

論文 円形 RC 柱の終局耐力算定式の精度検証

金 眞佑*1・朱 華佳*2・谷 昌典*3・孫 玉平*4

要旨: 曲げせん断載荷を受けた 275 体の円形断面を有する鉄筋コンクリート柱 (円形 RC 柱) の実験結果を用いて, データベースを作成し, 既往の曲げ終局耐力式及びせん断終局耐力式の精度の検証を行った。その結果, 曲げ破壊を起こした試験体に対しては崎野・孫が提案している式が, せん断破壊を起こした試験体に対しては, 本論文で提案される修正三宅式が精度良く実験結果を評価できることが明らかとなった。さらに, 両式を組み合わせることによって, 円形 RC 柱の曲げ及びせん断の破壊形式を精度良く予測することが可能であった。

キーワード: 円形断面, RC 柱, データベース, 曲げ破壊, せん断破壊, 破壊形式

1. はじめに

円形 RC 柱は, 水平力に対して断面形状に方向性がないことから, 矩形断面柱に比べて力学的に合理的であるが, 円形 RC 柱の終局耐力を計算するにあたっては, 現行の設計規準では断面を矩形断面に置換して, 矩形断面用の設計式を準用¹⁾しているのが現状である。この方法では断面置換及びせん断補強筋の取り扱い方の違いから同じ柱の終局耐力が異なる結果になる可能性がある。この問題点を解決するために, 三宅らが円形 RC 柱に直接適用できる終局耐力式を提案し, 実験データの比較により, 提案式の妥当性を実証した²⁾。しかしながら, 三宅らの提案式における有効コンクリート強度係数は部材の直径が 740mm 以上になると負の値となり, 適用範囲が制限されている難点がある。

そこで, 本研究は, 国内外からより広く円形 RC 柱の曲げせん断性状に関する実験結果を収集し, 柱のデータベースを構築すると同時に, 構築したデータベースに基づき, 三宅らのせん断耐力式を修正し, それと合わせて現在提案されている様々な終局耐力計算法の精度検証を行うことによって, 円形 RC 柱の終局耐力を直接評価する方法を確立することを目的とする。

2. 実験データ概要

本研究で用いた実験データは, 1980 年~2007 年まで, 日本建築学会大会梗概集, 日本コンクリート工学協会年次論文集, 及び ACI Journal に公表された論文から, スパイラルまたはフープによって横補強された円形 RC 柱 275 体からなっている³⁾。表-1 に実験変数の範囲を破壊

形式別に示す。破壊形式は, 文献中に記載のあるものについては, それに従い, 記載が無い試験体に対する判定基準は以下の通りである。

- (1) 文献中に, 曲げ耐力計算値が示されているものについては, 実験における最大耐力が曲げ終局耐力計算値の 95%, 又は, 曲げ降伏耐力計算値を下回った試験体を「せん断破壊 (S)」とした。
- (2) 文献中で曲げ耐力計算値が示されていないものについては, 主筋の降伏が明記されておらず, かつ, 最大耐力時の部材角が文献⁴⁾に示される標準的なせん断柱の終局時変形角である 1/250 以下の試験体を「せん断破壊 (S)」とした。
- (3) せん断破壊試験体以外で, ひび割れ性状及び履歴性状などに基づき, せん断ひび割れによる耐力低下の発生によって最終的にせん断破壊したと判断された試験体を, 曲げ降伏後のせん断破壊 (F-S) とした。
- (4) 上記以外の試験体は曲げ破壊 (F) とした。

図-1 に円形 RC 柱の破壊形式に影響を及ぼすと考え

表-1 実験変数の範囲

破壊形式	曲げ破壊	曲げ降伏後 せん断破壊	せん断破壊
試験体数	93	94	88
a/D	1.0 ~ 10.0	1.1 ~ 6.0	0.8 ~ 2.5
n	-0.15 ~ 0.76	-0.10 ~ 0.60	0.00 ~ 0.60
f'_c (MPa)	22.0 ~ 90.0	23.6 ~ 57.0	22.4 ~ 49.6
p_w (%)	0.06 ~ 1.62	0.05 ~ 1.62	0.00 ~ 0.79
f_{yh} (MPa)	240 ~ 1417	240 ~ 1420	0 ~ 1499
p_g (%)	0.53 ~ 5.57	0.52 ~ 5.21	1.33 ~ 4.57
f_{ys} (MPa)	240 ~ 894	240 ~ 803	296 ~ 1065

a/D : せん断スパン比, n : 軸力比, f'_c : コンクリート強度, p_w : せん断補強筋比, f_{yh} : せん断補強筋降伏強度, p_g : 主筋比, f_{ys} : 主筋降伏強度

