

既設下部工の耐震補強事例

Examples of seismic reinforcement of existing substructures

交通事業本部 交通第2部 畑村 美希

東日本大震災、熊本地震をはじめとする近年の地震被害報告を受け、平成24年度、平成29年度に道路橋示方書が改訂され、耐震設計を取り巻く環境はめまぐるしく変化している。我が国では、今後30年間に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率が高い地域の重要な橋梁に対し、耐震補強の加速化が進められてきた。本稿では、架橋条件(河川・環境)が厳しい橋梁における下部工の耐震補強設計を行った事例について紹介する。

1 はじめに

対象橋梁は、下り線が昭和29年(トラス部)と昭和33年(鈑桁部)、上り線が平成3年にそれぞれ竣工された。下り線では平成21年に河道掘削に伴う基礎補強工事が行われている。橋梁の基本諸元・条件を次表に示す(図1参照)。

橋梁名	上り線		下り線	
橋長	L=400.8m		L=400.5m	
支間長	l=60.5+61.4+61.2+60.2+39.4+2@40.0+36.0m		l=3@60.0+10@19.5+15.8m	
幅員構成	W=8.00m		W=6.40m	
上部工形式	4@鋼箱桁+4@鋼鈑桁		3@鋼トラス+11@鋼鈑桁	
下部・基礎工形式	橋台:逆T式(場所打杭) 橋脚:壁式(場所打杭)		橋台:重力式(木杭) 橋脚:壁式(ケーソン、木杭)	
橋梁斜角	θ=90°00'00"		θ=90°00'00"	
設計荷重	TL-20 (1等橋)		TL-20 (1等橋)	
適用示方書	S55 道示		S14 道示	
河川条件		上り線	下り線	上下線合成
現況阻害率 (基準:5.0%)	線阻害	3.58%	5.76%	6.10%
	面阻害	3.94%	9.41%	9.55%
環境条件	サ・マ・シ・メ遡上・孵化 ⇒常時河道内は5～8月のみ施工可			

2 耐震補強設計方針

2.1 耐震補強の基本方針

対象橋梁においては、平成24年の道路橋示方書(以下、「H24 道示」)に準拠した耐震補強設計を基本としている。また、既設橋の耐震補強設計への適用として「既設橋の耐震補強設計に関する技術資料」を参考とする。

2.2 目標とする耐震性能

耐震補強を行う上での要求性能は、H24 道示に準じて、「レベル1地震動:耐震性能1、レベル2地震動:耐震性能2」を確保する(表1参照)。

表1 目標とする耐震性能

橋の耐震性能	耐震設計上の安全性	耐震設計上の供用性	耐震設計上の修復性	
			短期的修復性	長期的修復性
耐震性能1: 地震によって橋としての健全性を損わない性能	落橋に対する安全性を確保する	地震前と同じ橋としての機能を確保する	機能回復のための修復を必要としない	軽微な修復でよい
耐震性能2: 地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能	落橋に対する安全性を確保する	地震後橋としての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急修復で対応できる	比較的容易に恒久復旧を行うことが可能である
耐震性能3: 地震による損傷が橋として致命的とならない性能	落橋に対する安全性を確保する	—	—	—

