

[2020] 曲げ圧縮部コンクリートの応力分布特性

正会員 柳 下 文 夫 (近畿大学理工学部)

1. まえがき

一般に、曲げを受けるコンクリート系部材の終局断面解析は、曲げ圧縮域に仮定するストレスブロックをコンクリートの一軸載荷時の応力-ひずみ関係と相似形に仮定し、それから求まる諸係数を用いて行われる。この解析方法は、Hognestad¹⁾ や Rüschi²⁾ の実験結果に基づくものであり、その後 Mattock等³⁾ が比較検討を行ない ACI 規準に示されているような等価な長方形分布に置き換える方法が実用上定着した。(図-1 参照) しかし、これらの実験的研究における試験体の断面形状は長方形のものがほとんどであり、コンクリート系土木構造物および杭等によく見られるような長方形以外の断面形状のものについては、ほとんど実験が成されていない。

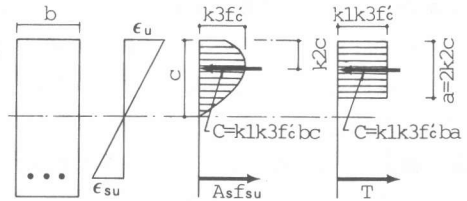


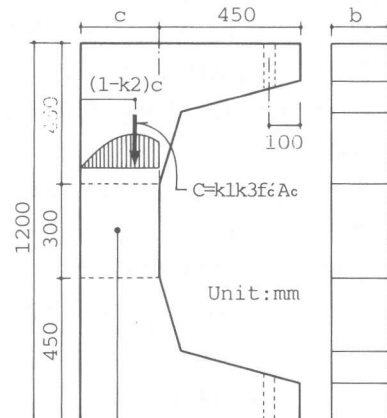
図-1 終局時曲げ圧縮域のストレスブロック

そこで本研究は、断面形状がストレスブロックの形状係数に対して与える影響に着目し、種々の断面形状を有する部材断面のストレスブロックの形状特性を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状および寸法の詳細を図-2に示す。中間部における断面形状は長方形 (Aタイプ)、半円形 (Bタイプ)、台形 (Cタイプ)、三角形 (Dタイプ)、中空半円形 (Eタイプ) の5種類とし、それぞれの形状に対して横補強筋 ($\phi 6$, $f_{sy}=2600\text{kg/cm}^2$) を配したものと無補強のものを1体ずつ製作した。中間部の横補強筋量は容積比にして1%に統一し、その間隔を図-2に併せて示した。なお、横補強筋のかぶり b^* は1cmとした。コンクリートの設計基準強度は 200kg/cm^2 とし、その配合を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材は最大粒径5mmの砕石、粗骨材は粒径15mm~25mmおよび5mm~15mm



	A-1 A-2	B-1 B-2	C-1 C-2	D-1 D-2	E-1 E-2
b	180	300	300	300	300
b*	-	-	150	-	150
c	250	150	130	150	150
s	46	40	46	55	53

s:hoop spacing (A-2~E-2)

図-2 試験体の形状および寸法

表-1 コンクリートの配合

Water-Cement Ratio (by weight)	Slump (cm)	s/a by Volume (%)	Quantities per cubic meter of concrete				
			Water	Cement	Aggregate		
					Coarse	Medium	sand
73	15	49	182	250	284	664	925

の碎石を3：7に重量配分したものをそれぞれ用いた。ベーススランプは15cmであるが、打設時スランプは平均12cmであった。

2.2 加力および測定方法

加力は、図-3に示すように軸力用主ジャッキにより△P1だけ載荷し、背面（Neutral Surface）ひずみを零にするように手動油圧ジャッキを用いPC鋼棒を介して副軸力△P2を与える。各部の変形およびひずみデータは、背面ひずみが零になった状態において静ひずみ計→計測用パソコンの順で計測・収録した。この様な方法により、断面に曲げ圧縮域の応力状態を再現しつつ、試験体が破壊に至るまで連続載荷した。なお、背面から主ジャッキの軸線までの偏心距離（e1）は、載荷点の局部圧壊が生じぬよう考慮して決定した。（図-3参照）

