

震源断層近傍の地震動上下成分・位相波特性の解析とそれに基づく上下成分波形の作成方法

中村 真貴¹・原田 隆典²・金井 則之³・野中 哲也⁴・児玉 喜秀⁴・本橋 英樹⁴

¹学生会員 宮崎大学大学院 農学工学総合研究科博士後期課程 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)
E-mail: ng1804u@student.miyazaki-u.ac.jp

²正会員 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)
E-mail: harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

³非会員 新日本製鐵株式会社 大分製鐵所生産技術部 (〒870-0992 大分市大字西ノ洲1番地)
E-mail: kanai.noriyuki@nsc.co.jp

⁴正会員 (株)地震工学研究開発センター
(〒889-2155 宮崎市学園木花台西1-1 宮崎大学産学・地域連携センター内)
E-mail: nonaka@eerc.co.jp, E-mail: kodama@eerc.co.jp, E-mail: motohashi@eerc.co.jp

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。そこで本論文では、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スペクトル振幅比の平均値と標準偏差の周期特性を求めた。また、震源断層の極近傍での観測記録は極めて少ない現状を補う目的で、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(0.5km~10km以内)の地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比の特性を求めた。これらのフーリエスペクトル振幅比特性と位相波特性を用いて、地震動水平成分波形が与えられた場合における地震動上下成分波形の作成法と数値計算例を示した。

Key Words : vertical seismic ground motion near fault, phase seismic wave motion, seismic source model, recorded seismic ground motion, simulation of vertical seismic ground motion.

1. はじめに

構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1, 2, 3)。通常の構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、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(本論文では道路

橋耐震設計指針⁴)における地盤分類を採用しI種、II種、III種地盤とする)を考慮して、地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比(|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求めるとする。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スペクトル振幅比の特性を求めた。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スペクトル振幅比の特性を用いて、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との関係を整理する。

次に、地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比特性と位相波特性を用いて、地震動水平成分波形が与えられた場合における地震動上下成分波形の作成方法を提案する。なお、本論文で用いる位相波特性に関

しては、全域通過関数の概念を導入してその特性を研究した和泉らの先駆的研究⁵⁾やスペクトル振幅の平滑化を使った野津らの研究⁷⁾があるが、本論文では、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)の作成方法を示すものとする。なお、構造物の地震時非線形応答の最大値等は、因果性を満たす地震動波形でも満たさない地震動波形でも変わらないと思われるが、構造物の非線形応答解析で求められる多様な地震動波形をフーリエスペクトルによってモデル化して地震動を再現する場合において、物理現象を忠実に再現するための条件として因果性波形

の作成方法を示すものである。

最後に、数値計算例により本方法から作成される地震動上下成分波形が観測記録や断層モデルによる理論的方法から求められる波形の特性を再現できることを示す。

2. 観測記録に基づく震源断層近傍の地震動上下成分の特性

(1) 解析に用いた地震と観測点

本論文では、表-1に示すように2000年から2008年の間に起きた9個の被害地震(内陸地震)において、断層最

表-1 解析で用いた内陸の被害地震とK-NET観測点と地盤分類

地震名 (発生年月日)	気象庁地震規模 M_{JMA}	断層分類	断層最短距離 20km 以内の K-NET 観測点 (道路橋耐震設計指針における地盤種別)
鳥取県西部地震 (2000/10/06)	7.3	横ずれ断層	TTR007(II種), TTR008(III種), TTR009(II種), SMN015(II種)
芸予地震 (2001/03/24)	6.4	正断層	HRS019(III種), EHM007(II種)
宮城県沖の地震 (2003/05/26)	7.0	逆断層	MYG001(II種), MYG002(I種), IWT008(I種)
宮城県北部の地震 (2003/07/23)	6.2	逆断層	MYG007(I種), MYG010(III種), MYG012(III種)
新潟中越地震 (2004/10/23)	6.8	逆断層	NIG017(II種), NIG019(II種), NIG020(II種), NIG021(II種)
福岡県西方沖地震 (2005/03/20)	7.0	横ずれ断層	FKO006(III種), FKO007(II種)
能登半島沖地震 (2007/03/25)	6.9	逆断層+横ずれ断層	ISK003(I種), ISK005(III種), ISK006(I種)
新潟中越沖地震 (2007/07/16)	6.8	逆断層	NIG016(II種), NIG018(III種)
岩手・宮城内陸地震 (2008/06/14)	7.2	逆断層	AKT023(II種), IWT010(I種), IWT011(II種), MYG004(I種), MYG005(I種)

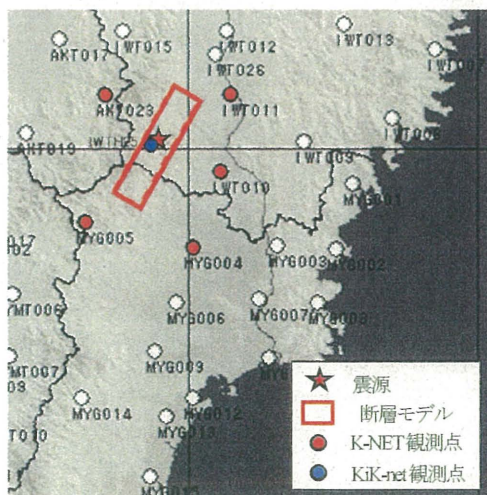


図-1 2008年岩手・宮城内陸地震の断層位置と用いた K-NET 観測点と KiK-net 一関西観測点位置

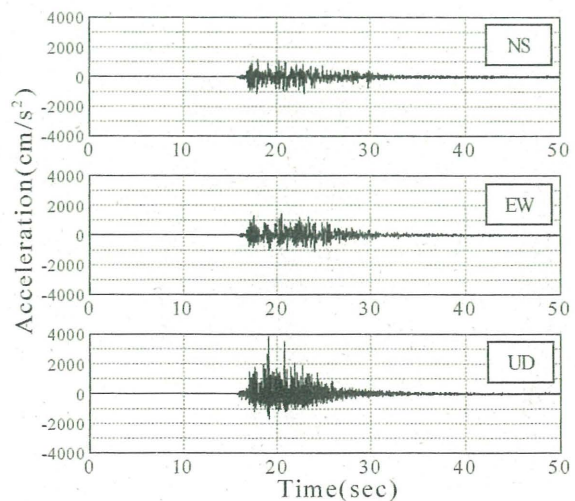


図-2(a) KiK-net 一関西観測点で観測された地震動加速度波形

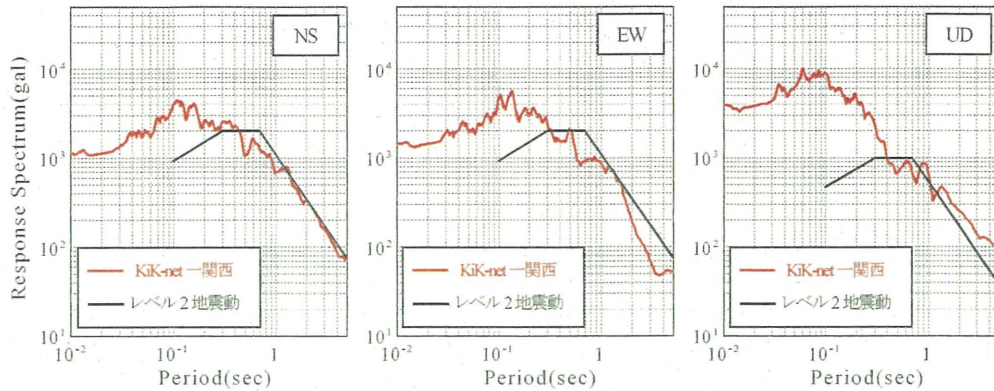


図-2(b) KiK-net 一関西観測点で観測された地震動の加速度応答スペクトル (減衰定数 $h=0.05$) とレベル2水平地震動の加速度応答スペクトルとその50%を上下成分の加速度応答スペクトル

