

V-8

コンクリートの白華発生と微細構造の関係の検討

北見工業大学工学部 正 員 桜井 宏 鮎田耕一 岡田包儀

北見工業大学大学院 学生員○荒木敬大

1.はじめに コンクリートは近年、美観等も重要な性質となりつつあり、美観の要因には、デザイン、表面の仕上がり、色、コンクリート表面のひびわれや、劣化、汚れ等が無い等があり、コンクリートの初期の養生が白華発生に大きな影響を与えるのは筆者らの既往の研究で明らかになりつつある¹⁾。本研究では、カラーコンクリート等の品質²⁾や美観の低下につながる白華(efflorescence)に着目し、コンクリート打設後のコンクリートの性質に大きく影響を与える細孔半径が10A(単位A:オングストローム)から10⁵Aまでの毛細管空隙や骨材下面の空隙に着目し、これらの空隙が白華発生面積率にどのように影響を与えるかを、実験検討する。

2.検討方法 Fig 2.1に検討のフローを示す。Table 2.1に示す水準の供試体を作成した。なお全データ数は108個である。供試体はカラーコンクリートとした。Table 2.2に供試体のベースコンクリートの配合とフレッシュコンクリートの性質及び材令28日圧縮強度を示す。配合はセメント量と水セメント比に着目して目標空気量を4.5±1%に管理した。なおスランブは参考として測定した。練り上がり後にベースコンクリートに着色料を添加した。R.H.80%で養生後、材令1日で重量、表面水分率³⁾を測定した。なお、表面水分率は、モルタル乾燥度計MT-8AM0型(ケット科学社製)の電極を供試体表面にあてて、表面水分率を測定した。表面の初期の状態を観察するために写真撮影を行った。Table 2.3に湿潤係数を算定する際の基準³⁾として、各種湿潤環境条件に対する養生の際の水分の供給に対する係数を示した。この係数の逆数に100を掛け湿潤係数とした。この後直ちに、Table 2.4に示す標準養生、恒温恒湿室、乾燥室及び特殊養生ボックス中で各種条件の養生を材令7日まで行った。また、これらを白華発生試験装置で材令91日まで試験を行った。試験後、これらの供試体の各試験面から白華発生面積を測定した。これらを供試体の全試験面積で除して、白華発生面積率(%)とした。また、試験に用いたコンクリート供試体で試験後、材令が平均で24カ月後、コンクリート表層部から5mmまでとコンクリート表面20mmから50mmまでのコンクリート供試体で、水銀圧入方式を用いてコンクリート供試体の細孔容積を測定した。実験結果を、単位セメント量、湿潤係数、水セメント比毎に整理し、分散分析⁵⁾等を行った。

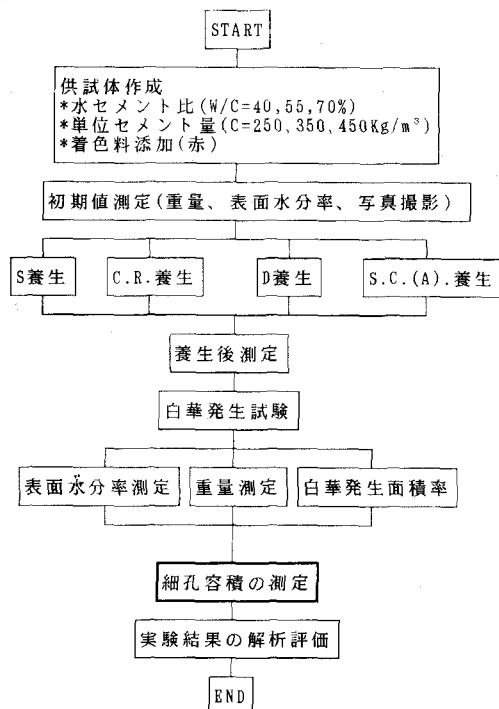


Fig 2.1 コンクリートの白華発生の要因に関する検討のフロー

Table 2.1 実験の水準

供試体サイズ	10*10*20cm
水セメント比(W/C)	40%, 55%, 70%
単位セメント量(C)*	250, 350, 450Kg/m ³
養生条件	S, S.C.(A), C.R., D

*細孔径分布の測定については単位セメント量250kg/m³を除き350, 450kg/m³のものについて行った。

Study on Relationship Between Efflorescence Affecting on Concrete Surface and Capillary System
by H. SAKURAI, K. AYUTA, K. OKADA and Y. ARAKI.

