

# 被災盛土の早期・強化復旧工法

中島 進\* 佐藤 武斗\*

## Rapid and Strengthened Retrofitting Method of Damaged Embankment

Susumu NAKAJIMA Taketo SATO

In Japan, due to severe rainfalls and massive earthquakes, there are many cases where embankment failure suspends the operation of railway services. Once an embankment is damaged, the embankment is requested to be retrofitted rapidly. In contrast, reinforcements of embankments, which usually lengthen retrofitting periods, are also recommended to avoid the repeats of the collapse against the future rainfall and earthquake. To answer these conflicting social requests, the authors develop a rapid retrofitting method with reinforcement of damaged embankment using the soil reinforcement and the gabion. This paper presents the process of the development of the procedure and an example of the applications.

キーワード：盛土，かご枠，地山補強，災害復旧

### 1. はじめに

盛土が地震・豪雨等で崩壊した場合、大型土のうなどで暫定的に盛土断面を確保した仮復旧の時点で列車運行を再開し、その後に必要に応じて仮土留め施工などを行いながら、本復旧工事が行われる場合がある（図1）。この場合、本復旧工事では仮土留めや監視、場合により徐行等の列車速度規制が必要となる。また、一度被災し現状復旧した盛土が再度災害で被災する事例もあり、盛土の復旧時に強化復旧が必要な場合もある。しかし、盛土を強化して復旧する場合、復旧工事が長期化し、列車の運行再開までに時間を要する。

そこで、図2に示すように、分割・ストック可能なかご枠を使用して盛土部を構築することで施工速度を向上させ、かつ地山補強材・排水パイプの後施工により列車運行を行いながら盛土の性能向上を可能とする被災盛土の早期・強化復旧法を開発した。本報告では、提案構造の特徴と、課題解決のために実施した性能確認試験、提案構造の設計・施工マニュアルの概要を報告する。

### 2. 提案構造の特徴

提案構造では相互に連結されたかご枠内に砕石やバラストなどを投入・転圧して被災により流出した盛土部分を復旧し、最終的に最上部は現行土構造標準に準拠して地盤材料により復旧する。単純に盛土により復旧する場合と比較して、砕石やバラスト充填による排水性の向上や、かご枠工の一体化による安定性の向上効果が期待され、通常の盛土よりも急勾配化（1：1程度）して盛土部を復旧することが可能である。また、必要に応じてか

\* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

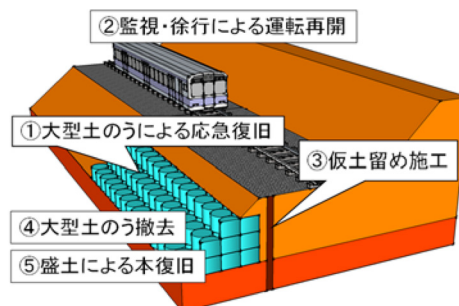


図1 従来復旧法の一例

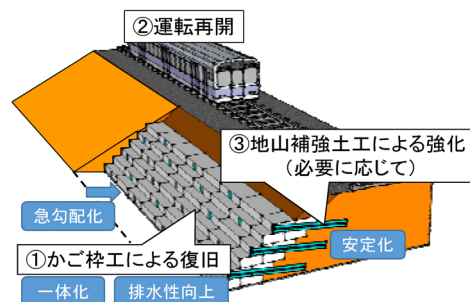


図2 提案構造の概要

ご枠内に保孔管を設置することで列車運行再開後に地山補強材をあと施工することも可能である。

一方で、(1) かご枠，地山補強材の併用による耐震性，耐降雨性の向上効果の確認，(2) 列車の繰り返し荷重に対する長期的な使用性の評価，(3) 施工法の確立などが課題であった。以下では、これらの課題に対する検討内容について述べる。

