

耐震解析

耐震設計の基本的考え方、静的・動的照査法

(株)長大

深谷 茂広

鋼構造基礎講座
「鋼構造における有限要素法の基礎とその適用に関する講習会」

耐震解析
～耐震設計の基本的考え方, 静的・動的照査法～

2008年6月26日

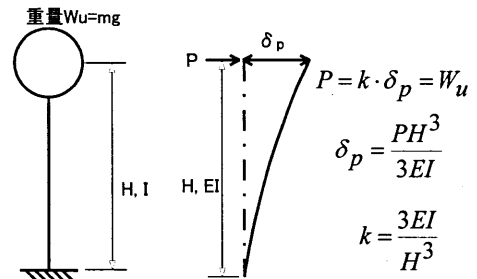
株式会社 長大 深谷茂広

目次

1. 耐震解析の基礎
2. 耐震設計の基本的考え方
3. 静的照査法
4. 動的照査法
5. 最近の話題

1. 耐震解析の基礎

振動の基本式 1質点モデル



運動方程式

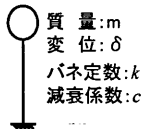
1自由度系の様々な表現

$$m\ddot{\delta} + c\dot{\delta} + k\delta = -m\ddot{z}_g$$

$$m(\ddot{\delta} + \ddot{z}_g) + c\dot{\delta} + k\delta = 0$$

$$(\ddot{\delta} + \ddot{z}_g) + \frac{c}{m}\dot{\delta} + \frac{k}{m}\delta = 0 \quad 2h\omega = \frac{c}{m} \quad \omega^2 = \frac{k}{m}$$

$$(\ddot{\delta} + \ddot{z}_g) + 2h\omega\dot{\delta} + \omega^2\delta = 0$$



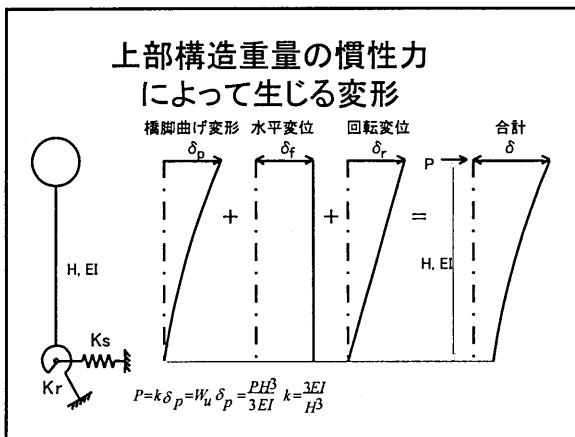
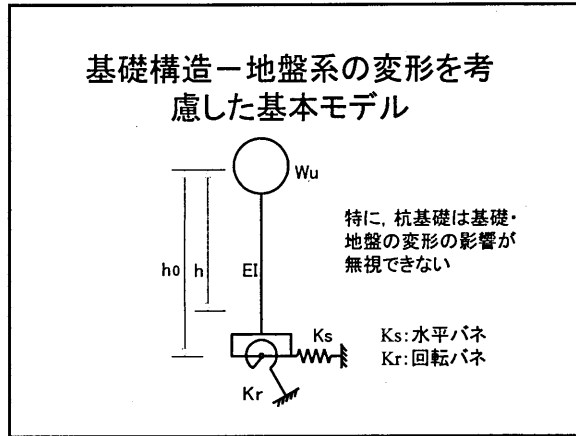
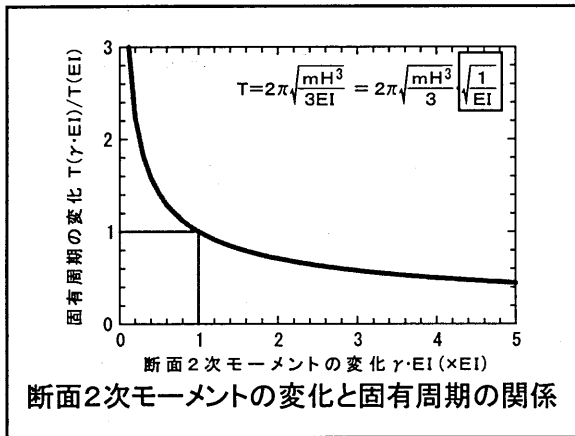
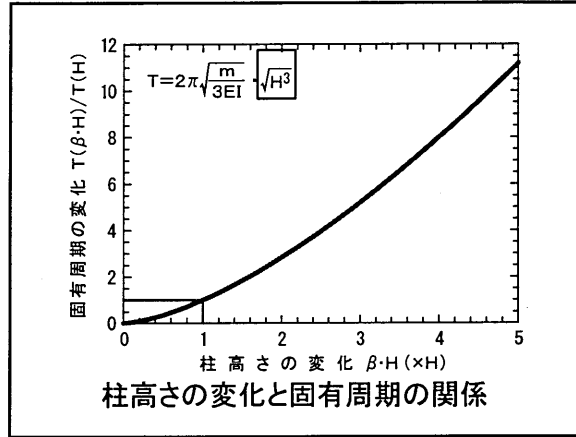
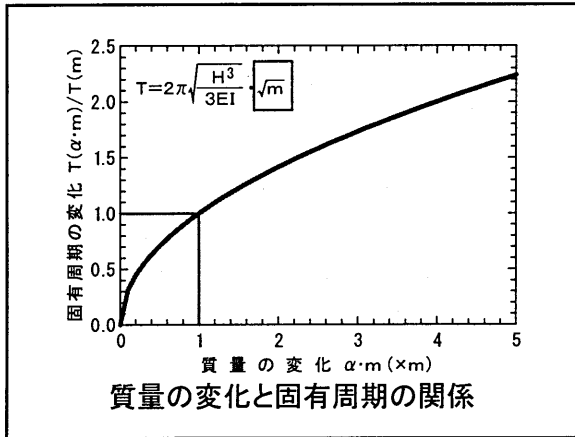
固有振動数, 固有周期

