

モルタル・コンクリートの圧密特性の解明と
改良型透水・脱水モデルの提案

平成 20 年 3 月

坂 本 英 輔

目次

第1章 序論

1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 本論文の構成	4

第2章 透水・脱水工法に関する既往の研究

2.1 概説	7
2.2 真空脱水処理工法に関する研究	8
2.2.1 真空脱水処理工法	8
2.2.2 従来工法	9
(1) 品質改善効果	9
(2) 品質改善メカニズム	24
2.2.3 提案工法	25
(1) 品質改善効果	25
(2) 品質改善メカニズム	39
2.2.4 土質における真空脱水処理	47
2.3 加圧脱水工法に関する研究	49
2.3.1 加圧脱水工法	49
2.3.2 品質改善効果	49
2.3.3 品質改善メカニズム	50
2.4 透水性型枠工法に関する研究	53
2.4.1 透水性型枠工法	53
2.4.2 品質改善効果	53
(1) 排水量	53
(2) 水セメント比	55
(3) 内部圧縮強度分布	55
(4) 反発度およびアバタと空隙	57
(5) 細孔量	59
(6) その他の品質改善効果	60
2.4.3 品質改善メカニズム	63

2.5	ブリーディングに関する研究	65
2.5.1	ブリーディング	65
2.5.2	ブリーディング特性	66
2.5.3	メカニズム	70
2.6	まとめ	74

第3章 フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性

3.1	概説	77
3.2	圧密理論	78
3.2.1	圧密現象	78
3.2.2	Terzaghi の一次元圧密方程式	78
3.3	圧密挙動に関する実験（実験 I）	81
3.3.1	実験の要因水準および調合表	81
3.3.2	実験方法および測定項目	83
3.3.3	実験結果および考察	84
	(1) 最終脱水量と最終圧密量 S_f の関係	84
	(2) 圧密量と時間の関係	85
	(3) 最終圧密量 S_f および理論圧密度 50% になる時間 t_{50}	85
	(4) 最終圧密量 S_f と単位水量 W の関係	90
3.4	過剰間隙水圧分布に関する実験（実験 II）	91
3.4.1	実験の要因水準および調合表	91
3.4.2	実験方法および測定項目	92
3.4.3	実験結果および考察	93
	(1) 水セメント比の影響	94
	(2) 粗骨材の影響（コンクリート）	94
3.5	まとめ	96

第4章 圧密処理されたモルタルおよびコンクリートの品質改善効果

4.1	概説	97
4.2	実験の要因水準および調合表	98
4.3	実験方法および測定項目	99
4.4	実験結果および考察	101

4.4.1	各種要因が品質改善効果に及ぼす影響	101
(1)	水セメント比の影響	101
(2)	圧密圧力の影響	102
(3)	細骨材容積比の影響	103
(4)	フロー値の影響	104
(5)	圧密開始時期の影響	105
(6)	粗骨材の影響（コンクリート）	106
4.4.2	平均密度と平均圧縮強度の関係	107
4.4.3	脱水率と品質改善効果の関係	107
4.4.4	セメント水比と平均圧縮強度の関係	108
4.5	まとめ	110

第5章 真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布の発生メカニズムに関する検討

5.1	概説	111
5.2	毛管張力が間隙水圧分布に及ぼす影響（実験Ⅰ）	112
5.2.1	真空脱水処理時の毛管張力	112
5.2.2	細管モデルを用いた解析	113
(1)	細管モデル	113
(2)	解析概要	114
(3)	解析結果	115
5.2.3	モデル材料を用いた実験	116
(1)	実験の要因水準および使用材料	116
(2)	実験方法および測定項目	117
(3)	実験結果および考察	118
5.3	粘性抵抗が間隙水圧分布に及ぼす影響（実験Ⅱ）	121
5.3.1	真空脱水処理時の粘性抵抗	121
5.3.2	モデル材料を用いた実験	122
(1)	実験の要因水準および使用材料	122
(2)	実験方法および測定項目	123
(3)	実験結果および考察	124
5.4	フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布に及ぼす空気	

量の影響（実験 III）	126
5.4.1 実験の要因水準および調合表	126
5.4.2 実験方法および測定項目	127
5.4.3 実験結果および考察	127
5.5 まとめ	131
第 6 章 改良型透水・脱水モデルによるコンクリートの品質改善効果の推定	
6.1 概説	133
6.2 ブリーディング現象への適用	134
6.2.1 コンクリートの密度分布および圧縮強度分布の推定フロー	134
6.2.2 モルタルを用いた推定フローによる解析	135
(1) 試料重量による圧力分布	135
(2) 最終圧密度	136
(3) 密度分布	136
(4) 圧縮強度分布	137
6.3 透水性型枠工法への適用	139
6.3.1 コンクリートの密度分布および圧縮強度分布の推定フロー	139
6.3.2 モルタルを用いた推定フローによる解析	141
(1) 側圧分布	142
(2) 圧密度	142
(3) 密度分布	145
(4) 圧縮強度分布	148
6.4 まとめ	151
第 7 章 結論および今後の課題	
7.1 結論	153
7.2 今後の課題および展望	155
付録	157
参考文献	175
論文目録	183
付録	189

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.2 本研究の目的

1.3 本論文の構成

第1章 序論

1.1 本研究の背景

近年、産業廃棄物や地球温暖化をはじめとした様々な環境問題、少子・高齢化や経済の減速傾向に伴う社会資本に対する投資の減退といった社会問題が起こっている。このような地球規模での環境・社会問題を背景に、現在、建築・土木構造物の主要な構造材料として広く利用されている鉄筋コンクリート（以下、RC）に関しては、高耐久なRC構造物に対する要求が高まっている。しかし、RC構造物の耐久性を決定するコンクリート部分は、現場施工による一品生産のため、材料、調合、施工、コストによる影響を大きく受け、品質の確保が難しい。

通常のコンクリートでは、従来と変わらず十分なワーカビリティを得るという施工上の要求からある一定の単位水量が必要となり、セメントの水和反応に必要な水量以上の水（余剰水）を使用している。この余剰水は、コンクリートの表面・内部強度の低下、乾燥収縮の増大、耐久性の低下など、コンクリートの性能を低下させる要因の一つとなっている。特に近年では、骨材事情が悪くなる一方で、ポンプ圧送、大規模な構造物の出現、さらに高度な耐震性能の要求による過密配筋などによって、流動性の良いコンクリートが要求されており、その結果、単位水量の多いコンクリートが使用されるようになり、コンクリートの品質低下が懸念されている。この問題を解決するために、施工時にコンクリート内部の欠陥となる余剰水の挙動を制御し、余剰水を人為的にある方向へある量だけ抜く、真空脱水処理工法、加圧脱水工法、透水性型枠工法などの透水・脱水工法[1]（図-1.1 参照）が提案・実用されている。同工法によって得られるコンクリートは、透水・脱水面からの品質改善効果が連続的に変化し、最も耐久性が必要である表層での品質改善効果が最大となることから、材料の持つ潜在能力を最大限に活かし切ることが可能であり、生産効率と環境負荷を考慮すれば極めて有効な手法であるといえる。

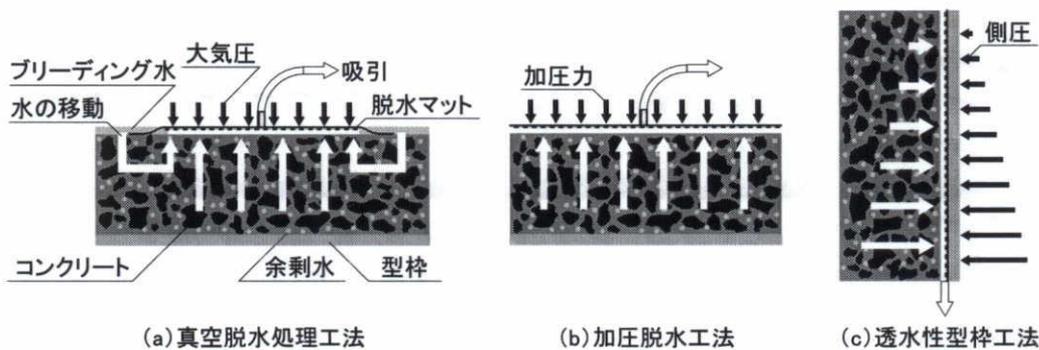


図-1.1 透水・脱水工法の概要

1.2 本研究の目的

透水・脱水工法は、建設現場での施工やコンクリート工場での製品製造工程で実用化されているが、学術的および実用的見地から系統的に取りまとめるには至っておらず、指針類も公には提示されていない。また、施工段階のコンクリート内部の状況および耐久性との関係は依然として不明であり、学問的にも実用的にもその解明が急務となっている。

第2章「既往の研究」によれば、透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善メカニズムに関する研究は数が少なく、研究途上のものが多いが、土質工学の分野で用いられている圧密理論をフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに適用することによって、透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善メカニズムを解明できると考えられる。そのような中であって、畑中ら[2]は、真空脱水コンクリートの圧縮強度分布と密度分布の間に相関性が見られることに着目し、土質工学で用いられる圧密理論をフレッシュコンクリートに適用して、真空脱水処理による品質改善効果を定量的に推定する手法を提案し、一連の基礎実験によって例証している。図-1.2に、真空脱水コンクリート中の密度分布および圧縮強度分布の推定フローを示す。すなわち、真空脱水コンクリート中の密度分布および圧縮強度分布は、処理時の間隙水圧分布に従って、各層ごとに圧密圧力を変化させて圧密理論を適用する事により推定できることを示している。しかし、同推定手法においては、フレッシュコンクリートの圧密特性および間隙水圧の分布特性を既知のものとして与える必要があるが、現時点では、これらのいずれについても不明な部分が多く、定量化されるには至っていない。

そこで本研究では、透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善メカニズムを系統的に捉えるための統一化理論の構築を目指し、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性の解明、およびこれに基づいた透水・脱水工法による品質改善効果の推定手法の提案を試みるため、以下の点について検討を行った。

- 1) フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに対する圧密理論の適用性の確認
および圧密モデルを決定する実験パラメータの定量化
- 2) 畑中らが提案した真空脱水コンクリートの品質改善効果の推定手法を改良した、ブリーディング現象および透水性型枠工法による品質改善効果の推定手法の提案
- 3) 真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布の発生メカニズムの解明

本研究が完成すれば、コンクリートから余剰水を取り除いて品質を改善するという透水・脱水工法を、一つの学問体系として取り扱うことが可能となることから、経験則から

だけでなく、品質改善メカニズムに基づいた新たな透水・脱水工法の提案が可能になり、社会的な貢献度はかなり大きいといえる。

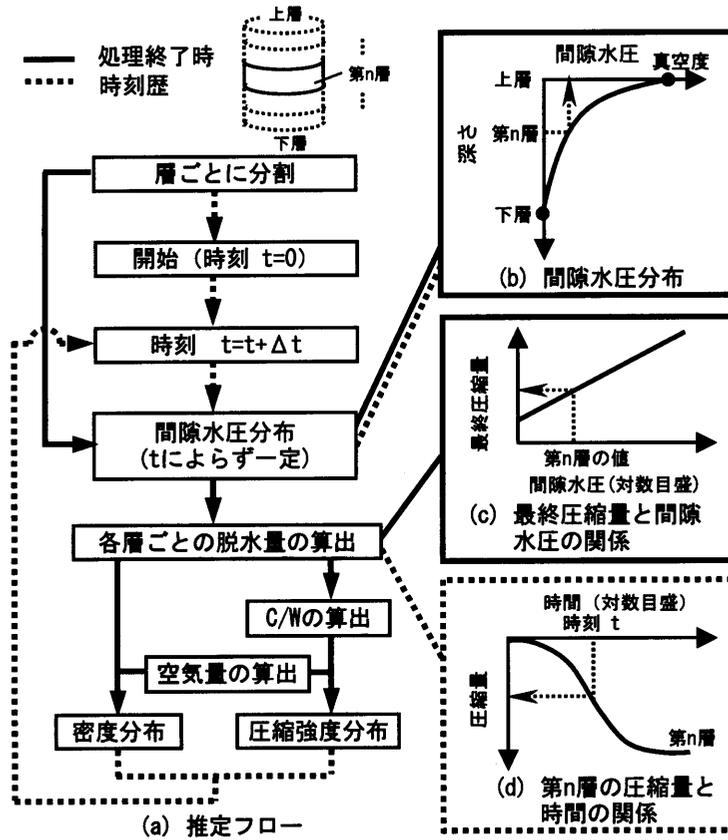


図-1.2 密度および圧縮強度分布の推定フロー[2]
 (間隙水圧が時間によって変化しない場合)

1.3 本論文の構成

図-1.3 に、本論文の構成を示す。本論文の構成は、以下の通りである。

第2章「透水・脱水工法に関する既往の研究」では、透水・脱水工法（真空脱水処理工法，加圧脱水工法，透水性型枠工法）およびブリーディング現象による品質改善効果およびそのメカニズムに注目して既往の研究を整理する。

第3章「フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性」では、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに対する圧密理論の適用性を確認し、圧密モデルを決定する実験パラメータの定量化を試みる。実験Ⅰでは、試料全体としての圧密挙動を明らかにするため、圧密処理時の各試料の圧密量に注目した検討を行う。実験Ⅱでは、試料内部での圧密の進行状況を明らかにするため、圧密処理時の各試料中の間隙水圧分布に注目した検討を行う。

第4章「圧密処理されたモルタルおよびコンクリートの品質改善効果」では、圧密処理された硬化後のモルタルおよびコンクリートの品質（ここでは、密度および圧縮強度）の定量評価を試みる。

第5章「真空脱水時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布の発生メカニズムに関する検討」では、これまで不明であった真空脱水処理時の試料中の間隙水圧分布の発生メカニズムを明らかにするため、主にモデル材料を用いた実験により検討する。実験ⅠおよびⅡでは、モデル材料を用いて、それぞれ毛管張力が間隙水圧分布に及ぼす影響および液相の粘性抵抗が間隙水圧分布に及ぼす影響について検討を行う。それらの結果を踏まえ、実験Ⅲでは、真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布に及ぼす空気量の影響を検討する。

第6章「改良型透水・脱水モデルによるコンクリートの品質改善効果の推定」では、提案した圧密モデルを用い、ブリーディング現象および透水性型枠工法によるモルタルおよびコンクリートの品質改善効果の推定を試みる。

第7章「結論および今後の課題」では、本研究で得られた結論をまとめるとともに、今後の課題および展望を記述する。

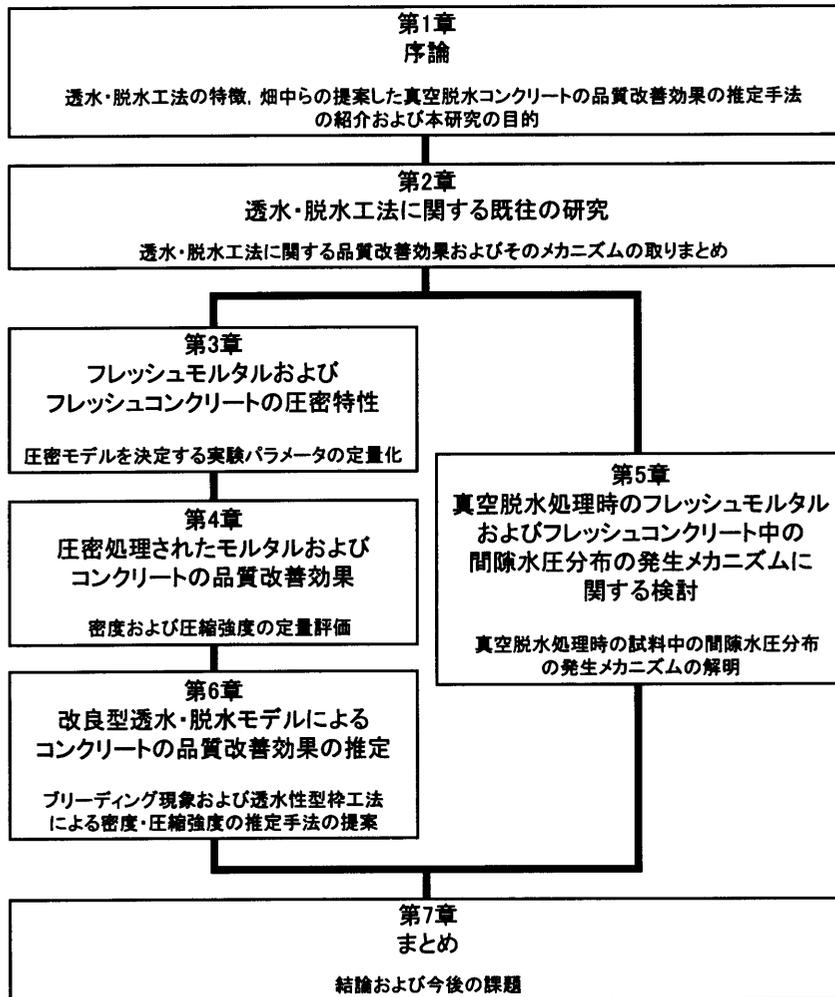


図-1.3 本研究の流れ

第2章 透水・脱水工法に関する既往の研究

2.1 概説

2.2 真空脱水処理工法に関する研究

2.3 加圧脱水工法に関する研究

2.4 透水性型枠工法に関する研究

2.5 ブリーディングに関する研究

2.6 まとめ

第2章 透水・脱水工法に関する既往の研究

2.1 概説

本章では、透水・脱水工法（真空脱水工法，加圧脱水工法，透水性型枠工法）およびブリーディング現象の品質改善効果およびそのメカニズムに注目して既往の研究を整理する。

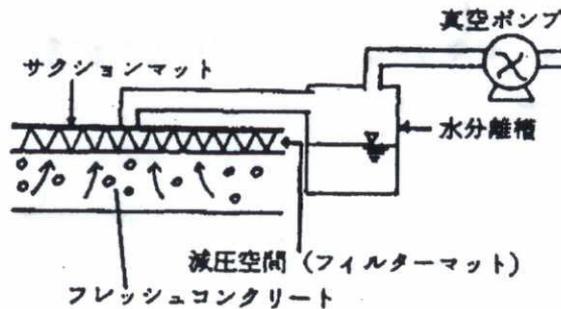
透水・脱水工法を適用したコンクリートの品質改善効果に関する既往の研究は数多くあるが、そのメカニズムについてはほとんど報告がない。このため、土質工学の分野における、真空脱水処理と加圧脱水処理の比較に関する知見についてもまとめる。

2.2 真空脱水処理工法に関する研究

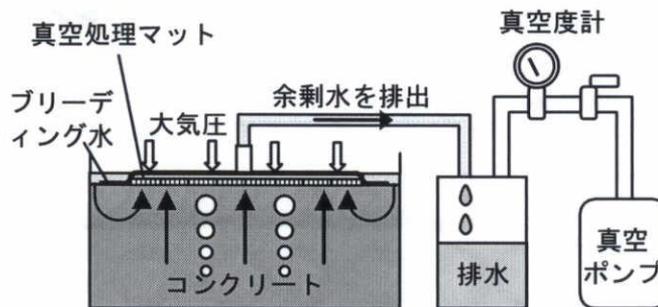
2.2.1 真空脱水処理工法

図-2.1に、真空脱水処理工法の概要を示す。脱水には、真空ポンプ、振動機の取り付けられたマットおよび水分離槽からなる装置を用いる。表面仕上げ直後のコンクリート上面に真空マットをかぶせて水分離槽を介して真空ポンプで吸引し、マットのフィルターでセメントなどの微粒子をろ過し、水分離槽で脱水分を回収する。

真空脱水処理工法は、1935年にアメリカで開発されたと言われている。日本では、土木の分野への適用は多く見られるものの、建築の分野では定着しなかった。その理由として、建築の分野では軟練りコンクリートを使用することが挙げられる。従来工法では、処理開始時期がコンクリート打設後30分以内と早いので、軟練りコンクリートでは作業時に直接コンクリート上に乗れず、足場が必要となり、實際上、施工現場でのコンクリートの打設に追いつかないのである。また、その他にも、セメント粒子を水と一緒に吸引するので、セメント分が不足し、表面強度の増加が少ないなどの問題点が挙げられる(表-2.1参照)。それらの問題点を改善し軟練りコンクリートでも適用可能な新たな真空脱水処理工法(提案工法)が考案された。本節では、従来工法および提案工法の品質改善効果およびそのメカニズムに関して既往の研究を取りまとめる。



(a) 真空脱水処理工法[従来工法]



(b) 改良型真空脱水処理工法[提案工法]

図-2.1 真空脱水処理工法の概要

表-2.1 従来工法と提案工法の比較

	処理開始時期	処理時間	施工量	特徴
従来工法	打設終了後 0~30分	15~20分	最大300m ³ /日	<ul style="list-style-type: none"> ・水と一緒にセメント粒子も吸引されるので、表面のセメント分が不足し、表面硬度の増加が少ない。 ・セメント不足のため、金こて仕上げが難しい。 ・表面亀裂の恐れあり。
	<p>ブリーディング水 → セメント粒子ごと脱水 → コンクリート床スラブ</p>			
提案工法	ブリーディングほぼ終了時	5分程度	最大1200m ³ /日	<ul style="list-style-type: none"> ・ろ過マットにより、セメント粒子が吸引されにくい。 ・コート剤を散布し、コンクリートの水和反応を促進し、表面亀裂を防止する。
	<p>ブリーディング水 → セメント粒子が吸引されにくい → ろ過マット → コート剤散布 → コンクリート床スラブ</p>			

2.2.2 従来工法

(1) 品質改善効果

(a) 脱水量

児玉[3]は、φ15×30cmの試験体を用いて、真空脱水処理を行ったときの排水量を測定している。実験要因は、真空脱水処理の有無および調合(A:W/C=0.55, W=203kg/m³, SL=17~19cm, B:W/C=65%, W=196kg/m³, SL=14~16cm, C:W/C=75%, W=188kg/m³, SL=11~13cm)である。なお、真空脱水処理の処理開始時期は打設直後で、継続時間は30分間、真空度は92%である。図-2.2によれば、排水量は最初の5分間に全排水量の約50%が排水され、10分後に67~71%が排水されるが、その後は徐々に緩慢となり30分経過してもたいした効果は見られていない。また、単位水量が大きい試験体ほど多量であり、最終的には、使用水量の16.1~17.3%が排水されたと報告している。

柿崎ら[4]は、100×100×10, 15, 20(厚さ)cmの試験体を用いて、真空脱水処理を30~40分間行ったときの脱水率(脱水量/単位水量)の経時変化および沈下量を測定している。実験要因は、真空脱水処理の有無、水セメント比(50, 60%), スランプ(12, 18cm), スラブ厚さ(10, 15, 20cm), 真処理継続時間(0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0min/cm)である。なお、真空脱水処理の処理開始時期は加水後30分で、継続時間は30分間、真空度は80%である。図-2.3によれば、脱水率は真空処理時間が長いほど、スラブが薄いほど、また水セ

メント比が大きいほど大きくなるが、スランプの変化に対してあまり影響されないと報告している。また、図-2.4によれば、マットの沈下量は、真空処理時間が長いほど、スラブが厚いほど、また水セメント比が大きいほど大きくなるが、スランプの変化に対してはあまり影響されないと報告している。

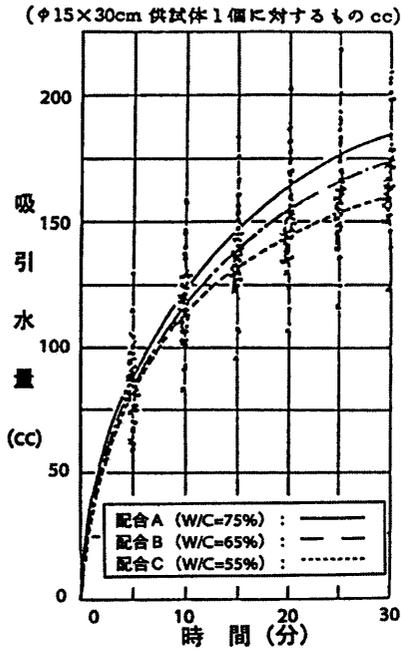


図-2.2 真空脱水処理時間と抽出水量[3]

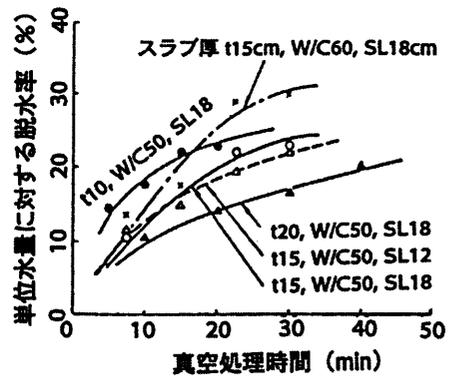


図-2.3 真空脱水処理時間と単位水量に対する脱水率との関係[4]

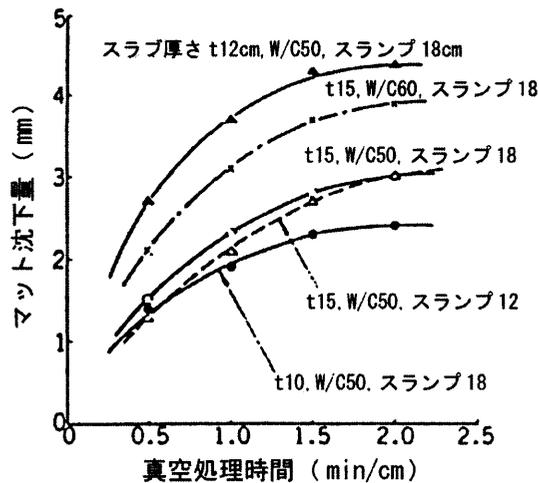


図-2.4 真空処理時間とマットの沈下量の関係[4]

R.MALINOWSKI ら[5]は、真空脱水処理にされたコンクリートにおける水セメント比と強度の関係および真空脱水処理コンクリートにおける締固めメカニズムや構成成分の変化を明らかにすることを目的に、一連の実験を行っている。水セメント比と強度の関係を解明するために行った実験の結果を図-2.5に示す。同図によれば、脱水量の容積はコンクリートの容積減少量よりかなり大きくなり、空隙の増加は、試験を行った全てのコンクリートにおいて確認されたと報告している。このことから、真空脱水コンクリートは、普通コンクリートを用いた強度と水セメント比の関係が適用できず、水+空気セメント比 (ϕ) の関係を用いる必要があるとし、真空処理を行っていないコンクリートの圧縮強度 (σ_0) の関係と同じように、真空処理コンクリートの圧縮強度 (σ_v) 用に修正した Abrams の公式を提案している。

$$\sigma_v = \sigma_0 B^{\phi_0 - \phi_v} = \sigma_0 B^{\frac{\Delta V_c}{C_0}} \quad (kp/cm^2) \quad (2.1)$$

ここに、 B : Abrams の公式で用いられている係数 (実験的にも決定できる),

ΔV_c : コンクリートの容積減少量,

C_0 : 調合設計時の $1m^3$ 当たりのセメント量

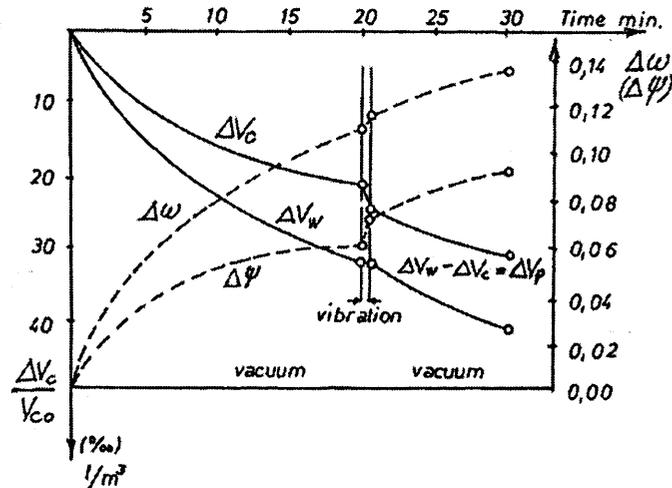


図-2.5 真空脱水処理時のコンクリートおよび排水の容積減少量[5]

中沢ら[6]は、10 (縦) × 38 (横) × 10 (高さ) cm の試験体を用いて、真空脱水処理を15分間行ったときの脱水量、水セメント比、容積、空隙の変化を調べている。実験要因は、真空脱水処理の有無、水セメント比 (50, 55, 60%), スランプ (4, 8, 12cm) である。なお、真空脱水処理の処理開始時期は打設直後、継続時間は15分間、真空度は90%である。表-2.2に調合表を示す。表-2.3によれば、水セメント比が大きいほど脱水量、水セメント比の減少量、容積の減少量および脱水量に対する容積の減少量の比は大きくなるのに

対して、空隙の増加量は小さくなっている。スランプが異なっても水セメント比が同一であれば、脱水量に対する容積の減少量の比および水セメント比の減少量はあまり変化していない。空隙の増加量は、水セメント比が最も小さい50%の場合に大きくなっている。これは、水セメント比が小さい場合に比較的硬練りコンクリートとなるため、真空脱水処理時に作用する大気圧では、脱水によって生じる空隙を十分に締め固めることが困難になってくることが考えられると報告している。

表-2.2 コンクリートの調合表[6]

Mix	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
						W	C	S	G
A B C	20	4±1.5	2±1	50	43.1	176	352	756	1001
	20	8±2.5	2±1	50	41.5	165	330	722	1055
	20	12±2.5	2±1	50	41.9	210	421	697	920
D E F	20	4±1.5	2±1	55	44.1	176	320	787	997
	20	8±2.5	2±1	55	44.1	201	365	743	942
	20	12±2.5	2±1	55	44.1	194	353	769	957
G H I	20	4±1.5	2±1	60	45.1	180	300	807	983
	20	8±2.5	2±1	60	45.1	192	319	787	957
	20	12±2.5	2±1	60	45.1	194	323	783	953

表-2.3 実験結果[6]

Mix	ΔV_w (kg/m ³)	$\Delta (W/C)$ (%)	ΔV_c (l/m ³)	$\Delta V_c / \Delta V_w$	ΔV_p (l/m ³)
A B C	29.61	8.4	17.77	0.60	11.84
	30.50	9.2	18.00	0.59	12.51
	37.11	8.8	22.27	0.60	14.84
D E F	30.00	9.4	24.30	0.81	5.70
	28.27	7.8	19.79	0.70	8.48
	32.84	9.3	29.56	0.90	3.28
G H I	32.06	10.7	26.61	0.83	5.45
	44.14	13.7	36.64	0.83	7.50
	45.38	14.1	39.48	0.87	5.90

細川ら[7]は、380(縦)×155(横)×10(高さ)cmの試験体を用いて、真空脱水処理を30分間行ったときの脱水量を測定している。試料は、AEコンクリートおよびnonAEコンクリートとし、AEコンクリートの調合は、水セメント比:48.5%、単位水量:149kg/m³、スランプ:9.4cmとし、nonAEコンクリートの調合は、水セメント比:53.4%、単位水量:162kg/m³、スランプ:3.0cmとしている。実験要因は、真空脱水処理の有無、エントレイ

ンドエアの有無である。なお、真空脱水処理の処理開始時期は打設直後、継続時間は30分間、真空度はAEコンクリートの場合は90%、nonAEコンクリートの場合は89%である。図-2.6によれば、ワーカビリティの良かったAEコンクリートにおいて高い脱水効果が得られたと報告している。

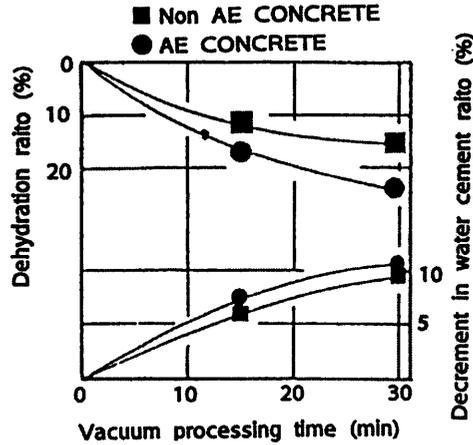


図-2.6 脱水率および水セメント比の減少量[7]

(b) 水セメント比

児玉[3]は、真空脱水処理直後の試験体を上中下の3層に分け、洗い分析によって各部分の水セメント比を調べている。図-2.7より、上下層の水セメント比は、かなり差異が見られ、試験体の調合水セメント比が大きいほど差が大きくなっている。また、調合に関係なく上層の水セメント比の低下が極めて大きく、下層は非常にわずかであると報告している。

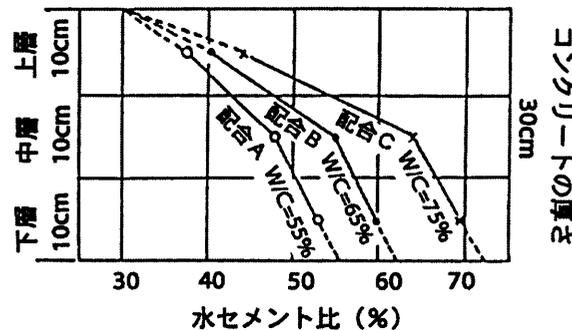


図-2.7 各層の水セメント比[3]

(c) 内部圧縮強度分布

児玉[3]は、真空処理コンクリートと同一水セメント比における無処理コンクリートとの強度比較および真空脱水処理した試験体の上中下に3分割した圧縮強度分布を測定している。図-2.8によれば、真空処理コンクリートは水セメント比が低下しても、低下した水セメント比と同一の水セメント比による無処理コンクリートより圧縮強度が小さくなると報告している。図-2.9によれば、真空処理したコンクリートでは、上下層の圧縮強度にはかなりの差異が見られ、上層は初期において相当に強度増進が見られると報告している。

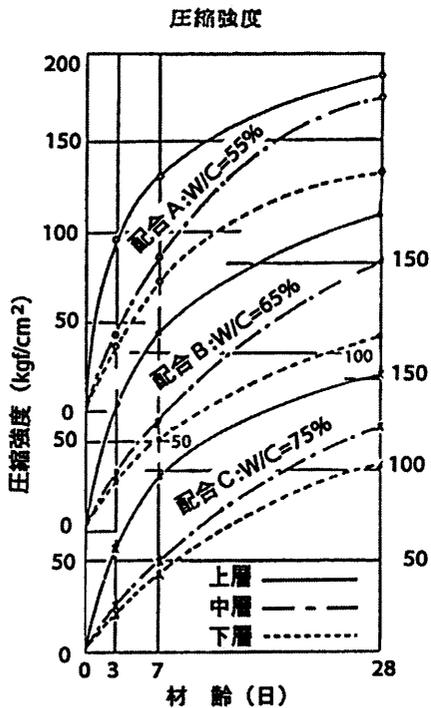


図-2.8 圧縮強度分布[3]

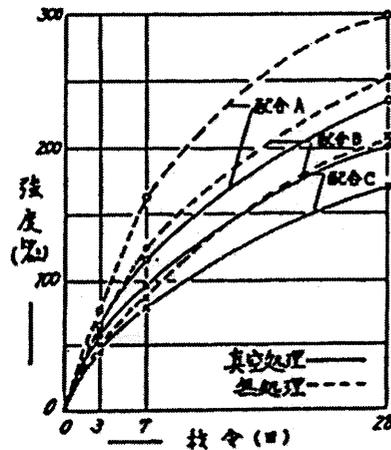


図-2.9 真空処理コンクリートと同一水セメント比における無処理コンクリートの強度比較[3]

柿崎ら[4]は、真空脱水処理した試験体を上下に2分割し、圧縮強度と単位水量に対する脱水率の関係を調べている。図-2.10によれば、上下層の圧縮強度の関係は、脱水率が15%程度までは無処理のスラブと同じように、上層が下層よりも10%程度強度が小さい傾向にあるが、脱水率が大きくなるにしたがって、その傾向は逆転すると報告している。また、圧縮強度比（無処理に対する真空脱水処理を行ったコンクリートの圧縮強度）と脱水率（単位水量に対する脱水量）の関係を調べており、図-2.11によれば、圧縮強度比は、脱水率が15~20%程度までおおきくなるが、それ以上の脱水率では、脱水率の増加にともなって、圧縮強度比が小さくなる傾向にあると報告している。なお、これらの結果は、コンクリート中の空隙の増加によるものと考えられると報告している。

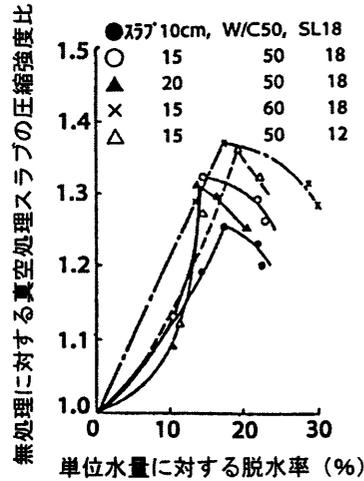
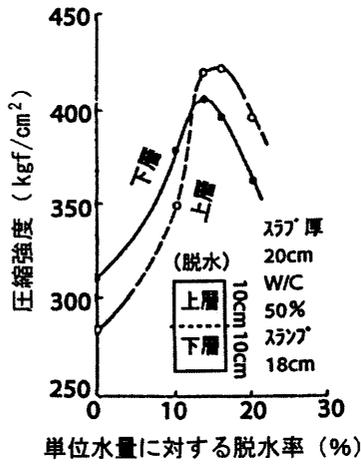


図-2.10 単位水量に対する脱水率とスラブ上下層の圧縮強度の関係[4] 図-2.11 単位水量に対する脱水率と無処理に対する真空処理スラブの圧縮強度比[4]

中沢ら[6]は、真空脱水処理した試験体を分割することなく圧縮強度を測定している。表-2.4によれば、水セメント比およびスランプが大きいコンクリートを真空脱水処理すれば、水セメント比の減少量は大きくなるものの、空隙が増加する結果となり、強度増大の効果が弱められるとしている。

表-2.4 実験結果[6]

Mix	Flexural strength (kgf/cm ²)						Compressive strength (kgf/cm ²)					
	Age of concrete (days)						Age of concrete (days)					
	7		14		28		7		14		28	
	Non-vac.	Vac.	Non-vac.	Vac.	Non-Vac.	Vac.	Non-Vac.	Vac.	Non-vac.	Vac.	Non-Vac.	Vac.
A B C	44	51	48	53	52	56	288	355	385	438	416	471
	43	55	45	57	53	57	328	408	389	441	427	466
	45	55	51	56	52	57	305	387	389	453	427	466
D E F	39	45	43	50	45	52	253	342	347	417	399	467
	44	48	46	58	51	59	287	384	320	372	395	443
	38	41	46	50	49	56	241	330	311	386	364	441
G H I	36	45	42	46	46	53	217	306	308	379	350	402
	36	42	43	47	47	51	226	306	298	362	348	420
	31	42	42	48	48	50	208	291	309	389	368	430

O.Ozdemir ら[8]は、真空脱水の効果を明らかにするために、真空脱水処理試験体と無処理試験体における力学的特性を比較している。実験要因は、真空脱水処理の有無であり、試験体サイズをφ15×30cmの円柱試験体および円柱試験体から採取したφ10×10cmのコア試験体である。なお、真空脱水処理の開始時期は打設後、処理継続時間は20分間、真空度は85%である。図-2.12によれば、真空脱水試験体(VPC)の圧縮強度は、全ての材齢で無処理試験体(PC)より大きくなり、特に、初期材齢(1, 3日)における増進が大きいと報告している。また、図-2.13に示す圧縮強度分布は、PCでは上層ほど小さくなるのに対し、VPCは上層ほど大きくなっており、これは、真空処理の脱水による表層の水セメント比低下のためと考えられると報告している。

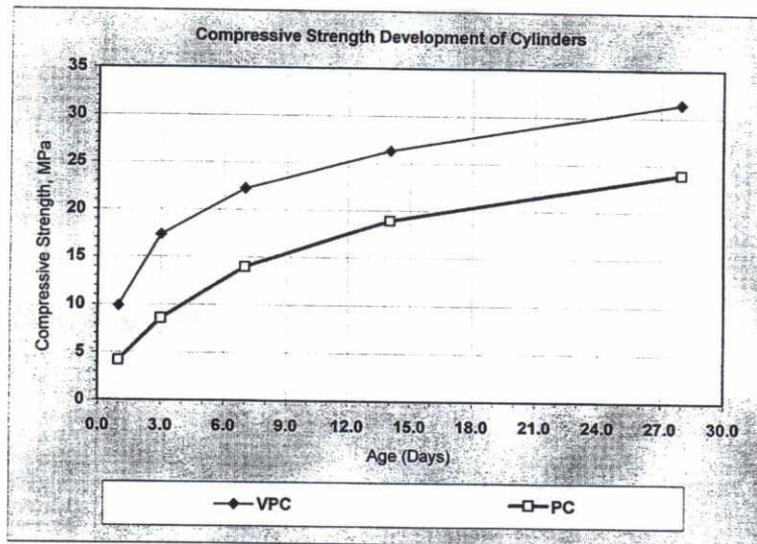


図-2.12 圧縮強度 (φ15×30cm 標準円柱試験体) [8]

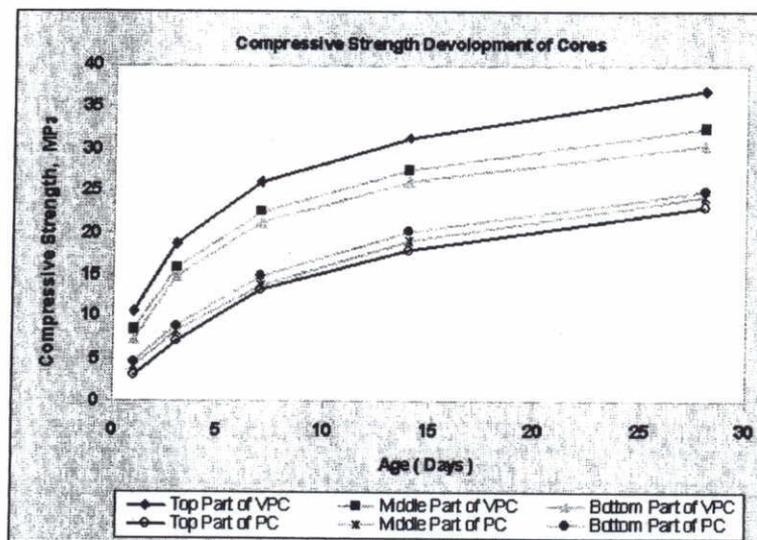


図-2.13 圧縮強度 (φ10×10cm コア試験体) [8]

C.Yang ら[9]は、現場打ちコンクリート床に対する真空脱水技術の適用性に関する検討および真空脱水処理装置の詳細について取りまとめている。真空脱水過程では、コンクリートの固体粒子間の自由水と毛管水の一部が排出されて湾曲した液体表面が毛管を形成し、その毛管壁が縮んで毛管圧が生じることによりコンクリートの固体粒子はさらに締め固まる。同時に内部摩擦は、これら2つの圧力差の影響下で増加し、土質に似た粘着力が生じる。この粘着力は弾性構造的な強度と呼ばれている。表-2.5によれば、脱型直後の無処理試験体の弾性構造的な強度は 0MPa であるのに対して、真空脱水試験体のそれは約 0.2~0.3MPa であると報告している。図-2.14 に、1982年に中国の研究者によって開発された、空気が入った泡のような突起のあるタイプV82真空プラスチックマットを用いた真空脱水処理装置の概要を示す。このマットは、脱水された水が脱水口に流れる時に、より抵抗が小さく、距離が短くなるように設計されており、同じ脱水率を得るのに4分の1の時間で済むと報告している。

表-2.5 真空脱水および無処理コンクリートの弾性構造的な強度[9]

Curing time immediately after remoulding (h)	0	1	2	3	4
Vacuum Concrete	0.201	0.239	0.320	0.419	0.636
Ordinary Concrete	0	0	0	0	0.236

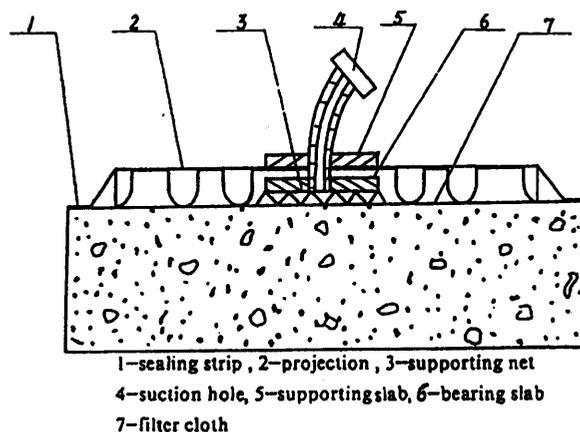


図-2.14 タイプV82真空吸引プラスチックマット[9]

真空脱水処理によって上層の圧縮強度増加が期待できることは、他にも報告[10,11]されている。

(d) 表面硬度

中沢ら[6]は、スランプおよび水セメント比が異なるコンクリートについて真空処理を行い、反発度法と超音波伝播速度法の複合法を用いて真空脱水処理したコンクリートの性状を検討している。図-2.15 に真空コンクリートおよび普通コンクリートの非破壊試験を用いた、日本建築学会式[式-2.2]による推定強度と実測強度との関係を示す。非破壊試験によっても、真空脱水コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートよりも大きくなるのが推定できるが、実測強度に対し推定強度がかなり小さい結果となっている。そこで、真空コンクリートに関する実験データを整理して得られた式を用いて推定強度を算出し、実測強度との関連性[図-2.16 (a) および (b)]を調べたところ、建築学会式と比較して、相対的にバラツキも少なく良好な傾向が得られていると報告されている。

$$F_c = 100 + 7.2R_0 \quad (2.2)$$

ここに、 F_c : 標準円柱強度 (kgf/cm²), R_0 : 基準硬度

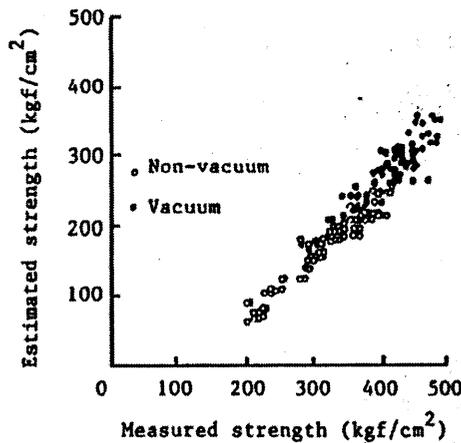


図-2.15 真空コンクリートおよび普通コンクリートの推定強度と実測強度の関係[6]

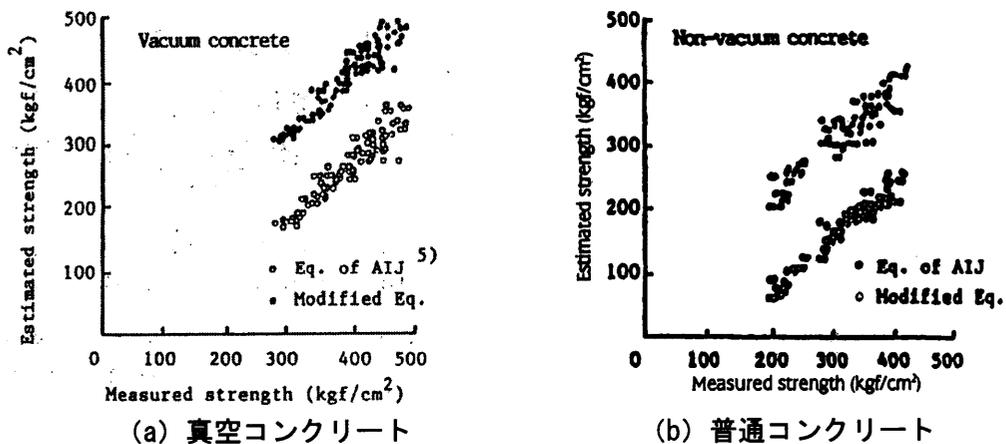


図-2.16 建築学会式と比較した推定強度と実測強度の関係[6]

(e) 細孔量

尾崎ら[12]は、真空処理によるコンクリート舗装の摩耗抵抗の改善を目的に、AE コンクリート（水セメント比：48.5%・単位水量：149kg/m³・スランプ：9.4cm）および nonAE コンクリート（水セメント比：53.4%・単位水量：162kg/m³・スランプ：3.0cm）を用いて実験を行った。なお試験体は、380（縦）×155（横）×10（高さ）cm で、図-2.17 に示す実験装置を用いて、真空処理を30分間行った。図-2.18 は、AE コンクリート および nonAE コンクリート中の表層モルタル部の細孔径分布を示したものである。図によれば、nonAE コンクリート中の表層モルタルの細孔容積は真空処理によって0.066 から0.046cc/g に減少してはいるが、AE コンクリート中の表層モルタルの方は、0.046 から0.036cc/g へさらに小さくなっていることが分かると報告している。

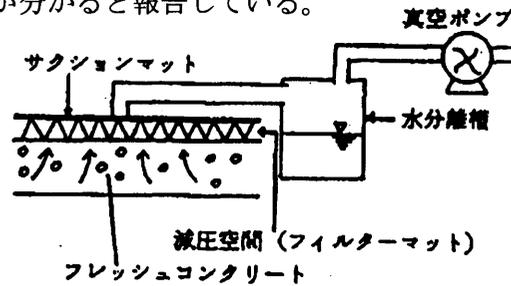


図-2.17 実験装置[12]

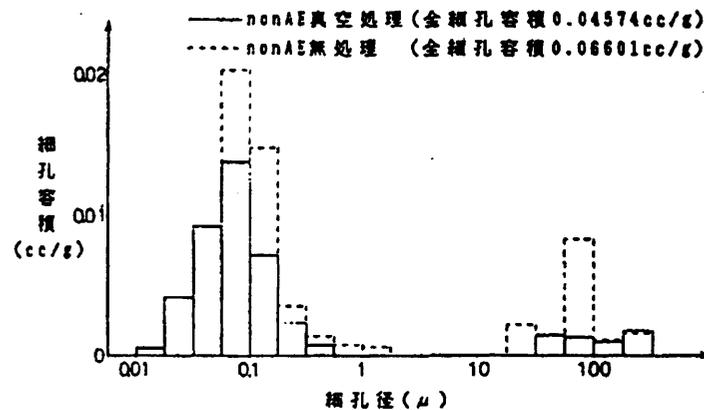
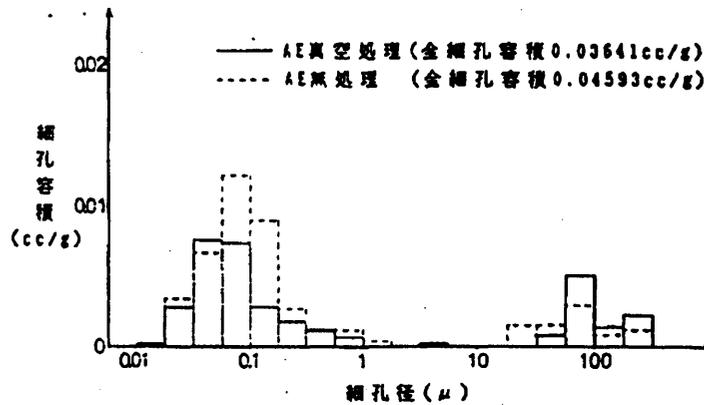


図-2.18 コンクリートの細孔径分布[12]

(f) その他の品質改善効果

尾崎ら[12]は、コンクリート舗装を施工する際、コンクリート表面を真空処理することによって、積雪寒冷地における路路面のスパイクタイヤによる摩耗抵抗を一層改善することおよびAEコンクリート中のエントレインドエアが真空処理によって抜け出す恐れがないことを確認することを目的に一連の実験を行っている。試験体サイズは、380×155×10（厚さ）cmである。なお、真空脱水処理の処理開始時期は打設直後、継続時間は30分間、真空度はAEコンクリートの場合は90%、nonAEコンクリートの場合は89%である。図-2.19は、トラバース型促進スパイク試験機を使用し、コンクリート表面の摩耗深さを実測した結果である。同図によれば、AEコンクリートでは真空脱水処理を行うことによって1/3～1/4に摩耗が減少すると報告している。図-2.20によれば、AEコンクリートのエントレインドエアは、真空処理によって抜け出ないので、必要な空気量は確保され、耐凍害性が損なわれる心配はないと報告している。

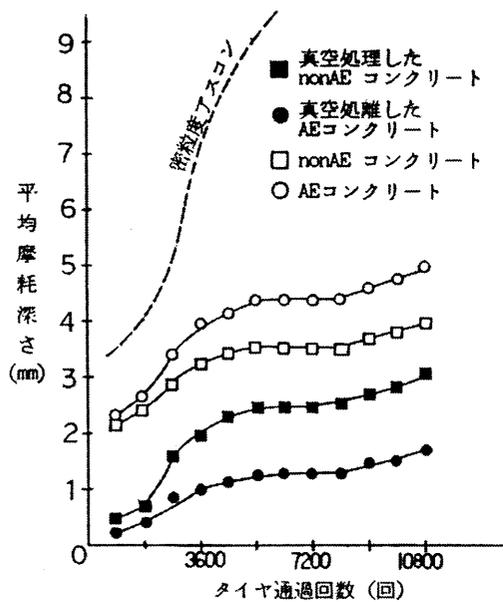


図-2.19 平均摩耗深さ [12]

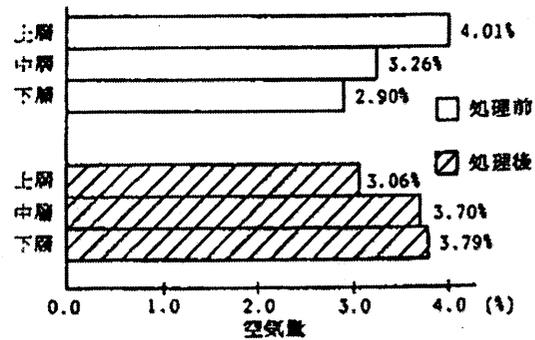


図-2.20 AEコンクリートの気泡分布 [12]

細川ら[13]は、環境条件を寒冷地および海洋環境と想定し、真空処理コンクリートを用いて寒冷地に構造物を施工するさいに問題となる耐凍害性、耐摩耗性、海水による劣化の原因である硫酸塩に対する性質を検討している。実験要因は、真空脱水処理の有無、エントレインドエアの有無であり、試験体サイズは、380×155×10（厚さ）cmである。なお、真空脱水処理の処理開始時期は打設直後、継続時間は30分間、真空度はAEコンクリート

の場合は90%, nonAE コンクリートの場合は89%である。図-2.21によれば, エントレインドエアを減少させることなく脱水し, 水セメント比を低下させることが可能なため, コンクリートの耐凍害性が改善されたと報告している。図-2.22によれば, 耐硫酸塩性では, 真空処理コンクリートは, 表層からの硫酸塩の浸透を妨げる働きがあることから硫酸塩による劣化を遅らせることができると報告している。

収縮低減効果については, コンクリートの乾燥収縮ひび割れが生じる主な原因は, 水分の蒸発に伴う体積の減少であるとされており, コンクリート表面を密実に仕上げ蒸発を抑えることにより乾燥収縮ひび割れを抑制することができるものと考えられ, 真空脱水処理による収縮低減効果[14]が確認されている。

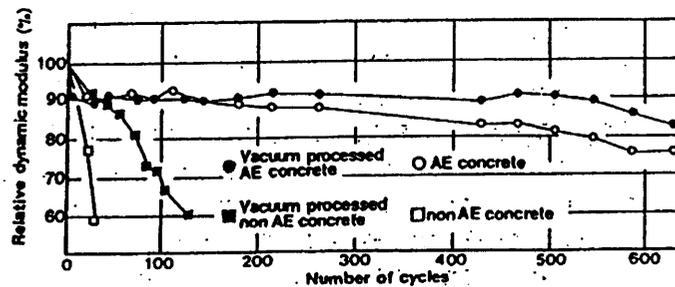


図-2.21 凍結融解試験による相対動弾性係数[13]

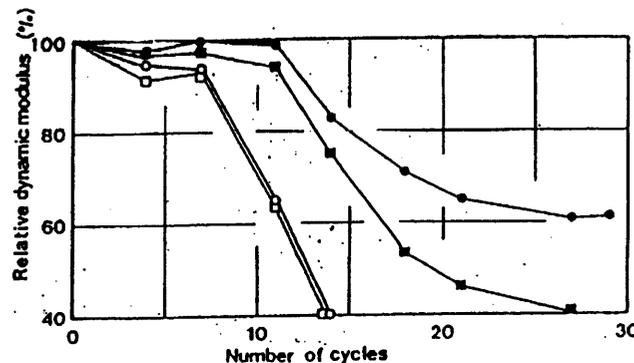


図-2.22 耐硫酸塩性試験による相対動弾性係数[13]

O.Ozdemirら[8]は, 真空脱水の効果を明らかにするために, 真空脱水処理試験体と無処理試験体における力学的特性を比較している。実験要因は, 真空脱水処理の有無であり, 試験体サイズを $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の円柱試験体(圧縮強度, 表面硬度試験用)および円柱試験体から採取した $\phi 10 \times 10\text{cm}$ のコア試験体(圧縮強度, すりへり, 吸水, 透水試験用)とし, 測定項目を表面貫入抵抗, 圧縮強度, 表面硬度, すりへり抵抗, 吸水性, 透水性としている。なお, 真空脱水処理の開始時期は打設後, 処理継続時間は20分間, 真空度は85%で

ある。図-2.23 によれば、真空処理終了時の試験体表面の貫入抵抗値は、無処理コンクリートの約 8 時間後と同じであると報告している。図-2.24 は、シュミットハンマーによる測定結果から求めた表面硬度を示している。同図から、VPC の表面硬度は、PC より約 83% 大きいと報告している。図-2.25 によれば、コア試験体の材齢 28 日のすりへり試験結果から VPC の表層のすりへり抵抗は、PC より約 58%大きくなると報告している。図-2.26 によれば、24 時間後の VPC の吸水率は、PC に比べて 36%小さいと報告している。図-2.27 によれば、試験体が割裂した最大貫入水深は、VPC の上層が最も小さく、PC より約 40% 小さいと報告している。

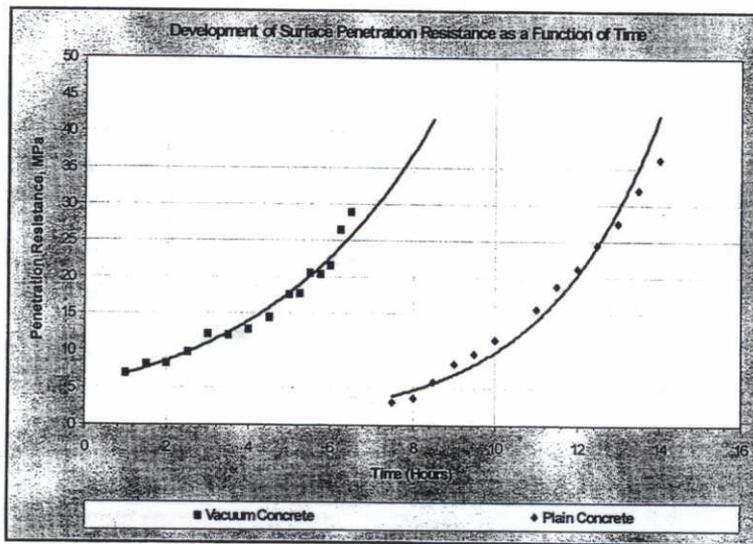


図-2.23 貫入抵抗値[8]

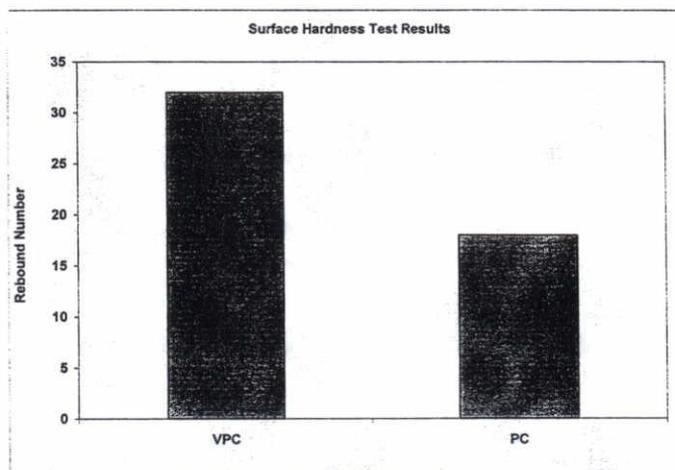


図-2.24 表面硬度[8]

