

鉄筋腐食量を考慮した海上橋脚の耐震性能評価と対策工法の提案

齊藤 創太*・佐藤 昌宏*・石原 晃一**・吉沼 志織**
平良 譲治***・國吉 啓太***

* (一財) 沿岸技術研究センター

** 日本工営 (株)

*** 内閣府 沖縄総合事務局

石垣市にある人工島(南ぬ浜町)と市街地を結ぶ「サザンゲートブリッジ」は、1993年に供用開始された道路橋であり、2020年の定期点検において、海上橋脚であるP4柱部に複数のひび割れやコンクリートの浮きが確認された。橋脚の劣化状態を詳細に把握するため、鉄筋腐食量調査(自然電位法、はつり調査)を実施した。その結果、現況評価および耐震補強の必要性、対策工法の検討を行い、十分な耐震性能を有していることから耐震補強は不要と判断した。性能(耐久性)確保のためには電気防食工法を対策工法として選定した。

キーワード : 海上橋脚, 鉄筋腐食量調査, 自然電位法, はつり調査, 耐震性能, 電気防食工法

1. はじめに

「サザンゲートブリッジ」は、石垣市にある人工島(南ぬ浜町)と市街地を結ぶPC3径間連続箱桁橋およびRC床版単純ローゼ桁橋で構成される橋長438mの道路橋である(写真-1)。1993年の供用開始後、兵庫県南部地震後の設計基準の見直しにより、2008年から2009年にかけてRC巻立による橋脚の耐震補強工事が実施された。その際、海上橋脚であるP4については耐震補強を実施せずに所定の耐震性能を有していることが確認されたため、未補強のまま供用されていた。その後、2020年の定期点検において、P4橋脚柱部に複数のひび割れやコンクリートの浮きが確認されたため、現況の劣化状態を把握し、耐震補強の必要性を検討することにした。本稿では、海上橋脚の劣化状態を把握するために鉄筋腐食量調査(自然電位法、はつり調査)を実施し、現況評価および耐震補強の必要性和対策工法の検討を行った結果について報告する。



写真-1 サザンゲートブリッジ全景

2. 自然電位法による鉄筋腐食量調査

2.1 調査概要

コンクリート中に埋設された鋼材の腐食状況を把握するため、自然電位法(JSCE-E 601-2000¹⁾)による電位測定を実施した。コンクリート中の鉄筋などの鋼材腐食は、電子の移動を伴う電気化学的反応であり、この移動による流れは腐食電流と呼ばれ、腐食反応の速さを表す。腐食した鋼材の自然電位は卑(-)側に変化するため、腐食状況に応じて変動する鋼材の自然電位を測定することにより、P4橋脚内部の鉄筋の腐食状況を推定できる。調査の手順を以下1)~3)に、測定状況を写真-2に示す。

- 1) 調査面に清浄な水を散水噴霧し、湿潤状態に保つ。
- 2) 電圧計の(-)端子に内部鉄筋、(+)端子に照合電極(飽和硫酸銅電極:CSE)を接続する。
- 3) 照合電極先端に含水させたスポンジを巻き付けてコンクリート表面の測定点に押し当て、測定する。



写真-2 自然電位測定

2.2 評価結果

自然電位法による電位測定を P4 橋脚全面で実施した。測点は橋脚外周半時計周りに約 1.6m 間隔で 1～10 (図-1)、鉛直方向は上部から下部に向かって約 2m 間隔で A～H (図-2) とした。測定結果の ASTM C 876 による評価基準を表-1 に、評価結果を図-2 に示す。測定の結果、海水面に近いほど電位が卑(－)側の値を示し、内部鉄筋が腐食している可能性が高いことが確認された。

表-1 自然電位測定結果の評価基準 (ASTM C 876)

自然電位 E (mV vs. CSE)	鋼材腐食の可能性
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350 < E \leq -200$	不確定
$E \leq -350$	90%以上の確率で腐食あり

