

厳しい制約条件下で施工可能な橋台・擁壁の耐震補強工法

佐名川 太亮* 中島 進* 神田 政幸**

Reinforcement Method of Abutments and Retaining Walls Under Severe Conditions

Taisuke SANAGAWA Susumu NAKAJIMA Masayuki KODA

The earth retaining structures like abutments and retaining walls are constructed at the boundary of bridges or embankments, and the many of them are along or crossing roads, rivers, or beside buildings. Therefore, for reinforcement constructions, strict conditions are normally placed, and the development of the effective method has been required. This paper introduces the new reinforcement methods recently developed, with application examples.

キーワード：耐震補強工法，橋台，擁壁

1. はじめに

設計体系の中で、橋台・擁壁は背面盛土から作用する土圧に抵抗する構造物として「抗土圧構造物」に分類される。1995年の兵庫県南部地震では、橋梁・高架橋のみならず、多くの抗土圧構造物も甚大な被害を受けた。これを受け、抗土圧構造物の設計についても各種の設計基準で、いわゆるレベル2地震動が設計地震動として設定されるようになり、新設の構造物については大規模地震動に対しても崩壊に至らないような構造物を構築されるようになった。一方で、既設構造物については、性能確保を目的とした耐震補強が順次実施されている。橋梁・高架橋などについてはせん断破壊防止を目的とした補強対策は概ね完了しており、続いて、既設の抗土圧構造物や基礎構造物についても必要に応じて耐震対策が検討されるようになってきている。

抗土圧構造物の既往の耐震補強工法としては、例えば橋台については滑动および転倒の抑制を目的として、ストラット工やシートパイル締切り工，グラウンドアンカーにて橋台を地盤に縫い付ける工法等が採用されていた（図1）。また、擁壁に関しては、壁体前面に鉄筋コンクリートを打設した上で、地山補強材でコンクリート壁面の安定を確保する工法などが比較的多く適用されていた（図2）。しかしながら、これらの工法では、施工時に構造物前面の空間を大きく占有する必要があり、都市部などの狭隘な箇所においては、用地や施工環境の制約により施工自体が困難となる場合も多い。一方で、耐震補強を優先的に実施する対象は都市部の構造物であるため、厳しい制約条件下でも施工可能で、かつ経済的な耐震補強工法の開発が望まれていた。

本報では、レベル2地震動に対しても性能を確保することができ、かつ施工時に構造物前面の占有を可能な限り縮小できる抗土圧構造物の耐震補強工法を概説するとともに、適用事例を紹介する。

2. 橋台の耐震補強工法

橋台における地震時の被害には、橋台の背面盛土に沈下が生じ、橋台と背面盛土の間に相対変位が生じる事例が多数報告されている。鉄道構造物の場合、この相対変位により軌道面に著しい変位が生じ、列車の走行安全性の低下に直結することから、近年既設橋台の耐震補強の計画が進められている。しかしながら、優先的に耐震補強の実施が検討されるのは都市部に存在する旧式の橋台

