

論文 鉄筋コンクリート円柱のせん断耐力

横濱 茂之*1

要旨：鉄筋コンクリート円柱の断面を分割した各要素に対して「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針」に基づくトラス機構とアーチ機構の考え方を適用して既往の実験値と比較検討した。検討の結果、各機構の角度、コンクリートの有効強度係数、軸圧による耐力上昇、寸法効果等を考慮することで実験値を評価できることを確認した。また、建築物の耐震設計で用いられている、正方形断面に置換して矩形断面部材の実験式から強度推定した場合に比べて精度も良く構造設計に利用可能な強度推定式が得られた。

キーワード：円形断面、せん断強度、断面分割、トラス機構、アーチ機構、寸法効果

1. はじめに

鉄筋コンクリート円柱のせん断耐力については、「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針」¹⁾(以下、終局強度型指針と称する) B法に基づく中田・鈴木らの研究²⁾、断面を5分割して若林・南理論を適用した村上・南らの研究³⁾がある。しかし、これらの研究成果は、平均的な強度推定を行うもので構造設計の実務には適用が難しい。そこで、本論文では、構造設計を念頭に置いた強度推定式の誘導を目的として、円形断面を100分割して、トラス機構とアーチ機構の特性値を統計処理して求め、独自のコンクリートの有効強度係数 ν (以下、有効強度係数と称する)を導入することで、既往の実験値と良く整合する推定式を得たので報告する。

2. 強度推定式の誘導

2.1 抵抗機構と断面分割

(1) アーチ機構

今、図-1の断面を考えると、アーチ機構コンクリート束の角度 $\tan \theta$ は、部材断面中央から端部になるにしたがい、断面のせいが小さくなることに伴って減少する。また、材長 L の影響も受ける(図-1参照)。

そこで、 $\tan \theta$ は、断面を100分割して各要素を長方形断面として終局強度型指針A法に準拠して求め、各要素の面積と $\tan \theta$ の積を累加後、円柱の全断面積で除し、材の長さ L とせいの比 (L/D) を変数として統計処理して求めることとした。

統計処理を行なったところ、 L/D が1.5以下の場合に回帰式が計算値を上回り危険側の値を与える結果となった。そこで、評価式の一貫性は失われるが、 L/D が1.5以上の場合を式(1)で、1.5未満の場合を式(2)で評価することとした(図-2及び図-3参照)。なお、断面の分割数を100としたのは、分割数が少ない場合、断面の端部(部材せいの小さい部分)で、 $\tan \theta$ を危険側に算定する傾向があるので、この事を回避するため設定した。

