

論文 FEMによる複合応力下におけるRC耐震壁のせん断挙動の解析

楊 辞冬*¹・野口 博*²・松本・尚志*³・荻原 みき*⁴

要旨: 複合応力を受けるRC耐震壁の既往の実験試験体10体を対象とし、鉄筋コンクリートの構成則を組み込んだユーザーサブルーチンを使用した汎用FEMプログラムABAQUSにより、3次元非線形解析を行った。壁要素のせん断挙動について、内部応力や変形、破壊の進行状況の解析結果を実験結果と比較検討した。その結果、せん断耐力については良好な対応が得られ、さらに既往のせん断耐力式の検討も行った。

キーワード: 鉄筋コンクリート、複合応力、耐震壁、平板、せん断耐力、3次元FEM解析

1. まえがき

荻原、菅原、新田、甲斐らによる「複合応力下におけるRC耐震壁の終局耐力評価の研究」[1][2]では、ボックス型構造物の地下外壁が面外力、面内力を立体的に受け、複雑な応力状態になる場合については、実験的にも解明が不十分なところから、複合応力下の面外せん断耐力を把握することを目的として、基本的な応力状態の壁要素の実験が行われた。さらにこの壁要素実験では、終局状態までの挙動を把握し、終局耐力の評価のための解析要素を開発するための基礎データを得ることも目的としている。

本研究では、上記の基本的な応力状態の壁要素実験試験体10体を対象として、RCの材料非線形性としてコンクリートのひび割れ、圧縮劣化、最大耐力後の軟化挙動、鉄筋の降伏などを考慮した筆者らの構成則[3]をユーザーサブルーチンとして組み込んだ汎用FEMプログラムABAQUSを用いて、3次元非線形FEM解析を行った。そして荷重-変形、せん断耐力、内部応力状態や破壊進行状況の解析結果を実験結果と比較検討し、既往のせん断耐力式の評価などを行った。

2. 解析方法

本解析では、入出力や非線形解法の機能に優れた汎用FEM解析プログラムABAQUSに、RCの材料非線形性としてコンクリートのひび割れ、圧縮劣化、最大耐力後の軟化挙動、鉄筋の降伏などを考慮した筆者らの構成則[3]をユーザーサブルーチンとして組み込んで使用した。コンクリートは、直交異方性体とし、Darwin-Pecknold等[4]の等価一軸ひずみの概念、Murray等[5]が三次元に拡張したものを使用した。コンクリートの応力-ひずみ関係を図1に示す。圧縮域の最大強度までは、曲線とし、最大強度以降のひずみ軟化域は線形を仮定した。ただし、コンクリート強度の最大値は、破壊基準によるものとした。破壊基準に関しては、図2に示すように、主応力空間($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)内に主応力の関数によって破壊曲面を定義し、主応力を成分とするベクトルがこの曲面を貫くときの値を、応力の最大値として求めた。破壊曲面には、Willam-Warnkeの3パラメータモデル[6]にさらに2つの自由度を加えた5パラメータモデル[7]を使用した。破壊曲面の偏差平面(直線 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (静水圧軸)に垂直な平面:紙面)による断面を図3に示す。コンクリートのひび割れは、分布ひび割れにより表現し、ひび割れたコンクリートの圧縮劣化特

*1 千葉大学大学院生 工修(正会員)

*2 千葉大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

*3 東京電力株式会社技術開発本部

*4 東京電力株式会社技術開発本部(正会員)

