

2.2.6 硬化コンクリート

(1) 硬化コンクリートの性質と種類

十分に硬化したコンクリートを一般に**硬化コンクリート**と呼ぶ。硬化コンクリートの性質は、使用材料、調合、製造、施工方法などのほか、材齢、温度、湿度などの養生条件、環境条件によって大きく異なる。

コンクリートは一般に、単位容積質量、骨材の種類、混和材料の混入の有無、製造場所などによって前掲の表-2.2.2のように分類できる。以下、

表-2.2.19 コンクリート強度に影響を及ぼす因子

内 的 因 子	<ul style="list-style-type: none"> ・セメントペーストの強度 ・骨材の量と品質（とくに、強度、粒径、形状） ・セメントペーストと骨材の付着性状 ・調合比（とくに、水セメント比） ・施工方法（とくに、締固め程度） ・養生方法（温度、湿度） ・材齢（水和初期の温度履歴、養生の履歴とも関連）
外 的 因 子	<ul style="list-style-type: none"> ・供試体の形状・寸法 ・载荷速度 ・加圧面の平面度 ・载荷応力状態（とくに、载荷面の摩擦）

用語の解説

硬化コンクリート

まだ固まらないコンクリートであるフレッシュコンクリートに対する用語で、十分に硬化したコンクリートの一般的な呼称。また凝結後の硬化過程にあるコンクリートは、一般に若材齢コンクリートと呼ばれる。

テクニカルワンポイント

鋼材に匹敵するコンクリートの実現

現在、中低層のRC建築物に用いられるコンクリートの圧縮強度は、およそ 20~30 N/mm² である。しかし、最近の技術の進展によって、右図に示すような、鋼材に匹敵する**超高強度コンクリート**が実現した。この例では、超高強度を得る主なポイントは、1) 高性能 AE 減水剤、2) シリカフューム、3) 硬質な骨材、を活用し、水セメント比を極限まで小さくすることであった。「学生によるコンクリート強度コンテスト」では、320N/mm² という、とてつもない強度のコンクリートが作られた実績もある。実験室レベルばかりでなく、最近では、圧縮強度がおよそ 150 N/mm² のコンクリートまで現場施工が可能となり、高層 RC 建物（地上 60 階）の実現に寄与している。ちなみに、セメントペーストの最高強度としては、加圧成形した一辺の長さが 1 cm の立方体を用いて、およそ 700 N/mm² を得たとの報告があり（米国）、コンクリートもまだまだ高強度化する可能性を秘めている。

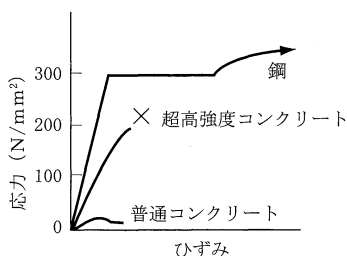


表-2・2・20 コンクリート強度・耐久性に係わる主な JIS 試験方法

試験目的	試験項目	試験方法
強度特性に係わる性能の確認	圧縮強度	JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法)
	引張強度	JIS A 1113 (コンクリートの割裂引張強度試験方法)
	曲げ強度	JIS A 1106 (コンクリートの曲げ試験方法)
	弾性係数	JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法) JIS A 1127 (共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数および動ポアソン比試験方法)
耐久性に係わる性能の確認	長さ変化	JIS A 1129-1 : 2001 (モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法 - 第1部 : コンパレータ方法) JIS A 1129-2 : 2001 (同第2部 : コンタクトゲージ方法) JIS A 1129-3 : 2001 (同第3部 : ダイヤルゲージ方法)
	収縮拘束応力・ひび割れ抵抗性	JIS A 1151 (拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法)
	中性化抵抗力	JIS A 1152 (コンクリートの中性化深さの測定方法) JIS A 1113 (コンクリートの促進中性化試験方法)
	凍結融解抵抗性	JIS A 1148 (コンクリートの凍結融解試験方法)
	熱的特性	JIS A 1325 (建築材料の線膨張率測定方法)

普通コンクリートを中心に硬化コンクリートの強度性質，変形性質，体積変化・ひび割れ，熱的性質，および耐久性について述べる。

(2) 強度性質

(a) 強度に影響を及ぼす因子

コンクリートの各種強度は，表-2・2・19のような内的および外的因子の影響を受ける。内的因子とは，**多孔質材料**であるコンクリートの内部組織の性状にかかわる因子である。一方，外的因子は試験方法に関する因子で，コンクリートの内部組織とは無関係であるが，試験方法の設定なしに強度を定量的に取り扱うことはできない。コンクリートの強度および耐久性に係わる試験方法のうち，JISに規定されている主な試験方法を表-2・2・20に示す。

(b) 圧縮強度

コンクリートの強度には，圧縮強度，引張強度，曲げ強度，せん断強度，疲労強度，付着強度などがあるが，コンクリート強度といえば一般に圧縮強度のことを意味する。これは圧縮強度が他の強度と比較して著しく大きく，鉄筋コンクリート (RC) の構造設計では主として圧縮力に対するコンクリートの抵抗力を利用するからである。また，コンクリートの圧縮強度は，他の諸強度および変形性質とも密接な関係があり，これらの概略値は圧縮強度から推定することができる。

1) 圧縮下のコンクリートの破壊過程

圧縮強度に及ぼす各種要因の影響について述べる前に，圧縮下のコンク

用語の解説

多孔質材料

コンクリートは基本的にセメントペースト，細骨材，および粗骨材からなる複合材料 (多相材料) であり，それぞれの構成材料それぞれの内部と界面に微細な空隙を有する多孔質材料である。

表-2.2.21 コンクリートの強度理論

強度説	提 唱 者	概要と強度式 (A, B は実験定数)
水セメント比説	D. A. Abrams (1919年)	プラスチックでワーカブルなコンクリートの圧縮強度はセメントペーストの水セメント比によって支配される。 $F'_c = A/B^x \dots \dots \dots (1)$ ここに、 $x = W/C$: 水セメント比
空隙比説	A. N. Talbot (1921年)	コンクリートの圧縮強度はセメントペーストの空隙に支配される。 $F'_c = \frac{A}{(1+v/C)^B} \dots \dots \dots (2)$ ここに、 C : セメントの絶対容積 v : 単位水量の容積とコンクリート 1m^3 中の空気の容積との和
セメント水比説	I. Lyse (1925年)	コンクリートの圧縮強度はセメント水比 (C/W) と直線関係にある。 $F'_c = A + B(C/W) \dots \dots \dots (3)$
ゲルススペース比説	T. C. Powers (1947年)	コンクリートの圧縮強度は材齢や調査に関係なく、ゲルススペース (ゲル / 空間) 比のほぼ3乗に比例する。

ここに、 x : 水セメント比 (%), F : 調合強度 (N/mm^2), K : セメント強度 (N/mm^2)

コンクリートの破壊過程について触れておく。供試体と載荷板との摩擦を除去した純粋な1軸圧縮試験を行った場合、一般に、荷重の増大に伴うコンクリートの破壊過程は、およそ以下のようなになる (図-2.2.18 参照)。

- ① 最大応力 (圧縮強度) のおよそ30%の応力になると、粗骨材とモルタルの境界層にボンドクラックが局所的に生じ、剛性 (ヤング係数) がわずかに低下する。
- ② 最大応力のおよそ50~70%の応力になると、粗骨材の周辺で生じた局所的なひび割れがモルタル中に進展する。
- ③ 最大応力のおよそ80~90%の応力になると、ひび割れが互いに連結して、大きなひび割れが形成され始める (この応力レベルを臨界応力度と呼ぶ)。

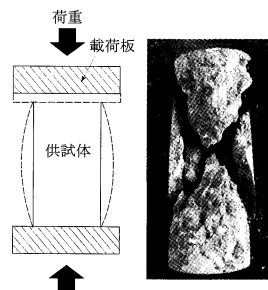
そして、ついには供試体の崩壊にいたる。供試体の最大耐力を断面積で除した値が圧縮強度 F'_c (記号として σ_B を用いることも多い) である。なお、応力下降域まで含めた応力-ひずみ関係については、次項「(3) 変形性質」にて詳しく述べる。

2) セメントペースト強度の影響

用語の解説

1 軸圧縮試験と端面摩擦

わが国や米国では標準供試体として円柱体を用いるが、ヨーロッパでは立方体を用いることが多い。いずれの場合も1軸圧縮試験とはいえ、供試体と載荷板との間に摩擦 (端面摩擦) が生じる。その結果、端部拘束の影響で供試体の破壊がせん断型になるなど、純粋な1軸圧縮応力状態にはなっていない (3軸応力状態にあるといえる)。標準試験法としての簡便性を優先した措置と考える必要がある。



