

鉄筋コンクリート建造物の弾塑性地震応答解析（その3）

—材軸直交分割法と材端剛塑性バネ法を併用した耐震壁をもつ骨組のフレーム解析法—

江戸 宏 彰 武 田 寿 一
中山 達 雄 表 佑 太郎

Inelastic Earthquake Response of Reinforced Concrete Buildings (Part 3) —Analysis of Shear Wall Frames by Use of Rigid-Inelastic Rotational Springs at Member Ends Together with Discrete Inelastic Segments Along Vertical Member Axes—

Hiroaki Eto Toshiyuki Takeda
Tatsuo Nakayama Yutaro Omote

Abstract

This report presents inelastic frame analyses of reinforced concrete structures with shear walls subjected to both earthquake motions and horizontal static force.

Rigid-inelastic rotational springs methods reported in part 2 cannot be applied directly to the inelastic analyses of structures with shear walls, because the rotational spring characteristic cannot be defined generally in shear walls.

In this analysis, inelastic flexural characteristics of members are represented by both discrete inelastic segments along vertical member axes in shear walls and rigid-inelastic rotational springs at member ends in beams. The idealized hysteresees of degrading trilinear type of walls and beams are defined by the moment-curvature relationships of discrete segments and the moment-rotation relationships of rotational springs respectively. Inelastic shearing force-shearing deformation relationships of walls are considered too. Of course, this analysis can be applied to the frame structures without shear walls too.

As an example, the statical response results obtained by this analysis are discussed and compared with the test results of reinforced concrete shear wall structures.

概 要

本報告は、地震動及び静的水平力を受ける耐震壁をもつ鉄筋コンクリート建造物の弾塑性フレーム解析法について述べるものである。

その2で報告した材端剛塑性バネ法は、耐震壁に対しては材端バネの性状を一般に定義できないため、耐震壁をもつ建物の弾塑性解析に直接適用することはできない。

本解析法では、部材の曲げの塑性性状を耐震壁は材軸直交分割要素、梁は材端剛塑性バネによって表わし、この分割要素のモーメント～曲率関係、材端バネのモーメント～回転角関係、さらに壁のせん断力～せん断変形関係の復元力特性を、それぞれ Degrading Tri-Linear 形に理想化して定義している。もちろん、本解析法は純ラーメン建物の解析にも適用できる。解析例として、鉄筋コンクリート壁式建物の静的応答解析を行い、解析結果と実験結果との比較、検討を行った。

1. 序

強震時の建物の弾塑性挙動の追跡を、柱、梁、パネル、耐震壁などの建物の構成部材の弾塑性挙動にもとづいて行う弾塑性地震応答フレーム解析（精算解析）は、強震時の建物の挙動を実状にできるだけ忠実に追

跡することを目的としている。

前報（その2）¹⁾で報告した材端剛塑性バネ法による精算解析は、鉄筋コンクリート純ラーメン建物を対象とする解析法で、柱及び梁の曲げの塑性性状を材端に挿入した仮想の剛塑性回転バネによって表わし、この材端バネのモーメント M ～回転角 θ 関係の復元力特性

を Degrading Tri-Linear 形に理想化して定義している。

柱、梁のように反曲点材長内にある部材の場合は、材の塑性変形を塑性化した側の材端バネの回転角で表わすことができるので、材端剛塑性バネ法で解析できる。しかし、耐震壁のように材長内に反曲点がない部材の場合は、材の塑性変形は塑性化した側の材端バネと他端の材端バネの両方の回転角で表わさなければならないので、材端剛塑性バネ法を直接適用することはできない。

本解析法では、耐震壁及び梁は線材に置換し、耐震壁の曲げの弾塑性性状を材軸直交分割要素、梁の曲げの塑性性状を材端剛塑性バネによって表わし、この分割要素のモーメントM~曲率1/ρ関係、材端バネのモーメントM~回転角θ関係、さらに耐震壁のせん断力Q~せん断変形δ関係の復元力特性を、それぞれ独立に Degrading Tri-Linear形に理想化して定義している。

