

コンクリート構造部材の設計強度保持のための 設計基準強度補正に関する研究

浅野工専

○殿廣 泰史・加藤 直樹

日大理工

木田 哲量・須藤 誠

元日大生産工

近藤 勉・今野 誠

K・S・マスターズ

清水 健介

構造 Eng.

伊澤 閑

中日本 Hwy Eng. 東京 高野 真希子

防衛大

加藤 清志

1 ま え が き

筆者らはすでに超高強度コンクリートおよびPC棒鋼を使用した持続可能なコンクリート柱の重拘束の必要性、コンクリートの最終破壊予知特性値“流動応力点”（応力比95%）を示した¹⁾が、超高強度（80N/mm²以上）の場合には爆裂による遷移現象となり、したがって臨界応力度が終局破壊の前兆特異点となる。Fig.1に臨界応力比・流動応力比と圧縮強度との関係を示す。流動応力比1.00, すなわち78≒80N/mm²以上の超高強度で爆裂現象が発生すること, また臨界応力比1.00, すなわち強度97≒100N/mm²以上では強度そのものが疲労限度を示す。本報ではさらに、従来、柱高さ／径比が2の管理供試体圧縮強度が、構造物の設計強度とされているが、筆者らのせん断強度－圧縮強度相関図から、円柱の破壊モードの剛性円錐体にせん断強度を適用し、実構造物の補正圧縮強度を特定できることを明らかにした。

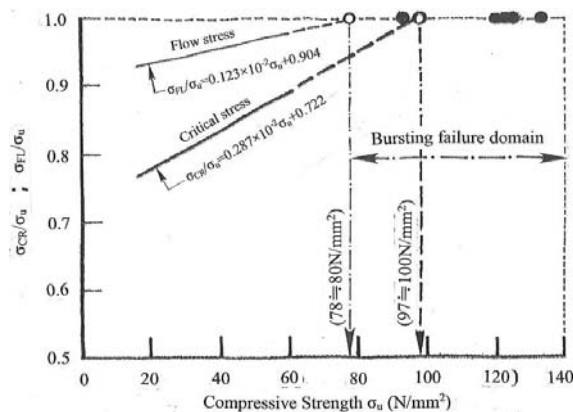


Fig.1 Compressive Strength vs. Phys. Characteristic Values.

2 圧縮体の内力と破断傾斜角

高強度コンクリートの骨材粒子は引張またはせん断破壊する (Fig.2)。圧縮材の任意断面 (θ) の垂直応力 $\sigma = (P/f) \cos^2 \theta \cdots \textcircled{1}$ とせん断応力 $\tau = (P/f) \sin \theta \cos \theta \cdots \textcircled{2}$, 合成応力 $p = (P/f) \cos \theta \cdots \textcircled{3}$ であり, 傾斜角の増大とともに垂直応力度は20°から70°に向い急激に減少し, 一方, せん断応力度は45°面上で最大となる (Fig.3, 4参照)。ここに, P: 軸力, f: 部材直断面積, K_s: 使用せん断応力度, $\mu (= \tan \varphi)$: せん断面上の摩擦係数, φ : 摩擦角

平衡条件から $\tau - \mu \sigma \geq K_s \cdots \textcircled{4}$; よって, 式④の左辺を最大にするθは,

$$\Omega = \tau - \mu \sigma = (P/f)(\sin \theta \cos \theta - \mu \cos^2 \theta)$$

$$(f/P) \partial \Omega / \partial \theta = (f/P) \partial / \partial \theta \{ \cos \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) \}$$

$$= (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + 2\mu \sin \theta \cos \theta = 0;$$

$$\cos 2\theta + \mu \sin 2\theta = 0$$

$$\cot 2\theta = -\mu = -\tan \varphi = \cot(\pi/2 + \varphi),$$

$$\therefore \theta = \pi/4 + \varphi/2 \cdots \textcircled{5}$$



Fig.2 Tensile Crack of Aggregate.

