

東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系

非線形コンクリート特論

(Nonlinear behavior of concrete and concrete
members)

Properties of concrete

Dr. S. Kono

コンクリート便覧 (日本コンクリート工学会)
Concrete handbook (Japan Concrete Institute)

コンクリートの材料試験 (Material test)

圧縮試験(Compression test)



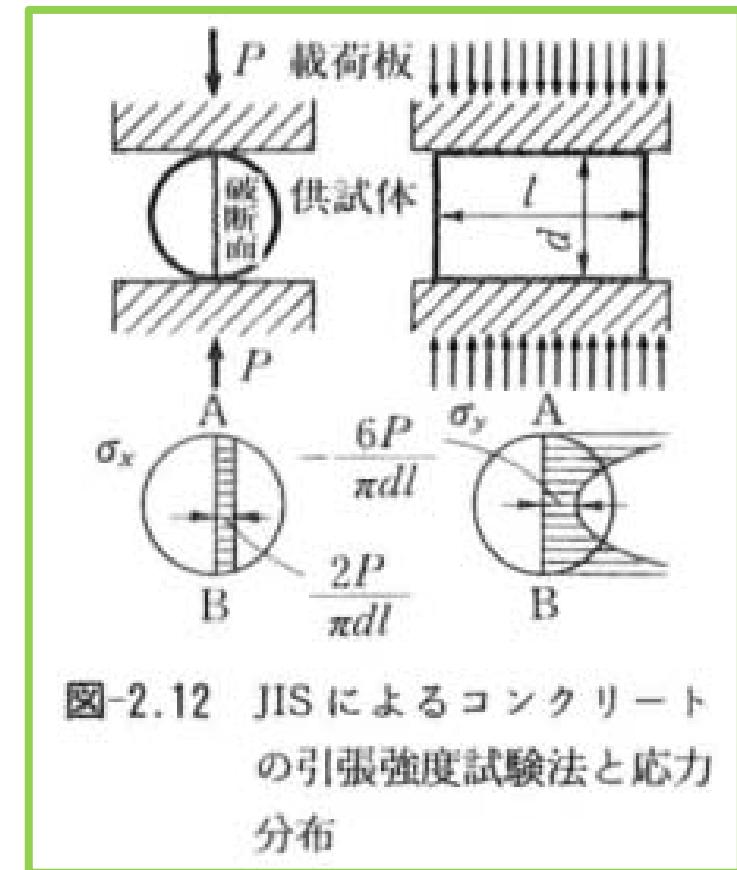
Pursuing Excellence



TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

コンクリートの材料試験 (Material test)

割裂引張試験(Splitting tension test)



Compressive strength(f'_c) – Water to cement ratio (W/C)