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{\frac{K}{W_u/g}} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K \cdot g}{W_u}}$$

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{W_u}{g \cdot K}} = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{W_u}{K}} \doteq 2.01 \sqrt{\frac{W_u}{K}}$$

$$P = K \cdot \delta_p = K \cdot \frac{PH^3}{3EI} \quad K = \frac{3EI}{H^3}$$

$$T \doteq 2.01 \sqrt{\frac{W_u H^3}{3EI}} = 2.01 \sqrt{\delta_p}$$



直列バネシステム

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{k_s} + \frac{h_0^2}{k_r}} = \frac{1}{\frac{h^3}{3EI} + \frac{1}{k_s} + \frac{h_0^2}{k_r}}$$

耐震解析法の分類

静的解析法

震度法: 質量に水平震度を乗じた水平力を静的に作用
 修正震度法: 固有周期と振動モードを考慮した水平力を静的に作用
 地震時保有水平耐力法: 非線形応答変位をエネルギー—定則等により近似的に求める
 プッシュオーバー解析: 振動モードを考慮した水平力を静的に漸増させ、非線形領域の荷重と変位の関係を求める

動的解析法

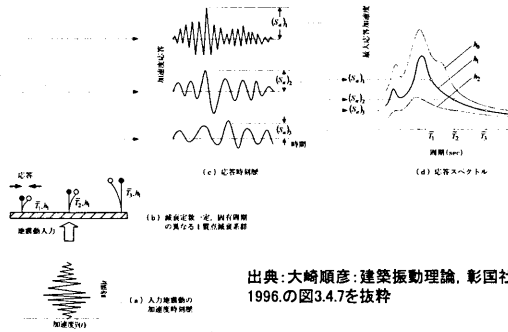
応答スペクトル法: モーダルアナリシスによる加速度応答スペクトル法、線形最大応答値の算出に限られる
 時刻歴応答解析: 直接積分法による応答解析、ニューマークβ法が一般的、非線形領域の応答解析に適する

耐震解析法の分類

	分類	振動特性	線形or非線形
震度法	静的	一様分布	線形
修正震度法	静的	考慮する注1	線形
地震時保有水平耐力法	静的	一様分布	材料非線形
プッシュオーバー解析	静的	考慮する注1	複合非線形注2
応答スペクトル法	動的	考慮する	線形
時刻歴応答解析法	動的	考慮する	線形 複合非線形注2

注1: 卓越振動モードの固有周期と振動形状をもとに慣性力とその分布を定める
 注2: 幾何学的非線形および材料非線形を考慮した非線形解析

加速度応答スペクトル



最大応答加速度と最大応答変位

固有周期T秒, 減衰定数hの1自由度系
 最大応答加速度SA

$$SA(T, h)$$

最大応答変位SD

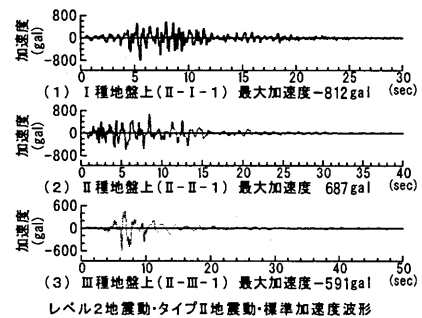
$$SD(T, h) = \frac{SA(T, h)}{\omega^2} = \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2 \cdot SA(T, h)$$