### 3. 耐震性・耐降雨性の評価

#### 3.1 実験概要

提案構造による耐降雨性，耐震性の向上効果を把握

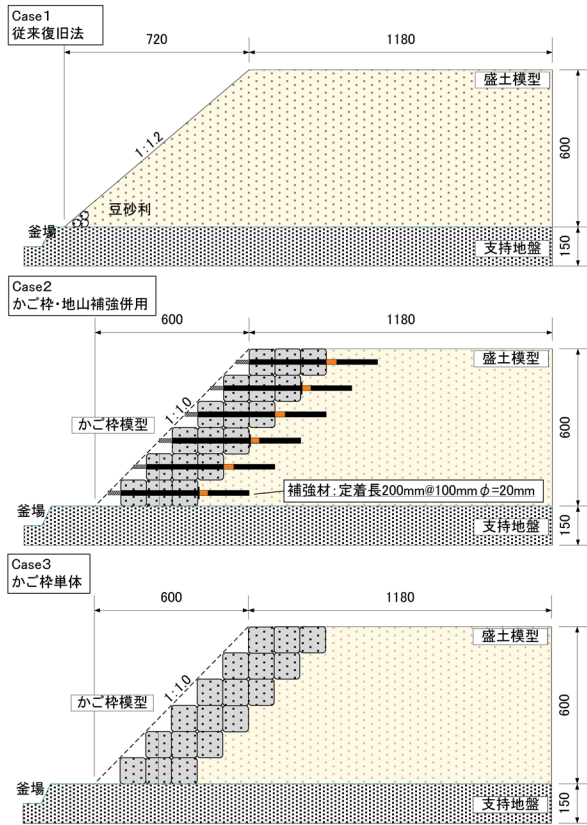


図3 実験模型の概要 (単位:mm)

表1 稲城砂の材料特性

礫分含有率	1.8%	地盤材料の分類記号	S-FG
砂分含有率	88.8%	土質区分	B群材料、土質3
細粒分含有率	9.4%	土粒子の密度	2.717
最大粒径	4.75mm	最大乾燥密度	1.685g/cm <sup>3</sup>
均等係数:U <sub>c</sub>	2.74	最適含水比	18.00%
内部摩擦角:φ'	37.3°	粘着力:c'	0.4kPa

※φ', c'はCD試験(拘束圧10、20、30kPa)により評価

するために、鉄道総研所有の中型振動台・降雨実験装置を用いて、図3に示す様に、Case1:従来復旧工法、Case2:かご枠と地山補強材を併用した復旧法(耐降雨性・耐震性向上)、Case3:かご枠単体復旧(耐降雨性向上)の3ケースについて実物の1/10程度の縮尺で性能確認試験を実施した。

性能確認試験では、最初に降雨作用を与え、盛土の変状や盛土内部の飽和度の上昇傾向から、耐降雨性を評価した。その後、水平方向に正弦波5Hz10波で加振し、最大加速度を約100galずつ増大させる形式で耐震性を評価した。

ここで、従来復旧工法および盛土部分は、縮尺率を考慮して稲城砂を最適含水比において締固めエネルギー $E_c=1.0E_c$ の最大乾燥密度に対して締固め度 $D_c=80\%$ の締固めにより構築した盛土により再現した。表1に盛土の物理・強度特性値を示す。盛土は山砂(稲城砂)により構築し、支持地盤は粒度調整碎石M-40を $D_c=95\%$ まで締固めた上に、表面に摩擦を確保した敷鉄板を敷設し、不透水条件とした。地山補強材については、直径φ200mm程度の地山補強材と、実際の盛土との剛性比が

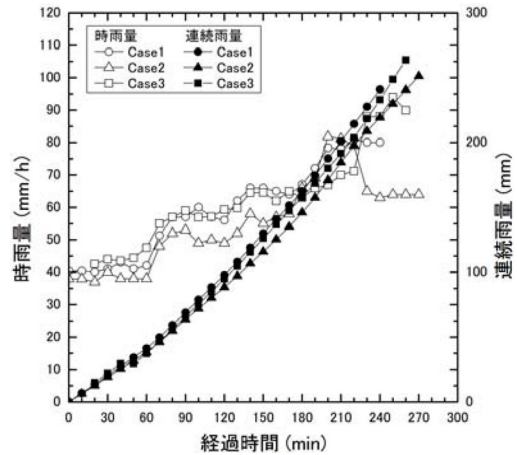


図4 連続雨量と時間雨量の関係

実物と同一になるように配慮して、樹脂により再現した。また、Case1については浸透水が法尻部から排水される際に、土粒子の流出が盛土の全体的な破壊に進行することを防止するために、法尻部に豆砂利を設置した。