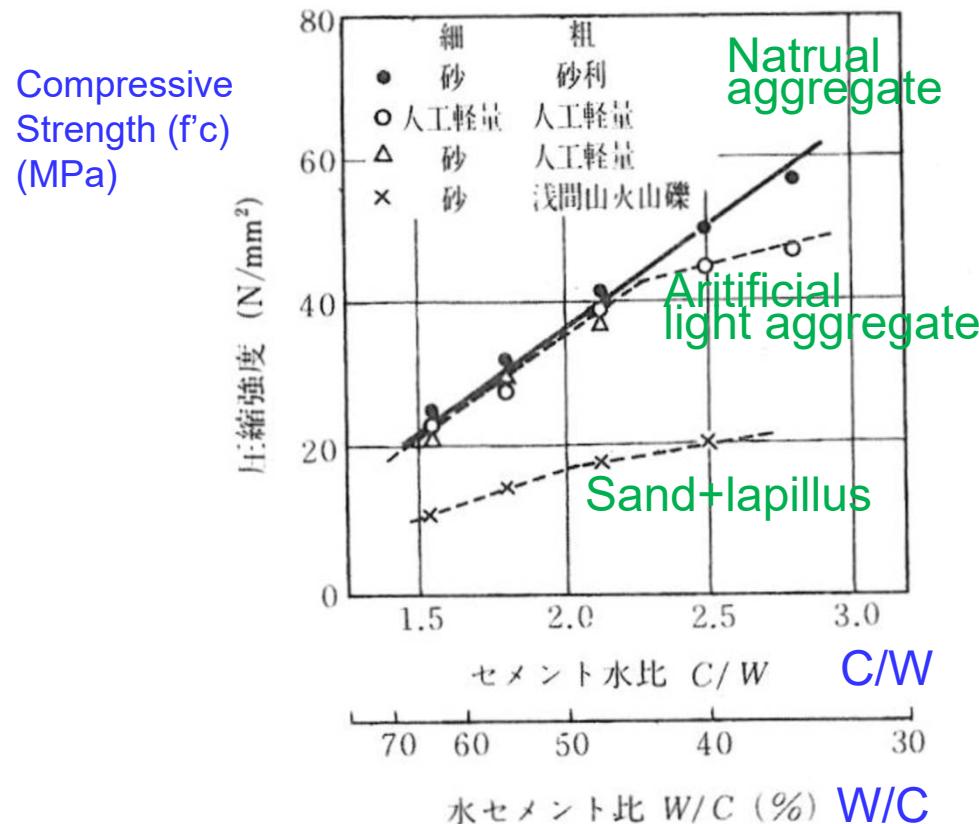


図-2.1 骨材の種別と圧縮強度の関係⁵⁵⁾

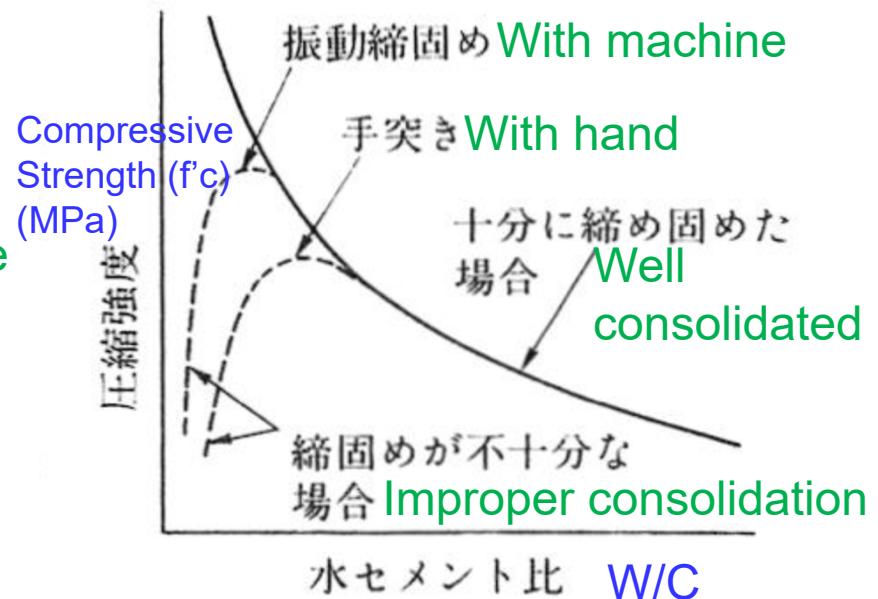


図-2.3 水セメント比と圧縮強度の関係

Compressive strength(f'_c) – diameter of cylinder

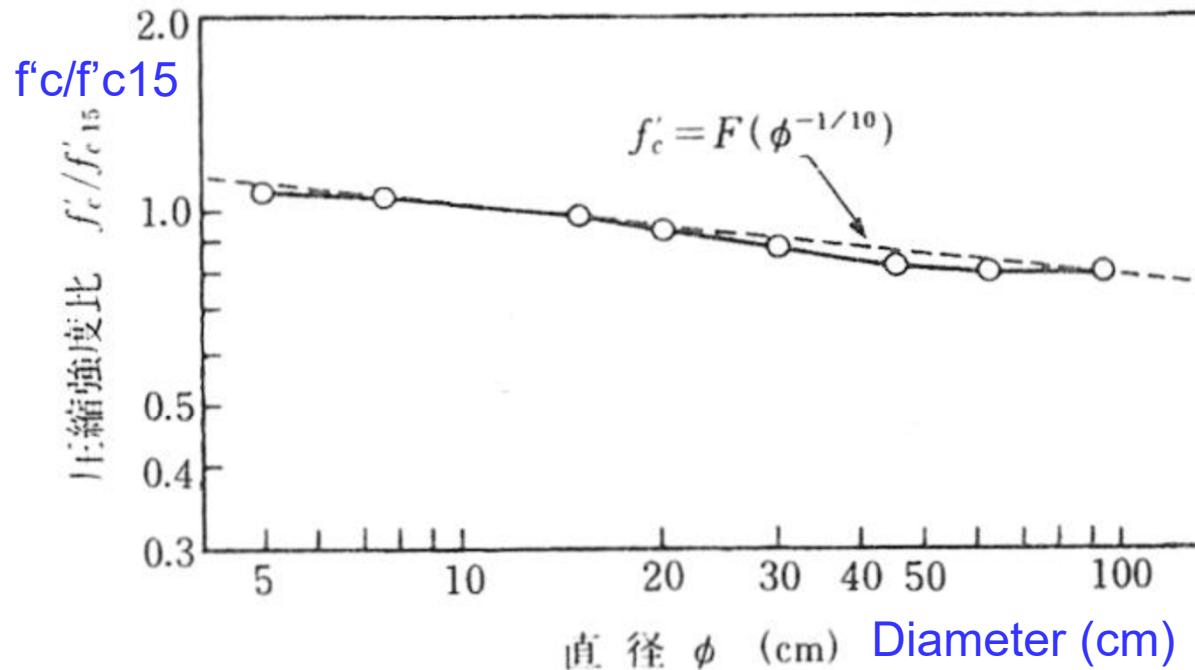


図-2.7 円柱供試体の直径と圧縮強度の関係⁶²⁾

(f'_{c15} : 直径 15 cm の供試体の圧縮強度)

f'_c15 is f'_c for diameter of 150mm

Compressive strength($f'c$) – height/diameter

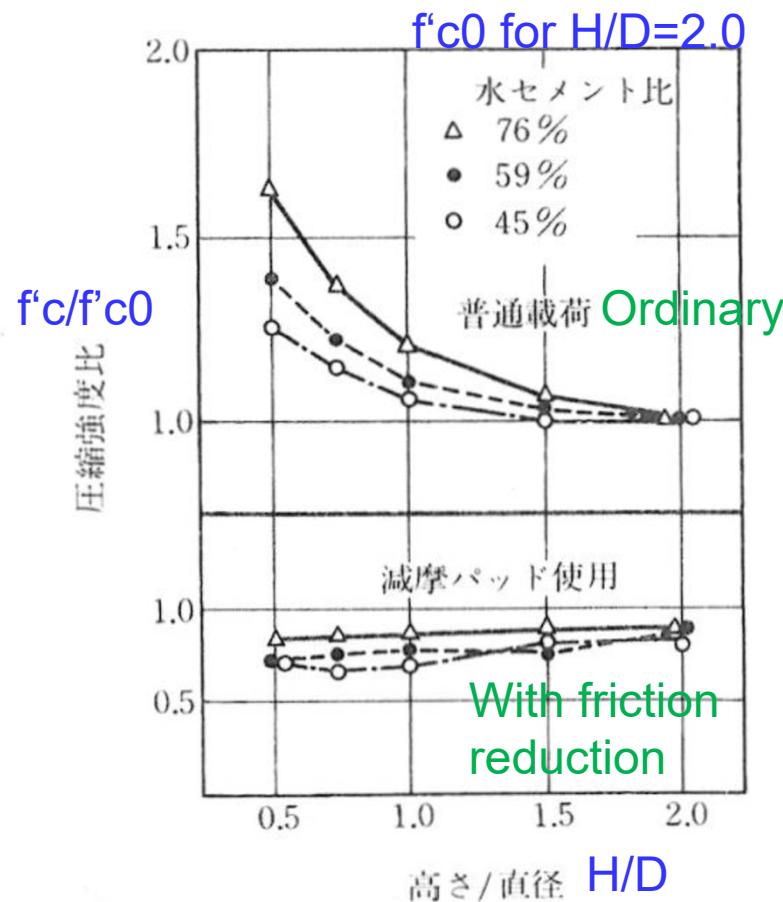


図-2.8 円柱供試体の高さ/直徑比と圧縮強度の関係⁶³⁾

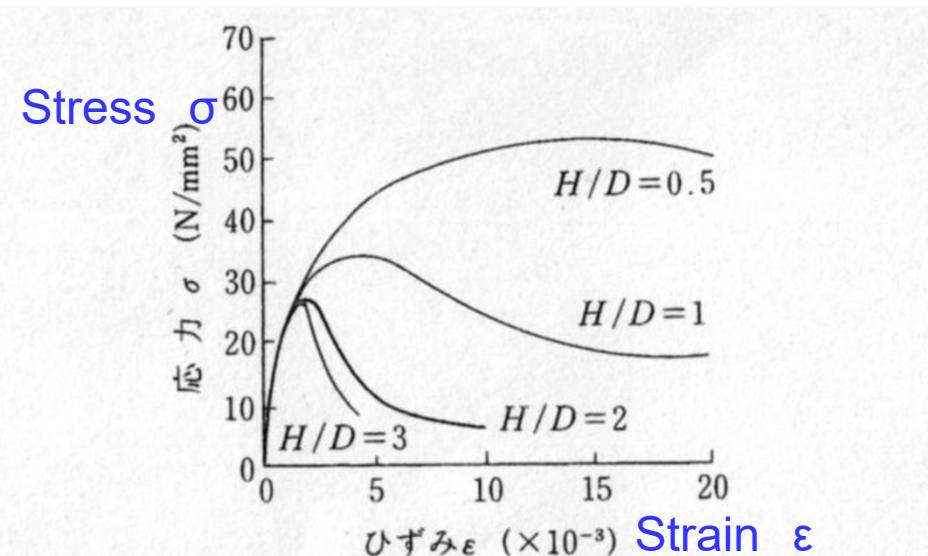


図-2.35 応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体形状 (H/D) の影響 (端面摩擦がある場合)¹⁰⁵⁾

Stress-strain relation is for cylinder test without friction reduction

from Concrete handbook(JCI)