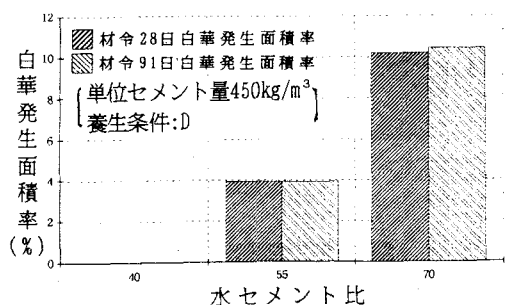


Fig 3.1.3 白華発生面積率と水セメント比の関係

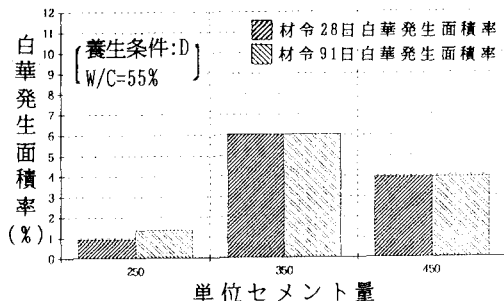


Fig 3.1.4 白華発生面積率と単位セメント量の関係

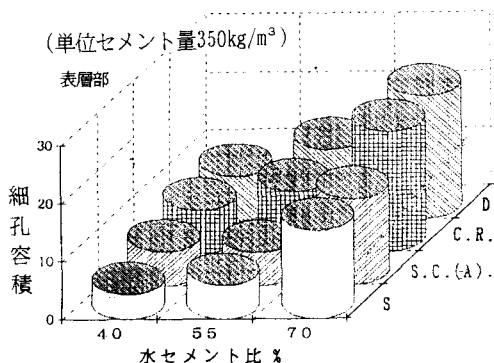


Fig 3.1.5 細孔半径が 10^{-4} A の細孔容積と水セメント比、養生条件の関係

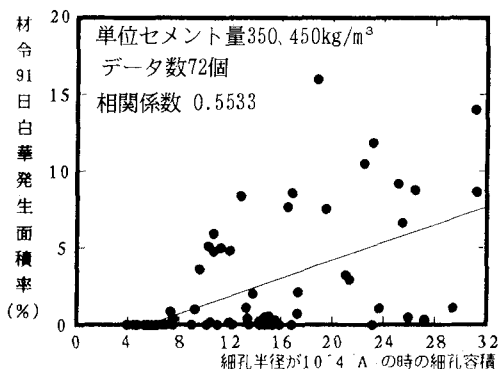


Fig 3.1.6 白華発生面積率と細孔半径が 10^{-4} A の細孔容積の関係

3.2. 考察

Table 3.2.1 に示す実験結果の相関係数行列より、材令28日及び材令91日ともに白華発生面積率と養生時の湿潤係数は負の相関であった。同様に材令28日及び材令91日ともに水セメント比は正の相関を示した。3つの要因の中では養生条件に続き、水セメント比、単位セメント量の順に相関を示した。Table 3.2.2 の分散分析の結果より白華発生面積率は、単位セメント量、水セメント比、養生条件の3つの要因のうちで養生条件の影響を1番受け有意水準1%で有意である、白華発生面積率と水セメント比の関係も、有意水準5%で有意と養生条件に続いて影響が大きい。白華発生面積率とセメント量の関係は有意水準5%で有意にも入らず強い影響は認められなかった。筆者らの既往の研究で水セメント比を正、養生条件を負とする重回帰モデルを得た。なお水セメント比が透水係数に影響し、コンクリート初期の養生はコンクリートの表面の緻密さに影響を与えると考えられる。これより、養生時からの水分の移動が白華発生の機構に大きく影響していると考えられる⁶⁾。したがってここでは細孔径に着目する。

