

第5回 耐震解析 (その2) 耐震解析の基礎技術

講師：藤田 雅義*

1. はじめに

前回 (その1) の講座では耐震解析の基礎知識と題して、耐震設計の基本、耐震設計の流れ、耐震解析の種類と特徴について解説しました。

今回 (その2) の講座は、耐震解析の基礎技術と題して、動的解析モデルの作成方法、解析結果に対する妥当性の確認方法について解説します。

本講座で対象とする構造物はPC 3径間連続ラーメン箱桁橋としています。ラーメン橋は地震時の挙動が複雑な橋に分類され、耐震性能2と耐震性能3の照査に動的照査法が用いられます。したがって、ラーメン橋の耐震解析の主流となっている動的解析を中心に解説します。

なお、PC 3径間連続ラーメン箱桁橋の架設工法は、張出し架設工法を対象としています。

2. 動的解析モデルの作成方法

図-1に本講座で対象とするPC 3径間連続ラーメン箱桁橋の全体モデル図を示します。

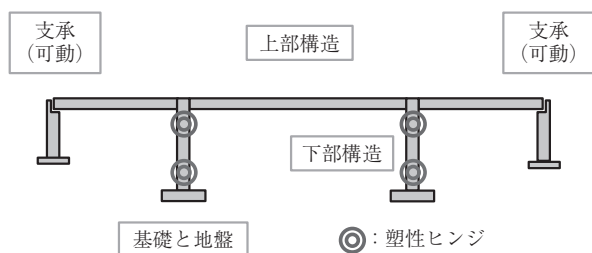


図-1 全体モデル図 (橋軸方向解析モデル)

PC ラーメン橋は、上部構造、下部構造、基礎と地盤、支承によって構成され、それぞれをはり要素やばね要素としてモデル化します。

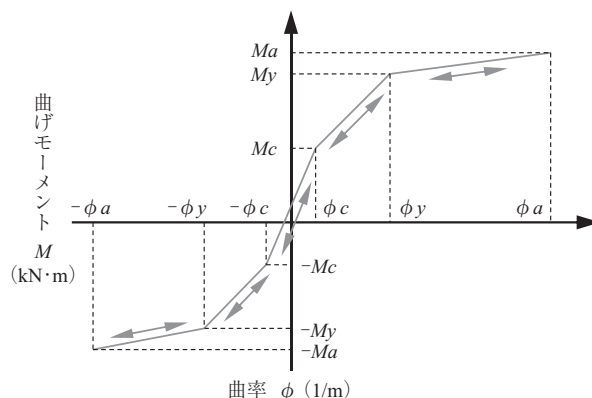
動的解析では、地震エネルギーを吸収する要素として、塑性ヒンジのモデル化がとくに重要です。塑性ヒンジの設置箇所は図-1に示すように、橋軸方向の解析では橋脚上下端に設定します。橋軸直角方向の解析では曲げモーメントが橋脚下端側で卓越するため、橋脚下端のみに設定します。

また、動的解析の初期状態や減衰特性の設定方法は、動的解析を実施するうえで重要な項目となることから、それぞれを個別に解説します。

2.1 上部構造

上部構造は直接活荷重が作用するため、耐震設計上の供用性の観点から塑性化させないことが基本です。上部構造が支承で支持される連続桁橋の場合は、地震による断面力が支配的とならず、上部構造の照査を省略できることから、線形はり要素としてモデル化します。

PC ラーメン橋のように地震の影響が設計上支配的となる場合は、経済性の観点から上部構造の一部に副次的な塑性化を許容します。ただし、塑性化を考慮する場合であっても、損傷は軽微なものに抑え、恒久復旧を行わずとも長期的な供用性を維持することが求められます。この場合は、上部構造を非線形はり要素としてモデル化し、骨格曲線^{a)}をエネルギー吸収効果のない非線形弾性モデルとします (図-2)。



