

技術報文

大規模土砂災害による被災現場の効率的な復旧法の検討

(独) 土木研究所 施工技術チーム 久保 哲也、森 芳徳、宮武 裕昭

1. はじめに

2009年8月11日に発生した駿河湾地震により被災した東名高速道路牧之原SA付近や、2007年3月25日に発生した能登半島地震により被災した能登有料道路のように、大規模な道路土工構造物が地震等により甚大な被災を受ける場合がある。このような被災現場では、交通機能が遮断され、復旧までに時間を要することで物流に支障を来すことや集落の孤立等の社会的影響が拡大することがある。このような場合、被災によって遮断された交通機能は早期に回復することが求められ、復旧には被災現場の状況や被災度に応じて交通機能を効率よく且つ迅速に回復できる工法の選定が必要である。

本研究では、過去の被災現場で採用された応急復旧等について調査(以下、実態調査と称す)し、道路土工構造物における大規模土砂災害を対象とした効率的な復旧法について検討した。



a) 牧之原 SA 付近¹⁾



b) 能登有料道路²⁾

写真-1 被災現場例

2. 災害復旧の進め方(道路震災対策便覧)³⁾

日本近郊では、多くのプレートが重なり合っていることから、古来より大小様々な地震が日本の各地で発生している。特に昨今多発している大規模地震の発生は、インフラに甚大な被害をもたらす社会生活基盤等に影響を及ぼしている。そこで、大規模地震発生時における道路の被害の軽減、ならびに被災後の道路交通の確保に資する技術的な手引きとして「道路震災対策便覧」が整備された。

道路震災対策便覧「震災復旧編」(以下、便覧と称す)では、道路が被災した場合、①緊急調査および緊急措置(第1段階)、②応急調査および応急復旧(第2段階)、③本復旧のための調査および本復旧(第3段階)の3段階の構成で災害復旧の進め方が示されている。震災復旧の第1段階では、重大な二次災害につながる可能性のある被害に対し、通行規制および被害拡大防止措置等の緊急措置が実施される。第2段階では、被災した道路構造物における損傷の進行状態を踏まえた二次災害防止対策や、道路交通確保の緊急性に基づく応急復旧が実施される。応急復旧の方針を定める際には、被災状況および被災度、一次災害に伴う二次的影響、応急復旧に対する制約条件が考慮され、応急復旧工は、応急復旧方針のもとに、設計条件(盛土構造、地形・地盤の状況、迂回路の有無等)、施工条件(資材、機材等の搬入および確保等)、工期ならびに工費を加味して選定される。その際、応急復旧は本復旧に至るまでの復旧過程の1つであることから、本復旧を実施する場合には手戻りとならないような応急復旧工の選定が必要となる。便覧では応急復旧の目安として、大規模な被災現場では、全面通行止めとし迂回路や仮設橋梁等による応急復旧を、中規模な被災現場では、車線の規制を行い、被災形態に応じた土留対策を行い、盛土・舗装

等による応急復旧の実施が示されている。震災復旧の第3段階では、地域復興計画を踏まえた道路施設の機能確保上、必要な耐震性能水準に基づく本復旧工事が実施される。本復旧工の選定では、応急復旧工の場合と同様に被災形態や被災度をもとに設計条件、施工条件、経済性、工期および環境・景観性を考慮して本復旧工が決定される。以下では、便覧の考え方を参考に実態調査の結果について整理する。

3. 実態調査

(1) 応急復旧工

実態調査では、被災現場の状況および被災度、被災現場で採用された応急復旧や本復旧の実態等について、平成7年～平成23年の期間を対象として、主に災害報告書、災害事例集および専門雑誌等⁴⁾等を用いて道路盛土災害の被災事例を93件収集して整理した。

収集した被災事例は、道路土工構造物の安定性や走行性等を考慮した応急復旧のための被災度判定⁵⁾を参考に、**図-1**に示す「完全崩壊」、「部分崩壊」および「部分変状」の被災形態に分類した。分類した被災形態は、完全崩壊が44%、部分崩壊が31%および部分変状が25%の割合であった。

図-2は、被災現場で採用された応急復旧工の割合を示したものである。被災現場で採用された応急復旧工は、主に迂回路が30%、次いで大型土のう工が16%、片側交互通行（交通規制）が12%、切土・盛土・土砂撤去といった地盤材料のみで施工した応急復旧（以下、土工と称す）が8%、仮設橋梁が6%であった。

