

論文 高強度材料を用いた RC 部材の終局せん断耐力

中澤 淳^{*1}・蒲原 裕一^{*2}・南 宏一^{*3}

要旨：普通強度から超高強度のコンクリートに高強度せん断補強筋を組み合わせた鉄筋コンクリート柱の実験を行い、既往の耐力式では、十分な計算精度で終局せん断耐力を評価できないことを指摘した。そこで、若林・南理論による終局せん断耐力式のトラス機構およびアーチ機構に含まれるコンクリート強度とせん断補強筋量の有効係数を、実験で得られた知見に基づいて修正し、鉄筋コンクリート部材に高強度材料を用いた場合でも、本論文で提案する耐力式によって柱および梁部材の終局せん断耐力を精度良く評価できることを示した。

キーワード：高強度材料，終局せん断耐力，トラス機構，アーチ機構

1. はじめに

建物の高層化，大スパン化や，構造部材断面の縮小化を目的として，使用材料を高強度化することが進んでいるが，RC 構造物の性能設計を行なうには，部材の耐力や変形性能を明示し，その性能を保障する必要がある。そのためには，終局耐力（特に，終局せん断耐力）の算定において，理論的に裏付けされた精度の良い計算式の確立が要求される。筆者らは RC 部材のせん断耐力に対して極めて有効な終局強度解析法である若林・南の拡張累加強度理論の $n-q$ 方程式¹⁾（以後，若林・南式と呼称）に着目して検討を行い，高強度材料（コンクリートとせん断補強筋）を用いた RC 柱部材に関してはせん断耐力の予測が危険側となる傾向があることを指摘した²⁾。そこで，本研究では高強度材料を用いた RC 柱部材の終局せん断耐力について，若林・南式を応用して修正を加えたせん断強度式を提案し，その適合性を検証する。

2. 検証対象にした実験概要

本論文で用いた実験データは，過去に筆者らが行った 6 シリーズのものであり，合計 34 体の試験体による実験値である。実験計画の詳細は

文献³⁾に示す。実験変数はコンクリート強度 B ，柱長さ比 L/D （ここで， H は柱長さ， D は柱せい），軸力比 $n (=N/(bD - B))$ ，ここで， N は軸力， b は柱幅），せん断補強筋比 $p_w (=WA/(bx))$ （ここで， WA はせん断補強筋断面積， x はせん断補強筋間隔）およびせん断補強筋降伏強度 w_y である。 B は 21, 36, 60 および 100N/mm² 級の 4 種類， L/D は 3 および 2 の 2 種類， n は 0.1, 0.3, 0.5 の 3 種類， p_w は 0.20~1.14%， w_y は 295, 785, 1275N/mm² 級の 3 種類である。共通因子としては，柱断面 $b \times D=300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，主筋量 16-D16（SD685 相当）である。

3. 終局せん断耐力の検討

既往の理論や提案式では，コンクリート強度の有効係数 c およびせん断補強筋の有効係数 s が，コンクリート圧縮強度 B およびせん断補強筋強度 w_y のそれぞれのみに関係する有効係数として検討されている⁴⁾⁵⁾。一方，文献³⁾の実験結果や筆者らの研究では，高強度せん断補強筋は，コンクリートの横拘束量等に影響を与え，コンクリートを高強度にすることで，せん断補強筋の補強効果をより有効に使用できると考えている。そこで，著者らは， c およ

*1 JFE テクノワイヤ（株）技術部商品技術室 博士（工学）（正会員）

*2 福山大学大学院 工学研究科建築学専攻修士課程

*3 福山大学工学部建築学科教授 工博（正会員）

び s が B およびせん断補強筋量 $p_w \cdot w_y$ のみに関係するのではなく、 c には B と $p_w \cdot w_y$ のそれぞれが、 s にも B と $p_w \cdot w_y$ のそれぞれが影響すると考え、コンクリート強度とせん断補強筋量の因子を含む c と s は式(1)で表現し、式(1)の2変数について検討する。

$$\left. \begin{aligned} c &= f(B, p_w \cdot w_y) \\ s &= g(B, p_w \cdot w_y) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

したがって、 B および $p_w \cdot w_y$ の影響について、それぞれの補正係数を検討するためには、 B と $p_w \cdot w_y$ の2項に分離し、それぞれ2項の累加ができる単純な式で表す必要がある。

