

論文

[1163] 80数年経過した鉄筋コンクリートアーチ橋（石川橋）の解体調査

鳥居和之*1、上田信二*2、西本俊晴*3、川村満紀*4

1. まえがき

我が国で最も古い鉄筋コンクリート橋は、明治36年に建設された京都府琵琶湖疎水運河に架けられたメラン式アーチ橋（橋長：7.3 m）と神戸市若狭橋（スラブ橋、橋長：3.7 m）であるが、両橋の架設以後、明治時代には約40の鉄筋コンクリート造の橋が建設されたと報告されている[1、2]。石川橋（橋長：24.9 m、幅員：10.5 m）は、明治44年3月に金沢城の百間堀の水堀を埋立て構築されており、兼六園と金沢城の石川門とを結ぶ橋として金沢市民や観光客に親しまれてきた。明治時代に架設された鉄筋コンクリート橋で現存するものは次第に少なくなってきており、それらの橋は歴史的建造物としての価値も大きい。しかし、石川橋はその下のお堀通りの拡幅工事にともない残念なことに平成5年11月に取り壊されることになった。石川橋の建設当時の材料（コンクリート、鉄筋）、施工方法および構造形式の詳細は不明であるが、写真-1に示す建設時の工事写真が1枚残されており、この写真からは主鉄筋を2層に配置した鉄筋コンクリート造のアーチ橋であることを知ることができる。今回の解体調査では、石川橋の現況を正確に記録することを第一の目的としたが、自然環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久性の問題に関連して、長い年月が経過したコンクリートの性質と鉄筋の腐食状況とくに注目しており、材料、施工法および構造形式の全般にわたる詳細な調査を実施した。

本調査は、平成5年度および6年度の2年間に渡って実施する予定であり、本文では平成5年度に実施したコンクリートの非破壊検査、コンクリートコアの力学的試験、および鉄筋の腐食状況などの調査結果について報告する。

2. 調査の概要

石川橋の解体調査の項目を表-1に示す。コンクリート表面部の健全度を調べるために、平成5年6月から8月にかけて・モルタルの浮きおよびひびわれの調査（赤外線撮影（サーモグラフィ法）、シュミットハンマー（N型、P型）、超音波パルス速度）および・コンクリート表面部の各種分析（中性化深さ（フェノールフタレイン1%溶液の噴霧）、塩化物イオン量（電位差滴定法（JCI SC-5）、X線回折、示差

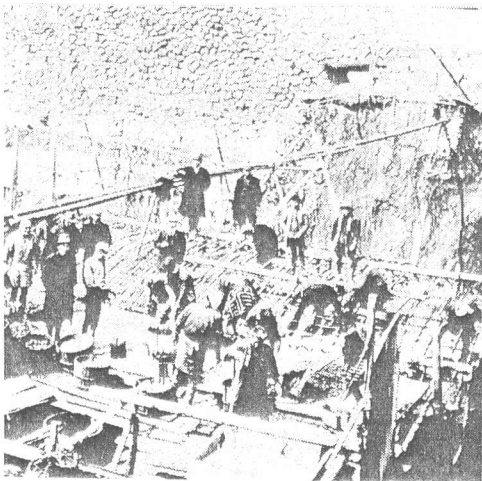


写真-1 石川橋の建設時の施工状況

表-1 石川橋の解体調査の項目

調査項目	内容
外観調査	ひびわれ、モルタルの浮き、滲水、エフロレッセンス
非破壊試験	赤外線撮影（サーモグラフィ法） 反発硬度（シュミットハンマー P型、N型） 超音波パルス速度（Audit）
コンクリートコアの力学的試験	圧縮強度（JIS A 1108） 静弾性係数（JISCE-1988（案）コンプレッソメータ） 動弾性係数（JIS A 1127 共振法（振動試験）） 超音波パルス速度（Audit）
コンクリートの各種分析	中性化深さ（フェノールフタレイン1%溶液の噴霧） 塩化物イオン量（電位差滴定法（JCI SC-5）） 水和生成物の同定（X線回折、示差熱分析） 微視的構造観察 （走査型電子顕微鏡観察、蛍光顕微鏡観察、水浸圧入式顕微鏡）
コンクリートの配合推定と骨材試験	コンクリートの配合推定（セメント量、骨材量） 骨材試験（粒度分布、比重、吸水率、単位容重）
鉄筋の試験	降伏強度および引張率（JIS Z 2241） 鉄筋および母材の化学組成 鉄筋の腐食性状

