

超軽量高強度PCカーテンウォールの開発

—— 超軽量高強度コンクリートの物性 ——

小川 晴 果 永井 康 淑
川 地 武 山 口 恒 雄

Development of Ultra-Lightweight and High-Strength Precast Concrete Curtain Wall

—— Properties of Ultra-Lightweight and High-Strength Concrete ——

Haruka Ogawa Yasuyoshi Nagai
Takeshi Kawachi Tsuneo Yamaguchi

Abstract

The objective of this study was to develop an ultra-lightweight high-strength precast concrete curtain wall without need to use specialized manufacturing techniques. Ultra-lightweight concretes (ULC) with densities in the range of 1.2-1.5t/m³ were made using two ultra-lightweight inorganic coarse aggregates and fine expanded polystyrene beads. Compressive and splitting-tensile strength, Young's modulus, bond between concrete and steel reinforcement, drying shrinkage, resistance to the freezing and thawing cycling, and carbonation of ULC specimens were determined. The following results were obtained: 1)The compressive strength at 28 days varied from 270 to 460 kgf/cm², and the target compressive strength (200 to 350 kgf/cm² at 28 days) was reached. 2)The bond between concrete and steel reinforcement is equal to, or even better than, that of normal density concrete(NDC). 3)The drying shrinkage was smaller than that of NDC. 4)The resistance to the freezing and thawing was related to the type of aggregates. 5) The resistance to carbonation was very high.

概 要

本研究は、特殊な製造方法を必要としない、超軽量高強度プレキャストコンクリート(PC)カーテンウォールの開発を目的としたものである。2種類の超軽量無機系粗骨材と微粒子発泡ポリスチレンビーズの複合化によって製造した超軽量コンクリート(単位容積質量1.2~1.5t/m³)の圧縮強度、引張強度、静弾性係数、鉄筋との付着強度、長さ変化率、凍結融解および中性化に対する抵抗性について試験検討を行った結果、以下に示すことが明らかとなった。1)4週圧縮強度は270~460kgf/cm²の範囲であり、開発目標(200~350kgf/cm²)を充分達成できた。2)鉄筋の付着強度は普通コンクリートと同等以上である。3)乾燥収縮は普通コンクリートよりもむしろ小さい。4)凍結融解抵抗性は骨材の種類によって異なる。5)中性化速度は極めて遅い。

1. はじめに

軽量コンクリートを用い、プレキャストコンクリート(PC)カーテンウォールの軽量化を図ることは、構造物の重量軽減につながり、構造設計上有利なばかりでなく、PCカーテンウォールの大型化が可能となるため、特に高層ビルにおいては施工性が著しく向上する。ただし、一般にコンクリートは単位容積質量の低下にともない強度、耐久性および寸法安定性が低下するため、単位容積質量1.5t/m³以下の超軽量コンクリートでは、タイルや石材の打込みが困難である問題があった。

この研究は、タイル、石材の打込み一体成形が可能で、オートクレーブ(高温高圧蒸気養生)などの特殊養生を必要としない、耐久性に優れた超軽量PCカーテンウォールの開発を目的としたものである。本報では気乾単位容積質量1.2~1.5t/m³、圧縮強度200~350kgf/cm²を

目標とする超軽量コンクリートの材料・調合について実験検討を行った。

2. 使用材料および調合

2.1 使用材料

結合材としては早強ポルトランドセメントの一部をシリカフューム(比重2.20)で置換したのを用いた。骨材は市販の超軽量骨材のうち国産の1銘柄(粗骨材;スーパーメサライト, 細骨材;メサライト)およびドイツ産の1銘柄(粗骨材;リアポール, 細骨材;リアポール砂K)を使用した。骨材の品質をTable 1に示す。また、既往の研究成果を踏まえ、単位容積質量コントロール用混和材として微粒子発泡ポリスチレンビーズ(20倍発泡, 比重0.07)を使用した。混和剤には、高性能減水剤(ポゾリスSP-8N)およびAE剤(ポゾリス775S)を使

