



建設ICTマスター養成講座  
基礎養成編 選択分野別ソフトウェア実習 地震・津波

## 都市の地震防災

### 第3章：地震動を読む

震地震動の見方・とらえ方

東京都市大学 名誉教授、『都市の地震防災』編著

吉川弘道

## 第3章:地震動を読む 地震波の見方・とらえ方



### ユーイング-グレイの円盤式地震計(復元模型)

19世紀後半から多くの機械式地震計が開発されたが、画像は、ユーイング-グレイの円盤式地震計と呼ばれるもので、当時を偲ぶ模型が復元されている。これは、地震動の東西・南北方向と上下方向の3成分を同時にガラス円盤状に自記記録する。

現代では打って変わり、高精度高耐久性の地震計が各種開発され、我が国には膨大な数量の地震計が設置され、世界に類のない高密度地震観測網を形成し、‘その時’を待っている。

【出典】国立科学博物館

## 第3章:地震動を読む 地震波の見方・とらえ方

### 3. 1 地震動と地震波

- (1)地震動とは
- (2)地震波の伝播

### 3. 2 地震波の伝播

- (1)地震波の伝播ルート
- (2)地震波の減衰と増幅

### 3. 3 地震動波形のとらえ方

### 3. 4 震度とマグニチュード

- (1)震度と震度階
- (2)マグニチュードと震度

## 3.1:地震動と地震波

### (1)地震動とは

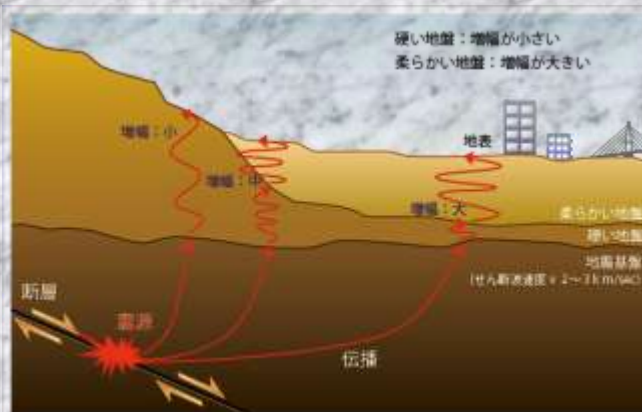


図1 地震波の伝播:震源・伝播・地盤増幅

震源で生じた地震波は、地中を数km～数百kmの距離にわたり伝わって地表面に達する。地震波が地中を伝わる時の地中の揺れ、あるいは地表面に達したときの地表の揺れを「地震動」という。

この地震波の大きさは速度や加速度などで表され、地震動の大きさは震度(震度階級)等によって表現される。震源より生じた地震波は、基盤(地中深くの岩盤)を伝播し、地盤(地表面近くの地盤)を経由して、地表面に達する。地表面に達した地震波は、構造物(橋梁、建物など)の基礎または本体を揺動し、構造物全体を揺らすことになる。したがって、耐震設計と地震防災については、この地震波をきちんと理解することがまずは重要となる。

## 3.1:地震動と地震波

### (2)地震波の伝播

地震動(地震波)は、次の3つの要素によって特徴づけられる。

- ・震源:断層破壊の規模・領域・壊れ方
- ・基盤伝播:震源断層から表層地盤下までの距離と基盤の特性
- ・地盤増幅:表層地盤の固さと層厚

地表面に到達する地震波の強さは、震源の地震規模(マグニチュード)が大きいほど、また震源断層からの距離が近いほど大きくなる。また、地震波が伝わる岩盤によっても地震波が特徴づけられる。たとえば、硬質な地盤よりも軟質な地盤の方が減衰が大きく、震源からの距離が等しくても地震動は小さい。地震波は最終的に、表層地盤を通して構造物に達するため表層の地盤の影響を受ける。柔らかい地盤は、固い岩盤に比べて地震波が増幅されることが多い。基盤伝播における減衰は、「距離減衰式」によって表され、地盤増幅の大小は「地盤増幅率」によって表される。

## 3.1:地震動と地震波

### (2)地震波の伝播

距離減衰に用いられる距離には震源距離や震央距離があり、図2のように説明される。

- ・震源:震源断層の最初の破壊点・震央:震源の真上の地表面の位置
- ・震源距離:震源から観測点までの位置
- ・震央距離:震央から観測点までの位置

なお、図2の震央距離と震源距離は観測点Bまでの距離を示している。

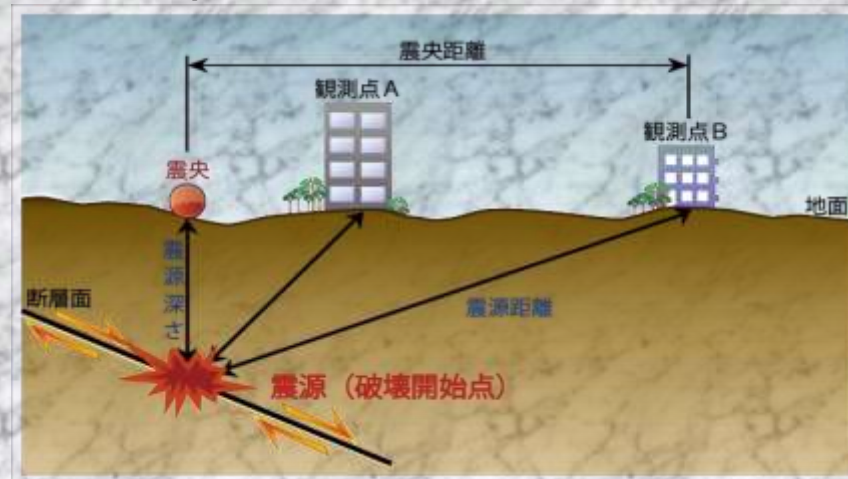


図2 震源, 震央, 観測点(震源距離と震央距離の差異)

## 3.2: 地震動の伝播

### (1) 地震波の伝播ルート

震源で発生した地震波が地表面のある地点に達するには、図3に示すように2つのルートがある。

- ・震源から地表面の地点まで地中を伝わっていくルートで、「実体波」と呼ぶ。

- ・一度震源近くの地表に達した後、地表を伝わるルートであり、「表面波」と呼ぶ。

物理学上は、この2種類の地震波に分類されるが、地震工学では、前者の実体波が重要となる。

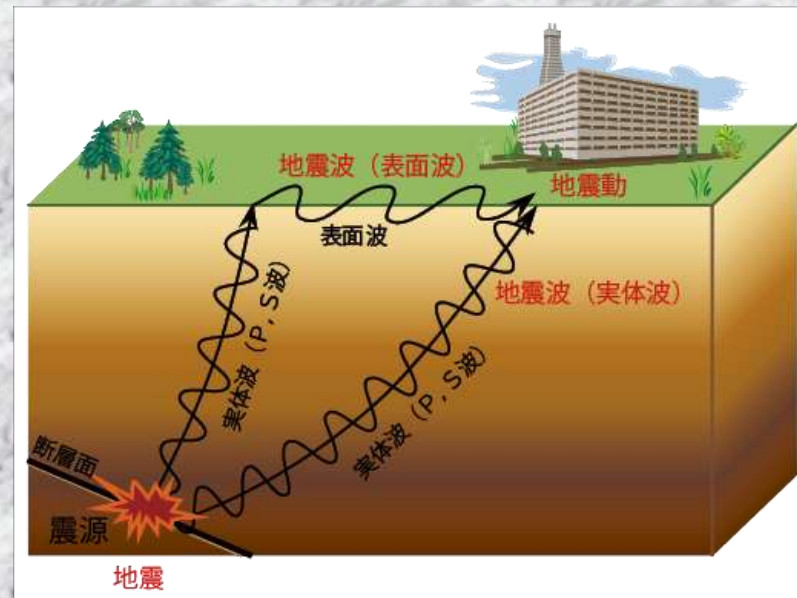


図3 地震波の伝わり方[1]

## 3.2: 地震動の伝播

### (1) 地震波の伝播ルート

実体波には地震波の進行方向と振動の方向が一致するP波(Primary Wave)と、進行方向に対して直交方向に振動するS波(Secondary Wave)がある

**P波:** 密度の変化が伝わる波で振動する方向が波の伝わる方向と同じになる。この波は固体、液体、気体を伝わり、その速度は岩盤中で5～7km/sec と速く、地震が発生したときに地表面のある地点に最初に到達して初期微動を起こす。

**S波:** ずれの変化が伝わる波で振動する方向が波の伝わる方向と垂直になる。この波は個体のみを伝わり、その速度は岩盤中で3～4 km/sec で、P波に続いて地表面のある地点に到達し、主要動と呼ばれる大きな揺れを起こす。

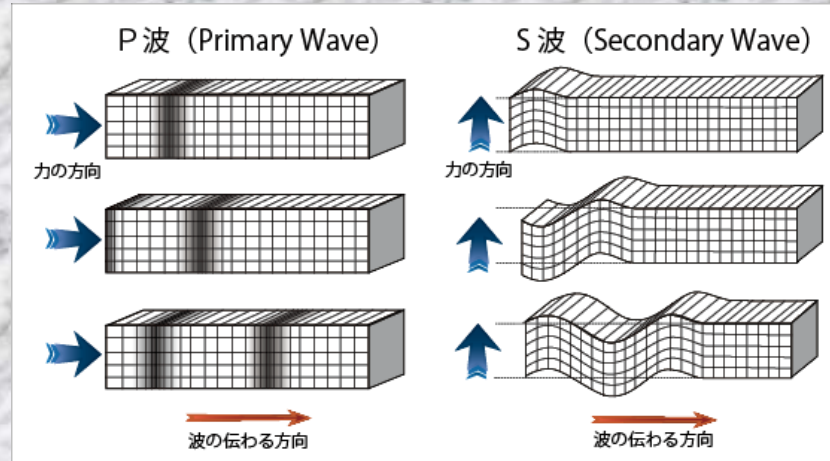


図4 地震波の伝わり方(実体波)

## 3.2: 地震動の伝播

### (1) 地震波の伝播ルート

このP波とS波は、実体波に混在し、特性を図5に示した。

左図において、A地点では最初に「ガタガタ」とゆれるP波を感じ、その後に「ユサユサ」と揺れを感じるようになる。これを地震波形で見ると右図のようになる。

すなわち、地震波(実体波)は最初に初期微動としてP波が現れ、その後主要動であるS波を記録し、やがて収束していくのが一般的である。

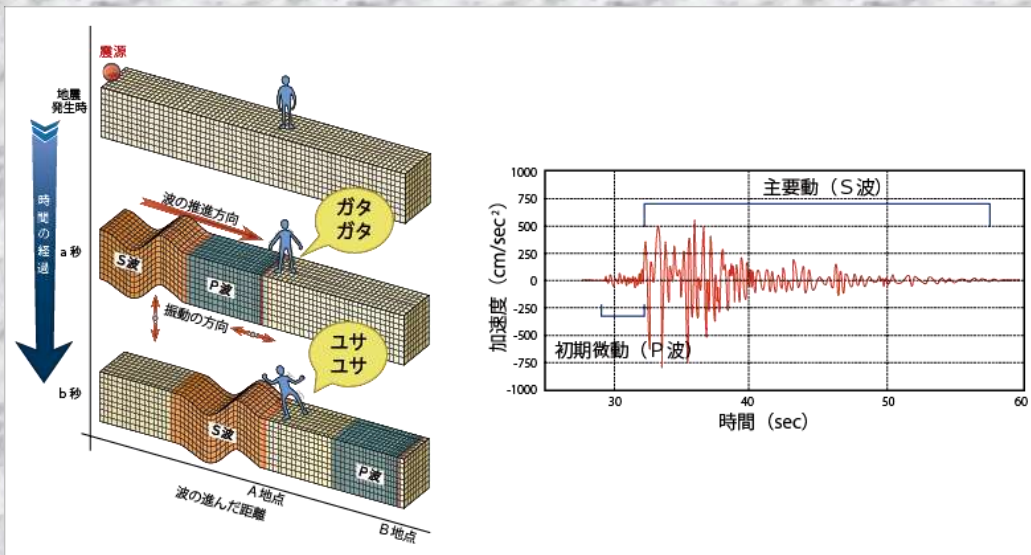


図5 左図:P波とS波の伝播特性  
右図:地震波の時刻歴波形

## 3.2:地震動の伝播

### (2)地震波の減衰と増幅

地震動の強さは、震源から離れると小さくなる。このことを距離減衰と呼ぶ。  
震源からの距離に従って、地震動の強さが低減する関係は、距離減衰式によって表される。図6に、距離減衰の考え方を示した(縦軸は地震動の強さ(震度)、横軸は震源からの距離(km)であることを確認されたい)。同図からは、震度は地震規模(マグニチュード)が大きいほど大きく、距離が小さいほど大きいことがわかる。

