

正負繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート耐震壁のFEM解析

大久保 雅 章 長 沼 一 洋

Analyses of Reinforced Concrete Shear Walls Subjected to Reversed Cyclic Loads

Masaaki Ohkubo Kazuhiro Naganuma

Abstract

A nonlinear finite element method has been developed for analyzing RC walls under cyclic loading. There are some difficulties in analyzing RC walls subjected to reversed cyclic loads. The stress-strain relationship of concrete under cyclic stresses and shear stress - shear strain relationship along cracked direction are modeled on the basis of previous experimental results. Simulation analyses are performed for various types of RC panel specimens and RC shear wall specimens subjected to reversed cyclic loads. The obtained analytical hysteresis loops, ultimate strengths, failure modes and cracking patterns correspond closely with the experimental results.

概 要

これまで実施が困難であった、繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート（RC）部材を対象とした有限要素法（FEM）による解析手法の開発を行った。繰返し応力下における、コンクリートの履歴特性・ひび割れ面のせん断伝達履歴特性等を詳細にモデル化した。開発した繰返し応力下の材料構成則を用いて、既往の静的正負繰返し載荷実験（RC平板およびRC耐震壁）を対象としたシミュレーション解析を実施し、適応性の検討を行った。その結果、試験体形状・材料特性・破壊モード等の異なるどの試験体においても、良好に実験結果をシミュレートできることを確認した。

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物を対象として、有限要素法（FEM）による2次元応力場の解析を行う場合、静的な一方単調載荷で行うのが一般的である。近年数多くの解析的研究が行われており、その解析の精度はかなり向上してきている。しかし、実際の地震力を想定した正負繰返し荷重を受ける場合の解析については、未だ解析例も極めて少なく、また、コンクリートの履歴特性など不明な点も数多く残されているのが現状である。

そこで本研究では、主に鉄筋コンクリート壁構造部材を対象として、2次元FEMによる繰返し載荷での解析手法の開発を行うこととした。

2. コンクリートの履歴特性のモデル化

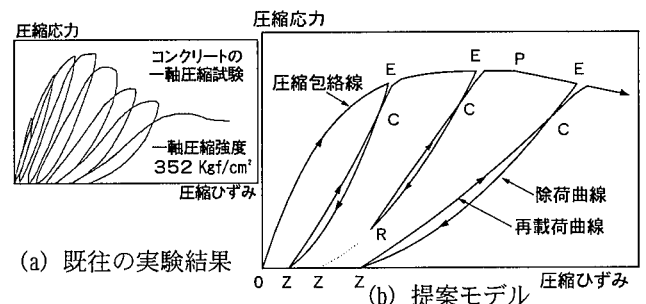
2.1 圧縮応力下の履歴特性モデル

圧縮包絡線からの除荷および再載荷曲線の実験結果の例をFig. 1(a)に示す。圧縮応力下の履歴特性は、既往の実験結果^{1)~3)}を参考に、Fig. 1(b)に示すようにモデル化する（主な記号は図中に表記）。ここで、図中C点の

応力 σ_c は次に示す Darwin等⁴⁾の提案に従う。符号は圧縮を負とする。

$$\sigma_c = 5/6 \sigma_E \quad [\varepsilon_E \geq \varepsilon_p] \quad \cdots (1)$$

$$\sigma_c = \min(2/3 \sigma_E, \sigma_E - 1/6 \sigma_p) \quad [\varepsilon_E < \varepsilon_p] \quad \cdots (2)$$



(a) 既往の実験結果

(b) 提案モデル

- P点 : 最大応力点 (ε_p, σ_p)
- E点 : 除荷開始点 (ε_E, σ_E)
- C点 : 除荷曲線と再載荷曲線の交点 (ε_c, σ_c)
- Z点 : 除荷後に応力が零となる点 ($\varepsilon_z, 0.0$)
- R点 : 再載荷開始点 (ε_r, σ_r)
- E~C間 : 直線 (剛性はE Z間割線剛性の α_1 倍)
- C~Z間 : 二次曲線 (C点で剛性連続)
- R~C間 : 二次曲線 (R点の剛性は除荷時の α_2 倍)
- C~包絡線 : 直線 (C点で剛性連続)
- Z~引張応力側 : ひび割れ発生まで直線

Fig. 1 圧縮側の履歴曲線のモデル化
Compressive Stress - Strain Relationship of Concrete

除荷後の残留ひずみ ε_z の算定式としては、次に示す Karsan 等⁹⁾の提案式がある。

$$\varepsilon_z = [0.145(\varepsilon_E/\varepsilon_p)^2 + 0.127(\varepsilon_E/\varepsilon_p)] \cdot \varepsilon_p \quad \cdots (3)$$

ここで、Karsan 等の提案式は、 ε_E が約 $4\varepsilon_p$ を越えて大きくなると、E Z間割線剛性 E_{Ez} が低下から増大に転じ、 $\varepsilon_E/\varepsilon_p$ の値がおよそ 6を越えると E_{Ez} が負になるなど不合理な点がある。そこで、 E_{Ez} が漸減するように、 $\varepsilon_E/\varepsilon_p \geq 4.0$ の場合は次の提案式を用いる。

$$\varepsilon_z = (\varepsilon_E/\varepsilon_p - 1.172) \cdot \varepsilon_p \quad \cdots (4)$$

除荷剛性を決める係数 α_1 は実験との対応性から、1.5 とする。ただし、Z点での剛性が零以下になる場合は α_1 を適宜小さくすることで回避する。再載荷剛性を決める α_2 は、R点がC点と包絡線の間にある場合は1.0とし、R点がZ点に一致する場合は、Z点の α_2 を α_{2z} とし、次式で算定する。

$$\alpha_{2z} = 2.0 \quad [\varepsilon_c/\varepsilon_p \leq 1.0] \quad \cdots (5)$$

$$\alpha_{2z} = 2.0 \cdot \varepsilon_c/\varepsilon_p \quad [\varepsilon_c/\varepsilon_p > 1.0] \quad \cdots (6)$$

R点がC~Z間の場合は α_2 の値を線形補完する。

すなわち、 α_2 はZ点の α_{2z} を用いて次式で算定する。

$$\alpha_2 = (\alpha_{2z} - 1.0) \cdot (\varepsilon_r - \varepsilon_c) / (\varepsilon_z - \varepsilon_c) + 1.0 \quad \cdots (7)$$