短距離が20Km以内の28のK-NET観測点で観測された加速度記録を用いた。図-1は2008年岩手・宮城内陸地震の断層位置と用いたK-NET観測点とKiK-net一関西観測点の位置を示す。図-2(a)と図-2(b)は、KiK-net一関西観測点で観測された地震動加速度波形とその5%減衰定数に対する加速度応答スペクトルを示す。図-2(b)の加速度応答スペクトル図には、3本の直線からなる道路橋耐震設計用のType IIのI種地盤 (内陸型地震動の硬質地盤) におけるレベル2水平地震動の加速度応答スペクトルとその50%を上下成分の加速度応答スペクトルとしてプロットしている。このような道路橋耐震設計用のレベル2地震動の加速度応答スペクトルと比較すると、KiK-net一関西観測点は逆断層直上に位置しており、水平最大加速度 $1435(\text{cm/s}^2)$ に対して上下成分では、断層永久変位を含む $3866(\text{cm/s}^2)$ の大加速度が観測されているものの、周期約0.4秒より長周期側では、道路橋耐震設計用のレベル2水平地震動の加速度応答スペクトルとほぼ同じであり、上下成分ではやや大きめであることがわかる。次節で示す震源断層近傍の地震動上下成分の平均的特性を解析するためには、28のK-NET観測点の記録のみを用いた。

(2) 地震動上下成分の特性

表-1に示す断層最短距離が20Km以内の28のK-NET観測点での加速度記録から、地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比 ($|V(T)|/|H(T)|$: T = 地震動の周期) を計算し、その平均値と標準偏差を求めた。このフーリエスペクトル振幅比の計算では、観測点の表層地盤特性を考慮するために、道路橋耐震設計指針における地盤分類⁹⁾を採用し、I種 ($T_G < 0.2$ 秒), II種 ($0.2\text{秒} < T_G < 0.6$ 秒), III種 ($T_G > 0.6$ 秒) の3種類の地盤毎に整理した。ここに、 T_G は地盤の卓越周期を表す。表-1の28の観測点の地盤分類は各観測点番号の後に (I種) 等で示している。地盤分類毎の観測点数は、

I種地盤で8, II種地盤で13, III種地盤では7地点となっている。なお、水平成分 $|H(T)|$ は東西, 南北方向の2つの水平成分のフーリエスペクトル振幅の二乗和平方として計算した。

図-3~図-5は、地盤分類毎の地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比の「平均値」と「平均値+標準偏差」、「平均値+2×標準偏差」をプロットしたものである。フーリエスペクトル振幅比の計算は、バンド幅0.1Hzのパーゼンウィンドウによる平滑化を行った。

図-3に示すI種地盤での地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比では、 $T = 0.06$ 秒で最大となり、周期が長くなるにつれて減少するが、 $T = 0.13$ 秒辺りよりほぼ一定となる傾向が読み取れる。なお、 $T = 0.06$ 秒より短周期側のフーリエスペクトル振幅比は最大値よりも小さくなっている。このような短周期側のスペクトル比の低下については、K-NET観測点の基礎形状と地盤の動的相互作用の影響が現れるもの⁸⁾と考えられ、自然地盤の地震動とは異なる。したがって、本論文では、 $T = 0.06$ 秒より短周期側のスペクトル比は、一定値として与えるものとする。

以上のI種地盤での地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比の特性は、図-4と図-5に示すII種地盤とIII種地盤での地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比の特性とも同じであることがわかる。しかし、地盤分類が違えば、スペクトル値の最大値や最大値が生じる周期、周期によるスペクトル比の減少率、スペクトル値が一定となる周期が違うことがわかる。

フーリエスペクトル比の平均値の特性でみると、最大値はI種, II種地盤で1.4と変わらないが、III種地盤では2.3と大きくなっている。最大値が周期とともに減少し始める周期では、I種地盤が最も短く0.06秒から減少するが、II種とIII種地盤ではやや長い0.09秒で減少し始めている。また、減少して一定値となる周期は、I種地

盤で0.15秒, II種地盤で0.25秒, III種地盤で1.0秒のように地盤が軟らかくなるにつれて長くなる. なお, 地盤種別毎の短周期側を一定値とする妥当性については今後十分に検討しなければならないが, 現時点では地盤種別を問わず, 適用範囲を $T = 0.03$ 秒~5秒の周期帯とするものとする.

以上のようなスペクトル比の平均値と標準偏差を用いて, スペクトル比の「平均値 + $m\sigma_{FJ}$ 」 (σ_{FJ} : J 種地盤での標準偏差) を, 次式のようにモデル化した.

I種地盤の地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比:

$$E \left[\frac{|V(T)|}{|H(T)|} \right] + m\sigma_{FI} \quad (1)$$

$$= \begin{cases} 1.4 + m\sigma_{FI} & 0.03 \leq T \leq 0.06 \\ (1.4 + m\sigma_{FI}) \left(\frac{0.06}{T} \right)^2 & 0.06 \leq T \leq 0.13 \\ (1.4 + m\sigma_{FI}) (0.46)^2 & 0.13 \leq T \leq 5 \end{cases}$$

ここに, $\sigma_{FI} = 0.7$. 上式で $m = 0$ とすると, スペクトル比の平均値が求められる.

II種地盤の地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比:

$$E \left[\frac{|V(T)|}{|H(T)|} \right] + m\sigma_{FII} \quad (2)$$

$$= \begin{cases} 1.4 + m\sigma_{FII} & 0.03 \leq T \leq 0.09 \\ (1.4 + m\sigma_{FII}) \left(\frac{0.09}{T} \right)^{1.5} & 0.09 \leq T \leq 0.25 \\ (1.4 + m\sigma_{FII}) (0.36)^{1.5} & 0.25 \leq T \leq 5 \end{cases}$$

ここに, $\sigma_{FII} = 1.0$.