### 3.2 耐降雨性の評価

耐降雨性については、降雨量を段階的に増大させる降雨試験で評価した。時間雨量40mm/hで試験を開始し、その後目標60mm/h、70mm/h、80mm/hに時間雨量を増加させた。各Caseにおける時間雨量と連続雨量の関係を図4に示す。

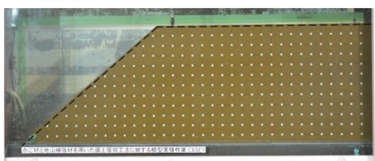
無対策のCase1では、連続雨量が187mmの時点でのり尻部に亀裂が生じ、その下部から盛土が崩壊した。崩壊範囲は図5に示すように、進行的に盛土上部に遷移し、連続雨量240mmの段階でのり肩に到達した。これに対して、Case2、Case3では、図6の通り、降雨による明瞭な変状は生じなかった。かご枠天端で計測した沈下量も、連続雨量250mmの段階でCase2では0.02mm、Case3では0.04mm程度と微少であった。

### 3.3 耐震性の評価

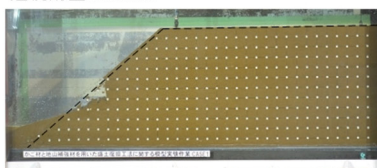
Case1では降雨試験において盛土が崩壊したため、Case2、Case3についてのみ振動実験を実施した。盛土内の飽和度は、降雨開始前には構築時の含水比から算出した値とほぼ同様で45%程度であったが、加振直前におけるのり肩付近の飽和度は、Case2で71%、Case3で84%程度であった。

各加振終了後の残留変位と最大加速度の関係を図7に示す。ここで、残留変位はかごの水平変位の最大値と、盛土天端の沈下量を示している。かご枠単体のCase3では、300galを超えると残留変位が増加し始めるが、かご枠と地山補強土工を併用したCase2では、600galを超過するまで残留変位量はほとんど増大せず、Case3と比較して耐震性も向上したことが確認された。降雨直

降雨散水開始から200分後(亀裂発生)  
連続雨量:187mm



降雨散水開始から220分後  
連続雨量:200mm



降雨散水開始から240分後  
連続雨量:240mm

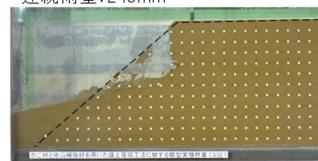


図5 盛土 (Case1) の崩壊状況(上:側面, 下:のり面部)

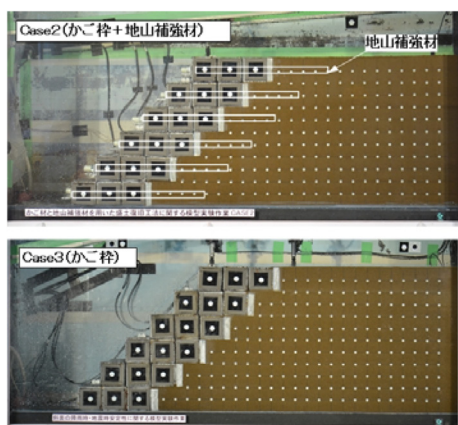


図6 連続雨量 250mm 降雨後の状況

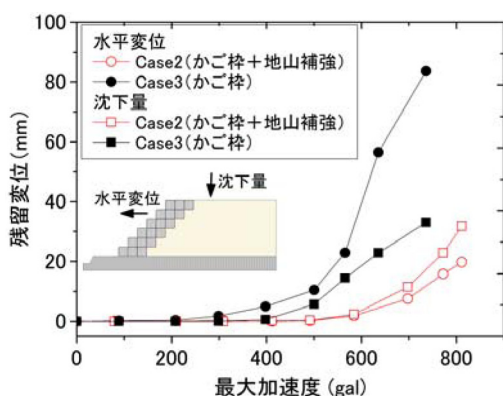


図7 最大加速度と残留変位の関係

後に大きな地震作用を受ける厳しい作用条件であるにもかかわらず、Case2, Case3 ともに盛土は崩壊に至らず、耐降雨性の評価試験結果と併せて、提案構造により、耐震性・耐降雨性の向上が実現可能なことを確認した。

