

# 論文 曲げとねじりを同時に受ける立体壁のパラメトリック解析

鈴木紀雄<sup>\*1</sup>・丸田誠<sup>\*1</sup>・宮下丘<sup>\*2</sup>・高橋元美<sup>\*2</sup>

**要旨：**繰り返し水平力とねじりを同時に受けるRC造立体壁の非線形挙動を計算する解析法を開発した。本法によるH形壁およびC形壁の実験試験体のシミュレーション解析結果は、実験結果と良好に対応するものとなった。本法により、水平強度-ねじれ強度の関係を求めたところ、相関曲線の形状に及ぼす軸力の影響は小さいこと、作用するねじりモーメントが純ねじり強度の30~50%以下ならば、水平強度は低下しないことが分かった。

**キーワード：**立体耐震壁、曲げ、ねじり、解析

## 1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造立体耐震壁をコア壁として用いた高層建物が建設されるようになっている。このような建物は、地震時にねじりが生じないように設計されるのが一般的であるが、水平力と同時にねじりが作用したときの立体壁の挙動を理解しておくことは、建物の耐震性を把握するために重要なことである。

筆者らは、これまでに、H形の水平断面を持つ立体壁を対象として、水平力とねじりモーメントを同時に加える実験<sup>1,2)</sup>や非線形FEM<sup>3)</sup>及び非線形ばねを組み合わせた解析モデル<sup>4)</sup>によるシミュレーション解析を実施してきた。また、前報<sup>5)</sup>では、立体壁を構成する個々の壁版の平面保持仮定と材料の応力-歪関係に基づいた単調加力に対する解析法を提案し、有効性を示した。

本報で示す解析法は、前報の解析法で用いた材料の応力-歪関係に除荷や再載荷の履歴特性を導入することにより、繰り返し加力に対する立体壁の弾塑性挙動を計算できるようにしたものである。本報では、解析法の概要を示した後、繰り返し加力を伴った実験のシミュレーション解析を通じて、解析法の妥当性を示す。次いで、いくつかのパラメトリック解析を行い、実験によって明らかとなってきた立体壁の性状を、さらに明確なものとすることを試みる。

## 2. 解析法

### 2. 1 対象

図-1のようなH形断面をもつ、剛強な基礎に取り付けられた立体壁を対象とする。ただしウェブ壁はフランジ壁の中央になくてもよい。頂部に取り付けられた剛な加力スタブに、直交2方向の

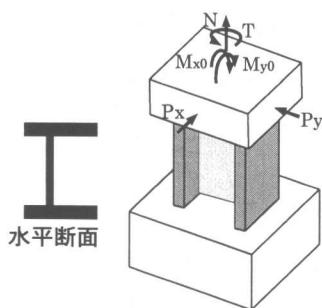


図-1 対象構造

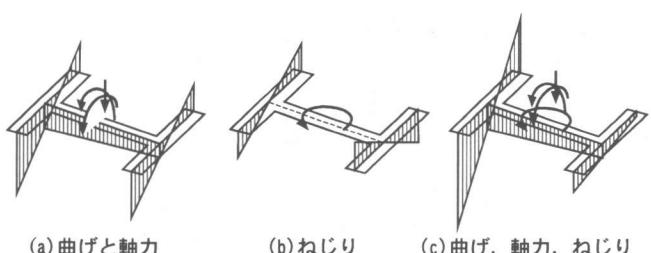


図-2 歪状態

\*1 鹿島技術研究所

\*2 鹿島ITソリューション部

水平力( $P_x, P_y$ )と水平軸回りのモーメント( $M_x, M_y$ ), および鉛直力( $N$ )とねじりモーメント( $T$ )の計6成分が作用する状態を扱う。

## 2. 2 基本仮定

H形断面に軸力と曲げモーメントが作用したとき, 断面の平面保持仮定が成り立つとすると, 軸方向の歪分布は図-2(a)のようになる。また, 弹性ねじり理論によると, 端部の「そり」が拘束された薄肉H形断面に純ねじりモーメントが作用したとき, 断面の歪は図-2(b)のようになる。これより, 軸力, 曲げモーメント, ねじりモーメントが同時に作用したときには, 図-2(c)のように, 断面全体としては平面保持が成り立たないが, H形を構成する3枚の平面壁はそれぞれ平面を保持すると仮定する。