なお、本解析法は、純ラーメン建物及び耐震壁と柱が並列する建物の解析も当然可能である。また、前報の解析法と同様に、本解析法は静的応答解析(任意の水平力分布モードの静的水平力増分によって、建物の崩壊過程を追跡する)及び動的応答解析(任意の地震波による地震応答解析)を行うことができる。

本報告では、本解析法の概略を述べ、さらに解析例として、4層1スパン鉄筋コンクリート壁式建物の静的応答解析を行い、解析結果と実験結果との比較、検討を行った。

2. 解析法

2.1. 解析仮定

- (i) 床は剛とする。
- (ii) 幾何学的非線形は考慮しない。
- (iii) 増分法を用い、増分内では剛性は一定とする。
- (iv) 部材の考慮する変形は、

耐震壁……………曲げ、せん断、軸方向変形

梁……………曲げ、せん断変形

とし、耐震壁の軸方向変形及び梁のせん断変形は弾性とする。

(v) 耐震壁の曲げ及びせん断に対する復元力特性には、水平力による軸方向力の変動の影響は考慮しない。

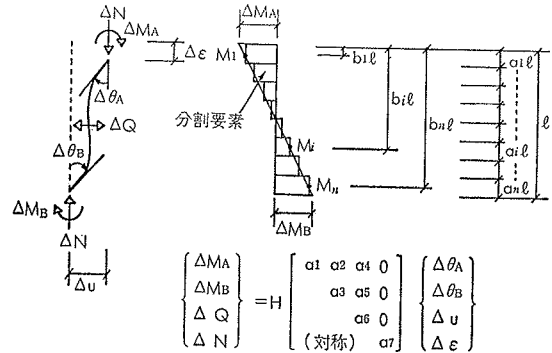
(vi) 耐震壁のせん断に対する復元力特性には、水平力によるモーメント~せん断力比の変動の影響は考慮しない。

2.2. 部材の瞬間剛性マトリックス

解析の流れ及び解析の流れに沿ったマトリックス計算は前報と同じなので、ここでは省略し、部材の瞬間

剛性マトリックスについてのみ述べる。

(i) 耐震壁



ここに、

$$H = 6EK_0 / \{(\alpha_A + \gamma)(\alpha_B + \gamma) - (\alpha_{AB} - \gamma)^2\}, K_0 = I_0 / \ell$$

$$\alpha_1 = \alpha_B + \gamma, \alpha_2 = \alpha_{AB} - \gamma, \alpha_3 = \alpha_A + \gamma, \alpha_4 = -(\alpha_B + \alpha_{AB}) / \ell$$

$$\alpha_5 = -(\alpha_A + \alpha_{AB}) / \ell, \alpha_6 = -(\alpha_4 + \alpha_5) / \ell, \alpha_7 = (E A_N / \ell) / H$$

$$\alpha_A' = 6 \left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{e_i} - 2 \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i b_i}{e_i} + \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i b_i^2}{e_i} \right), \alpha_B' = 6 \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i b_i^2}{e_i}$$

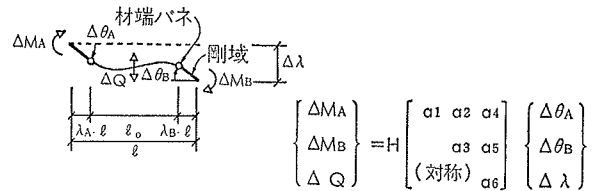
$$\alpha_{AB}' = 6 \left(\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i b_i}{e_i} - \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i b_i^2}{e_i} \right), e_i = EI_i / E I_0, \gamma = 6EK_0 x / \beta G A_s \ell$$

