

[2012] 鉄筋コンクリート耐震壁フレーム構造の非線形有限要素解析

松浦正一*1・斉藤大樹*2・井上範夫*3・柴田明徳*4

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造には、柱・梁だけからなる純ラーメンフレーム構造と、連層耐震壁を組み込んだ耐震壁フレーム構造がある。純ラーメンフレーム構造については広く研究され、その弾塑性挙動は概ね把握されてきているといえるが、耐震壁フレーム構造については、耐震壁自体の弾塑性性状の複雑さや、耐震壁に接続するフレームの拘束効果等のために十分には明らかにされていないのが現状である。

そこで本研究では、耐震壁を面材で、フレームを線材でモデル化した非線形有限要素解析プログラム FESTA (Finite Element STructural Analysis program) を開発した。また、このプログラムを用いて、耐震壁フレーム構造の解析を行ない、フレームの拘束を受ける連層耐震壁のひびわれ分布、主応力分布等を明らかにし、耐震壁の弾塑性挙動について検討を行なった。

2. 解析方法

2.1. 耐震壁のモデル化

コンクリートのモデル化 ひびわれ以前のコンクリートは、式(1)に表すような、Darwin・Pecknold[1]による等価1軸ひずみ理論を用いた直交異方性方程式で表し、Kupferら[2]の破壊条件を用いた。主応力-等価1軸ひずみ関係は、図.1に示す通りである。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} E_1 & \nu\sqrt{E_1E_2} & 0 \\ & E_2 & 0 \\ sym. & & \frac{1}{4}(E_1 + E_2 - 2\nu\sqrt{E_1E_2}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_1 \\ d\epsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ひびわれは、主応力が引張強度 f_t を超えた時に発生するものとし、ひびわれ以後の構成方程式は、ひびわれ座標系の直交異方性モデルとし、次式で表現した。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ & E_2 & 0 \\ sym. & & \beta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_1 \\ d\epsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ひびわれと平行方向(2方向)の圧縮応力-ひずみ関係は、Collinsら[3]によって提案された式(3)を用い、ひびわれを含む平均ひずみ (ϵ_1) に応じて、剛性及び耐力が劣化することを考慮した(図.2)。

$$\sigma_2 = \sigma_{2cmax} \left[2 \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_{cu}} \right) - \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_{cu}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_{2cmax}}{f'_c} = \frac{1}{0.8 - 0.34\epsilon_1/\epsilon_{cu}} \leq 1.0$$

f'_c : コンクリートの1軸圧縮強度

ϵ_{cu} : f'_c の時のひずみ

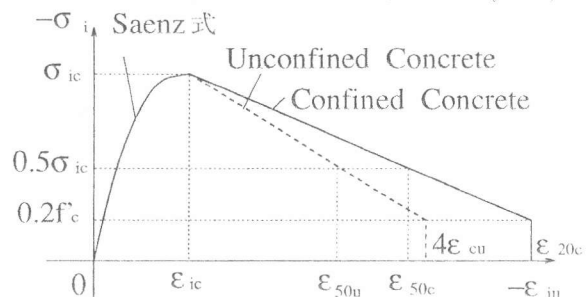


図.1 : ひびわれ以前の主応力-等価1軸ひずみ関係

*1 清水建設(株)、工修(正会員)・*2 東北大学助手 工学部建築学科、工博(正会員)

*3 東北大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員)・*4 東北大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

鉄筋とコンクリート間の付着に起因する Tension Stiffening モデルは井上 [5] が提案した式 (4) を用い (図.2)、ひびわれ面での骨材のかみ合いをモデル化するせん断剛性の低下は青柳 [6] が提案した式 (5) で表した。

$$\sigma_1 = f_t(a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3) \quad (4)$$

$$X = \epsilon_1 / \epsilon_{cr}$$

$$\beta G = \frac{0.036}{\epsilon_1} \quad (\text{ton.f/cm}^2) \quad (5)$$

なお、柱のコアコンクリートにおける靱性の向上を考慮し、ひびわれ以前、ひびわれ以後の圧縮側コンクリートに対して、Kent ら [7] が提案した式を参考にして、図.1、図.2 に示すように応力-ひずみ関係を修正した。

