

# せき板存置期間が高強度コンクリートの強度性状と耐久性に及ぼす影響

太田 達見 西田 朗 山崎 庸行  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

## The Effect of the Sheathing Removal Time on the Strength and Durability of High-Strength Concrete

by Tatsumi Ohta, Akira Nishida and Nobuyuki Yamazaki

### Abstract

The effect of the sheathing removal time on the strength and durability of high-strength concrete made with moderate-heat Portland cement was studied using full-scale specimens in a cold and dry environment. In the experiments, the concrete's setting time, temperature, compressive strength, length change, carbonation and pore volume were measured. From the experiments, the following conclusions were derived. 1) The strength of the concrete core specimen was not affected by the sheathing removal time. 2) The removal time had little effect on carbonation after about 34 hours had passed from the time the concrete was cast. 3) The removal time had little effect on length change once the concrete had set. 4) High-strength concrete made with moderate-heat Portland cement had almost identical strength properties and durability as concrete made with ordinary Portland cement.

### 概 要

中庸熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートによって現場内で製作するプレキャストコンクリート部材（サイト PCa 部材）を想定し、強度発現性などの面で不利な低温でかつ乾燥状態にある冬期において、せき板存置期間が躯体の品質（強度性状や耐久性）に及ぼす影響を明らかにするため、実大柱を模擬した試験体による実験を行った。その結果、せき板存置期間は強度発現性には影響せず、また耐久性に及ぼす影響もほとんどなく、JASS 5 に規定される普通ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの湿潤養生期間と同等としてよいことが明らかになった。

### § 1. はじめに

近年、設計基準強度が  $60\text{N}/\text{mm}^2$  を超える高強度コンクリートを実施工に用いるケースが増え、これら高強度コンクリートの水和発熱、強度発現、自己収縮、ひび割れなどに関する検討結果が報告されている<sup>1)</sup>など。高強度コンクリートは単位セメント量が多く、水和発熱による強度特性に及ぼす影響などがしばしば問題となるため、これを抑制する対策の一つとして低発熱形のセメントを用いる方法があげられる。

低発熱形のセメントとしては、低熱ポルトランドセメントや中庸熱ポルトランドセメントがあるが、乾燥収縮、中性化、耐凍結融解性などの耐久性の面で低熱ポルトランドセメントと同等の性能を有し、かつ材齢初期における強度発現性が低熱ポルトランドセメントよりも良好な中庸熱ポルトランドセメントは、高強度コンクリートの製造・施工に適していると考えられる。

中庸熱ポルトランドセメントは、これまでに原子力発電所などのマスコンクリートに適用された例<sup>2)</sup>はあるものの、高強度コンクリートに用いられた例はまだ少なく、諸性状に関しては十分に把握されているとは言い難い。

また、工期短縮や高品質の確保を目的として、高強度コンクリートを用いたプレキャストコンクリート（PCa）部材が、近年いくつかの現場に適用されるようになった。PCa 部材は製作工程を考えた場合にできる限り早期に脱型することが望ましいが、特に外気温が低く乾燥しがちな冬期に早期脱型した場合、強度発現性や耐久性に悪影響を及ぼす可能性がある。こうした点から、早期脱型を可能にする所要強度を得るためには、低熱ポルトランドセメントよりも材齢初期における強度発現性に優れた中庸熱ポルトランドセメントの方が適していると言える。

一方で、早期脱型またはせき板存置期間がコンクリートの品質に及ぼす影響に関しては、笠井の研究<sup>3)</sup>や和泉らの研究<sup>4)</sup>などがあるが、中庸熱ポルトランドセメント

を用いた高強度コンクリートについては検討されておらず、せき板存置期間が高強度コンクリートの品質に及ぼす影響は明らかにされていない。

そこで、中庸熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートにて製作する PCa 部材を想定し、低温で乾燥状態にある冬期において、せき板存置期間が躯体の品質に及ぼす影響を解明することを目的として、実験的検討を行った。

## § 2. 実験概要

実験は、実大柱を想定した模擬試験体（柱試験体と称す）を用いて行った。実験パラメータは、表-1 のように設定した。

### 2. 1 実験パラメータ

#### (1) せき板存置期間

冬期における低温と乾燥状態の下で、せき板存置期間が高強度コンクリートの強度性状や耐久性に及ぼす影響を解明するため、柱試験体のせき板存置期間（練混ぜ開始時刻から起算）を、8h、12h、16h、24h、34h および 72h とした。また、圧縮強度用供試体の脱型時刻も柱試験体のせき板存置期間に合わせた。なお、長さ変化測定用供試体の脱型時刻は、上記から 34h を除く 5 通りとした。

