

論文 混和材を用いた低放射化コンクリートの耐久性に関する検討

藤倉 裕介*1・西田 浩和*1・片寄 哲務*1・木村 健一*2

要旨: 原子力発電所の廃止措置時、放射化したコンクリートをクリアランスレベル以下にし、再利用可能なものにするため、残留放射能が普通コンクリートよりも非常に少ない「低放射化コンクリート」の開発を実施している。本研究では、低放射化に有効な混和材をセメントと置換したコンクリートを鉄筋コンクリート構造物へ適用した場合の適用性について調べるため、中性化促進試験および塩水浸漬による鉄筋腐食促進試験を実施した。その結果、混和材の使用によりコンクリート中の pH は低下し、促進中性化深さは大きくなるが、一方で劣化因子の侵入が少ないため鉄筋の腐食は観察されず、十分な耐久性を有することを確認した。

キーワード: 低放射化コンクリート, 白色セメント, 石灰石微粉末, シリカフェーム

1. はじめに

原子炉周りの遮蔽コンクリート、鋼材、配管などの材料の多くは、中性子との核反応により放射化し、廃止措置時には低レベルの放射性廃棄物となる。例えば、110万kWクラスの沸騰水型原子力発電施設(BWR)の廃止措置時には、約50万トンのコンクリートが廃棄物として発生する¹⁾。その内の大部分は一般廃棄物であるが、原子炉周りのコンクリート約0.4万トンは、低レベル放射性廃棄物に分類される。コンクリートの建設時の価格は約1.2万円/m³であるが、放射化されて放射性廃棄物となると、埋設コストだけで、高βγ低レベル放射性廃棄物(L1区分、余裕深度埋設処分相当)でその約2800倍、低レベル放射性廃棄物(L2区分、コンクリートピット埋設処分相当)で約460倍、極低レベル放射性廃棄物(L3区分、トレンチ埋設処分相当)で約65倍になると予想されている²⁾。これらに測定費、解体費、詰替費、被ばく対策の管理費などを加えると、莫大な費用となることが予想される。

そのため、リプレース時には、コンクリート部分の放射性廃棄物を大幅に削減し、一般廃棄物として再利用可能なものにするのが重要である。一般廃棄物として取り扱われる基準としては、クリアランスレベルという考え方が採用されており、法令³⁾が2005年に施行されている。このような背景から、著者らは原子炉で使用されるコンクリートの全てをクリアランスレベル以下とするため、コンクリートが放射化した際に問題となる長半減期RIの標的核種(元素)である、Eu(ユーロピウム)やCo(コバルト)の含有量の少ない骨材、セメントや混和材により構成されるコンクリート(以下、低放射化コンクリート⁴⁾)の開発を実施している。これまでに白色セメントと高純度の石灰石骨材を使用し、残留放射能が普通のコンクリートの1/30程度となるコンクリートに

ついで基礎物性を報告してきた⁵⁾。また、白色セメントの低発熱化を目的として検討した混和材(石灰石微粉末とシリカフェーム)のEuやCoの含有量を調べた結果、セメントよりもその含有量が少なく、低放射化の観点からも有用であることが分かり、これらをセメントと高置換することで残留放射能を更に1/50程度まで低減できることを明らかにしている^{5),6)}。コンクリートを1/50程度まで低放射化とすることで、原子炉周りのコンクリートの多くをクリアランスレベル以下とできることが示されている⁶⁾。しかしながら、石灰石微粉末の高置換は耐久性の低下を生じ⁷⁾、ボゾラン材料の使用はセメント水和物である水酸化カルシウムとの反応によりコンクリート中のpHを低下させることが報告されており⁸⁾、鉄筋コンクリートに適用することを想定した場合、鉄筋腐食といった早期劣化に影響を与える可能性がある。

そこで、本研究では、特に混和材を使用した低放射化コンクリートの鉄筋コンクリートへの適用性について検討するため、これまでに提案してきた1/10~1/30低放射化コンクリートおよび混和材を使用した1/50低放射化コンクリートについて、鉄筋を配置した試験体を作製し、CO₂濃度5%の環境下および高温下での塩水浸漬による乾湿繰り返しによる促進耐久性試験を実施し、コンクリートの耐久性について調べ、鉄筋腐食の有無について基礎的な検討を実施した結果について報告する。

