

棒状補強材により串刺補強した 仮復旧盛土の耐震性評価法

坂本 寛章* 小島 謙一** 後藤 幸司***

Evaluating Method of Seismic Performance of Provisionally Restored Embankments Reinforced by Reinforcement Bars like Skewers

Hiroaki SAKAMOTO Kenichi KOJIMA Koji GOTO

In this study, concerning a restoration method for damaged embankments with large sandbags and reinforcement bars, we performed model tests, and confirmed the reinforcing effects by reinforcement bars and the mechanism of seismic behavior. The result of the model tests was that the seismic performance of the restoration method was better than that of a provisional restoration method. Assuming destruction mode and transformation mode based on the result of model tests, we designed in a trial. As a result, we quantitatively evaluated the reinforcing effects by reinforcement bars. Finally we confirmed the validity of proposed designing method, and proposed the evaluating method.

キーワード：盛土、大型土のう、棒状補強材、耐震性能、模型振動実験、ニューマーク法

1. はじめに

近年、大規模な降雨や地震等の自然災害が発生し、土構造物においても被害が度々発生している。鉄道は線状構造物であるため、1ヶ所でも不通区間が発生すると鉄道システム全体の機能喪失に繋がることから、線区の重要性や他構造物の被災状況に応じて、土構造物も被災時に早期復旧が望まれる場合がある。

土構造物の中でも、盛土は比較的復旧が容易な構造物であるが、その被災規模や被災現場の条件（周辺環境やアクセス）によっては、復旧に多大な時間を要する場合がある。また一般的には、一旦仮復旧させ列車運行を確保させた後に、従来保有していた機能の回復、もしくは従来以上の強化復旧を行う場合が多い。しかし、このような2段階施工では、仮復旧時に使用する大型土のう等の仮設材を本復旧時に撤去したのち、新しい構造物を構築するため、手戻りが生じることとなり、本復旧完了までに多くの経費や時間を費やすこととなる。

本研究では上記の課題を克服するため、早期復旧が可能であり、また容易に強化が可能である、大型土のうと棒状補強材を併用した被災盛土復旧工法を提案し、模型振動実験を行い、棒状補強材による盛土の補強効果や地震時の挙動メカニズムを確認した。この実験結果をもとに、破壊・変形モードを仮定した上で試設計を実施し、棒

状補強材による補強効果を評価し、提案工法に対する設計法をとりまとめた。

2. 提案工法の概要

大型土のうと棒状補強材を併用する被災盛土復旧工法の概要を図1に示す。施工手順としては、まずのり面を段切り状に整形した上で、仮復旧時に使用する大型土のうを並べる。その後棒状補強材を大型土のうに打設し、最後に吹付工等により、のり面表面の風化防止を施す。この工法は、大型土のうによる仮復旧盛土を棒状補強材で補強して耐震性を向上させると同時に、従来は撤去していた仮復旧材である大型土のうを本復旧材として活用することで、工期の短縮が可能となり、経済性にも優れているといえる。