#### 4. 試験施工・列車の荷重に対する沈下特性

##### 4.1 概要

耐震性、耐降雨性の向上効果が確認された提案構造に対して、その構造の詳細や施工方法を検討することを目的に、施工試験を実施した。施工試験は、かご枠と地山補強土工に分けて実施した。さらに、施工した提案構造の列車荷重に対する長期安定性や地山補強材打設前に列車運行を再開した場合に、列車荷重による保孔管の内空変位の有無を把握することを目的に、起振機試験およびその再現解析を実施した。

##### 4.2 施工試験

施工試験の状況を図8に示す。かご枠は亜鉛-アルミ合金めっきの鉄線で構成され、一般部は幅1m×高さ0.5m×長さ1.0m、地山補強材をあと施工する保孔管部は幅0.5mである。保孔管は塩ビ製で本施工試験では直径を300mmとした。かご枠は4段積みで、平均的な勾配は1:1.0であり、かご枠上部に高さ1m、のり面勾配1:1.5の一般盛土部を構築した。一般盛土部は模型実験と同様に稲城産の山砂(稲城砂)を用いて、鉄道構造物等設計標準・同解説(土構造物)に準拠して、1Ecの締固め試験における最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ に対して、90%以上を施工の管理基準値として盛土を構築した。

提案構造の施工手順は図8に示す通りであり、崩壊土砂の撤去(整地)、かご枠組み立て、中詰・転圧、上部の盛土部施工、必要に応じて地山補強土工を施工して提案構造が完成する。列車運行は、盛土部の施工が完了した段階で可能となる。地山補強材は保孔管をかご枠内に内蔵しておくことで、任意の時期に施工可能となる。



図8 提案構造の施工手順

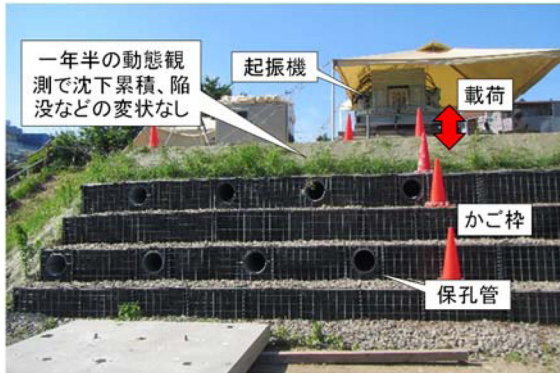


図9 起振機試験の状況

表2 試験ケース一覧

	起振力 (kN)	死荷重 (kN)	周波数 (Hz)	繰返し回数 (万回)
Case 1	20	125	8	25
Case 2	30			25
Case 3	40			25
Case 4	80			5

### 4.3 起振機試験

1年半の動態観測後に、列車荷重に対する提案構造の長期安定性を評価するための起振機試験を実施した。起振機試験では、鉄道総研所有の载荷方向可変式起振機を使用した。本装置は、列車荷重による繰返し荷重を再現可能な装置で最大起振力 80kN、振動数 1～30Hz での载荷が可能である。起振機試験の実施状況を図9に示す。計測項目は盛土・かご枠の沈下量及びかご枠に作用する圧力とし、沈下量はレベル測量とトータルステーションにより、かご枠に作用する圧力は土圧計により計測した。起振機は盛土のり肩から 2.5m の位置を軌道中心として設置した。起振機の設置には、起振機を軌道に締結する必要があるため、スラブ版を用いて設置した。しかし、本復旧法は主に有道床軌道の在来線を対象としているた