$$\tan \theta = 0.39(L/D)^{-0.96} \tag{1}$$

ただし、 $L/D \geq 1.5$

$$\tan \theta = -0.28 \text{Log}_e(L/D) + 0.37 \tag{2}$$

ただし、 $L/D < 1.5$

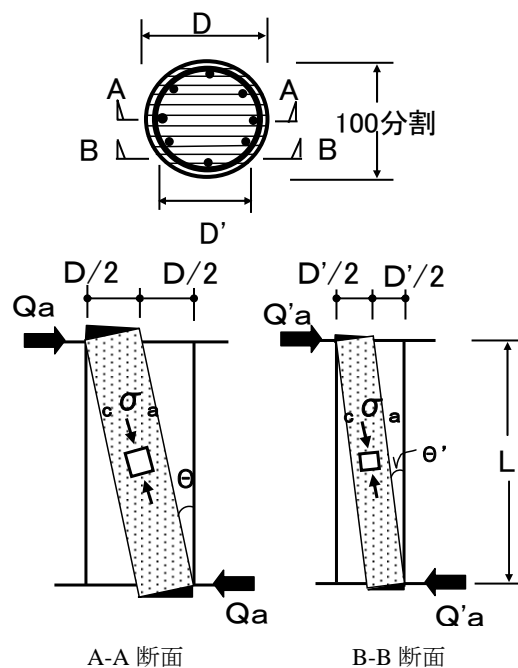


図-1 アーチ機構

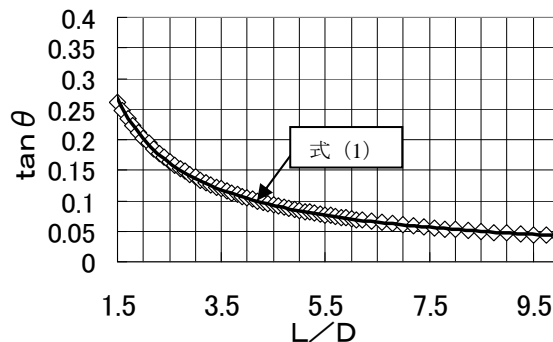


図-2 アーチ機構の角度 $L/D \geq 1.5$

*1 職業能力開発総合大学校東京校 建築施工システム技術科教授 (正会員)

(2) トラス機構

トラス機構も、先のアーチ機構と同様の断面分割を行って検討した。i 番目のコンクリート束の圧縮力 C_{ci} とせん断補強筋の負担力 T_{wi} が釣合っているとして、各要素の負担せん断力を求め、全要素分を集計すると $0.785P_w \approx Tw \cdot \pi/4$ を得た(図-4 参照)。この値は、渡辺の理論解⁴⁾と一致している。以後の検討では、せん断補強筋比を 0.785 倍して評価することとした。

有効強度係数 ν を終局強度型指針 A 法に基づき $\nu = 0.7 - \sigma_B/200$ で算定し、アーチ機構を無視して既往の実験値^{2), 5) ~ 15)} からトラス機構コンクリート束の角度 $\cot \phi$ を逆算すると図-5 となる。図より、 $0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B)$ が 0.15 以上の領域では逆算した $\cot \phi$ の下限値は 1 程度であり軸圧による耐力上昇は少ない。逆に、 $0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B)$ が 0.15 を下まわる領域では、軸圧による耐力上昇が顕著であり、かつ、 $\cot \phi$ の下限値が終局強度型指針 A 法の制限値 2 を超えて上昇している。 $\cot \phi$ の下限値が 2 を超えるのは、せん断補強筋が少ない場合には、対角線状のひび割れが進展して破壊に到り、交差するせん断補強筋の負担も評価してしまう事と、アーチ機構を無視した影響と考えられる。しかし、アーチ機構とトラス機構を完全に分離して検討するのは難しい。この為、図-5 を参考に式(3)~式(7)より $\cot \phi$ を算定した。なお、式中の j_t は、せん断補強筋の中心間距離を採用している。

$$\cot \phi_1 = 1 \quad (3)$$

$$\text{ただし, } 0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B) \geq 0.15$$

$$\cot \phi_1 = 0.23 / \{0.08 + (0.785P_w \cdot \sigma_{wy}) / (\nu \cdot \sigma_B)\} \quad (4)$$

$$\text{ただし, } 0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B) < 0.15$$

$$\cot \phi_2 = \sqrt{j_t / (D \cdot \tan \theta)} \quad (5)$$

$$\cot \phi_3 = \sqrt{\{\nu \cdot \sigma_B / (0.785P_w \cdot \sigma_{wy}) - 1\}} \quad (6)$$