用した。

2.2 調合条件

シリカフェームの置換率はセメントの内割り重量で10%とし、水結合材比は30%で一定とした。プレキャスト

Table 1 軽量骨材の性質
Physical Properties of Light Weight Aggregates

種類	記号	銘柄	絶乾比重	表乾比重	吸水率 (%)	粗粒率
粗骨材	M	スーパーメサライト	0.92	1.03	12.0	6.41
	L	リアポール	1.07	1.21	12.8	6.33
細骨材	M	メサライト	1.68	1.89	12.5	2.61
	L	リアポール砂K	1.47	1.71	19.3	3.00



Photo 1 微粒子発泡ポリスチレンビーズ顕微鏡写真 (×27倍)
Microphotograph of Fine Expanded Polystyrene Beads (×27)



Photo 2 超軽量粗骨材「スーパーメサライト」
Ultra-Lightweight Coarse Aggregate "Super MESALITE"



Photo 3 超軽量粗骨材「リアポール」
Ultra-Lightweight Coarse Aggregate "Liapor"

Table 2 コンクリートの調合
Proportion of the Concrete Mixtures

調合 No.	骨材の種類	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m ³) *1	絶対容積(L/m ³)					質量(kg/m ³)					化学混和剤 (kg/m ³)		練上単位容積質量の計算値 (t/m ³) *4	
				セメント	S F *2	粗骨材	細骨材	発泡ビーズ	セメント	S F *2	粗骨材 *3	細骨材 *3	発泡ビーズ	SP 8N	775S		
M1	メサライト	30	150	143	23	380	254	0	450	50	350	427	0	4	0.0225	1.501	
M2							204	50				343	3				1.410
M3							149	105				250	7				1.310
M4							94	160				158	11				1.212
L1	リアポール	30	150	143	23	380	254	0	450	50	407	373	0	4	0.0225	1.546	
L2							184	70				270	5				1.438
L3							123	131				181	9				1.343
L4							62	192				91	13				1.249

*1 混和剤を含む水量 *2 シリカフェーム *3 絶乾質量 *4 JASS 5 計算式による

コンクリートカーテンウォールの製造に一般的に用いられている、練上り時のスランプ5cm、および空気量4%を目標とした。また、練上りの単位容積質量の目標値は、1.2, 1.3, 1.4および1.5t/m³とし、細骨材の一部を発泡ポリスチレンビーズ(EPSB)で置換することによって調整した。コンクリートの調合をTable 2に示す。

3. 供試体の作製および試験方法

3.1 供試体の作製

コンクリート供試体の作製はJIS A 1138 (試験室におけるコンクリートの作り方) およびJIS A 1132 (コンクリートの強度用供試体の作り方) に準じて行った。なお、骨材はすべてプレウェットイングし、表乾状態となるように調整したものを用いた。

3.2 試験方法

試験項目および試験方法の一覧をTable 3に示す。

4. 試験結果および考察

4.1 フレッシュコンクリート

試験結果のまとめをTable 4に示す。EPSBを混入した調合の方がスランプが大きくなり、空気量も少なくなる傾向にあった。細骨材量が減少したこと、および微粒子で球形のEPSBのベアリング効果によってワーカビリティが改善されたことによると考えられる。また、練上り単位容積質量の実測値はJASS 5計算式による許容範囲±3.5%以内におさまっており、EPSBの混入により単位容積質量のコントロールが容易に行えることが確認された。

4.2 硬化コンクリート

4.2.1 単位容積質量 練上り単位容積質量と4週気乾単位容積質量の関係をFig. 1に示す。練上り単位容積質量に比べ、気乾単位容積質量は0.001~0.035t/m³軽くなった。

4.2.2 圧縮強度・ヤング係数 材齢と圧縮強度の関係をFig. 2に示す。また、単位容積質量と4週圧縮強度の関係、圧縮強度とヤング係数の関係をそれぞれFig. 3およびFig. 4に示す。早強セメントを使用したため材齢1週ではほぼ最終強度を発現した。単位容積質量と4週圧縮強度の間にはFig. 3に示すように強い相関関係が認められたが、同じ単位容積質量ではスーパーメサライトを用いたコンクリートに比べ、リアポールを用いたコンクリートの方が圧縮強度が高めとなっている。造粒タイプのリアポールの方が非造粒タイプのスーパーメサライトよりも圧縮載荷時に応力集中が起こりにくいためではないかと推察される。一方、Fig. 4に示すように同じ圧縮強度に対して、スーパーメサライトを用いたコンクリートの方がリアポールを用いたコンクリートに比べヤング係数は大きい傾向にあった。本試験における超軽量コンクリートのヤング係数の実測値は、以下に示す日本建築

