

橋の動的耐震設計法 マニュアルの概説

— 動的耐震設計のチェックポイント —

土木研究所耐震研究グループ 運上茂樹

PWRC 財団法人 土木研究センター
Public Works Research Center

解説内容

- マニュアルの作成の背景
 - 1) 動的耐震設計への転換
 - 2) マニュアルの作成
- 動的耐震設計の基本
 - 1) 振動の基本
 - 2) 解析モデル・解析条件
 - 3) 解析結果の評価
- 動的耐震設計のチェックポイント
 - ・ 解析結果の妥当性評価

動的耐震設計への転換(1)



1995年兵庫県南部地震による落橋、橋脚の倒壊等の甚大な被害



動的耐震設計への転換(2)

- 兵庫県南部地震の教訓
 - ・ 内陸直下の地震による非常に強い地震動
 - ・ 構造物が地震時にどのような挙動をするかを把握、追跡した上での耐震設計が不可欠
 - 損傷部位(塑性ヒンジ)、破壊モード
 - 弾性挙動を超える非線形挙動を考慮した耐震設計法
- 平成8年道路橋示方書
 - ・ レベル2地震として海洋型・内陸型地震を考慮
 - ・ 地震時保有水平耐力法が耐震設計の中心に(RC橋脚、鋼製橋脚、支承、基礎等に適用)
 - ・ 非線形動的解析法の活用

動的耐震設計への転換(3)

■ 性能設計への移行

- ・目的: 国際化への対応、多様な構造・工法への対応、コスト縮減等の成果の早期導入
- ・橋に対する要求性能を明示し、橋が所要の性能を有していることを照査する設計方法
- ・照査方法は、実験等により検証された手法であれば、標準解(みなし仕様)以外の選択も可能

■ 平成14年道路橋示方書: 性能規定型基準

- ・要求する事項とそれを満たす従来からの規定(みなし規定)の明確化
- 性能検証法としての動的照査法の適用の拡大

動的耐震設計法マニュアル作成(1)

■ 動的耐震設計法

- ・性能設計に即した合理的な耐震設計ツールの活用
- 動的解析法の課題(ソフトを使う共通課題)
- ・モデルが複雑? 入力パラメータが多い?
- ・ブラックボックス化? ソフト間のばらつきは?
- ・解析結果の評価が難しい?

■ 土木研究センターにおける検討委員会

- ・平成8~11年: 耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会 (座長: 川島一彦東京工業大学教授)
 - ・平成14~17年: 橋の動的耐震設計法マニュアル検討委員会 (委員長: 川島一彦東京工業大学教授)
- (学、官、ソフトウェア、コンサルタント会社から参画)

動的耐震設計法マニュアル作成(2)

■ マニュアルの対象

- ・これから動的耐震設計に取り組もうとされる初級者を主に対象
- ・中級者にも参考になるような情報、データも盛り込む

■ 動的解析体験版ソフトウェア“DYMO”

- ・シンプルな構造を対象に気軽にトライし、動的解析についての理解、感覚を深める目的
- ・発注者の方々も是非体験を
- ・解析法の開発者と利用者でノウハウの蓄積が重要

橋の動的耐震設計法マニュアル — 全体構成 —

■ 3編構成

・ 入門編

動的耐震設計の基礎知識

・ 動的耐震設計事例編

設計例で流れを追ってみよう

・ 応用編

動的解析をマスターするために

参考資料: 動的解析法

橋の動的耐震設計法マニュアル — 入門編 —

1. 動的耐震設計を始める前に

- ・振動の基本、振動の力学
- ・動的耐震設計の基本

2. 動的耐震設計を活用しよう

- ・耐震設計の流れ
- ・モデル化、入力地震動、動的解析方法
- ・動的解析結果の出力と耐震性能の照査
- ・動的耐震設計のチェックポイント

橋の動的耐震設計法マニュアル — 動的耐震設計事例編 —

■ 動的耐震設計例

鉄筋コンクリート橋脚(DYMO連動版)、免震橋、鋼製橋脚、コンクリートラーメン橋の4橋

■ 設計例の構成

1. 対象橋の条件
2. 動的解析モデルと解析条件
3. 動的解析結果(固有振動、時刻歴・最大応答値)
4. 耐震性能の照査(断面力、塑性率、変形の照査)
5. 動的耐震設計のチェックポイント

橋の動的耐震設計法マニュアル — 応用編・参考資料 —

■ 応用編

1. 橋梁のモデル化

M~モデルとM~モデル、材央・材端モデル、履歴モデル、減衰モデル

2. 入力地震動

時刻歴波形の作成手法、断層モデルによる地震動

3. 動的解析の留意点とベンチマーク解析

ベンチマーク解析、ソフトウェア間のばらつき試算例

■ 参考資料: 動的解析法

数値積分法、運動方程式

モード合成法、直接積分法、Newmark-法

道路橋示方書: 橋の耐震性能(1)

■ 耐震性能の定義

耐震設計上の安全性・供用性・修復性の3つの観点での性能

1. 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

2. 耐震性能2

地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能

3. 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

道路橋示方書:橋の耐震性能(2)

■ パフォーマンスマトリックス(目標とする性能)

| 設計地震動 | | A種の橋 | B種の橋 |
|---------|----------------------------------|---------------------------------------|--|
| 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 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とどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能 (耐震性能2) |
| | タイプ の地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震) | | |

橋の耐震設計

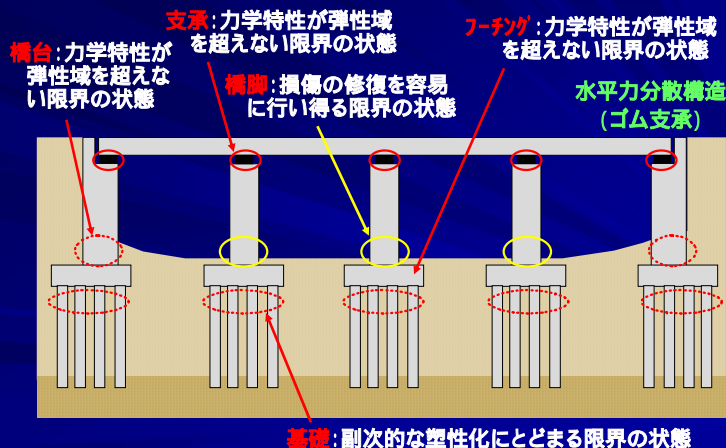
■ 耐震性能の照査の原則

- 橋全体系の限界状態と各部材の限界状態の設定
限界状態とは、それを超えると所要の性能を満足できなくなる限界の状態
- 性能照査では、地震時の橋の挙動が設定した限界状態を超えないことを照査 (応答値 < 許容値)

■ 性能照査法

- 橋の地震時の挙動の複雑さに応じて、「静的照査法」と「動的照査法」を選択

橋脚基部に塑性化を考慮する時の各部材の限界状態の設定例(耐震性能2)



