

論文

[2003] コンファインド高強度コンクリートの有効側圧と応力-ひずみ関係

正会員 畑中重光(三重大学建築学科)

正会員○服部宏己(東 急 建 設)

近藤洋右(三重大学大学院)

正会員 谷川恭雄(名古屋大学建築学科)

1. まえがき

別報[1]で3軸圧縮下の普通・高強度コンクリートの応力-ひずみモデルを提案した。本研究では、円形および角形のフープ筋で拘束した普通・高強度コンクリートが圧縮破壊していく過程で内部に発生する側圧を定量的に評価する。そのため、まず、コンファインドコンクリートの1軸圧縮下の塑性変形挙動を実験的に調べ、提案モデルを用いてフープ筋による有効側圧(等価側圧)を求める。次に、得られた等価側圧に基づき、帯筋のピッチおよび形状の相違が、拘束力の有効率に及ぼす影響を定量的に評価する。

2. 実験方法

実験の概要を表-1 (a)および(b)に示す。実験-Iは供試体の高さ-直径比(H/D)の影響を、実験-IIは供試体の断面形状の影響を調べるための実験である。その他の実験要因としては、水セメント比(W/C)、側圧の大きさ(σ_L)および帯筋ピッチ(S)を取り上げた。供試体の製作には、普通ポルトランドセメント、川砂(5mm未満)、碎石(5~15mm)、高性能AE減水剤および鋼輪(円形および角形ともに内径10cm)を使用した。鋼輪が降伏した場合に供試体に加わる側圧を表-2に示す。

実験-Iでは、供試体は、養生室内(温度 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $88 \pm 2\%$)で空中養生を行い、試験材令は約50日とした。実験-IIでは、養生室内(温度 $19 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $90 \pm 2\%$)で空中養生し、

表-2 鋼輪の降伏時の側圧の計算値

(a)実験-I

t (mm)	断面 形状	f_y (kgf/cm ²)	$\mu\sigma_{LV}$ (kgf/cm ²)	(S, d) (mm, mm)
3.1	円形	1950	12.6	(25, 2.6) (50, 5.2) (100, 10.4)
			25.1	(25, 5.2) (50, 10.4) (100, 20.8)

f_y: 鋼材の降伏点、S: ピッチ、t: 肉厚d: 鋼輪幅、 $\mu\sigma_{LV}$: 鋼輪降伏時の計算側圧

$$\mu\sigma_{LV} = \frac{2 \cdot t \cdot d}{S \cdot D} \times f_y$$

(b)実験-II

S (mm)	t (mm)	断面 形状	f_y (kgf/cm ²)	d (mm)	$\mu\sigma_{LV}$ (kgf/cm ²)
25	2.9	円形	2950	2.6	17.8
				5.2	35.6
				10.4	71.2
		角形	3200	2.6	19.3
				5.2	38.6
				10.4	77.2

表-1 実験概要

(a)実験-I

断面 (cm)	H/D	W/C	$\sigma_{c'}$ (kgf/cm ²)	σ_L (kgf/cm ²)	S (cm)
φ10	1	0.55	300	0	2.5
	2	0.32	700	12.5 25.0	5.0 10.0
	3	0.32	700	0 25.0	2.5

* $\sigma_{c'} = 50 \text{ kgf/cm}^2$ のみ

H/D: 供試体の高さ-直径比、W/C: 水セメント比

 $\sigma_{c'}$: コンクリート強度の目標値、 σ_L : 側圧の目標値

(b)実験-II

断面 (cm)	H/D	W/C	$\sigma_{c'}$ (kgf/cm ²)	σ_L (kgf/cm ²)	S (cm)
φ10	1	0.55	300	0	2.5
□10		0.32	700	18 36 72*	

*: $\sigma_{c'} = 700 \text{ kgf/cm}^2$ のみ

試験材令は約40日とした。供試体の個数は、実験-I および II 共に各要因毎に2個とした。

載荷は、200 t f アクチュエータ試験機を使用し、軸方向ひずみ(ϵ_1)が、 20×10^{-3} に至るまで、一定ひずみ速度(毎分約 1×10^{-3})で継続的に圧縮載荷した。載荷端面は、 $H/D=1$ の供試体の場合、2枚のポリプロピレンシートにシリコングリスを塗布した減摩パッドを挿入した。 $H/D=2$ および 3 の供試体は、破壊領域を明らかにするため、摩擦をきらずに載荷を行った。