そこで、コンクリートに対する有効係数とせん断補強筋に対する有効係数を分離することができる文献¹⁾の式(2)を用いて検討する。なお、文献³⁾で用いたほぼ全ての試験体は、図-1に示す $n-q$ 相

関曲線の中で、軸力の大きさがせん断強度に影響を与えない領域で終局耐力が決まる範囲で実験が行なわれており、検証に用いた実験データのせん断強度 Q_u は、式(2)によって求めた。

$$q = \left((1 + \frac{2}{B})^{1/2} \right) + p_w \cdot w_y \cdot d_1 \quad (2)$$

$$= (1 + 2 \cdot \frac{1}{B}) / 2 \quad (3)$$

$$= L/D \quad (4)$$

$$= p_w \cdot w_y / F_c \quad (5)$$

$$d_1 = d/D \quad (6)$$

ここに、 d : 主筋間隔、 F_c : コンクリート設計基準強度

上記の式(2)における q を Q_u 、 F_c を B とし、さらに Q_u を無次元化して表すと式(7)となる。

$$\frac{Q_u}{bD} = \frac{B}{1 + 2 \cdot \frac{1}{B}} + p_w \cdot w_y / B \cdot d_1 \quad (7)$$

B の影響と $p_w \cdot w_y$ の影響について、それぞれの有効係数を検討するために、式(7)を B と $p_w \cdot w_y$ の2項に分離すると、それぞれ2項の累加ができる有次元の単純な次式で表すことができる。

$$Q_u = 1/2 \cdot B \cdot \left((1 + \frac{2}{B})^{1/2} \right) \cdot b \cdot D + p_w \cdot w_y (d_1 \cdot \left((1 + \frac{2}{B})^{1/2} \right)) \cdot b \cdot D \quad (8)$$

ここで、式(8)を式(9)のように表し、 Q_u 、 cQ 、 rQ について重回帰分析を行う⁶⁾。

$$Q_u = c \cdot cQ + s \cdot rQ \quad (9)$$

$$cQ = 1/2 \cdot B \cdot \left((1 + \frac{2}{B})^{1/2} \right) \cdot b \cdot D \quad (10)$$

$$rQ = p_w \cdot w_y (d_1 \cdot \left((1 + \frac{2}{B})^{1/2} \right)) \cdot b \cdot D \quad (11)$$

コンクリート強度を変数にした場合の c を c_1 、せん断補強筋を変数にした場合の s を c_2 とし、コンクリート強度を変数にした場合の s を s_1 、せん断補強筋量を変数にした場合の s を s_2 として、 B および $p_w \cdot w_y$ について重回帰分析を行った結果を図-2および図-3にそれぞれ示す。 B に関してはコンクリート強度が大きくなるほど c_1 は小さくなり、逆に s_1 は大きくなる傾向がある。 $p_w \cdot w_y$ に関しては、せん断補強筋量が大きくなるほど c_2 は大きくなり、逆に s_2 は小さくなる傾向がある。このことから、 B が大きくなるとコンクリート強度有効係数は小さく評価し、せん断補強筋係数は大きく評価できることがわかる。一方、 $p_w \cdot w_y$ が大きくなるとコンクリート強度有効係数は大きく評価でき、逆にせん断補強筋有効係数は小さく評価することになる。分析結果から、 B および $p_w \cdot w_y$ がお互いに影響を与えていることがわかる。

図-2の B の重回帰分析結果をそれぞれ直線的に回帰すると式(12)、式(13)が得られる。

$$c_1 = 1.14 - B/250 \quad (12)$$

$$s_2 = 0.10 + B/200 \quad (13)$$

ただし、 B の単位は N/mm^2

図-3の $p_w \cdot w_y$ の重回帰分析結果をそれぞれ直線式に回帰すると式(14)、式(15)が得られる。

$$c_2 = 0.47 + p_w \cdot w_y / 27 \quad (14)$$

$$s_2 = 1.54 - p_w \cdot w_y / 12 \quad (15)$$

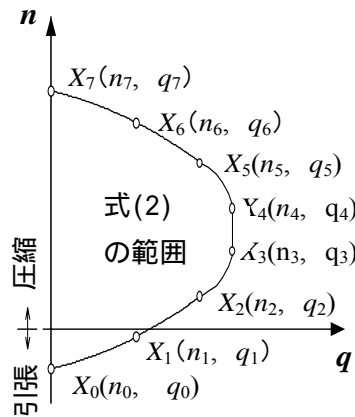


図-1 $n-q$ 相関曲線

ただし、 $p_w \cdot w_y$ の単位は N/mm^2
 ここで、 c_1 および c_2 と、 s_1 および s_2 の影響はほぼ1/2と考え、その相関の平均をとって表すと、 c および s は式(16)および式(17)で与えられる。

