

地震動評価における地質地盤情報の活用事例

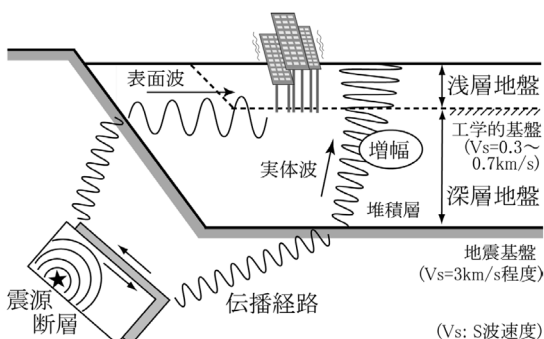
藤川 智¹⁾

1. はじめに

南海トラフなどにおける海溝型巨大地震が逼迫し、内陸型地震が多発している昨今、想定した地震による地震動とそれによる被害推定が、政府機関(中央防災会議、地震調査研究推進本部など)や自治体で精力的に実施されている。また、構造物の耐震設計においては、性能規定化の流れから地域特性を反映した地震動評価も進められているところである。このような地震動評価では、その目的や、利用できる情報の質と量に応じて手法が選択される。現状では、簡便な手法から、地震動波形を評価できる高度な手法まで開発されている。地震動の主要な成因のひとつは堆積地盤における増幅効果であり、上述のいずれの手法においても、地盤情報の精度が地震動評価結果に大きな影響を与える。本報では、強震観測記録のシミュレーションや想定地震による強震動予測の事例を紹介し、地震動評価における地質地盤情報の活用方法の概略を示す。

2. 地震動の地盤増幅と地震動評価手法

2.1 地震動と地盤構造

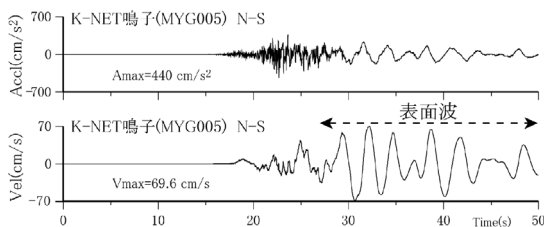


第1図 地震動の要因と堆積層での増幅。

地震動の特性は、震源特性、伝播経路特性、地盤特性の3つの特性で決まる。第1図に示すように、震源断層から伝わった地震波は伝播経路を経て、地震基盤(S波速度が約3km/s以上の中古生層)より浅い堆積層で増幅される。堆積層は、深層地盤(第三紀層から第四紀層の洪積層のうち比較的硬質な層)と浅層地盤(洪積層のうち比較的軟弱な層から沖積層)に分けられる。深層地盤の上面は、高層ビルの支持層になるような地盤であり、耐震工学・地震工学では工学的基盤と呼ばれる。深部から上昇してきた地震波(実体波)は、表層に向かって地盤が軟らかくなると、次第に増幅する。特に浅層地盤では深層地盤より軟弱であるため、そこで地震波が大きく増幅するとともに、土の非線形化による複雑な増幅や、地盤条件によっては液状化現象が生じることもある。また、盆地状の堆積層端部に地震波が入力すると、やや長周期地震動(周期数秒~10秒程度)と呼ばれる表面波が生じることがある。この場合、堆積層の固有周期に対応する地震波が、盆地内に閉じ込められて、長く地盤を揺らすことがある。

2.2 地盤増幅の観測事例

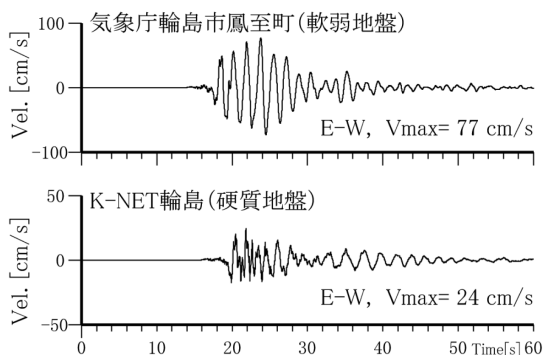
最近の地震で、地震動の地盤増幅が明瞭に見られた例を示す。はじめに、深層地盤を含む堆積層での増幅事例を示す。第2図は、2008年岩手・宮城内陸