* 1 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科、工博（正会員）
 * 2 真柄建設（株）技術研究所研究員
 * 3 真柄建設（株）技術研究所副所長
 * 4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科、工博（正会員）

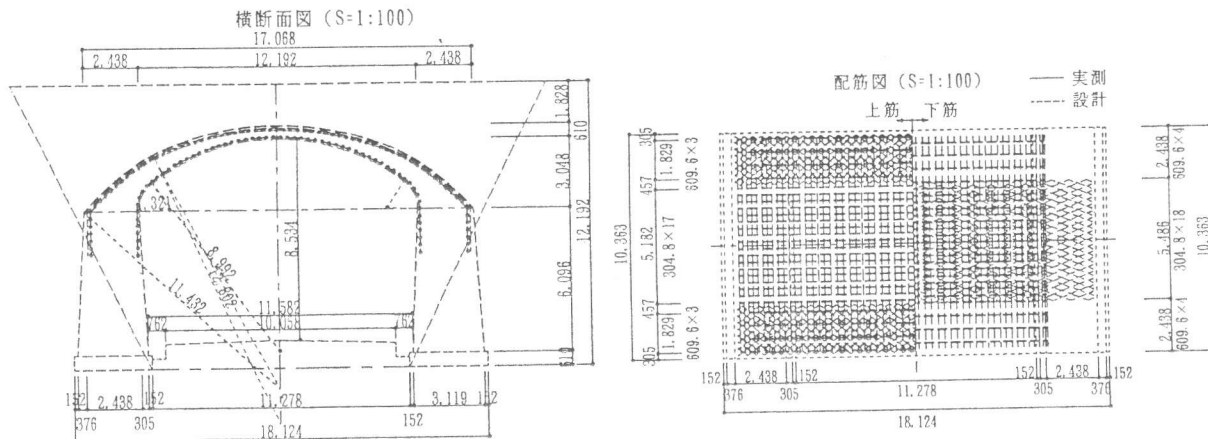


図-1 石川橋の横断面図（県庁側）および鉄筋の配筋図

熱分析)を行った。コンクリートコア(直径:10 cm、長さ:3~4 m)は、平成5年7月および10月の2回に渡り橋台(兼六園および石川門側、下段、中段、下段より各2本)、側面(県庁および兼六園下側、各4本)、クラウン中央(2本)およびウイング(2本)の位置で合計24本の貫通コンクリートコアを採取した。コンクリートコアは、粗骨材、空隙、ひびわれおよび変質部分をビニールシートに写し取り、表面からの深さ方向におけるそれらの分布状況を画像解析によって求めた。その後、JIS A 1107「コンクリートからのコアおよびはりの切り取り方法および強度試験法」に従って、表面から50 cmごとにその部分を代表するコンクリート供試体(直径:10 cm、高さ:20 cm)をコンクリートカッターで切り出し、供試体の両端面を研磨した後、圧縮強度、静弾性係数(コンプレッソメータ使用)および超音波パルス速度の測定を行った。また、クラウン部の舗装および土砂が完全に除去された平成5年10月の段階にて、鉄筋コンクリートのアーチ部の測量を実施するとともに、クラウンの中央および端部の2カ所でコンクリートを丁寧にはづり取り、鉄筋の配置およびその腐食状況を調べた。

