Seismic Design of Urban Infrastructure
都市施設の耐震設計

(5) Seismic Analysis Methods
⑸ 耐震解析法の種類と特徴

Kazuhiko Kawashima
Department of Civil Engineering
Tokyo institute of Technology
東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻
川島一彦

5．1　動的解析と耐震設計

1）動的解析の種類

●耐震設計では、与えられた地震力（設計地震力を求めることも耐震設計に含まれる）に対する構造物の応答（変位、変形、安全性等）を求めることが求められる

●動的解析はこの目的にかなう方法

●以下の方法がよく利用される

	応答スペクトル法	時刻歴応答解析法
線形	適用可	適用可
非線形	適用不可	適用可

2）非線形解析の前に、必ず必要とされる線形解析

●いきなり非線形動的解析を実施することは望ましくない

●まず、線形解析を行い、固有振動モード、固有周期、刺激係数、有効質量を求め、構造物の基本的な振動特性を把握するのがよい。

●さらに、線形動的解析によって、線形域の構造物のおおよその応答を頭に入れてから、非線形動的解析に進むのがよい。

3）最近、あまり使用されなくなった応答スペクトル法

●コンピュータの使用が高額であった時代（1970～1980年代）には、計算機コストを低減させるために、応答スペクトル法はよく使用された。

●しかし、現在では、以下の理由で、使用頻度が大幅に低下してきた。

- ✓ＰＣの普及で、計算コストは問題ではなくなった
- ✓非線形解析が重要となってきた。

●このため、最近では、地震応答スペクトルを直接入力したいといった特別な場合以外には、ほとんど使用されることはなくなってきた。地震応答スペクトルにフッティングさせた入力波形を用いた時刻歴応答解析の方が使用頻度が高いのが実情。

4) 線形静的解析法に使用される応答スペクトル法

- 1次モード (r＝1) だけを用いて線形静的解析を行う
- 応答を考慮した震度法の基本ー＞後述

$$\{u_{r\max}\} = \begin{Bmatrix} |u_{1r}(t)|_{\max} \\ |u_{2r}(t)|_{\max} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ |u_{nr}(t)|_{\max} \end{Bmatrix} = \beta_r S_D(\omega_{nr}, h_r) \begin{Bmatrix} \phi_{1r} \\ \phi_{2r} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \phi_{nr} \end{Bmatrix}$$

$$= \beta_r S_D(\omega_{nr}, h_r)\{\phi_r\}$$

5）動的解析とは、何を意味するか？

●動的解析とは、ある構造物にある地震動が作用した場合に、どのような応答が生じるかを解析的に求める行為

●ある地点である地震により観測された地震動を入力して動的解析をするということは、いまから建設しようとする構造物が、記録が得られた点に在り、もし、その時の地震動を受ければどのような応答を生じるかを推定する行為。

●この時に、当該構造物に生じる被害が許容される損傷に収まれば、その構造物は耐震的であると判定されるし、もし、許容される被害を上回るようであれば、その構造物は耐震的ではないと判定される。

●構造物に許容される損傷は、多くの場合、地震の規模や構造物と地震との距離、あるいは、地震の平均発生間隔（再現期間）、発生確率等に応じて与えられる。これを要求性能とか性能目標、性能マトリックス等と呼ぶ（後述）。

●耐震設計とは、性能マトリックスとして与えられる地震動に対して、構造物の応答やこれに基づく被害程度を動的解析によって推定し、これが要求性能を満足するように、構造物の寸法や形状、断面を定める行為。

●耐震設計＝耐震解析＋耐震性を高めるための各種の配慮（ここでは、特に、耐震設計と耐震解析を区別せず、耐震設計と呼ぶ）

●したがって、動的解析は、耐震設計を構成する重要な解析コンポーネント

6）動的解析すれば、耐震設計できるのか？

●耐震設計とは、構造物の形状や寸法、断面が固まっていない段階で、構造物の形状や寸法、断面を定める行為

●動的解析するためには、構造物の形状や寸法、断面が必要であるから、これらを仮定して動的解析し、その結果得られる耐震性が十分でなければ、再度、構造物の形状や寸法、断面を仮定し直し、最終的に、性能目標が達成されるまで、仮定ー＞解析ー＞評価を繰り返す。