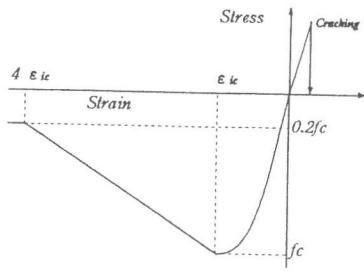


図1 コンクリートの応力-ひずみ関係

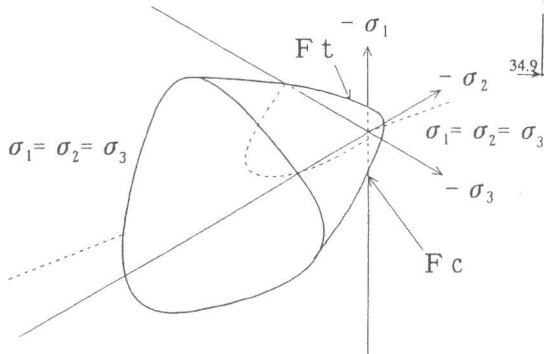


図2 コンクリートの破壊曲面

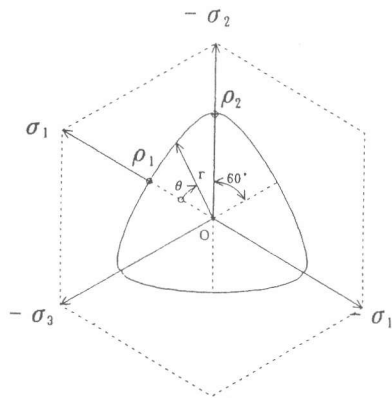


図3 コンクリートの破壊曲面の偏差断面

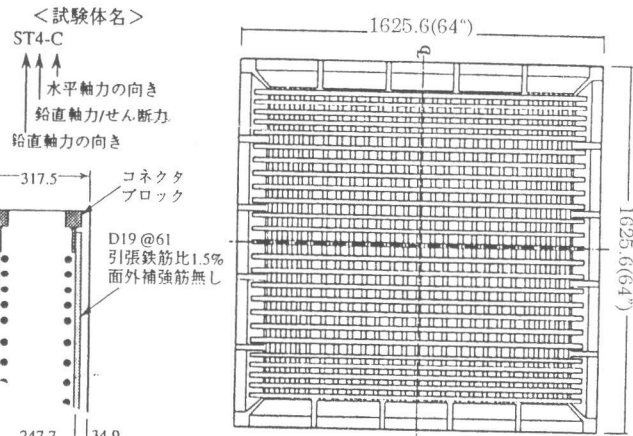


図4 試験体配筋図

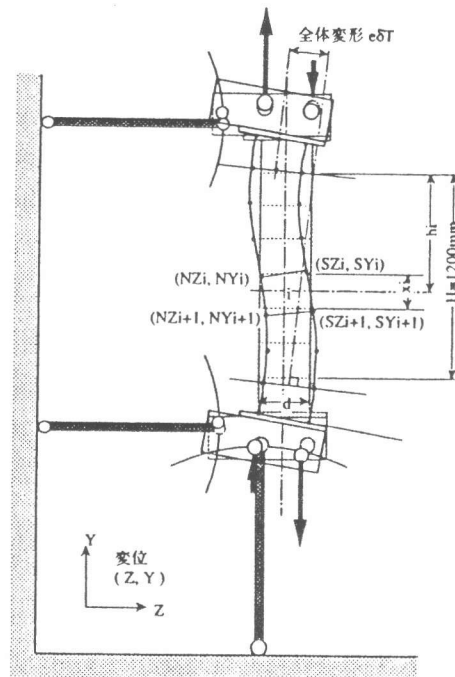


図5 実験加力図

性は、野口・浜田らの提案式[8]に基づいて表現した。鉄筋の応力-ひずみ関係は、バイリニア型とした。またコンクリート要素には、8節点ソリッド要素、鉄筋要素には、線材要素を用いた。

3. 解析対象とそのモデル化

解析試験体は、図4に示すように、荻原、菅原、新田、甲斐らによりトロント大学で実験が行われた一辺1625mm、厚さ318mmのRC平板10体で、面内方向には、D19が鉄筋比で3%程度配筋されている。面外のせん断補強筋は配筋されていない。加力方法を図5に示すように、水平一定軸力下で、鉛直方向に面外曲げと面外せん断力および軸力が载荷された。面外曲げは逆対称とし、試験体中央部で面外せん断力のみが作用するように制御された。試験体の加力パターンとしては、単調载荷時の面外せん断挙動に着目し、同時に作用させる面内応力の組み合わせを図6に示す。解析における要素分割図及び境界条件を図7に示す。解析では、試験体を鉛直方向中央部分のみを切り出した形とした。水平軸力、鉛直軸力や面外曲げを载荷する試験体端部は、実験で加力板

