

複層ポーラスコンクリートの現場施工と品質管理 に関する実験的研究

三重大学博士学位論文

2009年 9月

中 川 武 志

複層ポーラスコンクリートの現場施工と品質管理に関する実験的研究

Experimental Study on Actual Construction and Quality Control for Double-Layered Porous Concrete

概 要

本研究は、環境対応、生物共生等の面で極めて優れた性能を有するポーラスコンクリートの適用拡大を図ることにある。建物の内外構、歩道、駐車場等を対象とし、施工面および実用面の視点から、ポーラスコンクリートの基本特性、複層化による性能改善、施工・品質管理、機械化等に関する再検討を行うとともに、洗い出された問題点の解決を図り、より高機能かつより低コストな現場施工技術の確立を図ろうとするものである。

本研究(全7章)の主な内容は、以下のとおりである。

- ①空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法(第3章)
- ②仕上げ方法がポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度に及ぼす影響(第4章)
- ③供試体の高さ／直径比がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響(第5章)
- ④住空間における意匠性に配慮した複層ポーラスコンクリート歩道の現場施工(第6章)

これらの実験的研究により、ポーラスコンクリートの空隙率、圧縮強度、それらに及ぼす仕上げ方法および供試体の高さ／直径比の影響等について把握するとともに、作業性が良く付加価値の高い複層ポーラスコンクリートの施工方法を提案した。さらに、ポーラスコンクリートをより普及させるために不可欠と考えられる打設機、仕上機および現場透水試験装置の試作を行った。

も く じ

1. 序論	1
1.1 本研究の目的と背景	1
1.1.1 本研究の目的	1
1.1.2 環境問題とポーラスコンクリート	1
1.1.3 ポーラスコンクリートに対するニーズ	3
1.1.4 ポーラスコンクリートの複層化	5
1.1.5 ポーラスコンクリートの現場施工	6
1.1.6 ポーラスコンクリートの品質管理	6
1.2 本研究のフロー	7
1.3 本論文の構成	8
第1章の参考文献	9
2. ポーラスコンクリートに関する既往の研究	11
2.1 概説	11
2.2 製造方法	11
2.3 諸特性・機能	12
2.3.1 強度特性	12
2.3.2 空隙率と圧縮強度	13
2.3.3 摩耗・剥脱特性	17
2.3.4 熱緩和特性	18
2.3.5 吸音性	19
2.4 試験方法	19
2.5 現場施工と品質管理	20
2.5.1 打設方法	20
2.5.2 打設機械	21
2.5.3 品質管理	21
2.6 本研究に関連する製品・実施工例	22
2.6.1 二次製品（ブロック等）	22
2.6.2 透水性舗装	22

2.7	まとめ	24
2.8	本研究の位置づけと課題	24
	第2章の参考文献	27
3.	空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法	31
3.1	背景と目的	31
3.2	空隙の種類と定義	31
3.3	空隙率の測定方法	33
3.3.1	設計空隙率	33
3.3.2	フレッシュ時の空隙率測定方法	33
3.3.3	硬化後の空隙率測定方法	34
3.4	実験概要と実験方法	36
3.4.1	実験の要因と水準	36
3.4.2	調合および供試体の作成方法	37
3.4.3	実験方法	38
3.5	実験結果	39
3.5.1	フレッシュポーラスコンクリートの空隙率測定結果	39
3.5.2	硬化ポーラスコンクリートの空隙率測定結果	40
3.5.3	遠心脱水処理の効果	42
3.6	硬化後の空隙率測定方法の比較と提案	43
3.6.1	空隙率測定方法の比較	43
3.6.2	容積圧力法の位置づけと準備手順	44
3.7	まとめ	45
	第3章の参考文献	46
4.	仕上げ（締固め）方法がポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度に及ぼす影響	47
4.1	背景と目的	47
4.2	実験概要と実験方法	47
4.2.1	実験の要因と水準	47
4.2.2	仕上げ方法の分類と空隙率	48
4.2.3	実験方法	49
4.3	実験結果と考察	50
4.3.1	仕上げ方法の影響と各種要因との関係	50

4.3.2	仕上げ方法の影響と各種特性の関係	55
4.4	まとめ	56
	第4章の参考文献	58
5.	供試体の高さ／直径比がポラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響	59
5.1	背景と目的	59
5.2	実験概要と実験方法	59
5.2.1	実験の要因と水準	59
5.2.2	供試体	60
5.2.3	実験方法	61
5.3	実験結果と考察	61
5.3.1	空隙率	61
5.3.2	圧縮強度と空隙率および供試体の高さ／直径比の関係	62
5.3.3	圧縮強度と供試体の高さ／直径比の関係	63
5.3.4	円柱供試体とコア供試体の比較	65
5.3.5	結合材強度の影響	66
5.3.6	供試体の高さ／直径比に関する圧縮強度補正係数の推定	67
5.4	まとめ	68
	第5章の参考文献	69
6.	住空間における意匠性に配慮した複層ポラスコンクリート歩道の現場施工	71
6.1	背景と目的	71
6.2	歩道へのポラスコンクリートの適用	71
6.3	複層ポラスコンクリート歩道の概要	72
6.3.1	施工の概要と諸元	72
6.3.2	実験の概要	74
6.3.3	材料および調合	75
6.3.4	実験方法	75
6.3.5	施工状況	76
6.4	実験結果と考察	77
6.4.1	練上り後の経過時間の影響	77
6.4.2	締固め方法の影響	78
6.4.3	圧縮強度と空隙率の関係	80

6.4.4 全空隙率と透水係数の関係	80
6.5 複層ポーラスコンクリートの適用例	81
6.6 まとめ	81
第6章の参考文献	83
7. 総括	85
7.1 本研究成果の総括	85
7.2 本研究の成果	87
7.3 今後の課題	88
試作機の紹介	91
試作機1 ポーラスコンクリートの打設機	91
試作機2 ポーラスコンクリートの仕上げ機	95
試作機3 現場透水試験装置	100
謝辞	105
付録	
付録1 ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性評価に関する実験的研究	107
付録2 屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する基礎研究	118
付録3 底面を水中に浸漬させたポーラスコンクリートの熱特性に関する実験	128
付録4 複層ポーラスコンクリート透水舗装用樹脂材料の耐候性試験	132
付録5 ポーラスコンクリートに関するタイ(Thailand)との技術交流	142
付録6 複層ポーラスコンクリート舗装の支持力に関する検討	147
付録7 主な業績	150

第1章 序 論

1. 序 論

1.1 本研究の目的と背景

1.1.1 本研究の目的

本研究の主要な目的は、環境対応、生物共生等の面で極めて優れた性能を有するポーラスコンクリートの適用拡大を図ることにある。建物の内外構、歩道、駐車場等を対象とし、施工面および実用面の視点から、ポーラスコンクリートの基本特性、複層化による性能改善、施工・品質管理、機械化等に関する再検討を行うとともに、洗い出された問題点の解決を図り、より高機能かつより低コストな現場施工技術の確立を図ろうとするものである。

1.1.2 環境問題とポーラスコンクリート

現在、BRICS に代表される新興諸国の経済成長が進む世界において、日本をはじめとする先進国には、とりわけ環境技術面での貢献が求められ、その中で、各国の行政機関には、かけがえのない自然と住民の生活環境の保全に対して有効な施策を実施することが求められている。企業においても、経済活動の存続とシェア確保のために、より環境負荷の少ない生産方法や商品の開発が市場から強く求められている。こうした方向性が、21 世紀のメガトレンドであることは、多少の経済減速が発生しても、ほぼまちがいないものと考えられる。また、経済が長期にわたって停滞している日本経済において、逆に、さらなる経済成長を得るために必要なのは、これまでの常識にとらわれない技術で、環境性能や顧客満足度を高めたサービスや商品の実現である。

現在の建設関係者が取り組むべき課題には、次のようなことがらが考えられ、有効な方策の実施とその格段の進展が強く求められている。

- a) 建設業界全体のパフォーマンスアップ(業界再編、近代化、コスト低減、新技術)
- b) ヒートアイランド対策、省エネルギー化など、構造物の環境問題に対する取り組み
- c) 建設廃棄物の処分およびリサイクルに対する取り組み
- d) 構造物、住宅の安全性・信頼性の確保
- e) 国レベルの建設計画と国民ニーズのズレの修正
- f) 公共工事の経済誘起効果の回復

ここで、b)の構造物等の環境問題に対する取り組みに絞って言及する。

環境問題の内容としては、つぎのような項目がある。

- a) ヒートアイランド現象の防止
- b) 省エネルギー化

- c) 快適性の向上
- d) 地球温暖化対策
- e) 自然との調和

東京などの大都市のヒートアイランド現象^{1), 2)}は、都市構造物の環境問題の代表的な事例である。都市の排熱ないし畜熱効果によって、気温が周辺部よりも数度上昇し、広域的な生態系に影響を及ぼすほか、積乱雲が発達し激しい雷雨をもたらしたりする。また、その雨量が観測以来の統計データに照らし合わせて異例となるなど、地下街の水没や交通機関のマヒのみならず、人命に及ぶ災害となる事例が年に数回発生するに至っている。ヒートアイランド現象の原因は単純ではないかもしれないが、単位面積あたりのエネルギー使用量が多いことと、都市に多いアスファルト舗装道路やコンクリート構造物が熱を蓄えやすいことが大きな原因であることはほぼまちがいないと考えられる。このことから、土木構造物や建築物が都市機能や建設コストのみを重視して造られていてはならないことが明らかになっている。

また、自然との調和の問題では、これまで堤防、擁壁、水路等の土木構造物において、防災および維持管理のためにコンクリートが多用された結果、生態系の維持に影響を及ぼしつつあることも指摘されている³⁾。この問題に対する対策として、道路等の人口構造物による生態系の分断・破壊に配慮した計画とともに、緑化可能なコンクリート構造物、生物棲息可能なコンクリート製品などの導入が進んでいる^{4), 5)}。

アスファルト舗装道路やコンクリート構造物の熱的特性に関する問題点⁶⁾は、すなわち、それらが巨大な「かたまり」である場合、夏の日射によって温度が上昇し、また熱容量が大きいために夜になっても温度低下が遅いこと、日光(赤外線等)の反射や輻射に対する工夫がなく、不快感を感じることも、などである。したがって、現在では、ヒートアイランド現象

表 1.1 建築関連 5 団体による「地球環境・建築憲章」の概要⁹⁾

	建 築 憲 章
① 長 寿 命	建築は世代を超えて使い続けられる価値ある社会資産となるように、企画・計画・設計・建設・運用・維持される。
② 自 然 共 生	建築は自然環境と調和し、多様な生物と共存を図りながら、良好な社会環境の構成要素として形成される。
③ 省エネルギー	建築の生産エネルギー消費は最小限に留められ、自然エネルギーや未利用エネルギーは最大限に活用される。
④ 省 資 源 ・ 循 環	建築は可能な限り環境負荷が小さい、また再利用・再生が可能な資源・材料に基づいて構成され、建築の生涯の資源消費は最小限に留められる。
⑤ 継 承	建築は多様な地域の風土・歴史を尊重しつつ新しい文化として創造され、良好な生育環境として次世代に継承される。

防止のために、舗装では透水性アスファルト舗装およびインターロッキング舗装など透水性、保水性を考慮した舗装方法が積極的に採用されつつあり^{7),8)}、同様にコンクリート構造物に対しても内部に空隙をもつポーラスコンクリートの採用が期待されている。

2000年に日本の建築関連5団体が「地球環境・建築憲章」⁹⁾を作成し、具体的に土木・建築分野の課題に対する動き(運用指針)として5項目が掲げられている(表 1.1)。

1.1.3 ポーラスコンクリートに対するニーズ

ポーラスコンクリートは、こうした指針にもよく合致する建設材料であり、建設技術の中の小さな一つの分野であっても、透水・排水性、通気性、吸音・吸着性、生物・植生許容性、軽量性、再生資源利用性等、環境面での機能に極めて期待が大きく、その適用範囲は多岐にわたるものである。さらに、(強度やコストが重視された)建築物・構造物のためのコンクリートではなく、人と社会のためのコンクリートというコンセプトは、限りない発展の可能性をもつものと考ええる。

ポーラスコンクリートは、その基本的な特長や考え方は既に社会に認知されつつあり、適用が進みつつあるが、一方で、日本コンクリート工学協会の中でエココンクリート研究委員会が活動を開始してから既に15年程度が経過しているにもかかわらず、適用事例が豊富とはいえない現状は否定できない。すなわち、現状のポーラスコンクリートが、施工性や品質管理、経済性まで配慮したものになっていないなど、普及が進まない要因が潜在しているものと考えられる。とくに、作業性や品質管理方法等の施工者からのニーズを軽視すると、計画(理想の姿)と現実が乖離しやすく、品質低下およびコスト増の要因となり、工法としての魅力に乏しいものとなる。

したがって、ポーラスコンクリートの適用を拡大するためには、施主、構造設計者、施工者のニーズのバランス(図 1.1)を考慮し、全体として満足度を向上させる必要がある。

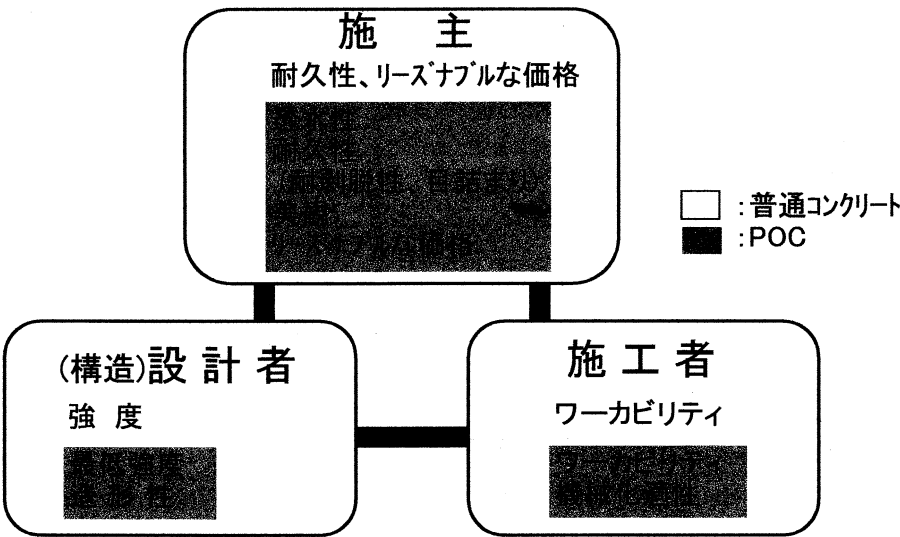


図 1.1 ポーラスコンクリートに関する施主・設計者・施工者のニーズ

そこで、本研究では、これらの問題に対して、可能な限り実験的に検証し、設計面および施工面から、ポーラスコンクリートの適用をより容易にするための方法を提示したいと考えた。

表 1.2 に、各者にどのようなニーズがあるかを検討した例を示す。表では、従来からのポーラスコンクリート、インターロッキングブロック・平板ブロック、タイル・レンガ貼り、普通コンクリート・アスファルトに関して、それぞれの特長を比較・評価している。また、ポーラスコンクリートの特長を活用する一つの方法として、本論文において提案する複層化が考えられ、表中に合わせて示している。

この表は、これまで公共工事および民間工事におけるポーラスコンクリートおよび複層ポーラスコンクリートの施工後に収集した、施主側および利用者の声(ISO 品質記録)、施工者(作業員)等との会議記録等を元に作成した資料の抜粋である。分析にあたり、材料の性能、施工上の問題点、施工単価などを詳細に比較検討し、さらに施工例の蓄積とともに改訂を繰り返してきたものであることを付記する。

表 1.2 施主・設計者・施工者のニーズの分析

視 点		ニ ー ズ の 内 容	複層 POC	従来 POC	コンクリート 二次製品	タイル、 レンガ等	コンクリート、 アスファルト
施主 から	一般的	透水性が高い	◎	◎	○	—	—
		施工方法・デザインが選べる	○	—	◎	◎	—
		美観が優れる	◎	△	◎	◎	—
		劣化等の心配が少ない	○	○	○	○	△
		掃除しやすい	○	△	△	○	○
		リーズナブルなコスト	○	△	○	○	○
	社会的	工期が短い	○	◎	△	△	◎
		使用時の安全性が高い	◎	◎	◎	◎	◎
		法令等に合致している	◎	◎	◎	◎	◎
		メンテナンスが容易	◎	○	△	○	○
設計者から		標準設計があり、適用しやすい	○	○	◎	○	◎
		強度が高く、管理しやすい	○	○	△	△	○
		空隙率、透水性、熱特性等が推定可能	○	○	○	—	—
		造形性が高い	◎	○	△	△	○
		施工上の問題が発生しない	○	○	○	○	○
		歩行弱者対策に対応可能	◎	○	◎	○	◎
施工者から		作業性が高い	◎	△	△	△	◎
		工数が少ない	○	◎	△	△	◎
		材料調達の制約がない	◎	△	◎	◎	◎
		作業時間の制約が少ない	○	△	○	○	◎
		機械化できる	○	△	—	—	◎
		工程が天候に左右されない	△	△	△	△	△
		廃棄物等の負担が少ない	△	△	△	△	△

注1) ニーズは、施工例の顧客アンケート、品質会議等による調査資料を元に編集したもの。
注2) 評価は、品質会議等による比較検討を継続的行った結果を元に概略、区分したもの。
◎: 十分対応可能、○: 対応可能、△: 場合により対応不可、—: 基本的に対応不可

1.1.4 ポーラスコンクリートの複層化

複層ポーラスコンクリートは、ポーラスコンクリートを基層として打設した後、砂利と樹脂による表層(ポーラス硬化体)とするもので、意匠性と高い透水性、耐久性を企図した工法である。基層のポーラスコンクリートは、基本的に単粒度の碎石を使用したものであり、表層は、歩道や住宅外構等で比較的多く用いられている各種の色の砂利を用いた樹脂舗装と基本的に同じ技術である。しかし、美観、排水、支持力、施工性等(図 1.1 のグレー部分)を総合的に考慮し、コストパフォーマンスが高くなるよう工夫がなされている。

「複層ポーラスコンクリート」の形態は、本研究で示す基層ポーラスコンクリートと樹脂表層による構造のみを指すのではなく、図 1.2 に示すように、用途に対応した種類が存在するものである。また、複層ポーラスコンクリートは、各種二次製品と組み合わせて施工することも容易であるとともに、表層については、樹脂の吹付け等の処理により、滑り止め(高摩擦)や温度上昇低減(低アルベド)の特性を付与することも可能である。

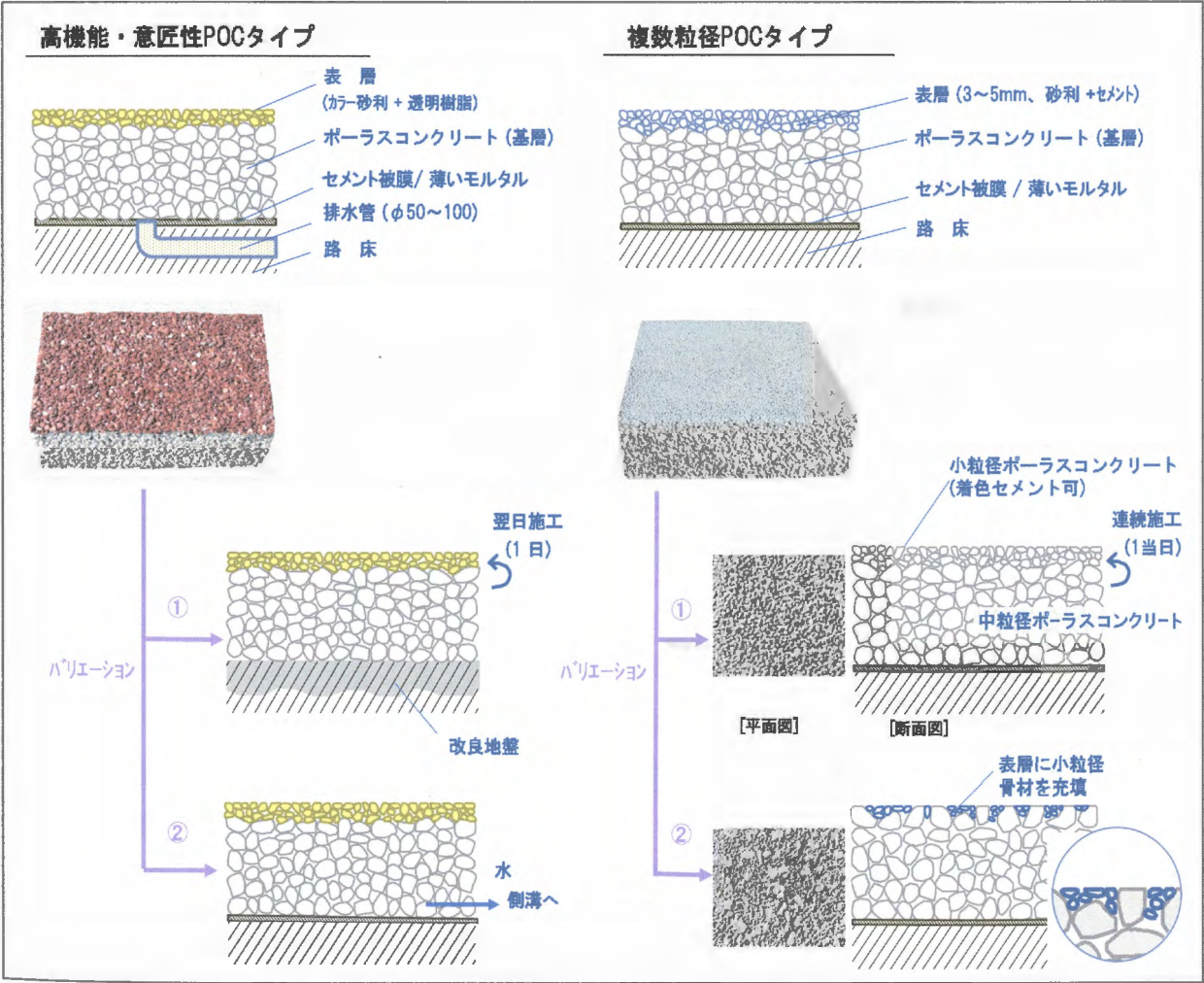


図 1.2 複層ポーラスコンクリートの種類

複層ポーラスコンクリートの工法は、著者が考案して基本的な特許を出願し、平成 20 年に取得している(中川武志：床面又は路面の舗装構造、特許第 4206170 号)。また、本研究と関連して考案した施工方法等について、平成 20 年に追加的に特許出願を行っている(中川武志：床面又は路面の舗装構造、特願 2008-261658)。また、タイ国においても、特許出願中である(中川武志、他：床面又は路面の舗装構造、タイ国特願 14862-042)。

1.1.5 ポーラスコンクリートの現場施工

ポーラスコンクリートを現場で、普通コンクリートと同じように直接打設して施工することとは十分可能であると考えられるが、施工事例がそれほど多くない。この理由として、車道や護岸など施工規模が大きい場合には、特殊機械の準備等が必要になるなどの問題が考えられ、一方、施工面積が小さい場合には、適切な施工機械がなく、人力による作業を強いられるため敬遠されていることが考えられる。また、希望するポーラスコンクリートのレディミクストコンクリートプラントへの製造委託が容易ではないことなども考えられる。

透水性などのポーラスコンクリートの各種機能は、一戸建て住宅、アパート・マンション、介護施設、店舗、事業所、建物の内外構、駐車場、歩道等においてより有効に活用できると考えられる。すなわち、とくに住環境に対し、より高品位で、より高性能で、より施工しやすいポーラスコンクリートのニーズがあるものとする。

したがって、このニーズと既存の工法や商品との差を検討し、ポーラスコンクリートを社会に役立たせていくためには、どのような問題点があるかを検討し、それを解決するための研究が必要であると考えられる。ポーラスコンクリートの複層化(複層ポーラスコンクリート)は、その一つの有望な解決手段であると考えられ、その考え方や特性を検証していく必要がある。

1.1.6 ポーラスコンクリートの品質管理

現場施工する場合に、適切な品質管理を行い、目的とする機能・性能を達成させる必要があるが、ポーラスコンクリートの場合には、品質管理の規準および項目等がまだ十分検討されていない状態である。また、品質管理の項目等が一応決められていても、施工や評価の手法が明確ではないために、当事者の判断による部分が少なくなく、ポーラスコンクリートの作業性に対する認識が低いために、結果として低い品質となることも多いと考えられる。

品質管理において、とくに留意すべき点として二つ挙げたい。すなわち、一つは、設計と実際の空隙率、圧縮強度、透水性などの違いをどのような方法で評価するのが適切なのかという点であり、もう一つは、施工性に伴う要求品質の実現のしやすさに配慮すべきであるという点である。現実には、硬さの経時変化や締固めによる性状変化の大きさなどの条件により、施工しやすいポーラスコンクリートと取扱いにくいポーラスコンクリートが存在し、取扱いにくい場合や適切な施工機械がなく、施工時間を要する場合には、やはり品質低下が起これやすくなると考えられるのである。

すなわち、ポーラスコンクリートの設計・施工方法に対する社会的習熟度が低い現状では、設計において品質の目標値を引き上げるよりも、取扱いやすい調合を採用し、施工しやすい環境、施工しやすい機械などを整えることにより、出来上がったポーラスコンクリートの品質が向上し、安定化することが期待でき、コスト低減にもつながるものとなる。

1.2 本研究のフロー

図 1.3 に本研究のフローを示す。本研究では、建物の内外構、歩道、駐車場等を対象として、施工面および実用面の視点から、ポーラスコンクリートの基本特性、複層化による性能改善、施工・品質管理、機械化等に関する再検討を行うとともに、問題点を洗い出してその解決を図り、より高性能な複層ポーラスコンクリートの現場施工技術の確立と高精度な品質管理を実現したいと考える。

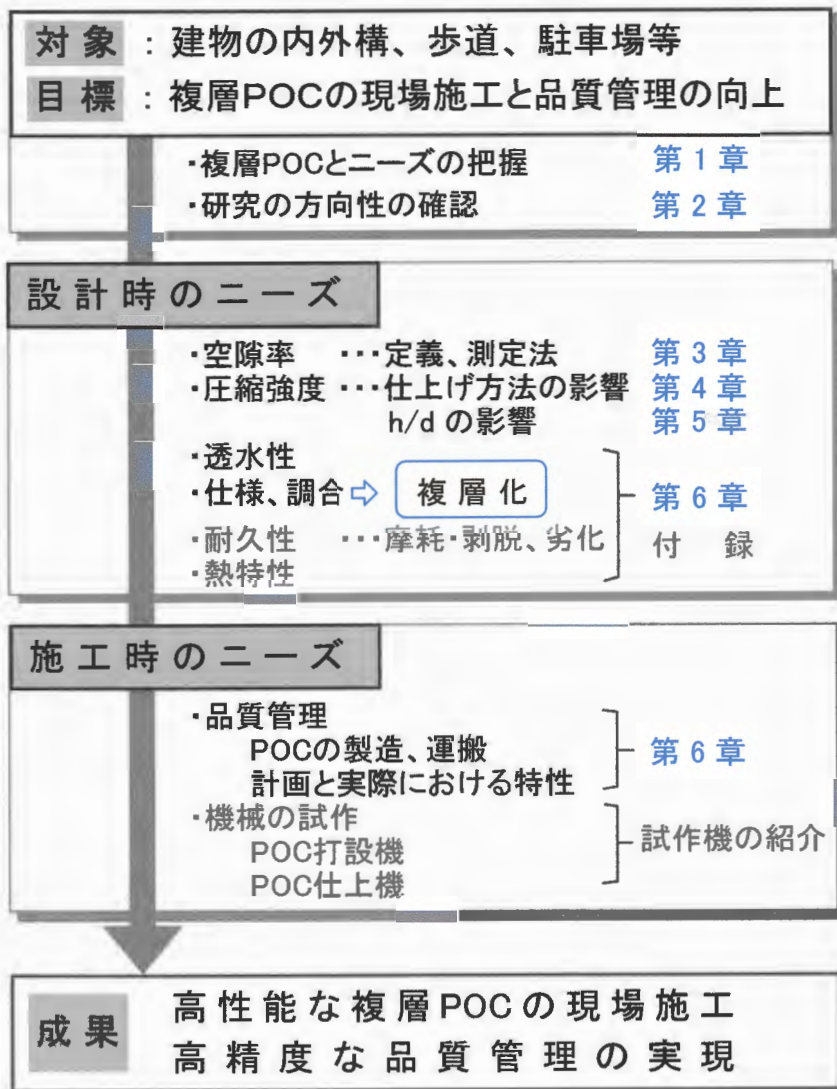


図 1.3 本研究のフロー

1.3 本論文の構成

第1章では、序論としてポーラスコンクリートの現状と本研究の目的を明らかにする。

第2章では、ポーラスコンクリートの各種特性、製造・施工方法に関する既往の研究の概要を示す。

第3章では、ポーラスコンクリートの従来の空隙率測定方法に関する問題提起と新しい測定方法の提案に関する実験とその結果について示す。

第4章では、ポーラスコンクリートを実際に施工するときに注意すべき、仕上げ(締固め)方法の影響に関する実験とその結果について示す。

第5章では、打設したポーラスコンクリートの品質評価時に問題となる、圧縮強度に及ぼす供試体の高さ／直径比の影響に関する実験とその結果について示す。

第6章では、ポーラスコンクリートの適用の拡大につながるいくつかの工夫を採り入れた工法である複層ポーラスコンクリート歩道に関する実施工実験を行い、施工方法と品質の関係を確認した結果について示す。

第7章では、以上について研究のまとめを示す。

なお、本研究にかかわる試作機として、ポーラスコンクリートの打設機、仕上げ機、および現場透水試験装置について紹介する。

最後に付録として、上記以外のポーラスコンクリートの関連テーマに関する研究論文および報告資料を添付するとともに、ポーラスコンクリートに関する海外での技術交流についても紹介する。

注) 本論文において、「空隙率」という記述は、全空隙率と同じ意味で使用している。全空隙率という記述は、ポーラスコンクリートの空隙率の内訳に関する説明箇所において、連続空隙率等との区分を明確にするために使用している。

第1章の参考文献

- 1) 東京都ヒートアイランド対策推進会議:ヒートアイランド対策取組方針、2003年3月
- 2) 一ノ瀬俊明: 地方自治体におけるヒートアイランド対策ー環境省委員会の活動ー、大気環境学会誌、Vol.37、No.6、A71、2002年
- 3) 梅舘秀一郎: ポーラスコンクリート普及拡大の道 多自然川づくりの流れの中で、アース&eco コンクリートマガジン、pp.64-67、2008年夏号
- 4) 安藤慎一郎: ポーラスコンクリート生物共生機能と適用事例 01 現場施工・二次製品による緑化工法、アース&eco コンクリートマガジン、pp.15-23 ほか、2008年夏号
- 5) 日本コンクリート工学協会編:環境対応型コンクリートの環境影響評価手法の構築研究委員会報告書、pp.167-172 ほか、日本コンクリート工学協会、2007年7月
- 6) 国土交通省: 政策課題対応型都市計画運用指針「環境負荷の小さな都市の構築」、2005年
- 7) 福田萬大、越川喜孝、辻井豪、浅枝隆、藤野毅: 夏季に給・散水した保水性舗装の熱環境緩和特性に関する実験的研究、土木学会論文集、No.613/V-42、225-236、pp.225-236、1999年2月
- 8) 唐沢明彦、多田克彦、小畑明、秋元文敏、清水進、江角典広、高森哲也: 保水性コンクリートブロック舗装の路面温度上昇抑制効果に関する研究、太平洋セメント研究報告、第152号、pp.44-58、2007年
- 9) 白江龍三: 建築における環境問題の包括的アプローチ、建築設計資料 No.95 環境共生建築、建築資料研究社、pp.4-23、2004年3月

第2章 ポーラスコンクリートに関する既往の研究

2. ポーラスコンクリートに関する既往の研究

2.1 概説^{1), 2)}

ポーラスコンクリートは、日本では 1964 年頃から、暗渠排水などに用いられる管またはその一部として実用例が見られ³⁾、1975 年頃からは雨水の地下浸透を図るマスに適用された事例がある。1983 年頃から、歩道・駐車場等への透水性舗装として適用されている。(社)日本コンクリート工学協会が 1992 年(平成 4 年)から設置した「コンクリート構造物の緑化設計法研究委員会」の中で、ポーラスコンクリートについての検討が行われ、続いて 1994 年に設置された「エココンクリート研究委員会」(玉井元治委員長)の報告書⁴⁾では、適用上の要求項目のなかで「・・・それらは用途のみならず製造から供用後の管理に至るまで、極力環境負荷を低減することを特徴としている。」とあり、ポーラスコンクリートが自然環境を守り、生活環境を快適にする技術としての注目度が高かったと考えられる。

一方海外では、1987 年にドイツ・オランダ・ベルギー・フランス等によって道路の低騒音化技術として研究プロジェクトが実施され、1992 年から試験舗装の施工がなされたことが報告されている⁵⁾。

本章では、ポーラスコンクリートの現場施工およびその際の品質管理の現状に着目して、本研究に関連する既往の文献を整理する。

2.2 製造方法

ポーラスコンクリートは、細骨材を使わず単粒度砕石などを使用して、空隙を確保して製造することにより得られる。ポーラスコンクリートに要求される目的・機能を達成するためには計画的に設計、調合、製造を行う必要がある。

平岩ら⁶⁾は、ペーストおよび骨材の各性質とポーラスコンクリートの基本性能を実験的に関連付けることにより、ポーラスコンクリートの調合設計法を検討し、ペーストのフロー値の設定、粗骨材の実積率と調合量を結びつける補正係数の導入により、目標空隙率が得られることを報告している(図 2.2.1)。

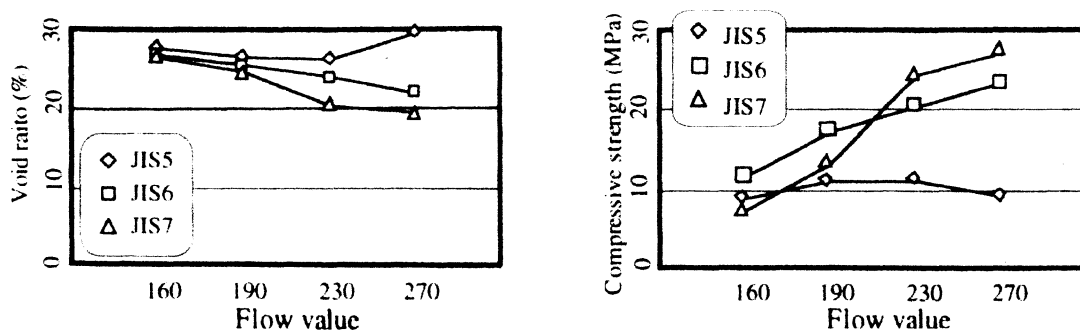


図 2.2.1 空隙率および圧縮強度とフロー値の関係⁶⁾

湯浅ら⁷⁾は、ポーラスコンクリートの製造に関する基礎的研究を行い、ミキサの練混ぜ性能がポーラスコンクリートに適した結合材ペーストの流動性の確保に重要であり、ペースト中の粉体を分散させることで良好な強度実現が期待できることなどを報告している。また、最近では、コンクリートがら等をリサイクル使用したポーラスコンクリートの製造およびその特性についても研究されている。前川ら⁸⁾は、大粒径のコンクリートがらをリサイクル使用したポーラスコンクリートを漁礁ブロック等に適用する場合の製造方法およびその特性について検討している。

2.3 諸特性・機能

2.3.1 強度特性

ポーラスコンクリートは内部に多くの空隙をもつため、普通コンクリートの強度に影響を及ぼす要因としての配合や結合材などの要因の他に、空隙率や空隙の形状・分布、締固め方法などの影響が考えられ、それぞれ研究が進められている。

柳橋ら⁹⁾は、ポーラスコンクリートの強度と空隙率の関係について、水セメント比、ペーストの軟度等を要因として実験を行い、水セメント比 25～30%の範囲では空隙率が 30%以下において水セメント比が低いほど圧縮強度が高いことを報告している。

また、吉田ら¹⁰⁾は、ポーラスコンクリートの空隙分布が曲げ強度に及ぼす影響を実験および数値解析により検討し、空隙が多い部分が破壊起点になりうることを報告している。

ポーラスコンクリートの結合材強度については、湯浅ら¹¹⁾は、圧縮強度に及ぼす影響を実験的に検討し、結合材強度が大きいほど圧縮強度が高く、圧縮強度は結合材強度および空隙率をパラメータとした指数関数で近似することができることを報告している(図 2.3.1)。また、大谷ら¹²⁾は、ポーラスコンクリートの結合材の分布を振動締固めの時間によって変化させて強度特性に及ぼす影響を調べ、空隙率と同様に結合材の分布状態が強度に大きく影響することを報告している。

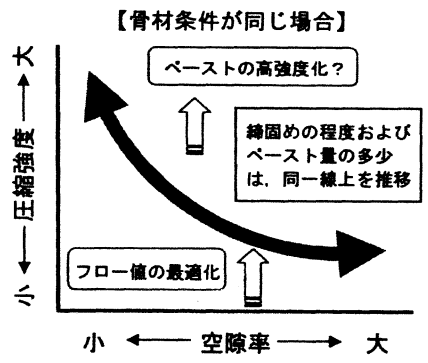


図 2.3.1 ポーラスコンクリートの強度特性に与える諸要因の影響の概念図¹¹⁾

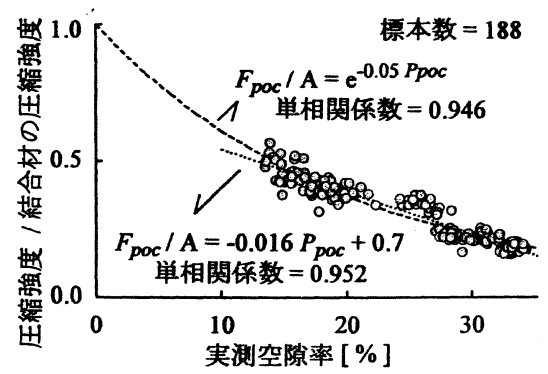


図 2.3.2 圧縮強度と空隙率の関係¹⁴⁾

小椋ら¹³⁾は、ポーラスコンクリートのセメントペーストに関する検討を行い、高性能 AE 減水剤を用いてペーストの強度を改善し、増粘剤を用いてペースト厚さを確保することにより強度を改善できたことを報告している。

また、山本ら¹⁴⁾は、ポーラスコンクリートの圧縮強度および空隙率の変動について実験的に検討し、圧縮強度および空隙率の確率分布はともに正規分布と強い相関があり、圧縮強度の変動係数は、各要因の変化に対してほぼ一定となることを報告している(図 2.3.2)。

2.3.2 空隙率と圧縮強度

岡田ら¹⁵⁾は、ポーラスコンクリートの締固めが空隙率および圧縮強度に及ぼす影響に関する実験を行い、締固め力を制御した振動締固め(型枠バイブレータ)では振動時間が長くなるほど空隙率は低下し、圧縮強度が増加すること、ランマーによる締固めでは落下回数が多くなるほど空隙率は低下し、圧縮強度は増加することを報告している(図 2.3.3)。

湯浅ら^{16),17)}は、ポーラスコンクリート製造時の振動締固め性状の影響について検討した結果、表面振動機により直接締固め作用を受ける上層部と受けない下層部では、概ね 10% 程度の空隙率の差を生じること、同一調合の場合、ポーラスコンクリートの空隙率と圧縮強度の関係は締固め程度にかかわらず、一つの曲線上に存在する(空隙率を変えずに圧縮強度を上げることはできない)こと、ペースト量および振動エネルギー量が多いほど垂れを生じやすいが適切なフロー値を設定すれば、垂れが発生しにくいこと(図 2.3.4)、ポーラスコンクリートの圧縮強度は空隙率と空隙率ゼロの時の圧縮強度を説明変数とする多孔質材料の強度式により表現できること、を報告している。また、ポーラスコンクリートの振動締固めの過程を図示(図 2.3.5)し、振動開始とともに供試体上層部から下層部にかけて順次締固めが進行し、ペーストの変形を伴いながら接触面積が徐々に増加し、最終的には隣り合う骨材が接触すると説明している。

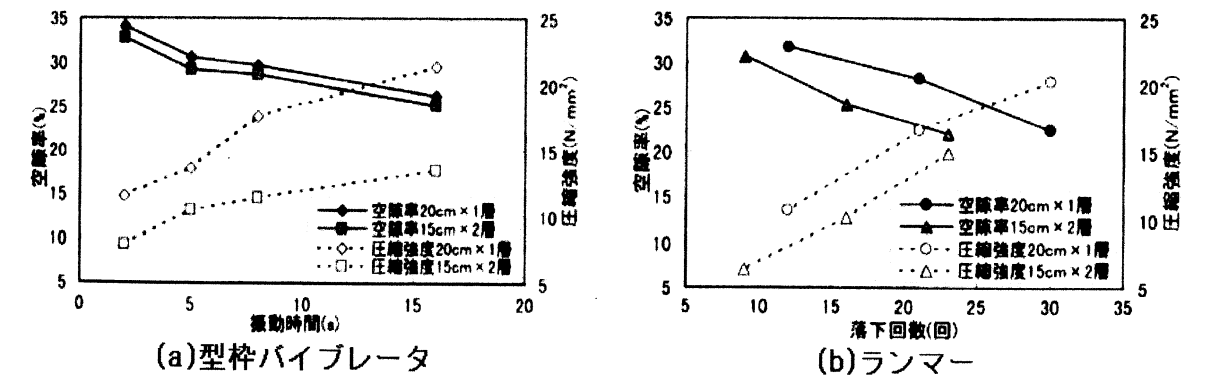


図 2.3.3 空隙率に対する締固めの影響¹⁵⁾

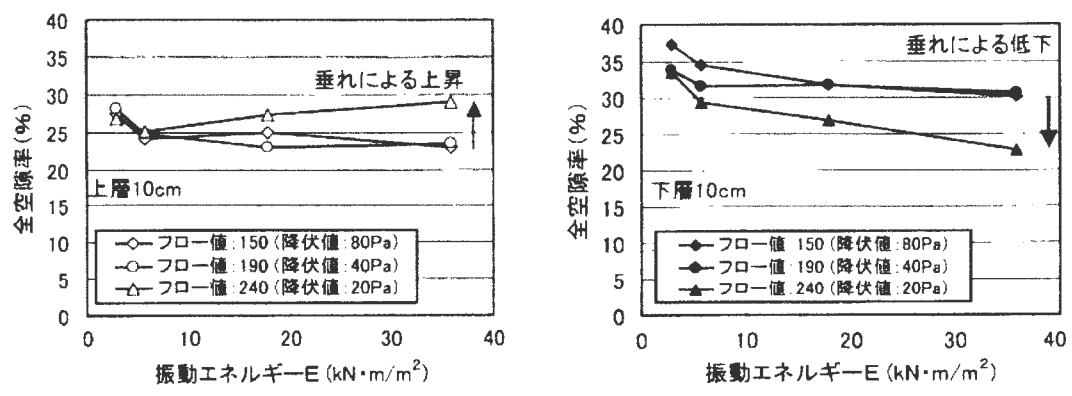


図 2.3.4 空隙率と締固めエネルギーの関係¹⁶⁾

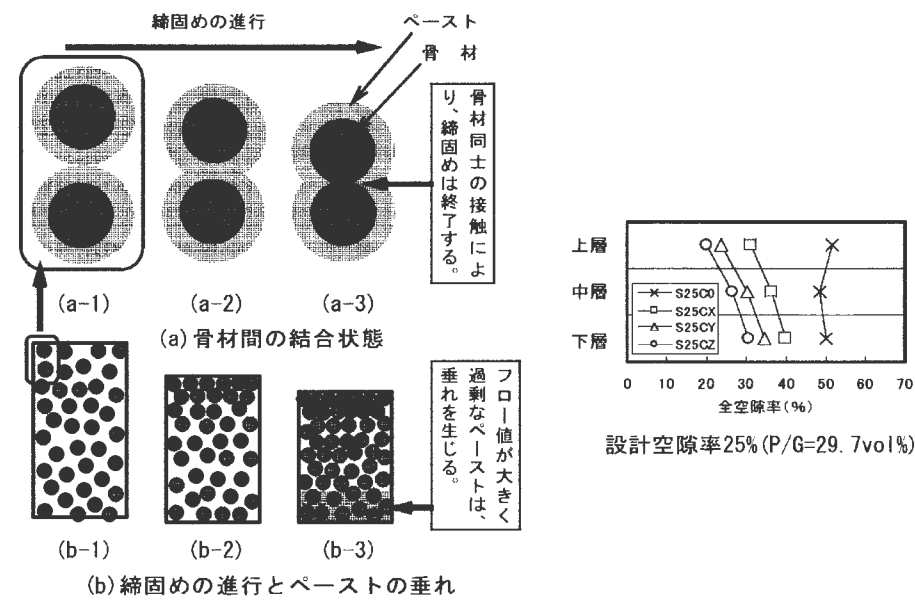


図 2.3.5 振動締固めの進行のイメージ¹⁶⁾

さらに、畑中ら¹⁸⁾は、圧縮強度と空隙率の関係曲線に対して、各要因が及ぼす影響について検討し、式(2.1)の形で示されるポーラスコンクリートの圧縮強度推定式において係数 A は、結合材強度のみに依存し、指数部の定数 B は粗骨材の粒径の影響を受けることを示している。

$$Y = A \exp(-Bx) \tag{2.1}$$

ここで、 Y : 圧縮強度 (N/mm²)
 x : 空隙率 (%)
 A, B : 定数

同様に、大谷ら¹⁹⁾は、ポーラスコンクリートの圧縮強度の推定式について、実験的検討により、骨材強度、水セメント比の影響も係数として組み込んだ式を提案している。

ことに関して、平岩ら⁶⁾(前述)は、粗骨材の実積率と調合上の粗骨材量を結びつける補正係数を導入し、骨材粒径別に補正係数を設定することで目標空隙率が得られることを示している。

越ら²⁰⁾および国枝ら²¹⁾は、円柱型枠につめた供試体とコア抜きを行った供試体を用いて、空隙率、透水係数、強度を測定した結果、円柱供試体では、型枠面に存在する空隙により、空隙率と透水係数はコア抜き供試体に比べて大きくなり、コア供試体に比べて圧縮強度は小さくなることを示した(図 2.3.6)。

また、普通コンクリート(通常強度)の圧縮強度試験時の供試体寸法の影響について、供試体の高さ／直径比の減少に伴い、圧縮強度試験結果が増加することが知られており、いくつかの報告がなされている²²⁾が、その傾向を示す曲線は、多少の幅を持つものとなっている(図 2.3.7)。JIS A 1107 中にも、コンクリートから採取したコアの高さ／直径比が 1.90 より小さい場合の圧縮強度の補正のため、表 2.3.1 の補正係数が示されている。谷川²²⁾によれば、この効果の原因としては、供試体端面に働く摩擦力が供試体の横方向への変形(ポアソン効果)を拘束するためであるとされている。

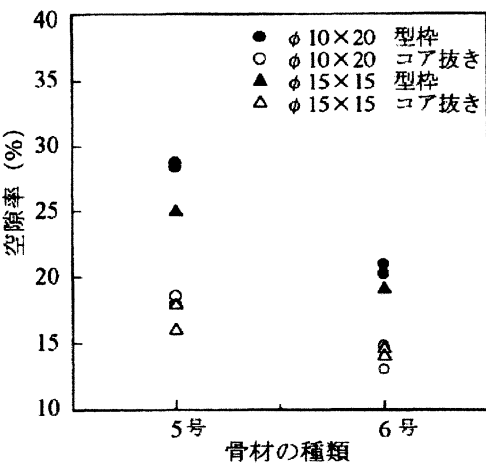


図 2.3.6 供試体作成方法と骨材寸法が空隙率に及ぼす影響²⁰⁾

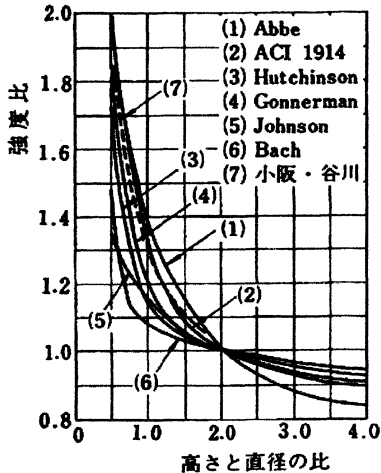


図 2.3.7 供試体の高さ／直径比が圧縮強度に及ぼす影響²²⁾

表 2.3.1 補正係数 (JIS A 1107)

高さと直径との比 h/d	補正係数	備考
2.00	1.00	h/d がこの表に表す値の間にある場合、補正係数は、補間して求める。
1.75	0.98	
1.50	0.96	
1.25	0.93	
1.00	0.87	

備考 表中に示す補正係数は、補正後の値が 40 N/mm² 以下のコンクリートに適用する。

野口ら²³⁾は、高強度コンクリート(圧縮強度 20～120MPa)について供試体寸法・形状の影響を実験および有限要素解析により検討した結果、供試体寸法の増大に伴い圧縮強度が低下するといった寸法効果は高強度なコンクリートほど顕著になること、高さ／直径比の影響は $h/d=2.0$ 以下の供試体において、式(2.2)により評価できることを示している。

$$n = k \{ \ln (2d / h) \}^2 + 1$$

(2.2)

ここで、 $k = 4.84 / F_c + 0.165$

n : F_c に対する圧縮強度の比率

h : 高さ (cm)

d : 直径 (cm)

F_c : $h/d=2$ の供試体の圧縮強度 (MPa) (圧縮強度 20～120MPa)

赤萩ら²⁴⁾は、圧縮強度 40N/mm² のコンクリート供試体を用い、高さ／直径比の影響について実験を行った結果、高さ／直径比が小さくなるにともない圧縮強度が大きくなること、円柱供試体では JIS A1107 の補正值よりも影響が小さく、コア供試体では、高強度コンクリートにおいても JIS の補正を適用できる可能性があることを報告している。

上記の報告は、普通コンクリートに関するものであって、ポーラスコンクリートに関する報告は今のところなされていない。

空隙率の測定方法に関して、前川ら²⁵⁾は、5mm 以下の小粒径骨材を用いたポーラスコンクリートについての実験的研究により、小粒径のポーラスコンクリートにおいては容積法による空隙率の測定では、残留空気および含水による誤差が生じる可能性が高く、質量法による測定が妥当であることを報告している(図 2.3.8)。

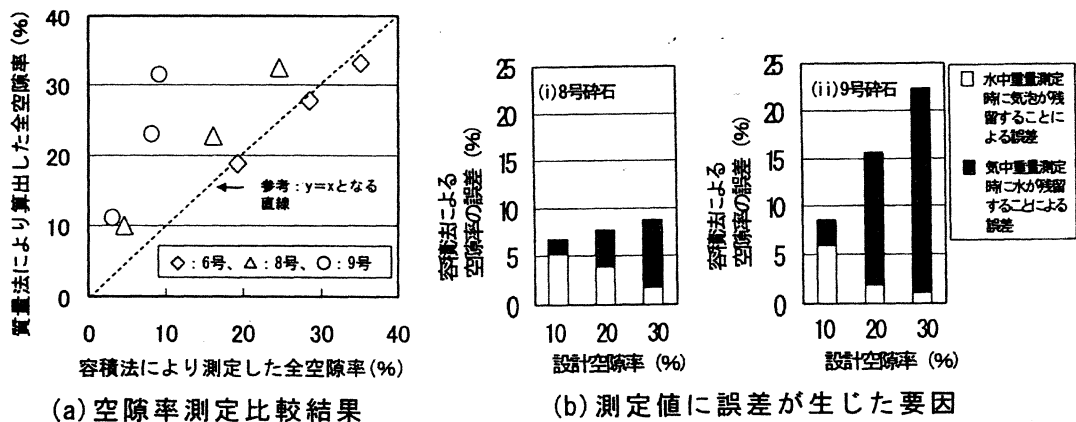


図 2.3.8 小粒径ポーラスコンクリートにおける空隙率測定結果²⁵⁾

以上より、ポーラスコンクリートの空隙率は、調合および締固め方法によって変化するとともに、空隙の分布も結合材のフロー値および締固めにより影響を受ける。圧縮強度は、結合材強度に依存し、空隙率が大きくなると低下するが、圧縮強度と空隙率の関係は指数関数等で推定しうるものであるとされている。一方、強い振動締固めを行わない場合のポーラスコンクリートの空隙率、圧縮強度についてはほとんど報告されていない。

