

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：土質・振動チーム

研究担当者：杉田秀樹、佐々木哲也、榎本 忠夫

【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。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20年度は、昨年度に能登半島地震の盛土の被災事例を基に構築した耐震診断手法について、既往の地震における盛土の被災事例を対象にその適用性を検証するとともに、精度の向上を図った。また、山岳盛土の動的遠心模型実験を対象として安定性照査手法、残留変形解析手法の適用性を検討し、各手法における安全率、滑動変位量とも実験における浸透水位、締固め度の違いによる地震時残留変位の違いを定性的に考慮できることを示した。

キーワード：道路盛土、地震、遠心模型実験、耐震診断法

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。

このため、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20年度は、昨年度に能登半島地震の盛土の被災事例を基に構築した耐震診断法について、既往の地震における盛土の被災事例を対象にその適用性を検討した。また、山岳盛土の動的遠心模型実験を対象として、安定性照査手法、残留変形解析手法の適用性を検討した。

2. 山岳道路盛土の耐震診断手法に関する検討

平成19年度は、2007年能登半島地震における被害・

無被害盛土を対象に、盛土崩壊に与える影響を検討するとともに、耐震診断手法として数理化理論により盛土の崩壊・未崩落を判定する経験式を提案した。平成20年度は精度の向上を目的に、他の被災事例を加え耐震診断手法の適用性を検討した。

2.1 数理化理論による分析の概要

既往の地震における被害・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分類し、それらの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。

数量化理論第Ⅱ類では、合成変数 α_i を、個体が t 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用とするものであり、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。

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

ここに、 $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}$ は、それぞれ α_i の t 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」と中被害、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

数量化分析の対象は、既往の地震において被害が生じた区間に存在した盛土の内、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

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ている。表 2-1 に検討対象とした盛土の地震毎の内訳を示す。

表-2.1 耐診断法の検討における検討対象

地震名	対象件数				無被害
	全数	被害			
		大規模	中被害	小被害	
1993年釧路沖地震	52	1	19	20	12
2004年新潟県中越地震	9	2	7	0	0
2007年能登半島地震	57	12	15	8	22
2007年新潟県中越沖地震	29	0	5	1	23
合計	147	15	46	29	57

(3) アイテム

数量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、のり尻構造物の有無を用いることにした。なお、平成 19 年度の検討では、これらに加えて変状履歴をアイテムとしていたが、対象とした地震によっては変状履歴の有無が不明な箇所があったため、今回はアイテムから除外することとした。

ここで、盛土区分については、「防災点検の手引き（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 l 、道路延長 L 、盛土のり面の鉛直投影面積 S の関係を図-2.1

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。また、図-2.3 に示すように、地山勾配は文献 3) にならい盛土両のり尻を結んだ線の勾配として、のり尻勾配は盛土のり先部の地山勾配でそれぞれ定義した。

l 、 L 、 S は図-2.2 に示すように定義した。 l/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。 $S/(l \cdot L)$ 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。

2.2 検討結果

表-2.2 に、数量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、盛土区分、盛土高、盛土形状の危険度、のり先構造物の有無、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-2.4 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-2.5 は、崩落・未崩落を判別するサンプルスコアの区切り位置とその時の各群の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を区切り位置とした場合、崩落についてはその値以上の累積頻度を、未崩落についてはその値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1程度を用いると、崩落と未崩落の的中率は85%程度となる。今後はさらに他の被災事例を加え、特に盛土材料の影響等についても検討する必要がある。

