

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

大橋 正¹・杉戸真太²・古本吉倫³

¹正会員 基礎地盤コンサルタンツ(株)中部支社 (〒451-0044 名古屋市西区菊井2-14-24)

E-mail:Ohashi.tadashi@kiso.co.jp

²正会員 岐阜大学流域圏科学研究センター教授 (〒501-1193 岐阜市屋柳戸1番1)

E-mail:sugito@gifu-u.ac.jp

³正会員 長野工業高等専門学校 准教授 (〒381-8550 長野市徳間716)

E-mail:furumoto@eu.nagano-nct.ac.jp

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加速度応答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。これら谷埋め造成地盤では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。谷埋め盛土などの不整形地盤での地震動の増幅は通常谷筋方向成分の増幅が報告されているが、谷直角方向成分の地震動の増幅が斜面安定に与える影響を研究した事例は少ない。本研究では、幾何学的干渉やインピーダンス比及び周波数特性による谷直角方向成分地震動の増幅が盛土斜面に与える影響を研究した。

研究成果として、谷直角方向の地震時増幅は谷幅 W と谷深さ D に大きく関係し、加速度増幅で最大25%程度の増幅が見込まれ、この結果斜面安定に及ぼす影響度は数%の安全率の低下となり、安定度評価においては、斜面直角方向の谷形状の効果を適切に見込む必要があることを示した。

Key Words : Safety Assessment , fill-slopes , Irregular Ground , SH wave

1. はじめに

大規模な宅地造成地や山間部の道路建設などでは、谷を埋め立てた盛土により斜面が形成されることが多い。このような谷埋め盛土では傾斜基盤上での盛土となる場合が多く、いわゆる基盤不整形による地震動の増幅が報告されている^{1),2)}。一方、傾斜基盤上の盛土での地震時斜面崩壊の被害は、1978年宮城県沖地震における緑が丘団地での被害報告²⁾で注目され、その後1993年釧路沖地震での緑が岡の斜面崩壊や1995年兵庫県南部地震の西宮市仁川大規模造成地の崩壊³⁾がある。最近では、2005年新潟県中越地震では、山間部の道路盛土での崩壊が、切土部での安定と対照的に確認されている。また、2007年能登半島地震では特に能登有料道路での谷埋め盛土での道路崩壊が記憶に新しい。

谷埋め盛土の地震時安定評価は、通常谷筋方向における不整形性による地震動の増幅を問題視し、特に盛土頂部の凸部での増幅が大きくなることが知られている。しかしながら、谷基盤の不整形性は谷筋

方向成分ばかりでなく、谷直角方向におけるU字谷やV字谷による地震動の幾何学的進行による影響や斜面安定も考えられ、これらに関連付けた報告は少ない。そこで、本研究では傾斜した基盤による盛土

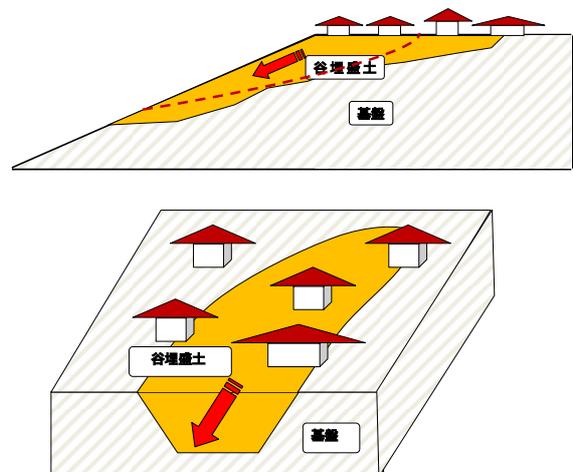


図-1 盛土造成地での斜面崩壊イメージ

の谷直角方向における地震動の幾何学的干渉やインピーダンス比および周波数特性による地震動の増幅

が、盛土斜面の安定に及ぼす影響について検討を行った。盛土斜面の安定は谷筋方向での震動方向であることから、谷直角方向での揺れ方として、谷直角断面を考えた場合での面外加振方向（SH波）として考え、谷筋方向の揺れを谷直角方向のSH波の増幅の重ね合わせ外力（割増係数）として評価することにより斜面安定に与える影響の程度を検討した。

2. 谷埋め盛土の安定に及ぼす各種要因について

地震時における谷埋め盛土安定に及ぼす要因としては、表-1に示すように素因としての地形や地質条件と気象や地震動による誘因が影響を及ぼすこととなる。谷埋め地は地形的に通常集水地形である場合が多く、気象条件による降雨の影響により地下水位上昇降下や乾湿繰り返しなどで盛土地盤強度の脆弱化による盛土の不安定化の報

表-1 地震時谷埋め盛土安定性に及ぼす要因

盛土安定に及ぼす要因	対象	安定性を低下させる誘因
地震動	加速度、震度	加速度増幅、変位増幅、 周波数特性
地形	山地、谷、盛土	集水、 地震動の幾何学的干渉
地質	岩盤、自然地盤、人工地盤	剛性低下、強度低下、有効応力減少 インピーダンス比
気象	降雨量、降雨継続時間	地下水位上昇、風化

表中の太字は本論文で扱う範囲

告もある⁴⁾。谷埋め盛土における不整形地盤での地震動の増幅は通常谷筋方向での増幅が報告されており^{5),6)}、谷筋方向の基盤や盛土形状により特に盛土頂部での加速度応答や変位応答の増幅が報告されている。一方、盛土谷直角方向での地震動の幾何学的干渉やインピーダンス比及び周波数特性による地震動の増幅が盛土斜面に与える影響を研究した事例は少ない。ここではこれらの要因のうち、特に図-2に示す谷直角方向の谷形状が盛土の安定に与える影響に着目する。

