新しい盛土構造を用いた橋台の設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 4～令 6
担当チーム：橋梁構造研究グループ
研究担当者：西田秀明、飯島翔一

【要旨】
本研究は、新しい盛土構造を用いた橋台の設計法を提案するうえで検証が必要となる項目とその方法の提案を目的として、砂質土を主体とした盛土、軽量盛土、補強土壁の各構造を橋台背面部に適用した場合を対象とし、技術基準に規定される各要求項目に対する検証事項を整理するとともに、整理・検証を試みたものである。本稿では、それらのうち、橋台への作用、耐久性、施工及び維持管理に関する検討結果を整理、ならびに新しい盛土構造を用いた橋台を設計するうえで確保すべき性能の比較対象となる通常の盛土を適用した橋台に対する動的遠心模型実験の結果について報告する。
キーワード：橋台背面アプローチ部、新しい盛土構造、設計法

1. はじめに

昨今、土木を含む建設業界では、熟練技術者、労働者の不足が深刻化しており、我が国の持続的な発展の不安要素の一つとして挙げられる。土木分野のうちの道路施設を見ても、新技術の導入が期待されており、例えば、令和２年に行われた国土交通省の道路技術懇談会では、道路分野における新技術導入促進方針(案)を定め、性能に応じた新技術の導入を可能とするために必要なプロセスを技術基準類に明確に位置づけることが示され [1]、活用を後押ししている。しかし、潜在的にニーズがあるにも関わらず、現実的には、中々活用が進んでいないのが現状である。例としては、橋台背面の盛土構造に新しい技術を適用することが期待されているが、標準的な設計法が示されていないなどの理由から、普及が進んでいないことがある。橋梁には、端部に橋台が設置され、その背面側に盛土構造が続き、道路が形成されるのが一般的である。一方で、周辺の土地制約や工費削減などの観点から、直壁構造の擁壁を有する盛土や土ではなく新材料で構築するなどの新しい盛土構造の適用事例も増えてきている。他方、今後も橋台背面に新たな盛土構造を用いた構造が開発されうる中で、そのような新構造を有する橋梁が所要の性能を有することを如何に検証するかが課題である。

こうしたことから、本研究では、新しい盛土構造を用いた橋台の設計法を提案するうえで検証が必要となる項目とその方法の提案を目的として、新しい盛土構造を用いた橋台の作用や抵抗の実態の検証、橋台の耐荷性能への影響の試算、耐荷性能への影響を考慮した新しい盛土構造を用いた橋台の設計法の検討を行った。また、令和４年度～５年度にかけて、橋台背面アプローチ部等の設計に関する共同研究を、土質・振動チーム、施工技術チーム、（一財）土木研究センター、EPS 開発機構、国総研で実施した。共同研究では、軽量盛土工法および補強土壁工法を対象として、アプローチ部の性能検証項目及び標準的な試験方法の検討を行った。本稿では、これらの検討で得られた成果を報告する。

2. 橋台及び橋台背面アプローチ部に求められる性能の整理と検討結果

平成２９年道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編（以下、H29 道示）[2]における一般的な橋台の設計は、簡単に述べると以下のようにして行われる。橋台は橋台の自重、上部構造からの荷重、橋台背面から作用する土圧、地震の影響、その他の作用等を考慮して、橋台基礎の安定性を照査するとともに、橋台のたて壁やパラペットなどの各部材に生じる断面力が安全余裕を考慮した制限値以下であることを照査する。また、橋台背面アプローチ部に関しては、H29 道示に橋台背面アプローチ部に用いる構造に求められる要件が規定されている。これらは主に土砂を締固めて構築されるような盛土構造を標準的な構造として念頭においているが、それ以外の新しい盛土構造を橋台に適用する場合においても同様に性能を満足する必要がある。それに加えて、通常の盛土と異なる振動特性を持つ場合には、レベル２地震動を考慮する設計状況における耐荷性能の照査を行うことが解説に示されている。本研究では、