2. 材料および配合

2.1 低放射化材料

コンクリートには約10数ppmのCo(コバルト)元素や約1ppmのEu(ユーロピウム)元素が含まれている。中性子がこれら元素に吸収されると長半減期の放射性核種である⁶⁰Co(半減期5.27年)、¹⁵²Eu(半減期13.54年)、¹⁵⁴Eu(半減期8.59年)が生成される。原子炉の中

*1 (株)フジタ 技術センター 基盤技術研究部 工修 (正会員)

*2 (株)フジタ 技術センター 基盤技術研究部 工博 (非会員)

表-1 各種コンクリート材料の元素分析結果⁶⁾

No.	名称	産地・品名	Sc(ppb)	Fe(ppm)	Co(ppb)	Cs(ppb)	Eu(ppb)	ΣD/C ^{**}
1	安山岩	JA-1(Japan)	28500	49500	12300	620	1200	14.6
2	玄武岩	JB-1(Japan)	27,500	62,900	38,200	1,230	1,490	25.8
3	流紋岩	JR-1(Japan)	5,070	6,200	830	20,800	300	4.70
4	石灰石	OO(Japan)	18.1	8.6	20	1.1	20	0.20
5	石灰石	KA(Japan)	42	58	70	15	52	0.53
6	石灰石	HA(Japan)	20	14	41	10	7	0.076
7	普通ポルトランドセメント	A(Japan)	6300	17900	9000	1000	690	10.0
8	高炉セメント B 種	B(Japan)	12,000	15,000	12,000	570	1800	27.2
9	低熱ポルトランドセメント	B(Japan)	3,100	18,500	5,200	620	270	5.12
10	白色セメント	S(Japan)	2000	1010	1590	540	280	4.19
11	中庸熱ポルトランドセメント	B(Japan)	4,700	28,000	21,000	1,200	480	13.8
12	石灰石微粉末	A(Japan)	68	133	98	34	51	0.70
13	石灰石微粉末	B(Japan)	112	270	104	28	81	1.10
14	石灰石微粉末	C(Japan)	0.3	1.0	4.5	<1	<0.1	0.0052
15	シリカフェューム	D(Japan)	5,400	1,630	880	170	1,900	25.2
16	シリカフェューム	E(Japan)	53	4,800	340	2,200	29	0.55
17	シリカフェューム	F(Japan)	58	9,200	750	2,200	27	0.65
18	シリカフェューム	G(Japan)	77	5,300	760	1,530	78	1.30
19	シリカフェューム	H(Japan)	190	10,300	2,800	6,100	94	2.26
参考	フライアッシュ	JCFA-1(Japan)	31,100	36,370	37,400	8,600	2,460	43.8

※熱中性子束 ($E_n < 0.4\text{eV}$) $2 \times 10^5 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のみと仮定し、40年運転、6年冷却として計算した。日本の原子炉に対するクリアランスレベルとしては、経産省省令第112号(2005.12.施行)のものを使用し、 ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu で評価した。

表-2 低放射化コンクリートの配合

記号	W/C (%)	W/(C+SF) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						SP (C+SF)×%	ΣD/C 比 ^{**}
				W	C	LP	SF	S	G		
N-1	50	50	50	175	350	—	—	861	947	0.5	1/10
L-1	50	50	50	175	350	—	—	899	913	0.5	1/20
WT-1	50	50	46	158	316	—	—	855	1018	1.0	1/31
WT-2	120	43	46	150	133	140	100	810	961	2.1	1/51

C:セメント, 表中の記号 N は普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³), L は低熱ポルトランドセメント (密度 3.22g/cm³), WT は白色セメント (密度 3.05g/cm³) を示す。
LP: 石灰石微粉末 (密度 2.71g/cm³), SF: シリカフェューム (密度 2.20g/cm³)
S: 石灰石砕砂 (密度 2.69g/cm³), G: 石灰石砕石 (密度 2.70g/cm³), SP: ポリカルボン酸系高性能減水剤
※熱中性子束 ($E_n < 0.4\text{eV}$) $2.0 \times 10^5 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のみと仮定して計算した。日本の原子炉に対するクリアランスレベルとしては、2005.12.1 施行のものを使用し、 ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu で評価した。また、普通コンクリートの ΣD/C を 18.8 としてその比を計算した。

