

地震動予測の現状と課題

Recent Issues for Ground Motion Prediction

後 藤 浩 之 (ごとう ひろゆき)

京都大学防災研究所 助教

澤 田 純 男 (さわだ すみお)

京都大学防災研究所 教授

1. はじめに

現在、震源を特定して地震動を予測する手法、いわゆるシナリオ型の地震動予測手法は構造物の耐震性照査やハザード評価に利用されつつある¹⁾。地震動予測によらない入力地震動評価と比べて、より積極的に地震学的知見や手法を取り入れていることが特徴である。ここでは、地震動予測手法の枠組みを簡単に紹介し、東北地方太平洋沖地震を受けて明らかになりつつある課題について説明する。

2. 地震動の予測手法

地震動予測では、予測したい地点（以降、対象地点）の地震動の周波数特性（フーリエ・スペクトル） U が震源特性 S 、伝播経路特性 P 、サイト増幅特性 G の三つの要素からなると考える。

$$U(\omega) = S(\omega)P(\omega)G(\omega) \dots\dots\dots (1)$$

地震動の周波数特性を求めることができれば、逆フーリエ変換によって時刻歴波形を得ることができるため、地震動予測では震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性の三つの要素をそれぞれ適切に評価することが重要となる。なお、各要素の具体的な表現方法や様々な予測手法は文献²⁾に詳しく紹介されている。

2.1 サイト増幅特性

サイト増幅特性は、対象地点で地震動がどれだけ増幅するか、を表現したものである。真下から地震動が入力すると仮定できるような浅い地盤による影響だけでなく、深い地盤構造による影響も含まれる。例えば、堆積層の厚い平野部などでは、地下深くの3次元の地盤構造が地震動に大きな影響を与えることが知られている。

この地盤構造の影響は、十分な数の観測記録が対象地点で得られている場合には、観測記録を利用して直接評価することが可能である。また、反射法などの物理探査によって詳細な地下の地盤構造を明らかにすることができれば、理論的に計算して評価することも可能である。いずれにしても、サイト増幅特性は地震によらず対象地点に固有の特性であると考えられるので、十分な調査・観測を行うことで、精度の向上が期待できる要素である。

2.2 伝播経路特性

伝播経路特性は、地震波が震源断層から対象地点に到達するまでに地球内部で受ける影響を表現したものである。特に、震源位置に依存しない項をサイト増幅特性、

依存する項を伝播経路特性として分離することが一般的である。主に、地震動の伝播距離に応じた減衰と散乱を評価することを目的としていて、距離に応じて地震動の振幅が減衰する機構（距離減衰）、媒質の非弾性変形により減衰する機構（内部減衰）、及び散乱により振幅が減衰する機構（散乱減衰）と散乱による地震動の継続時間の変化などを表現する。

地表付近で生じる地盤材料の非線形性の影響を除けば、震源の位置が同じ場合に、伝播経路特性とサイト増幅特性は地震の大小によらず等しいと考えることができる。つまり、小さな地震の記録から伝播経路特性とサイト増幅特性を取り出して、大きな地震における伝播経路特性とサイト増幅特性に利用することができる。この特徴を積極的に利用した手法が経験的グリーン関数法である。

経験的グリーン関数法は、中小地震の観測波形が伝播経路特性とサイト増幅特性とを表現したグリーン関数であるとみなし、予測したい地震の震源特性となるように波形を重ね合わせることで、地震動を予測する手法である。予測したい地震の断層付近を震源とする中小地震の記録が対象地点で観測されている必要があるため条件は厳しいが、高精度に伝播経路特性とサイト増幅特性を評価することができる。

2.3 震源特性

震源特性は、マグニチュードなど地震の規模、逆断層型や横ずれ型といった発震メカニズム、食い違い（すべり）が大きい領域（アスペリティ）の位置や大きさ、断層の破壊の仕方などによって表現される。例えば、簡便な地震動予測手法として知られる距離減衰式では、マグニチュードに関する項が震源特性に相当する。

より高度な手法、例えば経験的グリーン関数法や理論的手法などでは、地震断層に対して実際の地震に倣った破壊シナリオを設定して震源特性を表現する。設定する項目としては、破壊が始まる地点に相当する震源の位置、アスペリティの位置・数・サイズ、震源からどのような速度で破壊が広がっていくかという破壊伝播速度などである。これにより、アスペリティから放射される振幅の大きなパルスや、破壊が進行する方向に対して振幅が大きくなる影響（ディレクティビティ効果）を表現することができる。