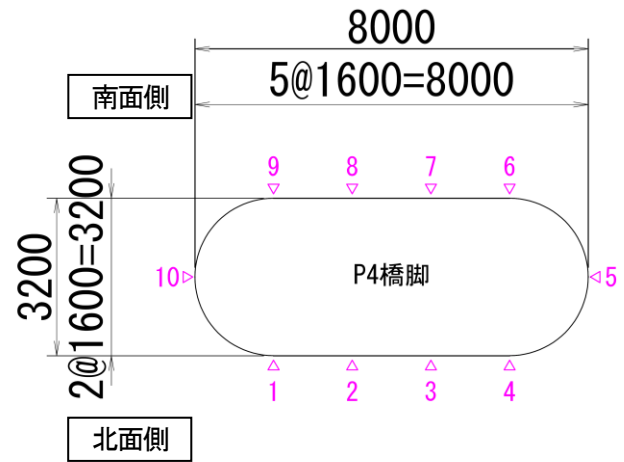
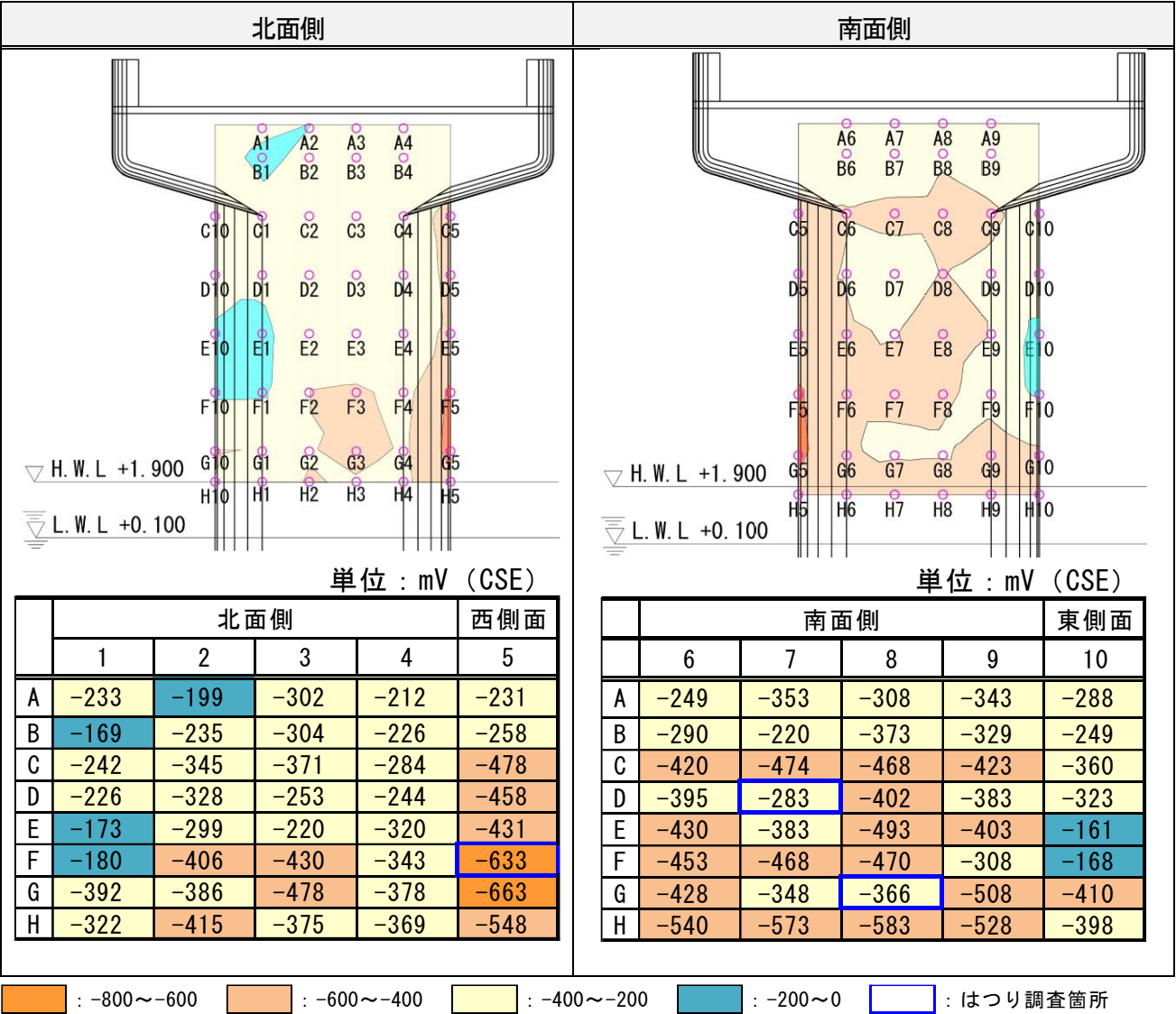


