

国道421号 佐目子谷橋における 自然電位法による鉄筋腐食推定

北村 知規¹・奥村 浩匡²

¹東近江土木事務所 道路計画課

²土木交通部 監理課 技術管理室

国道421号道路整備事業では、滋賀県中部地域と三重県北部地域を結ぶ東西ネットワーク上重要な道路で、永源寺ダム湖沿いの山間部における幅員狭小、線形不良、冬期の閉鎖および異常気象時通行規制区間の解消を目的とする道路整備を実施しており、佐目子谷橋はその一端を担う橋梁として、平成26年度に完成した。

佐目子谷橋では、桁内部に鉛照合電極を埋込み、桁外部へ配線した端子から鉄筋の自然電位測定を行う自然電位法による鉄筋腐食のモニタリング装置を設置した。コンクリート構造物中の鉄筋腐食の状態を非破壊で推定する本手法を、今後の維持管理へ活用していく際の比較基礎データとなる竣工時から現在までの測定結果を報告するとともに、供用中の鉄筋腐食度合と自然電位値の関係性について考察する。

キーワード 橋梁、鉄筋腐食、自然電位、鉛照合電極

1. はじめに

国道421号は、三重県桑名市の国道1号を起点とし、東近江地域を通過し、近江八幡市の国道8号を終点とする約70kmの幹線道路である。このうち、未改良区間である佐目萱尾工区(図-1)は、永源寺ダム湖畔を通る約3.3kmの区間で、線形が悪く、幅員狭小のため渋滞が頻発しており、早期の改修が望まれている。佐目萱尾工区では、橋梁や現道拡幅により、永源寺ダム湖側へ道路を張り出す計画で整備を進めており、佐目子谷橋はその一端を担う橋梁として、平成26年度に完成し、前後取付け区間を含めて平成28年度に供用を目指している。

近年、社会資本老朽化が進行し、適切な維持管理が求められる時代背景を踏まえ、当事務所では佐目子谷橋架設に合わせて、新たな維持管理手法の一つである自然電位法による鉄筋腐食のモニタリングが可能な装置を設置

した。

本内容は、佐目子谷橋の概要および当橋梁に導入した自然電位法による鉄筋腐食モニタリング装置、測定結果を紹介するとともに、供用中の鉄筋腐食度合と自然電位値の関係性について考察する。

2. 佐目子谷橋の概要

佐目子谷橋は、佐目子谷川が永源寺ダムに流れ込む合流地点を渡河する急峻な谷地形に架かる橋梁である。

本橋梁の道路規格は、第3種3級、設計速度50km/h、B活荷重、片側1車線、有効幅員8.5mであり、逆T式橋台1基(場所打ち杭基礎)、枕梁式橋台1基(深礎杭基礎)、柱式橋脚1基(ニューマチックケーソン基礎)のPC2径間Tラーメン箱桁となっている。(図-2)

3. 自然電位測定を採用経緯

(1) 社会資本老朽化の背景

滋賀県では15m以上の橋梁742橋を管理しており、建設後50年を経過する高齢化橋梁は、平成23年度末時点で61橋(全体の8%)であり、20年後には361橋(全体の49%)となり、橋梁の高齢化が急速に進行する。このような背景から、今後増大が見込まれる橋梁の修繕に要する費用に対し可能な限りのコスト削減への取り組みが不可欠となる。橋梁長寿命化修繕計画の考え方としても、