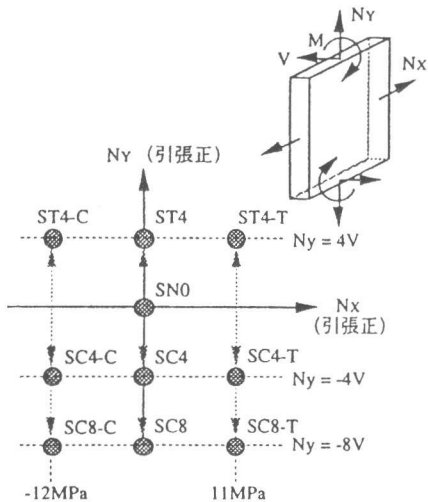


図6 面内及び面外応力関係

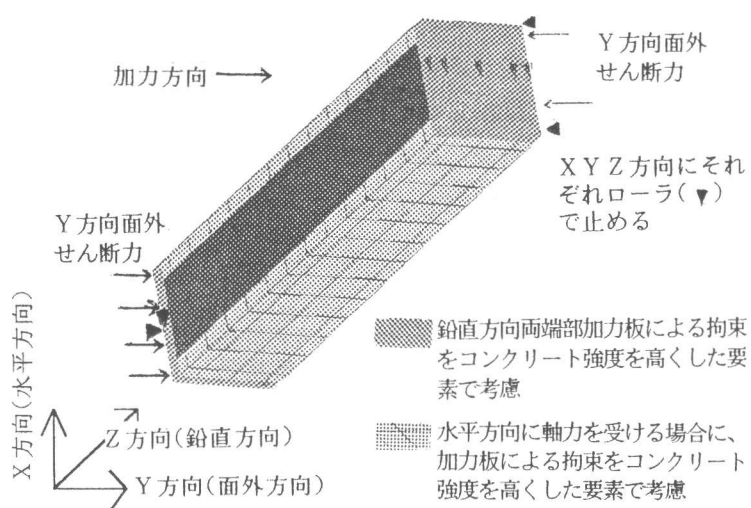


図7 要素分割と境界条件

によりコンクリートが横拘束されていることを考慮して、解析ではコンクリートの強度をやや高めた。主筋とコンクリートとの付着は完全付着とした。解析に使われたコンクリート及び鉄筋の材質は、トロント大学での実験材料試験データに基づいて決めた。詳細は文献1を参照されたい。

4. 解析環境と手順

解析は、HPワークステーション (EWS) 730CRX/96MBで行い、解析ソフトとしてはユーザーサブルーチンを組み込んだABAQUS Ver5.4を使用した。パソコンで入力データを作成し、EWSによる解析結果をパソコンで出力した。解析時間は、1体あたり14時間程度である。

5. 解析結果と実験結果との比較

5-1 面外せん断力と全体変形関係

面外せん断力と全体変形の関係について、解析結果と実験結果との比較を図8～図11に、それぞれ水平方向に軸力を受けない試験体、水平軸力下の鉛直軸力引張系試験体、水平軸力下の鉛直軸力4倍圧縮系試験体、水平軸力下の鉛直軸力8倍圧縮系試験体について示す。面外変形は、試験体の中央部(H=1200mm)を変形の評価区間とし、その下端中央点より立ち上げた垂線と上端中央点との距離を下端変形として求め、さらに同様に上端より変形を算定し、それらの平均値を全体変形とした。また、試験体SN0、SC4-C、SC8-Tの面外せん断力-全体変形関係について解析と実験の結果を図12、図13、図14に示す。さらに、同図に解析結果の曲げ変形とせん断変形も示してある。曲げ変形は、曲率を積分して求め、これを全体変形から差し引いてせん断変形を求めた。

全般的に、水平軸力が引張及び零の場合 (ST4-T、ST4、ST4-C、SN0) では、初期剛性はほぼ対応するが、荷重の上昇により解析の剛性の方が、実験よりかなり高めとなった。これは、解析では引張加力部付近の破壊を避けるために加力端部の剛性及び強度を高めたことの影響や、壁筋とコンクリートの付着を考慮していないことなどから生じたものと考えられる。しかし、せん断耐力については、解析と実験の結果は、ほぼ対応している。

