

論文 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

松本 豊*¹・栗原和夫*²・林 美貴*³

要旨：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、RC円形断面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RC円形断面柱の曲げせん断実験結果(円形105試験体)との比較により、本解析モデルのRC円形断面柱のせん断耐力解析への適用性を検討した。次に、円形断面を等断面積の正方形に置換する現行の設計法の妥当性およびRC円形断面柱のせん断耐力とせん断スパン比との関係について検討した。さらに、既往の拘束されたコンクリートの推定強度を本解析モデルに用いてせん断耐力との関係について検討した。

キーワード：修正圧縮場理論, RC柱, 円形断面, せん断耐力

1. はじめに

我が国のRC上部構造における円形断面部材の終局せん断強度については、明確に記載されている指針など^{1),2)}がなく、暫定的に「中実円断面部材に対するせん断設計は、同一断面積を持つ正方形断面に置き換えて行う」として既存の矩形断面の終局せん断強度式を準用する方法を推奨するととめている。

また、建築基礎構造設計指針³⁾に記載されている基礎構造の設計は依然として許容応力度設計法が主体であり、円形断面のコンクリート杭に関しては「場所打ちコンクリート杭の終局せん断耐力は、円形断面を断面積が等しい正方形断面に置き換え、鉄筋コンクリート部材のせん断強度の下限値を与える実験式を準用すれば算定できる」として上部構造と同様の方法を示している。このような現行の設計法による基礎構造において、1995年の兵庫県南部地震における基礎被害の代表的なものに杭頭部や杭中間部においてせん断破壊のような脆性的な破壊が生じていたため、杭のせん断耐力や杭頭接合法など杭基礎に関する耐震性能についての問題点が顕在化し⁴⁾、基礎構造の耐震性の確保が求められるようになった。

しかしながら、RC円形断面部材の曲げせん断実験に関しては矩形断面部材に比べその実験資料は極めて少なく、その耐震性能の評価に基づいた設計法を確立するためには多くの実験資料の蓄積が必要となった。このため1998年より場所打ちRC杭の二次設計の確立を目的とするせん断性能評価に関する実験的研究^{5)~15)}が集中的に多くの研究者により実施された。

一方、解析的研究に関しては、1987年に渡辺ら¹⁶⁾は、PCパイルのせん断耐力算定方法を示すとともに、円形せん断補強筋の補強効果を従来の長方形せん断補強筋に対する補強効果式に低減係数を乗じたものとして表した。この係数は現行の耐震指針¹⁾における中実円断面部材の

せん断設計に採用されている。鈴木・中塚ら¹⁷⁾は、塑性理論を用いたB法¹⁾による円形柱の終局せん断強度式を誘導し、修正荒川式などの各種算定式との比較検討によりその実用性を報告している。また、林ら^{18),19)}は、円形断面を等価な面積の正方形断面(以下、正方形置換断面と呼ぶ)あるいは長方形断面(以下、長方形置換断面と呼ぶ)に置換する設計法(以下、置換断面法と呼ぶ)について、既往の多くのRC円形断面部材の曲げせん断実験結果と修正荒川式およびA法との比較により、その適用性について述べている。孫ら²⁰⁾は、RC円形断面部材を正方形断面に置換することなく、せん断終局耐力を直接評価するための設計式を提案し、既往の多くの実験結果との比較検討を行い、既往のせん断設計式と同じ精度で実験結果を評価できると報告している。実験研究としては、1978年より黒正・林らによる円形断面および正方形置換断面柱の曲げせん断実験などの一連の研究^{21)~24)}が、2002年、2003年には金ら²⁵⁾、山田ら²⁶⁾により同様の曲げせん断実験が行われた。しかしながら、円形断面と矩形断面との構造特性の違い、せん断耐力に影響を及ぼす要因についての十分な検討には至っていないようである。

以上のように、現行の指針など^{1)~3)}に記載されている置換断面法においては、せん断耐力に影響を及ぼす要因であるせん断補強筋比、主筋比、せん断スパン比などの取扱いについての明確な記述はなく、また解析研究だけでなく実験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と考えられる。

