

[34] 多軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動に関する研究

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 山田 和夫 (名古屋大学工学部)

正会員 ○畑中 重光 (名古屋大学大学院)

1. まえがき

鉄筋コンクリート(RC)の非弾性挙動に関する多次元解析を行うためには、多軸応力下のコンクリートの応力(σ)—ひずみ(ϵ)関係(構成関係)並びに破壊条件に関する知識が不可欠であり、近年、多方面からの検討が行われつつある^{1),2),3)}。しかしながら、従来、破壊条件式および応力上昇域の構成関係式については比較的多くの研究がみられるものの、応力下降域の変形挙動に関する研究^{4),5)}は極めて少なく、今後の重要な課題であるとされている¹⁾。先に³⁾に報告したように、例えば帯筋によって横拘束を受けるコンクリートや鋼繊維補強コンクリートの圧縮靱性改善効果は、主に臨界応力度以後のコンクリートの体積膨張が帯筋や鋼繊維によって横拘束されることに起因するものと考えられるが、これらのコンクリートの塑性変形挙動を解析的に求めるには、比較的低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を得ることが極めて重要となる。

本研究では、1軸圧縮並びに多軸圧縮荷重下のコンクリートの応力下降域における変形挙動の解明を目的として、とくに端面摩擦、供試体形状、横拘束形式(分離型と一様型)などの要因が、1軸並びに3軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす影響について実験的に検討する。

2. 端面拘束実験

2.1 実験方法

実験の概要を表-1に示す。実験要因としては、

水セメント比(W/C)、供試体の高さ—直径比(H/D)、端面摩擦(μ)および端面拘束のための鋼輪の厚さ・幅($t \times b$)を取り上げた。

1)供試体の製作: 供試体は所定のH/Dを有する $\phi 10$ cm 円柱体および鋼輪(外径101.6mm)付円柱体とし、コンクリートの製作には普通セメント、川砂(粒径5mm未満)および川砂利(粒径5~15mm)を用いた。端面拘束用に用いた鋼輪の力学性質を表-2に示す。コンクリートは縦打ちとし、試験直前(材令約2ヶ月)まで養生室内(20℃,湿度80%)で養生した。

2)载荷および測定方法: 载荷には高剛性試験機を使用し、原則として供試体の平均ひずみが 20×10^{-3} に至るまで、ひずみ速度を約 $2 \times 10^{-3}/\text{min.}$ の一定として载荷を継続した。コンクリートおよび端面拘束用鋼輪のひずみ測定方法を図-1に示す。本研究では既往の研究⁶⁾に基づき、载荷端面において比較的均等応力分布が期待できるポリプロピレンとシリコングリスの組合せによる減摩パッドを減摩材として用いた。

表-1 端面拘束実験の概要

Notation of specimen	W/C	H/D	Shape	Casting direction	μ	$t \times b$ (mm)(mm)
e.g.1) CV2004 ↓ H=20.0cm ↓ Vertical casting ↓ Cylinder	0.45	0.5	C	Vertical	0,0.4	
			HC*		0	2.3 X 5 1.6 X 3,5
		1.0	C		0,0.4	
			HC		0	2.3 X 8,5,3.5* 1.6 X 7.2*,5,3
e.g.2) HC20235 ↓ tXb=2.3X5mm ↓ H=20.0cm ↓ Cylinder ↓ With hoop	0.70	1.25	C	Vertical	0,0.4	
			HC*		0	2.3 X 5 1.6 X 5,3
		2.0	C		0,0.4	
			HC		0	2.3 X 5
		2.0	P	Horizontal	0,0.4	

[Notes] *: Only for W/C=0.55, H/D: Slenderness ratio, W/C: Water-cement ratio, μ : Approximate value of static coefficient of friction, $t \times b$: Section size of hoop, C: Cylinder, HC: Cylinder confined by hoops at the ends, P: Prism

表-2 鋼輪の力学性質

t (mm)	σ_y (kg/cm ²)	σ_b (kg/cm ²)	ρ (%)
1.6	2870	3690	29.1
2.3	3030	4030	34.5

t: Thickness, σ_y : 0.2% offset point, σ_b : Breaking stress, ρ : Elongation percentage

