

(37) 柱RC梁Sとする混合構造の外柱・梁接合部の3次元有限要素解析

THREE-DIMENSIONAL FEM ANALYSES OF EXTERIOR BEAM-COLUMN CONNECTIONS IN HYBRID STRUCTURES

金 洸演* 野口 博**

by Kwangyeon KIM and Hiroshi NOGUCHI

Six specimens of exterior steel beam- RC column connections tested by authors were analysed by three-dimensional (3-D) nonlinear finite element analysis in order to clarify the stress transfer mechanisms of exterior beam-column connections. In the analytical model, the 3-D nonlinearity of concrete including cracking, compressive crushing, confinement effects by lateral plates and reinforcement, and compressive deterioration of cracked concrete was considered. The slip and opening behavior between steel plates and concrete was represented using 3-D joint elements based on the basic experiment.

The analytical stiffness was a little larger than the experimental stiffness, but the analytical strength showed a good agreement with the experimental strength. The increase of the analytical strength according to reinforcing levels got a good agreement with the increase of the experimental strength.

1. はじめに

最近、日米共同研究においてハイブリッド構造に関する研究が始まり、柱RC・梁Sで構成される混合構造に関する研究が各研究機関で活発に行われている¹⁾。しかし、その殆どは十字形の内柱・梁接合部の実験的研究に集中し、外柱・梁接合部の実験は比較的少なく、さらに、その解析的研究は数少ないのが現状である。また、各研究機関では独自の補強ディテールを中心に検討しているため、ディテールの違いによるせん断耐力への影響の検討が十分になされていない。

筆者らは、柱RC・はりSで構成される混合構造の外柱・梁接合部の中で、既往のはり貫通型における代表的な補強ディテールを同一条件で各種の補強の効果を把握し、接合部のせん断耐力式構築の際の基礎資料を得ることを目的とした実験を行っている²⁾。

本研究では、混合構造ト字型柱・梁接合部における応力伝達機構を解析的に明らかにすることを目的として、筆者らが実験を行った梁貫通型の試験体を対象として3次元非線形有限要素解析(以下FEM解析)を行い、接合部のせん断挙動、各種の補強ディテールの補強効果などを実験結果と比較しながら検討した。

2. 解析対象試験体

試験体諸元及び材料特性を表-1に示す。試験体は6体で、直交梁の有るEX-2試験体を標準試験体とした。EX-1は直交梁無し、EX-3はエンドプレート、EX-4はバンドプレート、EX-5はふさぎ板、EX-6はバンドプレートとふさぎ板その両方で補強したものである。試験体の詳細は参考文献2)を参照されたい。

* 工修 千葉大学大学院生 自然科学研究科 博士課程

** 工博 千葉大学教授 工学部建築学科

表-1 試験体諸元及び材料特性

試験体名		EX-1	EX-2	EX-3	EX-4	EX-5	EX-6
補強ディテール		直交梁無	標準	F B P	ﾊﾞﾝﾄﾞﾌﾟﾚｰﾄ	ふさぎ板	ﾊﾞﾝﾄﾞ+ふさぎ板
破壊モード		接合部降伏型					
R C 柱	軸力	$0.1 \sigma_B \cdot b \cdot D$					$0.2 \sigma_B \cdot b \cdot D$
	断面	300x300 (mm)					
	主筋	12-D13 $p_s=2.26\%$			12-D16 $p_s=2.65\%$		
	帯筋	2-D10 @40 $p_w=1.18\%$			4-D10 @40 $p_w=2.36\%$		
S 梁	断面	BH-250x100x6x22		BH-250x100x6x25		BH-250x100x6x28	
接合部	帯筋	2-D6 @50 $p_w=0.34\%$			-----		
F B P		-----		PL16(SS400)			
ﾊﾞﾝﾄﾞﾌﾟﾚｰﾄ		-----		PL9(SS400)		-----	PL9(SS400)
ふさぎ板		-----				PL2.3(SS400)	
直交梁		無し		有り			
材 料 特 性	コンクリート	$\sigma_B=300\text{kgf/cm}^2$		$\sigma_B=310\text{kgf/cm}^2$		$\sigma_B=300\text{kgf/cm}^2$	$\sigma_B=310\text{kgf/cm}^2$
	鉄筋	SD295 $\sigma_f=2950\text{kgf/cm}^2$					
	S 梁	SM490 $\sigma_f=3300\text{kgf/cm}^2$					
	F B P、ﾊﾞﾝﾄﾞﾌﾟﾚｰﾄ、ふさぎ板			SS400 $\sigma_f=2400\text{kgf/cm}^2$			

