

鉄筋コンクリート円柱のせん断耐力

Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns

横濱 茂之
YOKOHAMA Shigeshi

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

そこで、アーチ機構の角度 $\tan \theta$ 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た（図-2～図-3参照）。結果として、式(1)～式(2)を得た。

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

ただし、 $L/D \geq 1.5$

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

ただし、 $L/D < 1.5$

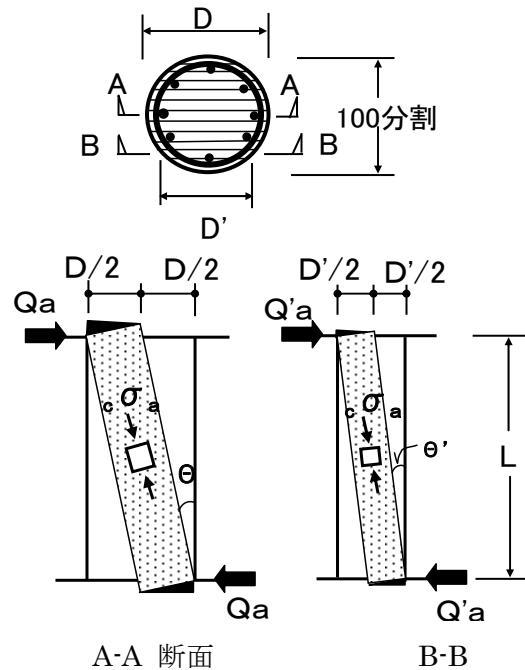


図-1 アーチ機構

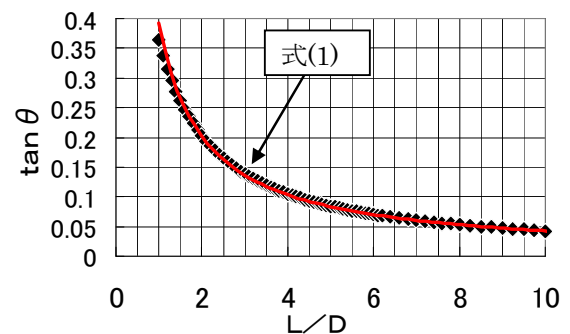


図-2 アーチ機構の角度 $L/D \geq 1.5$

(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 $0.785T_w \div T_w \cdot \pi/4$ 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)}からトラス機構の角度 $\cot \phi$ を逆算すると図-5 となる。図によると、 $0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B)$ が 0.15 以上の領域では逆算した $\cot \phi$ の下限値は 1 程度であり軸力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 を下回る領域では、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。

$$\cot \phi_1 = 1 \quad \text{----- (3)}$$

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

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

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

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

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

$$\cot \phi = \min(\cot \phi_1, \cot \phi_2, \cot \phi_3) \quad \text{----- (7)}$$

