

谷埋め造成地における盛土地盤の非線形性が地震動の増幅パターンに及ぼす影響 Amplification pattern of Seismic Motion in Filling Valley on Irregular Base-formation

大橋 正¹, 杉戸 真太²

- 1 基礎地盤コンサルタンツ株式会社
- 2 岐阜大学 流域圏科学研究センター

概 要

傾斜した基盤を有する谷埋め盛土における谷軸直角方向の応答加速度などの地震動の増幅は、これまでに谷形状 (W/D)、谷直角方向断面の両端傾斜角 (θ) や周波数特性により、最大値やその発生位置が異なることが示されている。本検討では谷埋め造成地などの谷直角方向断面における、谷埋め盛土地盤材料のせん断弾性定数や減衰定数のひずみ依存性などの非線形性の影響が、応答加速度の最大値の発生場所などの地震動増幅パターンに及ぼす影響について評価したので報告する。検討の結果、谷埋め盛土地盤では、盛土地盤材料のせん断弾性定数や減衰定数の変化により地震動 (応答加速度) が谷端部に集中する傾向が認められた。地盤のせん断弾性定数や減衰定数の変化の程度は、想定される地震動の規模により異なるが、より大規模な地震 (入力加速度が大きい) ほど地盤の減衰効果が顕著となり傾斜基盤から谷中央部までに屈折波の伝搬が減衰し、端部での直達波と屈折波の重なりによる応答が相対的に大きくなることが示された。これら一連の評価により、谷埋め盛り土造成地などで地震時の応答が大きくなる位置 (被害が出る位置) をある程度の範囲で特定できる可能性を示しているものと考えられた。

キーワード：谷埋め盛土，地震動の増幅，盛土地盤の非線形性，不整形地盤

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⁾。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 (基盤の傾斜) による影響があると考えられる。

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^{2),3)}。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^{2),3),4)}。

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こと

から谷底面幅 ($W1$) 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) に及ぼす影響を評価した。さらに、加速度応答の最大値の発

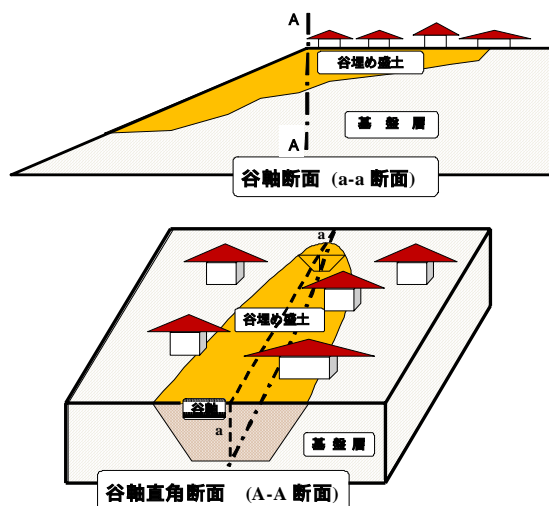


図-1 谷埋め盛土の検討断面の模式図

生パターンが谷埋め盛土地盤材料の非線形性によってどのように変化するかと、盛土造成地盤の地震時の被害範囲を想定するための基礎データを得ることに着目した。

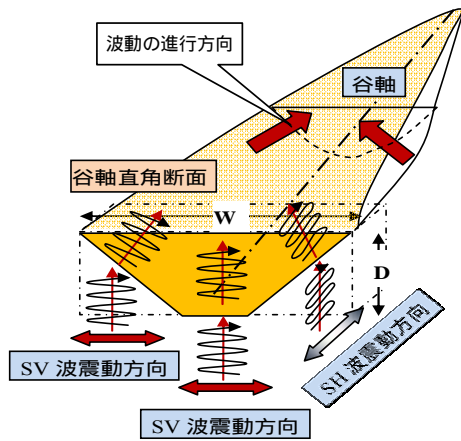


図-2 谷軸直角断面地震波震動方向イメージ

2. 傾斜基盤上盛土の地震動増幅メカニズムの解釈

2.1 片側傾斜基盤解析モデル

谷埋め盛土（両側基盤傾斜）の応答の変化をみるため、まず単純化したモデルにより波動の伝播を考えることとして、図-3 に示すように片側傾斜モデルを検討の対象

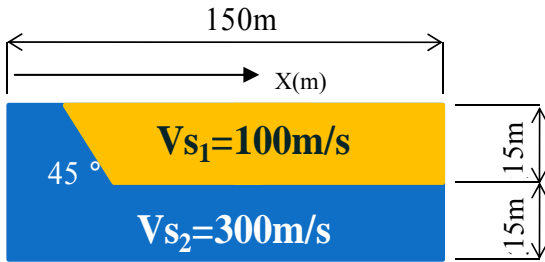


図-3 片側傾斜基盤解析モデル

とした⁴⁾。ここで、片側傾斜とは、谷軸直角断面の谷幅が無限に広がった幅の谷を想定したものである。

片側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、両側傾斜の谷埋め盛土はこの片側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- FLUSH)⁷⁾ 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。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。減衰定数は一律 2% を仮定した。