Table 3.2.1 相関係数(全データ) Table 3.2.2 分散分析結果(全データ)

	単位セメント量 (kg/m ³)	養生条件 (%)	水セメント比 (%)
白華発生面積率 材令28日	0.0230	-0.3570	0.2420
白華発生面積率 材令91日	-0.0340	-0.3870	0.2280

分散分析項目	要因	自由度	平方和	F値	F検定	判定
白華発生面積率 (材令28日)	湿潤係数:CM	3	220.459	8.20	0.0001	**
	水セメント比:W/C	2	81.715	4.56	0.0127	*
白華発生面積率 (材令91日)	単位セメント量:UCW	2	35.422	1.98	0.1439	
	湿潤係数:CM	3	263.955	9.20	0.0001	**
	水セメント比:W/C	2	90.928	4.75	0.0107	*
	単位セメント量:UCW	2	22.426	1.17	0.3138	

** : 有意水準1% * : 有意水準5%

Table 3.2.3 に示す白華発生面積率と細孔容積の関係では細孔半径が 10^{-4} A のものが他の細孔容積に比べ相関係数が高かった。これは細孔半径が小さすぎるとコンクリート内部の毛細管現象がおりずらく、また大きすぎると水の蒸発が活発に起こりすぎてコンクリート表面まで白華になるカルシウム分がでてこないものと思われる。水の毛管空隙による移動は $1.3\mu\text{m}$ (1.3×10^{-4} A)の径以上で起こると推定されており⁷⁾この解析結果と符合する。

Table 2.2 供試体の配合とフレッシュコンクリートの性質及び材令28日強度

Case	示方配合(単位量)						フレッシュコンクリートの性質及び材令28日強度					
	水セメント比(%) W/C	細骨材率(%) S/a	セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	AE剤 *1 (%)	空気量(%)	スランプリング(°C)	材令28日 標準養生 圧縮強度 (kg/cm ²)	材令28日 恒温恒湿 養生圧縮 強度(kg/cm ²)	材令28日 恒温恒湿 養生圧縮 強度(kg/cm ²)	材令28日 恒温恒湿 養生圧縮 強度(kg/cm ²)
1	40	30	100	250	613	1440	0.008	*3	0.1	21.0	316	245
2	55	30	138	250	584	1374	0.019	4.2	1.1	21.0	336	216
3	70	55	175	250	923	931	0.010	5.6	6.6	20.0	212	163
4	40	30	140	350	555	1311	0.088	3.8	1.0	16.5	322	284
5	55	60	193	350	1028	693	0.042	4.8	8.6	16.0	319	251
6	70	70	245	350	1102	479	0.053	4.6	24.1	15.0	201	171
7	40	60	180	450	784	891	0.144	5.2	8.0	16.5	360	288
8	55	47	248	450	892	602	0.324	5.3	24.4	16.3	285	219
9	70	70	315	450	918	396	0.302	4.4	*2	15.0	212	188

*1 セメント量に対するAE剤の重量パーセント

*2 スランプリングのため測定不能

*3 超硬練りのため空気量は管理できなかったが、参考値9.2%を得た

Table 2.3 湿潤係数を求める基準

環境条件	M*
水中	0.8
R.H. 90%	1.3
R.H. 70%	2.0
R.H. 40%	3.0

M*: dry creep coefficient

Table 2.4 養生条件

養生方法	養生条件	記号	CM
標準養生	水中養生	S	125
恒温室	温度約20°C、R.H.約85%	C.R.	67
乾燥室	温度約45°C、R.H.約30%	D	25
特殊養生*ボックス	温度約20°C、R.H.約95%以上	S.C.(A)	94