III種地盤の地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比:

$$E \left[\frac{|V(T)|}{|H(T)|} \right] + m\sigma_{FIII} \quad (3)$$

$$= \begin{cases} 2.3 + m\sigma_{FIII} & 0.03 \leq T \leq 0.09 \\ (2.3 + m\sigma_{FIII}) \left(\frac{0.09}{T} \right) & 0.09 \leq T \leq 1.0 \\ (2.3 + m\sigma_{FIII}) (0.09) & 1.0 \leq T \leq 5 \end{cases}$$

ここに, $\sigma_{FIII} = 1.3$.

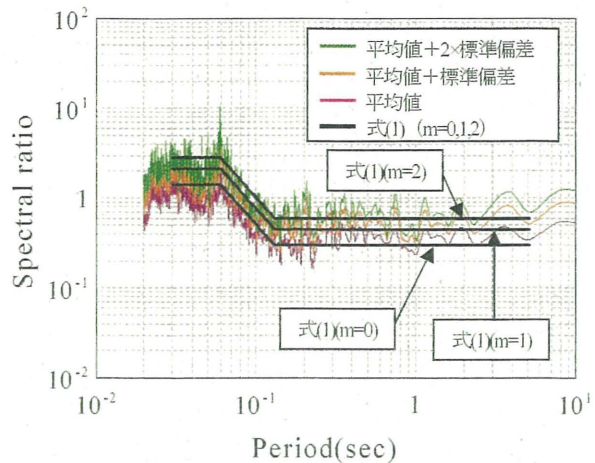


図-3 地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比 (I種地盤)

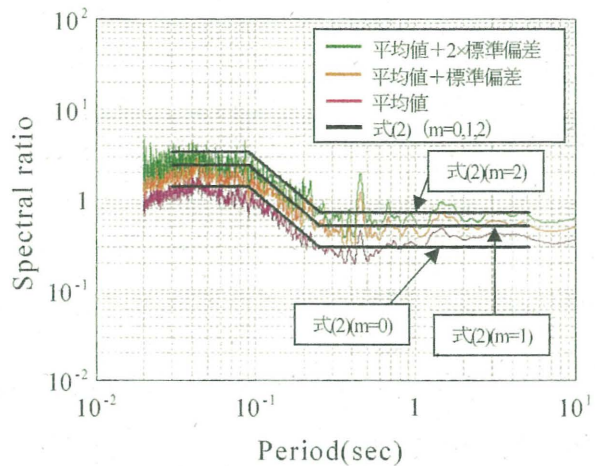


図-4 地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比 (II種地盤)

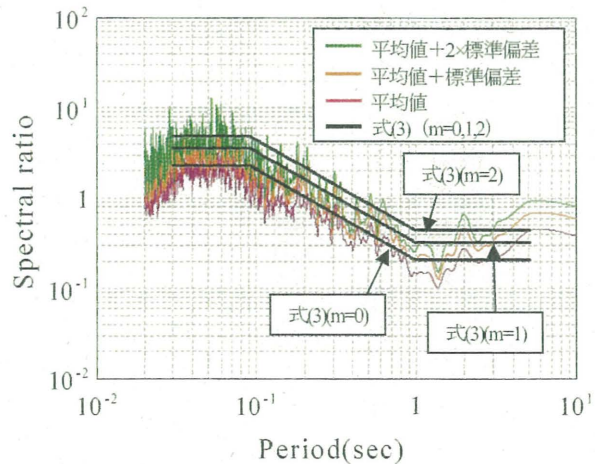


図-5 地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比 (III種地盤)

図-3~図-5には, 観測記録の「平均値」, 「平均値 + 標準偏差」, 「平均値 + 2×標準偏差」と, 式(1)~式(3)を比較しているが, 式(1)~式(3)が観測記録の特性をよ

く近似していることがわかる。なお、これらの結果は、今後、被害地震の断層近傍の強震動の記録の蓄積によって、変更されるべきものである。

実線の緑色、青色、赤色は、それぞれ断層線から 0.5km、5km、10km の地点における地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比を示す。

3. 断層モデルに基づく震源断層近傍の岩盤における地震動上下成分の特性

(1) 解析で用いた逆断層・地盤系モデルと方法

ここでは、地震動上下成分が大きくなると考えられる逆断層を想定し、図-6に示すように地盤モデルは逆断層を含む半無限地盤上に1層の表層地盤の厚さ(0km, 0.5km, 1.5km)を変えた3ケースの逆断層・地盤系とした。逆断層のマグニチュードは6.5を想定し、表-2にその逆断層の断層パラメータを示す。また、表-3に地盤の物性値を示す。これらの物性値による表層地盤の影響は、2Hz以下の長周期領域(0.5秒以上)の地震動特性を見るためのものである。逆断層の傾斜角は45度と60度の2ケースを仮定した。図-7に示すような震源断層上端の位置を地表面に投影した位置は直線となりこれを断層線という。ここでは、図-7に示すように逆断層の断層線の中央を横断する20kmの直線上(上盤側と下盤側のそれぞれ10km区間)の0.5km, 5km, 10km地点の合計6地点(上盤側と下盤側のそれぞれ3地点)の地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比を計算し(周期0.5秒以上を計算対象領域とした)、その特性を調べた。なお、表層地盤の物性値は表-3のように固定したが、今後0.5秒以上の長周期帯においても物性値の影響を調べ、より普遍的な特性について検討する必要がある。

地震動の作成としては、厳密な理論的方法を用いた。具体的には、原田らの方法⁹⁾¹³⁾を使って、運動学的断層モデルと水平成層地盤の剛性行列によって解析的に求められる振動数・波数領域の地震波動場を3重逆フーリエ変換して理論的に断層永久変位を含む地震動波形を合成した。詳細な作成方法については、文献9)~13)を参照されたい。なお、採用した理論的評価法の検証については、参考文献10)~12)で示され、実現象を再現できる精度の高いものとなっている。

(2) 震源断層モデルによる断層近傍の岩盤における地震動上下成分の特性

図-8は、周期0.5秒から5秒の周期帯における地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比をプロットしたものである。この図に示すように、逆断層の傾斜角45度と60度における上盤と下盤のそれぞれ3地点のフーリエスペクトル振幅比を左側と右側の図に示している。また、上段、中段、下段の図は表層地盤の厚さが0km, 0.5km, 1.5kmの3ケースの結果である。各図中の

表-2 解析で用いた逆断層の断層パラメータ

地震モーメント M_0 ($N \cdot m$)	2.23×10^{10}
立ち上がり時間 τ (s)	0.3
断層の長 L (km)	8.5
断層の幅 W (km)	8.5
断層破壊速度 v_r (km/s)	2.2
断層の走行方向 ϕ ($^\circ$)	0.0
断層面の傾斜角 δ ($^\circ$)	45.0 or 60.0
すべり方向 λ ($^\circ$)	90.0

表-3 解析で用いた地盤物性値

物性値	表層地盤	半無限地盤
表層地盤厚さ (m)	0 or 0.5 or 1.5	—
P波速度 (km/s)	2.8	6.0
S波速度 (km/s)	1.6	3.5
密度 (kg/m^3)	2300	2800
Q値	150	400