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生

*3 独立行政法人建築研究所 研究員 博士 (工学) (正会員)

*4 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

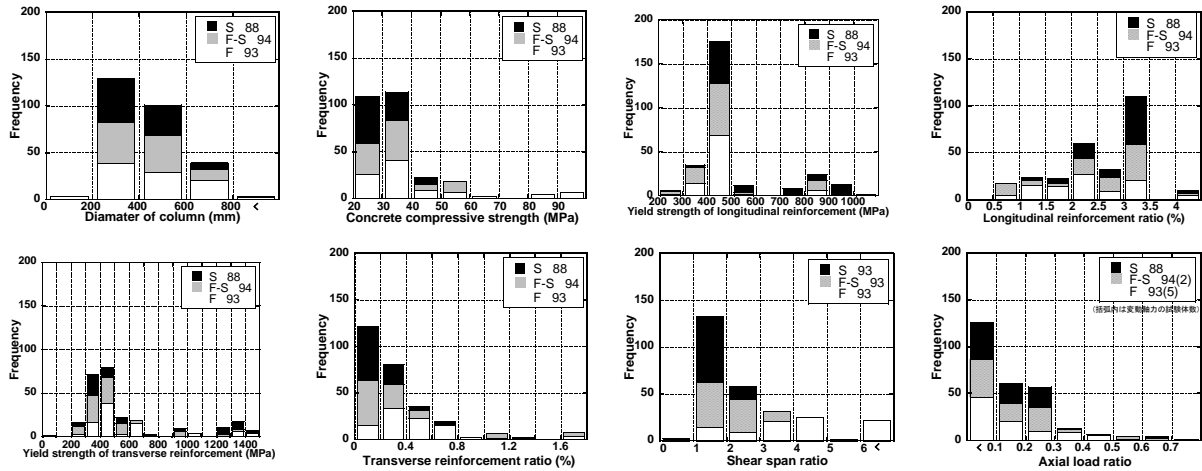


図-1 各実験変数に関する試験体数の分布

られる，断面直径，コンクリート圧縮強度，主筋降伏強度，主筋比，せん断補強筋降伏強度，せん断補強筋比，せん断スパン比及び軸力比の 8 つの実験変数に関して，試験体数の分布状況を破壊形式別に示す。

コンクリート圧縮強度が 50MPa 以上の試験体やせん断補強筋比が 1.0%以上の試験体にはせん断破壊が先行したものは無く，曲げ先行型の破壊をする傾向が見られた。また，せん断破壊した試験体のせん断スパン比は 2.5 未満であり，せん断スパン比が 2.5 以上の試験体は全て曲げ破壊となった。一方，主筋比，主筋降伏強度及びせん断補強筋降伏強度は，破壊形式に関わらず全ての領域に掛けて分布しており，明確な傾向は示さなかった。

3. 曲げ終局耐力算定式の精度の検証

円形 RC 柱の曲げ終局耐力算定は，円形断面に直接適用できる直接評価法と，矩形断面に置換して評価する方法の 2 つに大きく分けられる。ここでは，曲げ破壊先行 (F 及び F-S) したとされる 187 体の試験体のうち，変動軸力のピーク値が不明瞭であった試験体と二重にせん断補強筋が配置された試験体を除いた 180 体の試験体に対して，曲げ終局耐力を算定した。本文で取り上げる全ての算定式は，二重にせん断補強筋が配置された試験体を想定したものではないので，このような試験体を精度検証から除いた。耐力の計算に用いた方法は，直接計算式である崎野・孫式⁵⁾，日本建築学会「建築耐震設計における保有水平耐力と変形性能」に推奨されている中段筋