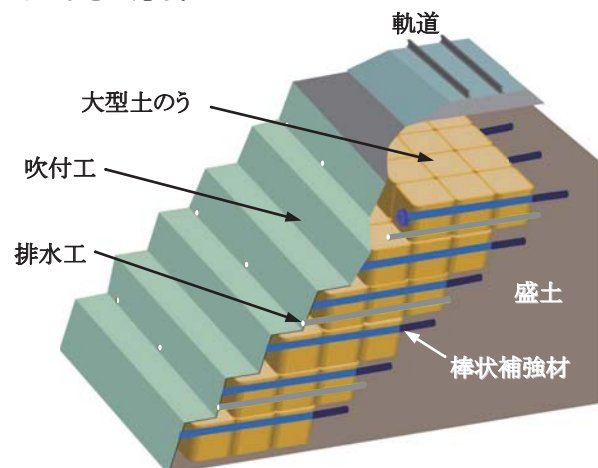


図1 提案工法概要図

* 構造物技術研究部（基礎・土構造）
** 前 構造物技術研究部（基礎・土構造）
*** 前 構造物技術研究部（現 ジェイアール東海コンサルタンツ㈱）

特集：構造物技術

3. 模型振動実験

3.1 実験の目的

棒状補強材を用いた補強土工法は、既設盛土の耐震補強や切土の安定化対策、擁壁の補強等、土構造物の補強を目的として採用されている¹⁾。ここでは大型土のうによる仮復旧盛土について、棒状補強材で補強した場合の効果を定量的に把握するため、模型振動実験を実施した^{2) 3) 4)}。提案工法においては、仮復旧時に大型土のうのみで補強した状態も存在する。このような状態で列車を通すことも考えられることから、仮復旧時のケースもあわせて検討した。

3.2 実験条件

盛土の高さは、実際の盛土の1/10スケール(600mm)で作製した。盛土材としては豊浦砂を使用し、比較的耐震性能の低い盛土を模擬するため、相対密度 $D_r=40\%$ 、含水比 $w=2\%$ 程度となるよう、層厚50mmごとに締固めを行った。大型土のうは、ポリエステル製シート(引張強度34.3kN/m、伸度13%)を円筒状に加工して盛土材を封入し、盛土材と同等の密度となるよう調整した。棒状補強材は、小径の補強材を想定してリン青銅(幅5mm×厚さ2.5mm×長さ600mm)を使用した。また、補強材の定着は、奥行き方向に横梁(600mm)を通しそれぞれの棒状補強材と固定する方法で行った。大型土のうの勾配は、1:1.0、1:1.5の2種類、地山の勾配は1:1.0を設定し、大型土のうの勾配が盛土全体の地震時挙動に与える影響を確認した。入力波は、正弦波(周波数5Hz、20波)を使用し、100galから100galきざみの段階加振とした。実験ケースを表1に、ケース1、ケース2の概要図をそれぞれ図2、図3に示す。ケース3はケース2から棒状補強材のみを取り除き、仮復旧を想定したケースである。

表1 実験ケース

ケース	土のう勾配	補強材間隔	備考
ケース1	1:1.5	300mm	
ケース2	1:1.0	200mm	
ケース3	1:1.0	-	仮復旧

3.3 実験結果と考察

(1) 大型土のうの勾配の影響

図4にケース1~ケース3ののり肩部の沈下量(DV01)、図5に水平変位量(DH01)をそれぞれ示す。ケース3に関しては、400gal加振時に土のうが崩壊したため、400gal加振後の沈下量及び水平変位量を計測できなかった。またケース1の800gal加振後の水平変位も計測不能であったため省略している。ケース1では700gal加振時、ケース2では800gal加振時で、それぞれすべり面が発生

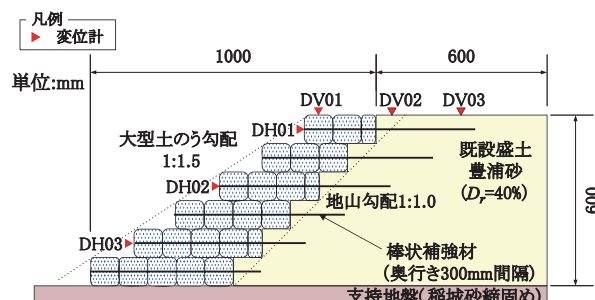


図2 模型実験概要図(ケース1)

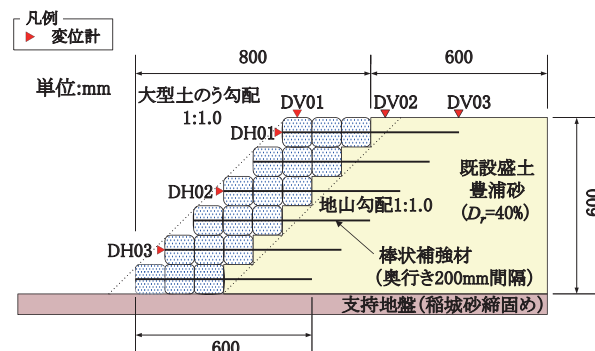


図3 模型実験概要図(ケース2)