壁版個材のねじり剛性は, 2枚のフランジ壁の面内剛性に起因する剛性に比べて小さく, 各壁版の面外剛性は, 直交する壁版の面内剛性に比べて小さいので, これらを無視する。

## 2. 3 力の釣り合い条件

力の釣り合い条件は以下の二つである。

- ①壁全体の任意水平断面において, 曲げモーメント, せん断力, 軸力, ねじりモーメントが外力と釣り合う。
- ②個々の壁板の任意水平断面において, 曲げモーメント, 軸力, せん断力が, その壁の頂部に作用する水平力, モーメント, 軸力, 隣接する壁板との境界に作用する鉛直力と釣り合う。

## 2. 4 変位の適合条件

変位の適合条件は以下の三つである。

- ①ウェブとフランジが連結されている。

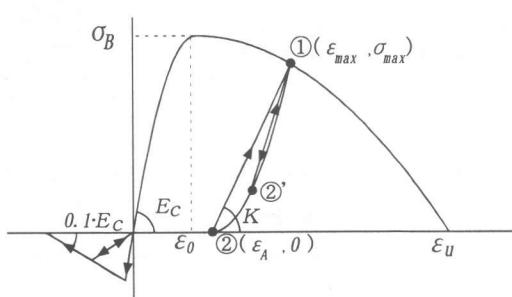


図-3 コンクリートの応力歪関係

②脚部で剛な基礎に固定されている。

③頂部で剛な加力スタブに取り付けられている。

## 2. 5 材料の応力-歪関係

### (1) コンクリート(図-3)

圧縮に対するスケルトンは, 最大強度までを Fafitis-Shah の式(1)によって表し, それ以後は, 野口・飯塚<sup>6)</sup>に倣ってパラボラ(式(2))とする。

$$\sigma = \sigma_B \cdot \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{\frac{E_c}{\sigma_B/\varepsilon_0}} \right\} \quad \text{for } \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_B \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right)^2 \right\} \quad \text{for } \varepsilon > \varepsilon_0 \quad (2)$$

引張に対するスケルトンは, 引張強度まで弾性とし, それ以後は直線で表現する。

圧縮スケルトンからの除荷は, パラボラ(式(3)), 図-3の①→②)で表す。

$$\sigma = \sigma_{\max} \cdot \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_A}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_A} \right)^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_A = \varepsilon_{\max} - \frac{\sigma_{\max}}{K} \quad (4)$$

$$K = E_c \quad \text{for } \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (5)$$

$$K = E_c \cdot \frac{\varepsilon_0}{\sigma_B} \cdot \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon_{\max}} \quad \text{for } \varepsilon > \varepsilon_0 \quad (6)$$

除荷曲線途上からの再載荷は, スケルトン上の折り返し点を目指す直線とし(②'→①), 応力度がゼロになった後の再載荷は, 除荷曲線と横軸の交点とスケルトン上の折り返し点を結ぶ直線(②→①)とする。

引張スケルトンからの除荷は原点を目指す直

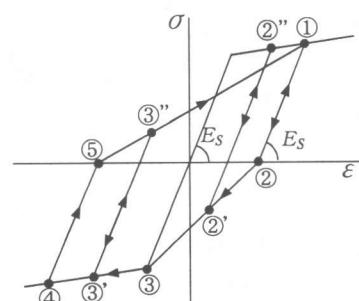


図-4 鉄筋の応力-歪関係

線とし、再載荷に対しても、同一直線を用いる。

ただし、 $\sigma_B$  と  $\varepsilon_0$ ：圧縮強度とそのときの歪、 $E_c$ ：初期剛性、 $\varepsilon_u$ ：歪軟化後に応力がゼロになるときの歪で、野口・飯塚<sup>6)</sup>によって算定し、拘束域と非拘束域で異なった値とする、 $\varepsilon_{\max}$  と  $\sigma_{\max}$ ：経験した最大圧縮歪とそのときの応力度。

