

土圧を低減した地下空間構築工法の開発



藤沢 一* 太田 正彦** 野澤 伸一郎*

橋桁を橋台で支える形式の架道橋、あるいは駅構内地下道の改築では、既設橋台の背面に仮土留工を設置し、新橋台を構築後、仮土留工を撤去するのが一般的である。橋台は橋桁を支持する機能に加えて背面盛土からの土圧に抗する機能を持つ必要があり、耐震設計法の見直しにより、さらに、工事費の増大と工期の長期化を招いている。そこで、橋台の負担すべき土圧を軽減したスリムな構造の橋台を考案し、この構造に対して試設計と振動試験を行った。その結果、経済性と耐震性能の向上を確認した。

キーワード：橋りょう，橋台，土圧，耐震設計，振動台

1 はじめに

橋台は橋桁の鉛直荷重と背面土圧荷重を支持する機能を併せ持つことが必要である。現在の設計では、これらの荷重に対しては杭によって支持する構造のため、阪神大震災を契機とした耐震設計法の見直しの影響もあって、特に基礎杭の太径化を招いて工事費を押し上げている。新設線の橋台においては、背面盛土を固化材で改良するなどの耐震強化された新型橋台が開発されている¹⁾。そこで架道橋、地下道の改築時に用いる仮土留工を永久構造物として使用して背面土圧を負担させ、橋台と基礎杭のスリム化により地下空間を拡大し、かつ耐震性を向上させた新型橋台を開発することとした。

2 開発概要

開発では、新型橋台の構造、設計方法の検討を行い、試設計により構造諸元とコストダウンの検証を行った。また、新型橋台の耐震性を確認するため、模型振動試験を実施し従来型橋台と新型橋台の耐震性の比較検討を行った。なお、試設計については、すでに設計された橋桁・橋台形式の架道橋の設計条件を用いた。

3 新型橋台の構造

架道橋や構内地下道の拡幅を行う場合、現在一般的に適用されている構造を図1に示す。この構造の場合、仮

土留工としては、狭隘・低空頭の作業空間を考慮してグラウンドアンカーが適用されることが多い。これまではグラウンドアンカーおよび土留壁は仮設部材として適用しており、橋台完成後にはグラウンドアンカーは除去するか、あるいは地盤内に残置されている状態であっても橋台の設計には反映していない。そこで、図2のようにグラウンドアンカーおよび土留工を永久部材として使用し、橋台と連結・一体化することで、橋台および基礎の設計や構造（以下「グラウンドアンカー橋台」という）を合理的かつ経済的で耐震性能を向上させることが可能と考えた。また、このような構造とすることができれば、施工能率の向上だけでなく、橋台、杭のスリム化により橋台前方スペースを従来型よりも大きくとることも可能になると考えられる。また、近年、仮土留工としてラディッシュアンカー²⁾をグラウンドアンカーの代換え工法として適用

