

地表地震断層近傍の強震動予測手法の開発と

工学的利活用に関する研究

Development of Strong Ground Motion Prediction Method in the Near Fault Region and
Application to Seismic Design for Buildings

田 中 信 也

論 文 要 旨

近年発生した内陸地殻内地震では、活断層に沿って大規模な地表地震断層（地震学的に認められる震源断層の延長が地表に達したもの）が出現する場合があります。地表地震断層近傍の建物被害についても報告がなされている。2011年4月に発生した福島県浜通りの地震（ $M_w6.6$ ）や、2016年熊本地震本震（ $M_w7.0$ ）では、強震動に起因すると思われる建物被害は小さいとされているものの、地表地震断層の直上の建物では断層変位の影響により大きな変形や傾斜による建物被害が生じており、地表地震断層近傍においては、強震動に加えて断層変位を含む長周期成分の評価が必要となる。

内陸地殻内地震を対象とした地震動評価では、一般的に、地震調査研究推進本部による震源断層を特定した地震の強震動予測手法（以下、強震動レシピとよぶ。）に基づき、深さが数 km～15km 程度の地震発生層において震源断層モデルが設定される。しかし、前述の建物被害を踏まえると、地表地震断層の直上や極近傍において地震動評価を行う場合、地震発生層以浅を含む地表に変位を伴う断層全体を考慮することが求められる。永久変位を含む長周期成分を対象とした地震動評価を行う場合、断層面上のすべり速度時間関数を適切に設定する必要があるが、地震発生層内と地震発生層以浅とですべり速度時間関数の形状が異なることが指摘されている。

以上の背景を踏まえ、本研究では、地表地震断層近傍における永久変位を含む長周期成分の地震動評価が可能な震源断層モデルの設定方法を含む強震動予測手法を開発し、工学的利活用を行うことを目的とする。

本論文は、下記に示す 5 つの章で構成されている。

第 2 章では、震源近傍における強震動予測に適用可能な地震発生層以浅におけるすべり速度時間関数を求めることを目的として、強震動記録を逆解析の対象とした既往の震源インバージョン結果を収集し、地震発生層以浅のすべり速度時間関数の設定が観測記録の再現性に与える影響について分析を行った。さらに、収集した震源インバージョン結果を用いて、地震発生層以浅に適用可能なすべり速度時間関数と、地震発生層以浅のすべり分布の設定方法を提案した。

本章で得られた結論を以下にまとめる。

- a) 震源インバージョン結果と強震動レシピに基づく震源断層モデルを対象に、理論的手法（波数積分法）を用いて地震動評価を行い、震源から遠い観測点では、地震発生層以浅のすべりを考慮しない強震動レシピに基づく震源モデルで観測記録を良く再現できることを確認した。一方、断層最短距離が 2km 程度以内の震源近傍の観測点では、強震動レシピに基づく震源モデルを用いると、地震発生層以浅のすべりを考慮しない場合に観測記録を過小評価し、考慮する場合に過大評価することを確認した。
- b) 上記の原因として、震源インバージョン結果では、地震発生層以浅におけるすべり速度時間関数が時間ウィンドウの後半ですべり速度が最大値に達する幅広の関数となっており、強震動レシピとの乖離が大きいことをあきらかにした。
- c) 震源インバージョン解析に基づく震源断層モデルの地震発生層以浅の小断層を対象に、すべり速度時間関数を規格化 Yoffe 関数でモデル化し、すべり量と τ_s 及び τ_R の関係を求めた。

第 3 章では、地表地震断層近傍における地震動評価のための震源断層モデルの設定方法として、強震動レシピを地震発生層以浅へ拡張する方法を提示した。さらに、過去に発生した地震を対象に震源断層モデルを設定し、観測記録を再現することで設定方法の妥当性を示した。

本章で得られた結論を以下にまとめる。

(1) 2016 年熊本地震

強震動レシピを地震発生層以浅に拡張した基本震源モデルを設定し、KiK-net 益城と西原村を対象に波数積分法を用いて周期 1 秒以上の長周期成分を評価した。KiK-net 益城の観測記録は良く再現できるものの、西原村では過小評価となる。西原村が過小評価となる原因として、地表地震断層から 1km 程度以内と非常に近いことから、地震発生層内からの地震動が S 波の放射特性の節となるために、非常に小さいことが挙げられる。この結果を踏まえ、2 種類の修正震源モデルを設定した。ひとつは地震発生層以浅のパラメータを修正したモデル、もうひとつは出ノロ断層を考慮したモデル

