

2008年岩手宮城内陸地震における 広帯域強震動評価

野畑 拓也¹・山崎 龍士²・酒井 久和³・Nelson Pulid⁴

¹学生会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科 都市環境デザイン工学専攻

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)

E-mail:takuya.nobata.7n@stu.hosei.ac.jp

²非会員 ミサワホーム株式会社 柏支店 (〒277-0852 千葉県柏市旭町2-10-22)

E-mail:Ryuji_Yamazaki@home.misawa.co.jp

³正会員 法政大学教授 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)

Email:hisakai@hosei.ac.jp

⁴非会員 防災科学技術研究所 地震・火山防災研究ユニット (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

Email:nelson@bosai.go.jp

本研究では 2008 年岩手宮城内陸地震を対象として、震源特性・伝播経路特性・サイト特性を物理的に考慮し、広帯域ハイブリッド合成法を使用した広帯域周波数強震動シミュレーション(BBSIM)を用いて地震基盤までの地震動評価を行う。

地震基盤以浅は重複反射理論に基づいて工学基盤波・地表面波を算定するとともに、工学基盤波の最大振幅に藤本・翠川(2006)の増幅率を乗じた地表面波を算出する。広帯域強震動評価に基づいてK-NetおよびKiK-netの観測記録と計算波形を比較し、震源断層モデルおよび強震動シミュレーション手法の妥当性を検討する。さらに工学基盤波と地表面波の最大振幅を強震動シミュレーション結果と地盤増幅率による算定結果について比較検討を行う。

Key Words : *strong ground motion, broadband frequency, multiple reflection analysis, average shear-wave, site amplification factor*

1. はじめに

わが国では今後 30 年以内に 70%の発生確率で南海トラフ巨大地震、首都直下型地震などの被害地震が切迫しており、これらの地震では構造物、人的な直接的被害が甚大であることは言を待たないが、同時に自然斜面や盛土等の土砂災害が多数発生することも予想される。土砂災害の中でも斜面崩壊による交通路の途絶は、孤立集落発生の原因となり、被災者の救援・救助活動に支障が生じ、被害が拡大する恐れがある。事実、2008年の岩手宮城内陸地震では、土砂災害による鉄道や道路の寸断により、緊急車両が搬入できず、地震発生直後の救助、救援活動が遅れた。このことから、地震による災害対策として斜面の崩壊を未然に防ぐことは、孤立集落の発生を防ぎ被災者の安全を確保する上で必須であると考えられる。そのためには、将来発生する地震に対して、斜面崩壊が

どの場所で発生する危険性があるのか事前に把握することが重要である。

中山間部においては道路に近接する斜面の数は膨大であり、個々に詳細な調査を経て耐震性を評価することは現実的ではない。そのため、簡易的に広域斜面の安全性を評価する必要がある。広域な斜面の安全性評価を行う場合には過去の地震被害とPGAやPGVなどの地震強度を用いて統計的に推定する手法が提案されている¹⁾。この場合、当然のことながら使用する地震強度の精度が耐震性評価手法の妥当性に大きく影響し、広範囲にわたって精度良い地震強度分布を推定することが求められる。

そこで本研究では斜面の安全性評価を行う予定である2008年岩手・宮城内陸地震の斜面被害領域を対象に震源断層モデルに基づく強震動シミュレーションにより強震

動分布評価を行う。

2. 強震動評価手法

本研究では、広帯域ハイブリッド合成法を使用した広帯域周波数強震動シミュレーション(BBSIM)を用いて、地震基盤における時刻歴波形を作成する。地震基盤以浅の工学基盤波・地表面波については重複反射理論に基づいて算定する。以下に各手法を示す。

2.1 広帯域ハイブリッド合成法

広帯域ハイブリッド合成法は、理論的手法での短周期の地震動を評価することが困難な点や、半経験的手法の対象地点での観測記録を必要とするなど、双方の欠点を補うために提案されたものである。地震動の長周期成分については理論的手法で計算し、短周期成分については統計的な手法で小地震の記録を模擬し、これを半経験的方法で重ね合わせて計算し、両者を足し合わせるものである。

