

鉄筋コンクリート造耐震壁の動の実験における 解析的検討

松井智哉¹・壁谷澤寿海²

¹工修 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-0032 東京都文京区1丁目1番1号)

²工博 東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 東京都文京区1丁目1番1号)

In this study, a FEM analysis and test results on two reinforced concrete shear walls with different span ratios are presented. Experimental tests were carried out on a shaking table in 2002. Analytically, a 4-node isoparametric element was used to model the panel while beam-element was used to model boundary columns and beams. The investigated parameters are shear wall strength, ultimate deformation and hysteresis characteristics. Up to ultimate stage, analytical and experimental results were, generally, in good agreement as to lateral force-lateral displacement relationship.

Key Words : Reinforced concrete, Shear wall, Non-linear analysis, Rotating crack model, Isoparametric element

1. はじめに

近年、性能規定型設計法に移行する動きが活発になり、より明快に目標性能を規定する設計指針を目指す検討に重点が置かれるようになってきた。日本でも2001年6月には、改正建築基準法が制定され、応答変形を念頭に置いた限界耐力計算が規定されるに至り、それを踏まえて耐震性能評価指針案では、建物の耐震性能の評価項目として使用限界状態、修復限界状態、安全限界状態と3つ限界状態が設定された。その際、それらの限界状態と対応させるために、地震動に対する応答として生じる、建物、層および部材の応力および変形を終局時までできる限り正確に評価することが必要となってくる。

ここでは、耐震壁部材の構造解析モデルの今後の精度向上を目的として、陳により提案された耐震壁モデル¹⁾を用いて非線形解析を行うことにより、実験結果との比較検討を行った。

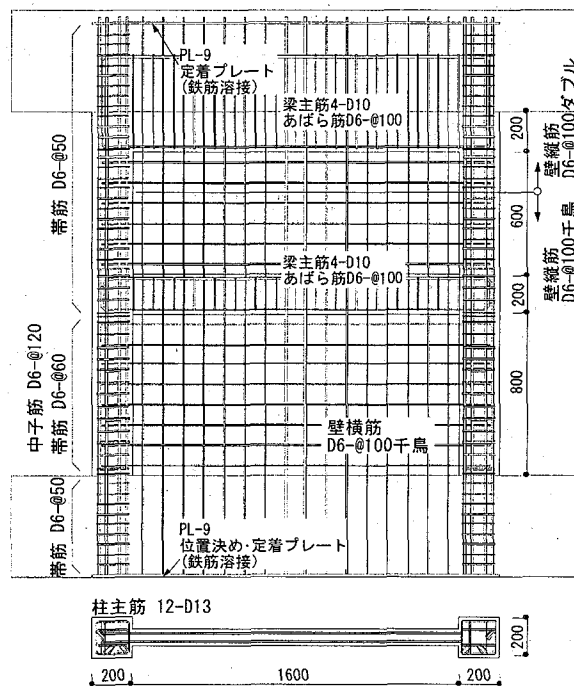


図-1 試験体配筋図

2. 対象耐震壁試験体

解析対象とする試験体は、2002年6,7月に実施された鉄筋コンクリート造耐震壁単体の動の実験で用いられた試験体2体である^{2),3)}。両試験体は、部材断面諸元は同一であるが、慣性力作用位置を変えるこ

とによりシヤ-スパン比を変化させ、せん断破壊先行型 (Wall-A; $M/Qlw=1.38$) と曲げ降伏先行型 (Wall-B; $M/Qlw=1.75$) となるように計画された。試験体の形状、実験時の試験体設置状況の概要、断面詳細、コンクリート及び鉄筋の材料特性をそれぞれ図1、図2、表1、表2、表3に示す。

表-1 部材断面詳細 (単位:mm)

		1階	2階
柱	B×D	200×200	
	主筋	12-D13 (pg=3.8%)	
	帯筋	2-D6@60 (pw=0.53%)	2-D6@50 (pw=0.64%)
	副帯筋	2-D6@120 (pw=0.27%)	—
梁	B×D	150×200	200×500 (上部スタブ内300に埋込)
	主筋	4-D10 (pt=0.54%)	
	あばら筋	2-D6@100 (pw=0.42%)	
	壁厚	80	
壁	縦筋	D6@100 (ps=0.4%)	2-D6@100 (ps=0.8%) (上部400mm) D6@100 (ps=0.4%)
	横筋	D6@100 (ps=0.4%)	

