

論文 繰返し荷重を受ける RC 面材の有限要素解析におけるモデルの検討

野崎幸男^{*1}・野口 博^{*2}

要旨: 本研究では、既往の研究で提案した履歴モデルに修正を加えることで、解析の精度の向上を図ることと、修正したモデルを適用した解析プログラムを用いることで既往の実験で行われた鉄筋コンクリート平板を対象として解析し、実験結果と比較・検討することを目的としている。モデルの修正を行ったことで、既往の提案モデルで問題であった低せん断応力域におけるせん断ひずみを過小評価することなく、実験値を追跡することができた。

キーワード: 有限要素解析、繰返し履歴モデル、RC 平板実験

1.はじめに

鉄筋コンクリート構造を合理的かつ安全に設計を行うための検討項目として、外力の影響、特に地震力の影響は最重要項目のひとつと考えられる。従来は、取り扱いの比較的簡便な静的荷重による単調載荷時を対象としたの解析的研究が数多く行われてきた。しかし、その地震力の影響を把握するためには、鉄筋コンクリート部材が繰返し荷重を受けたときの挙動を、解析的に検証できる方法を開発することも重要であると考えられる。

本研究では既往の研究[1]で用いた鉄筋コンクリート要素に適用するための繰返し履歴のモデル化について修正を行い、鉄筋コンクリート面材を対象に解析を行い、解析結果の検討を目的とするものである。

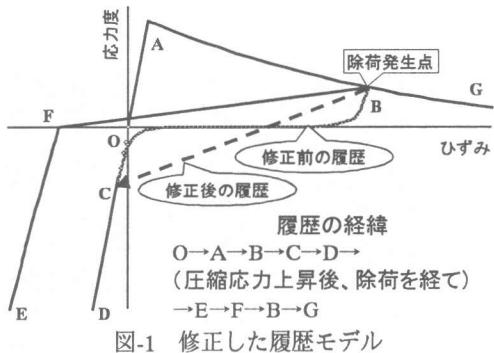
2.提案モデルにおける問題点

筆者らが以前に提案したモデル[1]では、解析を行った際の結果が実験結果と比較した時に、せん断応力の小さい範囲（低せん断応力状態）におけるせん断ひずみの値を過小評価する傾向にあった。平板が低せん断応力状態下にある時、積分点における主方向での応力成分は引張域→圧縮域、もしくは圧縮域→引張域へ移行する範囲に当たる。

鉄筋コンクリート要素に適用する履歴ルールのこの領域に修正を加え、解析結果にどの程度影響を与えるかを検討することとした。

3.繰返し履歴モデルの修正

本解析では、ひび割れ発生後のひずみ軟化域から、除荷が発生してからの通常のコンクリート圧縮応力上昇履歴に達するまでの履歴形状に変更を加える。本研究では複数の実験的研究を対象に解析を行うため、あえて特定の実験結果（たとえば[2]）を近似するのではなく直線履歴で表現する事で、どの程度実験結果を追跡できるかを検討することとした。図-1 にひずみ軟化域から除荷する場合の履歴のモデルを示す。直線近似とすることにより修正前のモデルと比較して図-1 において



*1 千葉大学大学院自然科学研究科（西松建設㈱）

工修（正会員）

*2 千葉大学 教授 工学部デザイン工学科建築系

工博（正会員）

表-1 解析対象試験体諸元

| 参考文献 | Collinsらの実験 [9] | | 大森らの実験 [10] | | | | |
|------------------|-----------------|--------|--------------------------|--------|-------|--------|--------|
| 試験体名 | SE8 | SE9 | SR05 SR10 SR14 SR17 SR20 | | | | |
| 試験体寸法 [mm] | 1625×1625×285 | | 2500×2500×140 | | | | |
| 計測範囲 [mm] | 1524×1524 | | 1400×1400 | | | | |
| コンクリート 筋 鉄 | 圧縮強度 [MPa] | 37.5 | 44.2 | 30.4 | 36.6 | 29.3 | 28.7 |
| | 圧縮強度時ひずみ | 0.0026 | 0.0027 | 0.0029 | 0.003 | 0.0031 | 0.0028 |
| | 割裂強度 [MPa] | 3.40 | 4.30 | 2.23 | 3.14 | 3.01 | 2.33 |
| | 配筋方向 | X | Y | X,Y | X,Y | | |
| | 鉄筋比 [%] | 3.0 | 1.0 | 3.0 | 0.51 | 1.02 | 1.36 |
| | 降伏強度 [MPa] | 492 | 479 | 492 | 398 | | |
| | 弾性係数 [GPa] | 200 | 195 | 200 | 200 | | |
| | 降伏ひずみ | 0.002 | | 0.002 | | | |