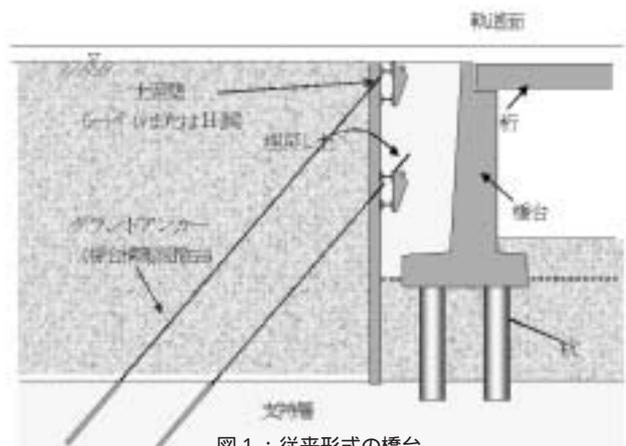


図1：従来形式の橋台

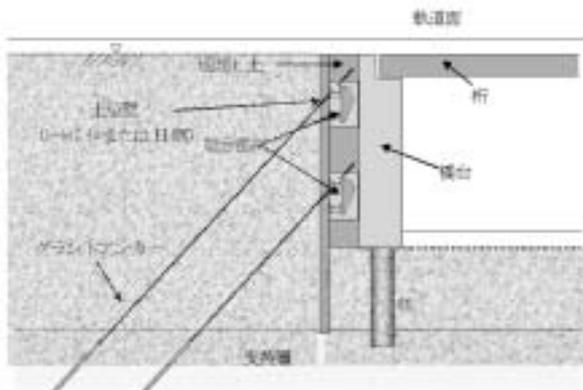


図2：グラウンドアンカー橋台

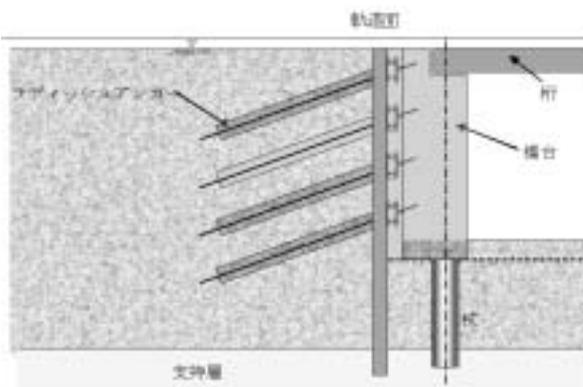


図3：ラディッシュアンカー橋台

する現場が増加していることから、ラディッシュアンカーと橋台を一体化させた構造（以下「ラディッシュアンカー橋台」という）についても、グラウンドアンカーと橋台を一体化させた新型橋台と同様の効果が期待できると考えられる。そこで本検討では、この2タイプの新型橋台の検討を行うこととした。

4 新型橋台の設計方法

新型橋台の設計方法は、出来る限り実務的な設計手法を適用することが重要であり、開発においては、これまでに確立されている設計手法（鉄道構造物等設計標準³⁾に示されている手法など）を基本として、グラウンドアンカー、及びラディッシュアンカーの耐震効果をこれら新型橋台の設計手法に反映させることとした。

グラウンドアンカー橋台、ラディッシュアンカー橋台の設計は、各アンカーの仮設構造物としての設計と橋台とアンカーが一体化した本設構造物（長期使用、使用、終局、地震時の各限界状態）としての2段階の設計を行う必要がある。本設構造物としての橋台の設計における耐

震設計では、静的非線形解析法によることとした。図4に静的非線形解析法に用いた解析モデルの概略を示す。静的非線形解析法は地震による動的な影響を静的荷重に換算して構造物の応答値（応力、変位）を算定する方法であり、モデル化の簡便性から多用される解析法である。ただし、複雑な挙動が予測される構造物の場合には注意を要する必要がある。開発では、別途、詳細な動的解析（動的有限要素解析）を行い、両者の応答値の比較を行い、両解析法による応答値を比較検討し、静的非線形解析法を用いた妥当性を検証している。

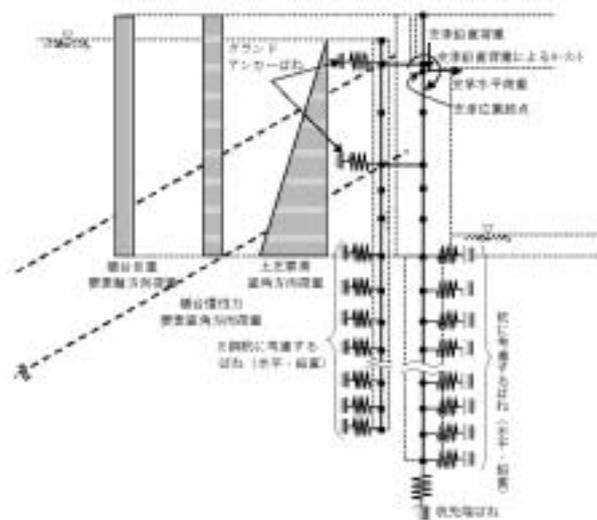


図4：グラウンドアンカー橋台の解析モデルの概略

5 試設計

5.1 構造物のスリム化

図5に示す既存設計の架道橋の橋台に対して、新型橋台の試設計を行った。仮土留壁を仮設構造物として使用した後、本設構造物として活用した場合の設計を行ったグラウンドアンカー橋台の場合を図6に、ラディッシュアンカー橋台の場合を図7に、従来と新型橋台の諸元の比較を表1に示す。橋台背面のグラウンドアンカー、ラディッシュアンカーの土圧負担による橋台背面土圧の低減効果により橋台、杭をスリム化した。グラウンドアンカー橋台は、橋台幅が約25%の減、杭径が約35%の減となり、また杭主方向鉄筋は従来型橋台ではD51（異径鉄筋直径51mm）が26本であったのが、グラウンドアンカー橋台ではD38（異径鉄筋直径38mm）が18本となった。ラディッシュアンカー橋台も同様の結果となった。