ここで、統計的な方法とは、地震の規模と短周期での震源スペクトルとの経験式を利用して、地震動のスペクトルを評価し、これに適合する時刻歴波形を作成するものである。

この方法は、長周期から短周期まで広帯域の地震動を評価できること、震源特性・伝播経路特性・地盤特性が物理的に評価されていること、観測記録を必要としないことなどの理由で、近年広く用いられるようになった²⁾。

本研究で使用するBBSIMは入倉³⁾が提案した強震動予測レシピアを参考に構築したものであり、広帯域ハイブリッド合成法が用いられている。長周期地震動は地盤構造データや各種パラメータを設定し、理論的手法により算定する。短周期地震動は作成した小断層における特有の放射パターンを模擬し、経験的グリーン関数法を用いて算定する。こうして得られた短・長周期地震動をハイブリッド合成法に基づき合成し、地震基盤における地震動を算定する流れである。図-1に解析フローチャートを示す。

2.2 全応力一次元解析

地震動の大きさは、地震基盤より上にある地盤の影響を強く受けるため、地盤モデルごとに応答特性を計算する。表層地盤・工学基盤における地震波は、各地盤モデルについて地震基盤波を入射し、水平成層した地盤においてS波が反射・透過を繰り返した地震動を重複反射理論に基づく計算で行う。

本研究では、地震基盤より以浅の工学基盤波、地表面波は重複反射理論に基づき、吉田・末富により開発された一次元地盤の地震応答解析プログラムであるDYNEQ

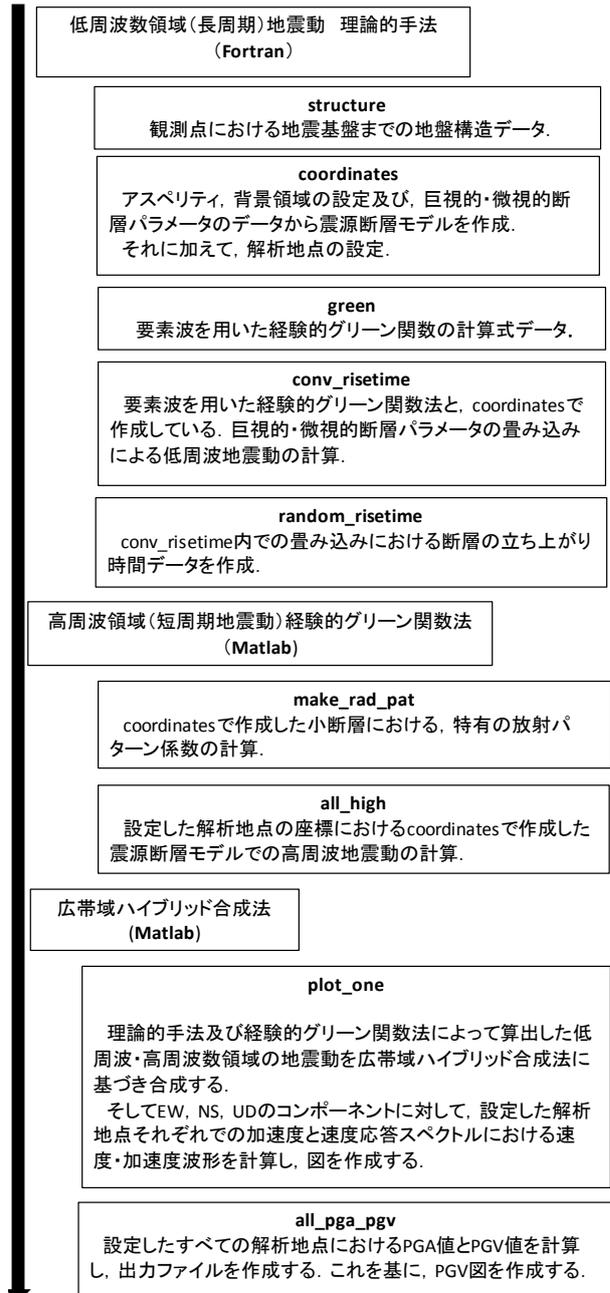


図-1 解析フローチャート

を使用した⁴⁾。

3. 地下構造・地盤構造モデル

広帯域周波数強震動シミュレーションは地震の震源特性、震源から地震基盤に至る地震波の伝播経路特性、地震基盤上に堆積する地盤内での増幅による地盤特性の三要素の評価が必要である。