M6、距離20km ⇒ 震度5弱

M7、距離30km ⇒ 震度5強

距離減衰式は、多数の地震記録(震源距離と揺れ(加速度、速度)の関係など)の統計的な処理で求められるもので、現在多くの提案式がある。

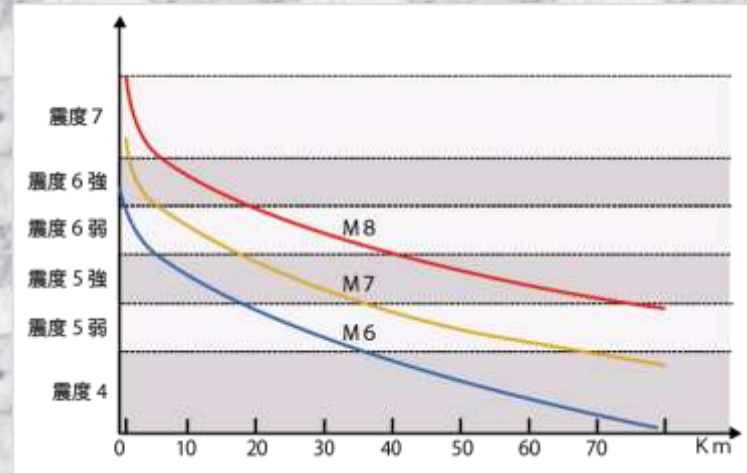


図6 距離減衰の考え方(模式図)

## 3.2: 地震動の伝播

### (2) 地震波の減衰と増幅

最後に、地震波(実体波)の入射と屈折を説明する。地盤/基盤は、一般的に深い地点ほど固く(波が伝わりやすく)、浅い地点ほど柔らかい(波が伝わりにくい)。このような中を地震波が通過するときは、異なる地盤種別の境界層にて屈折が生じる。これは地盤剛性が異なるためである。その結果、図7に示すように、震源断層から遠い地点では地震動が真下から伝播してくることになる。そのため、P波では縦方向の揺れが、S波では横方向の揺れが支配的となる。

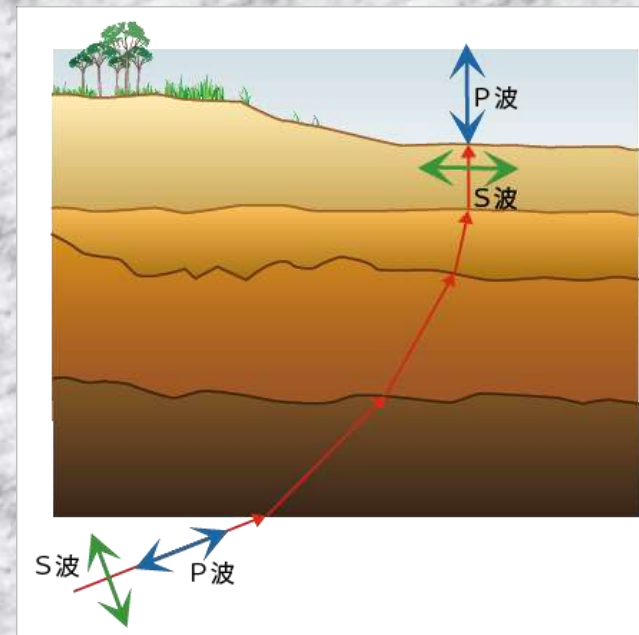


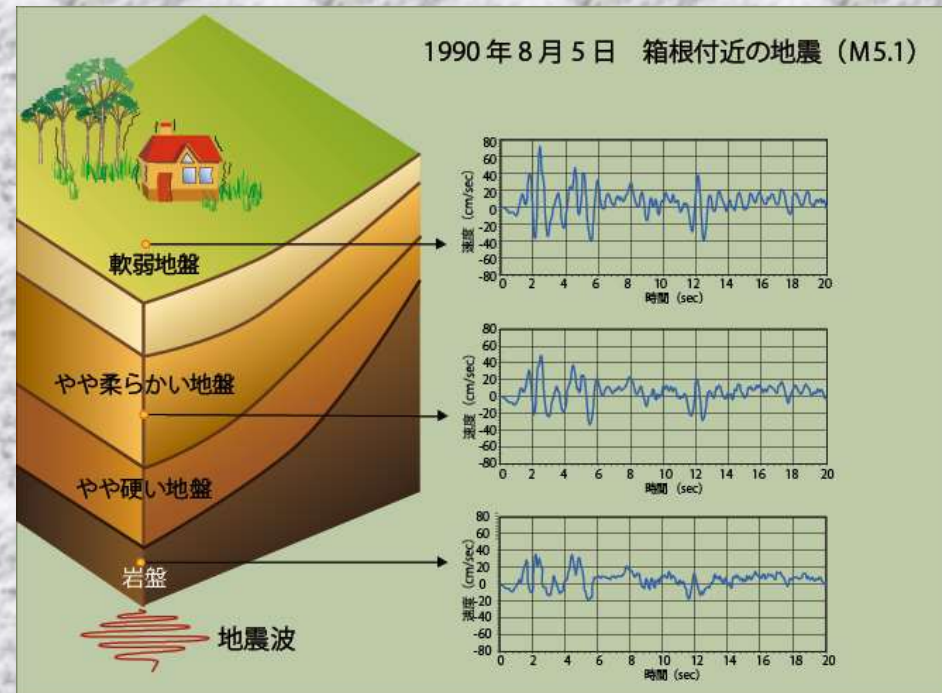
図7 地震波の入射と屈折

## 3.2:地震動の伝播

### (2)地震波の減衰と増幅

震源断層からの地中ルートにおいて、硬い地盤(せん断波速度2~3km/secの硬い地盤)を伝わってきた地震波は、表層の地盤を通過して地表に伝わり地震動となる。

このとき、地震波は表層の地盤の影響を受けて増幅する。すなわち、表層に近づくほど地震波の大きさ(振幅)は大きくなる。



### 3.3:地震動波形のとりえ方

地震動は波形(時間と振幅の関係)として表現される。地震動波形は、振幅などの特性を有する。振幅は波形の大きさであり、その振幅の単位は、加速度や速度が用いられることが多いが、変位が用いられることもある。

速度は変位の微小時間あたりの変化であり、速度の微小時間あたりの変化が加速度である。

どの指標を用いるかは構造物の種類による。たとえば構造物の応答や損傷との整合性を考えた場合、短周期構造物には加速度、中周期構造物には速度、長周期構造物には変位が適切である。

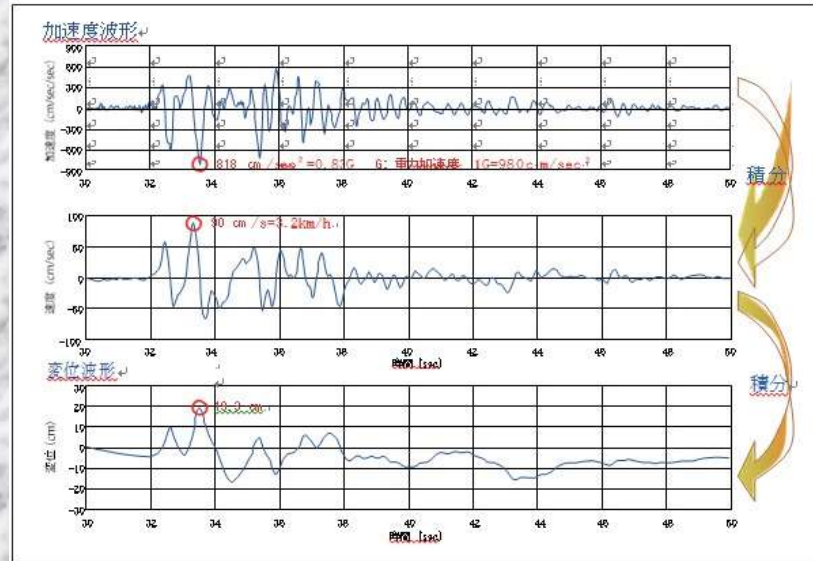


図9 兵庫県南部地震の地震動波形(神戸海洋気象台)  
: 加速度、速度、変位

## 3.4: 震度とマグニチュード

### (1) 震度と震度階

前節のように、時間と振幅の関係として求められる地震動は、複雑な特性を有しているが、工学的には「震度」と「震度階」のような単純な指標が用いられる。

震度は工学的な指標の1つとして用いられ、最も重要な指標である。地震波の特性を直接的に表すものではないが、住民生活に根付いた指標であり、災害と深く関連づけられ、被害状況の想定においては多用される指標である。

平成8年(1996年)4月以降は、計測震度計により観測し、速報を出している。これは気象庁が発表する震度であり、全国各地に設置した震度観測点で観測した震度である。このような震度(計測震度)は連続量であるため、しきい値に従って、震度の10階級の震度階級を定めている。

震度階級、計測震度、最大加速度、最大速度0、1、2、3、4、5弱、5強、6弱、6強、7の関係を表1に示す。

## 3.4:震度とマグニチュード

### (1)震度と震度階

表1 震度階級、計測震度、最大加速度、最大速度の関係[4]

震度階級	計測震度	最大加速度 (cm/sec <sup>2</sup> )	最大速度 (cm/sec)
0	～0.4	～1	～0.13
1	0.5～1.4	1～3	0.13～0.4
2	1.5～2.4	3～10	0.4～1.3
3	2.5～3.4	10～25	1.3～3.7
4	3.5～4.4	25～80	3.7～12.5
5弱	4.5～4.9	80～140	12.5～22.8
5強	5.0～5.4	140～250	22.8～41.6
6弱	5.5～5.9	250～450	41.6～75.8
6強	6.0～6.4	450～800	75.8～138.1
7	6.5～	800～	138.1～

