

7号北神戸線における無塗装耐候性橋梁

神戸第一建設部	設計課	南 荘	淳
神戸第一建設部	設計課	井 口	齊
神戸第一建設部	設計課	小 林	寛

要 旨

阪神高速道路公団では昭和54年度より防錆橋梁研究委員会を組織し、耐候性鋼板の適用性についての検討を開始した。その中でJIS規格に先駆けて阪神高速道路公団独自の規格を定め、湾岸線出島出路橋をはじめとして計3橋の無塗装耐候性橋梁製作・架設や、湾岸地区での飛来塩分量調査や暴露試験などの成果をあげた。

これらの橋梁については、その後の系統的な追跡調査により良好な結果が報告されていることを受け、平成10年4月に供用した北神戸線からと東～柳谷JCT間の鋼橋について、飛来塩分等の腐食環境が良いことやコスト縮減が期待できることから無塗装耐候性鋼板を全面的に採用した。その総鋼重は約1.3万tにもなり、約7億円の塗装費が削減された。なお、設計・施工にあたっては、「無塗装耐候性橋梁設計施工指針（平成4年7月）」によった。

本文では北神戸線の無塗装耐候性橋梁を紹介するとともに、供用後の点検計画等についても述べる。また、近年開発された安定錆促進工法の試験工事も一部で行い、その経過等についても報告する。さらに、錆安定度評価法についても若干の検討を行ったので、それについても述べる。

キーワード：北神戸線、無塗装耐候性橋梁、安定錆促進工法、錆安定度評価法

はじめに

平成10年4月に北神戸線箕谷出入路～有馬口出入路8.7km、同北延伸線有馬口JCT～柳谷JCT3.3kmが供用した(図-1)。このうち、有野第1工区以北の橋梁区間では鋼桁が採用され、飛来塩分量の比較的少ない地域に位置することや建設コスト縮減の観点から、これらについては無塗装耐候性鋼材を全面的に採用することとした。その結果、表-1に示すように単純合成I桁から4径間連続鋼床版箱桁まで各形式の橋梁に、全鋼重で約13,200tの無塗装耐候性鋼板が使用された。ここで耐候性鋼材使用による鋼板エキストラは約2億円であったが、約128,000m²の外面塗装費およ

び添接板塗装費約9億円を節約できたため、差し引き約7億円の初期コスト減となった。さらに、今後順調に錆が安定化すれば維持管理を省力化でき、メンテナンスコストの大幅な節約が期待できる。

本報では今回供用した無塗装耐候性橋梁の設計・施工、一部で試験的に実施した安定錆生成促進工法、ならびに維持管理省力化の目安を付けるために検討を行った錆安定度評価法について紹介する。

1. 設計施工上の留意点と現況

1-1 設計施工上の留意点

阪神高速道路公団では、湾岸線での実験橋の研

究成果を基に、平成4年7月に「無塗装耐候性橋梁設計施工指針¹⁾」を制定しており、当該橋梁群もこれにより設計・施工を行った。

設計上の留意点としては、主桁連結部に水抜きのために10mmの隙間をあけたり、桁端部および箱桁内面の重防食塗装の実施や、下フランジの排水勾配の確保、錆汁による橋脚汚濁防止のための水抜きパイプ設置などの配慮を行った。

また施工時の留意点としては、工場および現場での部材仮置きや桁架設時、床版打設時にはそれぞれ錆むらの原因を作らないよう注意を払った。

1-2 橋梁の現況

前項で紹介した種々の配慮にもかかわらず、供用後に初期の錆むらが目立つ箇所が一部に有り、平成10年6月に目視調査を行った。その結果、初期錆むらの原因としては、

- ① 床版打設時におけるコンクリート付着、
ならびに不適切な方法による除去
- ② 現場仮置き時における架台の跡
- ③ 床版打設前の降雨にともなう水みち
- ④ 寒冷な気候に伴う架設後の結露

等が考えられた。

このうち①については床版打設時に耐候性鋼に関する経験が少なく、桁養生や後処理方法に対する配慮が十分でなかったためと思われる。「無塗装耐候性橋梁設計施工指針¹⁾」には②の内容も含めて対策方針が示されており、今後一層の注意喚起が必要であると考えられる。

