

断層破壊過程を考慮した設計入力地震動

Design Ground Motion Considering Fault Rupture Process

香川 敬生 (かがわ たかお)

動地域地盤環境研究所 主席研究員

1. はじめに

耐震設計に用いる地震外力の設定にあたり、距離減衰式による経験的な地震動特性値（最大加速度、最大速度など）や応答スペクトルが簡便に用いられる一方、震源断層の破壊過程および堆積地盤の応答を考慮した地震波形の半経験的あるいは理論的な予測法が用いられるようになっている。これは、(財)土木学会が土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」¹⁾において「内陸の断層破壊に起因する震源断層近傍域での地震動の影響を耐震設計に取り入れる」ことを強調したことなど、平成7年兵庫県南部地震以降の耐震設計における地震像の変化を受けたものである。兵庫県南部地震の地震動は、大局的には経験的な距離減衰式で説明できるものの、そのばらつきは大きい。一方、次章で解説するように、震源断層の破壊過程および堆積地盤の応答を考慮すれば、個々の地震観測記録に見られる特徴を物理的に説明することができる。このため、震源断層の破壊過程を考慮した強震動評価の必要性が認識されたものである。(財)地盤工学会でも「土構造物への設計入力地震動に関する研究委員会」(委員長：京都大学防災研究所佐藤忠信教授)を設置し、震源断層破壊に伴う強震動予測を試みている²⁾。一方で、経験的なスペクトル距離減衰式にも断層面の広がりや³⁾、断層破壊進行の影響⁴⁾が取り入れられ、より現実的な地震動像の表現が行われるようになっている。

本論では、これらの流れのうち、特に震源断層の破壊過程を考慮した強震波形予測法およびその利用の現状について解説を行う。

2. 平成7年兵庫県南部地震と強震動

断層破壊による強震動の生成を具体的に理解するため、平成7年兵庫県南部地震による神戸市域の強震動を例とする⁵⁾。神戸市域から見た場合、兵庫県南部地震の震源は明石海峡深部の点震源ではなく断層面としてとらえる必要がある(図-1のA)。大地震の震源は断層破壊の始まった点であり、地震動には最終的に破壊した断層面が大きく影響する。右横ずれ断層運動では、図-1のBに示すように、断層の延長線に沿ってS波の放射が大きくなる特徴がある。さらに、明石海峡深部の破壊開始点から神戸市域へと断層破壊が進行し、神戸市域には継続時間が短く大振幅のパルス波が生じた(図-1のC)。これに反して、明石海峡部では継続時間が長く振幅の小

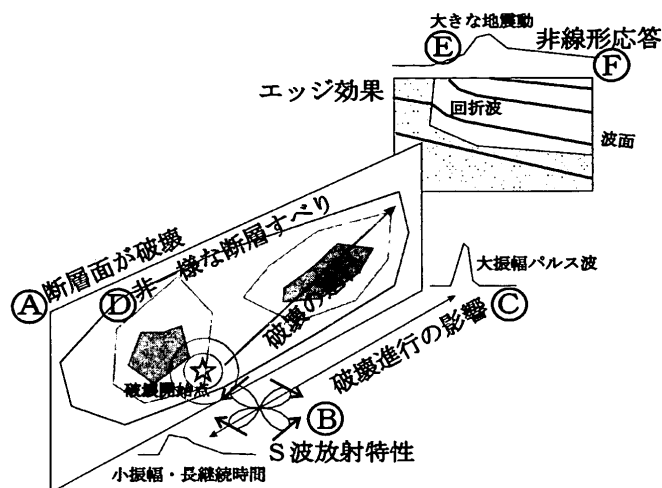


図-1 平成7年兵庫県南部地震の強震動生成イメージ (香川ほか⁵⁾に加筆)