供試体の軸方向のひずみを測定するため、それぞれ4本のボルトによって供試体の上下端から0.8cmの位置に、鋼製棒を固定した。すなわち、軸ひずみの検長は($H-1.6$) cmである。 $H/D=1$ の供試体の場合、応力上昇域は鋼製棒に取り付けた一対の変位計で、下降域は鋼製棒を外した後、載荷板間に取り付けた一対の変位計でそれぞれ測定した。 $H/D=2$ および 3 の場合は、一貫して鋼製棒に取り付けた一対の変位計で測定した。円形の供試体については、各鋼輪に貼付した一対のワイヤーストレインゲージ(W.S.G.)によってひずみを測定した。図-1 に供試体寸法およびゲージ貼付箇所を示す。

3. 実験結果とその考察

3.1 供試体の高さ-直径比(H/D)の影響 (実験-I)

(1) 鋼輪のひずみ分布と側圧

図-2 (a) および (b) は、 $H/D=2$ および 3 の供試体の鋼輪のひずみ分布状況を示したものである。(a)図と(b)図を比較すると破壊集中域の広がり、供試体の H/D が2と3ではあまり相違しない。また、図には示していないが、側圧レベルが高いほど破壊域が広がる傾向が見られた。

図-3 (a) および (b) は、図-2 (a) および (b) に対応する供試体の鋼輪のひずみから計算される側圧(計算側圧 σ_L)を示したものである。図-3によれば、供試体の H/D の増加に伴い側圧のばらつきが大きくなり、また、降伏しない鋼輪の数も増える。したがって、供試体の H/D の増加と共に、鋼輪の保有する横拘束能が発揮されなくなっていると言える。

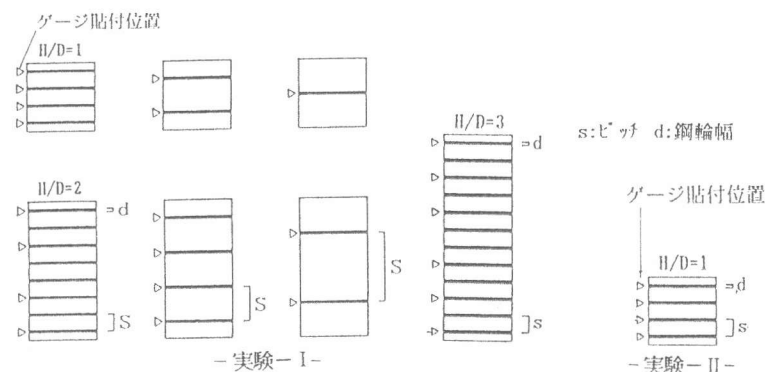


図-1 供試体形状とゲージ貼付位置

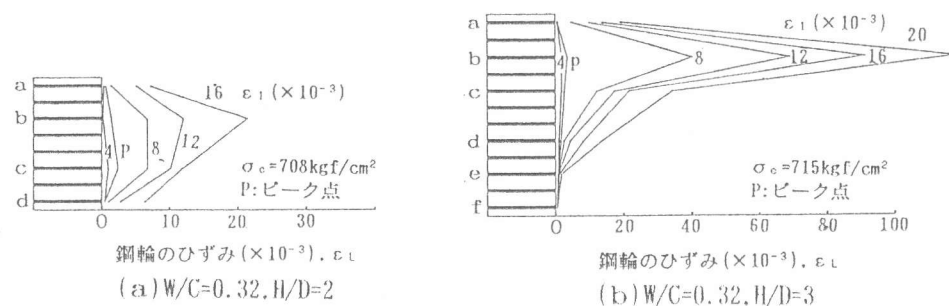


図-2 鋼輪のひずみ分布の変遷

(2) 応力-ひずみ曲線

図-4 は、縦応力-縦ひずみ曲線（以下、 $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線）に及ぼす供試体の H/D の影響を示したものである。ここで、ひずみは、前述のように供試体のほぼ全長に渡る平均値である。図によれば、供試体の H/D の増加に伴ってピーク時の応力が減少し（この傾向は能働側圧の場合[2]とは異なる）、また、 $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線の下降域が脆性的になる。この原因の一つとして側圧のばらつき（図-3 参照）が考えられる。