弾性、塑性、破壊

基本的に弾性とは元に戻る性質、塑性とは元に戻らない性質、また破壊とは応力の低下を生じる現象である。

ボンドクラック

粗骨材とモルタル (またはセメントペースト) との間の付着が損なわれて生じる微細なひび割れ

ヤング係数

応力-ひずみ曲線の傾き。すなわち、応力をひずみで割った値で、単位は応力と同じ。弾性係数ともいう。

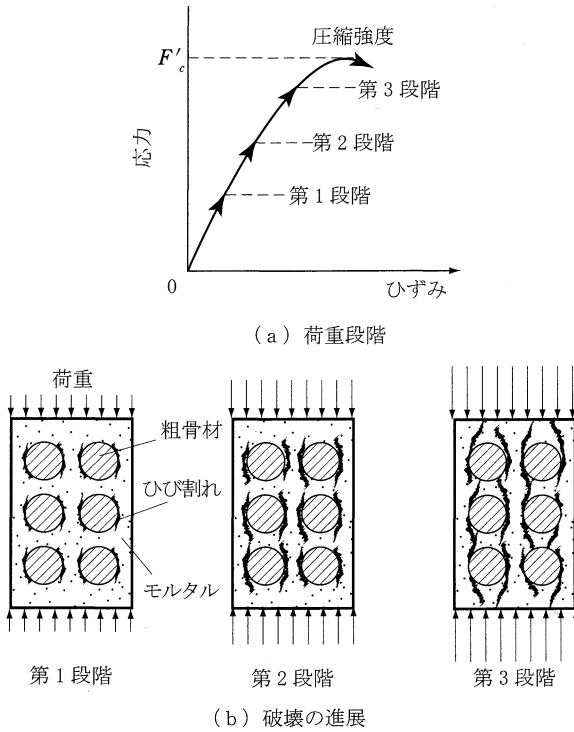


図-2.2.18 荷重段階と破壊の進展（純粋な1軸圧縮下）

コンクリートの圧縮強度に対して表-2.2.21に示すような諸説が提唱されており、結合材であるセメントペーストの強度が、コンクリート強度を大きく支配していることがわかる。これらのうち、セメント水比説に基づく表中の(3)式は、コンクリートの調合決定時の強度推定式として実用されている。例えば、JASS5では、砂・砂利を用いた普通コンクリートの水セメント比（セメント水比の逆数）の算定式の一例として下式を示している。

$$x = \frac{51}{F'_c / K + 0.31} \quad (\%) \quad (2.2.13)$$

この式によれば、コンクリート強度 (F'_c) はセメント強度 (K) に実用範囲でほぼ正比例することになる。なお、レディーミクストコンクリート工場では、通常、この式をそのまま使用するのではなく、自社の材料を使った試し練りによって、工場ごとに式中の係数を求めている。空隙比説はAEコンクリートの強度推定に有効である。

3) 骨材性質の影響

骨材の性質がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響は、常用される強度の範囲ではそれほど大きくない。しかし、以下のように条件によってはその影響を無視できない。図-2.2.19に示すように、モルタル強度に対して強度の小さい粗骨材を用いたコンクリートでは、モルタルの破壊より粗骨

用語の解説

臨界応力度

コンクリートの体積ひずみ ($\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$) が減少(収縮)から増加(膨張)に転じる応力とも定義される。

AEコンクリート

AE剤によって微細な空気を進行させたコンクリート

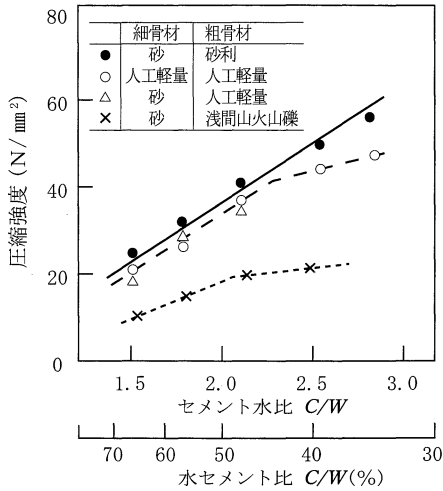


図-2-2-19 圧縮強度と水セメント比との関係に及ぼす骨材強度の影響 (村田)

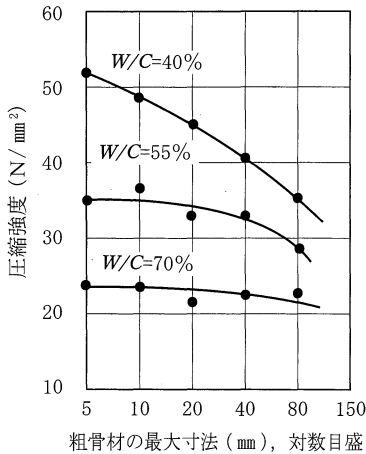


図-2-2-20 粗骨材の最大寸法が圧縮強度に及ぼす影響 (D.L. Bloem)

材の破壊が先行するため、セメント水比を増加させてもコンクリート強度の伸びは期待できない。また、図-2-2-20に示すように、**富調合**で高強度のコンクリートでは**粗骨材の最大寸法**が大きいほどコンクリートの圧縮強度は低下するといえる。これは、**ブリーディング**によって生じる骨材下部の弱化層が増すこと、およびコンクリート内部の非均質性が増すことで局部への応力集中性が増大し、ひび割れが発生しやすくなるためである。したがって、同一水セメント比の場合、コンクリート強度はモルタル強度より小さい。

4) 材齢の影響

コンクリート強度の増進は、セメントの水和反応に依存する。湿潤養生を行った場合、一般的な水セメント比の領域では、材齢14日くらいまでの強度の増進がもっとも著しく、その後、材齢約1年まで強度の増進が続く。材齢28日の強度は、材齢1年の強度のおよそ80%である。

用語の解説

富調合

通常より単位セメント量の多い(セメントリッチな)調合のこと。土木分野では、富配合という。

粗骨材の最大寸法

その粗骨材(群)が90%以上通る所定の網ふるいのうち、ふるい目の開きが最小のもの呼び寸法で表される。ある1個の最大の粗骨材の寸法ではない。

ブリーディング

打設後のコンクリートにおいて内部の自由水が上昇する現象。同時に、骨材やセメント粒子の沈降を伴っており、一種の材料分離である。

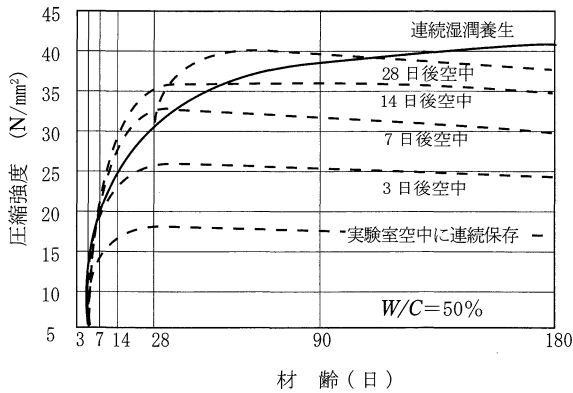


図-2・2・21 養生湿度が圧縮強度の発現に及ぼす影響 (米国開拓局)

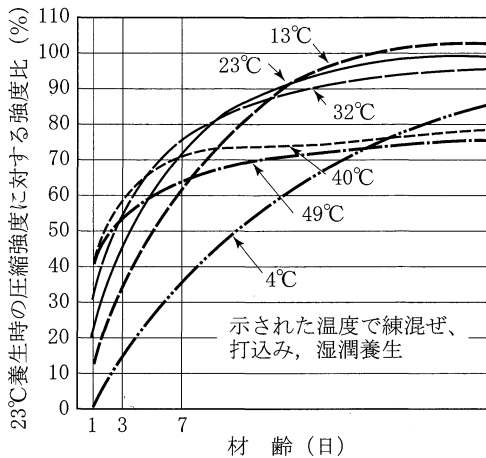


図-2・2・22 養生湿度が圧縮強度の発現に及ぼす影響
(ポルトランドセメント協会)

5) 養生方法の影響

養生方法は、セメントの水和反応と密接な関係があるため、コンクリート強度に及ぼす影響は極めて大きい。養生条件は養生湿度と養生温度に分けて考えることができる。養生湿度を変化させた場合の材齢に伴うコンクリート強度の発現状況を図-2・2・21に示す。図によれば、材齢約90日の時点で、打設後一貫して空中養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、湿潤養生を行った場合の約1/2にしか達していない。一方、養生温度が強度発現に及ぼす影響は、とくに初期材齢において顕著である。図-2・2・22に示すように、初期材齢における強度は養生温度が高いほど大きい、長期材齢ではこの関係が逆転する。

コンクリートの初期圧縮強度の推定には、積算温度(マチュリティー, M)を用いることができる。JASS 5では、寒中コンクリートの調合設計に際し、次式によって得られる積算温度に基づいて水セメント比を決定してよいと

積算温度

養生温度と時間の積のことで、熟成度またはマチュリティーとも呼ばれる。

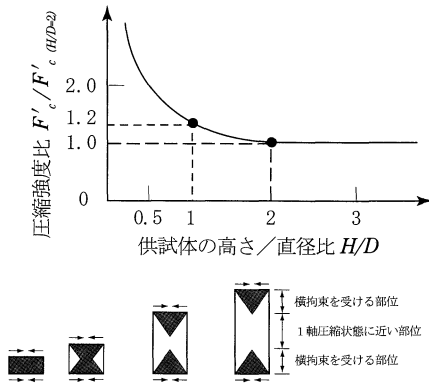


図-2-2-23 供試体の高さ/直径比 (H/D) と圧縮強度との関係

している。

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta + 10) \quad (2.2.14)$$

ここに、 z ：材齢(日), n ：構造体コンクリートの強度管理の材齢(日)

θ ：材齢 z (日) におけるコンクリートの平均養生温度 (°C)

6) 供試体形状の影響

わが国では標準供試体として、高さ と直径の比が 2 である $\phi 15 \times 30\text{cm}$ または $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱体を用いているが、構造物からコアを切り取る場合など、しばしばこの比率の供試体が得られないことがある。図-2-2-23 は円柱供試体の高さ - 直径比 (H/D) と H/D が 2 の供試体に対する圧縮強度比の関係を示したものである。図によれば、H/D が小さいほど圧縮強度は大きくなり、その程度は H/D が 1 以下の場合に著しい。これは端面摩擦によって、供試体が膨張したときに横拘束力が働くためである。JIS A 1107 ではコア試験に対し、端面摩擦の効果に対する強度の補正係

高さ-直径比 (H/D)

円柱供試体の形状を表す指標で、細長比とも呼ばれる。直方供試体であれば、直径の代わりに断面の辺長が用いられ、高さ-辺長比が同様な指標となる。

端面摩擦

コンクリートの載荷試験において、供試体の端面(載荷面)と載荷板との間に生じる摩擦のこと

コア試験

コンクリート構造物から円柱形のコアを抜き取って行う強度試験。JIS A 1107 に、供試体の採取方法が規定されている。

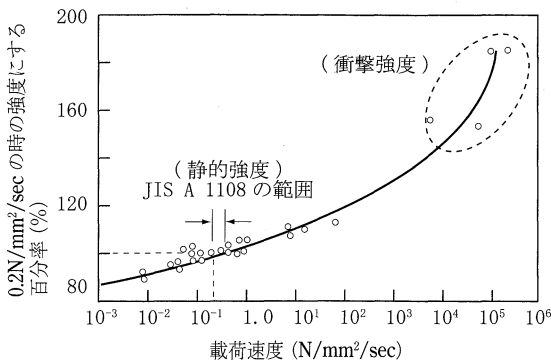


図-2-2-24 載荷速度が圧縮強度に及ぼす影響 (McHenry&Shideler の図に加筆)

