

論文 柱 RC・梁 S 接合部の形状がせん断耐力に与える影響に関する研究

金 洗演*¹・紅谷信行*²・野口 博*³

要旨：柱 RC・梁 S からなる混合構造では、接合部の挙動を把握することが重要である。本研究では、建物での接合部の形状の違いが接合部のせん断終局強度に与える影響を調べるために、実験及び 3 次元有限要素解析を行い、接合部耐力式構築の際の基礎資料を得ることを目的とした。梁貫通型エンドプレート形式の十字形とト字形の 2 体の実験及び解析結果から、既往の計算式によるせん断耐力はト字形については過小評価する傾向があり、耐力式においての形状係数の見直しが必要であることがわかった。

キーワード：混合構造、形状係数、せん断耐力、梁貫通型、柱 RC・梁 S 接合部

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、その研究対象のほとんどが十字形の内柱・梁接合部に集中しているのが現状である。このような接合部のせん断耐力は、接合部形状の違い（十字形、ト字形、T字形、L字形）に影響されるため、形状の違いによるせん断耐力への影響を調べる必要がある。そこで本研究では、既往の梁貫通型における基本的な補強ディテールであるエンドプレート形式の十字形とト字形[2]の 2 体の試験体の実験及び 3 次元有限要素解析を行い、接合部耐力式構築の際の基礎資料を得ることを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 試験体

試験体の一覧及び使用した材料の機械的特性を表-1 に示す。試験体は、梁貫通型で、エンド

表-1 試験体の一覧及び諸元

試験体名		IN-1 (十字形)	EX-3 (ト字形)
破壊モード		接合部降伏先行型	
RC 柱	軸力	$0.2 \sigma_B \cdot b \cdot D$	$0.1 \sigma_B \cdot b \cdot D$
	断面	300x300(mm)	
	主筋	12-D13 $P_g=2.66\%$	12-D16 $P_g=2.26\%$
	帯筋	4-D10 @40 $P_w=2.36\%$	2-D10 @40 $P_w=1.18\%$
S 梁	断面	BH-250x100x6x12	BH-250x100x6x25
接合部	帯筋	2-D6 @50 $P_w=0.34\%$	
材料強度	フランジ	SM490 $\sigma_Y=4202\text{kgf/cm}^2$	SM490 $\sigma_Y=3407\text{kgf/cm}^2$
	ウェブ	SM490 $\sigma_Y=4160\text{kgf/cm}^2$	
	F B P	SS400 PL16 $\sigma_Y=2900\text{kgf/cm}^2$	
	帯筋	SD295 $\sigma_Y=3498\text{kgf/cm}^2$ (柱)	SD345 $\sigma_Y=4188\text{kgf/cm}^2$ (接)
	コンクリート	$\sigma_B=313.0\text{kgf/cm}^2$	$\sigma_B=312.9\text{kgf/cm}^2$

* 1 千葉大学大学院 自然科学研究科、工修（正会員）

* 2 千葉大学大学院 工学研究科

* 3 千葉大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

プレート（以後、FBP）と直交梁（FBP 付き）を有するだけの単純な形式の 2 体で、IN-1 が内部接合部（十字形）、EX-3 が外部接合部（ト字形）である。EX-3 試験体の形状及び寸法を図-1 に示す。いずれの試験体も接合部破壊モードを想定し、軸力は IN-1 に $0.2 \sigma_B \cdot b \cdot D$ を、EX-3 に $0.1 \sigma_B \cdot b \cdot D$ を载荷した。コンクリートの設計基準強度 F_c は 270 kgf/cm^2 、圧縮強度 σ_B は 313.0 kgf/cm^2 である。