2.2 盛土地盤が線形とした場合の解析結果

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）を考慮しない場合の片側傾斜モデルにおける波動伝播を見てみ

る。図-4 は中央の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 波の水平加速度成分, および SV 波の鉛直加速度成分について、地表面のモデル端部からの各点距離毎のプロットを示している。図-4 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

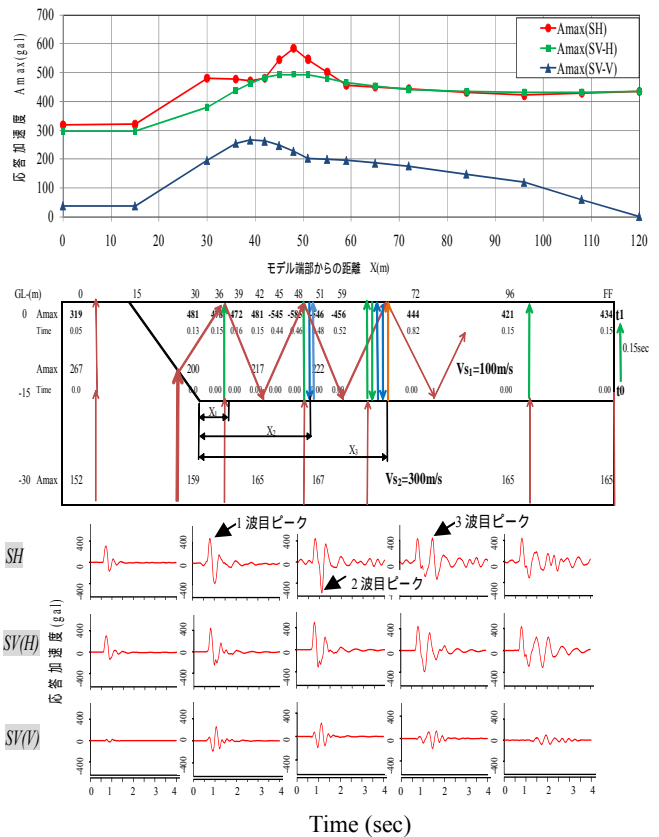


図-4 片側傾斜基盤による加速度

重ね合わせ説明図

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-4 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 0.3 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 $X=60\text{m}$ 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。

2.3 盛土地盤の非線形性を考慮した場合の解析結果

片側傾斜基盤上の盛土の地震時応答は、盛土材料のせん断弾性定数や減衰定数のひずみに対して線形の場合には下方からの鉛直直達波と側方基盤傾斜からの屈折波が重なり、応答が増大することが分かった。また、応答の増大の範囲は、鉛直直達波と屈折波の盛土内の重複反射による第 1 波だけでなく、第 2 波、3 波の重ね合わせにより大きな増幅の範囲が盛土中央部に拡大する可能性も指摘された。ここでは、盛土材料の非線形性が加速度応答に与える影響を検討した⁵⁾。地盤モデルは図-3 に示した断面および地盤物性であるが、盛土材料の非線形性 (せん断弾性定数と減衰定数のひずみ依存性) は、 $V_{s1}=100\text{m/s}$ 程度を検討に用いていることから、図-5 に示す佐々木らが求めた沖積粘性土の G/G_0 曲線を用いた。地盤の非線形性の影響を評価するため、入射加速度 (E) を 25, 50, 100 および 200gal として小ひずみから大ひずみまでの影響を評価する。また、入射波は 1Hz 及び 2Hz 正弦波半波長として周波数の影響も評価した。

図-6 上図は入射波 1Hz の場合のモデル端部からの露出基盤振幅 (2E) に対する増幅率をプロットしたものであり、下図は 2Hz のプロットである。両図ともに入射加速度振幅が 50gal までの比較的ひずみレベルの小さな範囲までは屈折波の影響がモデル右側までの広範囲に表れているが、入射波振幅が 100gal 以上では減衰効果が効いて谷右側の重ね合わせ効果は少ない。図-5 の図中の矢印は入射波 1Hz および 2Hz における盛土地盤のせん断弾性定数と減衰定数のひずみ依存カーブにおける有効せん断ひずみ γ_{eff} (最大せん断ひずみの 65% を仮定) の範囲を示している。入射

