

論文 鉄筋コンクリート柱のせん断強度への軸力の影響

白石一郎*1・高木仁之*2・狩野芳一*3

要旨：鉄筋コンクリート柱のせん断強度は、極限解析に基づいてかなり精度よく求められるようになってきている。しかし、多くの研究により、せん断強度への軸力の影響が指摘されているにもかかわらず、既往のマクロモデルでは考慮されていない。

本報では、下界定理に基づくマクロモデルに、簡便なひずみの適合条件を考慮して、せん断強度への軸力の影響を取り入れたせん断強度式を提案するとともに、その検証を行う。

キーワード：鉄筋コンクリート柱、せん断強度、有効係数、マクロモデル、FEM

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）柱や梁のせん断強度については、極限解析の上界定理や下界定理に基づく、いわゆるマクロモデルにより、精度よく求められるようになってきており、その成果は、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」（以下、指針と呼称）に取り入れられている。しかし、曲げ降伏を伴わずにせん断破壊する場合のRC柱のせん断強度に、軸力の影響のあることが、多くの実験〔1, 2〕や解析〔3〕により指摘されているにもかかわらず、極限解析に基づくマクロモデルでは考慮されていない。

本報では、軸力をパラメータとしたFEM解析を実施し、せん断強度への軸力の影響を検討し、その結果から、軸力の影響を考慮したせん断強度評価式を提案する。さらに、既往の実験結果との比較検討により、本報の提案式の検証を行う。

2. FEMによるパラメータ解析

2. 1 試験体および解析概要

FEM解析の対象として、図-1、表-1に示す黒正、林らのRC柱の曲げせん断実験〔1〕を取り上げる。また本報で用いたFEM解析手法は文献〔4〕と同様であり、解析モデルを図-2に示す。

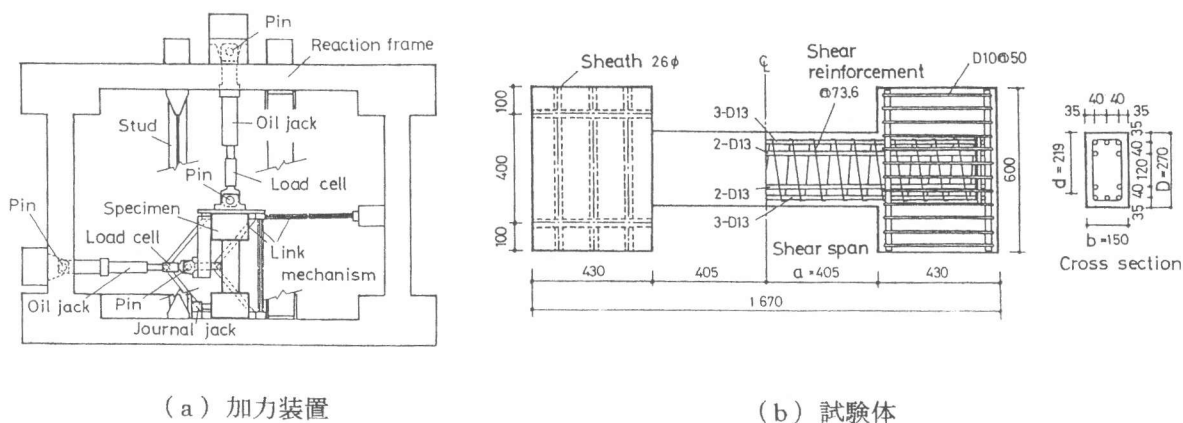


図-1 黒正、林らのRC柱の曲げせん断実験〔1〕

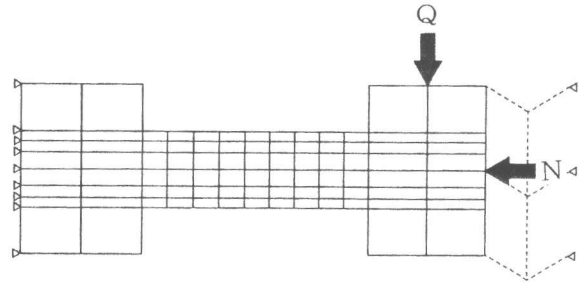
*1 日本工業大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*2 明治大学助手 理工学部建築学科、工修（正会員）

