

論文 繰り返しを考慮した RC 耐震壁のせん断性状に関する解析的研究

榎本勝則*1・野口博*2・柏崎隆志*3

要旨：I型耐震壁の解析例は数多くあるが、BOX型、コ型、T字型等の立体的な耐震壁の解析例は数少なく、直交壁等のせん断抵抗機構は、十分には評価されていないのが現状である。また、解析での荷重方法についてもその大半が単調荷重による耐力、変形の評価となっている。しかし、実験では殆どが正負繰り返し荷重となっており、解析でも繰り返し荷重時の鉄筋コンクリートのモデル化が必要とされている。そこで、本研究では立体耐震壁の解析手法と繰り返し荷重を考慮したコンクリートのモデル化についての検討を行う。
 キーワード：圧縮強度低減係数、立体耐震壁、繰り返し荷重

1. はじめに

1970年頃から、鉄筋コンクリート構造解析的研究では、有限要素法(FEM)が数多く適用されている。耐震壁部材では、形状が比較的平面なこともあり、二次元FEM解析によって精度よく評価されるようになってきている[1]。しかし、今までは平面的な耐震壁としての解析例は数多くあるが、BOX型、コ型、T字型等の断面形状を持つ立体的な耐震壁の解析例は数少なく[2]、直交壁等のせん断抵抗機構は、十分には評価されていないのが現状である。また、解析での荷重方法についてもその大半が単調荷重による耐力、変形の評価となっている。しかし、実験では地震時の挙動を評価するために殆どが正負繰り返し荷重となっており、解析でも繰り返し荷重時の鉄筋コンクリートの力学的挙動を正確に追跡し得るモデル化が必要とされている。そこで、本研究では立体耐震壁のせん断耐力評価のため、積層シェル要素を用いた単調荷重時のFEM解析を実施し、実験結果と比較検討を行った。また、繰り返し荷重時モデルの検討において、RC耐震壁やRC平板の非線形挙動では、ひび割れの閉開や鉄筋とコンクリート間の付着性状が、履歴特性に大きな影響を及ぼすことが考えられる。そこで、Collinsらにより行われた大型平板実験[3]を解析対象として、繰り返し荷重解析を行い、コンクリートの引張領域における除荷履歴に関する解析モデルの検討を行った。

2. FEM解析に用いた構成則と諸条件

表-1に本解析に用いた構成則を示す。

表-1 FEM解析に用いた構成則と諸条件

二軸応力下のコンクリートの構成則	<ul style="list-style-type: none"> 等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデル Saenz (普通強度) Pafitis (高強度) の応力-ひずみ曲線 Darwinらの破壊条件
コンクリートの圧縮側ひずみ軟化特性	<ul style="list-style-type: none"> 収斂点まで直線降下 側柱、梁部は修正Kent-Parkモデル[4]
テンションスティフニング特性	<ul style="list-style-type: none"> 白井式[5]
ひび割れ面のせん断伝達特性	<ul style="list-style-type: none"> Al-Mahaidiらのモデル
ひび割れ後の圧縮強度劣化特性	<ul style="list-style-type: none"> 筆者らによる提案式[6]
鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> 積層要素 応力-ひずみ関係はトリリニア型モデル

3. ひび割れたコンクリート

における圧縮劣化特性

3.1 圧縮強度低減係数

耐震壁や平板のせん断終局強度を評価する場合、ひび割れたコンクリートの圧縮強度の低下は耐力や変形に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

*1 千葉大学大学院 工学研究科建築工学専攻 (正会員)
 *2 千葉大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)
 *3 千葉大学助手 工学部建築学科、工修 (正会員)

そこで本研究室で行われた普通強度材料を対象とした実験[7]（実験1）と超高強度材料を対象とした実験[8]（実験2）の2シリーズのRC小型平板実験より、ひび割れたコンクリートにおける圧縮劣化の特性（圧縮強度低減係数 λ ）を引張ひずみの関数のみでなく、コンクリート圧縮強度を含んだ以下の式を提案[6]し本解析に使用した。

$$\lambda = \frac{1}{a + b (\varepsilon_{1u} / \varepsilon_0)^c}, \quad X = \sigma_B^{1/3} \quad (\sigma_B \geq 200)$$

$$a = \frac{e^x}{e^x + 1470}, \quad b = 0.02(9.90 - x)^2 + 0.70, \quad c = 0.141x - 0.715$$

σ_B : コンクリートの一軸圧縮強度 (kgf/cm²)