#### (2) コンクリートの設計基準強度

実験には、実施工で使用している設計基準強度が  $48\text{N}/\text{mm}^2$  (Fc 48 と略記) と  $80\text{N}/\text{mm}^2$  (Fc 80 と略記) の 2 種類の高強度コンクリート<sup>5)</sup>を用いた。

#### (3) 打込みおよび養生条件

柱試験体へのコンクリートの打込み、脱型およびその後の養生は、冬期屋外（2004年2月2日開始・技術研究所内）で行った。なお、圧縮強度試験用供試体と長さ変化測定用供試体の養生条件は表-1 に示すとおりとした。

表-1 実験パラメータ

試験体形状	せき板の存置期間	打込み	養生条件	測定項目
柱 1000×1000 ×1060mm	8h, 12h, 16h, 24h, 34h, 72h	屋外	冬期屋外曝露	圧縮強度 中性化深さ 細孔量
供試体	φ100 ×200mm	8h, 12h, 16h, 24h, 34h, 72h	室内 20℃ 80%	圧縮強度
			24h	
供試体	100×100 ×400mm	8h, 12h, 16h, 24h, 72h	室内 20℃ 80%	長さ変化率
			24h	

## 2. 2 試験体

### (1) 柱試験体の概要

柱試験体は図-1 に示す形状で、所定の材齢において高さ方向と側面（せき板に接する面）からコアを採取するため無筋とした。また、柱試験体のせき板存置期間は、図-1 における側面 A と側面 C、側面 B と側面 D とでそれぞれ同じとし、せき板存置期間の組合せは、Fc 48、Fc 80 とともに 8h と 12h、16h と 24h、34h と 72h とした。試験体数は両 Fc とともに 3 体ずつ、合計 6 体とした。

### (2) 材料および調合

実験で用いたコンクリート用材料の諸元および計画調合を、表-2 および表-3 に示す。なお、コンクリートの目標空気量と目標スランプフローは、Fc 48 では 3.0% と  $50.0\pm 10.0\text{cm}$ 、Fc 80 では 2.0% と  $65.0\pm 7.5\text{m}$  とした。

### (3) 製造、打込みおよび締固め

実験には、市中のレディーミクストコンクリート工場で各調合  $5\text{m}^3$  のコンクリートを製造して用いた。柱試験体への打込みは屋外にて運搬車から直接行い、締固めはコンクリート打込み中に棒形振動機にて行った。

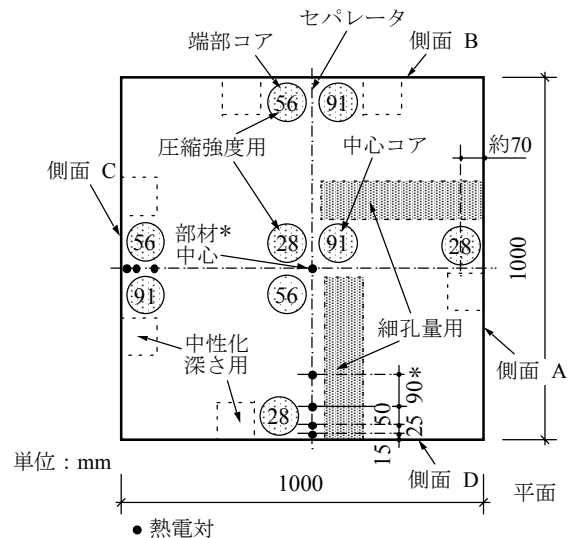


図-1 柱試験体の概要とコア採取位置

表-2 コンクリート用材料諸元

材料	仕様 (産地)	密度	実積率	粗粒率
セメント	C 中庸熱ポルトランドセメント (JIS R 5210)	3.21	—	—
細骨材	S 千葉県万田野産山砂	2.60	—	2.66
粗骨材	G1 住田産石灰岩砕石 Fc 48用	2.71	60.3%	6.59
	G2 両神産硬質砂岩砕石 Fc 80用	2.70	60.5%	6.59
混和剤	Ad 高性能AE減水剤標準形 (JIS A 6204)	—	—	—

粗骨材最大寸法：20mm (G1, G2 共通)

表-3 コンクリートの計画調合

Fc (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					Ad (%)	細骨材率 (%)
		C	W	S	G1	G2		
48	38.4	430	165	883	891	—	1.25	51.0
80	25.5	647	165	780	—	842	1.60	49.0

混和剤 (Ad) は単位セメント量に対する比率

### 2.3 測定項目および測定方法

#### (1) フレッシュ性状および凝結性状

練上り時および荷卸し地点において、コンクリートのスランプフロー、空気量および温度を測定した。また、荷卸し地点で採取した試料を用いて、JIS A 1147 に準拠したプロクター貫入抵抗試験を雰囲気温度 5℃と 20℃の下で行った。

