

谷埋め盛土における地震動の増幅パターンについて

基礎地盤コンサルタンツ(株) 正会員 大橋 正
岐阜大学 流域圏科学研究センター 国際会員 杉戸 真太

1. はじめに

近年発生した地震における宅地造成地や道路盛土などの谷埋め盛土地盤（傾斜のある谷筋の造成盛土地盤）での被害は、周辺の切土部分と比較して地震時の応答加速度の増幅が著しく大きくなることから、被害程度も大きくなると云われている^{1),2),3)}。これら谷埋め造成地盤では図-1に示すように盆状の傾斜基盤である場合が多く、地震時応答特性のうち不整形基盤による影響があると考えられる。本研究ではこれら谷埋め盛土における地震動の増幅特性のうち谷直角方向の谷の規模、特に谷底幅による地震動の増幅パターンがどのように変化するかについて検討したので報告する。

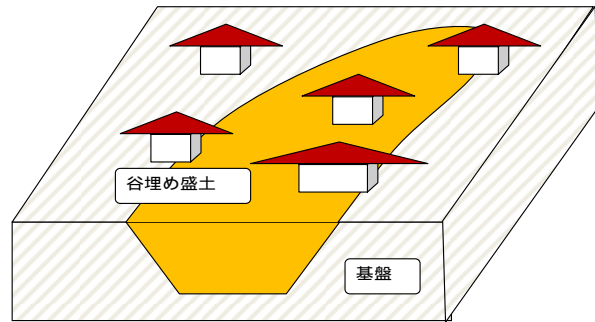


図-1 谷埋め盛土造成地のイメージ図

2. 傾斜した基盤を有する盛土における地震動の一般的な増幅傾向と本研究の着眼点

図-2に示すように傾斜した基盤を有する谷埋め盛土での谷軸直角方向の地震動の増幅は、谷上幅を W 、谷深さを D とした場合の谷形状係数 (W/D)、谷直角方向断面の両端傾斜角 (θ)、基盤と谷埋め盛土地盤とのインピーダンスコントラスト (IP) や入力地震動の周波数特性と地盤の卓越周波数との比などにより、盛土地表面の応答加速度の最大値やその発生位置が異なることが示されている^{4),5)}。また、谷埋め盛土の地震時応答特性としては、谷を谷軸方向と谷直角軸方向に分けて考えた場合、谷直角断面方向において谷中央部に向かって加速度応答が卓越するなどの傾向がこれまでに報告されている^{3),4)}。

図-3は谷埋め盛土の谷直角方向における地震応答計算結果の一例であるが⁴⁾、基盤と谷埋め盛土地盤とのインピーダンスコントラスト (IP) を 0.16 とし、盛土層の $1/4$ 波長則による卓越周波数 (f_g) と入射波の周波数 (f) との比を f/f_g で表した周波数特性により応答加速度の発生パターンが大きく変化しており、 f/f_g が 1 付近で谷中央部の応答加速度が大きくなっている例である。本検討では谷埋め盛土における谷直角方向断面の谷形状について、谷上面幅 (W) よりも波動の屈折などで直接応答の発生位置に対して影響が大きいと想定される谷底面

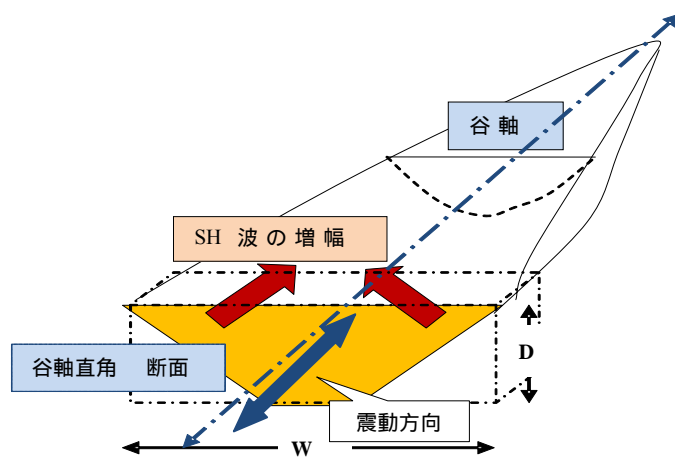


図-2 谷軸直角断面応答増幅イメージ図

幅 ($W1$) と谷深さ (D) の関係によって地震動増幅の程度や最大値が発生する位置の変化など、いわゆる増幅パターン（応答加速度の最大値の発生範囲の傾向）に及ぼす影響に着目した。