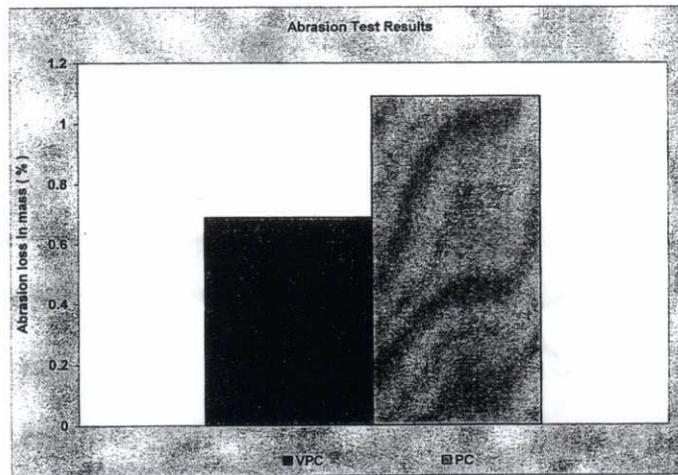


図-2.25 すりへり試験[8]

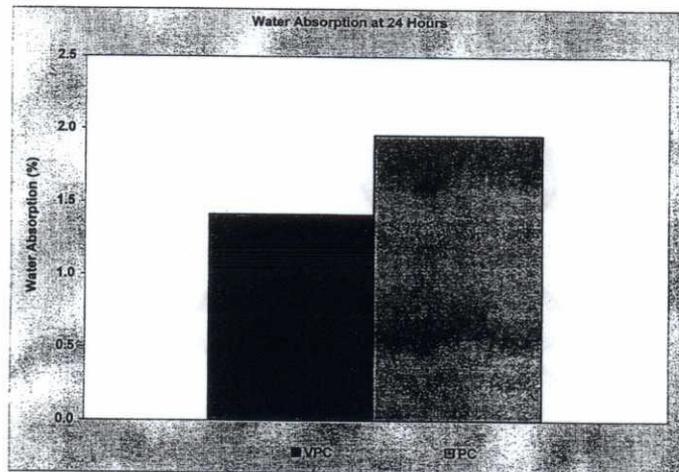


図-2.26 24時間後の吸水率[8]

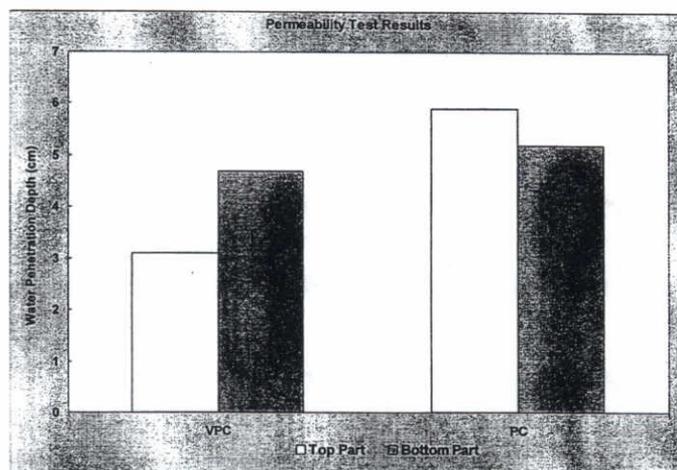


図-2.27 貫入水深[8]

耐久性に関する研究は、その他にも、凍結融解抵抗性[15]、耐凍害性[16]、水中疲労強度[17]等の検討が報告されている。

仕上材の付着性能については、接着強さは細孔構造に依存し、細孔量が少ないほど接着強さは大きくなる[18]としており、一方、表面の微細な凸凹により、付着面積が大きくなることによって向上する[19]との報告もある。真空脱水処理を施したコンクリートでは、表面の凸凹による付着面積については明らかにされていないが、水セメント比分布および細孔径分布を調べた実験では、無処理のコンクリートでは表層に近いほど水セメント比および細孔量が増大するのに対し、真空脱水処理を施したコンクリートでは逆に、表層に近いほど水セメント比および細孔量が減少するとしている[9]。これらのことから、真空脱水処理を施したコンクリートの付着性能の向上が期待される。

その他の真空脱水工法の有効な使用例として、真空脱水処理を行うことによりコンクリートの初期材齢での強度が増大するという特性を生かし、PCa床版の製造への適用により生産性の向上が期待される[5,9,20-24]。

(2) 品質改善メカニズム

大上ら[25]は、真空脱水処理による時間の進行に伴う排出液の増大過程についてモデル化を行っている。図-2.28は、脱水試験装置を示し、吸引圧に相当する空気圧(0.1~0.4kgf/cm²)をかけている。試験体は内径11mmの亚克力パイプを用いて、試験体長さLは5,7,10cmの3種類としている。試料は珪砂粉(平均粒径6μm)を用いている。脱水量と時間の関係式としてDarcyの法則から式(2.3)を得ている。図-2.29によれば、脱水過程について実験値と計算値が比較的良好に一致していることが分かる。

$$q = A\varepsilon L_0 \left(1 - \sqrt{1 - 2\kappa' t / L_0^2} \right) \quad (2.3)$$

$$\kappa' = \frac{1}{\varepsilon} \kappa \Delta P \quad (2.4)$$

ここに、 q :脱水量(cc)、 A :断面積(cm²)、 ε :空隙率、 L_0 :初期長さ(cm)、 κ :透水係数(cm³/s/g)、 t :時間(s)、 ΔP :空気圧(dyne/cm²)

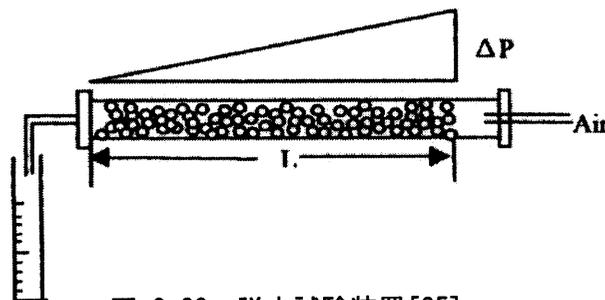


図-2.28 脱水試験装置[25]

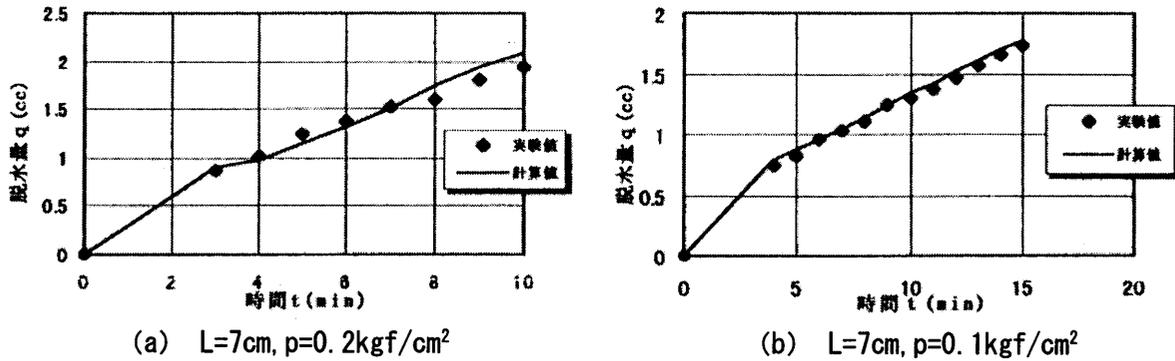


図-2.29 脱水過程[25]

2.2.3 提案工法

(1) 品質改善効果

(a) 脱水量

畑中ら[26]は、40（縦）×60（横）×24（高さ）cm および 46（縦）×30（横）×12, 18, 24（高さ）cm の試験体を用いて、真空脱水処理を行ったときの排水量を測定している。なお、真空脱水処理の継続時間は、5分間である。表-2.6 に実験要因を示す。図-2.30 (a) ~ (d) に示すように排水量に及ぼすスランプ、強度レベル、スラブ厚さおよび処理開始時期の影響について考察を行っており、図-2.31 に示すように、脱水率（脱水量/使用水量）は、スランプが大きいほど、強度レベルが低いほど、そして、処理開始時期が早いほど多くなるとしている。また、スラブ厚さの影響については、脱水率はあまり大きく変化しないが、スラブが極端に薄いと、水みちが早期に形成されることから脱水率が低下する可能性がある」と報告している。

表-2.6 各実験の要因と水準[26]

実験No.	要因	SL (cm)	Fc (Mpa)	試験体寸法 (cm)		脱水時期 (分後)	材齢 (日)	実験時期 (月)	真空ポンプの性能	測定項目
				上面	スラブ厚さ					
実験 I		8, 18	20	60 × 40	24	30, 120	3, 7, 28	9	100V, 200W 40L/分	・ブリーディング水の排水量 ・排水中の固形分量 ・反発硬度 (P, N型ハンマ) ・圧縮強度分布 (28日、φ5×5cmコア)
実験 II		10, 20 30, 40								
実験 III		18	20	12, 18, 24	120	8		100V, 200W 60L/分		
実験 IV				18	0, 30, 60 120, 240	11				

注) SL: 目標スランプ, Fc: 目標圧縮強度

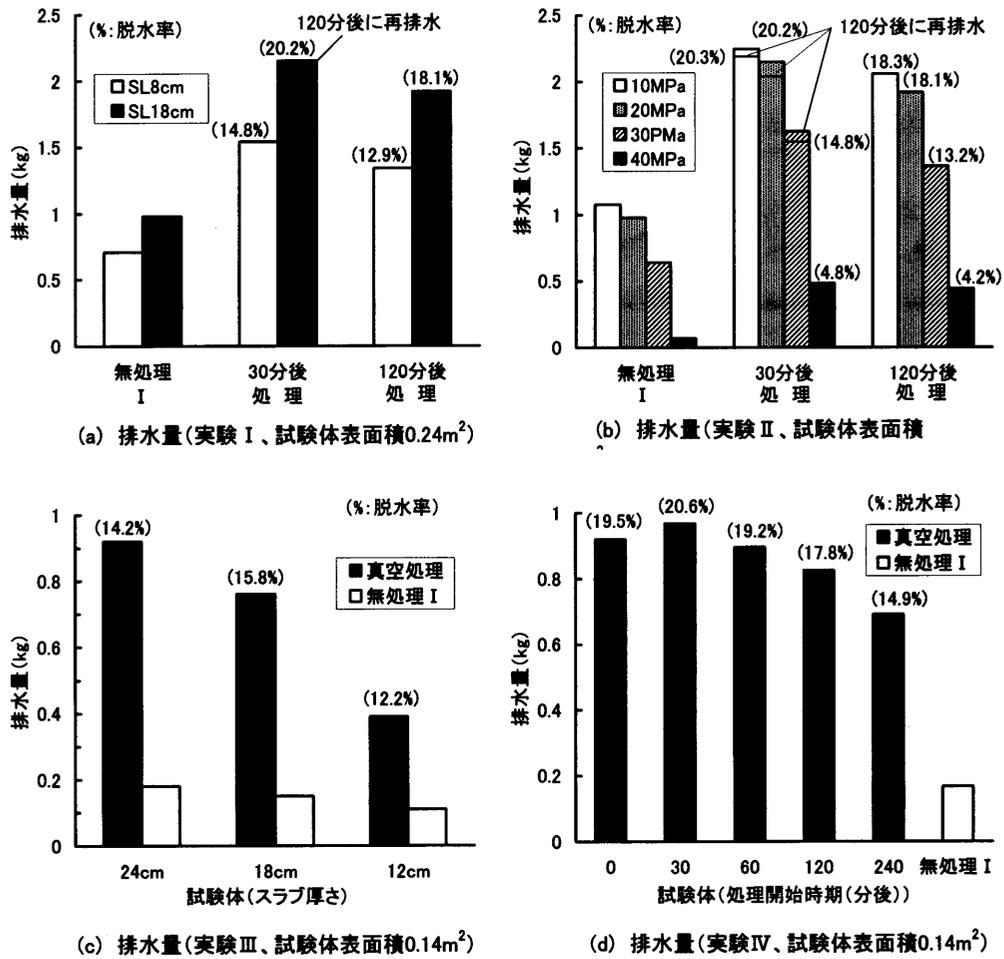
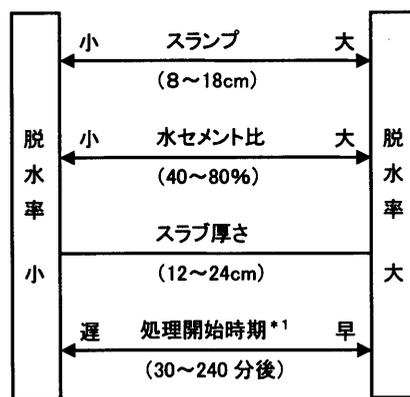


図-2.30 排水量[26]



処理開始時期の影響以外は、真空処理を打込み終了120分後に行った。

— (矢印なし): 顕著な差はなし。

*1: 打込み終了0分後処理を除く。0分後は、30分後より脱水率は小さい。

図-2.31 脱水率の傾向[26]

和藤ら[27]は、46（縦）×30（横）×18（高さ）cmの試験体を用いて、真空脱水工法に用いる処理マットの網目径の違いが、セメント粒子の吸引量に及ぼす影響を調べている。実験要因は、処理マットの種類（立体網、平面網 75, 150, 300, 600, 1000 μm）である。なお、処理継続時間は、5分間である。図-2.32によれば、真空処理による排水量は、どの試験体でも脱水率 25%程度で処理マットの違いによる顕著な違いは見られなかったと報告している。図-2.33によれば、排水中の固形分量は、網目径が大きいものほどセメント分を多く排出していると報告している。図-2.34によると、網目径が大きいほど真空度が低下し始める時期が早くなると報告している。以上のことから、網目径が大きいとセメント排出量が多くなることで水みちが形成されやすくなり、その結果、真空度が低下し締め効果が小さくなると報告している。

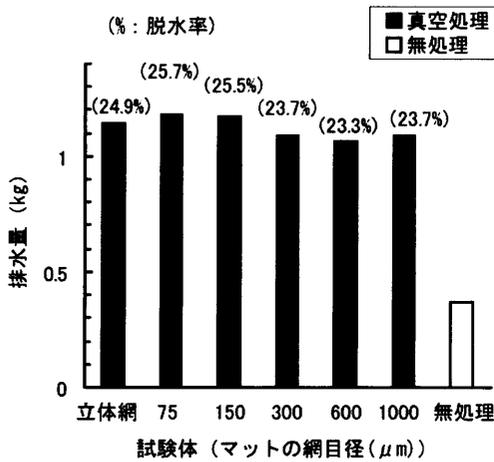


図-2.32 排水量 [27]

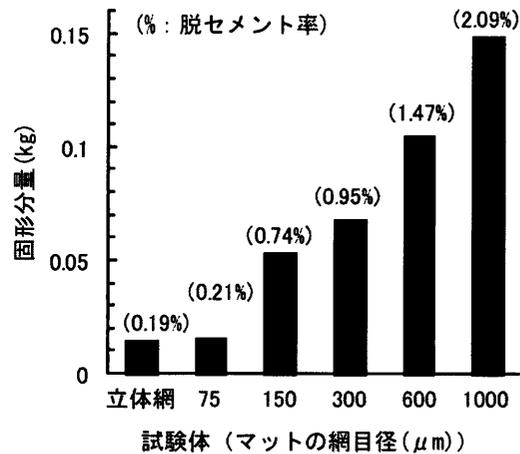


図-2.33 固形分量 (試験体面積 0.14m²) [27]

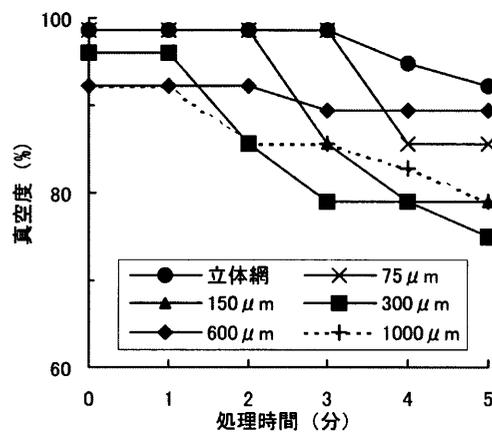


図-2.34 真空度の時刻歴 [27]

和藤ら[28]は、46（縦）×30（横）×18（高さ）cm、の試験体で、真空脱水処理時の真空度および処理継続時間の違いにより、コンクリートスラブ試験体の表層および内部強度分布性状がどのように異なるかを検討している。実験要因は、真空度（30，60，90%），処理継続時間（真空度30：5および15分，真空度60%：5および7.5分，真空度90%：5分）である。なお，真空脱水処理の開始時期はブリーディング終了時である。図-2.35によれば，真空脱水処理時間を5分とした場合，真空度が高い方が脱水量は多くなると報告されている。

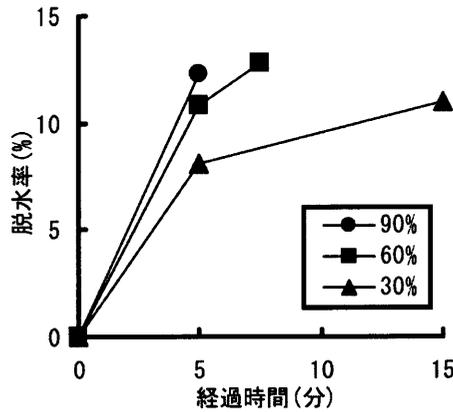


図-2.35 脱水率と経過時間の関係 [28]

(b) 水セメント比

山本ら[29]は、40（縦）×60（横）×24（高さ）cmの試験体を用いて、真空脱水処理を行ったときの水セメント比の分布を測定している。コンクリートの調合は水セメント比を65%とし、処理開始時期は打設後30分および120分の2水準とし、処理継続時間は5分間としている。図-2.36に圧縮強度分布を示し、図-2.37に水セメント比分布を示す。両者の結果から、水セメントの分布は、上層に行くにしたがって大幅に減少し圧縮強度分布と同様な傾向を示すが、真空脱水処理の開始時期の違いによる影響は確認できなかったと報告している。

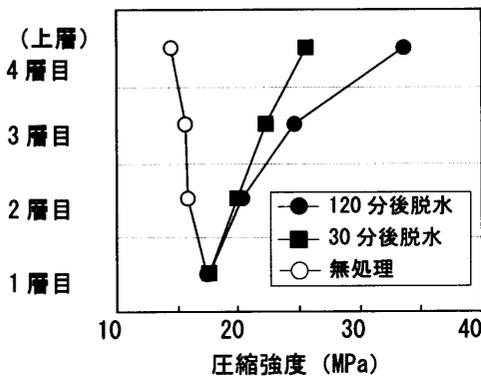


図-2.36 圧縮強度分布 [29]

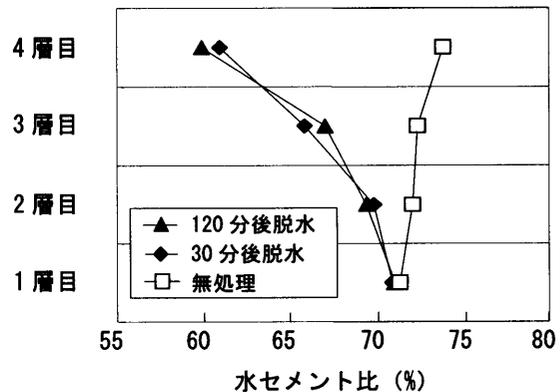


図-2.37 水セメント比分布 [29]

(c) 内部圧縮強度分布

Yamaguchi ら[30]は、市販技術である「脱水脱気保水工法」(ベストフローシステム)で施工されたコンクリートの表層部性状の改善効果を明らかにするために屋外実験を行った。要因をスランプ(8, 18cm) および真空脱水処理の有無とし、試験体サイズを、スランプ 8cm では 450×800×15 (厚さ) cm, スランプ 18cm では 275×350×15 (厚さ) cm としている。真空脱水処理の開始時期は打設後 150 分後、処理継続時間は 5 分間である。図-2.38 によれば、真空脱水処理を行った圧縮強度は無処理のそれに比べて大きくなり、スランプ 18cm および 8cm における圧縮強度の増加は、それぞれ 29%, 43%であると報告している。

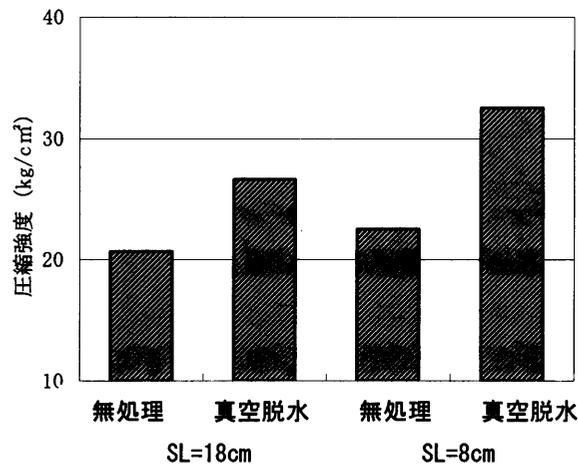


図-2.38 圧縮強度[30]

和藤ら[31]は、46 (縦) × 30 (横) cm の試験体を用いて、真空脱水処理を行ったときの圧縮強度分布および単位容積質量を測定している。コンクリートの調合は水セメント比を 65% とし、試験体高さを 12, 18 および 24cm の 3 水準としている。処理開始時期は打設後 120 分とし、処理継続時間は 5 分間としている。図-2.39 に圧縮強度分布を示し、図-2.40 単位容積質量を示す。真空脱水処理を行ったコンクリートの圧縮強度分布は、上層ほど大きく、その効果は表層から 15cm 程度までおよぶとしている。圧縮強度分布と単位容積質量を比較すると、両者の間には、強い相関が見られると報告している。また、図-2.41 に示すように、各種要因を変えた実験を行い、内部圧縮強度分布の傾向をまとめている。

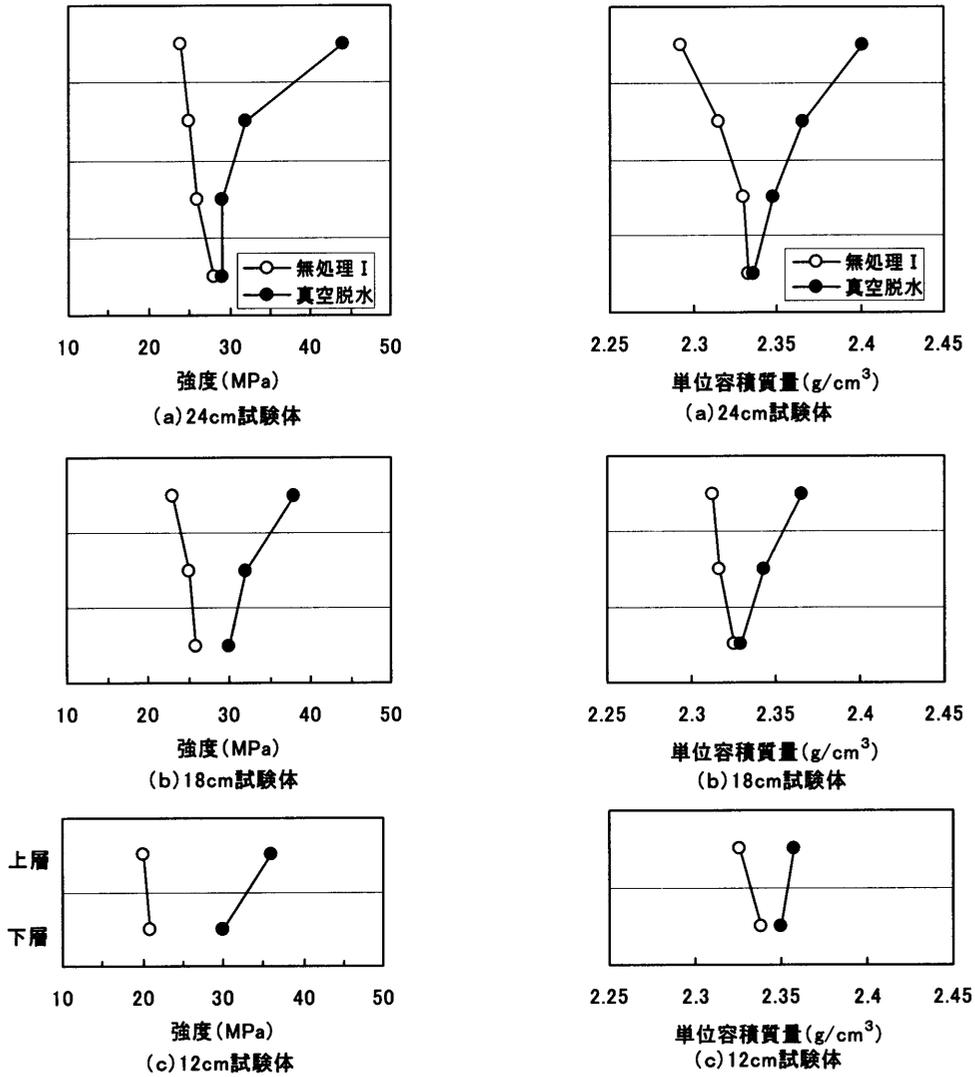
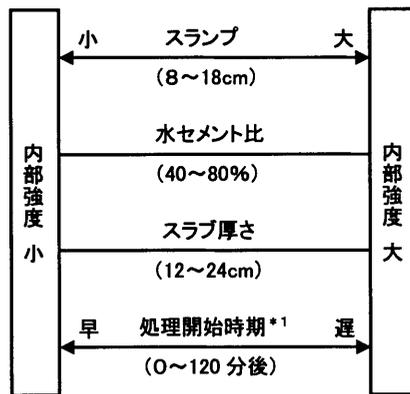


図-2.39 圧縮強度分布[31]

図-2.40 単位容積質量[31]



処理開始時期の影響以外は、真空処理を打込み終了 120 分後に行った。

— : 顕著な差はなし。

*1: 処理開始時期は、ブリーディング終了時 (打込み終了 120 分後) まで。打込み終了 240 分後を除く。

図-2.41 内部圧縮強度分布の傾向[31]

和藤ら[27]は、46（縦）×30（横）×18（高さ）cmの試験体を用いて、真空脱水工法に用いる処理マットの網目径の違いが、セメント粒子の吸引量に及ぼす影響を調べている。実験要因は、処理マットの種類（立体網、平面網 75, 150, 300, 600, 1000 μm）である。なお、処理継続時間は、5分間である。図-2.42によれば、いずれの網を用いた試験体においても、圧縮強度は上層にいくにつれて増加しており、立体網および75 μm目の平面網を使用した試験体がとくに良好であると報告している。

和藤ら[28]は、46（縦）×30（横）×18（高さ）cm、の試験体で、真空脱水処理時の真空度および処理継続時間の違いにより、コンクリートスラブ試験体の表層および内部強度分布性状がどのように異なるかを検討している。実験要因は、真空度（30, 60, 90%）、処理継続時間（真空度 30% : 5, 15分, 真空度 60% : 5, 7.5分, 真空度 90% : 5分）である。なお、真空脱水処理の開始時期はブリーディング終了時である。図-2.43によれば、上層の圧縮強度は真空度が高いほど大きくなるが、中～下層では真空度の影響はあまり見られず、真空度が小さい場合、処理の継続時間を延長しても圧縮強度の改善効果はあまり期待できないと報告している。

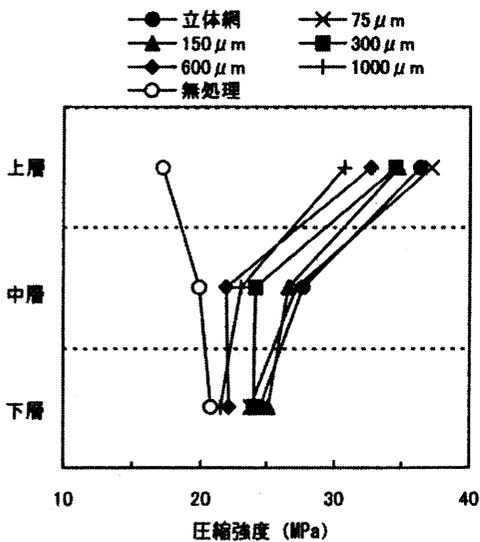


図-2.43 圧縮強度分布[27]

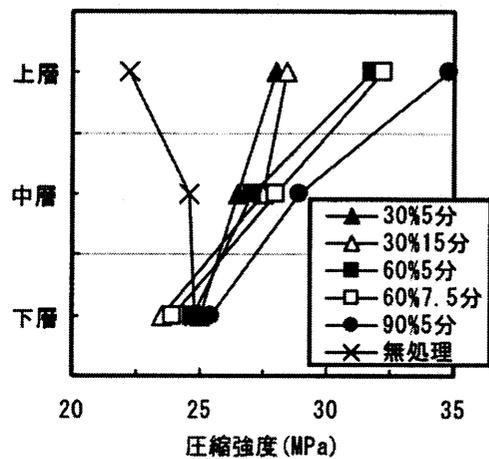


図-2.44 圧縮強度分布[28]

(d) 表面硬度

和藤ら[32]は、コンクリート表面の反発度を実測し、真空脱水処理による圧縮強度推定値の増分量は、図-2.44に示すように、おおよそ15~25%となるとし、各種要因を変えた実験を行い、内部圧縮強度分布の傾向をまとめている（図-2.45参照）。

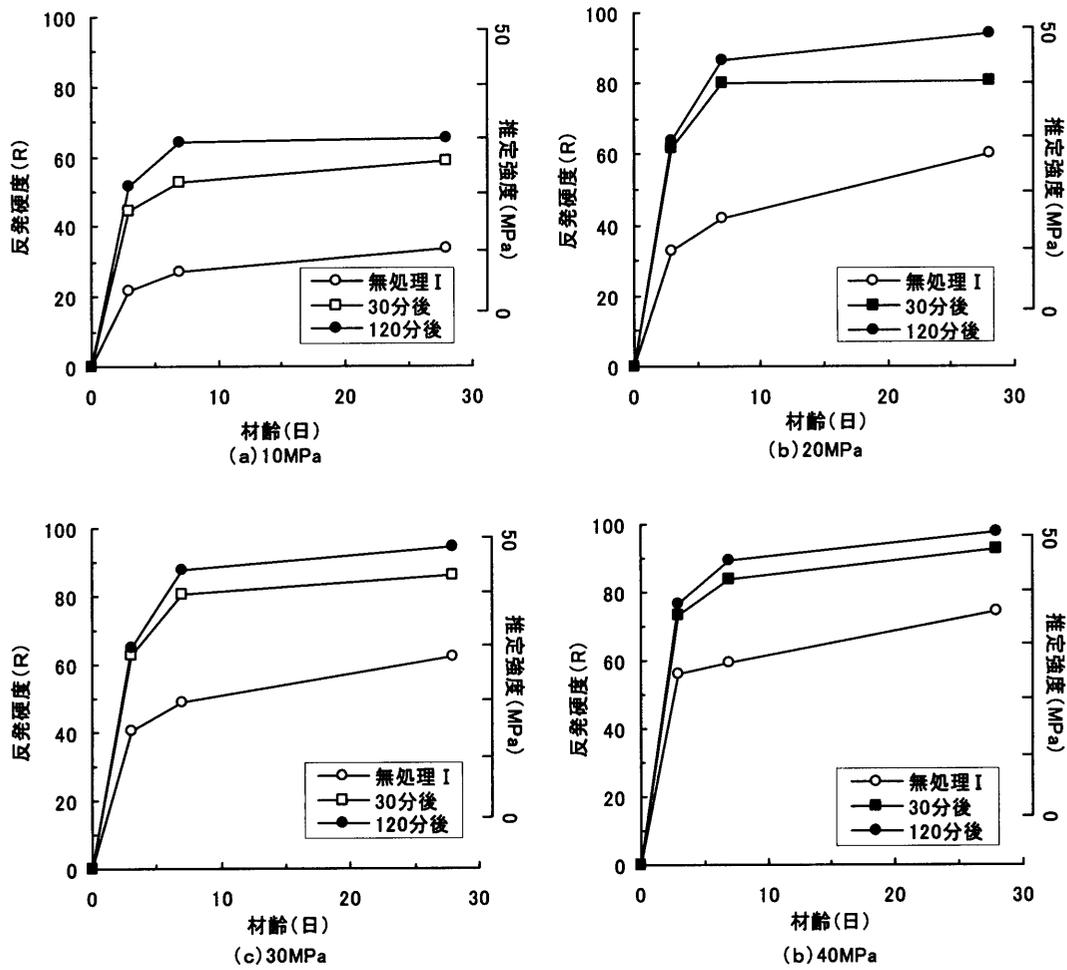
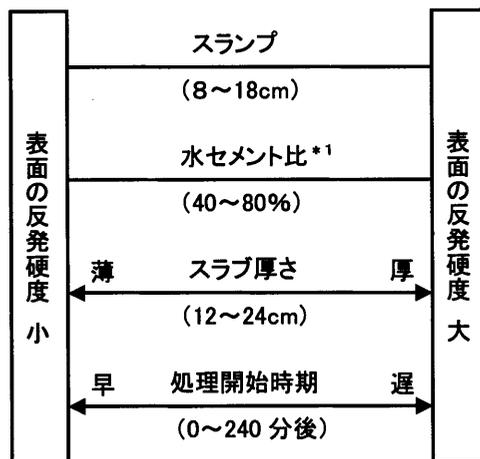


図-2.44 表面反発度 [32]



処理開始時期の影響以外は、真空処理を打込み終了 120 分後に行った。

—— (矢印なし): 顕著な差はなし。

* 1: 圧縮強度は、10MPa レベルを除く。

図-2.45 表面反発度の傾向 [32]

(e) 細孔量

山本ら[29]は、真空脱水処理を行ったコンクリート試験体の強度発現性状を支配する因子を明確にすることを目的として、試験体の大径の空隙構造および水セメント比分布を調べ、圧縮強度分布との関係を検討している。実験要因は、目標圧縮強度(10, 20, 30, 40MPa)、処理開始時期(打設 30, 120 分後)としている。測定項目は、大径の空隙面積(空隙径 1.0mm 以上) および水セメント比である。なお、水セメント比の測定は、目標圧縮強度が 20MPa の試験体についてのみ行っている。図-2.46 によれば、真空脱水処理により、有効細孔量は減少し、表層に行くほど細孔構造は緻密化され、締固めの効果が得られる。図-2.47 によれば、大径の空隙構造(空隙径 1.0mm 以上)については一定の傾向が得られず、真空脱水処理を行うことにより自由水が吸引されるが、大径の空隙には明確な影響を及ぼさないと報告している。

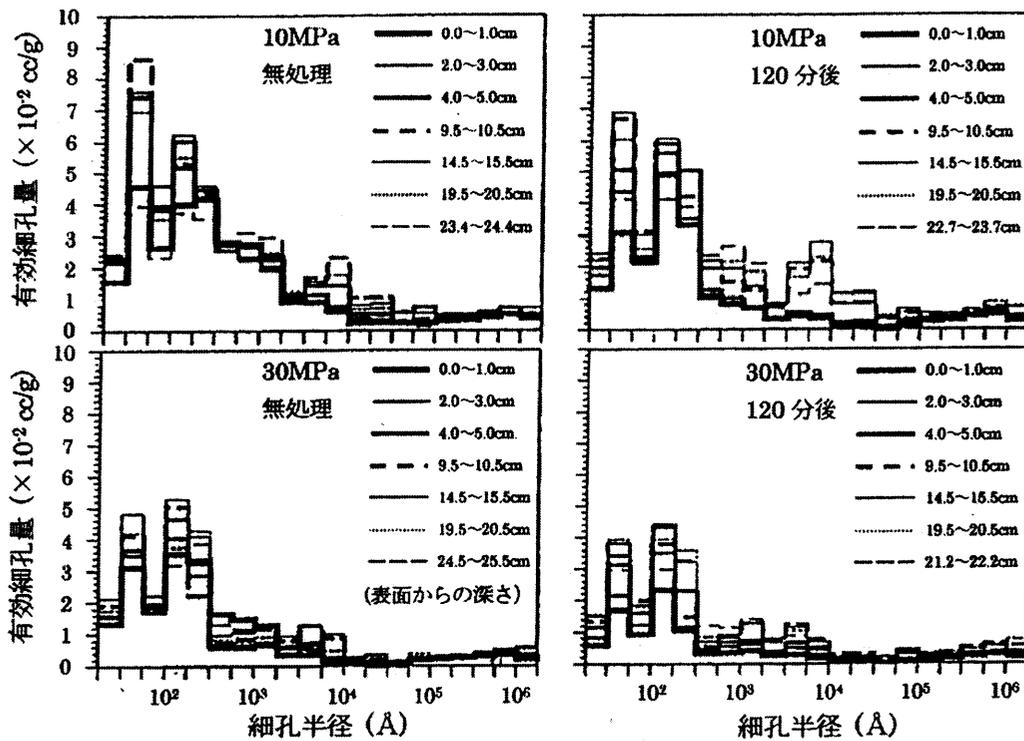


図-2.46 細孔径分布[29]

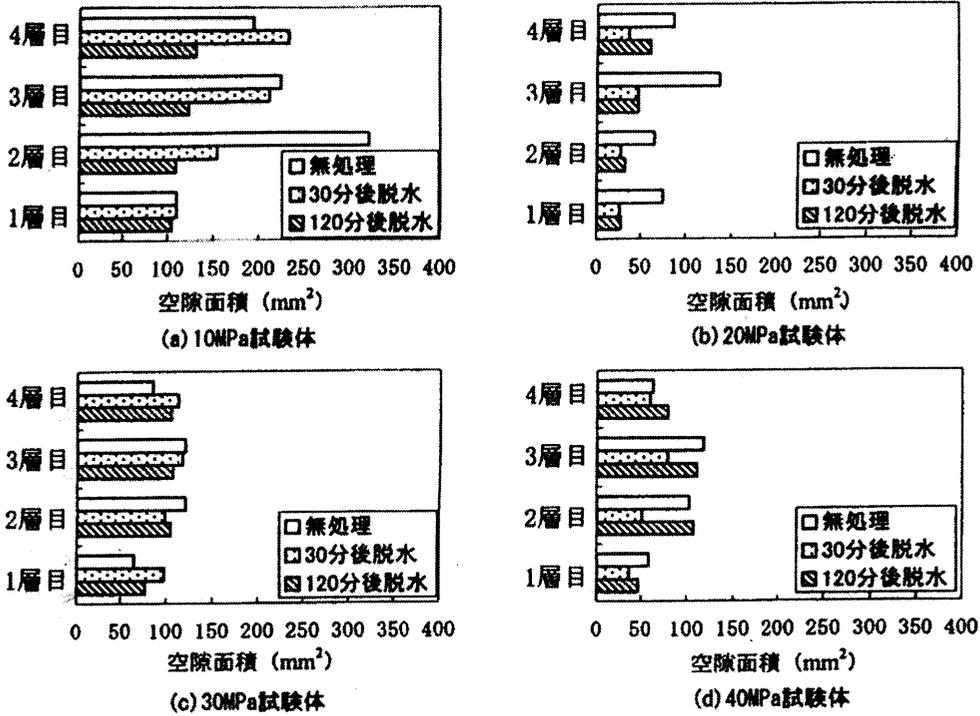


図-2.47 各層における空隙面積 [29]

(f) その他の品質改善効果

三島ら[33]は、真空脱水処理によるコンクリート床スラブ表層部の耐摩耗性の改善効果について検討している。要因をコンクリートの調合（建築調合（SL=18cm, W=185kg/m³），土木配合（SL=8cm, W=161 kg/m³））および処理方法（無処理，真空脱水処理）とし，試験体サイズを300×150×40 mm，測定項目を真空度，脱水率，すりへり係数である。なお，真空脱水処理の開始時期はブリーディング終了時，処理継続時間は5分間である。図-2.48によれば，真空脱水処理を行うことによって，コンクリート表層部のすりへり係数は19%～23%程度減少すると報告している。また，脱水率およびコンクリートの種類によらずほぼ一定となり，安定した品質の表層部を作ることができる」と報告している。

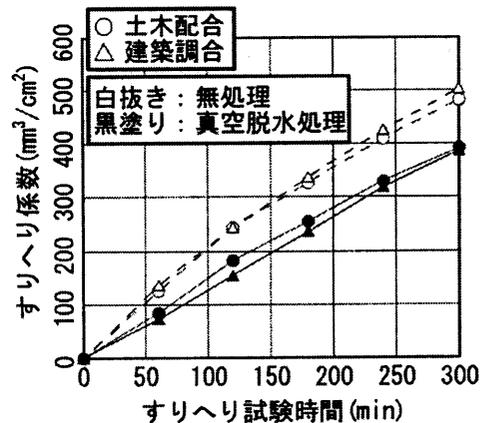


図-2.48 すりへり試験結果 [33]

小林ら[34]は、真空脱水処理を行ったコンクリートの混和材料による乾燥収縮低減効果を検討するため、各種混和材料を混和した真空脱水モルタルの長さ変化試験を行っている。実験要因は、混和材の種類（フライアッシュ、膨張材、収縮低減剤）、混和剤の置換率（各混和剤各3水準）、真空脱水処理の有、無である。試験体サイズを100×100×400mmである。なお、真空脱水処理の開始時期はブリーディング終了時、処理継続時間は5分間である。図-2.49 (a) および (b) によれば、真空脱水処理による乾燥収縮低減効果は14%程度であり、フライアッシュによる乾燥収縮低減効果より大きいと報告している。図-2.49 (c) によれば、膨張材による乾燥収縮低減効果は18~25%で置換率の増大に伴い収縮低減率は大きくなると報告している。図-2.49 (d) によれば、真空脱水処理と収縮低減剤を併用することで、45%程度の乾燥収縮の低減が図れるので、ひび割れ発生の抑制にきわめて有効であると報告している。

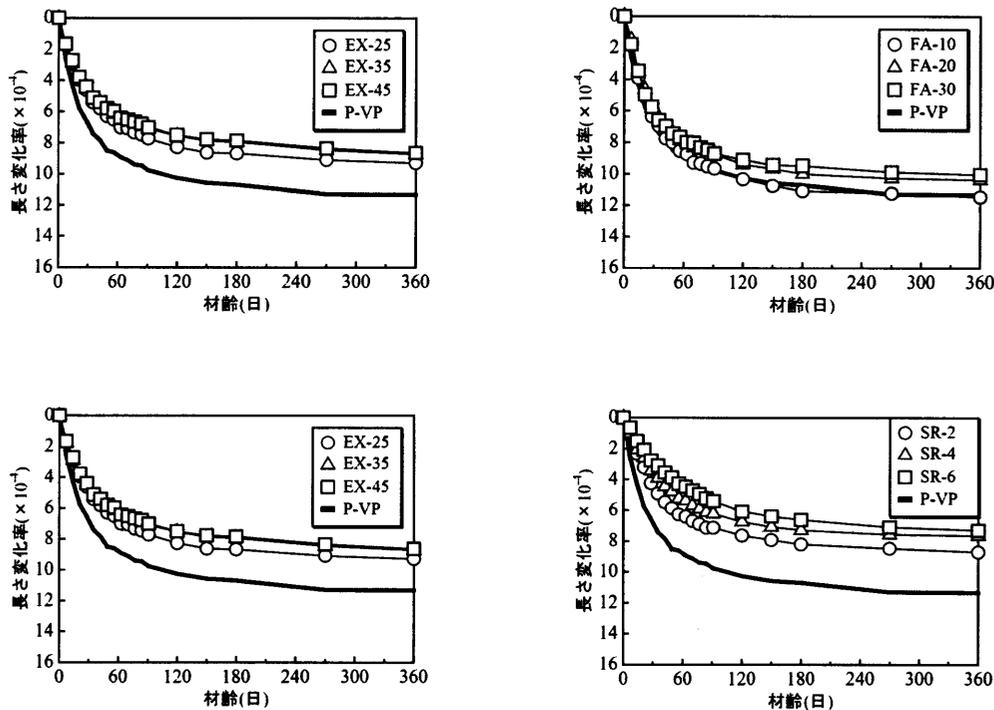


図-2.49 長さ変化の試験結果 (A法) [34]

前田ら[35]は、真空脱水処理工法の早期強度発現性に注目し、コンクリート打設直後における初期凍害（凝結前から初期凍害を受ける可能性のあるきわめて早期）に対する抵抗性について検討するとともに、凍害および真空脱水処理が細孔構造に及ぼす影響について検討している。実験要因は、真空脱水処理の有、無、凍結開始材齢（4, 6, 12, 18, 24,

36h) である。試験体サイズを 50×50×200mm, 50×50×50mm とし, W/C=0.55 の試料を用いている。なお, 真空脱水処理の開始時期はブリーディング終了時, 処理継続時間は 5 分間である。図-2.50 によれば, 真空脱水処理工法のもものが 12 時間以内に凍害を受けた場合, 無処理のものとは比べて圧縮強度の損失が小さくなり, 残存率 95%以下で凍結の影響があると見なすと, 真空脱水処理工法のもものは約 12 時間, 無処理のもものは約 18 時間必要で, 初期凍害に対してある一定の効果を期待できると報告している。なお, 圧縮強度の残存率は, 凍害を受けたコンクリートの圧縮強度は凍害を受けていないコンクリートの圧縮強度で除したものを示している。図-2.51 によれば, 初期凍害による総細孔量への影響はほとんど見られないが, 強度への影響が大きいと思われる 3 μm 以上の空隙量が増加する傾向が見られると報告している。

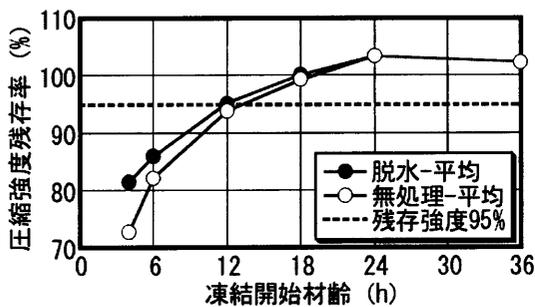


図-2.50 圧縮強度残存率 [35]

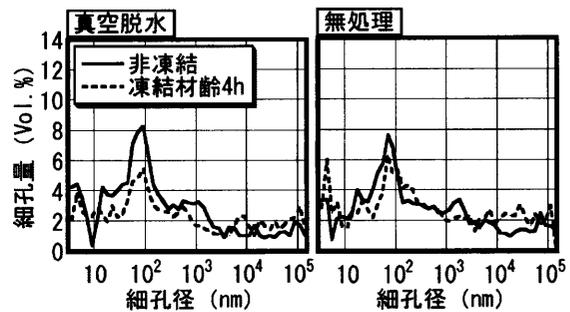


図-2.51 細孔径分布 [35]

畑中ら [36] は, 真空脱水処理が中性化特性に及ぼす影響に関する検討を行っている。要因を, 処理方法 (無処理, 真空脱水処理), 水セメント比 (45, 55, 65%) および養生方法 (湿潤養生, 乾燥養生) とし, 試験体サイズ 10×10×40 cm のものを用いて, 細孔径分布, 圧縮強度の測定および促進中性化試験を行っている。なお, 真空脱水処理の開始時期はブリーディング終了時, 処理継続時間は 5 分間とし, 促進中性化養生は, 温度 20°C, 湿度 60%, CO₂ 濃度 5% の環境条件下で行った。図-2.52 (a) によれば, 無処理に比べ真空脱水処理を行うと中性化深さ x が小さくなっており, W/C=65% で真空脱水処理を行った場合, W/C=55% の無処理試験体に相当し, W/C=55% で真空脱水処理を行った場合, W/C=45% の無処理試験体に相当していると報告している。また, 同図 (b) によれば, 真空脱水処理を行っても, 乾燥養生した場合, 湿潤養生に比べ極端に中性化深さ x が大きくなり, 初期の湿潤養生が極めて重要であると報告している。図-2.53 によれば, 中性化速度比と圧縮強

度の逆数および直径 50nm~168 μ m の細孔量の間には、直線的な関係が成立すると報告している。

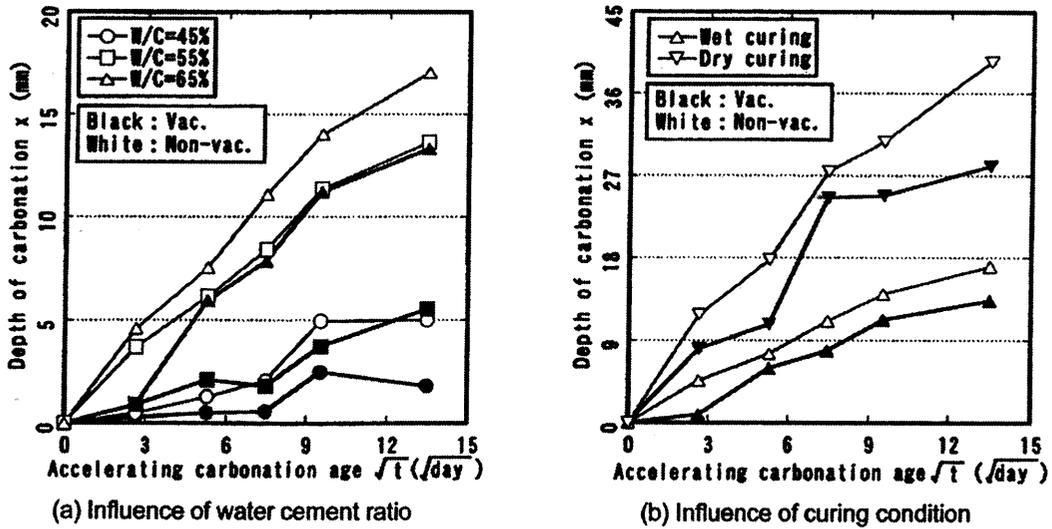


図-2.52 中性化深さ x と促進中性化期間の関係 [36]

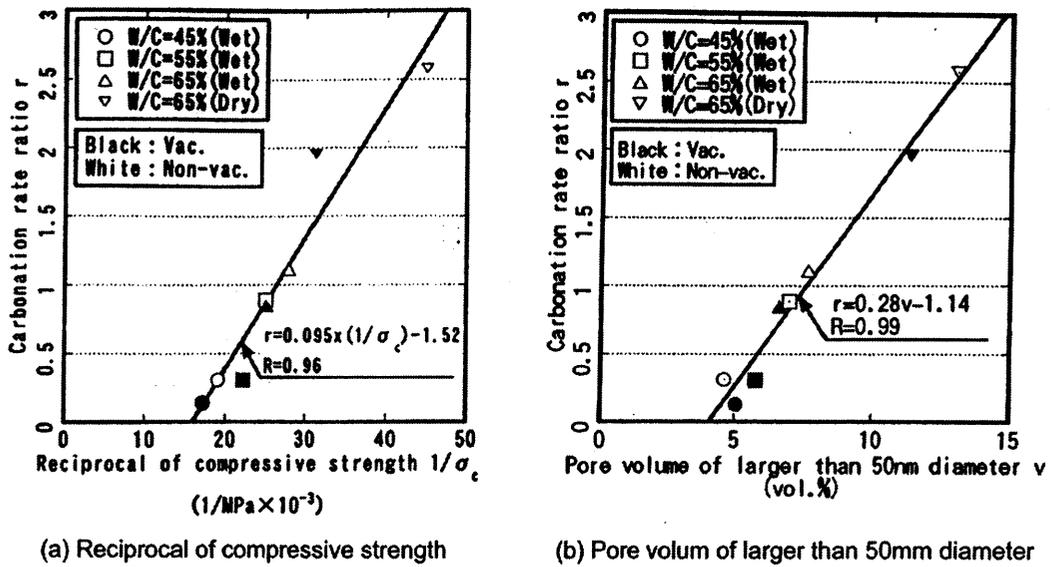


図-2.53 中性化速度比と圧縮強度の逆数および直径 50nm 以上細孔量の関係 [36]

坂本ら [37] は、真空脱水処理によるコンクリート床スラブの実大施工実験および実験室実験を行い、その品質改善効果を把握するため、表面性状(反発硬度, 引っかき傷の幅)および圧縮強度を測定している。また、真空処理マットの脱水口からの水平距離が真空脱水

処理の品質改善効果に及ぼす影響についても検討している。表-2.7に、実験の要因水準を示す。図-2.54に、無処理試験体に対する品質改善効果に及ぼす脱水口からの距離の影響を示す。同図によれば、評価指標値によって異なるが、同図(a)の圧縮強度に注目すると、脱水口に対する真空処理マット端部での品質改善効果は、実大施工実験では63%、実験室実験では57%程度となっており、大施工実験および実験室実験ともに、真空脱水処理による品質改善効果は真空処理マットの端部まで及ぶが、脱水口から離れると効果が減少する場合もあると報告している。また、真空脱水処理による脱水口近傍での品質改善効果に関して、実験室実験の結果は、実施工の特性を概ね再現できていると判断できると報告している。

表-2.7 要因水準[37]

(a) 実大施工実験

要因	水準
真空度(%)	0(無処理), 30, 70(現場平均真空度)
脱水口からの距離*1(cm)	0, 60, 120
養生方法	乾燥養生*2, 湿潤養生*3
地面への漏水	有, 無*4

[註]下線は基本水準を示す。

*1 真空脱水処理のみ

*2 材齢12日まで乾燥養生, 以後は屋外暴露

*3 材齢7日まで散水およびシート養生, 以後は乾燥養生と同様

*4 コンクリート下面の土間シートにより漏水防止

(b) 実験室実験

要因	水準
真空度(%)	0(無処理), 30, 70, 90
脱水口からの距離*1(cm)	0, 15

[註]下線は基本水準を示す。

*1 真空脱水処理のみ

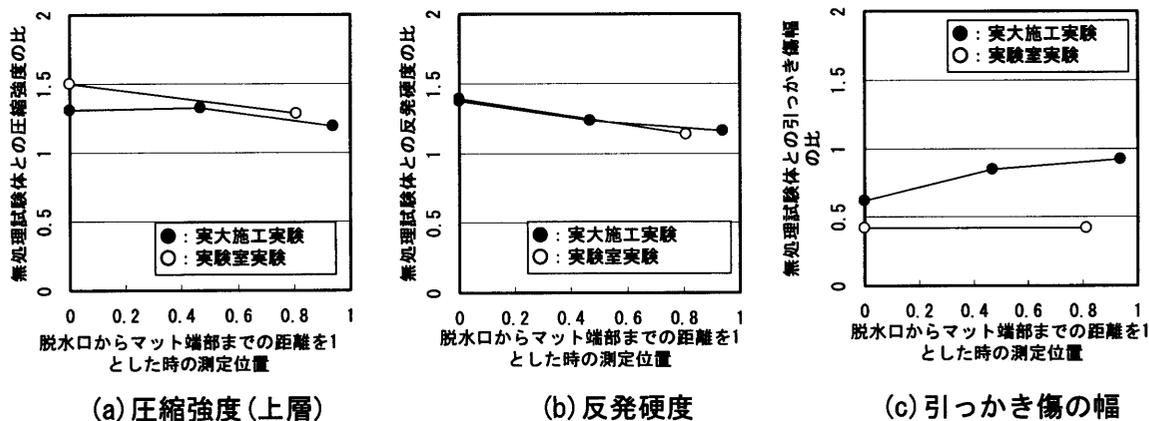


図-2.54 無処理試験体に対する品質改善効果に及ぼす脱水口からの距離の影響[37]

(2) 品質改善メカニズム

坂本ら[38]は、真空脱水処理時の空気泡の挙動が品質改善効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、可視化モデル材料を用いた可視化実験を行っている。図-2.55 は真空脱水処理における空気泡の挙動の予想図を示している。これによれば、固体粒子がマトリックス中に浮いた状態で真空脱水処理を行うと、大気圧による圧密効果で固体粒子相が圧密され、その分だけマトリックスが排出される。試料の圧密は固体粒子が実績率となるまで継続した後に終了する。その後も真空脱水処理を継続すると、試料全体としての体積は変化しないため、間隙水圧が減少し内包された空気泡が膨張し、この膨張分のマトリックスが更にホースより排出されるとしている。図-2.56 (a) ~ (d) は、可視化実験の様子が時系列で示されている。これによると、予想した真空脱水処理時の空気泡の挙動は概ね正しいことが確認されたと報告している。しかし、構成材料の密度・粘性など、対応性が十分に考慮されていない要因もあり、今後、実際のモルタルおよびコンクリートを用いて空気泡がどのように品質改善効果に影響するかを明らかにする必要があると報告している。

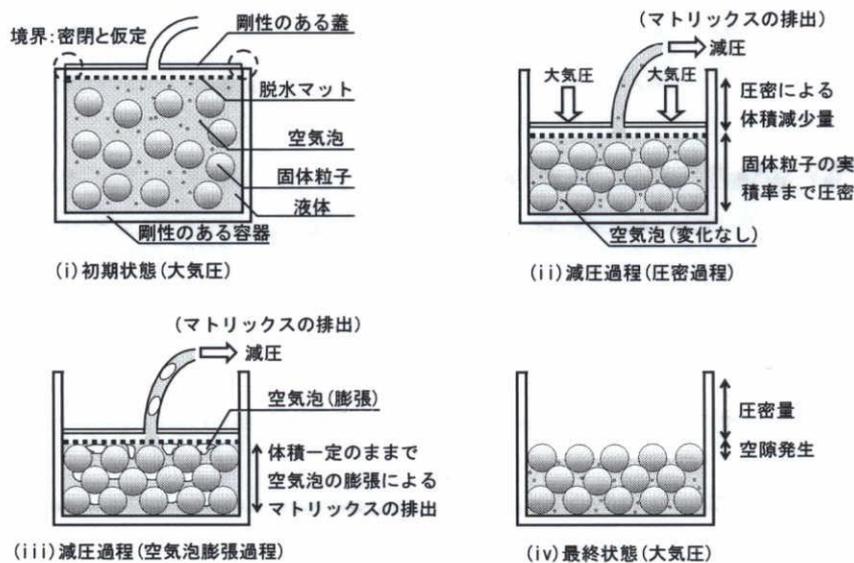


図-2.55 真空脱水処理における空気泡の挙動の予想図 [38]

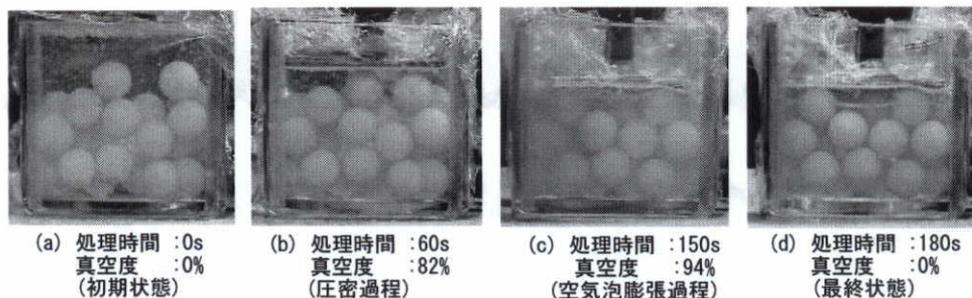


図-2.56 気・液・固 3 相モデル (試料上面のみ可動して減圧) [38]

坂本ら[39]は、脱水過程における空気泡の挙動予測の妥当性を検証するため、実際のモルタルおよびコンクリート中における間隙水圧の測定を行い、次いで、試料表層の空隙の発生条件についての検討を行っている。要因を試料（モルタル、コンクリート）、処理開始時期（打設直後、ブリーディングほぼ終了時）とし、測定項目をポンプによる吸引圧、脱水量の時刻歴および試料内部の間隙水圧としている。また、処理継続時間を5、30分としたときの、深さ3mmの総空隙面積および粒径分布の測定も行っている。図-2.57によれば、間隙水圧は、試料に関わらず上層ほど大きくなり、処理継続時間が長くなるに従って、下層部を中心に間隙水圧の増加が進行していくと報告している。図-2.58によれば、モルタルで真空脱水処理を行うと、無処理に比べて空隙が増加し、その増加量は、処理継続時間を長くした方が大きくなるが、コンクリートでは処理継続時間が5分の場合、無処理に比べて空隙が減少し、処理継続時間を長くすると、空隙は無処理よりも増加する。これは、モルタルは5分のうちに空気泡の膨張過程まで至り、コンクリートでは圧密終了が5分前後であったために、締固め効果により空隙が減少したものと考えられると報告している。図-2.59によれば、いずれの試料においても、処理継続時間を長くすると、表層部におい

