

論文

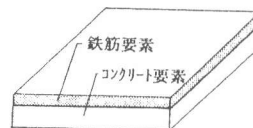
[2001] 普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリート部材の非線形有限要素解析

正会員○飯塚崇文(大成建設原子力部)

正会員 野口 博(千葉大学建築学科)

1. はじめに

非線形材料問題の構造解析に用いられる有限要素解析法(FEM)は、本質的には見ることの出来ない応力の流れを把握出来るなどの利点から、鉄筋コンクリート(RC)構造分野においても国際会議や国内の委員会活動等を中心として様々な構成則モデルや設計応用例が報告されてきた[1]。このような背景のもとで、本研究では、著者ら及び他機関での基礎実験成果[2]に基づいて、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各構成則モデルの定式化を行い、それらを組み合わせてRC部材の弾塑性挙動の解析に適用可能な2次元有限要素解析プログラムを開発することを目的とした。また、開発したFEM解析プログラムの信頼性の検証のために、普通強度と高強度材料を用いたRC耐震壁の実験結果と解析結果との比較検討を行った。



2. 鉄筋コンクリートの有限要素解析モデルの定式化

鉄筋コンクリートは、図1に示すように鉄筋を等価な面材と扱い、図1 鉄筋コンクリートモデル鉄筋とコンクリートの平均応力と平均ひずみ関係の要素剛性の重ね合わせにより表現した。RC部材の有限要素解析モデルは、1軸応力下での基礎実験成果に基づいた各材料特性モデルを基本として、従来の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力学的応答を統一的に記述できる構成則モデルの形として定式化した。

2.1 ひびわれ発生前のコンクリートモデル

ひびわれ発生前のコンクリートモデルには直交異性の亜弾性モデルを用い、多軸応力下でのコンクリートの主応力-等価1軸ひずみ関係を図2のように定式化した[3]。

2.2 ひびわれ発生後のコンクリートモデル

(1) ひびわれ直交方向の Tension Stiffeningモデル

鉄筋とコンクリート間の付着に起因する Tension Stiffening モデルは、コンクリートの高強度化による脆性化の影響及び図3 に示すように鉄筋軸方向と主応力方向がなす角度による有効付着面積の低下の影響を考慮して定式化した[3]。

(2) ひびわれ平行方向の圧縮剛性モデル ひびわれ発生後の圧縮剛性モデルは、図4に示すコンクリートの高強度化に伴う脆性化特性による圧縮剛性の低下現象を最大圧縮強度の関数で評価したモデルを用いた[3]。

(3) ひびわれ面でのせん断伝達剛性モデル ひびわれ面でのせん断応力及び圧縮応力の伝達構成則は、次式

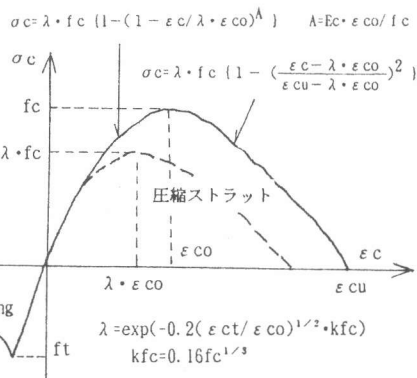


図2 主応力-等価1軸ひずみ関係

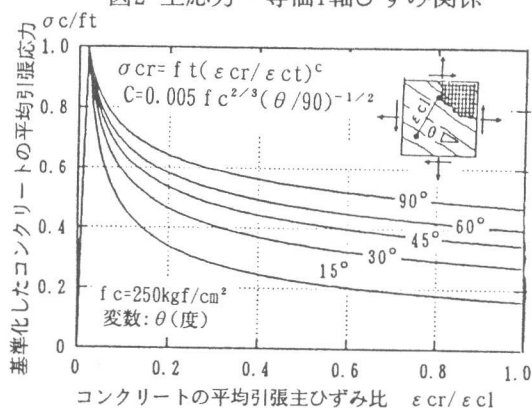


図3 Tension Stiffening モデル

に示すダイラタンシーと摩擦作用の交叉効果を考慮した[4][5]、4個の独立係数を持つせん断滑り変位とひびわれ幅の相互関数として定式化した。

$$\begin{Bmatrix} d\tau_c \\ d\sigma_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_h & -Kh\mu \\ -\beta Kv & Kv \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\delta_c \\ d\omega_c \end{Bmatrix} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} K_h &= \frac{d\tau_c}{d\delta_c} (\omega_c = \text{const}) & K_v &= \frac{d\sigma_c}{d\omega_c} (\delta_c = \text{const}) \\ \beta &= \frac{d\omega_c}{d\delta_c} (\sigma_c = \text{const}) & \mu &= \frac{d\delta_c}{d\omega_c} (\tau_c = \text{const}) \end{aligned} \quad (1.2)$$