Compressive strength(f'_c) – loading rate

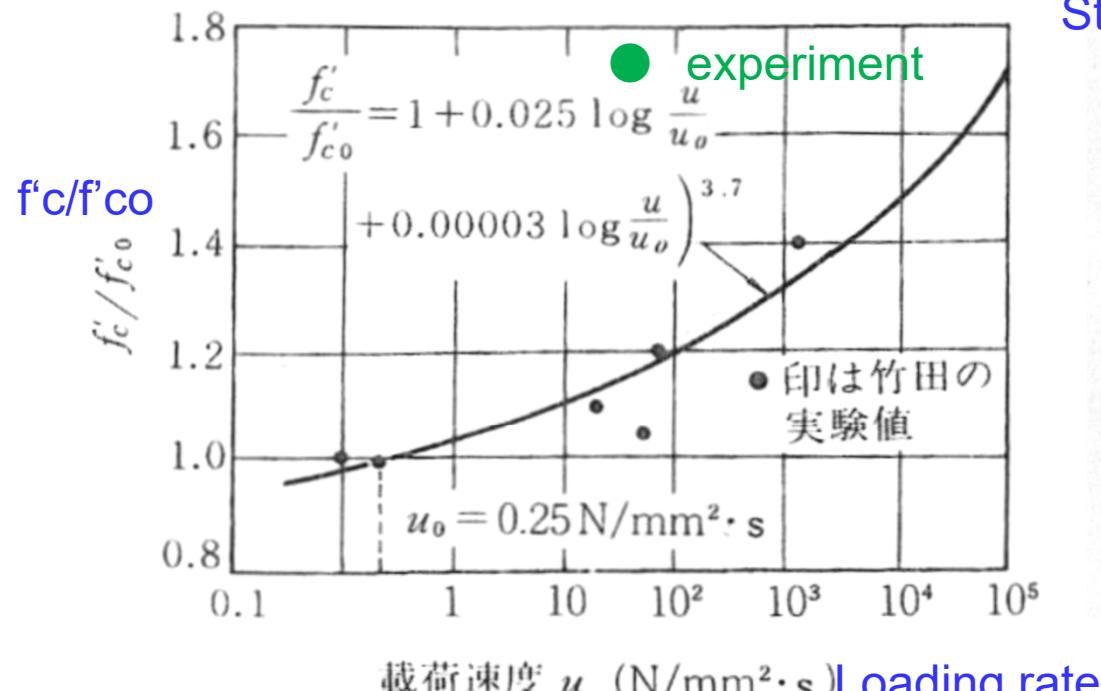


図-2.9 載荷速度と圧縮強度比の関係⁶⁶⁾ (N/mm²·s)
(標準載荷速度 u_0 で得られた強度 f'_{c0} に対する比)

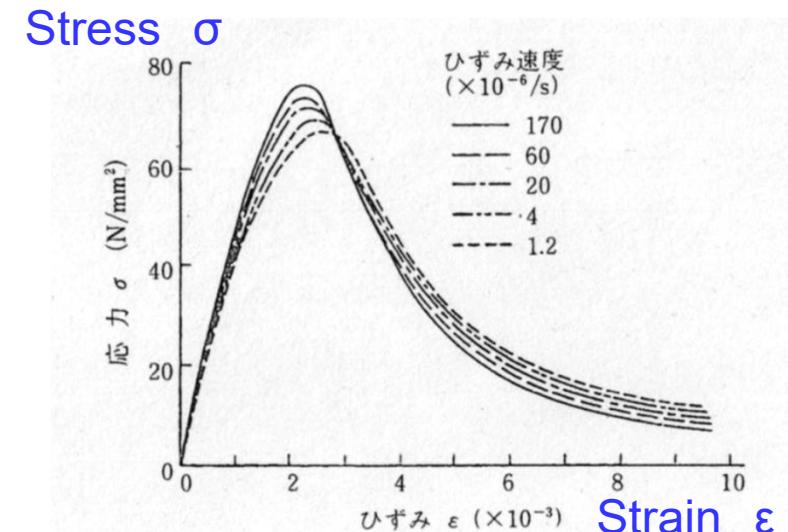


図-2.39 応力-ひずみ曲線に及ぼす載荷速度の影響（載荷速度が速い場合）¹⁰¹⁾

Stress-strain relation for different strain rate

Tensile strength ($f't$) - Compressive strength($f'c$)