表 1 : 従来型橋台と新型橋台試設計の比較

	従来式橋台	新型橋台 (グラントアンカー橋台) (ラディッシュアンカー橋台)
橋台幅 (m)	2.1	1.55
杭径 (m)	1.6	1.0
杭長 (m)	38.5	38.5
杭主方向鉄筋	D51-26本	D38-18本

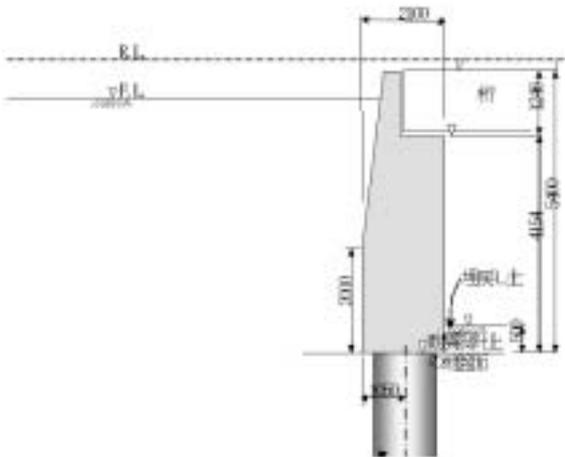


図 5 : 既存設計の橋台

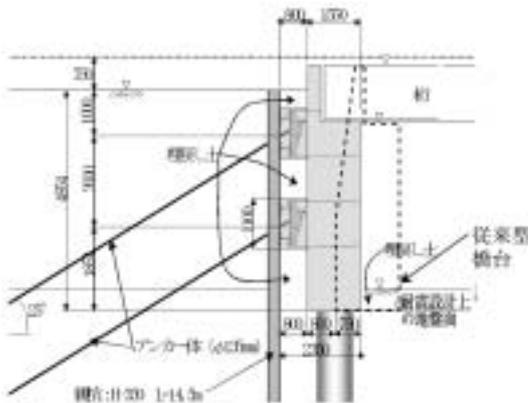


図 6 : グラントアンカー橋台の試設計結果

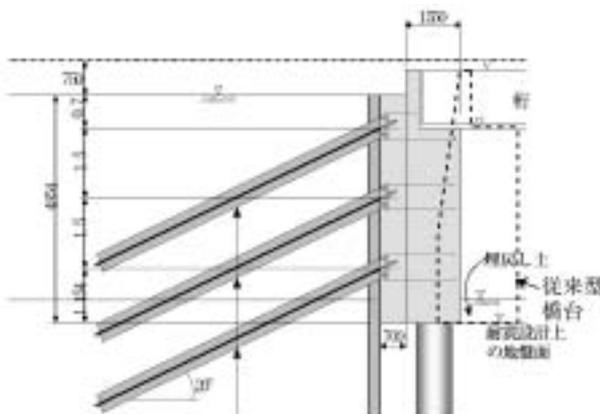


図 7 : ラディッシュアンカー橋台の試設計結果

5.2 耐震設計 (静的非線形解析)

図 5、6、7 に示す従来式橋台、グラントアンカー橋台、ラディッシュアンカー橋台の 3 タイプの橋台の静的非線形解析を行い、地震時における応答値の算定を行った。図 8 に、各タイプの橋台形式の杭頭位置での荷重～変位関係の比較を示す。

図 5 に示す既存設計による従来型橋台 (印) では、設計水平震度 $K_h=0.4$ 弱で杭部材が降伏し、その後 $K_h=0.45$ 程度で最大耐力に達する。場所打ち杭の降伏時の杭頭位置での変位は 200mm 弱であり、場所打ち杭の最大耐力時変位は 560mm 程度である。

グラントアンカー橋台 (印) では、 $K_h=0.36$ で H 鋼杭が引抜けるが、その後も設計水平震度の $K_h=0.71$ までほとんど線形応答していることがわかる。なお、 $K_h=0.71$ は大規模地震の地震時土圧に用いる最大値である⁴⁾。試設計では、塑性率の算定は安全側に H 鋼杭の引抜け時を降伏点として算定したが、実際には全体構造系としては安定した状態にあるため、大規模地震設計水平震度の $K_h=0.71$ まで線形応答するものと判断できる。このときの最大変位は 70mm 弱である。