なお、R点からC点に向かう途中で再び除荷となる場合は、Fig. 2(a) に示すように、Z点に二次曲線に向かうものとし、Z点での剛性 E_z を最後に包絡線から除荷した時の E_z に一致させる。その後、再載荷となる場合は、その点をR点として、前述した方法でC点に向かう。以上のように、Z点とC点の間で除荷・再載荷を繰り返す場合は、Z点とC点を固定して扱う。ただし、C点と包絡線の間で除荷となる場合は、Fig. 2(b) に示すように、包絡線からの除荷曲線がその点を通るようにC点とZ点を再定義する。これらの方法を用いることにより、実験で観察されるようなある程度の応力振幅で除荷・再載荷を繰り返すような場合、ひずみが漸増する現象が再現できるモデルとなっている。

2.2 引張応力下の履歴特性モデル

ひび割れ発生後の軟化域包絡線からの除荷および再載荷曲線の実験結果の例⁵⁾をFig. 3(a)に示す。引張応力下の履歴特性は、既往の実験結果^{5)~6)}を参考に、Fig. 3(b)に示すようにモデル化する(主な記号は図中に表記)。

L点の応力 σ_l およびGH間割線剛性 E_{GH} は実験結果との対応性から、次式で仮定する。

$$\sigma_l = 0.9 \sigma_c \quad \cdots (8)$$

$$E_{GH} = 1.5 \varepsilon_T/\varepsilon_c \cdot E_0 \quad (E_0: \text{初期剛性}) \quad \cdots (9)$$

係数 α_3 、 α_4 は圧縮側と同様に、 $\alpha_3 = 1.5$ 、 α_4 はR点がL点と包絡線の間にあるときは1.0、R点がH点に一致する場合は2.0とする。R点がL~H間の場合は α_4 の値を線形補完し、次式で算定する。

$$\alpha_4 = (\varepsilon_r - \varepsilon_l) / (\varepsilon_H - \varepsilon_l) + 1.0 \quad \cdots (10)$$

H点とL点の間で除荷・再載荷を繰り返す場合は、圧縮側と同様にH点とL点を固定する。L点と包絡線の間で除荷となる場合も、圧縮側と同様に包絡線からの除荷曲線

がその点を通るようにL点とH点を再定義する。

2.3 引張~圧縮間の履歴特性モデル

ひび割れ発生後の引張~圧縮間の履歴特性が得られている実験結果は、現時点では限られている。それらの1つであるStevens等の実験結果⁷⁾の主方向の応力~ひずみ関係をFig. 4に示す。実験結果を参考に、引張側でひび割れ発生後に圧縮側へ移行する場合、および再び引張側に移行する場合をFig. 5に示すようにモデル化する(主な記号は図中に表記)。ここで、H~J間およびK~L間の対数曲線は次式で与える。

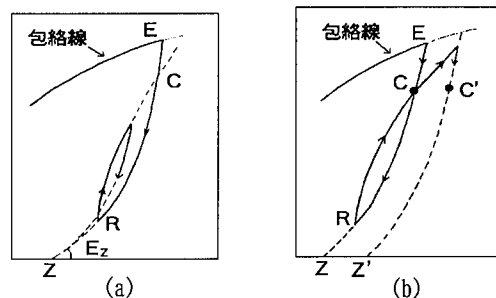
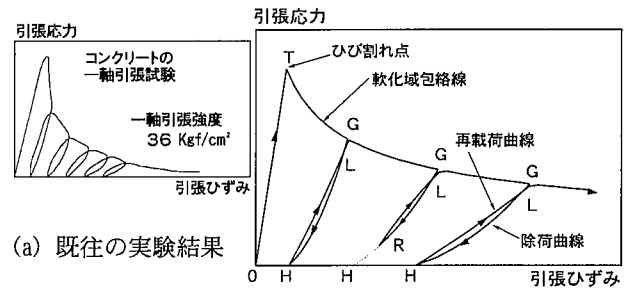


Fig. 2 除荷-再載荷-再除荷時のルール
Rule of Unloading - Reloading - Unloading



(a) 既往の実験結果 (b) 提案モデル

T点	: ひび割れ発生点 (ε_T, σ_T)
G点	: 除荷開始点 (ε_G, σ_G)
L点	: 除荷曲線と再載荷曲線の交点 (ε_L, σ_L)
H点	: 除荷後に応力が零となる点 ($\varepsilon_H, 0.0$)
R点	: 再載荷開始点 (ε_R, σ_R)
G~L間	: 直線 (剛性はGH間割線剛性の α_3 倍)
L~H間	: 二次曲線 (L点で剛性連続)
R~L間	: 二次曲線 (R点の剛性は除荷時の α_4 倍)
L~包絡線	: 直線 (L点で剛性連続)

Fig. 3 引張側の履歴曲線のモデル化
Tensile Stress - Strain Relationship of Concrete

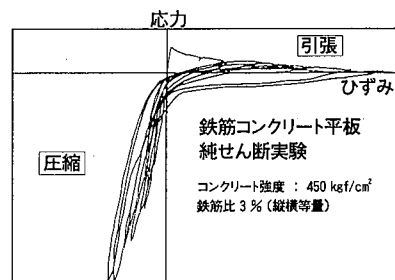


Fig. 4 SE9試験体の実験結果
Stress - Strain Relationship of Specimen SE9

$$\sigma = (\text{Log}_e (\varepsilon + a) + b) \cdot c \quad \dots\dots (11)$$

a, b, c : 係数 (2点通過と1点での剛性から決定)

J点およびK点の応力 σ_j および σ_k は次式で与える。

$$\sigma_j = \alpha_5 \cdot \sigma_T \quad \dots\dots (12)$$

$$\sigma_k = \alpha_6 \cdot \sigma_T \quad \dots\dots (13)$$

α_5 と α_6 を決定するための情報は現時点では不十分のため、暫定的に $\alpha_5 = -1.5$, $\alpha_6 = 0.5$ とする。

圧縮側から除荷した後にひび割れが生じる場合は、圧縮履歴の影響を考慮して、ひび割れ点の応力 (引張強度 σ_T) を次式で算定する。

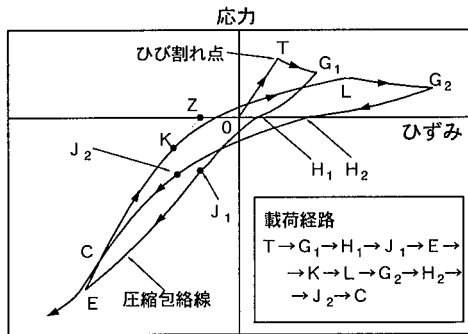
$$\sigma_T = \sigma_{T0} \cdot E_{Ez} / E_0 \quad \dots\dots (14)$$