③、④については桁架設後、床版打設まで期間が開いたことや、現地は六甲山系北側山間部であり、相当寒冷な気候であること等の事情があったためであるが、いずれも施工時期、床版打設時期の検討を十分に行うことにより対応可能と思われる。

しかし、上記の部分的な錆むらを除くと、全体的に良好に錆が進行しており、時間の経過とともに錆むらも目立たなくなると思われる。

表-1 北神戸線耐候性橋梁一覧

工区名	橋梁名称	桁形式	桁重量(tf)	
有野第1工区 (その1)	水無橋	単純合成箱桁	311.9	
		3径間連続非合成I桁	306.9	
		3径間連続非合成I桁	173.1	
		4径間連続非合成箱桁	464.3	
有野第1工区 (その2)	オドロ第1橋	3径間連続非合成箱桁	435.4	
		4径間連続非合成箱桁	591.3	
	オドロ第2橋	単純合成I桁	100.9	
		単純合成I桁	83.8	
有野第1工区 (その3)	有馬口第1橋	2径間連続非合成箱桁	243.7	
		3径間連続非合成I桁	228.1	
有野第3工区 (その1)	有野橋	3径間連続非合成箱桁	596.9	
		3径間連続非合成箱桁	546.2	
		2径間連続非合成I桁	211.6	
		4径間連続非合成I桁	337.4	
有野第3工区 (その2)	有野橋	3径間連続非合成I桁	220.5	
		3径間連続非合成I桁	271.8	
		5社入路橋	5径間連続非合成I桁	245.0
		5社出路橋	4径間連続非合成I桁	262.8
五社 出入路工区	5社入路橋	5径間連続非合成箱桁	403.7	
	5社出路橋	5径間連続非合成箱桁	335.8	
	5社出入路橋	3径間連続非合成箱桁	300.0	
	5社出入路有野川橋	単純合成I桁	99.9	
	有野川工区	有野五社橋	4径間連続鋼床版箱桁	2,131.9
堀越工区 (その1)	堀越川橋	単純合成I桁	993.2	
		単純合成I桁	120.0	
	松尾崎橋	単純合成I桁	82.3	
堀越工区 (その2)	池ノ谷橋	2径間連続非合成I桁	313.4	
		2径間連続非合成I桁	253.0	
堀越工区 (その3)	西堀越川橋	2径間連続非合成I桁	253.4	
		3径間連続非合成I桁	321.6	
		4径間連続非合成箱桁	497.7	
有馬口工区 (その1)	有馬口第2橋	単純合成I桁	80.8	
		5径間連続非合成箱桁	547.6	
		有馬口出路第1橋	単純合成I桁	81.2
有馬口 出入路工区	有馬口入路第1橋	5径間連続非合成箱桁	287.6	
	有馬口入路第2橋	4径間連続非合成箱桁	237.5	
	有馬口入路第3橋	単純合成箱桁	157.8	
	有馬口出路第2橋	単純非合成箱桁	74.9	
	合計			13,204.9

※重量は、耐候性ボルトおよび伸縮装置等付属物を除く。



図-1 耐候性橋梁位置図

2. 追跡調査計画

これらの無塗装耐候性橋梁について、供用後の維持管理ならびに今後の無塗装耐候性橋梁建設のための資料を得るため、標準的な橋種を選び、追跡調査を実施することとした。以下に概要を述べる。

2-1 対象径間

追跡調査の対象としては、今回供用した北神戸線の無塗装耐候性橋梁群より標準的な桁形式を選定し、日照等の影響を調査するため橋軸の方角も条件として表-2に示す位置を選定した。また、融雪剤の影響等により錆の進行に異常が認められた場合は、ここに示した以外でも随時調査対象に加えるものとしている。

表-2 追跡調査対象橋梁と調査点数

橋梁名	構造形式	橋軸方角	測定箇所	板厚減少調査	錆安定度調査
オドロ第2橋	単純合成I桁	南北	端支点上	10点	4点
			端横桁	1点	1点
松尾崎橋	単純合成I桁	東西	端支点上	8点	4点
			端横桁	1点	1点
オドロ第1橋	3径間連続非合成箱桁	南北	端支点上	10点	4点
			中間支点上	10点	4点
			端横桁	1点	1点
水無橋	4径間連続非合成箱桁	南北	端支点上	10点	4点
			中間支点上	10点	4点
			端横桁	1点	1点
有野五社橋	4径間連続鋼床版箱桁	東西	端支点上	10点	4点
			中間支点上	10点	4点
			端横桁	1点	1点
			耳桁	1点	1点

