

氏名	大野 晋
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成11年9月8日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和63年3月 東北大学大学院工学研究科建築学専攻前期課程修了
学位論文題目	震源の広がりを考慮した経験的地震動評価に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 源栄 正人 東北大学教授 杉村 義広 東北大学教授 井上 範夫 東京工業大学教授 翠川 三郎 東北大学助教授 栗田 哲

## 論文内容要旨

日本は太平洋・フィリピン海の海洋性プレートと北米・ユーラシアの大陸性プレートの計4つのプレートがせめぎ合う複雑な地震地帯構造に位置しており、地震活動度が非常に高く、過去に地震による被害を数多く経験している。したがって、構造物の耐震設計や都市・地域における地震被害予測のための地震動の評価は地震工学上重要な位置を占めている。その中でも、例えば1995年兵庫県南部地震において震源に近い神戸市が甚大な被害を受けたように、地震動の振幅が大きい震源近傍における評価が特に重要な課題となっている。

日本で起こる地震のタイプとしては、前述の複雑な地震地帯構造を反映して、海溝沿いのプレート境界で起こる地震、内陸の地殻内の浅い地震、沈みこむプレート内で起こる深い地震など多岐に渡っている。このうちプレート境界の沈みこみ帯の地震は、規模が大きき震動の伝わる範囲が広いこと、再来期間が数百年単位と内陸地震に比べて短いことから、被害想定や構造物への入力地震動評価の際に重視されてきた。その一方、内陸地震は再来期間が数千年単位と長く、プレート境界の想定地震に比べると規模は小さいものの、兵庫県南部地震に代表されるように、都市直下で発生すれば震源に近いために非常に大きな災害を引き起こし得る。日本では1948年福井地震以降兵庫県南部地震まで都市直下の内陸被害地震がなかったが、歴史地震を見れば過去に内陸地震による被害を多く受けて来ている。したがって、構造物の耐震設計や被害予測に用いる地震動評価の際に、内陸地震の影響は非常に大きいと言える。

地震工学の分野で地震動を評価する際には、マグニチュードと震源からの距離、地盤種別等をパラメータとして最大値やスペクトルを予測する距離減衰式が広く用いられている。距離減衰式を用いた地震動評価法は、パラメータの係数を観測記録から経験的に求めるため、経験的評価法と呼ばれている。この方法は観測記録を比較的良く説明するものの、理論の裏付けに欠けることがしばしば批判の対象となってきた。特に、距離減衰式は元々震源が点と見なせるような遠方での評価を対象としていること、パラメータの係数がそれを求めたデータセットに依存することから、データセットの範囲外への適用、その中でも震源近傍への適用には疑問を残してきた。また、距離減衰式は震源メカニズムや破壊伝播の影響を考慮していないため、これらの影響が大きいと考えられる長周期領域での適用にも疑問を残している状況にある。

距離減衰式はその算定に用いられた観測記録の性質を強く反映したものとなるが、前述のように日本では1953年に強震観測が始まってから内陸地震の発生が少なく、1995年兵庫県南部地震までは震源近傍での観測記録は特に少なかった。一方、米国カリフォルニアでは州の中央を太平洋プレートと北米プレートの境界が走っており、その周辺で多くの地震が発生していることから、内陸地震の震源近傍の強震記録も数多く観測されている。したがって、カリフォルニアの強震記録は震源近傍の経験的評価のためのデータセットとして世界中で最も充実したものとなっている。

以上の背景を踏まえて、本論文では、地震動の距離減衰式を断層モデルの立場から見直し、震源近傍で重要な因子となる断層の広がりや震源近傍における破壊伝播の効果を取り入れること、カリフォルニア内陸地震の最新のデータセットに基づき、震源近傍まで適用できる水平動と上下動の応答スペクトルの経験的な評価式を提案すること、提案した評価式について日本の内陸地震との対応を検討し、その適用性を示すことを目的としている。