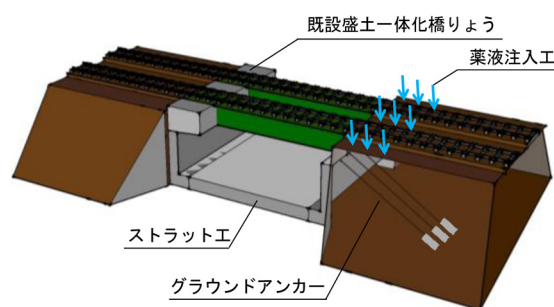


図1 既往の橋台の耐震補強例¹⁾

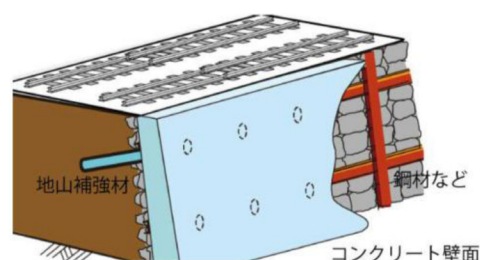


図2 既往壁の耐震補強例²⁾

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

** 構造物技術研究部

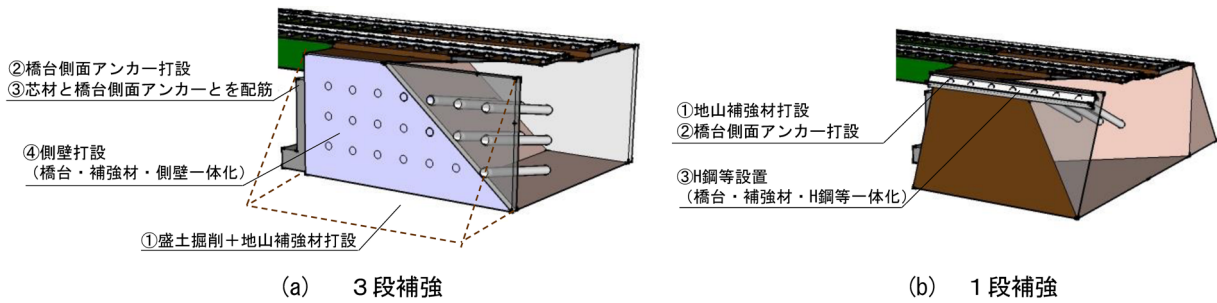


図3 地山補強材を用いた補強工法の概要¹⁾

であるのに対し、これまでに提案されてきた工法では、橋台前面の道路や線路を一時的に占有する必要があるため、計画を進めることが困難な場合が多かった。このような課題に対し、橋台前面の占有を最小限にできる橋台の耐震補強工法として近年以下の3つの工法が開発されており、また現場へ適用されつつある。

- ①地山補強材と橋台との連結による耐震補強工法
- ②橋台背面盛土の地盤改良による耐震補強工法
- ③鋼桁・橋台・盛土一体化橋梁

本章では、各工法の概要ならびに適用事例を紹介する。

2.1 地山補強材と橋台との連結による耐震補強工法

地山補強材と橋台との連結による耐震補強工法¹⁾は、補強材と剛壁面を用いて斜面急勾配化する地山補強土擁壁工（RRR-C工法）を応用し、橋台背面盛土側面から施工を行うことで、橋台・壁面・地山補強材を一体化し、地震時慣性力や地震時土圧に対する抵抗力を増大させる工法である（図3(a)）。橋台翼壁の補強も兼ねており、地震時における橋台と側壁の目開きによる背面盛土の落ち込みも防止できる構造となっている。また、補強効果としては低下するが、地山補強材を1段のみ打設し、鋼材等で橋台と連結する方法も提案している（図3(b)）。なお、地山補強土工法³⁾についてはラディッシュアンカー、キャロットアンカー、ロータスアンカーから選定することができる。

模型実験による補強効果の検証結果を簡単に紹介する。基礎的検討として、地震動の影響を静的場として模擬する「傾斜実験」と、動的場として模擬する「振動実験」を実施した^{例えば¹⁾}。振動実験では、重力式橋台を対象として縮尺1/8スケールの橋台模型を用いて実施している。正弦波500gal加振後の状況を図4に示す。加振後の橋台の残留変形量と背面盛土の沈下量に着目すると、補強を実施することでどちらも大きく抑制されていることが分かる。また、現行の設計基準において、一般的な耐震設計法（梁ばね解析を用いたプッシュオーバー・解析＋非線形応答スペクトル法）による設計法も提案しており、実構造物を想定した試算においても、レベル2地震動に対して十分な補強効果が発揮されることが示された。

