

氏名（本籍）	すずきふみの 鈴木文乃（岩手県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	乙第 1186 号
学位授与の日付	2024 年 3 月 18 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	震源の不均質性を踏まえた断層モデルの構築 と震源近傍の地震動評価に関する研究

論文審査委員	（主査）教授 永野 正行
	教授 衣笠 秀行 准教授 宮津 裕次
	教授 木村 吉郎 准教授 朝倉 巧

論文内容の要旨

1995 年兵庫県南部地震をはじめとして、近年、大地震の震源近傍では設計レベルを大きく超える地震動が観測されている。同様の地震は今後も日本全国で発生することが懸念され、建物応答への影響の把握のためにも適切な地震動予測が防災上重要である。

地震動はその生成要因を震源特性・伝播経路特性・地盤増幅特性により特徴づけられるが、震源近傍は遠方に比べて震源特性の影響が強く現れる。従って、震源近傍の地震動予測においては震源特性のモデル化が重要となる。震源特性は、過去に発生した地震の地震観測記録から個々の地震の震源特性が解明され、多数の地震のデータを蓄積し、統計的に分析することで予測に用いられる地震規模と各種震源パラメータのスケールリング則などが構築される。

近年の強震観測網の発達により地震観測記録が蓄積され、これらのデータにより多数の地震の震源特性が推定されている。しかし、耐震設計などで予測が必要とされる大規模地震の震源近傍の観測記録は必ずしも豊富ではない。このようなデータベースの空白領域を埋めるための検討として、強震観測網発達以前に発生した歴史地震の震源特性を推定し、地震動を評価することが考えられる。歴史地震は地震波形などの観測記録が乏しいため、被害状況などから推定された震度データを用いたアプローチが有効である。検討対象としては、首都圏に甚大な被害を及ぼし、その被害状況から密な震度分布が推定されている 1923 年関東地震が挙げられる。

また、震源断層はその領域内においてすべりや応力降下量などの震源パラメータが一樣ではなく、不均質な分布を有している。震源断層の不均質性は地震動にも影響し、分布との位置関係によって地震動は大きく変動する。従って、地震動評価においてもこれらの不均質

性を震源のモデル化に適切に反映することが重要である。不均質性を反映したモデルとして、日本では地震動予測地図や地震被害想定に広く用いられている特性化震源モデルがある。特性化震源モデルは、数個の単純なアスペリティにより、ディレクティビティパルスなど過去の地震による現象を再現しやすいメリットがあるが、アスペリティの位置や個数など、震源の不確実性を考慮する際にその設定に恣意性が生じるなどのデメリットがある。

震源の不均質性に関する異なるアプローチとして、空間的に不均質な分布を波数領域でモデル化した自己相似モデルがある。自己相似モデルは、アスペリティと背景領域などを明瞭に分けないため、アスペリティの位置や個数などを陽に与えることなく多数のシナリオを想定することができ、震源の不確実性を考慮した確率論的な地震動評価への展開も容易と考えられる。自己相似モデルは、世界の多数の地震のデータに基づき構築されているが、日本の地震のデータは少なく、日本の過去の地震の特性を十分に反映しているかについては検証が必要である。

一方で、震源近傍の設計レベルを超える地震動に対しては、高い耐震安全性を持つ免震構造物も、上部構造の擁壁への衝突や、免震部材の破断などの安全限界を超える危険性が指摘されており、正確な応答特性の把握が必要とされている。免震構造物の応答特性については、水平 2 方向同時入力と 1 方向入力による応答値の差や積層ゴムのねじれ変形など、地震動が 2 次元応答に与える影響が報告されている。しかし、それらの 2 次元応答の検討に用いられている地震波は代表観測波や、告示に示される地震動、正弦波などが多く、震源近傍の強震動特性を踏まえた上での検討事例は少ない。よって、震源近傍における地震動の 2 方向特性とその要因を検討し、それらの特性が免震構造物に及ぼす影響を検討する必要がある。

そこで本論文では、歴史地震を含む日本の地震の震源の不均質性を踏まえた震源モデルを構築し、その震源モデルが震源近傍の地震動に与える影響を評価することの重要性を、免震構造物の応答の観点も踏まえて示すこととする。

