

# 100年を経た鋼橋（明治橋）床版コンクリートの分析

A Study on the Slab Concrete of the 100 Years Old Steel Bridge; MEIJIBASHI Bridge

森川卓子\*, 水越睦視\*\*, 日野伸一\*\*\*  
Takako MORIKAWA, Mutsumi MIZUKOSHI and Shinichi HINO

- \* 理修 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 (〒274-8601 千葉県船橋市豊富町 585)
- \*\* 博(工) 住友大阪セメント(株) 福岡支店 技術センター (〒812-0011 福岡市博多区博多駅前 1-2-5)
- \*\*\* 工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

MEIJIBASHI Bridge constructed in 1902 is the plate girders bridge with composite decks. The bridge was investigated in 2004 for the purpose of preservation and repair. The slab concrete remains after the long-term exposure. The concrete is still sound, however part of the cement paste were dissolved with rainwater through the cracks. The carbonation of the concrete was progressed and alkali-aggregate reaction was not detected. The cements using for the concrete were made from the long burnt and slow cooling shaft kiln clinkers.

**Key Words :** old concrete, composite deck, long-term durability, old clinker, cement hydration

## 1. はじめに

明治橋は1902年に施工された鋼2主I桁橋であり、今も現位置（大分県臼杵市野津町）で供用中の日本最古の道路橋である（写真-1）。しかし現在は橋梁の損傷が著しく、歴史的価値のある本橋の維持・保存のためには何らかの補修が必要とされる。そこで2004年3月に、本橋の保存活動の一環として詳細な構造・損傷度調査および静的載荷試験が土木学会鋼構造委員会道路橋床版の調査研究小委員会・日本橋梁建設協会床版研究委員会・日立造船（株）により実施された<sup>1) 2) 3)</sup>。床版コンクリートに関する調査は同小委員会により、8本のコア抜き試料の圧縮強度試験および静弾性係数試験が実施されている（表-1）。

本研究ではこの強度試験後のコア試料を用いてコンクリートの各種分析を行った。日本国内において明治から大正にかけて打設された長期材齢を経たコンクリートの詳細な解析例は少ない<sup>4) 5) 6) 7) 8)</sup>。そこで本報告では当時使用されたセメント・コンクリートおよびその保存状態を明らかにするために詳細な分析を行い、検討を加えた。

## 2. 試験概要

### (1) 試料

本橋はトラフ状底鋼板の上にコンクリートが載せられた、いわゆる合成床版を有する。今回、強度試験実施後のコア抜き試料8本（φ75mm）を試験片として用いた。コア試料採取場所を図-1に、強度試験結果を表-1に示す。

コアはコンクリート上面に亀甲状のひび割れが発生していない範囲（図-1 A 部）およびひび割れが進展した範囲（図-1 B 部）において、トラフ状底鋼板の谷部より採取されたものである。コンクリートはトラフ状底鋼板の上底面高さで水平ひびわれが進展し、上下に分割されていた。

コンクリートコアの圧縮強度は No.5 コアを除いて A 部の方が B 部よりも全体的に低くなっていた。そこで強

度試験結果をもとに、コア採取場所（No.5 コアを除く A 部、および B 部）ごとに各種評価試験を行った。

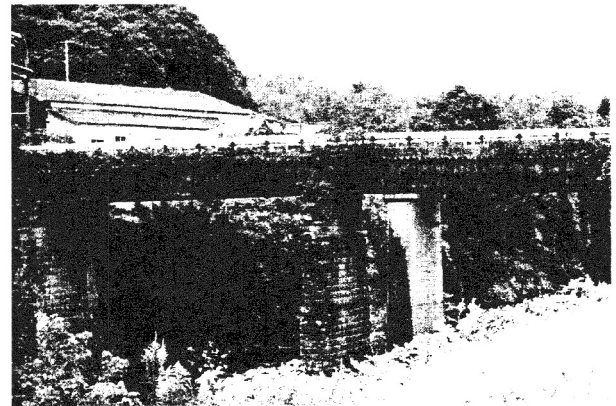


写真-1 明治橋外観

表-1 コンクリート強度試験結果<sup>2)</sup>

試料		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )
A	No.1	18.7	1.11
	No.2	18.9	1.44
	No.3	18.6	1.43
	No.4	19.7	0.56
	No.5	25.4	1.61
B	No.6	24.8	1.68
	No.8	24.6	1.48

