

[65] 低側圧3軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動

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

鋼繊維や帯筋によって補強したコンクリートの圧縮靱性改善効果は、おもに臨界応力度 (critical stress)¹⁾以後のコンクリートの体積膨張が鋼繊維や帯筋によって横拘束されることに因るものである。これらのコンクリートの圧縮塑性変形挙動をコンクリートに対する多軸圧縮効果の観点から解析的に求めるためには、比較的側圧下にあるコンクリートの応力下降域の構成関係に関する情報が必要不可欠である^{2)~5)}。しかしながら、この種の変形挙動を実験的に明らかにした研究は極めて少なく^{3), 6)}、既に得られている実験資料のみでは鋼繊維や帯筋による横拘束効果を多軸圧縮効果の観点から定量的に評価することはできない。

本研究では、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各種要因の影響を解明することを目的として、以下の2シリーズの実験を行う。実験-Iでは、載荷初期に加えられた側圧 (能働側圧) 下にあるコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす側圧の大きさ (σ_L)、2方向側圧 (σ_2, σ_3) の不均等性などの影響を実験的に明らかにする。側圧の不均等性の影響は、タイの位置、鋼繊維の配向性などに起因する横拘束力の不均等性の影響を論ずる際に重要となる。実験-IIでは、側圧の載荷パス (漸増、途中載荷、および途中除荷) がコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす影響を調べる。漸増側圧は帯筋や鋼繊維による横拘束力の変動 (受働側圧) と対応する。側圧の途中載荷および途中除荷の影響は、それぞれ、損傷を受けたコンクリートに対する3軸圧縮効果、および3軸圧縮下にあるコンクリートの損傷度を議論する際の基礎資料となる。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

実験-Iおよび実験-IIの概要を、それぞれ表-1および表-2に示す。実験-Iでは、実験要因として、水セメント比 (W/C)、供試体の高さ-辺長比 (H/D)、側圧の大きさ ($\sigma_L = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}$)、および側圧 (σ_2, σ_3) のバランスを取り上げた。3軸圧縮試験用の供試体断面は $10 \times 10 \text{ cm}$ の一定とした。実験-IIでは、実験要因として、水セメント比 (W/C)、漸増側圧の大きさ (σ_L)、側圧の載荷点 (ϵ_a)、および側圧の除荷点 (ϵ_b) を取り上げた。供試体は、 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ の立方体とした。

2.2 供試体の製作および養生方法

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、川砂 (5 mm 未満)、および川砂利 (5 mm ~ 15 mm) を使用した。また、ブリージング等により供試体内部の材質が不均一となることを避けるため、設計スランブを 5 cm の硬練りとし、コンクリートの練混ぜは分割

表-1 実験-Iの概要

Notation of specimen	W/C	Specimen		Casting direction	$\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}$ (kg/cm ²)	(σ_2, σ_3) (kg/cm ²)
		Section	H/D			
eg.1) TH1-26 H/D=1 Horizontal casting Triaxial test	0.45	10 cm	10 cm	1	Vertical	0 (0,0)
						2 (0,4)* (2,2)
						4 (0,8)* (2,6)* (4,4)
						8 (0,16)* (4,12)* (8,8)
eg.2) CV2 H/D=2 Vertical casting Cylinder	0.70	10 cm	10 cm	2*	Vertical	16 (16,16)*
						0 (0,0)
						8 (8,8)
						0 (0,0) 4 (4,4)
10 cm	10 cm	2	Vertical	2	0 (0,0)	
					0 (0,0)	

[Notes] W/C: Water-cement ratio, *: Only for W/C=0.55, H/D: Slenderness ratio, σ_2, σ_3 : Lateral stresses.

表-2 実験-IIの概要

Notation of specimen	W/C	Specimen		Casting direction	σ_L (kg/cm ²)	Stress path		
		Section	H/D			$\epsilon_a (\times 10^{-3})$	$\epsilon_b (\times 10^{-3})$	
e.g.) T8-0-15 $\epsilon_a=0$ $\sigma_L=8$ Triaxial test	0.45	10 cm	10 cm	1	Vertical	0-4*1 0-8*2 0-12*2	20	
						2*3		0, ϵ_m , 5
						8*3		0, ϵ_m , 5, 10
						8*3		0, ϵ_m , 5, 10, 15

[Notes] W/C: Water-cement ratio, H/D: Slenderness ratio, σ_L : Lateral stress ($=\sigma_2 = \sigma_3$), ϵ_a : Longitudinal strain at which lateral stresses are applied, ϵ_b : Longitudinal strain at which lateral stresses are removed, *1: Only for W/C=0.70, *2: Only for W/C=0.55 and 0.45, *3: Only for W/C=0.55, *4: Only for W/C=0.70 and 0.55.

