

論文の内容の要旨

論文題目 セメント改良補強土を利用した耐震性橋台に関する研究

氏 名 青 木 一 二 三

橋梁と盛土の接続部である橋台は、橋台から盛土へのアプローチ部が、列車走行による軌道から受ける繰返し荷重のため、橋台背面路盤の沈下が顕著になり、乗り心地などの劣化をもたらし、必然的に軌道整備等の保守量が多くなる。とりわけ地震時には橋台背面の盛土の沈下は著しく、路盤面に顕著な段差や不同沈下が生じることになり、列車の走行安全性を低下させる問題があった。

これらの問題を踏まえて長野新幹線で採用したスラブ軌道対応のセメント改良アプローチブロックは、列車走行における乗り心地の向上とメンテナンスフリーを実現した。また、地震時における橋台背面の揺すり込み沈下も十分小さくなることが想定された。一方、1995年兵庫県南部地震において補強土擁壁が高い耐震性能を発揮した。補強土擁壁は、背面盛土の揺すり込み沈下が少なく、背面盛土をジオグリッドにより壁体と一体化することによって壁体の断面力が軽減され、安定においても壁体の基礎が小さくできる特徴を有している。

以上の背景のもとで、本研究において飛躍的な耐震性と経済性を備えた橋台を開発にあたり、セメント改良土とジオテキスタイル補強土に着目して検討を進めることとした。

地震時における橋台の背面盛土沈下対策工は大きく分けて「揺すり込み沈下対策」

と「段差対策」がある。前者には、橋台背面（アプローチブロック）を、①粒度調整砕石などの良質の盛土材を用いて十分に締め固める方法、もしくは②粒度調整砕石にセメントを添加したセメント改良礫土を用いる方法がある。方法①は従来から多く用いられてきた対策工であり、方法②は北陸新幹線で用いられた対策工である。後者は、橋台と背面盛土をジオテキスタイルなどの補強材によって連結する対策工であり、ジオテキスタイルによって橋台の安定性が高まると同時に、仮に沈下が生じても橋台背面での大きな段差とはならない効果がある。

以上の対策工を施した橋台について、10分の1スケールの橋台模型を用いた振動台実験を系統的に実施して耐震性能を検証した。

アプローチブロック橋台の実験では、無補強橋台および粒調砕石を用いた橋台は背面盛土が崩壊した。セメント改良土を用いた橋台では、フーチングに踵がある場合は背面盛土が崩壊したが、フーチングに踵がない場合は、橋台部分と背面盛土が分離されているために、互いの動的応答特性が大きく異なるという欠点が見られた。一方、補強土橋台の実験では、背面盛土に敷設した補強材を橋台に固定することによって、補強領域の土が橋台・壁面工と一体となって挙動し、補強領域全体の土のせん断抵抗が橋台の耐震性に大きく寄与することが判明した。

以上の実験結果から新しい橋台形式として、揺すり込み沈下を抑制するためにセメント改良土アプローチブロックを用い、段差沈下を抑制するために補強材を配置してアプローチブロックと橋台を連結したフーチング部の踵の無い「セメント改良補強土橋台」を提案した。

「セメント改良補強土橋台」を対象にした詳細な模型振動実験では、前フーチングが大きい場合と小さい場合の比較実験を行った。前者の場合は転倒に対してフーチングに作用する地盤反力で大きな抵抗力が得られるのに対して、後者の場合は得られる地盤反力が小さいために、大きな補強材張力が発揮され、これを介して抵抗力がセメント改良土に分担された。この結果、補強材張力が破断強度以下であれば、躯体厚、フーチング幅をスリム化できることが分かった。

レベル2地震時の変位予測法を確立するために、上記の模型振動実験結果を対象として、Newmark法と極限安定解析による残留変形解析、等価線形化法による動的FEM解析と累積損傷度理論を組合わせたハイブリッド解析による累積変形解析、弾塑性FEM解析および弾塑性FDM解析による動的変形解析を実施して検証した。この結果、有限差分法による弾塑性FDM解析は、残留変形が若干小さめであったが、パラメータの少なさ、解の安定性といった利点のほか、段階盛土、荷重載荷などの施工工程を

反映した解析が可能であり、詳細な動的変形解析に適していることを明らかにした。一方、Newmark 法による解析は、入力地震動が大きくなって滑動安全率が 1 以下になると残留変形が急激に大きくなり、実測値より若干大きめではあるが、実設計において滑動変形量を比較的簡易に求めるために有効であることが分かった。

提案橋台を実現場に適用するにあたって、提案橋台の主部であるセメント改良土の変形強度特性に関する試験とセメント改良土中に定着した補強材の引抜き抵抗特性に関する試験を実施した。さらに、セメント改良アプローチブロックの必要強度を得るための施工管理手法について検討した。