## (2) 鉄筋 (図-4)

スケルトンは、引張、圧縮の双方ともバイリニアとする。引張 (圧縮) スケルトンからの除荷時には、横軸に達するまでは弾性剛性に等しい勾配を持つ直線とする (図-4 で①→②、④→⑤)。横軸を越えたら、圧縮 (引張) 側の経験最大歪 (降伏前には降伏点) を目指す直線 (②→③、⑤→①) とする。引張 (圧縮) スケルトンから横軸までの除荷中の再載荷は、除荷時と同一の直線を用いる (②→①、⑤→④)。圧縮 (引張) 側への再載荷 (②→③、⑤→①) 途中から応力が反転するときには、弾性剛性に等しい勾配を持つ直線とし、反対側で降伏していないときにはスケルトンを目指し (②'→②'')、降伏しているときには再載荷直線を目指す (③'→③'')。

## 2. 6 定式化と解法

有限個の水平断面において、以上の条件を満足するように、接線剛性を用いた増分形式で定式化し、与えられた頂部の外力に対する断面の曲率や軸方向歪を求める。これらを高さ方向に積分して変形を求めることができる。

増分解析より得られた断面の歪に対応する応

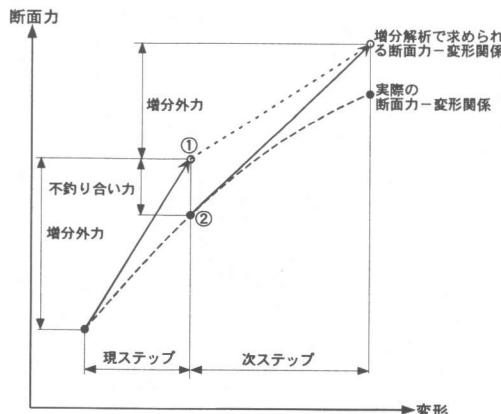


図-5 不釣り合い力

力度を材料の応力-歪関係から求め、これを積分して計算した軸力とモーメントが、そのときの変形に対応する実際の断面力である (図-5 の②)。材料が非線形化しているので、これらの断面力は外力 (①) と釣り合わず、不釣り合い力が生じている。釣り合わせるための収束計算は行わず、次ステップの計算時に、加力ステップに加える増分外力の他に不釣り合い力を各断面に加えることにより、誤差の蓄積を防止した。

## 2. 7せん断変形の考慮

上記の変形は、各壁板の曲げ変形に起因するものであるが、実際の変形にはせん断変形成分も含まれる。そこで、以下の方法で、各壁板のせん断力に対応するせん断変形を取り入れる。

各壁板のせん断力-せん断変形関係を正負とともに図-6 のようなひび割れ点と終局点を結ぶバイリニア型の折れ線とする。各点の強度と変形は、次のように算定する。

弹性剛性 :

$$K_s = G \cdot A_c / (\kappa \cdot h) \quad (7)$$

ひび割れ強度 : 正負で独立に主応力度式によつて算定する。

$$Q_{cr} = \kappa_w \cdot A_c \cdot \sqrt{f_t(f_t + \sigma_0)} \quad (8)$$

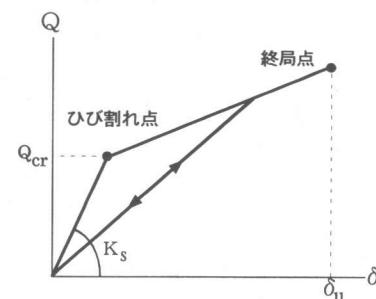
上式で軸方向応力度  $\sigma_0$  が時々刻々変動するので、ひび割れ点の強度も変動するが、正負それぞれの方向において、一旦ひび割れが発生したら、以後は発生時の値を保持することにする。

終局強度 : 文献 7)による。

終局強度時の変形 : 一般的な次の値を用いる。

$$\delta_{su} = 0.004 \cdot h \quad (9)$$

ただし、 $G$  : コンクリートの弾性せん断係数、



$A_c$  : 壁板の断面積,  $\kappa$  : 1.2,  $\kappa_w$  : フランジでは  $2/3$ , ウエブでは  $1.0$ ,  $f_t = 0.313\sqrt{\sigma_B}$  : コンクリートの引張り強度,  $\sigma_B$  : コンクリートの圧縮強度 ( $N/mm^2$ ),  $\sigma_0$  : 壁板の軸方向応力度で脚部断面の軸力を壁板の断面積で除した値を用いる,  $h$  : 壁の高さ。