の影響を考慮した略算式¹⁾ (以下 AIJ 略算式) のほか，Collins らが開発した解析プログラム Response2000⁶⁾による方法と，M-φ 断面解析による方法の 4 つである。表-2 には，Response2000 と M-φ 断面解析の概要を示す。なお，崎野・孫式の精度検証にあたっては，無拘束コンクリートの強度 f_p は寸法効果を考慮できる式(1)を用いて評価した。

$$f_p = 1.61 \cdot D_c^{-0.103} \times f'_c \quad (1)$$

ここで， D_c は柱の直径(mm)， f'_c はコンクリートシリンダー圧縮強度(MPa)である。

曲げ破壊が先行した試験体 (F 及び F-S) の最大耐力実験値を縦軸に，各評価法による曲げ耐力計算値を横軸にプロットしたものが図-2 である。また，計算値に対する実験値の比の予測精度を表-3 に示す。表-3 中の数値は，括弧なしが F 試験体，括弧ありが F-S 試験体の値である。図-2 と表-3 により，いずれの評価法も，計算値に対する実験値の比の平均値が 1.0 より高く，安全側の評価となった。また，計算値に対する実験値の比は，F 試験体に比べて F-S 試験体の方が全体的に小さな値となった。F 試験体と F-S 試験体のいずれに対しても最も標準偏差が小さかったのは，崎野・孫式で，全ての評価法の中で予測精度が最も高い結果となった。一方，AIJ 略算式は他の評価法に比べて，際立って標準偏差が大きく，実験値が計算値を 20%以上回った試験体の割合はそれぞれ 73%及び 54%と，実験結果を大幅に過小評価

表-2 Response2000 と M-φ 断面解析の概要

	Response-2000	M-φ 断面解析
コンクリートモデル	Popovic's	崎野・孫
鉄筋モデル	Collins ⁶⁾	完全弾塑性
その他	・コンクリート引張強度考慮	・コンクリート引張強度考慮しない ・Fiber 法によりコンクリート断面 100 分割

表-3 曲げ終局耐力の精度の検証結果(耐力比の統計値)

F (F-S)	試験体数	Mean	St.Dev
崎野・孫曲げ耐力式	88(92)	1.15(1.06)	0.137(0.179)
AIJ 略算式		1.27(1.17)	0.322(0.309)
Response-2000		1.21(1.15)	0.163(0.205)
M-φ 断面解析		1.15(1.08)	0.186(0.188)

