

南阿蘇鉄道第一白川橋梁の被災状況と復興に向けた取り組み

Minami Aso Railway No.1 Shirakawa Bridge Damage Status and Reconstruction Efforts

Kohara Junichi  
小原 淳一\*

Kawabata Hiroshi  
川畑 宏志\*\*

Yokoyama Hideki  
横山 秀喜\*\*\*

Tsuru Tsunetaka  
津留 恒誉\*\*\*\*

Nakagawa Ryuichi  
中川 竜一\*\*\*\*\*

Shiga Kotoku  
志賀 行徳\*\*\*\*\*

はじめに

2016年4月14日・16日に発生した熊本地震により、南阿蘇鉄道は大きな被害を受け、立野駅～中松駅にかけて長期間にわたる運休を余儀なくされた。中でも一級河川白川を横架する第一白川橋梁（図-1復旧後の第一白川橋梁）は、損傷が著しく、橋梁の損傷状況の把握から、対策方針の決定、復旧工事など、開通に向けた早急な対応が求められた。

本報は、第一白川橋梁の被災状況に基づいた復旧計画から設計について紹介するものである。

1. 既設橋梁

第一白川橋梁は、高森線（立野駅～長陽駅間）の一級河川白川に架かる単線鉄道橋として昭和2年に完成した。構造形式は、2ヒンジスパンドレル・ブレースド・バランスドアーチと呼ばれる日本でも希少なアーチ橋であり、先人たちの貴重な技術の結晶とその優れた景観美から、2015年度に選奨土木遺産として選出された。

本橋梁の概要を以下に示す。

【橋梁概要：被災前】(写真-1)

- (1) 橋梁名：第一白川橋梁
- (2) 橋長(支間長)：166.41 m(30.48 + 91.44 + 30.48)
- (3) アーチ部の高さ(下弦材下面)：18.288 m
- (4) 軌道構造：まくら木直結軌道(クーパーE33)単線
- (5) 上部工形式：2ヒンジスパンドレル・ブレースド・バランスドアーチ橋
- (6) 下部工形式：無筋コンクリート橋台・橋脚
- (7) 支承形式：端支点ピンローラ支承、中間支点ピン支承

2. 熊本地震による被災状況と復旧計画

第一白川橋梁の各支点は、異なる方向への移動が発生した。熊本地震による左右岸の異なる地盤変動の影響を受け、特に1P橋脚と2P橋脚は、支間間隔が狭まり、そり上がりが生じるなど、第一白川橋梁の上部工に異常な変形を生じさせた(図-2、写真-2,3)。



写真-1 第一白川橋梁

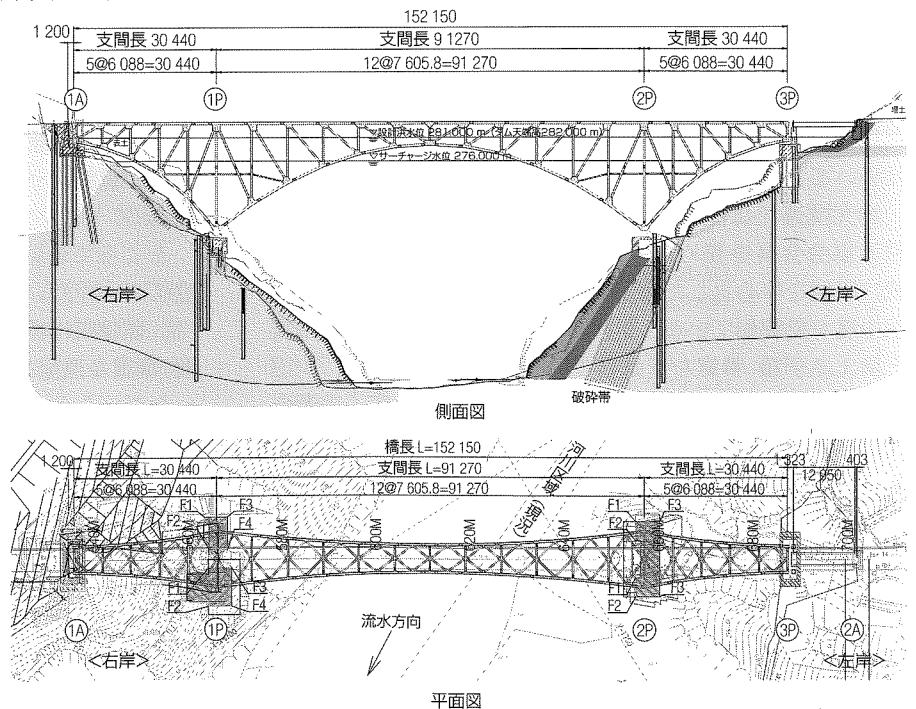


図-1 第一白川橋梁一般図(復旧後)