て第四象限への履歴がより現れることになり、低応力域でのひずみ量が大きく表現できることで、せん断ひずみの過小評価を避けることができると考えられる。このようにひずみ軟化域内の除荷発生以降を、直線としてモデル化している例は白井らの研究[3]にも見られる手法である。

4. 対象試験体

本解析では、既往の提案モデルの検討で用いた試験体と同じ Collins らによる SE8, SE9 試験体[4]に加え、鉄筋比の比較的低い大森らの試験体 SR05, SR10, SR14, SR17, SR20[5]について解析を行い、結果について検討を行うこととした。表-1 に解析の対象とする試験体の諸元を示す。

試験体は、総て鉄筋コンクリート構造の平板である。実験における載荷方法は研究者によって異なるが、試験体には純せん断状態が発生するような加力がなされており、総ての試験体で

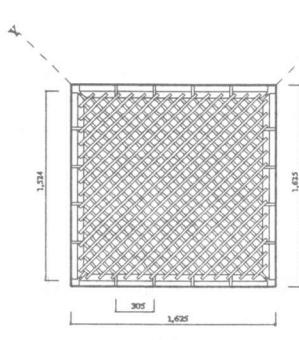
正負繰返し加力が行われている。SE8 試験体以外の試験体は、配筋方法が XY 両方向で配筋量が同等の等量配筋の試験体であり、SE8 試験体のみが XY 方向で配筋量が異なる不等量配筋の試験体である。

5. 解析方法

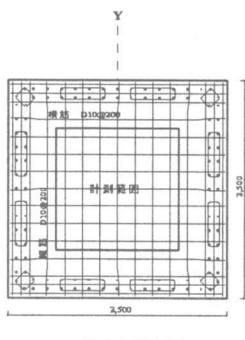
解析には張[6]の開発した有限要素解析プログラムに、以前の提案モデル[1]に、前述の修正を加えた繰返しモデルを加えた二次元非線形有限要素解析プログラムを使用した。

試験体のモデル化には三角形六節点アイソパラメトリック二次要素を使用し、Ziyaeifar の研究[7]を参考に一要素の要素分割とした。図-3 に要素分割図を示す。

補強筋については積層要素として扱い、鉄筋の応力-ひずみ関係はひずみ硬化の特性を考慮して、鉄筋降伏後は初期剛性の 1%の剛性を持つバライ



Collins らによる試験体[3]



大森らによる試験体[4]

図-2 試験体詳細図

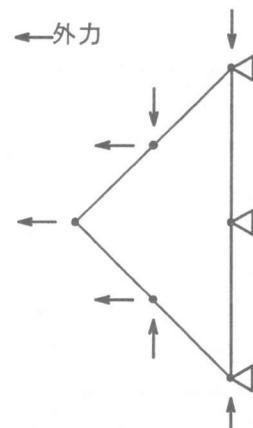


図-3 試験体要素分割と境界条件

ニア型を採用した。その他の試験体のモデル化の詳細については文献[1]を参照されたい。

材料特性の入力データには、基本的に既往の文献[4][5]に表記されている数値を採用した。ただし、鉄筋コンクリート平板について考えた場合、テストピースを使用した割裂強度試験での試験結果は、平板実験におけるひび割れ発生強度に対して下回ることが知られている。そこで、ひび割れ発生強度 (σ_{cr}) については ACI 規準の算定式[8]（式-1）を使用し、ひび割れ発生強度とすることとした。

$$\sigma_{cr} = 0.3\sqrt{\sigma_B} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \dots \quad (\text{式-1})$$