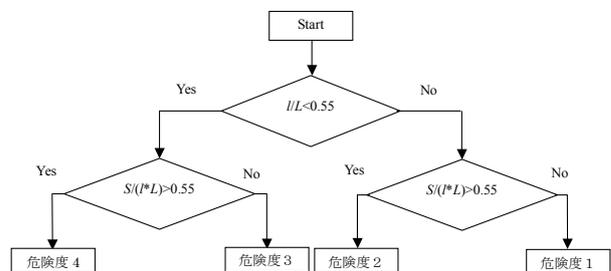


図-2.1 盛土形状の判定フロー

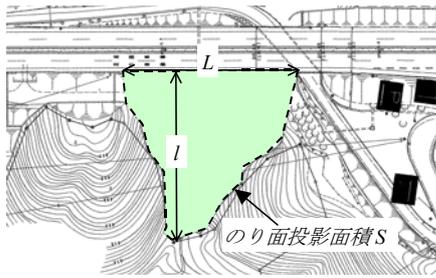


図-2.2 パラメータの定義

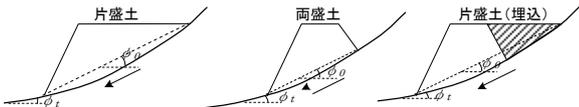


図-2.3 地山勾配 (ϕ_0) とのり先勾配 (ϕ_l) の定義

表-2.2 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	-1.25	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00		1.25	影響大		
盛土高	15m>H≥10m																1.406
	20m>H≥15m																
	25m>H≥20m																
	30m>H≥25m																
	H≥30m																
盛土区分	両盛(平地部)																1.235
	両盛(切盛境)																
	両盛(傾斜地部)																
	両盛(漂流横過部)																
	片切片盛部																
盛土形状の危険度	危険度 1																0.882
	危険度 2																
	危険度 3																
	危険度 4																
	のり先勾配	$\phi \ge 10^\circ$															
$10^\circ > \phi \ge 5^\circ$																	
$5^\circ > \phi$																	
地山勾配	$10^\circ \ge \phi$																0.562
	$20^\circ \ge \phi > 10^\circ$																
	$\phi > 20^\circ$																
のり先構造物	有																0.610
	無																

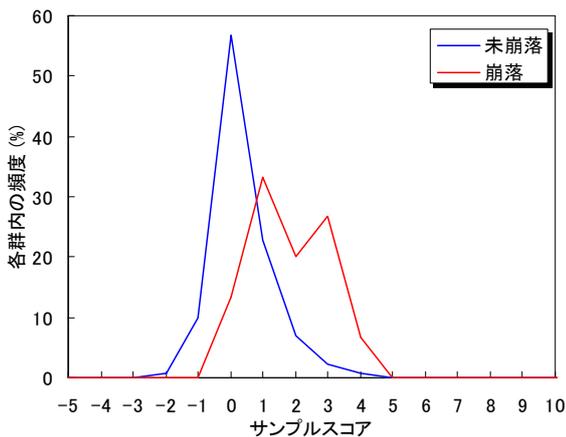


図-2.4 各群の頻度分布

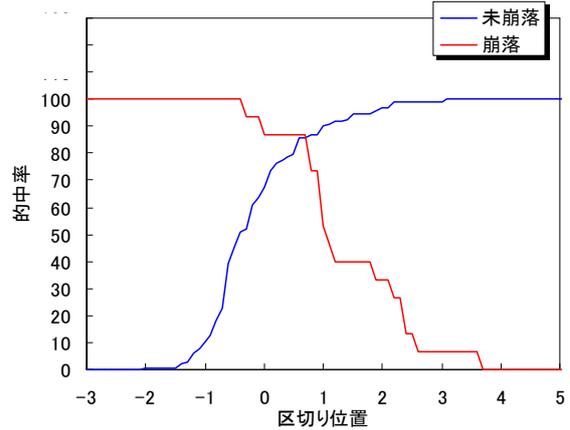


図-2.5 各群の的中確率

3. 盛土の耐震性評価手法の検討

レベル2地震動に対しては、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が求められてきている。そこで、ここでは、過年度に実施した動的遠心模型実験結果を対象に、円弧すべり法による安定計算および Newmark 法による残留変形解析の山岳道路盛土の耐震性能評価手法としての適用性を検討した。

3.1 検討方法

(1) 解析モデル

解析は、過年度に実施した浸透水的作用を受ける傾斜地盤上の盛土の動的遠心模型実験を対象とした。実験模型は、石膏で作成した傾斜した地山上に、盛土を構築したもので、ケースにより、盛土の締固め度、のり尻ドレーンの長さ、盛土背後の浸透水位、盛土高、基礎地盤の液状化の有無、盛土材料を変化させている。実験では、50Gあるいは75Gの遠心場において盛土背後の地山から盛土内に間隙流体を浸透させた後、加振を行っている。解析ケースを表-3.1、解析モデルの例を図-3.1に示す。なお、図表中の数値は、重力場換算した値を用いることとする。本解析では、表層すべりを考慮せず、実験での崩壊モードに合わせて盛土天端を通る円弧すべり面を想定した。

