

常時微動探査による地すべり層厚検出と滑動性の評価

香川大学創造工学部 教授 ○山中 稔, 准教授 地元孝輔

1. 研究の背景と目的

地層の厚さを調査する物理探査としては、弾性波探査、電気探査、高精度表面波探査等の物理探査がある。これら物理探査は解析上の課題から平坦面への適用が主流であり、また調査に時間と労力が多大にかかることから、地すべり地のような斜面地形には適用されてこなかった。本研究で用いる常時微動探査においても地層解析で水平地盤を仮定することから、これまで平野部での適用が主流であった¹⁾。しかし、申請者らの既往の地すべり地での適用研究²⁾により、常時微動探査における微動計の配置パターンや解析条件を工夫することで、より精度の高い地すべり層厚の検出が可能であることが明らかになってきた。

本研究は、申請者らのこれまでの知見をもとに、より急傾斜地における既存の地すべり地形上で、異なる配置パターンでの常時微動測定の実施や、単点微動測定で得た振動スペクトルから逆解析する方法を採用することで、さらなる地すべり層厚の高精度化を目指す。さらに、常時微動測定による解析により得た地層区分を用いて、地すべり土塊の滑動性を評価することを目的としている。

本研究では、2024 年能登半島地震により地すべりが発生した輪島市稲舟地区において、単点微動探査を多点力所で実施し、得られた S 波速度構造より、地すべり層厚を面的に解明するとともに、地すべり安定解析を円弧すべり法で実施し、地すべり土塊の滑動性（すべり安全率）を解析評価した。また、福井市内の地すべり地形が見られる山腹斜面において微動アレイ探査を実施し、クラックの発生により緩んだ地層の層厚分布の解明を行なった。

2. 常時微動探査について

地すべりの滑動性評価には、地すべり土塊の層厚や力学特性の把握が不可欠である。その把握のために、本研究では非破壊かつ簡便に地盤構造を推定可能な常時微動探査を採用した。

本研究では、常時微動探査装置を複数台用いる直線アレイ探査と、1 台で連続して観測する単点微動探査の 2 つの調査方法を併用した。直線アレイ探査からは S 波速度構造を推定するとともに、地すべり土塊に対応する低速度層の S 波速度を設定した。

写真-1 に、本研究で用いた常時微動探査装置を示す。ロガー（McSEIS-AT）にセンサー（3 成分ジオフォン）を接続して用いる。測定では、微動計は方位を合わせて地盤面に水平に設置する。地盤面が緩い場合には、長さ 5cm 程度のスパイクを取り付け、スパイクを地盤面にしっかりと差し込むことで微動計を地盤に密着させた。一方、舗装面のように硬質な箇所の設置では、周辺の小石などを取り除いた後、微動計に高さ調節の可能なレバリングプレートを取り付けて測定を行った。

1 箇所あたりの測定時間は約 30 分である



微動計 McSEIS-AT 3CH



3成分ジオフォン



スパイクでの設置



レバリングプレートでの設置

写真-1 微動計 McSEIS-AT とその測定状況

図-1 に、単点微動探査による調査地点の地すべり層厚を推定する解析例を示す。調査地点の地層を 2～3 層に区分（層厚と S 波速度）して得た理論分散曲線と、単点微動探査により得た H/V スペクトルのピークを一致させる。この一致した際の地層構造からその地点の地すべり層厚を求める。一致する地層構造（層厚，S 波速度）を得ることで、理論分散曲線のピークに一致させる。この方法で得た地すべり層厚分布に基づき斜面安定解析を行うこととした。