表-2 解析結果概要

| 試験体名 | 項目 | 解析結果 | | 実験結果 | | τ_{Ana}/τ_{Exp} | |
|------|---------------|--|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|--------------|
| | | $\gamma [\times 1000]$ | $\tau [\text{MPa}]$ | $\gamma [\times 1000]$ | $\tau [\text{MPa}]$ | | |
| SE8 | crack | + cycle - cycle | 0.29 -0.11 | 2.06 -2.01 | 0.17 -0.01 | 2.00 -2.10 | 1.03 0.96 |
| | steel-X yield | ε_S ε_{AVE} | *** *** | *** *** | *** *** | *** *** | *** |
| | steel-Y yield | ε_S ε_{AVE} | 4.50 4.52 | 5.20 4.50 | 4.25 3.20 | 5.30 4.00 | 0.98 1.13 |
| | | | | | | | |
| SE9 | crack | + cycle - cycle | 0.27 -0.10 | 2.45 -2.37 | 0.21 -0.10 | 2.40 -2.65 | 1.02 0.89 |
| | steel yield | ε_S ε_{AVE} | *** 6.47 | *** 9.23 | *** 6.00 | *** 9.50 | *** 0.97 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| SR05 | crack | + cycle - cycle | 0.22 -0.12 | 1.17 -1.16 | 0.23 -0.11 | 1.17 -1.14 | 1.00 1.02 |
| | steel yield | ε_S ε_{AVE} | 4.66 4.57 | 2.50 2.50 | ### 4.43 | ### 2.32 | ### 1.08 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| SR10 | crack | + cycle - cycle | 0.22 -0.13 | 1.27 -1.27 | 0.23 -0.13 | 1.54 -1.48 | 0.82 0.86 |
| | steel yield | ε_S ε_{AVE} | 5.07 4.95 | 3.97 3.97 | ### 4.67 | ### 3.75 | ### 1.06 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| SR14 | crack | + cycle - cycle | 0.22 -0.13 | 1.13 -1.13 | 0.29 -0.09 | 1.41 -1.21 | 0.80 0.93 |
| | steel yield | ε_S ε_{AVE} | *** 5.76 | *** 4.67 | ### 4.97 | ### 4.68 | ### 1.00 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| SR17 | crack | + cycle - cycle | 0.18 -0.10 | 1.13 -1.13 | 0.19 -0.16 | 1.35 -1.50 | 0.84 0.75 |
| | steel yield | ε_S ε_{AVE} | 8.62 7.36 | 5.57 5.57 | ### 5.46 | ### 5.81 | ### 0.96 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| SR20 | crack | + cycle - cycle | 0.32 -0.18 | 1.67 -1.67 | 0.28 -0.04 | 1.56 -1.35 | 1.07 1.24 |
| | steel yield | ε_S ε_{AVE} | 7.46 7.05 | 6.60 6.47 | ### 5.78 | ### 6.76 | ### 0.96 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

凡例

数値公表がないため、グラフからの読みとりによる値
実験（解析）で降伏が確認できなかった

###

実験での計測項目に含まれていない

ε_S

鉄筋（解析では積層要素、実験ではひずみゲージ）のひずみが降伏ひずみに達したときの値

ε_{AVE}

鉄筋と平行方向の試験体の平均ひずみが鉄筋の降伏ひずみに達したとき

6. 解析結果

6.1 初期ひび割れ

表-2 に各試験体の解析結果概要を実験結果と合わせて示す。凡例にもあるとおり、網目のマスに表記した数値は、参考文献に数値による記述がなかったものである。

初期ひび割れ発生強度については、解析結果と実験結果とは良い対応を示していると考えられる。また負サイクル側のひび割れ発生応力も、実験結果と良い対応を示している。ACI 規準による算定式で評価したひび割れ発生強度による評価は、妥当だったと考えられる。

6.2 鉄筋の降伏

鉄筋の降伏を評価する方法としては、2つの方

法がある。ひとつは、鉄筋そのもののひずみが降伏ひずみに達した場合に、鉄筋が降伏したと定義（以下、この定義による降伏を『真降伏』とよぶ）するもの。もうひとつは、鉄筋の配筋方向に平行な方向の試験体コンクリートのひずみ量（平均ひずみ）が鉄筋の降伏ひずみに達した場合に、鉄筋が降伏したと定義[4]（以下、この定義による降伏を『平均降伏』とよぶ）するものである。文献[4]では平均降伏を用いて鉄筋の降伏を評価しているため、本解析では、この2つの定義についての鉄筋の降伏について定量的に把握した。