2. 2 加力及び測定方法

加力は、図-2 に示すように、柱頭、柱脚をピン支持とし、柱頭に一定の軸力をアクチュエータで载荷した後、梁端に地震力を模擬した正負交番繰り返し载荷をアクチュエータによって行った。加力のサイクルは、層間変形角 $R=5 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ で正負各 1 サイクル、 $R=10, 20, 30 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ で正負各 2 サイクル、以後 $R=50 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ まで载荷する計画とした。層間変形は柱頭と柱脚を結ぶ測定フレームから測定した。また、接合部内の梁ウェブ及び FBP に 3 軸ゲージを貼り、せん断ひずみを測定した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 破壊状況及び復元力特性

図-3 に IN-1 と EX-3 の最終ひび割れ状況を示す。両試験体とも、接合部内のせん断ひび割れが、変位を増すことに柱の隅筋に沿う広がりを見せた。また、梁フランジとコンクリートの接触面で支圧的な圧壊が見られた。

図-4 に両試験体の柱せん断力-層間変形角関係を示す。なお、図-4 の点線は梁の全塑性耐力時の耐力を示す。外部接合部の EX-3 試験体では、 $R=5 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ のサイクルで柱に曲げひび割れが生じ、接合部内にせん断ひび割れが発生した後、 $R=20 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ のサイクルで接合部内梁ウェブ、梁フランジ及び柱主筋が降伏し始め、最大耐力に達した。内部接合部の IN-1 試験体もほとんど同様な性状を示したが、柱主筋が降伏し始めたのは $R=30 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ のサイクルであった。両試験体ともエネルギー吸収の少ない逆 S 字型の履歴性状を示した。