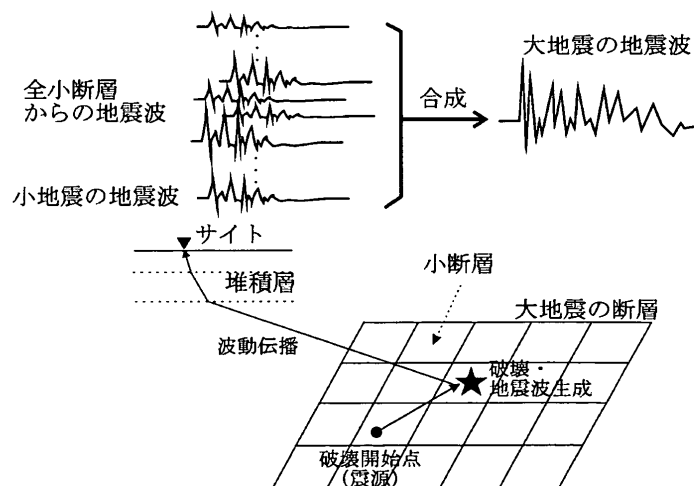


図-2 断層破壊過程を考慮した強震動評価法の考え方

さい地震動となったことが推定される。また、断層面上のすべりは一様ではなく、部分的に大きく急激なすべりを生じて強い地震動を放射した。このような場所をアスペリティーと称しており、その大きさが観測記録に見られる周期1~2秒の地震動に対応していると考えられる(図-1のD)。神戸市域に放射された強震動は、六甲山系と堆積層の速度差と深層地盤構造の影響によって生じた、岩盤部から湾岸部へ伝播する回折波と下方から到来した直達波が増幅的に干渉することにより、図-1のEに示すように狭い領域で増幅された(エッジ効果)。

論 文

また、軟弱な湾岸部では地盤の非線形応答によって地表付近では大きな地震動とならなかった（図-1のF）。これらが総合的に作用し、「震災の帯」と呼ばれる地震被害の集中域を生じたものと解釈される。このように複雑な現象は、地震規模（マグニチュード）と距離に基づく経験的な距離減衰式では表現することが困難である。

一方、断層破壊を考慮した強震動予測手法は、図-2に示すように大地震の大きな断層面を小断層に分割し、各小断層で生じた小地震による対象サイトにおける地震波形をまず評価する。この時に、小地震観測記録を用いる経験的グリーン関数法⁶⁾、理論震源スペクトルにフィッティングした乱数波形を用いる統計的グリーン関数法^{2),7)}、統計的グリーン関数法の長周期成分を震源および地震波伝播理論に基づく波形に置き換えたハイブリッド法⁸⁾などが提案されている。平成7年兵庫県南部地震では、周囲の強震観測波形を説明するように断層破壊過程が推定されており、地震観測点における地盤構造も調査されている。このように条件が揃っておれば、断層破壊に基づく強震動波形計算手法²⁾によって、図-3に神戸大学のNS成分を示すように、強震観測波形を再現することが可能である。図には、観測と計算による加速度・速度・変位波形および応答スペクトルを示している。ごく表層地盤の応答特性の差に起因すると考えられる短周期成分およびそれを反映した加速度波形を除いて、速度・変位は波形・最大値とも良好に再現されている。

3. 断層破壊モデルの設定

既に発生し断層破壊過程が詳細に把握されている地震への、断層破壊に基づく強震動波形計算手法の有効性は証明されたが、将来発生する地震の断層破壊過程を詳細に把握することは困難である。このような予測法では断層破壊に関する入力パラメーターが多く、未知の断層破壊についてはパラメーター設定による結果のばらつきが大きくなり、最大値や応答スペクトルのみで評価すれば、経験的な距離減衰式によるばらつきと変わらないか、それ以上となる場合がある。これが、断層破壊に基づく強震動波形計算手法を耐震設計のための強震動予測に適用する際の問題点となっている。

入倉・三宅^{9),10)}は、将来発生する地震の震源破壊過程のモデル化を試みている。既往地震で解析された震源破壊過程の経験的な評価¹¹⁾に基づき、そこに震源破壊の物理を導入することで想定断層標準的な破壊モデルを構築している。これら一連の研究は、「入倉のレシピ」⁹⁾および「修正レシピ」¹⁰⁾と称されている。以下に内陸地震を対象とした場合のプロセスを紹介する。

- ① 地形・地質調査による断層長さおよび地殻内地震発生層の厚さより断層面積を想定する。
- ② 地震モーメントと断層面積の経験的関係¹¹⁾より、地震モーメント（長周期地震動のレベル）と平均応力降下量（短周期地震動の指標）を想定する。このとき、地震モーメントが 10^{26} dyne·cm ($M_w 6.6$ 程度)より大きい場合は、断層面積の経験的関係に補

