

[16] 塩分を含む温泉下水中に一年間浸漬された軽量コンクリートの物性

正会員 ○椋井 宏 (大成建設技術研究所)
 正会員 金子 誠二 (大成建設技術研究所)
 正会員 松岡 康訓 (大成建設技術研究所)
 正会員 内藤 隆史 (大成建設技術研究所)

1. はじめに

本研究は 軽量コンクリートを下水処理場内の曝気槽や沈澱池の躯体に直接用いた場合の物理的・化学的耐久性について実験的に検討を行なったものである。実験は、軽量コンクリート及び普通コンクリート供試体を下水処理場内の高速曝気沈澱槽（エアロアクセレータ）中の下水に浸漬して、コンクリートの物理的・化学的性質の経時変化を調べ耐久性を評価しようとしたものである。なお本下水は一部海水の混入していることを特徴としているため化学的耐久性の評価はコンクリートの液接触面からの炭酸化、塩分の浸透能を中心に検討を行なった。浸漬期間は5年とし今回は1年までの浸漬実験結果について報告する。

2. 実験概要

供試体は、表-1に示す配合で製作した。使用セメントは躯体がマスコンクリートになることを考慮して、高炉セメントB種及び比較として普通ポルトランドセメントを用いた。他に軽量コンクリートに 0.5kg/㎡のエポキシコーティングをした供試体を作成した。下水処理場4ヶ所の水質分析試験結果を表-2に示す。データは夏期4回の測定の前平均値である。本下水処理場は、海水を含む温泉水、生活排水を処理し一般に含まれる工業排水は含まれていない。分析は溜水条件も考慮して、2日放置後のMアルカリ度、アグレッシブCO₂の変化をも調べた。これらはともにコンクリートの炭酸化に関連ある水質分析項目である。これらの項目は曝気槽で高く、2日放置後でもその傾向がある。一般に海水はSO₄²⁻/Cl⁻ = 0.14であるのに対し、本下水は0.20とSO₄²⁻の割合が海水よりも大きく、塩分は海水の約1/20の濃度である。供試体は、4週間標準養生（20℃、水中）を行なった後に表-3に示す測定項目の初期値を測定し、図-1に示す方法で曝気槽（高速曝気沈澱槽）中に浸漬した。また他に基準として同じ配合の供試体を標準養生槽（20℃、水中）中に浸漬した。浸漬期間は各々3ヶ月、6か月、1年である。供試体は各浸漬期間を経た後回収し、1日水中に保存し、さらに20℃60% R.H.の恒温恒湿室で乾燥してから測定を行なった。測定項目は重量変化、動弾性係数（JIS A1127による）、長さ変化（JIS A1129 コンパレータ法）及び、曲げ強度である。以上の物理試験の後に化学分析試料を製作するために供試体を表面から深さ方向に10mmごとにドライカッティングして0.15mmフルイを全通するまで粉碎した。化学的試験¹⁾としてはフェノールフタレインによる中性化深さ、遊離塩分量、全塩分量の測定、X線回折試験（X.R.D）、示差熱分析（D.T.A）

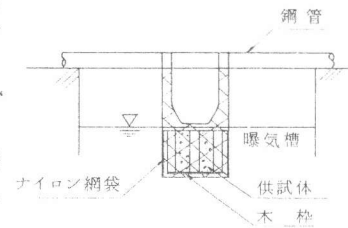


図-1 供試体の浸漬状況

表-2 水質試験結果

分項	項目	最初沈澱池	曝気槽	最終沈澱池	沈澱槽
PH		7.0 ^{*1}	6.9	7.0	7.0
		6.6 ^{*2}	6.7	7.0	7.0
全硬度		21	2.9	2.4	2.3
		3.0	3.1	1.2	1.3
Mアルカリ度		7.3	8.3	8.3	7.7
		9.1	12.1	2.5.0	7.8
CO ₂		1.5	2.3	1.9	1.6
		4.9	5.2	1.6	1.5
Cl ⁻		5.5.0	6.2.7	6.6.7	6.3.7
		10.9	1.2.3	1.2.5	1.0.9
Ca		16.0	1.5.5	2.2.2	1.5.7
		1.3	1.4	1.7	1.3
Na		15.3	1.7.0	2.0.5	1.6.5
		6.5	8.7	8.0	6.0
S ₁		2.0	2.2	2.0	1.9

