

第4回 耐震解析（その1）

耐震解析の基礎知識

講師：藤田 雅義*

1. はじめに

近年、構造解析に用いるコンピュータの性能の向上や解析ツールの整備が進み、比較的複雑な解析でも容易に解を得られるようになってきました。

一方で、経験が浅い設計技術者は、解析モデルや解析結果の妥当性を判断できる技術を身につけることが重要な課題となっています。

そこで、今回（その1）のテーマを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す。次回（その2）のテーマ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。

なお、講座で対象とする構造物は、PC3 径間連続ラーメン箱桁橋とします。

2. 耐震設計の基本

2.1 耐震設計の目的

橋の耐震設計は、想定した地震動に対して、構造物の重要度に応じて必要な耐震性能を確保することを目的とします。

道路橋示方書¹⁾では、橋に要求される耐震性能を耐震設計上の安全性・供用性・修復性の3つの観点としてとらえ、耐震性能の種類ごとに分類して規定しています（表-1）。

耐震性能1は、地震によって橋としての健全性を損なわ

ない性能としています。健全性を損なわない性能とは、橋を構成する各部材が損傷しないことです。地震による部材損傷がないとき、安全性と供用性は確保できているとみなせます。修復性については、短期的には機能回復のための修復を必要とせず、長期的には軽微な修復で済むことを要求されています。

耐震性能2は、特定部材の損傷を許容し、その損傷を限定的なものに留めることにより、落橋に対する安全性を確保しています。地震後は、橋としての機能を速やかに回復でき、機能回復のための修復が容易であることが求められます。

耐震性能3は、地震による損傷が致命的とならず、落橋に対する安全性の確保のみが求められています。

2.2 橋の重要度の区分

橋の重要度は、A種の橋とB種の橋の2種類に区分されます。A種の橋は重要度が標準的な橋として、B種の橋はとくに重要度が高い橋として位置付けられます。

具体的には、高速道路や一般国道の橋、跨線橋や跨道橋、さらには地域の防災計画から特に重要な橋はB種の橋として、それ以外の橋をA種の橋として区分します。

2.3 設計地震動

耐震設計で考慮する地震動は、橋の供用期間中に発生する確率の高い地震動（レベル1地震動）と、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動（レベル2地震動）の2種類として規定しています。

レベル2地震動の2種類とは、発生頻度が低いプレート境界に生じる海洋性の大規模な地震による地震動（タイプ

表 - 1 耐震性能の観点¹⁾

橋の耐震性能	耐震設計上の安全性	耐震設計上の供用性	耐震設計上の修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
耐震性能1： 地震によって橋としての健全性を損なわない性能	落橋に対する安全性を確保する	地震前と同じ橋としての機能を確保する	機能回復のための修復を必要としない	軽微な修復でよい
耐震性能2： 地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能	落橋に対する安全性を確保する	地震後橋としての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急修復で対応できる	比較的容易に恒久復旧を行うことが可能である
耐震性能3： 地震による損傷が橋として致命的とならない性能	落橋に対する安全性を確保する	—	—	—

* 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

Iの地震動)と、発生頻度が低い内陸直下型地震による地震動(タイプIIの地震動)としています。

2.4 設計地震動と目標とする橋の耐震性能

表-2は、設計地震動と目標とする橋の耐震性能を示したものです。レベル1地震動では橋の重要度によらず、橋としての健全性を損なわないことが求められます。

レベル2地震動の場合は、A種の橋では地震による損傷が橋として致命的とならない性能が、また、B種の橋では地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかにい行い得る性能が求められています。

表-2 設計地震動と目標とする橋の耐震性能¹⁾

設計地震動		A種の橋 (重要度が標準的な橋)	B種の橋 (とくに重要度が高い橋)
レベル1地震動		地震によって橋としての健全性を損なわない性能 (耐震性能1)	
レベル2地震動	タイプIの地震動 (プレート境界型の大規模な地震)	地震による損傷が橋として致命的とならない性能 (耐震性能3)	地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかにい行い得る性能 (耐震性能2)
	タイプIIの地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)		