●動的解析だけで耐震設計することを動的設計と呼ぶ。

7）静的非線形解析と動的設計のうまいバランス

●複雑な構造物では、変化させ得る形状、寸法、断面の組み合わせが多すぎて、これらに対して一々動的解析することは一般に得策ではない。

●誰がやっても同じような結果が得られる静的耐震解析に比較して、動的設計にはより高度な技術者が必要とされる。

●動的解析結果と似て非ならずの結果を与える静的耐震解析法を用いて、まず、形状、寸法、断面を概ね定める。その後に、この断面に対して動的解析を行い、要求性能を満たすように断面等を微調整する（動的照査と呼ぶ）。

●歴史的には、静的耐震解析が先に行われ、その後、動的解析法が普及してきた。

現在の耐震設計の流れ

静的設計から定められる構造、諸元

↓

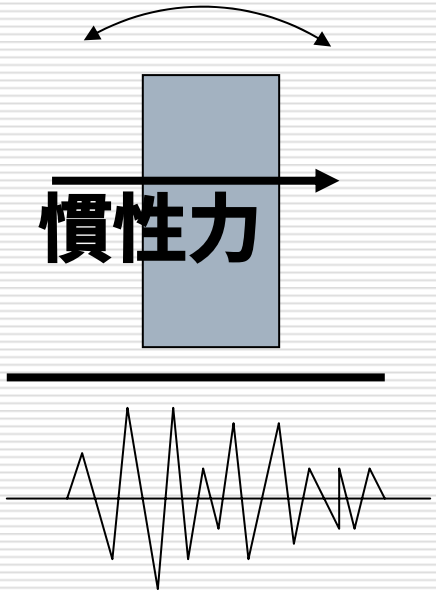
静的耐震解析法による断面設定

↓

動的解析による照査

5．2　静的非線形解析法

1）静的耐震解析法とは何か？



●構造物に作用する“動的な”地震力を、“静的な”地震力（慣性力）に置き直し、これを構造物に水平方向に作用させる

●これを静的横力法と呼び、1916年に東大の佐野利器教授によって提案された。

●静的耐震解析法には、以下の２種類がある。

✓線形静的解析法（震度法）

✓非線形静的解析法（地震時保有耐力法）

●佐野教授は当初、非線形静的解析法を用いて、構造物の限界状態をチェックし、構造物が崩壊しないように耐震解析することを考えていたが、当時は、これができなかった。この理由は、

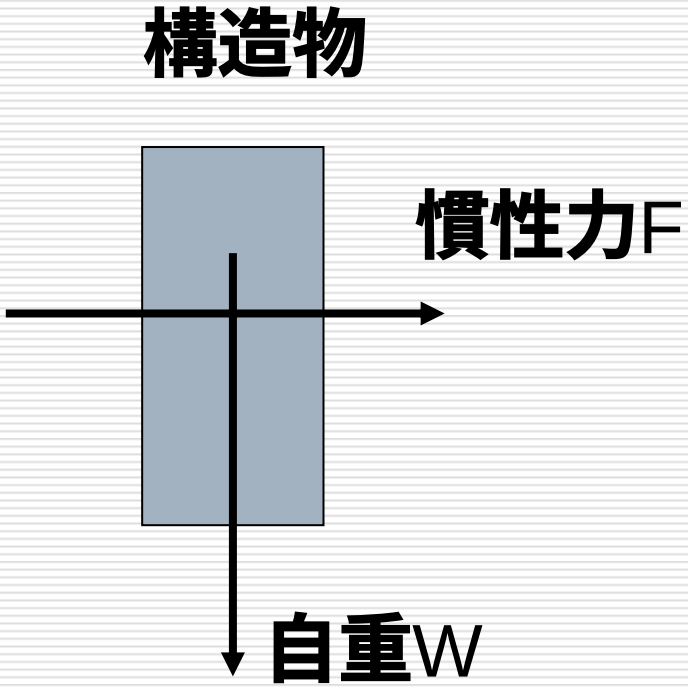
✓計算機がなかった時代であり、非線形静的解析ができなかった。
✓構造部材の非線形特性が知られていなかった。

●このため、佐野教授が提案した静的横力法は線形静的解析法として使用され、線形域の耐震解析に限定された。また、断面決定法も許容応力度法しか実用的に使用できなかった。