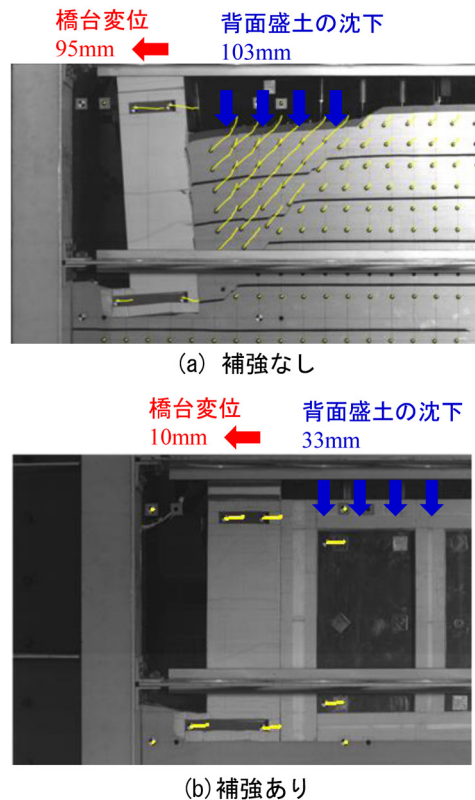


図4 補強材を用いた補強工法の性能確認¹⁾

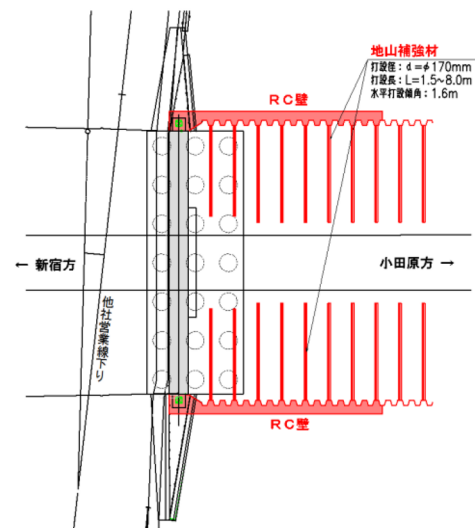


図5 補強計画概要図（平面図）⁴⁾

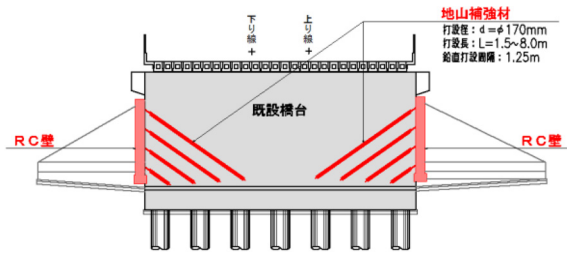
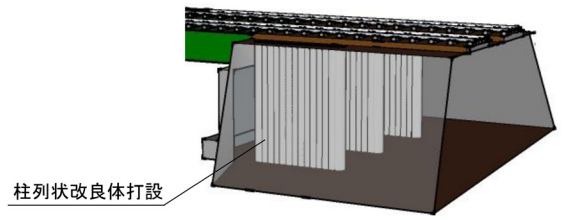


図6 補強計画概要図(断面図)⁴⁾

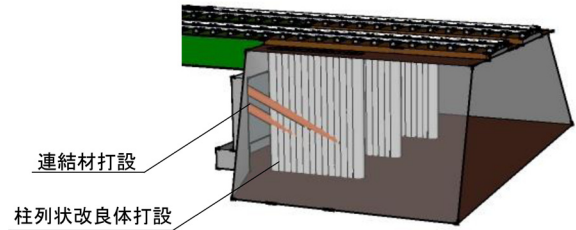
実構造物への適用が検討されている補強計画の概要図を図5, 6に示す。対象は鉄道を跨ぐ跨線橋ならびに盛土であり、橋台前面からの施工を大きく削減可能であること、さらには橋台と盛土の両者を一体として補強できることから、本工法の適用が計画された。現在詳細設計まで完了しており、着工にむけて調整を進めている。

