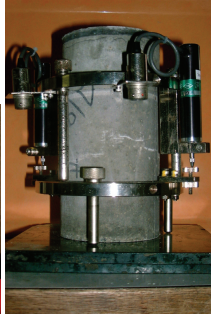


# コンクリート工学 第6回

## 硬化コンクリート ・強度



## 【硬化コンクリートとは？】

強度の発現過程にあるコンクリート



ボックス桁

## 【硬化コンクリートで重要となる性質】

硬化コンクリートの性質は、使用材料、配合、製造方法などのほか、温度・湿度などの養生条件、環境条件などによって変化する。

コンクリート構造物の設計や解析の上で、最も重要視されるのが、力学的性質である。

力学的性質 → 強度特性  
変形特性

その他、耐久性、寸法安定性、水密性、耐熱性、遮音性など

## 【硬化コンクリートの強度特性】

### (1)強度の種類

- ・圧縮強度 ・引張強度 ・曲げ強度 ・せん断強度
- ・支圧強度 ・付着強度 ・疲労強度

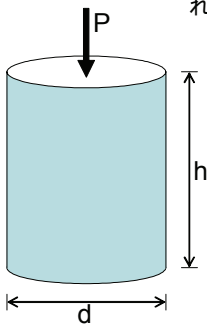
### (2)設計において最も重要視される強度

圧縮強度(特に材齢28日の強度)



### (3)圧縮強度

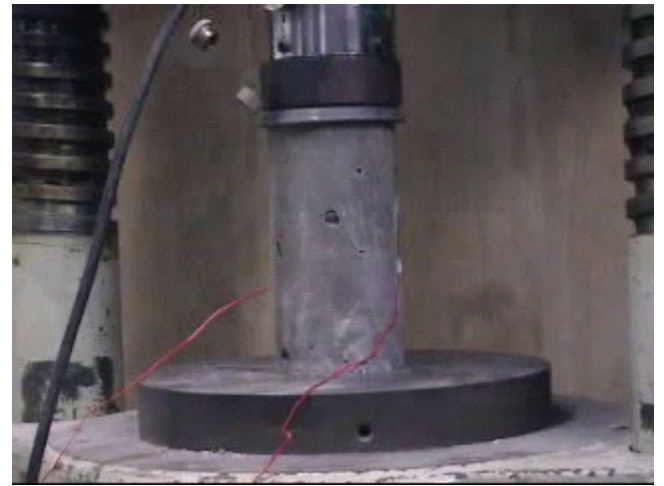
コンクリート工学において単に強度と言えば、圧縮強度をさす。  
理由:コンクリート・・・圧縮に強く、引張に弱い  
鉄筋コンクリートでは圧縮材として設計されている



供試体寸法:  $\phi 100 \times 200\text{mm}$

$$\text{圧縮応力: } \sigma_c = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi d^2}$$

$$\text{圧縮強度: } f_c = \frac{P_{\max}}{A} = \frac{4P_{\max}}{\pi d^2}$$



### (4)圧縮強度に影響を及ぼす要因

#### 1)材料の品質

普通強度の場合、セメントペーストの強度が影響  
高強度の場合、骨材の強度が影響

#### 2)配合

##### ・水セメント比説

コンクリートの圧縮強度は、水セメント比(W/C:コンクリート中の水とセメントとの質量比)に支配される

$$f'_c = \frac{A}{B/W/C}$$

##### ・セメント水比説

セメントと骨材が同じであれば、コンクリートのコンシステンシーは使用水量によって決まり(単位水量一定の法則)、使用水量を一定にすると強度はセメント量によって定まる

$$f'_c = A \left( \frac{C}{W} \right) + B$$

表-5.1 セメント水比と強度との関係(セメント協会)

