

# 論文 建設から約 100 年経過した配水池におけるコンクリートの溶脱評価

関 健吾<sup>\*1</sup>・横関 康祐<sup>\*2</sup>・取違 剛<sup>\*1</sup>・木村 彩永佳<sup>\*3</sup>

**要旨:** 浄水場や配水池などに用いられるコンクリートは、水道水等の作用によるコンクリートからの Ca 溶脱によって劣化するものの、使用材料および配合条件が Ca 溶脱に及ぼす影響については十分に解明されていない。そこで、これらの条件が Ca 溶脱に及ぼす影響の評価を目的として建設から約 100 年経過した配水池におけるコンクリートの Ca 溶脱の状態を調査し、調査結果に基づき解析的検討を行った。その結果、セメント鉱物の含有割合、表層の炭酸化が Ca 溶脱に影響を及ぼすことが分かった。さらに、本研究にて得られた知見に基づき、Ca 溶脱に対する抵抗性の高い材料・配合条件を示すとともに、耐久性設計の考え方の一例を示した。

**キーワード:** 溶脱, 溶解平衡, 数値解析, 耐用年数

## 1. はじめに

我が国の水道施設は概ね 100 年の歴史がある。我が国の水道施設における投資額の推移<sup>1)</sup>を図-1 に示す。水道施設の法定耐用年数は 60 年、管路で 40 年とされているが、図より、今後、法定耐用年数を迎える構造物が急増していくことが分かり、今後は施設の維持管理が重要となる。コンクリート構造物の耐久性を照査する際、塩害や中性化の進行に関する予測式は土木学会のコンクリート標準示方書【設計編】などに示されている。一方、浄水場や配水池などに用いられるコンクリート（以下、水槽コンクリート）において主たる劣化と考えられるセメント成分の溶脱については評価手法が確立されていないのが現状である。その背景としては、溶脱の進行は非常に緩やかであるため、一般的な構造物では劣化要因となりにくい点が挙げられる。しかし、近年では設計耐用年数 100 年の構造物が増加してきており、それに伴ってコンクリートにも長期の耐久性が求められていることから、溶脱についても十分な検討を行うことが重要である。

そこで本研究では、使用材料および配合条件がコンクリートからの Ca 溶脱に及ぼす影響の評価を目的として、建設から約 100 年経過した水槽コンクリートについて Ca 溶脱の状態を調査し、その後、数値解析によって使用材料および配合条件が Ca 溶脱に与える影響を評価するとともに、耐久性設計の考え方の一例を示した。

## 2. 約 100 年経過したコンクリートの劣化調査

### 2.1 調査対象および試料採取箇所

劣化調査を実施した水槽コンクリートの概要を表-1 に示す。調査対象は、1913 年に建設された愛知県名古屋市内に位置する配水池躯体の無筋コンクリートであり、建設から 98 年経過した時点で水道水（流水）と接してい

た配水池躯体の隔壁表面（以下、隔壁）および、建設から約 35 年まで外気に接しており、その後、配水池全体が埋め戻されてからの約 63 年は地盤と接していた配水池躯体の側壁地盤側（以下、側壁）の 2 箇所から φ100mm および φ150mm のコアを 1 本ずつ採取し、試験に供した。

### 2.2 試験項目および試験方法

#### (1) Ca の溶脱深さ（EPMA）

Ca の溶脱深さを測定するため、EPMA 分析を実施した。測定面は、水道水と接していた隔壁および地下水を含む地盤と接していた側壁の表面付近とした。採取した φ100mm のコアを割裂し、幅 4cm、表面からの深さ 8cm までの位置について分析を実施した。

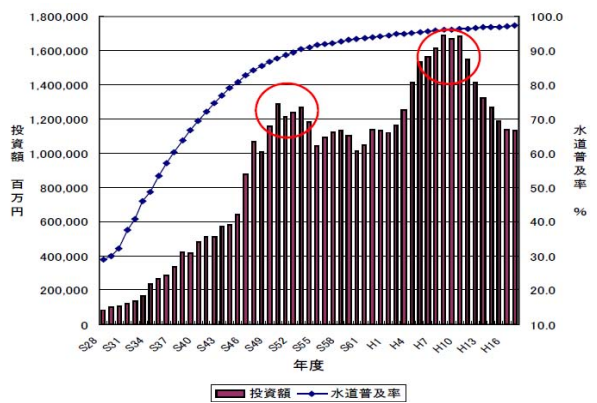


図-1 水道への投資額の推移（平成 17 年価格）<sup>1)</sup>

表-1 調査対象構造物の概要

名称	隔壁	側壁
構造物	配水池	
建設年	1913 年	
経過年数	98 年	
部材厚	250~700mm	1500~2000mm
対象部位	隔壁表面	側壁地盤側
接触環境	水道水（流水）	建設後 35 年：外気 →その後 63 年：地盤