静的照査法・動的照査法(1)

■ 静的照査法(震度法, 地震時保有水平耐力法)

- 地震の影響を静的な荷重としてモデル化
- 非線形応答変形をエネルギー一定則により推定
- 構造特性によって適用性あり(単純な構造に適用)

■ 動的照査法(時刻歴応答解析法)

- 非線形応答変形を静的解析よりも合理的に推定
- 様々な形式の橋に適用可能
- 解析上は、静的照査法と基本的な相違なし
- 解析モデルやパラメータの設定等が解析結果に影響を及ぼす場合があり、解析結果の妥当性の評価や解析結果の耐震設計への反映方法

必要な知識と技術が必要(静的照査も同様)

動的照査法と静的照査法 (2)

| 照査方法 | 動的照査法 | 静的照査法 |
|-------|---------------------------|------------------------|
| モデル | 多質点系モデル | 1質点系モデル |
| 地震動 | 時刻歴波形(設計スペクトルに適合した波形) | 設計震度(設計スペクトルを一定の減衰で補正) |
| 非線形部材 | 非線形性の発生が想定される箇所 | 橋脚基部等特定位置に設定 |
| 減衰の評価 | 減衰力としてモデル設定 | 設計震度の中に考慮 |
| 性能照査 | 最大応答値が許容値(限界状態)以内であることを照査 | |

動的照査法と静的照査法 (3)

| 橋の動的照査をする耐震性能 | 橋の動的特性 地震時の挙動が複雑ではない橋 | 塑性化や非線形性が複数箇所を生じる橋及び木材等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 | |
|---------------|--------------------------|--|--|--|
| | | | 高次モードの影響が懸念される橋 | 塑性ヒンジの発生箇所がはっきりしない橋、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 | 右記以外の条件の橋 | <ul style="list-style-type: none"> ・ゴム支承を用いた地震時水平分散構造を有する橋 ・免震橋 ・ラーメン橋 ・鋼製橋脚に塑性化を考慮する橋 | <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 ・上・中路式アーチ橋 ・曲線橋 |

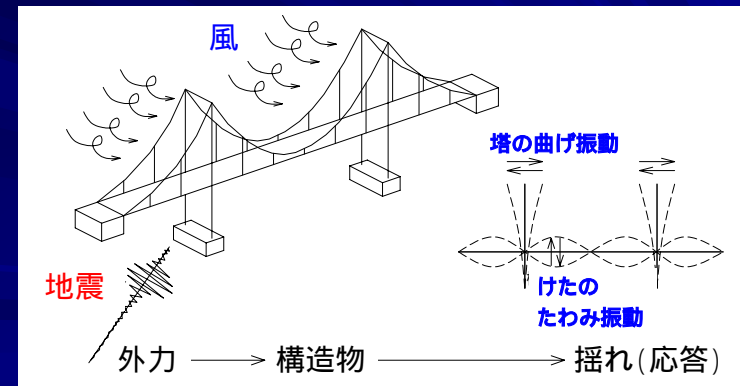
動的照査法と静的照査法 (4)

動的耐震設計のメリット

- ・橋が振動する際の固有な振動特性を理解できる
固有周期、固有振動モード、揺れやすい振動等
(静的照査法ではわからない)
- ・静的解析では求められない地震動による橋の揺れを追跡できる
各部材に生じる地震応答(断面力、変形等)
地震時の挙動が複雑な橋全体の地震応答
(静的照査法では最大値の推定のみ)
- ・構造的な弱点部や損傷の程度と範囲を把握できる
弾性域から塑性域に至る損傷の進展過程を追跡し、構造物の損傷位置、範囲、程度を把握

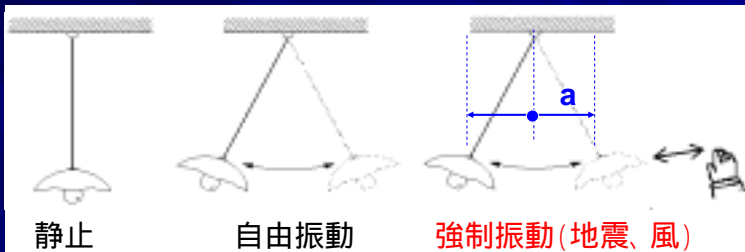
振動の基本 (1)

■ 構造物の振動



振動の基本(2)

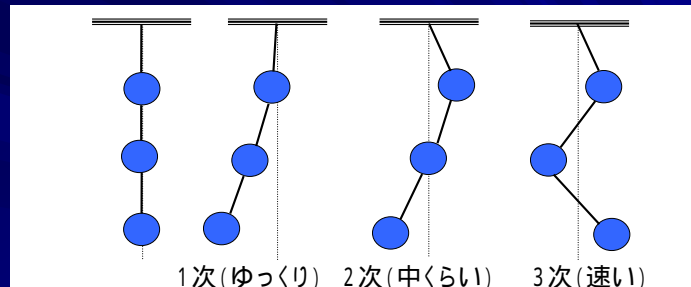
■ 地震による振動・周期・振幅



用語: 振幅 a とは? 揺れの大きさ(変位など)
 周期 T とは? 1往復揺れる時間(秒)
 振動数 f とは? 1秒間の振動回数(Hz)
 (周期の逆数で, $T=1/f$, $f=1/T$ の関係)

振動の基本(3)

■ 固有周期と固有振動モード



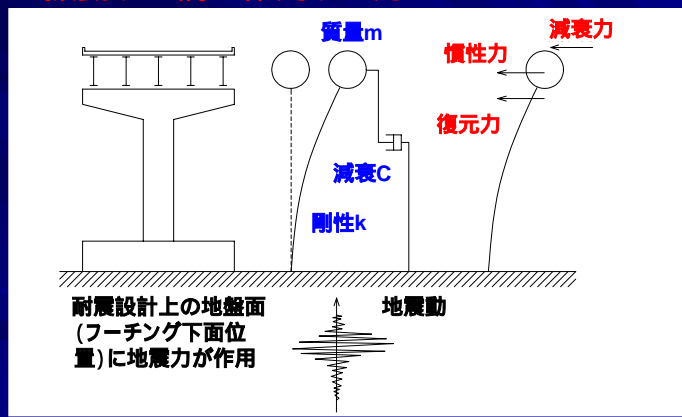
用語: 固有周期とは? 橋が揺れやすい周期
 固有振動モードとは? その時の揺れの形状
 刺激係数・有効質量とは? 揺れやすさの度合い
 固有振動解析とは? これらを求める解析

振動の基本(4)

- 解析結果のチェックに用いる固有振動特性
 - なぜ固有周期や固有振動モードが重要なのか?
 - 設計地震動の強さは周期によって変化する
 - 橋が揺れやすい振動が固有周期であることから、作用する地震力を決める基本的な指標になる
 - 固有周期でのチェック
 - 同一規模の橋では概ね一定の周期
 - 一般橋(0.5~1.0秒)、ゴム系支承(1.0~1.5秒)
 - 長大橋(規模によって、2~10秒)
 - 固有振動モードでのチェック
 - 橋は、橋桁を橋脚で支持するトップヘビーな構造
 - 橋桁が水平方向に振動する形状
 - 地震応答変位の分布は、モード形に相似な形に