混練とした。打設は2層打ちとし、各層ごとに木槌で叩いた後、最後に棒状パイプレータを用いて振動締め固めを行った。供試体はすべて材令1日目にキャッピング、2日目に脱型後、養生室内（温度：20°C±2°C、相対湿度：75%±10%）で養生した。試験材令は、実験-Iでは40日、実験-IIでは50日とした。供試体の個数は各要因ごとに3体とした。

2.3 载荷および測定方法

3軸圧縮载荷装置の模式図を図-1に示す。本装置は、鋼材の曲げ抵抗モメントを利用して側圧を加える方式を採っており、側圧の検出と制御が可能である。側圧の大きさは、鋼材の曲げ载荷用に取り付けられた鋼棒のひずみを測定することにより検出される。側圧は鋼棒の両端のナットの締付けにより制御される。また、本装置を高剛性試験機に組み入れることにより、最大主圧縮応力方向のひずみ速度が制御される。主圧縮载荷方向のひずみ速度は、毎分 2×10^{-3} に保ち、原則として、ひずみが载荷板間で 30×10^{-3} に至るまで载荷を継続した。なおブリーチング層の存在等に起因する破壊の集中性を緩和し、供試体全域に渡って破壊を均等化させるために、打込み下部を球座側にセットした⁷⁾。载荷面の減摩材としては、载荷端面において比較的均等応力が期待できる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ト⁸⁾を使用した。すべての供試体の縦ひずみは载荷板間に取り付けた差動トランスにより、横ひずみは変位変換器（図-1参照）により測定した。また、1軸圧縮供試体の応力上昇域の縦ひずみおよび横ひずみの測定には、ワイヤーストレインゲージ（W.S.G.）を用いた。

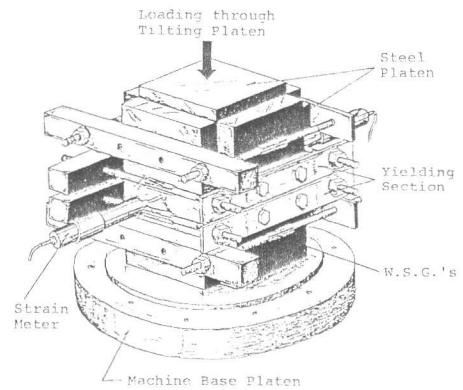


図-1 3軸圧縮载荷装置

3. 実験結果とその考察

3.1 実験-I

図-2は、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($\epsilon_2 = \epsilon_3$) 曲線に及ぼす均等側圧の影響を示したもので、図中には、側圧の実測値が併示してある。なお、最大応力近傍に至るまで

の各応力-ひずみ曲線は、1軸圧縮下の供試体より得られた曲線によって補正し、载荷板間で変位を測定することによる誤差を修正してある。図によれば、側圧が 2 kg/cm^2 程度でも、コンクリートの靱性は著しく増大している。また、 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線の下降域の形状は側圧によってあまり相違しない。一方、同一縦ひずみ(ϵ_1) 時の横ひずみ($\epsilon_2 = \epsilon_3$)は、側圧の増加に伴い比例的に減少しており、みかけ上のポアソン比は側圧の大きさによって著しく異なる。