$$\cot \phi = \min(\cot \phi_1, \cot \phi_2, \cot \phi_3) \quad (7)$$

2.2 有効強度係数 ν

長谷川らは、円筒形試験体でコンクリートの割裂試験を

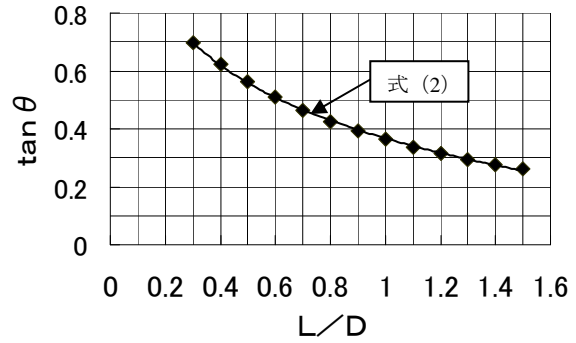


図-3 アーチ機構の角度 $L/D < 1.5$

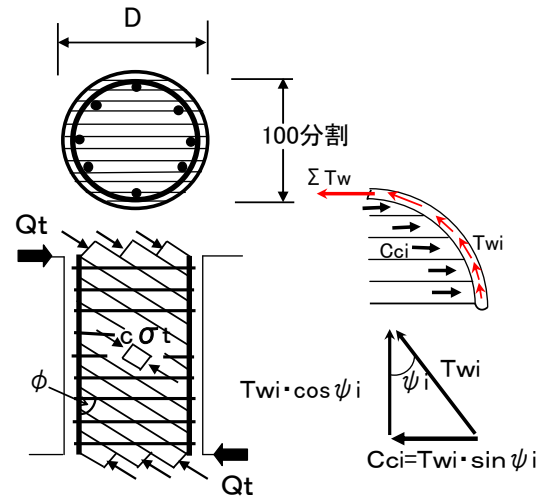


図-4 トラス機構

おこない寸法効果を検証している¹⁶⁾。図-6 は直径 10 cm の試験体の割裂強度平均値を 1 として、直径 200cm までの実験結果を整理したものである。明確に寸法効果が認められる。割裂試験と円柱の曲げせん断実験では破壊時の応力状態は異なる。しかし、せん断耐力の評価に寸法効果を取り入れることは力学的な厳密性に欠けていたとしても取り入れる必要があると考えた。この為、寸法効果を式(8)で評価してコンクリートの有効強度係数に反映させることとした。具体的には、終局強度型指針 A 法の $\nu = 0.7 - \sigma_B/200$ の 0.7 の項を、コンクリートの軟化後の強度は寸法効果の影響を受けるものと仮定して式(8)で置き換えた。また、第 2 項目 $\sigma_B/200$ の分母を

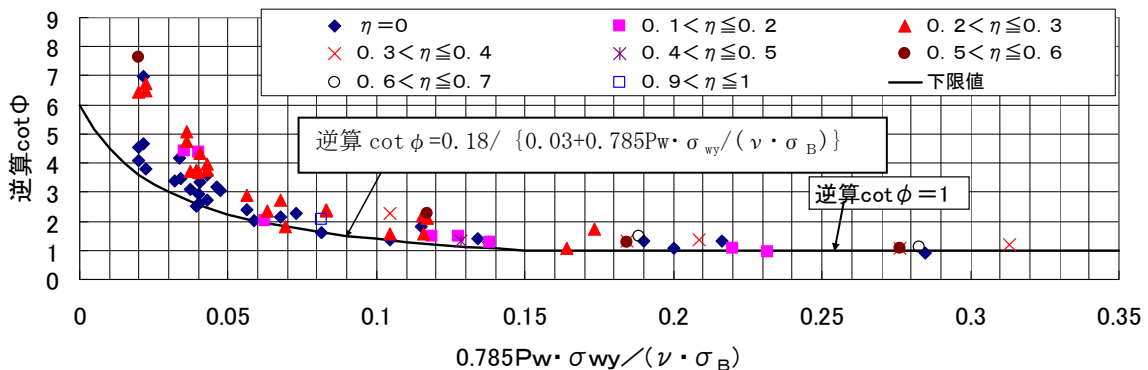


図-5 逆算で算定した見かけの $\cot \phi$

180 と仮定している。なお、図には荒川式の k_u も併記してあるが、傾向は良く一致している。

一方、先の図-5を見ると軸圧によるせん断耐力の向上が認められ、 $0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B)$ が 0.15 未満の領域で顕著である。この事を、考慮するために仮定したのが式(9)である。 $P_w / \sigma_B = 0$ 、軸圧比 $\eta = 1$ の時に、軸圧による耐力上昇は $\eta = 0$ の部材耐力と同等として $kn = 1$ を仮定し、中間の軸圧は直線補間して与えた(図-7参照)。この仮定を検討するために、 $P_w = 0$ でせん断破壊した矩形断面の実験値^{17)~19)}を終局強度型指針A法の耐力で除した値を縦軸に、軸圧比 η を横軸に取って描いたのが図-8である。 η が 0.5 近傍で、終局強度型指針A法で算定される耐力程度の耐力上昇を見込めることがわかる。また、先の図-5で、横軸が 0.02 かつ η が $0.5 < \eta \leq 0.6$ の実験資料(●印)も逆算 $\cot \phi$ が 2 倍を超える値を示しており、せん断補強筋の少ない領域では断面形状にかかわらず軸圧による耐力上昇は顕著である。