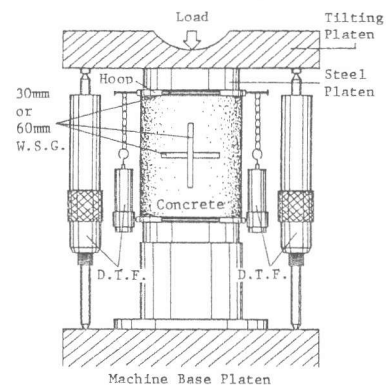


図-1 端面拘束実験の载荷およびひずみ測定方法

2.2 実験結果とその考察

1) 供試体の破壊状況：減摩パッドを用いた場合の供試体上端面のひび割れ発生状況の一例およびH/Dが異なる供試体の側面の破壊状況の一例を、それぞれ写真-1および写真-2に示す。

写真-1によれば、端面のひび割れはランダム、かつ面上に比較的均等に生じており、高ひずみ領域に至るまで減

摩効果は確保されたものと考えられる。写真-2によれば、H/Dが1.25以下の場合、供試体のほぼ全領域にひび割れが発生しているのに対して、H/D=2の供試体では打込みおよび載荷上部に破壊が集中している。

2) 1軸圧縮下の $\sigma-\epsilon$ 曲線に及ぼす供試体形状の影響：図-2に、減摩パッドを有し、かつ端面に鋼輪を持たない供試体の $\sigma-\epsilon$ 関係を示す。図によれば、応力下降域における耐荷能力はH/Dの減少に伴って増大し、とくにH/D=0.5および0.75の場合にその傾向が著しい。これは端面摩擦が完全にはゼロでないことも一因と思われるが、写真-2にもみられるように、H/Dの小さい供試体では崩壊に至るまでに供試体全域にわたって多数のひび割れが発生する⁷⁾のに対し、H/Dの大きい供試体では未破壊領域が多く残り、同一平均ひずみレベルにおける耐荷能力および単位体積あたりの蓄積エネルギーが前者に比べて小さいことによるものと推察される。したがって、コンクリートのような不均質な材料では、たとえ均等な応力を与えた場合でも、とくに応力下降域ではひずみ集中領域が存在し、実測の $\sigma-\epsilon$ 関係が供試体の形状・寸法の影響を大きく受ける⁸⁾ものと考えられる。

3) 1軸圧縮下の $\sigma-\epsilon$ 曲線に及ぼす端面拘束の影響：図-3(a)~(c)は $\sigma-\epsilon$ 曲線に及ぼす端面拘束の影響を示した一例である。図中には、それぞれの供試体について、上下の拘束鋼輪の引張降伏時相当の端面拘束力が側面に一樣にかかるものとして求めた横方向応力度（以後、等価拘束応力と呼ぶ）を横軸に平行な直線で示してある。ただし、降伏点以前の鋼輪の拘束応力は、それぞれ右側の縦軸の2倍のスケールで描いてある。等価拘束応力($\bar{\sigma}_L$)は次式によって算定した。

$$\bar{\sigma}_L = \frac{2 t'}{d} \sigma_s \quad (1) \quad \text{ここに、} \quad t' = 2bt/h, \quad h: \text{供試体の高さ, } d: \text{鋼輪の内径, } t: \text{鋼輪の内厚, } b: \text{鋼輪の幅, } \sigma_s: \text{鋼輪の円周方向の応力}$$

図-3(a)によれば、H/D=2の供試体の $\sigma-\epsilon$ 関係に及ぼす端面拘束の影響はあまり顕著ではない。これは、H/D=2の供試体では端面摩擦の影響を受けない領域が供試体中央部に存在するためと考えられる。一方、