* CO₂を常時混入する

3. 実験結果及び考察

3.1 実験結果 Fig 3.1.1に白華発生面積率と養生条件の関係を示す。乾燥室のものが白華発生面積率が最大で、次に恒温室のものが大きく発生し、ついで特殊養生ボックス、標準養生となっている。Fig 3.1.2に全実験ケースの白華発生面積率と湿潤係数の関係を示す。なお養生時、CO₂を常時混入したS.C.(A)のCO₂の影響は分散分析で低かったので湿潤係数を横軸にとった。湿潤係数が増加すると白華発生面積率が減少していることがわかる。なお、CM=94のばらつきが少なく、CM=125でばらついているものが若干あり、これは、湿潤係数の他の影響も考えられ、この点については今後さらに検討を要する。Fig 3.1.3に白華発生面積率と水セメント比の関係を示す。この図より水セメント比が増加すると直線的に白華発生面積率が増加していることがわかる。Fig 3.1.4に白華発生面積率と単位セメント量の関係のグラフを示す。この様に、セメント量による違いがあまり認められなかった。Fig 3.1.5に細孔半径が10⁻⁴Aの細孔容積と水セメント比、養生条件の関係を示す。細孔容積は水セメント比が70、55、40%の順に大きく、養生条件で見ると、D、C.R.、S.C.(A)、Sの順に大きい。Fig 3.1.6に白華発生面積率と細孔半径が10⁻⁴Aの細孔容積との関係を示す。細孔半径が10⁻⁴Aの細孔容積が増加すると白華発生面積率も増加し、正の相関を示す。

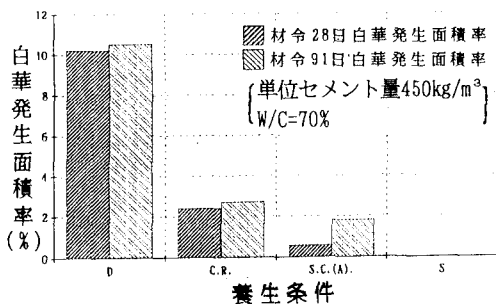


Fig 3.1.1 白華発生面積率と養生条件の関係

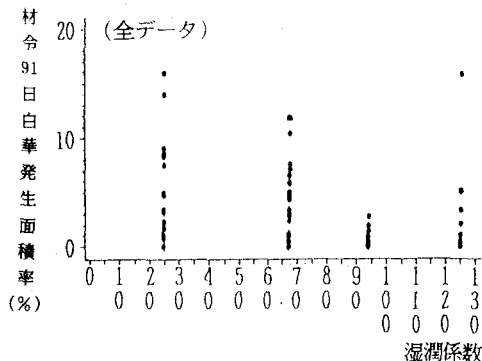


Fig 3.1.2 白華発生面積率と湿潤係数の関係

Table 3.2.3 相関係数 (単位セメント量350、450kg/m³ データ数72個)

	表面水分率 材令28日	表面水分率 材令91日	重量変化率 材令28日	重量変化率 材令91日	細孔容積率 表層部	細孔容積率 中心部	細孔半径 10 ⁵ A以上 10 ⁶ A未満 表層部	細孔半径 10 ⁵ A以上 10 ⁶ A未満 中心部	細孔半径 10 ⁴ A以上 10 ⁵ A未満 表層部	細孔半径 10 ⁴ A以上 10 ⁵ A未満 中心部	細孔半径 10 ³ A以上 10 ⁴ A未満 表層部	細孔半径 10 ³ A以上 10 ⁴ A未満 中心部	細孔半径 10 ² A以上 10 ³ A未満 表層部	細孔半径 10 ² A以上 10 ³ A未満 中心部	細孔半径 10 ¹ A以上 10 ² A未満 表層部	細孔半径 10 ¹ A以上 10 ² A未満 中心部
白華発生 面積率 材令28日	0.6223	0.3806	0.1849	-0.0893	0.2036	0.2187	0.1511	-0.0393	0.5256	0.3659	0.0433	0.3495	-0.0353	-0.0219	0.1639	0.1750
白華発生 面積率 材令91日	0.6385	0.3943	0.1577	-0.1074	0.2419	0.2462	0.1654	-0.0195	0.5533	0.3844	0.0735	0.3714	0.0055	-0.0041	0.1793	0.2121