応急復旧工を選定する際には、設計条件として盛土構造や地形状況が考慮される。そこで、収集した被災事例について各々整理すると、盛土構造については、完全崩壊および部分崩壊とも片盛土での被災が90%程度であり、被災事例の多くは片盛土で被災していたことを確認した。地形条件（河川沿い、沢地形、山地、平地）においては、完全崩壊および部分崩壊とも山地での被災が各々52%と67%であり、被災事例の多くは山地で被災していたことを確認した。ここで、本研究は、大規模土砂災害による被災現場の復旧法について検討していることから、部分変状については整理の対象から除外した。

図-3、**図-4**は、多くの被災件数が確認された片盛土および山地で採用された応急復旧工の割合を示したものである。採用された応急復旧工の割合は、迂回路および片側交互通行が大半を占めており、交通機能の確保が最優先されていたと推察できる。一方、迂回路や片側交互通行による応急復旧が困難であったと想定される被災現場においては、大型土のう工による応急復旧が全体の15%程度の割合を占めており、最も多く採用されていた。片盛土および山地で採用された応急復旧工を被災形態毎に整理すると、完全崩壊では、迂回路および片側交互通行の双方合せて

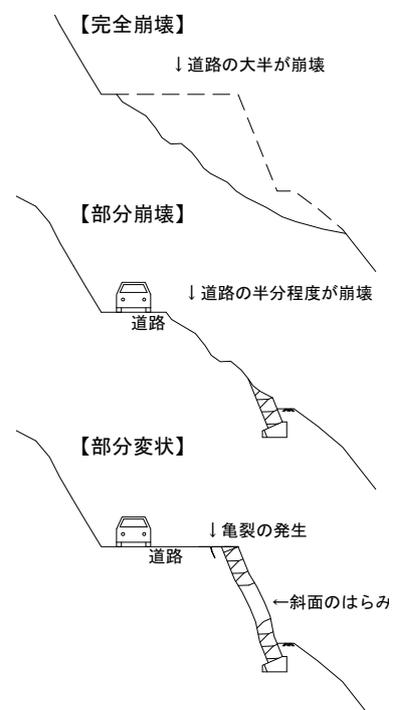


図-1 被災形態の分類

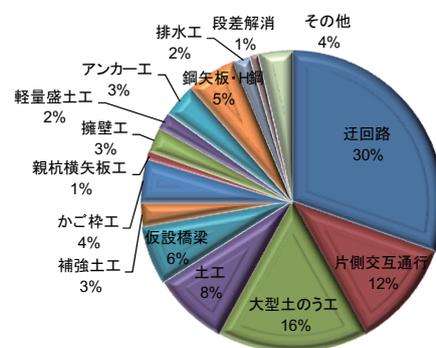


図-2 応急復旧工の分類

35%程度の割合を示し、次いで大型土のう工（約 17%）、土工（約 15%）、仮設橋梁（約 11%）による応急復旧工が採用されていた。一方、部分崩壊では、迂回路および片側交互通行の双方合せて 50%程度の割合を示し、次いでH鋼・鋼矢板（約 15%）、大型土のう工（約 13%）、擁壁工（約 10%）による応急復旧工が採用されていた。

被災現場で採用された応急復旧工における片盛土、山地、および被災形態の各相関について整理すると（図-5）、片盛土および山地で採用された応急復旧工は、相関係数が 0.9 となり強い相関があることを確認した。一方、各被災形態の相関については、片盛土および山地とも相関係数が 0.4 となり、やや相関があることを確認した。これは先に示したように、採用された応急復旧工は被災形態で異なる特徴を示しており、完全崩壊では土工、仮設橋梁が、部分崩壊では鋼矢板・H鋼が採用されていたことによるものと考えられる。完全崩壊では損失した交通機能の早期回復を目的に切土等による迂回路の設置または仮設橋梁等による応急復旧工が、部分崩壊では残存した片側車線の交通機能を維持するために、崩壊の進行を防ぐことを目的に鋼矢板・H鋼等による応急復旧工が選定されたと考えられる。