●静的横力法＋許容応力度法は“震度法”(日本では Seismic Coefficient Methodと訳されてきたが、Linear Static Analysisと訳す方ふぁ良い)と呼ばれ、国際的にも広く使用されてきた。

2) 震度法

構造物の質量をmとすると、



自重W

$$W = mg$$

g：重力加速度

慣性力F

$$F = kW = m\alpha \qquad (5.1)$$

k：設計（水平）震度

α：構造物に生じる加速度

$$\frac{F}{W} = k = \frac{m\alpha}{mg} = \frac{\alpha}{g} \qquad (5.2)$$

3）振動モードを考慮した修正震度法

●佐野教授は当初から、振動モードを考慮し、1次モードだけを考慮した形で静的横力方を提案したが、実務的には、設計震度の概念の方が浸透が強く、自重に設計震度を乗じた解析法が震度法として浸透していった。

●１９５９年にGeorge Houserカリフォルニア大学教授によって地震応答スペクトルが提案され、これが起爆剤となって、再び、1次モードを考慮した応答スペクトル法を震度法の基本とする考え方が持ち込まれた。これを**応答を考慮した修正震度法**と呼ぶ。

●例えば、１９７１年道路橋耐震設計指針や１９８０年道路橋示方書にはこの考え方が盛り込まれた。ダムの設計でも修正震度法的な考え方が採用されている。

Housner, G.W.: Behavior of structures during earthquakes, Proc. ASCE, 85, EM 4, 1959

●１９９０年以降の道路橋示方書では、全て、修正震度法を採用することとし、これを改めて震度法と名称を過去のものに戻した上で、静的フレーム法と呼ばれる線形静的解析法が使用されている。

●静的フレーム法の基本的な考え方は以下の通り。

✓１次モードが他の高次モードよりも卓越する。

✓１次振動モードは自重による静的たわみによって近似される。このため、固有値解析をするかわりに、静的たわみを１次振動モードとして使用する。

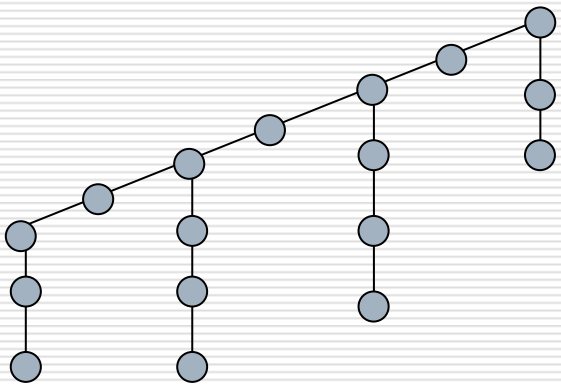
✓Rayleigh法により、固有値を求める。

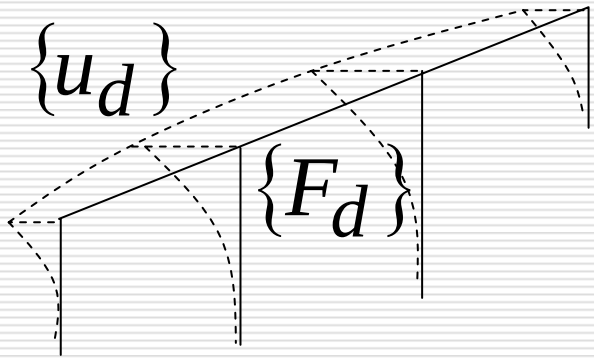
1）川島一彦他：連続橋の耐震設計法（その2）ー静的フレーム法による地盤条件が変化しない場合の耐震計算法の提案、土木研究所資料、第２４０９号、建設省土木研究所、１９８６
2）日本道路協会：道路橋示方書 V耐震設計編、１９９０、１９９６，２００２

4) 静的フレーム法

１次振動モードを考慮して、各橋脚に作用する地震力を近似的に求める線形静的解析法で、１９９０年から全橋梁の耐震設計に使用されている。

1) 着目する解析方向に自重を静的に作用させて、静的変位 $\{u_d\}$ を求める。また、この時に橋梁の各部に生じる断面力 $\{F_d\}$ も求める。





2）構造系を1自由度の振動系にモデル化し、さらに、静的変位$\{u_d\}$が1次振動モード$\{\phi_1\}$とほぼ同じと仮定して、Rayleigh法により固有周期を求める

