



断層極近傍のための理論地震動シミュレーション法を用いた 断層表層領域破壊時の地震動推定

山田雅行¹⁾、羽田浩二²⁾、今井隆太³⁾、藤原広行⁴⁾

1) 非会員 株式会社ニュージェック、チームマネージャ 博士(工)

e-mail : yamadams@newjec.co.jp

2) 非会員 株式会社ニュージェック 修士(工)

e-mail : hadakj@newjec.co.jp

3) 非会員 みずほ情報総研株式会社、シニアマネージャ 博士(数理学)

e-mail : ryuta.imai@mizuho-ir.co.jp

4) 正会員 独立行政法人防災科学技術研究所、領域長 博士(理)

e-mail : fujiwara@bosai.go.jp

要 約

断層極近傍における地震動予測を目的として、全無限一様弾性体のグリーン関数公式を用いた理論地震動の数値シミュレーション法を用いて、断層の極近傍において理論地震動シミュレーションを実施する際の積分誤差の評価を行った。その結果、観測点との距離 L に対して積分要素寸法が $0.5 \times L$ 以下となる必要があることを確認し、地表まで露頭した断層を考える場合の効率的な要素分割を提案した。

その上で本論文の主題である、地震発生層上端～地表(断層表層領域)においても地震動を発生する可能性があると考えた場合に、断層の極近傍における地震動強度の数値シミュレーションを行った。本研究で考察した条件の下では、断層表層領域における地震動の生成を考慮した場合には、断層表層領域を考慮しない場合(破壊開始点が右側下端)に比べて、最大速度(平均)、最大加速度(平均)は、それぞれ1.7倍、1.6倍程度となった。

キーワード： 断層極近傍、理論地震動シミュレーション、積分要素寸法、断層表層領域

1. はじめに

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾には、耐震強化岸壁などの設計のための地震動として、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮して、統計的グリーン関数法などの地震動予測手法によって算定した時刻歴波形を用いること、が明記されている。建築の分野でも「時刻歴応答解析建築物構造安全性評価業務方法書」²⁾において、建築物に作用する地震力として、加速度応答スペクトルに基づく

“告示波”に加えて、活断層分布、断層破壊モデル、過去の地震活動、地盤構造等に基づいて設定する模擬地震波“サイト波”を用いることが許されている。また、国や自治体の被害想定^{例えは3)4)}においても、震度分布や液化危険度分布の推定のために、同様の地震動予測手法が用いられることが多くなってきた。

ている。

本研究では、断層極近傍での地震動予測について考察する。ここで、断層極近傍とは、断層面からの距離が数km以下の領域とする。統計的グリーン関数法による地震動予測の妥当性については、断層近傍域（断層長と同程度の領域）においては、2000年鳥取県西部地震や2005年3月20日福岡県北西沖の地震などを対象とした地震調査研究推進本部地震調査委員会による検討⁷⁾などでもある程度の検証がなされてきている。一方で、断層極近傍においては、その予測精度に関して十分な検討がなされていない。統計的グリーン関数法のグリーン関数は、全無限一様弾性体のグリーン関数(後述)のうち、S波の遠地項のみを、地震動のスペクトルが ω^{-2} 則に従うものと仮定してモデル化したものである。このため、一般的に差分法などを用いた理論的な地震動予測手法と比べて、断層極近傍では誤差が生じると考えられている。野津⁷⁾は、この統計的グリーン関数に簡便に近地項と中間項の影響を加味する方法を提案し、断層から2kmおよび0.2kmの位置において、二等辺三角形型のすべり速度時間関数を用いた理論地震動と比較することによって、その有効性を示した。大西⁸⁾は、近地項と中間項の影響を補正する場合、補正量の大きい低周波数領域で補正前のグリーン関数の精度に注意を払う必要があることや、周波数や距離に対する適用限界を設定する必要があることに言及した。なお、大西⁸⁾では、断層近傍における近地項と中間項の影響を10km、5km、2kmの評価点を設けて検討を行っている。

統計的グリーン関数法や経験的グリーン関数法において、小地震から大地震を算定する際の重ね合わせ法は、表現定理に現れる断層面上での積分を近似的に実施し、基本的に小地震および大地震が ω^{-2} 則に従うものと考えている。したがって、この重ね合わせを行う際に用いられる、“強震動予測レシピ”⁹⁾¹⁰⁾に示された特性化震源モデルも、基本的に ω^{-2} 則に従うように構成されており、断層極近傍における地震動の厳密な計算を念頭に置いたものではない。また、特性化震源モデルを構成する個々の経験式は、断層から離れた場所での地震観測記録に基づくものであるため、断層極近傍に対して十分な精度を有していると考えすることは難しい。このように、従来から実施されてきた特性化震源モデルに基づく地震動予測は、必ずしも断層の極近傍の観測点に適用することを前提とはしていない。さらに、要素断層による手法は、数値積分を厳密に評価する手法とはなっていないため、断層極近傍(要素断層サイズよりも近く)では、計算手法が正常に機能しない場合がある。

一方、平成25年に内閣府から首都直下において考えておかなければならない震源やその地震に対する被害想定が公表された。また、2007年新潟県中越沖地震^{例えは11)}や2011年東北地方太平洋沖地震^{例えは12)}において原子力発電所に被害が生じたことを受けて、その耐震性をより高めるべく活断層調査が行われ、重要構造物の極めて近くに活断層の可能性が指摘¹³⁾¹⁴⁾されるといった報道もなされた。

また、特性化震源モデルに基づく地震動予測では、通常、岩盤の硬さや微小地震の発生履歴などを参考に“地震発生層”を定義し、深さ3~4km程度までのごく表層において地震動は発せられないものと考えたモデルを仮定する。しかしながら、1995年兵庫県南部地震時の野島断層^{例えは15)}や1927年北丹後地震における郷村および山田断層^{例えは16)}などのように、断層破壊に伴って地表面にもすべりが生じることは知られている。したがって、特に原子力発電所のような硬質地盤の場合には、地震動を発しうる領域の上限深さを決めることが難しい場合も考えられる。

このように、断層から水平方向および深度方向に極めて近い位置での地震動を、精度良く、合理的に評価できる手法を確立し、その影響を把握しておくことが急務であると考えられる。そこで、著者らは断層の極近傍における地震動予測を目的として、全無限一様弾性体のグリーン関数公式を用いた理論地震動の数値シミュレーション法を用いて、このような断層の極近傍において理論地震動シミュレーションを実施する際の積分誤差の評価を行った¹⁷⁾。さらに、地震発生層上端~地表においても地震動を発生する可能性があると考えた場合に、断層から極めて近い位置における地震動がどの程度の強度となりうるかについて、数値シミュレーションを行った。

2. 断層極近傍のための理論地震動シミュレーション法¹⁸⁾

全無限一様弾性体において、震源位置と時刻(ξ, τ)においてp方向に外力が作用する場合、グリーン関

数を G_{np} とすると、観測点位置と時刻 (x, t) における第 n 成分の変位 $u_n(x, t)$ は次式(1)で与えられる。

$$u_n(x, t) = \iint_{\Sigma} [u_i] v_j c_{ijpq} * \frac{\partial}{\partial \xi_q} G_{np} d\Sigma \quad (1)$$

