

[77] 多軸拘束効果を考慮した各種コンクリートの圧縮靱性の統一評価に関する研究

正会員 小阪義夫 (名古屋大学工学部)
 正会員 谷川恭雄 (三重大学工学部)
 正会員 ○畑中重光 (名古屋大学大学院)

1. まえがき

帯筋を配したコンクリートや鋼繊維補強コンクリート (以下, SFRCと略記) の圧縮靱性の改善効果は, 主としてコンクリートの体積膨張が帯筋や鋼繊維によって拘束されることに因るものである。これらの横拘束コンクリートの圧縮塑性変形挙動はコンクリートに対する多軸圧縮効果の観点から統一的に論ずることが可能である。

筆者らは, これまでに一連の低側圧3軸圧縮実験を行い, コンクリートの圧縮塑性変形挙動に及ぼす側圧の大きさ, 2方向の側圧の比, 側圧の載荷パスなどの影響を明らかにした^{1), 2)}。本報では, 引き続き, 供試体形状および離散型の側圧載荷の影響について調べる。次いで, 低側圧3軸圧縮実験結果に基づく各種横拘束コンクリートの圧縮靱性の統一の評価法について検討する。

2. 実験概要

実験要因として水セメント比 (W/C), 側圧の大きさ ($\sigma_L, \sigma_2 = \sigma_3$), 供試体の高さ一辺長比 (H/D), 側圧載荷点のピッチ (S), および供試体上下端面一載荷板間の摩擦 (静摩擦係数: μ) の有無を取り上げた。表-1に実験の概要を示す。

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), および川砂利 (5~15mm) を用い, 設計スランブを5cm, 調合強度を250~350 kgf/cm²とした。コンクリートの練混ぜには可傾式ミキサーを使用し, 棒状パイププレートによって, 振動締めを行った。供試体は断面10 x 10cm, 高さ10cm, 13cm, および20cmの3種類の角柱体, $\phi 10 \times 20$ cmの円柱体とし, コンクリートは供試体の高さ方向に打ち込んだ。打設後, 材令1日目にキャッピング, 2日目に脱型した後, 実験室内 (温度23 ± 2℃, 相対湿度75 ± 5%) で養生した。試験材令は約50日, 供試体の個数は各要因毎に3個とした。

載荷は前報¹⁾と同様の側圧加力装置と高剛性試験機を組み合わせで行い, 載荷および測定方法も前報¹⁾と同様とした。なお, 離散型側圧載荷は5 x 5mm断面の角鋼棒を供試体と側圧載荷用鋼板との間に挟んで行った。

3. 実験結果とその考察

3.1 供試体の破壊状況

供試体の破壊状況の一例を写真-1に示す。供試体の破壊状況はH/Dの大きさにより異なり, H/D=1および1.5の供試体がほぼ全域に渡って破壊したのに対し, H/D=2の供試体では破壊が供試体上部に集中し, 側圧の大きさにかかわらず, 供試体下部のおよそ1/3~2/3の部分が未破壊領域として残る傾向がみられた。

3.2 側圧の大きさの影響

図-1 (a) および (b) は, それぞれ, H/D=1および2の供試体の縦応力 (σ_1) - 縦ひずみ (ϵ_1) 曲線, および縦応力 (σ_1) - 横ひずみ ($\epsilon_2 = \epsilon_3$) 曲線に及ぼす側圧 (この場合は一様側圧) の大きさの影響を示したもので, 図中には, 側圧の実測値 (σ_L) が併示してある。図によれば, $\sigma_1 - \epsilon_1$ および $\sigma_1 - \epsilon_2 (= \epsilon_3)$ 曲線は, 側圧 (σ_L) が0の場合供試体のH/Dによって著しく相違するが, 側圧の増加に伴う最大応力および靱性の増加量は供試体のH/Dが相違してもあまり変化しない。