運動エネルギーは、

$$K = \frac{1}{2}\omega_d{}^2\{u_d\}^T[M]\{u_d\} \qquad (5.3)$$

自重を作用させた場合のひずみエネルギーは、

$$U = \frac{1}{2}\{u_d\}^T[K]\{u_d\} \qquad (5.4)$$

であるが、 $K = U$ より、

$$[K]\{u_d\} = [M][B]\{g\}$$

であるから、

$$U = \frac{1}{2}\{u_d\}^T[M][B]\{g\}$$

ここで、

$[B]$：多自由度系の動的解析で示した、地震動の作用方向を規定するマトリックス

$\{g\}=\{g_x, g_y, g_z\}^T$ ：x、y、z方向の重力加速度

運動エネルギーとひずみエネルギーを等値すると、

$$\frac{1}{2}\omega_d{}^2\{u_d\}^T[M]\{u_d\}=\frac{1}{2}\{u_d\}^T[M][B]\{g\}$$

これより、1次振動モードを静的たわみで近似した場合の近似的な1次固有周期は、

$$T_d=\frac{2\pi}{\omega_d}=2\pi\sqrt{\frac{\{u_d\}^T[M]\{u_d\}}{\{u_d\}^T[M][B]\{g\}}} \qquad (5.5)$$

モーダルアナリシスによれば、

$$\{u_{r\max}\} = \beta_r S_D(\omega_{nr}, h_r)\{\phi_r\} \qquad (5.6)$$

であるから（多自由度系の動的解析法参照）、

$$\{u_{1\max}\} = \beta_1 S_D(T_d, h_1)\{u_d\} \qquad (5.7)$$

また、静的自重を作用させた場合の橋梁の断面力$\{F_d\}$は既に求められているが、これは次式で与えられるものである。

$$\{F_d\} = [K]\{u_d\} \qquad (5.8)$$

一方、いま、求めたいのは、$\{u_{1\max}\}$の変位が生じた場合の断面力であるから、上式に$\{u_{1\max}\}$を代入すると、

$$\begin{aligned}\{F_{1\max}\} &= [K]\{u_{1\max}\} \\ &= \beta_1 S_D(T_d, h_1)\{F_d\} \qquad (5.9)\end{aligned}$$

●ここで、耐震設計で考えている方向だけの静的変位を考えるものとする。

●すなわち、いま、解析対象とする方向に水平力を作用させた場合に、この方向に生じる変位を$\tilde{u}_d$とすると、

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = 2\pi\sqrt{\frac{\{u_d\}^T[M]\{u_d\}}{\{u_d\}^T[M][B]\{g\}}}$$

$$\longrightarrow$$

$$\{u_d\} \longrightarrow \tilde{u}_d$$

$$\{g\} \longrightarrow g$$

$$[B] \longrightarrow \{1,1,1,\ldots\ldots,1\}^T$$

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = 2\pi\sqrt{\frac{\{u_d\}^T[M]\{u_d\}}{\{u_d\}^T[M][B]\{g\}}}$$

$$T_d \approx \frac{2\pi}{\sqrt{g}}\sqrt{\frac{\{\tilde{u}_d\}^T[M]\{\tilde{u}_d\}}{\{\tilde{u}_d\}^T[M]}}$$

$$= 2.01\sqrt{\delta} \qquad (5.10)$$

ここで、

$$\delta = \frac{\{\tilde{u}_d\}^T[M]\{\tilde{u}_d\}}{\{\tilde{u}_d\}^T[M]}$$

$$= \frac{\sum_i m_i \tilde{u}_{di}^2}{\sum m_i \tilde{u}_{di}} = \frac{\sum_i w_i \tilde{u}_{di}^2}{\sum w_i \tilde{u}_{di}} \qquad (5.11)$$

