

論文 拡張された修正圧縮場理論による袖壁付き RC 柱のせん断耐力の検討

松本 豊*1・栗原 和夫*2・大嶺 齋*3・島津 勝*4

要旨 : RC はり部材の断面解析に適用できるように拡張された修正圧縮場理論の解析モデルを用いて、袖壁付き RC 柱のせん断耐力の求解を試みた。得られた解析結果と既往の袖壁付き RC 柱の曲げせん断実験結果 (41 試験体) との比較により、本解析モデルの袖壁付き RC 柱のせん断耐力解析への適用性を検討した。次に、袖壁付き RC 柱を等断面積の長方形 RC 柱に置換してせん断強度を求める現行のせん断終局強度式による計算結果と既往実験結果および本解析結果との比較により、置換断面法を用いた評価式の適用性を検証した。また、本解析モデルを用いて袖壁付き RC 柱の最大耐力時のせん断力-曲げモーメント関係について検討した。

キーワード : 袖壁付き RC 柱, せん断耐力, 修正圧縮場理論, せん断スパン比

1. はじめに

我が国の袖壁付き RC 柱のせん断終局強度は、袖壁付き RC 柱を等断面積の長方形 RC 柱に置換して、実験式である修正荒川式に基づいた評価式^{1),2)}により求められることが多い。しかしながら、袖壁付き RC 柱に関する実験的・解析的研究は少なく、耐力や変形などの構造性能に不明な点が多く、評価法が不明確のため、これらの評価式の精度について検証が必要とされている。したがって、実務においては耐震スリットなどにより袖壁を構造部材と切り離して設計されることが多いのが現状である^{3)~5)}。

1995 年の阪神大震災において、袖壁などを切り離れた純フレームに修復不可能な損傷などの被害が報告され、使用限界性能や修復限界性能を高めるために有効と考えられる袖壁付き RC 柱の精度良い性能評価方法が必要と言われた⁶⁾。また、耐震スリットなどの施工性の問題が解消でき、強度型の建物において柱の剛性、耐力を上昇させるために有効な耐震要素となる袖壁付き RC 柱の構造性能の把握の必要性も高まってきた⁷⁾。このような背景より、最近、袖壁付き RC 柱を積極的に構造部材として評価するための実験的研究および構造特性の評価法についての研究^{7)~19)}が行われるようになった。

袖壁付き RC 柱の耐力や破壊性状などの構造特性に影響を及ぼす要因には、袖壁の配置、袖壁の形状(壁厚さ、壁長さ)、袖壁の縦・横筋量および柱の主筋、帯筋量、せん断スパン比などが考えられ、袖壁付き RC 柱の構造特性を把握するためにはこれらの要因の影響を定量的・定性的に把握する必要がある。しかしながら、解析的研究だけでなく実験的研究においてもこれらの構造特性の十

分な把握には至っていないのが現状である。

著者らは、Vecchio らにより RC はり部材の断面解析に適用できるように拡張された修正圧縮場理論の解析モデル²⁰⁾を用いて、円形断面の RC 柱およびコンクリート充填鋼管短柱のせん断耐力について解析を行い、限られた範囲ではあるが本解析モデルのこれら柱部材のせん断耐力解析への適用性について検証してきた^{21)~23)}。

本研究では、拡張された修正圧縮場理論の解析モデル²⁰⁾を用いて袖壁付き RC 柱のせん断耐力を求め、得られた解析結果と既往の曲げせん断実験結果^{7)~16)}との比較により本解析モデルの袖壁付き RC 柱のせん断耐力解析への適用性を検討する。次に、袖壁付き RC 柱を等断面積の長方形 RC 柱に置換してせん断強度を求める現行のせん断終局強度式¹⁾による計算結果と既往の曲げせん断実験結果^{7)~16)}および本解析結果との比較により、置換断面法を用いた現行の評価式の適用性を検証する。また、本解析モデルを用いて袖壁付き RC 柱の最大耐力時のせん断力-曲げモーメント関係について検討する。