図-3(b),(c)および他の本実験結果によれば、コンクリートの強度レベルにかかわらず、

H/Dが1.25以下の場合、1軸圧縮下の $\sigma-\epsilon$ 曲線は明らかに端面拘束の影響を受け、等価拘束応力が同程度であっ

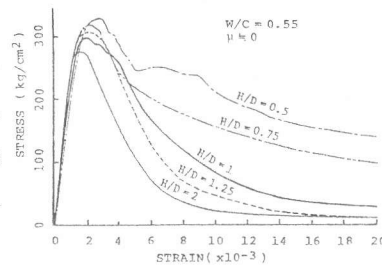
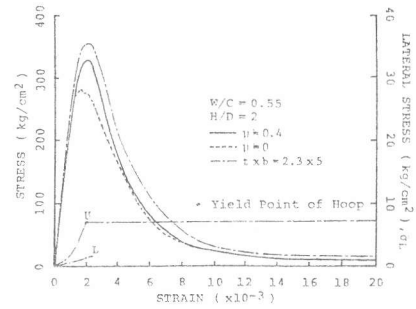
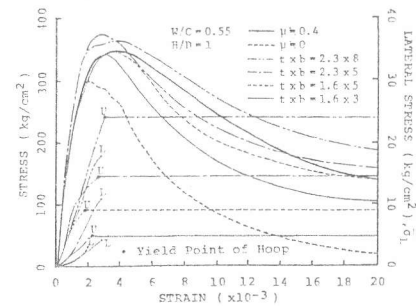


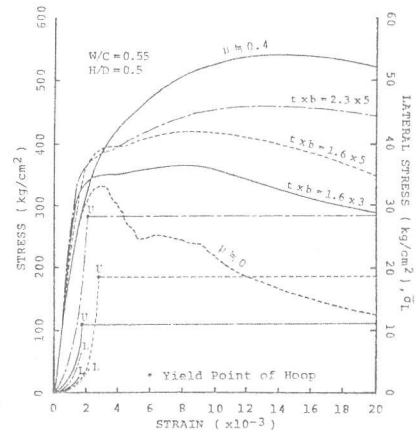
図-2 端面摩擦を減じた場合($\mu=0$)の $\sigma-\epsilon$ 曲線に及ぼす供試体形状(H/D)の影響(W/C=0.55の場合)



(a) H/D=2の場合



(b) H/D=1の場合



(c) H/D=0.5の場合

図-3 $\sigma-\epsilon$ 曲線に及ぼす端面拘束の影響(W/C=0.55の場合)

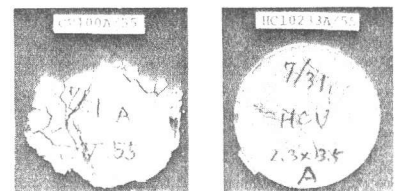


写真-1 供試体端面のひび割れ発生状況($\mu=0$ の場合)

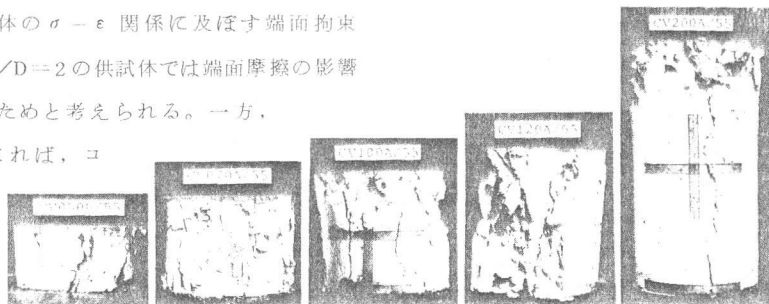
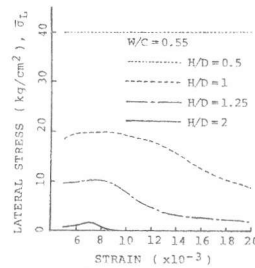
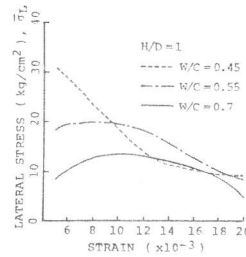


写真-2 供試体側面の破壊状況($\mu=0$ の場合)

ても、 σ - ϵ 曲線の延性化は H/D が小さいほど著しい。この傾向は、帯筋で拘束されたコンクリートでは同一帯筋量であってもそのピッチが小さいほど靱性が大きくなる現象と一致する。ただし、端面拘束を受けない供試体の σ - ϵ 曲線にも H/D の減少に伴う延性化がみられることが注目される。



(a) H/D の影響 ($W/C=0.55$ の場合)



(b) W/C の影響 ($H/D=1$ の場合)