2.2 橋台背面盛土の地盤改良による耐震補強工法

橋台背面盛土の地盤改良による耐震補強工法^{1) 5)}は、柱列状改良体を橋台背面盛土に造成することで土圧を低減し、橋台の変形や背面盛土の沈下を抑制する工法である。また、軌道面から改良体を造成するため、橋台前面からの施工を省略することができる。図7(a)に柱列状改良体を用いた補強工法の概要を示す。本工法は、橋台の背面盛土天端から盛土内にセメント系の材料を用いて、柱列状の改良体を造成する工法である。改良体の造成は、架線に支障しない高さの低空頭型機械を用いて機械攪拌もしくは噴射攪拌により施工可能である。改良体は軌道間に直径800mm程度のを150mm程度ラップさせながら、橋台高さと同程度の延長を連続的に施工することを基本とした。強度としては、土質に応じて1



(a) 連結なし

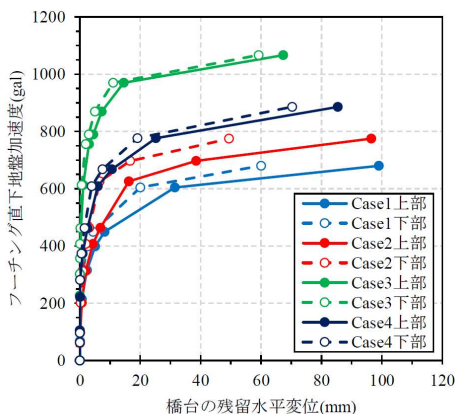


(b) 連結あり

図7 柱列状改良体を用いた補強工法の概要¹⁾

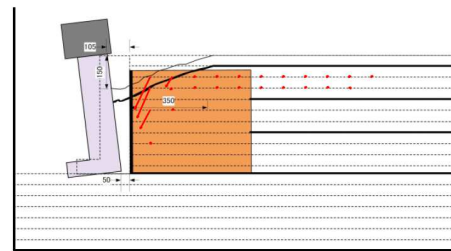
～5N/mm²程度と設定している。また、橋台前面からの施工が必要となるものの、橋台と改良体を連結させることで補強効果を増大させる方法(図7(b))についても提案し、検討を行っている。

本工法は、模型振動実験による検証が実施されている(例えば⁵⁾)。実験結果から、入力加速度～橋台の残留水平変位関係を図8(a)に、加振後の状況を図8(b)に示す。補強効果は連結の有無により大きく異なっており、連結を行わない場合には改良体により地震時主働土圧が低減されることで耐震性能を向上させているが、連結させた場合には、橋台と一体化することで転倒に対する抑え効果が発揮される他、改良体と背面盛土との摩擦が抵抗とな

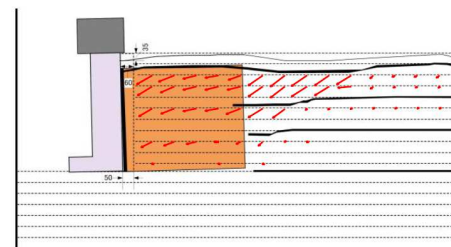


- Case1：無補強
- Case2：補強（連結なし）
- Case3：補強（連結あり）
- Case4：補強（連結あり，改良体寸法小）

(a) 加速度～残留変位関係



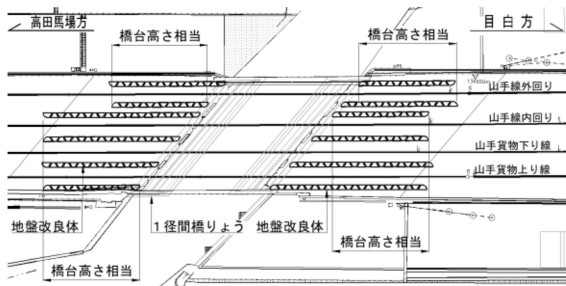
(b) Case2 (800gal加振後)