H29 道示に示されている橋台背面アプローチ部に求められる各要件に対して、新しい盛土構造を用いた場合における検討を行った。求められる要件と、通常の盛土および軽量盛土、補強土壁の各構造において行った検討内容を表-1 に示す。なお、ここでは、求められる要件のうち、３つの要件を抜粋して記載している。それぞれについて以下に述べる。

2.1　橋台への作用に関する検討

一つ目の要件は、耐荷性能の照査において、考慮する各状況での橋台への作用等が明らかであることである。標準的な構造である通常の盛土を適用した場合は、道示に規定される主働土圧および地震時主働土圧が三角形分布で作用するとして背面からの作用を考慮している。既往の橋台には、このような作用に対して橋の機能の観点と構造の安全の観点から大きな不具合が生じていないといった経験も踏まえて所要の性能性能を満足しているとみなしている。一方で、上記のような考え方のもとで経験的に設計法として確立されてきた部分が少なからずあり、三角形分布の土圧を作用させて規定に沿って設計された橋台が定量的にどの程度の水準で安全性が担保されているか、また、地震時などの状況における時々刻々と変化する橋台への動的作用の影響が耐荷性能の評価において如何にして考慮されていると言えるかなどは明らかではない。そこで、盛土から橋台への土圧がどのように作用し、橋台の安定性にどのような影響を与えているかを確認するために、通常の盛土を適用した橋台に対して動的遠心模型実験を行った。その結果の一部を 3.に後述する。

また、軽量盛土、補強土壁を橋台に適用した場合においても、この要件を満足する必要がある。道示の解説にも示されている通り、軽量盛土のうち発泡スチロール（以下、EPS）ブロックのようなそれ自体が自立する材料を用いて構成される構造は、通常の盛土とは振動特性が異なると考えられるため、その影響を別途検証する必要があるとされている。また、既往の研究では、EPS ブロックの間に設けられるコンクリート床版と橋台との相互作用が橋台に与える影響は定かではない。これらの影響を含め、橋台と軽量盛土の相互作用を明らかにするために、動的遠心模型実験を行い、過去に実施した実験や解析と合わせて分析を行った。その結果、橋台とその背面の軽量盛土が地震動などにより振動したときに、橋台が軽量盛土を押し込むように挙動することで、通常の盛土を有する橋台が考慮する主働土圧による作用とは異なるコンクリート床版からの作用を受けること、橋台とコンクリート床版の間に緩衝用の EPS ブロックを設置することでその作用を軽減することができることが明らかとなった。

2.2　耐久性に関する検討

二つ目の要件は、橋台背面アプローチ部の構造に用いられる材料の劣化などの経年変化に対して所要の耐久性を有することを要求するものである。通常の盛土を適用した場合であれば、経年変化として考えられるのは、スレーキングなどによる盛土材自体の変化や風化や水によるのり面の侵食などである。そして、これ