図-1 自然電位測定位置 (平面図)



※ -350mVよりも卑(－)側の値を示した場合、90%以上の確率で腐食あり

図-2 自然電位測定結果

3. はつり調査による鉄筋腐食量測定

3.1 調査概要

自然電位測定を実施した代表地点3箇所(D7, F5, G8)においてははつり調査を行った。電磁波レーダによる非破壊調査で鉄筋の位置を確認後、コンクリートカッターおよびピックハンマを用いて鉄筋を露出させ、腐食状況の外観確認および鉄筋径（ノギスによりリブあるいは節を除いた3箇所を測定した平均値）を測定した（写真-3）。腐食状況はコンクリート標準示方書²⁾に基づき、腐食グレード（表-2）で評価した。また、調査完了後は鉄筋に防錆スプレーを塗布し、ポリマーセメントモルタルで断面を修復した。



写真-3 はつり調査による鉄筋腐食量調査

3.2 調査結果

はつり調査の結果を表-3に示す。自然電位測定の結果、腐食の可能性が高いと判断したF5およびG8については腐食グレードが厳しい結果となり、最大約10%の鉄筋径の減少が確認された。

表-2 腐食グレードと鋼材の状態

腐食グレード	鋼材の状態
腐食グレードI	黒皮の状態、またはさびが生じているが全体的に薄い緻密なさびであり、コンクリート表面にさびが付着していることはない。
腐食グレードII	部分的に浮きさびがあるが、小面積の斑点状である。
腐食グレードIII	断面欠損は目視点検では認められないが、鋼材の全周または全長にわたって浮きさびが生じている。
腐食グレードIV	断面欠損が生じている。