#### (2) コンクリート温度

屋外曝露に供する各柱試験体に対して、コンクリート内部の温度を、図-1 に示すように、試験体側面から 15mm、40mm および 90mm の位置に設けた熱電対で測定した。また、Fc 48、Fc 80 の試験体 1 体ずつに、部材中心と側面から 180mm の位置に熱電対を設置した。

#### (3) 圧縮強度

コンクリートの練混ぜ開始時刻から起算して 8h、12h、16h、24h、34h および 72h (せき板存置期間) において、圧縮強度を測定した。これら材齢初期の圧縮強度は、雰囲気温度 5℃および 20℃における封かん養生の円柱供試体で求めた。なお、材齢 28 日、56 日および 91 日における圧縮強度は、表-1 に示す養生を行った供試体で求めた。

また、材齢 28 日、56 日および 91 日においては、柱試験体から採取したコア供試体の圧縮強度も測定した。コアは、図-1 に示すように、柱試験体の端部 (側面のほぼ中央：端部コアと称す) と中心部 (中心コアと称す) から採取し、採取したコアから各々 5 本の供試体を成形し、圧縮強度試験に供した。

#### (4) 長さ変化

せき板存置期間が長さ変化に及ぼす影響を把握するため、100×100×400mm 供試体 (同一条件で 3 体ずつ) を用いて、JIS A 1129 に準拠したコンタクトゲージ法 (測定区間 200mm) にて長さ変化を測定した。せき板存置期間 8h、12h、16h、24h および 72h の供試体では、脱型後直ちに供試体両側面にゲージブラグを貼付し、その時点から長さ変化を測定した。また、JIS に規定される標準条件の供試体 (標準供試体と称す) に関しては、コンクリート打込み後 24h で脱型し、7 日間の標準養生終了直後から長さ変化を測定した。なお、長さ変化試験は温度 20℃、湿度 50%の室内で行った。

#### (5) 中性化深さ

せき板存置期間が中性化進行に及ぼす影響を把握するため、材齢 28 日にて柱試験体各側面の中央部近傍から φ 100mm のコア (側面コアと称す) を採取し、JIS A 1153

に準じた方法で促進中性化試験を行った。

採取したコアは温度 20℃、湿度 50%の恒温室内で材齢 56 日まで乾燥させた後、温度 20℃、湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%の下で中性化を促進させた。促進期間は、1 週、4 週、8 週、13 週および 26 週とした。所定の促進期間を経たコアを割裂し、割裂面に対し 1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧し、試験体表面 (せき板面) からの中性化深さ (5 カ所ずつ) を測定した。また、JIS A 1153 に準拠して 100×100×400mm の供試体 (標準供試体と称す) による促進試験を行い、採取コアと同じ日に中性化深さを測定した。

#### (6) 細孔量

せき板存置期間が表層近傍におけるコンクリートの細孔構造に及ぼす影響を明らかにするため、柱試験体の側面コアを切断した薄片試料 (厚さ約 16mm・表面から試料中心までの距離 8mm、28mm、48mm、68mm および 88mm) に対して水銀圧入式ポロシメータ (細孔直径 0.003~500μm の測定可能) で細孔量を測定した。また、真空乾燥処理を行った細孔量測定用試料は、105℃で 2 日間乾燥させ初期重量を測定した後、吉野らの方法<sup>6)</sup>を参考として、不溶残分重量に基づく溶解率を求め、得られた細孔量をこの溶解率で除して有効細孔量を求めた。

## § 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュ性状および凝結性状

柱試験体に打ち込んだコンクリートのフレッシュ性状を、表-4 に示す。フレッシュ性状は、概ね表-3 に示した計画値どおりであった。なお、屋外における柱試験体への打込み時の外気温は 7.0℃であった。

表-4 コンクリートのフレッシュ性状

Fc	測定時期	フロー時間 (s)		スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
		50cm	停止			
48	練上り時	—	11.5	49.0×48.0	2.9	12.0
	荷卸し時	—	13.4	48.0×47.5	2.9	14.0
80	練上り時	12.4	29.3	55.5×54.5	1.8	15.0
	荷卸し時	8.7	33.4	62.0×58.5	1.3	15.5

図-2 に、雰囲気温度 5℃と 20℃における Fc 48、Fc 80 の両コンクリートに対する凝結試験結果を示す。図-2 には、得られた結果に基づく回帰曲線 ( $Rp=A \cdot \exp^{Bt}$ ) も示したが、この回帰式によって得られたコンクリートの始発・終結の推定時間は、表-5 に示すとおりである。