Compensation Procedure for Specified Strength Owing to Quality Guaranty
by Applying Size Effect to Structural Concrete Compression Member

by

Yasufumi TONOHIO, Naoki KATO, Tetsukazu KIDA, Tsutomu KONDO,
Makoto IMANO, Makoto SUDO, Kensuke SHIMIZU, Shizuka IZAWA
Makiko TAKANO and Kiyoshi KATO

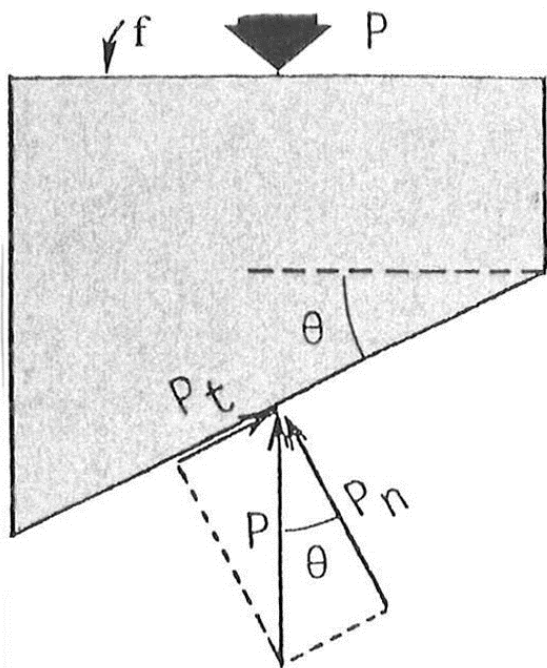


Fig.3 Internal Stress.

よって、使用限界状態せん断応力度は

$$K_s = (P/f) \{ \sin\theta \cos\theta + \cot(\pi/2 + \phi) \cos^2\theta \} \cdots \textcircled{6}$$

Fig.4は単純圧縮応力分布で、破断面傾斜角 $55^\circ \sim 80^\circ$ で σ より τ は卓越している。Fig.5は柱部材の H/D 比と強度との関係で、管理供試体2は端面拘束と寸法効果を受け傾斜角は小さく、3以上ではほぼ一定で約 10° 大きい。

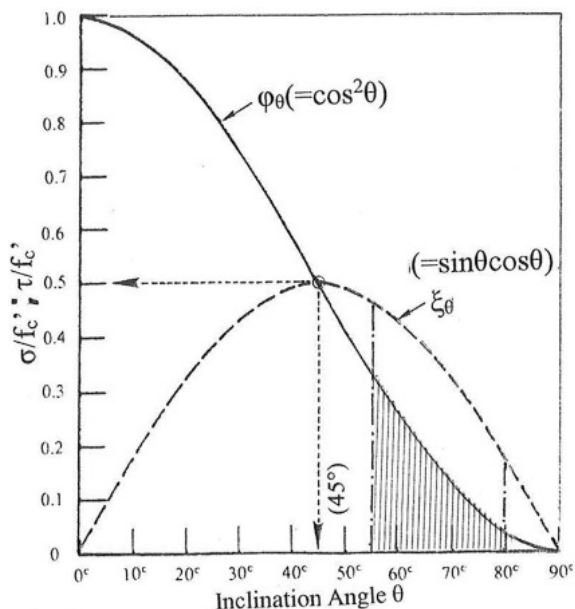


Fig.4 Eminent Shear.

3 せん断強度による圧縮強度の評価

3.1 せん断耐力による圧縮耐力の定式化

強度管理供試体 ($H/D=2$) の円柱部材が圧壊す

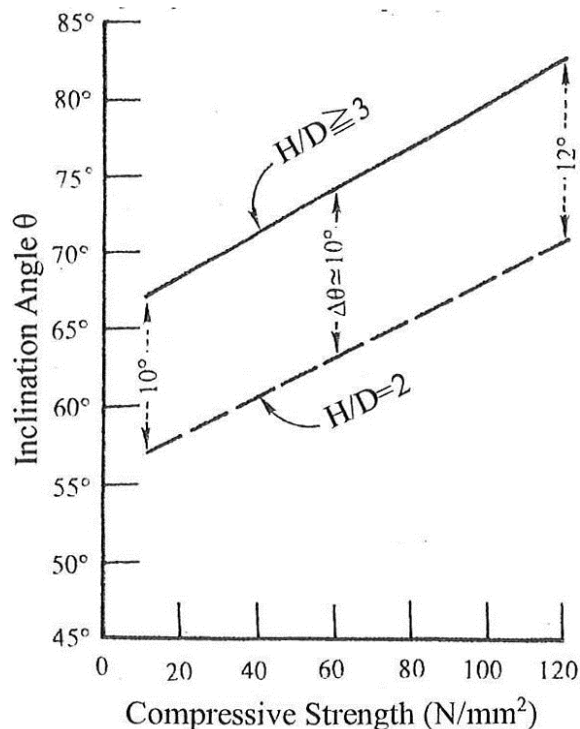


Fig.5 Shear Angle vs. H/D .