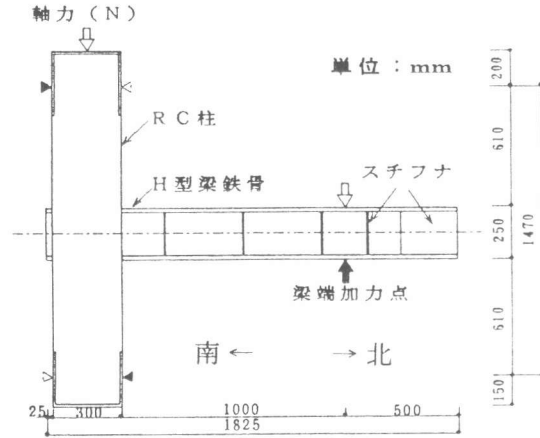


図-1 試験体の形状及び寸法

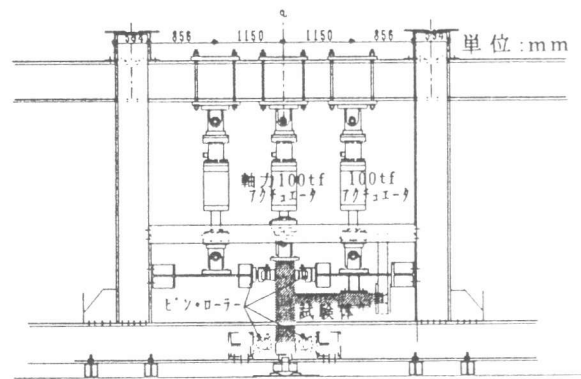


図-2 加力装置

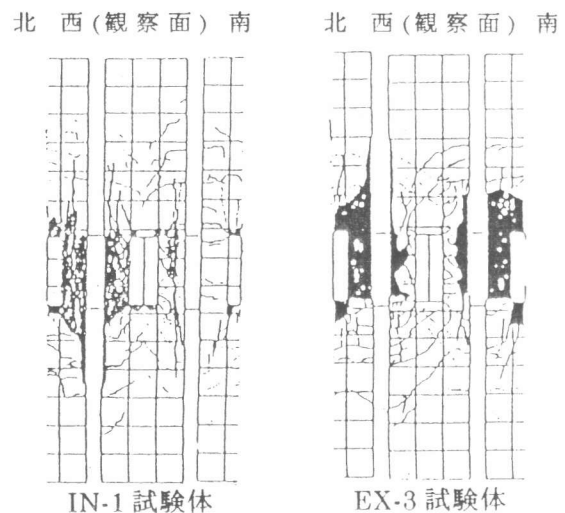


図-3 最終ひび割れ状況

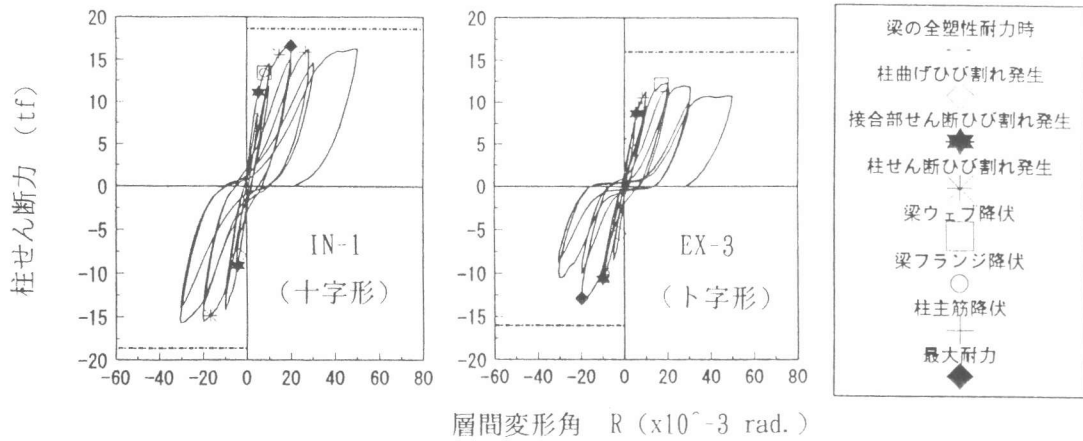


図-4 両試験体の柱せん断力-層間変形角関係

3. 2 接合部内ウェブのせん断ひずみ分布

両試験体の接合部内ウェブのせん断ひずみ分布を図-5に示す。両試験体とも、パネルゾーン中央付近のひずみがピークとなるパラボラ形のひずみ分布を示した。IN-1 試験体では、 $R=10 \times 10^{-3}$ rad. のサイクルで、EX-3 試験体では、 $R=20 \times 10^{-3}$ rad. のサイクルで、降伏ひずみに至った。

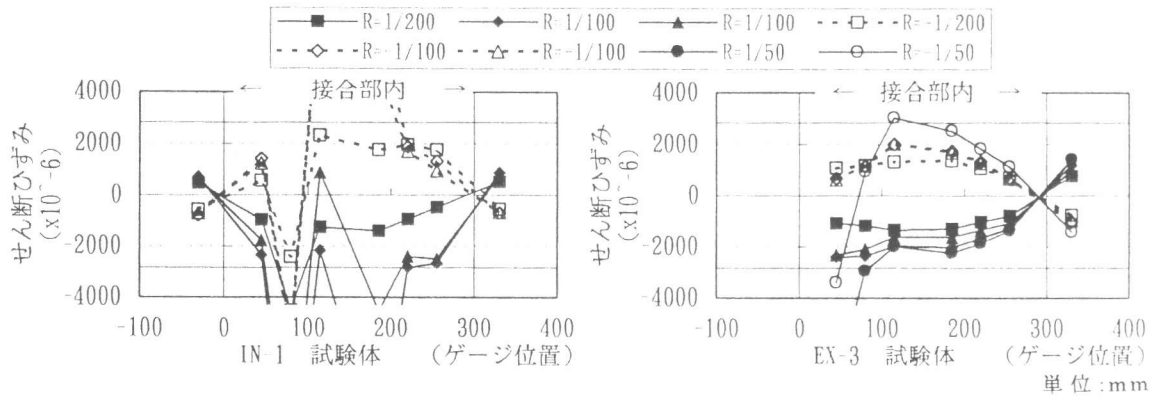


図-5 ウェブのせん断ひずみ分布 (図中の実線は降伏ひずみを示す)

