

強震動予測と地盤情報 — 深部から浅部地盤構造の影響 —

Geotechnical Information for Strong Ground Motion Estimation
—Effect of Deep and Shallow Velocity Structures—

香 川 敬 生 (かがわ たかお)

鳥取大学 教授 大学院工学研究科

1. はじめに

地震動による被害が発生する度に、局所的に被害が集中する場所が見られる。1995年兵庫県南部地震では神戸市街に「震災の帯」と呼ばれる被害集中域が発生し、2000年鳥取県西部地震では震源から離れた境港市で被害が見られた。2008年岩手宮城内陸地震では防災科学技術研究所 KiK-net 一関西で3成分合成で4Gを超える最大加速度が観測されるなど、地盤構造が影響したと思われる地震動の局所的な増幅事例は多い。一般に、地震による揺れは山地よりも堆積層上の平野や盆地で大きく、過去の被害地震で震度7相当の揺れが生じているのは堆積地盤上であることが圧倒的に多いことが報告されている¹⁾。

2011年東北地方太平洋沖地震では震源域から遠く離れた大阪湾岸部で高層ビルの共振現象で被害が生じており、これも深部地盤構造の影響と考えられている。このため、地盤の震動特性を把握して対策を講じておくことが地震被害軽減にあたって重要な課題となり、その基礎資料となる地盤情報への期待は大きい。

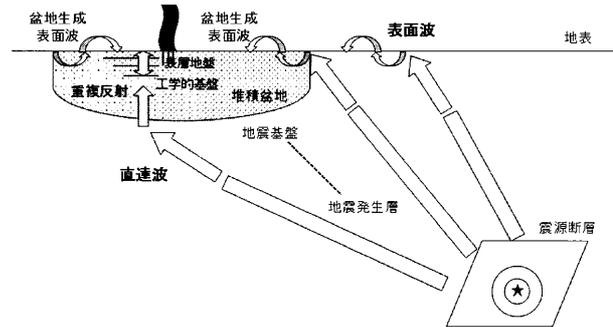
2. 地震動の生成・伝播と地盤構造の影響

まず、強震動がどのように生成され、それをどのように予測しているかを紹介する。

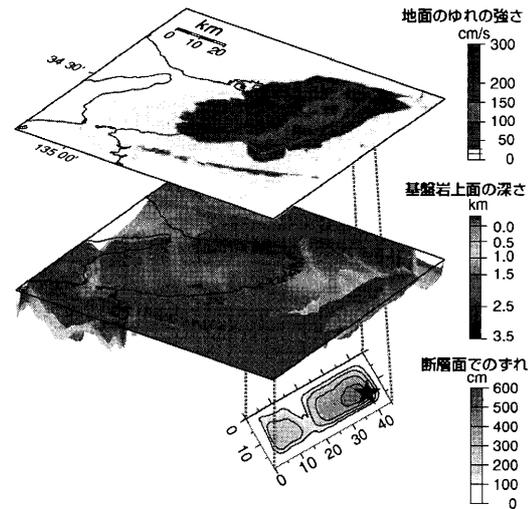
2.1 地震動の生成・伝播と地盤構造の影響

一般に、地震動は「震源特性」、「伝播経路特性」、「地盤増幅特性」に分けて考えられる。「震源特性」は断層面の大きさ、走向・傾斜、すべり量、すべり方向、すべりの分布、破壊開始点位置などによって生じる方位毎の地震動放射強度や周期特性のことであり、「伝播経路特性」は震源で生じた地震波が対象地域に至る間に受ける減衰や複雑な経路を通ることによる継続時間の伸び、経路の途中で生じる表面波の影響の総合特性である。このようにして対象地域に至った地震波はその場所の深部地盤及び浅部地盤の影響である「地盤増幅特性」を受けて構造物を揺らすことになる。

図一1にはこれを模式的に示しているが、地震発生層に連続する地震基盤と堆積層の境界、及び一般構造物の支持層である工学的基盤と完新世の軟弱な堆積層である沖積層の境界で地盤のコントラストが大きく、堆積地盤上で観測される地震動はこれらの境界による影響を強く



図一1 地震波の生成と伝播のイメージ

図一2 強震動予測の概念図 (大阪上町断層の事例)³⁾

受ける。したがって、これらの境界面までの情報を収集・整理し、モデル化しておくことが望まれる。なお、地震動の評価に用いられる物性は地震波 (P波, S波) の伝播速度と密度、及び減衰であり、特に揺れの主要動に影響の大きいS波速度が地震動評価において支配的な物性値となる。また、軟弱な表層地盤では非線形応答特性を支配する物性 (基準ひずみと最大減衰など) も重要となる。これらの3次元分布を可能な限り把握し、モデル化することが地震動評価の基本となる。