2.3.3 摩耗・剥脱特性

吉田ら²⁶⁾は、ポーラスコンクリートを水際・水中で使用する場合の耐摩耗性について検討し、すり磨き作用および突き砕き作用の摩耗形態において摩耗量は時間に比例し、単位時間当たりの摩耗量を求めることができること、材齢が同じであれば、空隙率が小さいほど摩耗抵抗性が高いことを報告している。

(社)セメント協会舗装技術専門委員会²⁷⁾は、16種類の舗装用ポーラスコンクリートを用いた共通試験のなかで、回転ラベリング試験を実施し、曲げ強度が高いほど平均すりへり量が小さくなることなど(図2.3.9)を報告し、また、ラベリング試験とカンタブロ試験で傾向が異なり、ポーラスコンクリートのカンタブロ試験には検討が必要であることも述べている。

藤崎ら²⁸⁾は、表面振動摩耗試験機およびエロージョン摩耗試験機を用いて、ポーラスコンクリートの耐摩耗性は、圧縮強度が高いほど、粗骨材の粒径が大きいほど、空隙率が小さいほど高い傾向がみられ、すりへの評価は可能であること、耐摩耗性には粗骨材の品質が重要であることなどを報告している。

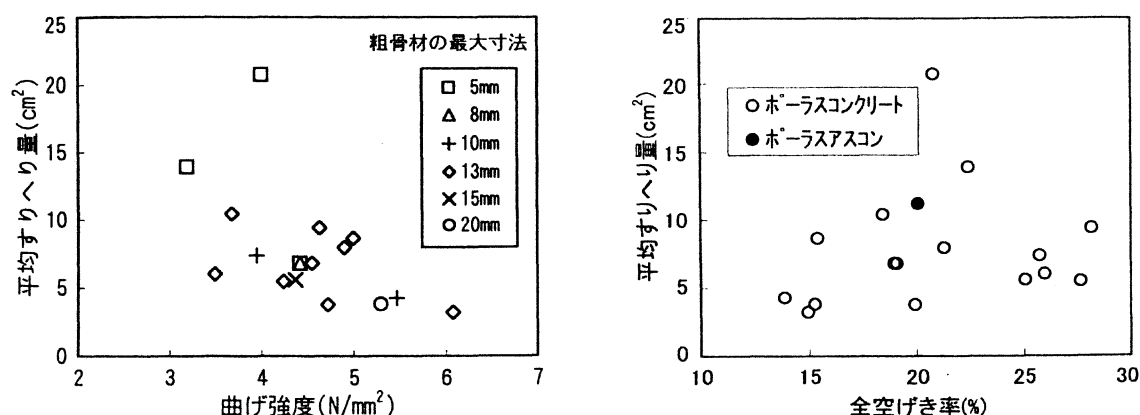


図 2.3.9 舗装用ポーラスコンクリートのラベリング試験結果²⁷⁾

これらの報告は、摩耗・すりへりに対する研究といえるが、透水性アスファルトやポーラスコンクリートでは、普通コンクリートの摩耗現象と異なり、骨材単位で剥脱することもあると考えられる。

透水性アスファルト舗装の骨材飛散抵抗性について、向後ら²⁹⁾は、カンタブロ損失量と剥脱深さを調べ、カンタブロ損失の小さいバインダーを使用した舗装では剥脱深さが小さいこと、カ

深さを調べ、カンタブロ損失の小さいバインダーを使用した舗装では剥脱深さが小さいこと、カンタブロ損失率がある程度以上になると剥脱深さが急増すること、衝撃荷重に対する骨材飛散抵抗性は空隙率の影響が大きいこと、ねじり荷重に対する抵抗性は空隙率の影響が小さくバインダーの選択が重要であることなどを報告している。

剥脱を含めたポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性について、著者ら³⁰⁾は、奥田式すりへり試験機を用いた実験を行い、耐剥脱性は奥田式すりへり試験機によりある程度の評価が可能であること、結合材強度の高いポーラスコンクリートでは普通コンクリートに比べてすりへり係数が小さく耐剥脱性にすぐれる可能性があることなどを報告している。

2.3.4 熱緩和特性

ポーラスコンクリートは、都市のヒートアイランド現象の抑制対策として、従来から注目されており、その温度上昇抑制機能は、ポーラスコンクリートの特徴の一つであり、通気性および保水性等によるものである。最近では、各種のポーラスコンクリートおよび舗装工法について、詳細な温度観測の結果が報告されている。

白井ら³¹⁾は、コンクリート舗装とアスファルト舗装について透水性および不透水性の試験舗装区画および空隙中に貯水する貯水性ポーラスコンクリート舗装を対象に夏期の温度上昇を実験および数値シミュレーションにより比較した結果、ポーラスコンクリートは普通コンクリートより日射吸収率が高いため、ポーラスコンクリート舗装面の温度および舗装面から大気に放出される顕熱流量はアスファルト舗装より小さいが、普通コンクリート舗装より大きくなったこと、貯水性舗装とした場合、舗装面の温度が低下し、気温上昇の抑制効果があることなどを報告している。

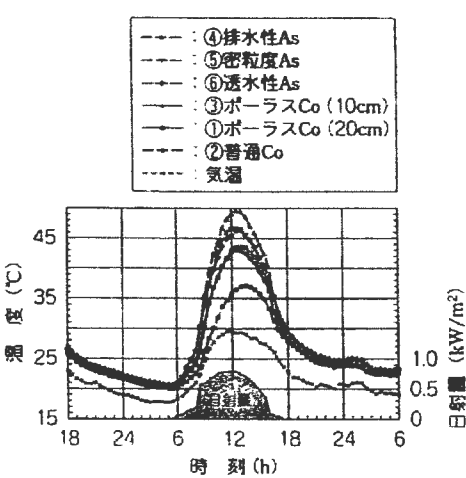


図 2.3.10 試験体の温度変化³²⁾

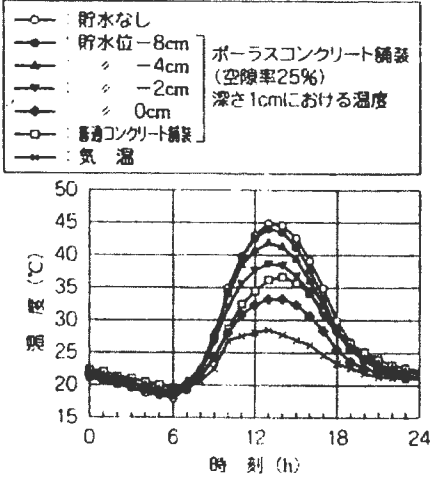


図 2.3.11 舗装温度に及ぼす貯留水位の影響³²⁾

福田ら³²⁾は、保水性および従来のアスファルト舗装および保水性セラミックブロックについて、夏期の舗装温度、アルベドおよび蒸発量を測定した。その結果、周辺への総熱放射量を低減させるには、保水性だけでなく、アルベドの小さい舗装材料を選択することが望ましいこと、舗装表面の熱収支を舗装各層の熱容量をもとに計算すると屋外供試体の実測蒸発量に見合う蒸発潜熱量となること、水分があまり含まれない場合でも空隙率が大きい舗装では通気性により表面近傍の温度を低下させる効果があることを報告している(図 2.3.10、図 2.3.11)。

永井ら³³⁾は、屋上敷設を想定した保水性のあるポーラスコンクリートのブロック体について、模擬的な日射を照射する実験を行った結果、ポーラスコンクリートの空隙率が高いほど温度上昇抑制効果が高くなること、ポーラスコンクリートの潜熱による温度上昇抑制効果を高めるためにはブロック深部の水分を表面付近まで揚水する工夫が必要であることを報告している。

2.3.5 吸音性

今日では、騒音をはじめとする道路沿線環境対策のために、主要道路の走行部分以外の機能を重視して構造物の断面配置等が検討され、ポーラスコンクリートや砕石が適用されることが増えている。最近の主要道路の騒音対策³⁴⁾においては、単なる防音壁の設置にとどまらず、空隙をもつアスファルト舗装またはポーラスコンクリート舗装、構造物への吸音材・振動吸収材の取付け、ポーラスコンクリート等の吸音ブロック設置および非利用エリアへの砕石敷設などの対策法を併用することが多くなっている。

寺島ら³⁵⁾は、ポーラスコンクリートの吸音特性を残響室法により測定し、試料の厚さ 50～150mm においてある程度の吸音能力を有すること、また、設置状態(すきま寸法)により吸音効果が変わることを報告している。

2.4 試験方法

ポーラスコンクリートに関する試験方法は、空隙率の測定方法(硬化体およびフレッシュ時)および透水係数の測定方法が日本コンクリート工学協会(JCI)により規準案³⁶⁾として提案されており、適用されていることが多い。

空隙率測定方法として、容積法は、連続空隙率と独立空隙率およびその和としての全空隙率の値が得られるが、2.2 項で述べたように、小粒径や空隙率の低いポーラスコンクリートにおいて、水の飽和・排出の困難さから測定精度が低くなるという問題点が指摘されている。質量法は、既知の調合条件から全空隙率を求めるものであるが、例えば実施工において、場所によって調合・締固め等の条件が変化している可能性があるときは適用がふさわしくない

所によって調合・締固め等の条件が変化している可能性があるときは適用がふさわしくないということが考えられる。また、JCI 規準(案)では、容積法、質量法とも水中浸漬 24 時間の後、気中放置 24 時間としていることから、正規には 48 時間以上を要するという問題もある。

梶尾³⁷⁾は、ポーラスコンクリートの高さ方向の空隙率分布について、水位法³⁸⁾の水位測定を排除した「浮力法」を提案している。浮力法によれば、供試体を切断することなく、高さ方向の連続空隙率が求められており、測定結果は容積法による連続空隙率とほぼ同等となることを示している。

透水係数の測定方法については、提案されている JCI 規準(案)は、均質な円柱供試体に対するものであるので、打設現場、複層ポーラスコンクリート等の場合については、別の方法を模索的に試みる必要がある。

道路舗装に関しては、測定箇所装置を設置して、単位時間に流入する水量から透水性を評価する現場透水試験方法³⁹⁾も適用されており、簡易な評価方法として、また経年変化を評価する方法として用いられている。ただし、JCI 規準(案)による透水係数と現場透水試験による値との相関関係についてのデータは少ない。また、既存の現場透水試験装置では、高い透水性を示すポーラスコンクリートに対しては測定不能となることも多い。

2.5 現場施工と品質管理

2.5.1 打設方法

上原ら⁴⁰⁾は、比較的大きな粒径のポーラスコンクリートを製造・施工する際の留意点について検討し、バインダーの品質を把握するためには、振動下におけるバインダー落下量を指標にする方法が有効であること、3 m³のポーラスコンクリートをアジテートした結果、40kg のバインダーの損量があったこと、アジテータ車を用いる場合、ドラムを回転させない方がポーラスコンクリートの経時変化を抑えられることなどを報告している。

岳ら⁴¹⁾は、粒径 13mm 以下の規格外再生骨材を透水性(ポーラスコンクリート)歩道に活用し、強度、透水係数等および試験施工箇所の熱特性を測定している。その結果、単位セメント量が多い(460kg)ものの、目標空隙率 10%以下で低品質な規格外再生骨材でも透水性歩道用コンクリートの設計条件を満足すること、吸水率の大きい再生骨材を用いることで天然碎石を用いるより透水性・保水性にすぐれる点があることを報告している。

また、最近では、多自然型河川化、建設廃材の削減、工事の省エネルギー化等を目的として、河川護岸等において、現地で撤去済のコンクリート廃材を破碎し、ポーラスコンクリートの材料として使用し、打設する事例も出ている。長岡ら⁴²⁾は、現場内で、破碎・分級した再生骨材とセメントペーストをアジテータ車で練り混ぜ、護岸工事を施工した事例を紹介し



写真 2.5.1 護岸工事における施工機械 43)



写真 2.5.2 道路用フィニッシャ
(ポーラスコンクリート) 44)

2.5.2 打設機械

浅野⁴³⁾は、主に河川護岸の現場打ちポーラスコンクリート施工において、機械施工事例を紹介している。法面で施工面積が 1000 m²以上の施工を想定したものであり、特殊施工機械の準備、機械の配置等、大掛かりな工事となっている(写真 2.5.1)。

車道舗装⁴⁴⁾に対しては、アスファルトフィニッシャ等、アスファルト舗装用機械をベースとして、改造した機械が用いられることが多い(写真 2.5.2)と考えられるが、施工事例および報告は少ない。中規模面積ないしそれ以下の面積の施工に関しては、機械使用の事例報告は見られない。

2.5.3 品質管理

田中ら⁴⁵⁾は、ポーラスコンクリートのフレッシュ時における性状を現場で迅速に把握する試験方法を検討した結果、ポーラスコンクリートに紙タオルをあてた後、振動を加えてモルタルを付着させ、その付着量を測定する方法を提案している。

湯浅ら⁴⁶⁾は、結合材ペーストの流動性を評価する方法としてビカー針の貫入量による評価を試み、一般に用いられるフロー値だけでなく、ビカー針試験を行うことで、より正確に把握できることを報告している。

ポーラスコンクリートでは、スランプ試験において、スランプ値ゼロであることが少なくなく、ワーカビリティの評価が困難な面があること、練混ぜ後の時間経過に伴うペースト性状の変化も、仕上げ修正が容易な普通コンクリートに比べて施工性に対する影響が大きい、ポーラスコンクリートの品質管理に関しては、一部の施工事例において紹介されるにとどまり、研究報告は少ない。

なお、普通コンクリートの品質管理に関しては、近年の、コンクリートの種類の拡大および構造物に対する品質管理要求の高まりを背景として、例えばコンクリート工学協会の中に、品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価研究委員会が設置されている。新しい特性に

び構造物に対する品質管理要求の高まりを背景として、例えばコンクリート工学協会の中に、品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価研究委員会が設置されている。新しい特性に対する試験法、施工後の確認試験方法等について調査研究が行われ、また、コンクリートの品質に及ぼす施工の影響が検討されている⁴⁶⁾。

2.6 本研究に関連する製品・実施工例

2.6.1 二次製品(ブロック等)

二次製品による舗装への適用報告例として、唐沢ら⁴⁷⁾は、15種の保水性コンクリートブロック(インターロッキングブロック:写真2.6.1、図2.6.1)を使用した舗装について路面温度上昇抑制効果に関する実証的実験を行った結果を報告しており、降雨後ないし給水システムをとともなう舗装工法は温度上昇抑制効果が持続すること、保水性セメントグラウトを使用した保水性ブロック舗装が最も高い抑制効果を示したことなどを報告している。



写真 2.6.1 保水性インターロッキング
ブロック舗装⁴⁷⁾

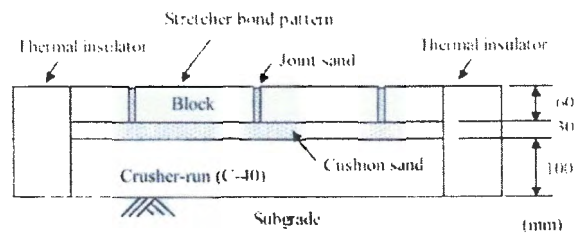


図 2.6.1 保水性インターロッキングブロック
の断面構造⁴⁷⁾

2.6.2 透水性舗装

透水性舗装あるいは排水性舗装には、ポーラスコンクリート、開粒度アスファルト舗装、また、コンクリート二次製品としての平板ブロックによる舗装、その他各種材料による舗装方法があり、実用化が進んでいる^{48)、49)、50)}。透水性舗装には以下のようなメリットがある。

- a) 雨天時の路面の水たまりの発生を防止する。これによって、
 - イ) 車両の走行による水しぶきが発生せず、運転者の視界が確保されるとともに、周辺に水しぶきを飛散させない。
 - ロ) 車両のハイドロプレーニング現象を防止し、またブレーキ時の停止距離を短縮することにより事故防止につながる。
 - ハ) 夜間の路面が見やすくなり、安全性が高まる。
- ニ) 路面(足元)の水切れがよくなるため、歩行者や車椅子利用者の通行が快適になる。

- イ) 都市のヒートアイランド現象を低減する。
- ロ) 路面からの熱輻射を軽減し、通行者の不快感を軽減する。
- ハ) 従来のアスファルトに比べて、高温化しないため流動抵抗が保持しやすく、道路が傷みにくい。
- d) 都市の粉じんを吸収し、雨水とともに排除できる。
- e) 雨水の地下浸透が可能で、地下水循環を確保することができる。
- f) 路面や内部の空気接触面に酸化チタン等の光触媒を付加することにより、NO_x 分解などの大気浄化作用または雨水に吸収された物質の自浄作用が期待できる。

日本においては、道路交通騒音も長年の環境問題となっているため、透水・排水性舗装は低騒音化技術として期待されているとともに、走行安全対策としての機能も高いことから、「機能性舗装」として位置づけられている。機能性舗装による騒音低減効果等については、近藤ら⁵¹⁾、押野ら⁵²⁾、他により検討され、通常の舗装方法に対して数 dB～10dB 程度の騒音低減効果があると報告されている。機能性アスファルト舗装では、交通量にもよるが、供用開始後の経過時間にもなって、空隙の目詰まりやわだちが発生し、保守作業が欠かせない面を持つが、現在では、主要道路における透水性舗装の安全面での優位性が広く認知され、JH でも、建設中の第二名神高速道路の全線に透水性舗装(アスファルト舗装)を採用することとしている。

ポーラスコンクリート舗装に関しては、(社)セメント協会⁵³⁾において、舗装用ポーラスコンクリート共通試験が実施されている。1998 年に曲げ強度、透水試験、ラベリング試験、吸音レベル試験等が実施され、ポーラスコンクリートはポーラスアスコンに比べて、空隙率・透水性を確保しやすいこと、回転ラベリング試験によるすりへり抵抗性が高いこと、すべり抵抗性が高いこと、などが報告されている。

1999年に福井県において50m×幅8m×3箇所⁵⁴⁾、2000年に千葉県において50m×幅3.65mの試験舗装が実施され⁵⁵⁾、その後3年間経過後の中間報告がなされている。報告では、平坦性、すべり抵抗性、わだち掘れに対しては、ほぼ当初の状態を保持しているものの、透水性や騒音低減効果については目詰まりが発生し、低下していることが指摘されている。

梶尾ら⁵⁶⁾は、高機能舗装の一つとしてのポーラスコンクリート舗装が普通コンクリートと同程度の強度を有し、排水性アスファルト舗装に比べて高い耐久性をもつことを述べている。

野田ら⁵⁷⁾は、わだち掘れ・飛散等の起こりにくい排水性舗装として、既設アスファルト舗装の上に薄層のコンクリートを付着オーバーレイさせる工法を採用し、たわみ、変形等について検討した結果、夏期静止荷重に耐え、温度上昇も比較的少ないためアスファルト層の塑性流動も少ないことなどを報告している。

いて検討した結果、夏期静止荷重に耐え、温度上昇も比較的少ないためアスファルト層の塑性流動も少ないことなどを報告している。

野中⁵⁸⁾は、透水性アスファルト舗装のバインダ劣化防止、骨材飛散抑制、目詰まり防止等を目的として熱硬化性樹脂を表面に塗布し樹脂皮膜を作る工法、近赤外線を高反射して路面の熱吸収・温度上昇を抑制する遮熱性舗装工法の事例を紹介している。

透水性舗装は、適用場所や条件に対応して各種の工法の中から適切なものを選択できる状況にある。また、ポーラスコンクリートの適用に関しても、下層の設計(不透水層の有無、不透水層の厚さ、勾配設定など)や表層の設計(樹脂仕上げ、目詰まり防止処置、研磨、リサイクル骨材の使用等)に幅があり、要求される機能や意匠性に対して対応可能な範囲が広がっている。したがって、今後も適用事例が広がるものと考えられる。近年、さらに各種の新しい舗装技術が紹介されており、機能・効果の報告がなされるとともに、透水性舗装の効用について認知度の進展が期待される。

2.7 まとめ

本章では、ポーラスコンクリートの現場施工およびその際の品質管理の現状に着目して、本研究に関連する既往の文献を整理した。以上のように、ポーラスコンクリートには、従来の普通コンクリートないしコンクリート二次製品にはない機能が求められており、とりわけ環境に配慮した場合に適用の必要性が高まることが多い。したがって、今後も適用事例が大幅に増加すると考えられ、引き続きポーラスコンクリートの特性や強度・耐久性、それらを考慮した設計や製造方法などに関する基礎的な研究を深めていくことも必要であると考えられる。ポーラスコンクリートを適用する際に強度やコストなど問題がある場合でも、基礎的な研究成果を元に、それらの問題点を一步步改善・克服して適用事例が積み重ねられていくと想定される。

ポーラスコンクリートの各種性能、すなわち透水・排水性、通気性、吸音・吸着性、生物・植生許容性、軽量性、再生資源利用性等は、土木・建築の分野において極めて有用であり、適用範囲は多岐にわたると考えられる。従来、強度やコストが重視されがちであった建築物・構造物の一要素としてのコンクリートから脱皮し、人と社会のための機能性材料として限らない発展の可能性をもつものとする。

2.8 本研究の位置づけと課題

本章でも逐次指摘したように、現場打設を考えると、実施工上の問題点がいくつか発生する。本研究では、第一章に示した施主・設計者・施工者のニーズを背景に、これまでの研究では不足する部分、未検討の部分の解明・把握を進めることとし、複層ポーラスコンクリートの現場施工に可能な限りとり入れることを考えている。既往の研究(既存の工法)と本研究の関係

a) 設計空隙率の考え方と空隙率の測定方法

課題：振動締固めではなく、コテ仕上げで打設する場合、設計空隙率の決定方法がない。また、小粒径 POC など、従来の空隙率測定法がうまく適用できない場合がある。

- 強い締固めを行わない場合の設計と施工法を示す。
- 空隙率の定義の問題点と新しい定義、精度の高い測定法を提案する。

b) 締固めの影響とその評価

課題：品質の安定化のためには強い締固めを行うことがよいとされているが、ポーラスコンクリートの持つ空隙率を活かす場合にはあえて締固めを抑制し、空隙率を残す方法も考えられる。しかし現状では、締固めの抑制とそれによる硬化ポーラスコンクリートの品質への影響に関しては不明である。

- 強い締固めを行わない場合の施工方法を確立する。

表 2.8.1 ポーラスコンクリートの既往の研究に対する本研究の位置づけ

		既 往 の 研 究	問 題 点	本 研 究	本論文
基本特性	空隙率	JCI規準(案)による定義と測定方法	独立空隙率の定義に疑問 精度と所要時間に問題がある	→準連続空隙率の提案 →新しい測定方法	第3章
		振動締固めを前提としている	実積率まで締固めない場合が不明	→弱い締固めの検討	第4,6章
	圧縮強度	各種要因の影響をある程度把握している	仕上げ方法の影響が判断しにくい 高さ／直径比(h/d)の影響が不明	→仕上げの影響を明確化 →h/dの影響を明確化	第3章 第5章
		供試体による評価が多い	打設したPOCの評価が困難	→現場での評価方法	第6章、付録
仕様	層構造	単層を前提としている	複層POCの報告はみられない	→複層化	第6章
	意匠性	ほとんど未検討	意匠性についての報告がない	→意匠性の向上	
	用途	二次製品、法面、車道が多い	中規模面積に対して適用しにくい	→建物の内外構、歩道等	
		強度重視の調査が多い	機能優先の場合の検討が不十分	→機能性・作業性を向上	
	調合	高セメント量	セメント量(=コスト)の検討が必要	→低セメント量	
		低W/C	作業性が検討されていない	→高W/C	
		小～大粒径	複数粒径の設計方法が未整理	→中粒径、複層化	
	透水係数	雨量想定の透水係数が多い	高透水性のメリット活用が不十分	→高透水性メリット活用	第6章、付録
	耐久性	高強度化による対応を想定	強度重視では作業性が低下する	→総合的な向上	
設計	熱特性	いくつかの事例報告がある	影響要因の検討が不十分	→重要因子の選別	付 録
	設計空隙率	実積率を使用した設計	強い締固めを行わない場合が未検討	→締固めない仕上げ方法	第4,6章
	評価	円柱供試体を漠然と想定	円柱とコアの差が不明確	→円柱とコアの比較	
	透水性	POC単体の透水性能	透水・排水に関する応用例が少ない	→計画的な排水	
施工	事例	実験的な施工が多い	建築外構等の実施工の報告例がない	→中規模面積で実施工	第6章
	作業性	大規模工事が多く、中規模以下の報告が少ない	中規模面積施工の機械化が未検討	→施工機械の開発	試作機の紹介
			作業性向上に関する報告がない	→作業性の向上	
	品質管理	基本的な品質管理	打設後の品質に対する検討が少ない	→品質管理の向上	第4,5,6章

c) 現場打設と供試体との特性の違い

課題: 現場打設したポーラスコンクリートの特性を作成した円柱供試体で評価してよいか。

→ 円柱供試体と打設箇所から採取したコア供試体との違いを確認する。

d) コア供試体の圧縮強度の補正方法

課題: コア供試体の高さ／直径比が小さい場合、普通コンクリートのような補正方法に関するデータがない。

→ ポーラスコンクリートにおける高さ／直径比の影響を明らかにし、補正方法を示す。

e) 調合と作業性、供給体制、コスト

課題: 高い圧縮強度をもつポーラスコンクリートを前提とすると、セメント量を多くする必要があり、現場での作業性が低下する。また、製造単価が上がる。また、レディミクストコンクリートプラントでの製造やトラックアジテータによる搬送および清掃が容易ではなくなる。

→ 製造しやすく、扱いやすいポーラスコンクリートの製造方法を確立する。

f) 耐久性、意匠性

課題: 単なるポーラスコンクリートでは、骨材剥脱等の耐久性に不安があり、また、意匠性が不足する。

→ 複層ポーラスコンクリートなど、付加価値が高く、耐久性・意匠性を高めた工法を提案する。

g) 施工性、施工時の品質管理

課題: 中規模面積のポーラスコンクリート打設に適する打設機、仕上げ機がない。このため、人力等による施工が主になり、作業能率が低く、品質も低下しやすい。また、打設後のポーラスコンクリートの特性(透水係数、耐久性等)を評価する方法がない。

→ 締固めの程度を制御できるポーラスコンクリート用仕上げ機を開発する。

→ 連続的にポーラスコンクリートを敷均しできる打設機を開発する。

→ 高い透水係数に対応できる現場透水性試験装置を試作する。

→ 複層ポーラスコンクリートの表層に使用する樹脂材料の耐候性を把握する。

第2章の参考文献

- 1) 玉井元治：ポーラスコンクリートは環境を「保全」するだけでなく「創造」する、ポーラスコンクリートの製造とこれからがわかる本、(株)セメントジャーナル社、pp.4-13、2001年9月
- 2) (財)先端建設技術センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き、山海堂、2002年6月
- 3) 伊藤昌昭：透水コンクリートの概要および"エコマテリアル"としての用途、セメント・コンクリート、No.576、pp.11-16、1995年2月
- 4) 玉井元治、水口裕之、出村克宣、岡本亨久：委員会報告「エココンクリート研究委員会報告」、コンクリート工学年次論文集、Vol.18、No.1、pp.19-27、1996年
- 5) 野田悦郎：ヨーロッパの低騒音ポーラスコンクリート舗装を視察して、セメント・コンクリート、No.607、pp.8-17、1997年9月
- 6) 平岩陸、田中清人、谷川恭雄、森博嗣：ポーラスコンクリートの調合設計法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.121-126、2001年
- 7) 湯浅幸久、村上和美、前川明弘、畑中重光：ポーラスコンクリートの製造に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.21、No.1、pp.235-240、1999年
- 8) 前川明弘、畑中重光、三島直生、湯浅幸久：リサイクル型大粒径ポーラスコンクリートの製造および漁礁としての適用性に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、第589号、pp.43-48、2005年
- 9) 柳橋邦生、米澤敏男、佐久間護、池尾陽作：緑化コンクリートに関する研究および施工、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.871-876、1994年
- 10) 吉田知弘、国枝稔、音野琢也、六郷恵哲：ポーラスコンクリートの空隙分布が曲げ強度に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26、No.1、pp.1437-1442、2004年
- 11) 湯浅幸久、畑中重光、三島直生、村尾健：ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす結合材強度の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26、No.1、pp.1425-1430、2004年
- 12) 大谷俊浩、村上聖、佐藤嘉昭、三井宜之：結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.139-144、2001年
- 13) 小椋伸司、国枝稔、栗原哲彦、六郷恵哲：ポーラスコンクリートの強度改善、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.1、pp.499-504、1997年
- 14) 山本貴正、畑中重光、小池狭千朗、三島直生：ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、p.1267-1272、2005年
- 15) 岡田正美、柳橋邦生、米澤敏夫、安藤慎一郎：ポーラスコンクリートの振動締固め方法に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.21、No.1、pp.241-246、1999年
- 16) 湯浅幸久、畑中重光、三島直生、前川明弘、宮本高秀：ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.37-34、2002年
- 17) 湯浅幸久、別府智子、宮本高秀、畑中重光：セメントペーストの流動性がポーラスコンクリートの振動締固め性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.23、No.1、

- に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.37-34、2002 年
- 17) 湯浅幸久、別府智子、宮本高秀、畑中重光：セメントペーストの流動性がポーラスコンクリートの振動締固め性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.23、No.1、pp.133-138、2001 年 7 月
 - 18) 畑中重光、三島直生、湯浅幸久：ポーラスコンクリートの圧縮強度－空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.594、pp.17-23、2005 年 8 月
 - 19) 大谷俊浩、村上聖、佐藤嘉昭、三井宜之、平井孝之：ポーラスコンクリートの圧縮強度推定式の構築に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.590、pp.25-30、2005 年 4 月
 - 20) 越健、島崎馨、国枝稔、六郷恵哲：ポーラスコンクリートの空隙率と空隙分布の評価、コンクリート工学年次論文集、vol.21、No.1、pp.249-264、1999 年
 - 21) 国枝稔、古川浩司、鎌田敏郎、六郷恵哲：ポーラスコンクリートの性能評価とその寸法依存性、日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集、p.151-156、2003 年 5 月
 - 22) 谷川恭雄ほか：改訂版建築材料、pp.63-86、理工図書、1988 年
 - 23) 野口貴文、友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮力学特性に及ぼす供試体寸法・形状の影響、日本建築学会構造系論文集、第 473 号、pp.19-28、1995 年
 - 24) 赤萩満、阿部道彦、玉井孝幸、嵩英雄：コンクリートコアの圧縮強度に及ぼす供試体高さ／直径比の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、pp.769-770、2008 年 9 月
 - 25) 前川明弘、山本晃、三島直生、畑中重光：小粒径ポーラスコンクリートの空隙率測定方法に関する研究、第 60 回セメント技術大会講演要旨 2006、pp.218-219、2006 年
 - 26) 吉田宗久、玉井元治：ポーラスコンクリートの耐久性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1185-1190、2002 年
 - 27) (社)セメント協会：舗装用ポーラスコンクリート共通試験結果報告、舗装技術専門委員会報告、1999 年
 - 28) 藤崎隆一郎、堀口敬、佐伯昇：ポーラスコンクリートの耐摩耗性の評価試験方法、ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例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.143-150、2003 年
 - 29) 向後憲一、渡貫辰彦、井上武美：排水性舗装の骨材の飛散抵抗性に関する検討、土木学会舗装工学論文集、第 7 巻、pp.7-1～7-6、2002 年 12 月
 - 30) 中川武志、犬飼利嗣、三島直生、畑中重光：すりへり試験によるポーラスコンクリートの剥脱耐性評価のための基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.1261-1266、2005 年
 - 31) 白井一義、梶尾聡、下山義秀、中原大磯：夏期におけるポーラスコンクリート舗装の表面温度特性、舗装、36-9、pp.16-21、1999 年
 - 32) 福田萬大、越川喜孝、辻井豪、浅枝隆、藤野毅：夏季に給・散水した保水性舗装の熱環境緩和特性に関する実験的研究、土木学会論文集、No.613/V-42、225-236、pp.225-236、

- 34) 国土交通省道路局：騒音に係る道路構造対策、国土交通省ホームページ、2004 年
- 35) 寺島貴根、池野美帆、畑中重光、三島直生、中川武志：ポーラスコンクリートの吸音特性の測定、日本建築学会東海支部研究報告集、Vol.41、pp.425-428、2003 年 2 月
- 36) 日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工に関する研究委員会：同報告書、日本コンクリート工学協会、2003 年
- 37) 梶尾聡：ポーラスコンクリートの配合設計法と空隙性能に関する研究、首都大学東京博士論文、pp.91-126、2008 年 2 月
- 38) Marc De Somer, Etienne De Winne: Method to Establish the "Porosity-Depth" Distribution of Porous Concrete Pavement Using Cylindrical 100cm² Cores Samples, 8th International Symposium on Concrete Roads, Theme II, pp.171-176, 1998
- 39) 日本道路協会編：舗装試験法便覧、日本道路協会、5-4-1、1996 年 10 月
- 40) 上原伸郎、田中伸幸、佐藤健司、増岡臣一：環境に配慮したポーラスコンクリートの試験施工、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1269-1274、2002 年
- 41) 岳康幸、鶴田達哉、佐藤正史、楠貞則、添田政司：規格外再生骨材を用いた透水性歩道用コンクリートの開発、コンクリートテクノ、Vol.26、No.9、pp.35-40、2007 年 9 月
- 42) 長岡誠一、橋本芳：リサイクルポーラスコンクリート工法、アース&eco コンクリートマガジン、pp.50-54、2008 年夏号
- 43) 浅野嘉津真、ポーラスコンクリートの生物共生機能と適用事例 02 機械化施工による緑化工法、アース&eco コンクリートマガジン、pp.24-30、2008 年夏号
- 44) 日本道路協会編：透水性舗装ガイドブック 2007、pp.39-47、日本道路協会、2007 年 8 月
- 45) 田中博一、栗田守朗、江渡正満、戸栗智仁：ポーラスコンクリートのフレッシュ時における品質管理方法、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.127-132、2001 年
- 46) 綾野克紀、丸屋剛、児島正朗、宇治公隆、今本啓一、浦野真次、半井健一郎、神代泰道、高橋幸一：委員会報告 品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価研究委員会、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、2009 年
- 47) 唐沢明彦、多田克彦、小畑明、秋元文敏、清水進、江角典広、高森哲也：保水性コンクリートブロック舗装の路面温度上昇抑制効果に関する研究、太平洋セメント研究報告、第 152 号、pp.44-58、2007 年
- 48) 坂田則彦：騒音を吸収するコンクリート板、セメント・コンクリート、No.607、pp.42-47、1997 年 9 月
- 49) 新田弘之：ポーラスコンクリート舗装の車道での活用、コンクリートテクノ Vol.20、No.8、2001 年 8 月
- 50) 西岡真稔：都市ヒートアイランド抑制を狙う環境配慮型道路舗装、建築雑誌 Vol.120、No.1527、2005 年 1 月
- 51) 近藤升、大西博文：二層式排水性舗装の自動車走行騒音低減効果について、騒音制御、Vol.25、No.3、pp.129-131、2001 年 6 月

- 51) 近藤升、大西博文：二層式排水性舗装の自動車走行騒音低減効果について、騒音制御、Vol.25、No.3、pp.129-131、2001年6月
- 52) 押野康夫：排水性舗装の自動車走行騒音の低減効果、騒音制御、Vol.25、No.3、pp.133-137、2001年6月
- 53) (社)セメント協会：舗装技術専門委員会：ポーラスコンクリートの車道舗装への利用拡大に向けて、セメント・コンクリート、No.631、pp.64-71、1999年9月
- 54) (社)セメント協会：車道用ポーラスコンクリート現場試験舗装結果(福井県)－中間報告(供用3年)－、舗装技術専門委員会報告、R-15、2003年11月
- 55) (社)セメント協会：車道用ポーラスコンクリート試験舗装中間報告－千葉県道松戸－野田線・供用3年－、舗装技術専門委員会報告 R-16、2004年10月
- 56) 梶尾聡、中村秀三、野田悦郎、中原大磯：ポーラスコンクリート舗装の品質特性と使用性に関する報告、コンクリート工学、Vol.42、No.7、pp.24-31、2004年7月
- 57) 野田悦郎、中原大磯、梶尾聡：ポーラスコンクリートを用いたホワイトトッピングの構造的性能の一検討、舗装、40-5、pp.7-12、2005年5月
- 58) 野中眞一：合成樹脂を用いた道路舗装高機能化の技術動向、DIC Technical Review、No.11、pp.37-45、2005年

第3章 空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法

3. 空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法

3.1 背景と目的

ポーラスコンクリートは、透水性、保水性、通気性、熱緩和特性、吸音性、吸着性等、従来のコンクリートにない各種の優れた機能性をもつ。これらは主に、内部の連続的な空隙に依存することから、ポーラスコンクリートの適用にあたって空隙率を正確に設計し、打設現場において適切に品質管理することは重要な意義をもつ。空隙率が、意図する数値から離れてしまうと、各種の機能や強度も変化してしまうためである。したがって、ポーラスコンクリートを用いて歩道や構造物を施工する際に、調合や締固め方法をはじめとして、どのような条件でどのように空隙率が増減するかを知り、設計にフィードバックする必要がある。

空隙率の測定法は、日本コンクリート工学協会の「ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会」により、フレッシュ状態に対して圧力法、硬化状態では容積法および質量法[以下、JCI 規準(案)]¹⁾がそれぞれ提案されている。しかし、骨材種類・粒径の多様化などポーラスコンクリートの幅が広がり、JCI 規準(案)の定める方法が必ずしも適切とはいえない場合も生じている。とくに、骨材粒径が 5mm 以下程度の小粒径ポーラスコンクリート²⁾においては、平均空隙径が小さいため、供試体を 24 時間で飽和および表乾状態にすることが難しく、一般に用いられる容積法では質量測定に誤差が生じやすいことなどの問題点が指摘されている²⁾⁴⁾。

本章では、ポーラスコンクリートの設計・施工方法および品質管理方法の確立に資することを目的として、フレッシュコンクリートの空気量の測定方法(JIS A 1128)を応用した容積圧力法を新たに提案する。さらに、各種の測定方法による空隙率測定結果に及ぼす骨材粒径、締固めの影響を検討するとともに、気中質量の測定時間を短縮するための供試体の遠心脱水処理の効果についても検討する。

3.2 空隙の種類と定義

一般に、ポーラスコンクリートは、粗骨材の各粒の間に分散した大径の連続空隙をもつことが特徴である。その構成イメージを示せば、図 3.1 のようになる（図中の空隙名称は、表 3.1 を参照）。

日本コンクリート工学協会の「ポーラスコンクリートの設計・施工に関する研究委員会報告書」¹⁾によると、連続空隙とは、「供試体表面からみて連続している空隙であり、容易に水で飽和・排水される空隙」、独立空隙とは、「供試体表面からみて、独立している空隙であり、水で飽和・排水するには若干の時間を要する空隙」と定義されている。しかし、実際に独立している空隙の場合、1 日程度の浸水での飽和・排水は非常に困難と考えられる。

また、小粒径・低空隙率のポーラスコンクリートの場合、「独立」でなく空隙が連続していて

も空隙径が小さいため飽和・排水がかなり難しい。こうした点は、空隙の名称と実際の状態とが矛盾するため、誤解を招きやすく、上記報告書の表現はやや適切さを欠くものと思われる。

以上を踏まえ、本研究では、図 3.1 および表 3.1 に示すように、空隙をその連続性に応じて 1 つのレベルに分類する。連続空隙は、JCI 規準(案)どおりの定義とする。準連続空隙は、連続した空隙と考えられるが飽水・排水するのに若干の時間を要する空隙とする。独立空隙は、供試体表面からみて完全に独立している空隙とする。また、全空隙は、基本的には上記の 3 種の空隙の合計とするが、独立空隙は通常のポーラスコンクリートにおいては構成割合が小さいと考えられるため、便宜的に無視しても影響は小さいものと考えられる。

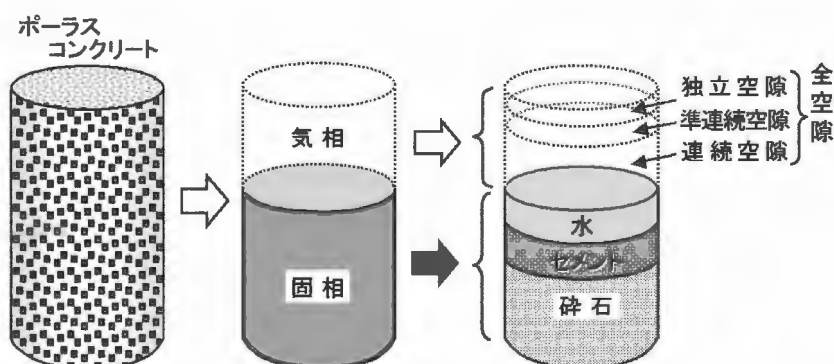
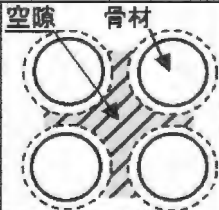
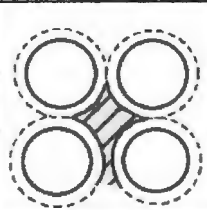
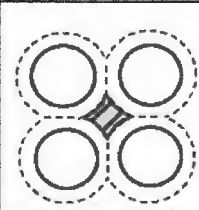


図 3.1 ポーラスコンクリートの構成(容積)

表 3.1 ポーラスコンクリートの空隙の分類

空隙のイメージ					
飽水・排水		容易	時間を要する	困難	
空隙の名称	JCI 規準(案)	連続空隙	独立空隙	—	
	本報告の定義	全空隙			
		連続空隙 A_1	準連続空隙 A_2	独立空隙 A_3	
		全空隙 A_T			
測定方法の有効範囲	フレッシュ			圧力法	
				質量法	
				質量法	
	硬化後	容積法			
		容積圧力法			

[注] 本定義においては、セメントペースト中の微細空隙は対象としない。

3.3 空隙率の測定法

表 3.2 に、本研究で取り扱う空隙率の測定方法の一覧を示す。同表中には、供試体を表面乾燥状態とすることを目的とした水中浸漬の有無、および後述する水中浸漬後の供試体の乾燥時間を短縮するための遠心脱水処理の有無についても実験の一要因と捉え、A～C の記号で、それぞれ区別して示してある。出典の欄において、JCI 規準(修)とあるのは、JCI 規準(案)と同じ算定方法によるが、手順を若干修正した方法であり、提案とあるのは本研究で新たに提案・検討する方法である。

3.3.1 設計空隙率

設計空隙率とは、一般に、調合時のポーラスコンクリートの単位容積から各材料の単位容積を差し引いて求められる空隙量の全容積に占める割合とされている⁵⁾⁷⁾(図 3.1 参照)。しかし、実際には、ポーラスコンクリート内部の骨材が設計条件である実積率までは充填されないため、実測値は設計空隙率より大きめの値をとることが多い。また、算定できる空隙率は全空隙率のみであり、連続・準連続・独立のそれぞれの空隙率を設計時に予測することは困難である。

3.3.2 フレッシュ時の空隙率測定方法

(1) 圧力法

JIS A 1128 に定められたフレッシュコンクリートの空気量測定のための空気量試験器をポーラスコンクリートの空隙率測定に用いる方法で、JCI 規準(案)の中で「ポーラスコンクリートのフレッシュ時の空隙率試験方法(案)」として提案されている^{1), 8)}。本方法では、連続空隙と全空隙が測定される。

測定は、概略、以下の手順で行う。

- a) 試験容器の質量を測定した後、試験容器にフレッシュポーラスコンクリートを充填した状態の質量と、そのポーラスコンクリートの空隙に注水し、容器上端まで満たした状態の質量との質量差から供試体の空隙容積を求め、空隙率を求める。このときの空隙を、連続空隙と見なす。
- b) 試験器の上部を取り付け、空気量測定時の注水法の要領で上部まで注水する。
- c) 空気室を加圧し、開弁時の圧力降下量から容器内の空気量を求める。

c)で求めた空気量が、準連続空隙率および独立空隙率に相当するものと考えられる。また、①で求めた空隙率との合計が全空隙率となる。ただし、本方法では、試料を試験器に充填する際に、振動締固めなど実際の施工方法を再現することが難しい場合があること、および連続空隙率と準連続空隙率の区別ができないこと等の問題点もある。

表 3.2 本実験で対象とする空隙率の測定方法の一覧

試料の状態	試験法の名称	出典	測定手順の概要			他の測定項目	得られる空隙率	算定式※				
フレッシュ時	圧力法	JCI規 準(案) ¹⁾	打設 →	気中質量 W_1	→ 注水 →	全体質量 W_2	→	空気量 A_P		連続空隙率 全空隙率	$A_1 = (W_2 - W_1) / V_C$ $A_T = A_1 + A_P$	
	質量法	JCI規 準(修) ¹⁾	打設 →	気中質量 W_3 (型枠内)						型枠質量 W_{11} 固相密度 ρ_S	全空隙率	$V_S = (W_3 - W_{11}) / \rho_S$ $A_T = (V_A - V_S) / V_A$
硬	質量法 A [水中浸漬なし]	JCI規 準(修) ¹⁾	脱型 →	気中質量 W_4						固相密度 ρ_S	全空隙率	$A_T = (V_A - W_4 / \rho_S) / V_A$
	質量法 B [水中浸漬・ 気中乾燥]	JCI規 準(案) ¹⁾	脱型 → 水中浸漬 (24h) →	気中放置 (24h) →	気中質量 W_4							
	質量法 C [水中浸漬・脱水]	提案	脱型 → 水中浸漬 (24h) →	脱水 (7min) →	気中質量 W_4							
化	容積法 A [水中浸漬・ 気中乾燥]	JCI規 準(案) ¹⁾	脱型 → 水中浸漬 (24h) →	水中質量 W_5	→	気中放置 (24h) →	気中質量 W_6 (即時)	→	水中質量 W_7	連続 + 準連続空隙率	$A_1 + A_2 = (V_A - W_6 + W_5) / V_A$	
	容積法 B [水中浸漬・脱水]	提案	脱型 → 水中浸漬 (24h) →	水中質量 W_5	→	脱水 (7min) →	気中質量 W_6 (即時)	→	水中質量 W_7	準連続空隙率 (→全空隙率)	$A_2 = (W_5 - W_7) / V_A$	
後	容積圧力法 A [水中浸漬なし]	提案	脱型 →	気中質量 W_8	→	注水 →	全体質量 W_9	→	空気量 A_P	試験容器 + 水の質量 W_{10}	連続空隙率 準連続空隙率 (→全空隙率)	$V_S = W_8 + W_{10} - W_9$ $A_1 = (V_A - V_S) / V_A$ $A_2 = A_P \times V_C / V_A$
	容積圧力法 B [水中浸漬・脱水]	提案	脱型 → 水中浸漬 (24h) →	脱水 (7min) →	気中質量 W_8	→	注水 →	全体質量 W_9	→	空気量 A_P		

[注] □ : 測定値, A_T : 全空隙率(%), A_1 : 連続空隙率(%), A_2 : 準連続空隙率(%), A_P : 空気量(%), V_s : 固相容積(cm^3), V_A : 供試体の見かけ容積(cm^3), V_C : 試験容器の容積(cm^3), $W_1 \sim W_{11}$: 質量の測定値(g), 脱水: 遠心脱水処理
※ 水の密度は $\rho_w = 1\text{g}/\text{cm}^3$ (一定)と仮定し, 式中では省略している。

(2) 質量法

硬化後のポーラスコンクリートに対して JCI 規 準(案)¹⁾で提案されている方法をフレッシュ時に応用した方法で、型枠内の供試体質量を測定し、調合設計時の固相密度を使用して固相容積を求め、空隙率を推定する方法である。

測定も容易で、供試体作成直後に空隙率が得られること、また、水中質量の測定が不要であるため、飽和状態や表乾状態を作ることが困難な小粒径ポーラスコンクリートの測定にも適用できる^{2), 3)}などの利点がある。ただし、全空隙率が得られるのみであるという欠点ももつ。

3.3.3 硬化後の空隙率測定方法

(1) 質量法

質量法は、JCI 規 準 (案) に示されている方法であり、供試体の気中質量を測定し、調合設計時の固相密度を使用して固相容積を求め、全空隙率を推定する方法である。

質量法は、空隙率測定方法の中では簡易な方法であるが、測定するのが気中質量のみであり、ポーラスコンクリートの調合条件、骨材およびセメントの密度が既知で、各材料の比率が不変であることを前提としている。また、JCI 規 準(案)では、供試体を表乾状態とするために、気中質量の測定前に 24 時間の水中浸漬および 24 時間の気中放置を行うこととされている。

(2) 容積法

容積法は、JCI 規 準 (案) に示されている方法であり、供試体の気中質量と水中質量の差から

固相容積を求める方法である。

筆者らが行った実験結果によれば、6号～9号砕石を使用したポーラスコンクリートの場合²⁾、6号砕石では容積法と質量法による空隙率がほぼ同程度となるのに対し、粒径が小さくなるほど容積法による測定値の方が小さくなる傾向が得られている。この主な原因としては、容積法による空隙率の測定誤差が考えられる。すなわち、水中質量測定時に供試体内部に気泡が残留することによる誤差、気中質量測定時に水が残留することによる誤差などが考えられる。したがって、容積法で空隙率を測定する場合には、上述の傾向を認識しておく必要がある。

また実用面では、一連の測定に48時間以上を要するという所要時間の問題が挙げられる。

(3) 容積圧力法

本方法は 3.2 で述べたフレッシュ時の空隙率測定の考え方を、硬化後のポーラスコンクリートに応用したものである (図 3.2)。以下、本方法を容積圧力法と称する。

フレッシュ時の場合は、試験容器にフレッシュポーラスコンクリートを充填するのに対して、硬化後の場合は、見かけ容積を測定した上で供試体を容器内に格納する。連続空隙率の測定はフレッシュ時とほぼ同様の考え方であるが、測定精度を向上させるために、本報では、試験器上部を組立てて注水した状態で、供試体を入れる前後の質量の差から供試体の固相容積を求める。空気量に関しては試験容器の容積に対する比率(%)が表示されるので、供試体の見かけ容積に対する比率に換算する必要がある。すなわち、連続空隙率および準連続空隙率は、以下の式を用いて求められる。

$$A_1 = 100 \times \{V_A - (W_8 + W_{10} - W_9) / \rho_w\} / V_A \quad \cdots (3.1)$$

$$A_2 = A_P \times V_C / V_A \quad \cdots (3.2)$$

ここに、 A_1 ：連続空隙率 (%)、

W_8 ：供試体の気中質量 (g)、

W_9 ：供試体を入れた試験器と水の合計質量 (g)、

W_{10} ：試験器と水の合計質量 (g)、

A_2 ：準連続空隙率 (%)、

A_P ：空気量測定により測定された空気量 (%)、

ρ_w ：水の密度 (g/cm³)、

V_A ：供試体の見かけ容積 (cm³)、

V_C ：試験容器の容積 (cm³)

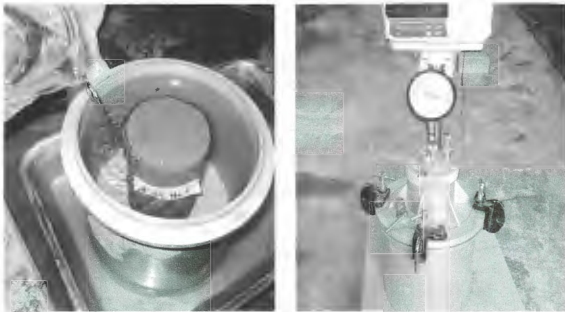
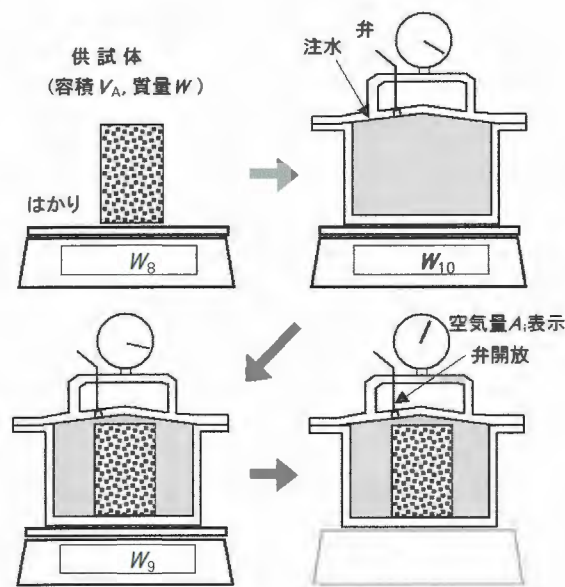


写真 3.1 空気量試験器による空隙率測定
(容積圧力法)

図 3.2 空気量試験器による空隙率測定(容積圧力法)

3.4 実験概要と実験方法

3.4.1 実験の要因と水準

本実験では、幅広い範囲の骨材粒径および空隙率をもつ硬化ポーラスコンクリートに対し、新しく提案する容積圧力法をはじめ各空隙率の測定方法の適用性および妥当性を比較・検討する。表 3.3 に、実験の要因と水準を示す。

骨材には、5～8 号砕石を用いる。また本章では、単位結合材量と締固めの程度を適宜組み合わせることにより空隙率を制御する。これは実務レベルにおいては、必ずしも実験室と同様な締固めが行われないこと、むしろ高い空隙率の実現を優先して振動締固めを行わない場合もあることなどの理由による。また、空隙率に対する締固め方法の影響を把握するため、締固め方法をコテ仕上げと表面振動機による振動締固めの 2 種類とした。

表 3.3 実験の要因と水準

要 因	水 準	
粒 径	5号(13～20mm)	6号(5～13mm)
	7号(2.4～4.8mm)	8号(1.2～2.4mm)
単位結合材量	136L/m ³ ※	241L/m ³ 315L/m ³
締 固 め 方 法	コテ仕上げ	表面振動機による振動締固め
空隙率測定方法	表2に示す9種類	

※：8号砕石を用いた場合のみ、結合材量の調整が必要なため155L/m³とした。

表 3.4 供試体の諸元

骨材種類	単位結合材量 (L/m ³)	W/C (%)	締固め 方法 *	設計空 隙率(%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	G	SP
5号	241	30	コテ	25.2	117	390	1381	0
			振動	20.8			1501	
6号	136	46	コテ	35.2	80	175	1385	0
			振動	30.5			1512	
	241	30	コテ	24.7	117	390	1385	
			振動	20.0			1512	
7号	136	46	コテ	36.3	80	175	1366	0
			振動	33.2			1450	
	241	30	コテ	25.8	117	390	1366	
			振動	22.7			1460	
	315	25	コテ	18.1	137	560	1366	2.8
			振動	15.0			1450	
8号	155	46	コテ	34.1	92	200	1361	0
			振動	30.2			1466	
	241	30	コテ	25.6	117	390	1361	
			振動	21.7			1466	
	315	25	コテ	17.9	137	560	1361	2.8
			振動	14.0			1466	

[注] *:「コテ」はコテ仕上げのみを、「振動」は表面振動機による振動締固めを示す。

3.4.2 調合および供試体の作成方法

表 3.4 に今回の供試体の調合条件および諸元を示す。結合材の水セメント比は、締固め時に結合材が脱落しないだけの十分な粘性を確保するために、単位結合材量が多いほど W/C が小さくなるように 3 種類に変化させた。骨材には、同一の岩種（三重県佐奈産緑紋岩、表乾密度 2.70 ～2.72g/cm³）で、粒径範囲のみ異なる 4 種類を用いた。

本実験では、締固め程度が極めて軽微なコテ仕上げの供試体が含まれることから、調合設計時には、碎石の実積率として、JIS A 1104 に準拠したものに加え、突き棒で締め固められていない条件で得られた値も別途測定した。

各締固め方法による実積率の測定結果を図 3.3 に示す。同図には、締固め比も併示してある。ここで、締固め比は、以下のように定義した。

(締固めなしの実積率)

(締固め比) =

.....