本論文の構成は全6章で、以下の通りである。

## 第1章 序論

第1章では、本論文の背景及び目的を述べると共に、経験的地震動評価法に関する既往研究及び強震観測記録について整理した。

## 第2章 震源の広がりを考慮した距離減衰式

第2章では、距離減衰式における震源近傍の地震動評価の問題点として、断層からの距離の取り方が不適切であることを指摘すると共に、断層モデルから求められるS波スペクトルの短周期近似に基づき、物理的に明確な形で面震源効果を取り入れた等価震源距離という新しい距離尺度を提案した。等価震源距離を用いることで、断層の面的な広がりや効果、断層と観測点の3次元的な位置関係の影響に加え、断層面上の不均質なエネルギー放出の影響まで距離減衰式で評価できるようになることを示した。また、震源近傍の観測記録の距離減衰特性を検討し、等価震源距離を用いることで震源近傍でも点震源理論に基づいて評価できることを示した。

## 第3章 カリフォルニアの強震記録のデータベース

第3章では、第4章以降の経験式の算定に用いる米国カリフォルニア州の強震観測記録について、地震や観測点の諸元についてまとめると共に、地震波の信頼周期帯の検討など予備的な解析を行った。また、震源・伝播・地盤の各特性について、既往研究からカリフォルニアと日本の比較を行い、同じマグニチュードと距離に対して、少なくとも基盤層では類似の地震動振幅が期待できることを指摘した。

## 第4章 水平動・上下動の距離減衰式の評価

第4章では、第3章で整理したカリフォルニア強震記録のデータベースに対して等価震源距離を用いた回帰分析を行い、距離減衰式を算定した。この距離減衰式は、第三紀以前の地盤・更新世の地盤・完新世の地盤それぞれにおいて、水平成分・上下成分の最大加速度・最大速度・周期 0.02～5秒までの加速度応答スペクトルを評価できること、等価震源距離及び Moho 面からの反射波の影響を考慮できる距離減衰形状を採用することで、震源近傍及び遠方での適用性を高めていること、完新世の地盤の水平成分について増幅率を入射波の振幅に依存させた形式としており、非線形応答の影響を考慮できるという特徴を持つものである。

また水平成分と上下成分の関係について検討し、距離減衰特性及びマグニチュード依存性は同等であること、したがって第三紀以前及び更新世の地盤では上下/水平比は距離に依存せず、0.5-0.7程度の値をとることを示した。一方、完新世の地盤の上下/水平比は水平成分の非線形性の影響により距離に依存すること、本論文で求めた距離減衰式は震源近傍の完新世の地盤で上下動が卓越するという現象を良く説明できることを示した。

さらに、震源依存項のマグニチュード依存性について、震源スペクトルのスケージングモデルに基づく検討を行い、本研究のマグニチュードの範囲(4.9～7.5)ではマグニチュードの1次式で十分であることを確認した。震源メカニズム解や震源深さ依存性を検討し、逆断層の地震の方が横ずれや正断層の地震よりも振幅が大きいこと、地殻内地震であっても深い地震の方が浅い地震よりも短周期の振幅が大きいことを示した。ただし、震源深さ依存性はマグニチュードが大きくなると小さくなること、これは断層面が地震発生層全域に渡るためと考えられることを指摘した。

## 第5章 震源近傍における震源メカニズムと破壊伝播の影響

第5章では、第4章の距離減衰式では考慮されていない震源近傍における破壊伝播効果について、カリフ

オルニアの強震記録を用いて検討した。その結果、震源近傍における破壊伝播効果は、破壊進行方向において主に断層直交成分のみが長周期で大きくなる現象として現れること、この効果を除けば、破壊進行方向と逆方向、断層の上盤と下盤の差は、少なくとも等価震源距離を用いている限りは地盤によるばらつきよりも小さく、余り大きな相違をもたらさないことを示した。さらに第4章で算定した距離減衰式に対し、この効果に対する補正が必要な範囲及び補正係数を示した。

#### 第6章 兵庫県南部地震への適用

第6章では、日本の代表的な内陸地震であり、震源近傍で多くの観測記録が得られている兵庫県南部地震を対象として、第4章及び第5章で求めた距離減衰式の適用性について検討を行った。兵庫県南部地震の地震記録に対しても震源近傍における破壊伝播効果の検討を行い、カリフォルニアの記録よりもやや短周期から影響が現れるものの、卓越範囲や距離減衰式に対する補正係数はカリフォルニアの記録と概ね整合することを示した。また兵庫県南部地震では、カリフォルニアの記録で共通に見られた Moho 面からの反射波の卓越は確認されないこと、これは日本とカリフォルニアの地殻構造の相違によるものと考えられることを指摘した。