\* 八千代エンジニアリング(株) 統括事業本部 国内事業部 構造・橋梁部 部長  
 \*\* 九州支店 道路・構造部 シニアコンサルタント  
 \*\*\* (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 設計第一課 課長補佐  
 \*\*\*\* 南阿蘇鉄道(株) 専務  
 \*\*\*\*\* 鉄道部長兼総務課長  
 \*\*\*\*\* 鉄道課長

キーワード：熊本地震、復旧計画、鋼アーチ橋

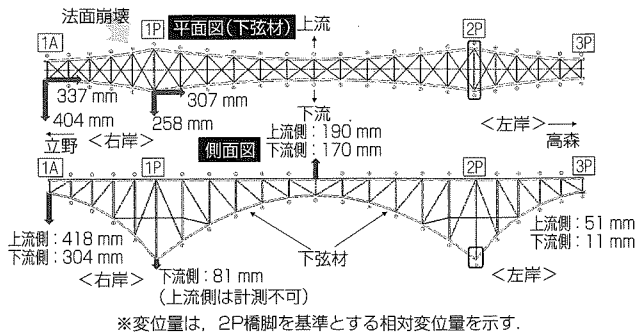


図-2 被災した第一白川橋梁変形図(国土交通省「南阿蘇鉄道の鉄道施設災害復旧調査参考資料」より抜粋)

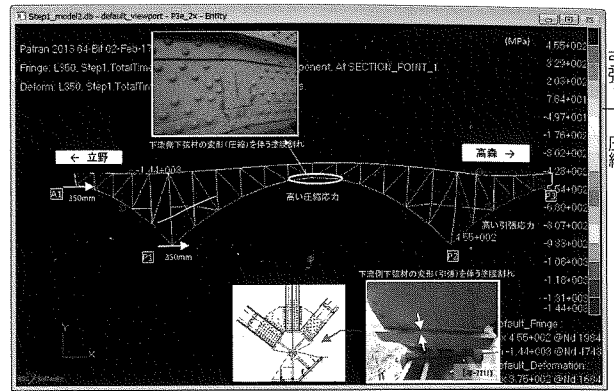


図-3 第一白川橋梁変形解析結果(国土交通省「南阿蘇鉄道の鉄道施設災害復旧調査参考資料」より抜粋)

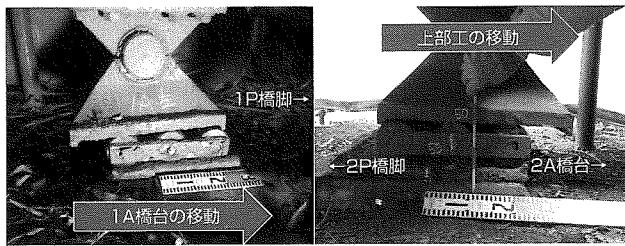


写真-2 第一白川橋梁損傷写真(支承部)

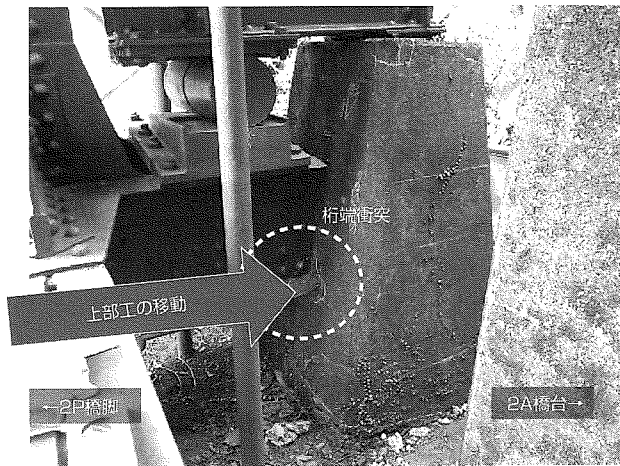


写真-3 第一白川橋梁損傷写真(3P橋脚支承部)

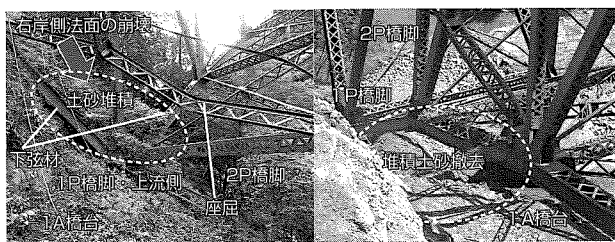


写真-4 第一白川橋梁損傷写真(起点上流側)

