

論文 平板理論によるコンクリートの応力-ひずみ関係とねじりを受ける RC 部材の変形

志村和紀^{*1}・塩永亮介^{*2}・佐伯 昇^{*3}

要旨：ねじりを受ける RC 部材中のコンクリートは圧縮-引張の二軸応力下にあり、またひび割れが存在し、解析の際には圧縮応力-ひずみ関係における応力を通常の一軸状態に比べ低減させる必要がある。純ねじり実験のひずみ計測結果を基に、それを再現した RC 平板の載荷実験により応力低減係数について検討した結果、低減率には 0.55 程度の下限があることが明らかになった。また、RC 部材の純ねじり解析において、ねじりに対する有効断面をかぶりコンクリートと内部コンクリートに分け、それぞれの応力低減を別個に扱うことにより解析の精度が向上することが明らかになった。

キーワード：RC 平板モデル、二軸応力、応力低減係数、純ねじり、かぶりコンクリート

1. はじめに

RC 部材にねじりモーメントが作用する場合、部材はねじりに対して有効な中空断面部分で抵抗すると考えられる。この仮定を基に構築された解析モデルは立体トラスモデルをはじめとしていくつか提案されているが、現在は部材を RC 平板に置き換えた手法が多くの研究者によって用いられている^{1),2),3),4)}。また、コンクリートは圧縮-引張の二軸応力状態になるため、圧縮応力-ひずみ関係は一軸圧縮状態に比べ剛性が低下すると考えられ、応力の低減を行う必要がある。この応力低減係数は Collins らの提案式¹⁾が主引張ひずみのみにより決定されるため、解析の際に扱い易く、広く用いられている。これに対し、二軸強度の低減係数としての検討から Collins 式は強度の低減を過大に見積もるとの報告もあり、低減係数に限界値を設け、0.6 までとした強度低減式なども提案されている^{5),6)}。また、Collins 式の構築に用いられた実験は RC 平板のせん断加力実験で、主引張応力、主圧縮応力およびせん断応力の比を一定とした載荷を行っており、このような載荷条件がねじりを受

ける部材にそのまま適用できるか詳しい検討はなされていない。

本研究では、ねじりを受ける桁の壁要素をモデル化した RC 平板試験体による載荷実験を行った。載荷方法としては、既往の純ねじり実験データを基にその圧縮主ひずみ-引張主ひずみ挙動を再現することとし、これにより得られた応力-ひずみ関係を用いて RC 平板モデルによる純ねじり解析を行い、その適用性を検討することを目的とした。

2. 実験概要

ねじりを受ける中実断面 RC 部材を、ねじりに対して有効な中空部材に置き換え、各壁には作用トルクに対して一様なせん断流が生じると仮定する(図-1)。

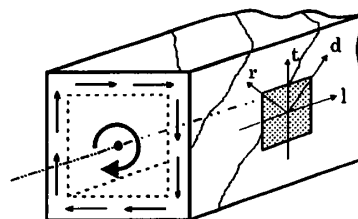


図-1 ねじりを受ける RC 部材

*1 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 工修(正会員)

*2 石川島播磨重工株式会社

*3 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博(正会員)

壁の軸方向 (l) および横方向 (t) にはせん断流に対応するせん断応力が生じ、主応力方向 (d, r) にはそれぞれ圧縮主応力 (σ_d) および引張主応力 (σ_r) が生じる。この応力状態を再現するため、図-2 および表-1 に示す試験体により載荷実験を行った。試験体は二軸試験用に4体、一軸試験用に2体製作し、コンクリート平板中に交差する斜め 45° 方向に鉄筋を2本ずつ100mm 間隔で配置し、軸方向の載荷端部は閉合型横方向鉄筋で補強した。二軸試験ではかぶりコンクリート厚が30~40mmの部材を想定し、断面の厚さを100mm および80mm、鉄筋の種類をD10 および D13の2種に変化させた。

