

能登半島地震における 崩壊盛土の物理力学的特性

古地 祐規¹・國生 剛治²・石澤 友浩³・山本 純也⁴

¹中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail: kochi@civil.chuo-u.ac.jp

²中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail: kokusho@civil.chuo-u.ac.jp

³中央大学助教 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail: ishizawa@civil.chuo-u.ac.jp

⁴中央大学 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

2007年3月25日に石川県能登半島沖を震源とするマグニチュード6.9の能登半島地震が発生した。石川県七尾市、輪島市、穴水町で震度6強を観測したほか、広い範囲で震度5弱以上を観測した。この地震により、石川県七尾市内の能登有料道路の各所において大規模な盛土の斜面崩壊が多数発生した。崩壊土は流動距離が大きく、沢などに到達し河道閉塞をも引き起こしていた。筆者らは同年4月5日にそれらの斜面崩壊地点で現地踏査を行い、未崩壊部の盛土から不攪乱試料を採取した。これらの試料について、物理試験、繰返し非排水三軸試験、繰返しせん断試験後の単調載荷試験を行い、得られた結果について報告する。

Key Words : *The Noto Hanto Earthquake in 2007, Landslide, Embankment, Liquefaction, Cyclic triaxial test*

1. はじめに

2007年3月25日に石川県能登半島沖を震源とする能登半島地震が発生した。この地震により、石川県七尾市内の能登有料道路の各所において大規模な盛土の斜面崩壊が多数発生した。崩壊土は流動距離が大きく、沢などに到達し河道閉塞をも引き起こしていた。筆者らは同年4月5日に斜面崩壊の起こった地点で現地踏査を行い、未崩壊部の盛土から不攪乱試料を採取した。これらの試料について、物理試験、飽和状態、不飽和状態での繰返し非排水三軸試験、繰返し載荷後、単調載荷試験を行い、得られた結果について報告する。

2. 能登半島地震

2007年3月25日午前9時41分に、石川県能登半島沖（北緯37度13.2分，東経136度41.1分）を震源とするマグニチュード6.9の地震が発生した。震源深さは約11kmであった。石川県七尾市、輪島市、穴水町で震度6強を観測したほ

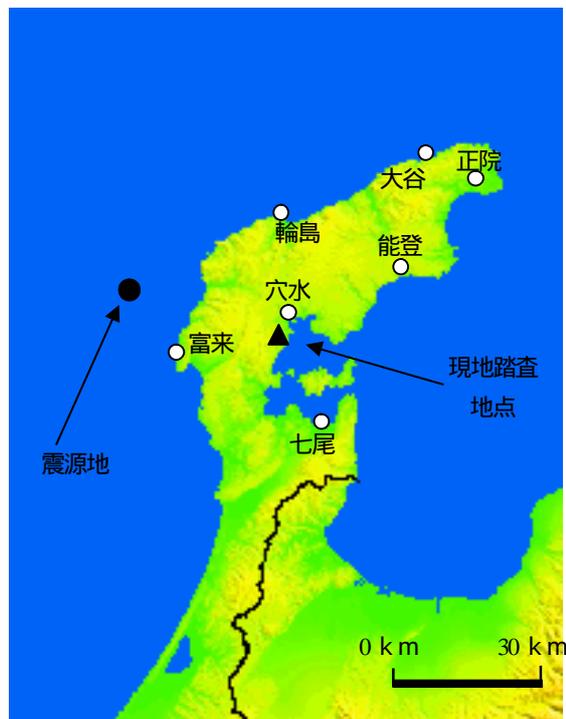


図-1 地震動観測地点¹⁾

表 4 震央付近の最大速度，最大加速度

観測点名	速度(kine)		加速度(gal)	
	EW	NS	EW	NS
大谷	11.835	15.352	169.425	166.391
正院	24.999	22.264	158.527	173.331
輪島	22.146	39.417	396.151	518.813
能都	18.768	22.995	588.584	621.749
穴水	97.945	34.916	781.54	473.526
富来	49.471	37.966	849.034	718.451
七尾	33.397	26.989	182.745	202.59