※最大加速度と最大速度の数値は目安

## 3.4:震度とマグニチュード

### (1)震度と震度階

表3 気象庁震度階級関連解説表-2

震度階級	木造建物(住宅)		鉄筋コンクリート造建物	
	耐震性が高い	耐震性が低い	耐震性が高い	耐震性が低い
5弱	—	壁などに軽微なひび割れ・亀裂がみられることがある。	—	—
5強	—	壁などにひび割れ・亀裂がみられることがある。	—	壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が入ることがある。
6弱	壁などに軽微なひび割れ・亀裂がみられることがある。	壁などのひび割れ・亀裂が多くなる。 壁などに大きなひび割れ・亀裂が入ることがある。 瓦が落下したり、建物が傾いたりすることがある。倒れるものもある。	壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が入ることがある。	壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が多くなる。
6強	壁などにひび割れ・亀裂がみられることがある。	壁などに大きなひび割れ・亀裂が入るものが多くなる。 傾くものや、倒れるものが多くなる。	壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂が多くなる。	壁、梁(はり)、柱などの部材に、斜めや X 状のひび割れ・亀裂がみられることがある。 1階あるいは中間階の柱が崩れ、倒れるものがある。
7	壁などのひび割れ・亀裂が多くなる。 まれに傾くことがある。	傾くものや、倒れるものがさらに多くなる。	壁、梁(はり)、柱などの部材に、ひび割れ・亀裂がさらに多くなる。 1階あるいは中間階が変形し、まれに傾くものがある。	壁、梁(はり)、柱などの部材に、斜めや X 状のひび割れ・亀裂が多くなる。 1階あるいは中間階の柱が崩れ、倒れるものが多くなる。

TOKYO CITY UNIVERSITY

フォーラムエイト

## 3.4:震度とマグニチュード (2)マグニチュードと震度

マグニチュードは、地震(震源断層)の規模を表す尺度であり、震度階は、各地での指標である。

日本では気象庁によって決定される気象庁マグニチュード(Mj)が用いられている。ただ、気象庁マグニチュードは、大きな地震ではその値が頭打ちになるため、巨大地震では震源断層の面積やすべり量などから推定された地震モーメントを基に求められるモーメントマグニチュード(Mw)が用いられることもある(東日本太平洋沖地震のマグニチュードの場合がそうであった)。

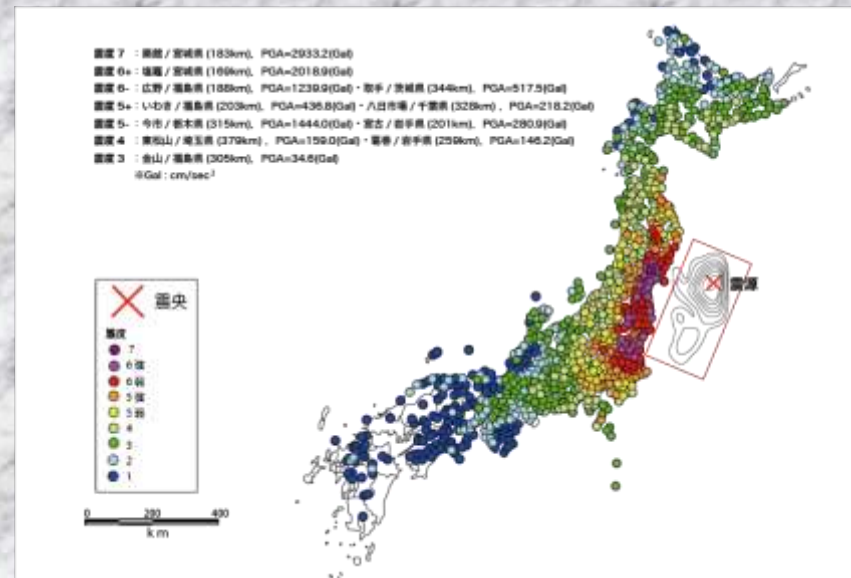


図10 東日本大震災における震源(マグニチュード)と震度(地震調査推進本部)



建設ICTマスター養成講座  
基礎養成編 選択分野別ソフトウェア実習 地震・津波

## 都市の地震防災

### 第5章：構造物の応答：

### 構造物はどのようにして揺れるか

東京都市大学 名誉教授、『都市の地震防災』編著

吉川弘道

## 第5章:構造物の応答:構造物はどのようにして揺れるか

### 精密模型による建物の模擬振動実験

地震による建物の揺れの大きさは、地震により異なり、建物によっても異なる。写真は、精密縮写模型(8階建て建物)の振動実験であるが、同じ地震動に対し、柱と梁で構築された建物(右側:ラーメン構造)では、ゆっくりと大きく揺れているが、壁を設置した建物(左側:壁構造)は、左右への揺れの間隔が短く揺れ幅も小さくなる。



画像提供:THK株式会社

## 第5章:構造物の応答:構造物はどのようにして揺れるか

### 5.1 地震による構造物の応答

- (1)構造物の挙動
- (2)地震動と構造物の応答特性

### 5.2 構造物の振動モデル

- (1)運動方程式
- (2)慣性力
- (3)減衰力
- (4)復元力
- (5)構造物の固有周期

### 5.3 構造物の応答性状

- (1)時刻歴応答
- (2)応答スペクトル
- (3)設計用スペクトル

## 5.1: 構造物の応答

### (1) 構造物の挙動

基礎など地盤と接する部分から、構造物へ地震動が入力されると構造体が揺れる。この構造物の揺れを応答と呼び、さらに応答により構造体に変形し、付加応力が作用する。徐々に応答が大きくなり、構造物を構成する柱や壁などの各部材の限界を超えてひび割れ、破断などが発生し、激震を受けると、倒壊などの最悪な地震被害が発生する。図1は、一連の挙動を模式的に示したものである。

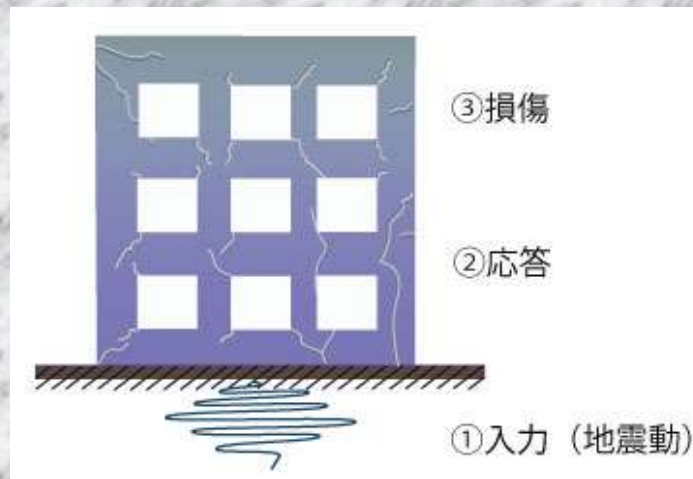


図1 構造物の応答

## 5.1: 構造物の応答

### (1) 構造物の挙動

これらの応答と損傷は、地震動や構造物で異なる性状を示し、構造物の応答は、入力される地震動の特性(卓越周期、位相など)と構造物の特性(剛性や重量など)により影響される。

損傷の程度は、応答の大きさと構成部材(梁、柱、壁など)の限界能力(強度・耐力、変形能力など)の相対的な関係により、さまざまな様相を呈する。

以上から地震時の構造物の挙動を再現するためには、構造物へ入力される地震動の特徴、構造物の特性、構成部材の限界を把握することが重要となる。

本章では、主に地震動と構造物の特性より決定される応答について、事例を交えながら説明する。

## 5.1: 構造物の応答

### (2) 地震動と構造物の応答特性

地震時の構造物の応答特性は、揺れの大きさと継続時間など、様々な地震動の特性に影響を受ける。

図左上に示した「東北地方太平洋沖地震M9.0」における地震動のように、揺れの継続時間が長く、繰り返し揺れが生じる地震の場合と、図左下に示した「兵庫県南部地震M7.3」における地震動のように、直下型地震で短時間に衝撃的な揺れが生じる地震とでは、構造物の応答が相当異なり、このため被災の様相も異なる。

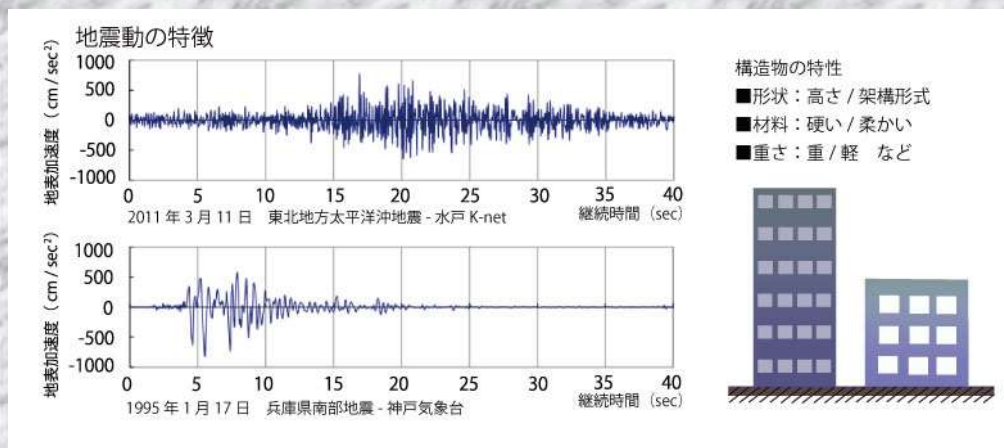


図3 地震動と構造物の特性

一方、同じ地震動でも、構造物の特性により異なった揺れ方を示す場合がある。構造物の高さ、架構の形式(柱・壁の多い少ないなど)、構造体の材料の硬さや柔らかさ、構造物の重さの違いなどが応答に影響する。

## 5.1: 構造物の応答

### (2) 地震動と構造物の応答特性

一般的に、入力である地震動が持つ卓越した周期帯と、構造物固有の揺れる周期帯が一致した時、構造物は共振状態となり、大きな応答が発生する。

図3に示した2つのタイプの地震動は、地表面の最大加速度値は、いずれも  $800\text{cm/sec}^2$  程度である。しかしながら、各構造物に対し、どちらの地震動がより激しく応答するか、あるいは同程度なのか、容易には予測できない。

これらの応答を簡易に予測する運動方程式や応答スペクトル法などの工学的手法を紹介する。

## 5.2: 建造物の振動モデル

### (1) 運動方程式

時刻歴に従って揺れが変化する地震動に対する建造物の応答を予測するため、運動方程式に基づいた数値解析手法が多用される。運動方程式は、複雑な建造物の架構を単純な微分方程式による振動モデルに置換したもので、地震動(入力値)と応答(出力値)との関係を示したものである。一般的な振動モデルは、建造物を3つの力学要素によってモデル化(図4)し、次式にて表される。

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = f(t)$$

すなわち、重心位置を質点とした等価質量 $m$ 、減衰の度合いを示す減衰係数 $c$ 、元に復元しようとする弾性バネ定数 $k$ によって構成される。



図4 振動モデルと運動方程式

## 5.2: 構造物の振動モデル

### (1) 運動方程式

地震時の運動方程式は、地震動入力である外力  $f(t)$  に対し、構造物の特性により決まる  $m/c/k$  値と質点の時刻歴応答で釣り合う関係である。  
 $m/c/k$  の3特性は、対応する質点の加速度/速度/変位から慣性力/減衰力/復元力となる。すなわち、次のようになる。

- 慣性力：等価質量  $m$  と応答加速度  $\ddot{x}(t)$
- 減衰力：減衰係数  $c$  と応答速度  $\dot{x}(t)$
- 復元力：弾性バネ定数  $k$  と応答変位  $x(t)$

## 5.2: 構造物の振動モデル

### (2) 慣性力

慣性力は見かけの力と呼ばれ、物体に直接的に力が作用するものでないため理解しにくいですが、図5に示す電車の急発進などを例とするとイメージしやすい。

電車が急発進すると、車内の乗客には後ろ向きの力を感じる。これは電車の床に加速度が発生し、車外から見て元の位置に留まろうとする乗客に見かけの加速度が発生し、見かけの力である慣性力が発生するためである。慣性力の大きさは質量×加速度で表され、図5の例で加速度が同じ場合は、質量の重い乗客ほど大きい慣性力を持つこととなる。