繰り返しに対しては、原点指向型の履歴特性を仮定する。

### 3. 実験シミュレーション解析

ねじりと水平力を単独、あるいは同時に加えた立体壁の実験<sup>1),2),8)</sup>のシミュレーション解析を行い、本解析法の妥当性を検証する。

#### 3. 1 H形壁

試験体は、図-7に示すようなH形断面で、剛強な基礎と加力スタブを持っている。基礎を反力床に固定し、加力スタブにねじりモーメントと水平力を正負繰り返しで与えた。軸力は加えていない。

水平力を弱軸方向に加えた試験体HW50と、強軸方向に加えた試験体HS50の2体を解析対象とした。

どちらの試験体でも、水平力によって生じる脚部断面における曲げモーメントとねじりモーメントの比がほぼ  $1:1$  に保持されている。

荷重-変形関係を図-8に示す。HW50の実験では、水平変形が  $1.1mm$  のときにコンクリートが圧壊して耐力低下が始まったが、解析でも  $1.15mm$  のときに荷重を増やすことができなくなった。それ以下の変形では、水平力-水平変形関係とねじりモーメント-ねじり回転角関係のどちらにおいても、解析より得られた包絡

線と履歴ループは実験結果と良く一致している。

HS50では、解析の方が実験結果より剛性が高く、ループ面積は解析の方が大きくなっているが、耐力はほぼ一致している。

いずれの解析においても、除荷時の水平変形のみを実験に一致させたが、除荷時のねじり回転角も実験と解析でほぼ一致しており、解析の妥当性が裏付けられている。

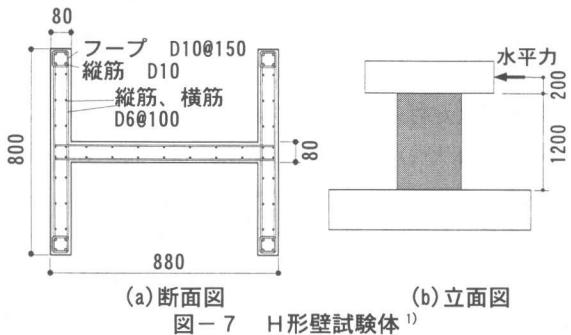


図-7 H形壁試験体<sup>1)</sup>

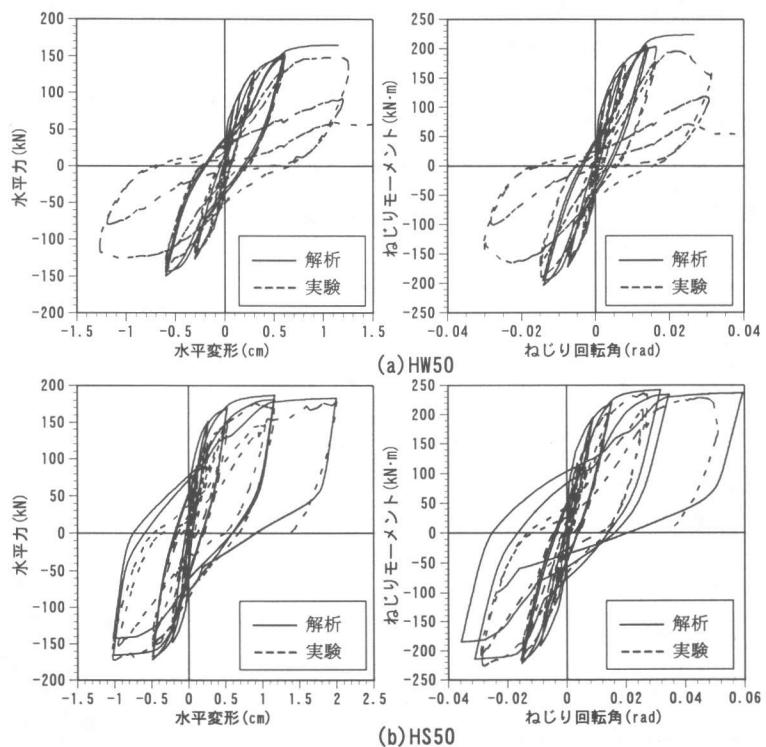


図-8 H形壁の荷重-変形関係

### 3.2 C形壁

文献8)の試験体C2を対象とする。図-9のような形状で、剛強な基礎と加力スタブを持ってい。基礎を反力床に固定した状態で、加力スタブに一定軸力と正負繰り返しの純ねじりモーメントが加えられた。