3. 石川橋の構造形式と配筋状況

石川橋の横断面図および配筋図を図-1に示す。石川橋の構造形式は3心式の鉄筋コンクリートアーチ橋であり、全体としてはモニエ式(Monier)のアーチ橋を模倣している[3, 4]。鉄筋の配置については、主鉄筋(1インチの角鋼)と横方向の配力鉄筋(5mmの角鋼)とが亜鉛メッキされた番線で結合されており、上層および下層の2層の格子状の鉄筋組みになっていた(写真-2(a))。上層鉄筋の上には施工の際の打ち継ぎ目を確認でき、その上にさらにエキスパンドメタルが施されていた。主鉄筋は橋台の上部の位置で止められており、橋台には鉄筋などの補強材は使用されていない。アーチ部の主鉄筋は5~6mの長さで継ぎ足してあり、継ぎ手部にはリベット継ぎ手(下層の中央部のみ使用され、切削した鉄筋を張り合わせ、その部分に3本のリベットが打ってある、写真-2(b))と重ね曲げ継ぎ手(加熱した鉄筋を折り曲げて、番線で結束している、写真-2(c))とが使われており、継ぎ手の位置は上層と下層とでずらしてあった。また、ウイング部分は幅61cmの無筋コンクリートであり、鉄筋コンクリートのアーチ部との間に支え筋は使用されておらず、ウイングは鉄筋コンクリート本体の上に直接乗った構造になっていた。

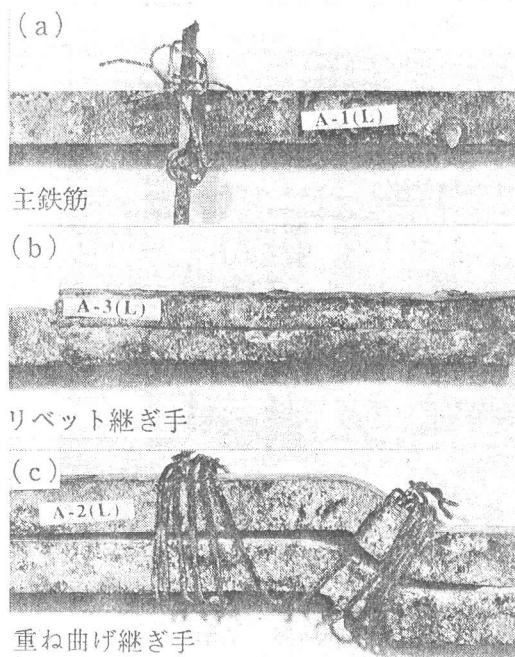


写真-2 主鉄筋および継ぎ手部の外観

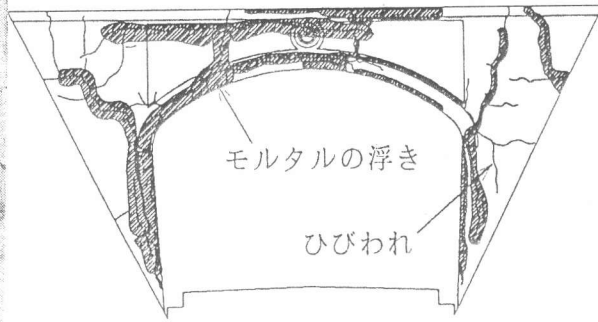
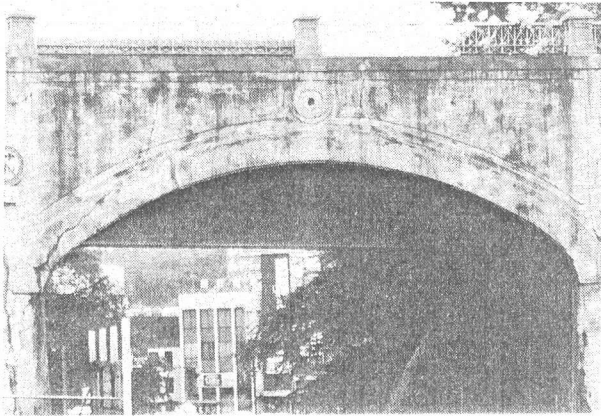