二軸の圧縮-引張試験装置を図-3 に示す。フレームに固定された油圧ジャッキを鉄筋端部

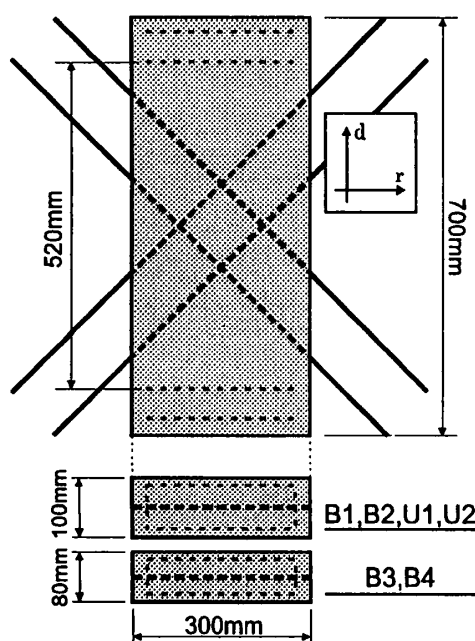


図-2 試験体

表-1 試験体諸元

試験体	載荷方法	断面 (mm×mm)	鉄筋	コンクリート	
				圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
B1	二軸	300×100	D10	40.01	2.62
B2		300×100	D13	38.37	2.84
B3		300×80	D10	37.04	2.73
B4		300×80	D13	37.26	2.40
U1	一軸	300×100	D13	26.45	2.07
U2		300×100	D13	35.68	2.71

に取り付け、これに引張力を作用させながら試験体のコンクリート端面に圧縮力 (d 方向) を作用させた。これらの作用力により、試験体の d 方向には主圧縮応力が、 r 方向には主引張応力が生じる。この装置は主圧縮応力と主引張応力の組合せを自由に設定でき、圧縮応力の計測も容易であることが特徴である。また、載荷端部の閉合筋による補強および鋼板による摩擦の影響はひずみ測定部である試験体の高さ中央付近においては無いものとした。

載荷は図-4 に示す既往の RC 部材の純ねじり実験⁹⁾から得られたひずみデータに従って行った。試験体のコンクリートひずみの測定は d 方向および r 方向に設置したパイ型ゲージ (検長 100mm) により行い、ひずみを逐次モニタしながら図-4 のひずみ経路となるよう、圧縮力および引張力を調整した。なお、鉄筋の降伏後は油圧ジャッキによるひずみ制御は不能となるため、以後はコンクリートへの圧縮力のみ増加させた。また、一軸試験については鉄筋に引張力は与えず、 d 方向の圧縮荷重のみ載荷した。

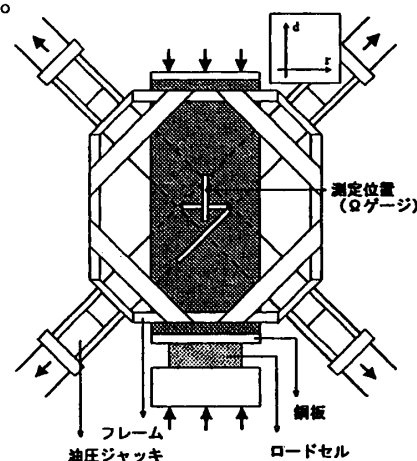


図-3 実験装置

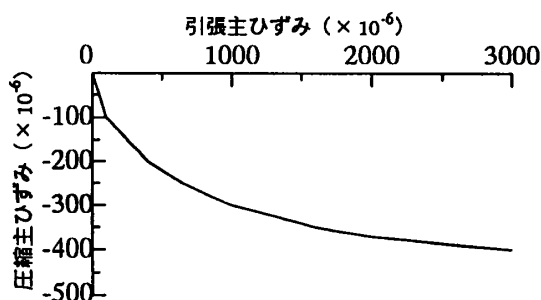


図-4 純ねじりひずみ測定値

3. 実験結果

3.1 一軸試験による圧縮応力-ひずみ関係

一軸試験によるコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係を図-5 に示す。ここで、円柱供試体による圧縮強度を応力のピークとした2次放物線（応力ピーク時のひずみは 0.002）を標準曲線として比較すれば、実験値には幾らかの低減が見られる。これは試験体形状が版状であること、埋め込まれた鉄筋部で応力の集中、割裂作用が生じるなどの原因によると考えられる。また、圧縮ひずみが 1000 μ 付近で剛性が急に低下しているが、試験体表面にひび割れは観察されなかった。これは、コンクリートの内部ひび割れが生じたためと推測される。