Table 3 試験項目および方法
Test Procedures

試験項目		試験方法
フレッシュ コンクリート	スランプ	JIS A 1101 (コンクリートのスランプ試験方法)
	単位容積 質量	JIS A 1116 (まだ固まらないコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の重量による試験方法)
	空気量	同上
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法)
	静弾性係数	JIS 原案 (コンクリートの静弾性係数試験方法 (案))
	引張強度	JIS A 1113 (コンクリートの引張強度試験方法)
	鉄筋との 付着強度	JIS 原案 (引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法 (案))
	長さ変化率	JIS A 1129 (セメント及びコンクリートの長さ変化試験方法)
	凍結融解 促進中性化	JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤) 付属書2 高耐久鉄筋コンクリート造り始施工指針 (案)・同解附付1

Table 4 フレッシュコンクリートの性質
Properties of the Fresh Concrete

調合 No.	スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	単位容積質量 (kg/l)			練上り 温度 (℃)
			実測 値	計算値 *1	実測値と 計算値の 差(%) *2	
M 1	2.5	7.9	1.484	1.501	-1.12	25.5
M 2	5.6	6.1	1.421	1.410	0.77	23.5
M 3	7.5	3.5	1.349	1.310	2.85	25.5
M 4	6.8	2.1	1.257	1.212	3.57	25.0
L 1	2.6	9.6	1.551	1.546	0.30	24.3
L 2	5.5	8.2	1.437	1.438	-0.88	24.3
L 3	4.0	5.2	1.374	1.343	2.23	24.1
L 4	7.1	4.3	1.290	1.249	3.22	24.3

*1 JASS 5 計算式による *2 許容範囲±3.5%

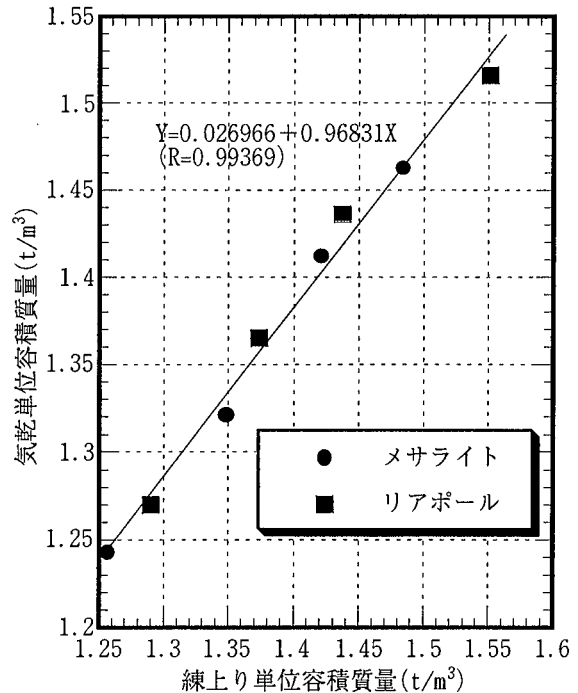


Fig. 1 練上り単位容積質量と気乾単位容積質量
Air Dried Concrete Density vs
Fresh Concrete Density

学会RC基準式による計算値とよく一致した。また、超軽量コンクリートのヤング係数は、同式で求めた同じ圧縮強度の普通コンクリート（気乾単位容積質量 2.3t/m^3 ）のヤング係数の45~56%にあたり、軽量コンクリートでは同一圧縮強度の普通コンクリートに比べヤング係数が低下するという既往の研究結果と一致した²⁾。

$$E = 2.1 \times 10^5 \times (\gamma / 2.3)^{1.5} \sqrt{F_c / 200}$$

ここに、E：コンクリートのヤング係数(kgf/cm²)

γ ：コンクリートの気乾単位容積質量(t/m³)

F_c：コンクリートの設計基準強度(kgf/cm²)