$$c = 0.80 + B/500 + p_w \cdot w_y/54 \quad (16)$$

$$s = 0.80 + B/400 - p_w \cdot w_y/24 \quad (17)$$

図-4に式(16)、式(17)によって求めた c 、 s と $p_w \cdot w_y$ および B の関係を示す。 c は $p_w \cdot w_y$ が大きく、 B は小さいほど1.0に近づく傾向を示した。 s は $p_w \cdot w_y$ が小さく、 B が大きいくほど1.0に近づく傾向を示した。このことから、コンクリート強度の増大により c は小さくなるが、 $p_w \cdot w_y$ の増大によりせん断補強筋の横拘束による効果が増すことがわかる。

s に関しては $p_w \cdot w_y$ が大きくなるほど s が小さくなるが、 B が大きくなると s も大きくなり、せん断補強筋に対する効果が増すことが示された。なお、ここではトラス機構におけるコンクリートの圧縮束の角度を45度と考えているため c 、 s が1.0を超え、それぞれの補強効果が1.0より増す場合がある。

4. 提案したせん断耐力式の適合性

前述で提案した c および s を用い、式(7)

中の B を $c \cdot B$ に、 $p_w \cdot w_y$ を $s \cdot p_w \cdot w_y$ に修正して評価する。

図-5に提案式による終局せん断耐力の計算値と文献³⁾の実験値との比較を示す。対象とした試験体全般に対する実験値と計算値との比の平均値は1.06、標準偏差は0.13であり、高強度材料を用いたRC部材のせん断耐力評価式による計算値と実験値の対応は良好である。

