

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（1年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職
	しづや さとる 澁谷 啓		神戸大学大学院 工学研究科		教授
②研究 テーマ	名称	沢埋め道路盛土の経済的な耐震診断と耐震補強の開発			
	政策 領域	[主領域4] コスト構造改革	公募	タイプII ハード分野	
		[副領域7] 防災・災害復旧工事	タイプ		
③研究経費（単位：万円）	平成27年度	平成28年度	平成29年度	総合計	
※H27は受託金額、H28以降は計画額を記入。端数切り捨て。	998	5,000	5,000	10,998	
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）				
氏名	所属・役職				
谷 和夫	東京海洋大学・教授（元、防災科学技術研究所・主幹研究員）				
田口 定一	（一社）近畿建設協会・理事・技師長				
中西 典明	復建調査設計(株)・部長				
片岡 沙都紀	神戸大学・助教				
石田 正利	太陽工業(株)・技術センター長				
戎 剛史	国土防災技術(株)・課長補佐				
歳藤 修一	ライト工業(株)・課長				
加藤 卓彦	(株)日建設計シビル・設計部長				
野並 賢	応用地質(株)・専任職				
中澤 博志	国立研究開発法人 防災科学技術研究所・主幹研究員				
伊藤 修二	前田工織(株)・補強土排水推進部長				
⑤研究の目的・目標	（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）				
<p>沢埋めの古い道路盛土における災害が依然として多く、また、それらが被災した場合の影響は非常に大きく復旧にも多大な時間を要することになる。本委託研究は、このような被災事例が多い沢埋めの道路盛土を対象に、物理探査と簡易なサウンディングの組合せによる合理的な耐震診断法と、土のう構造体を用いたのり先補強による経済的な耐震補強工を開発するものである。</p>					

⑥これまでの研究経過

(研究の進捗状況について、これまでの研究目標の達成状況とその根拠(データ等)を必要に応じて図表等を用いながら具体的に記入。また、研究の目的・目標からみた研究計画、実施方法、体制の妥当性についても記入。)

平成27年度の目標の達成状況(黄色:耐震補強、緑色:耐震診断)

各テーマ	平成27年度の目標	責任者	達成状況
【テーマ1】:地盤材料試験による中詰め材の検討	土のうちの中詰め材について、粒度改善と重質化を達成するための、現地発生土と製鋼スラグの配合の考え方を確立	片岡沙都紀	100%達成
【テーマ2】:模型実験による耐震補強の基礎的な検討	補強メカニズムを解明	澁谷啓	100%達成
【テーマ3】:‘実物実験’による耐震診断・耐震補強の実証	物理探査および簡易なサウンディングの適切な組合せ方法を提案	谷和夫	50%達成
【テーマ4】:耐震補強に係る土のうと設計法の開発	土のうの適切な寸法と材料及び構造等を決定	中西典明	100%達成

【テーマ1】:地盤材料試験による中詰め材の検討

1. 研究目的・目標

土のうを用いて法尻補強をするためには、土のう内部に入れる中詰め材が重質であること、中詰め材が密な状態にあること、等が必要である。本研究では、単体では中詰め材としては適さない鉄鋼スラグと建設残土に着目し、これらを所定の配合比で混合した土(以下、鉄鋼スラグ混合土)を用いて粒度試験、締固め試験、一軸圧縮試験を実施し、鉄鋼スラグ混合土の中詰め材としての適用性を検討した。

2. 鉄鋼スラグ混合土の物理・力学特性

2.1 材料の物理特性

表1は、原材料(建設残土および製鋼スラグ)の物性である。建設残土は、高速道路建設予定地より発生した残土であり、高い細粒分含有量を示す。一方、製鋼スラグは転炉より精製されたスラグである。表1より、鉄鋼スラグの土粒子密度は、建設残土に比べると高い値を示している。また、各材料の初期pHは、建設残土が8.8に対して鉄鋼スラグは11.5と高い値を示している。図1は、鉄鋼スラグと建設残土を所定の体積割合で配合した場合の締固め曲線である。鉄鋼スラグの混合割合が大きくなるほど、締固め曲線は右下から左上に推移する傾向が確認できる。図2に粒径加積曲線を示す。図より、鉄鋼スラグ混合土(スラグ混合割合50%)の最大粒径が建設残土単体のものよりも小さくなっているが、これは建設残土の原粒土における粒径幅が広く、建設残土を採取する際に試料粒径がばらつくことで最大粒径が変動したものである。