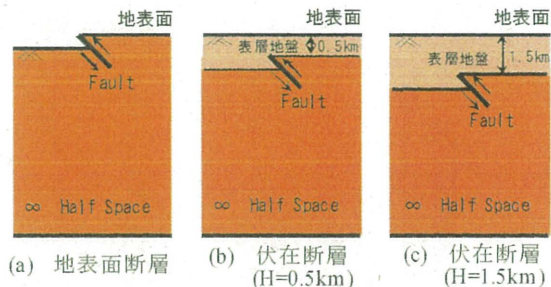


図-6 解析で用いた逆断層・地盤系モデル

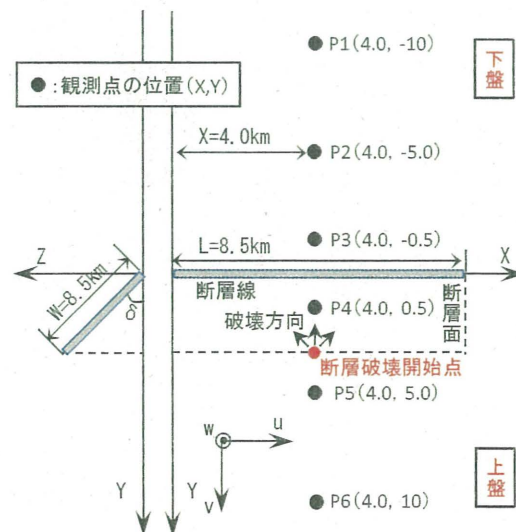


図-7 逆断層と観測点の位置

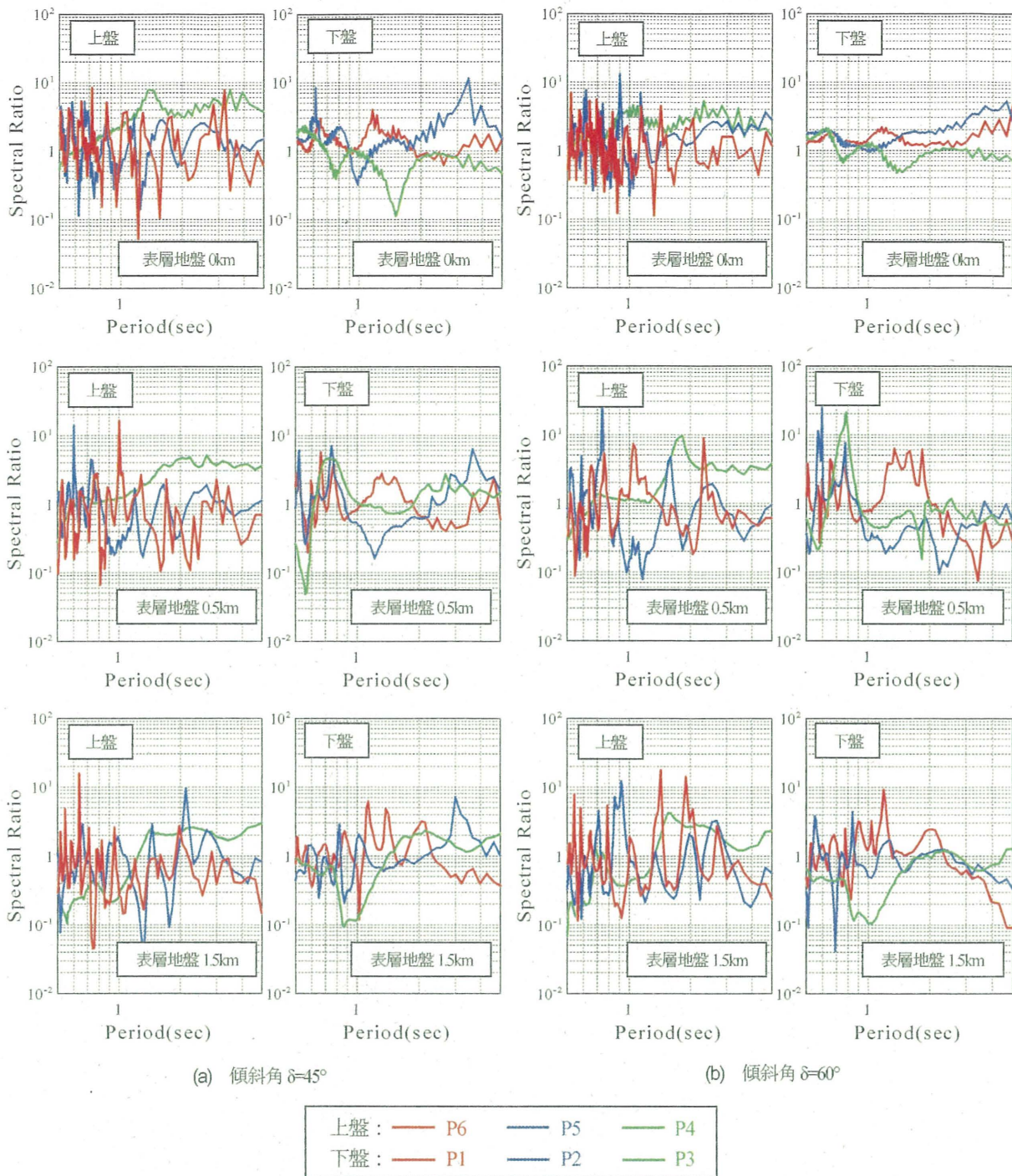


図-8 理論的方法で計算した逆断層近傍での地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比 (傾斜角 45 度と 60 度, 上盤と下盤の各 3 地点, 表層地盤厚 0 km と 0.5 km と 1.5 km)

図-8から、表層地盤の厚さと逆断層の傾斜角に依らず共通的なフーリエスペクトル振幅比の特徴は、上盤側と下盤側でその特徴が異なることである。すなわち、上盤では、断層線からの距離に近い0.5kmと5kmの2地点の地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比(緑色と青色の実線)は1以上(特に1.0秒以上の周期帯)となる周期帯が多くなるが、断層線から10kmと遠くの

地点のフーリエスペクトル振幅比(赤の実線)は1以下の周期帯が多くなる。しかし、下盤では、断層線からの距離が少し遠い5kmと10kmの2地点のフーリエスペクトル振幅比(青色と赤色の実線)は、1以上または1以下の周期帯が不規則に現れているのに対し、極近い0.5kmの地点(緑色の実線)のみで、1以下の周期帯が多くなっている(表層地盤の厚さが0kmの場合には1以下であり、

表層地盤の厚さが大きくなるにつれ1以上の周期帯が現れている).