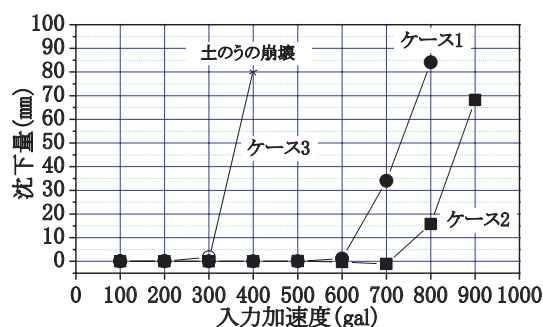


図4 各ケースののり肩部沈下量(DV01)

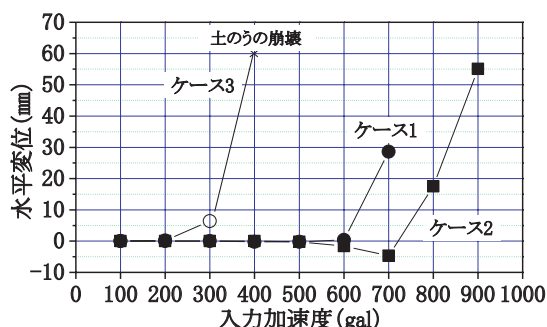


図5 各ケースののり肩部水平変位量(DH01)

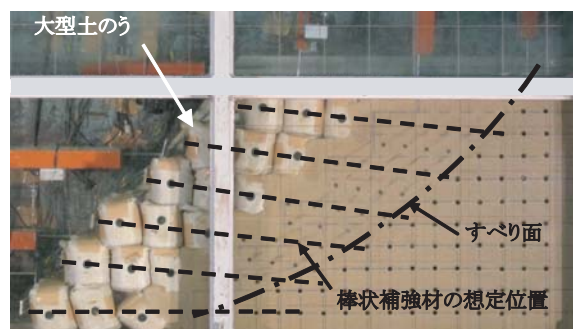


図6 加振後の状況(ケース2)

し大きな変位が生じた。図6に、ケース2における900gal加振後の模型の様子を示す。図より、盛土内にはすべり面が生じたものの、棒状補強材による拘束効果で、大型土のうも含めて変形が抑制されていることがわかる。ケース1を基準として考えた場合、ケース2は大型土のうの勾配は急であるものの、棒状補強材の配置密度が高いことから、双方の影響が相殺されてほぼ同程度の入力加速度で崩壊したものと考えられる。

上記の実験結果より、仮設時の安定性が確保できれば、棒状補強材の数量と長さ、及び大型土のうの勾配を組み合わせることで、施工性、経済性に配慮した構造を適切に設定することが可能であると考えられる。

(2) 棒状補強材の補強効果

仮復旧を想定したケース3では、400gal加振時に大型土のうが崩壊し、のり肩部の土のうが大きく斜め下方に変位して盛土が崩壊した。ケース3の400gal加振後の状況を図7に示す。400gal加振後ののり肩部の水平変位(DH01)で比較するとケース2では0mmであるのに対し、ケース3では100mm以上の大きな変位を生じ崩壊に至っている。この違いは、拘束が緩いのり肩付近で、棒状補強材で大型土のうを一体化することで、特に補強効果が明確に表れたことによるものと考えられる。

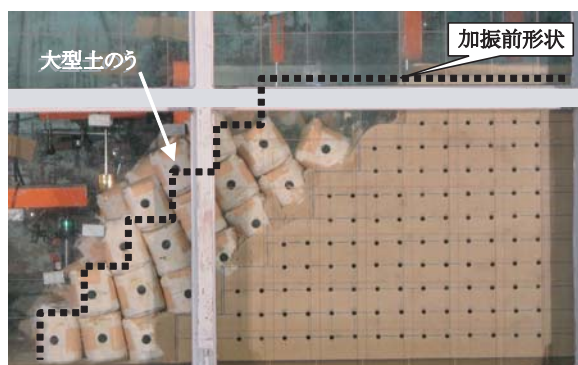


図7 加振後の状況（ケース3）

3.4 模型振動実験の検証解析

模型振動実験では、棒状補強材による補強効果や崩壊時のメカニズムを確認することができた。模型振動実験では、提案工法に対して2ケースを実施しており、いずれも盛土内で円弧すべりが発生し、円弧すべり起動力により補強材が引抜け、大型土のうが前面に移動する変形モードとなった。このことから、本構造の変形計算法として、ニューマーク法を適用した円弧すべり変形計算法⁵⁾を採用することとし、その妥当性について検討した。