表-1　本研究の検討内容（通常の盛土、軽量盛土、補強土壁）

要件	条文	検討内容（通常盛土）	検討内容（補強土壁）	検討内容（軽量盛土）
橋台への作用に関する要件	設計において考慮する各状況における橋台背面アプローチ部から橋台への作用等が明らかであること。	動的遠心模型実験結果を分析することにより、橋台背面アプローチ部に通常の盛土を用いた場合の橋台への作用等や安定性への影響を確認した。	動的遠心模型実験結果を分析することにより、橋台背面アプローチ部に補強土壁を用いた場合の橋台への作用と水平震度との関係、設計式との関係を確認した。	動的遠心模型実験結果及び振動台実験、解析結果を分析することにより、橋台背面アプローチ部にEPS 盛土を用いた場合の橋台とコンクリート床版との相互作用を明らかにし、対策方法の効果を検証した。
耐久性に関する要件	経年的な変化への対処方法が明らかであること。	風化や水によるのり面の侵食などに対して、吹付けコンクリートや植生など別途の措置を施すことで耐久性を確保できるとみなすことができることを確認した。	補強土壁に一般的に用いられる 鋼製補強材に着目し、腐食減量のデータを統計的に整理し、100年後の腐食減量の見込みを検証した。	EPSブロック、緊結金具、壁面材について、劣化因子に対する経年変化を過去の材料試験などの結果から整理・分析し、耐久性を確認した。
施工や維持管理に関する要件	1)及び2)を満足するための設計，施工及び維持管理の方法が明らかであること。	通常の土を用いた盛土構造であれば，適切な基礎地盤の処理と排水施設の設置を行うとともに，適切な材料を用いて締固め管理等を行い，踏掛版を設けたうえで，点検等の維持管理を適切に行うことにより，考慮する各状況において橋と土工の間で路面の連続性が確保されるとみなすことができることを確認した。	過去に大規模地震動の作用を受けた橋台背面アプローチ部の補強土壁の被災事例の収集・分析や動的遠心模型実験結果の分析などにより、補強メカニズムが維持される変状の形態や変形量を検証し、点検において状態を外観により確認及び把握する上での着眼点を整理した。	過去に大規模地震動の作用を受けた橋台背面アプローチ部のEPS 盛土の被災事例を収集・分析することにより、通行機能を確保するための措置ならびに対策等を整理し、点検においてEPS 盛土の状態を外観により確認及び把握する上での着眼点を整理した。

らのような経年変化に対しては、吹付けコンクリートや植生などの対策を講じてのり面を保護したり、道示の参考資料に示されるような排水施設を設置して盛土内に水が浸入しないような措置を施すのが一般的である。道示において耐久性を確保する方法として類型的に３つ挙げているうちの方法２は、別途の措置により経年変化の影響を及ばないようにするものであり、上記の対策や措置は方法２に当てはまると考えることができる。軽量盛土や補強土壁に用いられる人工材料に対しても、その材料が耐久性を有しているかどうかの検証が必要となるため、耐久性を確保するための３つの方法のうち、どの方法によって確保していることを実現しようとしているのか、道示で規定している標準的な設計供用期間 100 年の間に部材交換などが必要となるかどうかなど、維持管理を含めた戦略をたてることが求められる。共同研究では、軽量盛土に対しては、EPS ブロック、壁面材、EPS ブロック同士を接続する緊結金具について、それぞれの劣化因子に対する経年変化の実態を過去の材料試験や既往研究などを確認して整理した。また、補強土壁については、鋼製補強材の腐食に対して、腐食減量の測定データを統計的に分析することにより、標準的な設計供用期間の 100 年後における腐食減量の評価などの検討を行い、経年変化への対処方法の考え方を整理した。

2.3　施工や維持管理に関する検討

三つ目の要件は、上記２つの要件を満足するための施工や維持管理の方法を設定して、考慮する各状況において橋と土工の間で路面の連続性が確保されることを要求するものである。通常の盛土を適用した場合であれば、適切な基礎地盤の処理と排水施設の設置を行うとともに、適切な材料を用いて締固め管理等を行い、踏掛版を設けたうえで、点検等の維持管理を適切に行うことにより、大規模な地震の際も含めて通行機能を確保するうえで重大な障害にならないことがこれまでの震災経験等により確認されていると H29 道示の解説に記述されている。また、軽量盛土や補強土壁を適用した場合には、沈下による変形が生じた場合に、通常の盛土と比べて復旧が難しいとされているとも記述されている。こうしたことから、基礎地盤が不安定な場所で用いるのは避け、変状の程度を点検などにより速やかに確認できることや、速やかな復旧が可能となる程度の損傷に留める構造としておくことが必要である。この要件に関して、共同研究では過去に震度５以上の大規模地震動の作用を受けた被災事例を収集・分析し、変状の傾向や課題を整理し、点検において盛土の状態を外観により確認及び把握する上での着眼点、通行機能を確保するための措置ならびに対策等を整理した。

