

7章 構造物の応答

7回 構造物の応答

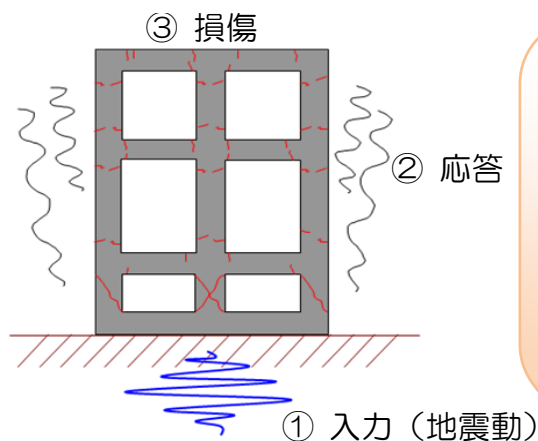
1. 地震による構造物の応答

(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ると、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。

これらの応答と損傷は、地震動や構造物の特性により異なる性状を示し、構造物の応答は、入力される地震動と構造物の剛性と重量などの特性により影響される。損傷の程度は、応答の大きさと各部材の限界能力（強度・耐力、変形能力など）の関係により、様々な様相を呈する。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、各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説明する。



- 構造物に外力（地震動）が入力されると、構造物は応答し、変形や応力が発生する。
- 応答が大きくなり、構成する部材の限界（強度・耐力、変形能力など）を超えると 構造物は損傷（ひび割れ、破断、倒壊など）する。

図 1 構造物の応答



図 2 構造物の損傷事例（出典：土木学会 東北地方太平洋沖地震 被害調査報告）

(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、地震動の特性に影響を受ける。例えば、図3の左上に示した「東北地方太平洋沖地震 M9.0」における水戸市の地震動のように、敷地より比較的遠方で起こった海溝型の巨大地震で、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3の左下に示した「兵庫県南部地震 M7.3」における神戸市の地震動のように、敷地近傍で起こる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、このため被災程度も異なる。

一方、同じ地震動としても、構造物の特性により異なった揺れ方を示す。例えば、構造物の高さ、柱・壁の多い少ないなどの架構の違い、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、応答へ影響する。

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とされている。

下図に示した二つのタイプの地震動は、地表面の最大加速度は、いずれも800cm/sec²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。