2-2 調査内容

調査内容は、外観調査、設計上の留意点に関する調査、板厚減少調査および錆安定度調査とし、その内容について以下に示す。

(1) 外観調査

外観調査については、表-2に示す対象橋梁において、今後の調査に必要な基礎データの収集を目的として全体を対象とし、経年変化が分かるように記録する。

(2) 設計上の留意点に関する調査

設計上の留意点に関する調査については「無塗

装耐候性橋梁設計施工指針」に定められた構造細目について、錆の生成状況、埃や滞水の状況を調査するものとする。

(3) 板厚減少調査

表-2に示す位置での部材の板厚減少調査を行う。測定方法は超音波測定器などによる。

(4) 錆安定度調査

表-2に示す位置での錆安定度の確認を行う。試験方法については、湾岸線で行ったフェロキシル試験などによるものとする。

3. 安定錆促進試験工法試験工事

無塗装耐候性鋼材は、一定期間は表面に初期錆が発生し、その後、初期錆の内面に安定錆が生成する。この時に初期錆は風化して消失するが、その際、錆汁による路下や橋脚等への汚染が問題となる場合がある。また、飛来塩分が多いなど環境が悪い場合は初期錆が生成し続け、いつまでも安定錆に移行せず、錆汁による汚染だけでなく板厚減少なども問題となる。

こういった初期錆対策として、いくつかの方法が実施あるいは提案されているが、大きく3種類の方法に分けることができる。すなわち、

- ① 外部からの塩分の侵入をプライマー等で一定期間物理的に遮断し、その間に安定錆の生成を期待する方法
- ② 鋼材の組成自体を塩分の影響を受けにくいように調整する方法
- ③ 化学反応等により積極的に安定錆生成を促進させる方法

である。

これらのうち、①については多くの実績があるが、②、③についてはまだ開発されて間が無く、実績も少ない。また、全ての方法において、その効果等についてまとまった評価がされていないのが実状であるが、一般的な評価は以下の通りである。①については施工が容易であるが、施工後15年を経てもプライマー皮膜が劣化せず、安定錆生成が期待通りに進まない事例が見られる。②につ

いては、まず橋梁設計時点までに対応が必要となり、また鋼材エクストラも現時点では相当高価となる。③についてはプライマー塗布により必要な元素を供給するものであるが、化学反応中に多量の副生成物が発生し、景観上問題となった事例もある。しかしながら施工は容易であり、短期間での安定錆生成も達成されるといわれている。

そこで、今回はこれらのうち、桁架設後にも施工可能な③の方法について、その効果を確認するため試験工事および追跡調査を実施することとした。

施工および調査を行うための条件が良いことから五社出入路橋を施工箇所として選定し、工事範囲は橋台部桁端より延長約10m、処理面積約350m²で、平成10年11月上旬に施工した。竣工後の様子を写真-1に示す。その後2週間毎の写真撮影を継続しているが、詳細調査は外観から錆安定化が進んだと判断された時点で行うこととし、後日、別の機会で報告するものとした。



写真-1 安定錆促進工事施工後の様子
(橋台付近が試験施工部、奥が未施工部)

4. 安定錆の定義と評価法

4-1 錆の種類

鉄の錆はその組成によって表-3に示す5種類に分類される。一般的には表中の非晶質錆が、Cu、Cr、P等の耐候性元素を含み亀裂も少ないので安定錆と考えられている。一方最近の研究では、20年以上経過した安定錆を分析した結果、非晶質層の下にCrの凝縮した α -FeOOH層が形成されてい

表-3 錆の種類

化合物名称 錆物名	色結晶の形状	結晶系	備考
α -FeOOH ゲーサイト 針鉄錆	黄色～褐色 針状	斜方晶	・一般的には粗大、粒度により色変化 ・Cr置換により微細化→安定錆
β -FeOOH アカガナイト 赤鉄錆	淡褐色～白 針状	正方晶	・塩分環境下でのみ生成する錆 ・結晶中にCl ⁻ イオン含有
γ -FeOOH レピドロサイト 鱗鉄錆	オレンジ 針状	斜方晶	・いわゆる初期の赤錆成分
Fe ₃ O ₄ マグネタイト 磁鉄錆	黒色 八、六面体状	逆スピネル 立方晶	・黒錆、ミルスケール ・不安定
非晶質錆	褐色	不定形 (アモルファス)	