図-4 端面摩擦効果のひずみレベルによる変化状況

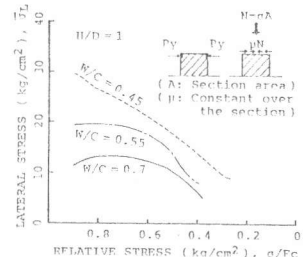


図-5 応力下降域における端面摩擦効果の変化状況 ($H/D=1$ の場合)

4) 1 軸圧縮下の σ - ϵ 曲線に及ぼす端面摩擦の影響 :

図-4(a) および(b)に、端面摩擦が σ - ϵ 関係に及ぼす効果を端面拘束力による効果に置き代えた場合の、等価拘束応力 (σ_L) のひずみレベルによる変化を示す。端面摩擦による拘束効果は H/D の減少とともに著しく増大し、 $H/D=1$ の場合、ひずみが約 10×10^{-3} に至るまでは、圧縮強度の大きいコンクリートほど等価拘束応力の値が大きくなる傾向があることが分かる。これらの拘束効果はひずみレベルによっても異なり、ひずみが約 10×10^{-3} を超えると同一耐荷能力を与える等価拘束応力の値は減少する。図-5に、応力下降域における等価拘束応力 (σ_L) と耐荷応力比 (σ/F_c , ここに、 F_c : 端面摩擦が存在する場合の圧縮強度) との関係の一例を示す。図中のような単純モデルを仮定した場合、上記の現象が単に耐荷能力の減少によってもたらされると仮定すれば、 σ_L と σ/F_c とは比例関係にあるはずであるが、本実験結果では、 W/C および H/D にかかわらず、ほぼ上に凸の関係となった。このことから、高ひずみ領域においては、ひずみの進行に伴う動摩擦係数の低下が生じていると推察される。

3. 3 軸圧縮実験

3.1 実験方法

実験の概要を表-3に示す。実験要因としては、水セメント比 (W/C)、供試体の高さ-辺長比 (H/D)、側圧 (σ_L) および端面摩擦を取り上げた。

1) 供試体の製作: 供試体は所定の H/D を有する断面が $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の角柱体および標準円柱体とした。供試体の製作および養生方法は端面拘束実験と同様である。

2) 載荷および測定方法: 供試体端面の鋼輪による分離型の横拘束と全側面への一様拘束の効果を比較・検討するため、鋼輪と類似した載荷パスで横拘束力を加えうる図-6のような 3 軸圧縮試験装置を試作した。横拘束用のネジ切り鋼棒の力学性質を表-4に示す。縦 (ϵ_1) 方向の載荷には高剛性試験機を使用し、ひずみ速度は端面拘束実験と同様とした。

3.2 実験結果とその考察

1) 3 軸圧縮実験結果: 載荷方向の σ_1 - ϵ_1 関係の測定結果を図-7(a)~(d)に示す。ただし、横拘束応力が加

表-3 3 軸圧縮実験の概要

Notation of specimen	W/C	H/D	σ_L (kg/cm ²)	μ^{*1}
e.g.1) T00-20 → H=20cm → $\mu=0$ → Without lateral confinement	0.45	1	0	0, 0.4 ^{*2}
	0.55		8	0, 0.4 ^{*2} , 0.4 ^{*3}
	0.55		16	0
e.g.2) TB34-10 → H=10cm → $\mu=0.4$ → $\phi 3\text{mm}$ Brass bolt → Triaxial	0.7	2	0	0, 0.4 ^{*2}
			3, 4, 8, 14, 26, 47	0, 0.4 ^{*2}

[Notes] H/D : Height/diameter ratio, σ_L : Lateral confining stress
 μ : Approximate value of static coefficient of friction
 μ^* : End frictions are present only for $W/C=0.55$, μ^* : End friction on the upper and lower surfaces, μ^* : End friction on the all surfaces

表-4 ネジ切り鋼棒の力学性質

Notation	Material	ϕ (mm)	P_y (kg)	P_b (kg)	ϵ (%)	σ_L (kg/cm ²)
B2	Brass	2.0	160	165	6.2	3.2
B3	Brass	2.9	210	215	7.3	4.2
S4	Steel	3.7	400	420	6.1	8.0
S5	Steel	4.7	680	690	7.1	13.6
S6	Steel	5.7	1300	1360	7.1	26.0
S7	Steel	7.8	2350	2625	7.3	47.0