表-1に文献³⁾の全試験体34体の実験値と、提案式による計算値を示す。

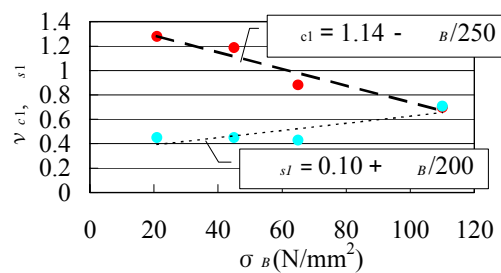


図-2 c_1 および s_1 と B の関係

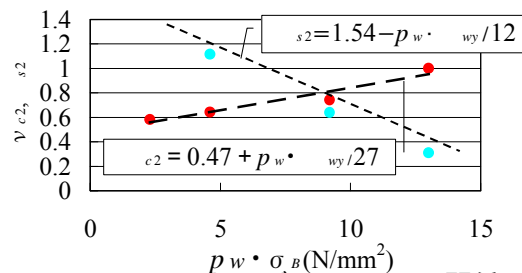


図-3 c_2 および s_2 と B の関係

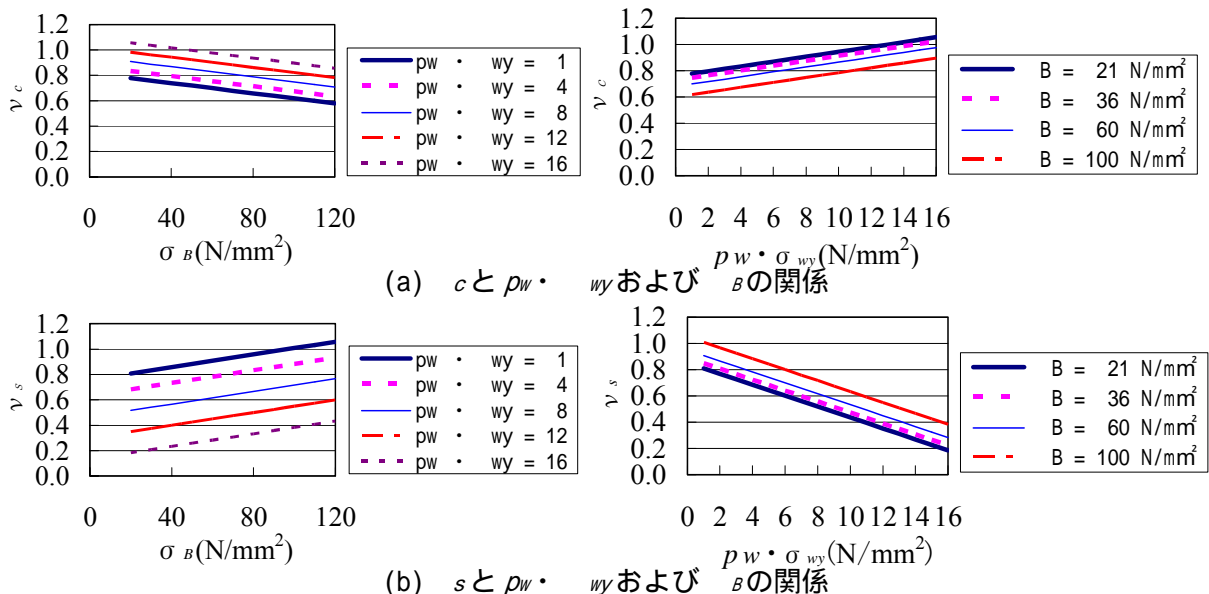


図-4 有効係数とせん断補強筋量およびコンクリート強度の関係

図 - 6 は、文献³⁾の全試験体 34 体に対する実験値と、提案式による計算値の比較である。印は実験による最大値を表しており、棒グラフにはそれぞれトラス機構およびアーチ機構による強度をそれぞれ表している。この解析結果に見られるように、文献³⁾の実験計画において選択された試験体では、トラス機構によるせん断力負担率が小さく、アーチ機構による負担率が大きくなっていることがわかる。計算値と実験値の対応には若干のバラツキがあるが全般的な傾向は極めて良く一致しており、高強度材料を用いた場合の RC 柱のせん断強度は前述の提案式で推定できることを示している。

図 - 7(a) および (b) にコンクリート強度 100N/mm^2 と用いたせん断補強筋強度 785 および 1275N/mm^2 を組み合わせた試験体の $n - q$ 曲線を示す。実験値と理論値の対応は良好である。

提案式による $n - q$ 方程式のせん断耐力予測

精度を検証するために、著者らの既往の実験データ³⁾に、梁部材も含めた文献^{7)~10)}の実験データを加えた以下に示す条件を満足するものを検証データとして採用した。