表-1 実験の概要

Notation of specimen	W/C	H/D	σ_L (kgf/cm ²)	S (cm)	μ
e.g.) T6-5-1-0.4 H/D=1 S=5cm $\sigma_L=6$ kg/cm ² Triaxial test	0.45	1.0	3	0	0
				1	0
				5*	0.4**
				10**	
				0	
				5	
	0.55	1.3	6* ¹	0	0
				5	
				10	
				0	
				5	
				10	
0.70	2.0	12* ²	0	0	
			5		
			10		
			0		
			5		
			10		

[Notes] W/C: Water-cement ratio, H/D: Height/width of specimen, σ_L : Lateral confining stress, S: Spacing of lateral steel bar, μ : Approximate value of coefficient of static friction, *¹: Only for H/D=1, *²: Only for H/D=1 of W/C=0.55, *³: Only for H/D=1 and 2 of W/C=0.55, **⁴: Only for W/C=0.55.

3.3 供試体の高さ一辺長比の影響

図-2に $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす供試体の高さ一辺長比 (H/D) の影響を示す。図によれば、曲線のピーク点の応力およびひずみは H/D の減少に伴ない若干増加する。下降域の曲線形状に及ぼす H/D の影響は側圧の大きさにかかわらず顕著であり、 H/D の増加とともに曲線形状は脆性的となる。また、その変化量は側圧の大きさにはさほど依存しないといえる。

通常の1軸圧縮実験によって得られる $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線がひずみの測定域によって著しく異なること、および $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線を構造部材の変形解析に使用する際には両者間における破壊域の対応を明確にしておくことが重要であることなどは既によく知られている^{3), 4), 5)}。小柳ら⁶⁾は、端面摩擦が存在する通常の1軸圧縮荷重を受ける横打ち供試体について、破壊域および非破壊域の変形挙動の重ね合わせによる荷重-変形曲線の推定を試みている。筆者らは、既報⁷⁾において H/D が1~2の縦打ち供試体について端面摩擦を減じた一定側圧下の軸方向圧縮荷重試験を行い、その破壊域の大きさと実測の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線との関係を考察し、図-3(a)に示すような理想破壊域モデルを提示した。写真-1および既往の研究に基づき、既報と同様、破壊域の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 関係は $H/D=1$ の供試体の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線と一致するものと仮定する。いま、 $l_p = D$ (ただし、 l_p : 理想化された破壊域の長さ、 D : 供試体の辺長) とし、 $H/D=1.3$ および2の供試体の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線を推定すると図-3(b)の破線が得られ、実測曲線と比較的良く一致する。本モデルでは、破壊域と非破壊域の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線はピーク点で分岐するが、供試体の内部破壊は臨界応力度以後急激に進展すると考えられるため、より

詳細な検討を行う場合には、この臨界点

(たとえば、側圧レベルにかかわらず、 $0.8 F_c$ 。ここに、 F_c : ピーク時の応力) 以降は破壊域と非破壊域とで異なった $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線を与える必要がある。

ここでは、応力下降域における本モデルの適用性を調べる。図-3(c)は、圧縮強度および側圧レベルの異なる $H/D=2$ の供試体の応力下降域の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線について、本モデルによる推定曲線と実測曲線とを比較したものである。図によれば、 $W/C=0.45$ および 0.55 の場合には、