(2) 解析条件

解析で用いた盛土材の強度定数を表-3.2に示す。表中の c 、 ϕ は圧密排水三軸圧縮試験 (CD 試験) の結果を用いた。なお、江戸崎砂_No.1の締固め度 82%では、CD試験を実施していないため、締固め度 85%、90%の結果から直線近似により求めた値を用いた (図-3.2)。

各盛土材のCD試験の応力-ひずみ曲線を図-3.3に示す。同図において、今回用いた盛土材のせん断挙動には

明瞭なピークが見られなかった。そのため、本解析では残留強度時の c 、 ϕ は考慮しないこととする。また、加振直前の浸透水位に対する間隙水圧を考慮し、浸透水面より上層を湿潤重量、下層を飽和重量として計算した。

Newmark 法による残留変形解析で用いた入力地震動は動的遠心模型実験と同じ波形を用いた。入力地震動波形を図-3.4 に示す。

表-3.1 解析ケース

CASE	盛土高	締固め度	盛土材	基礎地盤	浸透水位				
					盛土背後	のり尻			
06_1	15m	$D_c=90\%$	江戸崎砂_No.1	地山 (石膏)	高	高			
06_2		$D_c=85\%$							
06_6		$D_c=82\%$					江戸崎砂_No.2	低	高
06_8									中
06_9									低
07_1-4	30m	$D_c=82\%$	江戸崎砂_No.2	液状化地盤 (江戸崎砂_No.2 $D_c=82\%$)	高	高			
07_2						低			
07_3						中			
07_5						高			
07_6						低			
07_9	15m		粘性土 (能登土)	地山 (石膏)	低	高			

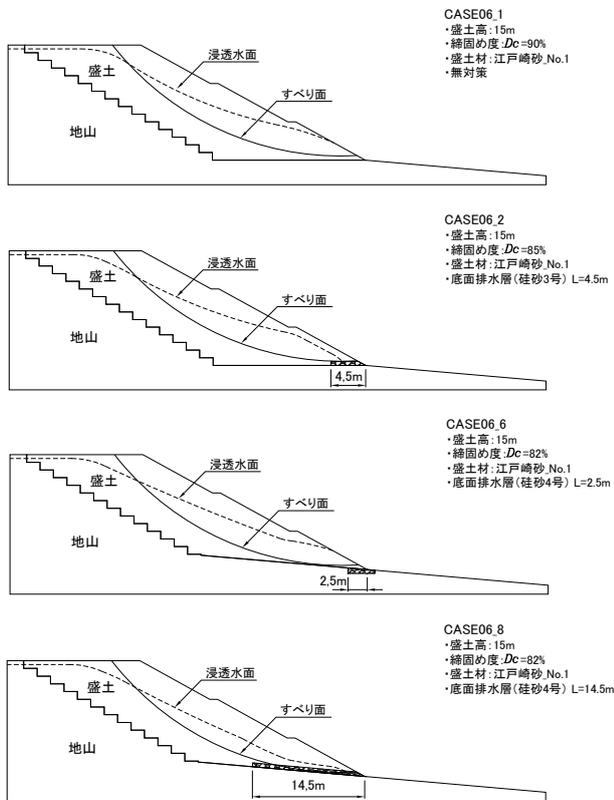


図-3.1 解析モデルの例 (Case06_1~Case06_8)

表-3.2 各盛土材の強度定数

盛土材	締固め度 D_c (%)	内部摩擦角 ϕ (度)	粘着力 c (kN/m ²)	液状化強度比 RL_{20}
江戸崎砂 No.1	90	35.7	2.5	0.16
	85	33.9	1.1	0.13
	82	32.8	0.26	—
江戸崎砂 No.2	82	32.6	2.5	0.11
能登土	82	31.9	0.2	0.00

