

設計業務における動的解析の正しい適用と判断

久保田 翼 [ニュー設計株式会社]

1. はじめに

動的解析の位置づけが基準や指針類の中で明確にされるようになって、設計実務の中で動的解析を実施する機会が増えてきた。

動的解析を正しく適用し効率的に設計に反映させていくためには、特に

- (1) 実施する動的解析の目的をよく理解しておくこと
- (2) 目的に合わせた解析方法，モデル化，使用データ等を適切に設定できること
- (3) 結果を正しく評価し判断できること

が大切である。

2. 設計における動的解析の目的

動的解析を行う際には、その意義や目的を十分認識しておかねばならない。目的に応じて、解析手法の選択，モデル化，着目点，結果の見方などに違いが生じることになるからである。

2.1 2次以上の振動モードと動的解析

震度法や修正震度法で代表される静的な耐震設計法は、基本的に1次の振動モードを対象としている。しかし、2次以上の振動モードが無視できない構造物で地震時の断面力や変位を照査するためには、動的解析によらねばならない。

道路橋示方書[V]耐震設計編において「地震時の挙動が複雑な橋は、動的解析を行いその結果を設計に反映させるのがよい」と表現されている。「地震時の挙動が複雑な橋」というのが、まさに「2次以上の振動モードが応答に寄与する割合を無視できない構造物」を指している。

各次の振動モードが応答に寄与する程度は、固有値解析で得られる各次の振動モードに対応した刺激係数（本文 2.4.3, 4.4.2 参照）からも判断できる。

図-1 は高さ 130m の鉄塔構造物を例にしたものである。(a)は「1次振動モードによるモーメント」、(b)は「2次振動モードによるモーメント」、(c)の点線は両方を重ね合わせたものである。

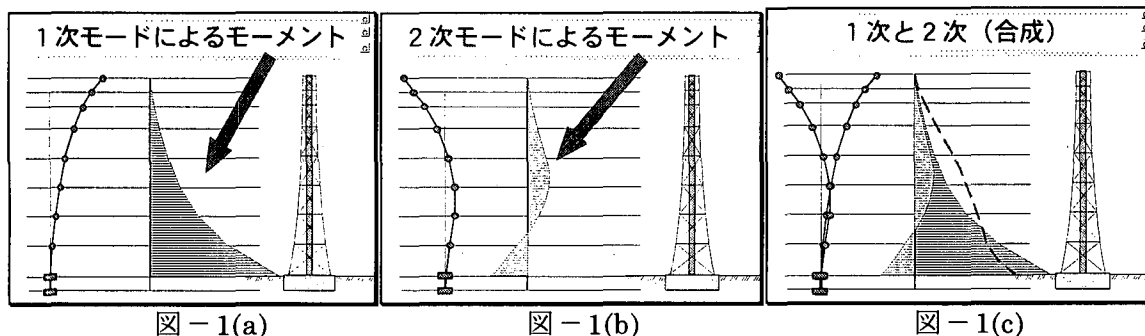


図-1(a)

図-1(b)

図-1(c)

2.2 複数の構造系の連成と動的解析

埋設管路やトンネル、地下タンクなどは、構造物系と地盤系という二つの系が連成する。(詳細は本文第6章。) これらの静的な設計法としての応答変位法では構造物近接地盤の変位(分布)、それもある時刻における変位分布(等時刻変位分布)が必要になる。

地盤が成層をなす場合には、1次振動モードとしての深さ方向変位の分布や、地盤内の波動伝播を想定した変位分布の近似値を静的に求める方法は提案されている。

しかし、平面的な位置の違いによる地盤条件の差や、地形の変化、近傍のその他構造物の影響も考慮した地盤の等時刻変位分布は静的には求めることが難しく、構造物と周辺地盤の連成による動的解析が必要になってくる。

地中構造物と地盤との相互作用の問題ばかりではなく、「トンネルと立坑」、「地下タンクに付属する機器配管系」などの耐震設計において、両者の相対変位が問題となる場合には、静的な設計法では限界があり動的解析が用いられる。