図-1 位置図

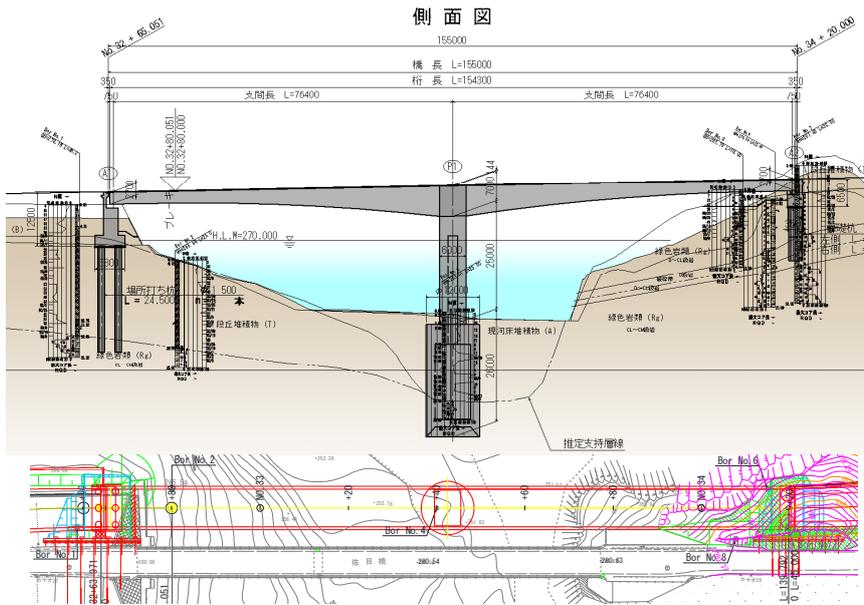
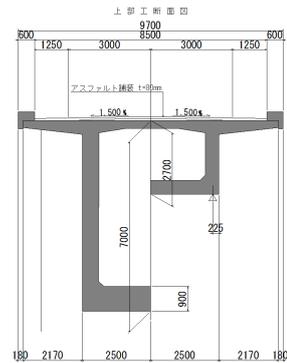


図-2 橋梁一般図



設計条件

橋長	155.0m (道路中心線上)	
設計活荷重	B活荷重	
形式	上部工	PC2径間Tラーメン箱桁
	下部工	逆T式橋台(A1)、枕梁式橋台(A2)、橋脚(P1)(充実断面)
	基礎工	場所打ち杭基礎(A1)、深礎杭基礎(A2)ニューマチックケーソン基礎(P1)
幅員構成	図示	
舗装	アスファルト舗装 t=80mm	
適用示方書	道路橋示方書・同解説 Ⅰ～Ⅳ (平成14年3月)	

これまでの損傷が現れてからの対症療法的な修繕ではなく、劣化や損傷が顕在化する前に計画的・効率的に修繕する予防保全に着目している。¹⁾

(2) 装置設置の経緯

従前の橋梁点検においては、点検頻度・方法、人的労力からも損傷が顕在化する前に劣化の傾向を把握することは困難である。本装置は、非破壊試験にて鉄筋の腐食度合いを推定するための新たな手法であり、予防保全の観点からその有用性を期待して設置したものである。

4. 鉄筋コンクリート構造物の劣化要因

(1) 鉄筋コンクリート構造物の劣化要因

鉄筋コンクリートの主な劣化要因として表-1の要因が挙げられる。鉄筋コンクリート構造物の劣化は、①鉄筋腐食からひび割れを誘発する場合（鉄筋腐食先行型）、②ひび割れ発生により内部鉄筋の腐食を誘発する場合（ひび割れ先行型）の2ケースに大別でき、コンクリートのひび割れと鉄筋の腐食が相互に関連して発生する。

今回、国道421号佐目子谷橋における劣化要因としては、冬期における凍結防止剤散布が必要な環境条件から、比較的発生頻度が高いと想定される塩害による鉄筋腐食が該当する。また、塩害は多くの場合、中性化と複合して発生すると言われていることから、当橋梁においては、鉄筋腐食先行型による劣化が進行すると考えられる。

表-1 鉄筋コンクリート構造物の劣化要因

劣化の種類	劣化要因	メカニズム
①鉄筋腐食先行型	塩害	飛来塩化物や海砂、凍結防止剤等に含まれる塩化物イオン(Cl ⁻)がコンクリート中に浸透することにより、鉄筋表面の不動態皮膜が破壊され鉄筋の腐食が進行
	中性化	大気中の二酸化炭素とセメントの水和生成物である水酸化カルシウムが化学反応し、コンクリート中のアルカリ性の環境が失われることにより鉄筋表面の不動態皮膜の形成が阻害され鉄筋の腐食が進行
②ひび割れ先行型	アルカリ骨材反応	骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物とコンクリート中の水酸化アルカリを主成分とする水溶液との化学反応により、アルカリシリカゲルが生成され、骨材周囲より水分を吸収膨張することで、大きなひび割れへと進展
	疲労、凍害	輪荷重の繰返し作用によりひび割れや陥没を生じたり、微細な細孔を通してコンクリート内部に水が浸入し、水分の凍結膨張と融解が長年繰り返されることによりコンクリートのひび割れへと進展