[Notes] ϕ : External diameter, P_y : Tensile load at 0.2% offset point, P_b : Breaking load, ϵ : Elongation percentage, σ_L : Lateral stress applied to the specimen of $H/D=2$ ($D=10\text{cm}$) at $P=P_y$ per 4 bolts

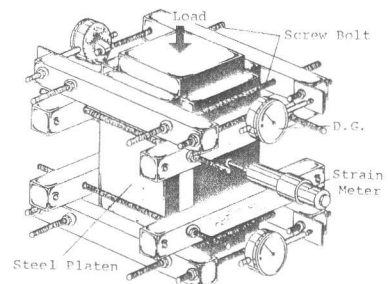
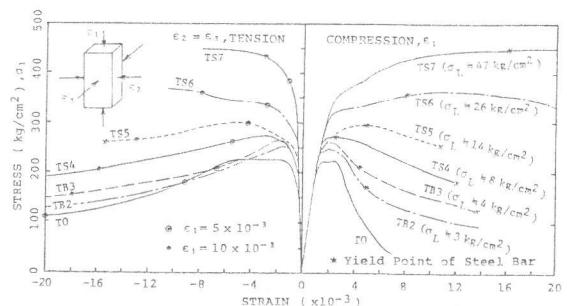


図-6 3 軸圧縮試験装置



(a) 側圧の影響 ($H/D=2$ の場合)

図-7 3 軸圧縮実験結果

わり始めるまでは、1軸下の $\sigma_i - \varepsilon_i$ ($i=1,2,3$) 関係を示すものとして減摩材等の存在によるひずみ測定誤差を修正してある。図-7(a) によれば、側圧が 5 kg/cm^2 程度でもコンクリートの靱性は著しく増大しており、3軸圧縮の効果顕著である。また、コンクリートの横ひずみは側圧の増加に伴い比例的に減少している。図-7(b)によれば、3軸圧縮下の $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 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軸載荷時の応力下降域にみられるConverging branch⁹⁾は、側圧が増加するとともに高ひずみ域へ移動している。図-7(c)によれば、側圧が 8 kg/cm^2 のとき、 $H/D=1$ の供試体から得られる $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線は $H/D=2$ の場合より延性的で、1軸下の $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線の相違がそのまま現われている。図-7(c)および(d)によれば、 $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線に及ぼす端面摩擦の影響は、供試体の H/D が小さいほど、また、摩擦面が多いほど顕著である。また、端面摩擦が存在する場合には、横拘束用の鋼棒の降伏が遅れ、端面摩擦によってコンクリートの横ひずみが拘束されていることが分かる。

2)分離型と一様型の横拘束効果の相互比較：端面拘束実験および3軸圧縮実験によって得られた $\sigma - \varepsilon$ 曲線($\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲線と等価)の比較例を図-8(a)~(c)に示す。図-8(a)によれば、 $H/D=2$ の供試体については端面拘束の効果がほとんどみられないのに対し、一様拘束の場合には、たとえ側圧が小さい場合でも顕著な拘束効果が認められる。一方、 $H/D=1$ の供試体の端面拘束実験結果と $H/D=2$ の供試体の一様拘束実験結果とを比較した図-8(b)によれば、両者の $\sigma - \varepsilon$ 曲線の形状は比較的類似しており、分離型拘束の場合でも一様拘束圧の約70%程度の効果が現われている。ただし、両者の供試体の H/D が相違するため、拘束圧がゼロの場合の $\sigma - \varepsilon$ 関係は相違している。一方、図-8(c)は両者の H/D が1の場合の比較例であるが、分離型拘束では、一様拘束に比べて等価拘束応力が半減しているばかりでなく、ひずみの進行に伴う耐荷能力の低下が著しい。

4. むすび

1軸並びに3軸圧縮実験によって得られる $\sigma - \varepsilon$ 曲線は、端面摩擦のみならず、供試体の形状・寸法によっても著しく相違することに留意する必要がある。今後、応力下降域も含めたコンクリートの構成モデルについて詳細に検討するとともに、鋼繊維補強コンクリートやコンファインドコンクリートの塑性変形挙動に関する解析的検討を行う予定である。

〔謝辞〕本研究に際し、実験およびデータ整理にご助力を得ました鈴木清孝君(名大院生)、松村高俊君(名大学生)、小川孝次君(愛工大学生)および須崎明彦君(愛工大学生)に深謝致します。