①せん断剛性(K_h) 提案するせん断剛性モデルは、李・前川[6]、Buja[7]らによる接触面密度せん断伝達モデルを基本として、図5及び次式に示すコンクリート強度によるひびわれ表面の粗度評価を組み込んだ簡略応力伝達モデルである。

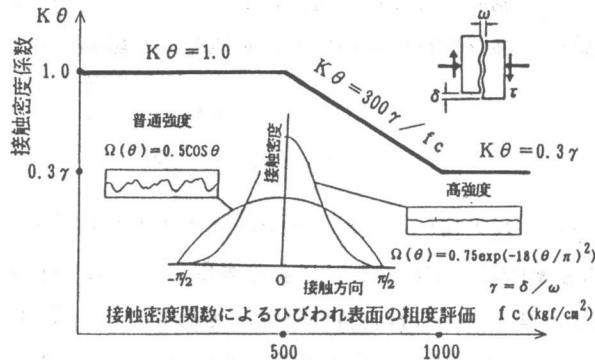


図6 接触密度係数とコンクリート強度の関係

$$\begin{aligned} \text{[载荷域]} \quad \tau &= K\theta \cdot \tau_{\max} \frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2} \\ \text{[除荷域]} \quad \tau &= \tau_{\max}' - E\phi_1(\gamma_{\max} - \gamma) \\ \text{[再载荷域]} \quad \tau &= \tau_{\min}' + E\phi_2(\gamma - \gamma_{\min}) \end{aligned} \quad (2)$$

コンクリート強度によるひびわれ表面の粗度評価を表す接触密度係数は、李・前川[6]、Buja[7]らの基礎実験成果を参考に、普通強度コンクリートでの有効ひびわれ表面積に対する各コンクリート強度での有効ひびわれ表面積の比として扱い、図6に示すコンクリート圧縮強度とせん断ひずみの関数で評価している。

②直交剛性(K_v) ひびわれ面の局部接触後の直交圧縮剛性モデルは、コンクリートの高強度化に伴う脆性化現象を、図7に示すように縦弾性係数を変数に持つ直交引張ひずみの指数関数で評価した[8][9]。