3. 傾斜基盤盛土の地震動増幅メカニズムの1つの解釈

3.1 片側基盤傾斜解析モデル

谷埋め盛土（両側基盤傾斜）の応答の変化をみるため、図-4に示すように、まず単純化したモデルにより波動の伝播を考えるととして片側基盤傾斜モデルを検討の対象とした^{6,7)}。

片側基盤傾斜モデルにおける応答加速度の大きくなる位置をモデル端部からの距離 X (m) で表し、両側基盤傾斜の谷埋め盛土はこの片側基盤傾斜モデルの対象断面であると考えて、谷埋め盛土の加速度応答の発生パ

ターンを解釈することにする。解析は、2次元有限要素解析（Advanced-FLUSH⁸⁾）による谷埋め盛土造成地のモデルとし、境界条件として側方にはエネルギー伝達境界を設定し、底面に粘性境界を設定した。地盤物性としてはインピーダンスコントラスト（IP）を0.3程度とし、盛土地盤と基盤のせん断弾性波速度を $V_{s1}=100\text{m/s}$ 、 $V_{s2}=300\text{m/s}$ 、密度を $\rho_1=17.6\text{kN/m}^3$ 、 $\rho_2=21.6\text{kN/m}^3$ としている。波動の幾何学的影響を見るため、今回は盛土地盤の非線形性（せん断弾性定数と減衰定数のひずみ依存性）は考慮していない。入力地震動は鉛直SV波とSH波を考え2Hz正弦波半波長の入射振幅100gal（E）としている。