本研究では、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RC円形断面柱のせん断耐力を求め、既往の曲げせん断実験結果および修正荒川式との比較により、本解析モデルのRC円形断面柱のせん断耐力解析への適用性を検討する。次に、既往の円形断面と正方形置換断面のRC柱の曲げせ

*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 崇城大学講師 工学部建築学科 (正会員)

ん断実験結果と本解析結果との比較により、置換断面法の適用性を検討する。また、RC 柱のせん断耐力に影響を及ぼす主要因と考えられるせん断スパン比と円形断面および正方形置換断面のせん断耐力との関係を検討する。最後に、円形断面は正方形断面に比べてせん断補強筋のコンクリートへの横拘束効果が大きいと考えられ、既往の拘束されたコンクリートの強度推定式より求めたコンクリート強度を本解析モデルに組み込んだ。得られた解析結果と既往実験結果のせん断耐力との比較により、拘束されたコンクリート強度とせん断耐力との関係を検討する。

2. 解析モデル

2.1 拡張した修正圧縮場理論

Vecchio らの提案した修正圧縮場理論²⁷⁾は、RC 構造物の一部を RC 平板要素として取出し、この要素を RC 要素の平均的性状としてマクロに捉えた解析モデルであり、この RC 要素を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 要素の弾塑性挙動の予測が可能となる。しかしながら、この理論は部材断面に一樣なせん断応力、軸応力の作用を受け、一樣なひずみが生じている場合のみ予測可能であり、はり部材のように曲げモーメントと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部材には直接適用できない。したがって、RC 部材断面を薄い層に分割して、各々の層が一樣なせん断応力、軸応力の作用を受ける RC 平板要素と見做して各々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矩形断面の RC 部材の断面解析に適用可能な解析モデルに拡張された^{28),29)}。

本研究では、この拡張された修正圧縮場理論を用いて、円形断面の RC 柱を図-1 に示すような薄い長方形の層に分割して円形断面に近似し、せん断耐力を求める³⁰⁾。なお、本解析法の詳細は文献 27)~29)を参照して頂きたい。また、本解析では円形断面を 18 層に分割して解析した。

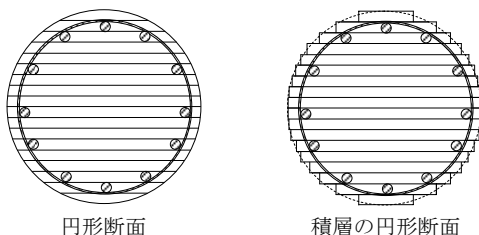


図-1 解析モデル

2.2 材料モデル

ひび割れたコンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮領域では一般に用いられている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の関数で表される圧縮強度低減係数を乗じた式(1)を採用した。また、引張領域には、コンクリートのひび割れ以後におけるテンション・スティフニング効果を考慮した式(2)を用いた。

$$\text{圧縮領域: } f_{c2} = f_c \cdot \beta \cdot \left[2 \cdot \frac{\epsilon_2}{\epsilon_c} - \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\text{引張領域: } f_{c1} = \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{200 \cdot \epsilon_1}} \quad (2)$$

$$\text{ここで, } \beta = \frac{1.0}{0.8 - 0.34 \cdot \frac{\epsilon_1}{\epsilon_c}} \quad f_{cr} = 0.33 \sqrt{f_c}$$

f_c : 圧縮強度 β : 圧縮強度低減係数
 f_{cr} : ひび割れ強度 ϵ_1 : 主引張ひずみ
 f_{c1} : 主引張応力 ϵ_2 : 主圧縮ひずみ
 f_{c2} : 主圧縮応力 ϵ_c : 圧縮強度時ひずみ

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

2.3 拘束されたコンクリートの推定強度

拘束されたコンクリートの推定強度を式(3)に示す崎野らの強度推定式³¹⁾により求め、これを用いて拘束効果を考慮したせん断耐力を求めた。

$$f_{cc} = f_p + 4.18 \cdot f_{re} \quad (3)$$

$$= 0.8 \cdot f_c + 4.18 \cdot \left[\frac{1}{2} \rho_h \cdot f_{hy} \left(1 - \frac{S}{2 \cdot D_c} \right)^2 \right]$$

