

## パルス状の地震動の地表層による増幅特性の分析

鈴木崇伸<sup>1)</sup>

1) 東洋大学, 教授 博士 (工学)  
e-mail : tsuzuki@toyo.jp

### 要 約

本研究は震源域で得られた波形を分析してその特徴を明確にするとともに、基盤・表層地盤・構造物の連成解析を行い、パルス波を入力したときの地表・構造物の振動の特徴を分析している。パルス波が表層地盤でどのように増幅され、また構造物がどのように応答するかを検討した結果を報告する

キーワード： パルス波, 強制振動, 応答スペクトル

### 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降に、日本全国に強震観測網が整備され、震源域での強震データが数多く得られるようになった。兵庫県南部地震ではいわゆる震災の帯に相当する地区での波形が大振幅のパルス波であったことからキラールパルスと呼ばれるようになったが、その定義は明確でない。その後、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震、2016年熊本地震においても震央近くに置かれた地震計でよく似た波形が得られ、その周辺で家屋被害が多く発生している。

本研究は震源域で得られた波形を分析してその特徴を明確にするとともに、基盤・表層地盤・構造物の連成解析を行い、パルス波を入力したときの地表・構造物の振動の特徴を分析している。パルス波が表層地盤でどのように増幅され、また構造物がどのように応答するかが明確になれば、震源地域の防災対策に反映できる。

### 2. 震源域で観測された地震動の特徴

1995年兵庫県南部地震では甚大な被害を生じた神戸市内で数多くの地震記録が得られ、震源域の強震動が初めて明らかになった地震であった。この地震を教訓に設計地震動が引き上げられており、直下型地震に耐える構造物をつくる上で日本の防災史に残る地震となった。観測記録のうちJR鷹取のNS成分の速度波形を図1(a)に示している。図の7秒付近から始まる速度の振幅が1m/s以上になる部分がキラールパルスといわれる成分であり、この部分から徐々に減衰していく約1秒の周期を持つ地震動が多く多くの構造物に被害をもたらしたと考えられる。

鈴木は地震動を分析するグラフとしてU-A図を提案している。この図は加速度波形の包絡線Aとランニングスペクトルの周期Tを組み合わせ推定変位 $U=(T/2\pi)^2 A$ を計算し、(U,A)を連続プロットした図形であり、加速度と応答変位の変化を視覚的に分析することができる利点を持っている。図-1(b)にJR鷹取のU-Aグラフを示している。周期1秒をやや上回った応答であり、最大値が(0.4m, 7m/s<sup>2</sup>)程度であることが判読できる。応答スペクトルを用いれば、周期1秒から2秒の間のピークとして計算されるが、観測波

形の情報を残して地震動の分析をすることができる。この揺れ特性が多くの被害をもたらした原因であると考えられる。なお加速度が $5\text{m/s}^2$ に達したときに周期が伸びて変位振幅が大きくなっているのは地盤の非線形化が影響していると考えられる。

図2(a)に2004年新潟県中越地震の川口町役場の観測地震動のEW成分の速度波形を示す。同図(b)に水平2成分を用いたU-A図を示している。JR鷹取とよく似た速度波形であり、揺れ始めてすぐに最大値となり徐々に減衰をする周期1秒程度の揺れとなっている。U-A図をみると、JR鷹取の揺れを2倍程度に拡大した揺れであることがわかる。およそ10年の差があり、地震計の性能も異なるため、単純に2倍であったわけではないが、よく似た特性を持つことは確認できる。

図3は2016年熊本地震のKiK-net益城の地震動を示している。同図(a)はEW成分の速度波形であり、鷹取、川口町と非常によく似た波形となっている。同図(b)はU-A図であるが、こちらも1秒をやや上回る揺れで鷹取、川口町と非常によく似た図形となっている。同図(a)にはKiK-net益城の地下で観測された速度波形を、ハッチを付けて表示している。地表の速度波形には長周期の揺らぎが見られるがこれは地下の長周期の動きに連動しているのがわかる。この速度波形を積分したのが図4である。黒線が地表の変位、ハッチを付けているのが地下の変位波形である。EW方向に約1m移動しており、地上の変位は地下の動きに地表部の振動が加わったものと考えられる。

震源域で観測された波形の例を3例示したが、10秒足らずの短時間に周期1秒程度の強い揺れが起こり、揺れ始めてすぐに最大となり徐々に減衰していく様子は共通した特徴である。また最大加速度が $10\text{m/s}^2$ 程度、最大速度が $1\text{m/s}$ 程度であることも共通している。これらの揺れがどのように引き起こされるか分析を行ってみる。