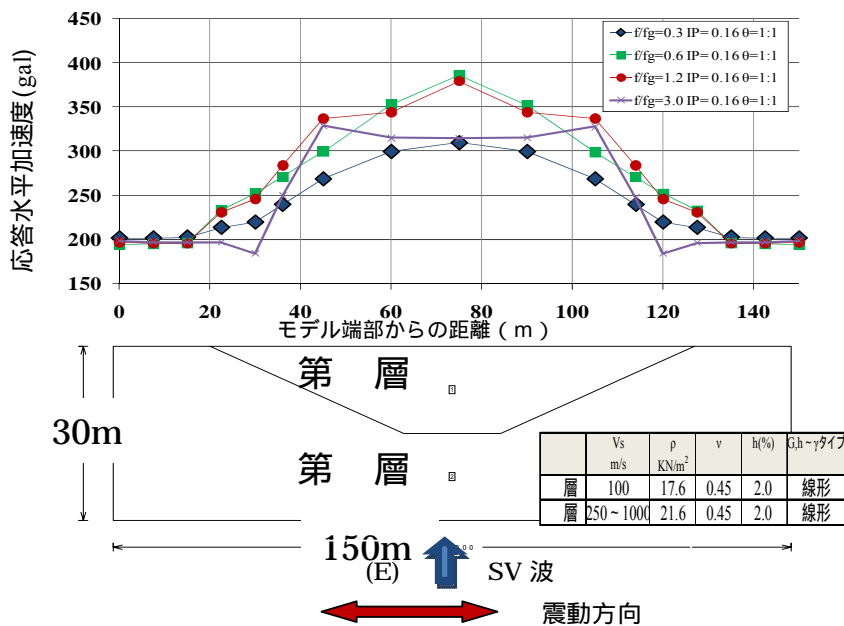


図-3 谷埋め盛土谷直角方向地震応答の例

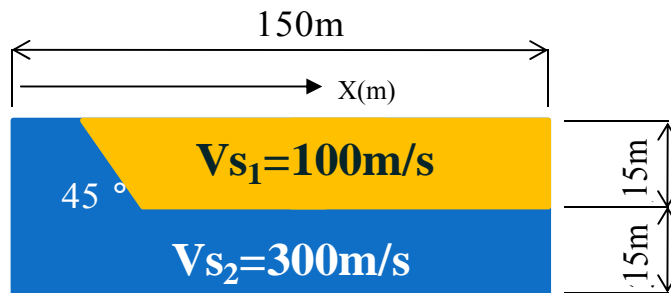


図-4 片側傾斜基盤解析モデル

3.2 片側基盤傾斜解析結果

図-5は中央図が解析モデルを表し、その中に代表例としてSH波の波動伝播のイメージを矢印で示し、基盤層上面から地表面への加速度波形のピークポイントの到達時間の数値と応答加速度 (A_{max}) の数値を示している。上図にはSH波、SV波の水平加速度、およびSV波の鉛直加速度について、地表面のモデル端部からの各点距離毎でのプロットを示している。図-5下図にはモデル端部から0m、36m、48m、及び59m地点の地表面のSH波、SV波の水平加速度、およびSV波の鉛直加速度波形を示している。例えば、SH波に着目すると、モデル右側のフリーフィールドでは、ピークポイントは、 $V_{s2}=300\text{m/s}$ の基盤層を底面から $V_{s1}=100\text{m/s}$ の盛土層境界まで進行し、 $V_{s1}=100\text{m/s}$ の盛土層をGL-15m ($t_0=0.0$ 秒) から地表面まで $t_1=0.15$ 秒で到達する。地表面最大加速度は430gal程度となっている。モデル左側の露出基盤地表面では、同様にモデル底面からの波動の最大値の発生ピークポイントはGL-15mから0.05secで第1波が到達している。図-5上図中の X (m)の表示は、モデル左端からの距離であるが、 $X=36\text{m}$ 付近の基盤が片側傾斜から水平成層に移行する範囲では、GL-15mからの地表面への加速度波形のピークが到達する時間は、右側フリーフィールドと同じく $t_1=0.15$ 秒付近であるが、最大加速度は水平成層（フリーフィールド）と比べて10%程度増幅の478galとなっている。これは、水