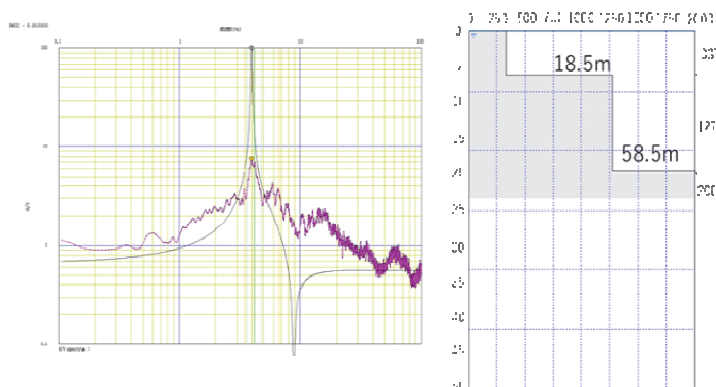


図-1 単点微動探査で得た H/V スペクトルに理論分散曲線を一致させて地層構造を求める方法

3. 2024 年能登半島地震で地すべりが生じた輪島市稲舟地区での調査

1) 輪島市稲舟地区の被災概要

2024 年 1 月に発生した能登半島地震によって、輪島市稲舟地区の農地に複数の地すべりブロックが滑動し、多数の亀裂や斜面崩壊が発生した（図-2 参照）。地すべり学会調査団の報告⁴⁾によると、斜面崩壊により強風化の珪質泥岩と風化が進んでいない珪質泥岩との境界面に沿ってすべり面が露出している状況が確認でき、この境界面は、斜面下方に向かって傾斜している。すべり土塊と基盤岩とは風化の程度や透水性の相違が明瞭で、すべり面付近では湧水が確認されている。また、この上部にある段丘面においては、ブロック内及びブロック外周沿いに亀裂等の変状が多数認められている。

図-3 に示すように、本地区は比高約 50m の海岸段丘地形に位置しており、凹状地形であることから過去に崩壊した地すべり地であることが推測できる。



図-2 稲舟地区の被災状況³⁾

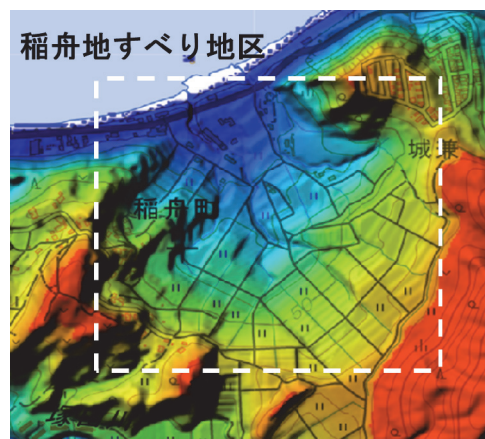


図-3 稲舟地すべり地区の標高図

2) 稲舟地すべり地区での常時微動探査の方法

図-4 に示す稲舟地すべり地区において、L 型状に微動計を配したアレイ探査を 10 区域（A～J 区域）、単点微動探査を 1 測線上に 24 か所、および任意の地点で単点微動探査を実施した。微動計は 10 m 間隔で配置し、すべての地点で 30 分間計測した。写真-2 には、常時微動探査の実施状況を示す。

3) 微動探査により得られた各地点の H/V スペクトル

図-5 に、L 型状に微動計を配置した A～J 区域のうち、地すべり土塊内に位置すると想定した 3 区域（A，D，H 区域）における微動探査により得た H/V スペクトルを示す。(a)図の A 区域の H/V スペクトル