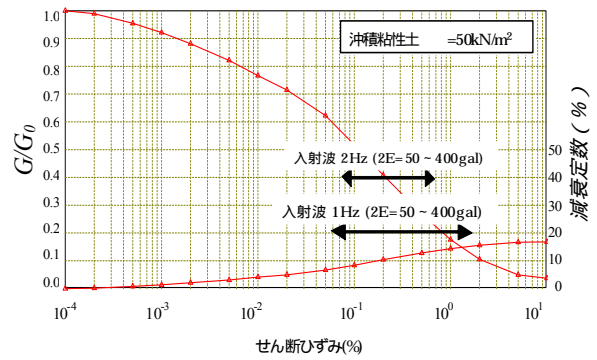
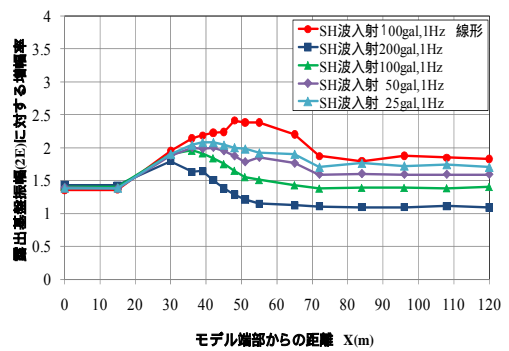
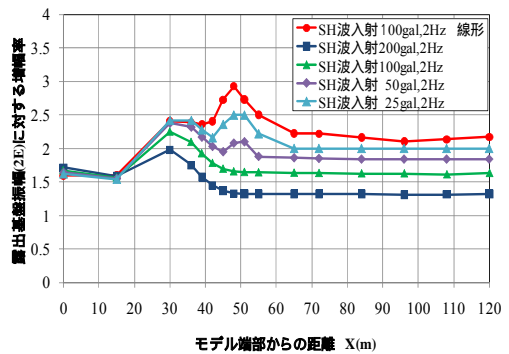


図-5 検討に用いた $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線



モデル端部からの距離 X(m)



モデル端部からの距離 X(m)

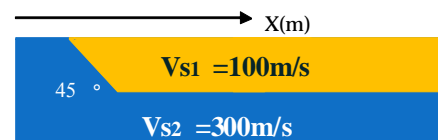


図-6 片側傾斜基盤解析モデル

波 25 ~ 200gal (2E=50 ~ 400gal) の場合、有効せん断ひずみ γ_{eff} は 0.06% ~ 1.52% の範囲を示し、 G/G_0 は初期値から 10 数% ~ 60% の低下となり、減衰定数は数% ~ 10 数% の上昇となる。1Hz 入射波の場合の方が 2Hz 入射に比較して有効せん断ひずみが大きく、基盤とのインピーダンスコントラストが大きくなる (波動インピーダンス比は小さくなる)。したがって、2Hz 入射の場合よりも 1Hz 入射のケースでは、片側傾斜基盤からの屈折波は Snell の法則によって、屈折角が大きくモデル右側に向かって進行する。但し、有効せん断ひずみが大きいため、減衰定数も 10 数% と大きくなるため、振幅の減衰も大きく、増幅率も小さい。

3. 谷埋め盛土での地震動増幅パターンの検討

3.1 谷埋め盛土（両側基盤傾斜）解析モデル

片側基盤傾斜による単純化モデルによって波動の重ね合わせ効果が確認されたが、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最大値の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本章の谷埋め盛土の地震動増幅パターン検討における3種類の谷軸直角方向断面モデル形状として検討することとする。

図-7は谷埋め盛土（両側基盤傾斜）の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（対象断面）に対して全断面モデルとなるものである。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）⁷⁾を用いている。境界条件として側方にはエネルギー伝達

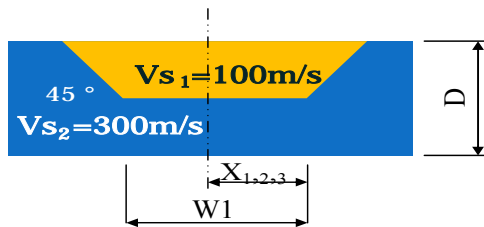


図-7 谷埋め盛土谷軸直角方向断面解析モデル

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 $Vs_1=100\text{m/s}$ 、 $Vs_2=300\text{m/s}$ 、密度を $\rho_1=17.6\text{kN/m}^3$ 、 $\rho_2=21.6\text{kN/m}^3$ としている。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。

3.2 盛土地盤の非線形性を考慮した解析結果

(1) 周波数の違いによる応答パターンの変化

盛土材料の非線形性（せん断弾性定数と減衰定数のひずみ依存性）を考慮した場合に両側傾斜地盤からの屈折波と直達波との重ね合わせによる応答の増幅や最大値の発生位置がどのように変化するかを検討した。解析条件は入射波を1Hz及び2Hzとし、盛土地盤の非線形特性は図-5の $G/G_0, h \sim$ 曲線を用いた。図-8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-8の X_1, X_2 および X_3 は、図-4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増大位置から基盤傾斜の谷底の端部までの距離を表している。図-8では、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。すなわち $X_1=0.5D$ 、 $X_2=1.5D$ 、 $X_3=3D$ 程度が図-4から求められている。そこで、 $W1/D=1$ ($W1=2X_1$) のケースは、図-4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）形状とした。 $W1/D=3$ ($W1=2X_2$) 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-8の $W1/D=6$ (広幅) の場合、1Hz, 2Hzともに地表面加速度の最大値は両側傾斜基盤が平坦部に移行する周辺で両側ともにピークが見られる（二つ山）。これは、第1波の重ね合わせがあるものの、それ以降は減衰効果が大きく中央部ではほぼ水平成層状況での応答と同様である。

