

4

建設後約80年を経過した RCT 桁橋の補修に関する検討

佐藤文彦

SATO Fumihiko

株式会社片平エンジニアリング
名古屋支店/構造橋梁部



1—はじめに

内海橋は愛知県知多郡南知多町内に架かり、昭和3年建造という県内屈指の古い鉄筋コンクリート橋である。河口付近という立地条件から塩害が主因とみられる劣化が顕著であり、「炭素繊維シート接着補強」による対策を計画し、現在補修工事が完了している。本事業に関しては、老朽化・塩害対策事例として土木学会等の場でも計画～工事までの全体概要を紹介しているが、ここでは当社が担当した損傷劣化調査及び対策工法検討に絞り、その内容を紹介する。

2—検討業務の内容および目的

内海橋(写真1)は、一般国道247

号の内海川(2級河川)の河口付近に架かるRC橋で、知多半島において重要な役割を担っている。既往の橋梁点検により、主桁および床版裏面に多数のひび割れが目視確認されていた。

本業務は、当該橋梁に適した対策を講ずるべく、詳細な損傷調査、損傷原因特定のための調査・解析・評価と、その結果をふまえた対策案の立案・検討から詳細設計までを主たる目的としたものであった。

主要な構造諸元は次の通り(図1)。
橋 長: 18.27m
支 間 長: 5.40m(桁長=6.05m)
有効幅員: 7.30m(4間)
構造形式: RC単純T桁橋(3連)

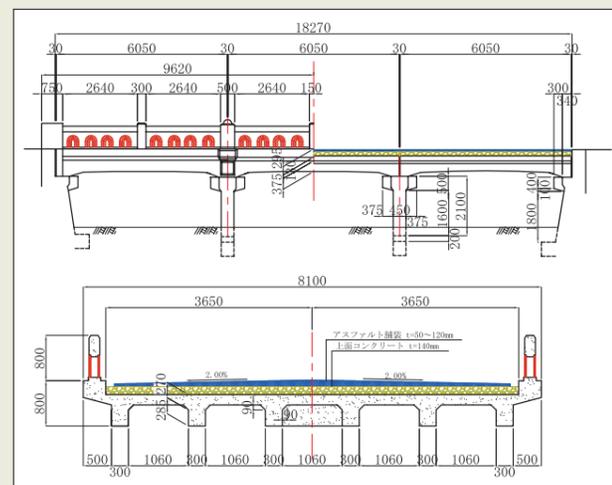


■写真1—内海橋の様子(対策実施前、下流側から望む)

3—橋歴調査・工学的調査

1) 調査項目の設定

内海橋は建造年次が不明確で、設計資料も皆無であったため、対策検討のベースとなる当初設計の再現が困難であった。これを解決するため、地元住民への聞き取りや郷土史書を所蔵する図書館を利用して橋歴調査を行った。



■図1—内海橋の主要構造寸法

■表1—工学的調査の実施項目および数量

項目	区分	単位	数量	備考
寸法調査	主要構造寸法のメジャー計測	橋	1	
目視調査		橋	1	
鉄筋調査	RCレーダー探査(ピッチ、被り)	箇所	5	橋脚2、桁2、床版1
	はつり調査(鉄筋径、腐食程度)	箇所	3	橋脚1、桁1、床版1
	自然電位法による腐食度調査	箇所	5	橋脚1、桁4
力学試験	コア供試体の圧縮試験	試料	2	橋脚1(φ45mm)、床版1(φ55mm)
	表面反発度測定	箇所	5	橋脚2、桁2、床版1
	床版の衝撃弾性波試験	箇所	1	床版面
化学試験	塩分調査	箇所	5	橋脚2、橋台2、桁1
	コンクリートの中酸化試験	箇所	10	橋脚4、桁・床版6
	コンクリートの配合分析	試料	1	床版1



■写真2—桁下面の橋軸方向ひび割れ



■写真3—亀裂発生箇所の様子



■写真4—ジャンカの様子

顕在化している損傷劣化程度の確認とその原因究明を目的とした工学的な調査については、表1に示す項目を計画・実施した。ここで、弾性波測定や自然電位法による鉄筋腐食調査など比較的实施事例の少ない手法も取り入れ、多様な調査により多角的なデータが収集出来るよう工夫した。

