

## 戦-43 道路橋の合理化構造の設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：星隈順一、白戸真大、岡田太賀雄

### 【要旨】

道路橋の設計基準においては橋台背後の裏込めは、良質な土を用い、入念に施工することが規定されており、それを前提として橋台の耐震設計法が構築されている。一方で、傾斜地や軟弱地盤条件では、良質な土に周辺地盤条件セメント安定処理土、発泡コンクリート盛土、補強土等の人工材料を適用する事例も増えてきているが、地震時の構造本体との相互作用が明確でなく、良質な土を用いて入念に施工した場合と比べて、地震時の橋台の振動・減衰特性に与える影響が不明であり、橋台の耐震設計法の考え方は確立されていない。そこで、平成 21 年度は、橋台背面に軽量材として用いられる事例が多い EPS を裏込め材とした場合を対象として非線形動的解析を行った。その結果、背面に土を用いた場合に比べて、背面に裏込め材が存在しない場合に近い応答をすることが分かった。

キーワード：橋台、裏込め材、EPS、耐震設計、動的解析

### 1. はじめに

近年、地震に対して安全性や修復性を確保するために部材寸法が大きくなったり、落橋防止構造等を設置する必要性からコストが高くなってしまいう高架橋の代わりに、従来土構造の一部を構成する要素として用いられてきたカルバートを大型化したり、連続化したりすることで本体道路として用いることが提案され、実際に事業で使用され始めている。また、橋においても、ポータルラーメン橋やインテグラル橋など、地震時の背面土の応答や抵抗を積極的に考慮することで、橋の設計を合理的にするための研究が行われている。このような、土構造と橋梁の境界的な構造物は、橋梁と土構造の両者の特性を合わせた合理的な構造となる可能性を有しているものと考えられる。

盛土に代表される土構造と橋梁構造は、それぞれ用いられる材料や構造、想定される損傷形態や修復方法が異なるため、それぞれの特性を考慮して耐震設計が行われている。したがって、土構造と橋梁の中間に位置するような構造の設計法をそれぞれの観点のみで検討することは、安全性や修復性について見落としがあったり、逆に過大であったりするなど、異なる設計結果となってしまう。

また、盛土構造については、土に替わって発泡スチロール、発泡コンクリートなど土ではない材料も用いられるが、盛土構造の設計では土とみなされ軽量盛土と呼ば

れる。また、補強材を配置した補強土盛土が用いられることもある。しかし、橋梁においては、橋台及び橋台基礎の耐震設計法は、橋台背後は良質な土で構成されるとき振動特性や受働抵抗特性、減衰特性が考慮され、構築されている。したがって、土に替わって発泡スチロール、発泡コンクリートなど、土ではない材料を用いる場合には、例えそれらが軽量盛土と呼ばれるものであっても、橋台や橋台基礎の耐震設計法を別途検討する必要がある。さらには、これまで軽量盛土と呼ばれる材料や補強土について、一軸圧縮強度や材料の劣化特性に関する研究は進められているが、橋の一部を構成する要素として積極的に用いる場合には、変状が生じたときの復旧が容易ではないこと、内部の状態の点検が容易ではないことを考慮し、修復性や維持管理の容易さやについても検討しておく必要がある。

以上のように、今後、土構造と橋梁の両者の特性を合わせた合理的な構造を用いたり、様々な材料を橋台背後に用いたりするために、本研究では、土構造物、橋梁構造物それぞれで整備されてきた設計の前提条件や設計法、維持管理法を統一的な観点から見直し、作用荷重の考え方や要求性能・限界状態の設定、維持管理のしやすさ、点検補修のしやすさを考慮した性能検証法を整備する。

### 2. 課題の整理

同じ社会的役割が求められる路線にある構造物は、

その種別によらず、地震に対して等しい安全性と修復性を有する必要がある。盛土に代表される土構造と橋梁構造は、それぞれ用いられる材料や構造、想定される損傷形態が異なるため、それぞれの特性を考慮して耐震設計が行われている。土構造の場合、安定勾配を満足し、また入念に締め固めされ、排水が適切に行われている場合には、大地震時にも完全に崩落することは少なく、仮に沈下等が生じて路面上の点検で発見が可能であり、更に、使用材料が土であることから復旧も容易である。したがって、計算により沈下量等を把握して、一定の状態に収まるように諸元を決定するという行為を設計では一般に行わない。一方で、橋梁の場合には、損傷の確認は路面からだけでは不十分であり、ある程度時間がかかること、また、一旦部材に損傷が生じると補修に時間がかかることから、損傷箇所や損傷度を計算により予測し、損傷を制御するように設計が行われる。なお、地震時のみならず常時においても、下部構造の沈下は上部構造の損傷を引き起こすので、沈下が懸念されることが無いように十分に安全な基礎構造が設計される。

