

鉄筋コンクリート平板の二軸載荷実験

小池 健 仁 長 沼 一 洋
山口 恒 雄 武 田 寿 一

Biaxial Loading Tests on Reinforced Concrete Panels

Kenji Koike Kazuhiro Naganuma
Tsuneo Yamaguchi Toshikazu Takeda

Abstract

For prediction of the behaviors of nuclear power plant structures composed of reinforced concrete shear walls and having complex cross-sectional configurations, it is necessary to grasp the actual behaviors of the concrete elements under various conditions and to establish analytical models adequately. Biaxial loading tests on reinforced concrete panels are performed to obtain fundamental data about shear strength. The parameters in the tests are directions of reinforcing bars and loading methods. The results of the tests are as follows. In diagonally-reinforced specimens compressive strengths of concrete struts are lowered to $0.66 F_c$ to $0.71 F_c$ in a pure shear state in which F_c is compressive strength according to concrete test cylinder, and stiffness and strength are increased by adding the membrane compressive force. In longitudinally- and transversely-reinforced specimens, compressive strengths of concrete struts are not lowered by the initially-given transverse strain.

概 要

原子炉建屋等の鉄筋コンクリート壁体から構成される複雑な断面形状をもつ構造物の挙動を有限要素法によって解析的に予測するためには、コンクリート要素の各種条件下における実現象を把握し、それを解析モデルに適切に反映させる必要がある。このため、せん断応力場におけるコンクリートの力学的諸性状を実験的に把握し、解析技術を向上させることを目的として、配筋方向と加力方法をパラメータとした鉄筋コンクリート平板の二軸載荷実験を行なった。その結果、以下のことが分かった。斜め配筋試験体では純せん断応力状態に近い場合、コンクリートストラットの圧縮耐力は、テストピースの値(F_c)に比べ、 $0.66F_c \sim 0.71F_c$ と低かった。また、膜圧縮力が作用している場合、剛性及び耐力の上昇が認められた。一方、縦横配筋試験体では初期に与えた横方向ひずみが圧縮耐力に及ぼす影響はほとんど認められなかった。

1. はじめに

原子炉建屋等の鉄筋コンクリート壁体から構成される複雑な断面形状を持つ構造物についても、地震荷重を想定した時の弾性域から破壊に至るまでの挙動を有限要素法を用い、解析的にかなりの精度で予測できるようになってきた¹⁾。しかし、解析結果はコンクリートの応力-ひずみ関係についての仮定条件にかなり支配され、特に、せん断破壊型の構造物を対象とする解析では、面内せん断応力が卓越する領域のコンクリートの応力-ひずみ関係と破壊基準に工夫を施しているのが現状である。

このような背景のもとに、せん断応力場におけるコンクリートの力学的諸性状を実験的に把握し、それらの結

果を解析上の仮定条件に反映させることにより、解析技術の信頼性を向上させることを目的としてこの研究に着手した。

この報告は、第1報として、配筋方向と加力方法をパラメータとし、せん断応力-せん断ひずみ関係に及ぼす膜応力の影響、コンクリートストラットの応力-ひずみ関係に及ぼす横ひずみ(ストラットに直交する方向のひずみ)の影響を把握することを目的として実施した鉄筋コンクリート平板の二軸載荷実験の結果について述べたものである。