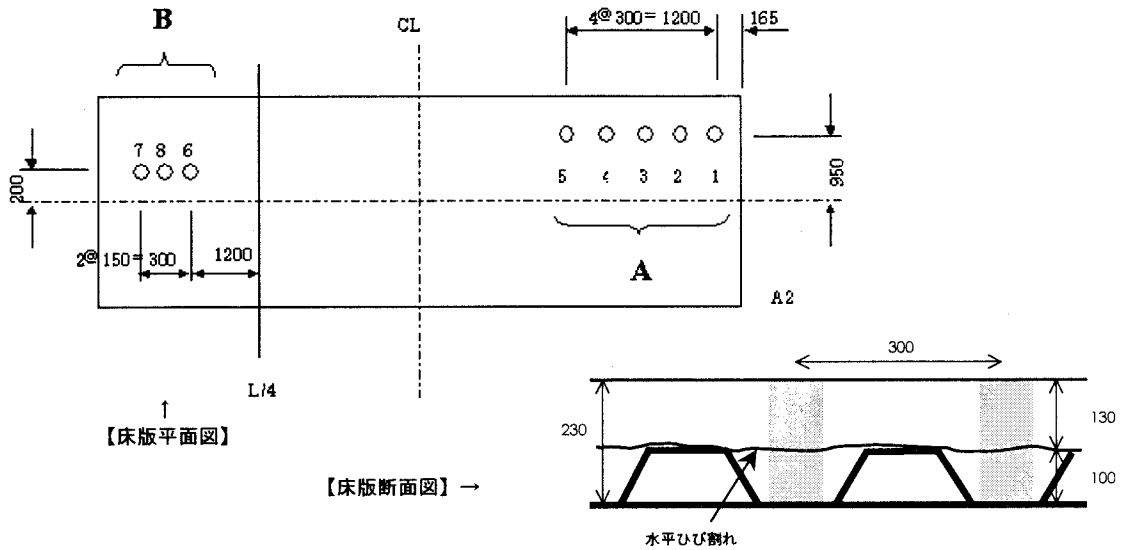


図-1 コア試料採取場所

(2) 試験項目

コアより分取したコンクリート片を用いて各種解析を行った。解析項目は①外観記載、②モルタル部化学分析(湿式)、③配合推定、④気泡システムパラメータ、⑤細孔径分布、⑥粉末 X 線回折、⑦SEM 観察、⑧反射顕微鏡観察、⑨EPMA である。

3. 結果

3-1 使用材料の性状

(1) セメントの化学組成

モルタル部の化学分析を JIS R 5202 に準じて実施した。分析結果を表-2 に示す。

今回分析を行ったモルタル中には、細骨材として珪石の他に雲母片や種々の岩片を含んでいたため、セメント自体の正確な化学組成を推定することができなかった。

(2) 配合推定

セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18<sup>9)</sup> に準じて、コンクリートの水中質量・表乾質量・絶乾質量・不溶残分・CaO 量・強熱減量を測定し、配合推定値を求めた。骨材の特性値は、同報告の細骨材および粗骨材の