カルバートは、その英語 *culvert* が一般的に意味するように、もともと水路カルバートのように、盛土に比較して小型の断面を有しているものであった (*a pipe for waste water that crosses under roads, railways, etc* — the Cambridge Advanced Learner's Dictionary より)。したがって、その損傷や破壊がカルバートを含む盛土構造全体の耐震性の考え方を考えるものではないと考えられる。しかし、カルバートを大型化し、本体構造として利用することで、橋梁と同じようなスパンを跨ぐ構造としたり、単体の大型アーチカルバートを隣り合うように連続して設置する連続カルバート構造としたり、複数の柱を配置した多連アーチカルバート構造としたりすることで高架構造に置き換えるときには橋と同じように沈下や安定、耐震性の検討も必要となり得るが、小型カルバートと同様に部材寸法を決定すれば、部材厚や基礎寸法が小さくなる。そのため、橋に比べると相当に建設コストが減ることになるが、本来有すべき安全性や修復性が満足されているのかどうかの検証法に標準的な考え方はない。たとえば、このような連続アーチカルバート構造とアーチ主構と路面の間に土が重複される橋である重複アーチ橋では、構造諸元によっては、地震時の応答や地震後の調査・補修のしやすさも類似点が多いものと考えられる。

一方で、橋についてみれば、単独で存在する高架橋が地震に対して応答する場合に比べて、両端橋台の単径間

橋または連続橋の応答は橋台背面の土の振動に支配されることも考えられる。現在は、橋台背面土の応答を見込まず橋の応答を計算することが安全側と考えられており、一般に無視しているが、背面土の影響を見込まないことで著しく安全側の構造になっている場合もありえる。

また、橋台背後や連続カルバートの上に発泡セメント等の人工材料を適用する場合には、構造本体の設計にて考慮する人工材料からの反力特性や地震力が明確でない。たとえば、橋台の耐震設計について、平成 14 年版の道路橋示方書耐震設計編は、土圧の影響が大きく、また振動特性も土の影響が支配的である場合には橋台の耐震性の照査を省略可能としている。また、橋台基礎の地震時保有水平耐力法においては、土の影響が支配的であるものとして、躯体やフーチングの設計水平震度が与えられている。一方で、土でない材料で裏込めされる場合には、

- ・ 質量が小さいことから背面材料の振動の影響が橋台の振動において支配的にならない可能性がある
- ・ 受働抵抗が十分に期待できなく、橋台の自由応答を抑制する効果が十分に期待できない可能性がある
- ・ 一方で、軽量材料のさらに背後の土の振動の影響に支配される可能性もある。

したがって、土以外の材料を用いる場合には、橋の設計も合わせて見直す必要がある。

平成 21 年度は、以上の課題のうち、橋台背面の荷重軽減策など、橋台への土圧軽減によるコスト削減効果のみならず、急峻な地形での山岳盛土の代わりに施工性の向上を期待するため等、橋台背面に軽量盛土を用いる事例が従来よりも増えつつあることから、当面の統一した運用方針を策定が急がれている軽量材料を橋台裏込めとして設置する場合の橋台及び橋台基礎の耐震設計法を提案するために、軽量材料のうち EPS (発泡スチロール) を用いた場合を代表として、橋台の地震時挙動を把握するための基礎的な検討を数値計算により行った。

なお、開削により地中に設置される大型ボックスカルバートや開削トンネルの耐震性については、別途、平成 22 年度より開始の「ボックスカルバートの耐震設計に関する研究」にて扱われる予定である。