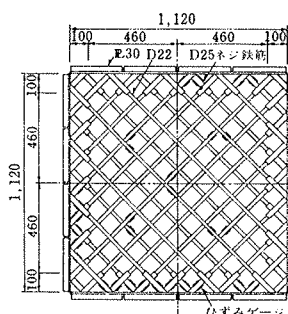
2. 実験概要

2.1. 試験体

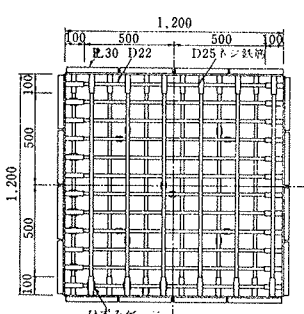
試験体 No.	形状寸法	配筋方向	鉄筋比	加力方法
1	112cm×112cm	斜め配筋	2.6%	一軸圧縮加力(二軸圧縮+せん断状態に対応)
2	壁厚t=15cm	斜め配筋		横方向引張降伏の後Tを一定とし、Cで破壊
3		斜め配筋		T=Cの比例載荷(純せん断状態に対応)
4	120cm×120cm	横筋のみ	D22 @100 シングル	横方向引張降伏の後Tを一定とし、Cで破壊
5	壁厚t=15cm	縦横配筋		横方向引張降伏の後Tを一定とし、Cで破壊
6		縦横配筋		横方向ひずみ $3 \cdot \epsilon_y$ の後、Tを一定とし、Cで破壊

T: 横方向引張力, C: 縦方向圧縮力

表一 試験体一覧



図一 配筋図(No. 1~No. 3)



図二 配筋図(No. 5, No. 6)

試験体一覧を表一に、試験体形状、配筋図を図一と図二に示す。試験体は壁厚が15cmの正方形板で、辺長はNo. 1~No. 3が112cm, No. 4~No. 6が120cmである。鉄筋はD22(SD35, 波ふし)を使用し、100mm間隔のシングル千鳥配筋とした。鉄筋比は2.6%である。

実験パラメータは配筋方向と加力方法である。No. 1~No. 3は斜め配筋(鉄筋と加力軸のなす角度が45°), No. 4は横筋のみの一方向配筋であり, No. 5とNo. 6は縦横配筋(鉄筋と加力軸が一致)である。ひびわれ発生後のコンクリートストラットの応力-ひずみ関係に、ひびわれと直交方向のひずみの大きさが及ぼす影響を調べるため、横方向引張ひずみをパラメータとした試験も加えた。斜め配筋試験体は、一般の縦横直交配筋された壁がせん断を受けている状態と対応し、加力方法の違いによって、鉄筋の主軸方向で考えた応力状態は以下の通りである。一軸圧縮加力のNo. 1は二軸圧縮+せん断に対応する。No. 2は横方向に引張力Tを加え、降伏ひずみ ϵ_y に達したのち引張力を一定にして縦方向圧縮力Cを加えて破壊させたもので、初期段階では二軸引張+せん断に対応し、その後、純せん断応力状態に漸近する。No. 3はT=Cの比例載荷であり、純せん断応力状態に対応する。No. 4, No. 5は最初に横方向に降伏ひずみ ϵ_y まで、No. 6は $3 \cdot \epsilon_y$ まで引張り、その後、引張力を一定に保ち、縦方向圧縮力を加えて破壊させた。

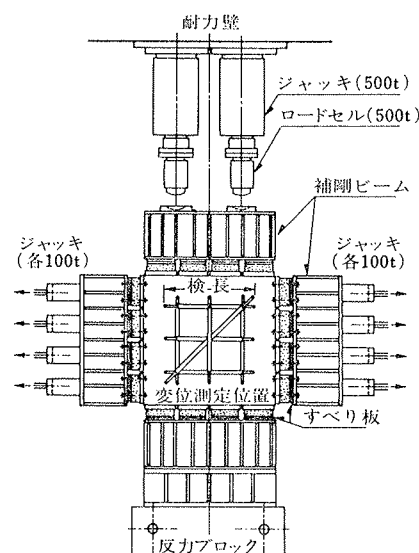
鉄筋の端部にはD25ネジ鉄筋をガス圧接し、試験体の一边を4分割した鉄板R30に固定した。

圧縮試験			割裂試験	
圧縮強度 (kg/cm ²)	ヤング係数 ($\times 10^4$ /cm ²)	ポアソン比	単位重量 (kg/ℓ)	引張強度 (kg/cm ²)
313	2.40	0.166	2.32	24.2

表二 コンクリートの材料試験結果

種類	降伏点 σ_s (kg/cm ²)	降伏ひずみ ϵ_s ($\times 10^{-6}$)	引張強度 σ_b (kg/cm ²)	ヤング係数 Es ($\times 10^6$ kg/cm ²)	伸び (%)
D22	4,200	2,310	5,870	1.86	18.4
D25	4,370	2,310	6,010	1.94	26.2