写真-3 石川橋のコンクリートの現況（県庁側）

図-2 たたき検査にて確認されたひびわれおよびモルタルの浮きの状況（県庁側）

4. コンクリート表面のひびわれとモルタルの浮きの状況

コンクリート（クラウン部）のひびわれおよびモルタルの浮きの状況を写真-3および図-2に示す。石川橋のコンクリートの表面には、昭和49年の補修時にモルタル（1～2cm）が全面に施されていたが、モルタルとコンクリートとの接着に使用したエポキシ系の樹脂は完全に風化しており、降雨および日射の影響を受ける県庁側の側面ではとくにコンクリート表面のモルタルの浮きが顕著であった。赤外線写真は平成5年8月の快晴時に早朝から夕方まで連続的に撮影を行った。その結果、気温が最大になった午後1時の画像ではモルタルの浮いた部分と健全部とでは1～2℃の温度差が生じており、サーモグラフィ一法によるモルタルの浮きの識別が可能であった。しかし、実建造物の撮影ではコンクリート表面の凹凸と日射角度との関係や表面の汚れなどで識別が不可能となる箇所も随所に認められた。石川橋の橋台の基礎（平成6年4月調査予定）には松杭が使われているようであるが、不同沈下が生じており、石川橋の両側面には橋台からウイングにかけて大きな貫通したひびわれが何本も存在していた。また、土塁に接した橋台の奥の方よりひびわれを通じて水が常時供給されていたようであり、石川橋の橋台の内側のモルタルには水の滲出および遊離石灰の跡が多数観察された。

5. コンクリートの力学的性質

明治時代のコンクリートの配合は容積配合であり、鉄筋コンクリートにはセメント：砂：砂利＝1：2：4～1：2.5：5のものが採用されていたと報告されている〔2〕。石川橋の建設時には既に国産のセメントが使われていたようであり、セメントの凝結より少し多い程度の水を加え、各層（15～20cm）ごとに硬練りコンクリートを鞘で丁寧に突き固めて作製したものと思われる〔5〕。クラウン部分より採取したコンクリート塊を塩酸（5%）で溶解し、使用骨材を調べた結果、コンクリート用骨材には金沢市の近辺の川原からと推測される川砂利（比重：2.54、吸水率：4.4%、最大寸法：50mm）および川砂が使われており、骨材中には瀬戸物のかけらや木切れなども混在していた。

コンクリートコアの粗骨材および空隙の分布状況を図-3に示す。クラウンおよび橋台の表面から1mまでの部分のコンクリートは、10～20mm程度の骨材（最大寸法：40～50mm）が使用されており、これらの部分は空隙も比較的少