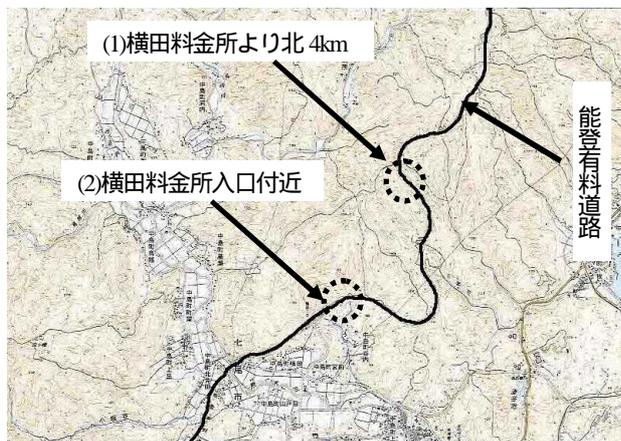


図 2 現地踏査地点

か，広い範囲で震度5弱以上を観測した．この地震の西北西-東南東方向に圧縮軸をもつ横ずれ成分を含む逆断層型であり，地殻内で発生した地震である¹⁾．この地震により，能登有料道路の横田料金所付近等で大規模な盛土の斜面崩壊が多数発生した．能登有料道路の徳田大津IC～穴水IC間では，数ヶ所の道路崩落が生じ，復旧までに時間を要した．

図 4にK-netの地震動観測地点を，表 4にこの地震により，防災科学技術研究所のK-netにより得られた震央付近の最大速度，最大加速度をそれぞれ示す．

3. 採取地点

試料は2007年4月5日に石川県能登有料道路横田料金所から車でアクセスできる大規模崩壊地点から採取した．試料の採取方法として斜面に水平な面を掘りその面から垂直に直径 $\phi=8.37\text{cm}$ ，高さ $h=12\sim 15\text{cm}$ の塩ビパイプを立て，それを地面に押し込み土を採取した．図 2に現地踏査地点を示す．

(1) 横田料金所より北4km

この地点は谷埋め盛土ではなく，高低差が40m程度と大きな腹付け盛土である．ここでは4本(No.5～8)の不攪乱試料を採取した(図 3に試料採取地点を示す²⁾)．崩壊土の流動距離が大きく，流動直下の沢まで到達して河道