表三 鉄筋の機械的性質



図三 加力装置

試験体周辺部は、面外補強板R10(図一四~図一七参照)を用い、各々M10ボルト2本で固定した。

コンクリートの材料試験結果を表二に、鉄筋の機械的性質を表三に示す。

2.2. 加力方法及び測定方法

加力装置を図一三に示す。加力装置の設計では次の点に留意した。試験体周辺で各辺4点加力とするが、荷重制御の場合、局部破壊の防止が困難となるため、周辺に補剛ビームを取り付け、非線形域でも境界部の加力方向変位が一樣となるように変位制御方式を採用した。なお、試験体の周辺における辺方向変位を拘束しないように、補剛ビームとの間にすべり板を設けた。

圧縮加力用500tジャッキ2台、引張加力用100tジャッキ8台を使用し、二方向とも単調加力とした。

変位測定位置を図一三に示す。測定は、加力軸の二方向と45度方向について試験体の両面にボルトを立て、両端をピンとしたスライド式の計測治具を測定区間にかけて渡し、高感度変位計で行なった。

3. 実験結果及びその検討

3.1. 破壊性状

実験結果一覧を表-4に、最終破壊状況を図-4～図-7に示す。ひびわれ発生状況、最終破壊状況の特徴は次の通りである。

(1) No. 2～No. 5では初ひびわれは引張力と直交方向に発生した。No. 1では圧縮加力のみでも加力方向にひびわれが発生した。

(2) 最終破壊はいずれも試験体全域にわたるコンクリートの圧壊によって生じた。

(3) 斜め配筋試験体 (No. 1～No. 3) は縦横配筋試験体 (No. 4～No. 6) に比べて、ひびわれ間隔が小さく、配筋方向がひびわれ発生状況に及ぼす影響が認められた。

(4) 圧縮力のみを加えた No. 1は、引張力も加えた No. 2, No. 3に比べ、破壊直前のひびわれ間隔が大きかった。

(5) 斜め配筋で、横方向に引張力Tを加え、鉄筋が降伏ひずみ ϵ_y に達した後、引張力を一定に保ち、縦方向圧縮力Cを加えた No. 2と T=C の比例载荷をした No. 3との最終破壊状況は類似していた。

3.2. 鉄筋コンクリート部材の平均応力-ひずみ関係

引張加力時の引張平均応力-ひずみ関係を図-8～図-10に示す。No. 3では圧縮力も同時に加えている。縦軸は引張荷重を全断面積で除した引張平均応力、横軸は変位 (裏表各3点計6点の平均) を検長で除した平均ひずみである。縦横配筋試験体については横方向の鉄筋ひずみの平均値も併せてプロットした。これらの図から以下の傾向が認められる。

(1) 縦横配筋 (No. 4～No. 6) の場合、引張加力時には加力と直交する方向のひずみはほとんど生じないが、

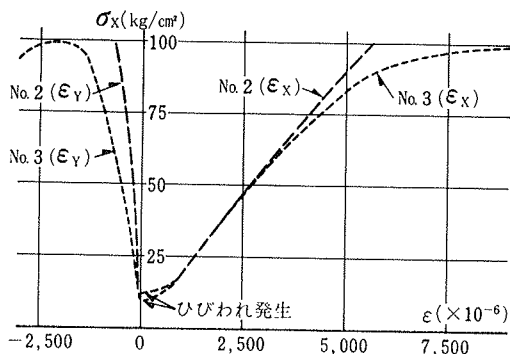


図-8 引張平均応力-ひずみ関係 (No. 2, No. 3)