$$\sigma_c / f_c = 0.3 \exp(-0.0015 \cdot E_c(\omega - \omega_1)) \quad (3)$$

③ダイラタンシー比(β) 载荷域のダイラタンシー比は、図8及び次式に示すように粗骨材寸法を変数に持つ直交圧縮応力の指数関数により定式化した[10][11]。

$$\beta = 1.7 \exp(-8(Da/15)^{2/3} |\sigma_c / f_c|) \quad (4)$$

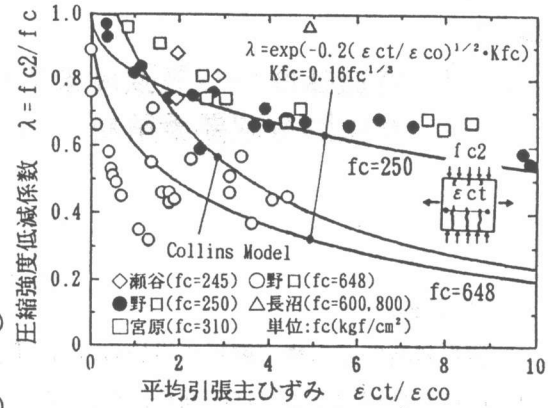


図4 ひびわれ発生後の圧縮剛性モデル

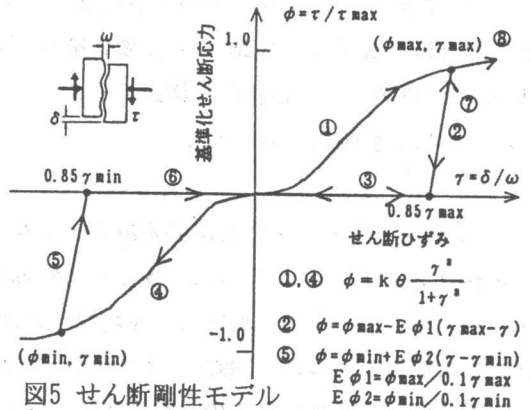


図5 せん断剛性モデル

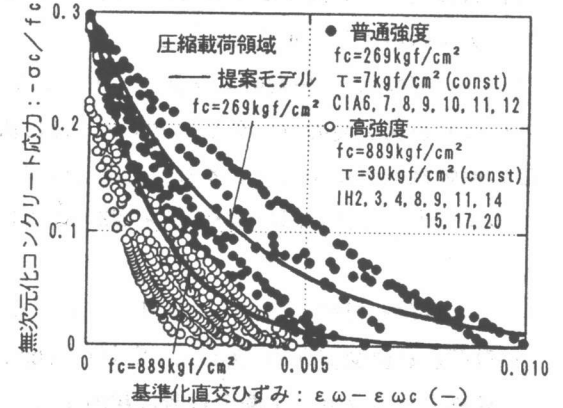


図7 直交圧縮剛性モデル

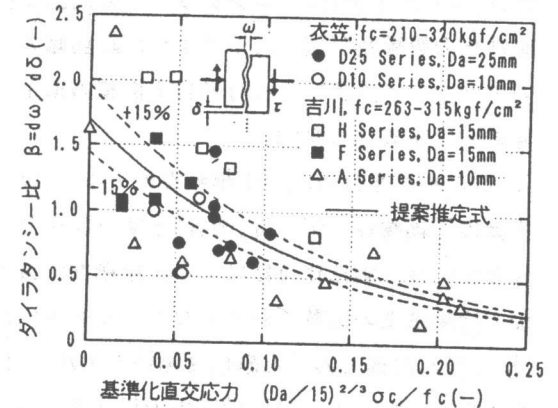


図8 ダイラタンシー比と基準化直交応力の関係

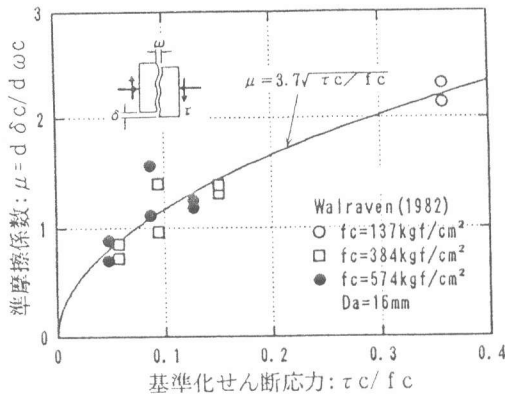


図9 準摩擦係数と基準化せん断応力の関係

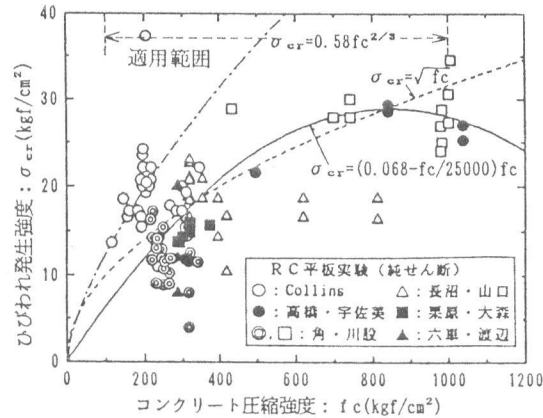
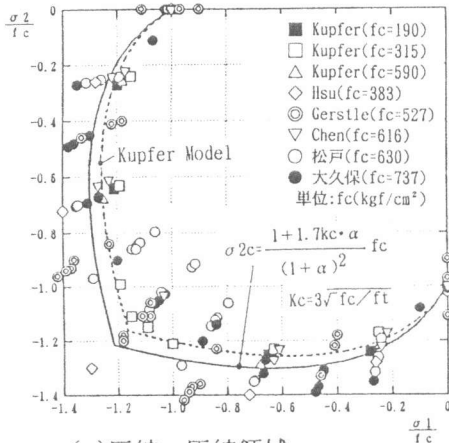
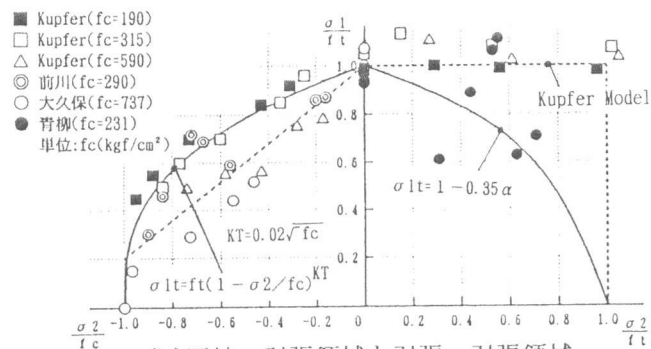