試験値(全国平均値)をもとに、s/a を 45% と仮定した全骨材に対する値を算出して用いた。計算結果を表-3 に示す。

(3) クリンカの特徴

コンクリート片を研磨し、未水和のまま残存していたセメント粒子について顕微鏡観察・EPMA による組成分析を行った。結果を写真-2、表-4 に示す。

試料中には 100 $\mu$ m を超える粗粒クリンカ粒子がまだ多く残存しており、使用されたセメントは現在のものと比べ粒度が粗かったことがわかる。エアライトは 30~100 $\mu$ m 程度の大きさで、比較的丸みを帯びた不定形状を呈するものが多くみられた(写真-2)。ビーライトは 10~50 $\mu$ m 程度の大きさであり、一部点線線条や櫛歯状凹凸を伴う I~Ia 型ビーライトであった。また間隙相はきわめて大型のフェライト相・アルミネート相より成る。

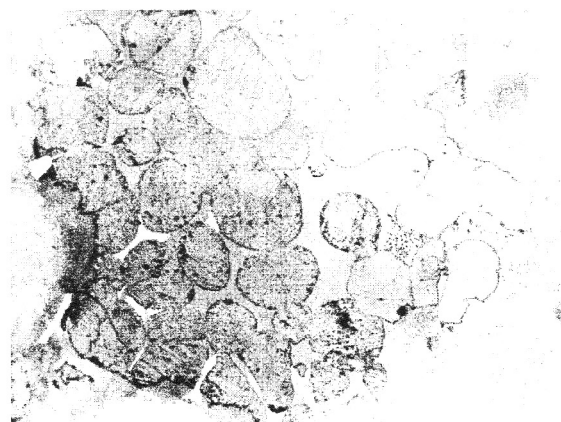
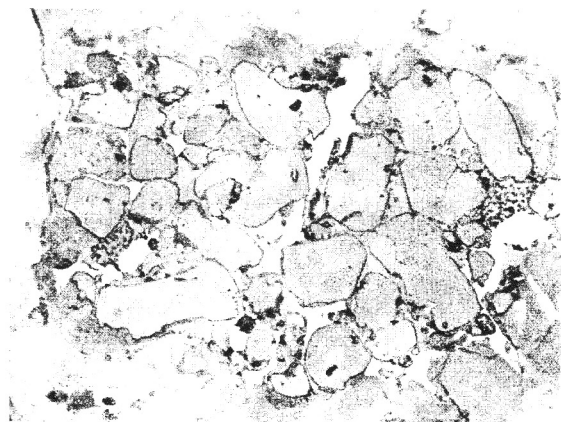
こうしたクリンカ組織は、長時間焼成・徐冷時にみられるものであり、当時日本国内においてセメント製造に使用されていた堅窯による焼成の特徴を示しているものと考えられる。

表-2 モルタル部の化学組成

(%)	試料 A	試料 B
975°C ig.loss	6.85	6.02
insol.	68.88	69.97
SiO <sub>2</sub>	6.07	5.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.97	3.79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.34	3.00
CaO	9.08	9.63
MgO	0.75	0.86
SO <sub>3</sub>	0.12	0.12
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.13
K <sub>2</sub> O	0.33	0.34
Cl	0.002	0.008

表-3 配合推定結果

試料	A	B	
配合推定値 (ig. loss 法)			
骨材量	(%)	82.3	82.0
セメント量	(%)	13.3	14.3
結合水量	(%)	4.4	3.7
単位置推定値 (ig. loss 法)			
単位骨材量 (表乾ベース)	(kg/m <sup>3</sup> )	1759	1769
単位セメント量	(kg/m <sup>3</sup> )	280	304
単位水量	(kg/m <sup>3</sup> )	252	198
水セメント比	(W/C)	90	65



50μm

写真-2 モルタル部研磨面の光学（反射）顕微鏡写真／硝酸エタノールエッチング

写真中央結晶の輪郭ははっきりして見える部分が未水和のまま残存しているクリンカ、縁辺部は水和した部分。現代のセメントのクリンカ組織と大きな差はないが、間隙相が大型分離を示すなど徐冷されたクリンカ特有の組織を示している。