正を加える⁹⁾。それより小さい地震の場合、平均応力降下量は約2.3 MPaとなる。

- ③ 経験的関係より、アスペリティーの総面積を断層面積の約22%と設定する。
- ④ アスペリティー総面積に対する全断層面積の比(1/0.22)に応じて、アスペリティーの応力降下量（地震モーメント 10^{26} dyne·cm 以下の場合は約10.5 MPa）を設定する。
- ⑤ 断層セグメント数に応じた個数分に、アスペリティー面積を分配する。このとき、アスペリティーの等価半径（円形アスペリティーを仮定した場合の半径）とすべり量には比例関係があるため、トレンチ調査による1回の変位量をアスペリティー分割と配置の参考資料とすることができる。
- ⑥ 地表断層の分岐形態¹²⁾から破壊開始点位置を絞り込んで設定する。

このようにして平均的な断層破壊モデルを構築することができる。これに対象サイトの地盤応答が評価できるだけの周辺地盤構造情報を組み合わせれば、想定地震による地震動波形を計算することが可能である。しかし、このように設定した断層破壊モデルは平均的なものであり、レシピで利用した経験的関係のばらつきによる影響を考慮する必要がある。このため、複数のシナリオによる地震動波形の計算を実施し、それらに基づいた工学的判断によって設計入力地震動が設定されることになる。

4. 強震動予測結果の利用

このような強震動予測結果の利用法をいくつか紹介する。徳林ほか¹³⁾、足立ほか¹⁴⁾は、それぞれ大阪湾岸部および京都盆地におけるサイトで地震動評価を行う際、複数の断層破壊モデルによって計算された強震動波形から応答スペクトルを求め、それらを総合的に評価することで入力地震動を設定している。このような想定入力地震動は、対象震源断層の破壊および対象サイトの地盤応答を直接反映したものであるため、対象構造物への影響が最も大きいパターンを設計入力地震動として抽出する場合においても、総合的な設計スペクトルを設定する場合においても、地震動卓越周期に物理的な意味づけが可能であり、工学的判断を行う際に有利である。

大阪府土木部¹⁵⁾は、地盤応答特性および想定震源断層からの距離に応じて府域を19のゾーンに分割し、四つの内陸地震を対象として各ゾーン内に複数の計算対象点を設定してハイブリッド法による強震動評価を実施している。その結果、各ゾーン内で最も大きな地震動を生じた波形を、「想定標準地震動」として耐震設計に用いている。この成果は、震源断層と地盤応答の地域特性を考慮しつつ広い範囲の設計入力地震動を設定した嚆矢となっている。近年、名古屋地区の建築構造物を対象として、同様の試みがより高精度に実施されつつある¹⁶⁾。

設計入力地震動は、このように震源断層の破壊過程および堆積地盤の応答を考慮した地震動予測法を用いることにより、画一的なものから対象断層と地盤応答の地域

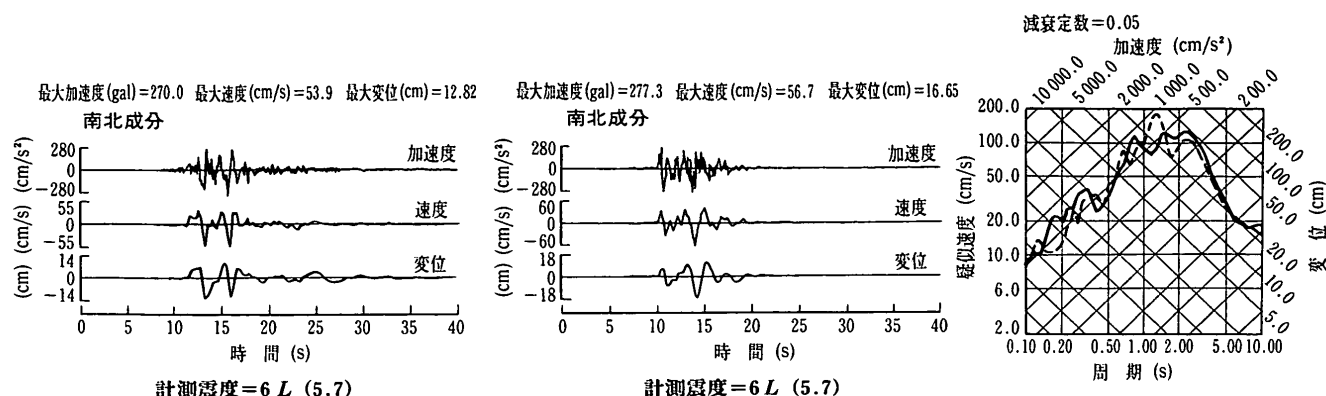


図-3 平成7年兵庫県南部地震の強震動シミュレーション例 (神戸大学 NS 成分)