鉄筋のモデル化 耐震壁の中の鉄筋は一様に配置されていると考えられるので層要素としてモデル化し、コンクリートの構成マトリックスに鉄筋の軸方向の剛性を重ね合わせた。なお、応力ひずみ関係はバイリニア型とした。

2.2. 柱・梁のモデル化

柱・梁は図.3 に示すような、材端に非線形曲げバネを有する材端曲げバネモデルで表現し、モーメント-回転角関係は tri-linear 型とした。なお、せん断バネ及び、軸方向バネについては弾性とした。ここで面材の節点自由度は水平・鉛直の 2 であり、線材の自由度は水平・鉛直・回転の 3 であるので、そのままでは面材と線材を同時に解析することは困難である。そこで、線材の節点数を 2 から 4 に増し、1 節点当たりの自由度を 2 に揃えることによって柱・梁要素を全体系に組み込むことにする。図.4 に示すように、梁要素における A 端の変形と力を、節点 1,2 における変形と力で表すと、

$$\theta_A = \frac{u_2 - u_1}{h}, \quad u_A = \frac{u_1 + u_2}{2}, \quad v_A = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (6)$$

$$Q_1 = Q_2 = \frac{Q_A}{2}, \quad P_1 + P_2 = P_A, \quad (P_2 - P_1) \frac{h}{2} = M_A \quad (7)$$

2 節点梁要素における力と変形の関係は、梁の部材剛性マトリックス $[k_B]$ を用いて次の式で表されるとすると、

$$\begin{Bmatrix} M_A \\ P_A \\ Q_A \\ M_B \\ P_B \\ Q_B \end{Bmatrix} = [k_B] \begin{Bmatrix} \theta_A \\ u_A \\ v_A \\ \theta_B \\ u_B \\ v_B \end{Bmatrix} \quad (8)$$

4 節点梁要素の力と変形の関係は、変換マトリックス $[T_B]$ を用いて次のように表される。

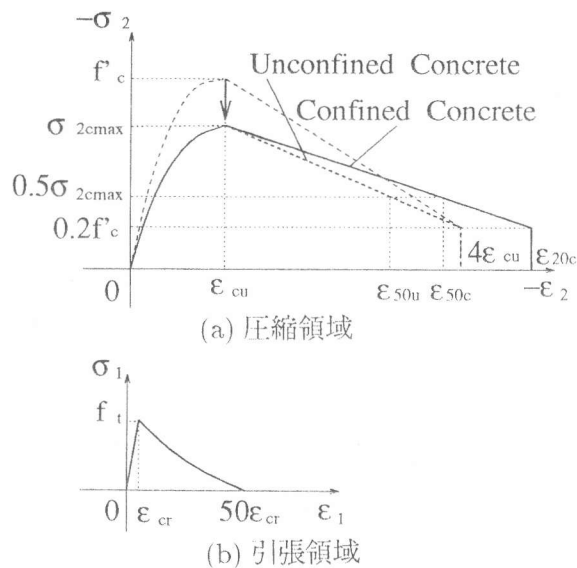


図.2: ひびわれ以後の応力-ひずみ関係

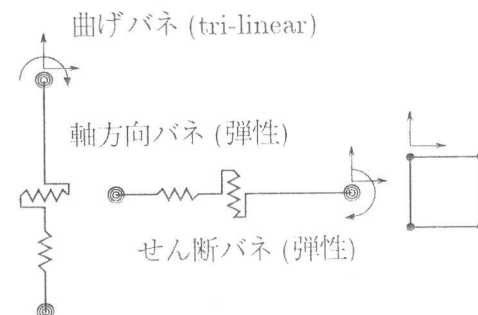


図.3: 線材モデルと面材モデル及び、それらの節点自由度

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ Q_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ Q_4 \end{Bmatrix} = [\mathbf{T}_B]^T [\mathbf{k}_B] [\mathbf{T}_B] \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ただし、

$$[\mathbf{T}_B] = \begin{bmatrix} [\mathbf{h}_B] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\mathbf{h}_B] \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{h}_B] = \begin{bmatrix} -1/h & 0 & 1/h & 0 \\ 1/2 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}$$

