

論文 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

大宮 幸^{*1}・香取 慶一^{*2}・林 静雄^{*3}

要旨： 鉄筋コンクリート円形断面部材のせん断終局強度については，その算定法や安全余裕度について十分な検討は行われていない。このため，円形断面部材のせん断終局強度算定値と実験結果との関係を明確にし，今後の設計における資料とすることを目的として，円形断面部材のせん断終局強度に関するデータベースを作成し，円形断面部材のせん断終局強度として最も広く用いられている荒川式の適用性について考察した。この際，矩形断面への置換法（長方形・正方形），せん断補強筋比の取り扱いが安全余裕度に及ぼす影響について検討した。これら結果をもとに，ばらつきの少ない新たなせん断終局強度算定式を提案した。

キーワード： 円形断面部材，せん断終局強度，荒川 mean 式

1. はじめに

日本建築学会を始め各機関から鉄筋コンクリート構造設計や計算に関する多くの規準や指針が発行されているが，鉄筋コンクリート円形断面部材のせん断終局強度算定法について明確に定められたものはない。このため通常，コンクリート円形断面部材のせん断終局強度は，断面を等価な断面積を持つ正方形断面に置換し，既存の矩形断面部材のせん断終局強度式を適用することにより算出されている。

円形断面の例として，現場打ちコンクリート杭が挙げられるが，このせん断終局強度算定法について「建築基礎構造設計指針」¹⁾に以下のように示されている：「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值（不合格率，約 5 % に相当）を与える実験式を準用すれば算定できる」。しかしながら文献[1]にはせん断補強筋比や主筋比の考え方など適用方法について明確な記載はなく，これらは設計者の判断に任せられている。

設計式が何であれ，実験結果に対し，平均と分散から定まる余裕度が一定であれば，設計上は問題はない。しかし，設計者によってシアスパン比，せん断補強筋比，主筋比などの取り扱い

い方が異なっているにもかかわらず，実験値に対する設計式の安全余裕度について示された例はない。このため円形断面部材のせん断設計は，安全余裕度が不明なまま行われている。

以上のような現状を踏まえ，本論では円形断面部材のせん断終局強度算定法と，その安全余裕度や適用性についての考察を行った。検討対象とした設計式は，現在最も広く用いられている荒川式とする。荒川式の適用にあたって，矩形断面への置換方法を 2 種類，せん断補強筋比の考え方を 3 種類設定し，検討を行った。

2. 検証用試験体

検証に用いた試験体は，参考文献[2]～[15]に示す試験体の中で，逆対称加力を行った試験体 101 体である。試験体の実験変数の範囲は，コンクリート強度 21 ～ 55 N/mm²，せん断補強筋比 0 ～ 1.6%，軸力比 0 ～ 0.5，せん断スパン比 0.9 ～ 2.3 である。円形断面部材は最外端の鉄筋が降伏してからも耐力は上昇し，曲げ破壊とせん断破壊の判別が難しい。このため計算式の検証にあたって，せん断終局強度計算値が曲げ終局強度計算値の 1.1 倍以上の試験体を除外した。このため計算式によって検証した試験体数が異なっている。なお，曲げ終局強度の計算は，平

*1 東京理科大学工学部建築学科 助手 工博

*2 東京工業大学建築物理研究センター 助手 工博

*3 東京工業大学建築物理研究センター 教授 工博

面保持を仮定した断面曲げ解析で行った。鉄筋の応力 - 歪関係はバイリニアとし、コンクリートの応力 - 歪関係には梅村の e 関数を使用した。コンクリートの最大強度時の歪は、明記されていない文献もあったので、コンクリート強度に関わらず 0.25% とし、最外縁のコンクリート圧縮ひずみが 0.30% となったときの曲げモーメントを曲げ終局モーメントとした。