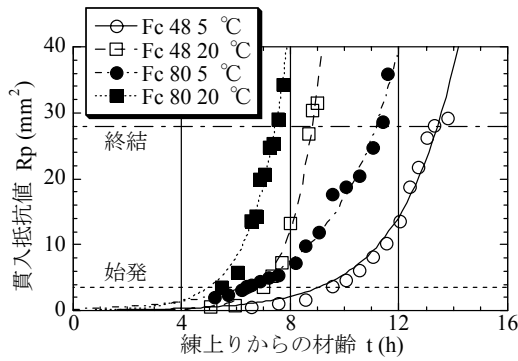


図-2 コンクリートの凝結性状

表-5 凝結の始発時間と終結時間の推定結果

温度	Fc 48		Fc 80	
	始発	終結	始発	終結
5°C	9.01 h	13.42 h	6.17 h	11.15 h
20°C	6.78 h	8.81 h	4.99 h	7.46 h

### 3.2 コンクリート温度

図-3に、Fc 48 および Fc 80 の柱試験体に設置した熱電対で測定した温度履歴（側面から 15mm、90mm および部材中心）を示す。図中の凡例は、せき板存置期間を表す。コンクリート温度は、Fc 48 では練上りから約 22h～29h で、Fc 80 では約 24h～28h でピークに達し、試験体中心の最高温度は Fc 48 で 40.5°C、Fc 80 で 63.8°C であった。その後、温度は徐々に低下し、72h～96h 以降は表面近傍の各点とも外気温に伴って変動した。

各測定点の温度上昇や最高温度は、せき板存置期間によって異なっていた。せき板存置期間 8h と 12h では、温度が 15°C～30°C と上昇過程にあったため、脱型によって温度が急激に低下することはなかった。しかし、その後の温度上昇に影響が見られ、最高温度は他の場合よりも約 9°C～13°C 低かった。また、16h、24h および 34h では、水和発熱による温度上昇がピーク近くに達しており、脱型によって外気に触れることで急激な温度低下が見られた。一方、72h では温度の降下過程にあるため、脱型による温度への影響は認められなかった。また、部材中心や、図中には示していないが試験体表面から 180mm の位置においても、脱型によるコンクリートの温度変化は見られなかった。

このように、水和発熱によってコンクリート温度が上昇する過程および最高温度到達前後までは、せき板（塗装合板：厚さ 12mm）による保温効果が確認された。

なお、屋外曝露期間中の平均外気温と平均湿度は、材齢 28 日までがそれぞれ 9.1°C、49.7%、28 日～56 日が 9.5°C、57.9%、56 日～91 日が 16.3°C、56.7% であった。

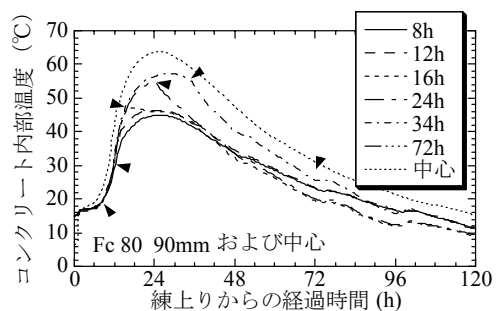
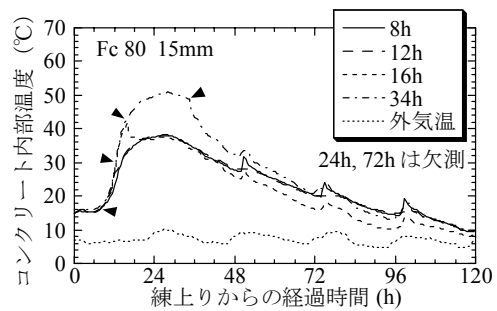
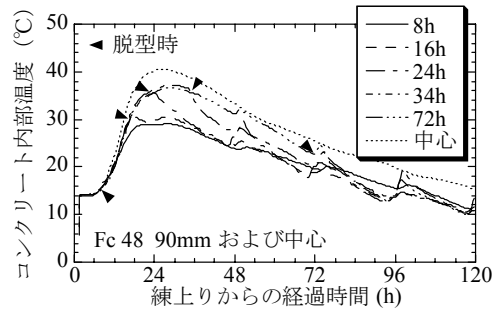
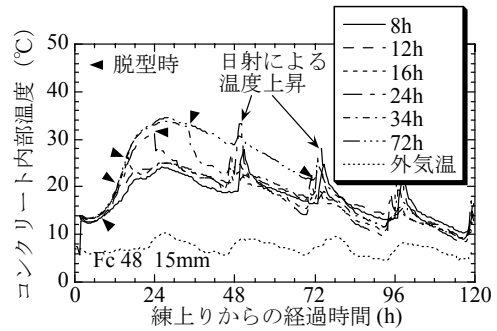