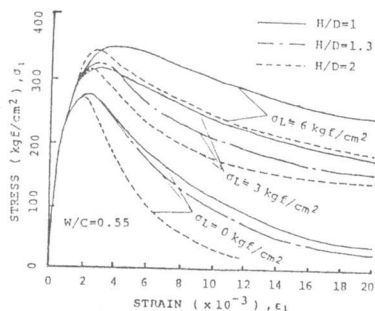


図-2 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす供試体の H/D の影響

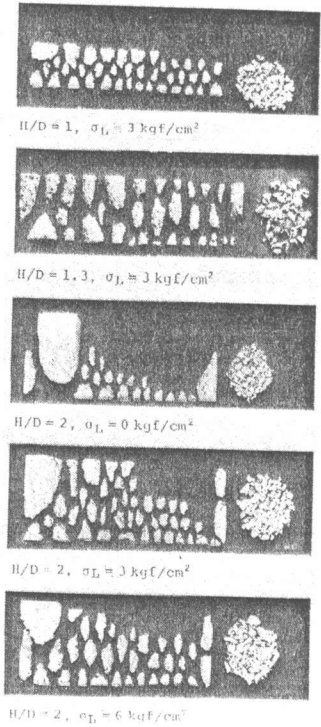
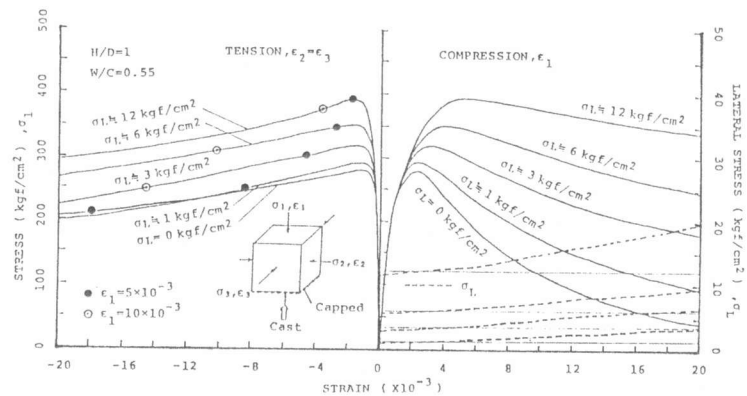
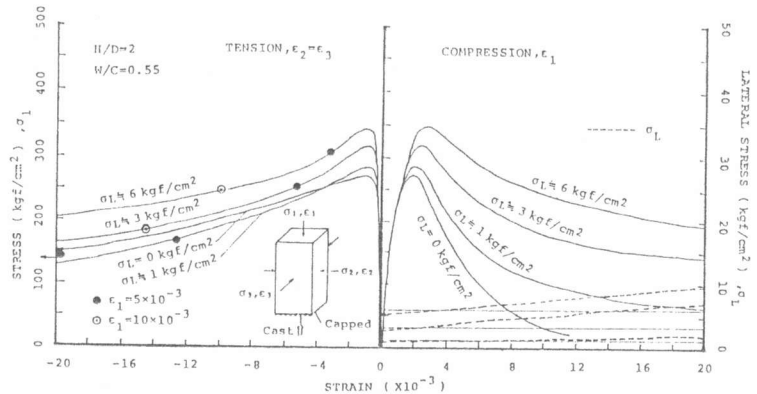


写真-1 供試体の破砕状況
(写真上部が打込み下部に相当)



(a) $H/D=1$



(b) $H/D=2$

図-1 $\sigma_1 - \epsilon_1, \epsilon_2 (= \epsilon_3)$ 曲線に及ぼす側圧の大きさ (σ_l) の影響

側圧レベルにかかわらず比較的良好な推定曲線が得られているが、 $W/C=0.70$ の場合の推定曲線は実測曲線をかなり下回り、その差異は側圧レベルが小さいほど大きくなっている。 W/C の値によって推定精度に差異が生じた一つの理由として、 $W/C=0.70$ のコンクリートでは破壊がかなり延性的となることが挙げられる。すなわち、巨視的にみた破壊域の耐力能力の低下率が比較的小さいため、破壊の集中度が緩和されているものと考えられる。したがって、このような現象については、理想破壊域の長さ (l_p) を増加させるなどの考慮が必要である。