鉄筋の降伏する時のせん断応力の値につい

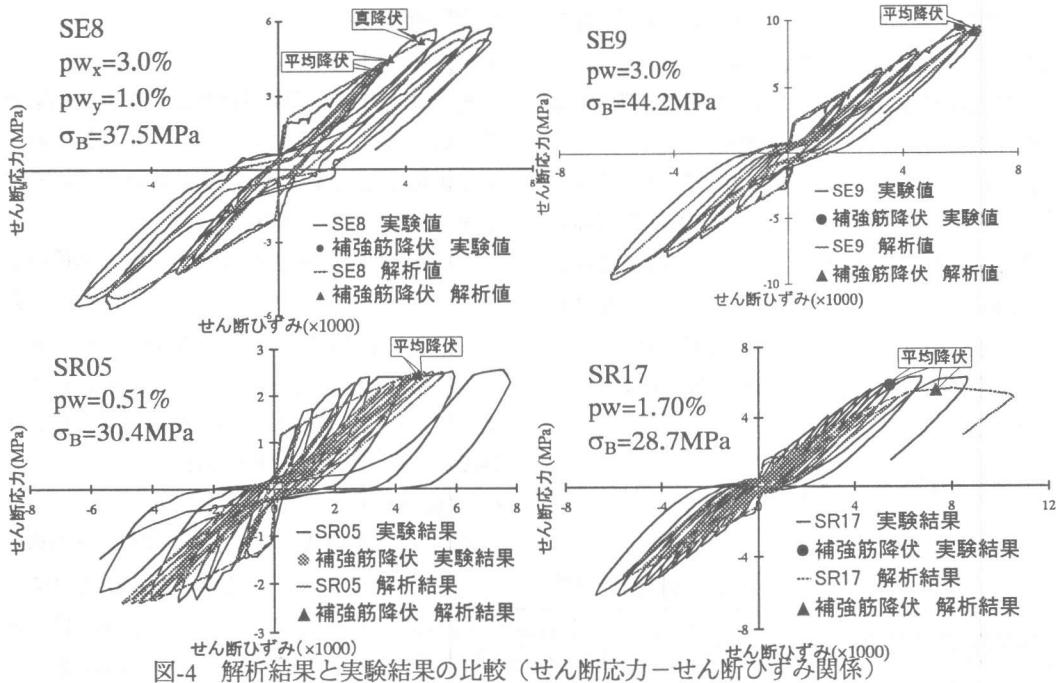


図-4 解析結果と実験結果の比較(せん断応力-せん断ひずみ関係)

ての比較であるが、真降伏、平均降伏とともに実験と解析では殆ど差はなかった。また真降伏と平均降伏はほぼ同時に発生しており、せん断応力の値では差はなかった。ただし、SR14 試験体の解析では真降伏は見られなかった。また、SE9 試験体では、実験中、真降伏は確認できなかったと報告されている。

SE8 試験体については平均降伏に到った時のせん断応力では、実験結果と解析結果で差が認められた。また、実験、解析ともに真降伏と平均降伏の発生が同時に起こっていないことが確認できた。これは他の試験体と異なり、配筋方法が不等量配筋であるためではないかと考えられる。

6.3 履歴形状

以前の提案モデルでは SE8, SE9 試験体を対象とした解析で、低せん断応力域でせん断ひずみを過小評価するといった問題点を抱えていたが、履歴ルールに修正を加えた本解析では低せん断応力域でのせん断ひずみの評価は過小評価とはならず、良い対応を示したと考えられる。他の試験体でも、低せん断応力域でのせん断ひずみの評価は良好であった。(図-4, 図-5 参照)

SE8, SE9 試験体では載荷のサイクルが進んだ

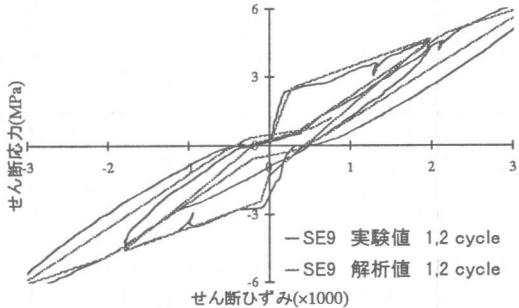


図-5 低応力域における解析結果(SE9 試験体)

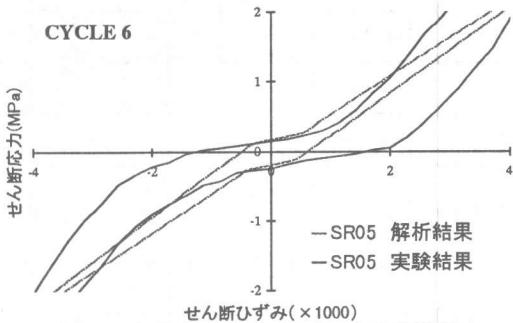


図-6 大変形サイクルにおける実験値と解析値の比較(SE05 試験体)

