

地山・盛土補強土工法による 既設道路盛土の耐震補強事例

澁谷啓¹・中西典明²・小阪拓哉³・鈴木聡³・龍岡文夫⁴・歳藤修一⁵

神戸市須磨区東落合にある神戸市道垂水妙法寺線玉坂トンネルは4車線道路のボックスカルバートンネルであり、トンネル坑口上部のパラペットのひび割れ、盛土変状、排水施設の破損など多くの異常が見られた。このため2012年8月よりパラペットの変状計測を開始し、変形が8ヶ月で3mmと累加的に増加していることから早急な対応が必要であると判断された。盛土直下は神戸市の幹線道路であり、盛土やパラペットの崩壊等は第三者および交通機能に重大な影響を与えるため、この危険な状況を解消するにあたり、影響の大きさを勘案して常時およびレベル2地震動に対応可能な盛土安定対策を実施した。本論文では、この既設道路盛土の耐震化対策における一連の調査、解析、設計そして対策工の施工について述べている。

キーワード：盛土，耐震設計，補強土工法

1. はじめに

2015年3月、国土交通省道路局により道路土工構造物技術基準¹⁾が制定され、盛土を含めた各種道路土工構造物に関して、地震動（レベル1およびレベル2）に対して所要の性能を考慮した設計が義務化されることになった。道路を線状構造物として捉え、土構造物に対しても橋梁、トンネル、等と同等の性能を要求している。しかしながら、道路盛土に関する性能規定型の設計法は未だ定まっていないため、既設盛土の耐震性能に関しては、極限つりあい法による現行設計法を用いて評価せざるを得ない。一方、既設道路盛土の有効な耐震対策の一つとして、巨大地震に対するジオシンセティック補強盛土の強靱性が明らかとなってきた²⁾³⁾⁴⁾。

2. 既設道路盛土の耐震対策の考え方

兵庫県南部地震では、宅地盛土の被害は地下水位の高い箇所に集中していた⁵⁾。このことから、まずは盛土内の地下水位を下げるのが耐震対策の手始めである（図-1b）。このような既設盛土の地下水位低下工法として、とりわけ谷埋め盛土では、沢水を盛土内に入れない「盛土防水工」の適用が根本対策として効果的であろう⁶⁾⁷⁾。つぎに、のり先に補強土構造体等を設置することにより、安全性が格段に向上する。排水機能を有する補

強土壁であれば一挙両得であろう（図-1c）。ここで、のり先補強のための構造体は、すべり面がのり先補強体の中に発達しないことが必須条件である。これらの対策講じても所定の安全性が確保できない場合には、大口径アンカー等を用いた地山補強土工法⁸⁾を適用すればよい（図-1d）。

本論文では、神戸市須磨区にある既設道路盛土の耐震化対策における一連の調査、解析、設計そして地山・盛土補強土工法による対策工の施工について述べている。本事例では、剛な一体壁面工を持つジオシンセティック補強土(GRS)擁壁によるのり先補強工法とロータスアンカーによる地山補強土工法を組み合わせた対策工事を実施した。

3. 既設道路盛土の地山・盛土補強土工法による耐震補強の事例

(1) 背景・地盤調査・観測・事前解析・概略設計

本稿で紹介するのは、2015年3月に耐震対策が完了した神戸市須磨区東落合にある神戸市道垂水妙法寺線玉坂トンネル上の道路盛土の事例である⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。玉坂トンネルは、4車線道路のボックスカルバートンネルであり、トンネル坑口上部のパラペットのひび割れ、盛土変状、排水施設の破損など多くの異常が見られた（写真-1～写真-3）。このため神戸市では、パラペットの変

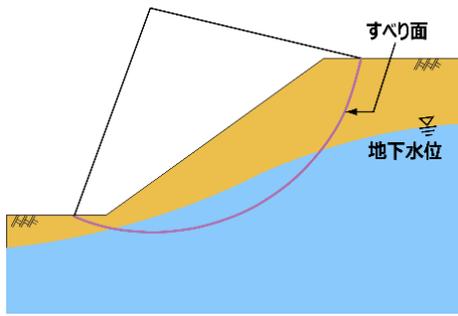
¹正会員，神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻，教授（〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1）

