

論 文

[2001] 高強度材料を用いた RC 短柱のせん断挙動の FEM 解析

二村有則^{*1} 野口博^{*2} 北山和宏^{*3} 丸田 誠^{*4}

1.はじめに

日本建築学会の R C 造建物の終局強度型耐震設計指針¹⁾では、塑性理論に基づくせん断設計式が提案されており、普通強度材料の実験に良い対応を示している。しかし、高強度材料の場合には普通強度材料に比べ圧縮強度低減が顕著である等の違いがあり、修正を行う必要が生じている。また、このせん断設計式には、軸力の影響が考慮されていないこと、仮定の妥当性等の問題点も指摘されている。そこで本研究では、高強度材料を用いたせん断破壊型の R C 短柱の曲げせん断実験を行い、F E M 解析による検討も併せて、せん断補強筋量・軸力比がせん断耐力に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

実験は、実寸1/4程度の正方形断面の柱10体について行った。全試験体とも断面寸法20cm×20cm、内法スパン長さ40cm、せん断スパン比M/QD=1.0の短柱である。なお、本研究では、加力方法（繰り返し載荷、単調載荷）、せん断補強筋比（ $p_w=0.3, 0.6, 1.2, 1.8(\%)$ ）、および軸力比（ $n=N_u/\sigma_b=0, 0.15, 0.3, 0.6$ ）をパラメータとした8体について着目し検討を行う。表-1に試験体諸元一覧を、表-2に本実

験で使用した材料の試験結果を示す。また、NSK-1の配筋図を図-1に示す。なお、せん断補強筋には、突き合わせ溶接された閉鎖型の丸フープと角フープを同一断面に配筋した。

表-1 試験体諸元一覧

試験体番号	試験体名	軸力比 n^{*1}	主筋 η^{*2}	せん断補強筋	せん断補強筋比 $p_w(\%)$	備考
NSK-1	CK-6-3R	0.3	0.41	12-D13	D6	0.6(@106)
NSK-2	CK-6-3T					単調載荷
NSK-5	CK-8-3R					0.3(@106)
NSK-6	CK-12-3R					1.2(@53)
NSK-7	CK-18-3R					1.8(@36)
NSK-8	CK-6-0R		0			軸力なし
NSK-9	CK-6-1.5R	0.15	0.20			低軸力
NSK-10	CK-6-6R	0.6	0.82			高軸力

$$^{*1} n = N / cN_u \quad cN_u = A_c + \sigma_s + 0.85(b + D - A_c) + \sigma_b$$

$$^{*2} \eta = N / (b + D + \sigma_b)$$

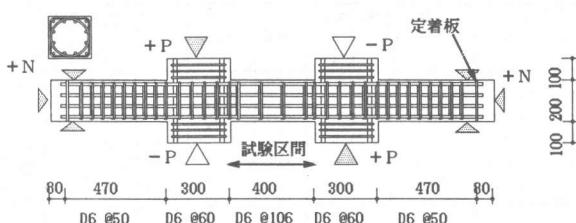


図-1 試験体配筋図

表-2 材料試験結果

鉄筋の材料特性			
種類	E_s (kgf/cm ²)	σ_{wy} (kgf/cm ²)	ϵ_y (μ)
主筋	2.23×10^4	7350	3360
せん断補強筋 ^{*3}	2.18×10^4	8630	6670
コンクリートの材料特性			
Ec	σ_b (kgf/cm ²)	σ_t (kgf/cm ²)	ϵ_{cu} (μ)
3.83×10^4	576	36.7	2250