でコンクリートが放射線に曝された場合、 ^{60}Co と ^{152}Eu および ^{154}Eu でγ線放出核種のほぼ全てを占めることが知られている⁹⁾。すなわち、これらの標的核種となる Eu や Co といった元素の含有量の少ない骨材やセメント、混和材を使用することにより、普通コンクリートと比べて残留放射能の少ないコンクリートを製造できる。放射化の程度を示す指標は、ΣD/C (ΣDi/Ci, Di: 核種 i の放射能濃度, Ci: 核種 i のクリアランスレベル, 本研究では ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu の 5 つの核種で評価する。) の値で評価される。すなわち、ΣD/C をできるだけ小さくすることが望まれ、ΣD/C が 1 以下であれば、クリアランスレベル以下となり、一般廃棄物として再利用が可能となる。

表-1 に、骨材およびセメント、混和材の微量元素分析結果および計算で評価した ΣD/C を示す。表-1 に示すように低熱ポルトランドセメント(No.9)や白色セメント

(No.10)は、普通ポルトランドセメント(No.7)よりも ΣD/C が小さく低放射化のセメントであることが分かる。骨材では、石灰石が玄武岩、安山岩、流紋岩よりも ΣD/C が小さく、コンクリートの多くを占める骨材に ΣD/C の小さな石灰石を用いることで、他の骨材を使用したコンクリートと比較して大幅に低放射化が可能である。また、白色セメントの低熱化のために検討した混和材の調査結果も表-1 中に示す。石灰石微粉末、シリカフェュームともに産地により各含有量が異なるが、セメントよりも ΣD/C の小さいものが使用材料の候補として挙げられる。

2.2 コンクリートの配合

本研究で検討した低放射化コンクリートの配合を表-2 に示す。N は普通ポルトランドセメント (表-1 中 No.7), L は低熱ポルトランドセメント (表-1 中 No.9), WT シリーズは白色セメント (表-1 中 No.10) を使用し

た配合である。骨材は石灰石骨材（表-1 中 No.5）を使用した。ちなみに、N-1 および L-1 は、これまでに提案している“1/10 低放射化コンクリート⁵⁾”，WT-1 は、同様に“1/30 低放射化コンクリート⁵⁾”である。ここで、1/10 や 1/30 とは、普通ポルトランドセメント(No.7)と安山岩骨材(No.1)で構成されるコンクリート（以下、普通コンクリートと呼ぶ。）との $\Sigma D/C$ （普通コンクリートの $\Sigma D/C$ を 18.8 とする。）の比を示し、普通コンクリートと比較して放射化量の低減率を示している。WT-2 は、表-1 に示す石灰石微粉末(No.13)，シリカフューム(No.17)をセメントと置換して使用した。WT-2 に示す配合により、 $\Sigma D/C$ 比を約 1/50 にまで低減が可能となる。ちなみに、セメント、石灰石微粉末、シリカフュームの組み合わせは無数に考えられるが、設計基準強度 33N/mm²を確保するよう、セメントの石灰石微粉末、シリカフュームの置換率を事前に検討している。その他の配合条件としては、粗骨材の最大寸法を 20mm とし、スランブ 15±2.5cm，空気量 4±1.5%とした。

3. 試験概要

3.1 基礎物性試験

(1) フレッシュコンクリートの性状

コンクリートの練り上がり温度が 20℃となるように各材料を準備し、表-2 に示す配合についてフレッシュ性状を確認した。所定のスランブが得られるようにポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。特にシリカフュームを使用した配合では、空気量調整剤（消泡剤）を使用した。コンクリートの練上がり直後のスランブ、空気量、コンクリート温度を JIS A 1101, JIS A 1128 に準じて測定した。また、JIS A 1116 に準じ、エアメータを用いて単位容積質量を測定した。さらに、コンクリートの凝結時間を JIS A 1147 に準じ、自動凝結試験機を使用して測定した。JIS A 1123 に準じてブリーディング試験を実施した。