ることが明らかとなり、これを最終安定錆とみなす学説も提案されている^{2),3)}。

4-2 従来の安定錆評価法

公団では、錆安定度評価法のひとつとして既にフェロキシル試験法の有効性を確認している⁴⁾。図-2(a)(b)は出島出路橋、(c)は海岸地帯と工場地帯に設置された試験片におけるフェロキシル試験結果の経年変化図である。

しかしながら、フェロキシル評価点は、錆表面の緻密さを直接測定した指標であり、化学的・物理的根拠が薄く定量的評価とは言い難い。これは、調査を継続しても、維持管理の省力化(ここでは調査・点検の打ち切り)に踏み切る点が明確に判定できないことを示している。

さらに、(a)(b)に今回測定した五社ランプ(SMA490AW材)のデータをプロットしたところ、同じ暴露期間における湾岸線のデータより大きな数値が出ていることがわかる。北神戸線と湾岸線の暴露環境の違いを考慮すると、むしろ五社ランプの安定錆は出島出路と同等以上に安定化するものと思われることから、フェロキシル試験結果は測点間相互の直接比較には必ずしも適当でないことが伺える。ただし、図より、ある測点の経年変化をみる指標としては十分であるといえる。

また、公団では、フェロキシル試験法と同時に、鋼材腐食量についても試験片でのデータを蓄積しているが、これについてもフェロキシル試験法と

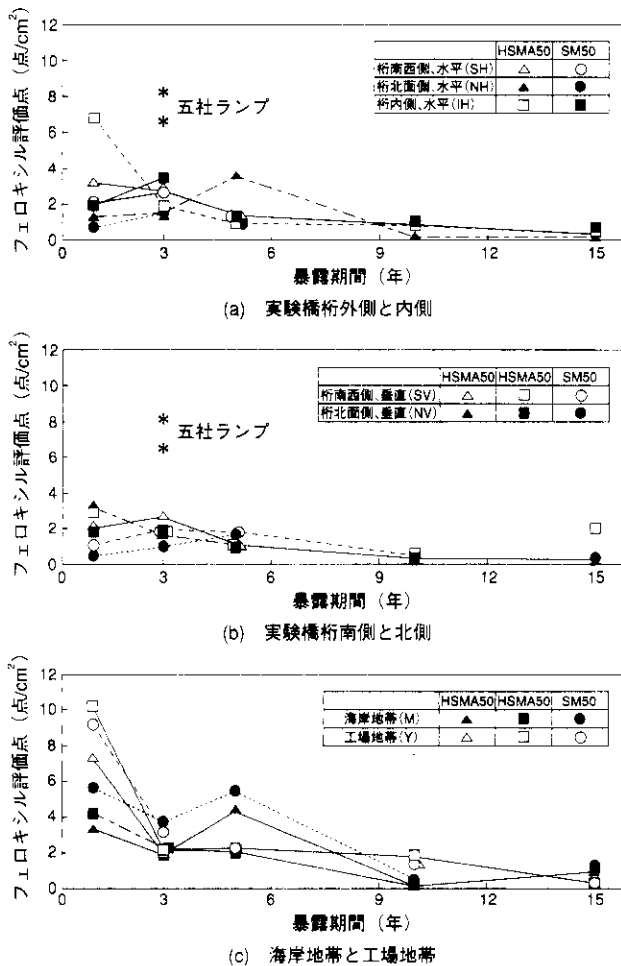


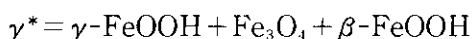
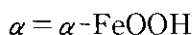
図-2 フェロキシル試験結果の経年変化

同様、ある測点の経年変化をみる指標としては優れるが、実橋では板厚の減少量から鋼材腐食量を推定することとなり、精密な測定は困難であると思われる。

そこで、今回の試験工事では錆の安定度を化学的・物理的根拠を持って評価する方法として錆構造比法および腐食電位法を提案し、従来のフェロキシル試験法や鋼材腐食量調査法と併せて錆安定度評価を行い、提案手法の妥当性を検証することとした。