また、高強度せん断補強筋を用いた試験体を評価したところ、計算値が実験値を上まわる傾向が認められた。この為、式(10)を仮定して計算値を安全側に評価することとした。

$$ks = 5 / D + 0.5 \quad (8)$$

ただし、 $10 \leq D \leq 50$ D:円柱の直径(cm)

D > 50 の時 $ks = 0.6$

$$kn = (1 - 5.5 \cdot P_w \cdot \sigma_{wy} / \sigma_B) \eta \quad (9)$$

ただし、 $0 \leq kn \leq 1$

$$kw = \{1 - 0.00051(\sigma_{wy} - 588)\} \quad (10)$$

ただし、 $\sigma_{wy} \geq 588$ (N/mm²) , $0.65 \leq kw \leq 1$

$\sigma_{wy} < 588$ (N/mm²) の時 $kw = 1$

$$\nu = \{kn + (ks - \sigma_B / 180)\} kw \quad (11)$$

ただし、 $\{kn + (ks - \sigma_B / 180)\} \leq 1$

2.3 せん断補強筋の無い部材の取り扱い

アーチ機構残余部の三角形 ABC の領域にストラットが生じ引張主筋と釣合うことができると仮定すると(図-9参照)、この部分でせん断力の負担が可能となる。この時、被り部分(濃い網掛けで示した部分)は、ストラットの反力の一部を受け持つことが可能と考えられる。この機構は、せん断補強筋の無い部材では、部材の全幅、三角形 ABC の全領域で考える事はできるが、ストラットと主筋の間の付着応力 τ_b 、及び、被り部分の拘束には限界がある。本論文の検証のみで、この影響を定量的に捉えることはできない。しかし、評価式への反映を考えて、せん断補強筋の無い部材のアーチ機構の幅は、 $\Delta = 0.125$ を仮定し、見かけ上、せん断耐力が 1.25 倍になるとして計算値を算定した。

