

### 3.3.11 三次元強震動波形の推定に関する研究

#### 目 次

##### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5 ヶ年の年次実施計画
- (e) 平成 18 年度業務目的

##### (2) 平成 18 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
  - 1) 三次元強震動推定手法の構築
  - 2) 既往検討波の必要油量と 3 次元震動台の限界性能
  - 3) 3 次元震動台の限界性能を考慮した強震動
- (c) 業務の成果
  - 1) 三次元強震動推定手法の構築
  - 2) 既往検討波の必要油量と 3 次元震動台の限界性能
  - 3) 3 次元震動台の限界性能を考慮した強震動
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 三次元強震動波形の推定に関する研究

(b) 担当者

| 所 属            | 役 職   | 氏 名   | メールアドレス            |
|----------------|-------|-------|--------------------|
| 財団法人 地域地盤環境研究所 | 特別研究員 | 入倉孝次郎 | irikura@geor.or.jp |

(c) 業務の目的

将来発生する可能性の高い地震を想定して3次元強震動を推定する方法を構築し、最大規模の強震動試算を行う。また、設計に用いられている地域波についても調査し、これらを3.3.10で検討される三次元地震動データベースに大地震強震動波形およびその前提資料として提供する。

(d) 5カ年の年次実施計画

1)平成14年度：

三次元強震動波形の推定手法に関する調査と大阪平野を対象とした推定手法の検討を行う。

大阪平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理を行う。

大阪平野を対象とした三次元強震動波形の推定を行う。

2)平成15年度：

濃尾平野を対象とする三次元強震動波形の推定手法を検討する。

濃尾平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理を行う。

濃尾平野を対象とした三次元強震動波形の推定を行う。

大阪平野を対象とした三次元強震動波形の推定を補足する。

3)平成16年度：

関東平野を対象とする三次元強震動波形の推定手法を検討する。

関東平野を対象とした強震動計算条件の収集・整理を行う。

関東平野を対象とした三次元強震動波形の推定を行う。

大阪平野・濃尾平野を対象とした三次元強震動波形を補足する。

三次元強震動波形を三次元強震動データベースに反映する。

4)平成17年度：

3次元強震動計算手法を適用条件毎に整理し、その解説を作成する。

過去の地震の大被害域ではあるが記録の得られていない地点において、強震動の試算を行う。

地域波の収集・整理を行う。

三次元地震動シミュレーション波形を三次元地震動データベースに登録するための情報整理とフォーマット変換を行う。

5)平成18年度：

3次元強震動計算手法およびそれに付随する周辺技術についての解説を追加作成し、これまでに作成した手法解説とともにユーザーが参照できる形式で整理する。

既往3次元強震動波形について、必要油量など3次元震動台の限界性能に関わる物理量を計算し、限界性能に対する位置付けを評価する。

3次元震動台の限界性能を考慮し、その能力を最大限活用する強震動を策定する。対象はパルス波的な震源近傍強震動とやや長周期地震動を含む継続時間の長い地震動の2タイプとする。

(e) 平成18年度業務目的

1) 三次元強震動波形推定手法の検討

昨年度までに、経験的グリーン関数法の手法および適用にあたっての留意点、条件についての解説を作成した。今年度は、本検討における強震動評価でも利用した統計的グリーン関数法について、その解説を作成する。また、断層破壊シナリオの設定法についてもまとめる。更に、既往の解説と併せて、ひとつの独立した手法マニュアルを完成する。

2) 既往検討波の必要油量と3次元震動台の限界性能

これまでに作成した3次元強震動波形は、条件に応じた強震動シミュレーションを実施したまでであり、震動台の性能で加震可能かどうかについての検討はおこなっていない。そこで、作成波形による必要油量および加速度 - 速度関係を評価し、3次元震動台の限界性能に対する作成波形の位置付けを把握する。

3) 3次元震動台の限界性能を考慮した強震動

3次元震動台で用いる地震波形は、その性能を越えたものであってはならないが、一方で性能限界に近い地震動を用意しておくことも重要である。そこで上記の油量および加速度 - 速度関係の評価を参考に、パルス波的な震源近傍強震動とやや長周期地震動を含む継続時間の長い地震動の2タイプについて、3次元震動台の能力を最大限活用することができる強震動波形を策定する。

(2)平成18年度の成果

(a) 業務の要約

平成18年度は次の各項目を実施した。

1) 三次元強震動推定手法の構築

本検討における強震動評価でも利用した統計的グリーン関数法と断層破壊シナリオの設定法について、強震動予測手法の整理および経験的グリーン関数法に関する既往の解説と併せてひとつの独立した手法マニュアルとすべく、手法解説を作成した。

## 2) 既往検討波の必要油量と3次元震動台の限界性能

平成17年度までに作成した3次元強震動波形について、震動台で必要とされる必要油量の時間変化を評価し、その最大値が震動台で供給できる最大油量に対してどの程度の割合になっているかを評価した。また、加速度 - 速度関係についても評価を行った。波形によっては、震動台の供給最大油量あるいは加速度 - 速度関係を越えたものがあることがわかった。

## 3) 3次元震動台の限界性能を考慮した強震動

上記検討において3次元震動台の供給最大油量を越えた波形に着目し、振幅調整を施すことにより、3次元震動台の能力を最大限活用できる、性能限界に近い地震動波形を作成した。また、それらが加速度 - 速度関係を満たしていることを確認した。その中には、パルス波的な震源近傍強震動とやや長周期地震動を含む継続時間の長い地震動の2タイプが含まれる。

## (b) 業務の実施方法

### 1) 三次元強震動推定手法の構築

#### a) 統計的グリーン関数法の概要

統計的グリーン関数法について、その手法について解説し、経験的グリーン関数法と組み合わせて用いることのできる簡単なプログラム例を示した。

#### b) 断層破壊シナリオ設定法の概要

強震動評価において重要となる非一様断層破壊シナリオの設定法について整理し、解説を行った。

#### c) 三次元強震動推定手法の整理

a)、b)の解説と既往の手法解説とを併せて、ひとつの独立した手法マニュアルをPDFファイル形式で提供した。

### 2) 既往検討波の必要油量と3次元震動台の限界性能

#### a) 既往検討波形の必要油量評価

3次元震動台で用いられている油量計算プログラムを既往計算波形による油量計算のために修正し、これまでに本検討を通じて計算した34波形について、必要油量の時間変化を評価した。

#### b) 3次元震動台の限界性能との比較

a)で計算した必要油量および加速度 - 速度関係について、3次元震動台の限界性能との比較を実施し、加震可能性について検討した。

### 3) 3次元震動台の限界性能を考慮した強震動

#### a) 3次元震動台の限界性能を考慮した強震動作成

2)の検討結果を参考に、パルス波的な震源近傍強震動とやや長周期地震動を含む継続時間の長い地震動の2タイプについて、3次元震動台の能力を最大限活用できる性能限界に近い地震動波形を作成した。

#### b) 三次元地震動データベースへの波形提供

a)で作成した波形について、3.3.10で検討される三次元地震動データベースに取り込むべく、ヘッダ情報を加えたK-NETフォーマットの波形ファイルとして提供した。

(c) 業務の成果

1) 三次元強震動推定手法の構築

a) 強震動波形計算手法の概要

地震とは、震源断層の破壊によって発生した地震波動が伝播し、サイト近傍の地盤構造の影響を受けて対象構造物を揺らす現象である。このとき、規模の小さい地震の震源は断層面積およびすべり量が小さく、規模の大きい地震は大きな面積の断層が大きくすべることになる(図1)。

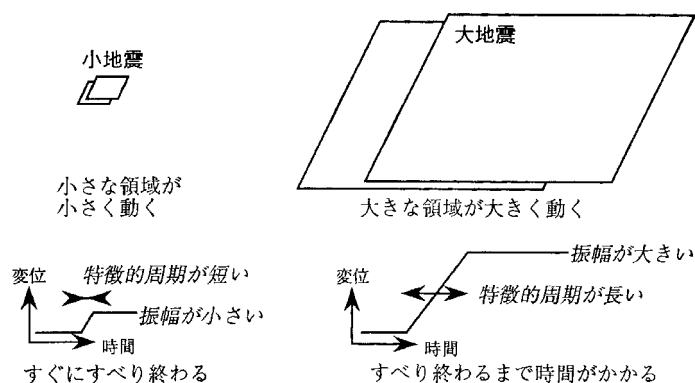


図1 大地震と小地震

大地震に比べて小地震の震源断層は小さく、その観測記録は点に力が加わった場合の伝播経路およびサイト周辺地盤の応答と近似的に考えることができる(グリーン関数)。大地震の断層面を幾つかの小断層に分割すると、断層全体が破壊する大地震は小断層がそれぞれ破壊する小地震の集合として評価することができる。すべりの成長と断層破壊の伝播による時間遅れと、地震波が生じた場所(小断層)から地震動を評価する地点との距離による震幅の違いを考慮して小地震による波形を順に足し合わせると、大地震による波形を合成することができる。これが強震動評価の基本的な考え方である。このとき、適用条件に応じて小地震の記録(グリーン関数)をどのように仮定するかにより、

- 1) 経験的グリーン関数法(観測小地震波形を用いる: Irikura(1986)<sup>1)</sup>など)
- 2) 統計的グリーン関数法(スペクトルに適合させた人工地震波を用いる: 釜江・他(1990)<sup>2)</sup>など)
- 3) 理論計算法(波動伝播理論に基づく計算波を用いる: 3次元差分法 [Graves(1996)<sup>3)</sup>]など)
- 4) ハイブリッド法(2), 3)の長所を活かし短所を補うように合成)