2. 解析モデル

2.1 拡張された修正圧縮場理論

Vecchio らの提案した修正圧縮場理論²⁴⁾は、RC 部材の一部を RC 平板要素として取り出し、これを一様な応力とひずみを受ける要素として捉え、鉄筋とコンクリートに分離し、ひずみの適合条件、力の釣合い条件および鉄筋とコンクリートの応力-ひずみ関係を用いて RC 平板要素の弾塑性性状を予測することができる手法である。しかしながら、この理論は、一様なせん断応力、軸応力の作用を受け、一様なひずみが生じている部材のみ予測

*1 (株)エス・エー・アイ構造設計事務所 修士(工学) (正会員)

*2 崇城大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*3 崇城大学大学院 工学研究科建設システム開発工学専攻 大学院生

*4 長崎大学助教 工学部工学科 博士(工学) (正会員)

可能であり、RC はり部材のように曲げモーメント、せん断力を受けると断面に応力勾配やひずみ勾配が生じるため、一要素としては扱えず、このままでは適用できない。したがって、Vecchio らは、RC はり部材の断面を薄い層に分割して、各々の層が一様なせん断応力、軸応力の作用を受ける RC 平板要素とみなして各層に修正圧縮場理論を適用し、曲げモーメント、せん断力および軸力を受ける RC はり部材の断面解析に適用可能な積層の解析モデルに拡張した²⁰⁾。

本研究では、このように拡張された修正圧縮場理論の解析モデル²⁰⁾を用いて袖壁付き RC 柱のせん断耐力について解析を行った。なお、本解析モデルの詳細は文献(20), (24), (25)を参照して頂きたい。また、本解析では袖壁付き RC 柱の断面を図-1 に示すように 18 層の長方形に分割した。

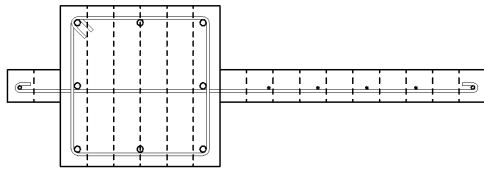


図-1 袖壁付き RC 柱の積層モデル

2.2 材料モデル

ひび割れ後のコンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮領域では、放物線の関係式に修正圧縮場理論の特徴の一つである主引張ひずみ ϵ_1 の関数で表わされる圧縮強度低減係数 β を乗じた式(1) を用いた。引張領域では、コンクリートのひび割れ以後におけるテンション・ステイフニング効果を考慮した式(2)の関係式を用いた。

なお、鉄筋の応力-ひずみ関係は、降伏応力を折点とする完全弾塑性型の関係式を用いた。

$$\text{圧縮領域: } f_2 = f_c \cdot \beta \cdot \left[2 \cdot \frac{\epsilon_2}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \dots (1)$$

$$\text{引張領域: } f_1 = \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{200 \cdot \epsilon_1}} \dots (2)$$

ここで、

$$\beta = \frac{1.0}{0.62 - 0.38 \cdot \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0}} \quad f_{cr} = 0.33 \cdot \sqrt{f_c}$$

- | | |
|-------------------|--------------------------|
| f_1 : 主引張応力 | ϵ_0 : 圧縮強度時のひずみ |
| f_2 : 主圧縮応力 | ϵ_1 : 主引張ひずみ |
| f_c : 圧縮強度 | ϵ_2 : 主圧縮ひずみ |
| f_{cr} : ひび割れ応力 | β : 圧縮強度低減係数 |

3. せん断終局強度式

袖壁付き RC 柱のせん断終局強度を求める現行の設計式には、「2001 年改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準」¹⁾の式(以後、耐震診断式と呼ぶ)、「2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書」²⁾の式があり、一般的に多用されている。また、最近、袖壁付き RC 柱の断面を壁部分と壁厚さを差し引いた柱残余部分とに分割して各々のせん断終局強度を修正荒川式および A 法により求めて累加する式^{26), 27)}などが提案されている。

本論では、置換断面法を用いた耐震診断式¹⁾の適用性を検討する。なお、均等、不均等な両側袖壁付き RC 柱および片側袖壁付き RC 柱を各々「均等袖壁」、「不均等袖壁」および「片袖壁」と略す。また、「不均等袖壁」と「片袖壁」を併せて「不均等・片袖壁」と略す。