²正会員，復建調査設計（株）大阪支社 技術部，（〒532-0004 大阪市淀川区西宮原1-4-13）

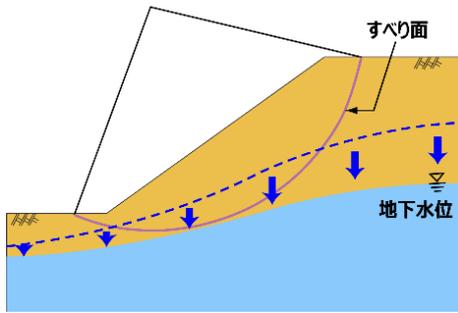
³正会員，（株）複合技術研究所，（〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目23番6号 協立四谷ビル）

⁴正会員，東京理科大学 理工学部 土木工学科，嘱託教授（東京大学名誉教授）（〒278-8510 千葉県野田市山崎2641）

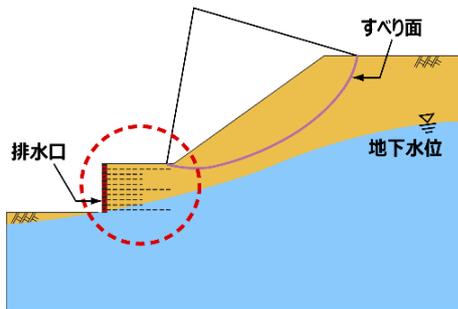
⁵正会員，ライト工業（株） 西日本支社 技術営業部，（〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-16-8）



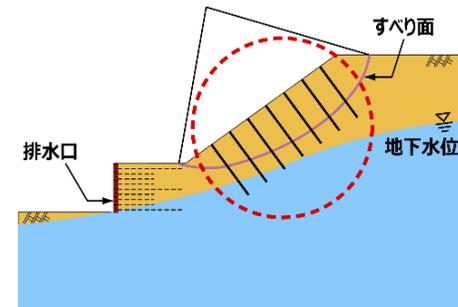
(a) 無対策盛土 (現況)



(b) 地下水位低下



(c) 地下水位低下+のり先補強



(d) 地下水位低下+のり先補強+のり面補強

図-1 既設盛土の耐震対策の例

状計測を行い、パラペット変形が8ヶ月で3mmと累加的に増加していることから、早急な対応が必要であると判断した。

そこで、短期間で本格的な調査、解析、設計そして対策工の施工までを実施した。盛土直下は神戸市の幹線道路であり、盛土やパラペットの崩壊等は第三者および交通機能に重大な影響を与える。この危険な状況を解消するにあたり、影響の大きさを勘案して常時およびレベル2地震動に対応可能な盛土安定対策を実施することとした。



