

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

地震防災の目的は、大地震が発生しても、建造物の被害によって人命損失と社会・経済活動の機能麻痺が生じないように、または、これらの被害を社会が許容できる範囲内に収めるように、建造物や社会・経済システムを設計し、構築することである。

この目的のために、地震学分野の研究者は、どのような原因によって地震が発生するのかを明らかにすることが最も基礎的な研究課題であると考えて、地震発生の正体である震源断層の破壊とそこから発生する地震波の伝播と観測地震動の関係や地震予知の研究に力点を置いている。一方、地震工学や耐震工学の研究者や技術者は、地震によって建造物に被害が生じないようにすることが重要であると考えて、建造物や施設の地震対策の方法を開発する研究に力点を置いている。さらに、社会学や経済学、法学、心理学等の人文社会学の研究者は、防災教育や防災意識の向上、社会制度や保険制度、災害時の法律等によって地震被害を軽減する方策を研究している。

本論文では、地震学分野と工学分野に関係する地震動の工学的予測方法の開発を行なうものとする。

1.1.1 研究の背景

建造物の耐震設計、既存建造物の耐震診断とその補強、国や自治体などが行なう地震被害想定等において、最も基礎的かつ重要な情報である地表の地震動は、震源断層の破壊によって生じた地震波が地中を伝播し地表面に到達した結果として得られるものである。したがって、地表で観測された地震動には、「震源断層の特性」と震源からの「地震波伝播特性」、観測点の「表層地盤特性」の3つの特性が含まれているが、地表で観測された地震動から、これら3つの特性を分離し、抽出するためには震源断層から地表面に至る地震波伝播に関する適切な数理モデルが必要とされる。

これらの数理モデルに関する研究は、後の1.2.1の研究の現状に示すように主に地震学分野で進められてきた。一方、地震防災や耐震工学、地震工学等の工学分野では、被害が生じるような地表における強い地震動（強震動）の観測記録を用いて、強震動の最大値（最大加速度、最大速度、最大変位）や加速度応答スペクトル、気象庁震度、強震動のパワースペクトル、継続時間等の強震動の特性値が地震の規模（マグニチュード）と震源距離、震央距離や断層最短距離、さらに観測点の表層地盤分類（岩盤、洪積地盤、沖積地盤等）によってどのように変わるかを統計的に調べ、これら

の結果をいわゆる地震動の距離減衰式として整理し利用している。

地震学分野で研究開発されてきた地震動波形合成法は、3次元弾性波動理論における境界積分表示や弾性波動の反射・屈折に関する定式化に基づく震源断層破壊に関する数理モデル、地層中を反射・屈折しながら伝播する地震波伝播に関する数理モデルから構成されており、工学分野の技術者や研究者には難解で複雑なものに見える。このため、これらの地震動波形合成法は、これまで工学分野で利用されてこなかった。しかし、これまで工学分野で利用されてきた地震動の距離減衰式は、既存の強震動観測記録の統計処理に基づく地震動の特性値に関する経験式であり、また、大きな被害が生じるような大地震の震源域近傍での観測記録は極めて少ないことから、震源域近傍の地震動予測に関しては、これまでのように経験式のみでは十分ではない。

したがって、今後の構造物の耐震設計、既存構造物の耐震診断とその補強、国や自治体などが行なう地震被害想定等の工学的問題における地震動の予測に関しては、地震学分野で研究開発されてきた地震動波形合成法を用いることが望ましい。このためには、工学分野の技術者や研究者にわかりやすい地震動波形合成法の定式化の開発やこれに基づく震源域近傍の地震動特性、特に、後の**1.2.2**の研究の現状に示すようにこれまでの耐震設計において十分に研究がなされて来なかった地震動の上下成分の波形作成法の開発が必要と考えられる。