柱基部のせん断力と曲げモーメント

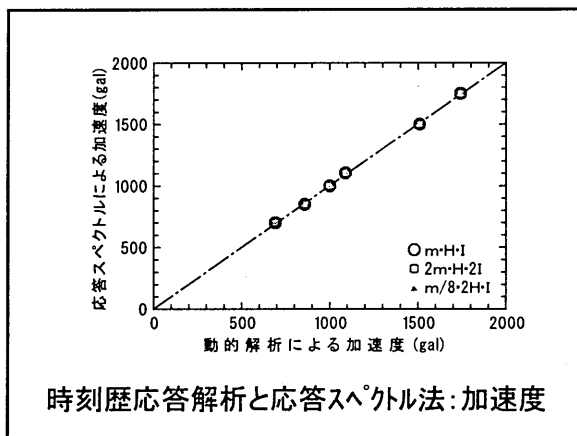
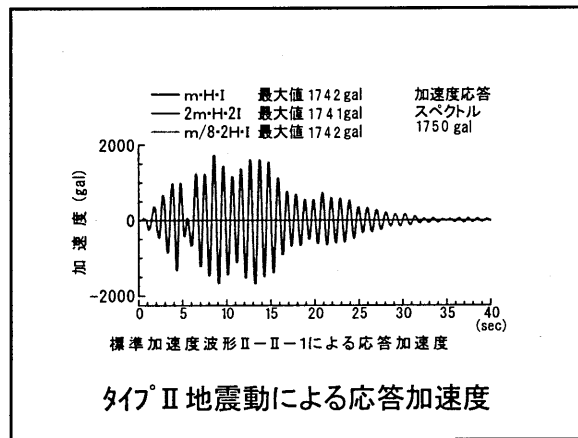
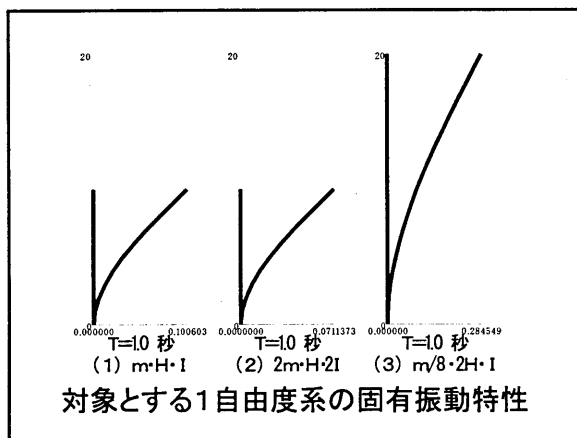
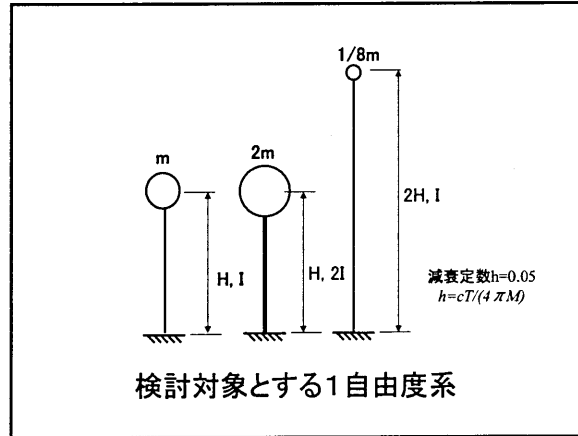
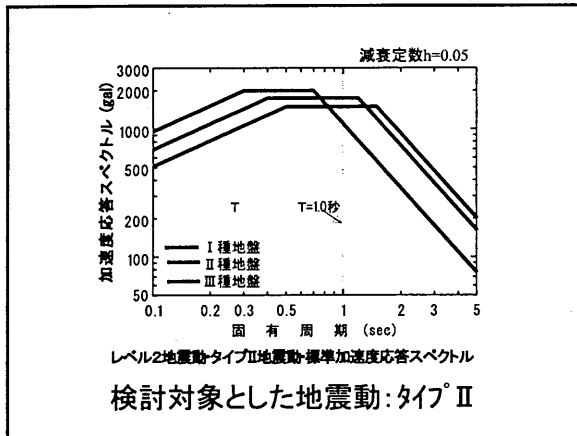
柱の高さ(慣性力作用位置の柱基部からの高さ) H, 上部構造重量Wuのとき,

$$\text{柱基部のせん断力} \quad \frac{W_u}{g} \cdot SA(T, h)$$

$$\text{柱基部の曲げモーメント} \quad \frac{W_u}{g} \cdot SA(T, h) \cdot H$$



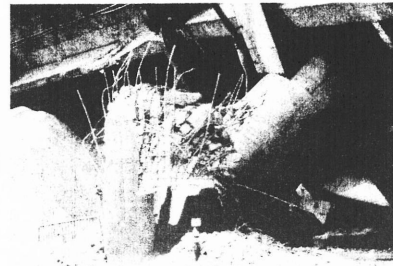
検討対象とした地震動: タイプ II



2. 耐震設計の基本的考え方

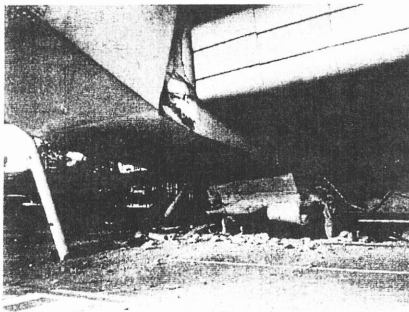
地震被害と耐震設計法の変遷

	主な被害地震	提起された課題	地震工学の発展
I	関東(1923) 福井(1948)	<ul style="list-style-type: none"> 破壊的な構造物の被害 地震動に対する地盤特性の影響 地震後の火災 	<ul style="list-style-type: none"> 静的荷重による設計 建物に震度法採用 (K=0.1) : 1924 道路橋 (K=0.2) : 1939 建築基準法 (K=0.2) 1950
II	新潟(1964) 十勝沖(1968) 宮城県沖(1978)	<ul style="list-style-type: none"> 液状化 RCのせん断破壊 ライフラインの被害 	<ul style="list-style-type: none"> 動的設計法 RCの弾塑性設計法 液状化対策 ライフライン耐震工学
III	兵庫県南部(1995)	<ul style="list-style-type: none"> 断層近傍域の地震動 非線形応答と破壊 土構造物の大変形と破壊 液状化地盤の側方流動 危機管理、防災情報 	<ul style="list-style-type: none"> 二段階設計法 構造物と地盤の塑性設計法 性能設計、許容リスク リアルタイム地震防災 既存社会基盤施設



せん断破壊し、倒壊したRC橋脚
1995. 1. 17兵庫県南部地震で倒壊したピルツ橋の橋脚と杭

阪神・淡路大震災調査報告編集委員会（土木学会・地盤工学会・日本機械学会・日本建築学会・日本地震学会）：阪神・淡路大震災調査報告、土木構造物の被害、橋梁、1996. 12より



1995. 1. 17兵庫県南部地震で崩壊した建石交差点の鋼製橋脚

兵庫県南部地震の教訓に基づく、土木学会の提言

- ・ 構造物の性能照査では、供用期間内に1から2度発生する確率の地震動強さ(レベル1地震動)と、発生確率は低いが断層近傍域で発生する極めて大きな地震動強さ(レベル2地震動)の2段階の地震動を想定する。
- ・ 構造物が保有すべき耐震性能、すなわち想定された地震動強さの下での構造物の機能の状態や損傷の度合は、その構造物の重要度と地震動強さの発生頻度を考慮して決定すべきである。