表-2 コンクリートの材料特性

	部位	σ_B	ε	E_c	ν	σ_t
試験体 A	1層壁部	26.4	1770	24.4	0.19	2.62
	2層壁部	30.0	1861	25.4	0.19	2.69
	基礎スタブ	28.4	—	—	—	2.44
	上部スタブ	29.3	—	—	—	2.28
試験体 B	1層壁部	25.2	1811	24.8	0.18	2.47
	2層壁部	29.6	1828	26.2	0.19	2.48
	基礎スタブ	26.4	—	—	—	2.36
	上部スタブ	29.0	—	—	—	2.46

σ_B : 圧縮強度 (N/mm²)、 ε : 圧縮強度時歪 (μ)、
 E_c : $\sigma_B/3$ 割線剛性 (kN/mm²)、 ν : ポアソン比、
 σ_t : 引張強度 (N/mm²)

表-3 鉄筋の材料特性

種別・使用部位	σ_y	ε_y	E_s	σ_t	ε_u
D6 (SD295A) 壁筋・柱・梁横補強筋	377	1952	196	493	29.4
D10 (SD295A) 梁主筋	366	2018	181	503	28.0
D13 (SD390) 柱主筋	434	2538	186	605	22.8

σ_y : 降伏強度 (N/mm²)、 ε_y : 降伏歪 (μ)、
 E_s : ヤング係数 (kN/mm²)、 σ_t : 引張強さ (N/mm²)、
 破断ひずみ (%)

3. 耐震壁モデル

(1) モデル概要

本解析では、陳により提案された4節点アイソパラメトリック要素耐震壁モデル¹⁾を用いた。このモデルでは耐震壁を1つのパネル要素に、周辺部材を線部材要素として表現しており、材料特性に基づいて復元力を決定できる。RCパネル要素は分散ひび割れモデルを採用しているため、構成則は要素内の平均応力と平均ひずみとの関係で与えられ、鉄筋は

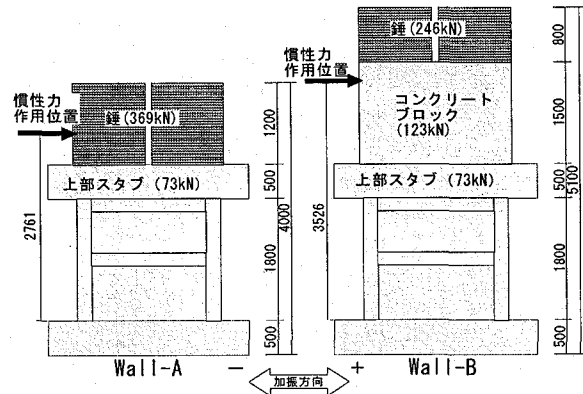


図-2 試験体設置概要図

パネル要素に一樣に分布し、コンクリートのひずみと等しいと仮定されている。コンクリートのひび割れモデルは回転ひび割れモデルとしている。回転ひび割れモデルは、固定ひび割れモデルにおけるせん断伝達モデルを使わないことやパラメータを少なくできるなどプログラム上の簡便性に関する利点がある。しかし、耐震壁への導入、繰り返し応力下での適用例が少なく、さらなる検証が必要である^{例え4),5)}。

(2) RCパネル要素の構成則

RCパネル要素はコンクリート要素と鉄筋要素の重ね合わせとして表現され、応力とひずみの関係は式(1)のようになる。

$$\{\sigma\} = \{[Tc]T[Dc][Tc] + [Ts]T[Ds][Ts]\} \{\varepsilon\} \\ = [D] \{\varepsilon\} \quad (1)$$

ここで

$\{\sigma\}$: 鉄筋コンクリート要素の平均応力
 $\{\varepsilon\}$: 鉄筋コンクリート要素の平均ひずみ
 $[Dc]$: コンクリートの主方向の剛性マトリックス
 $[Ds]$: 鉄筋の配筋方向の剛性マトリックス
 $[Tc]$: コンクリートの座標変換マトリックス
 $[Ts]$: 鉄筋の座標変換マトリックス

