

氏 名	池 浦 友 則
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 3 年 5 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 57 年 3 月 東北大学大学院工学研究科建築学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	震源の不均質すべりを考慮した半経験的地震動評価法と その応用に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 和泉 正哲      東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 杉村 義広      東北大学教授 平沢 朋郎

## 論 文 内 容 要 旨

近年、都市や重要構造物の耐震検討の場では、与えられた地点の周辺で、将来発生する可能性のある大地震を具体的に想定し、それによる地震動を適格に予測評価することが要求されるようになっている。本研究は、そのような要求に答える合理的かつ実用的な新しい地震動評価法として、「震源の不均質すべりを考慮した半経験的地震動評価法」を提案し、その理論的特性と適用性を明らかにするとともに、現実の地震動予測問題へ適用法を示したものである。

半経験的地震動評価法とは、過去に観測された小地震の地震動記録を、大地震の震源における破壊の進展とともに次々に重ね合わせることにより、大地震の地震動を評価する方法の総称である。小地震を重ね合わせる数は、大地震と小地震の地震モーメントをそれぞれ  $M_0$ 、 $M_{0E}$  とすると、 $M_0$ 、 $M_{0E}$  で与えられ、通常は、断層の長さ  $L$ 、幅  $W$ 、すべり量  $D$  に関して、各々、 $n = (M_0 / M_{0E})^{1/3}$  個の重ね合わせを行う。この方法は、大地震の震源およびその周辺で発生した小地震の観測記録を用いることによって、たとえ震源から地震動観測地点までの地下構造が未知であっても、現実の複雑な波動伝播経路の特性を反映した地震動評価が極めて容易にできるという特徴を持っており、また、近年充実しつつある強震観測の成果が積極的に活用できるという意味でも、現実の地震動予測問題に適用できる評価法として有力視されている。

本評価法は、この半経験的地震動評価法を基本とし、これに、地震学の最近の知見に基づいて、短周期地震動の励起を支配するすべりの不均質性の効果を確率論的に導入したものである。具体的

には、一まず、大地震の断層面を  $n \times n$  個に分割し、各小領域に対してランダムなすべり量  $D_{ij}$  ( $i, j = 1 \sim n$ ) を与えることにより、断層面上で不均質なすべり分布のモデルを想定する。次に、 $D_{ij}$  を断層面全体の平均すべり  $D_0$  と平均からの偏差  $\Delta D_{ij}$  の和に分解し、それぞれの寄与による地震動波形  $S_L(t)$  と  $S_S(t)$  を、小地震の地震動波形  $S_E(t)$  から半経験的方法によって求め、最後に、両者を足し合わせて不均質すべりによる大地震の地震動波形  $S_{SV}(t)$  を評価する — というものである。

このモデルでは、すべりの不均質性の度合いがパラメータ  $S_D$  によって表現される。 $S_D$  は全小領域 ( $n \times n$  個) にわたって  $\Delta D_{ij}$  の二乗平均値を求め、その期待値を要素地震のすべり量  $D_E$  で基準化した値として定義される。また、断層面上における  $\Delta D_{ij}$  の総和を 0 に拘束し、半経験的评价法で最も重要なパラメータである大地震の地震モーメント  $M_0$  を、すべりの不均質性  $S_D$  によらず一定に保っているという特徴がある。

以上の評価法の大まかな特性を把握するために、1983年日本海中部地震 (M7.7) の秋田を例に、強震動のシミュレーションを行う。合成波の短周期成分は  $S_D$  の増加とともに卓越し、本評価法が、震源すべりの不均質性ととも短周期地震動が大きく励起される、という地震学の知見に良く整合するものであることが示される。同時に、地震動スペクトルについては、細かな山谷まで良く観測記録と一致する結果が得られ、半経験的地震動評価法としての長所を良く保っていることが確認される。

本評価法の理論的性質をさらに詳しく検討する。まず、半経験的地震動評価法による合成波形は、「小地震に対する大地震の地震動の倍率 (合成倍率)」および「小地震の地震動波形」の2つの要因によって決定される。したがって、合成倍率の妥当性と、評価結果に及ぼす要素地震の震源特性の影響を把握しておくことが重要である。このうち合成倍率は、小地震記録の重ね合わせ方によって規定され、震源からの地震波の励起を表現した震源スペクトルのスケージングに対応づけられる。そこで、本評価法から期待される震源スペクトルの合成倍率を理論的に導き、既往の確率論的モデルやスケージングモデルとの対応関係を調べる。