2) 橋歴調査

a) 地元住民への聞き取り調査

南知多町役場を通じて、郷土史編纂に携わる地元のお年寄りを紹介頂いた他、郷土史に詳しい方々に対して聞き取り調査を行った。この結果、竣工年は「昭和3年」とほぼ特定できた。

b) 文献調査

県内主要図書館、南知多町郷土史料館の史料等を閲覧したところ、内海橋に関連する記事や写真が多数見つかり、当時の先端技術である鉄筋コンクリート橋に対する世間の関心の高さが伺えた。

同時に、国内でも比較的早い昭和3年建造を裏付ける背景(地元経済活力、観光資源開発への期待、半島先端までの鉄道延伸計画が中断したことによる自動車交通への依存などの情勢)も明らかになり、聞き取り調査で得た情報との整合性が確認できた。

3) 工学的調査

a) 寸法調査・目視調査

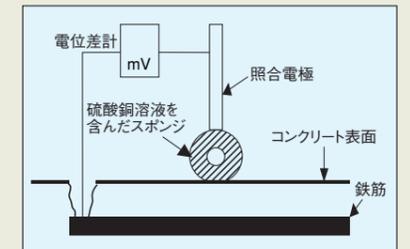
橋梁全体の損傷目視調査、主要構造寸法測定を行った。確認できた状況は次の通りである。

①桁下面の橋軸方向に3列のひび割

- れが生じている(写真2)。
- ②桁表面は全体的にひび割れが多く、1mm以上の亀裂状のひび割れも見られる(写真3)。
- ③床版下面は桁端に部分的な欠損箇所がある。
- ④桁下面にジャンカ・鉄筋の露出箇所が見られる(写真2、4)。
- ⑤床版下面および桁側面・桁端付近に表面被覆等の補修跡が見られる(写真2～4)。

b) 鉄筋調査

鉄筋レーダーによる鉄筋かぶりピッチ調査では、主鉄筋ピッチは9cmまたは18cm(3寸・6寸ピッチ)、かぶりは約6cm(2寸)との結果を得た。また、はつり調査で目視確認したところ、鉄筋レーダー計測結果と精度良く整合していた。なお、桁表面の不陸(凹凸)がひどく、探査不能であった桁下面をはつり出したところ、かぶり4cm、鉄筋径φ18～22mm(腐食がひどく特定不能、一部破断)であった。



■図2—自然電位測定のご概念図

更に、橋梁全体の鉄筋発錆状況について自然電位差法による推定を試みた。

自然電位差法とは、研究等によって一般的事実として認知されているコンクリートの自然電位発生傾向を応用した鉄筋の腐食程度を推定する方法である。コンクリートの自然電位は、アルカリ性環境下で鉄筋表面に不動態皮膜が形成されている場合には高い電位値を示し、逆に塩化物イオン等の影響により不動態皮膜が破壊されている場合には低い電位値を示す(図2)。

はつり箇所では鉄筋に激しい腐食が見られたが、電位差の測定結果(表2)からは腐食程度は中位と判

■表2—自然電位差法による鉄筋の腐食確率推定結果

調査位置	電位(mV)	腐食確率推定結果							
		>-100	-100≥>-200	-200≥>-300	-300≥>-400	-400≥>-500	-500≥>-600	-600≥>-700	-700≥
①第1径間G5桁	度数	2	4	16	0	0	0	0	0
	指示率(%)	9.1	18.2	72.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
②第1径間G3桁	度数	1	0	17	0	0	0	0	0
	指示率(%)	5.6	0.0	94.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
③第1径間G5、G4桁間の床版	度数	12	11	16	0	0	1	0	0
	指示率(%)	30.0	27.5	40.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0
備考	区分	自然電位E(mV)	ASTM基準 腐食確率P(%)		BS規格 腐食確率P(%)				
	I	E>-200	90%以上の確率で腐食なし		腐食確率は5%以下				
	II	-200≥E>-350	不確定		腐食確率は50%				
	III	-350≥E	90%以上の確率で腐食あり		腐食確率は90%以上				