状態であっても実験結果との対応は良好を保つが、鉄筋比の小さい SR05, SR10 試験体ではサイクルが進むにつれて、残留せん断ひずみの評価が実験値よりも小さくなる傾向の解析結果となった。ま

た、載荷サイクルが進むにつれて各サイクルのピークの荷重から除荷する際の履歴ループが、実験結果では膨らんでいるのに対して、解析結果では直線的な結果を得ている。鉄筋比が小さい試験体での実験結果は、ピーク変形が大きいサイクルでは低せん断応力域でスリップ現象が起き履歴形状が逆S字状になっているが、解析ではこの特徴を一部分以外は追跡することはできなかった（図-6参照）。しかし、鉄筋比の大きいSR17試験体では概ね良好な解析結果になったと考えられる。

また全体的な特徴として、SE試験体では解析値と実験値では全体的に良好な対応を示したのに対し、SR試験体についてはひび割れ発生後の二次勾配はいずれの試験体ともに実験よりも柔らかめの評価となった。既往の解析的研究[9]ではSE試験体(SE8)については実験結果に対して解析結果の第二勾配がやや堅めで、SR試験体についてはよい対応している報告がなされているが、本研究では逆の傾向が見られ、同一モデルで複数の実験を説明するには、実験での境界条件の違いなどを考慮した、更なる検討が必要であると考えられる。

6.4 履歴面積

図-7に、縦軸に実験におけるサイクルごとの履歴面積を、横軸に解析におけるサイクルごとの履歴面積を取ったグラフを示す。実験における履歴面積が比較的小い範囲では、解析値と実験値で

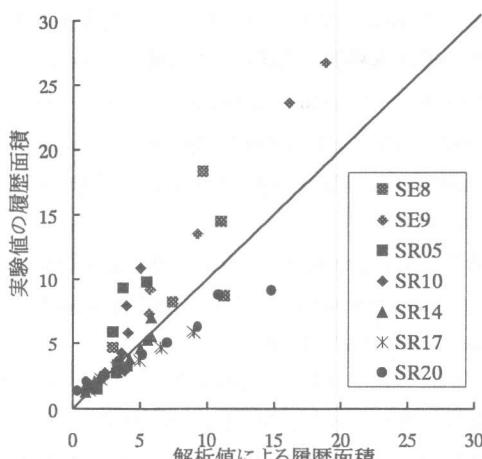


図-7 各試験体における履歴面積の比較

は良好な対応を示している。また、実験における履歴面積の比較的大きい範囲では、解析値は概して実験値を過小評価する傾向にあることがわかった。これは履歴形状で逆S字形状のループの低応力域におけるスリップ現象部分を実験に比べ狭い範囲でのみ追跡することができたため、履歴面積としては過小評価したためと考えられる。また、SE9試験体では、実験結果では逆S字形状にはならないもののピーク荷重から除荷されるときのループはやや膨らみを持つ傾向にあるのに対して、解析では直線的なループを描くため、履歴面積的には過小評価する結果となった。

6.5 コンクリートの負担応力

本解析では、大森らの研究[4]と同じ以下の方でコンクリートのみの負担応力を求める。

補強鉄筋と平行方向の試験体の平均ひずみ量(ε_x)が求まるとき、以下の式で補強鉄筋の負担応力が計算できる。

$$fs_x = Es \cdot \varepsilon_x \quad \dots \dots \quad (\text{式-2})$$

純せん断状態を作り出しているため、鉄筋と平行方向の作用応力(fn_x)は零になる。また、試験体はコンクリートと鉄筋で外力に対して抵抗しているので、以下の式が成立する。

$$fc_x + \rho \cdot fs_x = fn_x = 0 \quad \dots \dots \quad (\text{式-3})$$

$$fc_x = -\rho \cdot fs_x \quad \dots \dots \quad (\text{式-4})$$

ここで、 ρ は鉄筋比である。また本解析では鉄筋は、せん断力に対して抵抗できないものとして取り扱うため、せん断力(V)は総てコンクリートが負担することになり、(式-5)が成立する。

$$V = V_c \quad \dots \dots \quad (\text{式-5})$$

上記の方法で求めたコンクリート負担応力を縦軸に、横軸にはひずみの値を取りグラフ化した代表的なものを図-8に示す。両試験体で共通している点は、解析結果のグラフに記した網目の領域に履歴が描かれない点である。実験ではその領域に履歴が描かれるような結果が得られているが、解析では評価することができなかった。