3. せん断終局強度式の考え方

3.1 せん断強度式

先に述べたとおり、本論では荒川式に軸力の補正を加えたいわゆる修正荒川式を検討対象とする。平均値を示す荒川 mean 式に対し、荒川 min 式は、実験値に対する 5% 不合格の限界を示す式と位置付けられているが、荒川 min 式では、安全余裕度係数がコンクリート負担分にしか掛けられていないので、ここでは一応別の式として、適合性の検討を行った。

3.2 断面の置換法

現在もっとも一般的に行われているのは、円形断面と断面積の等しい正方形断面（正方形置換断面と呼ぶ。図 1- b 参照）に置換する方法である。この方法の場合、正方形置換断面部材の全せいが円形断面部材より小さくなるので、シアスパン比が大きくなり、曲げ形に判断されやすくなる。そこで全せいが円形断面部材の直径と等しく、かつ断面積の等しい長方形断面（長方形置換断面と呼ぶ。図 1- c 参照）に置換する方法を検討した。主筋は、引張鉄筋、中間鉄筋、圧縮鉄筋に 3 等分して配分することにした。

3.3 せん断補強筋比

円形断面部材のせん断補強筋比をどのように置換するかについても解釈が異なっている。具体例として以下の二つの方法が挙げられる。

1 組のせん断補強筋の断面積 (a_w) を最もせん断力が大きくなる部材中央の幅、すなわち直径 (D) とせん断補強筋間隔 (s) で除したものとする場合 (p_{w1})、 a_w を置換した矩形断面の幅 (s_B) とせん断補強筋間隔 (s) で除したものとする場合 (p_{w2}, p_{w3})。また円形断面の場合、図 2 に示すように、せん断補強筋を横切る斜めひび割れの位置によって、せん断補強筋の負担力とせん

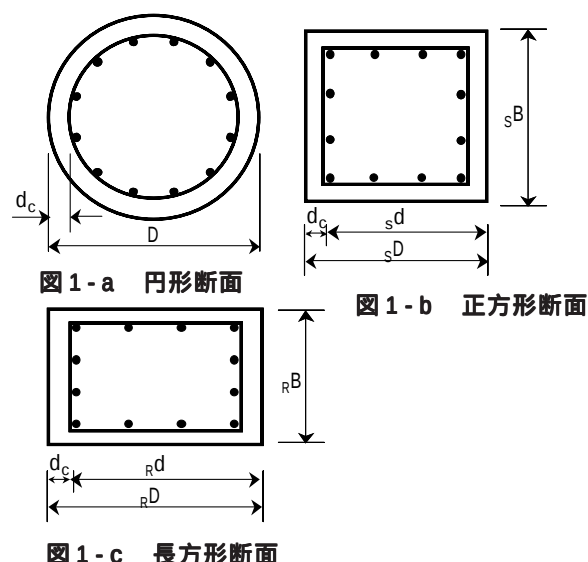


図 - 1 円形断面の置換方法と記号

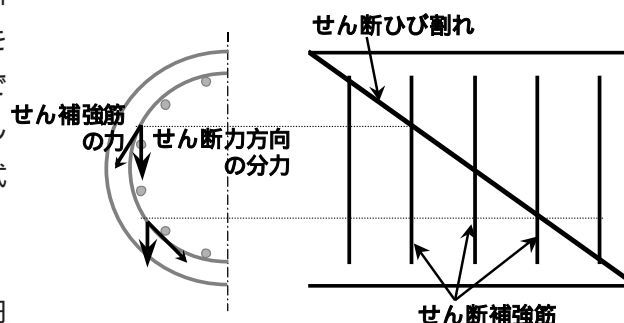


図 - 2 せん断補強筋位置とせん断力に有効な成分

[せん断補強筋比の考え方]

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 $p_{w2} = \frac{a_w}{s_B \cdot s}$ $p_{w4} = \frac{\pi}{4} \frac{a_w}{B \cdot s}$