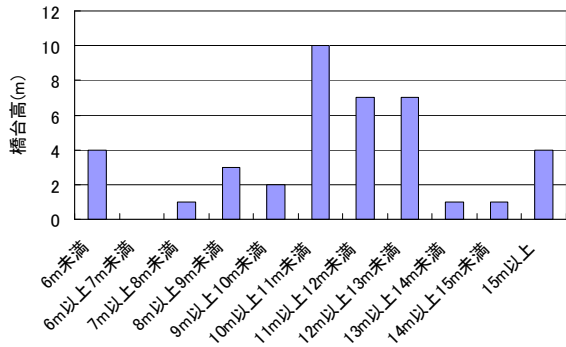


図-1 橋台高の分布

### 3. EPS を背面に用いた橋台の事例調査と計算対象橋梁及び計算ケースの設定

各地方整備局を対象に EPS を背面に用いた橋台の事例収集を行い、集められた 40 橋台に対してその構造条件の傾向を把握した。橋台高さ、地盤条件、EPS を採用した理由、支承条件について分析した結果を図-1 から図-4 に示す。橋台高は、10m 以上 13m 未満の事例が多い。地盤条件としては、I 種地盤上での設置事例は無く、III 種地盤上に設置された事例が多く、採用理由としては、主に、軟弱地盤上の盛土の沈下や橋台の側方移動対策、土圧による基礎の水平変位の軽減のためがあげられている。山岳地での盛土区間に続く橋台において適用されている例もあると考えられるが、今回収集した事例ではそのようなものはなかった。支承構造に関しては、分散構造を用いた事例が多い。

以上の傾向分析において最も頻度が高い条件のものを計算対象として選定する。対象橋台及び地盤条件について図-5 に示す。III 種地盤上に設置された水平力分散支承を有する橋台高 11.9m、幅 11.8m の橋台である。基礎形式は場所打ち杭であり杭径 1.2m、杭本数 12 本、杭長 37m である。なお支持する上部構造は鋼 2 主桁を想定しており、分担重量を 4650kN とした。EPS は側方移動対策

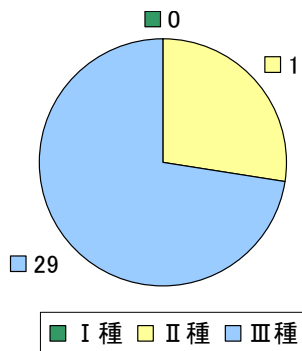


図-2 地盤種別の整理結果

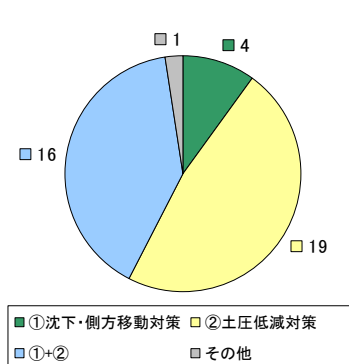


図-3 採用理由の整理結果

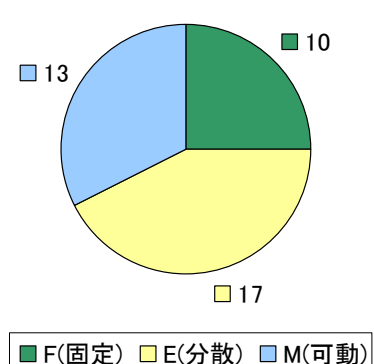


図-4 支承条件の整理結果

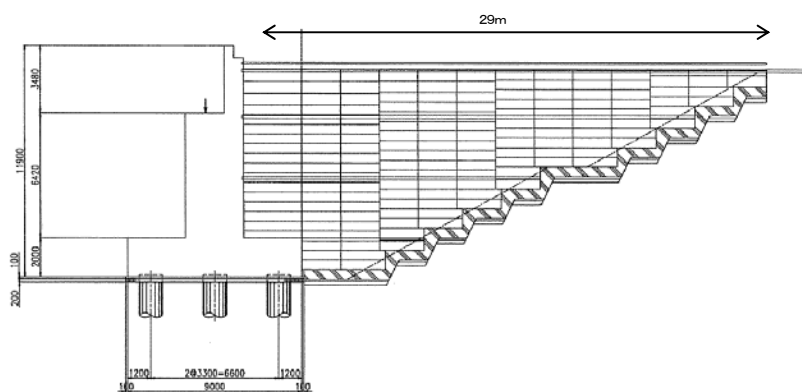
として橋台背面に設置されている。前述した通り地震時の橋台と EPS との相互作用が明確では無いが、図-5 の諸元の設定は、レベル 2 地震動に対して橋脚及び橋脚基礎の地震時保有水平耐力法の照査を満足するように行った。EPS はブロック状のものを敷設することを想定し、載荷重の分散のために、高さ 3m 毎に厚さ 15cm のコンクリート床版を設置している。

