

地震時終局挙動評価における 非線形有限要素解析に関する考察

吉田 裕・有井一晃**・石川敏充***

*工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

**工修 東京工業大学大学院理工学研究科 (同上)

***東京工業大学大学院情報理工学研究科 (同上)

今回改訂された道路橋示方書において、非線形の効果を考慮した動的解析の位置づけが明確にされたことを受けて、大きな変形と材料非線形をともなう、構造の複合非線形問題に焦点を絞り、地震動に対する時刻歴応答解析など、非線形解析の実態を探り、耐震設計過程への適用に関する、現実的な枠組みについて考えようとするものである。上記示方書においては、目標とする橋の耐震性能に関して、「健全性を損なわない」など、設計で対象とする非線形領域に関する、現実的な歯止めがかけられている。設計過程に位置づけるためには、安定に、信頼度の高い解を手にすることができることが、大切な判断基準となるので、現状においては、対象非線形領域を限定して、解法の完成度を高め、解析の質的向上を目指して、課題の1つ1つを着実に解決していくことが急務になると判断するものである。

Key Words : dynamic response analysis, geometric nonlinear effect, design specification, bridge pier

1. はじめに

「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」¹⁾に、非線形の効果を考慮した動的解析を行い、その結果を設計に反映させることが、設計照査過程の基本的な位置に置かれたことを受けて、道路橋の設計過程における、非線形時刻歴応答解析の活用に関心が集められた²⁾。さらに、今回改訂された道路橋示方書³⁾において核となる、地震時保有水平耐力法における、構造物の非線形域の変形性能や動的耐力を考慮する設計思想の中で、構造物に損傷が生じ、破壊に至る過程を念頭に置いて、構造にじん性を確保することの重要性が強く認識され、相当な強非線形領域までの解析が期待されている一面がある。

また、地震時保有水平耐力法は、地震による荷重を静的に作用させて設計する耐震設計法であるが、地震力を考慮して、構造部材が非線形域に入っても適切なねばりをもたせ、そのエネルギー吸収機能を考慮することを基本としているために⁵⁾、適用には相当高度な技術力が要求される。このような状況の中で、示方書に地震時の挙動が複雑な橋に対する動的解析の位置づけが明確にされているので、一足飛びに、汎用システムによる非線形解析に依存する動向も見られる。

一方で、上記道路橋示方書においては、目標とする橋の耐震性能に関して、「健全性を損なわない」：「地震時に構造部材に生じる応力度や変位が許容応力度法により与えられる許容応力度や許容変位以内に収まること、

すなわち降伏状態を超えるような損傷を生じないこと」(「[]内は、鉄筋コンクリート橋脚を例にとった解説⁴⁾)、「致命的な被害を防止する」：「落橋が生じないように主要構造部材の水平耐力が低下しはじめる状態の手前であること」、「限定された損傷にとどめる」：「橋としての機能の回復をより速やかに行うためにこれよりもさらに余裕をもった状態にあること」などとして、設計で対象とする非線形領域に関する、現実的な歯止めがかけられている。また、橋脚の非線形域におけるじん性に関して、過度のじん性に頼った設計とならないように、「原則として橋脚下端から上部構造の慣性力の作用位置までの高さの1/100」の許容残留変位を設定して、橋脚の残留変位の上限值に縛りがかけられている⁵⁾。

改めていうまでもなく、力学現象を対象とする解析システムは、多くの理想化を踏まえて構成されているものであり、得られる解は本質的に近似解である。特に、非線形解析が対象とすることを期待される領域は限りなく広く、強非線形域になればなるほど、なお相当に高度な研究の領域に残されている、数多くの困難な課題を抱えているのが実状である。地震動時刻歴応答解析に関しては、線形に近い解析においてさえ、実効のある解析結果を手にするためには、相当なレベルの技術力が必要になるのが普通である。

本論文は、大きな変形と材料非線形をともなう、構造の複合非線形問題に焦点を絞って、地震動に対する時刻歴応答解析など、非線形解析の実態を探り、耐震設計過

程への適用に関する、現実的な枠組みについて考えようとするものである。

非線形領域の対象範囲が広がると、解析の困難度は桁違いに高くなる。非線形解析を設計過程に位置づけるためには、一般の技術者のレベルで、安定に、信頼度の高い解を手にすることができる、大切な判断基準となる。

したがって、現状においては、なお上述の「設計で対象とする非線形領域に関する、現実的な歯止め」や「橋脚の残留変位の上限值に関する縛り」の範囲に対象非線形領域を限定して、解法の完成度を高め、解析の質的向上を目指して、課題の1つ1つを着実に解決していくことが急務になると判断する。

2. 立体骨組構造を対象とした複合非線形地震動応答解析のアルゴリズムの例

解析過程の具体的な姿を確認する意味で、筆者らが開発したアルゴリズム^{6)～9)}の概要を示す。本論文に示す解析結果は、すべてこのアルゴリズムによって得られたものである。