ると、剛体部・破壊面・放出部に分離する(Fig.6)。上下2個の剛体部側面積 F_0 は式⑦で与えられる。

$$F_0 = 2\pi d(d^2 + h^2)^{1/2} \cdots \textcircled{7}$$

ここに、 d : 円柱半径、 h : 高さ $H/2$

円錐体全側面積 F_0 に Fig.7 に示す圧縮強度と一面せん断強度相関図²⁾ によるせん断強度 f_c' を F_0 に乗じ、全せん断力 V_t を求めかつ鉛直成分を直円柱断面 A で剰し、見掛けの圧縮強度は $f_c'' = V_t \sin\theta / A \cdots \textcircled{8}$ となる。

しかし、Fig.5 に示すせん断傾斜角は、高強度ほど大きくなる。

3.2 寸法効果の導入

式⑦の高さ h は $h = d \tan\theta$ であることに留意しなければならない。したがって、 $H/D = 2h/(2d)$ を用い、部材寸法効果³⁾ λ を Fig.8 より定めることができる。

4 構造物強度と管理供試体強度との関係

Fig.9 に実構造物コンクリート強度と設計強度を示すが、流動応力点以下の爆裂を生じない超高強度未満で設計基準強度を満たしていないことが判明した。

一方、圧縮応力-体積ひずみ関係で流動応力点が生起せず、Fig.1 に示すように強度1.00 (終局強度相当) に対応する強度レベルは約 80 N/mm^2 であり、さらにこの 80 N/mm^2 超ではせん断面積の増大により逆にせん断耐力、すなわち圧縮耐力も設計耐力よりも増大するのである。

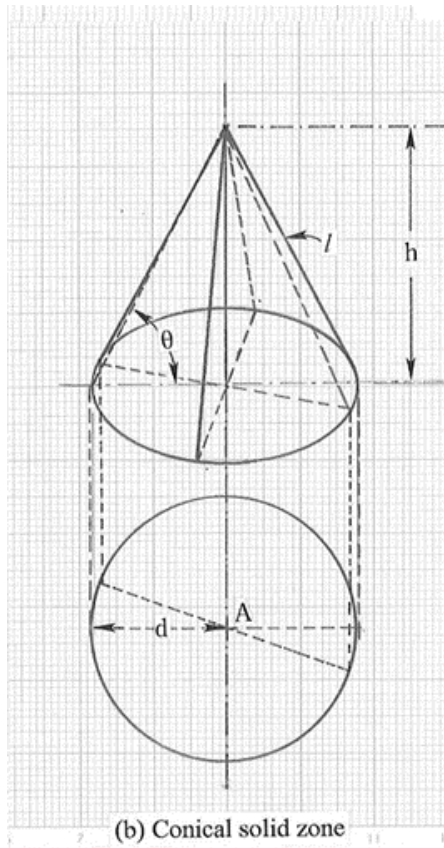
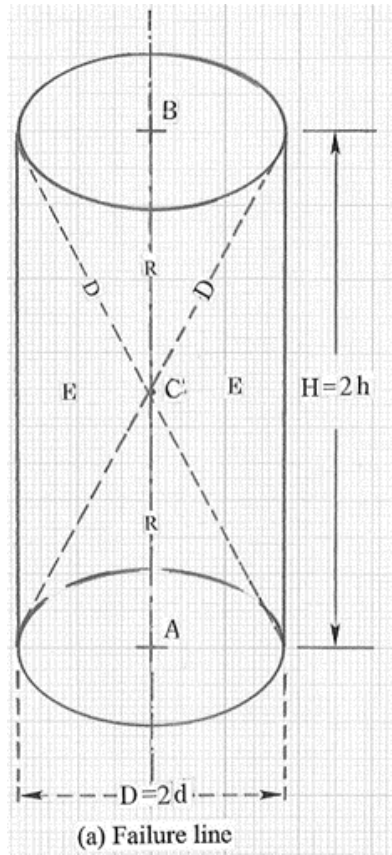


Fig.6 Conic Failure Mode of Compressed Column.