これらを適切に評価するために、観測点における地下構造・地盤構造のモデル化を行い、地震波の伝播特性や堆積地盤の増幅による地盤特性を評価する必要がある。対象とする解析範囲の地下構造を、地震波の伝播経路

となる上部マントルを含んだ“地震基盤以深の地殻構造”，主に地震波の長周期成分の増幅に影響を与える地震基盤から工学的基盤までの“深部地盤構造”，主に地震波の短周期成分の増幅に影響を与える工学的基盤から地表までの“浅部地盤構造”の三つに分け，以下の方法によりモデル化を行う。

3.1 地殻構造

震源断層から地震基盤以深の地殻構造までのモデル化は，防災科学技術研究所のHi-net高感度地震観測網の3D Tomography Viewer⁹⁾を用いて作成するHinet 3D Tomography Viewerからは，P波・S波速度が得られる．これら2つの値は，解析地点936個全て共一次元内挿法を用いて決定した．そして得られたP波・S波速度の値から，密度・Q値のパラメータを算出し，地下構造・地盤構造モデルを作成する．算定は次式⁶⁾による．

・密度 ρ (g/cm³)

$$1.5\text{km/s} < V_p < 6.1\text{km/s} \text{ のとき} \\ \rho = 1.74V_p^{0.25} \quad (1)$$

$$6.1\text{km/s} < V_p \text{ のとき} \\ \rho = 0.541 + 0.3601V_p \quad (2)$$

・S波速度に対するQ値：Q_s

$$0.3\text{km/s} < V_s < 5\text{km/s} \text{ のとき} \\ Q_s = -16 + 104.13V_s - 25.225V_s^2 + 8.2184V_s^3 \quad (3)$$

$$V_s < 0.3\text{km/s} \text{ のとき} \\ Q_s = 13 \quad (4)$$

・P波速度に対するQ値：Q_p

$$Q_p = 2Q_s \quad (5)$$

3.2 深部地盤構造

一般に地震基盤から深部地盤構造までのモデル化は，深層ボーリング，反射法・屈折法弾性波探査，微動探査，重力探査データや地質構造情報などが利用される。

本研究では，地震ハザードステーション(J-SHIS)⁷⁾から解析地点それぞれのボーリングデータや地質図を使用しモデル化を行った．作成したモデルを図-2に示す．モデル作成にあたって，工学基盤は $V_s=400\text{m/s}$ に設定した．ただし，IWTH25の表層S波速度が 450m/s であったため，地震基盤から表層まで直接算定した．