2.1 動的な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不釣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¹⁰⁾、線形運動方程式の時間積分法として提案された α 法^{11) 12)}の考え方を導入することによって次式が得られる。

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

式①に Newmark 法の直接時間積分公式

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

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

を考慮することによって、次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left[(1+\alpha)[K_{T(j-1)}] + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} [M_{(j-1)}] + \frac{\gamma}{\beta\Delta t} [C_{(j-1)}] \right] \{\Delta u^{(j)}\} \\ & = \{f_{ext}\}_{<I+\Delta t>} - \{f_{int(j-1)}\} \\ & - [M_{(j-1)}] \left\{ \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \{\Delta u_{(j-1)}\} - \frac{1}{\beta\Delta t} \{\dot{u}\}_{<I>} - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{\ddot{u}\}_{<I>} \right\} \\ & - [C_{(j-1)}] \left\{ \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \{\Delta u_{(j-1)}\} + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \{\dot{u}\}_{<I>} + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \{\ddot{u}\}_{<I>} \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

2.2 多成分地震動入力波を対象とする応答解析法

式④において、変数を未知変数成分(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、時間増分($t \sim t + \Delta t$)間の状

態量を収束計算($j-1 \sim j$)によって求めるための関係式を構成することができる。

$$\begin{aligned} [K_{pp}] \{\Delta u_p^{(j)}\} & = \{\bar{f}_{pext}\} - \{\bar{f}_{pint}\} - \frac{1}{\beta\Delta t^2} [M_{pp}] \{\Delta u_{p(j-1)}\} \\ & + \frac{1}{\beta\Delta t} [M_{pp}] \{\dot{u}_p\}_{<I>} + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) [M_{pp}] \{\ddot{u}_p\}_{<I>} \\ & - \frac{\gamma}{\beta\Delta t} [C_{pp}] \{\Delta u_{p(j-1)}\} - \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) [C_{pp}] \{\dot{u}_p\}_{<I>} \\ & - \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) [C_{pq}] \{\dot{u}_q\}_{<I>} - [K_{pq}] \{\Delta \bar{u}_q^{(j)}\} \\ & + \frac{1}{\beta\Delta t} [M_{pq}] \{\bar{u}_q\}_{<I>} + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) [M_{pq}] \{\ddot{\bar{u}}_q\}_{<I>} \\ & - \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) [C_{pq}] \{\bar{u}_q\}_{<I>} - \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) [C_{pq}] \{\ddot{\bar{u}}_q\}_{<I>} \quad (5) \end{aligned}$$

式⑤は変位増分($\Delta u = u_{(t+\Delta t)} - u_{(t)}$)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。

2.3 部材内に設けた応力評価小領域

部材内の応力の分布状態をより詳細に追跡するために、図-1に示すように、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。このことに伴い、被積分項に応力項を含む各部材要素の幾何剛性マトリックスおよび内部節点力の評価に際しては、各小領域ごとに体積積分を行っている。

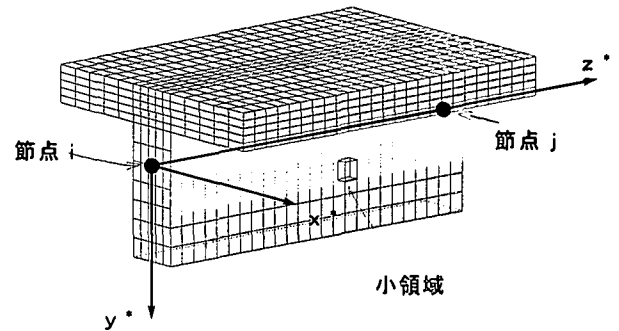


図-1 応力評価のために設定した小領域

3. 地震動時刻歴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、加速度、速度および変位波形である。当該強震計の特性により、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^{13) 14)}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, EW および UD 成分について、解析に用いる加速度、速度および変位波形を図-2に示す。

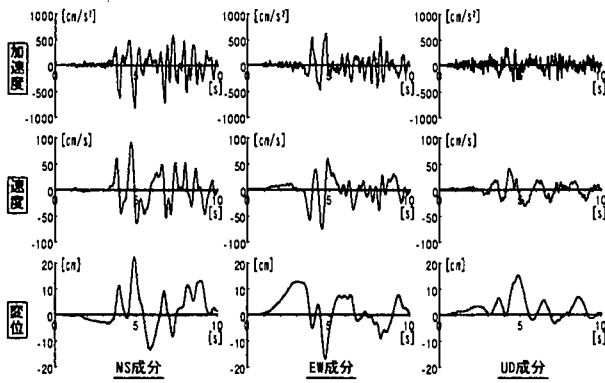


図-2 加速度の基準線を補正して得られた加速度、速度、変位波形 [兵庫県南部地震(神戸海洋気象台)]