3. 解析手法及び解析モデル

本解析では、米澤・内田・雨宮が開発した、低次元要素及び接合要素を有する3次元FEM解析プログラム^{3), 4)}を用いた。図-1に要素分割図を示す。形状の対称性を利用して、S梁の中心線から半分のみを対象として要素分割を行い、柱の切断面を面ローラー支持とした。解析では、実験と同様に柱頭部に一定軸力を加えた後、梁端部に荷重増分を与えた。以下に解析モデルの概要を示す。

コンクリート要素：8 節点ソリッド要素を用い、コンクリートは直交異方性体とし、Darwin-Pecknoldらの等価一軸ひずみモデル⁹⁾をMurrayらが3次元に拡張したもの¹⁰⁾を使用した。破壊曲面には、Willam-Warnekeの3パラメータモデル¹¹⁾にさらに二つの自由度を加えた5パラメータモデル¹²⁾を用いた。また、最大強度までの応力-ひずみ関係にはSaenz式¹³⁾を用い、最大強度以後の下降部分にはParkモデル¹⁴⁾を用いて補強筋による靱性の向上を考慮した。ひびわれ

は要素の積分点領域の分布ひびわれモデルにより表現し、ひびわれ平行方向のせん断剛性は無視した。ひびわれたコンクリートの圧縮劣化特性には、ひびわれと直交方向の引張ひずみの関数とした野口らの提案式⁸⁾を用いて、圧縮強度低減係数を決定し、圧縮応力を受ける方向に対して前述の破壊条件により決定された応力状態における最大圧縮強度に λ を乗じて考慮した。

プレート要素：4 節点の平面シェル要素で、Von Mises の降伏条件式に基づく完全弾塑性モデルを用いた。

鉄筋要素：材軸方向のみに剛性を有する 2 節点線材要素を用いた。

ボンドリンク要素：鉄筋とコンクリートの付着—すべり関係を表現するために、互いに直交するパネから

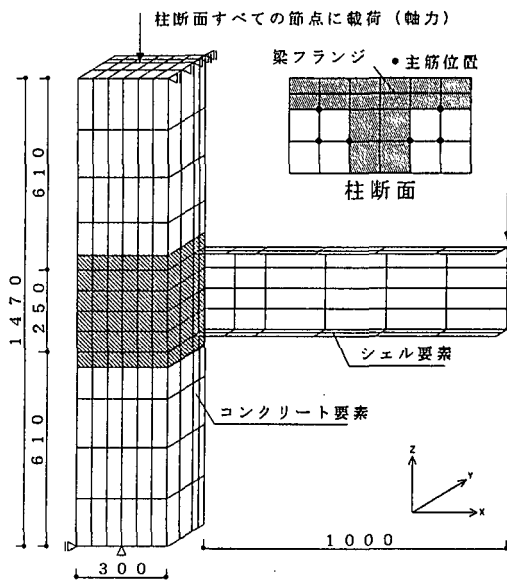


图-1 要素分割

表-2 ボンドリンク材料定数

	E1	E2	τ_1	τ_{max}
標準	8000	80	10.3	26.3
Ex-4	4000	850	18	26.3

ここで、

E1:第一剛性 E2:第二剛性 単位: kgf/cm³

τ_1 :第一剛性の上限界付着強度、 τ_{max} :最大付着強度 単位: kgf

なるリンク要素を用いた。表-2にボンドリンクの材料定数を示す。材料定数は張らのRC柱の解析を参考にしたが、柱の付着劣化が顕著に見られたEX-4試験体については、第一剛性を半分にし、第二剛性を比較的大きく設定した。

接合要素: 8節点ソリッド要素の形状関数を用いて米澤らが開発した接合要素⁴⁾を用いた。梁フランジ及びウェブとコンクリート間のすべての界面は、節点を別々に定義し、それぞれの節点に接合要素を設け、鋼板とコンクリート間の開閉とすべりを表現した。境界面に法線方向の開閉挙動に関しては、 σ_n が引張応力を受ける場合には、 $0.04F_c$ に達するまで線形を仮定し、それを越えたら応力を零として余剰応力を解放し、圧縮応力を受ける場合には、無限大の剛性を与え、線形を仮定した。境界面に水平方向のすべり挙動に関しては、 σ_t が $0.04F_c$ に達するまで線形を仮定し、その後は、 σ_n が圧縮応力を受ける場合、(1)式で得られた剛性を用い、摩擦係数を0.65とし、 $\sigma_t > 0.65 \cdot \sigma_n$ に達したら $\sigma_t = 0.65 \cdot \sigma_n$ として余剰応力を解放した。垂直応力(σ_n)が引張応力を受ける場合には、 σ_t を零とし、余剰応力を解放した。

$$K_t = -\mu_c \cdot \sigma_n \cdot h / 0.002 \quad (\sigma_n < 0) \quad \text{----- (1)}$$