(a)コンクリート強度：21 ~ 120N/mm^2

(b)せん断補強筋強度：295 ~ 1275N/mm^2

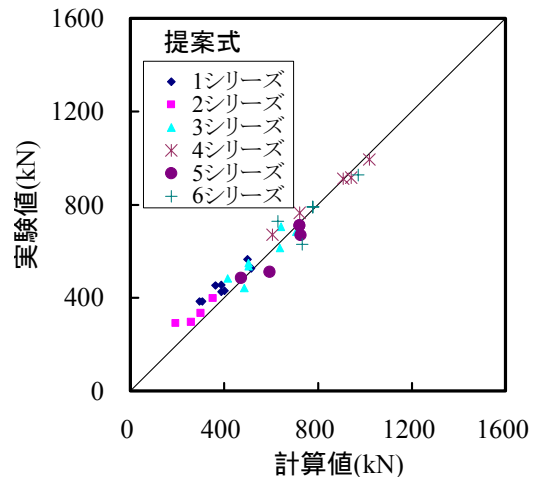


図 - 5 提案式および若林・南式と実験値の関係

表 - 1 実験値と計算値の比較

シリーズ	試験体	σ_B (N/mm^2)	H/D	n	p_w (%)	σ_{wy} (N/mm^2)	$p_w \cdot \sigma_{wy}$	(10)式 c	(11)式 s	aQ_{su} (kN)	iQ_{su} (kN)	Q_{su} (kN)	Q_{exp} (kN)	Q_{su}/Q_{exp}
1	A-1	39.8	3	0.3	0.95	385	3.4	0.79	0.75	216	147	362	452	1.25
	A-2				0.20			0.76	0.82	208	87	295	383	1.30
	A-3				0.40			0.75	0.82	219	88	307	384	1.25
	A-4				0.40			0.79	0.74	229	159	388	427	1.10
	A-5	42.2	3	0.3	0.80	930	7.44	0.79	0.74	229	159	388	455	1.17
	A-6				0.86			0.59	250	250	500	566	1.13	
	A-7				0.85			0.59	263	253	516	527	1.02	
	A-8				0.27			0.78	242	160	402	431	1.07	
2	B-1	20.7	3	0.3	0.20	831	1.66	0.79	0.78	119	75	194	290	1.50
	B-2				0.40			0.82	124	136	260	295	1.14	
	B-3				0.80			0.88	133	218	351	397	1.13	
	B-4				0.40			0.82	180	120	301	334	1.11	
3	B-5	60.4	3	0.3	0.1	851	3.40	0.74	0.81	327	158	485	441	0.91
	B-6	0.20			0.70			0.89	329	87	416	482	1.16	
	B-7	0.40			0.73			0.82	344	160	504	550	1.09	
	B-8	0.80			0.80			0.67	375	264	638	613	0.96	
	B-9	1.14			0.85			0.55	400	307	708	685	0.97	
	B-10	0.5			0.73			0.82	344	160	504	535	1.06	
	B-11	2			0.3			0.73	0.82	501	142	643	705	1.10
4	B-12	115.8	3	0.3	0.20	870	1.74	0.60	0.99	505	102	607	672	1.11
	B-13				0.40			0.63	0.95	532	189	722	764	1.06
	B-14				0.80			0.70	0.80	588	320	908	911	1.00
	B-15				1.14			0.75	0.67	635	384	1019	993	0.97
	B-16				0.40			0.63	0.95	775	167	942	916	0.97
5	D-1	64.4	3	0.3	0.20	1373	2.74	0.72	0.85	339	134	473	485	1.03
	D-2				0.40			0.77	0.73	363	230	594	511	0.86
	D-3				0.80			0.88	0.50	412	314	726	669	0.92
	D-4				1.14			0.96	0.30	454	269	722	710	0.98
	D-5				2			0.40	0.77	0.73	529	204	722	710
6	D-6	102.2	3	0.3	0.20	1373	2.74	0.64	0.94	480	149	732	629	1.16
	D-7				0.40			0.70	0.83	519	261	629	729	1.01
	D-8				0.80			0.80	0.59	596	374	780	789	0.95
	D-9				1.14			0.89	0.40	662	355	780	789	0.95
	D-10				2			0.40	0.70	0.83	755	231	971	927

注) aQ_{su} :アーチ機構によるせん断耐力計算値, iQ_{su} :トラス機構によるせん断耐力計算値,
 Q_{su} :せん断耐力計算値, Q_{exp} :実験値

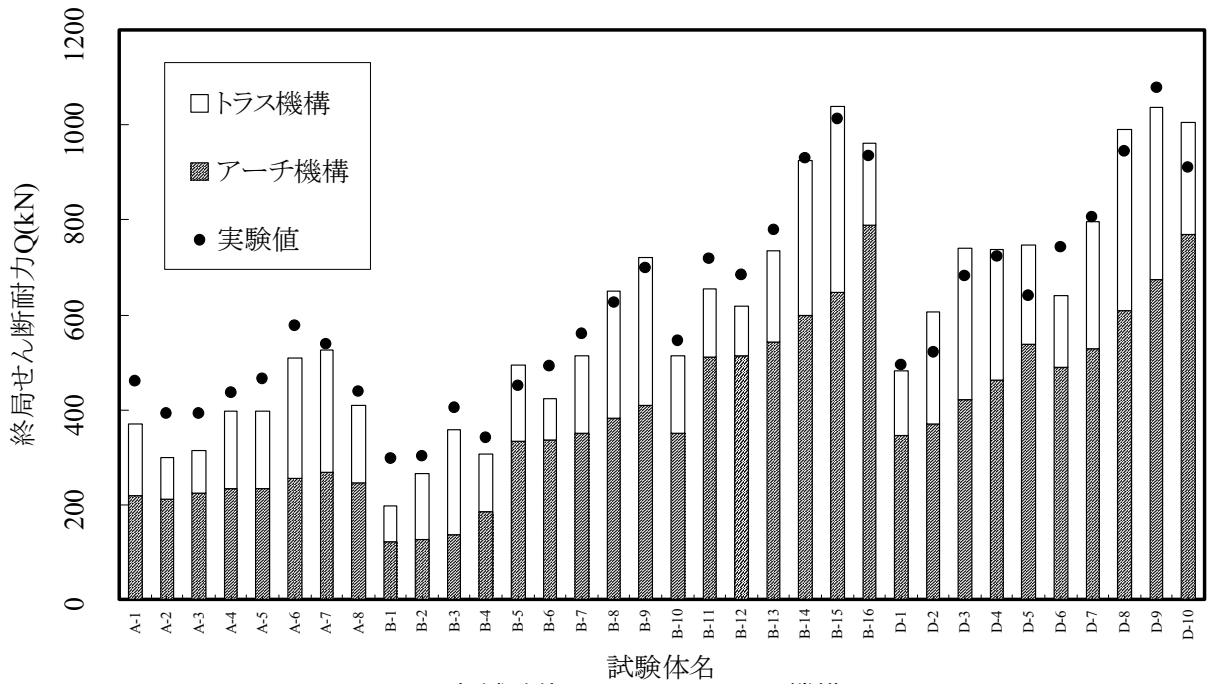
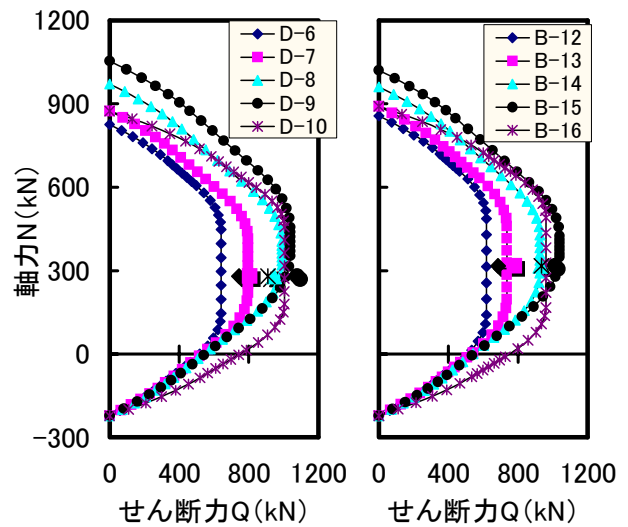