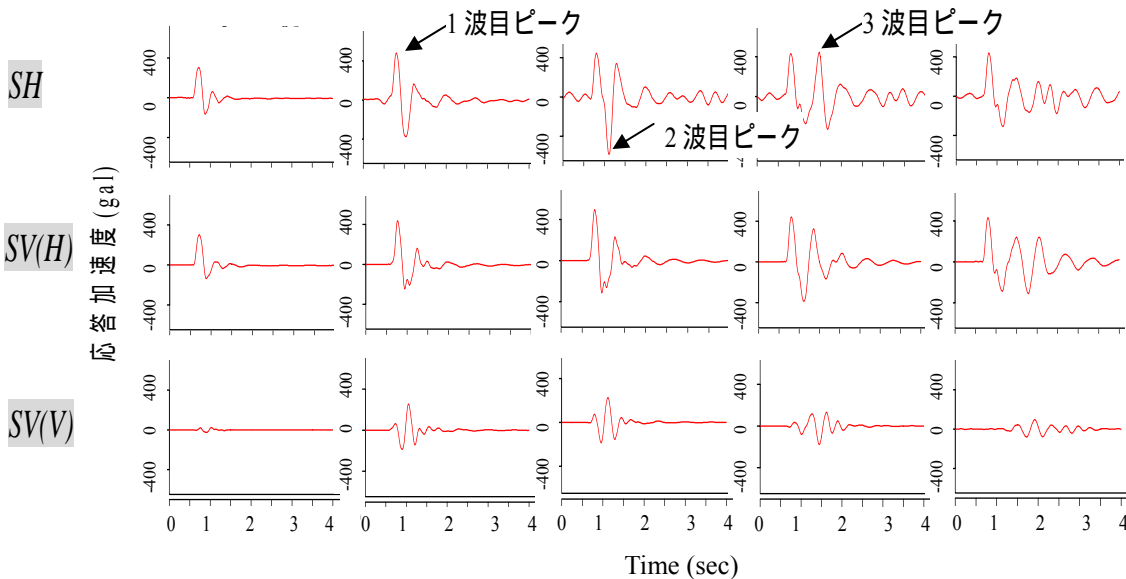
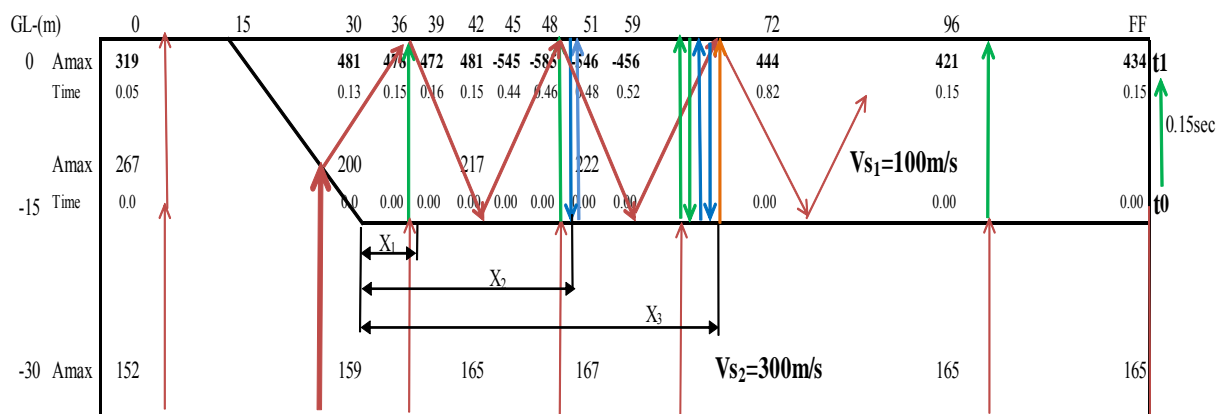
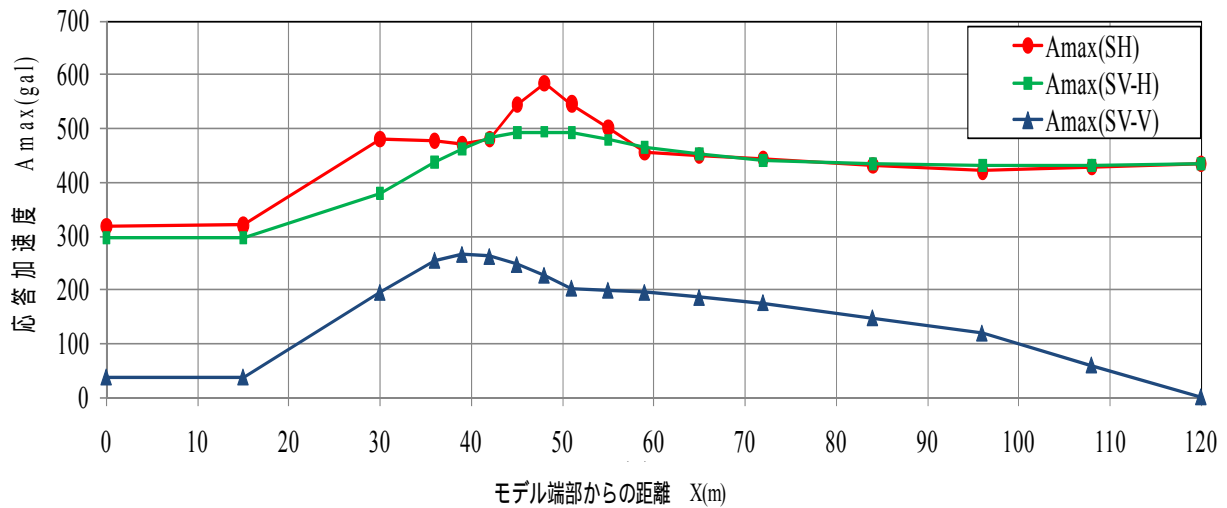


図-5 片側傾斜基盤による加速度重ね合わせ説明図

平成層地盤（フリーフィールド）と同じ鉛直下方から伝播してきた直達波と片側傾斜層から進行してくる屈折波との重ね合わせによるものと考えられる。さらに、 $X=48\text{m}$ 付近では最大加速度は水平平成層地盤（フリーフィールド）の最大値と比較して 35%程度大きい 585gal の増幅となっている。そして、 $X=48\text{m}$ 付近での最大加速度波形のピークの到達時間は最初に地表面にピークの第 1 波が到達してから約 0.30 秒が経過した 0.46 秒後となっている。これは、GL-15m の境界の下方から伝播した直達波が 0.15sec で第 1 波として地表面に到