^{*3} 0.2% off set 値

*1 千葉大学大学院生（正会員）

*2 千葉大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 東京都立大学講師・工博（正会員）

*4 鹿島建設技術研究所（正会員）

3. 実験結果

表-3に実験結果一覧を示す。なお、表中には終局強度型指針A法によるせん断耐力算定値を示す。ここで、コンクリート圧縮強度の有効係数を以下の2ケースで変化させ、実験結果との適合性を検討した。

$$\text{CASE1. (AIJ¹⁾) : } \nu \cdot \sigma_B = (0.7 - \sigma_B / 2000) \cdot \sigma_B$$

$$\text{CASE2. (CEB²⁾) : } \nu \cdot \sigma_B = 3.68 \cdot \sigma_B^{0.667-2}$$

3.1 せん断力-層間変形関係

図-2(a)～(c)に実験結果から得られたせん断力-層間変形関係を、加力方法、せん断補強筋比、軸力比について示す。

加力方法の比較では、初期剛性はほぼ同じだが、単調載荷は繰り返し載荷に比べせん断ひび割れ発生後の剛性低下が著しくなっており、わずかながらせん断耐力も高くなっている。せん断補強筋比による比較では、初期剛性はほぼ同じ値となっている。補強筋量が増加するとともに、最大耐力及び最大耐力時の変形量は大きくなり韌性も向上している。軸力比による比較では、軸力が低下すると早い時期からの剛性の低下がみられた。一方、せん断変形能は向上している。最大耐力は、軸力比n=0.15のNSK-9でかなりせん断耐力が上昇しているが、全体的に軸力が高くなるほど最大耐力は上昇している。また、高軸力になるほど最大耐力後の韌性は低下している。

3.2 せん断耐力

図-3にAIJ式とCEB式から得られる $\nu \cdot \sigma_B$ とコンクリート強度 σ_B の関係を示す。図から解るように、

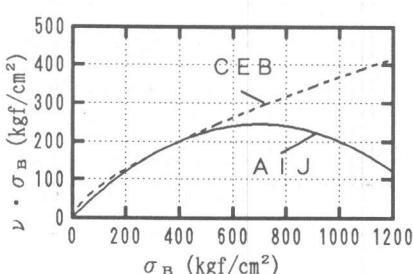
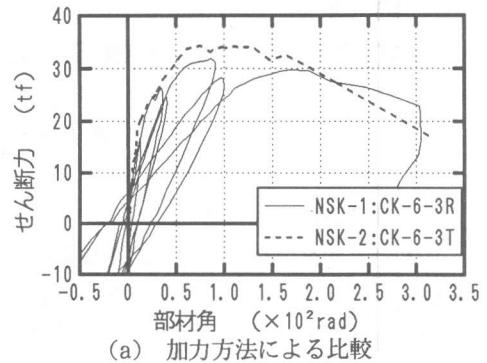
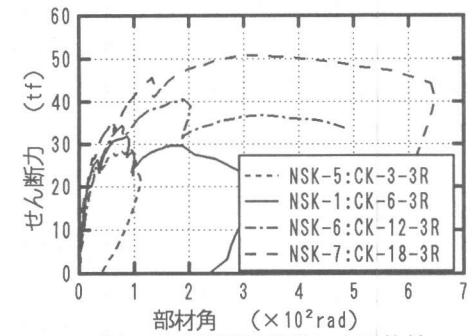