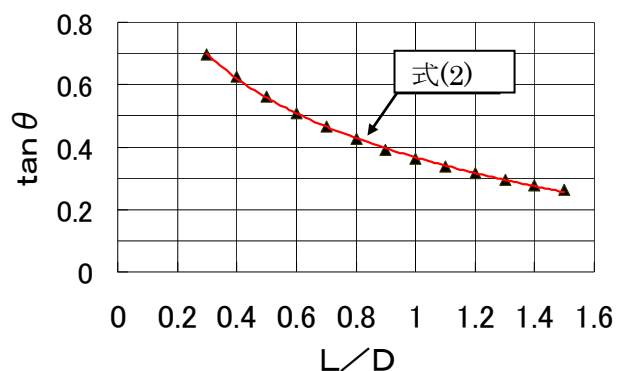


図-3 アーチ機構の角度 $L/D < 1.5$

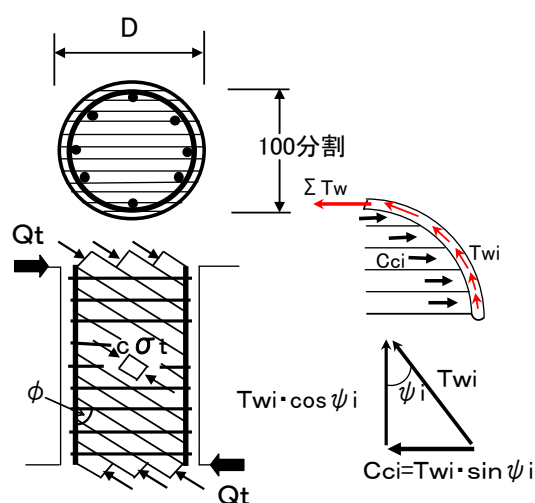
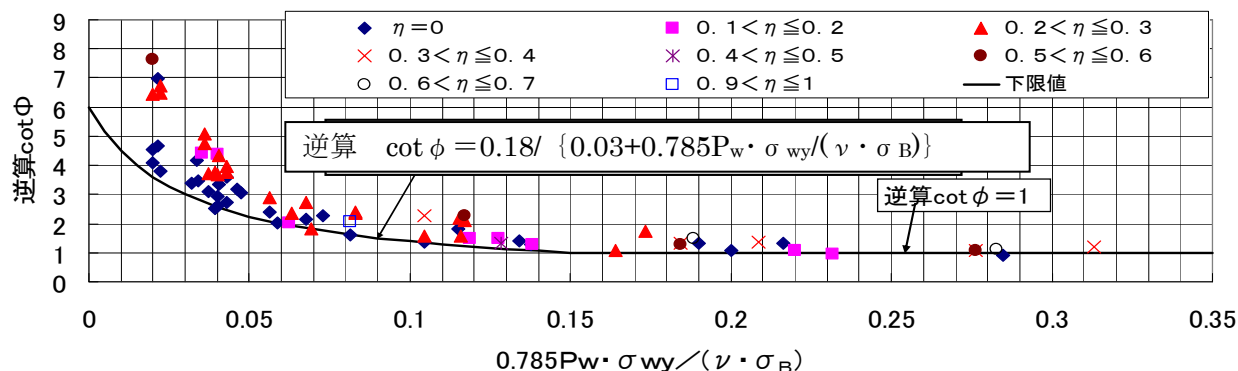


図-4 トラス機構

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 200 cm 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。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、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。



図－５ 逆算で算定した見かけの $\cot \phi$

一方、軸力によるせん断耐力の向上が認められ、 $0.785 P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B)$ 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、軸力による耐力上昇は、軸圧比 $\eta = 0$ の部材と同等とし、 $kn = 1$ を仮定し中間の軸力を直線補間して与えた(図－7 参照)。この仮定は、大胆ではあるが、実験資料の豊富な矩形断面の実験値^{17)~19)}を検討した図－8 と、円形断面の図－5 を見る限り決して根拠の無い仮定ではなく、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力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。

$$ks = 50 / D + 0.5 \quad (8)$$

ただし、 $0.6 \leq ks \leq 1$

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

ただし、 $0 \leq kn \leq 1$

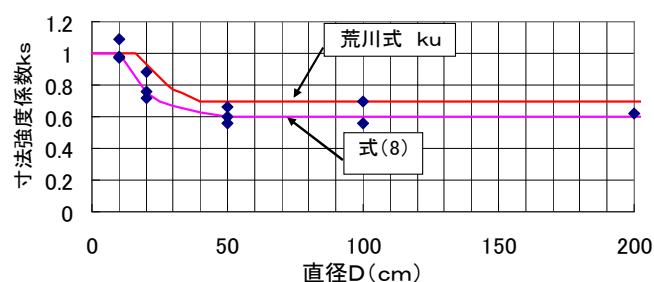
$$kw = \{1 - 0.00051(\sigma_{wy} - 588)\} \quad (10)$$

ただし、 $\sigma_{wy} \geq 588 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

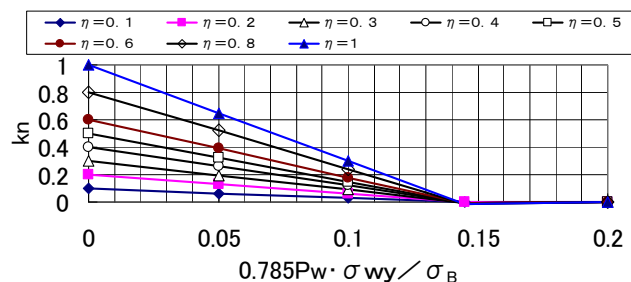
$$0.65 \leq kw \leq 1$$

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

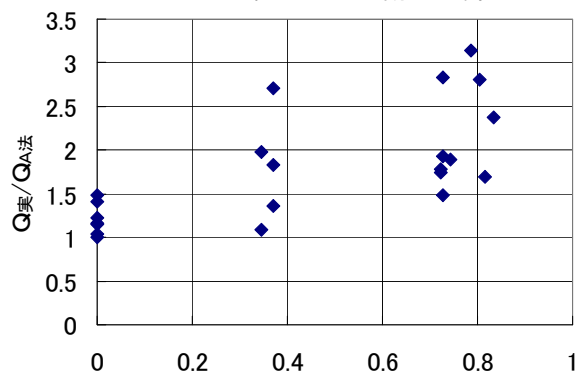
ただし、 $\{kn + (ks - \sigma_B / 180)\} \leq 1$