\*1 鹿島建設（株） 技術研究所 土木材料グループ 修士（工学）（正会員）

\*2 鹿島建設（株） 土木管理本部 土木技術部 博士（工学）（正会員）

\*3 鹿島建設（株） 技術研究所 土木材料グループ（正会員）

## (2) 配合推定

ギ酸溶除法にて配合推定を実施し、単位水量、単位セメント量および単位骨材量を算出した。また、φ150mmのコアを用いて長径5mm以上の骨材が占める面積を測定し、単位粗骨材量を算出した。なお、細骨材および粗骨材の密度はいずれも2.65g/cm<sup>3</sup>と仮定し、セメントの密度は文献<sup>2)</sup>に示される1911年当時の普通ポルトランドセメントの密度である3.01g/cm<sup>3</sup>とした。

## (3) 水和物の定量

Ca溶脱の影響を受けていない側壁の中心部の試料を用いて、鈴木らの提案する方法<sup>3)</sup>に基づき水和物の含有量を定量した。定量対象は水酸化カルシウム、炭酸カルシウム、シリカゲル、エトリンガイト、モノサルフェート、モノカーボネート、付着水とした。なお、本研究において、微量で検出されない鉱物および定量対象外の鉱物は全てCSHに含まれるものとして仮定した。

## 2.3 調査結果

### (1) Caの溶脱深さ (EPMA)

EPMAによる分析結果を図-2および図-3にそれぞれ示す。図-2および図-3中に示す破線に囲まれた部分のうち、ペーストと考えられる部分の分析結果を用いて表面からのCaの濃度分布を算出した。算出したCaの濃度分布を図-4および図-5にそれぞれ示す。

本研究では、EPMA分析結果を目視で判断することで、

溶脱劣化の過程を、Caの溶脱していない領域(健全)、コンクリートからCaの溶脱が開始した領域(1)、溶脱したCaが何らかの影響で沈殿または残存した領域(2)、Caの溶脱が急激に進む領域(3)、Caが消失した領域(4)の5つに区分することとした。図に示すとおり、隔壁は、表面から26mmまで溶脱しており、領域(1)~(4)が確認された。なお、同試料の中性化深さをJIS A 1152に準じて測定したところ、16.3mmであった。供用開始から水道水と接していたことを考慮すると、Ca溶脱によって中性化したものと考えられる。側壁は、表面から36mmまで溶脱しており、領域(1)~(3)が確認され、領域(4)は確認されなかった。中性化深さは11.2mmであったが、前述のとおり、側壁は建設から約35年にわたって外気に接していたことから、この間に大気中のCO<sub>2</sub>と反応し、中性化が進んだ可能性がある。

## (2) 配合推定

配合推定結果を表-2に示す。表より、隔壁は単位水量が151kg/m<sup>3</sup>、W/Cが53.2%であり、現在のスランブコンクリートに近い配合であったと推察される。一方で、側壁は単位水量が116kg/m<sup>3</sup>、W/Cが56.9%であり、硬練りの配合であったと考えられ、隔壁と側壁ではコンクリートの種類を使い分けていた可能性がある。隔壁は厚さ250~700mmの比較的薄い壁であることから軟練りのコンクリートを使用し、側壁は厚さ1500~2000mmの厚い

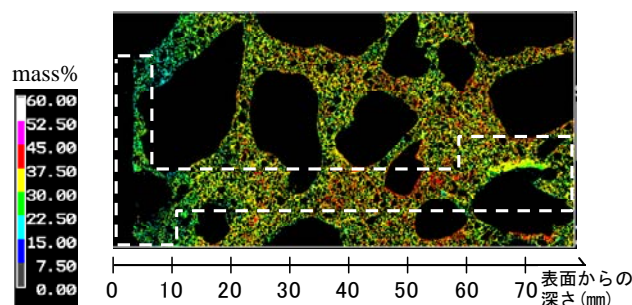


図-2 EPMAによる分析結果(隔壁, CaO)

