

シリーズ「新・強震動地震学基礎講座」

(第7回) 地盤構造の推定法

強震動委員会 川崎慎治 ((株)地球科学総合研究所)

地盤による地震ハザード、とりわけ強震動による被害を想定し地震防災に生かすための地盤構造推定法について概説する。浅部の地盤物性は垂直方向にも水平方向にも不均質性が強く、地震波の振幅は空間的に大きく変動するので、サイトに固有の増幅特性を正しく理解することが重要である。例えば、地形・地質的な境界が存在する場所では、実体波の増幅やマルチパス信号の増幅の干渉が起こるだけでなく、変換波や表面波の励起や実体波との干渉により地震波伝播が複雑に挙動することが知られている。このため、地震動を適切に評価し、地震の揺れやすさを正しく予測するためには、目的対象とするスケールや周波数帯に応じて、増幅特性に影響を与える地盤パラメータを精度よくモデル化する必要がある。

平成7年(1995年)兵庫県南部地震を契機として、主要な都市部において全国的に地下構造調査が実施され、成果である地盤構造モデルは国家の基盤的なデータとなっている(http://www.jishin.go.jp/database/project_report/chousakansoku02kozo/)。堆積平野に立地する都市部の地質環境的な特徴は、多くが中・古生代の基盤岩(地震基盤)の上位に第三系および第四系の堆積層が累重する地質地盤となっていることである。作成された堆積盆地スケールの地盤モデルから、浅部地盤のサイズミックインピーダンス(地震波速度と密度の積)が地震基盤のそれと比べて大きく低下していることから、基盤の入力波に対して表層の地震波が増幅することが定量的に裏付けられている。

このような地震防災を目的とした地下構造調査では、地形、地質学的な調査の他に物理探査がよく利用される。物理探査は、地下の構造形態や物性を非破壊かつ三次元的(二次元的)に可視化できる優れた手法であり、弾性波、重力、磁力、電磁気、地中レーダなどの様々な物理現象を利用する。また、調査領域に応じて、空中、陸上、海域、坑内等の探査に分けられるが、最近はこれまで技術的に難しかった海陸境界域の探査も、計測技術の進展にともなって行われている。

弾性波探査は、地震波動伝播に強い影響を与える物性値(P波速度、S波速度、Q値など)を推定できる利点がある。そのため、浅部から深部地盤の速度構造と構造形態を明らかにする目的で、反射法探査、屈折法探査、微動アレイ探査、表面波探査を実施することが多い。

反射法探査は、人工震源から地下の地層境界で反射した弾性波を受振器で捉え、そのデータを解析することにより反射断面図を作成し地下構造(二次元または三次元)を可視化する手法である。堆積岩地域では、堆積層から密で連続的な反射を期待することができ、その立体的な分布や形状から層序追跡による地質地盤構造モデルの作成、さらには、地域の堆積環境や構造発達史の解明に資するデータが得られる。それだけでなく、反射断面から地表付近の活断層とその深部延長の震源断層の関係を統一的に把握することができ、想定される地震の震源断層パラメータを規定する基礎的な情報を得ることができ、活断層調査など浅層調査に対しては、P波よりも波長の短いS波を利用して反射断面の分解能を高めたS波反射法も有用である。データ処理においては、共通反射点(CDP)重合法に基づく処理フローが一般的に用いられるが、近年、反射面の傾斜だけでなくその曲率を考慮して補正する方法(CRS法など)を用いるケースも増えており、低重合、低SN比のデータに対してイメージング向上が期待されている。

屈折法探査では、走時トモグラフィックインバージョン法、または、レイトレーシング等のフォワード計算により試行錯誤的に速度層モデルをチューニングする解析法が多用される。反射法と屈折法はどちらも人工震源による探査データを用いるが、解析に用いる時系列データ区間(時間とオフセット距離のウィンドウ)が異なるため、両者の結果は独立的で、相補的な関係である。一般に、反射法で求められる速度構造は、屈折法より精度的に劣る場合が多いが、反射法と屈折トモグラフィを併用することで、速度と深度情報の信頼度を相乗的に高めることができ、結果的に、地盤モデルや断層モデルを高度化できる利点がある。なお、人工地震探査では、主にP波震源が使われることからP波速度構造が得られるが、地震防災についてはS波速度構造が重要である。このため、PS検層データ等から地域ごとの V_p - V_s 関係式を構築してS波速度を推定する試みもなされる。