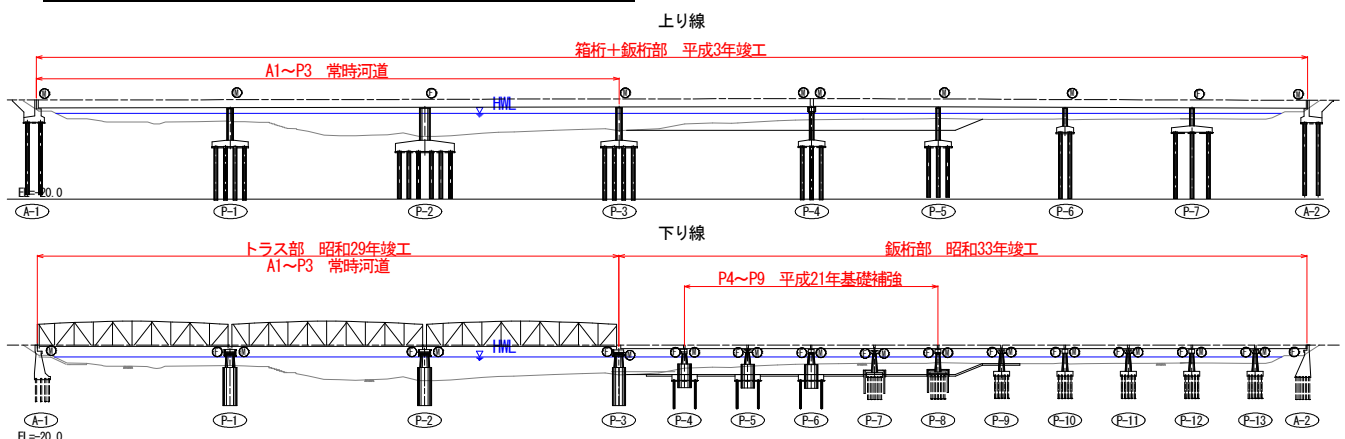


図1 橋梁概要図

2.3 現橋耐震診断結果

対象橋梁については、現橋耐震診断の結果、以下の橋脚で補強が必要となった(表2参照)。下り線では、ケーソン基礎および木杭を併用した直接基礎において、応力超過が確認され対策が必要となった。

表2 現橋診断結果

■上り線							
	P1(M)	P2(F)	P3(M)	P4(M,M)	P5(M)	P6(M)	P7(F)
柱	塑/回/せ	せん断力	塑/回/せ	塑/回/せ/変	せ/変	せん断力	せん断力
底版	ok	曲げMo	ok	ok	ok	ok	せん断力
基礎	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
■下り線							
	P1(F,M)	P2(F,M)	P3(F,M)	P4(F,M)	P5(F,M)	P6(F,M)	P7(F,M)
柱	せん断力						
底版	-	-	-	-	-	-	ok
基礎	側壁部材(水平)曲げMo/せん断力			ok	ok	ok	-
	P8(F,M)	P9(F,M)	P10(F,M)	P11(F,M)	P12(F,M)	P13(F,M)	
柱	せん断力						塑: 塑性率
底版	ok	曲げMo	曲げMo	曲げMo	曲げMo	曲げMo	回: 回転角
基礎	-	-	-	-	-	-	せ: せん断力
							変: 残留変位

3 下部工耐震補強設計における課題

3.1 河積阻害率

対象橋梁のうち、下り線は現況阻害率が基準の5%を超過しているため、巻立て補強工法や仮設工を検討する際は、治水上の影響について留意する必要がある。

3.2 環境制約

交差河川は、サケ・マス・シヤマが遡上する清流河川であり、再生産を担う河川として沿岸漁業の大きな役割を果たしている。対象橋梁付近の河道もシヤマの産着卵箇所となっているため、常時河道内の施工については、遡上・孵化に配慮した5～8月中の実施が厳守とされている。

3.3 ケーソン基礎の補強

下り線のうちP1～P3橋脚のケーソン基礎は、昭和29年に設計され、当時の計算書が不明なため、設計手法の詳細が定かでない。ケーソン基礎については、昭和45年に下部工設計指針にて規定されるまで、設計手法が明確化されておらず、H24道示で照査した場合、基礎補強が必要と判定される。

H24道示による照査方法は、実挙動と異なる安全側の設計となるため、既設構造物に対しては厳しい評価となる。一方、ケーソン基礎の補強には大規模な河川締切が必要であり、河川や環境面を与える影響は大きい。このため、ケーソン基礎の既設耐力を最大限に評価し、補強規模のミニマム化を図る事が重要となる。