ここでは、模型振動実験のケース2を対象として実物大スケールに換算したモデルを構築して解析を行い、実験結果と比較することとした⁶⁾。表2に試算条件、図8に解析モデル、表3に各土層の設計用値を示す。既設盛土材として使用する豊浦砂については、三軸圧縮試験

を行い検証解析における設計用値を設定した。

図9に、模型振動実験及び検証解析による円弧すべり面を示す。模型振動実験では、明確にすべり面が確認できた800gal加振後の想定すべり面を示している。また、検証解析においては、すべり面は支持地盤を通過する円弧形状となった。模型振動実験におけるすべり面の方がやや浅い円弧形状となったものの、どちらも全体すべりモードとなり円弧形状も良く類似している。また、降伏

表2 試算条件

項目	条件
盛土高さ	H = 6.0 m
大型土のうの勾配	1 : 1.0
盛土材	豊浦砂 (D=40%)
大型土のう	1.0m × 1.0m × 1.0m の立方体
補強材	中径棒状補強材 補強材径：170 mm 長さ：6.0 m 水平間隔：2.0 m 鉛直間隔：1.0 m (6段) 設置角度：水平
入力地震動	正弦波 5Hz, 20波 100gal から 100gal 刻みの段階加振

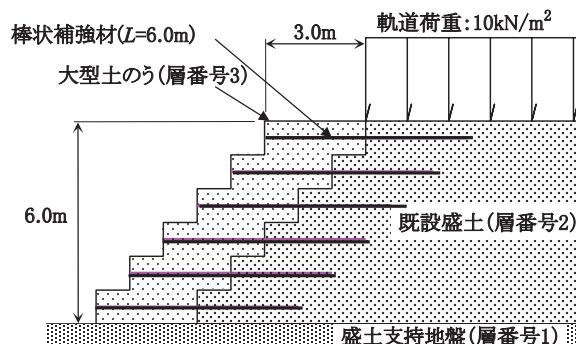


図8 解析モデル

表3 各土層の設計用値

層番号	飽和重量 (kN/m³)	湿潤重量 (kN/m³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m²)
1	18.0	18.0	40.0	22.0
2	16.0	16.0	35.0	3.0
3	10.0	10.0	35.0	500.0

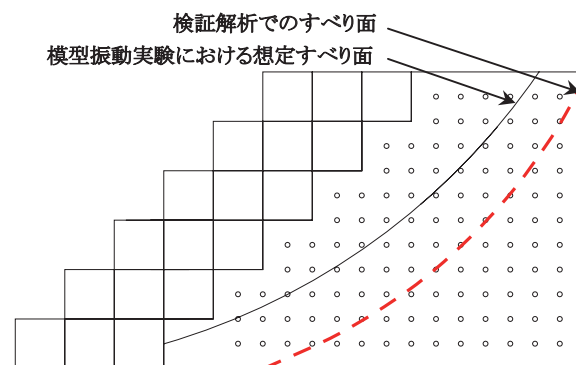


図9 模型振動実験における想定すべり面と解析結果の比較

特集：構造物技術

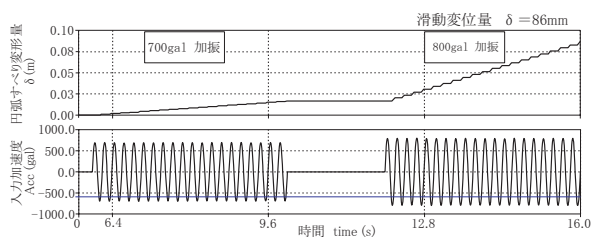


図10 検証解析における滑動変位時刻歴（700gal～800gal）

震度に関しては、模型振動実験では $k_y=0.7\sim 0.8$ 程度であり、解析結果は $k_y=0.65$ であることから、概ね検証解析で実験結果をシミュレーションできたといえる。