(2) 鉄筋腐食のメカニズム

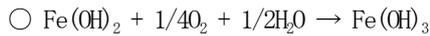
健全なコンクリートは、セメントの水和反応によって生成した水酸化カルシウムにより強いアルカリ性(pH12程度)を示す。コンクリート内部の鉄筋は、この強アルカリにより表面に不動態被膜が形成されて保護されている。ところが、塩害環境下でコンクリート内部に塩化物イオンが浸透して鉄筋位置まで到達すると、不動態被膜が破壊され鉄筋腐食が生じる。

鉄筋が腐食すると、腐食した部分は鉄が電子としてコンクリート中に溶け出すアノード反応（酸化反応）が発生する。一方で、健全な部分では、腐食部から溶け出した電子が水や酸素と反応するカソード反応（還

元反応)が発生する。

- アノード反応： $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$
- カソード反応： $2e^{-} + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow 2OH^{-}$
- 全反応： $Fe + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow Fe(OH)_2$

上記の反応により生じた水酸化第一鉄(Fe(OH)₂)は、溶存酸素(H₂O + O₂)の供給により、次式の反応を生じて二酸化第二鉄(Fe(OH)₃)の赤錆となる。²⁾



このように、コンクリート内部における鉄筋腐食は、電気化学反応に基づいて進行し、腐食部で鉄がイオン化することで電子(e⁻)が鉄筋中に残されるため、電位が低くなる。この電位の高低差から生じる電流は腐食電流と呼ばれ、電池(腐食電池)が形成されることが知られている。

5. 自然電位法による鉄筋腐食モニタリング

(1)測定原理

自然電位法とは、腐食により変化する鉄筋の電位を測定することによって、鉄筋腐食を診断する電気化学的方法である(図-3)。当方法は原理が単純で測定も簡単であり、1977年に「ASTM C576(米国工業規格)」に規格化され、(社)土木学会においても「JSCE-E601-2000コンクリート構造物における自然電位測定方法」として2000年に基準化されている。

(2)測定装置

本装置は、鉄筋の電位を測定するため鉛照合電極を桁端部に埋め込み、桁外部となる箱桁の内空に設置したプルボックスへ配線した。(図-4、5、6)

設置位置としては、伸縮装置からの凍結防止剤を含んだ漏水を仮定し、最も劣化の進行が速いであろう桁端部の鉄筋に着目している。

(3)測定方法

箱桁内部空間に設置したプルボックス内部の照合電極に電圧計(マルチメーター)を接続し、自然電位を測定する。測定状況は図-7のとおり。

(4)判定方法

ASTM C876(米国工業規格)に準拠し、鉄筋の腐食状況を判定する。判定基準を表-2に示す。しかし、この判定基準には不確定領域(596≧E>446)があることから、維持管理に使用するためには、腐食発生の有無を判定するための、しきい値を設定する必要がある。本橋梁は完成後一年半余りしか経過していない建設初期段階で

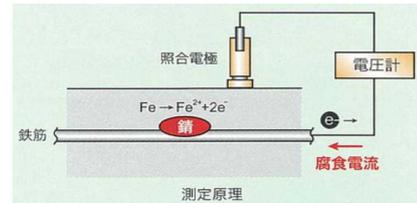


図-3 自然電位法 測定原理イメージ

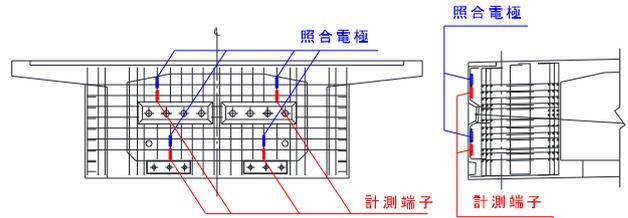


図-4 鉛照合電極、計測端子設置位置図



図-5 鉛照合電極、計測端子設置状況

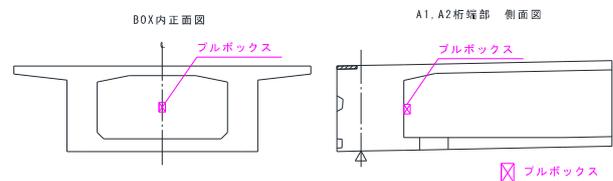


図-6 プルボックス設置位置図



図-7 測定状況

表-2 ASTM C876 の腐食判定基準

自然電位 E(mV) (vs. CSE)	自然電位 E(mV) (vs. 鉛照合電極)	腐食確率
$E > -200$	$E > 596$	90%以上の確率で腐食なし
$-200 \geq E > -350$	$596 \geq E > 446$	不確定
$-350 \geq E$	$446 \geq E$	90%以上の確率で腐食あり