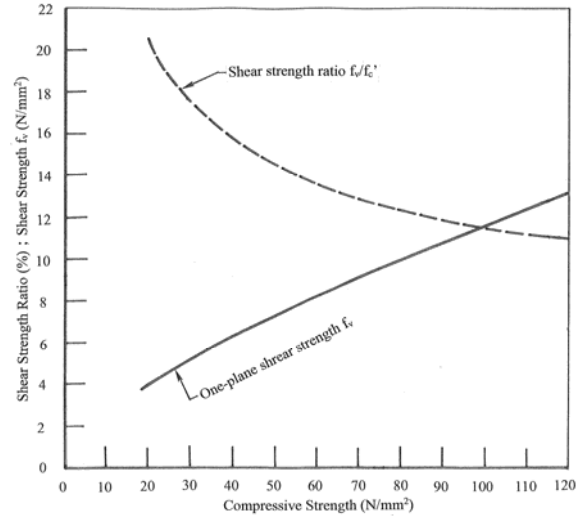


Fig.7 Relation between Shear and Compressive Strength.

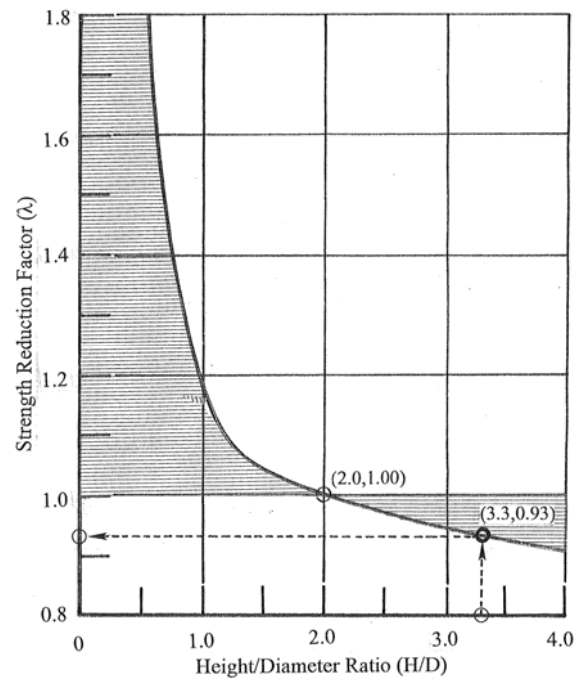


Fig.8 Relation of Strength Reduction Factor vs. H/D.

強度不足領域の上限値超では、破壊傾斜角 θ は座標 $(70\text{N/mm}^2 ; 75^\circ) \sim (120\text{N/mm}^2 ; 83^\circ)$ に関し、円錐側面積 F_0 は母線長 ℓ または強度依存性傾斜角の関数で、式⑨のようになる。

$$F_0 \propto \ell ; \text{ また } F_0 \propto \tan^{1/2} \theta \cdots \textcircled{9}$$

結局、柱状構造物圧縮強度 f_{co}' は式⑩、⑪の関数式 Φ となる。

$$f_{co}' = \Phi(f_{ck}', f_v, F_0) \cdots \textcircled{10}$$

$$= \Phi(f_{ck}', f_v, \theta, d, \ell, \lambda) \cdots \textcircled{11}$$

ここに、 f_{ck}' ：コンクリートの設計基準強度

f_v ：コンクリートの一面せん断強度

- θ : f_{ck}' に対応するせん断角
 d : 管理供試体または柱状構造部材の半径
 ℓ : 同上円錐母線長
 λ : 部材寸法効果強度修正係数

よって, Fig.9に示すように圧縮強度 80N/mm^2 超では母線長や破壊傾斜角は対数的に増大する特性を示す。すなわち, せん断耐力も圧縮耐力も対数的に増大することとなる。

以上から, 従来は柱状実構造物の設計基準強度 f_{cko}' は, 管理供試体設計基準強度 f_{ck}' と等価, すなわち $f_{cko}' \equiv f_{ck}' \cdots (12)$