次項より、これらの応答を簡易に予測する振動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。

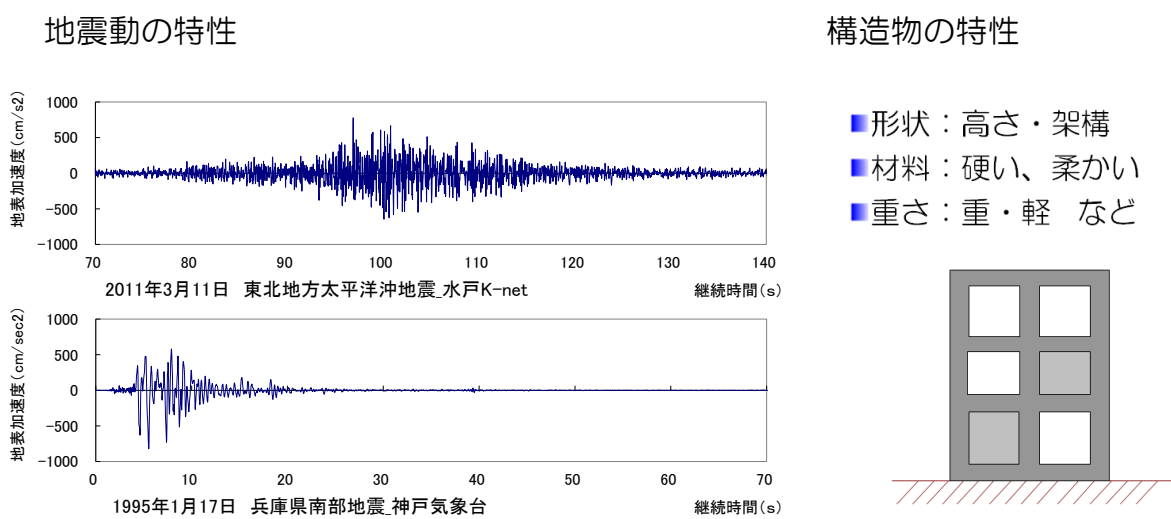


図3 地震動と構造物の特性

2. 構造物の振動モデル

(1) 振動方程式

時刻歴に従って揺れが変化する地震動における構造物の応答を予測するため、振動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、複雑な構造物の架構を、工学的に重さ・減衰・硬さの単純な微分方程式にて振動モデル化し、地震動と応答値の関係を示したものである。

一般的な振動モデルは、構造物を図4に示すような3つの力学要素によってモデル化される。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 、復元力である弾性バネ定数 k 、で構成される。

地震時の振動の運動方程式は、時刻歴である地震動入力 $p(t)$ に対し、 m, c, k と質点の時刻歴応答で釣り合う関係である。 $m/c/k \cdot$ 応答値は、それぞれ慣性力/減衰力/復元力と呼ばれ、対応する応答値は質点の加速度/変位/速度である。すなわち、

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

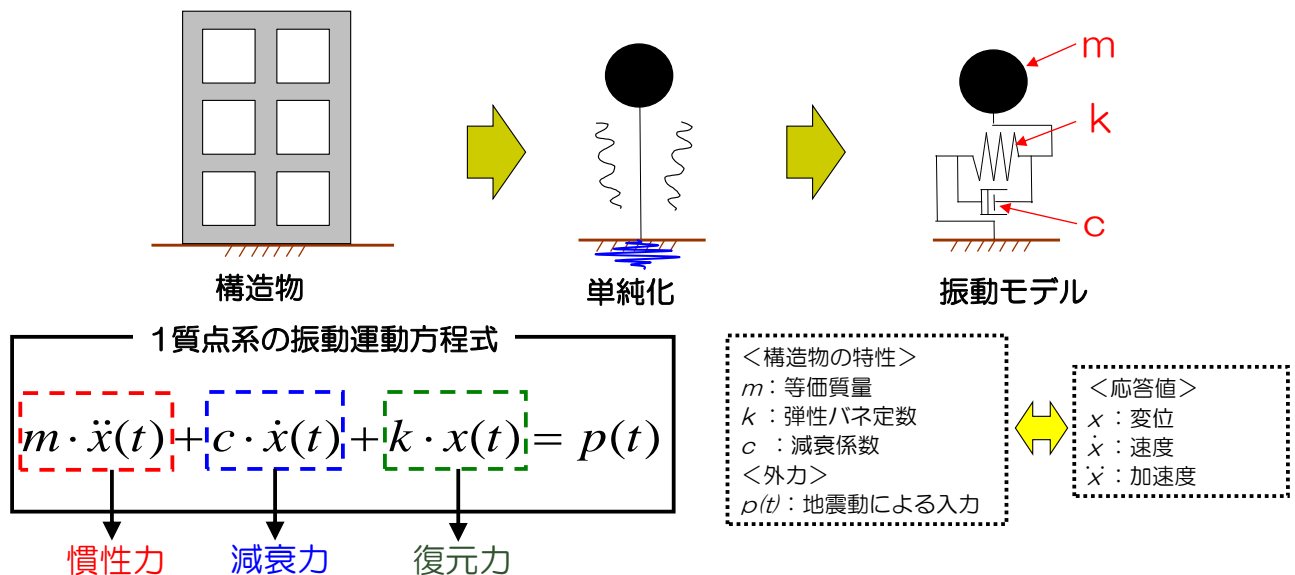


図4 振動モデルと振動運動方程式

(2) 慣性力とは

慣性力は見かけの力と呼ばれ、物体に直接力が作用するものでないため理解しにくが、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、質量の重い乗客はより重い慣性力を持つこととなる。

