

報告 60年間供用されたコンクリート橋の材料調査について

小嶺 啓蔵^{*1}・鶴田 浩章^{*2}・高場 正富^{*3}・真崎 洋三^{*4}

要旨：長年月供用されたコンクリート橋の解体にともない、その材料的性質を調査することを目的として材料試験および非破壊検査を実施した。非破壊検査は、コンクリート、および鉄筋に対する情報を得る事を目的として実施し、材料試験と解体により得られた情報とを照らし合わせ、長年月供用された構造物の性状を把握するとともに、非破壊検査の精度・問題点と留意点を整理した。材料試験からは、コンクリートの経年変化による強度的な低下、および鉄筋の顕著な腐食は見られず、良質のコンクリート構造物であったことがうかがえた。

キーワード：既設橋調査、材料試験、非破壊検査

1. はじめに

土木構造物建造中心の時代から補修補強が不可欠となった現在、構造物をいかに長く安全に供用させるかということが維持管理のポイントとなっている。そのためには、構造物の状態を的確に把握する必要があるが、実際に供用中の構造物がどのような状態であるかは、一般的に外観や非破壊検査からしか情報が得られない。

今回、約60年間道路橋として供用されてきた久留米大橋が河川改修事業にともない解体、架け替えられた。そこで、長年月供用された本橋の性状を把握することを目的として材料試験を行った。また、解体によりその内部状況が確認できるため、一般的な非破壊検査がどの程度有効な情報として利用できるのかを確認することを目的として非破壊検査を実施した。

以上の結果を整理し、長年月供用されたコンクリート構造物に関する材料的情報、および非破壊検査に対する情報を提供することができれば、今後のコンクリート構造物の維持管理に対し、有意義なものになると考え本報告を行う。

2. 久留米大橋概要

構造形式：RC 2主桁ゲルバー橋

橋 長：L = 324.5 m

有効幅員：B = 7.50 m

径間割り：L=25.0m+9×30.5m+25.0m

端部支持桁長：L = 32.0m

中間部支持桁長：L = 44.5m

吊 桁 長：L = 16.5m

設計活荷重：自動車荷重 P = 8.0t

(2等橋) 群集荷重 W=500kg/m²

設計基準：大正15年6月(1926)道路橋に関する細則等(内務省土木局)

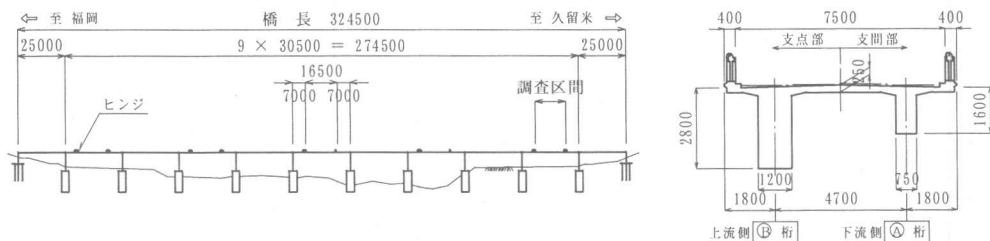
久留米大橋(図-1参照)は、昭和9年に竣工したRC 2主桁ゲルバー橋で、平成5年に解体されるまで約60年間、久留米市への玄関口として多大な交通量を支えてきた。本橋は国道3号線が筑後川を横断する位置にあり、筑後川の河口(有明海)から約30kmの地点に位置する。橋体は河川水位面から8~10m程度の高さにあり、通風性も良好で、凍結等の影響も少なく、本橋の環境条件は良好であったと言える。

*1 オリエンタル建設(株)福岡支店 副支店長(正会員)

*2 九州大学大学院講師 工学研究科建設システム工学専攻 工修(正会員)

*3 建設省九州地方建設局 企画部 事業評価管理官

*4 (株)構造技術センター 技術2部 課長

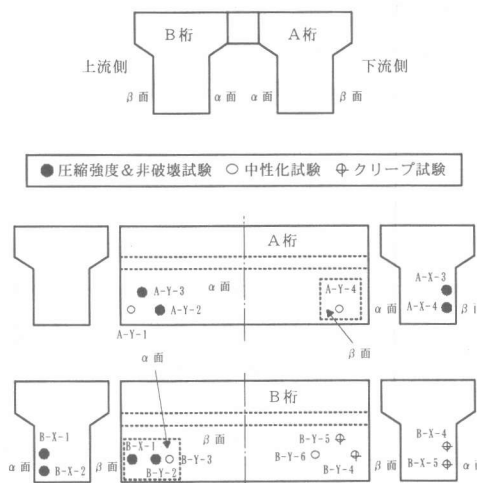


図－１ 久留米大橋橋梁一般図

3. 調査位置

本橋は目視調査の結果、目立った損傷・劣化部位は見あらず、橋梁全体を通して良好な状態であった。調査位置は河川高水敷部にあり作業性が良く、桁の状況も平均的な状態であった久留米側の吊り桁部で行った。

