

構造物の非線形地震応答解析における解析時の設定方法が解析結果に及ぼす影響

深尾 憲司

1. はじめに

兵庫県南部地震以後の耐震設計基準の改訂により、動的解析による構造物の地震時の動特性を精度よく把握することが重要視されている。それ故、解析において考慮することも多様化し、地震波・解析モデル・解析手法等様々な仮定や設定が導入されているが、再現性・精度を追求するためにも対象となる構造物や地盤条件に応じて適切な設定方法を選定して解析することが重要である。そこで、本研究では、それら解析時の設定の中で復元力モデル(M-φモデル)及び減衰の取り扱いに着目し、それらの設定方法が解析結果に及ぼす影響について検討する。

2. 研究内容

本研究では動的解析における設定のうち次の3つについて検討を行う。

- ① 非線形復元力モデル(M-φモデル)の算定に解析モデルの軸方向変形に伴う軸力変動を考慮することによる応答解への影響を検討する。
- ② 構造減衰の大きさの違いが応答解の安定性に及ぼす影響を検討する。
- ③ 動的解析における応答解の不安定(発散)要因でもある高次モードの応答に対する数値減衰^[1]の減衰性について把握する。

3. 解析手法

本研究における解析では、数値積分法に直接積分法を採用するためある条件下で次式に表される増分型運動方程式を逐次計算し、時間の経過する方向に積分して応答解を求める。

$$M\Delta\ddot{U} + C\Delta\dot{U} + K'\Delta U = \Delta F \cdots (1)$$

ここで、 M 、 C 、 K' は質量マトリクス、減衰マトリクス、接線剛性マトリクスを表し $\Delta\ddot{U}$ 、 $\Delta\dot{U}$ 、 ΔU 、 ΔF は、加速度、速度、変位、外力の増分ベクトルである。本解析では、直接積分法にNewmark β法を採用し、次の理論式に基づいて加速度、速度、変位を決定し逐次計算を行う。

$$\begin{cases} \dot{U}_{n+1} = \dot{U}_n + (1 - \gamma)\ddot{U}_n \Delta t + \gamma\ddot{U}_{n+1} \Delta t \\ U_{n+1} = U_n + \dot{U}_n \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\ddot{U}_n \Delta t^2 + \beta\ddot{U}_{n+1} \Delta t^2 \cdots (2) \end{cases}$$

また、本解析では橋脚の非線形復元力特性をM-φモデル(図1)により再現するが、研究内容①では軸方向変形に伴う軸力変動を考慮するため毎ステップごとに各要素のM-φモデルを更新し逐次計算を行う。研究内容②では解析時の減衰マトリクスをレイリー型に基づいて設定するが、その際基準モードの構造減衰の設定が応答解の安定性に及ぼす影響を検討する。図2にレイリー型のモード減衰定数を示す。研究内容③では式(2)におけるパラメータを $\gamma > 0.5$ で解析を行い数値減衰の高次モード応答に対する減衰性を検討する。図3に研究内容①における地震応答解析の解析フローを示す。