※ c, ϕ : CD試験結果

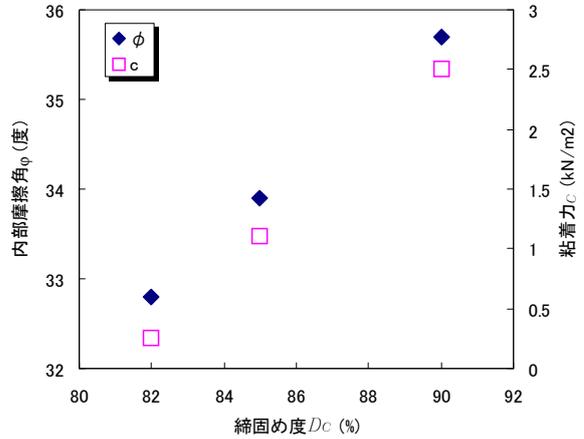


図-3.2 江戸崎砂_No.1における締固め度と c 、 ϕ の関係

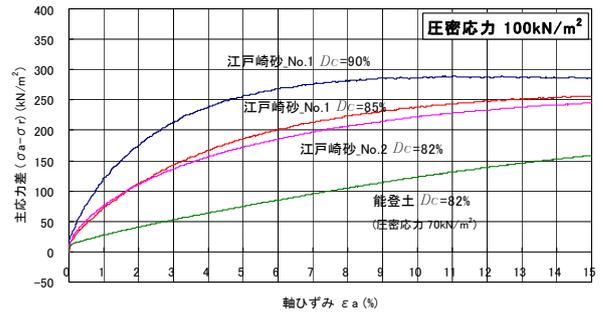


図-3.3 CD試験による応力-ひずみ曲線

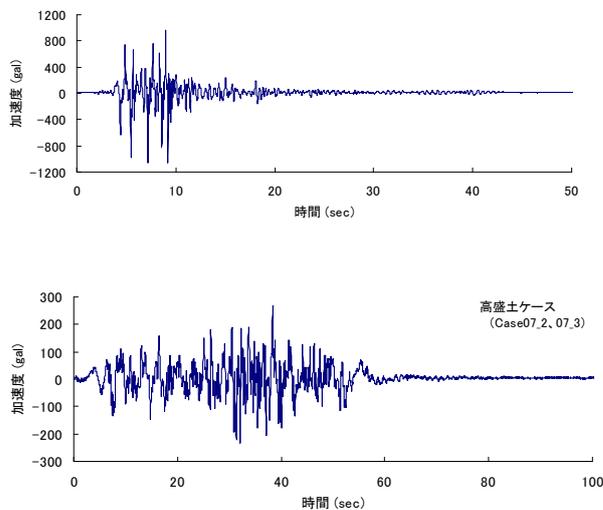


図-3.4 入力地震動波形

3.2 検討結果

円弧すべり法および Newmark 法による解析結果を表-3.3 および図-3.5～図-3.8 に示す。ここで、表中ののり尻水位比はのり尻部の浸透水位を盛土厚で除したものである。

表-3.3 解析結果一覧

CASE	締固め度 Dc (%)	実験結果		解析結果	
		のり尻水位比	のり尻沈下量 (m)	安全率	のり尻沈下量 (m)
06_1	90	0.81	0.25	1.22	1.80
06_2	85	0.79	0.55	1.13	2.92
06_6	82	0.67	5.95	1.01	204.59
06_8	82	0.29	2.60	1.18	2.06
06_9	82	1.00	1.05	1.31	1.04
07_1-4	82	1.00	2.09	1.11	1.65
07_2	82	0.01	1.35	1.22	0.66
07_3	82	0.28	16.69	1.10	3.86
07_5	82	0.78	5.71	0.98	155.91
07_6	82	0.22	3.26	1.21	1.18
07_9	82	0.70	0.48	0.99	113.48

(1) 常時の円弧すべり安全率と実験による沈下量の関係

図-3.5 は常時の円弧すべり面を仮定した安定計算による安全率と模型実験ののり尻沈下量の関係を示している。図中では、盛土高 15m で基礎地盤の液状化が生じないケースを“基本モデル”と称している。締固め度 82% のケースを比較すると、のり尻付近の浸透水位が高く、安全率が低くなるにつれ、のり尻沈下量が大きくなる傾向が見られる。締固め度 85%、90%では、同程度の安全率の締固め度 82% (Case06_8) と比べると、のり尻沈下量は小さくなっている。なお、盛土背後の浸透水位を低下させた Case07_1-4 は、Case06_8 と同程度ののり尻沈下量および安全率となっているが、のり尻部の水平変位量においては約 2 倍の変形量となっている。高盛土モデル、液状化モデルも同様に浸透水位が高く安全率が低いとのり尻沈下量は大きくなった。しかし、盛土材が粘性土である Case07_9 では、江戸崎砂の Case06_6 と同程度の安全率となっているが、盛土の沈下量は 0.48m と小さくなった。また今回の実験の範囲では、基礎地盤が健全な地盤である場合、安全率が 1.2 以上を確保していれば大規模な崩壊には至らない結果となった。