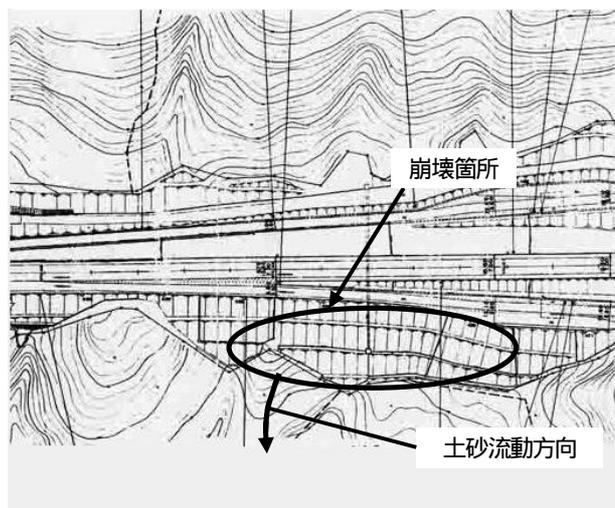


図 4 試料採取地点(2)²⁾

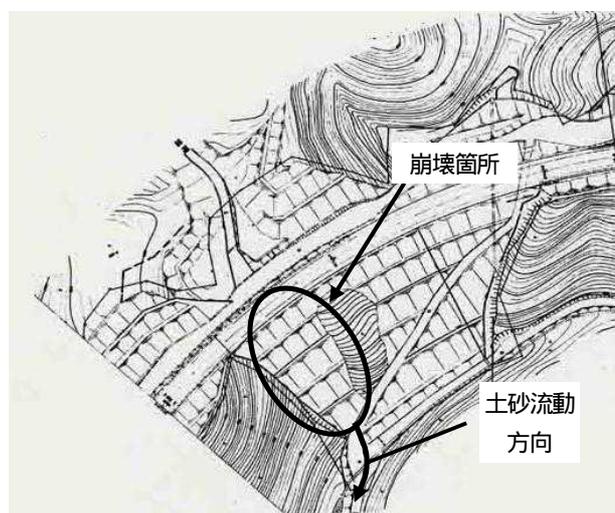


図 3 試料採取地点(1)²⁾

閉塞を起こし，さらに沢沿いに右折して全体で100mほど流動していた．道路完成後25年の間に成長した灌木を載せた剛体的流動の特徴も見せていた．また，崩壊土先端部の太い杉の幹には高い位置まで泥の汚れが付き，強い衝撃エネルギーで根こそぎ前面の杉を移動させながら，木立の途中で止まっており，杉林は流動土塊に対しかなりの抵抗となりうることを示唆していた．また，崩壊エリアの側面の盛土から湧水がみられたことから，盛土背後の地山は地下水涵養源と見られ，地下水により盛土の含水比が高まっていた可能性が考えられる．

(2) 横田料金所入口付近

この地点(図 4に試料採取地点を示す²⁾)においても4本(No.10～13)の不攪乱試料を採取した．

この地点では腹付け盛土により建設した料金所から本線までのアクセス道路が崩壊している．流動距離は大部分で50m程度であるが，杉林のない開けた部分でさらに30mほど流動的に流れていた．

4. 採取試料の物理特性

図 5 に採取試料の粒径加積曲線を示す．採取した地点の間には，粒度分布に大きな違いは見られなかった．礫分含有率 $G_c=10.0 \sim 32.0\%$ ，細粒分含有率 $F_c=33.9 \sim 52.0\%$ である．また，均等係数 $U_c=130$ である．

表 2 に不攪乱試料の物理特性を示す．2ヶ所の離れた地点で採取したにもかかわらず，8 個の試料の物理特性に大きなひらきがないことは特筆すべきである．試料の物理特性の平均値は以下のとおりである．

(1) No5～8 (横田料金所より北 4km)

湿潤密度 $\rho_t=1.406\text{g/cm}^3$ ，乾燥密度 $\rho_d=0.911\text{g/cm}^3$ ，含水比 $w=54.3\%$ ，土粒子密度 $\rho_s=2.643\text{g/cm}^3$ ，間隙比 $e=1.90$ ，飽和度 $S_r=75.5\%$ ．

(2) No10～13 (横田料金所入口付近)

湿潤密度 $\rho_t=1.539\text{g/cm}^3$ ，乾燥密度 $\rho_d=1.028\text{g/cm}^3$ ，含水比 $w=49.7\%$ ，土粒子密度 $\rho_s=2.729\text{g/cm}^3$ ，間隙比 $e=1.65$ ，飽和度 $S_r=82.0\%$ ．

液性・塑性限界試験の平均値は，液性限界 $w_L=60.0\%$ ，塑性限界 $w_P=40.7\%$ ，塑性指数 $I_P=19.8\%$ であり，図 6 に示す塑性図より，採取した不攪乱試料は A 線を下回り B 線より右側にプロットされるため，圧縮性が大きく低塑性な土とみなされる．

5. 採取試料の力学特性

得られた不攪乱試料について繰返し非排水三軸試験，繰返し載荷後の単調載荷試験を行った．使用した試験機は小型三軸試験機で供試体は直径 50mm，高さ 100mm である．

(1) 試験方法

室内に持ち帰った不攪乱試料は塩ビ管からせん断力が加わらないように抜き取った．その後トリミング法により直径 50mm，高さ 100mm になるよう供試体を作成した．飽和状態では，供試体設置後に脱気水を通水した後バックプレッシャーを 196kPa 加え B 値が 96% に達することを確認し，有効拘束圧 $\sigma'_c=49\text{kPa}$ で等方圧密した．

圧密完了後，非排水状態で軸圧のみを変化させて繰返し非排水三軸試験を行った．繰返し非排水三軸試験は両振幅軸ひずみ DA が 10% に達するまで載荷させた．

不飽和状態で試験を行う場合，採取した含水状態のまま供試体を設置し，有効拘束圧 $\sigma'_c=49\text{kPa}$ で等方圧密した後，非排水状態で平均主応力一定状態³⁾で繰返しせん