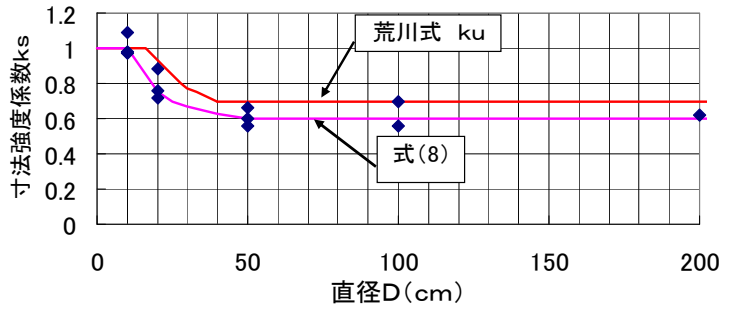


図-6 寸法効果

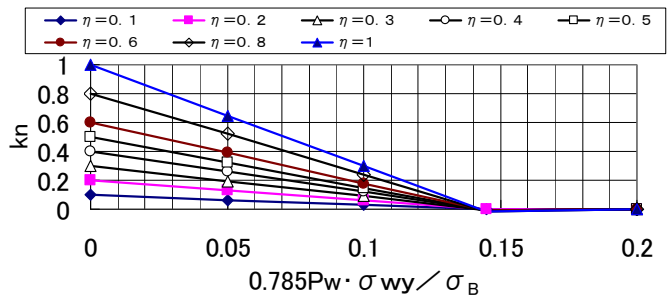


図-7 軸圧による耐力上昇

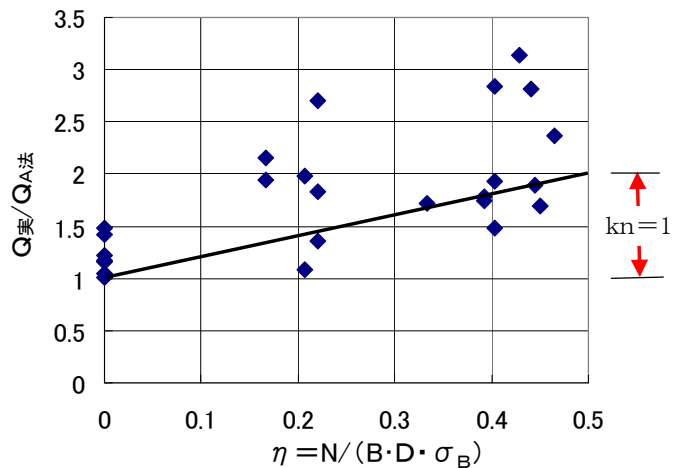


図-8 矩形断面柱の軸力による耐力上昇

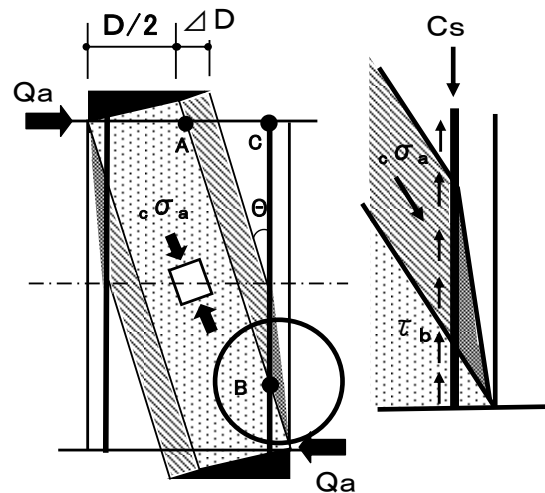


図-9 $P_w = 0$ の部材のアーチ機構

3. 強度推定式の検証と考察

3.1 提案する強度推定式の検証

式(1)～式(11)より得られる各値を式(12)に代入して計算値を算定した。なお、式中の A_c は円柱の断面積である。せん断耐力 Q_{su} の計算値と、既往の実験値^{2), 5)~15)}との適合性を図-10に示す。図によれば、計算値は実験値のほぼ下限を捉えており、かつ、せん断補強筋量や軸圧比 η によるばらつきも特に認められない。ただし、実験資料 85 体のうち 3 体の計算値が実験値を上まわった。1 体は、 $P_w=0$ の試験体、残りの 2 体は P_w が 0.2% を下まわる試験体であり実務上は存在しない。また、これらの試験体は、図-11に示すように j_t に比べて、せん断補強筋の間隔 x が大きな試験体であった。

$$Q_{su} = 0.785D \cdot j_t \cdot P_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) A_c \cdot \nu \cdot \sigma_B / 2 \quad (12)$$

$$\beta = \{0.785(1 + \cot^2 \phi) P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B)\} \quad (13)$$

3.2 既往の推定式の検証

建築物の耐震設計や耐震診断では、円形断面部材を正方形断面に置換して、せん断耐力を評価することが多い。ここでは、せん断補強筋の中心で、被りコンクリートとコアコンクリートの面積を求めて、面積が等しい正方形断面に置換すると共に、主筋を 4 辺に配置する図-12の置換をおこない、式(14)の修正荒川式^{20), 21)}を適用した。既往の実験値との適合性を図-13に示す。軸圧比の大きな試験体で計算値が実験値を大きく上まわる傾向が認められ、かつ、ばらつきも大きく、9 体が実験値を上ま

わっている。そこで、下記の①②の制約を設けて、式(14)を、再計算すると図-14となる。図より、軸圧比 η が大きい 2 体で計算値が実験値を上まわったが、ほぼ下限値を捉えていることがわかる。この事からも、①②の条件設定の妥当性が認められる。円柱の場合、高さ方向の頂点付近で断面が少ないため寸法効果を荒川式の ku で評価すると実状と違う評価になると考えられる。

① せん断補強筋の断面積を 0.785 倍する。

② ku に代わって ks を用いる。

$$Q_{su} = \{[0.12kp \cdot ku \cdot (18 + \sigma_B) / (M/Qd + 0.12)] + 0.85 (P_w \cdot \sigma_{wy})^{0.5}\} b \cdot j + (0.1N / A_c) b \cdot j \quad (14)$$