試験体の各部の測定を次のごとく行った。中間部の鉛直（検長35cm）・水平変位はカンチレバ型ひずみゲージ変換式変位計（±2.5mm, 2000μ/mm, ±5mm, 1000μ/mm）を用いて測定した。試験体A-2～E-2に配した横補強筋の軸方向ひずみは、ひずみゲージを貼付し測定した。

3. 解析方法

試験体中間部のストレスブロックの形状係数は以下に示す2つの方法により求めた。

3.1 方法-1（Case-1）

各計測ステップの軸力の和（P1+P2）を用いて次式の通りに計算を行った。

$$k1k3 = \frac{C}{Ac \cdot f_{c'}} = \frac{P1+P2}{Ac \cdot f_{c'}} \quad k2 = 1 - \frac{P1 \cdot e1 + P2 \cdot e2}{(P1+P2) \cdot c}$$

P1：主軸力

P2：副軸力（PC鋼棒による）

e1, e2：P1およびP2の背面に対する偏心距離

f_{c'}：コンクリートの最大圧縮応力

Ac：断面積

c：中立軸（背面）から圧縮縁までの距離

3.2 方法-2（Case-2）

まず断面を鉛直変位測定位置で断面せいの直角方向に要素分割する。それぞれの要素のコンクリート応力は、その平均ひずみに対応する応力を持つとし、その合力は要素の中心に作用するものとする。要素応力は各ひずみに対し、シリンダーの一軸圧縮試験結果（σ-ε関係：後述）より求め、各要素の合力の和を圧縮合力“C”とし、次式を用いて係数k1k3を計算する。係数k2は合力の作用位置から直接求めた。

$$k1k3 = \frac{C}{Ac \cdot f_{c'}}$$

k1：圧縮応力分布の圧縮域での平均値と最大応力との比

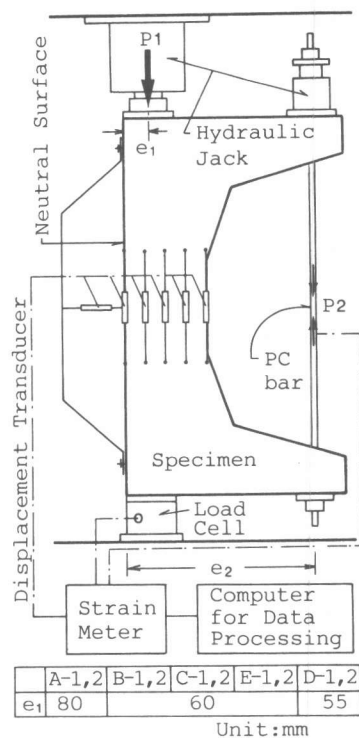


図-3 加力および測定方法

k₂: 合力の作用位置を表す係数

k₃: 圧縮応力の最大値の圧縮強度 f_c' に対する比

4. 実験結果と考察

4.1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

図-4に示すコンクリートの応力-ひずみ曲線は、各試験体につき6本のテストピース (10φ×20cm) の圧縮試験より得た応力-ひずみ曲線を平均化したものである。強度のばらつきは設計基準強度に対して+14%~8%の範囲であった。

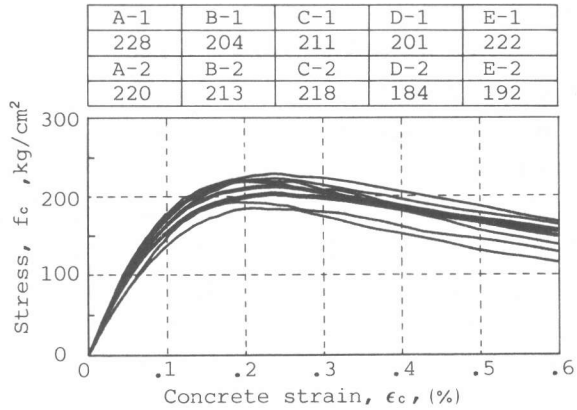


図-4 コンクリートの応力-ひずみ曲線

4.2 変形の適合条件

変形前に一平面上にあった断面は、変形後も一平面上に存在するとした、

いわゆる平面保持の仮定は曲げ材の応力解析上不可欠の基本原則である。図-5は、試験体A-1~E-1の代表的な縁ひずみに対するひずみ分布を示したものである。同図から、各断面形状とも断面内のひずみ分布は三角形に近い形となっており、平面保持の仮定がほぼ成立していることが確認された。