地下タンクにおける付属する屋根や機器配管、原子力発電所の地中ダクトの内部配管などでは、土木構造物と切り離して動的解析が行われることがある。これらの機器・配管系の動的解析における入力地震動は、土木構造物側から与えることになり動的解析が必要になってくる。

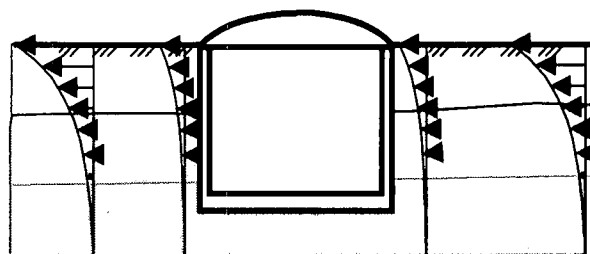


図-2

2.3 動的解析における着目点(動的解析で得たい量 - 応答値)

動的解析によりいろいろの情報(結果, データ)を得ることができる。それらの情報のうち何を設計に反映させようとするのかは、動的解析の目的を別の意味から考えるのと同じことである。設計に用いる部材断面力を直接動的解析から求めるのか(or 求めなければならないのか)、加速度のみを求めればよいのか、または変位なのか、それらをどのように設計に反映させるのか、といったことである。

2.3.1 応答加速度のみを求める事例

動的解析の応答加速度から地震力を評価し、部材断面力などは別途静的解析を行うような場合である。例えば、図-1のトラス鉄塔でサポートされた構造物を、1本の曲げ-せん断型の質点棒にモデル化し、動的解析で各質点の加速度を求める。

各質点はある高さ範囲の構造部分を代表する。質点の応答加速度をその高さ範囲の平均加速度として地震力に換算し、静的にトラスのフレーム解析などで部材毎の地震時断面力を求め設計する。

この場合、質点の最大加速度を用いることは過大評価になる場合がある。2次振動モード

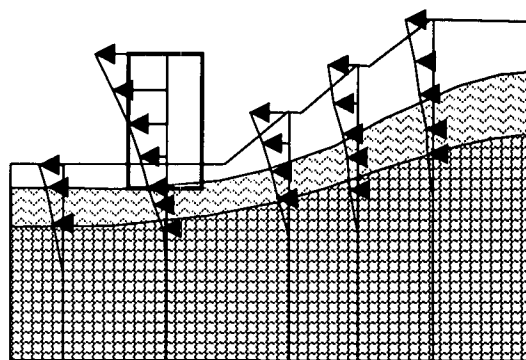


図-3

を無視し得ない構造物であれば、質点棒の下端のモーメントが最大となる時刻における各質点の応答加速度、および下端のせん断力が最大となる時刻 t_s の応答加速度分布などを用いる。

図-3 で示す斜面安定問題でも同じ同様である。

2.3.2 等時刻の最大相対変位のみを求める事例

静的な応答変位法で、沈埋トンネルや地中の構造物の耐震設計を行う場合などである。この場合、「地盤の最大相対変位」が問題となる。応答変位法の意味と地盤の応答変位特性をよく理解して判断することが望まれる。

トンネルやカルバートの横断面設計であれば、図-4 のように構造物の上下端での相対変位が最大となる時刻に着目する。

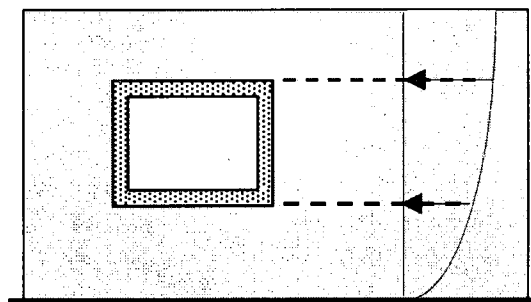


図-4

2.3.3 部材の応力度を求める事例

動的解析で直接、部材の応力度まで評価する場合がある。例えば、ラーメン式橋脚の PC 橋梁で橋軸方向の地震時照査を動的解析で行う場合を考える。橋脚は、塑性ヒンジ部を $M-\theta$ モデルとし、中間部は $M-\phi$ モデルを用いて動的解析を行う。