一方、終局強度型指針では暫定的に、円柱を断面等価な正方形断面に置換して、せん断補強筋の断面積を 0.785 倍して A 法を適用するとしている。 $\tan \theta$, $\cot \phi$, ν を A 法に準拠した場合の実験値との適合性を図-15に示す。 $0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B)$ が 0.75 より小さい領域では $Q_{実}/Q_{計}$ が大きな値となっており、軸圧による耐力上昇を考慮していないことを反映して梁試験体に比べて柱試験体の安全率が高くなる傾向にある。しかし、 $0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B)$ が 0.75 より大きい領域の適合性は良い。今、 $P_w=0.002$, $\sigma_{wy}=345\text{N/mm}^2$, $\sigma_B=21\text{N/mm}^2$, $\nu=0.595$ の部材を仮定すると $0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B)=0.043$ となる。この値は、図-15のばらつきが少なくなる領域の始まりに位置し、以後 P_w が増えるにしたがって実験値との整合性は良くなる。この領域では、図-14と比較するとばらつきの少ない評価方法といえる。なお、5 体の推定値が

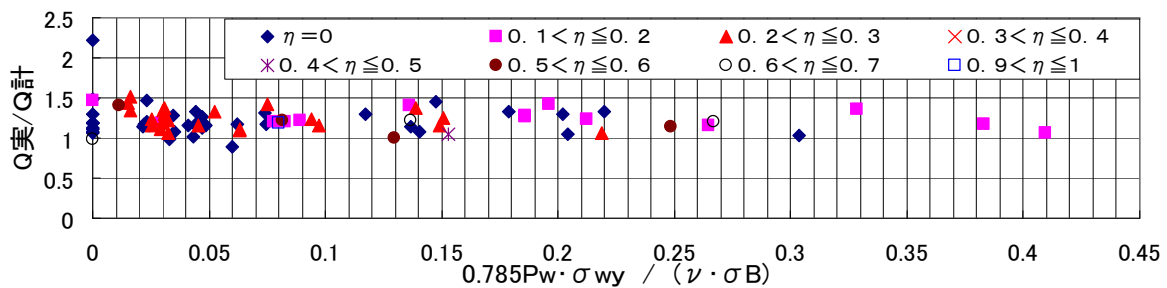


図-10 本法と既往の実験値の適合性

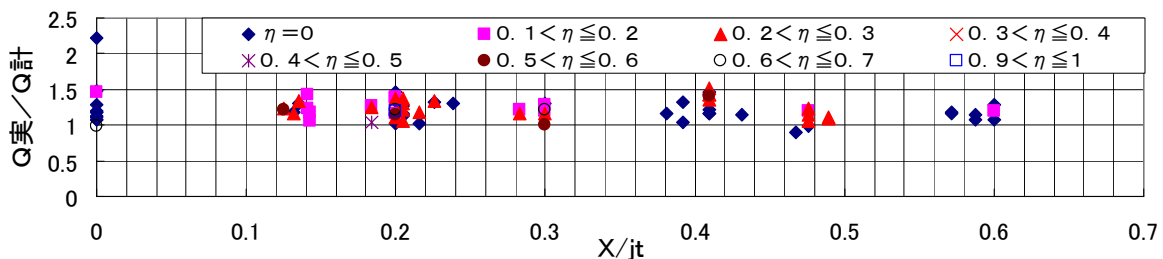


図-11 本法と既往の実験値の適合性

実験値を上回った。これらの試験体は σ_{wy} が 480N/mm^2 を超える試験体であった。

ところで、実験値の推定において本法で用いたトラス機構の角度 $\cot\phi$ と、終局強度型指針で暫定的に用いている方法による $\cot\phi$ を比較すると図-16となる。 ν の値が異なるため単純な比較はできないが、終局強度型指針の暫定的な方法に比べると、本法で仮定している $\cot\phi$ の値は、せん断補強筋の極端に少ない領域以外では小さな値を仮定していることがわかる。