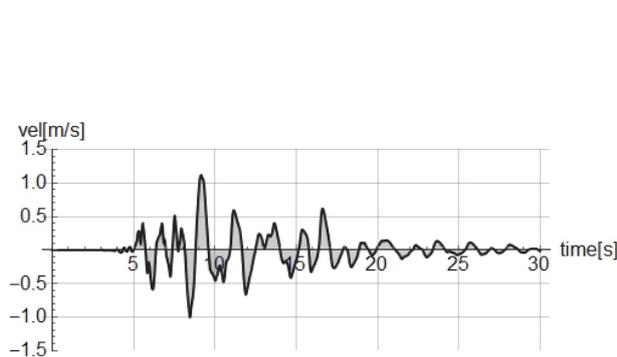


図1(a) JR鷹取NS成分の速度波形

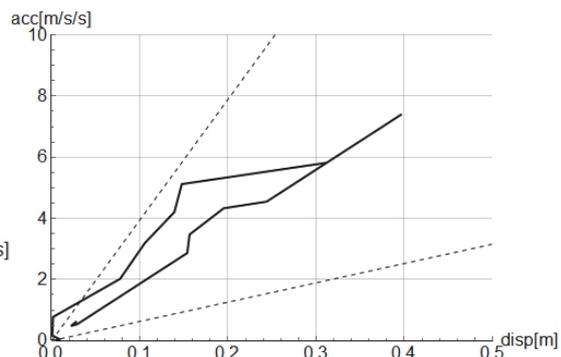


図1(b) JR鷹取NS成分のU-A図

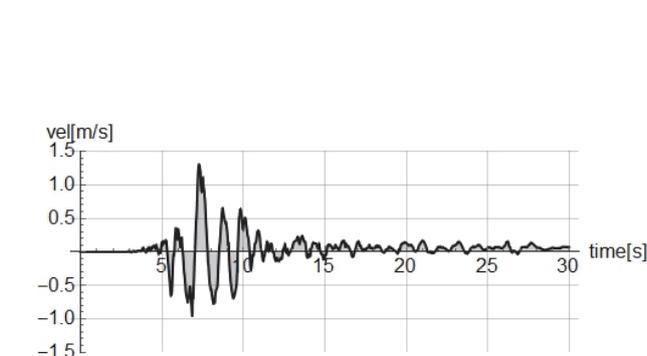


図2(a) 川口町役場EW成分の速度波形

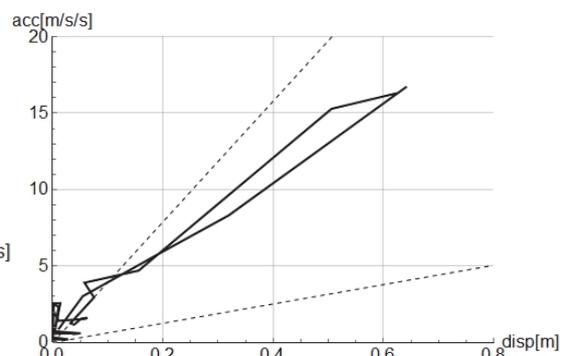


図2(b) 川口町役場EW成分のU-A図

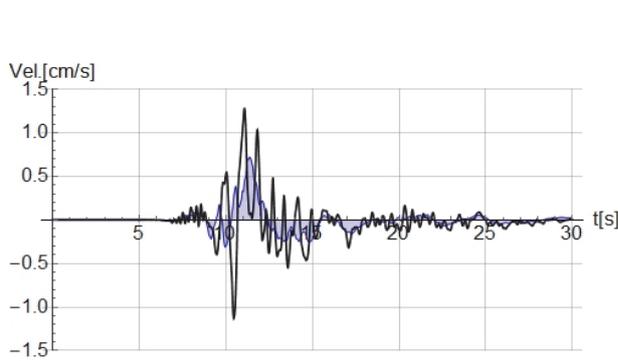


図3(a) KiK-net益城EW成分の速度波形

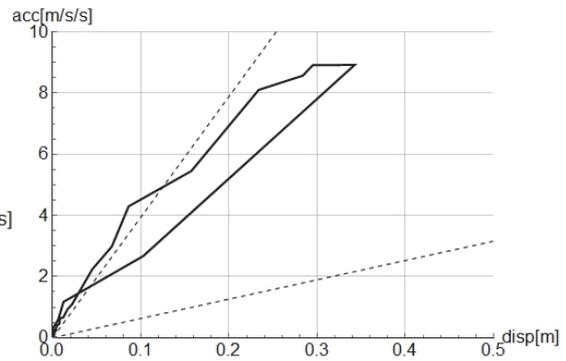


図3(b) KiK-net益城EW成分のU-A図

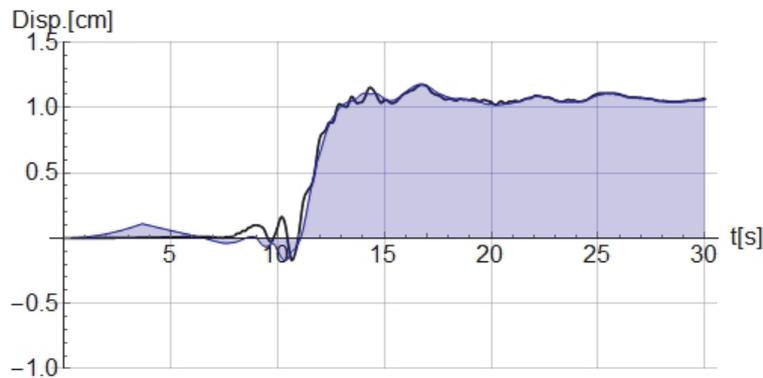


図4 KiK-net益城EW成分の変位波形

### 3. 振動シミュレーション

#### (1) 解析モデル

簡単な関数でパルス波を近似し、地盤-構造物系の応答計算を行う。図5に解析モデルの概要を示している。剛基盤が衝撃的に動くときの表層と構造物の運動を分析する。構造物が大きく変形するメカニズムの分析が主眼であり、表層の応答計算は1次元せん断体のモード解析を行い、1次モードのみを対象とする。剛基盤上にある表層の厚さを $H$ 、せん断波速度を $V_s$ とすると、1次モードの周期は $T_g=4H/V_s$ となり、刺激係数は $\beta=4/\pi$ となる。高次モードの影響を無視して地盤固有周期 $T_g$ の影響を分析する。基盤の変位を絶対座標系で $u_b(t)$ とする。地表の変位を絶対座標系で $u_g(t)$ とすると、減衰定数を $h_g$ として運動方程式は次式となる。ここに上付きのドットは時間微分の回数を表している。外力として支配的な項は基盤変位 $u_b$ に関する項となる。