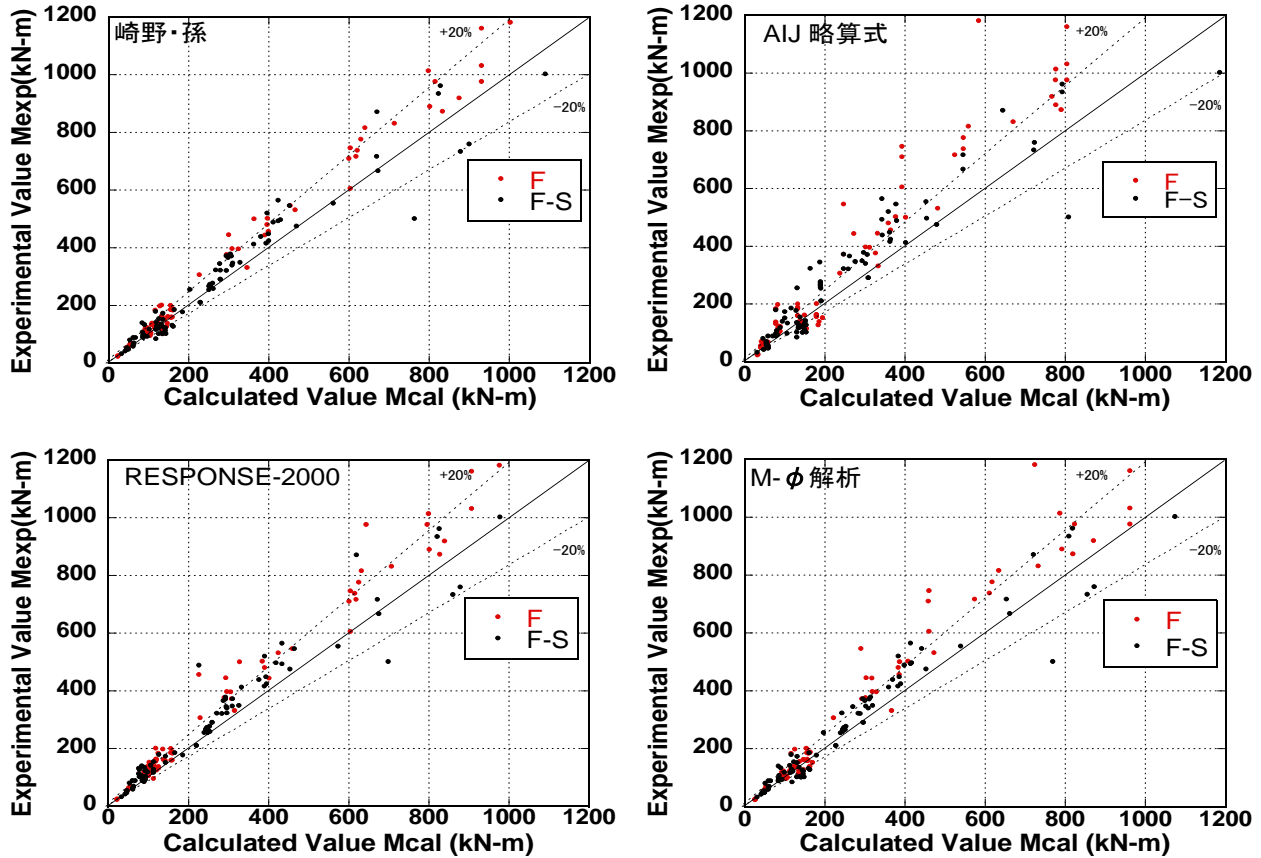


図-2 曲げ終局耐力の実験値と計算値の比較

する結果が非常に多いことから、予測精度に大きな問題があると言える。上述した考察から、円形断面を有する鉄筋コンクリート柱の曲げ終局耐力の算定には、最もばらつきが小さい崎野・孫式を用いるのが適切であると考えられる。

4. せん断終局耐力算定式の精度の検証

円形断面柱を対象としたせん断終局耐力算定式は、曲げ終局耐力算定式と同様に、矩形断面に置換する方法と、円形断面のまま直接評価する方法の2種類がある。本研究において対象としたせん断終局耐力の算定式は、1) 修正大野・荒川式⁷⁾、2) NewRC WGによって提案されている2つの式⁸⁾、3) ACI 規準式⁹⁾、4) 三宅らの提案式の5つで、最初の3つの方法は断面置換法で、他の2つは直接評価法である。断面置換による算定式及びACI式の詳細については関連文献を参考されたい。

4.1 断面置換法の概要と精度検証

円形断面を矩形断面に置換するには、図-3に示すような正方形断面及び矩形断面に置換する方法¹⁰⁾が一般的である。正方形断面へ置換する場合、断面積が等しくなるような正方形の一边を決定するため、円形断面に比べて断面せいが小さくなり、せん断スパン比が変わってしまう欠点がある。一方、長方形断面に置換する場合には、全せいは直径と等しくして、断面積が等しくなるよ

うに断面幅を決定すればよい。なお、断面を矩形に置換した場合に用いるせん断補強筋比の計算方法を表-4に示す。表-4に示す p_{w1} は円形断面としてのせん断補強筋比で、断面幅に円形断面の直径を用いる。 p_{w2} と p_{w4} は置換して得られた矩形断面としてのせん断補強筋比で、断面幅に矩形断面の断面幅を用いたものである。また、図-4に示すように、円形断面柱の場合は、せん断補強筋を横切る斜めひび割れの位置によってせん断補強筋

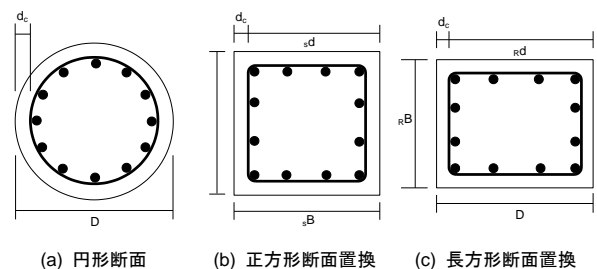


図-3 円形断面の置換方法と記号¹⁰⁾

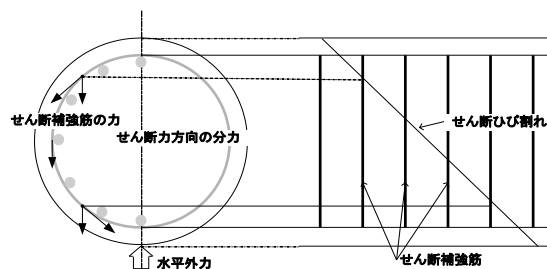


図-4 せん断補強筋位置とせん断力に有効な成分

表-4 せん断補強筋比の置換方法¹⁰⁾

円形断面より算出する場合		$p_{w1} = \frac{a_w}{D \cdot s}$
正方形断面の場合	$p_{w2} = \frac{a_w}{B \cdot s}$	$p_{w3} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{a_w}{B \cdot s}$
長方形断面の場合	$p_{w4} = \frac{a_w}{R \cdot B \cdot s}$	$p_{w5} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{a_w}{R \cdot B \cdot s}$

a_w : 1組のせん断補強筋の断面積, s : せん断補強筋間隔, 他の記号は 図-3 参照

表-5 断面置換によるせん断終局耐力の精度検証結果 (耐力比の統計値)

