

長寿命の既設橋梁における床版コンクリートの 材料的評価について

浦西 勝博

近畿技術事務所（〒573-0166大阪府枚方市山田池北町11-1）

近畿技術事務所は、各事務所から依頼を受けて土木材料に関する調査・評価を行っていることもあって、長寿命の既設橋梁の床版取替を含む大規模修繕を機会に、撤去された旧床版に対して中性化深さ試験、含有塩化物イオン量試験、圧縮強度・静弾性係数試験、E PMA法によるコンクリート中の元素の面分析を行うこととした。

今回は、約90年前に施工された旧床版コンクリートを材料的側面から見た場合の性状およびその評価について報告をするものである。

キーワード 長寿命、既設橋梁、コンクリート構造物、材料的評価

1. 目的

一般国道2号淀川大橋は、昭和20年の大阪大空襲により米軍の攻撃を受け被災しましたが、その後同じ構造で復旧される等、歴史的な構造物であり、完成当初から昭和50年に至るまで阪神電鉄の路面電車が橋の中央を走行し、鉄道橋としての役割も果たしてきました。

また、近年の調査では、1日あたりの交通量が3万4千台にもおよび、道路橋として現在でもなお重要な構造物であることは言うまでもありません。

建設後約90年が経過した淀川大橋で、平成29年2月より床版を取り替える大規模な工事が実施されました。そこで、近畿技術事務所は、建設後90年経過したコンクリートの品質はどのようなものかを調べることを通して、近畿地方整備局管内の長寿命の既設橋梁について、材料的評価を行うものである。

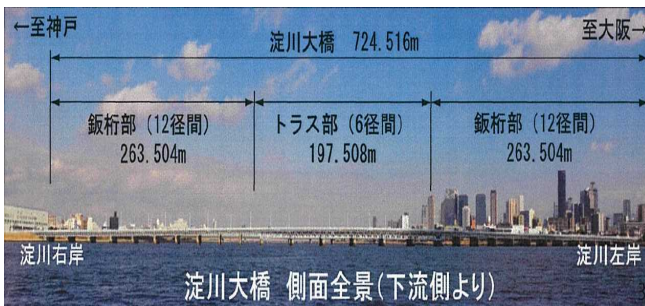


図-1.1 淀川大橋の全体

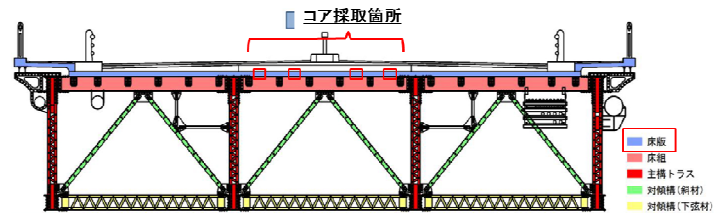


図-1.2 淀川大橋の横断面図

2. 試験概要

旧床版コンクリートの健全度を評価するため、旧床版から採取したコア試料を用いて、(1)～(4)の試験を実施した。

(1) 中性化深さ試験

中性化深さの測定はJ I S A 1 1 5 2「コンクリートの中性化深さの測定方法」により実施した。

コンクリートカッターを用いてコアを切断し、切断面にフェノールレイン溶液を噴霧した。中性化深さは、赤紫色に呈色した部分が安定した後（約10分程度）、ノギスを使用して表面から呈色した部分までの距離を10mm間隔で測定をした。（図-2.1参照）

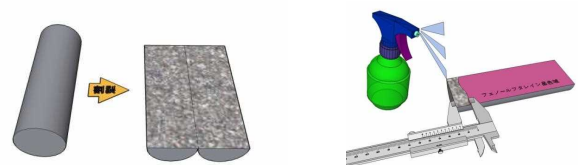


図-2.1 中性化試験

(2) 含有塩化物イオン量試験

コア試料を床版仮面から表-2.1に示す深度でスライスした。なお、全試料共通の深度75～85mmはコア試料高さの中間部に位置したため、コンクリートの内在塩分量を評価することを目的に設定した。加えて、深度35～45mm及び75～85mmはコア試料によっては、鉄筋近傍に位置したことから、塩分量が鉄筋の腐食発生限界値に到達しているかどうかを推定するため当該深度を設定した。