Mc: ひび割れ時曲げモーメント ϕ_c : ひび割れ時曲率
 My: 鉄筋降伏時曲げモーメント ϕ_y : 鉄筋降伏時曲率
 Ma: PC 弾性限界時曲げモーメント ϕ_a : PC 弾性限界時曲率

図-2 非線形弾性モデル (上部構造)

なお、動的解析モデルは構造物の振動特性を適切に表現できるように、上部構造要素を分割します。一般的な連続桁橋の場合は、1~2次の固有振動モードを考慮できればよいため、各支間を10等分程度に分割します。PC ラー

* Masayoshi FUJITA : JIP テクノサイエンス (株) 建設ソリューション事業部 東京技術営業部

ン橋の場合は、施工時のブロック割や照査位置を考慮して、上部構造設計時のモデル分割としています（図 - 3）。

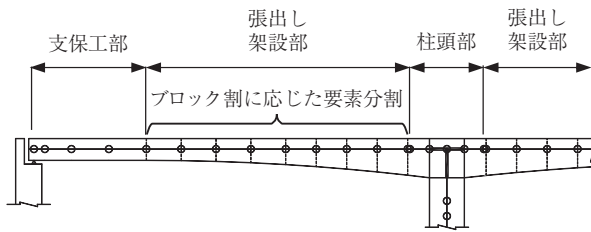


図 - 3 上部構造の解析モデル

2.2 下部構造

下部構造の解析モデルを図 - 4 に示します。下部構造は、一般に塑性ヒンジと塑性ヒンジ以外の橋脚一般部、フーチングとして構成され、それぞれをはり要素やばね要素としてモデル化します。

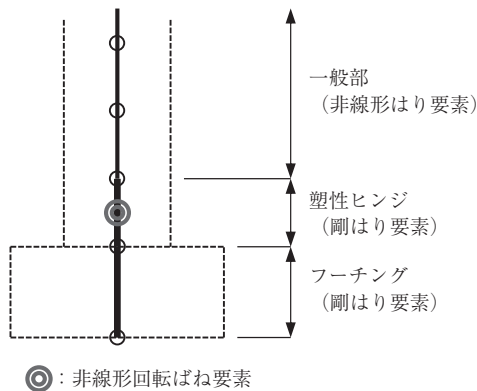


図 - 4 下部構造の解析モデル

橋脚の要素分割方法は上部構造と同じで、橋の応答に影響を与える固有振動モードを適切に表すことができるようにします。具体的には、橋脚一般部の要素長を塑性ヒンジと同程度の長さになるように要素分割します。

塑性ヒンジは、2つの剛はり要素の中央に非線形回転ばね要素を設定することによりモデル化しています。非線形回転ばね要素は、降伏点、限界状態に相当する点からなるバイリニア型の履歴モデル^{b)}とします（図 - 5）。

履歴特性は、最大点指向の剛性低下型 Takeda モデルを用います。これは、地震力の繰返し作用を受けると過去の最大点を目指し、塑性率に応じて要素剛性が低下するという鉄筋コンクリートの特性を表現しています。