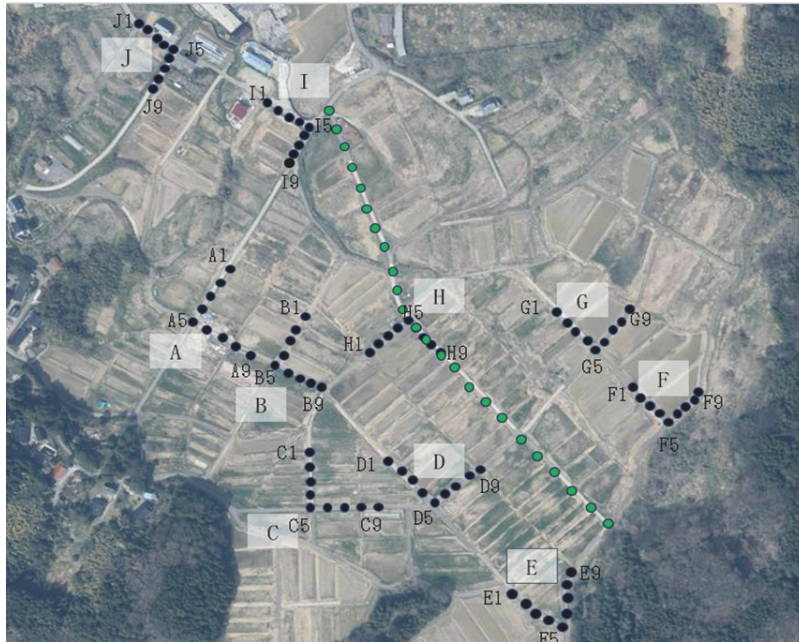


図-4 微動探査の実施地点（稲舟地区）

写真-2 実施状況

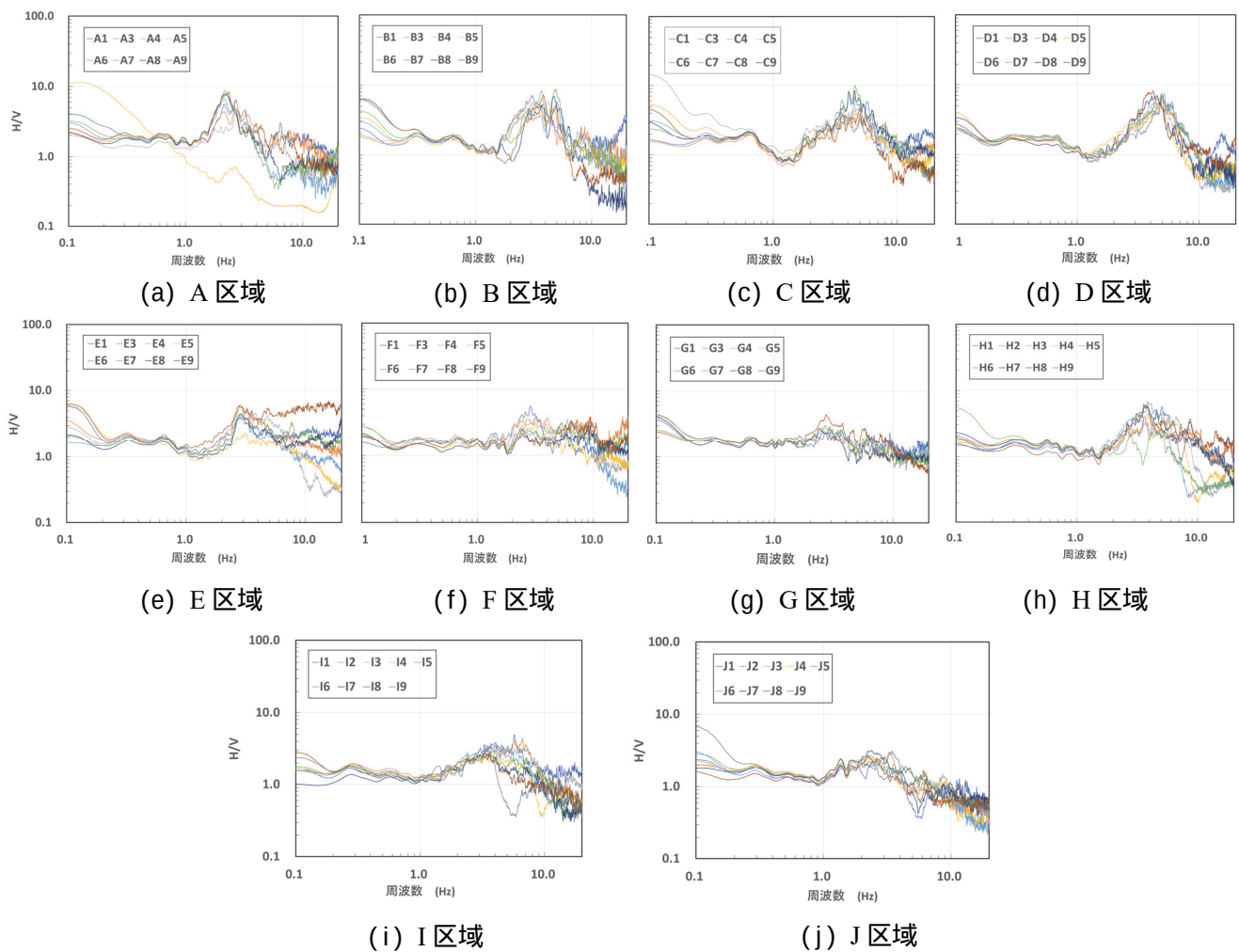


図-5 稲舟地区内の各区域の微動探査により得られた H/V スペクトル

ルは、A9 地点で他と異なる形状を示すものの、A1～A8 はほぼ同様の形状を示している。ピーク周波数は 2.2～2.5Hz を呈しており、A 地域内での大きな地層の変化はないことが分かる。一方、他の区域においても、同一区域内の H/V スペクトルの形状は概ね同様であり、ピーク周波数はある値の幅に内に終息していることから、同一区域内での大きな地層の変化は見られないと言える。