表1 使用した試料の各種物性

区分	建設残土	スラグA
土粒子密度(g/cm ³)	2.694	3.294
初期含水比(%)	30.9	5.2
液性限界(%)	38.4	NP
塑性限界(%)	31.0	NP
粒度(%)	礫	36
	砂	16
	細粒土	48
初期pH	8.8	11.5
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.41	2.32
最適含水比(%)	29.3	11.3

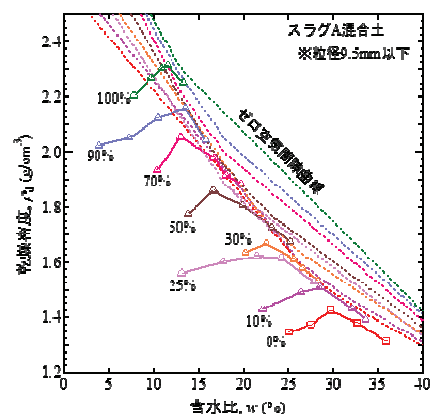


図1 各試料の締固め曲線

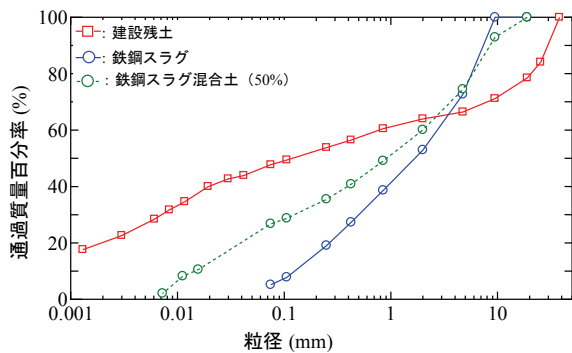


図2 粒径加積曲線

また細粒分含有量は、鉄鋼スラグを混合させることにより砂～シルトの粒径割合が増加している。

2. 2 材料の力学特性

一軸圧縮試験用供試体は、試料の初期含水比が最適含水比になるように水分調整し、締固め度が70%と90%になるように油圧ジャッキを用いて静的に締固めた後、所定の期間、気中養生した。

図3は、鉄鋼スラグ単体および鉄鋼スラグ混合率50%試料における養生日数と一軸圧縮強度との関係である。締固め度が70%の試料群では、養生日数の増加に伴い、強度は殆ど増加しない。一方、道路土工の管理下限値である締固め度90%の混合土では、養生7日目で $q_u=750\text{kN/m}^2$ となった。また、鉄鋼スラグと建設残土を混合させることにより広い分布幅を持った粒径が得られていることから、鉄鋼スラグを細粒分リッチな土材料に混合することにより粒度改善効果が明らかである。

図4は、締固め度90%試料における鉄鋼スラグの混合割合と一軸圧縮強度との関係である。強度はピークを示し、鉄鋼スラグ混合割合が約50%で強度が最大となった。今回の一連の実験では、鉄鋼スラグが最も水和反応が盛んな含水量が、鉄鋼スラグ混合率50%であったものと考えられる。

3. 得られた知見、自己評価、研究計画・体制の妥当性

本年度に実施した一連の鉄鋼スラグ混合土の室内試験結果から、単体では盛土に適さない細粒分含有率の高い建設残土に鉄鋼スラグを適切に配合すれば、粒度改善効果による締め固め特性の向上および強度増加を確認した。よって、鉄鋼スラグ混合土を土のうち詰材として使用することで、用途に応じた土のうちの重質化、密実化ならびに高剛性化を実現できることが分かった。耐震性の劣る既設盛土には、細粒分含有率の高い土材料が用いられていることが予想される。この種の土材料に鉄鋼スラグを適量混合して土のうちの詰材材料とすることで、クリープ変形の少ない土のうの構造体を構築できる見通しが立った。

以上の事柄から、当該テーマに関しては、当初の目標を100%達成できたものと評価する。また、研究計画・体制も妥当で問題はなかった。

表2 一軸圧縮試験用供試体の作製条件

材料の混合条件	締固め度	養生日数
鉄鋼スラグ単体	70, 90%	1, 7, 28, 60, 90, 180日
スラグ A 混合土 (配合率: 10, 25, 30, 50, 90%)	90%	28日