スライス片をジョークラッシャーで粗粉碎し、粉碎したものを105℃で乾燥後、ディスクミルで0.15mmふるい全通まで微粉碎した。

各深度において、JIS A 1154:2012「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法により塩化物イオンの定量分析を行った。

また、コンクリートの単位容積質量は、2,300kg/m³を使用し、(式5.1)より単位容積あたりの塩化物イオン量に換算した。

$$c = c^- / 100 \times \rho$$

c : 単位容積あたりの塩化物イオン量 (kg/m³)
 c^- : 塩化物イオン濃度 (%)
 ρ : コンクリートの単位容積質量 (kg/m³)

(式5.1)

表-2.1 分析試料の深度一覧

径間No.	深度 (mm)		
	35～45	75～85	115～125
P2-P3	○	○	○
P6-P7		○	
P10-P11		○	
P13-P14		○	
P14-P15		○	
P16-P17		○	
P19-P20		○	
P23-P24		○	
P27-P28	○	○	○

(3) 圧縮強度・静弾性係数試験

圧縮強度・静弾性係数試験は、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮試験方法」およびJIS A 1149「コンクリートの静弾性試験方法」により実施した。

圧縮強度試験時、コア側面に貼り付けた2枚のひずみゲージ(検長60mm)により、縦ひずみの測定を行い、(式5.2)および(式5.3)で圧縮強度および静弾性係数を算出した。また、コア供試体の端面処理

は研磨処理とした。

$$f_c = P / A$$

f_c : 圧縮強度 (N/mm²)
 P : 最大荷重 (N)
 A : 断面積 (mm²)

(式5.2)

$$E_c = (S_1 - S_2) / (\epsilon_1 - \epsilon_2) \times 10^{-3}$$

(式5.3)

E_c : 静弾性係数 (KN/mm²)
 S_1 : 最大荷重の1/3に相当する応力 (N/mm²)
 S_2 : 縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力 (N/mm²)
 ϵ_1 : 応力 S_1 によって生じる縦ひずみ
 ϵ_2 : 50×10^{-6}

(4) EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析

コア試料全断面に対して、JSCE-G574-2013「EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法」により、C1(塩素)、C(炭素)、Ca(カルシウム)、及びSi(珪素)の4元素について、面分析を行う。なお、C1およびCは、それぞれ塩害および中性化の進行状況を、CaおよびSiはそれぞれセメントペーストおよび骨材の分布状況を確認するために選定した。

また、C1については、同基準の付属書3(参考)「EPMAによるコンクリートの濃度分布の作成方法」を参考に、塩化物イオンの濃度分布を作成する。

EPMA用試料の加工概要を図-2.2に示す。EPMA法は分析可能な試料の大きさが最大80mm×80mmであるため、1回でコアの高さの80mm分しか分析できない。そこで、同図に示すように、コアを幅80mm×高さ140mm程度の板状に加工し、それを更に上下に2分割し、コア1本当たり上下の2箇所で行い、上下2箇所の分析結果を合わせて床版全断面の面分析結果を得ることとした。

その後、試料サイズが縦80mm、横80mmとなるように切り出した試料を樹脂埋め込み後、研磨紙を用いて測定面の鏡面研磨を行った。最後にエタノールで超音波洗浄をした後、減圧乾燥により48時間以上乾燥させた試料を真空蒸着装置(日本電子(株)JEE-400)によって金蒸着を行い、EPMA測定用試料とした。

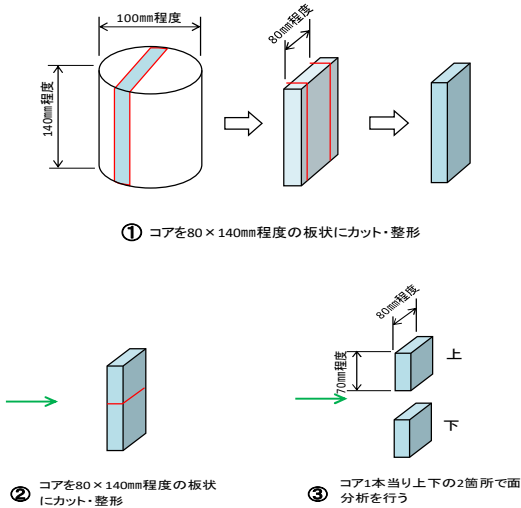
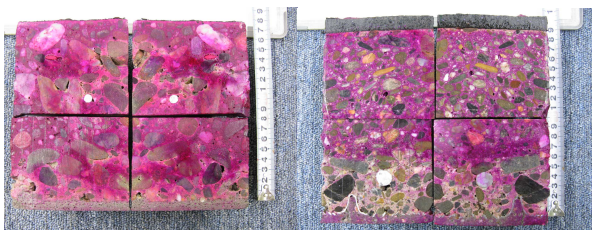