図－６ 寸法効果



図－７ 軸力による耐力上昇



図－８ 矩形断面柱の軸力による耐力上昇

2. 3 セン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鈎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, セン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, セン断補強筋の無い部材のアーチ機構の幅は, $\angle=0.125$ を仮定し, 見かけ上, セン断耐力が 1.25 倍になるとして計算値を算定した。

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, セン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, セン断補強筋の間隔 x が大きな試験体であった。

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

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

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, セン断耐力を評価することが多い。ここでは, セン断補強筋の中心で, 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

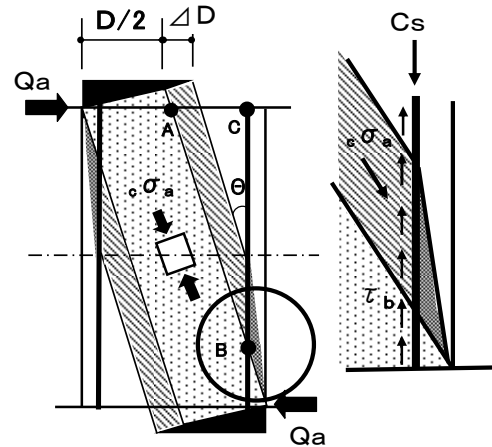


図-9 $P_w=0$ の部材のアーチ機構

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 体の実験値を上まわっている。そこで, ①せん断補強筋の断面積を 0.785 倍する。② k_u に代わって k_s を用いるという条件を設けて, 式(14)の計算値を再計算すると図-14 となる。図より, 軸圧比 η が大きい 2 体の実験値を上まわったが, ほぼ下限値を捉えているがわかる。この事からも, ①②の条件設定の妥当性が認められる。

$$Q_{su} = \{0.12k_p \cdot k_u \cdot (18 + \sigma_B) / (M/Qd + 0.12)\} + 0.85(P_w \cdot \sigma_{wy})^{0.5} b \cdot j + (0.1N / A_c) b \cdot j \quad \text{----- (12)}$$

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, セン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。 $\tan \theta$, $\cot \phi$, v 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。 $0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (v \cdot \sigma_B)$ 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, 軸力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, $0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (v \cdot \sigma_B)$ が 0.75 より大きい領域の適合性は良い。

今, $P_w=0.002$, $\sigma_{wy}=345\text{N/mm}^2$, $\sigma_B=21\text{ /mm}^2$, $\nu=0.595$ 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。