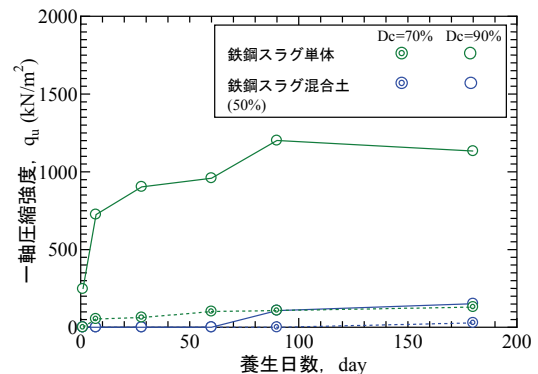


図3 一軸圧縮強さと養生日数の関係

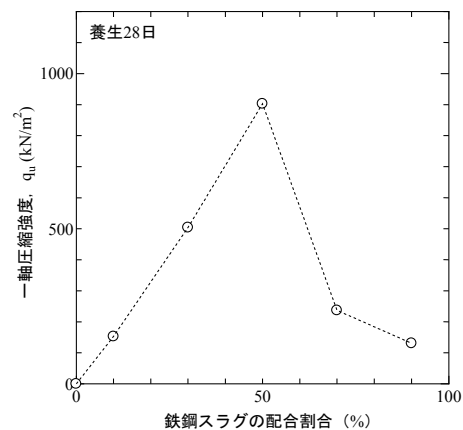


図4 一軸圧縮強さと鉄鋼スラグの配合率の関係

【テーマ2】: 模型実験による耐震補強の基礎的な検討

1. 研究目的・目標

本研究で提案しているのり尻補強効果の定性的な検証のために、小型模型を用いた振動台試験により確認することを今年度の目標とした。一連の試験では、補強対策の有無による加振時の盛土の応答特性および崩壊形態の違いを詳しく観察した。

2. 土材料の選定

振動台試験時に、加振により盛土堤体の破壊が明確に確認できるような盛土材料を選定するために、現地発生土(以下、鋼土と記載、平均粒径 $D_{50}=2\text{mm}$)に砂($D_{50}=0.2\text{mm}$)を所定の体積配合率で配合した土試料を準備し、各種の土質試験(粒度試験(図5)、締固め試験(図6)、透水試験(図7))を実施した。これら一連の室内試験結果と別途実施した一軸圧縮試験結果を総合的に勘案し、鋼土と砂の体積比率を50:50とし、さらに初期含水比を最適含水比よりも乾燥側(初期含水比2~4%)で設定した小型盛土を築造した。

3. 小型振動台装置を用いた模型試験

上述の土試料を用いて、のり先補強の有無による模型盛土の応答特性および崩壊形態の違いを観察した。ここで、加振時の波形条件は5Hz、40波の正弦波とし、最大加速度は300、600、1000galの3ケースとした。また、盛土試験体の締固め度 $D_c=80\sim85\%$ とした。土槽(横:1600mm、奥行:900mm、高さ1000mm)内に、のり面勾配1:1.5の無補強盛土およびのり尻部に高さ150mmのアンクルを組み込んでのり尻補強した2種類の盛土を準備し(図8)、表3に示す4ケースの試験を実施した。

図9は、case3の試験結果である。当該盛土は対策の有無に関係なく加速度が600galのときに斜面内部で崩壊が見られたが、その崩壊規模は対策有の方が無対策のものよりも明らかに小さくなった。つまり、のり尻補強により、崩壊被害が軽減できる可能性が示唆された。

図10は、対策の有無による水平加速度の値を比較している。高々40cmの高さの模型盛土の応答特性は、のり尻補強の有無に依らず、入力加速度よりも1.3~1.4倍程度高い値を示した。

4. 振動台模型試験における数値解析

4. 1 粘着力(c)の影響 - すべり面の形状と安全率

円形すべり面スライス法を用いて、盛土の粘着力($c=0.0, 1, 0.5, 1.0\text{kPa}$)と、水平震度($k_h=0.15, 0.3, 0.6, 1.0$)を変えた