ここで、 f_{cc} : 拘束されたコンクリートの圧縮強度
 f_p : プレーンコンクリートの圧縮強度
 f_{re} : 側圧係数
 f_c : コンクリートシリンダーの圧縮強度
 ρ_h : 補強筋の体積比 f_{hy} : 補強筋の降伏強度
 S : 補強筋のピッチ D_c : 補強筋の芯々間距離

3. 解析

3.1 解析上の破壊形式

本解析においては、破壊形式をせん断破壊、曲げ破壊および曲げせん断破壊の3つに分けた。せん断破壊はせん断補強筋が全せいの中央部近傍で降伏ひずみに達した後、さらに降伏が上・下端(圧縮側・引張側)に拡がり、ひずみの増大により収斂計算不可能となったもの、曲げ破壊は引張側の主筋が降伏ひずみに達しあるいは圧縮側コンクリートが圧縮強度に達して徐々に中央部へ拡がり収斂計算不可能になったものとした。また、曲げ破壊とせん断破壊の明確な区別がつかない場合を曲げせん断破壊とした。

3.2 既往実験結果との比較

本解析モデルのRC円形断面柱のせん断耐力解析への適用性を検討するため、図-2～図-6に示すように既往の曲げせん断実験結果と本解析結果および修正荒川mean式との比較を行った。比較に用いた試験体は、文献5)～15), 17), 23)～26)および32)の円形断面柱の105体である。試験体は、実験変数が直径：250～600mm，コンクリート強度：22～55 MPa，主筋比：1.8～4.6%，せん断補強筋降伏強度：247～1420 MPa，せん断補強筋比：0.07～1.8%，軸力比：0.0～0.6，せん断スパン比：0.8～3.0の範囲を選定した。なお、選定した105体のうちせん断破壊したと報告されているのは74体であった。一方、本解析によりせん断破壊したと判断した試験体は39体で、曲げせん断破壊と判断したものを含めると57体であった。

図-2は全試験体105体のせん断耐力の実験値と本解析値とを比較したものであり、図-3は実験でせん断破壊した74体の実験値と本解析値とを比較したものである。図-4は、本解析でせん断破壊した39体および曲げせん断破壊した18体を含めた57体の実験値と本解析値とを比較したものである。なお、図中に耐力比(実験値/解析値)の平均値および変動係数を示している。

これらの図より分かるように、全試験体105体では平均値が1.14であるが、実験でせん断破壊した74体の平均値は1.11で、本解析でせん断破壊した39体の平均値は1.07となり実験値により近くなっている。

図-5は、実験でせん断破壊した74体の実験値と正方形置換断面を用いた修正荒川mean式によるせん断耐力の計算値との比較をしたものである。図-6は、本解析でせん断破壊した39体および曲げせん断破壊した18体を含めた57体の実験値と計算値との比較したものである。なお、図中に耐力比(実験値/計算値)の平均値および変動係数を示している。

これらの図より分かるように、実験でせん断破壊した74体の平均値は1.17であり、文献18)に示されている耐力比の平均値とほぼ同じ値(1.16)となった。また、本解析でせん断破壊した39体の計算値の平均は1.15と実験値に近くなっているが、本解析結果の平均値は図-4に示すように1.07であり、計算値に比べ本解析結果の方がより実験値に近くなっていることが分かる。

以上より、本解析によりせん断破壊する試験体のせん断耐力の予測は可能と考えられる。

3.3 矩形断面への置換の検討

金ら²⁵⁾および山田ら²⁶⁾は、円形断面とこれの正方形置換断面のRC柱の曲げせん断実験を行なっている。これらの既往実験結果と本解析結果とのせん断耐力の比較により、置換断面法および本解析の適用性を検討する。なお、金ら²⁵⁾は長方形置換断面の実験も実施しており、比