..... (3.3)

(JIS 法による実積率)

締固め比は、骨材粒径によらず、おおよそ 0.92～0.94 の範囲でほぼ一定となっている。

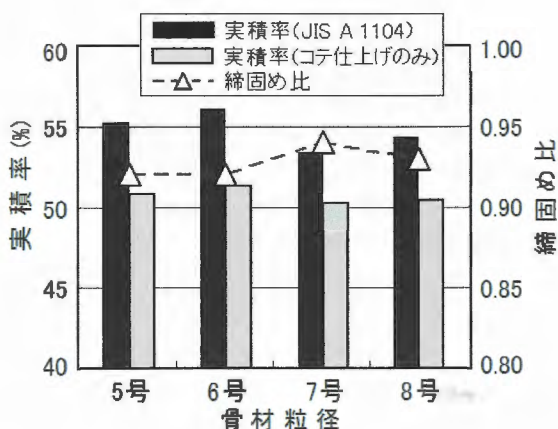


図 3.3 骨材の実積率と締固め比

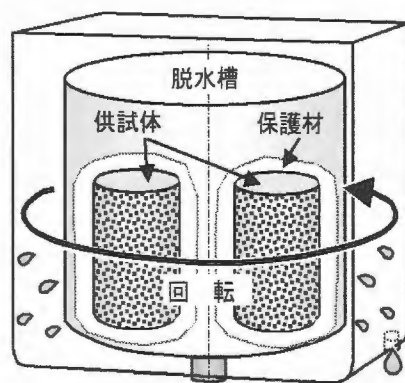


図 3.4 供試体の遠心脱水処理

練混ぜには、傾胴ミキサを使用し、碎石、セメント、水の順で投入した後、2 分間（8 号碎石を用いた場合には、3 分間）練り混ぜた。

供試体は、圧縮強度試験用型枠($\phi 100 \times 200 \text{mm}$)を使用して作成した。空隙率の制御はポーラスコンクリートの単位調合量からあらかじめ求めた供試体 1 個あたりの所定質量を型枠に充填する方法で行った。型枠への打込みは、振動締固めの場合⁹⁾、3 層に分けて突き棒により締め固めた後、高周波バイブレータを組み込んだ表面振動機を使用して行った。コテ仕上げ供試体については、供試体内で著しい不均一が生じない程度に突き棒で突き固めた後、コテ仕上げを行った。作成した供試体は、合計 48 体である。

3.4.3 実験方法

(1) フレッシュポーラスコンクリートの空隙率測定

ポーラスコンクリート供試体の作成時に、質量法および圧力法による空隙率の測定を行った。測定回数は、各水準につき 1 回ずつ、合計 36 回行った。

(2) 硬化ポーラスコンクリートの空隙率測定

硬化後のポーラスコンクリート円柱供試体について、容積法、質量法、容積圧力法の 3 方法による空隙率測定を各水準につき 1 回ずつ実施した。したがって測定回数は、それぞれ 48 回である。写真 3.1 に、容積圧力法の測定実施状況を示す。

(3) 供試体の遠心脱水処理

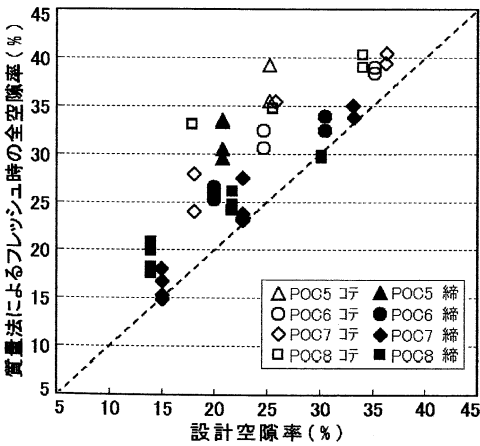
本実験では、容積法による測定において、水中から供試体を取り出した後、気中で 24 時間放置するという手順の時間短縮を図るため、図 3.4 の装置(市販の洗濯機)を用いて供試体の遠心脱水処理を試みた。脱水槽は、直径 350mm、回転数約 800rpm で、供試体が損傷しないようタオルで保護した上で、7 分間の脱水を行った。

3.5 実験結果

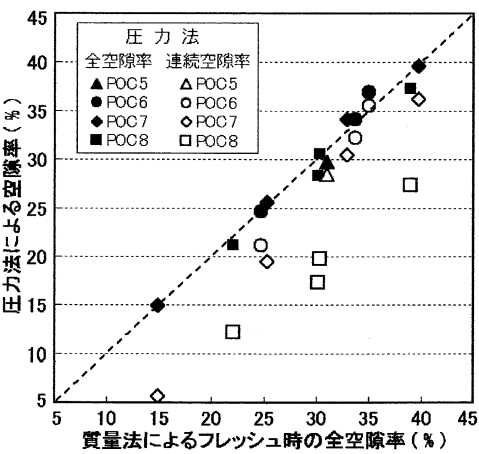
3.5.1 フレッシュポーラスコンクリートの空隙率測定結果

図 3.5 に、フレッシュポーラスコンクリートの空隙率の測定結果を示す。図(a)には、設計空隙率と質量法による円柱供試体の全空隙率の測定結果の関係を示す。図によれば、両者の相関はかなりばらついており、設計空隙率と比べて実測空隙率の方が、最大で 15%程度大きくなっている。とくに、コテ仕上げの場合に差が大きく、また、粒径の大きい 5 号砕石を用いた場合には、締固め方法によらず差が大きい。これは、型枠による壁効果¹⁰⁾が影響していること、および締固めが不十分なこと、すなわち調合設計で用いた実積率まで締め固めることができないことなどのためと考えられる。図(b)には、2 つの測定方法、すなわち、質量法および圧力法の測定結果の比較を示す。ここで、質量法による測定結果は全空隙率のみを示し、圧力法については、連続空隙率の測定結果も示す。まず、全空隙率（塗りつぶしたプロット）に注目すると、両者の測定結果には非常によい相関があることから、いずれの方法でもほぼ正確な値が測定されていると判断できる。また、圧力法による連続空隙率（白抜きのプロット）からは、粒径が小さくなるほど（例えば、POC7、POC8）連続空隙率の全空隙率に対する割合が小さくなっていることが分かる。これは、フレッシュポーラスコンクリートを充填した圧力容器に注水する際に、骨材粒径が小さいほど空気が抜けにくいことによると考えられるが、その残存する気泡の量も、圧力法では精度良く測定されていることを示す。

以上の結果より、全空隙率に関しては、いずれの測定方法でも精度良く測定されていると判断できること、および測定される空隙量に対してセメントペーストの硬化時に発生する収縮量は（W/C=50%程度以下では）十分に小さいと考えられることから、以下、硬化後の空隙率の測定結果との比較対象として、質量法によるフレッシュ時の全空隙率測定結果を用いることとする。

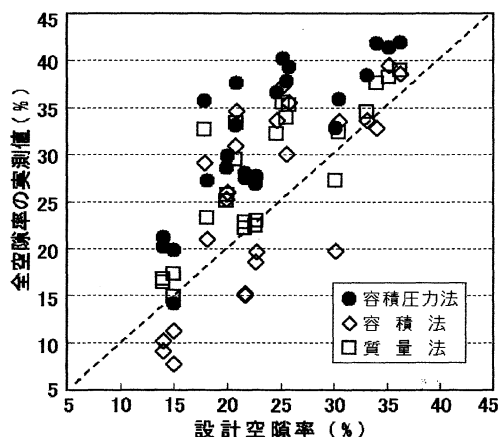


(a) 質量法による全空隙率実測値と設計空隙率の関係

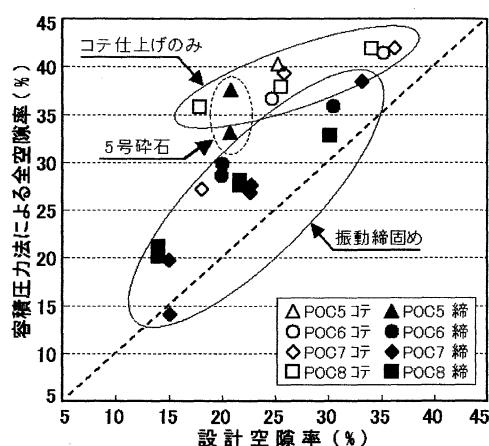


(b) 圧力法と質量法による空隙率実測値の関係

図 3.5 フレッシュポーラスコンクリートの空隙率の測定結果



(a) 全空隙率(3 方法)の実測値と設計空隙率
の関係



(b) 容積圧力法による全空隙率と設計空隙率
の関係

図 3.6 硬化ポーラスコンクリートの全空隙率測定値と設計空隙率の関係

3.5.2 硬化ポーラスコンクリートの空隙率測定結果

硬化したポーラスコンクリート供試体について、容積法、質量法および容積圧力法で測定した全空隙率を図 3.6 に示す。ここで、容積法および容積圧力法で得られる測定値については、連続空隙率と準連続空隙率を合計したものを全空隙率として示した。

図 3.6(a)は、3 種類の測定方法で得られたすべてのデータと設計空隙率の関係を示したものである。図によれば、いずれの測定方法においても全空隙率の測定値はばらついており、設計空隙率との相関性が明瞭ではない。これは、フレッシュ時〔図 3.5(a)〕と同様、型枠の壁効果や締固めの不足等の影響によるものと考えられる。

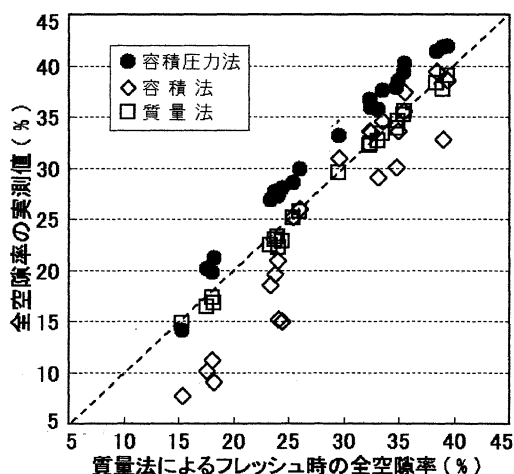
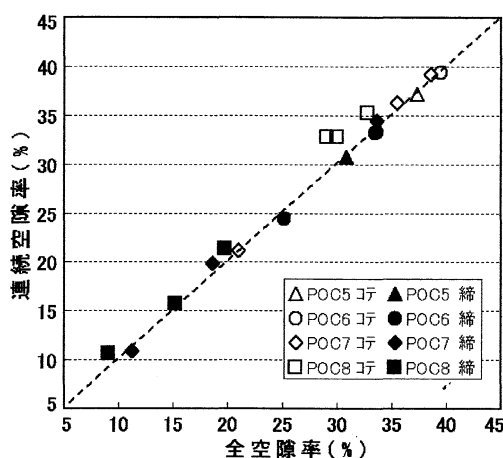
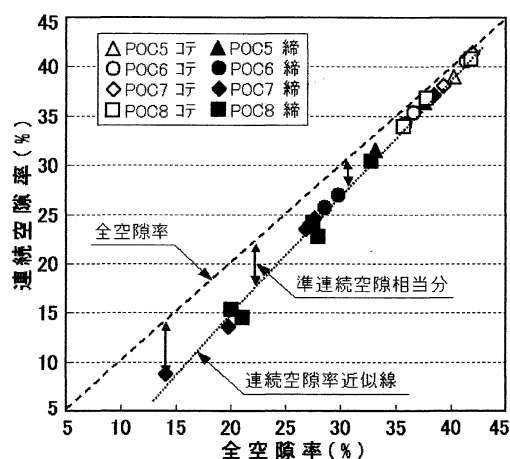


図 3.7 硬化後の全空隙率と質量法によるフレッシュ時の全空隙率の関係



(a) 容積法



(b) 容積圧力法

図 3.8 硬化ポーラスコンクリートの連続空隙率と全空隙率

容積圧力法による測定値のみを取り出し、骨材および締固めの影響について図 3.6(b)で考察する。図によれば、フレッシュ時と同様に、振動締固めの場合にはコテ仕上げのみの場合と比較して設計空隙率との差が小さいことがわかる。すなわち、振動締固めの方が、空隙率の値は小さくなるものの、全空隙率の制御は容易であるといえる。また、5号碎石を用いた供試体では、やはりフレッシュ時と同様、締固め方法によらず設計空隙率との差が特に大きくなっている。

硬化後の全空隙率の測定結果と質量法によるフレッシュ時の全空隙率の測定結果との関係を図 3.7 に示す。図から明らかなように、硬化後の全空隙率と設計空隙率とを比較した前掲の図 3.6 と比べて、測定値の相関が良い。また、測定方法については、容積圧力法と質量法によるデータのばらつきが小さく、これに対し、容積法ではデータのばらつきが大きいことがわかる。これは、3.3 で述べたように、供試体によっては水中浸漬および気中放置の過程で含水量が安定しない場合が生じることによると考えられる。測定値の大きさに関しては、質量法による値がフレッシュ時の結果とほぼ同程度となるのに対して、容積圧力法は大きめの、容積法は小さめの値となる傾向がある。この原因としては、容積圧力法では脱型後にそのまま気中質量を測定した場合に、供試体が表乾状態と比べて、わずかに乾燥しており、空隙率が大きく測定されたことが考えられる。また、容積法で空隙率が小さく測定される傾向は、既往の研究結果²⁾と同様である。

図 3.8 に、容積法および容積圧力法により測定された各供試体種類別の連続空隙率と全空隙率の比較を示す。図(a)に示す容積法の結果によれば、全空隙率と連続空隙率がほぼ同程度となり、準連続空隙率がほぼ 0%であると判定される。一方、図(b)に示す容積圧力法の結果によれば、準連続空隙率は、粒径によらず、全空隙率が大きくなるほど小さくなる傾向が見られ、全空隙率が 15%の場合で 6%程度となっている。

3.5.3 遠心脱水処理の効果

ここでは、遠心脱水処理の効果を検討するため、脱水処理の有無による測定値の比較を測定方法ごとに図 3.9 に示す。なお、データはすべての骨材粒径を含んでいる。

図 3.9(a)に、脱型後、すぐに気中質量を測定して容積圧力法を適用した空隙率（水中浸漬なし）と、24 時間水中浸漬後、取り出して脱水処理をした供試体について容積圧力法を適用した空隙率（水中浸漬・脱水処理）の比較を示す。

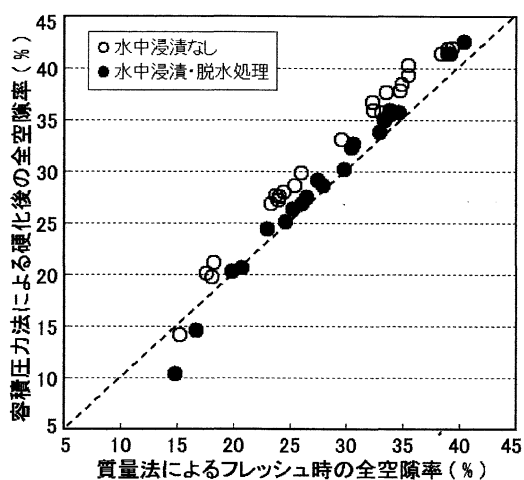
図によれば、脱水処理後の空隙率が質量法によるフレッシュ時の全空隙率にほぼ一致しているのに対し、水中浸漬なしの場合には 2~3%程度大きな値となっている。その理由としては、前述したように、脱型時の供試体が表乾状態よりも乾燥しているためと考えられる。一方、脱水処理後の供試体は表乾状態に近いと判断できる。

測定値のばらつきは、脱水処理の有無にかかわらず同程度と見ることができる。また、質量法によるフレッシュ時の全空隙率が 15%付近のデータが小さい値となっているが、これは測定された空隙のほかに独立空隙が存在していることが理由として考えられる。

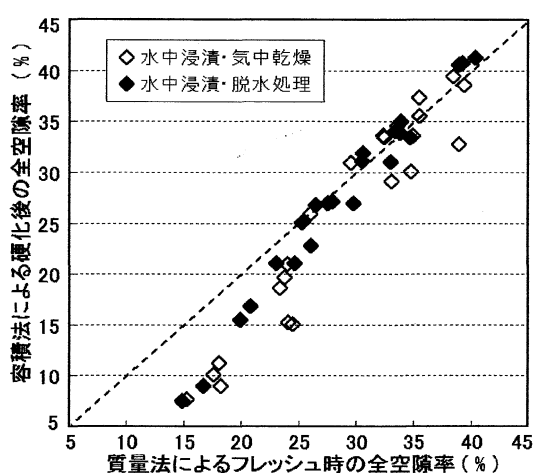
図 3.9(b)に、容積法で測定した空隙率の比較を示す。水中浸漬後に気中乾燥したデータはばらつきが大きいのに対して、脱水処理を行ったデータではばらつきが小さく、質量法によるフレッシュ時の全空隙率に若干近い値となっている。このことから、容積法においても、供試体の脱水処理が有効であると考えられる。

また、全空隙率がおおよそ 25%程度以下で、容積法による測定結果が小さくなる傾向が見られる。この傾向は脱水処理の有無にかかわらず見られ、また、図(a)の容積圧力法の結果から、気中質量測定においては脱水処理によってほぼ表乾状態にできると考えられるため、この誤差は水中質量測定時に供試体内部に気泡が残留したことによる誤差と考えられる。図によれば、この水中質量測定時の誤差は、空隙率が小さくなるほど大きくなる傾向がわかる。

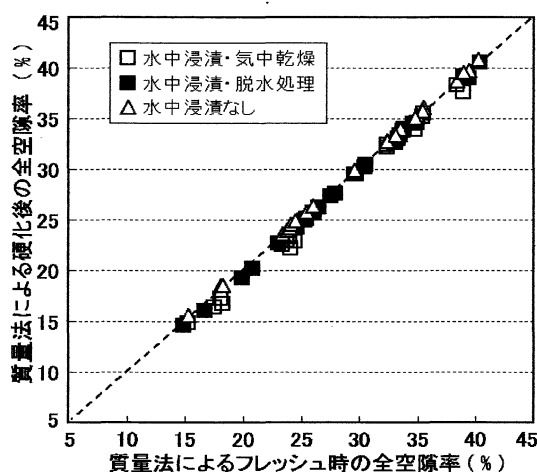
図 3.9(c)に、同様に質量法で測定した空隙率の比較を示す。図によれば、脱水処理の有無にかかわらず、いずれの方法による測定値も質量法によるフレッシュ時の全空隙率とよく一致している。このような傾向、すなわち、質量法で水中浸漬なしの測定結果が水中浸漬したものと変わらないという傾向は、前述した容積圧力法の結果（図 3.9(a)）と一見矛盾しているが、この原因は測定値の処理方法の違いによる影響と考えられる。すなわち、供試体が表乾状態以上に乾燥した場合に、容積圧力法ではその過剰乾燥水分の質量をそのまま水の密度（本報では 1.0g/cm^3 ）で除して容積として取り扱うのに対し、質量法では固相の密度（本報では約 2.5g/cm^3 ）で除して容積に変換するため、密度差の分だけ含水状態の誤差を過小評価する結果となる。以上の考察からは、いずれの測定方法も供試体を表乾状態とするという仮定条件が満足されていないため、是非の判断はできないが、同一の質量測定値を用いた場合でも誤差の出方が異なるという点は認識しておく必要がある。



(a) 容積圧力法



(b) 容積法



(c) 質量法

図 3.9 供試体の脱水処理の効果

3.6 硬化後の空隙率測定方法の比較と提案

3.6.1 空隙率測定方法の比較

本実験結果より、今回提案する容積圧力法について、以下のようなメリットが確認された。

- 1) 小粒径を含むポーラスコンクリート全般に適用できる。
- 2) フレッシュ状態および硬化後の供試体、または施工後に採取したコア供試体など、試験容器に収まり、見かけ容積を求めることができれば、どのような形状でも空隙率が測定できる。
また、本実験において、質量法によるフレッシュ時の全空隙率に近い値が得られたことから、高い精度が期待できる。
- 3) 連続空隙率と準連続空隙率を同時に測定でき、固相密度がわかれば、測定結果の一部を利用して、質量法による全空隙率も算定することができる。

- 4) 試験方法が簡便で、かつ既存の装置を活用して短時間に測定できる。
- 5) 質量法の測定結果と比較することにより、独立空隙をある程度推定できる。

表 3.5 に、硬化後のポーラスコンクリート供試体を対象とした質量法、容積法および容積圧力法の比較を示す。なお、表中にはおおよその総合評価結果も記した。

質量法は、これらの中では簡易で比較的精度の高い方法であるが、全空隙率しか得られない点、ポーラスコンクリートの調合条件、骨材およびセメントの密度が既知でなければならない点など、品質・施工の管理にはあまり適さないといえる。容積法は、調合条件等が既知でなくても空隙率を測定できる方法であるが、特に小粒径のポーラスコンクリートに対する測定精度と連続空隙・準連続空隙の分析に難点があると考えられる。容積圧力法は、上述のメリットをもつため、質量法および容積法に比べて、得られる空隙率の種類、測定精度、所要時間、制約条件の点で総合的に優れ、一般的な品質管理・施工管理に適するものと考えられる。

表 3.5 硬化後ポーラスコンクリートの空隙率測定方法の比較

		質 量 法			容 積 法		容 積 圧 力 法	
得 ら れ る 空 隙 率		全 空 隙 率			連 続 空 隙 率 準連続 空隙率		連 続 空 隙 率 準連続 空隙率	
計 測 項 目		供試体の見かけ容積 気 中 質 量			供試体の見かけ容積 気 中 質 量 水 中 質 量		供試体の見かけ容積 気 中 質 量 容器+水の質量 容器+水+供試体の質量	
必 要 条 件		調合および使用材料 の密度が既知			供試体のサイズ が計測可能		供試体が試験器 に入ること	
細 区 分	表 2 の 記 号	A	B	C	A	B	A	B
	処 理	水中浸漬 なし	水中浸漬 気中放置	水中浸漬 脱 水	水中浸漬 気中放置	水中浸漬 脱 水	水中浸漬 なし	水中浸漬 脱 水
所 要 時 間		数 分	48時間以上	24時間以上	48時間以上	24時間以上	数 分	24時間以上
精 度	粒径 13mm程度以上	○	◎	◎	○	◎	○	◎
	粒径 5～13mm程度	○	◎	◎	△	○	○	◎
	粒径 5mm程度以下	○	○	◎	×	△	○	◎
総 合 評 価		○	○	◎	△	○	○	◎

[注] ◎: 精度が比較的高く適用もしやすい、○: 精度および適用性に一長一短がある、△: 精度および適用性に問題がある、
×: 適用困難。

3.6.2 容積圧力法の位置づけと準備手順

容積圧力法により、空隙率を測定する場合には、図 3.10 に示すような 2 つのパターンの準備手順が考えられる。すなわち、供試体脱型後、すぐに気中質量を測定して容積圧力法を行う手順（この場合、供試体の乾燥度によって数%の誤差が発生しうる。）、および水中養生の途中で水中から取り出した供試体を遠心脱水処理して容積圧力法を行う手順である。いずれのパターンでも上記の手順によれば、比較的短時間で精度の良い測定ができるといえる。

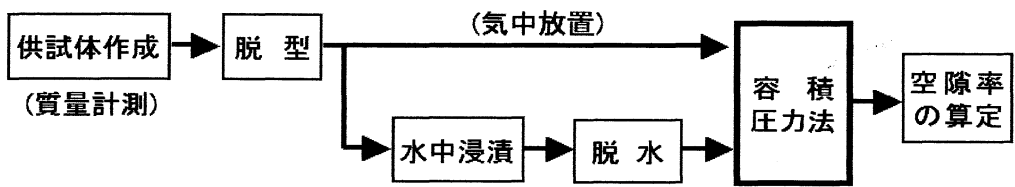


図 3.10 容積圧力法の準備手順

3.7 まとめ

空気室圧力法を用いた硬化ポーラスコンクリートの空隙率の測定方法 (容積圧力法) を提案し、従来の容積法および質量法と比較することにより、以下の知見が得られた。

- 1) 容積圧力法により、小粒径の硬化ポーラスコンクリートを含めた空隙率測定が可能である。
また、空隙種類 (連続、準連続) の分類、所要時間の短縮も可能になるなどの利点がある。
- 2) 従来、用いられてきた容積法は、測定値のばらつきが大きく、空隙率が 15%以上の範囲では、最大で 10%程度小さい値となる場合がある。
- 3) 空隙率の測定に際し、水中浸漬・気中放置を行う場合、水の飽和・排出が容易に進まないと測定精度が低下する。この問題を解消する方策として、遠心脱水処理が有効である。

第3章の参考文献

- 1) ポーラスコンクリートの設計・施工に関する研究委員会：同報告書、日本コンクリート工学協会、pp.179-180、2003 年
- 2) 前川明弘、山本晃、三島直生、畑中重光：小粒径ポーラスコンクリートの基礎的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.60、pp.264-270、2006 年
- 3) 前川明弘、山本晃、三島直生、畑中重光：小粒径ポーラスコンクリートの空隙率測定方法に関する研究、第 60 回セメント技術大会講演要旨、pp.218-219、2006 年
- 4) 畑中重光、三島直生：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、2006 年
- 5) 平岩睦、田中清人、谷川恭雄、森博嗣：ポーラスコンクリートの調合設計に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.23、No.1、pp.1117-1122、2001 年 7 月
- 6) 湯浅幸久、畑中重光、三島直生、村尾健：ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす結合材強度の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26、No.1、pp.1425-1430、2004 年
- 7) 山本貴正、畑中重光、小池狭千朗、三島直生：ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.27、No.1、pp.1267-1272、2005 年
- 8) 安藤慎一郎：フレッシュコンクリートの品質管理と試験方法、ポーラスコンクリートの製造とこれからがわかる本、セメントジャーナル社、pp.38-41、2001 年
- 9) 湯浅幸久、畑中重光、三島直生、前川明弘、宮本高秀：ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.34-44、2002 年 2 月
- 10) 村上聖、大谷俊博、三井宣之、平居孝之：ポーラスコンクリートモデル供試体の圧縮強度とその理論に関する研究、ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集、pp.55-62、2002 年

第4章 仕上げ（締固め）方法がポーラスコンクリートの 空隙率および圧縮強度に及ぼす影響

4. 仕上げ(締固め)方法がポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度に及ぼす影響

4.1 背景と目的

これまでに、空隙率に及ぼす締固めの影響は、振動締固めを行うことにより空隙率および圧縮強度のばらつきが小さくなること、空隙率－圧縮強度の関係のグラフにおいて、締固めの影響は結合材強度を切片とする指数関数で示される近似曲線上を移動すること、すなわち、締固めを行うと空隙率が下がり圧縮強度が増加すること、などの知見が得られている¹⁾⁷⁾。

一方、ポーラスコンクリートの用途によっては、振動締固めを行わない場合もあるが、この場合、ポーラスコンクリートの空隙率をどのように制御(または管理)するかという問題がある。一般に、購入時の碎石のデータとしては、JIS A 1104 による実積率測定値が示され、実積率は所定の突固めを行った状態における測定値であるため、締固めを行わないポーラスコンクリートの空隙率を設計する方法がなく、圧縮強度等の特性を推定することも現状では不可能となる。また、空隙率に対する影響を調べる場合に、円柱型枠により製作した供試体で評価すると、現場に打設されるポーラスコンクリートの特性と異なってくることが考えられ、締固めの影響も異なることに注意する必要がある。

現実的に、ポーラスコンクリートの適用を計画する場合、これらの問題の検討を避けるため、かさ容積が最小となるような強い振動締固めを前提とすることが多いが、この場合には、圧縮強度は得やすいものの、ポーラスコンクリートの空隙率が小さくなり、透水性等の特性が十分に得られていない場合も考えられる。また、駐車場を含めて、車道以外のポーラスコンクリート適用箇所においては、高い圧縮強度が不要な場合も多いため、ポーラスコンクリート用の仕上げ機械、すなわち締固めを目的とするのではなく、表面の仕上げを主な目的とする軽度な振動エネルギーによる機械が求められており、そのような場合の締固め程度を評価する必要もある。

本研究では、3 種類の仕上げ(締固め)方法がポーラスコンクリートの基本的特性に及ぼす影響を把握することを目的として、現場に打設したポーラスコンクリートからコア抜きしたコア供試体の空隙率、圧縮強度および透水係数を測定し、定量的な評価を行った。

4.2 実験概要と実験方法

4.2.1 実験の要因と水準

表 4.1 に、実験の要因と水準を示す。

仕上げ(締固め)方法の影響は、ポーラスコンクリートの空隙率に現れると考えられ、圧縮強度は空隙率にほぼ依存すると考えられる。本実験では、粗骨材粒径 3 水準、設計空隙率 3 水準、供試体高さ(打設厚さ)3 水準、仕上げ(締固め)方法 3 水準(軽盛り、コテ仕上げ、振動締固め)として、

表 4.1 実験の要因と水準

要 因	水 準
骨材（粒径 mm）	5(13-20)、 <u>6(5-13)</u> 、7(2.5-5)
目標空隙率(%)	15、 <u>20</u> 、30
供試体高さ(mm)	50、 <u>100</u> 、200
仕 上 げ	振動、コテ、軽盛り

※下線は基準値

表 4.2 表面振動機の諸元

重 量		33 (kg)
打撃板	幅	0.28(底 0.25) (m)
	長さ	0.40(底 0.30) (m)
走行速度		24～27 (m/min)
振 動 数		1.5 (Hz)
起 振 力		4.9 (kN)
エンジン出力		1.5 (kW)

ポーラスコンクリートを作成した。ただし、粗骨材は 6 号、設計空隙率は 20%を基準の水準とし、仕上げ方法 3 水準は全ての条件に対して行うものとした。

4.2.2 仕上げ方法の分類と空隙率

ポーラスコンクリートの締固め方法の 3 種類は、次のように分類し、施工した。

- a) 軽盛り・・・型枠の高さまで一層でフレッシュポーラスコンクリートを敷き詰める。締固めは可能な限り行わず、表面は、平滑にする目的で軽くコテで押さえて仕上げを行う。
- b) コテ仕上げ・・・フレッシュポーラスコンクリートを、まばらな箇所ができない程度に軽くコテで締めながら型枠に敷き均し、最後に表面をコテでしっかりとおさえて仕上げとする。
- c) 振動締固め・・・振動機械(プレートランマ)による締固め。型枠に所定高さより 2cm 程度高めにフレッシュポーラスコンクリートを敷き均し、表面を軽くコテで平滑にした後、振動機械を作動させて 2 回通過することとした。振動機械の運転は、可能な限り同一の状況になるよう配慮して行った。表 4.2 に使用した振動機械の諸元を示す。

図 4.1 に空隙率に対する締固め方法の影響のイメージ図を示す。

概略的には、従来、設計空隙率は骨材の実積率を使用して計算し、打設されたポーラスコンクリートは、振動締固めを行うことによりほぼ設計空隙率が達成されると考えられている(図中の▲印)。もし、締固めをまったく行わず、軽盛り状態で仕上げた時の空隙率は、骨材の実積率の値を締固めない状態(軽盛り)で測定した値を代入して推定すると、6 号碎石の場合には図のように通常の設計空隙率より 7～9%程度大きな値となる(図中の□印)。したがって、コテ仕上げなどの強い締固めを行わない仕上げでは、この 2 つの値の間に位置することとなるため、打設後の仕上げ方法によってどのような実測空隙率となるのかを把握し、設計空隙率の推定精度を高めていく必要がある。

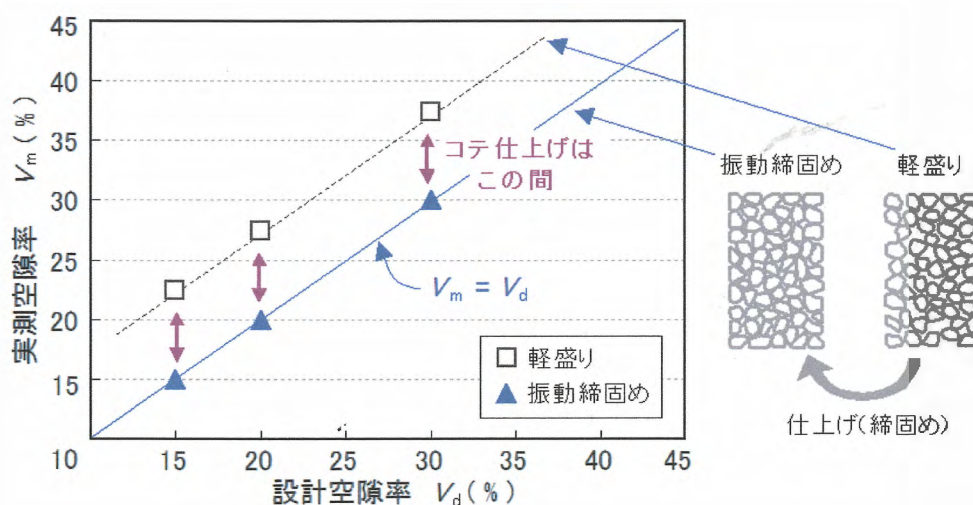


図 4.1 空隙率に対する締固め方法の影響のイメージ

また、詳細に予測すると、ポーラスコンクリートの仕上げ方法による空隙率の変化幅は骨材のみの場合の締固めによる変化幅より大きい。また、軽盛り時のかさ容積および空隙率は、結合材の流動性が低いと大きくなり、この傾向は設計空隙率が小さくなるほど大きい。

さらに、ポーラスコンクリートの締固めに必要な振動エネルギー^{3), 9)}は、骨材の粒径、形状および粒度分布(最大粒径と最小粒径の比)、結合材の単位量および流動性等に依存するとともに、締固めが可能となる単位時間あたりの振動エネルギーのしきい値もこれらに依存すると考えられる。すなわち、振動締固めを行っても必ずしも図 4.1 のようには設計空隙率に近づかない場合もありうると考えられる。

4.2.3 実験方法

(1) 供試体

実験に使用した材料は、普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm^3)、混和剤としてポリカルボン酸系高性能減水剤(密度 1.07g/cm^3)、骨材として三重県佐奈山産 5 号(13~20mm、表乾密度 2.72、実積率 58.1%)、6 号(5~13mm、表乾密度 2.72、実積率 57.4%)、7 号(2.5~5mm、表乾密度 2.67、実積率 54.6%)である。

供試体は、表 4.1 に従い、6 号砕石、設計空隙率 20%、高さ 100mm を基準の水準とし、水セメント比 30%、目標フロー値 190 で、各条件 3 本とし、合計 81 本を作成した。

ポーラスコンクリートの練混ぜは、パン型ミキサ(容量 100L)を使用し、ペースト先練り方式でフロー値を確認してから砕石を投入し、2 分以上練り混ぜた。

ペーストのフロー値は、190 を目標として、各調合に適する量の高性能 AE 減水剤を添加した。

打設現場は、掘削の後、路床をプレートランマにより転圧し、所定の高さ(ポーラスコンクリート打設厚さ)の型枠を設置した。ポーラスコンクリートは、幅 320mm×長さ 700mm(軽盛りお

よびコテ仕上げ、振動締固めの場合は機械の通過を円滑にするため 1300mm)の型枠に打設し、コア供試体の間隔は 100mm を確保した。

ポーラスコンクリートの打設は、4.2.2 で述べた仕上げ方法によって行った。振動締固めの機械の通過速度は 0.17m/s 程度(実測)とした。このとき、1ヶ所の振動時間は(打撃板長さ÷0.17m/s×2=3.5s となる。この時の振動エネルギーは、およそ 2kN・m/m²である。

ポーラスコンクリート打設後、乾燥防止のための散水を毎日行い、コア抜き作業を行った 14 日目から 22 日目まで水中養生とした。コア抜きは、内径 93mm のコアドリルを使用して行い、目視により供試体に微細なひび割れ、キズ等が発生していないことを確認した後、コアの両端を洗浄・研磨して供試体とした。材齢 23 日の時点で気中放置し、容積圧力法による空隙率測定を行った。測定の後、乾燥させて硫黄によるキャッピング処理を行った。

圧縮強度試験は、打設後 28～29 日に実施した。合わせて、結合材の圧縮強度試験も打設後 28 日に実施した。

なお、ポーラスコンクリートのコア供試体の特性を把握する貴重な機会であるため、透水係数も合わせて測定した。透水係数の測定は、キャッピング処理の前に行った。

(2) 測定方法

空隙率は、日本コンクリート工学協会による「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」¹⁰および、容積圧力法(第 3 章で記述)¹¹⁾によった。

透水係数の測定は、キャッピング直前に行い、日本コンクリート工学協会による「ポーラスコンクリートの透水係数試験方法(案)」¹⁰⁾によった。このとき、試験装置の内径は 100mm であるため、直径 93mm の供試体の側面に緩衝材(発泡ウレタン)を巻きつけて測定した。

コア供試体の圧縮強度については、高さが供試体によって異なるが、ここでは高さ／直径比による補正は行っていない(圧縮強度試験結果に及ぼす高さ／直径比の影響に関しては、第 5 章にて検討)。結合材の供試体は、直径 50mm、高さ 100mm(標準)である。

4.3 実験結果と考察

4.3.1 仕上げ方法の影響と各種要因との関係

(1) 設計空隙率

6 号砕石を用いたポーラスコンクリートについて、供試体高さ $h=100\text{mm}$ の条件における、実測空隙率と設計空隙率との関係を図 4.2 に示す。ここで、設計空隙率は、JIS A 1104 による砕石の実積率を使用して計算した値として、3 つの仕上げ方法を比較した。また、実測空隙率は、質量法と容積圧力法の 2 種類の測定方法による。その結果、締固めを行わない軽盛りでは設計空隙率より(空隙率の値で)8%程度大きくなり、コテ仕上げでは設計空隙率より若干大きめ(-2～+3%程度の空隙率)、振動締固めでは設計空隙率より小さい(-1～-6%程度)空隙率となった。

後述する複層ポーラスコンクリート歩道の施工実験(第6章)においても、コテ仕上げにより現場打設された基層ポーラスコンクリートの空隙率が設計空隙率に近く、振動締固めでは設計空隙率より数%低い結果が得られている。これらの結果から判断すれば、ポーラスコンクリートの高さ、調合、測定方法などの条件によっては、設計空隙率より数%小さい空隙率となることは起こりうる現象であると考えられる。以下、その理由について考察する。

図4.3に、仕上げ方法によるポーラスコンクリートのかさ容積の変化のイメージを示す。軽盛り時のかさ容積は、図(a)に比べ、図(b)のように、設計空隙率が小さくなる(単位結合材量が多くなる)ほど、結合材の流動性が低いほど、大きくなると考えられる。また、軽盛り時のかさ容積の大きさと締固めに必要な振動エネルギーとの間には相関関係があるものと考えられる。

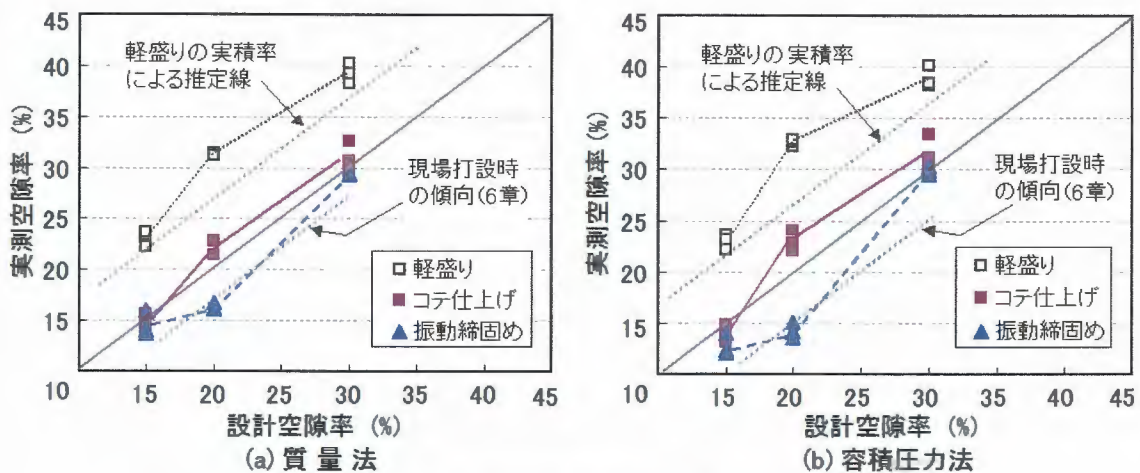


図 4.2 実測空隙率と設計空隙率の関係 ($h=100\text{mm}$)

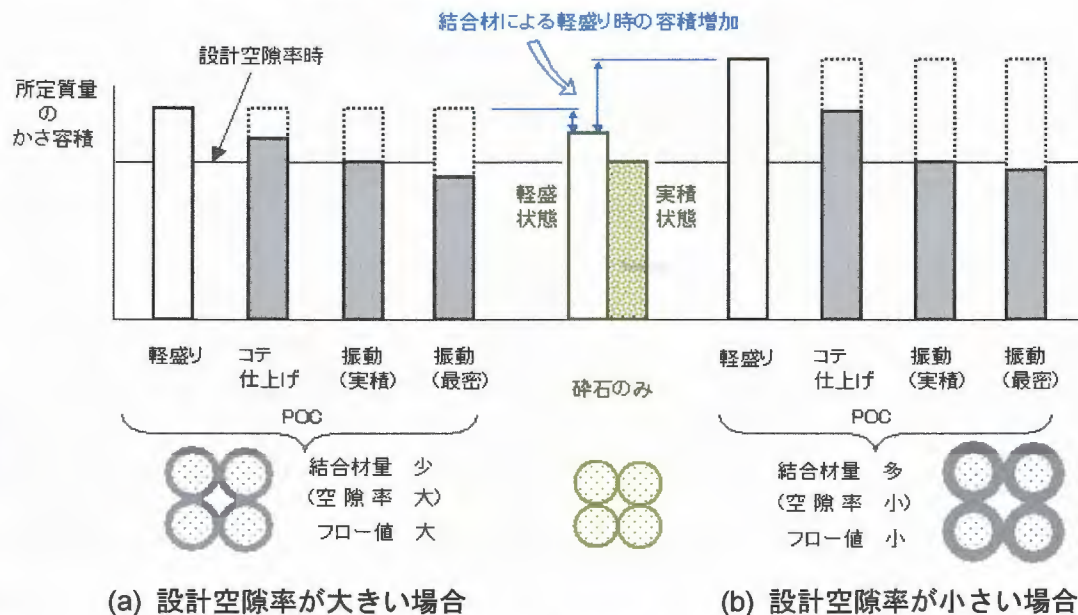


図 4.3 締固め時のかさ容積の変化のイメージ

振動締固め時の実測空隙率が設計空隙率を下回る理由として、以下の a)・c) が考えられる。

- a) 骨材をペーストが包囲している場合、図 4.4 に示すように、摩擦力による骨材のインターロックをペーストが緩和(潤滑)する効果が生じると考えられ、骨材のみの場合よりも若干流動性が高まり、骨材が移動しやすくなることによって締固め後のかさ容積が小さくなる。

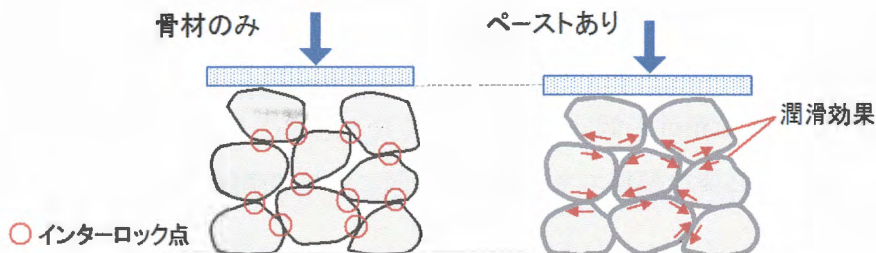


図 4.4 ペーストによるインターロックの緩和(潤滑)効果

- b) 骨材の実積率試験時には壁効果が生じる。すなわち図 4.5 に示すように、通常、骨材の実積率は粒径 40mm 以下の骨材に対しては 10L 程度の容器を使用して測定するため、壁効果が比較的大きいのに対し、現場で採取するコア供試体においては、このような容器による壁効果は発生しない。また、実積率試験時と現場打設における締固め方法が異なることも影響要因である。

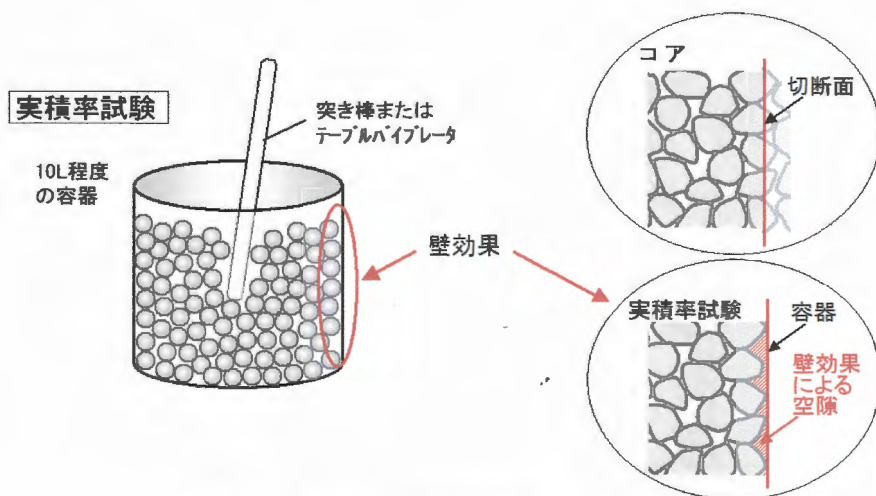


図 4.5 骨材の実積率試験時の壁効果

- c) 供試体の高さの影響（後述）

上記の理由 a)・c)に加え、軽盛りに関しては、空隙率の再現性は高くはないと思われ、比較的大きな誤差を含むものと考える必要がある。

(2) 供試体の高さ

図 4.6 に、6 号砕石、目標空隙率 20% の場合について、供試体の高さを実測空隙率の関係を示す。図から、供試体の高さ(ポーラスコンクリートの打設厚さ)が 100mm 程度において差が大きくなっており、高さ 50mm 程度では振動締固めとコテ仕上げの実測空隙率が近くなること、高さ 200mm の場合も高さ 100mm に比べて仕上げ(締固め)方法による差が小さくなっていることがわかる。

図 4.7(a)に、今回の実験における振動締固めの効果について、供試体高さごとの締固めのイメージを示す。高さ 50mm では締固めエネルギーは全体に及ぶものの、骨材のインターロックが早期に生じるため、締固めによる容積変化および空隙率変化が少ないと考えられる。高さ 100mm では締固めの効果がほぼ全体に及ぶために空隙率の変化が最も大きくなると考えられる。

供試体の高さ 200mm では、締固めの効果が表層から 100mm 程度に限定され、供試体全体と

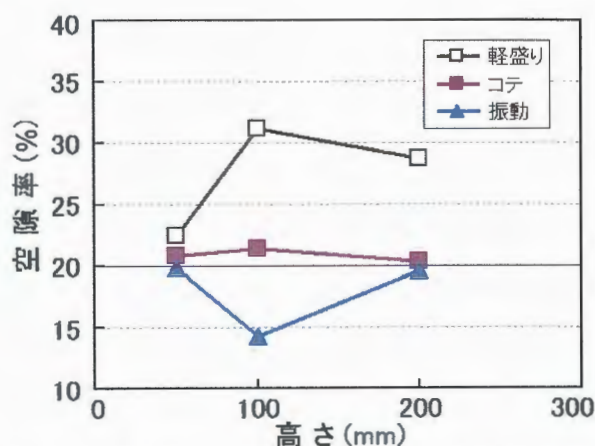
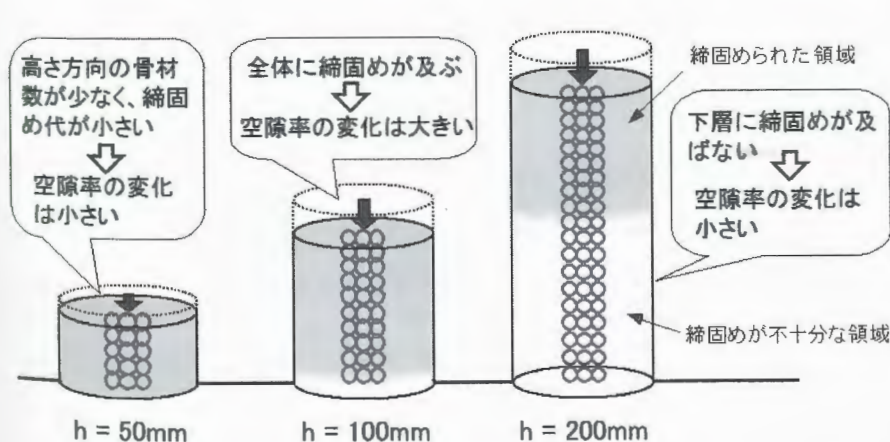
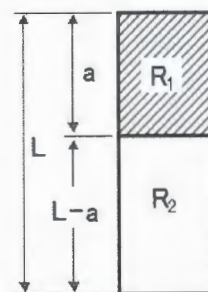