4.1.3 引張強度 4週圧縮強度と4週引張強度の関係をFig. 5に示す。L1の調査を除き、引張強度の圧縮強度に対する比率は1/12~1/16の間であった。また、その比率は圧縮強度が高くなるにつれて小さくなっており、軽量コンクリートに関する既往の研究結果と一致した²⁾。

4.1.4 鉄筋との付着強度 試験結果のまとめをTable 5に示す。また、引張強度と付着強度の関係をFig. 6に示す。自由端のすべり量 $0.002D$ における付着応力度は、93.8~111.8kgf/cm²であった。既往の研究によれば³⁾、普通コンクリート（圧縮強度 225kgf/cm^2 ）の異形鉄筋（水平筋）に対する平均付着応力は 48kgf/cm^2 であることから、超軽量コンクリートの付着強度は普通コンクリートと同等以上であることが確認された。また、鉄筋の付着強度はコンクリートの引張強度の増大に伴い、増大する傾向にあった。

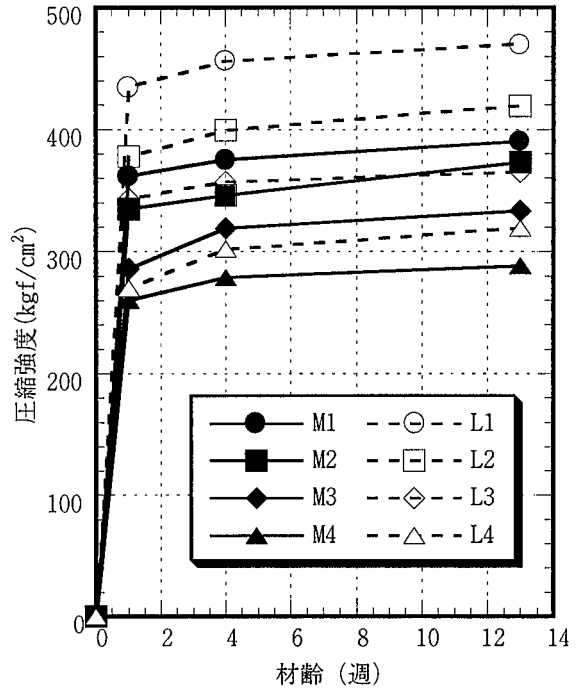


Fig. 2 材齢と圧縮強度の関係
Compressive Strength Development with Time

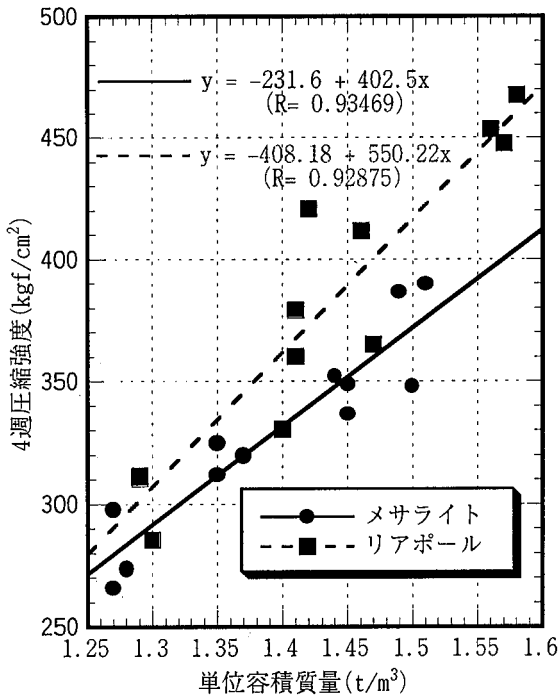


Fig. 3 単位容積質量と4週圧縮強度の関係
28-Day Compressive Strength vs Density of ULC

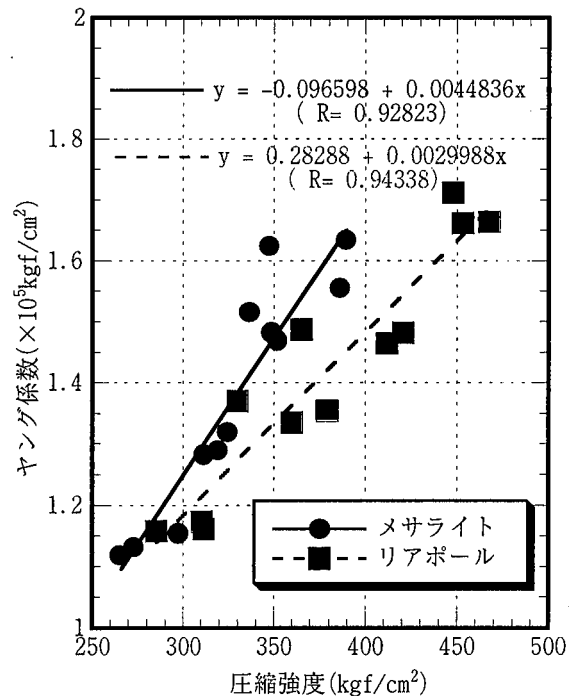


Fig. 4 圧縮強度とヤング係数の関係
E-modulus vs Compressive Strength of ULC