セメント改良補強土橋台の背面盛土（アプローチブロック）には、粒度調整砕石をセメント安定処理して締固めた「セメント改良礫土」を用いるが、そのピーク強度、残留強度などの強度特性を明らかにする必要がある。このため、セメント改良礫土の大型三軸試験結果を行なった結果、十分な締固めを行なうことでセメント改良礫土のピーク強度が飛躍的に高まることが確認できた。

セメント改良補強土橋台は、躯体に結合されたジオグリッド補強材をセメント改良土に定着することによって、構造的に一体化して安定性が確保される。また、補強材の引抜き抵抗特性は躯体の設計にも大きく関与する。このため、セメント改良補強土アプローチブロックに敷設した補強材の引抜き試験を行なった。いずれの試験も補強材がつかみ部近傍で破断し、セメント改良土との付着は良好であった。同荷重レベルでの引き抜け量は、剛性の高い 60 kN/m タイプの方が 30 kN/m タイプよりも小さかった。しかし、拘束圧の違いによる引き抜け量の差は見られなかった。補強材が比較的固いセメント改良土の中で引き抜かれる場合、セメント改良土と補強材のすべり特性だけでなく、補強材の引張変形特性が強く反映されると考えられる。なお、引抜き試験による補強材のばね定数は、想定した設計ばね定数と近いことが確認された。

セメント改良補強土橋台は、セメント改良粒度調整砕石アプローチブロックの抵抗力に依存する構造物であるので、適切な施工管理手法を定め、品質が保証できるものにする必要がある。粒度調整砕石にセメントを添加し、一層ごとに撒き出して十分な転圧を行うことで、間隙を限りなく小さくして、土の恒久的な安定性を確保することが最も重要な施工条件となる。締固め管理は、これまでの施工試験方法および施工管理データの問題点とセメント改良礫土の三軸圧縮試験結果に基づいて、締固め密度比 (D 値) を基本にした新しい施工管理方法を提案した。合理化された主な点は以下のとおりである。

- ① 圧縮試験用の供試体寸法は、粒調砕石の最大粒径を考慮した大きさにした。

② 締固め密度比(D 値)が 95 %のときの強度保証に配慮した。

これまでの模型振動実験による挙動および検証解析結果、セメント安定処理土の強度特性およびジオグリッド補強材の引抜き抵抗特性を踏まえ、実務設計に適用できる設計手法を提案した。特徴としては、橋台構築における施工手順を踏まえるとともに、橋台躯体と補強材を介してそれを背面で支持するセメント改良アプローチブロックに分離して、安定および部材の照査を行うことにある。これによって、橋台躯体と背面のセメント改良補強土アプローチブロックとの複雑な相互作用を反映させながら、明解で容易な設計法にすることができた。

九州新幹線高田トンネル坑口付近において、提案した設計手法および施工管理方法に基づき設計、施工したセメント改良補強土橋台を対象にして、施工管理手法の確認、載荷試験によって荷重一変形特性、試験時の挙動、主要部の応力状態を把握するとともに、施工中および長期的な挙動を計測した。さらに、水平載荷試験結果について逆解析を行い、同定した諸定数を入力値としてレベル 2 地震動に対する挙動解析を実施し、実用的設計手法の有用性および本構造の耐震性能を検証した。

セメント改良補強土橋台は、従来形式である逆 T 式橋台との比較において、耐震性能は同等以上になっているが、建設費は約 20% 経済的であった。これは、ジオグリッド補強材等のセメント改良補強土アプローチブロックの建設費は増加するが、橋台の躯体およびフーチングの建設費が各段に少なくなったことによる。

水平載荷試験は、おおむね計画最大水平荷重近くで、反力体である隣接橋脚 2 基の変位が大きくなった時点で終了した。本橋台天端の水平変位量は 16mm で、反力橋脚の水平変位量の約半分であり、セメント改良補強土アプローチブロック等の背面側の慣性力を作用させていない条件では、橋脚 1 基の 4 倍程度の水平耐力を有していた。セメント改良補強土の変位モードは転倒モードであり、事前検討での想定結果と整合していた。また、補強材等の部材応力も想定結果を下回った。

セメント改良補強土橋台の長期計測を、橋台施工時から水平載荷試験を経て上部工載荷後測定値が十分安定したと見なせる約 1 ヶ月間まで行った結果、セメント改良補強土橋台の安定性が極めて高いことを確認した。

水平載荷試験結果について弾塑性 FDM 解析による逆解析を行って同定された諸特性を用いてレベル 2 地震動相当の地震波入力による動的解析を行った。この結果、降伏震度と変形モードは、おおむね設計結果と一致することが明らかになった。

本研究の成果として、新たに提案した「セメント改良補強土橋台」が、極めて高い耐震性と経済性を具備したメンテナンスフリーの構造物であることを実証した。