図 - 6 各試験体のアーチ・トラス機構

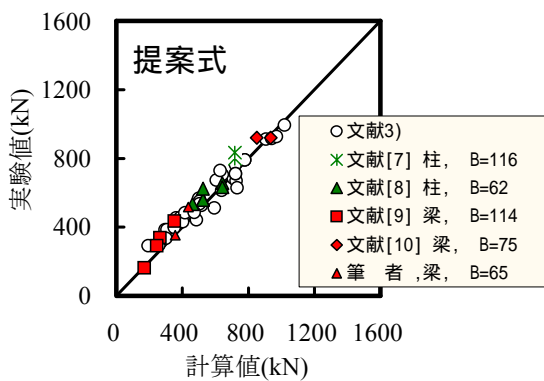
- (c) 付着破壊によって最大耐力が決定されない。
- (d) 軸力比：0~0.5
- (e) 曲げ降伏によって最大耐力が決定されない。

文献³⁾の実験値に、文献^{7)~10)}の他の研究機関における実験値を含めた検証結果を図-8(a)，(b)に示す。(a)において縦軸および横軸はそれぞれ実験値および提案式による終局せん断耐力の計算値を示し、印は文献³⁾の実験データを示している。また、(b)は計算値に対する実験値の比率(実験値/計算値)の頻度分布を示したものであり、図中のハッチ部分は既往の研究データ16体に対するものを示している。全データに対する実験値と計算値の比の平均値は1.08、標準偏差は0.12であり極めて良好である。