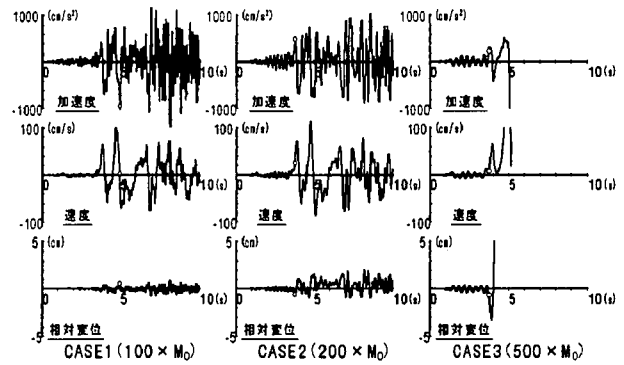


図-4 はり部の質量が異なる場合の応答の比較 (NS+UD)

4. 門型骨組構造の3次元地震動時刻歴応答解析

具体的な解析例を示し、考察する。

4.1 解析対象と解析条件

解析対象は、図-3に示したような門型の立体骨組構造である。構造の面内水平方向にNS方向を、面に垂直な方向にEW方向を定義している。解析は、柱の両支点部に、NS成分とUD成分が入力される、2次元的な挙動の場合と、NS、EW、UDの3成分が同時に入力される、3次元的な挙動の場合である。導入した上載荷重Pは対象構造の柱の降伏応力の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を考慮した複合非線形解析である。

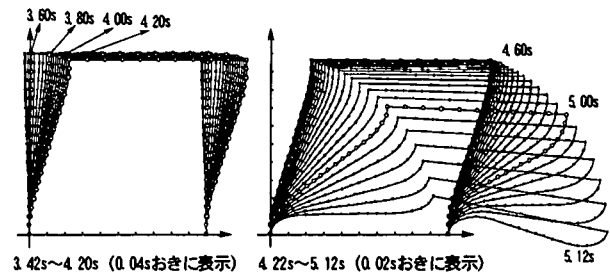


図-5 崩壊に至る変形の推移(実寸)
(CASE3: 500 × M₀)

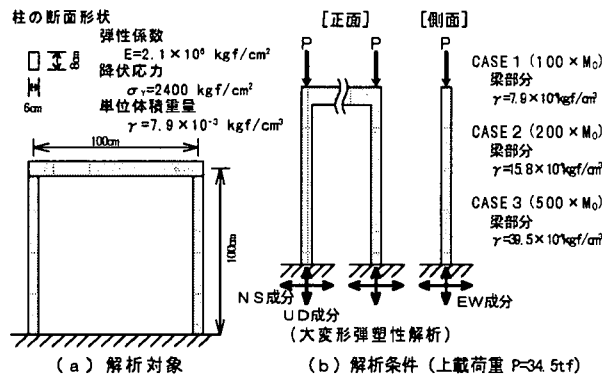


図-3 解析対象と解析条件

4.2 はり部の質量の違いによる応答の比較 (NS成分とUD成分)

一本の柱の全質量 M_0 を規準として、はり部の質量を $100 \times M_0$, $200 \times M_0$, $500 \times M_0$ の3種類に設定して、応答の違いを比較したものが図-4である。図には、柱頭部の応答加速度、速度および柱下端を規準とした相対変位を示した。塑性域が発生した時点に○印をつけているが、 $500 \times M_0$ の場合には、途中で崩壊に至っている。この際の、崩壊に至る変形の推移を図-5に示し、対応する柱の上、下端部の塑性域の進展の様子を図-6に示している。

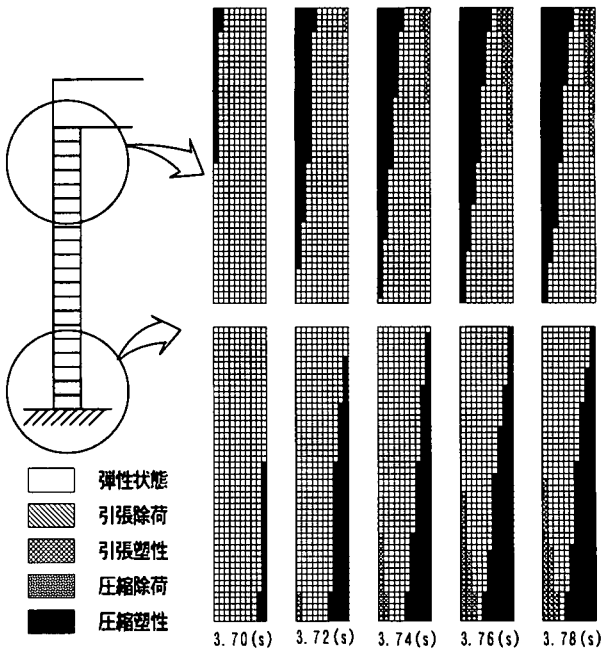


図-6 柱の上・下端の塑性域の進展の様子
(CASE3: 500 × M₀)