柱要素の場合も同様に変換する。なお、柱・梁接合部は面材でモデル化し弾性として取り扱う。

2.3. 非線形解析手法

非線形解析は荷重増分法により、修正 Newton-Raphson 法を用いて行ない、連立一次方程式の解法にはスカイライン法を用いた。なお、収束計算の際の不釣り合い力は、各要素の応力より算出した等価節点力を、系全体で合計した全等価節点力と、外力との差をとって求めた。

3. 解析プログラムの検証

本解析プログラムにおける壁要素の精度を検討するために、高橋ら [8] が高層建物の連層耐震壁の下層部を想定して静的加力実験を行なった縮尺約 1/5 の 1 スパン 3 層独立耐震壁のシミュレーション解析を行なった。なお、本解析プログラムは単調載荷を対象としているので、繰り返しのについては取り扱わない。

3.1. 実験概要

図.5 に試験体の概要を、表.1 に配筋及び鉄筋比を示す。柱・梁部材の主筋の降伏強度は $3.685(\text{tonf}/\text{cm}^2)$ 、柱・梁・壁のせん断補強筋の降伏強度は $1.976(\text{tonf}/\text{cm}^2)$ 、コンクリート強度は $0.23(\text{tonf}/\text{cm}^2)$ である。実験は柱断面に対して $f'_c/6$ 相当の軸力 $22.4(\text{tonf})$ を両柱に加え、水平力を 3 層梁の中心線位置に加えた。

表.1: 試験体の配筋及び、鉄筋比

種別	配筋	鉄筋比 (%)
柱主筋	6-D10	1.34
梁主筋	1.2 層 4-D10	1.48
	3 層 6-D10	1.34
梁帯筋	4φ@40	0.31
梁肋筋	1.2 層 4φ@75	0.29
	3 層 4φ@50	0.26
壁筋	4φ@50	0.52

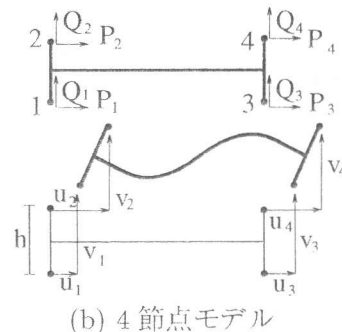
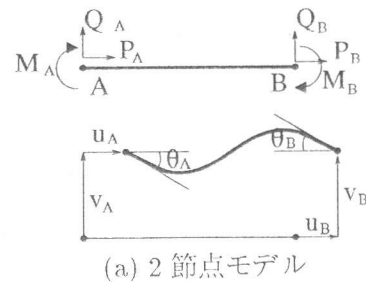


図.4: 柱・梁のモデル化

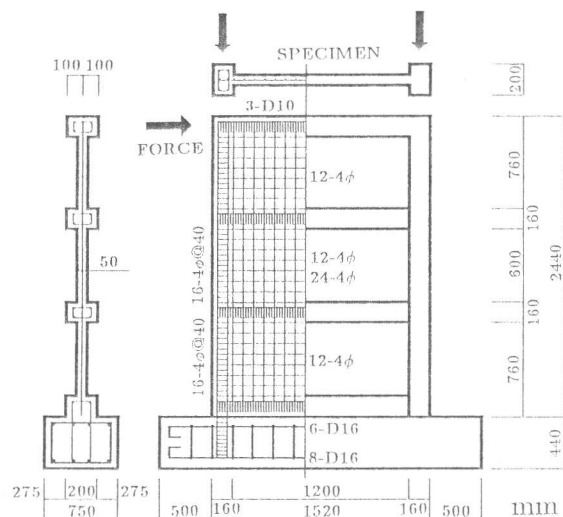


図.5: 3 層独立耐震壁試験体

3.2. 解析結果

3層梁の中心位置における荷重変形関係を図.6に、1層の層間変形角が $R_1 = 3/1000$ におけるひびわれ状況の実験と解析の比較及び、その時の主応力分布を図.7に示す。その結果、最大耐力はほぼ一致し、荷重変形関係も良く捉えられていることが分る。また、ひびわれ分布が良い対応を示しており、力の流れも解析によってよく把握できる。