また、材料試験に用いたコアは、この吊り桁部を切り出し採取した。コアの採取位置は下流側の桁をA、上流側の桁をBとして切断面の端面から橋軸方向に採取したものをX、ウェブ側面から橋軸直角方向に採取したものをYと表示している。図－２にコア採取位置を示す。



図－２ コア採取位置

4. 材料試験

4.1 試験項目

材料試験は本橋の材料特性、および経年変化

について調査することを目的として、配合推定、コア載荷試験（圧縮強度・弾性係数）、超音波伝播速度試験、クリープ試験を行った。また、主桁を解体した後に鉄筋を取り出し、鉄筋の強度試験も行った。

4.2 配合推定

配合推定は、セメント協会コンクリート専門委員会報告F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」に準じて実施した。

各単位量を算定するにあたり仮定した数値を表－１に示す。なお、細骨材と粗骨材の割合は4：6と仮定した。コンクリートの空気量は本橋が架設された当時に混和剤の使用はないものとみなし2％と仮定した。

表－１ 単位量推定に使用した仮定値

	CaO (%)	比重	insol (%)	吸水率 (%)
セメント	64.5	3.16	—	—
細・粗骨材	0.42	2.61	95.2	1.68

配合推定結果を表－２に示す。その結果を、本橋と同時代に施工された西大橋にて、当時の福岡県の配合をほぼ正確に推定したとしている報告¹⁾（骨材量 $a=1,892\text{kg/m}^3$ 、セメント量 $c=343\text{kg/m}^3$ 、水量 $w=165\text{kg/m}^3$ ）と比較すると、セメント量と水量がかなり少ない値となった。しかし、本推定において、試料が構造物全体を代表するものかどうか、また、コンクリートの打設、養生状況などの不確定要因に加え、各材料の単位量算出に当たっては計算に必要な数値の一部を

仮定しなければならない。したがって、配合推定結果は試料の配合についての手がかりを与える程度であるのが現状であろう。

表－２ 配合推定結果 (A-Y-4)

単位容積質量 (kg/m ³)			
気乾	表乾	絶乾	
2,403	2,432	2,322	
化学分析結果			
CaO (%)	insol (%)	ig. loss (%)	
7.90	79.3	3.6	
絶乾ベースにおける配合割合			
骨材 (%)	セメント (%)		
83.3	11.7		
単位量の推定結果			
W/C (%)	骨材量 (kg/m ³)	セメント量 (kg/m ³)	水量 (kg/m ³)
51.5	1,967	272	140

4.3 コア載荷試験

コア載荷試験による圧縮強度を表－３に、弾性係数を表－４に示す。

圧縮強度試験結果は、35～44 (N/mm²) となり、本橋が建造された当時のコンクリートの圧縮強度が200～320 (kgf/cm²) であったという報告¹⁾からみると、数十年を経過した後の圧縮強度は当時から最大で1.8～2.2倍程度の増加を示している。また、橋軸方向 (X) と橋軸直角方向 (Y) では、傾向として橋軸直角方向の圧縮強度が橋軸方向より小さくなっている。これは供用中に受けた荷重方向と採取したコンクリート供試体の圧縮試験時の荷重軸方向との関係があると考えられる。繰り返し圧縮荷重を受けたコンクリート供試体において繰り返し荷重と同方向を荷重軸として静的圧縮試験を行うと、微細ひび割れ分散性が向上することにより圧縮強度が5～10%増加するという結果も報告されており²⁾、長年月供用されたコンクリートの圧縮強度は供用中に受けた荷重、およびその方向も考慮に入れる必要があると考えられる。

表－３ 圧縮強度 (N/mm²)

A	測定値	平均値	B	測定値	平均値
A-X-3	42.5	39.3	B-X-1	43.7	42.8
A-X-4	36.2		B-X-2	41.8	
A-Y-2	38.0	36.7	B-Y-1	36.4	37.5
A-Y-3	35.2		B-Y-2	38.5	