3.4 離散型側圧載荷時の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線

図-4 (a) に離散型側圧載荷供試体の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす側圧の加力点のピッチ (S) の影響を示す。図によれば、本実験の範囲、すなわち側圧加力用鋼棒のピッチ (S) が供試体の辺長 ($D=10\text{ cm}$) 以下の範囲では、 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線のピーク時の応力およびひずみに及ぼす側圧の離散度すなわちピッチの影響はほとんど認められない。しかしながら、ピーク点以後は離散度の影響が徐々に現われ、ピッチが大きいくほど、ひずみの増加に伴う応力の低下が顕著になる。また、ピッチの増加による下降域の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線の脆性化は側圧のレベルに依存し、側圧が大きくなるほどその影響が著しくなる。離散型側圧載荷法による3軸圧縮試験時の $H/D=1$ および 2 の供試体の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線を、一様側圧下の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線で評価した場合の等価側圧 (σ_L) を図-4 (b) に示す。

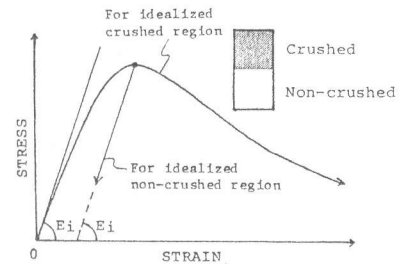
4. 各種横拘束コンクリートへの適用

各種の横拘束コンクリートの圧縮塑性変形挙動を理想的なある基準状態 (たとえば、供試体形状: $H/D=1$, 側圧パス: 能動載荷, 2方向の側圧の比: $\sigma_2/\sigma_3=1$, 側圧載荷点: 全側面一様載荷) の3軸圧縮下のプレーンコンクリートの塑性変形挙動と対比させて、これらの横拘束効果を基準状態の側圧 (等価側圧) に換算することができる。上記の基準状態に対する各種要因の影響を模式的に示せば図-5 のようになる。

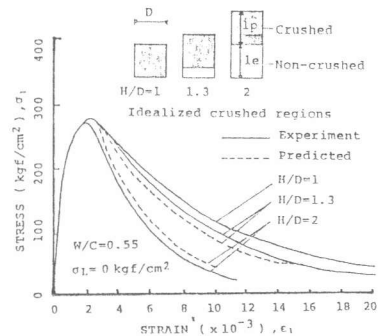
この等価側圧を用いた $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線の評価には、等価側圧という物理的意味の明確な量を用いて各種横拘束コンクリートの $\sigma_1 - \epsilon_1$ 関係を統一的に表示し得る点に大きな特徴があり、種々の力学的複合法の組合せ (ここでは、数次の複合と呼ぶ) による圧縮靱性の改善効果を等価側圧の累加によって推定することもある程度可能になるものと考えられる。たとえば、本研究で取り扱った諸要因の影響がそれぞれ独立であると仮定した場合の複合コンクリートの等価側圧は表-2 に示した式によって求められる。

ここで鋼輪で横拘束したプレーンコンクリートおよびSFRCの1軸圧縮時の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線を本低側圧3軸圧縮実験結果で評価した例を示す。なお、これらのコンクリートに対する実験条件は、原則として本実験の1軸圧縮の場合と同様とした。

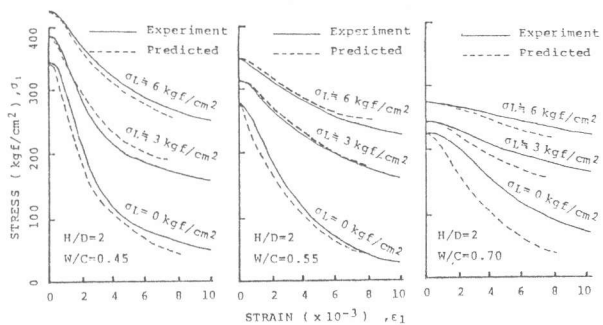
図-6 は鋼輪で横拘束したコンクリートの等価側圧 (${}_H\bar{\sigma}_L$ および ${}_H\bar{\sigma}_L$) と鋼輪の横ひずみから求めた計算側圧 (${}_H\sigma_L$) とを