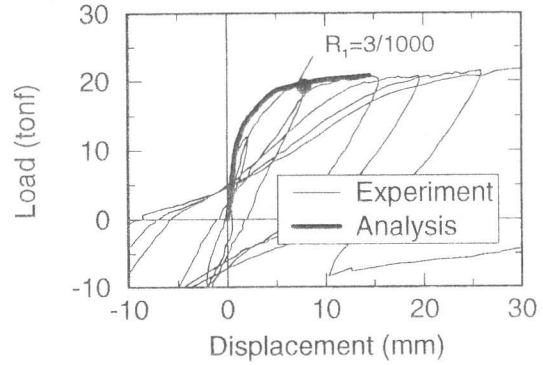


図.6：荷重-変形関係

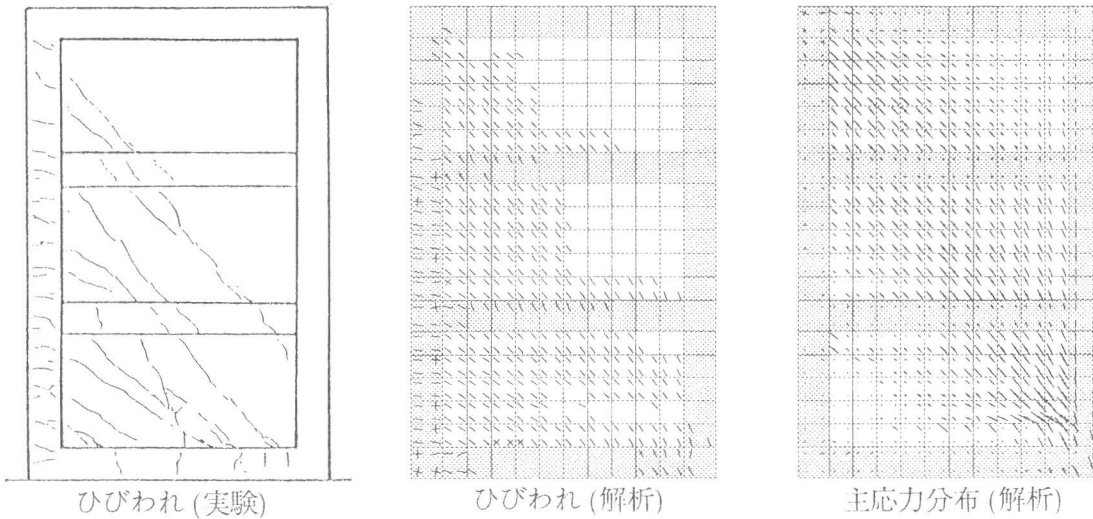


図.7：ひびわれ状況の実験と解析の比較及び、その時の主応力分布 ($R_1 = 3/1000$)

4. 耐震壁フレーム構造の解析

本研究で開発した非線形有限要素解析プログラムでは、耐震壁を含む骨組構造をそのまま扱えるので、耐震壁フレーム構造の解析を行ない、その有用性を検討した。

4.1. 解析方法

解析対象は図.8に示すようなX方向3スパン、Y方向3スパンの7階建て鉄筋コンクリート造建物で、耐震壁は建物の中央部に配置されている。階高は1階が5m、2～7階が4mである。各部材の断面寸法及び、配筋を表.2に示す。各部材の主筋の降伏強度は $4.4(\text{tonf}/\text{cm}^2)$ 、せん断補強筋の降伏強度は $3.3(\text{tonf}/\text{cm}^2)$ 、コンクリート強度は $0.3(\text{tonf}/\text{cm}^2)$ である。また、各層単位面積当たりの重量は $1.2(\text{ton}/\text{m}^2)$ として、各層の柱に初期軸力として作用させた。水平力は逆三角形分布として与え、Y2フレームの連層耐震壁部分に加えた。

