9. 硬化コンクリートの特性

(1) 圧縮強度 compressive strength, fc'

・強度、耐久性、経済性、美観、・・・ → 1番重要なのは強度、2番目が耐久性.

・強度の中で最も代表的なものは、コンクリートの場合は圧縮強度 f_c'.

・強度はセメントの水和反応に関係する. したがって時間とともに増加する.

・直接的には、水セメント比（W/C）に大きく関係する.

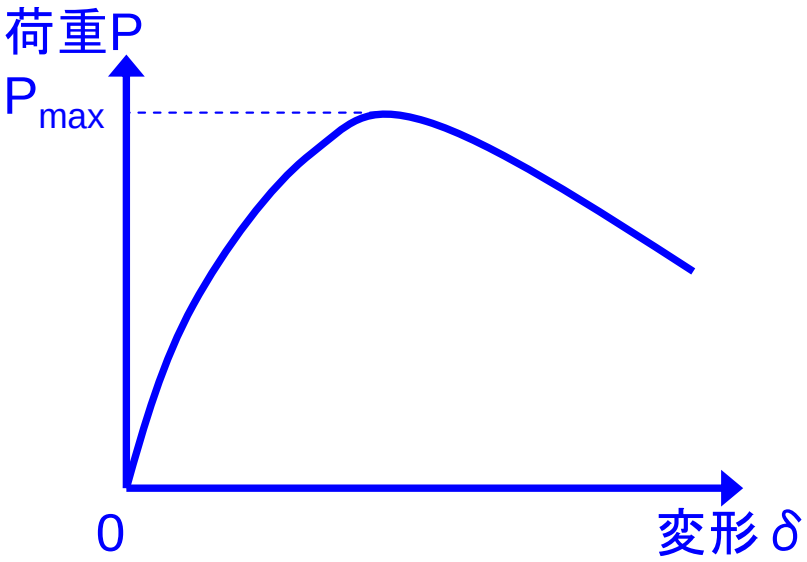
・圧縮強度 f_c' はC/Wの増加とともに、直線的に増加する.

$f_c' = A + B(C/W)$

・圧縮強度以外の強度： 引張強度、曲げ強度、付着強度、支圧強度など. しかし、これらの強度は圧縮強度から推定することができる（各種実験式の提案あり）.

・したがって、単に「強度」といった場合は、コンクリートの場合は「圧縮強度」である.

・圧縮強度f_c'： コンクリートに一方向の圧縮力を加え、破壊するときの応力で表したもの。



$f_c' = P_{max} / A_c$

ただし、P_{max}: 破壊荷重（最大荷重）

A_c: コンクリートの断面積

通常は、直径10cm、高さ20cmの円柱供試体を使用する。

・仮にP_{max}=240kNであるとすると、

f_c'= 240 000/(π ×50×50) = 30.6 N/mm^2 (MPa)

・コンクリートの圧縮強度 f_c'の範囲は？ :

→ 10 ～ 100 N/mm^{2}程度. しかし、最近は200N/mm^{2}を超える超高強度のコンクリートも製造可能となっている.

・圧縮強度に影響する要因は？

(a) コンクリートの材齢（コンクリート打込み後の経過日数）.

一般に、材齢が長期であるほど、強度は増加する. セメントの水和反応に関係.

(b) 使用材料の種類や品質.

早強セメントを使用すると強度発現が早い（7日強度）. 普通セメントは早強よりも強度発現は遅い（28日強度）.

粗骨材は高強度であれば、コンクリート強度に影響しない。低強度（低品質）であると、骨材強度でコンクリート強度が頭打ちになる.

(c) 施工方法.

練混ぜを十分に. 締固めも十分に. 硬化後は十分な温度と水分を与える（養生）. これらが不十分だと強度は低下する. 材料分離. これが発生すると強度は著しく低下.

(d) 試験方法.

供試体の形状や寸法、供試体の端面の平面度、載荷速度.

・供試体の寸法が相似的に拡大した場合、強度（単位面積当たりの耐荷力）はどうなるか？

→ 強度は一般に低下する.「寸法効果」size effect.

