生命工学に基づく生活・居住環境づくりと共生に関する研究グループ

資源循環型高強度・高耐久コンクリートの開発と評価

湯浅 昇(建築工学科) 友澤史紀(日大生産工(研究所))

1. はじめに

超高強度コンクリートが、超低水セメント比に よって実現されている。しかしながら、こうした 超高強度のコンクリートを実現させる水セメント 比では、理論上、水和に必要な水が不足し、未水 和セメントが多く残っているはずである。最近の ゼネコン主導型で開発されている 150N/mm2 超級 建築用コンクリート待望論、放射性廃棄物貯蔵施 設への寿齢1万年のコンクリートの要請を考える と、(1)極端に水和に必要な水量が不足している状 態ではどのような水和物が生成されているものか、 (2) 多量の未水和セメントは長年月にわたり安定 なものか、特に外気、水と接するような表層部で どう変化するのか、また、コンクリート表面から は深いところにある内部では変化があるのか、未 だ実験的に検証されておらず、基礎的な研究が待 たれているところである。

また、近年建設業界では、地球環境問題等の切迫した問題から、既存構造物の維持保全方法や耐久年数の長い建物を用いることなどが重要視されてきている。沿岸地域に建造されたコンクリート構造物では、海風によって運ばれる飛来塩分などによる鉄筋の腐食やそれに伴うコンクリートの表面剥離など、塩害による劣化が問題とされ、更なる研究、維持保全上の対策が必要である。しかし、塩害抵抗性に関する試験方法が確立されているとはいえず、鉄筋コンクリート構造物の立地環境に合わせた耐久設計・維持管理が困難であるのが現状である。

本報告においては、先ず、極小断面の超低水セメント比のペースト試験体について、養生が強度発現、膨張・収縮に及ぼす影響を検討した。次に、コンクリートの塩化物イオン浸透性を評価する試験方法・試験条件を整理、提案し、その上で、塩化物イオン浸透性に及ぼすコンクリートの使用材料、調合、初期養生の影響を検討した。更に、環境温度、建物の平面配置、高さの影響を検討した。

2. 超低水セメント比セメントペーストの強度発現・膨張収縮

2.1 実験概要

1) 使用材料

a. セメント

表 1 に示した水セメント比 13、16、20%については、M社製シリカフュームプレミックスセメント、25%については、セメント協会研究用セメントをE 社製シリカフュームで15%置換したセメント、30、40%については、研究用セメントを用いた。

b. 高性能 AE 減水剤

T社製高性能 AE 減水剤を用いた。なお、3 割の 固形分が含まれているため、その3割を練り水に 追加した。

2) 試験体の作製

a. セメントペーストの練混ぜ、成形

表1に示した水セメント比13、16、20、25、30、40%のセメントペーストをモルタルミキサにより練り混ぜた。

圧縮試験用供試体は、セメントペーストを注射器で吸引して、素早く内径約5.75mmのプラスチック製ストローに詰め成形した。

長さ変化測定用供試体は、40×200×5mm の型枠 にセメントペーストを詰め込み成型した。

b. 養生方法

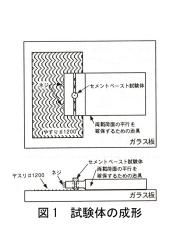
圧縮試験用供試体、長さ変化測定用供試体ともに、材齢3日まで、所定の温度(20、40、60、80(水セメント比13、16%のみ)℃)の恒温装置内において封緘状態で静置した。材齢3日で脱型し、水中養生、封緘養生、気乾養生(20℃のみ、R.H.60%)した。

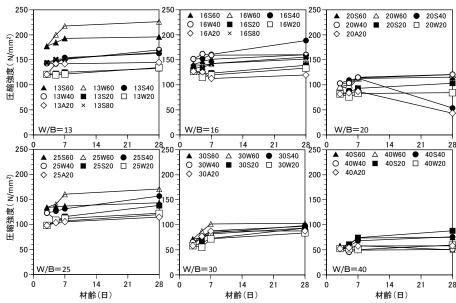
c. 強度試験用供試体の作製

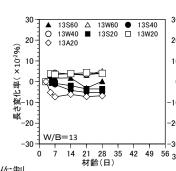
材齢84日目に密閉容器より試験体を取り出し、 直径5.75mm、高さ11.5mmの円柱試験体を作製した。 上下の載荷面の平行を確保するため、図1に示す様 に治具を用い、#1200のやすりを用いて研磨した。