σ_{T0} : 圧縮履歴を受けない場合の引張強度

E_{Ez} : E-Z間割線剛性

Fig. 6 に示すように、Z点からひび割れ発生まではZ点の剛性で直線とし、ひび割れ発生後はZ点を原点と考えて引張側の除荷・再載荷ルールを適用する。再び圧縮側に戻る場合は、前述したひび割れ後の圧縮側への移行ルールに従う。

本モデルでひずみの振幅を徐々に大きくした場合の引張～圧縮間の履歴特性をFig. 7に示す。Fig. 4の実験結果と履歴性状がほぼ対応している。



- ・圧縮側に初めて移行する場合
 - J点 : 引張除荷曲線から圧縮包絡線への移行点
 - K点 : 圧縮除荷曲線から引張再載荷曲線への移行点
 - H→J間 : 対数曲線 (J点で剛性連続)
 - C→K間 : 二次曲線 (K点はC→Zへの除荷曲線上)
 - K→L間 : 対数曲線 (K点で剛性連続)
- ・圧縮側に再度移行する場合
 - J点 : 引張除荷曲線から圧縮再載荷曲線への移行点
 - H→J間 : 対数曲線 (J点の剛性はE-Z間割線剛性)
 - J→C間 : 二次曲線 (J点での剛性連続)

Fig. 5 引張～圧縮間の履歴曲線 (1)
Hysteresis Loop of Concrete (After Cracking)

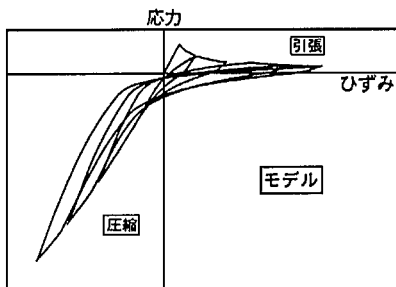


Fig. 7 本モデルによる引張～圧縮間の履歴特性
Hysteresis Loop Obtained from Proposed Model

2.4 ひび割れ方向のせん断伝達履歴特性モデル

ひび割れを分布ひび割れ (smeared crack) として表現する場合、ひび割れ面のせん断伝達特性は、ひび割れ方向のせん断応力～せん断ひずみ関係で表現される。既往のひび割れ幅を一定としたせん断伝達履歴特性の実験結果の例⁹⁾をFig. 8(a)に示す。既往の実験結果^{9~10)}に基づいて、ひび割れ方向のせん断応力～せん断ひずみ履歴特性を Fig. 8(b) に示すようにモデル化する (主な記号は図中に表記)。

F点のひずみ γ_F は実験結果を参考に次式で与える。

$$\gamma_F = 0.5 \gamma_D \quad \dots\dots (15)$$

除荷してF点通過後に再載荷した後に、R点とD点の間で除荷・再載荷を繰返す場合は、R点からD点に向かう曲線上を動くものとする。せん断ひずみの符号が正から負に変わる場合、負の領域に初めて移行する時は包絡線上に乗せ、それ以外の場合は、原点をR点として負側のD点に向かう再載荷曲線に乗せる。

本モデルでせん断ひずみを徐々に大きくした場合のせん断伝達履歴特性をFig. 8(c)に示す。この曲線の包絡線には既報¹¹⁾で提案したモデルを用いている。Fig. 8(a)の実験結果とほぼ対応する特性が再現されている。

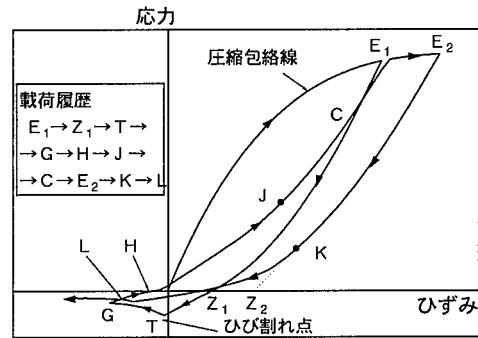
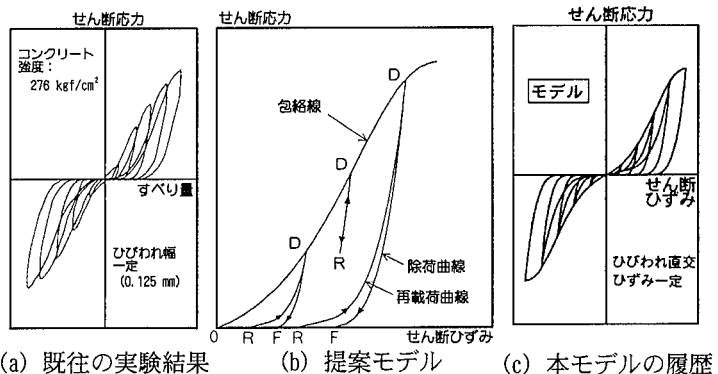


Fig. 6 引張～圧縮間の履歴曲線 (2)
Hysteresis Loop of Concrete (Compression→Tension)



- D点 : 包絡線からの除荷開始点 (γ_D, τ_D)
- F点 : 除荷後に応力が零となる点 ($\gamma_F, 0.0$)
- R点 : 再載荷開始点 (γ_R, τ_R)
- D～F間 : 4次曲線 ($\tau = a (\gamma - \gamma_F)^4$, : a は係数)
- F→原点 : 応力零を保持 ($\tau = 0.0$)
- R→D間 : 4次曲線 ($\tau = a (\gamma - \gamma_R)^4$, : a は係数)
(R点がD～F間の時は除荷曲線上に戻る)

Fig. 8 ひび割れ面のせん断伝達特性
Shear Transfer Characteristic along Cracked Direction

3. RC平板のせん断加力試験およびRC円筒のねじり試験のシミュレーション

3.1 解析対象試験体とモデル化方法

Table 1 に解析対象とした試験体の諸元を示す。繰返し載荷によるせん断加力を受けるRC平板試験体およびねじり加力を受けるRC円筒試験体の中から、コンクリート強度、鉄筋量、破壊モード等が偏らないように、また同一のシリーズに限定せず様々な研究機関で実験が行われた試験体を11体選定している。この中には、鉄筋が縦横方向で不等量に配筋されているため、解析上ひび割れ面のせん断伝達モデルを用いる必要があるStevens等のSE8試験体⁷⁾も含まれている。