一方、水平軸力が圧縮の場合、解析では実験に比べ、SC4とSC4-Cでやや剛性が高めとなり、SC4-Cで耐力がやや低めとなった他は、解析結果は実験結果の剛性、耐力とほぼ対応した。また、

図8では、水平軸力零で、鉛直軸力が、圧縮から引張に変化するSC8、SC4、SN0、ST4の順に剛性低下していく傾向や、水平軸力が圧縮から引張に変化する、それぞれST4-C、ST4、ST4-T（図9）、またSC4-C、SC8、SC8-T（図11）の順に剛性低下していく傾向は、解析と実験でほぼ対応していることがわかる。なお、図15にSN0の最大耐力付近の変形状況を拡大して示す。試験体中央部に対し、逆対称に変形していることがわかる。

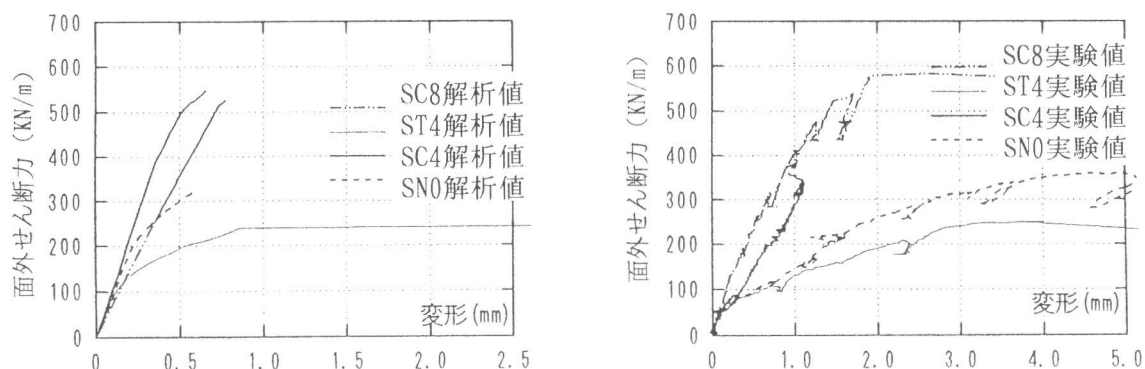


図8 水平軸力なし試験体P-δ図

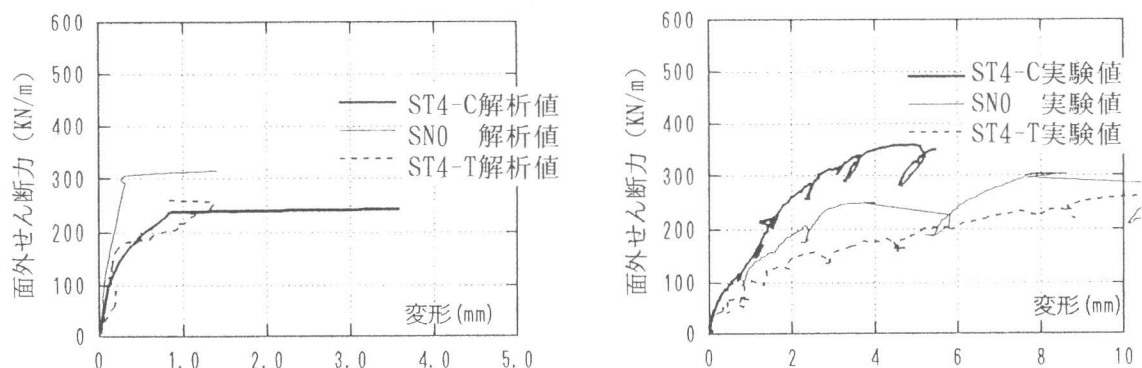


図9 鉛直方向引張系試験体P-δ図

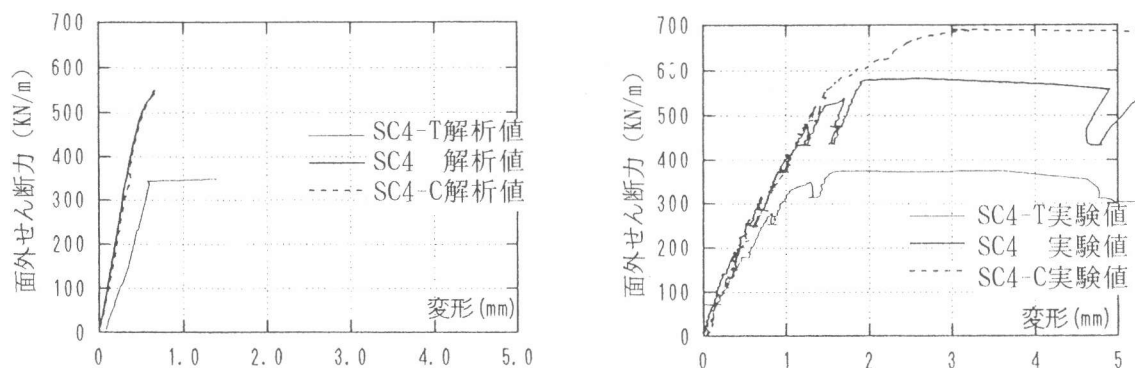


図10 鉛直方向4倍圧縮P-δ図

5-2 せん断耐力

解析におけるせん断耐力を、文献2に示されている実験結果などと比較して図16に示す。荻原、甲斐らは、文献2で、せん断耐力が鉛直軸力と同様に水平軸力の変動によってもせん断耐力が変化することを、2軸応力下のコンクリートの圧縮強度として補正して、称原式[9]や、2軸圧縮効

果や引張応力下での圧縮強度の低減係数を考慮した沼倉、白井らによる2つの修正モデル[10]により検討し、軸力の効果をコンクリートの圧縮強度の変動で説明できることを報告している。

図16での鉛直軸力の影響を見ると、せん断耐力の解析結果は実験、修正モデル(ℓc2)、及び称原式に近い結果となっている。図16の水平軸力の影響については、解析結果が実験によく対応し、また修正モデル(ℓc2)と称原式にも近い結果となっている。このことから、修正モデル(ℓc2)と称原式の適用性が解析の面からもある程度裏付けられたと考えられる。