性を反映したものへと移行しつつある。

5. おわりに

震源断層の破壊過程および堆積地盤の応答を考慮した地震波形の予測法は実用化の域に入ったと考えられる。しかし、その予測精度は、計算に用いる震源破壊モデルと地盤構造モデルに左右されている。標準的な震源破壊モデルの構築については現状でも一応の成果が得られているが、数少ない既往地震によるデータを総合評価したものであり、将来発生し得るあらゆる形態の地震に対応するためには課題も残されている。震源近傍における強震観測記録の蓄積と解析によって、今後も引き続いてその精度を高めてゆく必要がある。しかし、そのためにはいくつかの地震発生を待たねばならず、世代を超えたプロジェクトとなろう。一方で、強震動評価のもう一つの柱となる地盤構造モデルについては、現状でも調査に応じた質と量で情報を蓄積することができる。強震動予測精度の向上、ひいては設計入力地震動のばらつき軽減のためには、高精度・高密度の強震観測と大地震が想定される地域における地下構造情報の収集を地道に続けておくことが望まれる。

謝辞

本論は、(株)日本地震学会「強震動委員会」における成果⁵⁾および(株)地盤工学会「土構造物への設計用入力地震動に関する研究委員会」の成果²⁾を下敷きとしており、これらの活動に携わった関係諸氏に感謝します。

参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 1996.
- 2) 香川敬生・江尻譲嗣：震源断層の破壊過程を考慮した震源近傍地震動の試算, 「土構造物の耐震設計に用いるレベル2地震動を考える」シンポジウム, 地盤工学会関西支部, pp. 1~6, 1998.
- 3) Ohno, S., T. Ohta, T. Ikeura and M. Takemura: Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, *Tectonophysics*, 218, pp. 69~81, 1993.
- 4) Somerville, P. G., N. F. Smith, R. W. Graves and N. A. Abrahamson: Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seism. Res. Lett.*, 68, pp. 199~222, 1997.
- 5) 香川敬生・入倉孝次郎・武村雅之：強震動予測の現状と将来の展望, *地震*, 2, 51, pp. 339~354, 1998.
- 6) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., pp. 151~156, 1986.
- 7) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長：地域的な震源スケールリング則を用いた大地震 (M7 級) のための設計用地震動予測, *日本建築学会構造系論文集*, 416, pp. 57~70, 1990.
- 8) Kamae, K., K. Irikura and A. Pitarka: A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, pp. 357~367, 1998.
- 9) 入倉孝次郎・三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測, *地学雑誌*, 110, pp. 849~875, 2001.
- 10) 入倉孝次郎・三宅弘恵：予測のための震源のモデル化, 最近の強震動予測研究—どこまで予測可能となったのか?—, *月刊地球*, 号外 No. 37, pp. 62~77, 2002.
- 11) Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, 70, pp. 59~80, 1999.
- 12) 中田 高・島崎邦彦・鈴木康弘・佃 栄吉：活断層はどこから割れ始めるのか?—活断層の分岐形態と破壊伝播方向—, *地学雑誌*, 107, pp. 512~528, 1998.
- 13) 徳林宗孝・澤田純男・香川敬生・宮腰 研・鶴来雅人：3次元盆地構造を考慮した大阪湾岸部における強震動評価, *土木学会第54回年次学術講演会講演概要集*, 1B, pp. 306~307, 1999.
- 14) 足立幸郎・秦 健作・吉村敏志・香川敬生・趙 伯明：京都地域における活断層を考慮した設計入力地震動の検討, 第一回日本地震工学会研究発表・討論会梗概集, p. 109, 2001.
- 15) 大阪府土木部：大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書, 1997.
- 16) 福和伸夫・山岡耕春・鈴木康弘・釜江克宏・香川敬生・佐藤俊明：名古屋市域の強震動予測の試み：協議会方式による設計用地震動策定の現状, *地球惑星科学合同学会2001年度合同大会予稿集*, S5-012, 2001.

(原稿受理 2002.10.29)