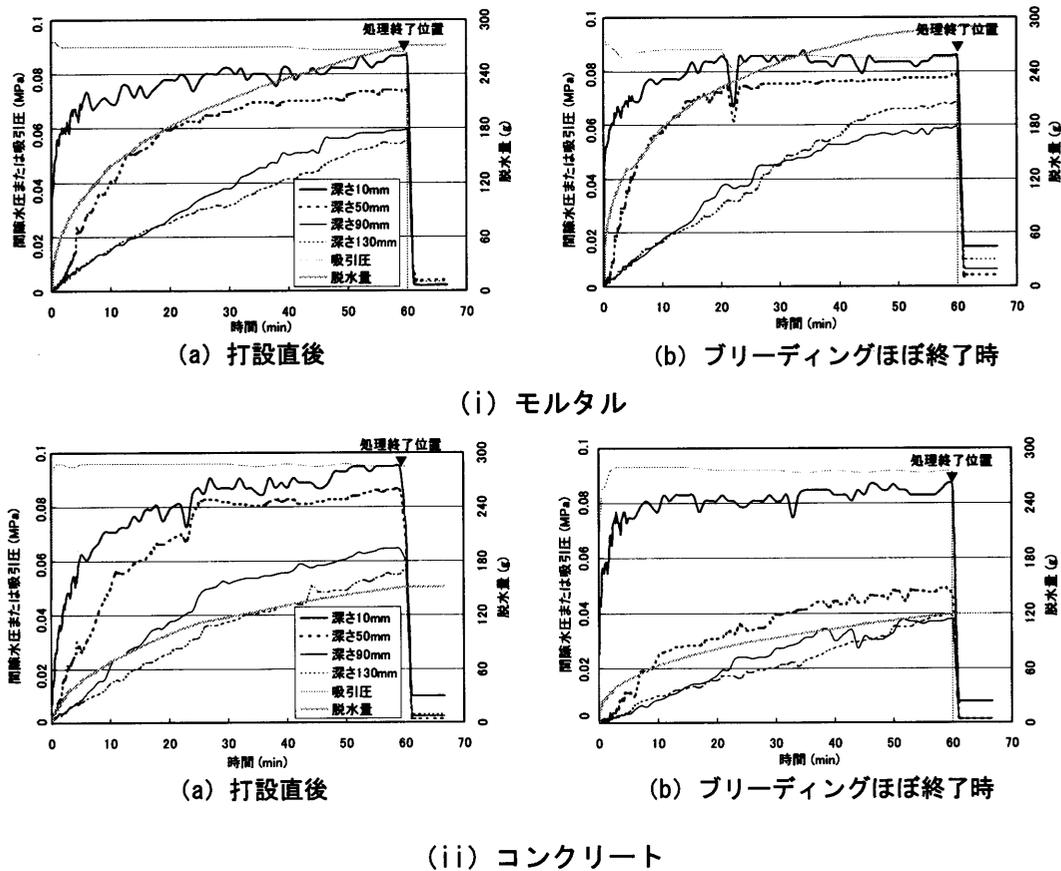


図-2.57 間隙水圧の時刻歴[39]

て直径 300~1000 μm 程度の空隙が増加する傾向があり、前報の脱水過程における空気泡の挙動予測が妥当であることが確認されたと報告している。

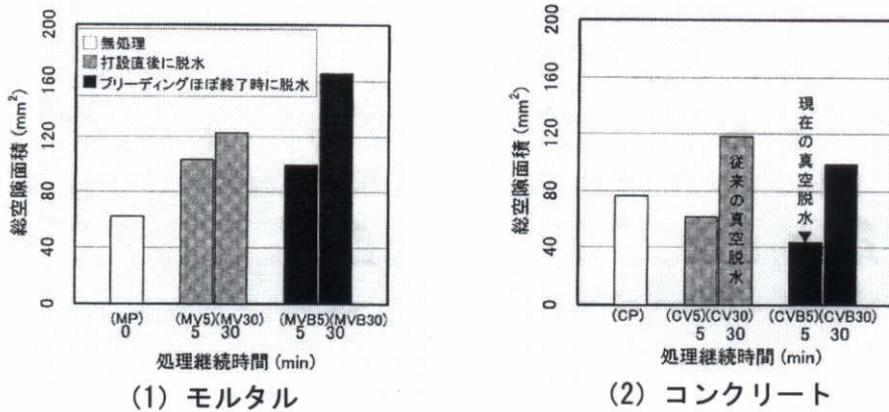


図-2.58 総空隙面積[39]

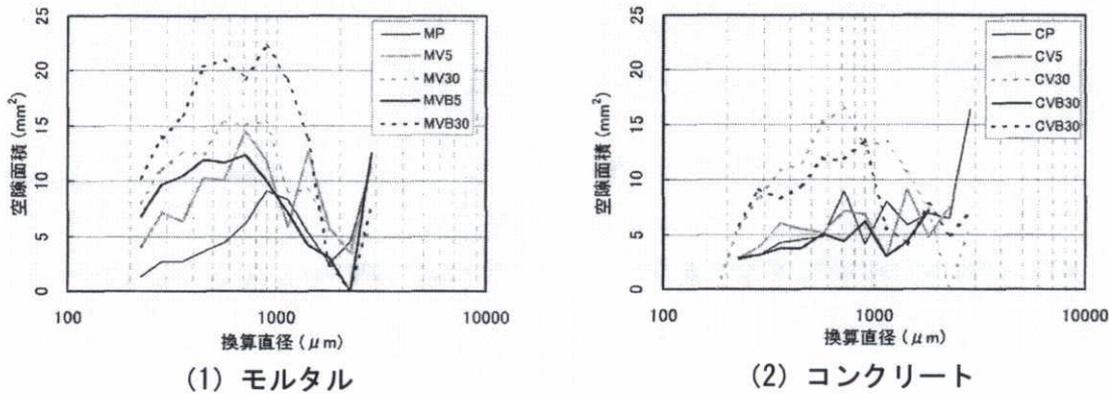


図-2.59 深さ 3 mmにおける空隙の粒径分布[39]

平川ら[40]は、真空脱水処理工法時におけるコンクリート内部の水分移動性状を明らかにするために、実験的および解析的手法により考察を行っている。実験要因は、真空領域 (24×24, 30×30, 36×36cm)、脱水口数 (1, 9個: 図-2.60 および 61 参照) とし、試験体サイズを 36×36×20 (高さ) cm である。なお、真空脱水処理の開始時期は打設 120 分後、処理継続時間は 10 分間、真空度は 100% である。解析モデルは、供試体の形状寸法に対する 1/2 モデルで、2次元解析を行っている。図-2.62 によれば、真空領域、脱水口数に関わらず、脱水率はほぼ同じ経路で増加することから、真空脱水処理開始時期において脱水量は真空領域の変化には影響を受けず、真空度の変化に影響を受けると報告している。図-2.63 によれば、真空領域、脱水口数に関わらず、単位時間当たりの脱水率の時間的変化は、処理開始後およそ 100 秒で一定となっていることから、プリーディング終了後に真空脱水処理を施す場合、処理時間は 5~10 分程度で十分な効果が得られると報告している。

図-2.64 によれば、非真空領域の差異が局所的な到達圧に影響を及ぼす結果として、深度方向への脱水量に差異が見られたと報告している。図-2.65 によれば、真空度は真空マット端部に向かうにつれ減少するものと仮定した場合、図-2.66 に示した実挙動に対応することが確認されたと報告している。

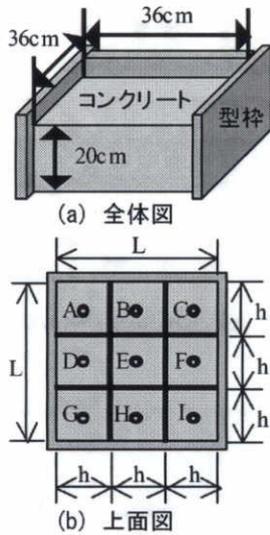


図-2.60 試験体形状寸法[40]

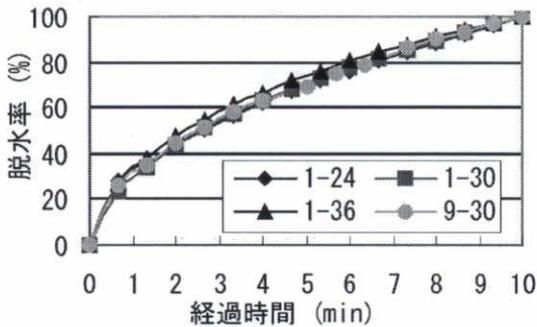


図-2.62 全脱水量に対する脱水率変化[40]

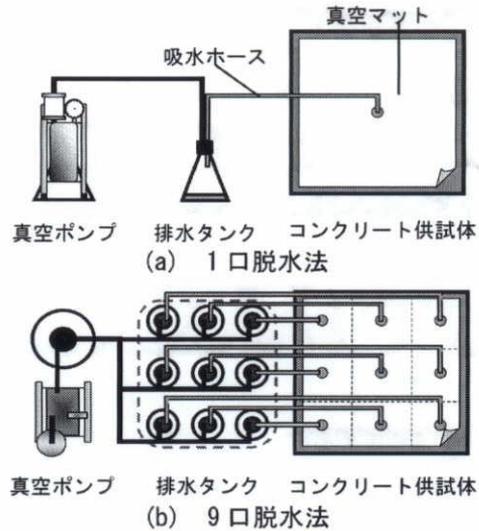


図-2.61 局所的脱水量測定図[40]

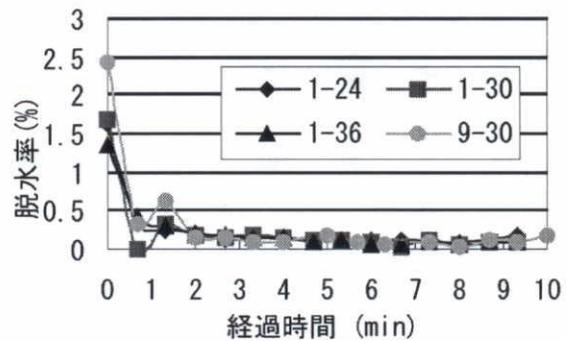


図-2.63 単位時間当たりの脱水率変化[40]

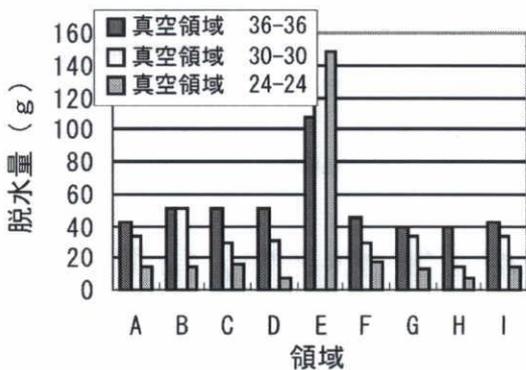


図-2.64 各要素の脱水量[40]

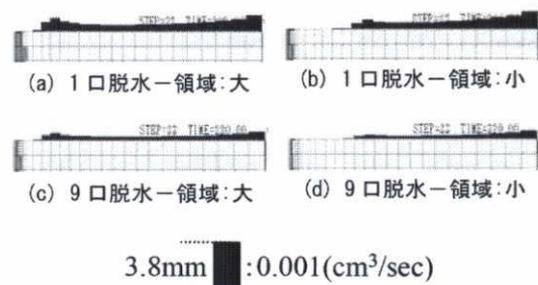


図-2.65 真空領域および真空脱水口数による脱水量[40]

平川ら[41]は、真空脱水処理時における局所的に異なる真空状態が水分移動性状に及ぼす影響の評価を目的として、間隙水圧を測定することで真空脱水処理の影響領域および影響度について実験的な検討を行った。実験要因は、間隙水圧計の設置位置（深さ 5, 10, 15, 19cm）、設置方向（鉛直方向、水平方向）とし、試験体サイズを 36×36×20（高さ）cm、測定項目を間隙水圧としている。なお、真空脱水処理の開始時期はブリーディング終了後、処理継続時間は 10 分間、真空度は 100%である。図-2.66 によれば、真空脱水処理開始後 10 分経過時点において急激に間隙水圧が低下している。これは、コンクリート内部での脱水可能な余剰水量が少なくなり、過剰脱水によって空気みちが形成されたためと報告している。図-2.67 によれば、真空脱水処理開始後 5 分では、特に領域 A および B において大きな動水勾配となり、間隙水圧も最大となっている。すなわち、領域 A および B において流速ベクトルは領域 C に比べて大きくなり、各領域からの脱水量も異なると報告している。図-2.68 は、供試体形状寸法の 1/4 モデルにおける 3 次元的な水分移動性状を示している。同図によれば、真空処理開始後約 5 分では、各層における水分移動がコンクリート表面に向かって垂直に上昇するのに対し、約 5 分経過後では、水平方向の動水勾配が鉛直方向を上回り、脱水口へ向かう集約的な性状を示していると報告している。

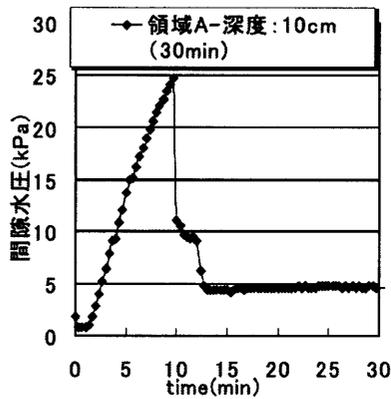
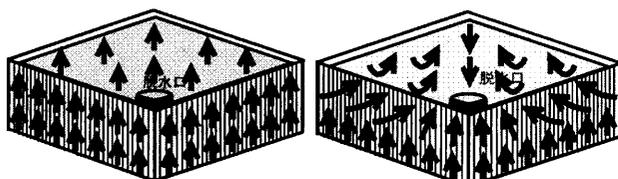
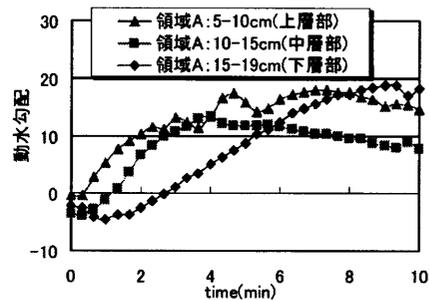


図-2.66 脱水保持時間 30 分における
間隙水圧履歴[41]

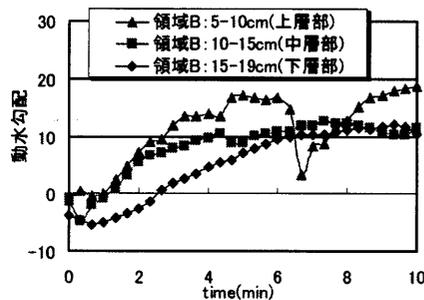


(a) 真空処理初期 (b) 約 5 分経過時

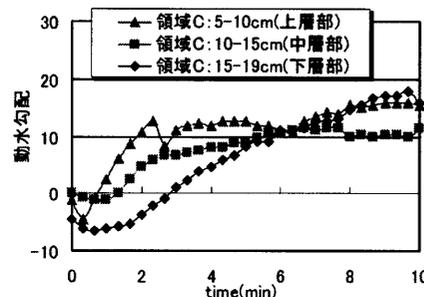
図-2.7 3 次元的な水分移動[41]



(a) 領域 A における動水勾配



(b) 領域 B における動水勾配



(c) 領域 C における動水勾配

図-2.68 鉛直方向の動水勾配履歴[41]

服部ら[42]は、真空脱水処理に起因した内部圧縮強度分布の発生メカニズムを明らかにすることを目的として、モルタルおよびコンクリートの密度推定に対する一次元圧密理論の適用性について検討を行っている。モルタルに関する実験の要因は、脱水方法（加圧脱水、真空脱水、無処理）および圧密圧力（0.05, 0.10MPa）である。真空脱水処理における真空度は95%、処理開始時期はブリーディングのほぼ終了時（練混ぜ後120分）、処理継続時間は300sとした。試験体サイズを $\phi 100 \times 120\text{mm}$ とし、同試験体から $\phi 25 \times 25$ のコア試験体を3本採取した。また、コンクリートについて、実験の要因は、モルタルと同様とし、加圧脱水の圧密圧力 p は0.1MPaおよび0.5MPaとした。真空脱水処理における真空度は85%、処理開始時期はブリーディングのほぼ終了時（練混ぜ後90分）、処理継続時間は300sとした。試験体サイズは $\phi 150 \times 180\text{mm}$ とし、同試験体から $\phi 50 \times 50\text{mm}$ のコア試験体を3本採取した。測定項目は、ブリーディング水の排水量、処理による脱水量、圧縮量と時間の関係（モルタルのみ）、密度分布（コア）である。図-2.69によれば、最終段階に至るまでの圧縮量の増加傾向は、圧密圧力 $p=0.05\text{MPa}$ および 0.1MPa ともに実験値と理論値が比較的良好に一致しており、モルタルの脱水過程には、圧密理論の適用が可能であると報告している。図-2.70によると、加圧脱水試験体では、無処理試験体と比較した各層ごとの脱水量は深さ方向にほぼ一定であると推測され、圧密理論の適用が可能であるが、真空脱水試験体の密度分布は、最下層では無処理試験体と同程度となっており、最上層では0.1MPaの加圧試験体と同程度となっていることから、深さ方向に間隙水圧の分布が発生していることが考えられると報告している。また、密度分布の発生メカニズムを解明するために、モルタルおよびコンクリート内部の間隙水圧分布を実測している。実験要因は、試料高さ（ $\phi 150 \times 105, 180\text{mm}$ ）、処理開始時期である。また、測定項目は間隙水圧、吸引圧である。図-2.71によれば、試料（モルタルおよびコンクリート）の各時間における間

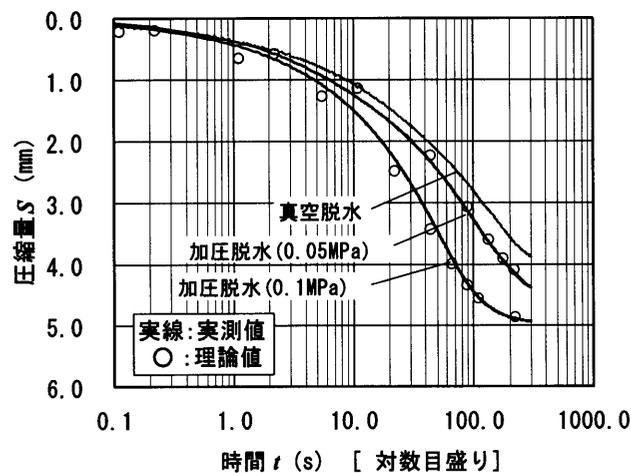


図-2.69 圧縮量 S と時間 t の関係 [42]

隙水圧は深さ方向に分布を生じ、図-2.70と同様に、上層ほど大きくなる傾向が見られることから、密度分布は圧密理論を応用し、間隙水圧の分布を考慮すれば推定可能であると報告している。

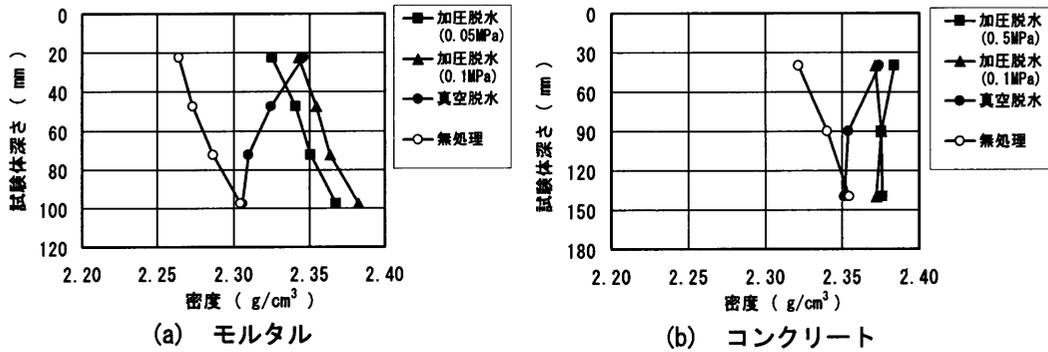


図-2.70 密度分布[42]

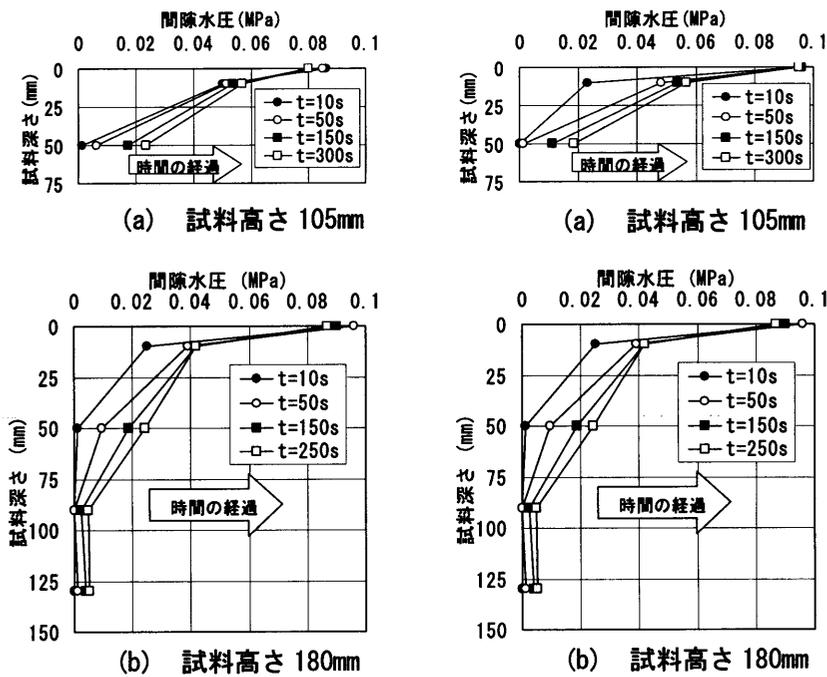


図-2.71 間隙水圧分布の時刻歴[42]

畑中ら[2]は、真空脱水コンクリートの圧縮強度分布と密度分布の間に相関性が見られることに着目し、土質工学で用いられる圧密理論をフレッシュコンクリートに適用して、真空脱水処理による品質改善効果を定量的に推定する手法を提案し、一連の基礎実験によ

って例証している。図-2.72 に、真空脱水コンクリート中の密度分布および圧縮強度分布の推定フローを示す。同図によれば、真空脱水コンクリート中の密度分布および圧縮強度分布は、処理時の間隙水圧分布に従って、各層ごとに圧密圧力を変化させて圧密理論を適用する事により推定できると報告している。

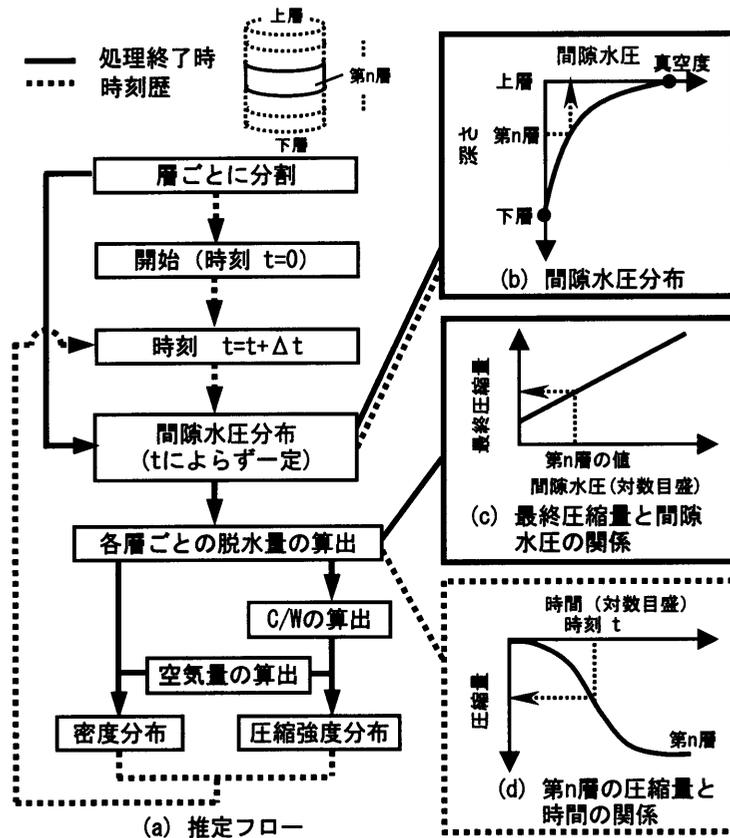


図-2.72 密度および圧縮強度分布の推定フロー[2]
(間隙水圧が時間によって変化しない場合)

2.2.4 土質における真空脱水処理

対象とする試料を土とした土質工学の分野では、圧密現象に関する研究として数多く行われており[例えば、43 および 44]、真空脱水工法については、これと同様な原理の工法として、一般的には真空圧密工法という名称で呼ばれている。文献[45]では、真空脱水処理と加圧脱水処理の応力状態が示されており、図-2.73 に示すように、脱水終了時の有効応力は、加圧脱水処理および真空脱水処理ともに式 (2.5) で示される。

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta \sigma \tag{2.5}$$

ここに、 σ : 脱水終了時の有効応力 (MPa), σ_0 : 載荷前または処理前の有効応力 (MPa), $\Delta \sigma$: 有効応力の増加分 (MPa)

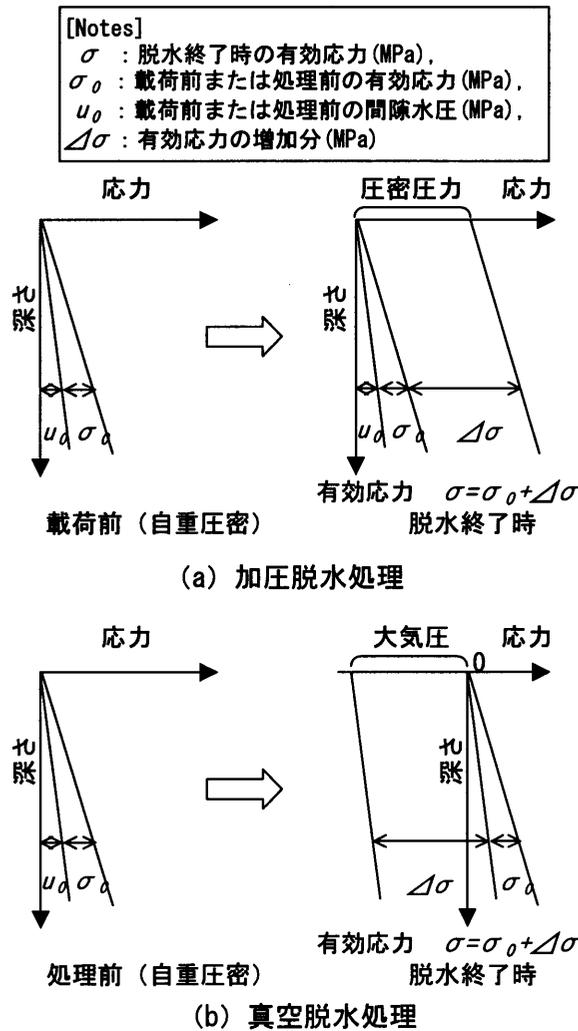


図-2.73 加圧脱水処理と真空脱水処理の応力状態[45]

谷村ら[46]は、加圧脱水処理と真空脱水処理の挙動を比較した実験を行っている。試験体は、直径5cm、高さ10cmの円柱体とし、試料はNSF粘土($G_s=2.756$, $WL=61.1\%$, $I_p=27.4\%$)を用いている。圧密圧力は196kPaとし、処理時間は約10分間として、体積ひずみを計測している。図-2.74によれば、体積ひずみと時間の関係は、真空脱水処理と加圧脱水処理では、ほぼ同様な傾向を示していることが分かる。

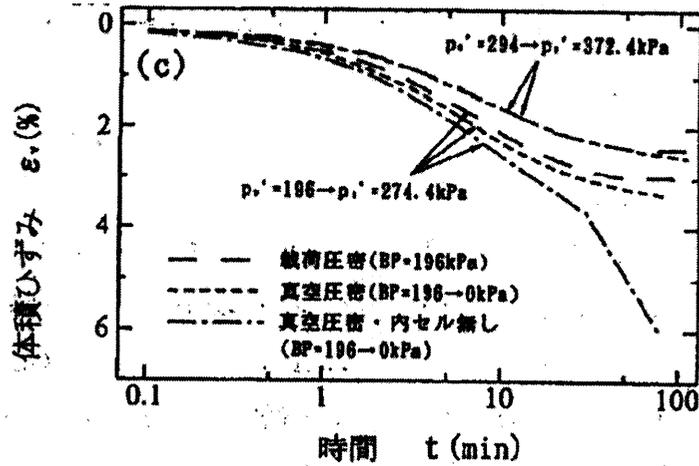


図-2.74 体積ひずみの経時変化[46]

2.3 加圧脱水工法に関する研究

2.3.1 加圧脱水工法[47-49]

加圧脱水工法とは、型枠にコンクリートを投入して振動台上で振動締固めを行ったあと、油圧装置等を用いて $0.7\sim 1.0\text{N/mm}^2$ 程度の圧力をコンクリートにかけて成形する方法である。また、真空ポンプを用いて余剰水を吸い出すと同時に、油圧による加圧を併用する方法もある。図-2.75 に、加圧脱水工法の例を示す。この工法は、加圧により自由水が絞り出されてコンクリートが密実になるので、強度や耐久性が増大する。

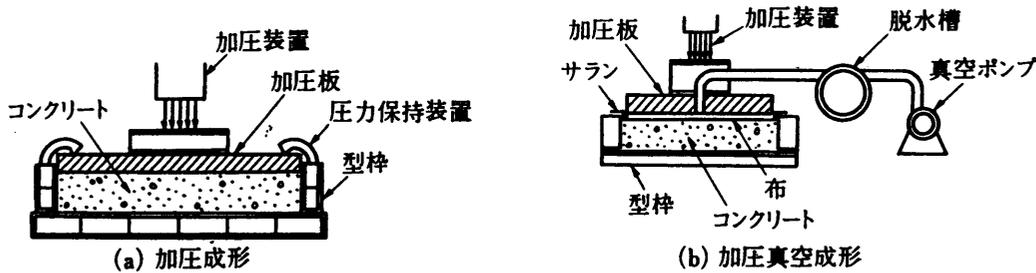


図-2.75 加圧脱水工法の例[47-49]

2.3.2 品質改善効果

土師ら[50]は、場所打ちコンクリートの品質向上の一方法として加圧脱水法を取り上げ、加圧脱水されたコンクリートの基礎的な物性試験を行っている。実験要因は、加圧力 (0, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0MPa) および材齢 (0, 3, 6 時間) である。測定項目は、圧縮強度、曲げ強度、透水係数および乾燥収縮量である。試験体サイズは、 $\phi 10\times 20\text{cm}$ の円柱試験体 (圧縮強度試験) および $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱試験体 (曲げ試験) である。図-2.76 に、材齢と強度増加率の関係を示す。強度増加率は、各々の材齢時の無加圧コンクリートの圧縮強さを基準に、各々の加圧脱水コンクリートのそれらとの割合である。同図によれば、圧縮強度の増加割合は、最終的に加圧しない試験体のおおよそ 1.5 倍になり、硬化後の強度増加の原因は、脱水による水セメント比の低下の影響によると報告している。

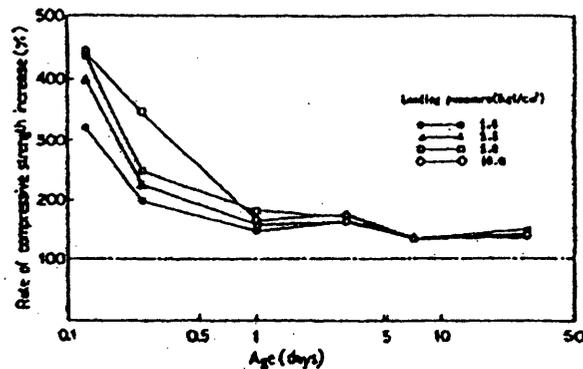


図-2.76 材齢と強度増加率[50]

佐藤ら[51]は、加圧脱水コンクリートの基本性状を把握するため、加圧力、加圧保持時間が脱水量、早期自立性および硬化コンクリートの諸特性に及ぼす影響について検討している。実験要因は、加圧力 (0.2, 0.5, 0.8MPa) および加圧保持時間 (1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30 分) である。測定項目は、脱水量、空気量、透水係数および圧縮強度である。試験体サイズは、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱試験体である。図-2.77 に、脱水率と圧縮強度の関係 (材齢 7 日) を示す。同図によれば、加圧脱水コンクリートの圧縮強度が増加する傾向は、単位水量を減じたコンクリートの圧縮強度とほぼ一致しており、加圧脱水によるセメント比の低下が圧縮強度に対して支配的影響を及ぼしていると報告している。図-2.78 に、脱水量と空気量および気泡間隔係数の関係を示す。同図によれば、加圧脱水を行った硬化後のコンクリートの空気量および気泡間隔係数は、脱水を行っていないものほとんど変わらないと報告されている。

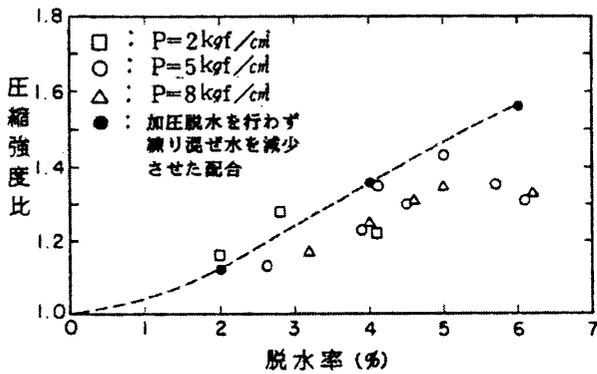


図-2.77 脱水率と圧縮強度 (材齢 7 日) [51]

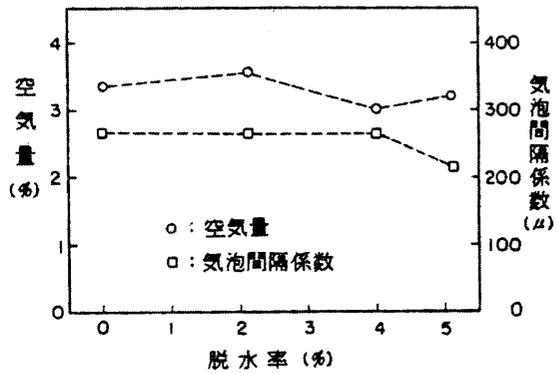


図-2.78 脱水率と空気量および気泡間隔係数 [51]

コンクリートを対象とした加圧脱水工法に関する研究は、圧縮強度、気泡等の品質に関する考察[52 および 53]やトンネルの覆工に採用される場所打ライニング工法の充填性に関する考察[54-56]などが見られる。

2.3.3 品質改善メカニズム

河井[57]は、モルタルを用いた下面排水の加圧脱水実験を行い、モルタルの加圧脱水特性について検討している。実験要因は、混和剤 (プレパックドコンクリート用混和剤 IA : P モルタル, 高強度プレパックドコンクリート用混和剤 GF : F モルタル), 水結合材比 (40, 45, 50%), 加圧力 (0.15, 0.25, 0.35, 0.45MPa) である。測定項目は、脱水量、沈下量、間隙水圧であり、試験体サイズは、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円筒形である。図-2.79 に示す脱水量の経時変化から、脱水量は加圧時間の平方根にほぼ比例して増加し、式 (2.6) で表されると

している。また、図-2.80 および図-2.81 に示す間隙水圧の経時変化および水結合材比の経時変化から、加圧脱水処理では、間隙水圧が減少しはじめる面（脱水境界面）の下側では圧密が生じており、上側では脱水過程が生じていないとし、モルタルの加圧脱水過程は圧密を含めたる過過程と見なせると報告している。

$$S = (2pk / \varepsilon_d \cdot \gamma_f)^{1/2} \quad (2.6)$$

ここに、 S : 沈下量, p : 加圧力, k : 脱水固化層の透水係数, ε_d : 脱水ひずみ,
 γ_f : 水の単位体積質量

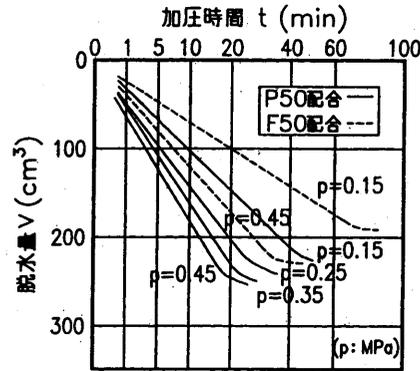


図-2.79 脱水量の経時変化 [57]

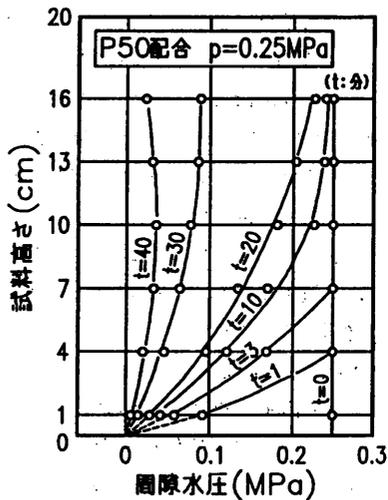


図-2.80 間隙水圧の経時変化 [57]

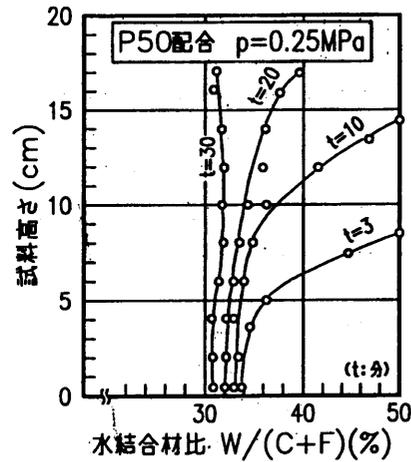


図-2.81 水結合材比の経時変化 [57]

神代ら[58]は、鋼管コンクリート構造（CFT造）用の充填コンクリートの充填性を事前に評価する方法として加圧ブリーディング試験について検討している。実験要因は、単位セメント量（350, 425, 500kg/m³）、加圧力（50, 150, 250, 500, 750kPa）である。加圧ブリーディング試験における試験体サイズは、φ125×145mmとしている。写真-2.1によれば、C425（W/C=41.1%）やC500（W/C=34.0%）については、密実な充填状況が確認されたが、C350（W/C=50.0%）では比較的大きなすき間が発生し、充填性が劣る結果となった、と報告している。図-2.82はC350における加圧脱水量の測定結果である。これによれば、加圧力が250kPa以下では圧密理論による理想値とほぼ一致したが、加圧力が500kPa以上では、初期の段階において実際の脱水の進行の方が速くなるが、C500については全ての加圧力に対して理論値とほぼ一致しており、以上の結果から概ねコンクリートの加圧脱水特性に対して、圧密理論が適用できると報告している。図-2.83によれば、鋼管内部の充填性が劣ったC350については最も透水性が大きくなることが報告されている。

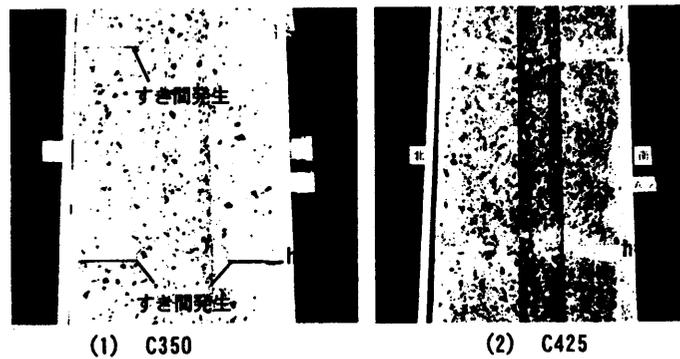


写真-2.1 ダイアフラム部の充填状況 [58]

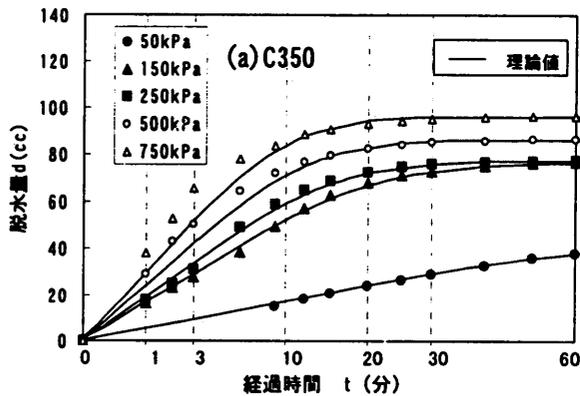


図-2.82 加圧脱水量の測定結果 (C350) [58]

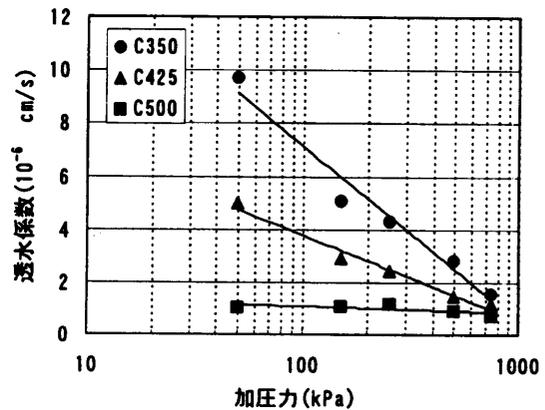


図-2.83 透水係数の算定結果 [58]

2.4 透水性型枠工法に関する研究

2.4.1 透水性型枠工法[47 および 59]

透水性型枠工法とは、透水性材料（透水性の織布や吸水シート）を型枠のせき板に取り付けることにより、コンクリート中の余剰水や気泡を型枠外に排出し、脱型後のコンクリート表面からアバタや気泡を除去する方法である。せき板に小孔を設けるもの、孔を設けずせき板の端部から排出させる構造のものなどがある。図-2.84 に、透水性型枠工法の例を示す。

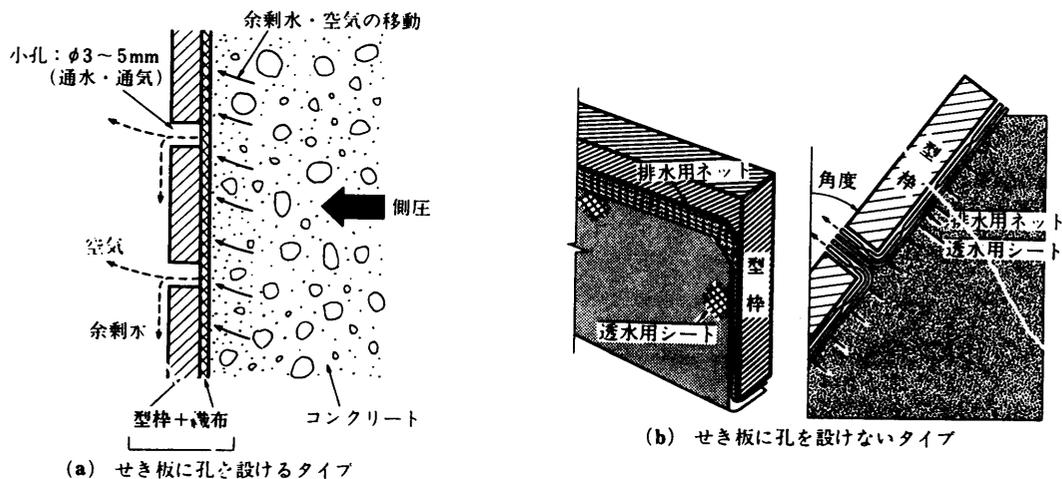


図-2.84 透水性型枠の概要[47]

2.4.2 品質改善効果

(1) 排水量

石神ら[60]は、透水性型枠の排水作用がブリーディング水量に影響を与えていると報告しており、永田ら[61]は、透水性型枠のブリーディング水量がシートなしに比べ極端に減少する理由として、ブリーディング水が透水シートから排出されるとしている。

小柳ら[62]は、排水量とブリーディング水量の経時変化を検討している。図-2.85 に結果を示す。それによると、透水性型枠からの排水はブリーディングよりも長時間かけて収束していくと報告している。

排水量とコンクリート調合の関係について、いくつかの研究[63-65]では、全て図-2.86 に示すように、調合時における水セメント比にかかわらず排水量はほぼ同じであると報告している。また、芳賀ら[66]は、スランプの違いにおける排水量を検討している。図-2.87 にその結果を示す。同図によれば、スランプが大きいコンクリートほど排水量が多いとしている。

透水性型枠の高さ位置と排水量の関係については、いずれの文献[62,67-69]も図-2.88に示すように、コンクリート上部よりも下部のほうが側圧が大きいことにより、排水量は多いと報告している。

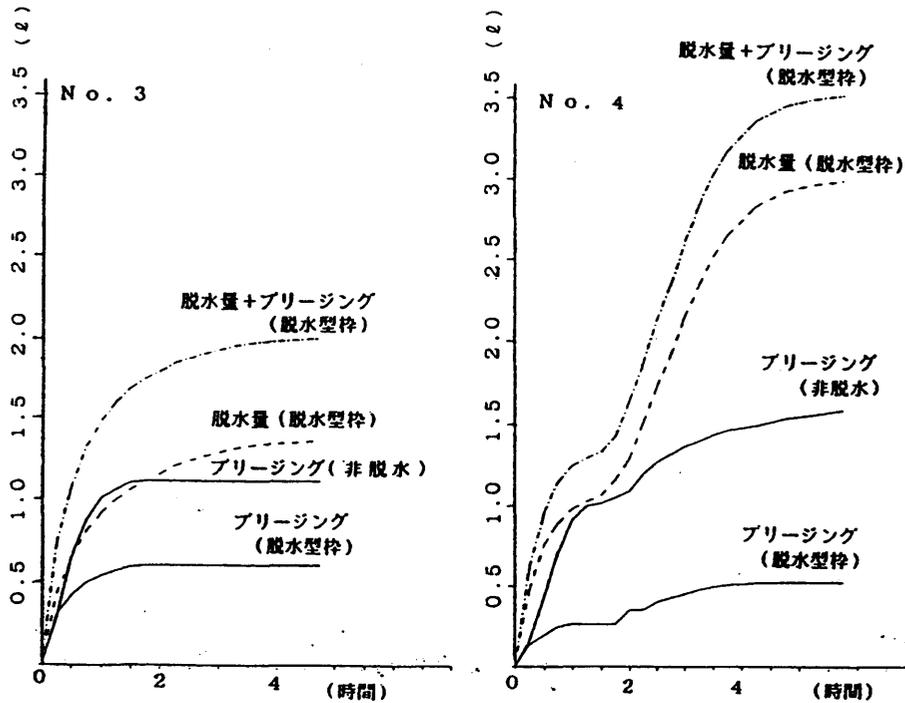


図-2.85 ブリーディング水量と排水量の関係[62]

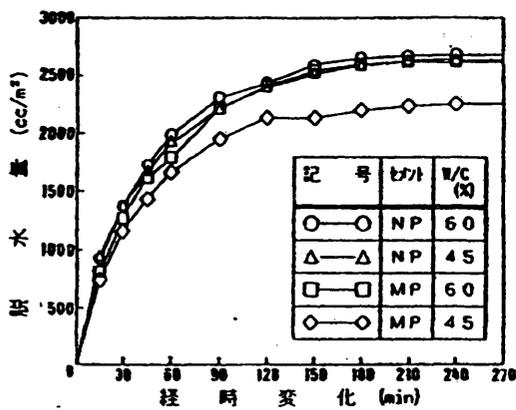


図-2.86 水セメント比と排水量の関係[64]

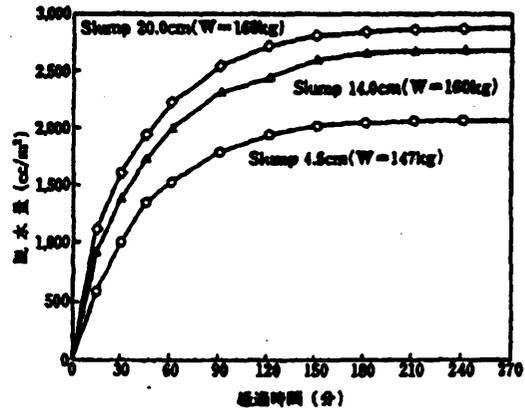


図-2.87 スランプと排水量の関係[66]

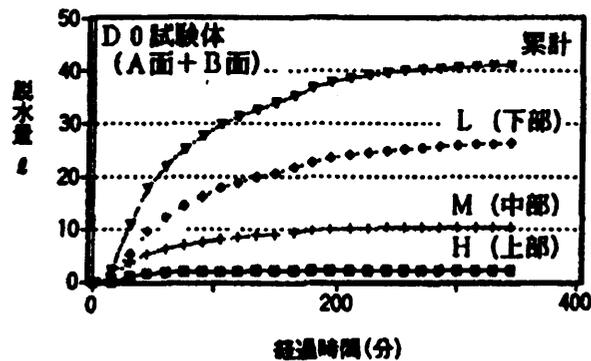


図-2.88 コンクリートの高さ位置における排水量[68]

(2) 水セメント比

透水性型枠を使用することによって型枠付近の水セメント比が低減されることがいくつかの研究[70-72]で報告されている。図-2.89に結果を示す。いずれの研究でも型枠表面から20~50mmの深さの範囲まで水セメント比が低減していると報告している。また、型枠表面付近のセメント量を調べている研究[65,73]もあり、それらによると、図-2.90に示すように、型枠表面から5mm程度の範囲では、セメント量が増加していると報告している。

(3) 内部圧縮強度分布

透水性型枠内部のコンクリート強度を検査するために、コア試験体を用いた圧縮強度分布の測定が数多く行われている。図-2.91に試験体高さ別の採取位置によるコア圧縮強度分布を示す。ほぼ全ての文献において、透水性型枠によって、内部圧縮強度も改善されているとされている。材齢による影響[60,61,67,68,75-77]では、反発度と異なり、材齢に関わらず透水性型枠の効果が一定して現れると報告されている。試験体高さによる影響[62,65,67,75-80]では、試験体下部のほうが大きな改善効果を示すとされている。しかし、透水性型枠の影響範囲がコンクリートの表層部に限られているため、その範囲外で採取されたコア試験体では、透水性型枠の効果があまりない結果となるという報告[60および78]もある。また、水セメント比による影響では、笠井ら[65]は、水セメント比が大きいほど透水性型枠の効果が大きいとしているのに対し、庄谷ら[71]はそれと逆の見解を示している。

竹田ら[64]によれば、透水用のシートを用いた型枠をダム堤体やドーム構造物などに適用することを目的として、傾斜面に用いた場合あるいは中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合のコンクリートの耐久性改善の効果およびその影響範囲について検討している。表-2.8に、実験要因および試験体概要を示す。図-2.92に、透水性シートを用いた場合の

合板型枠に対する表面強度比を示す。同図によれば、材齢28日における普通ポルトランド(NP)の強度増加率は30~50%であるが、中庸熱ポルトランドセメント(MP)のW/C=60%のそれは、上部で20%、下部で80%であり、強度増加率の高さによる差が大きい。この強度増加の差は、コンクリートの凝結速度の違いが、型枠に作用する側圧に影響するために生じると考えられると報告している。

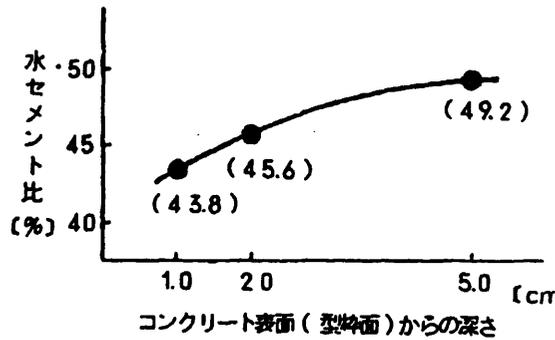


図-2.89 コンクリート表面からの深さと水セメント比の変化[70]

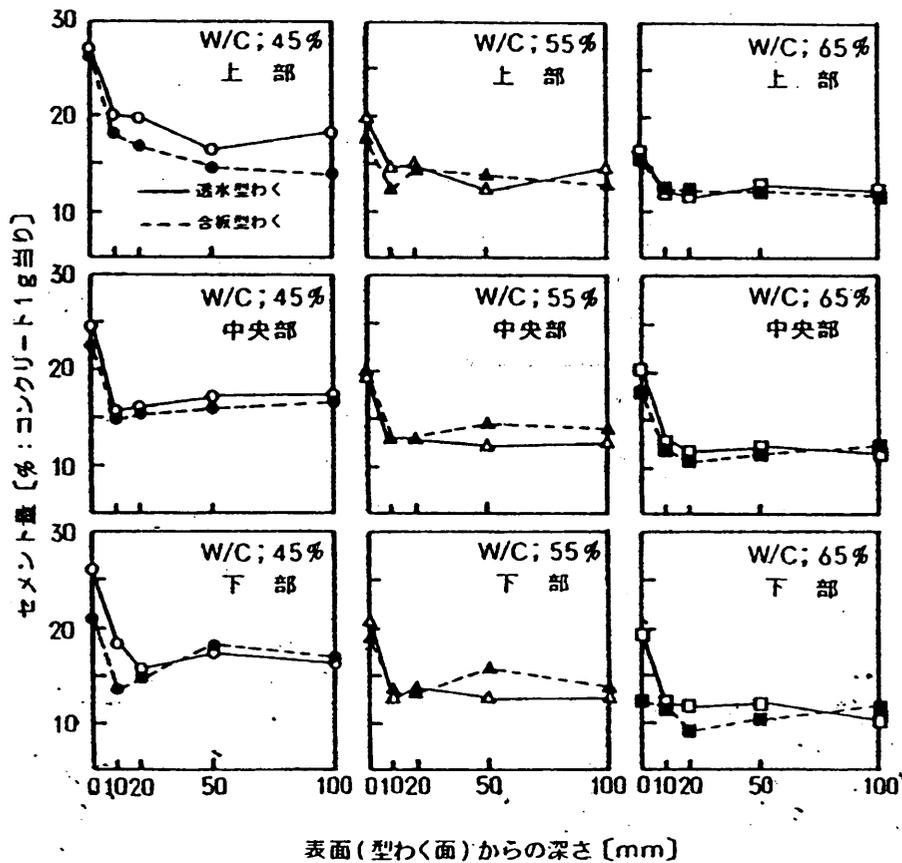


図-2.90 コンクリートの深さの違いによるセメント量[65]

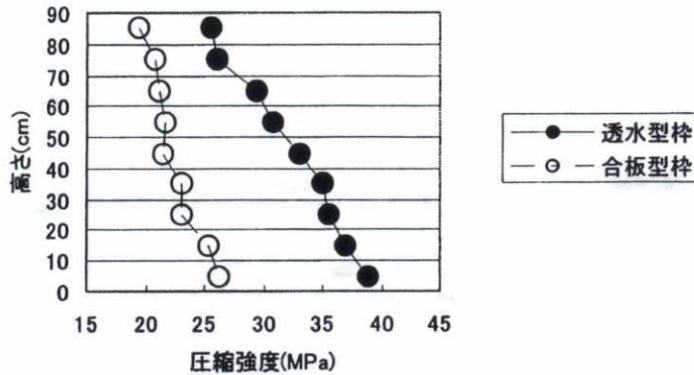


図-2.91 透水性型枠を使用したコンクリートの内部圧縮強度分布[80]

表-2.8 試験体の概要[64]

形状寸法	鉛直面型わく				傾斜面型わく		
	Q=90°				Q=60°, 45°, 30°		
供試体No	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
傾斜角	90°				60°	45°	30°
使用セメント	普通ポルトランドセメント		中熱ポルトランドセメント		普通ポルトランドセメント		
水セメント比	6.0	4.5	6.0	4.5	6.0		
配合	I	II	III	IV	I		

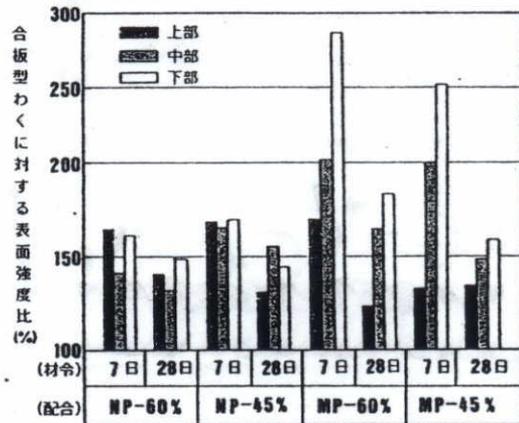


図-2.92 表面強度の増加率
(合板型枠=100) [64]

(4) 反発度およびアバタと空隙

反発度法で行われたコンクリートの表面反発度の測定結果によれば、透水性型枠を使用することによりいずれも強度が改善されている。その改善効果はいずれの文献においても、特に若材齢[60,61,63,68,70,76,78,80,81]および下層部[62,64-68,70,78-83]のコンクリートにおいて顕著であると報告されている。図-2.93 に材齢および試験体高さの異なるコンクリートの反発度を示す。また、芳賀ら[66]は、スランプの異なる試験体では、反発度に差異はないと報告している。

その他の手法による表面強度の測定例として、芳賀ら[64 および 66]は、超音波伝播速度による測定を行っている。図-2.94 に測定結果を示す。同図によれば、コンクリート表

面部から深さ 5cm にかけて、透水性型枠による緻密化、高強度化の影響があったと報告している。庄谷ら[71]は、Pull-off 法による接着引張強度の測定を行った。その結果、透水性型枠を使用することにより、ごく表層で強度の向上が顕著であると報告している。また、池田ら[63]は仕上剤付着強度を、大友ら[84]はコンクリート型枠面の表層引き剥がし強度を測定し、いずれも透水性型枠を利用することにより強度が改善されたと報告している。

透水性型枠の効果としては、強度および耐久性の改善以外に表面の気泡除去がある。コンクリート表面の仕上がり状態、すなわちアバタの減少は視覚的にも判断が容易であることから、以下に示すアバタ率の式を用いて多くの研究[61,63,64,66,69,70,76,77,81,83-85]で評価する試みが行われている。これら全ての研究において、図-2.95 に示すように、透水性型枠を使用することによってアバタ率およびアバタの数は大幅に減少することが報告されている。

熊谷ら[67]は、鋼管を埋設したコンクリートを打設し、鋼管直下の空隙量を測定した。その結果、透水性型枠を使用したコンクリートでは鋼管直下の空隙率が少なくなると報告している。

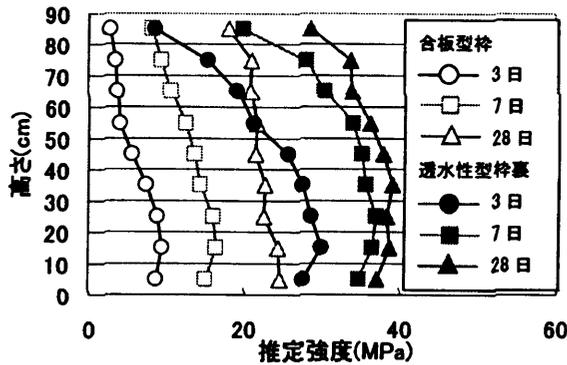


図-2.93 コンクリート高さ位置における表面反発度[74]

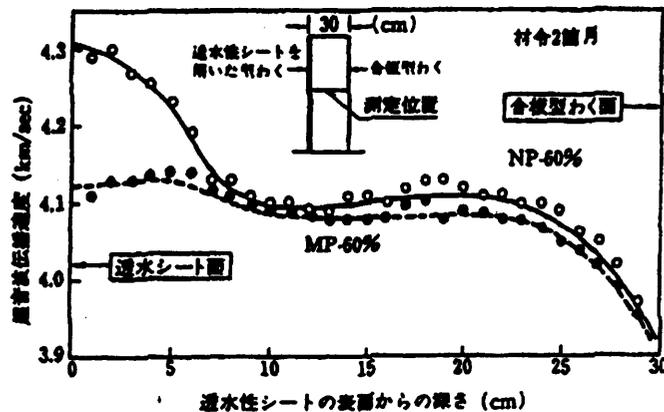


図-2.94 超音波伝播速度の測定結果[66]

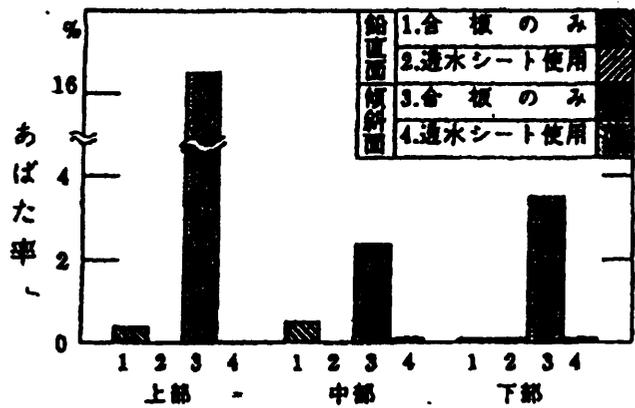


図-2.95 コンクリート高さ位置におけるアバタ率[83]

(5) 細孔量

透水性型枠を使用することにより型枠表面が緻密化することは、細孔径分布の測定結果が端的に示している。多くの文献[61,64,65,68,69,73,79,85,86]において、透水性型枠を使用したコンクリートの細孔径はコンクリート表面に近いほど減少するとしている。そして、その影響範囲は使用された透水性型枠やコンクリートの調合によって差異はあるものの、おおよそ10mmの深さまで及ぶと考えられている。図-2.96に透水性型枠と合板型枠の細孔径分布を比較したものを示す。