試験体 No.	配筋方向	加力方法	ひびわれ発生荷重		鉄筋降伏荷重		最大荷重		
			T (t) (σ_x kg/cm ²)	C (t) (σ_y kg/cm ²)	引張・圧縮の区別	T (t) (σ_x kg/cm ²)	C (t) (σ_y kg/cm ²)	T (t) (σ_x kg/cm ²)	C (t) (σ_y kg/cm ²)
1	斜め	一軸圧縮加力	—	-100 (-59.5)	降伏せず	—	—	—	-410 (-244)
2	斜め	T(ϵ_y)を一定としCで破壊	24 (14.3)	-19 (-11.3)	引張降伏時	160 (95.2)	—	165→159 (98.2)(94.6)	-172 (-102)
3	斜め	T=Cの比例载荷	19 (11.3)	-19 (-11.3)	引張降伏時	140 (83.3)	-140 (-83.3)	168 (100)	-165 (-98.2)
4	横のみ	T(ϵ_y)を一定としCで破壊	41 (22.8)	—	引張降伏時	183 (102)	—	188→182 (104)(101)	-432 (-240)
5	縦横	T(ϵ_y)を一定としCで破壊	34 (18.9)	—	引張降伏時 圧縮降伏時	186 (103) 182 (101)	— -642 (-357)	187→180 (104)(100)	-716 (-398)
6	縦横	T(3· ϵ_y)を一定としCで破壊	34 (18.9)	—	引張降伏時 圧縮降伏時	185 (103) 180 (100)	— -636 (-353)	190→180 (106)(100)	-705 (-392)

$\sigma_x = T/A$, $\sigma_y = C/A$, A = 全断面積, 最大荷重 T 欄の → 印の右側は最大荷重後の一定荷重を示す。

表-4 実験結果一覧

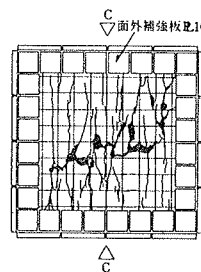


図-4 破壊状況 (No. 1)

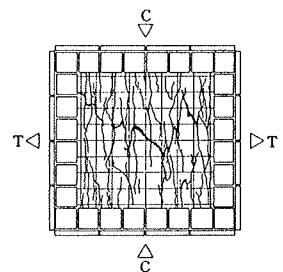


図-5 破壊状況 (No. 3)

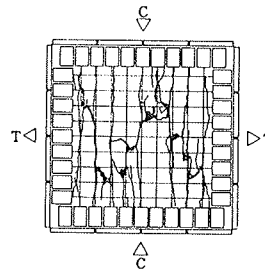


図-6 破壊状況 (No. 4)

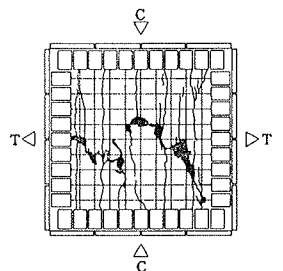


図-7 破壊状況 (No. 5)

斜め配筋の場合は、引張加力のみ (No. 2) でも直交方向に圧縮ひずみが生じている。

(2) 縦横配筋の場合、変位計から求めた引張ひずみは横筋のみの剛性から求めた計算値とほぼ一致する。なお横筋ひずみの平均値は変位計から求めたひずみより多少

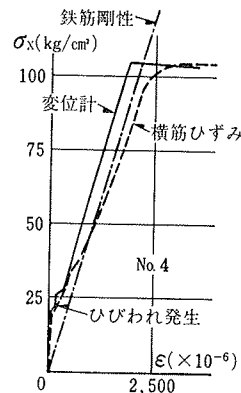


図-9 引張平均応力-ひずみ関係 (No. 4)

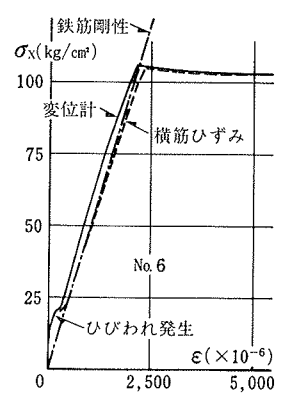


図-10 引張平均応力-ひずみ関係 (No. 6)

大きい。これは、横筋ひずみが局部的なひずみを測定しているためではないかと思われる。

圧縮加力時の圧縮平均応力-ひずみ関係を図-11と図-12に示す。No. 2, 4, 5, 6 については、それ以前に引張加力を行なっているため、図中のひずみは全て圧縮加力開始時を原点としている。これらの図から以下の傾向が認められる。