表-3 はつり調査結果

はつり箇所	鉄筋腐食状況写真		はつり調査結果												
D 7 H=7040mm ※HWLを基準 	 はつり後状況	 鉄筋露出状況	腐食グレード：I 自然電位：-283mV (vs. CSE) かぶり（主鉄筋）：120mm、かぶり（帯鉄筋）：95mm 周辺状況：うき、ひびわれ等の損傷は見られない。 鉄筋径計測結果： <table><tr><th>鉄筋分類</th><th>設計（公称径）</th><th>計測値</th><th>鉄筋径減少率</th></tr><tr><td>主鉄筋</td><td>D22 (22.2 mm)</td><td>22.06 mm</td><td>0.6%</td></tr><tr><td>帯鉄筋</td><td>D16 (15.9 mm)</td><td>15.50 mm</td><td>2.6%</td></tr></table>	鉄筋分類	設計（公称径）	計測値	鉄筋径減少率	主鉄筋	D22 (22.2 mm)	22.06 mm	0.6%	帯鉄筋	D16 (15.9 mm)	15.50 mm	2.6%
鉄筋分類	設計（公称径）	計測値	鉄筋径減少率												
主鉄筋	D22 (22.2 mm)	22.06 mm	0.6%												
帯鉄筋	D16 (15.9 mm)	15.50 mm	2.6%												
F 5 H=3040mm ※HWLを基準 	 はつり後状況	 鉄筋露出状況	腐食グレード：III 自然電位：-633mV (vs. CSE) かぶり（主鉄筋）：110mm、かぶり（帯鉄筋）：85mm 周辺状況：ひび割れ（幅：1mm）が近傍に見られる。 鉄筋径計測結果： <table><tr><th>鉄筋分類</th><th>設計（公称径）</th><th>計測値</th><th>鉄筋径減少率</th></tr><tr><td>主鉄筋</td><td>D22 (22.2 mm)</td><td>20.93 mm</td><td>6.1%</td></tr><tr><td>帯鉄筋</td><td>D19 (19.1 mm)</td><td>17.33 mm</td><td>10.2%</td></tr></table>	鉄筋分類	設計（公称径）	計測値	鉄筋径減少率	主鉄筋	D22 (22.2 mm)	20.93 mm	6.1%	帯鉄筋	D19 (19.1 mm)	17.33 mm	10.2%
鉄筋分類	設計（公称径）	計測値	鉄筋径減少率												
主鉄筋	D22 (22.2 mm)	20.93 mm	6.1%												
帯鉄筋	D19 (19.1 mm)	17.33 mm	10.2%												
G 8 H=1040mm ※HWLを基準 	 はつり後状況	 鉄筋露出状況	腐食グレード：IV 自然電位：-366mV (vs. CSE) かぶり（主鉄筋）：120mm、かぶり（帯鉄筋）：95mm 周辺状況：うきが見られる。 鉄筋径計測結果： <table><tr><th>鉄筋分類</th><th>設計（公称径）</th><th>計測値</th><th>鉄筋径減少率</th></tr><tr><td>主鉄筋</td><td>D22 (22.2 mm)</td><td>21.67 mm</td><td>2.4%</td></tr><tr><td>帯鉄筋</td><td>D19 (19.1 mm)</td><td>17.22 mm</td><td>10.9%</td></tr></table>	鉄筋分類	設計（公称径）	計測値	鉄筋径減少率	主鉄筋	D22 (22.2 mm)	21.67 mm	2.4%	帯鉄筋	D19 (19.1 mm)	17.22 mm	10.9%
鉄筋分類	設計（公称径）	計測値	鉄筋径減少率												
主鉄筋	D22 (22.2 mm)	21.67 mm	2.4%												
帯鉄筋	D19 (19.1 mm)	17.22 mm	10.9%												

3.3 鉄筋腐食量調査結果のまとめ

自然電位の分布およびはつり調査箇所と腐食グレードを併記した図を図-3 に示す。自然電位の分布と同様に腐食グレードについても海水面に近いほど厳しい結果となり、自然電位法による電位とはつり調査による腐食グレードの傾向が概ね一致した。

4. 橋脚の耐震性能照査

2008 年に設計基準の改訂（道路橋示方書・同解説（2002 年 3 月）³⁾）に伴う耐震性能の再照査が実施された。P4 橋脚以外の橋脚は耐震性が不足していると判断され RC 巻立による耐震補強が実施されたが、P4 橋脚の耐震補強は不要であると結論づけられた。

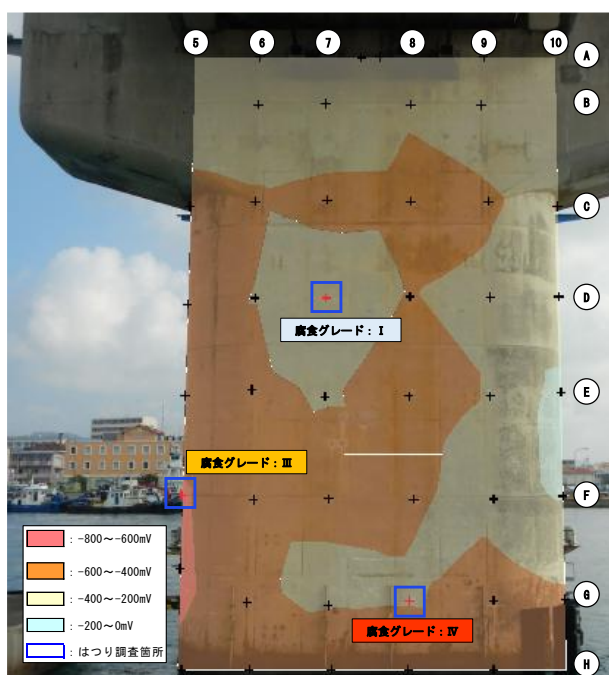


図-3 電位分布とはつり調査による腐食グレード
(南面側)