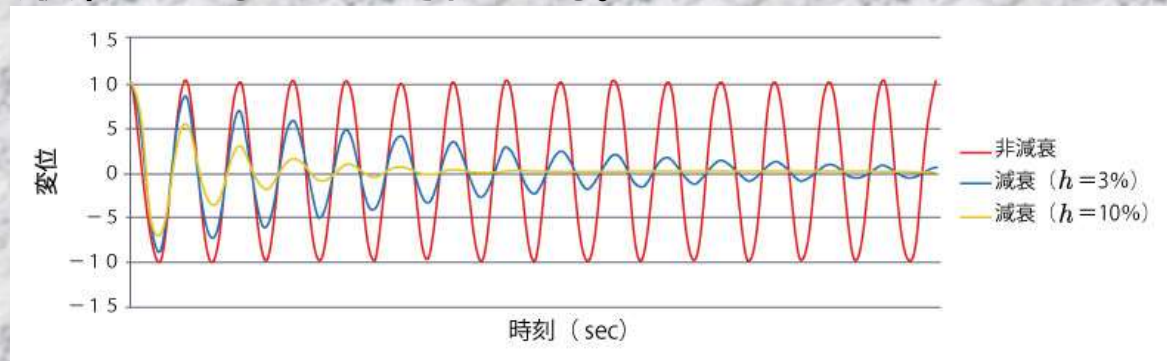
図5 慣性力のイメージ

## 5.2: 構造物の振動モデル

### (3) 減衰力

減衰とは、振動する運動を減少させる作用のことである。構造物における減衰は、振動中に構造物の内部で振動エネルギーが熱や音などに置換されたり、外部へ逸散していくことによる。実務上では鉄筋コンクリート造や鉄骨造などの形式により、減衰定数 $=0.5\sim7\%$ などが用いられている ( $c=2mh\omega$ )。

図6は、1質点系モデル(固有周期1秒)に対する非減衰と減衰 ( $h=3\%$ 、 $10\%$ ) の自由振動を示した。減衰がない場合は揺れが一定振幅を保つのに対して、減衰がある場合は揺れの大きさが時間とともに減少する。また、減衰定数  $h$  が大きい方が、より早く収束していることが示されている。



## 5.2: 構造物の振動モデル

### (4) 復元力

復元力は、ある変形を受けた質点が元の位置に戻ろうとする力である。たとえば、バネの先端に作用力  $f$  により変位  $x$  が生じている場合、バネには作用力の反対方向へ作用力と同じ大きさの復元力  $F'$  が発生している(図7)。復元力  $F$  と変位  $x$  の大きさは比例し、両者の関係は、次式で表される。

$$F = kx$$

ここで、 $k$ を弾性バネ定数と呼び、単位変位に必要な力を意味し、N/mmなどの単位系となる。

バネ定数が多いほど、同じ変位  $x$  に対する復元力は大きくなる。

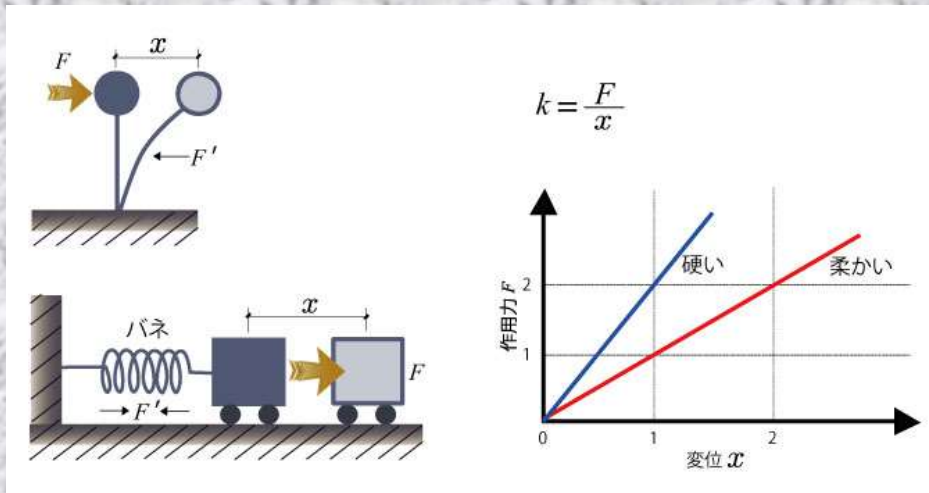


図7 復元力とは

## 5.2: 構造物の振動モデル

### (4) 復元力

たとえば、同じ力が作用した場合、硬い構造物の変位は小さく、柔らかい構造物の変位は大きくなり、同じ変位を生じさせるためには、硬い構造物には、柔らかい構造物よりも大きな作用力が必要となる。これを図化すると図7の右に示した作用力－変位の関係となり、硬い物体ほど、弾性バネ定数  $k$  が大きくなる(図7中の勾配が大きくなる)。

構造物を構成する柱や壁などの水平力に抵抗する部材が多い(大きい)ほど、 $k$  が大きくなり、また部材の材料自体(鉄骨、鉄筋コンクリート)が硬い場合にも  $k$  が大きくなる。

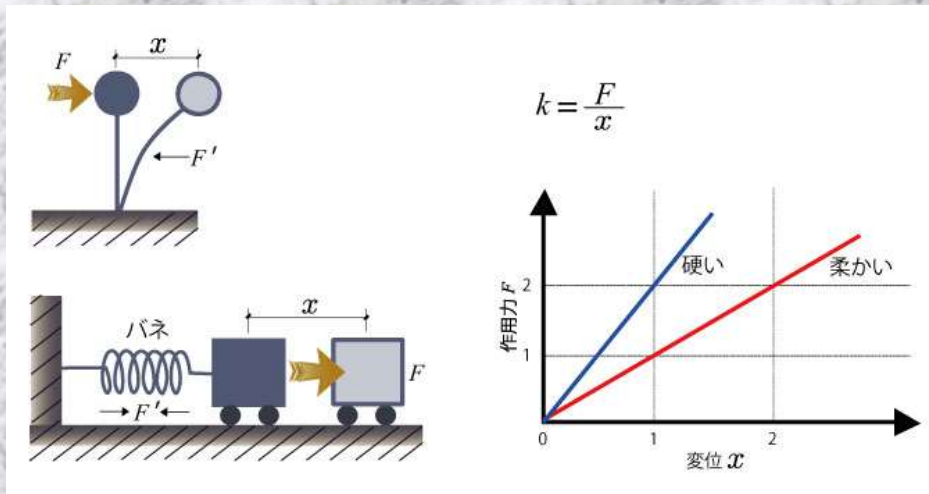


図7 復元力とは

## 5.2: 建造物の振動モデル

### (5) 建造物の固有周期

1質点系モデルは、図8のようにモデル化されるが、どのような地震動に対しても、その応答は1つの決まった周期で振動する。これを建造物の固有周期と呼ぶ。

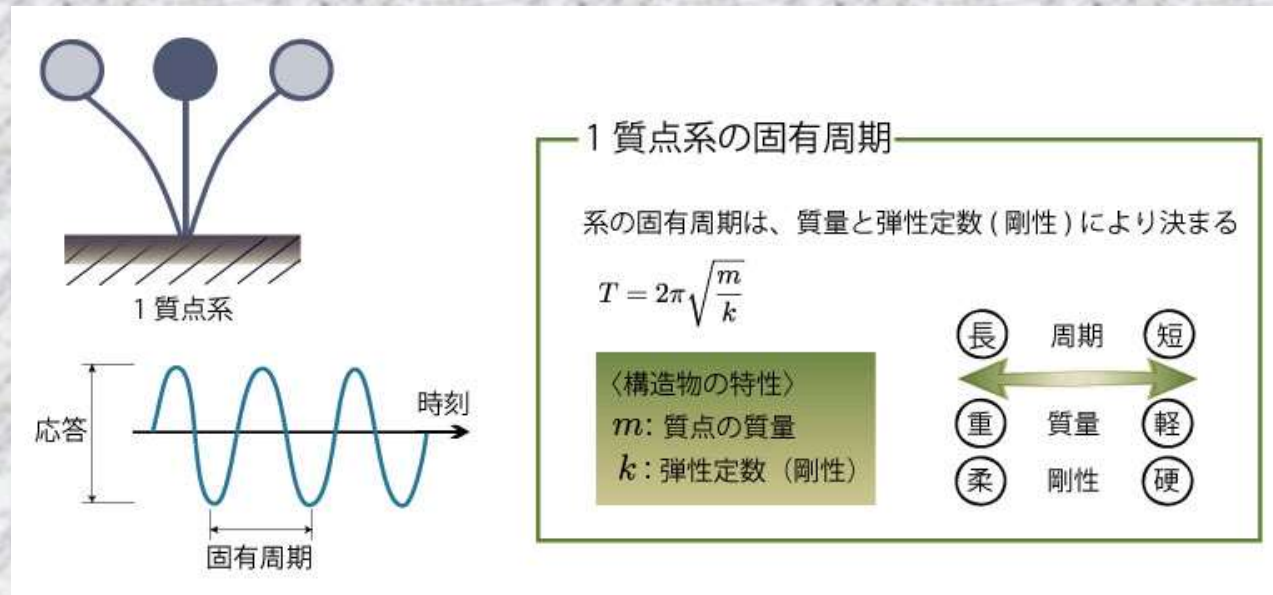


図8 1質点系の固有周期

## 5.2: 構造物の振動モデル

### (5) 構造物の固有周期

すなわち、2つの係数(等価質量  $m$ 、弾性バネ定数  $k$ )によって固有の振動特性を有するもので、固有周期  $T$  は下式にて表される(質量  $m$  は、 $m=W/G$  ( $W$ :重量、 $G$ :重力加速度))。

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad T = 2.0\sqrt{\frac{W}{k}} \quad \dots(3)$$

固有周期を表す上の式(3)は、剛性の大きさ、質量の大きさによって決定されるもので、図9に図示した大小関係を確認されたい。

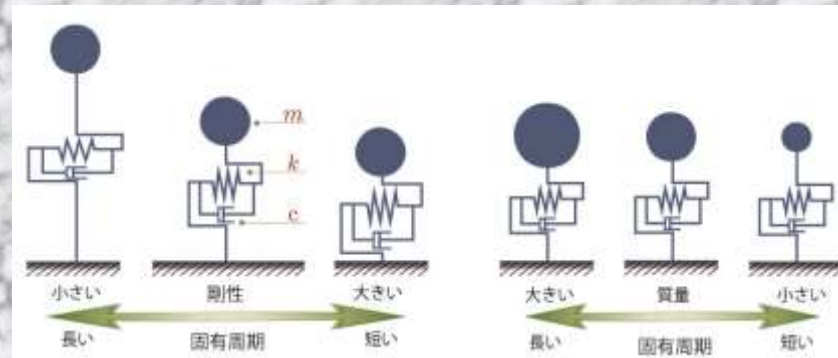
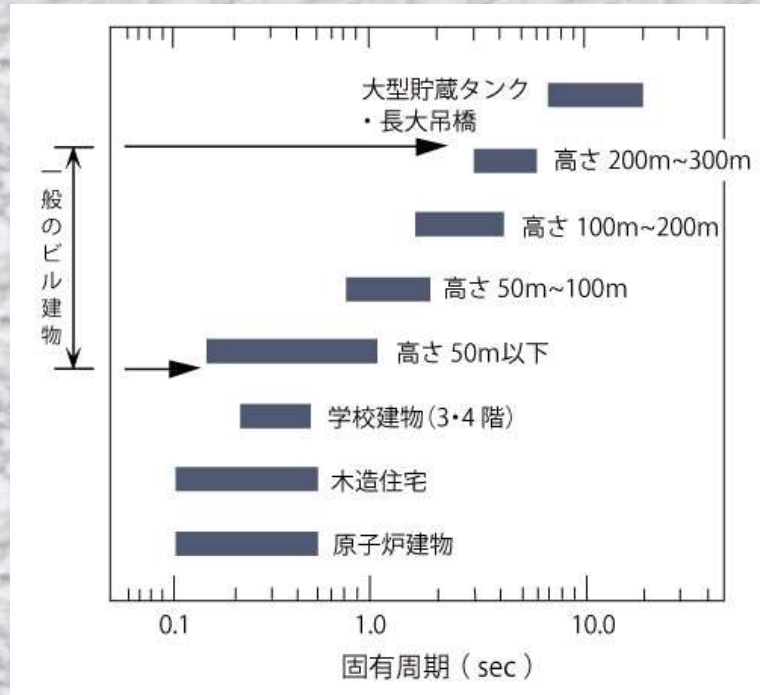