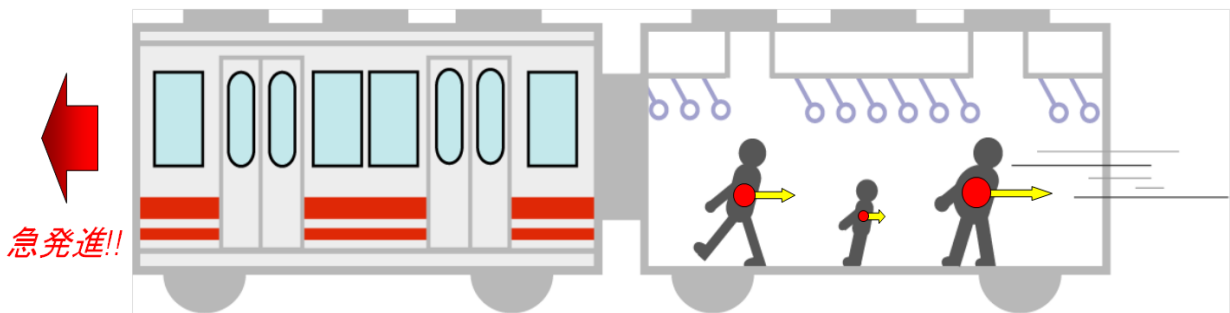


図5 慣性力のイメージ

(3) 減衰特性

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。減衰のメカニズムは極めて複雑であり、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 $h=0.5\sim7\%$ などが用いられている。 $(c=2mh\omega)$

図6に固有周期1秒の系に、非減衰と減衰 ($h=2\%$) の自由振動を示す。減衰がある場合、揺れが時間とともに収束していることが示されている。

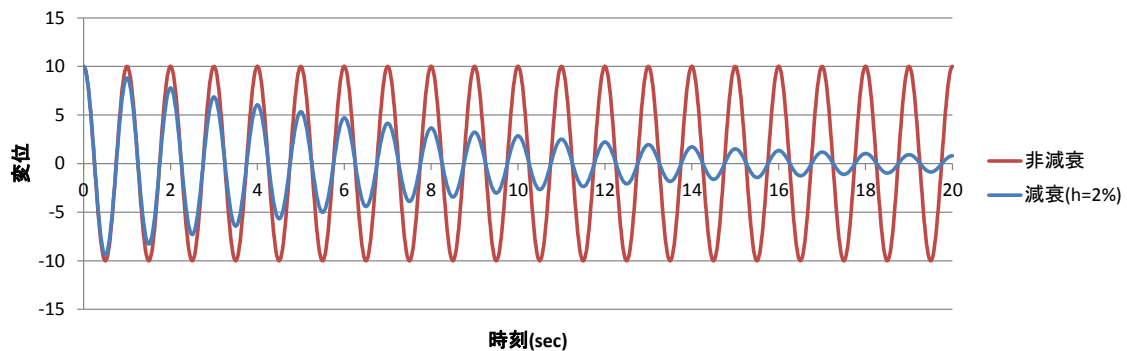


図6 減衰の有無の自由振動

(4) 復元力特性

復元力は、ある変形を受けた物体が元の位置に戻ろうとする力である。例えば、滑車バネの先端に作用力 F により変位 x が生じている場合、滑車バネには、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。

この復元しようとする物体の特性を、作用力 F から考えてみると、 F を大きくすると、物体の変位 x が大きくなることを意味している。弾性特性の物体では、 F と x の大きさは比例し、 $K=F/x$ が一定値となる。この K を弾性バネ定数と呼び、単位変位に必要な力を意味し、 kN/cm などの単位系となる。