各ひずみにおける圧縮応力の標準曲線応力に対する比を低減率として表したものを図-6 に示す。これによれば低減率はほぼ一定で 0.8 程度となる。Hsu の提案した応力低減式⁷⁾の中でも低減率の初期値を 0.9 としており、面内圧縮力を受ける RC 平板では、一軸応力状態でも載荷初期から応力低減が生じると考えられ、本論ではその低減率を 0.8 とした。

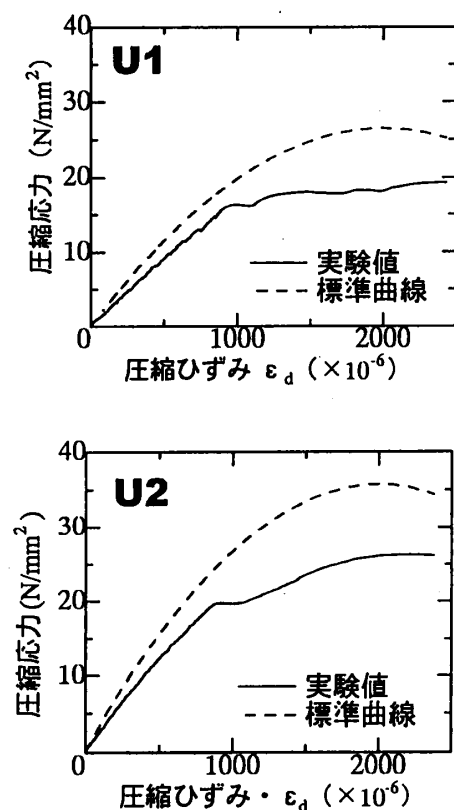


図-5 一軸試験による圧縮応力-ひずみ関係

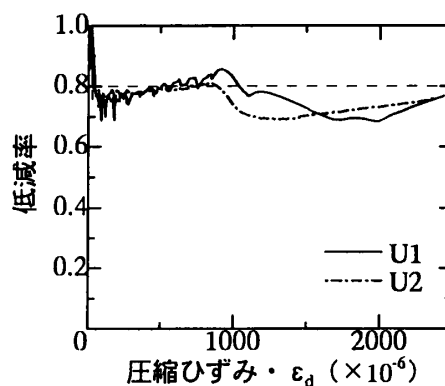


図-6 一軸圧縮の応力低減率

3.2 二軸試験による圧縮応力-ひずみ関係

圧縮-引張の二軸応力下のコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係の応力低減式としては Collins のものがその扱いやすさから広く用いられている。これは前節で示した標準曲線（式(1)で η を 1.0 としたもの）に低減係数 η による応力低減を行うものであり、 η は式(2)で表されるように引張主ひずみ ε_r で定まる。また、Hsu も自らの実験結果から式(3)のような低減係数を提案している。両者の主な相違は、Collins 式は引張ひずみが小さい領域では低減を行わないのに対し、Hsu 式は低減係数の初期値を 0.9 としている点である。

$$\sigma_c = \eta \cdot f'_c \left\{ 2 \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

$$\text{Collins} \quad \eta = \frac{1}{0.8 + 0.34 \varepsilon_r / \varepsilon_0} \quad (2)$$

$$\text{Hsu} \quad \eta = \frac{0.9}{\sqrt{1 + 400 \varepsilon_r}} \quad (3)$$

η : 低減係数 ε_r : 引張ひずみ
 f'_c : 圧縮強度 ε_0 : 最大応力時のひずみ
 ε_d : 圧縮ひずみ ($\varepsilon_0 = 0.002$)

図-7 に二軸試験の実験値、標準曲線、Collins 式および Hsu 式より得られたコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係を示す。