σ_n : 境界面に法線方向の応力、 σ_t : 境界面に水平方向の応力、 μ_c : 摩擦係数、 h : 接合要素の厚さ

(1)式は、筆者らが行った鋼板とコンクリート間の付着特性に関する基礎実験⁵⁾の考察により得られた付着応力-すべり関係における初期剛性の算定式である。また、エンドプレート、バンドプレート、ふさぎ板は拘束が大きく、鋼板とコンクリートの分離やすべりが比較的少ないと考えられるから、計算量節減のため、すべて接合部コンクリートと完全付着と仮定した。

4. 解析結果

4. 1 最終破壊状況

図-2に標準試験体EX-2の実験における最大耐力時の破壊状況を、図-3に解析における最大耐力時の

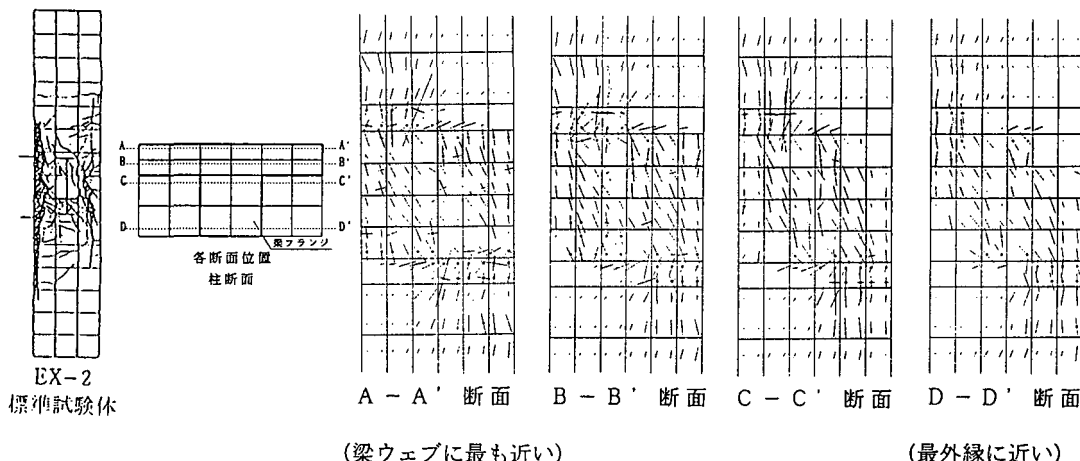


図-2 実験の破壊状況 図-3 解析の最大耐力時の各断面の接合部コンクリートの圧縮主応力の流れ

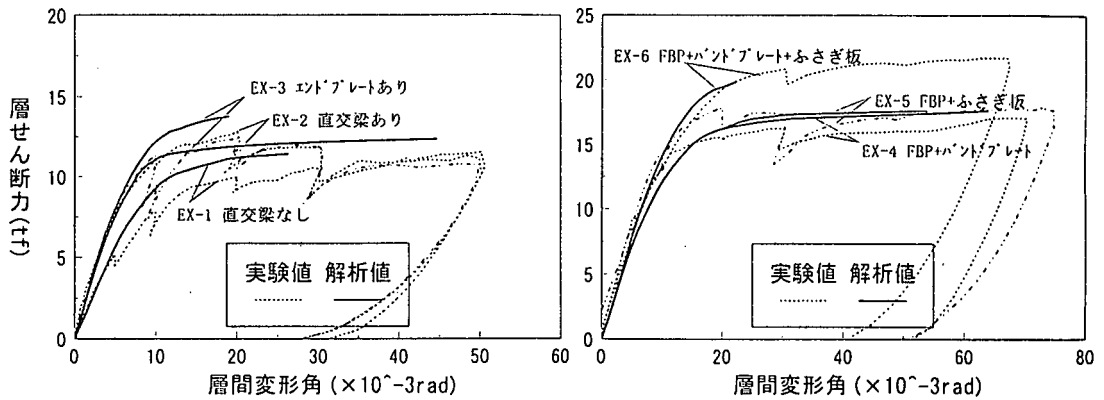


図-4 各試験体の柱せん断力-層間変形角関係の実験結果との比較

各断面の接合部コンクリートの圧縮主応力の流れを示す。なお、図の中の黒点はコンクリートの圧壊を示しているが、接合部中央に近い断面ほど、接合部内梁フランジに接する柱側のコンクリートの圧壊が顕著に見られ、実験時の破壊状況と同じ傾向を示していることが分かる。また、解析結果の主応力の流れを見ると、直交梁ウェブをはさんで左右に、同程度の二つの圧縮ストラットが形成され、外柱・梁接合部の場合でも、既往の内柱・梁接合部の解析⁴⁾の場合と同じ傾向を示していることが分かる。

4. 2 柱せん断力-層間変形角曲線

図-4に各試験体の解析結果の柱せん断力-層間変形角関係を実験結果と比較して示す。EX-2とEX-6試験体では最大耐力が実験値をやや下回り、EX-3では最大耐力が実験値を少し上回っているが、他の試験体では、初期剛性・耐力ともに実験と良好に対応しており、補強ディテールの違いが柱・梁接合部の挙動に与える影響について、解析でも実験と同じように再現していることが認められた。

4. 3 最大耐力の実験値との比較

表-3 各試験体の最大耐力の一覧

表-3に各試験体の最大耐力の一覧及び解析値と計算値の比を示す。

以下に各部材の最大耐力の計算式を示す。接合部の計算式としては、無補強のEX-1,2では、SRC標準の(2)式⁶⁾を用いた。補強を行ったEX-4,5,6では、

試験体	解析値 (tf)	実験値 (tf)	解析値/ 実験値	計算値 (tf)			解析値/計算値		
				梁	柱	接合部	梁	柱	接合部
EX-1	11.42	11.55	0.99	14.55	12.85	12.05	0.78	0.89	0.95
EX-2	12.36	12.77	0.97	14.55	12.90	12.05	0.85	0.96	1.03