ここに、 $[u_i] v_j c_{ijpq}$ はモーメント密度テンソル、 Σ は断層面である。また、グリーン関数 G_{np} は式(2)となる。

$$\begin{aligned} G_{np} = & \frac{1}{4\pi\rho} (3\gamma_n \gamma_p - \delta_{np}) \cdot \frac{1}{r^3} \int_{r/\alpha}^{r/\beta} \tau \delta(t-\tau) d\tau \\ & + \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} \gamma_n \gamma_p \cdot \frac{1}{r} \delta(t - \frac{r}{\alpha}) \\ & - \frac{1}{4\pi\rho\beta^2} (\gamma_n \gamma_p - \delta_{pn}) \cdot \frac{1}{r} \delta(t - \frac{r}{\beta}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 γ_n, γ_p : n, p 方向の方向余弦、 δ_{np} : クロネッカーのデルタ、 r : 震源距離、 α : P波速度、 β : S波速度、 ρ : 密度である。また、 $\delta(t)$ はディラックのデルタ関数を示す。

式(1)に示すように、広がりをもつ断層に対する理論地震動の算定には、断層面 Σ における面積分を行わなければならない。理論地震動シミュレーションの積分を数値的に行う場合、十分小さい小断層面 Σ_i を考えて、その小断層の代表点 ξ^i に対して点震源近似した式(3)を用いる。なお、式(3)の M_{pq} は地震モーメントテンソルである。

$$\begin{aligned} u_n(x, t) = & \left(\frac{15\gamma_n \gamma_p \gamma_q - 3\gamma_n \delta_{pq} - 3\gamma_p \delta_{qn} - 3\gamma_q \delta_{np}}{4\pi\rho} \right) \cdot \frac{1}{r^4} \int_{r/\alpha}^{r/\beta} \tau M_{pq}(t-\tau) d\tau + \\ & \left(\frac{6\gamma_n \gamma_p \gamma_q - \gamma_n \delta_{pq} - \gamma_p \delta_{qn} - \gamma_q \delta_{np}}{4\pi\rho\alpha^2} \right) \cdot \frac{1}{r^2} M_{pq}(t - \frac{r}{\alpha}) - \left(\frac{6\gamma_n \gamma_p \gamma_q - \gamma_n \delta_{pq} - \gamma_p \delta_{qn} - 2\gamma_q \delta_{np}}{4\pi\rho\beta^2} \right) \cdot \frac{1}{r^2} M_{pq}(t - \frac{r}{\beta}) \\ & + \left(\frac{\gamma_n \gamma_p \gamma_q}{4\pi\rho\alpha^3} \right) \cdot \frac{1}{r} \dot{M}_{pq}(t - \frac{r}{\alpha}) + \left(\frac{\gamma_n \gamma_p - \delta_{np}}{4\pi\rho\beta^3} \right) \gamma_q \cdot \frac{1}{r} \dot{M}_{pq}(t - \frac{r}{\beta}) \end{aligned} \quad (3)$$

一般に、式(3)において r^{-4} に比例する右辺第 1 項は近地項、 r^{-1} に比例する右辺第 4、5 項は遠地項と呼ばれ、両者の中間的な特徴を持つ右辺第 2、3 項は中間項と呼ばれている。

なお、本研究における理論地震動シミュレーションでは、地表における特別な取り扱いを行っていないことから、直達の入射波の強度についてのみの議論を行っている。境界部における反射などの散乱波の影響については、別途検討が必要であると考えられる。

3. 理論地震動シミュレーションの積分計算時の誤差

3.1 理論地震動シミュレーションの積分誤差の要因と対処方法の現状

理論地震動シミュレーションの積分を数値的に行う場合、十分小さい小断層面 Σ_i を考えて、その小断層の代表点 ξ^i に対して数値積分を行う。しかしながら、観測点が断層の極近傍の場合、観測点までの距離 r が非常に小さいため、小断層面 Σ_i の大きさとの関係によって、理論地震動シミュレーションの積分

誤差が生じる。観測点が小断層の代表点と一致する場合、適切な特異点処理を行う必要が生じる。周波数領域での計算においては、境界要素法における要素積分として開発された手法を用いることにより、Cauchyの主値積分を用いた特異要素における積分評価手法や、擬似特異積分のために開発されたPART法などが知られている¹⁹⁾²⁰⁾。また、同様に周波数領域においては、グリーン関数から静的項を分離することによって、観測点が断層面に近い場合でも効率的に積分を行える手法も提案されている²¹⁾²²⁾。一方で、時間領域における積分については、特異点の評価方法の検討は、周波数領域の検討ほど十分にはなされていない。

3.2 理論地震動シミュレーションの積分誤差評価

いま、図1に示すような地表に露頭する断層(20km×20km、強震動生成域8km×8km)を考える。この断層の地表断層線に対して面外方向(Y方向)に0.001km(1m)離れた観測点(○印)の理論地震動の試算を行った。試算においては、すべり速度時間関数が中村・宮武(2000)²³⁾に従う地震モーメントテンソルを震源に与えた。その際に用いた積分要素分割を表1に示す。ここでは、要素分割は等分割とし、要素寸法の2乗が Σ_i に相当する。図2に要素寸法(m)と計算された理論地震動の最終変位量(m)の関係を示す。これを見ると、積分要素分割に依存して、断層の極近傍の地震動の大きさが変化しており、積分誤差が生じていることがわかる。

断層の極近傍の地震動と積分要素分割の関係を詳細に検討するために、観測点付近の200×200mの領域(図1の観測点付近の□)を取り出して、前節と同じ観測点における理論地震動シミュレーションを行った。その際に用いた積分要素分割を表2に示す。

表1 積分要素分割

case	要素分割	要素数	要素寸法(m)
1	100×100	10000	200
2	200×200	40000	100
3	500×500	250000	40
4	800×800	640000	25
5	1000×1000	1000000	20
6	2000×2000	4000000	10
7	5000×5000	25000000	4

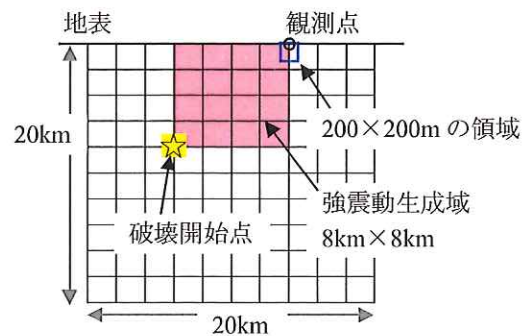


図1 断層モデル

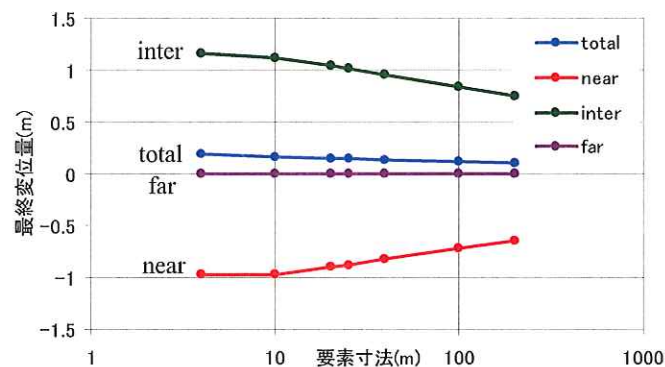


図2 要素寸法と最終変位量の関係

図3、4に、要素寸法(m)と観測点付近の200×200mの領域の断層に対して計算された理論地震動の最終変位量(m)の関係を示す。図中の各線は、理論地震動シミュレーションにおいて計算される近地項(near)、中間項(inter)、遠地項(far)、3つの項の和(total)を示す。図3は観測点のY座標を0.001km(1m)とした場合で、要素寸法が0.5m以下の結果でほぼ収束した値となっていることがわかる。また、図4は観測点のY座標を0.010km(10m)とした場合で、要素寸法が5m以下でほぼ収束した値となっていることがわかる。すなわち、