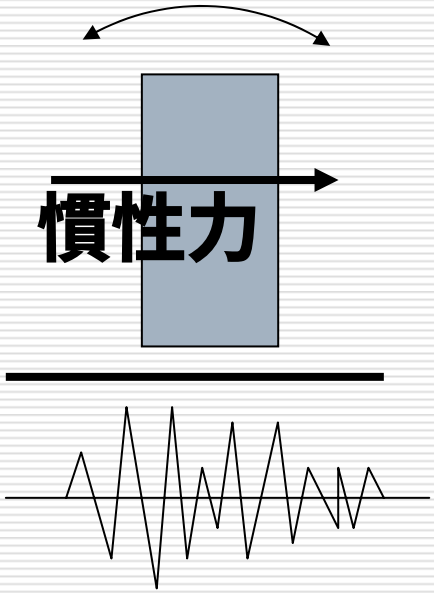
5）震度法（線形静的耐震解析法）の利点は何か？

●計算尺しか無かった時代でも、誰もが容易に解析できた。

●解析に必要なパラメータは、静的設計（自重に対する設計）に必要とする構造物の諸元以外に、設計震度だけであり、容易であった。このため、誰が解析してもほとんど同じ結果を得ることができた。

●建設投資をするためには、絶対的尺度が必要であり、震度法の結果は耐震設計の基本としてこれだけは遵守すべき値と長く考えられてきた。

6）震度法（線形静的耐震解析法）の問題点は何か？



●構造物を１自由度系と仮定して、慣性力＝マス Ｘ 設計スペクトルとして慣性力が求められるが、２次モード以上の高次の振動モードの影響が見込まれていない。したがって、高次のモードが卓越する構造物には適用できない。＜ー静的横力法の限界

●強震動を受けると（これが、耐震設計の主目的）構造物は非線形化する。線形解析では、この効果を取り入れることができない。したがって、強震動を受けても安全であるか否かが照査できない。＜ー線形解析法の限界

5．3　非線形静的耐震解析法

1）地震時保有耐力法（非線形静的解析法）とは？

●震度法と同じく、静的横力法を使用する。

●断面設計には許容応力度法ではなく、部材の変形性能や動的耐力を使用する。

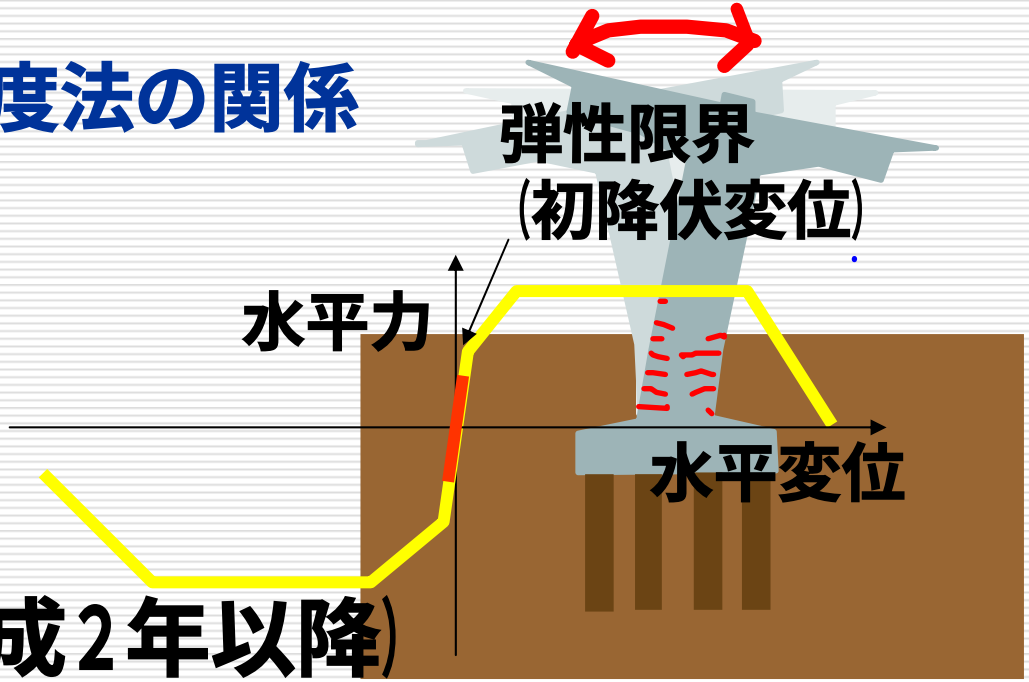
●構造物が非線形域に入るため、構造物の応答が線形応答とは異なってくる。このことによる作用地震力の変化を荷重低減係数によって考慮する（後述）。