図-3 柱試験体内部の温度履歴

### 3.3 コンクリートの圧縮強度

柱試験体脱型時における封かん養生供試体の圧縮強度を表-6に、材齢 28 日、56 日および 91 日における供試体の圧縮強度を表-7に、コア供試体による圧縮強度（供試体 5 本の平均値）を表-8にそれぞれ示す。表-8に示すように、材齢 91 日において、いずれのコア強度も設計基準強度（Fc）を満足していた。

表一六 柱試験体脱型時の封かん養生供試体圧縮強度

Fc	温度 (°C)	練混ぜ開始からの経過時間						
		8h	12h	16h	24h	34h	48h	72h
48	5	—*	0.4	0.9	2.6	4.9	9.5	14.5
	20	0.4	2.3	5.7	11.6	16.1	—	25.7
80	5	0.3	0.7	1.4	6.9	14.4	—	36.9
	20	1.9	8.8	20.8	35.9	41.1	—	60.8

単位：N/mm<sup>2</sup>

表一七 養生条件が異なる供試体の圧縮強度

Fc	材齢 (日)	20°C					5°C
		標準	封かん	8h 気中	16h 気中	24h 気中	封かん
48	28	58.9	55.6	29.8	36.6	40.6	49.6
	56	65.7	57.9	27.8	36.1	40.2	54.5
	91	67.2	59.3	30.4	36.3	40.5	56.9
80	28	102	105	69.9	78.3	80.9	91.7
	56	105	110	71.0	78.3	81.8	97.6
	91	110	110	69.5	78.5	80.4	98.2

単位：N/mm<sup>2</sup>

表一八 採取コア供試体の圧縮強度

Fc	材齢 (日)	端部コア						中心コア
		せき板存置期間						
		8h	12h	16h	24h	34h	72h	
48	28	49.1	53.8	53.5	51.1	55.2	53.3	55.7
	56	52.7	52.2	53.5	55.6	55.8	59.8	59.7
	91	62.2	61.3	63.0	59.1	63.1	64.9	62.2
80	28	93.4	90.2	94.9	101	99.4	102	103
	56	93.2	92.5	100	91.0	95.3	103	103
	91	99.2	99.0	108	99.4	101	101	110

単位：N/mm<sup>2</sup>

### 3.4 長さ変化

温度 20°C、湿度 50%における Fc 48、Fc 80 の両コンクリートの長さ変化測定結果を図一四に示す。図一四の各線は、長さ変化測定結果を Branson ら<sup>7)</sup>の式(式(1))に基づき回帰したものである。また、式(1)によって推定した時間無限大における長さ変化率(終局長さ変化率  $\epsilon_{\infty}$  と称す)をまとめて表一九に示す。

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{\infty} \cdot \frac{t^B}{A + t^B} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\epsilon_{sh}$ ：長さ変化率

$\epsilon_{\infty}$ ：終局長さ変化率

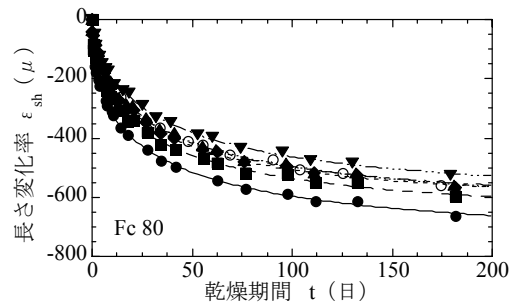
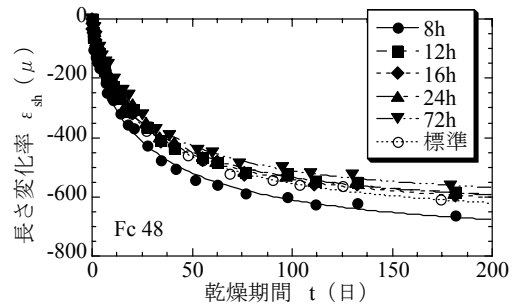
$t$ ：時間

$A$ および $B$ ：定数

終局長さ変化率は、Fc 48、Fc 80 ともにせき板存置期間が 8h の場合に 764~768  $\mu$ であった以外は、せき板存置期間による差はあまりなく、630~693  $\mu$ の範囲にあり、乾燥開始前に 7 日間標準養生を行った標準供試体(図一四に示す「標準」)の終局長さ変化率と同等であった。

なお、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 25%~40%のコンクリートの長さ変化率は、温度 20°C、