(1) 同一配筋の試験体を比較すると、圧縮加力によって生じる横方向ひずみが大きいものの方が耐力が低い。

(2) 圧縮鉄筋がない No. 4 は、圧縮鉄筋がある No. 6 よりも耐力が低い。

3.3. せん断応力-せん断ひずみ関係

斜め配筋試験体については、配筋方向に関するせん断応力 (τ)-せん断ひずみ (γ) 関係を図-13に示す。ここに、 $\tau = (T - C) / 2A$ 、 $\gamma = \epsilon_x - \epsilon_y$ である。直応力が $\tau \sim \gamma$ 関係に及ぼす影響は顕著で、No. 1 は二軸圧縮力の影響で剛性、耐力共に高く、No. 2 は初期は二軸引張力の影響で低い剛性を示すが、耐力付近ではほぼ純せん断状態となるため No. 3 とほとんど等しくなっている。最大せん断応力は No. 1 が $6.8\sqrt{F_c}$ 、No. 2 が $5.5\sqrt{F_c}$ 、No. 3 が $5.6\sqrt{F_c}$ であった。なお、最大耐力時に、鉄筋は No. 1 では降伏していないが、No. 2 と No. 3 では降伏している。

3.4. コンクリートの圧縮応力-圧縮ひずみ関係

圧縮方向のコンクリート応力 (σ_y)-ひずみ (ϵ_y) 関係を図-14と図-15に示す。 σ_y の算定は以下の方法で行なった。

$$\sigma_y = \frac{\text{圧縮外力} - \text{鉄筋応力の圧縮方向成分}}{\text{圧縮方向のコンクリートの断面積}}$$

ここで鉄筋の応力は次の三つの方法で評価した。

手法①: 鉄筋方向変位計の値を鉄筋平均伸びと仮定。

手法②: 鉄筋のひずみ実測値 (10点) の平均値。

手法③: 横方向引張力を全て鉄筋に負担すると仮定。

これらの図に見られるように、 σ_y についての評価手

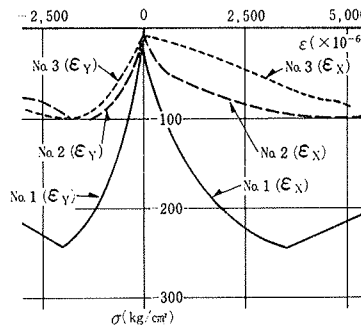


図-11 圧縮平均応力-ひずみ関係 (No. 1~No. 3)

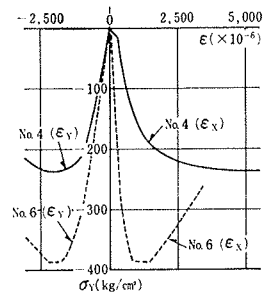


図-12 圧縮平均応力-ひずみ関係 (No. 4, No. 6)

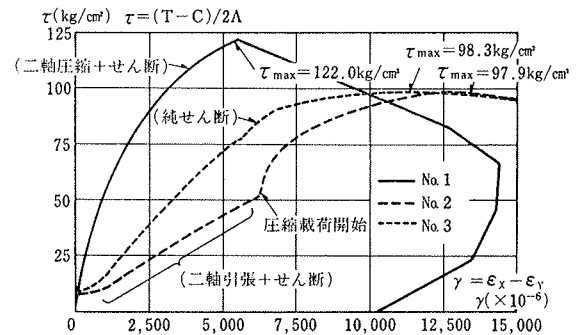


図-13 せん断応力-せん断ひずみ関係 (No. 1~No. 3)