微動アレイ探査は、面的に展開した高感度地震計(微動計)で取得した微動データから表面波の分散曲線(周期と位相速度の関係)を解析し、観測された分散曲線をフィッティングするようにS波速度構造モデルを逆解析により推定するものである。微動アレイ探査に関しては、F-K法、

SPAC 法やこれを拡張した CCA 法などの手法がある。それぞれ、微動の発生源や到来方向に関する前提条件が少しずつ異なっていて、データ取得方法や解析方法に違いがある。微動アレイ探査の詳細に関しては、今後の本連載に譲ることとする。

人工建造物の耐震安全性を考える場合、強震動評価で要求される周期範囲は、概ね 10 秒から 0.1 秒程度の帯域である。この周波数帯域は、長周期構造物から一般住宅、精密機器装置までの固有周期と関係しており、調査の目的や対象に応じて、それらに特化した地盤調査法が選択され実施されている。微動アレイ探査はこれらの周期帯域の S 波速度を直接測定できるメリットが大きいが、分解能や精度の限界もあるため、上述した地球物理学的な調査手法の有効性や限界を目的に照らし合わせて考慮した上で、地盤モデル構築のためのワークフロー（適切な組み合わせと手順）が個別に提案されている。

図 1 は、弾性波を用いた各調査手法の垂直分解能と対象スケール（水平方向）に関して大まかに図示したものである。前述した物理探査法以外に、より分解能を高める手法として、ボーリングによるコア分析、坑井を利用した物理検層、坑井間トモグラフィ、VSP 調査（鉛直アレイ観測）も記載している。各手法間で探査スケールや分解能にギャップが有るため、複数の異なる物理探査データを組み合わせて統合し解析することが信頼性を高めることにつながる。その際、費用対効果を考えると、手法ごとに異なるスケールや精度を理解し、段階的なアプローチによって概査から精査に向けて効率よく調べる手順が合理的である

が、特定されたサイト直下を調査対象とする場合は、ボーリングによる調査を中心にして、地盤の面的な広がりを物理探査で補間するアプローチもある。

一方、ポテンシャルデータ（重力、磁力、電磁気など）は地盤構造に対する分解能はある程度限界があるものの、空中物理探査によるサービスも近年提供されており、広域でシームレスな概査法として利用されている。中でも重力探査では、ブーゲー異常を傾向面補正した残差重力値から、既知の基盤深度を拘束条件とするインバージョンによって重力基盤深度または密度構造の三次元分布を推定している。最近では、重力勾配テンソルを用いて短波長の密度構造の急変部を同定するとともに、急変部にあたる密度境界の傾斜角を推定するといった取組みも行われている。

地震動評価を目的とした一部の調査では、中小地震の観測データを利用して地下構造モデルの妥当性が検証されている。具体的には、波動場計算により理論的な波形、振幅スペクトル、卓越周期、H/V スペクトル、レシーバ関数等を計算し、観測結果との比較を通してチューニングすることでモデルの高度化が図られている。このような強震動評価の高精度化のためのモデル更新作業や地盤情報のデータベース化作業は、全国一次地下構造モデルの構築に関するプロジェクトなどによって展開されている (<http://www.jishin.go.jp/>)。

物理探査の最近の動向として、今後の発展が注目される解析手法を 2 つ紹介する。1 つ目の地震波干渉法は、微動アレイ探査など受動的な地震探査法を理論的に説明づけて、様々な調査法が提案されている。人工震源を用いる