表－４ 弾性係数 (×10⁴ N/mm²)

供試体	動弾性係数：E _D		静弾性係数：E _S		E _D /E _S
	測定値	平均値	測定値	平均値	
A-x-3	3.40	3.50	2.66	2.71	1.28
A-X-4	3.59		2.75		1.31
A-Y-2	3.63	3.67	3.01	3.11	1.21
A-Y-3	3.71		3.20		1.16
B-X-1	3.73	3.63	3.00	3.07	1.24
B-X-2	3.52		3.14		1.12
B-Y-1	3.84	3.84	3.05	3.15	1.26
B-Y-2	3.83		3.25		1.18

静弾性係数と動弾性係数の関係は、一般に動弾性係数が初期弾性係数より5～20%大きいと言われている。今回求めた静弾性係数は割線弾性係数であり、初期弾性係数より若干小さい値であると考えられる。したがって、今回測定した E_D/E_S 値は、動弾性係数が静弾性係数より12～31%大きいことになり、ほぼ妥当な結果となっている。

4.4 超音波伝播速度

内部欠陥、ひび割れ深さ等について検討するために採取したコアに対して超音波パルス伝播速度を測定した。測定は日本コンクリート工学協会より示されている超音波パルス伝播速度の標準測定方法試案(1992年)にしたがい、グリスを塗布し振動子をコンクリート供試体の端面に密着させ超音波パルスの伝播時間を測定し算定した。測定結果は V=4.3～4.5 (km/s) を示した。

この結果は、一般的な音速によるコンクリートの品質レベル判断から見ると、V=4.0 (km/s) 以上あるため、試験供試体の品質は良好とみなす事ができる。つまり、本橋のコンクリートは

長年月の供用による品質の劣化はほとんど認められないと言う事ができる。

4.5 クリープ試験

一般に、長年月経過したコンクリートにはほとんどクリープは発生しないと言われる。しかし、長期材齢コンクリートにおいてもクリープが生じる可能性はあるため、本橋供試体でクリープ試験を行った。

試験における持続荷重は、供試体圧縮強度の1/4相当(9.8N/mm²)とした。なお、供試体は乾燥収縮の影響を無視できるように、試験開始まで約8ヶ月間室内で乾燥させた。

試験結果は、荷重時弾性ひずみにばらつきが見られたものの、いずれの供試体においても荷重日数50日程度からひずみが一定値に収束し始め、90日を過ぎると完全に一定値に収束した。

全ひずみから弾性ひずみを差し引いてクリープひずみと荷重日数の関係を示したのが図-3である。

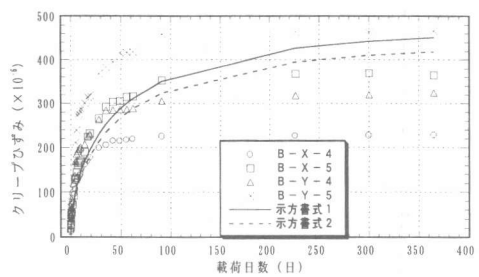


図-3 荷重日数とクリープひずみ

図中に実線および破線で示したのがコンクリート標準示方書のクリープ予測式による計算値である。示方書式1の算定においては本橋建造と同時期に同じ福岡県の配合で建造された西大橋のコンクリートの配合推定結果を参考にして、W=165kg/m³、C=343kg/m³、W/C=48%を使用した。示方書式2の算定は旧久留米大橋の配合推定結果を参考にして W=140kg/m³、C=272kg/m³、W/C=51.5%を使用した。実測値と比較すると分かるように長年月供用されたコンクリートにおいても予測値程度、あるいはそれ以上のクリープひずみも生じていることが分かる。

次に図-4でクリープ係数と荷重日数との関係を見てみる。

荷重日数とクリープ係数は各供試体とも近い値を示し、約60年間供用されたコンクリートにおいてもクリープ係数は0.8~1.1程度であるということが分かった。したがって、この結果から補強設計においては、クリープを考慮する必要性が考えられる。なお、コアの採取位置(橋軸方向、橋軸直角方向)によるクリープの明確な差異はうかがえなかった。