(3) コンクリートの構成則

ひび割れ前のコンクリートの構成則は、平面応力状態での応力とひずみの関係から式(2)で表せる。ひび割れが発生したコンクリートの構成則については、ひび割れがコンクリートの主引張ひずみ直交方向に一致し、主引張ひずみ方向が変化した場合にはひび割れ方向を主引張ひずみ直交方向に回転させ、応力とひずみの主軸が常に一致する（共軸性）との仮定の下、式(3)で表せる。

・ ひび割れ前

$$[D_c] = \frac{E_c}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ \text{sym} & & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

・ ひび割れ発生後

$$[D_c] = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ \text{sym} & & G \end{bmatrix} \quad (3)$$

E_c : コンクリートのひび割れ前の弾性係数

E_1, E_2 : 第1, 第2主応力方向の弾性係数

ν : ポアソン比

G : せん断弾性係数

ここで、せん断弾性係数 G は応力とひずみの共軸性によりモールの応力円、ひずみ円から式(4)より求めることができる。

$$G = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \quad (4)$$

σ_1, σ_2 : ひび割れたコンクリートの主応力

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: ひび割れたコンクリートの主ひずみ

(4) 鉄筋の構成則

鉄筋は、軸方向剛性のみ考慮することとし、式(5)に示す。

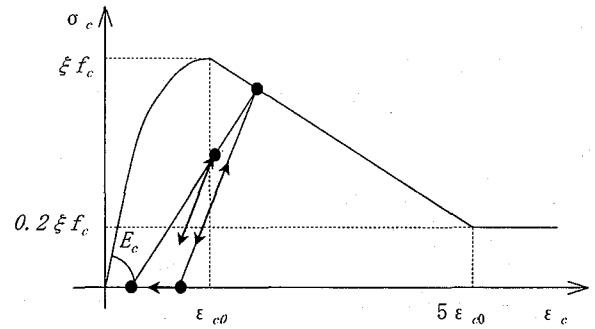
$$[D_s] = \begin{bmatrix} \rho_{sx} E_{sx} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{sy} E_{sy} & 0 \\ \text{sym} & & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ρ_{sx}, ρ_{sy} : x, y 方向の配筋率

E_{sx}, E_{sy} : x, y 方向鉄筋の弾性係数

(5) 材料モデル

パネル要素のコンクリートの圧縮モデルは、圧縮強度に達するまではVecchio, Collinsにより提案された直交する引張ひずみによる圧縮強低減係数を採用し⁶⁾、ひずみ軟化域は直線とした（図3）。引張モデル



$$\sigma_c = \zeta f_c \left\{ 2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right\} \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0}$$

$$\sigma_c = \zeta f_c \left\{ 1.2 - 0.2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right\} \quad \varepsilon_{c0} < \varepsilon_c \leq 5\varepsilon_{c0}$$

$$\sigma_c = 0.2\zeta f_c \quad 5\varepsilon_{c0} < \varepsilon_c$$

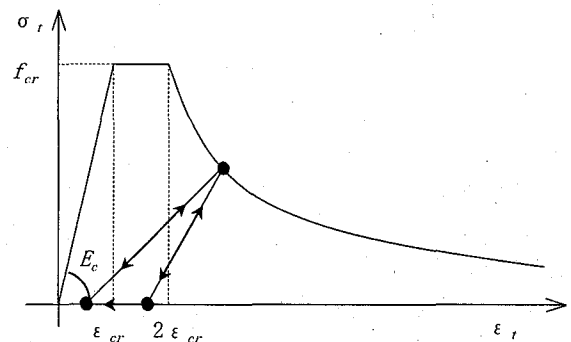
f_c, ε_{c0} : コンクリートのシリンダ強度とそれに対応するひずみ

ζ : 直交方向の引張ひずみによるコンクリートシリンダ強度 f_c の低減係数

$$\zeta = \frac{1.0}{0.8 - 0.34 \varepsilon_t / \varepsilon_{c0}}$$

ε_t : 直交方向の引張ひずみ

図-3 コンクリート圧縮モデル



$$\sigma_t = E_c \varepsilon_t \quad \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr}$$

$$\sigma_t = f_{cr} \quad \varepsilon_{cr} < \varepsilon_t \leq 2\varepsilon_{cr}$$

$$\sigma_t = f_{cr} \left(\frac{2\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t} \right)^c \quad \varepsilon_t \leq 2\varepsilon_{cr} < \varepsilon_t$$