(a) 理想破壊域モデル

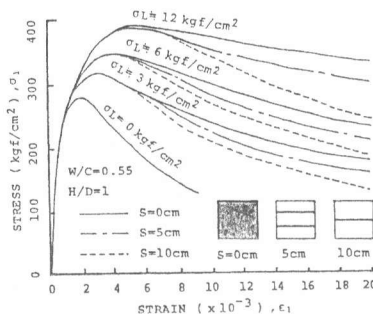


(b) 実測曲線と推定曲線との比較

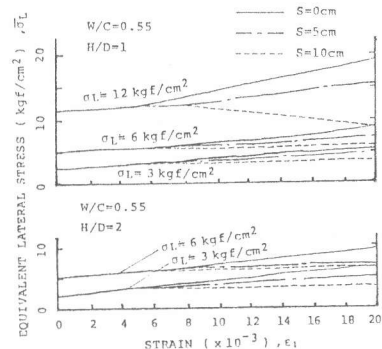


(c) 応力下降域曲線の推定精度

図-3 理想破壊域モデルとその適用性



(a) $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線



(b) 等価側圧曲線

図-4 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす側圧載荷点の離散度の影響

比較したものである。なお、記号 σ_L および $\overline{\sigma}_L$ は、それぞれ一様および離散型側圧荷時の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線で評価した場合の等価側圧を表わす。図によれば、等価側圧 $\overline{\sigma}_L$ は ϵ_1 の値がおよそ 10×10^{-3} に至って計算側圧 σ_L に一致する。すなわち、鋼輪の横拘束効果は計算側圧 σ_L からほぼ推定できるが、その際には、側圧荷点の離散性(S)、および供試体の水平断面内での側圧の不均等性に起因する3軸圧縮効果の遅延性などの点も考慮すべきと考えられる。

図-7は、鋼輪で横拘束したSFRCの1軸圧縮荷時の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線の等価側圧(${}_{SFH}\overline{\sigma}_L$)と累加側圧(${}_{SF}\overline{\sigma}_L + {}_H\overline{\sigma}_L$)とを比較したものである。ただし、鋼繊維の混入(V_f :鋼繊維の体積混入率)により側圧荷点の離散性の影響が緩和されると考えられるため、ここでは鋼輪の等価側圧として離散性の効果を含まない ${}_H\overline{\sigma}_L$ を使用した。図によれば、それぞれの横拘束方法による等価側圧の単純累加によって比較的良い推定値が得られている。

この他、等価側圧という物理量を用いることにより、各種コンクリートの圧縮靱性を比較・評価し得ること、構造設計時に部材に所定の靱性を付与するためのコンクリートの複合形式の選択に多様性を持たせ得ること、などいくつかの有効な適用が考えられる。

5. 結論

本報では、低側圧3軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす供試体形状および側圧荷点の離散性の影響を調べるとともに、低側圧3軸圧縮実験結果に基づき各種横拘束コンクリートの圧縮靱性の統一的评价法について論じた。本研究によって得られた結果は以下のようにまとめられる。

(1) 低側圧3軸圧縮下の場合も1軸圧縮時と同様の破壊域モデルを適用することにより、異なる形状の供試体の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線を互いに関連づけることができる。

(2) 低側圧3軸圧縮下のコンクリートの $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす側圧荷点の離散性の影響は、ピーク点以後徐々に現われ、ひずみレベルおよび側圧の増加に伴い増大する。

(3) 各種の横拘束法によるコンクリートの圧縮靱性改善効果を等価側圧で表示することにより、種々の横拘束方法の組合せ効果の推定が可能であると考えられる。

[謝辞]

本研究に際し、松村高俊君(名大大学院)、筒井一仁君(愛工大4年)、および宮本英信君(三重大4年)の御助力を得た。また、本研究費の一部は昭和59年度竹中育英会研究助成金によった。付記して謝意を表します。

[引用文献]