達し、そこで全反射(同位相)し、反射波は0.3secでGL-15mの境界での再反射(位相逆転)の後、約0.45secで元と逆位相の第2波として到達し、片側傾斜から同様に反射・進行してきた屈折波と重なり大きな増幅となったものと想定された。さらにX=60m付近で反射を重ねた第3波が到達しているが、鉛直直達波と側方からの屈折波は減衰し水平成層地盤(フリーフィールド)での最大値とほぼ同じレベルの450gal程度となったものと想定される。ただし、水平成層地盤での最大値到達時間0.15秒と比べて加速度波形のピークの第3波到達時間は0.82秒となり、大きく時間遅れを伴っている。本検討では盛土層の減衰定数は2%の一定値として設定しており、ひずみ依存性は考慮していないため、減衰はさらに顕著となる可能性もある。以上の検討結果により、傾斜した基盤を有する盛土における地震動(応答加速度)の増幅は、下方から伝播する鉛直直達波と片側傾斜基盤から進行する屈折波との重ね合わせ効果によるところが大きいことが分かった。また、これら第1波、第2波、および第3波の到達で盛土地表面加速度の大きくなる位置と傾斜基盤の谷底の端部からの距離を X_1 、 X_2 および X_3 と設定してみる。この X_1 、 X_2 および X_3 を谷底幅W1の中央からの距離として次章の谷埋め盛土の地震動増幅パターン検討における3種類のモデル形状として検討することとする。

4. 谷埋め盛土での地震動増幅パターンの検討

4.1 谷埋め盛土(両側側基盤傾斜)解析モデル

図-6は谷軸直角方向(谷の盆状の地形構造)のモデルについて形状の違いによる地震時応答のパターンを確認するための代表的2次元解析モデルである。片側基盤傾斜モデルに対して対象断面となるものである。解析は、片側基盤傾斜モデルと同様に2次元有限要素解析(Advanced FLUSH)⁸⁾を用いている。境界条件として側方にはエネルギー伝達境界を設定し、底面に粘性境界を設定した。地盤物性としてはインピーダンス比を0.2程度とし、盛土地盤と基盤のせん断弾性波速度を

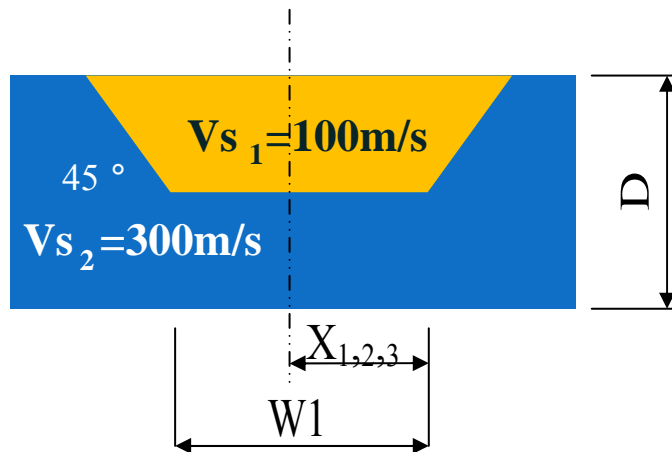


図-6 谷埋め盛土谷直角方向断面解析モデル

$V_{S1}=100\text{m/s}$ 、 $V_{S2}=300\text{m/s}$ 、密度を $\rho_1=17.6\text{kN/m}^3$ 、 $\rho_2=21.6\text{kN/m}^3$ としている。片側基盤傾斜モデルと同様に波動の幾何学的影響を見るため、盛土地盤の非線形性(せん断弾性定数と減衰定数のひずみ依存性)は考慮していない。入力地震動は鉛直SH波を考え2Hz正弦波半波長の入射振幅100gal(E)としている。

4.2 両側基盤傾斜解析結果

図-7は谷底面幅W1と谷深さDの比を $W1/D=1$ 、 $W1/D=3$ 、および $W1/D=6$ とした場合の基盤からの応答加速度の増幅率の違いを示している。ここでの増幅率は、入射振幅(E)が全反射する露出基盤入力振幅としてEの2倍の200galに対する地表面加速度の最大振幅と定義する。図-7の X_1 、 X_2 および X_3 は、図-5で示した第1波、第2波、および第3波到達地点付近で盛土地表面加速度の大きくなる位置から基盤傾斜の谷底の端部までの距離を表しており、谷底幅W1をそれぞれ X_1 、 X_2 、および X_3 の2倍に設定している。 $W1/D=1$ ($W1=2X_1$)のケースは、図-5の第1波目で応答が大きくなる位置付近を中央とした谷埋め盛土(両側基盤傾斜)形状である。また、 $W1/D=3$ ($W1=2X_2$)は同じく2波目の位置であり、 $W1/D=6$ ($W1=2X_3$)は3波目の位置である。図-7によると、谷底面幅の違いにより応答の発生パターンに違いがみられる。すなわち、 $W1/D=6$ の谷底幅の広いケースでは応答加速度の増幅率は、両側の基盤傾斜と谷底面の変化点付近で大きくなり、谷中央部に向か