(電位による腐食評価基準参考規格)

■表3—シュミットハンマー試験結果

調査位置	反発度 (R)	推定強度 (N/mm ²)	推定式
第2径間G6桁側面	40	32.5	$\sigma_c = -18.3 + 1.27 \times R$ ここに、 σ_c :推定強度 R:反発度
第2径間G5桁下面	42	31.2	

■表4—コア圧縮試験結果

供試体寸法 (mm)			最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm ²)
径 (d)	高さ (h)	h/d		
45.1	79.2	1.756	25	15.3

■表5—塩分含有量の分析結果

調査位置	表面からの深さ (mm)	全塩分量分析結果		判断基準及び指標値	
		E ₁ (Cl-%)	E ₂ (Cl-kg/m ³)	JIS A 5308 (Cl-kg/m ³)	土木学会 (Cl-kg/m ³)
第2径間 G6桁	0~30	0.046	1.06	0.30 (0.60)	1.2
	30~60	0.128	2.94		
	60~90	0.140	3.22		

※E₂=E₁×D/100、D:コンクリートの気乾単位体積質量 (2300kg/m³と仮定して算定)

■表6—コンクリートの中性化深さ試験結果(ドリル法)

調査位置	中性化深さ (mm)				備考
	1箇所目	2箇所目	3箇所目	平均	
第1径間 G2桁ハンチ	120.0以上	120.0以上	120.0以上	120以上	ドリルの有効長以上
第1径間 G4桁ハンチ	120.0以上	120.0以上	120.0以上	120以上	ドリルの有効長以上
第2径間 G1桁中央部	(45.5以上)	(46.8以上)	(40.5以上)	(40以上)	鉄筋に接触
第2径間 G4桁ハンチ	(76.0以上)	(93.0以上)	—	(75以上)	鉄筋に接触
第2径間 G6桁中央部	8.2	8.7	9.1	8.7	表面補修の効果?

■表7—採取したコアの状態

状態	コア写真
<ul style="list-style-type: none"> ◆表面から約5mmはモルタル層を形成。 ◆表面から6cm付近で採取作業中にコアが破断。 ◆表面より2~6cm付近は近傍の鉄筋の錆び汁溶出跡が見られる。また骨材はほぼ均等に分布している。 骨材:砂利/採取長:約10cm	

断され、橋梁全体としては健全な鋼材が現存していることが示された。

c) 力学試験

コンクリート強度は、現場にて実施したシュミットハンマー試験および採取したコアの圧縮試験より推定した。その結果、シュミットハンマー試験(表3)では高い値が得られたが、コアの圧縮試験(表4)からはその1/2程度しか得られなかった。

d) 化学試験

塩分調査、中性化試験およびコンクリートの配合分析を実施した。塩分含有量は、鉄筋の配置される深さ30~60mmの範囲で2.94kg/m³を示し(表5)、土木学会の指標値1.20を大きく上回った。

また、中性化深さも調査した5箇所中4箇所鉄筋がぶり深さを上回

った(表6)。

4) 調査結果の評価と対策方針

調査結果を総括すると次の通りであった。

- ①総じて劣化の進行はかなり進んでいることが確認された。
- ②鉄筋の腐食は桁下面では著しい部分も見られたが、自然電位差法による調査結果と現状の橋の状態をみると、全体的には有効に働く鋼材が相当量残っていると考えられる。
- ③劣化を示す情報が多数あるものの、橋の健全性を即座に失うような状況ではない。
- ④塩分含有量、中性化深さの度合いから、鉄筋の腐食が今後加速的に進行し、橋の耐荷性能に支障をきたす可能性がある。

現況の評価としては、緊急性は無いものの、今後劣化が進行し、橋の機能に支障をきたす恐れがあると結論した。

以上の評価に加え、国道247号の拡幅整備(都市計画決定済、次年度より当該地周辺の調査に着手する段階)の事業計画より、現橋の必要耐用年数は10~20年程度である点を考慮し、以下の対策を実施することとした。