図-3は、Ahmadによる実験結果⁹⁾、筆者らの既報⁶⁾の実験結果、および今回の実験結果を比較した一例である。Ahmad および筆者らの既報

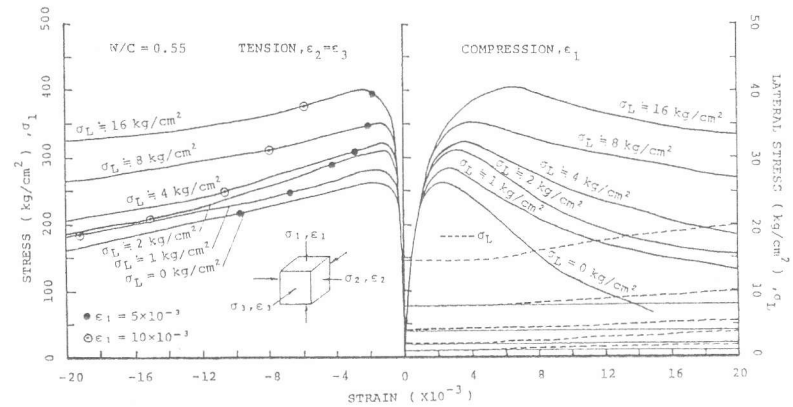


図-2 側圧 ($\sigma_L, \sigma_2 = \sigma_3$) の影響

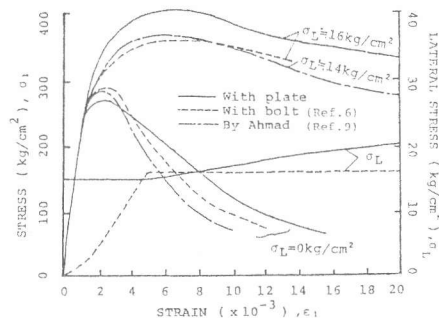


図-3 既往の実験結果との比較

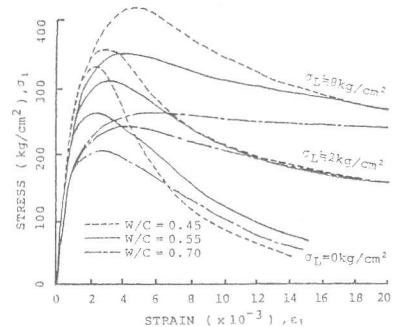


図-4 W/C の影響

の実験では側圧はともに荷初期はゼロであり、およそ $\epsilon_1 = 6 \times 10^{-3}$ のひずみレベルに至って一定となる。このため、曲線相互の比較には荷パスおよび1軸圧縮下の曲線の相違を考慮する必要があるが、図から判断して、本実験結果は、ほぼ妥当な値であると考えられる。

以下、図-4~6に、それぞれ、 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼすW/C、側圧の不均等性、および供試体のH/Dの影響を示す。図-4によれば、3軸圧縮下の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼすW/Cの影響は、1軸圧縮下の場合とほぼ同様であり、通常1軸荷時の応力下降域にみられる収束領域¹⁰⁾は、側圧の増加に伴い高ひずみ域に移行している。

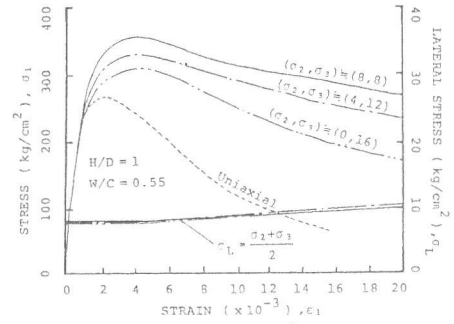
図-5(a)および(b)によれば、側圧(σ_2 および σ_3)の平均値がたとえ同一であったとしても、側圧の不均等性、すなわち偏差成分の増加によって最大応力および圧縮タフネスは減少する。しかし、応力下降域の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線の形状は、側圧の不均等性にかかわらず比較的類似している。側圧の不均等化によるこのような圧縮タフネスの減少は、タイの配置や鋼繊維の配向に起因する横拘束効果の不均等化が、コンファインドコンクリートや鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRCと略記)の圧縮タフネスを減少させることを示唆する。2軸圧縮($\sigma_2 = 0$)時の圧縮タフネスの増加率は、均等側圧時に比べてほぼ半減する。

図-6によれば、既報⁶⁾でも指摘したように、1軸圧縮下の応力下降域における $\sigma_1 - \epsilon_1$ 関係は、端面摩擦を減じた場合でも、供試体のH/Dの影響を著しく受ける。側圧(σ_L)が約4 kg/cm²の場合にもH/Dが1の供試体の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線は、H/Dが2の供試体の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線よりも延性的となっており、1軸圧縮下での相違がそのまま現われている。