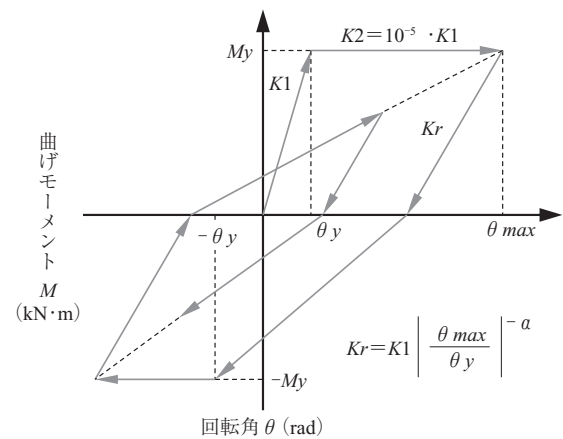
また、塑性ヒンジ以外の橋脚一般部は、非線形はり要素としてモデル化します。

履歴特性は塑性ヒンジと同様に、最大点指向の剛性低下型 Takeda モデルを用います。ただし、横軸の回転角 (θ) を曲率 (ϕ) に変更することが必要です。

フーチングは、橋脚などほかの構造要素と比べて十分に剛性が高いため、剛はり要素としてモデル化します。

2.3 基礎と地盤

基礎は一般には降伏しないように設計され、また、地盤



$K1$: 降伏剛性 θ_y : 降伏回転角
 Kr : 除荷剛性 θ_{max} : 最大回転角
 a : 除荷時剛性低下指数 (0.5)

※ 非線形はり要素の場合、横軸の回転角 (θ) は曲率 (ϕ) になります。

図 - 5 非線形履歴モデル (下部構造)

は非線形性が強い特性を示しますが、一般にはその非線形特性を等価剛性とします（図 - 6）。このため、基礎と地盤間の抵抗特性は、等価剛性を用いた線形ばね要素としてモデル化します。

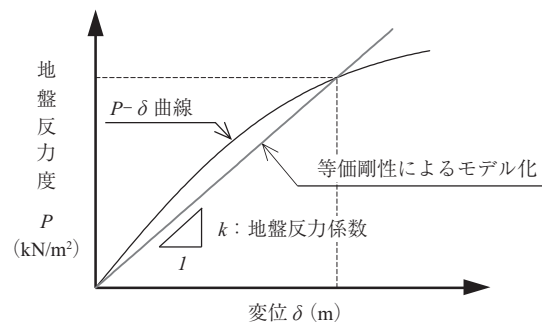


図 - 6 地盤反力係数を等価剛性として示した例

具体的には、基礎と地盤間の抵抗特性は集約ばねとしてモデル化します（図 - 7）。集約ばねは、水平ばね、鉛直ばね、回転ばねを、1つのばね要素として集約したものです。

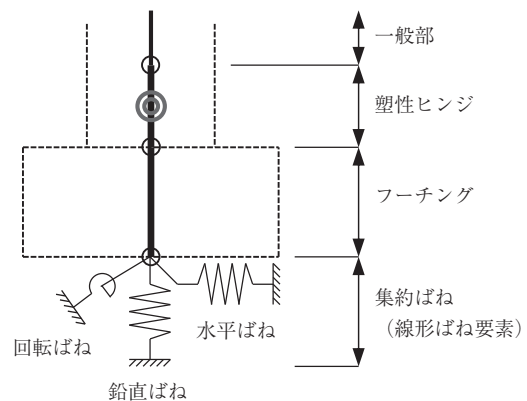


図 - 7 基礎と地盤の解析モデル

なお、集約ばねは、地震時に地盤に生じる変形に相当する地盤の剛性から地盤反力係数を求めて算出します。このため、道路橋示方書V耐震設計編¹⁾で示される地盤の動的せん断変形係数を用いて算出します。

2.4 支 承

支承は、上部構造に作用する荷重を下部構造へ伝達するとともに、上部構造の温度変化などによる橋軸方向の伸縮やたわみによる回転変位に追従できる機能を有しています。

動的解析モデルでは、荷重の伝達や変形を適切にモデリングする必要があり、支承条件に応じてモデル化を変えています。道路橋示方書に基づいた支承のモデル化の例を表-1に示します。

表 - 1 支承のモデル化の例¹⁾

支承条件	橋軸方向	橋軸直角方向	鉛直方向	橋軸周	橋軸直角周	鉛直軸周
固定支承	拘束	拘束	拘束	拘束	自由	自由
可動支承	自由	拘束	拘束	拘束	自由	自由
弾性支承	ばね	ばね	拘束	拘束	自由	自由

2.5 動的解析における初期状態

動的解析を行う前に、橋の各部材の初期状態を適切に考慮します。本講座で対象としているPCラーメン橋では、架設ステップやクリープ・乾燥収縮の影響を考慮し算出した死荷重時断面力を初期状態とします。