ε_{1u} : ひび割れ直交方向の平均引張ひずみ

ε_0 : 一軸圧縮強度時のひずみ

4. 立体耐震壁のFEM解析

4.1 解析モデル

本解析では汎用FEM解析プログラムABAQUSを使用し、米澤らによる二次元解析用ユーザーサブルーチン[9]及びABAQUS所有の積層シェル要素を用いることにより、RC立体耐震壁等の解析も可能となる。図-1にBOX型試験体における解析モデル、積層シェル要素の概念を示す。モデル化に際しては加力スラブは耐力に直接影響を及ぼさないものと考えられるため、剛体に近いものとし、基礎スラブは三次元ソリッド要素とした。鉄筋は全て一方向に剛性を有する等価な鉄筋層に置換し、平面シェル要素に重ね合わせた。

4.2 FEM解析対象試験体

FEM解析対象試験体として、秋野らによるBOX型耐震壁試験体(B1-1~7)[10]7体（実験A）、宮崎らによるBOX型及びその半割としたコ型耐震壁試験体(D試験体、E試験体)[11]2体（実験B）、及び大塚らによる直交壁の付いた耐震壁試験体（標準試験体として直交壁のないNW6試験体、直交壁厚6cmのTW7、直交壁厚12cmのTW8）[12]3体（実験C）の計12体

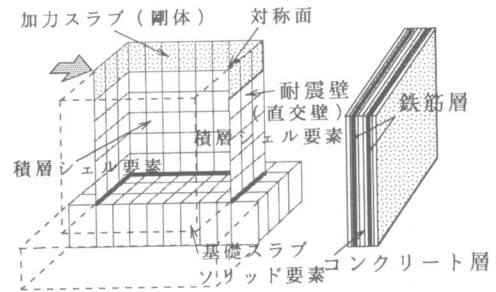


図-1 解析モデル, 積層シェル要素の概念
表-2 材料定数 (単位: kgf/cm²)

実験	試験体名	コンクリート		実験におけるパラメーター
		圧縮強度	割裂強度	
A	B1-1	277	24.5	シアスパン比 壁補強筋比 軸力 壁厚
	B1-2	247	20.9	
	B1-3	248	20.1	
	B1-4	305	27.6	
	B1-5	297	25.7	
	B1-6	275	25.4	
	B1-7	247	19.8	
B	D試験体	280	22.0	試験体形状 全体半割
	E試験体	283	19.9	試験体形状 直交壁厚 壁補強筋比
C	NW6	300	21.8	
	TW7			
	TW8			