図-2.2

3. 試験結果

(1) 中性化深さ試験

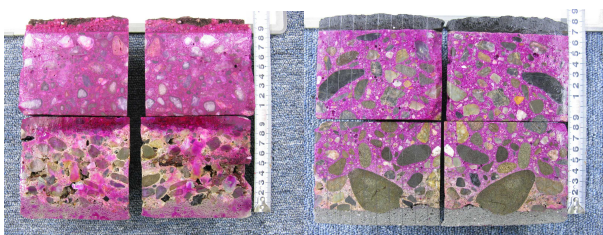
中性化試験の実施状況写真は以下の写真-3.1～写真-3.5のとおりである。



中性化状況:P2-P3

中性化状況:P6-P7

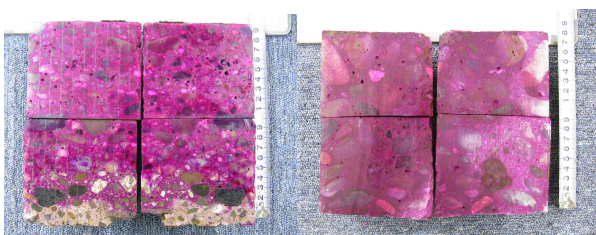
写真-3.1



中性化状況:P14-P15

中性化状況:P16-P17

写真-3.2



中性化状況:P19-P20

中性化状況:P23-P24

写真-3.4

表-3.1 中性化深さ測定結果

径間No.	測定値 (mm)									平均 中性化 深さ (mm)	最大 中性化 深さ (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
P2-P3	28.0	22.0	22.0	28.0	27.0	25.0	20.0	22.0	17.0	23.4	28.0
P6-P7	60.0	57.0	57.0	55.0	55.0	57.0	65.0	65.0	62.0	59.2	65.0
P10-P11	32.0	30.0	30.0	32.0	30.0	25.0	23.0	27.0	21.0	27.8	32.0
P13-P14	55.5	50.0	49.0	54.5	55.0	53.0	53.0	51.0	54.0	52.8	55.5
P14-P15	77.0	78.0	77.0	78.5	75.0	76.0	79.0	77.0	80.0	77.5	80.0
P16-P17	32.0	35.0	40.0	38.0	35.0	30.0	27.0	30.0	40.0	34.1	40.0
P19-P20	15.0	15.0	14.0	13.0	18.0	20.0	21.0	15.0	15.0	16.2	21.0
P23-P24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P27-P28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

平均中性化深さはコア試料の採取箇所によって大きく異なり、全く中性化がみられないコアから 80 mm 近くまで中性化が進行しているコアまで様々であった（表-3.1）。これは、淀川大橋建設当初に打設された床版コンクリートの暴露環境が供用開始以降その位置によって異なった可能性が考えられる。また、後述するように圧縮強度及び静弾性係数の試験結果にも大きなばらつきが認められたことから、コア試料の採取箇所によってコンクリート品質が異なり、これが中性化の進行に影響を及ぼした可能性が考えられる。

(2) 含有塩化物イオン量試験

含有塩化物イオン量

表-3.2 含有塩化物イオン量試験結果

径間No.	塩化物イオン濃度C1 ⁻ (%)			塩化物イオン量C1 (kg/m ³)		
	35-45 mm	75-85 mm	115-125 mm	35-45 mm	75-85 mm	115-125 mm
P2-P3	0.025	0.018	0.015	0.58	0.41	0.35
P6-P7		0.015			0.35	
P10-P11		0.015			0.35	
P13-P14		0.011			0.25	
P14-P15		0.018			0.41	
P16-P17		0.011			0.25	
P19-P20		0.017			0.39	
P23-P24		0.011			0.25	
P27-P28	0.024	0.012	0.012	0.55	0.28	0.28

コンクリート中の塩化物イオン量について、配合設計における現在の基準 (0.30 kg/m³ 以下) に照らすと、コア試料の採取箇所や床版の高さ方向によって当該基準値を超えるものがやや多く認められた（表-3.2）。しかしながら、一般的な鉄筋の腐食発生限界値 (1.2 kg/m³)^{*}に到達するものはなく、淀川大橋の旧床版コンクリートにおいて塩害による劣化は生じていないと考えられる。