E_c : コンクリートの初期弾性係数 $E_c = 2 f_c / \varepsilon_{c0}$

c : 鉄筋による指数、溶接鉄筋 $c=0.2$, 異形鉄筋 $c=0.4$, ここでは、を採用する $c=0.4$

f_{cr}, ε_{cr} : コンクリートの引張強度とそれに対応するひずみ

図-4 コンクリートの引張モデル

ルは、岡村・前川によるモデル⁷⁾を用いる（図4）。鉄筋に関しては、バイリニアモデルとしている。

4. 解析方法

対象試験体の解析モデルを図5に示すように3節で示したパネル要素と柱、梁部材で構成されている。柱は、軸方向の剛性のみを考慮し非線形ばねモデルを用い、梁の曲げは剛とし軸方向は線形ばねモデルを用いる。載荷方法は、慣性力作用位置に増分変位を与える方法とした。すなわち、両試験体の違いは、このときの載荷位置によって表現されることになる。また、剛性変化による不釣合力は、次のステップで解除する。

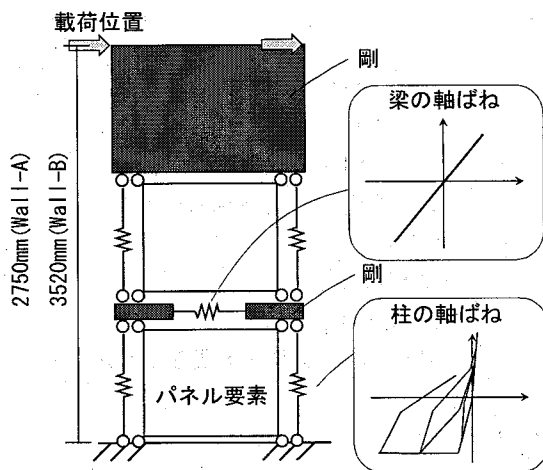


図-5 解析モデル

5. 解析結果

(1) 解析結果の概要

図-6に両試験体の水平力 - 耐震壁上部の変位関係を示す。Wall-A、Wall-Bともに実験値と解析値は、初期剛性、降伏点と包絡線に関しては概ね良い対応を示す結果となった。また、最大耐力については実験値が解析値を2割ほど上回っているところがみられる。これは、柱主筋、壁筋のひずみ速度による強度上昇が原因の1つと考えられる²⁾。