の各種法が用いられている。今年度は、これらのうち統計的グリーン関数法について

解説する。また、強震動シミュレーションにあたって重要となる、断層破壊シナリオの設定法についても解説を行う。

b) 統計的グリーン関数法

想定する地震断層に経験的グリーン関数法を適用して強震動を予測しようとする際、実際には適当な小地震の観測記録が事前に得られていることは稀である。そこで、<sup>2</sup> 則に基づくスペクトル形状を満たす小地震波形を、数値計算によって作成する試み（統計的小地震波形の合成）がおこなわれる場合もある [釜江・他(1990)<sup>2</sup>]。そのようにして設定した基盤地震動の例を図2に示す。

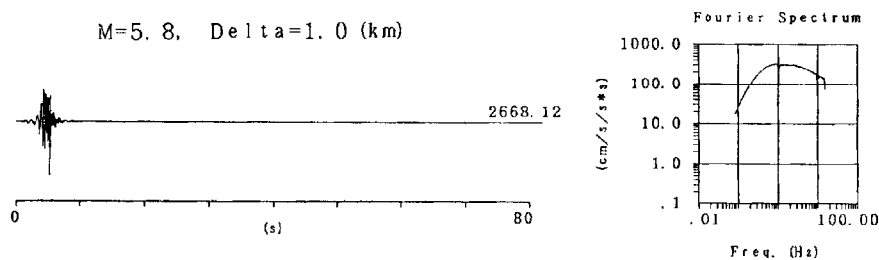


図2 統計的グリーン関数の例

<sup>2</sup> 則を満たす震源波形の加速度フーリエ・スペクトル  $S_A(f)$  は、

$$S_A(f) = R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot PRTITN \cdot \frac{\pi M_0}{\rho V_s^3} \frac{f^2}{1 + (f/f_c)^2} \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{max})^n}} \quad (1)$$

と表すことができる [Boore(1983)<sup>4</sup>]。ここで、 $M_0$  は地震モーメント、 $\rho$ 、 $V_s$  は地震が発生する媒質の密度、S波速度である。 $R$  は地震波の放射特性（断層すべり方向との離角に依存する地震動の強さ）を表す係数である。 $FS$  は地表面の影響を考慮する係数で、地表面の解放波であれば2.0である。 $PRTITN$  は、水平方向の2成分にエネルギーを分配する係数で、一般には0.71が用いられる。また、 $f_{max}$  と呼ばれるある周波数より高周波数で観測スペクトルの振幅が更になくなることが知られており、ここでは経験的に震源スペクトルにその効果を導入している。 $f_c$  [Brune(1970)<sup>5</sup>]、 $f_{max}$  [Faccioli(1986)<sup>6</sup>] は、例えば、

$$f_c = 4.9 \times 10^6 V_s \left( \frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$f_{max} = 7.31 \times 10^3 M_0^{-0.12} \quad (3)$$

のように経験的な関係が得られている。 $f_{max}$  で表現する地震動の高周波数限界は、そ

の生成過程を中心に議論がおこなわれている分野であり、その表現方法はこの他にも多くのものがある（例えば ）。

<sup>2</sup> 則を模式化した加速度スペクトルを図3に示す。ここで示したように、 $f_c$ と地震モーメントが3乗の関係にあることがわかる。  $\Delta\sigma$ はストレス・ドロップ（応力降下量）と呼ばれる量であり、断層面全体の平均としては50~100bar（5~10MPa）程度が一般的である。ストレス・ドロップが大きいと「硬く」壊れて短周期の波を多く放射する（ $f_c$ がより高周波数になる）地震、小さいと「軟らかく」壊れて短周期成分の少ない（ $f_c$ が低周波に移動）地震になる。統計的波形合成法で用いる要素地震のストレス・ドロップは、断層全体の面積と地震モーメントから導かれるストレス・ドロップと対応している必要がある。

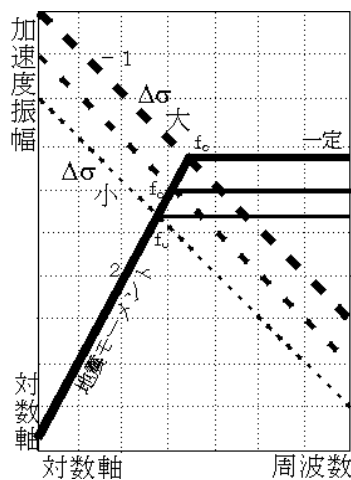


図3 模式的な加速度震源スペクトル

(1)~(3)式で注意を要するのは、(1)式は理論式であるために用いられるパラメータの単位系がCGSあるいはMKSで統一されているのに対して、(2)、(3)式は経験式であるために、使い易い単位系が用いられており、地震モーメントが dyne·cm、S波速度が km/s、ストレス・ドロップは bar（0.1MPa）が前提となっている。

次に、震源からある距離  $r$  までの伝播経路の特徴を上記の震源スペクトル  $S_A(f)$  に加味すると、

$$R_A(f) = S_A(f) \cdot \frac{1}{r} \cdot \exp\left(\frac{-\pi f \cdot x}{Q(f) \cdot V_s}\right) \quad (4)$$

のようになる。ここで、 $r$ は震源距離であり、 $1/r$ は実体波（P波，S波）の幾何減衰を表している。また、 $Q(f)$ は周波数毎に定義された減衰係数（Q値）である。地殻のQ値は周波数依存した形でモデル化されることが多く、日本の平均的な値としては、

$$Q(f) = 130 \times f^{0.77} \quad (5)$$

などが用いられている [ 福島(1994)<sup>7)</sup> ]、これで、任意距離の岩盤におけるスペクトル形状を記述することができる。これに、何らかの位相特性 ( Boore(1983)<sup>4)</sup>ではランダム位相) を与えることにより、図 2 に示したような、 $f^{-2}$ 則を満たす理論地震波形を作ることができる。

また、地盤増幅特性を何らかの形で評価でき ( 記録による経験量あるいは地震応答計算)、それを  $G(f)$ すると、上記の岩盤スペクトル  $R_A(f)$ を入射波として、

$$F_A(f) = R_A(f) \cdot G(f) \quad (6)$$

のように地表面地震動  $F_A(f)$ をシミュレーションすることが可能である。

ここまでの表現は振幅スペクトルに関するものであるが、波形を作成するには位相特性を設定する必要がある。一般には、ランダム位相のホワイト・ノイズに波形包絡線を掛けたものを作成し、そのスペクトルが(1)式を満たすように振幅調整をすることがおこなわれる。Boore(1983)<sup>4)</sup>は、この波形包絡線に以下のような関数を用いている。

$$W(t) = a \cdot t^b \cdot e^{-ct} \cdot H(t) \quad (7)$$

$$a = \left[ \frac{(2c)^{2b+1}}{\Gamma(2b+1)} \right]^{1/2}$$

$$b = -\varepsilon \ln \eta / [1 + \varepsilon (\ln \varepsilon - 1)] \quad (8)$$

$$c = b / \varepsilon T_w$$

の関数形で示される時間ウィンドウを先のホワイト・ノイズに施す。ここで、 $T_w = 2.0 / f_c$ であり、(2)式を介して地震規模と関連している。また、一般には  $\varepsilon = 0.2$ 、 $\eta = 0.05$ が用いられる。

この他にも、Jennings et al.(1968)<sup>8)</sup>による波形包絡線や、

$$W(t) = t \cdot \left(1 - \frac{t}{T_w}\right) \quad 0 < t < T_w \quad (16)$$

のように簡単な2次関数を用いることもできる。

この考え方を FORTRAN のサブルーチンとして表したものを以下に示す。サブルーチン rand は擬似一様乱数に対応している。

```

C *****
C   subroutine stcst(maxtim,wsmall,csmall,cdum,env,ntim,dt,rmo,sdrop,
C   &                dist,fmax,fn,vs,ro,q0,qf,nf1,nf2)
C *****
C   parameter ( rtp=0.63, fs=2.0, prtitt=0.71 )
C   dimension wsmall(maxtim),env(maxtim)
C   complex   csmall(maxtim),cdum(maxtim)
C
C   pai=2.0*acos(0.0)
C   intrnd=1

```



```

C
tim=real(ntim)*dt
fc=4.9e6*vs*(sdrop/rmo)**(1.0/3.0)
tw=2.0/fc
C
amp0=rtp*fs*prt*tn*pai*rmo/(ro*(vs*1.0e5)**3.0)
amp0=amp0/tim
C
call rand(maxtim,wsmall,ntim,intrnd)
C
itmax=10
do 1 it=1,itmax
C
  if(it.eq.1) then
    call envlop(maxtim,env,ntim,dt,tw)
  else
    call taper(maxtim,env,ntim,dt,tw)
  end if
  do 3 i=1,ntim
    csmall(i)=cplx(env(i)*wsmall(i),0.0)
3  continue
C
  call fft(maxtim,ntim,csmall,-1)
C
  if(it.eq.itmax) goto 1
  csmall(1)=(0.0,0.0)
  do 4 i=2,nf1-1
    csmall(i)=(0.0,0.0)
    csmall(ntim+2-i)=conjg(csmall(i))
4  continue
  do 5 i=nf1,nf2
    frq=real(i-1)/tim
    omg=2.0*pai*frq
    amp=amp0*(frq**2.0)*(1.0/(1.0+(frq/fc)**2.0))
    & *(1.0/sqrt(1.0+(frq/fmax)**fn))
    q=q0*frq**qf
    amp=amp*exp(-1.0*pai*frq*dist/(q*vs))/(dist*1.0e5)
    scl=amp/cabs(csmall(i))
    csmall(i)=csmall(i)*cplx(scl,0.0)
    csmall(ntim+2-i)=conjg(csmall(i))
5  continue
  do 6 i=nf2+1,ntim/2
    csmall(i)=(0.0,0.0)
    csmall(ntim+2-i)=conjg(csmall(i))
6  continue
C
  do 7 i=1,ntim
    cdum(i)=csmall(i)
7  continue
  call fft(maxtim,ntim,cdum,1)
  do 8 i=1,ntim
    wsmall(i)=real(cdum(i))
8  continue
C
1 continue
C
return
end
C *****
C subroutine envlop(maxtim,env,ntim,dt,tw)
C *****
C dimension env(maxtim)
C
C nmax=int(tw/dt+0.5)
C
C do 1 i=1,nmax
  t=real(i-1)*dt
  env(i)=t*(1.0-t/tw)
1 continue
  do 2 i=nmax+1,ntim
    env(i)=0.0