耐震診断式では、均等袖壁および片袖壁のせん断終局強度を、図-2 に示すように、引張側の袖壁を無視し、圧縮側の袖壁と柱の断面積を等価な長方形断面に置換して修正荒川式に基づいた式(3)により求めている。式中の記号については、文献 1) を参照して頂きたい。

なお、本研究では、不均等袖壁のせん断終局強度を、均等袖壁および片袖壁の耐震診断式を準用して、引張側の袖壁を無視し等価長方形断面に置換して求めることにした。

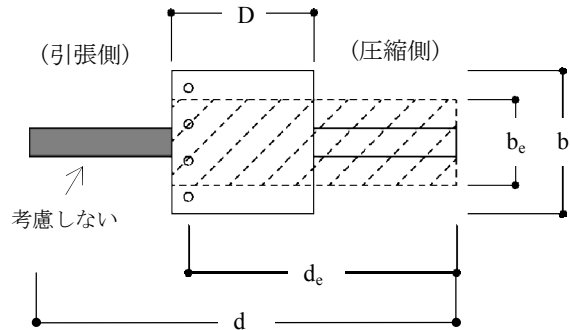


図-2 耐震診断式の置換方法

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_t^{0.23} (F_c + 18)}{M / (Q \cdot d_e) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{we} \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \cdot \sigma_{0e} \right\} \cdot b_e \cdot j_e \dots (3)$$

ここで、

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| d_e : 柱の引張鉄筋の中心から圧縮側袖壁の外縁までの距離 | b_e : (柱断面積+圧縮側袖壁断面積)/(柱せい+圧縮側袖壁長さ) |
| j_e : $7d_e/8$ | d : 柱せい+袖壁長さ |

4. 結果の比較および検討

本解析モデルによる袖壁付き RC 柱のせん断耐力解析

への適用性を検討するため、袖壁付き RC 柱の既往曲げせん断実験結果と本解析結果との比較を行った。次に、置換断面法を用いた耐震診断式の適用性を検討するため、耐震診断式の計算結果と既往曲げせん断実験結果および本解析結果との比較を行った。比較に用いた試験体は、均等袖壁が 32 体^{7)~14)}、片袖壁が 7 体^{12),13),15),16)}および不均等袖壁が 2 体^{13),16)}の計 41 体である。これらの試験体は、柱幅 b 、柱せい D : 200~400mm、片側袖壁長さ : 200~1200mm、袖壁厚さ : 50~150mm、主筋比 : 1.9~2.7%、帯筋比 : 0.20~0.68%、袖壁一般部の縦筋比、横筋比 : 0.32~0.78%、0.16~1.28%、軸力比 : 0.167~0.400、 M/Qd : 0.30~1.25 の範囲であった。

また、破壊形式については、文献 11), 13), 15)において、袖壁付き RC 柱は柱と袖壁部分の大きな剛性および挙動の差により、一義的に定義することは難しく、比較的初期に破壊する袖壁と柱部分とに分けて実験結果を述べている。したがって、本論では文献 7) を参考にして、袖壁端部の曲げひび割れに対してせん断ひび割れが進展した、または壁縦筋に先行して壁横筋が降伏した試験体を袖壁の「初期せん断破壊」、曲げ破壊性状などが先行する試験体を袖壁の「初期曲げ破壊」と呼ぶことにする。