(2) 力学特性

直径 100mm，高さ 200mm の円柱型枠を用いて試験体を採取し、コンクリート打設から 24 時間後に脱型し、標準養生（20℃，水中養生）した。材齢 7 日，28 日，91 日における圧縮強度を JIS A 1108 に準じて測定した。

(3) 細孔径分布

試験体は、力学特性とは別に直径 100mm，高さ 200mm の円柱型枠を用いて試験体を採取し、標準養生（20℃，水中養生）したものを用いた。材齢 28 日にて試験体を取り出し、ハンマーにて 5mm 角程度まで粉碎し、アセトンに 1 日浸漬した後、さらに 105℃にて炉乾燥したものを試験体とした。試験は、水銀圧入式ポロシメータを使用して細孔径分布を測定した。

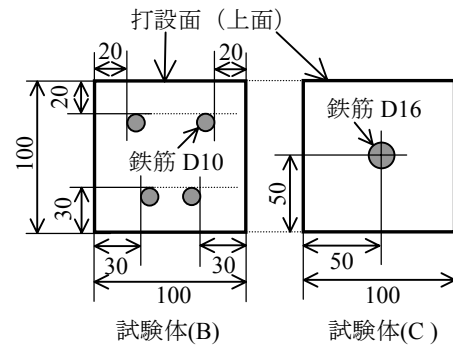


図-1 有筋試験体の断面図および配筋状況

3.2 促進耐久性試験

促進耐久性試験は、100 mm×100 mm×400mm の鋼製型枠を用い、表-2 に示す配合のコンクリートについて試験体を作製して実施した。試験体は、無筋のコンクリート試験体(A)，図-1 の断面図に示すようにかぶり 20mm および 30mm で鉄筋 (D10) を配置した試験体(B)，断面の中央に鉄筋 (D16) を配置した試験体(C) を，下記に示す促進試験ごとに 3 体ずつ作製した。鉄筋は、浮きさびや油分等の付着が無いことを確認し、そのまま使用した。試験体はコンクリート打ち込み後、材齢 1 日にて脱型し、材齢 28 日まで 20℃の水中にて養生を行った。水中養生終了後、試験体の打設面（上面），下面および端面（100mm×100mm の 2 面）をエポキシ樹脂で厚くコーティングした。促進耐久性試験の項目および方法を以下に示す。

(1) 中性化促進試験

JIS A 1153 に準じ、試験体(A)，(B)，(C)について中性化促進試験を実施した。試験体は材齢 28 日まで 20℃の水中にて養生した後、コンクリート表面を所定の樹脂コーティングし、さらに気中（温度 20℃，湿度 60%）にて 28 日間養生後、温度 20℃，湿度 60%，二酸化炭素濃度 5%の条件下で試験を行った。促進試験期間は、0，1，4，8，13 週とした。中性化深さの測定は、所定の期間で無筋試験体(A)の端部 10cm を切断し、その断面にフェノールフタレイン 1%アルコール溶液を噴霧して未着色部分を中性化領域と判定し、中性化深さを求めた。中性化深さを観察後、深さ方向に 10mm ごとに（カッターの刃の厚みを含む）30mm まで試験体をスライスし、炉乾燥後に粉碎して粉末試料を作製し、粉末試料 10g を用いて土壤養分分析法にて pH を測定した。鉄筋の腐食状況については、中性化深さや pH の試験結果および目視において試験期間ごとに確認した。また、促進期間 13 週にてコンクリートをはつり、鉄筋の腐食状況を確認した。