法①~③による差は小さくなく、定性的に次のような傾向があることが認められる。

斜め配筋試験体の場合(図-14)、二軸圧縮+せん断応力状態で鉄筋が降伏せずにコンクリート崩壊で耐力が決定された No. 1 では σ_y 最大値は $0.83 F_c \sim 0.92 F_c (= 2 \times 7.4\sqrt{F_c} \sim 2 \times 8.1\sqrt{F_c})$; F_c はコンクリートの圧縮強度材料試験値) と、既往のせん断試験の結果と比較して高いが、 F_c よりも低い。純せん断応力状態に近似する No. 2 及び No. 3 では鉄筋降伏後のコンクリート崩壊で耐力が決定されているが、 σ_y 最大値は $0.66 F_c \sim 0.71 F_c (= 2 \times 5.8\sqrt{F_c} \sim 2 \times 6.3\sqrt{F_c})$ と、同様に高くなっている。また、No. 3 の $\sigma_y - \epsilon_y$ 関係で鉄筋降伏後、応力の増分はなくともひずみの増分は認められる。換言すれ

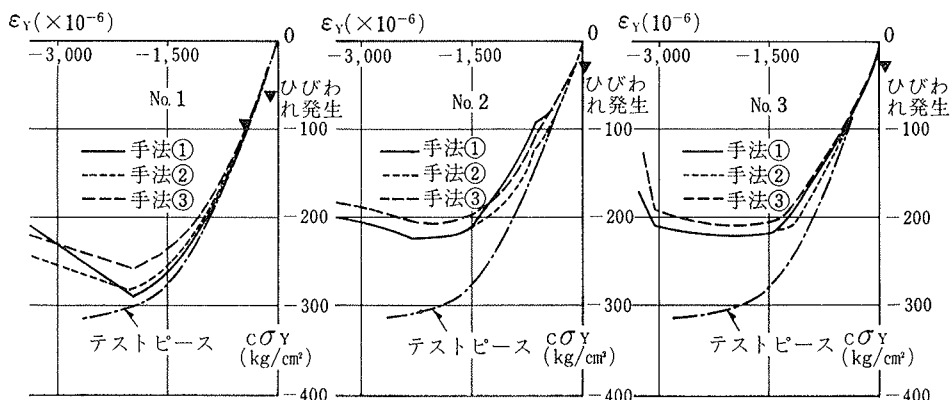


図-14 コンクリート圧縮ストラットの応力-ひずみ関係 (No. 1~No. 3)

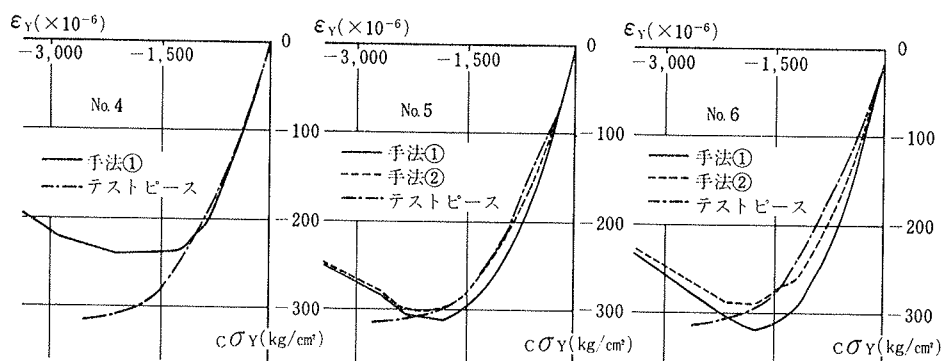


図-15 コンクリート圧縮ストラットの応力-ひずみ関係 (No. 4~No. 6)

ば、鉄筋降伏後のせん断ひずみの増大と共に、コンクリートストラットの見掛けの剛性が低下する性状がある。また、ひびわれ発生後の剛性は No. 1 に比較して、No. 2, No. 3 の方が低くなる傾向も認められる。

