

耐震 One Point アドバイス
地震動の伝播；基盤／地盤／構造物

・断層から構造物の揺動まで

地震時に構造物が大きく揺れ動き、時として大きな震害を被るのは、どのようなメカニズムによるものだろうか？そして、どのように設計すれば、合理的な耐震設計と言えるのであろうか？

まずは、応答する構造物から震源域まで遡り、図 1 のような模式図を描いてみた。震源断層から発生した地震波は、数 km から数 100km に及ぶ距離の基盤を伝播し、建設地点の地盤にて変化/増幅する。ついには、地震波が基礎より入力することにより、構造物は激しく応答/振動する。

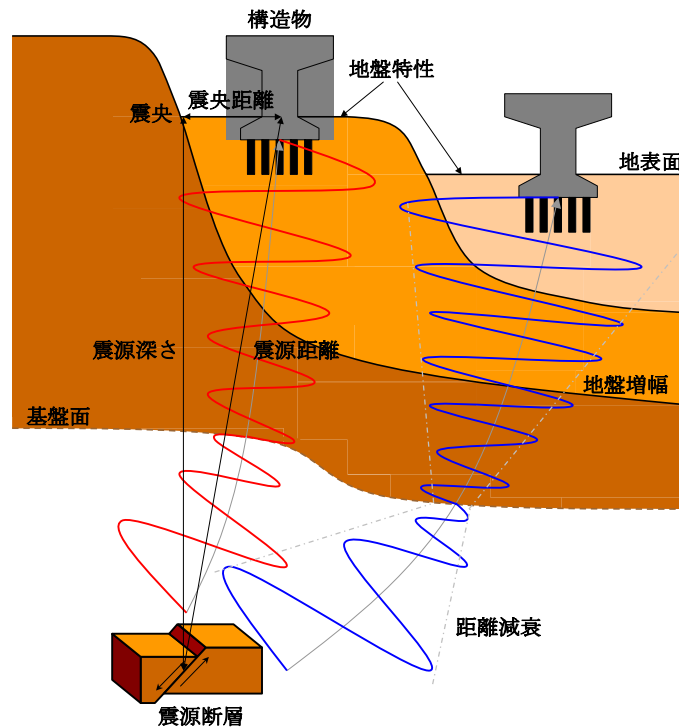


図 1 地震波の発生／伝播／増幅と構造物の応答

このため、土木/建築構造物に対する耐震性能の照査には、震源断層の調査から始まり、伝播／距離減衰、表層地盤における増幅、地盤と構造物の相互作用と入力損失、構造物の応答解析、など異なる多くの固有技術の集積とインテグレーションが必要とされる。さらには、耐震補強、免震/制震、などのハード的対処、加えて、信頼性理論、性能設計法、リ

スク評価、の観点からの探求も近年の特長である。このような知見の集積は、最終的には、基準書（示方書、ガイドライン）として一般化される。

しかし一方では、不幸にして甚大な地震被害を経験し、今なお、耐震解析/耐震設計を根源から見直すことを余儀なくされている。例えば、土木学会では、その最先端の調査・研究成果をとりまとめ、提言として公表しており、現在では第3次提言[1]として発表されている。

・動的挙動の特徴：時刻歴波形から見る

図1に示した模式図のうち、震源断層と地震波の伝播については地震学(seismology)の範疇として、ここでは、基盤面から構造物の揺動までの様子を、シミュレーションを交えて概要を説明したい。