```

```

2 continue
C
  return
  end
C *****
  subroutine taper(maxtim,env,ntim,dt,tw)
C *****
  dimension env(maxtim)
C
  nmax=int(tw/dt+0.5)
  ntaper=int(1.0/dt+0.5)
  do 1 i=1,ntim
    if(i.le.nmax) then
      www=1.0
    else if(i.le.(nmax+ntaper)) then
      www=real(nmax+ntaper-i)/real(ntaper)
    else if(i.le.(ntim-ntaper)) then
      www=0.0
    else
      www=real(i-(ntim-ntaper))/real(ntaper)
    end if
    env(i)=www
  1 continue
C
  return
  end

```

### c) 断層破壊シナリオの設定

強震動シミュレーションのための震源断層モデルの設定法として、入倉・三宅 (2001)<sup>9)</sup> および Irikura et al. (2004)<sup>10)</sup> による「レシピ」について概説する。基本的には既往地震の断層破壊過程から経験的に平均的な特性を抽出し、それを将来発生する地震の断層破壊シナリオに適用しようという試みに相当する。

#### Step 1: 断層破壊面積 ( $S = LW$ )

断層長さ  $L$  を決め、地震発生層厚と断層傾斜を考慮した最大幅 ( $W_{max}$ ) との関係で断層幅を設定する。

$$\begin{aligned}
 W \text{ (km)} &= L \text{ (km)} & L < W_{max} \\
 W \text{ (km)} &= W_{max} \text{ (km)} & L \geq W_{max}
 \end{aligned}$$

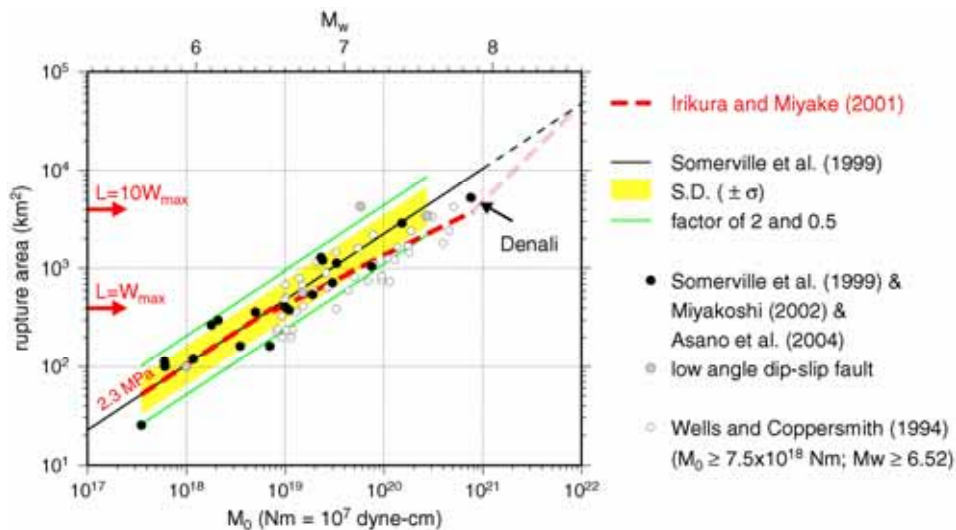


図4 地震モーメントと断層破壊面積のスケーリング則 [ Irikura et al.(2004)<sup>10)</sup> ]

Step 2: 地震モーメント ( $M_0$ )

断層破壊面積と地震モーメントの関係式から設定する ( 図4 )。

$$\begin{array}{lll} S \text{ (km}^2\text{)} = 2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3} & M_0 < 7.5 \times 10^{25} \text{ dyne-cm} & \text{Somerville et al. (1999) }^{11)} \\ S \text{ (km}^2\text{)} = 4.59 \times 10^{-11} \times M_0^{1/2} & M_0 \geq 7.5 \times 10^{25} \text{ dyne-cm} & \text{入倉・三宅 (2001) }^9) \\ S \text{ (km}^2\text{)} = 5.30 \times 10^{-25} \times M_0 & M_0 \geq 7.5 \times 10^{27} \text{ dyne-cm} & \text{Scholz (2002) }^{12)} \end{array}$$

Step 3: 平均応力降下量 ( $D_{sc}$ )

クラック理論 [Eshelby (1957)<sup>13)</sup>] 基づき設定する。短周期レベル [ 壇・他 (2001)<sup>14)</sup> ] を介した設定法も提案されている。

$$\Delta \bar{\sigma}_c = \frac{7\pi^{1.5}}{16} \cdot \frac{M_0}{S^{1.5}}$$

Step 4: アスペリティの総面積 ( $S_a$ )

断層破壊面積とアスペリティの総面積の経験則 [Somerville et al.(1999)<sup>11)</sup>, 入倉・三宅 (2001)<sup>9)</sup>] から設定。

$$S_a/S = 0.22$$

Step 5: アスペリティの応力降下量 ( $\Delta \sigma_a$ )

アスペリティ理論から、平均応力降下量に Step4 で設定した比の逆数を掛けて求める [入倉・三宅 (2001)<sup>9)</sup>]。

$$\Delta \sigma_a = \Delta \bar{\sigma}_c \cdot \frac{S}{S_a}$$

Step 6: アスペリティの個数 ( $N$ ) と配置

アスペリティの個数は対象断層帯のセグメンテーションに依存する。アスペリティの位置は地表変形量から推定して設定する。再来期間の短い地震であれば過去の地震時のアスペリティ位置が参照できる。近年では GPS 観測網が捉えたバック・スリップ量が援用できる。

Step 7: アスペリティの平均すべり量比 ( $D_a$ )

動的震源破壊シミュレーションの結果を基に、STEP6 で設定したアスペリティ個数 ( $N$ ) に応じて、断層面全体の平均すべり量 ( $D$ ) に対するアスペリティ部の平均すべり量 ( $D_a$ ) の比を設定する。

$$\begin{array}{ll} D_a/D = 2.3 & N = 1 \\ D_a/D = 2.0 & N = 2 \end{array}$$

$$D_a/D = 1.8$$

$$N = 3$$

Step 8: アスペリティの実効応力(  $\sigma_a$  ) と背景領域の実効応力 (  $\sigma_b$  )

アスペリティ部の実効応力(  $\sigma_a$  ) は応力降下量 (  $\Delta\sigma_a$  ) で近似できる。背景領域の実効応力(  $\sigma_b$  )は、動的震源破壊シミュレーションの結果より、アスペリティ部の 1/5 程度に設定できる。

Step 9: すべり速度時間関数の設定

Kostrov 型のすべり速度時間関数を想定する( 図5 )。その際、最大すべり速度は実効応力から、継続時間はアスペリティの大きさと破壊伝播速度から設定する。ここでも、動的震源破壊シミュレーションの結果が参照されている [ 中村・宮武(2000)<sup>15)</sup> ]

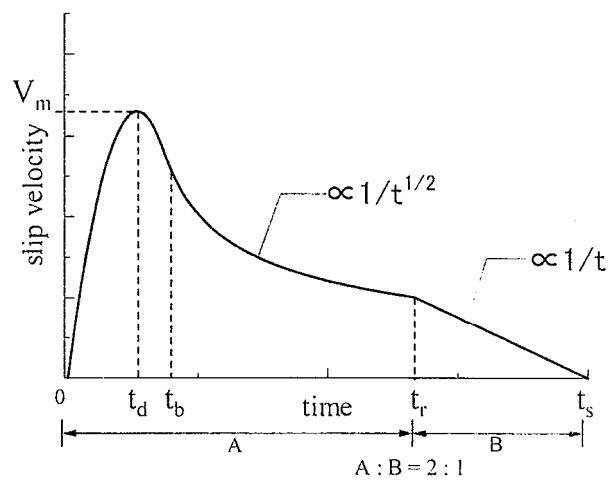


図5 強震動計算のためのすべり速度時間関数例 [ 中村・宮武(2000)<sup>15)</sup> ]

[その他のパラメータ] - 破壊開始点

内陸地震の破壊開始・終了点は、図6に示すように、活断層の分布形状から想定される [ 中田・他 (1998)<sup>16)</sup> ]

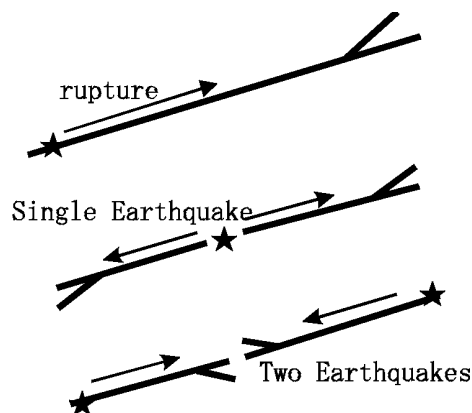


図6 活断層の分岐と想定される破壊開始点・破壊方向 [ 中田・他 (1998)<sup>16)</sup> ]

2) 既往検討波の必要油量と3次元震動台の限界性能

a) 既往検討波形の必要油量評価

3次元震動台で用いられている油量計算プログラムは、Windows上での動作を想定したFortranプログラムであり、3成分の速度波形と変位波形を入力して必要油量の時間変化を出力するものである。複数の波形を順次処理する作業に不向きであることと、お互いに関連しない速度波形と変位波形を誤って入力する懸念もあるため、計算加速度波形から速度波形と変位波形を内部演算して用いるようにプログラムの波形を既往計算波形による油量計算のために修正し、フリーUnixのLinux上で動作するように移植を行った。