ラディッシュアンカー橋台 (印) では、 $K_h=0.40$ でアンカー材が引抜け、 $K_h=0.58$ 程度で H 鋼杭が引抜けた後は、急激に非線形性が強くなり $K_h=0.70$ 程度で基礎杭部材が降伏する結果となっている。大規模地震設計震度の $K_h=0.71$ まで荷重増加しており、全体構造系としての耐震強度は残存していることがわかる。この場合、230mm 程度の変位が発生している。

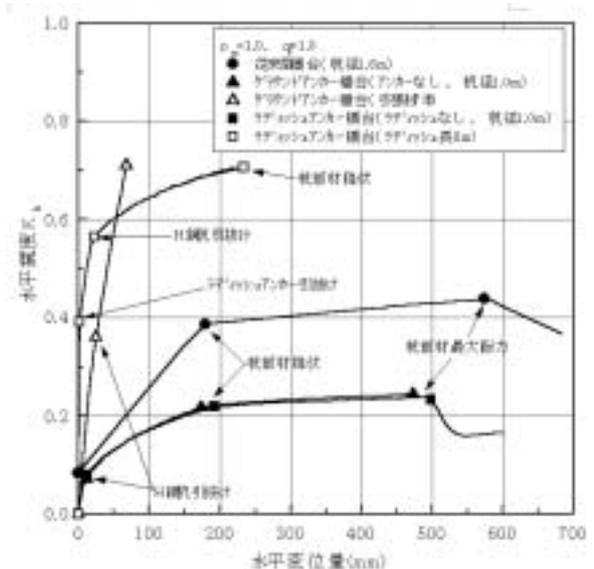


図 8 : 各橋台形式の杭頭位置での荷重～変位量の比較

5.3 模型振動実験

新型橋台の地震時の動的挙動を模擬実験により確認することにより地震時耐震性能を確認し、構造の有効性と安全性を検証するために模型振動試験を行った。

5.3.1 実験概要

模型振動実験は、従来型橋台、グランドアンカー橋台、ラディッシュアンカー橋台の3タイプの形式の橋台を対象に実施し、図9に示す鉄道総研の実験土槽を用いて行った⁵⁾。模型は10分の1縮小模型として作成した。橋台基礎杭、グランドアンカー、ラディッシュアンカーなどの構造物模型は、既往の試設計による橋台の実寸法から相似則を適用して決めた。加振は100galずつ増やす不規則波（神戸波）段階加振を行った。表2に実験ケースを示す。橋台模型はアルミの無垢材（ $\rho = 26.9 \text{ kN/m}^3$ ）を用い、橋桁は鉄製、総質量200kgで橋台側はヒンジ結合、反対側はローラー支持である。支持地盤、盛土地盤は豊浦標準砂を用い、空中落下法で相対密度60%を目標に作製した。また、橋台背面盛土にはバラスト軌道を模擬した散弾により1kPaの上載圧を加えた。杭はリン青銅板（厚さ2mm、幅75mm、長さ55cm）を2本設置した。



図9：土槽全景

5.3.2 実験結果

加振後の変形図を図10～12に示す。従来型橋台の400gal加振後の変形図を図10に示す。上部変形図の縦横目盛は10cmである。従来型橋台の変形・破壊モードは、大きく前傾する変形モードである。この前傾は橋桁に作用する地震慣性力と橋台に作用する背面土圧の影響によるものと考えられるが、杭の前面地盤の受働抵抗が効いている結果となった。ただし、橋台の変形に伴い、橋台

背面地盤は大きく沈下しているため、橋台背面には大きな段差沈下が生じた。従来型橋台の最終加振の入力加速度は400galであった。この状況は、図8の水平震度 $K_h=0.4$ 程度の杭部材が降伏し変位が急増する段階である。しかし、これは大変形に至ったものであるため、耐震性能としては200gal程度と考えられる。従って、この加振規模は中規模地震動に対応する耐震レベルであり、今回用いた諸元では、従来型橋台は大規模地震の地震動に対する耐震性能を有していないと判断される。