一方、縦横配筋試験体の場合(図-15)、一方向配筋の No. 4 を除き、 ϵ_y まで横方向に引張り、その後縦方向に圧縮力を加えた No. 5 及び $3 \cdot \epsilon_y$ まで横方向に引張り、その後縦方向に圧縮力を加えた No. 6 とも、 $c\sigma_y$ の最大値はそれぞれ $0.96 F_c \sim 0.99 F_c$ 、 $0.92 F_c \sim 1.02 F_c$ となり、横方向ひずみの大きさの影響は受けず、ほぼ F_c と等価となっている。換言すれば、部材の圧縮耐力は鉄筋とコンクリートの累加強度で決定されているといえる。なお、No. 4 の $c\sigma_y$ 最大値が $0.77 F_c$ と低くなった理由は、横方向引張による鉄筋近傍のコンクリートの局所的な損傷が部材耐力にまで影響を及ぼしたのではないかと考えられ、No. 5 と No. 6 では引張鉄筋の両側に千鳥に配置された圧縮鉄筋がこの局部破壊による耐力低下を防止したのではないかと考えられる。

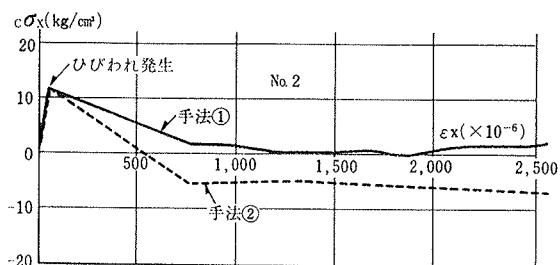


図-16 ひびわれ直交方向のコンクリートの応力-ひずみ関係 (No. 2)

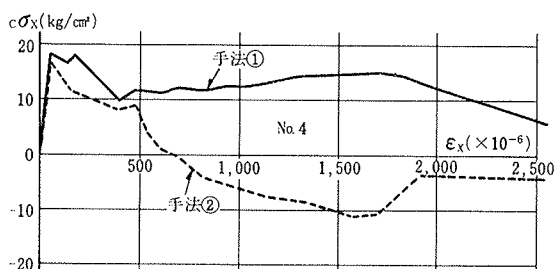


図-17 ひびわれ直交方向のコンクリートの応力-ひずみ関係 (No. 4)

以上のように、No. 1~No. 3 の膜圧縮+せん断応力または純せん断応力に近似した状態の $c\sigma_y - \epsilon_x$ 関係と No. 4~No. 6 の膜圧縮+膜引張応力状態のものとは、その性状が相違するといえる。

3.5. コンクリートの引張応力-引張ひずみ関係

No. 2, No. 4 の引張方向コンクリート応力 ($c\sigma_x$) - ひずみ (ϵ_x) 関係を図-16と図-17に示す。 $c\sigma_x$ の算定は圧縮方向の場合と同様に、次式により求めた。

$$c\sigma_x = \frac{\text{引張外力} - \text{鉄筋応力の引張方向成分}}{\text{引張方向のコンクリートの断面積}}$$

どちらの試験体も、ひびわれ発生後は付着の影響によるテンションステフニング効果が認められる。手法②で、 $c\sigma_x$ が負の値を示しているのは、実測された鉄筋ひずみが局所的なものであるため、評価上の誤差が生じたのではないかと考えられる。

4. まとめ

鉄筋コンクリート平板の二軸載荷実験を行なった結果、今回の実験の範囲内で以下のことが分かった。

(1) 斜め配筋試験体では純せん断応力状態に近い場合、コンクリートストラットの圧縮耐力は、 $0.66 F_c \sim 0.71 F_c$ とテストピースの値 (F_c) より低かった。また、見掛けの応力-ひずみ関係はひびわれ発生後、剛性が低下した。膜圧縮+せん断応力状態の場合、純せん断の場合に比べ、剛性、耐力の上昇が認められた。

(2) 縦横に配筋した2体の試験体では、初期に与えた横方向ひずみが ϵ_y 及び $3 \cdot \epsilon_y$ の場合でも累加強度式がほぼ成り立ち、コンクリートストラットの圧縮耐力に及ぼす影響は明瞭には認められなかった。

最後に、計画立案の段階で本研究に参加していた大内一職員(カリフォルニア大留学中)の協力に感謝します。

参考文献

- 1) 武田, 山口, 伊藤, 大内, 長沼: 原子炉建屋の非線形解析手法に関する研究, 大林組技術研究所報, No. 35, (1987), pp. 113~117