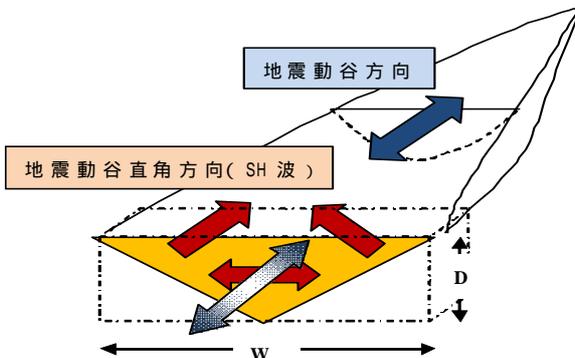


図-2 谷埋め造成盛土のイメージ図

3. 傾斜した基盤による盛土の地震動増幅特性

(1) 地震動の幾何学的干渉の影響解析

a) 解析モデル

基盤不整形での地震動の幾何学的干渉による増幅特性を評価するため図-3に示すように2次元有限要素解析（FLUSH）による谷埋め盛土造成地でのモデルとして、谷方向モデル（1-1断面）と谷直角方向モデル（A-A断面）を考えてみる。境界条件として側法にはエネルギー伝

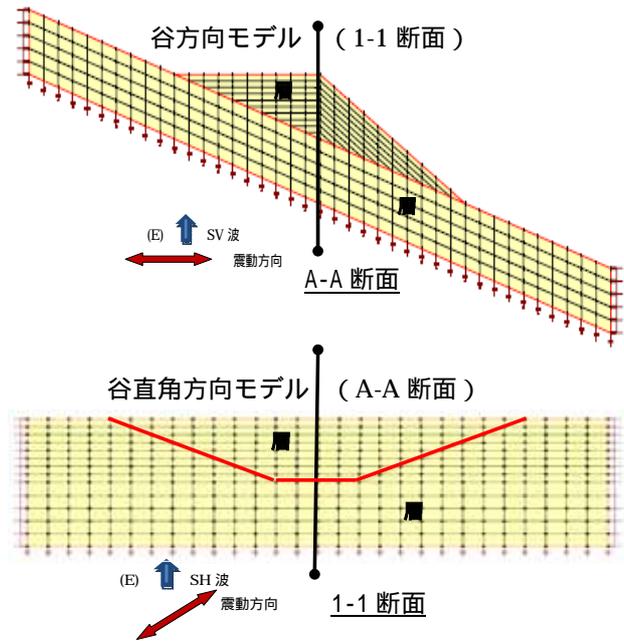


図-3 2次元有限要素解析モデル（周波数応答法）

達境界を設定し、底面には弾性境界を設定した。地盤物性としては表-2に示すようにインピーダンス比を0.16程度とし、盛土地盤（第層）と基盤（第層）のせん断弾性波速度を $V_{s1}=100\text{m/s}$ 、 $V_{s2}=500\text{m/s}$ 、密度は $\rho_1=17.6\text{KN/m}^3$ 、 $\rho_2=21.6\text{KN/m}^3$ としている。波動の幾何学的影響を見るため、本研究では盛土地盤および基盤の非線形性は考慮していない。減衰定数は一律2%とした。また同じく表2に示すように谷埋め盛土の層厚を D 、谷幅を W 、谷直角方向斜面勾配を1:1から1:4に変化させて、不整形モデルについて W/D^2 を基準としてケーススタディーを行った。

入力地震波は谷方向断面では、面内加振を考え鉛直SV波とし、谷直角方向断面では面外加振のSH波を考える。両断面モデルとも1Hz正弦波半波長の入射振幅を100gal(E)としている。地震波入射面は谷方向断面モデル、谷直角断面モデル双方とも、基盤層上の元地表面からGL 15mの位置としている。

表-2 谷埋め盛土不整形モデル解析用地盤物性一覧表

	W (m)	D (m)	W/D	傾斜角度θ	Vs ₁ (m/s)	Vs ₂ (m/s)	ρ ₁ (KN/m ³)	ρ ₂ (KN/m ³)	Vs ₁ ρ ₁ /Vs ₂ ρ ₂	h(%)		非線形性	周波数 (Hz)	入射波	T _g =4H ₁ /Vs ₁ (sec)	f _g =1/T _g (Hz)	f/f _g
case-1	45	15	3	1:1	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6
case-2	75	15	5	1:1	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6
case-3	75	15	5	1:2	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6
case-4	120	15	8	1:1	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6
case-5	120	15	8	1:2	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6
case-6	120	15	8	1:3	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7 </td <td>0.6</td>	0.6

b)解析結果

解析結果として、まず図4に示すように谷埋め盛土の谷方向断面(1-1断面)においては、盛土天端付近に向かってSV波の地震応答値の増幅がみられる。従来から指摘されているように、凸部での応答増幅であり本研究の条件では最大加速度 340gal 程度である。

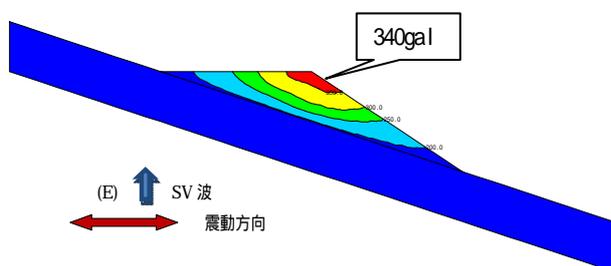


図-4 谷方向モデル(1-1断面)の応答計算結果

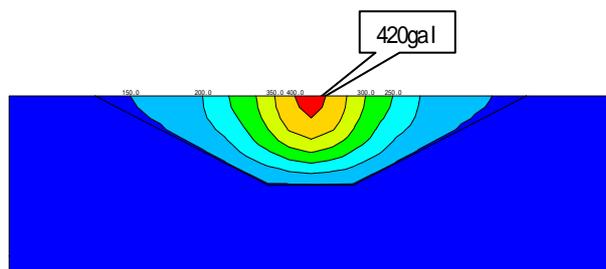


図-5 谷直角方向モデル(A-A断面)の応答計算結果 (W/D=5 1:2の計算例)