コンクリートの種類	セメントの種別	セメントの量(%)	C/W比との関係		備考
			7日	28日	
砂・砂利(25mm)コンクリートスラブ厚=4-22cm	普通ポルトランドセメント	50-70	$\sigma_{7d} = 186 + 217 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 195 + 300 \frac{C}{W}$	F-16
	早強ポルトランドセメント	40-50	$\sigma_{7d} = 117 + 225 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 124 + 275 \frac{C}{W}$	
砂・砂利(25mm)コンクリートスラブ厚=4-22cm	普通ポルトランドセメント	40-60	$\sigma_{7d} = 121 + 166 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 24 + 176 \frac{C}{W}$	F-19
	早強ポルトランドセメント	40-50	$\sigma_{7d} = 12 + 149 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 100 + 137 \frac{C}{W}$	
一般土木用	砂利(40mm)	45-65	$\sigma_{7d} = 181 + 210 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 110 + 237 \frac{C}{W}$	F-19
	砂利(40mm)	45-65	$\sigma_{7d} = 182 + 224 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 70 + 235 \frac{C}{W}$	
舗装用(耐久強度)	砂利(40mm)	36.4-50	$\sigma_{7d} = 11.5 + 14.0 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 30.6 + 10.1 \frac{C}{W}$	F-21
	砂利(40mm)	36.4-50	$\sigma_{7d} = 6.2 + 17.3 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 19.9 + 16.2 \frac{C}{W}$	
アレーンコンクリートスラブ厚=21cm	砂利(25mm)	50-70	$\sigma_{7d} = 185 + 214 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 190 + 299 \frac{C}{W}$	F-15
	砂利(25mm)	50-70	$\sigma_{7d} = 215 + 242 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 219 + 332 \frac{C}{W}$	
砂・砂利(25mm)コンクリート	高炉セメント	45-65	$\sigma_{7d} = 149 + 167 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 115 + 242 \frac{C}{W}$	F-15
	フライアッシュセメントB種	45-65	$\sigma_{7d} = 188 + 202 \frac{C}{W}$	$\sigma_{28d} = 215 + 290 \frac{C}{W}$	

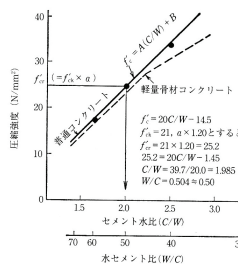


図 4.2 セメント水比と圧縮強度との関係

・空隙セメント比説

水と空気量の容積の和を空隙とみなし、強度は空隙とセメントの容積比に支配される  
空隙1%増加 → 強度5%低下

この説は、AEコンクリートに適用可能  
空気量1%増加 → 強度4~6%低下

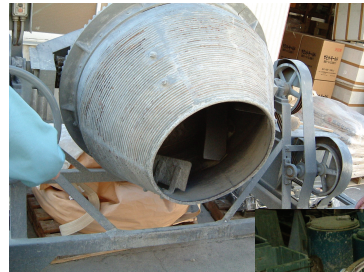
3) 施工方法

・練混ぜ

ミキサの違い

可傾式ミキサ(1.5分) < 強制練りミキサ(1分)

練混ぜ不足は、強度低下につながる



← 可傾式ミキサ



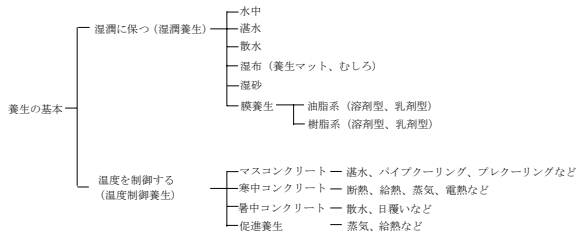
強制練りミキサ →

・締め

振動締めを行うと、コンクリート中の空隙が少なくなり、密実な組織となるため強度が増加する  
ただ、振動時間が長すぎると、材料分離することがある。

・養生方法

養生とは、コンクリート打設後、強度発現を助けるために十分な湿度と温度を与えるとともに、有害な外力の作用を防ぐこと。例、標準養生(温度20°Cの水中養生)