迂回路や片側交互通行による応急復旧が困難であったと想定される被災現場で最も多く採用された大型土のう工に着目し、その用途について整理すると、完全崩壊では主に抗土圧構造物として大型土のうが使用されており、その割合は 80%程度であった。一方、部分崩壊では主に崩壊法面の被害の拡大防止を目的としたのり面保護で使用されており、その割合は 75%であった。また、大型土のう工の復旧高さについては、完全崩壊では 10m 以上の高さが、部分崩壊では 5m 未満の高さが多かった。完全崩壊の現場では、道路が全損しており交通が完全に遮断されている場合が多く、一方、部分崩壊の現場では 1 車線程度の交通は確保されている。大型土のうは前者においては喪失した交通の確保のための抗土圧構造物として採用され、後者においては被害の拡大防止、のり面保護として採用されていると推測される。また、仮復旧から本復旧への移行において、完全崩壊の場合は大型土のうの撤去により一時的とはいえ再度交通機能が喪失されるのに対して、部分崩壊の場合では被災しなかった 1 車線程度の交通機能は確保したままの移行が可能である。従って、大型土のうを残置することによる手戻りの回避、交通機能の確保については、完全崩壊の現場において特にニーズが高いものと考えられる。

大型土のう工による応急復旧が、交通機能の早期回復に対する有効性について検証した。図-6は被災延長 W（道路延長方向）と応急復旧日数 N の関係を示したものである。ここで、本調査では応急復旧時の土砂撤去量や土工量等の情報がほとんど得られなかったため、情報が得られた被災延長で整理することとした。被災延長と応急復旧日数との相関性は、被災延長が 100m 以内

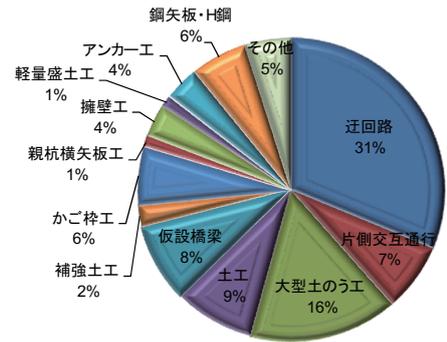


図-3 応急復旧工の分類（片盛土）

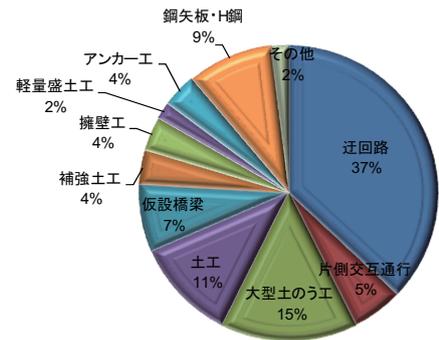


図-4 応急復旧工の分類（山地）

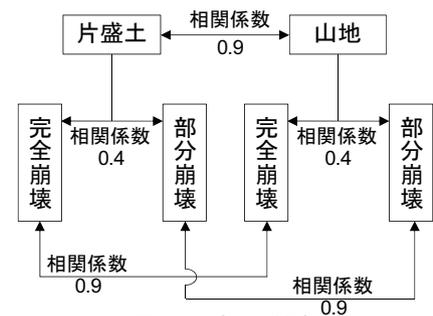


図-5 相関係数

で、応急復旧日数が 50 日以内の範囲では相関係数が 0.65 となり、やや相関があると考えられる。

被災延長と応急復旧日数は、近似直線 $N=0.4W$ の関係にある。大型土のう工は近似直線 $N=0.4W$ より若干下回っている現場が多く、大型土のう工による応急復旧は早期の交通機能回復に有効であったと推察する。しかし、大型土のう工で応急復旧された被災現場の多くは、その後、主に擁壁工や補強土壁工等により本復旧されているケースが多数見受けられ、本復旧の際には、大型土のうの撤去といった手戻りが生じていたと考えられる。したがって、手戻りが生じない復旧法とすることができれば早期の本復旧が可能になると考えられる。