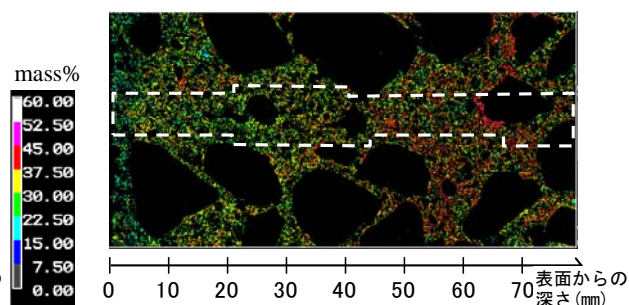


図-3 EPMAによる分析結果(側壁, CaO)

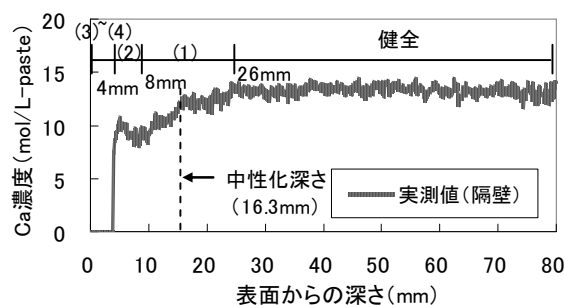


図-4 Caの濃度分布(隔壁)

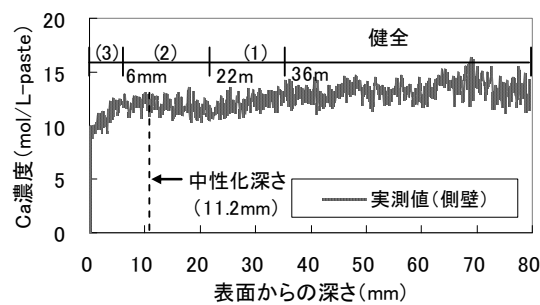


図-5 Caの濃度分布(側壁)

表-2 配合推定結果

記号	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				単位量 (L/m <sup>3</sup> )			
				水	セメント	細骨材	粗骨材	水	セメント	細骨材	粗骨材
隔壁	53.2	24.0	40	151	284	477	1511	151	94	180	570
側壁	56.9	29.8	40	116	204	636	1497	116	68	240	565

表-3 水和物の定量結果

記号	建設年 (年)	試験実施 時の材齢 (年)	セメント水和物の含有量(mass%)							
			水酸化 カルシウム	炭酸 カルシウム	シカ ゲル	エトリ ン ガイト	モノサル フェート	モノカー ボネート	付着 水	CSH
側壁	1913	98	5.2	0.0	2.5	3.1	—	9.4	1.5	78.2
既往の研究 <sup>5)</sup>	1901	110	0.0	0.5	0.2	1.1	—	3.6	0.5	94.1
既往の研究 <sup>6)</sup>	1898	102	4.0	4.0	1.0	3.0	19.0	—	4.0	65.0

壁であることから硬練りのコンクリートを使用したものと考えられる。これは、文献<sup>2)</sup>に示される「対象部材によって硬練り、中練り、軟練りのコンクリートを使い分けた」とされる記述と一致する。さらに文献<sup>2)</sup>によると、当時のコンクリートは容積割合でセメント:砂:砂利を1:2:5もしくは1:3:6とする配合が基本であったとされる。すなわち、s/aは29~33%程度であったと考えられる。本研究における隔壁および側壁のs/aは24.0%および29.8%であり、文献<sup>2)</sup>に示される値とほぼ同等であった。

写真-1に隔壁のコア外観を示す。写真より、粒径の大きな粗骨材が多いことが分かる。久田らによると、骨材の比表面積が減少すると物質の移動度は減少する<sup>4)</sup>とされていることから、当該構造物は、Gmax20mm程度の骨材を使用することが多い現代のコンクリートと比較して、Ca溶脱に対する抵抗性が高い可能性がある。