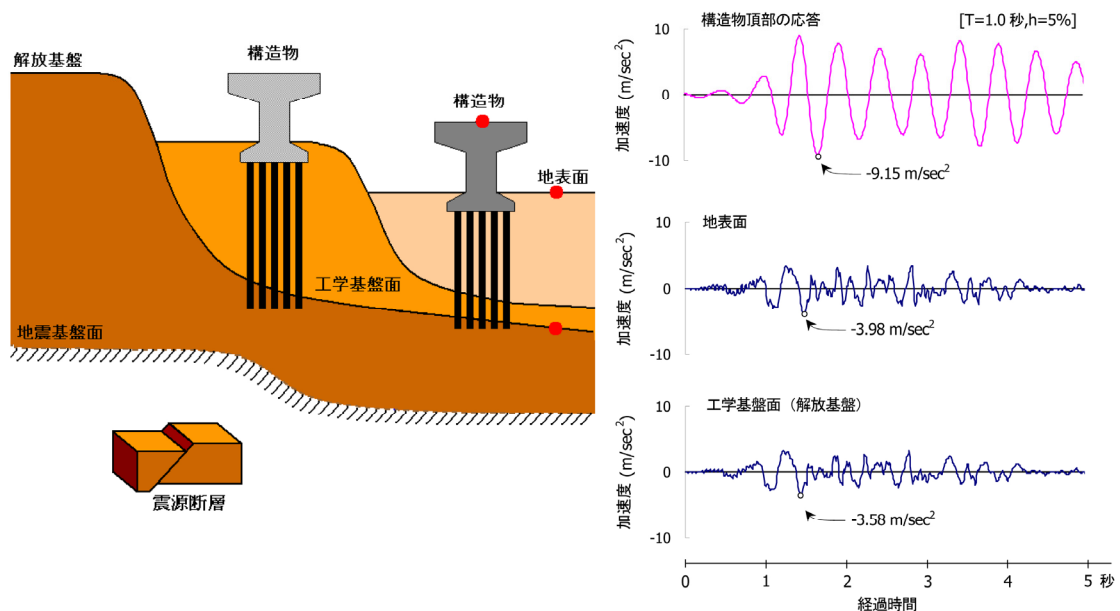


図2 工学基盤面/地表面/構造物頂部の加速度時刻歴波形

地震波の地盤増幅と地上構造物の振動の実例として、3地点の加速度時刻歴波形を図2のように示した[2]。これは、構造物直下の基盤面に到達した地震波（P波とS波として知られる弾性波）が、地盤中にて（ある周波数帯の波）が増幅または減衰して、構造物に入力する。構造物は、入力波の振幅、周波数特性、継続時間に依存して動的応答を呈する。3波形の特徴と差異を観察されたい。

この場合、最大加速度が、358Gal → 398Gal → 915Gal と次第に増大していくことがわかる。工学指標として用いられる倍率を尺度として見ると、地盤増幅倍率が1.11、応答倍率

が 2.30 のような結果となっている。本例の場合，I 種地盤を想定しているため地盤による変動は少なく（波形はほとんど変化せず），地表面→構造物の場合，周波数特性の変化（長周期成分の増加/短周期成分が消失）が，時刻歴波形から大略読みとれる。

・動的挙動の特徴：スペクトル特性から見る

このような動的挙動を今度は，周波数特性（固有周期）の観点から見るため，図 3 のような加速度応答スペクトルをまとめた（図 2 とは異なる計算条件であることをお断りしたい）。