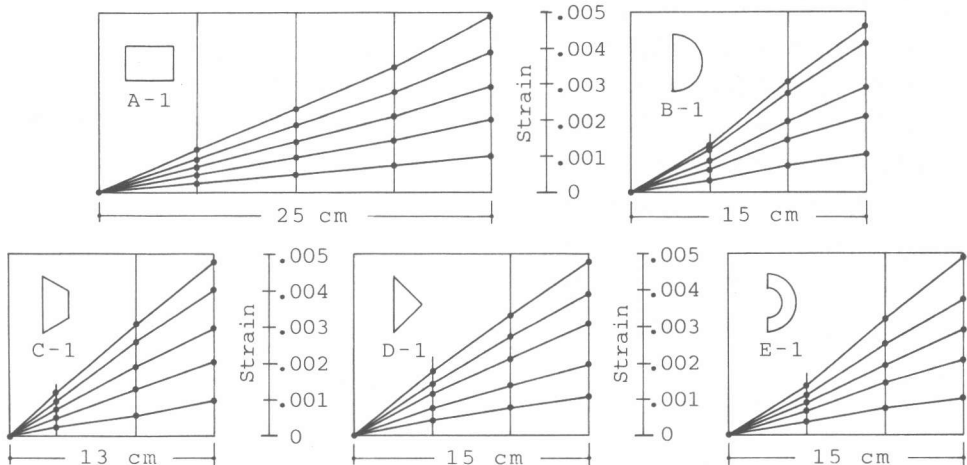


図-5 試験体A-1~E-1のひずみ分布

4.3 ストレスブロックの形状係数

図-6は、試験体A-1~E-1に対して、前項3に述べた2つの解析方法より求めたストレスブロックの形状係数 k_1k_3 、 k_2 、 k_2/k_1k_3 の分布を各断面について描いたものである。土木学会では、一般に曲げ破壊の条件としてコンクリートの圧縮縁ひずみがある終局値 ϵ_{cu} に達したときに破壊するとしていて、普通 $\epsilon_{cu}=0.0035$ という値を常用している。そして、ひずみが0.0035の時の k_1k_3 はACI規準と同様に、実際の分布では0.72程度、等価な分布では0.85という数値を与えている。一方、終局ひずみの値は断面の形状によって異なることが Rüschi⁴⁾ や森田博士⁵⁾ の計算によって指摘されている。そこで本実験結果の考察においては ϵ_{cu} を一定の値に仮定する

のではなく、断面解析上の終局限界点を定めるいくつかの方法 (ϵ_{cu} を定める・at (k_2/k_{1k3})_{min}・at (k_{1k3})_{max}・at ($C=T$)_{max}) の内から、その定義が単鉄筋断面のみならず複鉄筋断面にも拡張されている (k_2/k_{1k3})_{min}の時点を終局限界点と仮定し、その時の諸係数を図-6から読み取りシリンダー強度 f'_c に対してプロットしたものが図-7である。断面の形状によって諸係数の値が大きく影響を受けることが同図は示している。例えば、三角形断面の係数をACI値と比較した場合 k_2 については約35%, k_{1k3} の値は約25%程度大きな値を示した。