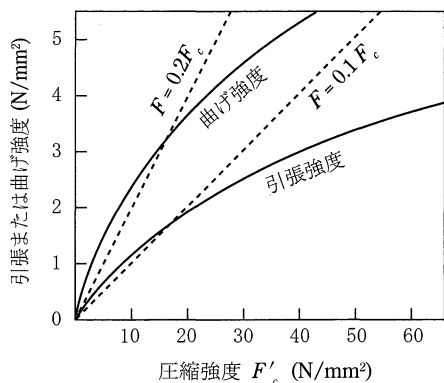


図-2.2.25 引張・曲げ強度と圧縮強度との関係

数を規定している。

7) 荷速度の影響

図-2.2.24に示すように、荷速度が大きくなるほどコンクリート強度は高くなる。これは、荷速度が供試体内部のひび割れの進展速度を上回るために生じる現象である。そのため、内部ひび割れがあまり発生していない荷初期における荷速度の変動は、コンクリート強度にそれほど影響を及ぼさない。

(c) 引張強度

コンクリートの引張強度 (F_t) は、図-2.2.25に示すように普通強度レベルでは圧縮強度の1/8-1/13で極めて小さい。また脆(ぜい)度係数の

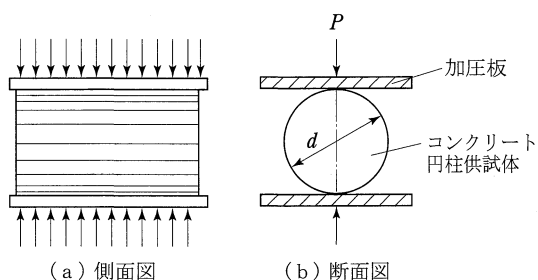


図-2.2.26 割裂引張試験法

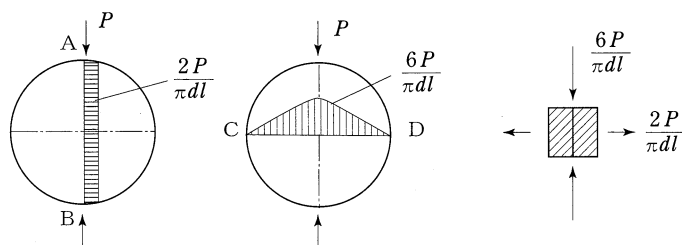


図-2.2.27 弾性円板の内部応力分布 (平面応力状態)

脆度係数

引張強度に対する圧縮強度の比。コンクリートの脆さ(もろさ)を表す一つの指標

平面応力状態

ある特定の平面内のみ応力が生じ、この平面に垂直な方向の応力は生じない(ひずみは生じる)状態

値は高強度のコンクリートほど大きい。

一般に、コンクリートの引張強度は、図-2・2・26に示すように、圧縮強度用供試体を横にして、断面の直角方向に加圧する**割裂試験**で求める。この試験方法によって得られる強度を**割裂引張強度**という。図-2・2・27は弾性円板に上下から線荷重を加えた場合の内部応力分布を示したものである。図から明らかなように、断面中心付近では、 x 方向に引張力が、また y 方向にその3倍の圧縮力が働く。コンクリートの引張強度は前述のように圧縮強度のおよそ1/10であるため、この円板は引張破壊し、引張強度 F_t は次式によって求めることができる。

$$F_t = 2P / (\pi dl) \quad (2.2.15)$$

ここに、 P :最大荷重 (N)、 d :円柱体の直径 (mm)、 l :円柱体の長さ (mm)

割裂試験による供試体の破壊面は、図-2・2・27に示すように1軸引張応力状態にはないが、直接引張強度とほぼ等しい値が得られる。一方、直接引張試験は、試験が困難なこともあり、一般にあまり行われない。

(d) 曲げ強度

コンクリートの曲げ強度は図-2・2・25に示すように、普通強度レベルでは圧縮強度の1/5～1/8程度で、引張強度のおよそ1.5～1.8倍である。曲げ強度は断面に生じた**引張縁応力**の最大値を表すため、材料が線形弾性体であれば原理的には引張強度と同じ値になるはずである。曲げ強度が引張強度より大きくなるのは、曲げ破壊時において断面内の引張側に塑性変形が生じるためである(図-2・2・28参照)。

コンクリートの曲げ試験方法として、JIS A 1106では図-2・2・29に示すような3等分点荷重方法が、また、DIN(ドイツ規格)では中央集中荷重方法が、またASTM(アメリカ規格)では両方法が採用されている。いずれの場合も曲げ強度(F_b)は次式によって求められている。

$$F_b = M/Z \quad (2.2.16)$$

ここに、 M :最大曲げモーメント(N・m)、 Z :断面係数(幅 b 、高さ h の長方形断面の場合は $Z = bh^2/6(m^3)$)

しかし、得られる**曲げ強度**は荷重方法によってかなり異なり、図-2・2・30に示すように、3等分点(2点集中)荷重による場合よりも中央(1点)集中荷重とした場合の方が曲げ強度が大きくなる(理由は右欄に記す)。

(e) せん断強度

コンクリートのせん断強度(F_s)は、図-2・2・31に示すような直接せん断試験による場合、圧縮強度のおよそ1/4～1/7となる。

コンクリートのせん断試験方法として各種の方法が提案されているが、直接せん断試験は必ずしも容易ではないため、間接的にせん断強度を求める方法として**モールの応力円**が用いられる。すなわち、図-2・2・32を参照して、せん断強度(F_s)は次式によって求められる。

割裂試験

わが国の標準引張試験方法としてJIS A 1113に規定されている。これは、赤沢常雄が考案し1943年に土木学会誌に発表したものであるが、海外では、同様な方法がBrazilian Testとして知られている。

引張縁応力

曲げを受ける断面における引張側の縁応力で、弾性理論では、次式によって求められる。すなわち、引張縁応力=(曲げモーメント)/断面係数。曲げモーメントが最大になる時のこの値が曲げ強度である。

曲げ強度と荷重方法

荷重方法によって曲げ強度が異なる理由は必ずしも明確ではないが、供試体全体の中での高い応力領域(高曲げモーメント領域)における強度の確率分布、ひび割れの進展経路の自由度などが考えられる。

モールの応力円

弾性体内の1点における任意方向の面に作用する垂直応力とせん断応力との関係を図示したときに得られる円。モール(C. O. Mohr, 1835-1918)は、ドイツの応用力学者

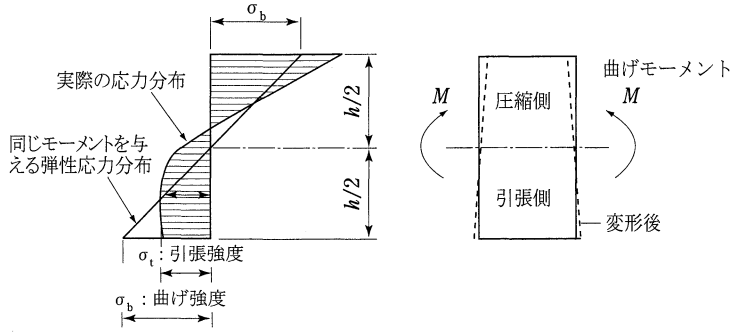


図-2・2・28 曲げを受ける供試体の断面内応力分布

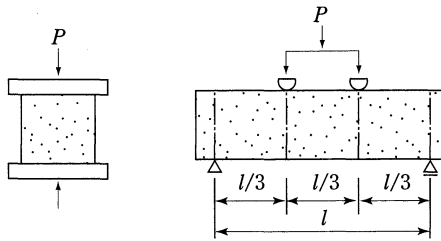


図-2・2・29 曲げ試験方法

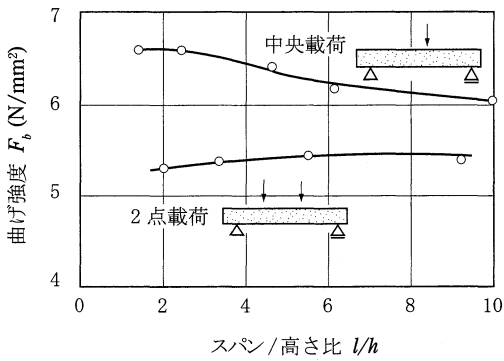


図-2・2・30 曲げ強度に及ぼす載荷方法と供試体形状の影響

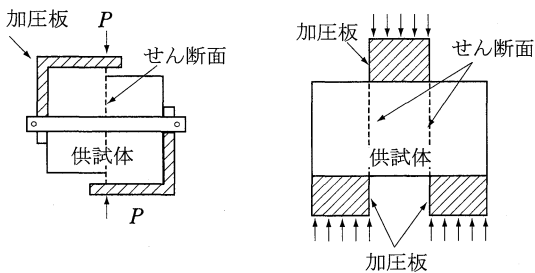


図-2・2・31 直接せん断試験方法

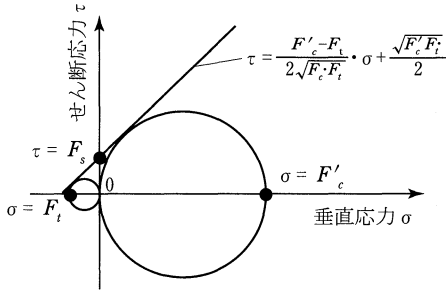


図-2.2.32 モールの応力円によるせん断強度の推定

$$F_s = \sqrt{F'_c + F_t} / 2 \quad (2.2.17)$$

ここに、 F'_c : 圧縮強度、 F_t : 引張強度

RC 梁、柱、耐震壁などに生じるせん断ひび割れは、斜め引張応力によるものであり、この場合のひび割れ強度は引張強度と同程度と見なすのが妥当である。

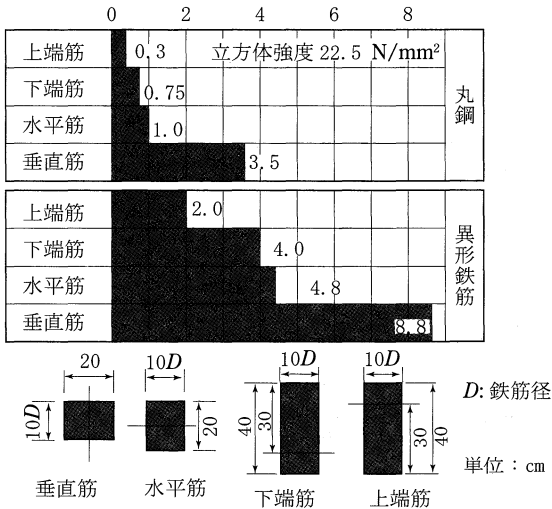


図-2.2.33 付着強度に及ぼす鉄筋位置と方向の影響 (Isteg-Stahl 社)