本論文は全 5 章から構成されている。

第 1 章の序論では、研究の背景と目的を述べ、既往の研究を整理した上で、本論文の構成を示す。

第 2 章では、1923 年関東地震の震度データの逆解析により、震源の不均質性として推定された強震動生成域 (SMGA) から震源モデルを構築し、首都圏の強震動をシミュレーションした。震源特性は震度インバージョン解析結果に基づき 6 つの SMGA を持つマルチアスペリティモデルを構築した。伝播経路特性と地盤増幅特性は不均質減衰構造と経験的地盤増幅率を用いた。シミュレーション結果は震度 6 強～7 の地点が神奈川県南部や千葉県南部に分布する傾向など、木造家屋全壊率に基づき推定された震度を概ね再現した。擬似速度応答スペクトルの分布は、周期 1～2 s の平均が神奈川県南部や千葉県南部で 200 cm/s を超え、東京都東部では約 100～200 cm/s、SMGA からやや離れた埼玉県東部で約 50～100 cm/s であった。震度と応答スペクトルのシミュレーション結果を地盤情報と震源距離で回帰し、残差をクリギング法で補間して、地盤情報を反映した詳細地震動分布を推定した。本研究の結果から以下 3 つを議論した。1) SMGA は波形・測地データに基づく大きなすべりの近く

に位置するものが多かった。一方で、大きなすべりから外れた位置にある東京湾北部の SMGA は、関東地方南部にはほとんど影響を及ぼさないが、埼玉県や東京都北西部の震度を再現するためには必要であった。2) 東京 23 区内の地震動レベルは後背湿地や三角州、海岸低地、埋立地で地震動が大きく、火山灰台地で小さい。地震動と建物の分布から地震リスクが相対的に高い地域を確認した。3) 本シミュレーション結果は、近年の巨大地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録と比べて都心部で震度が概ね 1 階級大きな地震動であった。

第 3 章では、多数の日本の過去の地震を対象に、震源断層のすべりの不均質性を自己相似モデルにより評価した。すべり分布の 2 次元波数スペクトルは von Karman 型の自己相関関数を用いてフィッティングした。推定したハースト指数と相関距離を、既往研究の世界の地震による経験的モデルと比較し、規模依存性や地震タイプによる違いを分析した。ハースト指数 H はモーメントマグニチュード M_w の影響を受けず、地震タイプによる違いは小さい。 H の中央値は 0.77 であり、世界の地震の平均値とほぼ同じである。走向方向の相関距離 a_x は M_w と正の相関を示し、地震タイプによる差は見られず、 a_x の特性は世界の地震による経験的モデルとほぼ同じであった。一方で、傾斜方向の相関距離 a_y は M_w と正の相関があるが、 a_y は各地震タイプで M_w の大きい範囲で飽和傾向にあり、これは地震発生層の厚さに起因していると考えられる。飽和する M_w は内陸地殻内地震では 6.3、プレート間地震では 8.4 であった。この M_w は 3 stage scaling の 1 段階と 2 段階の境界値とほぼ一致した。さらに、これらの推定した自己相関関数のパラメータと震源近傍の地震動の関係として、相関距離は地震動のコーナー周波数に、ハースト指数は地震動の高周波数域のスペクトルの傾きに影響することをシミュレーションにより確認した。

第 4 章では、震源近傍の観測記録および第 2 章と第 3 章の震源近傍のシミュレーション波形を用いて免震構造物の 2 方向同時入力の応答解析を行った。楕円形となる地震動の水平 2 方向成分の同時入力と、それぞれ 1 方向成分の入力で応答値が変わり、1 方向成分のみでの応答解析では危険側の評価となる場合があった。従って、震源近傍の地震動は水平 2 方向のオービット特性の評価が重要である。オービット特性は、断層の上端深さが 3 km の場合は断層線上付近では断層直交 (FN) 成分のみの直線形となるが、上端深さが浅いほど断層平行 (FP) 成分が大きな楕円形となった。上端深さ 0 km のときの地震動の全無限解による近地項・中間項・遠地項の寄与は、FP 成分は近地項が支配的であり、FN 成分は各項がそれぞれ影響し合っている。よって、震源が近いほどオービット形状は FP 成分の大きな楕円形となると考察した。また、これらの各成分と各項の寄与の関係から、破壊伝播速度により FP 成分に対する FN 成分の比率が変わり、オービット形状が変わることを示した。地震動の 2 方向特性によって免震構造物の 2 次元応答が異なることから、免震構造物の応答の観点からも、震源近傍の地震動評価は全項を考慮できる理論的地震動評価手法を用いるべきである。そのような評価が必要な範囲の根拠として、近地項の距離減衰が切り替わる距離以内を「震源近傍領域」として提案し、例として 2016 年熊本地震の震源近傍となる範囲を示した。