4. 3 NS, EW, UD 3成分が同時に入力される場合の応答解析

はり部の質量が $100 \times M_0$ の場合の構造に、NS, EW, UD の3成分が同時に入力される場合の、柱頭部の NS, EW, UD 3方向の応答加速度、速度および絶対変位を図-7に示す。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り、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-8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、崩壊直前の柱下端部の塑性域の分布の様子を図-9に示している。

4. 4 非線形時刻歴応答解析と耐震性能の評価について

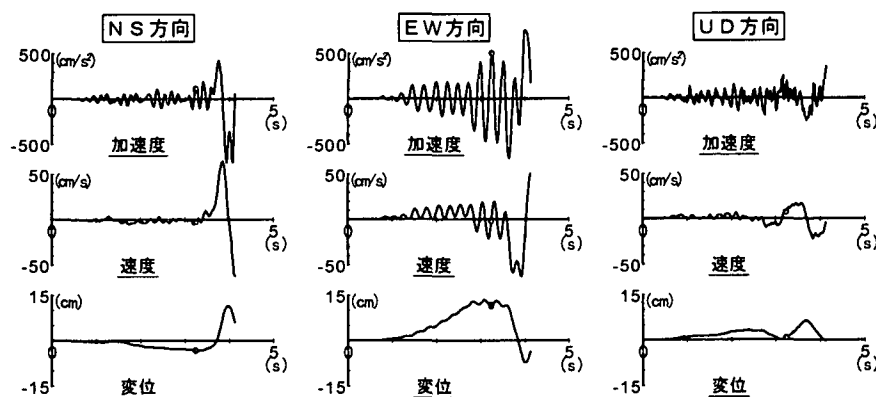
ここで対象としている構造は、鋼材を想定した、一様な充実矩形断面の部材で構成される、門型の、極めて単純なモデルである。したがって、図-8に示した、応答における絶対的な変形の推移と入力点の動きを除いた相対的な変形の推移を比較しても明らかなように、震度法や地震時保有水平耐力法など、地震力を静的な力に置き換えて耐震性能を評価する方法で、相当なレベルで、的確な耐力評価が可能なものである。

しかし、このような単純なモデルであっても、「構造

物に損傷が生じ、破壊に至るということまでを考慮して耐震設計する」、地震時保有水平耐力法との対応においては、柱上部に考慮する質量、既載の上載荷重などの影響、面内と面外挙動における、塑性ヒンジの発生位置に関わる性状など、単にそれを大き目に取り込めば、安全側の評価につながるといった図式には乗らない部分が多くある。特に、鋼製橋脚では、局部座屈の影響と橋脚に求められるじん性など、構造工学的に、兼ね合いが相当に難しい問題を多く内包している。

解析法の観点から見れば、局部座屈の評価や上載荷重が限界状態に及ぼす影響の評価は、大変形問題であり、塑性ヒンジの評価は、材料非線形問題で、その解析法における位置づけも、解析の困難度も大きく異なるものである。解析法の実状を考えれば、むしろモデル化に、相当なレベルの工学的な判断を必要とする。

本来、動的解析は、設計の「照査」や「特殊な形状、構造を有する橋などにおいて、静的な評価法では適確に評価することができない、複雑な構造」に対する評価法として位置づけられているものである。「非線形性が複数箇所に生じる橋等」を、動的解析結果に基づいて「適切に」耐震設計するためには、相当な検討と経験を積み上げることが急務になると判断される。



柱頭部の応答加速度・速度・絶対変位 (○印は塑性域が発生した時点)

図-7 NS, EW, UD 3成分同時入力の場合の解析結果 ($100 \times M_0$: NS+EW+UD)

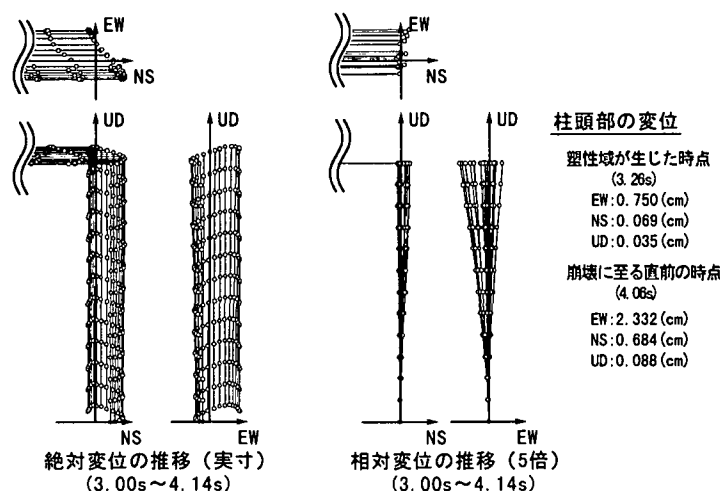


図-8 崩壊直前の変形の推移 ($100 \times M_0$: NS+EW+UD)

