

部材降伏を考慮した高層ビル地震応答解析の略算法

武田 寿一 鼻 高 淳
岡田 宏 表 佑太郎

Abbreviated Earthquake Response Analysis of Highrise Building Frame Considering Member Yielding Method

Toshikazu Takeda Sunao Shotaka
Hiroshi Okada Yutaro Omote

Abstract

In order to precisely catch the elasto-plastic behavior of a highrise building in a strong earthquake, in parallel with a grasp of the total behavior of the building, safety should be aimed for analyzing the stresses of the various members comprising frames with sufficient accuracy. On the other hand, practical considerations must be given to preventing computing time for analysis from becoming lengthy. The analytical method presented in this report consists of the procedure of classifying the frames composing a building firstly converting exterior frames (pure lattice type) into a multi-mass system showing shear deformation behavior and interior frames including shear walls into a bending yield type response system, then introducing total horizontal rigidity and carrying out response analysis. As results, the bending stress of each member and the shearing force of each frame in the elasto-plastic range have become clearly known, and a practical step forward has been taken.

概 要

高層建築物の強震時の弾塑性性状を把握するためには、建物全体としての挙動の把握と平行して、フレームを構成する各部材の応力も必要に応じて、十分な精度のもとに解析して安全を期すべきであるが、一方では、演算時間の冗長さを防ぐための実用上の配慮も加えなければならない。本報告で示す解析法は、一つの建物を構成するフレームを分類し、外周ラーメンに多い、純ラーメンをせん断多質点系に、内側の、耐震壁を含むラーメンを、曲げ降伏型部材応答系として、全体の水平剛性を導き、これにより応答解析を行う手法である。解析結果として、各構成ラーメンの弾塑性挙動時における、部材応力状態、水平外力負担状況を明快に知ることができ、実用上の一つの進展を得た。

1. 序

高層フレームに地震力などの水平外力が加わる場合の応答あるいは応力解析法の拡張、実用化をはかるために、従来から各方面で努力が続けられているが、筆者らも以下に示すアプローチを経験してきた。

すなわち、所報 No. 4¹⁾に示した方法は、フレームの弾塑性性状を考える場合に、建物の水平剛性を変更しながら、任意層の層せん断力降伏に対してチェックを行うものである。この方法では、建物を全体としてとらえるという設計的な立場からは一つの有効な手段であり、計算時間や計算機の容量の点からも有利な方法である。しかし、この方法では、対象とする一方のフレームに、異なる種類の何枚かのラーメン（例えば純ラーメンと壁付ラーメン）が併立していても、全

部を加算した任意層の層せん断力ということで処理されているから、現実にはどのラーメンが降伏するか、逆にいえば、入力される任意層の層せん断力にどのような履歴を与えるか、という点で判断に迷うことになる。そこで、もし可能なら、フレームを構成する、すべての部材について、それぞれ適当な弾塑性性状を考慮すれば、より厳密な弾塑性解析になるであろうことは当然考えられることである。

所報 No. 5²⁾に示す方法では、この点に着目してフレームを構成する一つのラーメンだけを対象として、ラーメンを構成するすべての部材（柱、はり、パネル、壁など）にそれぞれ弾塑性チェックを行う解析法を示した。この解析法の計算例によれば、ヒンジの発生する順序が適確に判り、応答値自体も先の層せん断力降伏型とは必ずしも類似でないことなど興味ある結果

を得た。

しかし、もしこの方法を建物全体の全ラーメンに適用すると、計算時間や、計算機の容量で、ばう大なものになり、実用上殆んど不可能に近い。

そこで本報告では、上記2つの解法をうまく結合してラーメンを構成する各部材の曲げ降伏を考慮しながら、しかもフレーム全体を解くことを目的とした実用解法の一提案を示す。

すなわち、図一1に示すように、建物のある方向のフレームで、部材降伏を考える必要があるラーメンについては層剛性型解析法を用いることによって、建物全体の強震時における弾塑性地震応答挙動を、できるだけ精算要素を加味しながら、しかも建物全体を少ない演算時間と容量で処理しようとしたものである。

なお本報告に示した解析方法は現在のところ以下に示すフレームのみを対象とする。

2. 建物のモデル化

本解析法で扱おう構造は、高層ビルで、ごく基本的に用いられる。中央コア型の建物の短辺方向を対象とする。すなわち、基準階の平面図は図一2に示した形状であり、地震応答に用いる短辺方向骨組架構は、図一3のような2種類(Aラーメン、Bラーメン)が何枚かずつ寄り集まったものとする。

図一4(a)に概念図として示すAラーメンは外周の純ラーメンで、せん断降伏型に近いと考えれば、多質点系せん断降伏型モデルに置換し、内側のBラーメンは、中央スパンに耐震壁を持つラーメンなので、同じく概念図としての図一4(b)に示すように、中央に置換柱を