図-1 単柱橋脚の1次の固有振動モード図

が卓越するモードとなるため、地震時の挙動が複雑ではない橋となります。

なお、地震時の挙動が複雑ではない橋は、地震の影響を静的に置き換えても解析精度は劣らないため、静的解析が適用されます。

一方で、地震時の挙動が複雑な橋とは、静的照査法では地震時の挙動を十分な精度で表すことができない橋、静的照査法の適用性が限定される橋を指し、次の4項目として規定しています。

- ① 橋の応答に主たる影響を与える固有振動モードの形状が静的照査法で考慮する1次の固有振動モードの形状と著しく異なる場合
- ② 橋の応答に主たる影響を与える固有振動モードが2種類以上ある場合
- ③ レベル2地震動に対する耐震性能の照査において、塑性化が複数箇所に生じる可能性がある場合、または、複雑な構造で塑性化がどこに生じるかはっきりしない場合
- ④ レベル2地震動に対する耐震性能の照査において、構造部材や橋全体系の非線形履歴特性に基づくエネルギー一定則の適用性が十分検討されていない場合

今回の講座で対象としているラーメン橋は、図-2に示すように、橋脚の上下端に主たる塑性化^{c)}を、上部構造には副次的な塑性化^{d)}を考慮します。このため、ラーメン橋は、塑性化やエネルギー吸収を複数箇所に考慮する橋に分類されます。ゆえに、耐震性能1では静的照査法を、耐震性能2では動的照査法を行うこととなります。

3.2 ラーメン橋の耐震設計手順

ラーメン橋の耐震設計手順を図-3に示します。

手順①は、耐震設計を行う事前準備として、死荷重や

3. 耐震設計の流れ

3.1 耐震性能の照査方法

道路橋示方書では、耐震性能の照査方法や耐震設計の手順が標準化され、詳しくまとめられています。ここでは、道路橋示方書に基づいた耐震性能の照査方法について説明します。

耐震性能の照査方法を説明するうえで、重要なキーワードは「地震時の挙動の複雑さ」です。表-3は、地震時の挙動の複雑さと耐震性能の照査方法についてまとめたものです。

地震時の挙動が複雑ではない橋とは、構造系が単純で1次の固有振動モードが卓越した構造系、もしくは主たる塑性化の生じる部位が明確となっていることが条件とされます。

図-1に、単柱橋脚の1次の固有振動モード図を示します。図-1の場合は、構造系が単純で1次の固有震度

表-3 地震時の挙動の複雑さと耐震性能の照査方法¹⁾

照査をする耐震性能	橋の動的特性	塑性化やエネルギー吸収を複数箇所に考慮する橋またはエネルギー一定則の適用性が十分検討されていない構造の橋	静的解析の適用性が限定される橋	
	地震時の挙動が複雑ではない橋		高次モード ^{a)} の影響が懸念される橋	塑性ヒンジ ^{b)} が形成される箇所がはっきりしない橋または複雑な振動挙動をする橋
耐震性能1	静的照査法	静的照査法	動的照査法	動的照査法
耐震性能2	静的照査法	動的照査法	動的照査法	動的照査法
耐震性能3	静的照査法	動的照査法	動的照査法	動的照査法
適用する橋の例	<ul style="list-style-type: none"> 固定支承と可動支承により支持される桁橋(曲線橋を除く) 両端橋台の単純桁橋(免震橋を除く) 	<ul style="list-style-type: none"> 弾性支承を用いた地震時水平力分散構造を有する橋(両端橋台の単純橋を除く) 免震橋 ラーメン橋 鋼製橋脚に支持される橋 	<ul style="list-style-type: none"> 固有周期の長い橋 橋脚高さが高い橋 	<ul style="list-style-type: none"> 斜張橋、吊橋等のケーブル系の橋 アーチ橋 トラス橋 曲線橋

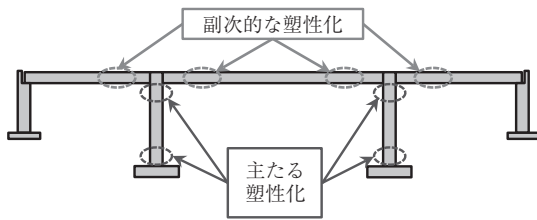


図 - 2 塑性化する部材の組合せ例 (ラーメン橋)