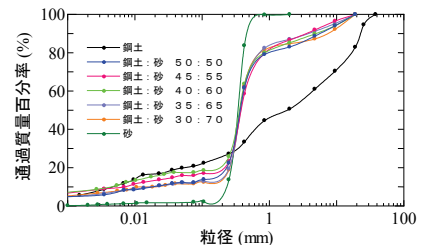


図5 粒径加積曲線

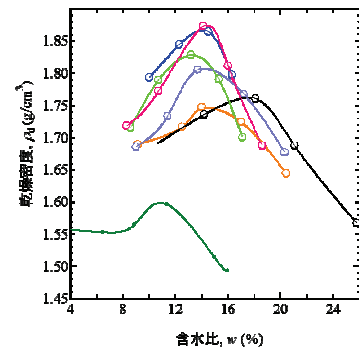


図6 締固め曲線

● 鋼土 : 砂 = 30 : 70	$v_{opt}=14.8$ (%) $\rho_{dmax}=1.748$ (g/cm ³)
● 鋼土 : 砂 = 35 : 65	$v_{opt}=14.2$ (%) $\rho_{dmax}=1.807$ (g/cm ³)
● 鋼土 : 砂 = 40 : 60	$v_{opt}=13.2$ (%) $\rho_{dmax}=1.829$ (g/cm ³)
● 鋼土 : 砂 = 45 : 55	$v_{opt}=14.4$ (%) $\rho_{dmax}=1.874$ (g/cm ³)
● 鋼土 : 砂 = 50 : 50	$v_{opt}=14.0$ (%) $\rho_{dmax}=1.866$ (g/cm ³)
● 鋼土 : 砂 = 100 : 0	$v_{opt}=17.5$ (%) $\rho_{dmax}=1.762$ (g/cm ³)
● 鋼土 : 砂 = 0 : 100	$v_{opt}=11.7$ (%) $\rho_{dmax}=1.600$ (g/cm ³)

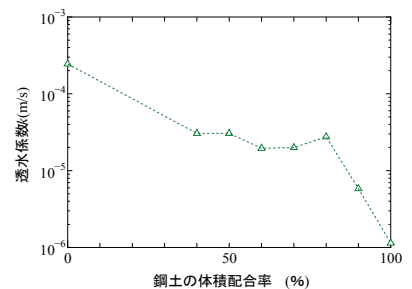


図7 土配合率と透水係数の関係

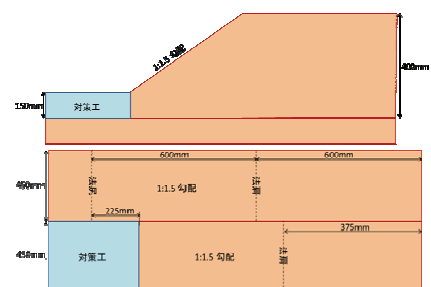


図8 盛土施工の側面図 (上) および上面図 (下)

極限つり合い解析(震度法)を実施した。図11に示すように、粘着力(c)が大きくなると、円弧すべり面が深くなり、安全率(F_s)が増加することが分かる。

4. 2 のり尻耐震補強の効果

盛土高(H)に対するのり尻補強部の高さ(h)の影響を検討するため、地震時の応答性(動的応答解析)、安定性(極限つり合い解析)、滑動変位量(Newmark S法)の各種解析を実施した。図12に示すように、地盤の粘着力(c)と、水平震度(kh)を変えた一連の安定解析を実施し、補強領域(h/H)が大きくなる程、安全率が增加する傾向が明らかとなった。

5. 得られた知見、自己評価、研究計画・体制の妥当性

振動台を用いた模型試験および数値解析より、のり尻補強により盛土の耐震性が格段に向上すること、のり尻の補強領域が大きい程、補強効果がより顕著であることが明らかとなった。本研究の耐震補強工法の有用性が確認でき、来年度以降の実大実験による検証に弾みがついた。

以上より、本年度におけるテーマ2の研究目標は**100%達成されたものと評価**する。また、研究計画・体制は妥当であった。

表3 試験条件

Case	加速度計	勾配	Dc (%)
1	鉛直方向	1 : 1.5	80~85%
2	鉛直方向	1 : 1.5	80~85%
3	水平方向	1 : 1.5	80~85%
4	鉛直方向	1 : 1.5	80~85%

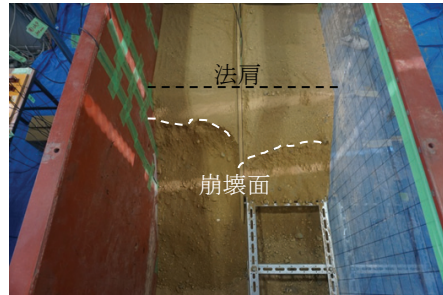


図9 600 gal で加振後の様子 (右：対策有，左：対策無)

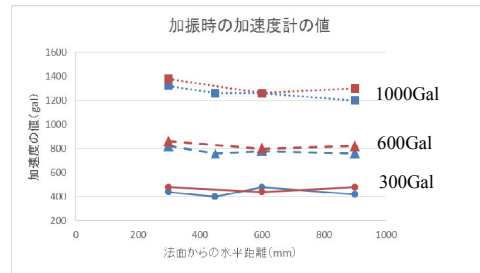


図10 各設定加速度における加速度値の比較 (赤：対策有，青：対策無)