提供されたテストデータでの動作を確認した上で、これまでに本検討で計算した34波について、必要油量の時間変化を計算した。その結果の一例を図7～11に示す。図7、8には、平成14年度に実施した、想定東南海・南海地震による大阪平野此花サイトにおける波形（加速度）を積分した速度および変位波形を示している。

図9は、これらの波形を必要油量計算プログラムに入力して得られた、必要油量の時間変化を示している。震動にともなって油量が単調に増加し、震動の終了とともに必要油量が飽和していることが分かる。この波形の必要油量は非常に多い。図10、11には、平成16年度に実施した2004年新潟県中越地震において余震観測記録から合成したK-NET小千谷サイトにおける例を示す。

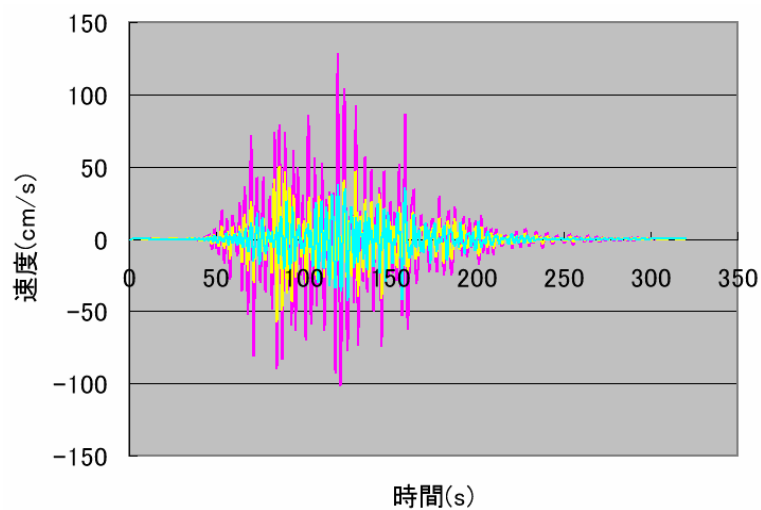


図7 想定東南海・南海地震による此花におけるシミュレーション速度波

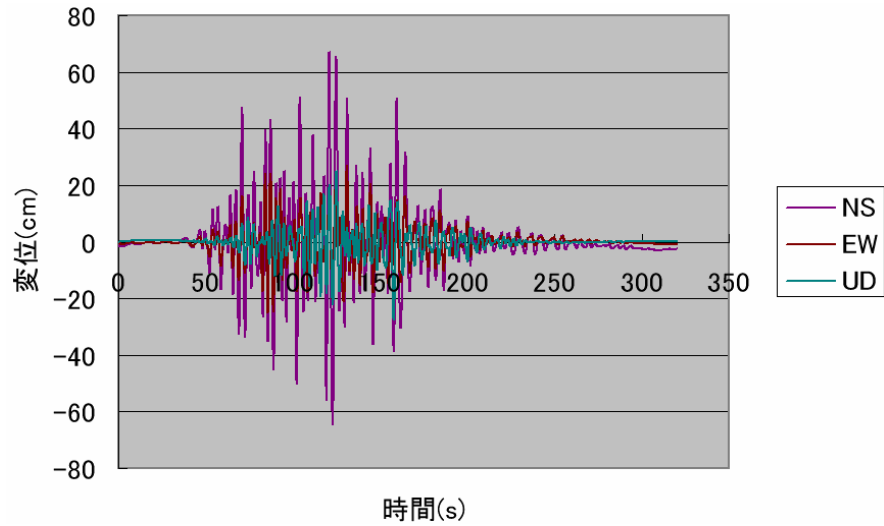


図 8 想定東南海・南海地震による此花におけるシミュレーション変位波

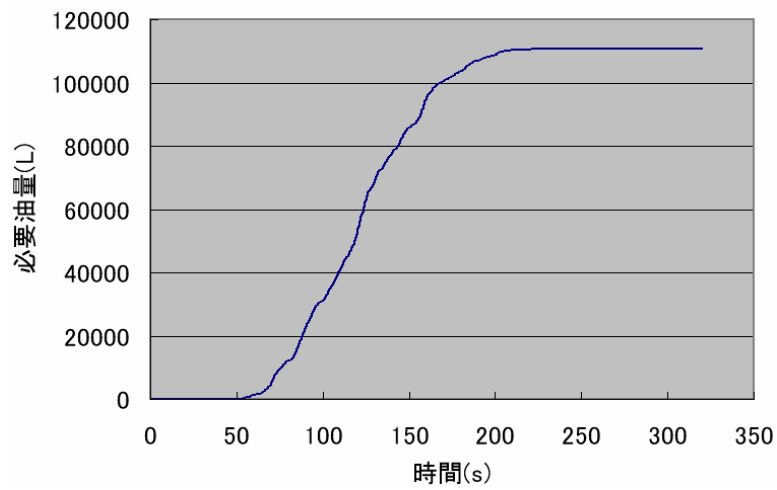


図 9 図 7 および図 8 の波形より計算された必要油量の時間変化

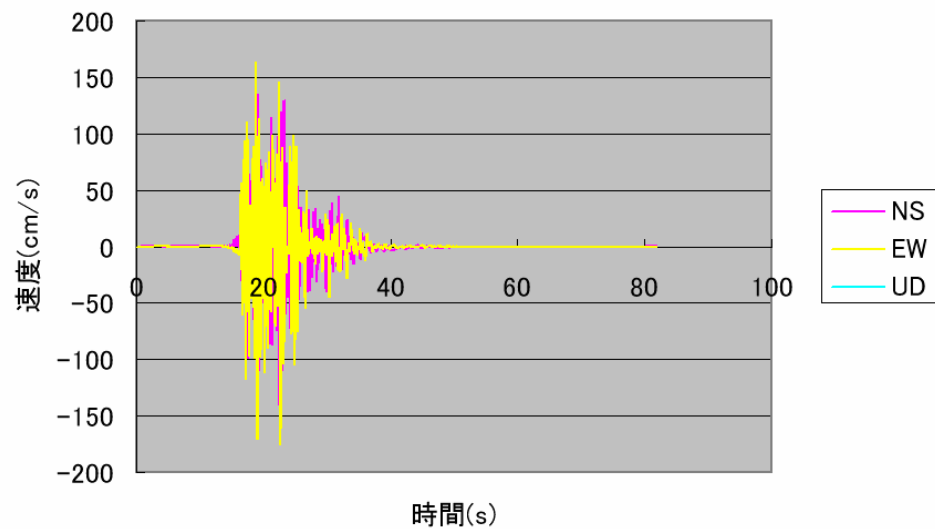


図10 2004年新潟県中越地震小千谷におけるシミュレーション速度波

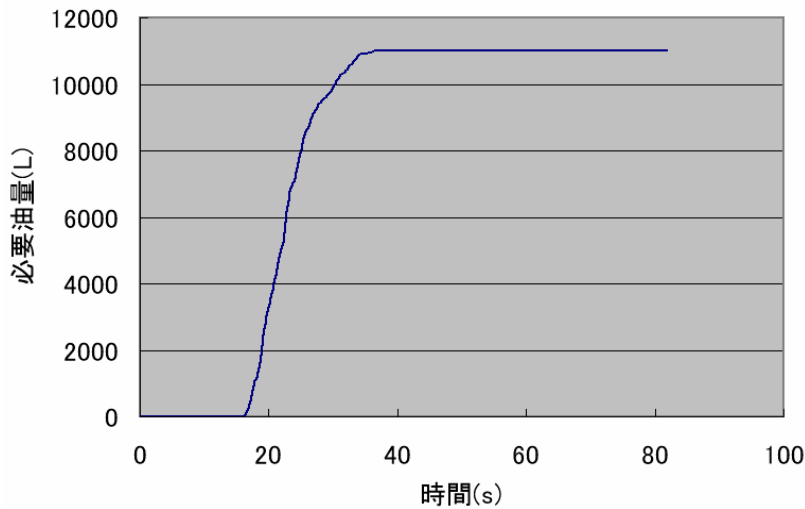


図11 図10の波形より計算された必要油量の時間変化

b) 3次元震動台の限界性能との比較

既往34波形の全てについて、同様の評価を行った結果を、一覧表として表1に示す。表中の手法は、EGF：経験的グリーン関数法、hybrid（統計的グリーン関数法と理論的手法のハイブリッド法）をそれぞれ示している。また、データ数（ $n$ ）とサンプリング時間間隔（ $dt$ ）を掛け合わせることで、波形ファイルの継続時間が分かる。全てのオリジナル波形は加速度であるが、積分を施すことで速度波形と変位波形を作成しており、それらの最大値を表に示している。なお、オリジナルの加速度波形において精度の応じたフィルター処理が施されているため、積分にあたってはオフセットおよび前後のテーパー処理を施すのみでフィルター処理はおこなっていない。図9および図11のような必要油量の時間変化よりその最大値を読み取り、3次元震動台の許容油量（20000L）との比（許容油量 / 必要油量）を安全係数として算出している。この定義では、安全係数が1を下回る場合に震動台の限界性能を越えることになる。そのようなデータは表1に明記している。

また、3次元震動台の性能は加振機推力とサーボ弁流量制限からも規定される。加震する構造物の重量および周波数帯域にも依存するが、1200トン搭載の条件において、  
 水平動：加速度 $900\text{cm/s}^2$ と速度 $200\text{cm/s}$ で描く楕円に入る、  
 上下動：加速度 $1500\text{cm/s}^2$ と速度 $70\text{cm/s}$ で描く楕円に入る、  
 ことが条件となる。また、最大変位は水平100cm，上下50cm以内である。図12には、平成17年度に実施した2003年十勝沖地震において余震観測記録から合成したK-NET広尾サイトにおける水平2成分の例を示す。NS成分でわずかに逸脱していることが分かる。