土木学会の提言が設計基準類に反映される

- ・ 土木学会の提言を受けて、2段階設計法、性能設計法の考え方が取り入れられる。
- ・ 道路橋示方書(1996)
- ・ 建築基準法(1998)
- ・ 鉄道構造物等設計標準(1999)
- ・ 港湾の技術上の基準(1999)など

道路橋の耐震性能

耐震性能の定義

- ・ 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
- ・ 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
- ・ 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

道路橋の設計地震動と目標とする耐震性能

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Iの地震動 (プレート境界型の大規模な地震) 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)	地震による損傷が橋として致命的と見なされない性能(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)

設計に考慮するレベル2地震動(道路橋)

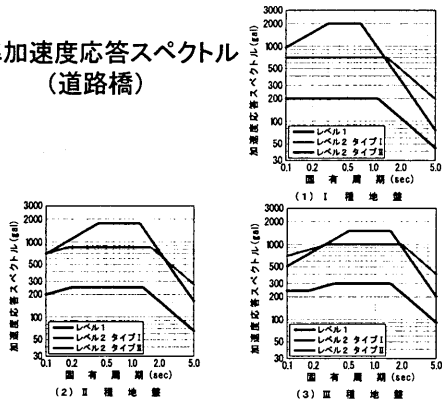
レベル2地震動：発生確率は低いが断層近傍域で発生する極めて大きな地震動強さの地震

タイプIの地震動：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動

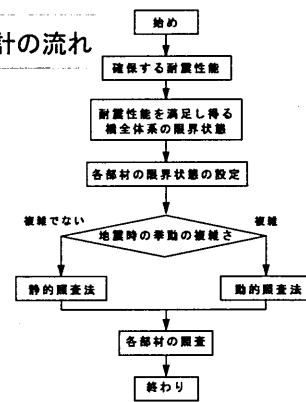
特徴：地震動の時間が長く、繰返し回数が多い

タイプIIの地震動：平成7年兵庫県南部地震の様に発生確率が極めて低いマグニチュード7級の内陸直下型地震による地震動

標準加速度応答スペクトル(道路橋)



基本的な耐震設計の流れ



橋の耐震性能と塑性化させる部材

塑性化を考慮する部材の選定のポイント(耐震性能2)

- 塑性化を考慮しようとする部位において確実なエネルギー吸収が図れるか？ その部位の塑性化が橋全体の安定性に支障を来さないか？
- その部位の損傷は修復可能か？ また修復は容易にできるか？(修復性)
- その部位の損傷により交通確保が不可能とならないか？(供用性)

耐震性能の照査方法

橋の動的 特性 照査 をする 耐震性能	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に生じる橋及び材料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、複雑な震動挙動を伴う橋	静的照査法	動的照査法
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	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	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	動的照査法
適用する橋の例	上記以外の条件の橋	・ゴム支床を用いた地震時水平力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	・固有周期の長い橋 ・橋脚高さが高い橋	・斜張橋、吊橋等のケーブル系の橋 ・上・中陸式アーチ橋 ・曲線橋	

3. 静的照査法

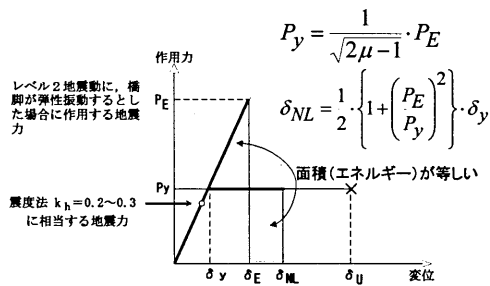
震度法, 地震時保有水平耐力法

- ・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簡便に推定
- ・非線形応答の推定精度にばらつきがあり, 安全側の判断が必要となる。
- ・橋の構造条件や振動モードによって適用条件に制約がある。

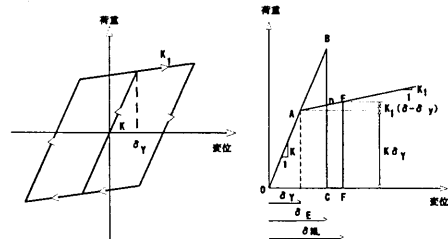
震度法と地震時保有水平耐力法

静的照査法による耐震性能の照査		
分類	震度法	地震時保有水平耐力法
地震動	レベル1	レベル2
特徴	構造物の弾性域の振動特性を考慮して, 地震による荷重を静的に作用させて応答を求め, 耐震設計する	構造物の非線形域の変形性能や動的耐力を考慮して, 地震による荷重を静的に作用させて応答を求め, 耐震設計する