※土木学会のコンクリート標準示方書〔維持管理編〕2018年制定版では「類似の構造物の点検結果がない場合には、設計や施工記録等の情報からセメントの種類および水セメント比を確認した上で、式により腐食発生限界塩化物イオン濃度を設定してよい」とされているが、淀川大橋の床版コンクリートは建設後約100年が経過しており配合条件が不明であるため、ここでは配合条件によらない2007年制定版の値を一般的な鉄筋の腐食発生限界値とした。

(3) 圧縮強度・静弾性係数試験

試験結果を表-3.3に、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-3.6に、応力-ひずみ曲線を図-3.7~図-3.9に示す。

なお、表-3.3には既往文献[1]に基づき、直径50mmコアの圧縮強度に補正係数1.12を乗じて直径100mmコアの圧縮強度を推定した値を参考値として表記している。

表-3.3 圧縮強度、静弾性係数試験結果

径間 No.	平均直径 (mm)	平均高さ (mm)	h/d	高さ補正	質量 (g)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度参考値* (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
P2-P3	49.3	98.6	2.00	1.00	446	120.0	62.8	70.4	38.6
P6-P7	49.3	96.7	1.96	1.00	425	72.5	38.0	42.6	31.2
P10-P11	49.3	98.3	1.99	1.00	439	103.0	54.0	60.5	34.5
P13-P14	49.4	97.8	1.98	1.00	438	70.8	36.9	41.3	35.8
P14-P15	49.3	97.9	1.98	1.00	433	67.4	35.3	39.5	19.7
P16-P17	49.4	97.8	1.98	1.00	430	58.3	30.4	34.0	27.0
P19-P20	49.3	98.5	2.00	1.00	425	71.9	37.6	42.1	25.5
P23-P24	49.4	97.8	1.98	1.00	430	59.7	31.2	34.9	28.9
P27-P28	49.4	98.6	2.00	1.00	436	78.2	40.8	45.7	32.3

※直径50mmコアの圧縮強度に補正係数1.12を乗じて、直径100mmコアの圧縮強度を推定した値

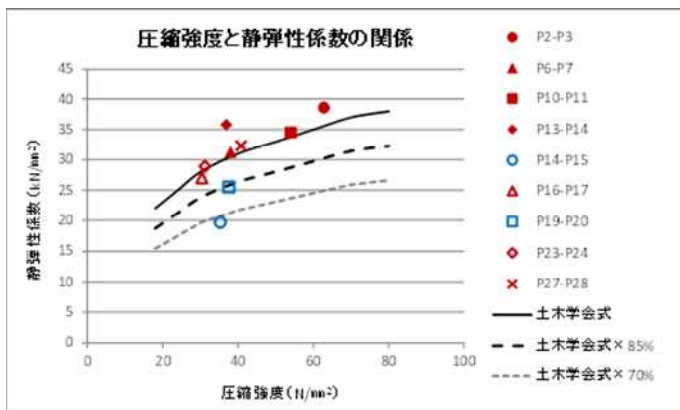


図-3.6 圧縮強度と静弾性の関係

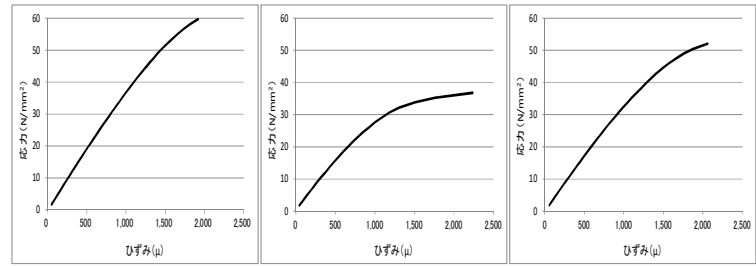


図-3.7 応力-ひずみ曲線
(左：P2-P3、中：P6-P7、右：P10-P11)