3.3 浅部地盤構造

浅部地盤構造の地下構造モデルは，表層地質データや

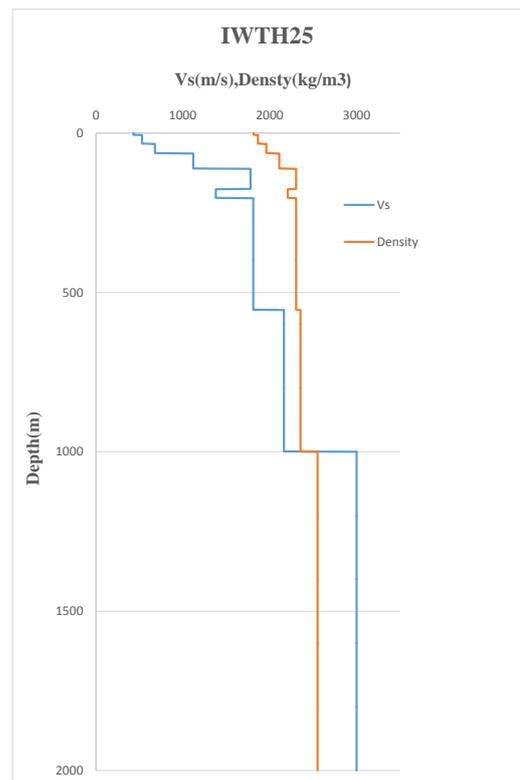
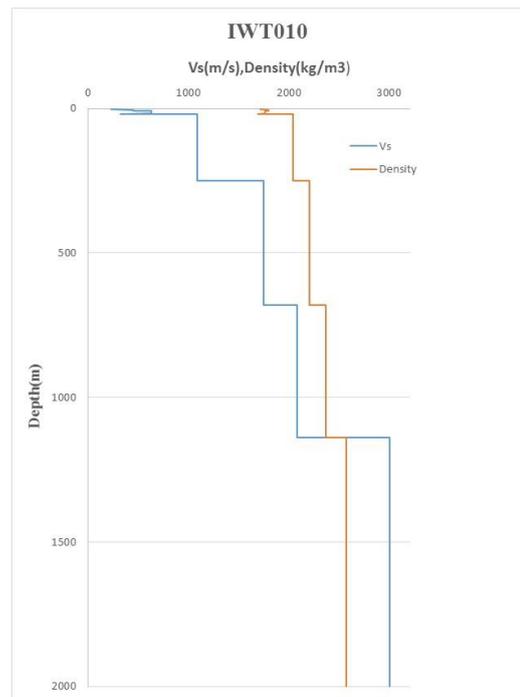


図-2 地下構造モデル

地盤調査に利用されているボーリングデータを収集して一次元速度構造モデルを作成する．これは浅い地盤で強震が発生した際に発生する可能性のある，非線形現象を高い精度で評価するために必要なものである．しかしながら，浅部地盤構造は水平方向に局所的に大きく変化することが多々あるにもかかわらず，利用可能なボーリン

グ情報がほとんど存在しない地域も多い。このような地盤情報が不十分である広域なエリアの浅部地盤構造を評価するにあたっては、藤本・翠川(2003)⁹⁾の日本全国のデータに基づいた国土数値情報の地形分類と地盤の平均S波速度を利用する。また、工学基盤から表層までの地震動の増幅は、藤本・翠川(2006)⁹⁾の、地盤の非線形性の影響を考慮した地盤増幅度を推定するための提案式を用いる。式(6)に提案式を示す。

$$\log_{10}(ARV) = 2.367 - 0.852 \cdot \log_{10}(AVS30) \pm 0.16 \quad (6)$$

ARV: 基準地盤($V_s=400\text{m/s}$)の最大速度振幅に対する地盤の増幅度

AVS30: 深さ30mまでの地盤の平均S波速度(m/s)

4. 広帯域強震動評価

4.1 解析範囲

今回対象としている解析範囲は、岩手宮城内陸地震の震源(E.140.880 N.39.028)と同研究室の研究で使用する荒戸沢地すべり地点(E.140.852 N.39.028)が解析範囲内に収まるよう設定を行った。上記領域が含まれるよう東西南北1.5kmごとにメッシュ分割を行い、その交点を解析地点とした。図-3に解析範囲を示す。また、その他の解析地点として、図-4に示すK-Net及びKiK-Netが設置している地震計設置地点を9つ追加した。