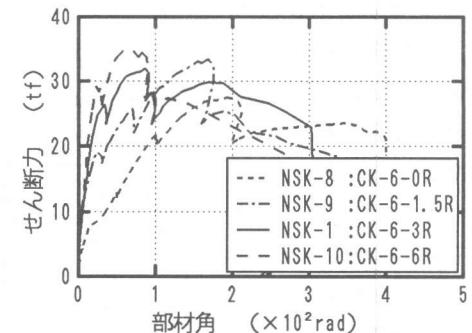
図-3 AIJ式とCEB式による比較



(a) 加力方法による比較



(b) せん断補強筋比による比較



(c) 軸力比による比較

図-2 せん断力-層間部材角関係

表-3 実験結果一覧

試験体	曲げ ひび割れ (tf)	せん断 ひび割れ (tf)	最大耐力 Q_u (tf)	せん断耐力計算値 (A法)			
				CASE	$\cot \phi$	β	Q_u (tf) 実験値 計算値
NSK-1	18.0	24.7	31.9	1	1.88	1	30.7 1.04
				2	1.97		32.1 0.99
NSK-2	17.9	24.3	34.3	1	1.88	1	30.7 1.12
				2	1.97		32.1 1.07
NSK-5	16.8	23.6	28.7	1	2.00	0.55	21.3 1.34
				2	2.00	0.51	22.2 1.29
NSK-6	20.0	25.7	40.6	1	1.13	1	36.8 1.11
				2	1.20		39.2 1.04
NSK-7	18.0	28.3	50.9	1	1.00	1	37.0 1.37
				2	1.00		39.8 1.28
NSK-8	4.9	7.9	27.4	1	1.88	1	30.7 0.89
				2	1.97		32.1 0.82
NSK-9	10.4	18.5	33.4	1	1.88	1	30.7 1.09
				2	1.97		32.11 1.04
NSK-10	26.3	29.1	35.3	1	1.88	1	30.7 1.15
				2	1.97		32.1 1.10

AIJ式では、高強度になると普通強度よりも低い値となってしまう。本研究では、 $\sigma_B = 576(\text{kgf/cm}^2)$ であり、大きな差異が生じるレベルではないが、表-3の実験値と計算値を比較すると、 $\nu \cdot \sigma_B$ にCEB式を用いることにより、良い適合性を示している。せん断抵抗機構の内訳は、 $\cot\phi$ と β の値に着目すると、せん断補強筋比が $p_w = 0.3\%$ と小さいNSK-5のみアーチ機構を想定していることがわかる。 $p_w = 1.8\%$ の時にはトラス機構の角度が45°となっている。

せん断耐力-各パラメータ関係を図-4(a), (b)に、A法の計算値と共に示す。せん断補強筋比で比較すると、軸力を考慮できないA法では、 $p_w = 0.6\sim 1.2\%$ で、やや安全側の値を示すが、 $p_w = 1.8\%$ では $p_w \cdot \sigma_{wy}$ に上限を設定しているために低めの評価となる一方、アーチ作用の生じる $p_w = 0.3\%$ では、せん断補強筋比の小さい場合、軸力によりせん断耐力がかなり上昇する為にA法では、かなり低めの値となっている。

軸力比で比較すると、A法では軸力を考慮できないにも関わらず、軸力無しのNSK-8については過大評価となり、軸力のある試験体では良い対応を示した。

3. 3 せん断補強筋の効果

図-5に最大耐力時のせん断補強筋のひずみ分布を、せん断補強筋量をパラメータとした4体について示す。図中のひずみの値は角フープと丸フープの平均値を用いた。ひずみ分布は似た傾向を示しており、ほぼ同様の値となった。

本実験では、最大耐力以前でのせん断補強筋の降伏は、丸フープの降伏が数箇所のみで、角フープは降伏しておらず、せん断補強筋の降伏によりせん断耐力が決定したとは考えにくい。よって、せん断補強筋の効果を把握するために、図-6に各試験体の最大耐力とその時のせん断補強筋の負担力 $P_w \cdot \sigma$ の関係を示す。ここで、 σ は補強筋の材料試験結果でひずみを0.2%オフセットして求めた降伏強度 σ_{wy} の場合と、実験で計測したせん断補強筋ひずみの平均値より求めた応力度 σ_{we} の場合と併せて示す。

せん断補強筋比で比較すると、 $p_w \cdot \sigma_{wy}$ で評価した場合、最大耐力はほぼ線形に増大する。 $P_w \cdot \sigma_{we}$ で評価した場合には、せん断耐力の上昇に従い $p_w \cdot \sigma_{we}$ の増加の割合が減少し、 $p_w \cdot \sigma_{wy}$ との差が増加する傾向を示している。これは、補強筋量が多くなると、降伏していない主筋とせん断補強筋によりコンクリートを拘束し、コンクリート