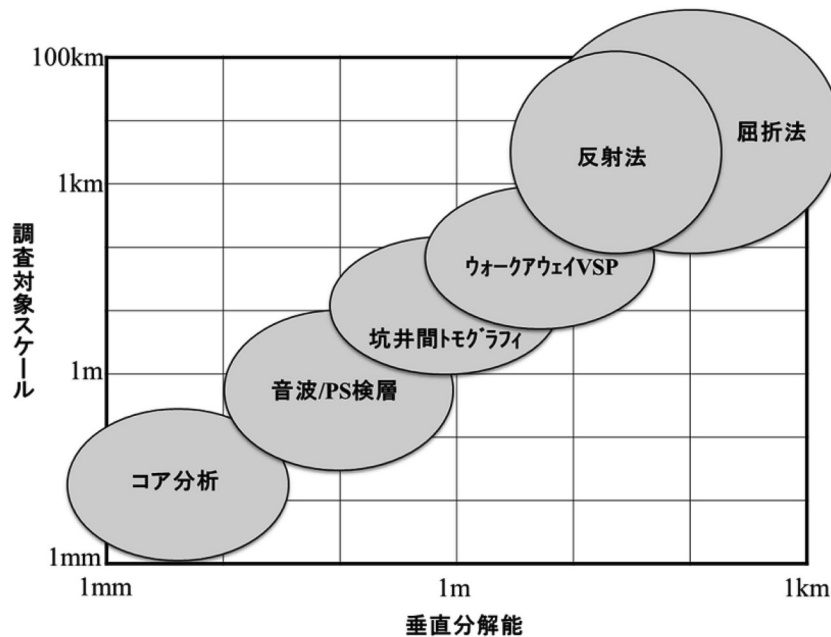


図 1 弾性波を用いた調査法の分解能と対象スケール（概略図）

アクティブな地震探査においても応用例が増えていて、例えば、反射法調査で発震ができず受振点しかない測線区間でも、周囲の発震記録から擬似的に発震記録を構築し、通常の反射法処理では歯抜けになった反射断面をある程度穴埋めすることに利用されている。

2つ目は、FWI法（Full-Waveform Inversion）を挙げる。FWI法は、探査データを用いて観測波形と合成波形との残差が最小となるように非線形繰り返しインバージョンによってモデルを最適化し、地下の物性を推定する手法である。FWIの基本的なコンセプトは1980～90年代に既に示されているが、地震探査データの広帯域化や計算機性能の向上により、近年、二次元実データ、さらには三次元実データへの適用事例が増えている。初動走時データのみを用いた走時トモグラフィ解析に比べて高い分解能を有するため、より細かなスケールの構造把握を目的とする場合に利用される。例えば、重要施設の浅部地盤において規模の小さな低速度帯の存在が直上の地震波振幅異常を生み出すことがあり、低速度帯の規模や性状を正確に把握する必要がある

ある場合に提案されることがある。最近では、物性パラメータのうちP波速度だけでなく、S波速度、密度、減衰項などをマルチパラメータとして同時に解く研究開発も進められている。

以上のように、物理探査は利用の仕方（調査法および仕様の細かさ）に応じて地震動評価の精度向上に役立っていて、地震リスクを正しく評価するための使命は大きいと言える。物理探査は、従来、石油資源開発と強く結びついて発展してきたが、同時に、地震学とも連携して技術的發展を遂げてきた歴史がある。現在、地盤工学、土木工学的な観点から、基礎の設計など地盤強度（ジオメカニクス）に関する情報が求められている。また、液状化対策など水理特性に関する情報やインフラの維持・管理に係るモニタリング法としてのニーズも高い。今後、様々なスケールの各種物理探査データを組み合わせて統合解析すること、地盤情報としての信頼性を高めながらいかに付加価値を生み出せるかが技術開発を推進していく上での大きな課題となっている。

（第8回）強震動予測手法の概要

強震動委員会 香川敬生（鳥取大学大学院工学研究科）

地震の揺れは、どの程度の規模の震源断層がどのような過程で破壊するか（震源特性）、その破壊進行によって生じた地震波がどのように周囲に伝わるか（伝播経路特性：グリーン関数）によって構成され、これらは断層面上の破壊によって生成・伝播する波動を、断層面の破壊進行に沿って積分することにより表現できる（例えば、Aki and Richards, 2002）。さらに、強震動予測で対象とするような堆積地盤では、特に地震波増幅や震動継続時間の伸長が起きることから、伝播経路特性を構成する要素のうち、地震動が局所的にどのように変化するか（サイト増幅特性）を明示的に分けて、合計3要素に分けて考えることが多い。図1にそのイメージを示す。つまり強震動予測とは、これ

らをうまくモデル化し、対象地点における想定地震断層による揺れを予測することにあたる。

このモデル化に際して、震源特性を地震規模（マグニチュード）で、伝播経路特性は震源断層からの距離で、サイト増幅特性は揺れ易さ係数でそれぞれ代表させ、過去に発生した地震による観測記録の地震動特性値（最大加速度値や最大速度値など）をこれら3パラメータで回帰分析した、経験的な地震動予測式（距離減衰式）を用いることがまず考えられる。この場合、図2の上を示すようなモデル化をおこなうことになり、平均的な地震動を既往観測記録に基づくばらつきとともに提示することができる。予測式の骨格には地震波の生成、伝播、サイト増幅の影響がモデ