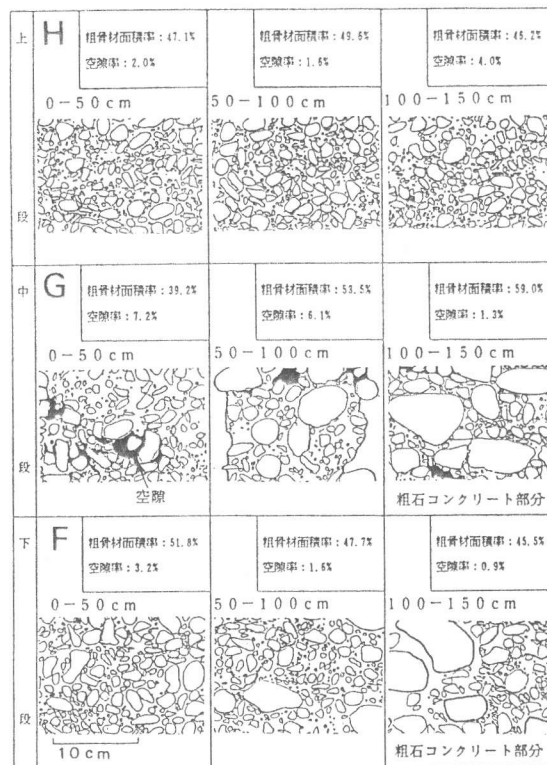


図-3 コアの粗骨材および空隙の分布状況

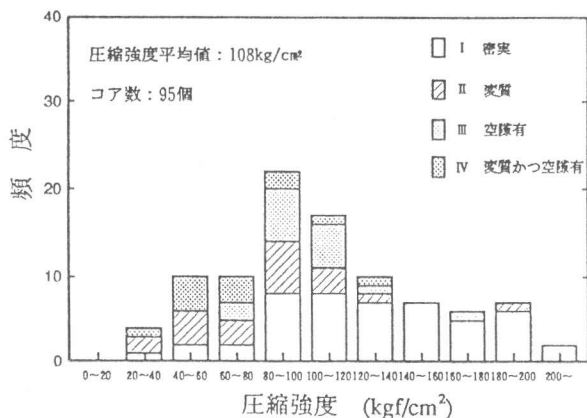


図-4 コンクリートの圧縮強度の分布状況

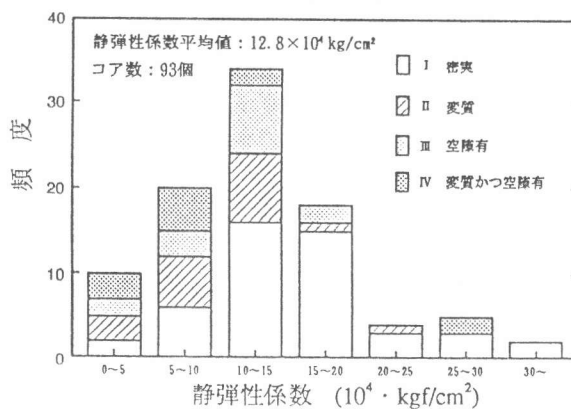


図-5 コンクリートの静弾性係数の分布状況

なく均質であり、コンクリートの変質もほとんど見られなかった。しかし、橋台の奥の方のコンクリートは、粗石コンクリートとして作製されたようであり、ぐり石(10~30cm)の周囲をモルタルで突き固めているために、空隙が多く残っており、これらの部分のコンクリートは水の影響でかなりの部分に変質していた。コンクリート供試体は、密実度と変色の状況により・密実部、・変質部、・空隙部および・変質かつ空隙部と4種類に分類した。コンクリートの単位容積重量は、密実なもので2150~2250 kg/m³、変質または空隙を含むもので2000~2150 kg/m³程度であり、現在のコンクリートと比較していずれも小さな値であった。

コンクリート供試体の圧縮強度および静弾性係数の分布状況を図-4および5に示す。コンクリートの圧縮強度は数10 kgf/cm² から200 kgf/cm² とかなりの広い範囲にあり、それに伴って静弾性係数も数万 kgf/cm² から20数万 kgf/cm² に分布していた。橋台部分では表面から内部に向かうにつれて変質および空隙部が多くなる傾向にあり、その結果圧縮強度も低下する傾向にあった。とくに、コンクリートの変質部分(モルタル部分は茶褐色に変色)は、写真-4に示す蛍光顕微鏡写真からも明らかのようにモルタル部分が多孔質になるとともに、モルタルと粗骨材との界面に大きな空隙が観察され、モルタルと粗骨材との付着力の低下のために圧縮強度および静弾性係数ともに小さくなっているのが特徴であった。

6. コンクリートの各種分析

コンクリートのX線回折の結果を表-2に示す。コンクリートの変質部分は水酸化カルシウムがほとんど存在せず、炭酸カルシウム(Calcite および Vaterite)が多く存在することが判明している。これらの結果より判断すると、コンクリートの変質部分ではひびわれを通じて水の影響を受け、長年に渡ってモルタル中または骨材の界面より水酸化カルシウムが溶脱した結果、多孔質な組織が形成されたようである。実際、コンクリートの破断面を観察すると、コンクリート中の気泡やひびわれ部分には炭酸カルシウムを