4.1.5 長さ変化 材齢と乾燥収縮ひずみの関係をFig. 7に示す。乾燥収縮ひずみは、単位容積質量の減少に伴い増大する傾向にあった。細骨材の代わりに、ヤング係数の小さいEPSBの混入量が増大したことがその一因と考えられる。超軽量コンクリートの材齢12ヶ月の乾燥収縮ひずみは $3.86 \sim 6.36 \times 10^{-4}$ の範囲であった。既往の研究データより、普通コンクリート（スランプ5cm, 単位セメント量 450kg/m^3 ）の材齢12ヶ月の乾燥収縮ひずみが 7×10^{-4} 程度であることから²⁾、超軽量コンクリートの乾燥収縮は普通コンクリートよりもむしろ小さいことが確認された。ただし、一般に、軽量コンクリートの乾燥収縮は長期にわたって増大することが知られているため引き続き測定を継続していく必要があると考える。

Table 5 鉄筋との付着強度試験結果
Bond Strength between Concrete and Steel Reinforcement

調査No.	鉄筋位置	付着応力度(kgf/cm ²)			
		自由端のすべり量 0.002D	標準偏差	最大値	標準偏差
M1	中央	99.8	9.4	124.9	1.5
M2		109.7	15.0	122.9	7.2
M3		95.0	12.9	137.9	5.1
M4		106.5	19.5	134.8	2.8
L1	中央	93.8	0.1	102.9	4.0
L2		94.6	16.3	122.4	5.4
L3		111.8	8.5	129.9	6.9
L4		109.2	8.4	115.1	3.2

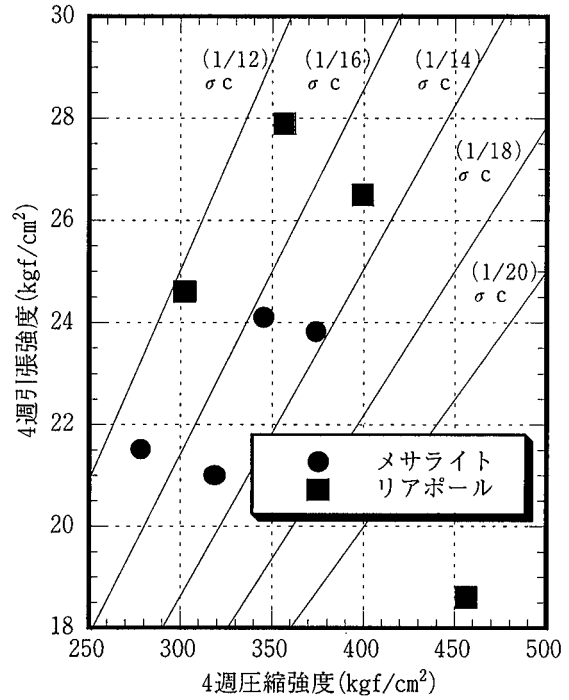


Fig. 5 圧縮強度と引張強度の関係
28-day Tensile Strength vs 28-day Compressive Strength of ULC