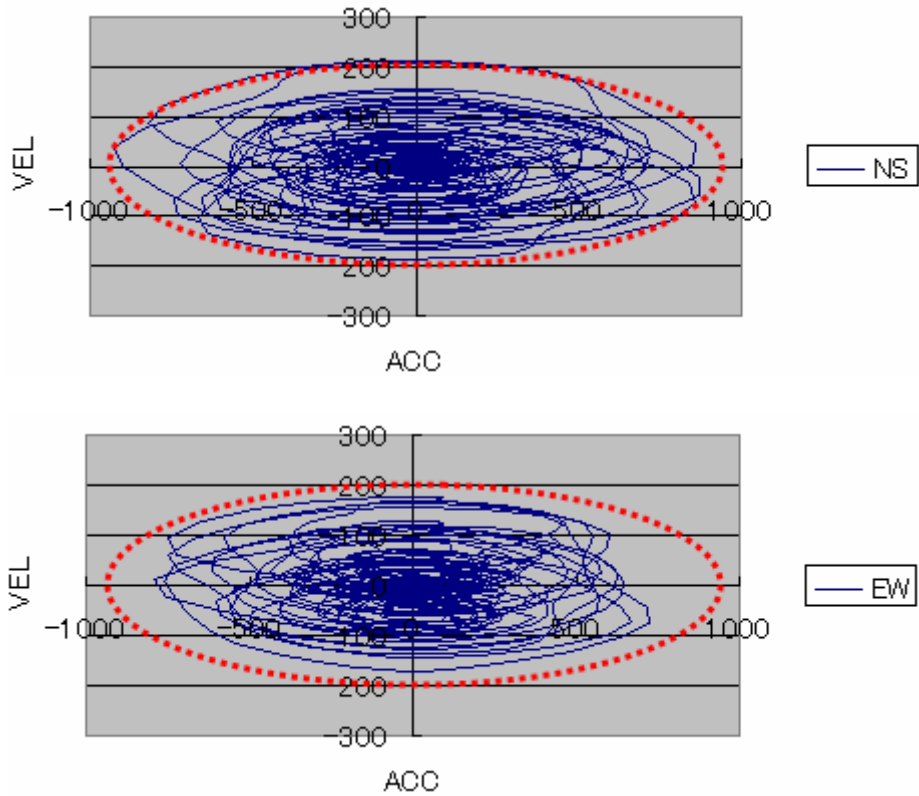


図12 2003年十勝沖地震による3次元震動台の水平加速度 - 速度関係

表1には、この観点で評価した場合の安全係数（最大許容値 / 計算値）を最右列に示しているが、条件を逸脱するものが3波見られる。なお、最大変位はそれぞれ全て許容範囲内であることを確認している。

表1 既往34波形の特性値と必要最大油量など



| 年度  | 地震     | サイト       | 手法            | n             | dt(s) | PGA(gal) | PGV(cm/s) | PGD(cm) | 油量安全確認   |         | 最大値安全係数 |      |
|-----|--------|-----------|---------------|---------------|-------|----------|-----------|---------|----------|---------|---------|------|
|     |        |           |               |               |       |          |           |         | 最大油量     | 安全係数    |         |      |
| H14 | 兵庫県南部  | 関震協戸大     | EGF           | 8192          | 0.010 | 54.2     | 11.5      | 9.11    | 1120.6   | 17.85   | 8.85    |      |
|     |        | K-NET西宮   | EGF           | 8192          | 0.010 | 708.6    | 116.1     | 30.75   | 13557.0  | 1.48    | 1.24    |      |
|     | 吉野     | KIK-net田尻 | EGF           | 16384         | 0.100 | 74.3     | 11.0      | 7.28    | 0.1      | 4670.84 | 18.09   |      |
|     |        | KIK-net此花 | EGF           | 16384         | 0.100 | 45.8     | 5.4       | 2.19    | 454.8    | 43.97   | 12.10   |      |
|     |        | 関震協弥栄     | EGF           | 16384         | 0.100 | 41.6     | 22.6      | 20.85   | 1286.1   | 15.55   | 8.85    |      |
|     | 東南海・南海 | KIK-net田尻 | EGF           | 32768         | 0.100 | 131.7    | 17.8      | 10.31   | 7375.7   | 2.71    | 4.93    |      |
|     |        | KIK-net此花 | EGF           | 32768         | 0.100 | 294.9    | 128.6     | 67.11   | 110690.4 | 0.18    | 1.56    |      |
|     |        | 関震協弥栄     | EGF           | 32768         | 0.100 | 33.9     | 15.5      | 12.58   | 9031.4   | 2.22    | 5.94    |      |
| H15 | 濃尾     | K-NET津島   | EGF           | 16384         | 0.100 | 862.3    | 69.2      | 17.04   | 42669.9  | 0.47    | 1.04    |      |
|     | 三河     | K-NET安城   | EGF           | 16384         | 0.100 | 782.8    | 30.3      | 2.55    | 1857.7   | 10.77   | 1.15    |      |
|     | 東南海    | K-NET津島   | EGF           | 32768         | 0.100 | 456.3    | 46.0      | 18.39   | 22077.3  | 0.91    | 1.96    |      |
|     |        | K-NET四条畷  | hybrid(2cmp.) | 32768         | 0.100 | 166.4    | 18.8      | 6.53    | 240.0    | 83.33   | 5.37    |      |
|     |        | 東南海・南海    | K-NET大阪       | hybrid(2cmp.) | 32768 | 0.100    | 154.0     | 27.2    | 16.84    | 5246.4  | 3.81    | 5.84 |
|     |        | K-NET羽曳野  | hybrid(2cmp.) | 32768         | 0.100 | 187.1    | 32.9      | 11.42   | 3561.5   | 5.62    | 4.24    |      |
| H16 | 中越     | K-NET小千谷  | EGF           | 8192          | 0.010 | 2170.5   | 175.2     | 23.48   | 11006.7  | 1.82    | 0.41    |      |
|     | 関東     | K-NET氷川   | EGF           | 8192          | 0.010 | 62.6     | 6.1       | 3.14    | 127.3    | 157.15  | 14.38   |      |
|     |        | K-NET小田原  | EGF           | 8192          | 0.010 | 822.4    | 77.6      | 26.34   | 24988.6  | 0.80    | 1.09    |      |
|     |        | K-NET新宿   | EGF           | 8192          | 0.010 | 440.8    | 36.9      | 11.26   | 2289.7   | 8.74    | 2.04    |      |
|     |        | K-NET横浜   | EGF           | 8192          | 0.010 | 772.7    | 102.9     | 19.13   | 16278.9  | 1.23    | 1.12    |      |
| H17 | 兵庫県南部  | 関震協神戸大    | hybrid        | 4096          | 0.013 | 226.2    | 33.5      | 11.23   | 805.5    | 24.83   | 3.98    |      |
|     |        | 関震協本山     | hybrid        | 4096          | 0.013 | 296.2    | 97.5      | 39.75   | 4388.6   | 4.56    | 2.04    |      |
|     |        | a00       | hybrid        | 4096          | 0.013 | 602.0    | 89.0      | 26.65   | 3808.1   | 5.25    | 1.38    |      |
|     |        | a01       | hybrid        | 4096          | 0.013 | 553.8    | 61.5      | 23.55   | 3197.9   | 6.25    | 1.62    |      |
|     |        | a02       | hybrid        | 4096          | 0.013 | 596.4    | 87.9      | 29.73   | 4147.6   | 4.82    | 1.51    |      |
|     |        | a03       | hybrid        | 4096          | 0.013 | 428.0    | 72.1      | 31.81   | 4167.4   | 4.80    | 1.98    |      |
|     |        | 中越        | K-NET十日町      | hybrid        | 4096  | 0.013    | 272.4     | 14.8    | 4.37     | 83.5    | 239.53  | 3.30 |
|     |        |           | KIK-net湯ノ谷    | hybrid        | 4096  | 0.013    | 335.4     | 25.5    | 5.14     | 428.5   | 46.68   | 2.66 |
|     | b00    |           | hybrid        | 4096          | 0.013 | 523.0    | 22.2      | 9.78    | 828.1    | 24.15   | 1.72    |      |
|     | b01    |           | hybrid        | 4096          | 0.013 | 587.6    | 27.3      | 11.68   | 935.5    | 21.38   | 1.53    |      |
|     | b02    |           | hybrid        | 4096          | 0.013 | 36.0     | 23.3      | 12.15   | 763.3    | 26.20   | 2.04    |      |
|     | b03    |           | hybrid        | 4096          | 0.013 | 325.2    | 15.5      | 10.82   | 434.8    | 46.00   | 2.77    |      |
|     | 十勝     | K-NET広尾   | hybrid        | 8192          | 0.010 | 928.9    | 47.0      | 11.37   | 3529.6   | 5.67    | 0.97    |      |
|     |        | S-1       | hybrid        | 8192          | 0.010 | 987.5    | 51.8      | 6.53    | 5092.5   | 3.93    | 0.91    |      |
|     |        | S-2       | hybrid        | 8192          | 0.010 | 483.0    | 18.5      | 2.54    | 785.9    | 25.45   | 1.86    |      |

許容油量:20000, A<sub>max</sub>=900, V<sub>max</sub>=200

### 3) 3次元震動台の限界性能を考慮した強震動

#### a) 3次元震動台の限界性能を考慮した強震動作成

2)で実施した検討結果(表1)から、必要油量で4波、加速度-速度関係で3波が3次元震動台の限界性能を越えていることが分かった。このうち、加速度-速度関係については加震する構造物の重量および周波数帯域にも依存して許容範囲が決まり、オリジナル波形が加速度であるため、表1の安全係数を用いた振幅調整によって適正なレベルの波形を比較的簡単に得ることができる。一方で、必要油量は地震動の周波数特性も関係する複雑なシステムの出力である。そこで、必要油量を超過した4波について、油量が限界を超えないように振幅調整を行った。波形の形状が同じであれば最大振幅と必要油量は基本的に1価関数であると考えられるため、ここでは2分法によって逐次近似的に最適解を求める方法を使った。