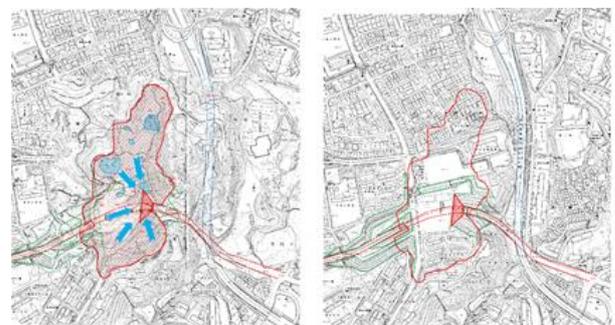
写真-1 トンネル坑口上部のパラペットのひび割れ



写真-2 盛土変状

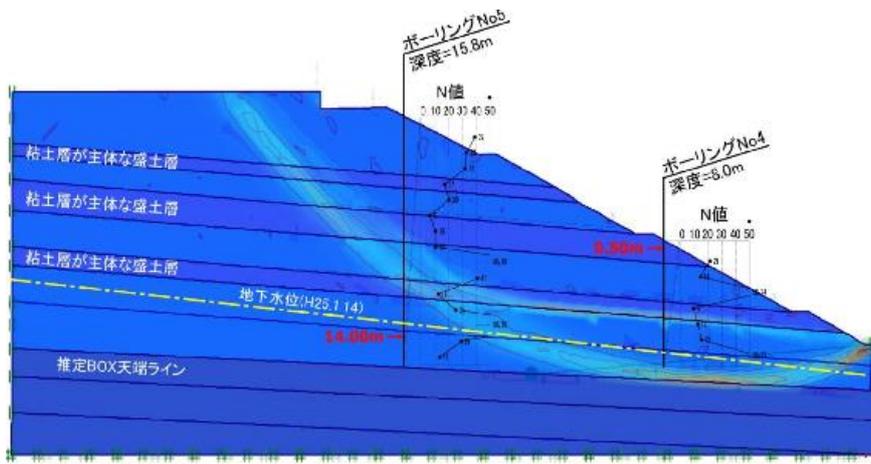


写真-3 排水施設の破損



盛土前 (1970年) 盛土後 (2010年)

図-2 玉坂トンネル付近の新旧地形図



地質調査から得られた土質定数

区分	単位体積重量 γ_s (kN/m ³)	弾性係数 E (MPa)	粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 ϕ (°)	ポアソン比
粘土主体の盛土層	17.0	25.0	15	5	0.33
砂質土系盛土層	17.0	30.0	0	25	0.30

図-3 常時安定解析結果

玉坂トンネルのボックスカルバートは谷地形の土地に開削工法によって施工され、1977年に竣工している。ボックス上部の盛土は、盛土高さが15mを超える高盛土で、盛土材には周辺の造成地から持ち込まれたスレーキングを起ししやすい神戸層群の未固結の硬質粘土が多く混入していることが判明した。図-2は開発前後の玉坂トンネル周辺の地形である。この図から開発前の旧地形図では玉坂トンネル位置は集水地形となっており、現状においても地下水供給量が多い。

玉坂トンネル上部盛土では2箇所ボーリング孔においてパイプひずみ計と自記水位計を設置して変状を観測するとともに、パラペット天端の変位計測を継続した。当該盛土は砂質系土と粘性土の互層となっており、ボックスカルバート天端付近ではN値が比較的高いが、中間部ではN値が10前後であった。

上記の地盤調査およびモニタリング結果を受けて、現況盛土の安定性をFEMで順解析によって評価した。図-3に解析結果を示す。解析結果では盛土の安全率は $F_s=1.003$ となったが、地下水位の変動状況によっては盛土が不安定化する可能性があるかと判断した。このため、緊急対策として盛土上部の排土を行った。しかし、上部排土によっても常時、地震時ともに十分な安定性を確保できないため、抜本的な対策が必要であると判断した。

パラペット背面をのり面処理した場合の常時安全率を計算した。パラペット背面を1:1.5ののり面で処理した場合、常時は $F_s=1.14$ 、L2地震時 $F_s=0.74$ と必要安全率を満足しないことが分かった。これに対し、のり先に擁壁を用いて盛土を設置すれば抑え盛土的效果が期待でき全体の安定に有利に作用することから、パラペット撤去後ののり先に擁壁を設置して盛土の抑えとする対策を検討した。しかし、安定解析を行ったところ、L2