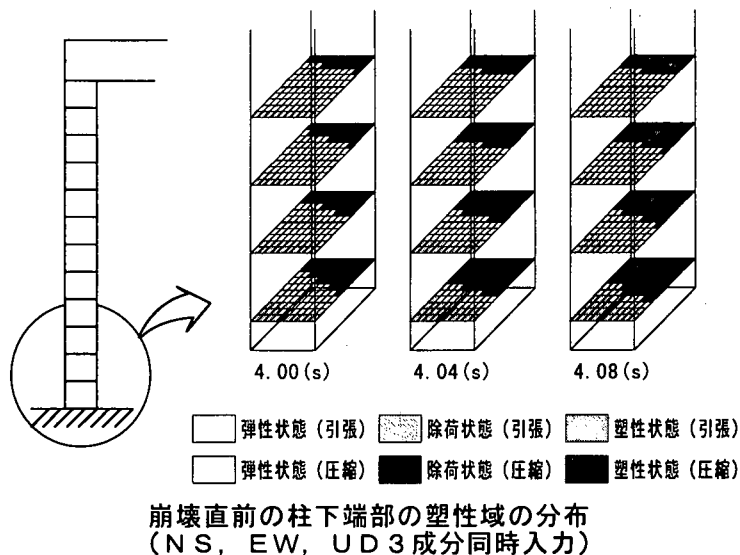


図-9 崩壊直前の柱下端部の塑性域の分布 ($100 \times M_0$: NS+EW+UD)

5. 軸力と水平力を受ける H 型鋼柱材の複合非線形解析の例

軸力と水平力を受ける H 型鋼柱材を対象とした、解析の事例をもとに、モデル化の問題や必要になるコンピュータの性能などについて考える。

5.1 軸力と単獨に水平力を加力した場合の解析

松井らは、一定の軸力を導入した下端固定、上端自由の H 型鋼柱材の自由端に、柱材の断面主軸と任意の角度を持って水平力を載荷し、大きく変形する場合の弾塑性挙動に関する実測結果を報告している¹⁵⁾。試験体の諸元など、実験の概要を図-10に示す。

筆者らは、立体骨組構造を対象とする部材要素内部の局所的な応力の評価精度を高める手立てを開発して、複合非線形問題の解析過程を高度化し、その検証を目的として、松井らによる実験に対応する解析を行い、比較検討した⁶⁾。図-11に示した解析結果の例は、3次元固体問題の最も一般的な 1 節点 3 自由度の 8 節点 6 面

体要素によって、さらに同じ問題を解析して比較したものである。柱の降伏応力の 30% の軸力が導入され、水平加力方向が 60° の場合の結果を挙げている。解析に用いた要素分割を図(a)に示し、解析によって得られた荷重-変位関係を、松井らの実測結果と比較して、図(b)に示している。図-12は、解析によって得られた、固定端近傍の塑性域の進展の様子を図示したものである。