*1: 上段採水面後, *2: 下段採水2日後

表-1 コンクリートの配合及び品質

供試体記号	配合条件			品質				備考		
	W/C (%)	セメントの種類	粗骨材の種類	セメント量 kgf/㎡	練上り温度℃	スランプ (mm) ベースコンクリート (NP-20 添加後)	空気量 (%) ベースコンクリート (NP-20 添加後)		単位容積重量 (tf/㎡)	σ ₂₈ (kgf/cm ²)
RL 45	4.5	高炉(B)	軽骨	3.47	13.0	13.5 (21.0)	7.4 (6.6)	1.883	3.23	
RL 55	5.5	"	"	2.88	13.0	13.0 (17.5)	7.0 (6.2)	1.902	2.57	
RL 55C	5.5	"	"	"	13.0	13.0 (17.5)	7.0 (6.2)	"	"	エポキシ樹脂コーティング
BN 45	4.5	"	普通	3.56	13.0	14.5 (18.5)	4.6 (4.0)	2.325	3.82	
NN 45	4.5	普通(10)	"	3.38	13.0	14.0 (19.2)	4.4 (3.9)	2.322	4.76	

を行なった。さらに塩分量の分布を調べるために走査型電子顕微鏡 (S.E.M-X.M.A)による全塩分量の測定²⁾を行なった。

3. 実験結果及び考察

i) 物理的性質

3ヶ月、6ヶ月、1年経過後の供試体の物理的性質を表-3に示す。材令と圧縮強度の関係を図-2に示す。曝気槽中、標準養生とも浸漬期間の増加とともに動弾性係数が上昇している。曲げ強度、長さ変化、重量比ともバラツキはあるがほぼ一定であり、劣化の傾向はない。このように曝気槽に浸漬した供試体の物理的性質は、標準養生した供試体のそれとほぼ同等であり、一年間程度の浸漬では劣化は認められない。

ii) 化学的性質

中性化深さについては、表-3に示したように、曝気槽中の供試体が標準養生したものより約2倍程度大きい値を示している。コーティングした供試体 (BL55c)は、曝気槽中で0.8mmの深さまで中性化を受けている。

図-4に表面からの深さと遊離塩分量 (NaCl換算)の関係を示す。軽量骨材を用いた BL45, BL55は普通骨材を用いた BN45, NN45に比べ約2倍の塩分が浸透している。また浸透深さも軽量コンクリートの方が普通コンクリートよりも大きい。軽量コンクリートにコーティングした BL55cでも中性化を受け、また塩分の浸透もみられた。これは製作時にわずかな目視できない欠陥があったためと考えられる。また高炉セメントB種を使用した普通コンクリート供試体 (BN45)と普通ポルトランドセメントを使用したもの (NN45)の遊離塩分量の深さ方向の分布を比べると、BN45は表面は0.1%であるが15mmで急激に減少し、25mmでほとんど存在していない。これに対し、NN45では表層の塩分がBN45より少ない0.05%であるが、15mm程度の深さでBL45と逆転し30mm程度まで塩分量が浸入している。このように高炉セメントB種は比較的表層の塩分が高いにもかかわらず内部まで