$$\ddot{u}_g + 2h_g \left( \frac{2\pi}{T_g} \right) \dot{u}_g + \left( \frac{2\pi}{T_g} \right)^2 u_g = 2\beta h_g \left( \frac{2\pi}{T_g} \right) \dot{u}_b + \beta \left( \frac{2\pi}{T_g} \right)^2 u_b \quad (1)$$

地表が $u_g(t)$ で揺れるときに、固有周期 $T_s$ である構造物がどのように振動するかを分析する。剛体変位を伴う振動を対象にするため、構造物の変位を絶対座標系で定義し $u_s(t)$ とする。減衰定数を $h_s$ として運動方程式は次式となる。外力として支配的な項は地表変位 $u_g$ に関する項となる。

$$\ddot{u}_s + 2h_s \left( \frac{2\pi}{T_s} \right) \dot{u}_s + \left( \frac{2\pi}{T_s} \right)^2 u_s = 2h_s \left( \frac{2\pi}{T_s} \right) \dot{u}_g + \left( \frac{2\pi}{T_s} \right)^2 u_g \quad (2)$$

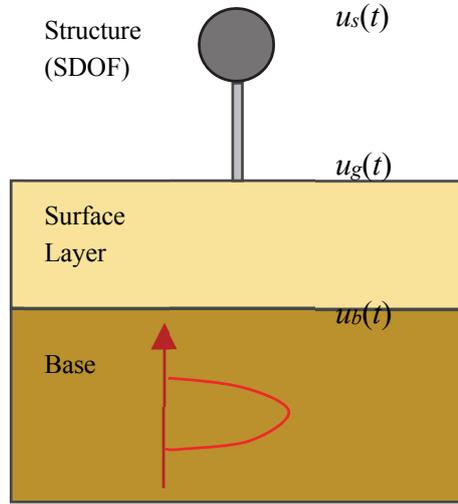


図5 解析モデル図

## (2) 入力パルス波

2章において過去の観測データとして示したように、震源域では最大速度が1m/s程度になっている。そこで基盤の速度波形を正弦波の半波長分として、振幅 $V_0=1\text{m/s}$ の半波長の運動が作用する時間 $T_p$ を変化させて運動方程式を解くこととする。入力エネルギーは速度の2乗に比例するため、作用する時間が変わっても最大エネルギーは一定の条件とする。図6(a)に $T_p=0.5\text{s}$ (青),  $1.0\text{s}$ (緑),  $2.0\text{s}$ (桃)とした速度波形を示している。

$$\dot{u}_b(t) = V_0 \sin\left(\frac{\pi}{T_p} t\right) \quad (0 < t < T_p) \quad (3)$$