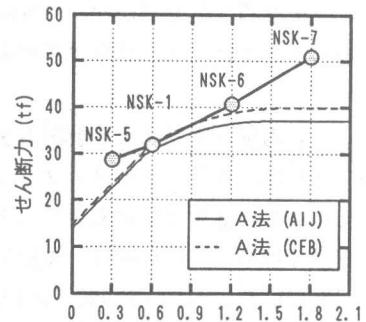


図-4(a)せん断力-せん断補強筋比関係

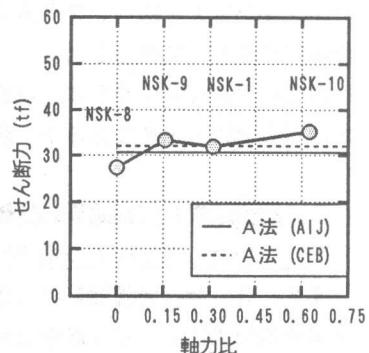


図-4(b)せん断力-軸力比関係

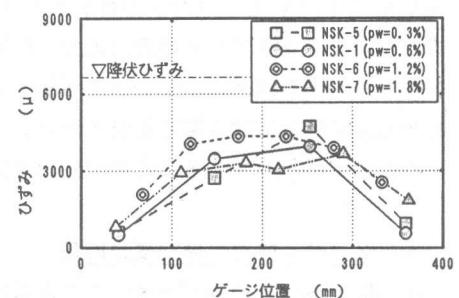


図-5 せん断補強筋のひずみ分布

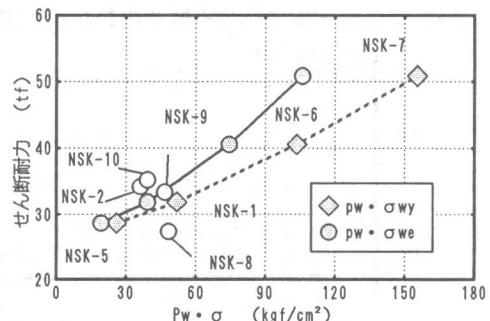


図-6 せん断耐力- $P_w \cdot \sigma$ 関係

の圧縮強度が上昇する拘束効果が顕著に現れたと考えられる。

一方、軸力比で比較すると軸力比の増加と共に σ_{we} は小さくなる傾向を示し、A法の計算ではアーチ機構は生じていないにも関わらず、トラス機構によるせん断力の負担が減少しており、軸力の増加によりアーチ機構が構築されていると考えられる。

4. 有限要素法による解析方法及び試験体のモデル化

解析は、張³⁾によるプログラムをコンクリート圧縮強度低減係数について高強度コンクリートに対応した飯塚式⁴⁾に変更して用いた。コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係を図-7に示す。上昇域では Fafitis-Shah 式⁵⁾を用い、下降域で直線とした。プレーンコンクリートの収敛点は $\sigma_{cu} = 100(\text{kgf/cm}^2)$ 、 $\varepsilon_{cu} = 5000(\mu)$ とした。コアコンクリートはせん断補強筋等の拘束効果により耐力上昇が生じていると考えられるため、修正 Kent-Park 式⁶⁾により拘束効果を考慮した。テンションスティフニング特性は、既往の平板実験では高強度の場合、劣化が激しい傾向にあるため、テンションスティフニングが消失するときのひずみを 1000μ として表現した。付着特性は、張らの研究に基づいて決定した。

図-8に要素分割図を示す。主筋は Hoop 要素とし、せん断補強筋は積層要素とした。なお、実験では正負繰返し載荷であるが、解析ではせん断力を荷重制御で単調載荷する。

5. 解析結果と実験結果の比較

5. 1 コンクリートの拘束効果

【3. 3 せん断補強筋の効果】で述べたように、高せん断補強筋量になるとコンクリートを拘束する効果によりせん断耐力が上昇すると考えられる。よって、コンクリートの拘束効果による影響を検討するため、せん断補強筋量が最も多く、コンクリートを拘束する効果が高い $p_w = 1.8\%$ の NSK-7 について、プレーンコンクリート、コンクリート圧壊時のひずみを考慮した Kent-Park 式、およびコンクリートの最大耐力と圧壊時のひずみを考慮する修正 Kent-Park 式を用いて解析を行った結果を図-9に示す。図から解るように、コアコンクリートの拘束効果の評価により、せん断耐力の解析値は大幅に影響を受け、コンクリートの耐力上昇を考慮することにより比較的良く適合する。