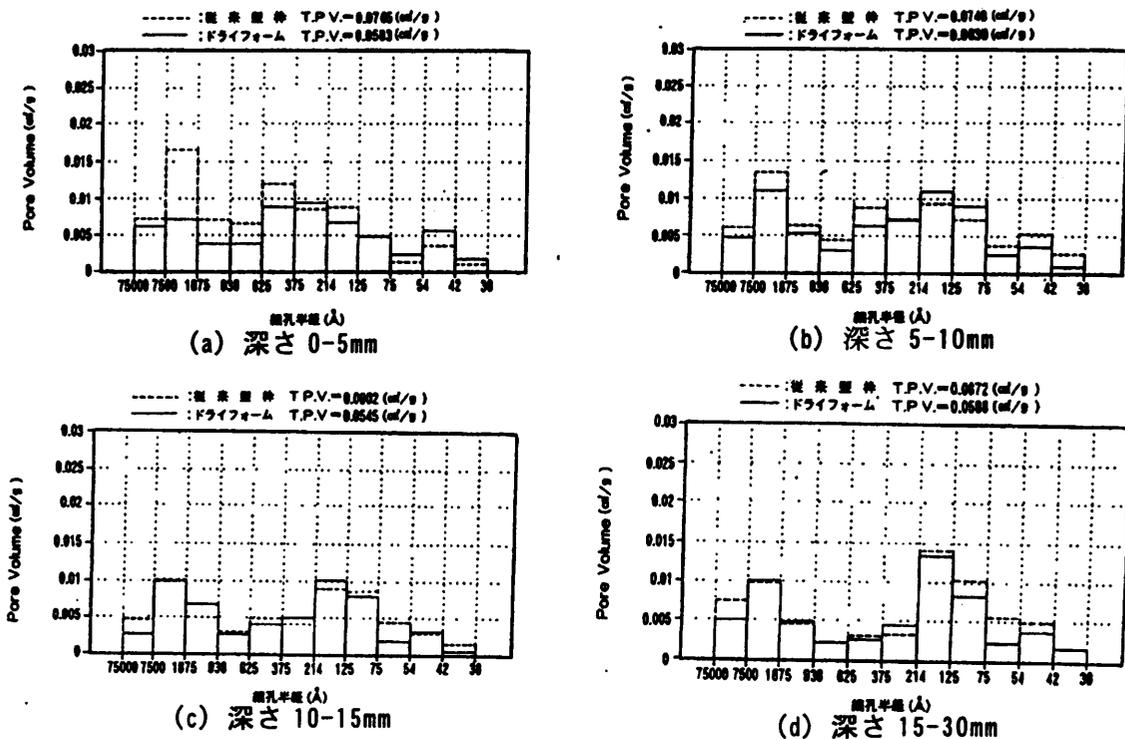


図-2.96 細孔径分布比較[73]

高見ら[79]は、施工方法を検討することにより、密実で耐久性のあるコンクリートを実現するために、透水性型枠・型枠振動締固め、および棒状フィルターによる真空吸引脱水工法を適用した場合の耐久性に与える影響を明らかにしている。実験要因は、スランプ (8 および 18cm)、使用型枠 (透水性型枠および合板型枠)、内部振動の有無、型枠振動・型枠再振動の有無、棒状フィルターによる真空吸引の有無である。図-2.97 に、コンクリートの調合表を示す。表-2.9 に、各試験体の打設時の型枠面からの4段階の深さによる試料の総細孔量を示す。同図によれば、透水性型枠に型枠振動および型枠再振動を併用すると、コンクリート中の総細孔量の減少する範囲は、スランプ 8cm のコンクリート (No.5) では、表面から 50~60mm まで達するのに対して、スランプ 18cm の単位水量の多いコンクリート (No.10) では、表面から 10mm 程度であると報告している。

表-2.9 コンクリートの調合表[79]

Maximum size of coarse aggregate (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	Water cement ratio W/C (%)	Sand percentage S/a (%)	Unit weight (Kg/m ³)				
					Water	Cement	Sand	Gravel	Chemical admixture
20	8 (7)	4.0(3.8)	55	44.2	167	304	796	1056	0.760
20	18(17)	4.0(4.1)	55	45.4	191	347	775	978	0.868

Unit weight of chloride in fresh concrete was 0.056 Kg/m³

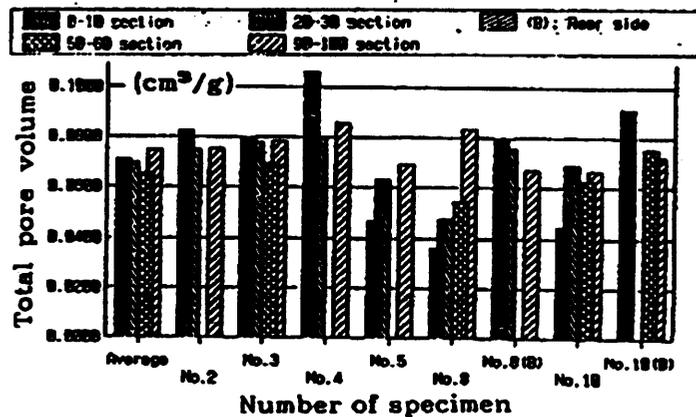


図-2.97 試験体の打設時の型枠面からの4段階の深さによる試料の総細孔量[79]

(6) その他の品質改善効果

透水性型枠によって、緻密化された表層コンクリートの性質を探るために、いくつかの文献では透水試験[63,64,70,82]および吸水試験[63,69,76,77,87]を行っている。表-2.10 に

透水試験の結果、図-2.98 に吸水率の結果を示す。これらの結果からも、透水性型枠を使用したコンクリートの表面は水密性に優れていると報告されている。

いくつかの文献[61,63,68,72,73,75,84,85]では、凍結融解試験が行われている。図-2.99 に凍結融解試験の結果の例を示す。これより、透水性型枠を使用したコンクリート表面は密実で剥離が生じにくい組織が出来上がっており、凍害のある環境条件下でも高い耐久性を示すと報告している。

いくつかの文献[61,63-66,69-71,75,76,78,83,85,86,88]では、促進中性化試験が行われている。また、同様に塩分浸透試験が行われた文献[63,64,66,68,73,75,83-85,88,89]もいくつか存在した。図-2.100 に両試験の結果の例を併せて示す。このように、透水性型枠を使用したコンクリートはCO₂やCl⁻の浸透を抑制し、普通型枠より長期にわたって構造物の耐久性を維持できる。また、同図によれば、透水性型枠の有無によらず、下層部ほど中性化および塩分浸透に対する抵抗性が高いと報告されている。

池田ら[63]は、マッシュパな壁体コンクリートを想定した実大模擬部材を用いて各種試験を行い、その一つとして乾燥収縮量を測定した。測定結果を図-2.101 に示す。同図によれば、透水性型枠を使用することにより、若干の改善効果があることを示している。

小柳ら[62]は、ASTMC779 ドーリー試験機によるすり磨き磨耗試験を行った。試験結果を図-2.102 に示す。同図によれば、透水性型枠を使用したコンクリートの磨耗抵抗性は向上するが、その効果は中下層部のみで、上層部では効果があまりなかったと報告している。

片山ら[88]は、透水性型枠を使用したコンクリートに微細ひび割れが発生する場合について、養生方法別にその原因を検討している。それによれば、透水性型枠を使用したコンクリートは余剰水の排出とセメント粒子の移動に伴い、表面では仕上材料のモルタルのようになると考えられる。また、ひび割れの原因は乾燥収縮によるものであるとすると、モルタル状態の表層コンクリートは単位水量が普通コンクリートに比べて大きいため、微細ひび割れが生じると考えられると報告している。養生方法別の微細ひび割れの発生状況に関しては、無養生と送風養生において、微細ひび割れが比較的多く発生したと報告している。

表-2.10 透水試験結果[66]

NO	セメントの種類	W/cm (%)	単位水量 (kg/m ³)	吸水係数 (×10 ⁴ cm ² /sec)	
				透水シート面から	全面から
①	NP	60	147	173	466
②			130	74	432
③			148	125	520
④			45	140	8.3
⑤	MP	60	200	241	1000以上
⑥			45	150	147

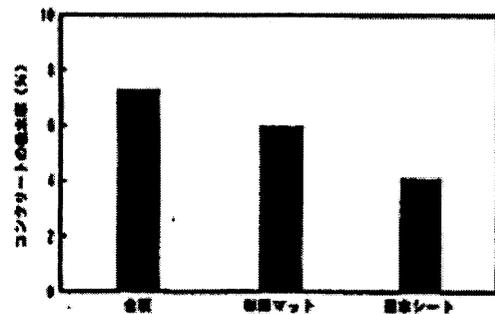


図-2.98 コンクリートの吸水率[69]

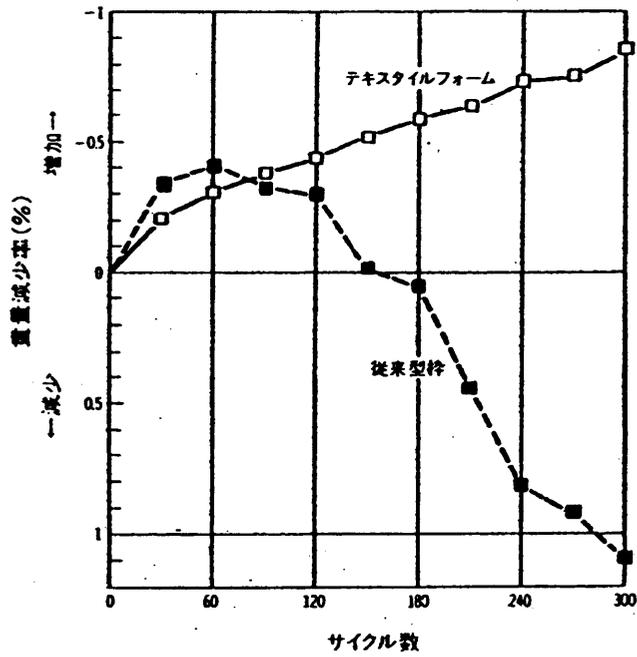


図-2.99 凍結融解試験による重量変化 [75]

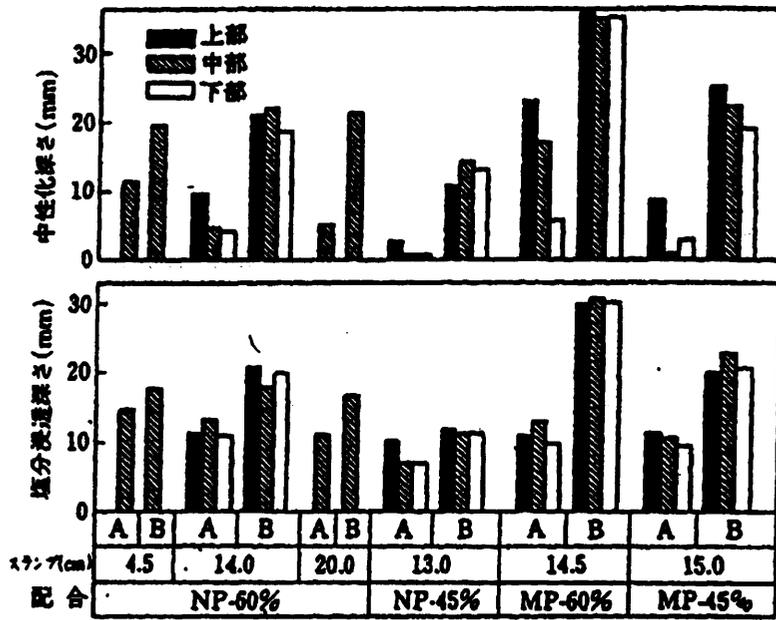


図-2.100 中性化促進試験・海水浸漬試験結果 [66]

乾燥収縮 (試験期間 180日)					
試験体	型 枠	平均値 ($\times 10^{-4}$)		繊維/合板	改善率%
A (一般壁)	合 板	9.3		0.9	10
	テキスタイル フォーム	8.6			
B (斜め壁)	合 板	13.3		0.9	10
	テキスタイル フォーム	11.9			

図-2.101 乾燥収縮試験結果[53]

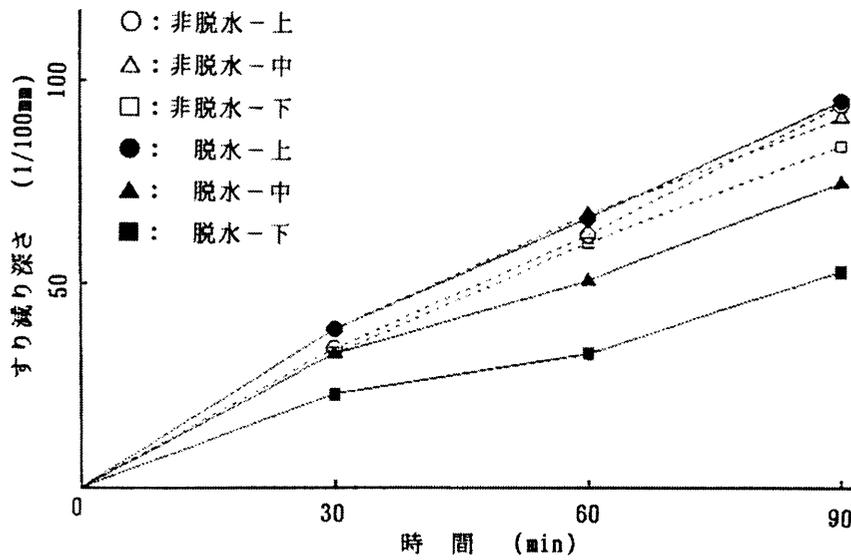


図-2.102 すり磨き摩耗試験結果[62]

2.4.3 品質改善メカニズム

伊藤ら[82]は、透水性型枠工法について、コンクリートの打設後にコンクリート内部の水がどのように移動し排水されるかを解析的に検討している。透水性型枠工法の脱水機構は、排水がブリーディング方向と透水シート方向の2方向に現れるため、2次元圧密理論を適用している。解析理論は線形圧密理論を用い、①間隙流体の質量保存、②流体の運動に対するダルシー則、③間隙を有する物体の釣合い、④間隙を有する物体の変形に対するフックの法則、⑤Terzaghiの有効応力原理の5つの基本仮定に立脚している。式(2.7)および式(2.8)に線形圧密理論の支配方程式を示す。

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_{i,j}) - nm_f \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{k}{\gamma_w} (\sigma_{,i})_{,i} = 0 \quad (2.7)$$

$$[G(u_{i,j} + u_{i,i})]_{,i} + [(K - \frac{2}{3}G)u_{k,k}]_{,i} + f_i = 0 \quad (2.8)$$

ここに、 σ ：間隙水圧， u_i ：粒子の変位ベクトル， n ：間隙率，
 m_f ：間隙水の体積圧縮係数， k ：透水係数， γ_w ：水の単位体積重量，
 G ：せん断弾性係数， K ：体積弾性係数， f_i ：物体力，
 $,i$ ： i に対する偏微分

なお、解析に必要なコンクリートの要素特性は、透水特性と変形特性であり、透水特性は、変水位透水試験および加圧ブリーディング試験を行い、変形特性については、直接一軸圧縮試験を行なって決定している。

解析の妥当性を検証するため、30（縦）×60（横）×60（高さ）cmの試験体を用いた透水性型枠工法の排水量を測定している。図-2.103および図-2.104は、それぞれブリーディングおよびシート排水による排水量と時間の関係の解析値と実験値の比較を示しており、どちらも両者は比較的良好に一致している。また、脱水機構の検討として、解析によって等間隙水圧曲線を求め、それに直角な方向に水の流れが生じる（ダルシーの法則）として、図-2.105に透水性型枠工法の水の流れの方向を示している。さらに、間隙比と圧縮強度の関係を求めて深さ方向の圧縮強度分布を推定しているが、実験値と解析値はあまり良く一致していない。これは、解析では固体部分の容積は一定とし、水の移動のみによって容積変化を求めているが、実際には、セメント粒子、砂粒子の移動が影響していることが考えられると報告している。

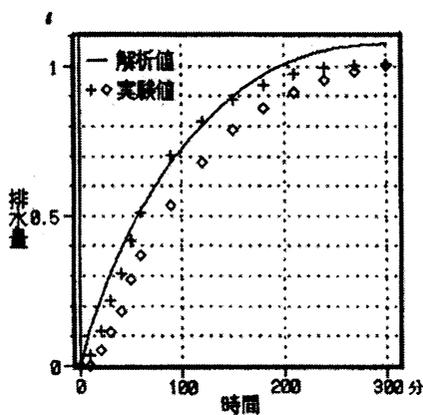


図-2.103 排水量—時間
 (ブリーディング) [82]

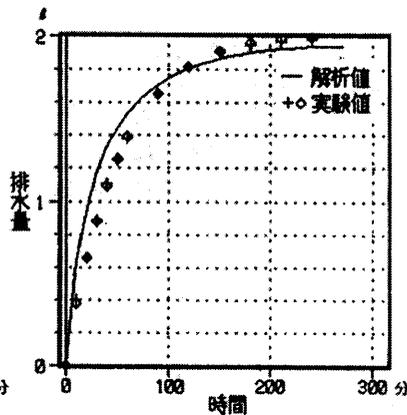


図-2.104 排水量—時間
 (シート排水) [82]

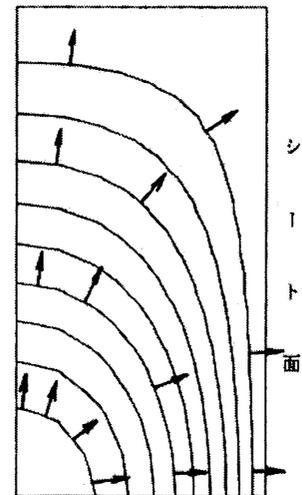


図-2.105 流れの方向 [82]

2.5 ブリーディングに関する研究

2.5.1 ブリーディング

ブリーディングとは、図-2.106に示すように、練混ぜ水の一部が骨材やセメント粒子の沈降に伴ってコンクリート上面に集まってくる現象をいう[90]。

ブリーディングに影響する因子は、1) 材料、2) 調(配)合、3) 施工に大別できる[91]。

1) 材料

セメント：粉末度の細かいセメントほど、凝結時間が早くなるほど、ブリーディングは少なくなる。

骨材：一般に骨材が細かいほど、ブリーディングは少なくなる。

混和材料：AE剤、減水剤はブリーディングを少なくする。

2) 調(配)合

単位水量が多いほど、単位細骨材量が少ないほど、ブリーディングは多くなる。また、水セメント比が大きくスランプが大きいほど、粗骨材量が多く細骨材中の微粒分量が少ないほど、ブリーディングは多くなる[90]。

3) 施工

打ち込み速度が速い、棒突きや振動が過度、型枠の寸法が大きい、水漏れの少ない型枠の使用などの場合は、ブリーディングが多くなる。

ブリーディングの多いコンクリートは沈降も大きく、上昇した水は上部の水セメント比を大きくし、かつ粗骨材の下部に空隙を発生させ、壁・柱コンクリートの上部強度を低下させる[90]。また、骨材とセメントペーストあるいは粗骨材とモルタル、鉄筋とコンクリートの付着を悪くし、構造物の耐力低下の原因にもなる[90]。しかし少量のブリーディングはコンクリートの表面仕上げ作業を容易にする[90]。

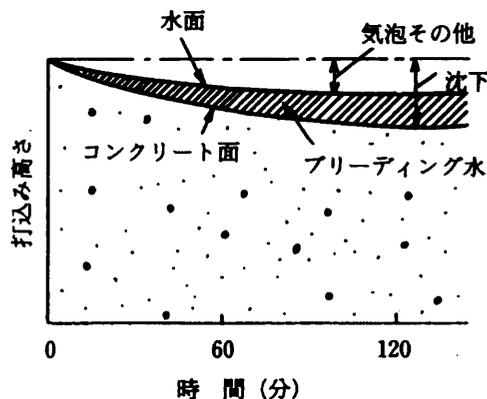


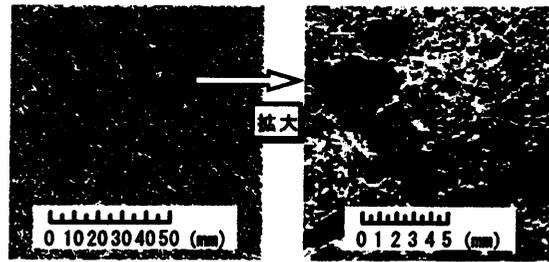
図-2.106 コンクリートの沈下とブリーディング[92]

ブリーディング試験 (JIS A 1123) は、以下のようにして行う。

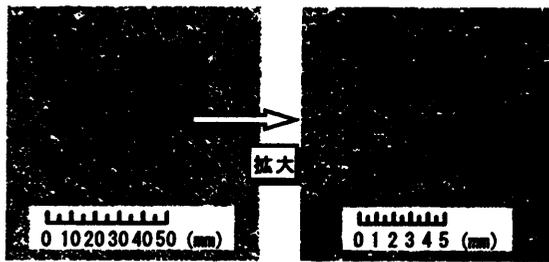
室温 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ の条件下で、内面を機械仕上げした水密な金属性の円筒状の容器 (内径 250mm, 内高 285mm) に、コンクリートを JIS A 1116 の 5.1 によって打ち込み、コンクリートの表面が容器のふちから $30\pm 3\text{mm}$ 低くなるようにこてでならす。試料の表面をこてでならした直後に、時刻を記録し、試料と容器を振動しないような水平な台又は床の上に置き、適当なふたをする。次に、記録した最初の時刻から 60 分の間、10 分ごとに、コンクリート上面に浸み出した水を吸い取る。その後は、ブリーディングが認められなくなるまで、30 分ごとに水を吸い取る。水を吸い取るのを容易にするため、その 2 分前に厚さ約 5cm のブロックを容器の底部片側に注意深く挟んで容器を傾け、水を吸い取った後静かに水平の位置に戻す。吸い取った水はメスシリンダーに移し、そのときまでにたまった水の累計を 1ml まで記録する。ブリーディングが認められなくなったら、直ちに容器と試料の質量をはかる。

2.5.2 ブリーディング特性

犬飼ら [93] は、自由水の挙動を定量的に把握するために、自由水とみなした着色液をモルタル中に注入し、その挙動 (水みち) を観察することにより検討を行っている。写真-2.2 によれば、内部を上昇する着色液の多くは粗骨材粒子の表面を沿うように着色されており、自由水の多くは、セメントペーストと粗骨材の界面を水みちとして上昇するものと考えられると報告している。また、図-2.107 に示すように、自由水の上昇距離をモデル化し、二次元可視化実験により、そのモデルの適用性を検証している。その結果、1) 試料が均一な場合は、セメント粒子や骨材の沈降による置換によって、自由水はゆっくり上昇する。2) 自由水の近傍にすでに水みちが形成されている場合は、水みちがセメント粒子や骨材によって充填され、同時に自由水が水みちに沿って上昇する。自由水の上昇速度は比較的大きくその距離も長い。3) 自由水の近傍に型枠面がある場合は、型枠面が水みちとなり (壁効果)、自由水は型枠面に沿って上昇する。と報告している。



(a) No. 3 (切断位置: 底面から34mm)



(b) No. 4 (切断位置: 底面から66mm)

写真-2.2 試験体水平切断面の着色状態 (実験1) [93]

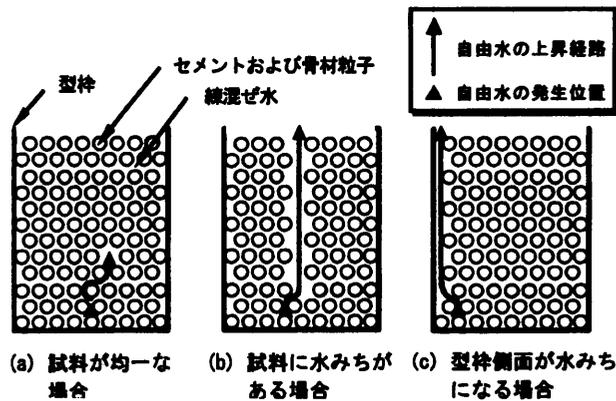


図-2.107 自由水上昇過程のモデル [93]

加藤ら[94]は、ブリーディング現象を生じるセメントペーストを用いて、配合の違いがブリーディング速度および練混ぜ後の粉体の粒度に及ぼす影響に関して検討を行っている。ブリーディング速度は密度が大きく粒子径の大きい粉体ほど速い速度を持つと考えられるが、図-2.108 および 109 によれば、速度の逆転現象が生じていることが認められた。これは、2種類の粉体を混合した場合、粉体の置換率が50%の点で凝集体の大きさがピークとなり粉体以下と以上で凝集構造の依存形態が変化するためであり、これは、粒度分布の測定結果においても、置換率50%の点で凝集体の大きさがピークになることが明らかになったと報告している。

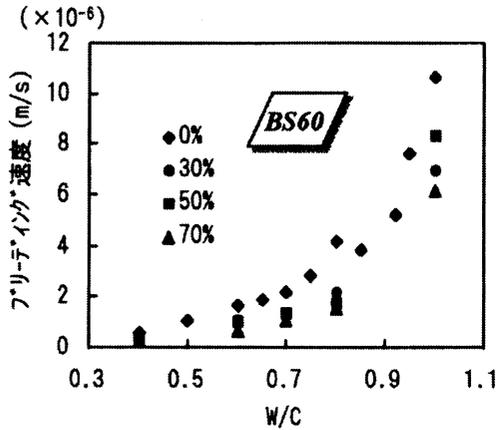


図-2.108 W/C とブリーディング速度の関係 [94]

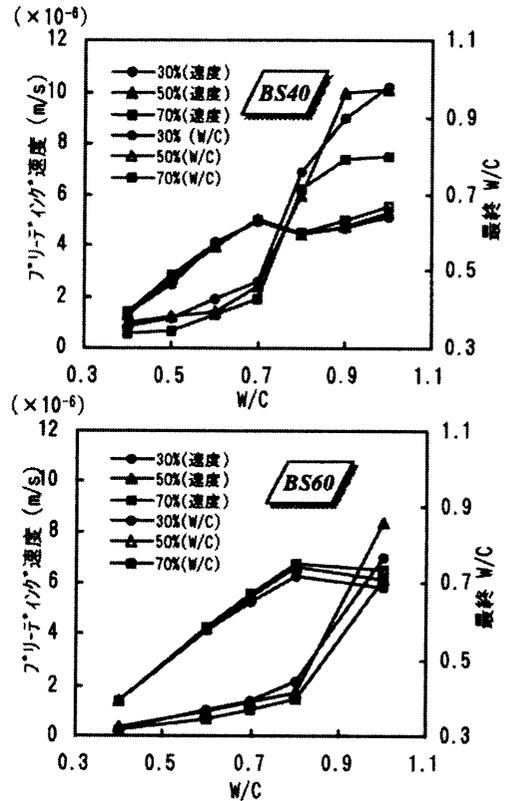


図-2.109 初期 W/C と速度および最終 W/C の関係 [94]

上嶋ら [95] は、鉄筋周辺部の透水性状を詳細に解明するために、水平方向に配された鉄筋の下面に、ブリーディングが上昇することによって形成される連続した空隙が、鉄筋周辺部の透水性に与える影響を評価するとともに、鉄筋の径による鉄筋表面積の大小が、透水性に与える影響を評価している。図-2.110 および 111 によれば、鉄筋に対して水平方向に打設された供試体は、鉛直方向に打設された供試体に比べ、得られた透水係数は非常に大きな数値を示した。これは、打設直後にブリーディング水が上昇することにより、水平方向に打設された供試体の鉄筋下面に、連続した空隙が形成されることによる影響であると報告している。また、図-2.112 および 113 によれば、D25 鉄筋の配された供試体は、D13 鉄筋の配された供試体に比べ、得られた透水係数は大きな値を示した。これは、鉄筋下面へのブリーディング水の上昇により形成される空隙径や空隙分布が鉄筋径に依存していることを示していると報告している。

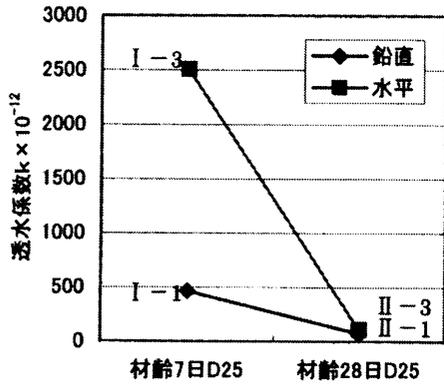


図-2.110 打設方向に関する影響評価 (a) [95]

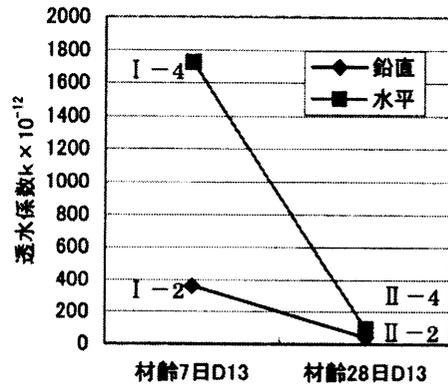


図-2.111 打設方向に関する影響評価 (b) [95]

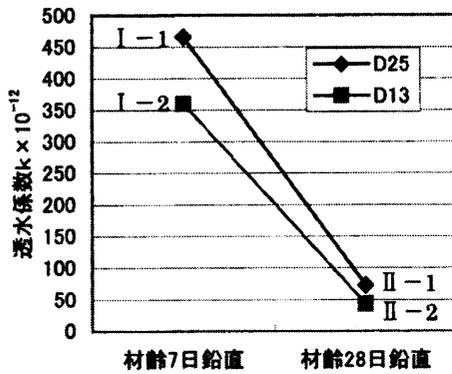


図-2.112 鉄筋径に関する影響評価 (a) [95]

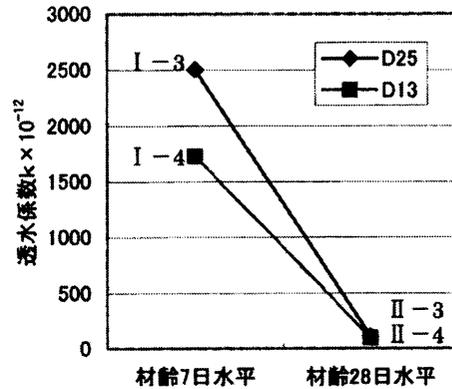


図-2.113 鉄筋径に関する影響評価 (b) [95]

加賀[96]は、適切な内部ブリーディング試験方法を確立し、遊離水の移動機構を把握するために、諸条件を変えて実験的な検討を行っている。図-2.114によれば、外部ブリーディング量は試験容器の径に比例していることが認められた。これは、遊離水は容器の周囲から上昇する割合が多いからであると報告している。また、図-2.115によれば、試験容器の高さを変えても外部ブリーディング量は変わらないことが認められた。これは、表面まで浮上する水は表面から20cm程までであり、試料の高さに比例しないことを示していると報告している。また、図-2.116によれば、内部ブリーディング試験で滴下する水は水圧や水道の影響を受け、吸水の部位によって滴下量が異なると報告している。また、図-2.117によれば、内部ブリーディングの滴下量と単位水量は、ほぼ直線的な関係にあると報告している。

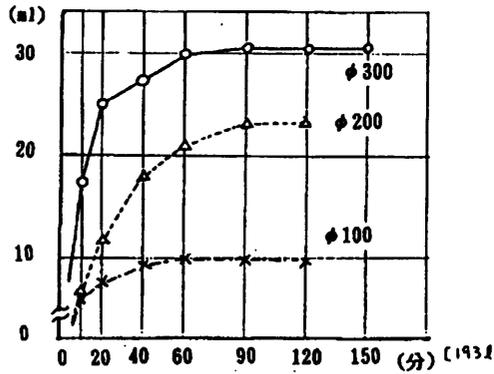


図-2.114 径を変えた外部ブリーディング試験[96]

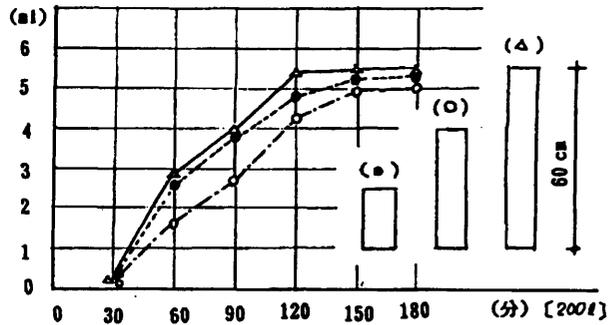


図-2.115 高さを変えた外部ブリーディング試験[96]

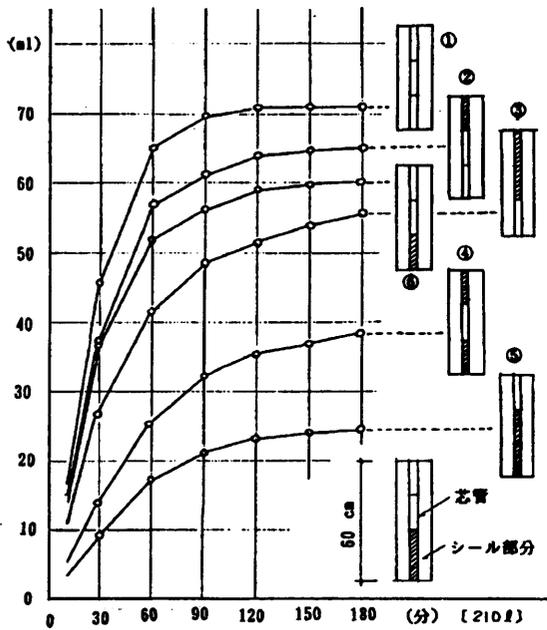


図-2.116 高さを変えた内部ブリーディング試験[96]

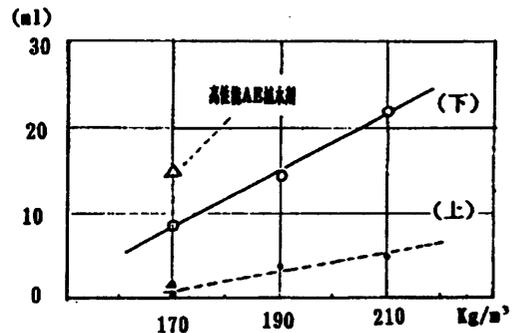


図-2.117 高さを変えた内部ブリーディング試験[96]

2.5.3 メカニズム

吉田[97]は、フレッシュコンクリートのブリーディング現象を数理的に表すことを目的として、土質工学の分野で扱われている圧密理論を用いて実験的および理論的な考察を行っている。ここでは、コンクリートの打設終了時からの沈下率（打設終了時のコンクリート高さに対する沈下量）と時間の関係を Terzaghi の圧密理論を応用して導き、理論式として式 (2.9) が、半理論式として式 (2.10) が、また、実験式として式 (2.11) が実験値に近い値となると報告している。図-2.118 に実験値と推定式との比較を示す。

$$\Delta H = \frac{\alpha_0}{1 + \varepsilon_0} \cdot \frac{\gamma h_1}{2} \cdot m \int_0^T T^{n-1} e^{-mT} dT \quad (2.9)$$

$$\Delta H = \frac{\alpha_0}{1 + \varepsilon_0} \cdot \frac{\gamma h_1}{2} \cdot (1 - e^{-mT}) \quad (2.10)$$

$$\Delta H = \frac{2.2}{100} (1 - e^{-0.2457^{0.6}}) \quad (2.11)$$

ここに、 ΔH ：沈下率， α ：圧密係数， α_0 ： $t=0 \sim \tau$ (τ ： α の値が不変と認め得る限界時間)のときの圧密係数， ε_0 ：コンクリートの空隙比（一定容積内の空隙の容積とセメントおよび骨材の実質容積との比）， γ ：コンクリートの単位重量， h_1 ：打ち込み終止時のコンクリートの換算高さ， T ：打ち込み終止時からの時間， m ：係数 (=0.015)， n ：係数 (=0.4)

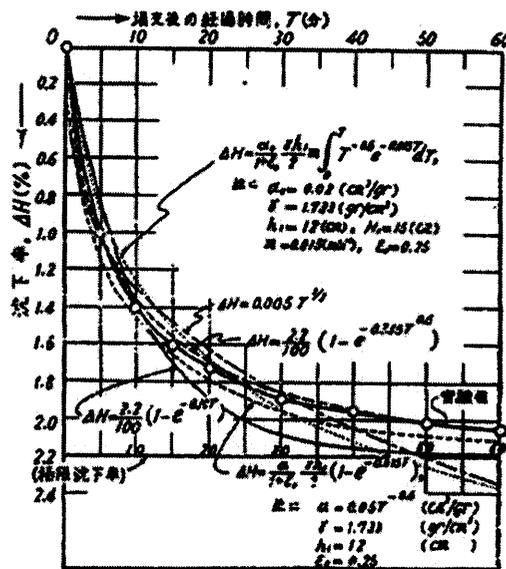


図-2.118 コンクリートの沈下の推移[97]

平田ら[98]は、石灰石粉の添加によりブリーディング現象を制御したコンクリートを用いてブリーディング水の移動機構を調査している。ブリーディング現象は、図-2.119 および図-2.120 に示すように、マクロ的には自重による次元圧密といえ、また、固体粒子の沈降速度より水の上昇速度が数倍大きいため、ミクロ的には浸透流としての性格が強いとされている。実験は、600 (縦) × 600 (横) × 1800 (高さ) mm の試験体を用いて、下層から 100mm, 700mm, 1200mm および 1600mm の位置に間隙水圧計を設置し、水圧分布およ

び水セメント比の分布を測定している。コンクリートの調合は、単位水量以外の各材料の容積構成比率を一定とし、水セメント比を 58.3%~73.7%としている。図-2.121 によれば、高さ方向の間隙水圧分布は、打設直後に最下層（高さ 100mm の位置）で最大となり時間の経過とともに下層から徐々に水圧が減少し、270 分後にはどの高さにおいてもほぼ 0kgf/cm²となっている。また、図-2.122 にブリーディングのシミュレーション方法を示し、表-2.11 に水セメント比の実験による推定水セメント比を示し、表-2.12 にシミュレーションによる結果を示す。シミュレーション結果は実験による推定値とほぼ同等となり、ブリーディング現象は、透水現象と加圧脱水処理による圧密現象の複合現象として考えられると報告している。

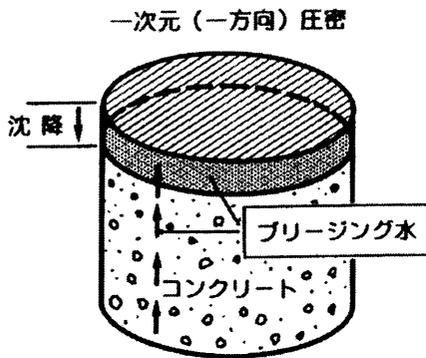


図-2.119 ブリーディングのマクロモデル[98]

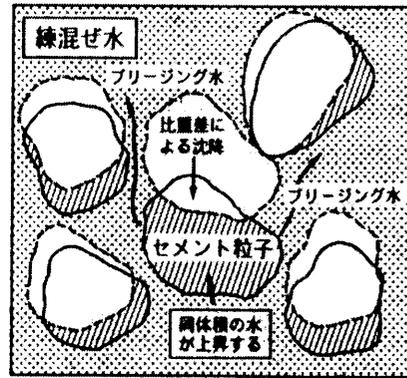


図-2.120 ブリーディングのミクロモデル[98]

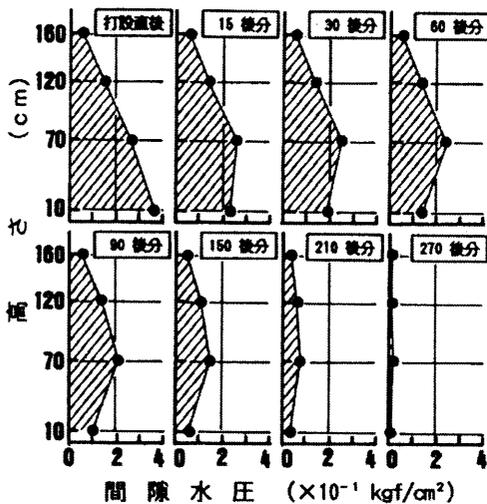


図-2.121 高さ方向の間隙水圧の分布[98]

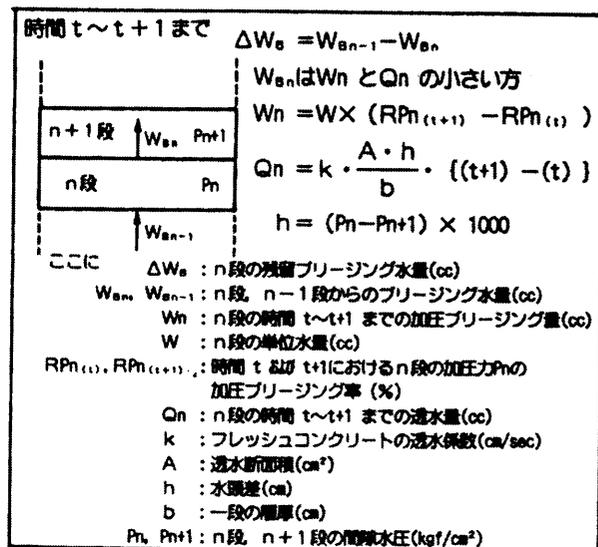


図-2.122 シミュレーションの概念図[98]

表-2.11 高さ方向の推定水

セメント比[98]			
試験方法	水中重量法	乾燥重量法	コア強度による推定
高さ(mm)	推定水セメント比(%)		
1725	62.3	65.4	72.4
1575	63.3	64.6	72.6
1425	63.3	59.4	67.3
975	61.4	59.0	64.9
525	60.8	59.0	62.5
75	57.7	54.5	58.7
標準試料	63.1	59.7	63.5

表-2.12 ブリーディングのシミュレーション結果[98]

段 No.	高さ (mm)	経過時間 (分)									
		直後	15	30	45	60	75	90	105	300	
計算による水セメント比 (%)											
12	1725	63.5	64.0	64.1	64.2	64.2	64.2	64.3	64.4	64.4	64.4
11	1575	63.5	63.8	63.9	64.0	64.0	64.1	64.1	64.1	64.1	64.1
10	1425	63.5	63.8	64.0	64.0	64.0	64.1	64.1	64.1	64.1	64.1
9	1275	63.5	63.9	63.4	64.0	64.1	64.1	64.1	64.1	64.1	64.1
8	1125	63.5	63.8	64.0	64.0	64.1	64.1	64.1	64.0	64.0	64.0
7	975	63.5	63.5	64.0	64.0	64.1	64.1	64.1	64.1	64.1	64.1
6	825	63.5	63.3	58.0	62.0	63.1	63.9	58.5	58.5	58.5	58.5
5	675	63.5	62.6	62.6	59.2	57.4	56.3	56.3	56.3	56.3	56.3
4	525	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
3	375	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
2	225	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
1	75	63.5	58.8	58.8	58.8	58.8	58.8	58.8	58.8	58.8	58.8

2.6 まとめ

本章では、透水・脱水工法（真空脱水工法、加圧脱水工法、透水性型枠工法）およびブリーディング現象の品質改善効果およびそのメカニズムに注目して既往の研究を整理した。

透水・脱水工法およびブリーディング現象の品質改善効果については、密度分布および圧縮強度分布の発生メカニズムを明らかにするために必要と思われる脱水率、水セメント比分布および圧縮強度分布についてまとめた。数多くの研究によって無処理からの変化量が得られているが、コンクリートの調合、処理方法の違いなど多くの要因が異なることから、得られた変化量に違いが見られている。

透水・脱水工法およびブリーディング現象の品質改善メカニズムは、ブリーディング現象に関しては、圧密理論を適用した解析により、実験値と解析値が比較的一致することが明らかになったが、透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善メカニズムに関する研究は数が少なく、研究途上のものが多いことが明らかになった。以下に、その代表例を示す。

真空脱水処理工法に関しては、畑中ら[2]は、土質工学で用いられる圧密理論をフレッシュコンクリートに適用して、真空脱水処理による品質改善効果を定量的に推定する手法を提案し、一連の基礎実験によって例証している。しかし、同推定手法においては、フレッシュコンクリートの圧密特性および間隙水圧の分布特性を既知のものとして与える必要があるが、現時点では、これらのいずれについても不明な部分が多く、定量化されるには至っていない。

加圧脱水工法に関しては、神代ら[58]は、鋼管コンクリート構造用の充填コンクリートを対象とした加圧ブリーディング試験を行い、コンクリートの加圧脱水特性に対して、概ね圧密理論が適用できると考えられると報告している。しかし、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性を取り扱った研究は数が少ない上に、試験体の寸法や試験装置などの測定条件もまちまちで、各測定結果を直接比較することは困難である。

透水性型枠工法に関しては、伊藤ら[82]は、透水型枠工法の脱水機構に2次元圧密理論を適用して、コンクリート打設後のコンクリート内部の水の移動、および圧縮強度分布を解析的に検討している。しかし、圧縮強度については、間隙比と圧縮強度の関係を求めて深さ方向の分布を推定しているが、実験値と解析値はあまり良く一致していない。

以上のように、透水・脱水工法およびブリーディング現象の品質改善メカニズムには、土質工学の分野で用いられている圧密理論をフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに適用すればよいと考えられる。しかし、各試料の圧密特性を取り扱った研究は数が少ない上に、試験体の寸法や試験装置などの測定条件もまちまちで、各測定結果を直接

比較することは困難である。

そこで本研究では、透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善メカニズムを系統的に捉えるための統一化理論の構築を目指すため、まず、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに対する圧密特性を明らかにし、次いで、圧密理論に立脚したブリーディング現象および透水性型枠工法による品質改善効果の推定手法の提案を試みることにする。

第3章 フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性

3.1 概説

3.2 圧密理論

3.3 圧密挙動に関する実験（実験Ⅰ）

3.4 過剰間隙水圧分布に関する実験（実験Ⅱ）

3.5 まとめ

第3章 フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性

3.1 概説

第2章「既往の研究」によれば、透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善メカニズムに関する研究は数が少なく、研究途上のものが多いが、土質工学の分野で用いられている圧密理論をフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに適用することによって、透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善メカニズムを解明できると考えられるが、各試料の圧密特性を取り扱った研究は数が少ない上に、試験体の寸法や試験装置などの測定条件もまちまちで、各測定結果を直接比較することは困難であることが明らかとなった。

そこで本章では、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに対する圧密理論の適用性を確認し、圧密モデルを決定する実験パラメータの定量化を試みる。実験Ⅰでは、試料全体としての圧密挙動を明らかにするため、圧密処理時の各試料の圧密量に注目した検討を行う。実験Ⅱでは、試料内部での圧密の進行状況を明らかにするため、圧密処理時の各試料中の間隙水圧分布に注目した検討を行う。

3.2 圧密理論

3.2.1 圧密現象

図-3.1 に、本研究で適用する圧密現象の概念図を示す。対象とする試料は、固相および液相の2相に分け、それぞれを非圧縮性と仮定している。圧密現象とは、土が内部間隙水の排水を伴いながら徐々に圧縮していく現象をいい、その過程において土の密度は増加していくとされている。

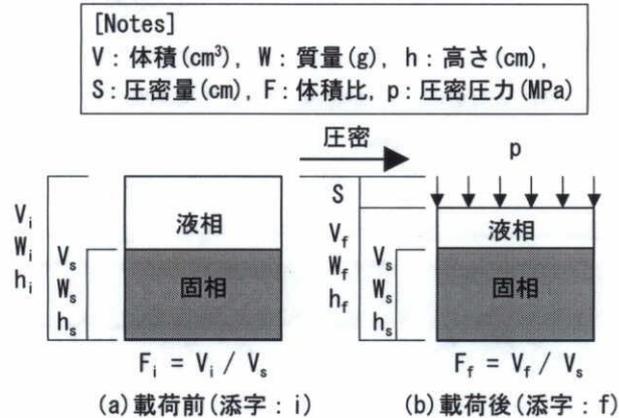


図-3.1 圧密現象の概念図[42]

3.2.2 Terzaghi の一次元圧密方程式[99]

Terzaghi は、過剰間隙水圧の消散過程を式 (3.1) で定式化している。本研究では、圧密現象を表す最も基本的な同式を用いることにした。ここで、過剰間隙水圧とは、载荷によって発生する間隙水圧の増加分である。なお、式 (3.1) は均質な試料に対応しており、自重および過大な層厚の変化の影響は考慮されていない。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.1)$$

ここに、 u : 過剰間隙水圧 (MPa), t : 時間 (s), c_v : 圧密係数 (cm²/s),
 z : 層の深さ (cm)

式 (3.1) は、片面透水の境界条件 [式 (3.2) および式 (3.3)] および初期条件 [式 (3.4)]のもとで、変数分離法で解くと式 (3.5) となる。 U_w, Z, T_v は、変数 u, z, t を無次元化したものであり、式 (3.6) ~ 式 (3.8) で定義される。

$$z = 0, t = t \text{ で, } u = 0 \quad (3.2)$$

$$z = H, t = t \text{ で, } \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

$$t = 0, z = z \text{ で, } u = u_0 = p_z \quad (3.4)$$

ここに, H : 片面透水の層厚 (cm), u_0 : 初期過剰間隙水 (MPa), p_z : 圧密圧力 (MPa)

$$U_u(Z, T_v) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n 2}{\alpha_n} \cos(\alpha_n Z) \exp(-\alpha_n^2 T_v) \quad (3.5)$$

ここに, $\alpha_n = \pi(2n+1)/2$ で, n は正の整数である。

$$U_u = \frac{u}{p_z} \quad (3.6)$$

$$Z = \frac{z}{H} \quad (3.7)$$

$$T_v = \frac{c_v}{H^2} t \quad (3.8)$$

図-3.2 に, 式 (3.5) から求めた層の深さ z を片面透水の層厚 H で除した値 Z と圧密圧力 p_z で過剰間隙水圧 u を除した値 U_u の関係を示す。同図によれば, 排水面 (上面) の過剰間隙水圧は瞬時に消散し, 内部の過剰間隙水圧も排水面に近い位置から徐々に消散し, 最終的には, 非排水面 (下面) の間隙水圧も消散していくことが分かる。また, 図-3.2 において各等時線の右側の面積は, 圧密量の無次元量 S/S_f (以下, 圧密度) となり, 図-3.3 に示すように, 圧密度 U と時間係数 T_v の関係は一本の曲線で示される。したがって, 最終圧密度 S_f および圧密係数 c_v が既知であれば, 式 (3.8) および図-3.3 より圧密度 S と時間 t の関係を導くことができる。

ここで, 式 (3.1) 中の圧密係数 c_v は, 圧密の速さを支配する係数であり, 本研究では圧密終了時までを対象としていることから, 曲線定規法[100]により, これを求めることとした。圧密係数 c_v は, 曲線定規法では, 片面透水の場合, 式 (3.9) で表される。

$$c_v = \frac{0.197 \cdot \bar{h}^2}{t_{50}} \quad (3.9)$$

ここに, \bar{h} : 試験体の平均高さ (cm), t_{50} : 理論圧密度 50%になる時間 (s)

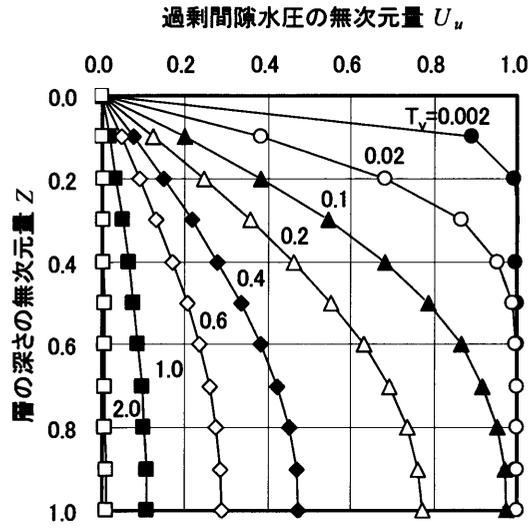


図-3.2 過剰間隙水圧分布の時刻歴

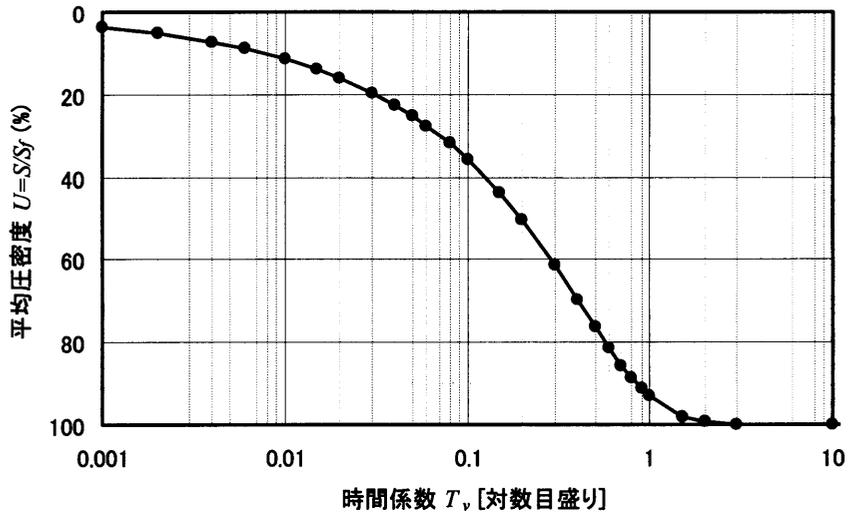


図-3.3 平均圧密度と時間係数の関係

3.3 圧密挙動に関する実験（実験1）

本節では、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの試料全体としての圧密挙動を明らかにするため、圧密量に及ぼす各種要因の影響について検討する。まず、最終脱水量と最終圧密量の関係、および圧密量と時間の関係からフレッシュモルタルおよびコンクリートに対する圧密理論の適用性について検討する。次に、圧密の速さを支配する圧密係数 c_v を算出するために必要な、最終圧密量 S_f および理論圧密度 50% になる時間 t_{50} に及ぼす調合および载荷条件の影響について検討する。

3.3.1 実験の要因水準および調合表

表-3.1 に実験の要因水準を、表-3.2 に調合表を示す。フレッシュコンクリートの脱水特性は、加圧ブリーディング試験の結果よると、水セメント比、圧密圧力、単位粗骨材量、高性能 AE 減水剤による粒子の分散状態、水の粘性、単位水量など、多くの要因の影響を受けると考えられている[57]。そこで本研究では、一般的なモルタルの調合をもとに、水セメント比、圧密圧力、細骨材容積比、フロー値、圧密開始時期および粗骨材最大寸法を実験要因とした。粗骨材最大寸法の影響については、基準調合のモルタルおよび粗骨材最大寸法の異なる2種類のコンクリートを用いて実験を行った。また、圧密開始時期の影響については、現在の真空脱水処理工法の処理開始時期がブリーディングほぼ終了時であることから、打設直後およびブリーディング終了時の2水準とした。なお、基本調合のモルタルに関しては、2回の圧密試験を行った。

表-3.1 実験の要因水準

要因		水準
モルタル	水セメント比 (%)	35, <u>50</u> , 65
	圧密圧力 (MPa)	0.05, <u>0.10</u> , 0.15
	細骨材容積比	0.45, <u>0.50</u> , 0.55
	フロー値 (mm)	180, <u>220</u> , 260
	圧密開始時期	打設直後, ブリーディング終了時*
コンクリート	粗骨材最大寸法 (mm)	13, 20

[註]下線は基本水準を示す。

* 打設後190分(ブリーディング試験は、JIS A 1123に準拠)

表-3.2 調合表

(a) モルタル

W/C (%)	s/m	目標値		単位置量(kg/m ³)			間隙比 e=V _v /V _s	混和剤添加率(%)			実測値	
		FL (mm)	Air (%)	W	C	S		SP/C	AE/C	AF/C	FL (mm)	Air (%)
35	0.50	220	6.8	227	648	1295	0.42	0.84	0.0005	0	216.4	6.8
	0.45	220		295	590	1166	0.57	0	0.0090	0	213.4	5.6
50	0.50	180		265	529	1295	0.50	0	0.0100	0	184.5	5.8
		220						0.60	0.0060	0	219.9	5.8
	260	0.63						0.0080	0	252.4	6.7	
	0.55	220						1.00	0.0020	0.001	214.4	6.0
65	0.50	220		291	447	1295	0.56	0	0.0120	0	213.9	3.9

[註] W/C:水セメント比, s/m:細骨材容積比, FL:フロー値, Air:空気量, W:水, C:セメント, S:細骨材, e:間隙比, V_v:液相および気相の体積, V_s:固相の体積, V_v:液相および気相の体積, V_s:固相の体積, SP:高性能AE減水剤, AE:空気運行情剤, AF:消泡剤

(b) コンクリート

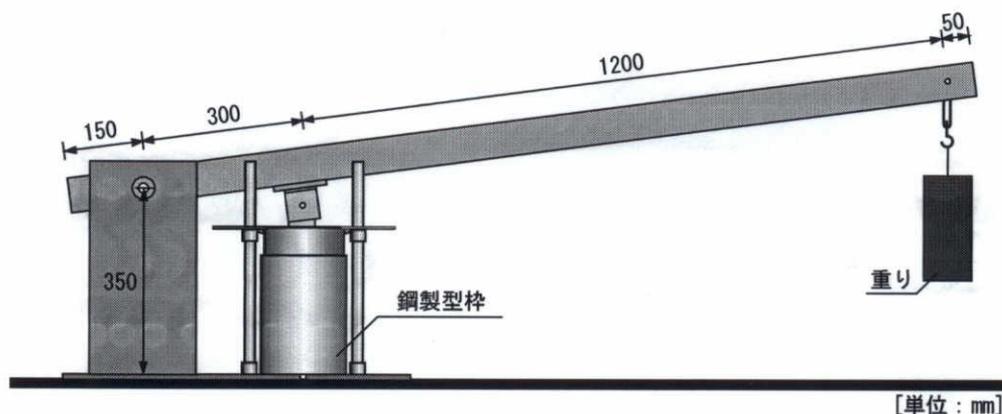
W/C (%)	s/a (%)	s/m	G _{max} (mm)	目標値		単位置量(kg/m ³)				間隙比 e=V _v /V _s	混和剤添加率(%)			実測値	
				SL (cm)	Air (%)	W	C	S	G		SP/C	AE/C	AF/C	SL (cm)	Air (%)
50	50	0.50	13	18.0	4.5	176	353	863	887	0.28	0.85	0.001	0.002	16.0	3.8
			20								0.60	0.001	0.002	18.5	5.2

[註] W/C:水セメント比, s/a:細骨材率, s/m:細骨材容積比, G_{max}:粗骨材最大寸法, SL:スランプ, Air:空気量, W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, e:間隙比, V_v:液相および気相の体積, V_s:固相の体積, SP:高性能AE減水剤, AE:空気運行情剤, AF:消泡剤

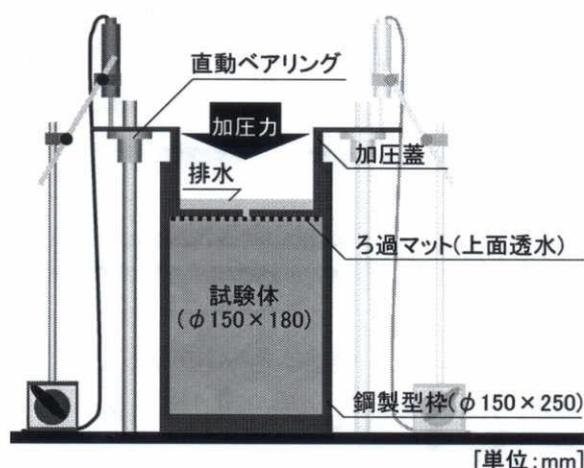
3.3.2 実験方法および測定項目

図-3.4に、独自に開発した圧密試験装置の概要を示す。本装置は、この原理を利用して、作用点にある試料に所定の圧密圧力を加えることができる。なお、作用点での荷重は、装置の自重も含めてロードセルを用いて事前に確認した。

試験体は、 $\phi 150 \times 255\text{mm}$ の鋼製の型枠に、試料を高さ180mmまで打設したものとし、所定の圧密圧力を加えた。なお、持続圧密時の水の流れ、およびセメント分の流出を考え、試験体上面にろ過マットを敷いて上面のみの片面透水とした。試験体の打設後から、温度 20°C ・湿度60%の恒温恒湿室内で圧密が終了するまで持続荷重を行った。ここで、圧密開始直前の試験体上面には、圧密開始時期がブリーディング終了時のものを除き、ブリーディング水はほとんど見られなかった。圧密開始時期がブリーディング終了時のものは、ブリーディング量を計測後に、ブリーディング水を再び試料に戻して圧密処理を行った。



(a) 圧密試験装置



(b) 圧密処理時の試験体周囲の拡大図

図-3.4 実験装置の概要

測定項目は、圧密量の時刻歴（サンプリング周期 5Hz）および最終脱水量である。圧密量は、ストローク 25mm の接触型変位計で加圧蓋上面の対角線上 2 箇所計測し、その平均値とした。最終脱水量は、加圧蓋内に溜まる排水をスポイトで採取した合計量から固形分量を差し引いて補正したものとした。

