

3.4 山岳道路盛土の耐震補強技術に関する試験調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：振動チーム

研究担当者：杉田 秀樹、佐々木哲也

水橋 正典

【要旨】

2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震では山岳道路盛土に多大な被害が生じ、長期間にわたり道路交通機能が失われた。このため、山岳道路盛土についても道路交通機能の低下を最小限に抑制するとともに、被災後の機能回復を迅速に行う必要があり、道路の機能および道路盛土の修復性を考慮した耐震診断技術および耐震対策技術の開発が求められている。そこで、本研究は、山岳道路盛土の合理的で経済的な耐震診断法・耐震対策工の設計法を提案することを目的に実施するものである。平成19年度は、能登半島地震で被災した盛土について地盤調査および事例分析を行うとともに、山岳道路盛土の耐震性に及ぼす諸条件を検討するために、動的遠心模型実験を行った。能登半島地震の事例では、盛土内に浸透した水が大規模崩壊に影響した可能性を示し、また、盛土の地震時安定性に及ぼす盛土及び地形・地質条件を明らかにした。また、動的遠心模型実験の結果より、盛土崩壊に及ぼす盛土高、盛土材料、基礎地盤の安定性の影響を明らかにした。

キーワード：道路盛土、地震、遠心模型実験

1. はじめに

2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震では山岳道路盛土に多大な被害が生じ、長期間にわたり道路交通機能が失われた。このため、山岳道路盛土についても道路交通機能の低下を最小限に抑制するとともに、被災後の機能回復を迅速に行う必要があり、道路の機能および道路盛土の修復性を考慮した耐震診断技術および耐震対策技術の開発が求められている。また、道路盛土は「道路土工のり面工・斜面安定工指針」¹⁾によれば、当該盛土の重要性と復旧の難易度に応じて耐震性能を確保することとされているが、レベル2地震動に対しても、土構造物である盛土に変形を一切許容しないことは合理的でないことから、盛土の残留変形量により耐震性能を評価することも求められてきている。

そこで、本研究は、山岳道路盛土の合理的で経済的な耐震診断法・耐震対策工の設計法の提案することを目的に実施するものである。平成19年度は、能登半島地震で被災した盛土について地盤調査および事例分析を行うとともに、山岳道路盛土の耐震性に及ぼす諸条件を検討するために、動的遠心模型実験を行った。

2. 能登半島地震で被災した盛土の調査

2007年能登半島地震で被災した道路盛土について地盤調査および事例分析を行い、道路盛土の大規模な崩壊に与える盛土条件、地形条件を検討した。

2.1 被害の概要

能登半島地震により、何等かの通行規制を要する道路土工・斜面の被害は80箇所が生じた。内訳は、有料道路（能登有料道路）で53箇所、直轄国道（能登自動車道）で1箇所、補助国道で9箇所、県道で17箇所である。図-2.1に直轄国道、補助国道、能登有料道路、県道の被災箇所の位置を示す。



図-2.1 被災箇所位置図

道路土工の被害としては、傾斜地盤上に構築された盛

3.4 山岳道路盛土の耐震補強技術に関する試験調査

土の崩壊が多く、基礎地盤の液状化による盛土全体の崩壊はほとんど見られない。能登有料道路では比較的大きな盛土崩壊が11箇所、国道249号では比較的大きな盛土崩壊が2箇所で生じた。能登有料道路の別所岳SA近傍17.7kpの路面崩壊の様子を写真-2.1、写真-2.2に示す。盛土の被害形態としては、沢や谷等の集水地形に築造された高盛土の流動性崩壊、カルバートや橋梁など異種構造物との取り付け部の段差、切土部から片切片盛などに構造が変化する部分の切盛境での段差等であった。基礎地盤の液状化による盛土全体の崩壊はほとんど見られない。こうした被災パターン傾向は、これまでの地震においても、山間地における盛土被害の特徴として見られたものである。



写真-2.1 別所岳SA近傍の路面崩壊
(能登有料道路17.7kp七尾市中島町田岸)



写真-2.2 上空からの斜め写真
(能登有料道路17.7kp七尾市中島町田岸)

表-2.1に能登有料道路被災箇所位置を示す。表中の災害規模は石川県の定義にしたがい、「大規模崩落」は盛土がすべり崩壊したもの、「崩落予想」は概ねのり面の変状や路面のクラック等が路床まで達しているもの、「路面変

状」は路床までは達していない路面クラック等の被害であり、以後、能登有料道路の被害程度はこの定義に従う。

能登有料道路では地震直後から柳田IC～穴水IC間で全面通行止めの措置が執られた。応急復旧工法、本復旧工法は、地震後に設置された「能登有料道路復旧工法検討委員会」(委員長 金沢工業大学 川村教授)において検討された。柳田IC～徳田大津ICは応急復旧の後、3月29日15:00より暫定二車線の供用が開始された。徳田大津IC～穴水ICについては、迂回路設置等の応急復旧により、徳田大津IC～横田IC間は4月20日に、横田IC～穴水ICは4月27日に供用が再開された。本復旧は順次行われ、11月30日に全線で迂回路が解消され、本線供用が再開された。

一方で、直轄国道、補助国道、県道については、国道249号輪島市町野町々木の落石発生箇所を除いては本復旧が完了しており、この落石発生箇所についても7月7日に5:00～20:00の時間帯で片側交互通行による供用が開始された。