このとき、これらの部材の変形量としての θ や ϕ は、その部材の曲げモーメント M に応じて決定される。さらに云えば、この M は、死荷重時の M と動的解析による地震時の M の合計量が用いられる。

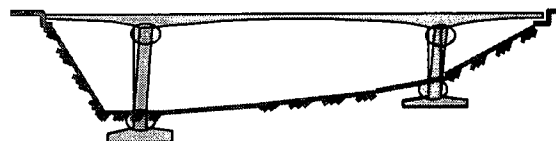


図-5

3. 目的に合った解析方法とモデル化

動的解析を行う目的と動的解析で得たい項目（応答値の種類：着目点）が決まったら、それらに最もふさわしい解析方法とモデル化が選定され、使用データを設定しなければならない。

3.1 解析方法とモデル化

解析方法とモデル化は目的を満足する範囲で、できるだけ単純なものがよい。解析に要する手間もさることながら、結果の判断が容易になるからで、むやみに複雑な解析方法やモデル化は極力避けたいところである。

3.1.1 単純なモデル化がのぞましい

設計での動的解析は、動的現象を完全に再現するためのものではない。地震時の構造安定性や部材の安全性を保証し、かつ経済性も考慮した合理的な設計ができればよい。

まず考えるのが「1次元モデルで解析できないか」であろう。そしてできるなら「3次元モデル」は避け

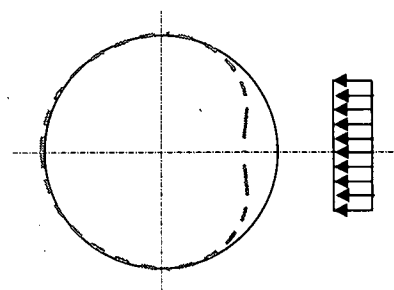


図-6 偏荷重と断面力

たいところである。正しいモデル化の選択には、動的解析はもちろん、設計・構造特性等の知識と経験、判断力が求められる場合も少なくない。

例えば、地下タンクで、周囲の盛土形状や地盤条件が軸対称ではない場合でも、軸対称で動的解析してよい場合がある。地下タンクのような円筒シェル構造では、部分的な偏作用荷重によって発生する断面力は、荷重の作用位置付近での影響が非常に大きく、離れた位置ではそれが非常に少ないという構造的な特性があるからである。

3.1.2 モデル化の意味を理解することの大切さ

解析の目的と着目点、解析方法に合わせてモデル化を行うことになる。ここで大切なことは、そのモデル化の持つ意味を十分理解しておくことである。上部構造のモデル化に比べて、地盤との接点である基礎構造部分のモデル化は難しい場合がある。

ケーソンや連壁基礎のように、剛性が大きく根入れが深い基礎を例に説明する。

図-7は、橋脚の基礎としてのケーソンを表す。4つの地層のうち最下層は堅固な岩盤でその上の3つの地層からなる表層の地震時の地盤変位分布を図の右側に示す。

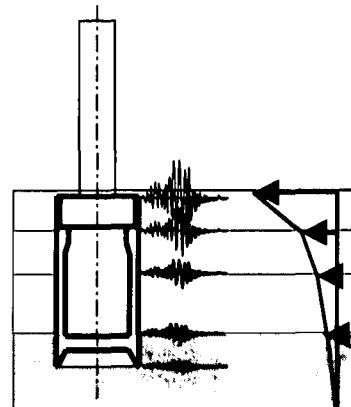


図-7

このような基礎に対し図-8に示す3つのモデル化を仮定してみた、

(a)は、構造系と地盤系を連成させたモデルで、基盤の加速度と周辺地盤の変位(分布)応答を基礎部への入力としている。

(b)は、ケーソンを剛体として一つの質点で代表させ、

周辺地盤との等価な集中バネを設けている。入力は質点位置付近の地盤の加速度を、基盤を含めた4つの地層の平均的な加速度値として入力する。

(c)は、橋脚下端とケーソン頂版の合計質量を持つ質点に、地盤との相互作用バネを設けている。入力は地表での地盤の応答加速度波形とする。浅いフーチング基礎と同じような考え方のモデルである。