1Hz入射波の応答は、2Hzの場合と比較して谷中央部に加速度の最大値の発生位置が変化している。一方、 $W1/D=1$ (狭幅) の場合、1Hz, 2Hzともに地表面加速度の最大値は谷中央部にピークが見られる。 $W1/D=3$ (中幅) では、2Hz入射の場合ピークは両側の2つ山となり、1Hzの場合には最大値は谷中央部にピークが見られる。

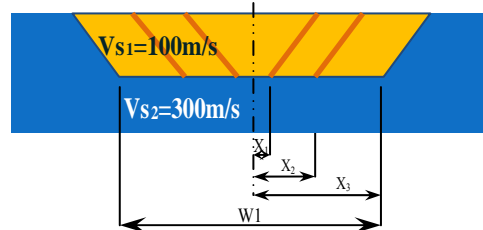
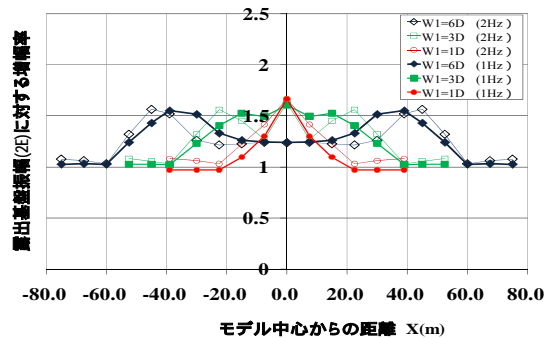


図-8 $W1/D$ による加速度増幅の発生パターンの違い（非線形）

(2) 入力レベルの違いによる応答パターンの変化

図-9は谷底面幅 $W1$ と谷深さ D の比を $W1/D=1$ (下図) および $W1/D=6$ (上図) とし、入力加速度レベルを50, 100, 200, および400galとした場合の、盛土地盤の非線形性の影響による増幅の発生パターンの違いを評価したものである。入射波の周波数は1Hz正弦波半波長である。上図の広幅モデルの場合には入力加速度レベルの違いによる二つ山の応答傾向の違いはないが、加速度レベルが大きくなるに従って両側傾斜付近での二つ山の傾向が明瞭となる。減衰の影響で増幅率は小さくなる傾向を示し、また側方基盤からの屈折波の減衰が入力加速度レベルの増加に伴って大きくなるため、谷中央部での加速度増幅率は減少していくものと考えられる。一方、下図の狭幅モデルでは入力加速度が200gal程度までは谷中央部に応答が集中しているが、外力が400galとなりレベル2相当になると発生パターンは二つ山となり谷中央部の応答は著しく減衰し、波動の重ね合わせは基盤傾斜部周辺のみで顕著となることが分かった。

(3) 盛土地盤の非線形性による加速度発生パターン

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-10 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($W_1/D=1$)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-8 および図-9 上図)では、波動の重ね合わせによるピークは

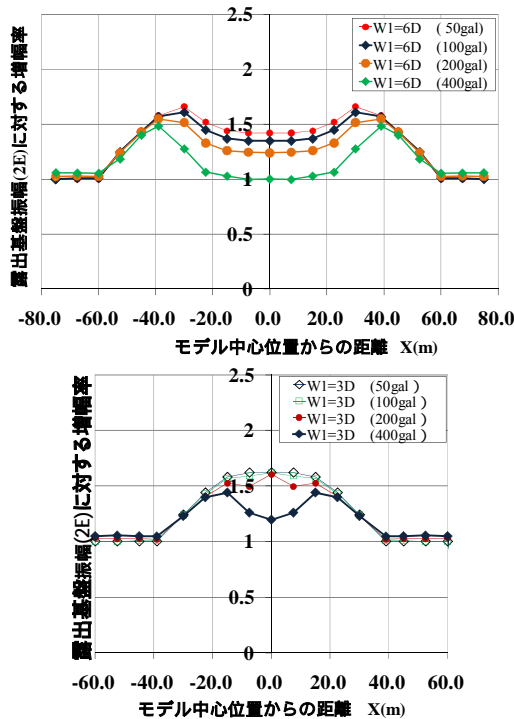


図-9 入力加速度の違いによる増幅発生パターンの違い(非線形)

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(図-8 および図-9 下図)では、入力周波数が小さな場合(2Hz から 1Hz へ波長が長くなる場合)と外力が大きくなる場合には、地盤の非線形性の影響による減衰効果で中央部での干渉が消滅する場合と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。