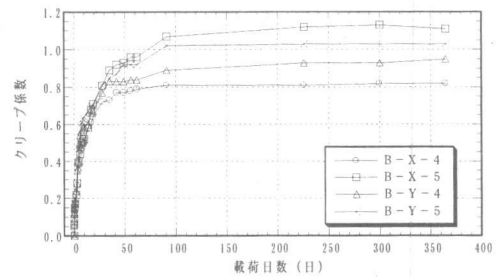


図-4 荷重日数とクリープ係数

4.6 鉄筋強度試験

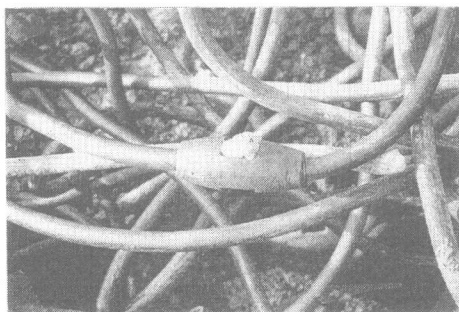
本橋の引張鉄筋には丸鋼(φ36~40mm)が使用されていた。鉄筋強度試験には桁解体の際にはつりだした鉄筋を用いた。鉄筋強度の試験結果を表-5に示す。

表-5 鉄筋の引張試験結果

試料	直径 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	伸び率 (%)
A	40.3	260	418	2.12×10 ⁵	40.3
B	36.3	234	377	2.03×10 ⁵	42.8
C	36.4	282	421	2.09×10 ⁵	38.1

鉄筋は強度的に若干ばらつくが、ほぼ現行JIS規格のSR235鉄筋に相当する。ただし、伸び率はSR235の規格である20%以上から較べると約2倍近い値となっている。

なお、本橋の鉄筋継手は機械式継手(カップラー)を使っており、現在の異形鋼棒による重ね継手と大きく異なっていた(写真-1)。



写真－1 鉄筋継ぎ手状況

5. 非破壊検査

5.1 検査項目

鉄筋コンクリート構造物の状態を非破壊で把握するために、一般的な非破壊検査である、反発度試験（シュミットハンマー法）、自然電位測定、中性化試験、鉄筋探査を行った。

5.2 コンクリートの圧縮強度

圧縮強度は、シュミットハンマー法にて推定を行った。測定はワイヤーソーにより切り出したA、B桁の切断面にて行った。その測定による推定値と、採取コアによる圧縮強度試験結果を表－6にまとめる。なお、圧縮強度の推定は、日本材料学会の推定式（式(1)）を用いた。

$$F_c = 13(R_0 + \Delta R) - 184 \quad (1)$$

ここで、 F_c ：圧縮強度（ kgf/cm^2 ）

R_0 ：測定反発度（25点の平均値）

ΔR ：補正係数（=0：水平打撃）

表－6 圧縮強度推定値と実験値の比較

反発度 測点	測定 反発度	圧縮強度 推定値 (N/mm^2)	採取コア 種類	圧縮強度 試験結果 (N/mm^2)
A-2-1	46.7	41	A-Y-2	38
A-2-2	47.3	42	A-Y-3	35
A 桁平均	—	42	A 桁平均	37
B-1-1	48.8	44	B-Y-1	36
B-1-2	48.3	44	B-Y-2	39
B-2-1	44.1	38	B-X-1	44
B-2-2	49.4	45	B-X-2	42
B 桁平均	—	43	B 桁平均	40

反発度は、コンクリートの含湿状態、および炭酸化等の打撃面状況により変化しがちであるので、測定においては注意が必要であると言われている。しかし、本試験結果ではシュミットハンマー法による圧縮強度の推定値は、実際のコア供試体の圧縮強度試験結果より若干大きい値となるが、ほぼ近い値を得ることができた。

5.3 中性化試験

中性化試験はもっとも一般的なフェノールフタレイン法で、採取コアの割裂面と、解体時の桁切断面で行った。その結果を表－7に示す。

表－7 中性化深さ

供試体 種類		中性化深さ (cm)		
		平均	最大値	最小値
コア	A-Y-1	0.41	1.4	0
	A-Y-4	1.46	3.2	0.2
	B-Y-3	0.23	1.3	0
	B-Y-6	0.28	1.6	0
桁面	A桁	—	1.3	0
	B桁	—	1.0	0