3) 水和物の定量

水和物の定量結果を表-3に示す。なお、表中には比較として既往の研究<sup>5), 6)</sup>において得られている、建設から約100年経過した水槽コンクリートの調査結果を示した。表より、側壁の水和物はCSHが78.2%を占めており、モノカーボネートが9.4%、水酸化カルシウムが5.2%であった。既往の研究<sup>6)</sup>によると、材齢56日における水酸化カルシウム量は20%程度であるのに対し、本研究では、Caの溶脱や炭酸化の影響を受けていない健全部においても水酸化カルシウム量は5.2%と少なかった。この理由として、既往の研究<sup>5)</sup>に示されるとおり、長期の材齢経過に伴い、水酸化カルシウムが他の水和物に変化したものと推察される。モノカーボネートが多い理由として、未水和セメントが空気中のCO<sub>2</sub>と反応した可能性がある。

3. 数値解析による溶脱抵抗性の評価

水道水もしくは地盤と長期にわたって接した水槽コンクリートの溶脱抵抗性を数値解析により評価した。まず、前述の調査結果に基づいて解析を実施し、用いた解析手法の妥当性について検証を行った。その後、溶脱抵抗性を高めるための使用材料および配合条件を数値解析によって検討した。数値解析には、筆者らがこれまでに開発した化学平衡と物質移行に関する数値解析モデル<sup>6), 7)</sup>を用いた。これは、質量保存則を基本とし、図-6に示す化学平衡に加えて、セメント系材料中のイオンの拡散およびセメント系材料からのCa溶脱に伴う物質移行

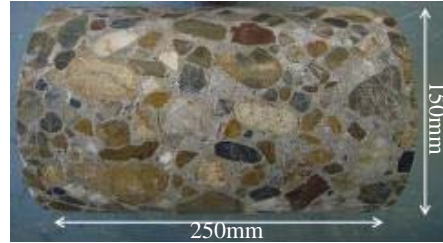


写真-1 コア外観 (隔壁)

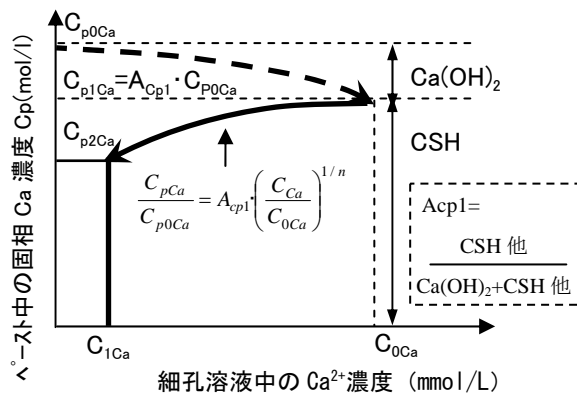


図-6 溶解平衡関係の概念図

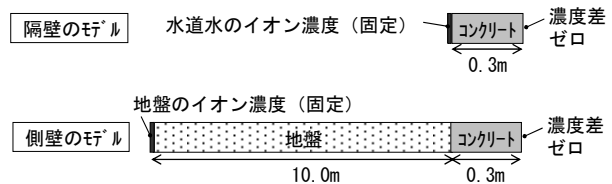


図-7 解析モデル

表-4 境界条件

境界条件	pH	イオン濃度 (mmol/L)						
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
水道水	7.3	0.000	0.141	0.135	0.033	0.122	0.283	0.029
地盤	7.6	0.000	0.931	0.604	0.217	0.671	1.048	0.008

特性の変化を考慮できるものである。本モデルの基礎方程式を式(1)に示す。

$$\frac{\partial(\phi \cdot C_i)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{eff}^i \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + Q_i \quad (1)$$

ここに、C<sub>i</sub>: 細孔溶液中のイオン種 i の濃度(mol/L)、  
 φ: 空隙率、D<sub>eff</sub><sup>i</sup>: イオン種 i の見かけの拡散係数(m<sup>2</sup>/s)、  
 Q<sub>i</sub>: イオン種 i の単位時間・単位体積あたりの溶出量

3.1 解析モデル

解析モデルを図-7に、境界条件を表-4に示す。隔壁はコンクリート要素の左端に水道水のイオン濃度を与え、側壁は地盤にイオン濃度を与えた。両モデルともに、右端は濃度差がないものとした。