図10に検証解析における変形計算結果の時刻歴を示す。検証解析では模型振動実験と同様に、100galから100gal刻みの段階加振を設定しており、図では700galから800galまでの解析結果を示している。降伏震度 $k_y=0.65$ であるため、盛土の変形は700gal加振時から発生しており、800galで急激に変形量が増大した。800gal加振後の滑動変位量は86mmであった。模型振動実験における800gal加振後の累積変位量はDV03の位置で鉛直変位量1mm（実物大換算で10mm）であることから、解析結果の変形量の方が大きい。

これまでの検討結果を総合的に判断すると、円弧すべり変形計算法では降伏震度が若干低く算定され、その結果、変形量は大きく算定されるが、設計計算法では安全側の結果が得られていることから、設計の実務上においては問題ないと考えられる。

4. 被災盛土復旧工法の試設計

4.1 設計方針

前章では、提案工法の模型振動実験に対する検証解析を行い、設計法の妥当性について確認した。本章では、大型土のうを用いた仮復旧盛土に対し棒状補強材を併用する復旧工法に関する設計法を確立するため、試設計を実施した⁷⁾。

設計の前提条件として、想定する破壊・変形モードを定めた。模型振動実験の検証解析の結果、盛土の変形計算法として適用されている、ニューマーク法を用いた円弧すべり変形計算法を適用することとした。一方、模型振動実験では、大型土のう全体を一体化したブロックとみなした場合、盛土前面側に滑動するような挙動も確認できた。このことから、大型土のうのブロック体を擬似擁壁とみなし、擬似擁壁の滑動・転倒モードについて切土補強土擁壁の設計計算法である、2ウェッジ法を適用して試計算を実施した。その結果、滑動モードは円弧すべりモードの降伏震度とほぼ同程度であり、転倒モードは滑動モード及び円弧すべりモードの3～4倍程度の降

伏震度であった。このことから、転倒モードについては実質的に安定計算を実施する必要はないと考えられるが、試計算では大型土のうの形状や棒状補強材の仕様について全てのケースに対応できないことから、本検討では設計項目とした。表4に各破壊・変形モードにおける安定計算法を示す。本構造においては、大型土のうや盛土の部分的な抜出しや小崩壊が発生しないようにするため、構造細目として水平方向（線路方向）に横梁を設置し棒状補強材頭部と固定することで、大型土のう全体の一体化を図ることを前提条件とした。

復旧する盛土の要求性能については、被災前に有していた性能に戻す「原状復旧」と、被災前よりも性能を向上させる「強化復旧」がある。路線の重要度や他構造物の被災状況などを総合的に勘案して復旧のレベルを選択することとなるが、ここでは「原状復旧」を想定して、性能ランクⅡ（常時においては通常の保守で対応できる程度の変形は生じるが、L2地震動や極めて稀な豪雨に対しても壊滅的な破壊には至らない性能を有する土構造物）を復旧後の性能として設定した。図11に、被災盛土の復旧に関する提案構造の設計フローを示す。図より、まず復旧後の盛土に対する要求性能を決定し、復旧後の盛土の構成、形状を設定した上で、要求性能に対する照査を行う。また、図では試計算の実施例として検討項目等を示している。要求性能に対する照査として、施工時安定、安全性、復旧性の照査を行うが、それぞれの照査項目は設定する性能ランクに応じて設定するものとする。以後、図示したフローにしたがって試設計を実施した⁷⁾。

表4 設計に用いる安定計算法⁵⁾

破壊・変形モード	安定計算法
円弧すべり	円弧すべり計算法
土のうブロック体の滑動	2ウェッジ法による滑動計算法
土のうブロック体の転倒	2ウェッジ法による転倒計算法