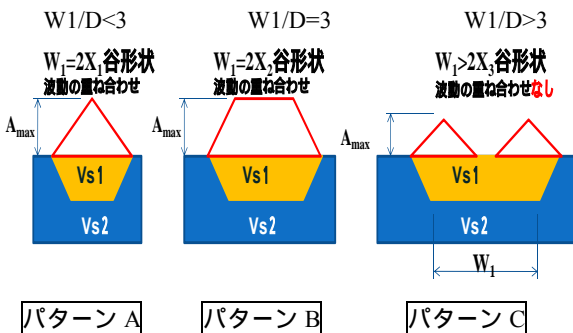


図-10 盛土形状による加速度増幅の発生パターン

4. 実地震における加速度増幅パターンと被害

4.1 能登半島地震の概要

2007年3月25日9:42に石川県能登半島沖を震源とするマグニチュードM=6.9の地震が発生した。震源深さは11kmであり、輪島市、七尾市、穴水町などで震度6強を観測した。この地震により、輪島市門前町等での多くの家屋倒壊や能登有料道路で複数の大規模盛土崩壊が発生し、交通が遮断された。

4.2 能登半島有料道路の被害パターン

石川県道路公社能登有料道路では、本地震で11か所の大規模盛土崩壊が発生した⁵⁾。図-14は、道路建設前の昭和40年代の地形図であるが、図中の2つ赤丸は本研究で対象とする七尾市中島町豊田の谷底低地末端部の近接する谷埋め



写真-1 谷埋め盛土崩壊地区(その1)



写真-2 谷埋め盛土崩壊地区(その2)



図-14 能登半島道路検討対象崩壊地の旧地形状況(国土地理院発行 1/25000 地形図「中島」に加筆)

盛土の2か所崩壊箇所であり、谷形状により被害パターンが異なる例である。その1崩壊箇所は、谷幅約225m、谷埋め盛土厚は最大で15m ($W/D=10$, $\theta=1:2$ および $1:3$)であり谷の両端部と中央部で複数のブロックに分割して崩壊が

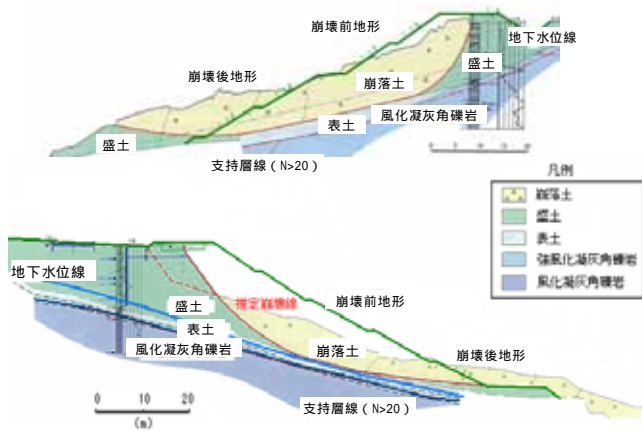


図-12 対象谷埋め盛土の崩壊形態 (上図その1崩壊, 下図その2崩壊)

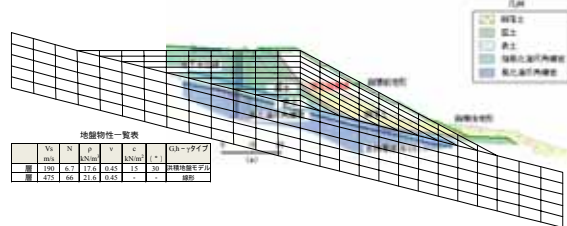


図-19 2次元解析モデル例 (その1崩壊地点) 文献5)に加筆

発生した地点である。その2の崩壊箇所は谷幅約60m、谷埋め盛土厚は最大で15~20m ($W/D=1$)であり、谷幅60mにわたって一気に崩壊が生じた地点である。被災後のボーリングデータによると、周辺は安山岩質凝灰岩を基盤として、盛土は礫混じり粘性土で構成されており、平均N値はその1地区、その2地区でそれぞれ5および7である⁸⁾。図-12は、石川県道路公社からの提供データを地盤工学会がまとめたその1崩壊地点およびその2崩壊地点の地層断面図資料⁸⁾であり、崩壊の形態、盛土・基盤構成、元地形などが示されている。

4.3 検証解析用入力地震動

能登半島地震ではK-NETおよびKiK-netで強震記録が観測⁹⁾されている。本崩壊地近傍では11地点で地表及び地中での強震記録が得られている。本検討に用いる入力地震動は、久世ら¹⁰⁾が推定したアスペリティー分布を基に算定した。具体的には、11か所の能登半島地震の強震観測記録KiK-net (地中)を観測地点のボーリングデータから作成した地盤モデルにより、周波数依存型地盤震動解析法FDEL¹¹⁾を用いて工学的基盤 ($V_s=500\text{m/s}$)相当に変換し震源インバージョンに用いている。さらに、推定した2007