●静的横力法を使用するため、高次モードの影響は取り入れられない。したがって、高次モードが卓越する構造物の耐震設計には適さない。

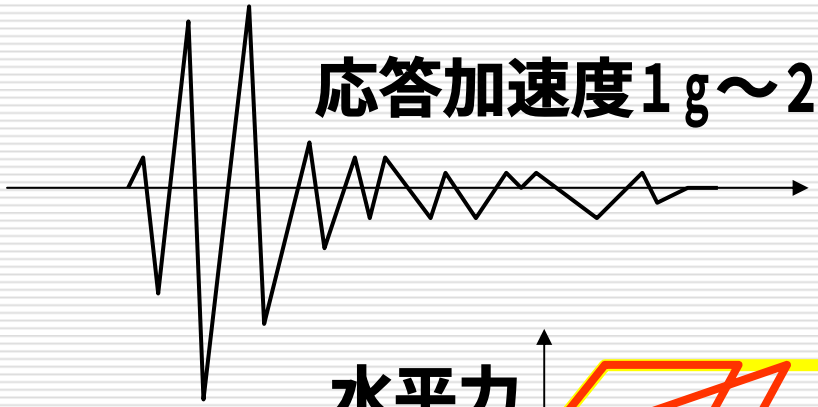
2）地震時保有耐力法と震度法の関係

震度法

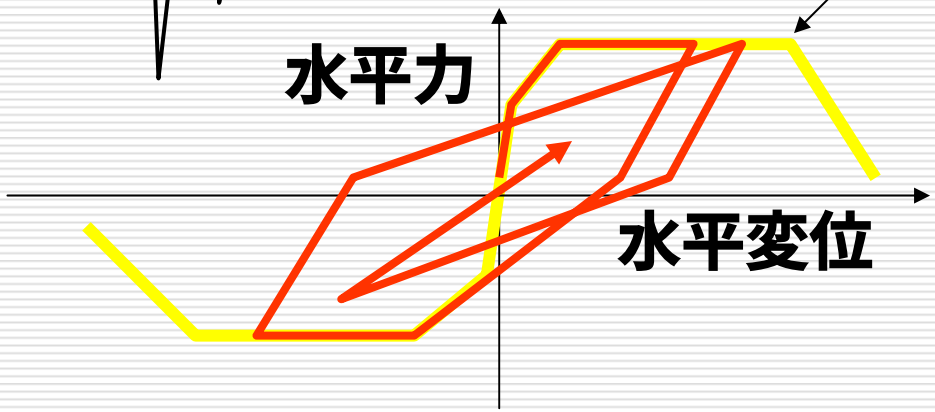
応答加速度0.2～0.3g



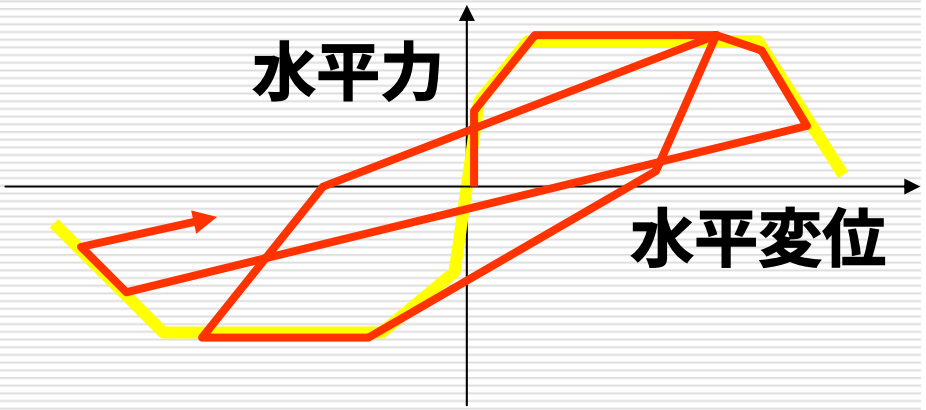
地震時保有耐力法（平成2年以降）



応答加速度1g～2g



崩壊の可能性有り



3) 地震時保有耐力法では何が必要か？

●構造物を構成する主要構成部材の非線形特性（後述）

●橋梁であれば、橋脚、橋台、地盤と基礎の動的相互作用など

●１自由度系を仮定した線形耐震解析法であるため、以下の制約がある。

✓橋脚や橋台間で著しい剛性の違いがある場合（高次モードの影響）

✓解析に考慮されるのでは、橋脚や橋台の非線形性までで、桁間の衝突や構造部材の破断後の特性は解析できない。

５．４　動的設計

1）動的照査が広範囲に取り入れられている日本の耐震設計

●日本の橋梁の耐震設計では他の国に比較して、最も広範囲に動的照査が取り入れられている。

●橋脚間の剛性が異なったり、免震橋では動的解析が日常的に使用されている。

●動的解析ソフトが充実し、容易にＰＣで解析可能な環境となっている。

●一貫解析が可能で、途中で、あれこれ手を入れる必要がない。

2) しかし、まだ、動的設計は早いという意見もある

●静的非線形耐震解析では、構造物の断面諸元、設計応答スペクトルがあれば、構造解析可能。このため、誰が解析してもほぼ同じ解析結果が得られる。

●これに対して、動的解析では、構造物の断面諸元、設計応答スペクトルの他に、入力地震動、固有振動モード、減衰特性等を求めるか与えなければならない。特に、入力地震動や減衰特性によって敏感に解析結果が異なり、誰が解析するかによって解析結果が異なってくる。

●高度の技術を持つ技術者が必要とされる。

3）本当に、動的解析は初期断面の決定に使いづらいのか？

●実際の状況を考えてみよう。現実の構造物の振動応答は動的解析以上にもっと複雑である。

●例えば、基礎の回りの地盤の影響ー＞動的解析では、地盤ばね等によってモデル化し、簡略化している。

●構造物の減衰特性ー＞実際の構造物のエネルギー吸収性能は複雑。これを動的解析では、一般に減衰定数によって超簡略化している。

●地震動ー＞実際には、各下部構造位置で地震動は異なるが、この影響を現在は一般に無視して解析する場合が多い。

●耐震設計という行為は、基準に従って流れ作業で設計計算書を作ることではない。