*3 明治大学教授 理工学部建築学科、工博（正会員）

表一 FEM解析対象試験体

試験体名	P_w (%)	w_{σ_y} (kgf/cm ²)	f_c (kgf/cm ²)	σ_o (kgf/cm ²)
C00	-32N	0.146	6370	331
	-40N	0.228	6230	331
	-32H	0.146	13100	331
	-40H	0.228	13000	331
	-50H	0.356	14000	353
	-60H	0.512	14200	353
C02	-32N	0.146	6370	352
	-40N	0.228	6230	352
	-32H	0.146	13100	352
	-40H	0.228	13000	352
	-50H	0.356	14000	367
	-60H	0.512	14200	367
C04	-32N	0.146	6370	366
	-40N	0.228	6230	366
	-32H	0.146	13100	366
	-40H	0.228	13000	366
	-50H	0.356	14000	346
	-60H	0.512	14200	346



図一 解析モデル図

2.2 解析プログラムの検証

解析した18体のうち、軸力の異なるC00-40H、C02-40H、C02-50H試験体の荷重-変位関係の比較を図-3に示し、FEM解析を行った全試験体についてのせん断強度の比較を図-4に示す。これらの図から、解析結果は概ね実験結果と対応しており、解析プログラムの妥当性を確認した。

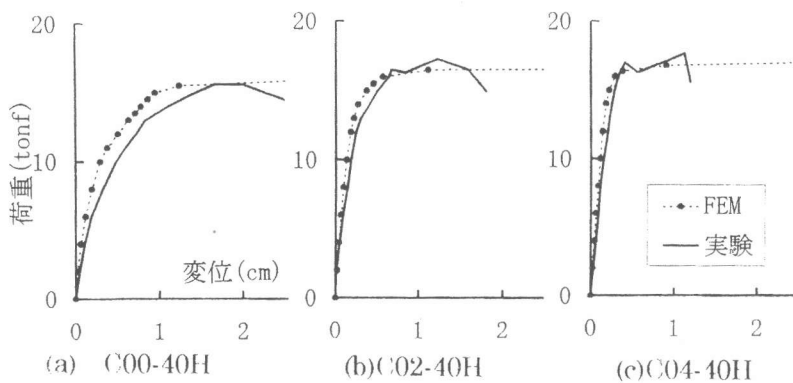


図-3 荷重-変位関係の比較

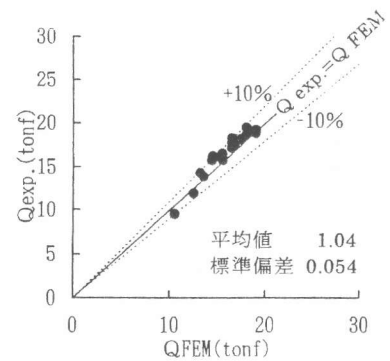


図-4 せん断強度の比較

2.3 せん断強度への軸力の影響に関するFEM解析

本節では、表一中の32Nシリーズを対象に、軸力をN=0~100t(軸応力度 $\sigma_o=0\sim 247\text{kgf/cm}^2$)まで変化させたパラメータ解析を実施した。なお柱主筋は弾性材とし、コンクリート強度は 360kgf/cm^2 とした。解析結果のせん断強度(Q_u)と軸力(N)の関係を図-5に示すが、N=60tonf($\sigma_o=150\text{kgf/cm}^2$)までは、軸力の増大とともにせん断強度が増加している。またそれ以上の高軸力域では、逆にせん断強度が低下する傾向となっているが、これは破壊モードがせん断引張型からせん断圧縮型に移行するためと考えられる。本報では、軸力の増大によりせん断強度が上昇するような軸力域を対象に考察を行う。