表-1 に、各測点の H/V スペクトルにおける卓越周波数と、区域ごとの平均値を一覧する。なお、表中において卓越周波数が 2.00～3.00Hz を水色に、3.00～4.00Hz を黄色に、4.00Hz 以上を橙色に色分けしている。ここで、2 層地盤における 4 分の 1 波長則に即して考察すると、A、B、F、J 区域の卓越周波数の平均値が 2.00～3.00Hz と低いことが、これは稲舟地すべり地区の外辺部に位置していることから、地すべり層厚が比較的薄いものの、地すべり土塊の S 波速度波低い（強度が低い）ことが想定される。さらに、卓越周波数の平均値が 4.00Hz 以上を示した C、D 区域は稲舟地すべり地区の中央側に位置しており、この C、D 区域における地すべり層厚は比較的厚いが、地すべり土塊の S 波速度波低い（強度が低い）ことが想定される。

表-1 各測点の H/V スペクトルにおける卓越周波数 (Hz)

測点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	平均
A	2.70	欠測	2.69	2.59	2.82	2.14	2.20	2.14	2.32	2.45
B	2.70	欠測	3.07	2.56	2.56	2.55	3.72	3.08	3.26	2.94
C	3.80	欠測	3.62	4.53	4.55	4.61	4.53	4.07	4.06	4.22
D	4.97	欠測	4.96	4.91	4.84	5.14	4.88	4.18	4.20	4.76
E	2.84	欠測	2.84	2.79	2.98	2.93	2.85	2.87	2.99	2.89
F	2.87	欠測	3.19	3.17	3.16	2.35	2.32	2.44	2.44	2.74
G	2.91	欠測	2.70	2.70	2.53	2.72	2.72	2.75	2.72	2.72
H	3.60	3.63	3.77	3.88	3.91	2.84	3.91	3.59	3.59	3.64
I	4.01	3.50	3.99	3.71	4.01	4.07	4.04	3.63	3.63	3.85
J	3.51	3.30	2.30	2.43	2.46	2.37	2.37	2.24	1.98	2.55

3) L 型アレイ探査による地すべり地の S 波速度構造の解析

図-6 に、各区域の L 型アレイ探査により求めた S 波速度構造をそれぞれ示す。一般的に、地すべり土塊の平均 S 波速度が 100～300 m/s であることから、約 300 m/s 以下の低速度層に着目して層境界を設定した結果、層境界深度は 5.6～20.8 m となった。S 波速度は深度方向に緩やかに増加し、明瞭なすべり面を持たない粘土質層の連続分布が示唆され、本地点の地すべりはクリープ的挙動を示す可能性があると推察できる。

表-2 に、L 型アレイ探査から得られた S 波速度構造に対して加重平均で求めた、A、B、C、D、H の各区域の平均 S 波速度を示す。

表-2 各区域の平均 S 波速度 Vs (m/s)

	A 区域	B 区域	C 区域	D 区域	H 区域
第 1 層	135	199	255	207	243
第 2 層	340	326	520	688	511
第 3 層	—	520	—	—	—