表-2.1 能登有料道路の被災箇所一覧

路線名	区間	NO.	被災箇所	kp	上下	被災状況	災害規模
能登有料道路 (能登南側道路)	柳田IC ～徳田大津IC	第-1	別所岳上郷	9.2	下下	下部土すべり、ヒソヒソ陥没	陥没陥没
		第-2	別所岳中郷	11.5	下下	下部土すべり	陥没陥没
		第-3	別所岳下郷	15.0	下下	下部土すべり	陥没陥没
		第-4	別所岳中郷	12.4	下上	路面陥没、クラック	陥没陥没
		第-5	別所岳中郷	12.0	下上	路面陥没、クラック	陥没陥没
		第-6	別所岳中郷	19.8	下上	路面陥没、クラック	陥没陥没
		第-7	別所岳中郷	21.0	下下	下部土すべり	陥没陥没
能登有料道路 (能登半島縦貫 有料道路)	徳田大津IC ～終点	第-8	七尾市中島町田岸	0.0	下上	路面陥没	陥没陥没
		第-9	七尾市中島町田岸	4.6	下上	クラック	陥没陥没
		第-10	七尾市中島町田岸	4.8	下下	下部土すべり	陥没陥没
		第-11	七尾市中島町田岸	5.4	下上	クラック	陥没陥没
		第-12	七尾市中島町田岸	5.6	下上	道路陥没	大規模陥没
		第-13	七尾市中島町田岸	5.7	下上	路面陥没、クラック	陥没陥没
		第-14	七尾市中島町田岸	6.0	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-15	七尾市中島町田岸	6.3	下上	道路陥没	大規模陥没
		第-16	七尾市中島町田岸	10.6	下上	路面陥没	大規模陥没
		第-17	七尾市中島町田岸	10.8	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-18	七尾市中島町田岸	11.1	下上	路面陥没	陥没陥没
		第-19	七尾市中島町田岸	11.3	下上	路面陥没	陥没陥没
		第-20	七尾市中島町田岸	11.7	下下	道路陥没	大規模陥没
		第-21	七尾市中島町田岸	12.7	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-22	七尾市中島町田岸	12.9	下上	路面陥没	陥没陥没
		第-23	七尾市中島町田岸	13.0	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-24	七尾市中島町田岸	13.2	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-25	七尾市中島町田岸	13.7	下上	路面陥没	陥没陥没
		第-26	七尾市中島町田岸	13.9	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-27	七尾市中島町田岸	14.7	下下	道路陥没	大規模陥没
		第-28	七尾市中島町田岸	14.8	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-29	七尾市中島町田岸	15.0	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-30	七尾市中島町田岸	15.1	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-31	七尾市中島町田岸	15.3	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-32	七尾市中島町田岸	15.9	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-33	七尾市中島町田岸	16.1	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-34	七尾市中島町田岸	16.3	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-35	七尾市中島町田岸	16.9	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-36	七尾市中島町田岸	17.7	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-37	七尾市中島町田岸	18.2	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-38	七尾市中島町田岸	18.9	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-39	七尾市中島町田岸	19.0	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-40	七尾市中島町田岸	19.1	下上	路面陥没	陥没陥没
		第-41	七尾市中島町田岸	20.2	下上	路面陥没	陥没陥没
		第-42	七尾市中島町田岸	21.1	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-43	七尾市中島町田岸	21.5	下上	路面陥没	陥没陥没
		第-44	七尾市中島町田岸	21.9	下上	路面陥没	陥没陥没
		第-45	七尾市中島町田岸	22.2	下上	路面陥没	陥没陥没
		第-46	七尾市中島町田岸	23.4	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-47	七尾市中島町田岸	24.1～24.0	上下	橋台背面陥没、ウイング陥没	大規模陥没
		第-48	七尾市中島町田岸	25.3	下下	路面陥没	陥没陥没
		第-49	七尾市中島町田岸	26.3	下上	路面陥没	陥没陥没
第-50	七尾市中島町田岸	3.7	下下	路面陥没	陥没陥没		
田鶴浜道路	徳田大津IC ～田鶴浜IC	田-1	田鶴浜	3.7	下下	路面陥没	陥没陥没

2.2 調査方法

(1) 現地踏査

道路土工の被害に関する現地調査を、地震発生から3日後の3月28日～3月30日と約6週間後の5月8日～5月11日の2回にわたって実施した。第2回調査では、能登有料道路の徳田大津IC～穴水IC区間における被害箇所および無被害箇所を対象とした詳細な現地踏査を行った。現地踏査は、被害箇所および無被害箇所について、以下の項目を把握することを目的に実施した。調査箇所数の内訳を

表-2.2に示す。

- ① 盛土背後地の水の供給・湿潤状況（沢、池、湿地等の有無）
- ② 盛土のり面、のり先の湿潤状況・湧水の有無、排水施設の健全性
- ③ 路面の沈下、亀裂、段差、のり面の亀裂・はらみだし等の変状、補修履歴、既往災害の有無

表-2.2 第2回調査の調査箇所内訳

被災程度		全盛土箇所数	調査箇所数
被害	大規模崩落	11	11
	崩落予想	19	19
	路面変状	12	8
無被害		61 (うち盛土高15m以上31箇所)	14 (盛土高15m以上)
計		103	52

(2) 地盤調査

能登有料道路において、①盛土の締固めの程度、②盛土内の水位、③盛土基礎地盤の崩積土の有無、④盛土材料の力学特性等と被害の関係を把握することを目的に、地盤調査を実施した。

調査箇所は、大規模崩落箇所および類似の盛土形状、地形条件の未崩落箇所とした。表-2.3に調査箇所及び調査内容を示す。

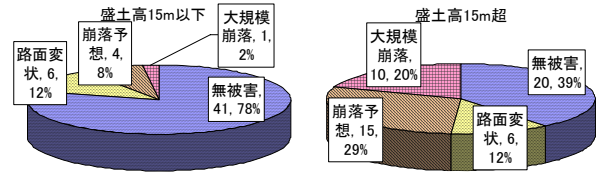
表-2.3 能登有料道路の地盤調査箇所及び調査内容

項目	調査箇所	調査内容									
		観測1	観測2	観測3	観測4	観測5	観測6	観測7	観測8	観測9	観測10
調査	地盤ボーリング (径:50mm)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	標準貫入試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	密度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
調査	ジオメトリックグラブ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
調査	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	現場湿潤度試験	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

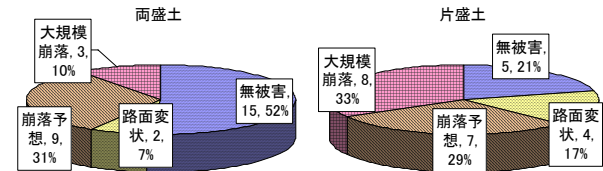
2.3 調査結果

(1) 現地踏査に基づく道路盛土の被害の傾向

ここでは、能登有料道の徳田大津IC～穴水IC間の盛土を対象に実施した現地踏査の結果を整理する。徳田大津IC～穴水IC間の盛土は103箇所あり、このうち盛土高15m超の盛土は51箇所である。盛土高15m超の盛土を対象に詳細な現地踏査を実施した。