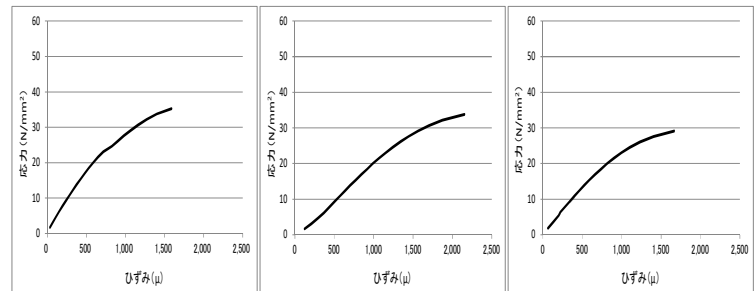


図-3.8 応力-ひずみ曲線
(左：P13-P14、中：P14-P15、右：P16-P17)

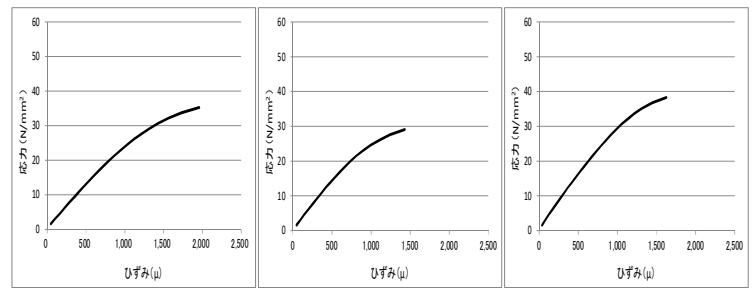


図-3.9 応力-ひずみ曲線
(左：P19-P20、中：P23-P24、右：P27-P28)

コアの圧縮強度及び静弾性係数は、淀川大橋における採取箇所によって大きく異なることが判明した。特に、圧縮強度については試験結果に大きなばらつきが認められたが、最低でも30N/mm²（参考値）の圧縮強度を有することが確認された。静弾性係数については一部を除きコンクリート標準示方書〔設計編〕記載の土木学会式に基づく算定値と概ね同じような傾向を示した。なお、P14-15とP19-P20が土木学会式の値を下回っている原因としては、骨材の品質の影響も考えられるが、他の径間で使用されている骨材と外観上大きな違いが認められないことから、恐らく長年の輪荷重の繰り返し作用の影響で内部に微細なひび割れが発生し、ひずみが大きくなった可能性の方が高いと考えられる。旧床版のコンクリート配合は不明だが、既往の調査資料[2]によると淀川大橋建設当時の床版の強度設計値は135kgf/cm²（13N/mm²）であり、全ての試料で当該強度を大きく上回っている。加えて、現在の配

合で想定される一般的な設計基準強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ をも満足している。これは、淀川大橋が建設当時においても重要構造物であるとの認識の下、より安全側に設計され慎重に施工されたものと考えられる。

(4) EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析

各元素のマッピング像を図-3.10 及び図-3.13～図-3.15 に示す。なお、各図中に示されたカラーバーは元素毎に濃度スケールを示したものであり、赤～橙で示される部分が高濃度、青～黒で示される部分が低濃度の領域を表している。

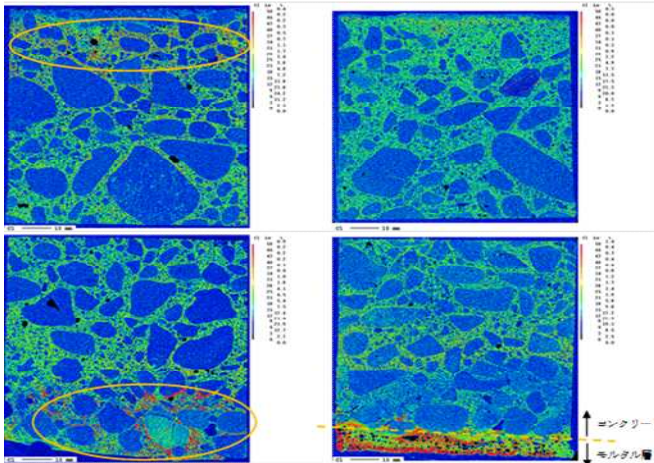


図-3.10 Cl (塩素) のマッピング像
(左 : P2-P3、右 : P27-P28)