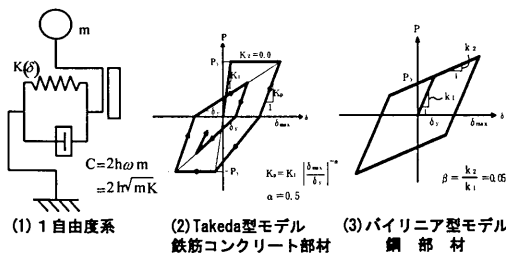
地震時保有水平耐力法



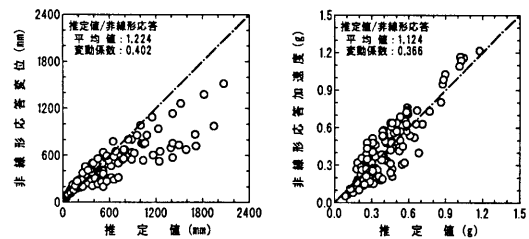
レベル1地震動とレベル2地震動による弾性応答の比較



バイリニア型の復元力特性を有する非線形系の非線形応答の性質

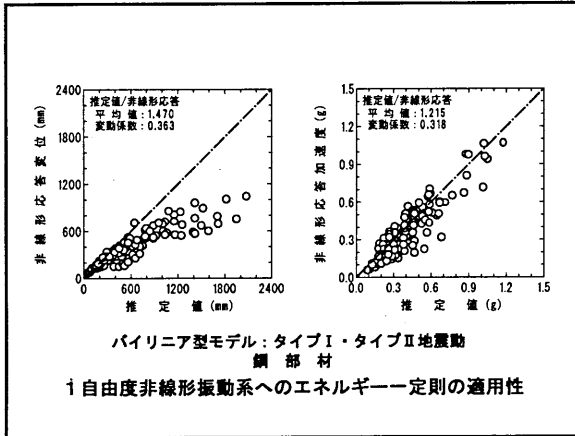


エネルギー一定則の推定精度を検討した1自由度非線形系



Takeda型モデル: タイプI・タイプII地震動 鉄筋コンクリート部材

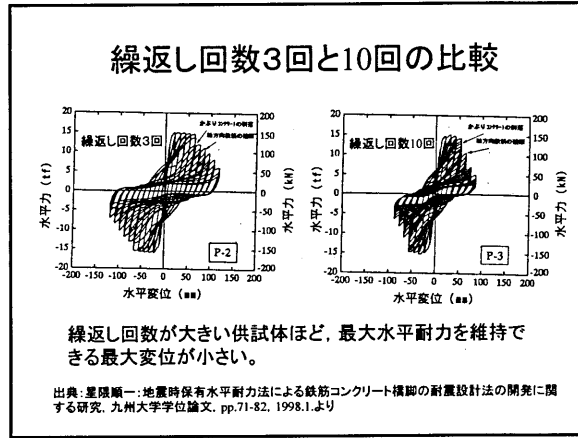
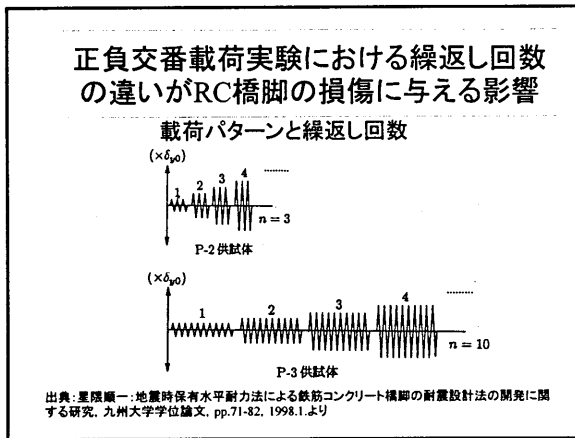
1自由度非線形振動系へのエネルギー一定則の適用性



4. 動的照査法

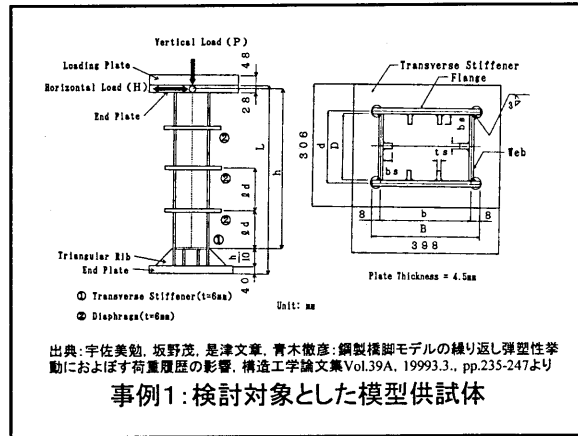
時刻歴応答解析法による応答推定

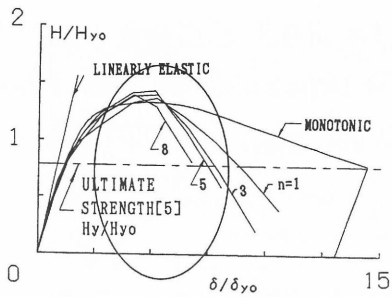
- ・非線形応答変形は静的解析よりも精度よく推定
- ・非線形部材の復元力には繰返し载荷の特性を評価する
- ・様々な形式の橋に適用可能
- ・解析モデルの設定法等が解析結果に重要な影響を及ぼすこともあり、求められた結果の妥当性の評価や解析結果の耐震設計への反映方法等については、動的照査法に関する適切な知識と技術が必要



正負交番载荷実験における繰返し回数の違いが鋼製橋脚の損傷に与える影響

最大水平耐力付近までの領域であれば、载荷繰返し回数の影響をほとんど受けず安定した塑性履歴が得られる
(道路橋示方書V耐震設計編, 平成14年3月, pp.395)



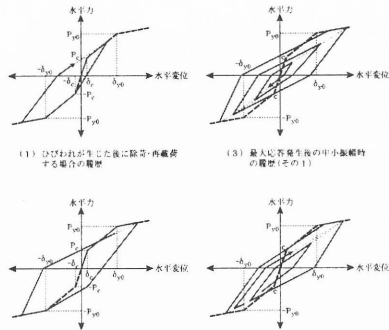


水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線

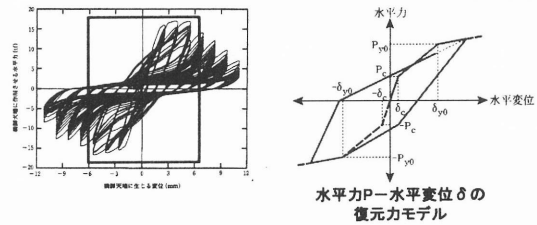
出典：宇佐美勉、坂野茂、是津文章、青木徹彦：鋼製橋脚モデルの繰り返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響、構造工学論文集Vol.39A、1999.3.、pp.235-247より