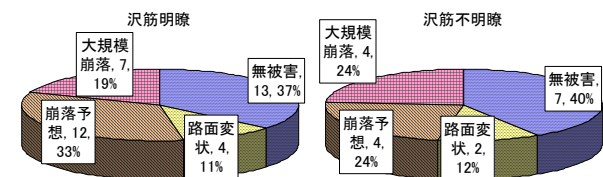


(a) 盛土高さ

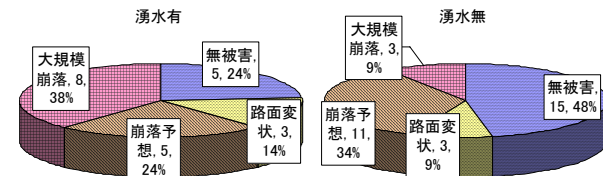


(b) 盛土形状

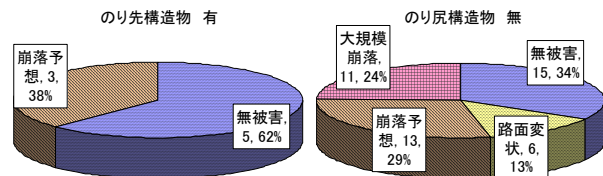
図-2.2 盛土構造と被害の関係



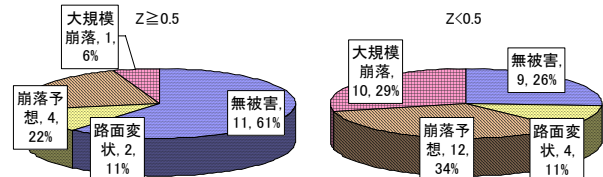
(a) 沢筋の影響



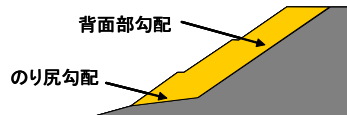
(b) 湧水の有無



(c) のり先構造物の有無



(d) 地山勾配の影響



(d) 地山勾配の影響

図-2.3 地形条件と被害の関係

図-2.2、図-2.3に徳田大津IC～穴水IC間の盛土の盛土構造や地形条件と被害程度の内訳を示す。盛土被害の傾

向を整理すると以下のとおりである。

- ① 盛土高15m超の盛土で被害の割合が高い傾向が見られた。盛土高が高いほど被害を受けやすい傾向があるといえる。
- ② 片盛土において大規模崩落の割合が高い傾向が見られた。このことから、切盛り境や地山傾斜地において被害が大きくなった可能性が考えられる。
- ③ 盛土背面の沢筋の有無やのり面からの湧水状況では被害程度に明確な傾向が見られなかった。このことから、盛土内の地下水の浸透状況は沢筋や湧水の状況のみでは判断が困難である可能性が考えられる。
- ④ 地山勾配について、のり尻勾配と盛土背面部勾配との比Zが小さい、すなわち盛土背面の勾配よりのり尻の勾配が緩い傾向が高いほど、被害の割合が高い傾向が見られた。
- ⑤ のり先構造が無い場合において被害の割合が高い傾向が見られた。このことから、のり先構造は盛土のり尻の変形を抑制する効果が高い可能性が考えられる。

(2) 地盤調査に基づく道路盛土の被害の傾向

2007年能登半島地震により、能登有料道路では比較的大きな盛土崩壊が11箇所で見られた。これらの盛土はいずれも沢部を埋めた盛土である。盛土の被害程度と盛土材料、盛土の締固めの程度、盛土内の水位等の地盤や盛土の条件が被害の程度に与える影響を明らかにすることを目的に、能登有料道路の崩壊・未崩壊盛土において、地盤調査を実施した。

1) 調査方法

表-1に調査箇所及び調査内容を示す。今回の調査では、大規模崩落箇所および類似の盛土形状、地形条件の未崩落箇所の合計7箇所、標準貫入試験あるいはラムサウンディングを行うとともに、調査工を利用して地下水位の測定を行った。標準貫入試験は、縦22（崩落予想）、縦26（無被害）、縦38（大規模崩落）（写真-1参照）の3箇所で行った。これらの箇所では併せてシンウォールサンプリングによる盛土材料の不攪乱試料を採取した。なお、表中の被害程度は文献1)に従い、「大規模崩落」は盛土がすべり崩壊したもの、「崩落予想」は概ねのり面の変状や路面のクラック等が路床まで達しているもの、「路面変状」は路床までは達していない路面クラック等の被害である。

2) 調査結果

図-2.4に盛土材料の粒径加積曲線を示す。これらはシンウォールサンプリングにより得られた試料に基づくも



写真-2.1 能登有料道路（縦38）の崩壊状況¹⁾

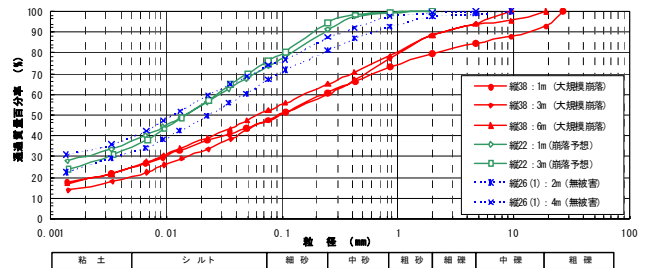


図-2.4 盛土材料の粒度分布図

のである。盛土材料は全体的に細粒分を多く含み、高液性限界のシルトや粘性土に分類される材料が多くみられた。大規模崩落箇所では礫の混入率が高い傾向にあるものの、崩壊規模による材料の大きな差異はみられなかった。

図-2.5にボーリング柱状図を、図-2.6にボーリング箇所の断面図を示す。これらのボーリングはいずれも盛土のり尻付近で実施したものである。なお、縦38（大規模崩落）のボーリングは、同一盛土内の未崩落箇所で行ったものである。これらより、被害程度によらず、盛土内のN値はいずれも5以下と低い、盛土内の水位については、無被害及び崩落予想箇所では低く、大規模崩落箇所では高いことがわかる。

図-2.7に被害程度と盛土の締固め度、盛土のり尻付近の地下水位、N値の関係をそれぞれ示す。図(a)の盛土の締固め度は、サンプリング試料及び盛土表層付近での現場密度試験から得られたものである。また、図(b)の地下水位は、地下水位を計測したボーリングあるいはサウンディング地点の盛土厚さに対する比で表している。さらに、図(c)のN値は、ボーリング及びラムサウンディングの結果より得られた盛土部分の平均N値である。締固め度については、大規模崩落箇所において、締固め度が高い箇所がいくつかみられたが、全体的に80～90%の範囲でばらつき、崩壊規模と締固め度との間には明瞭な相関がみられなかった。盛土内の地下水位については、大規模崩落が生じた箇所においては、盛土のり尻付近の地下水位が盛土の表面近傍まで達している箇所が多く、盛土