図-8に示すように、逆断層・地盤系モデルを想定し理論的方法によって求めた地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比は、上盤と下盤並びに、表層地盤の厚さと逆断層の傾斜角、断層線からの距離によって変わるが、約0.5秒以上の周期帯において、スペクトル振幅比が1以上の周期帯があることがわかる。例えば、図-8(a)の表層地盤厚さ1.5kmのP4地点(断層線から500m地点、図-7参照)の水平成分(v方向)と上下成分(w方向)の変位波形は、図-A(付録)に示すように大きな上下変位波形が求められている。このことは、2章で示した既往の強震観測記録に基づく平均的なスペクトル振幅比が約0.5秒以上では全て1以下であることとは異なるため、特に、逆断層近傍のように地震動上下成分が水平成分よりも大きくなる場合には、震源断層・地盤系モデルによる理論的方法から地震動を評価する必要性を示している。

(3) 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net-関西の観測地震動上下成分の特性と震源断層モデルによる特性の比較

ここでは、上記(2)項で示した震源断層モデルによる地震動上下成分の特性と2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net-関西の地表面での観測地震動上下成分の特性を比較する。

まず、0.5秒以上の周期帯を対象として、KiK-net-関西の地表面での観測地震動加速度波形から振動数領域における積分を行なって求めた変位波形と震源断層モデルによる変位波形の比較を行ない、その結果を図-11に示す。断層モデルによる変位波形は、断層による岩盤の永久変位を含む変位波形の特性をよく再現していることがわかる。なお、ここで用いた逆断層・地盤系モデルとしては、KiK-net-関西の観測点が、震源断層上に位置するため(図-2(a)参照)、最も近いアスペリティを参考¹⁴⁾にして図-9のようにモデル化した。半無限地盤内の逆断層を仮定し、それらの断層パラメータと地盤物性値を表-4と表-5に示す。また、震源断層のすべり時間関数は、表-4と表-5に示す断層パラメータと地盤物性値を固定して、すべり時間関数のみを未知数として、マルカート法¹⁵⁾を用いて、KiK-net-関西の観測変位波形と計算変位波形の3成分の振動数領域での誤差の二乗和が最小になるように推定した(図-10)。今後は、断層パラメータや地盤モデルの影響について順解析から検討し、計算波形と観測波形がより一致したモデルの推定を行う予定である。

次に、観測記録と断層モデルによる地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比を比較した。その結果は図-12に示すように観測記録の特性を再現してい

表-4 観測記録との比較で用いた逆断層の断層パラメータ

	断層①	断層②
地震モーメント M_0 ($N \cdot m$)	1.48×10^{18}	5.55×10^{17}
断層の長 L (km)	5.6	2.1
断層の幅 W (km)	7.7	
断層破壊速度 v_r (km/s)	2.8	
断層の走行方向 ϕ ($^\circ$)	209.0	
断層面の傾斜角 δ ($^\circ$)	50.0	48.0
すべり方向 λ ($^\circ$)	104.0	

表-5 観測記録との比較で用いた地盤の物性値

物性値	表層地盤	半無限地盤
表層地盤厚さ (km)	0.4	—
P波速度 (km/s)	3.0	6.0
S波速度 (km/s)	1.8	3.5
密度 (kg/m^3)	2300	2800
Q値	150	400

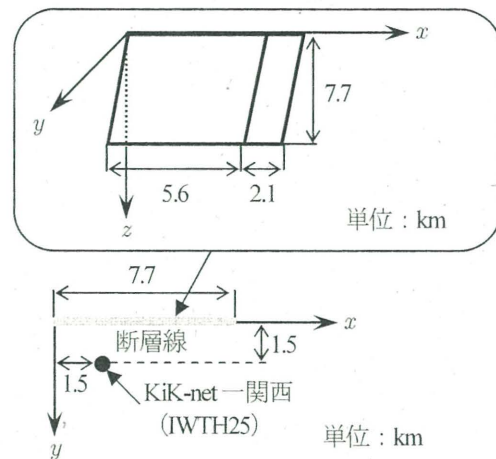


図-9 震源断層のモデル図と KiK-net-関西観測点と震源断層の位置関係

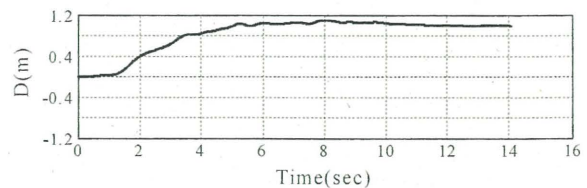


図-10 2008年岩手・宮城内陸地震の再現波形で用いたすべり時間関数D

る。ただし、周期3秒~4秒では観測記録の特性が大きく現れているものの、その他の周期帯では断層モデルによるスペクトル振幅比は、やや観測記録の特性よりも大きめとなっている。この原因は、図-11に示す変位波形の比較からわかるように断層モデルによる水平変位波形は観測波形よりもやや過小評価しているため、地震動上下

成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比では、断層モデルによる結果の方が大きめに評価されることによる。一般に、図-11に示すような波形の再現性はあるといえるが、図-12に示すスペクトル振幅比ではこの程度の違いが見られる。前述したように断層パラメータや地盤モデルを変えてより精度の高い再現を試みる。本論文では0.5秒以上の長周期帯を対象としているが、表層地盤の厚さや物性値に関しては、実測データを基に詳細な物性値を考慮することも課題である。

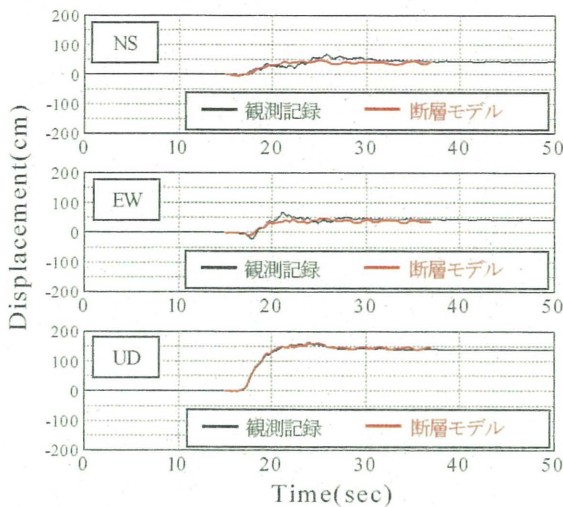


図-11 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西の地表面での観測加速度記録の積分で求めた変位波形と断層モデルによる変位波形の比較

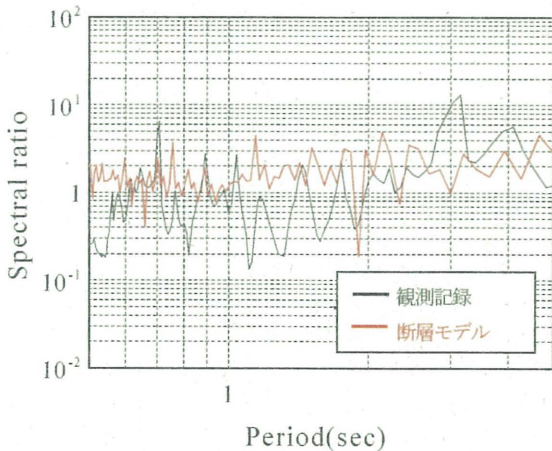


図-12 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西の地表面での観測加速度記録と断層モデルによる地震動上下成分と水平成分(EW成分)のフーリエスペクトル振幅比の比較