なお本解析では、建物の対称性を考慮してY1フレームとY2フレームを対象とし、両者を各層において両端ピンの剛な線材で連結し、荷重増分法により最大耐力時まで解析を行った。

C1~C3 : 柱のタイプ
G1, G2 : 梁のタイプ

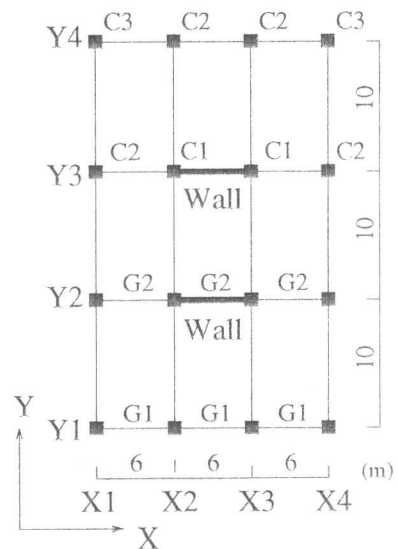


図.8：解析対象建物の平面図

表.2：各部材断面リスト

階	梁	G1	G2	階	柱	C1	C2	C3
7 ~ R	断面	45 × 75 (cm)	45 × 75	6 ~ 7	断面	80 × 80	80 × 80	80 × 80
	上端筋	4 - D35	4 - D35		主筋	12 - D35	12 - D35	12 - D35
	下端筋	4 - D35	4 - D35	4 ~ 5	断面	80 × 80	80 × 80	80 × 80
5 ~ 6	断面	45 × 75	45 × 75		主筋	12 - D35	12 - D38	12 - D38
	上端筋	5 - D35	6 - D35	1 ~ 3	断面	80 × 80	80 × 80	80 × 80
	下端筋	5 - D35	6 - D35		主筋	12 - D35	14 - D38	16 - D38
2 ~ 4	断面	45 × 75	45 × 75	階	耐震壁			
	上端筋	5 - D38	6 - D38		壁厚	30		
	下端筋	5 - D38	6 - D38		縦横筋	2 - D16@200		
基礎	断面	75 × 150	75 × 150	1 ~ 3	壁厚	30		
	上端筋	10 - D38	10 - D38		縦横筋	2 - D16@100		
	下端筋	10 - D38	10 - D38					

4.2. 解析結果

各層における層せん断力と層間変位の関係を図.9に、また各層における最大耐力時の耐震壁の負担せん断力の割合を図.10に示す。低層部における耐震壁の負担せん断力の割合は80%程度であり、4層、5層、6層と上層にゆくにつれ、耐震壁の負担せん断力の割合は減っていき、特に7層(最上層)の耐震壁の負担せん断力は急激に減り0に近くなるのがわかる。

また、連層耐震壁における鉄筋降伏、コンクリートの主応力状態、ひびわれ分布及び、各フレームの塑性率(第2折れ点に対する変形の比率)を図.11~13に示す。図.11の主応力分布図からは、各層から中間荷重が入力され、アーチ的挙動として直接1層壁脚部へ流れてゆく力と、トラス的挙動として梁・壁横筋を通じて流れてゆく力が混在し、最終的には1層壁脚部に集中して大きな圧縮力が生じているのが良く分る。図.12の鉄筋降伏を示す図からは、1層の壁脚部のみならず2層の1部まで縦筋が降伏しており、曲げ降伏型であることがわかる。このように、壁筋の降伏状況を把握することにより、曲げ降伏時のヒンジゾーンも推定することができ、有用である。図.13のひびわれ分布図からは、低層部では、壁板に約45°方向のひびわれが多く見られ、さらに高層部の境界梁付近には梁の曲げ戻しによると思われるひびわれも見受けられる。また、Y2フレーム(壁フレーム)の梁(特に左側の梁)は塑性率が大きくなっている。これは連層耐震壁の曲げ回転変形に対して梁が抵抗するため、他の梁よりも曲げバネの変形が進んだものである。同じY2フレームであっても右側の梁が左側の梁よりも塑性率が小さいのは、壁柱の圧縮変形が引張変形よりも小さかったためである。