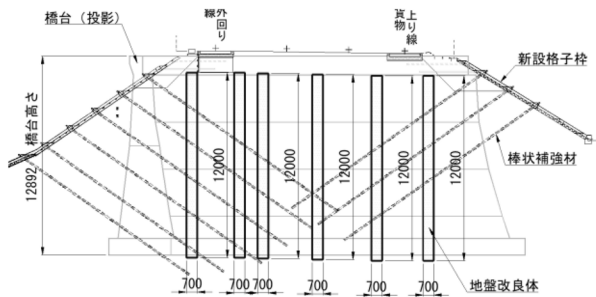
(c) Case3 (1100gal加振後)

(b) 加振後の状況

図8 模型実験による柱列状改良体を用いた補強工法の性能確認(文献5)に加筆



(a) 施工箇所平面図



(b) 施工箇所断面図

図9 柱列状改良体を用いた補強工法の適用事例⁶⁾

り、耐震性能を大きく向上させている。図8(b)の結果を見ると、橋台と改良体を連結した場合には、改良体の寸法を半分にしたとしても、連結を行わなかったケースと同等以上の効果が表れている。模型実験結果等を基に、2.1節と同様に現行耐震設計手法に準じた設計法の提案を行った。

本工法の適用事例⁶⁾を図9に示す。本事例では、複々線を支持する橋台の耐震補強として適用されており、基本的には線路両側を挟み込むように柱列状改良体を配置し、線間が広い箇所については2列配置している。また、橋台に49度の斜角があるため、橋台高さ(13m)をベースに、改良体端部が線路直角方向に揃うように柱列地盤改良体の改良延長を調整している。

当該区間の線路閉鎖時間が約3時間と非常に短いため、通常の改良径 $\phi 800\text{mm}$ でなく、改良径 $\phi 1400\text{mm}$ の半円とし、ラップさせることで $\phi 800\text{mm}$ と同様の柱列地盤改良体を構築した。

2.3 鋼桁・橋台・盛土一体化橋梁

既設盛土一体橋梁⁷⁾は、鋼桁の架け替えを伴わずに鋼桁・橋台形式の老朽橋梁の延命化・耐震化を図ることを目的として、鋼桁と橋台を鉄筋コンクリートで一体化

し、橋台と背面盛土では地山補強材を橋台前面あるいは側面から背面盛土に向けて打設して一体化することで、鋼桁・橋台・盛土部からなる橋梁・橋台部の機能向上を図るものである(図10)。鋼桁と橋台を一体化することにより、支承部のメンテナンスが省略可能となることに加えて、単純支持されていた鋼桁が両端固定となることで、列車荷重作用時の発生モーメントが低減され、必要

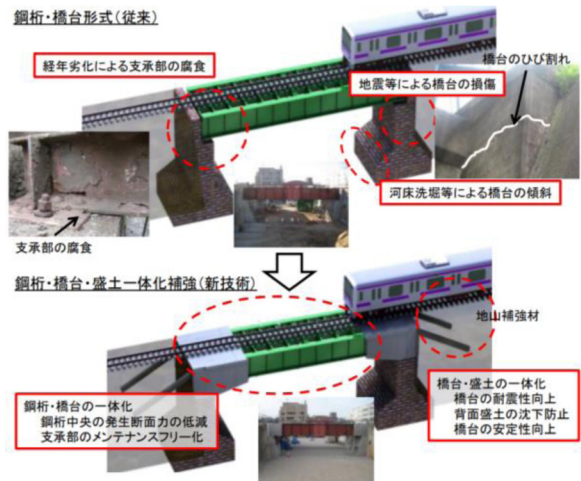
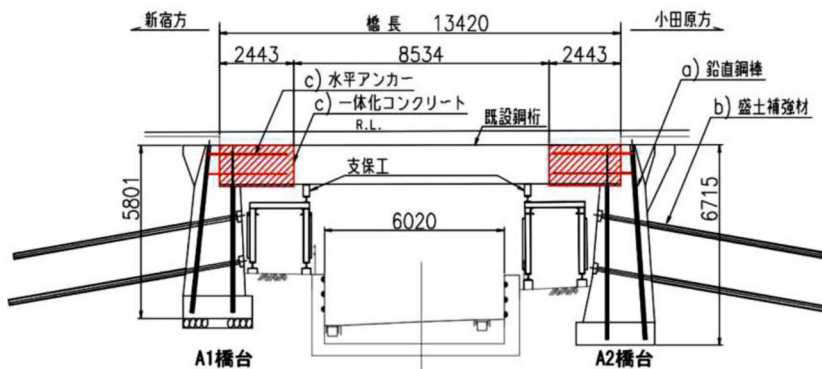