図10 ひびわれ発生強度とコンクリート強度の関係



(a) 圧縮-圧縮領域



(b) 圧縮-引張領域と引張-引張領域

図11 2軸応力下でのコンクリートの破壊基準

④準摩擦係数(μ) 摩擦係数は、ひびわれ幅一定下でのせん断応力に対する垂直応力の比であるが、本研究ではひびわれ平行方向ひずみに対するひびわれ直交方向ひずみの比を準摩擦係数と定義して、ひびわれ界面での応力-変位関係の交叉効果を評価した。準摩擦係数μは、図9に示すようにせん断応力一定下でのWalravenら[12]の一面せん断実験より基準化せん断応力の関数として評価した。

$$\mu = 3.7\sqrt{\tau c / f c} \quad (5)$$

2.3 コンクリートの破壊基準

(1)ひびわれ発生強度[9] 普通強度から高強度コンクリートまでを網羅したひびわれ発生強度は割裂強度とは異なり、図10及び次式に示すように既往の平板実験成果に基づいてコンクリート圧縮強度の指数関数により評価した。

$$\sigma_{cr} = (0.068 - f c / 25000) f c \quad (6)$$

(2)2軸応力下でのコンクリートの破壊基準[9] 圧縮-圧縮領域での破壊基準は、FEM解析で比較的良好に用いられているKupferらの破壊条件式を基本として、図11(a)に示すようにコンクリートの高強度化に伴う脆性化機構と限界引張ひずみを考慮して定式化した。また、圧縮-引張領域での破壊基準は、図11(b)に示すように圧縮主応力が小さい領域では引張主応力の低下は小さく、一軸圧縮強度付近の大きな領域では引張強度は急激に低下することを引張破壊係数を用いて評価した。更に、引張-引張領域での引張破壊強度は、コンクリートの引張破壊が微小ひびわれの進展に起因して生ずると考えれば、1軸引張強度からの強度低下を考慮の方がより合理的であると考えられ、図11(b)に示すように青柳・山田のRC平板の実験成果から定式化した。

2.4 コンクリート内での鉄筋モデル

鉄筋コンクリート内での鉄筋モデルは、図12に示す鉄筋単体モデルに有効降伏強度と有効ひずみ硬

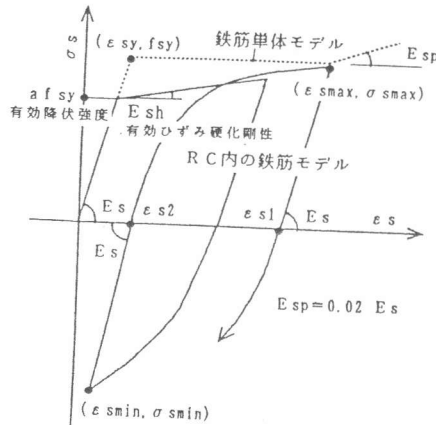


図12 コンクリート内の鉄筋モデル

化剛性を組み込んだ曲線型で定式化した[13]。

2.5 ひびわれ面を横切る鉄筋のダボ作用モデル

鉄筋のダボ作用モデルは、Dulacska[14]による直接せん断実験の結果に基づいて、図13に示すようにコンクリートの等価なせん断応力-せん断ひずみ関係へ置換変換して定式化した。

3. 有限要素解析の手法

非線形解析法は、毎回新たに接線剛性マトリックスを設定して収束計算させる修正Newton-Raphson法を用いた。収束計算の判定基準は次式に示す通常0.1%の残差力 and の比で行い、収束反復計算の上限値で収束しない場合は、不釣り合い力を次の解析ステップにおいて荷重として解放する手法を用いた。

$$\frac{\sum (\phi_i)^2}{\sum (F_i)^2} \times 100 \leq \text{収束判定基準値} \quad (7)$$

図14に、開発した非線形2次元有限要素解析プログラム『FERC』の全体の流れを示す。プログラム言語はMS-Fortran(Ver. 4.1)で、解析に用いたパソコンの機種は32ビットのPC-9801RA、H98、OS/2(Ver. 1.21)を用いた。