第2図 盆地内で観測された表面波の例。

1) 清水建設株式会社 技術研究所

キーワード: 地震動, 浅層地盤, 深層地盤, 簡便法, 詳細法



第3図 浅層地盤における増幅の例。

地震で防災科学技術研究所(防災科研)のK-NET鳴子(MYG005)で観測された加速度と速度の波形である。波形には主要動から数秒遅れて、周期3秒程度の大きな振幅が見られる。特に速度波形の後続動は主要動より大きな振幅を示している。このサイトは堆積層が盆地形状をした鬼首カルデラの中に位置する。このため、盆地端部で励起された表面波が観測記録の後続部に現れたものと見られる。このような表面波に起因する被害事例も多くある。2003年十勝沖地震における苫小牧では、やや長周期地震動が石油タンクの火災の主な原因になったと考えられているし、2004年新潟県中越地震では、震源から数百kmも離れた、東京都内の高層ビルが大きく揺れ、エレベータのワイヤーロープが破断した原因となったと考えられている。遡って、1995年の兵庫県南部地震では、盆地端部で生成された表面波が神戸市内の「震災の帯」の成因になったことが証明されている(例えば、川瀬・林, 1996)。

次に、浅層地盤の増幅事例を示す。第3図は、2007年能登半島地震での輪島市内の2つの観測点、すなわち、防災科研のK-NET輪島(ISK003)と気象庁の輪島市鳳至町観測点での速度波形の比較である。波形の最大振幅は3倍程度異なる。これらの2地点は東西に約1km程度離れているだけであり、この地震動の差異の要因は、主として浅層地盤構造の違いによると考えられる。周辺地質図やボーリング柱状図を見ると、K-NET観測点は表層数メートルでS波速度が500m/s以上の固い地層(岩盤)が現れる。片や気象庁観測点は軟弱なシルト層が20m以上続く沖積地盤上にある。このような浅層地盤の軟弱さの違いが、地表地震動に大きな違いをもたらしたと考えられる。

第1表 地震動評価手法の概要。

	簡便法	詳細法
浅層地盤	<ul style="list-style-type: none"> 距離減衰式 増幅度 	<ul style="list-style-type: none"> 等価線形解析 逐次非線形解析 有効応力解析(液状化解析)
深層地盤		<ul style="list-style-type: none"> 半経験的方法 理論的方法 ハイブリッド法
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 必要な地盤情報が少ない 広域の評価に向く 地震動の平均値とばらつき 確率論的評価に利用 	<ul style="list-style-type: none"> 必要な地盤情報が多い 地表での広域評価は不向き 波形を評価できる 地盤非線形化や液状化、表面波を表現

第2表 地震動評価に用いる主な地質地盤情報。

	簡便法	詳細法
浅層地盤	<ul style="list-style-type: none"> 表層地質 微地形区分 平均S波速度(AVS30) N値 	<ul style="list-style-type: none"> 土質 S波速度 密度 工学的基盤深さ 土の非線形特性 液状化強度
深層地盤		<ul style="list-style-type: none"> 堆積層の幾何学的形状 S波, P波速度構造 密度構造 減衰(Q値)

2.3 地震動評価手法と地質地盤情報

地震動を評価する手法は、簡便なものから詳細なものまで、様々な手法が開発されている。これらの手法は、地震被害想定や構造物の設計用地震動の作成などの目的と、利用できる情報の多寡に応じて使い分けられる。第1表に地震動評価手法の概略を示す。同表では、簡便法と詳細法の2つに分類している。また、評価において主に考慮される地盤を、浅層地盤と深層地盤に分けて示している。

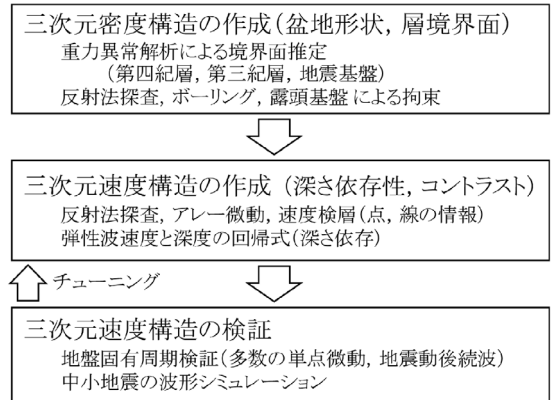
簡便法では、地震動の最大値や最大応答値の平均値を距離減衰式により評価し、さらにサイトの増幅特性を表す増幅度を考慮して地表地震動を評価する。距離減衰式からは地震動の平均値とばらつきが与えられるため、多くの地震を対象として一定の地震動レベルを超える確率を評価(確率論的な地震ハザード評価)することもできる。必要とされる情報は、震源位置・深さ、断層面形状、地震規模、増幅度である。地盤に関する情報は増幅度のみである。距離減衰式