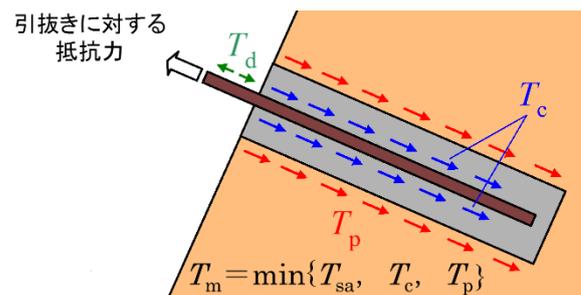


図-4 補強材の引抜け抵抗のメカニズム

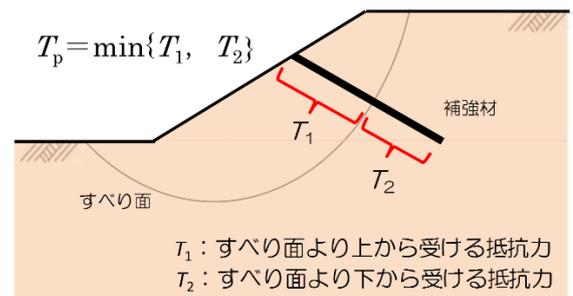


図-5 引抜け抵抗の考え方

地震時 $F_s=0.77$ となり、この対策だけでは盛土の安定を確保できないことが分かった。

上記より、盛土安定にはのり面部補強とのり先押え工の両方の対策を行う必要があると判断した。盛土はボックスカルバート上に設置されているため通常のアンカーの打設はできないことを考慮して、盛土上部での比較的短い補強材によって盛土を安定化する地山補強土工法およびのり先部での剛な壁面工を持つジオテキスタイル補強土擁壁の組み合わせを選定した。

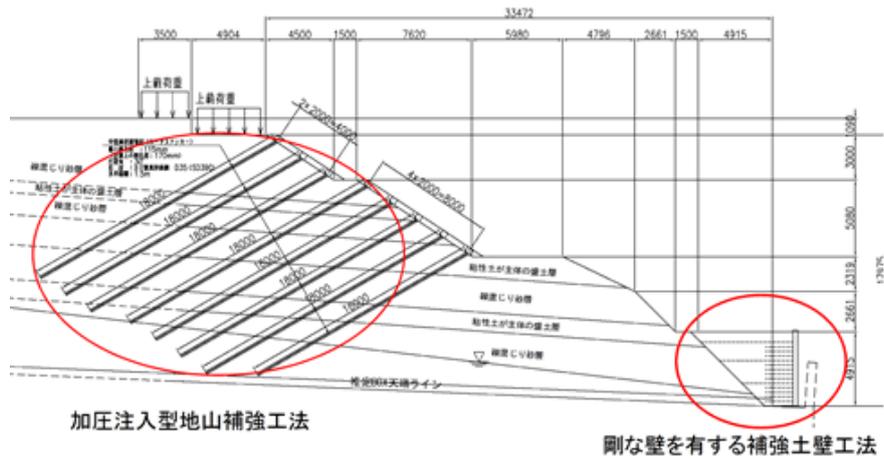


図-6 玉坂トンネル盛土補強対策工



写真-4 現場全景（施工中）

当該サイトにおけるのり先の擁壁は、計画擁壁直下に幹線道路があることや盛土内の地下水位上昇が盛土不安定化につながる恐れが高いことなどの現場条件から、次の要件を満足する必要があった。

- ①破壊モード：破壊時に直下の通行車両に被害を与えないこと、部分的な破壊が全体に波及しないこと、土のこぼれ出しを許容しないこと。
- ②排水性能：高い排水性能によって盛土内の地下水位上昇を抑制すること。
- ③補強性能：地山補強土工法と一体となってレベル2地震動に対し安定であること。
- ④壁面の前方を占拠しない施工が可能であり、施工時に盛土を不安定化させないこと。

上記の要件を満足する工法として、道路盛土では適用事例の少ない「剛な一体壁面工を有する補強土壁工法」を採用した。この工法では、剛な一体壁面工を用いることによって擁壁の安定性を失うことなく下部のジオシンセティック補強材を比較的短くできることから、腹づけ工事では既設盛土の掘削量を小さくできて既設盛土

を不安定化させない。また、剛な一体壁面工は、補強盛土自体を建設後それに固定したコンクリート表型枠を用いてコンクリートの現場打ちによって建設するため、壁面の前方を占拠しない。これらの特徴から、本工法は上記の要件が必須である本現場での腹づけ工事に適していると判断した。

(2) 設計・施工

法肩から高さ約 8.0m の範囲の盛土斜面（勾配 1 : 1.5）に地山補強材を配置した場合のレベル 2 地震動に対する安定性を、道路基準¹³⁾によって検討した。また、のり先部に既設盛土を 1 : 1 の勾配で掘削して高さ 5.0m の GRS 擁壁を腹づけした場合の L1 と L2 地震動に対する安定性を、鉄道基準¹⁴⁾によって検討した。盛土の土質特性の設計値は、現場密度試験と現地から採取した土の一面せん断試験の結果を用いた。一方、設計水位は、地盤調査結果を基本として設定するが、補強土内については、GRS 擁壁が排水性能に優れていることを考慮して、壁体底面レベルに設定した。