図10 既設盛土一体化工法の概要⁸⁾



(a) 断面図



(b) 隅角部の概要

図11 既設盛土一体化工法の適用事例⁹⁾

耐荷力を大幅に減ぜられることにより老朽鋼桁の延命化が図れるといった利点が得られる。また、地震時に対しては、鋼桁・橋台のラーメン構造化により反対側の橋台背面盛土の受働抵抗が期待できることや構造的弱点である支承部をなくすことで耐震性が格段に向上する。

本工法の開発にあたり、模型実験や隅角部補強に関する部材実験、橋台・背面盛土の一体化補強に関する部材実験を実施し、地震時の全体挙動や部材挙動など基本的な特性を把握した^{例えば8)}。また、試験橋梁を施工し、動態観測ならびに載荷実験を実施しており、その性能を直接的に確認している。

本工法の適用事例⁹⁾を図11に示す。当初は掛け替えを計画していたが、本工法の適用により工事費を抑えながら、耐震補強と併せて橋梁の長寿命化を図った。本事例では、無筋橋台の耐力向上を図るため、はじめに橋台に鉛直方向に鋼棒を挿入し、次に背面盛土と橋台の一体を図るため、橋台前面よりアンカーを打設した。そして、鋼桁と橋台の隅角部を、鉄筋コンクリートで一体化している。

施工後の性能確認として、列車通過時に桁に生じるたわみが施工前と比較して1/2～1/3に低減していることが確認されたほか、付加的な効果として列車通過時の騒音レベルの低下も確認された。

3. 擁壁の耐震補強工法

全国の鉄道沿線には土留め壁が25万か所以上存在しており、このうちの大半が石積み擁壁である。石積み擁壁はコンクリートが普及する前から土留め擁壁として活用されており、大規模地震においては石積み擁壁が崩壊に至る事例が多数報告されている。耐震補強の対象とする重要な構造物ではあるものの、箇所数が多いことから経済的な補強工法の開発が望まれていた。また、これまでに実施されてきた耐震補強工法としては、図2に示した地山補強材と擁壁前面にコンクリート壁体を増設する補強が挙げられる。しかしながら、鉄道沿線においては施工用地が限定されている場合や、石積み壁面に電気設備など撤去・移設が困難な支障物が存在する場合が多いことから、コンクリート壁体を打設することが困難な場合が多い。

そこで、石積み壁の前面にネット・金網などを設置するとともに、地山補強材を打設して背面地盤の安定化を図る工法（ネット補強工法）²⁾が提案されている。概要図を図12に示す。本工法は、擁壁前面に架設されているケーブルなどの支障物の移設が不要であることや、鉄筋型枠工事が不要となるため狭いスペースで施工が可能である点が利点である。また、小径で大きな抵抗力が得られ、施工機械もコンパクトなロータスアンカー工法を