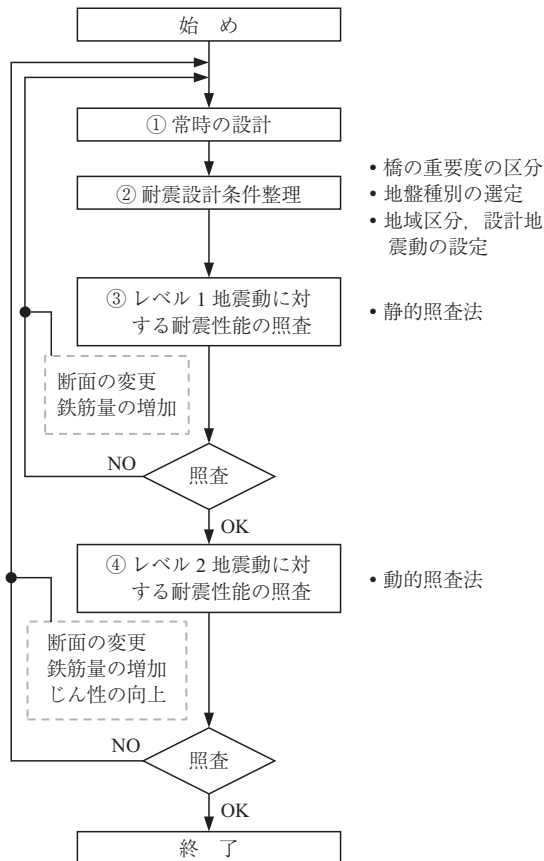


図 - 3 ラーメン橋の耐震設計手順

活荷重などに対する常時の設計を行います。

手順②は、橋の重要度の区分、地盤種別の選定、地域区分、設計地震動の設定などの耐震設計条件を整理します。

手順③は、レベル1地震動に対する耐震性能の照査として、静的解析法により断面力を算出します。

照査は許容応力度法で行い、対象となる部材の応力が許容応力度を満足するか否かで判断します。許容応力度を満足しない場合は、断面の変更や鉄筋量を増やすことにより、許容値を満足するまで繰り返します。

手順④は、レベル2地震動に対する耐震性能の照査として、動的解析法で応答値を算出します。

照査の流れは同じで、対象となる部材の応答値が許容値を満足するか否かで判断します。許容値を満足しない場合は、断面の変更や鉄筋量の増加、じん性を向上させることにより、許容値を満足するまで繰り返します。

4. 耐震解析の種類と特徴

耐震設計を行う場合の解析法は、図 - 4 に示すように静的解析と動的解析の2種類に分類されます。

本来、地震は動的現象ですが、静的解析は動的な地震力を静的な地震力に置き換えて行う手法です。動的解析と比べ静的解析は比較的簡単にモデル化でき、照査も容易であるため、従来からよく用いられています。静的解析の代表例は、震度法と地震時保有水平耐力法です。

一方、動的解析とは、地震による橋の挙動を動的現象としてとらえ、地震波形や加速度応答スペクトルを入力し、橋の変位や断面力を求めます。動的解析の代表例は、応答スペクトル法と時刻歴応答解析法です。

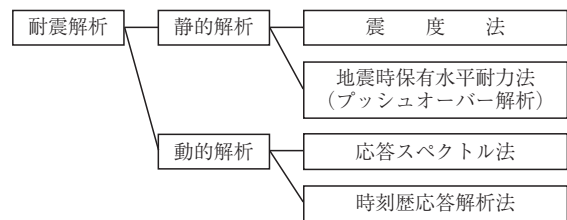


図 - 4 耐震解析の種類

4.1 震度法

震度法は耐震性能1の照査に用いる解析方法です。震度法は構造物にレベル1地震動を設計水平震度⁹⁾として作用させ、各部材の断面力を算出します。具体的には、構造物の節点重量に設計水平震度を乗じて慣性力を算出します。

道路橋示方書で示される設計水平震度の値は、0.1～0.3となります。設計水平震度は、地盤種別や地域別補正係数、構造物の固有周期により求められます(図 - 5)。

なお、震度法による照査は許容応力度法で行い、各部材の力学的特性が弾性域を超えないことを照査します。

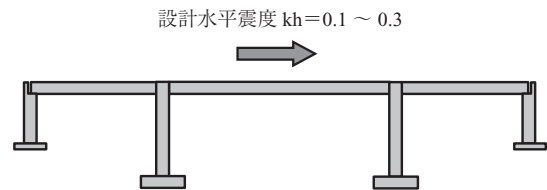


図 - 5 地震力の作用方法 (震度法)