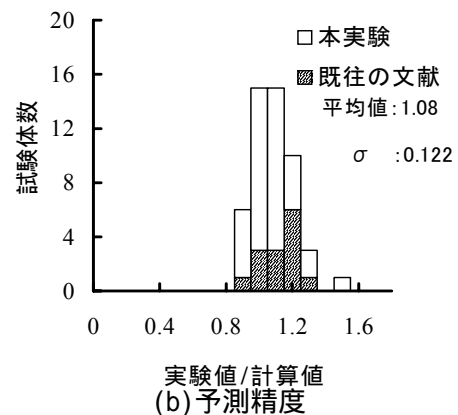


(a) $f_y=785\text{ (N/mm}^2)$ (b) $f_y=1275\text{ (N/mm}^2)$

図 - 7 N - Q 相関曲線



(a) 実験値 - 計算値



(b) 予測精度

図 - 8 提案式のせん断耐力予測精度

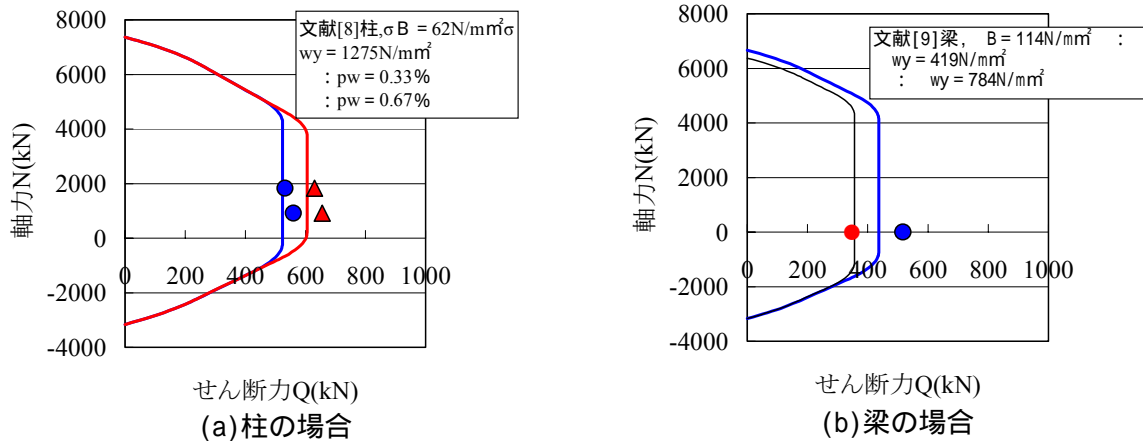


図 - 9 N - Q 相関曲線

図 - 9(a) および(b)に提案式による既往の研究⁸⁾⁹⁾の $n - q$ 相関曲線をそれぞれ示す。同図に、正荷重時の最大強度に関する実験値を印で示している。ここでは、軸力の影響について確認するために、軸力を実験変数にしている柱部材と軸力が零である柱部材について、計算値と実験値との関係を表している。軸力が無い場合(すなわち梁)も含め、軸力が小さい部材に対しても概ね精度良く評価できている。

5. まとめ

高強度材料を用いた RC 柱の終局せん断耐力は提案式によってほぼ推定できることが示された。さらに、この提案された終局せん断耐力式は梁部材も含め既往の高強度材料を用いた RC 部材の終局せん断強度の予測に対しても良好の適合性を示した。

参考文献

- 1) 若林 実, 南 宏一: コンクリート系構造部材のせん断強度について, 京都大学防災研究所年報, 第 24 号 B-1, pp.245-277, 1981.4
- 2) 中澤淳, 南宏一: 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の終局せん断強度に関する一考察, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp843-844, 1999.9
- 3) 中澤淳, 桑田裕次, 南宏一: 高強度材料を用いた RC 柱のせん断破壊性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp397-402, 1999.6
- 4) 益尾潔: 鉄筋コンクリート柱, はり部材のせん断

- 耐力の評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.185-190, 1992.6
- 5) 桑田裕次, 南宏一: 60Mpa 級高強度鉄筋コンクリート柱, はり部材のせん断耐力の評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp185-190, 1992.6
 - 6) 東京大学出版会: 基礎統計学 3 自然科学の統計学 東京大学教養学部統計学教室編, (財)東京大学出版会, 2001.2
 - 7) 中江晃彦, 倉本 洋, 南 宏一: 1200 キロ級のコンクリートを用いた RC 柱部材のせん断破壊性状, コンクリート工学年次論文報告集 12-2, pp.357-362, 1990.6
 - 8) 井上章男, 西村泰志, 倉本 洋: 高強度せん断補強筋を用いた鉄筋コンクリート柱のせん断破壊性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.635-636, 1992.8
 - 9) 榎本浩之, 慶 祐一, 柿田芳久, 渡辺史夫, 六車 照: 超高強度コンクリートを用いた梁のせん断強度に関する研究(その 1. $f_c' = 1200 \text{kg/cm}^2$ に関する実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.287-288, 1990.10
 - 10) 慶 祐一, 榎本浩之, 渡辺史夫, 六車 照: 高強度コンクリートを用いた梁のせん断強度に関する研究(その 1. $f_c' = 600 \text{kg/cm}^2, 800 \text{kg/cm}^2$ に関する実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.269-270, 1991.9