としてきたが, 本研究により

$$f_{cko}' \equiv f_{ck}' + \Delta f_{ck}' \cdots (13)$$

ここに, $\Delta f_{ck}'$: 補正圧縮強度
 でなければならないことが判明した。

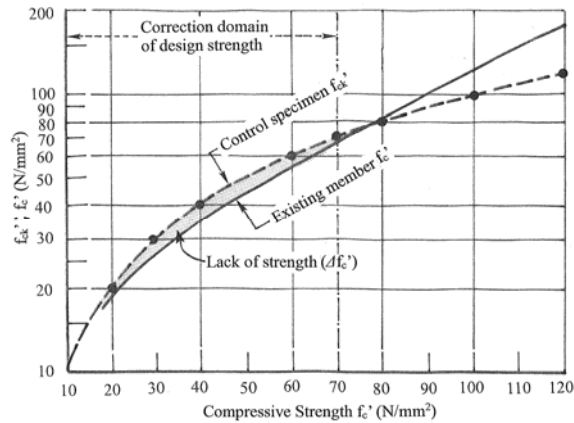


Fig.9 Correction Domain of Control Specimen.

5 計算例

日本セメント協会では, やむを得ず水セメント比を定める場合として, 28日圧縮強度推定式を式(14)で与えている⁴⁾。

$$f_{c28}' = A \cdot C/W + B \cdots (14)$$

$$= 30 \cdot C/W - 19.5 \cdots (15)$$

ここに, f_{c28}' : 28日圧縮強度 (N/mm^2)

A, B : 実験定数

C, W : 単位セメント量および単位水量 (kg/m^3)

式(15)は管理供試体{ $\phi 100 \times 200(\text{mm})$ }で作製されたもので, いま実構造物の円柱{ $\phi 300 \times 3,000$ (無筋と仮定)}を設計基準強度 $f_{ck}' = 40\text{N/mm}^2$ で施工したい。

- 1) 設計条件: AEコンクリート, 単位水量 170kg/m^3 , 粗骨材最大寸法 25mm , スランプ 8cm 程度とする。

- 2) 圧縮せん断傾斜角を考慮した強度補正計算: 設計基準強度 $f_{ck}' = 40\text{N/mm}^2$ に対する補正量は, Fig.9より $\Delta f_{ck}' = 6.2\text{N/mm}^2$ である。
 ゆえに実構造物補正強度 f_{co}' は

$$f_{cko}' = f_{ck}' + \Delta f_{ck}' = 40.0 + 6.2$$

$$= 46.2 (\text{N/mm}^2)$$

式(14)を用い, $\partial f_{ck}' / \partial C = A/W$;

よって, $\Delta f_{ck}' = (A/W) \Delta C$;

$$\therefore \Delta C = (W/A) \Delta f_{ck}' \cdots (16)$$

強度補正の単位セメント量補正量は

$$\Delta C = (170/30) \times 6.2 = 35.1 (\text{kg/m}^3)$$

- 3) 修正後の単位セメント量 C_o :

$$C_o = C + \Delta C \cdots (17)$$

修正前の単位セメント量 C は, 式(14)より

$$C = W/A (f_{ck}' - B) = 170/30 \{40 - (-19.5)\}$$

$$= 337.2 (\text{kg/m}^3)$$

よって, 式(17)より

$$C_o = 337.2 + 35.1 = 372.3 (\text{kg/m}^3)$$

- 4) 実構造物補正強度 f_{co}' の検証 :

基本強度推定式(14)を用い

$$f_{co}' = (30/170) \times 372.3 - 19.5$$

$$= 46.2 (\text{N/mm}^2)$$

よって, 2)の f_{co}' と一致している。

6 まとめ

超高強度コンクリートでは, 流動応力点相当で爆裂すること, 一般に円柱の破壊モードから円錐剛体側面に一面せん断強度を適用し, H/D比および寸法効果を取り込み, 柱部材の耐力を推定できる。

強度不足領域 80N/mm^2 以下では, 柱状実構造物設計基準強度 f_{cko}' は, 初期の管理供試体設計基準強度 f_{ck}' と補正圧縮強度 $\Delta f_{ck}'$ との和となる。

実構造物部材の強度不足分を補正し, いやしくも“瑕疵”とか“偽造”呼ばわりされることのないように, 万全を期すべきである。

参考文献

- 1) 加藤清志: 研究開発四季報⑤土木・建築・環境編, 日本ビジネスレポート, pp.22-29 (1980).
- 2) 高野真希子・木田哲量・阿部 忠・加藤清志・加藤直樹: コンクリートのせん断傾斜角要因固定化に関する研究, 45回材研連論文集, pp.292-293 (平13.9) .
- 3) ASTM, 25, Part II, pp.237-250 (1925) .
- 4) セメントの常識, 一般社団法人セメント協会, p.29 (2017) .