また、右岸側法面の崩壊により、第一白川橋梁の1P橋脚部において、横からの土砂堆積による荷重を受け、部材の損傷および1P橋脚部への土砂堆積が生じた(写真-4)。

復旧計画の立案に先立って、上部工の変形状況を考慮した応力解析を実施した。結果、上部工に過度な残留応力が生じていることが確認されたため、既存橋梁の補修による再利用ではなく、架け替えによる復旧を計画した(図-3)。下部工については、1A橋台のパラペットや3P橋脚のRC突起付け根などでひび割れが発生しているものの、躯体本体の損傷は軽微であることから、躯体の再利用を基本とした復旧を計画した。

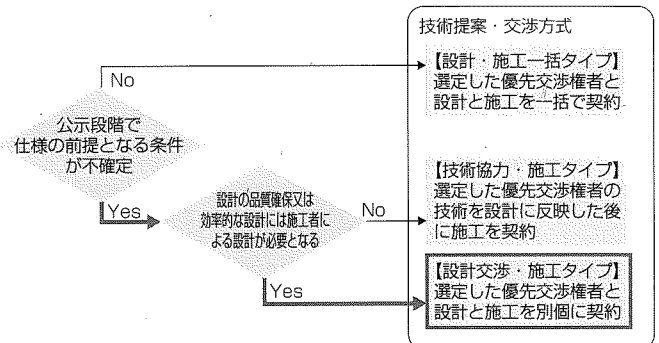


図-4 技術提案・交渉方式のタイプ選定(「国土交通省直轄工事における技術提案・交渉方式の運用ガイドライン」より抜粋)

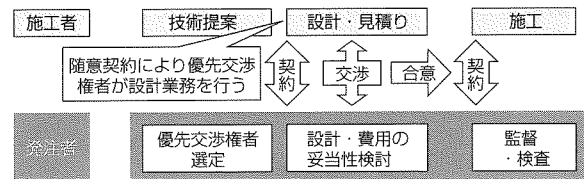


図-5 技術提案・交渉方式(設計交渉・施工タイプ)による発注方式

### 3. 上部工詳細設計および復旧工事の発注

本橋は、白川の渓谷地に架かるため、上部工復旧工事には、ケーブルクレーン工法を想定した。本工法は、施工会社により所有機材が異なること、さらに実際に工事で使用する機材により計画を行うことで復旧工事の工程を把握し、早期復旧に向けての対策を迅速に行える利点を考慮し、技術提案・交渉方式(設計交渉・施工タイプ)による発注方式を採用した(図-4,5)。

なお、本橋の復旧計画および上部工詳細設計、上部工復旧工事の発注方針に関しては、南阿蘇鉄道と高森町、南阿蘇村、熊本県による技術審査委員会にて検討のうえ、了承された。

### 4. 復旧橋の計画方針

既設橋梁は、白川の渓谷地を繋ぐ景観美に優れた構造物であり、南阿蘇鉄道の観光資源として重要な橋梁であることから、架け替え橋は、同形式(2ヒンジスパンドレル・ブレースド・バランスドアーチ橋)による復旧を計画した。下部工については、既設構造を生かし、基礎杭による補強案を採用した(図-1)。なお、設計に際しては、技術基準の進展や現在の第一白川橋梁をとりまく環境の変化などを

考慮し、以下の点に配慮した。

- ・上部工の架け替え（既設橋と同じ構造形式の採用）
- ・溶接構造の採用
- ・耐震設計（L2地震時）の考慮
- ・立野ダムの湛水の影響の考慮
- ・補強杭による下部工の補強

### 5. 上部工の架け替え（既設橋と同じ構造形式の採用）

既設橋梁では、側径間部の下弦材にピン・上弦材にトツグルと呼ばれる変形装置（ジャッキにより上弦材を伸縮させて中央併合部の上下位置を調整する）を設け、架設時にトツグルにより中央併合部を調整する架設方法が採用された（図-6）。このトツグル部は、中央部の併合後に棒部材に交換されている。新設橋梁では、架設精度の向上から、このようなヒンジやトツグルは設けずに、剛結構造として計画した。

### 6. 溶接構造の採用

既設橋梁は形鋼やレーシングバーをリベットにより接合したラティス構造の疑似箱断面が採用されていたが、現在では溶接技術の向上により、通常の板材を溶接した箱断面部材とし、高力ボルト接合にて現地で接合する計画とした（写真-5、図-7）。