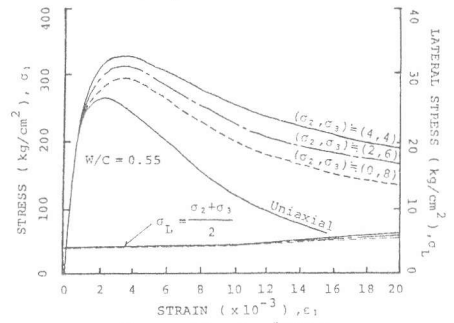
3.2 実験-II

図-7(a)および(b)は、能働側圧および受働側圧下にあるコンクリートの $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線を示したものである。図によれば、 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす側圧の荷パスの影響は顕著であり、応力下降域のあるひずみレベルにおいて等しい側圧が加わっていたとしても、受働側圧下の供試体の耐荷力は能働側圧下で得られる耐荷力には達しない。すなわち、供試体の損傷度は、ひずみレベル(ϵ_1)のみならず、側圧の荷パスにも依存する。また、図から明らかのように、受働側圧下で得られる $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線は、1軸圧縮下のコンファインドコンクリートやSFRCの $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線と酷似している。一般に、圧縮下のコンクリートやSFRCのマトリクスコンクリートは、帯筋や鋼繊維によって漸増側圧を受けると考えることができるが、マトリクスコンクリートの損傷が比較的小さいうちに、これらの横拘束力を発現させることが可能であれば、同素材の複合から、より高靱性の複合材料を生み出し得るものと考えられる。

図-8は、 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす側圧の途中荷の影響を調べたものである。図によれば、圧縮強度時に側圧を加えれば、その後の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線は能働側圧下の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線にほぼ一致する。しかし、応力下降域



(a) $\sigma_L = 8 \text{ kg/cm}^2$ の場合



(b) $\sigma_L = 4 \text{ kg/cm}^2$ の場合

図-5 側圧の不均等性の影響

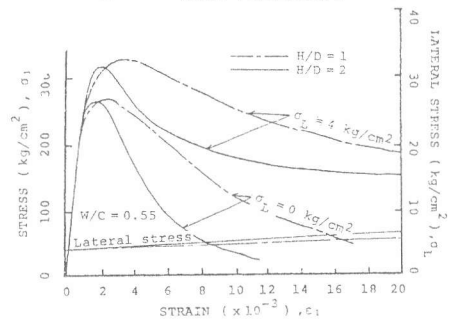
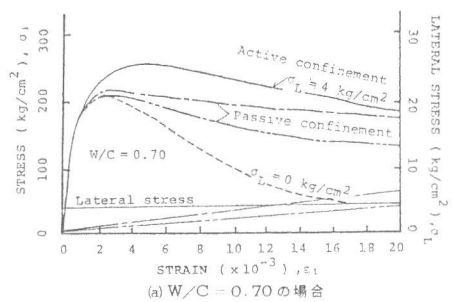
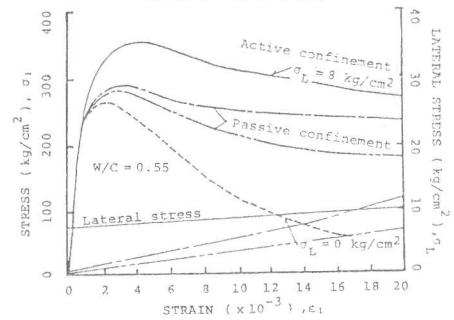


図-6 供試体のH/Dの影響



(a) W/C = 0.70 の場合



(b) W/C = 0.55 の場合

図-7 能働および受働側圧効果の比較

において側圧を加えた場合には、側圧載荷時のひずみレベルが高いほど能働側圧下の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線との差異が顕著になる。すなわち、前述のように、コンクリートの靱性に及ぼす3軸圧縮効果は、コンクリートの損傷度に依存している。また、側圧載荷直後の圧縮主応力 (σ_1) の増分は、ひずみレベルにかかわらず、ほぼ一定であり、例えば $\sigma_L = 8 \text{ kg/cm}^2$ の場合、約 80 kg/cm^2 である。これより、応力降域にあるコンクリートであっても、連続体部分の弾性係数の減少、すなわち連続体部分の横方向の損傷度は比較的小さいことが推測される。

図-9 (a) および (b) は、 $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線に及ぼす側圧の途中除荷の影響を調べたものである。これらの図によれば、応力降域のあるひずみレベルにおいて側圧を除荷しても、その後の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線は、1軸圧縮下の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線とは一致しない。また、図からも明らかなように、本実験では、側圧の除荷に数分間を要するため、若干の応力緩和が生じており、再載荷直後に現時点での供試体の最大耐荷能力に達する。再載荷後のピーク時の応力は、1軸圧縮下の $\sigma_1 - \epsilon_1$ 曲線上の同一ひずみレベル (ϵ_1) における応力に比べ、約 $50 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ 大きい。すなわち、側圧の存在によって、最大圧縮軸方向のあるひずみレベル (ϵ_1) におけるコンクリートの損傷度は減少している。また、最大応力近傍で側圧を除荷した場合、除荷後のピーク応力が1軸圧縮強度を上回っている。これは、3軸圧縮による圧密効果に因るものと考えられる。