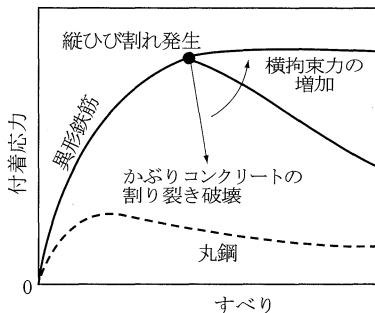


図-2.2.34 付着応力-すべり曲線に及ぼす横拘束の影響

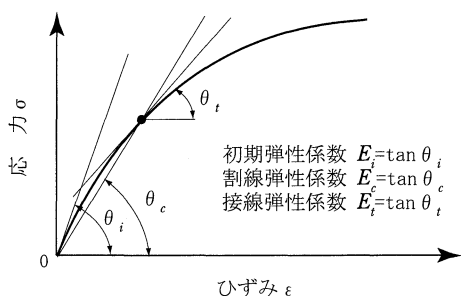


図-2-2-35 弾性係数の定義

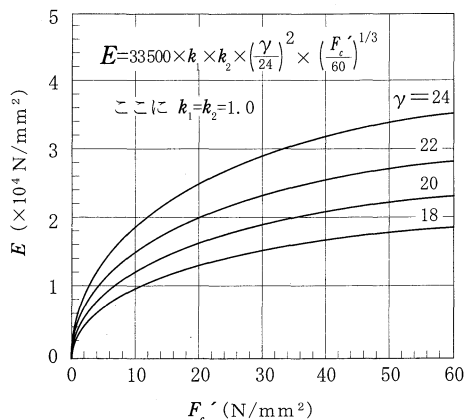


図-2-2-36 ヤング係数と圧縮強度との関係 (RC 規準)

(f) 付着強度

コンクリートの付着強度は、タイル-モルタル・コンクリート間、鉄筋-コンクリート間などの力の伝達を健全に行ううえで重要である。とくに RC 構造物では、鉄筋とコンクリートが一体となって相互に力を伝達し合いながら外力に抵抗することが構造上の基本条件である。

付着応力は鉄筋表面の単位面積あたりに生じる平均応力で表され、付着強度は一般に破壊時の付着応力の大きさとして表される。付着強度に影響を及ぼす要因としては、鉄筋の表面状態、コンクリートの強度、鉄筋の位置および方向 (図-2-2-33)、かぶり厚さ (図-2-2-34)、鉄筋周囲の横補強筋 (図-2-2-34 参照)、コンクリートの締固めなどがある。

(3) 変形性質

(a) 弾性諸定数

1) ヤング係数

コンクリートの応力-ひずみ曲線は、荷重初期の段階から非線形となるため、元来、完全弾性材料における応力とひずみの比であるヤング係数 (または弾性係数、 E_c) は一義的には定められない。そのため、図-2-2-35 に示すように目的に応じて、種々の弾性係数が定義される。これらのうち、構造設計には通常、圧縮強度の 1/3 の応力点と原点を結ぶ直線の勾配で表

用語の解説

付着の劣化と構造性能

鉄筋とコンクリートの付着が損なわれる例として、短期的には地震時のせん断力による付着破壊、長期的には鉄筋の発錆による付着劣化などが挙げられる。鉄筋とコンクリートの一体性が損なわれることから、いずれも、構造部材のぜい性破壊に結びつく可能性が高い。

かぶり厚さ

RC 構造物において、鉄筋の表面からこれを覆うコンクリート表面までの最短寸法をいう。その最小値は、RC 構造物の耐火性や耐久性にも密接に関係する。

完全弾性材料

応力とひずみが完全に比例する理想的な弾性材料

ヤング係数、弾性係数

JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法)に、静的な圧縮力を受けるコンクリート円柱供試体、および構造体から採取した円柱コア供試体の縦方向の弾性係数を求める試験方法が規定されている。ここでは、最大荷重の 1/3 に相当する応力点と縦ひずみ 50×10^{-6} の時の応力点とを結んだ割線弾性係数を採用している。

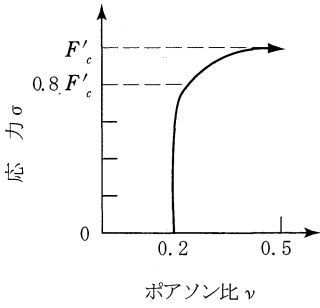


図-2-2-37 ポアソン比と応力レベルの関係

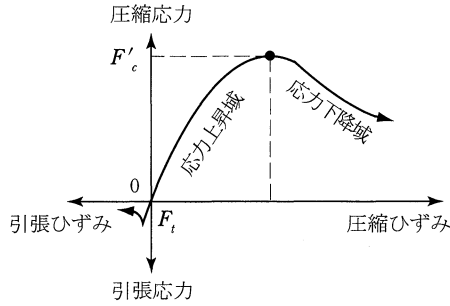


図-2-2-38 コンクリートの応力-ひずみ曲線の概要

される割線弾性係数（セカントモデュラス, $E_{1/3}$ ）が用いられる。

わが国のRC規準ではコンクリートのヤング係数の表示式として次式を用いている。この式を用いて求めたヤング係数の値を図-2-2-36に示す。

$$E_{1/3} = 3.35 \times 10^4 \times (\gamma / 24)^2 \times (F'_c / 60)^{1/3} \quad (2.2.18)$$

ここに、 $E_{1/3}$ ：ヤング係数 (N/mm^2)、 γ ：コンクリートの気乾単位容質量 (kN/m^3)、 F'_c ：圧縮強度 (N/mm^2)

2) ポアソン比

コンクリートのポアソン比 (ν) は载荷応力に応じて図-2-2-37に示すように変化する。コンクリートの初期ポアソン比は一般に1/5~1/7程度であり、RC規準では、コンクリートの種類にかかわらず、 $\nu = 0.2$ を採用している。ポアソン比が急増する圧縮応力レベルは最大応力の約80%程度であり、前述の臨界応力度にほぼ相当する。

3) セン断弾性係数

コンクリートのせん断弾性係数 (G) は、弾性材料の場合に成立する次式を用いて、ヤング係数 (E) とポアソン比 (ν) とから求めることができる。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.2.19)$$

ここで、 $\nu = 1/6$ とすると、 $G \approx 0.43E$ となる。

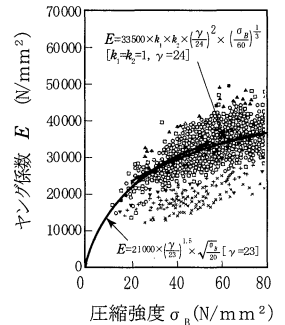
(b) 応力-ひずみ曲線

構造解析のためには、载荷の初期から終局にいたるまでの、全領域にわたる応力 (σ) - ひずみ (ϵ) 関係に関する詳細な情報が必要となる場合が多い。また、コンクリートは主に圧縮材として使用されるため、圧縮载荷時の $\sigma - \epsilon$ 曲線（以下、単に $\sigma - \epsilon$ 曲線と呼ぶ）が重要となる。コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線の概要を引張時も含めて図-2-2-38に示す。コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線は厳密には载荷初期から非線形となる。これは、圧縮強度の項で述べたように、コンクリート内部の微小破壊が応力の増大に伴い徐々に進行するからである。さらにコンクリートは、最大耐力到達後に内部ひび割れの急激な進展によって耐力力が低下するひずみ軟化材料であるため、 $\sigma - \epsilon$ 曲線の勾配は負となる。

用語の解説

ヤング係数の表示式

図中には、種々の骨材および混和剤を用いたコンクリートのデータが一緒に掲載してある。一見するとばらつきが大きいのが、骨材（係数 k_1 ）と混和剤（係数 k_2 ）の種類が決まれば、図中に示した表示式によっておおむね良い推定値が得られることが知られている（RC規準）。



せん断弾性係数

材料のずれ変形に対する抵抗の大きさを表す弾性係数（一般に G で表記）。せん断応力 τ とせん断ひずみ γ との間の比例定数であり、 $\tau = G \gamma$ の関係がある。