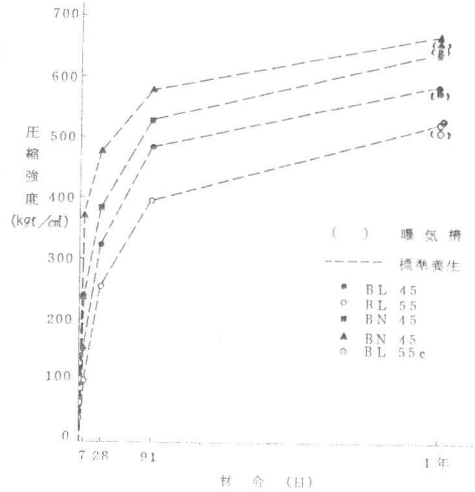


図-2 材令と圧縮強度

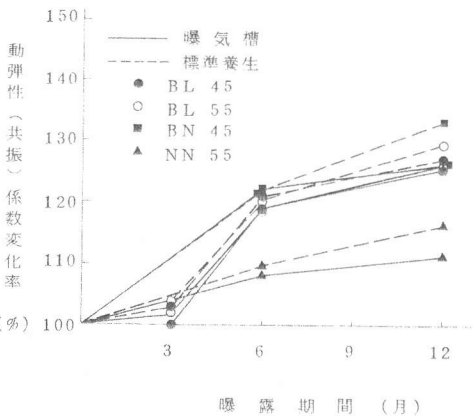


図-3 曝露期間と動弾性係数の関係

表-3 曝露した供試体の物性値

供試体	養生条件	3ヶ月					6ヶ月					12ヶ月					供試体圧縮強度 (kgf/cm²)					
		共振周波数 (Hz)	動弾性係数 ×10 ⁵ (kgf/cm²)	曲げ強度 (kgf/cm²)	長さ変化率 (×10 ⁻⁵)	重量比動定値初期値 (%)	共振周波数 (Hz)	動弾性係数 ×10 ⁵ (kgf/cm²)	曲げ強度 (kgf/cm²)	長さ変化率 (×10 ⁻⁵)	重量比動定値初期値 (%)	共振周波数 (Hz)	動弾性係数 ×10 ⁵ (kgf/cm²)	曲げ強度 (kgf/cm²)	長さ変化率 (×10 ⁻⁵)	重量比動定値初期値 (%)	中性化深さ (mm)	7日	28日	91日	1年	
BL45	曝気槽養生	2014 (100)	2.68 (119)	5.31	34	9.65	2019 (119)	2.66 (107)	5.34	-3.9	9.68	2083 (126)	2.88 (103)	6.51	1.35	97.4	1.5					57.9
	標準養生	2022 (103)	2.71 (109)	5.82	68	9.74	2041 (121)	2.78 (105)	5.15	8.5	9.80	2072 (127)	2.93 (107)	5.51	1.06	98.5	0.7	155	323	483		58.7
BN45	曝気槽養生						2343 (122)	4.56 (81)	8.04	-2.5	10.00	2404 (126)	4.80 (77)	7.97	1.28	99.9	0.8					64.3
	標準養生						2345 (122)	4.55 (82)	7.34	3.2	9.99	2329 (133)	4.62 (71)	8.28	1.41	100.2	0.4	238	382	527		64.0
NN45	曝気槽養生						2355 (108)	4.64 (77)	7.50	3.8	9.96	2418 (112)	4.67 (75)	8.12	1.19	100.2	0.9					66.0
	標準養生						2368 (110)	4.72 (77)	6.63	11.8	10.01	2309 (117)	4.61 (75)	7.43	1.56	100.5	0.4	371	476	578		66.8
BL55	曝気槽養生	1988 (102)	2.72 (121)	5.39	76	9.64	2018 (119)	2.70 (113)	5.03	8.9	9.65	2039 (126)	2.79 (108)	6.03	2.99	97.4	1.5					50.8
	標準養生	2024 (104)	2.67 (114)	5.54	158	9.73	2020 (120)	2.75 (106)	5.43	7.7	9.76	2070 (130)	2.90 (103)	5.69	2.22	98.4	1.0	104	257	395		52.1
BL55c	曝気槽養生										2064 (126)	2.85 (93)	6.09	1.77	99.0	0.8						52.9

() : 材令4週の期値を100とした値

浸透しない傾向がみられる。 図-5は一年間浸漬したコンクリート表面からの深さと遊離石灰量の関係を示したものである。特に曝気槽中に浸漬した高炉セメントB種を使用した供試体表層の遊離石灰量は供試体内部の遊離石灰量より減少している。これに対して標準養生した供試体表面の遊離石灰量の減少は比較的少ない。また普通セメントを使用したNN45は、曝気槽、標準養生槽とも表層部の遊離石灰量は内部に比べてほとんど減少していない。