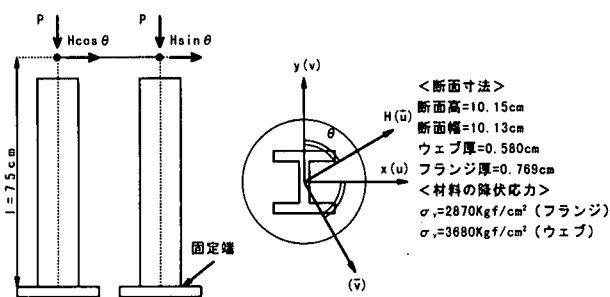


図-10 松井らによる実験の概要¹⁵⁾

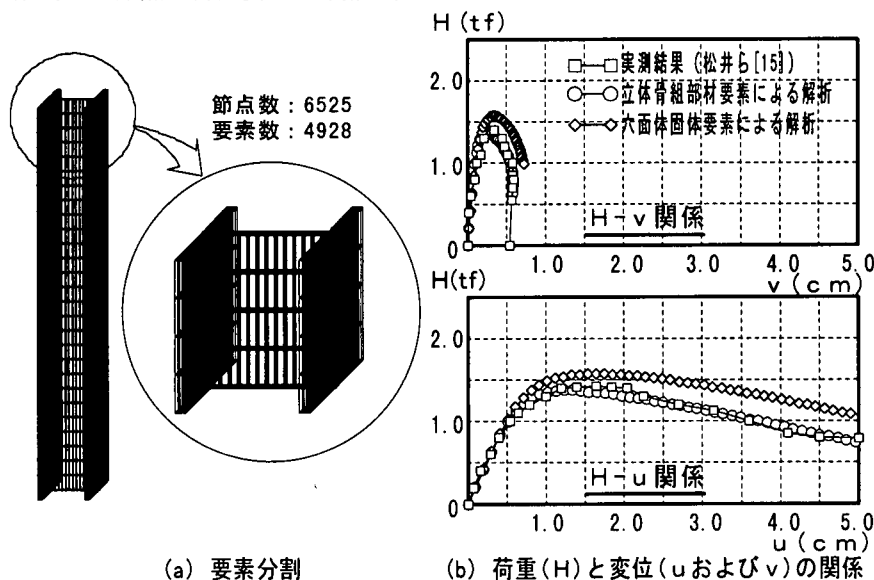
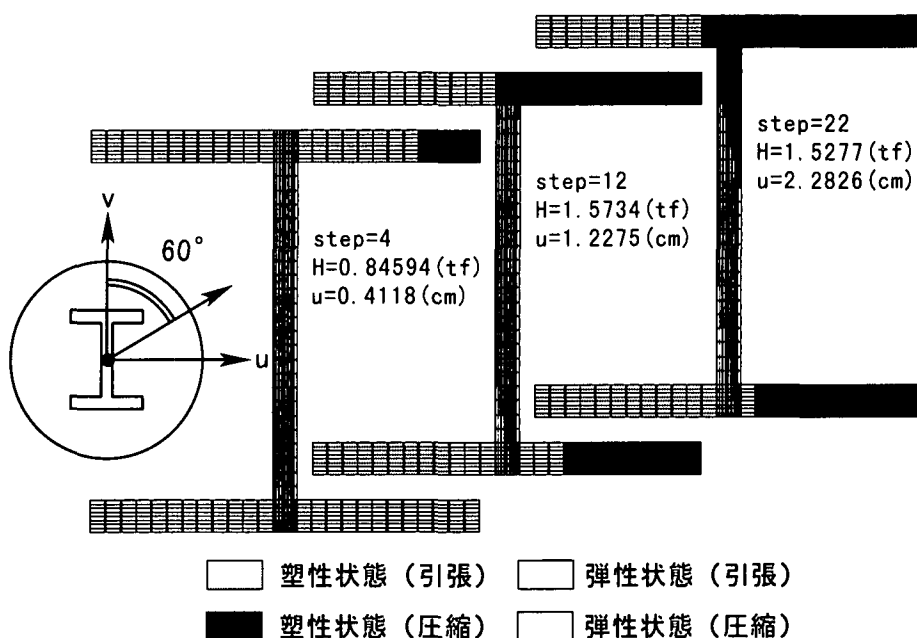


図-11 軸力と水平力を受ける H 型鋼柱材の複合非線形解析の例



図－１２ 固定端近傍の塑性域の進展の様子

5.2 一定軸力下で繰り返し水平力を受ける H 型鋼柱材の解析

図－１３は、柱の降伏応力の 30% の軸力が導入され、図中に示した 60° の方向に水平力を、繰り返し加力した場合の解析結果を、松井らの実測結果と比較して示したものである。解析における水平方向の繰り返し加力の方法は、加力方向変位 $\bar{u}$ の振幅を、材長の 1/100 にとって 1 サイクル、その後 1 サイクルごとに 1/100 ずつ増加させて、加力したものである。材料の弾塑性構成則は、単純な等方硬化のパリニアモデルを用いている。

解析によって得られた荷重－変位関係を松井らの実測結果と比較したものが図（a）である。図中、横軸は加力方向変位 $\bar{u}$ および加力方向と直角の方向の変位 $\bar{v}$ である。図中に○印で示した荷重位置に対応する、固定端近傍の塑性域の分布を、図（b）に示している。

松井らは、得られた荷重～変位関係についてその特徴を次のよう述べている。「H- $\bar{v}$ 関係は変位振幅が ± 0.01 のときは、各サイクルで同一の履歴を示し安定しているが、 ± 0.02 になると、変位 $\bar{v}$ は 1 方向に偏り始め、さらに変位振幅が ± 0.03 となると最初のサイクルで変位 $\bar{v}$ が急増し、試験体は軸力が維持できずに崩壊する。一方、H- $\bar{u}$ 関係は、変位 $\bar{v}$ が多少 1 方向に偏り始めてもそれほど大きな影響を受けず、原点に対して点対称となる紡錘形の履歴を示す。」

このことは、加力方向には、変位を強制的に制御していることによる端部の拘束の影響とも考えられる。

解析においては、H- $\bar{u}$ および H- $\bar{v}$ 関係ともに安定した解が得られているが、変位振幅ごとに最大耐力が上っていく。いずれにしても、一方向に単調に載荷する場