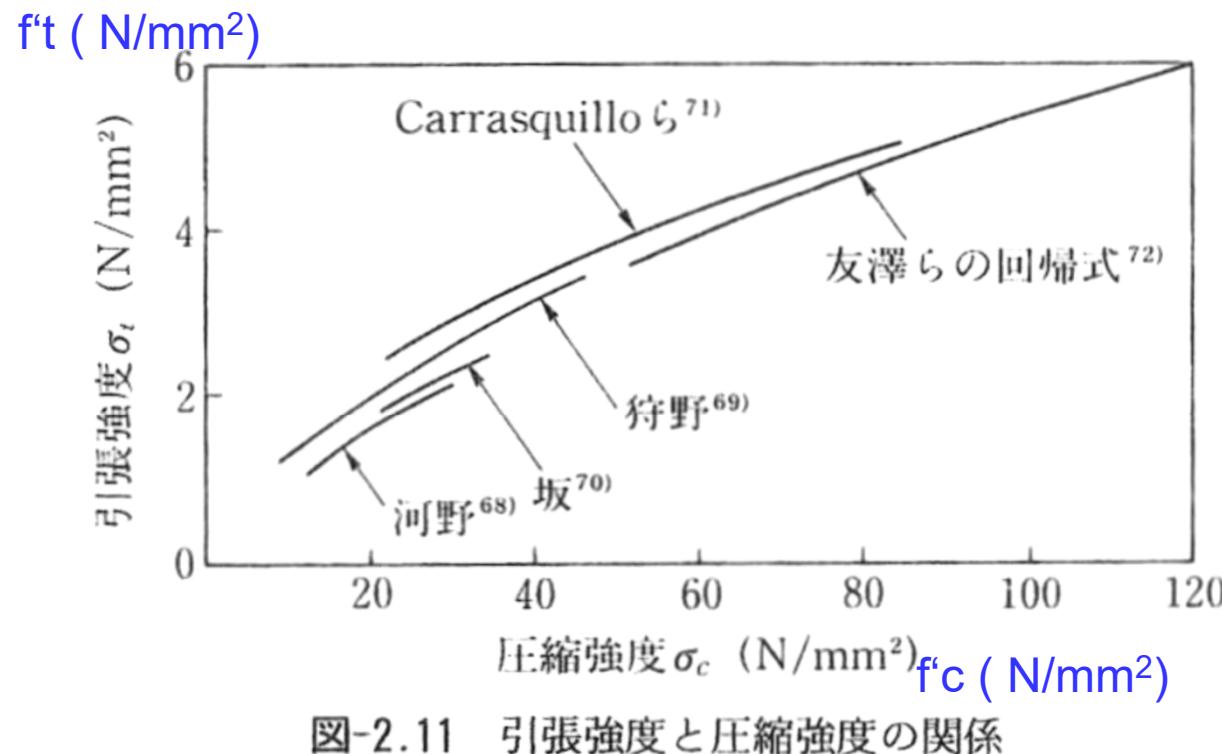


図-2.11 引張強度と圧縮強度の関係

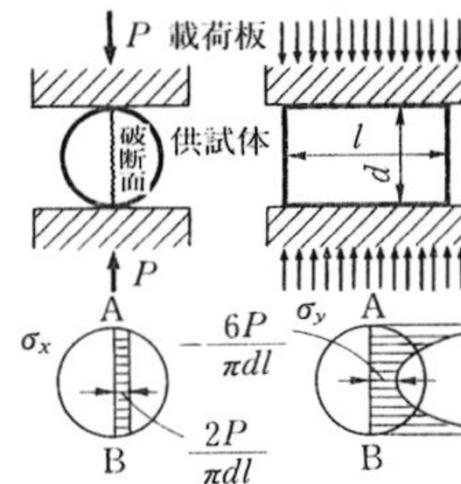


図-2.12 JIS によるコンクリート
の引張強度試験法と応力
分布

支圧強度

Bearing strength

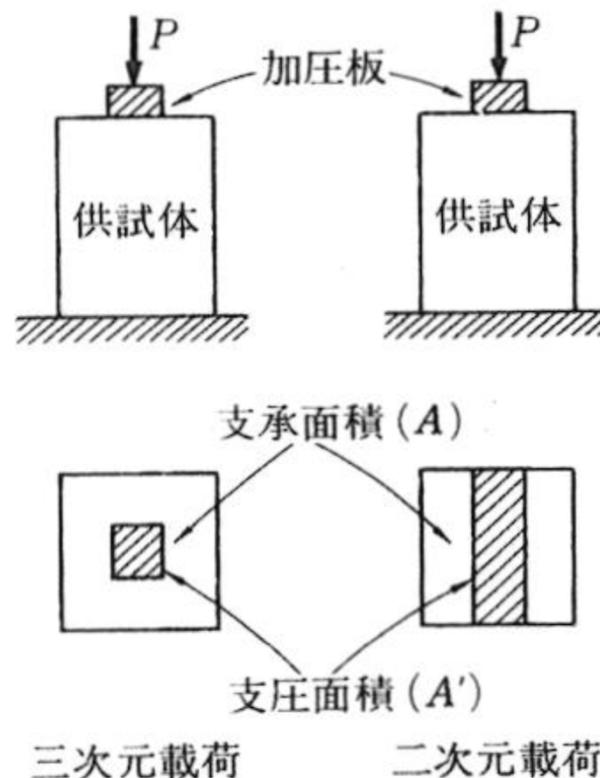


図-2.18 局部圧縮⁸¹⁾

組み合わせ応力下の強度(破壊曲面)¹² (failure surface)

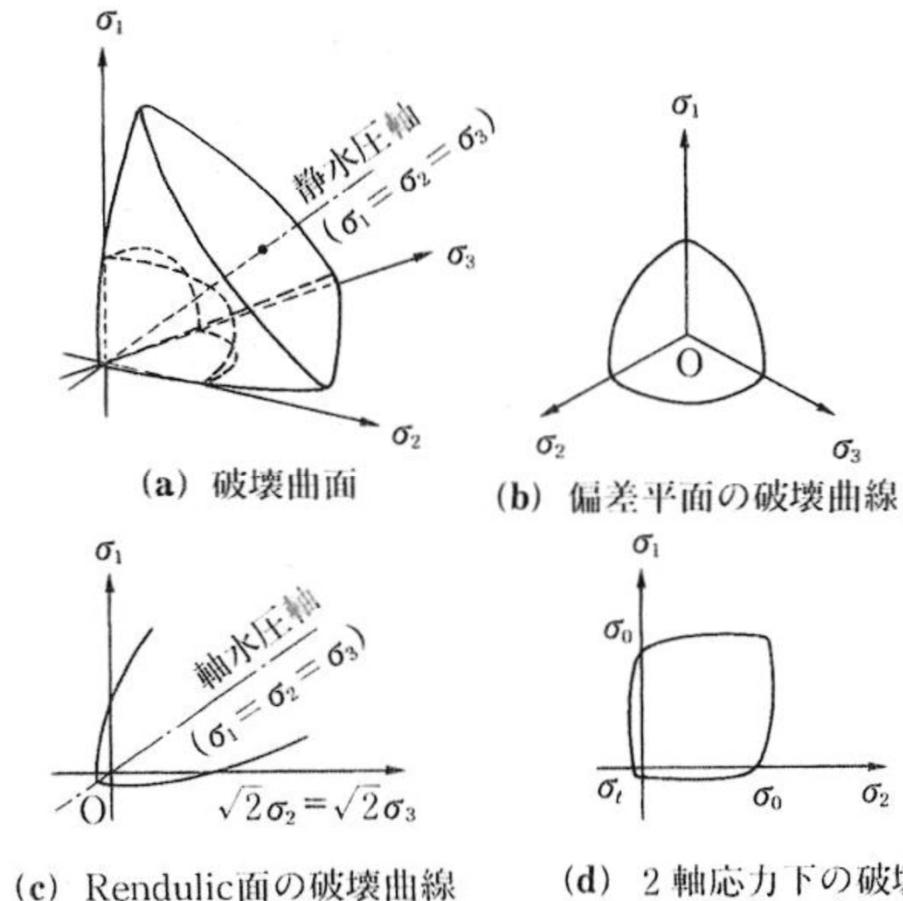


図-2.21 コンクリートの破壊曲面

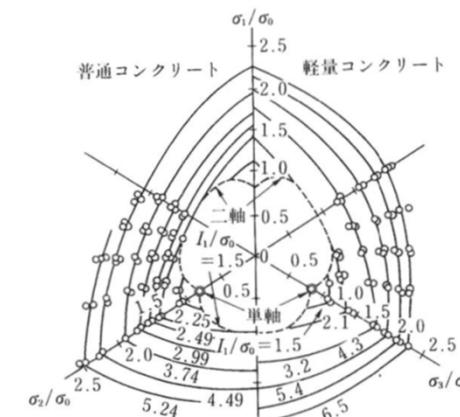


図-2.22 偏差平面の破壊曲線例^{36),37)}

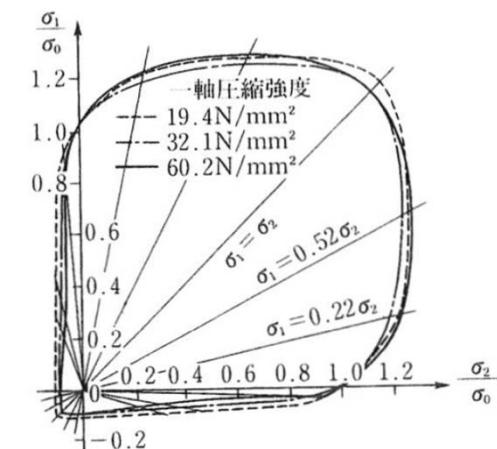


図-2.24 2軸応力下の破壊曲線例³⁸⁾

from Concrete handbook(JCI)

付着強度

Bond strength

Bond strength τ_b (N/mm²)
平均付着応力 (N/mm²)

		0	2	4	6	8	
	Upper horizontal	0.29					立方体強度 $f_c = 22.1 \text{ MPa}$
	Lower horizontal	0.74					丸 鋼
	Horizontal		0.98				
	Vertical			3.43			
	Upper horizontal			1.96			Deformed bar
	Lower horizontal				3.92		異形 鉄筋
	Horizontal				4.70		
	Vertical					8.62	