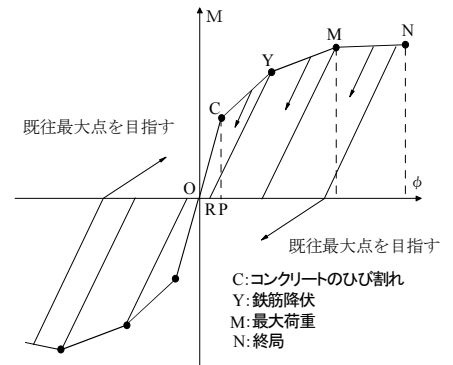


図1 M-φモデル

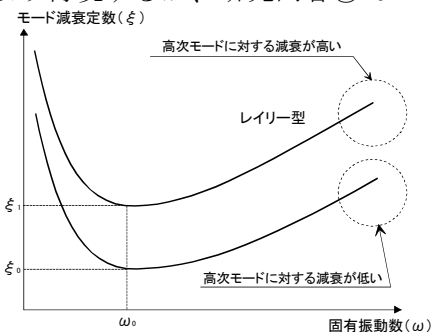


図2 モード減衰定数

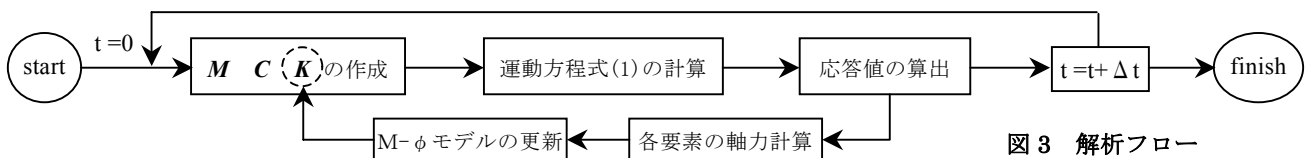


図3 解析フロー

4. M-φモデルの算定に軸力変動を考慮した地震応答解析

解析対象は、鉄道総合研究所が行った振動台実験に用いたRC門型ラーメン試験体とする。図4に実験に用いた試験体形状と解析モデルを示す。実験に用いた地震波は、兵庫県南部地震時のもので水平方向及び鉛直方向から入力させた。解析には復元力特性として橋脚の曲げ特性(M-φ)、軸方向鉄筋の抜け出しによる回転バネ特性(M-θ)^[2]を考慮した。また、本節における解析はすべて構造減衰2%で行った。

4.1 単調増加地震波を用いた地震応答解析

model1 に対し図5に示す10秒間で400galに達する単調増加地震波を入力した解析により軸力とM-φモデルの変曲点(図1のC、Y、M、N点)の相関を把握した(図6)。その結果C、Y点の曲率、曲げモーメント及びM、N点の曲げモーメントは軸力に比例し、逆にN点の曲率は軸力に反比例する結果となった。それにより、M-φモデルの傾き(曲げ剛性)は軸力増加時では大きくなり、軸力減少時で小さくなる結果となった。この解析時の履歴曲線(M、φ)を比較すると、軸力が増加する圧縮側で軸力一定とした場合のM-φモデルの外側を履歴し、軸力が減少する引張側で内側を履歴する結果(図7)となり、図6に示す相関が反映される結果となった。さらに、M-φモデルでは、損傷状況を各要素の曲率と変曲点の曲率により判別しているが、軸力変動を考慮しない場合のM-φ関係は常に一定であるため、今回のような左右対称の解析モデルであれば、橋脚要素の曲率も左右で等しく推移していくため圧縮側と引張側で損傷状況は等しくなるが、軸力変動を考慮することで軸力の増加する圧縮側と軸力の減少する引張側で変曲点の曲率の推移が異なりそれによる引張側と圧縮側の損傷状況の差が生じることも把握できた。

4.2 水平方向地震波のみを入力した地震応答解析

次に model1,2 に対し振動台実験に用いた水平方向の地震加速度を入力させ解析を行った。応答値において軸力変動の影響が最も表れたのが履歴曲線(M、φ)でありその結果は、model1,2 伴に軸力変動を考慮しない場合は軸力一定として算定したM-φモデルに沿った履歴(M-φモデルの剛性変化点と履歴曲線の傾きの変化点がほぼ一致している)であるのに対し、軸力変動を考慮することで圧縮側ではM-φモデルの外側を引張側では内側を履歴する結果となった(図8)。変位や加速度応答に関して、軸力変動を考慮したことによる影響は、モデルにより異なる結果となりmodel1と比較しmodel2の方が軸力変動を考慮したことによる影響が大きく表れたといえ、地震加速度が大きく、変形が大きな時刻にその影響がより顕著に表れる結果となった。

4.3 水平方向と鉛直方向の地震波を同時入力した地震応答解析

鉛直方向地震加速度に伴う、軸力の増大によりM-φモデルの変曲点の変化が大きくなったが、水平方向地震波のみを入力させた時と比較して応答値には大きな変化はない結果となった。それは、M-φモデルが加速度・変位といった応答値に対しては変曲点間の傾き(接線剛性)として反映さ