なお、片袖壁の加力方向の正負は文献 12), 15), 26)を参考にして、図-3 に示すように、袖壁側が引張になる場

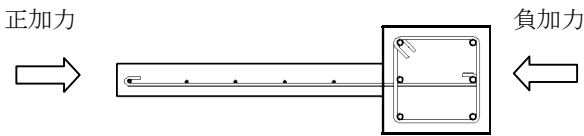


図-3 袖壁付き RC 柱の加力方向

合を正加力、柱側が引張になる場合を負加力とした。不均等袖壁の場合は、長い袖壁側が引張になる場合を正加力とした。

4.1 実験結果と解析結果および計算結果との比較

(1) 解析結果との比較

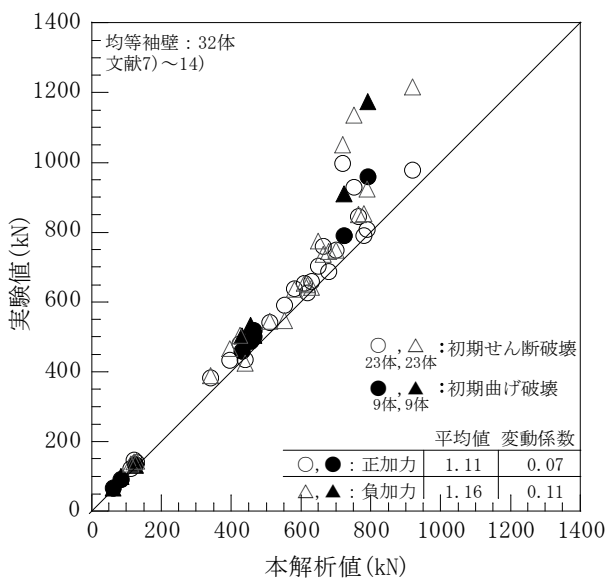
図-4(a)および(b)は、均等袖壁および不均等・片袖壁の既往実験結果と本解析結果とを比較したものである。なお、図中に耐力比(実験値/本解析値)の平均値、変動係数を示し、また、既往実験において袖壁の初期せん断破壊の試験体を○, △, 初期曲げ破壊を●, ▲で表した。

これらの図より分かるように、均等袖壁の正および負加力の耐力比の平均値は各々 1.11, 1.16 で、変動係数は 0.07, 0.11 となり、不均等・片袖壁の正および負加力の耐力比の平均値は各々 1.33, 1.14 で、変動係数は 0.20, 0.14 となった。

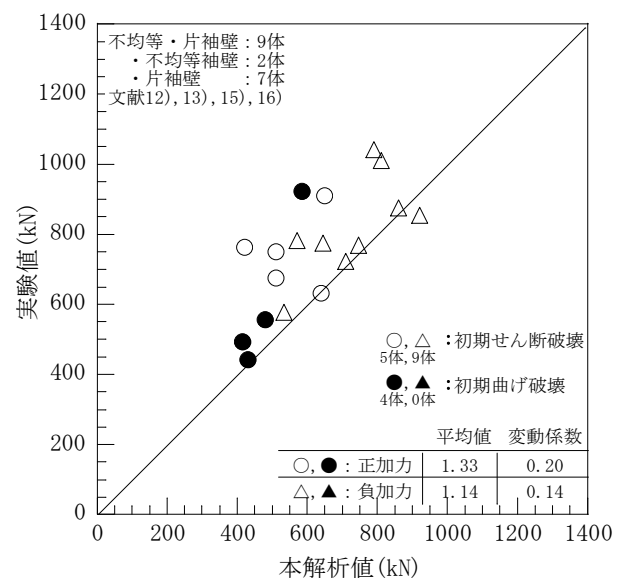
以上より、均等袖壁の正および負加力の本解析結果は実験結果をよく捉えておりバラツキも小さく安全側にあることが分かる。一方、不均等・片袖壁の正加力の本解析結果は、負加力の場合と比べて実験結果との差およびバラツキともに若干大きくなった。この差の一つの要因として、文献 12), 13), 15), 16)の実験が逆対称の繰返し载荷であり、不均等・片袖壁の試験体の断面形状が非対称であることが考えられる。しかしながら、全体的には本解析結果と実験結果との差および耐力比のバラツキは小さく、概ね実験結果を捉えており、本解析は袖壁付き RC 柱の曲げせん断耐力の予測が可能と考えられる。

(2) 計算結果との比較

図-5(a)および(b)は、均等袖壁および不均等・片袖壁の既往実験結果と耐震診断式による計算結果とを比較



(a) 均等袖壁



(b) 不均等・片袖壁

図-4 既往実験結果と本解析結果の比較

したものである。なお、図中に耐力比(実験値/計算値)の平均値、変動係数を示し、また、既往実験において袖壁の初期せん断破壊となっている試験体を○, △で、初期曲げ破壊を●, ▲で表した。

これらの図より分かるように、均等袖壁の正および負加力の耐力比の平均値は各々1.20, 1.26 で、変動係数は0.24, 0.26 となり、不均等・片袖壁の正および負加力の耐力比の平均値は各々1.97, 1.12 で、変動係数は0.41, 0.24 となった。