安全係数を1とすることは危険と考えられるので、安全係数1.1をターゲットとして検討を実施した。その結果得られた1923年関東地震による速度波形を図13に、それより計算される油量の時間変化を図14にそれぞれ一例として示す。検討した4波について、その特性値と必要油量を表2に示す。表1の最大加速度と比較すると、関東最大波約0.78倍、濃尾最大波約0.54倍、東南海最大波約0.88倍、東南海・南海最大波約0.28倍の振幅補正となっていることが分かる。また、これらの波形はいずれも加速度-速度関係を満足している。

以上の検討によって、内陸型および海溝型について、3次元震動台の限界性能を考

慮した強震動波形が用意された。図 15～18 にその波形およびスペクトルを示す。

ただし、一般には震源規模や地盤応答の違いによって地震動の振幅差が生じるため、動単純に波形を何倍かするような振幅調整では地震動の本質的な補正とはならない点に留意しておく必要がある。

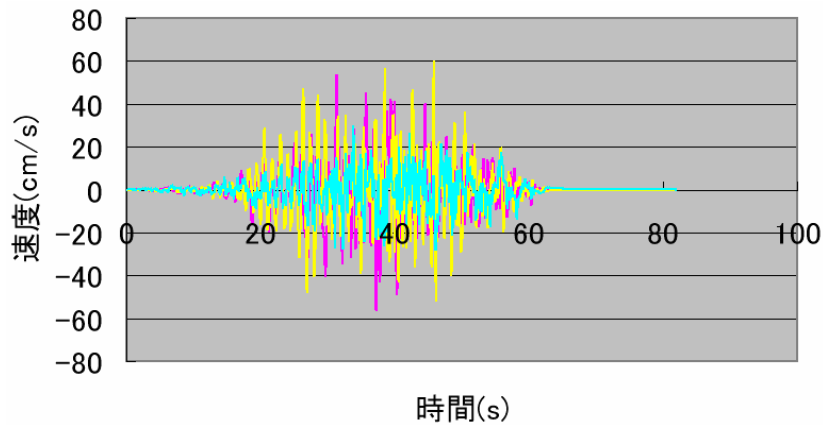


図13 1923年関東地震による3次元震動台の油量限界速度波

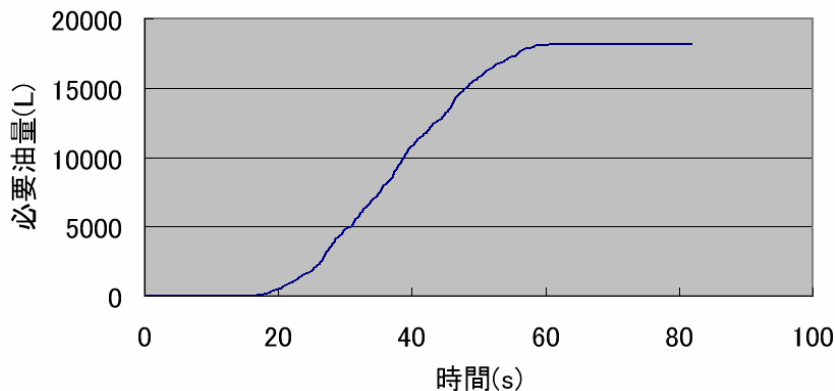


図14 図12の波形より計算された必要油量の時間変化

表2 振幅調整4波形の特性値と必要最大油量など

| 地震       | サイト       | 手法  | n     | dt(s) | PGA(gal) | PGV(cm/s) | PGD(cm) | 油量安全確認  |      | 最大値安全係数 |
|----------|-----------|-----|-------|-------|----------|-----------|---------|---------|------|---------|
|          |           |     |       |       |          |           |         | 最大油量    | 安全係数 |         |
| 関東最大     | K-NET小田原  | EGF | 8192  | 0.010 | 640.2    | 60.4      | 20.50   | 18126.7 | 1.10 | 1.41    |
| 濃尾最大     | K-NET津島   | EGF | 16384 | 0.100 | 468.1    | 37.6      | 9.30    | 18130.4 | 1.10 | 1.91    |
| 東南海最大    | K-NET津島   | EGF | 32768 | 0.100 | 401.0    | 40.4      | 16.16   | 18061.0 | 1.11 | 2.23    |
| 東南海・南海最大 | KIK-net此花 | EGF | 32768 | 0.100 | 82.2     | 35.9      | 10.89   | 18322.8 | 1.09 | 5.58    |

許容油量:20000,  $A_{max}=900$ ,  $V_{max}=200$

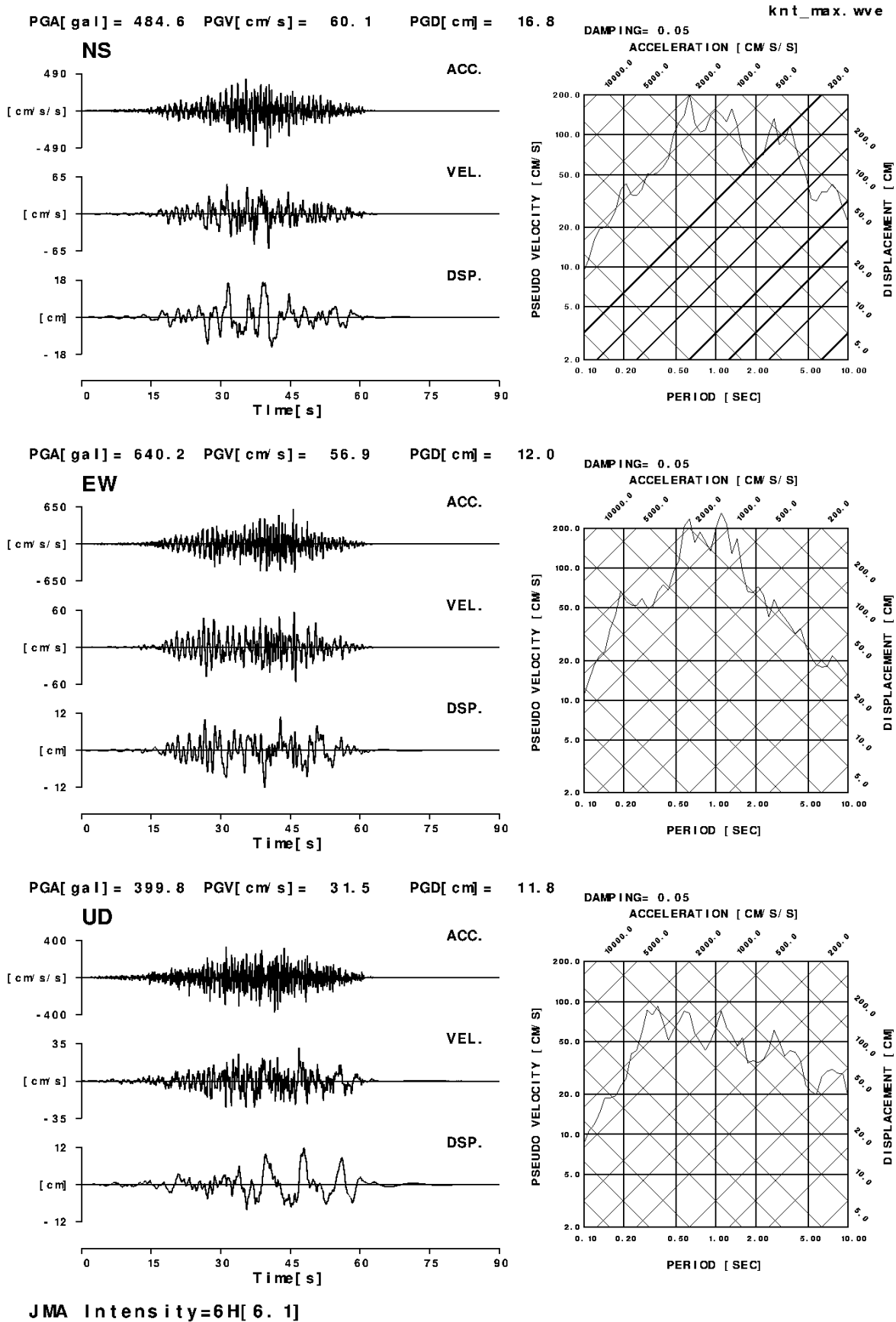
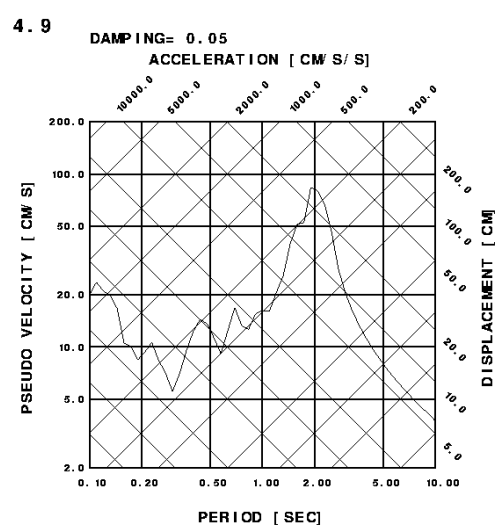
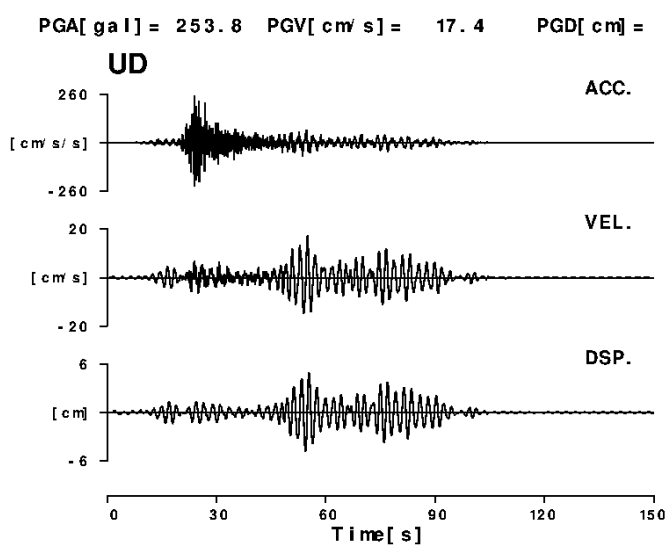
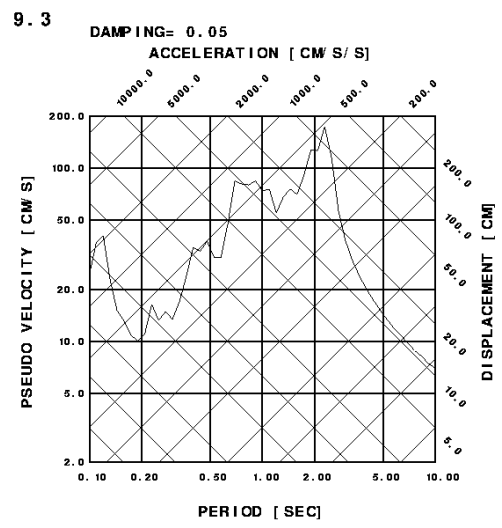
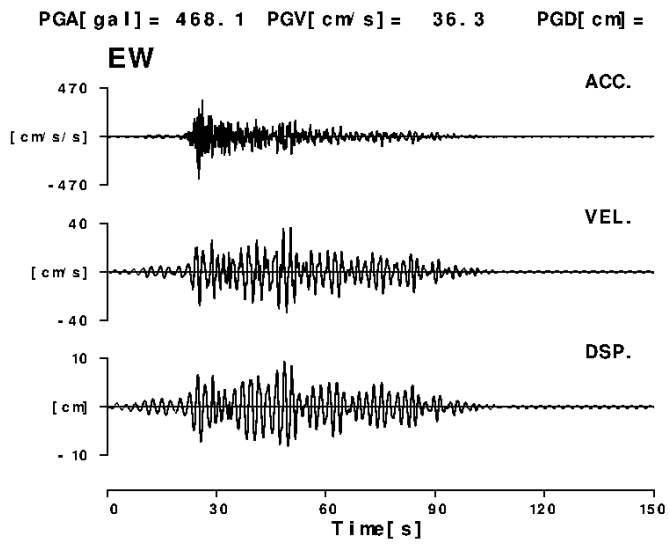
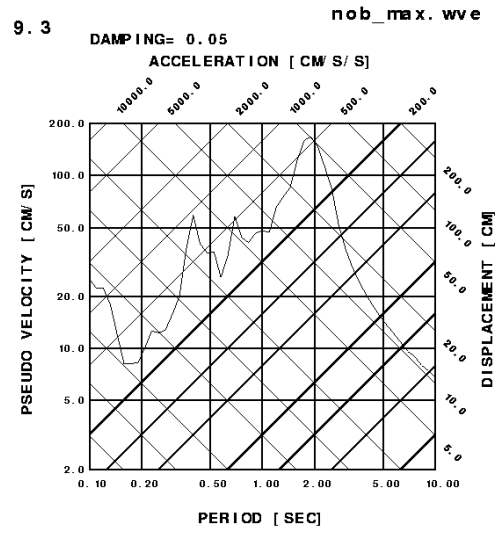
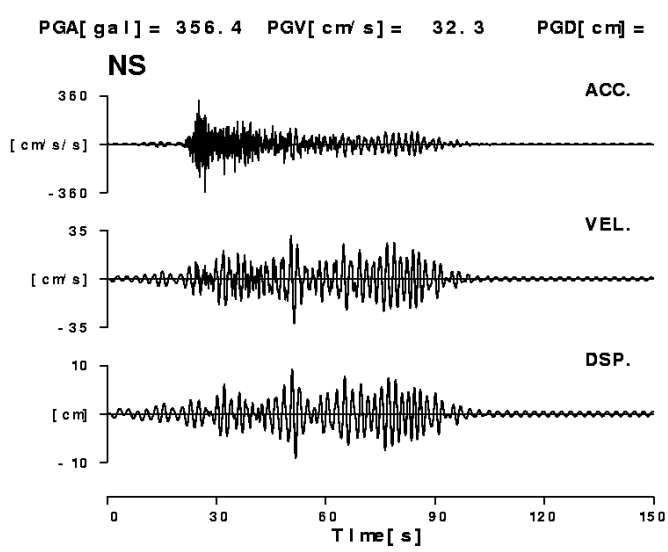