① 乾燥・湿潤の影響

・湿潤で養生すると強度は材齢とともに増加する。  
・乾燥状態に移すと、初期は強度増加するが、水和反応が妨げられるので、その後の強度増進が小さくなる。

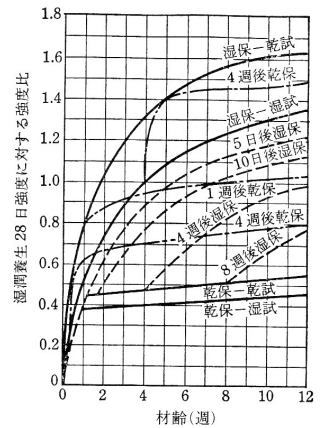


図 4.3 湿潤養生 28 日強度に対する各種養生方法の場合の強度比

② 養生温度の影響

・養生温度が高くなるほど、材齢28日までの強度は高くなる。  
・長期強度は、一般に低温で養生した方が高温で養生したものより高くなる。

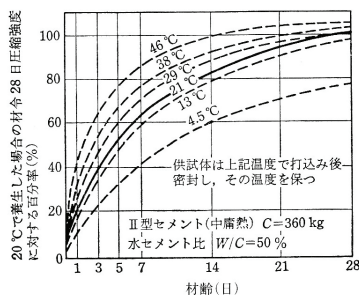


図 4.4 コンクリートの圧縮強度に及ぼす養生温度の影響<sup>3)</sup>

③ 凍結の影響

・フレッシュコンクリートが凍結するとセメントの水和反応が止まり、水による見かけの強度を生じる。しかし、常温に戻ると凍結していないものに比べ強度は劣る。  
・ある程度強度発現したあとの凍結はあまり影響ないが、初期において凍結すると強度増進が小さくなる。

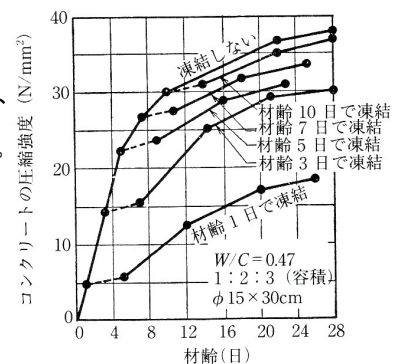


図 4.5 コンクリートの凍結が圧縮強度に及ぼす影響<sup>4)</sup>

④ 蒸気養生・オートクレーブ養生

・蒸気養生

最適温度55~75°C、85°C以上は有害  
初期材齢の強度は大となるが、材齢28日では標準養生より10~15%低くなる。

・オートクレーブ養生

高温(180°C前後)・高圧(10気圧)下で行う養生  
養生直後に70~100N/mm<sup>2</sup>の強度が得られる。

・材齢

コンクリート強度の増加割合は水和反応量による。  
強度増加には、温度と材齢がともに影響する。  
これらをひとつの変数で評価するために、以下のパラメータが利用されている。

積算温度(マチュリティー)M

$$\text{積算温度(マチュリティー)} M = \sum \Delta t_i (T_i - T_0)$$

ここで、 $T_i$  : 養生温度  
 $\Delta t_i$  : 養生温度  $T_i$  に保たれた期間  
 $T_0$  : 水和反応が進まないと考えた温度 (一般に、-10°C)

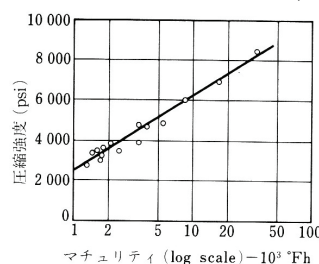


図 4.38 マチュリティーの対数と強度との関係

強度と積算温度との関係

$$\sigma = A \log M + B$$

A, B: 実験により定まる定数

・試験方法

①供試体寸法・形状

- ・円柱供試体の高さ $h$ と直径 $d$ の比 $h/d$ が大きくなると強度は小さくなる(加圧板との摩擦による)。摩擦がなければ強度は小さくならない。
- ・形状が相似であれば、寸法が大きいかほど強度は小さくなる(寸法効果)。

表 4.3 形状・寸法の異なる各種供試体の圧縮強度比<sup>9)</sup>

材齢	円柱供試体 (cm)			立法体 (cm)		角柱体 (cm)	
	$\phi 15 \times 15$	$\phi 15 \times 30$	$\phi 20 \times 40$	15	20	15×30	20×40
7日	0.67	0.51	0.48	0.72	0.66	0.48	0.48
28日	1.12	1.00	0.95	1.16	1.15	0.93	0.92
91日	1.47	1.49	1.27	1.55	1.42	1.27	1.27
1年	1.95	1.70	1.78	1.90	1.74	1.68	1.60