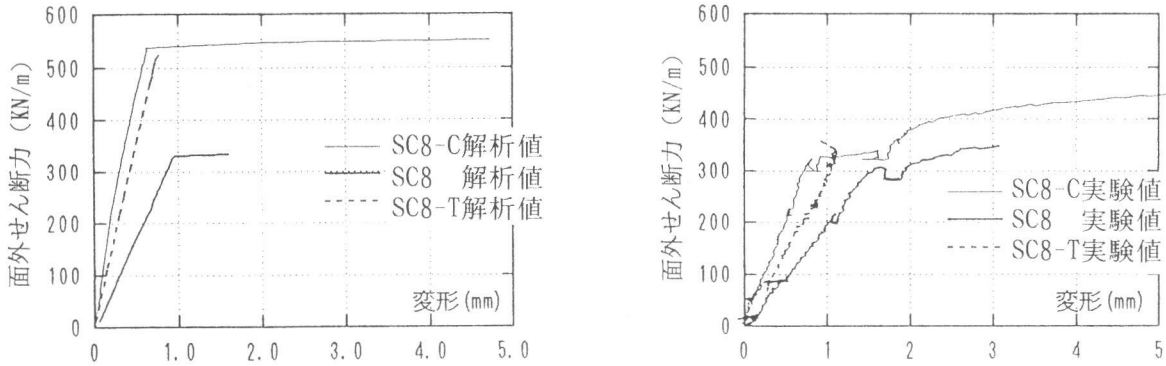


図11 鉛直方向8倍圧縮P-δ図

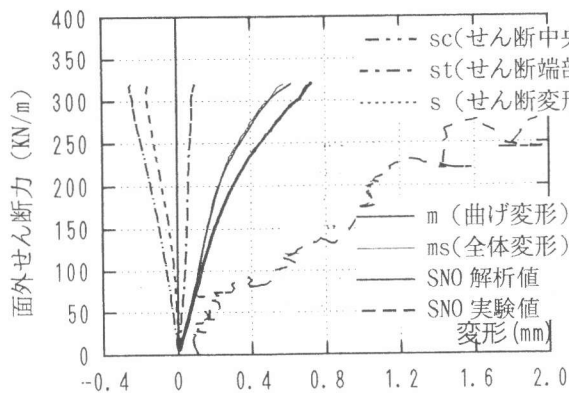


図12 試験体SNO荷重-変形図

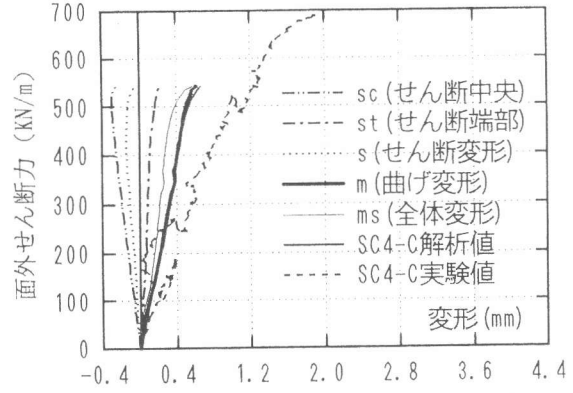


図13 試験体SC4-C荷重-変形図

5-3 圧縮主応力コンター図

試験体SN0、SC4-C、SC8-Tの最大耐力付近の圧縮主応力コンター図を図17に示す。