(2) 終局変形角

図-7に水平力-変形角関係の包絡線を示す。また、最大耐力が80%に低下したときの変形角（終局変形角）を解析結果と実験結果のそれぞれについて示した。

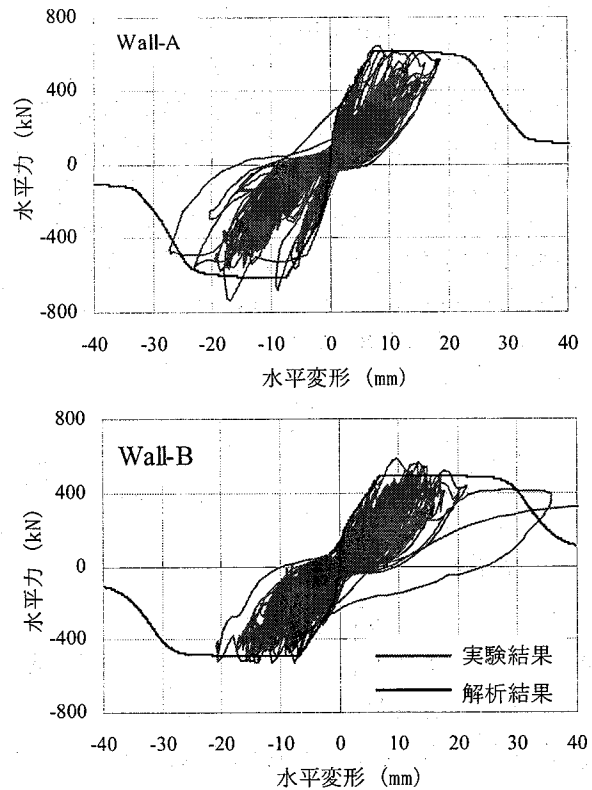


図-6 水平力-水平変位関係（単調載荷）

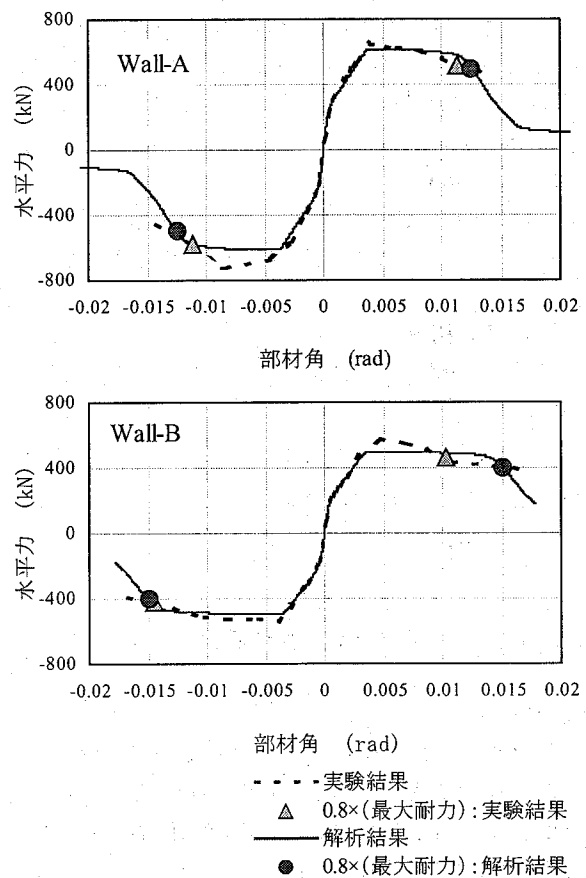


図-7 水平力-部材角の包絡線

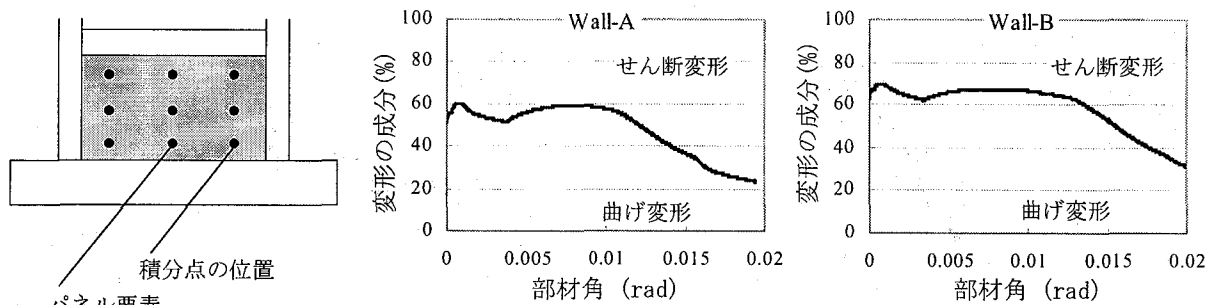


図-8 耐震壁上部の水平変形成分

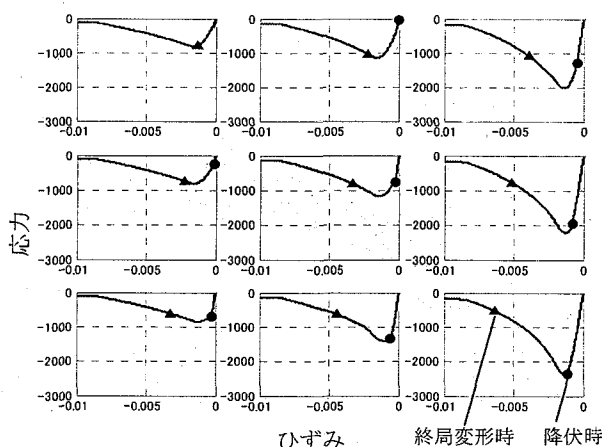


図-9 コンクリートの主方向応力-ひずみ関係
(Wall-A、1層)