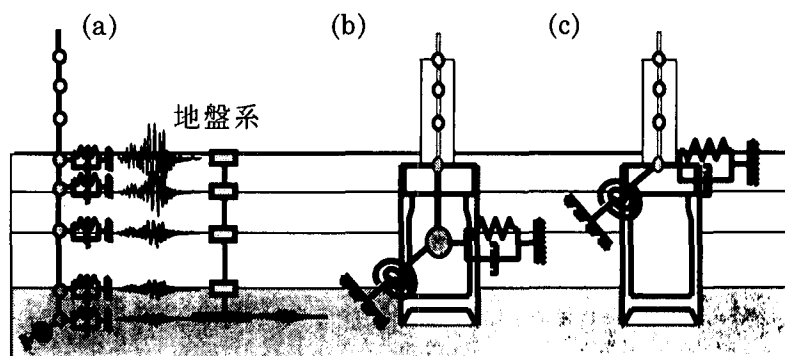


図-8 ケーソン基礎のモデル化

ケーソンや連壁剛体基礎、鋼管ウェル基礎などの静的な地震時安定計算では、橋脚を介して基礎に作用する上部工からの地震力は、耐震設計地盤面以下の地盤反力によって支持され安定を保つという仮定をしている。しかし、動的には、地表からある深さ範囲(耐震設計地盤面以下を含む)の地盤の地震時挙動が、基礎部に入力されることを無視できないケースがある。

そのような動的特性を、なるべく忠実に表そうとしたモデルが(a)である。これに対して、(b)または(c)は、周辺地盤の応答加速度を入力波に用いることによって、地盤の動

的挙動の影響を考慮しようとするもので (a)に比べると簡易なモデル化といえる。

動的解析の目的が、上部工の応答値を求めることが主である場合には、基礎のモデル化による上部工への影響の程度を見極めた上で判断することが大切である。影響度は、支持基盤から上の地層の厚さと基礎幅との比率によっても左右される。

4. 動的解析結果の評価と判断

解析が目的どおり正しく行われたかどうかをまず判断し、工学的に納得できる結果になっているかどうかを読みとることが大切である。広い意味で動的解析は、固有値解析(本文 2.3, 2.4)と応答解析(本文 2.4, 2.5)に分けられる。以下では、動的解析結果を読みとる上での留意点について説明する。

4.1 固有値解析結果

固有値解析(本文 2.4)によって、構造物の動的な特性を知ることができる。ただ、固有値解析は弾性解析であるため、構造非線形の問題では、すべての部材が弾性域にあるときや降伏剛性にしたときなど、それぞれについて別個に固有値解析を行うことになる。レベルⅡ地震動に対する照査では、降伏剛性に対する固有値を求める。

構造物の地震応答は、固有振動モードの重ね合わせ(本文 2.4)であり、各振動モードが全体の応答に寄与する割合は、刺激係数(本文 2.4.3)から判断できる。

また、ある剛性(たとえば降伏剛性)における、ひずみエネルギー比例減衰率や運動エネルギー比例減衰などの各モード毎の減衰率も求められる。ただ、図-8(a)のように、構造系と地盤系の減衰特性が異なる系を連成させたモデルで、各系の減衰率のオーダーが大きく異なる場合がある。

このような時、ひずみエネルギー比例減衰に等価な減衰を、レーリー減衰(本文 2.4.4)で近似させようとしたときに、全体系に整合したレーリー減衰を本文式(2.4.32)だけで考慮することは難しく、どちらかの系の減衰特性を犠牲にするか、または復元力特性として履歴減衰を考慮するなどの工夫が必要になる。

4.2 応答解析結果

加速度や変位、断面力等の応答値について、工学的な意味や妥当性を理解することが重要である。

固有値解析結果として得られた振動モードのうち、どのモードが応答に影響しているかという観点から、応答結果を理解することができる。刺激係数の大きな振動モードに着目し、その固有振動数が入力波の加速度応答スペクトルが比較的大きな値であれば、その振動モードでの応答は大きくなる。

また、ある等時刻での力の釣り合いを照査することによって、応答結果を理解し設計に反映させることも重要である。特に周辺地盤との力のやりとりにおいて、静的には考えていなかった動的な事象を見つけることもでき、合理的な設計が可能になる。

以上