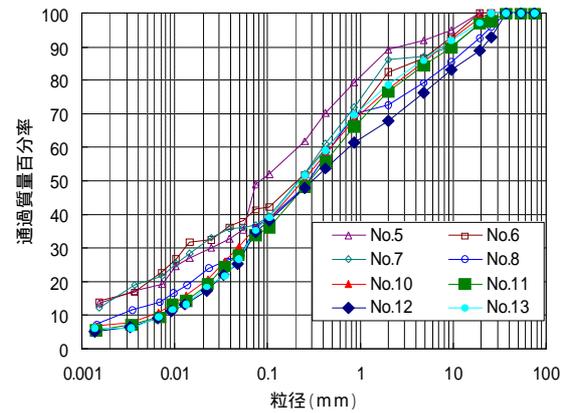


図 5 粒径加積曲線

表 2 試料の物理特性

	No5	No6	No7	No8
湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	1.389	1.449	1.381	1.440
乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	0.899	0.946	0.890	0.946
含水比 $w(\%)$	54.5	53.2	55.2	52.2
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.643	-	-	-
液性限界 $w_L(\%)$	63.4	57.7	58.7	56.9
塑性限界 $w_P(\%)$	46.72	38.56	38.00	37.23
塑性指数 $I_P(\%)$	16.68	19.14	20.70	19.67
間隙比 e	1.94	1.80	1.97	1.79
飽和度 $S_r(\%)$	74.2	78.3	74.1	76.9

	No10	No11	No12	No13
湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	1.563	1.518	1.570	1.506
乾燥密度 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	1.039	0.993	1.064	1.016
含水比 $w(\%)$	50.4	52.8	47.5	48.2
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.691	2.688	2.782	2.753
液性限界 $w_L(\%)$	57.0	-	-	-
塑性限界 $w_P(\%)$	35.39	-	-	-
塑性指数 $I_P(\%)$	21.61	-	-	-
間隙比 e	1.70	1.61	1.71	1.59
飽和度 $S_r(\%)$	77.7	81.9	83.2	85.3

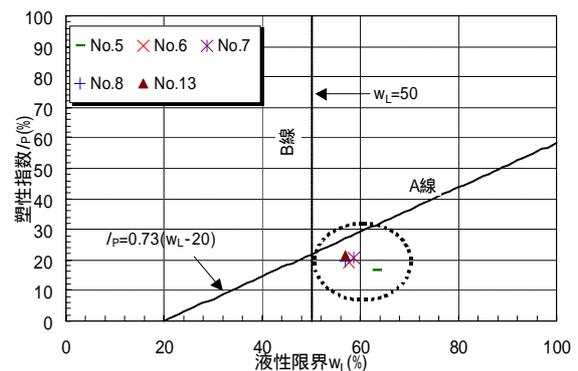


図 6 塑性図

断試験を行った．各条件ともに周波数 $f=0.05\text{Hz}$ で繰返し非排水三軸試験を行った．

さらに，繰返し載荷後の残留強度を調べるため，DA=10%まで達した供試体について，非排水状態のまま単調圧縮せん断試験を軸ひずみ $\epsilon=25\%$ まで行った．

(2) 試験結果

図7に繰返し非排水三軸試験結果を、両振幅軸ひずみ DA が 5%に達するまでの繰返し応力比 R_L と繰返し軸荷回数 N_c の関係 N_c で示す。飽和供試体 (No.5, 6, 7, 13) での繰返し回数 $N_c = 20$ 回での繰返し応力比は $R_L=0.21$ と粘性土系の土ではかなり低いことがわかる。また, No.13は採取した地点が異なるにも関わらず, No.5~7と同程度の繰返し応力比を示した。

不飽和供試体 (No.8, 10, 11, 12) で実験を行った結果を同図中に示す。(1) 地点では No.8 の 1 供試体のみであるが, $N_c = 20.5$ で繰返し応力比 $R_L=0.32$ 程度の値を示した。(2) 地点では No.10~12 の計 3 本の供試体について行った。繰返し応力比は全ての軸荷回数において飽和状態を上回り, $R_L=0.27$ 以上の値を示した。

