

論文

[2072] 高強度鉄筋コンクリート壁柱のせん断特性に関する研究

正会員○香田 伸次 (清水建設技術研究所)

正会員 坂口 昇 (同)

山野辺宏治 (同)

正会員 熊谷 仁志 (同)

1. はじめに

近年、建築構造物の超軽量化・超高層化を目的として、高強度材料を用いた高耐力部材の研究が各所で行われている。その結果、高強度コンクリート特有の破壊時の脆性的な挙動を防止する対策が特に必要であることが指摘されている。部材の脆性的な破壊モードのうち曲げ圧縮破壊については、コンクリートを横拘束筋によって十分コンファインすることにより、終局耐力の上昇、靱性能の改善が可能であることが確認されている。しかしせん断破壊については、横補強量を増やしてもせん断圧縮破壊を防止する効果に限界があると考えられ[1]、さらに高強度コンクリートのひび割れ面が普通強度に比べ平滑であることにより、せん断応力下のコンクリート圧縮強度の有効係数 ν がコンクリート強度の増加に伴い減少するため[2]、耐力的にも材料の高強度化のメリットが十分に発揮できない等の問題が残っている。

そこで今回、せいに比べて幅が小さい部材(壁柱)のせん断実験を行い、せん断圧縮破壊時の挙動について検討する。この実験では幅方向の拘束筋(幅止筋)量を主なパラメータとし、横拘束することによる靱性能改善の可能性と、有効係数が見掛け上どの程度上昇するかを調べる。またその際、予備実験として行った壁柱の中心圧縮実験の結果を用い、一軸圧縮応力下での幅止筋の効果と、せん断圧縮応力下のそれとを比較するものとする。

2. 予備実験(壁柱の中心圧縮実験)

2.1 実験概要および結果

表1および図1に示す10種類の試験体(各3体、計30体)に対し単調圧縮荷重を行った。パラメータは断面の縦横比と横拘束の有無とし、特に正方形断面と縦横比が最大のものについて短辺方向の拘束筋(幅止筋)量の違いについて比較した。コンクリートは全て同時に打設した。表2に使用材料の物性を示す。表中コンクリートは100φx200シリンダー試験結果による。

表3には、実験結果として最大軸応力度を示す。ただし鉄筋を有するものについては、軸荷重から主筋による軸力負担分を減じたものを、横拘束筋によるコア断面積(コア寸法は拘束筋芯々間距離とした)で除すことにより軸応力度とした。

2.2 断面形状による影響

断面の縦横比が最大軸応力度に及ぼす影響を図2に

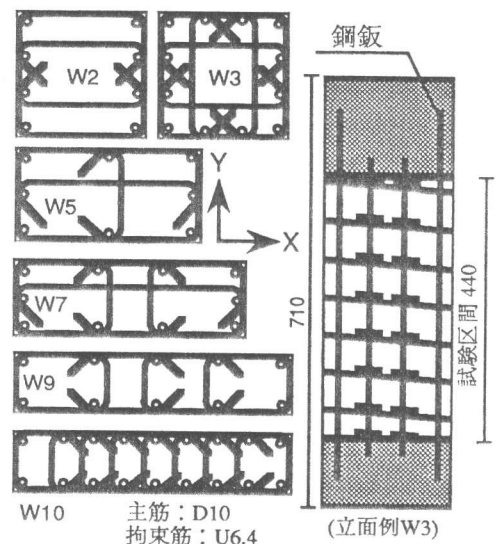


図1: 試験体形状(中心圧縮実験)

示す。プレーンコンクリートでの比較では、縦横比の増加に伴い軸強度が低下する傾向が若干見られた。この傾向は、文献[3]による形状補正係数 K_d 、 K_f を用いて概ね把握できるものと考えられる(表1)。ただし、 K_d は下式により、

$$K_d = 0.81 + \frac{1.01 \cdot d}{0.424 \cdot V/h + h} \quad (1)$$

ただし、 V : 試験体(試験区間)体積 (cm^3)

h : 試験体(試験区間)高さ (cm)

d : 試験体断面幅(短辺長さ) (cm)