解析方法-1, 2の比較において、長方形・中空半円形・三角形の各値は、“曲げ圧縮部のコンクリートの応力がひずみのみの関数として与えられるのなら、任意の断面形状における応力分布の性質は計算で求められる”とした理論をほぼ裏付けたが、半円形・台形のそれぞれの k_2 については大きな差が示された。これは、試験体の数が少ないことなどから要因を明確にできないが、さらに研究を要するポイントの一つであると思われる。なお、表-2に実験結果から求めた実際の分布の形状係数 (k_2, k_{1k3}^*) と、それらを用いて求めた実用設計の場合にしばしば用いられる等価な分布の形状係数 (k_2, k_{1k3}^{**}) をそれぞれ示した。

表-2 形状係数 k_2 & k_{1k3}

	Case-1			Case-2		
	k_2	k_{1k3}^*	k_{1k3}^{**}	k_2	k_{1k3}^*	k_{1k3}^{**}
A-1	0.39	0.81	1.04	0.43	0.81	0.94
B-1	0.30	0.78	1.30	0.51	0.79	0.77
C-1	0.32	0.88	1.38	0.48	0.80	0.83
D-1	0.57	0.90	0.79	0.64	0.86	0.67
E-1	0.40	0.87	1.09	0.44	0.82	0.93

* Actual value ** Equivalent value

4.4 終局圧縮縁ひずみと横補強筋

前項4.3同様、(k_2/k_{1k3})_{min}の時点を終局限界点とした場合の終局圧縮縁ひずみ (ϵ_{ou}) を表-3に示す。同表から ϵ_{ou} は断面形状によって大きく変化することがわかる。長方形断面の2軸曲げのように、圧縮