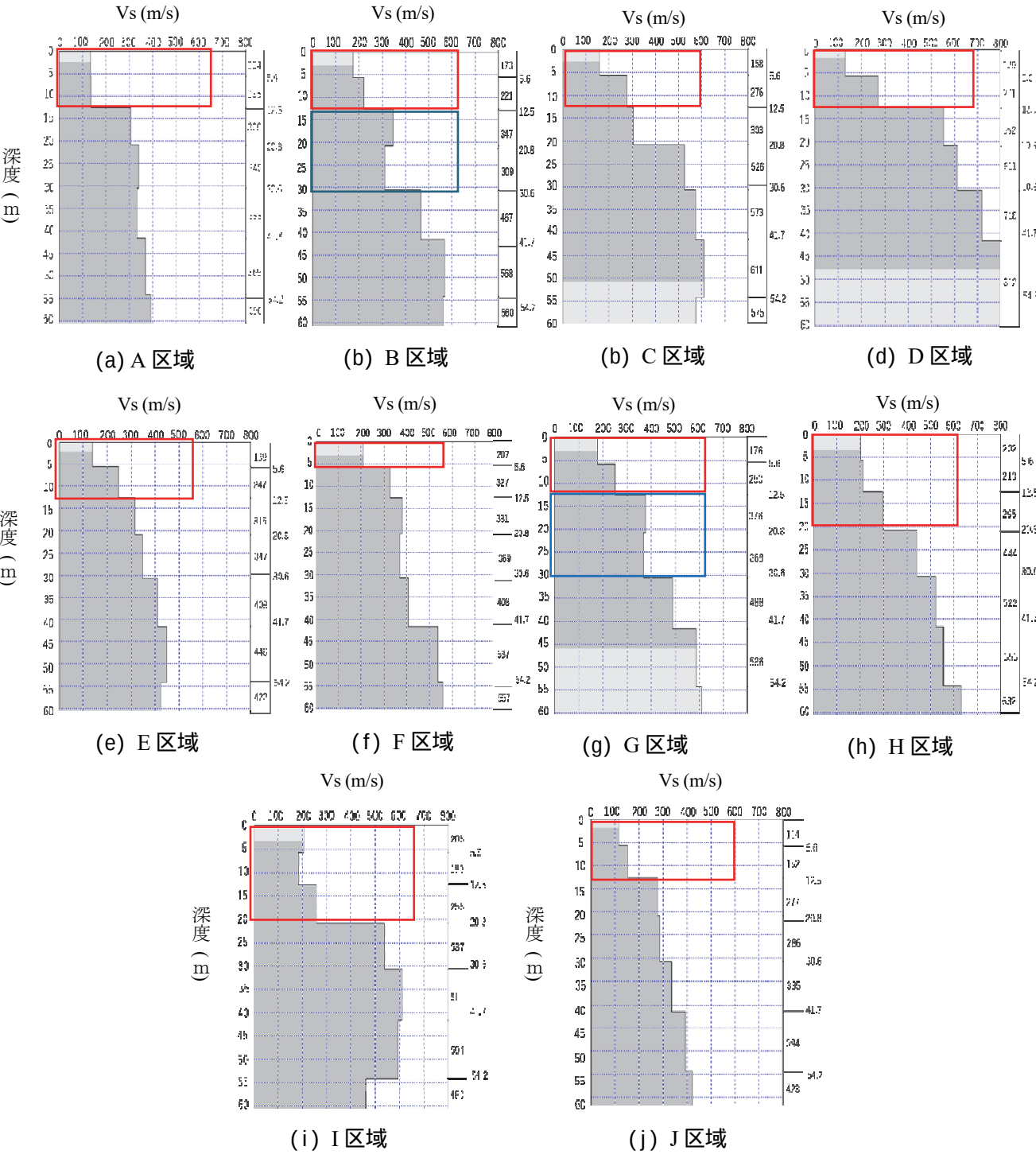


図-6 L型アレイ探査により得たS波速度の深度方向分布図

4) H/V スペクトルと理論分散曲線を一致させて求めた地すべり土層の層厚

算出した S 波速度を用いて、前述の図-1 のように理論分散曲線のピークを H/V スペクトルに一致させることで、地すべり層厚を算出した。表-3 に、算出した各区域の地すべり層厚の平均値を示す。

表-3 地すべり層厚の算出結果

	A 区域	B 区域	C 区域	D 区域	E 区域	H 区域
地すべり層厚 (m)	15.8	9.9	11.5	11.9	16.7	13.4

5) 地すべり土層の安定解析

図-7 に示す S-S' 測線の地すべり土層断面において、すべり安全率を求めることとした。表-3 の地すべり土層の層厚を用いた。解析に用いる土質強度定数は表-2 の V_s を用いて、 N 値換算式により設定した。

表-4 に、すべり安定解析に用いた土質物性を示す。地すべり層の平均 $V_s=208$ m/s を用いて今井の換算式より $N=11.4$ を得た。この N 値から土質物性を推定した。地下水位面は、被災調査報告⁴⁾ に湧水があったとのことより、想定地すべり層の中間深度に設定して解析を行った。

図-7 に、常時（水平震度 $k_h=0.0$ ）における最小安全率を示す円弧すべり面を示す。常時の地すべり安全率は 4.32 と高く、斜面は安定していることが示された。

表-4 すべり解析に用いた土質物性

湿潤単位体積重量 γ_t	15.9 kN/m ³
飽和単位体積重量 γ_{sat}	16.9 kN/m ³
粘着力 c	68.1 kN/m ²
内部摩擦角 φ	0.0°