速度の微分により加速度に変換でき、また速度の積分により変位に変換できる。変位は初期変位を0とすると最終変位は $2T_p V_0/\pi$ となる。また最大加速度は $\pi V_0/T_p$ となり、基盤が動き始めるときと停止するとき最大の慣性力が作用する。図6(b)に $T_p=0.5, 1.0, 2.0\text{s}$ とした加速度波形を示している。パルス幅が小さくなると最大加速度が大きくなる条件で応答計算を行うこととする。

三角関数を半波長分で打ち切る入力条件となるが、入力波の振動数特性を調べる。図6(c)に $T_p=0.5, 1.0, 2.0\text{s}$ とした加速度波形のフーリエスペクトルを示している。時間軸での最大加速度は異なるが、スペクトル計算を行うとフーリエ振幅の最大値は一定となる。 $T_p=0.5\text{s}$ のときに1.4Hzがピークとなり、 $T_p=1.0\text{s}$ のときに0.7Hz、 $T_p=2.0\text{s}$ のときに0.4Hzがピークとなっている。パルス幅 $T_p$ の半波長の入力は周期に換算しておよそ $1.4T_p$ の成分が卓越する入力になっており、また高振動数成分の影響は小さいことが確認できた。この単峰型の入力が地表層で増幅されて構造物にどのように作用するかを前述の簡単なモデルを使って計算してみる。

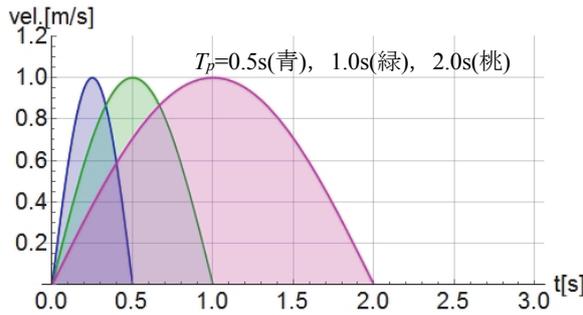


図 6(a) 入力地震動の速度波形

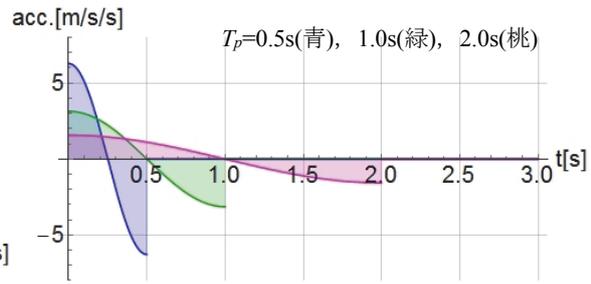


図 6(b) 入力地震動の加速度波形

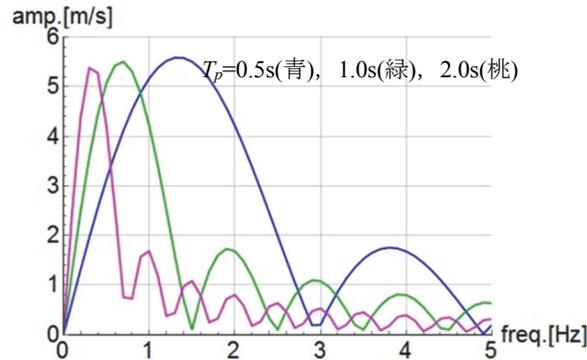


図 6(c) 加速度波形のフーリエスペクトル

### (3) 解析例

パルス状の入力波を用いて地表の応答と構造物の応答を計算する。  $T_p=1.0s$ ,  $T_g=1.0s$ ,  $T_s=1.0s$  とした計算結果を図 7 に示している。  $h_g=0.2$ ,  $h_s=0.1$  としている。 図 6(c) によれば、1.4s の周期が卓越する入力となっている。 同図(a)は変位応答の計算結果である。 黒線が地表の応答を表し、赤線が構造物の応答を表している。 構造物は地表の動きにやや遅れて動き、途中で地盤の変位を追い越して最大変位となり、その後徐々に収束する波形となっている。