5. 2 せん断力-層間変形関係

図-10(a)～(c) の各パラメータによる実験値と解析値のせん断力-層間変形関係を示す。また図-11 に NSK-1 の最大耐力時の実験でのひび割れ図、及び

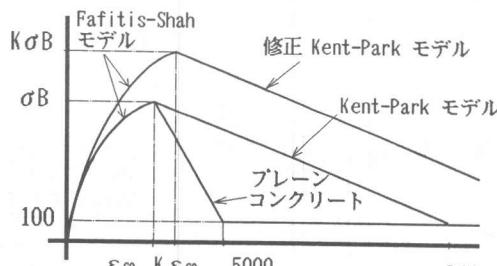


図-7 コンクリートのモデル化

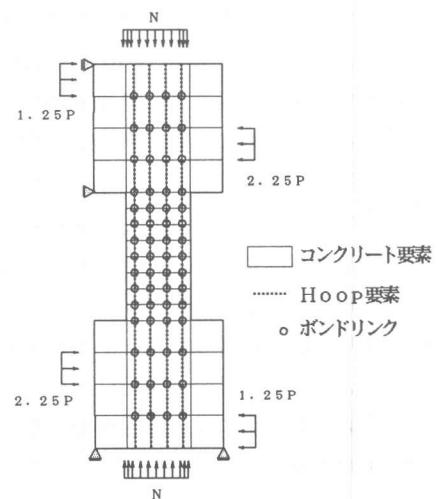


図-8 要素分割図

解析から得られた変形図と主応力図を示す。変形図のひび割れ状況はひび割れ図と良く一致している。解析でも、実験同様コンクリートの圧壊により破壊した。

繰り返し載荷と単調載荷のせん断力－層間部材角関係に与える影響を検討すると、解析では単調載荷のため、高めではあるがNSK-2にはほぼ近い値を示した。一方、繰り返し載荷のNSK-1では、せん断ひび割れ発生後の剛性低下が単調載荷に比べ顕著となっている。この傾向は、解析は単調載荷であること、また、 $n=0.3$ のNSK-1は、 $n=0.15, 0.6$ のNSK-9, 10よりも低いせん断耐力を示しており、実験値が低い耐力となったとも考えられる。よって、図-10(b) (c)での実験値と解析値の比較では、 $p_w=0.6\%$, $n=0.3$ の試験体の比較に、NSK-2を用いた。

各パラメータによる実験値と解析値の比較では、解析値は実験値と良く似た傾向を示しており、若干の差異がある試験体はあるものの、せん断耐力及びせん断ひび割れ発生時期は、実験とほぼ等しくなっている。なお、初期剛性はほぼ同じであるが、全般的に解析値は2次剛性が高くなる傾向がある。本解析では離散ひびわれモデルを用いておらず、分布ひびわれモデルのみで試験体を表現したために、ひびわれによる変形が小さめとなったものと考えられる。

なお、曲げひび割れ発生による初期剛性の低下は見られなかった。

6. パラメータ解析

前章での検討を基に、FEMによるパラメータ解析を行う。解析に用いたパラメータは、せん断補強筋比($p_w=0.3, 0.6, 1.2, 1.8\%$)、軸力比($\eta=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$)である。材料定数は、表-1の値を使用した。

図-12(a)には、せん断補強筋量をパラメータとしたせん断耐力－軸力比関係を実験結果と比較して示し、図-12(b)に軸力比をパラメータとしたせん断耐力－せん断補強筋比関係を示す。張ら⁷⁾による普通強度RC柱のFEM解析では、低せん断補強筋量になるほど軸力によるせん断耐力上昇が顕著となる一方、高せん断補強筋量ではさほど軸力による耐力上昇は