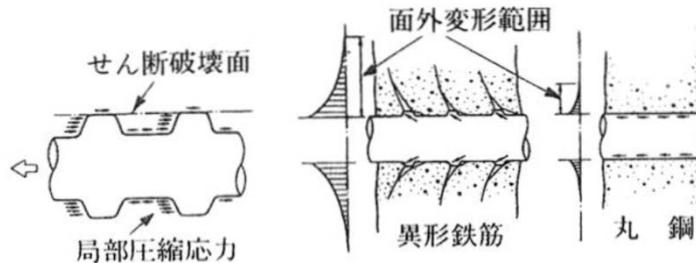


図-2.25 付着耐荷機構⁹⁸⁾

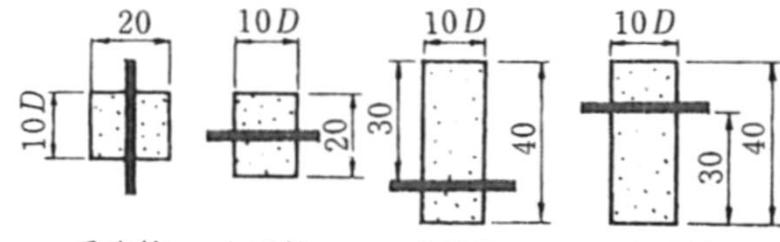


図-2.26 鉄筋の配置と付着強度⁷⁹⁾
Vertical Horizontal Lower Upper
Horizontal

from Concrete handbook(JCI)

圧縮破壊過程

Failure mechanism under compression

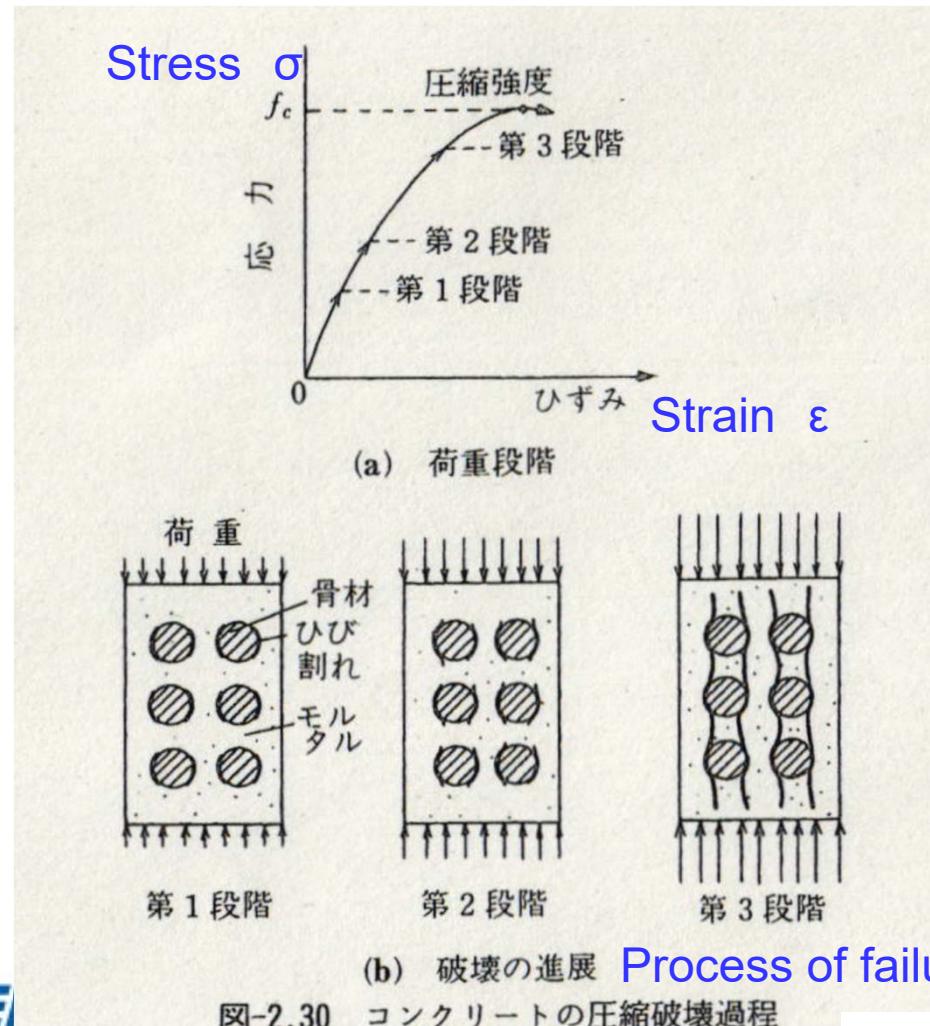


図-2.30 コンクリートの圧縮破壊過程

from Concrete handbook(JCI)

応力歪曲線

Stress-strain relation and peak point

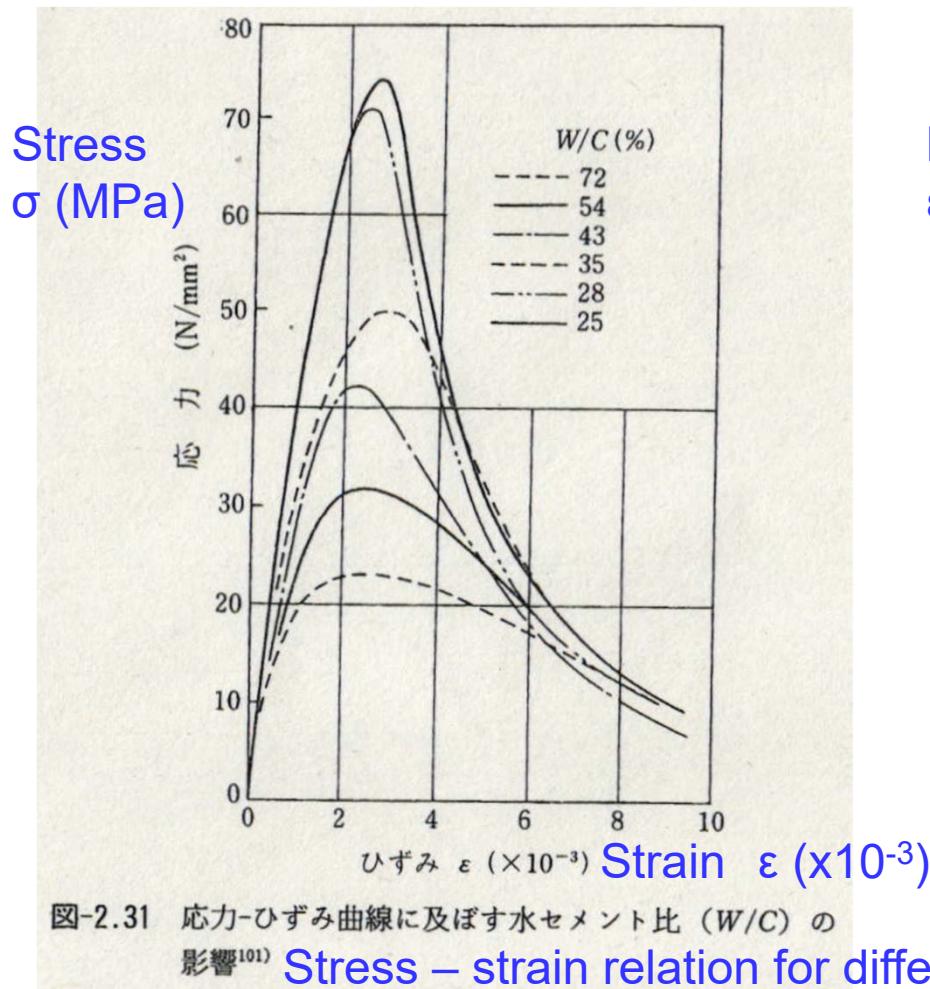


図-2.31 応力-ひずみ曲線に及ぼす水セメント比 (W/C) の影響¹⁰¹⁾ Stress – strain relation for different f'c