図 4.6 空隙率と高さの関係 (6 号砕石、設計空隙率 20%)



(a) 高さによる締固め効果の違い



R_1, R_2 : 空隙率

$$R_0 = \frac{a R_1 + (L - a) R_2}{L}$$

(b) 領域により締固め程度が異なる場合の空隙率

図 4.7 供試体高さによる締固め効果の違いとその空隙率

しての空隙率の変化が小さくなると考えられる。この傾向は、湯浅ら⁹⁾による報告、すなわち、硬化後の円柱供試体を上中下の3層に分割して空隙率を測定した結果、下層にいくほど空隙率が高くなるという報告に符合するものである。

従来、骨材の実積率を使用して計算した設計空隙率が振動締固めを行った供試体の実測空隙率に近かったのは、高さ200mmの(円柱)供試体を前提としており、200mmの供試体において表面付近の空隙率が低く、下部の空隙率が高いことが平均化されて得られた平均的な空隙率が代表値として用いられたためであると考えられる。例えば図4.7(b)のように、供試体内部において2つの領域で空隙率が異なる場合、供試体全体の空隙率 R_0 は、式(4.1)で求められる。

$$R_0 = \frac{a R_1 + (L - a) R_2}{L} \quad (4.1)$$

ただし、 L ：供試体長さ (mm)、

a, b ：領域の長さ (mm)、

R_1, R_2 ：それぞれの領域の空隙率 (%) である。

なお、上式中の定数である a, b, R_1, R_2 の具体的な値とこれらに及ぼす諸要因の影響の程度については、今後さらに検討を要する。

(3) 骨材粒径

設計空隙率20%、供試体高さ100mmにおける、実測空隙率と骨材粒径範囲の中央値の関係を調べた結果、6号砕石(粒径中央値9mm)の場合に仕上げ方法による差が最も大きくなり、次が7号砕石の場合、5号砕石の場合が最も差が小さかった。これは、表4.3のように、それぞれの骨材の粒径比(最大径/最小径)の影響を受けていることが考えられる。すなわち、粒径比が大きい砕石は、締固めによるかさ容積の変化が大きく、粒径比が小さい場合には、締固めてもかさ容積の変化が小さいことが推定される(図4.8)。

表 4.3 単粒度砕石の骨材粒径の幅

砕石 呼称	粒径範囲 (mm)	粒径比 (最大/最小)
5号	13 ~ 20	1.5
6号	5 ~ 13	2.6
7号	2.5 ~ 5	2.0

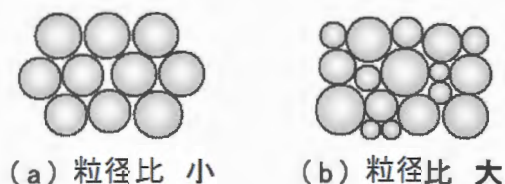


図 4.8 骨材の粒径比(最大/最小)

4.3.2 仕上げ方法の影響と各種特性の関係

(1) 空隙率の構成

図 4.9 に、6 号砕石のポーラスコンクリート供試体について、全空隙率に対する準連続空隙率の比と全空隙率との関係を示す。図では、全空隙率が小さくなると準連続空隙率の比が大きくなることがわかる。全空隙率 15%程度において比の値は最大 0.3 程度、全空隙率が 25%程度になると比の値は 0.05 程度以下になっている。図 4.9 で示したように、軽盛り、コテ仕上げ、振動締固めの順に全空隙率が小さくなり、準連続空隙率の比が大きくなると考えられ、空隙率が大きい軽盛りでは、準連続空隙率はほとんど発生しないと考えられる。

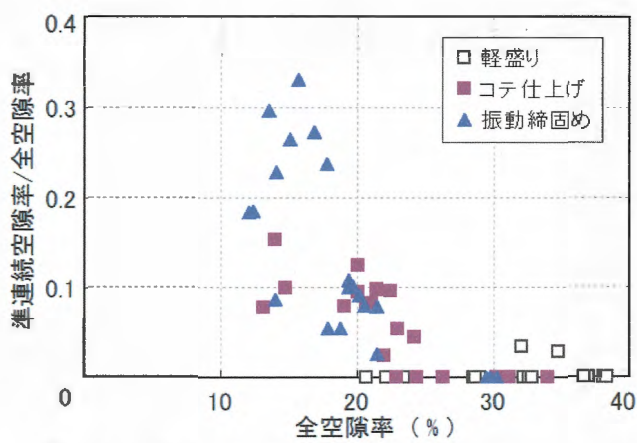


図 4.9 準連続空隙率の測定結果(容積圧力法)

(2) 圧縮強度

骨材粒径 5～13mm(6 号砕石)における各供試体の圧縮強度と空隙率の関係を図 4.10 に示す。圧縮強度と空隙率の関係についての指数関数による近似曲線からみると、結合材強度が一定の条件では、仕上げ(締固め)方法による差は小さく、ほぼ同程度とみることができる。なお、空隙率と圧縮強度の近似曲線の切片としている結合材強度は、その圧縮強度試験の結果から、W/C=30%では 87.2N/mm²であった。

また、ここでのコア供試体の圧縮強度は、供試体の高さ／直径比による補正を行っていない値である。補正を行うと、図のプロットより数 N/mm²程度、圧縮強度が小さくなると考えられ、既往の研究結果¹²⁾とほぼ一致する傾向であると考えられる。

(3) 透水係数

図 4.11 に、供試体の透水係数測定結果について、透水係数と空隙率(全空隙率)の関係として示す。空隙率は、質量法による値を使用している(容積圧力法による値でもほぼ同様の傾向)。図の結果では、仕上げ方法による差は明瞭ではない。透水係数は空隙率(および平均空隙径)に強く

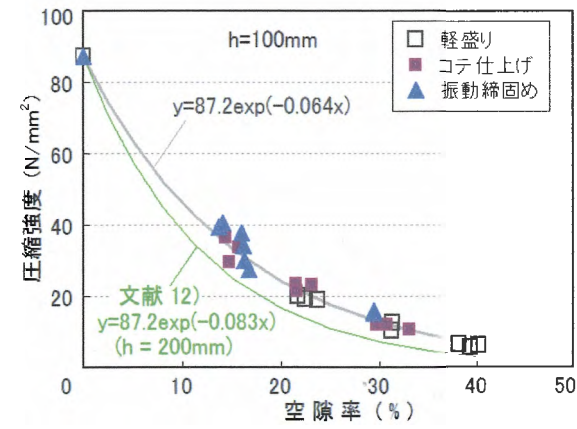


図 4.10 圧縮強度と空隙率の関係¹²⁾

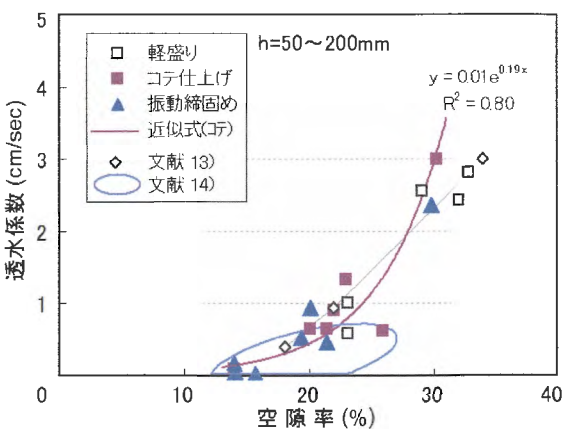


図 4.11 透水係数と空隙率との関係^{13),14)}

依存すると考えられ、空隙率が同じ程度であれば、透水係数は同じ程度であると考えられる。

また、今回の実験範囲では、空隙の内訳において準連続空隙が比較的少なかったため、横軸を連続空隙率としても大きな変化は現れない。

既往の研究の結果^{13), 14)}に照らしても、今回の結果とおおむね一致している。

4.4 まとめ

ポーラスコンクリートを現場打設し、採取したコア供試体を使用し、3種類の仕上げ方法(軽盛り、コテ仕上げ、振動締固め)について空隙率および圧縮強度への影響を調べた結果、以下のよう な知見が得られた。

- 1) 振動締固めでは実積率を使用して求めた設計空隙率より実測空隙率が小さくなり、軽盛りでは骨材の軽盛り時の実積率を用いて推定した空隙率よりも大きくなる傾向が見られた。高さ 100mm 程度の現場施工においては、振動締固めでは設計空隙率より最大 6%程度小さく、コテ仕上げは振動締固めと軽盛りの中間で設計空隙率に比較的近く、-2~+3%程度であった。
- 2) 従来、骨材の実積率を使用して計算した設計空隙率が振動締固めを行った供試体の実測空隙率に近かったのは、高さ 200mm の(円柱)供試体を前提としており、200mm の供試体において表面付近の空隙率が低く、下部の空隙率が高いことが平均化されて得られた平均的な空隙率が代表値として用いられたためであると考えられる。例えば、供試体内部において2つの領域で空隙率が異なる場合(図 4.7)、供試体全体の空隙率 R_0 は、式(4.1:再掲)で求められる。

$$R_0 = \frac{a R_1 + (L - a) R_2}{L}$$

(4.1)

ただし、 L :供試体長さ(mm)、 a, b :領域の長さ(mm)、 R_1, R_2 :それぞれの領域の空隙率 (%)である。

- 3) 締固めの程度が大きくなるにしたがって(軽盛り、コテ仕上げ、振動締固めの順に)全空隙率が小さくなり、それに伴って全空隙率に対する準連続空隙率の比が大きくなる。全空隙率 15%程度において比の値は最大 0.3 程度、全空隙率が 25%程度になると比の値は 0.05 程度以下になった。空隙率が高い軽盛りでは、準連続空隙率はほとんど発生しないと考えられる。
- 4) 圧縮強度および透水係数は、空隙率に高い依存性が見られ、その空隙率は締固め方法による影響を受ける。圧縮強度と空隙率との関係は、結合材強度が一定の条件では締固め方法によらず、1 本の指数関数 $\{y=87.2\exp(-0.064x), x\text{空隙率}\}$ によりほぼ近似することができた。

なお、締固め程度は、ポーラスコンクリートの品質管理および施工管理における重要項目の一つであり、調合、骨材、および高さ(版の厚さ)等の条件と振動機(単位時間あたりの振動エネルギー)の条件が相互に関係することを認識しておく必要がある。また、空隙率 20%あるいは高さ 100mm 付近の条件下では、現場打設の際に、仕上げ(締固め)に伴う高さの減少を予測して敷均しを行う必要がある。また、目標とする仕上げ高さおよび空隙率を実現するためには、単位時間あたり振動エネルギーを幅広く制御できる仕上げ機械等が必要になると考えられる。今回、仕上げ方法の影響に関する実験結果が得られたことにより、機械(後述の「試作機の紹介」参照)の試作につながった。

第4章の参考文献

- 1) 平岩陸、田中清人、谷川恭雄、森博嗣:ポーラスコンクリートの調合設計法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp121-126、2001年
- 2) 石黒哲、湯浅幸久、畑中重光:ポーラスコンクリートの物理的性質に及ぼす各種要因の影響、日本建築学会東海支部研究報告集、pp.73-76、2000年
- 3) 湯浅幸久:ポーラスコンクリートの内部構造と強度特性に及ぼす結合材の流動性と振動締固めの影響、三重大学博士論文、pp.81-102、2002年
- 4) 湯浅幸久、畑中重光ほか:ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.37-44、2002年2月
- 5) 柳橋邦生、米澤敏男ほか:ポーラスコンクリートの締固め方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.2、pp.589-594、1998年
- 6) 岡田正美、米澤敏男ほか:ポーラスコンクリートの振動締固め方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.1、pp.241-246、1999年
- 7) 湯浅幸久、別府智子、宮本高秀、畑中重光:セメントペーストの流動性がポーラスコンクリートの振動締固め性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、vol.23、No.1、pp.133-138、2001.7
- 8) 越健、島崎馨、国枝稔、六郷恵哲:ポーラスコンクリートの空隙率と空隙分布の評価、コンクリート工学年次論文集、vol.21、No.1、pp.249-264、1999年
- 9) 超固練りコンクリート研究委員会報告書、(社)日本コンクリート工学協会、pp.147-168、1998年6月
- 10) ポーラスコンクリートの設計・施工に関する研究委員会:同報告書、日本コンクリート工学協会、2003年
- 11) 中川武志、畑中重光、三島直生、湯浅幸久、前川明弘:空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法、日本建築学会構造系論文集、第73巻、第629号、pp.1043-1050、2008年7月
- 12) 畑中重光、三島直生、湯浅幸久:ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材の影響に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.594、pp.17-23、2005年8月ほか
- 13) 前川明弘、山本晃、三島直生、畑中重光:小粒径ポーラスコンクリートの基礎的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.60、pp.264-270、2006年
- 14) 野田悦郎、梶尾聡、中原大磯、市川勝俊:ポーラスコン舗装の実用化への取組み～舗装の高機能性化をめざして～、コンクリートテクノ、Vol.20、No.8、pp.42-48、2001年8月

第5章 供試体の高さ／直径比がポラスコンクリートの 圧縮強度に及ぼす影響

5. 供試体の高さ／直径比がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響

5.1 背景と目的

ポーラスコンクリートは、建物の内外構や駐車場、歩道等への適用が進みつつあるが、比較的新しい技術であり、実施工時の品質管理のための評価法が整っていない点もいくつか残されている。中でも、基本的な品質指標となる圧縮強度について、供試体の高さ／直径の比が 2.0 を下回る場合の評価方法が確立されていない。すなわち、コンクリートの圧縮試験を行う場合、その供試体の寸法は JIS A 1132 に定められており、標準的な円柱形状では供試体の高さ h が直径 d の 2.0 倍程度であることとされている。圧縮強度試験において、供試体の高さが小さい場合には、試験結果が相対的に高めになることがわかっている。一般に、コンクリート打設現場から抜き取ったコア供試体などで、供試体の高さ／直径比(h/d)が 2.0 から 5%以上ずれる場合には、高さ／直径比による影響を除くため、標準供試体($h/d=2.0$)の場合の値を推定することが求められる。これは、ポーラスコンクリートの打設現場においてもよく発生するケースであるため、適切な評価方法が求められている。

普通コンクリートにおいては、供試体の高さ／直径の比の影響に関する既往の研究¹⁾とともに、JIS A 1107 に圧縮強度の補正係数が示されている。最近では、高強度コンクリートなど、より広範囲なコンクリートについての傾向も報告されている²⁾⁵⁾。しかし、ポーラスコンクリートにおいては、適用すべき補正係数がないため、現状では、普通コンクリートの補正係数を使わざるを得ないが、その妥当性については不明であった。

本研究では、このような状況を解消するため、ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす供試体の高さ／直径の比の影響に関する実験を行い、空隙率と圧縮強度の傾向を把握するとともに、圧縮強度の補正方法を検討した。

また、供試体の高さ／直径比の影響に対する空隙率や骨材粒径、水セメント比等の影響を確認するとともに、さらには、円柱型枠を使用した供試体とコア供試体との違い⁶⁾⁸⁾についても確認することを目的として実験を行った。

5.2 実験概要と実験方法

5.2.1 実験の要因と水準

実験は、高さ／直径比の異なる円柱型枠を使用してポーラスコンクリート円柱供試体を作成し、硬化した後に、空隙率試験および圧縮強度試験を行った。表 5.1 に実験の要因と水準を示す。空隙率を 3 水準、高さ／直径比(h/d)は 6 水準(供試体の直径は、100mm で一定)、水セメント比は 3 水準に変化させた。

実験に使用した材料の諸元を表 5.2 に示す。砕石は建物外構、歩道等に使用されることが多い

表 5.1 実験の要因と水準

要 因	水 準
空 隙 率 (%)	15, 20, 30 (3水準)
高さ/直径比 h/d^*	0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 (6水準)
水セメント比 (%)	25, 30, 45 (3水準)

[注] *: 円柱供試体の直径は100mmで一定とした。

表 5.2 使用材料の諸元

種 類	特 性
セメント	普通ポルトランドセメント 密度: $3.15(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、比表面積: $3150(\text{cm}^2/\text{g})$
骨 材	単粒度碎石6号 表乾密度: $2.72(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、実積率: 57.3(%)、粒度範囲: 5-13mm
混和剤	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系) フローリックSF500HC、密度: $1.05\text{--}1.09(\text{g}/\text{cm}^3)$
混和材	石粉(石灰石微粉末) 密度: $2.70(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、比表面積: $4000(\text{cm}^2/\text{g})$

6号碎石(骨材粒径 5~13mm)とした。水セメント比 45%の場合には、所定のペーストのフロー値が得られるよう、石灰石微粉末を混和した。

5.2.2 供試体

ポーラスコンクリートの練混ぜは、4章の実験と合わせて行い、一軸パン型ミキサ(容量 100L)を使用して、ペースト先練り方式とした。型枠は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱型枠を用い、 $h/d = 3$ の場合には、2つの型枠を接続して使用した。打設は、所定の高さ/直径比および設計空隙率に近づけるため、調合表から計算した質量を、高さ/直径比に応じて、適宜突き棒による締固めを行いながら投入した後、表面振動機($\phi 95\text{mm}$ 、電源 220V、60Hz、0.47A、3120/min、150W)を使用して、10秒間締め固めた。脱型後は、材齢 27日まで水中養生を行い、28日目に圧縮試験を行った。供試体の両端面には、硫黄キャッピングを行った。

供試体は、1条件につき 3本(5調合で計 90本)を作成した。写真 5.1 に実験において作成した円柱供試体の状況を示す。

なお、供試体は、円柱供試体を基本とするが、4章の実験における一部の条件($W/C=30\%$ 、空隙率 20%)のコア供試体についても、高さ/直径比の影響の面から整理して圧縮強度試験結果の傾向を確認することとした。

現場に打設したポーラスコンクリートの練混ぜは、円柱供試体の作成と同時に行ったもので、打設時の締固めは、プレートランマ(プレートサイズ $280 \times 300\text{mm}$ 、周波数 1.5Hz、起振力 4.9kN)を使用して行った。コアは、材齢 14日に採取し、端面を研磨して、空隙率を測定した後、圧縮試験前にキャッピングを行った。コア供試体の直径は 93mm、予定した高さ/直径比は 0.75~2.25程度の範囲である。

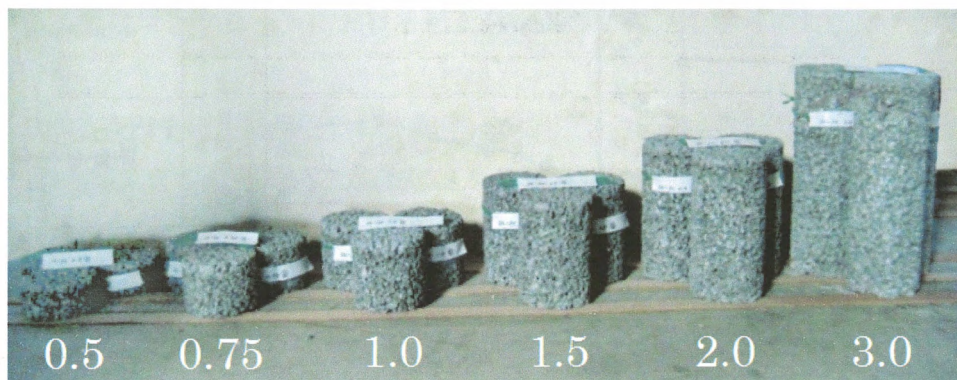


写真 5.1 硬化後の円柱供試体（図中、下の数字は h/d ）

5.2.3 実験方法

粗骨材の密度、実積率の測定については、JIS A 1110(粗骨材の密度および吸水率試験方法)および JIS A 1104(骨材の単位容積質量および実積率試験方法)に準拠して行った。

練混ぜ時には、ペーストのフロー値⁹⁾を測定するとともに、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体を 3 個ずつ作成し、圧縮試験を行った。

供試体の空隙率の測定は、日本コンクリート工学協会の規準(案)¹⁰⁾に示された質量法および容積法により全空隙率を測定した（容積圧力法は、 $h/d=3$ の供試体が空気量試験機に入らず、測定ができないため採用しなかった）。容積法では、独立空隙率は無視し、連続空隙率と準連続空隙率の和を全空隙率とした。

圧縮強度試験は、打設後 28～29 日に実施し、JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に準拠して行うこととした。円柱供試体は、研磨を行わず、上下端面に硫黄キャッピングを行った。

なお、ポーラスコンクリートの練混ぜおよび打設は、4 章(仕上げ方法による空隙率および圧縮強度の影響)の実験と同時に行った。コア供試体については、4 章の実験に含まれている供試体と同一である。

5.3 実験結果と考察

5.3.1 空隙率

図 5.1 に、全空隙率と高さ／直径比の関係を示す。

図によれば、供試体の高さ／直径比が大きくなると、いずれの設計空隙率および水セメント比においても、空隙率が増加する傾向が見られる。これは、湯浅らの研究¹¹⁾にもあるように、供試体上面からの振動エネルギーが下層方向に伝播するにしたがって減衰することが理由と考えられる。

締固めの際の振動エネルギーが一定であっても、ポーラスコンクリートの高さ(打設厚さ)により内部の性状が変化する可能性があること、高さ／直径比が大きい供試体では空隙率の高さ方向の分布が一樣ではない可能性があることに注意が必要である(4.3.1(2)参照)。

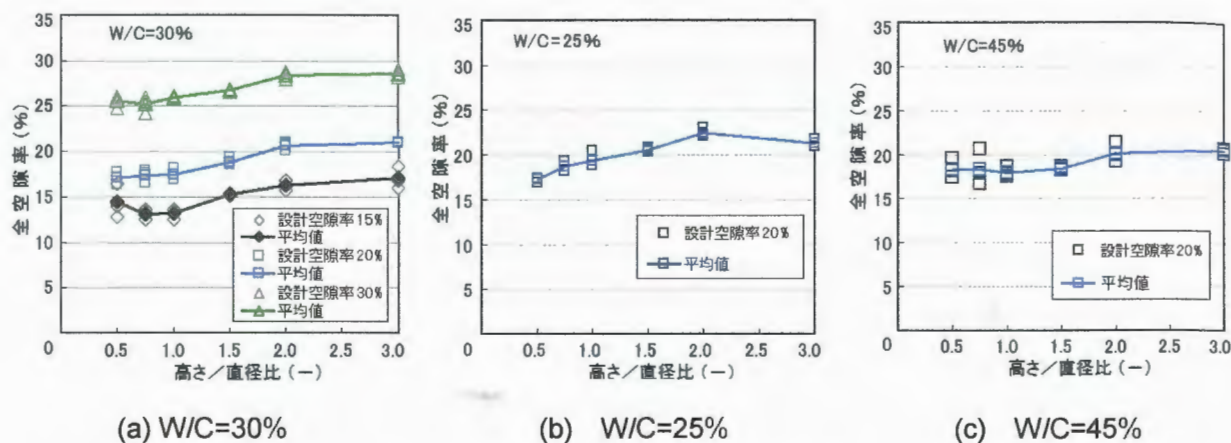


図 5.1 全空隙率と高さ/直径比の関係

5.3.2 圧縮強度と空隙率および供試体の高さ/直径比の関係

図 5.2 に、水セメント比 30%における圧縮強度と質量法による全空隙率の関係を示す。ここでの圧縮強度は、供試体の高さ/直径比による補正は行っていない。図中の近似曲線は、高さ/直径比を考慮した結合材強度の値を y 軸切片とした指数関数¹²⁾による。同図によれば、各高さ/直径比ごとの近似曲線の形状はほぼ同じとみることができる。また高さ/直径比が小さくなるほど、近似曲線が上方へシフトしていることがわかる。

なお、ペーストの圧縮強度については、高さ/直径比によってペースト強度が変化するので、

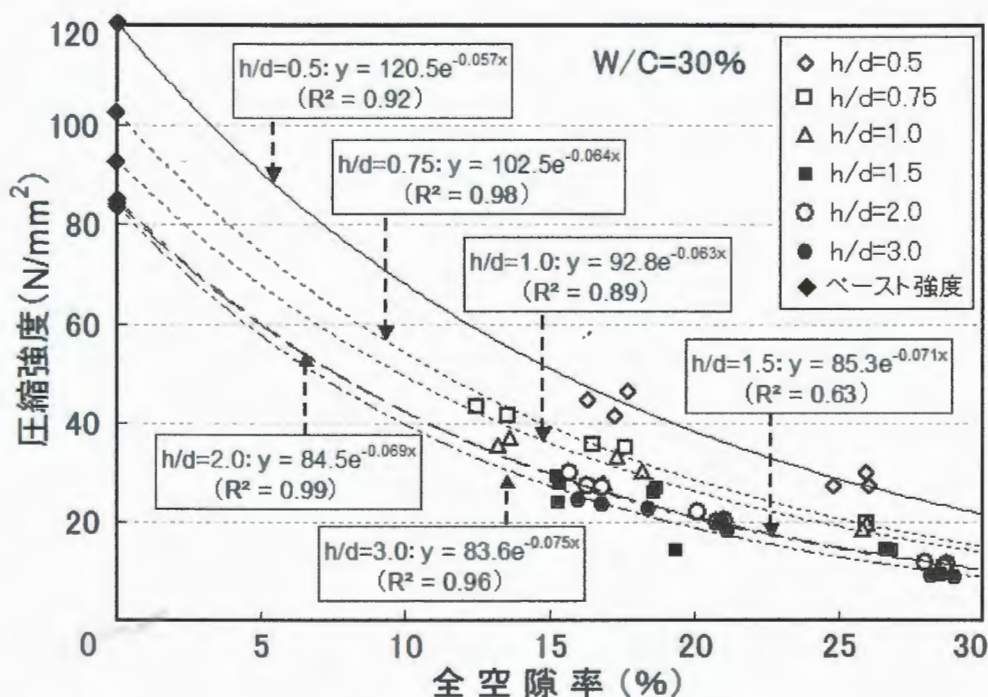


図 5.2 圧縮強度と全空隙率の関係

野口らによる高強度コンクリートにおける補正データの研究³⁾を参考にしてペースト強度の補正を行っている。

図 5.1 における空隙率測定結果と目標空隙率との誤差をみると、供試体の高さ／直径比が小さいものほど、誤差が大きくなっているが、図 5.2 を見ても、 x 軸の空隙率において設計空隙率(15%、20%、30%)付近にプロットされているデータが少なく、全体的に 2～4% ほど誤差がある。これは、振動締固めの強さが影響していると考えられる。すなわち、高さ／直径比が小さい供試体に対して供試体に対する振動締固めが強すぎた(または時間が長かった)ことが推定され、それによって若干の骨材破壊等により、空隙率が目標値よりも小さくなったことが考えられる。

前述のように図 5.2 において、高さ／直径比が小さくなるにしたがって、空隙率－圧縮強度の曲線が上方に移動した理由として、まず以下のような影響が考えられる。

- a) 圧縮強度試験の際、供試体と載荷板との間に摩擦(以下、端面摩擦という)が存在し、供試体の載荷軸と直交する方向の膨張に対して拘束力が働くこと。この端面摩擦の影響については、普通コンクリートに対して、図 5.3 に示すような供試体の高さ／直径比と圧縮強度比との関係が考察¹⁾されており、ポーラスコンクリートにおいても同様の傾向があることが推測される。
- b) 骨材粒径等に依存した微視的破壊のサイズと供試体寸法との関係が影響すること¹³⁾。すなわち、骨材粒径等と供試体寸法の比が変わると力学的相似関係が一定ではなくなると考えられ、この比が小さくなれば普通コンクリートないし均質弾塑性体に近づくと思われる。

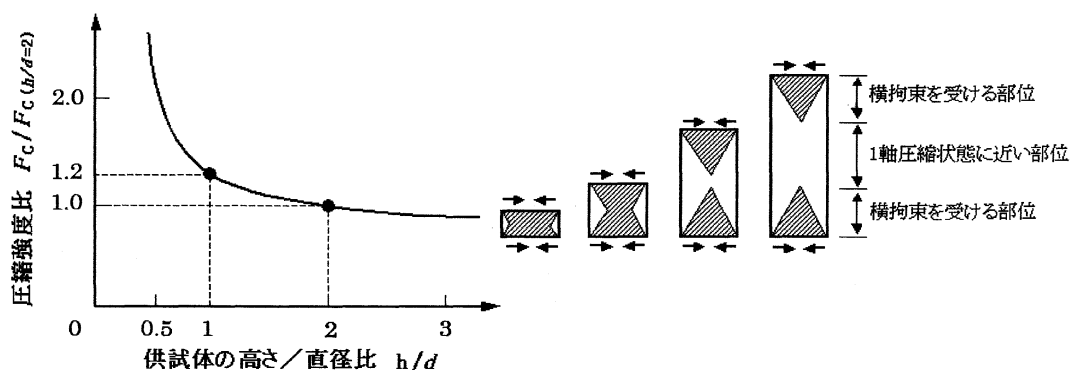


図 5.3 供試体端面の拘束による影響¹⁾

5.3.3 圧縮強度と供試体の高さ／直径比の関係

本研究の目的である、圧縮強度と供試体の高さ／直径比との関係を検討するためには、空隙率を同一として評価する必要があるため、図 5.2 中に示した近似式の結果から条件ごとに空隙率 15%、20%および 30%における圧縮強度推定値を求め (W/C=30%)、圧縮強度(無補正)と供試体の高さ／直径比との関係としたものを図 5.4 に示す。図では、高さ／直径比が大きくなると、圧縮強度が減少することがよくわかる。また、ここでは、空隙率が大きくなると圧縮強度が小さくなる傾向が明瞭である。

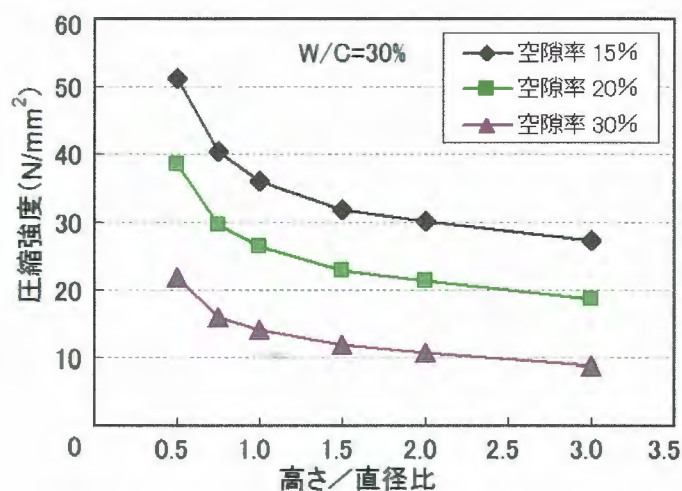


図 5.4 圧縮強度と高さ/直径比の関係 (空隙率の影響)

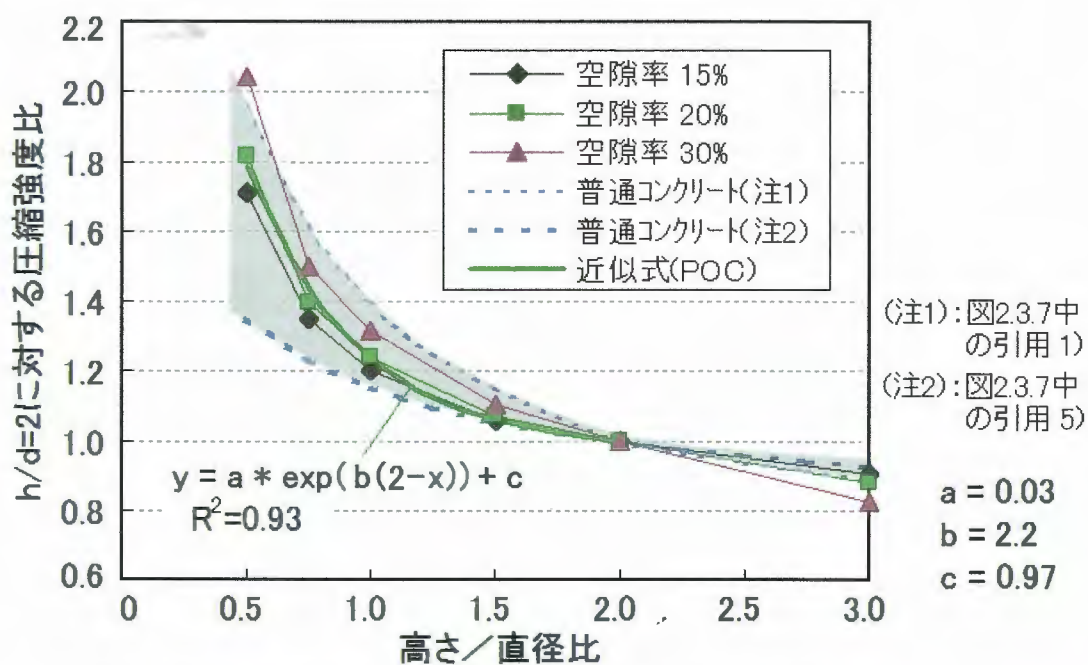


図 5.5 圧縮強度比と高さ/直径比の関係 (W/C=30%) ¹⁾

図 5.5 に、 y 軸を高さ/直径比=2.0 における圧縮強度に対する比としたグラフを示す(水セメント比 30%)。図 5.5 を見ると、いずれの空隙率においても、高さ/直径比が小さくなるにつれて圧縮強度比の傾きが大きくなっている。ポーラスコンクリートにおいて、空隙率が大きくなると圧縮強度比が若干大きくなる傾向がみられるが、これについては、空隙率がほぼゼロである普通コンクリートについての既往の研究と比較して考察する。

図 5.5 では、既往の研究による普通コンクリートコア供試体に関する補正値を併せて示した。普通コンクリートにおいては、図 2.3.7 中に示された引用曲線(1)から(5)まで程度の幅(グレーの部分)があると思われる。また、野口らの研究(圧縮強度 20N/mm^2 以上が実験対象)³⁾による強度比の近似式において圧縮強度 20N/mm^2 を代入すると、曲線はグレー部分の中ほどに位置するのに対し、鈴木らの研究(圧縮強度 30N/mm^2 以上が実験対象)⁵⁾ではグレー部分よりやや下方に位置しており(JIS A 1107 に示された圧縮強度補正係数の逆数に近いデータ)、やはりおおむねグレーの部分程度の幅をもつことが推定される。

今回のポーラスコンクリート(空隙率 15~30%)についての結果は、グレー部分にほぼ入っていると見ることができる。したがって、現状では、ポーラスコンクリートの圧縮強度比と高さ／直径比との関係に及ぼす空隙率の影響は、普通コンクリートの圧縮強度比の幅から判断して実用上は、無視できると思われる。また、現場施工における評価に関しては、圧縮強度比は普通コンクリートとおおむね同程度と考えてよいだろう。

5.3.4 円柱供試体とコア供試体の比較

これまでに示したデータは、円柱供試体による結果であるが、4 章の実験におけるコア供試体の圧縮強度に関するデータから、供試体高さ／直径比の影響についても整理した。図 5.6 に、圧縮強度と供試体高さ／直径比の関係における円柱供試体とコア供試体(6 号砕石、振動締固め、設計空隙率 20%、水セメント比 30%)との比較を示す。3 つの折れ線は、図 5.4 における円柱供試体の結果である。コア供試体と円柱供試体とを比較すると、ほぼ同様の傾向が見られる。なお、コア供試体の結果は、圧縮強度－空隙率の関係についての近似曲線を求め、空隙率 20%における圧縮強度を推定したものである。

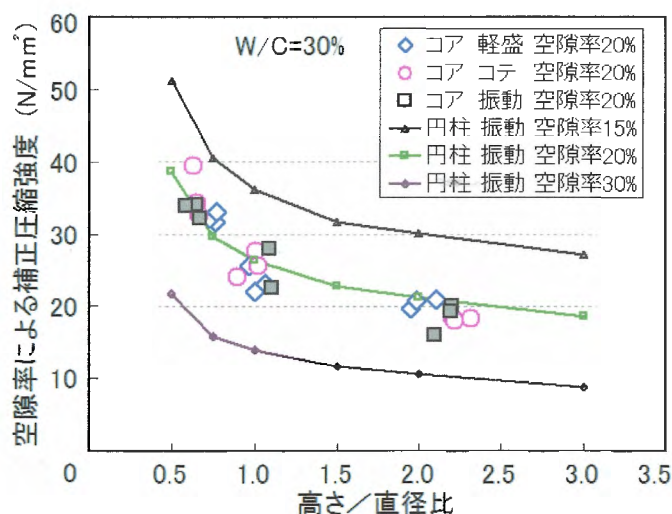


図 5.6 円柱供試体とコア供試体の比較

空隙率 15%および 30%におけるコア供試体の実験結果はデータ数が少なく、設計空隙率と空隙率実測値との差も大きかったため、所定空隙率での圧縮強度推定が困難であると考え、データは使用しなかった。円柱供試体とコア供試体で振動締固め方法が異なる(円柱供試体：表面振動機、振動エネルギー $20\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}^2$ 程度、コア供試体：プレートランマ、振動エネルギー $2\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}^2$ 程度)ため、同一条件での直接比較とはならないが、第4章の結果によれば、圧縮強度-空隙率関係は同じとみられるため、同一空隙率であれば、高さ/直径比が圧縮強度に及ぼす影響の比較は可能と考える。

5.3.5 結合材強度の影響

図 5.7 は、圧縮強度と高さ/直径比の関係に対する水セメント比の影響を空隙率 20%の場合について示している。また図 5.8 は、 y 軸を高さ/直径比=2.0 の供試体の圧縮強度に対する比としたグラフを示す(空隙率 20%)。図 5.8 によれば、水セメント比のいずれの条件においても、おおむね一つの曲線上に乗っており、近似式は図 5.4 における近似式とほぼ一致した。すなわち、 $W/C=25\sim 45\%$ に関しては、圧縮強度比に対する水セメント比の影響は小さいとみてよいと考えられる。

なお、すべての試験結果について、図 5.4 および図 5.7 における近似式を用いて、 $h/d=2.0$ の場合の圧縮強度を推定するとともに(水セメント比が異なる場合に y 軸切片がずれることに対応するため)、各水セメント比のペースト強度で正規化して求めた圧縮強度比と全空隙率の関係を図 5.9 に示す。

図 5.9 より、水セメント比のいずれの条件においても、実験結果はおおむね一つの曲線上に乗っているとみることができる。すなわち、圧縮強度比-空隙率関係からみても、 $W/C=25\sim 45\%$ に関しては、圧縮強度比に対する水セメント比の影響は小さいとみてよいと考えられる。

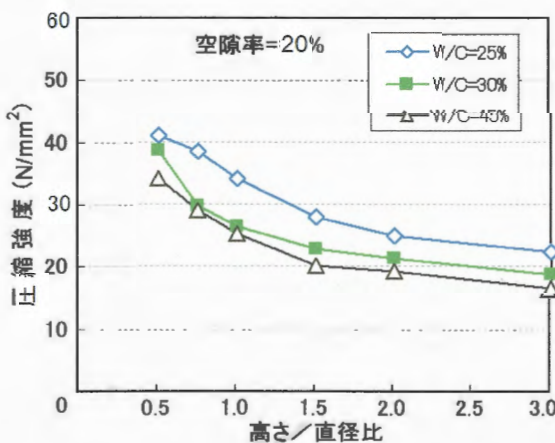


図 5.7 圧縮強度と高さ/直径比の関係
(水セメント比の影響)

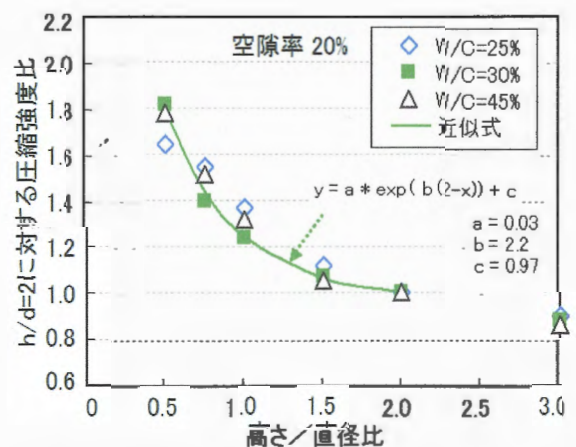


図 5.8 圧縮強度比と高さ/直径比の関係
(水セメント比の影響)

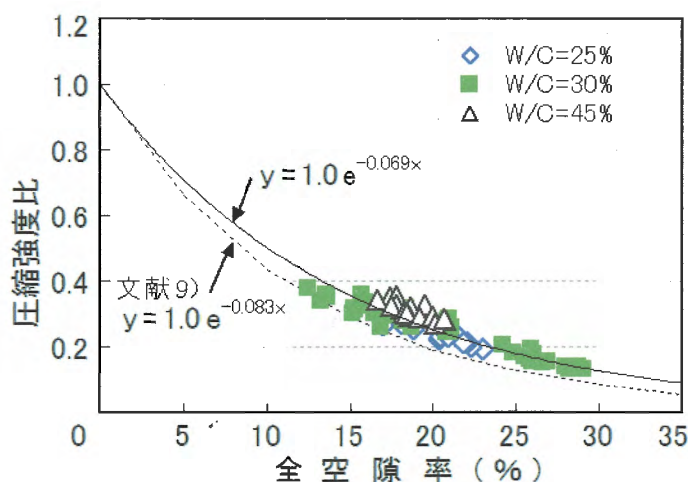


図 5.9 圧縮強度比と空隙率の関係(水セメント比の影響)⁹⁾

5.3.6 供試体の高さ／直径比に関する圧縮強度補正係数の推定

圧縮強度比と高さ／直径比の関係については、ポーラスコンクリートの場合、骨材粒径、締固め方法などの供試体の作成条件によってある程度の幅を持つことも考えられるが、実用的な意味から一つの近似式で示すことは有効であると考ええる。

図 5.4 および図 5.5 の結果から、ポーラスコンクリートの圧縮強度比は図 5.5 中の近似式で推定することができ、供試体の高さ／直径比が 0.5 から 2.0 の範囲の圧縮強度補正係数は、圧縮強度比の逆数として、式(5.1)により得ることができる。

$$n = 1 / \{ a \cdot \exp(b(2 - x)) + c \} \quad (5.1)$$

ここに、 n : 高さ／直径比に関する圧縮強度補正係数

x : 高さ／直径比

a, b, c : 定数、 $a = 0.03$ 、 $b = 2.2$ 、 $c = 0.97$

この式によれば、圧縮強度補正係数は、 $h/d = 1.5$ において 0.94 程度、 $h/d = 1.0$ において 0.81 程度、 $h/d = 0.5$ において 0.56 程度となる(JIS A 1107 の補正值は、表 2.3.1 参照)。 $h/d = 2.0$ の供試体の圧縮強度は、測定された圧縮強度に n を乗じて求めることができる。

上記の近似式を用いて補正する際の参考のため、定数 a および b の値によって圧縮強度比－高さ／直径比関係の曲線がどの程度変化するかを図 5.10 に示しておく。

今回の実験では、水セメント比の影響は比較的小さく、空隙率の影響についても実用上、空隙率 15～30% の範囲では、その影響を無視してもよいことから、圧縮強度に対する供試体の高さ／直径比の影響は、上述の式により実用的に推定できると考えられる。ただし、空隙率の分布、骨材粒径¹¹⁾等も圧縮強度と高さ／直径比の関係に影響することが考えられるため、今後、確認することが望ましい。

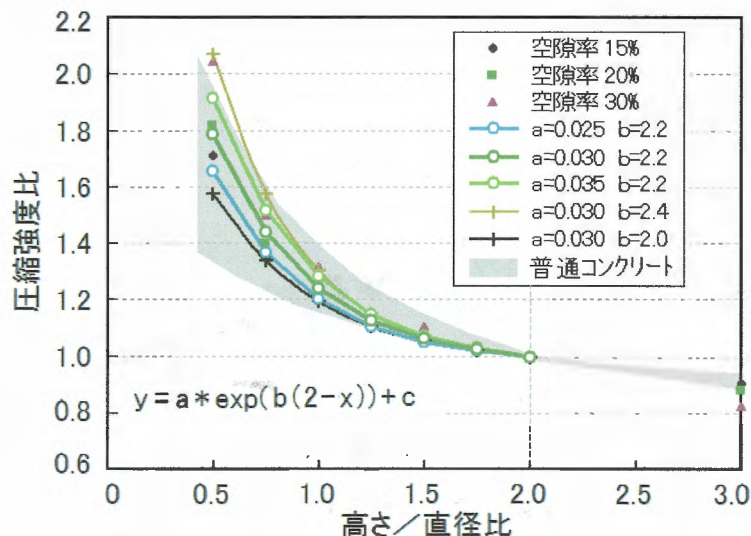


図 5.10 近似式中の定数 a 、 b による曲線の変化

5.4 まとめ

ポーラスコンクリートの圧縮強度に対する供試体高さ／直径比の影響に関する実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 6号砕石を使用したポーラスコンクリートについて、供試体の高さ／直径比が小さくなると、圧縮強度が上昇し、その傾向は普通コンクリートとほぼ同様であった。
- 2) ポーラスコンクリートの圧縮強度比と空隙率との関係において、空隙率が大きくなると圧縮強度比が若干大きくなる傾向が見られる。しかし、その程度はあまり大きくなく、その変動幅は既往の研究報告書における普通コンクリートのデータの変動幅の範囲内であった。そのため本研究では、ポーラスコンクリートの圧縮強度比と供試体の高さ／直径比との関係式を1本の曲線で近似することとした。その結果、供試体の高さ／直径比の影響に関する圧縮強度の補正係数は、 $h/d=0.5 \sim 2.0$ の範囲において、次の式により得られる。

$$n = 1 / \{ a \cdot \exp(b(2 - x)) + c \}$$

ここに、 n : 高さ／直径比に関する圧縮強度補正係数、 x : 高さ／直径比、定数 $a=0.03$ 、 $b=2.2$ 、 $c=0.97$ である。また、適用範囲は、 $W/C=25 \sim 45\%$ 、空隙率 $15 \sim 30\%$ である。上式によれば、圧縮強度補正係数は、 $h/d=1.5$ において 0.94 程度、 $h/d=1.0$ において 0.81 程度、 $h/d=0.5$ において 0.56 程度であった。

- 3) 供試体の高さ／直径比の影響は、円柱供試体とコア供試体でほぼ同様の傾向であると考えられる。
- 4) 供試体の高さ／直径比と圧縮強度比との関係に対する水セメント比の影響は比較的小さいと考えられる。

第5章の参考文献

- 1) 谷川恭雄ほか:改訂版 建築材料―その選択から施工まで、pp.63-98、理工図書、1989年
- 2) 赤萩満、阿部道彦ほか: コンクリートコアの圧縮強度に及ぼす供試体の高さ/直径比の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.769-770、2008年9月
- 3) 野口貴文、友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮力学特性に及ぼす供試体寸法・形状の影響、日本建築学会構造系論文集、第473号、pp.19-28、1995年
- 4) 奥野すみれ、江口清: 小径コアによる低強度コンクリートの圧縮強度の推定に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.773-774、2008年9月
- 5) 鈴木澄江、伊藤康司、鹿毛忠継、瀬古繁喜: 高強度コンクリートのコア供試体における高さ直径比が圧縮強度に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp. 397-402、2009年
- 6) 平岩陸、田中清人、谷川恭雄、森博嗣: ポーラスコンクリートの調合設計法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.121-126、2001年
- 7) 越健、島崎馨、国枝稔、六郷恵哲: ポーラスコンクリートの空隙率と空隙分布の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.21、No.1、pp.249-264、1999年
- 8) 大谷俊浩、村上聖ほか: ポーラスコンクリートの空隙率と圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響、セメント・コンクリート論文集、No.56、pp.298-303、2002年
- 9) 湯浅幸久、別府智子、宮本高秀、畑中重光: セメントペーストの流動性がポーラスコンクリートの振動締固め性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.23、No.1、pp.133-138、2001年7月
- 10) ポーラスコンクリートの設計・施工に関する研究委員会: 同報告書、日本コンクリート工学会、2003年
- 11) 湯浅幸久、畑中重光、三島直生、前川明弘、宮本高秀: ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.37-44、2002年2月
- 12) 畑中重光、三島直生、湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度―空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材の影響に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.594、pp.17-23、2005年8月など
- 13) 宮本博: 破壊力学の基礎、培風館、1977年

第6章 住空間における意匠性に配慮した複層ポーラス コンクリート歩道の現場施工

6. 住空間における意匠性に配慮した複層ポーラスコンクリート歩道の現場施工

6.1 背景と目的

ポーラスコンクリートは、透水性、保水性、通気性、吸音性、吸着性、熱緩和特性等の機能を有するため、土木分野だけでなく、建物まわりの住空間の快適性の向上に役立てることも期待されている^{1) 2)}。建築分野への実用例として、インターロッキングブロック舗装などが広がりを見せている一方、フレッシュ状態でポーラスコンクリートを用いた現場施工は、一部の適用例^{3) 4)}を除き全国的にはあまり多く行われているとは言えない。

この一因として、現状では、ポーラスコンクリートの製造・運搬・打設面での取扱いが必ずしも容易でないこと、品質管理のしやすい施工方法が普及していないことなどの問題が考えられる。例えば、道路舗装を想定した場合、ポーラスコンクリートの調合は、水セメント比 30～35%、単位結合材量 350～450kg 程度とされることが多い^{5) 6)}。このような富調（配）合の結合材を用いたポーラスコンクリートの供給体制を整えることは、レディミクストコンクリートプラントに、製造、運搬、そして洗車の各作業において、新たな負担を強いることになる。また、施工者に対しても、とくに夏場の施工や品質管理には工夫と経験が要求される。市場性から見れば、ポーラスコンクリート単体では、その仕上がりが高品位な印象につながらないことも欠点の一つとして挙げられ、意匠性に優れた工法の充実が求められている⁷⁾。

ポーラスコンクリートを複層化し、とくに表層をエポキシ樹脂で結合したポーラス硬化体とすることにより意匠性と質感を向上し、住空間の快適性を向上させる方策となる。また表面の仕上げが容易になり平滑に仕上げやすいことから耐剥脱性の向上などのメリットも期待できるものである。本章では、建築分野におけるポーラスコンクリート活用のための一つのツールとして複層（基層＋表層）ポーラスコンクリートの一形態を提案し、これを適用して建物周囲の歩道を現場打設により施工した事例を報告する。

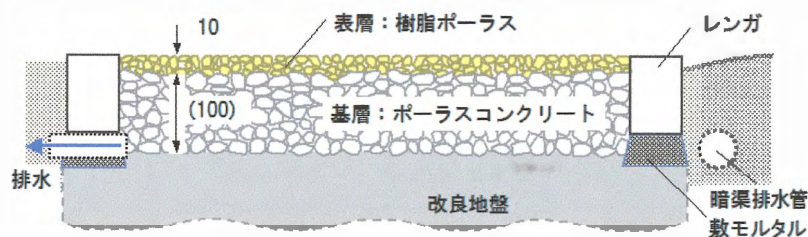


図 6.1 複層ポーラスコンクリート歩道(断面)

6.2 歩道へのポーラスコンクリートの適用

ポーラスコンクリートを道路に適用する場合には、車道用普通コンクリート舗装または転圧コンクリート舗装の設計基準に基づき、 $3\sim4\text{ N/mm}^2$ 以上の曲げ強度を達成することが前提とされることが多い。しかし、アスファルトコンクリート舗装が一般的に使用されていることから考えると、条件によっては必ずしも高い強度を必要としないことも推測できる。

重交通を対象としない歩道や駐車場等で、地盤または路床が適度に剛であれば、水セメント比が50%近くで単位結合材量が少なく、圧縮強度 10N/mm^2 、曲げ強度 2N/mm^2 程度のポーラスコンクリートを使用しても、強度的には実用上何ら問題はないと考えられる。ただし、摩耗や剥脱といった表層の問題には別途対処する必要がある。

また、このレベルの強度のポーラスコンクリートであれば、プラントでの製造、アジテータ車での運搬および現場での施工性が優れ、品質管理もさほど困難ではないという利点がある。