3.4 木杭併用の底版補強

下り線のうちP7～P13橋脚は、木杭を併用した直接基礎である。上り線設計時の柱状図を確認すると、H24道示における支持層には未達であるが、変状は生じていない。

橋脚数が多く施工規模拡大により河川への影響度が増すため、木杭による底面地盤強化の効果を適正に評価し、補強規模のミニマム化を図る事が重要となる。

4 既設耐力の評価方法の検討

前項にて述べた課題を踏まえ、下り線の基礎補強回避に向けて以下の通り検討を行った。

4.1 ケーソン基礎の補強回避

(1) 現行の設計手法と実挙動との差異

H24道示では、周辺からの地盤反力に対し中空部がつぶれるような検討を2次元フレームにて解析している(図2参照)。フレーム計算のため、隔壁部材中心でのモーメントで照査しているが、実際にはこの位置でケーソン側壁が破壊することはなく、ハンチ内側は剛域となりハンチ端が破壊位置となる。このため、実挙動とは異なりかなり安全側の設計である。

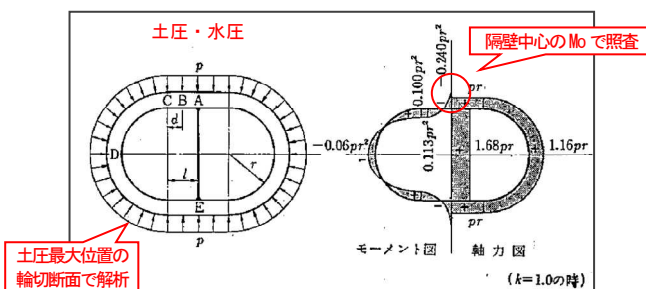


図2 ケーソン側壁水平鉄筋にかかる作用力図(常時)

(2) 剛域を考慮したフレーム解析

実挙動に近づけた解析として、隔壁厚およびハンチ部の剛域を考慮したフレーム解析を実施し、剛域端部の実発生モーメントによる応力照査を行った(図3参照)。

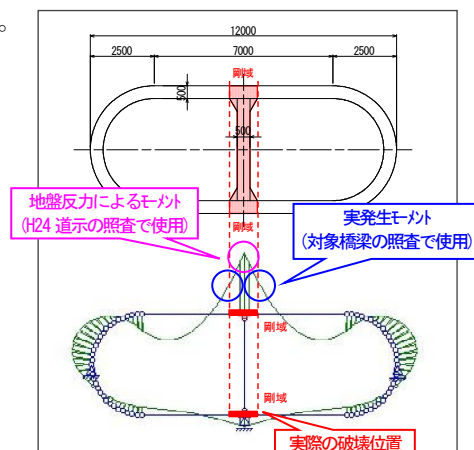


図3 解析イメージ図

(3) 検討結果

剛域を考慮し実挙動に近づけた解析により、P1～P3橋脚全てにおいて耐力照査を満足する結果となった。これにより、ケーソン基礎の補強を回避することが可能となった(表3参照)。

表 3 耐力照査結果（対象；P1～P3）

照査項目		単位	P1(橋軸)		P2(橋軸)		P3(橋軸)	
			現行	実挙動	現行	実挙動	現行	実挙動
側壁部材 (水平方向)	最大曲げモーメント	kNm	385	322	393	329	365	305
	降伏曲げモーメント		309	425	299	425	296	425
	最大せん断力	kN	318	267	324	272	301	253
	せん断耐力		290	290	277	277	277	277
総合判定			NG	OK	NG	OK	NG	OK

4.2 底版補強の回避

(1) 木杭による底版地盤補強部の評価

下り線については、竣工時の地質条件が不明である。上り線設計時の柱状図を確認すると現行基準における支持層には根入れされていないが、現状において変状は確認されていない。したがって、直接基礎として構造計算を実施した場合の最大地盤反力度以上の地耐力を有していると考えられる。