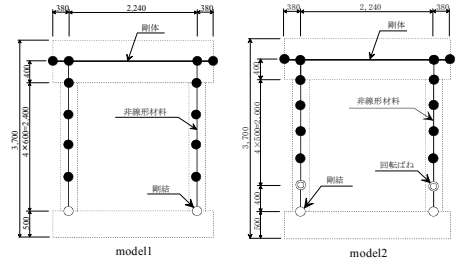


図4 解析モデル

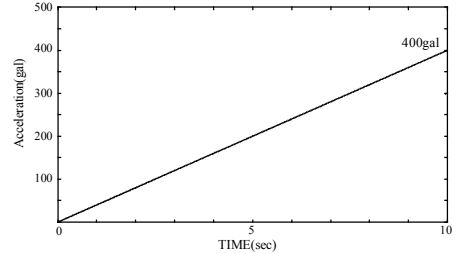


図5 単調増加地震波

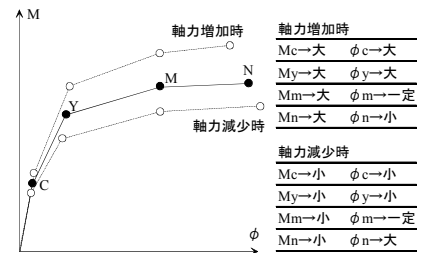


図6 軸力とM-φモデルの相関

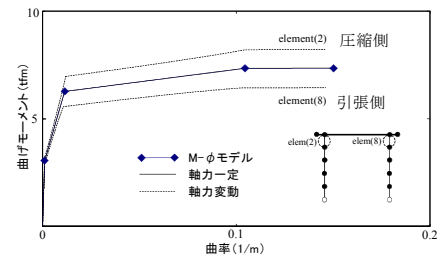


図7 履歴曲線

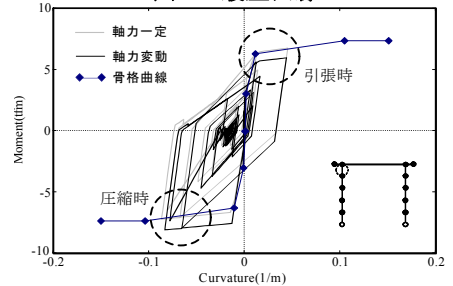


図8 履歴曲線(水平)

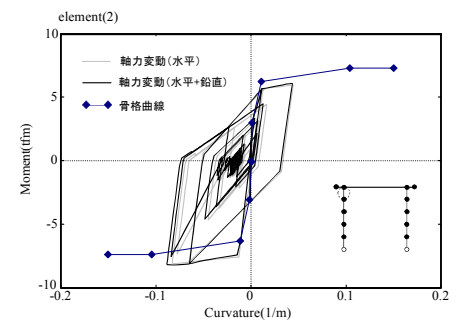


図9 履歴曲線(水平+鉛直)

れるため、軸力変動による変曲点(C、Y、M、N点)の変化は大きいですが、図 10 に示すように接線剛性の変化は小さく応答値に対し大きな影響がなかったことによると考えられる。しかし、本節の解析で軸力変動が非常に大きい場合M- ϕ モデルの変曲点の変化も大きくなり履歴曲線が精度を欠いた結果になる可能性を有していることが分かった。

5. 構造減衰の大きさの違いが解の安定性に及ぼす影響

解析対象は前節同様、振動台実験(鉄道総研)の試験体とし、解析モデルも図 4 の model1 を採用した。本解析では、解析時の減衰マトリクスをレイリー型減衰に基づいて設定するが、基準モードにおける構造減衰の設定が応答解の安定性に及ぼす影響を検討するため、構造減衰を 0.001~1%で設定し解析を行った。その結果、構造減衰を 0.001%及び 0.05%と非常に小さい値に設定し解析を行った場合は解析が途中で中断する結果となった。図 11 に示すように加速度応答等で解が発散したことによると考えられるが、これは図 2 に示すように基準モードで小さい構造減衰を設定したことで高次モードに対しての減衰も小さくなり、変位応答と比べ高次モードの応答が表れやすい加速度等で解が発散したと考えられる。図 12 に構造減衰を 0.001%に設定した場合と 1%に設定した場合の加速度応答に関するフーリエスペクトルを比較する。構造減衰を 1%に設定した場合、高振動数領域で大きな減衰を示しているのに対し 0.001%に設定した場合は高い振動数が卓越し、高次モードに対する減衰の違いが応答解に表れたといえる。

6. 数値減衰の減衰性についての検討

6.1 高次モード応答に対する減衰性

本節では、動的解析において時として解の中断や発散を引き起こす高次モードの応答に対し効果的な減衰を与えられる数値減衰の減衰性について検討を行った。そのため、図 11 の解が発散したケースに対し、Newmark β 法の係数 $\gamma=0.7$ として解析を行い結果を比較した。図 13 に加速度応答を図 14 に加速度応答に関するフーリエスペクトルの比較を示す。図 11、13 の比較より $\gamma=0.7$ に設定したことで応答解の発散による解析の中断がなくなり、安定した解が得られることが分かった。これは、図 14 に示すように高振動数領域に対し大きな減衰が付加されたことによると考えられる。変位応答には γ を 0.7 に設定したことによる影響はほとんど見られなかった(図 15)。次に、 γ の大きさの違いによる減衰性の違いについて検討を行った。その結果、変位応答に関しては γ 値の大きさによる応答の変化はほとんど表れなかったが、加速度及び軸力応答に関しては、高振動数領域に限って違いが表れ、 $\gamma=1.5$ で解析した方が小さく応答する結果となった(図 16)。これらの結果から、数値減衰は低振動数領域(低次モード)に対しては影響を与えることなく、発散要因である高振動数領域(高次モード)に対し限定的に減衰を加えることができ、最大応答値に予期せぬ減衰を