長方形断面の場合 $p_{w3} = \frac{a_w}{R_B \cdot s}$ $p_{w5} = \frac{\pi}{4} \frac{a_w}{R_B \cdot s}$

[記号] a_w : 1組のせん断補強筋の断面積 / s : せん断補強筋間隔 / D, s_B, R_B : 図-1参照

断力の方向が異なるため、円形断面と矩形断面では、せん断補強筋の効果が異なる。斜めひび割れの角度が 45 度の場合、せん断補強筋の効果の平均値は、円形断面の場合矩形断面に対し $\pi/4$ 倍となり、この値を用いて補正したほうが良いとの指摘もあるため、補正係数を用いる場合についても検討を行う (p_{w4}, p_{w5})。ただし、円形断面と長方形置換断面は断面積が等しいので、 $\frac{\pi D^2}{4} = R_B^2 B D$ つまり、 $\frac{\pi}{4 R_B} = \frac{1}{D}$ となり、 p_{w1} と p_{w5} は等しくなる。従って断面を長方形に置換する場合 p_{w5} を考える必要はない。

4. 正方形断面へ置換した場合の検証結果

4.1 荒川 min 式による検証 [式(1)]

実験値と計算値との比較を図-3～5に、実験値と計算値の比の平均値、標準偏差、及び、不合格率を5%に抑えるための係数（平均値から標準偏差の1.7倍を引いた値）を表-1に示す。図中の点線は近似直線を、実線は平均値に表-1の α を乗じた95%の信頼線を示している。

せん断補強筋比の取り方によらず、式(1)は、95%合格率を満足している。 p_{w4} とした場合が最も安全側の値を与え、補正を掛けず p_{w2} とした場合が最も標準偏差が小さくなっている。

4.2 荒川 mean 式による検証 [式(2)]

実験値と計算値との比較を図-6～8に、実験値と計算値の比の平均値、標準偏差、及び、不合格率を5%に抑えるための係数を表-2に示す。図中の点線、実線は4.1と同様である。

荒川 min 式同様、せん断補強筋比の取り方によらず、式(2)の平均値は実験値を上回っているが、95%合格率を満足するためにはそれぞれ表-2で示した安全係数を乗じる必要がある。 p_{w2} とした場合、平均値は最も低くなり、標準偏差、安全係数も最も小さな値となった。また荒川 mean 式は荒川 min 式に比べ、標準偏差が小さくばらつきが少ない。

$$Q_{su} = \left(\frac{0.092k_u k_p (\sigma_B + 18)}{\frac{L_o}{s} d + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right) B_s j \quad (1)$$

$$Q_{su} = \left(\frac{0.12k_u k_p (\sigma_B + 18)}{\frac{L_o}{s} d + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right) B_s j \quad (2)$$

[記号]

k_u : s による補正係数

k_p : 引張鉄筋比 $\rho_t (= \frac{a_t}{s B_s d})$ による補正係数

$a_t = \frac{a_g}{3}$ a_g : 主筋全断面積

σ_B : コンクリート圧縮強度

L_o : 試験体内法長さの半分

s : 正方形置換断面の有効せい

p_w : せん断補強筋比 ($p_{w1}, p_{w2}, p_{w3}, p_{w4}$)

σ_{wy} : せん断補強筋の降伏点

σ_0 : 平均軸方向応力度 ($= \frac{4N}{\pi D^2}$)

N : 軸力

s : 正方形置換断面の幅 ($= \frac{\sqrt{\pi} D}{2}$)

$s j = \frac{7}{8} s d$

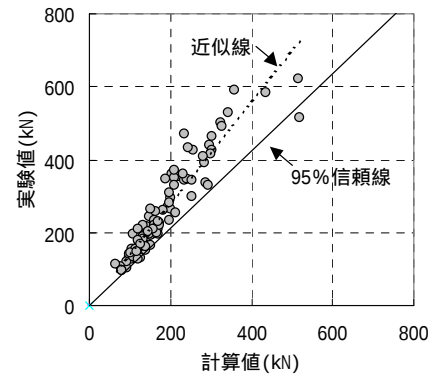


図-3 実験値と計算値との比較
(正方形置換, 荒川 min 式, $p_w = p_{w1}$)