観測点との断層の最短距離を L とした場合、積分要素寸法は $0.5 \times L$ 以下であれば、積分誤差が十分に小さいものと考えられる。

図5、6に、要素寸法(m)と観測点付近の 200×200 mの領域の断層に対して計算された理論地震動の最大速度(左図、m/s)と最大加速度(右図、m/s/s)の関係を示す。図中の青線は、理論地震動シミュレーションにおいて計算された変位の近地項(near)、中間項(inter)、遠地項(far)の和(total)を微分して求めた値である。図5は観測点のY座標を0.001km(1m)、図6は観測点のY座標を0.010km(10m)とした場合である。短周期帯域の地震動の特徴を示す最大速度、最大加速度においても要素寸法がそれぞれ0.5m以下、5m以下でほぼ収束した値となっていることがわかる。すなわち、短周期帯域においても観測点との断層の最短距離 L に対して、積分要素寸法が $0.5 \times L$ 以下であれば、積分誤差が十分に小さいものと考えられる。

式(3)において近地項、中間項、遠地項ともに、それぞれ r^4 、 r^2 、 r^{-1} に比例することから、 r が小さくなるにつれて算定される地震動は大きくなり、地震動の精度は r の精度に大きく影響を受ける。すな

表2 積分要素分割 (200×200 m)

case	要素分割	要素数	要素寸法(m)
1	5×5	25	40
2	10×10	100	20
3	20×20	400	10
4	50×50	2500	4
5	100×100	10000	2
6	200×200	40000	1
7	500×500	250000	0.4
8	1000×1000	1000000	0.2
9	2000×2000	4000000	0.1

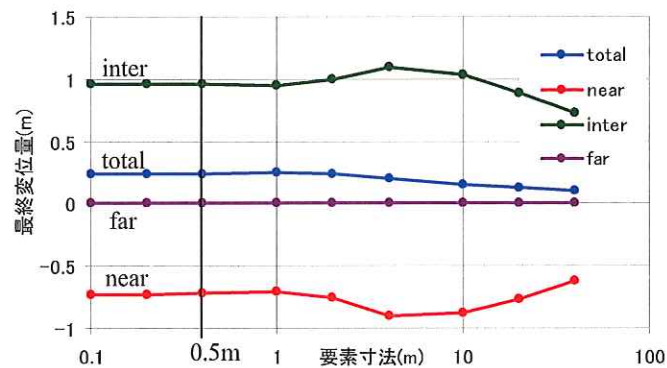


図3 詳細要素寸法と最終変位量の関係 (Y=0.001km)

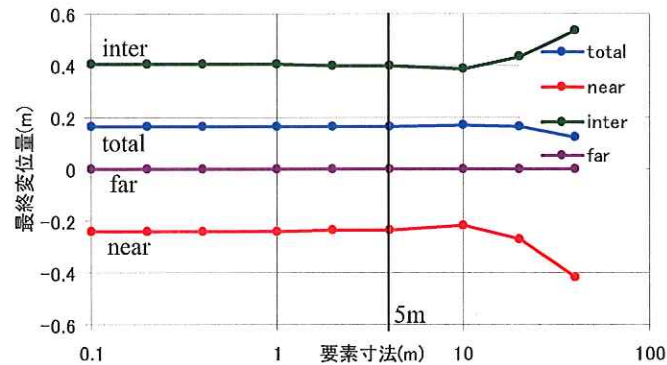


図4 詳細要素寸法と最終変位量の関係 (Y=0.01km)

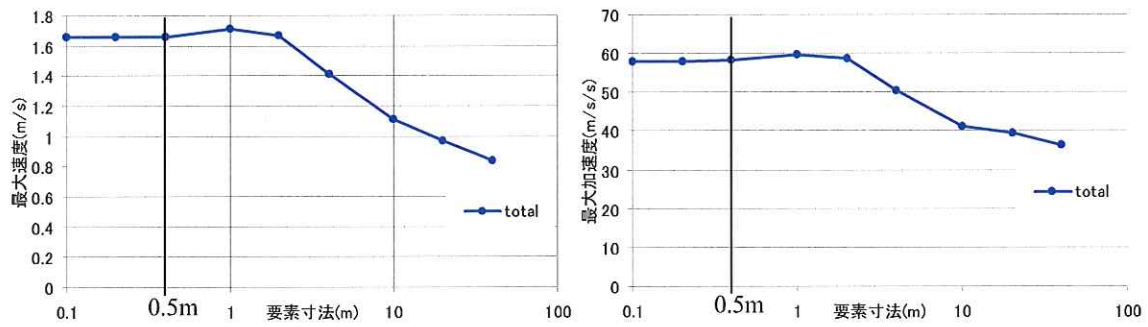


図5 詳細要素寸法と最大速度、加速度の関係 (Y=0.001km)

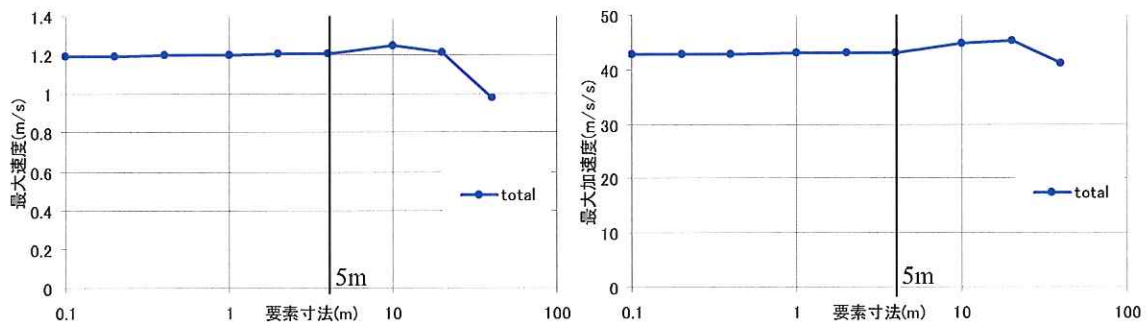


図6 詳細要素寸法と最大速度、加速度の関係 (Y=0.01km)

わち、積分誤差が最も生じやすいのは、観測点に最も近い要素であると考えられる。この要素に対して、積分要素寸法を $0.5 \times L$ とした場合、観測点から要素中心までの距離と観測点から要素端までの距離差は約3%となる。したがって、要素内における距離差の平均は1%前後と考えられるため、理論地震動のシミュレーション結果が十分に収束した値となったものと考えられる。

3.3 積分要素分割の提案

図1に示すように、観測点との最短距離 $L=0.001\text{km}$ 、地表まで露頭した $20\text{km} \times 20\text{km}$ 程度の断層全体を考える場合、断層面全体について要素寸法を $0.5 \times L$ 以下として積分計算を行うことは効率的ではない。前節の検討によって明らかとなったように、各小断層と観測点の距離に対して積分要素寸法が $0.5 \times L$ 以下となればよいことを勘案すると、図7に例を示すように観測点近傍を密(最小分割 0.0002km)に、観測点から遠ざかるにつれて疎(最大分割 0.25km)となるように積分要素を配置することが合理的であると考えられる。

4. 断層表層領域破壊時の地震動推定

通常、岩盤の硬さや微小地震の発生履歴などを参考に“地震発生層”を定義し、深さ3~4km程度までのごく表層において地震動は発せられないものと考えたモデルを仮定するが、断層破壊に伴って地表面にもすべりが生じることを勘案すると、特に硬質地盤の場合には、地震動を発生する領域の上限深さを決めることが難しい場合が考えられる。