図-6は曝気槽内に1年間浸漬した供試体 (BL45, BL55) のX線回折試験結果である。 BL45, BL55とも表層に炭酸カルシウム ($CaCO_3$) が検出されており、水酸化カルシウム ($Ca(OH)_2$) のピークが表層では弱く、深部では明瞭に検出されている。この傾向は水セメント比が 55%のBL55の方が水セメント比 45%のBL45より顕著である。BL45にはわずかであるが、 $4CaAl_2 \cdot 13H_2O$ が認められる。 C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) が遊離石灰 ($Ca(OH)_2$) を取り込み生成されたものである。しかし一年間 SO_4^{2-} 、 Cl^- が含まれた下水に接触し、かつコンクリート中に遊離塩分の増加がみられたにもかかわらず、コンクリート中にエトリンガイト、フリーデル氏塩は検出されなかった。以上のX線回折の結果よりコンクリートの変状を示すセメント水和鉱物として炭酸カルシウムが表層に認められた他は劣化を示すセメント水和鉱物³⁾⁴⁾は認められなかった。

図-7は曝露養生と標準養生の表層部 (0~10mm) のコンクリート (BL45, BL55) の経時変化を求めた D.T.A. の結果である。水酸化カルシウムの吸熱ピーク (500~580℃) は、標準養生の場合は3ヶ月、6か月、1年経過後増加しているが、曝気槽中のものは変化していない。これは標準養生よりも炭酸化しやすい環境の曝気槽中の供試体では水和の進行に伴う遊離石灰の生成と炭酸化は一定反応であり、他方標準養生の場合は水和に伴う遊離石灰の生成の方がまさっていることを示している。

図-8は各供試体の液接触面 0~20mm部分の浸透塩分量の経時変化を示した結果である。軽量コンクリートの BL45, BL55の遊離塩分量は浸漬期間とともに増加している。これに対し普通骨材を用いたコンクリートの BN45, NN45の場合は6ヶ月以降ほとんど変化していない。また全塩分量 (TCl) と遊離塩分量 (Cl⁻) の関係をCl⁻ / TClの比で表わすと普通コンクリートでは約30%であるのに軽量コンクリートでは約60%を示し、軽量コンクリートでは遊離塩分量の比率が普通骨材を使用したコンクリートの2倍の値を示している。すなわち全塩分量に占める遊離塩分量の割合が高く固定化されているCl⁻が普通コンクリートよりも少ないことを示している。さらに軽量コンクリート (BL55) 中を浸透している塩素 (Cl⁻) を軽量骨材とモルタル間でX線マイクロアナライザーの線分析でその浸透量を比較すると写真-1のような結果が得られた。右側が軽量骨材部分、左側がモルタル部分の全塩分量の線分析結果であり、両者に顕著な差がみられない。このように軽量コンクリートの塩分が普通コンクリ