一方、今回の鉄筋腐食量調査により、P4 橋脚においては鉄筋腐食が確認され、橋脚本体の耐震性能の低下が懸念されることから、鉄筋の腐食状況を考慮して P4 橋脚の耐震性能を照査した。耐震性能照査方法を表-4 に示す。

4.1 検討ケースおよびモデル

鉄筋腐食量調査結果を踏まえ、P4 橋脚の全高さにおいて鉄筋径の 10% 減少を考慮した。検討ケースおよび配筋状況と鉄筋の断面積減少率を表-5 に、検討モデルを図-4 に示す。

表-4 P4 橋脚の耐震性能照査方法

対策方針	L1 地震時	L2 地震時
準拠基準	道路橋示方書・同解説（2002 年 3 月） （2008 年の耐震補強設計時と同様）	
照査方法	静的照査	動的照査 （非線形時刻歴応答解析）
照査項目	曲げ耐力	①変位（塑性率、残留変位） ・塑性ヒンジ部（基部）の回転角 ・塑性ヒンジ部以外の箇所の曲率 ②曲げ耐力 ③せん断耐力 ・橋脚本体のせん断耐力

表-5 検討ケースおよび鉄筋の断面積減少率

鉄筋径	ケース1 (減肉なし)		ケース2 (鉄筋径10%減)	
	考慮径 (mm)	断面積減少率 (%)	考慮径 (mm)	断面積減少率 (%)
D22	22	0	20	19
D19	19	0	17	21
D16	16	0	14	23