3.3.3 実験結果および考察

(1) 最終脱水量と最終圧密量 S_f の関係

図-3.5 に、全試料に関する最終脱水量から算出した最終圧密量 S_{fd} と実測した最終圧密量 S_f の関係を示す。なお、ブリーディング終了時から圧密を開始した試験体の最終圧密量は、ブリーディング水を取り除いた脱水量から計算した。ここで、圧密処理時に試料内部の空気が排出あるいは圧密される場合、および排水が適切に採取できていない場合には、最終脱水量から算出した最終圧密量 S_{fd} は、実測値 S_f より小さくなると思われる。しかし、同図によれば、両者の間には、強い相関が見られ、前述のような測定誤差および空気量の影響は見られなかった。また、既往の研究によれば、加圧脱水を行った硬化後のコンクリートの空気量および気泡間隔係数は、脱水を行っていないものほとんど変わらないと報告されている[51]。

以上のことから、本試験装置による圧密挙動の把握は可能であり、試料内部の空気が圧密挙動に及ぼす影響はほとんどないものと考え、以下の議論を進める。

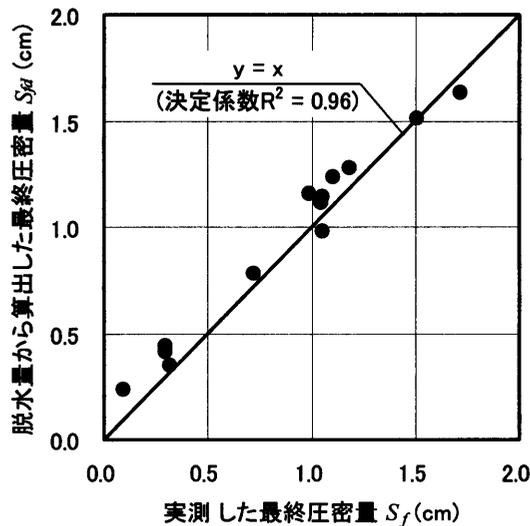


図-3.5 脱水量から算出した最終圧密量 S_{fd} と実測した最終圧密量 S_f の関係

(2) 圧密量と時間の関係

図-3.6に、圧密量と時間の関係の一例を示す。なお、実測値のサンプリング周期は5Hzであるが、見やすくするためにプロットを減らしてある。同図によれば、最終段階に至るまでの圧密量の増加傾向は、コンクリートおよびモルタルともに実験値と理論値が比較的よく一致している。他の水準に関してもほぼ同様の結果となったことから、モルタルおよびコンクリートの脱水過程には、圧密理論の適用が可能であると考えられる。

また、モルタルの実測値 (No.1, 2) の比較から、測定方法および試料のバラツキはそれほど大きくないことが分かる。さらに、モルタルおよびコンクリートの 100min 以降のデータに注目すると、圧密量はほぼ一定値になっている。すなわち、本実験の圧密圧力 0.05 ~ 0.15MPa の範囲では、1次圧密終了後に起こる圧密現象である2次圧密[100]がほとんど起こらないことが分かる。これは、モルタルおよびコンクリートともに、初期水和によって骨格構造が形成されるためと考えられる。以上の結果より、モルタルおよびコンクリートでは、一度骨格構造が形成されれば、それ以降はほとんど圧密されないと仮定して、圧密量がほぼ一定値に収束したときの値を最終圧密量 S_f と定義した。

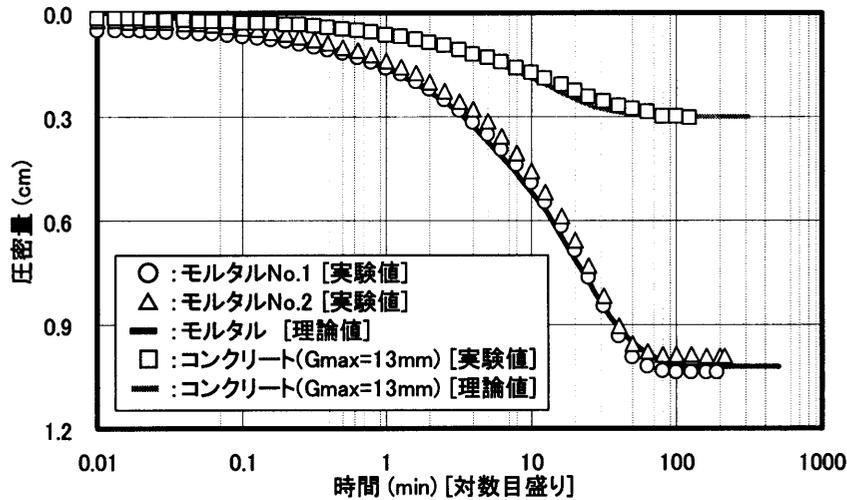


図-3.6 圧密量と時間の関係の一例 (圧密圧力:0.1MPa, W/C : 50%)

(3) 最終圧密量 S_f および理論圧密度 50%になる時間 t_{50}

図-3.7~10, 12 (以上, モルタル) および図-3.14 (コンクリート) に、最終圧密量 S_f および理論圧密度 50%になる時間 t_{50} と各種要因の関係を示す。基本調査のモルタルに関する最終圧密量 S_f および理論圧密度 50%になる時間 t_{50} は、2回の圧密試験結果の平均値から求めた。また、図中には圧密係数 c_v を併示した。

(a) 水セメント比の影響

図-3.7によれば、水セメント比が大きいほど、最終圧密量 S_f は大きくなり、理論圧密度 50%になる時間 t_{50} が小さくなる。これは、今回の調合では水セメント比が大きいほど、液相の量が多く、かつ透水性が高くなるためと考えられる。

(b) 圧密圧力の影響

図-3.8によれば、圧密圧力が最終圧密量 S_f に及ぼす影響は小さいが、圧密圧力が大きいほど理論圧密度 50%になる時間 t_{50} は小さくなる。圧密圧力が最終圧密量 S_f に及ぼす影響がほとんどないのは、試料の構成がほぼ同じであるためと考えられる。

(c) 細骨材容積比の影響

図-3.9によれば、細骨材容積比が大きいほど、最終圧密量 S_f が小さくなり、理論圧密度 50%になる時間 t_{50} が大きくなる。細骨材容積比が大きいほど最終圧密量 S_f が小さくなる原因は、骨格となる骨材の量が多くなるためと考えられる。一方、細骨材容積比が大きいほど理論圧密度 50%になる時間 t_{50} が長くなる原因は、今回の調合では細骨材容積比が大きいほど、液相の量が少なく、かつ透水性が低くなるためと考えられる。

(d) フロー値の影響

図-3.10によれば、フロー値が最終圧密量 S_f に及ぼす影響はほとんど見られないが、フロー値が大きいほど理論圧密度 50%になる時間 t_{50} は大きくなる。これは、本実験では同一調合のモルタルに対して化学混和剤の添加量のみでフロー値を変化させていることから、図-3.11に示すように、フロー値の大きい試験体は、混和剤の影響によりセメント粒子の分散が良好になり、透水性が低くなるため t_{50} の値が大きくなったものと考えられる。

(e) 圧密開始時期の影響

図-3.12によれば、圧密開始時期が遅くなると、最終圧密量 S_f および理論圧密度 50%になる時間 t_{50} が極端に小さくなる。最終圧密量 S_f が小さくなる原因は、図-3.13に示すように、ブリーディングが終了するまでの間に進行した水和反応によって形成された骨格構造の影響であると考えられる。一方、理論圧密度 50%になる時間 t_{50} が小さくなる原因は、ブリーディングにより液相の分布が上層に偏っているためと考えられる。

(f) 粗骨材の影響 (コンクリート)

図-3.14によれば、粗骨材の混入により、最終圧密量 S_f および理論圧密度 50%になる時間 t_{50} が小さくなる。また、本実験の範囲では、粗骨材最大寸法が最終圧密量 S_f および理論圧密度 50%になる時間 t_{50} に及ぼす影響はほとんどないことが分かる。

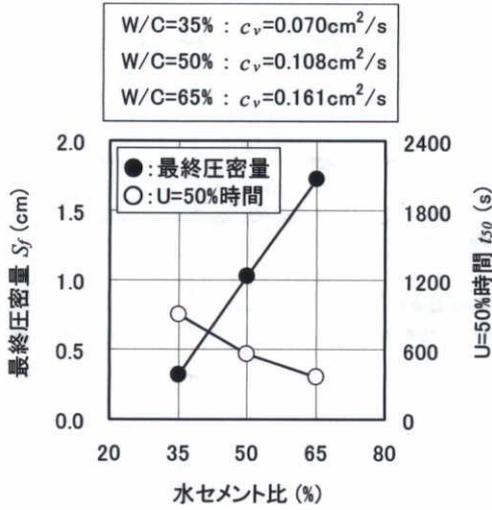


図-3.7 水セメント比の影響

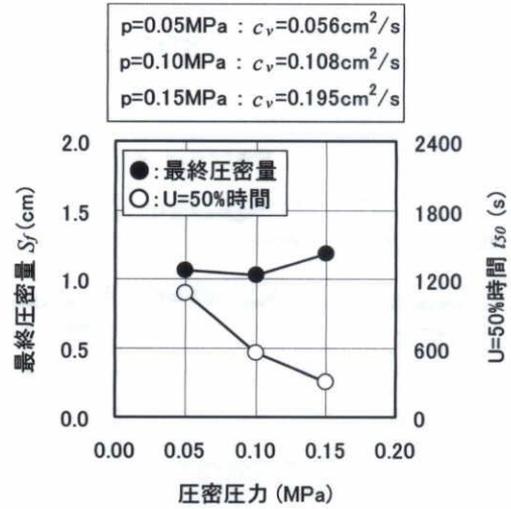


図-3.8 圧密圧力の影響

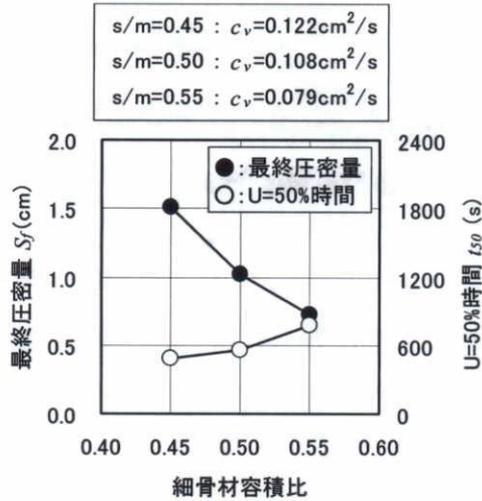


図-3.9 細骨材容積比の影響

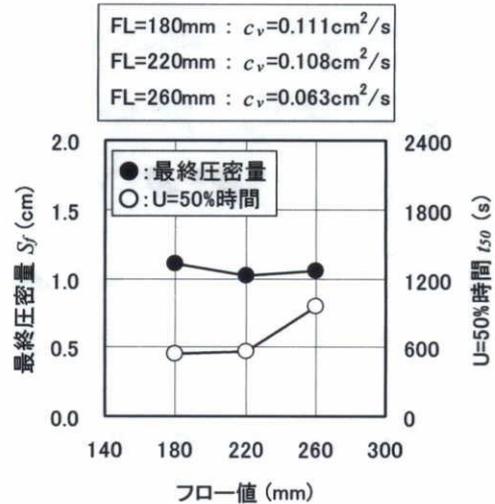


図-3.10 フロー値の影響

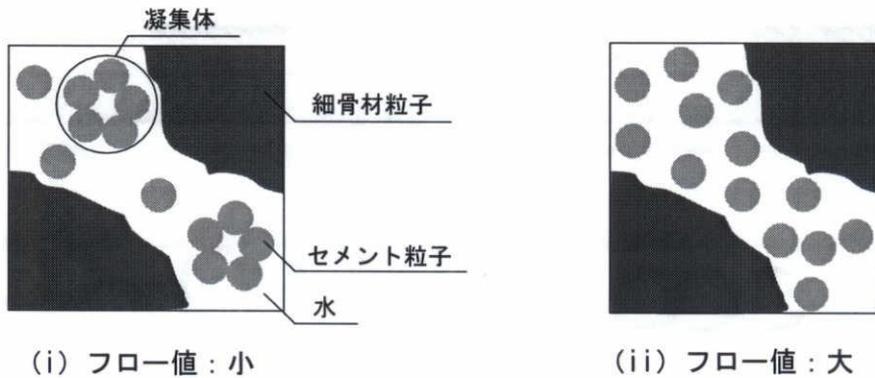


図-3.11 フロー値の影響によるセメント粒子の分散の違い

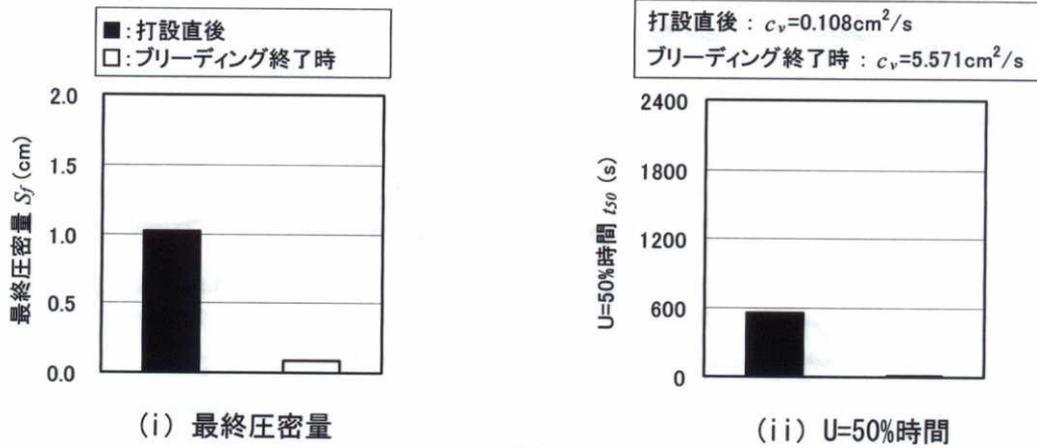


図-3.12 圧密開始時期の影響

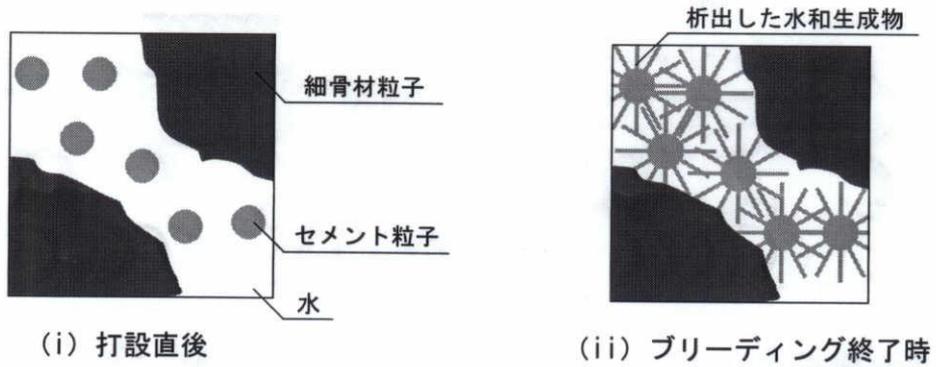


図-3.13 圧密開始時期による骨格形成状態の違い

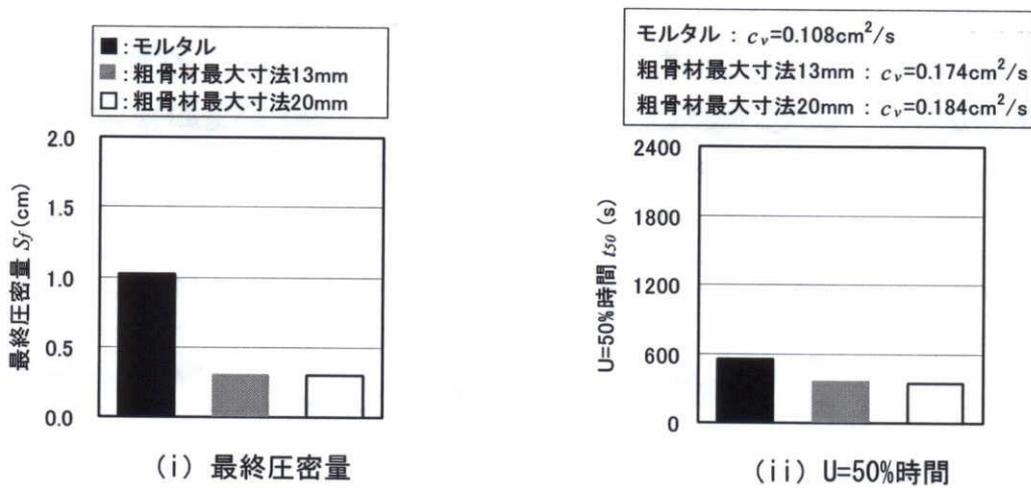


図-3.14 粗骨材の影響 (コンクリート)

以上の結果を踏まえ、表-3.3に、最終圧密度 S_f および理論圧密度 50%になる時間 t_{50} に及ぼす各種要因の影響についてまとめたものを示す。

表-3.3 最終圧密度 S_f および理論圧密度 50%になる時間 t_{50} に及ぼす各種要因の影響

要因		最終圧密度 S_f	U=50%時間 t_{50}
水セメント比	小	小	大
	大	大	小
圧密圧力	小	ほとんど影響なし	大
	大		小
細骨材容積比	小	大	小
	大	小	大
フロー値	小	ほとんど影響なし	小
	大		大
圧密開始時期	早	大	
	遅	小	
粗骨材の混入	無	大	
	有	小	

(4) 最終圧密度 S_f と単位水量 W の関係

図-3.15 に、最終圧密度 S_f と単位水量 W の関係を示す。なお、ブリーディング終了時から圧密を開始したものの単位水量 W は、ブリーディング量 (22.8g) を差し引いている。図中の近似直線は、コンクリートおよびブリーディング終了時から圧密を開始したモルタルのデータを除いたものについて求めた。

同図によれば、最終圧密度 S_f と単位水量 W には、強い相関が見られる。すなわち、最終圧密度 S_f に関しては、水セメント比、圧密圧力、細骨材容積比、フロー値によらず、調合中の液相の量の影響が支配的であることが分かる。ただし、水和反応の影響の大きな試料（ブリーディング終了時から圧密を開始したもの）および粗骨材を混入した試料（コンクリート）においては、この傾向が当てはまらない。コンクリートについては、粗骨材の混入によりモルタルと異なる粒度分布となることで、粒径比（最大粒径に対する最小粒径の比）が大きくなり、実積率が大きくなる[101]ことが原因の一つであると考えられる。

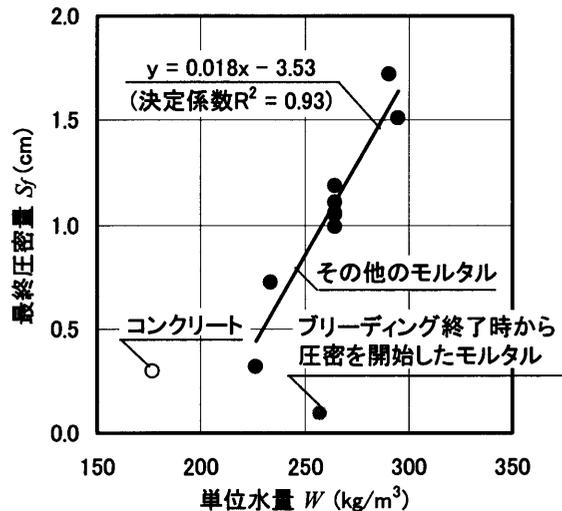


図-3.15 最終圧密度 S_f と単位水量 W の関係

3.4 過剰間隙水圧分布に関する実験（実験II）

本章では、試料内部での圧密の進行状況をより適確に検討するため、圧密処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの間隙水圧分布に及ぼす各種要因の影響について調べた。

3.4.1 実験の要因水準および調査表

表-3.4に実験の要因水準を、表-3.5に調査表を示す。実験要因は、水セメント比および試料の種類とした。ここで、コンクリートとして、基本調合のモルタルに対して最大寸法13mmの粗骨材を混入したものをを用いた。

表-3.4 実験の要因水準

要因	水準
試料の種類	モルタル, コンクリート
水セメント比 (%)	35, 50, 65

[註]下線は基本水準を示す。

表-3.5 調査表

(a) モルタル

W/C (%)	s/m	目標値		単位置量(kg/m ³)			間隙比 e=V _v /V _s	混和剤添加率(%)		実測値	
		FL (mm)	Air (%)	W	C	S		SP/C	AE/C	FL (mm)	Air (%)
35	0.50	220	6.8	227	648	1295	0.42	0.85	0.0005	212.2	5.8
50				265	529	1295	0.50	0.45	0.0060	219.1	6.4
65				291	447	1295	0.56	0	0.0120	223.5	4.8

[註] W/C:水セメント比, s/m:細骨材容積比, FL:フロー値, Air:空気量, W:水, C:セメント, S:細骨材, e:間隙比, V_v:液相および気相の体積, V_s:固相の体積, SP:高性能AE減水剤, AE:空気連行剤

(b) コンクリート

W/C (%)	s/a (%)	s/m	G _{max} (mm)	目標値		単位置量(kg/m ³)				間隙比 e=V _v /V _s	混和剤添加率(%)			実測値	
				SL (cm)	Air (%)	W	C	S	G		SP/C	AE/C	AF/C	SL (cm)	Air (%)
50	50	0.50	13	18.0	4.5	176	353	863	887	0.28	0.85	0.001	0.002	20.5	4.0

[註] W/C:水セメント比, s/a:細骨材率, s/m:細骨材容積比, G_{max}:粗骨材最大寸法, SL:スランプ, Air:空気量, W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, e:間隙比, V_v:液相および気相の体積, V_s:固相の体積, SP:高性能AE減水剤, AE:空気連行剤, AF:消泡剤

3.4.2 実験方法および測定項目

試験装置および試験体は、第3章3節と同様のものを用い、圧密圧力は、0.1MPaとした。圧密開始直前の試験体上面には、第3章3節と同様、ブリーディング水がほとんど見られなかった。

測定項目は、過剰間隙水圧、圧密量の時刻歴および最終脱水量である。過剰間隙水圧は、間隙水圧計を深さ 30, 70, 110 および 150mm の位置にピアノ線で作製した骨組みで固定して試料内に埋設し、この状態における静水圧を初期値として測定した（図-3.16 参照）。圧密量および最終脱水量の測定方法は、第3章3節と同様である。

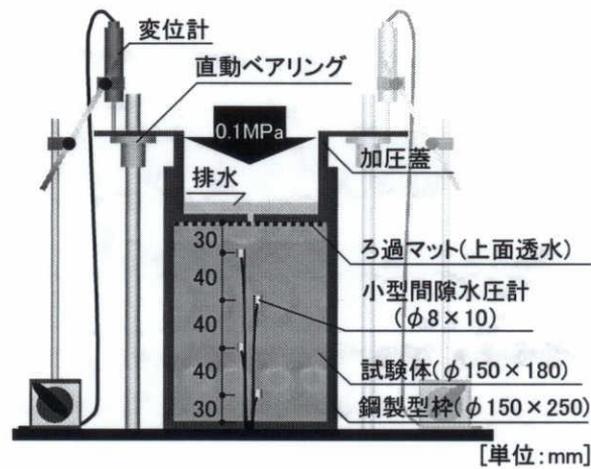


図-3.16 圧密処理時の試験体周囲の拡大図
(過剰間隙水圧の測定時)

3.4.3 実験結果および考察

図-3.17 および図-3.18 に、それぞれ圧密量と時間の関係および過剰間隙水圧分布の一例を示す。図-3.18 (a) によれば、過剰間隙水圧の値は、圧密処理を開始した後、時間の経過とともに上層から徐々に上昇し、 $t=0.3\text{min}$ 程度で下層が最大値に達することが分かる。この傾向は、全ての試験体に見られ、最下層が最大値に達するまでの時間は最長で 1min 程度であった。この過剰間隙水圧分布におけるタイムラグの原因は、打設時に緩く形成された骨格構造が载荷によって崩壊するためと考えられる。しかし本実験では、過剰間隙水圧が消散する段階での圧密挙動の把握を目的としているため、最下層の過剰間隙水圧が最大値に達した $t=1\text{min}$ 以降に注目して、以下の議論を進める。

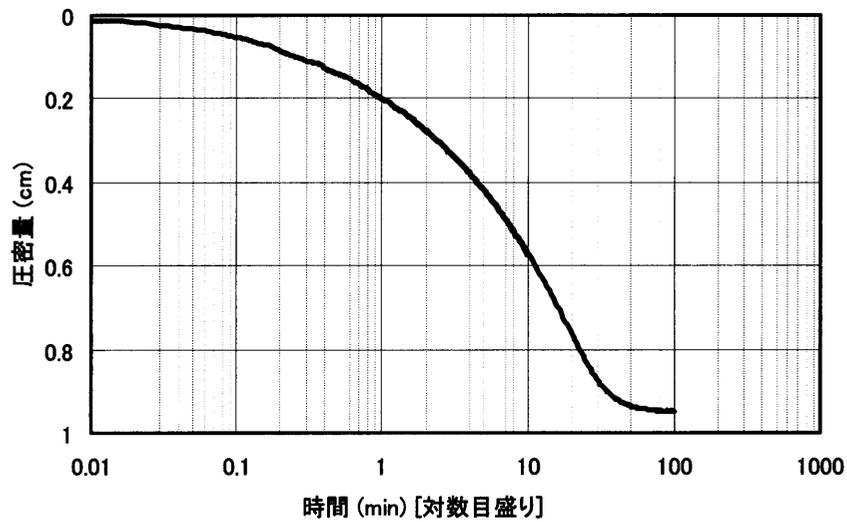


図-3.17 圧密量と時間の関係の一例 (W/C = 50%)

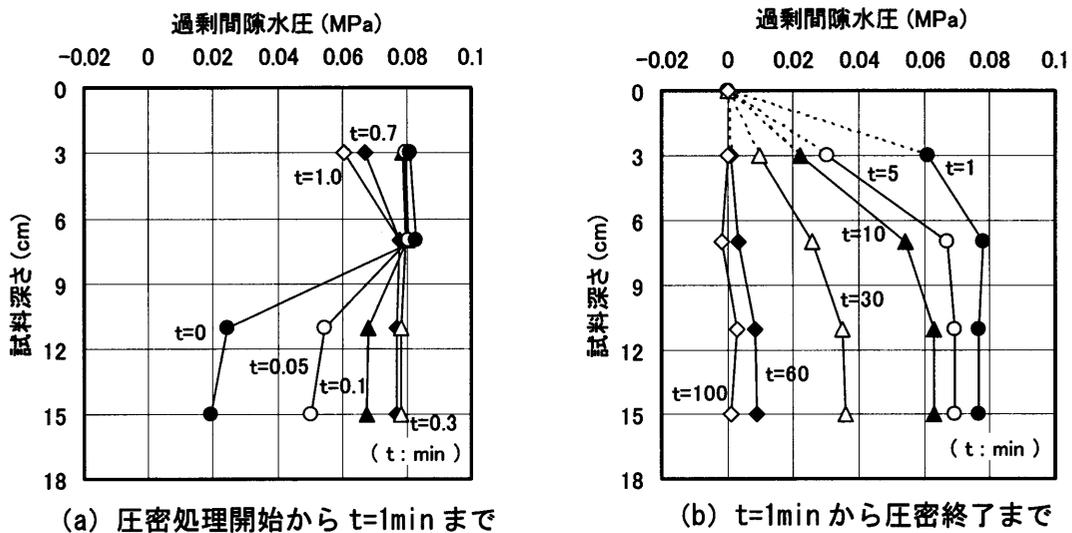


図-3.18 過剰間隙水圧分布の一例 (W/C = 50%)

図-3.19~22 は、各試料について実測値と解析値を比較したものである。これらの図によれば、各試料ともに実測された過剰間隙水圧分布の消散挙動の傾向は解析値と比較的によく一致しており、第3章3節と同様に、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの脱水過程には、圧密理論の適用が可能であると判断できる。なお、ここでの解析値は、式(3.5)の U_u に $t=1\text{min}$ 時の過剰間隙水圧の実験値の最大値をかけたものとしており、 c_v には、間隙水圧計の影響を排除するため、実験Iで得た値を用いている。

(1) 水セメント比の影響

図-3.19 (a) ~21 (a) の比較から、水セメント比が大きいほど、過剰間隙水圧がほぼ0になるまでの時間が短くなるのが分かる。また、 $t=1\text{min}$ 時点での過剰間隙水圧を比較すると、水セメント比に関わらず、過剰間隙水圧は約0.07MPaとなっている。圧密圧力が0.1MPaであることから、残りの0.03MPaは、有効応力として力が伝達されていると考えられる。図-3.19~21の解析値と実験値を比較すると、両者は、傾向だけでなく定量的にもほぼ同等な値となるのが分かる。

(2) 粗骨材の影響 (コンクリート)

図-3.20 (a) および図-3.22 (a) の $t=1\text{min}$ 時点での過剰間隙水圧を比較すると、コンクリートでは、モルタルに比べて過剰間隙水圧の値が小さくなる。これは、相対的に大径の粗骨材粒子によって骨格構造が形成されやすく、この骨格構造が、圧密圧力の一部を有効応力として負担したためと考えられる。図-3.20 および図-3.22の実験値と解析値を比較すると、両者は、傾向だけでなく定量的にもほぼ同等な値となるのが分かる。

なお、過剰間隙水圧分布の実験値と解析値との整合性に関する定量的な評価については、今後、データを増して統計的な処理などのより詳細な検討を行う必要がある。

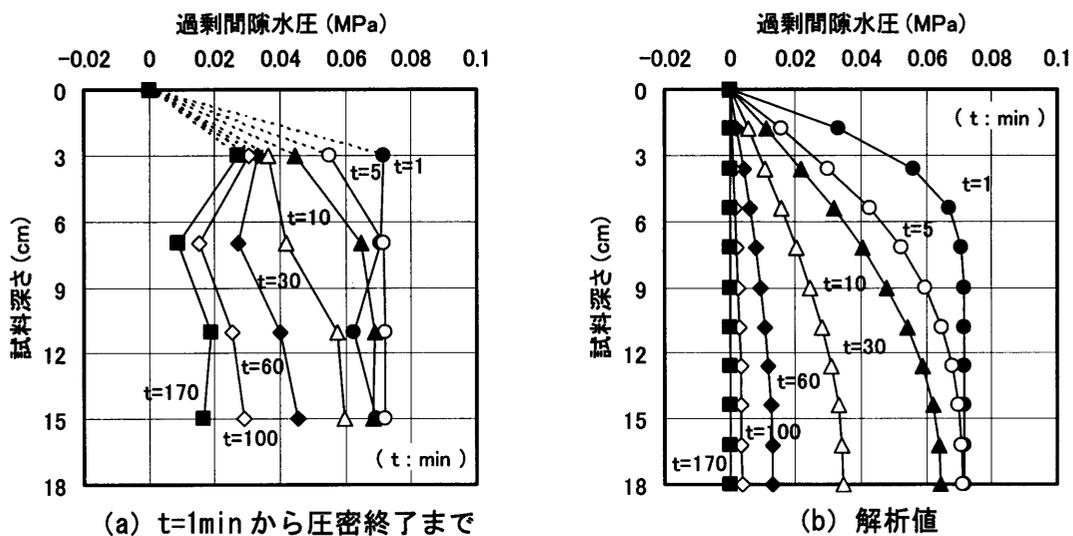


図-3.19 過剰間隙水圧分布 (W/C = 35%)

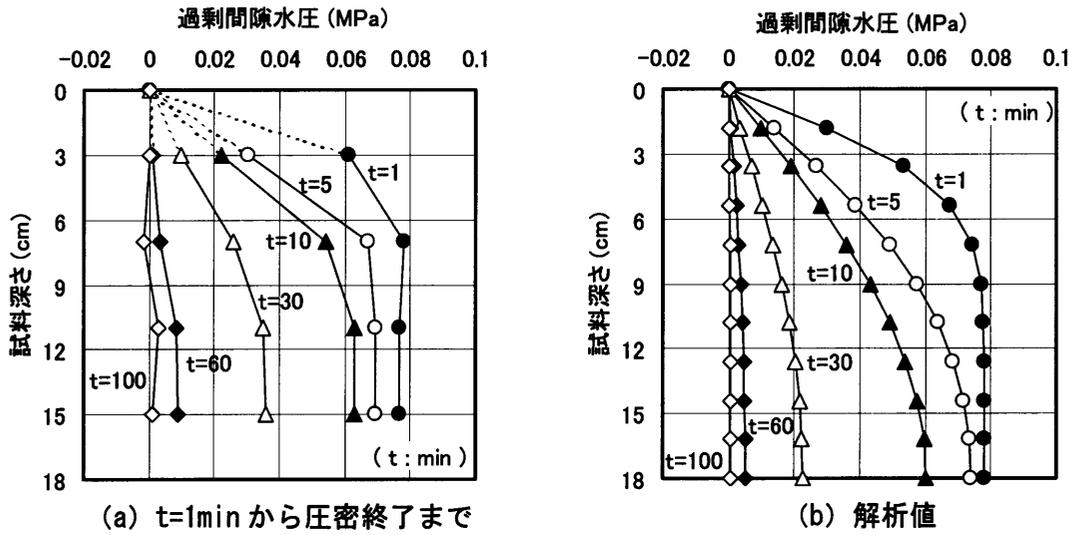


図-3.20 過剰間隙水圧分布 (W/C = 50%)

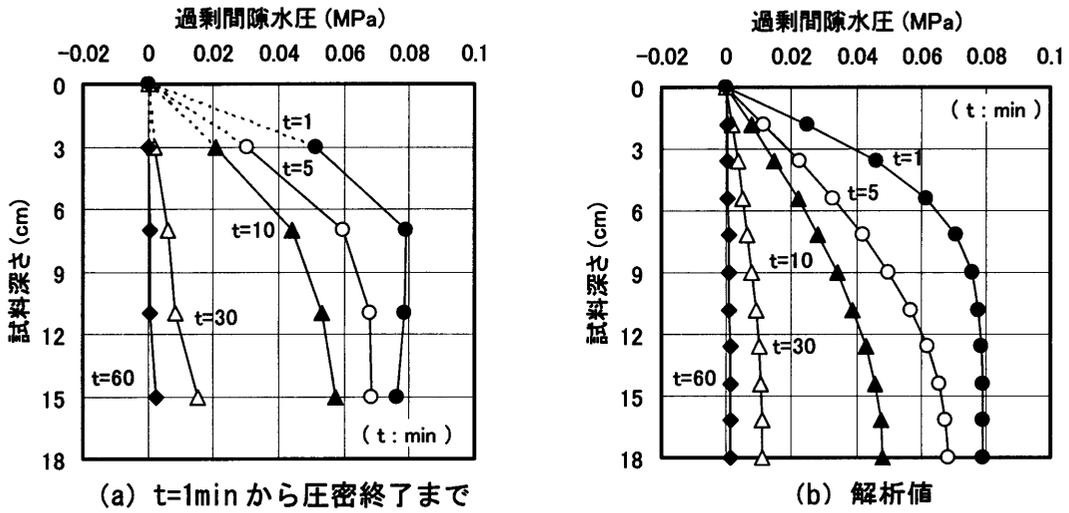


図-3.21 過剰間隙水圧分布 (W/C = 65%)

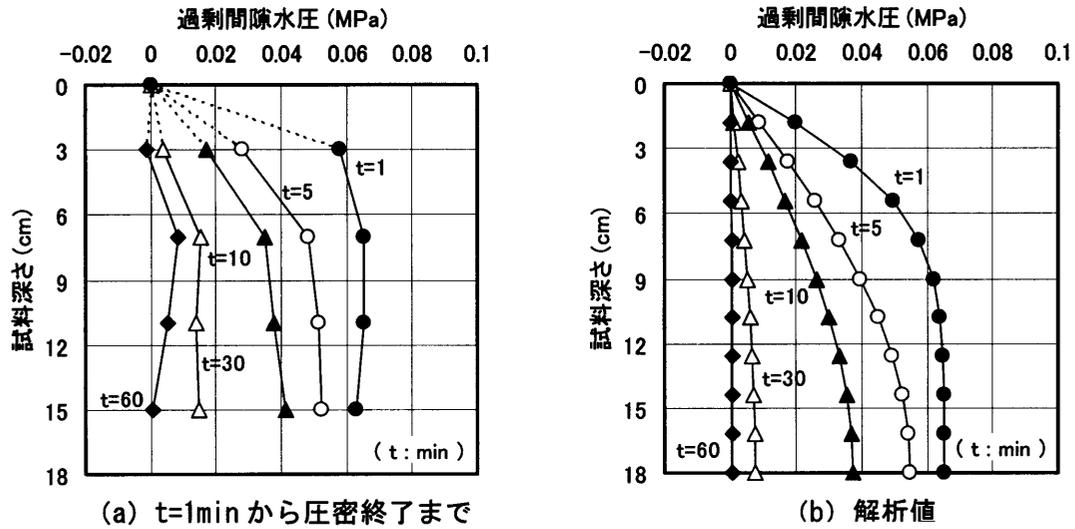


図-3.22 過剰間隙水圧分布 (コンクリート)

3.5 まとめ

本章では、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに対する圧密理論の適用性を確認し、圧密モデルを決定する実験パラメータの定量化を試みた。その結果、表-3.1 および表-3.4 に示した本実験の範囲では、以下のような知見が得られた。

- (1) 圧密量と時間の関係および過剰間隙水圧分布ともに、実験値と解析値は比較的良好に一致しており、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの脱水過程には、既往の圧密理論の適用が可能である。
- (2) 水和反応の影響の大きな試料および粗骨材が混入した試料を除くと、調合中の液相(単位水量)が多いほど、最終圧密量 S_f が大きくなり、両者の関係は一本の直線で近似できる。
- (3) 過剰間隙水圧分布を解析する際、圧密圧力 p_z で過剰間隙水圧 u を除した値 U_u の理論値に、 $t=1\text{min}$ 時の過剰間隙水圧の実験値の最大値をかけたものを用いると、実験値と比較的良好に一致する。

第4章 圧密処理されたモルタルおよびコンクリートの品質改善効果

4.1 概説

4.2 実験の要因水準および調合表

4.3 実験方法および測定項目

4.4 実験結果および考察

4.5 まとめ

第4章 圧密処理されたモルタルおよびコンクリートの品質改善効果

4.1 概説

第3章「フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性」では、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに対する圧密理論の適用性を確認し、圧密モデルを決定する実験パラメータの定量化を試みた。本章では、第3章3節「圧密挙動に関する実験（実験I）」で作製した試験体を用いて、圧密処理された硬化後のモルタルおよびコンクリートの品質（ここでは、密度および圧縮強度）の定量評価を試みる。

4.2 実験の要因水準および調合表

表-4.1 に実験の要因水準を，表-4.2 に調合表を示す。実験の要因水準および調合表ともに，第3章3節「圧密挙動に関する実験（実験I）」と同様である。

表-4.1 実験の要因水準

要因		水準
モルタル	水セメント比 (%)	35, <u>50</u> , 65
	圧密圧力 (MPa)	0.05, <u>0.10</u> , 0.15
	細骨材容積比	0.45, <u>0.50</u> , 0.55
	フロー値 (mm)	180, <u>220</u> , 260
	圧密開始時期	打設直後, プリーディング終了時*
コンクリート	粗骨材最大寸法 (mm)	13, 20

[註]下線は基本水準を示す。

* 打設後190分(プリーディング試験は, JIS A 1123に準拠)

表-4.2 調合表

(a) モルタル

W/C (%)	s/m	目標値		単位量(kg/m ³)			間隙比 e=V _v /V _s	混和剤添加率(%)			実測値	
		FL (mm)	Air (%)	W	C	S		SP/C	AE/C	AF/C	FL (mm)	Air (%)
35	0.50	220	6.8	227	648	1295	0.42	0.84	0.0005	0	216.4	6.8
	0.45	220		295	590	1166	0.57	0	0.0090	0	213.4	5.6
50	0.50	180		265	529	1295	0.50	0	0.0100	0	184.5	5.8
		220		265	529	1295	0.50	0.60	0.0060	0	219.9	5.8
	260	234		468	1425	0.43	0.63	0.0080	0	252.4	6.7	
	0.55	220		234	468	1425	0.43	1.00	0.0020	0.001	214.4	6.0
65	0.50	220	291	447	1295	0.56	0	0.0120	0	213.9	3.9	

[註] W/C: 水セメント比, s/m: 細骨材容積比, FL: フロー値, Air: 空気量, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, e: 間隙比, V_v: 液相および気相の体積, V_s: 固相の体積, V_v: 液相および気相の体積, V_s: 固相の体積, SP: 高性能AE減水剤, AE: 空気運行者, AF: 消泡剤

(b) コンクリート

W/C (%)	s/a (%)	s/m	G _{max} (mm)	目標値		単位量(kg/m ³)				間隙比 e=V _v /V _s	混和剤添加率(%)			実測値	
				SL (cm)	Air (%)	W	C	S	G		SP/C	AE/C	AF/C	SL (cm)	Air (%)
50	50	0.50	13	18.0	4.5	176	353	863	887	0.28	0.85	0.001	0.002	16.0	3.8
			20								0.60	0.001	0.002	18.5	5.2

[註] W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, s/m: 細骨材容積比, G_{max}: 粗骨材最大寸法, SL: スランプ, Air: 空気量, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, e: 間隙比, V_v: 液相および気相の体積, V_s: 固相の体積, SP: 高性能AE減水剤, AE: 空気運行者, AF: 消泡剤

4.3 実験方法および測定項目

図-4.1 および写真-4.1 に、それぞれ試験体の概要および試験体の成形の様子を示す。第3章3節「圧密挙動に関する実験（実験I）」で行った圧密試験後の試験体（ $\phi 150 \times$ 約180mm）を材齢1日で脱型し、水中養生とした。材齢14～21日に、その試験体から $\phi 50 \times 180$ mmのコア試験体を採取した（図-4.1(a) および写真-4.1(a)参照）。そのコア試験体は、カット（図-4.1(b) および写真-4.1(b)参照）および研磨（写真-4.1(c)参照）によって、 $\phi 50 \times 50$ mmの試験体に整形した。整形後の試験体は、水中養生とした。

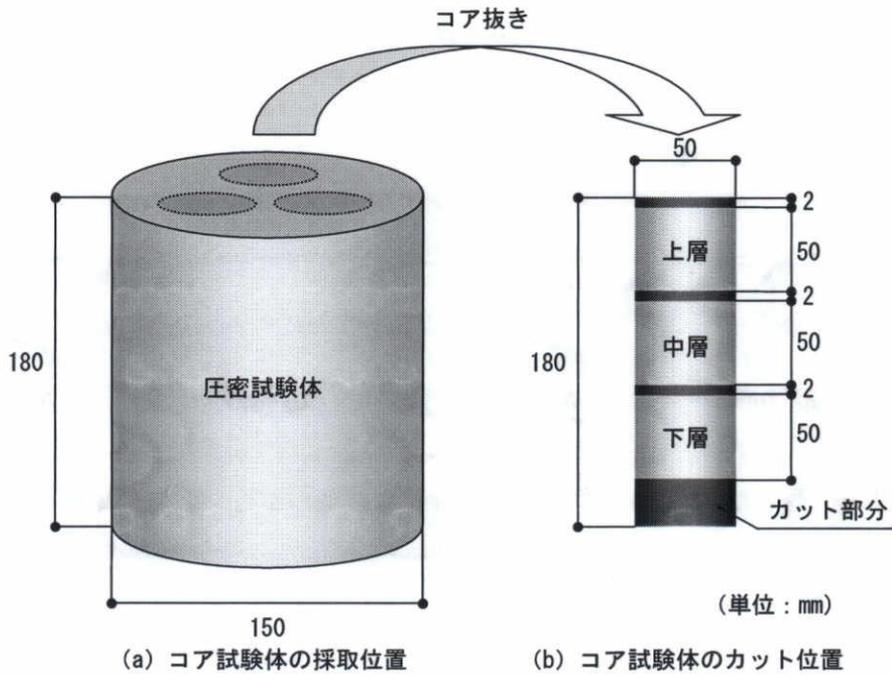
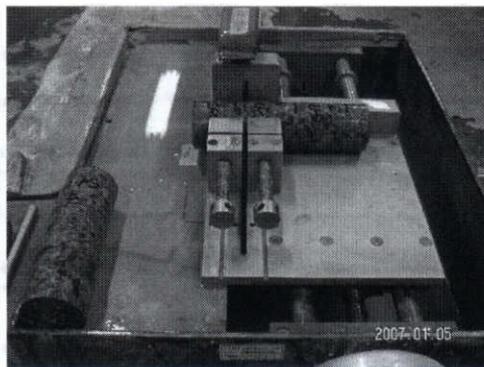


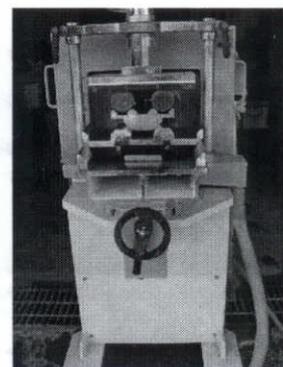
図-4.1 試験体の概要



(a) コア試験体の採取



(b) コア試験体のカット



(c) 試験体の研磨

写真-4.1 試験体の成形の様子

測定項目は、材齢 28 日における密度および圧縮強度である。密度は、材齢 27 日に、 ϕ 50×50mm コア試験体を水中から取り出し、気温 20℃、湿度 60%の恒温恒湿槽内で水中・気中重量を測定することにより算出した。圧縮強度は、50×50mm コア試験体の水中・気中重量測定後、気温 20℃、湿度 60%の恒温恒湿槽内に静置し、材齢 28 日に圧縮試験を行うことにより求めた。写真-4.2 に、圧縮試験（材齢 28 日）の様子を示す。なお、 ϕ 50×50mm コア試験体の圧縮強度は、JIS A 1107 に準拠して補正を行った。

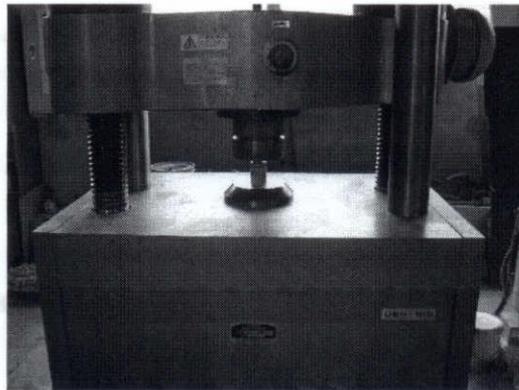


写真-4.2 圧縮試験（材齢 28 日）の様子

4.4 実験結果および考察

4.4.1 各種要因が品質改善効果に及ぼす影響

本項では、圧密処理された硬化後のモルタルおよびコンクリートの品質（ここでは、密度および圧縮強度）に及ぼす各種要因の影響を検討する。図（a）に密度分布を、図（b）に圧縮強度分布を、図（c）に密度と圧縮強度の関係を、図（d）に密度の改善効果を、図（e）に圧縮強度の改善効果をそれぞれ示す。ここで、密度および圧縮強度の改善効果は、それぞれ密度比および圧縮強度比で示す。なお、圧密処理された試験体の密度を無処理試験体の密度で除した値を密度比と定義する。圧縮強度比も同様である。

(1) 水セメント比の影響

図-4.2 (a) および (b) によれば、水セメント比によらず、圧密処理を行うと全層にわたって密度および圧縮強度が改善されることが分かる。また、無処理試験体では、ブリーディングの影響により上層ほど密度および圧縮強度が小さくなるが、圧密処理された試験体では、若干であるが上層ほど密度および圧縮強度が大きくなること分かる。同図（c）

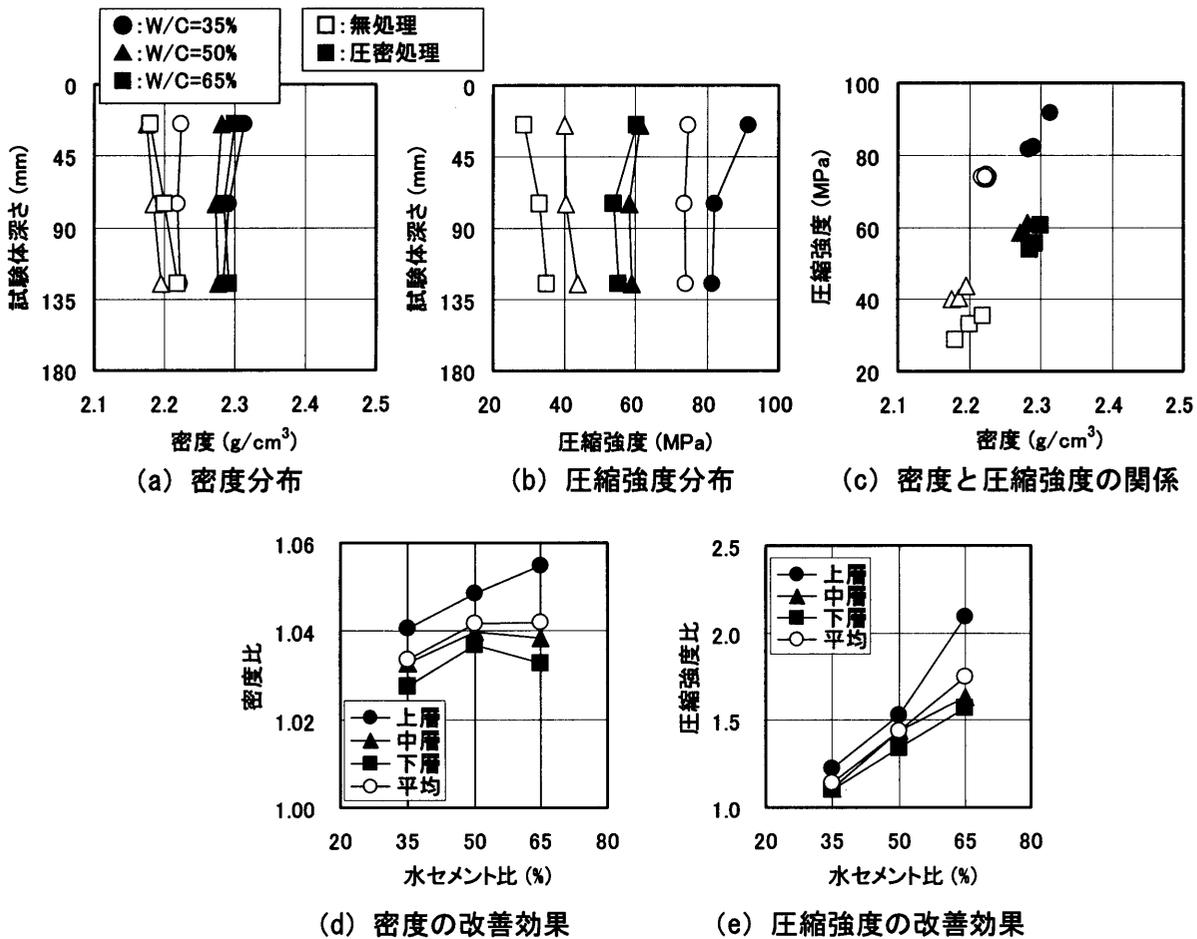


図-4.2 水セメント比の影響

(圧密圧力：0.10MPa, 細骨材容積比：0.50, フロー値：220mm, 圧密開始時期：打設直後)

によれば、密度と圧縮強度には相関があることが分かる。この傾向は、畑中ら[2,42]の報告と同様である。同図 (d) および (e) によれば、上中下層でバラツキはあるものの、平均で考えると、水セメント比が大きいほど密度および圧縮強度の改善効果が大きいことが分かる。なお、上層ほど密度および圧縮強度の改善効果が大きくなる原因は、無処理試験体のブリーディングの影響により、圧密処理された試験体の上層での品質改善効果が相対的に大きくなるためと考えられる。

(2) 圧密圧力の影響

図-4.3 (a) および (b) によれば、圧密圧力によらず、圧密処理を行うと全層にわたって密度および圧縮強度が改善されることが分かる。また、無処理試験体では、ブリーディングの影響により上層ほど密度および圧縮強度が小さくなるが、圧密処理された試験体では、密度および圧縮強度にほとんど分布がないことが分かる。同図 (c) によれば、密度と圧縮強度には相関があることが分かる。この傾向は、畑中ら[2,42]の報告と同様である。

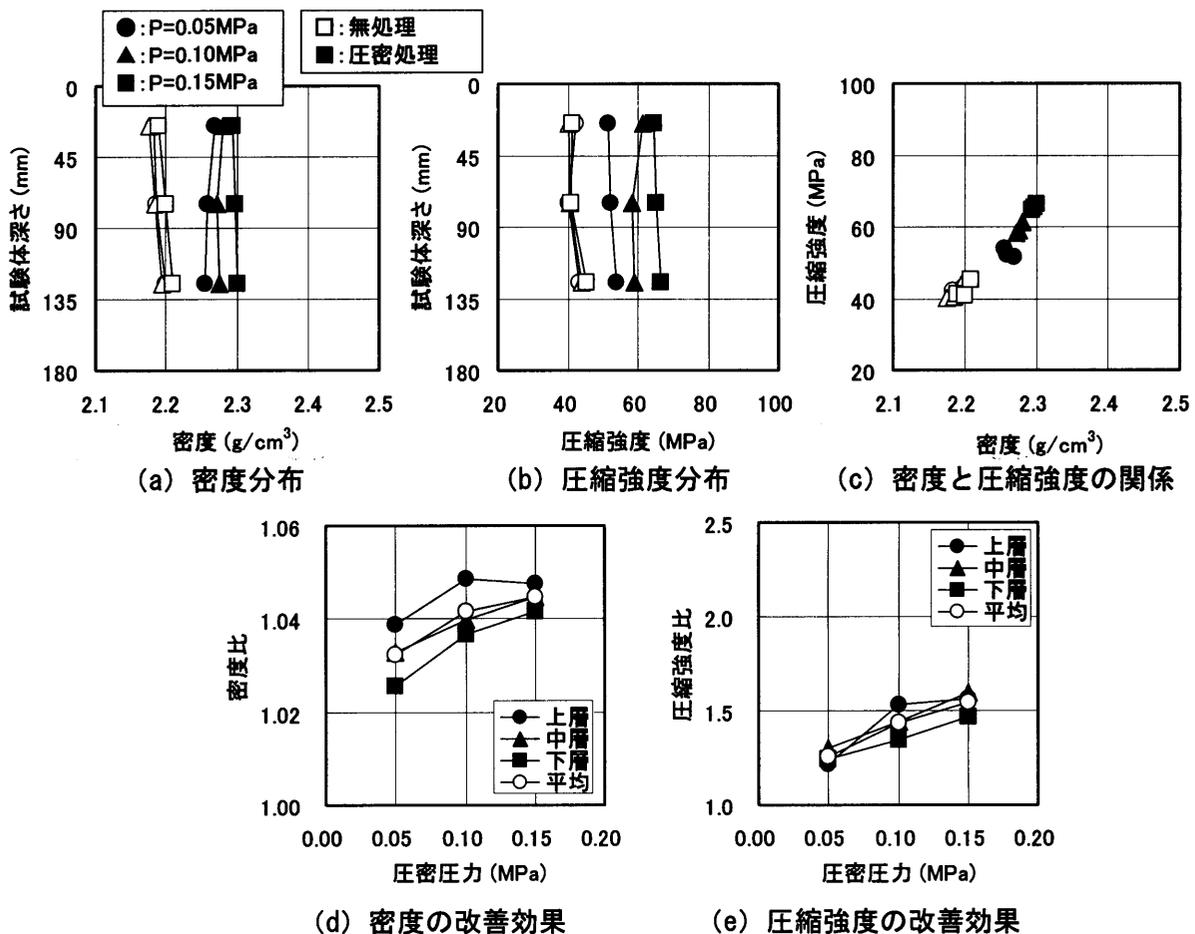


図-4.3 圧密圧力の影響

(水セメント比 : 50%, 細骨材容積比 : 0.50, フロー値 : 220mm, 圧密開始時期 : 打設直後)

同図 (d) および (e) によれば、上中下層で若干のバラツキはあるものの、平均で考えると、圧密圧力が大きいほど密度および圧縮強度の改善効果が大きいことが分かる。土師ら [50] は、圧縮強度の増加割合は、最終的に加圧しない試験体のおおよそ 1.5 倍になると報告しており、本実験の値は既往の研究と一致する。なお、上層ほど密度および圧縮強度の改善効果が大きくなる原因は、無処理試験体のブリーディングの影響で圧密処理された試験体の上層での品質改善効果が相対的に大きくなるためと考えられる。

(3) 細骨材容積比の影響

図-4.4 (a) および (b) によれば、細骨材容積比によらず、圧密処理を行うと全層にわたって密度および圧縮強度が改善されることが分かる。また、細骨材容積比が 0.45 および 0.50 の無処理試験体では、ブリーディングの影響により上層ほど密度および圧縮強度が小さくなるが、圧密処理された試験体では、密度および圧縮強度にほとんど分布がないことが分かる。しかし、細骨材容積比が 0.55 の無処理試験体では、密度および圧縮強度に分布

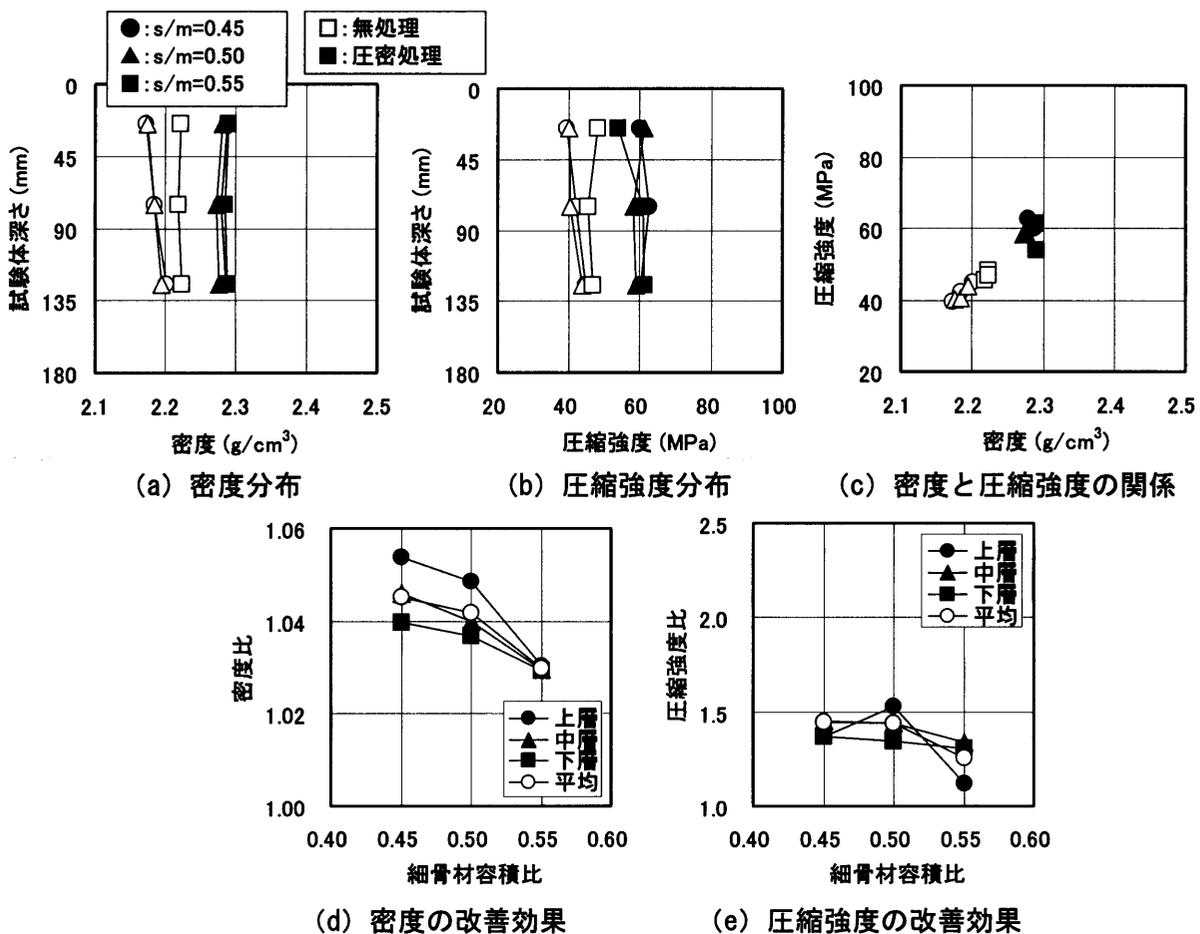


図-4.4 細骨材容積比の影響

(水セメント比 : 50%, 圧密圧力 : 0.10MPa, フロー値 : 220mm, 圧密開始時期 : 打設直後)