そこで本開発研究では、重交通を対象としない歩道の施工において、複層ポーラスコンクリートの採用を提案することとした。すなわち、基層には比較的低い強度のポーラスコンクリートを使用することによって現場での施工性と経済性を改善し、表層は高耐久なエポキシ樹脂で結合したポーラス硬化体とすることにより意匠性と質感を向上させる方法を採用することとした。実験は現在も進行中であるが、本章では、施工概要とともに、すでに実施した実験結果について、その一部を紹介する。

6.3 複層ポーラスコンクリート歩道の概要

6.3.1 施工の概要と諸元

今回、考案・実施工した複層ポーラスコンクリート歩道に期待される主な特長と機能をまとめると表 6.1 のようになる。また、歩道の断面は図 6.1 に示したとおりであり、基層に粗粒(6号砕石使用)の単粒度ポーラスコンクリートを、表層に細粒(5~9.5mm で、任意の色の玉石使用)の樹脂ポーラスコンクリート(以下、樹脂ポーラスと称する)を施してある。

図 6.2 に、複層ポーラス透水歩道の施工計画図を示す。工事箇所は、大学構内における建物に隣接し、歩行者が日常的に往来する経路であるが、未舗装で水がたまりやすいため飛び石が並べられていた。夏場には雑草の繁茂も問題であった(写真 6.1、写真 6.2 参照)。

本実験計画では、全長約 40m の歩道および階段を複層ポーラスコンクリートで施工することとした。歩道は計 7 区画に分け、外観は一樣であるが、施工条件を変えて区画ごとの特性を比較することとした。

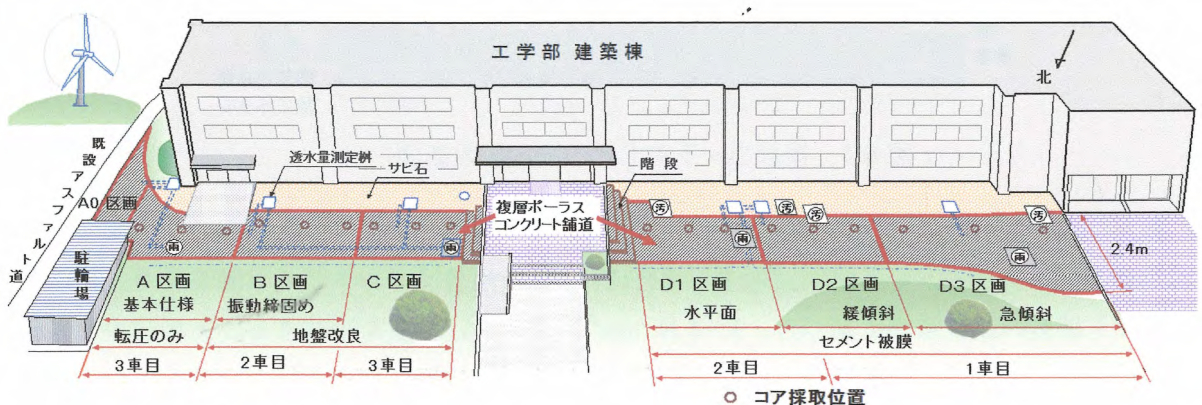


図 6.2 コンクリート歩道の施工計画図

ポーラスコンクリートは、レディミクストコンクリートプラントに製造・供給を依頼した。プラントから現場までの距離は約20km、アジテータ車による運搬所要時間は約30～50分であった。

写真 6.3 および写真 6.4 に、施工後の状況を示す。

表 6.1 複層ポーラスコンクリート歩道の特徴・機能

項 目	特 徴 ・ 機 能
意匠性・質感	○表層樹脂ポーラスの施工により、意匠性、質感が向上する。 ○表層用の石材（色）を選択でき、デザインの調和が図れる。
歩行性・使用性	○高い透水性のため、雨でも水たまり、水はねがない。 ○高い透水性と摩擦のため、歩きやすい。 ○屋内への泥・ほこりの持込みが少なく、建物が汚れない。
造形性・施工性	○現場打設のため、周辺部・狭小部・樹まわりの処理、勾配変化部への対応が容易。 ○基層ポーラスコンクリートの天端がラフでもよく、施工が容易 ○インターロッキングブロック施工に比べて作業時間が短い。
耐久性 ※	○基礎ポーラスコンクリートと表層樹脂ポーラスとの密着性が高く、樹脂の可撓性のため高い剥脱性が期待できる。 ○基層と表層の平均空隙径の違いにより、目詰まりしにくく、長期にわたって高い透水・排水性が期待できる。

[注] ※今後の実験により確認予定

表 6.2 実験の概要

要 因	水 準	供試体	測定項目
締 固 め	コテ仕上げ, 振動締固め	円柱供試体	全空隙率
路床の処理※	転圧のみ, 地盤改良, セメント被膜	コア供試体	圧縮強度 透水係数

[注] ※: セメント被膜とは、雨水の排水と浸透を調節するために路床表面に施すセメントペーストの膜

表 6.3 歩道の区画と施工概要

歩道区画	要 因		面積 (㎡)	代 表 厚 さ		傾 斜	透水量 測定値
	締固め	下部構造		基層 (cm)	表層 (cm)		
A0	コテ	転圧のみ	5.8	11.0	1.0	水平	
A	コテ	転圧のみ	9.1	11.0	1.0	水平	○
B	振動	地盤改良	6.2	14.0	1.0	水平	○
C	コテ	地盤改良	5.8	12.0	1.0	水平	○
D1	コテ	セメント被膜	7.0	10.5	1.0	水平	○
D2	コテ	セメント被膜	4.9	9.5	1.0	2/100	○
D3	コテ	セメント被膜	20.9	12.0	1.0	5/100	○

[注] 基層: 6号砕石を使用したポーラスコンクリート

表層: 樹脂ポーラス(粒径5～9.5mmの石材使用、エポキシ系樹脂)



写真 6.1 施工前の状況(A、B、C 区画該当箇所)



写真 6.2 施工前の状況(D1、D2、D3 区画該当箇所)



写真 6.3 施工後の状況(A、B、C 区画)



写真 6.4 施工後の状況(D1、D2、D3 区画)

6.3.2 実験の概要

表 6.2 に、実験の概要を示す。実験要因として、基層ポーラスコンクリートの締固め方法および路床の処理方法を取り上げた。測定項目は、空隙率、圧縮強度および透水係数である。

歩道は表 6.3 のように、実験対象の 6 区画(A~D)および付帯部(A₀)に分け、施工条件を変化させた。品質管理に関しては、ポーラスコンクリートの性状を目視で確認するとともに、円柱供試体を作成し、空隙率、圧縮強度、透水係数のばらつきを調査することとした。ここで、円柱型枠を使用して作成した供試体と打設箇所からコア抜きにより採取した供試体を区別して、前者を円柱供試体、後者をコア供試体と呼ぶ。

作成した円柱供試体は、脱型後、現場水中養生し、空隙率および透水係数の測定を行った後に材齢 28 日で圧縮強度試験を行った。また歩道の完成後、50 日経過した時点で、打設した歩道の各区画から 3 個ずつコア供試体(φ93×100~140mm 程度)を採取し(図 6.2 参照)、直ちに空隙率、透水係数および圧縮強度の測定を行った。

以上の測定結果により、本実験で打設したポーラスコンクリートが設計した品質を満足しているかどうか、円柱供試体とコア供試体の品質がどのような関係にあるかを中心に検討する。

表 6.4 使用材料および調合

材 料	基 層	セメント		普通ポルトランドセメント			
		砕 石	呼 称	6 号 (粒径5～13mm)			
			産 地	三重県佐奈山産			
			実 積 率	57.7 % (JIS A 1104) (軽盛状態 49.8 %)			
	表層	樹 脂		エポキシ系 2液混合・常温硬化型			
		石 材		天然砂利市販品 (粒径 5～9.5mm)			
調 合	基 層	種類	水セメント比 (%)	単 位 質 量			設 計 空隙率 (%)
				セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	
		普通	46	200	92	1570	27
	表層	軽盛	46	200	92	1355	35
				単 位 質 量			設 計 空隙率 (%)
				樹脂 (kg/m ³)	骨材 (kg/m ³)	珪砂 (kg/m ³)	
				88	1490	56	32

※ 軽盛状態の碎石の単位質量は、1355kg/m³

6.3.3 材料および調合

表 6.4 に、本実験で基層に用いたポーラスコンクリートの材料諸元および調合を示す。ポーラスコンクリートには、6 号碎石を使用し、水セメント比を 46%、単位セメント量を 200kg とした。これは試し練りの結果から、練混ぜおよび打設時に取扱いが比較的容易で、かつ経済的と判断された仕様である。

表層用のエポキシ樹脂の品質は、常温硬化型で、密度 1.0g/cm³、初期硬化時間は 12 時間程度、7 日硬化時(20℃)で引張強度 8.4N/mm²、破断時の伸び率 152%程度、耐候性はサンシャインウェザーメータによる 100 時間あたりの色差 ΔE が 6 以下である。

表層の樹脂ポーラスは、カラー石材をほぼ透明な樹脂で結合しているため経年時でも天然石材の風合いが持続し、退色・摩耗等による陳腐化を防ぐことが期待できる。

6.3.4 実験方法

現場施工ではレーキによる敷均しの後、コテ仕上げを、また、円柱供試体の作成にあたっては、突き棒による 2 層 10 回突きの後、コテ仕上げを行った。

空隙率の測定^{8), 9)}は、円柱供試体およびコア供試体ともに質量法 (全空隙率)により行った。透水係数の測定は、円柱供試体の場合、JCI 規準(案)⁸⁾に基づいて行った。コア供試体も、円柱供試体と同じ装置を使用した。供試体の直径が小さいため側面に緩衝材(1mm 厚の発泡ウレタンシート)を巻きつけて測定した。

圧縮強度試験は、端面に樹脂ポーラスがある場合には、それを取り除いた状態で行った。樹脂ポーラスの強度については、別途、樹脂ポーラスのみで作成した円柱供試体により測定した。全ての供試体の端面は、硫黄キャッピングを行った。コア供試体の圧縮強度については、供試体の高さが直径の 2 倍よりも短いため、便宜上、JIS A 1107 に示されたコンクリートコアの供試体高さによる補正值を用いて補正した。

表 6.5 工程表

工 種 \ 日 程	2008年 5月 (延べ8日)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
準 備 工								
掘削工, 排水工								
地盤改良, 路床工								
レンガ積工, セメント被膜								
基 層 (ポーラスコンクリート)								
養 生								
表 層 (樹脂ポーラス)								
気 温 (℃, 10:00)	20.5	19.5	21.9	21.1	23.4	21.0	21.9	26.5
相対湿度 (% , 10:00)	68	60	45	69	71	68	85	54

6.3.5 施工状況

表 6.5 に工程および温湿度の概要を、写真 6.5 から写真 6.8 に施工状況を示す。歩道は、掘削整正(B、C 区画のみ地盤改良)および転圧の後、排水計画およびレンガ等による区画分けを行った。D 区画は路床の処理として、セメント被膜処理を行った(写真 6.5)。セメント被膜処理は、多量の雨水は排水し、少量の雨水は地中浸透を図ることを目的とするもので、路床にセメントペースト(セメント 1:水 3 程度)を薄く塗るか、または路床の土に低濃度のセメントペーストを浸み込ませる処理である。

排水、縁石、路床の処理等の作業は事前に行い、ポーラスコンクリートの打設は 1 日で行った。実験区画の施工は、D3、D2、D1、B、C、A 区画の順である。

トラックアジテータにより搬送されたポーラスコンクリートは、排出開始時および排出終了時における目視確認を行った上で打設した(写真 6.6、写真 6.7)。ポーラスコンクリートのコンシステンシーは、プラント出発から 1 時間近く経過しても、大きく変化することはなく、敷き均し、コテ仕上げ等における作業性は良好であった。B 区画の振動締固めには、プレートランマを使用した(写真 6.8)。

歩道の表層となる樹脂ポーラスは、ポーラスコンクリート打設の 2 日後に施工した。本施工により、使用する玉石の選択次第で、歩道の意匠性や質感を様々に変化させることができると判断された。歩道の周囲は、美観の向上を考慮して碎石(サビ石)敷きとした。



写真 6.5 路床のセメント被膜、縁石状況(D3 区画)



写真 6.6 アジテータ車からのポーラスコンクリートの排出状況



写真 6.7 ポーラスコンクリートの打設
(C 区画)



写真 6.8 振動締めめ機による基層の
締めめ (B 区画)

6.4 実験結果と考察

6.4.1 練上り後の経過時間の影響

図 6.3 に、生コンプラントでの練上りからの経過時間を横軸として、各特性値の測定結果を示す。ここで、円柱供試体の採取は、各車の荷卸し開始時と終了時付近とした。また、コア供試体の経過時間は、図 6.2 に示す採取位置と当日の施工のタイムテーブルから推定した。全般的な傾向として、各特性値に及ぼす練上り後の経過時間の影響はあまり明確には現れていない。

(1) 全空隙率

図 6.3 (a) (i) に示す円柱供試体の測定結果によれば、2 車目の終了時（経過時間 60min 付近）で、他と比べて極端に大きな全空隙率の値が得られている。この時に採取された試料からは、粒度が粗粒に偏っている状態が目視で確認され、アジテータ車のドラムの回転により、粒度の偏りが発生したものと考えられる。全空隙率の増大はこの粒度の偏りによると推測され、アジテータ車によるポーラスコンクリートの運搬は、現場到着後、均一性の確保のために定期的にドラムを低速で逆回転させるなどの措置が必要と考えられる¹⁰⁾。

他の測定結果には、出荷ロットおよび経過時間の違いによる明確な傾向は見られず、全空隙率は概ね 25～30%程度の値であった。なお、コテ仕上げの設計空隙率の計算には軽盛り状態の骨材の実積率を使用した。実測値から判断して、円柱供試体は軽盛り状態よりも良く締まっていることが推測できる。

図 (ii) に示すコア供試体の全空隙率は、22～27%程度で、円柱供試体よりも 2～3%程度小さい。一つの理由として、コア供試体では供試体表面の壁効果の影響がないことがあげられる。また、2 車目の前半部分で全空隙率が極端に小さくなっている。この原因は不明であるが、結果として現場施工されたポーラスコンクリートの方が全空隙率のばらつきが大きくなった。

なお、表層に用いた樹脂ポーラス単体の全空隙率は 30～32%程度であった。エポキシ樹脂の膜厚が薄いため、基層よりも大きな空隙率が期待できる。

(2) 圧縮強度

写真 6.9 に、圧縮強度試験における円柱供試体の破壊状況の例を示す。供試体は、キャッピン

グ部分では破壊せず、概ね円錐状の破壊形態となった。図 6.3 (b) (i) に、円柱供試体の圧縮強度試験結果を示す。円柱供試体の圧縮強度は、前述した粒度の偏ったものを除けば $7 \sim 10 \text{ N/mm}^2$ 程度であった。この値は、過去の実績を基に目標としていた 8 N/mm^2 に近いものである。

図 6.3 (b) (ii) に、コア供試体の圧縮強度試験結果を示す。コア供試体の圧縮強度は、 $8 \sim 16 \text{ N/mm}^2$ 程度であった。円柱供試体と比べてコア供試体の方が大きくなる傾向が見られるが、この理由としては、コア供試体の表面が密で空隙率が小さいこと、コア供試体の材齢が円柱供試体よりも長い(円柱供試体は材齢 28 日で、コア供試体は材齢 50 日で圧縮強度試験を行った)こと、などの影響が考えられる。なお、表層に用いた樹脂ポーラス単体の圧縮強度は、 $2 \sim 2.5 \text{ N/mm}^2$ 程度であった。

(3) 透水係数

図 6.3 (c) (i) に、円柱供試体の透水係数を示す。透水係数は、全空隙率の結果と似た傾向を示しており、粒度の偏りが発生した供試体のデータを除けば、全体的には $3 \sim 6 \text{ cm/sec}$ 程度である。円柱供試体の透水係数は、目標としていた 2 cm/sec を十分満足している。

表層の樹脂ポーラスの施工(厚さ約 1 cm)を行った複層ポーラスコンクリートとしての円柱供試体の透水係数は、 3 cm/sec 程度であり、樹脂ポーラス単体の供試体(空隙率 $30 \sim 32\%$ 程度、骨材粒径 $5 \sim 9.5 \text{ mm}$ 、透水係数 $3 \sim 3.5 \text{ cm/sec}$)とほぼ同等な値となった。

図 6.3 (c) (ii) に、コア供試体の透水係数の測定結果を示す。コア供試体は、現場における透水性評価のため表層を含む状態で測定した。コア供試体の透水係数は $1 \sim 3 \text{ cm/sec}$ 程度で、表層を含む円柱供試体の透水係数より小さい。これは、コア供試体では型枠面の壁効果がないことによると考えられ、ポーラスコンクリートの透水性の評価・管理に円柱供試体を用いる場合には留意を要する¹¹⁾。

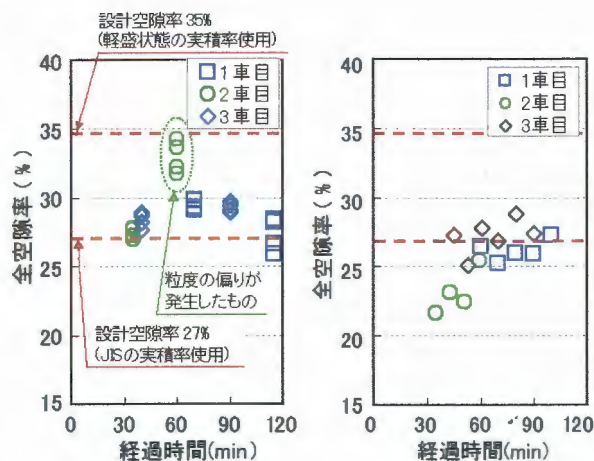
6.4.2 締固め方法の影響^{12)、13)}

図 6.4 に、各特性と締固め方法の関係を示す。図 (a) (i) に示す円柱供試体において、軽盛りの場合の空隙率は設計空隙率より大きく、振動締固めの場合には設計空隙率より小さくなった。コテ仕上げは、軽盛りと振動締固めの中間の結果となり、軽盛り状態における実積率の値(表 6.4 参照)を用いた設計空隙率は実測値との差異が大きいといえる。

図 (ii) に示すコア供試体では、コテ仕上げおよび振動締固めの両方のケースとも、円柱供試体より低い空隙率が得られている。これも主に円柱供試体の型枠の壁効果によるものと考えられる。

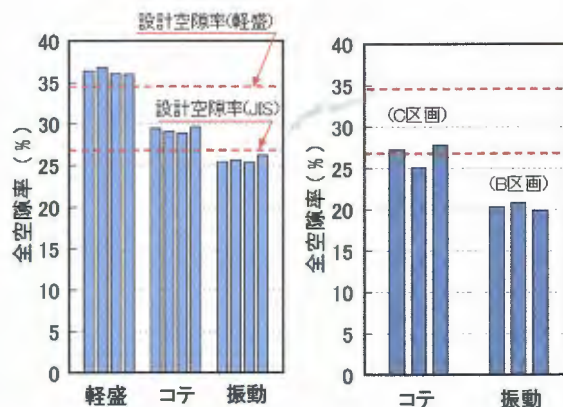
コア供試体の空隙率が小さいことに伴って、図 6.4 (b) および (c) に見られるように、コア供試体では円柱供試体に比べ、圧縮強度が大きく、透水係数が小さくなっている。

一般に、ポーラスコンクリートの空隙率、強度等の品質を安定させるために振動締固めを行うことが望ましい¹²⁾と考えられるが、設計空隙率を実現するという観点からは、円柱供試体とコア供試体との関係に加え、締固め程度による空隙率の変化などについても、さらに詳細に検討する必要がある。



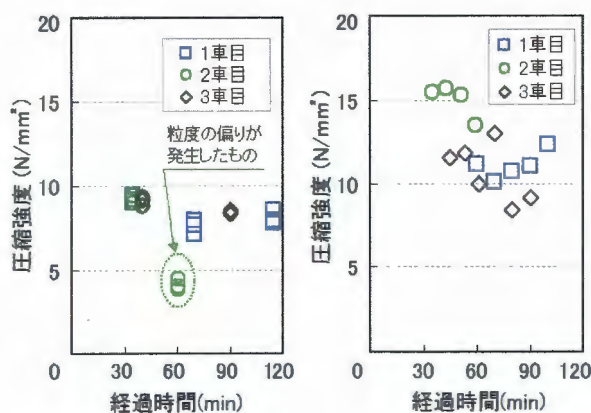
(i) 円柱供試体 (ii) コア供試体

(a) 全空隙率 (表層なし)



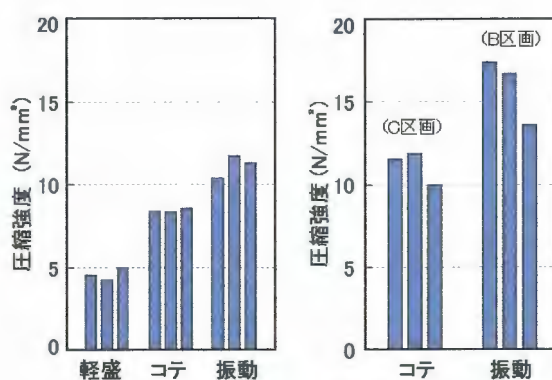
(i) 円柱供試体(3車目) (ii) コア供試体

(a) 全空隙率 (表層なし)



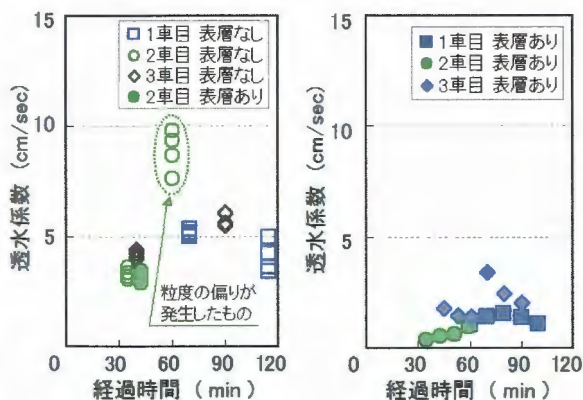
(i) 円柱供試体 (ii) コア供試体

(b) 圧縮強度 (表層なし)



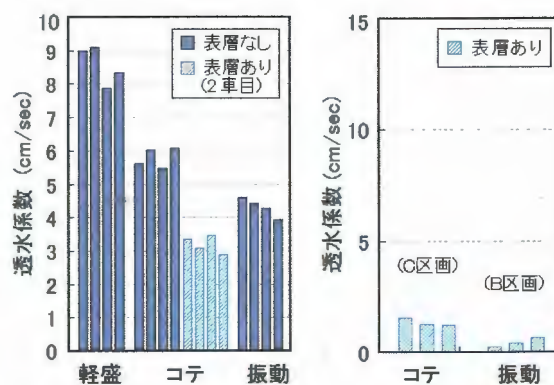
(i) 円柱供試体(3車目) (ii) コア供試体

(b) 圧縮強度 (表層なし)



(i) 円柱供試体 (ii) コア供試体

(c) 透水係数



(i) 円柱供試体(3車目) (ii) コア供試体

(c) 透水係数

図 6.3 打設したコンクリートの各特性と練り上り後の経過時間との関係(コテ仕上げ)

図 6.4 打設したコンクリートの各特性と締め固め方法の関係

6.4.3 圧縮強度と空隙率の関係¹²⁾⁻¹⁵⁾

図 6.5 に、各供試体の圧縮強度と空隙率の関係を示す。図中のプロットは、円柱供試体およびコア供試体に分けて示し、締固め方法の違い（コテ仕上げ、軽盛り、振動締固め）は同一マークで示した。また、同図中には文献¹²⁾に倣い、結合材の圧縮強度を切片とする指数関数で近似した結果も併せて示してある。

全プロットに対し、指数関数による近似を行った結果によれば、既往の推定式では、碎石 6 号を使用した場合のべき係数を-0.08 としていたが、本実験結果では、係数は-0.07 程度の値となった。円柱供試体とコア供試体の比較からは、コア供試体の圧縮強度が若干高いと思われていたが、圧縮強度・空隙率関係で見ると、ほぼ同一曲線上にのるという結果となった。

6.4.4 全空隙率と透水係数の関係¹³⁾

図 6.6 に、各供試体の全空隙率と透水係数の関係を示す。図によれば、実測された透水係数は、全空隙率に対してよい相関を示している。既に、図 6.3 で説明したように、コア供試体の透水係数は円柱供試体のそれより小さく、0.3~0.5 倍程度である。

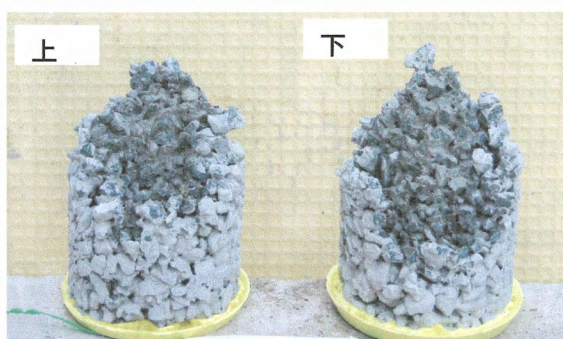


写真 6.9 圧縮試験を行った円柱供試体の破壊状況

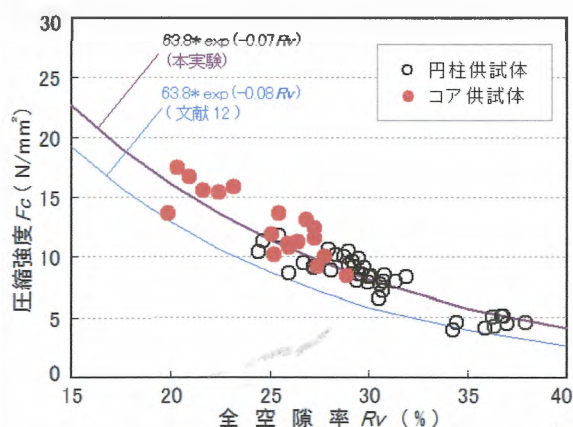


図 6.5 圧縮強度と全空隙率の関係

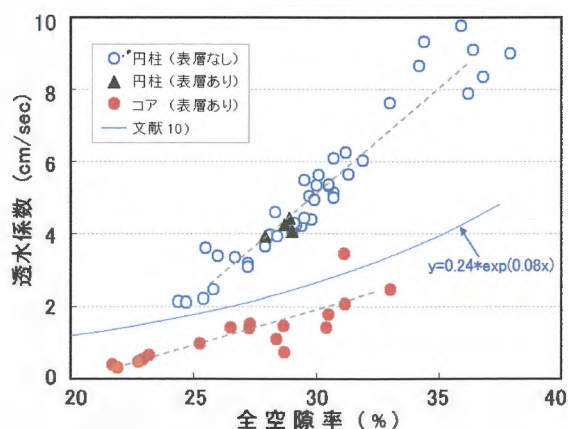


図 6.6 透水係数と全空隙率の関係

6.5 複層ポーラスコンクリートの適用例

本研究で実施工した複層ポーラスコンクリートを適用した他の事例を簡単に紹介する。写真 6.7～写真 6.10 は、それぞれ、複層ポーラスコンクリートを駐車場、トイレ、屋外階段、住宅の屋上に適用した例である。いずれの施工例も既に 3 年余りの時間が経過しているが、退色や摩耗・剥脱はほとんど生じておらず、透水性能の低下も確認されていない。



写真 6.7 駐車場における施工例



写真 6.8 屋外階段における施工例



写真 6.9 トイレにおける施工例



写真 6.10 住宅の屋上における施工

6.6 まとめ

本章ではポーラスコンクリートの建築分野への活用を目指し、基層と表層より成る複層ポーラスコンクリート歩道の現場施工実験と実験室実験について報告した。結果は、おおよそ以下のようによにまとめられる。

- 1) 本実験で用いた比較的低い強度のポーラスコンクリートは、透水性歩道の基層として十分な性能を有していると考えられる。また、歩道の表層を細粒度の樹脂製ポーラス硬化体とすることにより、ポーラスコンクリート単体で施工した歩道と比べて意匠性や質感を改善できることが確認された。
- 2) 本実験で基層に採用した水セメント比 46%、単位結合材量 290kg 程度のポーラスコンクリートは、レディミクストコンクリートプラントにおける製造、アジテータ車による運搬から洗車までの取扱いが比較的容易である。

- 3) 出荷ロットおよび時間経過に伴う品質の変動は、円柱供試体において、空隙率で 26～31%、圧縮強度で $7\sim 10\text{N/mm}^2$ 、透水係数で $2\sim 6\text{cm/sec}$ 程度であった。またコア供試体では、空隙率で 22～27%、圧縮強度で $8\sim 16\text{N/mm}^2$ 、透水係数で $1\sim 3\text{cm/sec}$ 程度であった。いずれの値も透水性歩道の基層として許容範囲にあると考えられる。
- 4) コア供試体と比較して、円柱供試体では、空隙率が大きく、圧縮強度が小さく、透水係数が大きい。これは、既往の研究で指摘されているように、主に円柱供試体の型枠の壁効果によるものと考えられる。品質管理に円柱供試体を用いる際には、この点に留意する必要がある。
- 5) ポーラスコンクリートの空隙率と圧縮強度の関係は、既往の研究で指摘されているように、結合材量の影響および締固め程度の影響を含めて、結合材の圧縮強度を切片とする指数関数の近似式に概ね一致した。また、本実験の範囲では、円柱供試体とコア供試体の結果も概ね同一曲線上にプロットされた。

なお、複層ポーラスコンクリートの表層に使用している樹脂材料については、比較的使用実績の多いエポキシ系樹脂であるが、経年劣化の傾向を確認するため、同じ用途の他の樹脂材料を含めて耐候性実験を行った。その結果については、付録 4 に記している。今後も引き続き、樹脂の耐候性、表層の目詰まり・耐摩耗性・耐剥脱性等の経年変化も調べる予定である。

第6章の参考文献

- 1) 堀口剛: 環境を再来・創造するポーラスコンクリート、アース&eco コンクリートマガジン、No.1、pp.50-56、2008年5月
- 2) 三島直生、中川武志、畑中重光、北野博亮: 屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.337-342、2008年6月
- 3) 上原伸郎、田中伸幸、佐藤健司、増岡臣一: 環境に配慮したポーラスコンクリートの試験施工、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1269-1273、2002年
- 4) 添田政司: 透水性歩道用コンクリートへの規格外再生骨材の適用に関する研究、第35回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集、pp.37-42、2008年10月
- 5) セメント協会 舗装技術専門委員会報告: 舗装用ポーラスコンクリート共通試験結果報告 R-11、1999年11月
- 6) 日本道路協会舗装委員会舗装設計施工小委員会: 透水性舗装ガイドブック、pp.26-33、2007年8月
- 7) 玉井元治、稲田純一、芋瀬英里: ポーラスコンクリートのランドスケープへの適応、アース&eco コンクリートマガジン、No.2、pp.56-63、2008年
- 8) 日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの設計・施工に関する研究委員会: 同報告書、日本コンクリート工学協会、pp.179-180、2003年
- 9) 中川武志、畑中重光、三島直生、湯浅幸久、前川明弘: 空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法、日本建築学会構造系論文集、第73巻、第629号、pp.1043-1050、2008年7月
- 10) 林善弘、橋本親典、辻幸和: アジテータ車のかくはん中のフレッシュコンクリートの流動に関する研究、土木学会論文集、No.502/V-25、pp.123-130、1994年11月
- 11) 城健、島崎磐、国枝稔、六郷恵哲: ポーラスコンクリートの空隙率と空隙分布の評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.1、pp.259-264、1999年
- 12) 湯浅幸久、畑中重光、三島直生、前川明弘、宮本高秀: ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.37-44、2002年2月
- 13) 石黒哲、湯浅幸久、畑中重光: ポーラスコンクリートの物理的性質に及ぼす各種要因の影響、日本建築学会東海支部研究報告集、pp.73-76、2000年
- 14) 畑中重光、三島直生、湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度－空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材の影響に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.594、pp.17-23、2005年8月
- 15) 梶尾聡: ポーラスコンクリートの配合設計法と空隙性能に関する研究、首都大学東京博士論文、pp.190-212、2008年2月

第7章 総括

7. 総括

7.1 本研究成果の総括

本論文の第3章から第6章において既に記述した各章の結論をここに一括して再掲する。

(1) 空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法(第3章)

空気量試験器を使用し、硬化ポーラスコンクリートの空隙率の測定方法として容積圧力法を提案し、従来の容積法および質量法との比較を行い、以下の結果を得た。

- a) 容積圧力法により、小粒径の硬化ポーラスコンクリートを含めた精度の高い空隙率測定が可能である。また、空隙種類の分類(連続、準連続、独立)、所要時間の短縮も可能になる。
- b) 従来の容積法は、測定誤差が大きく、空隙率が15%以上の範囲では、最大で10%程度小さい値となる場合がある。これは、水中浸漬・気中放置の際に、水の飽和・排出が容易に進まないためと考えられる。
- c) 空隙率の測定に際し、水中浸漬の後、供試体の遠心脱水処理を行うと水の排出が容易になり、短時間で精度の高い測定が可能である。

(2) 仕上げ方法がポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度に及ぼす影響(第4章)

ポーラスコンクリートを現場打設し、採取したコア供試体を使用し、3種類の仕上げ方法(軽盛り、コテ仕上げ、振動締固め)について空隙率および圧縮強度への影響に関する実験を行った結果、以下のような知見が得られた。

- a) 振動締固めでは実積率を使用して求めた設計空隙率より実測空隙率が小さくなり、軽盛りでは骨材の軽盛り時の実積率を用いて推定した空隙率よりも大きくなる傾向が見られた。高さ100mm程度の現場施工においては、振動締固めでは設計空隙率より最大6%程度小さく、コテ仕上げは振動締固めと軽盛りの間で設計空隙率に比較的近く、-2~+3%程度であった。
- b) 従来、骨材の実積率を使用して計算した設計空隙率が振動締固めを行った供試体の実測空隙率に近かったのは、高さ200mmの(円柱)供試体を前提としており、200mmの供試体において表面付近の空隙率が低く、下部の空隙率が高いことが平均化されて得られた平均的な空隙率が代表値として用いられたためであると考えられる。例えば、供試体内部において2つの領域で空隙率が異なる場合(図4.7参照)、供試体全体の空隙率 R_0 は、次式で求められる。

$$R_0 = \frac{a R_1 + (L - a) R_2}{L}$$

ただし、 L :供試体長さ(mm)、 a, b :領域の長さ(mm)、 R_1, R_2 :それぞれの領域の空隙率(%)である。

- c) 締固めの程度が大きくなるにしたがって(軽盛り、コテ仕上げ、振動締固めの順に)全空隙率が小さくなり、それに伴って全空隙率に対する準連続空隙率の比が大きくなる。全空隙率15%

程度において比の値は最大 0.3 程度、全空隙率が 25%程度になると比の値は 0.05 程度以下になった。空隙率が大きい軽盛りでは、準連続空隙率はほとんど発生しないと考えられる。

- d) 圧縮強度および透水係数は、空隙率に高い依存性が見られ、その空隙率は締固め方法による影響を受ける。圧縮強度と空隙率との関係は、結合材強度が一定の条件では締固め方法によらず、1 本の指数関数 $\{y=87.2\exp(-0.064x), x:\text{空隙率}\}$ によりほぼ近似することができる。

(3) 供試体の高さ／直径比 h/d がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響 (第 5 章)

ポーラスコンクリートの圧縮強度に対する供試体高さ／直径比の影響に関する実験を行い、以下の結果を得た。

- a) 6 号砕石を使用したポーラスコンクリートについて、供試体の高さ／直径比が小さくなると、圧縮強度が上昇し、その傾向は普通コンクリートとほぼ同様であった。
- b) ポーラスコンクリートの圧縮強度比と空隙率との関係において、空隙率が大きくなると圧縮強度比が若干大きくなる傾向が見られる。しかし、その程度はあまり大きくなく、その変動幅は、既往の研究報告書における普通コンクリートのデータの変動幅の範囲内であった。そのため本研究では、ポーラスコンクリートの圧縮強度比と供試体の高さ／直径比との関係式を 1 本の曲線で近似することとした。その結果、供試体の高さ／直径比の影響に関する圧縮強度の補正係数は、 $h/d=0.5\sim 2.0$ の範囲において、次式により得られた。

$$n = 1 / \{ a \cdot \exp(b(x - 2)) + c \}$$

ここに、 n : 高さ／直径比に関する圧縮強度補正係数、 x : 高さ／直径比、定数 $a=0.03$ 、 $b=2.2$ 、 $c=0.97$ である。また、適用範囲は、 $W/C=25\sim 45\%$ 、空隙率 15～30%である。

上式によれば、圧縮強度補正係数は、 $h/d=1.5$ において 0.94 程度、 $h/d=1.0$ において 0.81 程度、 $h/d=0.5$ において 0.56 程度であった。

- c) 供試体の高さ／直径比の影響は、円柱供試体とコア供試体ではほぼ同様の傾向であると考えられる。
- d) 供試体の高さ／直径比と圧縮強度比との関係に対する水セメント比の影響は比較的小さいと考えられる。

(4) 住空間における意匠性に配慮した複層ポーラスコンクリート歩道の現場施工 (第 6 章)

ポーラスコンクリートによる基層と、高耐久なエポキシ樹脂で結合したポーラス硬化体による表層からなる複層ポーラスコンクリート歩道の施工実験を行い、以下の結果を得た。

- a) 基層のポーラスコンクリートは強度が比較的低い調合であるが、透水性舗装の基層として十分な性能を有する。また表層を樹脂ポーラスとすることにより、意匠性や質感を改善できる。
- b) 実験に採用した水セメント比 46%、単位結合材量 290kg 程度のポーラスコンクリートは、レディーミクストコンクリートプラントにおける製造およびアジテータ車による運搬・清掃が比較的容易であり、現場における施工性等が良好である。

- c) ポーラスコンクリートの空隙率と圧縮強度の関係は、結合材量の影響および締固め程度の影響を含めて、結合材の圧縮強度を切片とする指数関数の近似式におおむね一致し、また、実験の範囲では円柱供試体とコア供試体の結果もおおむね同一曲線上にプロットされた。

7.2 本研究の成果

上述の実験結果により、ポーラスコンクリートの現場施工時における品質管理についての多くの知見が得られた。また、施主・設計者・施工者のニーズに対応した複層ポーラスコンクリートの施工方法を示すことができ、今後のポーラスコンクリート適用時の有効な参考事例になると考えられる。

本研究によって得られたポーラスコンクリート(複層ポーラスコンクリート)の現場施工に関する成果を、第2章の表2.8.1に対応させ、表7.1に一括して示す。また、逐一表中の項目を挙

表 7.1 本研究の成果

		既 往 の 研 究	本 研 究 の 成 果	特 記
基本特性	空隙率	JCI規準(案)による定義と測定方法	→準連続空隙率等を定義	新定義
		振動締固めを前提としている	→容積圧力法、遠心脱水処理を提案	新測定方法
	圧縮強度	各種要因の影響をある程度把握している	→弱い締固め(仕上げ)の場合を把握	
			→締固め方法の影響を把握	
透水係数	供試体による評価が多い	→h/dの影響の補正方法が得られた	新提案	
仕様	層構造	単層を前提としている	→円柱とコアの差を把握	
	意匠性	単層を前提としている	→複層化で実施工	新技術
	用途	ほとんど未検討	→意匠性を考慮して実施工	
		二次製品、法面、車道が多い	→歩道等で実施工	
		強度重視の調合が多い	→プラント供給を受けて実施工	
	調合	高セメント量	低セメント量 高W/C 中粒径・複層化 } 実施工で実用性を実証	
		低W/C		
		小～大粒径		
	透水係数	雨量想定 of 透水係数が多い	→高い透水性を活かして実施工	
	耐久性	高強度化による対応を想定	→総合的な向上策を考慮して実施工	
熱特性	いくつかの事例報告がある	→比較実験で重要因子を把握		
設計	設計空隙率	実積率を使用した設計	→締固めない場合の設計を確立	
	評価	円柱供試体を漠然と想定	→円柱とコアの差を把握	
	透水性	POC単体の透水性能	→排水計画を含めて実施工	
施工	事例	実験的施工、大面積が多い	→100㎡程度で実施工多数	
	作業性	施工機械の報告が少ない	→100㎡程度で実施工多数	新技術
		作業性に関する報告が少ない	→打設機、仕上げ機の試作	
	品質管理	基本的な品質管理	→高作業性の条件を提案	
			→作業性向上による品質向上も考慮	

げることにはしないが、本研究成果の概要を、各章ごとに以下に示しておく。

第3章では、既往の研究において、ポーラスコンクリートの機能性に大きく影響する空隙率に関して、独立空隙率の定義を見直し、準連続空隙率という区分を提案するとともに、従来の容積法より精度よく短時間で測定できる容積圧力法を提案し、その有効性を明らかにした。

第4章では、これまで不明確であったポーラスコンクリートの円柱供試体とコア供試体との関係、仕上げ(締固め)方法がポーラスコンクリートの品質に及ぼす影響などについて、これらの要因の影響を分離する形で実験結果を整理・検討した。

第5章では、これまで報告がなかった圧縮試験時の供試体の高さ／直径比の影響について、圧縮強度比(補正係数の逆数)と高さ／直径比の関係を示した。

第6章では、建物の内外構、歩道、駐車場等に対して、ポーラスコンクリートの現場打設に関する事例が少ないことから、より高品位で、より機能性が高く、施工しやすい工法が求められていると分析し、この現状に対して、透水性等の機能を重視し、強い締固めを行わないポーラスコンクリートの施工法を提案するとともに、複層化して意匠性および耐久性を高める方法を提案した。ここで採用したポーラスコンクリートは、水セメント比が高く、セメント量が少ない調合を適用することにより、レディーミクストコンクリートプラントでの製造、アジテータ車による搬送および清掃を含めた取扱いが容易になり、現場打設時の作業性も高まることにより品質を安定化させやすいものである。実験として実施工を行った複層ポーラスコンクリート歩道では、単に雨水を透水するだけではなく、高い透水性を活かし、かつ支持力と温度上昇抑制も考慮して路盤材を使用せず、路床のセメント改良を行い、必要に応じて路床に薄いセメント皮膜処理を行うことにより少雨の際には地中浸透を図り、多雨の際には排水する構造とした。

これらの成果は、ポーラスコンクリートの現場打設にかかわる諸々の問題の解決につながるものと考えられる。

7.3 今後の課題

建物の内外構、歩道、駐車場等において、より社会のニーズに合致した形でポーラスコンクリートを普及させるために、ポーラスコンクリートの設計・施工に関する系統的な特性把握と品質管理方法の充実とがさらに必要で、それに伴って以下のようないくつかの課題が考えられる。

(1) 基本特性への各種要因の影響の把握

ポーラスコンクリートの空隙率等に対する締固めの影響(さらに、それが円柱供試体とコア供試体でどのように違うのか)、供試体高さ／直径比の効果に対する骨材粒径の影響等、さらに実験による検討が必要である。

(2) 複層・複数粒径ポーラスコンクリートの設計

ポーラスコンクリートは、粒度を複数にして混合したり、多層化することにより性能を高めることができると考えられる。本論文(第6章)で述べた複層ポーラスコンクリート舗装は、その一

つであるが、複層・複数粒径とすることにより、とりわけ作業性(ワーカビリティ)、意匠性、圧縮強度などを高めることができると考えられるので、設計条件に応じて得られる品質特性、製造・施工上の注意点などの把握を進める必要がある。

(3) レディミクストコンクリートプラントからのポーラスコンクリート供給の一般化

ポーラスコンクリートの製造をレディミクストコンクリートプラントに依頼し、供給を受けるにあたり、プラントの設備やトラックアジテータで取り扱いやすい調合とすることによりプラント側の対応が容易になることがわかった(第6章)。これは、地域によらず、ポーラスコンクリートを普及させる点で大きな前進であると考えるが、ポーラスコンクリートの調合上の注意事項(搬送時間、混和剤、水分調整量)等について標準化を進める必要がある。ただし、幅広い調合条件を標準化するには時間を要すると考えられるので、比較的、多用される調合仕様から標準化し、実績を積み重ねる方式が望ましいと考えられる。

試作機の紹介

試作機の紹介

ポーラスコンクリートを建物の内外構、歩道等に施工する場合に、中規模の面積(数百 m^2 程度)のポーラスコンクリートの敷均しおよび表面の仕上げを行うにあたって適切な機械がなく、施工者のニーズに応える作業性の高い機械の開発が必要とされている。そのため、本研究の一環として、ポーラスコンクリートを連続的に運搬・敷均しを行う打設機およびポーラスコンクリートの表面を平滑に仕上げる仕上機を設計・試作し、施工実験を行った。また、現場における品質管理に資するツールとして、透水係数が非常に高い舗装に対応できる現場透水試験装置も試作した。以下のその概要を紹介する。

試作機 1 ポーラスコンクリートの打設機

1.1 打設機のニーズと提案

数百 m^2 程度の面積のポーラスコンクリートを効率よく敷き均す場合、現状ではバックホーおよびダンプによる小運搬、コンクリートバケツによるクレーン作業、一輪車等による小運搬、人力・レーキ等による敷均し作業が行われることが多い。

現状としては、人力作業が介在するため、下記のような問題点が考えられる。

- a) 複数の作業員を確保する必要がある。
- b) 敷均しに時間を要する。また、短時間に敷き均すためには重労働となる。
- c) 人力による敷均しの際、踏み締め方などにより締固め程度がばらつく。

したがって、このような問題の解決のため、ポーラスコンクリートの敷均しを連続的に行う機械を考案し、実用的なレベルを想定して試作する。

1.2 打設機の試作

新しい打設機(試作機)には、以下のような機能が必要と考えられる。

- a) トラックアジテータからポーラスコンクリートを受け取れること。2～4 m^3 程度積載可能なこと。
- b) 自走でき、ダンプアップ等の機構により、ポーラスコンクリートを打設箇所に連続供給できること。
- c) ポーラスコンクリートを、所定の全幅にわたり、均等に配分するためのシュートを備えること。
- d) シュートは、ポーラスコンクリートの打設厚さに対応して調節できること。
- e) シュートの形状は、ポーラスコンクリートが詰まることのない形状であること。
- f) ポーラスコンクリートをブレードまたはプレート状のもので、均等な厚さに敷き均せること。
- g) 清掃、メンテナンスが容易であること。

図1に、上記の要求を考慮して考案・設計した打設機の構造を示す。早期実用を考慮して、既存のクローラダンプをベースとした自走式機械を試作した。

表 1 に試作機の諸元を示す。実用時には、ポーラスコンクリートの打設厚さを、5~20cm 程度に無段階に設定可能、かつ走行中に操作・制御可能で、路床の勾配等に対応できることが望ましいが、今回の試作機では、3 段階(取付け・空車時のプレートと地面との間隙寸法で 8、16、24cm)の構造になっている。試作機では、POC 打設可能な幅はクローラの全幅より大きくすべき(クローラの全幅は打設幅より小さくすべき)と考えられるが、今回の試作で達成することはやや困難であった。

1.3 実験の概要

ポーラスコンクリートの打設実験は、実験用現場を確保し、路床転圧完了後の、幅 2.2m、全長 15m の打設区画に対して行った。表 2 に、実験概要を示す。

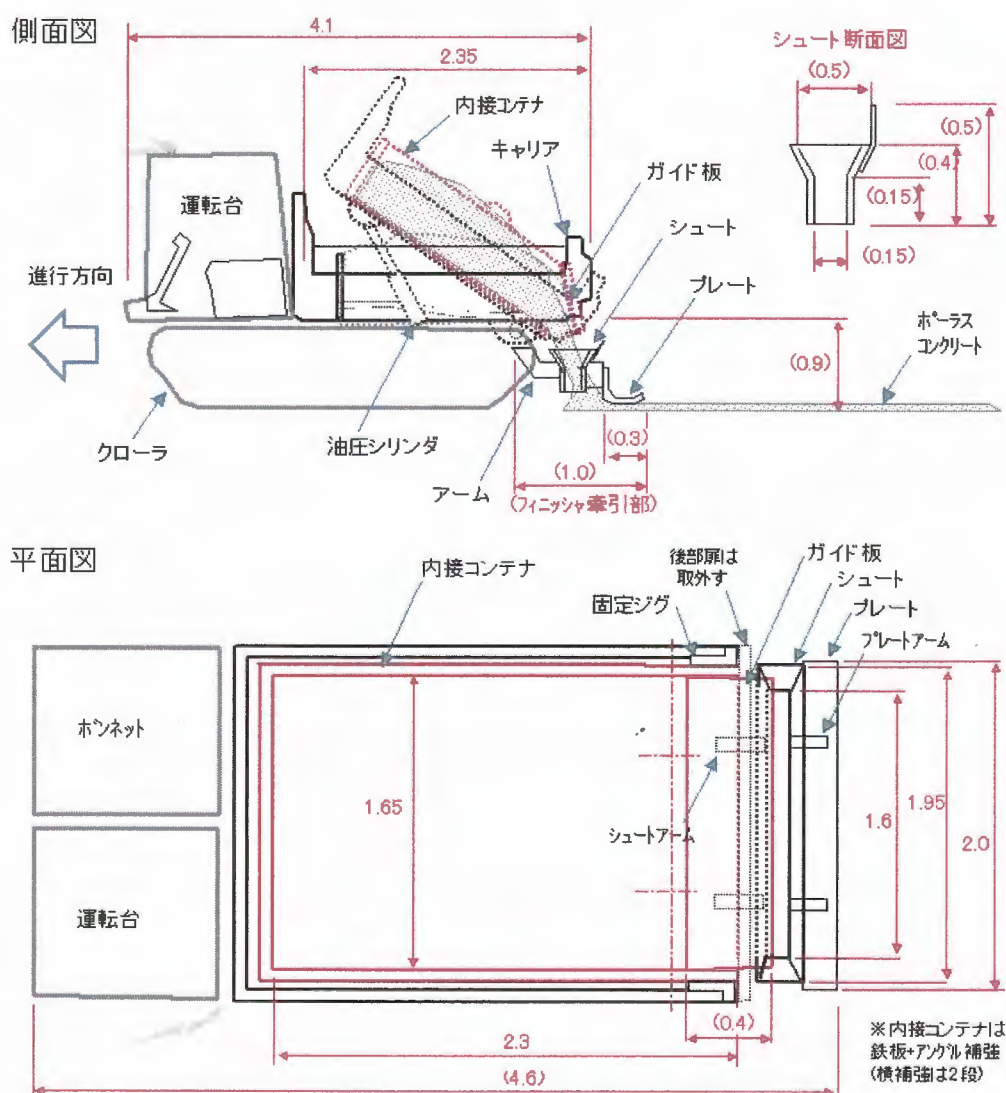


図 1 POC 打設機の試作機 [単位 : m]

表 1 試作機の諸元

機体寸法 (mm)	全 長	4135	
	全 幅	2000	
	全 高	2440	
コンテナ内寸 (mm)	長さ	2150	試作のため内接式 荷台容積 1.9 m ³
	幅	1650	
	高さ	500	
荷台床面高 (mm)		1000	
シュート部 (mm)	長さ	1200	脱着式 (取付全長4600)
	シュート幅	1600	
	プレート幅	2000	
走行速度 (m/min)		20	(打設時1〜3m/min)
定格出力(PS/rpm)		100/2600	

表 2 実験概要

打設 区画	全長 (m)		15
	幅 (m)		2.2
	厚さ (m)		0.08
	路床条件		プレートラン転圧
POC 調査	粗骨材		6号(5-13mm)
	水セメント比		46 %
	単位量 (kg/m ³)	砕石	1535
		セメント	175
		水	80
	設計空隙率 (%)		29

打設可能な幅を、設計段階で予測することは困難であるため、幅 2.2m は広めに設定した値である。目標打設厚さは 8cm、コンテナに約 1.5 m³のポーラスコンクリートを積載し、ダンプアップしながら、2m/min 程度の速度で前進して打設した。

1.4 実験結果と考察

試作機による連続的打設は、おおむね良好であった。写真 1、写真 2 に実験における打設状況を示す。

打設厚さ 8cm の設定では、打設幅は約 2.05m であった。両側面は、打設後、人力で型枠を当て整形したが、ポーラスコンクリートを移動・追加させる必要はなく、幅の誤差は±2cm 程度であった。ダンプアップが過度になると、シュートにポーラスコンクリートが盛り上がる状態となるが、今回の調合条件では、シュート部における流動は良好で、3 段階の中で最も閉塞が起こりやすいと推定される厚さ 8cm の場合においても閉塞は発生しなかった。ダンプアップを抑えて走行すれば、特段の問題は発生しない(初期的な技術習熟の範囲内)と考えられる。