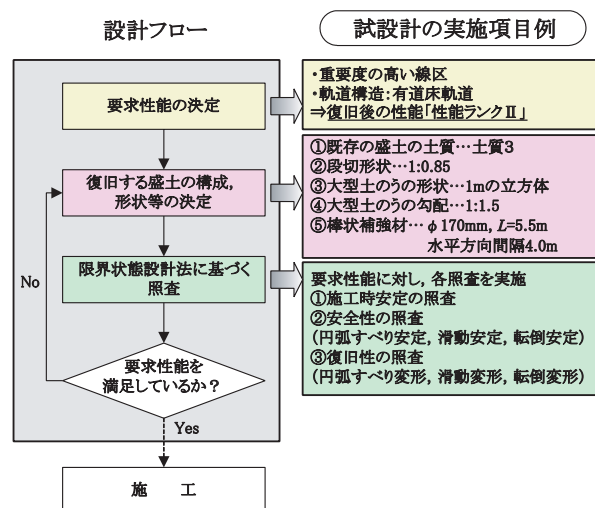


図11 被災盛土復旧の設計フローと実施例

4.2 設計条件

復旧性の照査において、L2地震時の変形量を算定するための設計地震動として、本検討では地盤種別をG2地盤とし、図12に示す土構造物用暫定波（G2m）を適用した。盛土の設計用値を定める際には、本来被災状況を勘案して逆解析を行い設定する方法や、被災地で実際に試料をサンプリングして土質試験を行う方法などが考えられるが、ここでは既設盛土及び大型土のう部分を土質3として設定した。表5に既設盛土の設計用値を示す。また、補強材については施工性や経済性を考慮し、中径補強材を選定した。

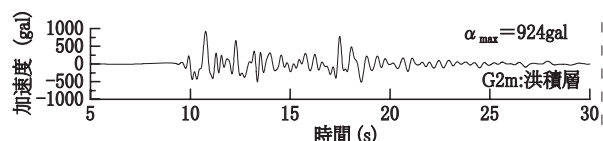


図12 入力地震動（土構造物用暫定波：G2m）

表5 既設盛土の設計用値

土質区分	単位体積重量 (kN/m ³)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (度)
土質3	16.0	6.0	35.0

4.3 試設計ケース

検討する試設計ケースを表6に示す。ケースAでは棒状補強材の水平方向の配置間隔を4.0mとし、盛土勾配を急勾配化したケースBでは水平間隔を2.0mと密に配置した。この他に仮設時の安全性を評価するため、補強材を使用しない場合（ケースC、ケースD）についても試算を実施した。図13、図14に試算モデル（ケースA及びケースB）を示す。ケースAは盛土勾配を1:1.5として被災前の盛土と同様の形状に復旧するものである。また、棒状補強材の打設角度については、大型土のうの配置を考慮したうえで、土のう同士を確実に拘束するよ

表6 試設計ケース

ケース	大型土のう	棒状補強材	備考
ケースA	勾配 1:1.5	L=5.5m, 水平間隔 4.0m	
ケースB	勾配 1:1.0	L=6.0m, 水平間隔 2.0m	
ケースC	勾配 1:1.5	なし	ケースAの復旧時
ケースD	勾配 1:1.0	なし	ケースBの復旧時