上記のような地震動波形合成法は、震源断層に関するモデル化と震源断層から地表に至る地盤構造とその物性値を必要とするため、この適用に当たってはこれらの不確定性を常に考慮して利用しなければならない。そこで、地震動波形合成法とともに、後の**1.2.3**の研究の現状に示すように地盤のボーリングデータ等の地盤情報を用いなくて、簡便に利用できる常時微動を用いて観測点の「表層地盤特性」考慮した簡便な地震動波形の予測法を開発しておくことは、工学的利用において有用であると考えられる。

1.1.2 研究の目的

そこで、本論文では、地震動の予測手法として、(1) 運動学的断層モデルと水平成層地盤モデルを用いた剛性行列による地震動波形合成法、(2) 因果性位相波の考え方を導入し、地震動水平成分波形から地震動上下成分波形の作成する方法、(3) 近傍の強震観測記録と常時微動H/Vスペクトル比を用いた地震動推定法、の3つの予測手法を開発する。

剛性行列による地震動波形合成法は、震源断層のパラメータと地層の厚さとその物性値を与えることで理論的に地震動波形を求めることができる。因果性位相波を用いた地震動上下成分波形の作成方法は、震源断層近傍の地震動上下成分と水平成分の特性をモデル化し、地震動水平成分波形と因果性位相波から上下成分波形を作成する方法である。常時微動を用いた地震動推定法は、その地

点のローカルな表層地盤特性を常時微動のH/Vスペクトル比の卓越周期により経験的に推定し、その特性と近傍の強震動観測記録を合成することで強震動観測点近傍の地震動波形を推定する手法である。本論文で開発する3つの地震動の工学的予測手法の具体的な内容は以下の通りである。

(1) 剛性行列による地震動波形合成法

運動学的断層モデルと水平成層地盤モデルを用いて構造技術者に馴染み深い剛性行列による地震波動場の定式化（振動数・波数領域の剛性方程式への定式化）において、震源断層の影響を表す外力項の表現に関して、(1) 半無限弾性体の剛性行列と無限弾性体中の震源断層から放射される地震波による変位と応力を用いる方法、(2) 半無限弾性体の剛性行列と解放基盤波を用いる方法、(3) 無限弾性体の剛性行列と無限弾性体中の震源断層から放射される地震波変位を用いる方法、の3つの方法を示す。この定式化により、剛性行列の演算のみによって地震波の影響を表す剛性方程式の外力項を求めることができるようになり、これまでは不完全であった剛性行列による地震波動場の定式化（原田ら 1999, 王 2006）^{1), 2)}が改良され、完全な剛性行列による地震波動場の定式化ができたことになる（中村ら 2010）³⁾。

(2) 地震動上下成分波形の作成方法

現行の構造物の耐震解析において、地震動の上下成分の設計荷重として、水平成分の設計震度や加速度応答スペクトルの50～70%を採用していることが多い。しかし、震源断層近傍の強震観測記録の蓄積に伴い、地震動水平成分に比べ、より大きな上下成分波形が観測される事例が多くなっている。これらの上下成分波形には断層の永久変位が含まれている。そこで、わが国で最近発生した内陸被害地震の震源断層近傍（断層最短距離20km以内）における強震観測記録を用いて、表層地盤特性を考慮して、地震動上下成分と水平成分のフーリエ振幅スペクトル比（ $|V(T)| / |H(T)|$: T = 地震動の周期）の平均値と標準偏差の周期特性を調べ、これらをモデル化した。また、震源断層の極近傍での観測記録は極めて少ないという現状を補う目的で、逆断層地震を想定した震源断層モデルから理論的に得られる岩盤における震源断層の極近傍（10km以内）の地震動上下成分と水平成分のフーリエ振幅スペクトル比の特性を求める。

以上のような観測記録と断層モデルによる理論的方法から求められる地震動上下成分と水平成分のフーリエ振幅スペクトル比の特性を用いて、2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西の観測地震動特性を再現する。また、位相波の特性を振動数領域における線形システムのフィルター理論によって解釈することにより、因果性を満たす位相波（因果性位相波と呼ぶこととする）とモデル化した $|V(T)| / |H(T)|$ を地震動水平成分波形から上下成分波形を作成する方法を示す。