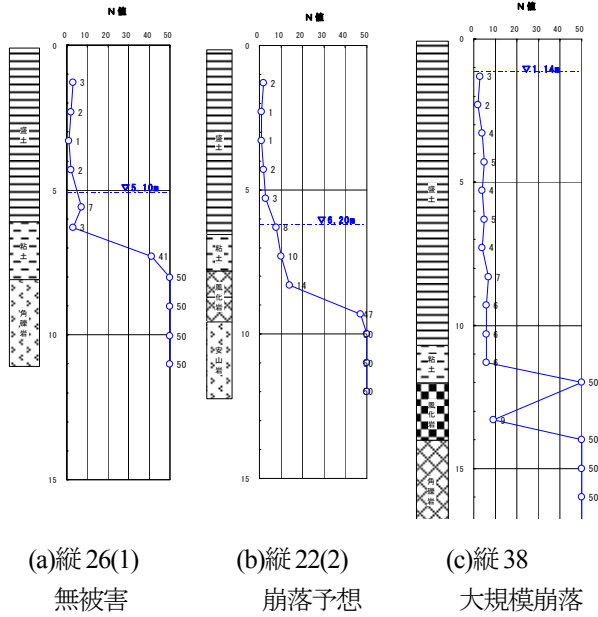


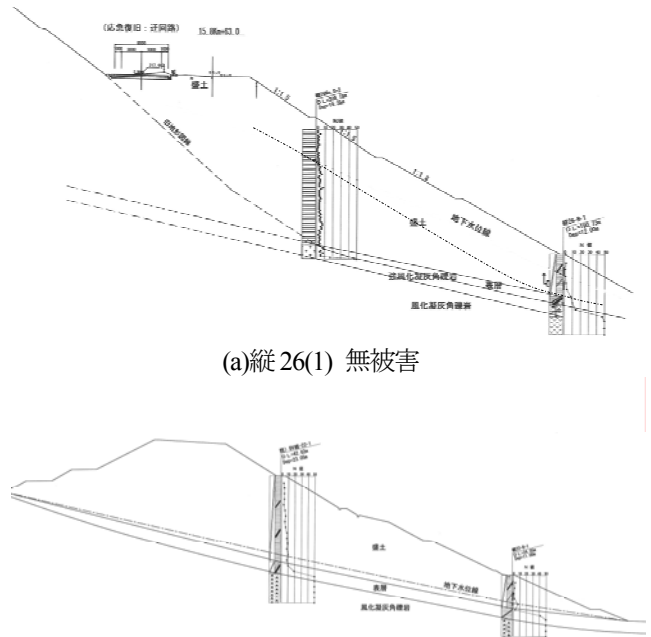
図-2.5 盛土のり尻付近の地盤柱状図

内への水の浸透が大規模崩落の一因となった可能性がある。ただし、水位は調査時点の孔内水位であり、また、大規模崩落箇所の水位の測定は縦38のボーリング箇所を除き崩土内で行っている点に注意が必要である。N値に関しては、大規模崩落盛土の方が高いN値となる傾向がみられたが、全体的としてどの盛土においてもN値が低いため、両者の差は有意なものとは考えにくい。

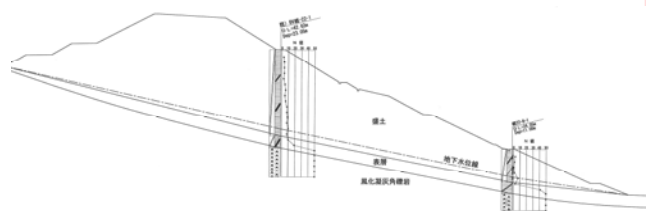
2.4 まとめ

2007年能登半島地震で被災した道路盛土について地盤調査および事例分析を行い、道路盛土の大規模な崩壊に与える盛土条件、地形条件を検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

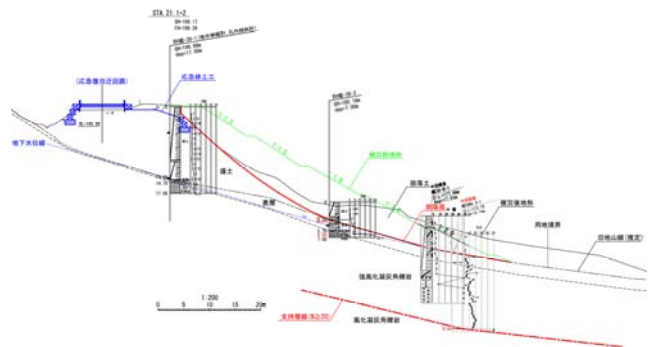
- ① 能登有料道路を中心として、強い地震動により、盛土構造物に多くの被害が生じた。路面からみた被災パターンは、路面崩壊、路面陥没、路面段差や亀裂である。盛土の被害形態としては、沢や谷等の集水地形に



(a)縦26(1) 無被害



(b)縦22(2) 崩落予想



(c)縦38 大規模崩落

図-2.6 調査箇所の断面図 (文献1)に加筆

築造された高盛土の流動性崩壊、カルバートや橋梁など異種構造物との取り付け部の段差、切土部から片切盛土などに構造が変化する部分の切盛境での崩壊等である。

- ② 能登有料道路では比較的大きな路面崩壊が11箇所が生じたが、いずれの箇所においても、沢や湿地等の水

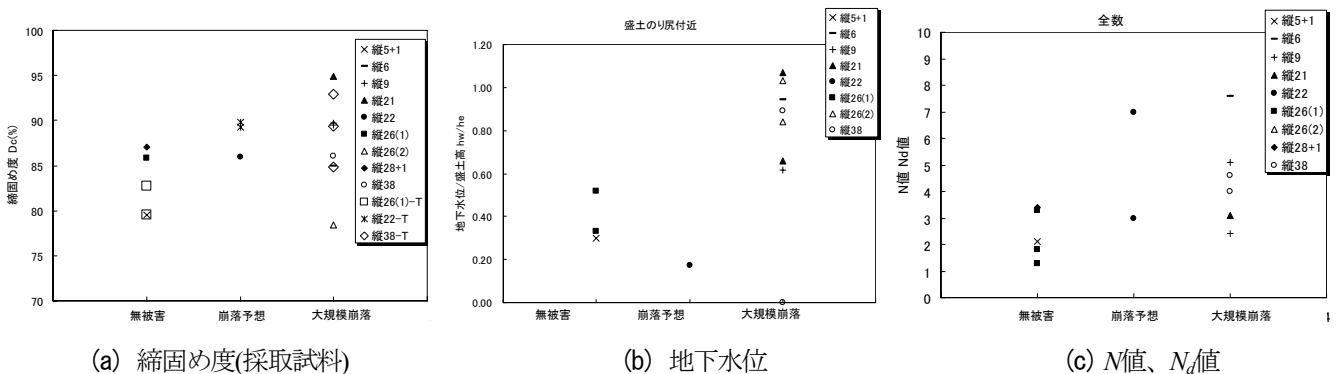


図-2.7 被害程度と地盤調査結果との関係

の存在が確認された。これらの箇所では、発災時には盛土内の浸透水の存在がすべり破壊に影響を及ぼした可能性が考えられる。

- ③ 盛土の陥没・崩壊、変状が生じた箇所は、亀裂の補修痕、路面の打ち換え痕など補修履歴の見られる箇所に多いように思われた。
- ④ 能登有料道路を対象として被害の要因分析を行った結果、大規模崩壊した盛土の特徴として、盛土高が15m以上、沢部を埋めた盛土であることが挙げられる。
- ⑤ 能登有料道路の大規模崩落箇所及び未崩落箇所を対象に地盤調査を行った。その結果、被災程度と盛土材料との相関はみられなかった。また、盛土の締固め度については、80～90%の間で大きくばらつき、大規模崩落箇所と未崩落箇所で有意な差は見られなかった。一方、大規模崩落が生じた箇所においては、盛土のり尻付近において地下水位が高い傾向があり、盛土内水位の有無が盛土の被災規模に影響を与えた可能性が考えられる。

3. 山岳道路盛土の耐震診断手法に関する検討

3.1 数理化理論による分析の概要

能登有料道路の被害・無被害盛土を対象として数理化理論第Ⅱ類を用いて、大規模崩落に及ぼす要因を分析するとともに、耐震診断手法の検討を行った。

(1) 計算の概要

数理化理論では、被災要因の各項目内をその程度または種別によりいくつかに分類し、それらあ項目と被災程度を相関づけるものである。

n 個の個体について p 個のアイテム（盛土形式、のり尻の状況など）があり、 j 番目のアイテムは k_j 個のカテゴリー（盛土形式→片盛土・両盛土、のり尻の状況→湿潤・乾燥など）を持っているとする。この場合、数理化理論で用いる式は、一般に以下のように表される。