アスペリティの大きさなどの諸元は自由に与えることもできるが、実際の地震に即したものであることが望ましいとされ、過去の地震におけるそれら諸量を統計的に

整理した結果を参照することが一般的である。実務上は、断層サイズからアスペリティサイズまでの標準的な設定方法を一連のプロセスとして整理した、通称「入倉レシピ」³⁾に従って設定することが多い。しかし、入倉レシピに従ったとしても、予測すべき地震の規模がどれくらいであるか、震源の位置はどこか、アスペリティの位置はどこかといった条件はあらかじめシナリオとして与えて計算しなければならない。すなわち、震源特性は伝播経路特性やサイト増幅特性のように一意に与えられるものではないことに注意が必要である。

3. 東北地方太平洋沖地震から見えてきた課題

先日東北地方太平洋沖地震は我が国では20世紀以降最大規模の Mw (モーメントマグニチュード) 9.0 の地震であった。地震の規模もさることながら、従来の予測手法では対応できないような地震の特徴が明らかになりつつある。ここでは、そのうち三つの項目に絞って紹介する。

3.1 スケーリング則

地震動予測では、小さな地震から大きな地震の震源特性を統一的に扱うため、オメガスクエアモデルに代表されるようなスケーリング則が利用されている。この枠組みでは、マグニチュードが大きくなるほど震源特性は大きくなるが、短周期成分は長周期成分に比べてその増え幅は小さく、遷移は滑らかであるとされている²⁾。例えば、海溝型地震に対して長周期地震動の危険性が近年指摘されていたが、その根拠の一つがスケーリング則である。

今回の地震で観測された地震動は、構造物に対して影響の大きい周期 1 秒前後のレベルが小さく、兵庫県南部地震で観測されたような破壊的な地震動ではなかった⁴⁾。一方で、東北地方から関東地方にかけての広い範囲で大きな最大加速度を観測し、水平最大加速度が重力加速度 (9.8 m/s^2) を越えるような記録が少なくとも 18 地点で観測されている⁴⁾。これは、地震動のレベルが 1 秒よりも短い周期帯域では小さくないことを表しており、従来のスケーリング則で考えられていた特徴と部分的には逆の傾向であるように思われる。

具体的に震源特性を取り出して議論することは容易ではないが、少なくとも従来のスケーリング則が M9 クラスの地震に対してそのまま適用できない可能性を示唆するものである。

3.2 アスペリティ

断層の中でも特に強い地震動を励起する場所としてアスペリティを設置する場合、通常はすべりの大きな領域としてアスペリティを定義し、震源シナリオを設定する。

ところが、今回の地震ではすべりの大きな領域と強い地震動を励起した領域とが重なり合わないことが指摘されている⁵⁾。数十 m に及ぶ大きなすべりは震源より東側の断層の浅い部分で発生したとされているが、1~2 秒程度の周期に対応する地震動は震源より西側の断層の深い部分で発生した⁴⁾。これは、地震動予測に対して設定すべきアスペリティは、すべりが大きいという意味でのアスペリティとは必ずしも一致しないこと、すなわち、津波を生成するようなゆっくりと大きくすべる領域とは一致する必要がないことを示唆している。

3.3 同心円状ではない破壊プロセス

今回の地震では、強い地震動を励起したとされる領域は、少なくとも三つあることが指摘されている。このうち宮城県沖合に二つ位置していると推定されているが、この二つは隣接した領域であるにもかかわらず一つが破壊してから次が破壊するまでに 50 秒程度の間が空いている⁶⁾。さらに、二つのうち後で破壊した方が震源に近いところに位置している。これは、震源から順次ほぼ同心円状に破壊が進展すると考えられていた従来の破壊プロセスでは表現できない。

なぜこのような複雑な破壊プロセスであったかについては、力学的な観点からメカニズムを検討しているところであるが⁷⁾、少なくとも震源シナリオの設定方法に関して、今後新しい考え方が必要であると思われる。

参 考 文 献

- 1) 山中浩明編：地震・津波ハザードの評価，朝倉書店，2010。
- 2) 地盤工学会編：地盤工学・基礎理論シリーズ「2. 地盤の動的解析—基礎理論から応用まで—」，地盤工学会，2007。
- 3) Irikura, K. and H. Miyake: Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, *Pure Appl. Geophys.*, pp. 85~104, 2010.
- 4) 後藤浩之：地震及び地震動の特性，土木学会東日本大震災被害調査団（地震工学委員会）緊急地震被害調査報告書，2011。
- 5) Koper, K. D., A. R. Hutko, T. Lay, C. J. Ammon and H. Kanamori: Frequency-dependent rupture process of the 2011 Mw9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of short-period P wave backprojection images and broadband seismic rupture models, *Earth Planets Space*, pp. 599~602, 2011.
- 6) Ide, S., A. Batltay and G. C. Beroza: Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, pp. 1426~1429, 2011.
- 7) 後藤浩之・山本揚二郎・北佐枝子：東北地方太平洋沖地震の動的破壊シミュレーション—数十秒あけて発生する隣接した破壊の表現—，日本地震学会2011年秋期大会講演予稿集，2011。

(原稿受理 2011.12.6)