各鉱物の化学組成をみると、現代のロータリーキルンクリンカの一般的な組成に概ね近い値を示していた。エーライトは、現代のものに比べNa量が若干高く、Al、S量などがわずかに低い傾向が認められた。ビーライトについてはFe、Mg量がかなり低く、K量も若干低い傾向が認められた。また、同時代（1899、1909）のセメントに関する研究<sup>7)</sup>で報告されていた値と比較してみると、アルミネート相中のNa量は総じて低く、本セメント中にはアルカリアルミネートが含まれていなかったことが確認された。

(4) 骨材

コンクリート中に含まれている粗骨材はおおよそ10～30mm程度の大きさでいずれも比較的円磨度が高い形状を呈しており、川砂利であると思われる。目視により簡易的に岩種判定を行った結果、コンクリート中に含ま

れる骨材の岩種は、泥岩、砂岩、風化した安山岩～玄武岩、石英脈片、緑色岩などであった。本橋周辺の岩層分布と比較して考えると、骨材にはおそらく周辺地域の川砂利が使用されたものと推察される。

3-2 コンクリート組織

(1) 外観的特徴

コア切断面の状況を写真-3に示す。コンクリートコアは、水平ひび割れがみられる部分を除いては比較的硬質な状態であった。しかし骨材界面など局所的に空孔の非常に目立つ部分も認められた。また水平ひび割れ近傍においては白色析出物が顕著に認められた。白色析出物は空隙を埋めるようにして生成しており、空隙中に二次的に析出してできたものと推察される。アルカリ骨材反応に関しては、その形跡は認められなかった。

表-4 未水和セメント中クリンカ鉱物の化学組成（EPMA測定値平均、wt.%）

鉱物相	エーライト		ビーライト		アルミネート相		フェライト相	
	A	B	A	B	A	B	A	B
CaO	72.12	72.04	65.44	64.21	59.78	57.39	48.51	48.20
SiO <sub>2</sub>	24.81	25.11	32.48	32.01	2.30	3.77	1.48	0.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.73	0.73	0.63	1.28	33.15	31.76	20.84	24.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	0.56	0.27	0.55	2.99	2.95	21.58	19.17
MgO	0.81	0.93	0.06	0.12	0.29	0.32	2.35	1.51
Na <sub>2</sub> O	0.13	0.16	0.20	0.26	1.07	2.72	0.06	0.01
K <sub>2</sub> O	0.03	0.06	0.14	0.61	0.16	0.62	0.00	0.00
SO <sub>3</sub>	0.04	0.01	0.41	0.29	0.01	0.01	0.00	0.01
MnO	0.05	0.06	0.04	0.08	0.02	0.02	1.20	1.01
TiO <sub>2</sub>	0.18	0.16	0.27	0.28	0.07	0.10	1.85	0.87
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.05	0.09	0.12	0.02	0.00	0.02	0.01
Ca/Si	3.11	3.07	2.16	2.15				
Al/Fe					17.38	16.83	1.51	2.02