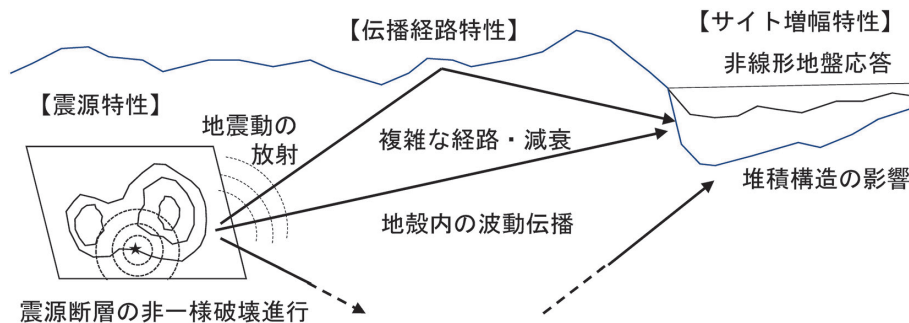
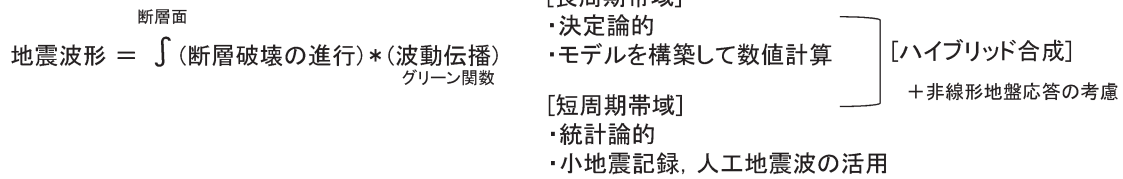


図1 震源、伝播経路、サイト増幅特性の概念図

【簡便法】 地震動特性値 = f(マグニチュード, 断層距離, 揺れ易さ係数)
震源特性を代表 伝播経路特性を代表 サイト増幅特性を代表

【詳細法】



[断層破壊進行]のモデル化: 既往地震の破壊進行の統計解析, 動力学的検討を反映したレシピ
 [波動伝播]のモデル化: 地下構造探査の蓄積と, それに基づいたモデル化のレシピ

図 2 簡便法, 詳細法 の概念

ル化されており, その上で既往観測記録を満足するように式のパラメータが与えられている. この考え方は, 応答スペクトルの形状など, 周期帯毎の地震動特性値を表現するスペクトル距離減衰式にも発展可能である. このような強震動予測は一般に「簡便法」と呼ばれており, 緊急地震速報で面的な地震動を即時に予測する場合や, 構造物の周期特性を考慮した耐震設計など工学的な地震動評価の第一段階として用いられている.

一方で, それぞれの特性を精緻にモデル化し, 複雑な震源断層の破壊プロセス, 3次元地下構造による影響を考慮して強震動を波形で評価するアプローチも考えられる. 波形が予測されておれば, スペクトルや地震動特性値をいかようにも評価することが可能である. このモデル化には十分なデータに基づく多数のパラメータを設定する必要があるとともに, 計算容量・時間ともに大きな計算資源を要する. しかし, 断層破壊の進行によるパルス波の生成や, 地下構造の影響による局所的な地震動の増幅など, 平均的な地震動予測式では十分に表現できないが, 実際の地震で往々にして観測される複雑な現象をも, 適切なパラメータ設定によって再現できることが強みである. このようなモデル化を「詳細法」と称し, 被害地震に見られる特殊な地震動の要因を理解するとともに, その影響が懸念される場合の地震動評価の照査に適用される機会が多くなっている.

地震動予測式については今後の「新・強震動地震学基礎講座」で詳しい解説が予定されているので, 詳細はそちらに譲ることとし, ここでは地震による断層破壊と地震波伝播のプロセスをより反映した「詳細法」について, 図2下を参照しつつ, 少し仕分けをおこなってみる. 「詳細法」で取り扱う内容は, 震源破壊および地下構造モデルの設定, 地震動計算手法, 結果の提示方法など多岐にわたる. 既往の講座, および今後それらが順に解説されていくことになるが, 強震動予測に関連する各項目について, それらの位

置付けを網羅的に整理しておきたいと思う.