Fig. 9 に試験体のモデル化方法の概念を示す。せん断加力を受けるRC平板試験体では、一様応力場が再現されていると考えられることから、1要素でモデル化し、所定のせん断力と軸力を載荷する。また、ねじり加力を受けるRC円筒試験体においても、端部の拘束による影響を除くとほぼ純せん断状態となると考えられる。そこで、端部の拘束による影響がほぼ無視できる試験体中腹部を対象として、RC平板試験体と同様に1要素でモデル化する。

コンクリートは4節点平面応力要素で表現し、鉄筋は縦横筋をそれぞれ一方剛性を有する等価な層に置換して、平面応力要素に重ね合わせる。ひび割れは要素内に一様なひび割れ状態を仮定する分布ひび割れモデルで表現する。

3.2 解析モデルと解析方法

コンクリートは直交異方性モデルとし、圧縮、引張、およびせん断伝達の基本的特性は既報^{11)~13)}の提案モデルを用いる。コンクリートの繰返し応力下の履歴特性とひび割れ方向のせん断伝達履歴特性には、今回開発したモデルを用いる。鉄筋の応力~ひずみ関係は、降伏後の剛性を弾性時の1/100倍に低下させたbilinearモデルで表現し、除荷剛性は弾性剛性として移動硬化則を用いる。

解析は接線剛性荷重増分法により、収束計算はNewton法により行う。

3.3 解析結果

3.3.1 コンクリートの応力~ひずみ履歴関係

Fig. 10 (a), (b)に Stevens等のSE9試験体⁷⁾、および大森等のSR17試験体¹⁴⁾の純せん断加力実験と解析から得られたコンクリートの応力~ひずみ関係をそれぞれ示す。ひび割れの発生から大ひずみレベルに至るまで、解析で得られた履歴ループは連続性を保ちながら滑らかなラインをたどっており、実験結果と比較的良く対応している。また、SE9試験体において同じ応力レベルでの繰返し加力を行った際、ひずみが漸増する傾向も再現されている。しかし、大ひずみレベルでの履歴面積が、実験に比べて解析ではかなり小さくなるなど、履歴曲線の形状に関して検討の余地がある。

3.3.2 せん断応力~せん断変形角関係(純せん断加力)

Fig. 11(a)~(e)にRC平板の純せん断加力実験^{7), 14), 16)}と解析から得られたせん断応力~せん断変形角関係の比較を、また、Fig. 12(a)~(c)にRC円筒のねじり加力実験^{17), 18)}と解析から得られたせん断応力~せん断変形角関係の比較をそれぞれ示す。いずれの試験体においても、せん断変形角の小さなレベルでは、除荷・再載荷曲線の形状や、初期剛性からせん断ひび割れ発生後の2次勾配への移行など、解析より得られた履歴ループは実験とほぼ対応している。また、せん断変形角の大きなレベルにおいても、除荷から逆方向載荷に切り替わるあたりでの性状は比較的良く対応しており、鉄筋比の小さいRC050-16, SR10試験体で実験時に観察された鉄筋降伏以

Table 1 解析対象試験体の諸元
Parameters and Material Properties of Specimens

試験体名	形状	コンクリート強度 kgf/cm ²	鉄筋比 %	降伏点 kgf/cm ²	応力比 V : f _{nx} : f _{ny} (引張 : +, 圧縮 : -)	実験の 破壊モード	文献
SE8	平板	377	不等量 X : 2.94 Y : 0.98	5017 4884	-	SY	7)
SE9		451	等量 2.94	4303		CF	
SR10		373	等量 1.02	4058		SY	14)
SR17		293	等量 1.70			CF	
SR20		318	等量 2.04			CF	
TR1		219	等量 1.02			1 : + 0.5 : + 0.5	
CR5		233	等量 1.02	1 : - 0.5 : - 0.5		CF	
RC050-16		397	等量 1.30	3590			SY
CT1	円筒	447	等量 2.07	3840	-	SY	17)
SP-1.0-0		208	等量 1.01	4530		SY	18)
SP-1.7-0		213	等量 1.75			CF	

*) V : せん断応力 f_{nx}:X方向鉛直応力 f_{ny}:Y方向鉛直応力 ...文献15)
SY:鉄筋降伏型 CF:コンクリート破壊型

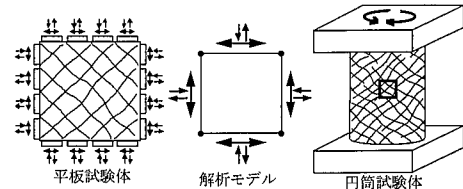


Fig. 9 試験体のモデル化方法
Idealization of Specimens

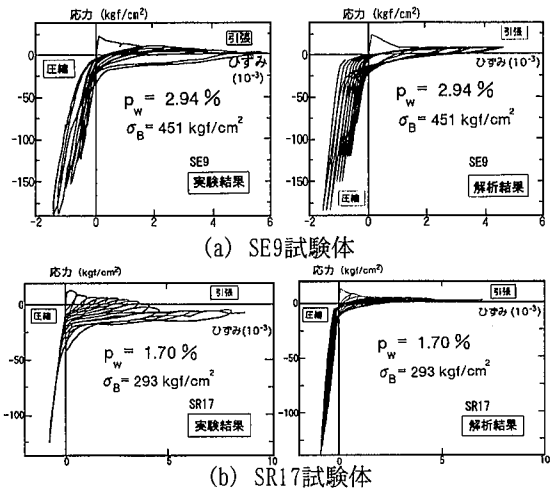
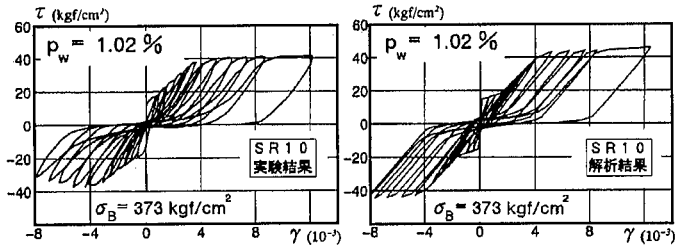
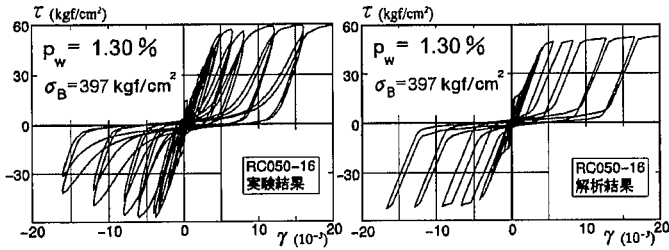


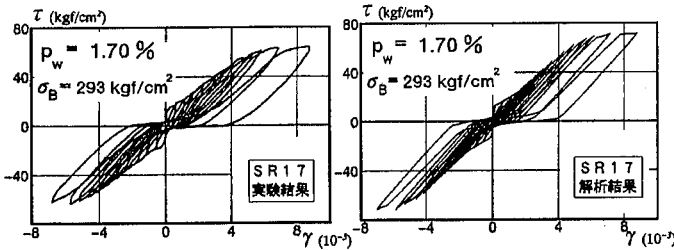
Fig. 10 コンクリートの応力~ひずみ関係の比較
Comparisons of Stress - Strain Relationships of Concrete



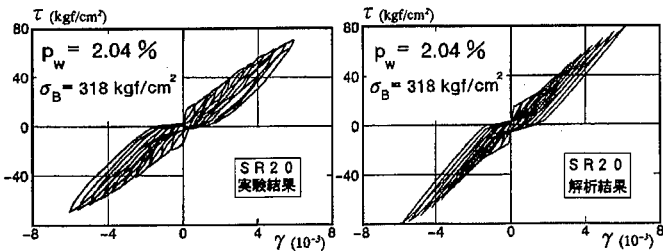
(a) SR10試験体



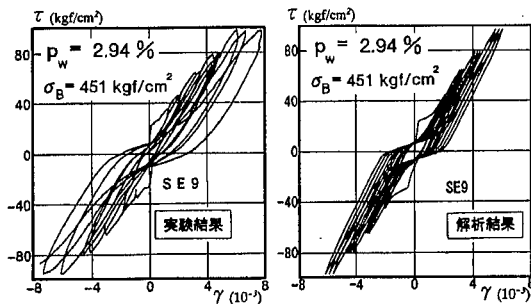
(b) RC050-16試験体



(c) SR17試験体

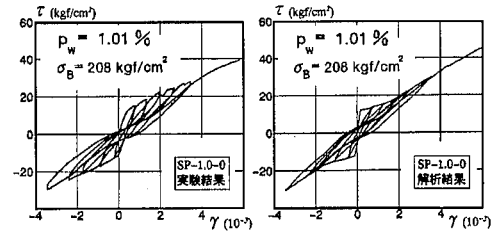


(d) SR20試験体

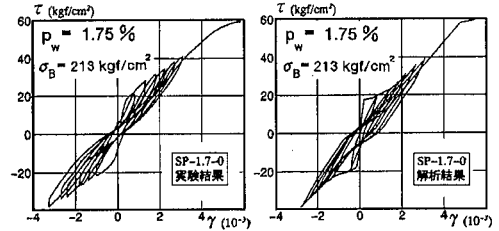


(e) SE9試験体

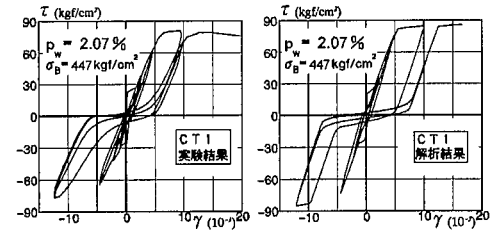
Fig. 11 せん断応力～せん断変形角関係の比較 (平板)
Comparisons of Shear Stress - Rotation Angle Relationships (RC Panels)



(a) SP-1.0-0試験体

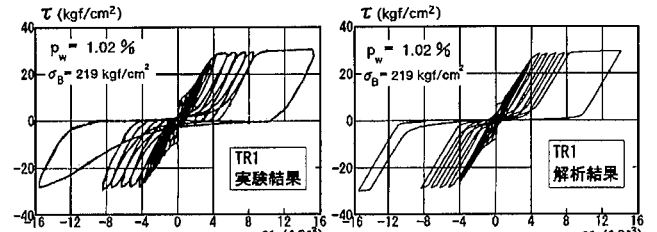


(b) SP-1.7-0試験体

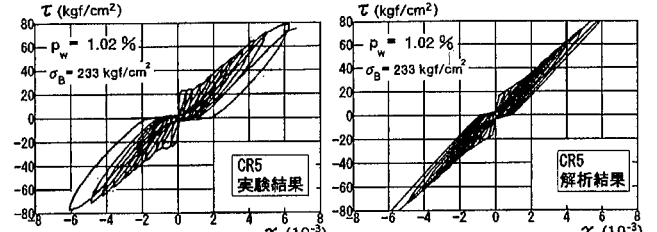


(c) CT1試験体

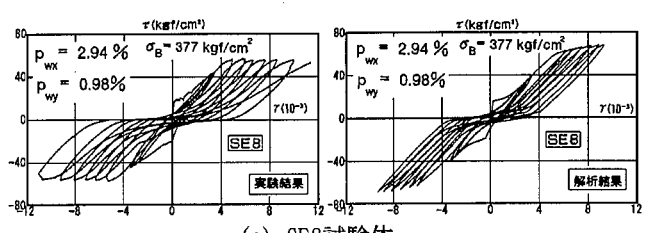
Fig. 12 せん断応力～せん断変形角関係の比較 (円筒)
Comparisons of Shear Stress - Rotation Angle Relationships (RC Cylinders)



(a) TR1試験体



(b) CR5試験体



(c) SE8試験体

Fig. 13 せん断応力～せん断変形角関係の比較 (複合加力)
Comparisons of Shear Stress - Rotation Angle Relationships (Combined Loading)

降の荷重切り替わり点近傍でのスリップ現象も、解析ではほぼ再現されている。

鉄筋降伏型のRC050-16, SR10試験体では、鉄筋降伏後の履歴ループの形状、特に昇り勾配に差が見られる。実験では再載荷時の剛性の復活が緩やかであるに対して、解析では急激に生じている。また解析結果において、正負の載荷方向により大変形レベルでの履歴ループの形状に差が見られ、負方向載荷の方が正方向載荷よりも履歴面積が小さくなる傾向がある。鉄筋降伏後の履歴ループの形状は、繰返し載荷時のコンクリートの圧縮塑性ひずみが小さいことや、鉄筋をbilinearモデルで表現していることなどにより、実験との対応性に差が現れたものと考えられる。また解析結果の非対称性については、正側でひび割れや鉄筋の降伏が先に生じていることに起因すると考えられ、今後検討する必要がある。

一方、SE9・SR20試験体などのコンクリート破壊型の試験体においても、せん断変形角レベルが大きくなるにつれ、実験結果と解析結果の履歴ループの形状に差が生じており、実験に比べ解析の方が履歴面積が小さくなる傾向が見られる。しかし、鉄筋降伏型の試験体の解析で見られたような、正負の載荷方向による履歴ループの形状の非対称性や履歴面積の違いは、それほど顕著ではない。

3.3.3 せん断応力～せん断変形角関係（複合加力）

Fig. 13(a), (b)に、複合加力で行われた栗原等のTR1・CR5試験体のせん断加力実験¹⁵⁾と解析より得られたせん断応力～せん断変形角関係をそれぞれ示す。TR1試験体はせん断力に加え2方向にせん断力の半分の等引張力を、CR5試験体は同様に圧縮力を載荷して実験が行われている。また、Fig. 13(c)にStevens等のSE8試験体（縦横不等量配筋）の純せん断加力実験⁷⁾と、解析より得ら

れたせん断応力～せん断変形角関係をそれぞれ示す。どの試験体においても、解析結果は実験の履歴ループ形状の特徴を、比較的良くとらえている。縦横不等量で配筋されたSE8試験体は、ひび割れ面でのせん断伝達モデルの影響を受ける試験体であり、モデルの有効性を確認することができる。

4. 耐震壁の水平加力試験のシミュレーション

4.1 解析対象とモデル化方法

Table 2に解析対象とした試験体の諸元を、Fig. 14に形状の概念を示す。解析対象には、形状、コンクリート強度、鉄筋量等の諸条件ができるだけ偏らないように、様々な研究機関で実験が行われた試験体を6体^{19)~23)}選定した。代表的な解析対象試験体の形状、および配筋をFig. 15に示す。

試験体の形状と加力条件から、I型断面試験体は2次元の平面応力要素を用いてモデル化し、箱型およびH型断面試験体は、平板シェル要素による3次元モデルとする。要素分割は、I型断面試験体の壁板部、H型・箱型試験体のウェブ壁を、50要素前後で正方形に近い要素形状で分割し、その他の部位も同程度の大きさの要素で分割する。基礎スラブは試験体の耐力に及ぼす影響が少ないものと考えられることから、それをモデル化せず、スラブ上面で完全固定とする。鉄筋は一方方向剛性を有する等価な層に置換し、平面応力要素、および平板シェル要素に重ね合わせる。曲げを受ける箱型、およびH型断面試験体のフランジ壁は、積層平板シェル要素を10層に分割し、断面内の対応する位置に鉄筋層を重ね合わせる。Fig. 16に代表的な試験体の解析モデルを示す。

Table 2 解析対象試験体の諸元
Parameters and Material Properties of
RC Wall Specimens

試験体名	断面	ワゴン比	コンクリート強度 kgf/cm ²	壁板		柱		柱の軸心力 kgf/cm ²	文献
				$\ell \times t$ cm	鉄筋比 % 降伏点 kgf/cm ²	B × D cm	鉄筋比 %		
P4012	I型	0.55	297	160×10	0.85 3620	20×40	1.91	30.0	20)
試験体名	断面	ワゴン比	コンクリート強度 kgf/cm ²	ウェブ壁		フランジ壁		壁全断面の軸心力 kgf/cm ²	文献
				$\ell_w \times t_w$ cm	鉄筋比 % 降伏点 kgf/cm ²	$\ell_f \times t_f$ cm	鉄筋比 %		
B1-4	箱型	0.8	305	150×8	1.20 3840	150×8	1.20	0.0	21)
RB-00S	H型	0.8	451	300×7.5	1.20 4303	300×7.5	1.20	4.7	22)
24M6-40		0.6	418		0.57		0.66		23)
36M8-40		0.8	396	200×15	0.85 4300	120×15	0.85	20.0	23)
36M12-40		1.2	351		0.85		5.16		23)

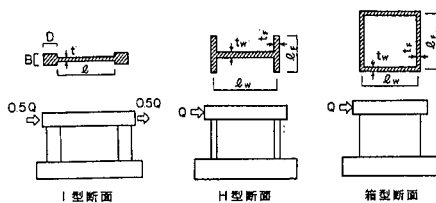


Fig. 14 試験体形状の概念
Configurations of RC Wall Specimens

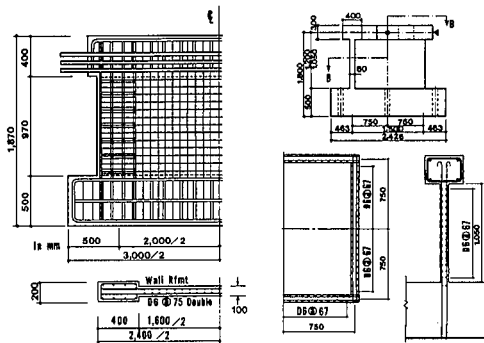


Fig. 15 I型および箱型試験体の形状と配筋
Configurations and Bar Arrangements of Specimens

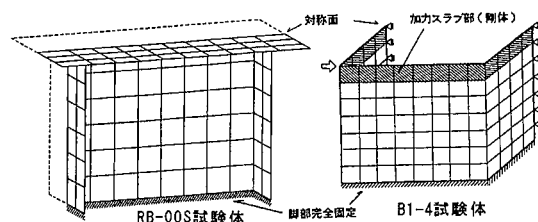


Fig. 16 RB-00S試験体とB1-4試験体のメッシュ分割
Finite Element Meshes of Specimen RB-00S and
Specimen B1-4