湿度 60%の条件下において 26 週(182 日)で概ね 400~600  $\mu$ の範囲にあることが示されており<sup>8)、9)</sup>など、本実験結果(図一四の「標準」に相当)と同等であった。



図一四 供試体による長さ変化率

表一九 式(1)による終局長さ変化率の推定結果

Fc	せき板存置期間					
	8h	12h	16h	24h	72h	標準
48	-768	-670	-678	-669	-640	-710
80	-764	-693	-649	-647	-630	-682

長さ変化率の単位： $\mu$

### 3.5 中性化深さ

柱試験体から材齢 28 日に採取した側面コアを用いて、促進中性化試験を行った。図一五に、促進期間 1 週、4 週、8 週、13 週および 26 週における中性化深さを、 $\sqrt{t}$  則による回帰曲線とあわせて示す。

Fc 48 では、せき板存置期間 8h~72h のいずれの場合も、中性化の進行は JIS に規定される標準条件(4 週標準養生後 4 週乾燥)よりも速く、せき板存置期間が短いほど速くなる傾向が認められた。一方、Fc 80 では、標準条件およびせき板存置期間 34h と 72h の場合に、26 週が経過した時点でも中性化深さは 0mm であったが、せき板存置期間が 8h~24h の場合には、中性化がわずかに進んでいた。

なお、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 22%と 27%のコンクリートに対する実験結果<sup>4)</sup>には、促進中性化期間 13 週で中性化深さは 0.5mm~5mm 程度であること、同じく水セメント比 25%のコンクリートに対する実験結果<sup>10)</sup>には、促進期間 26 週で 1mm 以下であることが示されている。これらのことから、中性化の進

行に関しては、中庸熟ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントは、同様の水セメント比のコンクリートであれば同等の性状を示すことが確認された。

方が、Fc で比べると Fc 80 よりも Fc 48 の方が、総有効細孔量は相対的に多かった。

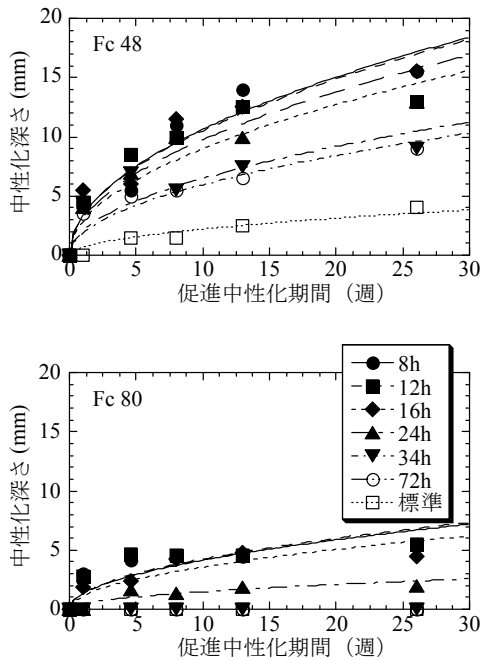


図-5 採取コアによる促進中性化試験結果

### 3.6 細孔量

図-6に、材齢28日および56日に採取した柱試験体の側面コアを切断して得た薄片試料の総有効細孔量分布を示す。図には、せき板存置期間8h、16hおよび72hの結果を示してある。総有効細孔量は、試験体側面側で多くなっている。また、材齢で比べると56日より28日の