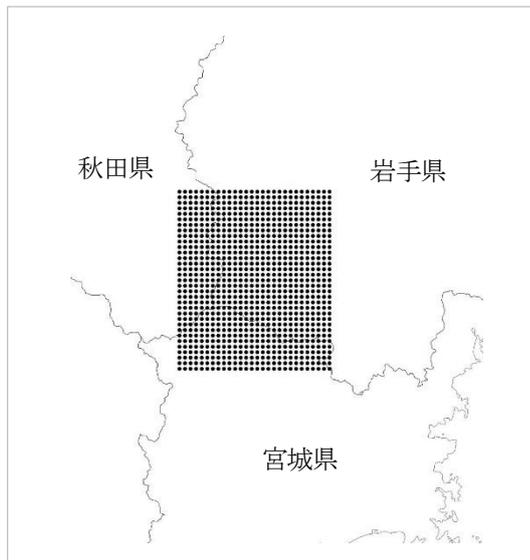


図-3 再現解析における解析924地点

4.2 特性化震源モデル

本研究の強震動評価においては、野津が作成した岩手宮城内陸地震の特性化震源モデル¹⁰⁾を用いた。野津の特性化震源モデルは、図-5に示すアスペリティが3つと背

景領域が1つである。また、各アスペリティの破壊はアスペリティ毎の破壊開始点(☆)から同心円状に拡大するものとなっており、破壊の順序としては、最初にアスペリティ1が破壊を開始し、1.7秒遅れてアスペリティ3が、2.8秒遅れて南側のアスペリティ2が破壊を開始ものとなっている。本震の震源震源パラメータを表-1、各アスペリティのパラメータを表-2に示す。



図-4 岩手宮城内陸地震の震源断層と本震の震央及び対象観測点

表-1 野津の岩手・宮城内陸地震、本震の震源パラメータ

時刻	2008/6/14 8:43
東経	140.88
北緯	39.028
震源深さ(km)	7.2
走向(°)	209
傾斜角(°)	51
すべり角(°)	104
$M_0(\text{Nm})$	$2.72\text{E}+19$

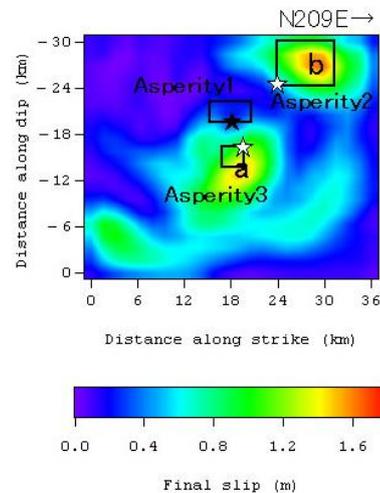


図-5 野津が作成した特性化震源モデル

表-2 特性化震源モデルのパラメータ

	Asp1	Asp2
破壊開始点東経	140.88	140.872
破壊開始点北緯	39.028	38.97
破壊開始点深さ(km)	8.0	4.9
長さ(km)×幅(km)	6.0×3.0	8.0×6.0
M ₀ (Nm)	5.60E+17	4.00E+18
相対破壊開始時刻(s)	0	2.8
破壊伝播速度(s)	2.6	2.6
ライズタイム(s)	0.29	0.58
分割数	4×2	4×3
小断層の一辺の長さ(m)	1500	2000
	Asp3	Asp4(背景領域)
破壊開始点東経	140.843	140.88
破壊開始点北緯	39.023	39.028
破壊開始点深さ(km)	11.1	8.0
長さ(km)×幅(km)	3.0×3.0	24.0×18.0
M ₀ (Nm)	1.00E+18	2.97E+18
相対破壊開始時刻(s)	1.7	0
破壊伝播速度(s)	2.6	2.6
ライズタイム(s)	0.29	0.29
分割数	3×3	8×6
小断層の一辺の長さ(m)	1000	3000

4.3 解析結果

地震観測サイトIWTH25, IWT010の2地点について広帯域周波数強震動シミュレーションにより計算した地震動の結果を図-6, 7に示す。2つの地震基盤波を比較すると震源に程近いIWTH25はIWT010に比べ最大加速度が4~5倍, 最大速度で4~6倍大きく, 主要動の到達が5秒早い。また, IWT010の速度波形EW成分では, 最初に周期2秒程度の比較的小さな震動が生じた後, EW成分のみ周期3秒程度のパルスが2度見られる。最初の震動は図-5のアスペリティ1で, 2つ目のパルスがアスペリティ3, 3つ目のパルスがアスペリティ2によるものと考えられる。一方, NS成分では, EW成分で3つ目のパルスが発生した13秒付近でほぼ同じ周期のパルスが発生しているが, 2つ目のパルスが発生した10秒付近では1秒未満の比較的大きな高周波震動は見られるもののEW成分と異なる傾向が見られる。次にIWTH25については, 特にNS成分に関してアスペリティ3のディレクティブティの影響を受け, 周期4秒程度の明瞭なパルスが生成されたと考えられる。