有し、剛域付のはりを持つラーメンとして、壁柱、外柱、境界梁の各部材について応力チェックを行う部材降伏型ラーメンとして扱う。

3. 各ラーメンの剛性および全体剛性

Aラーメンを多質点せん断降伏型と仮定する場合にはまずバネ定数を求めておき、式(1)に示す剛性マトリックスを作成する。各層の層せん断力と層間変位との

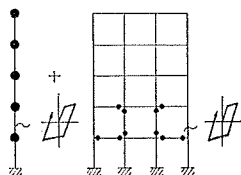
$$K_A = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & & & & \\ -K_1 & K_1+K_2 & -K_3 & & & \\ & -K_2 & K_2+K_3 & & & \\ & & & & & & \\ & & & & & & & -K_{n-1} \\ & & & & & & & & & K_{n-2}+K_{n-1} \\ & & & & & & & & & & -K_{n-1} & K_{n-1}+K_n \end{bmatrix} \dots(1)$$

間には、鉄骨造を対象とし、Bi-linear型の復元力を仮定する。

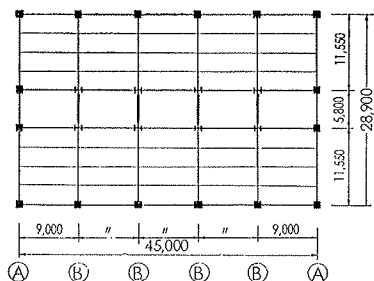
Bラーメンの場合には対象モデルの任意層を考え、図一5のような単位のユニットとして、柱はりの剛性マトリックスを B_{c1} , B_{c2} , B_g とすれば、層剛性マトリックスは式(2)となる。

$$B_i = \begin{pmatrix} B_{c1} \\ B_{c2} \\ B_g \end{pmatrix}_i \dots\dots\dots(2)$$

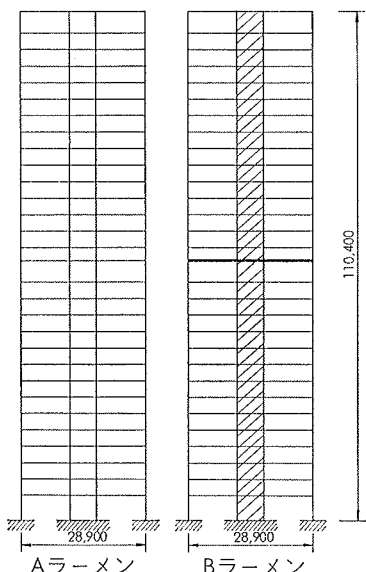
これに変換マトリックスAを用いて、全体座標系に対する剛性マトリックス K_i を式(3)で求める。



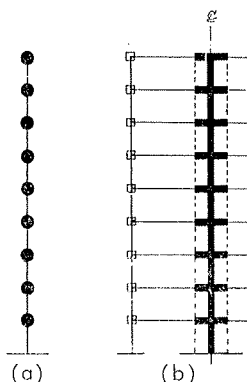
図一1 解析法概念図



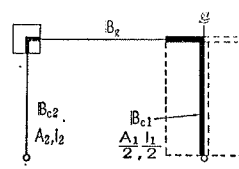
図一2 対象とする建物の平面図



図一3 対象とする建物のフレーム



図一4 モデル置換



図一5 層剛性用ユニット

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{A}^T * \mathbf{K}_i * \mathbf{A} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに \mathbf{A} は、式(4)の変換に用いられることは周知である。

$$\mathbf{D}_i = \mathbf{A} * \begin{Bmatrix} \mathbf{r}_i \\ \mathbf{r}_{i+1} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots(4)$$

上記の式で \mathbf{r}_i 、 \mathbf{D}_i は次の内容となる。

$$\mathbf{r}_i = \{ \theta_1, \theta_2, \gamma_1, \gamma_2, v_1, v_2, u \}_i^T \text{ (全体座標系)}$$

$$\mathbf{D}_i = \{ \mathbf{d}_{c1}, \mathbf{d}_{c2}, \mathbf{d}_g \}_i^T \text{ (部材座標系)}$$

\mathbf{K}_i は便宜的には式(5)となる。

$$\mathbf{K}_i = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 & R_1 \\ & S_3 & R_1 \\ \dots\dots\dots \\ S_{ym} & & F \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(5)$$