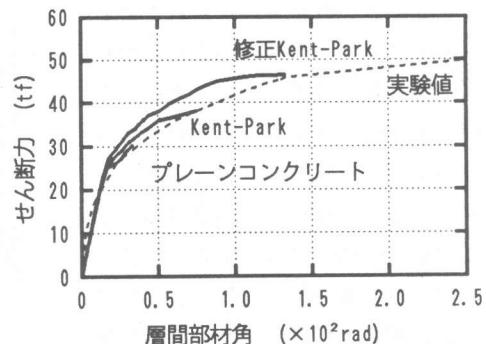
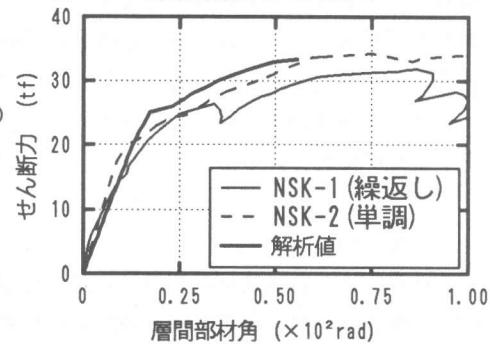
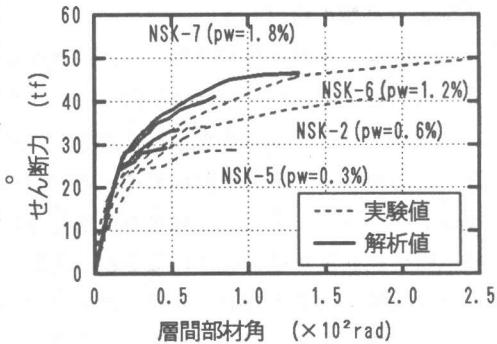


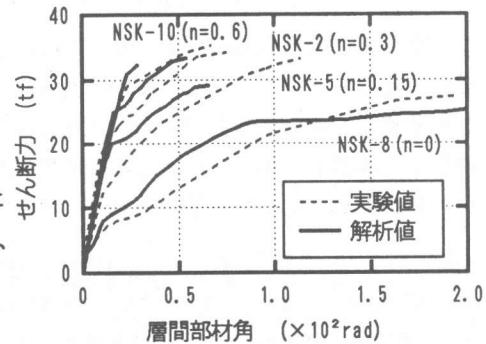
図-9 拘束効果による比較 (NSK-7)



(a) 加力方法による比較



(b) せん断補強筋比による比較



(c) 軸力比による比較

図-10 せん断耐力－層間部材角関係

生じないという報告がなされている。本解析でも、この傾向が表れており、高補強筋量になるに従い軸力による耐力上昇は小さくなる傾向がみられた。しかし、その傾向は普通強度コンクリートでの解析に比べかなり緩やかであり、軸力による耐力上昇に比べせん断補強筋量の増加による耐力上昇が顕著となっている。なお、高軸力下では、低せん断補強筋量では耐力低下を生じているのに対し、高せん断補強筋量になるとせん断耐力は上昇しており、コンクリートの拘束効果の考慮によるコンクリート強度上昇の影響が現れている。

7.まとめ

本研究では、高強度材料を用いたRC造柱のせん断実験を行った。また実験を基にFEM解析を行い、せん断補強筋量および軸力比がせん断性状に与える影響を検討した。

その結果、終局強度型指針A法の圧縮強度の有効係数にCEB式による $\nu \cdot \sigma_B = 3.68 \cdot \sigma_B^{0.667}$ を用いて評価すると、せん断補強筋比が中レベルでは、良い対応を示すが、高補強筋量になると計算値は頭打ちとなってしまい、実験値を評価しきれない。せん断補強筋量が高レベルになると、降伏していないせん断補強筋と主筋により、コンクリートを拘束するためせん断耐力が上昇すると考えられる。