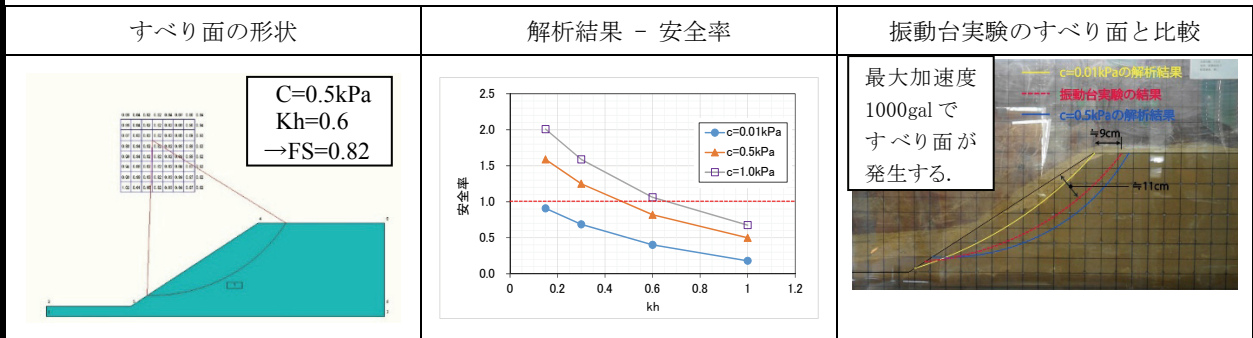


図11 粘着力の影響を考慮した際の解析結果

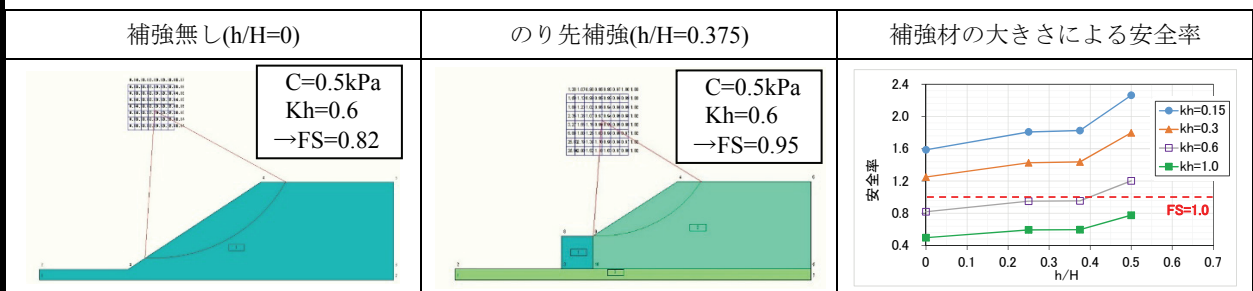


図12 のり先部の補強効果を考慮した解析結果

本研究では、実盛土（15箇所）を対象に調査票（案）の適用性を検討した。その結果、①盛土の変状と素因①有意な変状が認められなくても耐震性を損なえる可能性の高い素因を有する盛土を除外することなく抽出できた。②排水施設や構造物の構造体の劣化状況から、対策工の新設あるいは補修の必要性を評価できた。③対策工導入後の効果評価を行えた。などの成果が挙げられた。ただし、盛土材の評価方法や変状規模の評価への反映方法、継続観測結果の評価方法などの課題もあり、次年度に向けて更なる改良を行う予定である。