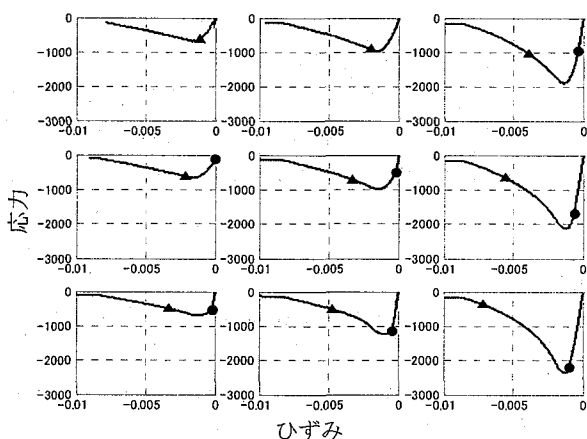


図-9 コンクリートの主方向応力-ひずみ関係
(Wall-B、1層)

終局変形角を比較すると、Wall-Aにおいては解析結果が若干過大評価となっているものの良い対応を示している。Wall-Bでは、正方向で解析値が 15×10^{-3} (rad) と実験値の 10×10^{-3} (rad) を大きく上回る結果となったが、負方向ではほぼ一致する結果となった。

(3) 曲げ変形とせん断変形

図-8は横軸に耐震壁上部の水平変形をとり縦軸にその曲げ変形とせん断変形の成分の割合を示したも

のである。曲げ変形は耐震壁の2階床位置および3階床位置の回転角を用いて算定し、せん断変形は全体変形から曲げ変形を差し引いて求めた。載荷開始から、曲げ変形が増加し、ひび割れ発生付近で一旦減少する。その後、降伏点（柱主筋の降伏時）から再び増加するが、終局変形に近づくにつれてせん断変形が卓越する傾向が両試験体において確認できる。実験において柱主筋の降伏後せん断変形成分が増加する現象がみられ^{3),8)}、これはひび割れ界面でのスライディング変形が原因の1つであるが、間接的に表現できているといえる。また、Wall-Bが全体をとおして曲げ成分がWall-Aに比べて大きく両試験体の差異が確認できる。

(4) RCパネル要素の応力状態

図-9、図-10に耐震壁Wall-A、Wall-Bそれぞれの1層目のパネル要素の積分点における主方向（圧縮側）のコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。

応力-ひずみ関係の経路全体をみると載荷により耐震壁の引張側にあたる方は、早い段階でひび割れが発生するために圧縮強度が低減されており、圧縮側に比べて1/2ほどになっている。また、Wall-AとWall-Bでは、顕著な違いはみられない。

次に降伏時の応力状態（グラフ上の●印）に着目してみる。両試験体とも圧縮側の脚部でコンクリートの圧縮強度に達しており、定性的に同じ状態となっている。

最後に終局時の応力状態（グラフ上の▲印）をみる。コンクリートは全体的に軟化域に入っており、圧壊により耐力低下が起こったといえる。しかしながら、ここでも2つの試験体の明確な挙動の違いはみられなかった。