以上より、耐震診断式の均等袖壁および不均等・片袖壁の計算結果は、実験結果に比べて小さく安全側の評価

となっているが、バラツキがあると言える。また、不均等・片袖壁の耐力比の平均値、変動係数ともに正加力と負加力との差があり、正加力は負加力に比べて実験結果との差が大きくバラツキも大きいと言える。これは、3章で述べたように、耐震診断式では引張側の袖壁を無視して残りの断面を等価な長方形断面へ置換しており、正加力は負加力に比べて等価断面積が小さくなるためと考えられる。

4.2 解析結果と計算結果との比較

図-6(a)および(b)は、均等袖壁および不均等・片袖壁の本解析結果と耐震診断式による計算結果とを比較した

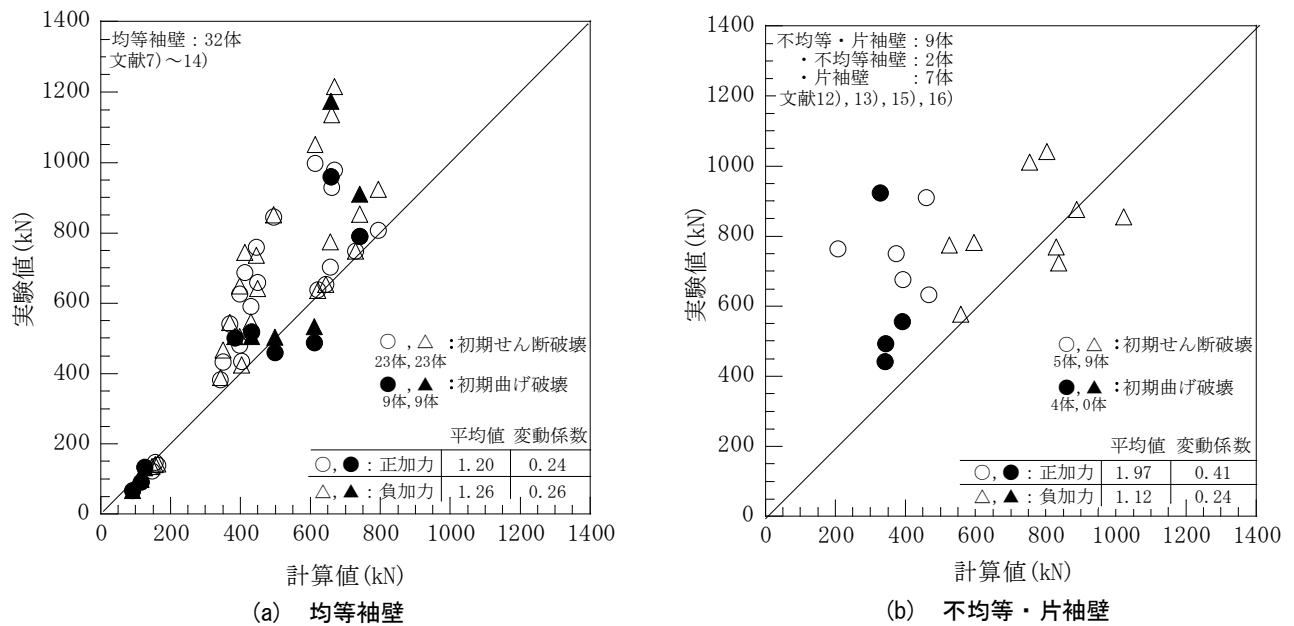


図-5 既往実験結果と耐震診断式の比較

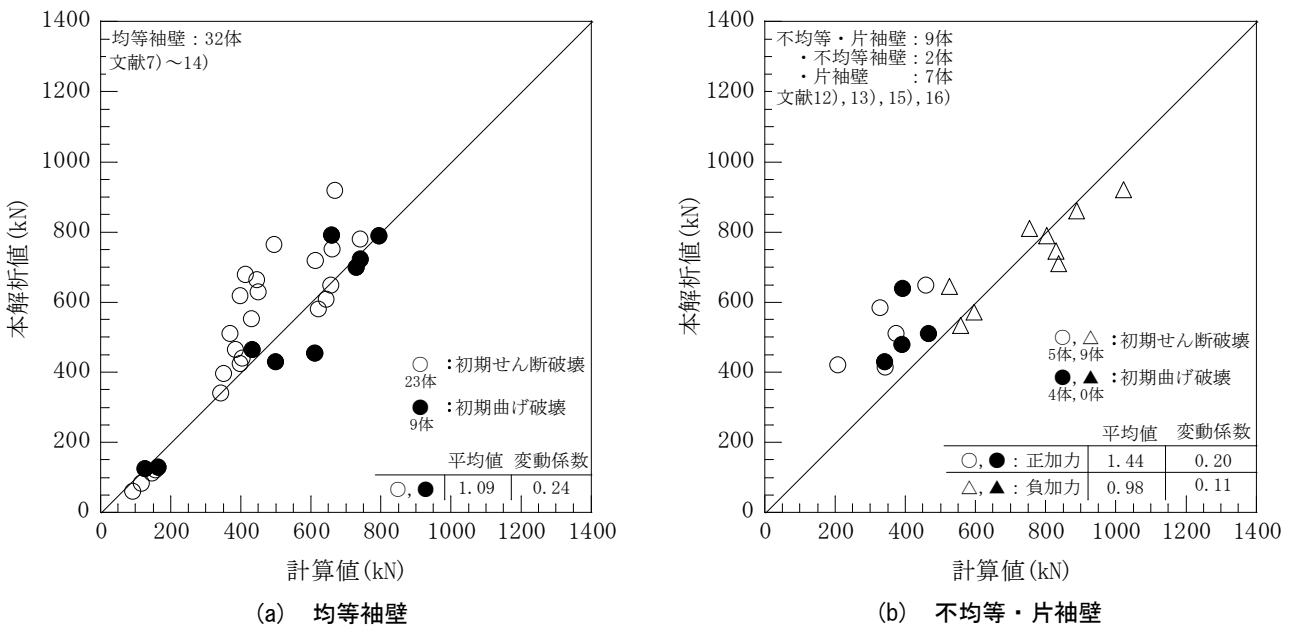


図-6 本解析結果と耐震診断式の比較

ものである。なお、図中に耐力比(本解析値/計算値)の平均値および変動係数を示し、また、本解析において袖壁の初期せん断破壊となった試験体を○, △で、初期曲げ破壊を●, ▲で表した。

これらの図より分かるように、均等袖壁の耐力比の平均値は 1.09 で、変動係数は 0.24 となり、不均等・片袖壁の正および負加力の耐力比の平均値は各々 1.44, 0.98 で、変動係数は 0.20, 0.11 となった。