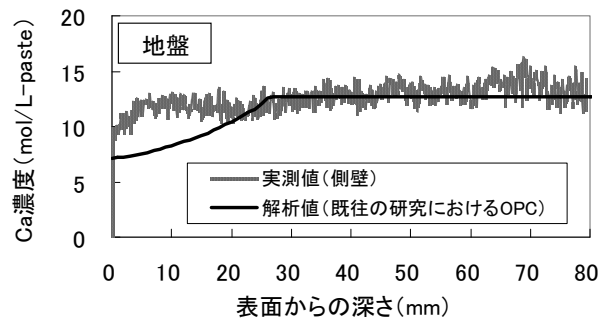
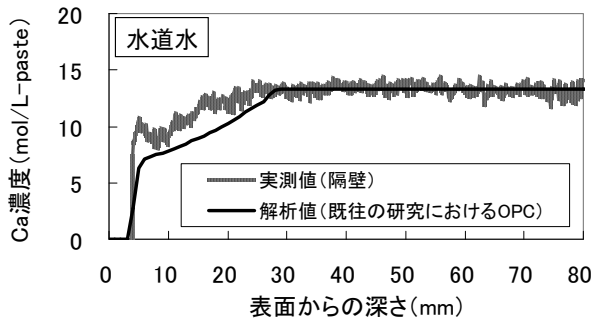


図-8 解析結果 (Case1)

### 3.2 解析条件および解析結果

#### (1) 既往の解析パラメータを用いた評価 (Case1)

Case1 は、図-6 に示す溶解平衡関係のうち、全Ca水合物中における水酸化カルシウムの割合を決定するパラメータ  $A_{cp1}$  を図-9 に示すとおり、材齢98年の間に0.82から0.948へと線形に変化するものとし、溶解平衡関係を決定するその他のパラメータは、既往の研究<sup>6)</sup>に示される普通ポルトランドセメント（以下、OPC）の値とした。また、配合条件（W/C、単位セメント量、単位骨材量）は表-2 に示す結果を用いた。

解析結果を図-8 に示す。図中には、EPMA による実測値を併記した。図より、いずれの解析においても、解析値は概ね実測値を再現できているものの、特に領域(2)に相当する部分について実測値との差が見られた。そこで、解析条件の見直しを行った。

#### (2) セメントの鉱物組成の影響評価 (Case2)

Case2 では、大正初期におけるセメントの鉱物組成を調査し、溶解平衡関係を決定するパラメータ（以下、溶解平衡パラメータ）を見直した。まず、当該構造物に使用されているセメントの鉱物組成を評価するため、文献<sup>2),8)</sup>に示される1911年および1912年のセメントの化学組成（表-5）を用い、Bogue式<sup>9)</sup>によりセメント鉱物の含有割合を算出した。算出結果を図-10 に示す。比較として、図中には文献に示される最近のOPC、中庸熱ポルトランドセメント（以下、MPC）および低熱ポルトランドセメント（以下、LPC）のセメント鉱物含有割合<sup>9)</sup>を併記した。図より、1911年頃のOPCは、現在のLPCにやや近い鉱物組成であることが分かった。ただし、現在のLPCと完全に同一ではないと考えられるので、表-6 に示す既往の研究<sup>6)</sup>におけるセメント種類ごとの溶解平衡パラメータを参考とし、当該構造物が建設された当時のOPCのn値（CSHの溶解平衡曲線を決定するパラメータ）、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶解度積および  $C_{1Ca}$ （CSH 溶出時の液相  $\text{Ca}^{2+}$ 濃度）を、OPCとLPCの平均値を用いることとした。

解析結果を図-11 に示す。図より、溶解平衡パラメータをOPCとLPCの平均値とすることで、特に隔壁を対象とした解析において、解析値は実測値に近づいた。このことから、当該構造物が建設されたものと同時期（大

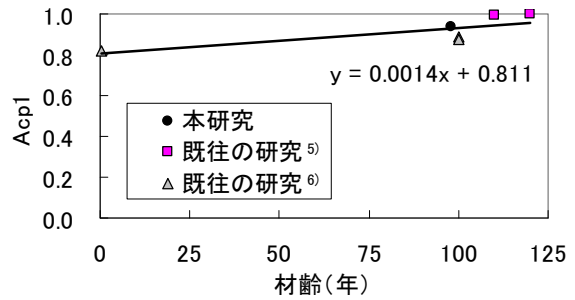


図-9 材齢と  $A_{cp1}$  の関係

表-5 セメントの化学組成 (%)

	西暦	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
文献 <sup>2)</sup>	1911年	23.6	5.4	2.4	61.6	1.7	1.6
文献 <sup>8)</sup>	1912年	22.5	7.5	3.0	63.0	-	-
平均	-	23.1	6.5	2.7	62.3	1.7	1.6
参考 <sup>9)</sup>	2002年	20.7	5.3	2.91	64.3	1.4	2.1