4.2 地震時保有水平耐力法

レベル2地震動のような大きな地震では、構造物の強度を向上させるだけで地震に抵抗するには限界があります。このため、特定の部材に損傷を許し、かつ、適切なねばり強さをもたせることにより、地震エネルギーを低減させる必要があります。地震時保有水平耐力法は、このような観点から用いられる設計方法の一つです。

地震時保有水平耐力法は、構造物が損傷した後の最大応答変位をエネルギー一定則に基づいて近似的に算出しま

す。図 - 6 は、1 質点系構造物に作用する水平力と水平変位の関係を簡単に示したものです。橋が弾性挙動する場合には、0 点と A 点は直線の関係が成立し、構造物に弾性応答水平力 P_E が作用すると、弾性応答水平変位 δ_E (A 点) が生じます。

一方、構造物が損傷し降伏に達すると、変位 δ_Y 以降の水平力は降伏水平耐力 P_Y (C 点) で頭打ちとなり、変位のみが増大し、弾塑性応答水平変位 δ_P に達します。

エネルギー一定則は、弾性応答水平変位 δ_E (A 点) のエネルギーと弾塑性応答水平変位 δ_P (D 点) のエネルギーが等しいという考え方に基づくもので、三角形 OAB と台形 OCDE の面積が等しくなるように弾塑性応答が生じると考えます。このように、エネルギー一定則は、塑性域に入っても橋脚の水平力が急激に減少することなく、変形できる領域が大きければ降伏水平耐力 P_Y は低くてもよいことになります。

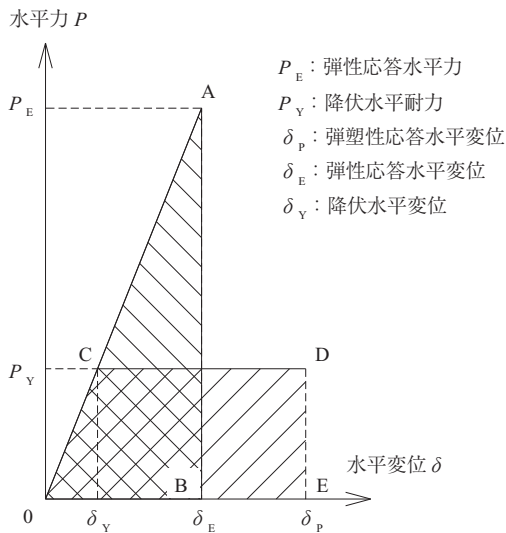


図 - 6 エネルギー一定則

なお、今回の講座で対象としているラーメン橋は、地震時の挙動が複雑な橋に分類され、エネルギー一定則の適用性が十分に検討されていない構造の橋です (表 - 3)。このため、ラーメン橋は橋全体系に対するプッシュオーバー解析¹⁾を行い、降伏変位と耐震性能に応じた限界状態に相当する水平変位を求めることになります。

プッシュオーバー解析のモデルは、橋脚上下端の複数箇所塑性ヒンジ (非線形回転ばね) をモデル化します。そのモデルに、慣性力に相当する静的地震力を水平震度として漸増作用させて、橋全体系の塑性化を進展させていきます。耐震性能に応じた限界状態に相当する水平震度は、複数の塑性ヒンジのうち 1 つが耐震性能限界に達する時の水平震度としています (図 - 7)。

図 - 8 は、プッシュオーバー解析より求められる橋全体系の水平震度と水平変位の関係を示したものです。図の縦軸は橋に漸増させる水平震度を示し、横軸は上部構造慣性力作用位置の水平変位を示します。水平変位は、作用する水平震度とともに増加します。とくに、塑性ヒンジが降