って水平成層地盤（フリーフィールド）の増幅率とほぼ同じ値で一定となっている。W1/D=1 の谷底幅の狭いケースでは応答加速度の増幅率は、谷中央部に向かって急激に増加しており、谷中央でピークとなっている。一方、W1/D=3 の谷底面幅が中程度のケースでは応答加速度の増幅率は、谷埋め盛土の両側の基盤傾斜と谷底面の変化点付近から谷中央部に向かって緩やかに増加している。これらの結果から、図-7 に示す水平成層地盤（フリーフィールド）の増幅率より大きな部分が

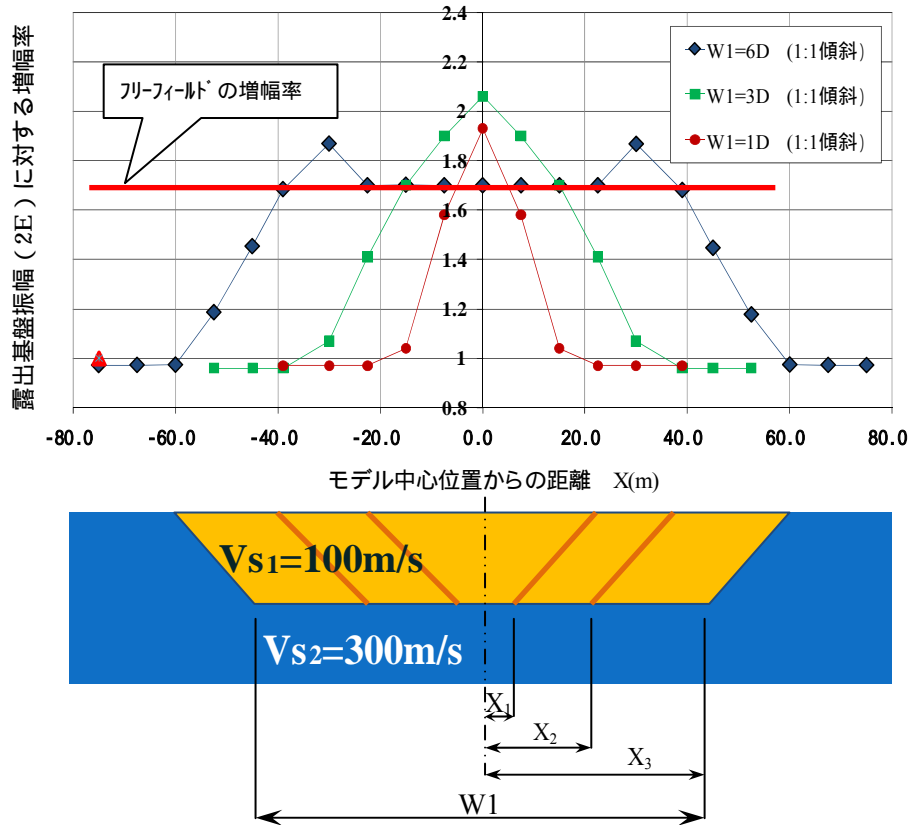


図-7 W1/D による加速度増幅の発生パターンの違い

谷埋め盛土の両側基盤傾斜による応答値の増幅の影響と考えられることから、図-8 に示すように増幅の傾向を 3 パターンに分類してみた。図-8 の谷底面幅が狭い場合（図左）には鉛直下方からの直達波と傾斜基盤から進行してきた屈折波の波動の重ね合わせで谷中央部に応答値のピークがみられる。また、谷底面幅が広い場合（図右）では、波動の重ね合わせによるピークは谷端の一部分に限られ、谷中央部では傾斜基盤からの屈折波は減衰し、大きな重ね合わせは少ない。谷底面幅が中程度の中央の図は、鉛直下方からの直達波と傾斜基盤からの屈折波がともに増幅し、さらに重ね合わせが幅広く生じる谷形状であることが想定された。