(2) 設計地盤定数の設定

対象橋梁の地盤反力度を算出し、設計地盤定数の設定を行う事とした。木杭による底版地盤補強効果は、対象橋脚において「砂質地盤 N=22 以上の強度」であると評価できる（表 4、図 4 参照）。

表 4 最大地盤反力度からの N 値推定

対象	荷重状態	地盤反力度 (kN/m2)		長期地盤反力度 q (kN/m2)	推定N値 N=q/10
		qmin	qmax		
P12	死荷重時（浮力無）	96.1	212.9	220	22
	死荷重時（浮力有）	58.9	175.7		

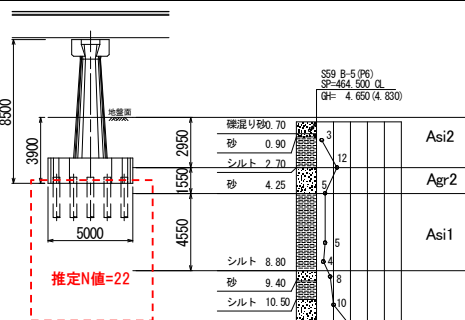


図 4 解析イメージ図

(3) 検討結果

推定 N 値を用いて直接基礎として取り扱う事により、P12 橋脚を除く 4 橋脚については、耐力照査を満足する結果となった。これにより、底版補強を回避でき補強量のミニマム化が可能となった(表 5 参照)。

表 5 耐力照査結果（対象；P9～P13）

【P9, P11, P13橋脚】 照査項目		単位	木杭による補強効果なし				木杭による補強効果あり			
			橋軸方向		橋軸直角方向		橋軸方向		橋軸直角方向	
			上面	下面	上面	下面	上面	下面	上面	下面
曲げモーメントに対する照査	最大曲げモーメント	kNm	456	3,653	224	1,430	406	3,100	199	1,238
	降伏曲げモーメント		3,206	3,539	1,547	1,786	3,198	3,529	1,542	1,782
せん断力に対する照査	最大せん断力	kN	294	2,639	140	1,187	261	2,355	125	943
	せん断耐力		8,327	13,820	2,802	7,097	7,851	13,501	2,727	6,759
判 定			NG		OK		OK		OK	

【P10橋脚】 照査項目		単位	木杭による補強効果なし				木杭による補強効果あり			
			橋軸方向		橋軸直角方向		橋軸方向		橋軸直角方向	
			上面	下面	上面	下面	上面	下面	上面	下面
曲げモーメントに対する照査	最大曲げモーメント	kNm	456	3,964	224	1,918	406	3,280	199	1,655
	降伏曲げモーメント		3,206	3,539	1,547	1,787	3,198	3,530	1,542	1,782
せん断力に対する照査	最大せん断力	kN	294	2,929	140	1,560	261	2,506	125	1,298
	せん断耐力		8,327	14,275	2,802	7,087	7,851	13,733	2,727	6,727
判 定			NG		NG		OK		OK	

【P12橋脚】 照査項目		単位	木杭による補強効果なし				木杭による補強効果あり			
			橋軸方向		橋軸直角方向		橋軸方向		橋軸直角方向	
			上面	下面	上面	下面	上面	下面	上面	下面
曲げモーメントに対する照査	最大曲げモーメント	kNm	456	3,998	224	2,085	404	3,365	199	1,795
	降伏曲げモーメント		3,206	3,539	1,547	1,787	3,198	3,530	1,542	1,782
せん断力に対する照査	最大せん断力	kN	294	2,994	140	1,712	261	2,567	125	1,416
	せん断耐力		8,327	14,209	2,802	7,055	7,851	13,805	2,727	6,721
判 定			NG		NG		OK		NG	