K_f については $K_f = 0.90$ とした。

また横拘束筋を有するものについては、断面の縦横比による影響が不明瞭となっている(図2)。

このことは、横拘束筋により破壊時の滑り角度が均一化し、形状の影響を打ち消す効果があったためと考えられるが、これに対する詳細な検討は今後の課題としたい。

2.3 横拘束筋による影響

拘束筋量によるコンファイン効果の違いについて、 Y 軸の拘束筋体積比 ρ_{sy} と最大軸応力度との関係を図3に示す。また図中では各種提案式[4][5]による計算値との

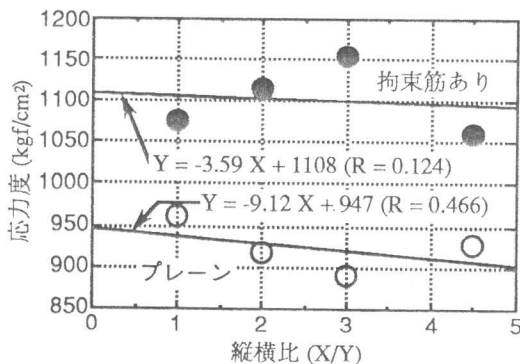


図2：縦横比が軸強度に及ぼす影響

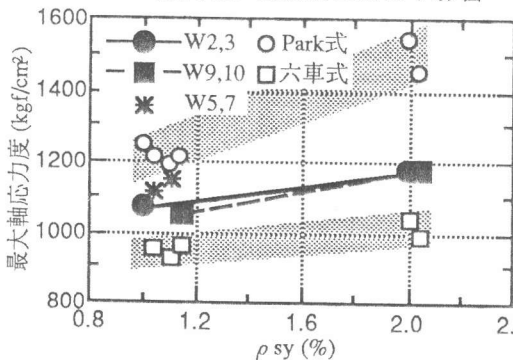


図3：横拘束筋によるコンファイン効果

表1：試験体一覧(中心圧縮実験)

番号	断面 XxY mm	縦横 比 X/Y	断面積 cm ²	ρ_{sy} (%)	
				X	Y
W1	210 x 210	1.0	441.0	プレーン	
W2				2.00	1.00
W3					2.00
W4	300 x 150	2.0	450.0	プレーン	
W5				2.14	1.04
W6	375 x 125	3.0	468.8	プレーン	
W7				2.18	1.10
W8	450 x 100	4.5	450.0	プレーン	
W9				2.22	1.14
W10					2.04

ただし、 ρ_{sy} : 拘束筋体積比

表2：材料の物性(中心圧縮)
(コンクリート)

圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	ポアソン 比
1175	4.30×10^5	0.21

(鉄筋)

種別	降伏点強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
D10	3430	1.86×10^6
U6.4	13180	1.94×10^6

表3：実験結果一覧(中心圧縮実験)

番号	最大応力度 (kgf/cm ²)			
	実験	σ_{ec}	Park式	六車式
W1	959	954(0.99)	—	—
W2	1072	—	1248(1.16)	1001(0.93)
W3	1178	—	1542(1.31)	1043(0.89)
W4	918	925(1.01)	—	—
W5	1114	—	1212(1.09)	958(0.86)
W6	888	912(1.03)	—	—
W7	1153	—	1188(1.03)	928(0.80)
W8	927	902(0.97)	—	—
W9	1057	—	1214(1.15)	965(0.91)
W10	1181	—	1450(1.23)	994(0.84)
平均	—	(1.00)	(1.16)	(0.87)

ただし、 \bullet 実験結果は各種3体の平均値

$\sigma_{ec} = K_f \cdot K_d \cdot \sigma_B$

\bullet 表中()内は、計算値/実験値

比較を示す。この結果、以下の傾向が見られた。

- ①修正Park式[4]は断面形状も考慮した式であるが、全般にわたって強度を過大評価している。この結果は特に ρ_{sy} の値が大きい領域で顕著で、拘束筋量の増加に伴う強度増分についても、十分に評価しているとは言えない。
- ②高強度材料も対象範囲としている六車式[5]では、逆に強度を過少評価しているが、強度増分についてはほぼ実験結果と対応している。

3. 壁柱のせん断実験

3.1 実験概要

表4、図4に示す6体の壁柱試験体に対して、対称または片持梁型の曲げせん断加力を行った。パラメータはシアスパン比、軸力、横補強筋量、幅止筋量とし、断面せい幅比は4:1で共通とした。表5に使用材料の物性を、図5に加力サイクルを示す。