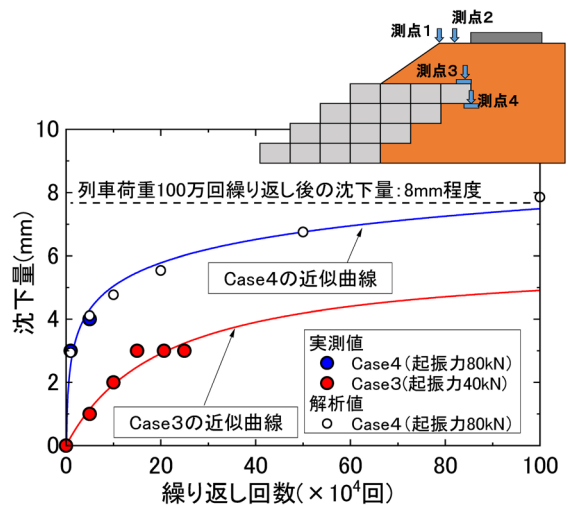


図10 繰返し回数と沈下量の関係

め、盛土天端にバラストを 20cm 程度撒き出して有道床軌道を模擬しており、その上にスラブ版を設置した。試験ケースの一覧を表2に示す。起振機試験では、片振幅の起振力を 20～80kN に変えて実施した。Case 4 の片振幅 80kN は現存する列車荷重の中で最も重い条件に相当する。

測点2の沈下量と繰返し荷重の関係を図10に示す。図中の Case 3 の結果には、目安として実験結果に合わせた近似曲線を示した。Case 3 では载荷回数の増加に伴い沈下量が収束する傾向にある。しかし、Case 4 では周辺環境への配慮から5万回(1日90本の列車走行がある線区では3年程度の列車走行回数)までの繰返し载荷で打ち切ったため、沈下が収束していないものと考えられる。そこで、起振機試験を再現可能な数値解析により、列車の繰返し荷重により発生する残留沈下量を評価した。

### 4.4 解析的検討

本研究の解析的検討では、以下の手順により列車荷重の繰返し载荷による盛土の沈下量を算定した。まず、(1)列車荷重による盛土内の応力増分を有限要素解析により算定し、(2)応力増分を用いて盛土の累積沈下特性から累積損傷度理論に基づき盛土の剛性低下を評価し、(3)低下した盛土の剛性を用いて、列車载荷時の盛土の沈下量を有限要素解析により算定する。

まず、図11に示す解析メッシュにより、有限要素解析を実施した。解析対象は、試験施工した被災盛土の線路直角方向の断面である。境界条件は、解析対象の下端を変位固定境界とし、右端を鉛直ローラーとした。列車荷重は、起振機試験の Case 4 に基づき設定しており、死荷重 85.2kN と起振力 80kN の和を 2.98m のレール2本で支持していることを考慮し、スラブの天端に  $27.72\text{kN/m} = (85.2\text{kN} + 80\text{kN}) / (2.98\text{m} \times 2)$  の静的荷重を入力した。再現解析に使用した地盤材料の剛性および累積変形特性は、土構造標準に記載された土質分