2.2 地震動の生成・伝播と地盤構造の影響

近年詳細法と称して実施されている強震動予測 (波形の予測) にあたっては、図一2に示すようにまず震源断層の破壊シナリオを設定し、地震基盤 (S波速度3000 m/s程度以上) から工学的基盤面 (S波速度300~400

m/s以上)までの不整形堆積地盤構造モデルを用いて差分法²⁾などで工学的基盤上の地震動を計算する。次に、工学的基盤面以浅の地盤モデルを用いて、非線形地盤応答特性を考慮した地震動を評価する。評価地点は対象構造物の立地する1地点の場合もあり、自治体の被害想定などの様に地域をメッシュに区切って複数点を対象とする場合もある。この流れの中で、深層地盤構造と浅層地盤構造モデルがそれぞれ活用されている。このうち深層地盤構造については3次元構造モデルが用いられ、浅層地盤構造については、評価点直下の構造が水平方向に連続するとした1次元地盤構造モデルが用いられている。

3. 地盤構造による影響把握と地盤情報

地盤構造が地震動に及ぼす影響を把握するためには、

- ① 観測による震動特性の把握
- ② 地下構造モデルを用いた震動特性の評価

の二つのアプローチが一般的に用いられる。①では強震観測点を設置して周辺で発生する中小地震から遠地の大地震までの地震記録を蓄積することになるが、短期間で成果が得られないことと観測点数に限界があることが課題である。これを補うために常時微動を用いた震動特性の把握が行われており、高密度な移動観測によって地域の震動特性を把握し、それらを取りまとめる作業⁴⁾が各地で行われている。

②のアプローチでは、主に工学的基盤に至る浅部地盤についてはボーリング情報をコンパイルした情報が基本となり、地域毎の情報をデータベース化する作業から全国を網羅した電子地盤図の作成まで様々な取り組みが試みられている⁵⁾。強震動評価においては、浅層30mの平均S波速度(AVS30)と地盤増幅には相関のあることが示されており⁶⁾、緊急地震速報などで用いられる簡便法(距離減衰)による震度推定でもその関係が用いられている。

また、工学的基盤以深の堆積層から地震基盤、さらには沈み込むプレートに至る深部地盤・地殻構造については、地震調査研究推進本部のプロジェクトの一つである「全国長周期地震動予測地図試作版」作成^{7),8)}にあたって深層ボーリングや物理探査情報が収集・整理され、地震観測記録で検証されたモデルが作成されている。内閣府による最新の地震動評価⁹⁾においても、このモデルに準拠した深部地盤構造モデルが用いられている。近年はこれら浅部と深部の地盤情報を統合管理して強震動評価に活用する動き¹⁰⁾や、地盤情報を積極的に収集して防災目的に利用するために法整備の必要性を説く提言が学会会議から行われている¹¹⁾。

4. 地盤が影響する周期帯域

都市が立地する平野部における工学的基盤の深さは概ね30m程度であり、沖積層のS波速度は平均して200m/s程度以下である。図-3に概念を示す「4分の1波長則」を適用すると、この地盤構造で卓越する波長は層

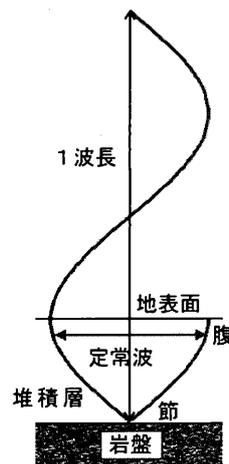


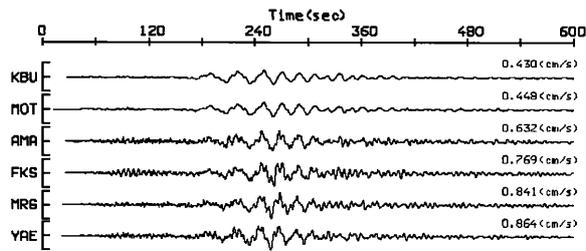
図-3 4分の1波長則

厚30mの4倍の120mとなる。波長は地震波伝播速度と周期の積であるため、これを地震動に影響の大きいS波速度で除するとこの地盤で卓越する周期は約0.6秒となる。

これに対して地震基盤までの平均S波速度は1000m/s弱程度であり、例えば大阪湾岸部での地震基盤深さ1500mを適用すると卓越周期は約6秒となり、工学的基盤までの浅部地盤情報では地震基盤までの深部構造に起因する長周期帯域の卓越周期を把握することはできない。2011年東北地方太平洋沖地震時には、地震基盤までのこの長い卓越周期と超高層ビルの固有周期がほぼ重なったため、共振現象を起こして少なからぬ被害を生じている。1995年兵庫県南部地震(M_j7.3)では周期1から2秒程度の地震動が卓越したため高層ビルの共振には至らなかったが、今後発生が懸念される海溝型巨大地震では長周期の地震動がより卓越することが懸念される。このような長周期地震動は表面波として伝播し、幾何減衰は距離の平方根分の1となり、距離分の1で減衰する実体波よりも遠方まで伝わる。また、長周期の地震動は波長が長いので遠方までの減衰が小さい。関東平野では周期8秒程度の長周期が卓越するなど、都市が立地する大規模平野では遠方で発生した巨大地震の影響を大きく受けることが懸念される。これら大都市域における地震基盤までの地盤構造をモデル化し、長周期地震動への対策を早急に講じておく必要がある。