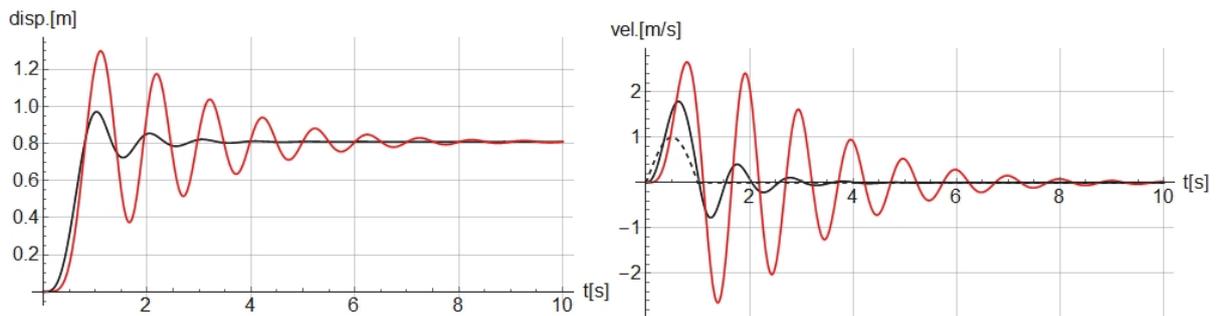
次に速度波形の結果を同図(b)に示す。 速度波形のグラフには基盤速度も点線で書き加えているが、地表の速度は基盤速度の 2 倍程度の応答の後、徐々に収束する運動となる。 構造物の運動を速度で見ると、地表速度が最大になる時刻に少し遅れて最大速度となり、徐々に収束している。 揺れはじめてすぐに最大振幅となり、徐々に収束する過去の震源域の波形の特徴と一致している。

加速度波形の結果を同図(c)に示す。 加速度が大きくなる時刻は速度よりも半周期だけ遅れている。 入力波形の特徴として  $t=0s$  にプラス方向に運動させるインパルスが作用し、 $t=1s$  において逆方向のインパルスが作用する計算となっているが、動き始めた基盤が停止するときに大きな加速度となり、逆方向に振れた後徐々に収束する波形となっている。

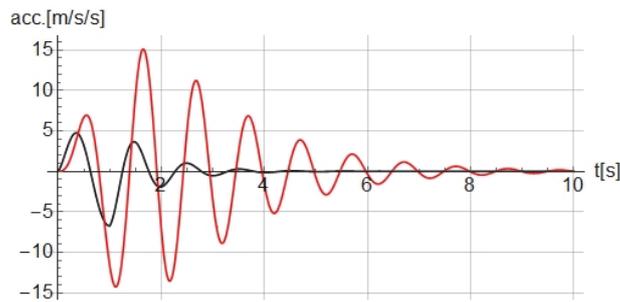
以上の応答計算結果を変位と力の関係に変換する。 横軸を相対変位とし、縦軸を絶対加速度の(-1)倍として連続プロットする。 式で表せば

$$\begin{aligned} \text{地盤の応答: } & (u_g - u_b, -\ddot{u}_g) \\ \text{構造物の応答: } & (u_s - u_g, -\ddot{u}_s) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。 相対変位と加速度は比例する量であり、減衰振動であるため連続プロットは楕円状になる。 楕円の長軸の傾きは固有振動数の 2 乗となり、加速度と応答変位の変化を視覚的に把握できるグラフである。 図 8(a)に計算結果を示す。 図の黒線が地表の応答、赤線が構造物の応答を示している。 周期 1s (傾きは  $4\pi^2$ ) の線に沿って地盤も構造物も運動しており、構造物の応答は地盤に比べて 2 倍程度になっていることがわかる。 また地表の応答は第 1 象限で大きく、第 3 象限で小さい非対称な運動になっている。

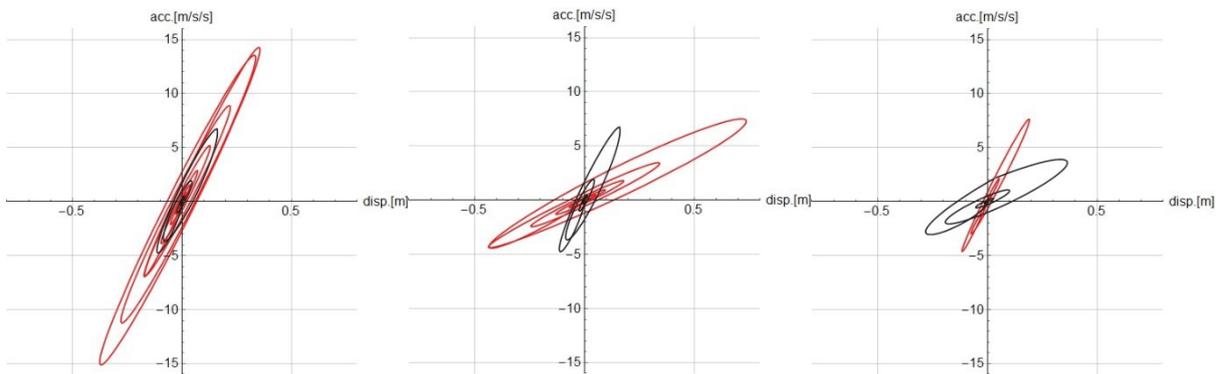


(a) 変位の応答波形 (黒：地盤, 赤：構造物) (b) 速度波形 (点線：基盤, 黒：地盤, 赤：構造物)