なお、これまでに示した研究結果のうち補強土壁に関する結果は報告書に取りまとめて公表されているため、詳細はそちらを参照されたい[3]。

3.　通常の盛土を適用した橋台に対する動的遠心模型実験

ここでは、新しい盛土構造を用いた橋台を設計するうえで確保すべき性能の比較対象となる通常の盛土を適用した橋台の有する性能を確認するために、通常の盛土を適用した橋台に対する動的遠心模型実験を実施し、地震動が作用したときの橋台と通常の盛土の挙動を確認した結果について報告する。

3.1　実験概要

実験は遠心加速度 80G 作用下で加振し、実験模型は相似則に従い、縮尺 1/80 で製作している。本節はすべて実物スケールで記述する。模型概要図を図-1 に示す。逆 T 式橋台模型は、高さ 8m、幅 12m、奥行き 6.56m で、杭模型は、杭径 0.88m、曲げ剛性 7.37×10^7kN/m^2、杭本数９本である。アルミパイプを用いて、実物と曲げ剛性が近しくなるようにした。桁模型はヒンジで橋台模型と接続し、反対側の端部は水平ローラーとした。

地盤模型は、支持層と背面盛土には宇部珪砂 6 号を用いて、相対密度 90%と 80%、層厚 3.2m と 8m となるよう作製した。粘土層にはスミクレーを用いて、脱気水で飽和した状態のまま遠心力で圧密させた後、層厚 16.8m となるよう成形して作製した。

遠心加速度が目標である 80G に達するまで、遠心加速度の上昇速度は背面盛土の盛立て速度として 3cm/day を想定し、これと等価になるよう模型スケールで 1G/min とした。

入力地震動は、H29 道示[4]に規定されるレベル 2 地震動タイプ I の動的解析用時刻歴波形 2-I-I-3 を相似則に基づいて補正した波形である。

3.2　実験結果

橋台とその背面の盛土との作用と抵抗を確認するため、図-3 に示す、橋台および盛土の応答加速度、橋台に作用する水平力の時刻歴図に着目する。また、土槽底面からの入力地震動を図-2 に示す。図-3 は、入力地震動の加速度が特に大きい 96～104s を拡大して示している。橋台の応答加速度は、橋台模型の天端に取り付けた加速度計で計測した値を、盛土の応答加速度は、橋台のたて壁背面から 100mm 離れた盛土地盤内に埋