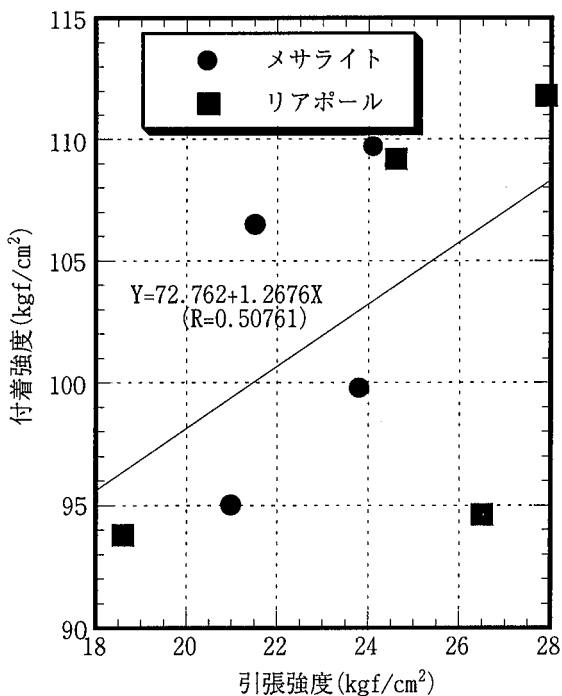


Fig. 6 引張強度と付着強度の関係
Bond Strength between Concrete and Steel Reinforcement vs Tensile Strength of ULC

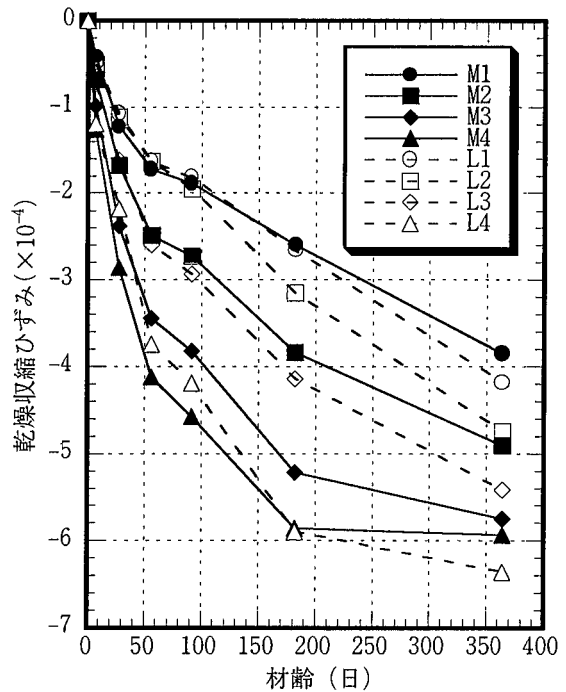


Fig. 7 乾燥収縮試験結果
Drying Shrinkage of ULC

4.1.6 凍結融解 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係をFig. 8に示す。スーパーメサライトを使用したコンクリートの耐久性指数は、200サイクルを終了した時点で85~89、300サイクルで69~88であり、耐凍害性に優れていることが確認された。しかし、リアポールを使用したコンクリートでは200サイクル迄に供試体が破損してしまい、耐凍害性に乏しいことが明らかとなった。また、スーパーメサライトを用いたコンクリートではEPSBの混入量が増大するにともない耐久性指数も増大しており、軽量細骨材の一部を非吸水性の微粒子EPSBで置換することによって、耐凍害性が向上することが確認された。

4.1.7 中性化 Photo 4に促進中性化試験結果の1例を示す。材齢91日の時点での中性化深さは、いずれの調合でもゼロであった。既往の研究から、軽量コンクリートの中性化は普通コンクリートよりもやや速いが、表面活性剤を使用することによって中性化を遅くできることが知られている²⁾。本実験の調査では高性能減水剤およびAE剤を用い、水結合材比を低減(30%)していることから中性化速度が著しく遅くなったものと判断できる。

5. まとめ

国産(スーパーメサライト)およびドイツ産(リアポール)超軽量無機系骨材と超微粒子発泡ポリスチレンビーズ(EPSB)の複合化による超軽量コンクリート(気乾単位容積質量1.2~1.5t/m³)の物性試験を行い、以下の事柄が明らかとなった。

