

I-B 343 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

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

1. はじめに

構造物基礎から入力される地震動に対する動的応答解析は、基礎部の変位と構造各部の変位との相対的な変位を対象として、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扱ってなされるのが普通である。水平動と鉛直動といった複数の入力成分を考慮する場合、対象が線形系であれば、それぞれに対する応答を独立に求めて、それらを重ね合わせることによって評価す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、このような方法をとることができない。本研究は、平面骨組構造を対象として、幾何学的な非線形性と材料の非線形性を考慮する複合非線形問題の、複数の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、上載荷重の影響などについて検討した結果を報告をするものである。

2. 解析過程の概要

2.1 動的非線形解析の基礎となる有限要素方程式 接線剛性マトリックスとつり合い力とで構成される非線形解析過程に、慣性項及び減衰項で表される力を考慮し、線形運動方程式の時間積分法として提案されたα法^{1) 2)}の考え方を導入することによって次式が得られる。

$$(1 + \alpha)[K_T]_{<t>,<t+\Delta t>} \{\Delta u_{<t>}& = \{f_{ext}\}_{<t+\Delta t>} - \{f_{int}\}_{<t>} - [M]\{\ddot{u}\}_{<t+\Delta t>} - [C]\{\dot{u}\}_{<t+\Delta t>} + \alpha[K_T]_{<t>,<t+\Delta t>} \{\Delta u_{(j-1)}\} \tag{1}$$

式(1)に Newmark 法の直接時間積分公式

$$\dot{u}_{<t+\Delta t>} = \dot{u}_{<t>} + \Delta t \cdot [(1 - \gamma) \cdot \ddot{u}_{<t>} + \gamma \cdot \ddot{u}_{<t+\Delta t>}] \tag{2}$$

$$u_{<t+\Delta t>} = u_{<t>} + \Delta t \cdot \dot{u}_{<t>} + \Delta t^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \cdot \ddot{u}_{<t>} + \beta \cdot \ddot{u}_{<t+\Delta t>} \right] \tag{3}$$

を考慮することによって、以下のような動的問題を対象とする、時間増分(t ~ t + Δt)間の状態量を収束計算(j-1 ~ j)によって求めるための基礎式を構成することができる。

$$\left[(1 + \alpha)[K_T]_{(j)} + \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M]_{(j-1)} + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C]_{(j-1)} \right] \{\Delta u^{(j)}\} = \{f_{ext}\}_{<t+\Delta t>} - \{f_{int(j-1)}\} - [M]_{(j-1)} \left\{ \frac{1}{\beta \Delta t^2} \{\Delta u_{(j-1)}\} - \frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}\}_{<t>} - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{\ddot{u}\}_{<t>} \right\} - [C]_{(j-1)} \left\{ -\frac{\gamma}{\beta \Delta t} \{\Delta u_{(j-1)}\} + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \{\dot{u}\}_{<t>} - \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \{\ddot{u}\}_{<t>} \right\} \tag{4}$$

式(4)は変位増分(Δu = u_(t+Δt) - u_(t))を求めるための収束計算(Δu_(j) = Δu_(j-1) + Δu^(j)、Δu_(j)はΔuの第j近似値)の基礎となる式である。

2.2 多成分地震動入力波を対象とする応答解析法 地震入力波として変位波形を与えるものとする。

式(4)の左辺の係数マトリクスをまとめて[K]と表し、外力項({f_{ext}})_(t+Δt) ≡ {f_(t+Δt))}を除く右辺のベクトルをまとめて{F}と表し、変位増分の成分のうち、入力波として強制的に与える変位増分をΔu_qとして区別して、式(4)を書き直すと次式のようなになる。

$$\begin{bmatrix} K_{pp} & K_{pq} \\ K_{qp} & K_{qq} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_p^{(j)} \\ \Delta \bar{u}_q^{(j)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{f}_{(t+\Delta t)p} \\ \bar{f}_{(t+\Delta t)q} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} F_p \\ F_q \end{Bmatrix} \tag{5}$$

式(5)の上半分から解式が次のように得られる。

$$[K_{pp}] \{\Delta u_p^{(j)}\} = \{\bar{f}_{(t+\Delta t)p}\} - \{F_p\} - [K_{pq}] \{\Delta \bar{u}_q^{(j)}\} \tag{6}$$