- 1) 小阪・谷川・畑中, コンクリート工学年報, 第5巻, 昭58, pp. 133-136, 2) Y. Kosaka, Y. Tanigawa, and S. Hatanaka, Int'l Jour. of Cement Compo. and Light-weight Conc. (in press), 3) 小阪・谷川・山田・畑中, セメント技術年報, 第37巻, 昭58, pp. 279-282, 4) 鈴木・中塚・鈴木・横木, 建築学会大会梗概集, 昭53, pp. 1717-1720, 5) Y. Kosaka, Y. Tanigawa, and S. Hatanaka, Trans. of AIJ, No. 337, March 1984, pp. 15-26, 6) 小柳・六郷・内田, セメント技術年報, 第37巻, 昭58, pp. 268-271, 7) 小阪・谷川・畑中, 材料, 昭60. 1. 第34巻, 376号, pp. 19-25.

表-2 複合コンクリートの等価側圧算定法

・一次の複合の場合

$$\overline{\sigma}_L(\epsilon_1) = \alpha \cdot B(\epsilon_1) \cdot \gamma(\epsilon_1) \cdot \sigma_L \quad \dots (1)$$

ここに、 α : 2方向の側圧の不均等性による低減係数
 $B(\epsilon_1)$: 側圧荷点の離散性による低減係数
 $\gamma(\epsilon_1)$: 側圧の荷重パスによる低減係数
 σ_L : 予想される最大の側圧

・数次の複合の場合(累加側圧)

$$\begin{aligned} \overline{\sigma}_L(\epsilon_1) &= \sum_1 \overline{\sigma}_{L1}(\epsilon_1) \\ &= \sum_1 (\alpha_1 \cdot \beta_1(\epsilon_1) \cdot \gamma_1(\epsilon_1) \cdot \sigma_{L1}) \quad \dots (2) \end{aligned}$$

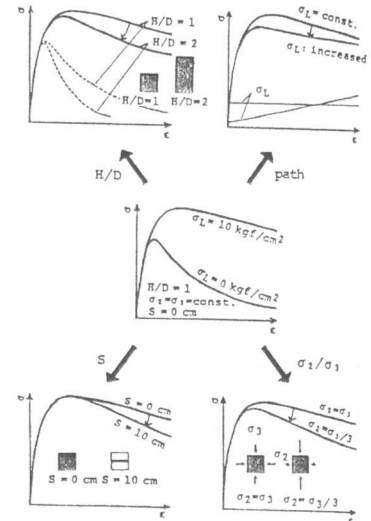


図-5 低側圧3軸圧縮下のコンクリートの $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす各種要因の影響

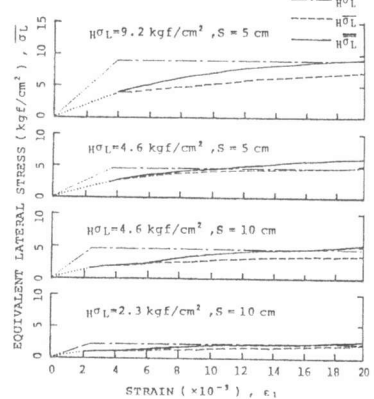


図-6 コンファインドコンクリートの等価側圧(${}_H\sigma_L$ および ${}_H\overline{\sigma}_L$)と計算側圧(${}_H\sigma_L$)との比較

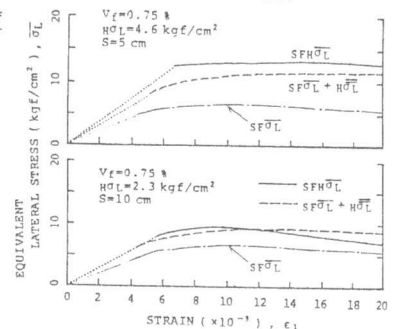


図-7 コンファインドSFRCの等価側圧(${}_{SFH}\sigma_L$)と累加側圧(${}_{SFH}\sigma_L + {}_H\sigma_L$)との比較