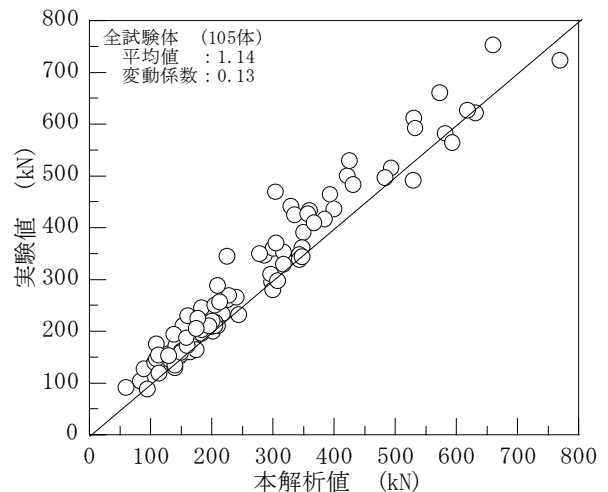


図-2 実験値と本解析値の比較(1)

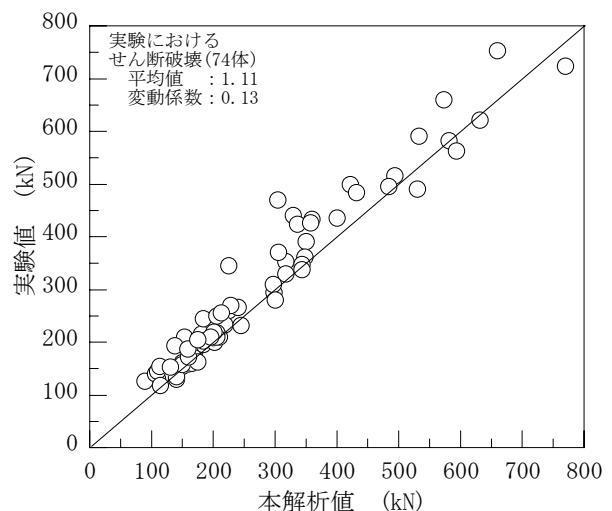


図-3 実験値と本解析値の比較(2)

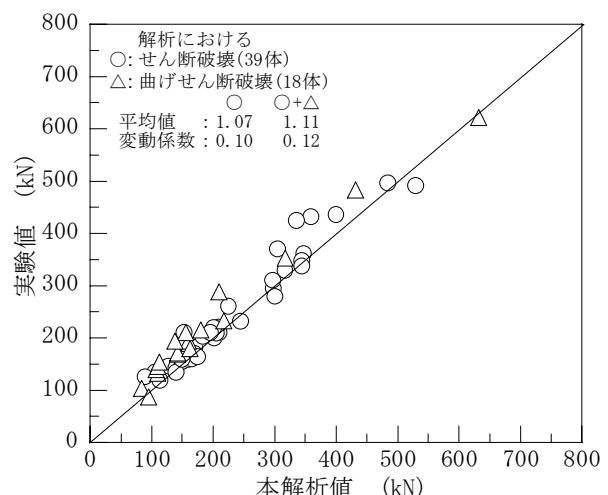


図-4 実験値と本解析値の比較(3)

較・検討の対象となる試験体数を多くするためにこれらの長方形置換断面も含めた。(以下、正方形と長方形の置換断面をまとめて矩形置換断面と呼ぶ)

図-7は、円形断面、正方形および長方形置換断面の実験値と本解析値との比較をしたものである。円形、正方形

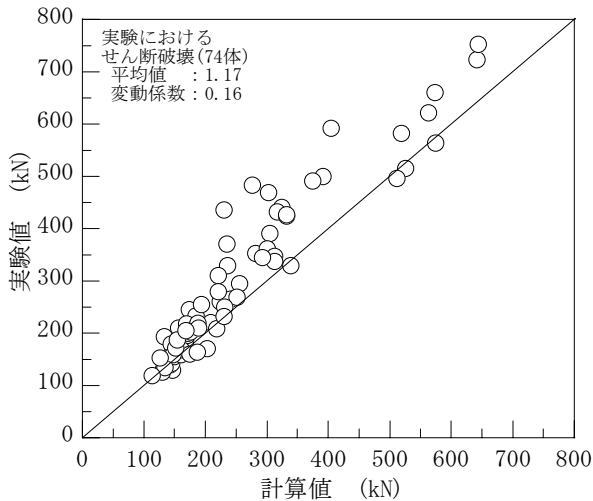


図-5 実験値と修正荒川式の比較(1)