(c) 加速度波形 (黒：地盤, 赤：構造物)

図7 パルス波入力シミュレーション結果



(a)  $T_p=1.0s, T_g=1.0s, T_s=1.0s$  (b)  $T_p=1.0s, T_g=1.0s, T_s=2.0s$  (c)  $T_p=1.0s, T_g=2.0s, T_s=1.0s$

図8 加速度-相対変位の応答グラフ (黒：地盤, 赤：構造物)

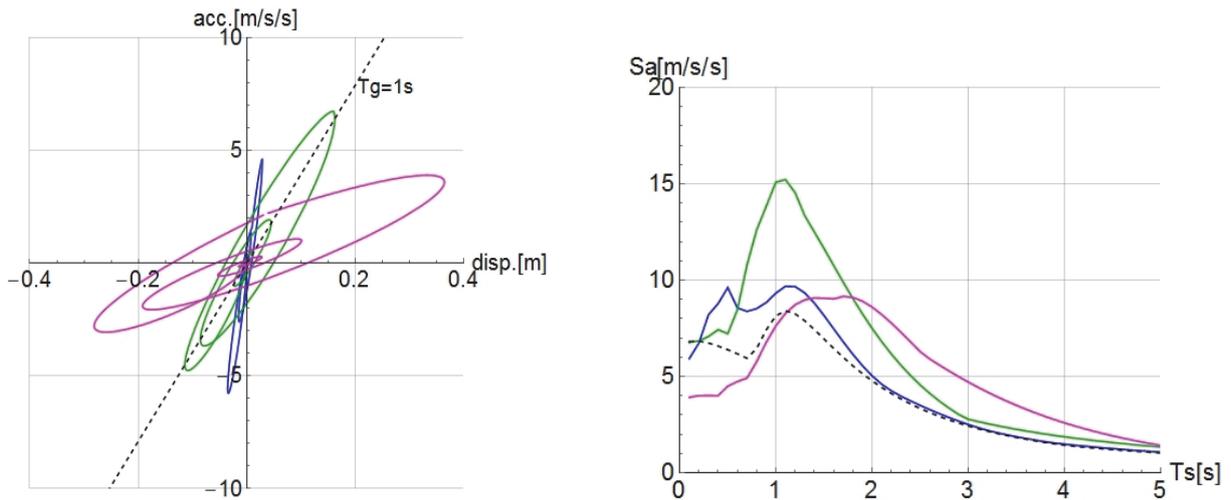
一方構造物はおよそ対称な運動となっているのがわかる。

この変位-力のヒステリシスを表すグラフを使って別の計算条件の結果を紹介する。図8(b)は構造物の条件を変更して  $T_s=2.0s$  にしたときの応答である。赤線で示した構造物の運動が長周期になり、変位が大きくなるのがわかる。最大加速度は同じくらいになっている。一方同図(c)は地盤の条件を  $T_g=2.0s$  にしたときの応答である。地表の応答が長周期化して加速度が小さくなり、変位応答が増大している。構造物は  $1s$  の条件であり、加速度は地表の2倍、変位は地表の  $1/2$  程度の応答となっている。

#### 4. パラメータスタディ

##### (1) 地盤固有周期の影響

パルス幅を  $T_p=1.0s$  として地盤固有周期  $T_g$  を変化させる計算を行い、パルス波が構造物に及ぼす影響を分析する。図9(a)に  $T_g=0.5s$  (青),  $1.0s$  (緑),  $2.0s$  (桃) としたときの地表の加速度応答と変位応答の計算結果



(a) 地表の加速度-相対変位の応答グラフ (b) 地盤固有周期を変えたときの加速度応答スペクトル  
 図-9 地盤固有周期をパラメータにした計算結果  
 ( $T_p=1.0s$ ,  $T_g=0.5s$ (青),  $1.0s$ (緑),  $2.0s$ (桃))