任意層に対する上下層の影響を式(6)のように入れる。

$$\left. \begin{array}{l} B_i = S_1^i \quad C_i = S_2^i \quad D_i = R_1^i \\ \dots\dots\dots \\ B_i = S_1^i + S_3^{i-1} \quad C_i = S_2^i \quad D_i = R_1^i + R_2^{i-1} \\ \dots\dots\dots \\ B_n = S_1^n + S_3^{n-1} \quad C_n = S_2^n \quad D_n = R_1^n + R_2^{n-1} \\ E = \sum_{i=1}^n F \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

このようにして B ラーメン (半分) の全体剛性は式(7)となる。

$$\mathbf{K}_B = \begin{pmatrix} B_1 & C_1 & & & & D_1 \\ C_1 & B_2 & C_2 & & & D_2 \\ & & C_{i-1}^T & B_i & C_i & D_i \\ & & & & C_{n-1} & D_n \\ \dots\dots\dots \\ D_1^T & D_2^T & & D_i^T & & E \\ & & & & D_n^T & \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式(7)をまとめて式(8)で表現する。

$$\mathbf{K}_B = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \dots\dots\dots \\ \mathbf{K}_{12}^T & \mathbf{K}_{22} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(8)$$

これから、地震応答に必要な水平剛性 \mathbf{K}_{BT} は式(9)で算出される。

$$\mathbf{K}_{BT} = \mathbf{K}_{22} - \mathbf{K}_{12}^T \cdot \mathbf{K}_{11}^{-1} \cdot \mathbf{K}_{12} \quad \dots\dots\dots(9)$$

建物全体の水平剛性は A ラーメンと、 B ラーメンの水

平剛性の和である。すなわち、 A ラーメンの枚数、 B ラーメンの枚数をそれぞれ N_A 、 N_B とすると、全体の水平剛性 \mathbf{K}_{total} は、式(10)で示される。

$$[\mathbf{K}_{total}] = N_A * [\mathbf{K}_{AT}] + 2 * N_B * [\mathbf{K}_{BT}] \quad \dots\dots\dots(10)$$

これにより外力 $\{P\}$ とのつり合い式は、式(11)となる。

$$\{P\} = [\mathbf{K}_{total}] * \{X\} \quad \dots\dots\dots(11)$$

増分式で書けば、

$$\begin{aligned} \{\Delta P\} &= \{\Delta P_A\} + \{\Delta P_B\} \\ &= \{N_A * [\mathbf{K}_A] + 2 * N_B * [\mathbf{K}_B]\} * \{\Delta X\} \quad \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

ここに $\{P\}$ または $\{\Delta P\}$ は地震外力、 $\{X\}$ または $\{\Delta X\}$ は水平変位となる。剛床を仮定すれば、式(11)を解いて得られる $\{X\}$ が、 A ラーメン、 B ラーメンに共通であり、これより各ラーメンの応力算定が可能である。

4. 計算例

計算例として、図一 2, 3 に略示した中央コア一式の、鉄骨造30階の事務所建築の短辺方向を用いる。

A ラーメンは、純ラーメン (2 枚) で、曲げせん断系として精算した場合の建物全体の固有周期に見合うバネマス系せん断降伏型を仮定する。B ラーメンは、耐震壁付ラーメン (4 枚) で、柱対称性を利用して、曲げせん断系部材降伏型の応答を行う。図一 6 以下に示す結果は、表一 1 の区分によって行った演算の結果である。

地震波入力は El Centro 1940 NS, 地動最大加速度 400gal, 減衰は内部粘性減衰系で、一次に対する減衰定数は 2% とする。建物の固有周期は、 $T_1 = 3.133 \text{ sec}$, $T_2 = 1.109 \text{ sec}$, $T_3 = 0.537 \text{ sec}$ となった。

図一 6 には各ケースの、建物全体の応答最大せん断力を、図一 7 には、建物全体の最大せん断力に対する A ラーメン 1 枚のせん断力負担率を示す。また図一 8

	A ラーメン	B ラーメン	A ラーメンの剛性
CASE-1	弾性	弾性	曲げせん断多質点系として柔性 matrix を入力
CASE-2	弾性	弾塑性	
CASE-3	弾塑性	弾塑性	せん断降伏型多質点系として剛性 matrix 入力