表2：橋台模型の振動実験ケース、及び結果

実験ケース	1	2	3
橋台形式	従来型	ゲラッドノコ型	ラディッシュノコ型
橋台	形：製高さ62cm、幅59cm		
杭数/土入	1/0	1/0	1/0
対策工	なし	ゲラッドノコ (円柱ノコφ2mm) 2段2列	ラディッシュノコ (円柱ノコφ40mm) 3段2列
盛土材 地盤材	豊浦標準砂		
加振波形	不規則波（神戸波）段階加振		
破壊加速度	200galで前傾	1,000galでも破壊せず	

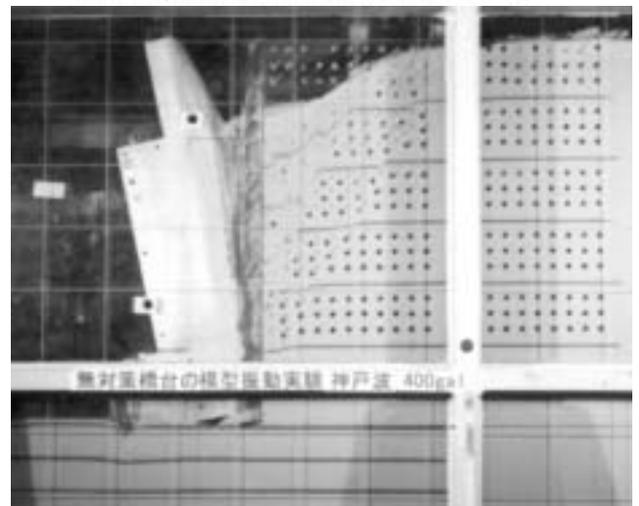
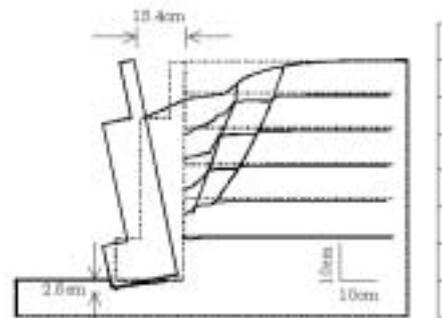


図10：従来型橋台（400gal加振後の変形状況）

グラウンドアンカー橋台の700gal加振後の変形を図11に示す。最終加振レベルの1,000gal加振でも、大きな変状には至っていない。グラウンドアンカー橋台の変形モードは、支承の付近はほとんど変位せずに、フーチングが前方に若干変位するモードを示し、従来型橋台とは反対の挙動を示した。これは、グラウンドアンカーの引き止めが効いたことによるものと考えられる。変形状況から、グラウンドアンカー橋台は大規模地震動に対する耐震性能を有していると判断される。

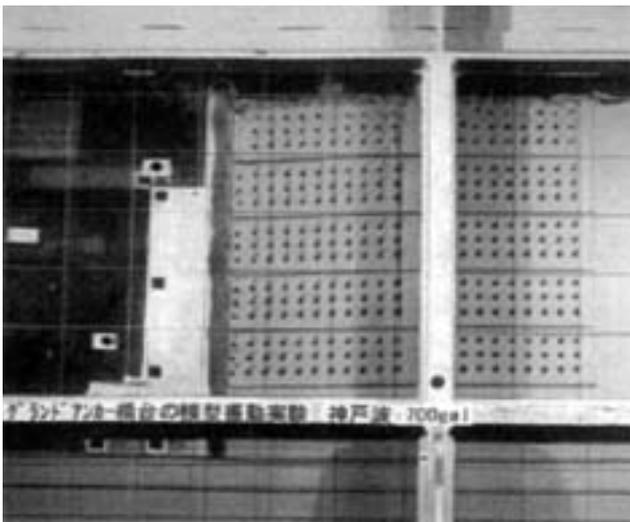
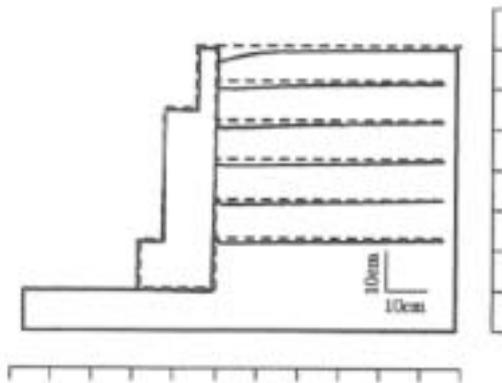