ここでは、地震発生層上端~地表(以下、「断層表層領域」と呼ぶ)においても地震動を発生する可能性があると考えて、断層極近傍に適用できる理論地震動シミュレーション法を用いて、断層から極めて近い位置における地震動強度の推定を行った。

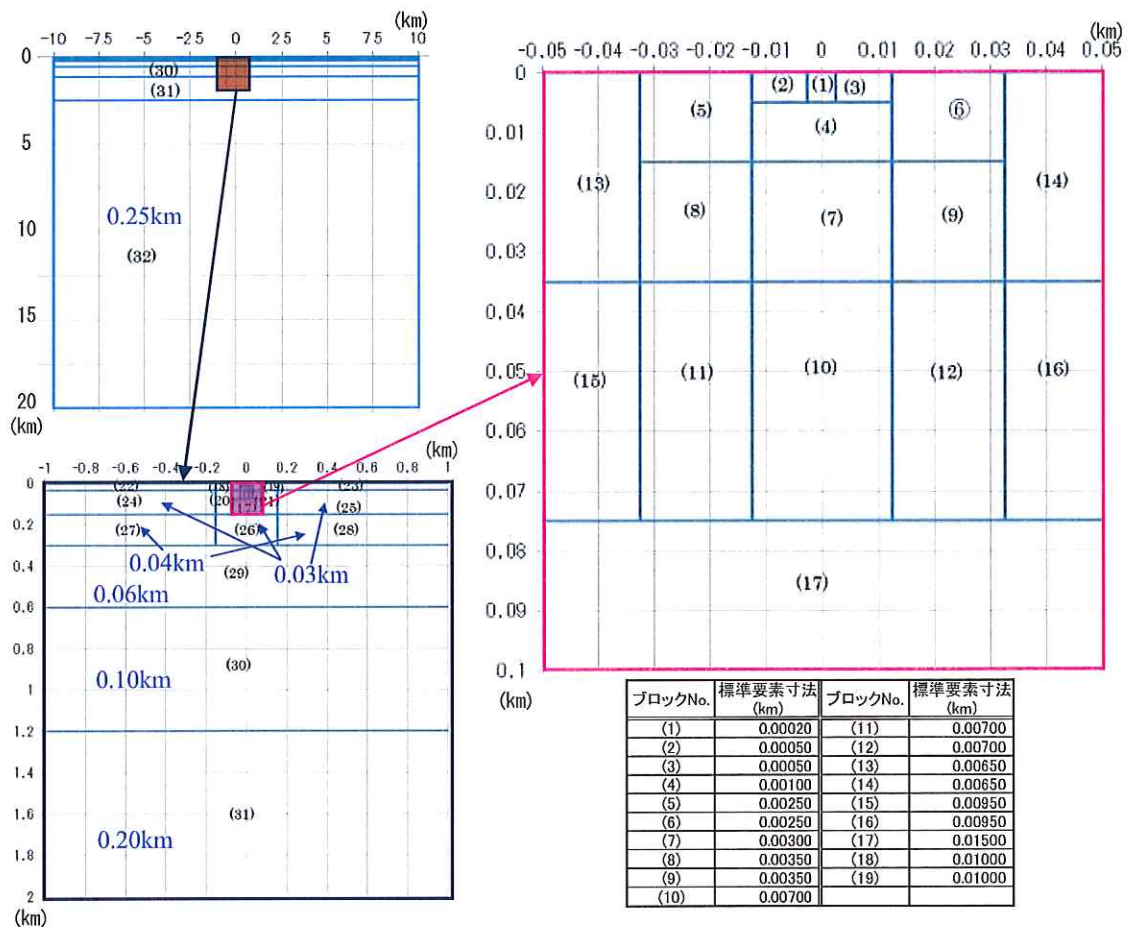


図7 積分要素分割例

4.1 断層のモデル化

断層は、長さ20km×幅20kmのMj7相当の横ずれ(傾斜90°)断層で、上端深さは4kmとし、8km×8kmの強震動生成領域(SMGA)を断層中央に配置した。破壊開始点は、SMGAの中央下端と右側下端の2ケースを想定した(図8)。このパラメータは、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」に倣って設定した(表3)。

通常、地震動が発生しないものと見なされる、上端深さより上部の断層表層領域においても地震動の発生を考慮した。断層表層領域は以下の考え方に基づいて設定した。

○断層表層領域は主導的に破壊を生じるのではなく、地震発生層のすべりに伴って破壊し、地震動を発生させるものと考え、断層表層領域のすべり量、応力降下量、ライズタイムは背景領域と同じ値とした。

○ただし、断層表層領域は背景領域より浅いため、地盤剛性は低く、地盤内の拘束応力も低いことは明らかであることから、SMGAおよび背景領域のすべり速度時間関数が中村・宮武(2000)によって表されるのに対して、断層表層領域は、中村・宮武(2000)とBox-Car型のすべり速度時間関数が混在するものとした。中村・宮武(2000)によるすべり速度時間関数は立ち上がり鋭いため強い地震動を生成し、Box-Car型のすべり速度時間関数は滑らかな特性から、それほど強い地震動を生成しない特徴を有している。

○中村・宮武(2000)とBox-Car型のすべり速度時間関数の混在の割合は50%ずつを基本と考え、以下の方法で分布させた。

- ・各要素震源(200m×200m)に中村・宮武(2000)とBox-Car型のいずれかを割り当てる方法
- ・各要素震源(200m×200m)に中村・宮武(2000)とBox-Car型の和(足し合わせられる割合が変化)のすべり速度時間関数をあてはめる方法