1. 2 2次調査（物理探査とサウンディングによる危険盛土抽出）手法の検討

沢埋め道路盛土の耐震性能の評価は①地下水、②土質、③締固め度を把握することにある。このことを念頭に、なるべく簡易で経済的な調査フローの検討を行った。

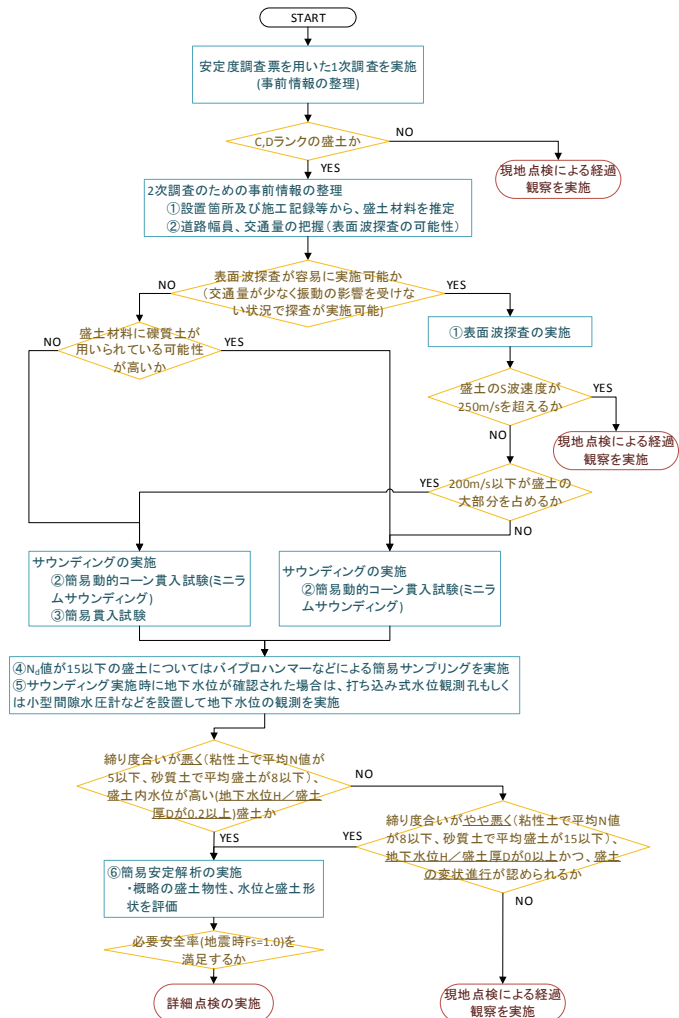
基本的な流れとして、1次調査でC、Dランクとされた盛土に対し、表面波探査の実施が容易であればこれを行い、やや緩い～緩い盛土であった場合に想定盛土材料に応じたサウンディングを実施する。そこで、締り度合いが悪く、地下水位が高い、もしくは両者の程度がそれほど悪いものでなくても変状の進行が確認される盛土に対して簡易安定性照査を実施し、詳細調査に進む。なお、2次調査の内容でも、盛土材料の強度特性に関する情報の精度は低いものの、対策工法の検討は実施可能である。

次年度は実盛土を対象に2次調査を実施し、その適用性を検討する。

3. 得られた知見、自己評価、研究・計画・体制の妥当性

「事前情報に基づいた物理探査と簡易なサウンディングの組合せ調査手法」の確立に向けて、今年度は1次調査及び2次調査における骨子作成を行い、1次調査については実盛土で調査票（案）の適用性を確認し、2次調査については実盛土での検証前の段階まで完了している。ただし、予算が不十分であったため、現場施工実験は実施できなかった。したがって、当初目標に対して**50%程度の達成度であると評価**する。経済的な耐震診断の進捗は完了に向けて着実に前進しており、当該テーマの研究成果及び研究体制は概ね妥当であったと評価できる。

表5 2次調査フロー（案）



【テーマ4】:耐震補強に係る土のうと設計法の開発

1. 研究全体の目標

テーマ4は土のう構造体（形状、材料、アンカー体）の設計に必要な安定照査方法、変形照査方法の確立を目指す。土のう構造体設計には下表の設計、施工に関する検討、確認が必要である。なお、土のう構造体の構成要素において、耐候性大型土のう等で豊富な実績とノウハウを有する前田工繊㈱が新たに参加した。

項目	検討内容	検討対象	確認が必要な事項	
設計	① 全体安定	土のう構造体を含む法面全体安定	①法面安定 ②土のう構造体形状 ③基礎地盤 ④アンカー	土のう構造体による抑止効果 土のう構造体一体性 基礎地盤反力 アンカーの効果(PS, PL)
	② 外的安定	土のう構造体の安定	転倒、活動、支持、沈下	構造体の変形性能、一体性、基礎地盤との相互作用、構造体下面地盤反力
	③ 内的安定	土のう構造体自体の安定	構造体のせん断強度 構造体のクリープ変形 土のう強度	積みかたによる強度特性 土のう間のせん断強度 側壁、支圧版による拘束効果 土のう変形性能 土のう構造体のクリープ変形
	④ 耐震性能	地震時の全体、外的、内的安定	耐震設計法	のり面の安定、構造体の安定
施工	土のう	材質、形状	土のう	強度、透水性、取り扱いやすさ
	中詰め土	中詰め土仕様	粒度、改良材料、締固め度	中詰め土仕様と土のう性状の関係
	基礎地盤	軟弱地盤上構造体挙動	改良方法、仕様	地盤反力、アンカー定着

表6 試験条件

試験No.	プレロード (kN=kN/m ²)	プレストレス (kN=kN/m ²)	側方拘束
①	0	50	あり
②		100	
③	100	50	



写真1 静的載荷試験装置

平成27年度は、検討事項の洗い出し、土のう構造体設計に当たっての課題抽出を行い構造体の性状把握を目的とする実験と土のう構造体の耐震補強効果を牧之原の崩壊盛土を対象とした試設計で確認した。