打設厚さの出来形測定結果(両側各 5 点、図 2)では、-2cm〜+1.5cm 程度の範囲であった。この変動は、シュートおよび敷均しのためのプレートがクローラ最後尾に取り付けられているため、路床の勾配変化による打設機の姿勢変化の影響を受けやすいためであると考えられる。路床の平坦度が高ければ問題ないものと考えられるが、当面の改良として、取付け部を支点とした上下機構、将来的にはシュート部の油圧による自動姿勢制御が望ましいと考えられる。

打設量については、打設開始から 8m 地点においてポーラスコンクリートの補充を行ったが、打設機は、打継ぎ目を発生させることなく、打設を継続できることが確認された。歩道のように連続的に打設する場合に対しては品質の安定化と作業能率の向上が十分期待できるものと考えられる。

実験区画は、約 25 分で打設完了した。撮影、状況確認などに要する時間を除けば、10〜15 分で打設可能と考えられる。すなわち、0.2m³/min 程度の打設能力であると考えられる。



写真1 打設機の運転状況(打設幅 2.05m)

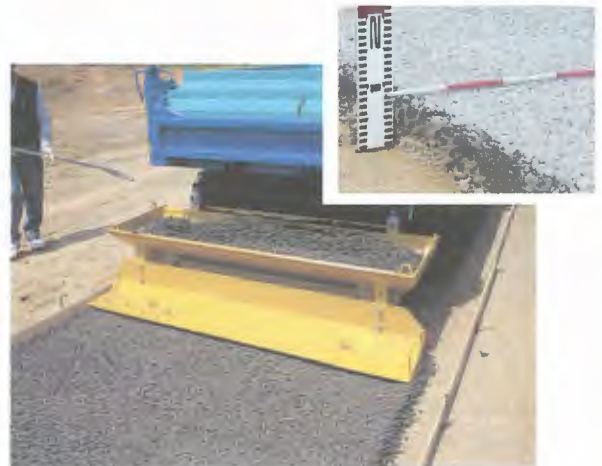


写真2 シュート部の状況(打設厚さ 8cm)

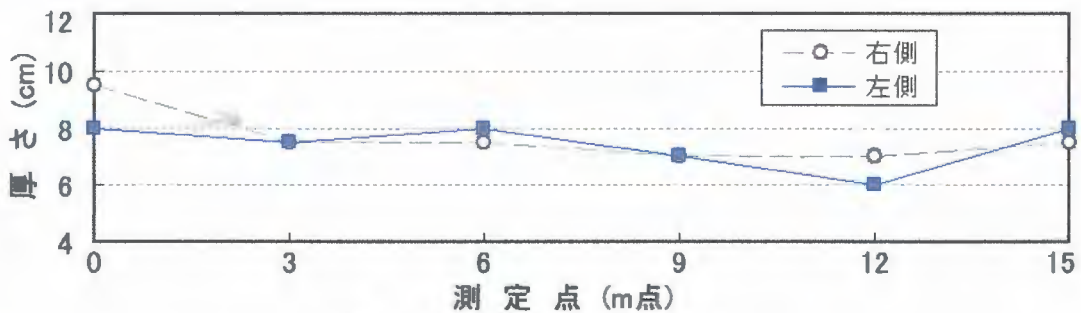


図2 厚さの出来形測定結果

ポーラスコンクリート打設機の試作機に関する今後の課題としては、次のような検討が必要である。

- 5号砕石を使ったポーラスコンクリートや水セメント比が小さく、セメント量の多い調合のポーラスコンクリートにおける確認実験と問題点の抽出を行うこと
- 試作機について、打設厚さを無段階に設定できる機構へ改造すること
- 機械搬送時の対応のため、シュート部を脱着しやすい機構に改造すること

今回の実験結果から、一回り小さい運搬機をベースとして、打設幅がクローラ全幅に対して余裕のある寸法とし、荷台の後部扉部の付替えとシュート部の取付けで打設機となる設計を行うことにより、歩道、駐車場等を想定した汎用機として十分使用できるものと考えられる。さらに将来的には、(試作機的方式では、現場の勾配により、ポーラスコンクリートの打設厚さが影響を受けやすいため、)油圧等によるシュート部の姿勢制御機能も検討する価値がある。

以上、試作した打設機は、打設・敷き均し作業の軽労化を可能にし、時間短縮および品質の均質化に有効であると考えられる。打設能力は $0.2\text{m}^3/\text{min}$ 程度と考えられ、歩道等連続的に打設する場合等においては、打継ぎ目の発生もなく、実用可能なことがわかった。

試作機 2 ポーラスコンクリートの仕上げ機

2.1 仕上げ機のニーズと提案

ポーラスコンクリートを建物の内外構、歩道、公園等に施工する場合に、前項の打設機と同様に、ポーラスコンクリートの敷均しおよび表面の仕上げを行うにあたって適切な機械がないのが現状であり、住宅外構や駐車場など、面積が数百㎡程度の場合には人力によるコテ仕上げを選択せざるを得ない状況である。

現状の一般的対応方法は、下記のような問題点があげられる。

a) 道路舗装用の機械 1)、2)

- ・ フィニッシャは小さいものもあるが、作業に不向きである。
- ・ 振動ローラ(幅 0.8～2m、長さ 2～4m 程度)は、転圧用であり、進行方向に、ポーラスコンクリートを押し出してしまうため、仕上げには不適である。

b) 汎用プレートランマ

- ・ 振動が効き過ぎて空隙率が下がる。
- ・ 締固めにより全体として天端が不陸(凸凹)になりやすく、その修正が難しい。
- ・ 機械の方向転換時などに掘り起しが発生しやすい。
- ・ アクセル開度を手元で調節できず、融通が効かない。

c) 人力によるコテ仕上げ作業

- ・ 労力がかかる(重労働)。
- ・ 作業進捗が遅くなり、ポーラスコンクリートの乾燥などの問題が生じやすい。
- ・ コテ仕上げでは、硬化後、表面の骨材が剥脱しやすい。
- ・ 5号砕石やセメント富配合のポーラスコンクリートをコテ仕上げで行うのは困難。

上述のような現状に対して、中規模の面積において、施工性を向上させ、もって品質の安定化を図るために、ポーラスコンクリートの打設作業の仕上げに有効な仕上機の開発が必要と考えられている。仕上げ機は、次の要求事項を実現できる機械と考え、設計した。

- a) 転圧または振動締固めのイメージではなく、ポーラスコンクリート表面を平滑に仕上げる。
- b) 表面付近を適度に締め固め、空隙率と強度、耐剥脱性をバランスよく両立させる。
- c) 打撃板面積および重量が調節可能。
- d) 機械の進行方向は、押し進みおよび引き進みの両方向とする。
- e) 走行、方向転換および振動調節等の操作が行いやすく、運搬しやすいサイズとする。

2.2 仕上げ機の試作

写真 3 に、試作機 2 種を示す。No.1 の機械を試作し、試運転により設計修正を行い、No.2 の

機械を試作した。No.1 からの変更点は、機械および追加分銅の質量、打撃板の曲面形状、ハンドル寸法等である。表 3 に試作機の諸元を示す。



写真 3 試作機外観 (左:No. 1、右:No. 2)

表 3 試作機の諸元

	単位	No.1	No.2
質 量	kg	33	29
追加 分銅	kg	9	20
全 高	m	920	820
打撃板 幅	m	0.56 (底0.53)	0.58 (底0.55)
長さ	m	0.38 (底0.28)	0.4 (底0.30)
走行 速度	m/min	24～27	20～30
振 動 数	Hz	1.5	1.5
起 振 力	kN	4.9	4.9
エンジン出力	kw	1.5	1.5

2.3 実験の概要

仕上げ機の性能は、打設現場における良好な作業性と仕上げ性能が最も重要であるため、実際の使用状況における試運転により確認した。表 4 に示す。写真 4 および写真 5 に、試運転の状況写真を示す。また、打設したポーラスコンクリートが硬化した後、コア供試体を採取して使用条件と特性を調べた。

仕上げ機による打設時の目標空隙率は、(第 6 章の実験において使用したプレートランマに対して本仕上げ機では、質量およびエンジン出力が同程度で打撃板面積がほぼ 2 倍であることから振動エネルギーが半分程度であること、および同実験結果において、コア供試体の空隙率が設計空隙率より小さくなっていることを考慮し)骨材の実積率 57.7%と軽盛り時の実積率相当値 49.8%を 1:2 の比率で配分した値 55.1%から算出した設計空隙率 29.4%とした。

なお、仕上げ機の試作および実験は、先述した打設機よりも早い時期に実施したため、本実験においては、打設機は要していない。

表 4 施工実験の概要

番号	施工場所	機械	分銅 (kg)	POC条件 (碎石、空隙率、w/c)	厚さ (cm)	面積 (㎡)	コア 採取
I	A 区画 1	No.1	有(9)／無	6号、29%、45%	10	70	○
II	A 区画 2	No.2	有(20)／無	＃ ＃ ＃	10	80	○
III	B	No.2	有(20)／無	＃ ＃ ＃	15	110	－
IV	C	No.2	有(10)／無	＃ ＃ ＃	10	100	○



写真4 実験状況（Ⅲ、機械 No.2）



写真5 実験状況（Ⅳ、機械 No.2）

2.4 実験結果と考察

表 5 に、仕上げ状況およびコア供試体の実験概要と結果を示す。

本実験は、試作機の試運転を兼ねたもので、要因と水準を幅広く設定した実験を今後行う必要があると考えられるが、作業性、仕上がり等に関して有用な知見が得られた。機械 No.1 と機械 No.2 の差は小さいが、打撃板の端部の曲率がやや小さい機械 No.1 では、振動締固めエネルギーが大きいと、方向転換時などに掘り起こしを発生しやすいという傾向が見られた。また、両方向兼用のハンドルは、約 50mm 短い機械 No.2 の方が、操作性が良かった。

打設したポーラスコンクリートから採取したコアの空隙率(表 5)は、目標空隙率に比較的近い値であるが、表層部を研磨した供試体において、目標よりやや小さい値となっており、現場施工では円柱供試体とは異なり、表面の仕上げを意図したものであっても、碎石の実積率を使用した設計空隙率 26.8%に近くなると見られる⁵⁾。

なお、実験においては、コア採取位置の機械の通過回数が 2 回であるが、仕上げ機の用途上、全体として平坦に仕上げるため、通過回数を制限して使用することは実用的ではない。表面の仕上げに主眼を置くと、設定した振動エネルギーで 2～3 回通過すると締固めの効果がそれ以上進行しないことが望ましい。今後、1 回あたりの振動エネルギーと機械の通過回数の影響について把握する必要がある。

圧縮強度については、コア供試体の試験結果に対して、供試体の高さ／直径比による補正(第 5 章の式(1))値で、 11.4N/mm^2 (分銅なし)、 12.5N/mm^2 (分銅 10kg) 程度であった。分銅の有無による効果も空隙率および圧縮強度の値に現れていると考えられる。

ただし、圧縮強度の測定結果は、コアの実験個数がまだ少ないため、今後、さらに実験で確認する必要がある。なお、これまでの施工例では、路床の支持力が確保されていれば、軽交通以下が主となる歩道・駐車場の場合、比較的低い強度($6\sim 10\text{N/mm}^2$ 程度)でも、複層ポーラスコンクリートの場合には、ほとんど問題が発生しないことが多い。

表 5 試作機の運転実験の概要と結果

区 分	詳 細		試運転評価		
			No.1	No.2	
作 業 性	直進仕上げ状況	分銅なし	○	○	
		分銅最大	○	○	
	方向転換時仕上げ状況	分銅なし	△	○	
		分銅最大	×	△	
	ON、OFFおよび振動調節		○	○	
	歩行の影響	分銅なし	○	○	
分銅最大		○	○		
仕 上 が り	平 滑 性	分銅なし	○	○	
		分銅最大	○	○	
	100㎡あたり所要時間（分）		30	30	
POC 特 性 （コア）	施工場所 A	空 隙 率	分銅なし	27.4	29.0
		（容積圧力法 %）	分銅最大	25.1	27.8
		断面状況観察	分銅なし	良好	良好
			分銅最大	良好	良好
	施工場所 C	空隙率 表層あり	分銅なし	－	29.1
		（容積圧力法 %）	分銅10kg	－	27.3
		空隙率 研磨後	分銅なし	－	26.9
		（容積圧力法 %）	分銅10kg	－	25.4
		断面状況観察	分銅なし	－	良好
			分銅10kg	－	良好
		圧 縮 強 度 （N/mm ² ）	分銅なし	－	11.4
			分銅10kg	－	12.5

※ 1) POC調査:6号砕石、空隙率29%、水セメント比45%
2) 評価 ○:良好、△:若干問題がある、×:問題がある。
3) 空隙率および圧縮強度は供試体1個または2個による結果
4) 圧縮強度は、h/dによる影響を5章の方法で補正した値
5) 所要時間は概算値

仕上げ能力については、今回の実験範囲では、各現場における所要時間の記録(実験のための時間を除外)から、100㎡あたりおおむね 30 分、すなわち 3 m²/min 程度であると推定される。コテ仕上げの場合には、通常、100㎡あたり 60～120 分程度要すると考えられるので、本仕上げ機による時間短縮効果は大きいと考えられる。

本仕上げ機は、施工能率の面では、十分実用レベルにあることが確認された。本仕上げ機の導入によって期待できる具体的なメリットを以下に示す。

- a) 必要な空隙率を確保しつつ、表面付近を目標とする一定の締固め状態とすることができる。
- b) ポーラスコンクリートの仕様(硬さ)に対応して締固めエネルギーを調節できる。
- c) 表面付近の骨材をインターロック(砕石どうしを密着させ、表面を平滑化)させることができる。これにより、

- ・ 高い透水性・排水性を確保し、長期的に目詰まりしにくくする。
- ・ 表面の強度を向上させ、骨材の剥脱を防止する。
- ・ コテ仕上げより平滑な仕上がりが得られる。

- d) 作業時間を大幅に短縮できる。
- e) 振動エネルギーの調節範囲が広いため、骨材粒径が比較的大きい 5 号砕石のポーラスコンクリートやセメント富調(配)合のポーラスコンクリートでも、比較的容易に仕上げられる。
- f) 機械の前後を歩いて使用することができる。また、施工直後でも養生を行うことにより足を踏み入れることが可能となる。
- g) 誰が施工しても同程度の仕上げ状態を得る事が可能。
- h) 打設作業が軽労化され、能率が向上し、工程計画が容易になる。
- i) 施工面積全体にわたって、均一なポーラスコンクリートの打設が可能になる。
- j) 透水性舗装のコストダウンが図れる。

ポーラスコンクリートの仕上げ機の開発に関する今後の課題としては、ポーラスコンクリートの仕様とそれに適する機械の条件設定との関係、走行回数の影響、振動エネルギーの実測、などについて確認する必要がある。

振動エネルギーについては、打撃板面積や質量が変化した場合、実際の振幅および振動数などのように変化するか、精度の高い推定が困難であり、また、作業時にはアクセル開度を調節して使用するので、これらの影響を把握するため、実際に測定してみる必要がある。

そして、施工時の作業者としては、ポーラスコンクリートの仕様にあわせて、最も適切な表面の仕上がり状況となるよう、分銅やアクセル開度、場合により打撃板面積を調節して使用することが考えられるので、設計側から見て、どのような方法で指定することが可能かを検討する必要がある。現実的には、例えば、振動機の起振力と面積あたりの質量により、仕上げ機の等級区分を行うことにより締固めエネルギー(の等級)を指定することなどが考えられる。

以上、試作した仕上げ機は容易かつ迅速に仕上げられるとともに、高い透水性能や目詰まりしにくいポーラスコンクリートにできる。誰にでも使用でき、常に同程度の仕上げ性能を発揮し、人による差をなくすることができると考えられる。仕上げ能力は、 $3\text{m}^2/\text{min}$ 程度であり、作業能率の面からは十分実用レベルにあると考えられる。

本仕上げ機は、従来の転圧用プレートランマ等と比べて、振動エネルギーが小さく、その調節可能範囲が広いことを特徴とするものであり、運転中の分銅効果の制御機構を含めて、三重大学と著者の共同で開発し、特許の出願(特願 2009-165488)を行った。

試作機 3 現場透水試験装置

3.1 高空隙率ポーラスコンクリートに対する試験機のニーズと試作

道路などの透水性舗装において、施工した部分の透水性能を確認する場合には、現場透水性試験^{6) 7)}が行われる。また、施工後の経年による目詰まりのチェックの場合にも同様の試験を実施することがある。これは、JCI 規準(案)における円柱供試体を作成して測定する透水性試験とは別に、現場の被測定部に円筒管型の装置を設置し、その断面から流入する単位時間当たりの水量を求めるものである。しかし、標準的な現場透水性試験装置では、本研究における複層ポーラスコンクリートのような高い透水性を示す場合には、流入可能な水量が大きすぎるため使用できない。そこで、透水係数が通常の透水性舗装より 1 桁程度大きい場合にも対応できる現場透水性試験装置を考案し、試作した。試作装置は、文献 6) の装置を参考にしたが、新たに考案した点および改良を加えた点を以下に示す。

- a) 断面積の異なる水位測定部および貯水部を用意しておき、透水係数の大小に応じて、適切な組合せを選択する方式とした。
- b) 落下水量を大きくするために、貯水量を大きくし、バルブを大径化した。
- c) 水位測定部の直径すなわち測定部面積を小さくした。

試作装置は、図 3 のように、上部に貯水部とバルブ、被測定箇所へ接して水位測定部を設置する構造であり、透水係数の大小に応じて、水位測定部と貯水部の適切な組合せを選択する。

粒径の大きいポーラスコンクリートでは、被測定部と水位測定部の接触部に隙間があると測定誤差が大きくなるため、接触部には、粘土等により所定断面から水が流入するようにする。

20 秒から 1 分程度の時間において、流入した水量を基本水量とし、測定中の貯水部および水

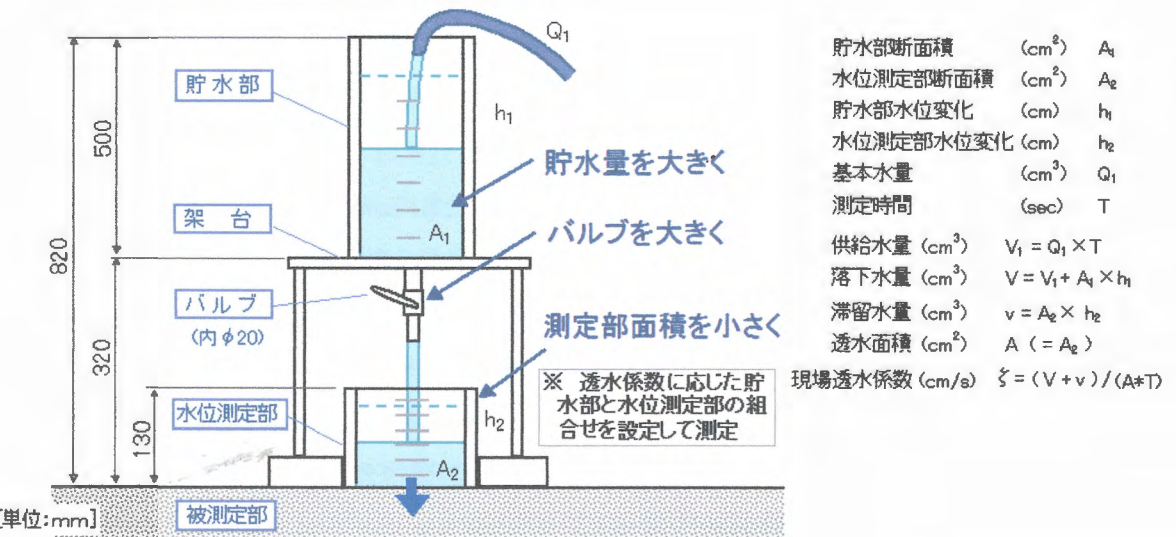


図 3 試作した現場透水性試験装置の構成

位測定部の水位変化から水量を補正して流入水量を求める。透水係数が大きい測定対象には、水道からの供給を受ける必要がある。基本水量および水位測定の精度は、時計を画面内に入れてビデオ撮影を行う、測定回数を増やすなど、必要に応じて精度を高めればよいが、供試体の透水係数測定において通常 1～5cm/sec 程度の透水係数を示すポーラスコンクリートの場合、現場における透水係数は概略値が得られれば、品質の判断ができるものと考えられる。

3.2 実験の概要

実験は、表 4 における施工場所 C(複層ポーラスコンクリート)について、コア供試体の採取予定位置 4 箇所を決定し、現場透水性試験を行った後、コアを採取して、その透水係数を JCI 規準(案)による測定を行った。空隙率の測定は、容積圧力法によった。JCI 規準(案)による透水係数測定では、コア供試体の直径が 93mm であるため、緩衝材を供試体に巻いてセットした。

被測定部の複層ポーラスコンクリートの諸元を表 6 に示す。

写真 6 および写真 7 に、試作した試験装置および一連の試験状況を示す。

表 6 現場透水試験を行った複層ポーラスコンクリート

項 目	内 容	
	基層 POC	表 層
使用骨材 (mm)	5～13mm 碎石	5～10mm 砂利
バインダ	セメント (W/C=46%)	エポキシ系樹脂
設計空隙率 (%)	29 (仕上機使用)	(30)
打設厚さ (mm)	100	(10)



写真 6 測定状況



写真 7 JCI 規準(案)によるコア供試体の透水係数測定

3.3 実験結果と考察

表 7 に、測定実験の結果を示す。表中の結果は、表層を含む測定対象に対する結果であり、また透水係数は水の粘性係数による補正を行った 15℃に相当する値である。

試作した試験機では、17cm/sec という値が測定できることがわかったが、20cm/sec 程度以上になると、落水量が多いため、透水状況の判断および水位測定部の読み取りが困難になると推定される。同じ位置における 2 回の測定結果は、比較的安定しているものの、コア供試体について測定した空隙率が $C_A \sim C_D$ 点で 3%以内の差に収まっているのに対して、透水係数の変化がやや大きな差となった。空隙率が、供試体の容積に対する平均値であるのに対して、水が断面方向に広がりやすい現場透水性試験では、表層付近の空隙率または空隙径の大小に影響を受けやすいためであると考えられる。

また、JCI 規準(案)による測定結果との比較においては、現場透水性試験では、測定対象のポーラスコンクリートに水が流入した時点で流入可能な断面積が広がるため、円柱供試体による透水性試験結果よりかなり大きな値(10 倍程度)となる。

今回の実験範囲では、対象とするポーラスコンクリートの諸元もほぼ同じであるため、円柱供試体の透水係数との関係の傾向が把握できないが、今後、2 つの試験方法を比較するデータの蓄積をしていくことにより、現場透水性試験だけで、ある程度の品質確認が可能となると考えられる。少なくとも、透水係数が高い (JCI 基準(案)による測定で 1cm/sec 程度以上) 場合には、有効な手段となることが考えられる。

表 7 実験結果

測定点	空隙率 (容積圧力法) 表層あり (%)	透 水 係 数					
		現場透水性試験					JCI規準(案) (コア供試体) (cm/s)
		D ₁ (cm)	D ₂ (cm)	1回目 (cm/s)	2回目 (cm/s)	平均値 (cm/s)	
C _A	28.4	10	6	9.3	9.6	9.5	1.3
C _B	29.9	10	6	17.9	16.5	17.2	1.2
C _C	28.4	10	6	17.2	17.1	17.2	1.1
C _D	27.3	10	6	9.6	9.6	9.6	1.0

※ D₁: 貯水部直径、D₂: 水位測定部直径

現場透水性試験装置に関する今後の課題としては、以下のようなことが考えられる。

- 空隙率、骨材粒径等を変化させた幅広い仕様のポーラスコンクリートに対して、現場透水性試験装置による結果と JCI 規準(案)の方法による結果を比較し、相関関係を把握する。
- 現場における、より簡易な透水性評価法(変水位透水試験)を実施し、a)の結果と比較する。

以上、試作した現場透水試験装置は、数パターンの貯水部と水位測定部の大きさを組合せるこ

試作機に関する参考文献

- 1) 関口修、浅野嘉津真:舗装用ポーラスコンクリートの要求品質と製造・施工のポイント、ポーラスコンクリートの製造とこれからがわかる本、セメントジャーナル社、pp.60-65、2001年9月
- 2) 浅野嘉津真、ポーラスコンクリートの生物共生機能と適用事例 02 機械化施工による緑化工法、アース&eco コンクリートマガジン、pp.24-30、2008年夏号
- 3) 日本コンクリート工学協会編、超固練りコンクリート研究委員会報告書、pp.157-162、1998年6月
- 4) 湯浅幸久、畑中重光、三島直生、前川明弘、宮本高秀：ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.37-34、2002年
- 5) 平岩陸、田中清人、谷川恭雄、森博嗣:ポーラスコンクリートの調合設計法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.121-126、2001年
- 6) 日本道路協会編:舗装試験法便覧、日本道路協会、5-4-1、1996年10月
- 7) 関口修、浅野嘉津真:ポーラスコンクリート舗装の品質管理とメンテナンス、ポーラスコンクリートの製造とこれからがわかる本、セメントジャーナル社、pp.66-69、2001年9月

謝辞

本研究の一部は、平成19年度～20年度日本学術振興会科学研究補助金・基礎研究（B）（研究代表者：畑中重光）によった。付記して謝意を表します。

本研究を行うにあたり、終始懇篤なご助言、ご指導をいただきました畑中重光先生（三重大学大学院教授・副学長）、三島直生先生（三重大学大学院助教）に対し、心から感謝しますとともに、ここにお礼を申し上げます。

また、本論文の審査に際して、有益なご助言をいただきました石川幸雄先生（三重大学大学院教授）、花里利一先生（三重大学大学院教授）、川口淳先生（三重大学大学院准教授）に深く感謝いたします。

谷川恭雄先生（名城大学教授・名古屋大学名誉教授）には実験その他の折にご指導をいただきました。玉井元治先生（近畿大学名誉教授）には、ポーラスコンクリートの施工現場などでのご指導をいただきました。

ポーラスコンクリートの空隙率測定に関する実験に際しては、三重県科学技術振興センターにお世話になり、湯浅幸久氏（三重県産業支援センター）、前川明弘氏（三重県工業研究所）に多くのご助言をいただきました。また、岸田依奈さん（三重大学卒業生）、張茂剛氏、スニル・プラタン氏（いずれも三重大学大学院生）のご助力を得ました。

ポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度に及ぼす仕上げ方法の影響、並びに、圧縮強度に及ぼす供試体の高さ／直径比の影響に関する実験に際しては、森鼻泰大氏（三重大学大学院生）、福田一真氏（三重大学卒業生）のご助力を得ました。

ポーラスコンクリートの熱特性に関しては、猛暑の折の実験に際し、北野博亮先生（三重大学大学院助教）の一方ならぬご指導、ご助力を得ました。また、ポーラスコンクリートの吸音特性についての実験に際しては、寺島貴根先生（三重大学大学院准教授）にお世話になりました。

複層ポーラスコンクリート歩道の現場施工実験の計画に際しては、富岡義人先生（三重大学大学院教授）にご指導いただきました。実験にあたっては、三雲生コン（株）、同大藪邦典氏、沖年幸氏（東洋工業（株））のご助力を得ました。複層ポーラスコンクリートに使用する樹脂の耐候性試験を実施するにあたっては、（株）INAX 総合技術研究所の杉山紀幸氏、加藤和信氏および日本診断設計株式会社の長谷川哲也氏（名城大学非常勤講師）にお世話になりました。

ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性に関する実験に際しては、東海コンクリート工業株式会社、犬飼利嗣氏（岐阜高専准教授）、坂本英輔氏（三重大学非常勤講師）、黒田萌氏（三重大学大学院修了生）、山本貴正氏（現豊田高専講師）、山本晃氏（大栄工業相談役）にお世話になりました。

高田豊文先生（滋賀県立大学准教授）には、研究計画にあたり大変お世話になりました。服部宏己先生（岐阜女子短大准教授）にも、とくに前期課程において有益なご助言をいただきました。

さらに、ゼミおよび各種実験に際して、中浜貴生氏(三重大学大学院生)、和藤浩氏(三重大学技術専門員)にお世話になり、岸田幸治氏、古市護氏、大村修太郎氏、中川陽大氏、山田淳司氏(いずれも三重大学卒業生)、大石祐太氏、田村雄一氏、西川稔氏(いずれも三重大学大学院生)、横山達資氏(三重大学学生)ほか、畑中研究室の方々に度々ご助力をいただきました。改めてお礼申し上げます。

また、タイ国との技術交流を進めるに際して、Prof. Prinya Chindaprasert (Former President of Khon Kaen University)、Dr. Thanudkij Chareerat (Lecturer of Kasetsart University)、Dr. Prof. Krasae Chanawongse (Founder, College of Asian Scholars)、矢口信二氏、Thinagorn Rophaya 氏(いずれもタイ大林)、Prasertrungruang Montree (Rungruang Administration & Management Co. Ltd) 氏にお世話になりました。おかげさまで海外における貴重な経験が得られましたことに深謝いたします。

最後に、各種実験の準備と作業には、著者の所属する(株)川島工業の松村豪氏をはじめとする職員の皆さんの多大なご協力がありましたことを、ここに記してお礼申し上げます。

このように、本研究は、多くの方々の暖かいご指導、ご協力をいただいた結果です。改めて深くお礼申し上げます。

中川 武志

付 録

付録1 ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性評価に関する実験的研究

(セメント・コンクリート論文集、No.60、pp.169-176、2006)

1. はじめに

1.1 研究の背景

ポーラスコンクリートは、環境改善に対する機能が期待され、透水性舗装や護岸工法などの多くの場で使用されている。ポーラスコンクリートは路盤や護岸の表層を構成することが一般的であるため、経年または劣化に伴う骨材の剥落・剥脱が発生することが懸念され、それらに対する抵抗性の評価が必要となる^{1),2),3),4),5)}。また、ポーラスコンクリートは打設方法および締固めの程度によって空隙および結合材の分布が変動しやすく、強度もばらつきやすい^{6),7),8)}。したがって、実用の際には、計画した品質が達成されているか、施工部のメンテナンスが必要かどうかなどを現場で判断できる方法の確立が求められている。

そこで、本研究では、ポーラスコンクリートの摩耗またはすりへりを含む剥脱に対する耐久性の把握のための適切な試験方法⁹⁾を検討するとともに、ポーラスコンクリートの剥脱メカニズムの把握を試みる。本報告では、奥田式すりへり試験を採用し、その試験方法について改良できる点を検討するとともに、各種要因の影響を把握するための実験を実施した。

1.2 研究のフローと本報告の位置づけ

Fig.1-1 に本研究のフローを示す。最終的には、現場でも可能なポーラスコンクリートの耐剥脱性試験方法の提案を行うことをめざして研究を進めている。本研究におけるポーラスコンクリートの剥脱とは、外部からの物理的な力が加わった場合に、骨材および結合材のすりへり、剥落、飛散等を含めた表面損傷が生じることを意味し(Fig.1-2)、耐摩耗・剥脱性はそれらに対する原形の保持能力として定義する。「剥脱」という言葉は、外力によって(ある程度)強制的に剥がされるという現象を明確にするために、「剥落」と区別して用いている。

これまでに、研究の基礎的段階として奥田式すりへり試験機によるすりへり試験を実施した¹⁰⁾。上述の実験では、奥田式すりへり試験によりポーラスコンクリートの摩耗・剥脱の定量的な評価が可能であることを確認し、耐摩耗・剥脱性に関する基礎的データが得られた。一方、供試体のサイズ、製作方法、および鋼片の形状等、試験の実施条件において改善すべき点も明らかとなった。

本論文では、奥田式すりへり試験に対して、供試体製作時の締固め方法、鋼片の形状、流水・乾燥条件の設定、試験結果の整理方法等について改良した試験方法で耐剥脱性試験を行った結果を報告する。

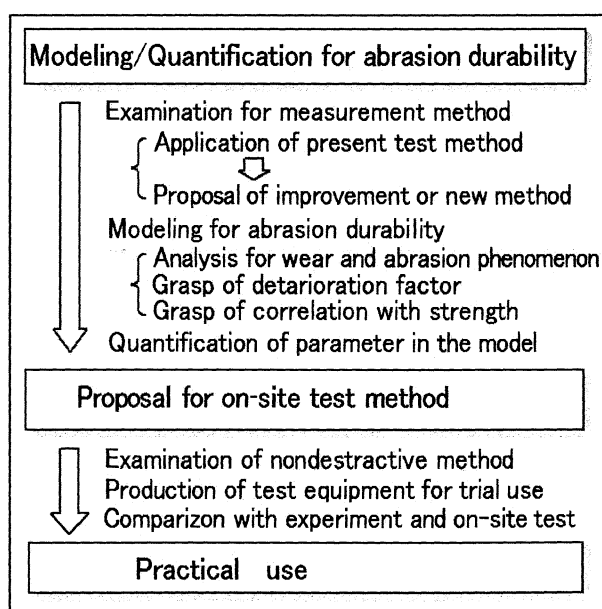


Fig.1-1 Flow of study

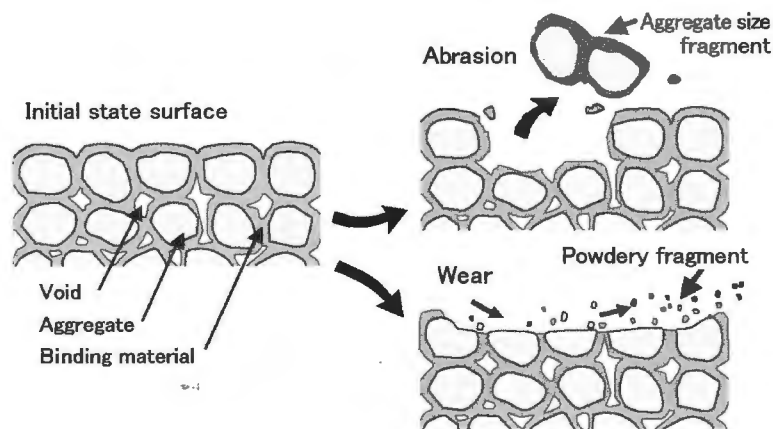


Fig.1-2 Abrasion and wear of porous concrete

2. 試験方法の改良^{11,12)}

2.1 供試体専用締固め機の製作

ポーラスコンクリートを打設する際、品質確保のため、適切な締固めは重要である¹³⁾。耐剥脱性試験等の供試体についても、計画した品質を実現する必要がある。製作上の要因によって品質のばらつきが発生することを防止するため、本実験では、高周波バイブレータ(240Hz、48V、5.5A)を組み入れた専用振動圧縮締固め機を製作し、使用した。

本機は供試体の表面全面をカバーする押さえ板により供試体表面を水平かつ平滑に仕上げることであり、また、バイブレータを所定時間作動させることにより締固めエネルギーの安定化が期待できる。

2.2 鋼片の形状

奥田式すりへり試験では、円柱状の鋼片($\phi 29 \times 40\text{mm}$ 、20個程度)の使用が標準となっているが、この形状や大きさの影響は不明であるため、その効果を把握する必要がある。今回は、次の3種類を使用した。

- ① 鋼球(小) $\phi 29\text{mm}$ 、21個、合計質量 1997g
- ② 立方体 $24 \times 24 \times 24\text{mm}$ 、18個、合計質量 1966g
- ③ 鋼球(大) 平均 $\phi 45\text{mm}$ 、5個、合計質量 2011g

これらの鋼片については、試験機の内部を可視化する工夫を行い、予め回転時の状況を把握し、動きが適切であることを確認した。

2.3 供試体周辺部防護板の取り付け

奥田式試験機において、試験時に鋼片が供試体型枠に当たり、型枠の振動や変形のために周辺部の剥脱が起こることを防止する対策を施した。

このため本実験では、供試体サイズを $300\text{mm} \times 150\text{mm}$ に変更し、以前の $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ と比べて周辺部の影響を小さくした。さらに、長辺側はやはり影響を受けると考えられるため、この影響を低減するために供試体の型枠周辺部に鋼製防護板を取付けた。

すりへり面積は、鋼片の形状および試験時間経過とともに変化するため、今回は、試験後の普通コンクリート供試体表面の実測値から推定することとした。すりへり面積は、鋼球(小、 $\phi 29\text{mm}$)で 240cm^2 程度、立方体で 220cm^2 程度、鋼球(大、平均 $\phi 45\text{mm}$)で 244cm^2 程度であった。

2.4 耐剥脱性試験のデータ整理方法

耐剥脱性(すりへり)試験は、各種の材料に対して実施することを想定し、データを可能な限り同一の評価方法で取り扱うことが望ましい。例えば、流水の有無を要因として実施する場合にはそれぞれ、水中・気中での評価となり、これらを直接的に比較できるように補正する必要がある。

すりへり減量は計測した供試体の水中重量の差を気中重量差に換算して求め、すりへり係数は、式(1)を用いて求めた。

$$A_c = V / A \tag{1}$$

- ここに、 A_c ：すりへり係数 (cm³/cm²)、
- V ：すりへり体積 (cm³)= W/D 、
- W ：すりへり減量(g) = $W_1 - W_2$ 、
- W_1 ：試験前の試験体質量(g)、
- W_2 ：すりへり後の試験体質量 (g)、
- D ：試験体のかさ密度 (g/cm³)、
- A ：すりへりを受けた面積 (cm²)

各種ポーラスコンクリートの摩耗・剥脱の比較のための指標には、実験結果についての経過時間とすりへり係数の関係から原点を通る直線近似式を求め、その傾きをすりへり速度と定義して用いる。

3. 実験の概要

3.1 実験の水準と要因

本実験の要因および水準を Table 1-1 に示す。ポーラスコンクリートの特性に影響を及ぼす要因^{13,14,15}は各種考えられるが、本実験では表中の網かけ部を基本水準として、空隙率、結合材強度、骨材粒径、鋼片形状、流水の有無、供試体製作時の締固め方法の影響を調べた。なお、本報告において、試験条件を Fig.1-3 のように略記する。

Variables	Levels			
Void ratio	15%,	20%,	25%,	Normal con.(3%)
Strength of binding material	130 N/mm ² ,	90 N/mm ² ,	40 N/mm ²	
Aggregate size	No.7(2.5~5mm), No.6(5~13mm), No.5(13~20mm)			
Shape of steel piece	Shpe.(D29),	Cubic,	Big sphe.(D45)	
Water condition	Water supplied,		Without water	
Tamping method	Tamping equipment ,		Static compacting	

Note) : Basic level

Table 1-1 Variables and levels in experiment

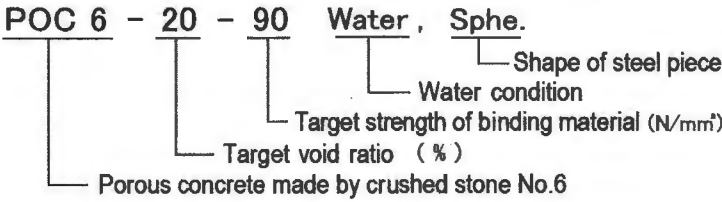


Fig.1-3 Simplified expression for condition

Table 1-2 Mix proportions of concrete

Spec.	Target void ratio (%)	Target strength of binder (N/mm ²)	Mixture		Unit weight (kg/m ³)						
			Water/ cement ratio (%)	Super- plasti- cizer SP/C	Water	Cement	Fly ash	Crushed stone			Fine agg.
								No.5	No.6	No.7	
POC-5	20	90	30	0.1%	121	403	0	1501	0	0	0
POC-6	20	130	25	0.1%	106	424	0	0	1512	0	0
	25	90	30	0.1%	93	309	0	0	1512	0	0
	20	90	30	0.1%	117	390	0	0	1512	0	0
	15	90	30	0.1%	141	471	0	0	1512	0	0
	20	40	30*	0.1%	117	195	141	0	1512	0	0
POC-7	20	90	30	0.1%	130	434	0	0	0	1450	0
Normal con.	—	60	0.6	0.0%	180	300	0	G 1050			S700

Note 1) Cement paste is mixed previously.
2) Flow value of cement paste is measured.
3) 28days cured in water.
4) G: Coarse aggregate, S: Fine aggregate
*: 50% of cement was replaced by fly ash.

Table 1-3 Materials of concrete

Cement		Normal portland cement	
Aggrigate		Solid content (%)	Ablasion loss (%)
	No.5	55	19.9
	No.6	56	22.1
	No.7	53	21.4
Fly ash		Type III	
Chemical admixture		High range water reducing agent	

3.2 供試体およびその製作方法

Table 1-2 に使用したコンクリートの調合条件を示す。また、Table 1-3 に使用材料を示す。

供試体製作用のポーラスコンクリートの練り混ぜは、ペースト先練りとした。また、試し練りにおいて、ペーストが目標フロー値となる混和剤の量を決定した。締固めには 2.1 節に示す専用締固め機を用いることを基本とした。打設後、圧縮強度試験用供試体については、24 時間経過をめぐに型枠を外し、28 日間の水中養生とした。すりへり試験用供試体は 24 時間経過後、水中に移し、28 日間の養生を行った。すりへり試験用供試体は 300mm×150mm×厚さ 60mm で、底面および側面は鋼板(厚さ 1mm)の型枠面となっている。

3.3 試験方法

本報では、奥田式すりへり試験の方法を 2 章で述べた点について改良した試験方法(Fig.1-4)を採用して耐剥脱性試験として実施した。

試験は、1 回に 6 個の供試体を取り付けて試験機を運転し、30 分毎に供試体を試験機から取り外して洗浄または粉じんの除去を行い、すりへり減量を測定した。また、表面の状況を観察・撮影した。回転数は 90rpm とし、流水条件の場合 200 /min の送水を行った。

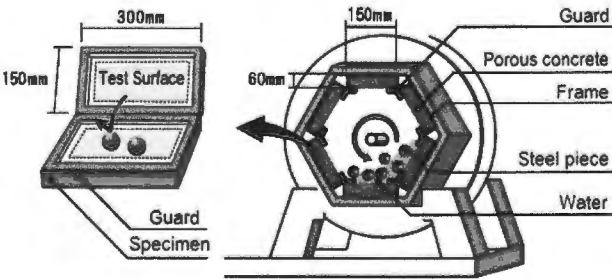


Fig.1-4 Improved attrition test instrument

4. 試験結果

4.1 供試体諸元の測定結果

供試体製作・養生後、各供試体の空隙率、かさ密度等の諸元を求めた。すりへり試験用供試体の測定結果を Table 1-4 に示す。また、すりへり試験の供試体と同じ調合条件で圧縮強度試験用供試体(φ100×200mm の型枠を使用)も製作し、同様に諸元を求めるとともに、JISA1132を参照し、材齢29日における圧縮強度試験を行った。Table 1-5 および Fig. 1-5 その結果を示す。

Fig.5 における曲線は、ポーラスコンクリート供試体の空隙率との関係を指数関数として推定した近似曲線である。

今回使用した供試体専用締固め機は、短時間に安定した仕上がりを得られることが製作時に確認できた。Fig.1-5 において、供試体によるばらつきが小さいことから締固めが安定的に行われていることが推察できる。

Table 1-4 Specification of test pieces for abrasion test

Spec.	Target value		Tamping method	Number of test piece	Result of measurement	
	Void ratio (%)	Strength of binder (N/mm ²)			Void ratio (%)※	Bulk density (g/cm ³)※
POC-5	20	90	T.E.	10	18.7	1.86
	20	90	S.C.	2	24.5	1.81
POC-6	15	90	T.E.	2	7.9	2.01
	20	130	T.E.	2	18.1	1.94
	20	90	T.E.	10	13.8	1.93
	20	90	S.C.	4	18.7	1.92
	20	40	T.E.	2	23.0	1.81
	25	90	T.E.	2	21.7	1.86
POC-7	20	90	S.C.	4	10.0	1.97
	20	90	T.E.	2	5.7	2.01
Normal con.	—	90	T.E.	10	— — —	2.35

Note) T.E.: tamping Equipment、S.C.:static compacting
※: Average value

Table 1-5 Specifications of test pieces for compressive strength test

Spec.	Target value		Result of measurement			
	Void ratio (%)	Strength of binder (N/mm ²)	Void ratio (%)	Bulk density (g/cm ³)	Compressive strength※ (N/mm ²)	Strength of binder※ (N/mm ²)
POC-5	20	90	26.2	1.864	13.3	115.2
POC-6	20	130	24.7	1.915	19.9	141.2
	25	90	30.1	1.786	12.4	115.2
	20	90	24.6	1.893	16.4	
	15	90	17.7	1.998	19.9	
	20	40	29.1	1.791	8.0	40.7
POC-7	20	90	18.7	1.970	19.3	115.2
Normal con.	—	60	2.3	2.367	37.2	—

Note) ※:Average value of three specimens.