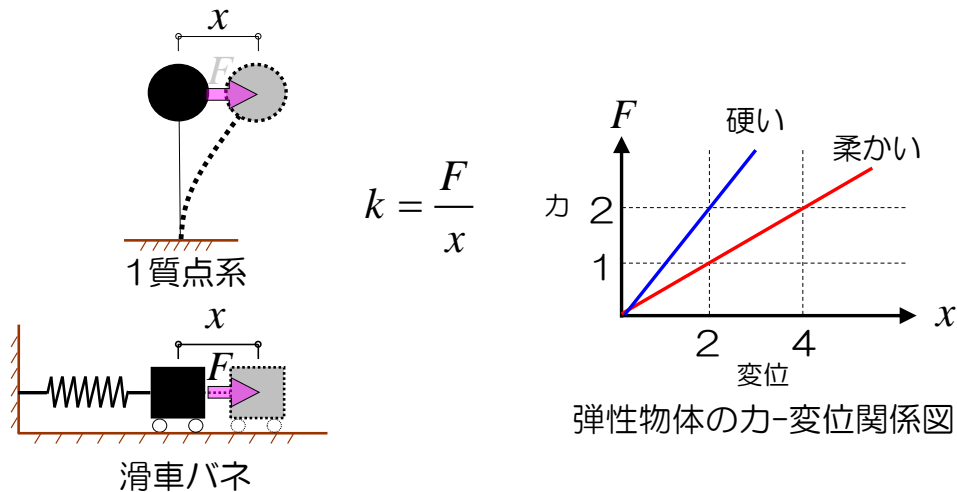


図7 復元力とは

例えば、硬い/柔らかい異なる構造物に、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る。同義に、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6に示した力-変位の関係となり、より硬い物体は、弾性バネ定数 K を示す傾きが大きくなる。

構造物では、柱や壁などの地震力に抵抗する部材が多い（大きい）場合に K が大きくなる。また部材の材料自体が硬い場合にも K が大きくなる。

(5) 構造物の固有周期

構造物を1つの質量と1つの弾性バネ定数の振動モデルに置換した場合、地震時に応答する周期は、その質量と弾性バネ定数により決定される。これは、1 質点系の応答が一つの決まった周期で振動することを示しており、これを構造物の固有周期と呼ぶ。図8に示したのが1 質点系の固有周期を求める定式であり、質点の質量 m と構造物の弾性バネ定数 K が求めれば、固有周期が求まる。質量 m は、重量 M /重力加速度 g である。

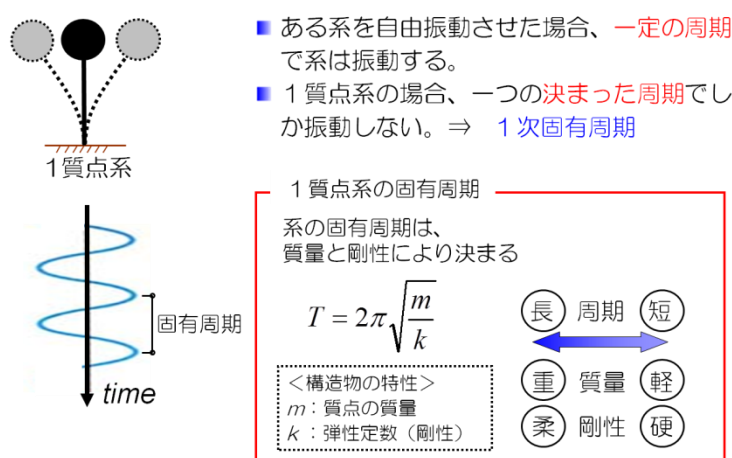


図8 1 質点系の固有周期

実構造物では、架構の規模や形状が様々であり、その固有周期は図9に示したようにその特徴により0.1秒～10秒程度と幅がある。

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、 $T=0.02H$ (鉄筋コンクリート造)、 $T=0.03H$ (鉄骨造) などの簡易式がある。 $T(sec)$