2. 土のう構造体の静的載荷試験

土のう構造体に対して写真1に示す静的載荷試験装置を用いてプレロードおよびプレストレスを載荷し、土のう構造体の変形特性、クリープ特性を確認した。

本試験によって以下の知見が得られた。

- (1)土のう構造体にプレストレスを載荷することでハニカム構造に一体化し、剛性が向上した。(2)プレロード載荷によって土のう構造体のクリープ変形によるアンカー力減少を抑制できる。(3)プレロード載荷後、土のう構造体のプレストレスによる変形はほとんど生じない。

3. 被災した道路盛土をモデルケースとした本工法の試設計

3. 1 検討概要

・2009年8月11日の駿河湾地震(M6.5)により被災した東名高速道路牧之原地区の盛土をモデルケースとして、土のう構造体による法先補強工法の試設計を行った。

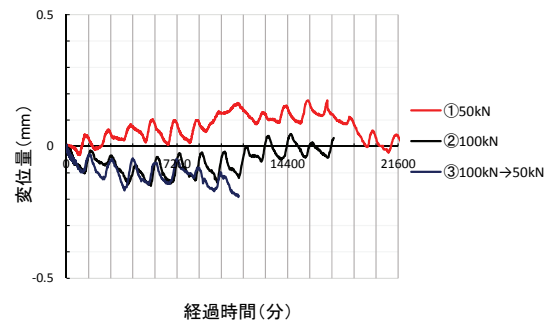


図14 経過時間～荷重関係

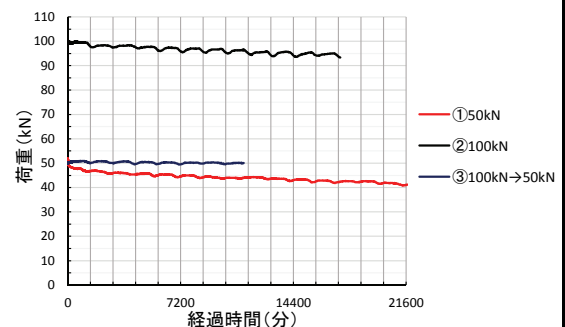


図15 経過時間～変位量関係

・本年度は、極限平衡法による盛土の全体安定検討を実施し、土のう構造体による法先補強範囲の検討、補強に伴う盛土の耐震性向上に対する効果の把握、評価を行った。

3. 2 検討条件

- ・適用基準：道路土工－盛土工指針（平成22年度版）（（公社）日本道路協会）
- ・検討断面(被災前断面)：右図¹⁾
- ・土質定数：既往文献²⁾より引用
- ・設計水平震度：0.16
(レベル2地震動)
- ・地震時必要安全率：1.0

3. 3 検討結果

- ・土のう構造体の設置範囲として土のう構造体の高さ（盛土法尻付近の地盤高に対する土のう構造体の天端までの高さ：H）をH=3m、6m、9m、12mと設定した。
- ・土のう構造体の高さの増大に伴って最少安全率が增大することを確認した。
- ・当該検討対象とした牧之原地区の盛土断面に対して土のう構造体の対策を適用する場合に留意すべき事項を検討結果に基づき以下に列挙する。
(1) 土のう構造体の高さは少なくともH=12m（盛土高の約1/3）必要。(2) 盛土層の下部に存在する谷床堆積物（粘性土層）が比較的軟弱であり、土のう構造体は当該土層の地盤改良を行った上で配置する必要がある。(3) 地震時の盛土の安定性を向上するためには盛土内の地下水位を低下させる対策を併用することが重要である。

4. 得られた知見、自己評価、研究計画・体制の妥当性

土のう構造体の設計に必要な安定照査方法や変形照査方法の確立を実施し、土のう構造体にプレストレス、プレロードを載荷した際のクリープ変形はわずかで内部の土のう構造の一体化により法先補強の構造体としての剛性、強度を期待できることを確認した。また、のり先に構造体を配置することで盛土の全体安定において耐震性能向上が期待できることを解析的に実証した。今年度の研究により、土のう構造体の耐震補強工法としての有望性を確認することができたため、当初の研究目標は100%達成できたものと評価する。また、次年度以降研究を進めていく上でも当該年度における本テーマの研究成果及び研究体制は極めて妥当であると評価する。

【参考文献】1) 中日本高速道路株式会社HP：【緊急報告】東名復旧までの115時間<駿河湾を震源とする地震による東名高速被災応急復旧報告, 2) 中村洋丈・横田聖哉・菅浩一・安田進・太田秀樹：東名牧之原地区における盛土のり面災害の動的変形特性, 第55回地盤工学シンポジウム, pp.205-212, 2010.