がなく、圧密処理された上層の圧縮強度が小さくなるのが分かる。同図 (c) によれば、密度と圧縮強度には相関があることが分かる。同図 (d) および (e) によれば、上中下層で若干のバラツキはあるものの、平均で考えると、細骨材容積比が大きいほど密度および圧縮強度の改善効果が小さいことが分かる。

(4) フロー値の影響

図-4.5 (a) および (b) によれば、フロー値によらず、圧密処理を行うと全層にわたって密度および圧縮強度が改善されるのが分かる。また、無処理試験体では、ブリーディングの影響により上層ほど密度および圧縮強度が小さくなるが、圧密処理された試験体では、若干であるが上層ほど密度および圧縮強度が大きくなっている。同図 (c) によれば、密度と圧縮強度には相関があることが分かる。同図 (d) によれば、平均で考えると、フロー値が大きいほど密度の改善効果が大きいことが分かる。同図 (e) によれば、平均で考えると、フロー値が圧縮強度に及ぼす影響は小さい。なお、上層ほど密度および圧縮強度の

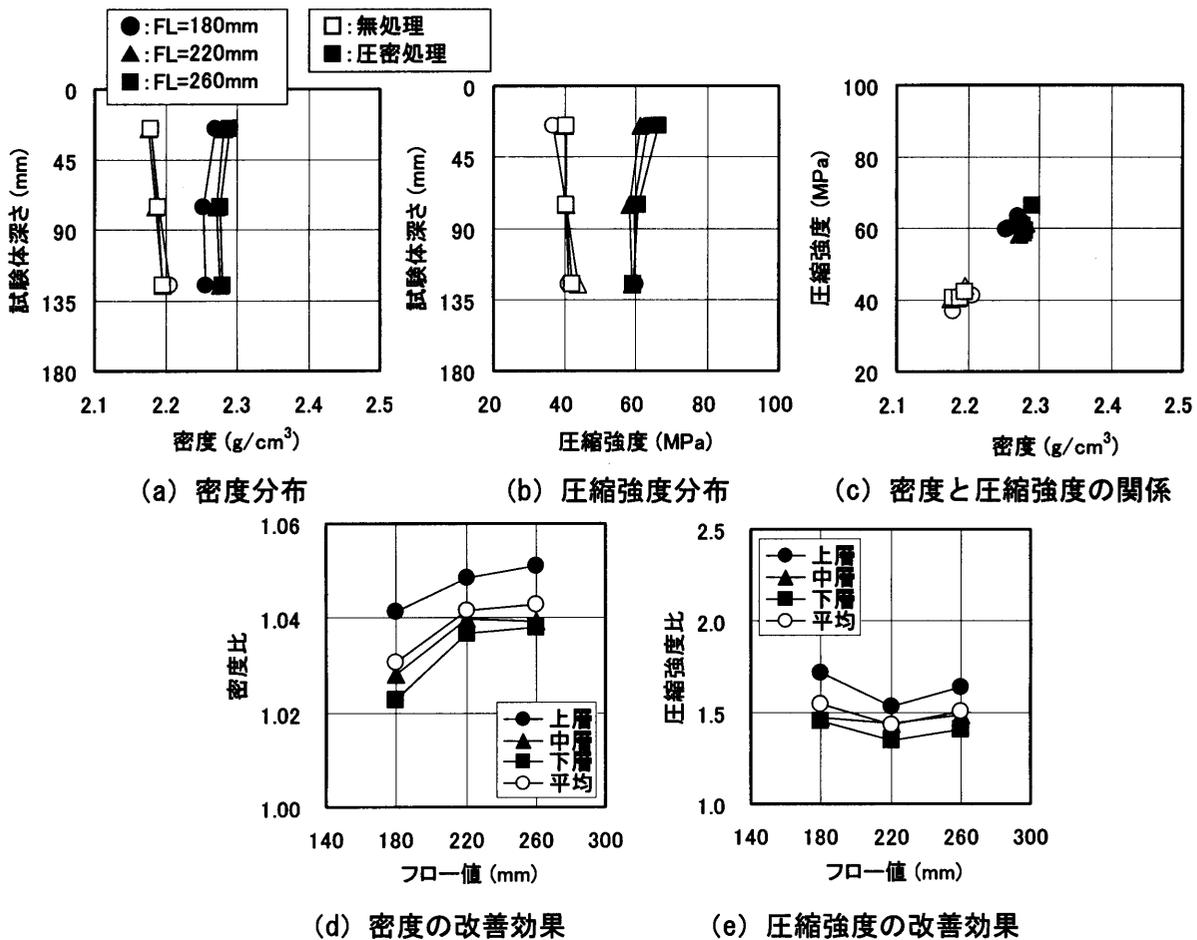


図-4.5 フロー値の影響

(水セメント比 : 50%, 圧密圧力 : 0.10MPa, 細骨材容積比 : 0.50, 圧密開始時期 : 打設直後)

改善効果が大きくなる原因は、無処理試験体のブリーディングの影響で圧密処理された試験体の上層での品質改善効果が相対的に大きくなるためと考えられる。

(5) 圧密開始時期の影響

図-4.6 (a) および (b) によれば、圧密開始時期によらず、圧密処理を行うと全層にわたって密度および圧縮強度が改善されることが分かる。無処理試験体では、ブリーディングの影響により上層ほど密度および圧縮強度が小さくなるが、圧密処理された試験体では、若干であるが上層ほど密度および圧縮強度が大きくなっている。また、同図 (c) によれば、密度と圧縮強度には相関があることが分かる。さらに、同図 (d) および (e) によれば、平均で考えると、圧密開始時期が遅いと、密度および圧縮強度の改善効果が小さくなることが分かる。なお、上層ほど密度および圧縮強度の改善効果が大きくなる原因は、無処理試験体のブリーディングの影響で圧密処理された試験体の上層での品質改善効果が相対的に大きくなるためと考えられる。

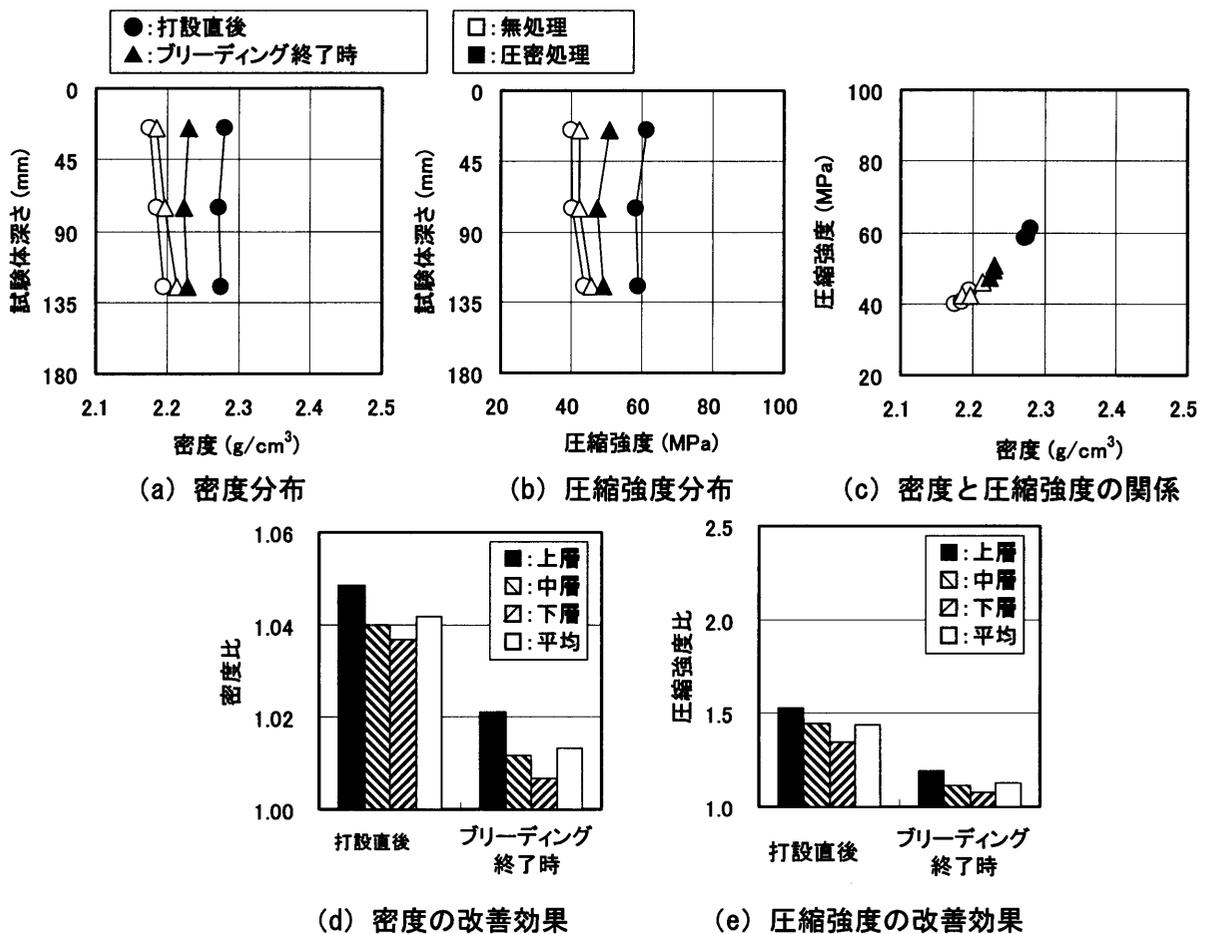


図-4.6 圧密開始時期の影響

(水セメント比 : 50%, 圧密圧力 : 0.10MPa, フロー値 : 220mm, 細骨材容積比 : 0.50)

(6) 粗骨材の影響 (コンクリート)

図-4.7 (a) によれば、モルタルおよびコンクリートによらず、無処理試験体では、ブリーディングの影響により上層ほど密度が小さくなるが、圧密処理された試験体では、分布がない。同図 (b) によれば、コンクリート ($G_{max}=13mm$) を除くと、無処理試験体では、ブリーディングの影響により上層ほど圧縮強度が小さくなるが、圧密処理された試験体では、上層ほど大きくなる。同図 (c) によれば、モルタルおよびコンクリートともに、密度と圧縮強度には相関があることが分かる。同図 (d) および (e) によれば、平均で考えると、試料の違いに関しては、モルタルよりコンクリートの方が、コンクリートの最大粗骨材寸法の違いに関しては、最大粗骨材寸法が小さいほど、密度および圧縮強度の改善効果が小さくなることが分かる。なお、コンクリート ($G_{max}=13mm$) を除いて、上層ほど密度および圧縮強度の改善効果が大きくなる原因は、無処理試験体のブリーディングの影響で圧密処理された試験体の上層での品質改善効果が相対的に大きくなるためと考えられる。

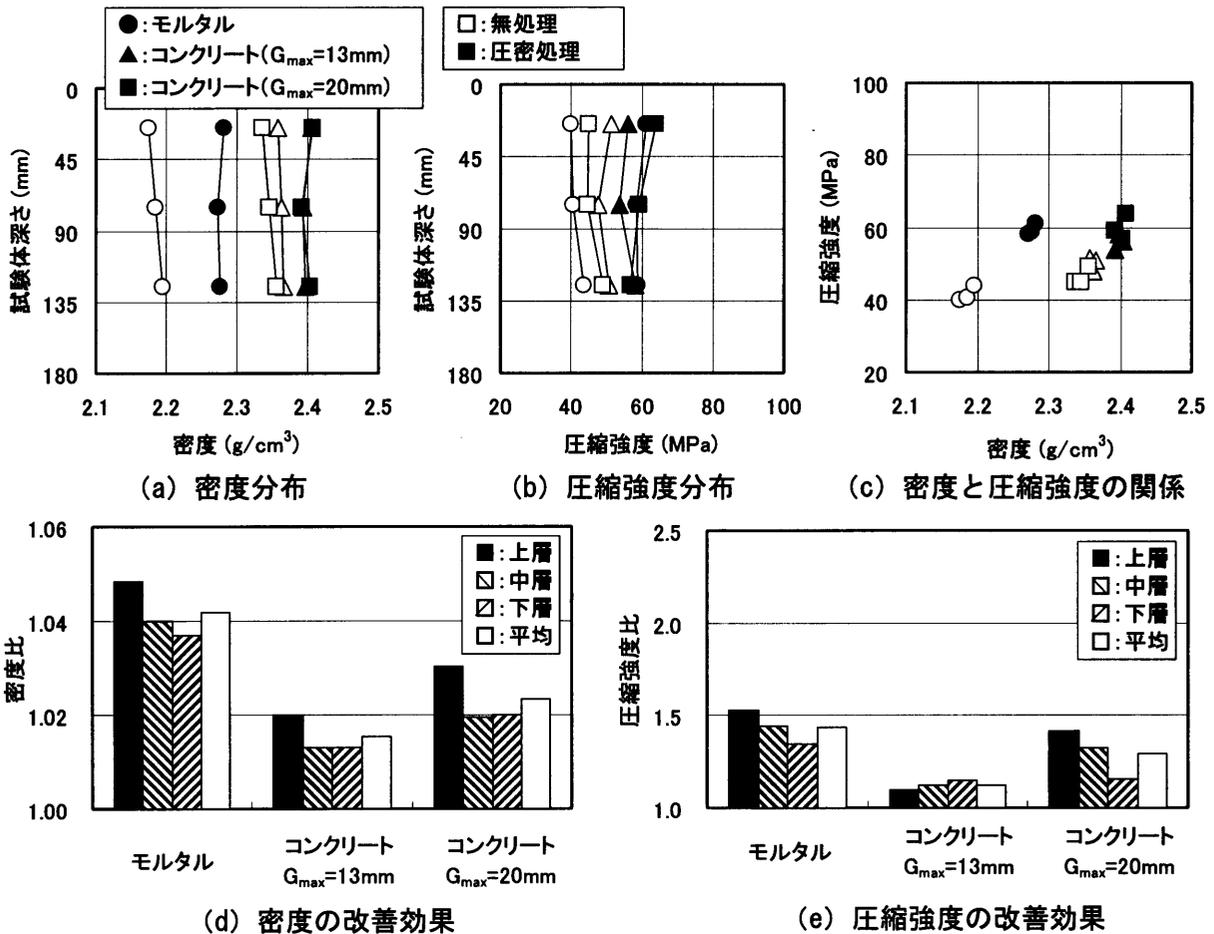


図-4.7 粗骨材の影響 (コンクリート)

[水セメント比 : 50%, 圧密圧力 : 0.10MPa, 細骨材容積比 : 0.50, 圧密開始時期 : 打設直後]

4.4.2 平均密度と平均圧縮強度の関係

図-4.8に、平均密度と平均圧縮強度の関係を示す。ここで、試験体各層の密度および圧縮強度を平均したもの、それぞれ平均密度および平均圧縮強度と定義する。同図によれば、モルタルおよびコンクリートともに、平均密度と平均圧縮強度には相関があることが分かる。

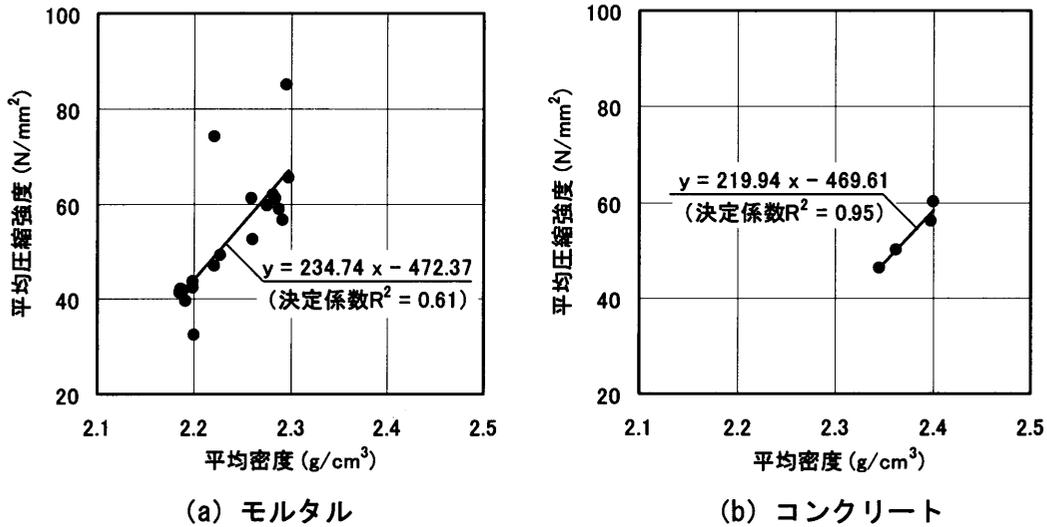


図-4.8 平均密度と平均圧縮強度の関係

4.4.3 脱水率と品質改善効果の関係

図-4.9に、脱水率と品質改善効果の関係を示す。脱水率は、脱水量を試験体中の使用水量で除したものの百分率と定義した。また、圧密処理された試験体の平均密度を無処理試

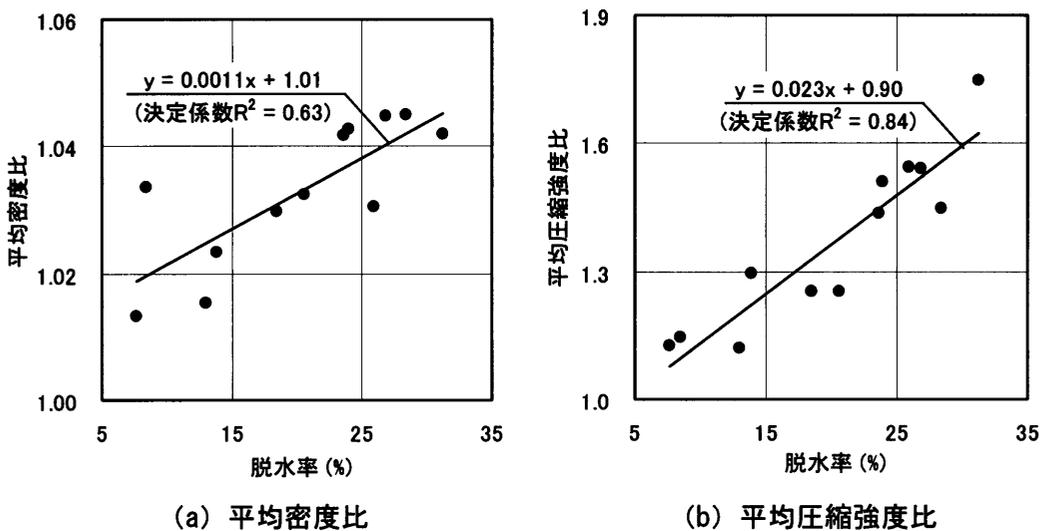


図-4.9 脱水率と品質改善効果の関係

験体の平均密度で除した値を平均密度比、圧密処理された試験体の平均圧縮強度を無処理試験体の平均圧縮強度で除した値を平均圧縮強度比とそれぞれ定義した。同図によれば、脱水率が大きいほど密度および圧縮強度の改善効果が大きいことが分かる。すなわち、圧密処理による品質改善は、圧密処理によって脱水され、モルタルおよびコンクリートの組織が密実になるためと考えられる。

4.4.4 セメント水比と平均圧縮強度の関係

図-4.10 に、セメント水比平均圧縮強度との関係を示す。圧密処理された試験体のセメント水比は、式 (4.1) ～式 (4.3) に代入することで求めることができる。なお、ブリーディング終了時に圧密処理を開始したものは、ブリーディング水および脱水量を合計したものから最終圧密量を算出した。また、同図中には、JASS 5 に採用されている水セメント比算定式である式 (4.4) [102]から求めたプロットを併記してある。

$${}_wU_A = ({}_wU_P - S_f/H \times {}_w\gamma \times 1000) / (1 - S_f/H) \quad (4.1)$$

$${}_cU_A = {}_cU_P / (1 - S_f/H) \quad (4.2)$$

$$C/W = {}_cU_A / {}_wU_A \quad (4.3)$$

ここで、 S_f : 最終圧密量 (cm), H : 片面透水の層厚 (cm), ${}_w\gamma$: 密度 (=1.0g/cm³),
 ${}_wU_P$, ${}_wU_A$: 調合上および圧密処理後の単位水量 (kg/m³),
 ${}_cU_P$, ${}_cU_A$: 調合上および圧密処理後の単位セメント量 (kg/m³),
 C/W : セメント水比

$$F = K(0.71X - 0.43) \quad (4.4)$$

ここに、 F : コンクリート圧縮強度 (MPa), K : セメント強度 (MPa),
 X : セメント水比

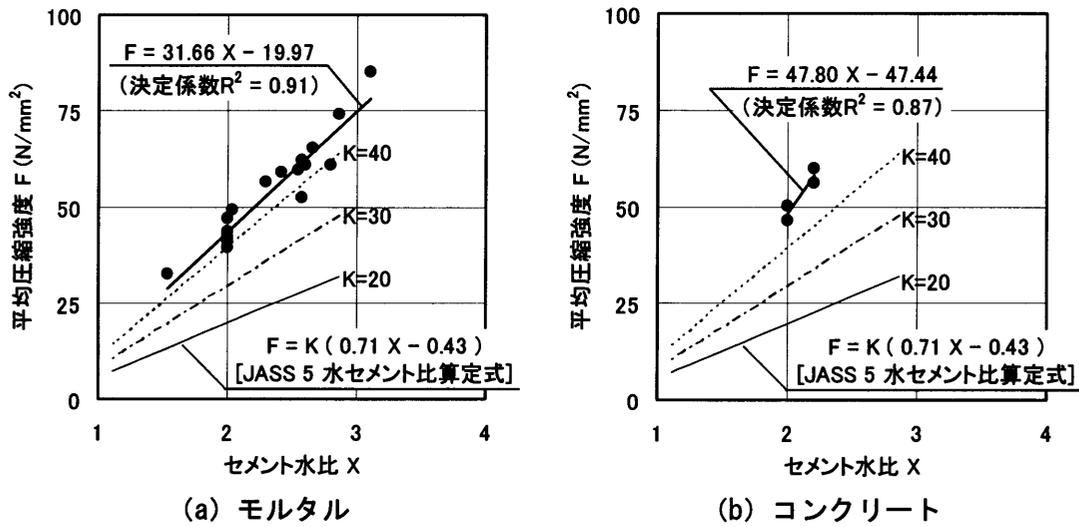


図-4.10 セメント水比と平均圧縮強度の関係

同図によれば、モルタルおよびコンクリートともに式(4.4)から求めた直線より傾きおよび切片ともに大きくなるものの、セメント水比が大きいほど平均圧縮強度が大きくなり、両者の関係は一本の直線に近似できる。すなわち、圧密処理された硬化後のモルタルおよびコンクリートはセメント水比説に従い、表-4.1に示した本実験の範囲では、式(4.5)および式(4.6)を用いれば、圧密処理された硬化後のモルタルおよびコンクリートの圧縮強度を推定することが可能である。ここで、佐藤ら[51]は、加圧脱水コンクリートの圧縮強度が増加する傾向は、単位水量を減じたコンクリートの圧縮強度とほぼ一致しており、加圧脱水によるセメント比の低下が圧縮強度に対して支配的影響を及ぼしていると報告しており、本実験は同様な傾向であったといえる。

$$F = 31.66X - 19.97 \quad (\text{モルタル}) \quad (4.5)$$

$$F = 47.80X - 47.44 \quad (\text{コンクリート}) \quad (4.6)$$

ここに、 F : 平均圧縮強度 (MPa), X : セメント水比

4.5 まとめ

圧密処理された硬化後のモルタルおよびコンクリートの品質（ここでは、密度および圧縮強度）の定量評価を試みた。表-4.1に示した本実験の範囲では、以下のような知見が得られた。

- (1) 圧密処理された硬化後のモルタルおよびコンクリートの品質改善効果は、試験体全層にわたる。
- (2) 密度と圧縮強度の関係、平均密度と平均圧縮強度（それぞれ、試験体各層の密度および圧縮強度の平均）の関係には、それぞれ相関がある。
- (3) 脱水率と平均密度、脱水率と平均圧縮強度には、それぞれ相関がある。
- (4) 本実験で用いたモルタルおよびコンクリートの平均圧縮強度の推定式は、それぞれ下式で表すことができる。

$$F = 31.66X - 19.97 \quad (\text{モルタル}) \quad (4.5)$$

$$F = 47.80X - 47.44 \quad (\text{コンクリート}) \quad (4.6)$$

ここに、 F ：平均圧縮強度（MPa）， X ：セメント水比

第5章 真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよび フレッシュコンクリート中の間隙水圧分布の発生メカニズムに関する検討

5.1 概説

5.2 毛管張力が間隙水圧分布に及ぼす影響（実験Ⅰ）

5.3 粘性抵抗が間隙水圧分布に及ぼす影響（実験Ⅱ）

5.4 フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の 間隙水圧分布に及ぼす空気量の影響（実験Ⅲ）

5.5 まとめ

第5章 真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水 圧分布の発生メカニズムに関する検討

5.1 概説

畑中らが提案した真空脱水処理による品質改善効果の推定手法[2]をより汎用的なものにするためには、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性および真空脱水処理時の各試料中の間隙水圧分布を既知のものとして与える必要がある。第3章では、各試料に対する圧密理論の適用性を確認し、圧密モデルを決定する実験パラメータの定量化を試みた。本章では、これまで不明であった真空脱水処理時の試料中の間隙水圧分布の発生メカニズムを明らかにするため、主にモデル材料を用いた実験により検討する。

図-5.1 に加圧脱水と真空脱水によるコンクリートの密度分布の比較を示す[42]。同図によれば、真空脱水コンクリートの密度には深さ方向に分布が生じるが、圧密圧力 0.1MPa (大気圧相当) で圧密処理した試験体では全層で密度が増加し、深さ方向に分布は生じない。これは、真空脱水処理時に間隙水圧分布 (図-5.2 参照) が生じるためと考えられるが、その発生メカニズムは不明である。加圧脱水と比較すると、真空脱水処理では、間隙水圧が負圧になることで気泡が膨張してメニスカスが形成され、毛管張力が発生する可能性があること、短時間で液相が排出されること等の違いがある。

そこで本章では、真空脱水処理時の試料中の間隙水圧分布の発生メカニズムとして、毛管張力および液相の粘性抵抗について着目する。実験 I および II では、モデル材料を用いて、それぞれ毛管張力が間隙水圧分布に及ぼす影響および液相の粘性抵抗が間隙水圧分布に及ぼす影響について検討を行う。そして、実験 III では、真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布に及ぼす空気量の影響を検討する。

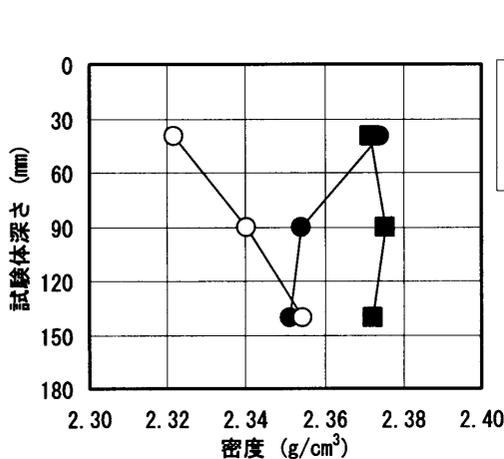


図-5.1 密度分布の一例
 (コンクリート) [42]

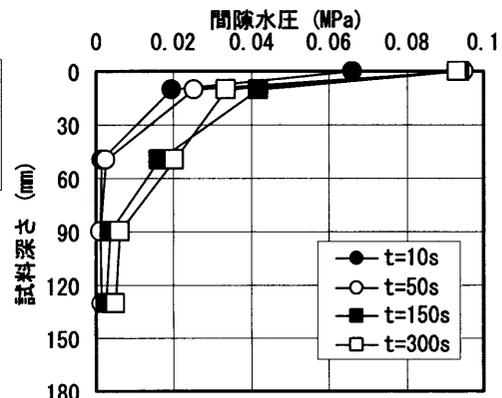


図-5.2 真空脱水処理時の間隙水圧分布
 の一例(コンクリート) [42]

5.2 毛管張力[103]が間隙水圧分布に及ぼす影響（実験1）

5.2.1 真空脱水処理時の毛管張力

図-5.3に、液相（水）、固相（固体粒子）、気相（空気泡）の3相にモデル化したコンクリートにおける真空脱水処理時の挙動を示す。真空脱水処理を行うと、主に液相が排出されてコンクリートの体積が減少し、固体粒子が密実に詰まってゆく（圧密現象）。この現象は、脱水面である試料上層部から徐々に進行していく。図-5.4に、図-5.3の初期状態と真空脱水処理時の拡大図を示す。真空脱水処理を行うと間隙水圧が負圧[2,4]となり、固体粒子間の距離が次第に小さくなる。そして、図-5.4 (b) に示すように、間隙水圧の低下とともに空気泡が膨張して固体粒子と接触する。固体粒子で囲まれた細管状の隙間にはメニスカスが形成されやすくなり、その部分には毛管張力が生じる。真空脱水処理時にこのようなメニスカスが形成されると、メニスカスより上の水に働く重力と毛管張力は吸引圧力に抵抗する力となり、それより下に伝達される吸引圧力が低減されると考えられる。なお、釣り合い状態は、図-5.5および式(5.1)で示される。

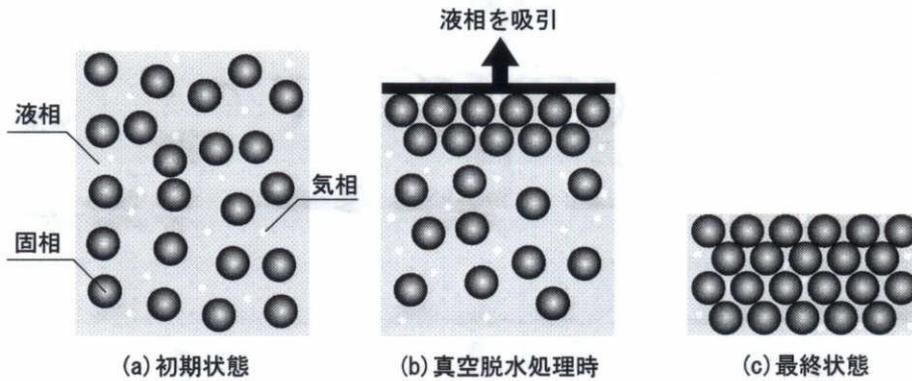


図-5.3 モデル化したコンクリートの真空脱水時の挙動

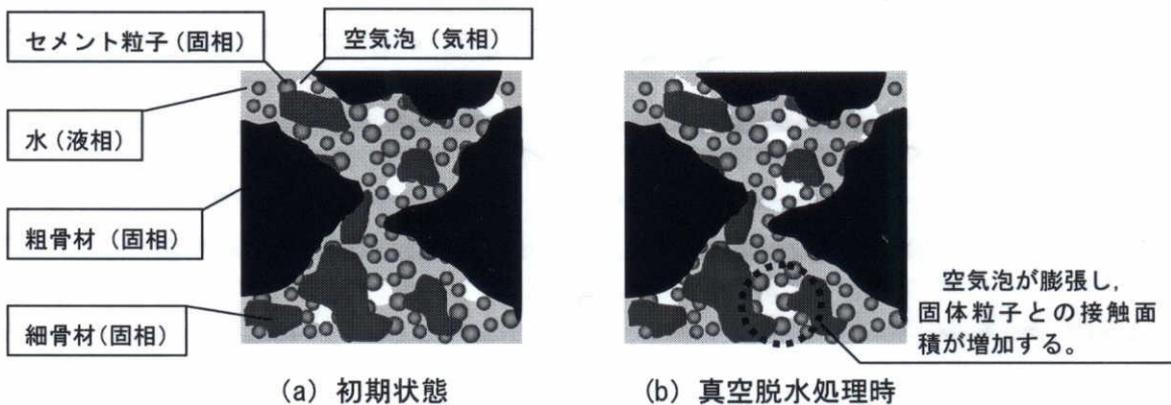


図-5.4 モデル化したコンクリート中の様子

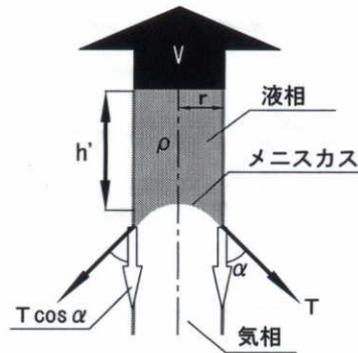


図-5.5 真空脱水処理時の毛管現象

$$\rho g \pi r^2 h' + 2\pi r T \cos \alpha = V \pi r^2 \quad (5.1)$$

ここで、 ρ :液体の密度(kg/m^3)、 g :重力加速度(m/s^2)、 r :毛管半径(m)、
 h' :メニスカスから吸引面の距離(m)、 T :表面張力(N/m)、
 α :メニスカスと毛管壁面との接触角($^\circ$)、 V :吸引圧(N/m^2)

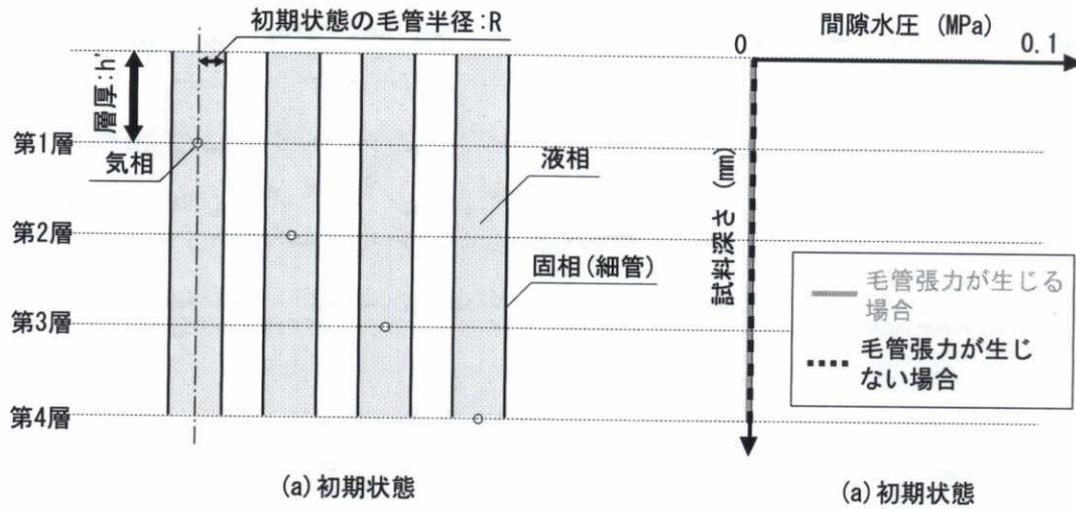
5.2.2 細管モデルを用いた解析

(1) 細管モデル

図-5.6に、真空脱水処理時のコンクリートの挙動をもとに提案した細管モデルの概要を示す。図-5.7に、真空脱水処理時のコンクリート中の間隙水圧分布(予想図)を示す。図中には、毛管張力が全く生じない場合も併記してある。

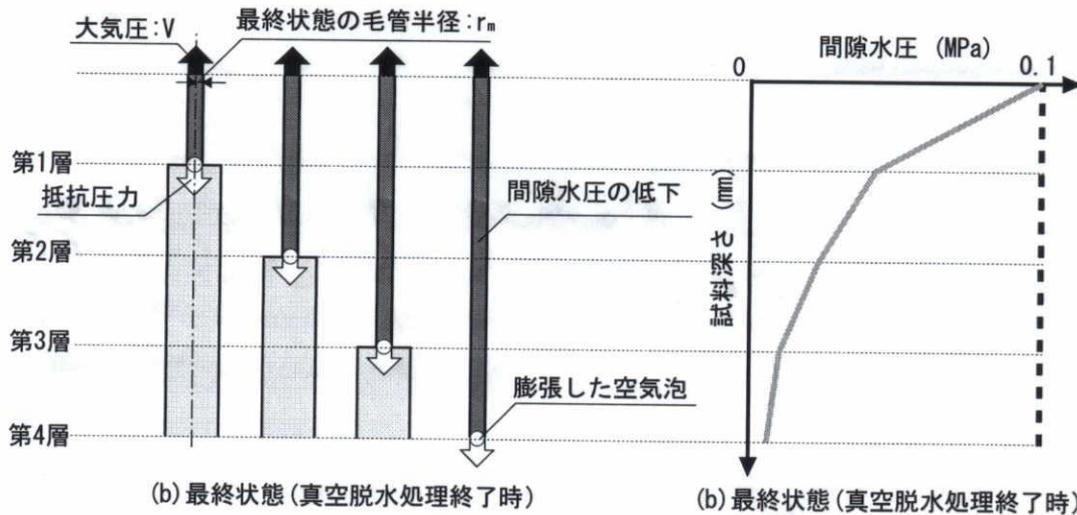
本モデルでは固体粒子間の距離を直径とする細管を考える。図-5.3に示したように、脱水されることにより固相は上層から密実に詰まっていくため、時間の経過とともに上層から細管の直径が小さくなってゆく。これは、間隙水圧が負圧になったことを意味しており、その層にある空気泡は膨張する。そして、膨張した空気泡は、細くなった細管の壁面に接することでメニスカスが形成される。メニスカスより上の水に働く重力と毛管張力は吸引圧力に抵抗する力となり、これらの抵抗値の合計が吸引圧力よりも大きくなった場合には、吸引圧力はその細管の下には伝達されなくなる。ここで、モデルを簡単にするために以下の条件を加えた。

- 1) 粘性抵抗の影響は、考慮しない。
- 2) メニスカスが形成された場合、それより下に吸引圧力は伝達されない。



(a) 初期状態

(a) 初期状態



(b) 最終状態 (真空脱水処理終了時)

(b) 最終状態 (真空脱水処理終了時)

図-5.6 細管モデルの概要

図-5.7 真空脱水処理時のコンクリート中の
 間隙水圧分布の予想図 (m=4)

(2) 解析概要

表-5.1 に、本解析で用いたパラメータを示す。間隙水圧の解析値は、式 (5.2) および式 (5.3) を用いて算出した。すなわち、間隙水圧は、吸引圧力によって生じる上向き力から、求める層より上に存在する水の自重および毛管張力によって生じる抵抗力 (図-5.5 および図-5.6(b) 参照) の総和を差し引いたものを各層での総細管断面積で除したものである。なお、最終状態の細管の半径は、毛管張力が大気圧と釣り合うとして式 (5.1) から算出できるが、初期状態の細管の半径は算出できないため、初期状態と最終状態の半径の関係を毛管半径比として、式 (5.4) で定義した。

表-5.1 パラメータ

大気圧: V (N/m ²)	100000
初期状態の細管本数: n_0 (本)	100
液体の密度: ρ (kg/m ³)	998.2
重力加速度: g (m/s ²)	9.8
層厚: h' (m)	0.05
表面張力: T (N/m)	0.07275
メニスカスと細管壁面との接触角: α (°)	10
毛管半径比: p	1.1

$$U_m = \frac{VA_m - \sum_{k=1}^m \{s_k W (\rho g \pi r_k^2 k h' + 2\pi r_k T \cos \alpha)\}}{A_m} \times 10^{-6} \quad (5.2)$$

$$A_m = \pi W \sum_{k=1}^m \left\{ (n_0 - s_k) \left(\frac{2T \cos \alpha}{V - \rho g k h'} \right)^2 \right\} + \pi s_m \left(\frac{2T \cos \alpha}{V - \rho g m h'} \right)^2 \quad (5.3)$$

添字は、第 m 層を示す。

ここで、 U_m : 第 m 層での間隙水圧 (MPa), V : 大気圧 (N/m²),
 A_m : 第 m 層での総細管断面積 (m²),
 s_m : 第 m 層で毛管張力が生じていない細管の本数 (本),
 W : 各層において毛管張力の生じる細管の割合(%), ρ : 液体の密度 (kg/m³),
 g : 重力加速度 (m/s²), r_m : 第 m 層の毛管半径 (m), h' : 層厚 (m),
 T : 表面張力 (N/m), α : メニスカスと細管壁面との接触角 (°),
 n_0 : 初期状態の細管の本数 (本)

$$p = \frac{R}{r_{\max}} \quad (5.4)$$

ここで、 p : 毛管半径比, R : 初期状態の毛管半径 (m),
 r_{\max} : 最下層の毛管半径 (m)

(3) 解析結果

図-5.8 に、抵抗力が水の自重および毛管張力である場合の間隙水圧分布の計算結果を示す。同図によれば、各層において毛管張力の生じる細管の割合 W が 60% の場合、実際の間隙水圧分布の測定結果と比較的よく対応していると思われる。図-5.9 に、抵抗力が水の自

重のみである場合の間隙水圧分布の計算結果を示す。図-5.8 および図-5.9 の比較から、間隙水圧分布は水の自重の影響をほとんど受けないといえる。

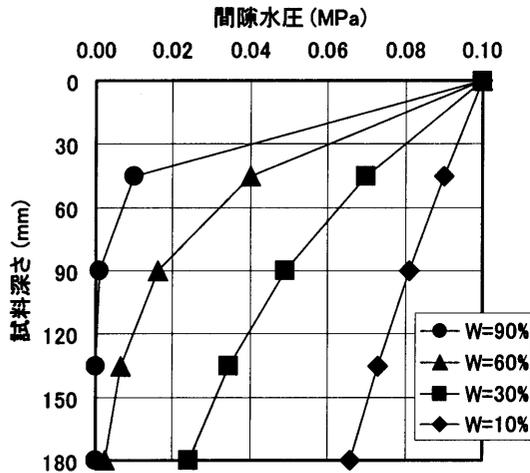


図-5.8 間隙水圧分布の計算結果
(抵抗力=水の自重+毛管張力)

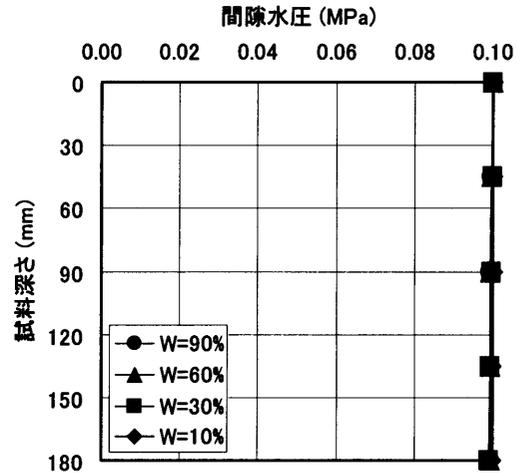


図-5.9 間隙水圧分布の計算結果
(抵抗力=水の自重)

5.2.3 モデル材料を用いた実験

細管（固体粒子間の間隙寸法）が細いほど毛管張力が大きくなることから、固体粒子間の間隙寸法を要因として間隙水圧の測定を行い、真空脱水処理時におけるモデル材料（珪砂および珪石粉）中の間隙水圧に及ぼす毛管張力の影響を検討する。

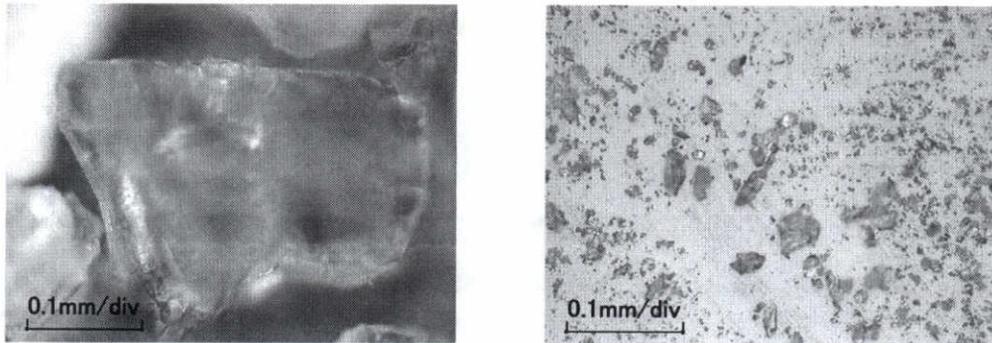
(1) 実験の要因水準および使用材料

本実験では、固体粒子間の間隙寸法を変化させるため、粒径の異なる5号珪砂、6号-3珪砂、8号珪砂、および珪石粉を用いた。表-5.2に使用材料および特性値を示す。使用材料を珪砂および珪石粉としたのは、セメントの水和反応の影響を取り除くためである。写真-5.1に、使用した珪砂(6号-3)および珪石粉の拡大写真を示す。

表-5.2 使用材料および特性値

使用材料		特性値
固相	珪砂 5号	ピーク目開きが $425\mu\text{m}$ でそのふるいに53.0%とどまるもの*, 絶乾密度: $2.58\text{g}/\text{cm}^3$
	珪砂 6号-3	ピーク目開きが $106\mu\text{m}$ でそのふるいに37.4%とどまるもの*, 絶乾密度: $2.60\text{g}/\text{cm}^3$
	珪砂 8号	$53\mu\text{m}$ ふるいに32.6%とどまるもの*, 絶乾密度: $2.56\text{g}/\text{cm}^3$
	珪石粉	比表面積: $3300\text{cm}^2/\text{g}$, 絶乾密度: $2.66\text{g}/\text{cm}^3$
液相	水	上水道水

*: JIS G 5901-1974を参照



(a) 珪砂[6号-3]

(b) 珪石粉

写真-5.1 使用したモデル材料の拡大写真

(2) 実験方法および測定項目

図-5.10 に試料の作製方法を示す。珪砂および珪石粉は、十分な水に24時間浸漬させた後、間隙水圧計を設置したφ150mmの型枠にジッキングを行いながら打設した。5号、6号-3、8号珪砂は打設後30分、珪石粉は打設後8時間それぞれ静置した後に、上層に溜まった水と試料高さが180mmになるように余分な試料を取り除いてから、20分間の真空脱水処理を行った。図-5.11 に実験装置の概要を示す。

測定項目は、吸引圧、間隙水圧分布の時刻歴および空気量である。間隙水圧計は、深さ10、50、90、130mmの位置に、ピアノ線で作製した骨組みで固定した。空気量の測定は、試料をモルタル用エアメータ容器にジッキングしながら打設し、5号、6号-3、8号珪砂は打設後30分、珪石粉は打設後8時間それぞれ静置した後に、試料をすり切ってから計測した。

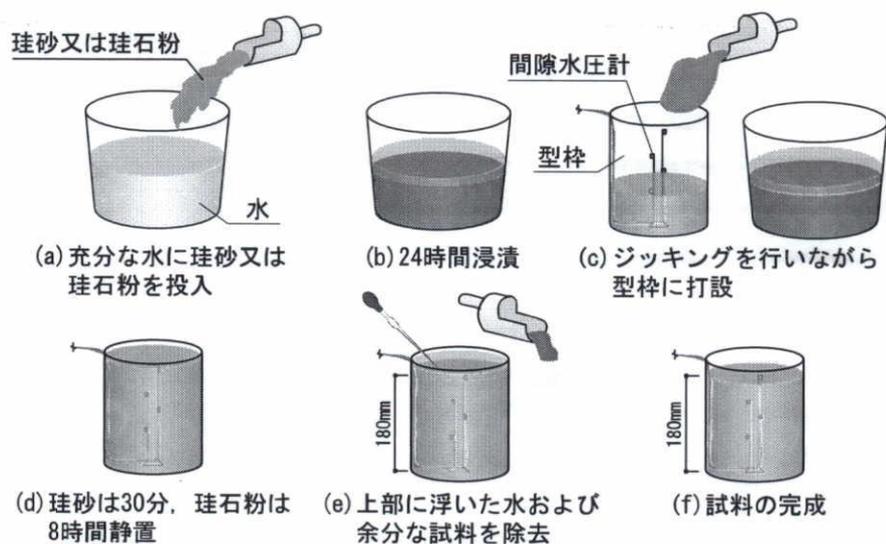


図-5.10 試料の作製方法

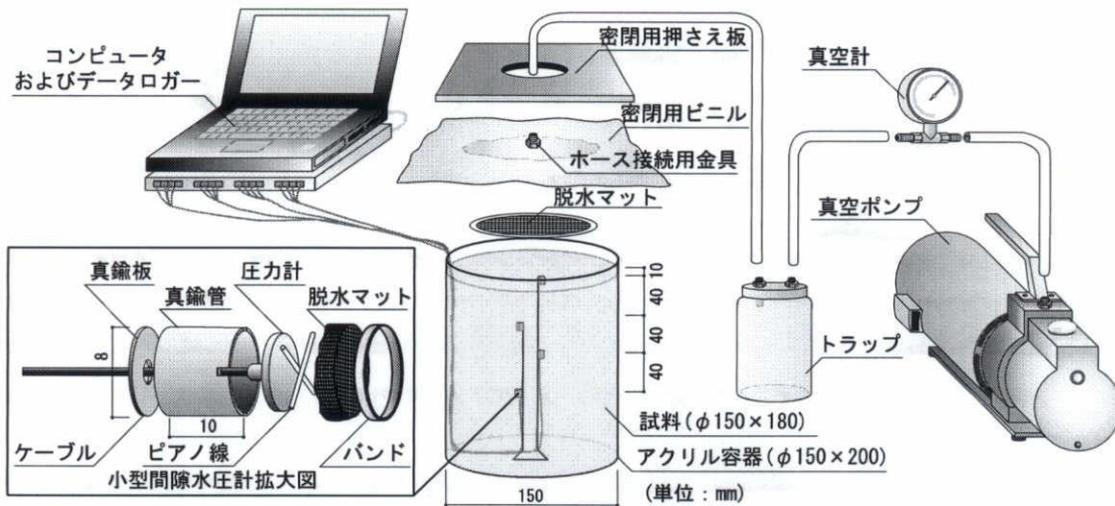
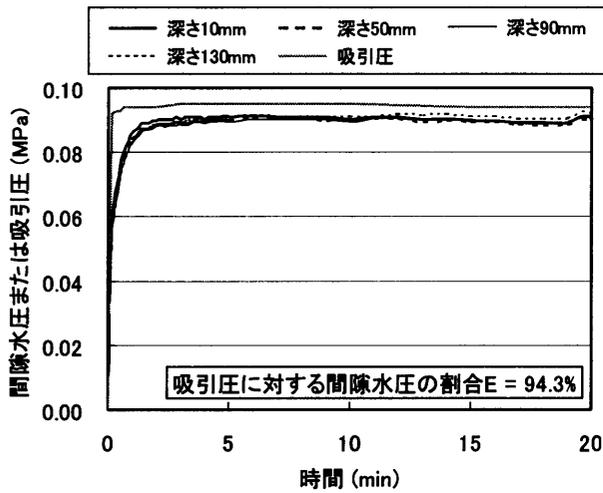


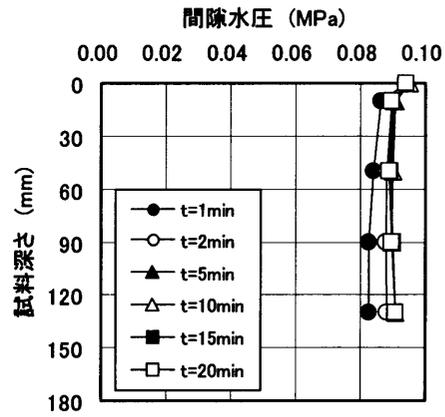
図-5.11 実験装置の概要

(3) 実験結果および考察

図-5.12 に、間隙水圧分布の時刻歴を示す。試料深さ 0mm での間隙水圧は、吸引圧を示している。ここで、各層の間隙水圧の面積 ($\text{MPa}\cdot\text{min}$) を吸引圧の面積 ($\text{MPa}\cdot\text{min}$) で除したものの平均を、吸引圧に対する間隙水圧の割合 E と定義する。吸引圧に対する間隙水圧の割合 E は、毛管張力の影響の大小を表すもので、この値が大きいほど、毛管張力の影響が小さいことを示す。同図の各 (i) に、吸引圧に対する間隙水圧の割合 E を併示する。同図によれば、グラフの形状から、5号、6号-3、8号珪砂では間隙水圧に分布が生じていないが、珪石粉は間隙水圧に分布が生じていることが分かる。また、吸引圧に対する間隙水圧の割合 E に着目すると、珪石粉がほかに比べて小さな値になっている。これは、珪石粉は5号、6号-3、8号珪砂に比べて固体粒粒子間の間隙寸法が小さく、毛管張力の影響が顕著になったことが理由と思われる。なお、試料深さ 0mm から試料深さ 10mm までの間隙水圧の低下分は、脱水マットおよびホースの抵抗と考えられる。

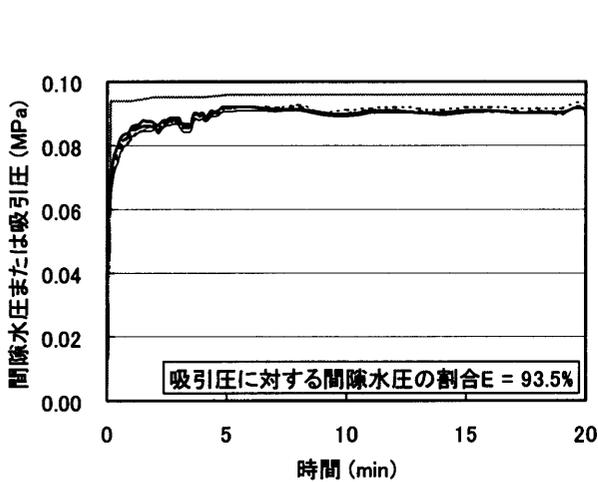


(i) 連続的な時刻歴

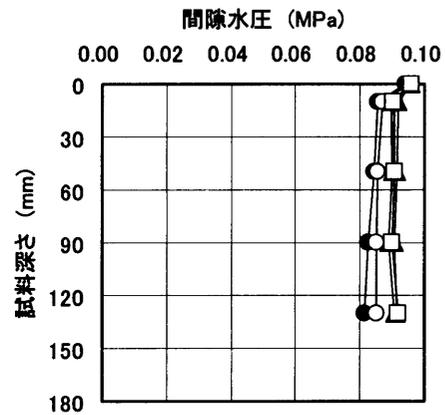


(ii) 離散的な時刻歴

(a) 5号珪砂 [Air=2.1%]

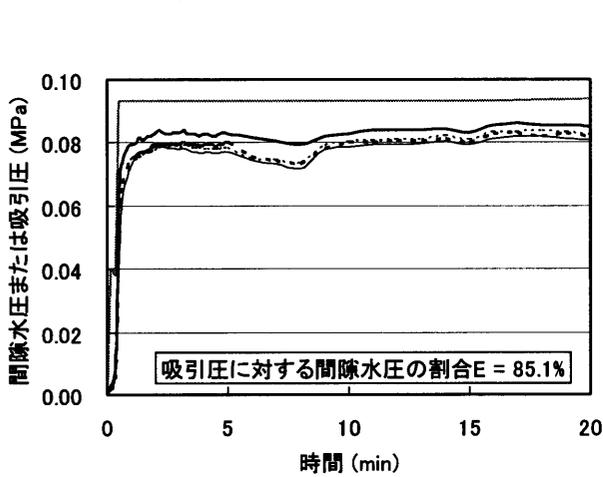


(i) 連続的な時刻歴

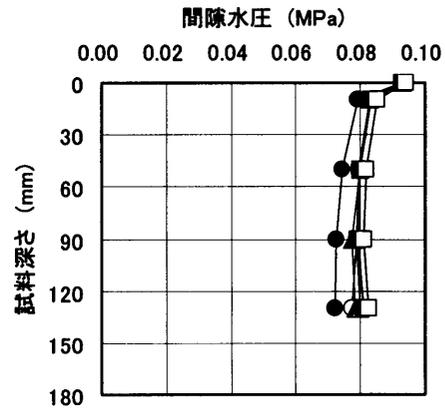


(ii) 離散的な時刻歴

(b) 6号-3珪砂 [Air=1.5%]



(i) 連続的な時刻歴



(ii) 離散的な時刻歴

(c) 8号珪砂 [Air=0.8%]

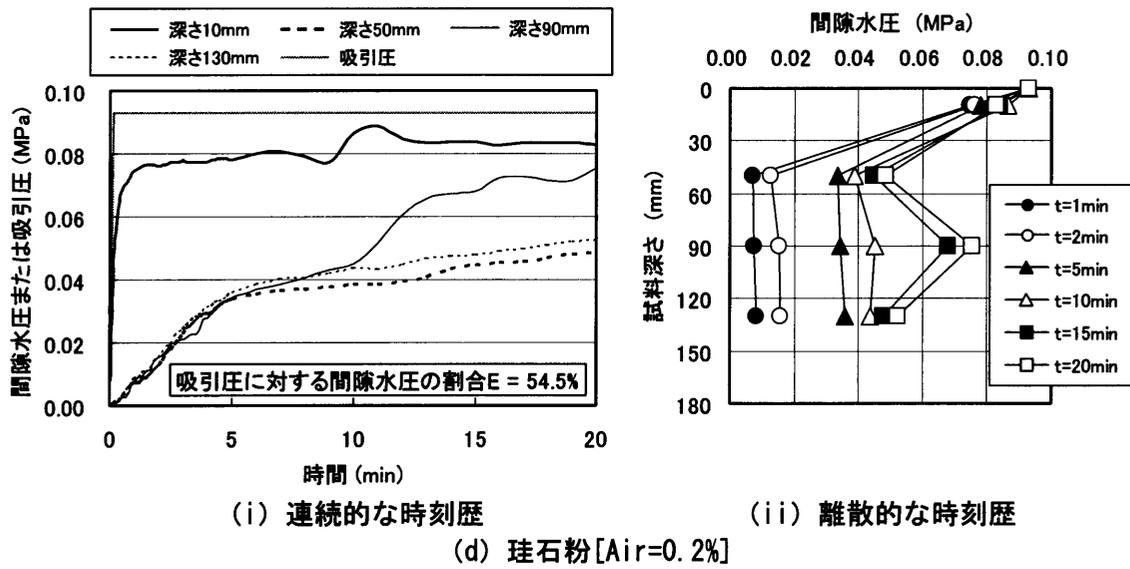


図-5.12 間隙水圧の時刻歴

以上の結果から、真空脱水処理では、間隙水圧が負圧になることで空気泡が膨張して毛管張力が発生し、下層への吸引圧の伝達が漸減するために間隙水圧に分布が生じる可能性があることが示唆された。

5.3 粘性抵抗が間隙水圧分布に及ぼす影響（実験II）

5.3.1 真空脱水処理時の粘性抵抗

水、油、空気などの流体中を運動する物体は、流体から物体の運動を妨げようとする抵抗を受ける。これは、変形に対して抵抗を示す流体の性質、いわゆる流体の粘性に起因するものである[104]。図-5.13に示すように、細い管を液体または気体が通るとき、管の中央部で最も速く、管壁に近い部分では遅くなる。その時の流速分布および平均流速は、それぞれ式(5.5)および式(5.6)で示すことができ、ハーゲン・ポアジュールの法則とよばれ、層流のときに成立する[105]。

$$u = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} (r_0^2 - r^2) \quad (5.5)$$

$$v = \frac{(p_1 - p_2)r_0^2}{8\mu l} \quad (5.6)$$

ここで、 u ：流速 (m/s)， $p_1 - p_2$ ：2断面間の圧力差 (Pa)， r_0 ：円管の半径 (m)，
 r ：円管の中心からの距離 (m)， μ ：粘性係数 (Pa・s)，
 l ：2断面間の距離 (m)，

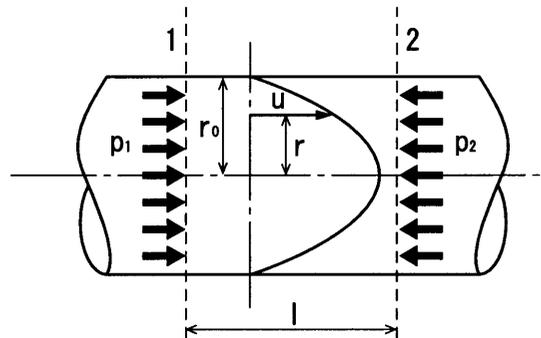


図-5.13 細管内における流速分布

前述したように、真空脱水処理を行うと、主に液相が排出されてコンクリートの体積が減少し、固体粒子が密実に詰まってゆく（圧密現象）。この現象は、脱水面である試料上層部から徐々に進行していく。図-5.14(b)に示すように、液相は、固体粒子で囲まれた細管状の隙間を移動し、排水面に到達する。このとき、細管壁（固相）と液相との間には粘性抵抗が生じることで吸引圧が低減され、間隙水圧に分布が生じると考えられる。また、圧密現象が進展していくにつれて、細管がより複雑になることで、液相が固相と接触する面積が増加し、液相の粘性抵抗による影響の度合いが大きくなると考えられる。