3.2 実験結果

最終破壊モードとしては、S5が引張主筋の破断であったのを除き、他の試験体は全て主筋降伏前のせん断圧縮破壊となった。図6に各試験体の最終破壊状況を示す。S5と等しい幅止筋量であるS6がせん断圧縮破壊した理由として、幅止筋仕様の違いによりS6の方が拘束効果が小さかったことが挙げられる。S5では中子幅止筋が主筋に懸けられ、S6では横補強筋に懸けられており(図4)、S6の方が拘束効果が大きいと予想された。しかし実験結果として、最大耐力時の危険断面付近の圧縮域の中子幅止筋ひずみを調べたところ、S5ではほぼ全数が降伏していたが、S6では平均で降伏ひずみの約1/3に達している程度であった。これは、幅止筋に異形PC鋼棒を用い折曲げ径を大きく取ったため、細径鉄筋に懸けられたS6では引張力が十分伝達されなかったことが原因であると思われる。

図7にせん断力-部材変形関係包絡線の比較を示す。幅止筋量の増加に伴い変形性能も改善されていることがわかる。また全試験体とも、最大耐力時まで横補強筋(加力軸方向)の降伏は見られなかった(図8)。

3.3 コンクリート圧縮強度有効係数 η

軸力とせん断力を受ける壁柱内の応力伝達を、塩原モデ

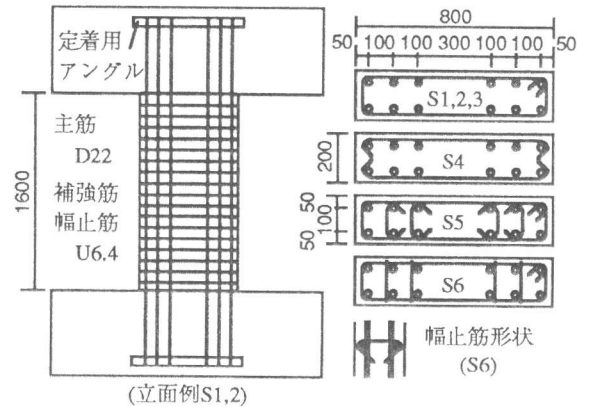


図4：試験体形状(せん断実験)

表4：試験体一覧(せん断実験)

番号	加力形式	M/QD	p_w (%)	p_s (%)	N tonf	η
S1	逆対称	1.0	0.3	0.075	159	0.10
S2					266	0.16
S3	片持梁	2.0	0.6	0.150	269	0.17
S4					266	0.17
S5					266	0.17
S6					279	0.17

ただし、 p_s ：幅止筋比、N：軸力、 η ：軸力比、S5とS6の違いは図4参照。

表5：材料の物性(せん断)
(コンクリート)

番号	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
S1	934	4.06x10 ⁵	0.22
S2	846	3.81x10 ⁵	0.21
S3	965	4.07x10 ⁵	0.20
S4	965	4.22x10 ⁵	0.22
S5	868	4.01x10 ⁵	0.21
S6	1008	4.24x10 ⁵	0.20

(鉄筋)

種別	降伏点強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
D22	10220	1.83x10 ⁶
U6.4	13200	1.97x10 ⁶

ル[6]を参考にして図9のように考える。この場合、壁柱がせん断圧縮破壊する時点では図中の線分AB（合成されたコンクリートストラットの幅）の大きさが限界に達すると考える。

$$\overline{AB} = \sqrt{Q_u^2 + N_c^2} \quad (2)$$

ただし、 Q_u : せん断耐力（実験値）、
 N_c : コンクリート部分の軸力（ $=N+N_s$ ）、
 N : 軸力（荷重）、
 N_s : 主筋による軸力（ $=\sum a_s \cdot \sigma_s$ ）、
 a_s : 主筋断面積、
 σ_s : 主筋軸応力度（実験値）。