イ) 桁表面のひび割れ補修

ロ) 腐食による欠損・破断が確認された桁主鉄筋の補強・補填

ハ) 万が一の突発的な破壊に備える、いわゆるフェイルセーフ装置の設置

これらを安価に、かつ利用実態(交通量・通行車両の荷重規模)をふまえた必要最小限度で実施することをコンセプトとして対策工法の検討及び設計を実施した。

4—対策検討

1) 条件設定

a) 目標とする耐荷性能

本橋は元々昭和3年竣工の橋梁であることから、当時の設計基準となる『道路構造に関する細則案(大正15年内務省制定)』によると、活荷重は3等橋(T-6)が採用された可能性が高い。この橋に、現行示方書に規定される正規の活荷重に耐えうる設計を行うことは、現実的ではないので、次の3つの荷重ケースを設定して応力値の結果等をふまえて耐荷力の向上を図るものとした。

活荷重①: T-20(道示A活荷重相当)

活荷重②: T-20(1台載荷)

活荷重③: T-16(1台載荷)

ここで活荷重③は現況の大型車交通量35台/h(H11センサスペース、休日交通量比1.50として推定)が主に観光バスであることから、国内車両メーカーが生産する観光バスの最大荷重が16t程度であるという調査結果に基づいて設定した、実荷重に最も近いケースである。

b) 建設当時の配筋の再現

補強量を設定するには、元々配置されていた鋼材量を推定する必要がある。活荷重T-6、衝撃係数を0.200、鉄筋の許容引張応力度120N/mm²、コンクリートの許容圧縮応力度15N/mm²として試算したところ、必要鉄筋量は1桁当り最下面にφ22mm-3本が必要との結果が得られ、調査結果とほぼ整合することから、これを建設当時の設計であったと仮定することとした。

2) 補強対策の検討

a) 補強工法の絞込み

母材コンクリート強度が元々弱い上に、老朽化・塩害劣化により脆くなっている状況に配慮し、母材への負担が小さく、桁表面の不陸にも適

用性があり、施工後も継続的な母材のモニタリングが可能な炭素繊維シート接着工法が最も適すると判断した(表8)。

b) 炭素繊維シート接着による補強量の検討

炭素繊維の必要量は、次の2点に留意して決定した。

①配置可能な補強材量

②母材の負担、特に補強材定着によって生じる付着力負担

配置可能な補強量は、桁下面に幅10cmの帯状の補強材を2列貼り付け、列間をモニタリングスペースとして5cmほど空け、また母材定着部の負担を軽減するため、補強材は1層までとした。この仮定の下では、配置可能な補強材の上限強度は引張強度換算で113kNとなる。

一方、付着面積と付着強度から付着力を計算すると171kNであり、上述の仮定通りに補強材を配置すれば母材は破壊に至らない(先に補強材が破断)。この時に期待できる付着応力度は、コンクリート標準示方書等を参考に0.2N/mm²とした。