図15 関東最大波の波形および応答スペクトル



JMA Intensity=5H[ 5.2 ]

図16 濃尾最大波の波形および応答スペクトル

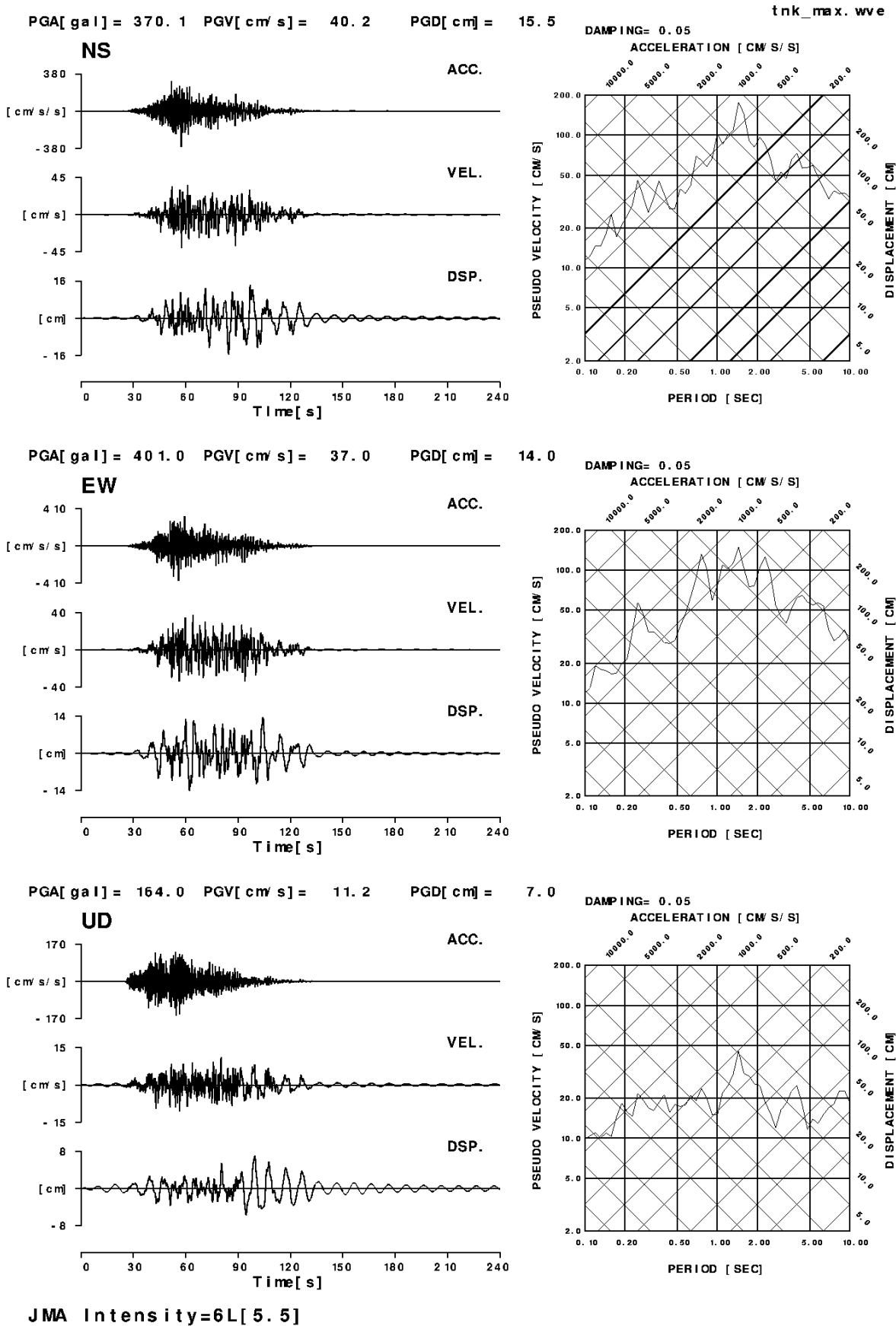
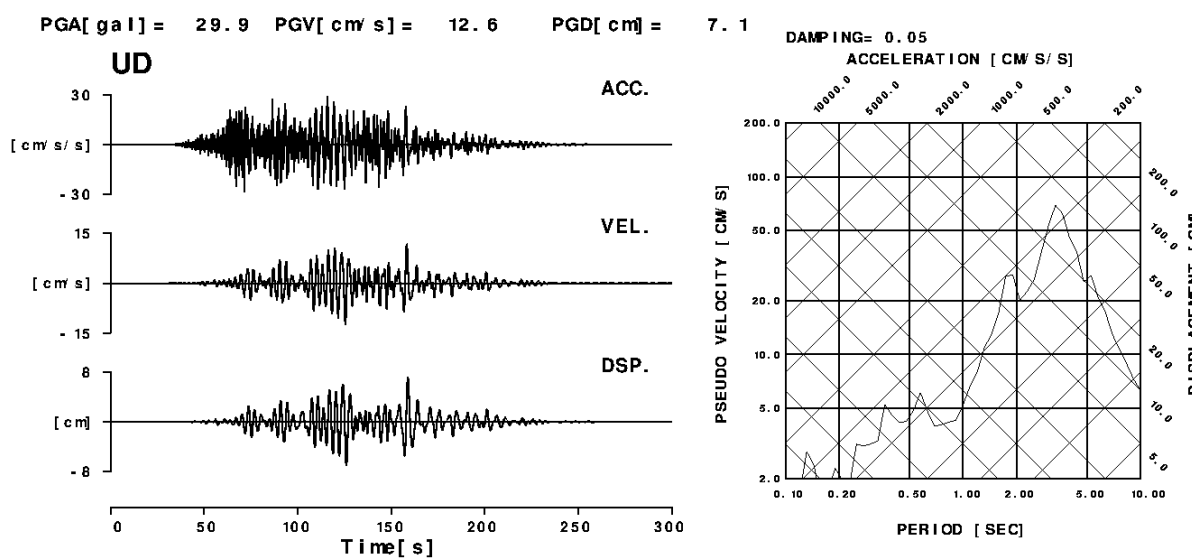
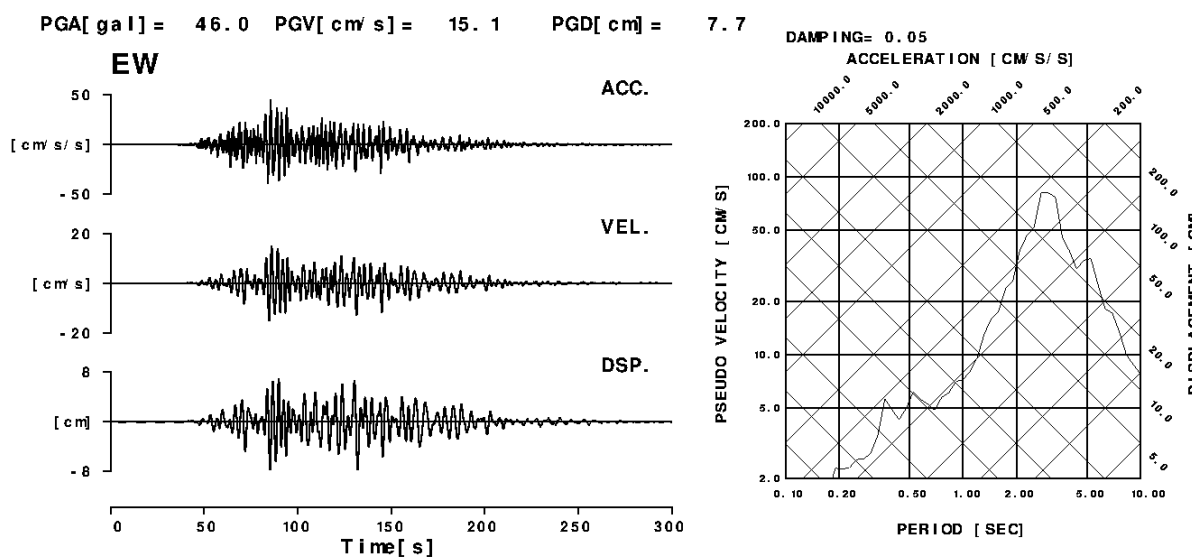
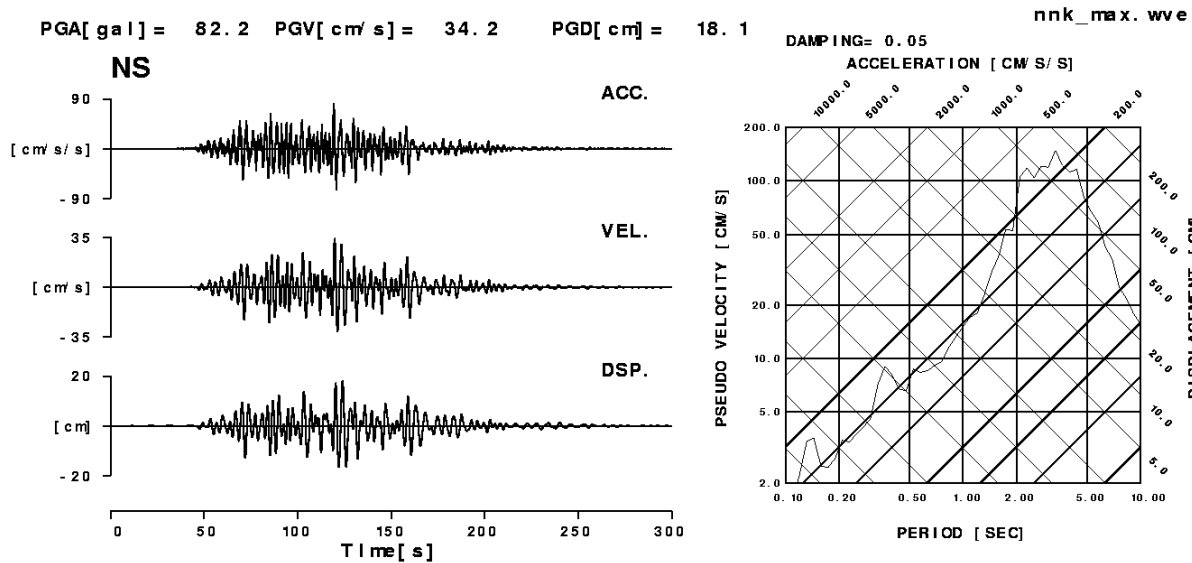


図17 東南海東最大波の波形および応答スペクトル



JMA Intensity=5L[ 4.6 ]

図18 東南海・南海最大波の波形および応答スペクトル

b) 三次元地震動データベースへの波形提供

a)で作成した強震動波形を K-NET フォーマットに変換し、3.3.10 で検討される三次元地震動データベースへ提供した。K-NET フォーマットでは、ヘッダ部に地震および観測点（ここでは地震動計算点）の情報が付記されるので、最低限の情報をファイル本体に取り込むとともに、補正波であるとの情報が付記されている。

なお、シミュレーションの基礎となった諸元の情報については、平成 17 年度検討において共通フォーマットで整理し、デジタル・ファイル(PDF 形式)で提供している。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 結論

合理的に三次元強震動をシミュレーションする手法である経験的グリーン関数法について、現実問題に適用するに際しての条件および留意点を整理し、解説を作成した。

既往強震動シミュレーション波形について、3次元震動台の性能限界（必要油量、最大加速度、最大速度）の観点から評価を行った。ほとんどの波形の必要油量は限界までに余裕のあるものであったが、一部継続時間の長い波形については必要油量を逸脱したものとなっていることが分かった。また、最大加速度が過大となっているものもあった。

必要油量が限界を超えているものを対象に、振幅調整を実施することで、性能限界にほぼ近い波形を、パルス波的な震源近傍強震動とやや長周期地震動を含む継続時間の長い地震動の2タイプについて得ることができた。

2) 課題

検討期間全体を通じて、三次元強震動シミュレーションに利用した手法として、離散化波数法および3次元差分法の手法解説が欠けている。ただし、これらの理論的手法の詳細解説には多くの頁を要するため、別途解説書を参考とされたい。

おもな強震動シミュレーションは経験的グリーン関数法によって実施している。その精度、特に利用可能周期範囲は要素地震として用いた観測記録の精度に大きく依存する。このため、将来においてより良質な記録が得られれば、本検討で解説し実践した強震動予測の方法論に則って、再計算することが望ましい。

(e) 引用文献

- 1) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., 63-104, 1986.
- 2) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福和保長: 地域的な震源スケーリング則を用いた大地震(M7級)のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 416, 57-70, 1990.
- 3) Graves, R. W. : Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, Bull. Seism. Soc. Am., 86, 1091-1106, 1996.
- 4) Boore, D. M. : Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiation Spectra, Bull. Seism. Soc. Am., 73,