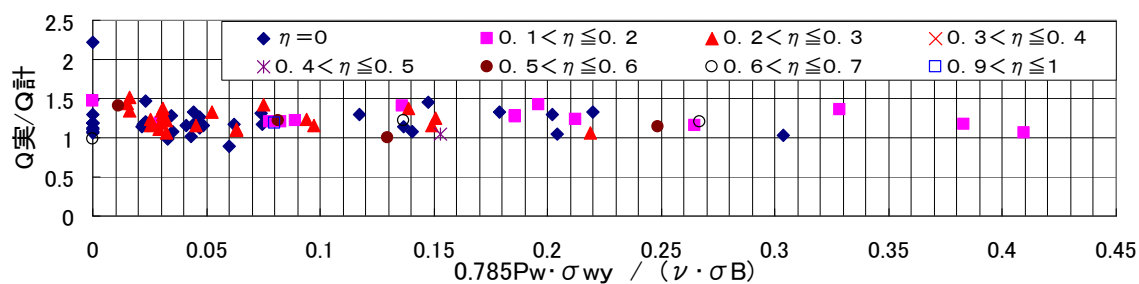


図-10 本法と既往の実験値の適合性

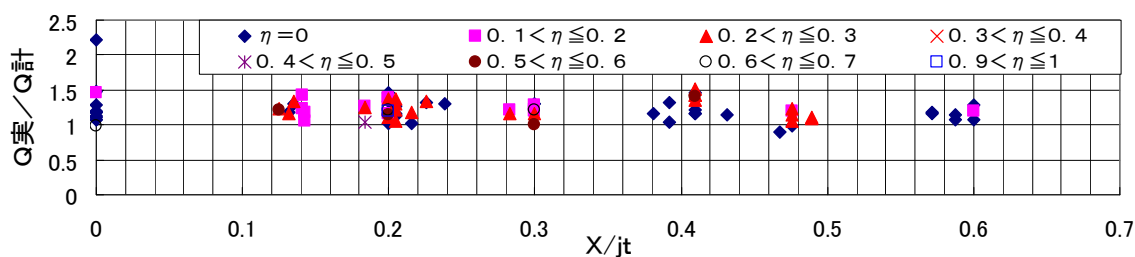


図-11 本法と既往の実験値の適合性

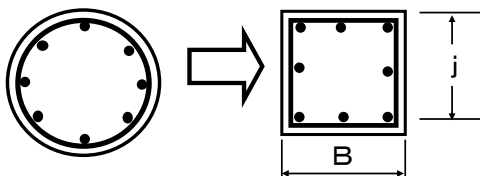
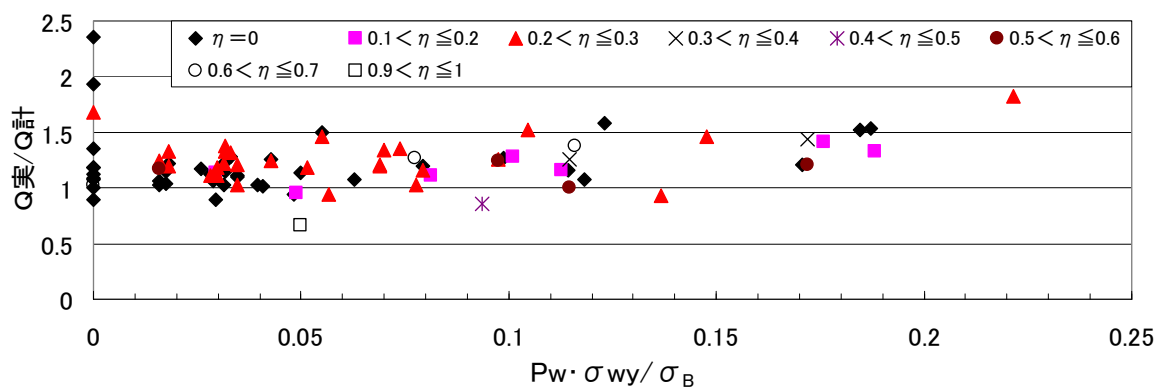
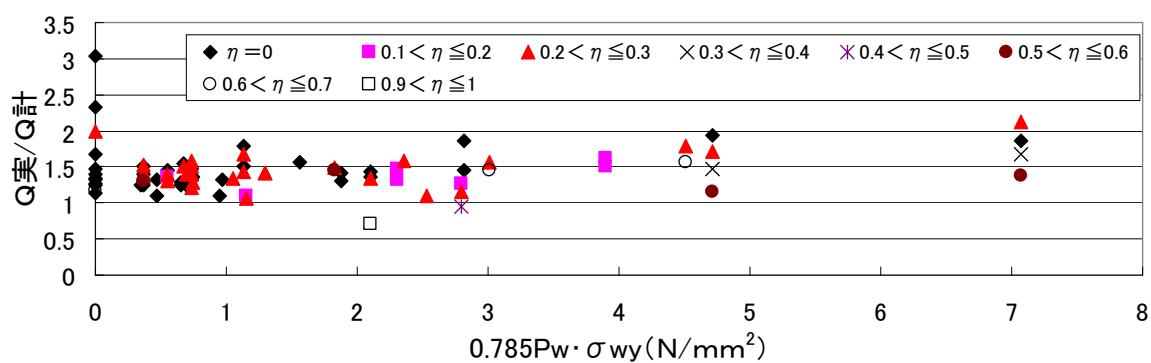