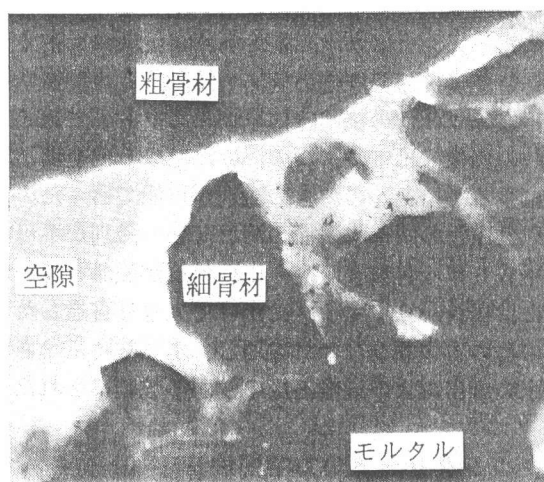


写真-4 蛍光顕微鏡観察結果(粗骨材の界面)

表-2 コンクリートのX線回折結果(C.P.S.)

	Ca(OH) ₂ at 18.1°	calcite at 29.3°	vaterite at 24.8°	ettringite at 9.0°	thamite at 9.2°	未水和セメント粒子 (β-C ₂ Sピーク)
A	33	240	67	60	11	有り
B	37	476	68	150	35	有り
C	18	448	358	43	8	有り
D	35	245	63	70	15	有り
E	38	201	95	90	18	有り
K(T)	35	245	68	39	12	有り
K(B)	140	200	90	40	20	有り

石川橋台(石川門脚) A:下段、B:中段、C:上段、D:東側側面、E:兼六側下側面
クラウン部 K(T):上部、K(B):下部

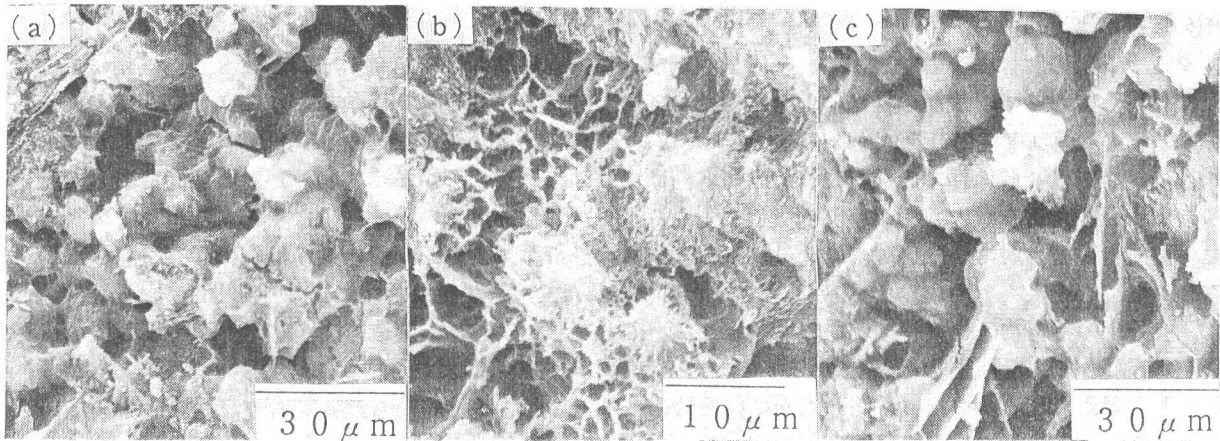


写真-5 コンクリートの変質部の内部組織

む白色の沈殿物が堆積しているのが認められた。コンクリート中の水酸化カルシウム（アルカリ性の低下）は C-S-H gel や Aft, Afm の分解を生じさせ、コンクリートの鉱物組成および微細組織を大きく変えている可能性もある [6]。コンクリートの走査型電子顕微鏡による観察結果を写真-5 に示す。走査型顕微鏡による観察では、変質部分の組織には水酸化カルシウムの溶脱を示す微細な孔が存在するとともに、C-S-H gel の形態も特異なものに変わっている（写真-5 (a, b)）。また、エトリングaitは存在せず、モノサルフェート水和物と思われる板状生成物が多く生成しているのが特徴である（写真-5 (c)）。