ねじりモーメント-ねじり回転角関係を、図-10に示す。実験のループ形状が紡錘形であるのに對して、解析では除荷時に原点に向かう形となり、実験結果と異なるものとなった。この試験体では壁版のせん断変形成分が大きいために、原点指向型としたせん断力-せん断変形関係モデルの形状が強く現れたものである。しかし、実験と解析の包絡線は良好に一致している。

### 4. パラメトリック解析

実験のシミュレーション解析より、解析から得られる荷重-変形関係のループ形状は実験結果と異なる場合もあるが、最大強度は良好に一致することが分かった。そこで、設計で重要となる最大強度を対象に、実験で検討されなかった軸力の影響を検討するため、軸方向応力度が0, 0.2 $\sigma_B$ , 0.4 $\sigma_B$ のときの、最大強度時における水平力とねじりモーメントの相関を求めた。

H形壁とC形壁のそれぞれについて、水平力とねじりモーメントの比を一定に保ちながら、水平力を断面の曲げに対する強軸方向、弱軸方向、および斜め45°方向に加えた場合の解析結果を図-11と図-12に示す。ここでは、絶対値よりも相関曲線の形状に着目し、正方向(向きは図-11,



(a)断面図 (b)立面図  
図-9 C形壁試験体

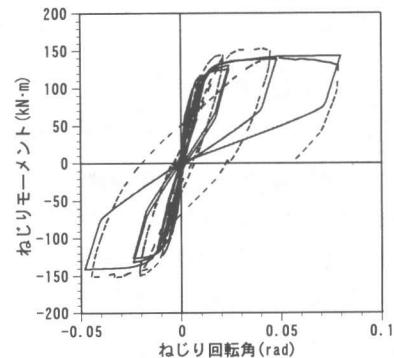


図-10 C形壁の荷重-変形関係

12参照)の水平力のみ加えたときの強度、およびねじりモーメントのみを加えたときの強度で基準化して表現した。

#### 4.1 H形壁における軸力の影響

強軸方向および弱軸方向に水平力を加えたとき、相関曲線は水平力の軸とねじりモーメントの軸の双方に対して対称となるが、斜め方向加力時には、水平力の軸に対して非対称となる。

軸力が高くなると、強軸方向加力時のように相関曲線が若干膨らんだ形状となる場合もあるが、軸力による違いは小さい。また、いずれの加力方向でも、純ねじり強度の30~50%以下のねじりモーメントは、水平強度に影響していない。