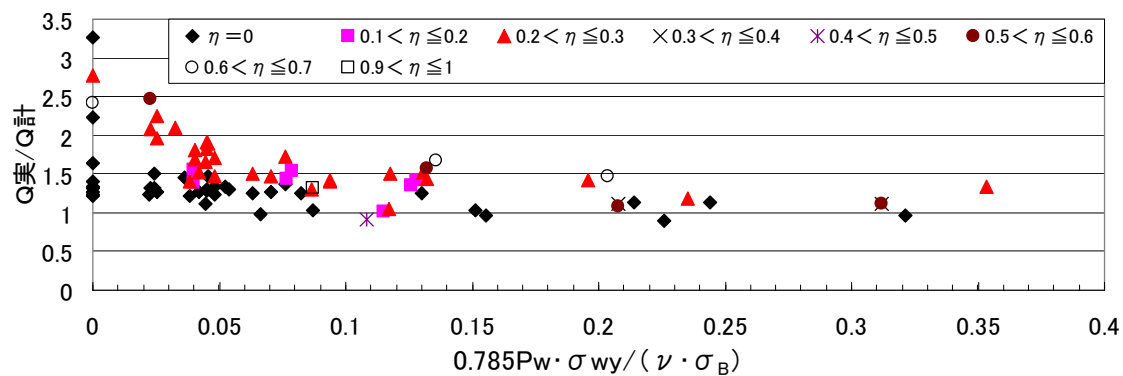
図-12 正方形断面への置換



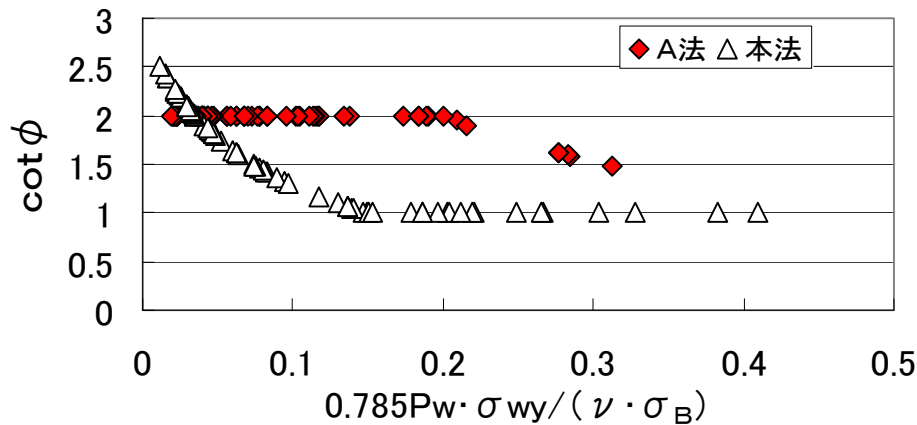
図－１３ 修正荒川式と既往の実験値の適合性



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



図－１６ 計算に用いた $\cot \phi$ の比較

4. 結 論

終局強度型指針 A 法を基本として断面分割に関する検討や既往の実験資料との整合性から求めた、アーチ機構、トラス機構、強度係数 ν 、寸法効果係数を用いる検討から次の結論を得た。

- ① 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好く適合した。
- ② 終局強度型指針 A 法で $0.785P_w \cdot \sigma_{wy} / (\nu \cdot \sigma_B)$ が 0.043 未満となる領域では軸力による耐力上昇が顕著であり、終局強度型指針 A 法で考慮していない軸力による耐力上昇を考慮しない限り実験値を精度良く推定するのは困難である。
- ③ 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。
- ④ 実験値の中には、円形帯筋と円形スパイラル筋が混在しているが、両者に明確な違いは認められなかった。ただ、個々の実験では円形スパイラルの有効性を認めるものも多く、現状では、円柱のせん断耐力を、

円形帯筋と円形スパイラル筋の違いを考慮して評価できないと考えざるを得ない。

謝 辞

本研究は、応用課程卒業生吉屋聡美氏の卒業研究の一部として行なった円柱の破壊実験を契機として実施したものである。実験から数年を経て、やっと一つの評価方法に辿り着いた感が強く、せん断問題の奥行きの高さ、荒川式の適合性の良さ等を実感させていただきました。また、推定式誘導に当たって下記の参考文献の実験資料を引用させていただきました。貴重な実験資料を公表していただいた関係各位に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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 R C 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
- 3) 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
- 4) 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 卷 2 号, pp. 483-488, 1987
- 5) 村上利憲ほか: 繰返し曲げ・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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 是永健好ほか: 異形 P C 鋼棒で横補強された場所打 R C 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 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
- 19) 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
- 20) 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