また、谷直角方向(A-A断面)では、V字型、U字型谷地形をモデル化しており、既往研究^{8),9)}によるとSV波では、加速度応答の増幅は見られるが、谷両側の基盤で盛土地盤が拘束される影響で変位(ひずみ)は抑制され、安定上の影響は少ないという報告もある。一方、谷直角方向での波動の振幅方向に着目し、SH波の進行を考えてみると、SH波の振幅と増幅はすべり方向と一致しており、加速度、変位共に谷方向に大きくなると考えられる。図5に谷直角方向モデルでの応答計算結果の代表値を示す。入射波は谷方向モデルでの振幅方向と同方向となるSH波を、やはり1Hz正弦波半波長の振幅100galとしている。W/D=5、1:2の計算例では、解放基盤での入力加速度2E(200gal)に対して420galの増幅となっている。

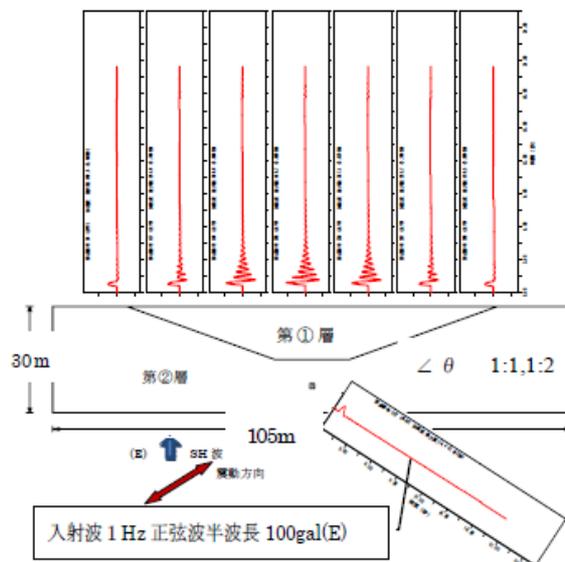
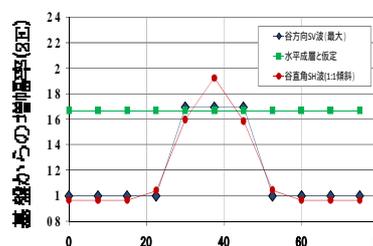
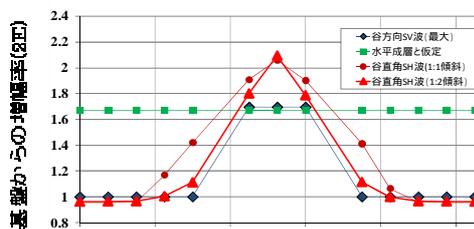


図-6 谷直角方向モデルの盛土応答計算結果例(地表面)

W/D=3



W/D=5



W/D=8

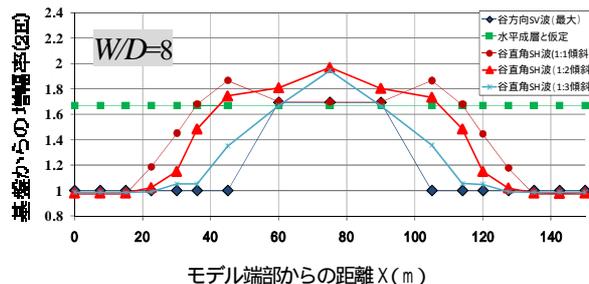


図-7 谷方向モデルのW/Dによる加速度応答の変化

図 6には $W/D=5$, $\theta=1:2$ の条件での地山（基盤）から谷埋め盛土の横断方向での加速度応答波形の変化を示している。切土地山での応答は入力とほぼ等しく、盛土部では谷中心部に向かって応答が増幅し中央でピークを迎えている。図-7 は、表-2 に示した谷埋め盛土不整形モデルの各ケースの谷直角方向での加速度波形の増幅として $2E$ に対する比を示している。特に W/D を 3, 5, 8 とし、谷傾斜角 θ を 1:1, 1:2, 1:3 に設定した場合の応答の変化をみている。 $W/D=8$, $\theta=1:1$ の場合、応答は谷傾斜面から底面の平坦部の境界付近でピークを迎えている^{10), 11)}が、 $\theta=1:2, 1:3$ と谷形状が U 字から V 字になるに従い、応答のピークは徐々に谷埋め盛土中央部に移行していく。応答値も徐々に大きくなっていくようであり、全体に約 2 倍強の増幅率を示している。谷中心部での位置の地盤構成が水平に連続すると仮定した水平成層モデルでの応答は約 1.7 倍である。谷直角方向斜面からの幾何学的な波動の屈折と両斜面からの波動の重ね合わせ（焦点効果）により、応答値が大きくなっていることがわかる。 $W/D=5$, $\theta=1:1, 1:2$ の場合は、応答は谷中心部でのピークとなり、

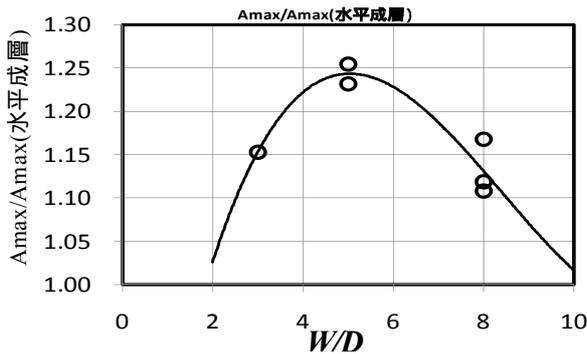


図-8 W/D ~ 谷直角方向の加速度増幅の関係

表-3 谷直角方向モデルの IP の違いによる応答変化確認のための条件一覧表

	W (m)	D (m)	W/D	傾斜角度 θ	V_{S1} (m/s)	V_{S2} (m/s)	ρ_1 (KN/m ³)	ρ_2 (KN/m ³)	IP $V_{S1}\rho_1/V_{S2}\rho_2$	h (%)		非線形性	周波数 (Hz)	入射波	$T_g=4H_1/V_{S1}$ (sec)	$f_g=1/T_g$ (Hz)	f/f_g
case-7	75	15	5	1:1	100	1000	17.6	21.6	0.08	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6
case-8	75	15	5	1:1	100	250	17.6	21.6	0.33	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6
case-9	75	15	5	1:1	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6
case-10	75	15	5	1:2	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6