計算式	断面置換方法	p_w	試験体数	Mean	St.Dev
修正 大野・荒川式	正方形置換	p_{w1}	88	1.11	0.177
		p_{w2}		1.09	0.173
		p_{w3}		1.21	0.181
	長方形置換	p_{w1}		1.06	0.173
		p_{w4}		1.03	0.165
		p_{w5}			
NewRC1	正方形置換	p_{w1}	76*	1.09	0.225
		p_{w2}		1.05	0.214
		p_{w3}		1.13	0.238
	長方形置換	p_{w1}		1.02	0.213
		p_{w4}		0.95	0.191
		p_{w5}			
NewRC2	正方形置換	p_{w1}	88	0.91	0.238
		p_{w2}		0.88	0.225
		p_{w3}		0.94	0.251
	長方形置換	p_{w1}		0.84	0.223
		p_{w4}		0.79	0.199
		p_{w5}			

*せん断補強筋がない12体は除外した

が負担する力とせん断力の方向が一致しない場合がある。そのため、斜めひび割れの角度を45度と仮定した場合の、せん断補強筋の効果の平均値である $\pi/4$ を、 p_{w2} 及び p_{w4} に乗じたものが p_{w3} と p_{w5} である。なお、 p_{w5} は p_{w1} と等しいため、本論文では、 p_{w5} を用いた検討を省略する。断面置換に基づく各評価式に $p_{w1} \sim p_{w4}$ のせん断補強筋比を適用した場合の計算結果を表-5に示す。いずれの評価法に関しても、長方形断面に置換して p_{w4} を用いた場合の標準偏差が最も小さい結果となった。断面置換による算定式に対しては、いずれの式でも、 $p_{w1} \sim p_{w3}$ を使用した耐力比が、長方形断面置換で p_{w4} を使用した式の耐力比より高い値を示したことは、断面置換を行う際に、せん断補強筋の負担分がせん断補強筋比によって計算値を過小評価してしまうことを意味する。

4.2 直接せん断強度式の概要と精度検証

4.2.1 既往の直接せん断強度式の概要

直接評価法には、ACI式と三宅らが提案した直接せん断耐力式(三宅式)の2つがある。ACI式については、文献9)を参照されたい。三宅式を式(2)に示す。

$$V_u = \frac{\pi D^2}{4} \cdot (0.175 \cdot n + 0.13) \cdot v_c \cdot f_c + \frac{\pi}{4} \cdot A_{sh} \cdot f_{yh} \cdot \frac{D}{s} \quad (2)$$

ここで、 v_c は有効圧縮コンクリート強度係数で、式(3)

で表される。

$$v_c = (1.4 - D/740) \cdot \exp(-f_c/41) \quad (3)$$

式(2)は、せん断破壊面における力の釣り合い条件とMohr-Coulombの破壊則に基づいて得られたもので、第1項はコンクリートが負担するせん断力、第2項はせん断補強筋が負担するせん断力である。また、式(3)はせん断破壊した72体の円形断面柱の実験データに対して回帰分析して得られた式である。

4.2.2 修正三宅式と精度検証

本節では、既往の三宅式の算定において柱の直径Dが大きくなるにつれ有効コンクリート強度係数 v_c が負になることを踏まえ、 v_c の再構築を行う。

v_c は対象とする各試験体のせん断耐力実験値から、(1)式より逆算して求める。その際、せん断補強筋の降伏強度の上限は文献¹⁰⁾を参考に687MPaとした。その結果とコンクリート強度の関係を図-5(a)に示す。図-5(a)に示す逆算から得た $v_{c,rest}$ とコンクリート圧縮強度の関係から線形回帰分析を施した結果、式(4)が得られた。