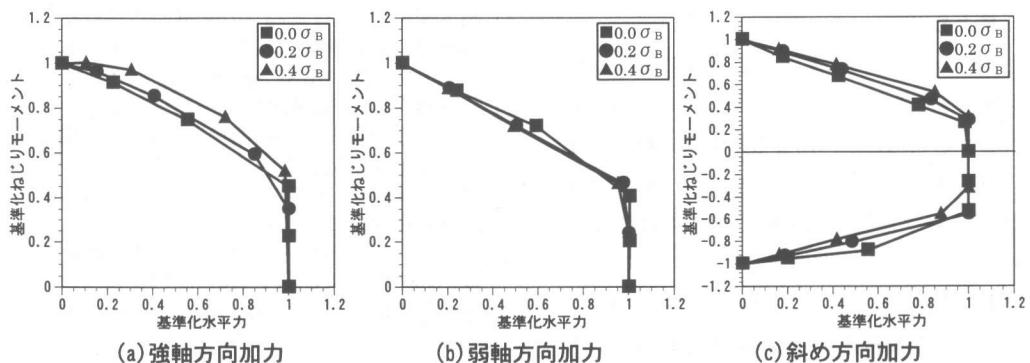


図-11 基準化したH形壁の水平強度-ねじり強度相関曲線

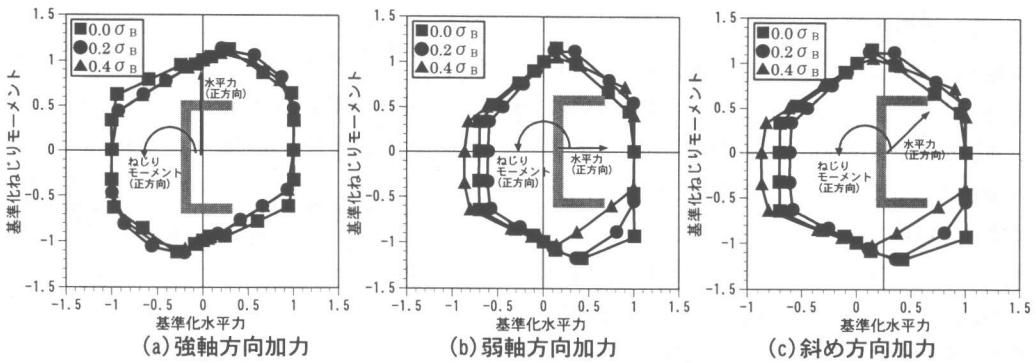


図-12 基準化したC形壁の水平強度-ねじり強度相関曲線

#### 4.2 C形壁における軸力の影響

相関曲線は、強軸方向加力時には原点に対して点対称、弱軸方向加力時には水平力の軸に対して線対称となるが、斜め方向加力時には完全に非対称な形状となる。

強軸方向加力時の降伏曲線は軸力によらずほぼ同一となる。弱軸方向および斜め方向加力時の第2象限と第3象限のねじりモーメントが小さい領域では軸力による違いが見られるが、正方向の水平強度で基準化したためであり、負方向の水平強度で基準化すれば軸力による違いは小さくなる。ただし、斜め方向加力時の第4象限のみは、軸力の影響が現れている。

H形壁と比べると、いずれの場合も、ねじりモーメントが純ねじり強度の30~50%以下ならば、水平強度はねじりモーメントに影響されない点は同じである。一方、ねじり強度は、純ねじり加力時が最大ではなく、水平力を若干加えた場合の方が大きくなる点が異なっている。

#### 5.まとめ

ねじりモーメントと水平力を同時に受けるH形壁の繰り返し加力解析法を開発した。実験結果と比較したところ、せん断変形が大きい場合に履歴ループ形状が異なる結果となつたが、それ以外の場合のループ形状や包絡線に関しては良好な一致が得られた。

この解析法を用いて、軸力と水平力の方向をパラメータとした解析を行い、H形壁とC形壁の水平強度-ねじり強度相関関係を求めた。壁の断面

形状や水平力の方向によって異なった相関曲線となるが、基準化すると軸力の影響はあまり大きくない。また、全ての場合において、ねじりモーメントが純ねじり強度の30~50%以下ならば、水平強度はねじりモーメントに影響されない結果となった。極端にねじれる建物でなければ、水平力に対する設計において、強度に対するねじれの影響は考慮しなくてもよいと考えられる。

#### 参考文献

- 丸田誠他:H形断面RCコア壁の水平力ねじり実験、日本建築学会大会学術講演梗概集C-2, pp.847-848, 1998
- 西岡聖雅他:H形断面RCコア壁の曲げねじり性状の研究、日本建築学会大会学術講演梗概集C-2, pp.451-454, 1999
- 宮下丘他:曲げモーメントとねじりモーメントを受けるH形RCコア壁のFEMによる弾塑性解析、日本建築学会大会学術講演梗概集C-2, p.455-456, 1999
- 高橋元美他:H形断面RCコア壁の水平力ねじり実験を対象とした壁谷澤モデルによるシミュレーション解析、日本建築学会大会学術講演梗概集C-2, pp.709-710, 1999
- 鈴木紀雄他:曲げとねじりを同時に受ける立体壁の非線形解析、コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.487-492, 2000
- 飯塚崇文他:普通強度から高強度コンクリートまでを対象とした圧縮特性の定式化、構造工学論文集, Vol.37B, pp.329-338, 1991
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針, 1990
- 森田真司他:鉄筋コンクリート造開断面耐震壁のねじれ性状に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.3, pp.677-582, 1998