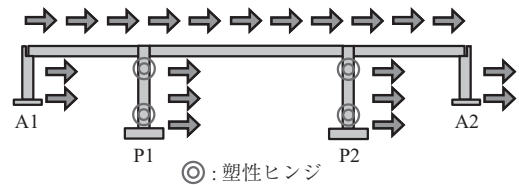
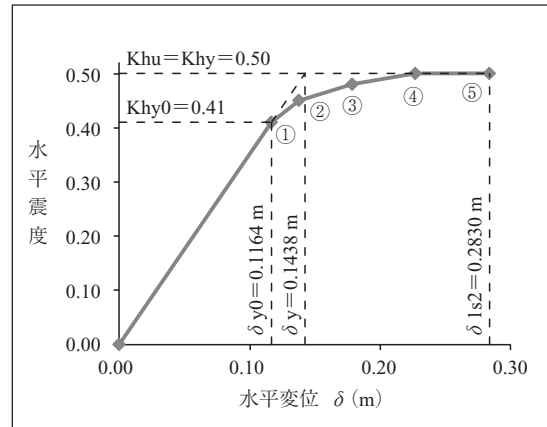


図 - 7 地震力の作用方法 (プッシュオーバー解析)



	水平震度 Kh	水平変位 delta (m)	橋脚の状態
①	0.41	0.1164	P2 下端 降伏
②	0.45	0.1374	P1 下端 降伏
③	0.48	0.1781	P2 上端 降伏
④	0.50	0.2262	P1 上端 降伏
⑤	0.50	0.2830	P2 下端 耐震性能限界

図 - 8 プッシュオーバー解析より求められる橋全体系の水平震度 (Kh) と水平変位 (δ) の関係

伏すること (①, ②, ③, ④) により、橋全体系の水平変位は急増します。⑤は、P2 橋脚下端の塑性ヒンジが耐震性能限界に達したことを示しています。

なお、構造系全体の挙動は、水平震度と水平変位を用いると次のように示すことができます。

初降伏時 $k_{hy0} = 0.41$, $\delta_{y0} = 0.1164$ m

降伏時 $k_{hy} = 0.50$, $\delta_y = 0.1438$ m

終局時 $k_{hu} = 0.50$, $\delta_{ls2} = 0.2830$ m

このように、橋全体系の水平震度と水平変位の関係を作図することにより、対象とする構造系の耐力や変形特性、また、どの塑性ヒンジで損傷が発生し、どのように損傷が進展していくかを把握することが可能です。このため、プッシュオーバー解析は、不静定構造物の弾塑性挙動を分析する上で非常に有益な解析方法となります。

4.3 応答スペクトル法

応答スペクトルとは、単純な 1 質点系の構造物が地震を受けた時に生じる最大応答値を固有周期ごとに示した図のことです。

図 - 9(a) に示すように、台上に減衰定数が等しく固有周期の異なる 1 質点系の構造物を用意し、台に地震波形を加えることにより、各固有周期ごとの最大応答値を得ることができたとします。そして、構造物に生じた最大応答値

を固有周期ごとにプロットした図を最大応答スペクトルと呼びます。

応答スペクトルは、変位応答スペクトル、速度応答スペクトル、加速度応答スペクトルの3種類があります。図-9(b)は、応答スペクトルの代表として、加速度応答スペクトルを示しています。