$$v_c = 0.6 \cdot \exp(-f_c/100) \quad (4)$$

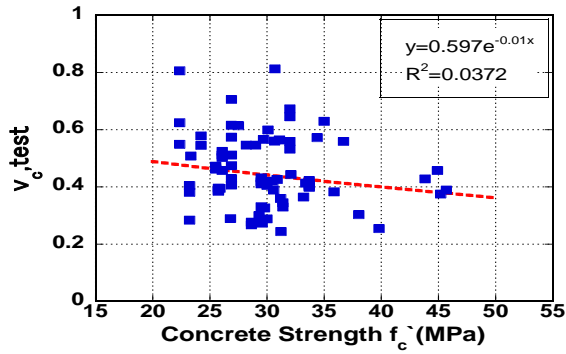
なお、学会指針式と同様に、 v_c をコンクリート強度の直線式とした場合、コンクリート強度が大きな範囲では v_c が0を下回り、適用性に問題がある(図-5(b)参照)ことから、指数関数式をあてはめた。

v_c の逆算結果を式(4)で計算された値で除したもの(以下相対 v_c と呼ぶ)と試験体のせん断スパン比及び軸力比の関係を図-6に示す。相対 v_c はせん断スパン比 a/D と比較的強い相関を示し、他の実験変数に対しては、せん断スパン比ほど明らかな相関関係が見られなかった。このことから、相対 v_c とせん断スパン比で回帰分析を行い、有効コンクリート強度係数の評価式として式(5)を提案する。

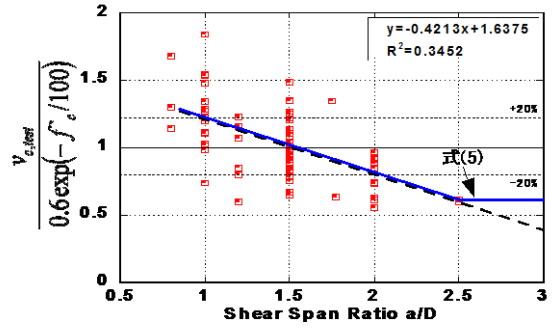
$$v_c = (1 - 1/4 \cdot a/D) \cdot \exp(-f_c/100) \quad (5)$$

以後、式(2)と式(5)を合わせた式を修正三宅式と呼ぶ。なお、せん断スパン比が2.5(a/D)以上でせん断破壊した試験体がないので、 a/D が2.5以上試験体の v_c を算定する際に a/D を2.5とする。(図-6(a)参照)

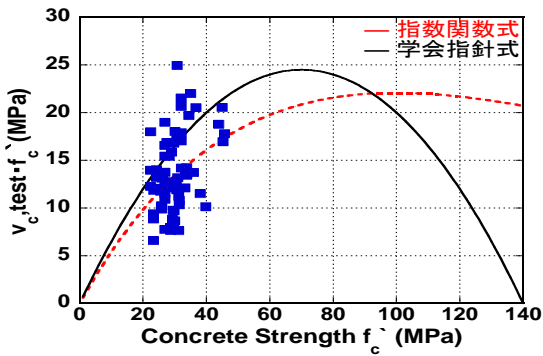
断面置換法、ACI式及び修正三宅式による計算結果とせん断破壊した試験体の実験値を比較したものを図-7に示す。なお、断面置換による評価法では、最も予測精度が良かった「長方形断面置換、せん断補強筋比 p_{w4} 」の結果のみを示している。耐力比の平均値は、ACI式以外の評価法で1.0に近い値を示した。また、断面置換による算定式で、耐力比の平均値の標準偏差が最も小さいのは修正大野・荒川式であり、以下、NewRC1、NewRC2の順となった。また、直接評価法による算定式に対しては、修正三宅式が良好な精度で実験結果を評価したことが図-7より分かる。また、他の算定法と比べて、修正