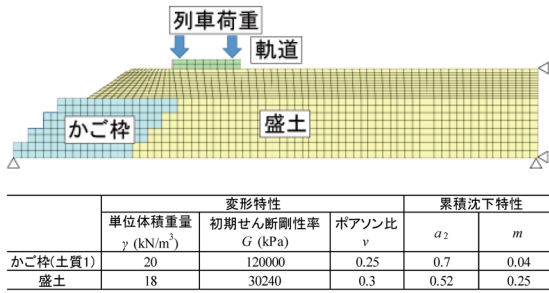


図 11 解析モデルおよび解析パラメータ

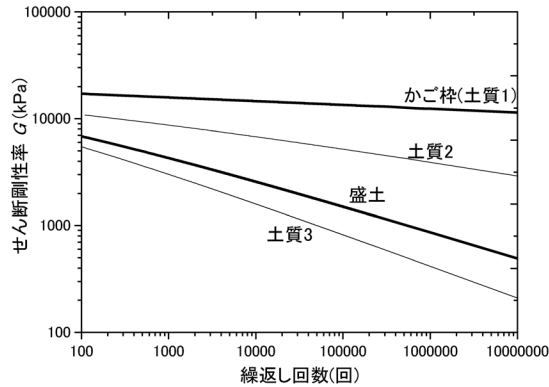


図 12 せん断剛性の低下特性

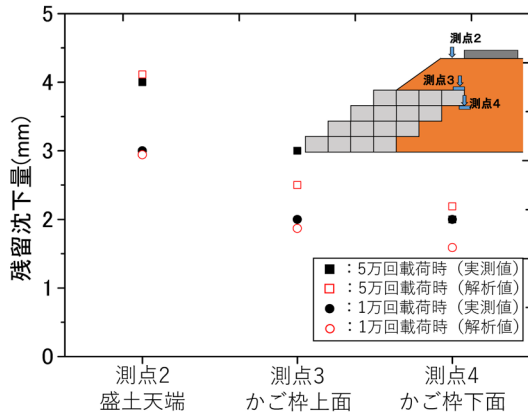


図 13 Case4 の再現解析結果

類ごとの標準値をもとに、バラストで充填されたかご枠工を土質1、盛土は土質3として設定した。累積沈下特性については、起振機試験の結果に整合するように図11の通りに設定し、図12に太線で示すように繰返し荷重回数とせん断剛性率の関係を算定した。図中に合わせて、土構造標準における土質2、3の変形特性を併せて図示している。盛土については、在来線の盛土材料として使用されることの多い土質2から土質3の間に位置しており、土構造標準に準拠して構築した盛土として、累積変形特性の設定は概ね合理的と考えられる。

設定したパラメータを用いてCase4の1万回および5万回荷重時における解析結果と実測した沈下量の比較を図13に示す。解析値は、測点2～4の計測点において実測の沈下傾向を概ね再現している。測点2は列車荷重を載荷している軌道に近いので、以下の解析では測点

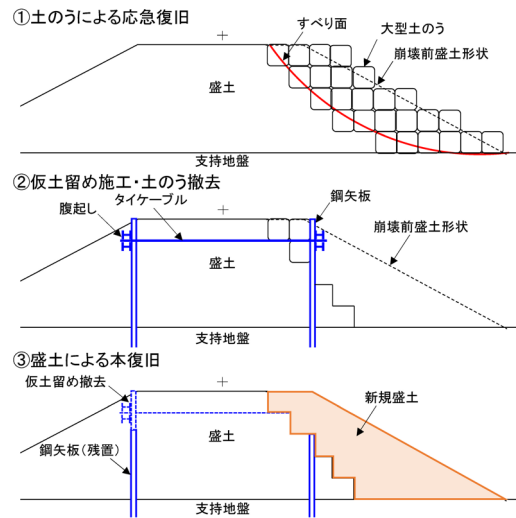


図 14 被災断面の概要と従来復旧法の施工手順

2の沈下量に着目し、解析では100万回荷重時の剛性低下を評価して提案構造に発生する残留沈下量を評価した。この繰返し回数は、1日90本の列車走行がある線区では3年程度の列車走行回数に相当する。地表面の測点における荷重回数と沈下量の関係は図10に示している。実測値に対して、解析値は概ね整合する結果となっており、荷重回数が多くなるにつれて、沈下量が収束する傾向にある。100万回荷重時の解析値は8mm程度であり、有道床軌道の整備基準値および頻度（基準値：20-30mm程度、頻度：最低年1回程度）と比較すると微小な値である。起振機試験では軌道直下にかご枠工が施工される厳しい条件で実施したが、列車荷重により提案構造に発生する沈下量は微小であることを確認した。

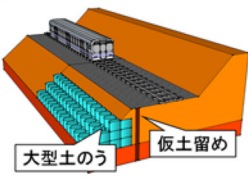
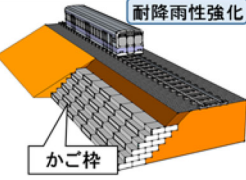
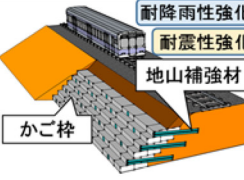
## 5. 設計・施工マニュアルと施工例