5 補強工法による治水上の影響

対象橋梁の巻立て補強に有効な工法として、① RC 巻立て工法、②鋼板巻立て工法が挙げられる。

対象橋梁のうち下り線については、現況阻害率が既に 5%を超過している。上下線での巻立て工法の組合せによる治水上の影響を検討し、最適な補強工法を選定する事とした。

なお、巻立て厚を抑えられる連続繊維シート工法は、必要補強量を確保できないため検討から除外した。

5.1 検討ケースおよび検討内容

(1) 検討ケース

補強工法は以下の 3 ケースとした。

【Case1】上り線:RC 巻立て、下り線:RC 巻立て

【Case2】上り線:RC 巻立て、下り線:鋼板巻立て

【Case3】上り線:鋼板巻立て、下り線:鋼板巻立て

(2) 検討結果

橋脚補強後の治水上の影響については、具体的に以下の点について検討を行った。

- ①架橋地点の流下能力を著しく低下させない事
- ②施工後の水位上昇量により上流に影響を及ぼさない事

5.2 不等流計算による治水上の影響検討

(1) 補強後の流下能力による検討結果

不等流計算により、計画高水位となる流下能力を算出した。いずれの工法組合せにおいても流下能力低下は 1.8%以下であり、治水上の影響がない事を確認した(図 5 参照)。

(2) 補強後の水位上昇量による検討結果

不等流計算により、橋脚巻立て後の水位上昇量を算出した。不等流水位は、計画高水位より低い値を示し、最大でも上昇水位は 3cm 程度であった。いずれの工法組合せにおいても治水上の影響がない事を確認した(図 7 参照)。

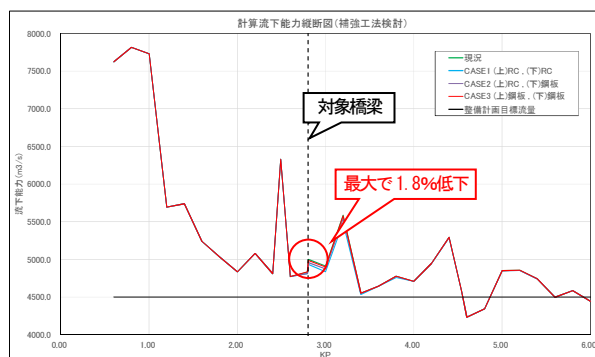


図 5 流下能力縦断面図

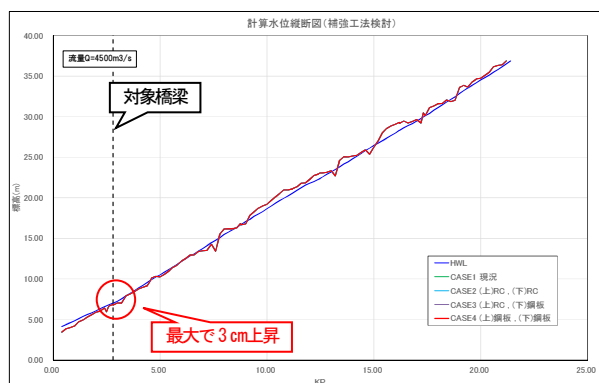


図 6 水位縦断面図

5.3 補強工法の選定

補強工法の組合せによる治水上の影響はほぼない事が確認された。ただし、下り線の単独線阻害率が現況で 6%程度であるため、極力河川へ配慮し「【Case2】上り線:RC 巻立て、下り線:鋼板巻立て」を採用案とした。

6 河川内橋脚の仮設工法

P2 橋脚は耐震診断の結果、橋脚の巻立てと底板補強が必要となった。対象橋脚は、交差河川の流川位置にあり、大型土のうでは施工時流下能力を確保できないため鋼矢板締切が必要となる。