表-3 コアの中性化深さおよび塩化物イオン量

7. 鉄筋の腐食状況

石川橋より採取したコンクリートコア（表面から 10 cm までの部分）の中性化深さおよび塩化物イオン量を表-3 に示す。中性化深さは日射や降雨などの局所的な環境条件（Micro-climate）の影響を受け、橋台、側面およびクラウンの各採取場所によって大きく異なっていた。橋台部では下段（A, F）、中段（B, G）、上段（C, H）の順番で中性化深さが大きくなる傾向にあり、上段では 20 ~ 30 mm の中性化深さが見られた。また、土に接しているクラウン（K）の上部はほとんど中性化が見られないのに対して、クラウンの下部は常時乾燥し、車の排気ガスの影響をも受けるので、コンクリートの中性化が最も進行しており、この部分では最大 30 ~ 40 mm の中性化深さが見られた（コンクリートの水/セメント比を 55%、中性化比率を 1 と仮定すると、この値は岸谷の中性化式により計算されたものとはほぼ一致する [7]）。一方、塩化物イオンは、石川門側の橋台の下段において 0.029% と最も大きく、橋台の上部、クラウンおよび側面には塩化物イオンはほとんど存在しなかった。従って、石川橋における鉄筋腐食の要因としては中性化が主要なものであると考えられる。金沢市の中心部に位置する石川橋における塩化物イオンの供給源としては以前に使用された融雪・融氷剤および地下水

		中性化深さ (mm)	塩化物イオン (%)			中性化深さ (mm)	塩化物イオン (%)
石川門側	A-1	0	0.024	兼六園側	F-1	2	0.009
	A-2	2	0.035		F-2	15	0.014
	B-1	10	0.014		G-1	-	0.004
	B-2	20	0.009		G-2	27	0.004
	C-1	0	0.003		H-1	-	-
	C-2	25	0.024		H-2	16	0.000
	D-1	0	0.004		I-1	0	0.005
	D-2	0	0.004		I-2	0	0.002
	E-1	7	0.004		J-1	0	0.001
	E-2	0	0.007		J-2	0	0.002
K-1(T)		0	0.000	K-2(T)		3	0.004
K-1(B)		29	0.000	K-2(B)		43	0.004

石川橋橋台 石川門側 A:下段、B:中段、C:上段、D:側面側面、E:兼六園下側側面
兼六園側 F:下段、G:中段、H:上段、I:側面側面、J:兼六園下側側面
クラウン部 K (T):上部、K (B):下部