このように設計された橋台構造に対して、解析対象ケースとして、①背面に裏込材を用いず、橋脚のように設置されている場合、②橋台背面に土を用いた場合、③橋台背面に EPS を用いた場合について地震応答計算を行い、橋台及び背面材の地震時挙動を比較する。

### 4. 動的解析による EPS を用いた橋台の地震時挙動

#### 4.1 解析モデル

背面に軽量盛土 (EPS) を用いた場合、土を用いた場合の橋台のレベル 2 地震時の地震時応答を比較するためには、EPS 及び土と橋台の相互作用が適切に考慮される必要がある。EPS は受働変形 (圧縮変形)、主働変形 (引張り変形) に対して等方的に挙動すると考えられるが、土の場合は受働変形と主働変形で挙動が異なる。そこで、裏込め土の構成モデルは、橋台と裏込土の相対変位や裏込め土のひずみに応じ、Mohr-Coulomb の破壊規準を満たし、かつ、主働土圧や受働土圧の違いを考慮できるものである必要がある。また、裏込め土や EPS を設置する場合には、初期応力の変化に応じて地盤の非線形化の状態が異なることから、施工段階を追いながら死荷重解析を実施し、常時の応力状態と土の非線形化の状態を設定する必要がある。すなわち、①地盤のみの状況②盛土を設置した状況③橋台を設置した状況④背面に土あるいは EPS を設置した状況の各段階の応力状態の変化を計算した上で、それを初期状態として地震応答計算を実施する必要がある。そこで、本検討の目的に照らしたとき、以



フーチング下面からの高さ・深さ(m)	層厚(m)	土質	単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )	せん断弾性波速度V <sub>s</sub> (m/sec)
11.0	0.8	アスファルト	19	264
2.0	9.0	砂質土(盛土)	19	197
-6.0	8.0	粘性土	15	126
-6.7	0.6	砂質土	17	137
-9.2	2.5	粘性土	15	126
-10.2	1.0	砂質土	17	153
-13.9	3.8	粘性土	15	144
-14.3	0.4	砂質土	17	127
-19.3	5.0	粘性土	15	171
-20.7	1.5	砂質土	17	153
-24.2	3.5	粘性土	17	191
-28.3	4.2	砂質土	17	234
-35.4	7.1	粘性土	21	234
支持層				

図-5 解析対象橋台と地盤条件

上の2条件を満足させる一方、その他の条件については、計算の便を考慮し、ある程度簡略化したモデルを用いることにする。

以下、計算に用いた有限要素モデルの概要を示す。

地盤等については2次元の平面ひずみ要素を用いてモデル化し、橋台躯体、杭体は梁要素でモデル化し、フーチングはソリッド要素によりモデル化した。地盤の奥行きについては、文献1)を参考に橋台底板幅として設定した。2次元モデルであるため、杭-地盤間については、地盤のソリッド要素と杭体梁要素を二重節点とし剛バネで接続することとし、地震時の地盤全体の挙動が杭体に影響を及ぼすように設定した。

背面土の構成モデルとして、モールクーロンの破壊基準に基づく土の受働・主動状態が再現できるモデルを用いることとした。盛土として砂質土を想定し、 $C=0\text{kN}$ 、 $\phi=30^\circ$ と設定した。

EPSは履歴特性として、いわゆる Ramberg-Osgood モデルを用いた平面歪み要素でモデル化し、コンクリート床版については梁要素でモデル化した。EPS ブロック間は金具により緊結されていることからここでは一体として動くものとしてモデル化した。コンクリート床版とEPS間には摩擦を考慮したバネによりモデル化した。EPSと橋台間及びEPSと盛土間については、EPSと橋台が離れる方向には荷重が伝達しないことから、接触バネを用いて圧縮される方向のみ荷重が作用するようにした。

EPSの物性値および摩擦係数については文献2)を参考に設定した。またEPS上に敷設された舗装は平面歪み要素でモデル化したが、接触バネを設けず重量を考慮することで慣性力はEPSを介して作用することとした。