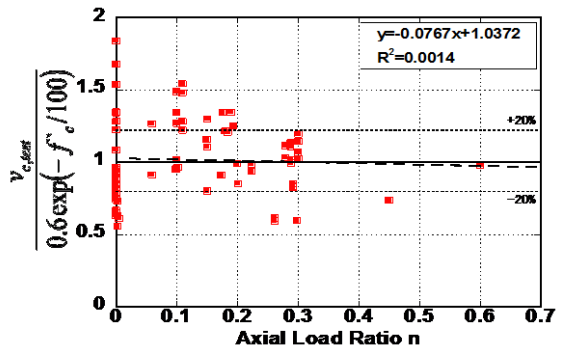
(a) 逆算 $v_{c, test}$ 値と f_c の関係



(a) せん断スパン比



(b) 逆算 $v_{c, test}$ と学会指針式の比較



(b) 軸力比

図-5 有効コンクリート強度係数の逆算結果

図-6 v_c と実験変数との関係

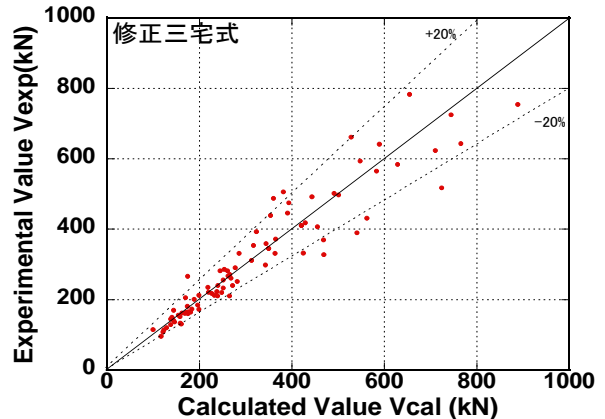
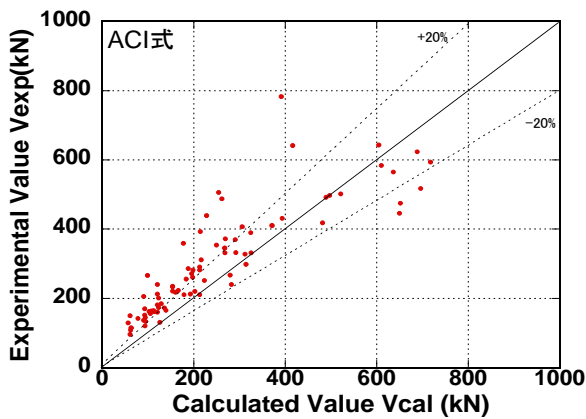
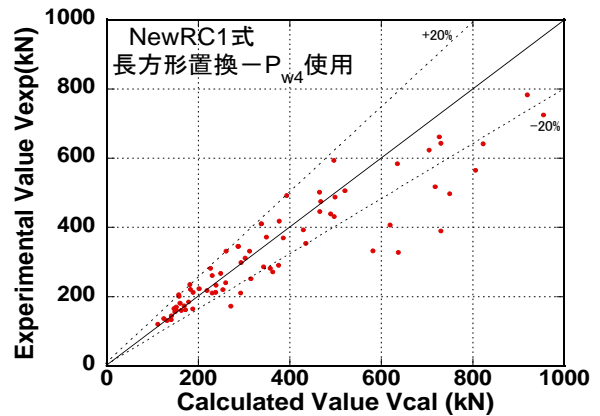
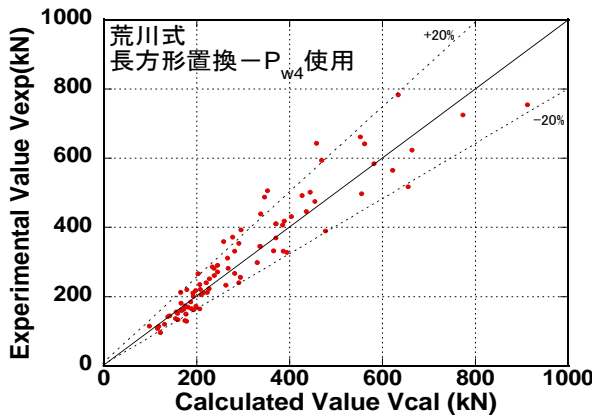
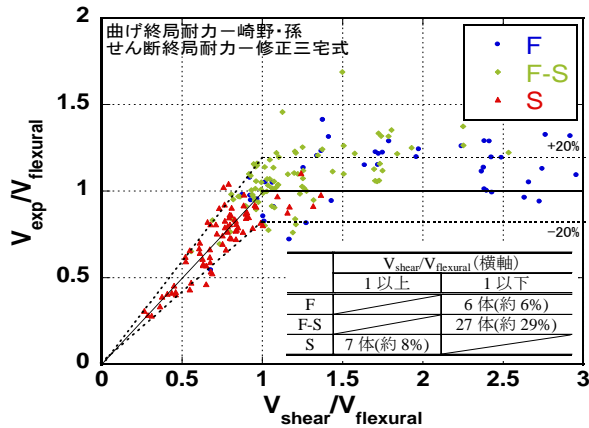