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^{k_j} \delta_i(jk) x_{jk}$$

$$\delta_i(jk) = \begin{cases} 1 & (\text{カテゴリー} k \text{ に反応したとき}) \\ 0 & (k \text{ 以外のカテゴリーに反応したとき}) \end{cases}$$

ここに、 α_i : i 番目の個体の合成変数、 x_{jk} : カテゴリースコア、 $\delta_i(jk)$: カテゴリー反応値。

数理化理論第Ⅱ類では、合成変数 α_i を、個体が r 個の群（大規模崩落、未崩落）のいずれかに属するかを判別する指標に使おうとするものであり、相関比 η^2 を次式のように定義し、これを最大とするようにカテゴリースコア x_{jk} を決定するものである。

$$\eta^2 = \frac{\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{n} (\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha})^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^r \alpha_i^2 - \bar{\alpha}^2}$$

ここに、 $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}$ は、それぞれ α_i の r 群および全体の平均値。

ここでは、大規模崩落発生の有無に着目し、大規模崩落を生じた「崩落」と崩落予測、路面変状、無被害を含めた「未崩落」の2つの群に分類して検討を行った。

(2) 検討対象

数理化分析の対象は、地震動の大きさの影響を除くため、能登有料道路における大規模崩落が生じた縦-6から縦-43の区間の盛土の内、以下の条件すべてに該当する盛土とした。

- ① 集水地形上の盛土
- ② 盛土高10m以上の盛土
- ③ のり先に構造物が無い盛土

なお、盛土延長の長い箇所、1箇所の盛土で被害・無被害に分かれる箇所については、2~3の盛土として分割した。よって、対象盛土は、大規模崩落12箇所、未崩落36箇所（変状19箇所、無被害17箇所）の計48箇所である。

(3) アイテム

数理化分析を行うにあたり、アイテムとして既存資料からデータを得やすいと考えられる盛土高、盛土区分、盛土形状、のり先勾配、地山勾配、変状履歴を用いることにした。

ここで、盛土区分については、「平成8年度道路防災総点検要領（豪雨・豪雪等）」²⁾に準じて、「片切・片盛部」、「両盛土（溪流横過部）」、「両盛土（傾斜地部）」の3つのカテゴリーに分類した。盛土形状については、盛土のり面長 I 、道路延長 L 、盛土のり面の鉛直投影面積 S の関係を図-3.1に示すフローで判断し、4つのカテゴリーに分類することとした。ここで、 I 、 L 、 S は図-3.2に示すように定義した。 I/L は、盛土形状が細長いほうが盛土側面の摩擦抵抗により壊れにくいことを表すパラメータで、この値が大きいほど安全となる。 $S/(I \cdot L)$ は、盛土のり先形状が閉じていると盛土側面の拘束により崩壊しにくいことを表すパラメータで、この値が小さいほど安全となる。また、地山勾配は、図-3.3に示すように、盛土両のり尻を結んだ線の勾配で定義した。

3.2 検討結果

表-3.1に、数理化解析の結果得られた、各カテゴリーのスコア、各アイテムのレンジを示す。カテゴリースコ

アが大きいほど崩壊に影響を与える要因であり、レンジは各アイテムに属するカテゴリースコアの最大値と最小値の差であり、値が大きいほどそのアイテムの崩壊に与える影響度が高いことを示している。これより、のり先勾配、盛土形状の危険度、変状履歴、盛土区分、盛土高、地山勾配の順で崩壊に与える影響が大きいことが分かる。

図-3.3に崩落、未崩落のサンプルスコアの頻度分布を示す。また、図-3.4は、崩落・未崩落を判別する区切り位置とその時の各群的中確率を示したものである。すなわち、あるサンプルスコアに対して、崩落についてはサンプルスコア以上の累積頻度を、未崩落についてはサンプルスコア以下の累積頻度を示している。

これより、崩落・未崩落の閾値として4程度を用いると、崩落と未崩落的中率は80%程度となる。ただし、今回の事例は能登有料道路に限定した結果であり、そのため、地震動の影響や盛土材料等はほぼ類似の事例を元に分析を行った結果である。したがって、異なる地震による被災事例への適用性については未検討である。今後は他の被災事例を加え、特に盛土材料の影響等について検討し、精度の向上を図る必要がある。

表-3.1 被害の有無に関する分析結果

アイテム	カテゴリー	スコア											レンジ			
		影響小	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0		5.0	影響大	
盛土高	H ≥ 20m 20m > H ≥ 10m															0.561
盛土区分	片切・片盛部 両盛土(深流横過部) 両盛土(傾斜地部)															0.922
盛土形状の危険度(パターンD)	危険度 4 危険度 3 危険度 2 危険度 1															1.856
地山勾配(沢筋)	φ > 20° 20° ≥ φ > 10° 10° ≥ φ															0.353
のり先勾配	5° > φ 10° > φ ≥ 5° φ ≥ 10°															3.087
変状履歴	変状 浸食 湧水 無															1.120
相関比 η ²		0.341														