4-3 錆構造比法 (α/γ^* 法)

錆構造比法は、対象橋梁より採取した錆サンプルをX線定量分析し、表-3に示す5種類の錆の構造比を調べる方法である。具体的には、



として、 α/γ^* の値を錆安定度の指標とするもので、その値が一定値以上(現在の研究では2.0以上)となると安定しているとされる。この手法は材料化学的意味を持つと思われるが、時間と費用がかかる。また、この指標はCrの凝縮した $\alpha\text{-FeOOH}$ 層を最終安定錆とみなす最近の説によっており、一般に安定錆とみなされている非晶質錆は考慮されていない。

4-4 腐食電位法

腐食電位法は、材料表面の防食性を、電気化学的によく用いられる分極特性曲線で評価する手法で、目的物に電極を一定時間当てることにより腐食電位を読みとり、腐食電位が高いほど防食性が高い、すなわちその錆は安定化していると評価される。

この方法は安定錆の定義によらず錆安定度の評価が可能で、簡便な測定でその場で結果が得られるという特徴を持つ。

5. 安定錆評価法の適用性

錆構造比法および腐食電位法の適用性を評価するため、五社出入路(3年経過)、出島出路(18年経過)、護摩谷橋(10年経過)について、同一箇所ではフェロキシル試験、錆構造比法および腐食電位法による錆安定度評価を実施した。結果を表-4に示す。

表-4 錆安定度評価試験結果比較

橋名	経年数	Fe点数	α/γ^*	電位
五社	3	8.2	0.5	-176
五社	3	6.6	0.5	-126
出島	18	0.3	3.7	-163
出島	18	0.3	5.6	-141
護摩谷	10	0.1	3.4	-40

5-1 錆構造比法とフェロキシル試験

フェロキシル試験による評価点数と錆構造比法における α/γ^* の相関を図-3に示す。ここで、フェロキシル評価点数が低いほど錆表面は緻密となり、 α/γ^* が大きいほど錆は安定化している。なお、この図では参考のため阪神高速道路公団以外

の橋梁のデータも含んでいる。

図より分かるように、両者には負の相関が見られる。 α/γ^* の評価が低いにもかかわらずフェロキシル評価点数の評価が高い領域が見られるが、この部分では非晶質鍍の割合が多く、相対的に α/γ^* が低く算定された可能性がある。