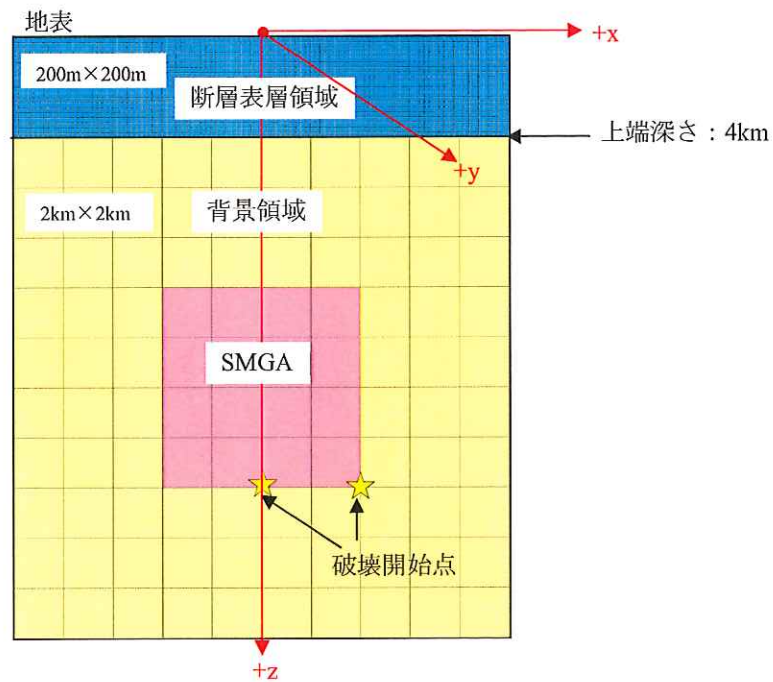


図8 震源モデル

表3 震源パラメータ

震源特性	設定値	備考
気象庁マグニチュード M	7.0	想定地震 $M=7.0$
上端深さ	4.0 km	想定上端深さ = 4km
モデル断層長さ L_{model}	20.0 km	$\log L = 0.6M - 2.9$
モデル断層幅 W_{model}	20.0 km	
地震モーメント M_0	$8.13E+18 \text{ N}\cdot\text{m}$	$\log(M_0) = 1.17M + 10.72$
平均すべり量 D	0.7 m	$M_0 = \mu \cdot D \cdot S_{model}$
S波速度 β	3.4 km/s	一般的な値
P波速度 α	6.0 km/s	一般的な値
平均密度 ρ	2700.0 kg/m ³	一般的な値
剛性率 μ	$3.12E+10 \text{ N/m}^2$	$\mu = \rho \cdot \beta^2$
破壊伝播速度 V_r	2.4 km/s	$V_r = 0.72 \beta$
アスペリティ 地震モーメント M_{0a}	$2.36E+18 \text{ N}\cdot\text{m}$	$M_{0a} = \mu \cdot D_a \cdot S_a$
アスペリティ 平均すべり量 D_a	1.3 m	$D_a = 2.0D$
アスペリティ 平均応力降下量 σ_a	17.1 Mpa	$\sigma_a = M_{0a} / ((16/7) \cdot r^2 \cdot R)$
アスペリティ モデル長さ $L_{a,model}$	8.0 km	
アスペリティ モデル幅 $W_{a,model}$	8.0 km	
アスペリティ ライズタイム T_{ra}	1.63 s	$T_{ra} = 0.5W_a / V_r$
背景領域 M_{0b}	$5.77E+18 \text{ dyn}\cdot\text{cm}$	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
背景領域 すべり量 D_b	0.6 m	$M_{0b} = \mu \cdot D_b \cdot S_{b,model}$
背景領域 実効応力 σ_b	2.9 Mpa	$\sigma_b = (D_b / W_b) / (D_a / W_a) \cdot \sigma_a$
背景領域 ライズタイム T_{rb}	4.08 s	$T_{rb} = 0.5W_b / V_r$

表4 検討ケース一覧

Case	断層タイプ	破壊開始点	すべり速度時間関数		配置	すべり量	ライズタイム	応力降下量
			中村・宮武(N)	BOX-Car(B)				
①	横ずれ	中央下端	$\alpha \times N + (1 - \alpha) \times B$		ランダム 配置 100通り	背景領域と同じ		
②		右端下端	$\alpha: 0-1$ の一樣乱数					
③		中央下端	1000メッシュ	1000メッシュ				
④		右端下端						

○100通りの乱数を用いて、すべり速度時間関数の位置によるバラツキを評価した。

断層中央を原点として、地表断層線の方をx軸(右側を正)、鉛直方向をz軸(下方を正)、面外方向をy軸(紙面奥から手前を正)として、 $y=0.1\text{km}(100\text{m})$ の位置に断層と平行に地震動予測地点を分布させた。前節に示した提案に従って積分要素分割を地震動予測地点ごとに設定し、断層極近傍に適用できる理論地震動シミュレーション法によって地震動を算定した。検討ケースは表4に示すとおりである。

4.2 断層表層領域破壊時の地震動推定結果

断層表層領域破壊時の地震動推定結果を図9～12に示す。図9～12の横軸は、地表断層線との距離 $y=0.1\text{km}(100\text{m})$ の位置に断層と平行に分布させた地震動予測地点のx座標を示す。断層中央が $x=0\text{km}$ 、断層左端、右端がそれぞれ、 $x=-10\text{km}$ 、 $x=10\text{km}$ に相当する。図9～12の縦軸は、各予測地点における最大変位、最大速度、最大加速度のx、y、z方向それぞれの値を、断層表層領域を考慮しない場合の最大値(x、y、z方向を問わず最大値)で除した比の値を示している。すなわち、断層表層領域を考慮することによって、どの程度、地震動強度が変化するかを示している。また、断層表層領域のすべり速度時間関数の分布を一樣乱数を用いて100通り作成し、それぞれの断層表層領域分布に対して理論地震動シミュレーション結果の平均と標準偏差を求めている。図9～12の緑線、ピンク線、水色線はそれぞれ、理論地震動シミュレーション結果の平均(AVE)、平均+標準偏差(AVE+sig)、平均-標準偏差(AVE-sig)を示す。ここでは、理論地震動シミュレーション結果の平均(AVE、緑線)に着目して考察を行う。

最大変位を見ると、x方向は、 $-10\text{km}\leq x\leq 10\text{km}$ の範囲で、破壊開始点が中央下端の場合、約3.5倍、破壊開始点が右側下端の場合、約2.9倍となった。これは断層表層領域を考慮することによって地表まですべり量を与えたことに起因すると考えられる。y、z方向では、x方向変位が生じたことに起因する変位が断層端部において大きな値となったが、それぞれx方向変位を上回る値とはならなかった。また、断層表層領域のすべり速度時間関数分布に対して、バラツキはほとんど見られなかった。

最大速度の平均(AVE)は、破壊開始点が中央下端の場合、x方向は断層中央部付近で約3.3倍、y方向は断層端部で1.9～2.2倍、破壊開始点が右側下端の場合、x方向は断層中央右寄りで約1.7倍、y方向は断層左端部で1.2～1.4倍となった。z方向はいずれの場合も断層表層領域を考慮しない場合の最大値(水平動)を上回らない結果となった。

最大加速度の平均(AVE)は、破壊開始点が中央下端の場合、x方向は断層中央部付近で1.8～2.0倍、y方向は断層端部で1.6～2.1倍、破壊開始点が右側下端の場合、x方向は断層中央右寄りで1.1～1.2倍、y方向は断層左端部で1.3～1.6倍となった。z方向はいずれの場合も断層表層領域を考慮しない場合の最大値(水平動)を上回らない結果となった。

断層表層領域を考慮しない場合の最大速度および最大加速度分布を図13、14に示す。図13、14はそれぞれ破壊開始点が中央下端、右側下端の結果である。破壊開始点が中央下端の場合は、断層の両側で最大速度および最大加速度を生じており、それぞれ 0.09m/s 、 2.9m/s/s であった。一方、破壊開始点が右側下端の場合、断層左側から少し離れた位置で生じた最大速度および最大加速度は、それぞれ 0.18m/s 、 5.0m/s/s となり、いずれも破壊開始点が中央下端の場合の約2倍であった。

断層表層領域を考慮した場合の最大速度、最大加速度の比は、この断層表層領域を考慮しない場合の最大速度、最大加速度で除した値である。このため、破壊開始点が中央下端の場合に比べて、破壊開始点が右側下端の場合の比の値が小さいのは、断層表層領域を考慮しない場合に破壊開始点が右側下端の方が、2倍程度大きい最大値をとることに起因している。言い換えると、破壊開始点が中央下端で断層表層領域を考慮した場合は、破壊開始点が右側下端で断層表層領域を考慮しない場合に対して、最大速度はx方向で約1.7倍、y方向で1.0～1.1倍、最大加速度はx方向、y方向ともに1.0～1.2倍となる。断層表層領域を考慮した場合の地震動は、破壊開始点が中央下端でも右側下端でも、大きく変化していないことがわかる。断層表層領域を除いた領域で生じる地震動は、破壊開始点の位置の違いによる影響(ディレクティブイティ)を大きく受けるのに対して、断層表層領域で生じる地震動はその影響をあまり受けないのは、断層表層領域で生じる地震動が、観測点の極近傍で発生するものの影響が支配的であるためであると考えられる。