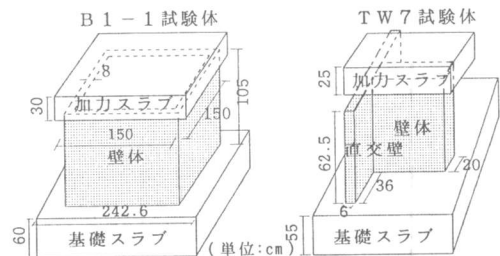


図-2 試験体形状

についてFEM解析を行った。試験体の材料定数を表-2に、試験体形状の一例を図-2に示す。

4.3 FEM解析結果

実験A～Cの各試験体における代表的なせん断力-頂部水平変位関係を図-3(a)～(f)に実験値と解析値の比較を表-3、図-4に示す。

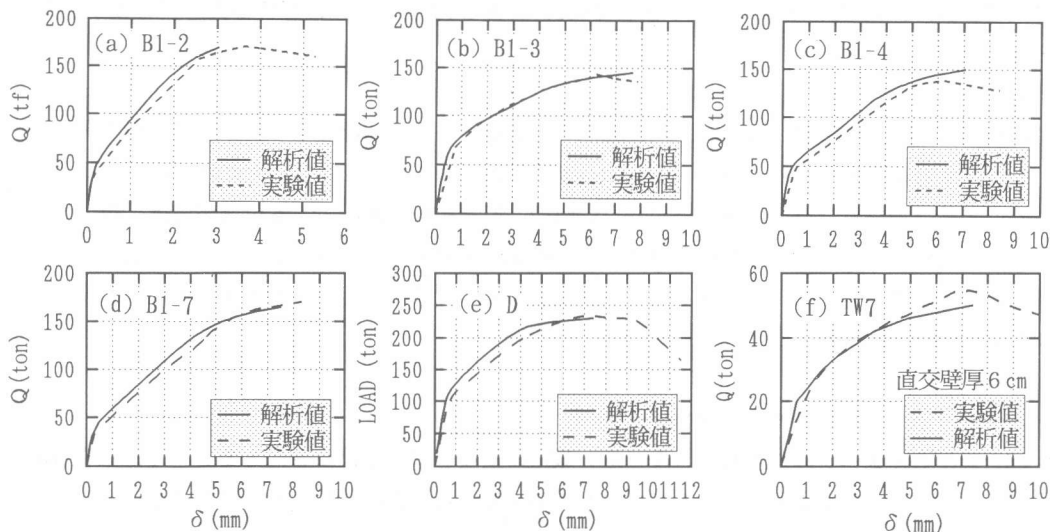


図-3 せん断力-頂部水平変位関係

表-3 諸強度一覧

実験	項目	初期剛性			最大荷重			破壊モード	
		実験値 (t/cm)	解析値 (t/cm)	実験値 / 解析値	実験値 (tf)	解析値 (tf)	実験値 / 解析値	実験	解析
A	B 1 - 1	4452	3669	1.21	208.7	182.0	1.15	SW	SW
	B 1 - 2	3704	3498	1.06	171.7	170.0	1.01	SW	SW
	B 1 - 3	1288	1494	0.86	139.2	145.0	0.96	SW	SW
	B 1 - 4	1514	1859	0.81	138.3	150.0	0.92	SW	SW
	B 1 - 5	1581	1828	0.86	182.9	175.0	1.05	FC	FC
	B 1 - 6	3000	3115	0.96	277.5	320.0	0.87	SW	SW
	B 1 - 7	1717	1507	1.14	168.8	165.0	1.02	SW	SW
B	D 試験体	1584	2182	0.73	234.3	230.0	1.02	SW	SW
	E 試験体	2186	2084	1.05	125.5	106.0	1.18	SW	SW
C	NW 6	199	200	0.99	44.4	42.0	1.06	SW	SW
	TW 7	263	301	0.87	54.8	50.0	1.10	SW	SW
	TW 8	264	304	0.87	61.3	54.0	1.14	SW	SW
		平均値		0.95	平均値		1.04		
		変動係数		0.13	変動係数		0.09		

*SW: 壁のせん断破壊, 圧壊
*FC: 曲げ破壊

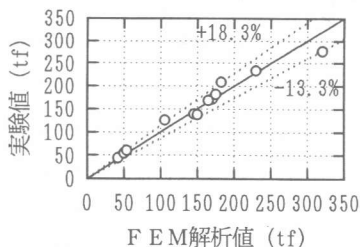


図-4 解析結果と実験結果の比較

最大耐力時の変形について解析値は実験値より小さい評価となっているのは、基礎スラブからの鉄筋の抜け出しや壁と基礎スラブの境界面でのすべり変形等を考慮していないためであると考えられる[13]。最大耐力についてみると、各試験体とも良好な対応を示している。E試験体に関して、実験ではD試験体と境界条件を同じにするため直交壁の切断面の変形を拘束しているが、E試験体の解析では直交壁の影響を明確にするため

直交壁切断部を自由端としている。この結果D試験体に対するE試験体の耐力比はほぼ半分の0.46となり半割とした直交壁がせん断に対して抵抗していることが推察される。また破壊性状は解析でもウェブ壁の対角線上に沿いせん断圧縮破壊に至っており、実験と一致している。実験Cにおける実験結果と解析結果を比較すると、実験での最大耐力はNW6に対しTW7は23%上昇し、解析では11.9%の上昇、TW8に対しては実験では38%、解析では28%上昇し、耐力上昇率は解析の方が実験より小さめとなった。

4.4 まとめ

FEM解析結果と実験結果の比較より、初期剛性は解析値が若干高めとなったが、最大耐力等についてほぼ良好な対応を示し、立体耐震壁の挙動は汎用プログラムABAQUSにユーザーサブルーチンを組み入れることでほぼ良好に評価できる。しかし、B1-2、B1-4等のせん断力-変位関係では、耐力を若干高めに評価し、変形も比較的小さいのは解析と実験との加力方法の違いによる影響も考えられる。そこで、繰り返し荷重を考慮したコンクリートのモデル化を行い、単調載荷との異差を明らかにしていく必要があると思われる。