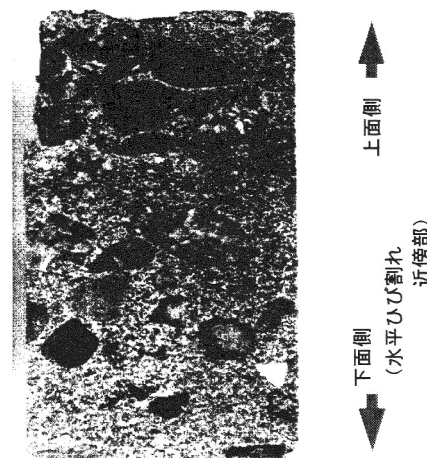


写真-3 コア垂直断面

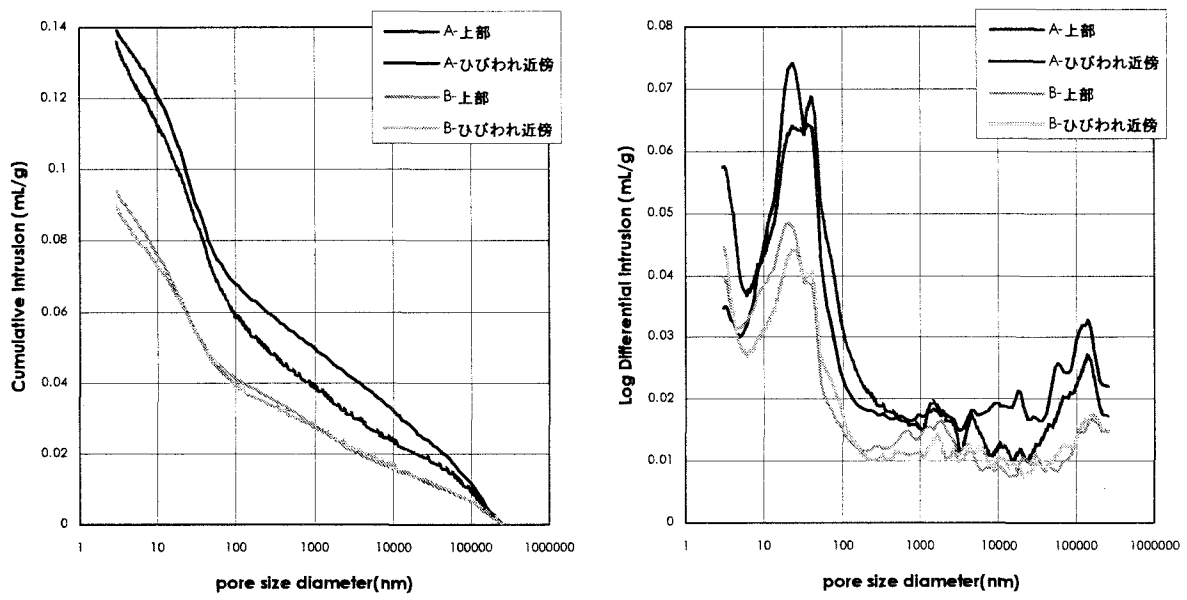


図-2 各試料の細孔径分布図

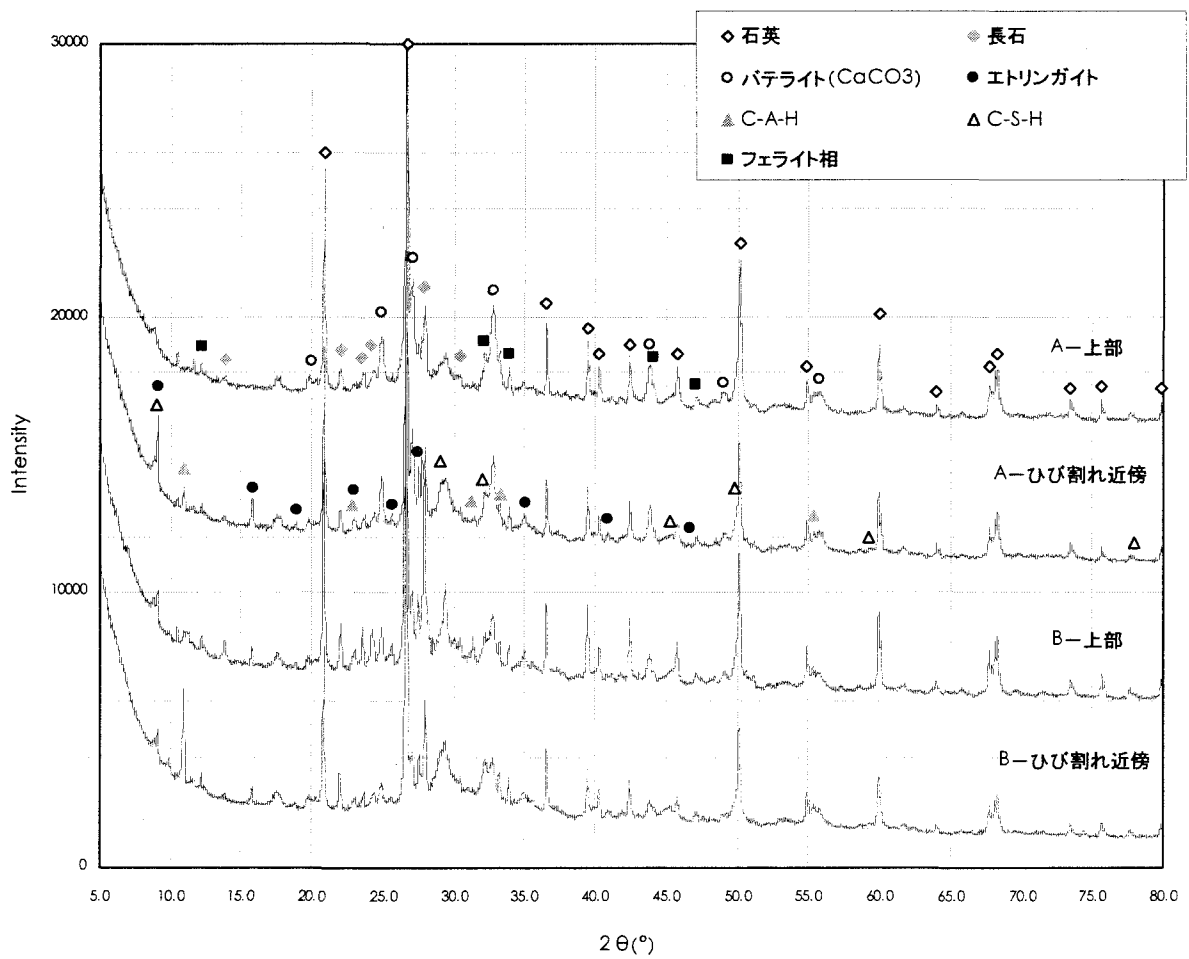


図-3 モルタル部の粉末 X 線回折図

## (2) 細孔構造

コンクリートの細孔構造を調べるため各試料について細孔径分布および気泡システムパラメータ測定を行った。細孔径分布は水銀圧入式ポロシメータにより測定した。気泡システムパラメータ測定については、リニアトラバース法により ASTM C 457 に準拠して実施した。本試験では耐久性に大きな影響を与える気泡間隔係数に重点を置いたため、球状の独立気泡のみの測定を行い、粗骨材中の微細空隙、ブリーディング等により生じた空隙、あるいは締め固めの程度に起因した空隙等はカウントしていない。なお、今回の試料では配合等の詳細が不明であるため、セメントペースト体積百分率には仮定値を用いた。細孔径分布図を図-2 に、気泡システム測定結果を表-5 に示す。

試料ごとに細孔構造を比較してみると、試料 B よりも A の方が全体的に空隙量が多く、よりポーラスな組織であることがわかった。両者のこの細孔構造の違いが、コアの採取場所による圧縮強度の違いに影響しているものと思われる。

また水平ひび割れ近傍では、その他の部位と比べ 20nm 前後の空隙量が少なく、40~50nm 前後の空隙量が多いという傾向が認められた。

表-5 気泡システムのパラメータと空気量 (試料 A)

パラメーター	単位	測定結果
気泡の比表面積	mm <sup>-1</sup>	34.4
単位長さあたりの気泡個数	個/mm	0.020
空気量	%	0.24
気泡間隔係数*	mm	527