第4章で得られた距離減衰式を兵庫県南部地震に適用した結果、第三紀以前の地盤においては、震源近傍での破壊伝播効果を考慮することにより観測値と良く整合すること、一方更新世の地盤においてはやや過小評価する傾向があること、完新世の地盤に対しては大きく過小評価することを示した。これらの更新世の地盤や完新世の地盤における過小評価の原因としては、長周期領域では盆地生成表面波による増幅が影響していること、またカリフォルニアと日本の堆積地盤の堆積過程の相違により、同じ地質年代でもカリフォルニアの地盤のほうがやや硬いことを指摘した。さらに、本論文で提案した距離減衰式を都市・地域における地震被害予測や構造物への入力地震動評価に適用する際の適用範囲と注意点を示した。

#### 第7章 結論

第7章では、本研究で得られた結果について要約した。

以上のように、本研究では、従来地震動の経験的評価法において十分に考慮されていなかった震源の広がり効果を取り入れた距離減衰式を提案し、米国カリフォルニア州の強震記録の統計解析により、震源近傍まで適用可能な水平動と上下動の地震動評価式を算定すると共に、震源近傍での破壊伝播効果を経験的に評価する方法を提案した。また、これらの評価法について、兵庫県南部地震の強震記録との比較を通じてその適用性を示したものである。

## 審査結果の要旨

構造物の耐震設計や都市・地域における地震被害予測のために地震動評価は不可欠であり、特に地震動の振幅が大きい震源近傍における評価は地震工学上重要である。本論文は震源近傍の地震動評価で重要な因子となる断層の広がり効果や破壊伝播の効果を取り入れた水平動と上下動の応答スペクトルの経験的な評価式を提案し、その適用性を示したものであり、全文6章よりなる。

第1章では、本論文の背景及び目的を述べると共に、経験的地震動評価法に関する既往研究及び強震観測記録について整理している。

第2章では、従来の距離減衰式における震源近傍の地震動評価の問題点として、断層からの距離の取り方に改良の余地があることを指摘すると共に、断層モデルから求められるS波スペクトルの短周期近似に基づき、物理的に明確な形で面震源効果を取り入れた等価震源距離という新しい距離尺度を提案している。これにより、断層の面的な広がり効果、断層と観測点の3次元的な位置関係の影響に加え、断層面上の不均質なエネルギー放出の影響まで距離減衰式で評価できることを示している。

第3章では、経験式の算定に用いる米国カリフォルニア州の強震観測記録について、地震や観測点の諸元についてまとめると共に、地震波の信頼周期帯の検討など予備的な解析を行っている。また、震源・伝播・地盤の各特性について、既往研究からカリフォルニアと日本の比較を行い、同じマグニチュードと距離に対して、少なくとも基盤層では類似の地震動振幅が期待できることを指摘している。

第4章では、第3章で整理したカリフォルニア強震観測記録のデータベースに対して等価震源距離を用いた回帰分析を行い、第三紀以前の地盤・更新世の地盤・完新世の地盤における距離減衰式を示している。それぞれの地盤において、水平成分・上下成分に対する応答スペクトルを評価し、地盤毎のスペクトル特性や上下と水平のスペクトル比に関する距離減衰特性及びマグニチュード依存性について検討している。

第5章では、第4章の距離減衰式では考慮されていない震源近傍における破壊伝播効果について、カリフォルニアの強震記録を用いて検討し、破壊進行方向において主に断層直交成分のみが長周期で大きくなる現象が見られることなどを示すとともに、この効果に対する補正が必要な範囲及び補正係数を示している。

第6章では、日本の代表的な内陸地震で兵庫県南部地震を対象として、第4章及び第5章で求めたカリフォルニアのデータに基づく距離減衰式の適用性について検証を行っている。また、本論文で提案した距離減衰式を都市・地域における地震被害予測や構造物への入力地震動評価に適用する際の適用範囲と注意点を示している。

第7章は結論である。

以上、要するに本論文は、従来の方法では不十分であった震源域の経験的地震動評価に関し、断層の面的広がりを考慮した新たな方法を提案し、その適用性を検証したものである。震源域の地震動評価技術に関する新しい有用な知見を提供しており、地震工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。