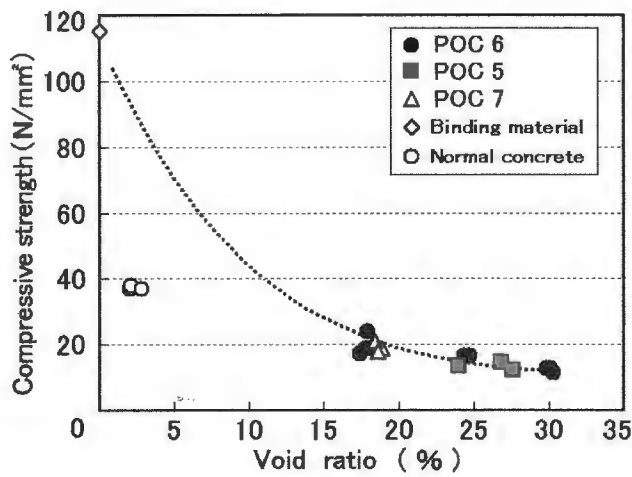


Fig. 1-5 Relation between compressive strength and void ratio

4.2 すりへり試験結果

11種類の供試体について耐剥脱性試験を150分まで実施し、同一種類供試体各2個についてのすりへり量(摩耗・剥脱量)を計測した。なお、乾燥条件下の結果については気中重量の差からするへり量を求め、流水条件下の結果については、測定した水中重量の差によるすりへり量の値を気中重量に換算している。

Photo 1-1 に、試験終了後の供試体表面の状況例を示す。本実験で設置した型枠部の防護板の効果により、いずれの条件においても周辺の局所的な剥脱は発生せず、供試体の試験面はほぼ均一に摩耗・剥脱が進行していた。

Fig.1-6 に、式(1)により求めたすりへり係数と経過時間の関係の例を示す。Fig.1-6 において、①、②の番号は同一シリーズ中の供試体番号である。累積のすりへり量は時間経過に伴い、ほぼ一定の勾配で増加している。

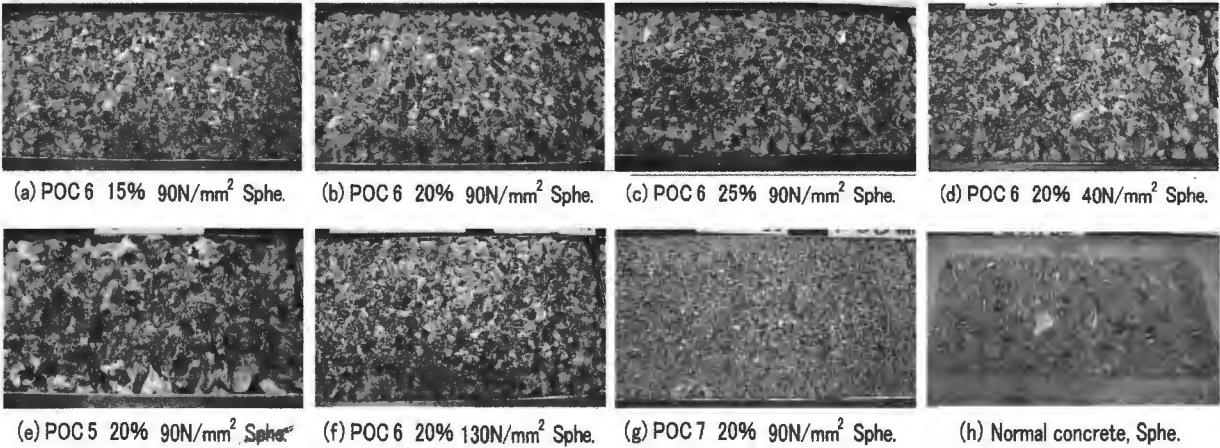


Photo 1-1 Surface of specimens after test (under water supplying condition)

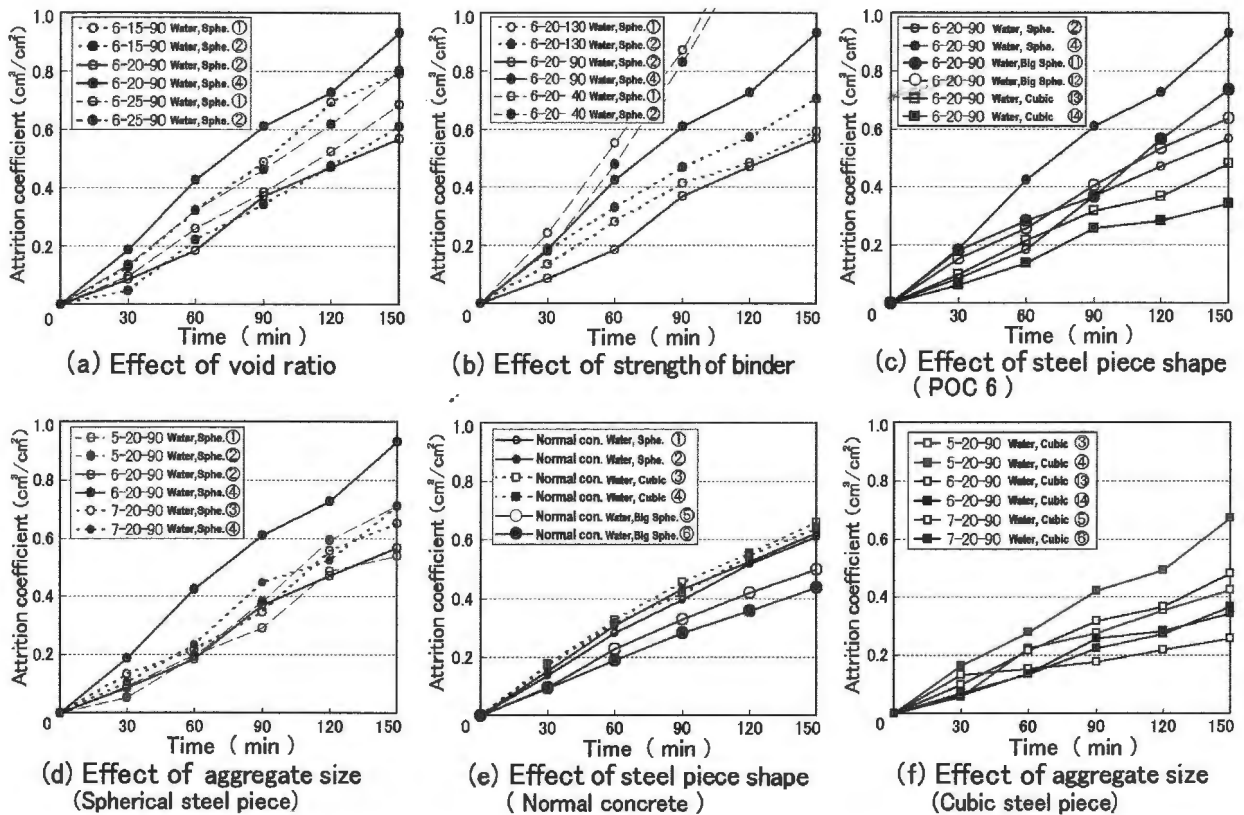


Fig.1-6 Relation between attrition coefficient and duration time

4.3 各種条件のすりへりに対する影響

Fig.1-7 から Fig.1-13 に、各種要因とすりへり速度の関係を示す。すりへり速度は、同水準の複数供試体の平均値である。

Fig.1-7 に、空隙率とすりへり速度の関係を示す。空隙率 23%程度までの範囲であれば、空隙率のすりへり速度に対する影響は小さいと考えられる。Fig.1-8 に、結合材強度とすりへり速度の関係を示す。空隙率 20%の場合、結合材強度が小さくなると、すりへり速度は大きくなる。

Fig.1-9 に圧縮強度とすりへり速度との関係を示す。圧縮強度が 15N/mm² 程度以上になるとすりへり速度が小さくなるとみられる。

Fig.1-10 に、骨材の代表寸法(骨材の中心粒径)とすりへり速度の関係を示す。鋼立方体では骨材代表寸法が大きくなるとすりへり速度が大きくなるようにも見えるが、顕著な差はみられない。

Fig.1-11 に、鋼片の形状とすりへり速度の関係を示す。ポーラスコンクリートでは、3 種の形状の中では鋼球(φ 29mm)および鋼球大(φ 45mm)が比較的すりへり速度が大きく、立方体ではやや小さいが、条件により傾向は若干異なる。普通コンクリートでは立方体の場合にすりへり速度が大きいので、立方体の角とポーラスコンクリートの空隙の相対関係にかかわりがある可能性が考えられる。

Fig.1-12 は、締固め方法(専用締固め機およびコテ仕上げ)によるすりへり速度の比較である。専用締固め機により製作した供試体は、空隙率は同程度であるが、コテ仕上げで製作した供試体に比べてすりへり速度が小さい。

Fig.1-13 に、耐剥脱性試験中の流水ありの条件と乾燥条件におけるすりへり速度の比較を示す。流水の有無は、摩耗・剥脱に対して比較的影響が大きいと見られる。必ずしも明確ではないが、乾燥条件では、対象によりすりへり状況ないしすりへり速度が大きく変わりやすいとみられ、流水条件では傾向が安定化するようである。

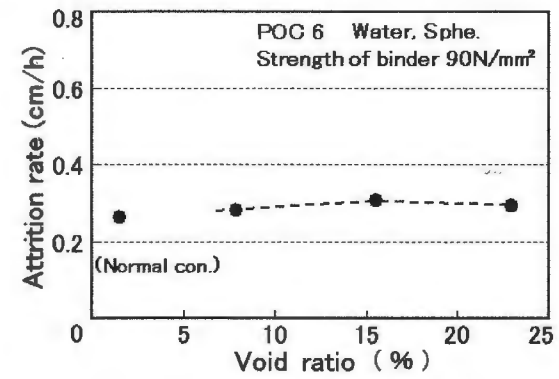


Fig.1-7 Relation between attrition rate and void ratio

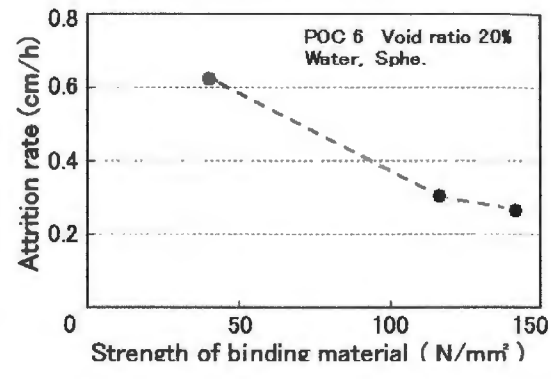


Fig.1-8 Relation between attrition rate and strength of binder

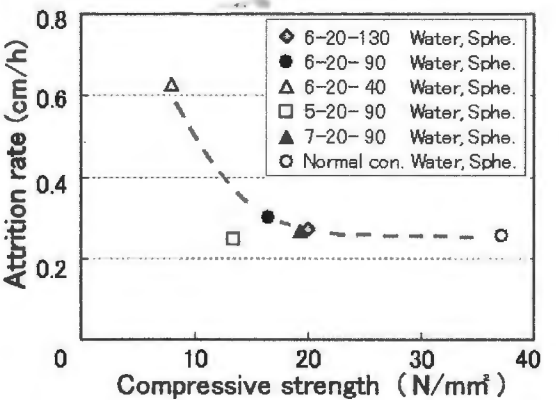


Fig.1-9 Relation between attrition rate and compressive strength

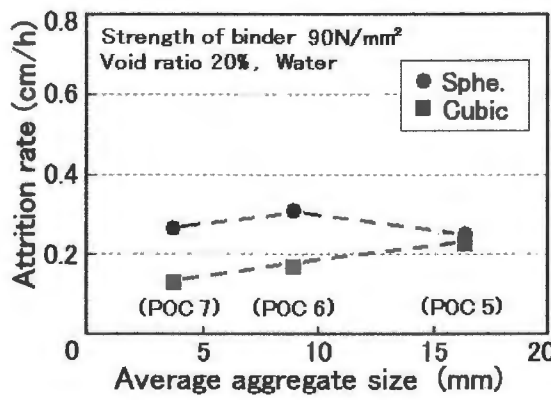


Fig.1-10 Relation between attrition rate and aggregate size

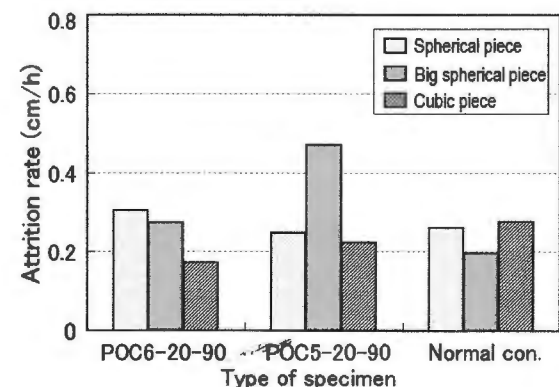


Fig.1-11 Effects of steel piece shape on attrition rate

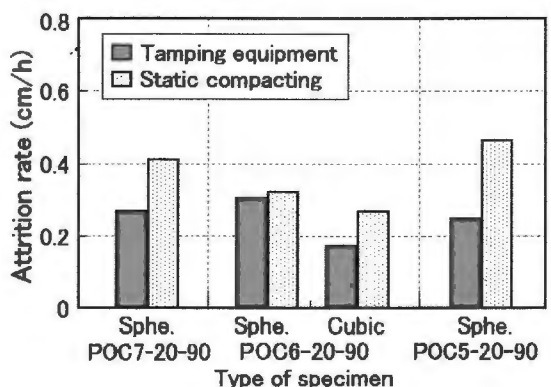


Fig.1-12 Effect of use of tamping equipment

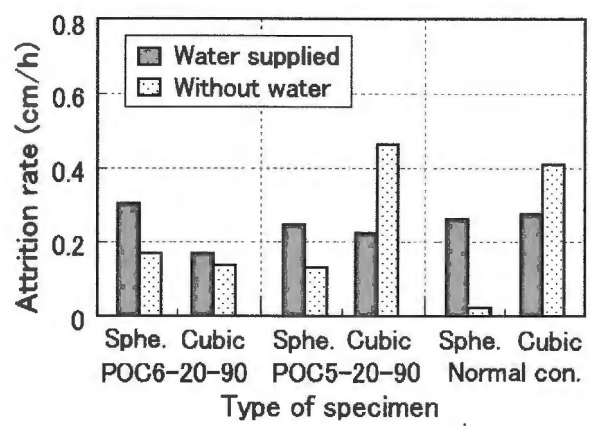


Fig.1-13 Effect of conditions of water supply

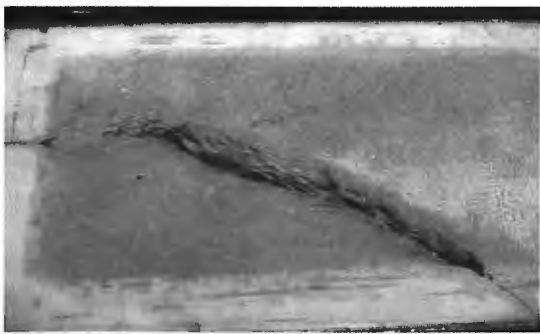


Photo 1-2 Specimen with abrasion concentrated in crack

5. 考察

Photo 1-1 に示した試験後の供試体に見られる特徴は、すりへりが支配的なことである。骨材には摩耗による傷が見られ、結合材強度、骨材寸法、空隙率等の条件によらず、骨材の剥脱(剥落、飛散)は少ないと見られる。通常のポーラスコンクリートでは、40N/mm² 程度以上の結合材強度をもち、今回のように製作方法に十分注意して施工すれば、今回の鋼片程度の衝撃には十分耐え得ることを示唆している。ただし、ポーラスコンクリートの耐剥脱性を評価するための試験方法として、今回の鋼片程度の衝撃荷重が妥当かどうか検討していく必要がある。

鋼片形状の影響について、Photo 1-1 で明瞭な傾向がみられないが、試験途中の観察において立方体では細かい剥脱痕もみられた。

また Fig.1-7、Fig.1-9、Fig.1-11 などの実験結果から判断すれば、ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性は普通コンクリートと同程度であると見られる。

なお、今回の試験で、ひび割れを生じていた結合材の供試体において、ひび割れ付近で剥脱の集中が見られた(Photo 1-2)。コンクリートおよびポーラスコンクリートの表面にひび割れや継ぎ目等がある場合の剥脱特性については今後の課題としたい。

6. まとめ

改良した奥田式すりへり試験法を用いた実験の結果から、以下の知見が得られた。

- 1) ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱耐性は、奥田式すりへり試験において、供試体製作のための専用締め固め機の導入、供試体型枠付近の防護などの改良を行うことにより、ある程度の評価が可能になると考えられる。
- 2) ポーラスコンクリートのすりへり速度を小さくする条件として、結合材強度が大きいこと、圧縮強度がある程度以上大きいこと、などがあげられる。
- 3) ポーラスコンクリートのすりへり速度に対する鋼片の形状の影響は、条件により傾向が異なり、さらなる検討が必要と考えられる。

- 4) ある程度の結合材強度をもつポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性は、普通コンクリートと比較して同程度である。
- 5) ポーラスコンクリートの空隙率および骨材粒径が耐摩耗・剥脱性に及ぼす影響は小さい。
- 6) ポーラスコンクリートのすりへり速度は、振動締固めを行った場合、静的なコテ仕上げの場合より小さくなる。ポーラスコンクリートの打設には適切な締固めが肝要である。
- 7) ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性の実験では、乾燥条件よりも流水条件の方が安定的な結果が得られるものと考えられる。

7. 今後の課題

ポーラスコンクリートの剥脱現象が発生する力学的条件についての検討を進めるとともに耐剥脱性評価に適する試験方法について引き続き検討したい。

また、施工現場における評価方法の開発および耐剥脱性に優れたポーラスコンクリートの施工方法の確立に進展させたいと考えている。

謝辞：

実験を実施するにあたり、三重県科学技術振興センターおよび東海コンクリート工業株式会社技術部のご協力を得た。付記して謝意を表する。

参考文献：

- 1) 長尾澄雄、伊藤美行：耐摩耗コンクリートに関する配合試験報告書、中部電力株式会社総合技術研究所、pp.4-5 (1986)
- 2) 吉森和人ほか：ポーラスコンクリートの強度と耐久性に関する研究、セメント・コンクリート論文集、Vol.49、pp.660-655 (1995)
- 3) 浅野嘉津真：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書 (2.4.5 すりへり作用)、日本コンクリート工学協会、pp.83-85 (2003)
- 4) (社)セメント協会、舗装用ポーラスコンクリート共通試験結果報告、舗装技術専門委員会報告 (1999)
- 5) 吉田宗久、玉井元治：ポーラスコンクリートの耐久性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.1185-1190 (2002)
- 6) 山本貴正ほか：ポーラスコンクリートの圧縮強度の変動に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、p.1267-1272 (2005)
- 7) 吉田知弘ほか：ポーラスコンクリートの空隙分布が曲げ強度に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26、No.1、pp.1437-1442 (2004)
- 8) 大谷俊浩ほか：結合材の分布状態がポーラスコンクリートの強度特性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1 (2001)
- 9) 藤崎隆一郎、堀口敬、佐伯昇：ポーラスコンクリートの耐摩耗性の評価試験方法、ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例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.143-150 (2003)

- 10) 中川武志ほか:すりへり試験によるポーラスコンクリートの剥脱耐性評価のための基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.27、 pp.1261-1266 (2005)
- 11) 中川武志ほか:ポーラスコンクリートの剥脱耐性評価に関する研究、その1試験方法の検討および実験概要、日本建築学会東海支部研究報告集第 44 号、pp.33-36 (2006)
- 12) 中川武志ほか:ポーラスコンクリートの剥脱耐性評価に関する研究、その2改良型奥田式すりへり試験機による実験結果、日本建築学会東海支部研究報告集第 44 号、pp.34-40 (2006)
- 13) 湯浅幸久ほか:ポーラスコンクリートの振動締固めに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.37-44 (2002)
- 14) 石黒哲、湯浅幸久、畑中重光:ポーラスコンクリートの物理的性質に及ぼす各種要因の影響、日本建築学会東海支部研究報告集、第 38 号、pp.73-76 (2000)
- 15) 湯浅幸久ほか:ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす結合材強度の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26、No.1、pp.1425-1430 (2004)

EXPERIMENTAL STUDY ON EVALUATION OF WEAR AND ABRASION DURABILITY OF POROUS CONCRETE

ABSTRACT : As porous concrete is mainly used currently in revetments covered with vegetation and permeable road bedding, it is important that its surface resists wear and that its aggregates resist abrasion. Presently there are no test methods to judge these characteristics of porous concrete.

Therefore, we conducted a wear and abrasion durability assessment of the porous concrete by using the Okuda attrition test instrument, and improve it with some points for optimization in the assessment. Wear and abrasion tests were carried out with factors as strength of binder, void ratio, size of aggregate, shape of steel piece in the instruments, tamping method to make specimen and condition of water supply in test. According to the measurement result, when the strength of binder was constant at 90N/mm², there were no differences in the rate of attrition when the void ratio was up to 23%. In addition, in comparison with the normal concrete (compressive strength: 37.2N/mm²) the porous concrete shows almost the same degree of wear and abrasion durability. On the other hand, when the void ratio was a constant 20%, the rate of attrition increased as the strength of the binder material decreased, thus the wear and abrasion durability become low.

KEY WORDS : Porous concrete, Wear durability, Abrasion durability, Okuda-type attrition test, Pavement

付録2 屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する基礎研究 (コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.337-343、2008)

2.1 はじめに

近年、夏季における都市部のヒートアイランド現象が問題となっている。この原因としては、自動車やエアコンの室外機等の熱源の都市部への集中が挙げられるが、この傾向をさらに加速させているのが、コンクリートおよびアスファルトによる地表面の被覆である。本来、地盤およびそれを覆っていた植物には、雨水を貯蔵し、晴天時にはその水分の蒸発潜熱により過度の温度上昇を抑える働きがある。しかし、現状の一般的な建物外壁および道路舗装では、雨水は下水を通じて河川等へ排出され、地表温度を抑えるために貯蔵されるシステムはない。さらに、コンクリートおよびアスファルトといった材料の熱容量が大きいことも、都市部のヒートアイランド現象に悪影響を及ぼす。

このような問題に対して舗装の分野では、舗装部分に保水性や貯水性を持たせ、その蒸発潜熱により舗装の表面温度を抑制する試みが行われており、一部では既に実用化されている。

使用材料としては、大きく分けてアスファルト系、セメント系、およびセラミックス系がある。アスファルト系ではポーラスアスファルト舗装^{例えば 1)}が、セメント系ではポーラスコンクリート舗装^{例えば 2)}およびポーラスコンクリートブロック^{例えば 3)}が、セラミック系では煉瓦を含む多孔質ブロック^{例えば 4)}が検討されているが、いずれも内部の空隙に存在する水分の蒸発潜熱を利用している。また、最近の研究報告では、舗装基盤となる多孔質材料そのものの保水性のみでは表面温度の抑制効果の持続性に問題があるために、吸水率の大きな再生骨材の利用⁵⁾や、基盤材への吸水性材料の混合¹⁾、空隙への保水材の充填³⁾、不織布などによる貯水槽から舗装底面への揚水⁴⁾、舗装材下部への雨水の貯留^{2), 6)}など、舗装材料の含水率を上げるための様々な工法、システムが提案されている。しかし、舗装基盤材の中でも、ポーラスコンクリートの熱特性に及ぼす調合や製造方法の影響に関する基礎的な研究は少なく、その性能に関しては不明な点が多い。

一方、筆者らはこれまでに、ポーラスコンクリートの圧縮強度をはじめとする各種の基礎物性に及ぼす骨材粒径の影響に関して、一連の研究を行ってきた^{7), 8)}。

本研究では、骨材粒径および製造方法の異なるポーラスコンクリート舗装を対象として、夏季の屋外における、基礎的な熱特性を把握することを試みる。

2.2 実験の概要

2.2.1 実験の要因と水準

表 2-1 に本実験の要因と水準を示す。水分状態は乾燥状態、水中で 24 時間吸水させた試験体を気中放置した状態(以下、湿潤)、の 2 つの状態とした。

使用材料は、ポーラスコンクリート(POC)以外に、一般に舗装に用いられることの多い普通コンクリート(NC)、およびアスファルト(AS)も使用した。また POC 用粗骨材として、それぞれ粒径の異なる単粒度碎石 6 号(5~13 mm)、7 号(2.5~5 mm)、8 号(1.25~2.5 mm)、および 8 号と 6 号

を 2:1 の比率で混合した複数粒径（以下 6+8 号）の骨材を使用した。POC の締固めの方法は、コテ仕上げのみと振動締固めの 2 種類とした。

POC の基本水準は、7 号碎石を用いて振動締固めにより打設された試験体とし、試験体厚さ t および結合材の水セメント比 W/C の各要因は基本水準の試験体のみで変化させた。

表 2-1 実験の要因と水準

要因	水準
水分状態	乾燥*, 湿潤
材料の種類	ポーラスコンクリート(POC), 普通コンクリート(NC), アスファルト(AS)
骨材の種類	6 号, 7 号, 8 号, 6+8 号
締固め方法	コテ仕上げ, 振動締固め
試験体厚さ	50 mm, 100 mm, 150 mm
結合材の W/C	46%, 30%

[注]*: 7 号および 6+8 号の振動締固め, アスファルト, 普通コンクリートの試験体のみ, 湿潤の測定と同時に乾燥状態での測定を行った。 —: 基本水準

2.2.2 使用材料および調合

表 2-2 に使用材料を, 表 2-3 に実験で使用したコンクリートの調合表を示す。POC の調合は, 締固め方法によらず同一とした。POC の設計空隙率は 30%とし, $W/C=30\%$ の POC のみ設計空隙率を 20%としたものを作成した。一般に透水性舗装として用いられる場合には 15~20%程度の空隙率が多い⁹⁾が, 本実験では歩道および建物外溝を対象とし, またその熱特性の改善を目的としているため舗装としては大きめの値を設定している。

比較用の AS には, 再生密粒度アスファルトを用いた。表 2-4 にアスファルトの配合表を示す。

表 2-2 コンクリートの使用材料

材料		種類	
セメント		普通ポルトランドセメント(密度:3.20g/cm ³)	
骨材	6 号	三重県 佐奈山産 碎石	粒径 5~13 mm, 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実積率 56.0%
	7 号		粒径 2.5~5 mm, 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実積率 53.3%
	8 号		粒径 1.25~2.5 mm, 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実積率 54.4%
混和剤(SP)		高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)	

表 2-3 ポーラスコンクリートおよび普通コンクリートの調合表

種類	使用骨材	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	SP
POC	6, 7, 6+8 号	46	80	175		1512	
	8 号		92	200		1512	
	7 号(低 W/C)	30	117	390		1512	0.39
NC	6+7 号+S	60	180	300	700	1050	

試料の打ち込み後、材齢 2 日で脱型した。その後、角形試験体上面に表面温度測定用の熱電対を試験体と同調合のセメントペーストでコーティングして接着した。ここで、試験体表面と底面の熱電対は、試験体表面温度を正確に測定できる様に、熱電対の被覆を 80 mm 程度はがし、先端部を溶接した状態で用いた。

温度測定時には、試験体側面にスタイロフォームをアルミ箔でコーティングした断熱材を付けて用いた。図 2-1 に試験体の概要を示す。養生は材齢初期に一度散水した以外は屋外暴露養生とした。

2.2.4 試験方法および測定項目

図 2-2 に実験場の配置図を示す。乾燥および湿潤状態では、まさ土を転圧した地盤に直接試験体を置いた状態で測定した。

屋外実験の測定項目は、角形試験体の表面温度・内部温度・底面温度、試験体設置位置付近の外気温、相対湿度、風速、および日射量である。試験体の各部の温度は、図 2-1 の様に設置した熱電対 (T 型) により測定している。各温度の測定間隔は 30 秒とした。外気温および相対湿度は、試験体から約 20m の位置にある百葉箱の測定値を用いた。風速は実験場脇の高さ 1.8m の位置に固定した超音波風速計を用いて計測した。日射量は実験場脇の高さ 1m の位置に日射計を固定して測定した。

試験体の水分状態が湿潤の場合においては、振動締固めした POC のみ、角形試験体と同条件で設置した $\phi 100 \times 100 \text{ mm}$ の円柱試験体の質量変化の測定を行い、水分蒸発量を算定した。

2.3 実験結果

2.3.1 空隙率および圧縮強度

図 2-3 に、POC の圧縮強度と空隙率の関係を示す。図中には、 $W/C=46\%$ のセメントペーストの圧縮強度の推定値¹⁰⁾ : 62.5 N/mm^2 を用いて既往の推定式⁷⁾ から推定した両者の関係式も示す。図によれば、複数粒径の試験体は、いずれも 20 % 台と小さくなっているが、これは、骨材粒径を混合したことで骨材のみの実積率が大きくなったためである。また、振動締固めを行った方が、コテ仕上げのみの場合よりも圧縮強度と空隙率の関係が高強度側にシフトしている。これは、振動により結合材が流動化し、骨材間を架橋するセメントペースト部分が強化されたためと考えられる。

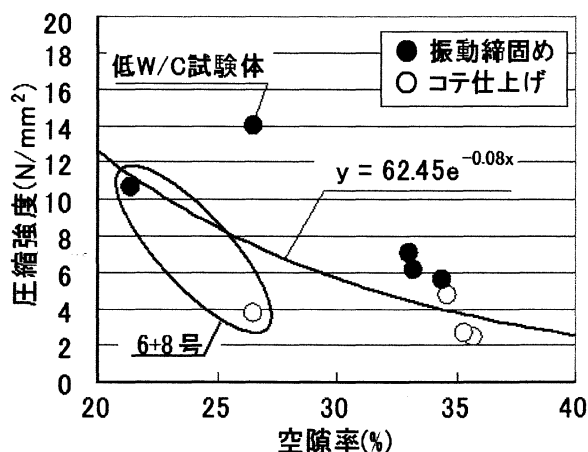


図 2-3 圧縮強度と空隙率の関係

2.3.2 試験体の熱特性

(1) 試験体の温度の経時変化

図2-4に、湿潤状態の試験体の内部温度分布の時刻歴を、図2-5に環境条件の測定結果を示す。試験体温度は日射量および気温と良い対応関係を示し、日射量の増加とともに表面温度が上昇し、13 時前後に最高温度に達する。また、内部および底部の温度は表面温度に少し遅れて上昇する傾向がある。日射量が減少し始めると、表面温度は急激に低下し、日没後には温度分布が逆転し、表面に近いほど低温となる。

(2) 表面温度に及ぼす各種要因の影響

図2-6に、乾燥および湿潤状態における試験体の表面温度履歴の比較を示す。図中のアスファルトの乾燥試験体については、測定中の熱により熱電対が剥がれたため、一部正確なデータが得られていないが、その部分を除外して考えると、POC および NC では、湿潤の場合に乾燥と比べて表面温度の上昇速度が低下し、最高温度も POC では約 5℃、NC では約 3℃の温度の低下が見られる。これに対して、AS では、最高温度については議論できないが温度の上昇および下降域を見ると、湿潤と乾燥で明確な差異は見られない。

湿潤状態のみで材料による影響をみると、AS、POC、NC の順に最高温度が高くなるという既往の研究結果²⁾と同様な傾向が得られた。

図2-7に、試験体の表面温度履歴に及ぼす各要因の影響を示す。図によれば、6+8 号を用いた場合に最高温度が 2℃程度低下する傾向がある以外は、骨材粒径、試験体厚さ、仕上げ方法および結合材の W/C の各要因は試験体表面温度に影響を及ぼさないことが解る。

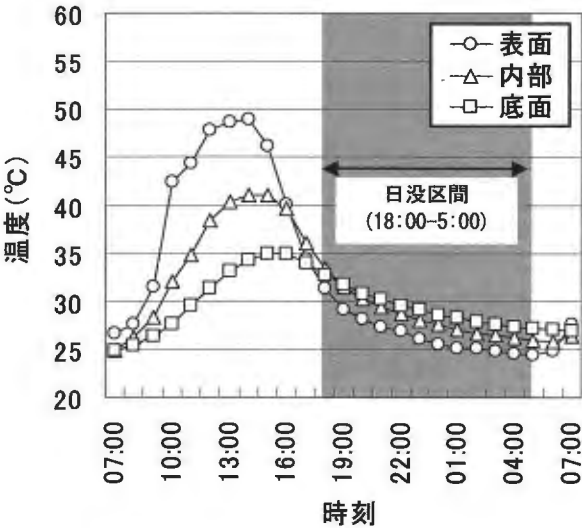


図 2-4 湿潤状態の試験体温度の測定結果
(測定初日、7 号 POC、振動締固め、t=100mm)

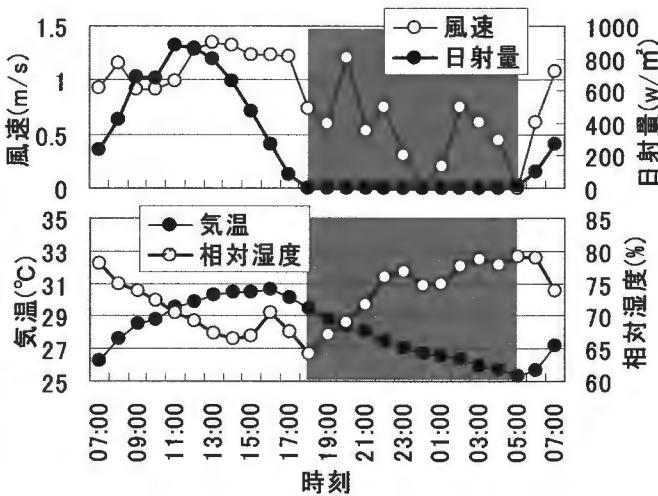


図 2-5 環境条件の測定結果

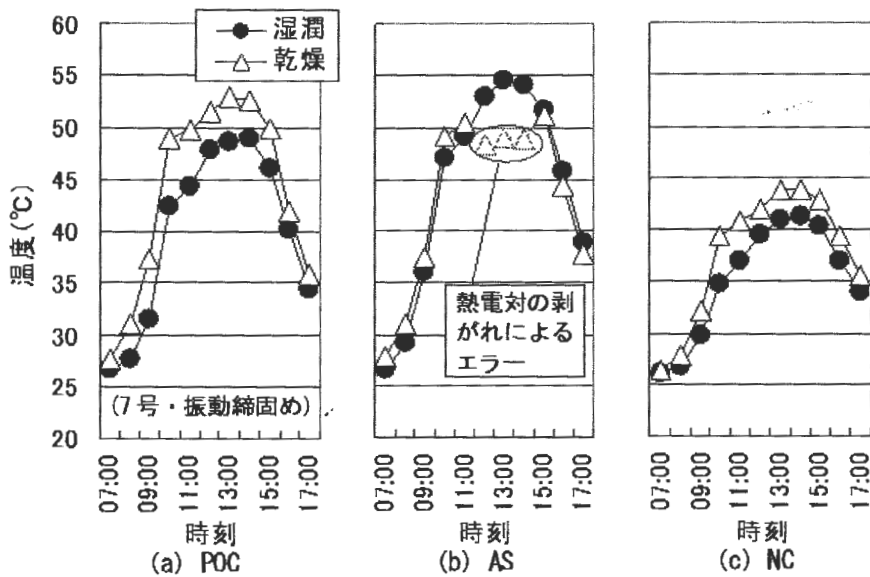


図 2-6 表面温度の経時変化に及ぼす試験体の水分状態の影響
(測定初日、試験体厚さ $t=100\text{mm}$)

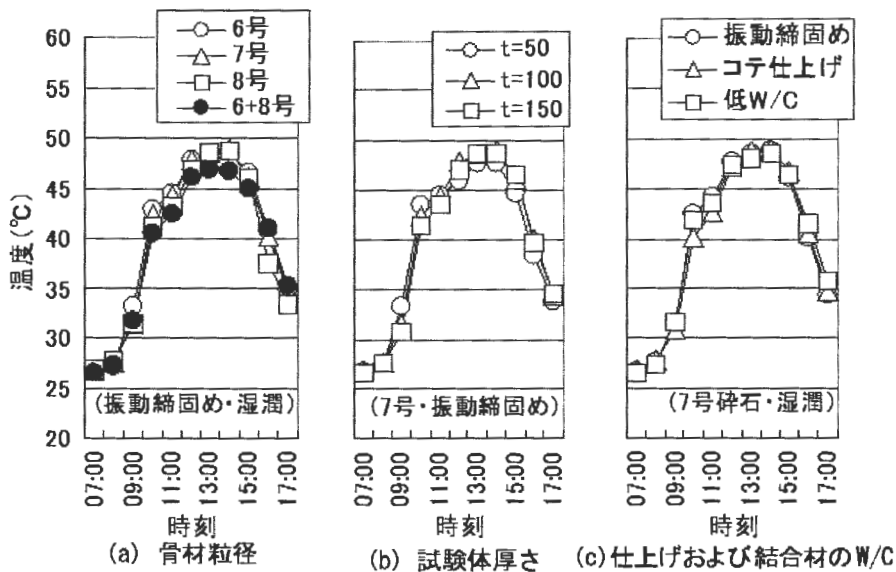


図 2-7 表面温度の経時変化に及ぼす各要因の影響
(測定初日、特記がなければ試験体厚さ $t=100\text{mm}$)

(3) 測定 3 日目までの表面温度

図 2-8 に、13 時の時点における表面温度と経過日数の関係を示す。この間、全ての試験体は外からの水分は与えていない。図によれば、全ての試験体において、経過日数とともに表面温度が上昇する傾向がある。この原因は明確ではないが、日射量の変化などの外的条件によるものと考えられる。また、図(a)からは、AS は 2 日目以降、乾燥と湿潤の温度差はなくなっている（1 日目のデータは前述した理由にて割愛）が、POC および NC は、3 日目においても乾燥に比べて湿

潤試験体の方がそれぞれ 4℃および 2℃程度低い温度になっている。この理由に関しては次節の水分蒸発量の測定結果と合わせて考察する。

POC の乾燥状態のものは、表面温度が AS と同程度まで上昇している。既往の研究においては、AS の表面温度が他の舗装材料よりも高くなる理由として、日射反射率の違いを挙げている³⁾。但し本実験結果は、表 2-6 に示す各試験体を用いて測定した反射率の違いを考えても矛盾する。また、図 (b)によれば、6+8 号の POC のみ、他の骨材粒径の試験体と比べて表面温度が低くなっている。ただし、同試験体は他の試験体と比べて空隙率が小さい。以上の結果を考察すると、試験体の表面温度に対しては、反射率だけでなく、容積比熱が影響していると予想される（ただし、POC の容積は空隙を含んだものとする）。この場合、試験体厚さの異なる試験体の表面温度に差が見られなかった結果〔図 2-7(b)参照〕とも矛盾しない。本実験の場合には、7 号のポーラスコンクリートの空隙率は 33%であり、ほぼ同一の材料を使用している NC と比べると 67%しか固相を含まないことになる。このため、NC と比べると POC は熱しやすく冷めやすい材料であるため、1 日のサイクルでは本実験結果のような大きな温度差となったとも考えられる。

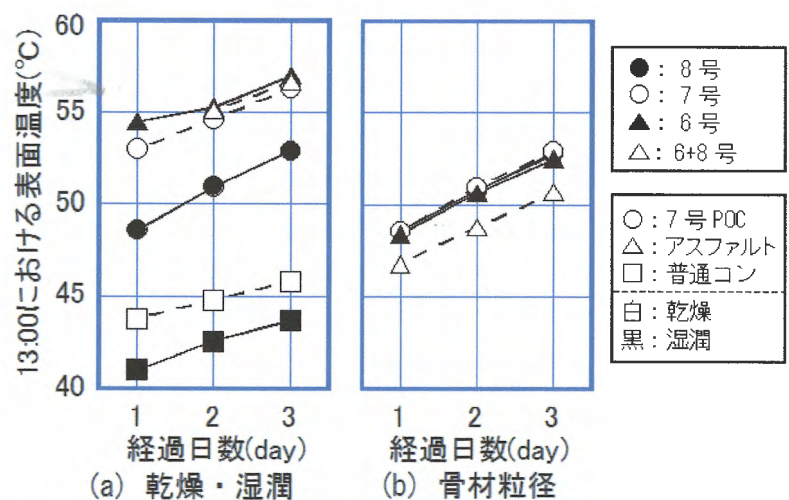


図 2-8 表面温度と経過日数の関係

(4) 質量変化量

図 2-9 に、試験体設置後の水分の蒸発等による質量変化量の測定結果を、図 2-10 に質量変化量の累積の計算結果を示す。累積の計算では、6:30～18:30 の間の変化量を昼とし、18:30～6:30 の変化量を夜として示す。また、初期状態は水切りの状態とした。このため、初期の質量変化量には地盤への水分流出量も含まれる。測定には各水準 2 本の $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱体を用い、結果はそれらの値を平均した。

両図によれば、骨材粒径に依存した保水性の傾向、すなわち、小径骨材を用いた方が大量の水分を放出するといった傾向が現れているのは 1 日目の昼間のみであり、2～3 日目では、水分蒸発量はほぼ同程度となっている。さらに、夜間には、地盤からの蒸発により供給されると考えられる水分により、質量増加の傾向を示す。これによる質量増加は粒径および日にちによらずほぼ一定値となっている。

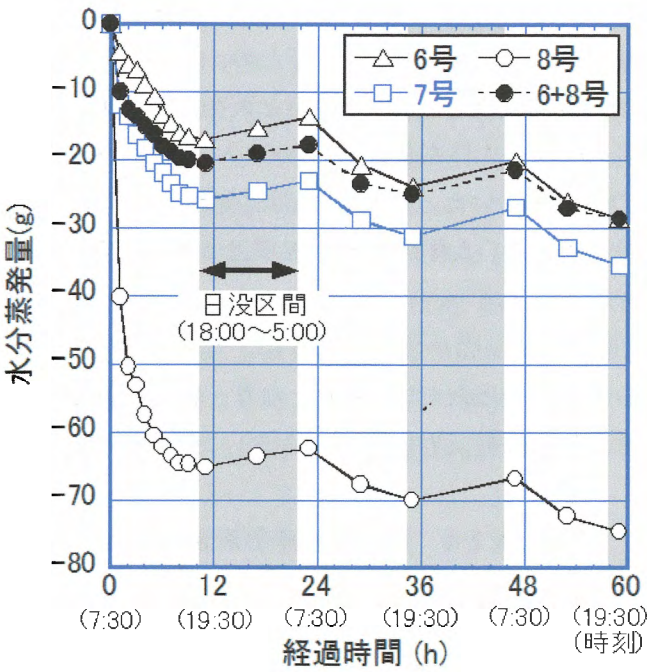


図 2-9 質量変化量の経時変化

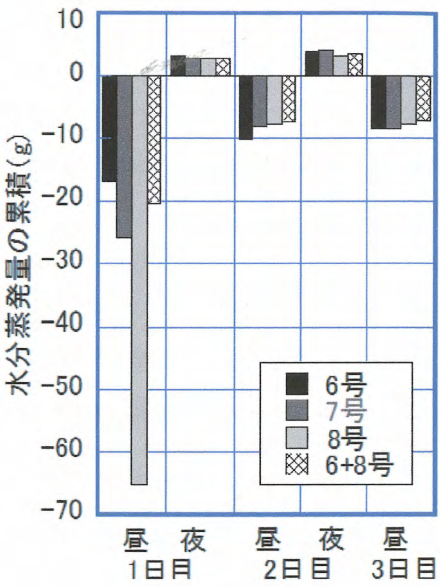


図 2-10 質量変化量の累積

(5) ポーラスコンクリート舗装の温度低減メカニズム

上記の(3)～(4)節で示した結果をあわせて、本実験条件における POC 舗装の温度低減メカニズムに関する考察を行う。

まず、乾燥試験体との温度差が3日間持続した〔図 2-8(a) 参照〕のは、図 2-10 に示すように、3日目まで一定量の水分蒸発による蒸発潜熱が確保されていたためと考えられる。

また、6+8号を除き、3日目まで表面温度に対する骨材粒径の影響が全く見られなかった〔図 2-8(b) 参照〕のは、水分蒸発量が粒径によって変わらないためである。

ここで、1日目の昼の水分蒸発量が粒径によって異なる点が表面温度の傾向と矛盾する。乾燥試験体との温度差が3日間ともほぼ一定であった〔図 2-8(a) 参照〕ことから考えると、これは恐らく、図 2-10 に示す1日目の昼間に減少している水分のうち、蒸発潜熱により試験体温度を低下させるために使われている量は、2～3日目の昼間の減少量と同程度であり、残りの水分は地盤方向に流下している、もしくは試験体温度の低減には寄与していない可能性が高い。

図 2-9 および 2-10 によれば、夜間に補給される水分と比べて昼間の水分蒸発量の方が多いため、試験体の質量は低下し続ける傾向にある。この余分に放出される水分は、非常に緩慢な蒸発速度から考えて、測定開始前の湿潤状態としたときにセメントペースト硬化体中の微細空隙に取り込まれたものだと考えられる。このため、さらに長期間の測定を継続した場合には、試験体の乾燥が進み、乾燥状態の試験体の温度に近づいていくことが予想される。

(6) 人体の受ける放射量

本実験から得られた結果から、中村の方法¹¹⁾を用いて、舗装材料ごとの、屋外の立位の人体が受ける短波長放射（日射と地面で反射した日射）・長波長放射（地面と天空）の放射量の評価を試みる。ここで、対象は無限に広い舗装面上に立つ人体を仮定し、POC、AS、NCの放射率はすべて0.9、日射反射率は表2-6の乾燥状態のものを用いた。舗装の表面温度および環境条件は、湿潤の測定開始後1日目の13:00の実測結果を用いた。人体の日射吸収率は0.66、放射率は0.9とした。

図2-11に、人体の受ける放射量の計算結果を示す。図から解るように、今回の計算条件においては、人体の受ける放射量は、表面温度の最も低かったNCが最大となり、続いてAS、POCの順となった。これは、地表面からの長波放射よりも日射反射の影響が大きいためである。

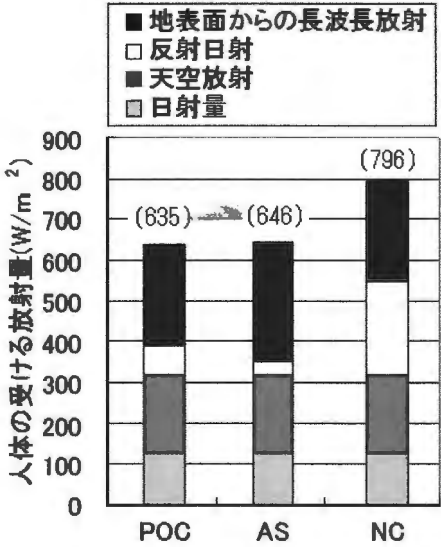


図 2-11 人体の受ける放射量の計算値〔()〕は合計量を示す]

表 2-6 日射反射率の測定結果

試験体種類		日射反射率 ^{*1}	
		乾燥	湿潤 ^{*2}
POC	6号	0.27	0.14
	7号	0.26	0.14
	8号	0.26	0.14
	6+8号	0.29	0.17
	7号(低W/C)	0.28	0.14
普通コンクリート		0.57	0.24
アスファルト		0.08	0.07

[注]*1：太陽高度=24.4～31.6°の範囲で測定
*2：表面に散水し湿潤状態として測定

2.4 まとめ

本論文では、ポーラスコンクリート舗装に関する、基本的な熱特性を把握することを目的とした実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 湿潤状態で放置したポーラスコンクリートの表面温度は、乾燥状態のポーラスコンクリートと比較すると、4～5℃程度低くなり、その効果は3日以上持続する。
- (2) 湿潤状態で放置されたポーラスコンクリートの表面温度に、骨材粒径、試験体厚さ、仕上げ方法、および結合材の水セメント比はほとんど影響しない。
- (3) ポーラスコンクリートと他の舗装材料との表面温度の違いには、日射反射率以外に容積比熱の影響が大きいと考えられる。
- (4) 人体の受ける放射量に関する計算結果からは、舗装表面からの長波放射よりも日射反射の影響が大きく、表面温度が最も低くなった普通コンクリートの場合に放射受熱量が最大となった。

2.5 今後の展望

最近の関連研究では、舗装表面の大幅な温度抑制効果を得るために、複雑なシステムや高価な材料の使用を試みたものが主流となっているが、それぞれにコストや耐久性の問題、また、貯水させるシステムにおいては細菌や害虫の繁殖などの不安も残る。

一方、本実験結果からは、夜間の POC 舗装直下の地盤からの吸水と思われる現象が確認された。このことは、地盤そのものを保水層として利用できる可能性を示唆するものであり、このような特性がうまく活用できれば、POC 舗装の透水性を利用して降雨を現地の地盤にそのまま浸透させ、その水分によって路面温度を低減させるといった自然の状態に近いシステムを構築できる可能性がある。さらに、この場合の舗装は通常の透水性舗装のみであるため、安価で広範囲な施工にも適していると考えられ、都市部の熱環境の改善に関する、有望な 1 つの解決法となり得ると思われる。

【参考文献】

- 1) 陳偉嬌, 水谷章夫, 大沢徹夫: 日射を受けた常時濡れ面での蒸発冷却効果及び蒸発性能の劣化—吸水性能を有する透水性アスファルト舗装材の蒸発冷却効果に関する研究(その2)—, 日本建築学会環境系論文集, No. 610, pp. 27-34, 2006. 12
- 2) 白井一義, 梶尾聡, 下山義秀, 中原大磯: 夏期におけるポーラスコンクリート舗装の表面温度特性, 舗装, Vol. 36, No. 9, pp. 16-21, 2001
- 3) 唐沢明彦ほか: 保水性コンクリートブロック舗装の路面温度上昇抑制効果に関する研究, 太平洋セメント研究報告, No. 152, pp. 44-58, 2007
- 4) 赤川宏幸, 小宮英孝: 湿潤舗装システムの開発, 舗装, Vol. 34, No. 4, 1999
- 5) 岳康幸ほか: 規格外再生骨材を用いた透水性歩道用コンクリートの開発, コンクリートテクノ, Vol. 26, No. 9, pp. 35-40, 2007
- 6) 円井基史, 梅干野晃, 浅野貴史, 板津佳恵: 蒸発冷却システムの基本性能に関する夏季屋外実験, 日本建築学会環境系論文集, No. 600, pp. 51-58, 2006. 2
- 7) 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度—空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 594, pp. 17-23, 2005. 8
- 8) 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
- 9) 水口裕之ほか: ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書(2.6.3 力学性能・耐久性能), 日本コンクリート工学協会, pp. 116-117, 2003. 5
- 10) 三島直生, 畑中重光, Thanudkij CHAREERAT, 湯浅幸久: セメントペーストの圧縮強度および弾性係数に及ぼす細孔構造の影響に関する基礎的研究, 第 56 回セメント技術大会講演要旨, 2002
- 11) 中村泰人: 建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について, 日本建築学会計画系論文集, No. 376, pp. 29-35, 1986

付録3 底面を水中に浸漬させたポーラスコンクリートの熱特性に関する実験
(日本建築学会学術講演会梗概集(中国) pp. 587-588、2008 年 9 月)

3.1 はじめに

本研究では、多孔質なポーラスコンクリート(以下、POC)を建物外構および舗装に適用し、都市部の熱環境を改善するシステムの開発を目指して一連の研究を行っている。

本報告では、図 3-1 に示すような、POC 底面を水中に浸漬させた場合を対象とし、夏期の屋外におけるポーラスコンクリートの熱特性の把握を試みる。

3.2 実験概要

表 3-1 に本実験の要因と水準を示す。使用材料は、POC 以外に、一般に舗装に用いられることの多い普通コンクリート(NC)、および密粒度アスファルト(AS)も使用した。また、POC 用粗骨材として、それぞれ粒径の異なる単粒度砕石 6 号(5~13mm)、7 号(2.5~5mm)、8 号(1.25~2.5mm)、および 8 号と 6 号を 2:1 の比率で混合した複数粒径(以下 6+8 号)の骨材を使用した。POC の締固めの方法は、コテ仕上げのみと振動締固めの 2 種類とした。

POC の基本水準は、7 号砕石を用いて振動締固めにより打設された試験体とし、試験体厚さおよび貯留水位は基本水準の試験体のみで変化させた。

表 3-2 にコンクリートの調合表と実測空隙率の測定結果を示す。POC の調合は、締固め方法によらず同一とした。POC の設計空隙率は 30%とした。POC および NC の練り混ぜには傾胴式ミキサを用いた。型枠には、300×300×100mm の角型鋼製型枠を用い、試験体作成時に図 1 に示す位置に熱電対を埋設した。養生は材齢初期に一度散水した以外は屋外暴露養生とした。温度測定時にスタイロフォームをアルミ箔でコーティングした断熱材を付けて用いた。

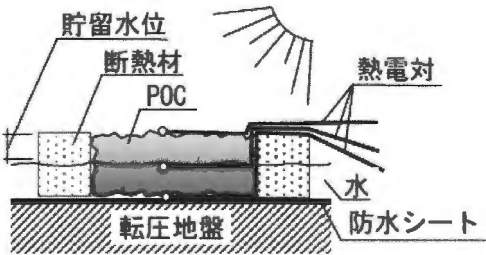


図 3-1 実験条件の概要

表 3-1 実験の要因と水準

要因	水準
材料の種類	ポーラスコンクリート、普通コンクリート、アスファルト
骨材の種類	6 号、7 号、8 号、6+8 号
締固め方法	振動締固め、コテ仕上げ
貯留水位	-25mm、-50mm、-75mm

[注] —：基本水準

表 3-2 調合表および実測空隙率

種類	使用 骨材	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				空隙率(%)	
			W	C	S	G	振動	コテ
POC	6号	46	80	175		1512	34.2	34.6
	7号						33.0	35.7
	8号		92	200			34.4	35.3
	6+8号		80	175			21.4	26.5
NC	6号	60	180	300	700	1050		

3.3 実験結果とその考察

(1) 試験体温度の経時変化

図 3-2 に気温および日射量の測定結果を、図 3-3 に試験体温度の測定結果を示す。

図 3-2 によれば、日射量は 11 時頃にピークを迎えて、その後低下していくが、図 3-3 に示した試験体の表面温度は、いずれの試験体においても、日射量のピークから 1 時間ほど遅れた 12～13 時頃にピークを迎えている。また、内部および底部の温度は、表面温度に少し遅れて上昇する傾向があり、14 時頃までは表面に近いほど温度が高くなるが、その後、表面温度は急激に低下し、日没後に温度分布が逆転し、表面に近いほど低温となる。

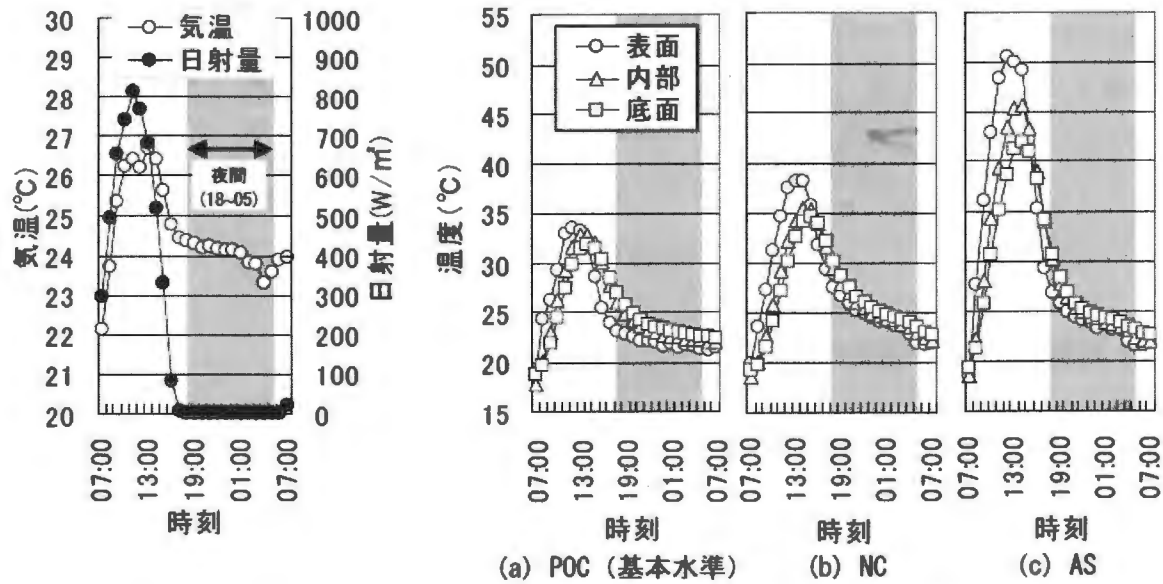


図 3-2 環境条件の測定結果

図 3-3 試験体温度の測定結果

(2) 試験体表面温度に及ぼす各要因の影響

図 3-4 に、13 時の時点における試験体の表面温度の比較を示す。図 (a) からは、基本水準の POC が、NC より 5℃、AS より 17℃程度低い温度となっている。また、図 (b) によれば、骨材粒径が小さい場合に表面温度が低くなる傾向があり、図 (c) によれば、全て 7 号碎石を使用した

POC であるにも関わらず、貯留水位が-75mm の場合のみ極端に高い温度となっている。以上のような傾向は、POC の揚水性能²⁾ によって説明することができる。

表 3-3 に、測定時の POC 試験体表面の可視画像および熱画像を示す。表中の画像から明らかなように、表面温度が 35℃以下の試験体は、全て表面まで揚水されていることが分かる(可視画像で硬化体が暗くみえる部分が湿潤部分)。また、コテ仕上げの 6+8 号では、小径骨材を混合したことによる部分的な揚水挙動も見られる。コテ仕上げの 7 号では、熱伝対を埋め込んだ部分が揚水されておらず、内部の不均一性の影響なども考えられる。

以上より、POC の底部を水中に浸漬させることで表面温度を大幅に抑制することは可能であるが、その条件として、材料の揚水性能および貯留水位を表面まで揚水が可能な範囲に調整することが必要となる。

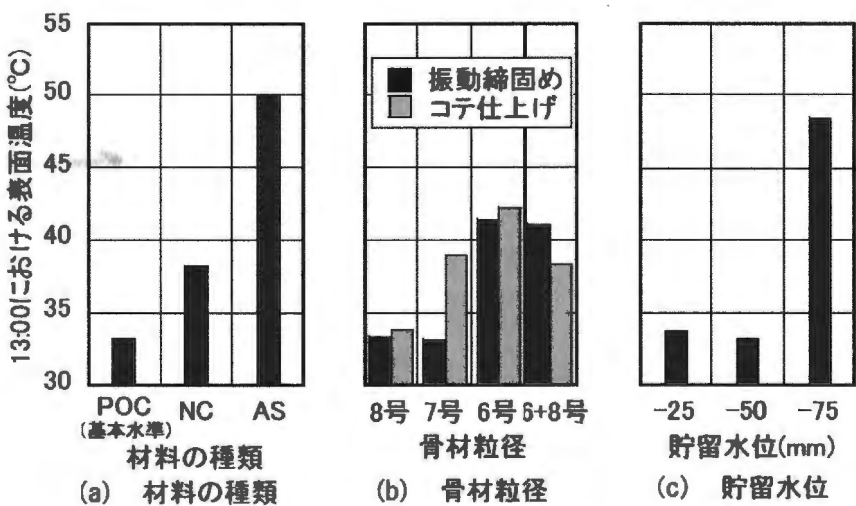


図 3-4 13:00 における表面温度の比較






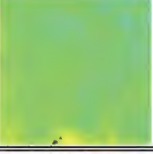
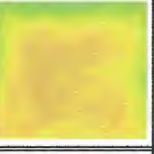