Table 3.2.3より白華発生面積率に影響を与えた細孔半径が10⁴A細孔容積の分散分析結果をTable 3.2.4.に示す。水セメント比，単位セメント量，養生条件がF検定による有意水準1%で有意であった。

Table 3.2.4 分散分析結果 (単位セメント量350、450kg/m³ データ数72個)

分散分析項目	要因	自由度	平方和	F値	F検定	判定
細孔半径	湿潤係数:CM	3	723.242	26.19	0.0001	**
10 ⁴ A	水セメント比:W/C	2	1960.749	106.50	0.0001	**
表層部	単位セメント量:UCW	1	467.874	50.83	0.0001	**
細孔半径	湿潤係数:CM	3	313.449	12.42	0.0001	**
10 ⁴ A	水セメント比:W/C	2	391.890	23.30	0.0001	**
中心部	単位セメント量:UCW	1	445.113	52.92	0.0001	**

** :有意水準1%

Table 3.2.5に白華発生面積率と細孔半径が10⁴Aの細孔容積の重回帰分析結果を示す。重回帰分析より次式のモデル式を得た。

MEN91=0.2904V-1.6065…式(3.2.1)

ただし MEN91:白華発生面積率(材令91日)(%) V:細孔半径が10⁴Aの細孔容積(表層部) なお相関係数は0.5533で、F検定による有意水準1%で有意であった。

Table 3.2.5 重回帰分析結果 (単位セメント量350、450kg/m³ データ数72個)

目的変数 (従属変数)	説明変数 (独立変数)				重相関係数	F検定値 (PR:>F)
	細孔半径が10 ⁴ Åから 10 ⁵ Åの細孔容積 係数推定値T検定値	定数項		係数推定値T検定値		
白華発生 面積率(%) (材令91日) :MEN91	0.2904	0.0001	-1.6065	0.0001	0.5533	0.0001

白華発生面積率に影響を与えた要因がコンクリート内部の，微細構造にどのように影響を与えるのかについて，重回帰分析より次式のモデル式を得た。

V=0.4258W/C-0.0779CM-3.8816…式(3.2.2)

ただし V:細孔半径が10⁴Aの細孔容積(表層部) W/C:水セメント比(%) CM:湿潤係数 なお重相関係数は0.8241であった。以上より細孔半径が10⁴Aの細孔容積(表層部)より白華面積率がある程度予測できることがわかる。

4.まとめ コンクリートの白華発生要因に関する実験と検討の結果以下の事が明らかになった。白華発生面積率と細孔半径が10⁴Aの細孔容積は他の細孔半径のものよりも相関が高く正の相関を示した。

【謝辞】 本研究にあたり北海道大学の藤田嘉夫名誉教授、佐伯昇教授の御指導を受けた。ここに感謝する。また、本研究の実施あたり満尾総研，池田コンクリート，バイエル(株)，北見工業大学の猪狩平三郎技官，北見工業大学卒業生の杉浦，成田，北見工業大学の中尾，迫，荒井，阿部，吉川，佐瀬，岩井，伊藤，田中各氏に実験及び解析に際し協力を得た。ここに感謝する。

【参考文献】 1)H. SAKURAI, K. AYUTA, KOKADA, Y. ARAKI Study on efflorescence to improve beauty of concrete. 北見工業大学 研究報告 第25巻 第1号: PP59~69, 1993
2)伊藤 茂富: コンクリート工学 森北土木工学 PP145化学的侵食，損食などに対する耐久性
3)山崎，榊原: 第45回セメント技術大会講演集, PP560~555, 1991
4)コンクリート標準示方書: 土木学会 平成3年度版 設計編PP.28, 1991
5)樺木 武: 演習 土木計画数学，森北出版(株)，1991
6)Peter Kresse: 白華現象—その発生のメカニズムと防止の可能性，バイエル(株) 資料
7)尾坂 芳夫, 後藤 幸正: ネビルのコンクリートの特性，技報堂出版, PP29, 1980