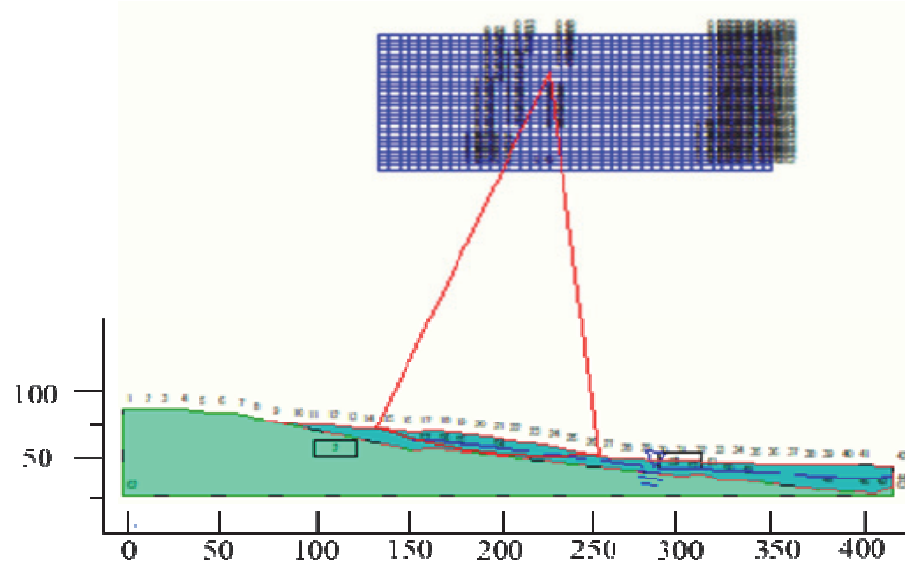


図-7 最小安全率時の円弧すべり面

表-5 水平震度を变化させた最小すべり安全率

すべり 安全率	常時 0.0	地震時（水平震度）					
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
F_s	4.25	1.75	1.35	1.10	0.93	0.80	0.71

表-5 に、地震時の解析として、同じ断面モデルと土質物性において、水平震度を上昇させた場合の最小安全率の変化について示す。地震時解析では、 $k_h=0.5$ 以上で安全率が 1.0 を下回る結果となった。能登半島地震において、本調査地では震度 7 が観測されている。震度階は最大加速度との関係は必ずしも一定ではないが、震度 7 は 400 gal 以上とされる。これに対し、設計水平震度 $k_h=0.5$ は重力加速度換算で約 490 gal に相当し、400 gal を上回る値となる。本解析において $k_h=0.5$ で安全率が 1.0 を下回ったことから、震度 7 相当の地震動条件と概ね整合していると考えられる。

以上のことから、本解析の結果、2024 年能登半島地震の余震として今後に水平震度 $k_h=0.5$ 以上の地震動が作用すると、地すべりが再滑動する可能性があることが示唆された。

4. 破碎性岩質斜面での調査

1) 調査の概要

等高線地形図から旧地すべり地形が判読された福井県内の破碎性岩質斜面の調査地において、地すべり土層の層厚直線微動アレイ探査および単点微動探査を実施した。

図-8 に探査測線を示す。探査測線は想定すべり範囲を跨ぐように設置した。直線アレイ探査は横断および縦断方向の2測線で行い、約15 m 間隔に微動計を配置し、各測線約30分間観測した。単点微動探査は同一地すべり地内で計19地点において各30分間実施した。

写真-3 に、縦断測線上および横断測線上での自動探査実施状況写真を示す、

2) 調査結果

図-9 に、直線アレイ探査における縦断測線と横断測線での2次元S波速度構造を示す。いずれの測線ともに、地表面から深度約10mまではS波速度約240m/sの低速度層が分布している。また、その下位には深度約25mまでS波速度約380m/sの層が存在している。この結果は、別途実施したPS検層結果と整合的であることから、解析結果の妥当性は高いと判断している。