図-8にPCラーメン橋の死荷重時断面力の例を示します。

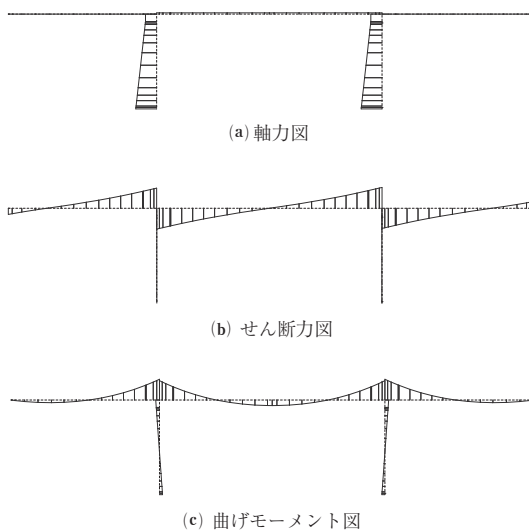


図 - 8 PC ラーメン橋の死荷重時断面力の例

2.6 減衰特性

橋の減衰特性は、部材の塑性化による履歴減衰、部材の粘性抵抗により生じる粘性減衰、振動エネルギーの地下逸散減衰などに分類されます。

これらの減衰を個々に評価することは難しいため、各構造要素ごとに規定されている減衰定数の標準値(表-2)を用いて固有値解析を行い、各固有振動モードごとのモー

表 - 2 各構造物要素の減衰定数の標準値¹⁾

構造部材	線形部材としてモデル化する場合	非線形履歴によるエネルギー吸収を別途考慮するモデルを用いる場合
上部構造(PC・RC)	0.03	-
弾性支承	0.03	-
RC 橋脚	0.05	0.02
基 礎	0.1 : I 種地盤上の基礎 およびII種地盤上の直接基礎 0.2 : 上記以外の条件の基礎	-

ド減衰定数を求めます。モード減衰定数は、質点の速度に比例する粘性減衰として設定されて、動的解析に用いられます。

粘性減衰の設定方法はいくつか存在し、質量行列に比例する質量比例型減衰 (aM)、剛性行列に比例する剛性比例型減衰 (βK)、両者を合成させた Rayleigh 型減衰 ($aM + \beta K$) の3種類がよく知られています(図-9)。

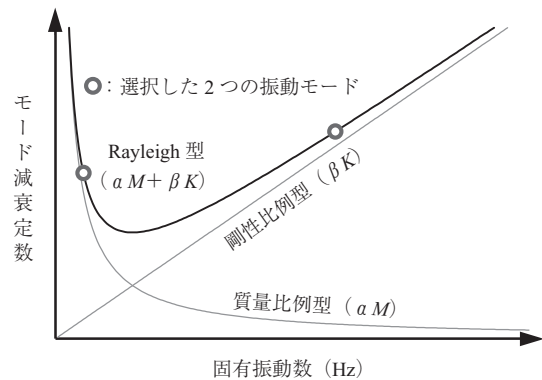


図 - 9 粘性減衰の設定方法

質量比例型減衰の特性は、固有振動数とモード減衰定数の関係が反比例することです。剛性比例型減衰の特性は、固有振動数とモード減衰定数の関係が比例することです。このため、質量比例型減衰は質量が大きく固有振動数が小さいときに、また、剛性比例型減衰は剛性が高く固有振動数が大きいときに、粘性減衰は大きくなります。

一方、Rayleigh 型減衰は2つの振動モードを選択することにより粘性減衰を評価します。したがって、Rayleigh 型減衰は広い範囲の固有振動数領域で、意図した減衰特性を設定できる特徴があります。

なお、道路橋示方書では、Rayleigh 型減衰モデルを粘性減衰の標準としています。したがって、使用実績は Rayleigh 型減衰モデルが最も多くなっています。