図9 構造物により異なる固有周期

## 5.2: 構造物の振動モデル

### (5) 構造物の固有周期



実構造物(高層ビル、低層建物、橋梁、タワーなど)では、架構の規模や形状がさまざまであり、その固有周期は0.1秒～10秒程度と幅がある(図10に、各種の固有周期を例示した)。

また、建物高さ $H(m)$ が固有周期に関係することから、建築設計の実務上、 $T=0.02H$  秒(鉄筋コンクリート造)、秒(鉄骨造)などの簡易式がある。

図10 さまざまな構造物の固有周期の実例

## 5.3: 構造物の応答性状

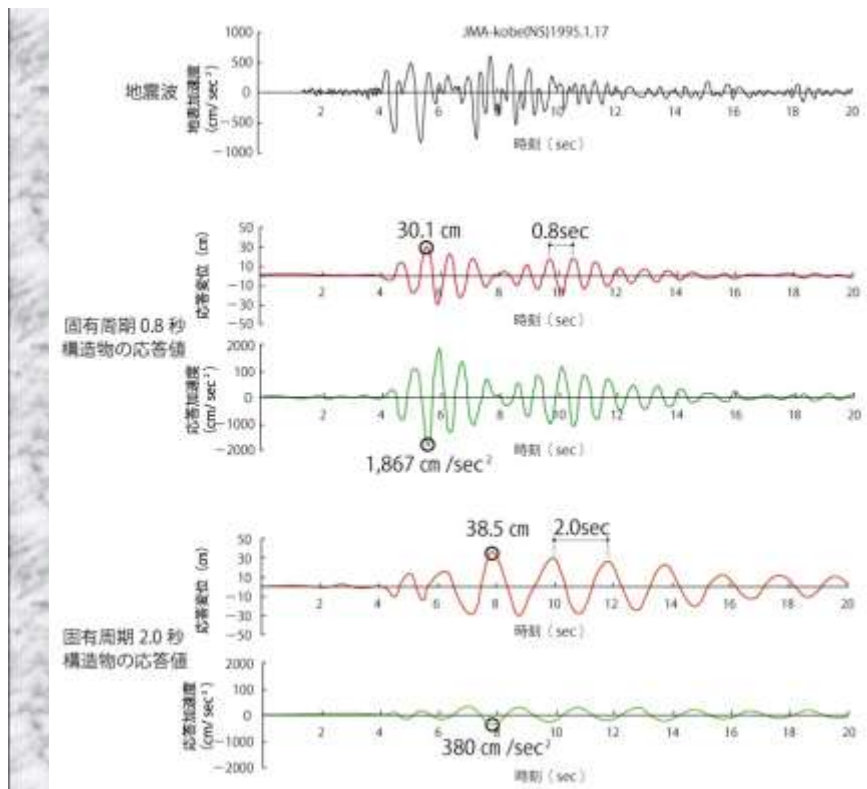
### (1) 時刻歴応答

このような構造物の地震時の応答性状は、時刻歴応答と応答スペクトルにて表現される。前者の時刻歴応答は時間軸上の変化する応答値として表わされ、実感しやすい物理量である。一方、後者の応答スペクトルは、構造物の固有周期と応答の最大値の関係として表され、地震動の特徴を表すものである。これら両者は地震動応答性状の表裏をなすもので、耐震工学の出発点でもある。

まず、図11に時刻歴応答の解析事例を示した。これは、同じ地震動が入力された場合の、構造物の固有周期の違いによる応答の差異を提示した。これは、固有周期0.8秒と2.0秒の振動モデルを準備し、これらに兵庫県南部地震の地震動(黒)を入力し、各々の応答値を示したものである(減衰は、いずれも  $h=2\%$  )。応答値は、質点における時刻歴の応答変位(赤)と応答加速度(緑)を示している。

## 5.3: 構造物の応答性状

### (1) 時刻歴応答



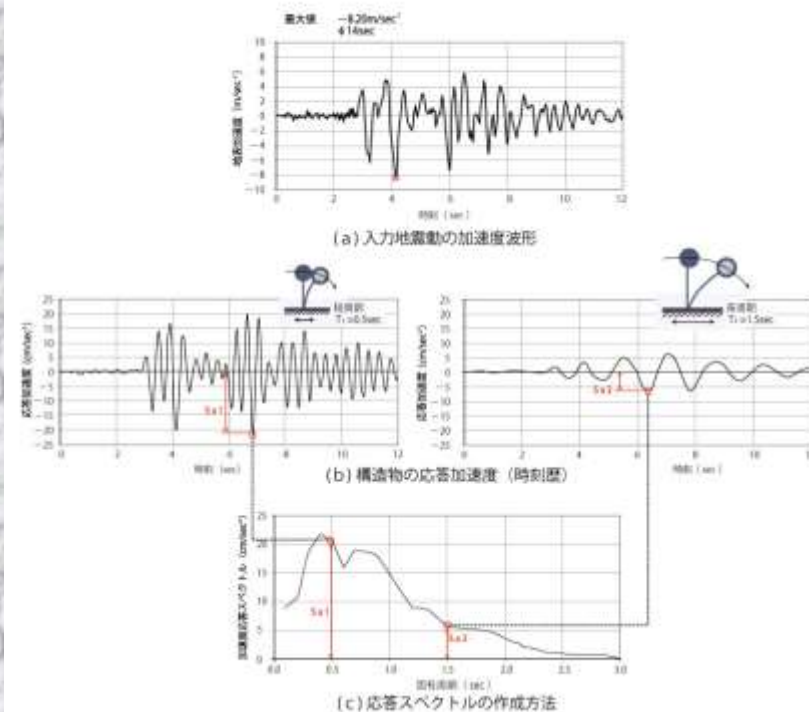
これらの比較より、固有周期が異なる構造物の応答として、以下の特徴がわかる。

- 異なる周期で応答する(それぞれ0.8秒、2.0秒周期で揺れる)

- 異なる時刻で最大応答を迎える(共振するタイミングが異なる)

- 最大応答値が異なる。(変位: 2.0秒 > 0.8秒、加速度: 0.8秒 > 2.0秒)

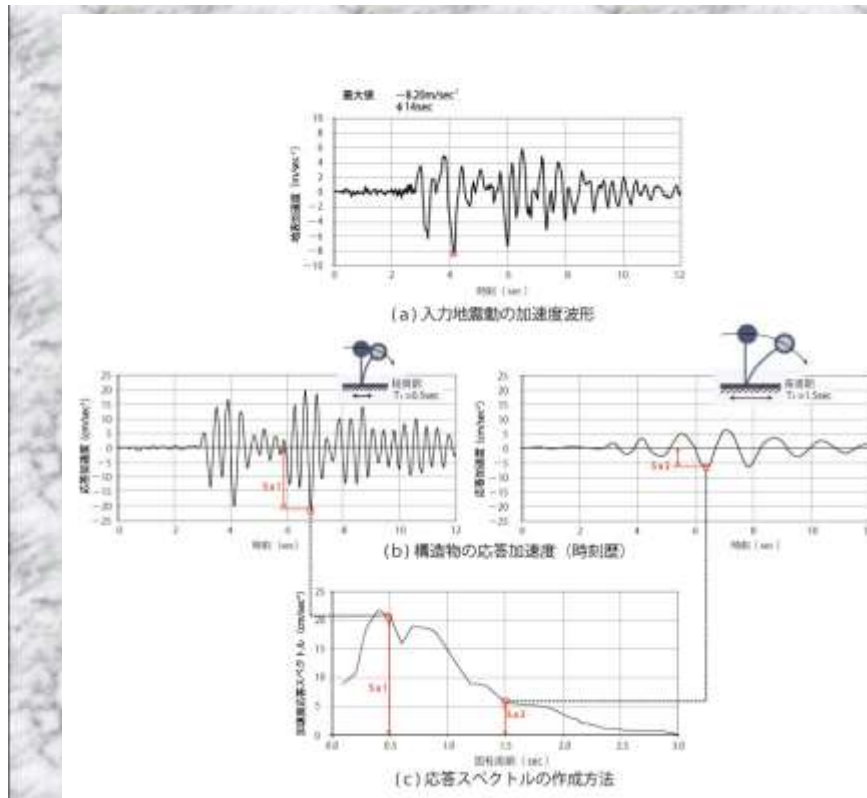
## 5.3: 構造物の応答性状 (2) 応答スペクトル



地震動における構造物の最大応答値を予測するのに有用な手法として応答スペクトル法がある。応答スペクトルは、図12に示すとおり入力波形に対し、1質点系振動モデルの固有周期を変数として振動解析を実施し、質点の最大応答値を縦軸に、各周期を横軸にプロットしたものである。これを用いれば、さまざまな固有周期の構造物の最大応答値を予測でき、いわゆる震度法/修正震度法(後述)の設計ツールとして多用される。

図12 応答スペクトルの作成方法とイメージ

## 5.3: 構造物の応答性状 (2) 応答スペクトル



応答スペクトルにより、どの周期帯の構造物に対して影響が大きいかを把握することが可能となり、最も応答が大きくなる周期帯をその地震動の被害を及ぼす「卓越周期」と呼ぶ。

なお、応答スペクトルには最大応答値(縦軸)として応答加速度・速度・変位などがあり、それぞれ、加速度応答スペクトル・速度応答スペクトル・変位応答スペクトルがある。

図12 応答スペクトルの作成方法とイメージ

## 5.3: 構造物の応答性状 (2) 応答スペクトル

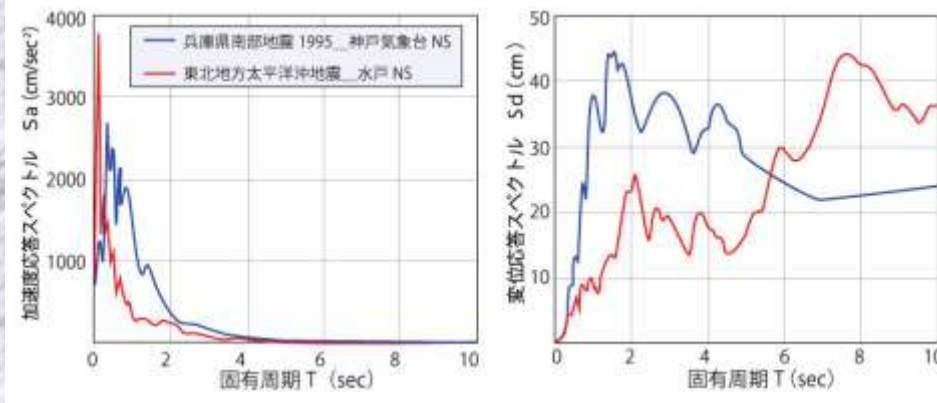
2つの地震動波形(先述の図3に提示)に対する、加速度応答スペクトルと変位応答スペクトルを図13に示した。同図より、次のことが読み取れる。

・加速度応答スペクトル(左図):