(2) 塩水浸漬および乾湿繰り返し試験

各試験体を 28 日間 20℃水中養生した後、促進試験を

開始した。促進試験は4日間50℃の塩水（塩化物イオン濃度3%）に浸漬した後、温度50℃、湿度60%の環境下で3日間乾燥させた試験（合計7日間）を1サイクルとし、促進試験のサイクルを0, 1, 4, 8, 13とした。各サイクル終了後、無筋試験体(A)を取り出し、コンクリート表面から深さ方向に10mmごとに30mmまで試験体をスライスし、炉乾燥後に粉砕して粉末試料を作製した。粉砕試料は深さごとに JCI-SC4（硬化コンクリートに含まれる全塩分の分析方法）に準じ、硝酸銀滴定法により全塩分量および可溶性塩分量の測定を行った。また、中性化促進試験と同様に粉末試料10gを用いて土壌養分分析法にてpHを測定した。鉄筋の腐食状況については、中性化深さやpHの試験結果および目視において試験期間ごとに確認した。また、13サイクルにてコンクリートをはつり、鉄筋の腐食状況を確認した。

4. 試験結果

4.1 基礎物性

(1) フレッシュコンクリートの性状

練り上がり直後のフレッシュコンクリートの性状を表-3に示す。スランプおよび空気量は、良好な値を示した。凝結時間は、WT-1では、N-1やL-1よりも早く、シリカフュームを含むWT-2では更に早くなる傾向にある。L-1では、ブリーディング率が大きな値を示した。シリカフュームを含むL-2では、測定できるほどのブリーディング水を生じず、ブリーディング率0%であった。

エアメータを用いて測定した単位体積質量は、シリカフュームの密度が小さいため、シリカフュームの使用により減少するが、一般のコンクリートとしては十分な値を有していることが分かる。

(2) 化学特性

標準養生における材齢と圧縮強度の関係を図-2に示す。各配合における強度発現の状況を比較する目的で、図中には実際に得られた圧縮強度をもとに、式(1)で表される土木学会の提案式¹⁰⁾で近似した曲線を示す。また、材齢28日における圧縮強度の値および式(1)中の各係数の算定結果を図-2中にそれぞれ示す。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} \cdot f'_c(28) \cdot d \quad (1)$$

ここで、 $f'_c(t)$ は材齢t日のコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 $f'_c(28)$ は材齢28日のコンクリートの圧縮強度(N/mm²)を示す。a, b, はセメントの違いによる強度発現の特徴を示す係数であり、dは材齢28日に対する材齢91日の強度の増加率である。土木学会では、普通ポルトランドセメントの場合、a=4.5, b=0.95, d=1.11, 早強ポルトランドセメントの場合、a=2.9, b=0.97, d=1.07を標準的な値として与えているが、N-1では

表-3 フレッシュコンクリートの性状

記号	SL (cm)	Air (%)	凝結時間 (hr : min)		ブリーディング率 (%)	単位体積質量 (kg/m ³)
			始発	終結		
N-1	12.5	5.3	7 : 19	9 : 28	8.74	2345
L-1	13.0	4.6	7 : 08	9 : 46	11.4	2340
WT-1	12.5	4.0	4 : 31	6 : 11	2.26	2392
WT-2	17.5	3.7	3 : 25	5 : 29	0.00	2340