盛土の全体安定は、道路基準¹³⁾にしたがって円弧すべり安定解析によって評価した。地山補強材の抵抗力 T_m は、図-4に示すように、芯材の設計引張耐力 T_{sa} 、芯材と定着材との付着力 T_c 、定着材と周面地盤との引抜け抵抗力 T_p の最小値とした。引抜け抵抗力 T_p は、図-5に示すように、すべり面より上の移動土塊の引き留め力 T_1 とすべり面より下の不動地山に対するアンカー力 T_2 の小さい方とした。また、切土補強土工法設計・施工要領¹⁴⁾に従って評価した。

一方、のり先の GRS 擁壁の安定性は、鉄道基準¹⁴⁾および RRR-B 工法のマニュアル¹⁶⁾にしたがって、補強領域に対して二直線施行楔法によって土圧を算定し、壁面工の滑動・転倒安定を検討した。鉄道基準¹⁴⁾による GRS 擁壁の L2 地震時での安定性の検討では、滑動モード、転倒モード、せん断変形モードの3つの破壊モードにおける変形量を算定して加算する¹⁷⁾。滑動モードと転倒モードによる変形量は、ニューマーク法により補強土壁の滑動マスと転倒のマスを剛体と仮定して、作用力を用いた運動方程式から変形量を算定した。

当該盛土の耐震補強工事は、平成 27 年 3 月に竣工した(図-6および写真-4)。ジオテキスタイル補強土擁壁のレベル2設計地震動に対する安定性は、Newmark 法等によって残留変形を算定して十分に小さいことを確認している¹⁰⁾。しかし、道路盛土であることから、盛土全体の地震時安定性は設計水平震度 0.2 に対して極限つり合い法で検討した。

4. まとめ

本論文では、神戸市須磨区にある既設道路盛土の耐震対策工事事例について述べた。主要幹線道路の一部であるカルバート上の盛土には著しい変状が見られ、盛土の土圧によりトンネル坑口上部のパラペットに多数のひび割れが生じ、早急な対応が必要であった。そこで、レベル2地震に対する安定性を確保するために、剛な一体壁面工を持つジオシンセティックス補強土(GRS)擁壁によるのり先補強工法とロータスアンカーによる地山補強土工法を組み合わせた対策工事を実施し、2014 年末に完成した。現在、カルバートおよび上部盛土ともに安定しており、変状の進行は見られない。

本事例で採用した工法は、これまでに道路盛土の耐震化対策としての実績は殆どない。しかし、剛な壁であるためすべり面が壁面を通過する虞がないこと、狭窄な場所での腹付け盛土が可能であること、下部カルバートに更なる重量負荷を与えないこと、壁面に地下水排水のための水抜き口が容易に設置できること、等の理由で剛な一体壁面工を持つジオシンセティックス補強土(GRS)擁壁をのり先補強工法として採用するに至った。同様に、盛土内に岩ずりが点在していたこと、深いすべりに対して補強材が 13m と長くなること、等の理由で地山補強土工法としてロータスアンカーを採用した。重要幹線道

路に位置する劣悪な盛土で、工事上の様々な制約があった当該現場において、これらの工法の採用は必然であったと言えよう。

本工事においては、極限つりあい法による現行設計法に照らして盛土の耐震性を評価したが、今後道路盛土でも、レベル2設計地震動に対する耐震性の照査を Newmark 法などによって算定した残留変形に基づいて行うのが合理的であろう。