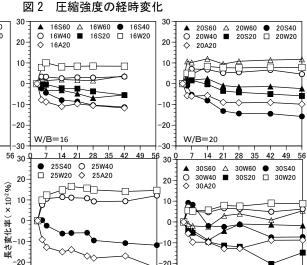
	一一一
4V I	ᆒᆔᄰ

X · Mid X												
W/B	結合材に 対する SSP-104率	必要量	研究用セメント	シリカ フューム	シリカフューム プレミックス セメント	結合材総量	SSP-104	水	予備実 フローコーンを 上げた直後の フロー値	験結果 フロー値	本実験 フローコーンを 上げた直後のフ ロー値	フロー値
(%)	(%)	(L)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(g/m^3)	(g/m^3)	(kg/m³)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
40	0	1000	1396	I	_	1396	I	558	119	218	177	253
30	0.2	1000	1622	_	_	1622	3	487	108	191	111	189
25	1.0	1000	1448	255	_	1703	17	426	154	194	169	213
20	0.7	1000	_	1	1879	532	13	376	125	191	231	264
16	0.9	1000	_	_	2032	492	18	325	184	208	285	298
13	1.5	1000	_	1	2163	462	32	281	172	203	277	296









10

10

14 21 28 35

42 49 56

d. 長さ変化測定用供試体の作製

コンタクトゲージを材齢3日に脱型後すみやか に、試験体の上下両方に、約 100mm の間隔で接着 により設置した。

3) 試験方法

a. 圧縮強度試験

所定の材齢材齢 84 日目に、強度用試験体を JIS A 1108 に準じて圧縮強度を測定した。試験機の最 大載荷荷重は 5,000Nである。8個の試験体の平 均値をもって圧縮強度とした。

b. 長さ変化試験

コンタクトゲージによる方法により、基長を材 齢3日で測定し、材齢7日から7日ごとに長さを 測定し、基長に対する変化率として整理した。

同一調合、同一養生では、3試験体上下2面で の平均値をもって結果とした。

図3 長さ変化率の経時変化

2.2 実験結果及び考察

1) 圧縮強度

W/B=25

-30 1

図2は、水セメント比ごとに圧縮強度の経時変 化を示したものである。凡例の最初の数字は水セ メント比 (%) を、アルファベットは W が水中養 生、S が封緘養生、A が気中養生を、後ろの数字は 養生温度 ($^{\circ}$ C) を表している。

養生温度が 60℃までは、温度が高いほど強度が 大きいが、80℃では 60℃の時よりも小さい。60℃ までのこの傾向は水セメント比が小さいほど顕著 であり、材齢 28 日までの強度発現をみると、養生 が極めて強い影響要因になっていることがわかる。

養生方法の影響をみると、水中養生が封緘養生 よりも大きく、その差は水セメント比が小さいほ ど大きく、超低水セメント比における未水和セメ ントの外部からの供給水による水和ととらえられ る。また、気中養生の場合、他の養生に比べ概ね 圧縮強度は小さく推移していることがわかる。

2)長さ変化

図3は、水セメント比ごとに試験体の長さの経 時変化を示したものである。水中養生を行った試 験体は膨張し、封緘養生、気中養生を行った試験 体は収縮することがわかる。

水中養生による膨張は、材齢3日までの現象で 材齢3日以降は変化が小さかった。一方、封緘養 生試験体の収縮は時間の経過とともに大きくなる 傾向にあった。気中養生では、乾燥初期の収縮が 大きいことが確認できる。

これらの傾向に及ぼす水セメント比の影響、養生温度の影響については、明解でなく、セメントの構成なども鑑みながら更なる検討が必要である。

3. コンクリートの塩化物イオン浸透性およびその 評価方法

3.1 コンクリートの塩化物イオン浸透性評価試験方法の提案¹⁾

1) 促進浸透試験機の試製

文献 2) によって示された試験方法をもとに、同一試験層内で塩水浸漬・熱風乾燥を自動で切り替えが可能であり、更に、試験温度の変更や試験状況のモニターが可能な試験装置(図 4)を表 2に示す仕様で試製した。