以上より、耐震診断式の均等袖壁および正加力の不均等・片袖壁の計算結果は、本解析結果に比べて小さめの評価をしているが、バラツキがあると言える。一方、負加力の不均等・片袖壁では、本解析結果に比べて若干大きめの評価となっているが、他の場合と比べてバラツキは小さいと言える。また、不均等・片袖壁の耐力比の平均値、変動係数ともに正加力と負加力との差があり、正加力は負加力に比べて本解析結果との差が大ききバラツキも大きいと言える。これは、3 章および 4.1 節で述べたように、耐震診断式では引張側の袖壁を無視して残りの断面を等価な長方形断面へ置換しており、負加力は正加力に比べて等価断面積が小さくなるためと考えられる。

5. 最大耐力時の Q-M 関係の検討

袖壁付き RC 柱の最大耐力、破壊性状などに影響を及ぼす要因の一つにせん断スパン比 M/Qd が考えられる。

図-7 は、本解析により M/Qd をパラメータにして、袖壁付き RC 柱の最大耐力時のせん断力 Q と曲げモーメント M との関係を求め、最大耐力、破壊性状などを検討したものである。なお、本解析例では、文献 9) の均等袖壁の SWS 試験体の諸元を用いた。また、図中にはパラメータである M/Qd の値を記した。