I_0 = 材の標準断面2次モーメント, I_i = i 分割要素の断面2次モーメント

EI_i = i 分割要素の瞬間曲げ剛性, βG = 材の瞬間せん断剛性

分割が細かいほど、精度が良い。塑性時には、 EI_i 及び βG が変化する。

(ii) 梁



ここに、

$$H = 6EK / \{(\alpha_A + \gamma)(\alpha_B + \gamma) - (\alpha_{AB} - \gamma)^2\}, K = I / \ell$$

$$\alpha_1 = \alpha_B + \gamma, \alpha_2 = \alpha_{AB} - \gamma, \alpha_3 = \alpha_A + \gamma$$

$$\alpha_4 = -(\alpha_B + \alpha_{AB}) / \ell, \alpha_5 = -(\alpha_A + \alpha_{AB}) / \ell$$

$$\alpha_6 = -(\alpha_4 + \alpha_5) / \ell$$

$$\alpha_A' = 2 \{ (1 - \lambda_A)^3 - \lambda_B^3 \} + \{ (1 - \lambda_A)^2 S_A + \lambda_B^2 S_B \}$$

$$\alpha_B' = 2 \{ (1 - \lambda_B)^3 - \lambda_A^3 \} + \{ (1 - \lambda_B)^2 S_B + \lambda_A^2 S_A \}$$

$$\alpha_{AB}' = \{ 1 - 3(\lambda_A^2 + \lambda_B^2) + 2(\lambda_A^3 + \lambda_B^3) \} + \{ \lambda_A(1 - \lambda_A) S_A + \lambda_B(1 - \lambda_B) S_B \}$$

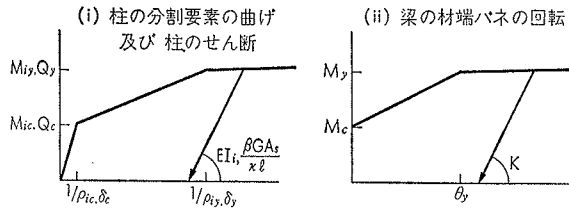
$$S_A = 6EK / K_A, S_B = 6EK / K_B, \gamma = 6EK x (1 - \lambda_A - \lambda_B) / G A_s \ell$$

K_A, K_B = 材端バネの瞬間回転剛性

弾性時には、 $K_A = K_B = \infty$ 即ち $S_A = S_B = 0$ で、通常の曲げ・せん断・剛域を考慮したたわみ角法と一致する。塑性時には、 K_A 及び K_B が変化する。

2.3. 部材の復元力特性

耐震壁の分割要素のM~1/ρ関係、梁の材端バネのM~θ関係及び耐震壁のQ~δ関係の復元力特性は、前



図一 1 スケルトンカーブ

報と同様に、曲げ材に対して提案された Degrading Tri-Linear 最大点指向形モデル (Takeda's Loop) とする。従って、耐震壁がせん断でぜい性破壊する建物には適用できない。

