

# マクロモデルを用いた骨組構造の地震崩壊解析コードの検証

## Verification of Macro-Model Seismic Collapse Analysis Code for Framed Structures

○非 片平 直樹 (筑波大院) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

非 井根 達比古 (防災科技研) 非 梶原 浩一 (防災科技研)

Naoki KATAHIRA, Graduate School, Univ. of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Tatsuhiko INE, NIED, 1501-21 Nishikameya, Mitsuta, Shijimi-cho, Miki-shi, Hyogo

Koichi KAJIWARA, NIED, 1501-21 Nishikameya, Mitsuta, Shijimi-cho, Miki-shi, Hyogo

### 1. 緒言

日本では常に地震による脅威にさらされており、大地震が発生した際に生じる被害を最小限に留めるには、耐震性の高い構造物を設計・建造することは必要不可欠であると言える。そのためにも、地震によって生じる構造物の挙動を短時間でシミュレートできる手法の開発は今後の構造物設計において非常に重要である。

また、首都圏においては今後、兵庫県南部地震のような大規模な直下型地震が発生すると言われているが、このような地震に対する構造物の被害を予測するためには、水平方向の加振のみによる解析では不十分と思われる。より優れた地震崩壊解析技術を構築するためには、鉛直方向の加振も考慮でき、かつ三軸同時に地震力を受けた際の構造物の崩壊挙動をシミュレートできるプログラムが必要不可欠である。

筆者らは、三軸方向同時に地震力を入力することが可能で、かつ構造物の崩落現象を解析することが可能なアルゴリズムを提案した。本稿では、8層構造物に対して水平二軸加振および三軸加振を行い、その崩壊挙動の比較を行う。解析手法として、ASI-Gauss法[1]を支持点加振[2]に基づいた地震応答解析プログラムに導入したものをを用いた。

### 2. 自重作用下の鉛直方向加振

重力と鉛直方向地震動を同時に作用させる場合、節点に作用する外力と要素内に発生する断面力に地震力に関する成分を加えることで、計算が不安定になってしまう傾向があった。そこで本研究では、重力と地震力の作用を区別し、重力作用の影響を計算する部分と、地震力による影響を計算する部分に分けたアルゴリズムを開発した。

時刻  $t + \Delta t$  における自重作用のみを計算する運動方程式は以下のように表される。時間積分法には陰解法を用いる。

$$[M]\{\ddot{u}_g\}_{t+\Delta t} + [K]\{\Delta u_g\}_{t+\Delta t} = \{F\}_t - \{R\}_t \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{\ddot{u}\}$ は節点加速度ベクトル、 $\{\Delta u\}$ は節点変位増分ベクトル、 $\{F\}$ は節点外力ベクトル、 $\{R\}$ は要素内力ベクトルを表しており、添字  $g$  は自重作用による成分であることを示している。外力  $\{F\}$  は、構造物の自重作用による値のみを使用し、地震力以外の荷重増分はないものと仮定する。また、要素内力  $\{R\}$  としては

$$\{R\}_t = \int [B]^T [D] [B] \{u_g\}_t dV \quad (2)$$

から自重作用下の変位  $\{u_g\}$  による値を算出する。ただし、 $[D]$ は応力-ひずみマトリックス、 $[B]$ はひずみ-変位マト

リックスである。

地震力による構造解析は、式(2)から求められる内力ベクトル  $\{R\}$  と、毎ステップ与えられる地震力ベクトル  $\{\Delta F\}$  を

$$[M]\{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [K]\{\Delta u_d\}_{t+\Delta t} = \{F\}_t - \{R\}_t + \{\Delta F\} \quad (3)$$

に代入することで行う。ただし、添字  $d$  は自重作用および地震力両方を考慮した成分であることを示している。なお、式(2)の  $\{R\}$  を算出する際に用いる座標変換マトリックスは、式(3)で得られる  $\{\Delta u_d\}$  を基準とする。この操作によって、地震力によって生じた構造物の幾何形状変化に応じて、内力ベクトル  $\{R\}$  が変化することを表現した。

要素が破断した瞬間には、破断要素の剛性をゼロにする。さらに、式(2)の  $\{R\}$  の成分を強制的にゼロにし、破断面の節点に作用する  $\{F\}$  からは、破断要素の重量分の節点力を差し引く操作を行う。よって破断した瞬間には、 $\{F\} - \{R\}$  で表される解放力が破断面に動的に作用することとなる。