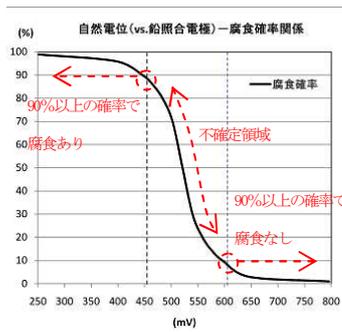


図-8 自然電位 - 腐食発生確率 (不確定区間の概念図)

あることから、鉄筋の腐食はないと判断できるため、90%以上の確率で腐食なしと推定できる596mVをしきい値として採用する。

なお、自然電位と腐食確率の概念図が図-8に示すとおり。不確定領域においては未知な部分が多く、最悪のケースとして鉄筋の腐食が急激に進行している可能性があることから、不確定領域界以上にしきい値を設定することが望ましいと考える。

(5)測定結果

電位測定は、橋梁上部工稼働中 (躯体完成後) の平成26年6月、7月および工事完成後の平成27年9月、10月の計4回実施した。測定結果を図-9に示す。

初回 (平成26年6月) の測定結果平均は569mV、第2回 (平成26年7月) の測定結果平均は595mVとなり、しきい値として設定した596 mVを下回る結果となり、判定結果としては不確定領域となる。自然電位法による測定においては、コンクリートの含水率や温度、酸素の供給状態によって測定値が変化するため、信頼性を向上させるためには長期的な測定が必要であるとされている³⁾。これを本橋梁のケースとして考えると、電位装置を埋設している橋梁側径間部の躯体コンクリートの完成時期が平成26年4月であり、測定までわずか2~3ヶ月しか経過していない建設初期のため、コンクリート中の含水率が高いことが要因として考えられる。

躯体コンクリート完成後約1年半が経過した第3回 (平成27年9月)、第4回 (平成27年10月) の測定結果平均はともに643mVで、しきい値として設定した596 mVを大幅に上回る値となった。判定結果としては、90%以上の確率で腐食がないと判定できる。初回測定時期よりも暴露期間が確保できたこと、供用開始前であり凍結防止剤散布も未散布であること、また測定結果も不確定領域界であるしきい値をクリアし、腐食が発生していないと判定できることから、今後の維持管理に用いる際の竣工時基礎データとして取り扱うことができると考える。

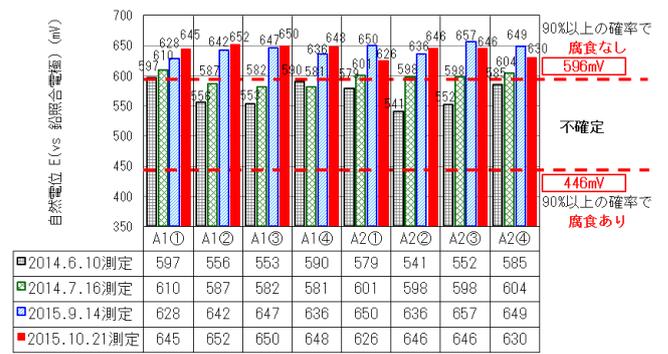


図-9 判定結果一覧

表-3 諸元値

	採用値	採用根拠
コンクリート規格 (側径間部躯体)	40-15-20早強	工事成果品 配合報告書 ⁹⁾
水セメント比 (%) W/C	39%	工事成果品 配合報告書 ⁹⁾
コンクリート表面からの深さ (cm) X	5.0	工事成果品 竣工図面 ⁹⁾
予測の精度に関する安全係数 γ_{cl}	1.0	標準値 (コンクリート標準示方書) ⁹⁾
塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm ² /年) D_{ap}	0.5	下記式(2)より算出
表面における塩化物イオン濃度 (kg/m ³) Co	4.0	既往論文 ⁹⁾ 実験値を準用

工事名：平成23年度 第AK41-5号 国道421号道路整備工事

6. 考察 (供用中の自然電位-鉄筋腐食の関係)

前章で述べたように、直近の測定結果にて、およその竣工時基礎データを得ることができた。しかし、自然電位法による測定方法においては、不確定領域における腐食の有無、挙動が不明瞭である。図-8の腐食概念図からも、供用中の測定においては、長期間におよび不確定領域内の結果を示すのではないかと想像できる。測定結果が不確定領域以下 (90%以上の確率で腐食がある) となった際には、すでに致命的な腐食が進行している可能性が排除できない。本章では、不確定領域期間における挙動を知る目安として、鉄筋腐食開始時期について各種基準、既往論文から推定する。