動的解析と力学モデル(1)

■ 振動する橋に作用する力



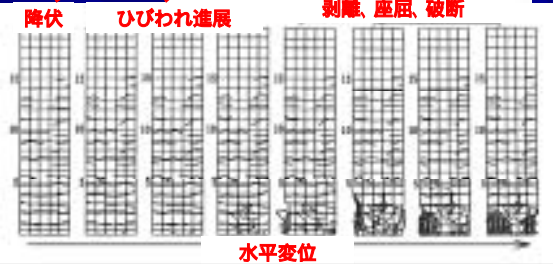
地震時の橋の振動特性・破壊特性



動的解析と力学モデル(2)

■ 部材の剛性

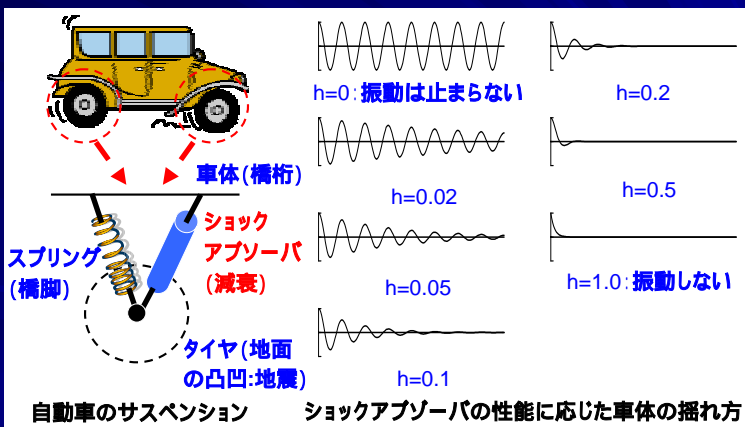
- ・実験データに基づく力学モデル・履歴モデル
- ・破壊特性と終局点許容変位



RC橋脚の破壊特性の例

動的解析と力学モデル(3)

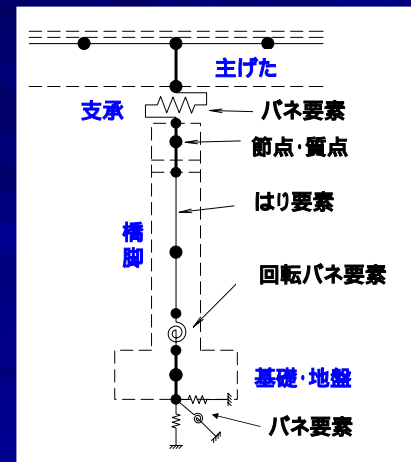
■ 構造減衰(材料減衰、逸散減衰等)



橋のモデル化(1)

■ モデル化

1. 骨組モデル
 - 質点と、質量を持たない部材要素から構築
2. 節点分割
 - 振動形状を表せる程度に分割
3. 部材要素
 - ・はり要素(曲げと軸力、せん断力)
 - ・トラス要素(軸力のみ)
 - ・バネ要素(一方向力)
 - ・剛要素



橋のモデル化(2)

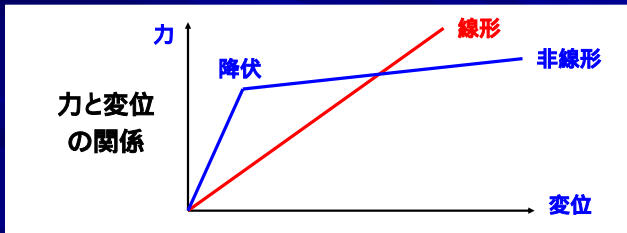
■ 部材の線形と非線形

・線形とは？

降伏前の損傷が生じる前までの弾性範囲の挙動

・非線形とは？

RC部材の鉄筋の降伏、鋼製部材の降伏など弾性範囲を超過する範囲の挙動、形状の変化など



橋のモデル化(3)

■ ゴム支承

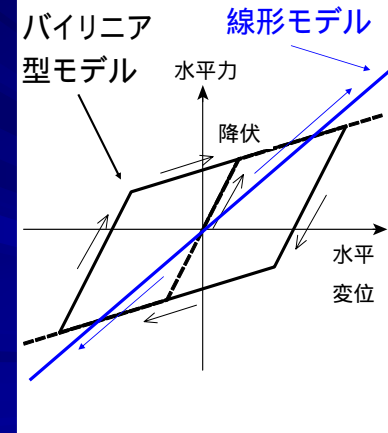
線形バネモデル

■ 免震支承

バイリニア型モデル
(あるいは、等価線形バネモデル)

■ 基礎・地盤

一般に、基礎は降伏以内の設計を行うため、等価線形バネ(水平・鉛直・回転成分)



橋のモデル化(4)

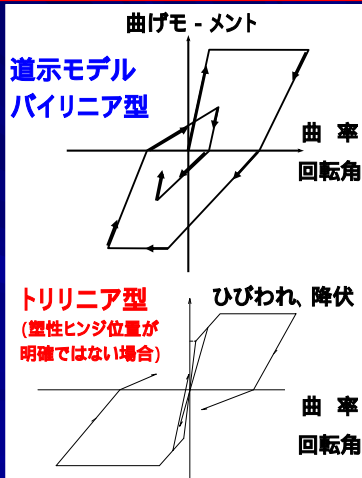
■ RC橋脚

・バイリニア型(道示モデル、ひびわれ点を除いた降伏点、終局点)

・トリリニア型(ひびわれ点・降伏点・終局点)

■ 履歴特性

・剛性低下型Takedaモデル(塑性変形を受けると除々に剛性が低下する特性をモデルに反映)

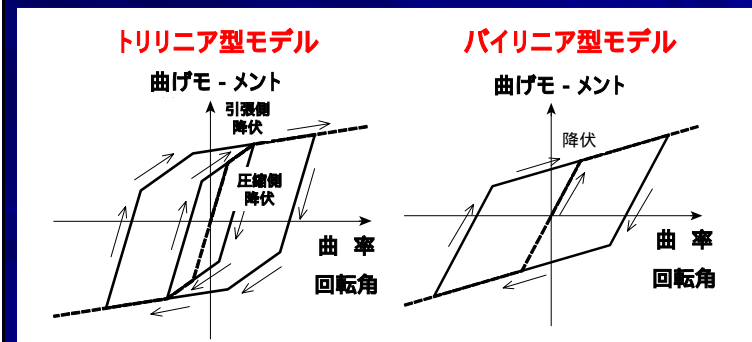


橋のモデル化(5)

■ 鋼製橋脚

・コンクリートを充填しない鋼断面(トリリニア型)

・コンクリートを充填した鋼断面(バイリニア型)