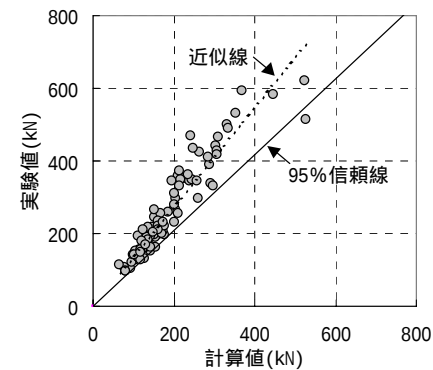


図-4 実験値と計算値との比較
(正方形置換, 荒川 min 式, $p_w = p_{w2}$)

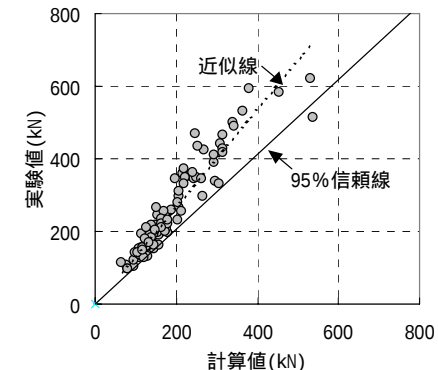


図-5 実験値と計算値との比較
(正方形置換, 荒川 min 式, $p_w = p_{w4}$)

表-1 平均値と95%信頼係数
(正方形置換, 荒川 min 式)

補強筋比	p_w		
	p_{w1}	p_{w2}	p_{w4}
実験値の平均 (Ave)	1.37	1.34	1.39
標準偏差 (σ)	0.19	0.18	0.20
$\alpha = \text{Ave} - 1.7 \sigma$	1.04	1.03	1.06

5. 長方形断面へ置換した場合の検証結果 [式(3)]

前章において、荒川 mean 式を用いた場合は、荒川 min 式を用いた場合に比べ、標準偏

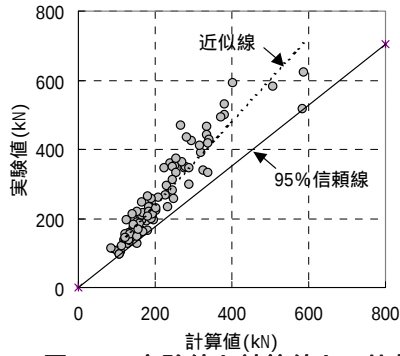


図 - 6 実験値と計算値との比較
(正方形置換, 荒川 mean 式, $p_w = p_{w1}$)

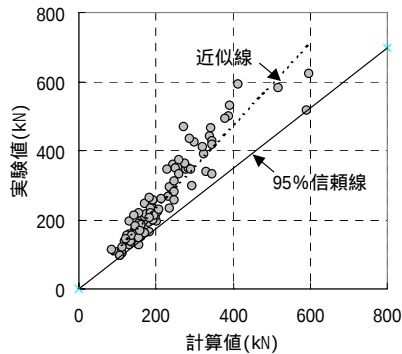


図 - 7 実験値と計算値との比較
(正方形置換, 荒川 mean 式, $p_w = p_{w2}$)

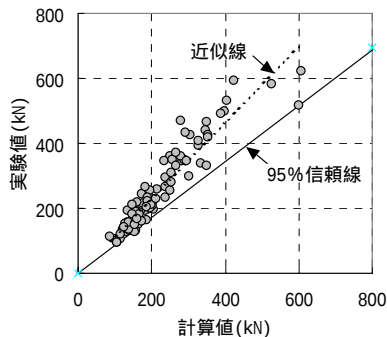


図 - 8 実験値と計算値との比較
(正方形置換, 荒川 mean 式, $p_w = p_{w4}$)