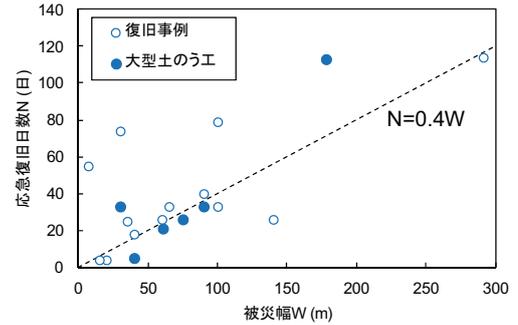


図-6 被災延長と応急復旧日

(2) 被災現場の制約条件

片盛土および山地の被災現場で応急復旧工を選定する際に考慮された設計条件や施工条件を把握するために、被災現場で生じた制約条件（以下、制約条件と称す）等について整理した。制約条件は、表-1 に示す項目に分類した。図-7 は、表-1 における各カテゴリの件数（完全崩壊）を示したものである。被災現場では、施工、交通機能および二次災害等に関する制約条件が多く生じていた。その内訳は主に急峻な地形や狭隘な箇所での施工、交通機能の確保およびすべり・崩壊等の誘発防止であった。整理の結果、被災現場で

表-1 被災現場での課題等

項目	主な内容（一部抜粋）
施工に関する条件	急峻な地形・狭隘な箇所での施工が困難 施工機械や材料の搬入が困難
地盤に関する条件	支持地盤の強度不足、支持層が深い
崩壊土砂に関する条件	仮置き場がない、残土処分場がない 崩壊土砂の処理方法
建設資材に関する条件	現地発生土・殻・部材等の再利用
交通機能に関する条件	迂回路の確保が困難、車線の確保 被災地域の孤立
地下水等の水に関する条件	地下水位の低下、排水能力の設定
二次災害等に関する条件	新たな崩壊の誘発、強化復旧
環境・景観に関する条件	緑化、国立・国定公園への影響

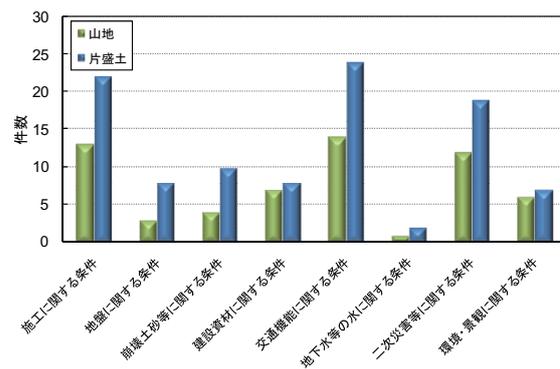


図-7 制約条件

多く確認された制約条件は、応急復旧を選定する際に最優先される事項や、応急復旧工事を行う際に必須となる制約条件であったことを確認した。したがって、迂回路や片側交互通行による応急復旧が困難であったと想定される被災現場においては、現地での制約条件を検討した結果、大型土のう工が多く採用されたと考えられる。特に施工に関する制約条件では、バックホウ等の掘削機があれば狭隘な箇所でも一連の復旧作業が可能で施工性に優れること、特殊な技能や機械を必要としないこと、また、施工時において、道路幅への影響といった空間的な制限がないことなど現場の状況に柔軟に対応でき工数を削減できることから大型土のう工による応急復旧が有効であったと考えられる。

(3) 効率的な復旧法の検討

本研究では、文献調査により得られた応急復旧としてのニーズが高い大型土のう工による応急復旧工に着目した。当研究では、道路管理者や施工業者を対象として大型土のう工による応急復旧に関するヒアリングを実施した。その結果、応急復旧で構築した大型土のう工は撤去せずに残

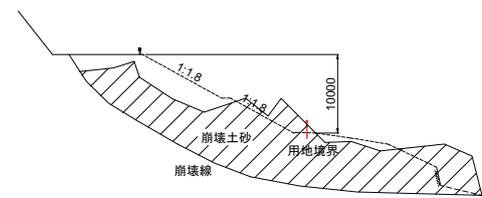
置させた状態で本復旧の施工が可能となれば早期の復旧（手戻りとならない本復旧）に有効であることが確認できた。そこで筆者らは、文献調査より確認された破壊モード等を参考に効率的な復旧法について比較検討した。

図-8(a)は、想定した大規模土砂災害における被災前の断面（点線）と想定した被災後の崩壊状態（実線）を示したものである。想定した被災前の断面は、盛土高が10mの高盛土である。本線は完全崩壊し、崩壊土砂は泥濘化し広範囲におよんでいる。このような被災現場では、被災直前における土工構造物内の水位は上昇しており、盛土材は高含水比の状態であったことが想定される。そのため、崩壊土砂は山側から谷側へと含水比が増加し、末端付近では泥濘化した状態であると考えられる。そこで筆者らは、比較的含水比が低い山側において復旧作業を図ることで、①作業効率の低い泥濘化した土砂の撤去作業が削減でき、②崩壊土砂の撤去および構築に要する土工量が削減でき、その結果、工期の短縮が図れ、応急復旧に求められる交通機能の早期回復に有効であると考えた。