(2) Newmark 法による残留変位量と実験によるのり尻沈下量の関係

図-3.6 は Newmark 法による地震時の滑動変位量から求まるのり肩部の沈下量と模型実験ののり尻沈下量の関係を示している。盛土高 15m で基礎地盤の液状化が生じない基本モデルにおいて、締固め度 82% で盛土内の浸透水を低下させた Case06_8、06_9、07_1-4 では実験値と解析値で近い値となったが、浸透水位が高い Case06_6 では解析値が大きな値となっている。また、締固め度が高い Case06_1、06_2 でも実験値よりも解析値が大きな値となった。一方、盛土高 30m の高盛土のケースでは、浸透水位が低い Case07_2 は実験値と解析値は近い値となっ

ているが、浸透水位が高い Case07_3 では実験値のほうが大きな値となった。また基礎地盤が液状化するケースでは浸透水位が低いと実験値が大きくなり、浸透水位が高いと解析値が大きくなった。なお粘性土モデルは浸透水位が高いケースであり、基本モデルと同様に実験値に対して解析値は大きな値となった。

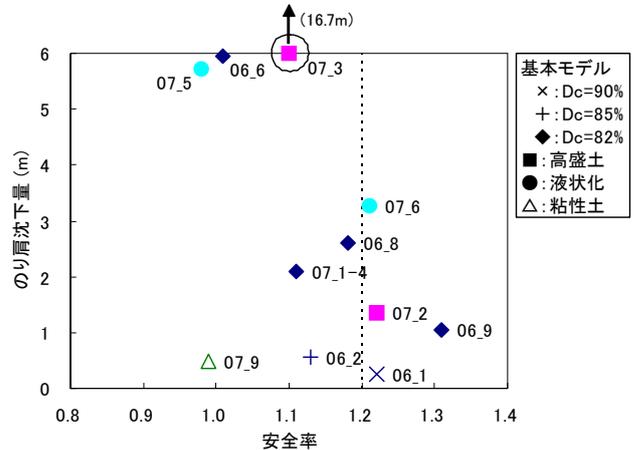


図-3.5 常時の円弧すべり安全率と実験による沈下量の関係

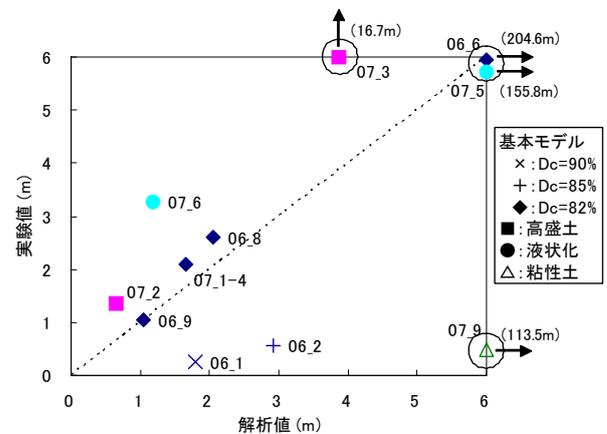


図-3.6 沈下量の Newmark 法による解析値と実験値の関係

(2) 締固め度と沈下量の関係

図-3.7 は盛土高 15m のケースにおける浸透水位の高い Case06_1、06_2、06_6 を対象として、締固め度とのり尻沈下量の解析値と実験値の関係を示している。これらより、実験結果および Newmark 法による解析結果とも締固め度が低いほど、残留沈下量が大きくなり傾向を示していることが分かる。ただし、(2) で述べたように、浸透水位が高い場合には、実験値よりも解析値のほうが大きくなる傾向が見られる。