提案構造の設計・施工法を取りまとめ、「かご枠と地山補強材を用いた盛土の早期強化復旧工法 設計・施工マニュアル」を作成した。作成した設計・施工マニュアルに基づき、実際に被災した高さ6mの盛土断面(図14)を対象として、従来復旧工法、提案工法で工費・工期の比較を行った結果を表3に示す。提案工法については、降雨補強を意図したかご枠単体の構造と、降雨・耐震補強を意図したかご枠と地山補強材併用の構造の2パターンで試算を行った。

従来の復旧法において、土のうの撤去・盛土の再構築にあたり、仮土留めが必要な場合と比較すると、かご枠単体で復旧した場合、工事費が6割減、地山補強で強化復旧した場合でも3割減である。工事完了までに要する期間についても、仮復旧後に手戻りを要する従来復旧法と比較して、3割減となる。

また、災害後に速やかに構造の設定が可能のように、

表3 提案構造と従来復旧法の工期・工事費の比較

復旧工法	従来復旧工法 (大型土のう)	かご枠による復旧工法	
		かご枠	かご枠+地山補強土工
概要			
復旧概要	大型土のう:250袋 仮土留め:Ⅲ型×50枚	かご枠: B1.0m×H0.5m×320m	かご枠: B1.0m×H0.5m×320m 地山補強材: φ133mm×15本、L=7.0m、
総工事費率	1.00	0.40	0.71
工期	列車の運行再開	9.7日(0.78)	12.5日(1.00)
	工事完了	17.6日(1.41)	27.4日(2.19)

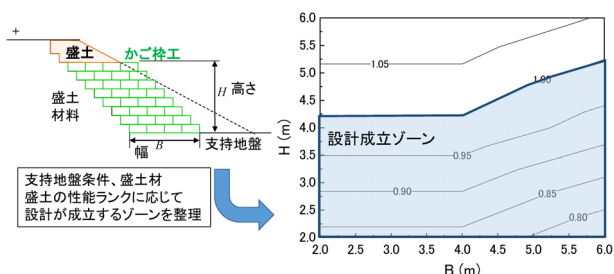


図15 作成したノモグラムの例



図16 豪雨で崩壊した盛土の復旧事例

幅と高さ、支持地盤条件と既設盛土の材料に応じて設計成立条件を整理したノモグラムを盛土の性能ランクごとに作成し、マニュアルに記載している(図15)。作成したマニュアルは、鉄道技術推進センターの専用HP(<https://railscope2.rtri.or.jp/TechCenterHomeMenu.asp>)に掲載している。

図16は豪雨で崩壊した集水地形における鉄道盛土の復旧に提案構造を採用した例である。同事例では、高さ7.7m程度の崩壊範囲のうち、下部2mをかご枠で復旧し、その上部は層厚管理材を敷設した盛土工により復旧した。列車運行再開後、保孔管内に地山補強材を施工して復旧工事を完了した。

## 6. まとめ

近年の豪雨の激甚化や災害後における鉄道の早期復旧への社会的要請にこたえ、鉄道のレジリエンス向上に向けて開発した盛土の早期強化復旧工法に関して、その概要と開発過程での検討内容を取りまとめた。災害での構造物復旧を早期化するためには、本検討で用いたストック可能なかご枠の様に、災害で被害が発生することを想定した「備え」が重要と考えられる。

また、保孔管の活用により、かご枠による降雨補強、地山補強の施工による耐震補強を段階的に行うことも可能と考えられる。同工法の普及も含め、鉄道のレジリエンス向上を低コストで実現するための研究開発を今後も進めていきたい。

同工法の開発において実施した試験施工や作成した設計・施工マニュアルは、岡三リピック(株)、小岩金網(株)、ライト工業(株)との共同研究の成果である。

## 文献

- 1) 佐藤ら：RRR 補強盛土による鉄道盛土構造物の災害復旧事例—平成25年山口・島根県豪雨災害におけるJR山口線の被害と復旧工事—, 地盤工学会誌, Vol.64, No.4, pp.20-23, 2016
- 2) 丸善：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物 平成25年改編, 2013
- 3) 館山ら：列車の繰り返し載荷による盛土の残留沈下量の算定方法, 鉄道総研報告, Vol.20, No.12, pp.43-48, 2006