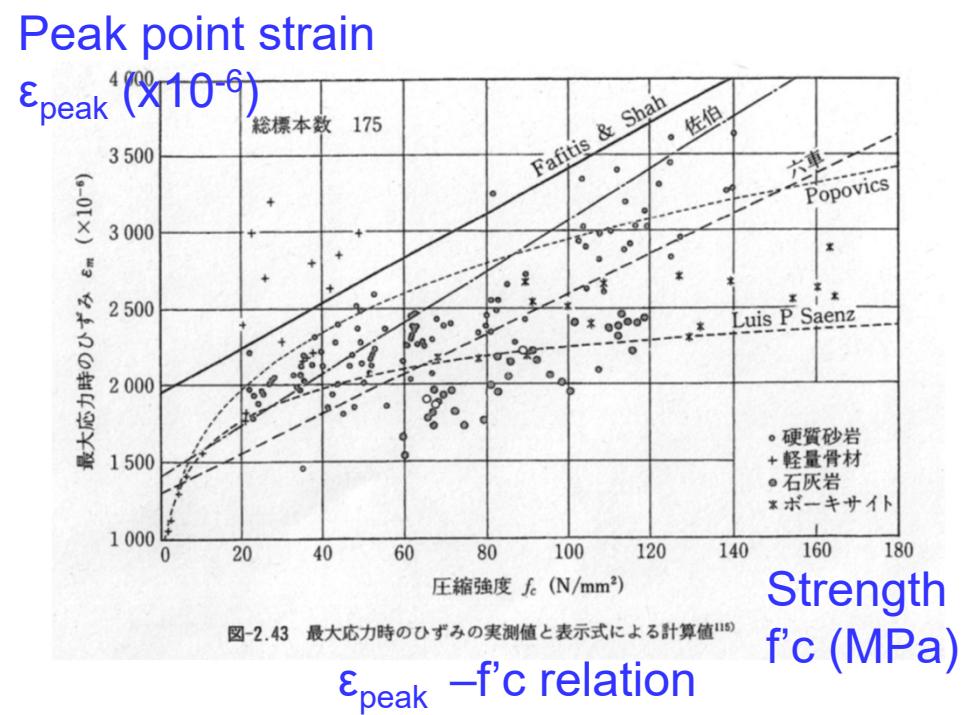


図-2.43 最大応力時のひずみの実測値と表示式による計算値¹¹⁵⁾

$\varepsilon_{\text{peak}} - f'_c$ relation

無次元化応力－無次元化歪関係

Nondimensionlized stress- Nondimensionlized strain relation

表-2.4 無次元化応力-無次元化ひずみ曲線の表示式¹¹⁶⁾

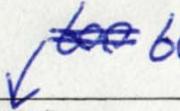
研究者	表示式	
梅村	$\eta = 6.75 (e^{-0.812\xi} - e^{1.218\xi})$	Umemura
Hognestad	$\begin{cases} \eta = 2\xi - \xi^2 & : 0 \leq \xi \leq \xi_m \\ \eta = 1 - \frac{0.15}{0.0038 - \xi_m} (\xi - \xi_m) & : \xi \geq \xi_m \end{cases}$ $f_c' = 0.85 f_c, \xi_m = 2 f_c/E_i$	Hognestad
Kent & Park	$\begin{cases} \eta = 2\xi - \xi^2 & : 0 \leq \xi \leq \xi_m \\ \eta = 1 - \frac{0.5}{\xi_{50u} - 0.002} (\xi - 0.002) & : \xi_m \leq \xi \leq \xi_{20c} \\ \eta = 0.2 & : \xi \geq \xi_{20c} \end{cases}$ $\xi_m = 0.002, \xi_{50u} = \frac{0.21 + 0.002 f_c'}{f_c' - 70}$	Kent&Park (fc in kgf/cm ² . See p.9 of Scott thesis. Eq. 1.9 should be $\xi_{50u} = \frac{0.21 + 0.29 f_c'}{145 f_c' - 70}$ for f_c' in MPa.)
鈴木	$\begin{cases} \eta = 2\xi - \xi^2 \\ \eta = -\tan\theta \cdot \xi + (\tan\theta + 1) \\ \tan\theta = 1.33 \times 10^{-3} f_c' + 0.1002 \end{cases}$	Suzuki
Fafitis & Shah	$\begin{cases} \eta = 1 - (1 - \xi)^a & : 0 \leq \xi \leq \xi_m \\ \eta = \exp \{-k(\xi - \xi_m)^{1.15}\} & : \xi \geq \xi_m \end{cases}$ $a = \frac{E_i \xi_m}{f_c'}, k = 0.17 f_c'$	Fafitis&Shar
六車	$\begin{cases} \sigma = E_i \xi + (f_c - E_i \xi_m) \xi^2 & : 0 \leq \xi \leq \xi_m \\ \sigma = \frac{1}{\xi_m - 0.004} \{(f_c - 100) \xi + 100 \xi_m + 0.004 f_c\} & : \xi_m \leq \xi \leq 4 \xi_m \\ \xi_m = (0.0013 f_c + 1.299) \times 10^{-3} \end{cases}$	Muguruma
Popovics	$\eta = \frac{n\xi}{n-1+\xi^n}$ $n = 0.00571 f_c + 1$	Popovics
谷川	$\eta = \frac{1}{n} + \frac{(n-1)X}{n-1+X^n}$ $n = 1 + a(f_c/100)^b, X = \xi^m, a, b, m : \text{実験定数}$	Tanigawa

(注) $\eta = \sigma/f_c, \xi = \epsilon/\epsilon_m$
 f_c : 圧縮強度 ϵ_m : 最大応力時のひずみ E_i : 初期弾性係数 f_c' : 供試体の圧縮強度