表 - 2 平均値と 95% 信頼係数
(正方形置換, 荒川 mean 式)

補強筋比	Pw		
	Pw1	Pw2	Pw4
実験値 計算値 の平均 (Ave)	1.16	1.14	1.18
標準偏差 (σ)	0.17	0.17	1.18
$\alpha = \text{Ave} - 1.7 \sigma$	0.87	0.86	0.88

差が小さくばらつきが少ないことがわかった。
そこで本章では, 荒川 mean 式についてのみ
検討を行う。

実験値と計算値との比較を図 - 9, 10 に, 実
験値と計算値の比の平均値, 標準偏差, 及び不

$$Q_{su} = \left(\frac{0.12 k_u k_p (\sigma_B + 18)}{\frac{L_o}{R d} + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \sigma_{wy} + 0.1 \sigma_0} \right) B_R j \quad (3)$$

[記号]

k_u : $R d$ による補正係数

k_p : 引張鉄筋比 $p_t (= \frac{a_t}{B_R d})$ による補正係数

$R d$: 長方形置換断面の有効せい

p_w : せん断補強筋比 ($= p_{w1}$ または p_{w3})

$R B$: 長方形置換断面の幅 ($= \frac{\pi D}{4}$)

$j = \frac{7}{8} R d$

その他の記号は 1 式と同じである

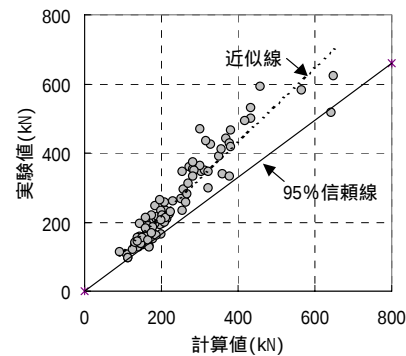


図 - 9 実験値と計算値との比較
(長方形置換, 荒川 mean 式, $p_w = p_{w1}$)

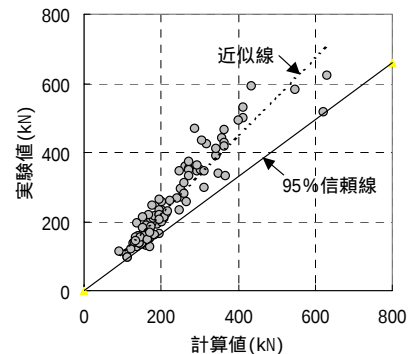


図 - 10 実験値と計算値との比較
(長方形置換, 荒川 mean 式, $p_w = p_{w3}$)

表 - 3 平均値と 95% 信頼係数
(長方形置換, 荒川 mean 式)

補強筋比	Pw	
	Pw1	Pw3
実験値 計算値 の平均 (Ave)	1.10	1.07
標準偏差 (σ)	0.16	0.15
$\alpha = \text{Ave} - 1.7 \sigma$	0.83	0.81

合格率を 5% に抑えるための係数を表 - 3 に示
す。図中の実線, 破線は 4.1 と同様である。

せん断補強筋比の取り方によらず, 式(3)の平
均値は実験値を上回っているが, 95% 合格率を
満足するためにはそれぞれ表 3 で示した安全係

数を乗じる必要がある。せん断補強筋比に補正を掛けず p_{w3} とした場合、平均値が最も低くなり、標準偏差と安全係数も最も小さな値となっている。

6. 設計式としての提案

6.1 鉄筋コンクリート円形断面部材

せん断終局強度提案式

5章の結果、円形断面の置換法及びせん断補強筋比の取り方により、以下のような傾向が見られた。

正方形置換断面の場合：荒川 min 式を用いている限り、95%の信頼確率は満足されていると思われる。またその際、せん断補強筋比に $\pi/4$ の補正を掛けた p_{w4} を使用した場合が最も安全側に評価できている。一方、荒川 mean 式を用いた場合には、十分な安全性を確保しているとは言い難い。このためせん断補強筋の取り方に応じて、表2に示した安全係数を乗じて用いることが望ましい。