合に比べて、繰り返し加力の場合には、解析による評価精度が相当落ちている。

解析で採った、材料の等方硬化モデルなど、改善の余地は残るが、実測の際の試験体端部の拘束条件に関する微妙な影響などは、解析では再現することが不可能な領域となる。

5.3 3次元解析に要するコンピュータの性能

図－１１に要素分割の様子を示したが、節点数は高々 6,525 であり、要素数は 4,928 である。解析の要になるのは疎な係数マトリックスで表わされる大規模な連立 1 次方程式を解く過程であり、スカイライン記憶法に基づくコレスキー法は、ごく一般的に用いられている解法である。この解法を採った場合に、一様断面の一本の柱材の解析に要するコンピュータの記憶容量が 104MB にもなる。また、繰り返し加力の場合の解析には、スーパーコンピュータ CRAY C916/12256（東工大情報センター）で約 9 時間の計算時間を要している。

実現象の解明を目的とする場合の解析対象は、形状や構造詳細の忠実なモデル化などに精魂を込めなければならなくなるので、直ぐに膨大な規模の問題となり、現在の相当なレベルのコンピュータを用いる場合でも、解析が不可能になる。したがって、現状で実のある解析を行うためには、数値モデルの作成に際して、解析上の限界を踏まえた上での、工学的、力学的に相当な水準の判断力や決断力が必要になるのが普通である。当然のことではあるが、モデル化の過程の質的な違いは、得られる解の信頼性に大きく影響することになる。