4.2 解析結果

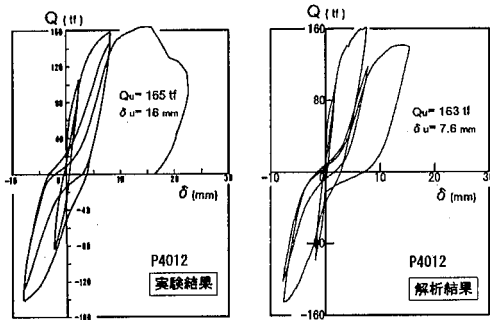
4.2.1 荷重～変位 (変形角) 関係 Fig. 17(a)～(f)に、それぞれの実験および解析から得られた荷重～変位関係を示す。形状、シアスパン比、材料特性、破壊モード等の異なる何れの試験体においても、履歴ループの全体的な形状は、実験と解析で良く対応している。特に、せん断ひび割れ発生から最大耐力近傍に至るまでは、包絡線の形状だけでなく、除荷・再載荷時の内部履歴の性状も実験の特徴を良くとらえており、解析による実験結果の再現性は良好である。また、加力方向による差もほとんど見られず、正側と負側の履歴ループは、ほぼ対称形となっている。

ただし、最大耐力は全体として良く一致しているものの、試験体によっては、耐力時の変形や耐力以降の挙動に差が見られるものもある。特にP4012、24M6-40試験体など、シアスパン比が小さくせん断が卓越し、局部的な圧縮破壊やせん断すべり破壊といった脆性的な破壊モードを示す場合には、この差が大きい。本解析では、試験

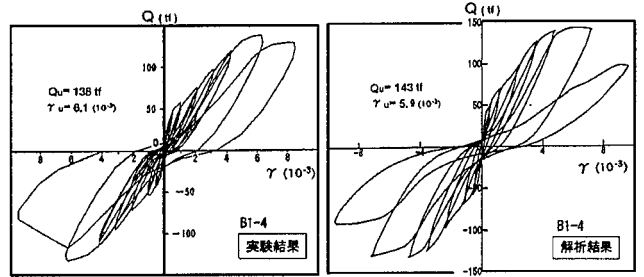
体脚部での鉄筋の抜け出しを考慮しておらず、変形状態に差が見られる場合の原因の一つと考えられる。また、ポストピーク後の挙動に関しては、材料レベルでまだ不明な点も多く、今後研究が必要と思われる。

4.2.2 ひび割れパターン Fig. 18(a)～(c)に実験および解析から得られた、形状の異なる試験体のひび割れ状況を示す。実験は最終破壊状況を、解析は最大耐力近傍での状況を示す。なお本解析では、正負繰返しによる加力を行っていることから、第1ひび割れとは異なる方向に第2ひび割れの発生を許容している。実線は現在開いているひび割れを、破線は閉じているひび割れを、またハッチ部分は圧縮ひずみ軟化状態を表している。

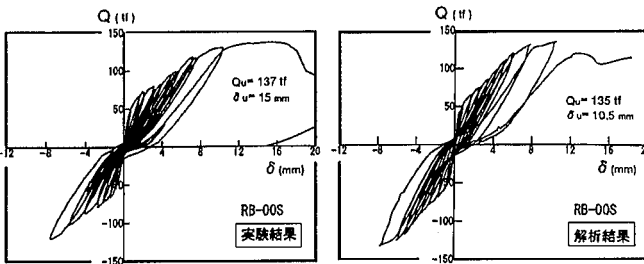
形状、破壊モード等の異なるどの試験体においても、ひび割れの角度や、柱端部、壁体下部での破壊位置はほぼ実験と対応している。正側、負側のひび割れは、必ずしも直交しておらず、また、ひび割れパターンはほぼ対称となっており、前項で述べた履歴ループの対称性に寄与していることが推察される。



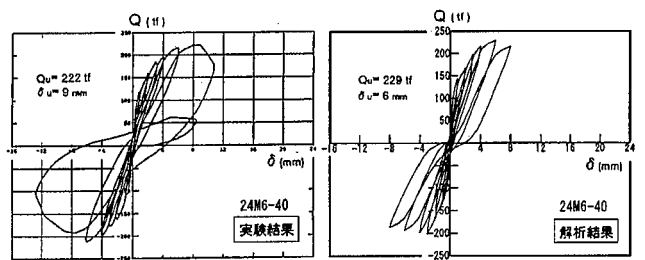
(a) P4012試験体 (I型)



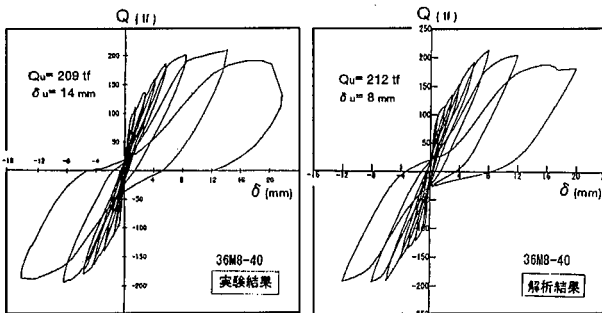
(b) B1-4試験体 (箱型)



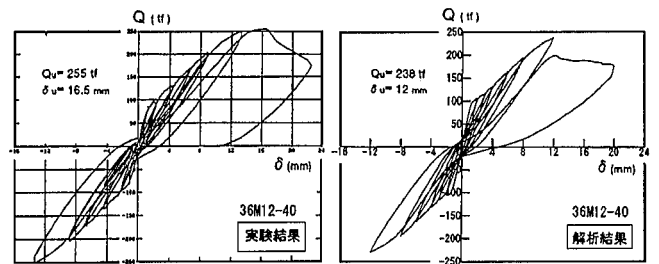
(c) RB-00S試験体 (H型)



(d) 24M6-40試験体 (H型)



(e) 36M8-40試験体 (H型)



(f) 36M12-40試験体 (H型)