5-2 腐食電位法とフェロキシル試験

フェロキシル試験による評価点数と腐食電位の相関を図-4に示す。腐食電位が高いほど測定し

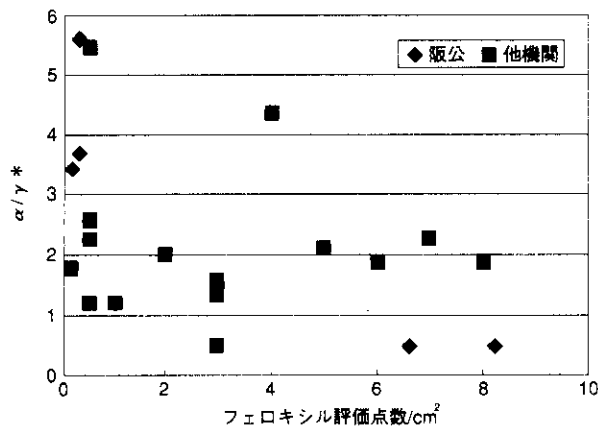


図-3 α/γ^* とフェロキシル試験の相関

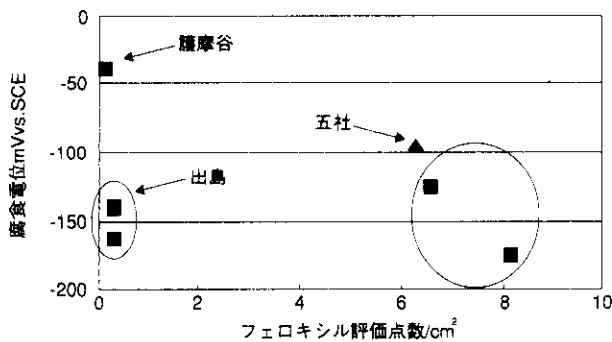


図-4 腐食電位とフェロキシル試験の相関

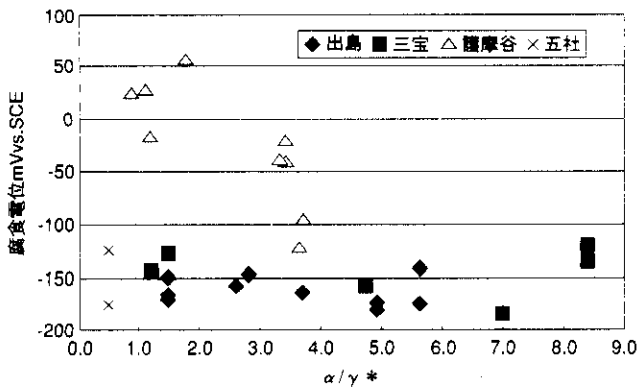


図-5 α/γ^* と腐食電位の相関

た表面の防食性が高いことを示す。

ここでは他機関のデータはなく、サンプル数が5点と少ないため、明瞭な傾向は見出せない。ただし、山間部に位置する五社および護摩谷のデータ(計3点)だけに着目すると、負の相関が見られる。

5-3 鍍構造比法と腐食電位法

鍍構造比法および腐食電位法に関しては、これまで述べた3橋に加えて湾岸線の三宝入路においてもデータを採取した。また、各橋とも複数の部材からデータを採取している。それらのデータから鍍構造比 α/γ^* と腐食電位の相関を見たのが図-5である。ここでは正の相関が期待されたが、今回のデータからは目立った傾向があらわれなかった。

ここで、護摩谷橋のデータが特異性を示しているが、本橋は表面の鍍膜がサンプル採取が困難なほど非常に強固であり、結果として採取できた試料が本来の鍍に比べ不安定な成分が多く、 α/γ^* が小さく評価されているものと思われる。

現時点でこれらの評価法を鍍安定度の指標として用いるにはまだ検討の余地があると思われるが、今後さらなるデータの収集と分析を行い、データの信頼性を高める必要があると思われる。

6. まとめ

以上より、次のことが分かる。

- (1)北神戸線では鋼重約13,200tの鋼橋に無塗装耐候性鋼材を用いることにより約7億円の初期コスト減となった。さらに、順調に鍍が安定化すれば今後のメンテナンスコストの大幅な節約も期待できる。
- (2)施工後の初期鍍むらについては、施工時期や工期の検討を十分行うことにより対処可能である。
- (3)北神戸線の耐候性橋梁は目視調査からは全体的に概ね良好に鍍が進行していると思われるが、追跡調査により確認される。
- (4)鍍安定度の評価法として、フェロキシル試験

法は定量的評価といえず、維持管理省力化への明確な判定ができない。

(5) 鋼材腐食量は確実な指標となりうるが、実橋での精密な測定が困難であり実用的でない。

(6) 錆構造比法や腐食電位法などの新しい錆安定度評価法はそれぞれに利点を持つが、現状では十分なデータが得られておらず、実用にはさらに検討が必要である。

今後引き続きデータを蓄積して、化学的・物理的根拠を持つ定量的な錆安定度評価法の確立が可能となれば、橋梁の維持管理省力化に寄与するものと考えられる。

さらに、追跡調査の結果より、日照条件や気候、散布融雪剤などの錆環境と錆安定度の関係が再評価できれば、耐候性鋼材の適用性拡大も可能となり、橋梁の建設コストおよび維持管理コストの縮減に結びつくものと思われる。

最後に、本稿をまとめるにあたってデータ提供等様々にご尽力を頂いた(社)鋼材倶楽部耐候性鋼WG、(財)阪神高速道路管理技術センター、住友金属工業(株)の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：無塗装耐候性橋梁設計施工指針，1992. 7.
- 2) 山下，幸，長野，三沢：長期大気腐食による耐候性鋼さび層の安定化過程，材料と環境，第43巻第1号，腐食防食協会，1994.
- 3) 三沢，山下，長野：耐候性鋼の安定さび層，まてりあ，第35巻第7号，日本金属学会，1996.
- 4) 阪神高速道路公団：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する調査研究報告書，1996.

7号北神戸線無塗装耐候性橋梁群



オドロ第1橋



オドロ第2橋



松尾崎橋



水無橋



有馬五社橋