固有周期0.4秒以下の構造物では、東北地方太平洋沖地震が、兵庫県南部地震より大きな最大応答加速度となり、0.4秒以上では両者の大小関係は逆転する。

・変位応答スペクトル(右図):

最大変位は、固有周期6秒程度から東北地方太平洋沖地震が大きくなる。



## 5.3: 構造物の応答性状

### (3) 設計用スペクトル

応答スペクトルが定まれば、構造物の設計に用いる外力を設定することができる。耐震設計の実務では、構造物の質量  $m$  および弾性バネ定数  $k$  より固有周期  $T$  を求め、これを加速度応答スペクトルと照合し、最大応答加速度  $a$  を予測するものである。最大応答加速度が既知となることにより、構造物への作用力  $F$  は、 $F = \text{構造物の質量} \times \text{応答加速度}$  により算出可能となる。この作用力  $F$  は、地震時に質点に作用する外力(地震力)の最大値となり、いわゆる地震荷重として用いられる。耐震設計に際しては、構造物の各部材が、この地震荷重力に耐えられるように照査することとなる。

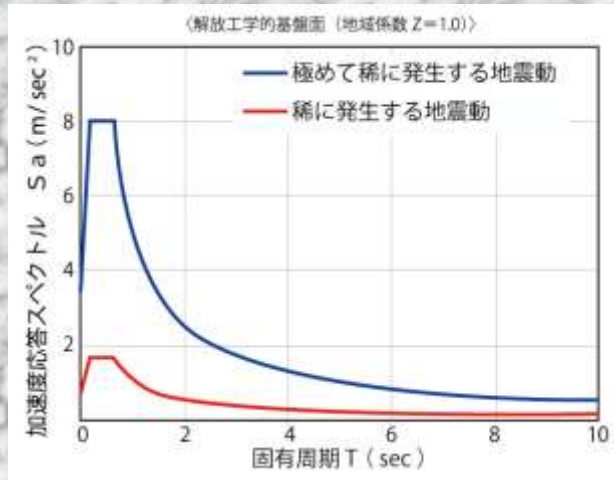
ここで、耐震設計に用いられる設計用応答スペクトルの事例を、図14に示したい。これは、建築基準法告示1461号で定義された解放工学的基盤における加速度応答スペクトルを基とし、さらに、当該敷地の解放工学的基盤から地表面までの増幅機構を考慮して設計に用いるもので、建築物の耐震設計にて基本となる設計用応答スペクトルである。

## 5.3: 構造物の応答性状

### (3) 設計用スペクトル

これら設計用応答スペクトルは形状が関数で示され、実地震動に対する応答スペクトル(たとえば、図13)と比較して滑らかな特徴を持つ。これは、将来発生するさまざまな卓越周期を持つ地震動に対して安全性を検証することを目的としているためである。

また2つのレベルの入力を想定し、稀に発生する中地震と、極めて稀に発生する大地震に対し、それぞれ建築物の目標性能を定め、設計を行うこととなる。



〈告示 1461 号 解放工学的基盤の加速度応答スペクトル (m/sec<sup>2</sup>)〉

固有周期 (sec)	稀に発生する地震動	極めて稀に発生する地震動
$T < 0.16$	$(0.64 + 6 \cdot T) \cdot Z$	$(3.2 + 30 \cdot T) \cdot Z$
$0.16 \leq T < 0.64$	$1.6 \cdot Z$	$8.0 \cdot Z$
$T \geq 0.64$	$(1.024/T) \cdot Z$	$(5.12/T) \cdot Z$

$T$ : 固有周期 (sec)  
 $Z$ : 地域係数 (0.7~1.0)



建設ICTマスター養成講座  
基礎養成編 選択分野別ソフトウェア実習 地震・津波

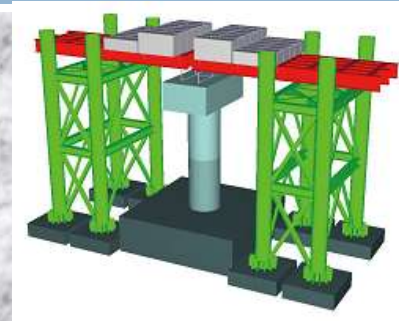
## 都市の地震防災

### 第7章：土木構造物の耐震技術を知る： 耐震設計と耐震補強

東京都市大学 名誉教授、『都市の地震防災』編著

吉川弘道

## 第7章:土木構造物の耐震技術を知る 耐震設計と耐震補強



### E-ディフェンス:世界最大級の震動実験施設

防災科学技術研究所兵庫県工学研究センターに、実大三次元震動破壊実験施設が開設され、E-ディフェンス(E-Defense)の愛称で知られている。

画像左は鉄筋コンクリート橋脚の試験状況であり、中央にある青色のフレームの中に、試験体(円形断面の柱部材)が見える。画像右は非線形動的応答解析のためのモデル化を示し、ブラインド解析コンペの優勝チームの解析モデルである。E-ディフェンスは大規模地震の3方向の揺れの再現、試験体の応答/損傷/崩壊過程の直接かつ克明な検証が可能であり、耐震性向上に関わる研究開発に大きく寄与している。

【画像提供】左/防災科学技術研究所、右/(株)フォーラムエイト

## 第7章:土木構造物の耐震技術を知る 耐震設計と耐震補強

### 7.1 耐震設計とは

- (1)設計照査
- (2)耐震設計に関する基本用語

### 7.2 土木構造物の耐震設計基準

- (1)性能設計法とは
- (2)道路橋示方書
- (3)鉄道構造物等設計標準

### 7.3 耐震補強の考え方と方法

- (1)架構形式の改善
- (2)部材の耐震補強

## 7.1:耐震設計とは

### (1)設計照査

#### ・壊れるか/壊れないか？

耐震設計(seismic design)はどのようにしてなされるのか。簡単にいうと、「構造物が地震に対して壊れないように設計すること」であり、工学的には「構造物が設定した設計地震動に対して、所定の耐震性能を有するように設計すること」のようにまとめることができる。

このため、耐震設計の実施に際しては、設計地震動による地震荷重(seismic load)、および構造物の耐震性能(seismic performance)の両者を算定し、設計照査(OKかNGか)は下式のように定められる。

- ・地震荷重 < 耐震性能  $\Rightarrow$  OK (1a)
- ・地震荷重 > 耐震性能  $\Rightarrow$  NG(不可) (1b)

## 7.1:耐震設計とは

### (1)設計照査

設計地震動による地震荷重と構造物の耐震性能と相対的な関係によって決定するともいえ、耐震設計の基本的な考え方である。

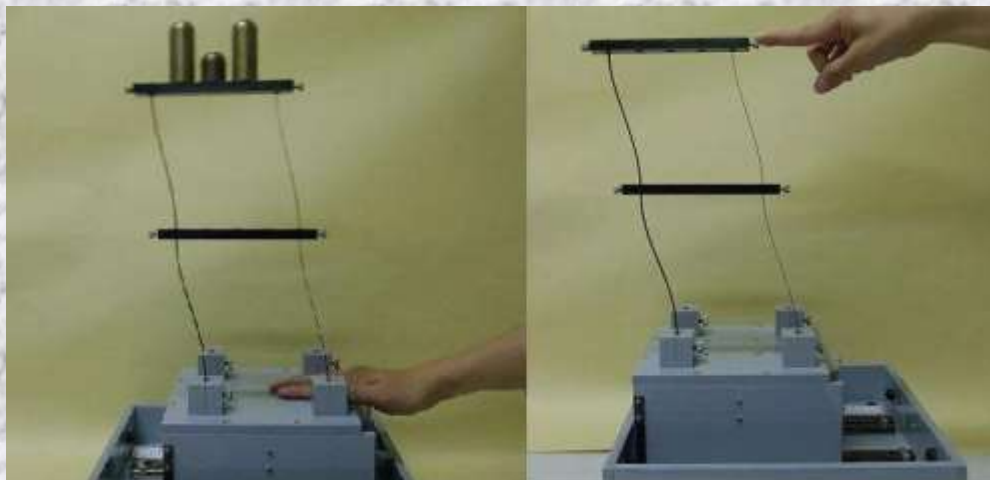


写真1 動的荷重(左)  
と静的荷重(右)

写真左は、基礎から地震波を入力して、上部構造物が「動的に応答」している。一方、右写真は左写真と等価な水平荷重を「静的に負荷」している。従って、右写真でいえば質点位置にて押している力が地震荷重である。構造物(2層ラーメン構造)が耐えられれば、式(1a)が成立し、安全性が照査されていることになる。

## 7.1:耐震設計とは

### (1)設計照査

ここで重要なことは両者のバランスである。たとえば、設計安全率を

$$\text{設計安全率} = \text{耐震性能} / \text{地震荷重} \dots\dots (2)$$

のように定義すると、式(1)にならって以下のように照査される。

$$\text{安全率} \geq 1: \text{OK} \quad \text{安全率} < 1: \text{NG} \dots\dots (3)$$

さらに、設計照査の結果がOKであっても、次のことを勘案することが必要である。

- ・安全率が大きい: 過大設計⇒建設コストが上がる。不経済な設計
- ・安全率が小さい: ギリギリの設計⇒想定外の過大荷重にて簡単に壊れてしまう

※構造物の目的を勘案した適度な安全性を設定し、被災リスクを最小限にすることが重要である。

## 7.1:耐震設計とは

### (2)耐震設計に関する基本用語

このような設計地震動と耐震性能に加えて、耐震設計の合理的具体的な実施に際しては、公的な基準が必要となり、これを総称して耐震基準(design code)と呼ぶ。土木構造物の場合、構造物毎に設計示方書または設計指針が定められ、建築物の場合、建築基準法および付随する諸規定が準備されている。

表1 耐震設計に関する基本用語

基本用語	解 説
耐震設計	構造物の目標耐震性能を発揮するよう架構形式や部材断面を設計すること。
耐震基準	耐震設計を実施する際の手法や手順などの基準となるもの。土木構造物と建築構造物、それぞれの基準が設けられている。
耐震性能	地震時における構造物の発揮する耐震能力。強さを表す「耐力」や変形能力を表す「じん性」などにより表現される。
地震荷重	設計地震動を荷重に変換したもの。例えば、構造物の質量を $M$ 、応答加速度を $A$ とすれば、地震荷重 $=MA$ にて算定できる。
設計照査	構造物が所定の地震荷重に対して、所要の耐震性能を満足しているか判定を行う行為。
耐震補強	既存の構造物について、より高い耐震性能を確保するよう、構成する部材を補強し、高強度化や高じん性化すること。

## 7.2: 土木構造物の耐震設計

以上のように耐震設計の基本的な考え方を示したが、実際に用いられる設計手法はかなり複雑である。耐震設計の手法については20世紀初頭に遡るが、主として欧米諸国からの発案によりいくつかの手法があり、下記のような4つの手法に整理できる。

- ① 震度法/修正震度法
- ② 応答変位法
- ③ 動的応答解析法
- ④ 応答スペクトル法

このような4手法を基本として、現在では、性能設計が主流となり、欧米諸国をはじめとして我が国でも定着している。

## 7.2: 土木構造物の耐震設計

### (1) 性能設計法とは

- ・ **要求性能**

構造物の建設に際しては、その建設目的と建設地点の環境によって、発注者または使用者の要求する性能(performance)がある。

- ・ **構造性能**

構造物はその構造形状、使用材料の仕様、施工具合によって特有の構造性能を有する(ここでいう性能とは、構造物の耐力、じん性にとどまらず、安全性、使用性、美観、(貯蔵物の)遮蔽性など、構造物本来の特性と機能を表す)。

## 7.2: 土木構造物の耐震設計

### (1) 性能設計法とは

性能設計(performance-based design)とは、これらの「**要求性能**」と「**構造性能**」とを対比させ、性能レベルにて設計照査するものである。