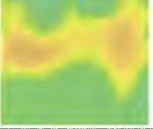

(3) 貯留水位と表面温度の関係

図 3-5 に、ハロゲンランプ(500W)を熱源とした室内実験で、貯留水位を 10mm ずつ上昇させたときの試験体表面温度の変化を示す。試験体と熱源との距離は 300mm とし、表面温度の測定は水位変化後 7 時間経過後のものを用いた。図の黒塗りのプロットの時点で表面までの揚水が確認されている。この時点を比較すると、骨材粒径が小さいものほど揚水性能が高い傾向が見られ、表面温度も急激に低下することがわかる。

3.4 まとめ

本実験の結果、底部を水中に浸漬させてポーラスコンクリートの表面温度上昇を効率的に抑制するために、ポーラスコンクリートの揚水性能および貯留水位を設計・調整し、表面まで揚水させることが必要であることが明らかとなった。

表 3-3 POC 試験体の表面

	8 号	7 号	6 号	6+8 号	
振動締固め	可視画像				<div>熱画像 温度凡例 (°C)</div> <div></div>
	熱画像				
コテ仕上げ	可視画像				
	熱画像				

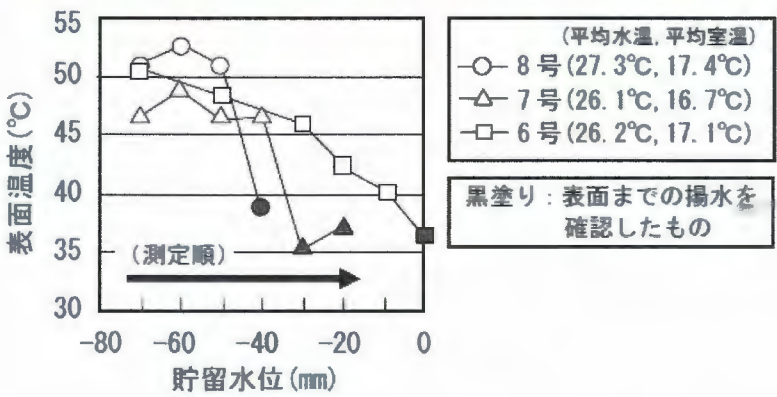


図 3-5 貯留水位と表面温度の関係

【参考文献】

- 1) 三島直生、中川武志、畑中重光、北野博亮:屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、2008.6
- 2) 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、2007.2

付録4 複層ポーラスコンクリート透水舗装に用いる樹脂材料の耐候性試験

複層ポーラスコンクリートにおいて、表層を樹脂で結合したポーラスコンクリート(以下、樹脂ポーラス)とする目的は、次のようなものである。

- ① ポーラスコンクリートを用いた透水性舗装の意匠性を高めることができる。
- ② 基層ポーラスコンクリートの上に樹脂ポーラスを施工すると、基層と表層の骨材の接触面積が大きく立体的となるため、表層の剥脱を低減できる利点がある。
- ③ 普通コンクリートに比べて平坦性を確保しにくいポーラスコンクリートの仕上げの精度を下げることができ、作業性が高まる。
- ④ 基層ポーラスコンクリートの平均空隙径より少し小さい空隙径となる砂利を用いることにより、目詰まりを防止でき、長期の透水・排水性を確保できる。

表層の樹脂ポーラスについては、建物の外構等で従来から行われている樹脂舗装の技術と大きな違いはない(ただし、目詰まりを防ぐため基層との空隙径の關係に配慮する等の違いがある)。施工は、左官等による作業となるが、所定の調査を実施すれば、比較的容易な作業である。しかし、意匠性すなわち美観と透水機能を長期にわたって確保するためには、経時劣化による摩耗・剥脱が少ないことが求められる。

したがって、複層ポーラスコンクリートで使用している樹脂ポーラスの経年変化による特性変化を確認する必要があるが、透水性舗装用樹脂(または、一般的な樹脂表層用樹脂)の耐候性試験のデータに関しては、公表されているものが少なく、また同一条件の複数材料の比較試験結果は筆者の知る限り公表されていない。そこで、3つの樹脂材料について、紫外線照射装置(サンシャインウェザーメータ)による

表 4-1 比較した樹脂材料

品名・型番 項目	エポ108 (XNR/H7475HG)	EX-480	ラストン NY-S
区 分	エポキシ系	エポキシ系	ウレタン系
タイプ	2液混合 主剤1:硬化剤0.8 常温硬化型	2液混合 主剤1:硬化剤0.5 常温硬化型	NON VOC 無溶剤1液型
硬化時間 ※ 養生時間	10h以上 48h以上	17h以上 48h以上	12h以上 48h以上
強 度 伸び率 硬化体比重	8 N/mm ² 152 % 1.08	(公表なし)	(公表なし)
特 長	非退色性良好		
用 途	樹脂舗装 複層ポーラス表層	樹脂舗装	樹脂舗装

※ 施工上、歩ける程度に硬化するまでの時間

耐候性試験を実施し、色、光沢、引張強度、耐摩耗性など、樹脂の特性がどの程度変わるかを調べ、比較した。

4.1 表層用樹脂材料の概要

透水性舗装用または一般的な樹脂表層用に用いられる樹脂材料としては、現在エポキシ系樹脂が主流であり、近年、ウレタン系樹脂も用いられるようになっている。

エポキシ系樹脂材料の特徴は、一般に普及していて入手しやすく、硬化後、適度な結合強度が得られること、また主剤と硬化剤の調合により、強度や可撓性および硬化時間等の特性をある程度設定できることなどが考えられる。ウレタン系樹脂の特徴としては、1 液であり、混合の必要がないこと、色の経年変化が極めて少ないこと、比較的硬度が低い(可撓性が高い)ことなどである。

本実験では、5 章の複層ポーラスコンクリート歩道施工実験等、これまで多く使用しているエポキシ系樹脂、同種で別商品の樹脂、および別種の樹脂としてウレタン系樹脂を選択した。

表 4-1 に、樹脂の諸元を示す。樹脂の製造は、各樹脂の所定の製造方法によった。

4.2 耐候性試験の内容

表 4.2 に実験の要因と水準を示す。樹脂または複層ポーラスコンクリートの樹脂表層の耐久性に対しては、紫外線および降雨による劣化の影響が大きいと考え、サンシャインウェザーメータを使用した促進劣化試験とした。色度と引張強度を調べることにし、要因として、樹脂の種類、試験時間(暴露時間)、表面からの深さを設定した。表面からの深さ(厚さ方向)による影響を検討するため、引張試験用の供試体は、3 枚を重ねて設置した(図 4-1)。

本試験は株式会社 INAX 総合技術研究所(常滑市)に委託して行った。

表 4-2 耐候性に関する実験の要因と水準

要 因	水 準		
試 験 時 間 (S W 暴 露 時 間)	なし(0h)、	400h、	800h
樹 脂 の 種 類	エポ108、	EX-480、	ラストン
供 試 体	引張試験用、樹脂ポーラス、ガラス板		
表面からの深さ(厚さ方向の重ね順) (引張試験体のみ)	表面、	真中、	下段

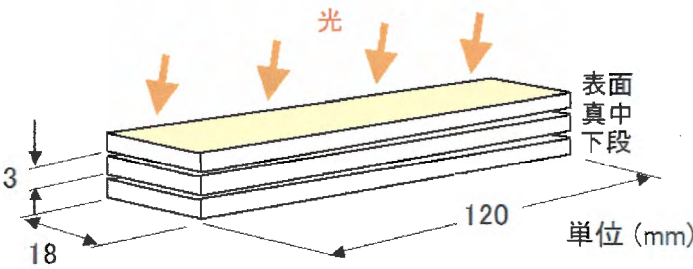


図 4-1 引張試験供試体の積み重ね状態

供試体の性状(形態)は、上記の試験に供するため、以下の3種類とした。

1) 引張試験体

液状の樹脂を型枠(寸法:125×20×t5 mm)に流し込み、半硬化後、脱型し、測端面を研磨した後、硬化養生を行った。

2) ガラス板

液状の樹脂をガラス板(寸法:200×80 mm)の上に、厚さ2mm程度を目標として塗布し、硬化させた。

3) 樹脂ポーラス

液状の樹脂と、表層用の砂利を練り混ぜ、型枠(寸法:400×150×t30 mm)に打設し、硬化後、切断機で100mm×100mmに切断した。

各試験または測定の概要は、以下のとおり。

1) 耐候性試験

試験機：サンシャインウェザーメータ スガ試験機製 [JIS B 7753]

光源：カーボンアークランプ

条件：ブラックパネル温度 63 湿度 50%Rh

降雨なし/あり 1月あたり 各 200h 降雨条件

イオン交換水 圧力 0.08～0.13Mpa 水量 2100±100mL/min

2) 測色

樹脂の外観上の色の評価として、色度を測定する。透明に近い場合、やや評価が困難であるが、同一条件において変化を比較する。

色彩色差計：CR-210 ミノルタ製

測定径： 引張試験体 ϕ 8mm、樹脂ポーラス ϕ 30mm

3) 摩耗試験

樹脂の劣化が耐摩耗性に及ぼす影響を評価するため、ガラス板に塗布した樹脂に対して、テーバー摩耗試験機 (JIS K 7204)を行う。

摩耗輪： S-42 サンドペーパーストリップ

試験荷重： 250gf

接触部直径内： ϕ 68 mm、外 ϕ 92 mm

試験回転数： 200rpm

4) 引張試験

樹脂の劣化が強度に及ぼす影響を評価するため、引張試験を行う。

万能試験機： チャック部には専用アタッチメント使用

供試体概寸： 長さ 120mm、幅 18mm、厚さ 3mm

ただし、ウレタン系の供試体は成型時に発泡したため、幅方向の整形が不能であった。

写真 4-1～写真 4-4 に、実験状況を示す。



写真 4-1 供試体の設置状況
(テーパー摩耗試験用ガラス板供試体)



写真 4-2 サンシャインウェザー試験機外観



写真 4-3 テーパー摩耗試験の状況



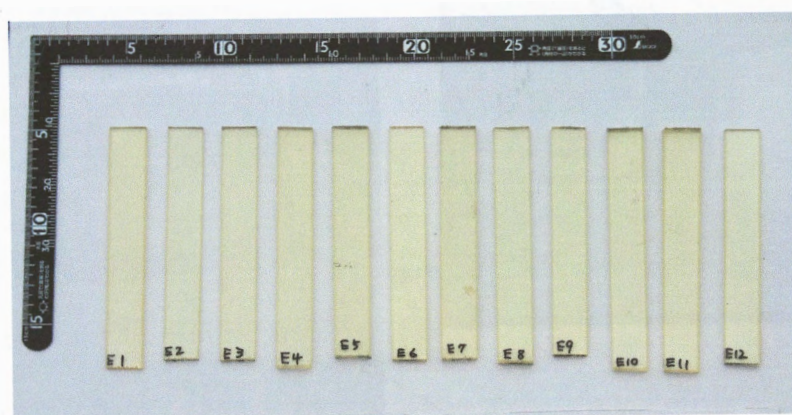
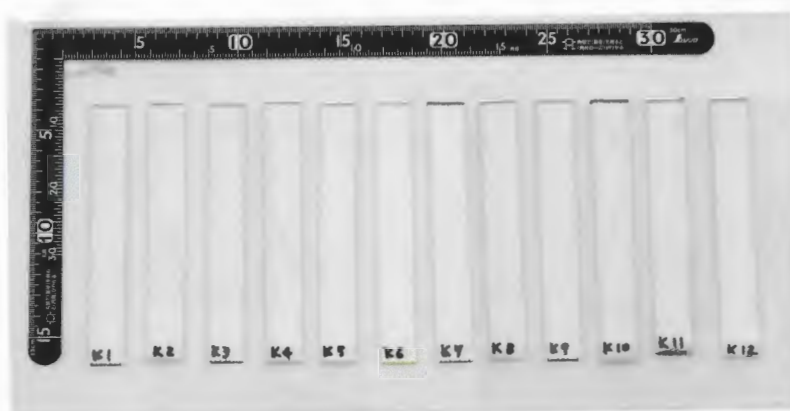
写真 4-4 引張試験の状況

4.3 実験結果と考察

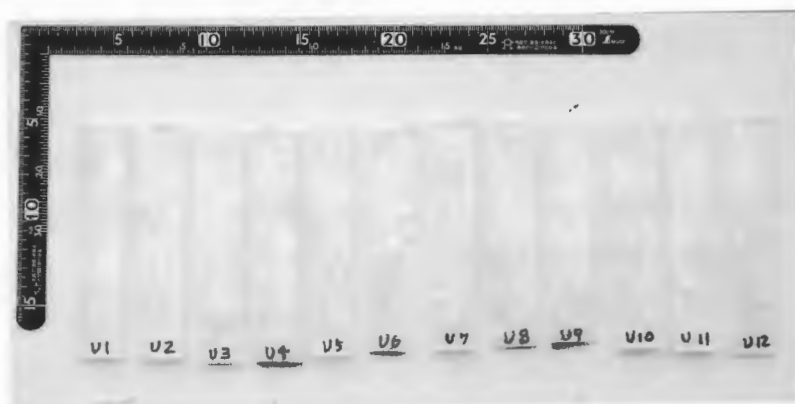
(1) 耐候性試験後の供試体の状況

写真 4-5 から 4-8 に、供試体の状況写真を示す。

写真 4-9 に、本実験におけるエポ 108 樹脂ポーラスの供試体の表面拡大写真と実施工の表面拡大写真の比較を示す。写真 4-9 をみると、本実験の 800h 後の供試体は、実施工 5 年 3 ヶ月経過の表面と比較すると、変化が少ないように見られる。このことから、本実験の 800h は、実際の気候環境の概ね 3 年から 4 年程度に相当するものと考えられる。

(a) エポ[®] 108

(b) EX 480



(c) ラストン

写真 4-5 引張試験用供試体 (試験前)

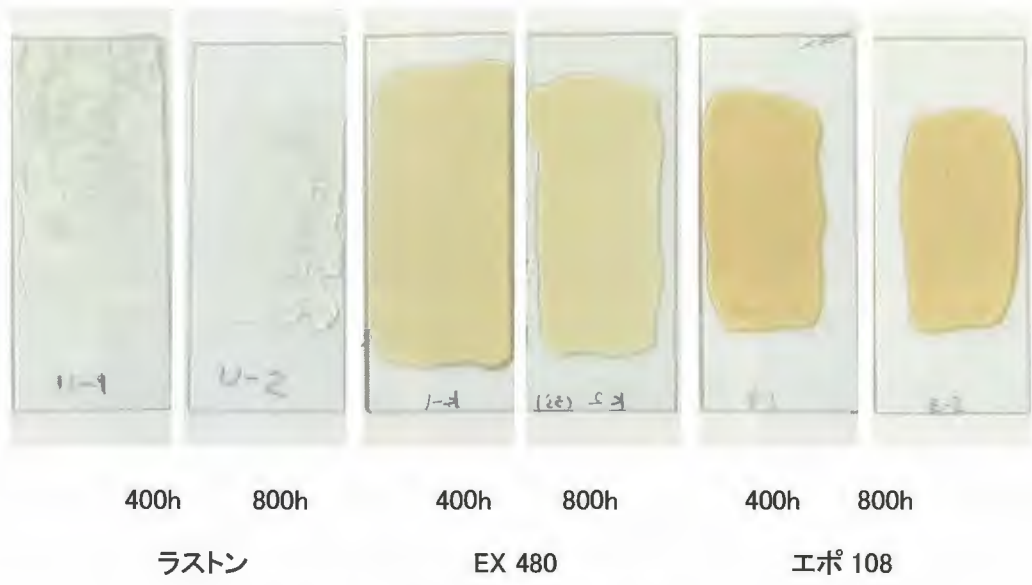


写真 4-6 ガラス板供試体の外観

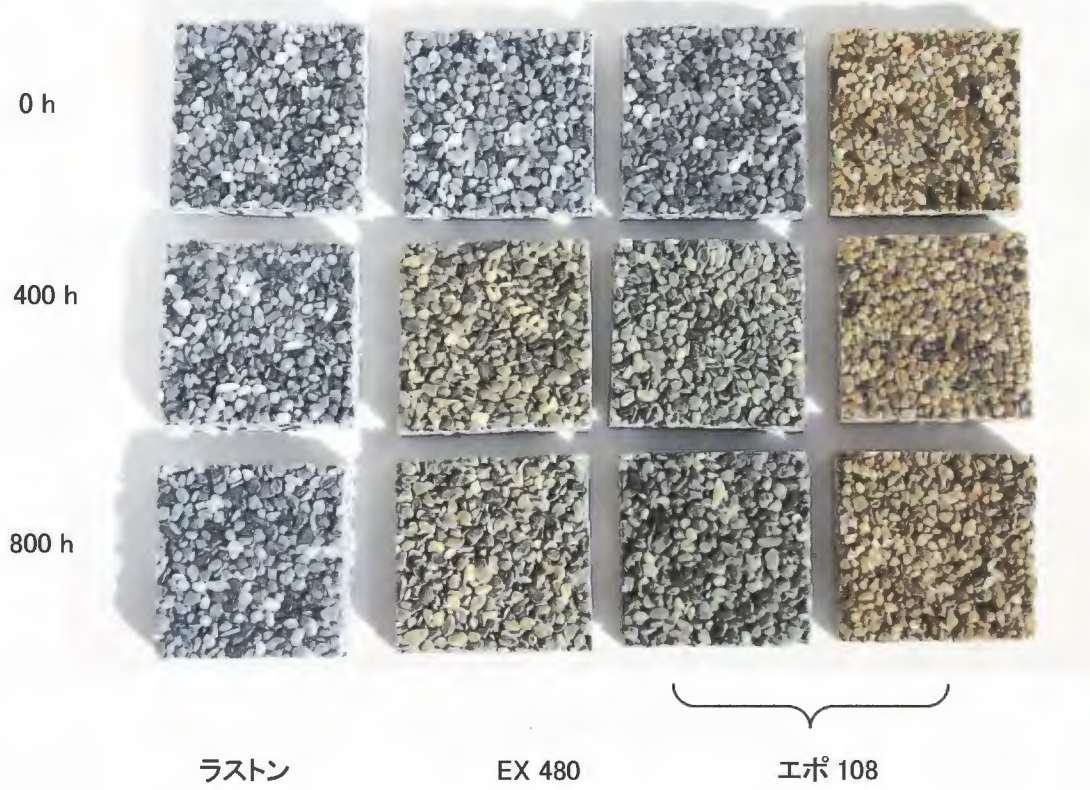


写真 4-7 樹脂ポーラス供試体の外観

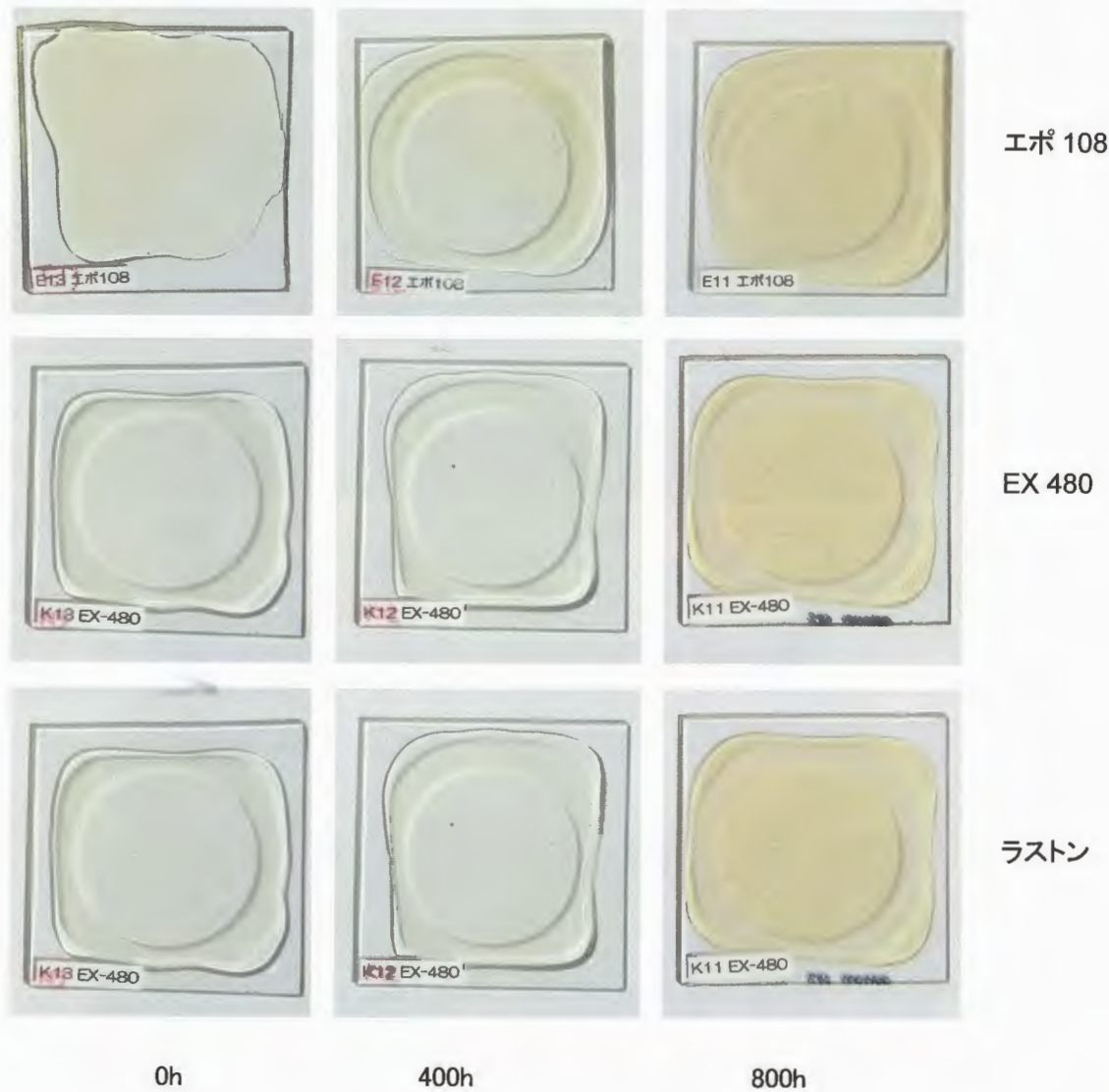


写真 4-8 テーバー摩耗試験供試体

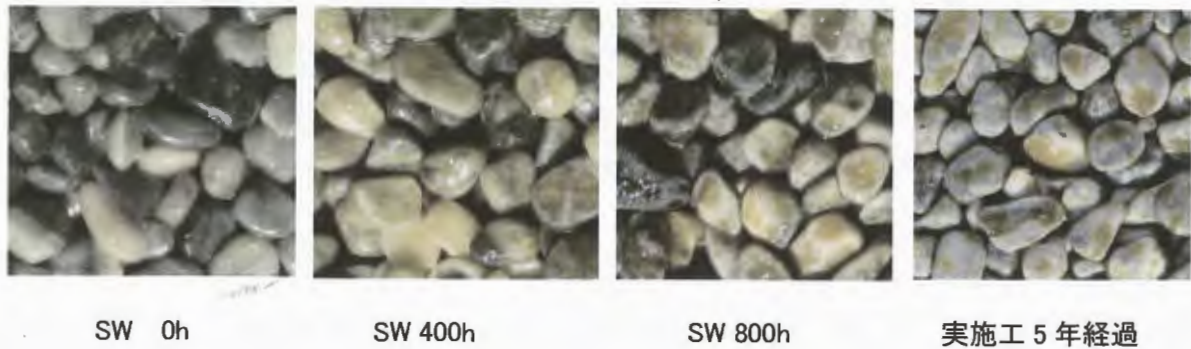


写真 4-9 サンシャインウェザー試験供試体と実施工表層の比較

(2) 測色結果

L*a*b*表色系(図 4-2 参照)による、ガラス板供試体の色度測定結果(色度の変化)を図 4-3 に、樹脂ポーラスの色度測定結果(同)を図 4-4 に示す。樹脂の成型時の色は、エポ 108 がやや黄色(褐色)が強く見え、EX480 がうすい黄色(褐色)、ラストンがほぼ透明に見える。ただし、樹脂ポーラスの供試体においては、いずれも樹脂の色は判別しにくい

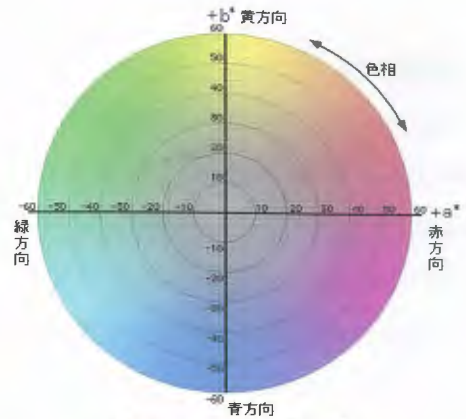
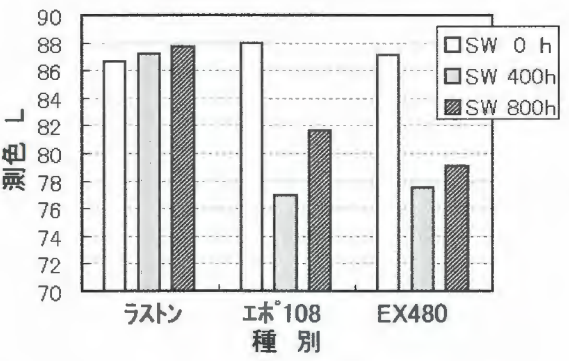
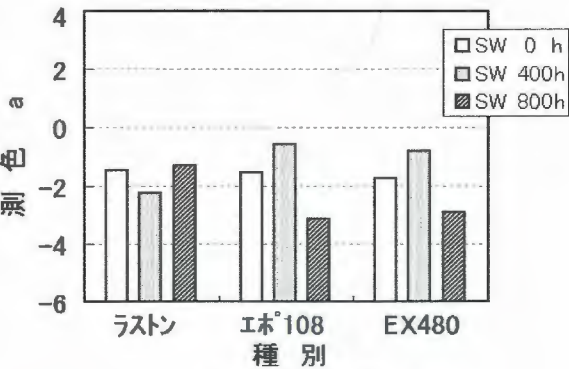


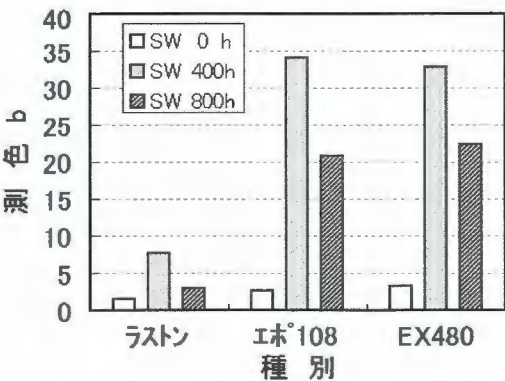
図 4-2 Lab*表色系



(a) 測色結果 L

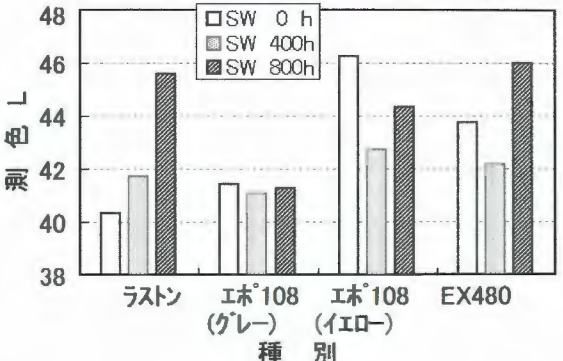


(b) 測色結果 a

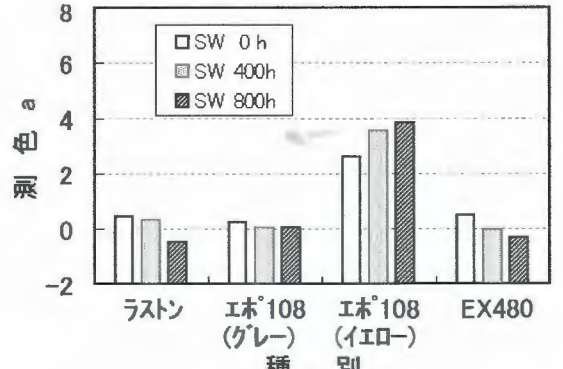


(c) 測色結果 b

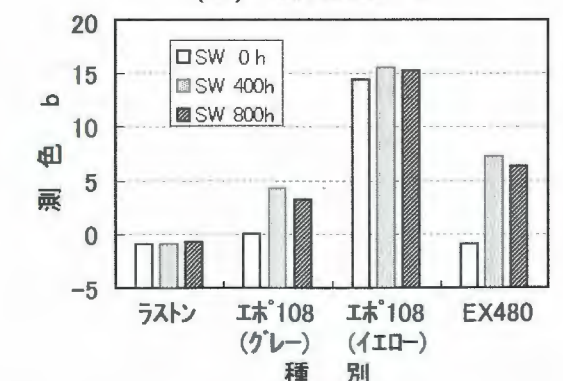
図 4-3 ガラス板供試体の色度測定結果



(a) 測色結果 L



(b) 測色結果 a



(c) 測色結果 b

図 4-4 樹脂ポーラス供試体の色度測定結果

(膜厚が薄いため透明に見える)。耐候性試験の進行による色度の変化をみると、ガラス板塗布の供試体では、ウレタン系のラストンの変化が比較的少なく、エポキシ系のエポ 108 および EX480 の変化が比較的大きい。b 値(+側は黄方向)の変化が大きく、黄化が進んだことがわかる。樹脂ポーラスの供試体では、エポ 108 の変化が比較的小さい。とくにグレーの供試体の変化が小さいと見られる。ただし、使用する砂利の色(グレーとイエロー)により差が生じるものかどうかは、不明である。

なお、外観上では、いずれの供試体も耐候性試験の進行とともに、光沢が少なくなっていることが確認できる。100h 試験後では、最も表面の砂利の周辺部の樹脂はかなり消失しているものと思われる。

(3) テーバー摩耗試験結果

図 4-5 に耐候性試験前後のテーバー摩耗試験結果を示す。テーバー摩耗試験の結果は、図を見ると、エポ 108 が最も摩耗量が少なく、また、耐候性試験(400h)の前後で、変化が小さいことがわかる。エポキシ系のエポ 108 と EX480 において、摩耗量が 0h より 400h 後の方が少なくなっている。この理由として、400h 後の硬度(強度)が増加していることが考えられるが、確認されていない。

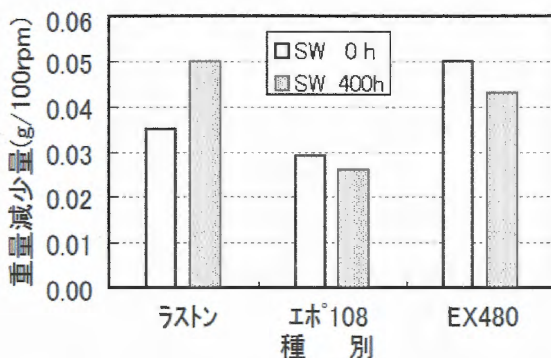


図 4-5 テーバー摩耗試験の結果

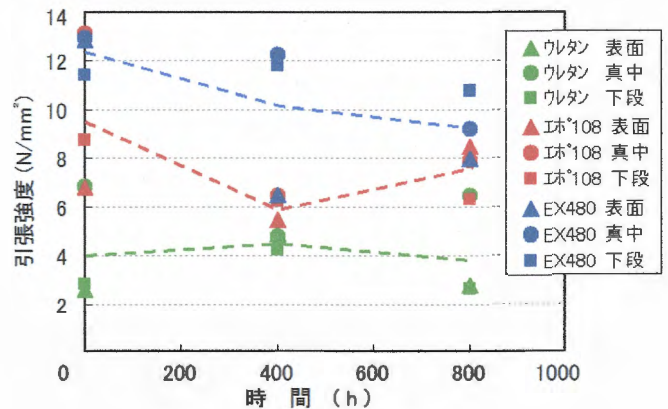


図 4-6 引張試験の結果

(4) 引張試験結果

図 4-6 に、耐候性試験 0h、400h および 800h における引張試験の結果を示す。図中において、厚さ方向の影響は記号を変えて示している。折れ線は、各 3 枚の引張強度の平均値の変化を示している。

図をみると、耐候性試験前においては、エポキシ系の EX480 の引張強度が比較的高く、ウレタン系のラストンが最も強度が低いことがわかる。これは、それぞれの樹脂の目標とする硬度が異なるためと考えられ、EX480 は比較的固く硬化させることを意図しているのに対して、同じエポキシ系であってもエポ 108 は、可撓性をいくぶん確保する性質を持っていると考えられる。ウレタン系のラストンは、可撓性があるとともに、供試体成型時に発泡したため、強度が低下したと考えられる。

耐候性試験 400h および 800h 後の引張強度は、EX480 については時間経過とともに低下する傾向がみられるが、エポ 108 およびラストンでは、明瞭な傾向が見られない。色度の変化はあっても、強度特性の変化は小さい可能性がある。

また、表面からの深さの影響については、紫外線の影響がもっとも厳しいと想定される表面の引張強度が低い傾向が見られる。また、下段も真中に比べて低い傾向がみられ、今回の実験のセット状態では、紫外線の反射や水の影響が、真中より厳しいことが考えられる。比較的、真中の供試体の強度が高いと見られるが、400h と 800h で強度の逆転も見られるので、供試体による強度のばらつきも考えられ、それほど明瞭な傾向とはいえない。

4.4 まとめ

サンシャインウェザーメータによる耐候性試験の結果、以下のことがわかった。

- 1) 樹脂の変色については、エポキシ系樹脂が黄化する傾向が確認された。膜厚 2mm 程度のガラス板では変化がやや大きくみられるが、膜厚の薄い樹脂ポークラスでは変化は相対的に小さくなる。樹脂ポークラスでは、エポ 108 の色度変化が少なかった。ウレタン系ではあまり変色が見られない。光沢はいずれの樹脂も同程度に失われる。
- 2) 引張強度は、初期強度が比較的高い EX480 は時間とともに低下傾向を示したが、初期強度が低めのエポ 108 およびラストンは、低下傾向は明瞭ではない。表面からの深さの影響は、今回の実験条件では傾向が明瞭ではないが、真中の供試体がいくらか紫外線および降雨の受けにくいという結果であった。
- 3) 摩耗試験では、エポ 108 が最も耐摩耗性が高く、耐候性試験後の変化も少ない結果となった。

参考文献

- 1) 野中眞一:合成樹脂を用いた道路舗装高機能化の技術動向、DIC Technical Review、No.11、pp.37-45、2005
- 2) 室井宗一:入門エポキシ技術①～⑬、月刊建築仕上り技術、1990 年 10 月～1991 年 10 月(連載)
- 3) 建築仕上り劣化調査診断技術および改修技術研修テキスト執筆委員会:第一分冊 改修基礎技術、社団法人日本塗装工業会、井上書院、1988 年

付録 5 ポーラスコンクリートに関するタイ(Thailand)との技術交流

タイ王国においては、近年、安価な労働力を活用した食品および工業製品の生産・輸出による経済発展が進んでいる。都市部を中心として、国民生活の向上も進み、家電製品等の耐久消費財の購入や住宅および住宅関連設備の充実、観光・リゾート施設への投資が意欲的に行われている。もっとも 2008 年以降は、リーマン・ブラザーズの破綻を端緒とする世界的な景気減速の影響もあり、タイにおいても必ずしも好調とはいえないが、そのような状況を背景に、先進的な環境技術としてのポーラスコンクリートに対する関心が高まり、ポーラスコンクリートの機能、製造法、適用法等に関する技術の講演・紹介を著者らに招請された。これまでの三重大大学との交流(Kohn Kaen 大学における三重大大学との共同研究、長谷川氏らによる遺跡修復技術に関するタイ王国関係者との交流等)を基に、ポーラスコンクリートを海外でも普及させること、タイ王国での技術的課題を洗い出すことを目的として、招請に伴い、ポーラスコンクリートに関する技術を紹介し、技術交流を図るとともに、タイ国技術者に対する技術指導活動も展開した。

以下に、技術交流の記録を示す。

技術交流の記録

(1) 2006 年 12 月 20 日～25 日 ポーラスコンクリートの技術講演と打設実験

12/20 バンコク着、ポーラスコンクリート打設実験準備

12/21 ポーラスコンクリートに関する講演と討議 (Kohn Kaen 大学)

参加者 Kohn Kaen 大学・土木工学科 Prinya 教授、生コン製造技術者、他

講演タイトル：「Permeable → Drainage Pavement」

(ポーラスコンクリートおよび透水性・排水性舗装紹介／環境保全の機能／
ポーラスコンクリートの練混ぜ、打設方法／施工事例紹介／
透水性舗装の特性・メリット)

打設実験 練混ぜ：約 0.5 m³、打設：4m×1.5m(約 6 m²)、厚さ約 10cm

12/21 ポーラスコンクリートの練混ぜ、打設実験 (同大学)

12/23 タイにおけるポーラスコンクリートプロジェクトについての討議

12/25 コンクリート技術者と打合わせ(バンコク)、バンコク発

Prinya 教授をはじめ、Kohn Kaen 大学関係者および生コン製造会社 CPAC 技術者等と交流の結果、現地の方々は、ポーラスコンクリートに強い関心をもっており、適用に非常に意欲的であった。また、ポーラスコンクリートを歩道や建物の内外構等の舗装ないし床面形成に適用し、表面に意匠性向上、平滑性向上、耐剥脱性向上等をねらいとして自然石・樹脂表層を施す技術(複

層ポーラスコンクリート)は、その価値が理解されたものと確信した。

ポーラスコンクリートは、製造および施工の上で、十分な品質管理がなされることが望ましいものの、優れた機能を都市づくりに活かすためには、より適用が容易な場所から普及拡大し、そのメリット享受と機能設計に慣れていくことが重要であり、必須であると考えます。今回の施工実験は、多くの参加者からよく理解できたとの感想が得られ、有意義であったと考えられる。

さらに、ポーラスコンクリートの普及のために、参加者からアイデアも出され、関係者でタイ国における特許申請も検討されるなど、その後の技術交流が深まることとなった。



写真 5-1 大学での講演



写真 5-2 POC 打設実験(練り混ぜ)



写真 5-3 POC 打設実験(目視確認)



写真 5-4 現場への POC 打設



写真 5-5 打設完了状況



写真 5-6 実験後の記念撮影

(2) 2007 年 9 月 14 日～16 日

9 月 14 日、 Bangkok タイ大林における講演と技術指導

参加者 三重大側 中川武志、畑中重光教授

タイ側 Prof. Dr. Krasae Chanawongse (Founder, College of Asian Scholars)

Prof. Prinya Chindaprasert (Former President of Khon Kaen Univ.)

タイ大林 矢口信二氏(副社長)、Mr. R. Thinagorn

Rungruang Admin.& Manag. Co. Ltd. Mr. P. Montree、CPAC ほか



写真 5-7 ポーラスコンクリート製造ユニット



写真 5-8 ポーラスコンクリート打設状況



写真 5-9 関係者との意見交換



写真 5-10 複層ポーラスコンクリート技術の指導

9 月 16 日、 Kaset Sart 大学における複層ポーラス歩道技術の講演

参加者 三重大側 中川武志、畑中重光教授

タイ側 Kasetsart 大学副学長、Dr. Thanudkij Chareerat (同講師)、他
Kasetsart 市建設関係者



写真 5-11 講演の状況



写真 5-12 聴講する関係者、学生

(3) 2007 年 5 月 ～9 月 ポーラスコンクリートに関するタイ国技術者への技術指導

- a) 2007 年 5 月 6～7 日 三重大・(株)川島工業他にて、技術交流、POC の概要説明
- b) 2007 年 6 月 14～18 日 タイ Bangkok にて、技術交流、技術講習
- c) 2007 年 7 月 27～29 日 (株)川島工業構内にて、実技講習
- d) 2007 年 8 月～9 月 タイ Bangkok における施工実験、実技指導・フォローアップ

関係者 三重大側 中川武志、畑中重光教授、同研究室メンバー

タイ側 Prof. Dr. Krasae Chanawongse (Founder, College of Asian Scholars)
 Prof. Prinya Chindaprasert (Former President of Khon Kaen Univ.)
 Rungruang Admin.& Manag. Co. Ltd. ほか



写真 5-13 タイにおける交流



写真 5-14 タイにおける技術講習



写真 5-15 日本における技術講習



写真 5-16 日本における実技指導

(4) 2009 年 3 月 9～10 日 タイにおける講演、技術協力協議

a) 3 月 9 日 Khon Kaen 大学における技術講演

関係者 三重大側 中川武志、畑中重光教授

タイ側 Khon Kaen 大学

Khon Kaen 県および Khon Kaen 市建設関係者

b) 3 月 9～10 日 技術協力協議

関係者 三重大側 中川武志、畑中重光教授

タイ側 Prof. Dr. Krasae Chanawongse (Founder, College of Asian Scholars)

Prof. Prinya Chindaprasert (Former President of Khon Kaen Univ.)

Rungruang Admin.& Manag. Co. Ltd. ほか



写真 5-17 試験施工箇所確認



写真 5-18 試験施工箇所の透水状況確認

写真 5-19 ポーラスコンクリート二次製品の
製作発表

写真 5-20 Krasae 氏の大学での交流

付録6 複層ポーラスコンクリート舗装の支持力に関する検討

6.1 はじめに

ポーラスコンクリートによる歩道、駐車場または建築内外構の床面等を設計する場合、道路(車道)等の設計規準を参照すると、断面構造は基礎碎石、均しコンクリート(またはモルタル)、コンクリート等の構造体という形態が一般的となる。歩道または床面が透水性の場合には、長期的に安定な構造を考慮すると不透水層を設けて排水計画を行う必要がある。しかし、これらは、近年の環境機能や快適性を要求される歩道、駐車場または建築内外構において、必ずしも適切でなくなることがある。

ここでは、歩道、駐車場または建築内外構についての支持力の考え方を整理し、社会的ニーズに合致させるための、従前よりも柔軟な考え方の設計について述べる。

6.2 支持力の確保の方法

6.2.1 一般的な考え方

歩道あるいは床面において、その上に作用する荷重に耐える力、支持力を確保するには、現状では次の2通りの方法が多いと考えられる(図6-1)。

a) 歩道または床面を構成するコンクリート等が、作用する荷重に対して、十分な強度(曲げ強度)を有するものとし、垂直荷重を広い面積で負担することにより、下部の構造(基礎碎石、路床)等が多少軟弱なものであっても問題が生じないようにする方法。これは、設計としてはシンプルであるが、実施工においては、コンクリートの厚さ不足、地盤の転圧不足等の問題により、構造物に曲げ荷重がかかるとひび割れを発生し、耐久性や美観を損ねることがある(写真6-1)。また、透水性舗装の場合には、浸透した水により基礎碎石や路床が徐々に流出または沈下しやすいという問題もある(不透水層を設ける必要があり、雨水の地下浸透とは両立できない)。

b) 可能な限り強固な下部構造を確保し、その上にコンクリート、二次製品などによる舗装構造を形成する場合。これは、従来の設計では、下部構造に厚い均しコンクリート等を設けると(支持力を得ることができるが、)コストと機能性の面から、魅力が少ない工法になりやすい。また、現実として設計思想とは異なり、下部構造が軽視される傾向にあり、二次製品による舗装では下部に砂を敷き均すため、車両等の通行により路面が凸凹になること(写真6-2)が多い。

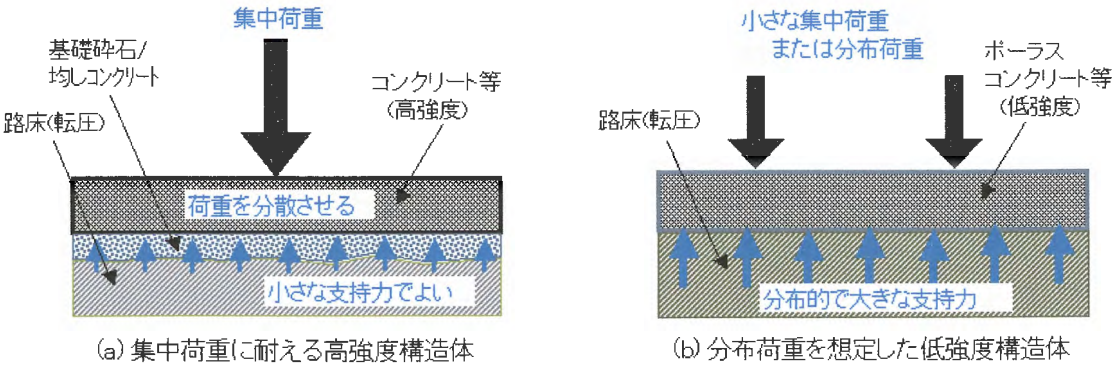


図 6-1 支持力の考え方

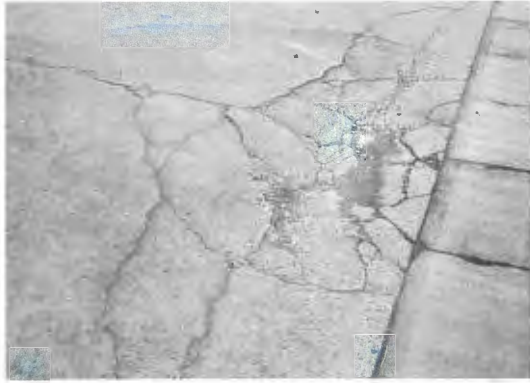


写真 6-1 傷んだコンクリート床盤



写真 6-2 傷んだインターロッキング舗装

6.2.2. 複層ポーラスコンクリートにおける考え方

(1) 支持力

複層ポーラスコンクリートでは、基層ポーラスコンクリートを、比較的空隙率が高く、セメント量の少ない調合とすることが多く、普通コンクリートや高強度ポーラスコンクリートのような曲げ強度は期待しない。したがって、複層ポーラスコンクリートを施工する場合は、路床はセメント系改良材等により、適度な地盤改良を行って転圧した上に基層ポーラスコンクリートを打設する。すなわち、路床の支持力を(ある程度)期待する。想定する車両等の荷重にもよるが、設計支持力は、おおむね $100 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ ($\approx 0.1 \sim 0.15 \text{ N/mm}^2$) 程度である。

6.2.1 の分類からは、(b)の考え方である。

歩道または床面の耐久性を劣化させる要因としては、ひび割れ、不等沈下、路床(碎石、土)の流出、植物の繁茂等が原因であることが多く、これらを発生させないことが、劣化防止にまず重要であると考ええる。

(2) 路床の処理

複層ポーラスコンクリートでは、下部に原則として基礎碎石の転圧、または均しコンクリートの打設を行うことはせず、改良・転圧した路床にセメント皮膜処理(水セメント比 70%程度以下のペーストを 1mm 以下程度に薄く塗り広げる)を行うこととしている。舗装構造断面に入った水は排水管、排水誘導溝により排水できる構造とする。適切なセメント皮膜処理は、多雨時は大部分を排水し、少雨時は保水または地下浸透とすることができると考えられる。

(3) 支持力の評価方法と対応^{1),2)}

歩道や床面の破壊・損傷につながりやすいのは、使用時に発生する集中荷重が最大の要因と考えられるので、支持力は集中荷重に耐えうる能力と考えられる。この支持力の評価は、意外と容易ではなく、設計においては、路床の支持力を仮定して、コンクリート(またはポーラスコンクリート等)の曲げ強度をもとに、単位面積あたりの許容荷重を推定する。施工後の評価は、何らかの破壊試験または破壊の可能性のある負荷試験による評価となる。

このような背景から(支持力の評価が容易ではないために)過剰設計が一般的になっている面があるのではないかと考えられる。低コストが要求される歩道や床面では、ひび割れ等、何らかの損傷が起こっても、舗装構造の美観や性能を大きく損ねないように工夫する考え方(損傷許容設計)も有望であると考ええる。

(4) 従来工法における基礎碎石の効果について

従来の舗装ないし床盤等の施工方法において、基礎碎石を敷き均し、転圧する工程は公共工事等の標準施工方法となっているが、支持力を向上させる効果よりも後工程の作業を容易にすることが主目的と考えられ、長期的には路面の流動・沈下を招く要因となる可能性も否めない。また、透水性舗装においては、基礎碎石は流動の可能性があるため使用しにくい。路床による支持力を得たい場合は、長期的にはマイナス面をもつ可能性がある基礎碎石を使用せず、図 6-1(b)のような考え方で路床の支持力を確保する方法も検討に値すると考える。

4. まとめ

複層ポーラスコンクリートでは、路床はセメント系改良材等により、適度な地盤改良を行って転圧した上に基層ポーラスコンクリートを打設する。基層ポーラスコンクリートは、曲げ強度の比較的低い仕様とし、路床の支持力を(ある程度)期待する。軽交通を想定した透水性舗装の適用箇所では、この方法が環境性能および快適性を実現するために有効であると考えられ、コストパフォーマンスが高くなるのではないかと考える。

また、基礎碎石を用いない舗装ないし床盤の施工方法の有効性を検討し、採り入れて行くべきであると考え。今後、複層ポーラスコンクリートの支持力を他の方法と比較して評価する実験、ないし数値計算も必要であろう。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会編:透水性舗装ガイドブック 2007、日本道路協会、pp. 12-33、2007 年 8 月
- 2) 超硬練りコンクリート研究委員会報告書、(社)コンクリート工学協会、pp.147-169、1998 年 6 月

付録7 主な業績

本研究に関連する公表論文

【学術論文】

No.	論文題目	発表誌名	巻、号、頁	発表年月	著者	備考
1	ポーラスコンクリートの耐摩耗・剥脱性評価に関する実験的研究	セメント・コンクリート論文集	No. 60, pp. 171-175	2006 年	中川武志 畑中重光 三島直生 犬飼利嗣	付録1
2	屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する基礎的研究	コンクリート工学 年次論文報告集	Vol. 30, No. 2, pp. 337-342	2008 年 6 月	三島直生 中川武志 畑中重光 北野博亮	付録2
3	空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法	日本建築学会 構造系論文集	Vol. 73, No. 629, pp. 1043-1050	2008 年 7 月	中川武志 畑中重光 三島直生 湯浅幸久 前川明弘	第3章
4	住空間における意匠性に配慮した複層ポーラスコンクリート歩道の施工実験	コンクリート工学	Vol. 46, No. 12, pp. 20-27	2008 年 12 月	中川武志 畑中重光 三島直生 松村 豪	第6章
5	ポーラスコンクリートの摩耗・剥脱耐性評価に関する研究	セメント技術大会 講演要旨	pp. 214-215	2006 年 5 月	中川武志 犬飼利嗣 三島直正 畑中重光	
6	底面を水中に浸漬させたポーラスコンクリートの熱特性に関する実験的研究	日本建築学会大会 学術講演会梗概集	pp. 587-588	2008 年 9 月	三島直生 中川武志 畑中重光 北野博亮	付録3
7	空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法に関する研究(その1:空隙率の定義と測定方法)	日本建築学会大会 学術講演会梗概集	pp. 599-600	2008 年 9 月	中川武志 松村豪 三島直生 畑中重光	第3章
8	空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法に関する研究(その2:各測定方法による測定結果の比較)	日本建築学会大会 学術講演会梗概集	pp. 601-602	2008 年 9 月	松村豪 中川武志 三島直生 畑中重光	第3章

9	ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす供試体の高さ／直径比の影響	日本建築学会大会 学術講演会梗概集	pp. 829-830	2009 年 8 月	中川武志 森鼻泰大 三島直生 畑中重光	第 5 章
10	実施工における舗装用ポーラスコンクリートの諸特性に及ぼす締固め方法の影響	日本建築学会大会 学術講演会梗概集	pp. 817-818	2009 年 8 月	森鼻泰大 中川武志 三島直生 畑中重光	第 4 章

その他著作物

No.	区 分	名 称	タイトル	著 者	年 月	巻、号、頁
1	専門誌	建設機械	意匠性と施工性を考慮した複層ポーラスコンクリート歩道施工実験	中川武志 畑中重光 三島直生	2009 年 10 月	Vol. 45, No. 6

関連する特許の出願

No.	発 明 の 名 称	出 願 人	受 理 番 号	発 明 者
1	床面又は路面の舗装構造	中川武志	特許第 4206170 号	中川武志
2	床面又は路面の舗装構造	中川武志	特願 2008-26165	中川武志
3	床面又は路面の舗装構造（タイ国における特許出願）	中川武志 P. Montree T. Chareerat C. Prinya	特願 14862-042	中川武志
4	ポーラスコンクリート用仕上機	三重大学	特願 2009-165488	中川武志 三重大学