2) 促進浸透試験条件の整理・決定

文献 2) では、3%NaC1 水溶液を用いて、試験温度を乾燥温度・浸漬温度を 50℃とし、1 サイクル



太休外寸·2615^W×1420^D×1645^Hmm

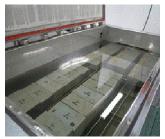


図4 Machine for Chloride Ion Infiltration

表 2 Specific of Machine

	本体が 1.2013 ~ 1420 ~ 1043
形状	試験槽有効内寸:1500 ^W ×800 ^D ×600 ^H mm
	水槽内寸:1890 ^W ×1300 ^D ×480 ^H mm
材質	外装:SUS304
付貝	内装:SUS316L
温度	塩水浸漬温度:+5℃~+60℃
皿及	乾燥温度:+5℃~+60℃
塩分濃度	MAX:4%NaCl
	塩水浸漬時:循環ポンプ作動
その他の 仕様	乾燥時:ファン作動(排気ダンパー有)
	操作切替:コントロールパネルにより最小10分刻みで自動切換え可能
	制御情報記録:試験槽内温度、塩化物イオン濃度 操作切替情報サイ
	クル情報

を浸漬4日、乾燥3日、更に常温下1日静置の8日としている。本研究では、これを参考に、乾燥期間を長くする程、促進効果が期待できるとの判断から、3%NaC1水溶液を用いて、試験温度を乾燥温度・浸漬温度とも50℃とし、1サイクルを乾燥4日、浸漬3日の7日とした。

3.2 塩化物イオン浸透性に及ぼすコンクリート の内的要因の検討

1) 使用セメント種類の影響 3)

提案した塩化物イオン浸透試験方法を用いて、 使用セメント種類の影響について検討した。

図 5 は、促進 10 サイクルにおける全塩化物イオン分布を示している。 高炉セメント B 種やフライアッシュセメント B 種を用いると、塩化物イオン浸透深さが浅くなり、逆に、低熱ポルトラントセメントでは深い層まで浸透している。

図6は、使用セメントの種類と見掛けの拡散係数の関係を示している。フライアッシュセメントB種や高炉セメントB種を用いると普通ポルトラントを使用した場合に比べ、見掛けの拡散係数は、1/2倍程度であり高い遮塩性を示し、一方、低熱ポルトラントセメントを用いると3倍程度となり塩化物イオンが浸透しやすいことがわかる。

2) 水セメント比の影響 4)

提案試験方法を用いて、普通ポルトラントセメ ントを用いたコンクリートにより、水セメント比

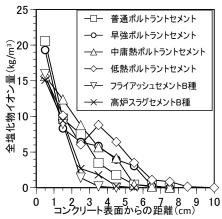


図 5 Distribution of Chloride Ion(Cement Kind)

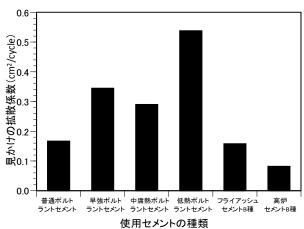


図 6 Diffusion Coefficient (Cement Kind)

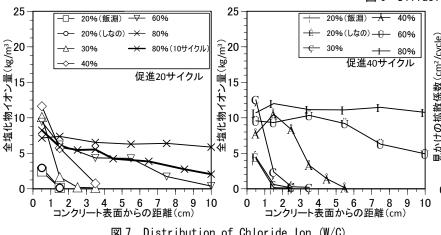
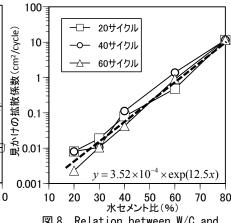


図7 Distribution of Chloride Ion (W/C)



Relation between W/C and 図 8 Diffusion Coefficient

の影響について検討した。

図7は、20、40サイクルにおける全塩化物イオ ン分布を示したものである。水セメント比が大き くなると塩化物イオンが深くまで浸透することが わかる。

図8は、見かけの拡散係数と水セメント比の関 係を示している。見かけの拡散係数の対数は、試 験サイクルに関係なく、水セメント比と良好な直 線関係が得られ、その関係は図中に示した式で表 わされる。

3) 乾燥開始材齢の影響 5)

提案試験方法を用いて、普通ポルトラントセメ ントを用いたコンクリートにより、乾燥開始材齢 の影響について検討した。

図9に、促進試験20サイクルにおける全塩化物 イオン分布を示す。乾燥開始材齢が違っても塩化 物イオン浸透は同じような傾向にあり、乾燥開始 材齢による顕著な相違は得られなかった。