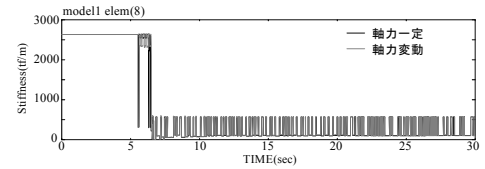


図 10 接線剛性の比較

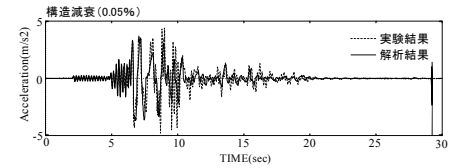
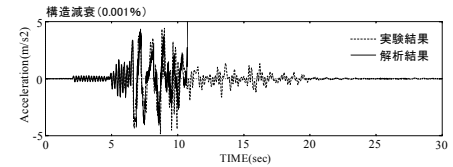
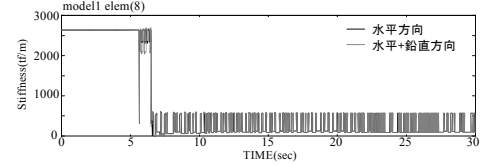


図 11 解の発散

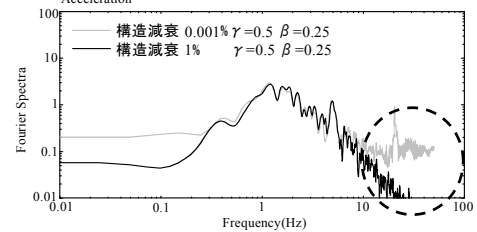


図 12 フーリエスペクトルの比較

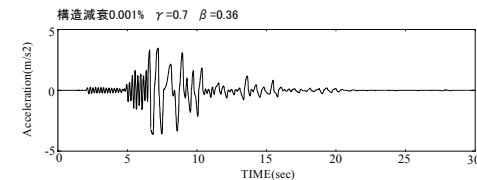


図 13 加速度応答 ($\gamma=0.7$)

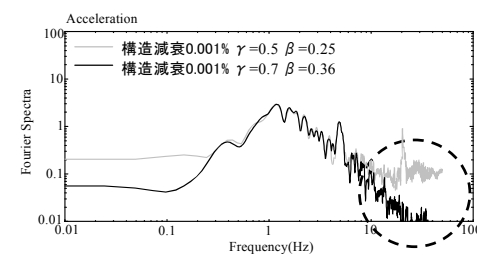


図 14 スペクトルの比較 (γ 値)

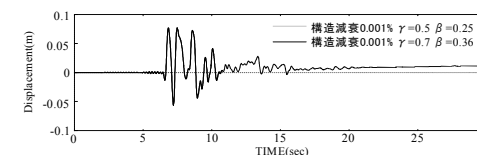


図 15 変位応答 ($\gamma=0.7$)

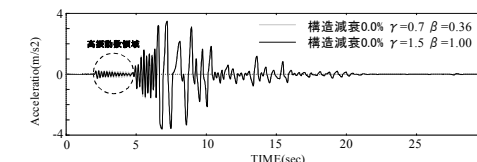


図 16 応答値の比較 (γ)

与えることなく安定解を求めることには有効であるといえる。

6.2 数値減衰の減衰力

本節では、数値減衰の減衰力を検討するため Newmark β 法のパラメータ γ を変化させ粘性減衰の減衰力と比較を行うことでその大きさを評価する。そこで、図 17 に示す 1 自由度強制振動系において構造減衰を与えず数値減衰のみ付加し γ を 0.7~1.5 で変化させ解析を行った。その変位応答結果を図 18 に、数値減衰を与えず構造減衰のみ付加し減衰定数を 0.005~0.05 で変化させ解析を行った変位応答結果を図 19 に示す。また、対数減衰比を用いて見かけ上の減衰力の大きさを比較した。その結果を図 20 に示す。これらの結果から、1 自由度強制振動系における自由振動の卓越する振動領域においては数値減衰による減衰が顕著に表れ、 $\gamma=1.2$ で解析を行った場合は、 $\xi=0.02$ で解析を行った場合とほぼ同等の減衰力が確認できる。しかし、定常状態以降の振動領域においては、 γ の違いによる減衰の違いはほとんど表れない結果となった。