表一 1 応答計算の種類と内容

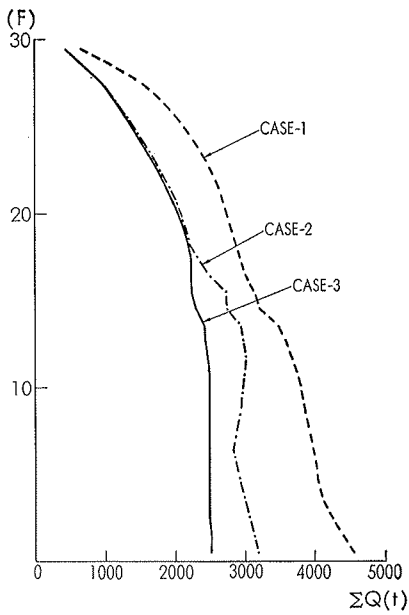


図-6 応答最大せん断力

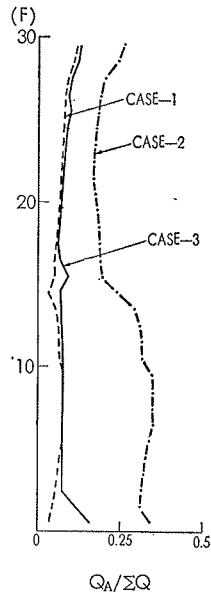


図-7 Aラーメンせん断力負担率

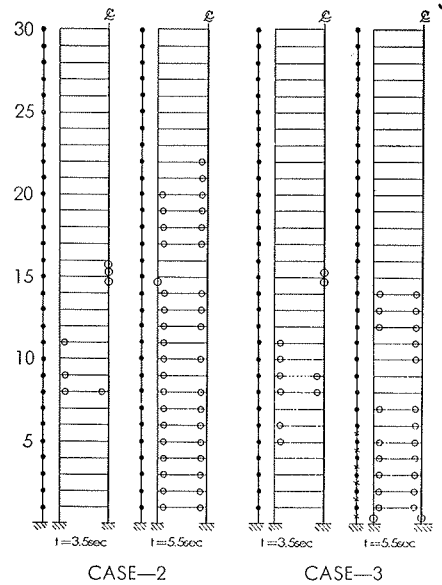


図-8 降伏発生箇所

には CASE-2および CASE-3 の、ヒンジ発生状況を代表的な時刻について示す。

図-6からは、CASE-3 の数値が、CASE-1 および 2 と比較して、大幅に低いことが判る。すなわち、全ラーメンに弾塑性を考慮することによって、建物に入力するせん断力が大幅に減少することが判る。また、図-7からは、CASE-1 および 3 の数値が CASE-2 と比較して著しく低いことが判る。すなわち、Aラーメン、Bラーメン双方に同様な弾塑性挙動を認めることによってAラーメンへのせん断力の入力低下している。

図-8では、CASE-2 および CASE-3 での、フレームの降伏ヒンジ発生状況を、 $t=3.5\text{sec}$ および 5.5sec について示すがこれらの図から直ちに2つのケースの一般的な傾向が論じられる訳ではないが、CASE-2 の $t=5.5\text{sec}$ でのBラーメンのヒンジ発生位置が、中層から下層にわたっていたものが、CASE-3 では下層の方に集中している上、ヒンジの数も少なくなっている。またAラーメンの降伏箇所も下階に集中していることが示されている。CASE-3 の $t=3.5\text{sec}$ では、Bラーメンに降伏ヒンジが発生していてもAラーメンは降伏していない。このことからAラーメンの降伏とBラーメンの降伏は必ずしも時間的な対応を示さないことが判る。

5. 結び

中央耐震コア付き高層ビルの強震入力による応答解析を行う場合、建物の外周純ラーメン(Aラーメン)と、外柱および壁柱からなる内側ラーメン(Bラーメン)

とを、何枚かずつ集めた形式を設定し、Aラーメンは多質点せん断降伏型と仮定し、Bラーメンは、曲げ、せん断、剛域を考慮し、柱、はりの各部材端に塑性ヒンジバネを仮定して、応答時の材端応力に応じて塑性化するものとし、これによって建物の剛性を逐次変更した。

計算例からみると、A、Bラーメン共に弾塑性挙動を考慮するケースが、Aラーメンによるエネルギー吸収の増大によって変形は増大するが、建物全体の応答応力は減少し、Bラーメンのヒンジ発生も、Aラーメンを弾性と仮定した場合に較べて減少する。

また、本計算例の建物を8秒間の地震応答に対して計算ピッチ $\Delta t=0.01\text{sec}$ で行くと、IBMS370/158 を用いて、CPU=1600sec となり、容量も 336K であるので、十分実用に耐え得る。

本例題では、大阪大林ビルの平面および立面を参考としたモデルを使用した。構造的内容は著しく異なったものである。したがって、応答結果等も含めて、全く別のケースと考えて差支えない。

なお、機械計算部開発課の板橋室二職員の協力を得たことを付記する。

引用文献

- 1) 「高層ビル耐震設計プログラムの開発研究」大林組技術研究所報 No. 4 1970 p. 45
- 2) 武田, 岡田, 表「高層ビル耐震設計プログラムの開発研究」(第2報) 一曲げ降伏型による弾塑性応答の精密解 大林組技術研究所報 No. 5 1971 p. 27