本シミュレーションでは、断層表層領域からの地震動発生を考える場合に、断層表層領域のすべり量、応力降下量、ライズタイムは背景領域と同じ値に設定した。また、一般には地表に近づくほど地盤剛性

は低下し、地盤内の拘束応力も低下すると考えられるが、断層表層領域内ではすべり量、応力降下量、ライズタイムおよびすべり速度時間関数分布を一樣と考えた。このような条件下において予測された地震動は、断層表層領域を考慮しない場合(破壊開始点が右側下端)に比べて、最大で最大速度が1.7倍程度、最大加速度1.6倍程度となることがわかった。

5. おわりに

断層から水平方向および深度方向に極めて近い位置での地震動を、精度良く、合理的に評価するために、全無限一様弾性体のグリーン関数公式を用いた理論地震動の数値シミュレーション法を用いて、このような断層の極近傍において理論地震動シミュレーションを実施する際の積分誤差の評価を行った。その結果、観測点との距離 L に対して積分要素寸法が $0.5 \times L$ 以下となる必要があることを確認し、実際の地表まで露頭した断層を考える場合の効率的な要素分割を提案した。

その上で本論文の主題である、地震発生層上端～地表においても地震動を発生する可能性があると考えた場合に、断層から極めて近い位置における地震動がどの程度の強度となりうるかについて、数値シミュレーションを行った。本シミュレーションには、全無限一様弾性体の理論地震動シミュレーション法を適用し、モデル化には、積分誤差評価の結果から提案した積分要素分割を用いた。本検討で用いた条件の下では、断層表層領域における地震動の生成を考慮した場合には、断層表層領域を考慮しない場合(破壊開始点が右側下端)に比べて、最大速度(平均)、最大加速度(平均)は、それぞれ1.7倍、1.6倍程度となった。

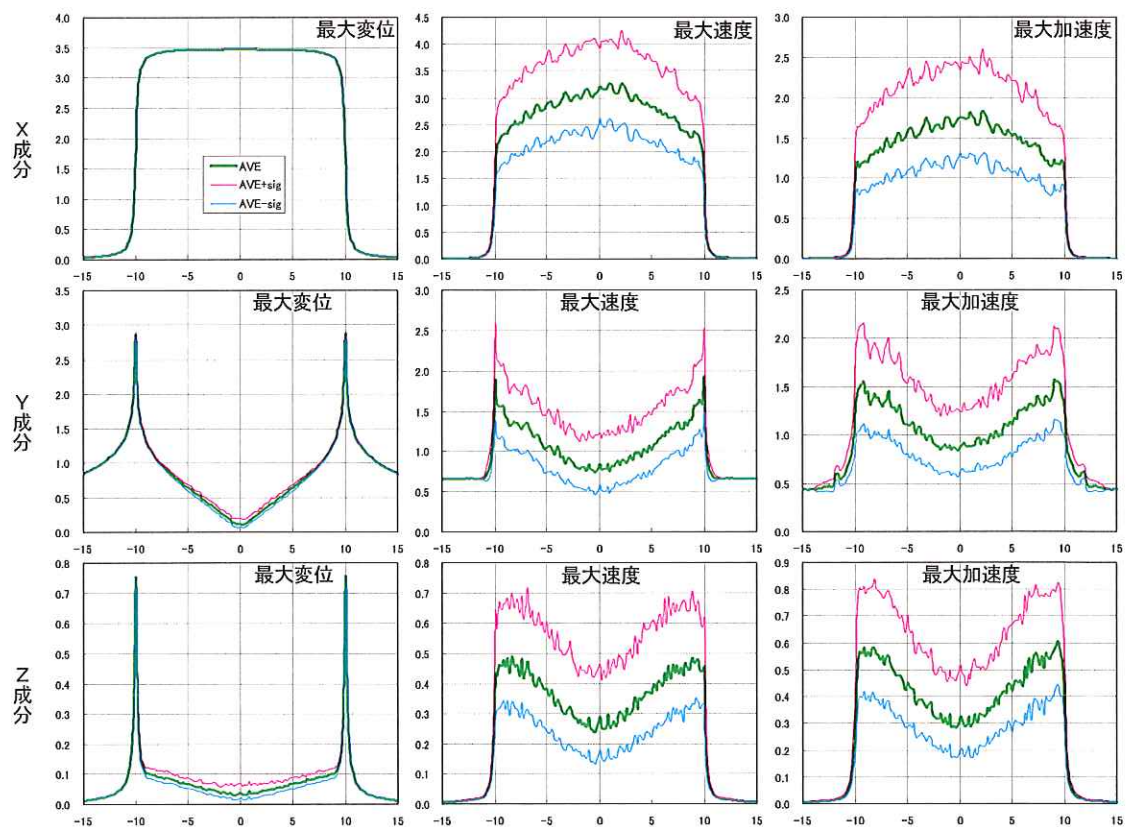


図9 断層の極近傍の理論地震動シミュレーション結果 (Case1) (横軸: x座標 (km))

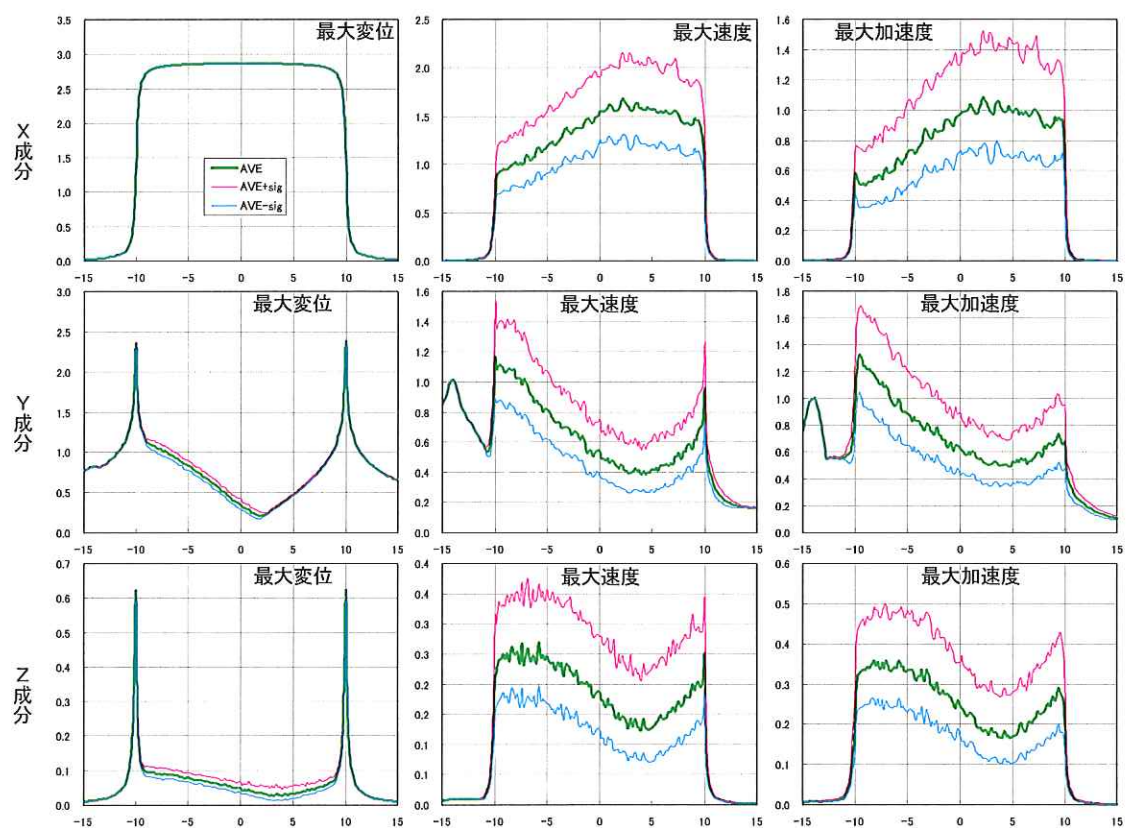


図10 断層の極近傍の理論地震動シミュレーション結果 (Case2) (横軸：x座標 (km))