軸力が0, 30, 60 tonfについて、せん断強度時の部材中央断面の主圧縮応力分布を図-6に示すが、軸力が増大するとともに、主圧縮応力度が大きくなっている。トラス・アーチモデルにおける部材中央断面での主圧縮応力分布は、図-7のようになるが、図6の結果は、軸力の増大により、アーチおよびトラス機構の斜めストラットのコンクリート強度が上昇していると考えられる。

一方、図-8には、せん断強度時の変形図および主ひずみ分布を示す。変形図によれば、軸力の増大につれて、部材軸方向変形が伸びから縮みに移行しており、また主ひずみ図では、軸力の上昇とともに、引張主ひずみが小さくなる傾向がみられる。したがって、これらの図から軸力が増加すると、部材軸方向、および、軸直交方向のひずみが小さくなっていることがわかる。

以上より、軸力の増大とともに、RC柱の軸方向および軸直交方向のひずみが拘束され、斜めストラットの圧縮強度が増加し、その結果、柱のせん断強度が上昇したと考えることができる。

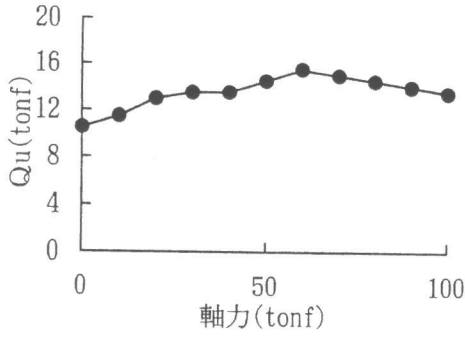


図-5 せん断強度と軸力の関係

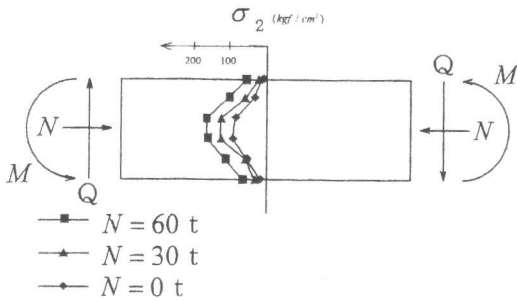


図-6 せん断強度時主圧縮応力分布

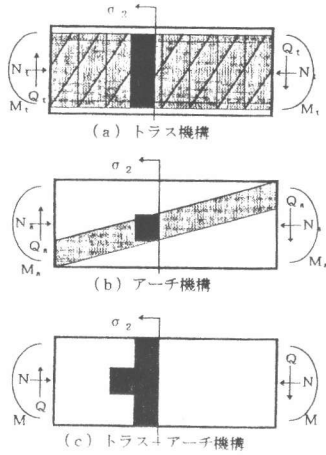
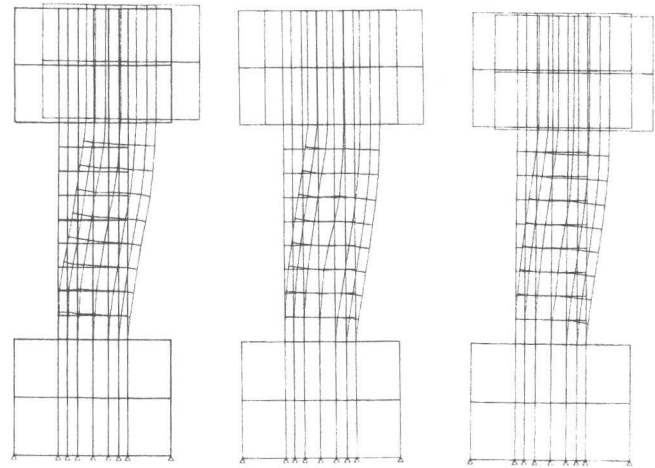
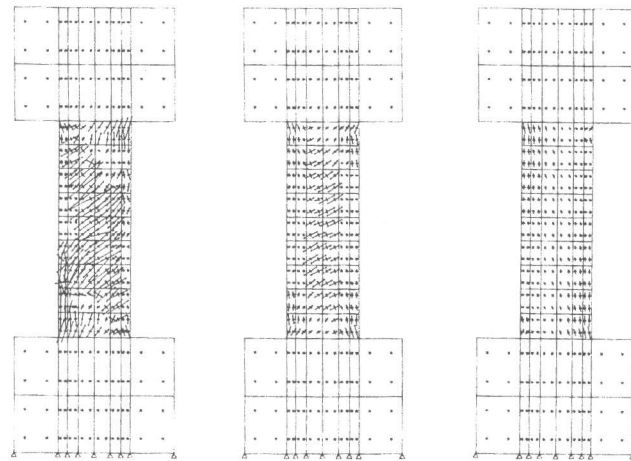