### 7. 耐震設計（L2地震時）の考慮

耐震設計は、最新の知見を反映させ、L2地震時に耐え

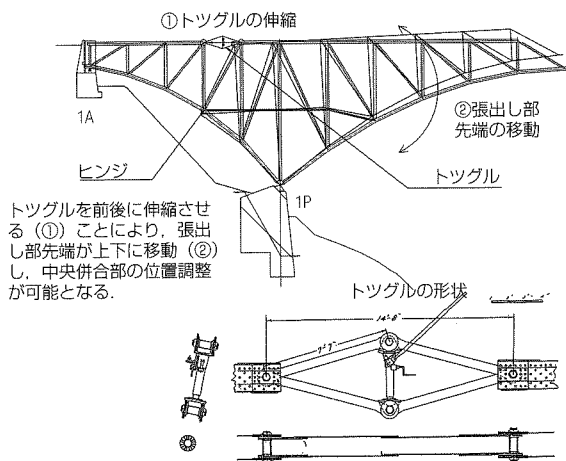


図-6 トツグルの形状と役割



写真-5 架け替え前の第一白川橋梁のラティス構造

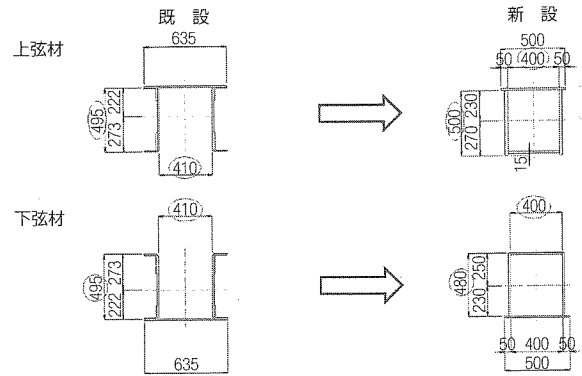


図-7 新旧部材断面構成

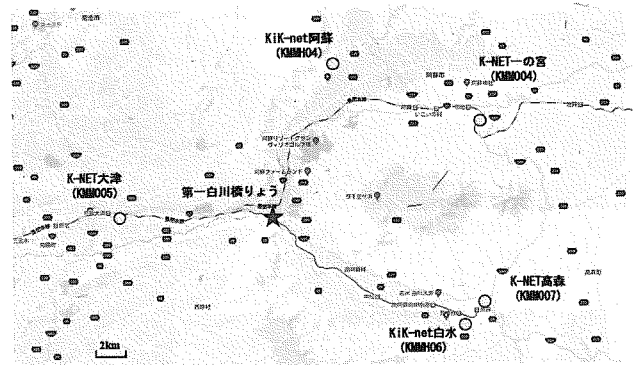


図-8 第一白川橋梁周辺の地震波観測点

うる構造とした。「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」において、L2地震動は強震動予測手法に基づき地点依存の地震動として算定することを原則としている。ただし、以下に示す2つの条件に該当しないことが確認できる場合は、簡易な手法によりL2地震動を設定することができるとしている。

- ①モーメントマグニチュードMw=7.0よりも大きな震源域が建設地点近傍に確認される場合。
- ②耐震設計上の基盤面より深い地盤構造の影響によって地震動の著しい増幅が想定される場合。

本橋の架橋位置では、①のMw=7.0よりも大きな震源域が確認されなかったことから、②の条件に該当するかどうかを確認するため、常時微動観測に基づいて基盤サイト増幅特性の評価を行った。

第一白川橋梁と周辺の公的観測点（図-8）において常時微動観測を行い、各地点のH/Vスペクトル比を算定した。続いて、H/Vスペクトル比の類似性から、第一白川橋梁と同様のサイト増幅特性を有すると考えられる公的観測点を選定した（図-9）。公的観測点では、あらかじめ地表波サイト増幅特性が評価されているため、この結果を用