復元力モデルの留意点

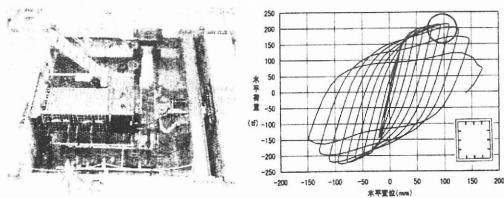
地震力を受ける場合は、繰返し力を受けるので、一方向に荷重を受ける時の挙動だけでなく繰返し加力に伴う荷重-変形曲線が示すループの形状や面積、繰返し加力に伴う耐力低下や劣化などの性状も重要で、このような場合には履歴特性と呼ばれることもある。



鉄筋コンクリート部材の復元力モデル：Takeda型モデル

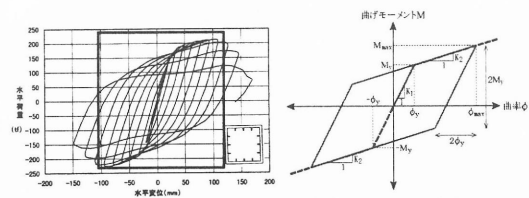


鉄筋コンクリート橋脚の正負交番載荷実験結果とTakedaモデル



コンクリートを充填した鋼製橋脚の正負交番載荷実験例

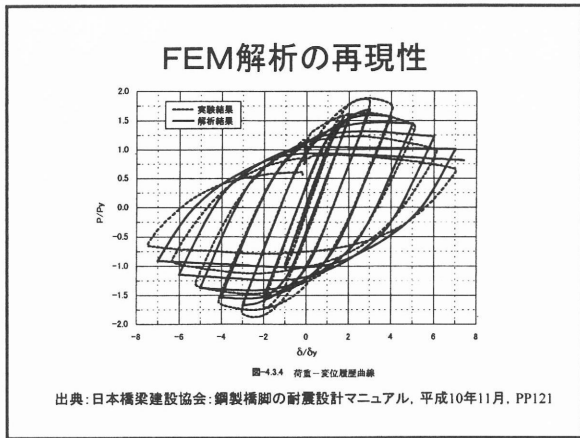
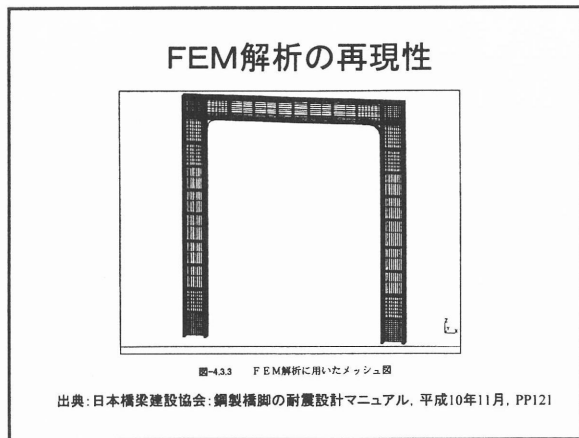
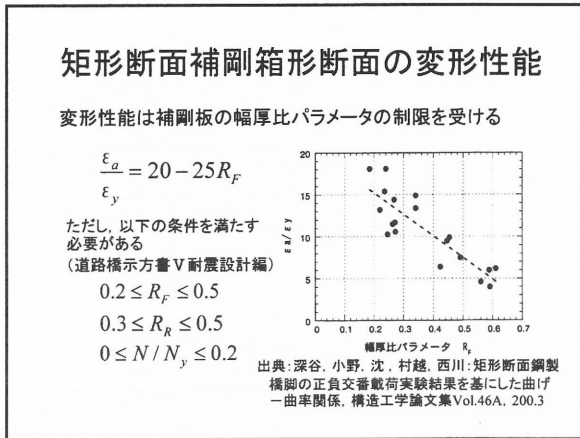
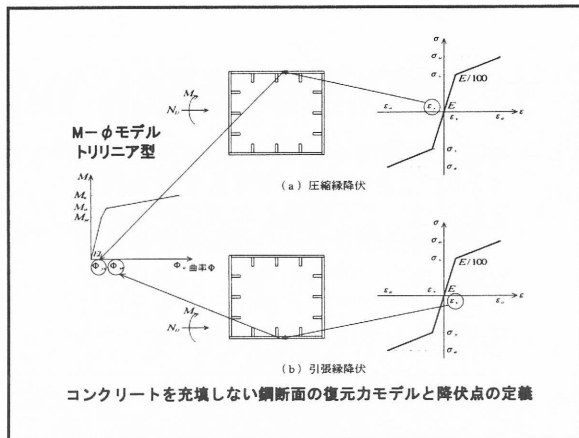
出典：建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社、鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会、道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書（Ⅶ）-鋼製橋脚の正負交番載荷実験（その2）、1998.9.