は基準とする地盤が示されており、それは地盤種別や表層の平均S波速度などで与えられる。増幅度は、必ずしも浅層地盤だけでの増幅を表すものではないため、同表には、浅層地盤と深層地盤の区分は示していない。第2表には、地震動評価に用いる主な地盤情報を示した。簡便法に用いる増幅度は、表層平均S波速度やN値から評価されることが多い。これらが計測されていない場合には、表層地質や微地形区分から経験的に評価されることもある。

一方、詳細法は地震動を時刻歴波形で評価できる手法である。必要な地盤情報の違いや、対象とする地震動の周期範囲の違いなどから、浅層地盤と深層地盤を分離して評価することが多い。数多くの地盤情報が必要であり、手法によっては計算時間が長くなる。このため、浅層地盤を除いて深層地盤のみを考慮すれば、広域(面的)の評価にも用いられるが、浅層地盤を考慮して地表面波形を広域で評価するのはやや不向きである。

深層地盤を対象とした詳細法は、対象とする周期範囲に応じて手法が分類される。これは、震源情報や地盤情報の精度に制約があり、手法ごとに適した周期範囲が異なるからである。半経験的方法(波形合成法)では、主に周期数秒以下を対象とする。これに対し、理論的方法では、堆積層を二次元・三次元的にモデル化し、盆地端部で生成される表面波によるやや長周期地震動を再現することができる。用いる情報の精度と計算時間を考慮して、周期2、3秒以上を対象とすることが多い。さらに、これらのある周期を境に重ねあわせ、広帯域の地震動を評価するハイブリッド法も用いられる。必要な深層地盤の情報の主なものは、堆積層の幾何学的形状、弾性波速度構造、密度、減衰(Q値)などである。

一方の浅層地盤では、強震時には地盤材料である土が非線形化することがあり、この影響を考慮した地震動の計算が行われる。予想される地盤のひずみレベルや利用できる地盤情報により、等価線形解析や逐次非線形解析(時刻歴解析)などの方法がある。軟弱な砂地盤では、液状化を評価できる有効応力解析も用いられる。これらの解析手法では、地層構成を表す柱状図、S波速度、密度、地盤材料の非線形性を表す動的変形特性や、液状化強度に関する情報が必要となる。



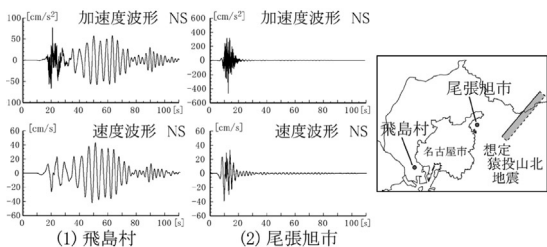
第4図 三次元地盤モデルの作成フロー。

3. 地質地盤情報の活用事例

3.1 深層地盤を対象とした詳細法の事例

耐震設計の性能設計化の流れや免震建物の増加などから、地域特性を考慮した地震動評価の要求が増している。愛知県内では、民間の設計業者や大学の研究者が中心となって、地域の地震環境や地盤環境を考慮した設計用地震動を作成するプロジェクト(愛知県設計用入力地震動研究協議会)が1999年11月に立ち上げられた(福和ほか, 2001)。ここでは、地震動作成のための深層地盤モデルの作成方法(佐藤ほか, 2002)と、評価した地震動の一部を紹介する。