この図より、最大耐力時のせん断力 Q は、同時に作用

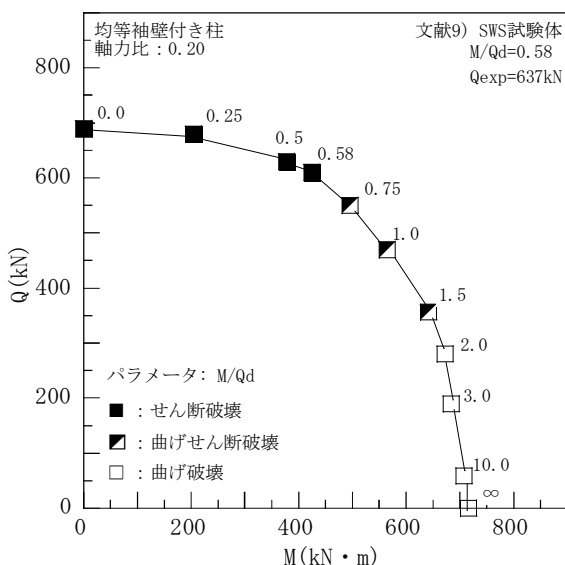


図-7 Q-M 関係

する曲げモーメント M の大きさの影響を受け、 M/Qd が大きくなるにつれて小さくなると言える。この最大耐力時の $M-Q$ 関係は曲線となり、円形および矩形断面の RC 柱と同様の傾向を示すことが分かった²⁾。したがって、この曲線上にせん断破壊と曲げ破壊の境界領域が存在し、解析的にこの領域を求めることが可能であり、本解析の場合は、 $M/Qd=0.75\sim 1.5$ 近傍にあった。

6. まとめ

拡張された修正圧縮場理論の解析モデルを用いて、袖壁付き RC 柱のせん断耐力の求解を試み、本解析モデルによる袖壁付き RC 柱のせん断耐力解析および置換断面法を用いた耐震診断式の適用性を検討した。次に、本解析モデルを用いて最大耐力時のせん断力-曲げモーメント関係について検討した。

限られた範囲ではあるが、本検討により得られた結果をまとめて以下に示す。

- 1) 本解析モデルによる解析結果は、全体的には実験結果との差は小さく、概ね実験結果を捉えている。したがって、本解析は袖壁付き RC 柱の曲げせん断耐力の予測が可能と考えられる。
- 2) 耐震診断式の均等袖壁および不均等・片袖壁の計算結果は、実験結果に比べて小さく安全側の評価となった。また、不均等・片袖壁の正加力の計算結果は、負加力に比べ大きく実験結果との差も大きくなった。これは袖壁付き RC 柱の等価断面積が負加力に比べ正加力の場合が小さくなるためと考えられた。
- 3) 耐震診断式の均等袖壁および正加力の不均等・片袖壁の計算結果は、本解析結果に比べて小さめの評価となったが、負加力の不均等・片袖壁では、本解析結果に比べて若干大きめの評価となった。また、正加力の不均等・片袖壁の計算結果は、負加力に比べ大きく本解析結果との差も大きくなった。これは上記 2) と同様に、袖壁付き RC 柱の等価断面積が負加力に比べ正加力の場合が小さくなるためと考えられた。
- 4) 本解析による袖壁付き RC 柱の最大耐力時のせん断力は、同時に存在する曲げモーメントの影響を受け、せん断スパン比が大きくなるにつれて小さくなり、これらの関係は曲線を示した。また、この曲線上のせん断破壊と曲げ破壊の境界領域を解析的に求めることが可能である。