橋のモデル化(6)

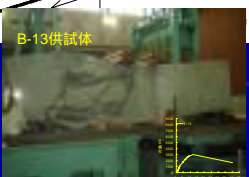
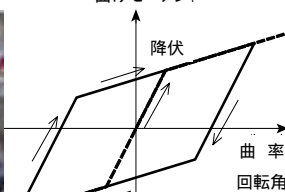
力学モデルの構築

- 各種構造部材の载荷実験等



力学モデルの設定 パラメータの設定

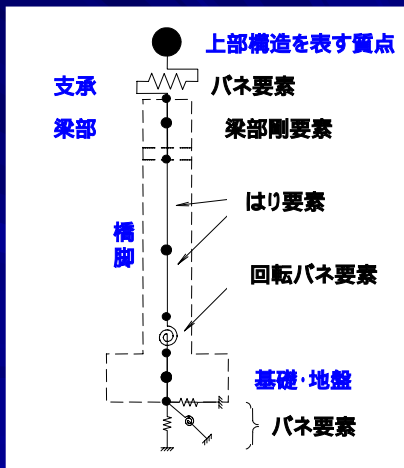
曲げモーメント



橋のモデル化(7)

単柱橋脚系

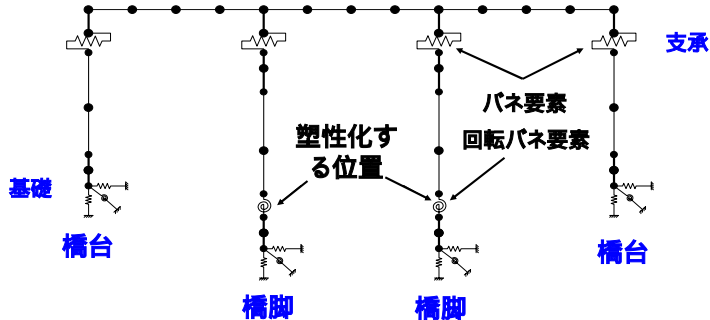
- 一様な構造形式が連担するような場合
- 設計振動単位が1基の下部構造とそれが支持している上部構造部分からなる場合
“DYMO”で取り扱うモデル



橋のモデル化(8)

連続桁橋

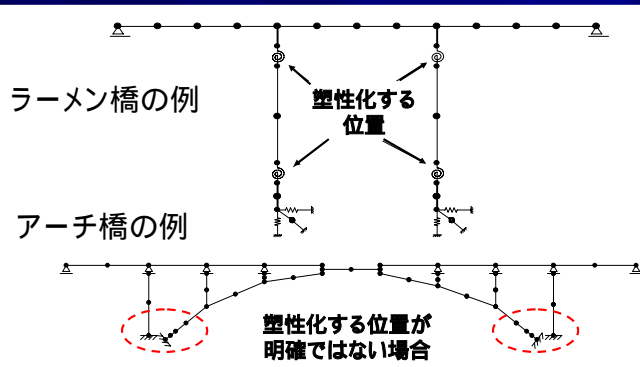
- 一般的な連続桁橋の場合には橋全体系のモデル化
(複数の下部構造とそれが支持している上部構造からなる)



橋のモデル化(9)

ラーメン橋、アーチ橋

- 橋全体系のモデル化
- アーチ橋等塑性化する位置が明確でない場合

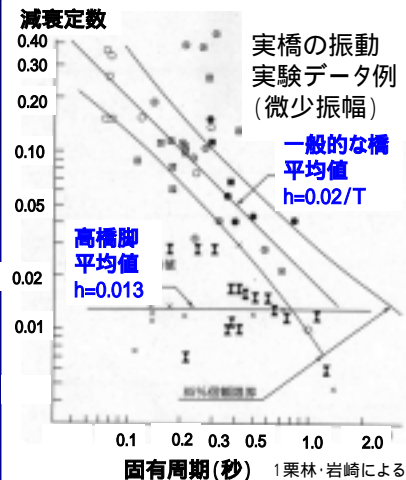


橋のモデル化(10)

■ 構造減衰

- 動的解析で個別に設定が必要なパラメータ
- 部材や地盤の材料減衰
- 継手や支承部の摩擦
- 空気抵抗
- 地盤からの逸散減衰
- 振幅依存性

■ 実験データ・強震観測データ等に基づいて経験的に設定



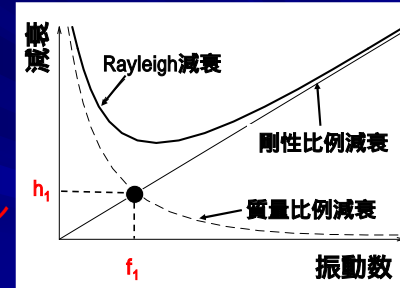
橋のモデル化(11)

■ 減衰力のモデル化

- 構造部材別に減衰定数を設定
- ひずみエネルギー比例法で振動モード毎の減衰定数を算定

■ 一般的な減衰モデル

- モード減衰定数 h_i
- 質量比例減衰 M
- 剛性比例減衰 K
- Rayleigh減衰 $M + K$



f_1 : 1次の固有振動数

h_1 : 1次のモード減衰定数

橋のモデル化(12)

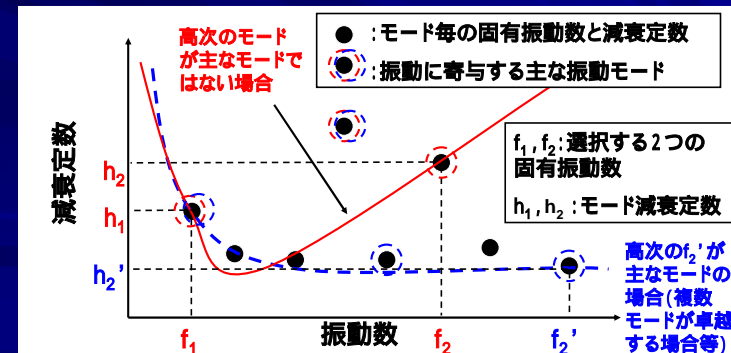
■ 構造部材別の一般的な減衰定数(道示参考値)

| 構造部材 | 鋼構造 | コンクリート構造 |
|------|---|-----------------------------|
| 上部構造 | 0.02 (線形部材) | 0.03 (線形部材) |
| ゴム支承 | 等価減衰定数 (0.03、あるいは、使用するゴム支承の実験値) | |
| 免震支承 | 0 (バイリニアモデルの場合、履歴減衰のみを考慮) あるいは、等価減衰定数(線形モデルの場合) | |
| 橋脚 | 0.01 (非線形部材) 0.03 (線形部材) | 0.02 (非線形部材) 0.05 (線形部材) |
| 基礎 | 線形バネ: 10% (種地盤、直接基礎) 20% (種種地盤、杭基礎、ケーソン基礎) | |

橋のモデル化(13)

■ 減衰モデルの設定例(1)