6.1 工法選定における課題

矢板締切工法としては、パイプロハンマを用いた打設工法が一般的であるが、対象橋梁においては以下の点が課題となる。

- ①矢板打設には仮栈橋の設置が必要となり、仮設規模が増し河川への影響が大きくなる(図 7 参照)。
- ②十分な桁下クリアランスを有していないため、栈橋上からの打設が困難である。
- ③サ・マ・シヤモの遡上に影響のない 5～8 月の 4 ヶ月間では、仮設工の設置ができない。

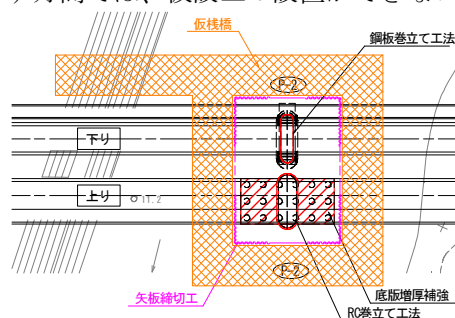


図 7 仮栈橋を利用した仮設イメージ

6.2 工法選定

前項にて述べた課題を踏まえ、対象橋梁においては「上部障害クリア工法」による圧入施工を採用した。採用工法は、大掛かりな仮栈橋を必要とせず

圧入施工の全行程を完結できる(図 8 参照)。

これにより、治水上の影響を抑え、かつサ・マ・シヤモの遡上や孵化に配慮した施工が可能となった。

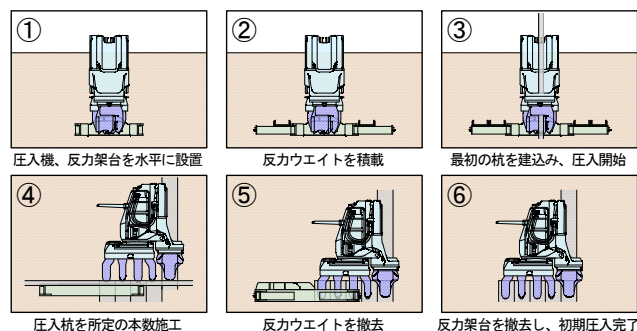


図 8 上部障害クリア工法による圧入イメージ

6.3 仮設工による治水上の影響

鋼矢板締切を設置した場合、施工時の面積阻害率が 10%を超過する事から、不等流計算にて施工時水位上昇量について検討を実施した。

不等流水位は、通年で計画堤防高より低い値を示した事から、鋼矢板締切による治水上の影響はない事を確認した(図 9 参照)。

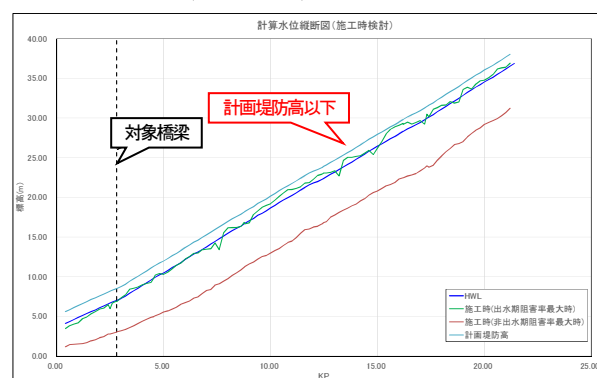


図 9 水位縦断面図(施工時)

7 まとめ

本稿では、既設下部工における耐震補強計画の一例を示した。

制約条件(河川、環境)の厳しい状況下において、補強回避に向けた検討の有効性および巻立て補強や仮設工が与える河川への影響度が、耐震計画を立案する上で選択肢を広げる一案になると考える。

本検討が今後の耐震補強計画において参考になれば幸いである。

[参考文献]

- 1)「既設橋の耐震補強設計に関する技術資料、2012.11」国土交通省国土技術政策総合研究所
- 2)「道路橋下部構造設計指針ケーソン基礎の設計編、S45.3」日本道路協会
- 3)「道路橋下部構造設計指針ケーソン基礎の設計編、S45.3」日本道路協会