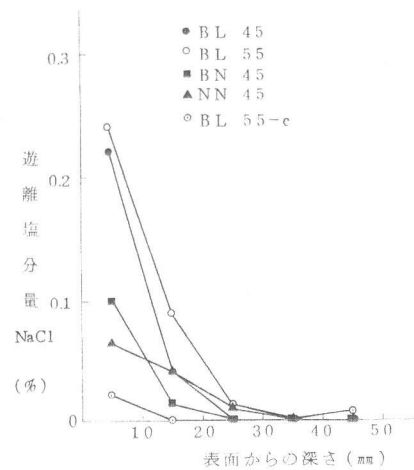


図-4

表面からの深さと遊離塩分の関係

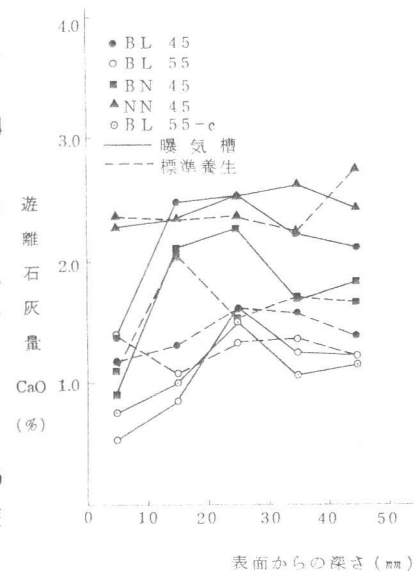
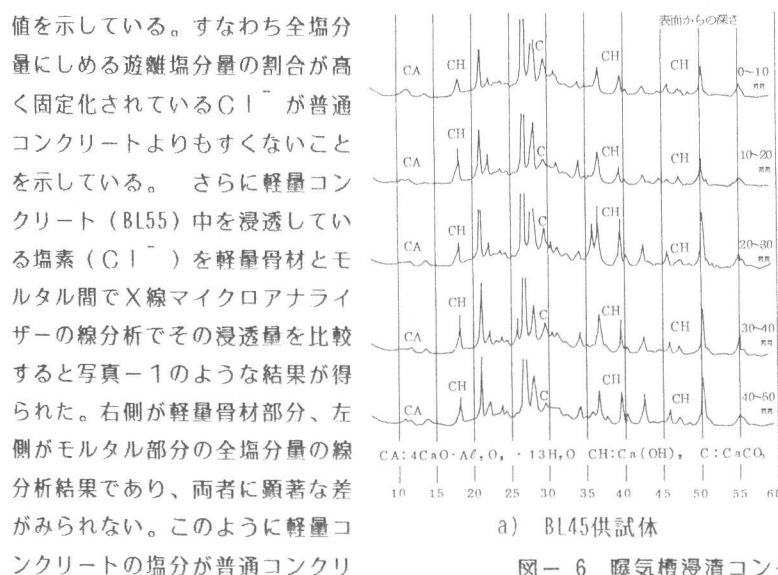
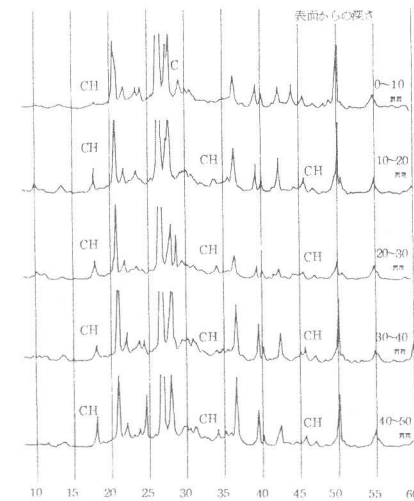


図-5

表面からの深さと遊離石灰の関係



a) BL45供試体



b) BL55供試体

図-6 曝気槽浸漬コンクリートのX線回折試験結果

ートの塩分より多くなった原因は骨材中にもモルタル部分とほぼ等しい量の遊離塩分が含まれていることによると思われる。

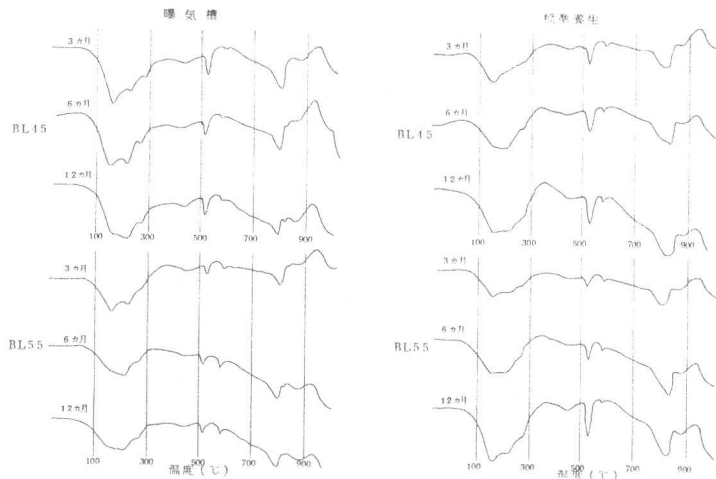
4. 結論

塩素イオン及び硫酸イオンを成分として含む温泉水を含む下水処理場内の高速曝気槽沈澱槽内と標準養生槽に、軽量コンクリート及び普通骨材のコンクリートを1年間浸漬した結果、以下のことが明らかになった。