次に、多自由度系についても同様に数値減衰による減衰力を評価するため、図 4 の model1 に衝撃波を加え自由振動させる際、 γ を 0.7~1.5 で変化させて解析を行い、減衰定数 ξ を 0.005~0.03 で変化させて解析した構造減衰の減衰力と比較した(図 21、図 22)。その結果、多自由度自由振動系においても 1 自由度系同様数値減衰による減衰が顕著に表れ、 $\gamma=1.2$ で解析を行った場合は、減衰定数 $\xi=0.01$ で解析を行った場合とほぼ同等の減衰力を有しているといえる。しかし、動的解析のような多自由度強制振動系では、図 15 の変位応答からも分かるように γ の違いによる見かけ上の減衰に大きな影響はなく、1 自由度強制振動系における定常振動(強制振動)と同様の結果となった。

7. 結論

本研究の結果から振動台実験(鉄道総合研究所)の試験体を対象とした動的解析においては、非線形復元力特性(M- ϕ モデル)の算定に、変形に伴う軸力変動を考慮することによる応答値への影響は小さいといえる。それは、軸力変動による変曲点(C、Y、M、N点)の変化は大きい、傾き(曲げ剛性)の変化は小さく軸力一定とした場合と比較し接線剛性に大きな影響がなかったことによると考えられる。

また、多自由度を有する振動系の動的解析においてレイリー型で減衰を考慮する場合、構造減衰を 0.1%以下の非常に小さい値に設定すると加速度応答等で高次モードが卓越し発散する可能性を有しているといえる。そのため、解の安定性及び精度の観点から構造減衰は 1%以上に設定するのが良いといえる。さらに、このような高次モードの応答が原因で解析が中断する場合は、Newmark β 法におけるパラメータ γ を 0.7 程度の値に設定することで、低次モードの応答に対してはほとんど影響を与えず、発散要因になっている高い振動数の応答に対してのみ大きな減衰を与えることができ、安定した応答解を期待できるといえる。

参考文献

- [1] 土木学会：阪神大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査の検証—解析手法の適用と比較—
- [2] 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計編，1998

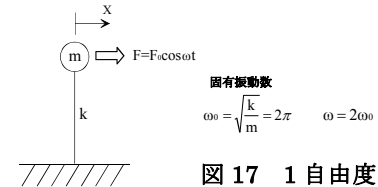


図 17 1 自由度系

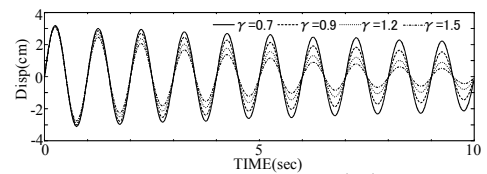


図 18 減衰力の比較(γ)

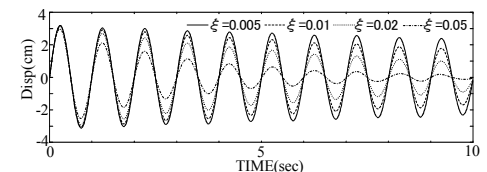


図 19 減衰力の比較(ξ)

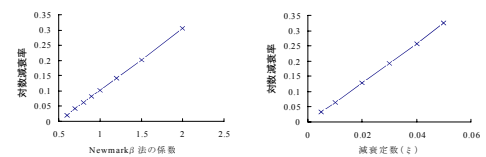


図 20 対数減衰比の比較

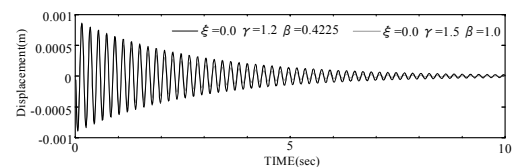


図 21 減衰力の比較(多自由度、 γ)

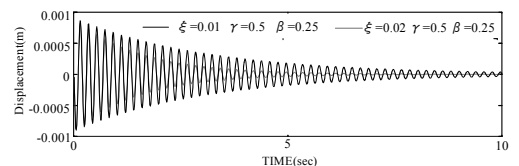


図 22 減衰力の比較(多自由度、 ξ)