3. 解析結果に対する妥当性の確認方法

動的解析は入力項目や出力項目が多いため、解析が終了後に解析結果の妥当性を確認することが必要です。

ここでは、解析結果に対する妥当性の確認方法として、固有値解析、最大応答変位図、最大応答断面力図、時刻歴図、履歴図、粘性減衰について、ポイント解説を行います。

3.1 固有値解析

図 - 10 は PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋の固有振動モード図とともに固有周期, 固有振動数, 有効質量比⁴⁾を示したものです。固有振動モードの次数は 1 ~ 4 次まで示しており, 固有周期が大きい順に並んでいます。

固有値解析の結果確認は, 橋の固有振動特性を把握することから始めます。

図 - 10 (a) は 1 次の固有振動モード図で, 橋が並進挙動⁴⁾しています。水平方向の有効質量比は 66.8 % と大きいいため, 地震時の主要モードとすることができます。

図 - 10 (b) に示す 2 次の固有振動モード図と図 - 10 (d) に示す 4 次の固有振動モード図は, 主に上部構造が上下に振動しています。水平方向の有効質量比は 0.0 % であるため, 水平方向地震の応答に寄与しないことがわかります。

図 - 10 (c) は 3 次の固有振動モード図で, 上部構造は鉛直方向に逆対象の挙動を示しつつ, 下部構造は並進挙動を示しており, 全体的には水平方向 2 次のモード特性となります。水平方向の有効質量比は 5.0 % であるため, 水平方向地震に影響を与えるモードであることがわかります。

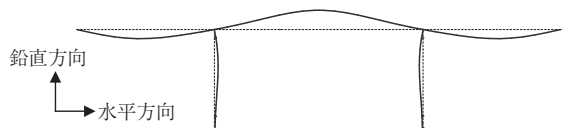
さらに, 主要モードの固有周期を確認します。筆者が経験した PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋の固有周期は, 0.8 ~

固有周期 $T=1.214$ (s) 水平方向有効質量比: 66.8 %
固有振動数 $f=0.824$ (Hz) 鉛直方向有効質量比: 0.0 %



(a) 固有振動モード図 (1 次)

固有周期 $T=0.483$ (s) 水平方向有効質量比: 0.0 %
固有振動数 $f=2.072$ (Hz) 鉛直方向有効質量比: 0.9 %



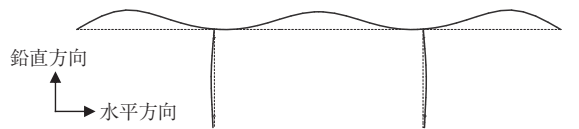
(b) 固有振動モード図 (2 次)

固有周期 $T=0.306$ (s) 水平方向有効質量比: 5.0 %
固有振動数 $f=3.267$ (Hz) 鉛直方向有効質量比: 0.0 %



(c) 固有振動モード図 (3 次)

固有周期 $T=0.239$ (s) 水平方向有効質量比: 0.0 %
固有振動数 $f=4.189$ (Hz) 鉛直方向有効質量比: 23.0 %



(d) 固有振動モード図 (4 次)

図 - 10 固有振動モード図

2.0 秒の範囲となります。本講座の場合は, 主要モードの固有周期が 1.214 秒であるため, 経験上妥当であると判断できます。ただし, 規模が大きい橋梁や極端に高い橋脚の場合は, 固有周期がさらに長くなります。

3.2 最大応答変位図

図 - 11 は PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋の最大応答変位図を示したものです。

着目するポイントは, 最大応答変位図 (図 - 11) と主要モードの形状 (図 - 10 (a)) が近似しているか確認します。両者が近似している場合は, 正しく解析できたという 1 つの判断材料になります。