年能登半島地震の断層モデルによるアスペリティー分布、地震モーメント M_0 及び断層の破壊伝達速度 V_r を用いて、杉戸らが開発した地震動予測法EMPR¹²⁾により波形合成を行った。図-14に合成された対象地点での露出基盤加速度波形を示す。検証解析の入力は露出基盤入射波の2倍の $A_{max}=130\text{gal}$ を用いることとした。

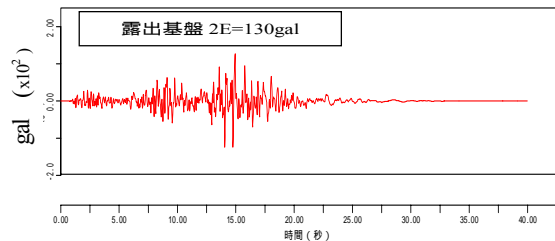


図-14 検証解析入力波形 (露出基盤 2E=130gal)

4.4 検証解析及び解析結果

(1) 地震動の増幅パターン

図-13に2次元有限要素解析による代表谷埋め盛土モデルとして、その1崩壊地点の谷方向のモデル (谷軸断面)を示す。境界条件として側方にはエネルギー伝達境界を設定し、底面には粘性境界を設定した。地盤物性は谷埋め盛土地盤 (第1層)と基盤 (第2層)のせん断弾性波速度を $V_{s1}=190\text{m/s}$, $V_{s2}=475\text{m/s}$ とし、 $\rho_1=17.6\text{kN/m}^3$, $\rho_2=21.6\text{kN/m}^3$ としている。その2崩壊地点のモデルも同じ地盤構成と物性を用いている。盛土地盤の非線形性は洪積粘性土地盤における $G_h \sim \gamma$ タイプを適用している。谷直角モデルとしては、現地での崩壊状況の確認や測量結果から斜面上部の天端付近の横断面を考え、その1崩壊地点では $W/D=10$ ($W=225\text{m}$, $D=15\text{m}$)、穴水側基盤傾斜を $\theta=1:3$ 、金沢側を $\theta=1:2$ とし、その2崩壊地点では $W/D=2$ ($W=60\text{m}$, $D=15\text{m}$)、 $\theta=1:1$ とした。

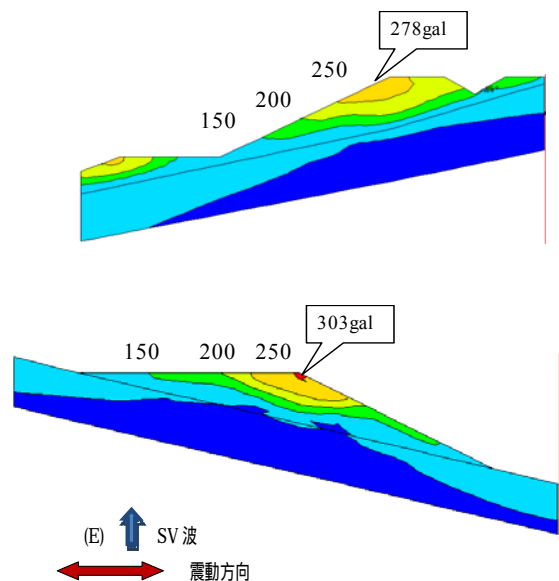


図-15 谷軸断面の加速度最大応答コンター図 (上図: その1崩壊地点、下図: その2崩壊地点)

図-15にその1地点およびその2地点での谷軸断面の加速度応答のコンター図を示す。最大地表加速度はその1崩壊地区で278gal, その2崩壊地区で303galの応答加速度である。図-16は谷軸直角断面での地表加速度応答値の入力振幅(2E=130gal)に対する増幅率を谷軸直角方向にプロットしたものである。その1崩壊地区では傾斜基盤端部付近で応答が大きくなり, 中央部ではほぼ水平成層と仮定した応答値と同じとなる二つ山応答である。増幅率は2.2~2.3倍程度であり, 水平成層地盤における応答に対する割増係