(3) 破壊領域長さ (l_P)

ここでは、既に提案されている仮想破壊域モデル[3]を用いてコンクリート供試体の破壊領域長さ (l_P) の数式表示を行う。 l_P の値は、図-5 に示す仮想破壊域モデルの概念に基づいて求めた。図-6 は、破壊領域長さの平均値 ($\bar{l}_P$: ピーク点以降の各ひずみレベル ε_1 での l_P の値の平均) について調べたものである。図によれば、高側圧になるほど破壊領域が広がる傾向にあることが分かる。図中に示したように $\bar{l}_P$ の値は、載荷パスの違いに拘らず、鋼輪の降伏時の計算側圧 ($H\sigma_{LY}$) の関数として次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \bar{l}_P &= (H\sigma_{LY}/30 + 1) \cdot D & (0 \leq H\sigma_{LY} \leq 30 \text{ kgf/cm}^2) & (1) \\ \bar{l}_P &= 2 \cdot D & (30 \text{ kgf/cm}^2 \leq H\sigma_{LY}) & \end{aligned}$$

供試体の全域がほぼ均等に破壊すると見なせる $H/D=1$ の供試体の $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線を破壊領域に適用し[3]、その長さを式(1)で求めれば、 H/D の異なるコンクリートの $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線が推定できる。前掲の図-4 には、 $H/D=2$ および 3 の供試体の応力下降域の $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線について、 $H/D=1$ の供試体の $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線から推定した値も併示してある。

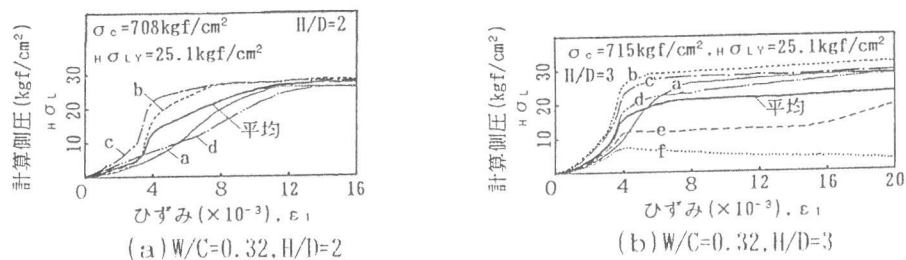


図-3 鋼輪の計算側圧の変遷

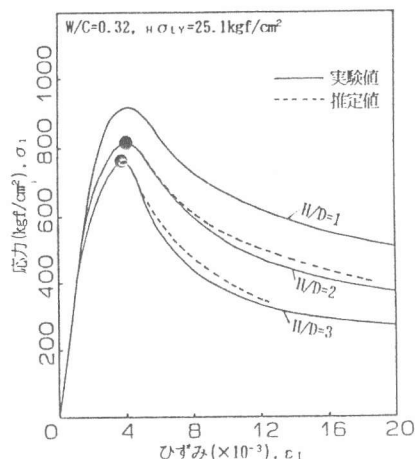


図-4 $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線に及ぼす H/D の影響

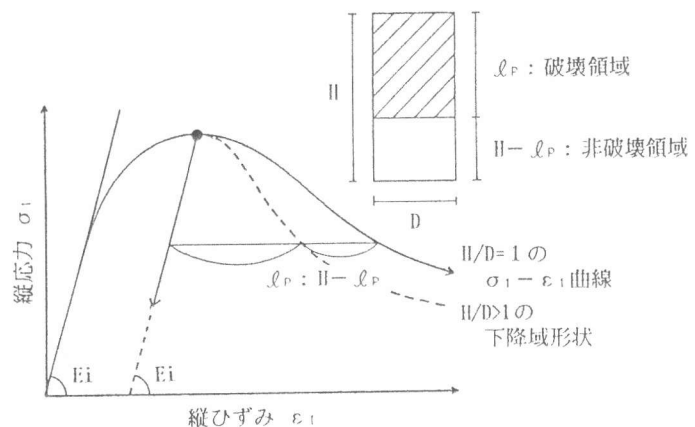


図-5 仮想破壊域モデル

また、図-7は、降伏時の計算側圧 $H\sigma_{LY}$ の異なる $H/D=2$ の供試体の $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲線の推定精度を調べたものである。ただし、ここでは、ピーク点を一致させ、下降域形状についての比較を行った。いずれの場合も、両者は比較的良好に一致しているといえる。