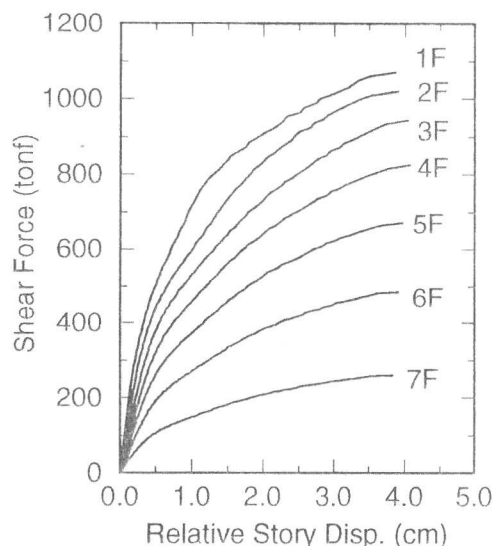


図.9：層せん断力と層間変位の関係

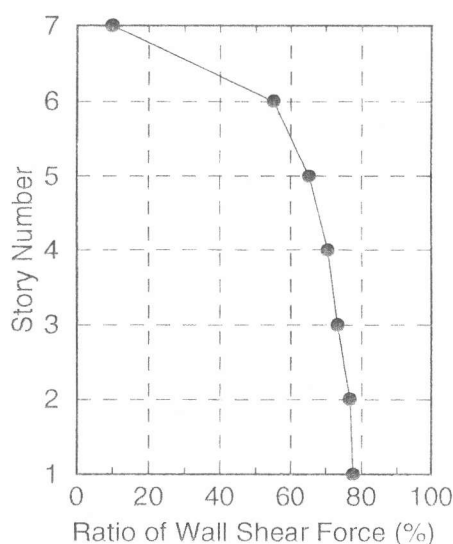


図.10：各層における耐震壁の負担せん断力比

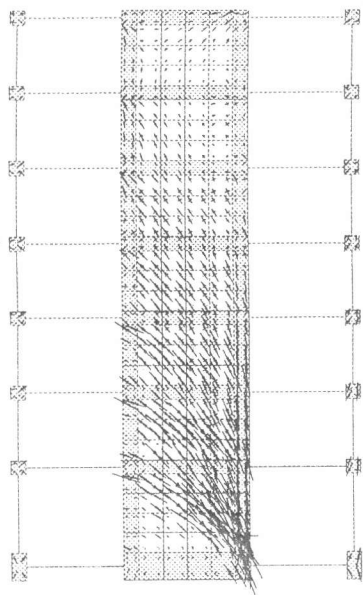


図.11 : 主応力分布 (Y2)

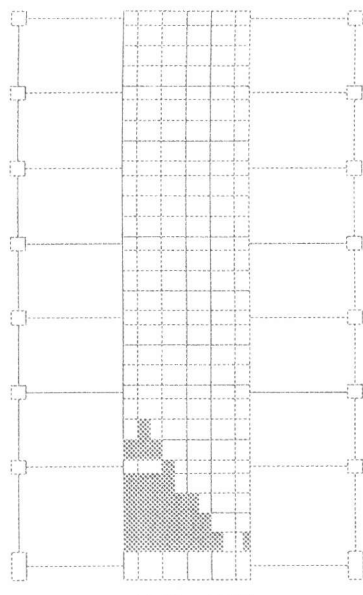


図.12 : 鉄筋(縦筋)の降伏状態 (Y2)