Fig. 17 荷重～変位関係の比較
Comparisons of Load - Displacement Relationships

5. むすび

繰返し荷重を受けるRC部材を対象としたFEMによる解析手法を開発することを目的として、繰返し応力下におけるコンクリートの履歴特性を詳細にモデル化した。開発した繰返し応力下の材料構成則を用いて、既往の静的正負繰返し載荷実験（RC平板およびRC耐震壁）を対象としたシミュレーション解析を実施した結果、試験体形状・材料特性・破壊モード等の異なるどの試験体においても、良好に実験結果を再現できることを確認した。今後、さらに検証解析を重ねて、提案モデルの適用性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Karsan, I. D. and Jirsa, J. O. : Behavior of Concrete Under Compressive Loadings, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 95, No. ST12, p. 2543~2563, Dec., (1969)
- 2) 小坂義夫, 他 : 高圧縮ひずみ領域におけるコンクリートの履歴特性, 建築学会大会梗概集, 構造系, p. 449~450, (1978. 9)
- 3) Sinha, B. P., Gerstle, K. H. and Tulin, L. G. : Stress-Strain Relations for Concrete Under Cyclic Loadings, ACI Journal, Vol. 61, No. 2, p. 195~211, Feb., (1964)
- 4) Darwin, D. and Pecknold, D. A. : Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete, Civil Engineering Studies, SRS No. 409, Univ. of Illinois, July, (1974)
- 5) Gopalaratnan, V. S. and Shah, S. P. : Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, ACI Structural Division, ASCE, Vol. 15, No. 1, p. 166~182, Jan., (1989)
- 6) Yankelevsky, D. Z. and Reinhardt, H. W. : Uniaxial Behavior of Concrete in Cyclic Tension, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 15, No. 1, p. 166~182, Jan., (1989)
- 7) Stevens, N. J., Uzumeri, S. M. and Collins, M. P. : Analytical Modeling of Reinforced Concrete Subjected to Monotonic and Reversed Loadings, Pub. No. 87-1, Department of Civil Engineering, Univ. of Toronto, Jan., (1987)
- 8) 渡辺史夫, 他 : ひびわれ面における骨材のかみ合い作用とそのモデル化, コンクリート工学年次論文報告集, 11-2, p. 311~316, (1989)
- 9) 西村 昭, 他 : ひびわれRC部材のせん断伝達作用に対するひびわれ面性状の影響, 土木学会論文集, 第360号, V-3, p. 99~100, (1985. 8)
- 10) 遠藤達也, 他 : 鉄筋コンクリートの動的せん断伝達特性および動的付着特性に関する実験的研究, 電力中央研究所報告, U88005, 26p, (1988. 10)
- 11) 長沼一洋 : 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その1)平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル, 建築学会構造系論文報告集, 第421号, p. 39~48, (1991. 3)
- 12) 長沼一洋 : FEM解析による鉄筋コンクリート耐震壁の耐力評価精度, 建築学会大会梗概集, 構造II, p. 311~312, (1993. 9)
- 13) 長沼一洋 : 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 建築学会構造系論文集, 第474号, p. 163~170, (1995. 8)
- 14) 大森信次, 他 : 繰返し面内せん断力を受けるコンクリート平板の弾塑性挙動に関する実験的研究, 建築学会構造系論文報告集, 第403号, p. 105~118, (1989. 9)

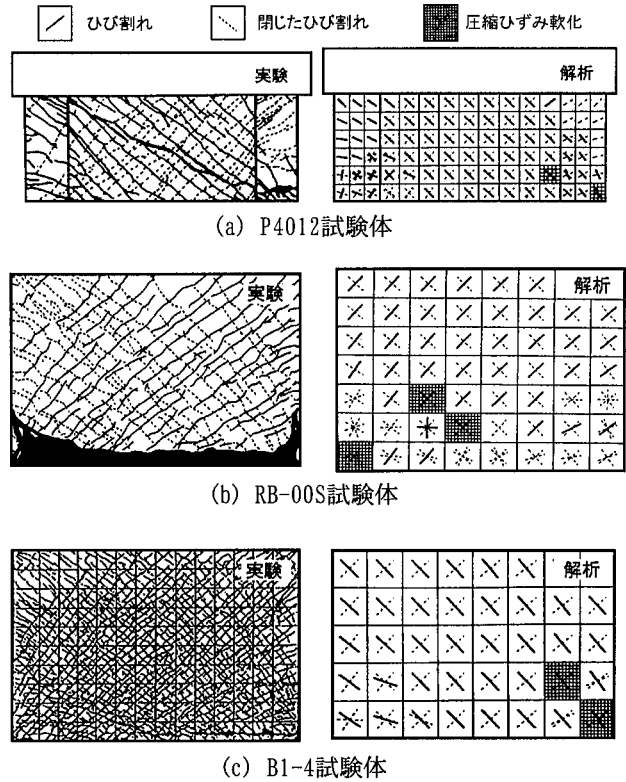


Fig. 18 ひび割れパターンの比較
Comparisons of Cracking patterns

- 15) 栗原和夫, 他 : 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, 建築学会構造系論文報告集, 第469号, p. 105~115, (1995. 3)
- 16) 大久保雅章, 他 : 鋼板コンクリート壁の純せん断加力実験, (その1) 実験概要と破壊経過, (その2) 実験結果, 建築学会大会梗概集, 構造I, p. 1745~1748, (1994. 9)
- 17) 中山達雄, 他 : 高温と外荷重とを受けるコンクリート構造物に関する実験的研究(その8)円筒部材の加熱+加力時挙動, 建築学会大会梗概集, 構造I, p. 883~884, (1985. 10)
- 18) 角 一行, 他 : 鉄筋コンクリート円筒壁体のせん断挙動に関する研究, 建築学会大会梗概集, 構造系, p. 1529~1532, (1983. 9)
- 19) 菅野俊介 : 「耐震壁選定試験体」選定理由および実験データの概要, 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム, 解析モデル検証用試験体の実験データ集, JCI-C6, p. 43~54, (1983. 10)
- 20) 青山博之, 他 : 増設RC耐震壁の耐力と変形能の評価に関する実験的研究(その1, その2), 建築学会大会梗概集, 構造系, p. 1407~1410, (1982. 10)
- 21) 稲田泰夫, 他 : 原子炉建屋の復元力特性試験(小型および部分模型)(その4)B1シリーズ試験, 建築学会大会梗概集, 構造系, p. 963~964, (1982. 10)
- 22) 杉山公一, 他 : 原子炉建屋耐震壁の動的性能に関する試験(その16)復元力特性確認試験のうちRA, RB, RCシリーズの静的試験, 建築学会大会梗概集, 構造II-B-2, p. 1013~1014, (1995. 8)
- 23) 兼近 稔, 他 : 高強度せん断補強筋のRC耐震壁への適用性に関する研究(その1 研究計画)~(その5 FEM解析による検討), 建築学会大会梗概集, 構造II, p. 567~576, (1989. 10)