EX-3	13.77	12.93	1.06	16.03	13.13	11.99	0.86	1.05	1.15
EX-4	17.68	17.10	1.03	16.03	13.45	14.12	1.10	1.31	1.25
EX-5	17.68	17.84	0.99	17.45	16.75	13.35	1.01	1.06	1.32
EX-6	19.87	21.73	0.91	17.45	21.64	13.46	1.14	0.92	1.48

*荷重は全て柱せん断力に換算

SRC標準式では補強効果を考慮していないため、JCIの提案式⁷⁾におけるコンクリート項の係数を、SRC標準を参考にして、0.2に修正した(3)式を用いた。ただし、 k_{SRC} の値についてはJCI提案式により、EX-3ではFBPによる拘束型の場合の0.77を用い、EX-4~6では接合部拘束型の場合の1.07を用いた。解析値は実験値と良く対応しているが、(3)式を用いたときの計算値は、解析及び実験値に比べて過小評価している。これは、EX-4~6では二つ以上の補強ディテールを使用した、コンクリート拘束型という分類で同一の k_{SRC} の値を用いたためであり、このような場合の k_{SRC} の値は何らかの形で補正しないとその適用性には限界がある。接合部に関しては、EX-1のみが計算値を下回ったが、この点は、コンクリートの支圧破壊で、SRC標準による計算値の耐力に達しなかった実験結果と一致した。また、EX-6試験体の補強ディテールは、EX-4とEX-5の

$$\cdot \text{梁: } bM_u = Z_p \cdot \sigma_y \quad \cdot \text{柱: } cM_u = 0.8a_1 \cdot \sigma_y \cdot D_c + 0.5N \cdot D_c \cdot (1 - N / (B_c \cdot D_c \cdot \sigma_B))$$

$$\cdot \text{接合部: } jM_u = cV_o (jF_s \cdot j_s + w_p \cdot w \sigma_y) + 1.2sV_o s \sigma_y / \sqrt{3} \quad \text{----- (2)}$$

$$Q_p = k_{SRC} \cdot 0.2 \sigma_B \cdot A_{c1} + w \sigma_y / \sqrt{3} \cdot A_w \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 $sV = j_t \cdot s_b d \cdot s_c d$ ($s_b d$ = フランジの重心間距離、 $s_c d$ = 主筋間距離)、その他の記号は参考文献6), 7) と同一