図-8に, 重複反射理論に基づき算定した工学基盤波を示す。地震基盤波と比べ最大加速度が2~3倍, 最大速度で3~4倍増幅し, EW成分の加速度波形では18秒以降に周期1秒程度の震動が減衰震動することが確認される。また, EW成分の速度波形では7秒付近から周期2秒程度の比較的大きな高周波震動が増幅し, 11~13秒を境に減衰震動している。この際, 9秒付近から高周波成分が波形に加わっており, 比較的大きな高周波成分については, 地震基盤波で7秒, 10秒, 12秒付近に生じた周期2秒程度のパルス

と対応していることがわかる。

図-9, 10に観測波と計算波形の比較を示す。IWT010のEW成分では主要動以降の震動の継続時間は類似しているものの, 計算波形には15秒以降に観測波形にある高周波成分が見られず, 最大加速度値も23倍小さい。一方, NS成分では最大加速度は同等の値であるが, 観測波形では10~20秒付近まで大振幅の震動が生じているが, 計算波形では10~13秒付近の振幅は大きいものの他の時刻での振幅が小さく, 波形は全く異なり継続時間が短くなっている。

IWTH25のEW成分では主要動以降の継続時間は類似しているものの, 12秒以降に観測波形にある高周波成分はほとんど計算波形に見られず, 最大加速度値も3/5倍小さい。一方, NS成分では最大加速度は同等の値となり, 主要動以降の継続時間も類似しているが, 観測波形では主要動が3~12秒付近に大振幅の震動が生じているが, 計算波形では3~7秒付近の振幅は大きいものの他の時刻での振幅は小さい。

これらの原因としては地震基盤から上層を1次元重複反射理論に基づいて算定しているために, 3次元地盤構造を1次元にモデル化し, 地盤構造が単純化されていることが考えられる。

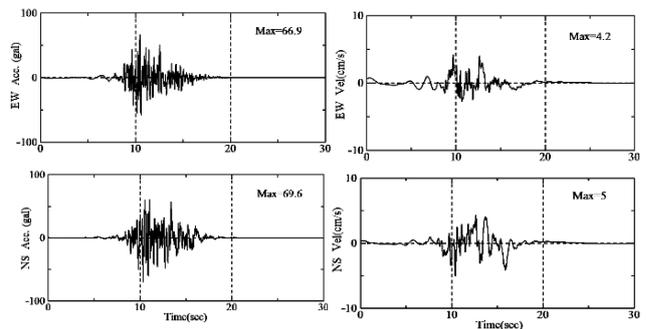


図-6 地震基盤波 (IWT010)

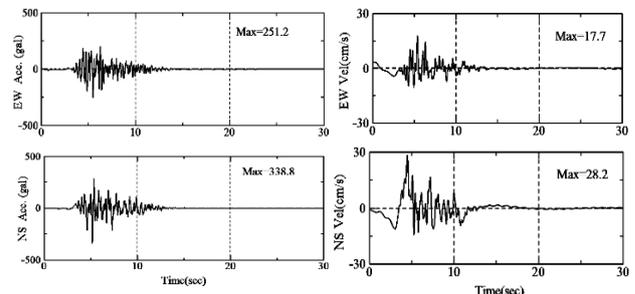


図-7 地震基盤波 (IWTH25)

表-3 最大加速度値の比較 (IWT010)