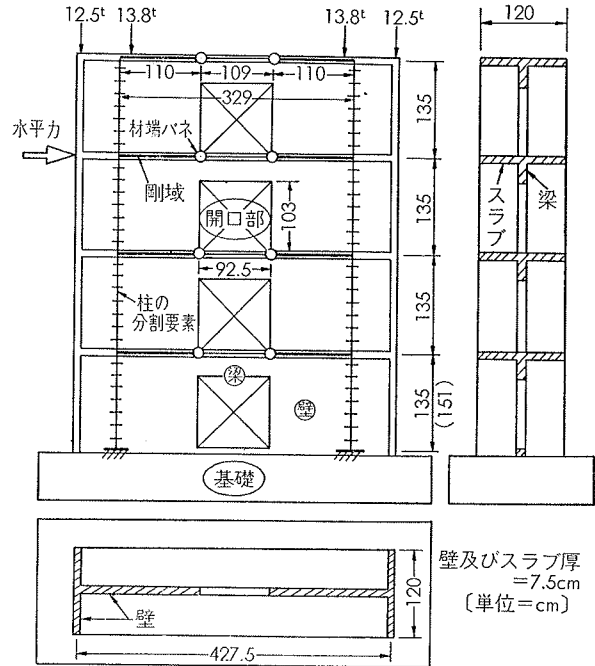
図一 1 に、スケルトンカーブを示す。

3. 解析例

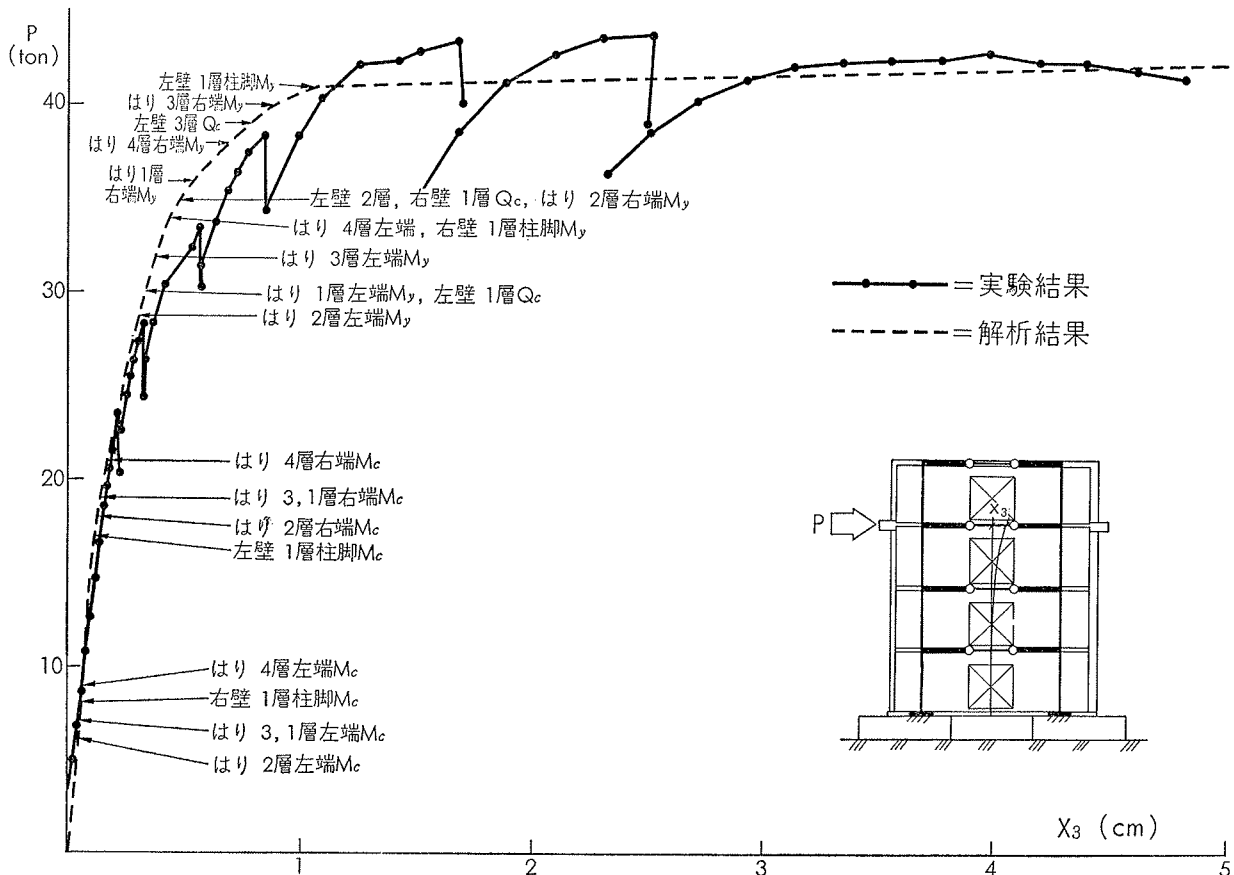
4 層 1 スパン鉄筋コンクリート壁式建物を対象として、静的応答解析を行い、解析結果と実験結果の比較、検討を行った。