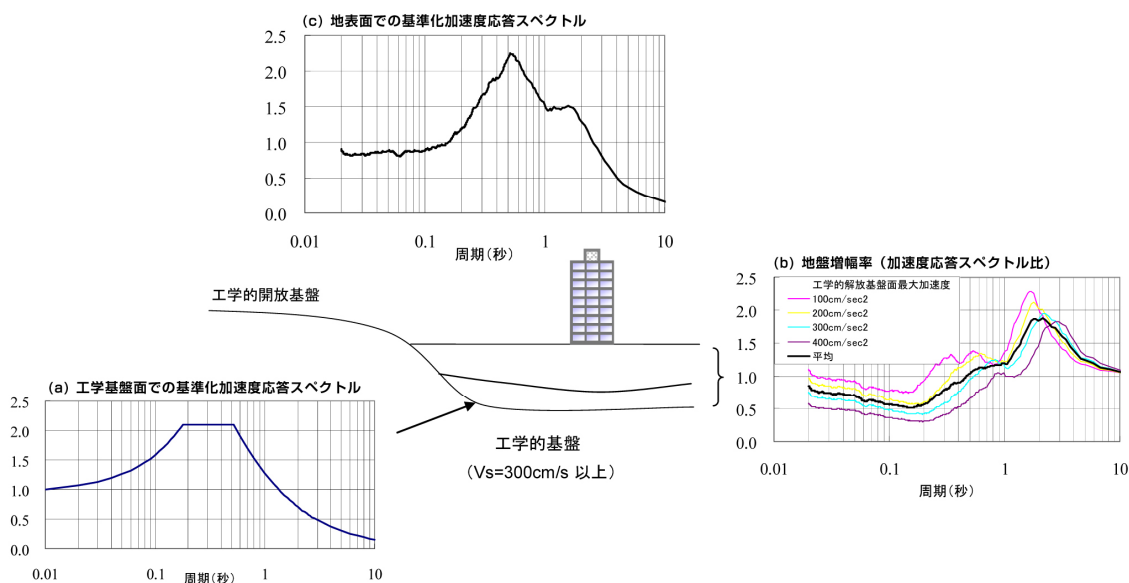


図 3 応答スペクトルから見た地震動の増幅と応答

図中の 3 つのスペクトルは，(a) 工学基盤面の標準化加速度応答スペクトル（建築基準法第八十二条六に準拠して作画），(b) 地盤増幅率（加速度応答スペクトル比），(c) 地表面の標準化加速度応答スペクトルである[3]。図(a)は，基盤面に建設された 1 質点系構造物の応答スペクトルと解釈され，縦軸は，入力地震動に対する倍率として表示している（固有周期ゼロにて，倍率は 1 となる）。

一方，(c)は地表面上での構造物の応答スペクトルである（縦軸は，同様に入力地震動に対する倍率）。そして，(b)が，(a)→(c)への（スペクトル上の）地盤増幅率であり，単純に(c)=(a)×(b)と考えても良い。(b)地盤増幅率（これは地盤種別と層厚に依存する）は，固有周期によってかなり異なり（短周期側では 1 以下である），また加速度の大小によっても異なり，地盤増幅率の複雑さを物語るものである。

図 2 と図 3 はいずれも耐震設計の基本ツールであり，数値シミュレーションに際しては高度なランダム振動学理論の知識が必要であるが，まずは，両図の見方と工学的な解釈を

会得されたい。このような時刻歴応答と応答スペクトルについては、ランダム振動の表と裏のような関係（どちらが表で、どちらが裏かは定かでない）にあり、早く慣れ親しんでもらいたい。

・構造物の地震時挙動の特徴

さて、以上のような概観のもと、地震時における地上構造物の挙動を、活荷重・死荷重を受ける場合に比べると、その特徴は次のようにまとめられる。

- ① 地盤の振動によって励起される地震荷重(earthquake loading)は、基本的に慣性力(inertial force)である。入力する地震動と応答する構造物の両者が、それぞれ固有の動的特性(周波数特性など)を持ち、両特性の兼ね合いにより震害が大きく異なる。
- ② 地震動は、深層の基盤から構造物が位置する地盤を介して、構造物に作用する。このため、周辺地盤の条件と基礎の形式により、構造物に入力する地震動の特性は大きく異なる。以上の2点は、地盤と構造物との相互作用(interaction)と呼ばれ、なお、多くの議論がなされている。
- ③ 地震荷重は、構造物に短時間ではあるが繰り返し作用する。これは、正負の異なる方向に繰り返し作用することにより、構造体に激しい劣化を強いるものである。
- ④ 予想される地震の規模、継続時間、周波数特性などは、建設地点を限定してもその不確定性はきわめて大きい。一方、塑性域に及ぶ構造物の力学挙動も不確定な要素が多く、結果として、構造物の被害予測も極めて困難なものとなり、信頼性理論、リスク解析などが、試みられている。

【参考文献】

- [1] 土木学会：2章 土木構造物の耐震性能と耐震設計法等に関する第3次提言
- [2] 吉川弘道：『鉄筋コンクリート構造物の耐震設計と地震リスク解析』, 丸善(株), pp.240 (2008.2)
- [3] 吉川弘道, 中村孝明:土木/建築施設の地震リスク評価とコンクリート構造物への適用, コンクリート工学/テクニカルレポート, 日本コンクリート工学協会, Vol.45, No.4, pp.16-22 (2007.4)