\*ペースト量を 30vol.% として算出した値

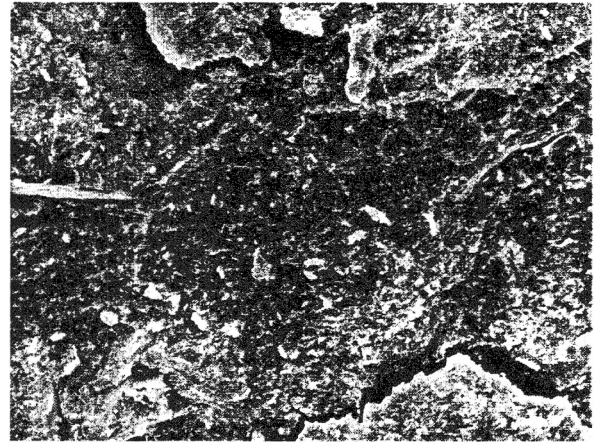
## (3) 水和生成物

水和生成物の同定の為、モルタル部分の粉末 X 線回折および破断面の SEM 観察を行った。粉末 X 線回折測定には、極力細骨材を取り除くよう配慮しながら粉碎したモルタル片を測定に用いた。また、水和物の化学組成を EPMA によって簡易的に測定した。

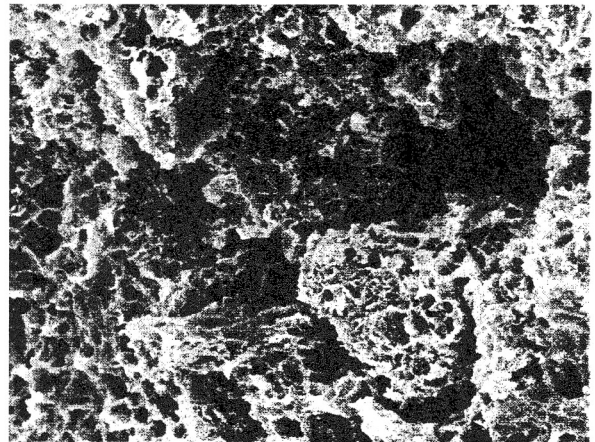
粉末 X 線回折測定結果を図-3 に示す。同定結果より、コンクリート中の水和物として、C-S-H や C-A-H、エトリンサイトなどが認められた。また水酸化カルシウムのピークは認められず、そのほとんどが炭酸化によりバテライトへと変化していることがわかった。

コンクリートの破断面を SEM によって観察した結果を写真-4 に、水和物の組成分析結果を表-6 に示す。ペースト部は基本的に緻密な組織を呈しており、硬質な硬化体が形成されていることがわかる (写真-4(a))。水和物は主に Ca/Si 比が 1.2~1.5 の C-S-H であった。しかし一方で、目視で確認されたような局所的に空孔の発達した部分においては、写真-4(b) に示すように蜂の巣状のポーラスな組織が認められた。これは外部から供給された水 (雨水など) によるペースト分の溶脱の痕跡であると思われる。また、水平ひび割れ近傍で多く認められた白色析出物は主に写真-4(c) に示すような針状結晶であった。これらの針状結晶は EPMA による組成分析結果より、エトリンサイトやカルシウムアルミネート系水和物であることが確認された。これらは、水平ひび割れより水が豊富に供給されることにより硬化体内部から Ca<sup>2+</sup> や Al<sup>3+</sup> が拡散

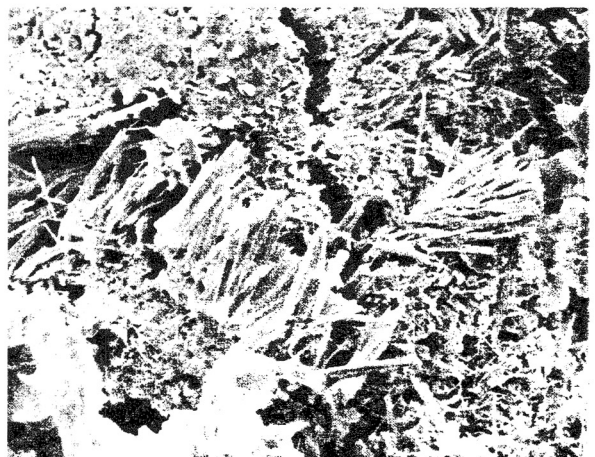
し、気泡内に二次的に水和物が生成したものであると推察される。



(a) コア試料は概ね緻密な硬化体組織を呈している。



(b) 蜂の巣状のポーラスな組織が局所的に認められる。



(c) 空隙内の白色析出物。エトリンサイトやカルシウムアルミネート系水和物が生成している。

10μm

写真-4 モルタル部破断面の SEM 像

表-6 水和物の化学組成 (EPMA 測定値平均)