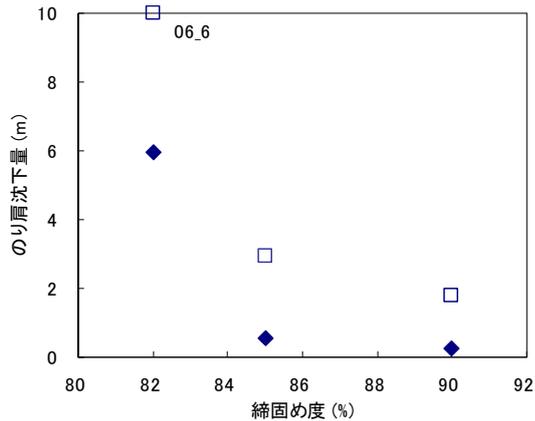


図-3.7 締固め度と沈下量の関係

(4) のり尻水位比と沈下量の関係

図-3.8 は盛土のり尻水位比と実験および解析によるのり肩沈下量との関係を示している。解析結果と実験値とも、浸透水位が高いほど、盛土の沈下量が大きくなる傾向を示しており、解析結果は盛土の残留沈下量に与える浸透水位の影響を定性的には表現しているといえる。ただし、締固め度が低くのり尻水位が高くなるほど解析による滑動変位量は大きくなっており、実験値と解析値の差が大きくなっている。これらの原因として、盛土材のパラメータとして今回の解析ではCD試験による c 、 ϕ および加振直前の間隙水圧を用いているが、対象とした盛土の挙動は、地震動の作用に伴う繰返し荷重による過剰間隙水圧の発生およびそれに伴う盛土材の強度低下の程度に依存するためであると考えられる。

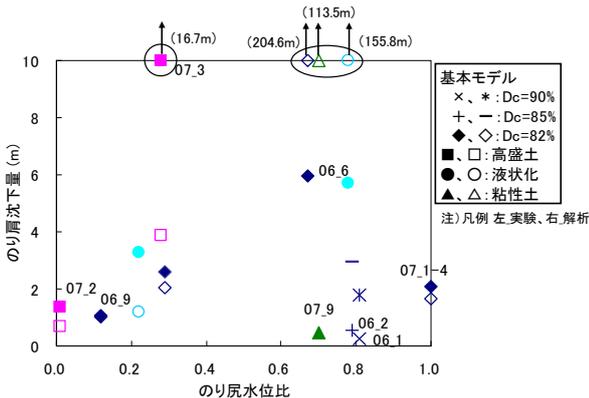


図-3.8 のり尻水位比と実験値、解析値の関係

4. まとめ

昨年度に能登半島地震の盛土の被災事例を基に構築した耐震診断法について、既往の地震における盛土の被災事例を対象にその適用性を検討した。また、山岳盛土の動的遠心模型実験を対象として、安定性照査手法、残留

変形解析手法の適用性を検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 山岳道路盛土の耐震診断手法に関する検討

- ①のり先勾配、盛土高、盛土形状の危険度、盛土区分、地山勾配が盛土の崩壊に与える影響が大きいことを確認した。
- ②既往の地震における盛土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85%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。

(2) 盛土の耐震性評価手法に関する検討

動的遠心模型実験の結果を対象に、円弧すべり面を仮定した安定計算および Newmark 法による残留変形量解析の適用性について検討した結果、以下の知見を得られた。

- ④常時における円弧すべり法による安定計算において、浸透水位を考慮した盛土の安全率が1.2以上を確保していれば、大規模な崩壊は生じない可能性があることを確認した。
- ⑤各手法における安全率、滑動変位量とも盛土の残留沈下量に及ぼす浸透水位、締固め度の違いの影響は概ね定性的に考慮することができることが分かった。ただし、浸透水位が高いほど、締固め度が高いほど実験結果と比較して解析結果は安全側の評価となった。一方で、浸透水位が高い高盛土および基礎地盤が液状化地盤である場合には、解析結果は実験結果より小さい評価となった。これらの原因として、盛土材のパラメータとして今回の解析ではCD試験による c 、 ϕ および加振直前の間隙水圧を用いているが、対象とした盛土の挙動は、地震動の作用に伴う繰返し荷重による過剰間隙水圧の発生およびそれに伴う盛土材の強度低下の程度に依存するためであると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：「道路土工のり面斜面安定工指針」、1999。
- 2) 道路保全センター：「防災点検の手引き(豪雨・豪雪等)」、2007。
- 3) 道路保全センター：「平成8年度道路防災総点検要領(地震)」、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 third fiscal year of the study, a simplified method to assess the seismic stability of road embankment was developed based on case histories of road embankments damaged by past earthquakes. And also a series of dynamic centrifuge test on road embankments on a stiff base slope were simulated by the residual displacements analyses of embankments using Newmark method. The residual displacements of embankment predicted by the analyses showed a good agreement with centrifuge test results.

Key words : road embankments, earthquake, centrifuge model tests