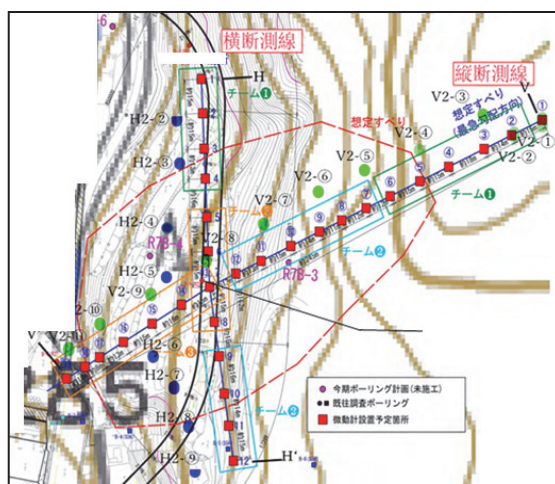
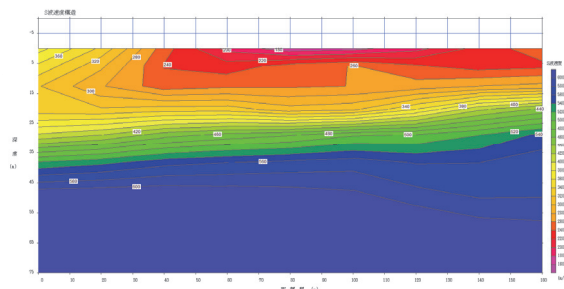


図-8 破碎性岩質斜面での探査測線

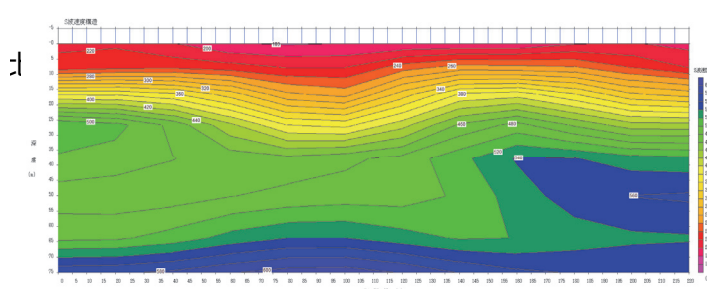


(a) 縦断測線上 (b) 横断測線上

写真-3 探査状況



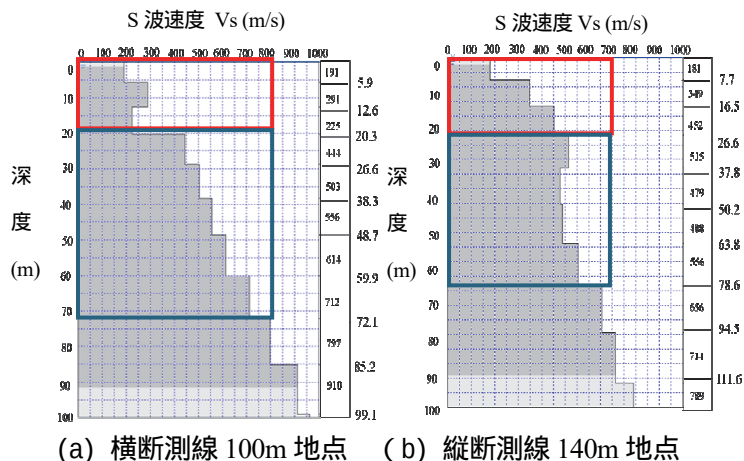
(a) 横断測線 (H-H')



(b) 縦断測線 (V-V')

図-9 二次元S波速度構造

図-10 に、横断測線と縦断測線が交差する地点での一次元S波速度構造を示す。横断測線での結果の方が、浅層部のVsが低いものの、深度20m以深では概ね同様の結果を示している。近傍のボーリングデータを参考にすると、第1層として安山岩由来の崩積土が地表から深さ約25mまで分布し、第2層として流紋岩由来の崩積土が深さ約25~38mまで存在する。想定地すべり土層は、上層部の第1層の崩積土として評価できる。



(a) 横断測線 100m 地点 (b) 縦断測線 140m 地点

図-10 一次元S波速度構造

図-11 に、横断測線上の H/V スペクトルを、想定地すべりの外側と内側に分けて示す。(a)図の想定地すべり外では周波数のピークが分散するものの、(b)図の想定地すべり内では周波数のピークが2～5 Hz の範囲に集中していることが分かる。

図-12 に、各測点の S 波速度構造を標高に合わせた断面図を示す。想定地すべり層厚は、横断方向で約 20.3～20.8 m、縦断方向で約 20.3～23.7 m であることが明らかとなった。