- モード減衰定数: 固有値解析から振動次数毎に算出
- Rayleigh減衰: モード減衰を近似する方法の1つで、主な振動モードのモード減衰を概ね下回るように2つの振動モードを選定



橋のモデル化(14)

■ 減衰モデルの設定例(2)

1. ひずみエネルギー法によるモード減衰定数の算出時及び減衰マトリックス作成時の部材剛性Kの設定例

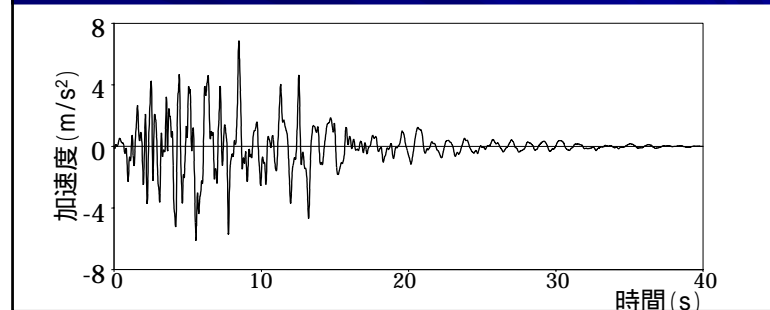
一般に等価線形でモデル化

- ・RC橋脚、鋼製橋脚: 1次剛性(降伏剛性)
 - ・ゴム支承: 等価剛性
 - ・免震支承: 等価剛性(1次剛性も)
 - ・線形部材: 弾性剛性
 - ・基礎・地盤: 等価剛性(降伏させない場合)
2. ダンパー・すべり摩擦等の新しい部材等により減衰性能を付加する場合はモデル化に注意

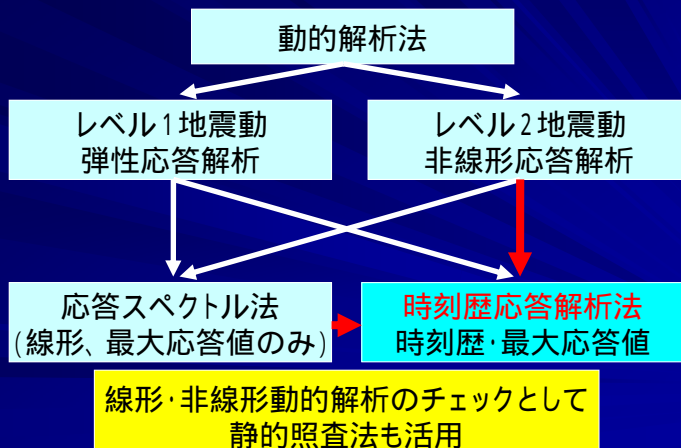
入力地震動

■ 入力地震動の設定

- ・時刻歴波形、応答スペクトル
- ・非線形動的解析: 時刻歴加速度波形(道示標準波)
(時間刻み毎のデジタルデータ)



動的解析法の選定



動的解析結果の出力

- 固有振動特性(揺れやすい振動は?)
 - ・固有周期(固有振動数)、振動モード
 - ・刺激係数、有効質量
- 応答値(橋の地震時挙動は?)
 - ・時刻歴応答波形(変位、加速度、速度、断面力等)
 - ・履歴曲線(RC橋脚のM~ の履歴図等)
 - ・最大応答値(変位、加速度、速度、断面力等の最大値と分布図)

最大応答値だけではなく、いずれも必ず出力して要チェック(エラーのチェックに有効)

固有振動特性

■ 橋の揺れやすい振動は？

- ・固有周期(固有振動数)、振動モード
- ・刺激係数、有効質量 **主要な振動モードの把握**

1次振動

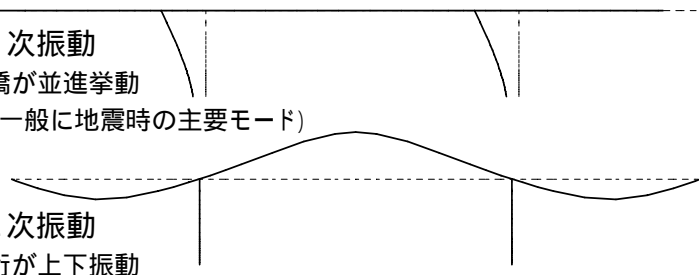
橋が並進挙動

(一般に地震時の主要モード)

2次振動

桁が上下振動

(桁橋の地震応答には一般に寄与しない)

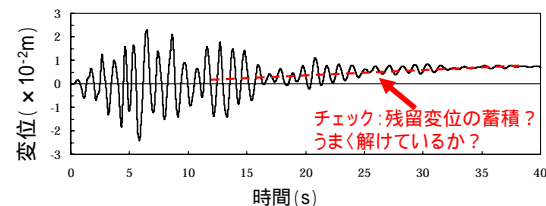


時刻歴応答波形

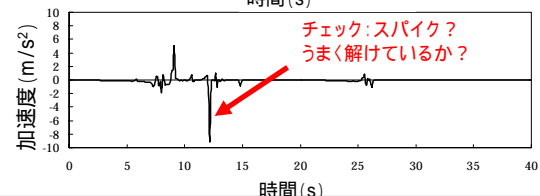
■ 橋はどのように振動するか？

- ・入力地震動に対する橋の揺れ方(正負の交番振動)

変位波形



加速度波形



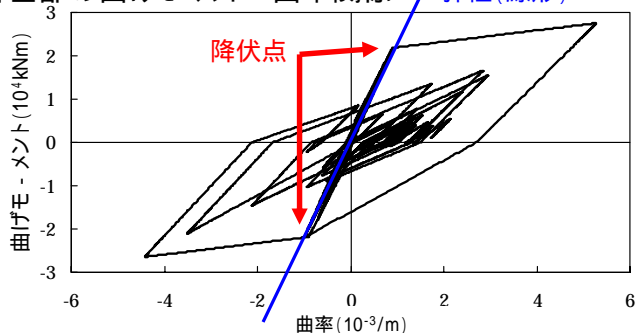
履歴曲線

■ 非線形部材の振動特性は？

- ・力と変位の関係等は、設定した履歴モデル上を動いているか(線形解析の場合は、直線上を)

橋脚基部の曲げモーメント～曲率関係

弾性(線形)

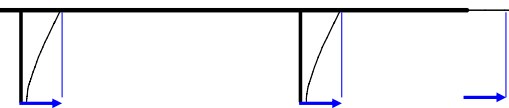


最大応答値の分布

■ 性能照査に用いる最大応答値は？

- ・卓越振動モードと類似した形状

最大変位



チェック: 上部構造が水平に変位する分布になっているか?

曲げモーメント



チェック: 橋脚基部で大きな断面力になっているか?

断面力の分布に不連続(釣り合っていないところ)はないか?