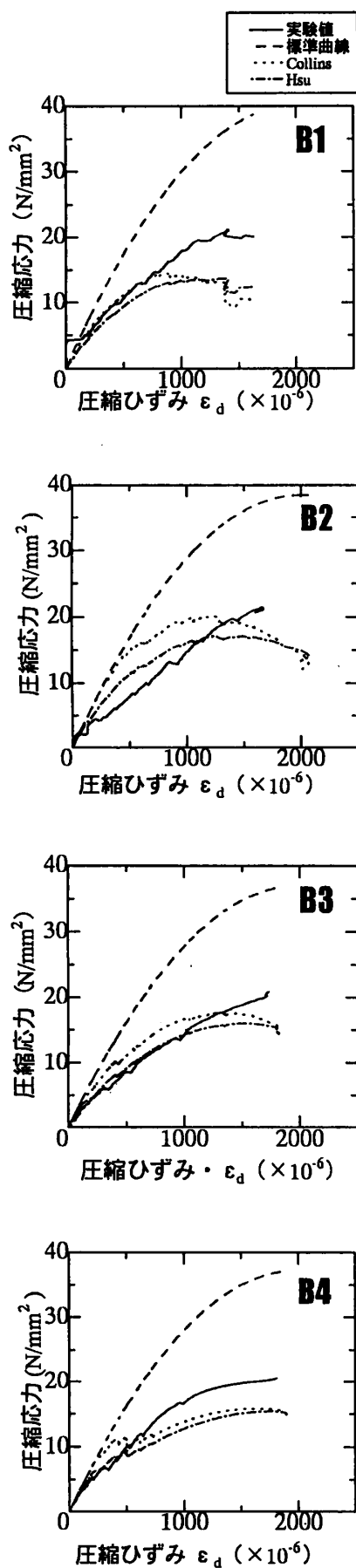


図-7 二軸試験の圧縮応力-ひずみ関係

図-7 によれば、実験値はいずれも標準曲線に対して応力の低減を示し、B2 試験体を除いて、圧縮応力が 10N/mm^2 程度までは Collins 式および Hsu 式と比較的一致する。また、初期の剛性は Collins 式よりも Hsu 式に近く、低減係数の初期値は 1.0 より小さいと考えられる。B2 試験体はひずみの制御に問題があり、載荷初期に大きな引張りひずみが生じたものである。破壊点付近の応力については、実験値はいずれも Collins 式および Hsu 式を上回り、これらの応力低減式が終局時付近の応力減少を過大に見積もる傾向のあることが示された。

3.3 ひび割れおよび破壊状況

試験体のひび割れ状況を図-8 に示す。一軸試験では、終局荷重付近までひび割れは生じず、斜め方向の鉄筋に沿ったひび割れが発生した後に圧縮破壊した。これは 3.1 節で述べたように鉄筋付近で応力集中が生じ、これが破壊面となる、せん断-圧縮型の破壊が生じたと考えられる。二軸試験では、試験体の高さ中央付近に d 方向のひび割れが発生し、これが上下に進展した後に圧縮破壊に至った。同様の破壊形式が RC 部材の純ねじり実験でも見られる。また、二軸試験の破壊の直前には試験体側面に d 方向のひび割れが発生した。このひび割れは、鉄筋の割裂作用およびコンクリートのポアソン効果によるものと考えられる。また、鉄筋埋込み端から上下載荷点方向への割裂ひび割れあるいは局部圧壊は観察されず、鉄筋を斜めに引張り上げながら圧縮力を作用させたことによる局部破壊は生じなかった。

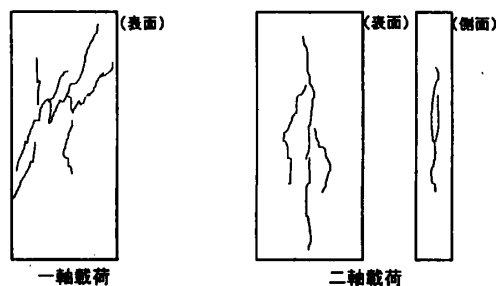


図-8 ひび割れ状況

4. 圧縮応力の低減係数

図-7 に示した二軸応力下の圧縮応力-ひずみ関係で、標準曲線に対する実験値の応力比をとり、これを低減係数として引張ひずみとの関係を表したものを Collins 式並びに Hsu 式による計算値とともに図-9 に示す。载荷初期は応力が小さいため、ひずみの制御誤差が大きく現れているが、引張ひずみの増加とともに低減係数が減少している。また、Collins 式並びに Hsu 式ではコンクリートの引張ひずみが 0.01 に達すると低減係数は 0.4 程度まで低下するが、実験では低減係数はある程度低下した後にほぼ一定の値 (0.5~0.6) となり下限値を持つと考えられる。このことはひび割れのあるコンクリートの圧縮強度低減式に下限値を設けた研究^{4),5)}とも対応する。