表-4 谷直角方向モデルの f/f_g の違いによる加速度応答の変化確認のための条件一覧表

	W (m)	D (m)	W/D	傾斜角度 θ	V_{S1} (m/s)	V_{S2} (m/s)	ρ_1 (KN/m ³)	ρ_2 (KN/m ³)	$V_{S1}\rho_1/V_{S2}\rho_2$	h (%)		非線形性	周波数 (Hz)	入射波	$T_g=4H_1/V_{S1}$ (sec)	$f_g=1/T_g$ (Hz)	f/f_g
case-11	120	15	8	1:1	200	1000	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.3	3.3	0.3
case-12	120	15	8	1:1	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	5.0	SH	0.6	1.7	3
case-13	120	15	8	1:1	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	2.0	SH	0.6	1.7	1.2
case-14	120	15	8	1:1	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	0.5	SH	0.6	1.7	0.3
case-15	120	15	8	1:2	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6
case-16	120	15	8	1:3	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6
case-17	120	15	8	1:1	100	500	17.6	21.6	0.16	2.00	0.45	線形	1.0	SH	0.6	1.7	0.6

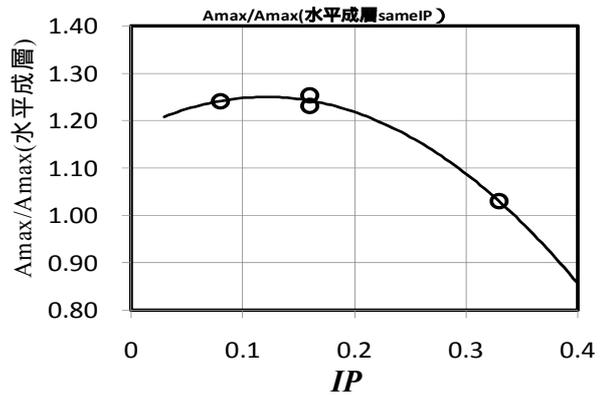


図-9 谷直角方向モデルの IP による加速度応答の変化

より焦点効果が顕著といえる。但し、 $W/D=3$, $\theta=1:1$ の場合には、焦点効果はあるものの重なり幅が広くやや応答値も小さくなっている。図-8 は谷直角方向形状 W/D による不整形性応答の水平成層地盤応答との比を求めたものであるが、図-7 での説明と同様に、表-2 に示した物性値と 1 Hz 入射波という条件においては、 W/D が 3~8 の範囲で応答値は 1.1~1.25 倍となり、特に谷直角方向斜面から波動の重ね合わせによる焦点効果で $W/D=5$ 程度で応答が大きく増幅することがわかった。

(2) インピーダンス比 (IP) の影響

谷直角方向の不整形性がインピーダンス比 (IP) によりどの程度変化するかを確認する。表-3 に谷直角方向モデルの IP の違いによる応答変化確認のための条件一覧表を示す。第 1 層のせん断波速度 V_S を $V_{S1}=100$ m/s に固定し、第 2 層を $V_{S2}=250, 500, 1000$ m/s と変化させて IP を 0.08 ~ 0.33 とした。図-9 は、 $W/D=5$ の場合のインピーダンス比を有する水平成層地盤での加速度応答とを比較したものである。図-9 によると、 IP がおおよそ 0.2 程度までは不整

形地盤の影響による応答値は水平成層での応答値の1.2倍以上となっており、 $IP > 0.3$ で1.1倍の影響が認められる。一般的な傾向として、 IP が大きくなるに伴い、不整形の影響は小さくなると云える。

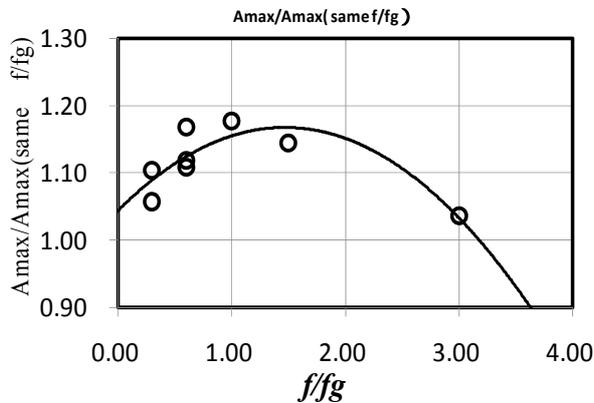


図-10 谷直角方向モデルの周波数特性による加速度応答の変化

(3) 周波数特性の影響

谷直角方向の不整形性が入射波の周波数特性及び盛土地盤の固有周期(T_g)との関係によりどの程度変化するかを確認する。表-4に谷直角方向モデルの入射波の周波数と盛土の固有周期で正規化した f/fg の違いによる応答変化確認のための条件一覧表を示す。 IP を0.16に固定し V_{s1} , V_{s2} を100~1000(m/s), 入射波の周期を0.5から~5Hz, f/fg を0.3~3.0とした。図-10は、 $W/D=8$ の場合の加速度応答が同じ f/fg を有する水平成層地盤での加速度応答とを比較したものである。図-10中 f/fg がおおよそ0.5~2.5程度までは不整形地盤の影響による応答値は水平成層での応答値の1.1以上となっており、特に $f/fg=1$ 付近で1.2倍の影響が認められる。

4. 地震動の増幅が盛土斜面安定に及ぼす影響 (W/Dとすべり安全率の関係)