「詳細法」では, 震源断層面上における非一様破壊の進行によって放射された地震動が3次元地下構造を伝播して対象地点に影響を及ぼす問題を扱う. その際, 対象とする波長に影響する細かさで, 震源および地下構造のモデル化をおこなうことが必要になる. 強震動予測の一般的な対象周期帯は0.1秒から10秒であるが, 固有周期の短い対象を含む場合(原子力発電所の機器応答など)にはより短い周期帯が必要となり, 長大橋や巨大タンクのスロッシングでは10秒を超える長周期帯域が対象となる場合がある. いずれにせよ, 最短対象周期を0.1秒としても, 震源断層を想定する地震発生層のS波速度を3.5km/sとして350m, 表層堆積層のS波速度を200m/sとして20mの波長を取り扱う必要があり, その波動伝播を表現するために必要な空間解像度がモデルに求められる. しかし, ここまで高解像度のモデル化は, 現状で用いることができるデータの観点からは非現実的である. そこで, 周期1秒程度を境として, それよりも長周期帯域を対象に震源および地下構造を具体的にモデル化し, 決定論的なアプローチで地震波の生成と伝播を取り扱うことがおこなわれる. この際の地震動評価には, 3次元差分法や有限要素法など波動伝播を解析的に解く計算手法が用いられる. 対象範囲が狭いなど地下構造の3次元的な広がりを考慮しない場合には, 水平成層構造を用いた理論的な計算手法(離散化波数法など)が用いられる場合もある.

一方, 周期1秒よりも短周期帯域は統計論的なモデル化で対応し, これらを相補的に合成すること(ハイブリッド合成)で広帯域の強震動予測がおこなわれる. 短周期帯域の評価には, 短波長の複雑な震源破壊や地下構造の影響を内在する小地震の観測波形記録を用いた経験的グリーン関数法, 過去の観測記録の統計的な特性を反映させて人工的に合成した地震波を用いる統計的グリーン関数法が活用さ

れている。なお、これらの手法では表層地盤の影響（サイト増幅特性）が弱震時でも強震時でも同じ線形応答を仮定しているが、特に軟弱な地盤では強震時に大ひずみを受けた場合に地盤剛性が低下し減衰が増大する非線形地盤応答を生じることが知られている。この状況をモデルに取り入れることも、より現実的な強震動評価には必要である。

「詳細法」では必要とするパラメータが多く、設定にあたってはその意味と働き、相互の関連についての専門的な知識が不可欠となる。そのため、標準的な設定をおこなうためのガイドラインとして、強震動予測レシピが検討されている。強震動予測レシピは新たな観測事実に基づき改訂が続けられており、平成29年4月に最新版（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2017）が公開されている。これに従うことにより、用いることのできる情報の多寡に応じて、評価者によらず震源断層破壊モデルおよび地下構造モデルを構築し、強震動評価を実施することができる。震源断層破壊モデルには、既往地震の断層破壊進行を統計解析した結果に加えて、断層の動力学的な破壊理論から導かれる成果も組み入れられており、設定の相互関係が物理的に破綻しないような配慮がなされている。地下構造のモデル化では、情報の多寡に応じたきめ細かな設定法が示されている。

しかし、強震動予測レシピによる設定値はあくまで標準値であり、対象とする事象の重要性に応じて、パラメータのばらつきを考慮して大きめの地震動になる設定を取り入れるなどの対応は必要となる。伝播経路特性やサイト増幅

特性が内在する不確定性は、時間をかけて詳しい調査・解析を実施する毎に解消されていくが、将来発生する地震の震源特性を予め想定することは困難である。そのような中で、過去の地震の平均像としての標準的な設定や、想定し得る最大の地震動をもたらす設定による、パラメータを決め打ちした確定論的な予測が、特に「詳細法」では主流としておこなわれてきた。一方、個々の設定パラメータのばらつきに配慮した多数のケースで強震動予測を実施し、得られた地震動特性値の確率密度に関する中央値、分布形状、上限値を考慮した確率論的な評価も「簡便法」では実施されている。近年の計算機環境の充実により、「詳細法」でもこのような確率論的な評価が志向されており、パラメータ設定の透明性や予測結果を提示する際の説明性が向上することが期待されている。

編集担当の干場充之氏、岩田知孝氏には本稿執筆の機会を頂き、さらに内容を読み易くするための非常に丁寧なコメントを頂きました。ここに記して感謝致します。

文献

- Aki, K. and P. G. Richards, 2002, Quantitative Seismology, 2nd edition, University Science Books, 700pp.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2017, 震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）, 51pp., http://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf.