

谷埋め盛土の斜面安定と谷直角方向地震動増幅特性について

基礎地盤コンサルタンツ(株) 正会員 大橋 正

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

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

傾斜基盤上の盛土での地震時斜面崩壊の被害は、1978年宮城県沖地震で注目され、その後1993年釧路沖地震での斜面崩壊や1995年兵庫県南部地震の西宮市仁川大規模造成地の崩壊¹⁾などがある。最近では、2004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、能登有料道路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問題では、通常谷筋方向における不整形性による地震動の増幅を考慮することが一般的であり、

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。一方、谷基盤の不整形性による地震動の増幅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字谷による地震波の幾何学的進行による影響やこれによる斜面安定も考えられ、これらを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上の盛土の谷直角方向における地震動の幾何学的干渉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、谷筋方向の揺れと谷直角方向のSH波の増幅の重ね合わせ地震力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。

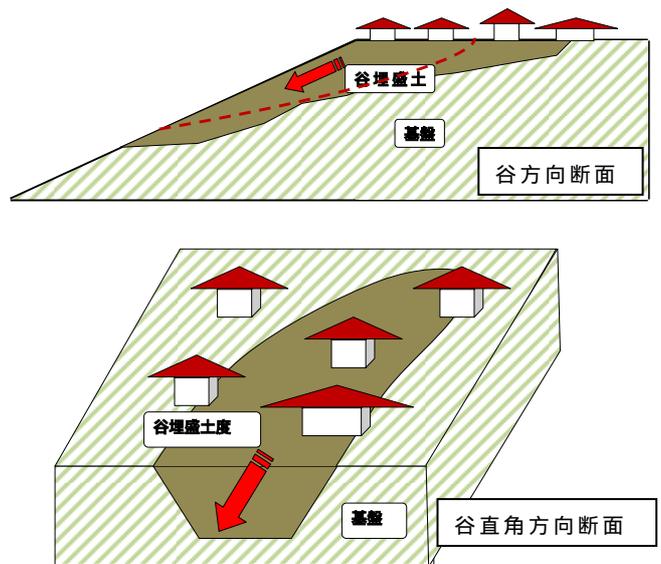


図-1 盛土造成地での斜面崩壊イメージ

2. 地震時斜面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。谷埋め地は通常集水地形である場合が多く、気象条件としての降雨の影響による地下水位の上昇降下や乾湿繰り返し及び地震動による過剰間隙水圧の上昇などで盛土地盤強度の軟化による不安定化の報告もある²⁾。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³⁾、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

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

応答や変位応答の増幅が大きくなると云われている。一方、盛土の谷直角方向での地震動の幾何学的干渉による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埋め形状が盛土の安定に与える影響に着目する。

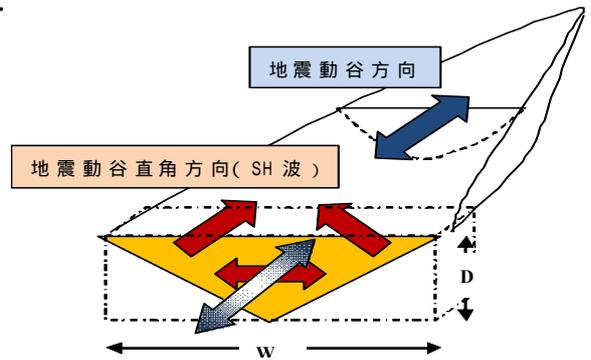


図-2 谷埋め盛土の谷直角方向イメージ図

3. 谷直角方向での傾斜基盤盛土の地震動増幅特性 (地震動の幾何学的干渉の影響解析)

基盤の傾斜による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、本章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2%とした。また、図-2及び表-2に示すように谷埋め盛土の層厚を D 、谷幅を W とし、谷直角方向斜面勾配を1:1から1:3に変化させて、不整形モデルについて W/D^4 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。両断面モデルとも入射波は、1Hz正弦波半波長の振幅を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

表-2 盛土の傾斜基盤の影響解析モデル地盤物性

	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	$T_g=4H_0/V_{s1}$ (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													
case-3	75	15	5	1:2													
case-4	120	15	8	1:1													
case-5	120	15	8	1:2													
case-6	120	15	8	1:3													

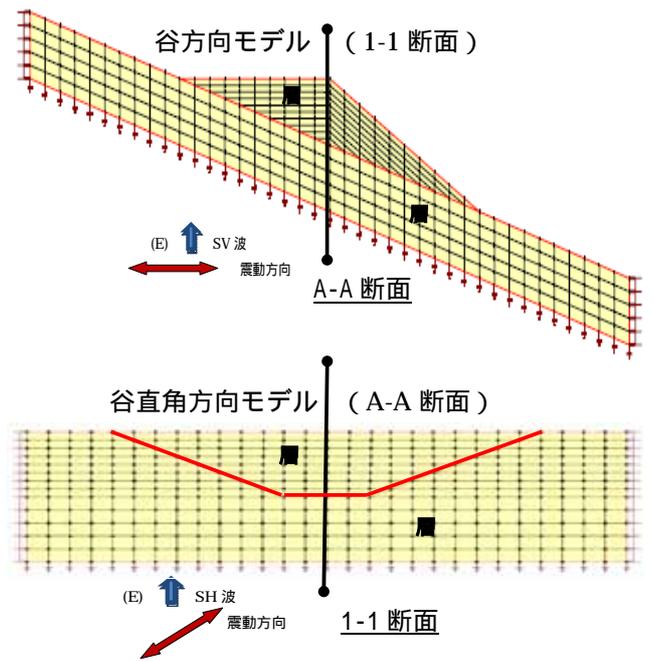


図-3 2次元有限要素解析モデル(周波数応答法)

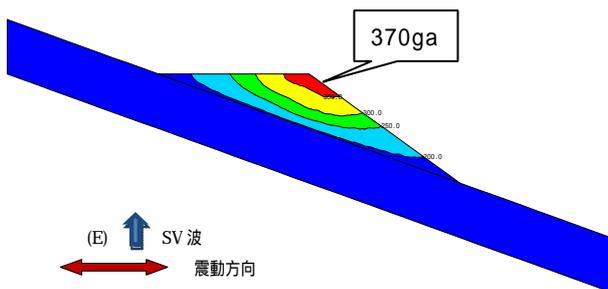


図-4 谷方向モデル(1-1断面)の応答計算

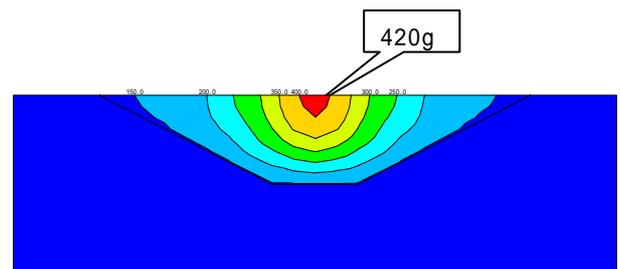


図-5 谷直角方向モデル(A-A断面)の応答計算結果($W/D=5$ 1:2の計算例)

デルとも、基盤層上の元の地表面から GL 15mの位置としている。

解析結果として、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は 370gal 程度である。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⁵⁾ 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 波の進行を考えると、SH 波の振幅と増幅は谷筋のすべり方向と一致しており、加速度、変位共に谷筋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 (1 Hz 正弦波半波長の振幅 100gal) を入力している。 $W/D=5$,

$\alpha=1:2$ 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 は $W/D=5$, $\alpha=1:2$ の条件での地山 (基盤) から谷埋め盛土の谷直角方向での地表面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、 $W/D=8$ の谷直角方向の加速度応答の変化図である。 $\alpha=1:1$ では、谷傾斜面から底面の平坦部の境界付近で応答値のピークを迎えているが、 $\alpha=1:2, 1:3$ と谷形状が U 字から V 字の緩傾斜になるに従い、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造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下方からの直達波の重ね合わせ (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。

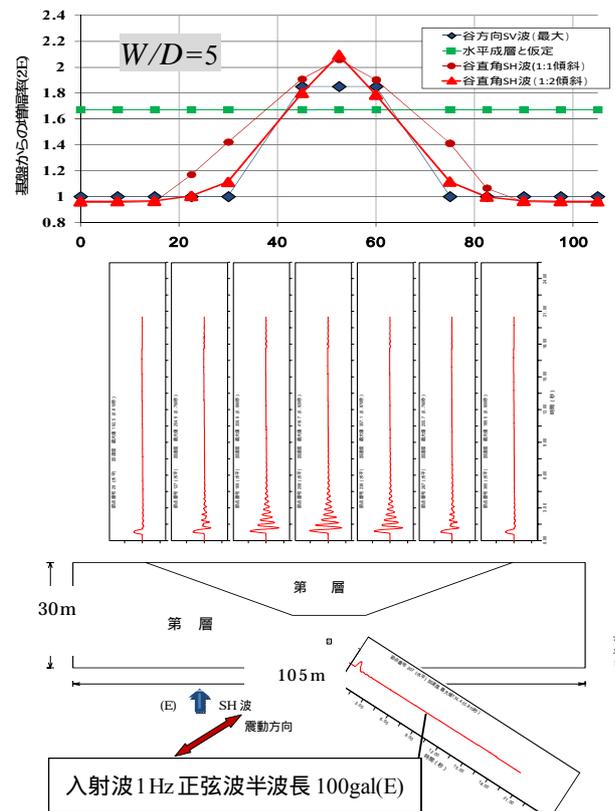


図-6 谷直角方向モデルの応答計算結果例 (地表面加速度波形 $W/D=5$)

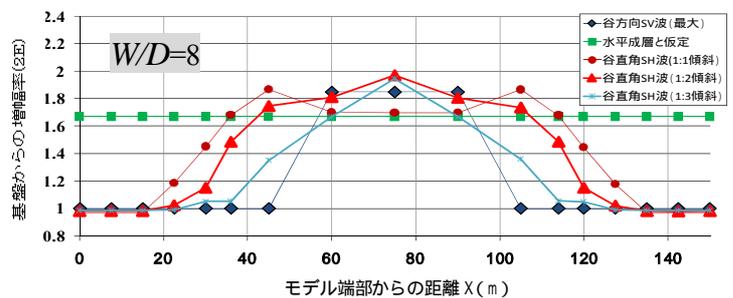


図-7 谷直角方向 $W/D=8$ の加速度応答の変化

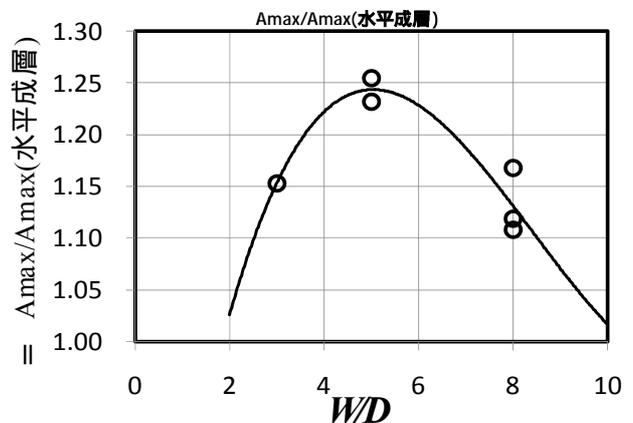


図-8 W/D ~ 谷直角方向増幅割合 の関係

図-6の $W/D=5$, $\beta=1:1$, $1:2$ の場合は、応答は谷中心部でのピークとなり、図-7の $W/D=8$ の場合よりも焦点効果が顕著といえる。図-8は谷直角方向形状 W/D による不整形地盤による応答値と水平成層地盤の応答値との比を示したものであるが、表-2の物性値と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の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。

4. 谷直角方向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地震動の増幅が斜面安定に及ぼす影響を確認するため、文献1)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 $c=20\text{kN/m}^2$, $\phi=30^\circ$ 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、等価加速度(加速度応答の深度方向の平均値)として、先に実施した図-4の加速度応答の最大値 $A_{\max}(sv)$ の0.6~0.75倍()を土塊重心に作用させた。また、基盤にはすべり面は通らないと仮定した。図-9に安定計算例を示す。図-10は谷直角方向断面が水平に連続すると仮定した水平成層地盤での応答値を地震力 ($Kh = \rho \cdot A_{\max}(sv)/g$) とした円弧すべり面法計算による安全率 ($F_s(\text{水平成層})$) と図-8で実施した各 W/D で求めた谷直角方向不整形による増幅を考慮した地震力 ($Kh = \rho \cdot A_{\max}(sv)/g \cdot \beta$) から求めた安全率 ($F_s(\text{不整形})$) の比を示している。盛土地盤の線形仮定及び1 Hz正弦波半波長(入射振幅100gal)での谷直角方向の地震応答が斜面安定に与える影響度は、最大数%程度の安全率の低下で表わされることがわかった。

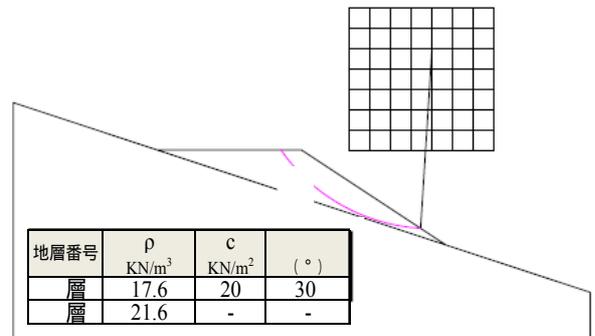


図-9 2次元分割法(円弧すべり面法(Fellenius法))による安定計算例

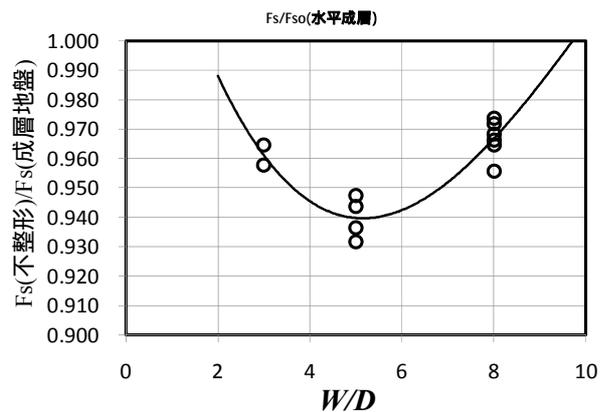


図-10 W/D による地震時すべり安全率の変化

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関して、谷直角方向の基盤傾斜により地震波が、幾何学的干渉と重ね合わせによる焦点効果で増幅し、すべり地震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の谷埋め盛土斜面崩壊(石川県七尾市中島町)地点であり、本



写真-1 崩壊後の対象谷埋め盛土斜面

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。

(2) 能登有料道路の谷埋め盛土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⁶⁾。図-11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⁶⁾。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-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資料⁶⁾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) 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、図-13に示す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⁷⁾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、図-15に示す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FDEL⁹⁾を用いて工学的基盤($V_s=500\text{m/s}$)相当に変換して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を用いて、杉戸らが開発した地震動予測法EMPR¹⁰⁾により波形合成を行った。表-3に想定した能登半島地震の断層

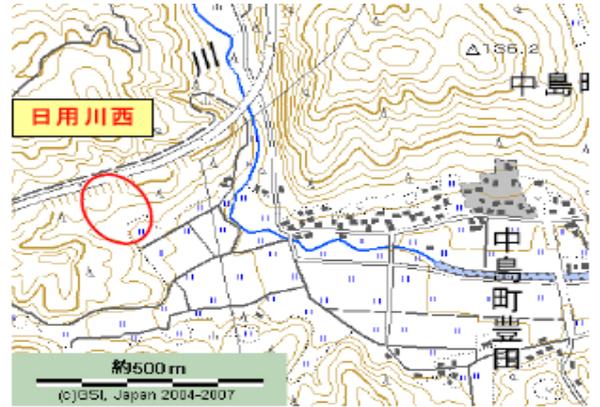


図-11 能登半島道路検討対象崩壊地の地形

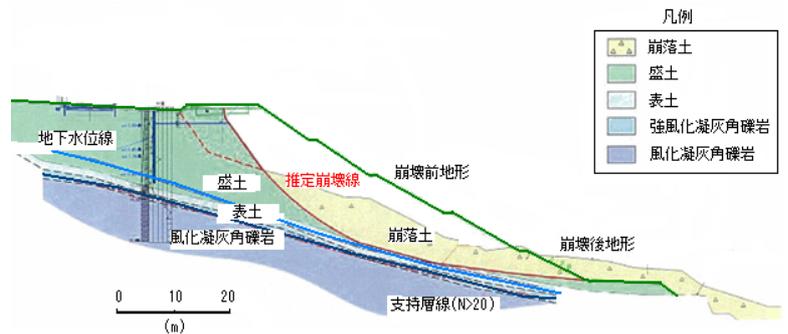


図-12 対象谷埋め盛土の崩壊形態 ⁶⁾に加筆

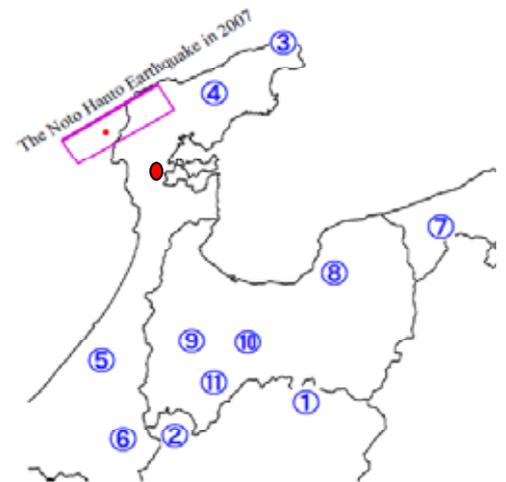


図-13 強震記録位置 ⁷⁾

表-3 断層緒元,地震モーメント,破壊伝搬速度 ⁷⁾⁸⁾

Fault Parameter		The Noto Hanto Earthquake in 2007
Hypocenter	Latitude (degree)	37.24
	Longitude (degree)	136.65
	Depth (km)	11.0
Fault Plane (after Aoi et al., 2007)	Length (km)	36.0
	Width (km)	24.0
	Strike (degree)	58.0
	Dip Angle (degree)	66.0
*Seismic Moment M_0 (Nm)		4.35×10^{18}
*Propagation Velocity of Fault Rupture v_r (km/sec)		1.89

の幾何学的パラメータと推定された地震モーメント M_0 及び断層の破壊伝達速度 V_r を示す。図-14に推定されたアスペリティー分布を示しているが、震源から北東に向かって破壊が進行していることがわかる。図-15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 $A_{max}=130gal$ を用いることとする。

(4) 検証解析条件および解析結果

図-16に2次元有限要素解析(FLUSH)による谷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-16中に示すように盛土地盤(第層)と基盤(第層)のせん断弾性波速度を $V_{s1}=190m/s$ 、 $V_{s2}=475m/s$ とし、 $\rho_1=17.6kN/m^3$ 、 $\rho_2=21.6kN/m^3$ としている。盛土地盤の非線形性は洪積地盤における $G_h \sim \gamma$ タイプを適用している。一方、谷直角モデルとしては、現地での崩壊状況の確認や測量結果から斜面上部の断面を考え、 $W/D=3$ ($W=45m, D=15m$)とした。

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、斜面凸部で加速度応答が大きくなっており、最大で約303gal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(SV波)のフーリエスペクトルを示しているが、2~3Hz付近の周波数領域での応答が卓越している。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

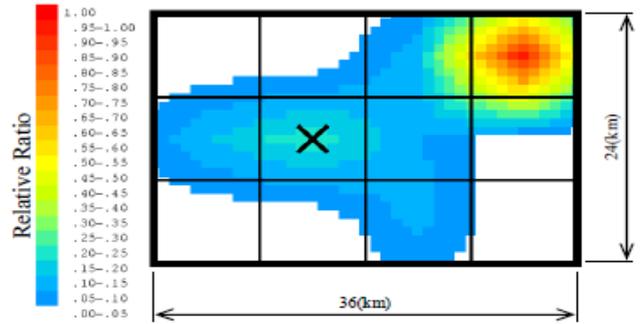


図-14 推定されたアスペリティー分布⁷⁾

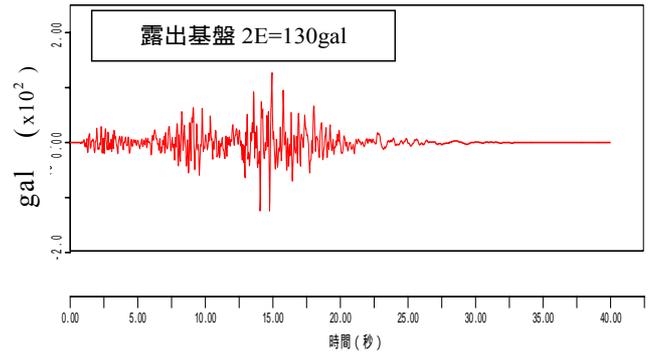


図-15 検証解析入力波形
(露出基盤 2E=130gal)

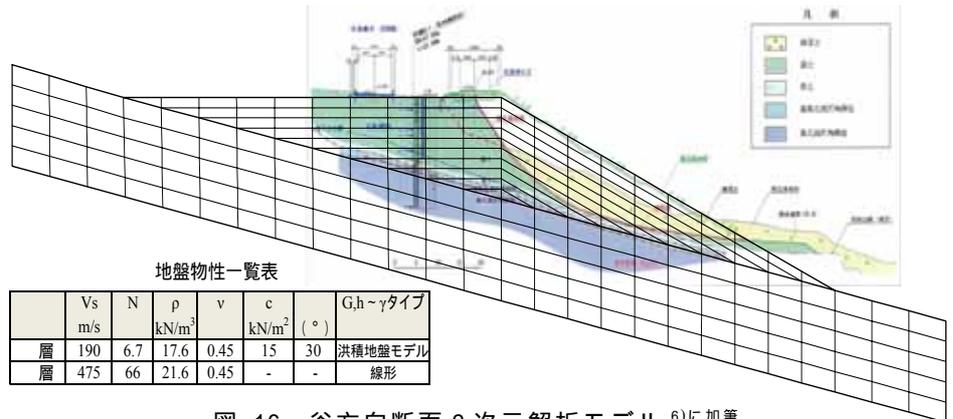


図-16 谷方向断面2次元解析モデル⁶⁾に加筆

と盛土中央部での加速度波(SV波)のフーリエスペクトルを示しているが、2~3Hz付近の周波数領域での応答が卓越している。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

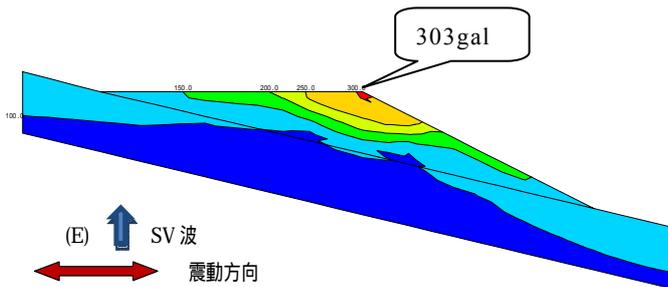


図-17 谷方向モデル加速度最大応答コンター

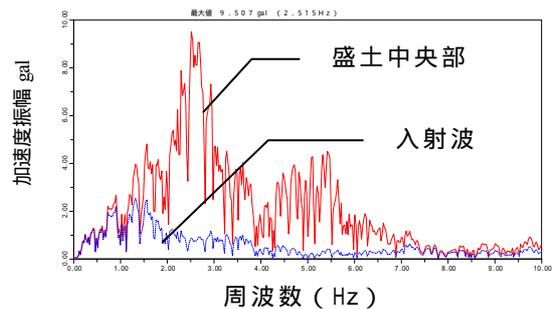


図-18 基盤と盛土内SV波フーリエスペクトル

る。1Hz正弦波半波長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、水平成層と比較した割増係数 β は1.35倍の応答が表れている。

(5)安定解析条件および結果

地盤モデルを図-20に示しているが、盛土の強度定数は既往調査資料⁶⁾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、 $c=15\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=30^\circ$ を求めた。地下水位は基盤上面としている。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、谷方向地震力(谷方向モデル)に加えて、谷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-19より $\beta=1.35$ が得られている。したがって、地震力 Kh は斜面頂部の応答値から以下のように求めた。

$$Kh = A_{max(SV)} \cdot g \cdot \beta$$

$$= 0.7 \cdot (303/980) \cdot 1.35 = 0.30$$

ここに、 $A_{max(SV)}$ は、谷筋方向モデルでの斜面応答加速度であり、 β は谷直角方向の増幅割増係数、 g は等価加速度として盛土深さ方向の加速度の平均である。図-20に2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を示す。安全率 F_s は、常時($Kh=0$)で1.54、谷方向のモデル化により得られた地震力($Kh=0.22$)では $F_s=1.07$ となり当該検討地点の崩壊状況を表示していない。一方、本研究での谷直角方向の不整形性を考慮して β の割増による地震力($Kh=0.30$)とした安定計算結果は図-20に示すように $F_s<1.0$ 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。但し、地震時の斜面崩壊の要因としては、本研究で着目した要因以外にも、地下水位の影響、過剰間隙水圧の影響、長期強度劣化の影響、鉛直地震動の影響、盛土材料の剛性のひずみ依存性等々、表-1に示した多くの誘因、要因があり、それらが複合して安全度が低下し崩壊に至っているものと推定される。本研究により、谷直角方向の基盤傾斜(盆状の構造)による地震動の幾何学的影響も数%程度の安全率の低下という形で影響を与えている可能性があることが分かった。

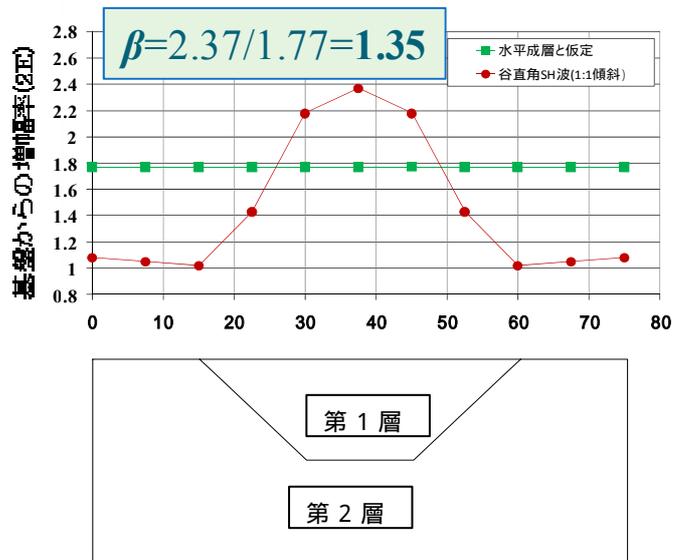


図-19 谷直角方向モデルの水平成層との比 ($W/D=3$, $\phi=1:1$)

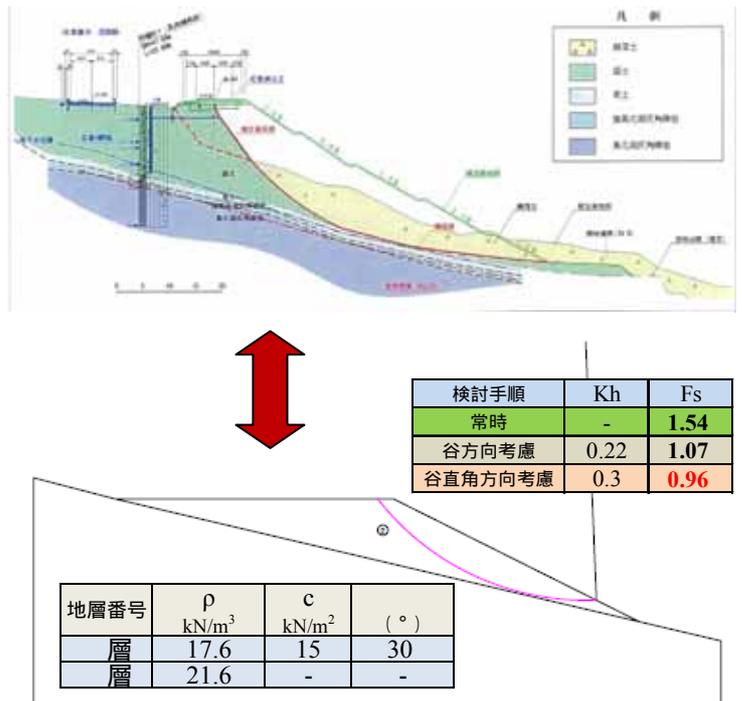


図-20 谷直角方向考慮すべり計算結果例 ⁶⁾に加筆

6. 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による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を、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(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場合、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。本研究では限定的条件での評価であるため、地盤の非線形性が安全率 F_s 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、及びインピーダンス比、周波数特性の影響や、多くの実例との対比などが今後の課題と考えている。

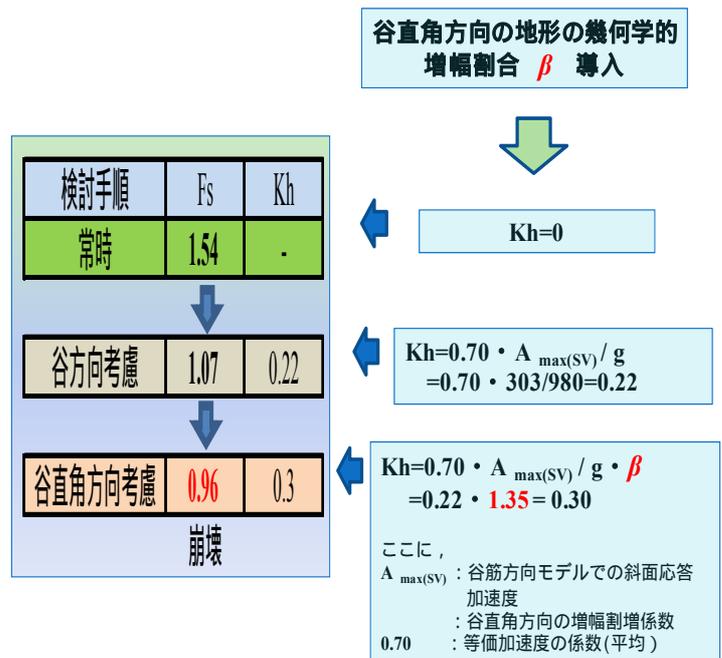


図-21 谷直角方向の不整形性を考慮した
すべり計算安全率 F_s の変化

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。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。また、中部土質試験協同組合の坪田邦治博士、久保裕一氏には盛土材料評価について貴重な意見をいただきました。ここに謝意を表します。

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) 野田利弘,中野正樹他：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.
- 3) 安田進他: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,2008.
- 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,2003.
- 5) 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,1984.
- 6) 地盤工学会：2007年能登半島地震 道路災害データ集, pp12-18, 2008
- 7) Masumitsu KUSE, Masata SUGITO and Nobuoto NOJIMA: Prompt Estimation of Strong Ground Motion Near Focal Region Based on Fault Inversion from Acceleration Records, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Paper No.03-01-0052, 2008.
- 8) 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/>.
- 9) 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, pp.49-58,土木学会論文集, No.493/ -27, 1994
- 10) 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