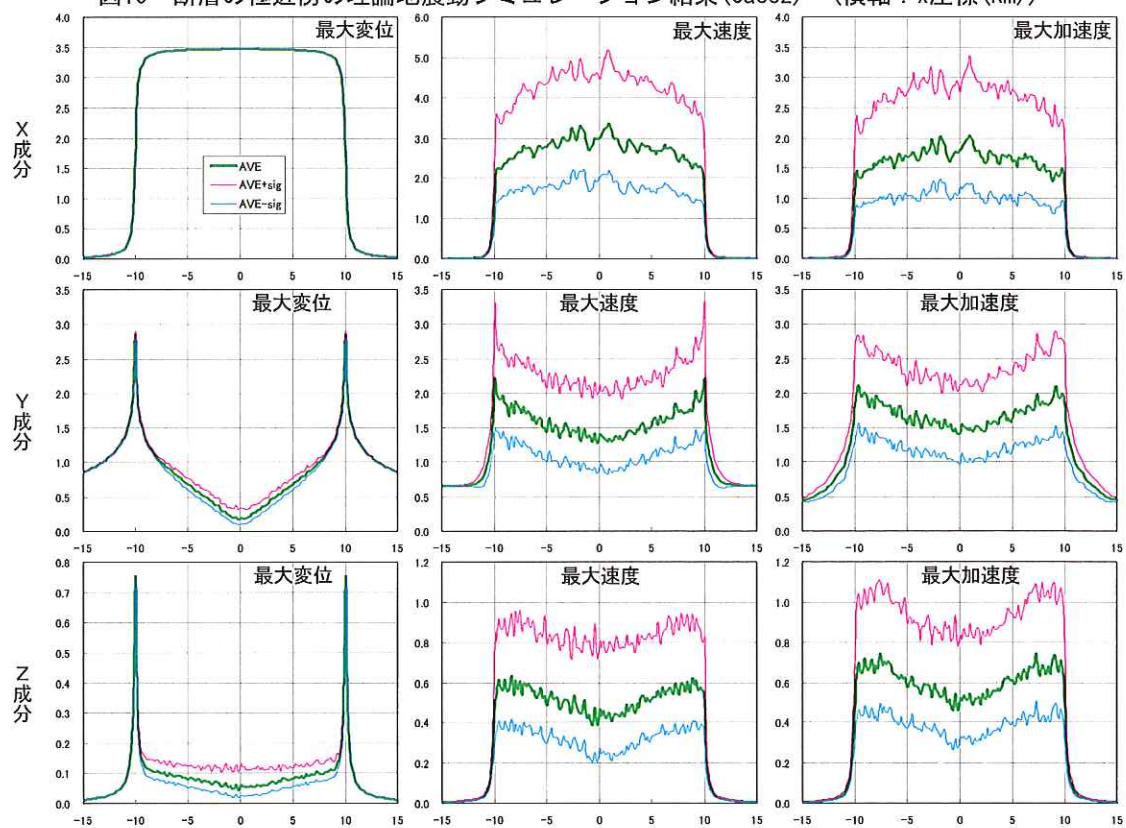


図11 断層の極近傍の理論地震動シミュレーション結果 (Case3) (横軸：x座標 (km))

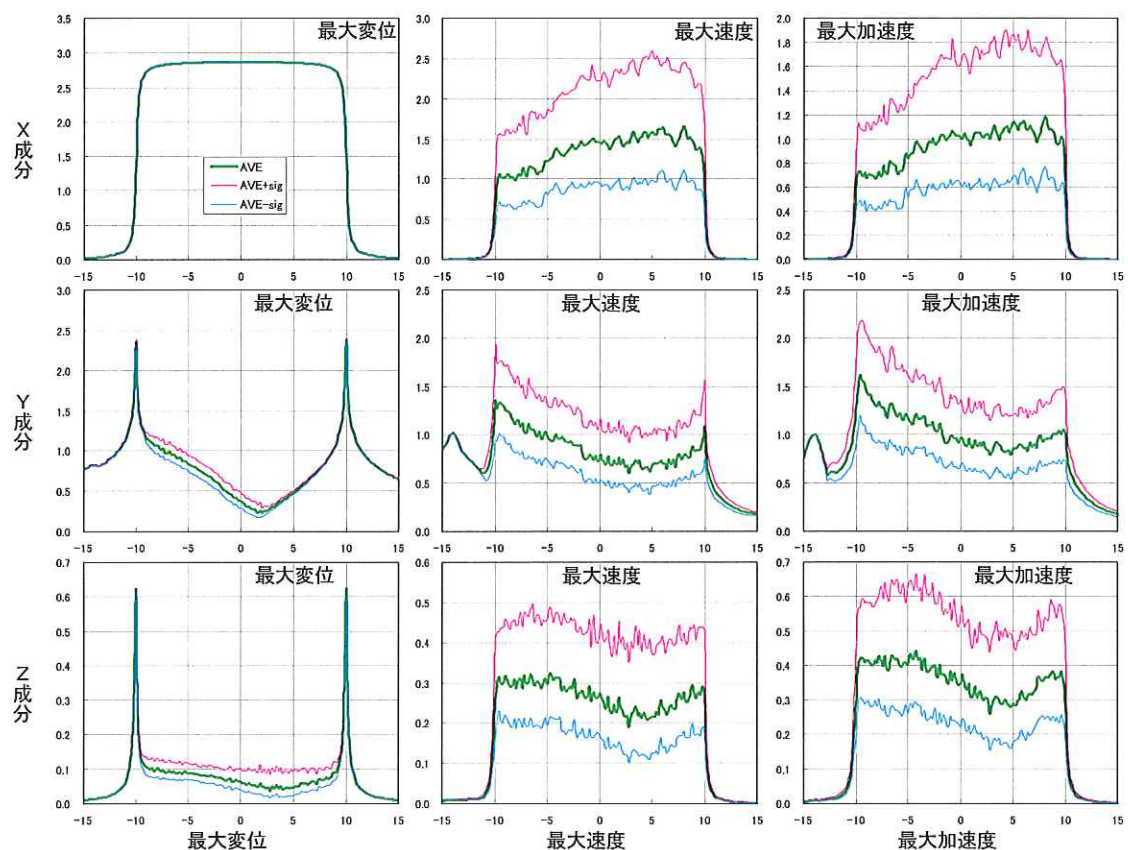


図12 断層の極近傍の理論地震動シミュレーション結果 (Case4) (横軸: x座標 (km))

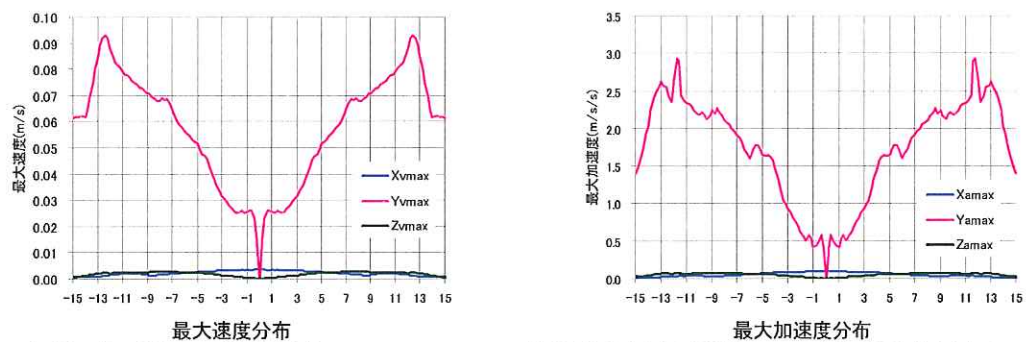


図13 断層の極近傍の理論地震動シミュレーション結果 (断層表層領域無し、破壊開始点が中央下端) (横軸: x座標 (km))

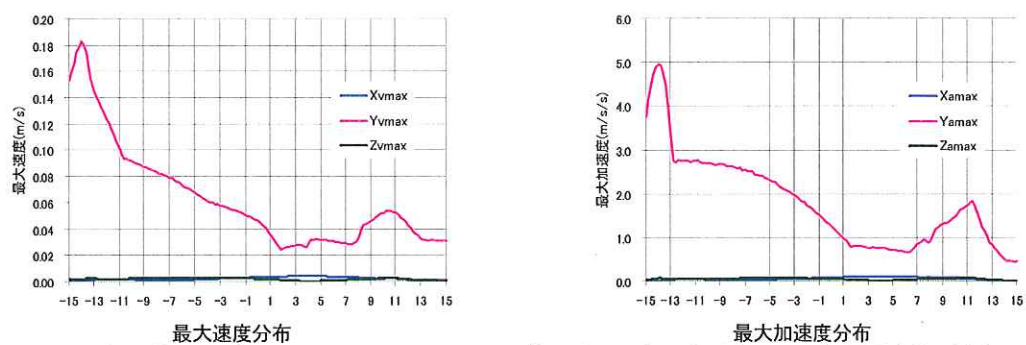


図14 断層の極近傍の理論地震動シミュレーション結果 (断層表層領域無し、破壊開始点が右側下端) (横軸: x座標 (km))

本シミュレーションでは、断層表層領域からの地震動発生を考える場合に、断層表層領域のすべり量、応力降下量、ライズタイムは背景領域と同じ値に設定した。また、一般には地表に近づくほど地盤剛性は低下し、地盤内の拘束応力も低下すると考えられるが、断層表層領域内ではすべり量、応力降下量、ライズタイムおよびすべり速度時間関数分布を一樣と考えた。今後は、断層表層領域におけるすべり速度時間関数の分布に対して、物理的考察を加えて、より現実に近いシミュレーションを行うことが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修、(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007.
- 2) 一般財団法人 日本建築総合試験所：時刻歴応答解析建築物構造安全性能評価業務方法書、<http://www.gbr.or.jp/contents/documents/center/8K-103.pdf>、2014.
- 3) 首都直下地震モデル検討会：首都直下のM7クラスの地震及び相模トラフ沿いのM8クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書、2015.
- 4) 兵庫県：兵庫県の地震被害想定(内陸型活断層)、<https://web.pref.hyogo.lg.jp/kk38/zisinnhigaisoutei.html>、2014.
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：鳥取県西部地震の観測記録を利用した強震動評価手法の検証について、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/02oct_tottori/index.htm、2000.
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：2005年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動評価手法の検証について、http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_fukuoka/index.htm、2008.
- 7) 野津厚：統計的グリーン関数に近地項と中間項を導入するための簡便な方法、第12回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.190-193、2006.
- 8) 大西良広：強震動予測手法の高精度化と建築物被害推定への利用に関する研究、京都大学学位論文、http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/120855/2/D_Onishi_Yoshihiro.pdf、2010.
- 9) 入倉孝次郎：強震動予測レシピー 一大地震による強震動の予測手法一、京都大学防災研究所年報、第47号A、pp.25-45、2004.
- 10) 地震調査研究推進本部：付録3 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)、2009.
- 11) 家村浩和：5学会合同による柏崎刈羽原子力発電所中越沖地震被害調査と報告、第3回近年の国内外で発生した大地震の記録と課題に関するシンポジウム、pp.33-37、2010.
- 12) 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所 東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について、https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/trouble/data/20120914_1F.pdf、2012.
- 13) 原子力規制庁：大飯発電所敷地内破碎帯の調査に関する有識者会合、http://www.nsr.go.jp/committee/youshikisya/ooi_hasaitai/、2012.
- 14) 原子力規制庁：東北電力東通原子力発電所敷地内破碎帯の調査に関する有識者会合、http://www.nsr.go.jp/committee/youshikisya/higashidori_hasaitai/、2012.
- 15) 岡田篤正、竹村恵二、加藤茂弘：兵庫県南部地震を引き起こした野島断層の諸性質、人と自然、No.9、pp.33-56、1998.
- 16) 岡田篤正、松田時彦：1927年北丹後地震の地震断層、活断層研究、No.16、pp.95-135、1997.
- 17) 山田雅行、羽田浩二、今井隆太、藤原広行：断層の極近傍を対象とした理論地震動シミュレーションの積分誤差の評価、日本地震工学会・大会、2013.
- 18) 安芸敬一、P.G.リチャーズ著、上西幸司、亀伸樹、青地秀雄訳：地震学 定量的アプローチ、2004.
- 19) K. Hayami : A Projection Transformation Method for Nearly Singular Surface Boundary Element Integrals, Lecture Notes in Engineering, Vol.73, 1992.
- 20) 亀伸樹：地震停止機構の理論的研究ー複雑な形状の断層破壊の新しい計算方法を用いてー、学位博士論文(理学)、東京大学、<http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3157743>、1998.
- 21) Hisada, Y, and J. Bielak : A Theoretical Method for Computing Near-Fault Strong Motions in Layered Half-Space Considering Static Offset due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity, Bull. of the Seism. Soc.of America, Vol.93, No.3, pp.1154-1168, 2003.
- 22) 日本建築学会：地盤震動一現象と理論一、pp.84-102、2005.

- 23) 中村洋光、宮武隆：断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式、地震2、No.53、pp.1-9、2000.

(受理：2014年8月5日)
(掲載決定：2015年4月9日)

Ground Motion Estimation in case of Rupture Surface Area using Theoretical Simulation Method for Very Near Site from a Fault

YAMADA Masayuki ¹⁾, HADA Koji ²⁾, IMAI Ryuta ³⁾
and FUJIWARA Hiroyuki ⁴⁾

1) Manager, NEWJEC Inc., Dr. Eng.

2) NEWJEC Inc., M.S. Eng.

3) Senior Manager, Mizuho Information & Research Institute, Ph.D.

4) Member, Director, NIED, Dr. Sci.

ABSTRACT

For the purpose of the ground motion estimation at a very near site from a fault, we prepared the theoretical simulation method based on the Green's function formula for uniform elastic fullspace, and evaluated integral error of the simulated theoretical ground motion at a very near site from a fault. As a result, the element size for integral had to be less than half of the distance between the element and the site. And, the effective element division was suggested for the fault which outcropped to the ground surface.

Furthermore, the theoretical motion was simulated numerically at a very near site from a fault, in the case that the strong ground motion generated from the surface area, which lay from the seismogenic upper limit to the surface. Under consideration for ground motion generation from the surface area, it was illustrated that the predicted maximum velocity (in average) and maximum acceleration (in average) were about 1.5 times for without consideration of the surface area when hypocenter located the bottom right of the SMGA.

Keywords: Very near site from a fault, Theoretical simulation method, Element size for integral, Surface area