構造性能が要求性能を上回ることにより設計照査が達成される。あるいは、発注者の求める要求性能をもとに目標性能を策定し、建造物が設計/施工されると捉えてもよい。

また、従来の設計法を仕様設計と呼び、新しい性能設計に相對する設計法として位置付けられる(図1)。



図1 性能設計法と従来手法との比較

## 7.2: 土木構造物の耐震設計 (2) 道路橋示方書・同解説(道路協会)

道路構造物を対象とした耐震設計は「道路橋示方書・同解説」にてまとめられ、土木系の代表的設計示方書としてよく知られている。まずは、本示方書の基本方針を要約して示したい。

『橋は、地震後において避難路、輸送路、社会活動の基幹路など、重要な役割が期待される。従って、その耐震設計に際しては、地震時における安全性はもとより、橋の重要度に応じて、供用性、修復性の性能を充分確保することが重要である』。

このため、道路橋示方書は性能規定型の技術基準書を目指し、橋の耐震性能、設計地震動および重要度の分類を規定している。

## 7.2: 土木構造物の耐震設計 (2) 道路橋示方書・同解説(道路協会)

### 設計地震動

- ・レベル1地震動: 供用期間中に発生する確率が高い地震動
- ・レベル2地震動: 供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動(タイプⅠ: プレート境界型の大規模地震動、タイプⅡ: 内陸直下型を想定した地震動)

### 耐震性能の区分と定義

- ・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で、機能が短期間で回復でき、大掛かりな補強を必要としない。
- ・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

以上のような分類と定義のもと、道路橋に対する性能マトリックスは表2と表3のようにまとめられる。

## 7.2: 土木構造物の耐震設計 (2) 道路橋示方書・同解説(道路協会)

表2は、3つの耐震性能と3つの限界状態(安全性、供用性、修復性)との対応関係を示したものである。

表2 耐震性能の分類(道路橋示方書[2]表-解2.2.1を簡略化)

橋の耐震性能	安全性	供用性	修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
耐震性能 1	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	軽微な修復よいで
耐震性能 2		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, 応急修復で対応できる	比較的容易恒久に修復を行うことが可能である
耐震性能 3		—	—	—

## 7.2: 土木構造物の耐震設計

### (2) 道路橋示方書・同解説(道路協会)

表3は、設計地震動と耐震性能との関連を示した性能マトリックスで、橋の重要度(A種、B種)に応じて記述されることが本示方書の特徴である。

表3 道路橋示方書における設計地震動(道路橋示方書[2]表-解2.2.2を再整理)

設計地震動	A 種の橋 重要度が標準的な橋	B 種の橋 重要度の高い橋
レベル 1 地震動	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	
レベル 2 地震動 ・ タイプ I の地震動 (プレート境界型大地震) ・ タイプ II の地震動 (内陸直下型地震)	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	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

## One Point Advice: 有限要素法の威力と魅力: コンピューター上で構造物を揺らす!

### ・有限要素法とは

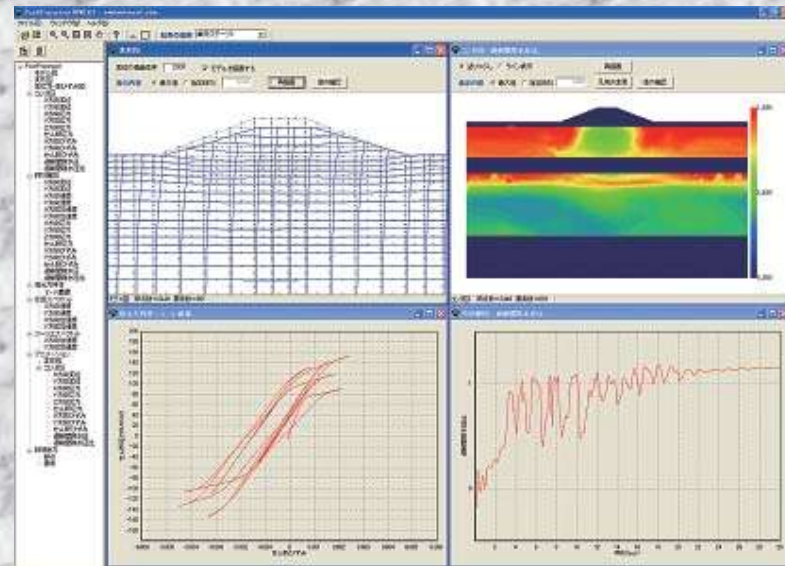
有限要素法は、対象物を有限個のメッシュ(有限要素)に離散化し、荷重/変位/振動などの外的作用に対する数値近似解を得るもので、FEM(Finite Element Method)と略称される。

FEMは、土木/建築/機械など工学分野における構造解析/動的応答解析/地盤解析などの必須の解析ツール(ソフト技術)である。ここでは、地盤の液状化解析と構造物の動的応答解析を例示したい。

# One Point Advice: 有限要素法の威力と魅力: コンピューター上で構造物を揺らす!

## ・盛土地盤の動的有効応力解析

盛土地盤に対する強震時の液状化検討結果の出力例。対象の盛土地盤をメッシュ状に分割し、地震波を与えた動的有効応力解析結果である(動的2次元有効応力解析)。これにより、時刻歴に伴う(本例では、30秒間の地震動)、地盤の変形、過剰間隙水圧の発生、剛性の低下、を克明に知ることができ、液状化判定と液状化対策に有効なソフト技術となっている。



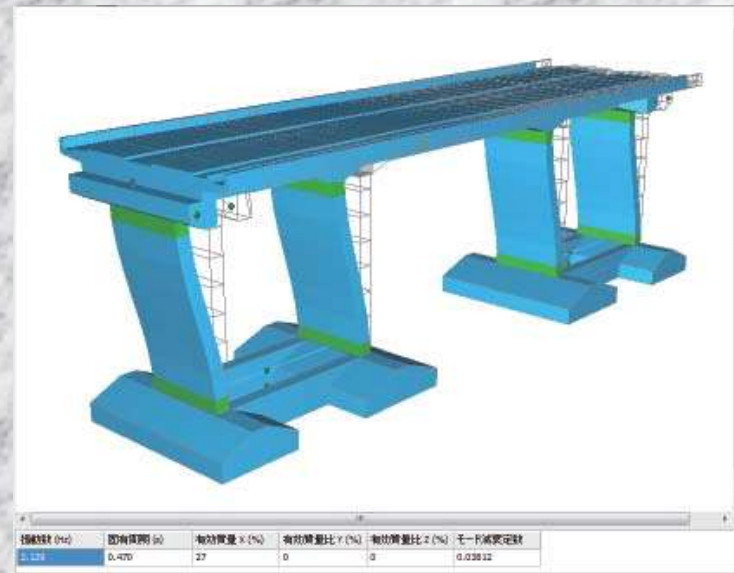
付図1 動的有効応力解析結果(変形図、過剰間隙水圧コンタ図など)  
(提供:(株)フォーラムエイト)

# One Point Advice: 有限要素法の威力と魅力: コンピューター上で構造物を揺らす!

## ・ラーメン高架橋の固有値解析

付図3は、鉄筋コンクリートラーメン高架橋の固有値解析(揺れ方のパターンと振動数を求める解析)の解析結果を示している。

通例、耐震設計に際しては、地震応答解析を行い、上部構造の応答変位、橋脚の作用断面力(曲げモーメント、せん断力)、塑性変形量等を、精度良く算出し、これにより、耐震性能を把握することができる。さらに、新設時の耐震設計に加えて、既設構造物(例えば、築10年)の耐震補強の検討を合理的に実施することができる。



付図3 鉄筋コンクリートラーメン高架橋の固有値解析  
(提供:(株)フォーラムエイト)

## 7.3:耐震補強の考え方と方法

土木構造物について、前述した設計用地震動における耐震性能の確保するため、さまざまな技術が用いられている。ここでは、耐震性能の乏しい既存構造物への補強技術を取り上げる。

たとえば、橋梁について、大地震時にも機能維持のため、致命的な被害である落橋や柱脚の崩壊などを防ぐ必要があるが、これらを実現する耐震補強には大別して2つの考え方がある。

### 【考え方 1】

架構形式を改善し、橋全体として地震動による生じる力や影響を減少させて性能を高める方法。

### 【考え方 2】

構成する橋脚などの部材自体の強度やじん性を高めて性能を確保する方法。

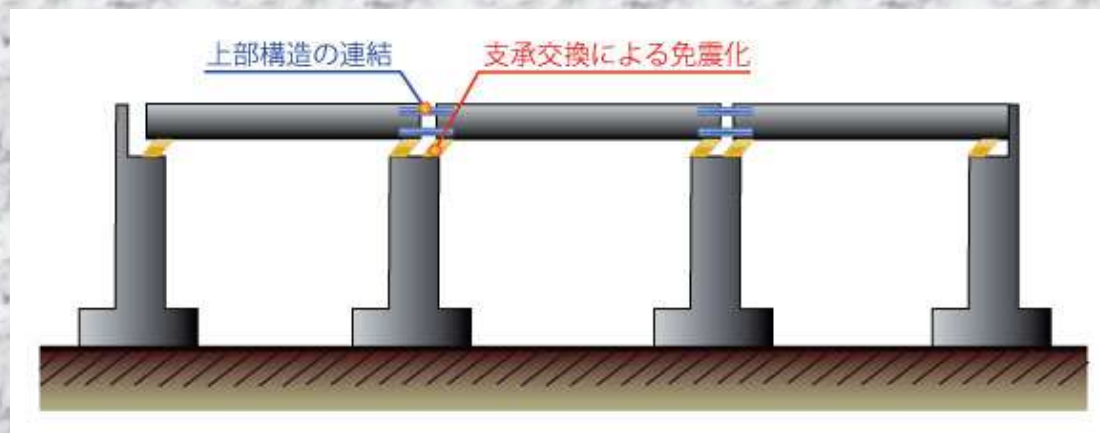
## 7.3: 耐震補強の考え方と方法

### (1) 架構形式の改善

既存の橋梁について、架構形式の改善により地震による致命的な崩壊を防ぐ手法を紹介する。

#### ・免震化による方法

橋を支える橋梁と橋脚の間にある支承について、免震支承、ダンパー等を併用した機構に取り換えることで、橋全体を長周期化するとともに、減衰性能を高めて、地震時に橋梁に作用する慣性力の低減あるいは遮断を図る方法。