曲げモーメントM-曲率phiの復元力モデル

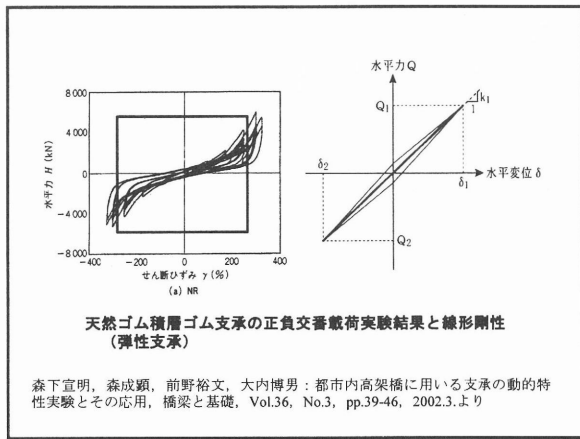
コンクリート充填鋼製橋脚の正負交番載荷実験結果とバイリニアモデル

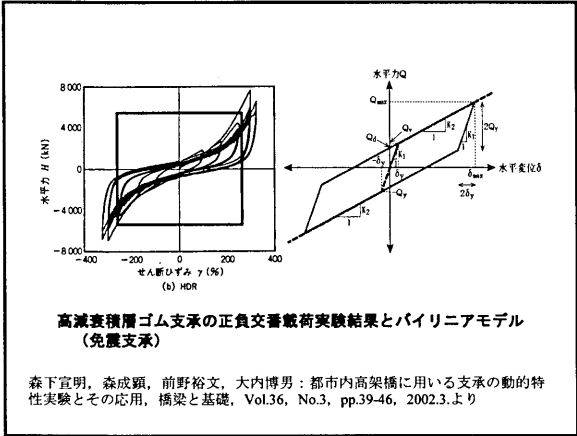
出典：建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社、鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書（Ⅶ）-鋼製橋脚の正負交番載荷実験（その2）、1998.9.



積層ゴム支承の復元力モデル

- 天然ゴム積層ゴム支承, 高減衰積層ゴム支承, 鉛プラグ入り積層ゴム支承の正負交番載荷実験結果によると, 何れの積層ゴム支承系とも, せん断ひずみが200~250%を越える付近から, ハードニングが顕著となる。
- 積層ゴム支承の耐震設計上の許容値は, ハードニング現象が顕著とならない領域で積層ゴム支承を用いるという観点から決まっている。
⇒250%以下





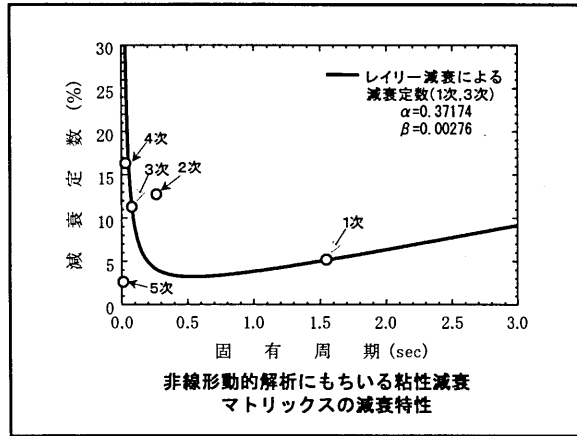
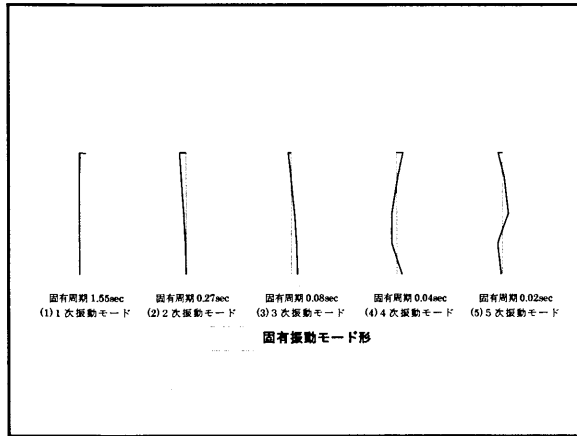
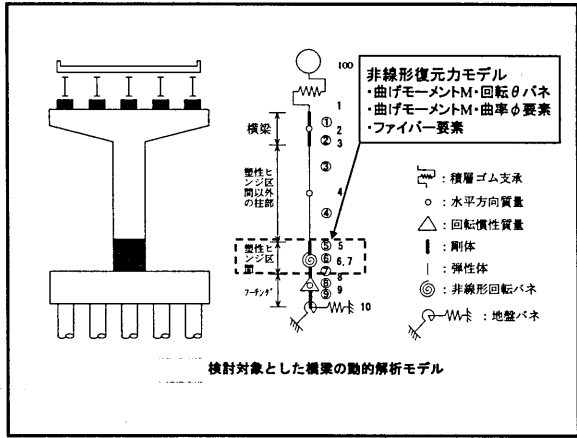
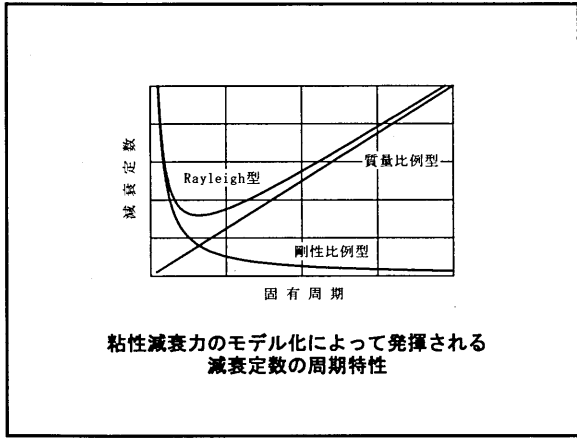
減衰マトリックスの作り方