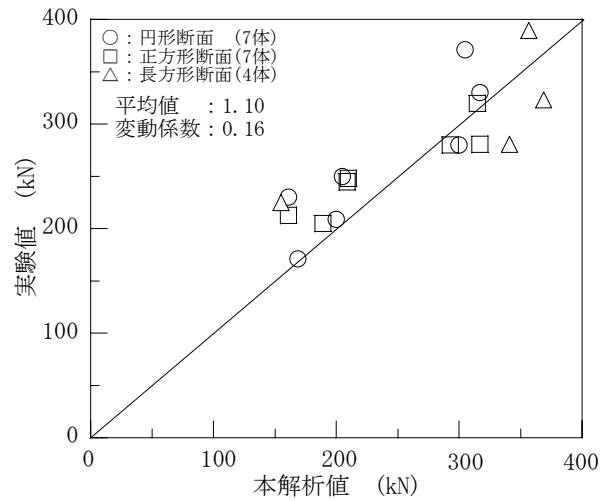


図-7 実験値と本解析値との比較

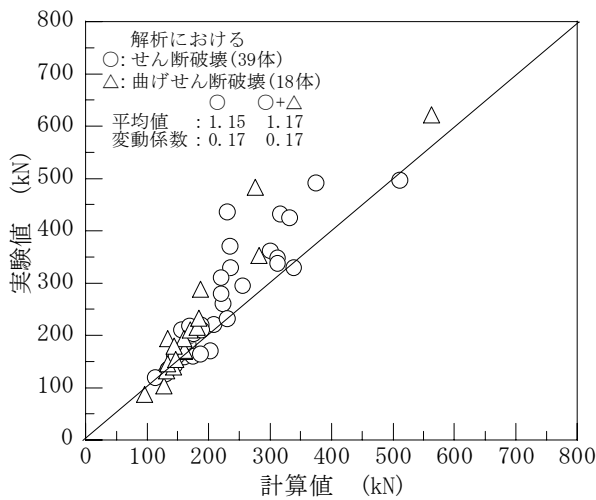


図-6 実験値と修正荒川式の比較(2)

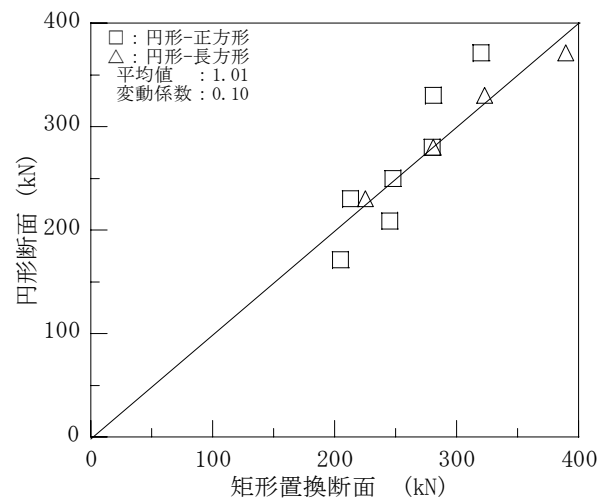


図-8 実験における円形と矩形の比較

および長方形の各々の試験体数は7体、7体および4体の計18体である。なお、実験でせん断破壊した試験体は18体のうち15体であり、本解析でせん断破壊したのは13体であった。図中に耐力比(実験値/解析値)の平均値および変動係数を示している。

この図より分かるように、18体の耐力比の平均は1.10で、変動係数は0.16であり、前節の図-3に示す実験でせん断破壊した74体の平均値1.11とほぼ同じであった。