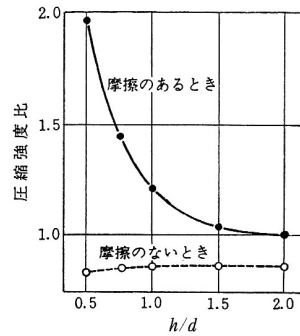


図 4.6 供試体の高さ $h$ と直径 $d$ の比と圧縮強度との関係<sup>9)</sup>

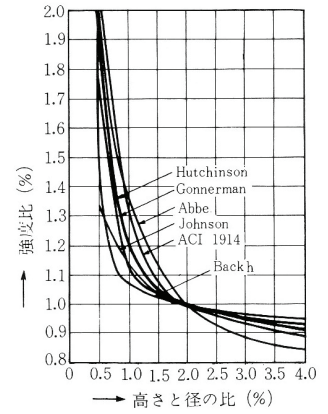


図 4.41 円柱供試体の高さ $h$ と直径 $d$ の比と強度との関係

②載荷面の平面度

- ・端面が平滑でないと、集中荷重あるいは偏心荷重となつて一般に見かけ上強度は低下する。
- ・JIS A 1108では平面度を0.02mm以下に規定
- ・平滑にするには、セメントペーストによるキャッピング、研磨機による研磨を行う。



研磨機

③載荷速度

- ・載荷速度が速くなるにつれ、見かけ上の強度は**高くなる**。
- ・JIS A 1108では毎秒0.2~0.3N/mm<sup>2</sup>

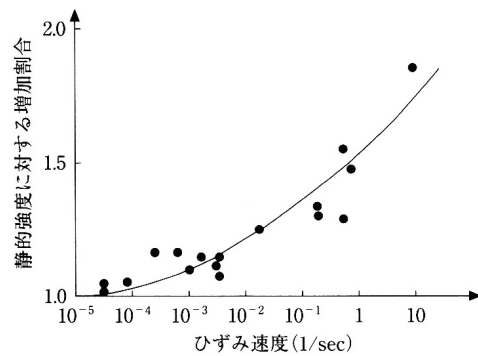


図 4.7 強度に及ぼすひずみ速度の影響<sup>9)</sup>

(5)圧縮強度の標準試験法(JIS A 1108)

- ・ $\phi 150 \times 300\text{mm}$ 、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体
- ・ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ では2層詰め7cm<sup>2</sup>に1回の割合で突く。  
 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ では3層詰めで各層25回突く。  
振動機では2層詰めで60cm<sup>2</sup>に一ヶ所挿入する。
- ・水槽などで湿潤養生、養生温度は20±3°C(標準養生)
- ・材齢は、7日(1週)、28日(4週)、91日(13週)を標準とする。
- ・水槽から取り出し、その直後に試験する。

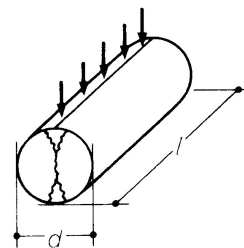
(6)圧縮強度以外の強度

1)引張強度

圧縮強度の1/10~1/13、この割合は強度が高くなるにつれ小さくなる。

圧縮強度  $f_c'$  と引張強度  $f_t$  との比  $f_c'/f_t$  → 脆度係数  
もろさ係数

通常、コンクリートの引張強度は、割裂引張試験により評価される。



引張強度

$$f_t = \frac{2P_{\max}}{\pi dl}$$

この数値は純引張試験結果とほぼ同じ値が得られる

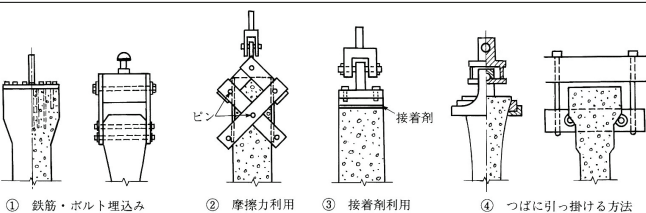
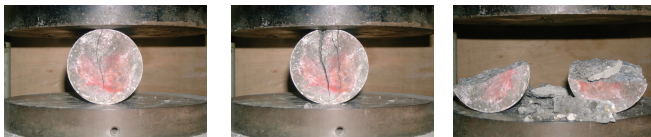


図-5 直接引張試験方法(文献9)、10)を元に作成)