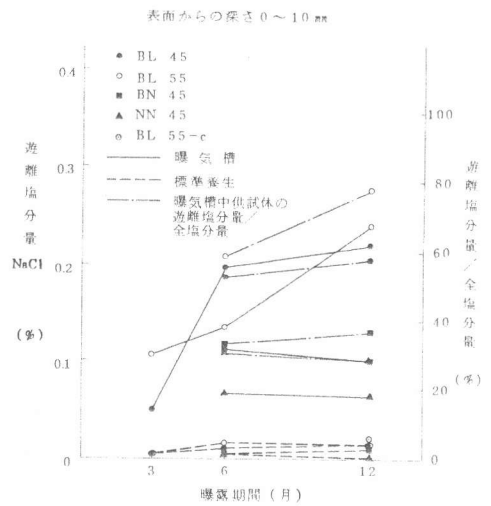
- 1) 曝気槽に浸漬した軽量コンクリート及び普通コンクリート供試体の圧縮強度、動弾性係数等の物理的性質は、標準養生したものと同等であり強度発現は正常であることがわかった。
- 2) 曝気槽に浸漬した高炉セメントB種を用いたコンクリート供試体の表層部の遊離石灰は標準養生したものに比べやや減少する傾向を示している。
- 3) 曝気槽に浸漬した高炉セメントB種を用いた水セメント比45%の軽量コンクリート供試体の中性化深さは1.5mmであり普通コンクリートに比べ約2倍であった。
- 4) 塩素イオンや硫酸イオンによるエトリンガイト、フリーデル氏塩は軽量及び普通コンクリート中に発生していなかった。
- 5) 軽量コンクリートは普通骨材を使用したコンクリートに比べ0~20mmの表層では2倍以上の遊離塩分が含まれており、遊離塩分の全塩分に対する比率も普通コンクリートの2倍以上の値を示した。しかし、軽量コンクリート中のモルタルと軽量骨材の全塩分量をX線マイクロアナライザーで分析した結果、両者の塩分量に差がないことから軽量コンクリートに塩分が多く含まれた原因の一つに軽量骨材中に塩分が蓄積されていることが考えられる。なお骨材中に塩分が含まれていることについては現在、化学分析により検討中である。

参考文献

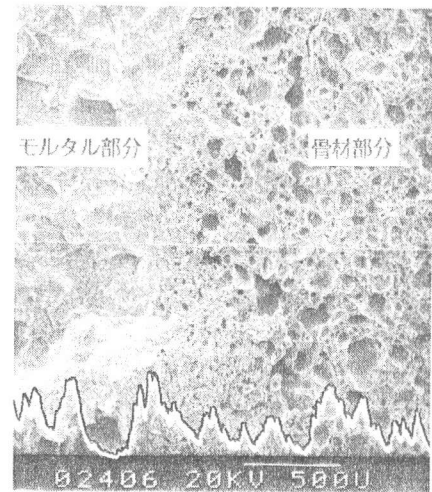
- 1) 金子、桜井他：「海洋環境下のコンクリートの塩素含有量とセメント水和化合物」 JCI年次講演会論文集 1984
- 2) 桜井、金子、佐伯、鮎田：「凍結融解作用をうける海岸コンクリートの表層部の化学特性」土木学会年次講演概要集1982
- 3) 田沢、金子他：「酸素活性汚泥法施設に用いたコンクリートの表面劣化」セメント技術年報 1983
- 4) Garl, R. Wilder et al ; "Concrete for sanitary Engineering Structure" ACI April 1981



図一 7 示差熱分析結果



図一 8 供試体最外面の経時変化



写真一 1 SEMによる全塩分量の分析