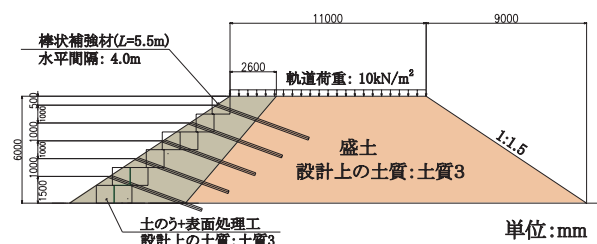


図13 試算モデル（ケースA）

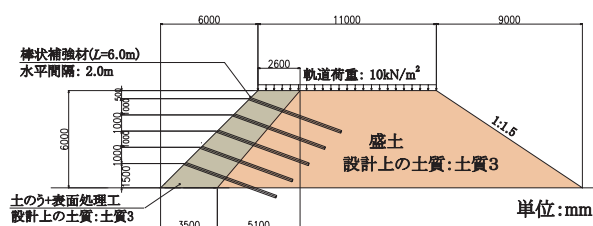


図14 試算モデル（ケースB）

うに設定するのが基本であるが、ここでは実施工を考慮した上で、打設角 $\theta = 20^\circ$ と設定した。

4.4 検討結果

(1) 復旧性の照査

復旧性（L2地震動）に対する照査の一例として、ニューマーク法による盛土体の変形量の計算結果を表7に、ケースAとケースBの円弧すべり変形量の時刻歴を図15に示す。復旧性に対する照査としては、円弧すべり安定、滑動・転倒安定のそれぞれに対して照査を行い、照査値の大きい方のモードを主たる変形モードとして採用する。今回の検討ケースでは、降伏震度、変形量とも円弧すべりモードが卓越する結果となった。表7にケースA～ケースDにおける照査結果を示す。盛土体の変位（盛土表面での沈下量の限界値）を変形レベル3（500mm）と定めたが、ケースAにおける変形量は472mm、ケースBでは490mmとなり、どちらも要求性能を満足する結果となっ

表7 試算結果

ケース	降伏震度 k_s	円弧すべり変形量 δ_b (mm)	限界値 δ_c (mm)	構造物係数 γ	照査値 $\gamma \cdot \delta_b / \delta_c$
ケースA	0.352	472	500	1.0	0.944
ケースB	0.358	490	500	1.0	0.980
ケースC	0.277	731	500	1.0	1.461
ケースD	0.144	1651	500	1.0	3.302

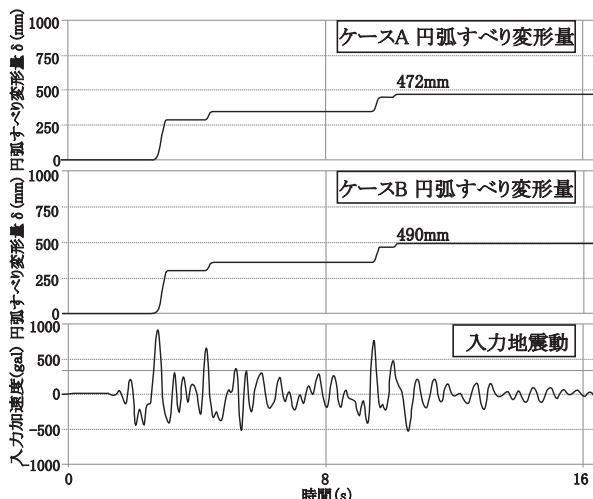


図15 試算結果（円弧すべり変形時刻歴）

特集：構造物技術

た。仮復旧として設計したケースC、ケースDと比較して、ケースA、ケースBで示した提案構造では、降伏震度が向上していることがわかる。また、ケースAとケースBで、円弧すべり変形量、降伏震度ともほとんど差異がみられない結果となった。模型振動実験でも、大型土のうの勾配と棒状補強材の補強量を変化させた2ケース間で同様の傾向がみられたことから、本試計算で適用した設計法の妥当性について定性的に示すことができたといえる。

(2) 安全性の照査

安全性の照査は、復旧性の検討と同様に円弧すべりモード及び滑動・転倒モードに対して照査を行った。①常時、②列車載荷時、③終局状態、④L1地震時の4種類の作用ケースに対してそれぞれ照査を行った。照査結果の一例として、表8にケースAの照査結果を示す。ここで表中の f_{rs} (円弧すべり抵抗係数) は所要安全率 F_s の逆数に相当する。表より決定ケースとしては、円弧すべり安定の作用ケース③ (終局状態) となった。なお、ケースBについてもケースAの照査結果と同様に、全ての照査値が1.0を下回り、性能ランクⅡの性能を満足する結果が得られた。

表8 安全性の照査結果 (ケースA)