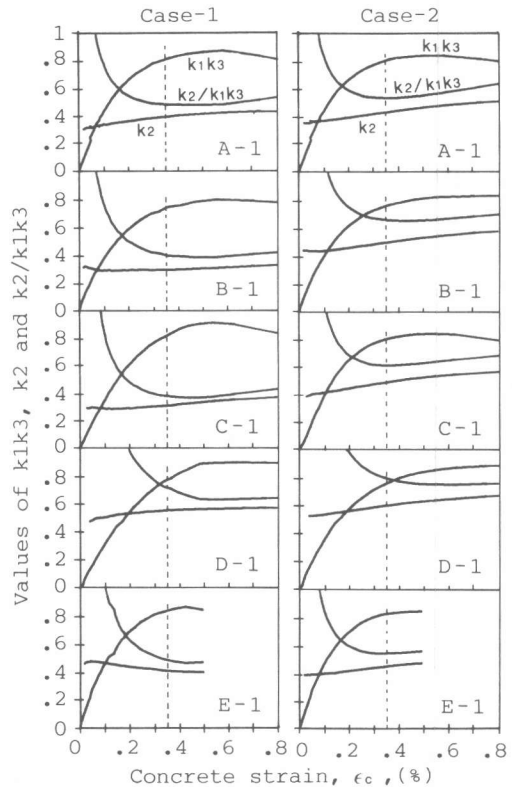


図-6 各試験体のストレスブロックの諸係数

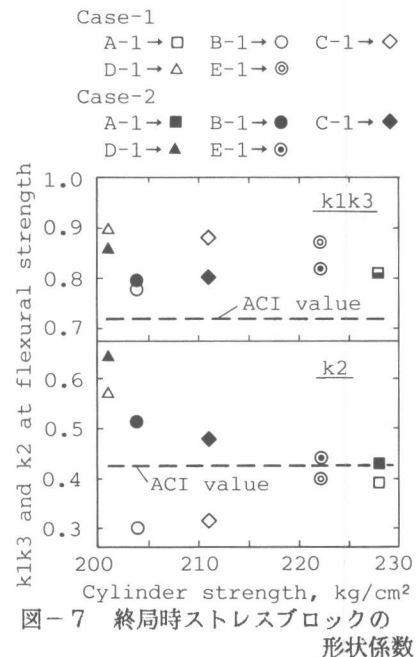


図-7 終局時ストレスブロックの形状係数

域が三角形になる場合の圧縮縁ひずみは、長方形の値の1.5倍と著しく大きくなる。

横補強筋を配したコンクリートが強度を増し⁴⁾、破壊までに大きな変形を許すのは周知の事実であるが、その効果を正確に把握するには至っていないこともまた事実である。ここでは断面形状と補強効果の関連について実験結果から考察する。表-3よりCase-1のaおよびbを比較して、同一補強筋量(容積比1%)に対する補強効果(終局ひずみの伸び)は、長方形→100%, 半円形→29%, 台形→47%, 三角形→56%, 中空半円形→84%(E-1の最終破壊性状が他の試験体と異なったモードを示したため参考値としたい)となり、断面形状により効果の程度が異なるということが特徴である。また、この補強効果の傾向は横補強筋のひずみ分布にも示され(図-8参照)、圧縮縁に近い部分で大きな力を負担している試験体の方がその効果が大きく、円形断面のように補強筋に加わる力が平均化されてしまうもののほうが補強効果は小さい。ただし、これらの傾向・数値は試験体の数が少ないことおよびコンクリート強度が若干ばらついているため定量的なものとは言い難い。

表-3 試験体の終局圧縮縁ひずみ

Type		A	B	C	D	E
Case-1	a Plain	0.359	0.473	0.436	0.541	0.421
	b Confined	0.717	0.611	0.640	0.846	0.773
Case-2	c Plain	0.376	0.440	0.375	0.617	0.332
	b/a	1.997	1.292	1.468	1.564	1.836

Unit: %

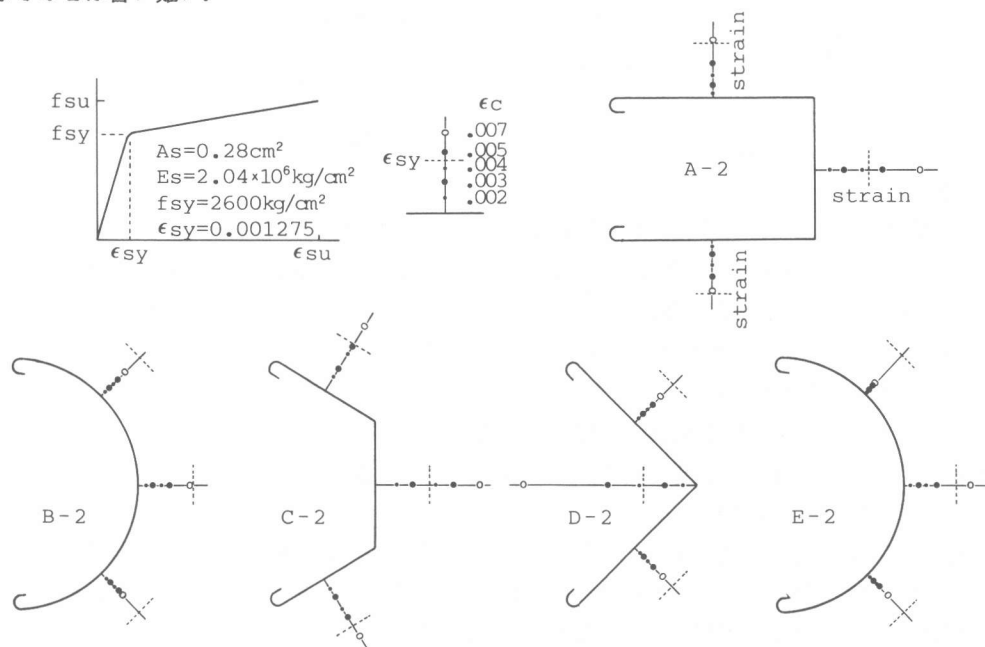


図-8 横補強筋のひずみ分布 (圧縮縁ひずみ $\epsilon_c=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7\%$ の場合)

4.5 要素分割による解析手法(方法-2)について

図-9に圧縮縁ひずみに対する総軸力($P1+P2$)と“方法-2”により求めた圧縮合力(C)との比較を示した。試験体A-1~E-1に対する両者は断面が破壊に至るまでほとんど一致している。しかし、試験体A-2~E-2については縁ひずみが0.2%程度から明らかな違いを示している。これは各要素に仮定したコンクリートの応力-ひずみ関係がいわゆるプレーンコンクリート(無補強テストピース)のものであり、拘束コンクリートのものであることの結果である。