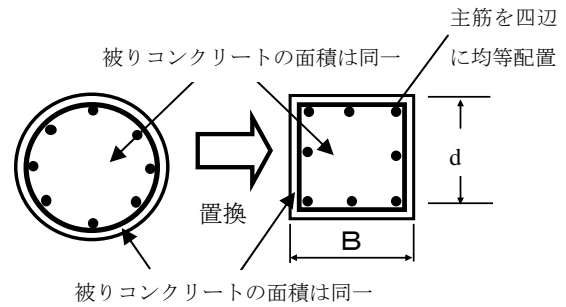


図-12 正方形断面への置換

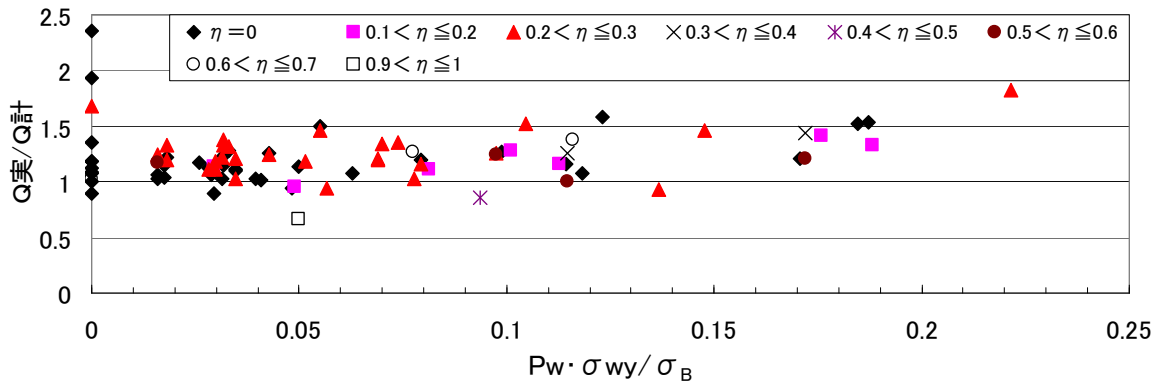


図-13 修正荒川式と既往の実験値の適合性

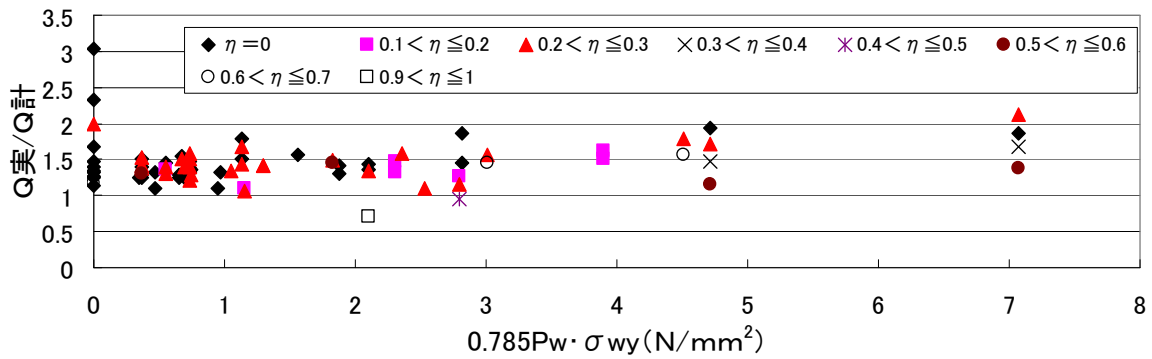


図-14 条件を附加した時の修正荒川式と実験値の適合性

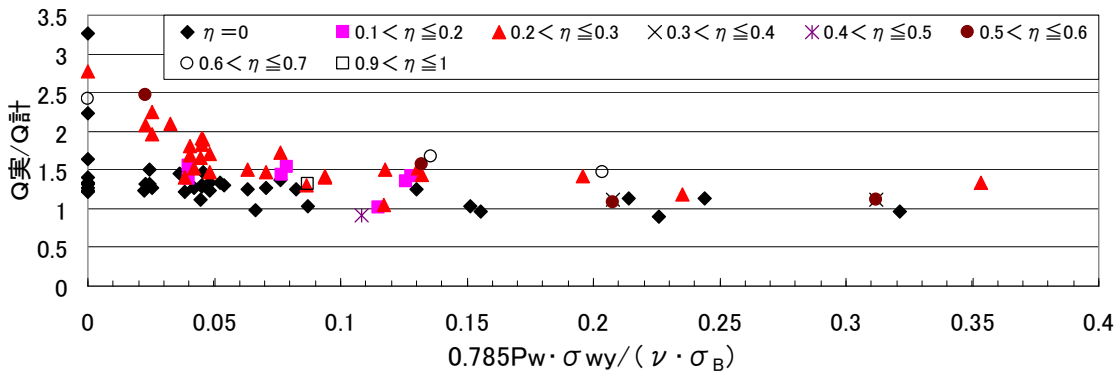


図-15 終局強度型指針A法と既往の実験値の適合性

4. 結論

円柱を断面分割して、アーチ機構の角度と、せん断補強筋の有効断面積を求め、独自のトラス機構の角度と強度係数 ν を仮定して求めた計算値と、既往の実験値は比較的良く適合した。また、修正荒川式と既往の実験値の適合性を向上させるためには、せん断補強筋の断面積を0.785倍し、かつ、寸法効果を考慮する係数に工夫が必要である。なお、今回の検討では、円形帯筋とスパイラル筋の違いによる耐力の差は認められなかった。

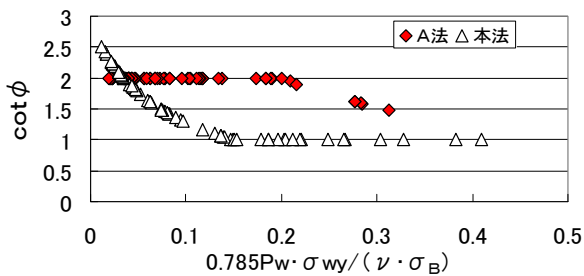


図-16 計算に用いた $\cot \phi$ の比較

参考文献

- 日本建築学会編：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，日本建築学会，pp.104-120，1997.7
- 中田浩之ほか：高強度コンクリートと高強度横補強筋を用いたRC円形柱のせん断耐力・変形特性，日本建築学会学術講演梗概集 C 構造 II，pp.707-708，1988.10
- 村上利憲ほか：円形および菱形柱の終局せん断耐力に関する一考察，JCI コロキウム RC 構造のせん断設計法に関する解析的研究，pp.133-140，1989.10
- 渡辺史夫：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巻2号，pp.483-488，1987
- 村上利憲ほか：繰り返し曲げ・せん断を受ける円形 X 形配筋柱の弾塑性挙動(その2)，日本建築学会学術講演梗概集 C 構造 II，pp.693-694，1988.10
- 酒向靖二ほか：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
- 山本俊彦ほか：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