ディテールを合わせたものであるため、EX-6接合部の計算値に対する上昇分は、EX-4とEX-5の上昇分を足したものにほぼ等しくなり、両補強効果の累加で評価できることがわかる。

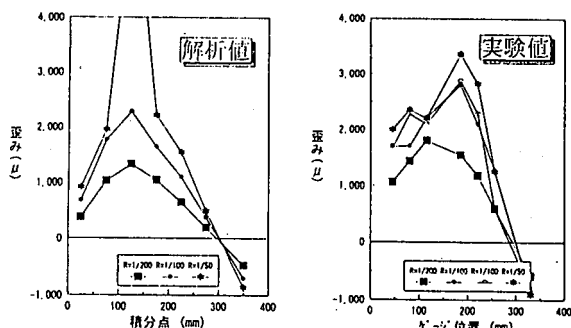
4.4 接合部梁ウェブのせん断ひずみ分布

標準試験体のEX-2、バンドプレートのEX-4、ふさぎ板のEX-5の接合部内S梁ウェブのせん断ひずみ分布を図-5に示す。実験結果と比較すると、ひずみが最大となる位置が多少ずれているが、これは解析における積分点がゲージ位置と正確には同じ位置ではないためで、どちらも接合部の中央付近でひずみが最大となり、EX-2に比べ、補強効果の大きいEX-4, 5では、接合部内のより幅広い領域でひずみが増大することなど、解析結果は実験結果と同様な傾向を示した。

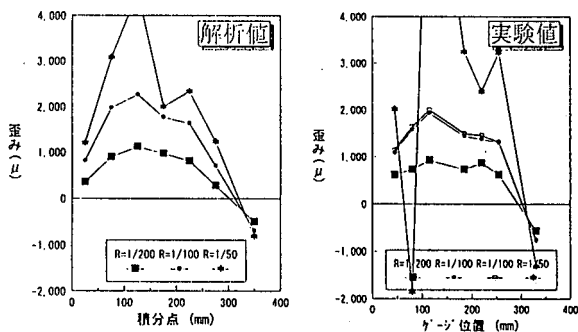
4.5 接合部パネルのせん断変形

解析結果を用いて、接合部コンクリート表面と接合部内ウェブにおけるせん断変形を計算し、その結果を図-6に示す。無補強のEX-2では、弾性域においては、接合部表面のせん断変形が接合部ウェブよりも遅れて増加する傾向があるが、最大耐力近くで梁フランジ上下面コンクリートの圧壊でS梁が剛体回転したため、逆に接合部表面のせん断変形が大きく増加し、最大耐力時には接合部表面がウェブの2倍近く変形した。バンドプレートで補強したEX-4でもEX-2とほぼ同様な傾向を示したが、接合部表面の最大耐力時の変形量はEX-2の6割程度にとどまり、補強によって変形の進行が抑えられたことが分かる。EX-5では、ふさぎ板で補強されているため、鋼板の拘束効果により接合部表面のせん断変形はほとんど進まず、最大耐力時にもウェブの変形の2割程度しか変形しなかった。

EX-2 (直交梁あり)



EX-4 (FBP+バンドプレート)



EX-5 (FBP+ふさぎ板)