中性化試験結果との比較のため、中性化予測深さを岸谷式（式(2)）を使用して算出する。

$$t = \frac{7.2}{R^2(4.6x - 1.76)^2} C^2 \quad (x \leq 0.6) \quad (2)$$

ここで、 t ：Cまで中性化する期間（年）

x ：強度上の水セメント比

C ：中性化深さ（cm）

R ：中性化比率

なお、算出にあたっては、中性化比率を1、期間を60年、強度上の水セメント比を配合推定から0.515として中性化深さCを求めた。その結果、中性化深さは $C=1.76\text{cm}$ となり、実際の中性化深さは計算値より小さめの値であった。

以上より、本橋は良質のコンクリートが施工されており、著しい中性化が生じていないこと、および、鉄筋のかぶり厚が約3cmであり中性化による鉄筋の腐食の可能性が低いことが確認された。

5.4 自然電位測定

自然電位の測定は、主桁下面および側面で行った。測定された自然電位は全て -200 mV より貴な値であり、ASTM（米国試験材料協会）の判断基準によれば「90%以上の確率で腐食していない」領域となる。

測定箇所を研りだした状況に等電位線を記入したものを写真-2に示す。鉄筋の腐食状況は表面錆が多少見られたものの、ほぼ測定結果と整合していると見られる。

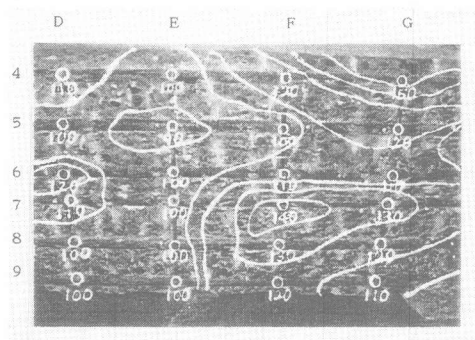


写真-2 鉄筋腐食状況

5.5 鉄筋探査

RCレーダーによる鉄筋探査を、主桁側面でスターラップを対象として行った。結果はピッチが約30cm、かぶりが約2.3cmとなった。測定後、鉄筋を研り出し配筋状況を確認したが、結果はピッチ、かぶりとも測定値とほぼ一致した。

鉄筋探査は測定器の性能にもよるが、かぶりが厚くなると測定精度が落ちる。また、今回の測定では、スターラップと判断される最外縁鉄筋の像の奥（深度方向）にも同様に鉄筋の像が生じた。したがって、配筋が1段以上の場合、最外縁鉄筋の内側鉄筋は測定（判断）が困難と考えられる。なお、鉄筋径は一般的な鉄筋探査器では測定できないため、径の把握が必要な場合、鉄筋を研り出し径を確認する必要がある。

6. まとめ

約60年間供用されてきた本橋は、材料試験・非破壊検査を行った結果、材料的にも経年変化

による顕著な劣化等は見られず、健全なコンクリート構造物であった。これは、本橋が国道3号線という重交通下にあったものの、周辺環境条件が良かったことに加え、非常に入念に施工されていたためと考えられる。このことを実証するかのように、解体桁の切断面（ワイヤーソーによる）は空隙等は見られず緻密なコンクリートとなっていた（写真-3）。このことは、新設されるコンクリート構造物の耐久性がいかに施工に左右されるかを伝えている。

本報告におけるデータが、コンクリート構造物の維持管理において今後、何らかの参考になれば幸いである。

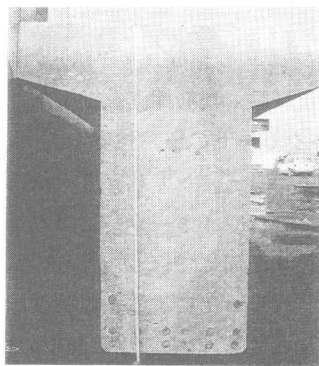


写真-3 解体桁の切断面

最後に、本報告は九州橋梁・構造工学研究会「長年供用されたコンクリート道路橋の調査手法に関する研究分科会」の活動の一環として産学官の協力を得て行ったものです。ご協力いただきました委員の方々、また建設省福岡国道工事事務所の関係者各位に深く感謝します。

参考文献

- 1) 田上為己：鉄筋コンクリート橋の歴史 福岡県の古き橋の調査報告
- 2) Matushita, H. et al. : A STUDY OF RESIDUAL STRENGTH OF CONCRETE AFTER BEING SUBJECTED TO REPEATED LOADING, Proc. of the 5th Int. Conf. on Structural Failure, Durability and Retrofitting (Singapore), pp. 221-228, 1997. 11