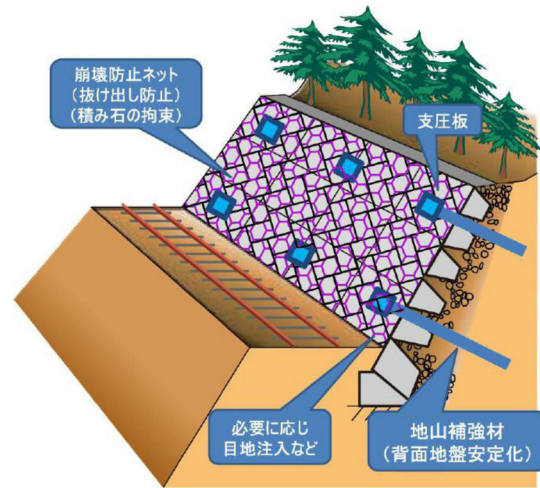


図12 ネット補強工法の概要²⁾

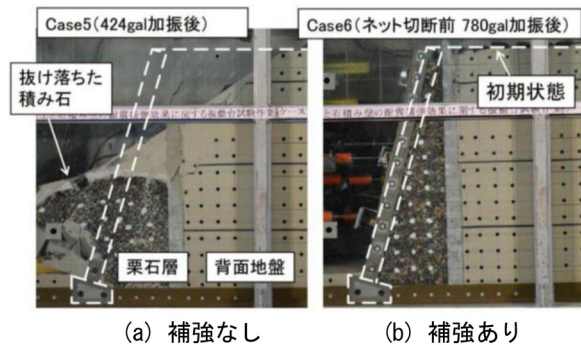


図13 模型振動実験によるネット補強工法の性能の確認²⁾

採用することで、さらに施工性が向上する。

本工法の性能については、模型実験による検証を行っている。検証事例の中から、振動実験における加振後の状況を図13に示す。無対策の場合は、400gal加振終了後に積石が抜け出し崩壊したのに対して、補強したものは、800gal加振後においても比較的軽微な変形にとどまっており、大規模地震に対して要求性能を満足することが可能であることが示された。これらの結果により設計法を提案しており、試算により一般的な石積み擁壁についてレベル2地震動に対しても安全性を満足することを確認している。

実現場への適用事例⁶⁾を図14、図15に示す。対象は約7mの石積み壁であり、石積み壁の全面にケーブルが添架されており、RC壁の打設が困難であったことから、ケーブルを避けながら補強することが可能であるネット補強工法が採用された。地山補強材は1m間隔で直径110mmの棒状補強材を用いることとし、使用するネットの材料は、長期耐久性や難燃性を考慮して、防食を施した高強度硬鋼線を用いている。