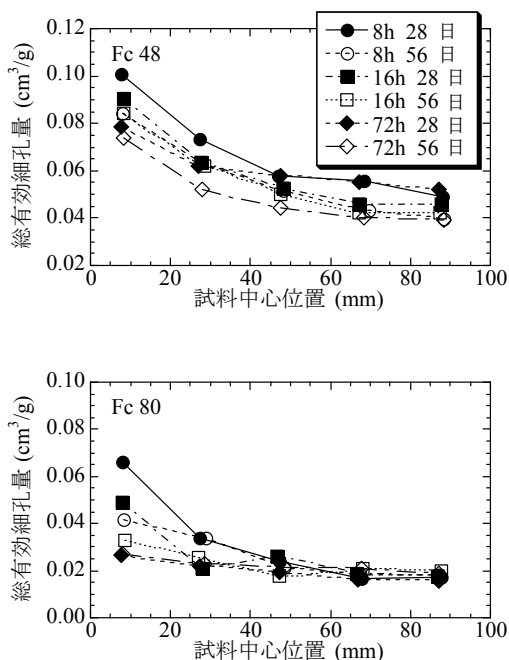


図-6 柱試験体内部の総有効細孔量分布

## § 4. 実験結果に対する考察

### 4.1 せき板存置期間の影響

#### (1) 圧縮強度

図-7に、せき板存置期間と端部コア供試体の圧縮強度との関係を示す。せき板存置期間が長くなると圧縮強度が増加するものもあるが、全般的な傾向が明確でないため、せき板存置期間(8h~72h)と各材齢(28日、56日、91日)における端部コアの圧縮強度との関係についてF検定を行った。その結果、Fc 48で材齢56日の場合以外はいずれも有意水準1%で「有意差あり」とはならず、せき板存置期間は、外気温の影響が大きい柱部材端部においてもコア強度にほとんど寄与しないことが判明した。これは、図-3に示すように、柱試験体の端部コア採取位置(コアの中心で表面から約70mm)において、せき板存置期間が最も短い8hと最も長い72hと比較しても、材齢3日程度までの間でコンクリート温度の差は最大約10°Cであり、加えて材齢3日以降、各せき板存置期間、各測定点ともに同様の温度履歴であったため、強度発現に影響する積算温度に差が生じなかったことが一因としてあげられる。

なお、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比22%と25%のコンクリートに対し、せき板存置期間を1日、3日および7日とした実験結果<sup>4)</sup>では、せき板存置期間は圧縮強度に影響しないことが示されている。この

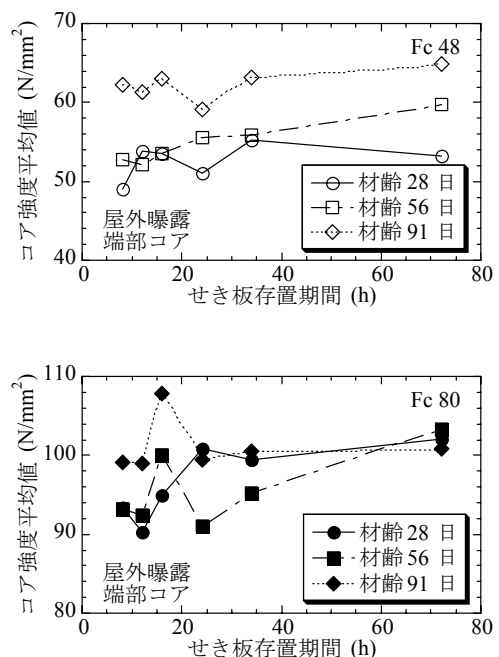


図-7 せき板存置期間と端部コア強度の関係

ことから、せき板存置期間が1日(24h)以上であれば、中庸熟ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートと普通ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートとは同等の強度性状を示すと推定される。

(2) 長さ変化

せき板存置期間と終局長さ変化率との関係を、標準条件での終局長さ変化率とあわせて図-8に示す。終局長さ変化率は、Fc 48、Fc 80ともせき板存置期間8hの場合に標準条件の場合よりも大きい。これは、せき板存置期間8hが凝結の終結前後に相当し、表-6の圧縮強度が示すように、コンクリートの組織が十分に形成されない状態で湿度50%の環境に曝され、水分が逸散したことに起因すると考えられる。標準条件での長さ変化率を基準として考えると、せき板存置期間が16h程度以上であれば、終局長さ変化率には影響しないと考えられる。

(3) 中性化

図-5に示した促進中性化試験結果を $\sqrt{t}$ 則によって中性化速度係数で表し、せき板存置期間と関係づけて図-9に示す。せき板存置期間が短いほど中性化速度係数は大きくなる傾向にあったため、両者の関係についてF検定を行った。その結果、せき板存置期間72hの場合を除くと、Fc 48では有意水準5%で、Fc 80では有意水準1%で「有意差あり」となり、せき板存置期間は中性化速度係数に影響することが明らかになった。ただし、図-9において、せき板存置期間が34h以上になると、中性化速度係数はFc 48、Fc 80ともほぼ一様の値を示しており、中性化の進行に関しては、34h程度がせき板存置期間の境界値と考えられる。

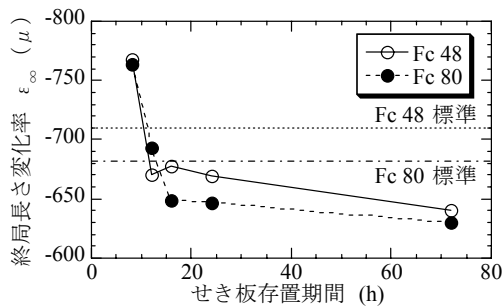


図-8 せき板存置期間と終局長さ変化率の関係

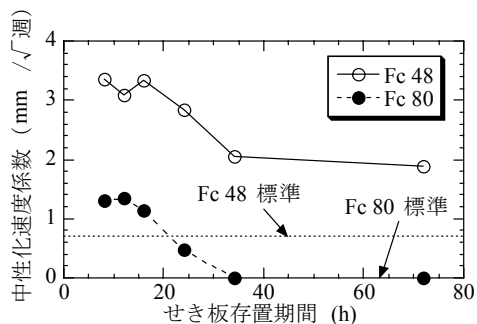


図-9 せき板存置期間と中性化速度係数の関係

なお、本実験におけるFc 48の結果(図-9の「Fc 48標準」)は、セメントの種類は異なるが、阿部ら<sup>11)</sup>による水セメント比35%と40%のコンクリートにおける中性化速度係数(0.39、1.12mm/√週)とほぼ符合した。