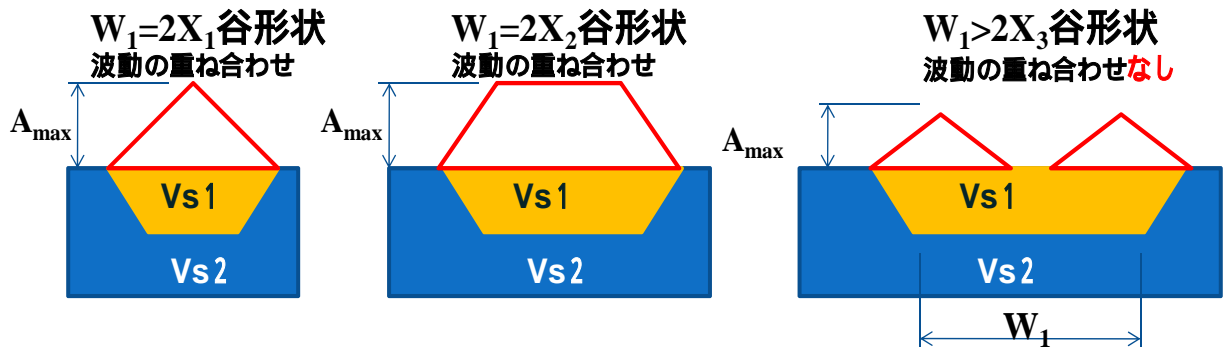


図-8 盛土形状による加速度増幅の発生パターン

5. 結論

谷直角断面の形状の違いによる地震時の応答値の違いのパターンについて評価した。結論として以下の知見が得られた。

- 1) 谷埋め盛土(両側基盤傾斜)の応答の変化をみるため,単純化モデルとして片側基盤傾斜の2次元有限要素解析(Advanced-FLUSH)による谷埋め盛土造成地のモデルを考えてみた.その結果,片側基盤傾斜から水平成層地盤に続く地表面位置の各距離で大きく加速度応答の違いがみられた.
- 2) 傾斜した基盤を有する盛土における地震動(応答加速度)の増幅は,下方から伝播する鉛直直達波と片側傾斜基盤から進行する屈折波との重ね合わせ効果により励起されるところで大きくなるということが分かった.
- 3) 谷埋め盛土の地震動の増幅は,鉛直直達波の重複反射の第1波と両端基盤傾斜からの屈折波の重ね合わせ地点が最も大きくなるとは限らず,第2波での重ね合わせ地点でより大きな増幅となる場合もあることが分かった.
- 4) 谷直角方向断面の規模(谷底幅 W_1 ,谷深さ D)により地震動増幅を3パターンに大きく分類した.これにより,谷形状により顕著に地震時の応答が大きくなる位置(被害が出る位置)が特定できる可能性があるものと考えられた.

今後は,周波数特性,インピーダンスコントラスト,および盛土材料のせん断弾性定数・減衰定数のひずみ依存性の影響などによる応答パターンの影響の検討を行う予定である.

参考文献

- 1) 都間英俊,常田賢一,小田和広,江川祐輔(2007): 応答加速度分布に及ぼす盛土の幾何学的形状の影響に関する解析的研究,土木学会地震工学論文集, pp.1205-1210.
- 2) 国土交通省(2008): 大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説.
- 3) 大橋正,森本巖他(1984): 傾斜基盤上造成地における地盤の振動特性,第19回土質工学研究発表会, pp.621-622.
- 4) 大橋正,杉戸真太,古本吉倫(2009): 谷埋め盛土の谷直角方向地震動増幅特性が斜面安定に及ぼす影響,土木学会地震工学論文集 第30巻,地震動,4.
- 5) 古本吉倫,杉戸真太,八嶋厚(2003): 周波数依存型等価線形化法による不整形地盤の震動特性について,土木学会地震工学論文集, Vol.27, No.201 (CD-ROM).
- 6) 今村年成,室野剛隆,畠中仁,棚村史朗,室谷耕輔(2001): 土の非線形を考慮した不整形地盤における波動伝播特性に関する一考察,土木学会第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp.501-504.
- 7) 川西智浩,室野剛隆,青木一二三,山崎貴之(2005): 地盤の不整形性が軌道面の折れ角に及ぼす影響,土木学会地震工学論文集, Vol.28, (CD-ROM).
- 8) 地盤ソフト工房(2004): ADVANSF/Win プログラム解説書