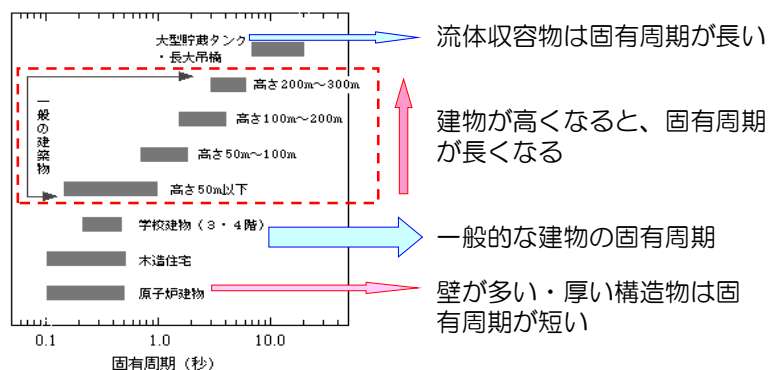


図9 様々な構造物と固有周期の関係 (出典：日本地震学会)

3. 建造物の応答性状

このような建造物の地震時の応答性状は、時刻歴応答、応答スペクトルにて表現される。前者の時刻歴応答は、時間軸上のランダム波として表わされ、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、ランダム波のうち、建造物の固有周期の関数として表わされ、同じく、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ある。

(1) 時刻歴応答

先ずは時刻歴応答を示すが、特に、同じ地震動が入力された場合の、建造物の固有周期の違いによる応答の差異を提示したい。比較するモデルは、図 10 に示す同じ質量の質点に、弾性バネ定数を調整した固有周期 0.8 秒と 2.0 秒の振動モデルである。これに兵庫県南部地震の地震動(黒)を入力し、各々の応答値を図 11 に示す。(減衰は $h=2\%$) 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。

これらの比較より、固有周期が異なる建造物の応答の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)