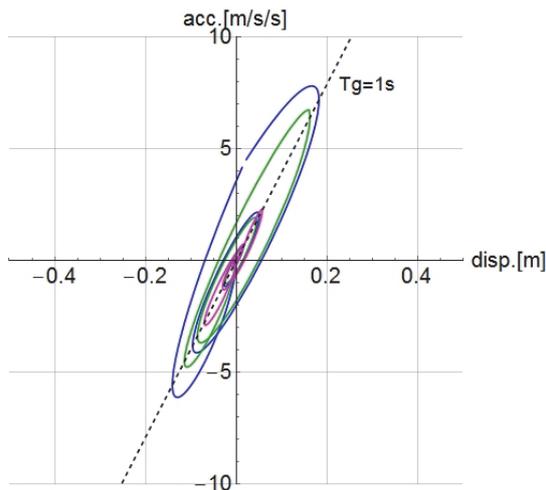
を示す。1.4sの卓越周期を持つ入力を与えており、地盤固有周期 $T_g$ によって加速度振幅が決まっている。 $T_g=0.5s$ の場合には $5m/s^2$ 程度、 $T_g=1.0s$ の場合には $7m/s^2$ 程度、 $T_g=2.0s$ の場合には $4m/s^2$ 程度となる。地盤固有周期がさらに小さい場合には $3m/s^2$ 程度となり、一方地盤固有周期が長くなると応答加速度は急速に低下する。変位振幅は加速度振幅をおよそ $(T_g/2\pi)^2$ 倍した振幅となっている。また最大応答は $T_g > T_p$ の場合にはパルス波を入力した方向に大きく、逆に小さい対称でない応答となっている。逆に $T_g < T_p$ の場合には入力した方向と逆の方向に大きく動いている。

地盤固有周期 $T_g$ を変化させたときに地表の最大加速度がどのように変化するかを調べる。地表の振動を1自由度系で近似した構造物に入力したときの構造物の加速度応答スペクトルを図9(b)に示す。この計算では $T_p=1.0s$ ,  $T_g=0.5s$ (青),  $1.0s$ (緑),  $2.0s$ (桃)とした3ケースのスペクトルを示している。また図中に地表層がない場合の応答スペクトルを黒点線で表記している。地表の入力加速度の最大はそれぞれ $5m/s^2$ ,  $7m/s^2$ ,  $4m/s^2$ 程度であるが、約2倍程度増幅されている。特に周期が1.0s付近の構造物は地盤固有周期に一致するときに大きな加速度振幅になっている。周期が一致していない場合においてもパルス幅 $T_p$ と地盤固有周期 $T_g$ に挟まれた周期帯で加速度応答が大きくなっている。地表の加速度応答は $T_g=0.5s$ (青),  $1.0s$ (緑),  $2.0s$ (桃)に対してそれぞれ0.7s, 1.4s, 2.8s以下で凡そ一定であり、この成分が構造物の応答を左右する。表層地盤の固有周期が震源域で起こる構造物の大振幅の揺れに大きく影響していると考えられる。

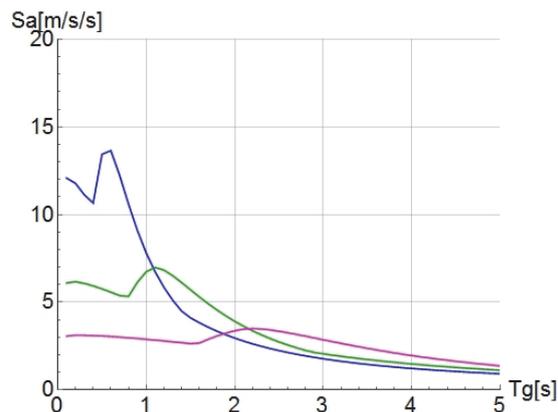
## (2) パルス幅の影響

次に地盤固有周期を固定してパルス幅を変化させ、パルス幅の影響を定量化する。地盤の固有周期 $T_g$ を1.0sとし、パルス幅を $T_p=0.5s$ (青),  $1.0s$ (緑),  $2.0s$ (桃)とした地表の応答を図10(a)に示す。地表の加速度と変位は周期1sに相当する直線に沿って変化する。パルス幅 $T_p$ に反比例して入力加速度の振幅を大きくする計算であるため、パルス幅が短いときには大きな応答となり、パルス幅が地盤固有周期よりも長くなると応答は急速に低減する。基盤が地盤固有周期に比べてゆっくり運動する場合には、変位量が大きなくても加速度は小さく、構造物への影響が小さいことになる。パルス波の幅が地盤固有周期よりも小さいときには入力方向に大きく応答する非対称の振動になっている。