図-7 せん断耐力実験値と計算値の比較

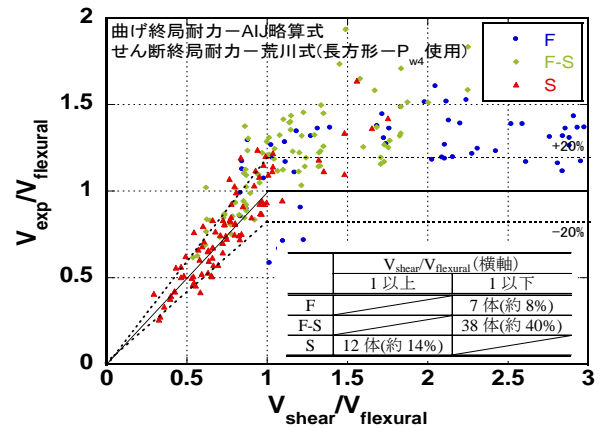
三宅式は、耐力比の平均値が 0.98、標準偏差が 0.145 で、最も精度が高かった。

5. 破壊形式の予測

本節では、本論文の検討で用いた曲げ終局耐力算定式



(a) 円形断面直接式使用



(b) 円形断面置換式使用

図-8 組合せによる耐力推定精度

及びせん断終局耐力算定式のうち、直接評価法同士を組み合わせた場合及び断面置換法同士を組み合わせた場合の破壊形式の予測精度に関して検討を行う。図-8は、せん断終局耐力計算値を曲げ終局計算値で割った値 ($V_{shear}/V_{flexural}$) を横軸に、各試験体の最大耐力を曲げ終局耐力計算値で割った値 ($V_{exp}/V_{flexural}$) を縦軸にとり、破壊形式ごとにプロットしたものである。破壊形式の予測精度の検討に用いた耐力算定式は、直接評価法のうちで最も予測精度が高かった崎野・孫式と修正三宅式、断面置換法のうちで最も予測精度が高かった AIJ 略算式と修正大野・荒川式である。なお、図-8 では $V_{shear}/V_{flexural}$ が 3 までの計算結果のみを示したが、 $V_{shear}/V_{flexural}$ が 3 を上回る試験体は直接評価法で 44 体、断面置換法で 30 体存在した。それらの試験体の全てが曲げ破壊であった。図-8 中には、予測された破壊形式が実験での破壊形式と異なる試験体の数と割合を示している。図-8 より、直接評価法である崎野・孫曲げ耐力式と修正三宅式を組み合わせれば、現行の断面置換法よりも高い精度で円形 RC 柱の破壊形式を予測することができる。

6. まとめ

曲げせん断載荷を受けた 275 体の円形断面を有する鉄筋コンクリート柱の実験結果を用いてデータベースを作成し、それに基づいて現行の終局耐力式の精度の検証を行った。その結果、曲げ破壊した試験体に対しては、崎野・孫式を、せん断破壊した試験体に対しては本論文で提案した修正三宅式で、実験結果を精度良く評価できることが分かった。このことは、円形 RC 柱の耐力算定には、煩雑な断面解析や矩形断面に置換することなく、高い精度で耐力を評価できることを示唆している。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築耐震設計における保有水平耐

力と変形性能, pp. 396-397, 1990

- 2) 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
- 3) 金眞佑, 孫玉平, 谷昌典, 藤永隆: データベースを用いた円形断面を有する RC 柱の破壊形式に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.317-318, 2010.9
- 4) 日本建築防災協会: 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・同解説, 2001
- 5) 孫玉平, 崎野健治: 拘束円形鉄筋コンクリート柱の曲げ終局強度の算定法, 日本建築学会九州支部研究報告, pp.229-236, 1997.3
- 6) M.P.Collins: Response-2000 Manual, (<http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/r2k.htm>)
- 7) 広沢雅也, 後藤哲郎: 軸力を受ける鉄筋コンクリート部材の強度と粘り (その 2 既往の資料に関する検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.819-820, 1971.11
- 8) 倉本洋, 渡邊史夫, 南宏一, 西村泰志ほか: 柱部材に対する NewRC せん断強度式の耐力予測精度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.705-706, 1993.9
- 9) Building Code Requirements for Structural Concrete and commentary, ACI Committee 318, 2005
- 10) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.27-32, 2004
- 11) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No.461, pp.95-104, 1994.7