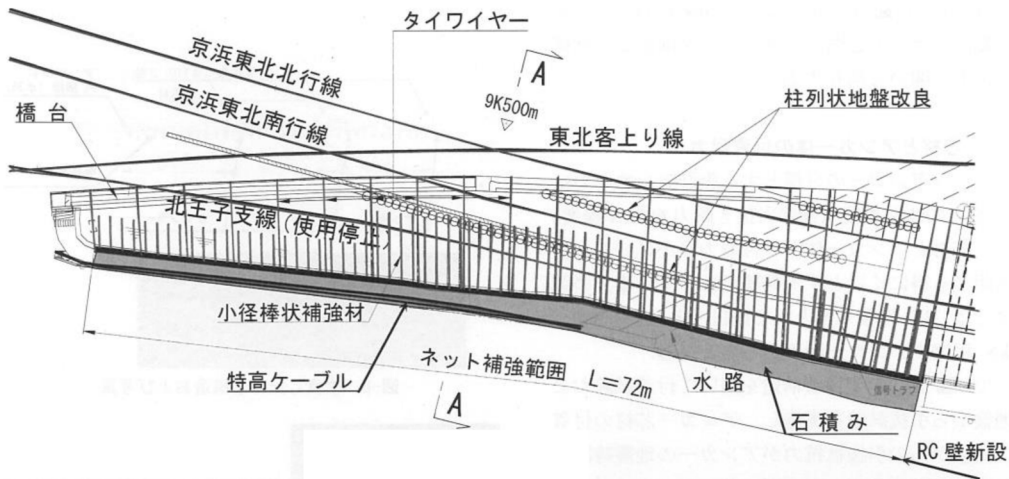


図 14 ネット補強工法の適用事例（平面図）⁶⁾

4. まとめ

本報では、厳しい制約条件下でも施工可能な橋台・擁壁の耐震補強工法を概説するとともに、適用事例を紹介した。各工法について模型実験や数値解析を用いた検討が実施されており、補強工法を適用することで旧式構造物であってもレベル2地震動に対して現行の設計基準における要求性能を満足できることを確認している。ただし、既設構造物の構造条件や地盤条件によって最適な補強の仕様は変化すると考えられるため、今後は補強の実施事例を収集・分析し、より良い補強工法の開発や、補強工法の選定法の提案などを行いたいと考えている。

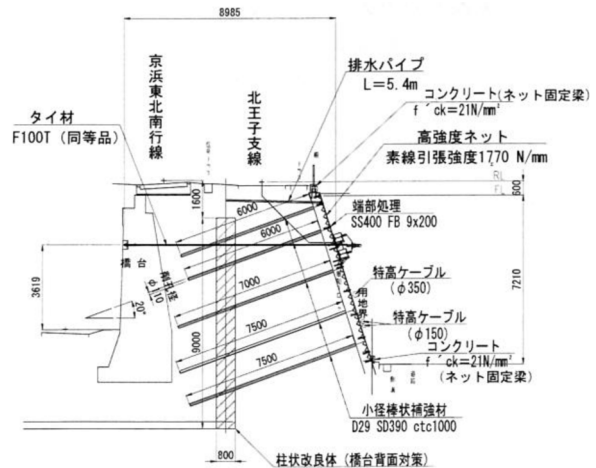


図 15 ネット補強工法の適用事例（断面図）⁶⁾

文 献

- 1) 佐名川太亮, 上野慎也, 西岡英俊, 池本宏文, 山田孝弘: 狹隘な場所の既設橋台の耐震補強工法と設計法, 鉄道総研報告, Vol.32, No.2, pp.41-46, 2018
- 2) 中島進, 渡辺健治, 神田政幸, 藤原寅士良, 高崎秀明, 池本宏文: 崩壊防止ネットと地山補強材による既設石積み壁の補強方法の開発, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.71, No.71, No.4, pp.317-334, 2015
- 3) RRR 工法協会: RRR-Nail (スリーアール・ネイル) による地山補強土工法 設計マニュアル (案), 2015
- 4) 兜俊彦, 早川雄馬, 堤純生, 土田光弘: 小田急小田原線 他社営業線に近接した跨線橋橋台および盛土の耐震補強計画 一新工法採用の試み, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, pp.V-333-334, 2019
- 5) 池本宏文, 高崎秀明, 藤原寅士良, 佐名川太亮, 西岡英俊: 柱列状改良体の連結による橋台耐震補強工法に関する実験的検討: 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4 (地震工学論文集第 36 巻), pp.I_679-I_693, 2017
- 6) 滝沢聡, 中村宏, 油谷彬博, 高崎秀明, 池本宏文, 山本忠: 土構造耐震補強における技術開発成果の現場適用事例, SED, No.53, pp.38-46, 2019
- 7) 白仁田和久, 笹山勝, 神田政幸, 小島謙一, 渡辺健治: 鋼桁・橋台・盛土一体化 (ラーメン構造化) による延命工法の提案と影響解析, 地盤工学会, 第 45 回地盤工学研究発表会, pp.1393-1394, 2010
- 8) 神田政幸, 須賀基晃, 横山智昭, 笹山勝, 杉本一朗: 鋼桁・橋台・盛土一体化による旧式橋梁の耐震補強, 鉄道総研報告, Vol.26, No.4, pp.29-34, 2012
- 9) 岡本浩資, 平島萌, 宮嶋真澄, 江原季映: 小田急小田原線 旧恩田川橋梁における耐震補強工事の施工報告 一既設盛土一体化橋梁 (インテグラル橋梁) 工法の施工, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, pp.VI-871-872, 2019