以上のことから、RC 部材のねじり解析に用いる圧縮応力低減係数を式(4)のように表した。

$$\eta = \frac{0.8}{\sqrt{1 + 400\varepsilon_r}} \quad (4)$$

($\eta \geq 0.55$)

η : 低減係数 ε_r : 引張ひずみ

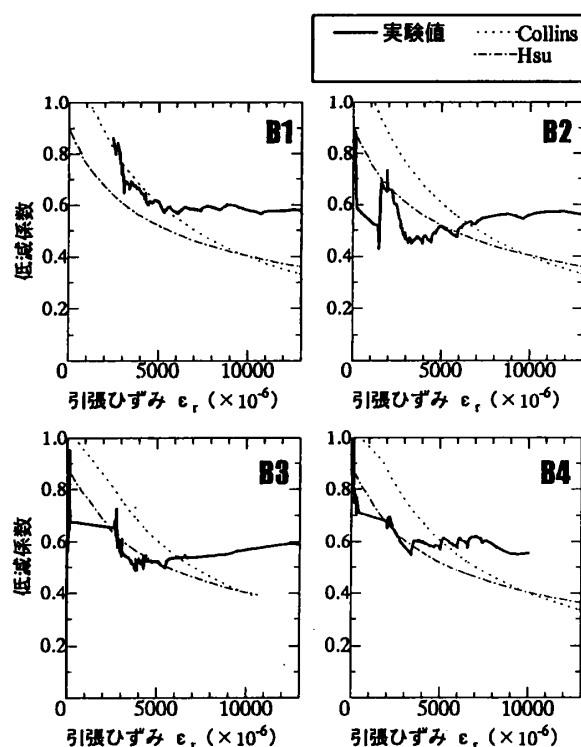


図-9 圧縮応力の低減係数

式(4)は、式(1)の標準曲線 (2次放物線) に適用する係数であり、3.1 節で示したように、初期の応力状態でも部材の形状および鉄筋の存在による応力集中のために 0.8 の応力低減があるとし、低減係数の下限値を 0.55 としたものである。

(4)式を実験値とともに図-10 に示す。B2 試験体については荷重の制御に問題があったため、検討から除いた。

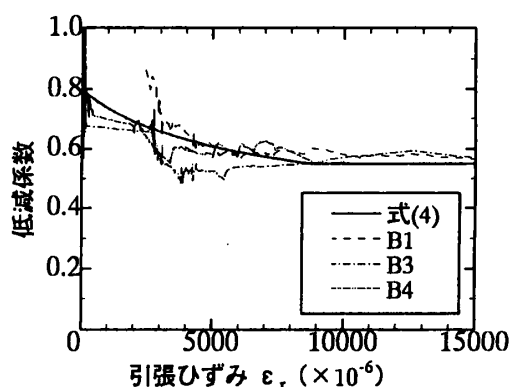


図-10 応力低減係数式と実験値の比較

5. ねじり解析への適用

前節で得られた応力低減係数式(4)を用いて RC 部材の純ねじり解析を行い、既往の実験結果との比較を行った。解析では、RC 平板モデルから得られた釣合い条件式および適合条件式およびかぶりの剥離を考慮した有効かぶり式⁸⁾を用いている。また、ねじりを受ける RC 部材の場合、かぶりコンクリートは面外方向の拘束は無いが、横方向鉄筋で囲まれたコア・コンクリートは横方向鉄筋および軸方向鉄筋により面外の変形が拘束されると考えられる。本実験は、面外方向の拘束の無い、かぶりコンクリートに対応していると考えられる。そこで、本論では断面をかぶりコンクリート部とコア・コンクリート部に分け、かぶりコンクリートの圧縮応力は(4)式により求め、コア・コンクリートについては詳しい検討がなされていないが、鉄筋の存在による応力集中とひび割れによる応力低減が生じると考え、低減係数は 0.8 の一定値と仮定した。