FEM、解析では、修正Kent-Park式によりコンクリートの拘束効果を考慮することにより、実験結果と良い対応を示した。また、軸力及びせん断補強筋量を変化させたパラメータ解析を行った結果、高強度では軸力の増加による最大耐力の上昇に比べ、せん断補強筋量の増加による耐力上昇が顕著となっている。

【謝辞】本研究では、鹿島技術研究所と千葉大学との共同研究として実験が行われた。その際、別所佐登志氏、井上範夫氏には貴重なご助言を戴いた。本研究は、建設省総プロNew-RC（委員長 青山博之東大教授）、高強度鉄筋分科会（主査 森田司郎 京大教授）の下に設けられた構成方程式・有限要素法WG（主査 野口博千葉大教授）にて貴重な御助言を得た。また本研究は文部省科研費補助金（総合研究(A)：課題番号 0430249、研究代表者 野口博）による分担研究である。

【参考文献】1)日本建築学会「鉄筋コンクリート造物の終局強度型指針・同解説」1988年 2)COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON: CEB-FIP MODEL CODE FOR CONCRETE STRUCTURES, 1988 3)張愛暉「鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に関する非線形解析」千葉大学学位論文 1991年 4)飯塚崇文「普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリートの構成則と有限要素解析に関する研究」千葉大学学位論文 1992年 5)Pafitis, A., and Shah, S. P. "Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Columns", ACI 1985, pp. 213-232 6)Park, R., Priestley, M. J. N. and W. D. Gill. Ductility of Square Confined Concrete Columns, Proceedings ASCE, Vol. 108, ST4, April 1982, pp. 929-950. 7)野口 博、張 愛暉「RC柱のせん断終局強度に及ぼす軸力の影響に関する解析」コンクリート工学年次論文 第13巻 1991年 pp. 381-384

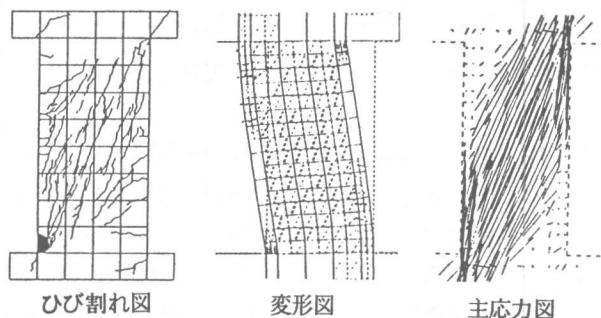
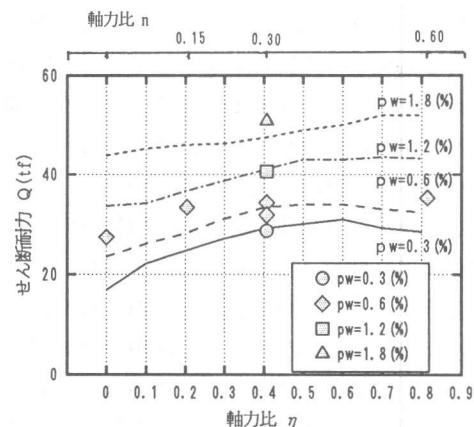
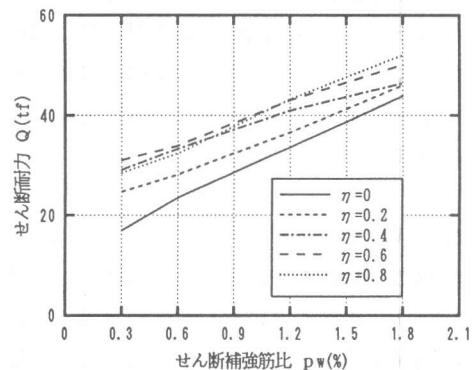


図-11 最大耐力時の変形・応力状態 (NSK-1)



(a) せん断補強筋量の影響



(b) 軸力比の影響

図-12 パラメータ解析結果