また、ここでは主筋のダボ作用によるせん断力の負担は無視する。

線分ABで表される力を圧縮コンクリートゾーンの断面積 Acc （図10）で除した値を、コンクリート有効圧縮強度 $\nu\sigma_B$ とする。

$$\nu\sigma_B = \overline{AB} / Acc \quad (3)$$

ただし、 $Acc = b \cdot x_n / \cos\theta$ 、

b : 壁柱幅、
 x_n : 主筋ひずみ分布実験結果から求めた中立軸位置（図11）、
 θ : 線分ABの水平軸に対する角度。

表6には各試験体について、最大耐力時における式(2)、(3)中の各要素の値および ν を示す。幅止筋のないS4試験体では $\nu=0.767$ となった。

3.4 幅止筋の効果

中心圧縮実験結果と良い対応を示した六車式において、横拘束筋によるコンファイン効果 C_c は次のように評価されている。

$$\sigma_{cm} = (1 + 43 \cdot C_c) \cdot f'c \quad (4)$$

$$C_c = \rho_s \cdot \frac{\sqrt{f_y}}{f'c} \cdot \left(1 - \frac{S}{2 \cdot W}\right) \quad (5)$$

ただし、 σ_{cm} : 拘束コンクリートの圧縮強度、
 $f'c$: プレーンコンクリートの圧縮強度、
 ρ_s : 横拘束筋の体積比、

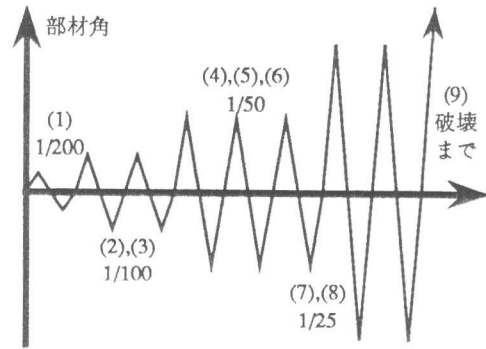
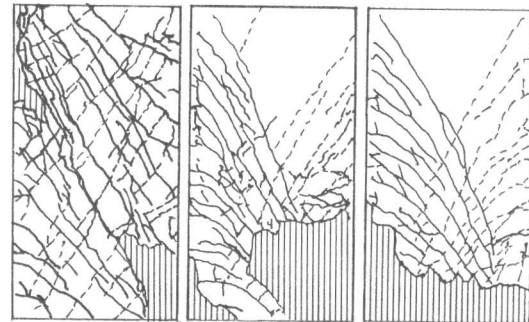
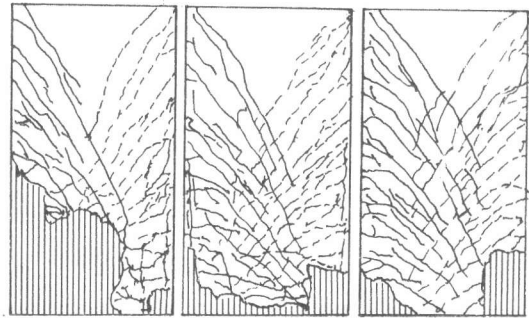


図5 : 加力サイクル(せん断実験)



(S1) (S2) (S3)



(S4) (S5) (S6)

図6 : 最終破壊状況

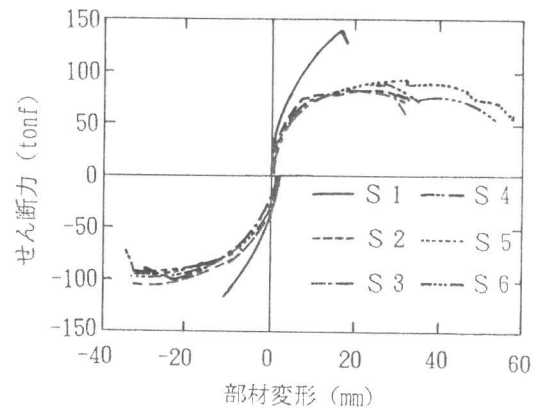


図7 : せん断力-部材変形関係包絡線

f_y : 横拘束筋の降伏点強度、
 S : 横拘束筋のピッチ、
 W : 拘束コア断面最小寸法。

これを参考にして、幅止筋による拘束効果 C_w を関数 F を用いて次のように定義し、表 6 で求めた各試験体の ν との関係性を調べる (図 12)。

$$\nu \sigma_B = (1 + F(C_w)) \cdot \nu_0 \sigma_B \quad (6)$$

$$C_w = p_{e,s} \cdot \frac{\sqrt{f_e}}{\sigma_B} \cdot \left(1 - \frac{S}{2 \cdot W}\right) \quad (7)$$