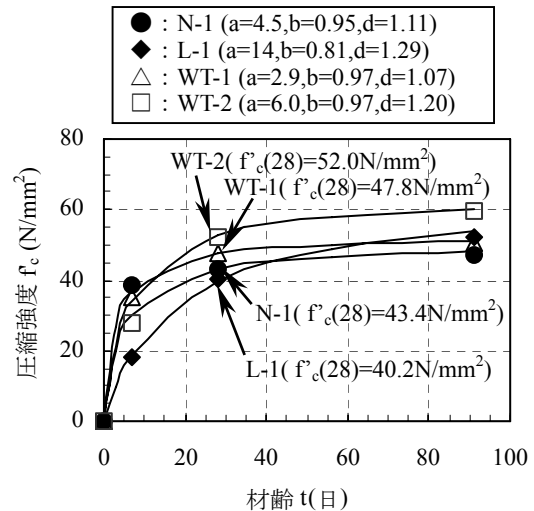


図-2 材齢と圧縮強度の関係

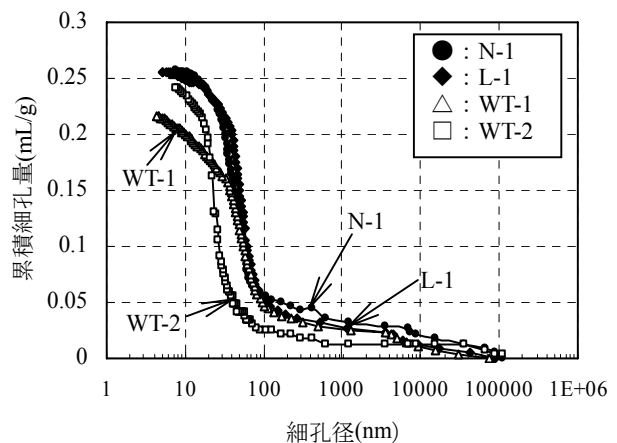


図-3 細孔径分布（材齢28日）

普通ポルトランドセメントの場合と同様の係数が得られ、白色セメント単体のWT-1では、早強ポルトランドセメントと同様の係数が本実験より得られた。また、単位セメント量が少ない配合であるWT-2では、石灰石微粉末やシリカフュームによる反応および空隙充填効果により、十分な強度が得られていることが分かる。

(3) 細孔径分布

細孔径分布の測定結果を図-3に示す。N-1とL-1は類似した傾向を示す。WT-1では、N-1, L-1と比べて80nm以下の細孔量が少ない傾向にあり、混和材を用いたWT-2

では、シリカフュームを含有しており、細孔が小さな範囲に分布していることが分かる。

4.2 促進耐久性試験結果

(1) 中性化促進試験

図-4 に中性化促進試験の結果を配合ごとに示す。混和材を使用しない N-1, L-1, WT-1 の配合では、中性化深さは小さく促進材齢 13 週において 5mm 程度の結果となった。一方、石灰石微粉末やシリカフュームを用いた WT-2 の配合では、促進材齢の増加に伴って中性化深さは増加し、促進材齢 13 週において約 20mm の中性化深さを示した。また、WT-2 では促進材齢 13 週における呈色域は濃い赤紫色を示さず、薄い桃色を示した。

図-5 は、促進材齢ごとに表面からの深さ 10mm ごとにスライスして粉碎し、土壌養分分析法にて得られた pH の WT-1 および WT-2 における結果を示す。混和材を使用した WT-2 の配合では促進開始時に pH=11.46 を示し、促進材齢の経過に伴って pH は低下しており、フェノールフタレイン溶液の呈色域を pH=10 程度以上とすると、中性化深さの結果と同様の傾向を示していることが分かる。N-1, L-1, では、WT-1 と同様に促進材齢の経過に伴って pH は低下せず、pH=12.3 程度を示した。WT-2 の配合では、N-1, L-1, WT-1 とは異なり、水酸化カルシウムとシリカフュームのポズラン反応により、C-S-H が生成される。水酸化カルシウムとシリカフュームの反応率を調べた実験結果¹¹⁾を参照すると、WT-2 の配合では材齢 28 日までに生成される全ての水酸化カルシウムはシリカフュームのポズラン反応により消費されている可能性がある。また、生成された C-S-H の CaO/SiO₂ モル比は 0.9~1.5 と考えられるが、セメント単体から生成される C-S-H の CaO/SiO₂ モル比 1.7~1.8¹²⁾ よりも小さく、中性化しやすい傾向にあると考えられる。