(3) 常時微動を用いた地震動推定法

この方法は常時微動記録と近傍の地震動記録のみを用いて、地盤情報には頼らない地震動推定

法に関する従来の方法（1.2.3 に後述）を改善することを目的に、「地震動と常時微動の H/V スペクトル比は完全に等しいものではなくほぼ等しい.そして 2 地点間距離が近い場合でも地表面鉛直地震動のスペクトル特性は異なる」という観測事実をできるだけ考慮した仮定に基づく新しい定式化を示し、「上下動の増幅特性を表す鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/o}$ 」と「常時微動と地震動 H/V スペクトル比の違いを表す補正係数 β_E 」の 2 つの係数の推定式を提案する.

この方法から求められる地震動を、宮崎県内の 16 個の強震動観測点と 2005 年福岡県西方沖地震による福岡市内の 2 つの観測点の記録と比較し、この方法の検証を行なう.

1.2 研究の現状

1.2.1 地震動の波形合成法

地震動の波形合成法は、Lamb (1904)⁴⁾が振動数・波数領域の解析法により無限地盤や半無限地盤における波動の定式化と計算例を示して以来、振動数・波数領域における定式化に基づく研究が主流である. Bouchon (1979)^{5), 6)}はこの方法を用いて運動学的断層モデルから放射される定式化を行ない、Thomson (1950)⁷⁾と Haskell (1953)⁸⁾による伝達行列法と組み合わせ、水平成層地盤の地震波動場の解析例を示した. Chouet (1987)⁹⁾はこれらの伝達行列法による地震波動解析問題の定式化や研究の現状をまとめている. 伝達行列の数値計算過程において、高振動数や層厚の大きい堆積層の場合、数値計算上、特別な取り扱いが必要となるため、これを克服する別の方法への展開を行なうことで安定的な計算ができる (Kausel and Roësset 1981 の剛性行列への展開, Kennet and Kerry 1979 や Luco and Aspel 1983 の反射・透過行列法への展開, Chin et al. 1984 や Schmidt and Tango 1986 のグローバル行列法への展開など)^{10)~14)}.

しかし、本論文で使用する剛性行列は構造技術者や工学分野に馴染み深い方法であり、運動学的断層モデルとの組み合わせ方法の定式化、地震波伝播の問題の適用性の検討を原田ら (1999)¹⁾は示している. また、王 (2006)²⁾は剛性行列による震源断層・水平成層地盤モデルを用いた地震波動場に対する定式化と、その具体的計算式を整理している. しかし、これらの剛性行列による地震波動場の定式化の一部において、伝達行列を用いて解放基盤面の地震動を求めているため、完全な剛性行列による地震波動場の定式化となっていない. この点を改良して完全な剛性行列による地震波動場の定式化が中村ら (2009)³⁾によって示された.

1.2.2 地震動上下成分の特性

建造物の非線形応答に及ぼす地震動の水平成分の影響に関する研究に比べると、上下成分の影響に関する研究は少ない（例えば日本建築学会 1998, 原田ら 2010, 児玉ら 2011）^{15)~17)}。通常の建造物の耐震設計では、上下方向の設計荷重として水平成分の設計震度または加速度応答スペクトルの 50~70%を採用しているものが多い。しかし、震源断層近傍の強震観測記録の蓄積に伴い、水平成分に比べると最大加速度、最大速度の大きい地震動上下成分が観測されてきている。例えば、2008年岩手・宮城内陸地震は逆断層の地震であり、KiK-net 一関西で水平最大加速度 1435(cm/s²)に対して上下成分では、断層永久変位を含む 3866(cm/s²)の大加速度が観測された。内陸地震の正断層の地震においても断層永久変位を含む強震動上下成分が予測される。