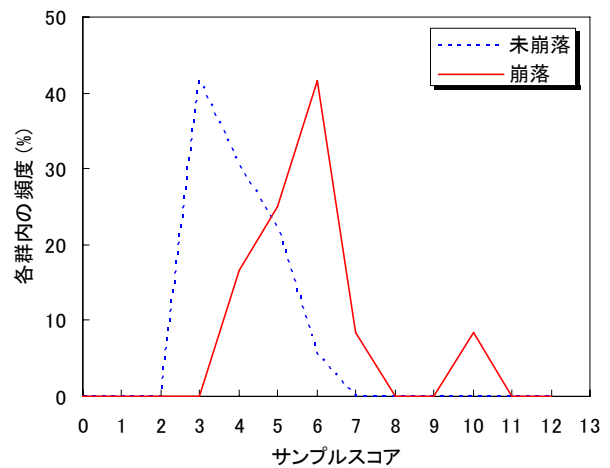


図-3.3 各群の頻度分布

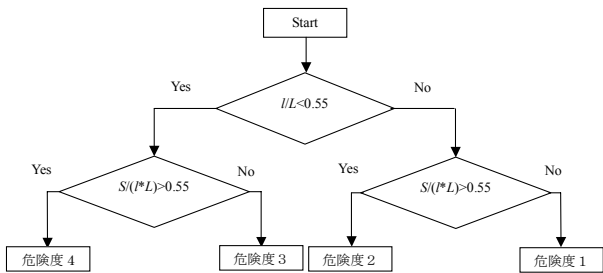


図-3.1 盛土形状の判定フロー

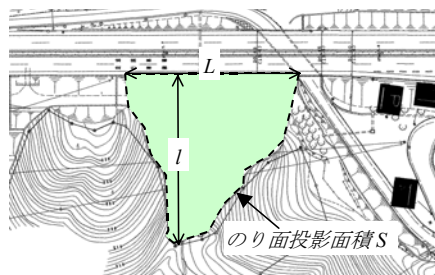


図-3.2 パラメータの定義

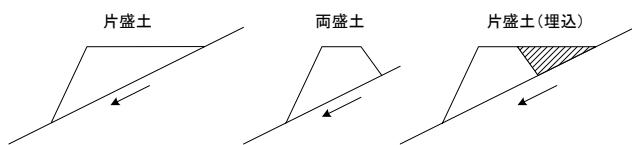


図-3.3 地山勾配の定義

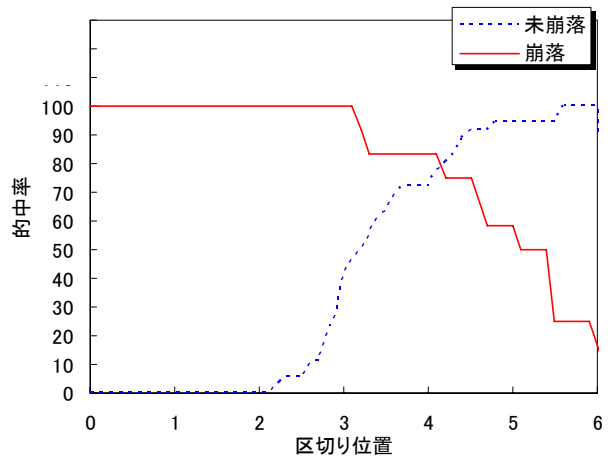


図-3.4 各群的中確率

3.3 まとめ

能登有料道の被害・無被害事例を対象に、数量化理論により盛土の崩壊に及ぼす要因の検討、及び盛土崩壊の予測手法の検討を行った。結果をまとめると以下のとおりである。

- ①のり先勾配、盛土形状の危険度、変状履歴、盛土区分、盛土高、地山勾配の順で盛土の崩壊に与える影響が大きい。
- ②能登有料道路の被災事例に基づいた数量化理論による

経験式により、盛土の崩壊・未崩落事例を 80%程度
の確率で判別することができた。

③今後は他の被災事例を加え、精度の向上を図る必要が
ある。

4. 山岳道路盛土の変形メカニズムに関する検討

平成 18 年度までの検討で、山岳道路盛土の流動的な崩壊
のメカニズムについて動的遠心模型実験により検討を
行ってきた^{2,3)}。その結果によると、盛土内への浸透水位
が高く盛土の締固め度が低いと盛土は流動的な崩壊を生
じることがあり、また浸透水位を下げることで盛土の大
規模な崩壊を防ぐことが出来る可能性があることを明らか
にしている。

ここでは、盛土高、盛土の締固め度および盛土内の浸
透水の水位等が、山岳道路盛土の流動的な崩壊に及ぼす
影響を動的遠心模型実験により検討した。

4.1 実験概要

実験は盛土高、基礎地盤の条件、浸透水位、底面排水
層の敷設長をパラメータとして、50Gあるいは 75Gの遠
心場で5 ケース実施した。また過年度に実施した3 ケー
スも比較対象とした²⁾。実験条件を表-1 に、模型断面お
よび計測器の配置を図-4.1 に、各ケースの概要を図-4.2
にそれぞれを示す。なお、表-4.1 中ののり尻水位は盛土
高 1/3 でのり面からの水位とした。また図表中の数値
は全て模型スケールで示している。盛土は最適含水比
($w=18.1\%$) に調整した山砂 (江戸崎砂: $D_{50}=0.278\text{mm}$ 、
 $\rho_s=2.732\text{g/cm}^3$ 、締固め試験による $\rho_{dmax}=1.605\text{g/cm}^3$ 、

表-4.1 実験条件

CASE	遠心 加速度	盛土高	締固め度	基礎地盤	浸透水位		対策工	最大加振 加速度
					盛土内	のり尻		
06.3	50G	300mm (15m)	82%	石膏	高	GL-28mm (1.4m)	底面排水層【珪砂4号】 L=50mm(2.5m)	47.4G
06.5						GL-60mm (3.0m)	底面排水層【珪砂4号】 L=290mm(14.5m)	47.8G
06.6						GL-74mm (3.7m)	底面排水層【珪砂3号】 L=290mm(14.5m)	45.3G
07.1-4	75G	400mm (30m)	江戸崎砂 Dc=82%		低	GL-0mm (0.0m)	底面排水層【珪砂4号】 L=50mm(2.5m)	41.5G
07.2						GL-110mm (8.3m)	底面排水層【珪砂3号】 L=150mm(11.3m)	21.5G
07.3						GL-79mm (5.9m)	底面排水層【珪砂3号】 L=150mm(11.3m)	21.5G
07.5	50G	300mm (15m)	江戸崎砂 Dc=82%	高	GL-34mm (1.7m)	底面排水層【珪砂3号】 L=90mm(4.5m)	42.7G	
07.6					GL-89mm (4.5m)	底面排水層【珪砂3号】 L=290mm(14.5m)	43.2G	

※ () 内は重力場換算値

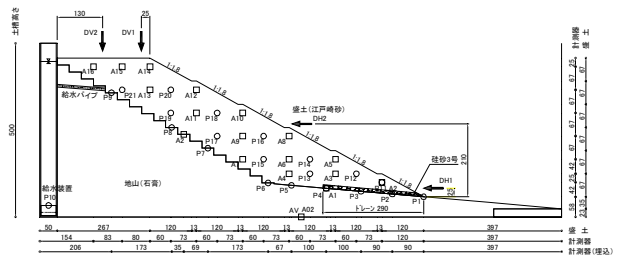


図-4.1 模型断面および計測器の配置(case07_2)

$F_c=9.4\%$) を突固めて、のり面勾配 1:1.8 で所定盛土高ま
で作製し、高さ 100mm 毎 (CASE07_2,3 は 67mm 毎) に
小段を設けた。地山は石膏で作製し、のり先の地山勾配
は 5° とし、盛土背面の地山勾配は 30° で段切りを施した。
CASE07_2,3 は重力場換算 30m の盛土として高盛土
の影響を検討した。CASE07_5,6 では、基礎地盤が液状
化するような場合を想定して、基礎地盤を盛土と同じ江
戸崎砂で $D_c=82\%$ となるように突固め作製した。対策工
は、盛土底面に厚さ約 10mm の排水層を敷き、敷設長・ド