### 3. 8層骨組構造の地震崩壊解析

文献[3]に記載されている従来型骨組モデルに対して水平二軸加振および三軸同時加振解析を行い、両者間の崩壊挙動の差異を比較した。材料の断面形状や材料定数などの情報に関しては、文献[3]を参照されたい。ただし、1層の柱については、基礎部の強固さを考慮するために、文献記載の断面形状から算出される値に対し、断面積は  $10^2$  倍、塑性断面係数は  $10^3$  倍、断面2次モーメントおよびねじり定数は  $10^4$  倍の値を用いた。また、崩壊現象を誘発させるために3層の柱の断面寸法を人為的に文献の60%の値とした。図1に解析モデルを示す。部材の破断判定条件としては、文献[4]と同等の条件を用いた。

時間積分法には Newmark の  $\beta$  法を用い、解析の安定性を考慮するために  $\beta = 4/9$ 、 $\delta = 5/6$  とし数値減衰を採り入れた。物理減衰は考慮していない。時間増分は  $5[\text{ms}]$  とし、 $8000[\text{step}]$  にわたり解析を行った。入力する地震波は、JMA-Kobe 波の加速度振幅を1.5倍にしたものを用い、X軸方向にEW、Y軸方向にNS、三軸加振の場合のみZ軸方向にUD成分を入力した。図2に入力加速度の時刻歴を示す。

水平二軸加振による解析結果を図3(a)に、三軸同時加振の結果を図3(b)に示す。三軸加振の場合においては、大きな加速度が加わる  $7.20[\text{s}]$  付近において、上層部でもはりの塑性化が見られた。また、水平二軸加振では  $20[\text{s}]$  以降の微小振動によって3層の柱の変形が増加し  $26[\text{s}]$  付近で崩壊したのに対し、三軸同時加振の場合はそれより早めの  $15[\text{s}]$  あたりの時点で崩壊が始まった。

#### 4. 結言

本稿では、構造物に生じる重力と地震力を区別して解析するアルゴリズムを用いて、8層の骨組構造に対して水平二軸加振と鉛直方向を付加した三軸同時加振解析を行った。その結果、鉛直方向加振が加わることで、崩壊パターンそのものはあまり変化が無いものの、崩壊開始時間が早まるという結果が得られた。今後は振動実験との定量比較を行うことで、本解析技術の有効性を検証していく予定である。

#### 参考文献

- [1] 磯部大吾郎, チョウ ミヨウ リン: 飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 579号, (2004), pp.39-46.
- [2] 磯部大吾郎, 津田真啓: 有限要素法による RC 骨組構造の地震崩壊解析コードの開発, 構造工学論文集, Vol.48B, (2002), pp.385-394.
- [3] 貝谷淳一, 他: 方杖ダンパー接合構造の設計例 その2 8階建て事務所建築の設計例, 日本建築学会学術講演梗概集 C-1 構造Ⅲ, (2006), pp.753-754.
- [4] 片平直樹, 磯部大吾郎, 他: 三軸加振下における大規模骨組構造の地震崩壊解析, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1 構造 I, (2008), pp.395-396.