4. 結論

本研究により、低側圧3軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動に関して以下の事項が明らかとなった。

- (1) 2方向側圧の不均等性の増加により、最大応力および圧縮タフネスは減少する。例えば、1軸圧縮時に対する2軸圧縮時の圧縮タフネスの増加率は、均等側圧3軸圧縮時の増加率に比べてほぼ半減する。
- (2) あるひずみレベルにおいて等しい側圧が加わっていたとしても、受働側圧下の供試体の耐荷力は能働側圧下で得られる耐荷力には達しない。すなわち、3軸圧縮効果は、供試体の損傷度の増加に伴い減少する。

コンファインドコンクリートやSFRCの圧縮塑性変形挙動を、多軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動として解析的に求めるためには、とくに、横拘束力の載荷パスとコンクリートの損傷度との関係を、これらの複合コンクリートの構成モデルに反映させることが肝要である。また、コンファインドコンクリートについては、前報で示したように、横拘束の分離性も併せて考慮する必要がある。

〔謝辞〕本研究に際し御協力を得た山田和夫助手、松村高俊君(名大院生)、三輪隆治君および高山健君(名大学生)に謝意を表します。また、本研究費の一部は、昭和58年度科研費・一般研究(C)によったことを付記する。

〔引用文献〕

- 1) 小阪・谷川、建築学会論文報告集、第233号、昭50:7, pp. 21-32.
- 2) Bazant, Z. P. and P. D. Bhat, Jour. of EM Div. Proc. of ASCE, Vol. 102, No. EM4, Aug. 1976, pp. 701-722.
- 3) Ahmad, S. H. and S. P. Shah, Jour. of ST Div., Proc. of ASCE, Vol. 108, No. ST4, Apr. 1982, pp. 728-742.
- 4) 清水、建築学会大会報告集、昭57:10, pp. 1251-1252.
- 5) Tanigawa, Y., K. Yamada, S. Hatanaka, and H. Mori, The Int'l Jour. of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 5, No. 2, May 1983, pp. 87-96.
- 6) 小阪・谷川・山田・如中、コンクリート工学年講、第5巻、昭58, pp. 133-136.
- 7) 小阪・谷川・山田・如中、セ技年報、第37巻、昭58, pp. 269-273.
- 8) 小阪・谷川・太田、コンクリート工学年講、第2巻、昭55, pp. 121-124.
- 9) Ahmad, S. H., University of Illinois at Chicago Circle, 1981, 375 pp.
- 10) Watanabe, F., Proc. of Int'l Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, Vol. IV, Aug. 1971, pp. 153-161.

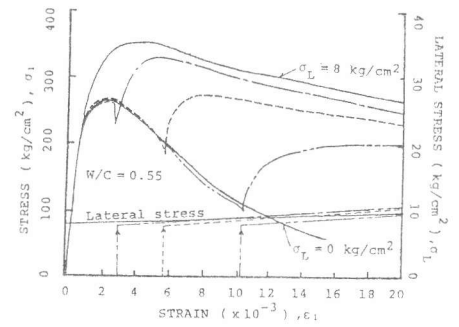
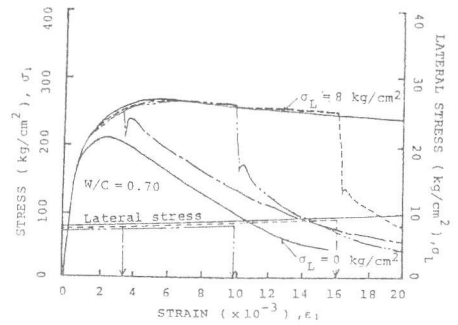
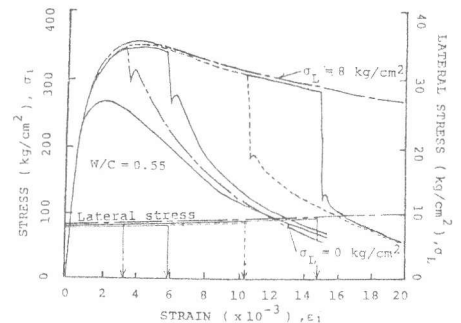


図-8 側圧の途中載荷の影響



(a) W/C = 0.70 の場合



(b) W/C = 0.55 の場合

図-9 側圧の途中除荷の影響