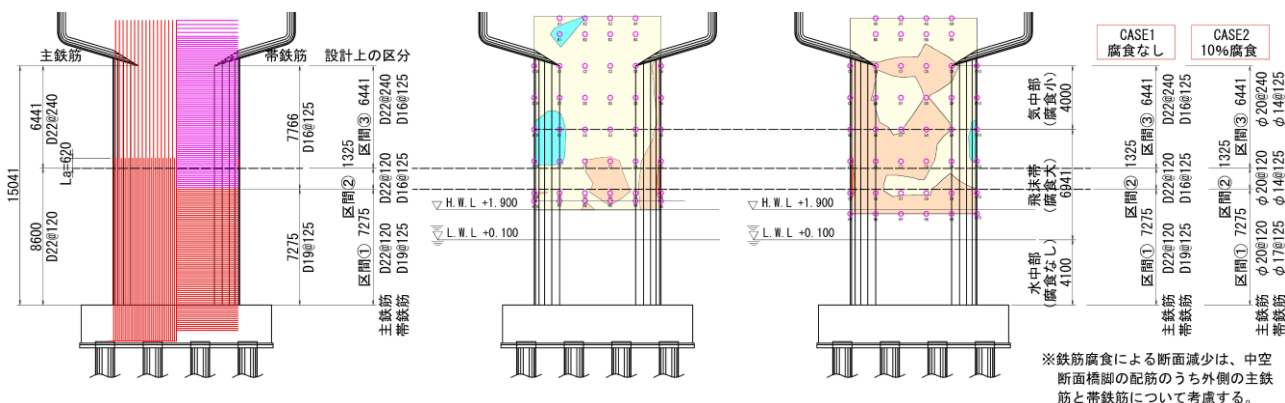


図-4 検討モデル

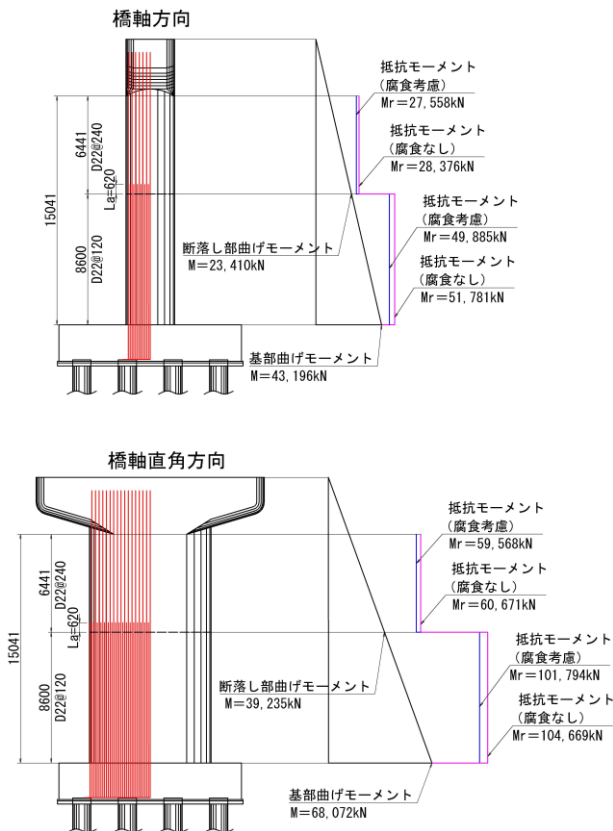


図-5 L1 地震時の曲げモーメント分布図

4.2 耐震性能照査結果 (L1 地震時)

L1 地震時に P4 橋脚に生じる曲げモーメントと橋脚の抵抗モーメントの分布図を図-5 に示す。ここで、L1 地震は、当初設計と同様に設計水平震度 $K_h=0.17$ とした。同図に示すように、腐食を考慮した場合でも発生曲げモーメントは抵抗モーメントに対して余裕があることがわかる。この理由として、当初設計 (1988 年) 時の鉄筋量は最小鉄筋量で決定されており、発生応力度は許容応力度に対して十分な余裕を有していたことが考えられる。なお、せん断力についてはコンクリートのみに耐力を期待する設計のため、鉄筋腐食の影響は受けないことから、本検討における照査は省略した。

4.3 耐震性能照査結果 (L2 地震時)

1) 適用基準およびモデル化の方針

L2 地震に対する耐震性能の照査は、道路橋示方書・同解説 (2002 年 3 月) に準拠して動的解析により実施した。橋脚を梁でモデル化し、基部から約 3m の区間には塑性ヒンジ長を考慮した $M-\theta$ モデル、それ以外の部分には $M-\phi$ モデルを適用し、主スパンである P3 橋脚-上部工-P4 橋脚全体をモデル化した。上部工は梁でモデル化し、非線形性は考慮しなかった。フーチングおよび橋脚上部の梁部を剛域とし、フーチング下端に地盤バネを設定した。P3 橋脚側は固定支承、P4 橋脚側は可動支承のため、P4 側の橋軸方向の水平移動を考慮した。P4 橋脚のモデル概要図を図-6 に示す。

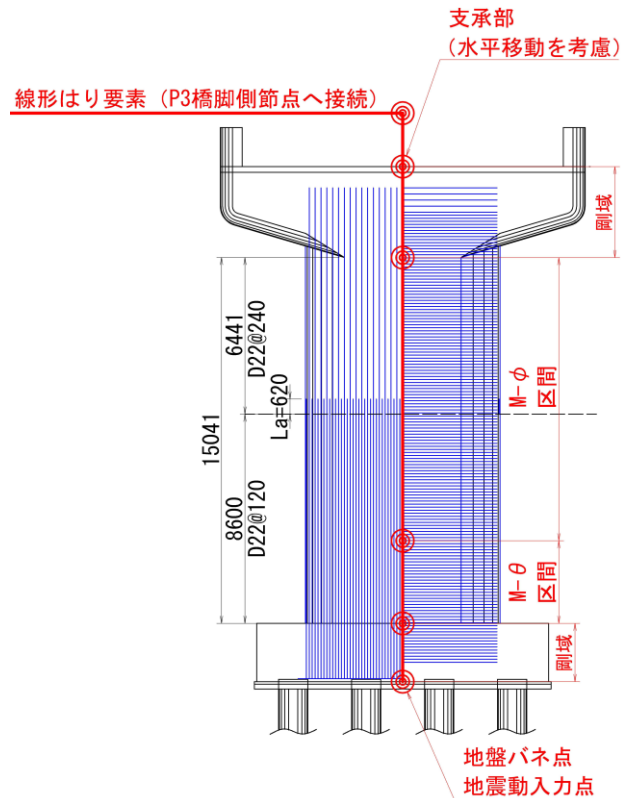


図-6 モデル概要図 (P4 橋脚)