耐震性能の照査

■ 性能照査

- ・レベル1:最大応答値(応力度、変位等)が許容値以下(許容応力度以下)
- ・レベル2:最大応答値(断面力、変位、塑性率、残留変位等)が許容値以下

■ 照査時のチェック点

- ・想定した箇所以外に塑性化が生じていないか？(塑性ヒンジ以外の箇所)
- ・塑性化により橋全体系が不安定にならないか？
- ・塑性化を考慮してはならない部材に塑性化が生じていないか？

照査結果の断面設計へのフィードバック

■ 照査を満足しない場合(静的照査法と同じ)

- ・塑性化を考慮しない部材:断面力の超過
軸方向鉄筋量増、断面増による耐力アップ
- ・塑性化を考慮する部材:
 - 塑性率の超過 帯鉄筋増によるじん性アップ、あるいは、耐力アップ
 - 残留変位の超過 耐力アップ
- ・ゴム支承:変形が超過
剛性(固有周期)の変更、減衰増
- ・橋全体系:変位が大
耐力アップ、剛性アップ

動的耐震設計のチェックポイント(1)

■ 動的解析結果の評価

- ・データを入力すると結果が出てくるが、結果が正しいかどうか評価できない。

■ ソフトウェア自体のバグ

- ・0ではない。
- ・詳細な解析法(収束解析法等)が異なるソフトウェアのベンチマーク解析によれば、同一のモデルを用いれば、概ね同様の結果を得る(マニュアル応用編)
通常は、ユーザーのモデル化、入力条件の設定が影響する場合が多い。

動的耐震設計のチェックポイント(2)

■ 動的解析結果の評価

- ・データを入力すると結果が出てくるが、結果が正しいかどうか評価できない。

■ チェックポイント

- ・確認事項:正しく解析できているか？
- ・比較解析(モデルやデータの設定変更による感度)
- ・解析法間の比較
(静的解析(プッシュオーバー解析)や線形解析)
動的解析の前に実施をしておくことが有効
- ・レベル1地震動に対する解析結果、設計震度の下限值($k_{hc} = 0.4c_z$)や地震時保有耐力法(例えば、降伏震度の大きさ:0.4~0.7程度)との対比

動的耐震設計のチェックポイント(3)

■ モデルは大丈夫か？

- ・モデル(座標値、剛性、質量)が違ってないか？
- ・支承条件などの境界条件は大丈夫か？

■ チェックポイント

固有周期は一般的な橋のものか？

一般的な橋 : 0.5 ~ 1.0 秒

規模の大きい橋 : 1.0 ~ 1.5 秒

ゴム支承の橋 : 1.0 ~ 1.5 秒

モード形状は、一般に橋が振動すると考えられる形状か(トップヘビーな振動性状)？

1次振動が卓越しているか？

動的耐震設計のチェックポイント(4)

■ 応答波形は適切か？

- ・入力波形は大丈夫か？
- ・解析の時間刻みは粗すぎないか？
- ・一般的でない新しい非線形モデル(剛性変化が著しい等)を使っていないか？

■ チェックポイント

波形の周期特性は橋の卓越モードの固有周期と近似しているか？

地震入力波形の形状と大きく違ってないか？

波形にスパイク等が生じていないか？

ノイズのような高い周期の成分が生じていないか？

履歴曲線は設定モデルと違ってないか？

動的耐震設計のチェックポイント(5)

■ 最大応答値は適切に求められているか？

- ・モデルと入力データは大丈夫か？

■ チェックポイント

応答値の分布は橋の振動性状と近いかな？

応答値の分布は卓越モード形状に近い分布かな？

3地震動の応答値が大きく違ってないかな？

応答値が極端に大きく、または、小さくなってないかな(静的照査、線形解析、下限値との対比)？

塑性化を生じさせない部材で塑性化してないかな？

断面力応答と非線形モデルの履歴曲線に不一致はないかな？

断面力分布に不連続(不釣合)が生じてないかな？

動的耐震設計のチェックポイント(6)

■ 設計へのフィードバックは適切か？

- ・モデルと入力データは大丈夫か？

■ チェックポイント

断面変更後の応答値が意図する方向に変わっているかな？

軸方向鉄筋・断面を増やして、耐力を大きくしたら応答値は下がったかな？

帯鉄筋増によりじん性を増やしたのに、断面力が大きくなってないかな？

免震支承の剛性を小さくして固有周期を延ばしたのに応答値が大きくなってないかな？

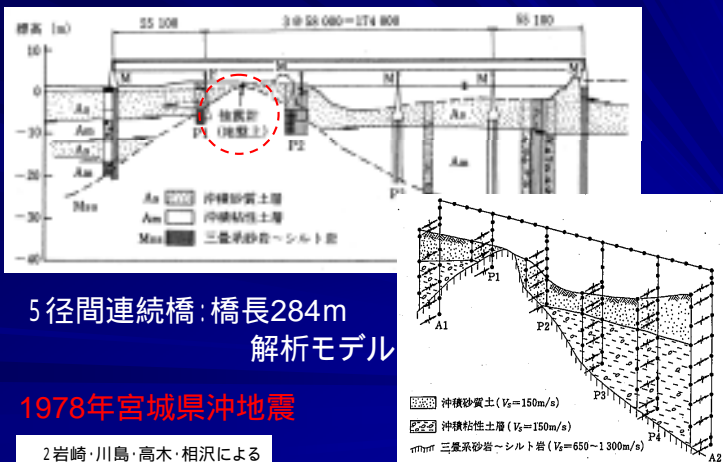
まとめ

- 今後の動的耐震設計の有効活用
- 使いこなすチェックポイント
 - ・機械的に入力と出力結果だけを見ない。
 - 必ず、固有周期、波形、履歴、最大変位、最大断面力図を出力し、解析した振動性状に異常がないか確認する。
 - ・応答値の傾向を確認する。
 - 静的照査の延長線上。したがって、線形解析、静的解析（プッシュオーバー解析等）と併用して、解析した結果に異常がないか確認する。
 - ・ダンパー等新しいモデルを用いる場合は、橋全体系での実験等により検証されたものを用いる。

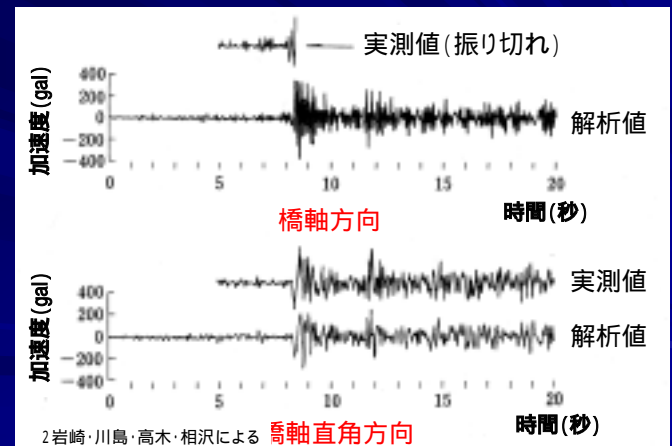
最後に：動的耐震設計の有効性の例

- 実験データや地震観測記録の蓄積
 - ・解析法全ての共通であるが、解析法や解析パラメータ等について実験等との検討、検証が不可欠
 - ・実験データ、観測データの蓄積が重要
- これまでの検証データの例
 - ・強震観測記録のシミュレーション
 - ・模型振動台実験のシミュレーション