鉛直、水平とも軸力なしのSN0では、左上端から右上端へ向かう圧縮ストラットの流れが比較的明瞭に見られるのに対し、水平、鉛直とも圧縮を受けるSC4-Cでは、圧縮ストラットの角度が急になり、幅広く一様に近く流れるのに対し、水平引張、鉛直圧縮を受ける

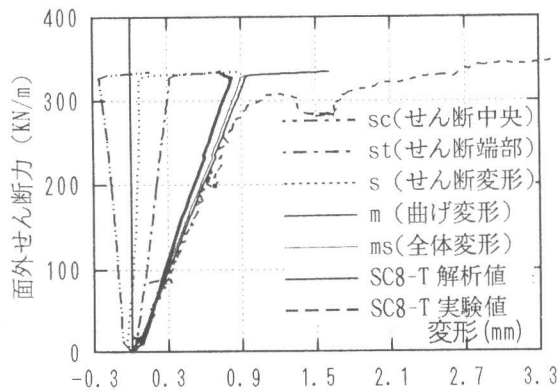


図14 試験体SC8-T荷重-変形図

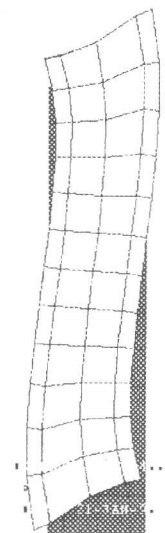
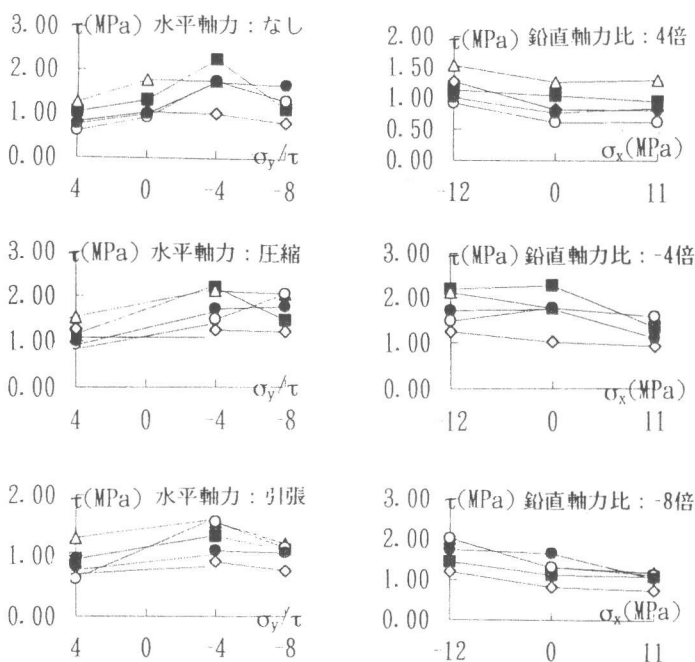