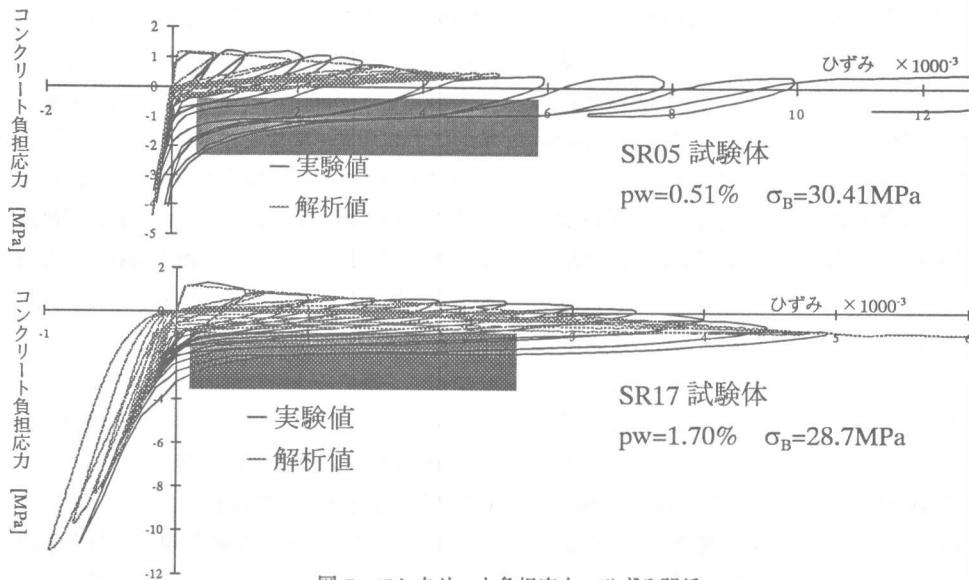


図-7 コンクリート負担応力-ひずみ関係

また SR17 試験体での圧縮応力域では、解析ではある程度、履歴に面積が生じたのに対して、実験ではほぼ面積がない結果となっている。SR05 試験体で解析結果で圧縮応力域の履歴に面積がほぼ零であるのは、主応力がコンクリートの圧縮強度の 1/3 に到達しない場合は、残留ひずみを発生させないというルールに基づいているからである。

7.まとめ

既往の提案モデルに修正を加えることで、低せん断応力域のせん断ひずみを良好に評価することができた。また、鉄筋の降伏の過程も実験結果と対応し、ほぼ満足できる解析結果を得ることができた。

履歴ループ形状では、低鉄筋比の試験体の逆 S 字状の履歴形状を評価することはできなかったが、高鉄筋比の試験体については履歴面積とともに概ね良好な結果を得ることができた。

【参考文献】

- [1]野崎・楨田・野口：RC 部材の繰返し履歴を考慮した有限要素解析 コンクリート工学年次論文報告集, Vol20, No.2 pp.1041-1046, 1997
- [2]Gopalaratnam and Shah: Softening response of Plain Concrete in Direct Tension, ACI Structural Journal, May-June, pp.310-323, 1985
- [3]白井・佐藤：鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究（その 6）日本建築学会学術講演梗概集, pp1615-1616, 1978
- [4]N.J. Stenves, M.P. Collins: "Analytical Modeling of Reinforced Concrete Subjected to Monotonic and Reversed Loading", Univ. of Toronto Publication No.87-1 Department of Civil Engineering, Dec., 1986
- [5]大森・栗原 他：繰返面内せん断力を受ける鉄筋コンクリート平板の弾塑性挙動に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文報告集 Vol.403, 1995
- [6]張：鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に関する非線形解析, 千葉大学学位論文 1990
- [7]Ziyaeifar, M.: Refined Transverse Shear Strains in Thick Plate-Shell Elements, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, 1996
- [8]ACI Committee 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-77), American Concrete Institute, 1977
- [9]栗原・坪田：繰返し面内複合応力を受ける鉄筋コンクリート平板の弾塑性解析モデルに関する研究 日本建築学会構造系論文報告集 No.469, p.105-p.115, 1995.5