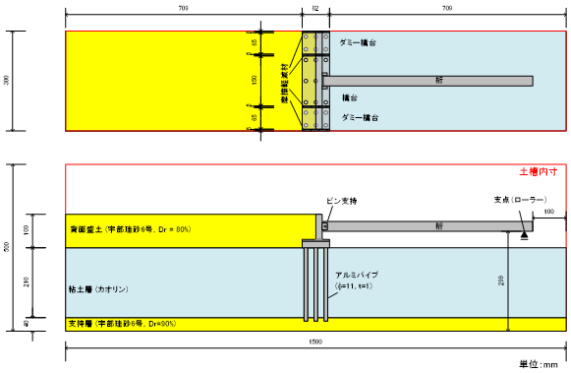

図-1　模型概要図

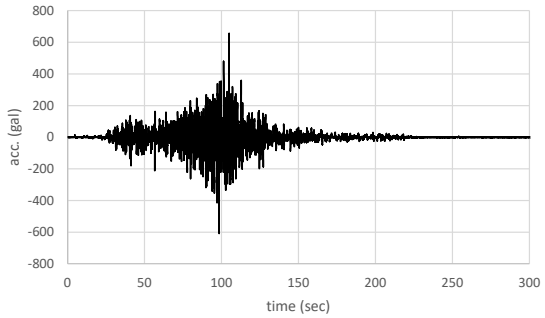

図-2　土槽底面からの入力地震動

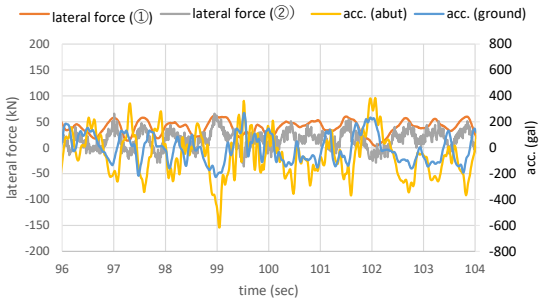

図-3　橋台および盛土の応答加速度、橋台に作用する水平力の時刻歴図

め込んだ加速度計で計測した値を示している。橋台に作用する水平力は、①橋台模型のたて壁基部に貼り付けたひずみゲージ、②杭基礎模型に貼り付けたひずみゲージにより計測されたひずみ値から換算した値を用いて算出した。

２つの方法で算出した、橋台に作用する水平力に着目すると、図-3 より応答波形が同位相であり、かつ、時間に拠らず概ね等しい値で応答していることが見て取れる。次に、橋台および盛土の応答加速度に着目すると、図-3 より同様に応答波形が同位相であるのが確認できる。一方で、加速度の負方向の応答値は波形のピーク付近で差が生じており、橋台の応答加速度の方が大きくなっている。

そして、水平力と加速度の応答波形を比較すると、図-3 より逆位相であることが見て取れる。応答加速度の逆符号が慣性力であることを考慮すると、橋台に作用する水平力と、橋台および盛土の慣性力はともに、同じ方向に作用していることになる。また、負の応答加速度のピーク付近で両者に差が生じていることから、慣性力が正方向に作用するとき、ここでは橋台の背面から前面への方向に動こうとするときに、ある加速度までは概ね同じ動きで、それを超えると橋台の方が大きく動こうとするといえる。

4.　まとめ

本稿では、新しい盛土構造を用いた橋台の設計法を提案するうえで検証が必要となる項目とその方法の提案を目的として、H29 道示に示されている橋台背面アプローチ部に求められる要件のうち３件に対して、通常の盛土および軽量盛土、補強土壁の各構造を橋台背面に用いた場合における検討を行った。また、新しい盛土構造を用いた橋台を設計するうえで確保すべき性能の比較対象となる通常の盛土を適用した橋台の有する性能を確認するために、通常の盛土を適用した橋台に対する動的遠心模型実験を実施し、地震動が作用したときの橋台と通常の盛土の挙動を確認した結果について報告した。

これらの研究と並行して、現在、道路橋の設計基準の改定作業が進められており、令和６年能登半島地震において見られた、橋台背面土砂の崩壊や流出による交通機能の低下などを踏まえて、規定が充実される見込みである。このような基準の動向も踏まえつつ、引き続き研究を行っていく予定である。

参考文献

1)　国土交通省：第２回 道路技術懇談会 配付資料 https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/dourogijutsu/doc02.html

2)　（公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編、2017.11.

3)　国土交通省 国土技術政策総合研究所、（国研）土木研究所、（一財）土木研究センター、発泡スチロール土木工法開発機構：橋台背面アプローチ部等の設計に関する共同研究(補強土壁の検証編)、国総研資料　第 1300 号、共同研究報告書 第 602 号、2024.12.

4)　（公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、2017.11.

Study on design method of bridge abutment using new embankment structure

Research Period: FY2022-2024
Research Team: The Bridges and Structural Technology Research Group
Author: NISHIDA Hideaki
IIJIMA Shoichi

Abstract: The introduction of new technologies is expected to be promoted in the road sector. In this study, the purpose is to develop a design method for bridge abutments using new embankment structures, and in order to understand the effects of the differences between conventional and new embankment structures on the interaction with the abutments, the necessary studies were conducted for the construction of a design method for each structure. In this paper, the results of dynamic centrifuge model experiments on conventional embankment structures are reported, and the integrated behavior assumed in the technical standards is confirmed. In addition, a study was conducted for the design methods of the lightweight embankment method and the reinforced embankment method as new embankment structures.

Keywords: Bridge abutment, New embankment structure, Design method