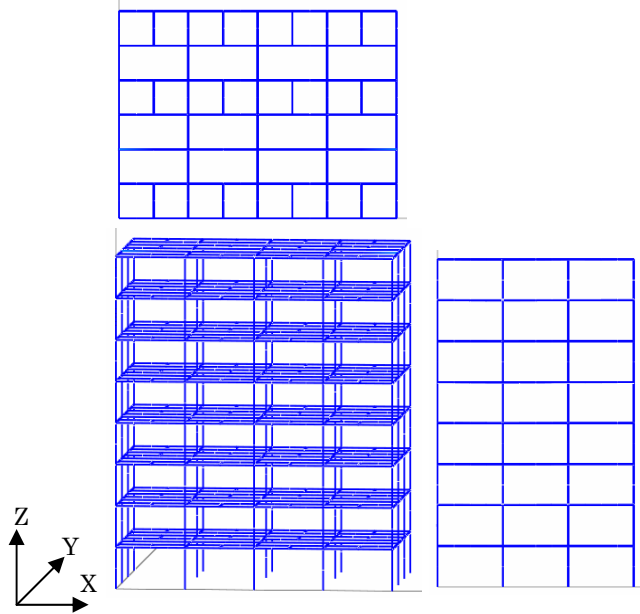


図1 8層骨組構造モデル

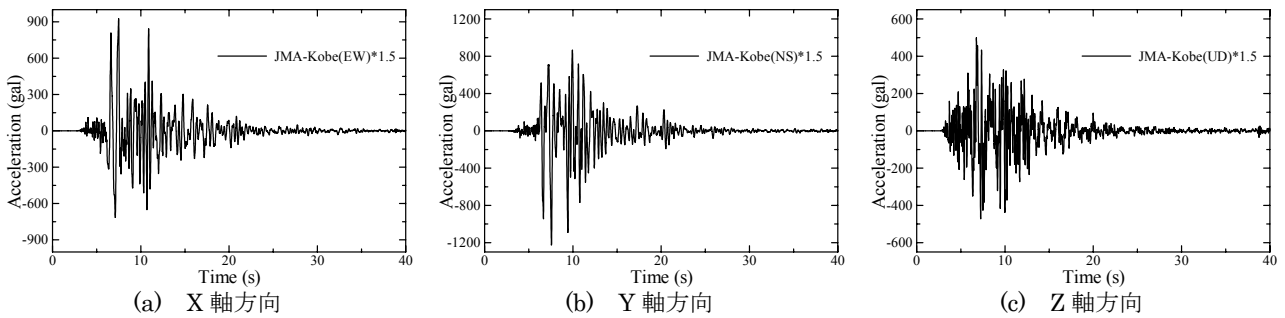


図2 入力加速度時刻歴

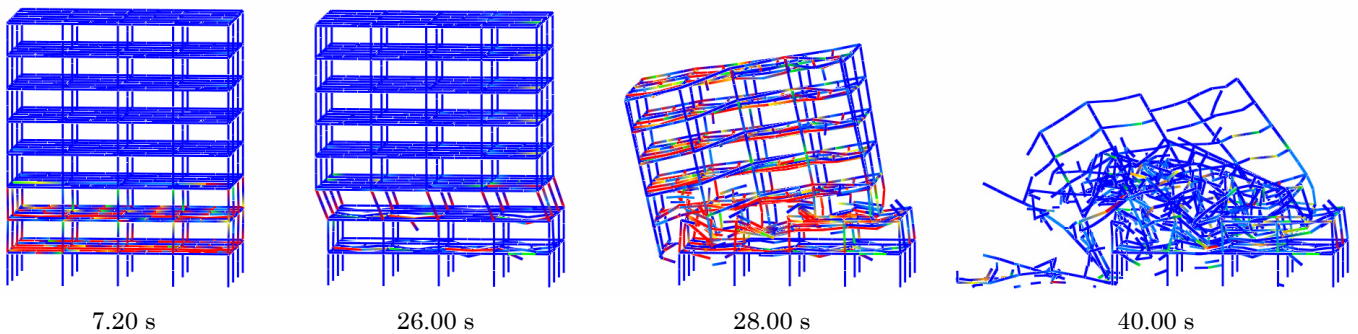


図3(a) 水平二軸加振解析結果

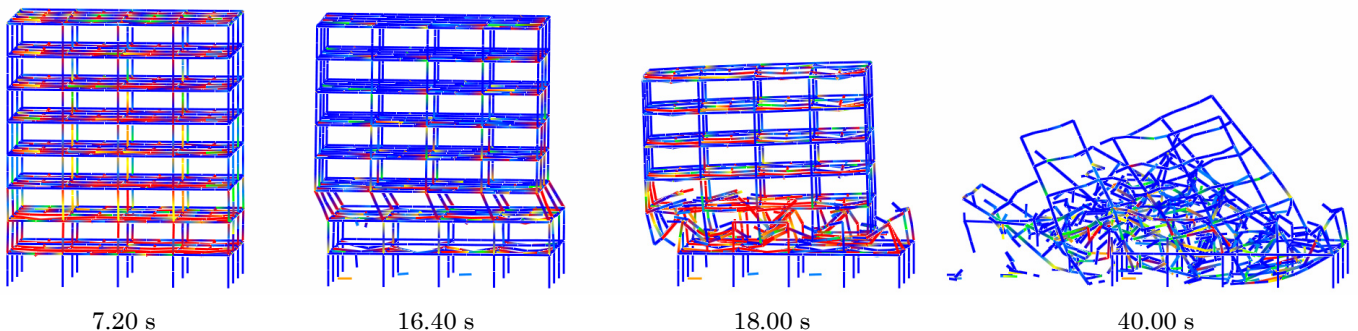


図3(b) 三軸同時加振解析結果