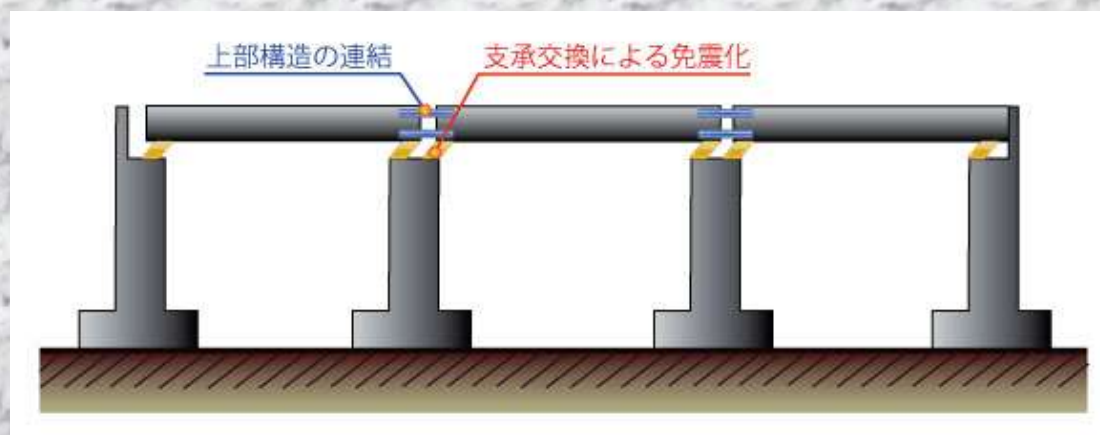


## 7.3:耐震補強の考え方と方法

### (1)架構形式の改善

免震支承は天然ゴムと鋼板の積層構造になっており、高軸力を支えるとともに、水平変位方向の剛性が低く、これにより上部構造の長周期化を実現することとなる。

ダンパーは、粘性体や粘弾性体で構成され、水平変形時に高い減衰力が発揮されるため、地震時にエネルギー吸収の減衰機構として働き、応答の低減や早期の収束が期待できる。

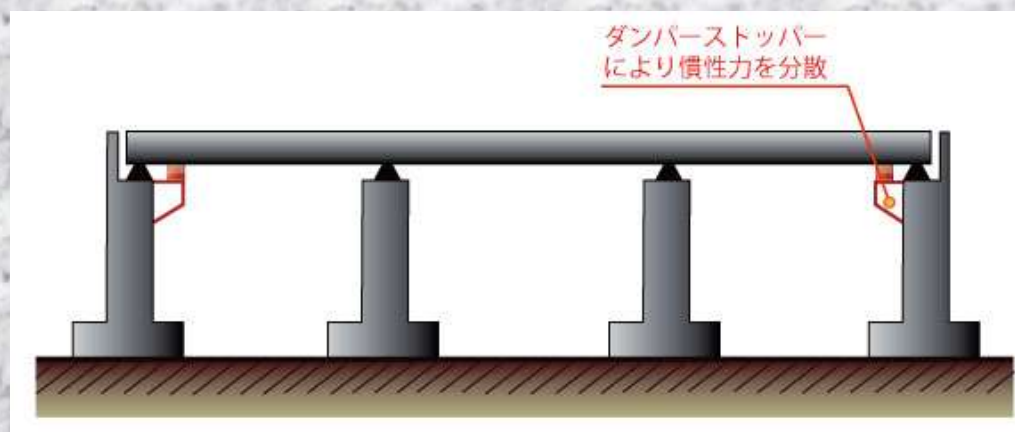


## 7.3: 耐震補強の考え方と方法

### (1) 架構形式の改善

#### ・慣性力を分散する方法

上部構造及び下部構造の支持条件を調整して、地震時に負担する慣性力をバランスよく他の下部構造に分散することにより、危険度の高い支持部の早期破壊から全体崩壊へとつながらないように橋全体として地震力に対して抵抗する方法。各下部構造への地震時慣性力の分散方法としては、ゴム系支承による方法、多点固定による方法、地震時のみ固定として機能するダンパーストッパーによる方法がある。



## 7.3: 耐震補強の考え方と方法

### (1) 架構形式の改善

#### ・変位拘束による方法

地震時に上部構造に生じる水平変位を橋台等により拘束する方法で、橋脚に作用する慣性力の低減を図る方法(図4)。両端に橋台を有する橋については、地震時の橋軸方向の変位は橋台との衝突により拘束をする。既存の橋台が衝突による作用力に耐えられない場合は、水平抵抗を強化するため、橋台の補強を行う。

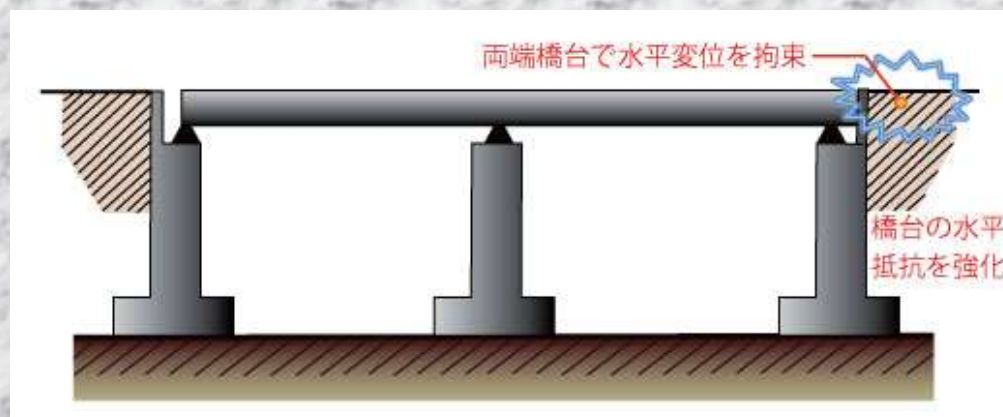


図4 変位拘束による方法

## 7.3: 耐震補強の考え方と方法

### (2) 部材の耐震補強

既設橋梁を構成する部材の曲げ耐力、せん断耐力、じん性能等の向上を目的とした耐震補強の技術には、たとえば鉄筋コンクリート製の橋脚では、コンクリート巻立て工法や鋼板巻立て工法、繊維シート巻立て工法などがある。これらの工法は、性能を向上させる目的や施工性などを考慮して選定される(図5)。

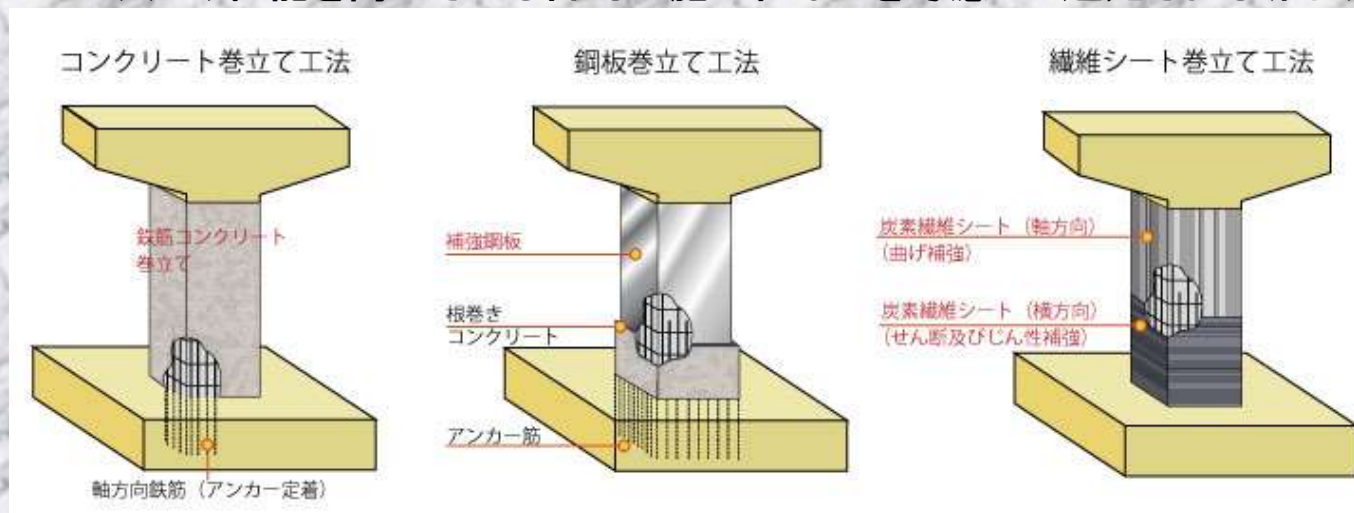


図5 橋脚の補強方法(鉄筋コンクリートの場合)

## 7.3: 耐震補強の考え方と方法

### (2) 部材の耐震補強

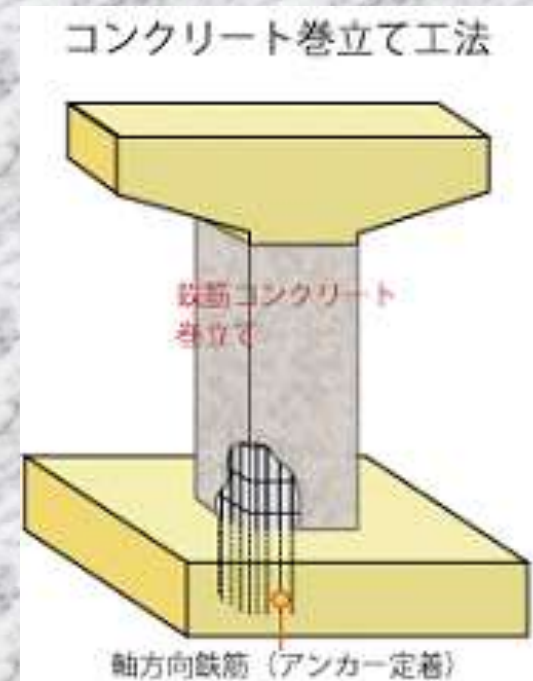
#### ・コンクリート巻き立て工法

既存橋脚の柱の周囲に、新たに軸方向筋及び帯筋を配筋しコンクリートで巻き立てる工法である。さらに、既存柱の中間を貫通させた帯筋を設けることもある。

構造的には、軸方向鉄筋による曲げ耐力、コンクリート断面の増大によるせん断耐力の向上が図られる。

また、中間貫通帯筋を設けることにより、柱全体の拘束力が上がり、じん性を発揮し、地震時の変形能力が向上する。

他の工法と比較して、安価な費用で補強することが可能であり、経済的に優れた工法である。



## 7.3: 耐震補強の考え方と方法

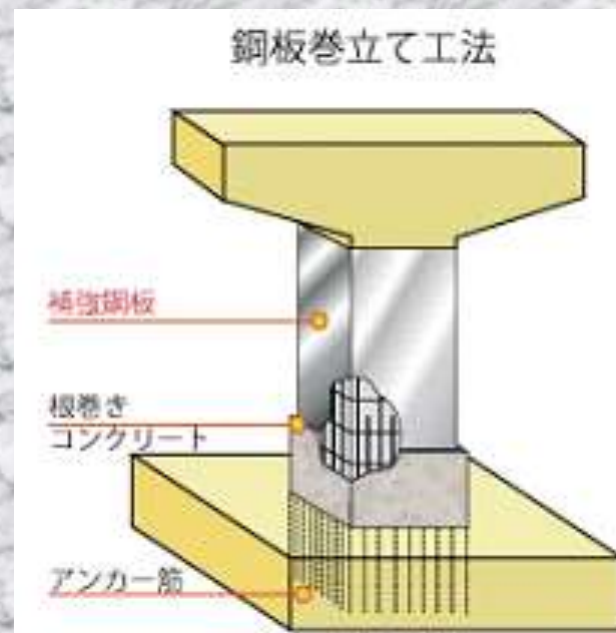
### (2) 部材の耐震補強

#### ・鋼板巻立て工法

既存橋脚の柱の周囲に、新たに鋼板を巻き立てる工法であり、さらに柱と鋼板の間に充填材を注入して密着させ、アンカー筋を通じて鋼板を既存の基礎フーチングへ定着させる構造である。

鋼板からフーチングへ定着された軸配筋により曲げ耐力が向上し、鋼板による柱への拘束力からじん性の向上が図られる。

コンクリート巻立てに比べて、柱脚の断面増加が少ないため、省スペースに適している。



## 7.3: 耐震補強の考え方と方法

### (2) 部材の耐震補強

#### ・繊維シート巻立て工法

既存橋脚の柱の周囲に、新たに炭素繊維やアラミド繊維など多本数の連続繊維を樹脂などでの結合材で集束したもので巻立てる工法である。炭素繊維シートの橋脚躯体の水平方向に貼り付けることにより、せん断耐力の向上を図り、基部曲げ破壊へと移行させることができる。また、拘束効果によりじん性の向上が図られる。