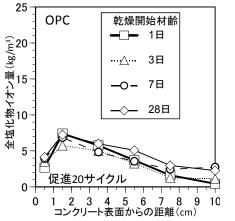


図 9 Distribution of Chloride Ion (Demolding Age)

3.3 塩化物イオン浸透性に及ぼす環境要因の検討

1) 温度の影響

温度が塩化物イオン浸透に及ぼす影響を検討す るため、材齢 28 日経過時に-25℃で冷凍保存し、 試験前に解凍した試験体(普通ポルトラントセメ ントを使用)を用いて、試製した試験機により、 表3に示す条件で検討を行った。

図 10 に、促進試験 50、35、20、5℃における塩 化物イオン分布を示す。どの水セメント比におい ても促進温度が高くなるにつれ て塩化物イオンは深くまで浸透 している。

図 11 は、見かけの拡散係数と 促進温度の関係を示したもので ある。どの水セメント比におい ても促進温度の上昇に伴い、見 かけの拡散係数は比例的ではな く急激に増大している。

図12は、見かけの拡散係数の自然対数と促進温度の絶対温度の逆数の関係を示したものである。両者は、水セメント比ごとに比例関係にあり、化学反応速度論に則った現象であった。水セメント比ごとの回帰式および活性化エネルギーを表4に示す。水セメントが小さいと大きな活性化エネルギーを必要とし、遮塩性が高いことがわかった。

2) 平面配置の影響 6)

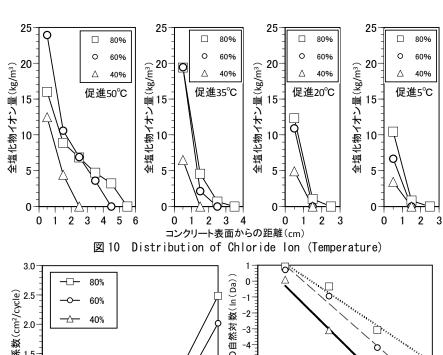
イタリアのシチリア島アウグ スタにある RC 造飛行船格納庫(図 13) を対象とし、図 14 に示す位置から、 ドリル法⁷⁾によって試料を採取し、飛行 船格納庫の平面的な位置による塩化物イ オン量の相違について検討した。

図 15 は、約 1mの高さにおいて、E19Bを 起点とした格納庫外周における塩化物イオン量を示している。海側に面している正面 では塩化物イオン量が多く、東西面では正 面から離れるに従い塩化物イオン量は小さ なものとなった。

3) 高さの影響 6)

同飛行船格納庫において、高さの影響について検討した。

図 16 は、W14B について、採取高さの違いによる塩化物イオン分布を示している。最も高い29.6m の測定点において、塩化物イオン量は最も大きい値を示した。それ以外の測定点においては、



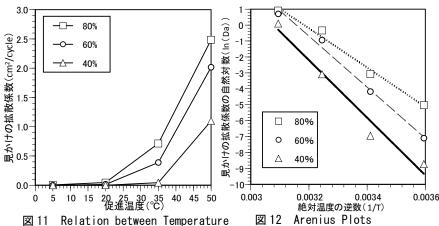


図 11 Relation between Temperature and Diffusion Coefficient

of Diffusion Coefficient

表 3 Test Condition

	材齢条件	材齢28日
	14.75.11.00名出	乾燥過程 4日(96時間)
	1サイクルの条件	浸漬過程 3日(72時間)
		50°C
促進浸透試験	乾燥∙湿潤 温度条件	35°C
		15°C
		5°C
	塩水濃度	3%
	取出しサイクル	5サイクル

表 4 Regression Expression and Activation Energy

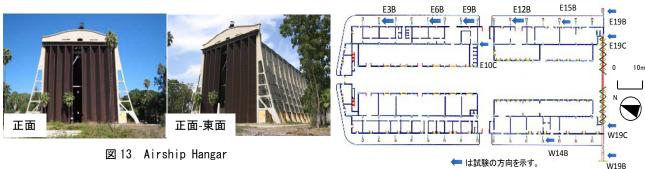
W/C	回帰式	活性化エネルギー (kJ/mol)
80%	$y=-1.23 \times 10^4 x + 39.2$	102.5
60%	$y=-1.60 \times 10^4 x + 50.6$	133.3
40%	$y=-1.81 \times 10^4 x + 55.6$	150.2