謝辞

本研究においては、崇城大学 岩原昭次教授、福井大学 磯雅人准教授に貴重な助言を頂きました。また、文献 7)~16) の貴重な実験結果を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート建築物の耐震診断基準・同解説，pp.191-195, 229-238, 2002.1
- 2) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：2007年版 建築物の構造関係技術基準解説書，全国官報販売共同組合，pp.641-663, 2008.5
- 3) 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，pp.294-300, 1999.8
- 4) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，pp.55-75, 2003.1
- 5) 日本建築構造技術者協会：構造スリット設計指針，技報堂出版，pp.43-55, 2009.8
- 6) 加藤大介，孫浩陽：袖壁付きRC造柱の最大耐力以降の挙動の評価法，日本建築学会構造系論文集，第566号，pp.97-103, 2003.4
- 7) 澤井謙彰，磯雅人，田尻清太郎：破壊モードを変化させた場合の袖壁付RC柱の曲げせん断性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, pp.133-138, 2008
- 8) 大宮幸，松浦康人，香取慶一，林静雄：袖壁付き柱の破壊形式を考慮したせん断終局強度に関する実験および考察，日本建築学会構造系論文集，第553号，pp.81-88, 2002.3
- 9) 壁谷澤寿成，壁谷澤寿海，東條有希子，壁谷澤寿一：せん断破壊型そで壁付き柱に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, pp.115-120, 2008
- 10) 田尻清太郎，澤井謙彰，磯雅人：鉄筋コンクリート造そで壁付き柱のせん断性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.2, pp.163-168, 2009
- 11) 裴根國，壁谷澤寿海，金裕錫，壁谷澤寿一，PHAN Van Quang, 石井貴子，福山洋，田尻清太郎：高強度鉄筋コンクリート造両側袖壁付き柱の耐震性能に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，pp.117-120, 2009.8
- 12) 裴根國，壁谷澤寿海，金裕錫，壁谷澤寿一：片側袖壁付き柱と両側袖壁付き柱のせん断耐力算定法の比較，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.2, pp.169-174, 2009
- 13) 裴根國，壁谷澤寿海，金裕錫，壁谷澤寿一：袖壁付き柱の構造特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.2, pp.115-120, 2010
- 14) 上原正敬，磯雅人，福山洋，田尻清太郎：袖壁付きRC柱のせん断挙動に与える軸力，袖壁の偏心，壁横筋比の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.2, pp.103-108, 2010
- 15) PHAN Van Quang, 壁谷澤寿海，金裕錫，壁谷澤寿一，裴根國，石井貴子，福山洋，田尻清太郎：高強度鉄筋コンクリート造片側袖壁付き柱の耐震性能に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，pp.121-124, 2009.8
- 16) 磯雅人，上原正敬，福山洋，田尻清太郎：袖壁付きRC柱のせん断挙動に与える袖壁の出幅の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.2, pp.109-114, 2010
- 17) 小林大軸，余勇，柏崎隆志，野口博：RC造袖壁付き柱の耐震性能に関する3次元FEM解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.205-210, 2005
- 18) 壁谷澤寿海，壁谷澤寿成：袖壁付き柱の実用せん断強度式，日本地震工学会・大会-2007 概要集，pp.248-249
- 19) 松本豊，栗原和夫，林美貴，島津勝：修正圧縮場理論による袖壁付きRC柱のせん断耐力の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.265-266, 2010.9
- 20) Vecchio, F. J. and Collins, M. P. :Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using Modified Compression Field Theory, ACI Structural Journal, May-June, pp.258-268, 1988
- 21) 松本豊，栗原和夫，林美貴：拡張された修正圧縮場理論によるRC円形断面柱のせん断耐力の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.2, pp.715-720, 2009
- 22) 栗原和夫，神崎翔伍，松本豊，大城盛博：コンクリート充填鋼管柱の曲げせん断耐力についての解析的研究，崇城大学研究報告，Vol.33, No.1, pp.43-50, 2008.3
- 23) 松本豊，栗原和夫，大嶺齋，島津勝：円形断面CFT短柱の角形断面への置換による曲げせん断耐力について，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.1185-1186, 2011.8
- 24) Vecchio, F. J. and Collins, M. P. :The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Proceedings V. 83, No.2, Mar. - Apr. , pp.219-231, 1986
- 25) 中村光，檜貝勇：拡張した修正圧縮場理論によるRCはり断面のせん断耐荷力評価，土木学会論文集，No.490, V-23, pp.157-166, 1994.5
- 26) 裴根國，壁谷澤寿海，金裕錫，壁谷澤寿一，PHAN Van Quang, 石井貴子：鉄筋コンクリート造片側そで壁付き柱の終局強度に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.55B, pp.385-390, 2009.3
- 27) 上原正敬，福山洋，向井智久，諏訪田晴彦，田尻清太郎，磯雅人：比較的薄い袖壁を有する袖壁付きRC柱の構造性能評価その2 せん断変形性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.67-70, 2010.9