4. 位相波特性の線形システム論的解釈

因果性を満たす地震動波形 $f(t)$ のフーリエスペクト

ル $F(\omega)$ を次式のように定義するものとする。

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} f(t)e^{i\omega t} dt \quad (4a)$$

ここに、因果性を満たす波形 $f(t)$ は次式のような時間領域で与えられるものとする。

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ f(t) & 0 \leq t < \infty \end{cases} \quad (4b)$$

ここで、フーリエスペクトル $F(\omega)$ を次式のように極座標表示し、振幅スペクトル $|F(\omega)|$ と位相スペクトル $\theta(\omega)$ で表すものとする。

$$F(\omega) = |F(\omega)|P(\omega) \quad (5)$$

ここに、 $P(\omega) = e^{-i\theta(\omega)}$ で位相波スペクトル $P(\omega)$ と定義すると、フーリエスペクトル $F(\omega)$ は、振幅スペクトルと位相波スペクトルの積として与えられるものと解釈できる。このことを線形「System」に入力「Input」が作用する時の応答「Output」に関する振動数領域の関係として線形システム論的に整理すると、振幅スペクトル $|F(\omega)|$ が「Input」特性、位相波スペクトル $P(\omega)$ が「System」特性を表し、フーリエスペクトル $F(\omega)$ が「Output」特性に対応する。また、次式のように位相波スペクトルのフーリエ変換から求められる波形を位相波 $p(t)$ と呼ぶこととする。

$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(\omega t + \theta(\omega))} d\omega \quad (6)$$

上式において、 $\theta(\omega)$ が 0 から 2π の範囲で一様確率密度関数に従うランダム変数である場合、位相波 $p(t)$ は定常ホワイトノイズとなる^{例えは10)}ため、非因果性波形となる。また、 $\theta(\omega)$ は因果性波形 $f(t)$ の位相スペクトルであり、上記のような一様ランダム変数ではないので、位相波 $p(t)$ には因果性波形 $f(t)$ の位相特性が含まれているが、振幅スペクトルを $|F(\omega)| = 1$ としているため、定常ホワイトノイズの特徴も有するものと考えられる。このことは、図-16(後で説明する)に示すように因果性波形 $f(t)$ として、2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西での地震動加速度波形上下成分を使って

位相波 $p(t)$ を計算した位相波からも確かめられる. すなわち, 位相波 $p(t)$ は, 因果性波形 $f(t)$ の波形特性を有するが, $f(t)$ のような因果性波形ではなく, 非因果性波形である.

以上のような位相波に関する特性を線形システム論的關係として振動数領域と時間領域で整理すると, 図-13 のようになる. 振幅スペクトル $|F(\omega)| = 1$ に対応する時間領域の関数は, 図-13 に示すようにデルタ関数 $\delta(t)$ となるため, 「Output」はシステム特性と同じ位相波となってしまう, 非因果性波形となる. したがって, 因果性位相波に改良するためには, 振幅スペクトル $|F(\omega)|$ に対応する「Input」特性を改善する方法しかないことになる.

そこで, 振幅スペクトル $|F(\omega)|$ のリップルを残しつつ, 考察する範囲の全ての振動数で振幅スペクトルを 1 に近似する方法として, 振幅スペクトル $|F(\omega)|$ に適当なバンド幅のスムージングを実施した振幅スペクトル $|\tilde{F}(\omega)|$ を作成して, $|F(\omega)| = 1$ の代わりに, $|F(\omega)| / |\tilde{F}(\omega)|$ (基準化振幅スペクトルと呼ぶこととする) を用いる.

図-14 は, パーゼンウインドウのバンド幅を 0.1Hz と 1.0Hz とした時の $|F(\omega)| / |\tilde{F}(\omega)|$ をプロットしたものであり, 振幅スペクトル $|F(\omega)|$ のリップルを残しつつも, 振幅スペクトルを 1 に近似できていることがわかる. また, $|F(\omega)| / |\tilde{F}(\omega)|$ に対応する時間領域の関数 $\tilde{f}(t)$ を描くと図-15 のように時間 $t = 0$ で大きな振幅を持つデルタ関数 $\delta(t)$ の特性を有するが, 振幅スペクトル $|F(\omega)|$ のリップルに対応する時刻歴波形が付け加わっている. この時間領域の関数 $\tilde{f}(t)$ を重みとした位相波 $p(t)$ の積分によって新しい位相波 $\tilde{p}(t)$ が求められる.

図-16は, 因果性を満たす地震動記録とその非因果性位相波 $p(t)$ (Band=0Hz) 並びに, 因果性位相波 $\tilde{p}(t)$ (Band=0.1Hz, 1.0Hz) を示す. この図からわかるように, バンド幅が大きい方がより因果性を満たす位相波となつ

ている. 付録の図-Bに示すように, バンド幅が2.0Hz, 3.0Hz, 4.0Hz と大きくなると, 因果性は満たされるが, 波形の振幅が少しずつ変わってくるのがわかる. そこで, 以後ではバンド幅=1.0Hzを用いるものとする.