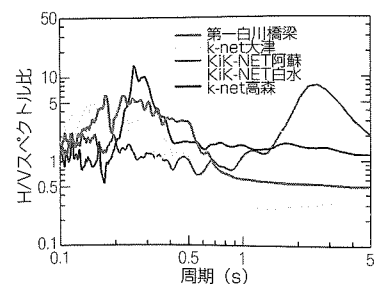


図-9 H/Vスペクトル比の地点間比較

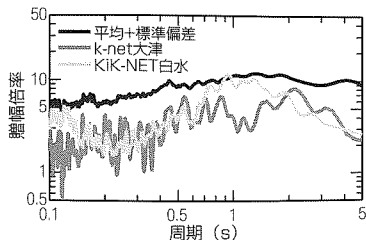


図-10 H/Vスペクトル比が同様の傾向を示す地点

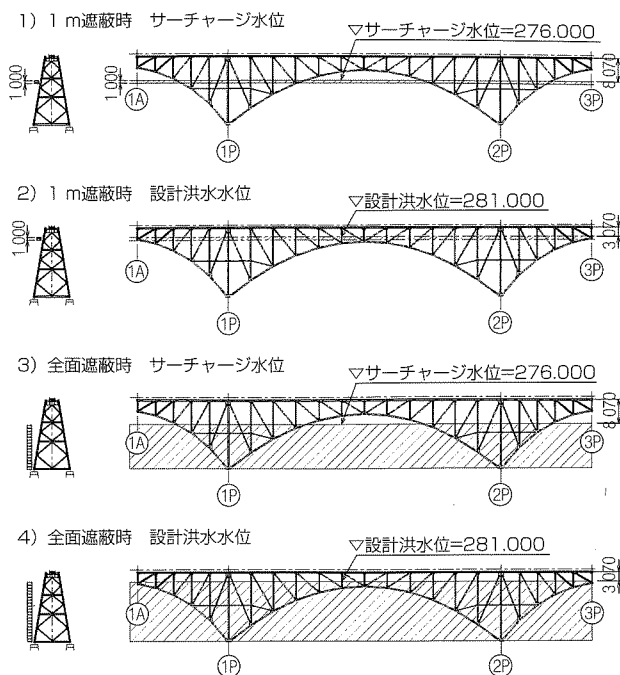
いて第一白川橋梁の地表波サイト増幅特性の傾向を把握した。この結果、当該地点のサイト増幅特性は標準L2地震動で想定している基盤サイト増幅特性（全国の平均+標準偏差）を下回っていることを確認し（図-10）、②の地震動の著しい増幅が想定する場合に該当しないことから、簡易な手法によりL2地震動を設定することができるものとした。

### 8. 立野ダムの湛水の影響の考慮

本橋は、震災前より計画されていた立野ダム貯水池内に位置しており（図-11）、洪水時湛水状況下での構造安定性ならびに維持管理等について検討が行われていた。しかし、震災により本橋を架け替えることとなったため、新設設計には、あらかじめ湛水の影響を考慮することとなった。

立野ダムは、異常時に湛水する構造であるが、湛水時には常時排水により水流が生じる。また、立野ダムの湛水時には、第一白川の大部分が浸水する位置関係となる。このため、立野ダムの湛水時には、第一白川橋梁の上部工に流水による水圧が生じることになる。橋梁の設計においては、この水圧として、流木等が橋梁部材に絡まり一部流水を遮蔽する場合を想定し、遮蔽する範囲により遮蔽なし・1m遮蔽（水面から1mに流木などが絡まる）・全面遮蔽の3ケースを考慮する（図-12）。

また、立野ダムの湛水により、第一白川橋梁の基礎地盤の緩みが懸念された。現地調査と地質調査結果により、基礎地盤の亀裂位置などを鑑み、左岸側は安定しているが、右岸側は地盤の亀裂が多く風化進行による基礎地盤としての安定性が懸念された。このため、右岸側について地盤の風化進行の防止を目的として法対策（法枠+コンクリー



	遮蔽なし		1m遮蔽		全面遮蔽	
	サーチャージ水位	設計洪水水位	サーチャージ水位	設計洪水水位	サーチャージ水位	設計洪水水位
横荷重 (kN)	1 305	2 080	3 002	7 259	4 885	13 793
等分布荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	8.83	7.59	13.97	18.19	8.42	11.52

図-12 立野ダムの湛水により考慮する作用力

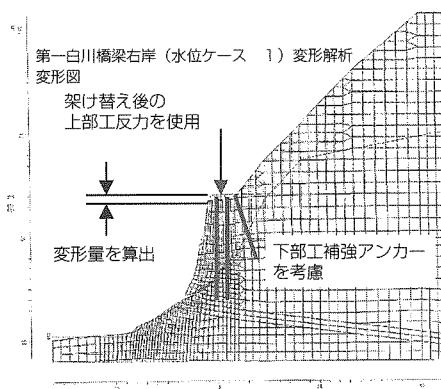


図-13 立野ダムの湛水による地盤の変形量解析

ト吹付け）を実施するものとした。

また、安全側にFEM解析により算出した基礎地盤が緩んだときの基礎の沈下量（ $\delta=1.4\text{ mm}$ ）について、橋梁の支点の強制変位として考慮するものとした（図-13）。

### 9. 補強杭による下部工の補強

#### 9-1 補強杭（高耐力マイクロパイル）の採用

耐震基準の改訂に伴うL2地震動の考慮や立野ダムの湛水の影響を考慮した結果、基礎底面での荷重集計において、浮上がりが発生するため、既設の直接基礎形式から、補強杭を考慮した補強案を採用した。表-1に1P橋脚（上流側）の基礎底面での荷重集計結果を示す。