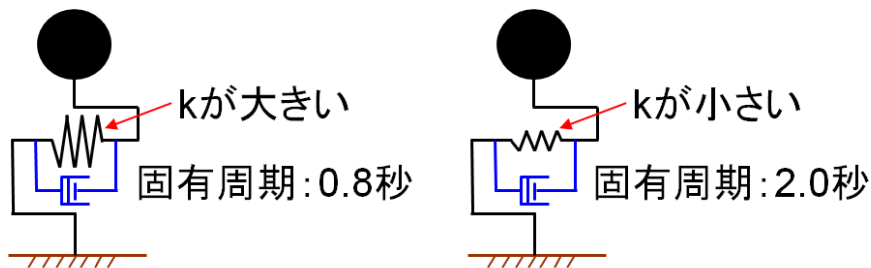


図 10 固有周期の異なる建造体の振動モデル

7章 構造物の応答

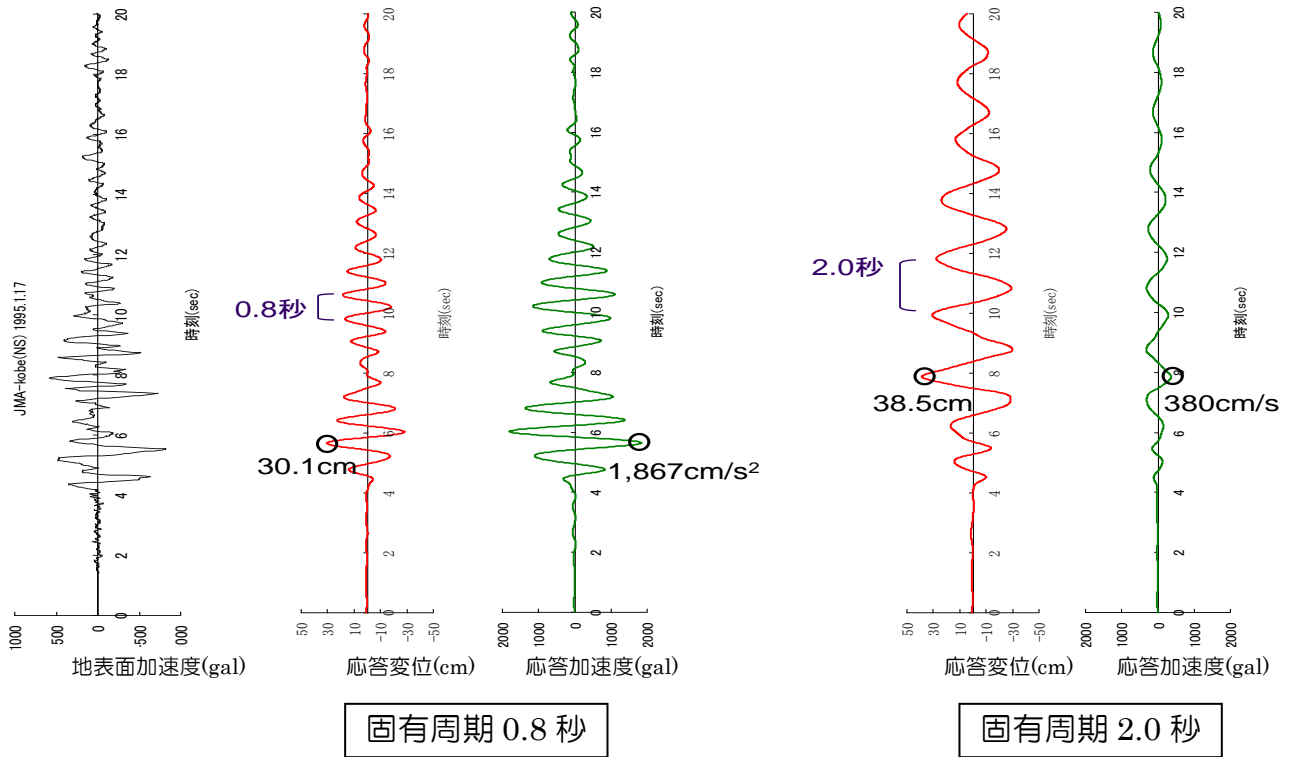


図 11 固有周期の異なる構造体の応答（左図：共通の入力地震動）

(2) 応答スペクトル

地震動における建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、振動モデルの固有周期を変数として振動解析を実施し、質点の最大の応答値を縦軸に、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、様々な固有周期の建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（後述にて示す）の設計ツールとして多用される。応答スペクトルにより、どの周期帯の建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・変位などがある。

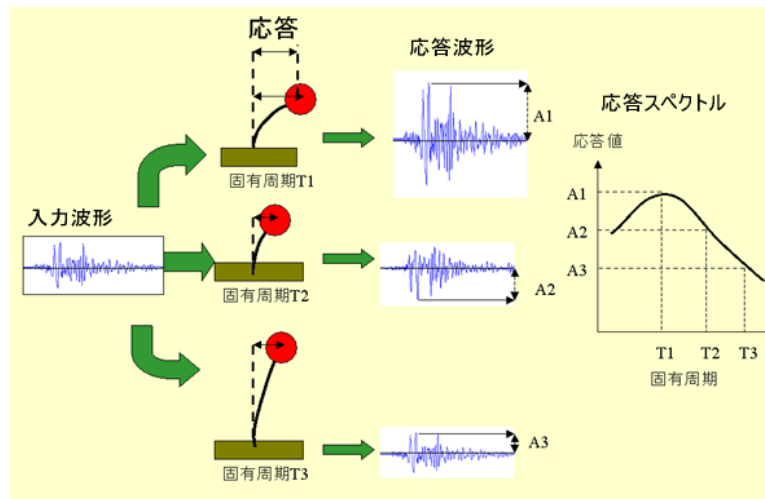


図 12 応答スペクトルの作成方法と見方（出典：気象庁）

次に、図 13 にて、先述の図 3 で示した二つの地震動波形の加速度・変位応答スペクトルを示す。左図より、固有周期 0.4 秒以下の建造物では、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 秒以上では逆転する。また右図より最大変位は、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ことが分かる。