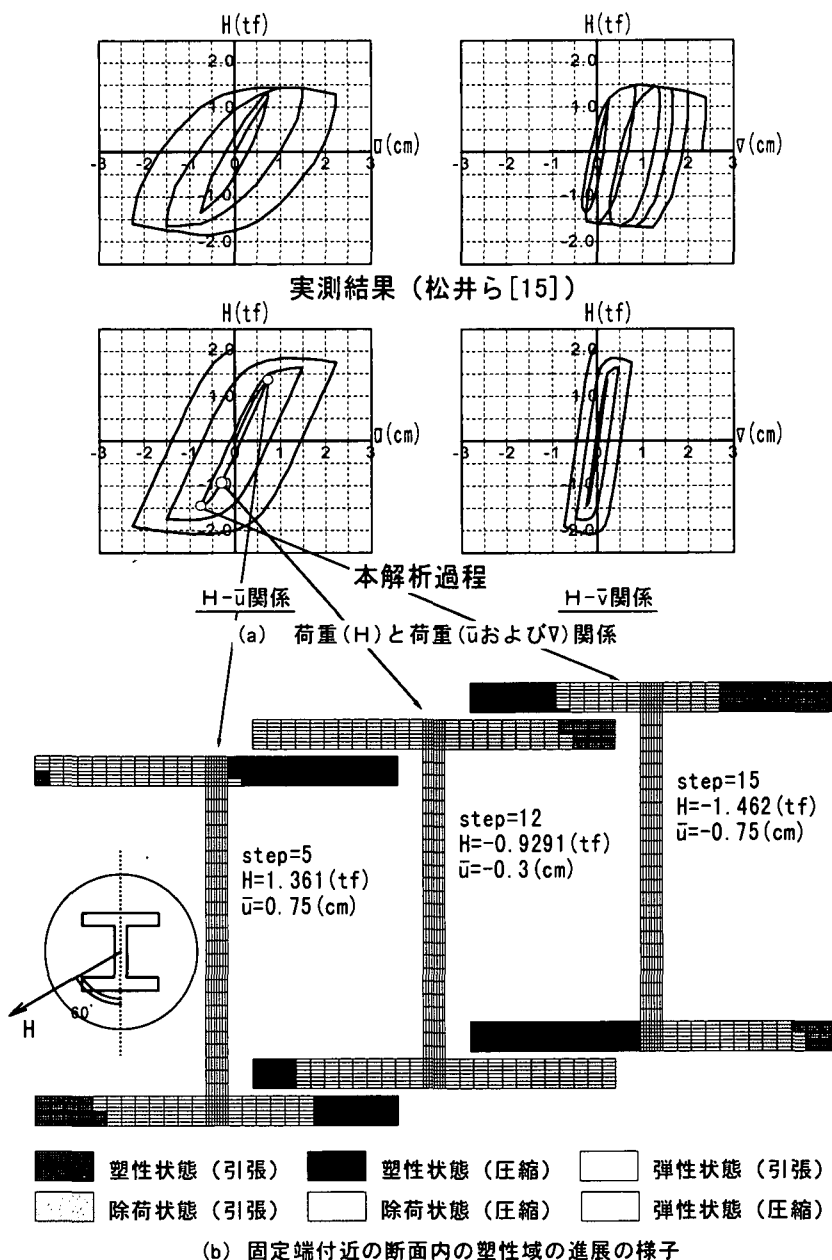


図-1.3 軸力と繰り返し水平力を受ける H 型鋼柱材の複合非線形解析の例

6. おわりに

大きな変形と材料非線形をともなう、複合非線形問題を対象とする動的解析に焦点を絞り、単純な構造系を対象とする解析事例をもとに、非線形解析の実態を示した。大きな変形を安定に追跡するためには、収束計算を含む、相当に複雑なアルゴリズムに依らなければならなくなる。また、部材内部で連続的に変化する、材料の非線形挙動を的確に評価するためには、それなりの評価点が必要になり、増分もそれなりに小さく採ることが必要になる。

したがって、複合非線形問題を対象として、実効のある解析結果を手にするためには、本来、相当な記憶容量と計算時間を必要とするものである。特に、複数の地震動入力成分を考慮する、非線形時刻歴応答解析に関しては、なお数多くの未解決の困難な課題を抱えており、対

応が可能なソフトはいろいろあっても、特に得られる解の信頼性の面で、解法自体が未だ確立されているとは言えないのが実状である。

今回改訂された道路橋示方書においては、非線形の効果を考慮した動的解析の位置づけが明確にされている。一方で、設計法の核となる地震時保有水平耐力法による設計過程には、随所に相当高度な判断力が必要になるために、直接、非線形解析の活用に期待が寄せられている一面がある。

非線形解析を設計過程に位置づけるためには、一般の技術者のレベルで、安定に、信頼度の高い解が得られることが、大切な基準となる。前述したように、道路橋示方書における、目標とする橋の耐震性能に関わる規定（「健全性を損なわない」：「地震時に構造部材に生じる応力度や変位が許容応力度法により与えられる許容

応力度や許容変位以内に収まること、すなわち降伏状態を超えるような損傷を生じないこと] など⁴⁾) などを考慮すれば、対処すべき非線形領域の範囲は、自ずから定まる。

したがって、実質を重視して、対象とする非線形領域の範囲を限定して、解法の完成度を高めることが肝要であると判断する。また、当然のことであるが、解析の難しさは非線形性の程度によるので、解析の質的向上に向けての技術力の整備に際しても、対象とする非線形領域の範囲を見定めることが、重要な視点になると考える。

参考文献

- 1) 「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」(建設省, 平成7年2月)
- 2) 小川篤生, 緒方辰男; 動的解析による耐震性の調査, 基礎工, Vol.25, No.3, pp.29-33, 1997.3.
- 3) (社)日本道路協会; 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 平成8年12月
- 4) 田村敬一, 本田利器; 耐震設計で考慮する地震力と耐震設計の基本方針, 基礎工, Vol.25, No.3, pp.8-14, 1997.3.
- 5) 運上茂樹; 地震時保有水平耐力法による耐震設計, 基礎工, Vol.25, No.3, pp.15-22, 1997.3.
- 6) 吉田 裕, 松島亘志, 中野 修; 「立体骨組の複合非線形問題を対象とする汎用解析過程の高度化」 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18巻 pp.301-306(1994)
- 7) 吉田 裕, 石川敏充; 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, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第1部(B), 686~687 (1996)
- 8) 吉田 裕, 児玉知之, 有井一晃; 立体骨組の複合

非線形問題を対象とした動的解析システムの構成, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第1部(A), 194~195 (1996)

- 9) 吉田 裕, 石川敏充; 構造複合非線形問題を対象とする地震動応答解析法の高信頼度化, 日本応用数理学会平成8年度年会講演予稿集, 152~153 (1996)
- 10) K.J.Bathe, A.P.Cimento: Some Practical Procedures For The Solution of Nonlinear Finite Element Equations, Computing Meth.Appl.Mech.& Engng.22, 59-85, 1980.
- 11) 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.
- 12) 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)
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 松井千秋, 森野捷輔, 津田恵吾; 軸力と任意方向水平力を受けるH形鋼柱材の弾塑性性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第361号, pp.113-122, 1986

ON DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS INCLUDING GEOMETRIC NONLINEAR EFFECTS RELATED TO EVALUATION OF ULTIMATE BEARING CAPACITY OF BRIDGE PIER STRUCTURES DURING EARTHQUAKES

Yutaka YOSHIDA, Kazuaki ARII and Toshimitu ISHIKAWA

The 1996 Part V Seismic Design of the Design Specifications of Highway Bridges presents some provisions for dynamic response nonlinear analysis. The finite element direct integration analysis with large deformation and material nonlinearities is discussed in this paper, related to the evaluation of ultimate bearing capacity of bridge pier structures during earthquake. Numerical results of simple model structures, subjected to JMA Kobe Observatory Records, are shown to clarify the points of the argument.