(5) 履歴特性

同様の解析モデルを用いて正負繰り返し載荷による非線形解析を行った。図-11に耐震壁が降伏するまでの履歴と降伏以降の水平力-水平変位関係を実

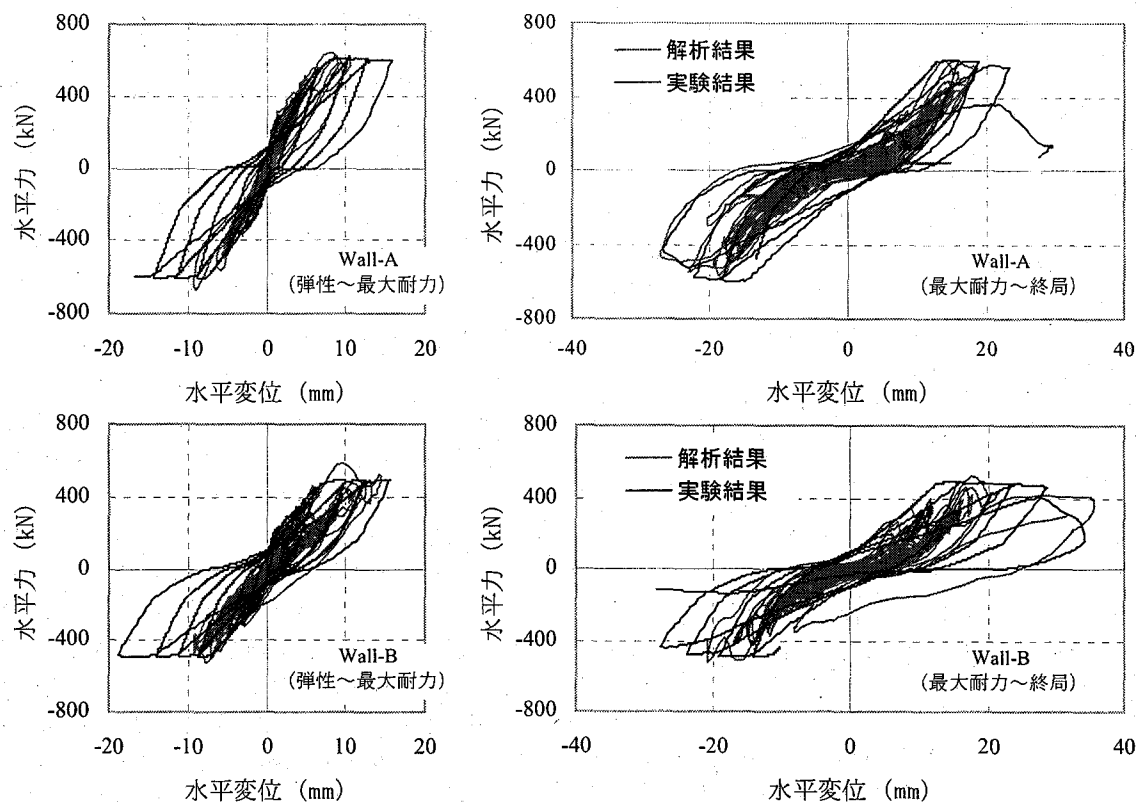


図-11 水平力-水平変位関係（正負繰返し載荷）

験結果と合わせてそれぞれ示す。

降伏までは除荷剛性是对应してるが、低応力下では、残留変位の小さい原点を指向する挙動が十分に表現できなかった。

降伏後の挙動をみると再載荷時にやはり低応力下でのスリップ現象、ひび割れが閉じたことによる剛性硬化現象を模擬するには至らなかった。しかし、除荷剛性、残留変位に関してみると概ね良い対応を示した。今後、地震応答解析を行う上で、履歴面積、内部履歴における挙動は重要になってくるので、さらに検討が必要である。

6. まとめ

4節点アイソパラメトリック要素耐震壁モデルを用いて鉄筋コンクリート造耐震壁の二次元非線形解析を行い、実験結果との比較検討を行った。それにより得られた知見を以下に示す。

本モデルにおいて2体の耐震壁を材料特性、材料挙動レベルの視点から検討したものの、両試験体の間で明確な違いは得られなかった。しかし、構造部材レベルでみると水平力-水平変形の包絡線は、耐

力低下の前まで良い対応を示した。

今後の課題として、履歴特性、耐力劣化域での精度に関して検討および解析モデルの改良、さらに地震応答解析に進めていくことが挙げられる。

参考文献

- 1) 陳少華, 壁谷澤寿海: 非線形解析における鉄筋コンクリート耐震壁のモデル, コンクリート工学年次論文集 Vol. 21, No. 3, pp. 763-768, 1999. 6
- 2) 松井智哉ほか: 鉄筋コンクリート造耐震壁の動的実験, 構造工学論文集, 2003. 4
- 3) 松井智哉, 秋田知芳, 壁谷澤寿海, 加藤敦: 鉄筋コンクリート造耐震壁の動的実験, コンクリート工学年次論文集 Vol. 25, 2003. 7
- 4) 山谷敦, 中谷光, 檜貝勇: 回転ひび割れモデルによる RC 梁のせん断挙動解析, 土木学会論文集, No. 620, Vol. 43, pp187-199, 1999. 5
- 5) 小泉貴人, 白井伸明, 森泉和人, 水井啓介: 面内繰返し応力を受ける RC 要素の構成則 (その 2) 提案モデルの検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, C-2, pp498-499, 1996. 9
- 6) Vecchio, F. and Collins, M. P.: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol. 83, pp. 219-231, 1986
- 7) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991
- 8) 後藤康明, 平吹雅弘, 城攻, 柴田拓二: 鉄筋コンクリート造連層耐震壁の変形挙動 (その 3 復元力特性, 変形性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp577-578, 1990. 101) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1997.