

東京工業大学大学院 学生員 石川敏充

東京工業大学工学部 正 員 吉田 裕

住友重機械工業

有井一晃

1. はじめに

一般に地震動応答解析は、基礎部の入力加速度に対応する慣性力に相応する項を外力項としてなされている。また線形系のもとで複数の入力成分を考慮する場合、それぞれに対する応答を独立に求め重ね合わせるなどの手立てが可能になるが、非線形系を対象とする場合には不可能になる。本研究は、立体骨組構造の、大変形と材料非線形性を考慮する複合非線形問題を対象として、複数の地震動入力成分のもとでの応答解析法を構成し、兵庫県南部地震に際して神戸海洋気象台で観測された地震動のもとでの応答解析を行い、大変形に加えての材料非線形性の影響などについて検討した結果を報告するものである。

2. 基礎となる有限要素方程式と多成分同時入力による地震動応答解析法の概要

接線剛性マトリックスとつり合い力とで構成される幾何学的非線形解析過程に、慣性項及び減衰項で表される力を考慮し¹⁾、線形運動方程式の時間積分法として提案された α 法の考え方を導入することによって次式が得られる²⁾。

$$(1+\alpha)[K_T]\{\Delta u_{(j)}\} = \{f_{ext}\}_{\Delta t+\Delta\tau} - \{f_{int}\}_{\Delta t} - [M_{(j-1)}]\{\ddot{u}_{\Delta t+\Delta\tau}\} - [C_{(j-1)}]\{\dot{u}_{\Delta t+\Delta\tau}\} + \alpha[K_T]\{\Delta u_{(j-1)}\} \quad (1)$$

式(1)にNewmark法の直接時間積分公式を考慮すると以下のような動的問題を対象とする基礎式が得られる。

$$\left[(1+\alpha)[K_{T(j-1)}] + \frac{1}{\beta\Delta t^2}[M_{(j-1)}] + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}[C_{(j-1)}] \right] \{\Delta u^{(j)}\} = \{f_{ext}\}_{\Delta t+\Delta\tau} - \{f_{int(j-1)}\} - [M_{(j-1)}] \left\{ \frac{1}{\beta\Delta t^2} \{\Delta u_{(j-1)}\} - \frac{1}{\beta\Delta t} \{\dot{u}_{\Delta t}\} - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{\ddot{u}_{\Delta t}\} \right\} - [C_{(j-1)}] \left\{ \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \{\Delta u_{(j-1)}\} + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \{\dot{u}_{\Delta t}\} + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \{\ddot{u}_{\Delta t}\} \right\} \quad (2)$$

変数を未知変数(添字 p)と入力波として与えることになる既知変数成分(添字 q)に分け、それぞれの係数マトリックスの対応する部分マトリックスに添字 p, q をつけて区別して表すと、以下のような動的問題を対象とする関係式を構成することができる。

$$\left[(1+\alpha)[K_{T(j-1)}] + \frac{1}{\beta\Delta t^2}[M_{T(j-1)}] + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}[C_{T(j-1)}] \right] \{\Delta u_p^{(j)}\} = \{f_{p,ext}\}_{\Delta t+\Delta\tau} - \{f_{p,int(j-1)}\} - (1+\alpha)[K_{T(j-1)}]\{\Delta u_q\} - [M_{T(j-1)}] \left\{ \frac{1}{\beta\Delta t^2} \{\Delta u_{q(j-1)}\} - \frac{1}{\beta\Delta t} \{\dot{u}_q\}_{\Delta t} - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{\ddot{u}_q\}_{\Delta t} \right\} - [C_{T(j-1)}] \left\{ \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \{\Delta u_{q(j-1)}\} + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \{\dot{u}_q\}_{\Delta t} + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \{\ddot{u}_q\}_{\Delta t} \right\} \quad (3)$$

式(3)は変位増分 $(\Delta u = u_{\Delta t+\Delta\tau} - u_{\Delta t})$ を求めるための収束計算

$(\Delta u_{(j)} = \Delta u_{(j-1)} + \Delta u^{(j)})$, $\Delta u_{(j)}$ は Δu の第 j 近似値)の基礎となる

式である。部材内の応力の分布状態をより詳細に追跡するために、各部材を軸方向・高さ方向・幅方向に細分割した小領域を設定し、小領域ごとに応力および弾塑性状態を評価する方法をとっている。