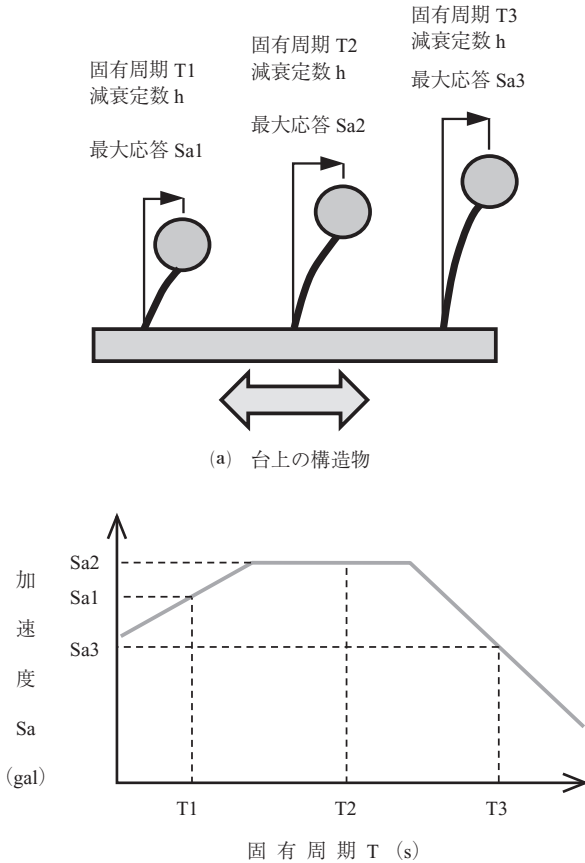


図 - 9 地震応答スペクトル

1質点系のモデルでは、固有周期と減衰定数がわかれば、応答スペクトルを用いることにより最大応答値を推測できると説明しました。しかし、ラーメン橋は1質点系の構造物には該当せず、多質点系の構造物とみなせません。このような、多質点系の構造物に対して、加速度応答スペクトルを用いて最大応答値を求める方法を、応答スペクトル法と呼びます。

応答スペクトル法の手順を、図-10に示します。

手順①は、固有値解析を実施し、複数の固有振動モードと固有周期を算出します。

固有振動モードは各節点のベクトルとして示されるので、各節点の加速度、速度、変位を加速度応答スペクトルとベクトルさらには固有円振動数⁹⁾により算出します(手順②)。

手順③は、多質点系のモデルに対して変形法を適用し、各部材の断面力を算出します。

多質点系構造物の最大応答値(加速度、速度、変位、断面力)は、各固有振動モードの最大応答値を集計すること

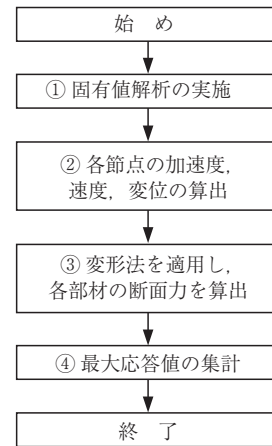


図 - 10 応答スペクトル法の手順

により求めます(手順④)。

各固有振動モードの最大応答値は同時期に発生しないため、集計方法は統計的に近似値を与える確率が高い二乗和平均法(SRSS法¹⁰⁾)を適用することが一般的です。しかしながら、近接した固有周期が存在する構造物に対しては、各振動モード間の相関性を考慮しながら、各振動モードによる応答値を重ね合わせて最大応答値を近似する完全2次結合法(CQC法¹¹⁾)を適用しています。

4.4 時刻歴応答解析法

時刻歴応答解析法は、耐震性能1、耐震性能2、耐震性能3の照査に用いられる解析方法です。時刻歴応答解析法は構造物をはり要素、ばね要素、質量、減衰としてモデル化し、基礎に地震波形を作用させ、構造物の応答値(変位、速度、加速度、断面力)を求める解析法です(図-11)。

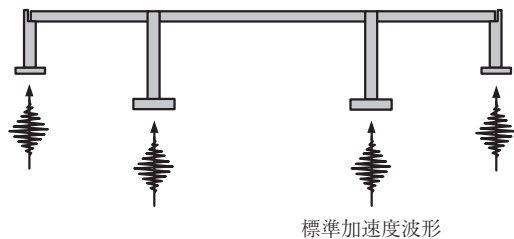


図 - 11 地震力の作用方法(時刻歴応答解析法)

1995年1月に発生した兵庫県南部地震以降、時刻歴応答解析法は地震の応答を正確にシミュレーションできる方法として注目を集めるようになりました。それと相まって、各種の耐震設計基準が改訂され、時刻歴応答解析の必要性が増えたこともあり、現在では頻繁に用いられる解析方法です。

時刻歴応答解析に用いる地震波形は、架橋地点で観測された地震記録を用いることが望ましいのですが、すべての架橋地点の地震記録が存在するわけではありません。このため、地震動の強度、周期特性、継続期間ならびに橋の固有周期、減衰定数などを考慮して、既往の代表的な強震記録を道路橋示方書に規定する加速度応答スペクトルに近い特性を有するように振幅調整した標準加速度波形を用いて