→ 供試体中に存在する欠陥中の最弱のものの強度は、欠陥の分布状態が同じなら、供試体が大きいものほど、小さくなる. 統計的なsize effect. ただし、これはあまり顕著ではない.

(注)コンクリートの破壊エネルギーに基づく寸法効果は、もっと顕著である.

・細長い供試体と横に広い供試体では、どちらの強度が大きいか？

→ 横に広い供試体. 端面摩擦の影響で、多軸圧縮効果が生じる.

→ 日本、米国では直径と高さの比が1:2の円柱供試体を使用. 欧州の諸国では、立方体供試体を使用. どちらが強いか？

・供試体が不整で曲がっていると、軸方向の圧縮力による2次モーメントが作用する.

・端面が平面でないと強度は低下する。

→ 2次モーメント（付加モーメント）の影響. および平面でないために端面に局所的な応力集中が起こって、局所的な破壊が進行する.

・載荷速度. 応力を与えるスピードが極端に遅いと、クリープ（遅れ変形）の影響が加わって、強度が低下する. 逆に極端に速すぎると、みかけの強度が増加する。

(e) コンクリートの配合.

・水セメント比（W/C）や空気量が影響する.

Abramsの水セメント比説（1919）

$$f_c' = \frac{A}{B^x}$$

x: 水セメント比(W/C)

A, B: セメントの品質や実験条件から決まる定数.

対数をとると、

$$\log f_c' = \log A - x \log B$$

水セメント比が大きくなると圧縮強度は低下する.

Lyseのセメント水比説（1932）　$f_c' = A + B(C/W)$

A, B: セメントの品質や実験条件から決まる定数.

・この式が現在も一般に使用されている.

・ただし、これを含めて、圧縮強度の「水セメント比説」ということが多い.

・空気量：　水セメント比を変化させずに、コンクリート中の空気量を1%増加させると、圧縮強度は4～6%程度減少する. これは空隙による強度低下である.

・AEコンクリートではエントレインドエアーが導入されるので、空気量は増加するが、エントレインドエアーによるボールベアリング作用で、コンクリートのコンシステンシー（軟らかさ）が増加する. このため、単位水量を減じることができ、W/Cを小さくできるので、空気量の増加に伴う、強度低下を補うことができる.

(2) 引張強度 tensile strength, f_t

・引張強度は圧縮強度のおおよそ1/10程度. もちろん一定ではない. 低強度のものほど、この比率は大きく、高強度のものほど、この比率は小さい. f_c' = 20 N/mm^{2}程度で1/10程度となる. 引張強度を圧縮強度から推定する実験式は以下の通り. 単位はN/mm^2.

$$f_t = 0.269 f_c'^{2/3}$$

・例えば、圧縮強度f_c' が30N/mm^{2}であると、$f_t = 0.269 \times 30^{2/3} = 0.269 \times 9.655 = 2.60$ であり、f_t =2.60 N/mm^2, 比率は1/11.5 となる.

・コンクリートの乾湿と引張強度：

湿潤状態にあるコンクリートを乾燥させると、引張強度はどのように変化するか？

・コンクリートの乾湿と引張強度：

湿潤状態にあるコンクリートを乾燥させると、引張強度はどのように変化するか？

→ 引張強度は低下する.

→ コンクリート表面部は乾燥して縮もうとする. 一方、内部は完全には乾燥しない. このため、表面部に引張応力が作用し、引張強度が低下する.

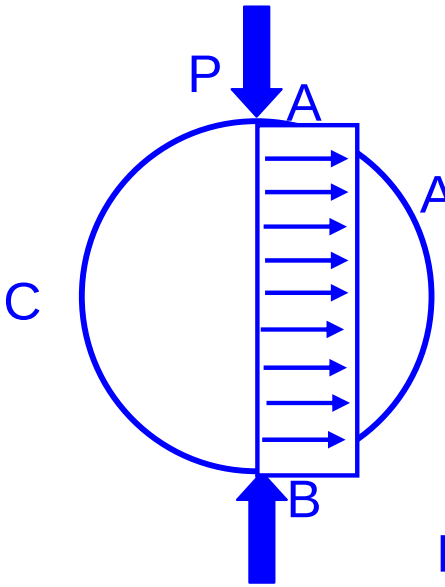
→ 完全に乾燥してしまうとこの現象は起きない.