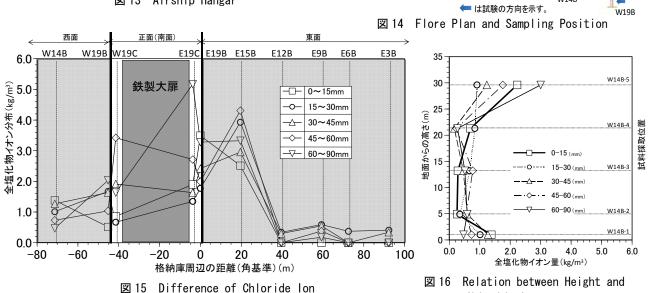
概ね低い値を示した。

4. まとめ

超低水セメント比セメントペーストの強度発現、 膨張収縮を検討した結果は、以下の通りである。

1) 養生温度が60℃までは、温度が高いほど強度





が大きいが、80℃では 60℃の時よりも小さい。 60℃までのこの傾向は水セメント比が小さいほど 顕著である。

- 2) 水中養生が封緘養生よりも大きく、その差は水 セメント比が小さいほど大きく、未水和セメントの 外部からの供給水による水和の進行と考えられる。
- 3) 水中養生を行った試験体は膨張し、封緘養生、 気中養生を行った試験体は収縮する。
- 4)水中養生による膨張は、材齢3日までそれ以降の変化は小さい。

コンクリートの塩化物イオン浸透性およびその 評価方法を検討した結果は、以下の通りである。

- 1) 促進試験機を試製し、促進試験条件を塩水濃度 3%、試験温度 50℃、1 サイクル乾燥 4 日浸漬 3 日の7日とした。
- 2) フライアッシュセメント B 種、高炉セメント B 種は遮塩性が高く、低熱ポルトラントセメントは 低いことがわかった。
- 3) 水セメント比を小さくすると、遮塩性が高くなることを確認し、水セメント比と拡散係数の関係

Chloride Ion

4) 乾燥開始材齢の違いが塩化物イオン浸透性に及ぼす影響は認められなかった。

- 5) 塩化物イオン浸透は、温度依存性が高く、化学 反応速度論に則ることがわかった。また、得られ た活性化エネルギーにより水セメント比が小さい 程、遮塩性が高くなることが理解できた。
- 6) 塩化物イオン量は、海側に面した正面から離れていく程、小さくなることがわかった。
- 7) 高い位置程、コンクリート中の塩化物イオン量が大きい傾向にあった。

「参考文献〕

式を示した。

- 1) 高橋英孝・湯浅昇・山田義知・大城武・松井勇・笠井芳夫: コンクリートの 塩化物イオン促進浸透試験方法の検討、学術講演梗概集 A-1 材料施工、 pp797-798、2008.9
- ソーンウィーラ・山田義知・杉山隆文・大城武:フライアッシュを細骨材の 一部として代替したコンクリートの遮塩性評価、日本建築学会構造系論文集、 No. 560、pp. 17-25、2002.10
- No. 560、pp. 17-25、2002. 10 3) 高橋英孝・湯浅昇・松井勇・笠井芳夫:セメント種類の違いが塩化物イオン 浸透性に関する研究、学術講演梗概集 A-1 材料施工、 pp. 189-170、2009. 8
- 4) 高橋英孝・湯浅昇・松井勇・笠井芳夫: コンクリートの水セメント比が塩化 物イオン浸透に及ぼす影響、セメント技術大会講演要旨、pp122-123、2009.5
- 5) 湯浅昇・笠井芳夫・松井勇・高橋英孝:エコセメントを用いたコンクリート の遮塩性に関する検討、日本コンクリート工学協会年次大会、2009.7
- 6) 湯浅昇・青木孝義・浜崎仁・谷川恭雄・高橋英孝:ドリル法・小径コアを用いた建造後90年を経過したイタリアRC飛行船格納庫の劣化調査、コンクリート構造物の非破壊検査論文集、pp351-356、2009.8
- 7) 湯浅昇・笠井芳夫・松井勇:ドリル削孔粉を用いたコンクリート中の塩化物 イオン量の現場試験方法の提案、日本コンクリート工学年次論文報告集、 No. 21、pp. 1303-1308、1999. 7