図-3.10 は Cl (塩素) の濃度分布を表したものである。径間 P2-P3 の試料では旧床版コアの上面側及び下面側に Cl の高濃度領域 (図中丸印) が認められるものの、内在塩分量を表していると考えられるコアの中間部は Cl が低濃度でほぼ一様に分布していることが分かる。一方、径間 P27-P28 の試料では旧床版コンクリートの下面に敷設されたモルタル層において Cl の高濃度領域 (図中破線下) が認められるものの、コンクリート中には高濃度領域がほとんど認められないことが分かる。これより、旧床版コンクリート中の塩化物イオン濃度は高さ方向によって異なり、凍結防止剤の散布や飛来塩分の影響等により旧床版の上下面では塩化物イオンが浸透し、比較的高濃度に分布するものと推察される。

図-3.11 は C (炭素) の濃度分布を表したものである。マッピング像の外周縁辺部に赤い高濃度領域が認められる領域は埋め込み樹脂部分に相当し、コンクリート組織内部に認められる赤い高濃度領域も同様にコンクリートの空隙に浸透した樹脂の組成を示しているとみられる。

径間 P2-P3 の試料では旧床版コアの上面側及び下面側に黄緑色で示される C の高濃度領域 (図中丸印) が

認められ、その部分で中性化が進行しているとみられる。一方、径間 P27-P28 の試料ではコンクリート下面のモルタル層において黄緑色で示される C の高濃度領域 (図中破線下) が顕著に現れているが、コンクリート下層部にも同様の高濃度領域が若干認められ、その部分で中性化が進行しているとみられる。

なお、(1) 中性化深さ試験で示した径間 P2-P3 及び P27-P28 の平均中性化深さはそれぞれ 23.4mm 及び 0.0mm であったが、用いた試料は同一径間で採取された別のコアであることに注意が必要である。

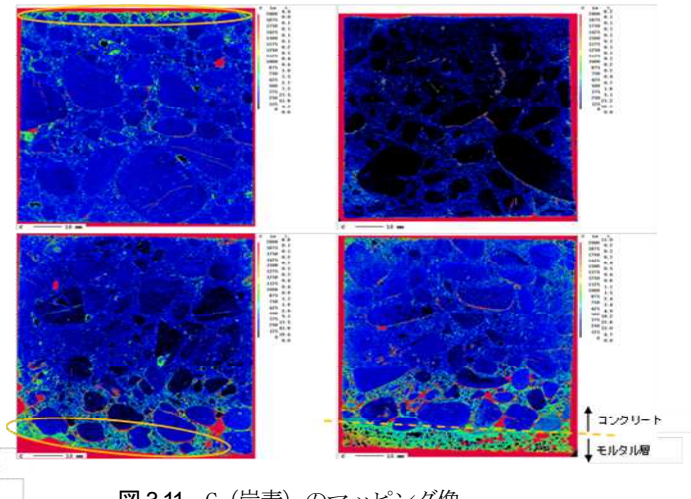


図-3.11 C (炭素) のマッピング像
(左 : P2-P3、右 : P27-P28)

図-3.12 は Ca (カルシウム) の濃度分布を表したものである。赤色～黄色で示される高濃度領域はセメントペーストの存在領域を示している。ここで P2-P3 と P27-P28 を比較すると、P2-P3 は P27-P28 に比べてカルシウム濃度が高いことが分かる。これは、実際に打設されたコンクリートの水セメント比が径間によって異なっていたことを表している可能性が考えられる。即ち、P2-P3 では圧縮強度が $62.8\text{N}/\text{mm}^2$ と最も大きいことから水セメント比が特に小さくカルシウム濃度が高いのに対し、P27-P28 では $40.8\text{N}/\text{mm}^2$ と十分な圧縮強度を有するものの水セメント比としては P2-P3 よりも大きくカルシウム濃度が比較的低く検出された可能性が考えられる。

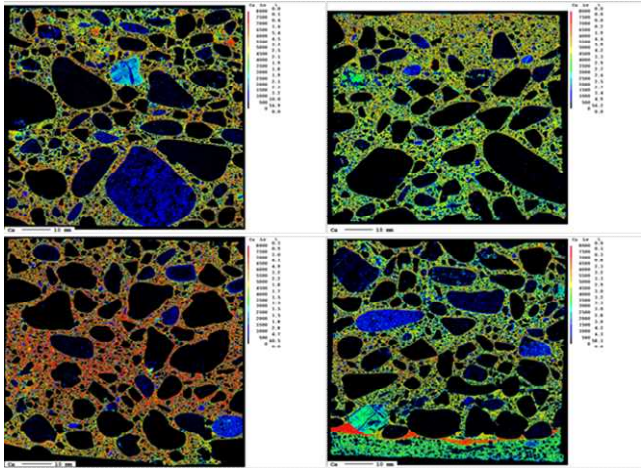


図-3.12 Ca (カルシウム) のマッピング像
(左 : P2-P3、右 : P27-P28)