照査項目	作用ケース	応答値 I_{ka} (kN・m)	限界値 M_{Ld}		照査値 $\gamma_i \frac{M_{Rd}}{M_{Ld}}$	判定
			f_{rs}	抵抗力 I_w' (kN・m)		
円弧すべり安定	①	1839.0	0.83	3343.7	$0.663 \leq 1.0$	OK
	②	2276.2	0.76	3660.5	$0.818 \leq 1.0$	OK
	③	2521.3	0.76	3934.9	$0.843 \leq 1.0$	OK
	④	4548.3	0.91	5544.3	$0.820 \leq 1.0$	OK
滑動安定	①	24.12	0.5	300.28	$0.161 \leq 1.0$	OK
	②	33.16	0.67	310.90	$0.159 \leq 1.0$	OK
	③	36.85	0.67	341.42	$0.161 \leq 1.0$	OK
	④	175.95	0.8	315.25	$0.698 \leq 1.0$	OK
転倒安定	①	146.77	0.5	3204.46	$0.092 \leq 1.0$	OK
	②	206.29	0.67	3281.90	$0.094 \leq 1.0$	OK
	③	230.04	0.67	3606.37	$0.095 \leq 1.0$	OK
	④	771.55	0.8	3341.71	$0.289 \leq 1.0$	OK

(3) 施工時安定性の照査

被災盛土の復旧にあたっては、すべり破壊面の脆弱部を除去して段切り処理する必要がある。図16に、施工時安定性の照査における試計算モデルを示す。図で示すように、のり面を段切り形状 (勾配 1:0.85) として円弧すべり安定計算法により照査を行った。試計算の結果、所要の施工時安定性を確保できることを確認した。

5. まとめ

被災盛土に対する復旧方法として、大型土のうと棒状補強材を併用した盛土復旧工法に対して、模型振動実験を実施し崩壊モードを検討した上で、検証解析及び試設計を実施した。本研究で得られた知見を以下に示す。

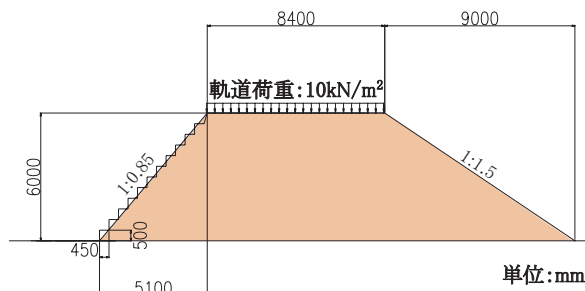


図16 試計算モデル (施工時安定性)

- ① 模型振動実験では、大型土のうを用いた仮復旧盛土に対して棒状補強材を併用することで、変位が抑制され、耐震性が大幅に向上することを確認できた。
- ② 模型振動実験結果に対し、ニューマーク法を適用した円弧すべり変形計算法を用いて検証解析を実施した。その結果、提案工法に対する計算法としての妥当性を確認できた。
- ③ 提案工法に対する試設計を実施し、棒状補強材による補強効果を定量的に評価することができた。また、円弧すべり計算法と2ウェッジ法を適用した、提案工法に対する設計法についてとりまとめた。

今後は、表面保護工や排水工を含めた構造物全体としての長期安定性について、実物大模型を用いた実証実験により評価を行い、提案工法の確立に向けて取り組んでいく予定である。

文献

- 1) 例えば、龍岡文夫：新しい補強土擁壁のすべて、総合土木研究所、2005
- 2) 後藤幸司、小島謙一：大型土のうと棒状補強材を併用した盛土の復旧に関する模型振動実験、土木学会第64回年次学術講演会講演概要集、pp.639～400、2009
- 3) 坂本寛章、小島謙一：模型実験による土のうと棒状補強材を用いた盛土の強化復旧対策に関する評価、第45回地盤工学研究発表会平成22年度発表講演集、pp.1491～1492、2010
- 4) 小島謙一、坂本寛章：土のうと棒状補強材による盛土の強化復旧対策に関する模型振動実験～盛土の勾配と補強材量～、第45回地盤工学研究発表会平成22年度発表講演集、pp.1005～1006、2010
- 5) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (土構造物)、丸善、2007
- 6) 矢崎澄雄、小島謙一、坂本寛章：土のうと棒状補強材による盛土の強化復旧対策に関する模型振動実験の再現解析、第45回地盤工学研究発表会平成22年度発表講演集、pp.1007～1008、2010
- 7) 矢崎澄雄、小島謙一、坂本寛章：土のうと棒状補強材を用いた盛土の強化復旧対策工法の設計方法に関する検討、土木学会第65回年次学術講演会概要集、pp.553～554、2010