→ 鉄筋コンクリートの場合は、コンクリートは収縮を鉄筋により拘束されるので、引張応力が作用し（鉄筋には圧縮応力）、コンクリートのひび割れにつながる。

・引張強度の試験方法

割裂試験により行なう（splitting tension test）.

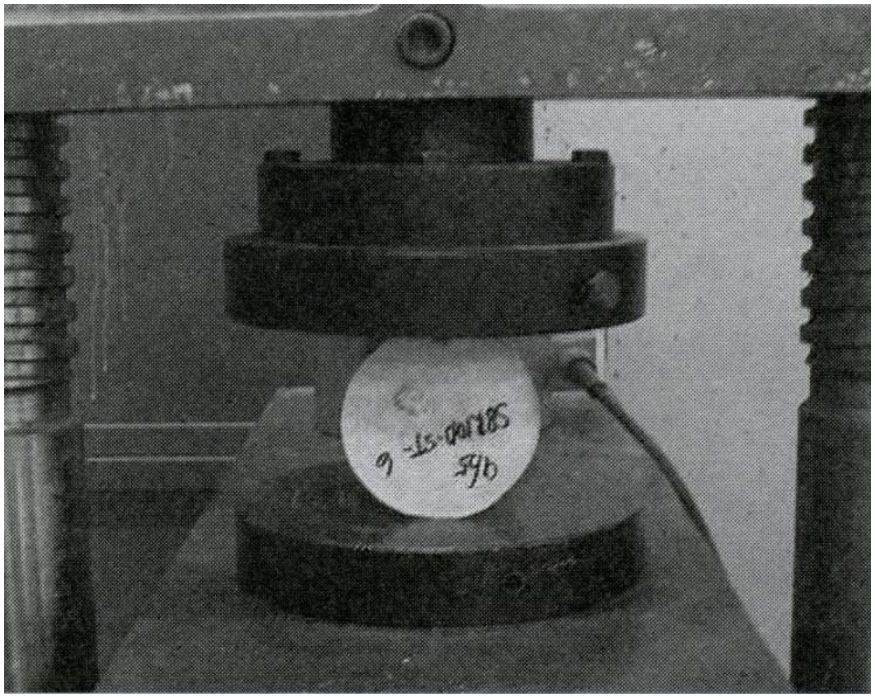
→ 円板（高さの短い円柱体）の直径の両端から圧縮力を作用させると、弾性理論によると、図のような応力分布が得られる.