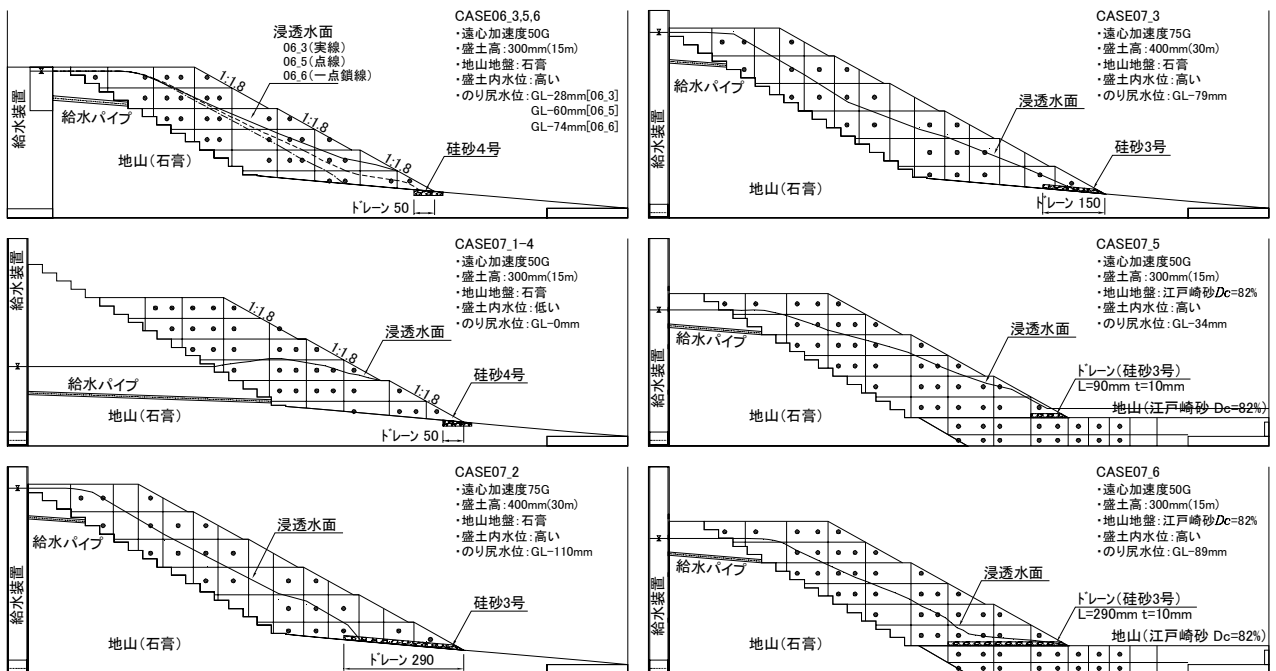


図-4.2 実験ケースの概要

レン材(硅砂3号、4号)・給水パイプの位置を変えることで、盛土内の浸透水位を調節した。なお、CASE07_1-4は盛土背後の浸透水位を下げたケースとした。

盛土作製後、所定の遠心加速度まで到達させ、盛土背面地山の任意箇所から水の50倍あるいは75倍の粘性をもつメトロース水溶液を浸透させた。加振前の浸透水位は図-2に示している。加振は浸透水位が目標水位で概ね定常状態に達した後に行った。実験で用いた加振波形としては、道路橋示方書³⁾に示されている、I種地盤におけるレベル2タイプ2地震動をCASE07_1-4,5,6に、レベル2タイプ1地震動をcase07_2,3にそれぞれ用いた。

4.2 実験結果

図-4.3、図-4.4に盛土のり肩沈下量と浸透水位、対策工との関係をそれぞれ示す。なお、図中の凡例は、浸透水位(◆,■)、高盛土(●)、基礎地盤(△)の検討条件毎で分類して示しており、数値は重力場換算した値である。

図-4.3は盛土のり肩沈下量とのり尻水位との関係を示しており、ここでは盛土高1/3での盛土厚に対する浸透水位の比でのり尻水位を表した。各検討条件とも、のり尻水位の低下に従ってのり肩沈下量も小さくなっていることがわかる。また盛土背後の浸透水位を下げた

CASE07_1-4は、のり尻水位を下げたケースと同程度ののり肩沈下量となった。高盛土のケースでも、のり尻水位を下げることで盛土の変形が大幅に低減していることがわかる。基礎地盤が液状化地盤のケースでは、のり尻水位の低下による盛土の変形抑制効果は小さい結果となった。

図-4.4は盛土のり肩沈下量と底面排水層敷設長との関係を示しており、底面排水層長とのり面長との比を横軸とした。図からのり面長の1/2程度まで底面排水層を敷設し、のり尻付近の浸透水位を低下させることで盛土の変形が抑制されていることがわかる。基礎地盤が液状化地盤のCASE07_6では、のり面長の1/2程度まで敷設しても盛土の変形は大きくなった。

図-4.5に盛土の変形状況を示す。のり尻付近の浸透水位を低下させたCASE06_6は盛土全体でその変形は小さいが、盛土背後の浸透水位を低下させた07_1-4ではのり尻付近の変形が顕著である。高盛土のケースでは、やや高め的水位で大規模な流動崩壊となっているが、のり尻水位を低下させることで大幅に変形を抑制していることがわかる。また基礎地盤が液状化地盤のCASE07_5,6では、盛土内の浸透水位が高いと盛土に流動的な崩壊が生