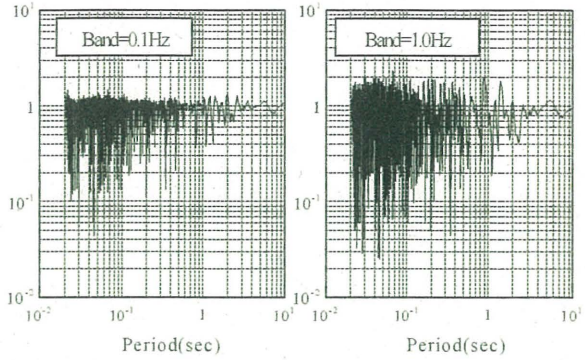


図-14 バンド幅0.1Hzと1.0Hzを使った基準化振幅スペクトル

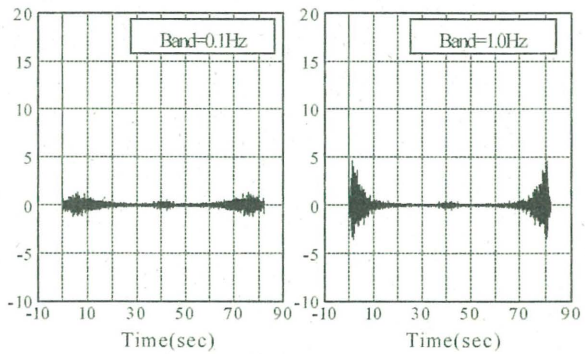


図-15 基準化振幅スペクトルの時間領域の関数

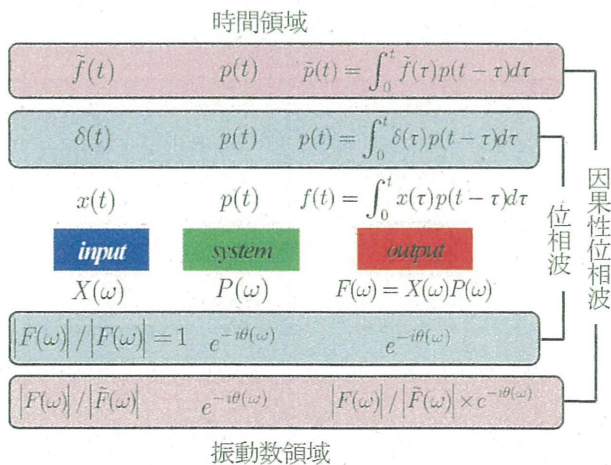


図-13 振動数領域と時間領域における位相波の線形システム論的關係

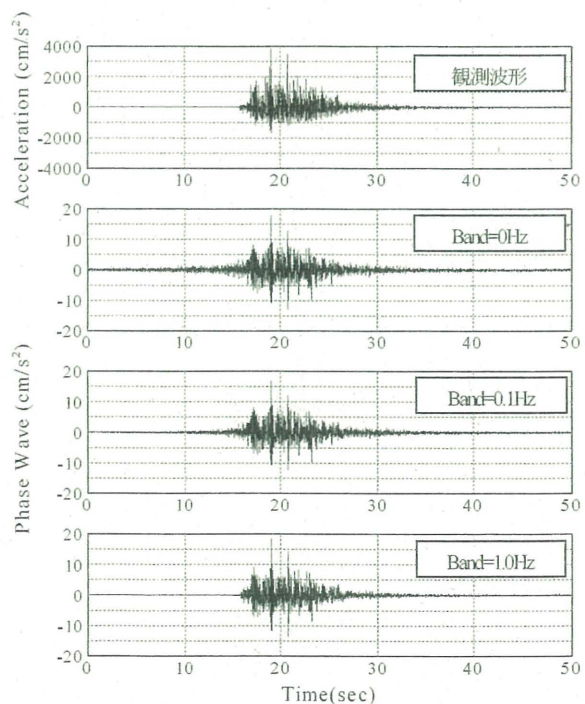


図-16 Kik-net一関西の観測加速度波形(上下成分)から求めた位相波 (Band=0Hz, 0.1Hz, 1.0Hz) (付録図-B参照)

5. 地震動上下成分波形の作成方法と数値計算例

これまでの設計用入力地震動としては、地震動水平成分のみが与えられる場合が多いが、上下成分波形を考慮した構造物の非線形応答解析が必要な場合を想定し、ここでは、地震動水平成分の振幅フーリエスペクトルと適切な観測強震動上下成分の位相特性を反映した地震動上下成分波形の作成方法と数値計算例を示す。

地震動上下成分加速度波形は次式のようなフーリエ変換によって求めることができる。

$$a_V(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_V(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (7a)$$

ここに、振動数 ω と周期 T の関係 $\omega = 2\pi/T$ を用いて、地震動上下成分加速度波形のフーリエスペクトルを次式のように与える。

$$A_V(\omega) = \left(E \left[\begin{array}{c} V(\omega) \\ H(\omega) \end{array} \right] + m\sigma_{FJ} \right) \left| \tilde{H}_D(\omega) \right| \left(\begin{array}{c} F_V(\omega) \\ \tilde{F}_V(\omega) \end{array} \right) \quad (7b)$$

式(7b)の右辺第1項は、式(1)~式(3)で与えられる地盤分類毎の地震動上下成分と水平成分の振幅スペクトル比を表す。第2項の $|\tilde{H}_D(\omega)|$ は設計入力地震動水平成分の平滑化処理した振幅スペクトル、第3項は適切な観測強震動上下成分の因果性位相スペクトルを表す。4章で示したように基準化振幅スペクトルを用いているため、その時間領域の時刻歴波形である位相波は因果性位相波となる。また、式(7b)の右辺第2項の水平成分のスペクトル振幅を平滑化しているため、式(7b)で与えられる地震動上下成分のフーリエスペクトルから求められる時間領域の地震動上下成分波形は因果性波形となる(計算波形の図-18を参照)。

以上のような地震動上下成分波形の作成方法の数値計算例として、2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西の観測地震動上下成分の位相特性を反映した地震動上下成分波形を作成する。図-17はKiK-net一関西において観測された地震動加速度波形から求めた地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比(赤実線)と、式(1)で与えられるI種地盤の「平均値+2×標準偏差」(m=2)および「平均値+3×標準偏差」(m=3)、「平均値+4×標準偏差」(m=4)(黒実線)の比較を表す。図-17より「平均値+3×標準偏差」や「平均値+4×標準偏差」のほうがより観測記録のスペクトル振幅比に近いことがわかる。そこで、地震動上下成分波形の作成においては、「平均値+(3~4)×標準偏差」を使うものと

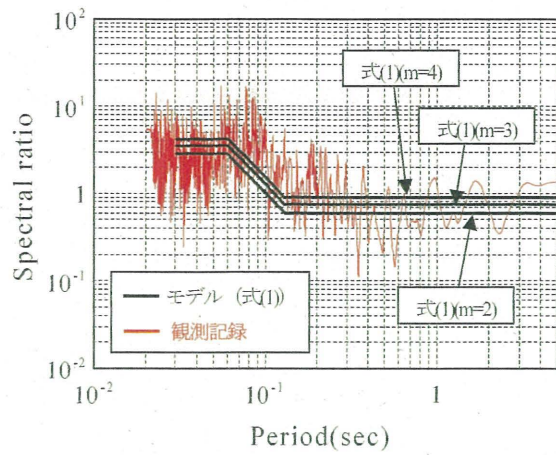


図-17 KiK-net一関西の観測加速度波形から求めた地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比と波形合成に用いた振幅比モデル(式(1))の比較

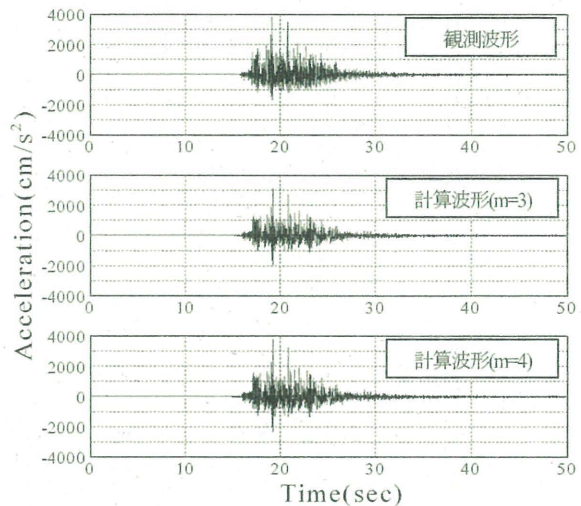


図-18 作成した地震動上下成分波形とKiK-net一関西の観測加速度波形の比較

する。また、設計用入力地震動水平成分としては、KiK-net一関西の観測地震動水平NS成分を用いた。

図-18に作成した地震動上下成分波形とKiK-net一関西の観測地震動上下成分の比較を示す。図-18は上段に観測地震動加速度波形を、下段に作成した地震動上下成分を表している。図から、観測記録上下動成分の位相特性を反映した地震動上下成分波形が再現できていることがわかる。また、「平均値+3×標準偏差」と「平均値+4×標準偏差」を用いて計算した地震動上下成分波形を比較すると、振幅の正方向では「平均値+4×標準偏差」を用いた場合の方が、負方向では「平均値+3×標準偏差」を用いた場合の方が観測記録を再現できている。なお、この例のように断層極近傍の記録に対して式(1)~(3)のような記録の統計処理による推定式を使う場合には、断層極近傍の観測記録の不足があり、この不足を補うために