3. 応答解析に用いる入力地震動

対象とする入力地震動は、兵庫県南部地震において神戸海洋気象台 87 型電磁式強震計により観測された加速度記録を

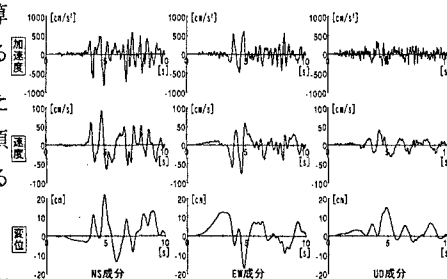


図-1 補正して得られた加速度、速度、変位

立体骨組、複合非線形問題、応答解析法

〒152 目黒区大岡山 2-12-1 緑が丘 1 号館 509 号室 TEL 03-5734-2587

もとに評価した加速度、速度、変位波形である。当該強震計の周期特性を考慮して、低周波域を除去することによって補正し、積分して得られた NS、EW、UD 方向の加速度、速度、変位波形を図-1 に示す。

4. 門型骨組構造物の地震動応答解析

4. 1 解析対象と解析条件

解析対象は、図-2 に示したような一本の柱の全質量 M_0 を規準として、はり部の質量が $100 \times M_0$ の門型の立体骨組である。解析は、面内水平方向に NS 方向を、面に垂直方向に EW 方向を定義して、NS・EW・UD の 3 成分が同時に入力される場合である。導入した上載荷重 P は対象構造物の降伏応力の 30% に相当する荷重である。解析は、大変形を考慮し、2 直線モデルで与えた材料の弾塑性性を考慮した複合非線形解析である。

4. 2 3 成分が同時に入力される場合の解析

構造に NS、EW の 2 成分と UD を加えた 3 成分が同時に入力される場合の柱頭部の応答加速度と相対変位を比較して図-3 に示す。2 成分の場合には面内方向だけの応答となるが、3 成分の場合では、面外方向には、柱の下端が固定、上端が自由の構造となるために、4.12(s) の直後に上載荷重に耐えきれなくなって、面外方向に崩壊する結果となっている。崩壊の直前の変形の推移を絶対変位および相対変位で描き、図-4 に比較して示している。この場合に塑性域が生ずるのは柱下端部であるが、崩壊直前の塑性域の分布を図-5 に示している。

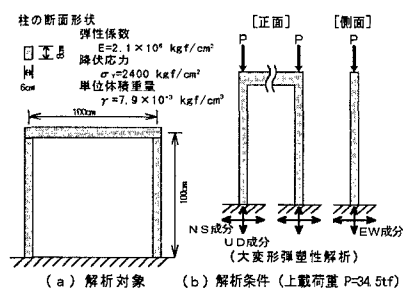


図-2 解析対象と解析条件

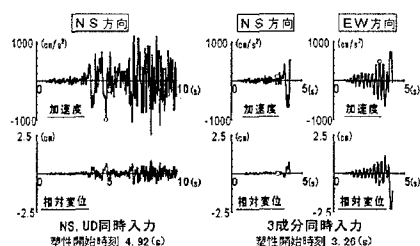


図-3 柱頭部の水平方向応答加速度・相対変位

(○印は塑性域が発生した時点)

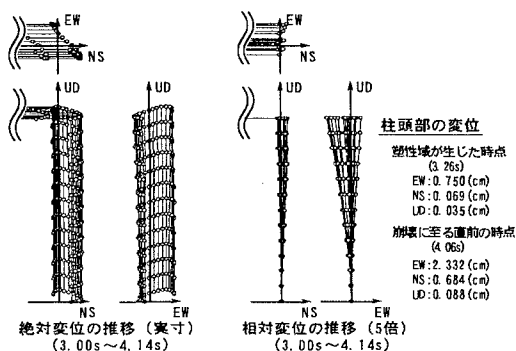


図-4 崩壊直前の変形の推移

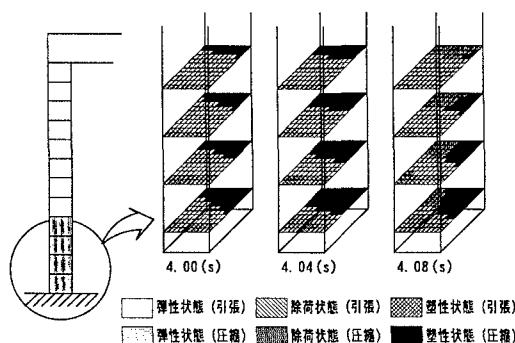


図-5 崩壊直前の柱下端部の塑性域の分布

5. おわりに

以上に、立体骨組構造の複合非線形問題を対象として構成した地震動応答解析過程について説明し、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の記録に基づいて、3 成分の地震動が同時に入力される場合の複合非線形時刻歴応答解析の結果を示した。立体骨組構造の複合非線形問題を対象とする地震動応答解析法として、安定に信頼度の高い解が得られることを確認した。

参考文献

- 1) Bathe, K.J. and Cimento, A.P. : Some Practical Procedures for the Solution of Nonlinear Finite Element Equations, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., pp.59-85, 1980.
- 2) 吉田 裕、魚地征一郎 : 「非線形動的解析における直接時間積分の安定性向上に関する検討」 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、日本鋼構造協会、第 17 巻 pp.525-530(1993.7)