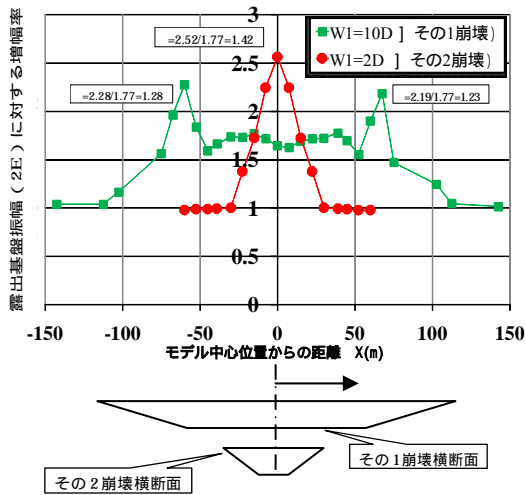


図-21 崩壊地点での加速度増幅率の比較

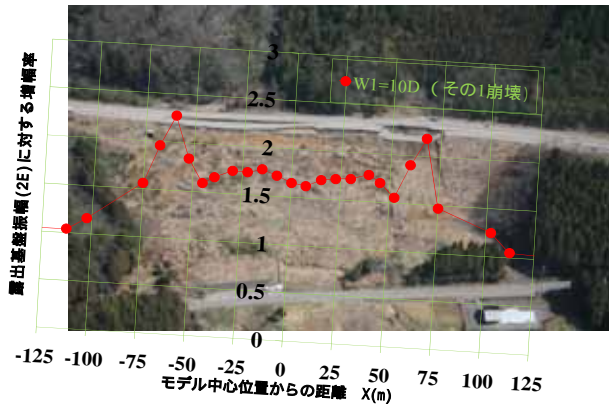


写真-3 地震動増幅と崩壊のパターン比較 (その1崩壊 W1/D=10)

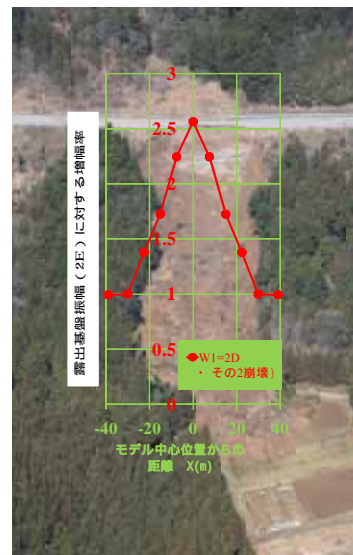


写真-4 地震動増幅と崩壊のパターン比較 (その2崩壊 W1/D=2)

数を³⁾とすると $\beta = 1.24 \sim 1.28$ 程度である。その2崩壊地点では, 増幅率は2.4倍であり, 1Hz正弦波半波長でのケーススタディの結果と同様に谷埋め盛土中央部で応答が大きくなり, 水平成層と比較した割増係数 β は1.4倍程度の応答が表れている。地震動から崩壊の形態を見てみると, 写真-3に示すように, その1崩壊は両側の基盤傾斜付近で深い崩壊と中央部付近の崩壊の3ブロックに崩壊が分かれている。まず地震動の大きな両側傾斜付近の崩壊が発生し, その後中央部が引き続き崩壊に至った可能性が考えられ

る。一方, その2崩壊(写真-4)は, 谷中央部に大きな地震動が発生し, 谷全体に一気に崩壊に至ったものと想定される。

(2) 安定解析条件および結果

谷埋め盛土の疑似的に3次元外力を考慮した安定性評価の一つの手法として, 大橋・杉村³⁾の方法が示されており, 今回もこの手法により被害の程度(安定度)を評価した。すなわち, まず谷軸断面で2次元SV波応答計算により最大応答値と平均応答値(加速度)を求める。次に, 代表的な谷軸横断方向で2次元SH波応答倍率を求める。谷軸断面のSV波の震動方向と谷横断方向のSH波の震動方向は同方向であり, 谷崩壊方向と一致するとの考え方である。谷埋め盛土の強度定数は既往調査資料^{3),8)}と, 現地盛土材料の締め固め試験結果から90%締め固め度($\rho_d=90\%$)を想定し, 三軸CU試験(不飽和)を実施して, $c=15\text{kN/m}^2$, $\phi=30^\circ$ を求めている。地下水位はその1崩壊地点では地震後の地盤調査結果から谷上部とのり尻を結ぶラインに想定されており, その2崩壊地点では基盤上面とされている。安定計算条件は先に実施したケーススタディと同様に, 2次元分割法(円弧すべり面法(Fellenius法))を用いている。

対象谷埋め盛土の崩壊状況を検討するにあたって, 谷軸方向地震力(谷方向モデル)に加えて, 谷軸直角方向の基盤傾斜による幾何学的増幅割増係数 β は, 図-16よりその1崩壊地点で $\beta=1.24 \sim 1.28$ が得られており, その2崩壊地点で

は $\beta=1.41$ が得られているため, 地震力 Kh は斜面頂部の応答値から以下のように求めた。

$$Kh1(\text{中央}) = \alpha \cdot A_{\text{max}(SV)/g} \cdot \beta = 0.7 \cdot (278/980) \cdot 1.00 = 0.20 \quad (\text{その1地点 中央部}) \quad \text{式-1}$$

$$Kh1(\text{両端}) = 0.7 \cdot (278/980) \cdot (1.24 \sim 1.28) = 0.24 \sim 0.28 \quad (\text{その1地点 端部}) \quad \text{式-2}$$

$$Kh2(\text{中央}) = \alpha \cdot A_{\text{max}(SV)/g} \cdot \beta = 0.7 \cdot (303/980) \cdot 1.42 = 0.31 \quad (\text{その2崩壊地点 全幅}) \quad \text{式-3}$$