図-8は、実験における円形断面と矩形置換断面のせん断耐力を比較したものである。図中の□印は7組の円形と正方形、△印は4組の円形と長方形の比較である。

この図より分かるように、円形断面と矩形置換断面の実験値の耐力比(円形/矩形)は平均値が1.01で、変動係数は0.10である。これらの既往実験の限られた範囲であるが、円形断面の矩形断面への置換は十分適用性があると言える。

図-9は、本解析における円形断面と矩形置換断面のせん断耐力を比較したものである。図中の□印は7組の円形と正方形、△印は4組の円形と長方形の比較である。

この図より分かるように、円形断面と矩形置換断面の

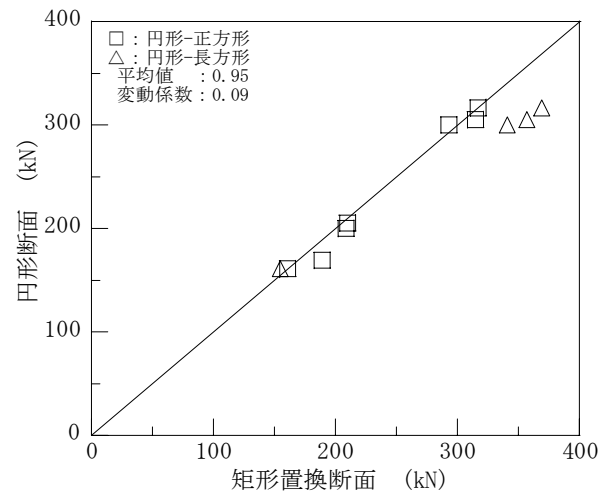


図-9 解析における円形と矩形の比較

解析値の耐力比(円形/矩形)は平均値で0.95、変動係数は0.09であり、図-8の実験値の比較と同様に、本解析においても円形断面の正方形および長方形断面への置換は十分適用性があることを示している。また、耐力比の平均値が0.95であり、矩形置換断面の方が円形断面よりせん断耐力が大きくなる傾向にあることが分かる。

3.4 せん断スパン比 (M/QD) による検討

図-10は、文献25)の円形断面(M/QD=1.0)と正方形置換断面(M/QD=1.12)の2試験体の諸元を用いて、破壊時のせん断力Qと曲げモーメントMとの関係についてM/QDをパラメータにして表したものである。なお、円形断面の直径Dと正方形置換断面のせいD'とはD'=0.89Dの関係がある。

この図より、せん断あるいは曲げ破壊時のM-Q関係は、円形、正方形ともに曲線となる傾向を示すことが分かる。このM-Q曲線上にせん断破壊と曲げ破壊の境界領域(円形：1.5~2.0, 正方形：2.25~2.81)が存在しており、解析的にこの境界領域を求めることは可能と考えられる。また、せん断破壊する領域では正方形の方が円形よりせん断耐力が大きくなっており、図-9においても同様のことが分かる。これは、文献16), 18)で述べられている正方形置換断面のせん断補強筋の補強効果の取扱い方が影響していると考えられる。

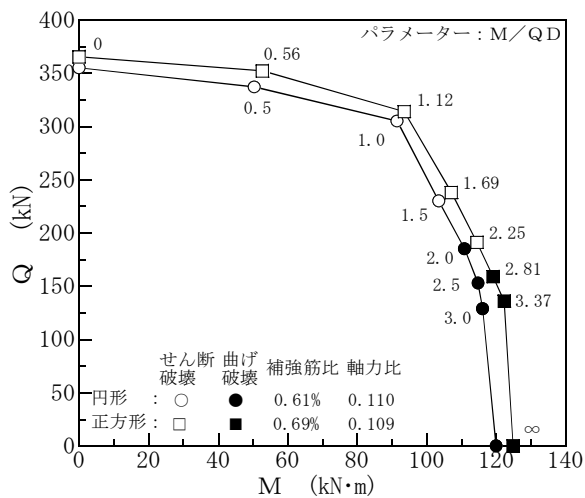


図-10 せん断耐力とM/QDの関係

3.5 拘束効果についての検討

拘束されたコンクリートの推定強度を用いた解析結果と既往実験結果との比較により、拘束されたコンクリート強度とせん断耐力との関係を検討した。まず、式(3)より求めた105体の拘束されたコンクリート強度 f_c とシリンダー強度 f_c との比 f_c/f_c (以下、強度上昇率と呼ぶ)を求めた。その結果、強度上昇率は1.0以下が56%で、1.0~1.1は17%、1.1~1.2は12%、1.2以上は15%(16体)であった。これは式(3)がプレーンコンクリート強度を基準にしており、せん断補強筋の体積比および降伏強度などによる強度上昇が本論の比較対象の試験体の場合は少なかったためと考えられる。