図-7 トラス・アーチモデルの主圧縮応力分布



N = 0 tonf N = 30 tonf N = 60 tonf
(a) 変形図



N = 0 tonf N = 30 tonf N = 60 tonf
(b) 主ひずみ図

図-8 FEM解析結果 (せん断強度時)

3. 軸力の影響を考慮したせん断強度式

3.1 せん断強度式の提案

本報では、指針式B法 [7] を修正して軸力の影響を考慮できるせん断強度式を提案する。すなわち、アーチ機構とトラス機構にそれぞれ異なる有効係数 v_a 、 v_t を導入すると次式となる (図-9)。

$$Q_u = p_w \cdot w \cdot \sigma_y^* \cdot b \cdot j + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2p_w \cdot w \cdot \sigma_y^*}{v_t \cdot f_c'} \right) (\sqrt{\lambda^2 + 1} - \lambda) \cdot v_a \cdot f_c' \cdot bD \quad \text{----(1)}$$

なお、記号の説明はまとめて末尾に示す。

有効係数 v_a 、 v_t は、式(2)の Collins の提案式 [5] により求めるものとする (図-10)。

$$v_a = \frac{1}{\alpha + \beta \cdot \varepsilon_{1a}}, \quad v_t = \frac{1}{\alpha + \beta \cdot \varepsilon_{1t}}, \quad \text{ここで、} \alpha = 0.8, \beta = 170 \quad \text{----(2)}$$

式(2)の ε_{1a} 、 ε_{1t} は、それぞれアーチ機構、トラス機構の主引張ひずみである。両機構は図-11に示すような、図-9の応力場と同一角度を有する一様斜めひずみ場を形成し、斜めストラットの主圧縮ひずみは、両機構ともに圧縮強度時のひずみ(ε_2)に達しているものとする。このように仮定すると、アーチ機構、トラス機構の主ひずみの角度および主圧縮ひずみが既知となるので、RC柱の材軸方向のひずみ(ε_x)を求めることができれば、 ε_{1a} 、 ε_{1t} は、次式のように求まる。

$$\varepsilon_{1a} = \lambda_A \cdot \varepsilon_x - \lambda_B \cdot \varepsilon_2, \quad \varepsilon_{1t} = 2\varepsilon_x - \varepsilon_2 \quad \text{---(3)}$$

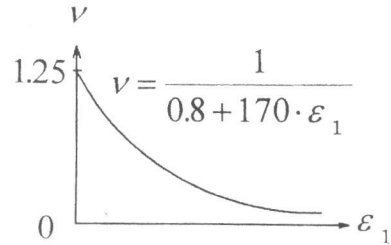


図-10 Collinsの有効係数 [5]