4. 開発したFEM解析プログラムの信頼性の検証

(1)解析対象の耐震壁試験体(1層I型) 解析対象の試験体は、普通強度材料を用いたJCI選定の『解析モデル検証用試験体』#1と#1”で青山らのP4012とP2012試験体[15]と高強度材料を用いた壁谷澤らのNW-1とNW-2試験体[16]である。更に表1に、壁板と側柱の寸法と配筋、及び鉄筋とコンクリートの材料特性を示す。

(2)解析結果と実験結果の比較 解析で得られた耐

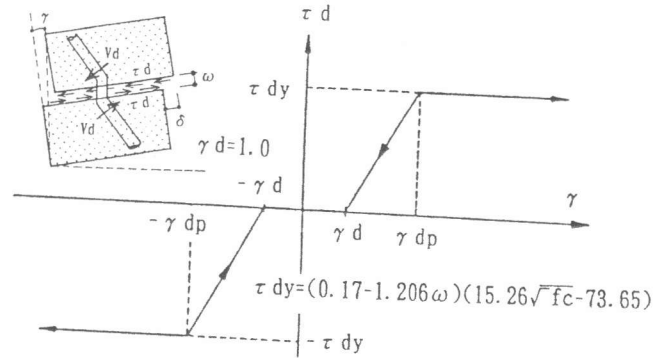


図13 鉄筋のダボ作用モデル

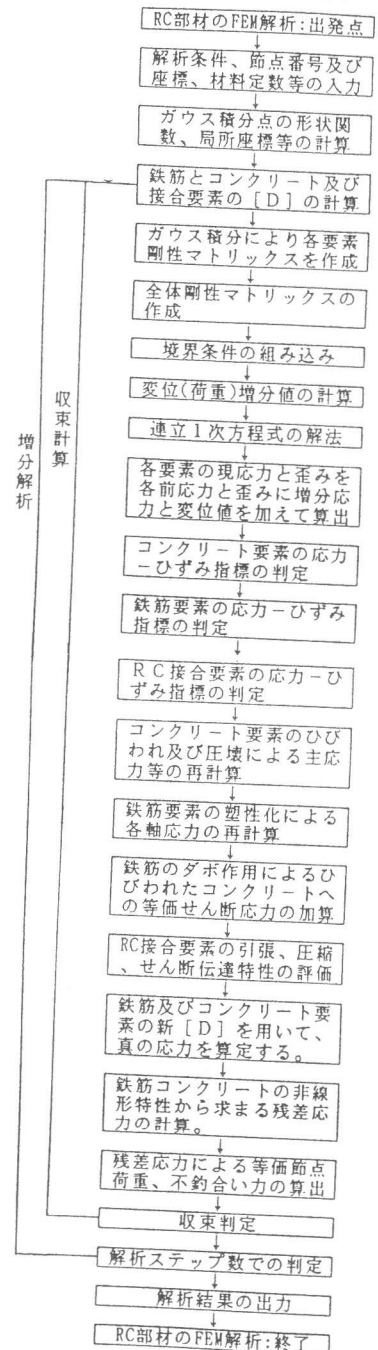


図14 開発した2次元有限要素解析プログラムの流れ

震壁の諸現象の耐力と変形量及び破壊形式を実験結果と比較して表2に示す。図15に、層せん断力－層間部材角関係の実験結果と本解析結果、Stevensによる3次元FEM解析プログラム[17]等を用いた解析結果との比較を示す。図16に、最大耐力時のせん断応力分布とトラス機構およびアーチ機構が負担する各圧縮主応力の流れを示す。

表1 解析対象供試体の寸法と配筋、及び材料特性

解析対象の1層1型耐震壁	側 柱		壁 板			コンクリート		鉄筋(壁・柱)	
	主 筋 Pw (%)	帯 筋 Pw (%)	内法高さ hw [M/QLw]	壁厚 tw 内法長さLw	壁筋比 Ps (%)	圧縮 強度 (kgf/cm ²)	降伏 強度 (kgf/cm ²)	降伏 強度 (kgf/cm ²)	降伏 強度 (kgf/cm ²)
#1 (P4012)	D13(1.9)	D6(0.32)	970[0.485]	100x1600	D6(0.85)	297	3620, 3680		
#1" (P2012)	D13(3.8)	D6(0.64)	970[0.485]	100x1800	D6(0.85)	297	3620, 3680		
NW-1(壁谷澤)	D10(2.1)	D6(0.70)	3000[2.0]	80x1300	D6(0.53)	894	10216, 7914		
NW-2(壁谷澤)	D10(2.1)	D6(0.70)	2000[1.33]	80x1300	D6(0.53)	955	10216, 7914		