3.1. 建物のモデル化

図一 2 に、建物の形状及び解析モデルを示す。この建物は、曲げ破壊形 (1 層の柱脚及び 1 ~ 4 層の梁端に降伏ヒンジができて崩壊形となる) で、実物の約 1/2



図一 2 建物の形状及び解析モデル



図一 3 水平力～3層の水平変位関係

の大きさである。

実験では、図-2 に示す様に、4 層にて一定軸方向力 (平均軸方向応力度 $\sigma_0 = 12.2 \text{ kg/cm}^2$) を載荷し、3 層にのみ正負交番漸増水平加力を行った。

解析では、耐震壁及び梁はともに全断面有効 (T 形断面) とし、部材の重心線をラーメン線とした。水平力は、3 層に加わる一方向漸増水平力のみとした。なお、耐震壁の直交分割数 $n=8$ (等分割) とした。

3.2. 部材の弾塑性性状のモデル化

耐震壁の分割要素の $M \sim 1/\rho$ 関係及び梁の材端バネの $M \sim \theta$ 関係は、コンクリートの応力 $c\sigma \sim$ 歪 $c\epsilon$ 曲線を、

$$e \text{ 関数 } \frac{c\sigma}{c\sigma_B} = 6.75 \left(e^{-0.812 \frac{c\epsilon}{c\epsilon_B}} - e^{-1.218 \frac{c\epsilon}{c\epsilon_B}} \right)$$

又は、

$$\text{黒正式 } \frac{c\sigma}{c\sigma_B} = \sin \frac{\pi}{2} \left(-0.27 \left| \frac{c\epsilon}{c\epsilon_B} - 1 \right| + 0.73 \frac{c\epsilon}{c\epsilon_B} + 0.27 \right)$$

として (各部材ごとに、コンクリートの圧縮試験結果をみて定めた) 行った断面計算にもとづいてモデル化した。なお、ここでは耐震壁の曲げひびわれ時のモーメント M_c 及び曲率 $1/\rho_c$ は、断面計算で得られた $M \sim 1/\rho$ 関係でコンクリートの引張縁の応力度が初めて引張応力度になる時の値とした。梁の M_c 及び $1/\rho_c$ は、下式で求めた。

$$M_c = c\sigma_t \cdot Z, \quad 1/\rho_c = \frac{M_c}{EI}$$

耐震壁の $Q \sim \delta$ 関係は、下式でモデル化した。

$$Q_c = \{k_c (500 + c\sigma_B) \frac{0.085}{\frac{M}{Q_d} + 1.7} + 0.1\sigma_0\} b_j$$

$$\delta_c = \gamma_c \cdot h, \quad \gamma_c = \frac{Q_c}{b_j \cdot G}$$

$$Q_y = 2 \cdot Q_c, \quad \delta_y = \gamma_y \cdot h, \quad \gamma_y = 4 \times 10^{-3}$$

ここに、

M/Q_d = 本解析法の弾性時の応力分布より求める。ただし、 $M/Q_d \leq 3$

h = 階高

3.3. 解析結果

図-3 に、水平力 $P \sim 3$ 層の水平変位 x_3 関係を示す。

図-3 をみると、解析結果と実験結果とは良く一致している。

解析結果をみると、水平力が増加するにつれて部材の塑性化が進み、剛性が低下していくのがわかる。特に、耐震壁の 1 層の柱脚が降伏する (35ton で右壁、45ton で左壁) と、剛性低下が著しい。

4. 結び

解析例として、本解析法で 4 層 1 スパン鉄筋コンクリート壁式建物の解析を行い、解析結果と実験結果との比較、検討を行った結果、耐震壁は材軸直交分割法、梁は材端剛塑性バネ法を用いた本解析法は、耐震壁をもつ鉄筋コンクリート建物の弾塑性応答解析法として有効であるといえる。

参考文献

- 1) 江戸, 武田: 鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答解析 (その 2), 大林組技研所報, No. 13, 1976. 8