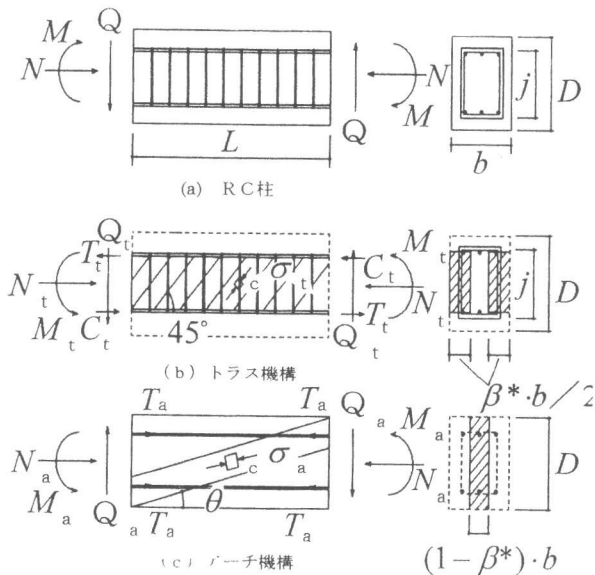


図-9 トラス・アーチ機構の応力場

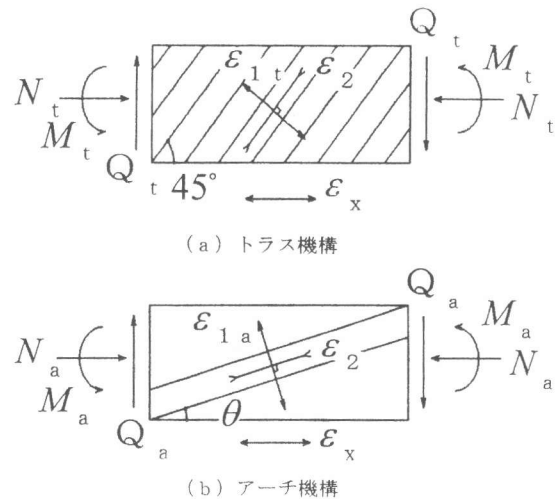


図-11 トラス・アーチ機構のひずみ場

柱の軸方向ひずみ(ε_x)は、両機構から柱主筋に作用する力に基づいて、主筋の軸方向変形(δ_x)を計算し、それを部材長さで除したものと定義すれば、次式が得られる(図-12参照)。

$$\varepsilon_x = \frac{\delta_x}{L} = \frac{1}{2E_s \cdot a_t} \left(\frac{v_a \cdot f_c' \cdot bD}{2} - N + p_w \cdot \sigma_y^* \cdot bD \left(1 - \frac{v_a}{v_t} \right) \right) \quad \text{---(4)}$$

この ε_x は、必ずしも実際の柱の軸方向ひずみを表すものではなく、軸方向ひずみへの軸力の影響を示す指標であると考えられる。図-13に、式(4)から得られる δ_x と、FEM解析のせん断強度時の軸方向変形を比較して示す。両者の値には差異もみられるが、同様の傾向を示している。

以上の式(2),(3),(4)を連立させて解くと、 ε_x が式(5)のように求まる。式(5)を式(3),(2),(1)に代入すれば、トラス、アーチ機構それぞれの有効強度係数、さらにRC柱のせん断強度が得られる。

$$\varepsilon_x = (A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}) / A_3 \quad \text{----(5)}$$

ここで、 $A_1 = -(\beta(2 - \lambda_A) p_w \cdot w \sigma_y^* b D + 2(\alpha - \beta \cdot \lambda_B \cdot \varepsilon_2) E_s \cdot a_i + \beta \cdot \lambda_A \cdot N)$

$$A_2 = -8\beta \cdot \lambda_A E_s \cdot a_i (\beta \cdot \varepsilon_2 (\lambda_B - 1) p_w \cdot w \sigma_y^* b D + N(\alpha - \beta \cdot \lambda_B \varepsilon_2) - \frac{f_c' b D}{2})$$

$$A_3 = 4\beta \cdot \lambda_A E_s \cdot a_i$$

式(1)のせん断強度式は、Collinsの修正圧縮場理論と同様の手法であるが、アーチ機構とトラス機構に別々の有効圧縮強度を導入している点に特徴がある。このせん断強度式では、軸力による強度上昇のみが考慮されており、軸力増大によりせん断強度が低下するような高軸力域(本報の解析結果では、およそ $\sigma_0 / f_c' > 0.5$)は適用範囲外である。