3. 3 FBPのせん断ひずみ分布

両試験体の直交梁のFBPのせん断ひずみ分布を図-6に示す。最終サイクルにおいても接合部内ウェブに比べてかなり小さい値を示していることから、FBPは直接にはせん断耐力に寄与せず接合部コンクリートの拘束に有効であると考えられる。

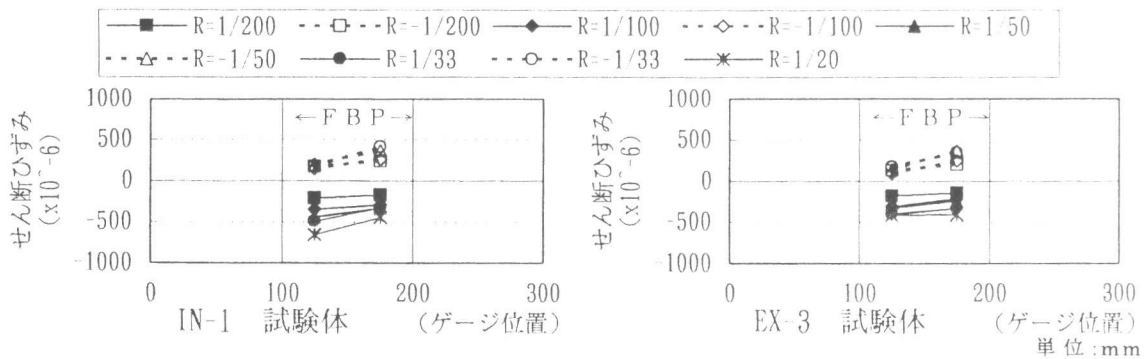


図-6 FBPのせん断ひずみ分布

4. 3次元有限要素解析

4. 1 解析手法及び解析モデル

本解析では、混合構造接合部の立体的な応力の流れを解析するために、米澤・内田・雨宮らが開発した、低次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-7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-Warnke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 λ 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、互いに直交するバネから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。

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、 $0.04 \sigma_B$ （圧縮強度）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 $0.04 \sigma_B$ 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、式(1)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

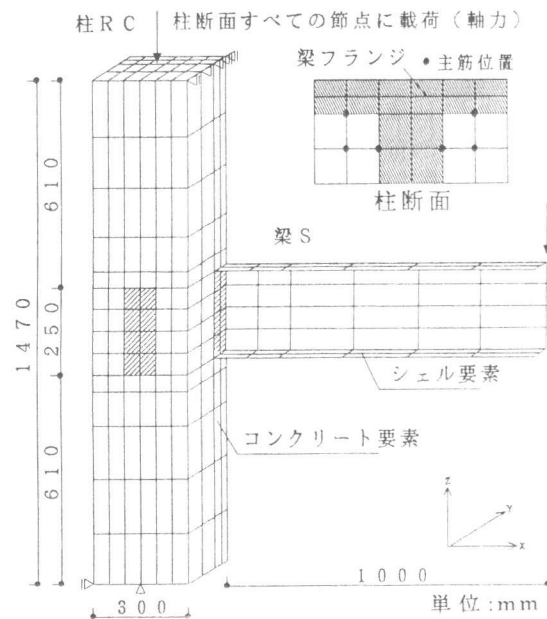


図-7 要素分割

表-2 ボンドリンクの材料定数

第一剛性	第二剛性	第一剛性の上限付着強度	最大付着強度
8000 kg/cm ³	80 kgf/cm ³	10.3 kgf/cm ²	26.3 kgf/cm ²

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

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

(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。式(1)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. 2 柱せん断力-層間変形角曲線

図-8に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-3試験体の最大耐力が実験値を少し上回っているが、IN-1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、接合部形状の違いが耐力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。