谷幅 W と谷深さ D の比や谷直角方向の傾斜角による外力の増加が斜面安定に及ぼす影響を確認するため、文献3)の「大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラインの解説」で示されている2次元分割法(簡便法(円弧すべり面法のFellenius法))による安定計算を行った。地盤物性強度定数は、盛土層では3章で実施した応答計算と同じ密度を用い、盛土の強度定数は $c=20\text{KN/cm}^2$, $=30^\circ$ と仮定した。地下水位は考慮していない。円弧すべり計算の地震力は、先に実施した図-7の加速度応答の最大値 A_{max} (地表付近)の0.6~0.75倍を土塊重心に作用させた。基盤にはすべり面は通らないと仮定した。図-11に安定計算例を示す。図-12及び表-5は谷直角方向断面が水平に連続すると仮定した成層地盤での応答値を外力とした円弧すべり面法計算による安全率(F_s (水

表-5 W/D による地震時円弧すべり安定計算ケースと安全度の変化一覧表

W/D	3			5			8		
傾斜角 θ	1:1	1:1	1:2	1:1	1:2	1:3	1:1	1:2	1:3
$=A_{max}/A_{max}$ (水平成層)	1.15	1.25	1.23	1.17	1.11	1.12			
$Kh=0.6 \sim 0.75A_{max}$ *	0.23	0.25	0.25	0.23	0.22	0.22			
	0.29	0.31	0.31	0.29	0.28	0.28			
F_s/F_{so} (水平成層)	0.958	0.937	0.932	0.956	0.968	0.966			
	0.965	0.947	0.944	0.965	0.974	0.972			

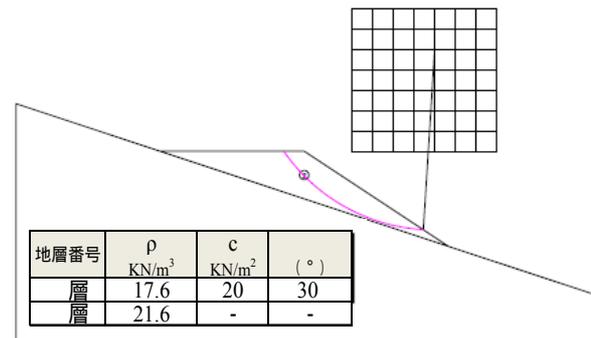


図-11 2次元分割法(円弧すべり面法(Fellenius法))による安定計算例

平成層))と図-8で実施した各 W/D で得られた外力で求めた安全率(F_s (不整形))の比を示している。盛土地盤の線形仮定や1Hz正弦波半波長の入射振幅100galでの応答による谷直角方向での地震応答が斜面安定に与える影響度は、最大6%程度の安全率の低下で表わされることがわかった。文献3)では、盛土の安定度について外力として一律0.25の設計水平震度を想定している。また、3次元効果を見込んだ安定解析では2次元解析に比べて1.0~1.3倍程度安全率が大きくなる傾向があると指摘しているが、本研究からわかることは、外力としての3次元効果についても適切に見込むことも重要であることがわかる。

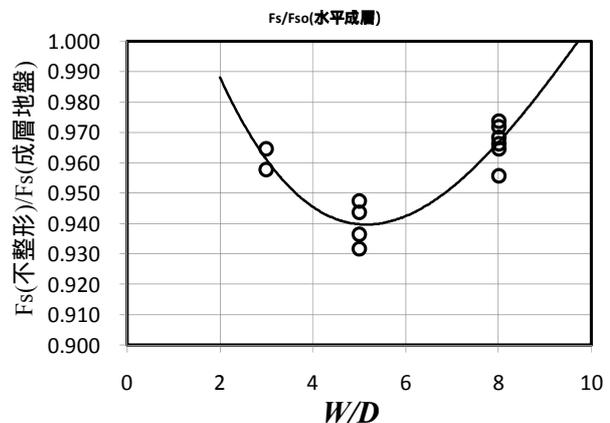


図-12 W/D の違いによる地震時すべり安全率の変化

5. 実地震における斜面安定への適用
(2007年能登半島地震能登有料道路斜面崩壊への適用)

これまでの検討により、谷埋め盛土斜面での地震時安定について、谷直角方向の形状が地震波の幾何学的干渉による焦点効果で増幅し、すべり外力として影響する可能性を指摘した。本章では、実地震での斜面安定での結果の検証を試みる。対象地震と斜面は、2007年能登半島地震における能登有料道路谷埋め盛土斜面崩壊（石川県七尾市中島町）地点であり、本評価手法を適用してみる。

(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。

(2) 能登有料道路斜面崩壊現場の状況

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¹²⁾。図-13は、道路建設前の昭和40年代の地形図であるが、本研究で対象とする崩壊箇所は、七尾市中島町豊田の谷底低地末端部の谷を埋め立てた盛土斜面である。谷幅は約60m、谷埋め盛土厚は最大で15~20m (W/D=3) 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6.7回である¹²⁾。写真-1に示す通り、被災直後の崩壊土砂の状況では含水はあまり多くない印象であった。

図-14は、石川県道路公社からの提供データを地盤工



図-13 能登半島道路検討対象崩壊地に地形状況

学会がまとめた資料¹²⁾であるが、基盤の谷方向の傾斜勾配は1:3程度、谷埋め盛土勾配は1:2程度である。また、近隣の住民からの聞き取りによると、本盛土は本震直後



写真-1 崩壊後の対象谷埋め盛土斜面



図-14 検討対象谷埋め盛土の地質構造と崩壊形態¹²⁾

に崩壊したものであることから、地震動の影響が大きい箇所と推察される。

(3) 2007年能登半島地震による入力地震動の推定

能登半島地震ではK-NETおよびKiK-netで強震記録が観測されている。本崩壊地近傍では、表-6に示す七尾、穴水、富来が震源距離が近く大きな外力が得られている。但し、穴水と七尾は比較的表層地盤が厚く、さらに軟弱であることから、表層の非線形の影響が大きく表れている¹³⁾。比較的基盤が地表に近く、対象地区のように基盤が地表近くにあることから、図-15に示す富来(ISK006 N-S)の観測波形を用いることとする。本崩壊地の震央距離