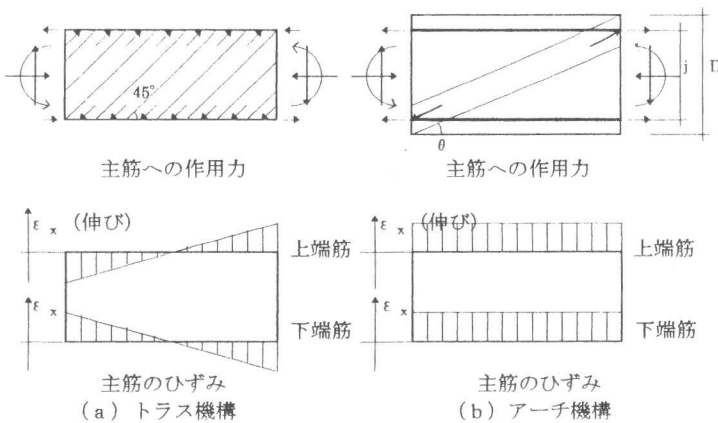


図-12 主筋に作用する力とひずみ分布

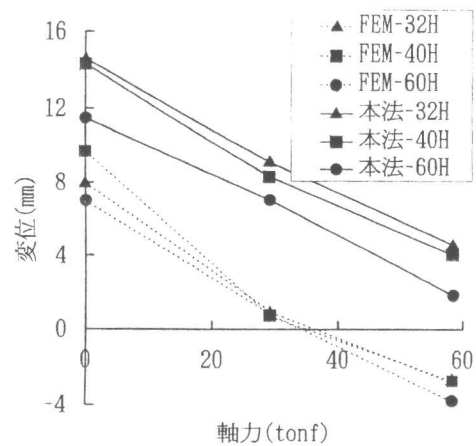
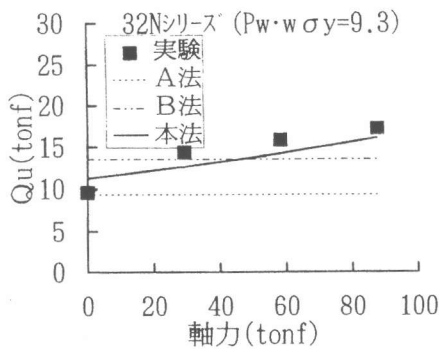


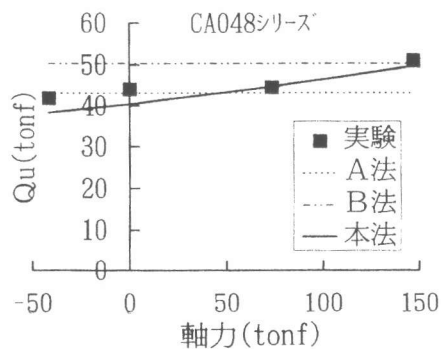
図-13 柱軸方向変形の比較

3.2 せん断強度式の検証

黒正、林ら[1]および南ら[2]の実験結果と、式(1)による計算結果(以下、本提案式)および指針式A法、B法[7]の計算結果を比較して図-14に示す。図よりA法、B法では、軸力の影響がみられないのに対し、本提案式では、軸力の効果があらわれており、実験結果とも対応している。



(a) 黒正、林らの実験[1]



(b) 南らの実験[2]

図-14 せん断強度への軸力の効果

次に、曲げ降伏を伴わずにせん断破壊したRC柱試験体55体を対象に、本提案式およびA法、B法の計算結果を比較して図-15に示す。同図より、本提案式の計算結果は、やや実験結果との差異もみられるが、A法、B法の計算結果よりも実験結果に近似している。