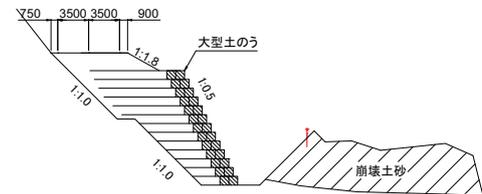
図-8(b)、(c)は、文献調査より完全崩壊の応急復旧工で多く採用されていた大型土のう工と土工で応急復旧した場合の断面形状を示したものである。山側での復旧作業を考慮して大型土のう工は法面勾配を1:0.5とし、土工では1:1.2とした。ここで、法面勾配の設定について、大型土のう工では、「耐候性大型土のう積層工法 設計・施工マニュアル」⁶⁾に記載されている標準断面図集に記載されている法面勾配1:0.5を参考とした。但し、1:0.5については、所定の安全率を確保するために補強材

(ジオテキスタイル)を併用することとした。1:1.2については、単位体積重量 $\gamma=19.0\text{kN/m}^3$ 、粘着力 $c=10.0\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=30^\circ$ の盛土材での復旧を想定し、余震($k_h=0.16$)を考慮した条件において安全率 $F_s=1.0$ が満足できる法面勾配とした。この結果、法面勾配を1:0.5とすることで崩壊土砂の撤去・掘削土量を法面勾配1:1.2に対し22%削減でき、構築時の土量においては14%削減できることが算出された。

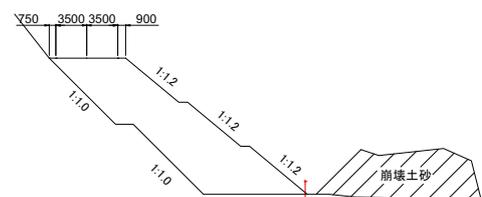
図-8(d)、(e)は、本復旧の断面形状例を示したものである。大型土のうは、本設構造物としては耐候性に課題があり、最大で3年程度の耐久性しか有していない。そこで、本復旧では大型土のうの紫外線対策として、大型土のうの前面に腹付け盛土を構築することで大型土のうの劣化対策を施すこととした。応急復旧の構造体と腹付け盛土とは、応急復旧で敷設されている補強材と腹付け盛土に敷設する補強材とを連結することにより一体化を図る構造とした。図-9に連結法を示す。また、腹付け盛土の壁面勾配を応急復旧時と同様な1:0.5とすることで、本復旧時にお



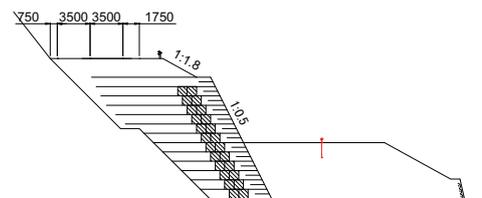
(a) 被災前、被災後の断面形状



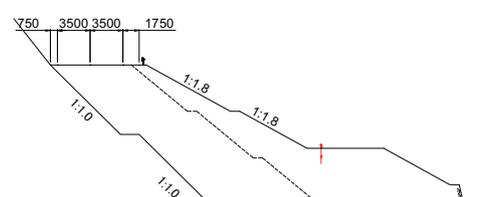
(b) 大型土のう工による応急復旧



(c) 土工による応急復旧



(d) 大型土のう工による本復旧例



(e) 土工による本復旧例

図-8 復旧方法

る土工量の削減を図った。この構造は、腹付け盛土で施工することが可能となるため、応急復旧で解放した交通機能を阻害することなく本復旧工事が行えると考えられる。一方、土工による本復旧は安定した盛土勾配を確保するために原形と同様な法面勾配 1:1.8 とした。本復旧における構築時の土工量は大型土のう工と比較すると 4% 程度削減できるが所定の計画高さ付近では施工ヤードを確保するために交通規制が生じる。