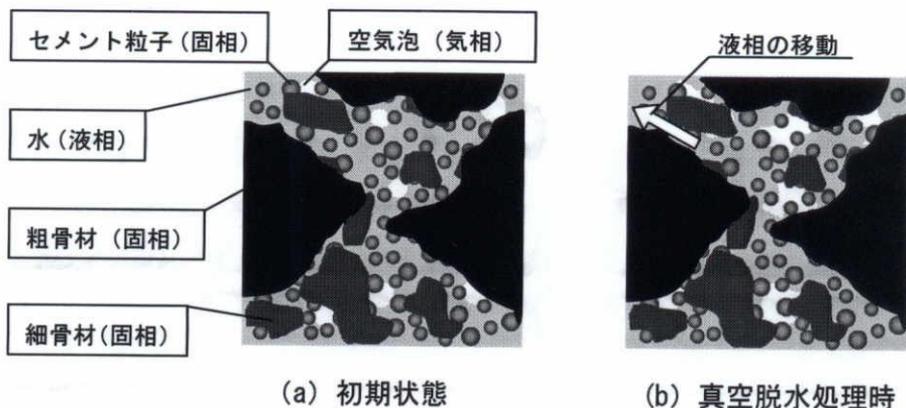


図-5.14 モデル化したコンクリート中の様子

5.3.2 モデル材料を用いた実験

液相の粘性および固体粒子の粒径を要因として間隙圧分布の測定を行い、真空脱水処理時におけるコンクリート中の間隙圧分布に及ぼす液相の粘性抵抗の影響を検討する。

(1) 実験の要因水準および使用材料

表-5.3 に実験の要因水準を示す。本実験では、液相の粘性抵抗の大小による間隙圧分布の違いを評価するため、細管の表面積を変化させることを目的として固相の粒径を、また、固相条件を一定とした場合の液相の粘性抵抗を変化させるために液相の粘度をそれぞれ変化させて実験を行った。表-5.4 に使用材料および特性値を示す。液相の粘度は、20℃の環境下でB型回転粘度計を用いて計測した実測値である。なお、使用材料を珪砂および珪石粉としたのは、セメントの水和反応の影響を取り除くためである。

表-5.3 実験の要因水準

要因	水準
固相の粒径	珪砂(6号-3), 珪石粉
液相の粘度(Pa·s)	0.002(水), 0.061(油)

表-5.4 使用材料および特性値

使用材料		特性値
固相	珪砂(6号-3)	ピーク目開きが $106\mu\text{m}$ でそのふるいに37.4%とどまるもの*, 絶乾密度: $2.60\text{g}/\text{cm}^3$
	珪石粉	比表面積: $3300\text{cm}^2/\text{g}$, 絶乾密度: $2.66\text{g}/\text{cm}^3$
液相	水	上水道水, 粘度: $0.002\text{Pa}\cdot\text{s}$
	油	食用なたね油, 粘度: $0.061\text{Pa}\cdot\text{s}$

*: JIS G 5901-1974を参照

(2) 実験方法および測定項目

図-5.15 に試料の作製方法を示す。珪砂又は珪石粉を、十分な水又は油に 12 時間浸漬させた後、間隙水圧計を設置した $\phi 150\text{mm}$ の型枠にジッキングを行いながら打設した。打設後 60 分間静置した後に、試料高さが 180mm になるように上層に溜まった水又は油および余分な試料を取り除いてから、20 分間の真空脱水処理を行った。図-5.16 に実験装置の概要を示す。

測定項目は、第5章2節3項(3)と同様である。

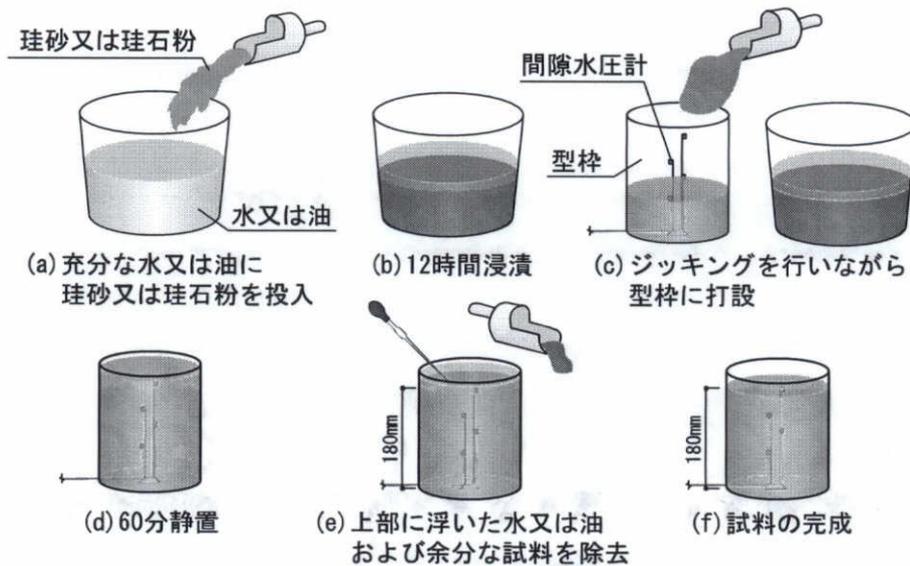


図-5.15 試料の作製方法

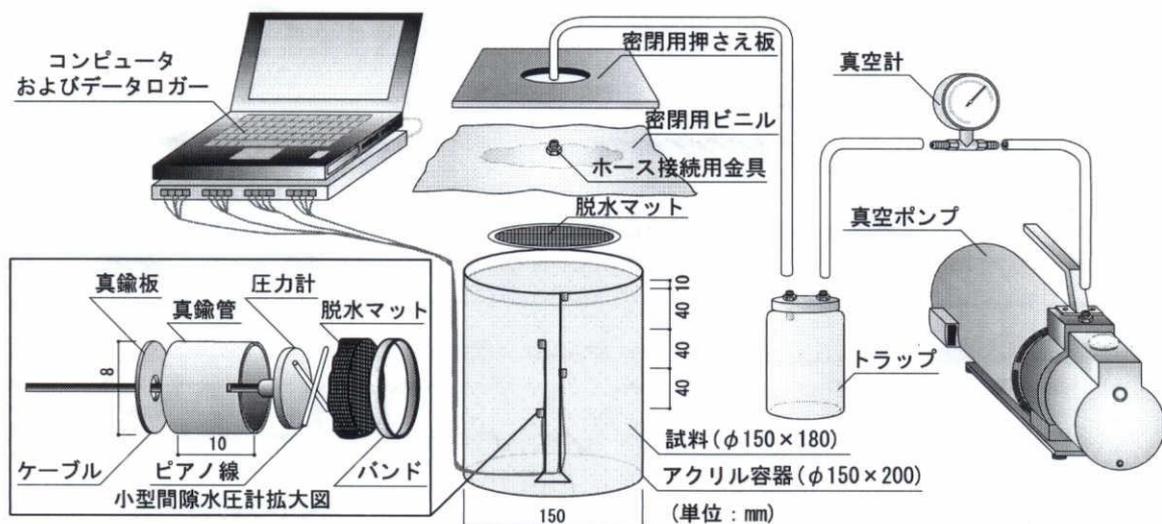


図-5.16 試料の作製方法

(3) 実験結果および考察

図-5.17に、間隙圧分布の時刻歴を示す。試料深さ0mmでの間隙圧は、吸引圧を示している。同図の各(i)に、吸引圧に対する間隙圧の割合 E を併示する。吸引圧に対する間隙圧の割合 E は、粘性抵抗の影響の大小を表すもので、この値が大きいほど、粘性抵抗の影響が小さいことを示す。

まず、間隙圧に及ぼす液相の粘度の影響については、同図(a)および(b)によれば、グラフの形状から、液相の粘度が小さい場合(液相:水)では、間隙圧に深さ方向の分布は生じないが、液相の粘度が大きい場合(液相:油)では、間隙圧に分布が生じることが分かる。また、吸引圧に対する間隙圧の割合 E に着目すると、液相の粘度が小さい場合(液相:水)の方が、液相の粘度が大きい場合(液相:油)に比べて小さな値となっている。これは、液相の粘度が増すと、液相と固相との間の粘性抵抗が大きくなるためと考えられる。

次に、間隙圧に及ぼす固相の粒径(細管の表面積)の影響については、同図(b)および(c)によれば、グラフの形状から、固相の粒径が小さい場合(固相:珪石粉)では、処理継続時間20分では、深さ10mm程度までしか圧密されていないことが分かる。吸引圧に対する間隙水圧の割合 E に着目すると、固相の粒径が小さい場合(固相:珪石粉)の方が、固相の粒径が大きい場合(固相:珪砂)に比べて極端に小さい値となっている。これは、珪石粉は粉体であるため、液相が固相と接触する面積が増加し、粘性抵抗の影響が極端に大きくなったためと考えられる。

以上の結果から、真空脱水処理では、強制的な液相の移動により粘性抵抗が生じ、下層への吸引圧の伝達が漸減するために間隙水圧に分布が生じる可能性があることが示唆された。

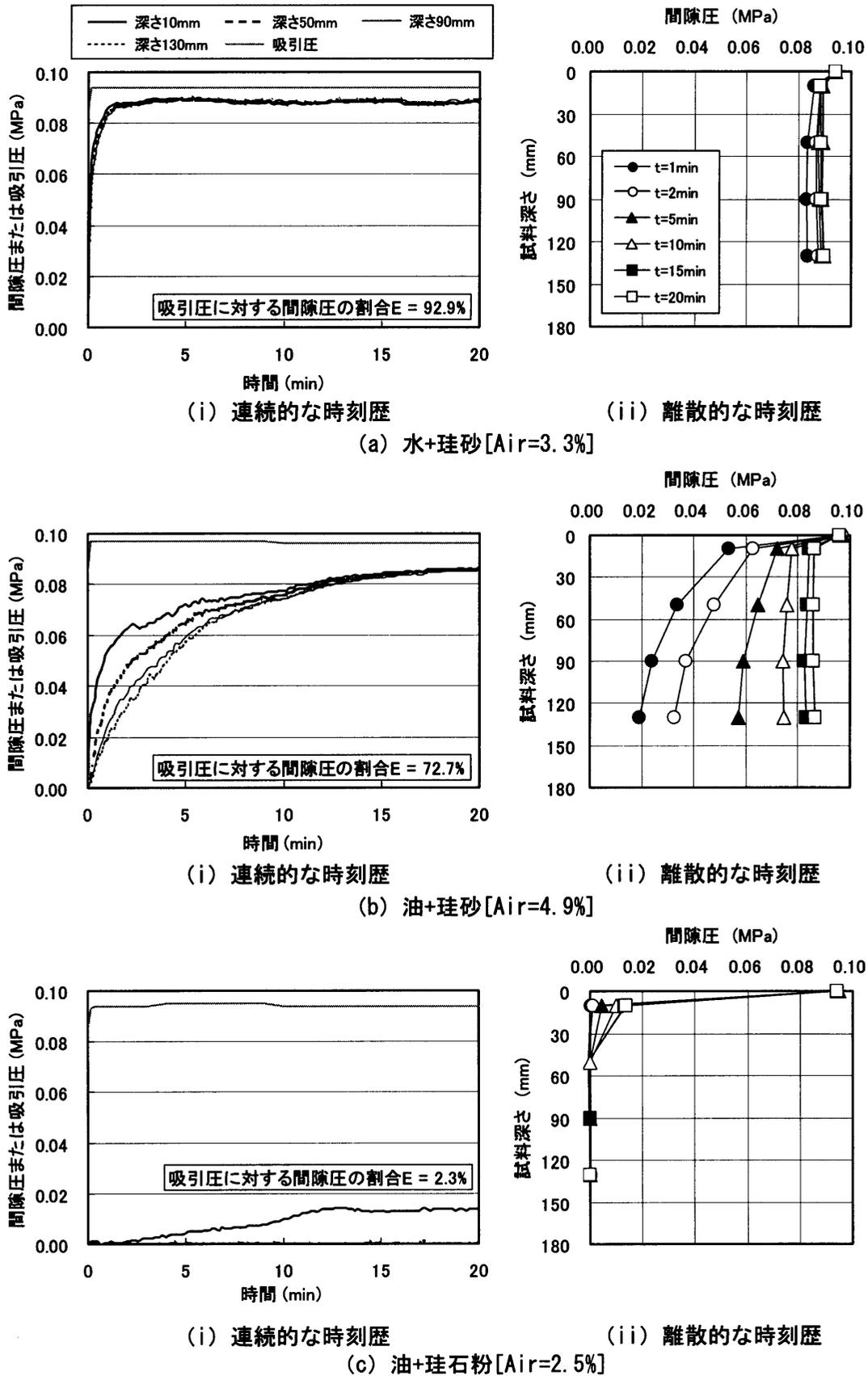


図-5.17 間隙水圧分布の時刻歴

5.4 フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布に及ぼす空気量の影響 (実験 III)

真空脱水処理時におけるフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布に及ぼす空気量の影響を検討する。

5.4.1 実験の要因水準および調合表

表-5.4 に実験の要因水準を示す。モルタルおよびコンクリートの空気量は、混和剤により調節した。表-5.5 に、モルタルおよびコンクリートの調合表を示す。

表-5.4 実験の要因水準

要因		水準
試料		モルタル, コンクリート
空気量 (%)	モルタル	0.5, 6.8, 11.0
	コンクリート	0.1, 5.1, 9.6

表-5.5 調合表

(a) モルタル

W/C (%)	s/m	単位置量(kg/m ³)			混和剤添加率 (%)			実測値	
		W	C	S	SP/C	AE/C	AF/C	FL (mm)	Air (%)
50	0.50	265	529	1295	0.45	-	0.004	263.5	0.5
					0.45	0.006	-	239.0	6.8
					0.38	0.050	-	232.5	11.0

[註] W/C: 水セメント比, s/m: 細骨材容積比, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, SP: 高性能AE減水剤, AE: 空気連行剤, AF: 消泡剤, FL: フロー値, Air: 空気量

(b) コンクリート

W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	単位置量(kg/m ³)				混和剤添加率 (%)			実測値	
			W	C	S	G	SP/C	AE/C	AF/C	SL (mm)	Air (%)
50	50	13	176	353	863	887	0.85	-	0.004	19.5	0.1
							0.85	0.0041	0.002	19.0	5.1
							0.80	0.0200	-	20.5	9.6

[註] W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, G_{max}: 粗骨材最大寸法, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, SP: 高性能AE減水剤, AE: 空気連行剤, AF: 消泡剤, SL: スランプ, Air: 空気量

5.4.2 実験方法および測定項目

モルタルおよびコンクリートを、間隙水圧計を設置したφ150mmの型枠にジッキングを行いながら打設した。打設後、温度20℃・相対湿度60%の恒温恒湿槽内で120分間静置した後に、20分間の真空脱水処理を行った。実験装置の概要は、図-5.16と同様である。

測定項目は、空気量、吸引圧、間隙水圧分布の時刻歴である。間隙水圧計は、深さ10, 50, 90, 130mmの位置に、ピアノ線で作製した骨組みで固定した。

5.4.3 実験結果および考察

図-5.18(a)～(c)にモルタルを、また、図-5.19(a)～(c)にコンクリートの間隙水圧分布の時刻歴をそれぞれ示す。試料深さ0mmでの間隙水圧は、吸引圧を示している。両図(a)～(c)の各(i)に、吸引圧に対する間隙水圧の割合 E を併示する。吸引圧に対する間隙水圧の割合 E は、空気量の影響の大小を表すもので、この値が大きいほど、空気量の影響が小さいことを示す。両図のグラフの形状から、試料および空気量によらず、間隙水圧に分布が生じることが分かる。

図-5.20に、吸引圧に対する間隙水圧の割合 E と空気量の関係を示す。同図によれば、モルタルでは、空気量が多いほど、吸引圧に対する間隙水圧の割合 E は小さくなっている。一方、コンクリートでは、空気量に関わらず、吸引圧に対する間隙水圧の割合 E は一定である。以上の結果から、モルタルでは、間隙水圧分布の発生メカニズムの原因として空気量の影響が考えられるが、コンクリートでは、他の要因の影響が支配的であることが分かる。この原因は、実験Iの結果を踏まえると、構成材料の粒径の違いによると考えられる。また、空気量が少ない場合の吸引圧に対する間隙水圧の割合 E に注目すると、モルタルの方がコンクリートより大きくなっている。この原因は、実験IIの結果を踏まえると、今回の調合では、モルタルに比べてコンクリートの方が液相の量が少なく、液相と固相が接する面積が増すことで、粘性抵抗が大きくなったためと考えられる。

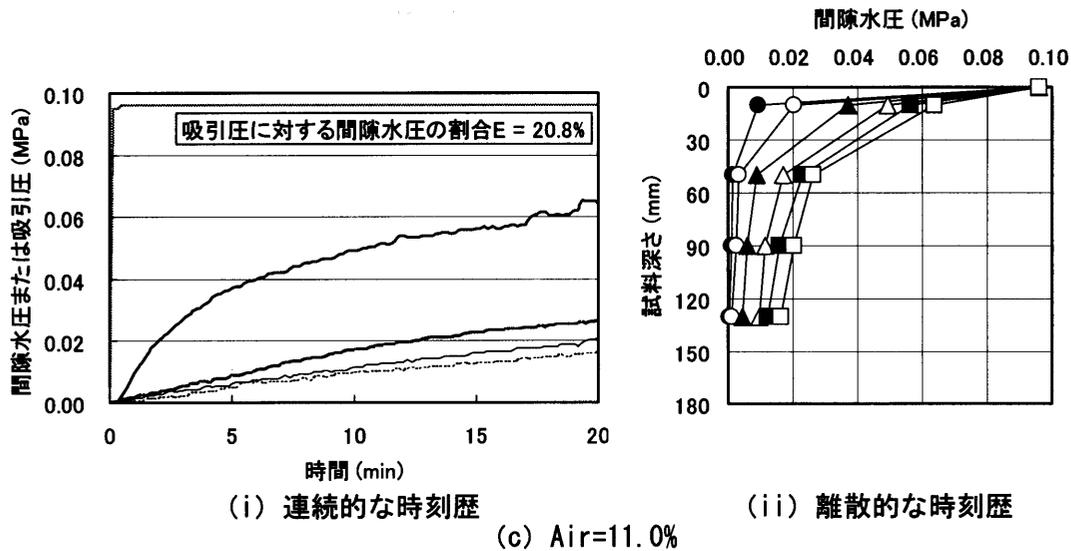
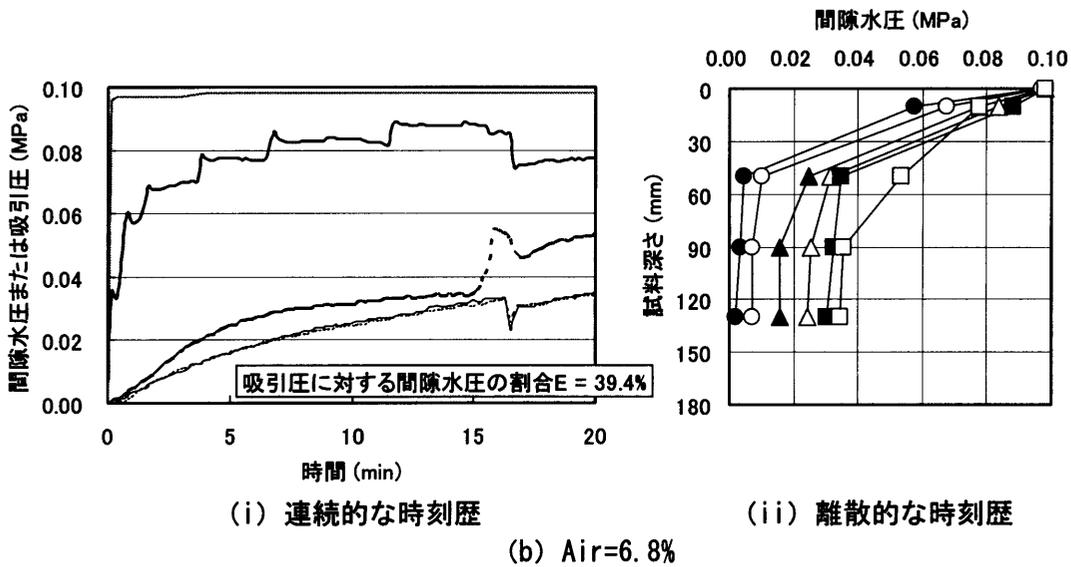
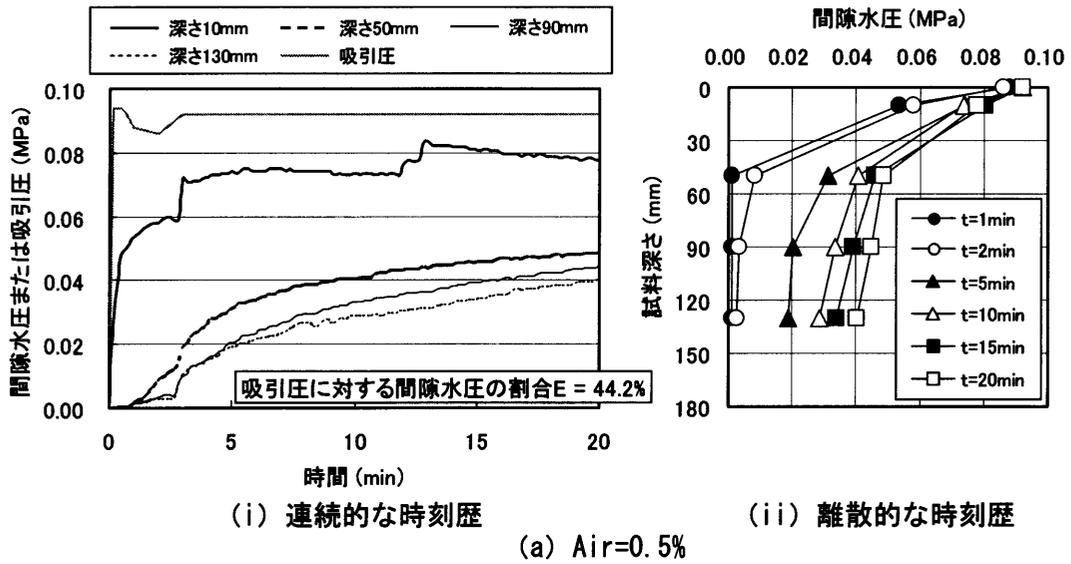


図-5.18 モルタルの間隙水圧分布の時刻歴

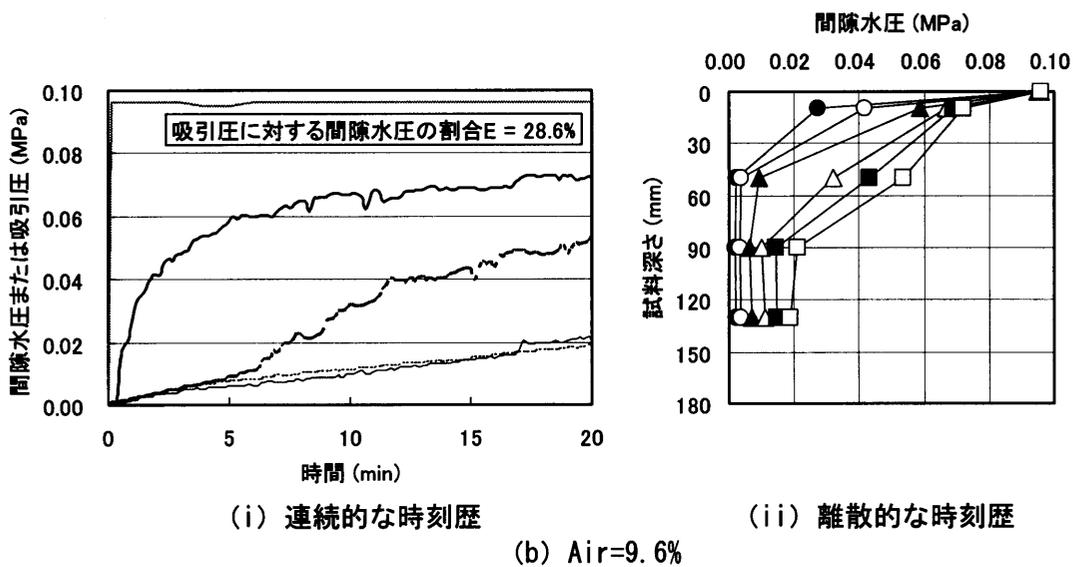
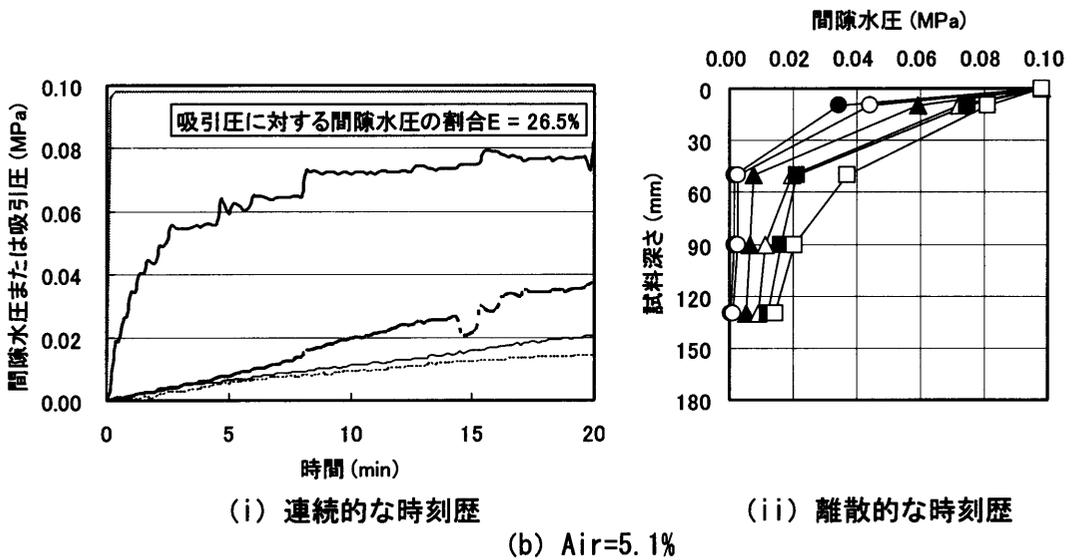
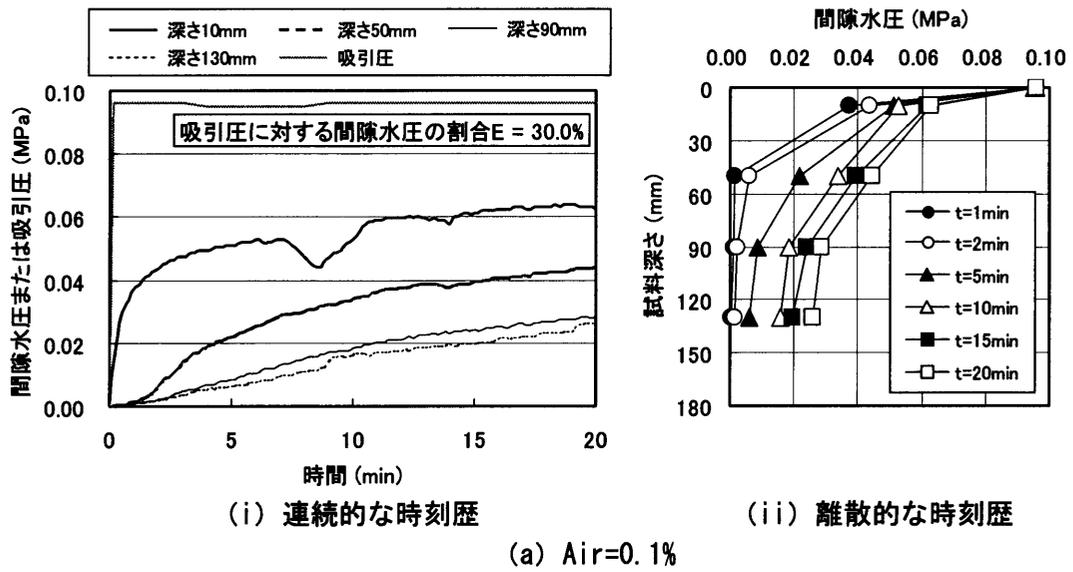


図-5.19 コンクリートの間隙水圧分布の時刻歴

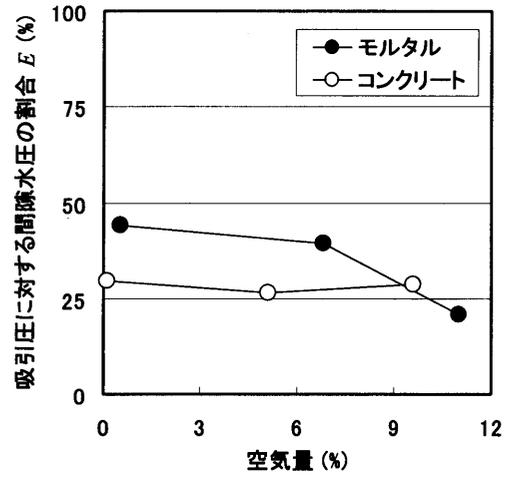


図-5.20 吸引圧に対する間隙水圧の割合 E と空気量の関係

5.5 まとめ

毛管張力および粘性抵抗に着目して、真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布の発生メカニズムについて、モデル材料を使った検討を行った。本実験の範囲では、以下のことが明らかになった。

- (1) 間隙水圧が負圧になることでメニスカスが形成されて毛管張力が生じ、下層への吸引圧力の伝達が漸減するために間隙水圧に分布が生じる可能性がある。
- (2) 強制的な液相の移動により粘性抵抗が生じ、下層への吸引圧力の伝達が漸減するために間隙水圧に分布が生じる可能性がある。

今後、真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布に及ぼす毛管張力および粘性抵抗の寄与率を明らかにするとともに、毛管張力および粘性抵抗以外の要因が間隙水圧分布に及ぼす影響についても検討する必要がある。

第5章 真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の
間隙水圧分布の発生メカニズムに関する検討

第6章 改良型透水・脱水モデルによるコンクリートの品質改善効果の推定

6.1 概説

6.2 ブリーディング現象への適用

6.3 透水性型枠工法への適用

6.4 まとめ

第6章 改良型透水・脱水モデルによるコンクリートの品質改善効果の推定

6.1 概説

図-6.1に、圧密理論の適用のためのモデルを示す。加圧脱水工法では加圧力が、真空脱水処理工法では大気圧が、それぞれ短期間に作用する圧密現象と考えられ、透水性型枠工法およびブリーディング現象では、試料の重量が長期間に作用する圧密現象であると考えられる。なお、加圧脱水工法および真空脱水処理工法においても試料の重量が長期間に作用するが、その影響は加圧力および大気圧によって生じる圧密現象の影響に比べて十分に小さいと考えて、本研究では考慮しない。

本章では、様々な現象および工法の中から、ブリーディング現象および透水性型枠工法を取り上げ、畑中ら[2]が提案した真空脱水コンクリートの品質改善効果の推定手法を改良して、本研究により得られた結果を用いた密度分布および圧縮強度分布の推定手法の適用を試みる。

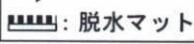
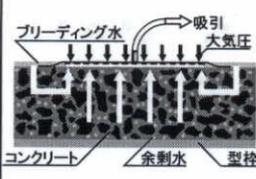
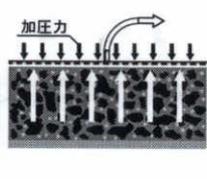
作用力が作用する期間	短期間		長期間	
作用力	加圧力	大気圧	試料の重量	
工法名あるいは現象名	加圧脱水工法	真空脱水処理工法	透水性型枠工法	ブリーディング現象
<p>モデル</p> <p>⇒: 水の移動 : 脱水マット</p>				

図-6.1 圧密理論の適用のためのモデル

6.2 ブリーディング現象への適用

6.2.1 コンクリートの密度分布および圧縮強度分布の推定フロー

図-6.2に、ブリーディング現象によるコンクリートの密度分布および圧縮強度分布の推定フローを示す。

本解析では、図(b)に示すように、各層ごとに試料重量を圧密圧力として作用させる。各層ごとの最終のブリーディング量は、圧密圧力および単位水量によって決まる最終圧密量の実験式[図(c)参照]を用いることで求められる。ブリーディング現象によるコンクリート内部の密度分布および圧縮強度分布の時刻歴[図(a)中の破線]は、最終圧密量の実験式[図(c)参照]、理論圧密度50%になる時間 t_{50} の実験式[図(d)参照]および第3章で示した圧密理論式[図(e)に示す圧密量の時刻歴]を用いることで求めることができる。

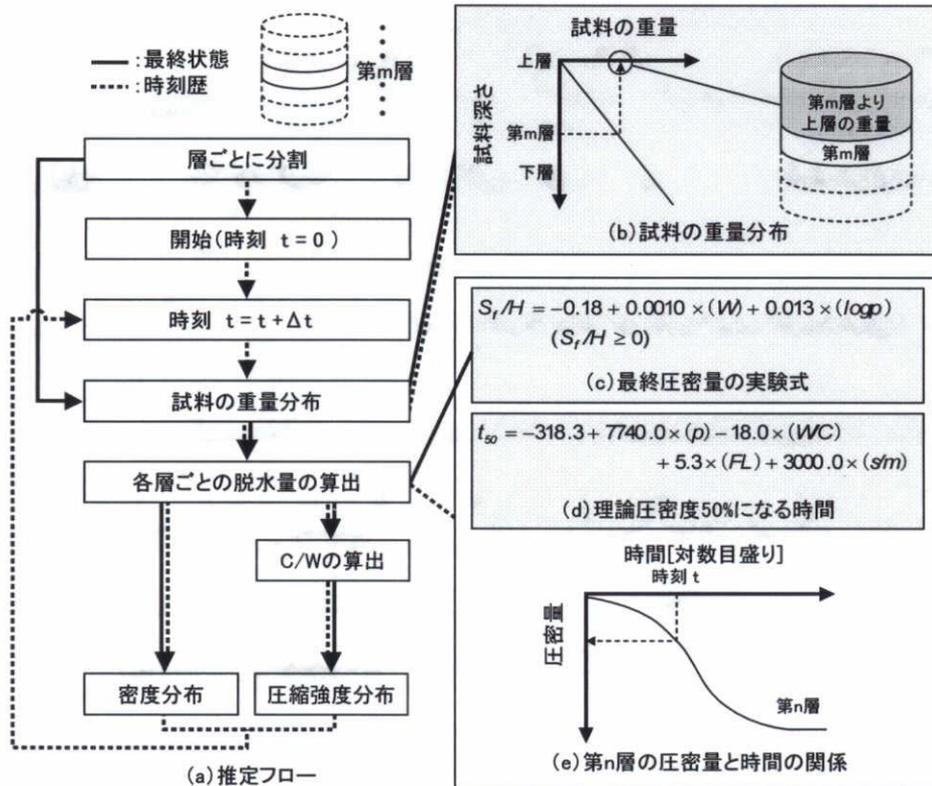


図-6.2 ブリーディング現象によるコンクリートの密度分布および圧縮強度分布の推定フロー (畑中らの推定方法[2]に加筆・修正：ハッチ部分)

6.2.2 モルタルを用いた推定フローによる解析

第3章および第4章で得られた実験結果を用いて、モルタルを用いた推定フローによる解析を行う。表-6.1に、本解析に用いるモルタルの調合表を示す。本解析に用いる試験体の寸法は試験体高さ 18cm とし、圧密処理終了時の密度および圧縮強度分布を求め、実測値との比較も行う。

表-6.1 モルタルの調合表

W/C (%)	s/m	目標値		単位量(kg/m ³)		
		FL (mm)	Air (%)	W	C	S
50	0.50	220	6.8	265	529	1295

[註] W/C:水セメント比, s/m:細骨材容積比, FL:フロー値, Air:空気量, W:水, C:セメント, S:細骨材

(1) 試料重量による圧力分布

図-6.3に、試料重量による圧力分布を示す。深さ z (cm) における圧力の算定には、式(6.1)を用いた。

$$u = \sum U_p \times g \times z \times 10^{-8} \quad (6.1)$$

ここに、 u : 試料重量による圧力 (MPa), $\sum U_p$: 無処理のモルタルの単位量 (kg/m³), g : 重力加速度 (m/s²), z : 試験体深さ (cm)

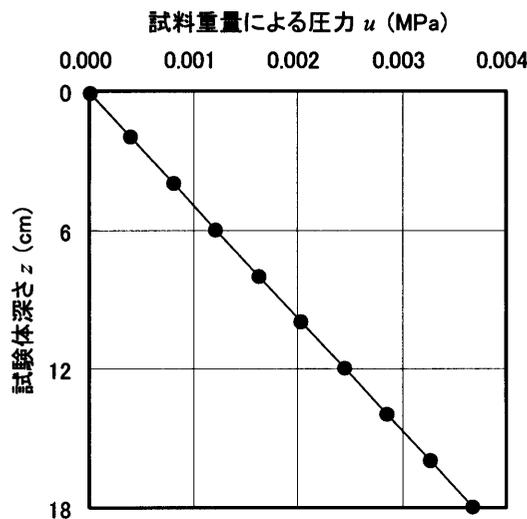


図-6.3 試料重量による圧力分布

(2) 最終圧密量

第3章では、最終圧密量 S_f と単位水量 W には強い相関が見られるという知見が得られた。また、畑中ら[2]によれば、最終圧密量 S_f と圧密圧力 p の対数値は、圧密圧力 $p=0.013\sim 0.132\text{MPa}$ の範囲で直線になると仮定できるとしており、本実験で採用した圧密圧力 $p=0.05\sim 0.15\text{MPa}$ の範囲でも同様であると考えられる。以上のことを踏まえ、最終圧密量 S_f 、単位水量 W および圧密圧力 p の対数値を変数として重回帰分析を行って得られた式(6.2)を用いて、最終圧密量を算出する。

$$S_f/H = -0.18 + 0.0010 \times (W) + 0.013 \times (\log p) \quad (S_f/H \geq 0) \quad (6.2)$$

(補正 $R^2=0.91$)

ここに、 S_f : 最終圧密量 (cm), H : 片面透水の層厚 (cm), W : 単位水量 (kg/m^3),
 p : 圧密圧力 (MPa)

(3) 密度分布

密度の推定値は、各層の S_f/H を式(6.2)より求め、式(6.3)に代入することで求めることができる。

$$\gamma = \{(\sum U_p - S_f/H \times_w \gamma \times 1000)/(1 - S_f/H)\} / 1000 \quad (6.3)$$

ここで、 γ : 密度 (g/cm^3), $\sum U_p$: 調合上の単位量の総和 (kg/m^3),
 S_f : 最終圧密量 (cm), H : 片面透水の層厚 (cm),
 $_w \gamma$: 密度 ($=1.0\text{g/cm}^3$)

図-6.4に、密度分布の実測値と解析値の比較を示す。同図によれば、実測値の方が解析値より大きくなるものの、解析値は実測値と同様に、上層ほど密度が小さくなる傾向が再現された。解析値が実測値より小さくなる原因として、式(6.2)の実験式の誤差および試験体の締固めの違いが考えられる。

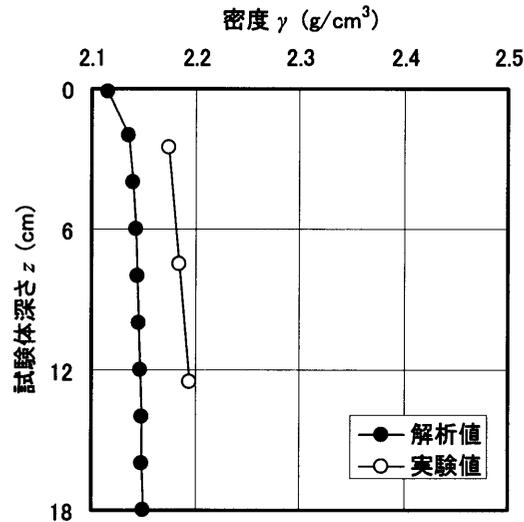


図-6.4 密度分布の実測値と解析値の比較

(4) 圧縮強度分布

セメント水比の推定値は、各層の S_f/H を式 (6.2) より求め、式 (6.4) ~ 式 (6.6) に代入することで求めることができる。第4章で求めたセメント水比と圧縮強度の実験式である式 (6.7) に、求めたセメント水比を代入することで圧縮強度の推定値を求めることができる。

$${}_wU_B = ({}_wU_P - S_f/H \times {}_w\gamma \times 1000) / (1 - S_f/H) \quad (6.4)$$

$${}_cU_B = {}_cU_P / (1 - S_f/H) \quad (6.5)$$

$$C/W = {}_cU_B / {}_wU_B \quad (6.6)$$

ここで、 ${}_wU_P$, ${}_wU_B$: 調合上およびブリーディング終了時の単位水量 (kg/m^3),

S_f : 最終圧密量 (cm), H : 片面透水の層厚 (cm), ${}_w\gamma$: 密度 ($=1.0\text{g}/\text{cm}^3$),

${}_cU_P$, ${}_cU_B$: 調合上およびブリーディング終了時の単位セメント量 (kg/m^3),

C/W : セメント水比

$$F = 31.66 \times X - 19.97 \quad (\text{モルタル}) \quad (6.7)$$

ここで、 F : 平均圧縮強度 (MPa), X : セメント水比

図-6.5 に、圧縮強度分布の実測値と解析値の比較を示す。同図によれば、解析値の方が実測値より大きくなるものの、密度分布と同様に、解析値は実測値の傾向を再現できている。解析値が実測値より大きくなる原因として、式 (6.2) および式 (6.7) の実験式の誤差、および試験体中に形成されたみずみちによる局所的な品質の低下が考えられる。

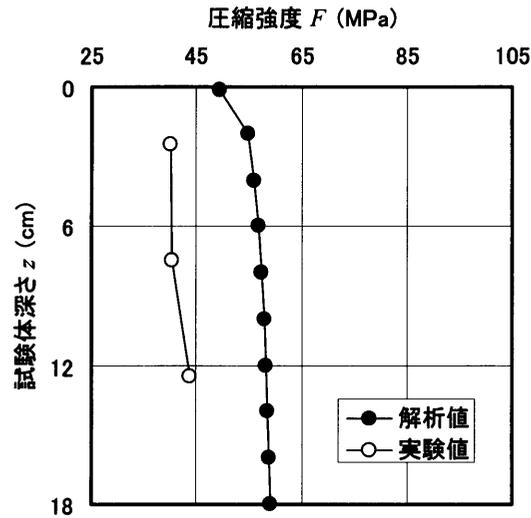


図-6.5 圧縮強度分布の実測値と解析値の比較

6.3 透水性型枠工法への適用

6.3.1 コンクリートの密度分布および圧縮強度分布の推定フロー

図-6.6に、透水性型枠工法によるコンクリートの密度分布および圧縮強度分布の推定フローを示す。透水性型枠工法により、コンクリートの密度および圧縮強度ともに試験体深さおよび透水性型枠からの距離の影響を受け、透水シートに直交する方向（鉛直断面）に

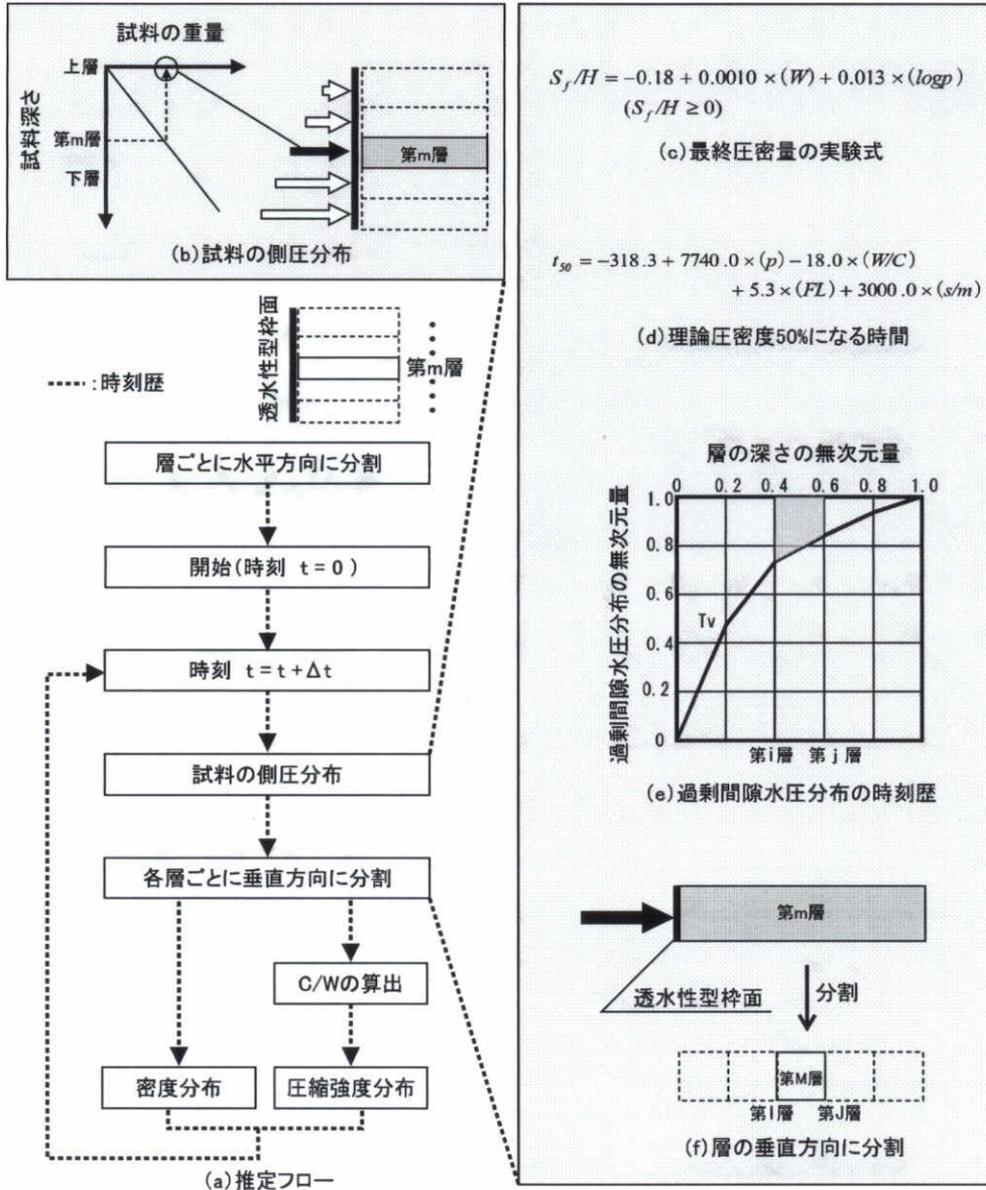


図-6.6 透水性型枠工法によるコンクリートの密度分布および圧縮強度分布の推定フロー
(畑中らの推定方法[2]に加筆・修正：ハッチ部分)

2次元的な分布が生じる。

本解析では、型枠側面に作用する側圧分布[図 (b) 参照]を与え、各層ごとに側圧を圧密圧力として作用させる。試料を水平方向に分割したときの第 m 層について、第3章および第4章から求めた最終圧密量[図 (c) 参照]および理論圧密度 50%になる時間[図 (d) 参照]の実験式を用いて圧密係数 c_v を算出する。その圧密係数 c_v を用いて、第 m 層を垂直方向に分割した要素のひとつである第 M 層[図 (f) 参照]について圧密量と時間の関係を求めることで、密度分布および圧縮強度分布の水平分布を求めることができる。また、密度分布および圧縮強度分布の垂直分布は、側圧分布にしたがった圧密圧力を各層に作用させて、水平分布を求める同様の手順を行うことで求めることができる。

6.3.2 モルタルを用いた推定フローによる解析

第3章および第4章で得られた実験結果を用いて、モルタルを用いた推定フローによる解析を行う。表-6.2に、解析の要因水準を示す。表-6.3に、本解析に用いるモルタルの調合表を示す。図-6.7に、本解析に用いた試験体の概要を示す。本解析では、透水性型枠工法を適用したモルタルの壁を想定しており、解析断面は、壁の長手方向の垂直断面である高さ150×厚さ20cmである。要素分割は、1×1cmの四角形分割とし、3000要素について解析を行った。なお、配筋の影響および型枠の摩擦拘束の影響は考慮しない。

表-6.2 解析の要因水準

要因	水準
フロー値 (mm)	110, <u>220</u> , 330
透水の継続時間 (hour)	2, <u>4</u> , 6

[註]下線は基本水準を示す。

表-6.3 モルタルの調合表

W/C (%)	s/m	目標値		単位置量(kg/m ³)		
		FL (mm)	Air (%)	W	C	S
50	0.50	220	6.8	265	529	1295

[註] W/C:水セメント比, s/m:細骨材容積比, FL:フロー値, Air:空気量, W:水, C:セメント, S:細骨材

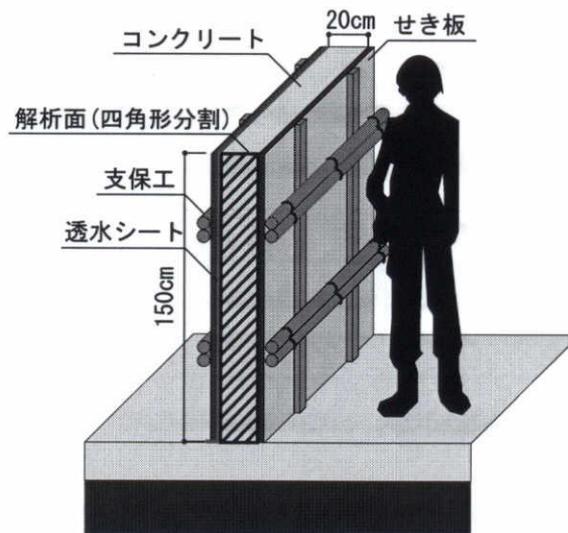


図-6.7 試験体の概要

(1) 側圧分布

型枠に生じる側圧分布を図-6.8のように仮定する。深さ z (cm) における側圧の算定には、式 (6.8) を用いた[102]。また、実際の側圧は水和反応の影響により時間とともに減少するが、モデルを簡単にするために、図-6.9に示すように、ある時刻で側圧分布が0になると仮定する。側圧分布が0となるまでの時間を透水の継続時間と定義する。

$$lp = \Sigma U_p \times g \times z \times 10^{-8} \quad (\text{試験体の高さ} \leq 150\text{cm}) \quad (6.8)$$

ここに、 lp : 側圧 (MPa), ΣU_p : 無処理のモルタルの単位量 (kg/m^3),
 g : 重力加速度 (m/s^2), z : 試験体深さ (cm)

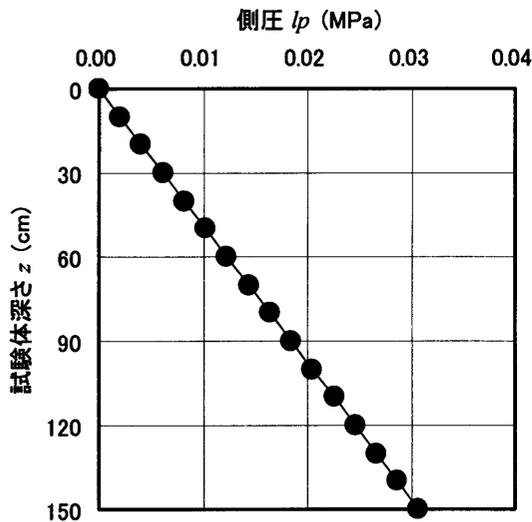


図-6.8 側圧分布

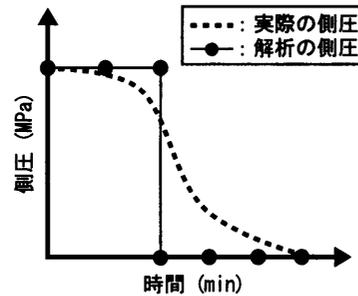


図-6.9 側圧の経時変化

(2) 圧密度

まず、圧密度の水平分布の求め方を説明する。

式 (6.9) に、第3章で得られた理論圧密度 50%となる時間 t_{50} と関連の見られる実験要因 (水セメント比, 圧密圧力, 細骨材容積比およびフロー値) を変数として重回帰分析を行って得られた式を示す。

$$t_{50} = -318.3 + 7740.0 \times (p) - 18.0 \times (W/C) + 5.3 \times (FL) + 3000.0 \times (s/m) \quad (6.9)$$

(補正 $R^2=0.89$)

ここに、 t_{50} ：理論圧密度 50%になる時間 (s)， p ：圧密圧力 (MPa)，
 W/C ：水セメント比 (%)， FL ：フロー値 (mm)， s/m ：細骨材容積比

式 (6.10) に、最終圧密度 S_f 、単位水量 W および圧密圧力 p の対数値を変数として重回帰分析を行って得られた式を示す。

$$S_f / H = -0.18 + 0.0010 \times (W) + 0.013 \times (\log p) \quad (S_f / H \geq 0) \quad (6.10)$$

(補正 $R^2=0.91$)

ここに、 S_f ：最終圧密度 (cm)， H ：片面透水の層厚 (cm)， W ：単位水量 (kg/m^3)，
 p ：圧密圧力 (MPa)

式 (6.11) に、式 (6.9) および式 (6.10) から求めた t_{50} および S_f を代入することで、圧密係数 c_v を求めることができる。そして、式 (6.12) に、圧密係数 c_v 、片面透水の層厚 H および時間 t を代入すると、時間係数 T_v を求めることができる。

$$c_v = \frac{0.197 \cdot \bar{h}^2}{t_{50}} \quad (6.11)$$

ここに、 c_v ：圧密係数 (cm^2/s)， \bar{h} ：試験体の平均高さ (cm)，
 t_{50} ：理論圧密度 50%になる時間 (s)

$$T_v = \frac{c_v}{H^2} t \quad (6.12)$$

ここに、 t ：時間 (s)， H ：片面透水の層厚 (cm)， T_v ：時間係数

式 (6.13) に、時間係数 T_v を代入することで、ある T_v における過剰間隙水圧の無次元量と層の深さの無次元量の関係を求めることができる。

$$U_u(Z, T_v) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n 2}{\alpha_n} \cos(\alpha_n Z) \exp(-\alpha_n^2 T_v) \quad (6.13)$$

ここに、 $\alpha_n = \pi(2n+1)/2$ で、 n は正の整数である。

$$U_u = \frac{u}{p_z} \quad (6.14)$$

$$Z = \frac{z}{H} \quad (6.15)$$

ここに、 U_u : 過剰間隙水圧の無次元量, u : 過剰間隙水 (MPa), p_z : 圧密圧力 (MPa),
 Z : 層の深さの無次元量, z : 層の深さ (cm), H : 片面透水の層厚 (cm)

式 (6.16) から、ある T_v における第 i, j 層間の深さにおける圧密量を求めることができる。同式の、右辺の S_f/H 以降は、ある T_v における等時線と第 i, j 層間で囲まれる右側の面積 (図-6.10 中ハッチ部分) が全面積 ($S_f/H=1$) に対する比を示している。

$$S/H \left(\frac{z_i + z_j}{2}, T_v \right) = S_f/H \times \frac{1}{2} (Z_j - Z_i) \times \left[\{1 - U_u(Z_i, T_v)\} + \{1 - U_u(Z_j, T_v)\} \right] \quad (6.16)$$

ここに、 S : T_v における圧密量 (cm), H : 片面透水の層厚 (cm), z_i, z_j : 第 i, j 層の深さ (cm), S_f : 最終圧密量 (cm), Z_i, Z_j : 第 i, j 層の深さの無次元量,
 U_u : 過剰間隙水圧の無次元量, T_v : 時間係数

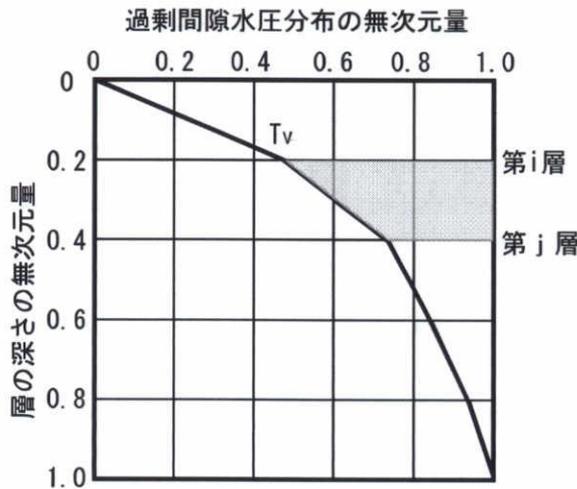


図-6.10 式 (6.11) の説明

圧密量の垂直分布は、式 (6.10) から S_f/H を求める際、側圧分布にしたがった圧密圧力を代入する。その後の手順は、水平分布を求める場合と同様である。

(3) 密度分布

密度の推定値は、各層の S/H を式 (6.16) より求め、式 (6.17) に代入することで求めることができる。

$$\gamma = \{(\sum U_p - S/H \times_w \gamma \times 1000)/(1 - S/H)\} / 1000 \quad (6.17)$$

ここで、 γ : 密度 (g/cm^3)、 $\sum U_p$: 調査上の単位量の総和 (kg/m^3)、
 S : 圧密量 (cm)、 H : 片面透水の層厚 (cm)、 $_w \gamma$: 密度 ($=1.0\text{g/cm}^3$)

(a) フロー値の影響

図-6.11 (a) ~ (c) に、密度分布に及ぼすフロー値の影響を示す。同図によれば、透水性型枠からの距離が近いほど、かつ、試験体の下部ほど密度が大きくなっている。また、フロー値が大きいほど、密度の増大面積が小さくなる。これは、フロー値が大きいほど、最終圧密量に達するまでの時間が長くなり、打設後に側圧分布が0になる時間が同じ場合、圧密量が小さくなるためと考えられる。

(b) 透水の継続時間の影響

図-6.12 (a) ~ (c) に、密度分布に及ぼす透水の継続時間の影響を示す。同図によれば、透水性型枠からの距離が近いほど、かつ、試験体の下部ほど密度が大きくなっている。また、透水の継続時間が長いほど、密度の増大面積が大きくなる。これは、打設後に側圧分布が0になる時間が長いほど、圧密現象が継続して圧密量が大きくなるためと考えられる。

以上より、本推定手法を用いれば、透水性型枠を使用した場合の、密度の水平分布および垂直分布を表すことができる可能性が示唆された。

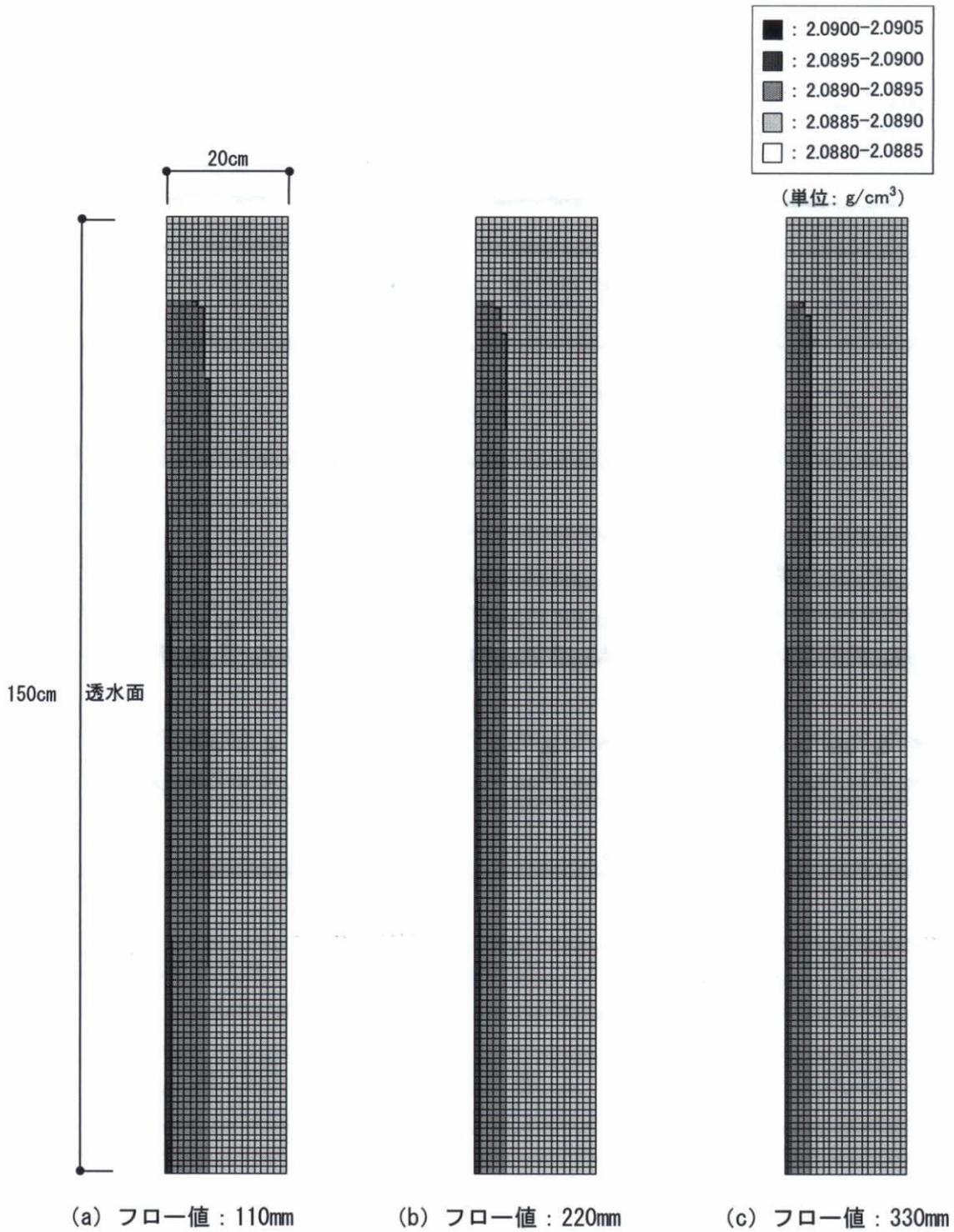


図-6.11 密度分布に及ぼすフロー値の影響 (透水の継続時間 : 4 時間)