遠地の巨大地震に際しては、より深い構造に起因する長周期の地震動が観測される場合がある。図-4に2003年十勝沖地震の際に大阪平野で観測された速度波形の例を示すが¹²⁾、周期約20秒の地震動が卓越していることが見て取れる。これは深さ約20kmの地殻-マントル境界(モホロビッチ不連続面)に起因し、地殻の平均S波速度を約4km/sとすれば説明できる周期である。図中、下4地点は堆積層上の観測点であり、硬質な上2点に比べて細かい周期の震動が載っていることが分かる。これが地震基盤以浅の堆積層によって大阪平野で卓越する周期約6秒の震動に相当している。振幅は小さく人体には感じないような揺れではあるが、地震計は堆積地盤構造及び地殻構造に起因するデータを情報

報告



図—4 大阪平野における2003年十勝沖地震の観測波形例

として記録していることが分かる。

5. 地盤情報に求められる分解能

次に、強震動予測にあたって用いる地盤情報に、どの程度の分解能が必要かを検討し、今後のモデル化にあたっての参考としたい。

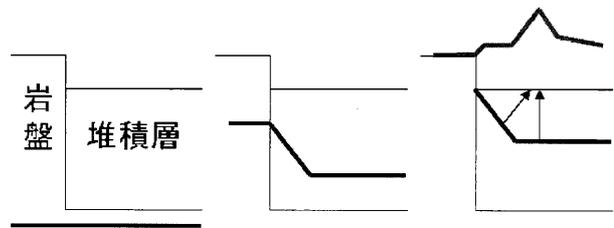
5.1 浅層地盤構造

工学的な地震動評価にあたっては、少なくとも10 Hz程度の周波数帯域まで検討できることが望ましい。現実には扱う最も軟弱な地盤（非線形化も考慮）のS波速度を80 m/sとして、先に述べた「4分の1波長則」を適用すると、10 Hzが卓越する地盤の層厚は2 mとなり、これが求められる分解能となろう。より軟弱な地盤で、さらに高周波数までを対象とする場合にはより細かい分解能が要求されるが、深さ方向に関しては現状のボーリング情報の分解能で十分対応できていると思われる。水平方向のデータ量は十分とは言えないが、データベースの充実と適切な空間補間によって対応する必要がある。なお、表層地盤の水平方向の変化は深さ方向に比べれば緩やかであり、水平成層構造としてモデル化されて評価される場合が多い。地盤構造を簡略化する代わりに、地盤の軟弱さを踏まえて非線形地盤応答を評価することが行われる。

ボーリング・データをコンパイルしてモデル化^{5),10)}して行くにあたっては、特に深さ方向の分解能を確保しておくことと、地震動評価に用いることの出来る物性値を直接把握できるボーリング点の充実に配慮する必要がある。現状のボーリング情報では地震波速度が直接測定されている事例はほとんどなく、N値からの経験的推定に拠らざるを得ない。非線形応答特性に至ってはデータが存在することが希である。地震防災に用いるデータとするには、このような課題を今後克服して行くことが望まれる。

5.2 深層地盤構造

地震基盤までを想定した強震動評価には、一般的には差分法が用いられる²⁾。その場合の対象最大周波数は、内陸の中小地震など、対象とする領域が小さい場合で2 Hz程度である。堆積層の平均S波速度を1000 m/sとすると、波長は500 mである。4次精度の差分の場合は1波長あたり5格子は必要とされるため、構造モデルの最小分解能は100 mとなる。より低速度の層までモデル化する場合はさらに細かいモデルが必要となるが、深さ方向に関しては物理探手法の分解能で十分に対応でき



図—5 エッジ効果のイメージ

る範囲である。ただし、水平方向に関しては利用できる探査情報などのポイントが限られ、何らかの空間補間¹³⁾を行って差分法の適用に資する3次元地盤構造モデルを構築する必要がある。