そこで本論文では、これまでほとんど研究されてこなかった地震動上下成分の特性を、我が国で最近発生した内陸被害地震の震源断層近傍の強震観測記録を用いて整理する。また震源断層の極近傍での観測記録は極めて少ないことを補うために、剛性行列による地震波動場の合成法を用いて地震動上下成分の特性を調べ、地震動上下成分波形の作成方法を提案する。この上下成分波形の作成方法において用いる因果性位相波に関する研究には和泉ら（1988）^{18), 19)}や野津ら（2009）²⁰⁾などがある。しかし本論文では、因果性位相波の特性を振動数領域と時間領域における線形システム論的解釈を示す。

1.2.3 近傍の強震観測記録と常時微動 H/V スペクトル比を用いた地震動推定法

常時微動の利用は 1950 年代から始まり（Kanai et al. 1954 や Aki 1957）^{21), 22)}、多くの理論的（演繹法的）または観測記録に基づく経験的（帰納法的）研究成果が蓄積されているが、現在でも微動と地震動の関係は解決されていない問題である（堀家 2001）²³⁾。常時微動の H/V スペクトル比（水平動のフーリエ振幅スペクトル/鉛直動のフーリエ振幅スペクトル）と地震時地盤の震動特性に関する中村ら（1986）²⁴⁾の研究以来、H/V スペクトル比と地盤震動特性に関する多くの理論的研究と観測記録に基づく研究がなされてきているが、未だに不明な点も多い（例えば Lachet and Bard 1994, 佐藤 1998, Fah et al. 2001）^{25)~27)}。

このような常時微動を利用した地震動推定法の 1 つとして、常時微動記録と近傍の地震動記録のみを用いて、地盤情報には頼らない地震動推定法が、丸山ら（2001）²⁸⁾によって提案されている。この論文では、2 つの地震記録から数 km 離れた地震動を推定し、0.1 秒から 1 秒の短周期地震動の実記録との整合性が確かめられている。大熊ら（2002）²⁹⁾は、宮崎県内の 20 地点の K-NET 観測点と 32 地点の FDMA(消防庁)観測点の常時微動記録と地震動記録から、丸山ら（2001）²⁸⁾の地震動推

定法の整合性を数十 km 離れた 2 地点間の応答スペクトルによって検討し、手法の有効性を確認するとともに、基準点の選定や鉛直地震動の増幅特性に依存して推定精度が変わることを示している。また、王ら (2006, 2007)^{30), 31)}は、震源特性・伝播特性・表層地盤特性の積として表される地震動のスペクトル特性の定式化により、これらの既往の研究(丸山ら 2001, 大熊ら 2002, 斎田ら 2003)^{28), 29), 32)}の適用性や推定精度並びに、基準点の選定・鉛直地震動の増幅特性の問題についての検討を行った。そして、2 地点間距離が 3~6km と短い宮崎県内の K-NET 観測点と FDMA 観測点の地震動記録と常時微動記録による検討から、推定法の誤差の定量化と誤差におよぼす 2 地点間での鉛直地震動成分の違いの重要性を示した。これらの既往の研究に共通することは、地震動と常時微動の H/V スペクトル比の形状は良く似ており、両者のスペクトル比のピーク振動数(最大振幅を与える振動数)には高い相関が認められるが、振幅の最大値に関しては高い相関がないということである。

原田ら (2008)³³⁾は地盤の卓越振動数によって上下動の増幅特性が大きく変わることを明らかにし、この特性を考慮することにより、短周期地震動の推定精度が向上することを示している。また中村ら (2009)³⁴⁾は、原田ら (2008)³³⁾の推定式において導入された「上下成分の増幅特性を表す係数」と「常時微動と地震動 H/V スペクトル比の違いを表す補正係数」の 2 つの係数を、地点毎に計測することのできる常時微動 H/V スペクトル比の特性から推定し、丸山ら (2001)²⁸⁾や原田ら (2008)³³⁾の地震動推定法の改良を提案している。