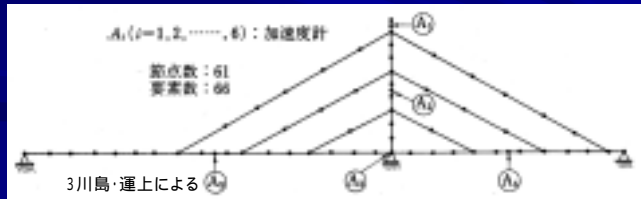
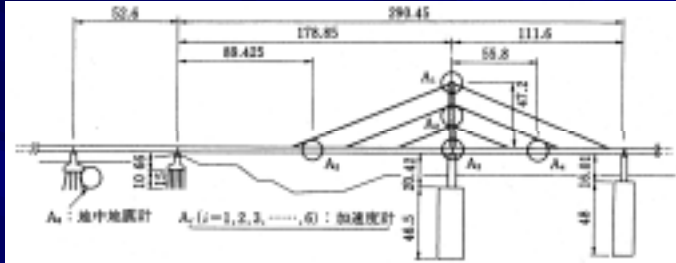
地震観測と解析の比較例：開北橋（1）



地震観測と解析の比較例：開北橋（2）

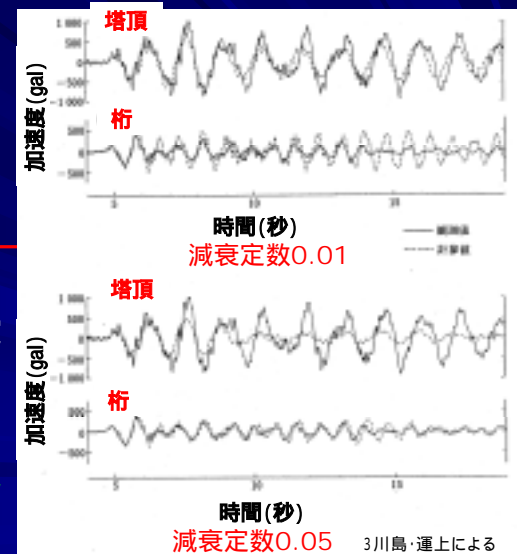


地震観測と解析の比較例:水郷大橋(1)



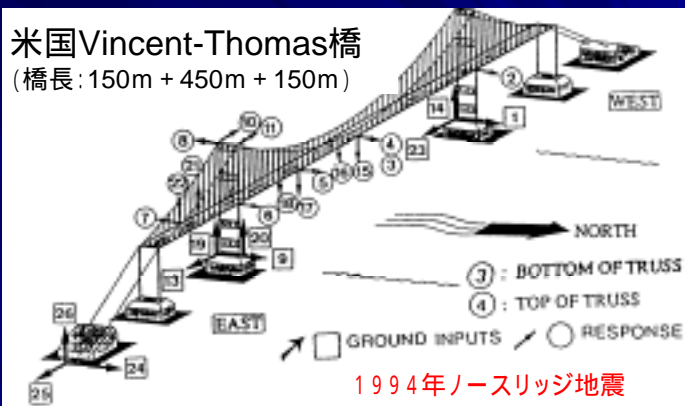
地震観測と解析の比較例:水郷大橋(2)

- 1987年千葉県東方沖地震
- 減衰定数をパラメータにした解析の場合
- ・主塔: 0.01程度
- ・桁: 0.05程度



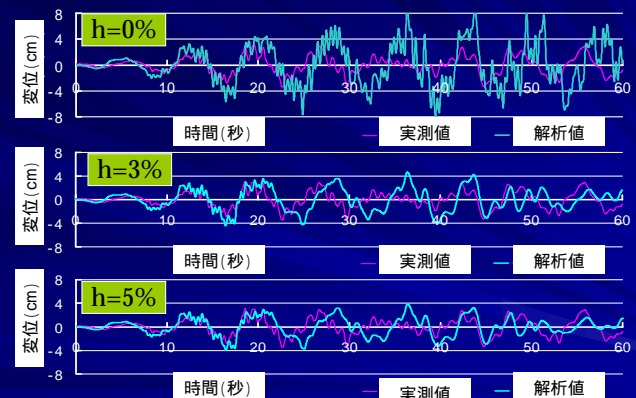
地震観測と解析の比較例:吊橋(1)

米国 Vincent-Thomas 橋
 (橋長: 150m + 450m + 150m)



4 Abdel-Ghaffarらによる

地震観測と解析の比較例:吊橋(2)