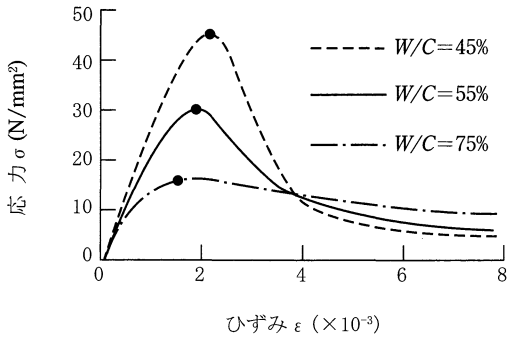


図-2-2-39 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす水セメント比 (W/C) の影響

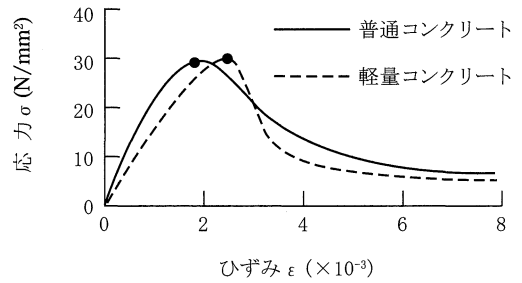


図-2-2-40 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす骨材種類の影響

コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線は、圧縮強度の場合と同様に、コンクリートの品種・品質および試験方法によって異なる。以下、材料学的な視点に基づき、 $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状とその力学的意味を考えながら主な要因の影響について考察する。

1) 水セメント比の影響

図-2-2-39は、 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす水セメント比、すなわちコンクリートの強度レベルの影響を示したものである。圧縮強度が大きいコンクリートほど応力上昇域の剛性および圧縮強度時のひずみは大きくなり、応力下降域の下り勾配が急になる。すなわち、コンクリート強度が大きいものほど、破壊が脆性的である。なお、応力下降域の $\sigma - \epsilon$ 曲線は、ひずみが約 4×10^{-3} を超えるような高ひずみの領域(収束領域と呼ぶ)では、コンクリート強度にかかわらずほぼ類似の形状を示す。これは、この領域では供試体内部のひび割れが著しく、荷重は主としてひび割れ面における摩擦や、粗骨材のかみ合わせ作用によって負担されるようになり、粗骨材やモルタル自身の強度はコンクリートの耐荷力にあまり関与しなくなるためである。

2) 粗骨材の影響

図-2-2-40は、 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす粗骨材の品質の影響を示したものである。水セメント比が等しい場合は、川砂利を使用した普通コンクリート

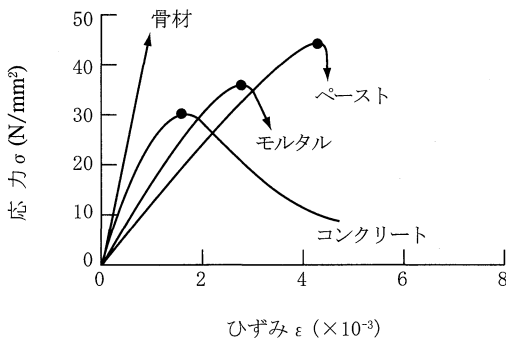


図-2-2-41 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす骨材混入量の影響

メモの欄

の方が軽量コンクリートに比べて、応力上昇域の剛性が大きい。また、応力下降域の勾配も緩やかで、破壊が若干延性的である。

図-2・2・41は、 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす骨材混入量の影響を示したものである。初期勾配、すなわちヤング係数に関しては、次のような複合則により説明される。

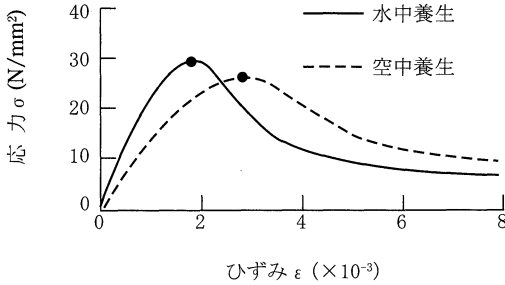


図-2・2・42 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす養生方法の影響

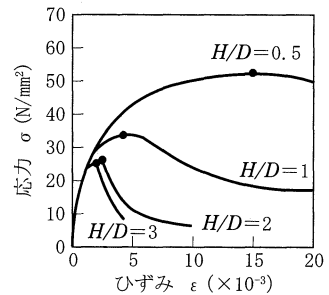
端面摩擦

コンクリートの荷重試験において、供試体の端面（荷重面）と荷重板との間に生じる摩擦のこと

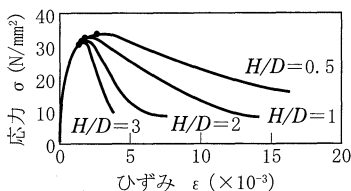
テクニカルワンポイント

供試体が細長いほど破壊は脆性的

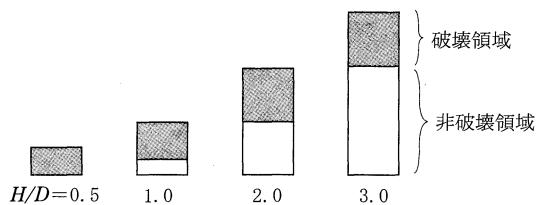
付図-1および付図-2はそれぞれ供試体-荷重板間に摩擦（端面摩擦）がある場合とない場合について、 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす供試体の高さ-直径比 (H/D) の影響を示したものである。付図-1によれば、圧縮強度の場合と同様に、 $\sigma - \epsilon$ 曲線も端面摩擦による横拘束の影響を著しく受ける。一方、付図-2によれば、たとえ端面摩擦を取り除いても、 $\sigma - \epsilon$ 曲線の応力下降域の形状は、 H/D が小さいほど延性的となる。これは、コンクリートの破壊が供試体のある限られた領域で生じること（ひずみの局所化）に起因する現象である（付図-2(b)）。また、付図-1と付図-2を見比べると、 $H/D=2$ および3の供試体から得られる $\sigma - \epsilon$ 曲線は、端面摩擦の影響をほとんど受けないことがわかる。



付図-1 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす供試体の高さ/直径比 (H/D) の影響 (端面摩擦がある場合)



付図-2 (a) $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす供試体の高さ/直径比 (H/D) の影響 (端面摩擦がない場合)



付図-2 (b) 供試体の破壊領域のイメージ (破壊成分を破壊領域に集約)

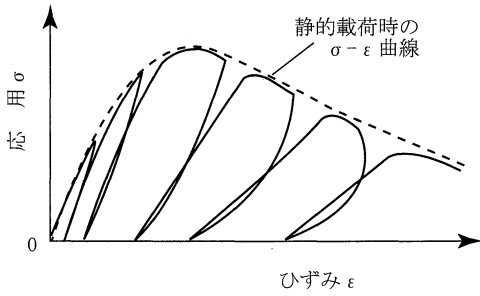


図-2・2・43 繰返し荷重時のσ - ε 曲線

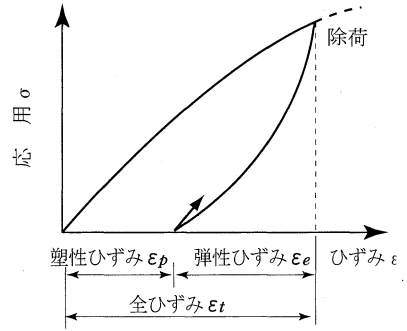


図-2・2・44 ひずみの成分分解

$$E_c = V_a E_a + (1 - V_a) \cdot E_m \quad (2.2.20)$$

ここに、 E_c 、 E_a 、 E_m ：それぞれ、コンクリート、粗骨材、モルタルのヤング係数、 V_a ：粗骨材の容積比

一方、圧縮強度に関しては**複合則**は成立せず、材料が非均質になるほど強度が低下する。逆に、材料が均質なほど強度は大きくなるが破壊は脆性的である。

3) 養生方法の影響

図-2・2・42は、 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす養生方法の影響を示したものである。空中養生を行ったコンクリートは、水中養生を行ったコンクリートに比べて応力上昇域の剛性および圧縮強度は小さいが、応力下降域の挙動が延性的となる。この理由として、空中養生を行ったコンクリートでは初期の乾燥過程で内部に初期応力が生じること、水和過程において水分の補給が十分に行われず、内部の組織が緻密化していないことなどが考えられる。

4) 繰返し応力の影響

図-2・2・43は、繰返し荷重を受けるコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線を示したもので、図中には静的荷重時の $\sigma - \epsilon$ 曲線(破線)を併示してある。繰返し荷重時の $\sigma - \epsilon$ 曲線の包絡線は、静的荷重時の $\sigma - \epsilon$ 曲線とほぼ一致する。また、図-2・2・44は、あるひずみレベルまで荷重した後、除荷・再荷重した場合の $\sigma - \epsilon$ 曲線を模式的に示したものである。コンクリートには低ひずみの段階から非回復性の**塑性ひずみ**が存在し、図-2・2・43からもわかるように、この塑性ひずみは全体のひずみの増加に伴い増大する。

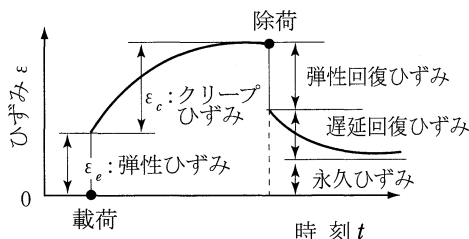


図-2・2・45 クリープひずみ ϵ_c の定義

用語の解説

複合則

複数の材料からなる複合材料の特性(強度、弾性係数など)が、使用した各材料の容積比率に応じてその複合材料の性質に寄与するという法則

塑性ひずみ

材料に加わっている荷重が解放された後でも元に戻らないひずみ。これに対し、元に戻るひずみを弾性ひずみという。

(c) クリープ

コンクリートにクリープ現象が生ずる原因としては、セメントゲル内の水の圧出、セメントペーストの粘性流動、結晶内部のすべり、微細ひび割れの進行などが考えられる。図-2.2.45は、低応力レベルの荷重をある一定時間加えた後、除荷した場合のコンクリートのひずみの進行状況を示したものである。このようにクリープひずみは荷重の初期に増加が著しく、徐々に増加率が減少し、載荷荷重が小さい場合は普通3~4年で一定値(終局クリープひずみ)に収束する。

クリープひずみ (ϵ_c) と載荷直後に生じる弾性ひずみ (ϵ_e) との比をクリープ係数 ($\phi_t = \epsilon_c / \epsilon_e$) という。この係数は、とくにプレストレストコンクリート構造において、プレストレスの減少量を計算する際に重要となる。