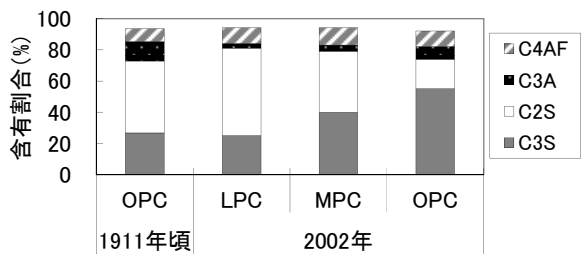


図-10 セメント鉱物量の比較

表-6 溶解平衡パラメータおよび解析条件<sup>6)</sup>

セメント	n 値 (-)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶解度積 (logKsp)	$C_{1Ca}$ (mmol/L)
OPC	4.5	-4.39	1.5
LPC	20.0	-4.54	1.5
OPC(1911年)	12.0	-4.47	1.5

正初期) に建設された構造物について解析的に Ca 溶脱の評価を行う際は、溶解平衡パラメータに留意する必要があることが分かった。また、LPCのようにn値の大きいセメントを用いることで、CSHの溶解傾向が変化し、表面付近におけるCaの溶脱を抑制できることが分かった。一方、表層部分の沈殿が生じていると推定される分布形状は模擬できていない。

#### (3) 表層部における炭酸化の影響評価 (Case3)

前述の調査結果より、側壁は表層部分が中性化してい

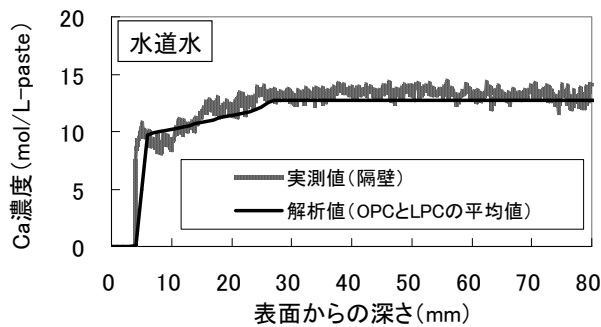


図-11 解析結果 (Case2)

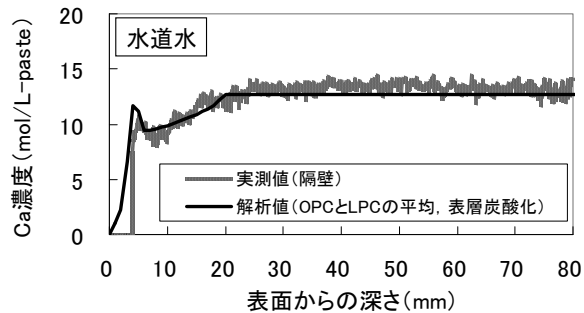
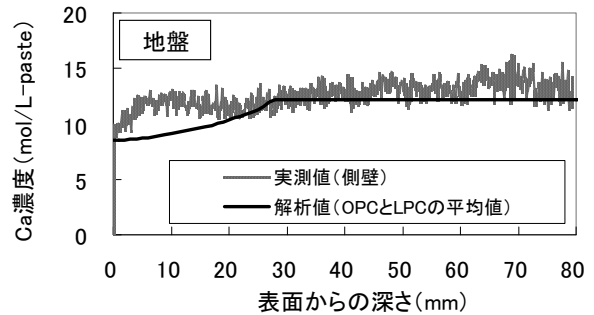
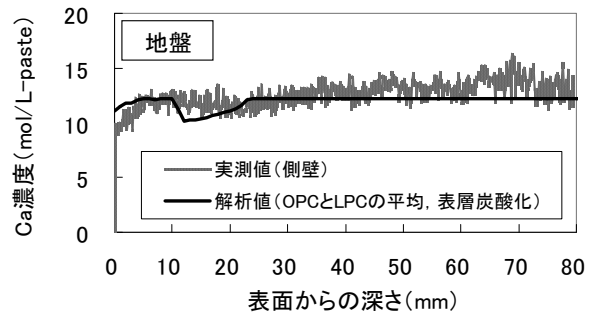


図-12 解析結果 (Case3)