●建設現場の地震動特性を定め、地盤条件や液状化・流動化の発生の有無、周辺環境条件を見極めて、技術者として、耐震的な構造物を設計するために必要な全ての行為

●動的解析程度の内容を複雑だと考えるような技術者には、もともと設計にあたってほしくない。

●低級な技術者の評価、給与は高く成らず、高度な技術を有する技術者の評価、給料は高い。低きに流れる方向では、技術者の評価は高まらない。ー＞医者を考えよ！

５．５　橋梁の耐震設計では動的解析はどのように利用されているか？

1）耐震解析法

- **線形弾性解析法**　Elastic Static Analysis (ESA)
- **線形動的解析法**　Elastic Dynamic Analysis (EDA)
- **非線形静的解析法**　Inelastic Static Analysis (ISA)
- **非線形動的解析法**　Inelastic Dynamic Analysis (IDA)

2) 橋の特性に応じて異なる必要とされる耐震解析法

日本道路協会 (2002)

カテゴリー		L1地震動	L2地震動
単純な応答特性を有する橋梁		ESA	ISA
複雑な応答特性を有する橋梁	静的解析法が適用可能な橋	ESA ＋ EDA	ISA ＋ IDA
	静的解析法が適用できない橋	EDA	IDA

ATC 32 & Caltrans (1999)

重要性	特性	Function Evaluation	Safety Evaluation
通常の橋	Type-I	ー	ESA or EDA
	Type-II	ー	EDA
重要な橋	Type-I	ESA or EDA	ESA or EDA
	Type-II	EDA	EDA, ISA and IDA

3）動的解析が必要とされる橋梁

●橋の応答に主たる影響を与える振動モードが静的解析法で想定する振動モードと著しく異なる場合

●橋の地震応答に影響を与える振動モードが2種類以上ある場合

●塑性ヒンジが複数箇所に想定される場合、又は、複雑な構造で塑性ヒンジがどこに生じるかはっきりしない場合

●構造部材や橋全体の非線形履歴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

具体的には、‥‥

●固有周期の長い橋（一般に、固有周期1.5秒以上）、又は、橋脚高さが高い橋（一般に、３０m以上）

●ゴム支承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

●斜張橋、吊橋等のケーブル系の橋

●アーチ橋

●小さな曲率半径で、上部構造の両端のなす角度が大きい曲線橋