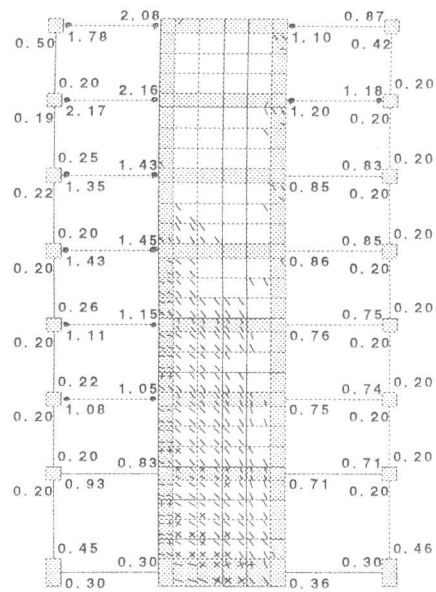


図.13(a) : ひびわれ分布と柱・梁の塑性率 (Y2)

5. まとめ

本研究では、耐震壁を面材で、フレームを線材でモデル化した非線形有限要素解析プログラム FESTA を開発し、まず3層独立耐震壁の実験をシミュレーション解析して信頼性を確認した。さらに、耐震壁フレーム構造の解析を行った結果、フレームに拘束される耐震壁のひびわれ分布や、コンクリートの主応力分布を把握することができた。

本解析プログラムによれば、平面架構内に耐震壁が不整形に配置された場合や、垂壁、腰壁、袖壁といった雑壁を含む建物も直接解析できる。実際に設計される建物では不整形なものが多いので、本方法は有用であると思われる。

謝辞 本研究を行なうにあたって、小山高専の高橋純一先生には、貴重な実験データを提供して頂きました。また、東北大学4年生の寺本尚史氏には、多大なる協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Darwin, D. and Pecknold, D. A. : Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete , UILU-ENG-74-2018 , Univ. of Illinois , Jul. 1974
- [2] Kupfer, H. B. and Gerstle, K. H. : Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses , Journal of the Engineering Mechanics Division , Proc. of ASCE , Vol.99 , No.EM 4 , Aug.1973
- [3] Vecchio, F. J. and Collins, M. P. : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear , ACI Journal , pp.219-231 , Mar./Apr.1986
- [4] Vecchio, F. J. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membranes , ACI Structural Journal , pp.26-35 . Jan./Feb.1989
- [5] Norio INOUE : Analysis of Reinforced Concrete Members Subjected to Cyclic Loads , IABSE COLLOQUIUM DELFT , Vol.54 , pp.487-502 , 1987
- [6] 青柳征夫 : 鉄筋コンクリートシェル要素の面内せん断 , RC 構造のせん断問題に関する解析的研究に関するコロキウム 論文集 , pp.135-148 . 1982.6
- [7] Kent, D. C. and Park, R. : Flexural Members with Confined Concrete . Journal of the Structural Division , proc. of ASCE , Vol.97 , No.ST7 , Jul.1971
- [8] 高橋純一 : 鉄筋コンクリート造耐震壁の地震時挙動と損傷指標に関する実験的研究 , 東北大学博士論文 , 1986.1

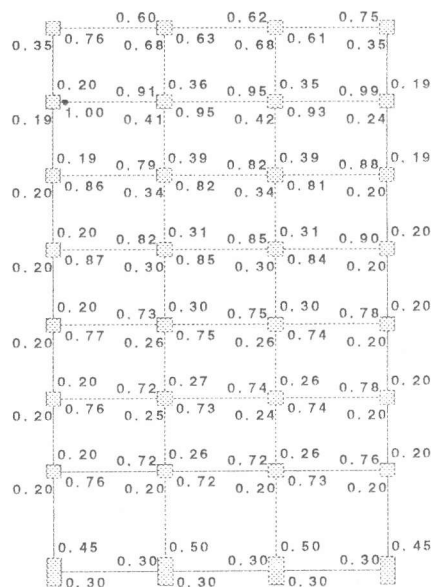


図.13(b) : 柱・梁の塑性率 (Y1)