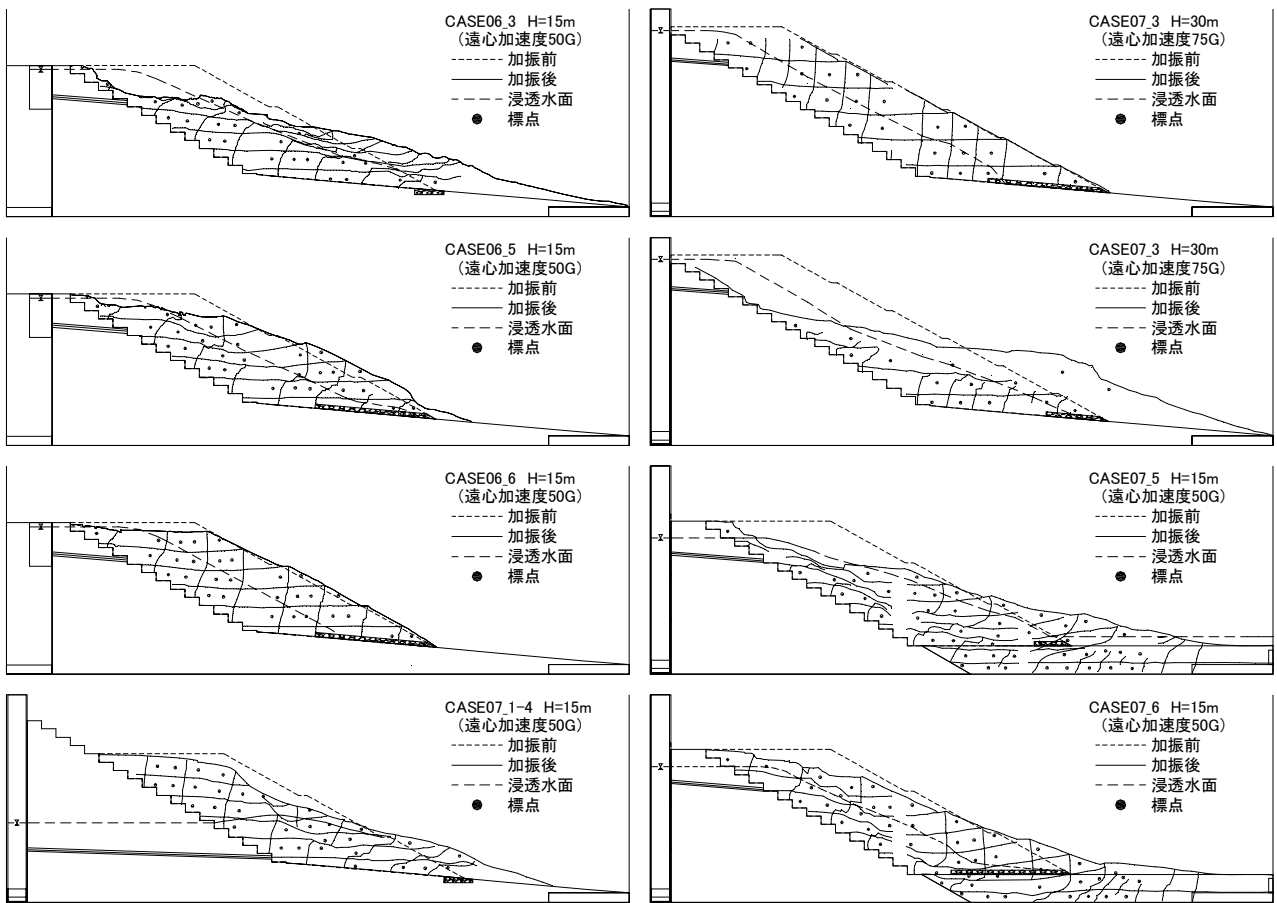


図-4.5 盛土の変形状況

じている。のり尻付近の浸透水位を下げた場合でも、盛土自体の変形は小さくなっているものの、基礎地盤の変形に伴って盛土も沈下する結果となった。

4.3 まとめ

動的遠心模型実験により、盛土のり尻付近の浸透水位を下げることで、より効果的に盛土の残留変位を小さくできる可能性があることを確認した。ただし、基礎地盤の液状化が生じる場合には、盛土内の浸透水位を低下させるとともに、基礎地盤の対策も必要であると考えられる。

5. まとめ

能登半島地震で被災した盛土について地盤調査および事例分析を行うとともに、山岳道路盛土の耐震性に及ぼす諸条件を検討するために、動的遠心模型実験を行った。結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 能登半島地震で被災した盛土の調査

①能登有料道路を中心として、強い地震動により、盛土構造物に多くの被害が生じた。路面からみた被災パターンは、路面崩壊、路面陥没、路面段差や亀裂である。盛土の被害形態としては、沢や谷等の集水地形に築造された高盛土の流動性崩壊、カルバートや橋梁など異種構造物との取り付け部の段差、切土部から片切片盛などに構造が変化する部分の切盛境での崩壊等である。

②能登有料道路では比較的大きな路面崩壊が11箇所が生じたが、いずれの箇所においても、沢や湿地等の水の存在が確認された。これらの箇所では、発災時には盛土内の浸透水の存在がすべり破壊に影響を及ぼした可能性が考えられる。

③盛土の陥没・崩壊、変状が生じた箇所は、亀裂の補修痕、路面の打ち換え痕など補修履歴の見られる箇所に多いように思われた。

④能登有料道路を対象として被害の要因分析を行った結果、大規模崩壊した盛土の特徴として、盛土高が15m以上、沢部を埋めた盛土であることが挙げられる。

⑤能登有料道路の大規模崩落箇所及び未崩落箇所を対象に地盤調査を行った結果、被災程度と盛土材料との相関はみられなかった。また、盛土の締固め度については、80~90%の間で大きくばらつき、大規模崩落箇所と未崩落箇所と有意な差は見られなかった。一方、大規模崩落が生じた箇所においては、盛土のり尻付近において地下水位が高い傾向があり、盛土内水位の有無が盛土の被災規模に影響を与えた可能性が考えられる。

(2) 山岳道路盛土の耐震診断手法に関する検討

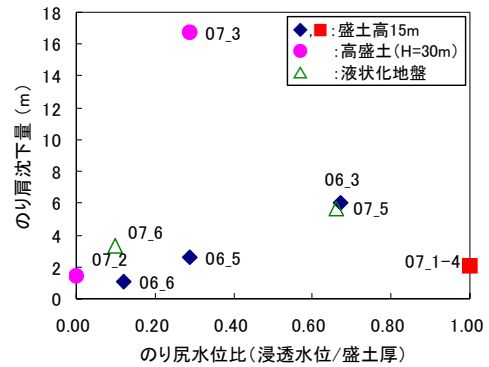


図-4.3 盛土変形量～のり尻水位関係

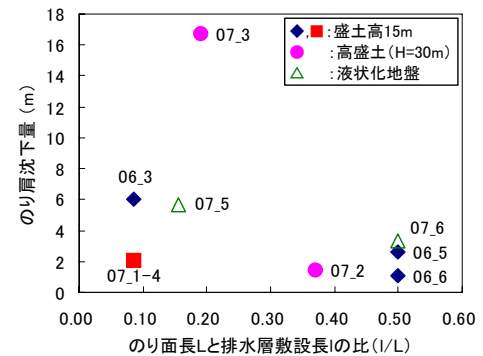


図-4.4 盛土変形量～底面排水層敷設長関係

①のり先勾配、盛土形状の危険度、変状履歴、盛土区分、盛土高、地山勾配の順で盛土の崩壊に与える影響が大きい。

②能登有料道路の被災事例に基づいた数量化理論による経験式により、盛土の崩壊・未崩落事例を80%程度の確率で判別することができた。

③今後は他の被災事例を加え、精度の向上を図る必要がある。

(3) 山岳道路盛土の変形メカニズムに関する検討

①動的遠心模型実験により、盛土のり尻付近の浸透水位を下げることで、より効果的に盛土の残留変位を小さくできる可能性があることを確認した。

②ただし、基礎地盤の液状化が生じる場合には、盛土内の浸透水位を低下させるとともに、基礎地盤の対策も必要であると考えられる。

石川県、石川県道路公社には、能登有料道路に関する被害データをご提供頂くとともに、調査に際して多大なご協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 能登有料道路復旧工法検討委員会：平成19年3月25日能登半島地震「能登有料道路復旧工法検討委員会—土工部会—報告書」、平成20年4月
- 2) 道路保全センター：「平成8・9年度道路防災総点検要領（豪雨・豪雪等）」、1996.

SEISMIC RETROFITS FOR ROAD EMBANKMENTS ON MOUNTAIN SIDE

Abstract : Purpose of this study is to develop seismic retrofits for road embankments on mountain side under strong earthquake motions. In the second fiscal year of the study, major factors affecting seismic behavior of road embankments were examined by case histories of road embankments damaged by the 2007 Noto-hanto earthquake and a series of centrifuge model tests on road embankments on a stiff base slope. The results demonstrated that elevation of seepage water strongly affected the magnitude of earthquake-induced permanent deformation of embankment.

Key words : road embankments, earthquake, centrifuge model tests