表2 諸現象と破壊形式の解析結果と実験結果の比較

普通強度のRC部材		JCI選定の基本耐震壁 #1 (青山, P4012)				JCI選定の基本耐震壁 #1" (青山, P2012)			
諸現象と破壊形式	実験 結果		解析 結果		実験 結果		解析 結果		
	Q (tonf)	δ (cm)	Q (tonf)	δ (cm)	Q (tonf)	δ (cm)	Q (tonf)	δ (cm)	
柱曲げひびわれ	30.0	0.02	31.0	0.02	20.0	0.02	32.0	0.03	
壁せん断ひびわれ	30.0	0.02	31.0	0.02	50.0	0.08	36.2	0.043	
柱主筋降伏	125.0	0.36	125.8	0.31	130.0	0.51	141.6	0.39	
最大耐力	161.0	1.60	161.7	1.63	141.0	0.73	141.6	0.39	
破壊 形式	壁板のせん断圧縮破壊		壁板のせん断圧縮破壊		壁板と柱脚部のせん断圧縮破壊		壁板と柱脚部のせん断圧縮破壊		
高強度のRC部材		高強度RC耐震壁 NW-1 (壁谷澤)				高強度RC耐震壁 NW-2 (壁谷澤)			
諸現象と破壊形式	実験 結果		解析 結果		実験 結果		解析 結果		
	Q (tonf)	R (10 ⁻³)	Q (tonf)	R (10 ⁻³)	Q (tonf)	δ (cm)	Q (tonf)	δ (cm)	
柱曲げひびわれ	33.0	0.80	35.0	0.80	53.7	0.56	54.0	0.58	
壁せん断ひびわれ	54.0	1.80	46.6	1.15	73.0	1.24	67.0	1.00	
柱主筋降伏	77.6	5.01	94.6	10.8	117.4	5.58	115.3	6.50	
壁筋降伏	93.0	10.12	103.5	15.6	138.1	10.02	136.2	11.5	
最大耐力	108.4	19.70	113.5	25.0	149.8	14.90	150.3	19.5	
破壊 形式	曲げ降伏破壊型		曲げ降伏破壊型		曲げ降伏圧縮破壊型		曲げ降伏圧縮破壊型		