図-11は、拘束されたコンクリートの推定強度を用いて拘束効果を考慮した解析値と実験値とのせん断耐力を比較したものである。比較に用いた試験体は、せん断補

強筋比と降伏強度の大きい文献17)の13体で、強度上昇率の平均値は1.26で、1.2以上が6体あり、拘束効果が顕著に現れると考えて選定した。なお、比較のためシリンダー強度を用いた本解析結果も図中に併せ示す。

この図より分かるように、実験値と拘束されたコンクリートの推定強度を用いた解析値の耐力比は、平均値で1.00、変動係数は0.10となった(図中の○：拘束考慮)。なお、実験値とシリンダー強度を用いた本解析値との耐力比は、平均値で1.17、変動係数は0.13である(図中の□：拘束なし)。限られた範囲であるが、文献17)のような補強筋比が大きく、高強度鉄筋を用いた場合は拘束効果を考慮すると実験結果をよく捉えていると言える。

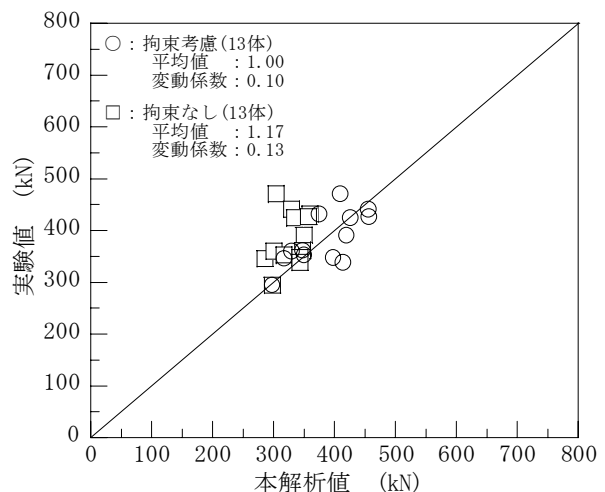


図-11 実験値と本解析値の比較

4. まとめ

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) 実験でせん断破壊した74体の既往実験結果と本解析結果の耐力比は、平均値で1.11、変動係数は0.13であった。また、本解析により判断したせん断破壊の39体の平均値は1.07で、変動係数は0.10となった。これより、本解析はせん断破壊する円形断面RC柱のせん断耐力の予測が可能と考えられる。
- 2) 円形断面と矩形置換断面の既往実験結果などから円形断面を矩形断面に置換しても十分適用性のあることが示されているが、本解析結果でも同様のことが言えた。
- 3) 本解析モデルにより、せん断破壊と曲げ破壊の境界領域をM/QDをパラメータにして解析的に求めることが可能と考えられる。
- 4) せん断補強筋の降伏強度および補強筋比が大きい場合は、拘束されたコンクリートの推定強度を用いて解析すると、解析値は実験値に近づく傾向にあった。