表-6 崩壊地近傍の強震記録地点一覧

コード	観測点名	緯度 北緯	経度 東経	最大加速度(gal)			三成分合成値 (gal)	計測震度	(km)
				N-S	E-W	U-D			
ISK006	富来	37.16	136.69	717	849	462	945	5.9	7
ISK005	穴水	37.231	136.904	473	782	556	903	6.3	19
ISK004	能都	37.308	137.147	622	589	147	666	5.5	42
ISK003	輪島	37.392	136.908	519	396	141	548	5.5	27
ISK008	羽咋	36.892	136.778	228	386	298	411	4.9	37
ISKH02	柳田	37.364	137.041	274	359	204	380	5.4	35
ISKH01	珠洲	37.527	137.284	359	123	94	360	5	63
TYM006	小矢部	36.672	136.897	144	186	36	227	4.6	64
ISK007	七尾	37.043	136.968	202	182	167	221	5.2	32

は17kmである。

最大加速度の算定は、道路橋仕方書・同解説 耐震設計編による距離減衰式(1種地盤)に基づき

$$A_{max} = 984.7 \times 10^{(0.216M)} \times (+30)^{(-1.218)} = 270 \text{ gal}$$

を用いることとする。

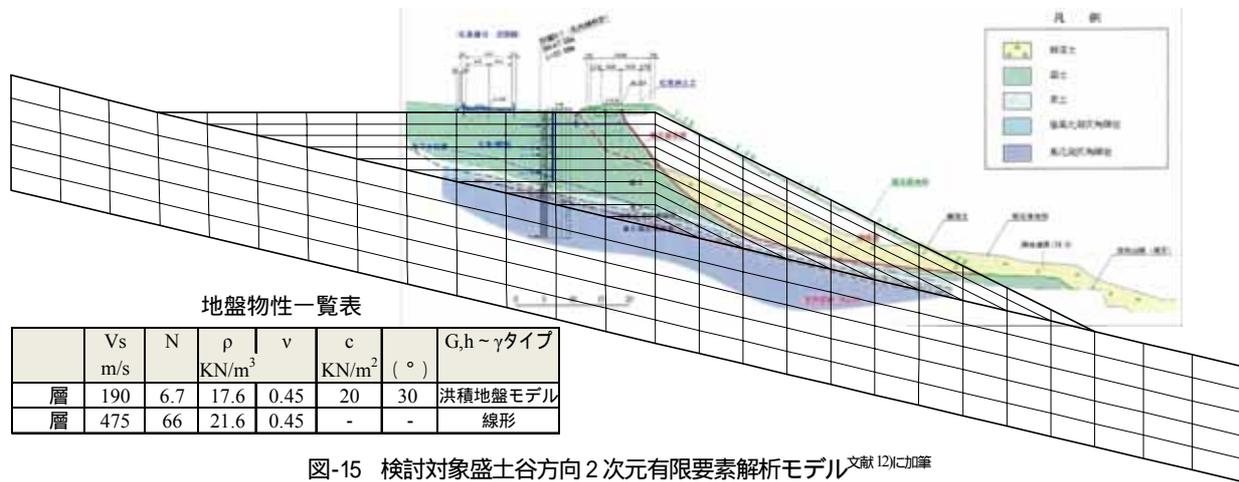


図-15 検討対象盛土谷方向2次元有限要素解析モデル(文献12)に加筆

(4) 地震動解析条件および解析結果

図-15に2次元有限要素解析(FLUSH)による谷埋め盛土モデルとして,谷方向モデルを示す.境界条件として側法にはエネルギー伝達境界を設定し,底面には弾性境界を設定した.地盤物性としては図-15中に示すよう

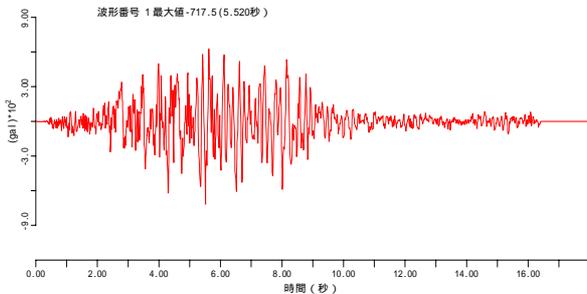


図-16 富来(ISK006 N-S)の観測波形

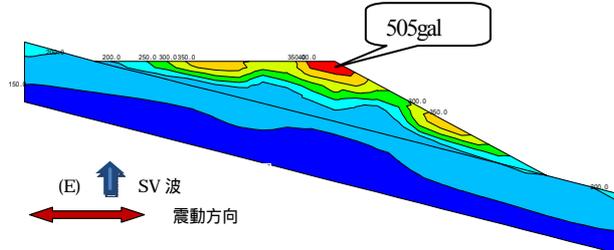


図-17 谷方向モデルの加速度最大応答コンター図

に盛土地盤(第層)と基盤(第層)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.盛土地盤の非線形性は洪積地盤における G,h \sim γ タイプを適用している.一方,谷直角モデルとしては,現地での崩壊状況確認や測量結果から斜面中程の断面 $W/D=3$ ($W=45\text{m}, D=15\text{m}$) を考える.図-17に谷方向モデルの加速度応答を示す,ここでも従来から指摘されているように,斜面凸で加速度応答は大きくなっており,最大で約505gal(斜面上部で320gal程度)の応答値である.また,図-18には入射波と盛土中央部での加速度波のフーリエスペクトルを示しているが,1.5~3.5Hz付近の比較的高周波領域での応答が卓越している.