長方形置換断面の場合：長方形置換断面とする場合、正方形とした場合より標準偏差が小さくばらつきは少ない傾向が見られた。最もばらつきが少なかったものは、荒川 mean 式を使用し、せん断補強筋比に補正を掛けない p_{w3} を使用した場合であった。

長方形置換断面の場合、部材幅は式(4)で表すことができ、幅とせいを円形断面部材の直径と線形に扱うことができる。このため計算上、長方形置換断面を意識することなく、円形断面から得られる情報のみで、荒川式を書き直すことができる。

以上の結果より、式(3)、式(4)と p_{w3} を使用し、表3に示す安全係数0.81を乗じた式(5)を、円形断面部材の設計式として提案する。

6.2 提案式の実験変数に対する適合性と適用範囲

提案式の各実験因子に関する適合性を、今回の検討に用いた実験因子の適用範囲と併せて、図-11に示す。図中には近似直線式をあわせて示す。提案式はせん断補強筋量(=せん断補強筋比とせん断補強筋の降伏点との積)に関してやや右上がりとなる傾向が見られる。しかし、ど

$${}_R B = \frac{\pi D}{4} \quad 0.785D \quad (4)$$

$$Q_{su} = 0.64 \left(\frac{0.12 k_u k_p (\sigma_B + 18)}{\frac{M}{Qd} + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right) Dj \quad (5)$$

[記号]

$d = D - d_c$

k_u : d による補正係数

k_p : 引張鉄筋比 $p_t (= \frac{a_t}{0.785 D d})$ による補正係数

$a_t = \frac{a_g}{3}$ a_g : 主筋全断面積

σ_B : コンクリート圧縮強度

$p_w = \frac{a_w}{0.785 D s}$

a_w : 1組のせん断補強筋の断面積

s : せん断補強筋間隔

σ_{wy} : せん断補強筋の降伏点

σ_0 : 平均軸方向応力度 $(= \frac{4N}{\pi D^2})$

N : 軸力

$j = \frac{7}{8} d$

の実験因子に対しても(実験値/提案式)は、ほぼ一定な値となっており、特に実験因子によるばらつきは見られない。

先にのべたとおり、今回検討に用いた試験体の実験変数範囲(コンクリート強度、せん断補強筋量、せん断スパン比、軸力)はほぼ実用範囲を満たしており、本提案式は十分適用性があるものと思われる。

7. まとめ

円形断面部材のせん断強度に関する過去の実験データを収集し、既往の実験式との適応性について検討した。置換断面の方法やせん断補強筋比の取り方など矩形断面への置換方法についても検討した結果、以下の知見を得た。

1) 収集した実験データは100体を超え、その実験因子の範囲についてもほぼ実用範囲を網羅している。

2) 現状で、最もよく行われている正方形置換断面の場合、荒川 min 式を用いている限り、ほぼ安全性は満足されていると思われる。ただし荒川 mean 式を用いた場合には、十分な安全性を確保しているとは言い難い。

3) 最も実験値と適合性の良いのは、長方形置換断面で荒川 mean 式を使用した場合である。

4) 以上の結果を用いて、95%信頼性を満足する円形断面部材のせん断終局強度算定式として、式(5)を提案した。提案式は、計算上長方形断面を意識することなく、円形断面から得られる情報のみでせん断強度を算出できる。