(wt.%)	エーライト 内部水和相	ビーライト 内部水和相	空孔内 析出物
CaO	42.07	42.07	45.34
SiO <sub>2</sub>	32.47	32.47	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.45	4.45	23.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.89	0.89	0.09
MgO	2.04	2.04	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01
SO <sub>3</sub>	0.31	0.31	7.97
MnO	0.07	0.07	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.28	0.28	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.11	0.01

#### 4. まとめ

今回、施工後 100 年を経た鋼プレートガーダー橋の床版コンクリートについて各種解析を行い、その性状を調査した。調査結果よりわかった床版コンクリートの特徴および現在の劣化状況について以下にまとめる。

##### (1) 使用材料

- ・ コンクリートに使用されたセメントは、現代のものに比べ粒度が粗く、まだ未水和のまま残されている部分が多く認められた。
- ・ クリンカを構成する鉱物は現代のものと同様であった。クリンカの組織は長時間焼成・徐冷時に認められる特有の組織を示していた。これは当時国内において使用されていた堅窯によって焼成されたクリンカの特徴であると考えられる。
- ・ コンクリートに使用された粗骨材は泥岩、砂岩、安山岩等であり、その形状などから周辺地域の川砂利が使用されたものと推察される。

##### (2) コンクリート組織、劣化の状況

- ・ 全体的にみると、比較的緻密で硬質なコンクリートといえる。ただし水平ひび割れから供給された水による局所的な溶脱の影響が認められ、部分的に脆弱になっている。
- ・ 橋台に近い側でよりポーラスな組織となっており、その影響によりコア強度が橋脚側に比べ低くなっている。

- ・ 炭酸化は進行しており、水酸化カルシウムのほとんどはバテライトに変化している。
- ・ 目視による観察結果および粗骨材の岩種、使用されていたセメントの化学組成から、アルカリ骨材反応は起こっていないと考えられる。

#### 謝辞

本研究は土木学会鋼構造委員会道路橋床版の調査研究小委員会（委員長：堀川都志雄教授）の活動の一環として試料をご提供頂き実施しました。同委員会ならびに現地調査においてご協力頂いた野津町（現臼杵市）、日本橋梁建設協会床版研究委員会、日立造船（株）にはここに深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 松井繁之，嶽下裕一：日本最古の合成床版を用いた鋼橋－明治橋－見聞録，第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.283-288，2003
- 2) 杉原伸泰，財津公明，松井繁之，堀川都志雄：100 年を経た合成床版を有する鋼 2 主 I 桁橋（明治橋）の構造・損傷度調査，第 4 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.29-36，2004
- 3) 山口浩平，高林和生，内田大介，日野伸一：100 年を経た合成床版を有する鋼 2 主 I 桁橋（明治橋）の静的載荷試験，第 4 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.37-42，2004
- 4) 江川顕一郎，中村隆幸，千代田将明：材令 80 年のダムコンクリートについて，コンクリート工学，Vol.29，No.2，pp.13-19，1991
- 5) 鳥居和之，上田信二，西本俊晴，川村満紀：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.983-988，1994
- 6) 長瀧重義監修：コンクリートの長期耐久性-小樽港百年耐久性試験に学ぶ，技報堂出版，1995
- 7) K. Katayama and K. Sakai : Petrography of 100-year-old concrete from Otaru port, Japan, the 2nd International Conference on Concrete under Severe Conditions, pp.250-261, 1998
- 8) 山田周平，稲田達夫，塚谷秀範，早川光敬，古賀康男：歴史的建造物“東京・丸ビル”に使われたコンクリート-その解体調査より，セメント・コンクリート，No.629，pp.28-36，1999
- 9) セメント協会コンクリート専門委員会：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告，1967