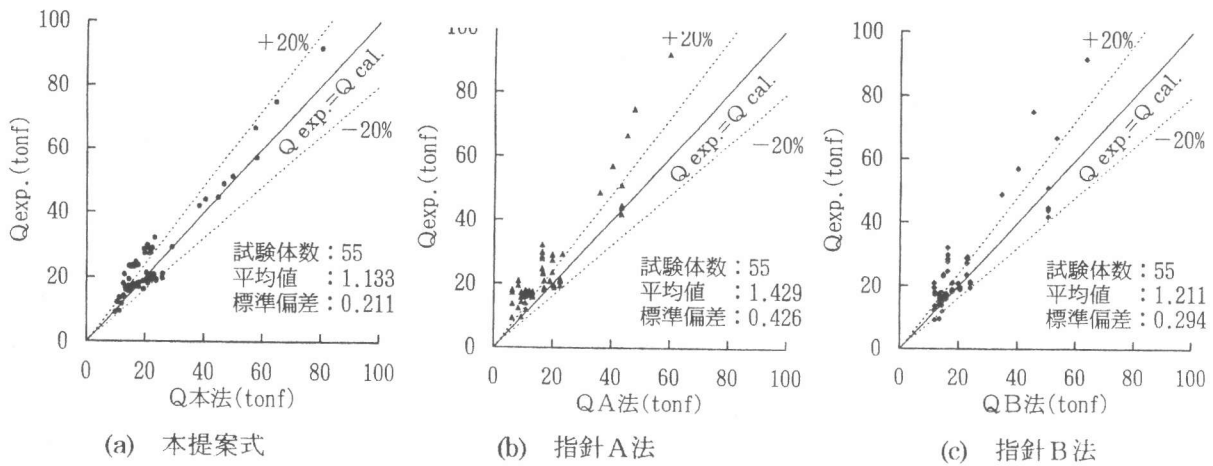


図-15 実験結果と計算結果との比較

4. まとめ

本報では、指針式B法を修正して、RC柱のせん断強度への軸力の影響を考慮したせん断強度式を提案した。この提案式は、簡便な方法でトラス、アーチ機構のひずみの適合条件を考慮して、両機構それぞれの有効係数を評価したものであるが、既往のRC柱の実験結果と比較した結果、計算値が実験値とよく対応することを確認した。

記号の説明

a_t : 主筋断面積、 b : 柱幅、 D : 柱せい、 E_s : 主筋のヤング係数、 f_c' : コンクリートの圧縮強度、 j : 主筋間距離、 L : 材長、 N : 軸力 (圧縮を正)、 p_w : せん断補強筋比、 σ_y : 補強筋降伏応力度、 $p_w \cdot \sigma_y^* = \min(p_w \cdot \sigma_y, (\Sigma \Psi / b) \cdot \tau_{max})$ 、 τ_{max} : 主筋付着強度 ($\tau_{max} = (0.307bi + 0.427 + 24.9qst) \sqrt{f_c}$, [6])、 $\Sigma \Psi$: 主筋周長の合計、 $\lambda = L/D$ 、 $\lambda_A = 2\sqrt{\lambda^2 + 1} / (\sqrt{\lambda^2 + 1} + \lambda)$ 、 $\lambda_B = (\sqrt{\lambda^2 + 1} - \lambda) / (\sqrt{\lambda^2 + 1} + \lambda)$ 、 ν_a, ν_t : アーチ機構、トラス機構のコンクリート圧縮強度の有効係数、 $\tan \theta = \sqrt{\lambda^2 + 1} - \lambda$ 、 $\beta^* = (2p_w \cdot \sigma_y / \nu_t f_c')$

謝辞

東京工業大学工業材料研究所教授 林 静雄先生には貴重な実験結果の資料をご提供頂きました。また、日本工業大学工学部建築学科卒論生 釜本宏典君、小林康博君には、数値解析等に御協力を頂きました。ここに、感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 黒正、松崎、林、小林他：高強度せん断補強筋を用いたRC柱に関する実験研究 (その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和62年10月、pp.483-484
- [2] 桑田、南：480キロ級の高強度コンクリートを用いたRC柱のせん断耐力に及ぼす作用軸力比の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17、No. 2、1995、pp.857-862
- [3] 張、野口：RC造柱のせん断強度に及ぼす軸力の影響に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、12-2、1990、pp.329-332
- [4] 白石、狩野、町田：鉄筋コンクリート造耐震壁の最大せん断耐力に関する一考察、日本建築学会構造系論文報告集、第365号、昭和61年7月、pp.144-155
- [5] M.P.Collins : The Shear Strength of Reinforced Concrete Structure, Japan Concrete Institute Annual Convention 1995
- [6] 森田、藤井：有限要素法解析における付着モデルの現状と今後の課題、RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集、1984年12月、pp.35-42
- [7] 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、1990年11月