まず、本評価法から導かれる震源スペクトルの合成倍率は、低周波数領域が大地震の全体的な断層運動を反映した  $D_0$  の寄与に支配され、一方、高周波数領域がすべりの不均質性を表す  $\Delta D_{ij}$  の寄与によって支配されている。具体的には、不均質なすべりに対して求められる合成倍率の期待値は、大地震と小地震のコーナー周波数をそれぞれ  $f_c$ ,  $f_{cE}$  として、 $f_c$  以下の低周波数領域で  $n^3$ ,  $f_{cE}$  以上の高周波数領域では  $nS_D$  で近似的に与えられる。したがって、すべりの不均質性は地震動の高周波数領域のみに影響を与え、低周波数領域には寄与しない。この合成倍率は、 $S_D = 1.0$  のとき  $\omega^{-2}$  モデルに対応し、 $S_D > 1.0$  のときは GUSEV のモデルに代表される、より高周波数成分に富んだスケージングモデルに対応する。また、本評価法から期待される震源スペクトルでは、 $S_D$  の増加に伴って高周波数成分が卓越し、周波数  $f_{cE}$  の位置に第2コーナーが形成される特徴があるが、これは移動震源確率モデル、伝播性破壊確率モデルといった既往の確率論的モデルと共通する重要な特徴である。

一方また、本評価法による結果は、長周期領域では大地震のモデル化に応じた合成倍率の特性の

みで決定されるが、短周期領域では、さらに要素地震の震源特性を反映したものとなる。そこで、要素地震の震源スペクトルを仮定し、それと合成倍率を用いて、本評価法で評価される短周期地震動のスペクトルを導き、不均質すべりから期待される短周期地震動の性質と、要素地震の震源特性が評価結果に与える影響を理論的に調べる。

その結果、合成波の短周期地震動の最大振幅は、長周期地震動のような強い Seismic Directivity をもたないことが示される。この性質は、短周期地震動の観測記録や震度に対して指摘される重要な性質である。また、本評価法による短周期地震動のスペクトルレベルは  $(S_D \Delta \sigma^{1/3} \Delta \sigma_E^{2/3})$  に比例して変化することが示される。ここに、 $\Delta \sigma$  と  $\Delta \sigma_E$  はそれぞれ大地震と要素地震の平均応力降下量である。また、この項は、他の確率論的なモデルで断層破壊の不均質性を規定している local stress drop:  $\Delta \sigma_L$  や rms stress drop:  $\sqrt{E[\tau^2]}$  等に対応する。このことから、本評価法では、すべりの不均質性  $S_D$  だけでなく、要素地震の応力降下量  $\Delta \sigma_E$  も、不均質断層のモデル化に関与し、短周期領域の地震動強さを決定づける重要な要因となっていることが指摘される。

以上のとおり、本評価法は、理論的な背景が明らかで、既往の地震学の知見と整合した特性を持つ合理的な地震動評価法である。

次に、地震動評価に対する本評価法の適用性を明らかにするため、国内に発生した M6.7~7.9 の 7 つの大地震、のべ 15 地点の地震動シミュレーションを行う。

その結果、地盤条件が比較的良好な地点では、本評価法によって、観測記録の応答スペクトルをほぼ説明する結果が得られる。また、地震動波形の包絡形状に関しては、M が 7.4 以下の比較的小さな地震ではおおむね本震記録に対応する結果が得られるが、M がより大きな地震では、本震記録を十分に表現できるとは限らず、震源の破壊時間で決まる強震部分の継続時間が表現できる程度であることがわかる。ただし、この問題は、地震規模が大きくなるにつれて、短周期地震波の発生過程が複雑になることに起因しており、大地震のモデル化をより詳細に行うならば、シミュレーションの精度を向上させることが可能である。

地盤条件が比較的良好な地点において評価した  $S_D$  の値は、大地震の地震規模によらず 0.7~1.5 の範囲にばらつき、平均するとほぼ  $S_D = 1.0$  である。したがって、平均的には  $S_D = 1.0$  とすれば、大地震の地震動が評価されるといえる。なお、その場合、本評価法の震源スペクトルのスケールリングは、 $\omega^{-2}$  モデルのスケールリングにほぼ対応する。