また、補強杭に関しては、以下の条件に配慮する必要がある。

- ・中間層には、レキ径10 cm程度のレキがある。
- ・支持層深度は、5 m未満であり、岩が露頭している。

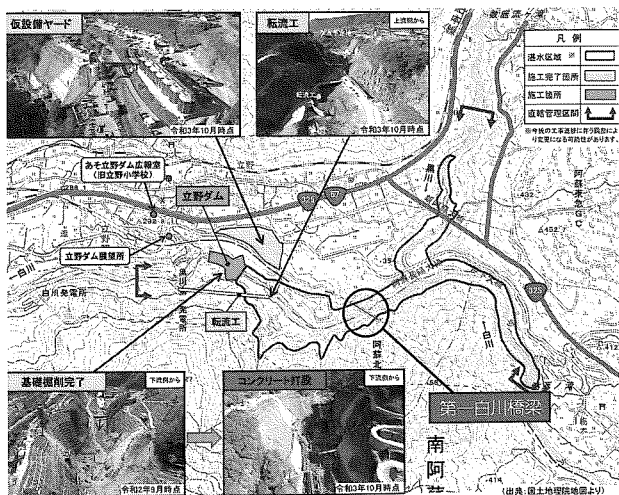


図-11 立野ダムの位置図  
（立野ダム工事事務所HPより抜粋）

・作業空間は狭隘で、斜面上である。

上記の条件から、深礎杭とマイクロパイルが該当するが、深礎杭を採用する場合は、杭径が2 m以上となり、基礎形状が大規模で斜面上での地形改変の影響が大きく、施工困難であることから、高耐力マイクロパイルを採用した(表-2)。

### 9-2 基礎のモデル化(1P橋脚(上流側))

橋脚基礎の補強後の支持機構は、既設基礎が直接基礎であることから、シートパイル基礎の考え方に準拠し、補強杭(高耐力マイクロパイル)の鉛直ばね以外に、既設基礎の鉛直ばねをモデル化し考慮した。なお、既設基礎の鉛直ばねは、押込み側の支持地盤の塑性化を考慮した非対称のバイリニアばねの分布ばねでモデル化した。ただし、滞水時の設計状況等で浮上がり力が発生する場合は、既設直接基礎底面の鉛直ばねは考慮しないこととした。

補強杭(高耐力マイクロパイル)のモデル化は、高耐力マイクロパイル設計・施工マニュアルに準拠し、以下のようにモデル化した。

- ・巻立て部軸線～巻立て部底面：剛部材
- ・巻立て部底面～既設基礎底面までの区間：非定着部

表-1 1P橋脚(上流側)の基礎底面での荷重集計結果

1P・上流側	線路方向			線路直角方向		
	M (kN・m)	V (kN)	H (kN)	M (kN・m)	V (kN)	H (kN)
常時	-374	2 993	-657	-1 362	2 993	252
常時(列)	-4 190	4 818	-1 816	-973	4 826	180
安全性 (列車荷重最大時)	-2 420	4 823	-1 607	-	-	-
湛水時 (全面遮蔽)	-	-	-	21 759	-7 513	-4 013
湛水時 (1m遮蔽)	-	-	-	10 046	-4 824	-1 854
レベル1地震時 (慣性力正方向→)	1 696	4 593	-597	-6 412	6 493	1 260
レベル1地震時 (慣性力負方向←)	-6 737	4 457	-2 273	924	2 557	-248
レベル2地震時 (慣性力正方向→)	18 873	2 839	3 410	-10 511	7 623	2 417
レベル2地震時 (慣性力負方向←)	-10 947	3 149	-3 124	7 914	-1 130	-1 938

表-2 1P橋脚(上流側)の基礎形式の選定

選定条件	基礎形式	杭基礎			深礎杭	ケーソン	鋼管矢板基礎	地中連続壁基礎	マイクロパイル	
		直接基礎	打込み杭	中掘り杭						場所打ち杭
地盤条件	中間層が硬質である	-	×	△	○	○	△	○	○	
	中間層にレキがある	レキ径 10 cm以下	-	×	△	○	○	○	○	○
		レキ径 10 cm~30 cm	-	×	×	○	○	○	△	○
		レキ径 30 cm以上	-	×	×	○	○	○	×	○
	支持層深度	5 m未満	○	△	△	×	○	×	×	○
		5~10 m	△	○	○	△	○	○	×	○
10~20 m		×	○	○	○	○	○	○	○	
20~40 m		×	△	○	○	△	○	○	○	
40~60 m		×	×	△	○	×	○	○	○	
水上施工	水深5 m未満	△	○	△	△	×	△	×	△	
	水深5 m以上	×	△	△	×	×	△	×	×	
施工条件	作業空間が狭い	○	×	×	×	○	×	×	○	
	斜杭の施工	-	○	×	×	×	-	-	○	
	周辺環境 振動・騒音対策 隣接構造物に対する影響	○	×	○	△	○	△	×	○	