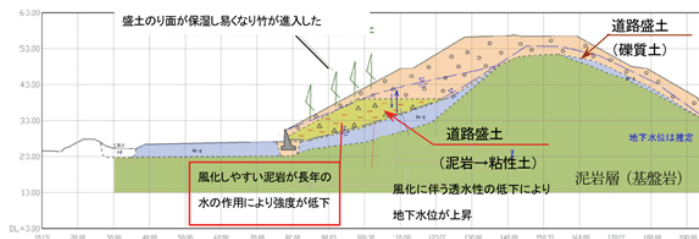
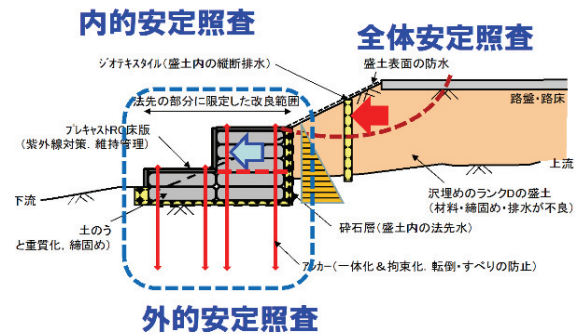


図16 検討断面（被災前断面）¹⁾

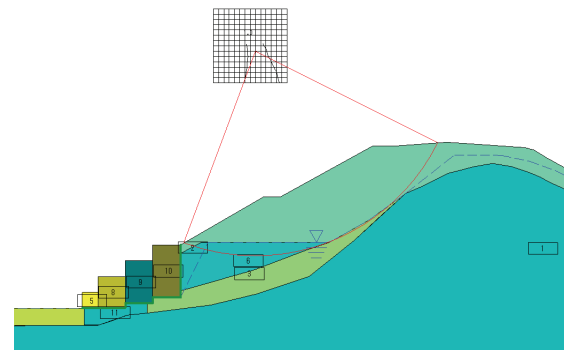


図17 検討結果（地震時最少安全率円弧）

⑦特記事項

(研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の見通しや進捗についての自己評価も記入。)

1. 研究のアイデアの議論を深め、研究の方向性を統一するために、3ヶ月に2回のペースで、新道路技術会議「沢埋め道路盛土の経済的な耐震診断と耐震補強の開発」の全体会議を計7回実施。その内、平成27年12月4日に開催された第6回会議では、国総研の藪雅行氏、榎本忠夫氏、谷川正嗣氏の参加を得て、見学会を実施した。(添付資料1参照)

2. 特許共同出願(準備中)

対象: 当該研究の耐震補強に基本的なアイデア

発明名称(仮): 「傾斜角の補修構造および補修方法」

発明者(順不同): 神戸大学、東京海洋大学(元、防災科学技術研究所)および共同研究者の所属会社7者

3. 研究発表:

▶ 第31回日本道路会議(掲載済)

著者	論文題目
戎剛史、眞弓孝之、澁谷啓、鍋島康之、野並賢、片岡沙都紀	既設道路盛土の点検管理手法に関する研究
片岡沙都紀、澁谷啓、肥後陽介、甲斐誠士、加藤亮輔、野並賢	既設道路盛土の性能評価のための地盤調査・試験方法の研究開発
片岡沙都紀、澁谷啓、植松尚大、河井克之、戎剛史	耐震性に優れ環境に優しい鉄鋼スラグ混合盛土の開発に向けた室内および現場施工試験

▶ Kansai Geo-Symposium 2015(掲載済)

著者	論文題目
片岡沙都紀、澁谷啓、植松尚大、河井克之、戎剛史	耐震性に優れ環境に優しい鉄鋼スラグ混合盛土の開発に向けた室内および現場施工試験

▶ 第51回地盤工学研究発表会(平成28年9月、岡山大学)(投稿予定)

著者	論文題目(仮)
片岡沙都紀、他	既設盛土の耐震補強を考慮した振動台試験による盛土の法先補強効果に関する検討
澁谷啓、他	既存盛土の耐震補強におけるのり先補強工法について
中西典明、他	のり先補強工法における土のう構造体の静的載荷試験
丁経凡、他	模型振動台実験における数値解析を用いた盛土ののり先補強効果検証に関する研究
加藤卓彦、他	被災した道路盛土をモデルケースとした法先補強工法の試設計
戎剛史、他	耐震診断を考慮した既設盛土の広域点検手法に関する研究