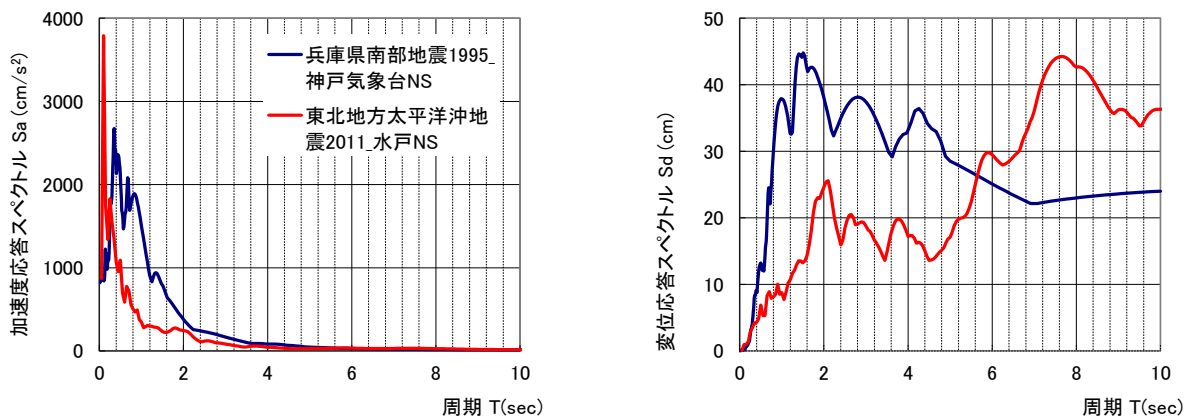


図 13 実地震動の加速度・速度応答スペクトル

応答スペクトルが定めれば、構造物の設計に用いる外力を設定することができる。これは、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。

次に、図 13 に示すように構造部の質量 \times 応答加速度が作用力 F を算出する。この F が地震時に質点に作用する外力（地震力）の最大値であるため、構造物の各部材について、この力に耐えられるよう照査することとなる。

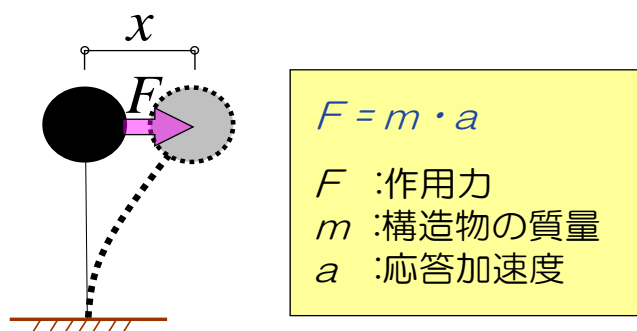


図 13 応答加速度と作用力

(3) 設計用応答スペクトル

建築物の構造設計では、高さ 60m を超える超高層建物や、免震構造の建物には、時刻歴応答解析を用いた構造耐力上の安全性の検証が必要とされる。一般的に、ここでの地震動は、図 14 に示した建築基準法告示 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。

これら設計用応答スペクトルは、形状が関数で示され、実地震動のスペクトルと比較して滑らかな特徴を持つ。これは、将来発生する様々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。

| 告示1461号 解放工学的基盤の加速度応答スペクトル(m/s ²) | | |
|---|--------------|--------------|
| 周期(秒) | 稀に発生する地震動 | 極めて稀に発生する地震動 |
| $T < 0.16$ | $(0.64+6T)Z$ | $(3.2+30T)Z$ |
| $0.16 \leq T < 0.64$ | $1.6Z$ | $8.0Z$ |
| $0.64 \leq T$ | $(1.024/T)Z$ | $(5.12/T)Z$ |

T:周期
Z:地域係数(0.7~1.0)