5. 繰り返し載荷時の平板試験体のFEM解析

RC耐震壁の挙動の追跡に関して、繰り返し載荷に重要となる除荷におけるモデルの構築を目的とし、本研究室で使用されている解析プログラムを繰り返し載荷時にも対応できるものとした。

5.1 コンクリートのモデル化

本解析モデルの繰り返し載荷時の主応力-等価一軸ひずみ曲線を図-5に示す。除荷時における剛性は初期剛性としている。鉄筋とコンクリートの付着による引張剛性効果の表現には単調載荷時と同様に白井式を用いる。引張領域での除荷経路については、既往の白井ら[14]及び前川ら[15]の研究を参考にし、次の2種類のモデル化を行い実験結果との比較検討を行った。

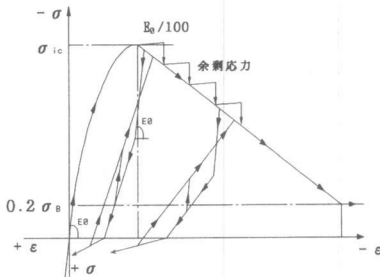


図-5 主応力-等価一軸ひずみ曲線

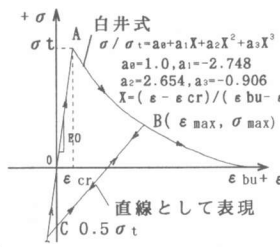


図-6 MODEL1

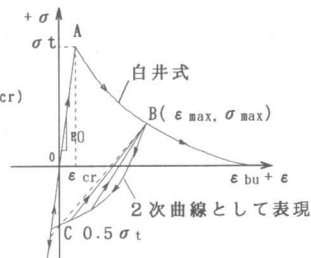


図-7 MODEL2

MODEL1: 図-6のように、正領域での除荷は、定点 $0.5\sigma_t$ に向かう直線とし、再載荷は同直線を通るものとする。

MODEL2: 図-7のように、除荷後、定点 $0.5\sigma_t$ に向かう2次曲線、再載荷は除荷点へ戻る直線とし、除荷経路と再載荷経路を分離したものとする。

5.2 各モデル間の相互作用

繰り返し載荷を受けるコンクリートには、一般に二方向のひび割れが発生し、引張剛性モデルと圧縮剛性モデルとは密接な関係を持ち、載荷・除荷・再載荷の載荷履歴においても連続的につながり合わされたループ

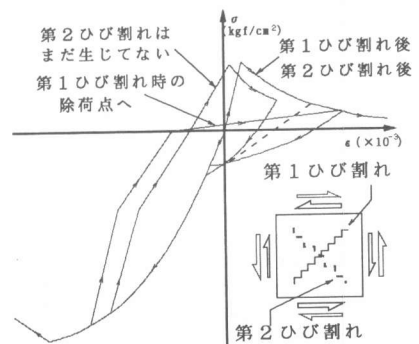


図-8 剛性の移行

を描けるモデルである必要がある。図-8に引張剛性から圧縮剛性への移行のモデルを示す。

5.3 固定ひび割れモデル

本解析では、コンクリート積分点において引張強度を超えた時点で、その最大主応力方向に直交する方向、つまりひび割れ方向を記憶する固定ひび割れモデルを使用した。

5.4 第2ひび割れ

鉄筋コンクリートが正負繰り返し荷重を受ける時に、コンクリートに第1のひび割れが発生した後、反対の荷重サイクルにおいて第2ひび割れが発生する場合がある。ただし、第2ひび割れと第1ひび割れとの交角が10度以上でなければコンクリートの引張応力が破壊包絡線に到達しても第2ひび割れは発生しないとした。これは、鋭角に交わる第2ひび割れが第1ひび割れと力学的に異なるものか否かまだ不明であること、および数値解析上の困難を回避するための二つの理由による。

5.5 Collinsらによる平板実験概要

面内繰り返し応力を受ける鉄筋コンクリートの解析モデルの誘導を目的とした、Collinsらによる正負繰り返し面内せん断応力を受ける大型平板実験が行われた。この実験のパラメータは、載荷条件、コンクリート強度、及び補強方法である。図-9試験体寸法を示す。表-4に載荷条件及び材料定数を示す。

表-4 載荷条件及び材料定数

試験体	載荷条件	コンクリート		X方向鉄筋		Y方向鉄筋	
		圧縮強度 (kgf/cm ²)	ピーク時の ひずみ(%)	鉄筋比 (%)	降伏強度 (kgf/cm ²)	鉄筋比 (%)	降伏強度 (kgf/cm ²)
SE8	純せん断	377.4	0.260	3.0	5018	1.0	4885
SE9	純せん断	450.8	0.265	3.0	4304	3.0	4304
SE10	純せん断 +二軸圧縮	346.8	0.220	3.0	4304	1.0	4885