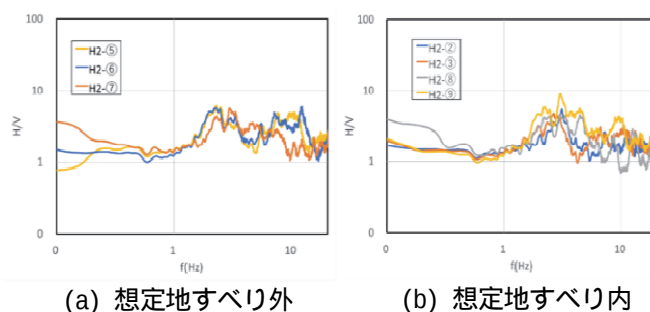


図-11 横断測線での H/V スペクトルの比

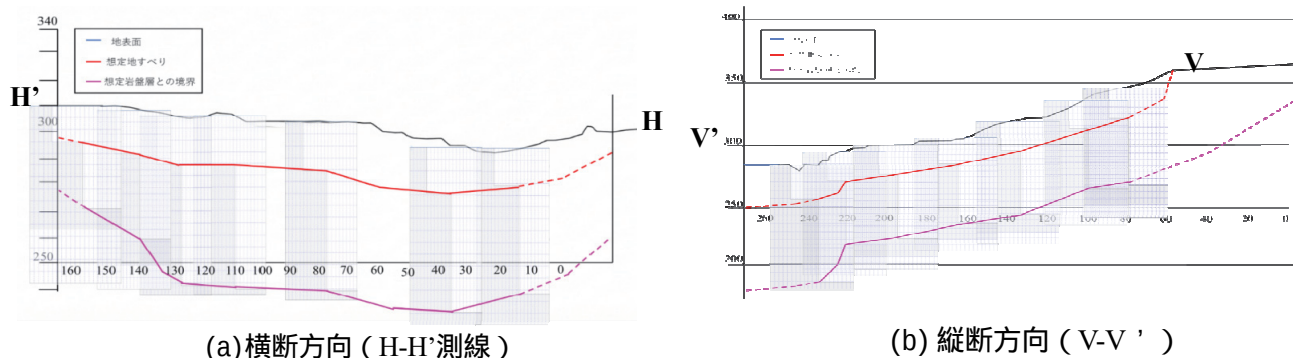


図-12 S 波速度構造より推定される層境界

5. まとめ

本研究では、2024 年能登半島地震で被災した輪島市稲舟地すべり地区と、福井県内の地すべり地形が見られる破砕性岩質斜面において、常時微動探査を実施し、常時微動探査より得られた物性を用いて、地すべり層厚や地盤構造を推定するとともに、稲舟地すべり地区では円弧すべり安定解析を行い、地すべりの滑動性評価を実施した。

本研究により得られた成果を、以下に要約する。

- ・常時微動探査から得られた S 波速度 V_s の深度方向分布を用いることで、地盤構造の層区分および地すべり層厚の推定が可能であることを示した。
- ・常時微動探査に基づく層厚算出および地すべり形状の推定結果が、地形学的解釈と整合的であることが確認できた。
- ・推定された地盤構造を用いて円弧すべり安定解析を実施し、すべり安全率の算出および滑動性の評価まで行うことができた。

参考文献

- 1) 山中 稔, 大久雅貴, 地元孝輔, 長谷川修一, 矢野弘道: 高松平野沿岸部における異なるアレイ形状での地盤 S 波速度構造の解析, 日本地震工学会第 19 回年次大会梗概集, 論文 No.D-5-3, 5p., 2025.12.
- 2) M. Yamanaka, M. Ooku, S. Hasegawa, H. Yano: Detection of Landslide Layer Thickness using Single Microtremor Survey, Asian Journal of Engineering Geology, 2025, Vol. 2, Special Issue, ARC-15 of IAEG, Abstract No.169, 2025.11.
- 3) 北陸地方整備局: 農地地すべり特定災害復旧事業「稲舟地区」事業概要,
https://www.maff.go.jp/hokuriku/kokuei/dogi/attach/pdf/noto_fukkyu-1.pdf
- 4) 日本地すべり学会能登半島災害調査団第 3 次調査団報告,
https://japan.landslidesoc.org/Reports/DisasterReports/2024/Noto_3rd.pdf