設計用の広帯域の地震動波形を作成する目的から、濃尾平野の地下構造をモデル化し、詳細法により地震動評価を行った。まず、フィリピン海プレートの形状と東海地方の大局的な水平成層地殻構造をモデル化し、さらに濃尾平野の三次元堆積盆地構造をモデル化した。地盤構造のモデル化手順を第4図に示す。最初のステップでは、盆地形状と地層境界面の作成を行った。面的に充実している重力異常データの解析により、第四紀層、第三紀層、地震基盤の3層密度構造を作成し、これを反射法探査や深層ボーリング、露頭基盤で拘束した。次に、弾性波速度構造を与えた。反射法探査、アレー微動計測結果、PS検層などの点や線の情報から速度と深度の関係式を回帰し、これより速度構造を与えた。最後に、面的に多くある単点微動計測による地盤卓越周期や、地震記録の後続波の卓越周期により地盤固有周期の検証を行った。また、中小地震の記録波形のシミュレーションも実施し、波形レベルでの検証も実施した。この検



第5図 想定地震による地震動評価結果の一例。

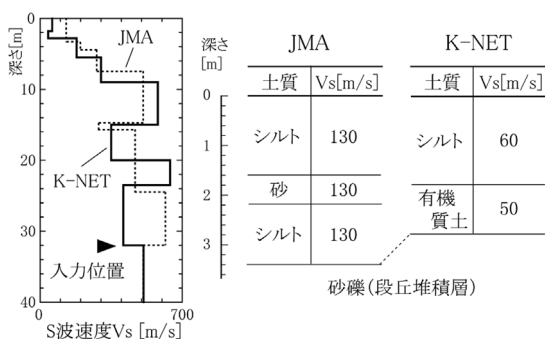
証作業と修正作業を繰り返し、最終的なモデルを作成した。これを用いて、想定された地震による工学的基盤上の地震動波形を計算し、次いでこの波形を入力として、別途モデル化した浅層地盤モデルの地震応答解析を行い、地表地震動を作成した。想定地震のひとつによる工学的基盤上の波形の例を第5図に示す。堆積層が厚い濃尾平野の西のサイトでは主要動に続く表面波が現れており、震源に近いサイトより速度波形の振幅が大きくなっていることが特徴である。

堆積盆地の深層地盤のモデル化のためには、膨大な量の情報が必要となる。現在では地下構造の探査が進められているが、今後のさらなる調査により高精度な情報の蓄積が重要と考えられる。

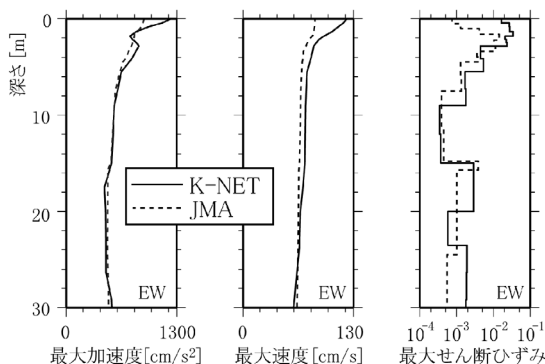
3.2 浅層地盤を対象とした詳細法の事例

浅層地盤は深層地盤より軟弱であることが多く、地震動が大きく増幅する場合がある。また、軟弱であるため、地盤材料の非線形化が増幅特性に大きく影響する場合がある。ここでは、浅層地盤の詳細な解析から、地表の強震記録の成因を説明した事例(藤川ほか, 2006)を示す。

2004年新潟県中越地震(M6.8)では、小千谷市内の近傍の2つの観測点で強震動記録が得られた。特に防災科研のK-NET小千谷(NIG019)の地震動は大きく、もう一方の気象庁(JMA)小千谷市城内の記録より最大加速度、最大速度とも1.4倍以上の大きさであった。両地点の水平距離は約700mであるため、この違いの要因は主として表層地盤増幅の違いと推察された。第6図は地震後に実施されたボーリングとPS検層による、S波速度構造とごく表層の土質である。地表から数メートル以深の大局的な構造は、2地点で大きな差は見られない。大きく異なるのは表層3mほ



第6図 2つの観測点の浅層地盤構造。



第7図 最大値の分布。

どの浅い構造であり、特にK-NETサイトはS波速度が50~60m/sと非常に軟弱である。加えて特徴的なのは、K-NETサイトにはやや特殊な有機質土層が存在することである。両地点の表層のシルト層とK-NETサイトの有機質土のサンプルを用いて、土の非線形特性を調べる動的変形試験を実施した。シルト層については一般的な非線形特性を示すが、有機質土はやや特殊で、ひずみに依存した非線形性が弱い(非線形化しにくい)特性があることが分かった。また、JMAサイトの薄い砂層の液状化試験を実施したが、液状化に対する強度が大きく、液状化(過剰間隙水圧の上昇)は考慮する必要がないと判断した。実際の地震時にも液状化の発生を示す痕跡は見つかっていない。これらの調査結果から浅層地盤のモデル化を行い、逐次非線形解析により応答解析を実施した。入力地震動には、2地点から数百m離れた洪積地盤上に位置する小千谷総合病院の免震建物基礎で得られた観測記録を用いた。