ヤング係数推定式

Formula for Young's modulus

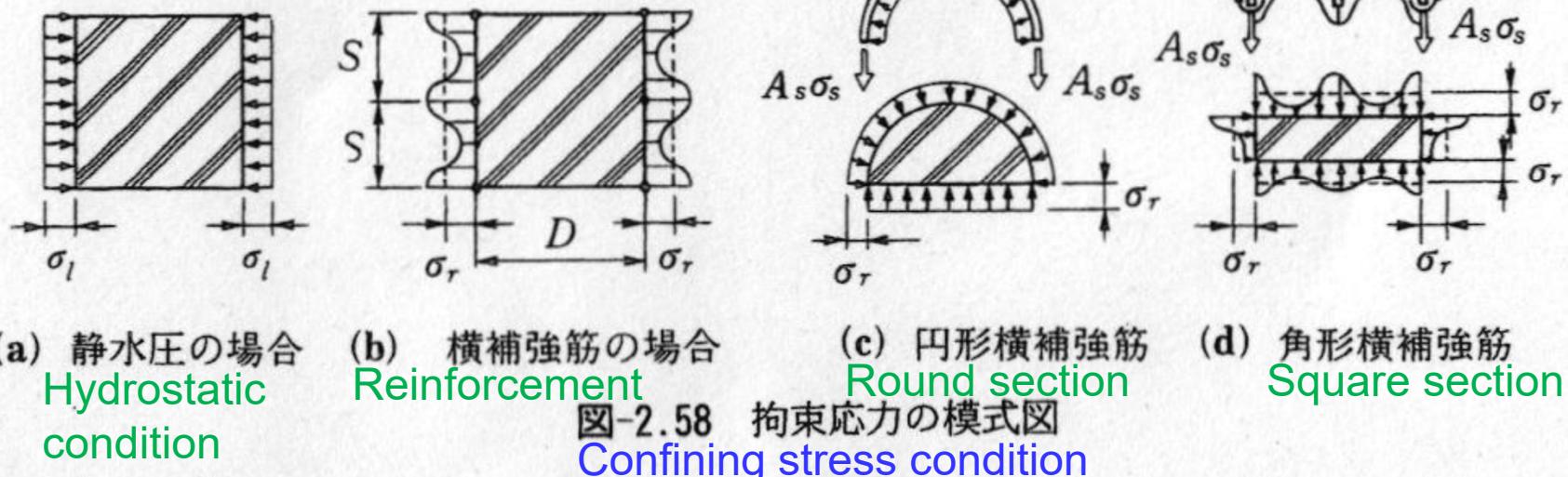
表-2.5 コンクリートのヤング係数の推定式・設計値

略称など	ヤング係数推定式または設計値						出典																					
建築学会式	$E = 210\,000 \cdot (\gamma/2.3)^{1.5} \cdot (F_c/200)^{0.5}$ (kgf/cm ²)						日本建築学会 RC 規準																					
土木学会	<table border="1"> <thead> <tr> <th>設計基準強度 (kgf/cm²)</th> <th>180</th> <th>240</th> <th>300</th> <th>400</th> <th>500</th> <th>600</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>普通コンクリート</td> <td>2.2</td> <td>2.5</td> <td>2.8</td> <td>3.1</td> <td>3.3</td> <td>3.5</td> </tr> <tr> <td>軽量骨材コンクリート*</td> <td>1.3</td> <td>1.5</td> <td>1.6</td> <td>1.9</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table>						設計基準強度 (kgf/cm ²)	180	240	300	400	500	600	普通コンクリート	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.5	軽量骨材コンクリート*	1.3	1.5	1.6	1.9	—	—	土木学会 RC 示方書
設計基準強度 (kgf/cm ²)	180	240	300	400	500	600																						
普通コンクリート	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	3.5																						
軽量骨材コンクリート*	1.3	1.5	1.6	1.9	—	—																						
	* ($\times 10^5$ kgf/cm ²) 骨材の全部を軽量骨材とした場合																											
ACI 363 式	$E = (40\,000 \cdot f_c^{0.5} + 1\,000\,000) \cdot (\gamma/2.346)^{1.5}$ (psi)						Report no. ACI 363 R-84																					
CEB-FIP 式	$E = \alpha \cdot 21\,500 \cdot (\sigma_{28}/10)^{1/3}$ (N/mm ²) $\alpha = 1.2$: 玄武岩, 硬質石灰岩 1.0: 石英岩 0.9: 石灰岩 0.7: 砂岩 						CEB-FIP MODEL CODE 1990																					
New RC 式	$E = k_1 \cdot k_2 \cdot 33\,500 \cdot (\gamma/2.4)^2 \cdot (f_c/600)^{1/3}$ (N/mm ²) $k_1 = 1.2$: 石灰岩碎石, か焼ボーキサイト = 0.95: 石英片岩碎石, 安山岩碎石, 玉石碎石 玄武岩碎石, 粘板岩碎石 = 1.0: その他の粗骨材 $k_2 = 1.1$: フライアッシュ = 0.95: シリカフューム, 高炉スラグ微粉末 フライアッシュ起源微粉末 = 1.0: 上記以外の混和材, 混和材無混入						New RC 報告書 (1992年)																					

(注) E : ヤング係数, F_c : 設計基準強度, f_c : 圧縮強度, σ_{28} : 28日圧縮強度, γ : 単位容積質量

コンクリートの拘束効果

Confined concrete



拘束コンクリートの強度と歪(円形断面)

Strength and strain of confined concrete (Circular section)

表-2.6 円形横補強筋をもつコンファインドコンクリートの強度・ひずみ算定式

研究者	圧縮強度比 $F_{cf}/F_0, F_{cf}/F_c$	圧縮強度時ひずみ比 $\varepsilon_{0,cf}/\varepsilon_0, \varepsilon_{0,cf}/\varepsilon_c$	備 考
Richart et al.	$1+4.1 C_t$	$1+5(K-1)$	$C_t = \frac{p_s \sigma_{sy}}{F_0}, K = \frac{F_{cf}}{F_0}$
Iyenger et al.	$1+2.3 C_i$	$1+23 C_i$	$C_i = (p_b - \bar{p}_b) \frac{\sigma_{sy}}{F_c}$
六車 ら	$1 + 150 C_c$	$1+1460 C_c$	$C_c = p_b \frac{\sqrt{\sigma_{sy}}}{F_c} \left(1 - \frac{S}{2w}\right)$
中塚 ら	$1+4.41 \frac{p_s \sigma_{sy}}{F_0} \left(1-1.24 \frac{S}{D}\right)$	$1+\left(\frac{100}{F_0}\right)^2 p_s \sigma_{sy} \left(1-1.11 \frac{S}{D}\right)$	_____
Mander et al.	$2.254 \sqrt{1+7.94 \frac{C_0}{F_0}} - 1.254 - 2 \frac{C_0}{F_0}$	$1+5(K-1)$	$C_0 = 0.5 p_b \sigma_{sy} \left(1 - \frac{S}{2D}\right)^2, K = \frac{F_{cf}}{F_0}$
崎野 ら	$0.8 + \kappa \frac{p_b \sigma_{sy}}{F_c}$	$\begin{cases} 1+4.7(K-1) & (K \leq 1.5) \\ 3.35+20(K-1.5) & (K > 1.5) \end{cases}$	$\kappa = 2.09 \left(1 - \frac{S}{2D}\right)^2, K = \frac{F_{cf}}{F_c}$

(注) F_0, ε_0 : プレーンコンクリートの圧縮強度およびそのときのひずみ度 F_c, ε_c : コンクリートシリンダー強度およびそのときのひずみ度 $F_{cf}, \varepsilon_{0,cf}$: コンファインドコンクリートの圧縮強度およびそのときのひずみ度 w : 核断面の最小寸法 σ_{sy} : 横補強筋の降伏強度 p_b : 横補強筋の体積比 p_s : 横補強筋の面積比 ($= \sum a_s / SD$) S : 横補強筋ピッチ D : 横補強筋の直径

拘束コンクリートの強度と歪(矩形断面)

Strength and strain of confined concrete (Rectangular section)