3.2 帯筋ピッチの影響(実験-I)

(1) $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲線および等価側圧曲線

図-8は、 $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲線に及ぼす帯筋ピッチの影響を示したものである。図によれば、たとえ帯筋量が等しくても帯筋ピッチの増大に伴い、ピーク点の応力とひずみおよび圧縮靱性は低下する。図-9は、3軸圧縮時の応力-ひずみモデル[1]に基づいて求めた図-8の $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲線に対応する等価側圧曲線を示したものである。ここで、等価側圧($\varepsilon\sigma_L$)とは、コンファインドコンクリートの圧縮靱性と同等な圧縮靱性を得るために要する能働かつ一様な側圧の大きさを表す。図によれば、帯筋ピッチの違いに拘らず、 $\varepsilon_1=8\times 10^{-3}$ 以降等価側圧の値はほぼ一定値に近づく。ただし、 ε_1 の範囲は 4.0×10^{-3} 以上としてある。

(2) 低減係数 β

既報[2]では、能働型側圧の載荷点の離散性による等価側圧の低下について定量化を行ったが、ここでは、受働型側圧の場合の減少率について考察を行う。別報[1]によれば、帯筋ピッチ S が供試体直径(D)の $1/4$ 以下($S=D/4$ 以下)の場合、ほぼ全側面一様の3軸圧縮と見なすことができる。そこで、等価側圧 $\varepsilon\sigma_L$ の低減係数 β の値を、 $S=D/4$ の場合の等価側圧に対するそれぞれの帯筋ピッチ($S=D/2$ または D)の場合の等価側圧の比として求めた。すなわち、

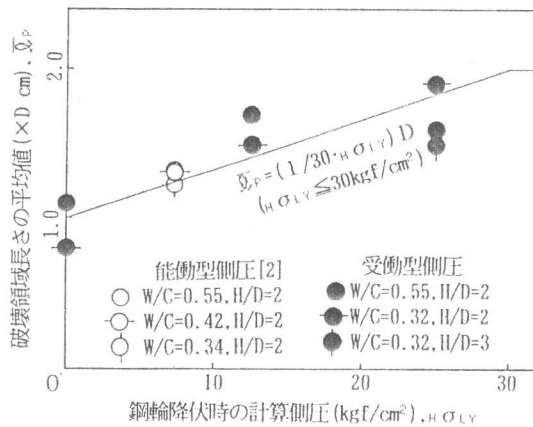


図-6 $\bar{\Sigma}_F-H\sigma_{LY}$ 関係

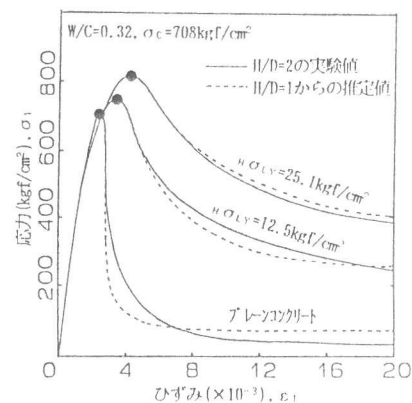


図-7 $H/D=2$ の供試体の
 $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲線の推定値

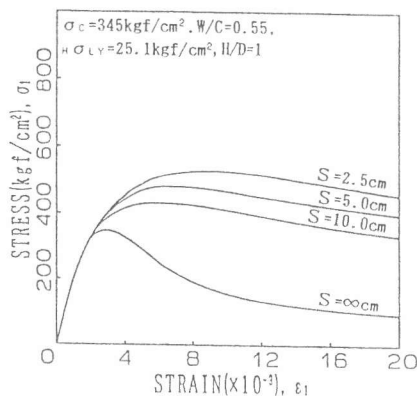


図-8 $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲線に及ぼす
帯筋ピッチの影響

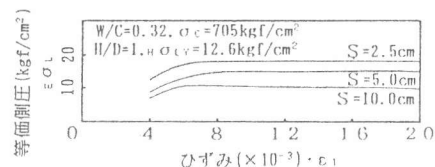


図-9 等価側圧曲線の比較
(帯筋ピッチの影響)

$$\beta = (S > D/4 \text{ の場合の } \epsilon \sigma_L) / (S = D/4 \text{ の場合の } \epsilon \sigma_L)$$