1.3 論文の構成

第 2 章では、運動学的断層モデルと水平成層地盤モデルにおける地震波動場の剛性剛列による定式化と 3 重フーリエ変換による 3 次元地震動波形を合成する基礎式の整理を行ない、**第 3 章**で剛性行列による地震動波形合成法の再現性を、横ずれ断層近傍で観測された地震動との比較により検証する。

第 4 章では、9 個の被害地震において断層から 20km 以内の K-NET 観測点で観測された強震記録を用い、道路橋示方書の地盤分類に基づいて 3 種類に分類し、地震動の上下成分と水平成分のフーリエ振幅スペクトル比により地震動上下成分の特性をモデル式として表現している。また、震源断層の極近傍における強震観測記録の不足を補う目的で、**第 2 章**に示した剛性行列による波形合成法を用いて、逆断層型震源断層 10km 四方の地震動波形を求め、断層から 0.5km, 5.0km, 10km の地震動上下成分と水平成分のフーリエ振幅スペクトル比より、断層の極近傍における地震動上下成分の特性を評価する。さらに、波形合成法を用いて、2008 年岩手・宮城内陸地震による KiK-net 一関西観測点で観測された地震動加速度波形から求めた変位波形を再現している。

第5章では、位相波の定義と位相波特性の線形システム論的解釈を示し、この位相波と**第4章**で示した強震観測記録による地震動上下成分と水平成分のフーリエ振幅スペクトル比のモデル式を使い、地震動水平成分波形を用いた地震動上下成分波形の作成方法を示す。

第6章では、この方法を用いた地震動上下成分波形の数値計算例を示し、観測記録との比較を行ない、本方法の検証例を示す。

第7章は、強震観測記録と常時微動 H/V スペクトル比を用いて、地盤の振動数特性を考慮した近傍の地震動推定式の改良を、**第8章**では、その地震動推定法の推定精度の検証例を示す。

第9章は、本論文のまとめと今後の課題を記述する。

参考文献

- 1) 原田隆典, 大角恒雄, 奥倉英世: 3次元直交座標系における波動場の解析解とその地震動波形作成への応用, 土木学会論文集, No.612/1-46, pp.99-108, 1999.
- 2) 王宏沢: 理論的方法による震源断層近傍の地震動特性と長大構造物の応答挙動に関する研究, 宮崎大学大学院工学研究科博士論文(2005年度), 宮崎大学学術情報リポジトリ (<http://hdl.handle.net/10458/674>), 2006.
- 3) 中村真貴, 原田隆典, 王宏沢, 野中哲也: 剛性行列による地震波動場の定式化と断層近傍の変位・速度・加速度波形の試算, 応用力学論文集, Vol.13, pp. 675 – 682, 2010.
- 4) Lamb, H.: On the propagation of tremors at the surface of an elastic solid, *Phil. Trans Roy. Soc., London*, A203, pp.1-42, 1904.
- 5) Bouchon M. : Discrete wave number representation of elastic wave field in three dimensional spaces, *Journal of Geophysical Research*, Vol.84, No.B7, pp.3609-3614, 1979.
- 6) Bouchon M.: Predictability of ground displacement and velocity near an earthquake fault, An example: The Parkfield Earthquake of 1966, *Journal of Geophysical Research*, Vol.84, No.B11, pp.6149-6156, 1979.
- 7) Thomson, W. T.: Transmission of elastic wave through a stratified soil medium, *Journal of Applied Physics*, Vol.21, pp.89-93, 1950.
- 8) Haskell, N. A.: The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, pp.17-34, 1953.
- 9) Chouet, B.: Representation of an extended seismic source in a propagator-based formalism, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No.1, pp.14-27, 1987.
- 10) Kausel, E. and Roësset, J. M.: Stiffness matrices for layered soils, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No.6, pp.1743-1761, 1981.
- 11) Kennet, B. L. N. and Kerry, N. J.: Seismic waves in a stratified half space, *Geophys. J.R. astr. Society*, Vol. 57, pp.557-583, 1979.
- 12) Luco, J. E. and Aspel, R. J.: On the Green's functions for a layered half-space, Part 1, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, No.4, pp.909-929, 1983.
- 13) Chin, R. C. Y., Hedstrom, G. W., and Thigpen, L.: Matrix methods in synthetic seismograms, *Geophys. J.R. astr. Society*, Vol. 77, pp.483-502, 1984.
- 14) Schmidt, H. and Tango, G.: Efficient global matrix approach to the computation of synthetic seismograms, *Geophys. J.R. astr. Society*, Vol.84, pp.331-356, 1986.