実態調査より、大規模土砂崩壊の被災現場において、大型土のう工による応急復旧は多くの被災現場で用いられており、応急復旧で構築した大型土のう工を残置させた状態で大型土のうの前面に腹付け盛土を構築する本復旧は早期の復旧に有効であると考えられる。そこで本研究では、①速やかに応急復旧を図る、②本復旧の際には手戻りが生じない復旧方法とする、③本復旧時には本設構造物としての性能を有する、④応急復旧時の構造体により本設構造物の安定性を損なわないことを開発目標とした。以下では、検討した大型土のう工を残置させた状態による本復旧の適用を検討するために、近接した地山や嵩上げ盛土を有するような実現場を想定した本復旧の変形挙動や安定性能に及ぼす影響について確認することを目的に動的遠心载荷模型実験（以下、本実験と称す）を行った。本報では紙面の都合上、変形挙動のみについて報告する。

3. 動的遠心载荷模型実験

(1) 実験概要

本実験では、実際のスケールの 1/50 の模型を作成し、最大遠心加速度が 100G まで対応可能なビーム型の動的遠心载荷実験装置を用い、遠心加速度を 50G まで上昇させ、模型の状態が安定した後にレベル 1 相当の 150gal、250gal およびレベル 2 相当の 350gal の正弦波 (2.0Hz) を 20 波ずつ段階的に加振した。

模型の寸法は、高さ 300mm（実際のスケールで 15m 相当）程度、幅 200mm である。模型寸法を図-10 に示す。大型土のうは不織布を用い縦 20×横 20×高 20mm（実際のスケールで縦 1.0×横 1.0×高 1.0m 相当）の立方体に作成し、大型土のうの中詰材には 7 号碎石とジリコンサンドを混合した材料 ($\rho_t=1.90\text{g/cm}^3$) を用いた。大型土のうは高さ方向に 15 段、奥行き方向に 2 列で積み重ねた。また、補強材は実際のスケールにおいて必要となる引張剛性 $E \cdot t$ (E : 弾性係数、 t : 厚さ) が、本実験の相似則に合うようなポリエチレン製のジオテキスタイル ($E \cdot t=36.0\text{kN/m}$)