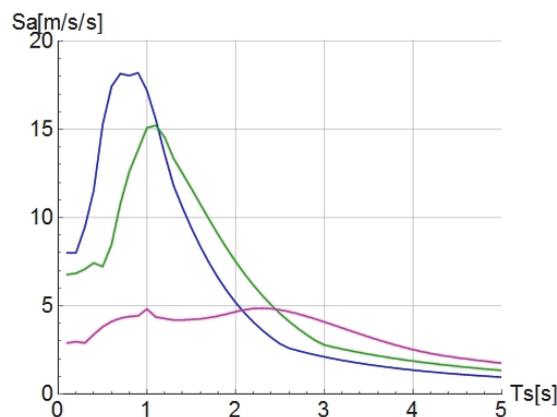
図10(b)はパルス幅と地盤固有周期を変化させたときの地表の最大加速度を連続プロットしたスペクトルである。パルス幅の条件を3種類設定しており、 $T_p=0.5s$ (青),  $1.0s$ (緑),  $2.0s$ (桃)として地盤固有周期 $T_g$ を連続的に変化させた加速度応答スペクトルとしている。パルスの最大速度を一定としているためパルス幅が短いほど加速度が大きくなり、地表の最大加速度も増大する。 $T_g=0s$ が入力加速度の振幅となる。若干の変動は見られるが $T_g < 1.5T_p$ の範囲で応答加速度は一定であり、



(a) 地表の加速度-相対変位の応答グラフ  
( $T_g=1.0s$ ,  $T_p=0.5s$ (青),  $1.0s$ (緑),  $2.0s$ (桃))



(b) 地表の加速度応答スペクトル  
( $T_p=0.5s$ (青),  $1.0s$ (緑),  $2.0s$ (桃))



(c) 加速度応答スペクトル  
( $T_g=1.0s$ ,  $T_p=0.5s$ (青),  $1.0s$ (緑),  $2.0s$ (桃))

図10 パルス幅をパラメータにした計算結果

$T_g > 1.5T_p$ の範囲では地盤固有周期 $T_g$ が長くなるにつれ応答加速が減少している。地盤固有周期が短い場合には加速度が大きくなり、地盤固有周期が長くなると加速度が小さくなる経験的事実にあった結果となる。応答加速が一定になる $1.5T_p$ 以下の地盤固有周期においてパルス波が地上構造物にどのように影響するか分析する。

図10(a)と同じ条件で構造物に入力したときの加速度応答スペクトルを図10(c)に示している。地盤固有周期 $T_g$ は $1.0s$ であり、パルス幅を $T_p=0.5s$ (青),  $1.0s$ (緑),  $2.0s$ (桃)と変化させた結果を示している。図10(a)で示したのと同様に地盤固有周期よりもゆっくりした入力に対しては $2m/s^2$ 程度の小さな応答となるが、地盤固有周期付近よりも短いパルス幅に対してはパルス幅 $T_p$ と地盤固有周期 $T_g$ で挟まれた周期帯で大きな加速度応答となることが判明した。

## 5. まとめ

震源域で観測されたパルス状の波形が構造物に及ぼす影響について分析を行った。いくつかの地震記録で見られた特徴は、10秒程度の短時間に数回大きな振幅がある揺れであり、揺れ始めてすぐに最大となり、徐々に減衰している。また断層運動の影響を受け永久変位成分を有している波形もある。

このような特徴を持つ波形を簡単なシミュレーションにより分析した。基盤に正弦波半波長の速度を

与え、1自由度系で近似した表層地盤と1自由度の構造物の応答計算を行った。その結果、パルス幅と地盤固有周期の間の周期では構造物の応答が大きくなること、パルス幅に比べて地盤固有周期が長い場合あるいは地盤固有周期に比べてパルス幅が長い場合には、応答が大きくなることが確認された。今後こうした増幅メカニズムを定量化していく予定である。

## 謝 辞

本研究ではJR, 気象庁, 防災科学技術研究所の公開した地震記録を使用しました。貴重な記録を公開した関係各位に感謝します。

## 参考文献

- 1) 山本大喜, 能島暢呂: 三角パルス波形モデルを用いた強震動特性の評価, 土木学会第37回地震工学研究発表会概要集, 2017.10.
- 2) 安井雅明, 西影武知, 見上知広, 亀井功, 鈴木恭平, 林康裕: パルス地震動に対する1自由度系最大応答理論解と応答特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.650, pp.731-739, 2010.4.
- 3) 鈴木崇伸: 断層運動を含む地震記録の分析, 土木学会第26回地震工学研究発表会(札幌), pp.521-524, 2001.8.

# Analysis of Amplification Characteristics of Pulse-like Earthquake Motion by Surface Layer

SUZUKI Takanobu <sup>1)</sup>

1) Professor, Toyo University, Dr. Eng.

## ABSTRACT

In this research, the waveforms obtained at the focal region are analyzed to clarify their features, and coupled analysis of the foundation / surface layer / structure is performed using vibration model of the surface layer / structure when inputting pulse-like waves. Based on calculation results, it is reported how pulse-like waves are amplified on surface ground and how structures respond.

*Keywords: Pulse-like wave, SDOF vibration, Response Spectrum*