ひずみの進行に伴う β の変遷を図-10に示す。図によれば、コンクリートの縦ひずみ(ϵ_1)の大きさに拘らず、 β の値は、ほぼ一定の値を示す。図-11は、低減係数 β の平均値($\bar{\beta}$)について調べたものである。図によれば、帯筋ピッチが大きくなるにつれて $\bar{\beta}$ の値は直線的に減少する傾向にある。 $S \leq D/4$ の場合、帯筋ピッチの影響をほとんど受けないことを考慮すると、 $\bar{\beta}$ は図-11中の破線で示される。しかし、表示式の簡単化と、安全側の推定という観点から、ここでは、 $\bar{\beta}$ の値を、図中の実線、すなわち次式で表すことにする。

$$\begin{aligned} \bar{\beta} &= 1 - S/2D & (S \leq 2D) \\ \bar{\beta} &= 0 & (S > 2D) \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 供試体の断面形状(円形・角形)の影響(実験-II)

(1) $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線および等価側圧曲線

図-12は、 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす供試体の断面形状すなわち帯筋形状の影響を示したものである。図によれば、ピーク点の応力およびひずみは、側圧の増大に伴い大きくなるが、角形供試体にお

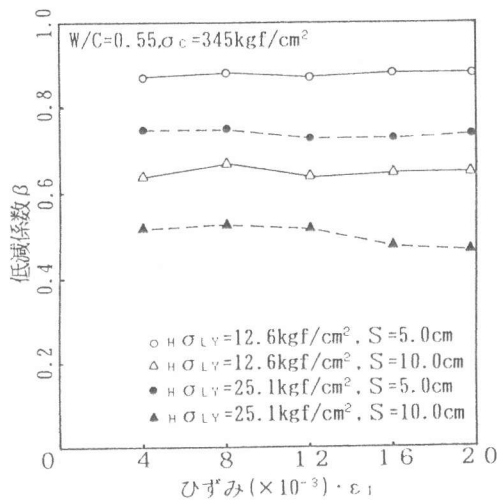


図-10 低減係数 β の変遷

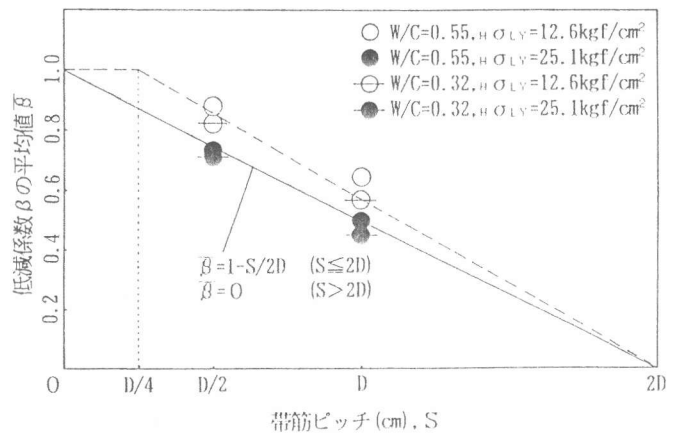


図-11 $\bar{\beta} - S$ 関係

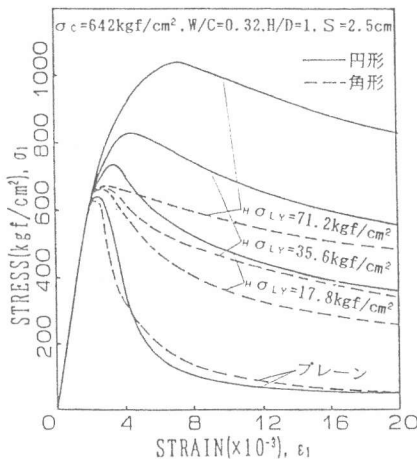


図-12 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす断面形状の影響

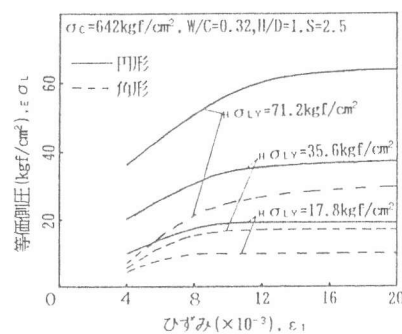


図-13 等価側圧曲線の比較(断面形状の影響)