図-11 にねじりモーメント-ねじり角関係について、本解析法を Hsu による純ねじり実験⁹⁾に適用した例を示した。B シリーズは、254mm×381mm の矩形断面で、体積鉄筋比を B1~B6 で 1.07%~5.28%と変化させたものである。これによれば、本解析法はねじり変形挙動をほぼ捉えることができると考えられるが、コア・コンクリートの応力低減係数を 0.8 と仮定しているために、他のかぶりの無い試験体に対して過大な耐力評価となる場合もあり、鉄筋による面外拘束を受けるコア・コンクリートの挙動について明確にする必要がある。

また、最大トルクについて他の実験データ^{3),9)}との比較を行った結果を図-12 に示す。

これによれば、耐力の実験値と解析値は良好な対応を示しており、計算値の実験値に対する比は、平均で 1.015、変動係数は 11.6%であった。また、土木学会コンクリート標準示方書のねじり耐力算定式では平均で 0.920、変動係数は 22.0%であり、本解析法による算定の精度は向上した。

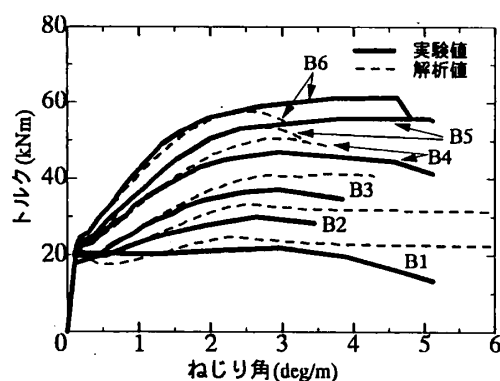


図-11 トルク-ねじり角関係

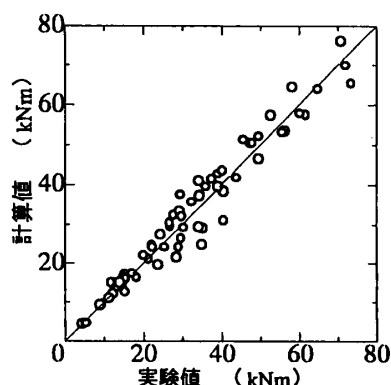


図-12 最大トルクの計算値と実験値の比較

6. まとめ

(1) RC 平板はその形状および埋め込まれた鉄筋部での応力集中あるいはひび割れにより一軸圧縮状態でも応力の低減が生じ、本実験ではその低減係数は概ね 0.8 であった。

(2) 圧縮-引張の二軸応力下の RC 平板のコンクリートの圧縮応力の低減係数には 0.55 程度の下限值がある。

(3) ねじりを受ける RC 部材の変形解析を行う際に、断面をかぶりコンクリートと横方向鉄筋で囲まれたコア・コンクリートに分け、提案した圧縮応力低減係数を適用することにより解析の精度が向上し、低減係数が有効であることが判った。

参考文献

- Vecchio, F. J. and Collins, M. P.: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *ACI Journal*, Vol.83, No.2, pp.219-231, 1986
- Hsu, T. C.: Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion, *ACI Structural Journal*, Vol.85, No.6, pp.624-635, 1988
- 長瀧重義, 李 承漢, 岡本享久: 鉄筋コンクリート部材のねじり耐荷機構に関する一考察, 土木学会論文集, No.390/V-8, pp.179-188, 1988
- 二羽淳一郎, 桧貝 勇, 守屋紀和: ねじりを受ける RC 棒部材に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.97-105, 1990
- 宮原長久, 川上泰司, 前川宏一: ひびわれを含む鉄筋コンクリート要素の 1 軸圧縮応力下における非線形挙動, 土木学会論文集, No.378, pp.249-258, 1987
- 出雲淳一, 島 弘, 岡村 甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9, pp.107-120, 1987
- Pang, X.D. and Hsu, T.C.: Behavior of Reinforced Concrete Membrane Element in Shear, *ACI Structural Journal*, V.92, No. 6, 1995
- 志村和紀, 原田希樹, 佐伯 昇: ねじりを受ける矩形および T 形 RC 部材の変形性状について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.587-592, 1994
- Hsu, T.C.: Torsion of Structural Concrete Behaviour of Reinforced Concrete Rectangular Members, *ACI SP-18*, pp.261-306, 1968