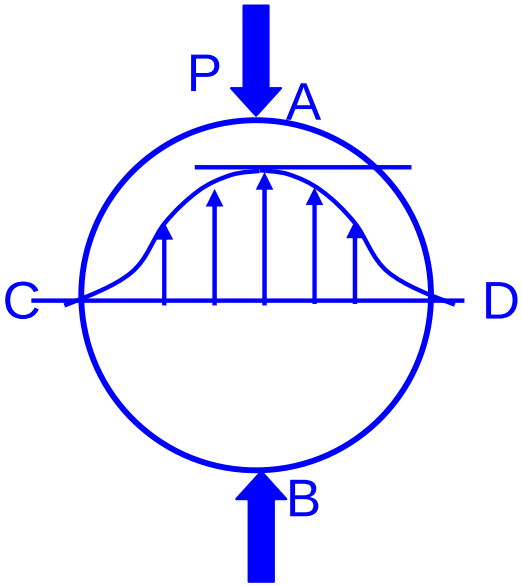
AB面に垂直な引張応力

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi d \ell}$$

P: 荷重、d: 供試体直径、ℓ: 供試体の厚さ



割裂引張試験



CD面に垂直な圧縮応力

$$\sigma_c' = -\frac{6P}{\pi d \ell}$$

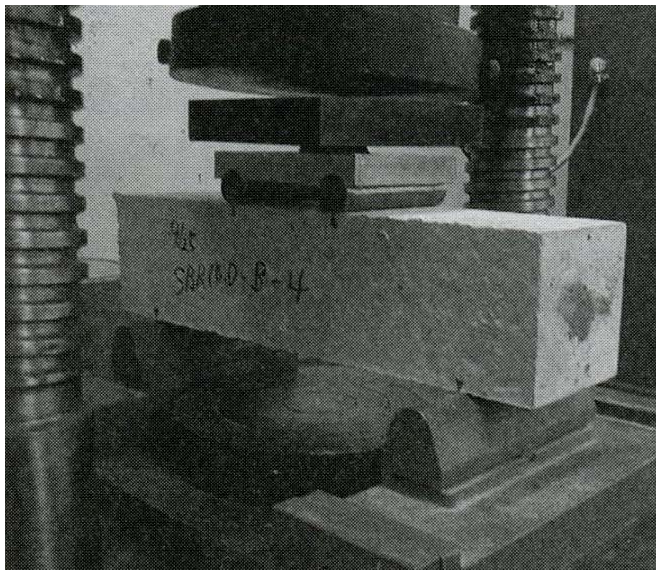
P: 荷重、d: 供試体直径、ℓ: 供試体の厚さ

・円板の中心では、鉛直方向に水平方向引張応力の3倍の圧縮応力が作用するが、コンクリートの引張強度は圧縮強度の約1/10と小さいため、引張によるひび割れが先行し、割裂破壊が生じる.

・割裂時の荷重をP_{max}とすると、コンクリートの引張強度f_tは以下のように求められる.

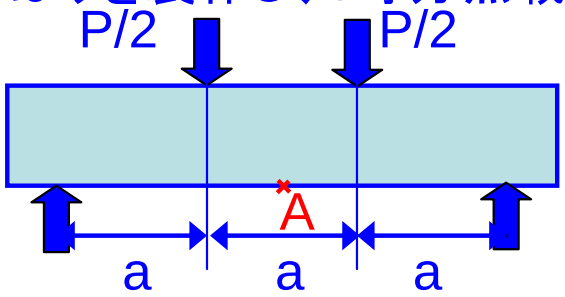
$$f_t = \frac{2P_{max}}{\pi d \ell}$$

・この割裂引張強度は、1軸引張試験（相当に困難）による強度にほぼ一致するので、簡易な割裂試験により引張強度を求めている（JISに規定）.

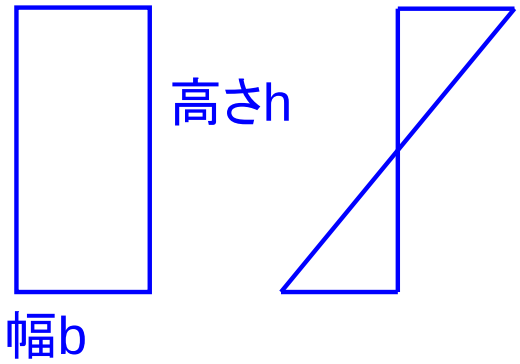


(3) 曲げ強度　flexural strength, f_b

・直方体のはりを製作し、3等分点載荷を行なう.



・このとき、等モーメント区間の断面の下縁A点における曲げ引張応力はどのように求められるか？



$$M=\left(\frac{P}{2}\right)a,\quad \sigma_t=\frac{M}{I}y,\quad I=\frac{bh^3}{12},\quad y=\frac{h}{2}$$

$$\therefore \sigma_t=\frac{Pa}{2}\frac{12}{bh^3}\frac{h}{2}=\frac{3Pa}{bh^2}$$

・無筋コンクリートの曲げ試験を行なうと、曲げひび割れの発生とほぼ同時にはりが破壊する。そのときの縁応力σ_tを曲げ強度f_b と定める. 曲げ強度は引張強度の1.5～2倍程度.

・曲げひび割れといっても、そこにひび割れが発生するのだから、引張強度ではないのか？なぜ引張強度と異なる曲げ強度が存在するのか？

・実は、曲げ強度は見かけの強度である. これは本当は材料特性ではない. 小さい供試体ほど曲げ強度は大きく、供試体が大きくなるにしたがって、引張強度に近づいていく。

・曲げ強度には著しい寸法効果がある. これは、コンクリートの破壊力学を用いて説明できる.