第 5 章の結論では、本研究で得られた知見についてまとめ、今後の課題と展望について

述べた。

論文審査の結果の要旨

地震動レベルが大きい大地震の震源近傍は、遠方に比べて震源特性の影響が強く現れるため、震源近傍の地震動予測には震源特性のモデル化が重要となる。震源特性は近年発生した多数の地震の観測記録から評価されているが、近年の地震では耐震設計などで予測が必要とされる大規模地震の震源近傍の観測記録は必ずしも豊富ではない。このようなデータベースの空白領域を埋めるための検討として、1923年関東地震など歴史地震の検討が有効である。強震観測網発達以前の歴史地震は、被害に基づく震度データを用いたアプローチが有効であるが、震度データの逆解析に基づくシミュレーションはない。また、震源はすべり量などの分布が一律ではなく不均質な分布を有している。1923年関東地震のような大規模な地震はこのような不均質性を無視できず、震源近傍では分布との位置関係によって地震動は大きく変動する。日本の地震の不均質性は特性化震源モデルによる検討が多く、国際的に主流である自己相似モデルによる検討は少ない。震源断層内の大すべり域近傍で生じる極大な地震動は、耐震安全性の高い免震構造物も2次元応答に与える影響が大きい。2次元応答の検討に用いられる地震波は代表観測波や告示に示される地震動が多く、震源近傍の地震動の2方向特性を踏まえた検討はない。

以上を踏まえ本論文では、歴史地震を含む日本の地震の震源の不均質性を踏まえた震源モデルを構築し、その震源モデルが震源近傍の地震動に与える影響を評価することの重要性を、免震構造物の応答の観点も踏まえて示した。

第1章の序論では、研究の背景と目的を述べ、既往の研究を整理した上で、本論文の構成を示している。

第2章では、1923年関東地震の震度データの逆解析により、震源の不均質性として推定された強震動生成域(SMGA)から震源モデルを構築し、首都圏の強震動をシミュレーションした。伝播経路特性とサイト特性は不均質減衰構造と経験的地盤増幅率を用いた。シミュレーション結果は震度6強~7の地点が神奈川県南部や千葉県南部に分布する傾向など、木造家屋全壊率に基づき推定された震度を概ね再現した。震度と応答スペクトルのシミュレーション結果を地盤情報と震源距離で回帰し、残差をクリギング法で補間して、地盤情報を反映した詳細地震動分布を推定した。

第3章では、多数の日本の過去の地震を対象に、震源断層のすべりの不均質性を自己相似モデルにより評価した。すべり分布の2次元波数スペクトルは von Karman 型の自己相関関数を用いてフィッティングした。推定したハースト指数と相関距離を、既往研究の世界の地震による経験的モデルと比較し、規模依存性や地震タイプによる違いを分

析した。ハースト指数 H と走向方向の相関距離 a_x は、地震タイプによる差は見られず、世界の地震による経験的モデルとほぼ同じであった。一方で、傾斜方向の相関距離 a_y は、各地震タイプで M_w の大きい範囲で飽和傾向にあり、これは地震発生層の厚さに起因していると考えられた。これらの推定した自己相関関数のパラメータと震源近傍の地震動の関係として、相関距離は地震動のコーナー周波数に、ハースト指数は地震動の高周波数域のスペクトルの傾きに影響することをシミュレーションにより確認した。

第4章では、震源近傍の観測記録および第2章と第3章の震源近傍のシミュレーション波形を用いて免震構造物の2方向同時入力の応答解析を行った結果、1方向成分のみによる応答解析では危険側の評価となる場合があった。従って、震源近傍の地震動は水平2方向のオービット特性の評価が重要である。その生成要因の1つとして、上端深さが浅いほど断層平行成分が大きな楕円形となり、全無限解による近地項の影響が大きいことを示した。2方向特性の観点から、震源近傍の地震動評価は全項を考慮できる理論的地震動評価手法を用いるべきであり、そのような評価が必要な範囲の根拠として、近地項の距離減衰が切り替わる距離以内を「震源近傍の領域」として提案した。

第5章の結論では、本研究で得られた知見についてまとめ、今後の課題と展望について述べている。

本論文では、歴史地震を含む日本の地震の震源の不均質性を踏まえた震源モデルを構築し、震源近傍の地震動に与える影響を評価するとともに、震源近傍に該当する領域を建物応答評価の観点から規定している。本論文で得られた研究成果は、今後の震源近傍における地震動予測および大振幅入力地震動を考慮した建物の耐震設計法の発展に大きく貢献するものである。以上により、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。