表-6 入力地震動

タイプ	地震名	記録場所	最大値 (gal)
I	1983年日本海中部	津軽大橋周辺地盤上 TR.	-433.372
	1984年日本海中部	津軽大橋周辺地盤上 LG.	-424.006
	1994年北海道東方沖	釧路川堤防周辺地盤上 LG.	438.520
II	1995年兵庫県南部	東神戸大橋周辺地盤上 N12W	-591.034
		ポートアイランド内地盤上 N-S	-557.427
		ポートアイランド内地盤上 E-W	619.186

・ $M-\theta$ モデル: 塑性化位置を橋脚下端に特定する。予想される塑性化位置にコンクリートのひび割れモーメント、最外縁鉄筋の降伏モーメントを折れ点とするトリリニア型の非線形回転バネを設け、動的解析によって得られた最大応答回転角が許容回転角以内であることを照査する。

・ $M-\phi$ モデル: 部材の曲げモーメントと曲率の関係を、コンクリートのひび割れモーメント、最外縁鉄筋の降伏モーメントを折れ点とするトリリニア型でモデル化し、部材の曲げ剛性の非線形性を考慮する。最大応答曲率が降伏曲率以下であることを照査する。

2) 入力地震動

道路橋示方書・同解説 (2002 年 3 月) においては、レベル2地震動としてタイプI (発生頻度が低いプレート境界型の大規模な地震)、タイプII (発生頻度が極めて低い内陸直下型地震) の2種類について3波形程度を考慮することとしている。今回の照査においてタイプI, IIとしてモデル下端に入力した地震動を表-6 に示す。

表-7 照査結果

検討ケース			ケース2：10%腐食				
方 向			橋軸方向		橋軸直角方向		
断面寸法			3. 200		8. 000		
地震動			タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅠ	タイプⅡ	
破壊形態の判定			曲げ破壊	曲げ破壊	曲げ破壊	曲げ破壊	
曲 げ 耐 力	基 部 以 外	曲率の照査					
		最大応答曲率	$\phi_{max} (\mu \cdot 1/m)$	313. 7	599. 7	147. 8	271. 8
		初降伏曲率	$\phi_{y0} (\mu \cdot 1/m)$	660. 2	660. 2	278. 4	278. 4
		比率	ϕ_{max}/ϕ_{y0}	0. 475	0. 908	0. 531	0. 976
		<判定>	$\phi_{max} \leq \phi_{y0}$	OK	OK	OK	OK
	基 部 (塑性ヒンジ部)	回転角の照査					
		最大応答回転角	$\theta_{max} (\mu \cdot rad)$	901. 8	2039. 0	792. 4	2463. 4
		降伏回転角	$\theta_y (\mu \cdot rad)$	978. 8	978. 8	840. 0	840. 0
		降伏判定	θ_{max}/θ_y	0. 921	2. 083	0. 943	2. 933
		許容回転角	$\theta_a (\mu \cdot rad)$	4348. 5	7718. 2	2246. 1	3652. 2
せん 断 耐 力	比率	θ_{max}/θ_a	0. 207	0. 264	0. 353	0. 674	
	<判定>	$\theta_{max} \leq \theta_a$	OK	OK	OK	OK	
	せん断力に対する照査						
	最大応答せん断力	S_{max} (kN)	3631. 3	4951. 6	6058. 0	8348. 1	
	せん断耐力	P_s (kN)	4986. 4	5163. 2	11647. 6	12028. 8	
変 位	比率	S_{max}/P_s	0. 728	0. 959	0. 520	0. 694	
	<判定>	$S_{max} \leq P_s$	OK	OK	OK	OK	
	残留変位の照査						
	応答塑性率	μ_r	0. 708	1. 413	0. 604	1. 584	
	残留変位	δ_R (mm)	0. 000	0. 016	0. 000	0. 016	
	許容残留変位	δ_{Ra} (mm)	0. 188	0. 188	0. 210	0. 210	
	比率	δ_R/δ_{Ra}	0. 000	0. 087	0. 000	0. 077	
<判定>	$\delta_R \leq \delta_{Ra}$	OK	OK	OK	OK		