である。いずれの修正震源モデルでも地表地震断層近傍の永久変位を含む広域の観測記録を全体的には概ね再現できる。

既往の断層変位や合成開口レーダーによる 2016 年熊本地震前後の地表変動との比較からは、出ノ口断層を考慮した修正震源モデルがより現実に近いモデルと考えられる。このことと、出ノ口断層を考慮していない基本震源モデルによる評価が西原村において過小評価となったことは、地表地震断層近傍における地震動評価においては、巨視的断層面の設定が非常に重要であることを意味している。

(2) 2014 年長野県北部の地震

本研究で提案した手法に基づき強震動レシピによる震源モデルを地震発生層以浅に拡張することで、2014 年長野県北部の地震における永久変位を含む広帯域の観測記録をハイブリッド法で概ね再現できることを示した。

(3) 1999 年コジャエリ地震・2008 年四川地震

本研究で提案した手法に基づき強震動レシピによる震源モデルを地震発生層以浅に拡張することで 1999 年コジャエリ地震及び 2008 年四川地震のような長大断層による地震の周期 1 秒以上の長周期成分の観測記録を再現できることを示した。

第 4 章では地表地震断層近傍の地震動と建物被害の関係を明らかにするために、2016 年熊本地震における地震動評価結果と、建物被害との関係について考察を行った。最後に、ここまでの検討で得られた結果を工学的利活用することを目的として、地表地震断層近傍における設計用地震動とその策定方法を示した。

本章で得られた結論を以下にまとめる。

(1) KiK-net 益城周辺と益城町下陳地区における建物被害と地震動の関係

- a) 下陳地区において建物被害調査を行い、建物被害の関係からは、益城町下陳における 2016 年熊本地震の地震動は、震度 6 強 (6.49) を記録した KiK-net 益城よりも小さく、震度 5 強～6 弱と推定される。
- b) 強震動レシピを地震発生層以浅に拡張した震源断層モデルを用いて下陳における 2016 年熊本地震本震時の地震動を計算した。求められた下陳の地震動から計算した計測震度は、KiK-net 益城よりも小さく、建物被害の傾向と定性的に対応することを確認した。
- c) 地表地震断層のほぼ直上に位置する下陳では、放射特性の節となり、深部からの FP 成分が小さくなる。このような震源特性、すなわち、地表地震断層と観測点の位置関係による影響と地盤特性の影響により下陳の地震動は KiK-net 益城よりも小さくなったと考えられる。

(2) 南阿蘇村における建物被害と地震動の関係

下陳と同じく地表地震断層直上に位置する南阿蘇村は下陳とは異なり、建物被害が大きいことから、地震動を計算した。南阿蘇村で求められる地震動は、同じ地表地震

断層近傍である下陳よりも大きく、建物被害の傾向と定性的に対応することを示した。下陳よりも地震動が大きくなった原因として、観測点極近傍の布田川断層の指向性効果の違いと、観測点からやや離れた出ノ口断層の指向性効果の違いが影響することを示した。

(3) 工学的利活用に関する検討

- a) 本研究で構築した方法に基づき設定した単純な震源断層モデルから求められる地震発生層以浅からの地震動は、 $M_w7.0$ クラスで周期 3~5 秒程度で告示波（安全限界）の 1.5 倍程度となる。一般的な建物被害に影響する周期 1~1.5 秒程度の地震動は告示波よりも小さいものの、免震構造や超高層構造物では注意が必要と考えられる。
- b) 地震発生層内と併せた地震動は、告示波を大きく超過する場合もあることから、地表地震断層近傍では、本研究で構築した方法を用いて地震発生層以浅を考慮した詳細な地震動評価を行い、設計用地震動を策定することが必要と考えられる。

第 5 章では、各章における結論を整理した。

以上より、本研究では、地表地震断層近傍の強震動予測手法の開発を目的として、地震発生層以浅を考慮した震源断層モデルの設定方法を構築し、複数の地震で得られた地表地震断層近傍における観測記録を再現することで震源断層モデルの設定方法の妥当性を示した。また、本研究で提案した方法により、観測記録が得られていない地表地震断層近傍地点における建物被害の傾向を定性的に説明できることを示した。

本研究で構築した方法に基づき設定した単純な震源断層モデルから求められる地震発生層以浅からの地震動は、 $M_w7.0$ クラスで周期 3~5 秒程度で告示波（安全限界）の 1.5 倍程度となる。一般的な建物被害に影響する周期 1~1.5 秒程度の地震動は告示波よりも小さいものの、免震構造や超高層構造物では注意が必要と考えられる。また、地震発生層内と併せた地震動は、告示波を大きく超過する場合もあることから、地表地震断層近傍では、本研究で構築した方法を用いて地震発生層以浅を考慮した詳細な地震動評価を行い、設計用地震動を策定することが必要と考えられる。