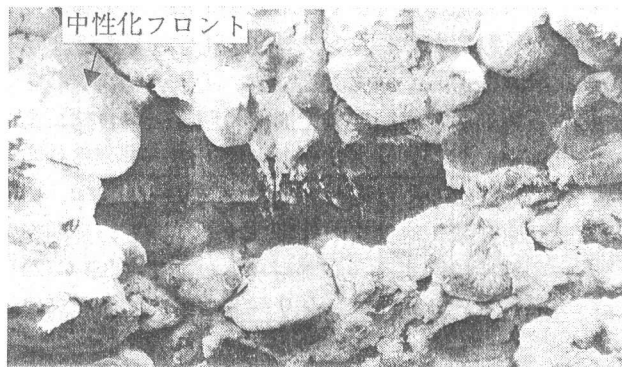


写真-6 クラウン下部の中性化と鉄筋腐食状況

中の塩分が考えられる。

クラウン部の解体調査の結果より、上層の主鉄筋、横方向鉄筋およびエキスパンドメタルには錆はまったく付着しておらず、鉄筋の状態は健全に保たれていた。一方、写真-6に示すようにクラウン部の下層の主鉄筋の下面は中性化のフロントに達していたが、この際にも鉄筋の腐食の発生は非常に軽微であった。今回の調査では、解体作業の進行に合わせて各断面の鉄筋の腐食状況を調べているが、局所的な腐食の進行（マクロセル腐食など）および断面欠損をともなう重大な鉄筋腐食の形跡は少なくともこれまでの調査においては確認されていない。当時の鉄筋（化学成分の分析結果より石川橋の鉄筋は銅の含有量が少ないことから、イギリス、ドイツからの輸入鉄筋または輸入したくず鉄が使用されたことが判明している）は、化学成分中の不純物（リン、イオウ、マンガンなどの含有量が多い）や製造方法（リムド鋼を丁寧に鍛造しているために、表面組織が緻密である）の相違の影響で現在の鉄筋よりも腐食に対する抵抗性が大きかったことも考えられる。また、鉄筋の表面には塗装の一部と思われる付着物も残っており、鉄筋の表面に何らかの処理が行われていた可能性もあり、この点については現在調査を行っている。

8. まとめ

石川橋の解体調査より、明治44年に建設された石川橋において使用された材料（コンクリート、鉄筋）の特徴、構造形式および配筋状態の詳細を明らかにすることができた。また、80数年が経過したコンクリートの劣化状況の調査より、コンクリートの劣化および変質には水が大きく関与していることが確認できた。すなわち、長期間に渡って乾燥状態に置かれたクラウン部ではコンクリートの変質はほとんど見られなかったのに対して、橋台部ではひびわれや空隙を通じて降雨や地下水の影響を受けた部分のみが変質していた。コンクリートの変質部では、モルタルと粗骨材との付着力が大きく低下しており、このため変質部では圧縮強度および静弾性係数が健全部と比較してかなり小さくなっていた。鉄筋腐食に関しては、塩分の影響は見られなかったが、乾燥状態に置かれたクラウンの下部でコンクリートの中性化が最も進んでおり、この部分では中性化のフロントが下層の主鉄筋にまで達していた。しかし、クラウン部全体において、内部の鉄筋の腐食は非常に軽微であり、局所的な腐食の進行および断面欠損をともなう重大な鉄筋腐食は認められなかった。

今回の調査では、鉄筋コンクリート構造物の耐久性の問題に関連して、コンクリートの劣化および変質に及ぼす水の影響や、鉄筋の腐食に及ぼす化学成分や製造方法の影響など興味深い問題が提起されている。前者については、コンクリートの鉱物組成や微細組織の変化についての検討を始めており、後者については川崎製鐵（株）鋼構造研究所の協力で鉄筋の力学的試験（降伏強度、伸び率）および鉄筋および錆の化学組成についての分析を行っている。

〔謝辞〕

本研究を実施するに当たりご協力いただいた金沢大学材料研究室筒井一臣氏、原田和彦氏、真柄建設（株）竹内勝信氏並びに石川県金沢土木工事事務所の方々に感謝いたします。

〔参考文献〕

1. 松本嘉司、鉄筋コンクリートの歴史・鉄道構造物、土木学会論文集、No.426, pp.23-28, 1991.2.
2. 国分正胤、コンクリートと施工法—その移り変わり—（その2）土木におけるコンクリート施工の移り変わり、コンクリート工学、Vol.18, No.2, pp.71-78, 1980.
3. 廣井 勇、鐵筋混凝土橋梁、工學會誌、第253巻、pp.285-301、明治36年6月。
4. 石橋詢彦、鐵筋混凝土通俗説明、工學會誌、第333巻、pp.492-503、明治43年11月。
5. 岡田 清、コンクリートと施工法—その移り変わり—（その11）土木における練り混ぜ・締固め・養生の移り変わり、コンクリート工学、Vol.19, No.5, pp.70-78, 1981.
6. 三原守弘 他、土中埋設コンクリートの長期変質における水質依存性、自然環境とコンクリートの性能に関するシンポジウム論文集（JCI-C32）, pp.155-158, 1993.5.
7. 岸谷孝一、鉄筋コンクリートの耐久性、鹿島建設技術研究所出版部、昭和37年12月。