ただし、 ν_0 : 幅止筋がない場合の有効係数 (S_4 における ν)、
 $p_{e,s}$: 有効幅止筋比 ($= n \cdot a_s / A_{es}$)、
 n : 区間 x_n に存在する幅止筋本数、
 a_s : 1 本の幅止筋断面積、
 $A_{es} = S \cdot x_n \cdot \cos \theta$ (図 10)、
 f_e : x_n 区間の幅止筋平均応力度 (実験値)。

式(7)では、有効幅止筋比にストラットの角度を考慮している。これにより、シアスパン比が違う場合には合成されたストラットの角度も異なるという点が (例えば S_1 と S_2 (表 6)) 評価できる。また幅止筋強度として、実測したひずみ量から求めた応力度を用いている。これは先述の通り、幅止筋仕様の違いによる拘束効果の差異を評価するためである。さらにコンクリート圧縮強度にシリンダー試験結果を用い、試験体形状等の影響を考慮した強度は用いていない。コアコンクリートでは拘束筋の存在により形状の影響が不明瞭となることは、中心圧縮実験結果の項で述べたが、プレーンコンクリートについては形状の影響が予想される。しかし今回は式(6)の ν_0 にこの影響も含まれるものと見なし無視した。

図 12 から C_w の増加に伴い ν も増加することがわかる。増加の程度については、せん断圧縮破壊した試験体の実験結果を単純に直線回帰して求めた際の傾き 273 が、式(4)における C_c の係数 43 の約 6.3 倍となっており、一見しては幅止筋の拘束効果がより有効であるように思われる。しかしこの差には、先述の式(5)、(7)間の拘束筋強度の扱い方の違いや、式(3)、(7)中の x_n に被りコンクリート部分も含んで扱っていることが影響してい

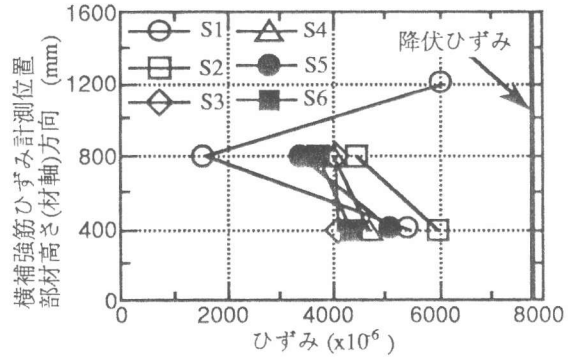


図 8 : 最大耐力時の横補強筋ひずみ分布

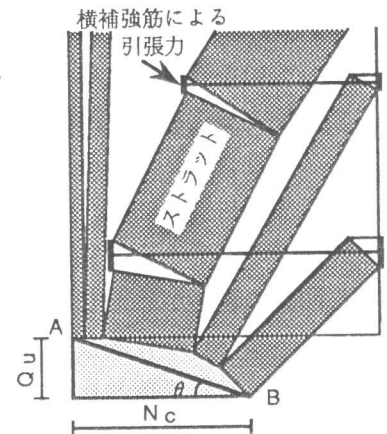


図 9 : 壁柱内の応力伝達機構

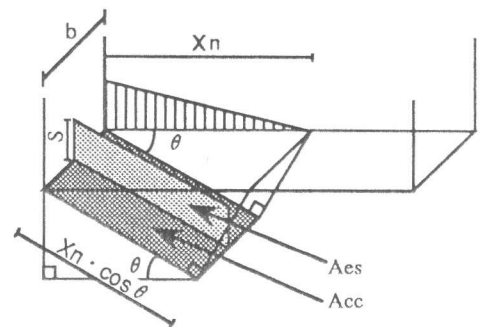


図 10 : 圧縮コンクリートゾーン断面積 Acc および 有効拘束断面積 A_{es}

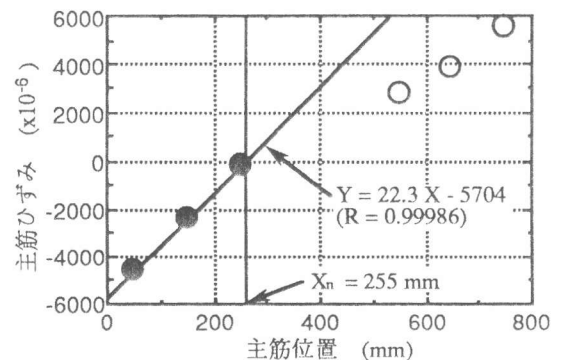


図 11 : 中立軸位置 (例 S_2)