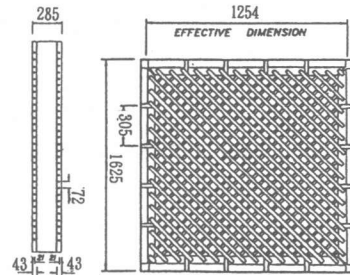


図-9 試験体寸法

5.6 実験結果と解析結果の比較

図-10に要素分割を示す。引張領域における除荷経路の影響を明確にするために、まず、除荷経路を原点へ向かう直線と仮定し、SE8の解析を行った。図-11に正荷重サイクルにおける解析結果と実験結果のせん断応力-せん断ひずみ関係の比較を示す。引張領域からの除荷による塑性ひずみを考慮しない場合、解析結果の残留ひずみは実験値の32.5%となり、ループ面積はかなり小さめの評価となった。図-12(a)、(b)にSE8、SE9をそれぞれMODEL1とMODEL2によって解析を行った、第1荷重サイクルの結果を示す。解析でのSE8の正サイクルの残留ひずみについてはMODEL1では、過小評価する結果となり、MODEL2では若干大きい値を取っている。総体的に

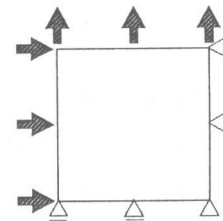


図-10 要素分割 (1要素)

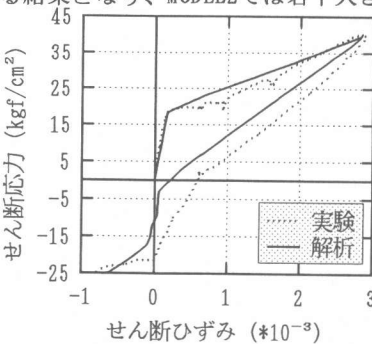


図-11 比較モデル

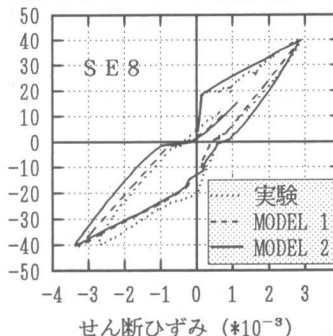
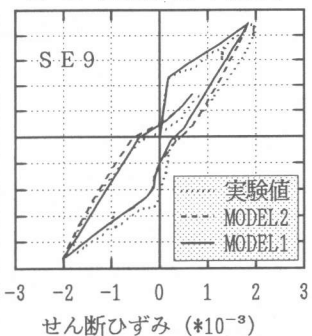


図-12(a)(b) せん断応力-せん断ひずみ関係



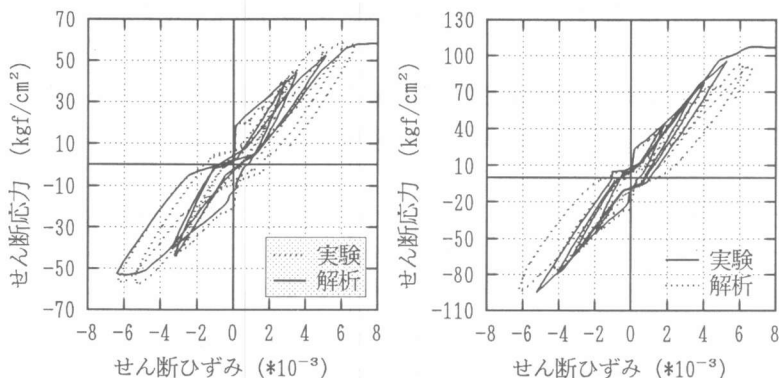


図-13(a)(b) MODEL2によるせん断応力-せん断ひずみ関係
 ○—実験 ◇---解析 (MODEL1) ▲-----解析 (MODEL2)