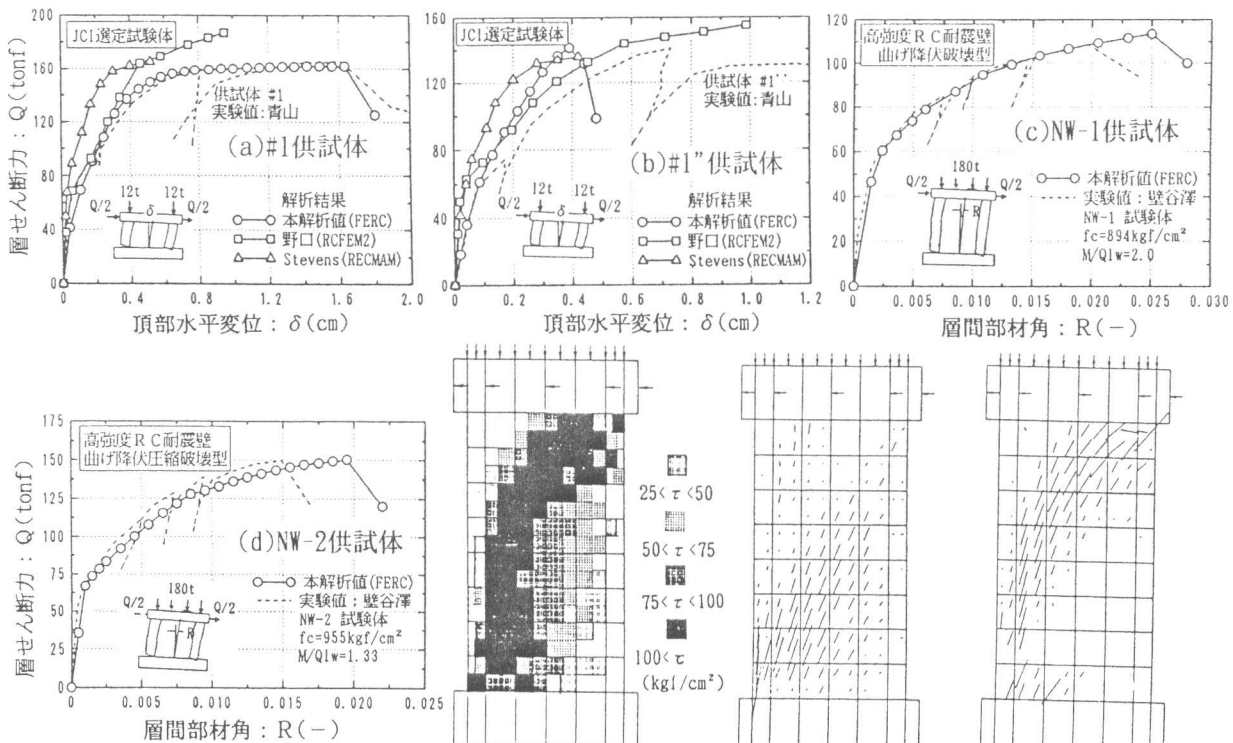


図15 層せん断力－層間部材角関係

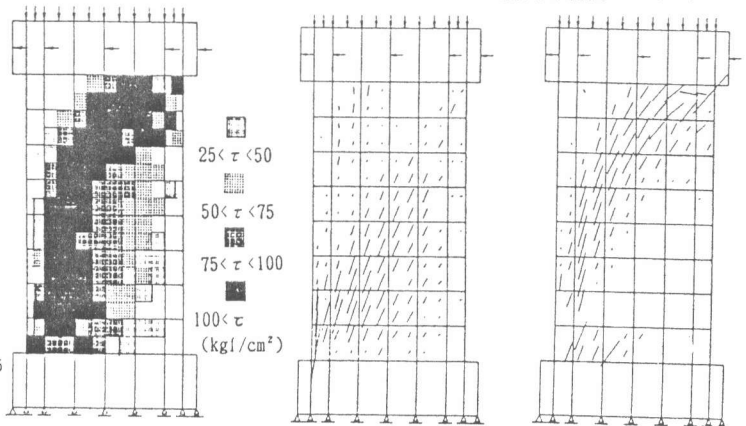


図16 NW-1試験体の最大耐力時の諸現象
(a)せん断応力分布 (b)トラス機構での圧縮主応力の流れ (c)アーチ機構での圧縮主応力の流れ
fc (kgf/cm²)

以上の実験結果と解析結果の比較から、次のことがいえる。

- ①提案した各構成則モデルを組み込んだ2次元FEM解析プログラム『FERC』を用いた解析結果は、#1''供試体での変形能を除いて、検証解析を行った4供試体の最大層せん断力、包絡線、破壊形式など実験結果と良い対応を示している。#1''供試体の解析での破壊形式は、壁中央部でのせん断圧縮破壊の発

生後、壁脚部でひびわれ面に沿ったせん断すべり破壊が実験値より早期に進展し、更に柱の圧縮破壊が生じて変形能の低下が認められた。

- ②壁板内の各せん断抵抗機構による圧縮主応力の流れは、トラス機構では加力点から圧縮側柱脚部への対角線方向へ一様に流れているが、アーチ機構では壁板内での圧縮ストラットの存在が明確に現れている。
- ③壁板高さが高いせん断スパン比2.0のNW-1供試体のトラス機構の角度 ϕ とアーチ機構の角度 θ は、壁板中央部では 23° と 20° で、更に圧縮側柱の脚部では 12° と 11° であり、終局強度型耐震設計指針[18]で定されている $\phi = 45.0^\circ$ を下回り $\cot \phi$ は2.3と4.7となり、指針での解析仮定との相違が認められた。塑性理論の下界定理に基づいて導かれている終局強度型指針のせん断強度式内の ϕ と θ の値にFEM解析結果を用いた場合、せん断終局強度の計算値は実験値を大幅に上向る傾向であり、内部応力状態に対応した変形等を考慮したより合理的なせん断設計用マクロモデルを構築する必要がある。

5. まとめ

普通強度から高強度材料まで用いられる鉄筋コンクリート部材の弾塑性挙動の追跡及び予測に適用可能な2次元有限要素解析プログラムの開発を行い、その信頼性を普通強度材料と高強度材料を用いた耐震壁試験体の実験結果との比較検証により確認した。更に、はり、柱、柱梁接合部等への適用性についても現在検討を進めている。

【謝辞】

本研究は、建設省NewRC総プロ(研究代表者:青山博之東京大学教授)の一環として行い、高強度鉄筋分科会(主査:森田司郎京都大学教授)及び構成方程式・有限要素法WGでは、貴重な討論を戴きました。ここに深く感謝致します。