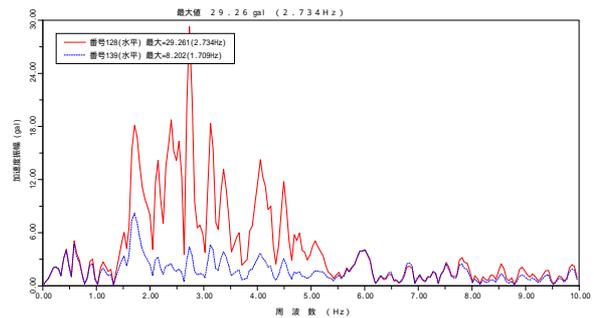


図-18 谷方向モデルの基盤と盛土内答波のフーリエスペクトル

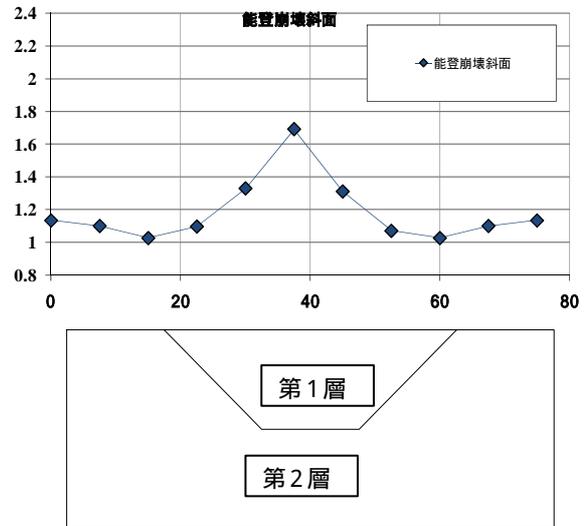


図-19 谷直角方向モデルの水平成層との比 ($W/D=3$, $H/D=1$)

図-19は谷直角方向での加速度応答計算結果について,谷中央部の地層構成が水平に連続すると想定した場合の応答値との比を谷直角方向にプロットしたものである.パルス波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,水平成層と比較して,1.6倍程度の応答が表れている.今回のモデルでは $W/D=3$, $T_g=0.32\text{sec}$, $I_p=0.33$, $f_g=3.2\text{Hz}$ 程度であり,1種地盤での高周波数帯の入力波には比較的応答するモデルといえよう.図-20は谷直角方向モデルの基盤と盛土内応答波の

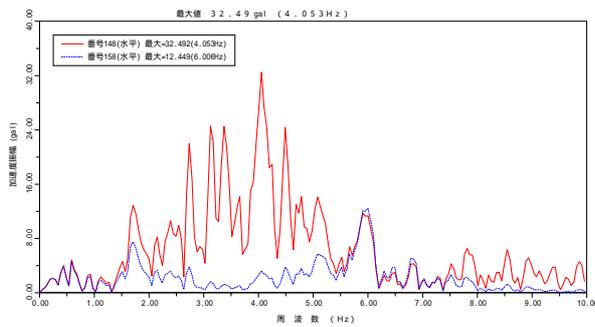


図-20 谷直角方向モデルの基盤と盛土内応答波のフーリエスペクトル

フーリエスペクトルであるが、谷方向のフーリエスペクトルと比べると、2.5～4.5Hzに卓越周波数が移行し、特に4Hz付近での応答が顕著である。

(5) 安定解析条件および結果

地盤モデルを図-15に示しているが、盛土の強度定数は、既往調査資料¹²⁾のN値からの推定と、粘着力を見込んで $C=20\text{KN/cm}^2$ 、 $\phi=30^\circ$ とした。地下水位は考慮していない。安定計算条件は先に実施したケーススタディと同様である。対象谷埋め盛土の崩壊状況を検討するにあたって、谷方向外力（谷方向モデル）に加えて、谷直角方向の地形の幾何学的増幅割合を β とすると、図-19より $\beta=1.6$ が得られている。したがって、地震力 Kh は斜面上部の応答値から以下のように求めた。

$$Kh = 0.6 \sim 0.75 A_{max}/g \cdot \beta = 0.6 \sim 0.75 \cdot (317/980) \cdot 1.6 = 0.31 \sim 0.39$$

図-21に二次元分割法（簡便法（円弧すべり面法のFellenius法））による谷直角方向不整形考慮の安定計算結果($Kh=0.39$)を示す。安全率 Fs は、常時で1.65、谷方向のモデル化により得られた外力（ $Kh=0.25$ ）では $Fs=1.10$

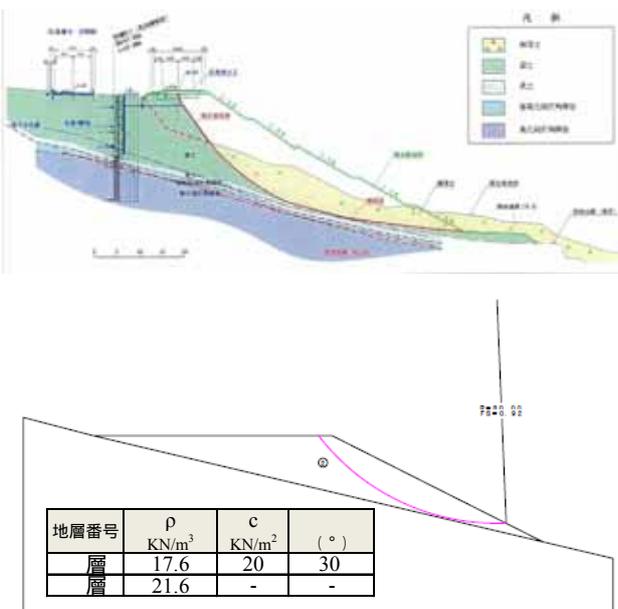


図-21 谷直角方向成分考慮円弧すべり計算結果例¹²⁾に加筆

表-7 谷方向および直角方向の不整形性を考慮したすべり計算安全率 Fs の変化

	Fs	Kh
常時	1.65	-
谷方向考慮	1.10	0.25
谷直角方向考慮	0.92	0.39

崩壊

となり当該検討地点の崩壊を表現していない。一方、本研究での谷直角方向の不整形性を考慮して β の割増による外力とした安定計算結果は表-7に示すように $Fs < 1.0$ となり、能登半島地震での崩壊をうまく表現できていると云える。