た。そこで、Case3 では、側壁におけるコンクリート要素の地盤側 11mm は炭酸化していたものとして解析を実施した。隔壁については、コンクリートの打込み完了から供用までの間（約 4 年）に、4mm 炭酸化していたものとした。解析への炭酸化の反映方法は既往の研究<sup>10)</sup>を参考とした。なお、隔壁および側壁ともに、溶解平衡パラメータは、Case2 と同様に OPC と LPC の平均値とした。

解析結果を図-12 に示す。図より、表層の炭酸化を考慮することで、解析値が実測値とほぼ一致した。このことから、長期間の構造物の溶脱評価を行う際は、炭酸化の影響を考慮することが重要である。また、表層を炭酸化させることで、溶脱を抑制できることが分かった。

### 3.3 Ca の溶脱抵抗性を高める配合条件と耐用年数

ここでは、これまでに得られた知見に基づき、水道水と接する水槽コンクリート (RC) の溶脱抵抗性を高めるための配合条件について解析的な検討を行った。検討ケースの設定にあたり、前提条件として、材料分離等を生じない良好なワーカビリティを有し、初期ひび割れ抑制のために W/C やセメント量は大きく変更しないものとした。検討ケースを表-7 に示す。水槽コンクリートに一般的に用いられていると考えられる 24-8-20N を標準とした。対策 1 は標準配合のうちセメント種類を n 値の大きい LPC に変更したものである。対策 2 は LPC を用い、Gmax を 40mm に変更して骨材量を増加し、s/a を小さくしたものである。対策 3 は対策 2 に加えて、溶脱抵抗性の向上を目的として表層 10mm を強制的に炭酸化させたケースである。なお、解析期間は 100 年とした。

溶脱抵抗性を基に耐用年数を評価するためには、限界状態を設定する必要がある。文献<sup>11)</sup>では溶脱限界深さを、

表-7 検討ケース

配合名	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位数 (kg/m <sup>3</sup> )				耐用年数 (3/4Gmax)
					W	C	S	G	
標準	OPC	53.0	46.0	20	172	325	813	955	8年
対策1	LPC	51.0	39.0	40	155	304	713	1116	13年
対策2									70年
対策3 (表層10mmを炭酸化)									100年以上

第三者影響度の観点からは 2/3Gmin としており、耐荷力の観点からはかぶり厚さとして設定している。そこで、本研究ではこれらを参考として、Ca 溶脱の進行に伴いセメントマトリックスが脆弱化し、粗骨材が抜け落ちて送水ポンプが詰まるような場合を想定して限界状態を設定することとした。Ca 溶脱によるセメントマトリックスの脆弱化は溶出したセメント水和物の種類や量によって程度が異なることから、一例として、Ca 濃度が 1% 低下した深さが 3/4Gmax を越えた時点を限界状態とした。

解析結果を図-13 に示す。図より、限界状態に達するまでの期間（以下、耐用年数）は、標準では 7 年であったのに対し、対策 1 では 8 年（1.1 倍）、対策 2 では 47 年（6.7 倍）、対策 3 では 100 年以上（14.3 倍以上）であり、対策を実施することで耐用年数は大幅に向上した。

この理由として、一般的な配合からセメント種類を LPC に変更した対策 1 は、CSH の溶解傾向が変わったことで、耐用年数が向上したものと考えられる。対策 2 は、セメントを LPC とした上で、Gmax を大きくして s/a を低減していることで、骨材周りの遷移帯量が少なくなり、物質移行経路が減少したために耐用年数が長くなったものと考えられる。ここで、材齢 98 年における対策 2 の溶脱深さは 43mm であるのに対し、対策 2 に近い配合条件である前述の隔壁の溶脱深さは 26mm であった。このこ

とから、大正初期のコンクリートは現代のコンクリートよりも溶脱に対する抵抗性が高かったことが分かる。これは、前述のように大正初期のコンクリートはLPCに近いセメントが使用されていたことに加えて、初期の炭酸化によるものと推察される。対策3は、対策2の表層を炭酸化させ、溶解度の低いCaCO<sub>3</sub>を表層に形成することで、耐用年数が大幅に向上したものと考えられる。

次に、水槽コンクリートの性能として重要な100年の間に水道水中に流出するCaの総量の比較を図-14に示す。図より、Caの総流出量は、対策1では標準の38%減、対策2では標準の53%減、対策3では標準の97%減となっており、いずれの対策においてもCaの総流出量を大幅に低減できることが分かった。