示した3章の断層モデルによる断層極近傍のスペクトル振幅比は、観測記録によるものよりも大きくなる傾向があるため、「平均値 + (3~4) × 標準偏差」程度を使うのが適切であろう。

6. まとめ

本論文では、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と震源断層・地盤系モデルによる理論的地震動作成方法を用いて、地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比を求め、その振幅比と位相波特性を使った地震動上下成分波形の作成方法を示した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 強震観測記録から、表層地盤特性(道路橋耐震設計指針の地盤分類: I種, II種, III種地盤)を考慮して、地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比の平均値と標準偏差の周期特性の評価式を求めた。
- (2) 震源断層近傍の強震動観測記録を補完する目的として逆断層・地盤系モデルによる理論的に作成した地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比を求め、上盤と下盤でその特性が異なることを明らかにした。また、断層からの最短距離が0.5kmと近い観測点では、フーリエスペクトル振幅比が1以上になり、上下成分が水平成分に比べ大きくなることを示した。これらのフーリエスペクトル振幅比の特性は、上盤側と下盤側で異なり、また表層地盤の厚さと逆断層の傾斜角、断層線からの距離によって変わること示した。
- (3) 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西の観測地震動上下成分の特性と震源断層モデルによる特性を比較し、理論的方法による再現性を示した。
- (4) 非因果性位相波と因果性位相波の特性を線形システムのフィルター理論により解釈し、因果性位相波の作成法を示した。
- (5) 地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比の評価式と位相波の考え方を用いて、与えられた地震動水平成分から適切な地震動上下成分の位相特性を有する地震動上下成分波形を作成する方法を提案し、数値計算例から方法の妥当性を示した。

謝辞: 本論文の観測波形の解析に当たっては、独立行政法人 防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの観測記録と震源メカニズム解を利用させて頂きました。記して御礼申し上げます。

付録

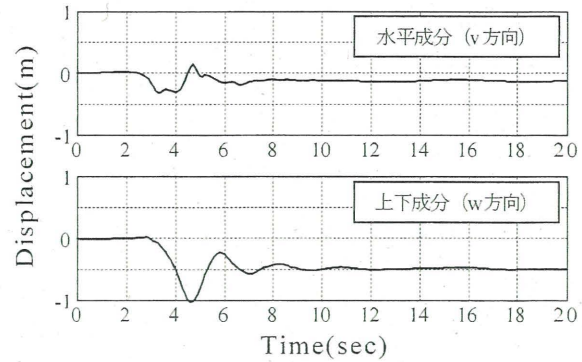


図-A 断層面の傾斜角 $\delta = 45^\circ$ における表層地盤厚さ 1.5km の P4 地点の変位波形

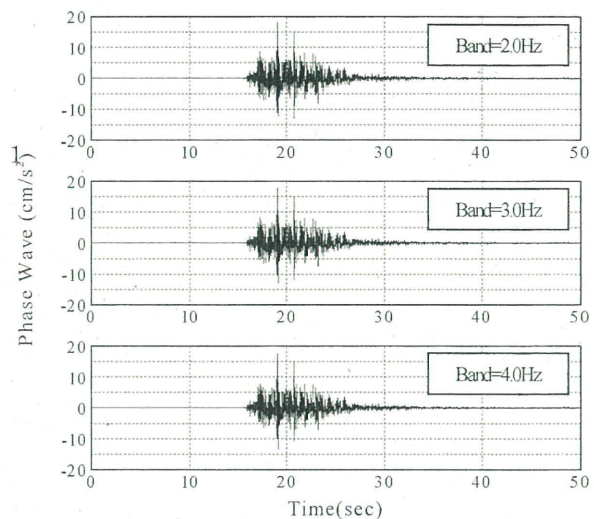


図-B KiK-net 一関西の観測加速度波形(上下成分)から求めた位相波(Band=2.0Hz, 3.0Hz, 4.0Hz)(図 16 参照)

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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, CDROM, pp.4256-4263, 2010.
- 3) 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.
- 4) (社) 日本道路協会: 道路橋指方書・同解説, V 耐震設計編, 2002.
- 5) 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, Vol.390, pp.18-26, 1988.

- 6) 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, Vol.390, pp.27-33, 1988.
- 7) 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, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
- 8) 河本悠歩: 地震観測記録に及ぼす地震計基礎形状及び周辺環境の影響に関する研究—構造物と地盤との動的相互作用解析に基づいて—, 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻博士前期課程研究論文, <http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/~fukuwa/paper-pdf/ajj2007/kawamoto.pdf>, 2007.
- 9) 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波形作成への応用, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.99-108, 1999.
- 10) 原田隆典, 王宏沢: 剛性マトリックスによる水平成層地盤の波動解析, 地震, 第 57 巻, 日本地震学会, pp.387-392, 2005.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 原田隆典: 震源断層から一貫して捉えた地盤・基礎・長大構造物系の応答評価とその予測法, 平成 16 年~平成 18 年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2)研究成果報告書, 宮崎大学工学部, 宮崎大学学術情報リポジトリ, <http://hdl.handle.net/10458/1054>, 2007.
- 14) Suzuki, W., Aoi, S., Sekiguchi, H.: Rupture process of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake derived from near-source strong-motion records, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 1, pp.256-266, 2010.
- 15) 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, pp.95-104, p.147, 1982.
- 16) Shinozuka, M., Deodatis, G., Harada, T.: Digital simulation of seismic ground motion, *Stochastic Approaches in Earthquake Engineering*, Edited by Lin, Y.K. and Minai, R., Springer Verlag, pp.252-298, 1987.

(2011. 12. 15 受付、2012. 3. 16 修正、2012. 3. 16 受理)

ANALYSIS OF VERTICAL GROUND MOTIONS AND PHASE MOTIONS OF NEAR FAULT RECORDS IN JAPAN AND ITS APPLICATION TO SIMULATION OF VERTICAL GROUND MOTIONS

Masaki NAKAMURA, Takanori HARADA, Noriyuki KANAI, Tetsuya NONAKA, Yoshihide KODAMA and Hideki MOTOHASHI

The vertical component of the ground motion recorded near the source in inland earthquakes occurred in Japan Island and the characteristics of the phase ground motion are studied. Also the vertical component of the ground motion synthesized using a thrust source model is studied. The curves for the Fourier spectral amplitude ratios of vertical to horizontal components are analyzed and summarized in terms of the mean and standard deviation of them for three surface soil conditions. Artificial vertical ground motions simulated using the proposed Fourier spectral amplitude ratios and the phase motions are compared with the records, in order to demonstrate an engineering capability of the proposed simulation method of vertical ground motions.