るそれらの増加率は、円形供試体の場合に比べ非常に小さくなっている。しかし、角形供試体でも、ピーク点以降顕著な靱性改善が見られ、下降域の $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲線の形状は、円形供試体のものとほぼ平行な関係になっている。また、図-13は、等価側圧 σ_L 曲線の比較を示したものである。図によれば σ_L の値は、ひずみの増加に伴い大きくなるが、供試体の断面形状(円形・角形)および W/C の違いに拘らず、 $\varepsilon_1=10 \times 10^{-3}$ 以降はほぼ一定値になる。

(2) 低減係数 η

図-14は、図-13に基づいて求めた等価側圧の低減係数 η (角形供試体の等価側圧/円形供試体の等価側圧)のひずみの進行に伴う変遷を示したものである。ここで、円形鋼輪と角形鋼輪の降伏点はほぼ同じである(表-2参照)。図によれば、 η の値は ε_1 の大きさに拘らずほぼ一定の値(平均値: 0.43)を示す。すなわち、角形コンファインドコンクリート内部の拘束応力は、ひずみレベルによらず、円形コンファインドコンクリートの場合のおよそ0.3~0.5倍になると言える。また、係数 η の値はコンクリートが高強度ほど大きくなる傾向がある。

4. まとめ

- 1) 高さ-直径比(H/D)の異なる3軸圧縮下のコンクリート供試体の破壊領域長さ(Q_P)の推定式を側圧の関数として提案した。これを仮想破壊域モデルに適用することにより、 H/D の異なるコンクリート供試体の $\sigma_1-\varepsilon_1$ 曲線を推定できる。
- 2) 帯筋ピッチに関する等価側圧の低減係数(β)は、ひずみレベルに拘らず、式(2)で表されることを示した。
- 3) 角形断面のコンクリート供試体にかかる有効側圧は、ひずみレベルに拘らず、円形断面の場合のおよそ0.3~0.5倍となることを示した。

なお、本研究で取り扱った供試体は断面寸法が 10×10 cmおよび $\phi 10$ cmのものであり、本研究結果を実部材に適用するには、部材寸法の影響について考慮する必要がある。この点については今後、引き続き検討する予定である。

[謝辞]

本研究に際して、御助力を得た小池狭千朗先生(愛知工業大学)、森博嗣先生(名古屋大学)、三木政明君(伊藤喜工作所(株))および田口貴史君(安井建築設計事務所)に深謝致します。

[参考文献]

- [1] 畑中重光・服部宏己・近藤洋右・谷川恭雄: 3軸圧縮下の普通・高強度コンクリートの応力-ひずみモデル, コンクリート工学年次論文報告集(投稿中), 1991
- [2] 畑中重光・服部宏己・吉田徳雄・谷川恭雄: 低側圧3軸圧縮下の高強度コンクリートの塑性変形挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 2, pp. 719-724, 1990
- [3] 小阪義夫・谷川恭雄・畑中重光: 低側圧3軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動, 材料, 第34巻, 第376号, pp. 19-25, 1985. 1

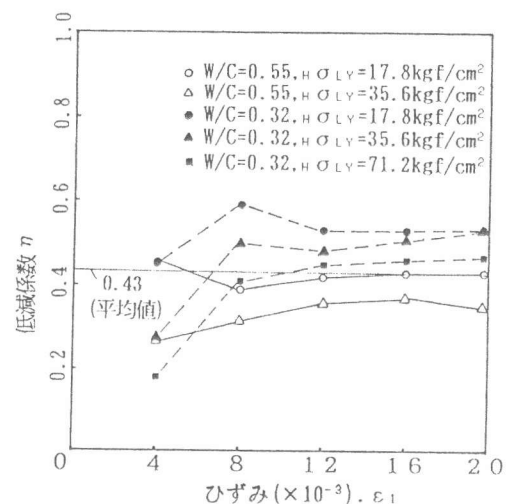


図-14 低減係数 η の変遷