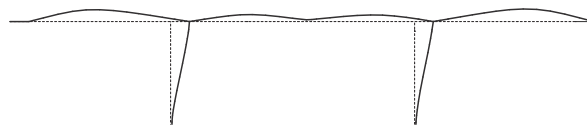


図 - 11 最大応答変位図

また, 最大応答変位図は, 支承ならびに基礎と地盤の集約ばねの境界条件の設定に, 間違いがないか確認することに役立ちます。

3.3 最大応答断面力図

図 - 12 は PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋の最大応答断面力図を示したものです。

最大応答断面力図は, 構造形式に応じた断面力が発生しているか確認します。PC ラーメン橋の場合は, 上部構造と下部構造が交差する剛結部や下部構造下端の曲げモーメントが卓越し, 大きくなっていることを確認します。

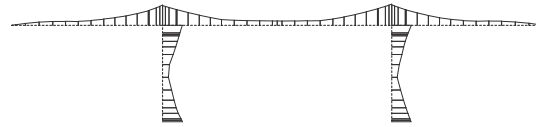
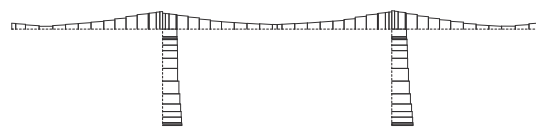
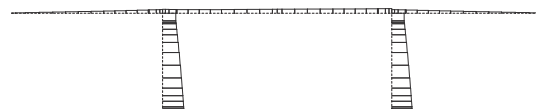


図 - 12 最大応答断面力図

3.4 時刻歴図

図 - 13 は時刻歴図で, 上部構造支間中央の節点位置の応答変位と入力加速度を重ね合せています。本講座では, 平成 7 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台地盤上 NS 成分 (呼び名: II - I -1)¹⁾ の加速度を使用しています。

着目するポイントは, 応答変位が入力加速度と大きく異なっていないか確認します。図 - 13 の場合は, 応答変位

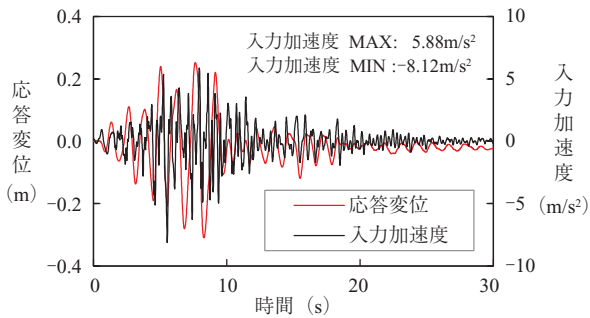


図 - 13 時刻歴図 (応答変位・入力加速度)

はやや長周期化していますが、波形分布はおおむね近似しており、解析が正常に終了したと判断できます。

時刻歴図のほかの利点は、入力波形が最終ステップまで正常に解析できているかを、容易に確認できることです。

図 - 14 は、上部構造支間中央節点位置の応答加速度図です。解析時間 0～9 秒までの応答加速度の最大最小値は $\pm 10 \text{ m/s}^2$ 程度で推移していますが、10 秒以降は $\pm 60 \text{ m/s}^2$ 程度で推移しています。

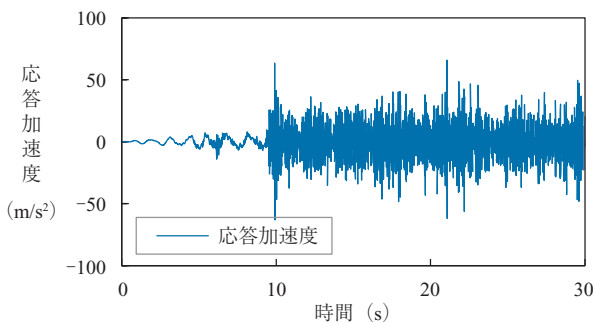


図 - 14 応答加速度図 (解析が発散した例)