表-3 地震動のパターン変化と実現象との安全率の対比

	W1/D (谷形状)	Kh (設計外力)	Fs (安全率)	実現象	地震動 パターン
その1崩壊 (端部)	10	0.24 ~ 0.28	0.93 ~ 0.98	端部で崩壊	C
その1崩壊 (中央部)	10	0.2	1.03	端部崩壊の後崩壊	C
その2崩壊	2	0.31	0.95	急激な崩壊	A

ここに、

$A_{max(S1)}$ は、谷方向モデルでの斜面応答加速度であり、 β は谷軸直角方向の増幅割増係数、 α は等価加速度として、加速度の最大値に対する盛土深さ方向の加速度の平均の割合である。

表-1に2次元分割法(簡便法(円弧すべり面法のFellenius法))による谷軸直角方向の傾斜基盤の影響を考慮した安定計算結果を示す。表-1はその1崩壊地点とその2崩壊地点における谷形状W1/D、式-1~3で求めた設計外力Kh、安定計算による滑り安全率Fs、実崩壊現象と図-10で示した地震動パターン分類を示す。その1崩壊では端部で設計外力は0.24~0.28で安全率が1以下となり、中央部で外力0.20で安全率が1を若干上回っている。地震動はパターンAの二つ山地震動となっている。したがって、崩壊は、まず地震動の大きな両側傾斜付近の崩壊が発生し、その後中央部が引き続き崩壊に至った可能性が考えられる。一方、その2崩壊では、谷中央部に設計外力として0.31の大きな地震動が発生し、パターンCの中央に外力が集中し、安全率も0.95となり、谷全体に一気に崩壊に至ったものと想定される。

5. 結論

地震動の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) 傾斜した基盤を有する盛土における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。
- 2) 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、2波、3波と両端基盤傾斜からの屈折波の重ね合わせで谷中央部に向かって加速度の増幅が認められた。第2波以降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。
- 3) 谷埋め盛土地盤では、盛土地盤材料のせん断弾性定数や減衰定数の変化により地震動(応答加速度)が谷端部に集中する傾向が認められた。
- 4) 地盤のせん断弾性定数や減衰定数の変化の程度は想定される地震動の規模により異なるが、より大規模な地震(入力加速度が大きい)ほど地盤の減衰効果が顕著となり傾斜基盤から谷中央部までに屈折波の

伝播が減衰し、端部での直達波と屈折波の重なりによる応答が相対的に大きくなることが示された。

- 5) 能登半島地震での近傍の2か所の谷幅の違う谷埋め盛土被害の被害パターンの比較を行ったが、谷幅が広い場合では、谷直角方向の両側基盤傾斜端部付近で2つ山の地震応答(パターンA)となり、崩壊も両端部の崩壊ブロックと中央の崩壊ブロックと分類できた。また、谷幅の狭い崩壊地点ではパターンCの谷中央での地震動の集中により、一気に谷全体が崩壊に至って様子が認められた。

以上より、谷形状(W1/D)により発生する地震動のパターンに3種類があることが判明し、被害もこのパターンで説明できそうである。今後は、その他の構造物に関しても谷埋め盛土の谷直角方向の形状と地震動の発生パターンと被害パターンの関係を定量的に評価していくことを考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省：大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説，2008。
- 2) 大橋正，森本巖他：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.621-622，1984。
- 3) 大橋正，杉戸真太，古本吉倫：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4,2009。
- 4) 古本吉倫，杉戸真太，八嶋厚：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)，2003。
- 5) 今村年成，室野剛隆，畠中仁，棚村史朗，室谷耕輔：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.501-504，2001。
- 6) 川西智浩，室野剛隆，青木一二三，山崎貴之：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)，2005。
- 7) 地盤ソフト工房：ADVANSF/Win プログラム解説書，2004。
- 8) 地盤工学会：2007年能登半島地震 道路災害データ集，pp.12-18，2008。
- 9) 防災科学技術研究所：近地地震動記録による能登半島地震の震源インバージョン(暫定版)，2007/3/28，<http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/noto070325/>
- 10) Kuse,M.，Sugito,M. and Nojima,N.：Prompt Estimation of Strong Ground Motion Near Focal Region Based on Fault Inversion from Acceleration Records，14th World Conference on Earthquake Engineering，Paper No.03-01-0052，2008。
- 11) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地震動解析法に関する一考察，土木学会論文集，No.493/□-27，pp.49-58，1994。
- 12) Sugito,M.，Furumoto,Y. and Sugiyama,T.：Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra，12th World Conference on Earthquake Engineering，Paper No.2111(CD-ROM)，2000。