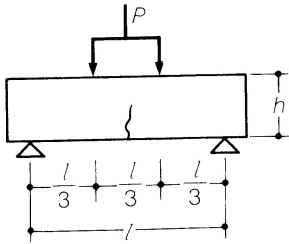


## 2) 曲げ強度

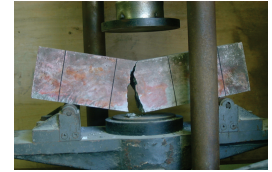
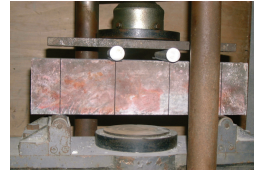
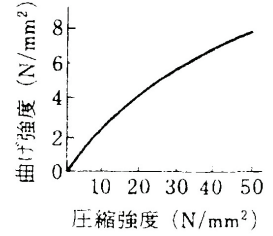
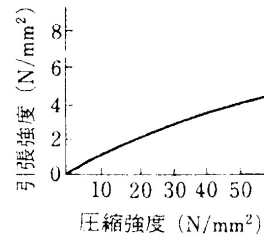
コンクリート舗装版、スラブ、舗道用平板では曲げ強度が設計に利用されている。  
 圧縮強度の1/5~1/8

曲げ強度

$$f_b = \frac{M}{I} y = \frac{M}{Z} = \frac{P\ell}{bd^2}$$



← 3等分曲げ載荷試験



## 3) せん断強度

圧縮強度の1/4~1/6  
 引張強度の2.5倍前後

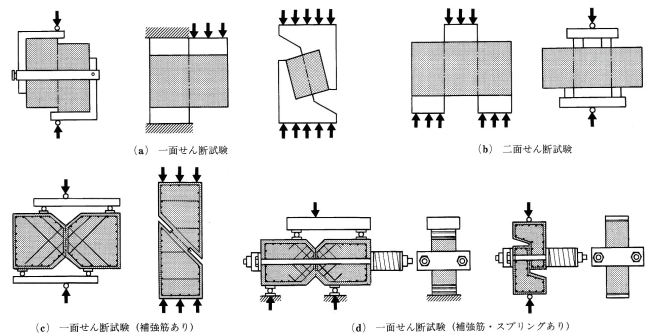


図9 せん断試験方法 (文献9, 14) を元に作成

## 4) 付着強度

新旧コンクリートの付着強度  
 建築研究所式付着試験機による評価



試験片(4×4cm)

付着強度 =  $\frac{\text{最大荷重}}{\text{付着面積}}$

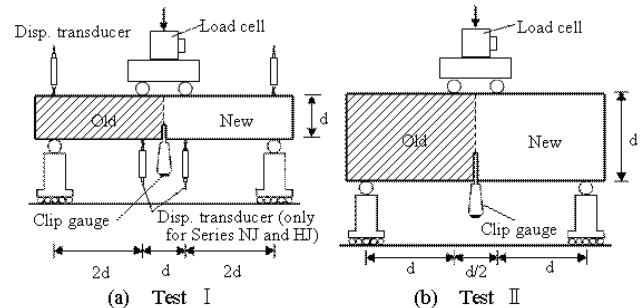


Fig. 4. Test setup

付着強度を曲げ付着強度(曲げ強度)として評価

## 鉄筋との付着強度

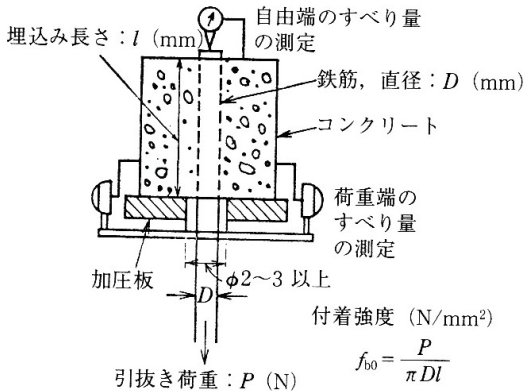


図4.12 付着強度を求めるための引抜き試験法

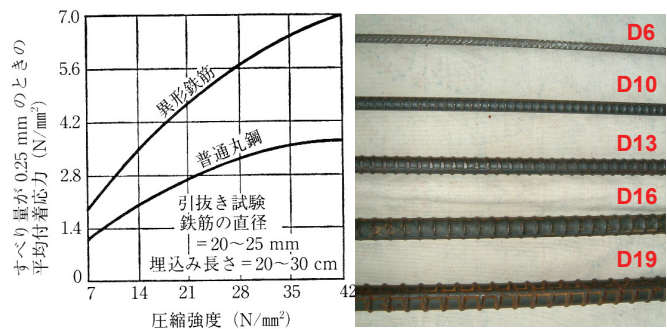


図4.13 付着強度と圧縮強度の関係<sup>2)</sup>