8. 結論

本研究では、傾斜した谷を盛土して造成した地盤の谷直角方向成分における地震動の幾何学的干渉やインピーダンス比および周波数特性による地震動の増幅が盛土斜面の安定に及ぼす影響を評価することを目的に検討を行った。盛土斜面の安定は谷筋方向成分の震動方向であることから、谷直角方向での揺れ方として、谷直角断面を考えた場合での面外加振方向（SH波）として考え、谷筋方向成分の揺れを谷直角方向のSH波の増幅の重ね合わせ外力（割増係数 β ）として評価することにより斜面安定に与える影響の程度を検討した。検討の結果、地震時の谷埋め盛土の安定を考える上で、谷筋方向成分の地震応答ばかりでなく、谷直角方向成分の増幅も斜面安定にある程度の影響を与えていることがわかった。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 谷直角方向でのSH波の増幅は盛土幅 W と盛土厚 D とした場合の W/D により増幅傾向が異なることが分かった。
- 2) 代表的な物性値と1Hz入射波という条件においては、 W/D が3～8の範囲で応答値は盛土が水平成層の場合の応答値の1.1～1.25倍となり、特に谷直角方向斜面から波動の重ね合わせによる焦点効果で $W/D=5$ 程度で応答が増幅することがわかった。
- 3) インピーダンス比 IP による不整形応答の違いは、全般的な傾向として、 IP が大きくなるに伴い、不整形の影響は小さくなると云える。また、 IP がおおよそ0.2程度までは不整形地盤の影響による応答値は水平成層での応答値の1.2以上となっており、 $IP > 0.3$ で1.1倍の影響が認められる。
- 4) 周波数特性による谷直角方向の不整形の影響を盛土の固有振動数と入斜地震波の比 ffg でみてみた場合、 ffg がおおよそ0.5～2.5程度までは不

整形地盤の影響による応答値は水平成層での応答値の1.1以上となっており、特に $f/f_g = 1$ 付近で1.2倍の影響が認められた。

- 5) 谷直角方向の不整形による地震動の増幅が盛土の安定に及ぼす影響は、本研究での盛土地盤の線形仮定や1 Hz正弦波半波長の入射振幅100galという条件では、最大6%程度の安全率の低下で表わされることがわかった。
- 6) 実地震での崩壊事例との対比検討をおこなった。その結果、2007年能登半島沖地震での能登有料道路の谷埋め盛土斜面崩壊において、本研究での谷直角方向の不整形性を考慮した割増による外力での安定計算結果は限定的な条件ではあるが、崩壊をうまく表現できていると云える。

以上、本研究では代表断面での谷埋め盛土の不整形地盤での地震動の増幅は、通常の谷筋方向での増幅ばかりでなく谷直角方向での地震動の幾何学的干渉が盛土斜面安定に寄与していることがわかった。本研究では限定的条件での評価であるため、今後は地盤の非線形性が安全率Fsの変動に与える影響や一般的な強度定数での変動との比較、及びその他多くの実例との対比などが今後の課題と考えている。

謝辞：本研究には（独）防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netの強震記録を使用させていただきました。また、強震記録のデータ整理や震源記録などで岐阜大学流域圏科学研究センター久世益充博士には多くの助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋本隆雄，宮島昌克，富沢元：1995年兵庫県南部地震における被害宅地盛土の地震応答解析と被害分布，pp1-8，土木学会地震工学論文集，2003。
- 2) 都岡英俊，常田賢一，小田和広，江川祐輔：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，

- pp1205-1210，土木学会地震工学論文集，2007。
- 3) 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
 - 4) 野田利弘中野正樹他（2008）：2004年新潟県中越地震における盛土～地盤系連成挙動に関する水～土骨格連成解析第43回地盤工学研究発表会，2008。
 - 5) 今村年成，室野剛隆，畠中仁，棚村史朗，室谷耕輔：土の非線形性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，pp501-504，土木学会第26回地震工学研究発表会講演論文集，2001。
 - 6) 秦吉哉，一井康二，李黎明，土田孝，加藤成二：傾斜基盤を有する盛土の地震応答特性に関する動的遠心模型実験，pp295-304，土木学会地震工学論文集，2007
 - 7) 安田進他（2008）2007年新潟県中越沖地震による谷底平野の揺れの被害について第43回地盤工学研究発表会
 - 8) 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（2003）土木学会地震工学論文集
 - 9) 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
 - 10) 川西智浩，室野剛隆，青木一三，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，pp1-9，土木学会地震工学論文集，2005。
 - 11) 秋吉卓，淵田邦彦，東治郎，中嶋直紀：不整形地盤の表面における地震応答集中について，pp513-516，土木学会第26回地震工学研究発表会講演論文集，2001。
 - 12) 地盤工学会：2007年能登半島地震 道路災害データ集，pp12-18，2008
 - 13) 福島康宏，末富岩雄，磯山龍二：2007年能登半島地震における地震動のサイト特性，pp168-177，土木学会地震工学論文集，2007
 - 14) 古地祐規，國生剛治，石澤友浩，山本純也：能登半島地震における崩壊盛土の物理力学特性，pp1007-1010，土木学会地震工学論文集，2007

(2008.??受付)

SAFETY ASSESSMENT of FILL-SLOPES for AMPLIFICATION DEGREE of SEISMIC FREQUENCY on IRREGULAR GROUND

Tadashi OHASHI Masata SUGITO and yoshinori FURUMOTO

Extensive damage of the slope embankment of road and residential lands were occurred in many Earthquake because of amplification degree of seismic frequency on irregular ground. In this paper, characteristics of many case-study on cross-sectional irregular vally ground are clarified by using FEM analyses. The effect of the cross-sectional shape of embankment on the characteristics of seismic amplification degree of acceleration is discussed for safety factor of slope stability.