応答解析による波形は省略するが、2地点とも観測

波形と解析波形がよく一致しており、地盤モデルと入力地震動が適切であることを示した。第7図には最大加速度、最大速度、最大せん断ひずみの深さ方向の分布を示す。最大速度の分布を見ると、2地点の差異は、表層3mの浅い層の増幅の違いであることが明瞭に分かる。これより、地表地震動の差異は、浅層地盤のうちのごく表層の地盤構造の違いに起因する増幅の違いで説明できることを示した。

ここでの検討では、ローカルな地盤、それもごく表層の地盤構造の違いが地表地震動の違いをもたらすことと、詳細な地盤情報があれば、高度な手法により、地表地震動が再現できることを示した。

3.3 簡便法における地盤情報の活用事例

様々な地震を対象とする地震ハザード評価では、設定された超過確率に対応する地震動強度の期待値とそのばらつきを考慮するために、いわゆる簡便法による予測手法が用いられる。最近では、緊急地震速報を利用した震度予測でも、即時的な結果の算出目的から、このような手法が準用されている。これらの地震動の評価精度に及ぼす要因のひとつは、地盤の増幅度である。

政府の地震調査研究推進本部による確率論的な地震動予測地図では、全国の地震ハザードを一律に評価し公開している。用いる評価手法は簡便法であり、全国を約250m四方のメッシュごとに評価している。各メッシュごとの微地形区分から平均S波速度を経験的に評価し、平均S波速度から既往回帰式を用いて増幅度を評価している。この場合、オリジナルの情報は微地形区分であるため、場所によっては予測精度が十分でないこともあると推察される。よりローカルな地域を対象とする評価であれば、PS検層による平均S波速度などの物理的・工学的な地盤パラメータを直接用いることで精度向上が期待できる。しかし、PS検層結果が面的に存在する地域も少ないため、都市部などでは、豊富に存在する柱状図のN値分布から、増幅度を評価する手法も検討されている(Kameda *et al.*,1982)。

近年は、「統合化地下構造データベースの構築」プロジェクトを筆頭に、地域において地盤データの収集とデータベース化が盛んに実施されている。これらが充実すれば、より高精度な増幅度の評価に結びつくものと考えられる。

4. おわりに

地震動評価手法の概略と、地質地盤情報の活用事例を示した。地震動評価では、深部地盤から浅部地盤まで、様々な地質地盤情報が必要である。信頼できる情報が利用できれば、高精度な評価が可能となる。その際に重要なのは、地盤の構造や物性などの地域性の取り込みである。このような地質地盤情報は、地域の安全安心を支える基盤情報となりうる。近年進められている調査研究により、地質地盤情報の蓄積が進んでいるが、まだまだ十分ではないと思われる。今後も既存データの収集・公開と、継続的な新規の調査結果の蓄積が重要と考えられる。

謝辞：気象庁と防災科学技術研究所の強震記録を借らせていただきました。

参考文献

- 藤川 智・先名重樹・藤原広行・大井昌弘(2006)：2004年新潟県中越地震の強震観測点における表層地盤の地震動増幅, 日本地震工学会論文集, 第6巻第3号, pp.27-42.
- 福和伸夫・久保哲夫・飯吉勝巳・大西 稔・佐藤俊明(2001)：愛知県名古屋を対象とした設計用地震動の策定, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp.81-82.
- Kameda, H., M. Sugito and H. Goto (1982) : 3rd International Microzonation Conference, Seattle, Vol.III, pp.1463-1474.
- 川瀬 博・林 康裕(1996)：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.
- 佐藤俊明・早川 崇・佐藤智美・藤川 智・福和伸夫・久保哲夫(2002)：愛知県名古屋を対象とした設計用地震動策定のための地下構造のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.129-130.

FUJIKAWA Satoshi (2010) : Utilization of ground information in estimating earthquake ground motion.

<受付：2009年12月2日>