- 15) 日本建築学会編：多次元入力地震動と構造物の応答，日本建築学会，1998.
- 16) 原田隆典，野中哲也，児玉喜秀，中村真貴：震源断層近傍の地震動上下成分の解析と上路式鋼アーチ橋の非線形応答挙動，第13回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.4256-4263，2010.
- 17) 児玉喜秀，原田隆典，野中哲也，中村真貴，宇佐美勉：逆断層近傍における上路式鋼トラス橋の応答特性，構造工学論文集，Vol.57A，pp.454-466，2011.
- 18) 和泉正哲，勝倉裕，大野晋：超関数理論に基づくFFT手法を用いた地震動の分離と合成に関する理論的考察，日本建築学会構造系論文報告集，日本建築学会，Vol.390，pp.18-26，1988.
- 19) 和泉正哲，勝倉裕，大野晋：地震動の因数分解に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集，日本建築学会，Vol.390，pp.27-33，1988.
- 20) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震動の生成—，土木学会論文集A，土木学会，Vol.65，No.3，pp.808-813，2009.
- 21) Kanai, K., Tanaka, T. and Osada, K.: Measurement of the microtremor I, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 32, pp.199-209, 1954.
- 22) Aki, K.: Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Wave, with Special Reference to Microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, pp.415-457, 1957.
- 23) 堀家正則：微動の研究について，地震，第2輯，第46巻，pp.343-356，2001.
- 24) 中村豊，上野真：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性の試み，第7回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.256-270，1986.
- 25) Lachet, C. and Bard, P.Y.: Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique, *Journal of Phys. and Earth*, Vol.42, pp.377-397, 1994.
- 26) 佐藤智美，川瀬博，松島信一：微動とS波，P波， coda から求められる地盤特性の違いとその理論的解釈，地震，第52巻，pp.291-318，1998.
- 27) Fah, D., Kind, F. and, Giardini, D.: A theoretical investigation of average H/V ratios, *Geophys. Journal Int.*, Vol.145, pp.535-549, 2001.
- 28) 丸山喜久，山崎文雄，本村均，浜田達也：常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動推定法の提案，土木学会論文集，No.675/I-55，pp.261-272，2001.
- 29) 大熊裕輝，松岡昌志，山崎文雄，原田隆典：宮崎県における常時微動H/Vスペクトル比を用いた地震動の推定，土木学会論文集，No.696/I-58，pp.261-272，2002.
- 30) 王宏沢，原田隆典，斉藤将司：K-NET観測点の記録を利用した近傍の未観測点の強震動推定法，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.12，CD-ROM，pp.434-437，2006.
- 31) 王宏沢，原田隆典，斉藤将司：常時微動H/Vスペクトル比による地震動推定法とその検証例，

土木学会地震工学論文集, pp.123-131, 2007.

- 32) 斎田淳, 松岡昌志, Shabestari, K.T., 山崎文雄: 兵庫県内の強震観測点における地震記録と常時微動を用いた計測震度分布の推定, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.159-168, 2003.
- 33) 原田隆典, 中村真貴, 王宏沢, 斉藤将司: 強震観測点の記録と常時微動 H/V スペクトル比を利用した近傍の未観測点の強震動推定法, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.11, pp.595-602, 2008.
- 34) 中村真貴, 原田隆典, 王宏沢, 斉藤将司: 常時微動 H/V スペクトル比を利用した強震観測点近傍の地震動推定法, 地震工学論文集, 土木学会, Vol.30, pp.65-74, 2009.