コンクリート標準示方書⁹⁾において、コンクリート中の鉄筋位置、供用年数における塩化物イオン濃度の推定式が次式(1)、(2)のとおり示されている。

$$C(x,t) = \gamma_{cl} \cdot Co \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \dots (1)$$

$$\operatorname{Log}_{10} D_{ap} = -3.9(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.5 \dots (2)$$

式(1)に適用する本橋梁における諸元値を表-3に示す。コンクリート規格、水セメント比は工事に実際に使用した配合報告書のデータを入力し、塩化物イオンの見かけの拡散係数については、上記式(2)により算出した。表面における塩化物イオン濃度について、コンクリー

表-4 算出結果

γ_{cl}	C_o (kg/m ³)	D_{ap} (cm ² /年)	x (cm)	$\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}}$	$erf \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}}$	t (年)	$C(x,t)$ (kg/m ³)
1.0	4.0	0.5	5	3.54	0.9999994	1	0.00
				2.50	0.9996930	2	0.00
				2.04	0.9960858	3	0.02
				1.77	0.9876909	4	0.05
				1.58	0.9745470	5	0.10
				1.44	0.9582966	6	0.17
				1.34	0.9419137	7	0.23
				1.25	0.9229001	8	0.31
				1.18	0.9048374	9	0.38
				1.12	0.8867879	10	0.45
				1.07	0.8697733	11	0.52
				1.02	0.8508380	12	0.60
				0.98	0.8342315	13	0.66
				0.94	0.8162710	14	0.73
				0.91	0.8018828	15	0.79
				0.88	0.7866873	16	0.85
				0.86	0.7761003	17	0.90
				0.83	0.7595238	18	0.96
				0.81	0.7480033	19	1.01
				0.79	0.7361035	20	1.06
				0.77	0.7238216	21	1.10
				0.75	0.7111556	22	1.16
				0.74	0.7046781	23	1.18
				0.72	0.6914331	24	1.23
				0.71	0.6846656	25	1.26
				0.69	0.6708401	26	1.32
				0.68	0.6637822	27	1.34
				0.67	0.6566277	28	1.37
				0.66	0.6493767	29	1.40
				0.65	0.6420293	30	1.43
.	.	.	.				
.	.	.	.				

法が今後の維持管理の新たな選択肢の一つになれば幸いである。

参考文献

- 1) 滋賀県土木交通部道路課：滋賀県橋梁長寿命化修繕計画
- 2) 独立行政法人土木研究所ほか：自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー107 電気化学的防食工法 設計施工指針（案）
- 4) 平成23年度 第AK41-5号 国道421号道路整備工事 成果品
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書（維持管理編）
- 6) 青山 實伸ほか：凍結防止剤によるコンクリート構造物中への塩分浸透状況 -土木学会第58回年次学術講演会-

ト標準示方書では、臨海部における海水の塩化物イオンの影響を受ける構造物に対する実績値しか記載がない。そのため、既往論文⁶⁾より本橋梁に近似する凍結防止剤散布による塩化物イオンの影響を受ける現場環境での実験値である4.0(kg/m³)を準用した。なお、既往論文における実験値によると、凍結防止剤散布によるコンクリート表面での塩化物イオン濃度は、臨海部での海岸からの距離0.1km程度並みに高いことが明らかとなっている。

以上の条件にて、本橋梁における鉄筋の腐食開始と推定できるコンクリート中の鋼材腐食発生限界濃度である1.20(kg/m³)⁵⁾に達するまでの供用期間(t)を算出すると、供用後24年で限界濃度を超える1.23(kg/m³)となり腐食が開始すると推定できる。（算出結果：表-4）

これは、塩害に特化した推定期間であり、塩害は多くの場合、中性化を複合して劣化が生じるとされているため、腐食開始時期はさらに前倒しされることも視野に入れ、維持管理に努めていきたいところである。

今後は限られた予算の中、維持管理費の平準化が必要であり、効果的な維持管理のためには、より広い視点で損傷状況を見極めることが重要になると考える。

自然電位法による鉄筋腐食推定は、不明な点も存在し、今後の更なるデータ蓄積が必要ではあるが、本手