【記号の説明】

Kfc: コンクリートの塑性化係数	kT: コンクリートの引張破壊係数
λ : コンクリートの圧縮強度低減係数	γd : 鉄筋のダボ作用効果が生じる時のせん断ひずみ
A: コンクリートの圧縮上昇域での形状係数	τdy : ダボ作用によるコンクリートの最大等価せん断応力
K θ : ひびわれたコンクリート面での接触密度係数	γdp : 鉄筋の最大ダボ作用せん断応力時のせん断ひずみ
$\varepsilon \omega$: ひびわれ直交方向のコンクリートの引張主ひずみ	Esh: コンクリート内における鉄筋の有効ひずみ硬化係数
$\varepsilon \omega c$: ひびわれたコンクリート面での局部接触時の $\varepsilon \omega$	Esp: 鉄筋のひずみ硬化係数
Da: コンクリート粗骨材の最大寸法(mm)	a f sy: コンクリート内における鉄筋の有効降伏強度
α : コンクリートの主応力比($\sigma 1 / \sigma 2$)	Fi: FEM解析での外荷重
σcr : コンクリートのひびわれ発生強度(kgf/cm ²)	ϕi : FEM解析での各節点の残差力
kc: コンクリートの圧縮破壊強度係数	ϕ : トラス機構の角度
μ : 準摩擦係数	

【参考文献】

- [1] Noguchi, H., "Recent Developments of Researches and Applications of RCFEM in Japan," Proc. of the Second Japan-U.S Joint Seminar on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Columbia University, New York, June 3-6, 1991. [2] 森田司郎(研究代表者)ほか、鉄筋コンクリート構造のFEM解析の精度向上に必要な基礎実験と解析モデルの開発、昭和63年度科学研究費補助金(総合研究(A))研究成果報告書、平成元年3月。 [3] 飯塚崇文、野口 博: 高強度鉄筋コンクリート要素のモデル化とその評価、1991年度建築学会年次講演梗概集、PP. 477-478, 1991.09. [4] Bazant, Z. P. and Gambarova, P., "Rough Cracks in Reinforced Concrete," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. st4, PP. 819-842, april., 1980. [5] 吉川弘道、田辺忠顕: コンクリート部材のひび割れ界面における力学的挙動に関する解析的研究、土木学会論文集、第372号、pp. 101~110, 1986年8月。 [6] 李宝禄、前川宏一: 接触密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式、コンクリート工学、Vol. 26 No. 1, PP. 123~137, 1988. 01. [7] Bujadham, B. and Maekawa, K., "Path-Dependent Stress Transfer along Crack in Concrete," コンクリート工学協会、JCIコロキウム「RC構造のせん断設計法に関する基礎実験、JCIコロキウム論文集、PP. 73-78, 1989. 10. [8] 飯塚崇文、野口 博: 地震時の鉄筋コンクリートのひびわれ閉閉挙動に関する研究」論文集、PP. 65-72, 1989. 10. 28. [9] 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、千葉大学学位取得論文、1992年2月。 [10] 衣笠秀行、野村設郎: コンクリートひび割れ面の繰返し応力伝達(その1)繰返しせん断実験、建築学会構造系論文報告集、第396号、PP. 37-49, 昭和64年 2月。 [11] 吉川弘道: 面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的挙動に関する解析モデル、(株)間組特定研究報告第2号、昭和62年5月。 [12] Walraven, J. C and Reinhardt, h. w., "Theory and Experiments on the Mechanical Behavior of Cracks in Plain and Reinforced Concrete Subjectd to Shear Loading", Heron Part A, Vol. 26, No. 1A, 1981. [13] 飯塚崇文、野口 博: 正負交番載荷時の高強度鉄筋コンクリートの構成モデル、第13回コンクリート工学年次論文集、第13巻第2号、PP. 49-54, 1991.06. [14] Dulaccka, H., "Dowel Action of Reinforcement Crossing Cracks in Concrete," ACI Journal, Vol. 69, No. 12, Dec. 1972. [15] 青山博之、加藤大介: 増設RC耐震壁の耐力と変形能の評価に関する実験的研究、1982年度建築学会学術講演梗概集、PP. 1407-1410, 1982. 10. [16] 松本和行、壁谷澤寿海: 高強度鉄筋コンクリート耐震壁の強度と変形能力に関する実験的研究、コンクリート工 学年次論文報告集、PP. 545-550, 1990. 06. [17] Stevens, N. J and Collins. M. P., "Analytical Modelling of Reinforced Concrete Subjecte to Monotonic and Reversed Loadings," Publication No. 87-1, Univ. of Toronto, Jaan., 1987. [18] 建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1991.