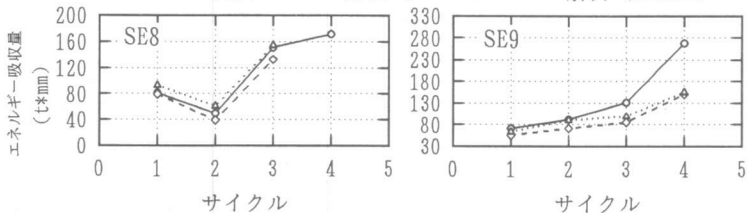


図-14(a)(b) エネルギー吸収量

ていおり、残留ひずみについても実験値と対応している。しかし、SE8とは逆に第3サイクルにおいて変形量が小さめの値となった。図-14(a)、(b)に各荷重サイクル毎のループ面積としてのエネルギー吸収量の推移を示す。エネルギー吸収量ではSE8, SE9ともに実験結果と解析結果は同様な傾向を示すが、SE9の第4サイクルでの急激なエネルギー吸収量の増加を解析では評価し得ていなかった。これは解析での除荷後の挙動が実験とは違い、直線的な経路をたどったためと考えられる。

5.7 まとめ

本研究では引張領域での除荷履歴に関し、履歴経路を直線とするMODEL1、二次曲線とするMODEL2の2種類について解析を行った。その結果、耐力については両モデルともほぼ実験と対応したが変形については最大耐力付近でやや大きめの評価となった。また、除荷後の残留ひずみに関してはMODEL1では過小評価となり、MODEL2の方が実験データを良好に評価できた。今後、最大耐力付近の荷重サイクルにおける変形、ループ面積等についての見直しが必要と思われる。

【謝辞】本研究は、文部省科研費補助金（総合研究（A）：課題番号 04302049、研究代表者野口 博）による分担研究である。

【参考文献】[1]范啓民「鉄筋コンクリート連層耐震壁のせん断強度の有限要素法解析」1993, 千葉大学修士論文 [2]長沼一洋「鉄筋コンクリート耐震壁の非線形解析手法とせん断強度に関する研究」千葉大学学位論文1993, 7月 [3]N. J. Stevens, M. P. Collins: ANALYTICAL MODELLING OF REINFORCED CONCRETE SUBJECTED TO MONOTONIC AND REVERSED LOADINGS, UNIVERSITY OF TORONTO Publication No. 87-1 Department of Civil Engineering [4]Park, R., Priestly, M. J. N. and W. D. Gill 「Ductility of Square Confined Concrete Columns」, Proceedings ASCE, Vol. 108, ST4, April 1982, pp. 929-950 [5]佐藤隆夫, 他「RC耐震壁の履歴特性と非弾性解析（解析用付着モデルとその検討）」日本建築学会学術講演梗概集, pp. 1803-1804, 昭和55年9月 [6]榎本, 他「ひび割れた超高強度コンクリートの圧縮特性の劣化に関する解析的研究」, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 737-738, 1994. 9 [7]濱田聡, 他「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」日本建築学会大会講演梗概集、構造II、pp. 397-398, 1988. 10 [8]米澤, 他「ひび割れた超高強度コンクリートの圧縮劣化の特性の劣化に関する基礎実験」日本建築学会学術講演梗概集, 1991年9月, pp. 479-480 [9]米澤健次「コンクリート系構造部材の非線形有限要素解析手法の開発とせん断抵抗機構の分析」、千葉大学学位論文、1995年1月 [10]稲田泰夫, 他「原子炉建屋の復元力特性試験（小型及び部分模型）（その4）B1シリーズ試験」日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和57年10月、pp. 963-964 [11]宮崎吉英, 他「建屋の復元力特性に関する研究（その15：ボックス耐震壁に関する実験）」日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和59年10月、pp. 2363-2364 [12]大塚弘, 他「直交壁を有する壁柱のせん断強度に関する研究（その2. 妻側壁柱のせん断実験）」日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和62年10月pp. 569-570 [13]長沼一洋「鉄筋コンクリート耐震壁の非線形解析手法とせん断強度に関する研究」千葉大学学位論文1993, 7月 [14]佐藤隆夫「RC耐震壁の履歴特性と非弾性解析（その1、解析モデル）」日本建築学会大会、昭和54年9月 [15]岡村、前川「鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則」技報堂出版1991年、5月

実験値との対応を見るとMODEL2の方が良好な対応となっている。図-13(a)、(b)にSE8, SE9に関して、MODEL2によるせん断応力-せん断ひずみ関係の解析結果と実験結果を比較して示す。SE8では負荷重サイクル、第3サイクル以降の正荷重サイクルにおいて若干、変位を大きめに評価しているが、耐力については良い対応を示している。SE9においても、耐力は良い対応を示し