表6：実験結果およびコンクリート有効圧縮強度 ν の計算

番号	Qu tonf	Ns tonf	Nc tonf	\overline{AB} tonf	x_n cm	$\cos \theta$	A _{cc} cm ²	$\nu \sigma_B$ kgf/cm	ν	C _w x10 ⁻³
S1	138.7	72.8	231.5	269.9	19.9	0.858	341	791	0.847	0.267
S2	88.1	73.0	339.2	350.5	25.5	0.968	494	710	0.839	0.164
S3	100.6	85.7	355.1	369.1	23.0	0.962	443	833	0.863	0.379
S4	94.5	87.7	354.0	366.4	25.6	0.966	495	740	0.767	—
S5	97.1	108.8	374.7	387.1	23.5	0.968	455	851	0.980	1.128
S6	96.6	112.1	390.6	402.4	22.9	0.971	445	904	0.897	0.739

るものと考えられ、単純な比較は有意義ではない。特に、実際の最大耐力時には一部既に剥落または圧壊している被りコンクリートを、健全なものとして評価することは問題が大きいと考えられる。しかし被りコンクリートとコアコンクリートの違いを意識的に扱うには、曲げ・せん断応力を受ける断面内のひずみ分布を把握し、両者の応力-ひずみ関係の違いが評価できる形にする必要がある。このようなひずみ分布を考慮したモデルについては、今後の検討課題としたい。

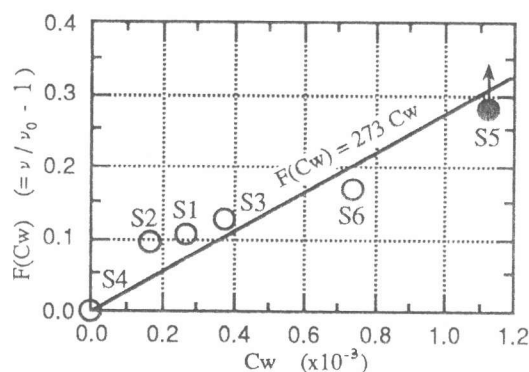


図12：幅止筋による拘束効果C_wと有効係数 ν

4. まとめ

- (1) 中心圧縮実験では、プレーンコンクリート試験体の場合、縦横比の増加に伴い軸強度が低下する傾向が若干見られた。この傾向は横拘束筋を有するものについては不明瞭であった。
- (2) 中心圧縮下の横拘束筋のコンファイン効果は、六車式により強度増分がほぼ評価できた。
- (3) 今回定義した方法により、コンクリートの有効圧縮強度係数 ν を実験値から求めた結果、幅止筋を有しない試験体の場合、 $\nu=0.767$ となった。
- (4) せん断実験では、幅止筋の拘束効果C_wの増加に伴い有効係数 ν も増加する傾向にあった。

参考文献：

- 1) 香田伸次ほか：高強度コンクリートを使用した柱のせん断特性に関する研究—せん断終局強度に対するシアスパン比の影響と横補強筋負担分の上限值—、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 829-830、1990. 10
- 2) Nielsen, M.P. : Limit Analysis and Concrete Plasticity, Prentice Hall, pp. 420, 1984
- 3) 香田伸次ほか：中心圧縮力を受ける超高強度鉄筋コンクリート柱の寸法効果と横拘束効果に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 751-752、1989. 10
- 4) Mander, J. B., et al. : Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, A. S. C. E., Vol. 114, No. 8, August, 1988
- 5) 六車照ほか：横補強筋による高強度コンクリートのじん性改善に関する研究、コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp. 317-320、1983
- 6) 塩原等：塑性理論を応用した鉄筋コンクリート耐震壁の終局強度算定方法、コンクリート工学、Vol. 25, No. 8, pp. 101-114、1987. 8