謝辞

本研究に際して文献5)~15), 17), 23)~26)および32)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・同解説，pp.115-116，1990
- 2) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能，p.140，1990
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，p.310，2001
- 4) 山肩邦夫：兵庫県南部地震による建築物基礎の被害の特徴と今後の対策，基礎工，Vol.24，No.11，pp.9-16，1996
- 5) 是永健好，小林淳，小室努，川端一三：異形 PC 鋼棒で横補強された場所打 RC 杭のせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.427-432，1998
- 6) 吉田誠，山本俊彦，山田和夫：鉄筋コンクリート杭の曲げせん断挙動に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21，No.3，pp.487-492，1999
- 7) 酒向靖二，山田和夫，山本俊彦：場所打ち鉄筋コンクリート杭のせん断挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.493-498，1999
- 8) 長江拓也，香取慶一，林静雄：場所打ちコンクリート杭への高強度せん断補強筋の適用に関する考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.403-408，1999
- 9) 新井元植，吉田誠，山本俊彦，山田和夫：場所打ち鉄筋コンクリート杭の曲げせん断挙動に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp. 667-672，2000
- 10) 酒向靖二，山田和夫，山本俊彦，矢野伸司：場所打ち鉄筋コンクリート杭のせん断挙動に及ぼすせん断スパン比の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.673-678，2000
- 11) 酒向靖二，山田和夫，山本俊彦，矢野伸司：円形断面を有する鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に及ぼす構成素材の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.181-186，2001
- 12) 山本俊彦，山田和夫，矢野伸司：鉄筋コンクリート円形部材の曲げせん断性状に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.187-192，2001
- 13) 本庄正樹，長江拓也，柳瀬高仁，林静雄：場所打ちコンクリート杭のせん断挙動に及ぼす寸法効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.979-984，2001
- 14) 矢野伸司，山田和夫，山本俊彦：円形断面を有する鉄筋コンクリート部材の曲げせん断挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.865-870，2002
- 15) 山本俊彦，山田和夫，矢野伸司：高強度せん断補強筋を用いた円形 RC 柱の曲げせん断挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.181-186，2002
- 16) 渡辺史夫，六車照，西山峰広：曲げとせん断を受ける PC パイルの耐力評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，9-2，pp.483-488，1987
- 17) 鈴木計夫，中塚佑，中田浩之，白沢吉衛：SD50 材の円形スパイラル筋を用いた RC 円形柱のせん断耐力・変形特性，コンクリート工学年次論文報告集，9-2，pp.601-606，1988
- 18) 大宮幸，香取慶一，林静雄：鉄筋コンクリート円形断面部材のせん断終局強度算定式に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1063-1068，2003
- 19) 林静雄，大宮幸，香取慶一：鉄筋コンクリート造円形断面部材のせん断終局強度式の適用性，コンクリート工学，Vol.42，No.2，pp.27-32，2004
- 20) 孫玉平，三宅良和：RC 円形断面柱の終局せん断耐力の算定式の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27，No.2，pp.229-234，2005
- 21) 黒正清治，林静雄，能森雅己，小川幸雄：円形断面を有する鉄筋コンクリート柱のせん断性状に関する実験，日本建築学会関東支部研究報告集，Vol.49，pp.217-220，1978
- 22) 黒正清治，林静雄，能森雅己：円形断面を有する鉄筋コンクリート柱の強度および変形性状に関する実験研究，日本建築学会関東支部研究報告集，Vol.49，pp.141-144，1978
- 23) 小川幸雄，林静雄，黒正清治：軸力と曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート円形断面柱の強度と変形性状に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，pp.1727-1728，1980.9
- 24) 山野辺宏治，黒正清治，福原正志，林静雄，小林克己：軸力と曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート円形断面柱の強度と変形性状に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，pp.1247-1248，1982.10
- 25) 金東範，長江拓也，香取慶一，林静雄：RC 造柱の断面形状が損傷過程と終局性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.258-268，2002
- 26) 山田和夫，山本俊彦，岡田亭：断面形状の異なる鉄筋コンクリート部材の曲げ・せん断挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.258-268，2003
- 27) 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
- 28) 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
- 29) 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
- 30) 松本豊，栗原和夫，岡島康樹，木上陽介：拡張した修正圧縮場理論による RC 円形断面部材のせん断耐力の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，pp.661-662，2005.9
- 31) 崎野健治，孫玉平：コンファインド高強度コンクリートの中心圧縮性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.713-718，1993
- 32) 伊藤光康，福田武久，鳥谷利夫，菊田繁美，堀川孝助：鉄筋コンクリート円形柱の復元力特性に関する実験研究 その1，その2，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，pp.403-406，1986.8