■表8—補強工法の比較検討表

No.	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
工法	鋼板接着工法	繊維シート接着工法	増厚工法	プレストレス導入工法	支持工法(縦桁増設)
概要図					
特徴	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート外面に鋼板を接着することにより、既設部材との一体化を図り、合成構造とする。 圧入法と注入法があるが、注入法の施工事例が多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 炭素繊維シートをエポキシ樹脂ではりつけ、既設部材との一体化を図る。 繊維の方向・シート枚数・シートの強度により、任意の補強が可能。 鋼板より軽く取扱が簡単で施工性がよい。 	<ul style="list-style-type: none"> 既設部材の上面あるいは側面等に鉄筋を配置し、コンクリート打設することにより、荷重に対する抵抗断面を増加させ、所用の耐力を工法。 	<ul style="list-style-type: none"> PC鋼材を使用し、桁にプレストレスを導入することで引張応力度を減少させ、発生しているひびわれを閉じさせたり、圧縮力を付与耐力を増大させる工法。 施工性が外ケーブル方式が用いられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 桁や床版を、増設桁や斜材で支持し、所用の耐力を確保する工法。
内海橋への適用性	<ul style="list-style-type: none"> ○実績が豊富であり、信頼性がある。 ×桁下面の不陸が大きいため確実な接着・一体化が困難。 ×補強材料(鋼板)が重いため、施工性が悪い。 ×母材を補修するため、母材の経過観察が出来ない。 ×材料は工場加工が必要で、加工前に既設桁の精密形状計測が必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ○補強材料がフレキシブルなため、桁の不陸への対応が図りやすく、寸法誤差等への現場合わせも容易となる。 ○補強材料の加工が容易であり、母材の経過観察(モニタリング性)に配慮した材料配置が可能である。 ×材料が安価で入手が容易。 ×下地(表面)処理時に母材を損傷させないよう、厳重な施工管理が必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ○補強材料が母材と同質なので、補強性が最も良い。 ○施工性はやや難だが、大形の材料が無く通用性はある。 ×母材を補修するため、母材の経過観察が出来ない。 ×下地(表面)処理時に母材を損傷させないよう、厳重な施工管理が必要である。 ×作業手間が多く、1週水期内で完了することが困難。 	<ul style="list-style-type: none"> ×アンカー部(母材との定着部)に荷重が集中するが、母材の強度・状態が良好でないため破壊する恐れがある。 ×ジャンク作業のために橋合背面の規制が必要となり、長期の交通規制が生じる。 	<ul style="list-style-type: none"> ○桁間に支障物が無く(一部に水道管等がある)、適用性が高い。 ○桁高が400mm程度確保でき、規格品のH形鋼が使用可能である。 ×コンクリート桁と鋼材の間に十分な設置効果を得られない可能性がある。 ×床版に対する下方向からの荷重が加わる構造となるため、床版の損傷要因になる可能性がある。
	×	○	△	×	△

■表9—炭素繊維シート接着補強の効果(補強前後の応力度)

活荷重ケース	衝撃係数	設計曲げモーメント (kN-m)	応力度 (N/mm ²)		補強量 (kN)		補強後応力度 (N/mm ²)		
			コンクリート $\sigma_{ca}=5.0$	鉄筋 $\sigma_{sa}=120$	補強材が負担可能な補強量	母材定着部の負担可能荷重	コンクリート $\sigma_{ca}=5.0$	鉄筋 $\sigma_{sa}=120$	補強材 $\sigma_{ra}=3400$
活① T-20	0.361	890.4	6.4	206.2	113	171	4.4	111.3	3349.0
活② T-20(1台)	0.200	558.6	4.0	129.4	(幅10cm1層2列配置を仮定)	($\tau_a=0.2$ N/mm ² と仮定)	検討省略		
活③ T-16(1台)	0.200	506.3	3.7	117.2					

上述の仮定通りに補強した場合の応力度を計算すると、いずれの材料も許容値に収まることが確認された。以上より、各桁下面に幅10cmの補強材を1層2列接着する方法を決定案として詳細設計を行った。

c) フェイルセーフ装置

当該道路は一般国道であるため、満載のセミトレーラなどが通行する可能性があり、加えて周辺に代替路が無い場合重量制限等の行政対応もすぐには難しい状況にあった。

終局耐力には余裕があるため、突発的に崩落する可能性は極めて小さいが、万が一の事態に備える目的でH鋼桁を設置することとした。

H鋼はコンクリートT桁の間に4本配置し、異常時のみに機能すべき装置であることから床版下面から10cm程度の隙間を設けた(受け持つ荷重は死荷重のみを想定)。

5—おわりに

本業務は、塩害が著しく施工条件も厳しい橋梁の補修設計であったが、最大の特徴は建設当時の設計思想が明確でなく、これらを模索しながら進めたことにあった。特に、使用材料の強度、衝撃係数の取り方などについて複数のケースを想定して試設計を繰り返し、「恐らくこうであったのではないか」という結論を導きながら進めた過程は貴重な経験であったと思う。

同時に、こういった設計情報の重要性も改めて感じた。現在の設計業務成果は電子化され、長期保管が可能となったが、膨大なデータが蓄積されるため、必要な時に必要なデータが見つかるとは限らない。親柱や壁高欄端部に、橋梁一般図や構造図などの基本情報を埋めておく等の安価でアナログ的な工夫があっても良いのではないかと感じた。