深層地盤は長い周期帯域に影響するだけではなく、盆地構造端部など急激に境界深度が変化する領域においては、広い周期帯で複雑な地震動を生じる。特に1995年兵庫県南部地震では、図—5に示すように盆地端部の影響（「エッジ効果」）によって山地から少し離れた堆積地盤上で局所的に地震動が大きくなる領域を生じ、「震災の帯」と称されている¹⁴⁾。同様の現象は2000年鳥取県西部地震における境港の被害集中域でも生じていたものと考えられている¹⁵⁾。都市が立地する平野や盆地の周囲には山地が存在することが多く、同様の現象が発生する危険性を持つ地域は多い。そのためにも、都市域の山地境界付近における深部地下構造の把握とその影響評価が急務となる。ボーリングなどの地盤情報及び地下構造探査の実施地点は、都市が発達し構造物が多い平野や盆地の中央部に集中する嫌いがあるが、地震防災の観点からは山地との境界部の情報を充実させることが重要である。

6. おわりに

強震動評価に用いる深層から浅層までの地盤情報について検討した結果を以下にまとめる。

- ① 浅層地盤の影響は周期1秒より短く、深層地盤はより長周期に影響することが多い。
- ② 浅層地盤は水平成層モデルによる近似でも十分ではあるが、軟弱地盤の非線形地盤応答を考慮することが望ましい。
- ③ 深層地盤については3次元的不整形地盤構造を考慮することが望ましい。
- ④ 強震動評価に用いるためには、地震波（P波、S波）伝播速度、密度、減衰の物性値が必要であり、浅層の軟弱地盤では非線形応答特性も必要である。
- ⑤ 深さ方向に期待される構造モデルの分解能は浅層地盤で2 m程度、深層地盤で100 m程度であり、より詳細な情報がコンパイルされることが望まれる。
- ⑥ 浅部から深部までを統合した地下構造データベースの構築が、強震動予測の面からも望まれる。
- ⑦ 都市が立地する平野や盆地の中心部だけでなく、山地境界における構造の把握が重要である。
- ⑧ 近年の地下構造モデルデータベースのプロジェクトや、地下構造情報を収集・整備するための法整備

を含む提言により、地盤情報の量及び質が飛躍的に向上することが望まれる。

以上、今後整備される地盤情報が強震動予測との有意義な連携を保って発展することを期待して結びとしたい。

参 考 文 献

- 1) 武村雅之・諸井孝文・八代和彦：明治以後の内陸浅発地震の被害から見た強震動の特徴—震度Ⅶの発生条件，地震2, Vol. 50, pp. 485~505, 1998.
- 2) 青井 真・早川俊彦・藤原広行：地震動シミュレータ：GMS, 物理探査, Vol. 57, pp. 651~666, 2004.
- 3) 産業技術総合研究所：地震動の予測，産総研の地震研究—地質学を基礎に地震に迫る，産業技術総合研究所，pp. 10~11, 2004.
- 4) 先名重樹：常時微動のデータベース化とデータの利活用，第3回シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築」研究成果の中間報告予稿集，防災科学技術研究所，pp. 21~26, 2009.
- 5) 山本浩司・三村 衛・矢田部龍一：全国電子地盤図の作成と地盤防災への適用性に関する研究—地域への適用と閲覧機能の視覚化—，京都大学防災研究所年報，Vol. 52B, pp. 371~381, 2009.
- 6) 松岡昌志・翠川三郎：国土数値情報とサイスマックマイクローニング，第22回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp. 23~34, 1994.
- 7) 地震調査委員会：「長周期地震動予測地図」2009年試作版，地震調査研究推進本部，2009.
- 8) 地震調査委員会：「長周期地震動予測地図」2012年試作版，地震調査研究推進本部，2013.
- 9) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震による津波高・浸水域等（第二次報告）及び被害想定（第一次報告）について，内閣府，2012.
(http://www.bousai.go.jp/nankaitrough_info.html)
- 10) 大井昌弘・藤原広行・河合伸一：地震防災のための統合地下構造データベースの構築，日本地震工学会論文集，Vol. 13, pp. 1~16, 2013.
- 11) 日本学術会議地球惑星科学委員会：提言「地質情報の共有化に向けて—安全・安心な社会構築のための地質地盤情報に関する法整備」，日本学術会議，2013.
- 12) Kagawa, T., H. Iemura, K. Irikura and K. Toki: Strong ground motion observation by the Committee of Earthquake Observation and Research in the Kansai Area (CEORKA), *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 4, No. 3 (Special Issue), pp. 128~133, 2004.
- 13) Kagawa, T., B. Zhao, K. Miyakoshi and K. Irikura: Modeling of 3-D basin structures for seismic wave simulations based on available information on the target area: Case study of the Osaka Basin, Japan, *Bulletin of Seismological Society America*, Vol. 94, pp. 1353~1368, 2004.
- 14) 川瀬 博・林 康弘：兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No. 480, pp. 67~76, 1996.
- 15) 岡本拓夫・西田良平・野口竜也：鳥取県西部地震(2000, M7.3) 時に認められた境港市の異常震域に関する一考察，第27回土木学会地震工学論文集，No. 213, 2003.
(原稿受理 2013.2.20)