3) 照査結果

非線形時刻歴応答解析による耐震性能照査の結果を表-7に示す。橋軸方向、橋軸直角方向ともに地震動タイプIと比較してタイプIIの方が厳しい結果となり、橋軸方向においてはせん断耐力、橋軸直角方向においては曲率の照査結果が最もクリティカルとなった(赤字部)。しかし、腐食を考慮したケース2においても全ての項目において所要の耐震性能を満足する結果となった。

5. 対策工法の検討

5.1 対策方針

L1地震時およびL2地震時の耐震性能は、鉄筋径を10%減じた場合でも所要の耐震性能を十分確保できていると考えられる。鉄筋の腐食状況を考慮した場合でも耐震性能を満足していることから、「性能回復のための補修補強対策」ではなく、「性能(耐久性)確保対策」を前提に対策工法を検討する。

5.2 環境区分を考慮した対策工法の選定

塩害に対する環境区分は海中部、干満帯、飛沫帯、海上大気中に分けられる。海中部は水と塩化物イオンが多量に供給されるが、酸素供給量が少ないため、劣化の進行は遅い。一方、干満帯や飛沫帯は酸素と水、塩化物イオンが十分に供給されるため、より厳しい塩害環境となる。以上の環境区分および橋脚の耐震性能向上が不要であること

表-8 塩害環境区分と適用可能な補修工法の例⁴⁾

補修工法	ひび割れ補修工法 ^{※1}	表面被覆工法	断面修復工法	電気防食工法 ^{※2}
環境区分				
海上大気中	○	○	○	○
飛沫帯	△	△	△	○
干満帯	△	△	△	△
海中部	△	△	△	△

表中の○は適用対象、△は適用する場合に検討が必要であることを示す。

※1：ひび割れ補修工法は、予防保全または表面被覆工法や電気防食工法などの補助工法として用いる。

※2：電気防食工法は、アルカリシリカ反応(ASR)の疑いがある場合は適用の可否や実施方法を検討する必要がある。

を踏まえ、港湾コンクリート構造物補修マニュアル⁴⁾に記載の補修工法(表-8)を参考に、最も適用範囲の広い電気防食工法を対策工法として選定(橋脚全面に適用)する。なお、コンクリートの浮きが確認された箇所には、浮きをはつり落とした後、ポリマーセメントモルタル等による断面修復工法を併用することとする。

6. まとめ

1) 橋脚表面での自然電位測定の結果、海水面に近い位置では電位が低く、鉄筋腐食の可能性が高い結果となった。また、はつり調査による腐食グレードについても海水面に近いほど厳しい結果となり、自然電位法による電位とはつり調査による腐食グレードの傾向が概ね一致した。

2) 耐震性能照査による現況評価の結果、L1地震時およびL2地震時のいずれも、鉄筋径を10%減じた場合でも所要の耐震性能は十分確保できていると考えられる。

3) 環境区分を踏まえ、最も適用範囲の広い電気防食工法を対策工法として選定する。なお、打音調査によりコンクリートの浮きが確認された箇所にはポリマーセメントモルタル等による断面修復工法を併用することとする。

謝辞

本稿は、内閣府 沖縄総合事務局 石垣港湾事務所発注の「石垣港臨港道路(橋梁)改良検討業務」の成果の一部をとりまとめたものである。業務実施にあたり検討委員会が開催され、東京工業大学(現：東京科学大学)の岩波委員長、琉球大学の富山委員、芝浦工業大学の穴見委員、港湾空港技術研究所の川端委員から貴重なご意見、ご指導をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 公益社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書[標準編] 土木学会標準および関連標準，pp. 220-222，2023。
- 公益社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，p. 130，2022。
- 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2002。
- 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾コンクリート構造物補修マニュアル，p. 18，2018。