図11：グラウンドアンカー橋台（700gal加振後の変形状況）

ラディッシュアンカー橋台の700gal加振後の変形状況を図12に示す。700gal加振後の橋台変位は、前方に約2cm併進変位している。この状況は、最大入力加速度1,000galでも同じである。この結果から、ラディッシュアンカー橋台の変形モードは傾斜せずに横移動する併進モードであること、補強材の背面が沈下すること、補強領域にはすべり面が認められないが背面盛土にすべり面が発生することが確認された。これは、橋台と補強材の一体化効果によるものである。また、補強領域の背面地

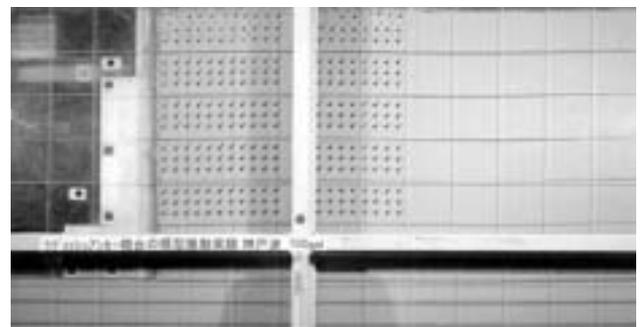
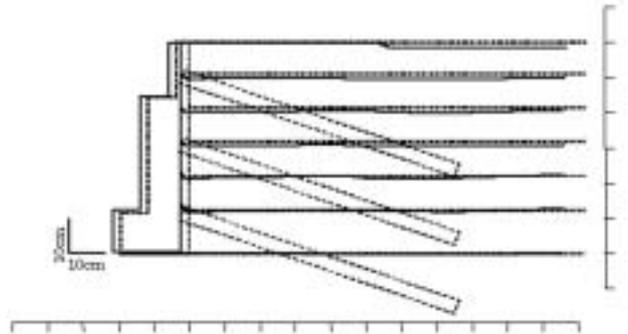


図12 ラディッシュアンカー橋台（700gal加振後の変形状況）

盤の沈下は小さく、補強領域の沈下がかなり抑制されている。これはラディッシュアンカーを設置した領域は、盛土地盤の変形を拘束する効果によるものと考えられる。これらの結果と実構造物ではフーチング前面の受働土圧が期待できる点から、ラディッシュアンカー橋台の耐震性能は、大規模地震に対して耐震性能を有していると判断される。

5.3.3 耐震解析、模型振動実験の考察

耐震解析、模型振動実験において、従来型橋台に比べ、新型橋台の耐震性の高さが確認された。また、耐震解析（静的非線形解析）と振動実験の結果は良く合っており、静的非線形解析を新橋台の耐震解析に用いる妥当性を実証したと言える。

6 おわりに

開発した新型橋台の工法展開を図るべく、現在設計施工マニュアルを作成中である。マニュアル作成におけるアンカー選定の留意点を述べる。グラウンドアンカーについては、新橋台の構造に用いるにあたって耐久性の確保が課題と考えられる。永久アンカーとしてのグラウンドアンカーには多くの種類があるが、使用実績のあるもの、性能確認試験が行われているものとして、公益法人から

技術審査証明されている工法を用いることを原則とする予定である。また、グランドアンカーの維持管理は、目視点検のみでなく残存引張力の管理が行えるアンカー頭部の構造にすることが必要であると考えている。なお、ラディッシュアンカーについては、本設構造物としての設計施工マニュアル⁶⁾を参照することとする予定である。

参考文献

- 1) 米澤豊司, 青木一三, 館山勝: セメント改良補強土橋台の開発, 基礎工, 2002.11.
- 2) たとえば村田修: 鉄道における基礎工に関する技術開発, 基礎工, 2002.11.
- 3) 運輸省鉄道局, 鉄道総合技術研究所: たとえば鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物, 丸善, 200.6.
- 4) 運輸省鉄道局, 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.10.
- 5) 鉄道総合技術研究所: セメント改良アプローチブロックを有する耐震性橋台に関する模型振動実験, 鉄道総研報告, 2002.3.
- 6) 既設盛土のり面急勾配化工法設計施工マニュアル, RRR工法協会, 2003.3.