表-2.7 角形横補強筋をもつコンファインドコンクリートの強度・ひずみ算定式

研究者	圧縮強度比 $F_{cf}/F_0, F_{cf}/F_c$	圧縮強度時ひずみ比 $\varepsilon_{0,cf}/\varepsilon_0, \varepsilon_{0,cf}/\varepsilon_c$	備 考
Iyenger et al.	$1 + 0.84 C_i$	$1 + 6.45 C_i$	$C_i = (p_b - \bar{p}_b) \frac{\sigma_{sy}}{F_0} = p_b \left(1 - \frac{S}{D}\right) \frac{\sigma_{sy}}{F_0}$
六車ら	$1 + 50 C_c$	$1 + 450 C_c$	$C_c = p_b \frac{\sqrt{\sigma_{sy}}}{F_c} \left(1 - \frac{S}{2D}\right)$
Park et al.	K	K	$K = 1.0 + \frac{p_b \sigma_{sy}}{F_c}$
Sheikh et al.	K_s	$1 + \frac{0.81}{C} \left[1 - 5 \left(\frac{S}{D}\right)^2\right] \frac{p_b \sigma_{sy}}{\sqrt{F_0}}$	$K_s = 1.0 + \frac{D^2}{140 p_{acc}} \left[\left(1 - \frac{mC^2}{5.5D^2}\right) \left(1 - \frac{S}{2D}\right)^2 \right] \sqrt{p_b \sigma_{sy}}$
中塚ら	$1 + 4.41 \alpha \beta_1 \frac{p_s \sigma_{sy}}{F_0} \left(1 - 1.24 \frac{S}{D}\right)$	$1 + \alpha \beta_2 \left(\frac{100}{F_0}\right)^2 p_s \sigma_{sy} \left(1 - 1.11 \frac{S}{D}\right)$	$\alpha = 0.075n + 0.7$ $\beta_1 = 1 - \frac{0.12}{n + 0.35}, \quad \beta_2 = 1 - \frac{1.0}{n + 1.9}$
Mander et al.	$2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{C_0}{F_0}} - 1.254 - 2 \frac{C_0}{F_0}$	$1 + 5(K-1)$	$C_0 = p_b \sigma_{sy} \left(1 - \frac{S}{2D}\right)^2 \left(1 - \sum_{i=1}^m \frac{w_i^2}{6D^2}\right), K = \frac{F_{cf}}{F_0}$
崎野ら	$1 + \kappa \frac{p_b \sigma_{sy}}{F_c}$	$\begin{cases} 1 + 4.7(K-1) & (K \leq 1.5) \\ 3.35 + 20(K-1.5) & (K > 1.5) \end{cases}$	$\kappa = 11.5 \left(\frac{d}{C}\right) \left(1 - \frac{S}{2D}\right), K = \frac{F_{cf}}{F_c}$

(注) F_0, ε_0 : プレーンコンクリートの圧縮強度およびそのときのひずみ度 F_c, ε_c : コンクリートシリンダー強度およびそのときのひずみ度 $F_{cf}, \varepsilon_{0,cf}$: コンファインドコンクリートの圧縮強度およびそのときのひずみ度 C : 主筋間隔 σ_{sy} : 横補強筋の降伏強度 d : 横補強筋径 E_{cf} : コンファインドコンクリートの応力下降勾配 p_{acc} : コアコンクリートの圧縮耐力 p_b : 横補強筋の体積比 p_s : 横補強筋の面積比 ($= \sum a_s/SD$) S : 横補強筋ピッチ D : 横補強筋の最小一辺長さ n : サブタイ本数 m , w_i : サブタイの脚間の数および距離

拘束コンクリートの応力歪関係(矩形断面)

Stress and strain relation of confined concrete (Rectangular section)

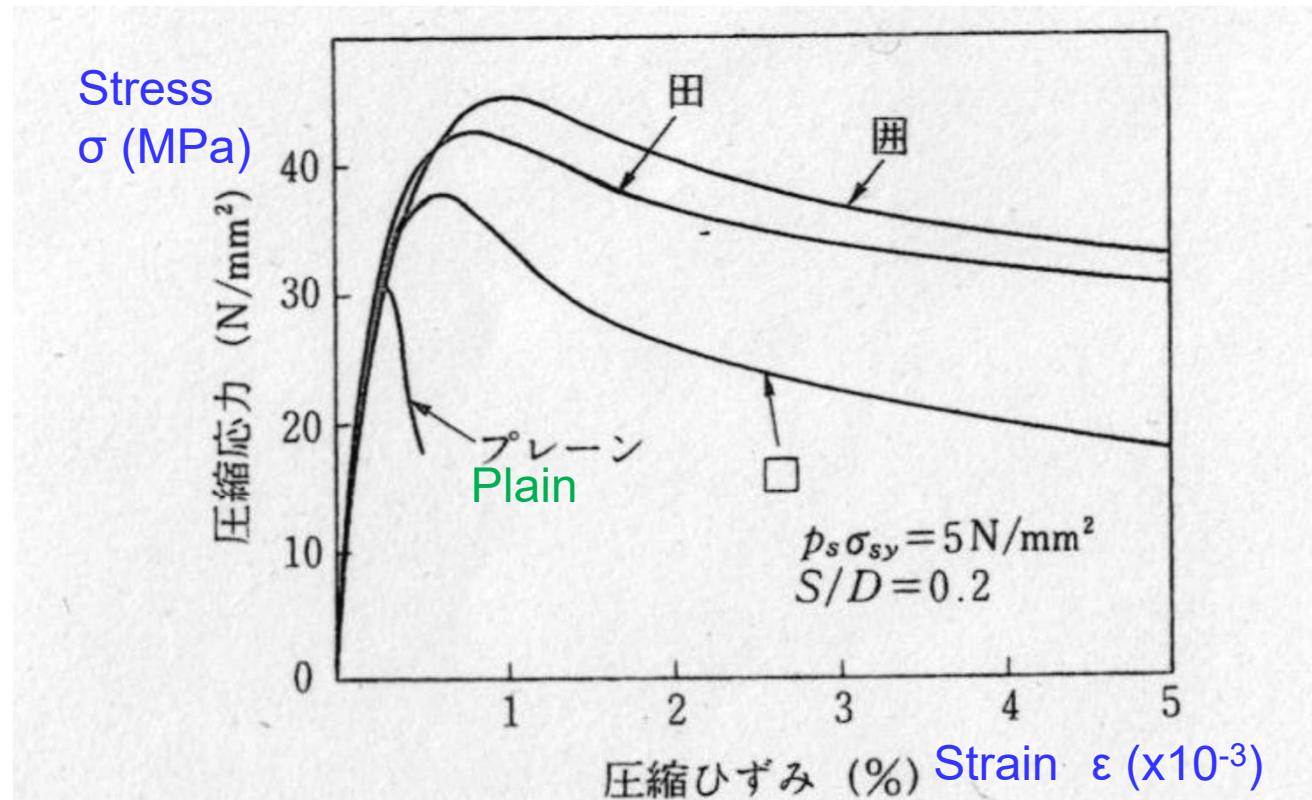


図-2.61 角形横補強筋をもつコンファインドコンクリート
の応力-ひずみ関係¹⁵⁶⁾

Stress – strain relation for confined
concrete with rectangular section