最大加速度(gal)	観測波形		計算波形	増幅率(1.25)
	EW	NS		
	287.3	219.4	181.5	185.5
			208.5	228

このことから、IWT010では強震動シミュレーションによる算定結果よりも藤本・翠川(2006)の提案式を用いた地盤増幅率を乗じた値が精度の高い結果となった。

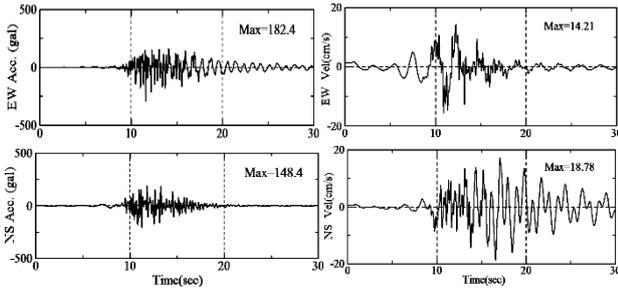


図-8 工学基盤波 (IWT010)

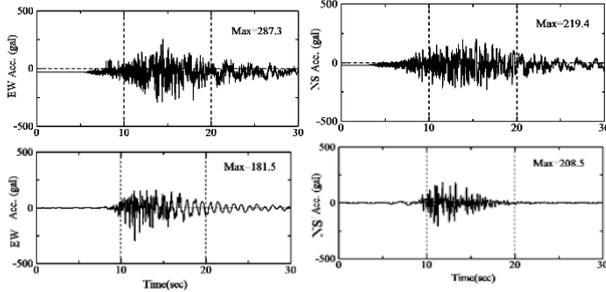


図-9 観測波形(上)と計算波形(下) IWT010

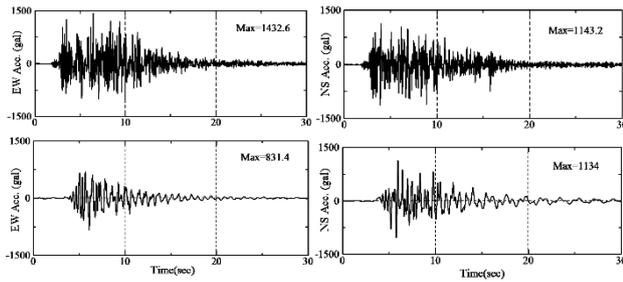


図-10 観測波形(上)と計算波形(下) IWTH25

4.4 地表における地震動強さの比較

3.3で示した藤本・翠川(2006)による経験式を用いて、解析範囲に設定しているK-Net, KiK-netの地震観測サイト9地点における増幅率を算出した。一例としてIWT010における結果を示す。ここで、IWT010の地盤増幅率は1.25である。この増幅率を工学基盤波の最大加速度値に乗じて地表における最大加速度を算出し、観測波の最大加速度ならびに計算波形の最大加速度と比較した。結果を表-3に示す。

IWT010の計算波形は工学基盤波に比べ最大加速度は1.1~1.2倍増幅し、EW成分の加速度値は増幅率を乗じたものと同等の値となり、NS成分は増幅率を乗じたものより9/10倍小さい値となった。

観測波形と比較するとNS成分ではどちらも観測記録に近い値となり、EW成分では2/3程度小さい結果となった。

5. おわりに

本研究では、広帯域周波数強震動シミュレーション(BBSIM)を用いて地震基盤における地震波を算定し、地震基盤以浅の工学基盤波・地表面波は重複反射理論を用いて算定した。地表面波と観測波を比較し、震源断層モデルおよび強震動シミュレーション手法の妥当性を検証した。結果、BBSIMにより求めた地震基盤波は速度波形で断層モデルのアスペリティの破壊によるパルスが確認された。IWT010のEW成分では、地震基盤波で発生した2つ目のパルス、NS成分では3つ目のパルスが観測記録で最大加速度を記録したものと対応している傾向が見られた。また、IWTH25でもEW成分では地震基盤波で発生した2つ目のパルス、NS成分では1つ目のパルスが観測記録で最大加速度を記録したものと対応している傾向が確認できた。