背面に裏込土もEPSも設置しない場合に対しては、裏込め土やEPSを配置する区間のソリッド要素を取り除い

た。

周辺地盤の構成モデルとして、履歴特性としていわゆる Ramberg-Osgood モデルを用いることとし、各土層の  $G/G_0-\gamma$ 、 $h-\gamma$  曲線については参考文献3)~5)に基づき設定した。

入力地震動については基盤層に道路橋示方書に示されているレベル2地震動タイプI及びタイプIIのI種地盤の波形を用いた。

#### 4.2 計算結果

以下の2点に着目して計算結果を比較する。

1. EPS 橋台を用いた場合の応答の位相や大きさは、背面のEPSの応答の位相や大きさの影響をどの程度受けるのか
2. EPS を用いた場合に、橋台の受働側への変位が土を用いた場合と同様に抑制されるのかどうか。

いずれも、設計水平震度の考え方や、照査における慣性力と土圧の向きの組合せを考察するためのものである。

図-6に橋台天端の応答加速度時刻歴の比較を示す。ここに、水平加速度は、前面側から背面側の向きが正である。背面にEPSを用いた場合の応答値は背面に土を用いた場合と橋台のみとした場合の中間的な値になっているが、位相は橋台のみの場合と同様になっている。また、加速度応答値に再び着目すると、特にレベル2地震動に対しては、背面が土であるときに他の場合に比べて応答加速度が小さくなっている。

図-7に橋台天端の応答変位時刻歴の比較を示す。ここに、水平変位は、前面側から背面側の向きが正である。同じくEPSは背面を土とした場合とは異なり、橋台のみの場合と同様の応答の大きさ、位相になっている。変位の大きさに着目すると、いずれも正側(橋台前面から背面側)への変位が負側(橋台背面から前面側)への変位