謝辞：本稿の作成にあたり、神戸市建設局ならびに神戸大学大学院の片岡沙都紀助教、白済民研究員の協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局国：道路土工構造物技術基準関係資料、平成27年3月、土交通省道路局ホームページにて公表 http://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000495.html
- 2) Koseki, J. and Shibuya, S. (2014): Mitigation of Disasters by Earthquakes, Tsunamis, and Rains by Means of Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls and Embankments, Transportation Infrastructure Geotechnology, ISSN 2196-7202
- 3) Tatasuoka, F., Koseki, J. and Kuwano, J. (2014): Natural disasters mitigation by using construction methods with geosynthetics; Earthquakes, Keynote Paper, Proc. of 10th Inter. Conf. on Geosynthetics, Berlin, September, pp.1-53
- 4) 一般財団法人災害科学研究所・盛土の性能向上技術普及研究会 (2014)：盛土の性能評価と強化・補強の実務，一般財団法人土木研究センター，pp.175-178
- 5) 沖村 孝，二木 幹夫，岡本 敦，南部 光広 (1999)：兵庫県南部地震による宅地地盤被害と各種要因との関係，土木学会論文集，623巻，VI-43 pp.259-270
- 6) 澁谷啓：盛土崩壊のメカニズムと対策工，ジオシンセティックス論文集，Vol.23，pp.1-14，2008.
- 7) 澁谷 啓，原 健二 (2010)：補強土壁の弱点と対策，基礎工，総合土木研究所，38(2),pp.18-24
- 8) 龍岡文夫 監修：新しい補強土擁壁のすべて—盛土から地山まで—，「新しい補強土擁壁のすべて」編集委員会 編，総合土木研究所出版，2005年10月，ISBN：4915451-07-0
- 9) 澁谷 啓，片岡沙都紀，中西 典明，龍岡文夫，小阪 拓哉，鈴木 聡，歳藤 修一，田尻 英之，上辻 和樹 (2015)：既設道路盛土の地山・盛土補強土工法による耐震補強 (背景と調査)，第50回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1103-1104
- 10) 鈴木 聡，小阪 拓哉，澁谷 啓，田尻 英之，上辻 和樹，龍岡文夫 (2015)：既設道路盛土の地山・盛土補強土工法による耐震補強 (設計)，第50回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1105-1106
- 11) 川添 英生，歳藤 修一，澁谷 啓，片岡沙都紀，中西 典明，田尻 英之，上辻 和樹 (2015)：既設道路盛土の地山・盛土補強土工法による耐震補強 (繰返し注入型地山補強土)，第50回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1107-1108

- 12) 中西 典明, 瀧谷 啓, 片岡 沙都紀, 龍岡 文夫, 小阪 拓哉, 鈴木 聡, 歳藤 修一, 田尻 英之, 上辻 和樹 (2015) : 既設道路盛土の地山・盛土補強土工法による耐震補強 (法先補強), 第50回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1109-1110
- 13) 日本道路協会 : 道路土工盛土工指針, 2010.4
- 14) 鉄道総合技術研究所 : 鉄道構造物等設計標準・同解説 土留め構造物, 2012.1
- 15) NEXCO 東日本, NEXCO 中日本, NEXCO 西日本 : 切土補強土工法設計・施工要領, 2007.1
- 16) RRR 工法協会 : RRR-B 工法 (補強盛土工法) 設計・施工マニュアル, 2001.3
- 17) 堀井 克己, 館山 勝, 古関 潤一, 龍岡 文夫 : 剛壁面補強土壁の大規模地震時の安定・変形解析, ジオシンセティック論文集, 第13巻, 1998

CASE STUDY ON ASEISMIC REINFORCEMENT OF AN EXISTING ROAD EMBANKMENT BY REINFORCED SOIL METHOD

Satoru SHIBUYA, Noriaki NAKANISHI, Takuya KOSAKA,
Akira SUZUKI, Fumio TATSUOKA and Shuichi TOSHITOU

Intensive cracks in a box culvert, a large deformation of an embankment on the box culvert and severe damage of drainage facilities were discovered at the Tamasaka tunnel portal a four-lane main road in Kobe city. It was found out that the deformation at the parapet of the tunnel had steadily accumulated 3mm over a period of eight months since the measurement started at August 2012. Based on the observations, a contingency plan was demanded to avoid carefully any serious hazardous events, which in turn would bring about damage to the transportation facilities caused by collapses of the embankment and of the parapet. Therefore, a scheme to stabilize the embankment with aseismic reinforcements was considered in order to improve the seismic safety against the Level-2 earthquake. In this paper, a series of geotechnical investigation, numerical analysis, the aseismic design and the counter-measures associated with this case study is in detail described.

KEYWORDS: Seismic design, Embankment, Reinforced soil method