図-3.13 は Si (珪素) の濃度分布を表したものである。橙色～黄緑色で示される高濃度領域は骨材の存在領域を示している。これより、珪素の濃度は骨材粒子毎に異なり粒子内部の分布状況も様々であることから、様々な岩種から構成される川砂利等が使用されたことを表していると言える。

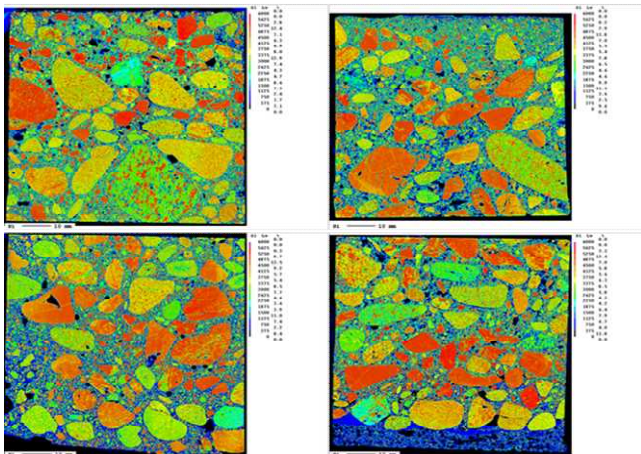


図-3.13 Si (珪素) のマッピング像
(左 : P2-P3、右 : P27-P28)

4. まとめ

大阪国道事務所所管の「国道 2 号淀川大橋床版取替他工事」の実施に伴い採取されたコア試料の一部を用いて室内試験を行った結果は以下のとおりである。

中性化深さはコア試料の採取箇所によって大きく異なり、全く中性化がみられないコアから 80 mm 近くまで中性化が進行しているコアまで様々であった。その理由として、後述する圧縮強度及び静弾性係数試験

においても大きなばらつきが認められたことから、コア試料の採取箇所によってコンクリート品質が異なり、これが中性化の進行に影響を及ぼした可能性が考えられる。

含有塩化物イオン量試験では、コア試料の採取箇所や床版の高さ方向によって配合設計における現在の基準 (0.30 kg/m^3 以下) をやや超えるもの ($0.35 \sim 0.58 \text{ kg/m}^3$) が認められたものの、一般的な腐食発生限界値 (1.2 kg/m^3) に到達するものはなく塩害による劣化は生じていないものと考えられる。

圧縮強度・静弾性係数試験では、コア試料から鉄筋を取り除くため直径 50mm の円柱供試体に特殊整形を施した上で試験を行った。圧縮強度・静弾性係数は、同様にコア試料の採取箇所によって大きく異なり、大きなばらつき ($30.4 \sim 62.8 \text{ N/mm}^2$ 及び $19.7 \sim 38.6 \text{ kN/mm}^2$) が認められた。但し、圧縮強度は参考値であるが、最低でも 30 N/mm^2 を有することが確認された。

E PMA法によるコンクリート中の元素の面分析結果からも、中性化、塩化物イオン濃度については、それぞれの試験結果とほぼ同様の結果が得られ、橋梁の区間によって水セメントが異なっていたり、骨材に川砂利等が使用されていたなど、建設当時の施工状況がうかがえる。

淀川大橋に係る平成 25 年度の定期点検結果によると「主桁、主構トラス、縦桁及び対傾構には腐食が生じ、床版には剥離・鉄筋露出が認められ、建設後約 90 年が経過した現状にあっては抜本的な大規模修繕が必要」と診断された。

従って、淀川大橋の構造物としての健全度は、腐食や剥離等による損傷が進行し、床版自体を更新する必要があると評価された次第だが、上記室内試験結果から旧床版コンクリートの品質に着目すると、建設後約 90 年が経過した割には塩害による劣化や中性化による劣化も少なく、コンクリート組成としては良好な状態であることが確認出来た。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート工学年次論文集、第22巻、第1号、PP427-432、2000年6月
- 2) 大正時代の鉄筋コンクリート床版がどうして長期使用に耐えられたのか！、日本橋梁建設協会技術委員会床版小委員会・保全委員会、平成28年度橋梁技術発表会