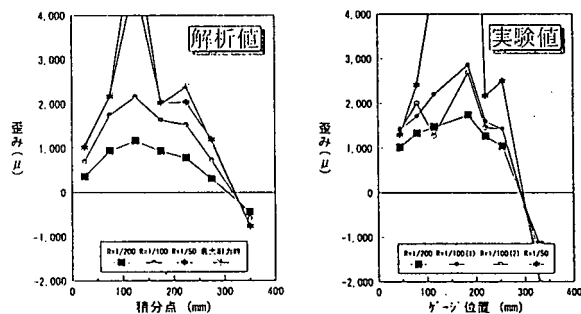


図-5 梁ウェブのせん断ひずみ分布

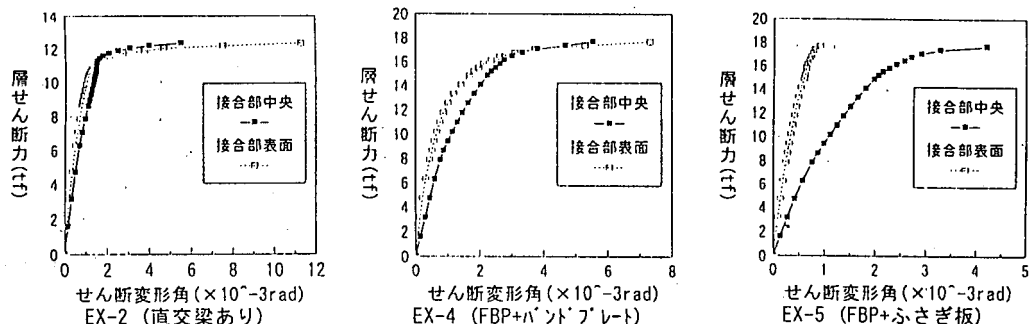


図-6 接合部コンクリート表面と接合部内ウェブにおけるせん断変形

5. まとめ

本研究では混合構造ト字型柱・梁接合部に関して、梁貫通型の試験体6体を対象に3次元非線形有限要素解析を行い、接合部のせん断挙動、各種の補強ディテールの補強効果などを実験結果と比較しながら検討した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 解析結果は、実験結果と比較すると耐力に関しては10%以内の誤差に収まり、剛性、梁ウェブのせん断ひずみ分布等も実験結果と良い対応を示し、本解析モデルによって実験結果を良好に追跡することができた。
- 2) 解析結果の主応力の流れは、直交梁ウェブを境に、左右に同程度の二つの圧縮ストラットが形成され、外柱・梁接合部の場合でも、既往の内柱・梁接合部の解析の場合と同じ傾向を示していることが分かったが、今後、定量的な検討が必要である。
- 3) 各試験体の接合部せん断耐力式は、無補強のディテールについては、SRC規準式よりほぼ評価できた。しかし、JCI提案式の修正式を用いたときの計算値は、ディテールの違いを明確に考慮できないため、補強の強いディテールほど過小評価する傾向があるので、今後、検討する必要がある。

【謝辞】 本研究はハイブリッド構造に関する日米共同構造実験研究（技術調整委員会委員長：青山博之 日大教授）の下で実施されたもので、RCS分科会（主査：野口 博千葉大教授）では貴重なご助言を頂きました。また、解析方法及びデータ整理に関しては、米澤健次氏（現、大林組）、恩地克枝氏（現、石川島播磨工業）には多大のご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】 [1] 日本建築学会：柱RC梁Sとする混合構造の柱梁接合部の力学的挙動に関するシンポジウム、1994年12月 [2] 金洗演、野口博：柱RC・はりSで構成される混合構造ト字形接合部の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報告集、Vol. 17, No. 2, pp. 1065-1070, 1995年 [3] 雨宮篤、内田和弘、野口博：鉄筋コンクリート系部材の3次元非線形有限要素解析プログラムの開発、コンクリート工学年次論文報告書、Vol. 14, No. 2, pp. 21-26, 1992年 [4] 米澤健次、野口博：柱RC・梁Sを用いた混合構造柱梁接合部のせん断性能に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, No. 2, pp. 1247-1252, 1994年 [5] 金洗演、米澤健次、野口博：鋼とコンクリートからなる合成構造の付着特性に関する研究、建築学会大会梗概集（東海）、構造C、pp. 1631-1632, 1994年 [6] 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1987年6月 [7] 日本コンクリート工学協会：混合構造研究委員会報告書、1991年 [8] 大久保雅章、濱田聡、野口博：地震時のひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に対する基礎実験、JCIコロキウム論文集、RC構造せん断設計法に関する解析的研究、pp. 17-27, 1989年10月 [9] Darwin, D. and Pecknold, D. A., "Nonlinear Biaxial Law for Concrete", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM2, Proc. Paper 12389, April, 1977, pp. 229-241. [10] Alaa, A. Elwi and David, W. Murray, "A3D Hypoelastic Concrete Constitutive Relationship", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 105, No. EM4, Proc. Paper 14746, August, 1979, pp. 623-641. [11] William, K. J. and Warnke, E. P., "Constitutive Model for the Triaxial Behaviour of Concrete", International Association for Bridge and Structural Engineering Proceeding, Vol. 19, 1975 [12] Argyris, J. H. G. Faust, J. Szimmet, E. P. Warnke, and K. J. William, "Recent Developments in the Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Reactor", Nucl. Eng. Des., Vol. 28, 1974, pp. 42-75 [13] Saenz, L. P. : Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete, by P. Desayi and S. Krishnan, American Institute Journal, Vol. 61, Sept., 1964, pp. 1229-1235 [14] Park, R. and Leslie, P. D. : Curvature Ductility of Circular Reinforced Concrete Columns Confined by ACI Spirals, 6th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Vol. 1, Tech. Papers, Christchurch, New Zealand, August, 1977, pp. 342-349