このことは、コンクリート強度はもとより断面形状・補強方法等をパラメーターとした補強コンクリートの力学性状が正確に評価できれば、特殊断面の曲げ解析は簡便に行えることを示している。

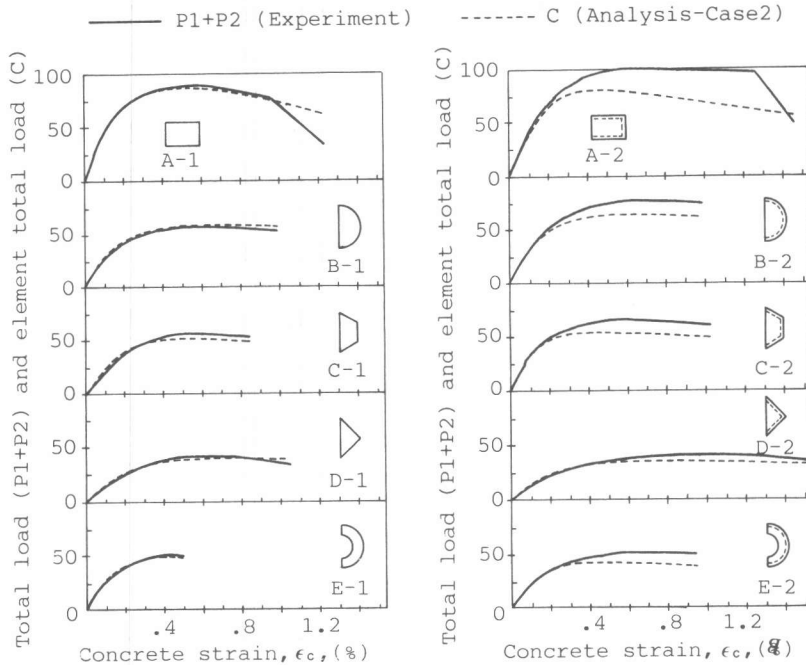


図-9 総軸力（実験）と合力（解析）の比較

5. 結論

曲げ圧縮部コンクリートの応力分布再現実験から以下のことが明らかになった。

- (1) 各断面形状とも圧縮縁ひずみが終局値に至るまで平面保持の仮定がほぼ成り立っている。
- (2) ストレスブロックの形状係数および終局圧縮縁ひずみは断面形状によって異なる。
- (3) 断面形状の違いによる等価ストレスブロックの形状係数が求められた。
- (4) 横補強筋の効果は断面形状によって異なる。
- (5) 要素分割による解析手法の有効性がある程度確認された。

今後、コンクリート強度・横補強筋量・補強方法・圧縮筋量・中立軸比等の要因も含めた実験・解析を行なう予定である。

【謝辞】 本実験に際し、貴重なるご助言を頂きました近畿大学水野俊一教授および建設省建築研究所企画部長岡本伸博士に感謝いたします。また、本実験に協力していただいた近畿大学卒論生、青山、的場、岡田、初鳥の諸君に感謝します。

【参考文献】

- 1) E. Hognestad, N. W. Hanson, and D. McHenry, "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design." Journal of ACI, Vol. 52, No. 6, December, 1955, pp. 455-479
- 2) H. Rüsçh, "Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone." Bulletin No. 120, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, 1955, 94 pp.
- 3) A. H. Mattock, L. B. Kriz, and E. Hognestad, "Rectangular Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design." Journal of ACI, Vol. 57, No. 8, February 1961, pp. 875-926
- 4) H. Rüsçh, "Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete." Journal of ACI, Vol. 32, No. 1, July 1960.
- 5) 森田司郎, "曲げ圧縮を受けるコンクリートの性質についての2, 3の考察." セメント技術年報, XXIV, 昭和45年
- 6) F. E. Richart, A. Brandtzaeg, and R. T. Brown, "A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stress," Bulletin No. 185, Univ. of Illinois Eng. Experiment Station, Urbana, Nov. 1928