表 - 4 各解析方法の長所と短所

		長 所	短 所
静的解析	震度法	<ul style="list-style-type: none"> 線形解析に適用されるため、入力項目が少なく、容易にモデル化を行える。 地震時の影響を静的な荷重に置き換えることにより、弾性応答値を精度良く計算できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 非線形解析は適用できない。
	地震時保有水平耐力法	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー一定則を適用することにより、非線形性を考慮した応答変位を近似的に算出することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー一定則は1質点系モデルやラーメン橋脚に限定されるため、適用範囲が狭い。
動的解析	応答スペクトル法	<ul style="list-style-type: none"> 線形解析に適用される。 最大応答値のみを簡単に求めることができる。 解析時間は短い。 	<ul style="list-style-type: none"> 非線形解析は適用できない。 地震による経時変化を知ることができない。
	時刻歴応答解析法	<ul style="list-style-type: none"> 線形解析、非線形解析どちらも適用できる。 地震の経時変化を知ることができる。 地震時の挙動が複雑な橋（斜張橋、アーチ橋、トラス橋等）に適用できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 非線形解析の場合、入力項目が多く、解析時間が長い。

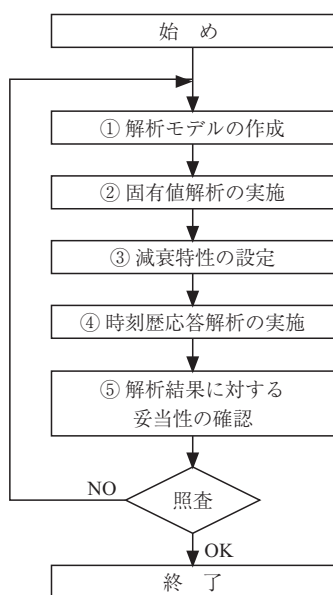


図 - 12 時刻歴応答解析法の手順

います。

また、時刻歴応答解析法は、構造部材を弾性応答させる線形解析と、構造部材の塑性化によるエネルギー吸収効果を考慮する非線形解析の2種類があります。非線形解析は、塑性化する部材を非線形要素としてモデル化するため、非線形動的解析とも呼ばれます。今回の講座で対象としているラーメン橋は、構造部材の塑性化によるエネルギー吸収効果を考慮する必要があるため、非線形の時刻歴応答解析が用いられることになります。

時刻歴応答解析法の手順を図 - 12 に示します。

手順②の固有値解析は、時刻歴応答解析に先立って必ず実施します。固有値解析は、対象構造物の基本的な振動特性（揺れやすい振動モードや固有振動数）、各固有振動モードに対する減衰定数を把握できるため、時刻歴応答解析を行う上で重要な作業の1つとなります。ほかにも、表 - 3 で説明したように、適切な耐震性能照査方法を選択する判断指標にもなります。

なお、手順①解析モデルの作成、手順③減衰特性の設定、手順⑤解析結果に対する妥当性の確認に関しては、今回の講座（その2）で詳しく解説します。

4.5 各解析方法の長所と短所

表 - 4 は、各解析方法の長所・短所などの特徴を示したものです。われわれ設計者は、それぞれの解析方法の特徴をよく理解し、解析の目的に応じて適切な解析方法を選定しなければなりません。

5. おわりに

今回の講座（その1）は、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。今回の講座が、読者みなさまの耐震解析に関する知識の向上につながり、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耐震解析の知識を深めるために役立つはずですが、興味のある方は参照下さい。

次の講座（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す。

注

- a) 高次モード：複数の固有振動数が存在する場合、固有振動数の高い方の状態のこと。
- b) 塑性ヒンジ：鉄筋コンクリート橋脚において、正負交番の繰返し変形を受けたときにヒンジ（蝶番）のように、塑性変形能を発揮する限定された部位のこと。
- c) 主たる塑性化：鉄筋コンクリートの限定された部位に塑性変形能を発揮させて、地震エネルギーの吸収を図ること。
- d) 副次的な塑性化：エネルギー吸収を考慮しない程度に塑性化すること。
- e) 設計水平震度：構造物に対する耐震設計で、作用させる地震動の大きさを表す無次元係数のこと。
- f) プッシュオーバー解析：構造物に対して静的な震度（荷重）を漸増載荷させて、載荷震度（荷重）と水平変位の関係によって構造物全体系の耐震性能を評価する解析方法のこと。
- g) 固有円振動数： 2π 時間の間に繰り返される振動回数のこと。
- h) SRSS法：Square Root of Sum of Squaresの略で、二乗和平均法のこと。
- i) CQC法：Complete Quadratic Combinationの略で、完全2次結合法のこと。

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 4 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