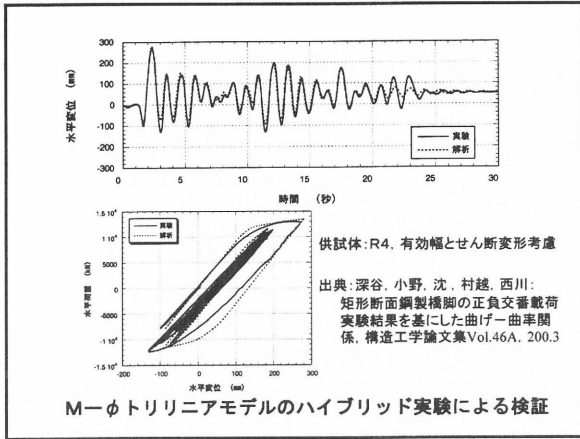
- 1) 質量比例型粘性減衰マトリックス

$$C_M = \alpha M$$
- 2) 剛性比例型粘性減衰マトリックス

$$C_K = \beta K$$
- 3) Rayleigh型粘性減衰マトリックス

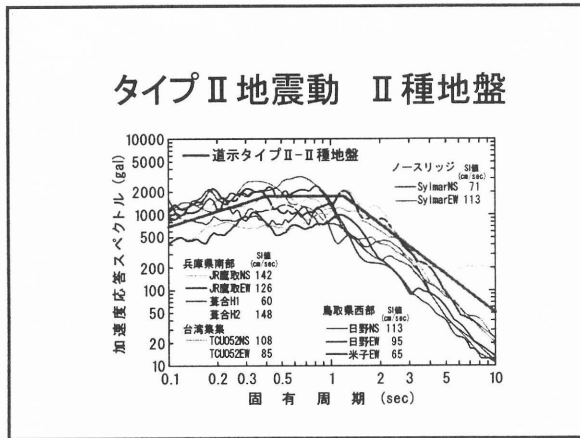
$$C_R = \alpha M + \beta K$$



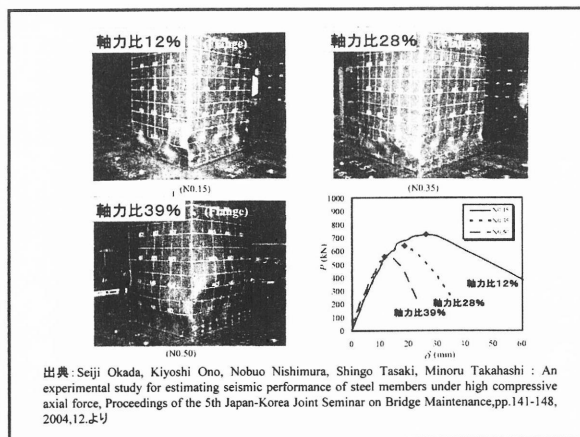


動的解析の留意事項

- 解析ソフトが優秀でも適切なモデル化が行われなければ, 信頼性がない.
- 解析ソフトには必ず限界があるので過信しない.
- 設計地震動を超える地震動に被災する可能性があることを念頭に, 変形性能, 耐震性能を確保する
- 鋼構造物は, 梁モデルではうまく考慮できない, 板の局部座屈, 部材の曲げねじり座屈に留意が必要
- ファイバーモデルの複合非線形解析は, 軸力による座屈と座屈に伴うたわみ変形を考慮することが可能であるが, 解析精度が確保できるような適切なモデル化が必要



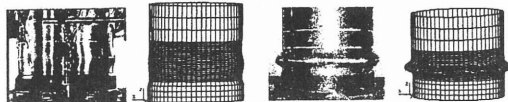
高軸力が作用する場合には変形性能が低下することに注意が必要



5. 最近の話題

鋼管の1方向载荷と2方向载荷

シェル要素を用いた複合非線形により静的繰返し再現できること、動的模擬実験により複合非線形解析で再現できることが明らかにされた。

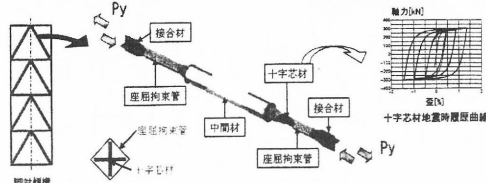


(a) PT4.5-1: Cyclic unidirectional load with 3 loading cycles

(b) PT4.5-2: Cyclic circular load with 3 loading cycles

出典: Yoshiaki Goto, Kunsheng Jiang, Makoto Obata: Stability and Ductility of Thin-walled Circular Steel Columns under Cyclic Biaxial Bending. The Second International Conference on Steel & Composite Structure, Korea, 2004.9

鋼製ダンパーによる耐震性向上



脚注横構

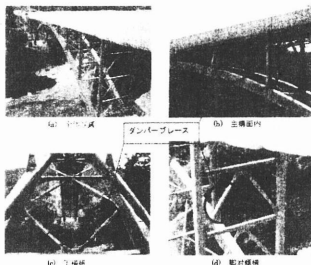
ダンパー部断面

十字芯材 : 軸力 P_y により塑性変形することでエネルギー吸収を行う
 中間材 : 両端のダンパー部を覆う
 座屈拘束管 : 十字芯材の座屈を拘束する

座屈拘束ブレースの一例

出典: 日本鋼構造協会: 阪神淡路大震災以降の制振・免震構造, 平成17年11月, pp II-28~31より

鋼製ダンパーによる耐震性向上



座屈拘束ブレースの上路式アーチ橋への適用例

出典: 日本鋼構造協会: 阪神淡路大震災以降の制振・免震構造, 平成17年11月, pp II-28~31より

最後に

この「耐震解析」が参考になれば幸いです。

ご静聴ありがとうございました。