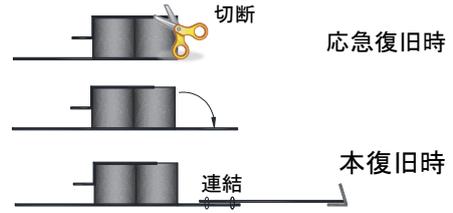


図-9 腹付け盛土との連結法

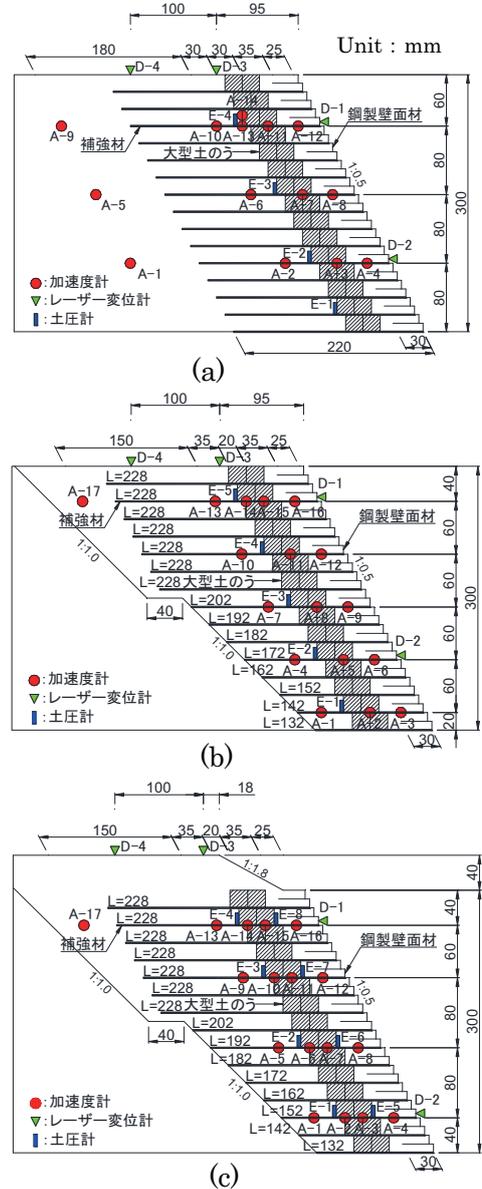


図-10 実験ケース

を使用した。補強材の敷設長および引張剛性は、(一財) 土木研究センターのジオテキスタイルを用いた設計・施工マニュアル⁷⁾に準じて算出した。腹付け盛土の土留めには高さ 10mm のステンレス製の L 型アングルを使用した。補強材と L 型アングルとは接着剤を用いて接続した。盛土材には江戸崎砂を用い、締固め度 85% の条件で盛土を作製した。本実験で使用した盛土材の物性を表-2 に示す。基礎地盤および盛土の背面に地山を設けるケースでは、江戸崎砂とセメントを重量比 9 : 1 (江戸崎砂 : セメント) の割合で混合したセメント改良土を用いた。

本実験は全部で 3 ケースの条件で行った。CASE-1 は新設の補強土壁の現場で多く採用されている補強材の敷設長が十分に確保された条件で、大型土のうが残置された構造体を模擬したものである。CASE-2 は計画高さまで大型土のう工による復旧を、CASE-3 は嵩上げ盛土を有する復旧断面で背面に地山が近接した現場を模擬したものである。計測項目は、構造体の変位、沈下、大型土のう背面に作用する土圧および応答加速度である。計測器の配置を図-10 に示す。

(2) 実験結果

本実験では、CASE-2、CASE-3 の何れにおいても加振時に補強土領域の背面と地山との間ですべり面が発生したことを目視により確認した。そこで盛土の挙動を把握するために、模型に設置した標点の動きを加振段階ごとにプロットした (図-11)。図中において、加振前 (紫線) と 350gal 加振後 (青線) の挙動を示す。また、図中の標点プロットされていない箇所については、土槽のフレーム等により標点を捉えることができなかった箇所である。

CASE-2 および CASE-3 における大型土のうの背面における盛土の標点は、地山付近では地山勾配と同程度の勾配 ($\theta=46^\circ$ 程度) で移動しており、大型土のう背面付近では地山勾配より若干緩い勾配 ($\theta=43^\circ$ 程度) で移動していることを確認した。腹付け盛土は、地山勾配よりも緩い勾配で標点移動しており、この傾向は天端からつま先にかけて顕著にみられた。また、地山付近の標点は、下段の地山勾配の延長線付近を境として移動量が異なる結果となった。これらの結果より、加振時における盛土の挙動は地山勾配の影響を受け、切り盛り境がすべり破壊を誘発させる要因となることを確認した。この破壊モードは、一般的な土工構造物にも想定できる破壊モードであり、大型土のうを残置させた影響によるものではないと考えられる。

図-12 は 350gal 加振後における大型土のうの標点から求めた残留水平変位を示す。ここで、以降で示す文中および図中の数値は (特に断りがない限り) 実大換算した値を用いるものとする。CASE-2 および CASE-3 は、CASE-1 と比較して入力加速度の増加に伴い水平変位の増加割合は大きくなる傾向を示す。特に壁高が高くなるに従い CASE-1 との差は乖離する傾向にある。最大

表-2 盛土材の物性

項目	江戸崎砂	
土粒子の密度	2.707	
粒度分布	礫分 (%)	-
	砂分 (%)	87.2
	シルト分 (%)	9.9
	粘土分 (%)	2.9
均等係数 U	4.05	
平均粒径 D_{50}	0.17	
最大乾燥密度 ρ_{max} (g/cm ³)	1.634	
最適含水比 (%)	17.5	
粘着力 c	13.8	
せん断抵抗角 ϕ (°)	33.5	