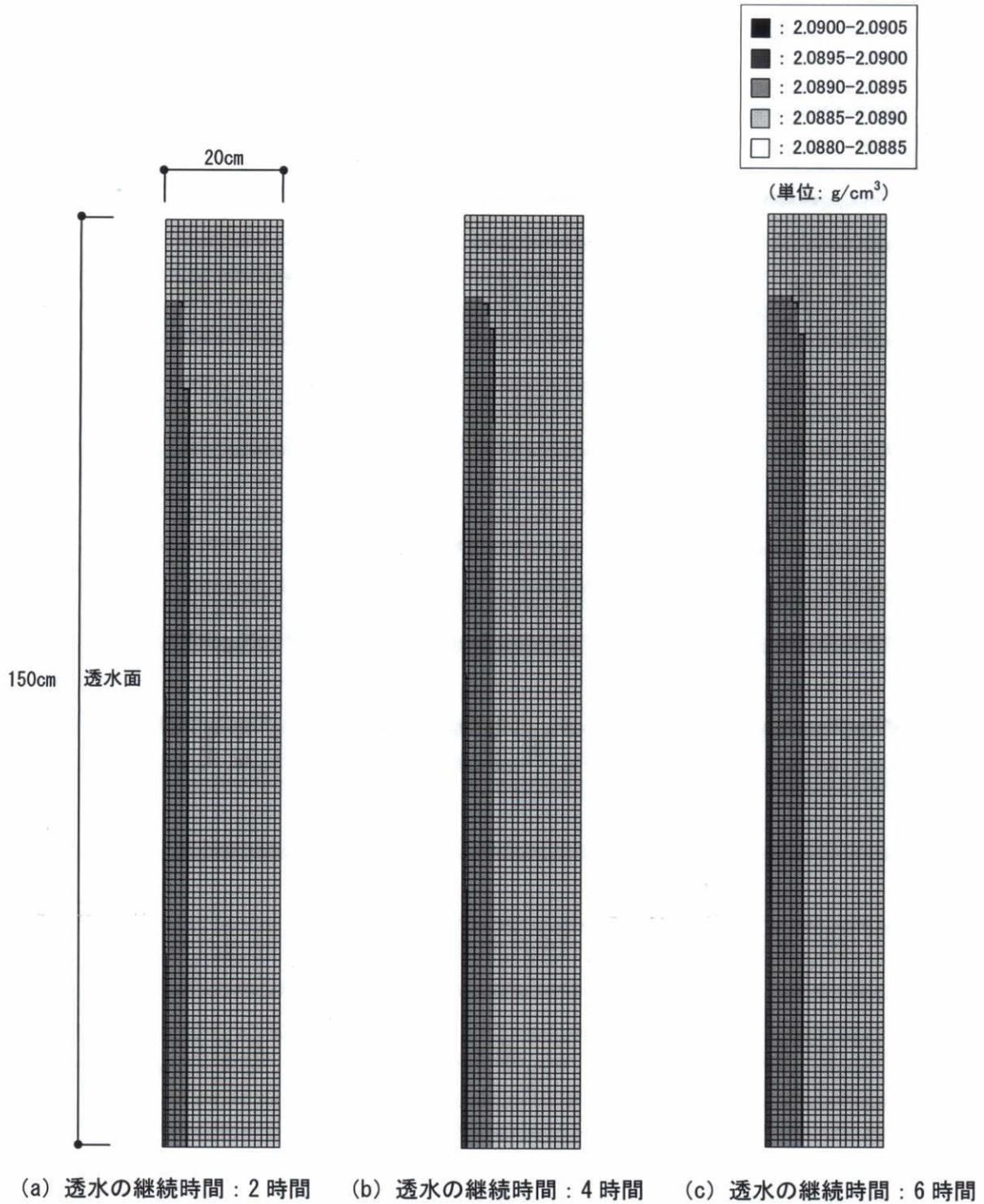


図-6.12 密度分布に及ぼす透水の継続時間の影響 (フロー値 : 220mm)

(4) 圧縮強度分布

セメント水比の推定値は、各層の S/H を式 (6.16) より求め、式 (6.18) ～式 (6.20) に代入することで求めることができる。第4章で求めたセメント水比と圧縮強度の実験式である式 (6.7) に、求めたセメント水比を代入することで圧縮強度の推定値を求めることができる。

$${}_wU_B = ({}_wU_P - S/H \times {}_w\gamma \times 1000) / (1 - S/H) \quad (6.18)$$

$${}_cU_B = {}_cU_P / (1 - S/H) \quad (6.19)$$

$$C/W = {}_cU_B / {}_wU_B \quad (6.20)$$

ここで、 ${}_wU_P$, ${}_wU_B$: 調合上およびブリーディング終了時の単位水量 (kg/m^3),
 S : 圧密度 (cm), H : 片面透水の層厚 (cm), ${}_w\gamma$: 密度 ($=1.0\text{g}/\text{cm}^3$),
 ${}_cU_P$, ${}_cU_B$: 調合上およびブリーディング終了時の単位セメント量 (kg/m^3),
 C/W : セメント水比

(a) フロー値の影響

図-6.13 (a) ～ (c) に、圧縮強度分布に及ぼすフロー値の影響を示す。同図によれば、透水性型枠からの距離が近いほど、かつ、試験体の下部ほど圧縮強度が大きくなっている。また、フロー値が大きいほど、圧縮強度の増大面積が小さくなる。これは、フロー値が大きいほど、最終圧密度に達するまでの時間が長くなり、打設後に側圧分布が0になる時間が同じ場合、フロー値が大きいほど、最終圧密度に達するまでの時間が長くなり、打設後に側圧分布が0になる時間が同じ場合、圧密度が小さくなるためと考えられる。高見ら[79]によれば、透水性型枠によるコンクリート中の総細孔量の減少範囲は、スランプ8cmでは50～60mmであるのに対して、スランプ18cmでは10mm程度であると報告しており、本解析の傾向と一致する。

(b) 透水の継続時間の影響

図-6.14 (a) ～ (c) に、圧縮強度分布に及ぼす透水の継続時間の影響を示す。同図によれば、透水性型枠からの距離が近いほど、かつ、試験体の下部ほど圧縮強度が大きくなっている。また、透水の継続時間が長いほど、圧縮強度の増大面積が大きくなる。これは、打設後に側圧分布が0になる時間が長いほど、圧密現象が継続して圧密度が大きくなるためと考えられる。竹田ら[64]によれば、透水性型枠工法による圧縮強度の改善効果は、普通ポルトランドセメントを使用した場合より中庸熟ポルトランドセメントを使用した場合

の方が大きく、コンクリートの凝結速度の違いが型枠に作用する側圧に影響するためと報告しており、本解析の傾向と一致する。

以上より、本推定手法を用いれば、透水性型枠を使用した場合の、圧縮強度の水平分布および垂直分布を表すことができる可能性が示唆された。

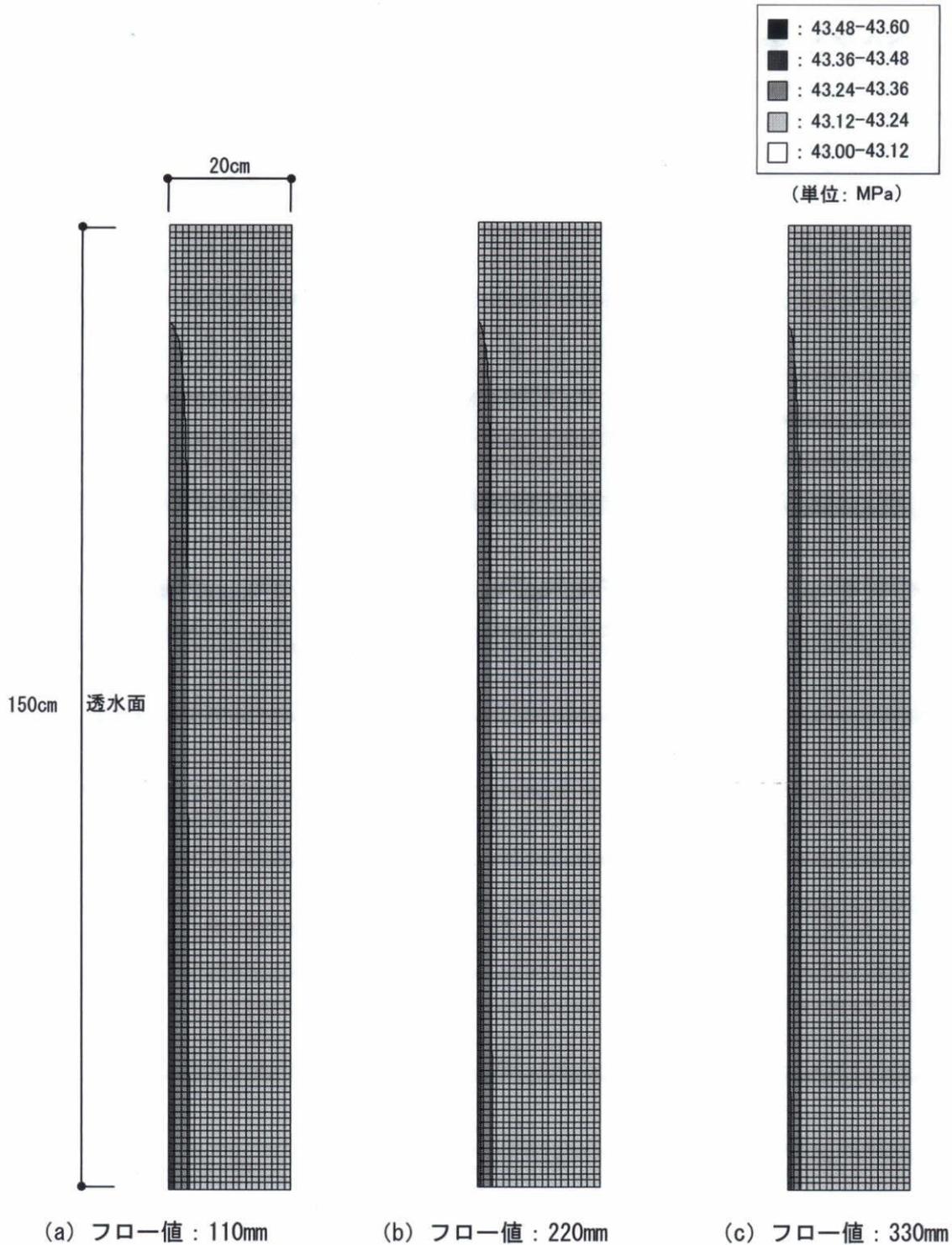
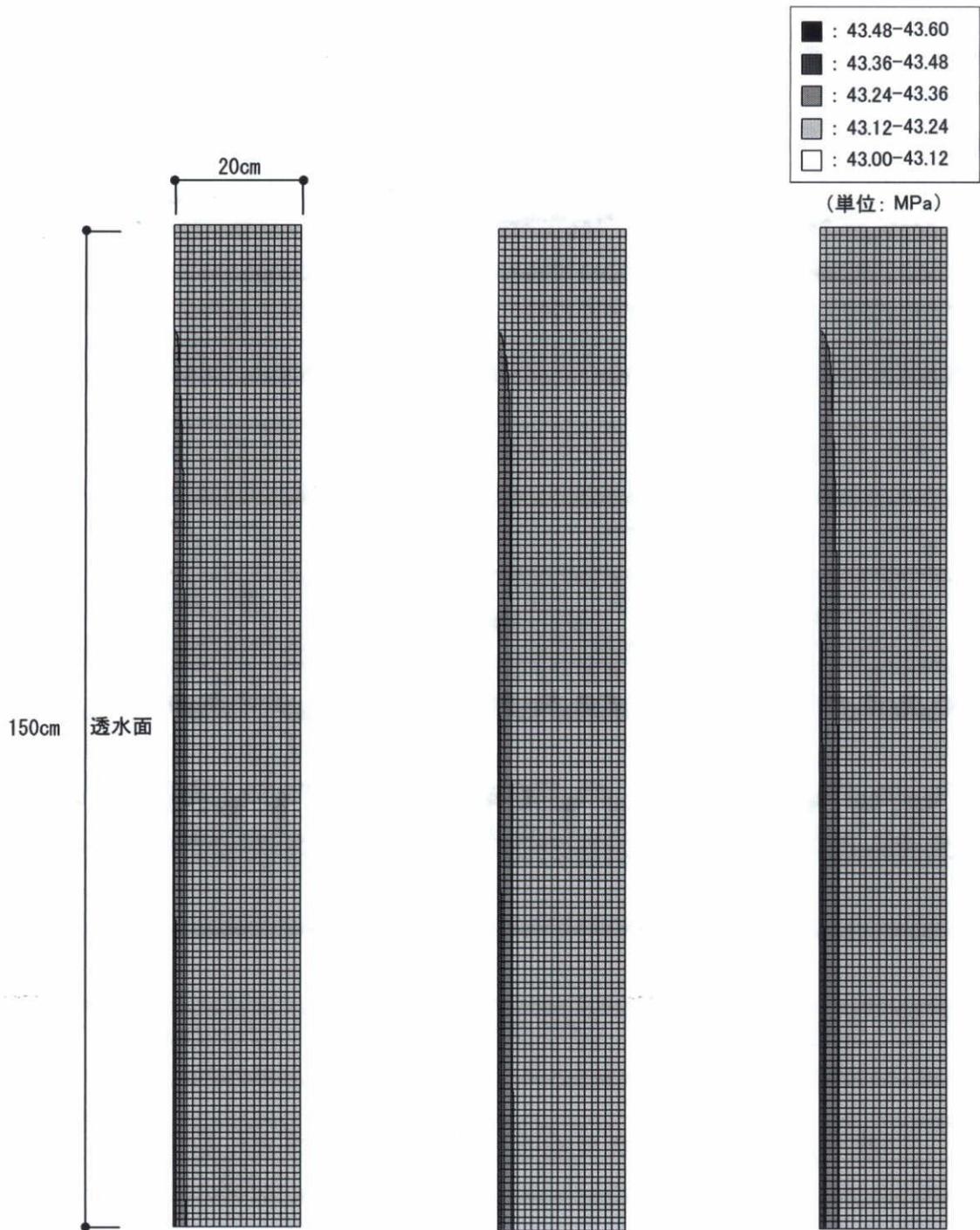


図-6.13 圧縮強度分布に及ぼすフロー値の影響 (透水の継続時間 : 4 時間)



(a) 透水の継続時間 : 2 時間 (b) 透水の継続時間 : 4 時間 (c) 透水の継続時間 : 6 時間

図-6.14 圧縮強度分布に及ぼす透水の継続時間の影響 (フロー値 : 220mm)

6.4 まとめ

本章では、圧密理論を適用して、ブリーディング現象および透水性型枠工法による密度分布および圧縮強度分布の推定フローを提案し、その適用性に関する検証を行った。その結果、ブリーディング現象に関しては、内部の密度分布および圧縮強度分布は、誤差は残るものの、おおむね良好な推定精度が得られた。また、透水性型枠工法に適用した場合には、複雑な2次元的な密度分布および圧縮強度分布を、極めて簡易な手法で推定できる可能性を示した。

第7章 結論および今後の課題

7.1 結論

7.2 今後の課題および展望

第7章 結論および今後の課題

7.1 結論

本研究では、透水・脱水工法によるコンクリートの品質改善メカニズムを系統的に捉えるための統一化理論の構築を目指し、まず、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに対する圧密理論の適用性を確認し、圧密モデルを決定する実験パラメータの定量化を試みた。次に、圧密処理された硬化後のモルタルおよびコンクリートの品質（ここでは、密度および圧縮強度）の定量評価を行った。以上の結果に基づき、ブリーディング現象および透水性型枠工法によるモルタルおよびコンクリートの品質改善効果の推定手法を提案した。また、これまで不明であった真空脱水処理時の各試料中の間隙水圧分布の発生メカニズムを解明するため、モデル材料を用いた実験的検討を行い、その主な原因として毛管張力および液相の粘性抵抗が挙げられることを明らかにした。

以下に各章で得られた主な成果をまとめる。

第1章「序論」では、本研究の背景として、透水・脱水工法の特徴および畑中らが提案した真空脱水コンクリートの品質改善効果の推定手法を示すとともに、本研究の目的を述べた。

第2章「透水・脱水工法に関する既往の研究」では、透水・脱水工法（真空脱水処理工法、加圧脱水工法、透水性型枠工法）およびブリーディング現象の品質改善効果およびそのメカニズムに注目して既往の研究を整理した。

第3章「フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性」では、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートに対する圧密理論の適用性を確認し、圧密モデルを決定する実験パラメータの定量化を試みた。実験Ⅰでは、試料全体としての圧密挙動を明らかにするため、圧密処理時の各試料の圧密量に注目した検討を行った。実験Ⅱでは、試料内部での圧密の進行状況を明らかにするため、圧密処理時の各試料中の間隙水圧分布に注目した検討を行った。その結果、圧密量と時間の関係および過剰間隙水圧分布とともに、実験値と解析値は比較的良好に一致しており、各試料の脱水過程には、既往の圧密理論の適用が可能であることを明らかにした。さらに、いくつかの調合要因と定量化した実験パラメータとの関係を明らかにした。

第4章「圧密処理されたモルタルおよびコンクリートの品質改善効果」では、圧密処理された硬化後のモルタルおよびコンクリートの品質（ここでは、密度および圧縮強度）の定量評価を試みた。その結果、圧密処理された硬化後のモルタルおよびコンクリートの品質改善効果は、試験体全層にわたること、および脱水量で補正したセメント水比と平均圧縮強度（各層の圧縮強度の平均）は、一本の直線式で表すことができること、などを明ら

かにした。

第5章「真空脱水時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布の発生メカニズムに関する検討」では、これまで不明であった真空脱水処理時の試料中の間隙水圧分布の発生メカニズムを明らかにするため、主にモデル材料を用いた実験により検討した。実験IおよびIIでは、モデル材料を用いて、それぞれ毛管張力が間隙水圧分布に及ぼす影響および液相の粘性抵抗が間隙水圧分布に及ぼす影響について検討を行った。それらの結果を踏まえ、実験IIIでは、真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布に及ぼす空気量の影響を検討した。その結果、真空脱水処理時の各試料中の間隙水圧分布の発生メカニズムの主な原因として、毛管張力および液相の粘性抵抗が挙げられることを明らかにした。

第6章「改良型透水・脱水モデルによるコンクリート中の品質改善効果の推定」では、提案した圧密モデルを用い、ブリーディング現象および透水性型枠工法による密度分布および圧縮強度分布の推定フローを提案し、その適用性に関する検証を行った。その結果、ブリーディング現象に関しては、内部の密度分布および圧縮強度分布は、誤差は残るものの、おおむね良好な推定精度が得られた。また、透水性型枠工法に適用した場合には、複雑な2次元的な密度分布および圧縮強度分布を、極めて簡易な手法で推定できる可能性を示した。

7.2 今後の課題および展望

本研究の結果からすると、加圧脱土工法および透水性型枠工法の適用に際しては、最終圧密度 S_f が大きく、かつ理論圧密度 50% になる時間 t_{50} が小さくなるような調合条件および載荷条件（加圧脱土工法では加圧力、透水性型枠工法では試料の自重）とすれば、硬化後の試料中の品質改善効果は大きくなるといえる。また、真空脱水処理工法の適用に際しては、最終圧密度 S_f が大きく、かつ理論圧密度 50% になる時間 t_{50} が小さく、かつ毛管張力が小さくなるような調合条件とすればよいことになる。以上の点を踏まえ、透水・脱土工法の今後の発展を考えると、以下に示す課題を解決する必要があると思われる。

- (1) 本研究で明らかにしたフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性は限られた範囲にとどまっており、特に、コンクリートの調合要因についてより詳細な検討が必要であると思われる。
- (2) 本研究では、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性に及ぼす水和反応の影響について、打設直後およびブリーディング終了時という2点しかおさえておらず、連続的な議論ができるよう更なる検討が必要であると思われる。それらが明らかになれば、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性から硬化後のモルタルおよびコンクリートの圧密特性であるクリープ特性に関して、統一的な議論を行うことができると思われる。
- (3) 真空脱水処理時の間隙水圧分布特性を把握するため、真空脱水処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート中の間隙水圧分布に及ぼす毛管張力および液相の粘性抵抗の寄与率を明らかにするとともに、水和反応の影響についても検討する必要があると思われる。それらが明らかになれば、真空脱水処理コンクリートの密度分布および圧縮強度分布を設計段階で推定することが可能になると思われる。
- (4) 透水性型枠工法による密度分布および圧縮強度分布の推定手法の妥当性を検証するため、透水性型枠使用時の側圧分布特性を明らかにする必要があると思われる。それが明らかになれば、真空脱水処理コンクリートと同様に、透水性型枠を使用したコンクリートの密度分布および圧縮強度分布を設計段階で推定することが可能になると思われる。

付録

付録[1]に、圧密量をひずみで表現した図を示す。付録[2]および[3]に、間隙水圧分布の発生メカニズムをポーラスコンクリートに応用し、その揚水メカニズムについて明らかにした論文を示す。

付録[1]-圧密量をひずみで表現した図一覧

付録[2]-Cement Science and Concrete Technology, No.60, 2006

付録[3]-Cement Science and Concrete Technology, No.61, 2007

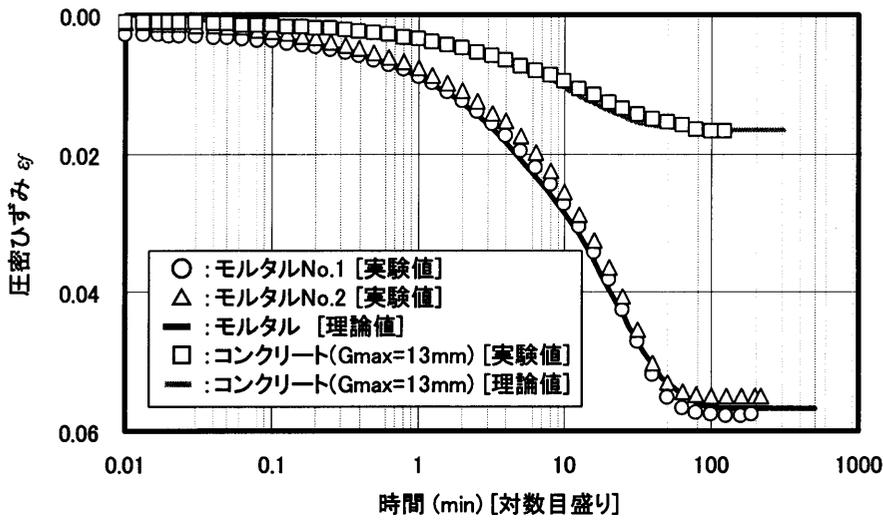


図-1 圧密ひずみと時間の関係の一例 (圧密圧力:0.1MPa, W/C : 50%)

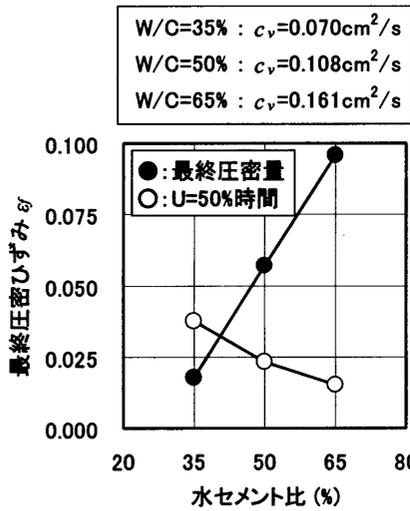


図-2 水セメント比の影響

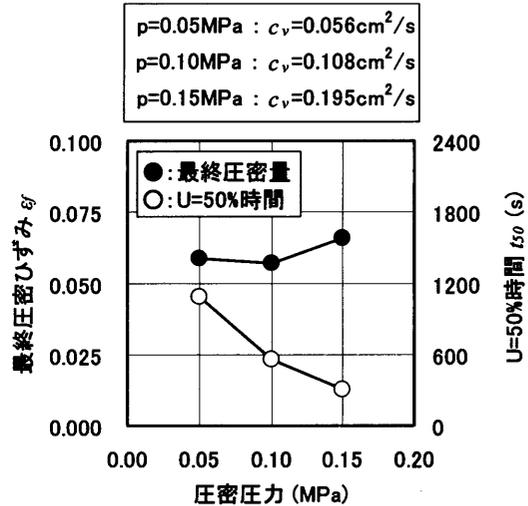


図-3 圧密圧力の影響

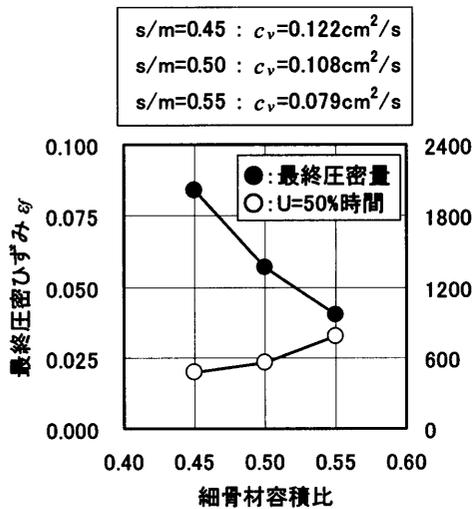


図-4 細骨材容積比の影響

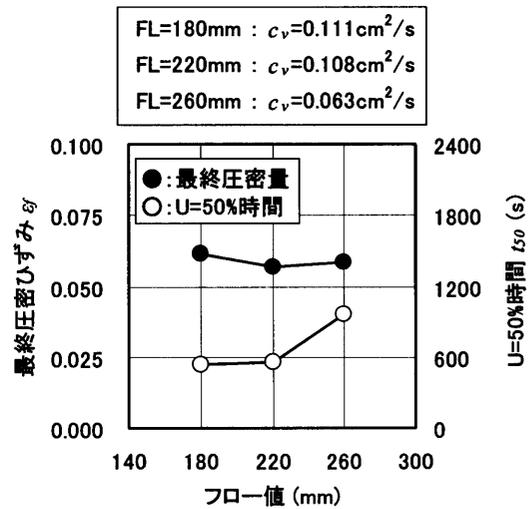


図-5 フロー値の影響

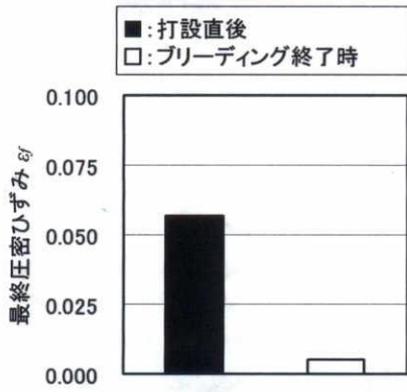


図-6 処理開始時期の影響

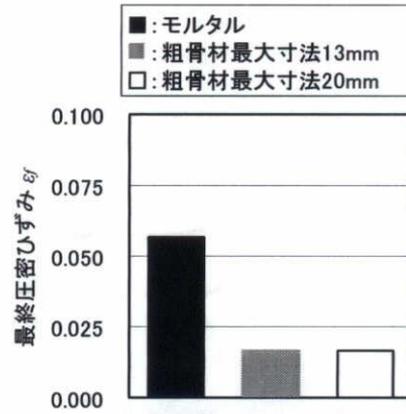


図-7 粗骨材の影響

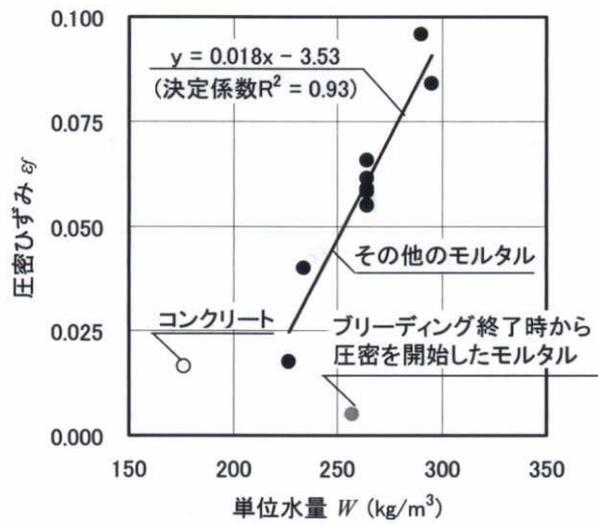


図-8 最終圧密ひずみ ϵ_f と単位水量 W の関係

参考文献

参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会:「透水・脱水によるコンクリートの品質改善に関するシンポジウム」委員会報告書・論文集, 2004.9
- [2] 畑中重光, 服部宏己, 坂本英輔, 三島直生: 圧密理論を適用した真空脱水コンクリート中の圧縮強度分布の発生メカニズムに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.596, pp.1-8, 2005.10
- [3] 児玉武三: 真空処理後のコンクリートの性質, セメント・コンクリート, Vol.16, pp.284-289, 1962
- [4] 柿崎正義, 和美廣喜, 陳滄耀: 真空コンクリート工法による床スラブの施工性に関する実験的研究, セメント技術年報, 第27号, pp.81-84, 1979
- [5] Malinowski, R.Rohde.M.: Vacuumcabanation of lightweight aggregate concrete, Nordic concrete research, 1983
- [6] 中沢隆雄, 谷川和夫, 黒崎通雄: 真空処理がコンクリートの強度に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.342-347, 1990
- [7] 細川潮, 尾崎昶, 菅田紀之: 真空処理によるコンクリートの耐久性の改善, セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.210-215, 1989
- [8] O.Ozdemir: Experimental Study on Vacuum Processed Concrete for Floor Construction, P.Seidler Industriefubboden / Industrial Floors 1999, Vol.1, pp253-263, 1999
- [9] C.Yang, Y.Wang, Z.Jiang and L.Gu: Application of Vacuum Dewatering Technique on Casting Concrete Floors, P.Seidler Industriefubboden / Industrial Floors 1991, pp.185-190, 1991
- [10] J.Musewald: Prufung der Wirksamkeit der Vakuumierung, P.Seidler Industriefubboden / Industrial Floors 1991, pp.145-157, 1991
- [11] A. M. Neville: ネビルのコンクリートバイブル, 技術堂出版, pp.295-297, 2004
- [12] 尾崎昶, 菅田紀之, 細川潮: 真空処理コンクリートのスパイクタイヤによる摩耗, セメント技術年報, No.42, pp.559-562, 1988
- [13] 細川潮, 尾崎昶, 菅田紀之: 真空処理を施したコンクリートの耐硫酸塩性に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, Vol.44, pp.640-641, 1989
- [14] 斉藤鶴義, 一家白惟俊, 野呂正治, 石川巖, 綿貫輝彦: セッコウ系収縮低減材を混和した真空コンクリートの収縮および強度性状, セメント技術年報, No.23, pp.308-312, 1969
- [15] 斉藤鶴義, 一家白惟俊, 藤山毅, 中荃義和: セッコウ系収縮低減材混和真空コンク

- リートの透水・摩耗抵抗・凍結融解などの諸性状について,セメント技術年報, No.23, pp.313-317, 1969
- [16] 細川潮, 尾崎昶, 菅田紀之: 真空処理を施したコンクリートの耐凍害性に関する研究, 土木学会年次学術講演会梗概集, 第43回, pp.178-179, 1988
- [17] 菅田紀之, 尾崎昶, 細川潮: 真空処理コンクリートの水中疲労強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.11, No.1, pp.293-298, 1989
- [18] 湯浅昇, 松井勇, 逸見義男, 佐藤弘和: 仕上材のはがれに及ぼす下地コンクリートの含水率, 細孔構造の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.573-578, 1996
- [19] 庄谷征美, 月永洋一, 菅原隆: 表層部の緻密化によるコンクリートの品質改善に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.570-573, 1992.2
- [20] 小柳光生, 川口徹: 真空脱水工法による合成床版の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.333-334, 1999
- [21] 白沢仁, 中瀬知幸, 押田文雄, 中山康志: 真空脱水製造によるコンクリートの強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A分冊, pp.593-594, 1991
- [22] 田中真人, 十代田知三, 横尾和人: 二酸化炭素ガス-真空脱水処理によるセメント製品の硬化促進方法, コンクリート工学年次論文集, Vol.8, pp.877-880, 1986
- [23] 横尾和人, 十代田知三, 田中真人: 二酸化炭素ガスによるセメント製品の硬化促進方法(その2) 真空脱水処理併用によるモルタル実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A分冊, pp.203-204, 1986
- [24] 金指雅夫, 横田博, 高田博尾, 手塚武仁: 真空脱水プレス成形による薄肉軽量繊維補強コンクリート板の物性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A分冊, pp.457-458, 1994
- [25] 大上勉, 藤崎一裕: 真空脱水処理過程に関する基礎的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部, Vol.54, pp.488-489, 1999
- [26] 畑中重光, 和藤浩, 三島直生, 村松昭夫: 真空脱水工法によるコンクリート床スラブの表層および内部強度性状改善に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第558号, pp.7-14, 2002
- [27] 和藤浩, 村松昭夫, 山口武志, 畑中重光: 真空脱水締固めを行ったコンクリート床スラブの表層および内部強度に及ぼす処理マット網目径の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.327-332, 2002
- [28] 和藤浩, 畑中重光, 三島直生, 村松昭夫: 真空脱水締固めを行ったコンクリート床

- スラブの表層強度および内部強度分布に及ぼす真空度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp375-380, 2004
- [29] 山本景司, 畑中重光, 和藤浩, 山口武志: 真空脱水処理を行ったコンクリートの内部強度分布とその要因分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.385-390, 2001
- [30] T.Yamaguchi and A.Muramatsu: Finishing Concrete Floor by Modified Vacuum Dewatering, P.Seidler Industriefubboden / Industrial Floors 1999, Vol.1, pp205-213, 1999
- [31] 和藤浩, 畑中重光, 山本景司, 村松昭夫: 床スラブコンクリートの真空脱水締固め工法における諸要因の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.391-396, 2001
- [32] 和藤浩, 村松昭夫, 山口武志, 畑中重光: 真空脱水締固め工法によるコンクリート床スラブの性能改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.1393-1398, 1999
- [33] 三島直生, 犬飼利嗣, 畑中重光, 坂本英輔, 和藤浩, 村松昭夫: コンクリート床スラブの真空脱水締固め工法の改善 (その 12 表層部の耐摩耗性), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.467-468, 2004
- [34] 小林広美, 畑中重光, 犬飼利嗣, 三島直生: 各種混和剤を混和した真空脱水モルタルの乾燥収縮に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp461-466, 2003
- [35] 前田哲宏, 畑中重光, 三島直生, 犬飼利嗣: 真空脱水処理を行ったコンクリートの初期凍害抑制効果について, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp383-388, 2003
- [36] 畑中重光, 三島直生, 坂本英輔, 服部宏己: 真空脱水処理したコンクリートの中酸化特性に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, No.57, pp.349-354, 2003
- [37] 坂本英輔, 三島直生, 古市護, 畑中重光: 真空脱水処理された実大コンクリート床スラブの品質改善効果の把握, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1325-1330, 2006.6
- [38] 坂本英輔, 畑中重光, 服部宏己, 三島直生: 真空脱水処理過程におけるコンクリート中の空気泡の挙動に関する可視化実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1233-1238, 2004
- [39] 坂本英輔, 畑中重光, 服部宏己, 三島直生: 真空脱水処理過程におけるモルタルお

- よびコンクリート中の空気泡の挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1021-1026, 2005
- [40] 平川博也, 小野貴史, 大下英吉: 真空脱水処理工法に伴うコンクリート内部の水分移動性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1359-1364, 2004
- [41] 平川博也, 鈴木康介, 大下英吉: 真空脱水処理工法におけるコンクリート中の水分移動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.427-432, 2005
- [42] 服部宏己, 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光; 圧密理論を適用した真空脱水工法の脱水メカニズムに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 585 号, pp.7-13, 2004.11
- [43] 三笠正人: 軟弱粘土の圧密, 鹿島出版会, 1963
- [44] 土質工学会: 土の圧密入門, 1993
- [45] 土質工学会: 軟弱地盤対策工法, 1993
- [46] 谷村剛嗣, 梅崎健夫, 塩野敏昭: 等方応力状態から真空圧密を受けた粘土の非排水せん断特性, 土木学会年次学術講演会, 第 54 回, pp.112-113, 1999
- [47] 社団法人日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点'02, 社団法人日本コンクリート工学協会, p.186,279, 2002
- [48] 笠井芳夫; コンクリート総覧, 技術書院, p.322, 1998.6
- [49] 日本コンクリート工学協会; コンクリート便覧, 技報堂出版株式会社, pp.880-881, 1978.7
- [50] 土師秀人, 林寿夫, 田村富雄: 加圧脱水コンクリートの基礎物性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.42, pp.588-589, 1999
- [51] 佐藤文則, 出頭圭三, 渡部正, 原夏生: 直打ちライニング工法における加圧脱水コンクリートの品質特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.11, No.1, pp.639-644, 1989
- [52] 内山宏: C&C エンサイクロペディア 養生 (3), セメント・コンクリート, No.520, pp.46-48, 1990
- [53] 吉田克弥, 伊藤伸一郎, 弘中義昭: 高流動コンクリートの表面に発生する気泡の除去方法に関する実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.49, pp.344-345, 1994
- [54] 神田亨, 青景平昌, 鎌田正孝: 加圧脱水を受けるフレッシュコンクリートの充填生, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.43, pp.352-353, 1988

- [55] 笹谷輝勝, 青景平昌, 神田亨: フレッシュコンクリートの加圧脱水特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.45, pp.776-777, 1990
- [56] 布谷一夫, 神山行男, 胡麻田博治: 加圧脱水コンクリートの打継ぎ目止水処理工法に関する基礎的研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.47, pp.530-531, 1992
- [57] 河井徹: モルタルおよびコンクリートの加圧脱水のメカニズムに関する研究, 透水・脱水によるコンクリートの品質改善に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.307-314, 2004.9
- [58] 神代泰道, 大池武, 川口徹: 加圧ブリーディング試験による CFT 造充填コンクリートの充填性評価に関する基礎的研究, 透水・脱水によるコンクリートの品質改善に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.315-320, 2004.9
- [59] A. M. Neville: ネビルのコンクリートバイブル, 技術堂出版, pp.297-298, 2004
- [60] 石神忍, 池永博威, 梅国章: 脱水工法に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.46, pp.498-503, 1992
- [61] 永田幹雄, 米田俊一, 松永篤: 脱水型わくを適用したコンクリートの表層部の品質, セメント・コンクリート論文集, Vol.44, pp.336-341, 1990
- [62] 小柳治, 岩瀬裕之, 河合敦, 小山秀紀: 脱水型枠の使用によるコンクリート性能の改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.97-102, 1988
- [63] 池田弘, 田中健治郎, 町田亘寛, 清水猛: 透水型枠(テキスタイルフォーム)によるコンクリート表層部品質の改善と鉄筋コンクリート建築物への適用: 熊谷技報, 第40号, pp.55-64, 1987.2
- [64] 竹田宣典, 平田隆祥, 十河茂幸, 芳賀孝成: 透水性シートを用いた型わくによるコンクリート表面の品質改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.11, No.1, pp.683-688, 1989
- [65] 笠井芳夫, 佐藤孝一, 管一雅, 長野基司: 透水型わくおよび合板型わくを用いた表層コンクリートのセメント量, セメント技術報, No.42, No.1, pp.391-394, 1988
- [66] 芳賀孝成, 十河茂幸, 竹田宣典, 平田隆祥: コンクリートの品質改善を目的とした型わく用透水シートの開発—エクセルフォーム工法—, 大林組技術研究所報, No.39, pp.61-65, 1989
- [67] 熊谷太一郎, 有岡正樹, 田辺大次郎: 透水型枠によるコンクリートの品質向上領域に関する実験的研究量, 土木学会論文集, No.433, Vol.15, pp.187-195, 1991
- [68] 石原誠一郎, 立花和彦, 崎山和隆, 木村建治, 吉川元清: 脱水・脱気型枠(ドライフォーム)を転用施工したコンクリートの耐久性に関する研究, 浅沼組技術研究報,

- No.3, pp.37-51, 1991
- [69] 舟橋政司, 佐藤文則, 出頭圭三, 内田明: 樹脂マット型枠によるコンクリートの品質改善効果について, 前田技術研究報, No.39, pp.61-65, 1989
- [70] 田沢雄二郎, 平和男, 伊藤隆彦: 繊維張付け型枠を用いたコンクリートの表層品質について, セメント技術年報, No.42, pp.395-398, 1988.12
- [71] 庄谷征美, 月永洋一, 菅原隆: 表層部の緻密化によるコンクリートの品質改善に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Nol.46, pp.570-573, 1992
- [72] 菅原隆, 庄谷征美, 佐伯昇: 表層部の緻密化によるコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Nol.46, pp.610-613, 1992
- [73] 石原誠一郎, 木村建治, 立花和彦: 脱水・脱気型枠(ドライフォーム)による高強度コンクリートの耐久性に関する研究(その2), 浅沼組技術研究報, No.2, pp.30-35, 1990
- [74] 庄谷征美, 月永洋一, 菅原隆: 表層部の緻密化によるコンクリートの品質改善に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Nol.46, pp.570-573, 1992
- [75] 小林茂敏: 脱水型枠のすすめ, セメント・コンクリート, Nol.519, pp.40-45, 1990.
- [76] 山田政克, 三木栄一, 中川美礼: 繊維型枠工法をもちいたコンクリート, セメント・コンクリート, Nol.517, pp.26-33, 1990
- [77] 池永博威, 石神忍, 荻原忠治, 牟田有宏: 脱水型枠シートがコンクリートの品質に及ぼす影響について, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, Nol.1, pp.999-1004, 1990
- [78] 崎山和隆, 木村建治, 石原誠一郎, 立花和彦, 島垣利久: 脱水・脱気型枠(ドライフォーム)による高強度コンクリートの耐久性に関する研究, 浅沼組技術研究報, 創刊号, pp.102-108, 1989
- [79] 高見忠良, 宮本文恵, 村田豊喜, 長野重行: 脱水工法がコンクリートの耐久性に与える影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.43, pp.216-221, 1989
- [80] 前田哲宏, 松田孝允, 三島直生, 畑中重光: 透水性型枠を使用したコンクリートの表層および内部強度性状に及ぼす再振動締固めの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.345-350, 2002
- [81] 飯島真人, 丸嶋紀夫, 森豊, 平井正樹, 細村正人: 透水性型枠を使用したコンクリート躯体品質の改善, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.823-824, 1997
- [82] 伊藤康司, 丸山久一, 清水敬二, 橋本親典: フレッシュコンクリートの脱水機構に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp.263-268, 1990

- [83] 岩竹季昭, 久米生泰, 庄司亨, 藤井学: 塩ビ製透水シートを用いた型枠工法のコンクリート表面性状について, 第46回土木学会年次学術講演会講演梗概集, pp.526-527, 1991
- [84] 大友健, 新藤竹文, 金子誠二, 内藤隆史: 高吸水ポリマーシートをもちいたコンクリート型枠面の物性改良工法, コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No.1, pp.311-314, 1987
- [85] 牛島栄, 酒井芳文, 原田和樹: 各種脱水型枠を用いたコンクリートの表面性状および耐久性, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.450-455, 1993
- [86] 平井和喜, 三橋博三, 成田健, 鄭載東: 有孔型枠を用いたコンクリート表層部の性質変化と耐中性化特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.437-440, 1988
- [87] 宮川豊章, 井上晋, 久米生泰: 透水型枠を用いたコンクリートの表面および内部の性質について, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.666-671, 1991
- [88] 片山功三, 小林茂敏: 透水型枠使用コンクリート表面に発生する微細ひびわれの原因と影響に関する研究, 土木学会論文集, No.433, Vol.15, pp.119-128, 1991
- [89] 荒川潤一, 榊田佳寛, 阿部道彦, 鹿毛忠継, 西山直洋, 中田善久, 田辺英男, 金谷秀光: コンクリートの塩害抑制に関する研究(その4.透水型枠工法による塩化物イオンの浸透抑制効果), 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, pp.283-284, 1996
- [90] 笠井芳夫; コンクリート総覧, 技術書院, pp.330-331, 1998.6
- [91] 日本コンクリート工学協会; コンクリート便覧, 技報堂出版株式会社, pp.30-33, 1978.7
- [92] 小野博宣, 角徹三, 塩田準二, 畑中重光, 大関一美, 金子林爾, 谷川恭雄, 森博嗣, 太田福男, 小池狭千朗, 馬場研治共著: 建築材料, 理工図書, p.61, 1989
- [93] 犬飼利嗣, 畑中重光, 三島直生, 金子林爾: 視覚的評価にもとづくモルタル中の自由水のブリーディング挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第590号, pp.1-7, 2005.4
- [94] 加藤佳考, 魚本健人: セメントペーストの凝集構造に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.565-570, 1997
- [95] 上嶋宣裕, 一ノ瀬晴幸, 大下英吉: コンクリートの打設方向による鉄筋近傍の透水性性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, 2001
- [96] 加賀秀治: フレッシュコンクリートのブリージング機構に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1191-1192, 1993.9

- [97] 吉田彌七：新しいコンクリートの沈下に関する数理的考察，土木学会論文集第 14 号，pp.6-13，昭和 27.9
- [98] 平田隆祥，竹田宣典，十河茂幸：石灰石粉を用いたコンクリートのブリージング水の移動機構と強度分布について，コンクリート工学年次論文集，Vol.15，No.1，pp.501-506，1993
- [99] 地盤工学会：土と基礎 Vol.54，No.10，Ser.No.585，pp.37-46，2006
- [100] 土質試験の基本と手引き，地盤工学会，2001
- [101] 竹内輝典，寺西浩司：骨材の実積率に及ぼす骨材粒度の影響に関する研究，日本建築学会東海支部研究報告集，No.42，pp.113-116，2004.2
- [102] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，pp.154-156，1994
- [103] 本多健一：表面・界面工学大系 上巻 基礎編，株式会社フジ・テクノシステム，pp.853-861，2005.5
- [104] 杉山弘，遠藤剛，新井隆景共著：流体力学，森北出版株式会社，1995
- [105] 栗津清蔵 監修：絵とき水理学，オーム社，pp.74-75，1992

論文目錄

論文目録

1. 関連論文

1.1 査読のある雑誌等

- 1) 畑中重光, 三島直生, 坂本英輔, 服部宏己: 真空脱水処理したコンクリートの中酸化特性に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, No.57, pp.349-354, 2003.2
- 2) 畑中重光, 服部宏己, 坂本英輔, 三島直生: 圧密理論を適用した真空脱水コンクリート中の圧縮強度分布の発生メカニズムに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.596, pp.1-8, 2005.10
- 3) Shigemitsu Hatanaka, Eisuke Sakamoto, Naoki Mishima and Akio Muramatsu : Improvement of strength distribution inside slab concrete by vacuum dewatering method, Materials and Structures (印刷中)
- 4) 坂本英輔, 畑中重光, 三島直生: フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートの圧密特性に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.627, 2008.5 (印刷中)

1.2 査読のある国内、国際会議のプロシーディングス

- 1) 坂本英輔, 畑中重光, 服部宏己, 三島直生: 真空脱水処理過程におけるモルタルおよびコンクリート中の空気泡の挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1021-1026, 2005.6
- 2) 坂本英輔, 三島直生, 古市護, 畑中重光: 真空脱水処理された実大コンクリート床スラブの品質改善効果の把握, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1325-1330, 2006.6
- 3) 坂本英輔, 畑中重光, 三島直生, 内藤理子: フレッシュモルタルおよびコンクリートの圧密挙動に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.1-6, 2007.7

1.3 その他

- 1) 坂本英輔, 三島直生, 和藤浩, 畑中重光: 真空脱水を行ったコンクリートの中酸化特性に関する実験的研究 (その1: 試験体の製作方法), 日本建築学会東海支部研究報告集, 第41号, pp.105-108, 2003.2
- 2) 坂本英輔, 三島直生, 和藤浩, 畑中重光: 真空脱水処理を行ったコンクリートの促進中酸化特性に及ぼす水セメン比および初期乾燥条件の影響に関する実験的研究, 第57回セメント技術大会講演要旨, pp.110-111, 2003.5
- 3) 坂本英輔, 三島直生, 和藤浩, 畑中重光: 真空脱水を行ったコンクリートの細孔量と中酸化速度, 2003年度大会(東海)学術講演梗概集, A-1材料施工, pp.537-538, 2003.9

- 4) 和藤浩, 畑中重光, 三島直生, 服部宏己, 坂本英輔, 村松昭夫, 山口武志: コンクリート床スラブの真空脱水締固め工法の改善 (その 10. 真空度の影響), 2003 年度大会 (東海) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.733-734, 2003.9
- 5) 坂本英輔, 服部宏己, 三島直生, 畑中重光: 可視化モデル材料を用いた真空脱水コンクリート中の空気泡の挙動に関する実験的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 42 号, pp.133-136, 2004.2
- 6) 服部宏己, 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: 圧密理論を適用した脱水メカニズムに関する実験的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 42 号, pp.129-132, 2004.2
- 7) 坂本英輔, 服部宏己, 三島直生, 畑中重光: 真空脱水処理時におけるモルタルおよびコンクリート内部の間隙水圧分布に関する実験的研究 (その 1. 実験概要), 2004 年度大会 (北海道) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.245-246, 2004.8
- 8) 服部宏己, 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: 真空脱水処理時におけるモルタルおよびコンクリート内部の間隙水圧分布に関する実験的研究 (その 2. 実験結果および考察), 2004 年度大会 (北海道) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.247-248, 2004.8
- 9) 和藤浩, 畑中重光, 三島直生, 服部宏己, 坂本英輔, 村松昭夫, 山口武志: コンクリート床スラブの真空脱水締固め工法の改善 (その 11. 真空度の影響に関する材齢 28 日の結果), 2004 年度大会 (北海道) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.465-466, 2004.8
- 10) 三島直生, 犬飼利嗣, 畑中重光, 坂本英輔, 和藤浩, 村松昭夫: コンクリート床スラブの真空脱水締固め工法の改善 (その 12. 表層部の耐磨耗性), 2004 年度大会 (北海道) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.467-468, 2004.8
- 11) 坂本英輔, 畑中重光, 服部宏己, 三島直生: 真空脱水処理過程におけるコンクリート中の空気泡の挙動に関する実験的研究, 日本コンクリート工学協会「透水・脱水によるコンクリートの品質改善に関するシンポジウム」, pp.285-290, 2004.9
- 12) 服部宏己, 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: 真空脱水処理を行ったコンクリートの圧縮強度分布の発生メカニズムに関する基礎的研究 (その 1. 実験目的および実験概要), 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 43 号, pp.85-88, 2005.2
- 13) 坂本英輔, 服部宏己, 三島直生, 畑中重光: 真空脱水処理を行ったコンクリートの圧縮強度分布の発生メカニズムに関する基礎的研究 (その 2. 実験結果および考察), 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 43 号, pp.89-92, 2005.2
- 14) 犬飼利嗣, 張民秀, 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: 二次元可視化手法を用いたコンクリート中の自由水の挙動 (透水型砕工法および加圧脱水工法に関する検討), 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 43 号, pp.93-96, 2005.2

- 15) 和藤浩, 犬飼利嗣, 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光, 金子林爾: 可視化手法に基づくコンクリート中の自由水の挙動評価に関する実験的研究 (その 1. 三次元可視化実験の概要), 2005 年度大会 (近畿) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.515-516, 2005.9
- 16) 犬飼利嗣, 和藤浩, 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光, 金子林爾: 可視化手法に基づくコンクリート中の自由水の挙動評価に関する実験的研究 (その 2. 三次元可視化実験の結果および考察), 2005 年度大会 (近畿) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.517-518, 2005.9
- 17) 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: 真空脱水処理された現場打ちコンクリート床スラブにおける大径空隙の膨張条件に関する考察, 2005 年度大会 (近畿) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.713-714, 2005.9
- 18) 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: 真空脱水処理過程におけるコンクリート中の間隙水圧分布の発生メカニズムに関する基礎的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 44 号, pp.69-72, 2006.2
- 19) 犬飼利嗣, 坂本英輔, 黒田萌, 三島直生, 畑中重光, 金子林爾: フレッシュモルタルの透水係数に関する基礎的研究 (その 1: 透水試験方法の提案および実験計画概要), 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 44 号, pp.73-76, 2006.2
- 20) 犬飼利嗣, 坂本英輔, 黒田萌, 三島直生, 畑中重光, 金子林爾: フレッシュモルタルの透水係数に関する基礎的研究 (その 2: 実験結果および考察), 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 44 号, pp.77-80, 2006.2
- 21) 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: 真空脱水処理時のコンクリート内部の間隙水圧分布に及ぼすメニスカスの影響, 第 60 回セメント技術大会講演要旨, pp.166-167, 2006.5
- 22) 和藤浩, 古市護, 坂本英輔, 三島直生, 村松昭夫, 山口武志, 畑中重光: コンクリート床スラブの真空脱水締固め工法の改善 (その 14. 実大施工実験と実験室実験の比較-実験概要), 2006 年度大会 (関東) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.419-420, 2006.9
- 23) 古市護, 坂本英輔, 和藤浩, 三島直生, 村松昭夫, 山口武志, 畑中重光: コンクリート床スラブの真空脱水締固め工法の改善 (その 15. 実大施工実験と実験室実験の比較-実験結果 1), 2006 年度大会 (関東) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.421-422, 2006.9
- 24) 坂本英輔, 古市護, 和藤浩, 三島直生, 村松昭夫, 山口武志, 畑中重光: コンクリート床スラブの真空脱水締固め工法の改善 (その 16. 実大施工実験と実験室実験の比較-実験結果 2), 2006 年度大会 (関東) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.423-424,

2006.9

- 25) Eisuke Sakamoto, Naoki Mishima and Shigemitsu Hatanaka : Study on quality improvement of concrete slab by vacuum dewatering method, Proceedings of The 13Th Tri-University International Joint Seminar & Symposium, pp.312-315, 2006.11
- 26) 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光 : 真空脱水処理時のコンクリート内部の間隙水圧分布に及ぼすメニスカスの影響に関する一考察, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第45号, pp.89-82, 2007.2
- 27) 古市護, 坂本英輔, 犬飼利嗣, 三島直生, 畑中重光 : フレッシュモルタルの透水係数に関する基礎的研究 (その3 : 加圧式透水試験方法の提案および基礎実験), 日本建築学会東海支部研究報告集, 第45号, pp.101-104, 2007.2
- 28) 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光 : 圧密処理時のフレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリート内部の間隙水圧分布に関する実験的研究, 2007年度大会(九州)学術講演梗概集, A-1材料施工, pp.533-534, 2007.8
- 29) 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光 : 真空脱水処理過程におけるコンクリート中の間隙水圧分布に及ぼす液相の粘性抵抗の影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第46号, pp.105-108, 2008.2

2. 参考論文

2.1 査読のある雑誌等

- 1) 服部宏己, 畑中重光, 三島直生, 坂本英輔 : 圧密理論を適用した真空脱土工法の脱水メカニズムに関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.585, pp.7-13, 2004.11
(服部氏の博士論文)
- 2) 畑中重光, 三島直生, 坂本英輔, PARK Kwangmin : 小粒径ポーラスコンクリートの揚水高さに関する理論的アプローチ, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.271-278, 2007.2
- 3) 畑中重光, 三島直生, 坂本英輔 : 小粒径ポーラスコンクリートの揚水モデルに関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.601-608, 2008.2

2.2 査読のある国内、国際会議のプロシーディングス

- 1) 服部宏己, 畑中重光, 坂本英輔, 三島直生 : 圧密理論を適用した脱水メカニズムに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1227-1232, 2004.7 (服部氏の博士論文)
- 2) 坂本英輔, 畑中重光, 服部宏己, 三島直生 : 真空脱水処理過程におけるコンクリート中

の空気泡の挙動に関する可視化実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1233-1238, 2004.7 (服部氏の博士論文)

- 3) 犬飼利嗣, 三島直生, 坂本英輔, 畑中重光: フレッシュモルタルの透水係数に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1109-1114, 2006.6 (犬飼氏の博士論文)

2.3 その他

- 1) PARK Kwangmin, 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: エコセメントを用いたコンクリートの長期強度特性に関する実験的研究—長期強度特性と細孔構造の関係—, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第44号, pp.17-20, 2006.2
- 2) PARK Kwangmin, 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: エコセメントを用いたコンクリートの長期強度特性に関する実験的研究 (長期強度特性と細孔構造の関係), 2006年度大会 (関東) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp.259-260, 2006.9
- 3) 坂本英輔, 高井玲子, 前川明弘, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの揚水高さに関する基礎的研究—ガラスビーズを用いた可視化モデル実験—, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第45号, pp.85-88, 2007.2
- 4) 坂本英輔, 三島直生, 畑中重光: ガラスビーズを用いたポーラスコンクリートの揚水高さに関する可視化モデル実験, 第61回セメント技術大会講演要旨, pp.206-207, 2007.5

謝辭

謝辞

本論文をまとめるにあたり、畑中重光先生（三重大学大学院工学研究科教授）には、多くのご助言を頂くとともに、研究の方向が正しく進むように懇切丁寧なご指導を頂きました。三島直生先生（三重大学大学院工学研究科助教）には、実験計画の立案から論文をまとめるに至るまで細部のわたるご指導・ご助言を頂きました。心より感謝の意を表します。

本論文の審査においては、花里利一先生（三重大学大学院工学研究科教授）、加藤彰一先生（三重大学大学院工学研究科教授）には、有益かつ適確なご助言を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

博士前期課程で直接指導して頂いた、服部宏己氏（東急建設株式会社）には、博士後期課程においても引き続き、研究に関する具体的なご助言を頂いたうえに、研究に行き詰まった時には力強い励ましの言葉を頂きました。内藤理子さん（東京都世田谷区役所）には、いつ終わるともしれない圧密試験に、最後まで忍耐強く付き合って頂きました。本実験を行うにあたり、和藤浩氏（三重大学技術専門員）には、職務で忙しいにもかかわらず夜遅くまで実験を手伝って頂きました。既に博士後期課程を修了された、湯浅幸久博士（三重県科学技術振興センター）、山本貴正先生（豊田工業専門学校講師）、吉田幸夫博士（株式会社アイテック）、犬飼利嗣博士（東海コンクリート工業株式会社）、前川明弘博士（三重県科学技術振興センター）、長谷川哲也博士（日本診断設計株式会社）には、経験者ならではのご助言・励ましの言葉を頂きました。現在、博士後期課程の学生である、中川武志氏（株式会社川島工業）、中浜貴生氏（四日市市役所）には、同じ博士後期課程の学生としていつも応援して頂きました。村松昭夫氏（株式会社建和）および山口武志氏（山口技研）には、本研究を進めるに上で、現場を熟知している方ならではの貴重なご意見を頂きました。既に博士前期課程を修了された、山本晃氏（株式会社三和工務店）には、視野が狭くなりがちな私に社会にも目を向けるように論じて頂きました。研究室のメンバーである、岸田幸治君（三重大学大学院生）、古市護君（三重大学大学院生）、Park Kwangmin 君（三重大学大学院生）、Hashmatullah RASA 氏（三重大学大学院生）、張茂剛氏（三重大学大学院生）、大村修太郎君（三重大学大学院生）、中川陽大君（三重大学大学院生）、西川稔君（三重大学学生）、田村雄一君（三重大学学生）、林田望伸君（三重大学学生）、岸田依奈さん（三重大学学生）、三和真弓さん（三重大学学生）には、伴にゼミに参加し、実験等を手伝って頂きました。森野捷輔先生（三重県建設技術センター）には、就職先を紹介して頂きました。畑中研究室に配属されたのが6年前。敬語すら満足に離せない状態だった私が、博士後期課程を修了するとは夢にも思いませんでした。これもひとえに、先程、紹介させて頂いた皆様からのご支援・ご指導の賜物と深く感謝致します。この恩に報いる

ことができるよう、益々精進したいと思います。

なお、本研究費の一部は、平成 17～19 年度科学研究費補助金特別研究員奨励費によつたことを付記して謝意を表します。

最後に、研究を最優先にしてきた私を理解し、終始温かく見守ってくれた家族に心より感謝します。

2008 年 3 月 18 日