コンクリートのクリープに関しては、次の二つの法則がほぼ成立することが知られている。

- ① デービス・グランビルの法則：載荷応力が圧縮強度の1/3程度以下の範囲では、終局クリープひずみは載荷応力にほぼ比例する。
- ② ホイットニーの法則：図-2.2.46に示すように、材齢 t_1 で載荷された場合のクリープの進行は、材齢 t_0 で載荷された場合の材齢 t_1 以後のクリープの進行状況に等しい。

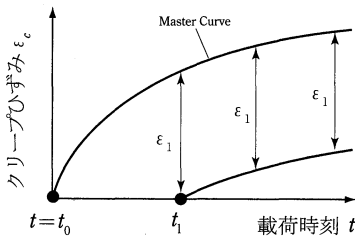


図-2.2.46 ホイットニーの法則

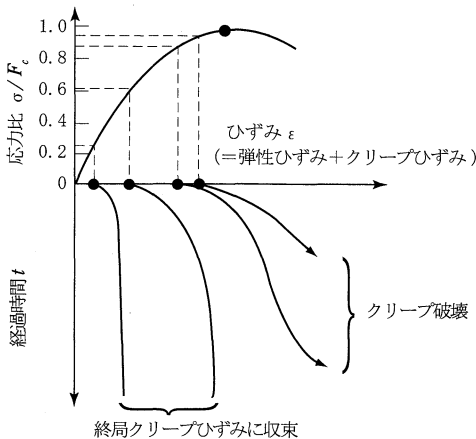


図-2.2.47 持続応力レベルとクリープの関係

用語の解説

クリープ

材料が持続荷重を受けるとき、時間とともにひずみ(変形)が増大する現象。RCの構造設計で用いるヤング係数比の設定、プレストレストコンクリートの設計、床スラブの長期たわみの予測などを行う際の重要な要因である。

セメントゲル

セメント水和物のこと。セメント水和物は、コロイド粒子の凝集物であるC-S-Hゲルが主体をなしていることからこのように呼ばれる。

プレストレストコンクリート

設計荷重によって生じる引張応力と相殺するように、PC鋼材によってあらかじめ圧縮力を与えたコンクリート

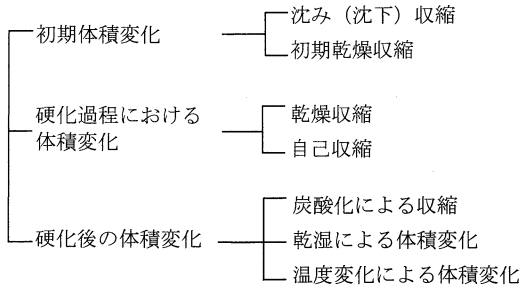


図-2・2・48 コンクリートの体積変化の分類

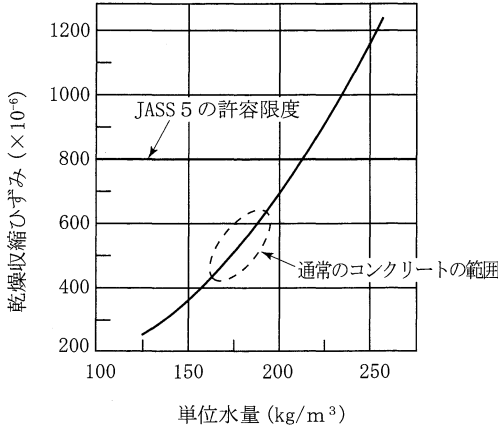


図-2・2・49 単位水量と乾燥収縮ひずみとの関係

これらの二つの法則によれば、コンクリートのクリープのひずみは、載荷応力が大きいほど、載荷時期が早いほど大きくなる。そのため、日本建築学会のプレストレスコンクリート設計規準では、終局クリープ係数の値を、**ポストテンション**の場合に対して2、**プレテンション**の場合に対して2.5と定めている。

一方、載荷荷重がある限度よりも大きくなると、図-2・2・47のようにクリープひずみの増加率は時間とともに増大し、**クリープ破壊**を生じる。クリープ破壊を起こさない限界の応力度を**クリープ限度**という。**クリープ限度**は圧縮強度の70～90%程度であり、前述の臨界応力度にほぼ相当する。

(4) 体積変化・ひび割れ

(a) 体積変化

コンクリートの体積変化は、およそ図-2・2・48のように分類できる。以下、とくに重要と考えられる乾燥収縮、自己収縮、および温度変化による体積変化について説明する。

コンクリートの**乾燥収縮**は、コンクリート中の水分の逸散によるもので、とくに骨材の吸水率および単位水量の影響を著しく受ける。例えば、単位水量 180kg/m^3 で乾燥収縮ひずみは約 600×10^{-6} であり、コンクリートの**伸び能力** (約 150×10^{-6} と考えてよい) を上回るため、乾燥収縮が周

ポストテンション工法

コンクリートの硬化後にPC鋼材を緊張してプレストレスを加える工法。型枠内にあらかじめシース(さや)と呼ばれる管を設置しておき、コンクリートを打ち込む。

プレテンション工法

コンクリートの硬化前にPC鋼材を緊張してプレストレスを加える工法。一般に、型枠両端のアバットと呼ばれる固定アンカー台の間でPC鋼材を緊張し、その後、型枠内にコンクリートを打ち込む。

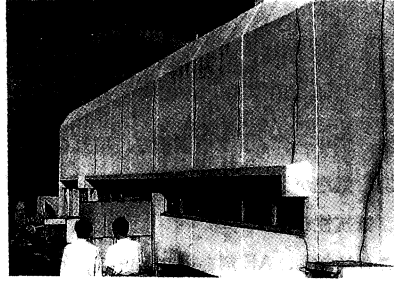
伸び能力

材料が引張破壊に至るまでに発揮できる引張変形またはひずみ量

テクニカルワンポイント

収縮目地なら収縮目地らしく

コンクリート外壁の目地には、積極的に収縮ひび割れを吸収することを目的として設けられる収縮目地と、単に美観上の要求から設けられる化粧目地とがある。



写真の建物の外壁には、コンクリートの収縮によるひび割れが見事に目地を外して入っている。化粧目地がひび割れの吸収にまったく役に立たず、結局のところ化粧どころではなくなってしまった例である。ちなみに、目地にひび割れの吸収効果を持たせるためには、少なくとも壁厚さの1/5程度の目地深さをとるべきであるとされている。

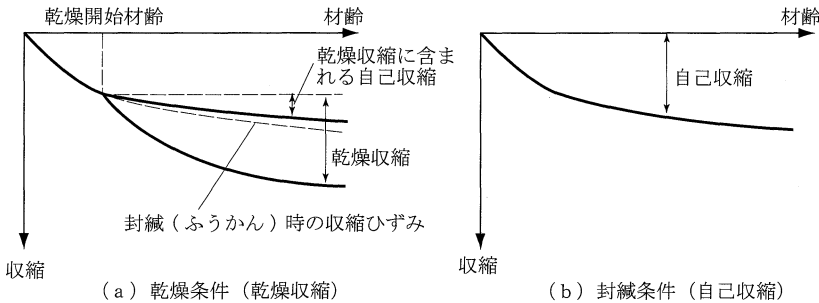


図-2-2-50 収縮ひずみの概念図 (丸山)

囲の拘束によって妨げられるとひび割れが発生する。

コンクリートの自己収縮は、セメントの水和に伴う体積減少で、セメントペーストの骨格が形成された凝結始発以降に生じる。

従来の普通コンクリートでは実用上無視できる値であったが、近年開発されてきた高強度コンクリートや高流動コンクリートのように、セメントなどの粉体量が多いコンクリートでは無視できない収縮である。自己収縮と乾燥収縮による収縮ひずみの概念図を図-2-2-50に示す。

マスコンクリートの内部では、セメントの水和熱により、大気温よりも温度が20～40℃高くなることもある。温度が上昇している初期材齢においては、コンクリートのヤング係数が小さく、クリープも大きいので構造体が拘束されていても膨張による圧縮応力は比較的小さい。しかし、その後、温度が下降し始めると収縮による引張応力によってコンクリートにひ

マスコンクリート

部材断面の最小寸法が大きく(目安として、80cm以上)、セメントの水和熱による温度上昇で有害なひび割れ(温度ひび割れという)が生じるおそれがある部分のコンクリート。マスコンクリートの温度ひび割れは、内部拘束によるものと外部拘束によるものの2つのタイプに大別される。