- 小川幸雄ほか：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，日本建築学会学術講演梗概集構造，pp.1737-1734，1978.9
- 石本一之ほか：鉄筋コンクリート円形断面部材のせん断強度と変形性状に関する実験研究，日本建築学会学術講演梗概集構造，pp.145-146，1979
- 小川幸雄ほか：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，日本建築学会学術講演梗概集構造，pp.1727-1728，1980.9
- 酒向靖二ほか：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集，Vol.21，No.3，pp.493-498，1999
- 新井元植ほか：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的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.667-672，2000
- 酒向靖二ほか：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
- 是永健好ほか：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
- 菊田繁美ほか：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，日本建築学会学術講演梗概集構造，pp.403-404，1986.8
- 長谷川俊昭ほか：コンクリートのひびわれ寸法効果，セメントコンクリート，pp.6-20，No.474，1986
- 降井繁蔵,山田稔：軸圧を受ける鉄筋コンクリート部材のせん断耐力に関する研究 III，日本建築学会論文報告集，号外，pp.41-44，1967.4
- 南宏一,若林実：せん断力を受ける鉄筋コンクリート柱の復元力特性に関する研究，日本建築学会近畿支部研究報告，pp.427-432，1971
- 八木貞樹ほか：軸圧を受ける鉄筋コンクリート部材のせん断耐力に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.823-824，1971.11
- 荒川卓：鉄筋コンクリートはりの許容せん断応力度とせん断補強について，コンクリート・ジャーナル Vol.8，No.3，No.7，1970
- 広沢雅也ほか：軸圧を受ける鉄筋コンクリート部材の強度とねばり，日本建築学会学術講演梗概集，pp.817-818，1971.11