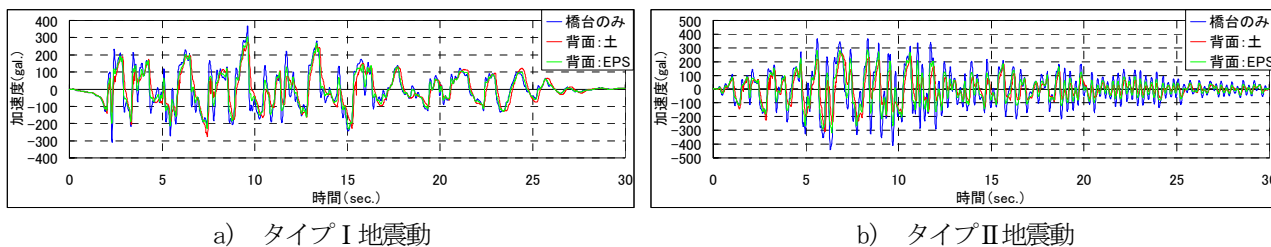


図-6 橋台天端の応答加速度の比較

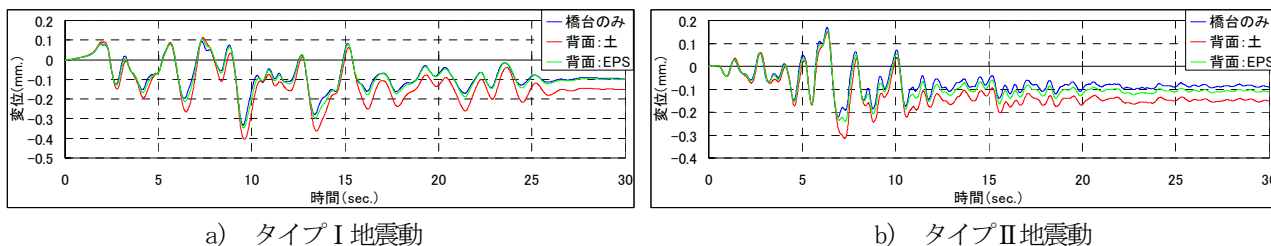


図-7 橋台天端の応答変位の比較

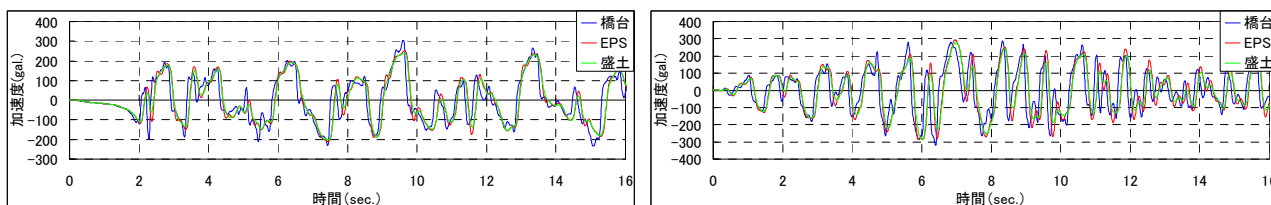


図-8 背面にEPSを用いた場合の表層における橋台・EPS中央部・盛土部の応答加速度の比較

より小さくなっているが、一方で、負側の変位は、橋台背面に土を用いたときが一番大きい。これは、背面土から橋台が押されているためと思われる、この結果は、橋台の応答が土の影響に支配されているという従来の見解に一致する。ただし、今後、変位が大きいことが、土圧など背面からの荷重の大きさの差に起因するのか、盛土部分も含めた周辺地盤応答の差であるのかなど、更なる詳細な分析が必要である。

図-8に背面にEPSを用いた場合の橋台天端高さでのEPSとその背後区間の盛土の応答加速度時刻歴を示す。参考までに、橋台天端の応答加速度時刻歴も合わせて表示した。EPSの応答は盛土に近い応答であるが、これらと橋台は別個に応答している。

## 5. まとめ

平成21年度は、道路橋示方書には具体的な規定がなく、耐震設計の考え方について当面の統一した運用方針を策定が急がれる、橋台背面に軽量材料を配置した場合の橋台及び橋台基礎の設計法の提案に向けて、裏込めとしてEPSを用いた場合、土を用いた場合、何も設置しない場合の橋台の応答を数値計算により比較した。その結果、橋台背面にEPSを設置した場合の橋台の地震時

の挙動は、背面に土を設置した場合よりも何も設置しない場合の挙動に近いことがわかった。今後、引き続き、橋台躯体が受ける荷重のうち、慣性力や背面からの荷重の大きさの割合や履歴特性を詳細に分析するとともに、EPS以外の材料についても検討を進め、耐震設計法の提案を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 牧剛史、土屋智史、渡辺忠朋、前川宏一：3次元非線形有限要素を用いたRC杭基礎―地盤計の連成地震応答解析、土木学会論文集A、vol.64、No.2、pp.192-207、2008。
- 2) 発泡スチロール土工法開発協会：EPS工法設計・施工基準書（案）、2007。
- 3) 岩崎敏男、常田賢一、吉田精一：沖積粘性土の動的変形特性―せん断剛性率とヒズミ依存性―、土木研究所資料第1504号、pp.49-54、1979。
- 4) 岩崎敏男、龍岡文夫、高木義和：地盤の動的変形特性に関する実験的研究（II）―広範囲なひずみ領域における砂の動的変形特性―、土木研究所報告第153号、1980。
- 5) 横田耕一郎、龍岡文夫：不撓乱洪積粘土のせん断変形係数について、土木学会第32回年次学術講演会概要集、pp.257-258、1977。

## Research on the seismic design of hybrid geotechnical-bridge structure

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2009-2011

**Research Team** : Bridge and Structural Technology  
Research Group

**Author** : HOSHIKUMA Jun-ichi

SHIRATO Masahiro

OKADA Takao

**Abstract** : The standard seismic design of highway bridge abutments is assumed to use sand or gravel as backfill. For example, the seismic design force of abutment is set based on the assumption that abutments are affected by the response of backfill during earthquakes. In addition, when using sand or gravel, the settlement of backfill is easy to be recovered after earthquakes and there is no severe problem to check the backfill service condition. However, when artificial materials such as formed cement, formed polystyrene, reinforced soil etc are used as backfill, the assumption above is not always relevant. In FY2009, we conducted the dynamic analysis of an abutment with different backfill material composed of sand, EPS, and none. As a result, the abutment response during earthquakes has more similar to each other when using EPS as backfill and when using nothing as backfill.

**Key words**: abutment, backfill material, formed polystyrene, seismic performance, dynamic analysis