※参考：基礎標準—鉄道総合技術研究所 ※記号 ○：適合性が高い  
 △：適合性がある  
 ×：適合性が低い

□：架橋位置の地盤条件

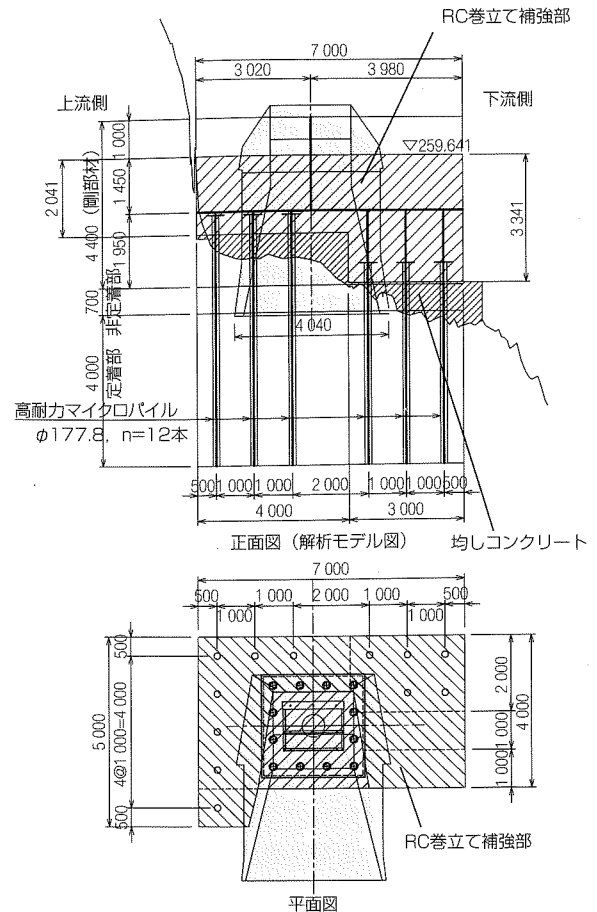


図-14 1P橋脚(上流側)の解析モデル

・既設基礎底面～杭底面までの区間：定着部

ここで、巻立て部底面～既設基礎底面までの区間は、既設躯体と近接し、周面摩擦が期待できるか不明であるため、安全側に巻立て部底面～既設基礎底面の区間を非定着部として設定した(図-14)。

### 9-3 補強杭の施工時期

また、補強杭の施工は、資機材の搬入出や作業員の移動に配慮し、既設上部工撤去前に施工を行うものとした。このため、既設上部工に配慮しながら既設躯体の両側に補強杭を配置した。

### 9-4 2P橋脚の基礎形状の見直し

2P橋脚に関しては、橋梁の上流側と下流側が急激に落ち込んだ斜面となっており、下流側については上部より落石の危険性もあったことから、上流側と下流側の基礎をRC構造で繋ぎ、中央に補強杭を配置する形式とした(図-15)。

### 9-5 3P橋脚

終点側には戸下トンネルが近接しており、施工ヤードが狭隘であることから、上部工架設で使用するケーブルクレーンの鉄塔を設ける場所がないため、3P橋脚をケーブルクレーンの鉄塔基礎として使用するものとした(図-16, 17)。ケーブルクレーンは、既設橋の撤去でも使用することから、3P橋脚の補強杭打設およびRC巻立て補強を行う必要があり、1P橋脚同様にケーブルクレーン設置前に行った。