入力加速度の最大最小値は図 - 13 で示したように $5.88 \sim -8.12 \text{ m/s}^2$ であるため、応答加速度は入力加速度と比べて異常に大きくなっています。したがって、図 - 14 の場合は解析が発散して終了したと判断できるため、条件の見直しが必要となります。

解析が発散する原因は、高い振動数領域の粘性減衰が小さく設定される時に生じます。対処方法は、Rayleigh 型減衰パラメータの β 値を大きくすることにより改善します。

3.5 履歴図

図 - 15 は上部構造はり要素の履歴図で、応答値と骨格曲線を重ね合わせています。両者を重ね合わせるにより、図 - 2 として設定した非線形弾性モデルが、解析結果としてどのように挙動したか確認します。応答値が骨格曲線上にプロットできていれば、入力が正しいと判断できます。

さらには、上部構造が副次的な塑性化に留まっているかを確認します。確認方法は、最大応答曲率が PC 弾性限界時の曲率 (ϕ_a) 以下であることを照査します。

図 - 16 は橋脚下端の塑性ヒンジの履歴図で、応答値と骨格曲線を重ね合わせています。両者を重ね合わせることによ

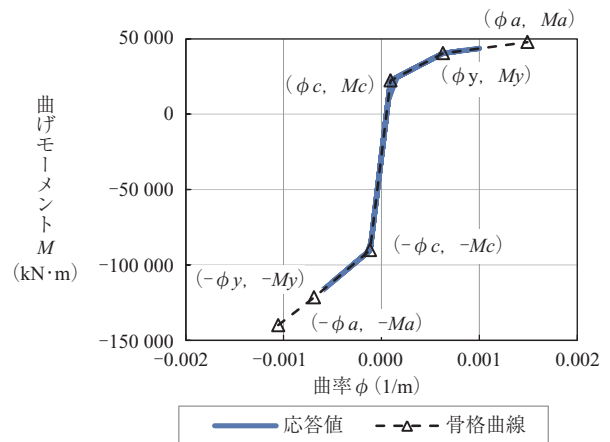


図 - 15 上部構造はり要素の履歴図

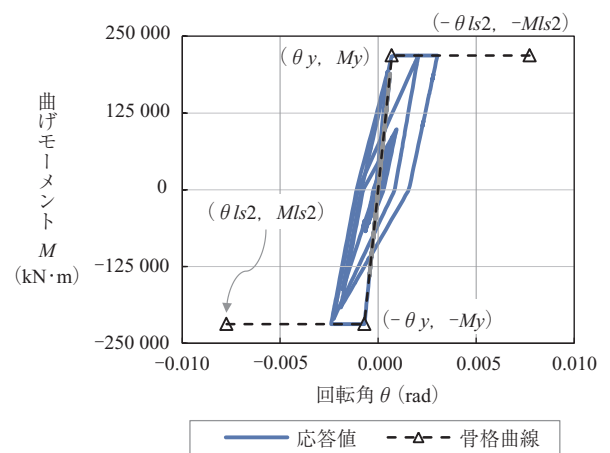


図 - 16 塑性ヒンジの履歴図

り、図 - 5 として設定した非線形履歴モデルが、解析結果としてどのように挙動したか確認します。

履歴図の場合は、要素が降伏する、降伏しないで挙動が異なります。要素が降伏するまでは、応答値は骨格曲線上にプロットされます。降伏後は履歴減衰が発生し、要素剛性は徐々に低下します。確認するポイントは、除荷時の剛性が降伏剛性より低下していること、荷重作用時の挙動が最大点指向型となっていることを確認します。

3.6 粘性減衰

図 - 17 は塑性ヒンジ近傍の最大曲げモーメント図で、曲げモーメントが不連続化した例を示したものです。

曲げモーメントが不連続化するのには、Rayleigh 型減衰パラメータの β 値を過大に設定したときに生じます。

塑性ヒンジは図 - 5 や図 - 16 に示したように、部材の塑性化による履歴減衰としてすでにモデル化しています。これに加えて過大な粘性減衰を付与することは、危険側の評価につながり、不具合事例となります。