5) 提案式は各実験変数に対し、ほぼ一様の傾向を示した。

なお本論文では、荒川式のみを検討対象としたが、今後その他のせん断終局強度設計式についても検討を行ってゆく予定である。

謝辞 本論は、東京工業大学建築物理研究センターの共同利用研究の一貫として行われたものである。

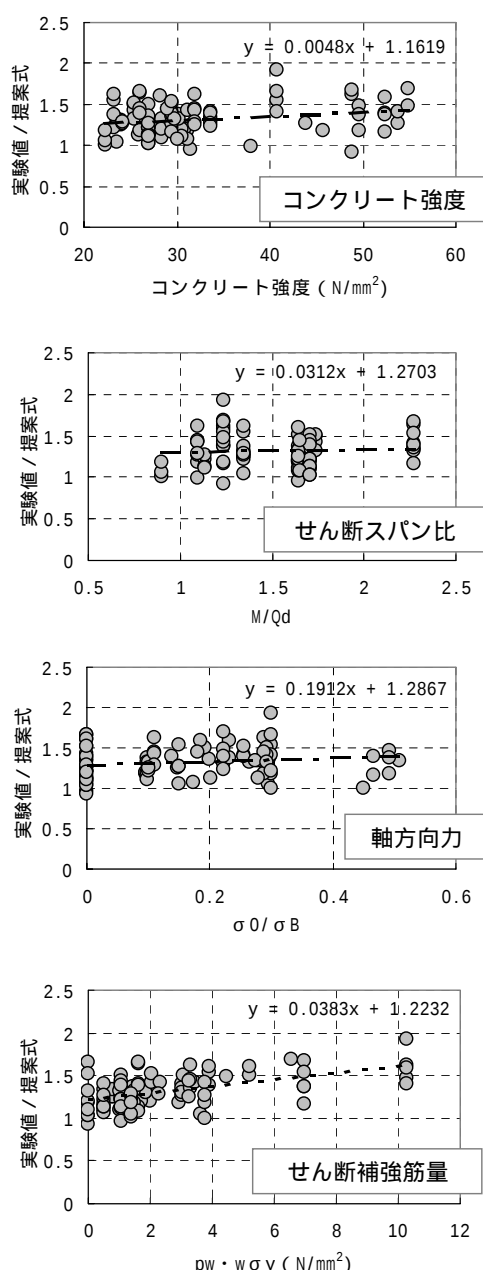


図 - 11 実験因子の範囲と適合性の検討

【参考文献】

1. 日本建築学会：「建築基礎構造設計指針」，2001
2. 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，pp.1727-1728，1980
3. 山野辺宏治，黒正清治，福原正志，林静雄，小林克巳：曲げせん断及び軸力を受ける鉄筋コンクリート円形断面柱のせん断強度と変形性状に関する実験研究，日本建築学会大会，pp.1247-1248，1982
4. 伊藤光康，福田武久，鳥谷利夫，菊田繁美：鉄筋コンクリート円形断面柱の復元力特性に関する実験研究，日本建築学会大会，pp.403-404，1986
5. 鈴木計夫，中塚信，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，10-3，pp.601-606，1988
6. 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ちRC杭のせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，20-3，pp.427-432，1998
7. 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，21-3，pp.403-410，1999
8. 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，21-3，pp.493-498，1999
9. 酒向靖二，山田和夫，山本俊彦，中野秀夫：場所打ちコンクリート杭の耐震性能評価に関する研究：日本建築学会大会，pp.483-488，1999
10. 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，22-3，pp.667-672，2000
11. 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，22-3，pp.673-678，2000
12. 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要素の影響：コンクリート工学年次論文集，23-3，pp.181-186，2001
13. 山本俊彦，山田和夫，矢野伸司：鉄筋コンクリート円形断面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，23-3，pp.187-192，2001
14. 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断面柱の曲げせん断挙動，コンクリート工学年次論文集，24-2，pp.181-186，2002
15. 金東範，長江拓也，香取慶一，林静雄：RC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，24-2，pp.205-210，2002