図15 試験体SN0変形図

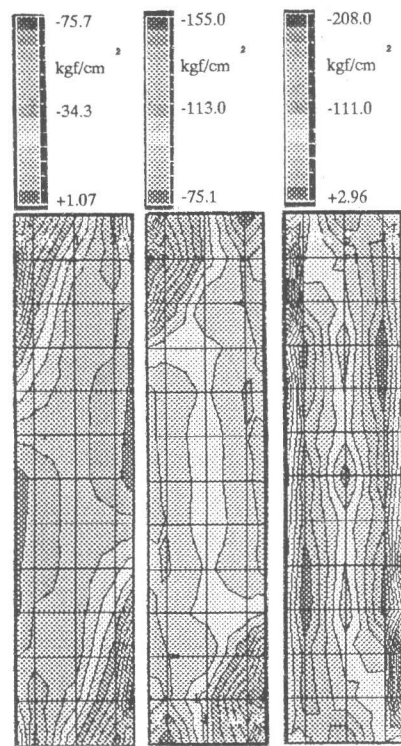
SC8-Tでは、圧縮ストラットの角度は急で、幅が狭くなっていることがわかる。今後、立体的な圧縮主応力等の流れを把握し、せん断抵抗機構やせん断耐力算定式の検討に役立てる必要がある。

●：解析値 ■：実験値 △：称原式
◇：修正モデル(νc1) □：修正モデル(νc2)



(a) 鉛直軸力による比較 (b) 水平軸力による比較

図16 既往の算定式の対応状況



試験体SNO 試験体SC4-C 試験体SC8-T

図17 圧縮主応力図

6. まとめ

面内直応力をパラメータとして、面外せん断力を受けるRC耐震壁の既往の実験試験体10体を対象として3次元非線形FEM解析を行った。壁要素の荷重-変形関係、せん断耐力、内部応力状態などについて解析結果を実験結果と比較した結果、面内軸力が引張系で剛性が解析で高い点を今後の課題に残したが、せん断耐力については良好な対応が示され、マクロ的な耐力式との対応もほぼ良好であることを確認した。

(謝辞) 本研究を実施するにあたり、トロント大学のコリンズ教授には、貴重なご助言とご協力を頂きました。ここに感謝致します。

参考文献：

- 1) 荻原 みき、菅原 良次、新田 康男、甲斐 芳郎：複合応力下におけるRC耐震壁の面外せん断挙動に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文報告集、18-2、1996年。
- 2) 荻原 みき、菅原 良次、甲斐 芳郎、新田 康男、" 複合応力下におけるRC耐震壁の終局耐力評価の研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.159-162、1995年8月。
- 3) 雨宮 篤、内田和弘、野口 博：鉄筋コンクリート系部材の3次元非線形有限要素解析プログラムの開発、コンクリート工学年次論文報告集、第14巻、第2号、pp.21-26、1992年
- 4) Darwin, D. and Pecknold, D. A. : Nonlinear Biaxial Law for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, No. EM2, Proc. Paper 12839, April, 1977, pp. 229-241.
- 5) Alaa, A. Elwi and Murray, D. W. : 3D Hypoelastic Concrete Constitutive Relationship, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 105, No. EM4, August, 1979, pp. 623-641.
- 6) William, K. J. and Warnke, E. P. : Constitutive Model for the Triaxial Behavior of the Triaxial Behavior of Concrete, International Association for Bridge and Structural Engineering, Proceeding, Vol. 19, 1975.
- 7) Argyris, J. H., G. Faust, J. Szimmat, E. P. Warnke, and K. J. Willam: Recent Developments in the Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Reactor, Nucl. Eng. Des., Vol. 28, pp. 42-75.
- 8) 野口 博、濱田 聡ら：地震時のひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験、コンクリート工学年次論文報告集、11-1、1989年、pp. 323-326。
- 9) 称原良一、加藤勉：鉄筋コンクリート耐震壁の終局耐力、日本コンクリート工学協会、RC構造のせん断問題に関する解析的研究に関するコロキウム論文集、pp.41-48、1982年6月
- 10) 沼倉隆人、白井伸明ほか：FEMパラメトリック解析に基づく高強度RC造耐震壁のせん断強度推定モデルの検討、コンクリート工学年次論文報告集、17-2、1995年、pp. 529-534。