図8に繰返し非排水三軸試験後, 単調圧縮せん断試験結果を偏差応力と軸ひずみの関係で示す。飽和供試体の最大偏差応力は 0.03MPa~0.04MPa を示していることから, 液状化後の残留せん断強度は 0.015MPa~0.02MPa であることがわかる。

同図中に 2004 年に起こった新潟県中越地震により発生した剛体的な地すべり被災地である, 新潟県東竹沢地区で採取した斜面崩壊土の単調軸荷試験結果も載せた⁴⁾。東竹沢地区の試料に比べて能登半島の試料は偏差応力の値が低いことから, 繰返しせん断後の静的な強度は低く, 地震により崩壊した地盤が流動的な地すべりを起こしやすかったと考えられる。

一方, 不飽和供試体の場合, 最大偏差応力は 0.075MPa 程度で, 飽和供試体に比べて明らかに大きい。また, 液状化後の強度の回復は小さいひずみから起き, 流動化に対する抵抗力は高いことがわかる。

6. まとめ

不攪乱試料を用いた各種試験の結果についてまとめる。

(1) 能登半島地震で斜面崩壊した地点より採取した不攪乱試料の物理特性より, 圧縮性が高く低塑性な土であることが分かった。

(2) 斜面崩壊土から採取した試料は細粒分含有率及び飽和度が高く, 粘性土を含む割合には液状化応力比がそれほど大きくない。また, 液状化後の単調軸荷における残留強度が低いことから流動性が高いといえる。

(3) 不攪乱試料の繰返しせん断強度や単調軸荷による残留強度は繰返しせん断強度は, 飽和度の低下により明らかに増加する。

(4) 崩壊斜面において, 湧水などが確認されたことから, 今回の崩壊には盛土材料が飽和状態に近づいたこと

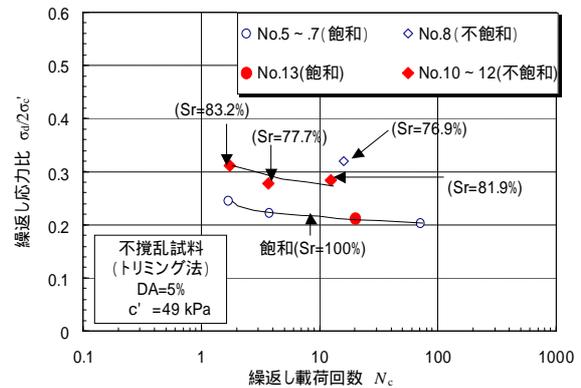


図7 繰返し非排水三軸試験結果

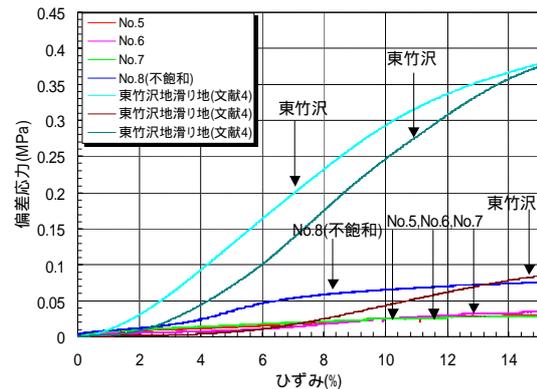


図8 単調圧縮せん断試験結果

が関わっている可能性がある。

謝辞：今回の調査は文部科学省科学技術振興調整費による委託研究開発（活褶曲地帯における地震被害データベースの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案, 研究代表者：小長井一男）の一環として実施したものである。現地調査は石川県土木部道路課の好意により行うことができ, 道路に関する資料をいただいた。また, 防災科学技術研究所 (NIED) のK-netのデータを利用していただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) NIED 独立行政法人防災科学技術研究所HP.
- 2) 石川県土木部道路課資料.
- 3) 石原研而：土質動力学の基礎, 第9章, 砂質土の液状化, pp.246-247, 1976.
- 4) 原 忠, 國生剛治, 古地祐規, 森戸義裕, 田中 正之：山古志村東竹沢で斜面崩壊を生じた砂岩の地震時力学特性, 第41回地盤工学研究発表会, 2006.

(2007.06.29 受付)