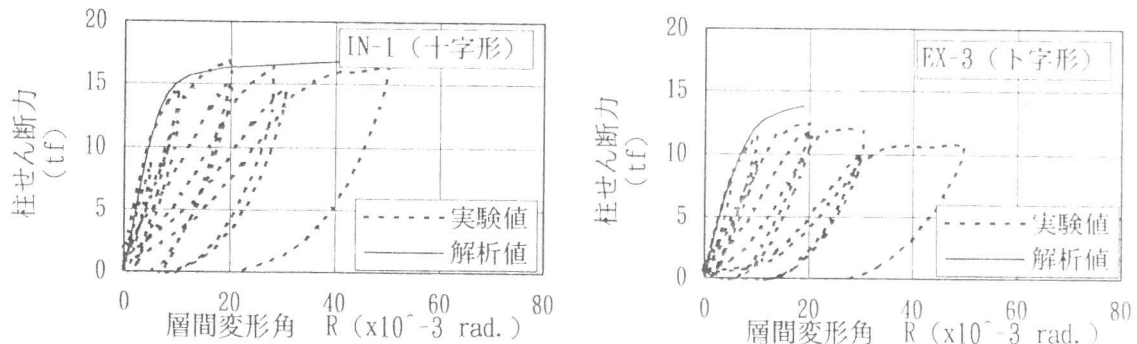


図-8 両試験体の柱せん断力-層間変形角関係の実験値との比較

4. 3 最大耐力の実験値との比較

表-3に両試験体の最大耐力の一覧及び実験値と計算値の比を示す。接合部のせん断終局強度の計算式としては、J C Iから提案された式(2)を用いた。なお、T字形のEX-3試験体については、式(2)のコンクリート項の係数をSRC規準を参考にして、0.2に修正した式(3)を用いた。ただし、 k_{SRC} の値はJ C I提案式により、エンドプレートによる拘束型の場合の0.77を用いた。

解析値は実験値とよく対応しているが、T字形のEX-3の計算値は、解析及び実験値に比べて若干低めに評価している。接合部のコンクリートが梁フランジ及びFBPにより拘束される混合構造においては、T字形接合部の形状係数がRC接合部に比べて大きくなると考えられる。

$$Q_p = k_{SRC} \cdot 0.3 \sigma_B \cdot A_{c1} + w \sigma_y / \sqrt{3} \cdot A_w \quad \text{-----(2)}$$

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

(記号は参考文献[7]による)

表-3 最大耐力の一覧

試験体	最大耐力 Q_c (解/実)	計算値 1(Q_c /計 1)	計算値 2(Q_c /計 2)
IN-1 (実験)	16.59	15.33(1.08)	-----
IN-1 (解析)	16.90(1.02)	15.33(1.10)	-----
EX-3 (実験)	12.93	11.99(1.08)	12.92(1.00)
EX-3 (解析)	13.77(1.06)	11.99(1.15)	12.92(1.07)

*荷重はすべて柱せん断力に換算した値(単位: tf)

そこで、式(2)のコンクリート項の係数を0.24にして計算した結果を計算値2に示す。計算結果は実験値及び解析値と良好な対応を見せており、混合構造における接合部の形状係数は、十字形の場合を0.3とした場合、ト字形の場合は0.24程度にするといい結果が得られた。

5. まとめ

柱RC・梁Sで構成されるエンドプレート形式の十字形とト字形の2体の試験体の実験及び3次元有限要素解析の結果から、混合構造接合部のせん断耐力式における形状係数は、十字形の場合を0.3とした場合、ト字形の場合は0.24程度であることがわかった。

今後、他のディテール形式及びL字形に関しても実験及び解析を行い、せん断耐力式の形状係数を検討する予定である。

[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)の一環として実施されたもので、RC S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。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, "A 3D 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. Szimmt, E.P. Warnke, and K.J. Willam, "Recent Developments in the Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Reactor", Nucl. Eng. Dec., Vol.28, 1974, pp.42-75 [13] Saenz, L.P.: Discussion of Equations 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