以上のように、配合条件を工夫することで、溶脱に対する抵抗性を向上できることが分かった。水槽コンクリートにおけるLCCの向上や、飲料水の水質向上のためにもこれらの対策は有効であると考えられる。ただし、本研究の考え方をもとに算出される構造物の耐用年数は、Caの溶脱に対する限界状態の設定方法によって異なるため、今後更なる検討が必要と考える。

#### 4. 結論

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 材齢98年が経過したコンクリートの溶脱深さは、水道水と接しているもので26mm、地下水と接しているもので36mmであった。
- 2) 大正初期のセメントの鉱物組成および炭酸化深さを考慮することで、溶脱によるCaの分布を解析により精度良く再現できることが分かった。
- 3) 大正初期に建設された水槽コンクリートは、骨材量が多く、現在のLPCに近いセメントが使用されており、結果として現代のコンクリートよりも高い溶脱抵抗性を有していた。
- 4) 使用材料および配合条件を工夫し、さらにコンクリートの炭酸化反応を利用することで、溶脱抵抗性を大幅に向上することができる。

謝辞：本論文で使用したデータの一部は、名古屋市上下水道局より提供頂いた。ここに記して、感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課：水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き，インターネットHP (<http://www.mhlw.go.jp/za/0826/d11/d11-01.pdf>)，p.2，2009.
- 2) 長瀧重義：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，p.54，p.68-69，1995

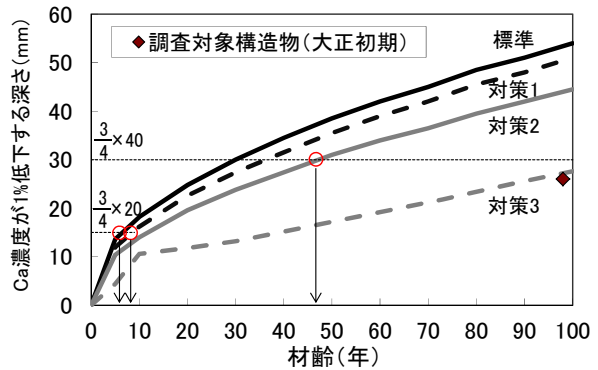


図-13 材齢とCa濃度が低下する深さの比較

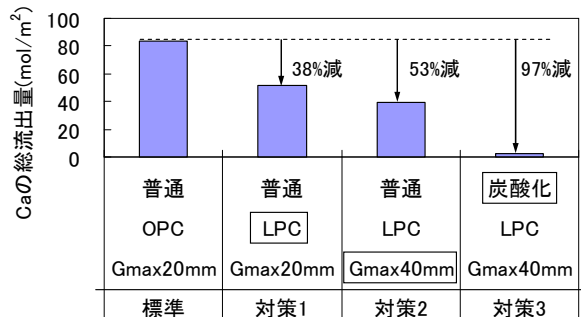


図-14 Caの総流出量の比較

- 3) 鈴木一孝，西川直宏，山出善章，谷口幾哉：コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に関する研究，コンクリート工学論文集，第1巻，第2号，pp.39-49，1990
- 4) 久田真，大即信明，N.B.Diola，桐山和晃：コンクリート中の塩化物イオンの電気泳動に及ぼす骨材の影響，土木学会論文集，No.599/V-40，pp.71-80，1998.8
- 5) 横関康祐ほか：建設から100年以上経過した日本最古のコンクリートの化学的特性に関する研究，鹿島技術研究所年報，Vol.59，pp.55-60，2011
- 6) 横関康祐：コンクリートからの成分溶出を対象とした千年レベルの長期耐久性設計に関する研究，東京工業大学学位論文，2004
- 7) 取違剛，横関康祐，武地真一，大即信明：コンクリート構造物の耐久性能評価ツール LIFE D.N.A.，鹿島技術研究所年報，Vol.57，pp.73-78，2009
- 8) 沢木大介：長期間経過した実構造物中のセメント硬化体のキャラクタリゼーション，東京工業大学学位論文，2010.3.
- 9) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'12，p.6，2012.9
- 10) 横関康祐，渡邊賢三，安田和弘，坂田昇：炭酸化養生によるコンクリートの高耐久化，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.555-560，2002
- 11) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 53 コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状，pp.166-167，2003.6