対処方法としては、Rayleigh 型減衰パラメータの β 値を小さく見直すことにより、曲げモーメントの不連続化は改善します。しかしながら、Rayleigh 型減衰パラメータの β 値を極端に小さく設定すると、図 - 14 に示すように解析が発散することがあります。

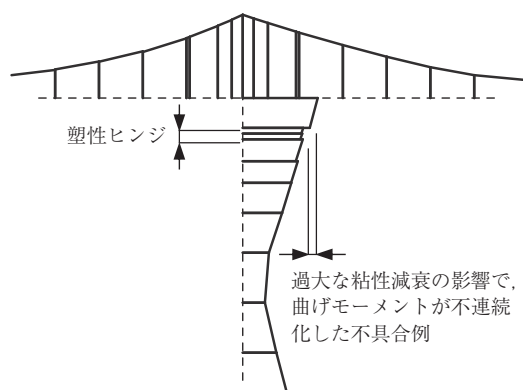


図 - 17 曲げモーメントが不連続化した例 (Rayleigh 型減衰の係数設定により生じる不具合例)

このように、動的解析は Rayleigh 型減衰パラメータの設定により解析結果が大きく異なります。Rayleigh 型減衰パラメータは、たとえば水平方向有効質量比が卓越する 2 つのモードを初期設定としたうえで、解析実施後は常に最大断面力図ならびに時刻歴図を確認しつつ、パラメータを調整していくことが必要です。

4. おわりに

今回の講座 (その 2) は、耐震解析の基礎技術と題して、動的解析モデルの作成方法、解析結果に対する妥当性の確認方法について解説しました。今回の講座が、耐震解析の基礎技術の向上につながり、さらには解析モデルや解析結果の妥当性を判断できる材料となれば幸いです。

なお、参考文献としてあげた書籍は、読者みなさまの耐震解析技術の向上に役立つはずですが、興味のある方は参照下さい。

今回の講座 (その 3) は、PC 構造物に対して耐震解析を適用した事例の紹介をします。

注

- 骨格曲線：要素の一方荷重に対する力と変形の関係を示した曲線のこと。
- 履歴モデル：骨格曲線を基本にしなが、正負の繰返し荷重が作用する際の除荷時と再載荷時の力と変形関係をルール化したモデルのこと。
- 有効質量比：第 n 次のモードが全体の応答にどれだけ寄与しているかを表す指標のことで、値を百分率として示したものの。
- 並進挙動：橋を構成する各節点が同一方向に平行移動すること。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V，平成 24 年 3 月
- 2) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，平成 9 年 3 月
- 3) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料 - PC ラーメン橋・RC アーチ橋・PC 斜張橋・地中連続壁基礎・深礎基礎等の耐震設計例 -，平成 10 年 1 月
- 4) 土木学会：橋の動的耐震設計，平成 15 年 3 月
- 5) 土木学会：実務の先輩たちが書いた 土木構造物の耐震設計入門，平成 13 年 10 月
- 6) 土木学会：実務に役立つ 耐震設計入門，平成 23 年 1 月
- 7) 土木学会：続・実務に役立つ 耐震設計入門 (実践編)，平成 26 年 10 月
- 8) 土木研究センター：橋の動的耐震設計法マニュアル - 動的解析および耐震設計の基礎と応用 -，平成 18 年 5 月

【2015 年 6 月 30 日受付】



刊行物案内

第 23 回 プレストレストコンクリートの 発展に関するシンポジウム 論文集

(平成26年10月)

本書は、平成26年10月に盛岡市 (アイーナ) で開催された標記シンポジウムの講演論文集です。

CD 版論文集：定価：12,000 円，会員特価 8,000 円／送料 300 円
 体 裁：プラスチック CD ケース入り
 書籍版論文集：定価：12,000 円，会員特価 10,000 円／送料 500 円
 体 裁：B5 判，箱入り