- 減衰定数をパラメータにした解析の場合
- 主塔: 0.03 ~ 0.05、桁: 0.05程度

鉄筋コンクリート橋脚模型の振動台実験

補強前

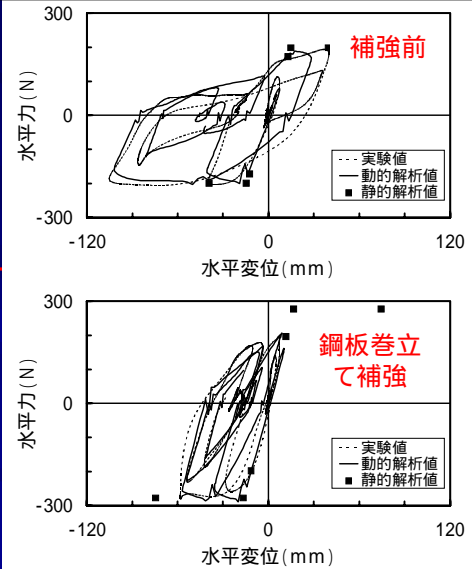


鋼板巻立て補強

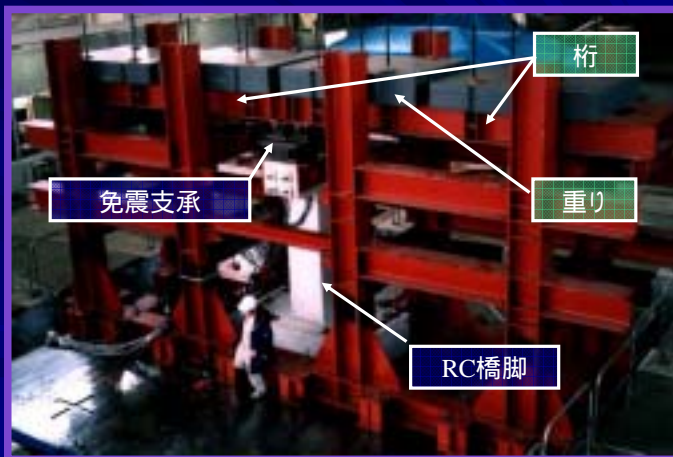


鉄筋コンクリート橋脚模型の振動台実験と解析の比較例

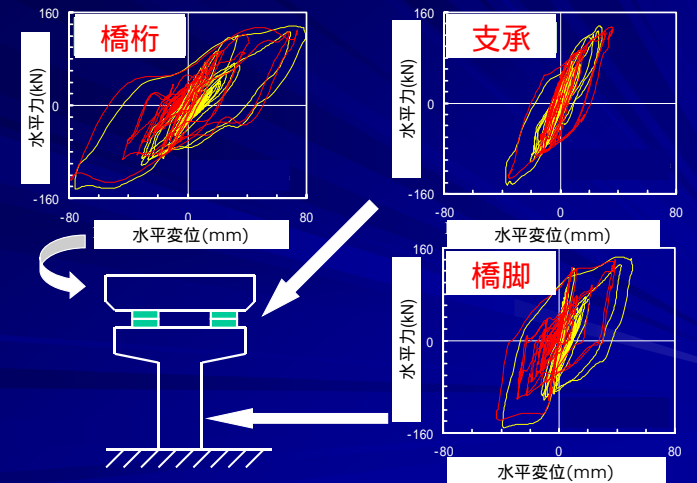
- 1995年神戸海洋気象台記録
- 一般的な解析方法(パイリニア型 Takedaモデル)との比較例



免震橋の振動台実験



免震橋の振動台実験と解析の比較例



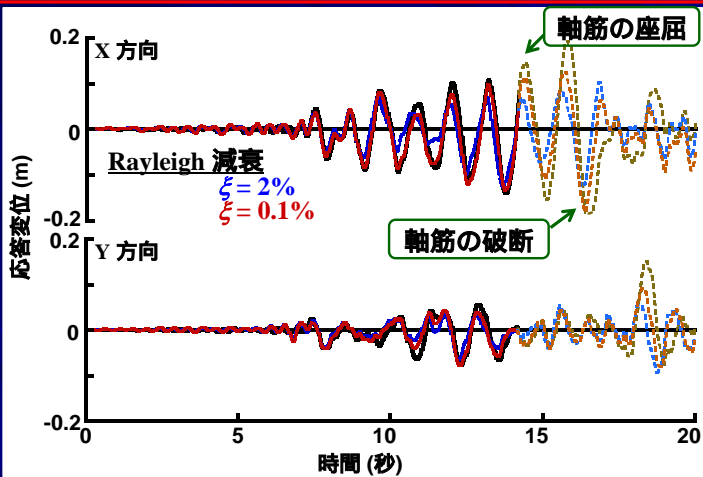
鉄筋コンクリート橋脚の振動台実験 - 3方向加振の例(1) -



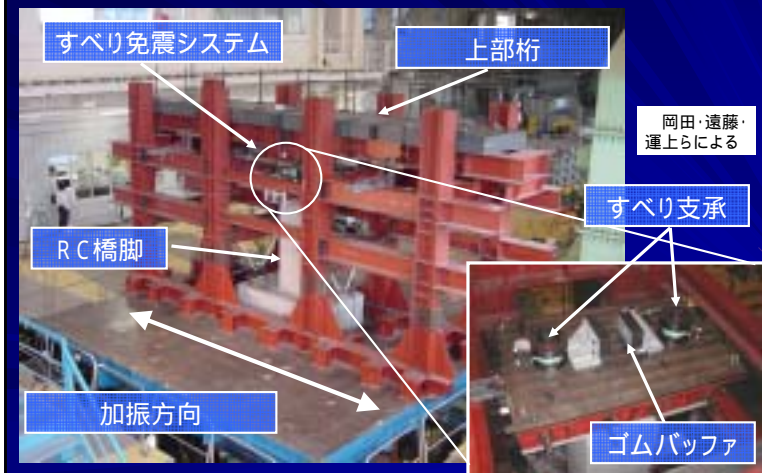
鉄筋コンクリート橋脚の振動台実験 - 3方向加振の例(2) -



振動台実験と解析の比較例 - 3方向加振の例 (ファイバーモデル) -



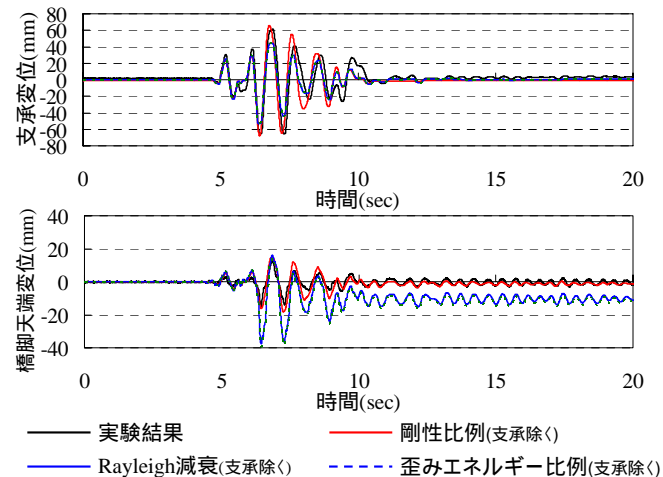
すべり支承を用いた免震橋の振動台実験



すべり支承を用いた免震橋の振動台実験



すべり免震橋の振動台実験と解析の比較例



まとめ

■ 実験データや地震観測記録の蓄積

- ・剛性や減衰等の部材のモデルやパラメータの設定によりばらつきはあるが、動的解析の有効性検討
- ・今後さらに実験データ、観測データの蓄積によるモデルのアップデートが重要



- ・新しい優れた技術の採用を、より積極的に行うことが可能となる性能設計時代に即した性能検証技術(実験技術、解析技術)の開発、発展

謝辞

■ 参考文献

- 本プレゼンデータ内で以下の文献を参考にさせていただきました(ページに文献番号を付しています)。
- * 1 栗林栄一、岩崎敏男: 橋梁の耐震設計に関する研究()
- 橋梁の振動減衰に関する実験結果 -、土木研究所報告、第139号、1970年
 - * 2 岩崎敏男、川島一彦、高木義和、相沢興: 開北橋における地盤とケーソン橋脚の動的相互作用の解析、土木学会論文報告集、第322号、pp.15-24、1982年
 - * 3 Kawashima, K., Unjoh, S. and Azuta, Y.: Analysis of Damping Characteristics of A Cable Stayed Bridge based on Strong Motion Records, Journal of Structural Engineering/Earthquake Engineering, Vol. 7, No.1, pp.181-190, 1990
 - 4 Abdel-Gaffar, et al: Seismic Behavior of Cable-stayed and Suspension Bridges, Ponts Suspendus Et Ahaubans, Deauville, France, 1994

ご静聴ありがとうございました。

PWRC 財団法人 土木研究センター
Public Works Research Center

Copyright(c) 2007 Shigeki Unjo All rights reserved.