鉄筋の腐食状況については、促進材齢 13 週にて全ての配合において全く観察されていない。

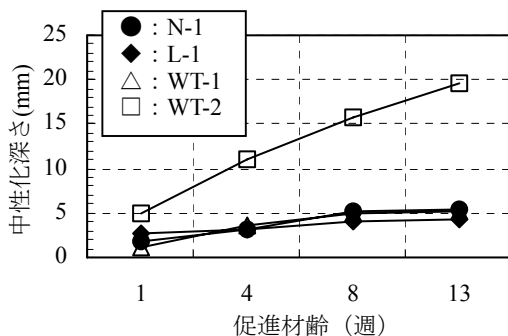


図-4 促進材齢と中性化深さの関係

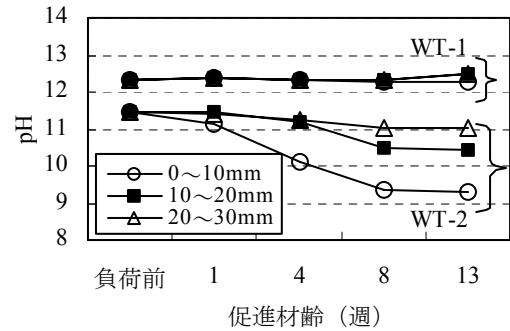


図-5 促進材齢と深さごとの pH の関係 (WT-1, 2)

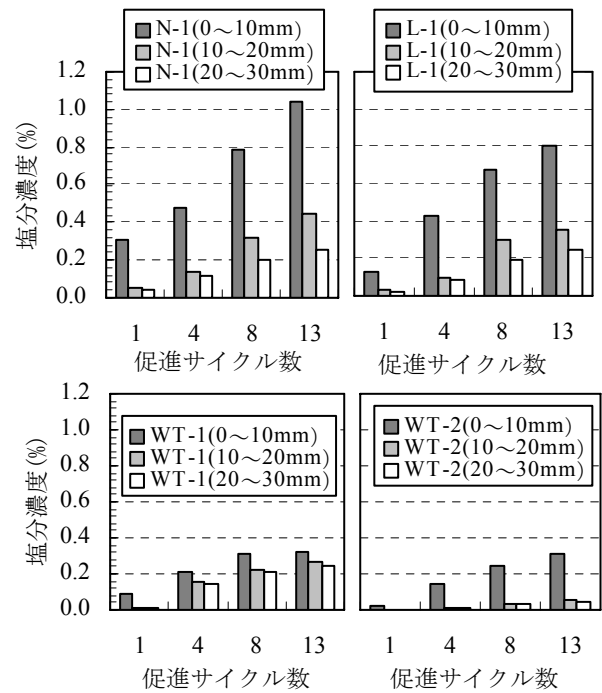


図-6 塩分濃度分析結果 (全塩分)

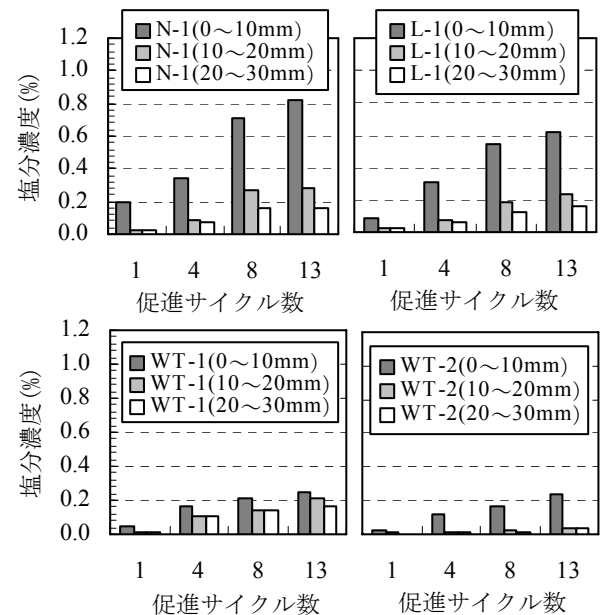


図-7 塩分濃度分析結果 (可溶性塩分)

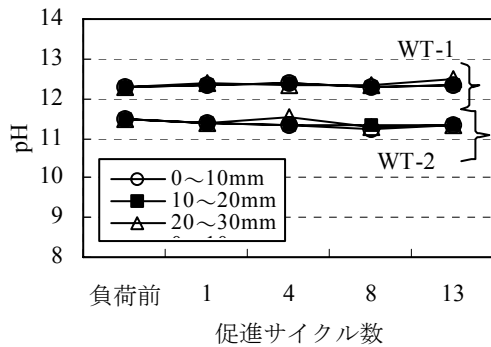


図-8 促進サイクルと深さごとの pH の関係 (WT-1, 2)