3. 入力変位波形

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

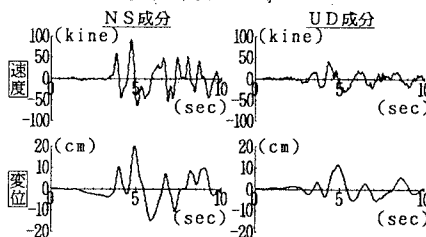


図-1 加速度の基準線を補正して得られた速度と変位 (兵庫県南部地震 (神戸海洋気象台))

洋気象台の気象庁87型電磁式強震計により観測された加速度記録をもとに評価した変位波形である。当該強震計の周期特性により、加速度記録の信頼度の高い周波数範囲は周期約0.1~10秒の間である。したがって、これを積分して速度、変位を評価するためには、観測周波数範囲を考慮した補正が必要になる。ここでは、筆者らが提案した方法^{3) 4)}により、低周波域を除去することによって補正し、積分している。神戸海洋気象台におけるNSおよびUD成分について、得られた速度および変位波形を図-1に示す。

4. 数値解析

4.1 解析対象と解析条件 解析対象は、図-2(a)に示したような鋼材の板の支点部にNS成分とUD成分が同時に入力される場合である。解析2、および3において導入した上載荷重P (=24.0kgf)は対象構造の座屈荷重の約60%に相当する荷重である。解析1、および2は、大変形を考慮した弾性解析であり、解析3は2直線モデルで与えた材料の弾塑性を考慮した複合非線形解析である。

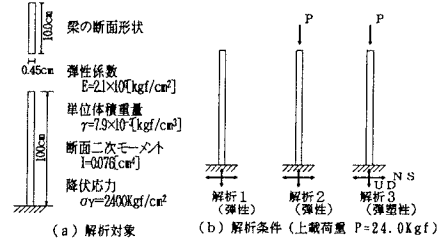


図-2 解析対象と解析条件（解析1~3）

4.2 上載荷重および材料非線形性の影響 対象構造の上端部と中央部における水平方向の応答速度（起

点時刻から10秒間）を比較して図-3に示す。解析には減衰を考慮していないために、解析1においても時間が経過するにしたがって一定の周期特性をもつ振幅が拡大し、応答速度が大きくなっているが、解析1と2の結果を比較して、上載荷重が応答に与える影響が非常に大きいこと、解析2と3を比較して、塑性域が進展することにより応答の周期が大きくなり延び応答値も大きくなるのがわかる。解析3における支点部近傍の塑性域の進展の様子を図-4に示す。

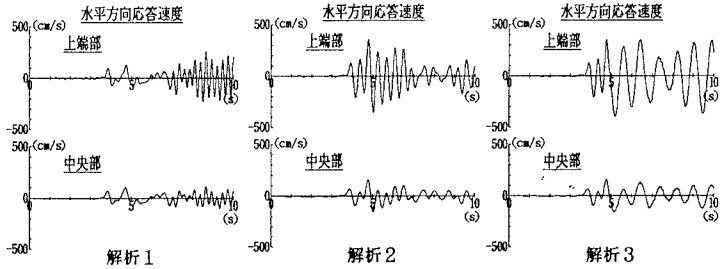


図-3 解析条件による応答の違いの比較

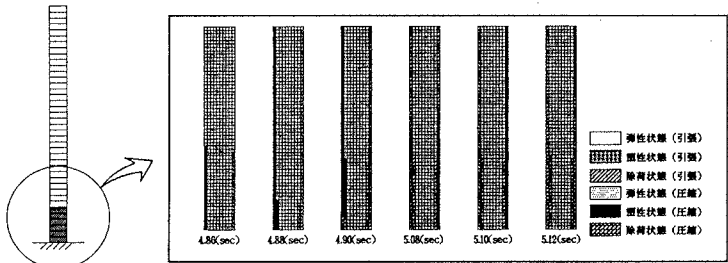


図-4 弾塑性域の進展の様相（解析3（弾塑性解析））

以上、平面骨組構造の複合

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た、水平(NS)および鉛直(UD)動が同時に入力される場合の解析結果を比較した。構造物の応答に与える、上載荷重および材料非線形性の影響が非常に大きいことが明らかにされた。

参考文献

- 1) H.M.Hilber, T.J.R.Hughes and R.L.Taylor : Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics, Earthquake Engrg. Struct. Dyn. 5, pp.99-118,1978.
- 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)
- 3) 吉田 裕・岡山和生：地震加速度記録の積分における濾波計算のアルゴリズム、土木学会論文報告集、第221号・1974年1月
- 4) 吉田 裕・増田陳紀・澤 正・若菜弘之：数値濾波の計算法と地震記録の非定常スペクトル解析への応用、土木学会論文報告集、第274号・1978年6月