2.2 コンクリート

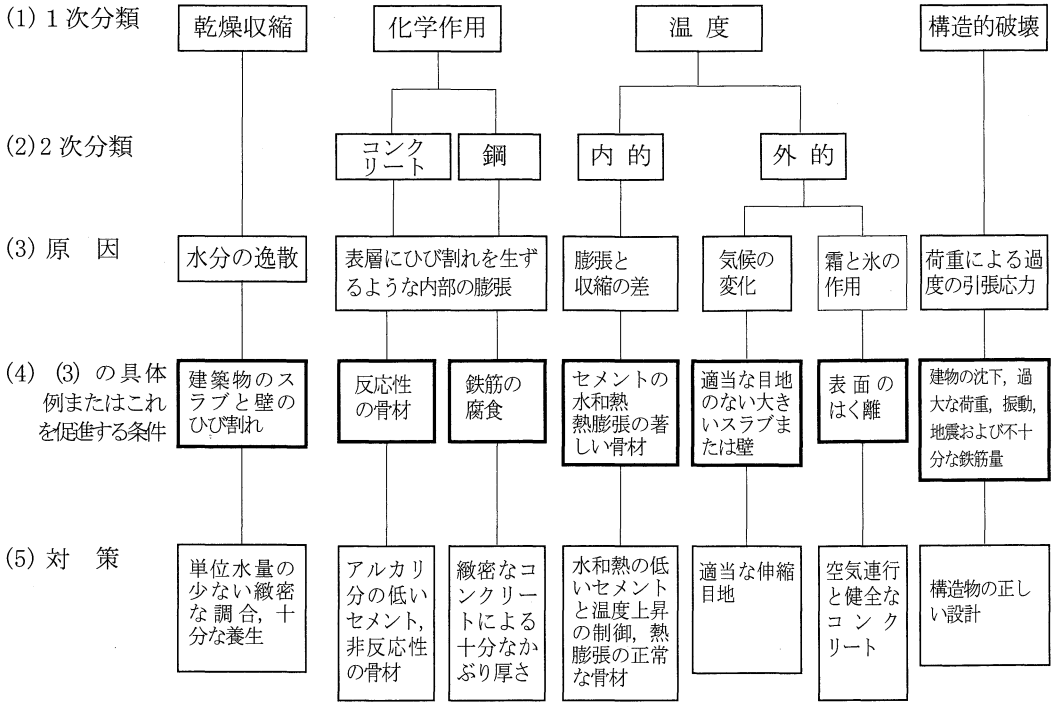
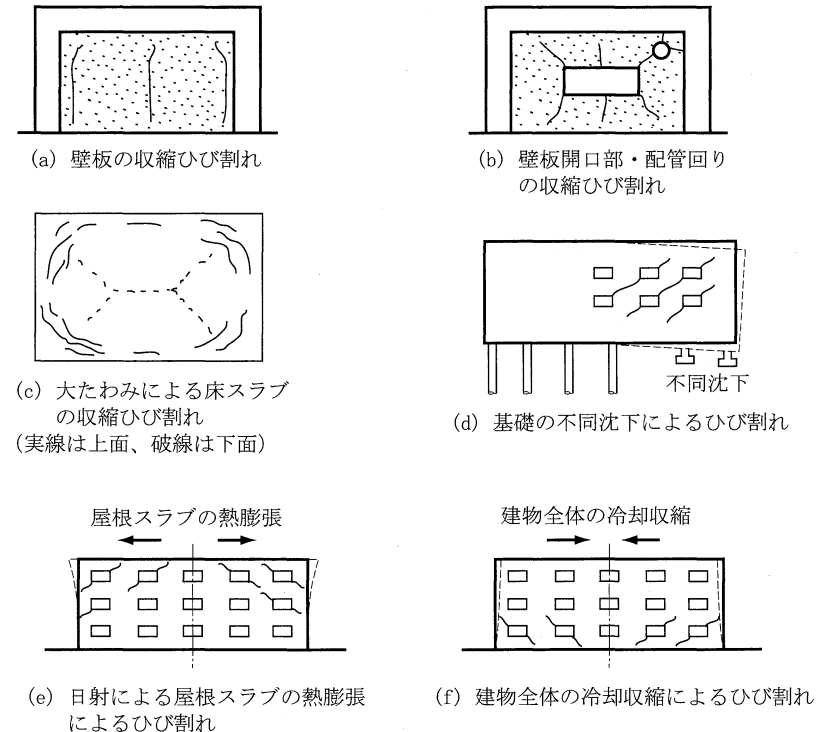


図-2.2.51 硬化コンクリートのひび割れの原因と対策 (Mercer)



(日本コンクリート工学協会「コンクリート技術の要点'07」を一部修正)

図-2.2.52 RC建物に生じる主なひび割れパターン

メモの欄

び割れを生じやすい。

(b) ひび割れ

硬化後のコンクリートに発生する主要なひび割れの原因と対策を図-2・2・51, またRC建物に比較的好く見られるひび割れパターンを図-2・2・52に示す。硬化コンクリートにひび割れが発生する根本的な原因として、次のような力学的欠点が挙げられる。すなわち、①伸び能力が小さいこと、②引張強度が小さいこと、③体積変化（乾燥収縮、温度伸縮など）が大きいこと、などである。

(5) 熱的性質

コンクリートの熱膨張係数は常温の範囲では、 $(7 \sim 13) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度である。これは鋼の線膨張係数とほぼ等しく、RC構造が成り立つための前提条件の一つとなっている。

コンクリートは構造材料の中では耐熱性および耐火性に優れているが、図-2・2・53および表-2・2・22に示すように、長時間高温にさらされると強度および弾性係数が低下する。

(6) 耐久性

(a) コンクリートの劣化原因

鉄筋コンクリートの耐久性を考えるうえで、コンクリートの耐久性を確保することは極めて重要である。図-2・2・54に、鉄筋コンクリートに見ら

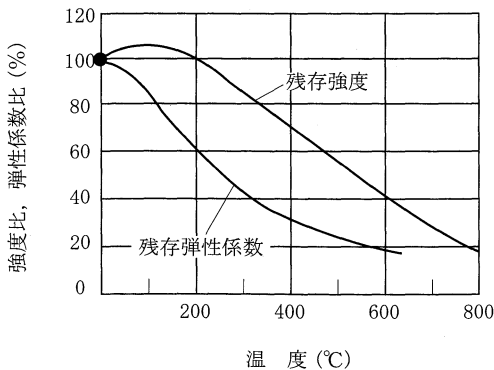


図-2・2・53 火熱を受けたコンクリートの残存強度と残存弾性係数

表-2・2・22 加熱下のコンクリートの反応

加熱温度	コンクリートの反応
100°C	自由水が逸散
260°C	セメント水和物中の結晶水の脱水開始
500°C	Ca(OH) ₂ の脱水分解が顕著、強度は半減
750°C	CaCO ₃ のガス分解開始、強度の喪失

用語の解説

熱膨張係数

一般に、単位温度変化あたりのひずみの変化量。長さLの棒がΔtの温度上昇に対し、ΔLだけ伸びたとする。このとき、関係式 $\Delta L = \alpha L \Delta t$ が成立し、Δtを無限小としたときの係数αの値と定義される。線膨張率ともいう。

鉄筋コンクリート (RC) 構造の3大原則

- ① 圧縮力はコンクリートが、引張力は鉄筋が負担(耐荷力、耐震性)
- ② 鉄筋とコンクリートの熱膨張係数はおおむね等しい。よって多少の温度変化があっても、反ったり、破壊したりすることはない(耐久性)。
- ③ 鉄筋は腐食や火熱に弱い。これをかぶりコンクリートのアルカリ性や耐火性で保護(耐久性、耐火性)

れる主な劣化現象とその原因が示してある。ここではコンクリートの劣化原因のうち、とくに重要と考えられる事項について述べる。

コンクリートの**早期劣化**を防止し、耐久性を確保するためには、通常、ひび割れが生じにくいこと、中性化に対する抵抗力があること、凍結融解作用に対する抵抗力があること、アルカリ骨材反応が生じないこと、塩化物含有量が少ないこと、などが要求される。前述したように JASS 5 では、コンクリートの基本的な耐久性を確保するため、材料・調合に関する規定を設けている（前述の表-2.2.13 参照）。

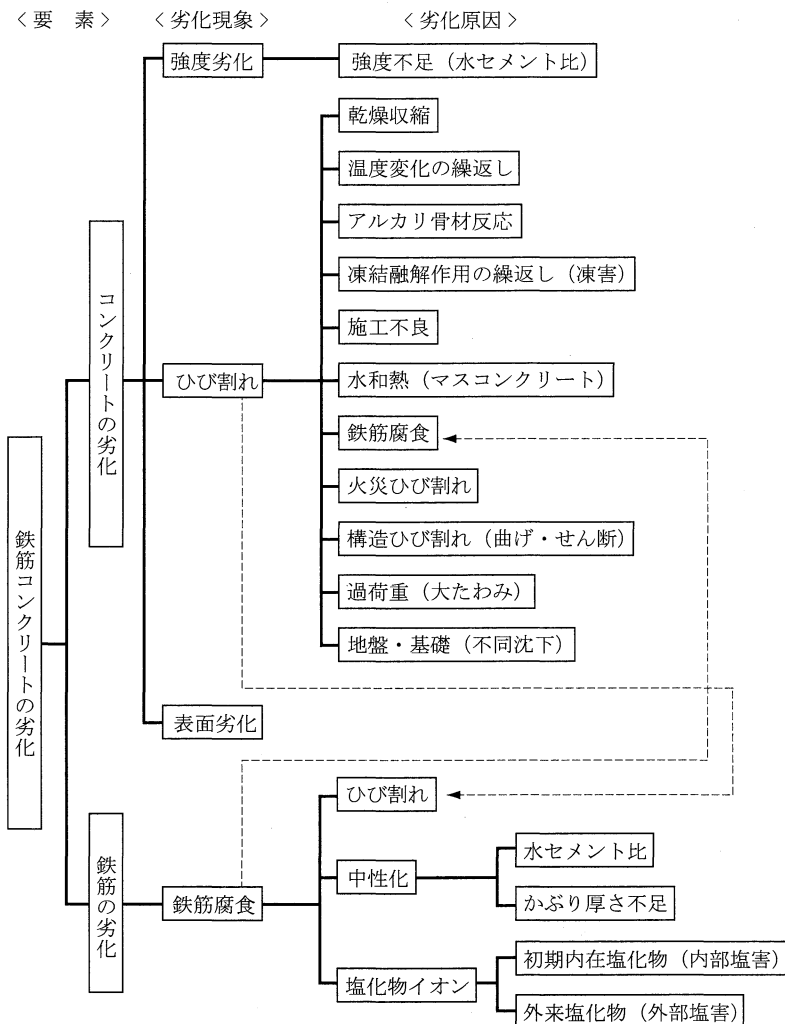
(b) 中性化

コンクリートは、元来強いアルカリ性 (pH12 強) であり、鉄筋の発錆を防ぐのに有効であるが、材齢の経過とともに空中の炭酸ガスと次のよう

用語の解説

促進中性化試験

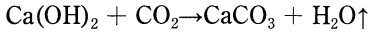
JIS A 1153 に規定されている。中性化の促進条件は、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、二酸化炭素濃度 $5 \pm 0.2\%$ とする。測定は、1, 4, 8, 13, 26 週になったときに行い、供試体の中性化深さの平均値、中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{週}}$) などを報告する。



(日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針 (案)・同解説)