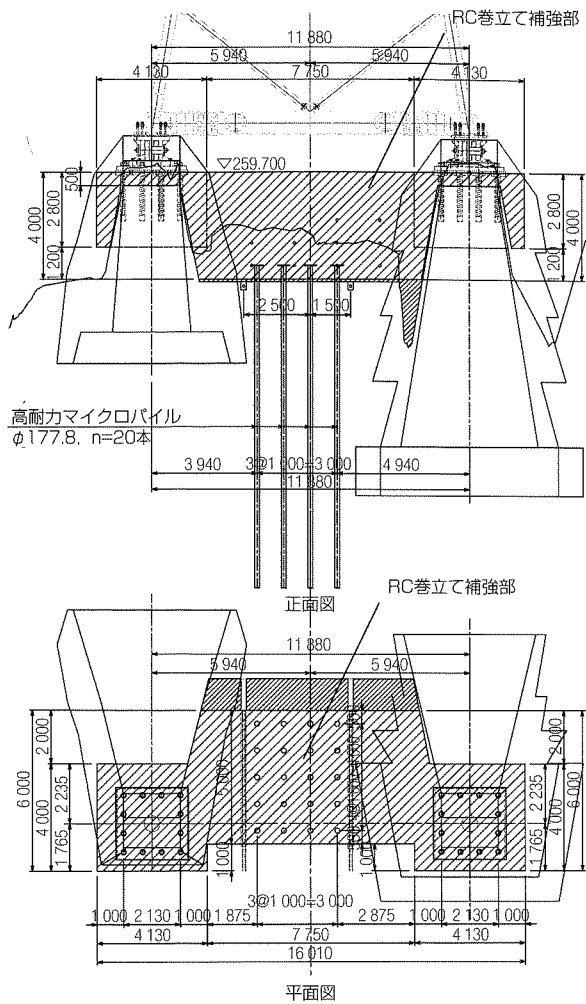


図-15 2P橋脚の一般図

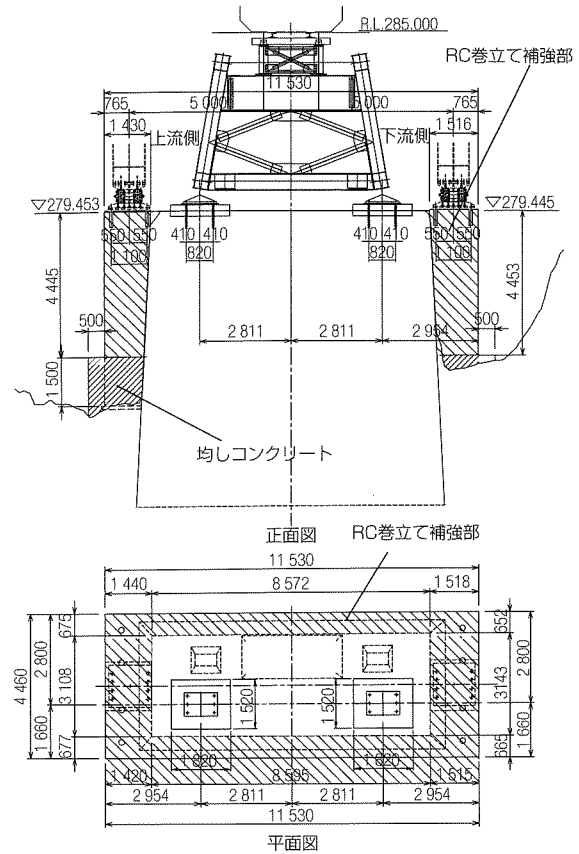


図-17 3P橋脚の一般図

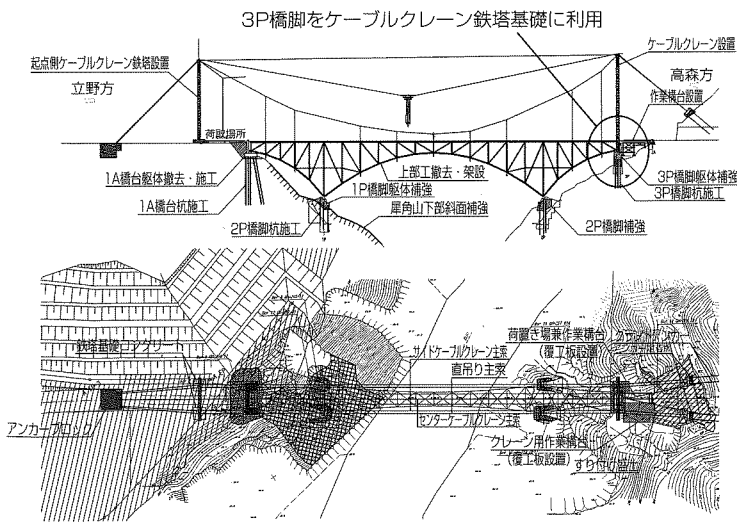


図-16 第一白川橋梁架設計画

おわりに

2016年4月の熊本地震から7年近く経過し、第一白川橋梁の架け換えも完了し、南阿蘇鉄道の全線開通も目前となりました。大規模な工事発注なども行ったことのない中で、無事にここまでたどり着けたのは、本工事にかかわったすべてのの方々のご協力のおかげであり、深く感謝申し上げます。

【プロジェクトデータ (復旧後)】

- 橋名：第一白川橋梁
- 所在：熊本県
- 橋梁：154.673 m
- 支間長：30.44+91.27+30.44 m
- 構造形式：2ヒンジスバンドレル・プレースド・バランスドアーチ橋
- 荷重：EA-15
- 事業主：南阿蘇鉄道(株)
- 適用標準：鉄道構造物等設計標準
- 技術支援：(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構
- 基本計画：八千代エンジニアリング(株)
- 詳細設計：上部工 エム・エムブリッジ(株)  
下部工 八千代エンジニアリング(株)
- 施工：エム・エムブリッジ(株)
- 施工協力：(株)福田組、極東興和(株)、三軌建設(株)、南陽建設(株)
- 工期：詳細設計：令和元年7月31日～令和2年3月20日  
施工：令和元年7月31日～