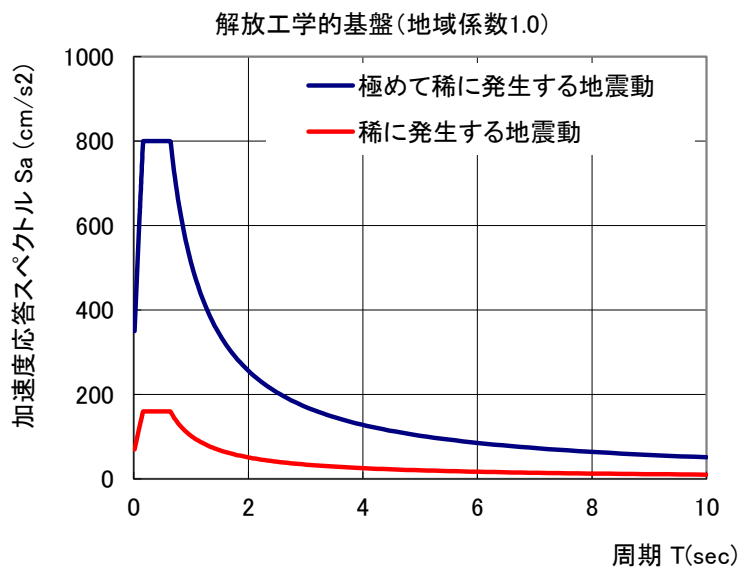


図 14 建築基準法の設計用応答スペクトル

7章 構造物の応答

今回の課題

下記の2つの質量、弾性バネ定数を持つ構造物の固有周期を定式より求め、下図で与えた応答スペクトルと照合し、応答加速度、地震力を求めなさい。なお、下記条件で算定すること。

固有周期は、簡易式 図8の定式を用いる。

地震力は、 $F = \text{質量} \cdot \text{応答加速度}$ とする。

ここで質量 m : 重量/重力加速度

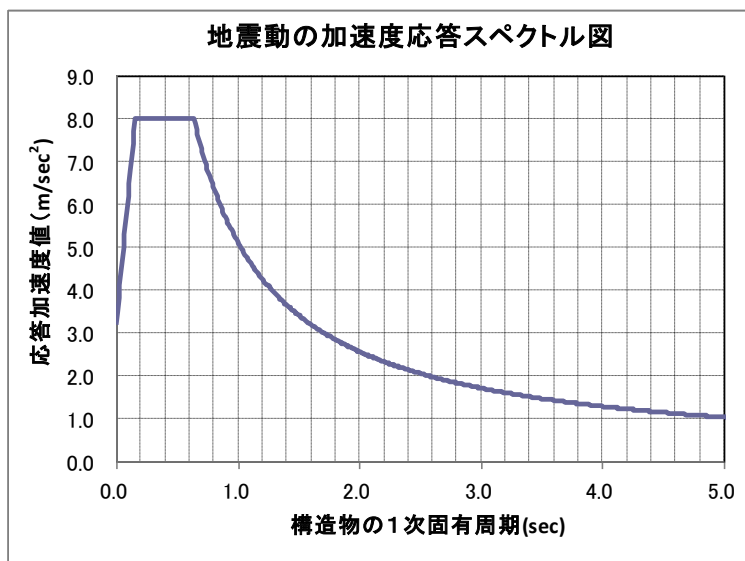
加速応答スペクトルは、下図を用いること。なお、重力加速度 9.8m/sec^2

【構造物】

- ・ 構造物 A 重量 $M=100\text{kN}$ ・ 弾性バネ定数 $K=4.0\text{kN/cm}$
- ・ 構造物 B 重量 $M=500\text{kN}$ ・ 弾性バネ定数 $K=2.2\text{kN/cm}$

(回答)

| | 構造物A | 構造物B |
|-------------|----------------------|----------------------|
| 一次固有周期 T | () sec | () sec |
| 応答加速度 a | () m/sec^2 | () m/sec^2 |
| 地震力 F | () kN | () kN |



各単位系に気をつけること！！