(2) 塩水浸漬および乾湿繰り返し試験結果

促進サイクル数ごとに調べた全塩分濃度の分析結果を図-6に示し、可溶性塩分濃度の分析結果を図-7に示す。WT-1やWT-2ではN-1やL-1と比較して塩分濃度が低いことが分かる。特にWT-2では、深さ10mm以深での塩分濃度が非常に低く、塩化物イオンのコンクリート内部への侵入に対する抵抗性が高いことが分かる。

これは、図-3の細孔径分布の結果に示すように、シリカフェームを含むWT-2の配合では、緻密な構造となっているために塩化物イオンの侵入が抑制されたものと推察される。WT-1の配合では、L-1やN-1と比較して細孔量が少なく、塩化物の侵入に対する抵抗性が高い。

土壌養分分析法にて粉砕試料のpHを調べた結果では、N-1、L-1、WT-1の配合では、促進サイクルの経過に伴ってpHは低下せず、pH=12.3程度を示した。図-8には、WT-1およびWT-2の配合における促進材齢とpHの関係を示す。WT-2の配合においても大きなpHの低下はみられなかった。さらに、鉄筋の腐食状況については、促進材齢13週にて全ての配合において全く観察されていない。

5. まとめ

低放射化の混和材を多量にセメントと置換し、普通コンクリートよりも残留放射能が1/50と非常に少ない低放射化コンクリートの鉄筋コンクリートへの適用性について検討するため、中性化促進試験および塩水浸漬による促進耐久性試験を行った。その結果、混和材を使用した配合では、シリカフェームのボズラン反応により水酸化カルシウムが消費され、コンクリート中のpHが11付近まで低下した。また、中性化促進試験では、促進材齢13週での中性化深さは20mm程度となり、中性化部分のpHは更に低下した。しかし水和組織が緻密になっており、塩化物イオンなどの劣化因子の侵入に対する抵抗性が高いことが分かった。本研究の範囲では、低放射化の混和材を使用した配合は原子力施設において定められる

最小かぶり¹³⁾(部位によるが、40mm~100mm)を有すれば、鉄筋コンクリートに適用できることを確認した。

謝辞：本報告は、「資源エネルギー庁・平成19年度革新的実用原子力技術開発費補助事業」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 通商産業省総合エネルギー調査会原子力部会中間報告：商業用原子力発電施設解体廃棄物の処理処分に向けて、平成11年5月18日
- 2) 経済産業省総合エネルギー調査会原子力部会廃止措置対策小委員会公開資料、1997
- 3) 経済産業省令：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第六十一条の二第四項に規定する精錬事業者等における工場等において用いた資材その他に含まれる放射性物質の放射能濃度についての確認等に関する規制、平成十七年十一月二十二日経済産業省令第百十二号
- 4) 金野正晴：低放射化コンクリートの開発の現状、コンクリート工学, Vol.42, No.6, pp.3-10, 2004.6
- 5) 藤倉裕介ほか：低放射化コンクリートのマスコンクリート部材への適用性の検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.29, pp.433-438, 2007.7
- 6) 長谷川晃ほか：クリアランスレベル以下にするための低放射化設計法に関する技術開発、資源エネルギー庁・平成18年度革新的実用原子力技術開発費補助事業報告書、2007.3
- 7) 平田隆洋、竹田宣典、十河茂幸：石灰石微粉末を多量に添加したコンクリートの強度と耐久性、セメント・コンクリート, No.611, pp.51-58, Jan.1998
- 8) 入矢圭史郎、高橋敏樹、三原守弘、本田明：ボズランを高含有したコンクリート中の鉄筋腐食挙動、コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1053-1058, 2004
- 9) Kinno, M. et al., "Raw Materials for Low-Activation Concrete Neutron Shield", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.39, No.12, pp.1275-1280, 2002.
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書2002年版【施工編】、2002
- 11) 浅賀喜与志ほか：水酸化カルシウム-シリカフェーム系の水和反応、石膏と石灰, No.208, pp.27-33, 1987
- 12) 坂井悦郎ほか：セメント水和の相組成モデル、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.101-106, 1998
- 13) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N, pp.77-78, 2001