- 1) 細骨材の一部をEPSBで置換することにより、コンクリートの気乾単位容積質量を1.2~1.5t/m³の間で任意にコントロールすることが可能であった。
- 2) 4週圧縮強度は279~456kgf/cm²の範囲にあり、開発目標であった200~350kgf/cm²を十分達成できた。
- 3) ヤング係数は学会RC基準式と良く一致しており、同じ圧縮強度の普通コンクリートのヤング係数の45~56%であった。
- 4) 引張強度は圧縮強度の1/12~1/16であり、軽量コンクリートに関する既往の研究結果と一致した。
- 5) 鉄筋とコンクリートの付着強度は、普通コンクリートと同等以上であった。
- 6) 材齢12ヶ月の乾燥収縮ひずみは3.86~6.36×10⁻⁴の範囲であり、普通コンクリートよりもむしろ小さいことが確認された。
- 7) 凍結融解試験(300サイクル)によって求めた耐久性指数はスーパーメサライトを用いたコンクリートでは69~88であり、耐凍害性に優れていたが、リアポールを用いたコンクリートは耐凍害性に劣っていることが確認された。
- 8) 促進中性化試験による材齢91日における中性化深さは、いずれの調合のコンクリートもゼロであり、中性化速度は極めて遅かった。

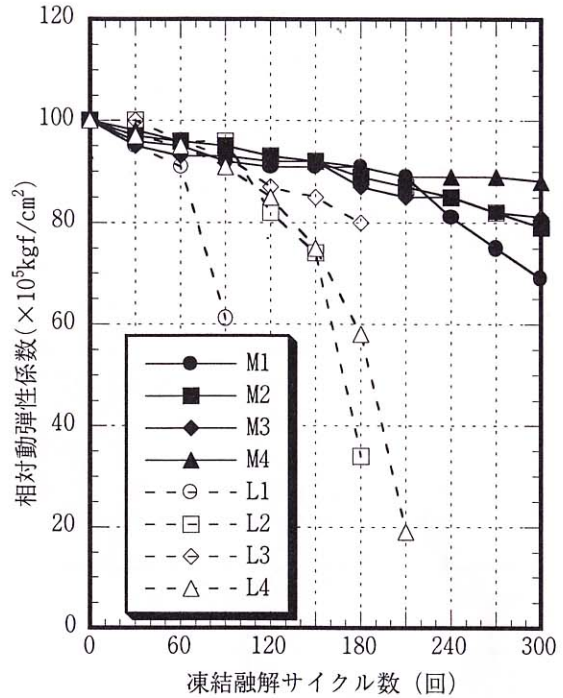


Fig.8 凍結融解試験結果
Freeze-Thaw Durability of ULC

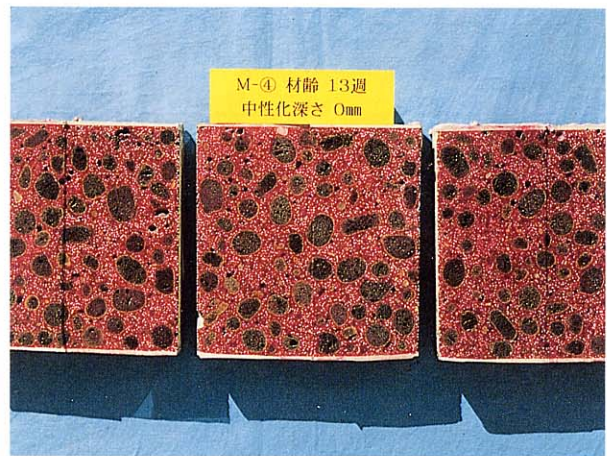


Photo 4 促進中性化試験結果の1例(材齢91日)
View of the Concrete Specimens after
Accelerated Neutralization Test

参考文献

- 1) 小川, 三谷, 永井, 林, 川地: 超軽量高強度PCカーテンウォールの開発(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.541~544, (1995)
- 2) 日本建築学会: 軽量コンクリート調査設計・施工指針案・同解説, 日本建築学会, p.41~80, (1978)
- 3) 日本コンクリート工学協会: コンクリート便覧, 技報堂出版, p.235, (1996)