一方、DYNEQにより算定したIWT010の工学基盤波は地震基盤波と比べEW成分では最大加速度、最大速度ともに3倍増幅し、NS成分では最大加速度が2倍、最大速度で4倍増幅した。EW成分の速度波形では、地震基盤波と同様のパルス波が顕著に確認できたが、NS成分では地震基盤波で発生した2つ目までのパルスは確認できるものの、それ以降は速度波形にバラつきが生じ同様の傾向は見られなかった。

また、地表面計算波は観測波形に比べ、IWT010のEW成分では最大加速度は2/3倍小さく、計算波形には観測波形にある主要動以降の高周波成分が見られず、NS成分では最大加速度は同等の値となったが、観測波形と比べ高周波成分が短く、波形は全く異なり継続時間が短くなった。一方、IWTH25のEW成分では最大加速度が3/5倍小さく、計算波形には観測波形にある主要動以降の高周波成分が見られず、NS成分では最大加速度は同等の値となり継続時間は概ね一致しているが、観測波形と比較し高周波成分が短い結果となった。

そのため、一次元の重複反射理論に基づいて表層の地震強度分布を求めるのではなく、経験的グリーン関数と対象地盤のサイト増幅特性の関係を用いて強度分布を推定するなど、地震基盤以浅の計算手法を再検討する必要があることが分かった。

また、今回は加速度波形の比較のみとなっているが、計算波形と速度波形の比較や、KiK-netの地中震度計における観測波形と工学基盤波の加速度・速度成分の比較をすることでより詳細な検証を行う予定である。

謝辞：本研究では港湾空港技術研究所の強震動記録ならびに防災科学技術研究所の強震観測網(K-Net, KiK-net)の地震観測記録、地震ハザードステーション(J-SHIS)の地盤データを使用させて頂きました。ここに記して謝意の表します。

参考文献

- 1) 酒井, 奥村, 塩飽, 香川, 長谷川, 澤田, 多々納: 地震時における斜面の簡易信頼性評価法に関する基礎的研究, 2012
- 2) 山中浩明: <シリーズ都市地震工学>地震津波ハザードの評価 編, pp.116-118
- 3) 入倉孝次郎: 強震動予測レシピ ―大地震による強震動の予測手法―, 京都大学防災研究所年報, 第47号 A, pp.25-45, 2004
- 4) 吉田望, 末富岩雄: DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株)技術研究所報, pp61-70, 1996.
- 5) 松原誠: 日本列島三次元地震波速度構造表示ソフトウェア, 防災科学技術研究所研究報告, 第76号, 2009年12月
- 6) 付録3 震源断層を特定した強震動予測手法: pp.1-24

- 7) 地震ハザードステーション(J-SHIS) HP: <http://www.jshis.bosai.go.jp/>
- 8) 藤本一雄・翠川三郎: 日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定, 日本地震学会論文集, Vol3, No.3, pp.13-27, 2003.
- 9) 藤本一雄・翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震学会論文集, 第6巻, 第1号, pp. 11-22, 2006.
- 10) 野津厚: 波形インバージョンにより推定された最近のわが国における内陸地殻内地震の震源過程, 港湾空港技術研究所報告, 第49巻, 第3号, pp.111-155, 2010.

An Analytical Simulation of Broadband Strong Ground Motions In the 2008 Iwate Miyagi Inland Earthquake

Takuya NOBATA, Ryuji YAMAZAKI, Hisakazu SAKAI, and Nelson PULID

In order to estimate a seismic hazard accurately, we have to consider physically the seismic source characteristics and propagation path characteristics, and site characteristics. Our study evaluated the strong ground motions at the seismic basement during the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquake with the broadband frequency strong ground motion simulation (BBSIM). We also calculated the engineering foundation-wave and ground surface wave based on the multiple reflection theory as well as the amplification factor by Fujimoto and Midorikawa (2006). We compared the calculated waveforms and the observation records of the KiK-net and K-Net, to examine the validity of the strong ground motion simulation technique and the source fault model. Furthermore, we compared the results based on the multiple reflection theory and the amplification factor in order to examine the accuracy of the later methodology for estimating the surface strong intensity.