図-2.2.54 鉄筋コンクリートの劣化現象の分類

な化学反応を起こして表層部から徐々にアルカリ性を失う。



鉄筋周囲のかぶりコンクリートが中性化し、水や空気が浸透してくると鉄筋が錆び、RC構造物の耐力および耐久性を損なう。中性化速度は、例えば、次のような浜田式で与えられる。

$$t = 7.2x^2 \tag{2.2.21}$$

ここに、 t : コンクリートの耐用年数、 x : 中性化深さ (cm)

いま、鉄筋に対するコンクリートのかぶり厚さを 3cm とすると $t \approx 65$ 年が得られる。これは通常の RC 構造物の耐用年数とされている期間にほぼ等しい。ただし、コンクリートの中性化は、いかなる条件下でも一様に進行するというわけではなく、水セメント比、セメントの種類、骨材の種類、表面活性剤の使用、環境条件、仕上げなどによって相当異なる。これらの各種要因の影響を考慮した以下のような中性化速度の計算式が岸谷によって提案されている。

・水セメント比が 60% 以上のとき

$$t = \frac{0.3(1.15+3w)}{R^2(w-0.25)} x^2 \tag{2.2.22(a)}$$

・水セメント比が 60% 以下のとき

$$t = \frac{7.2}{R^2(4.6w-1.76)^2} x^2 \tag{2.2.22(b)}$$

ここに、 w : 水セメント比、 x : 中性化深さ (cm)、 t : 期間 (年)、 R : 中性化比率 (表-2.2.23 参照)

中性化の判定は、一般にフェノールフタレイン 1% アルコール溶液をコンクリート断面に塗布して行う。

(c) 凍結融解作用

コンクリートに含まれている水分が凍結すると体積は約 1.1 倍に膨張し、凍結融解が繰り返されることによって、コンクリート内部にひび割れが生じる。このような凍結融解作用に対する耐久性を増大させるには、膨張圧に対してクッションとなる微細空気泡をコンクリート中に連行してお

表-2.2.23 各種コンクリートの中性化比率 (R) の値 (岸谷)

セメント	細粗骨材 表面活性剤	川砂・川砂利		
		プレーン	AE 剤	分散剤
普通ポルトランドセメント		1.0	0.6	0.4
早強ポルトランドセメント		0.6	0.4	0.2
高炉セメント (スラグ 30 ~ 40% 前後)		1.4	0.8	0.6
高炉セメント (スラグ 30 ~ 60% 前後)		2.2	1.3	0.9
フライアッシュセメント		1.9	1.1	0.8

凍結融解試験

ASTM C 666 および JIS A 6204 附属書 2 に規定がある。水中凍結水中融解法 (A 法) または空气中凍結水中融解法 (B 法) があり、凍結最低温度 -18°C 、融解温度 $+5^{\circ}\text{C}$ の繰返しを行う。評価は、材料の質量損失と動弾性係数の低下について行い、動弾性係数の低下を基に耐久性指数が計算される。

表-2・2・24 アルカリ反応性を有する物質を含む岩石（日本建築センター）

アルカリ反応性を有する物質		アルカリ反応性物質を含む岩石類
物質（鉱物）名	組成式	
クリストパライト	SiO ₂	安山岩，流紋岩，凝灰岩
トリジマイト	SiO ₂	安山岩，流紋岩，凝灰岩
玉 髓	SiO ₂	チャート，けい岩，粘板岩，けつ岩，砂岩，安山岩，流紋岩，凝灰岩
オパール	SiO ₂ ・nH ₂ O	安山岩，玄武岩，流紋岩，凝灰岩，砂岩，粘板岩，けつ岩
玻璃（はり）	（ガラス）	黒よう石，真珠岩，安山岩，流紋岩，砂岩

くことが最も重要であり，この目的で，AE 剤または AE 減水剤（前述）が使用される。

(d) アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応とは，骨材中のある種のシリカ質鉱物とセメントに含まれているアルカリとが化学反応を起こし，膨張してひび割れを生じる現象をいう。わが国では，1975 年後半に，阪神地区のコンクリート構造物のひび割れ損傷報告が発端となって，各地からアルカリ骨材反応による被害が報告されるようになった。

反応性骨材の種類を表-2・2・24 に示す。アルカリ骨材反応とは一般に骨材に含まれているシリカ質反応性物質とコンクリート中のアルカリとが反応する**アルカリシリカ反応**と考えてよい。アルカリシリカ反応は，骨材周辺のセメント硬化物中に含まれている微量のアルカリ金属イオンと，骨材中に存在する不安定なシリカ鉱物との反応による生成物（シリカゲル）が吸水によって膨張し，このときに生じる浸透圧によってコンクリートにひび割れが発生する現象である。写真-2・2・11 は反応性リムと白色のゲルを伴った骨材の様子である。

アルカリ骨材反応を抑制する方法として，JIS A 5308 では，およそ次のように規定している。すなわち，①コンクリート中の**アルカリ総量**を 3.0kg/m³ 以下とする，②**高炉セメント B 種，C 種**，または**フライアッシュ**



写真-2・2・11 アルカリ骨材反応による反応性リムと白色ゲルを伴った骨材

アルカリ総量

コンクリート中のアルカリ総量は，セメント，骨材，混和材，混和剤，および流動化剤に含まれる全アルカリ量の総和である。なお，セメントに含まれる全アルカリ量は，Na₂O および K₂O の含有量の和を，酸化ナトリウム Na₂O の量 (Na₂Oeq) に換算した値で表し，換算値は R₂Oeq (%) = Na₂O (%) + 0.658K₂O (%) で求められる (JIS A 5308 附属書 2)。

高炉セメント B 種，C 種

ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混合したもので，混合材の分量は，B 種で 30% を超え 60% 以下，C 種で 60% を超え 70% 以下である。

フライアッシュセメント B 種，C 種

ポルトランドセメントにフライアッシュを混合したもので，混合材の分量は，B 種で 10% を超え 20% 以下，C 種で 20% を超え 30% 以下である。

石垣に変身(?)したコンクリート擁壁

右の写真は、アルカリ骨材反応によってひび割れを生じたコンクリート擁壁である。ある都市の住宅団地に発生した被害であるが、この団地の擁壁は、ほとんどすべて石垣であり、一部のコンクリート擁壁が肩身を狭くして、石垣に変身したとの話（あくまでウワサ）もある。



セメントB種, C種を用いる, もしくは③アルカリ反応性のない骨材を用いる。

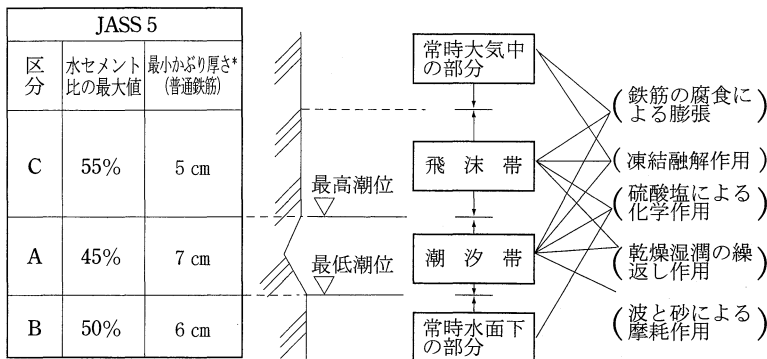
(e) 塩害

塩害は、地域によっては河川砂の採取が困難になってきたことと、海岸保全などで海底砂の採掘が活発になり、海砂の生産量が大幅に増大してきたことに伴って多く発生するようになった。現在では、近畿地方以西で、コンクリート用細骨材の多くを海砂に依存しているのが実状である。

塩化物がコンクリートに混入すると鉄筋が腐食しやすくなる。このとき、コンクリートの品質が悪く、かぶり厚さが小さいほど、また塩分量が多いほど鉄筋の腐食は早くなる。この塩化物が混入する経路には、コンクリート製造時のものと、硬化した後の海水のしぶきなど環境条件によるもの

塩害と中性化

コンクリートの硬化が始まると、塩化物イオンの一部は次第に不溶性のフリーデル氏塩 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) に変化し、セメント水和物中に固定化される(セメント質量に対し、塩化物イオンとして0.4%程度)。固定化された塩化物イオンは鉄筋腐食(不動態被膜の破壊)には関与しなくなるが、その後、中性化などによって分解して遊離することが知られている。このように、中性化と塩害には相互に関連する複合劣化の作用が存在する。



注) *計画供用期間の級を標準とし、W/C=45%とした場合

(a) JASS 5 による規定

(b) 海水による侵食

図 -2-2-55 海水によるコンクリートの浸食とその対策

のことがある。コンクリート製造時に混入する塩分としては、不完全な洗浄による海砂からの塩分や凝結促進剤として使用されている塩化カルシウムなどがあるが、とくに問題になるのは、海砂からの塩分混入である。JASS 5では、コンクリート中の塩化物の量を、原則として塩化物イオンの総量が $0.30\text{kg}/\text{m}^3$ 以下となるように規制しているが、通常の場合、砂中の塩化物 (NaCl) が 0.04% 以下であれば、この規制値は満足される。

(f) 海水による浸食

海水位付近のコンクリートは、図-2・2・55に示すように硫酸塩による化学作用、凍結融解、乾湿の繰返し、および波浪による摩耗などの浸食を受ける。このような浸食に対する耐久性を増大させるには、鉄筋に対するかぶり厚さを十分にとる、水セメント比の小さい水密性の高い（透水性や拡散性の低い）コンクリートを使用する、などの配慮が必要である。図中には、JASS 5による規定値も併示した。

メモの欄

用語の解説

凝結促進剤

コンクリートの凝結を促進するために使用される混和剤で、単に促進剤とも呼ばれる。塩化カルシウムがよく知られているが、最近では、非塩化物系の促進剤が多く使用されるようになった。

塩化物イオンの総量

塩化物イオン (Cl^-) 量の規制値 $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ を塩化ナトリウム (NaCl) に換算すると、Na および Cl の原子量はそれぞれ 23 および 35.5 であるから

$$0.3 \times (23+35.5) / 35.5 = 0.49\text{kg}/\text{m}^3$$

となる。