〔引用文献〕

- 1) 青山・野口, コンクリート工学, Vol.17, No.4, 昭54.4, pp.1-14., 2) W. F. Chen and E.-C. Ting, Jour. of EM Div., Proc. of ASCE, Vol. 106, No. EM1, Feb. 1980, pp. 1-10., 3) 小阪・谷川・畑中・森, コンクリート工学年次講演会講演論文集, 第4巻, 昭57, pp. 189-192., 4) M. D. Kotsoyos and J. B. Newman, ACI Jour. Sept.-Oct. 1980, pp. 340-346., 5) S. H. Ahmad and S. P. Shah, Jour. of ST Div., Proc. of ASCE, Vol. 108, No. ST4, Apr. 1982, pp. 728-742., 6) 小阪・谷川・太田, コンクリート工学年次講演会講演論文集, 第2巻, 昭57, pp. 121-124., 7) 小阪・谷川・山田・畑中, 建築学会東海支部研究報告集, 第21号, 昭58.2., 8) 大岸・小野・棚橋, コンクリート工学年次講演会講演論文集, 第4巻, 昭57, pp. 29-32., 9) F. Watanabe, Proc. of Int'l Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Vol. IV, Kyoto, Aug. 1971, pp. 153-161.

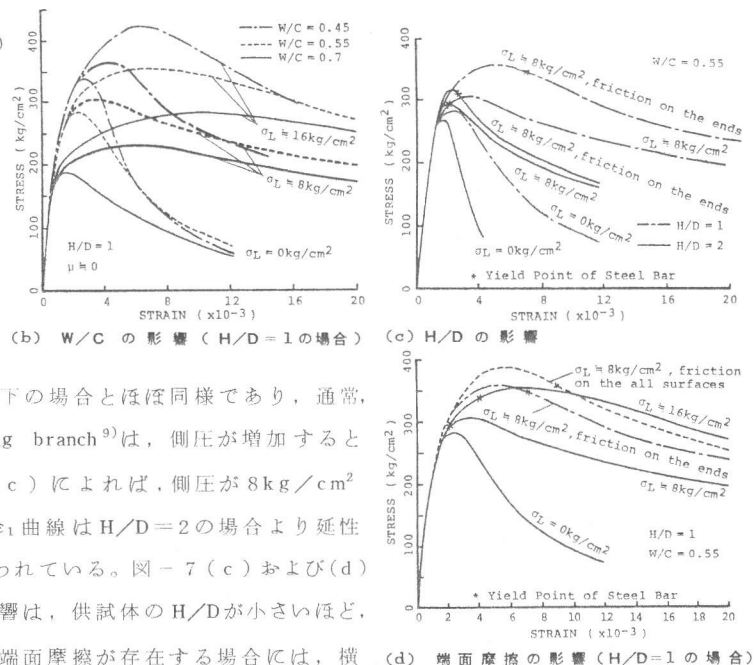


図-7 3軸圧縮実験結果

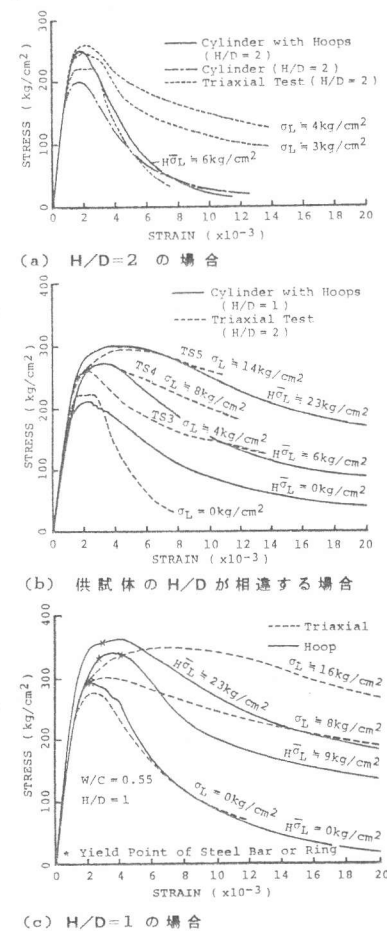


図-8 分離型と一様型横拘束効果