- 1865-1894, 1983.
- 5) Brune, J. N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., 75, 4997-5009, 1970.
  - 6) Faccioli, E. : A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties, Geophys. Monograph, 37, Maurice Ewing, AGU, 6, 297-309, 1986.
  - 7) 福島美光 : 地震動強さの距離減衰式(経験式)に関する最近の研究動向, 地震 2 46, 315-328, 1993.
  - 8) Jennings, P. C., G. W. Housner and N. C. Tsai: Simulated earthquake motion for design purposes, Proc. 4th WCEE, 145-160, 1968.
  - 9) 入倉孝次郎, 三宅弘恵 : シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110, 849-875, 2001.
  - 10) Irikura, K., Miyake, H., Iwata, T., Kamae, K., Kawabe, H., Dalgner, L.A.: Recipe for predicting strong ground motion from future large earthquake, Proceedings of the 13WCEE, 1371, 2004.
  - 11) Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seism. Res. Lett., 70, 59-80, 1999.
  - 12) Scholz C. H.: The mechanics of earthquakes and faulting, Cambridge University Press, 2002.
  - 13) Eshelby J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proc. Roy. Soc., A241: 376-396, 1957.
  - 14) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透 : 断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 545, 51-62, 2001.
  - 15) 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, 日本地震第 2 輯, 53, 1-9, 2000.
  - 16) 中田高, 島崎邦彦, 鈴木康弘, 佃栄吉 : 活断層はどこから割れ始めるのか? 地学雑誌, 107, 512-528, 1998.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

| 著者 | 題名 | 発表先 | 発表年月日 |
|----|----|-----|-------|
| なし |    |     |       |

2) 口頭発表、その他

| 発表者 | 題名 | 発表先、主催、発表場所 | 発表年月日 |
|-----|----|-------------|-------|
| なし  |    |             |       |



(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

| 名称 | 機能 |
|----|----|
| なし | なし |

3) 仕様・標準等の策定

なし