また、軟弱地盤地点における地震動評価に対しては、強震時に地盤が大きく非線形化する軟弱地盤の地震動は良く表現することができないことが明らかとなる。このため、軟弱地盤の地点において地震動評価を行う場合には、強震時でも非線形化する恐れのない位置（例えば、洪積層上面）に仮想の自由地表面を考え、その位置で大地震の地震動を評価する方法が提案される。

さらに、やや長周期の地震動評価に対しては、実用上の観点から、S 波と同様の重ね合わせを行う方法を試み、周期数秒の帯域についてファクター 2 程度の範囲で観測記録を説明する結果が得られる。この方法は、やや厳密性を欠く適用法であるが、実用上は有効であることが指摘される。

最後に、現実の地震動評価問題に対する本評価法の応用として、1923 年関東地震 (M7.9) の再来を想定した横浜 (京浜事-S) における入力地震動評価が試みられる。この地震動評価の主な特徴

は、a) 断層面の拡がりの効果を考慮して3つの要素地震を用いていること、b) 軟弱地盤の影響を避けてS波速度400m/sの基盤層の露頭位置で地震動を評価していること、c) 設計用地震動を評価する目的で既往のシミュレーションによる $S_D$ の上限値1.5を仮定していること、の3点である。

評価結果の地震動波形は、 $S_D$ の値を既往のシミュレーション結果の平均より大きな1.5としたため、住家被害や観測記録から推定される本震の地震動よりやや大きく、El-Centro NS, Hachinohe NSといった既往の設計用入力地震動と比較しても遜色ないものである。

以上のとおり、本研究で提案する「震源の不均質すべりを考慮した半経験的地震動評価法」は高い合理性と適用性を持つ。したがって、今後、都市防災や重要構造物の設計の場で地震動を評価する際には積極的に活用されるべきであると考え。また、本評価法の適用の機会を拡げ、また、その予測精度を向上させるために、a) 強震観測網の拡充、観測記録の蓄積とデータベース化、および、それらの公開、b) 中小地震の震源特性の解明、c) 速度型強震計による観測、およびd) 強震観測地点の地盤情報の整備、を推進することが、これまで以上に必要とされる。

## 審 査 結 果 の 要 旨

建築物の合理的な耐震設計のためには、将来発生する地震動の特性を概括的にせよ把握する必要がある。殊に建築物に大きな影響を及ぼす短周期地震波成分の発生は、断層破壊の不均質性に起因しており、この不均質性を合理的に組み込んだ地震動評価法の開発が必須である。本論文は、不均質な震源すべりを確率論的に表現したモデルに基づく半経験的地震動評価手法を提案したもので、全7章よりなる。

第1章は序論であり、既往の研究を整理し、本論文の立場を明らかにしている。

第2章では、確率論的に表現した不均質なすべり分布のモデルに基づいて、小地震の地震動記録から大地震の地震動を合成する半経験的震動評価法を示し、その地震動合成倍率の期待値を導いている。

第3章では、本評価法における震源スペクトルのスケーリングを理論的に導き、半経験的地震動評価法のスケーリングを明らかにするとともに、地震学における確率震源モデルや震源スペクトルのスケーリングモデルとの整合性を確認している。

第4章では、本評価法によって得られる短周期地震動のスペクトルを誘導し、不均質震源から励起される短周期震動の特性を明らかにするとともに、要素として用いられる小地震の震源特性が、評価される大地震の地震動にどのように関与するかを示している。

第5章では、わが国に発生したマグニチュード6.7~7.9の7地震のべ16地点の強震動評価に本評価法を適用し、本手法の妥当性を検証している。

第6章では、本評価法の応用例として、1923年関東地震の再来を想定した横浜（沖積地盤）における設計入力地震動を推定し、この地域における合理的な建築物設計用地震荷重を得ている。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は、震源から観測点に至る複雑な波動伝播経路の効果を忠実に表現できる半経験的地震動評価法をもとに、短周期地震動の励起を支配する震源すべりの不均質性の効果を確率論的に導入した地震動評価法を提案し、その合理性と現実の地震動予測問題に対する適用性を明らかにしたもので、建築構造学ならびに耐震工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。