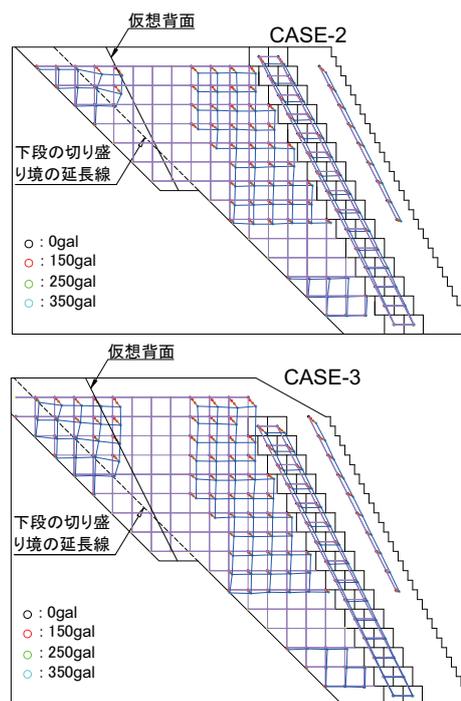


図-11 標点およびメッシュ

水平変位で比較すると CASE-2はCASE-1の約 2.85 倍、CASE-3 は約 3.15 倍である。これらの結果より、地山の有無が大型土のうの挙動に影響を及ぼしているものと考えられる。また、嵩上げ盛土が無い場合は最上段付近における大型土のうの水平変位（破線箇所）は小さく樽型の変形モードを示すが、嵩上げ盛土がある場合ではオーバートーニング（大型土のうの最上段で最大変位が生じる形状）の変形モードを示した。これらの結果より、嵩上げ盛土が無い場合は既存の補強土壁のマニュアル等で想定されている変形モードであり、構造物の安定性に対して大きく影響を及ぼす変形モードではないと推察する。

図-13 は 150gal、350gal 加振後での大型土のうの標点から求めた残留水平変位と沈下の関係を示す。150gal 加振後では各ケースとも残留水平変位と沈下の関係は同程度もしくは沈下が卓越する傾向を示すが、350gal 加振後で地山が近接する CASE-2、CASE-3 では沈下より水平変位が卓越する挙動へと変化する。

4. まとめ

本報では、過去の被災現場で施工された応急復旧等について調査し、道路土工構造物における大規模土砂災害を対象とした効率的な復旧法について検討した。文献調査より、大型土のう工が多くの被災現場で用いられており、特に完全崩壊の被災現場では、大型土のう工による高盛土の応急復旧に多くのニーズがあったと想定された。本研究では、大型土のう工による効率的な本復旧を図るために、応急復旧で構築した大型土のう工の前面に腹付け盛土を設置する方法について検討した。その結果、改善点はあるものの、本設構造物としての適用への可能性を得た。

参考文献

- 1) NEXCO 中日本 (2009) : 【緊急報告】 東名復旧までの 115 時間
- 2) 国土交通省北陸地方整備局 : 能登半島地震による能登有料道路の被害と復旧
- 3) (社) 道路協会 : :道路震災対策便覧 (震災復旧編) , 2007
- 4) (社) 全国防災協会 : 災害採択事例集
- 5) (社) 道路協会 : :道路震災対策便覧 (震災復旧編) , p.67, 2007
- 6) (一材) 土木研究センター : 耐候性大型土のう積層工法 設計・施工マニュアル, 2012.
- 7) (一材) 土木研究センター : ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル, 2013.

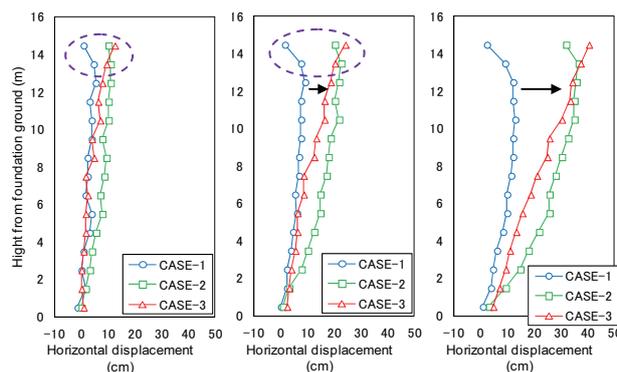


図-12 大型土のうの残留変位

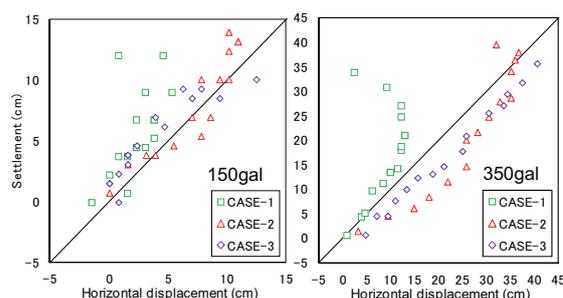


図-13 大型土のうの残留水変位と沈下