(4) 細孔量

図-10に、せき板存置期間と屋外曝露した柱試験体の側面コアによる試料の総有効細孔量との関係を、Fc別、曝露期間別に示す。図中の凡例は、測定用試料の中心位置を試験体側面からの距離で表したものである。

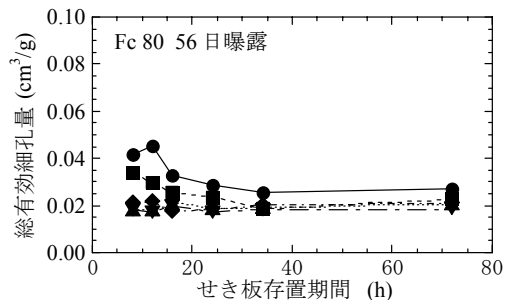
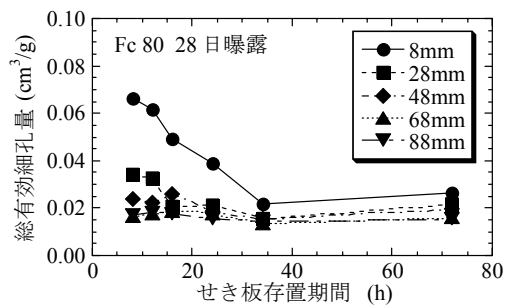
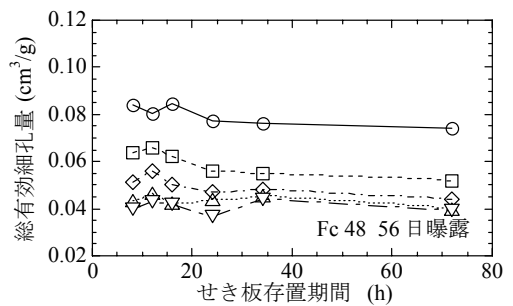
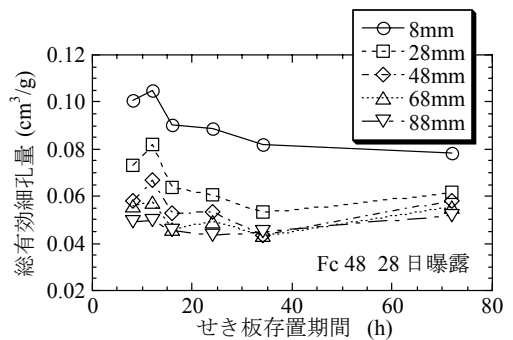


図-10 せき板存置期間と総有効細孔量の関係

せき板存置期間が短くなるにしたがって総有効細孔量が多くなっている。特に、表面から8mmの位置では、存置期間が34h以下の場合に総有効細孔量は多いが、34h以上ではほぼ一定である。このような傾向は、中性化の場合と類似している。一方、試験体の内部側(48mm以深)では、せき板存置期間にかかわらず総有効細孔量はほぼ同じであり、せき板存置期間の影響は認められなかった。

## 4.2 乾燥状態の影響

### (1) 圧縮強度

表-7 に示した標準養生供試体の圧縮強度に対する各養生条件下での圧縮強度の比と、同じく標準養生供試体の見かけ密度(試験前における供試体質量と実測寸法に基づく)に対する各養生条件下での見かけ密度の比を求め、両者の関係を図-11 に示す。

いずれの材齢においても、材齢のごく初期から湿度50%の環境に曝されると、供試体表面からの水分逸散量が多くなるため見かけ密度が減少し、標準養生供試体に対する圧縮強度の比は、見かけ密度の比に比例してほぼ直線的に低下する結果となった。

### (2) 細孔量

図-10 に示す屋外曝露した柱試験体の表面近傍における総有効細孔量は、Fc 48、Fc 80 ともに曝露期間28日の方が56日の場合よりも多かった。この理由の一つには、曝露開始から28日が経過するまでの2月は降水量が8mm(気象庁・江東区新木場におけるアメダスデータ)と少

なく乾燥していたのに対し、曝露期間28日~56日までの3月は62mmであったことがあげられる。すなわち、セメント量が多い高強度コンクリートの表面近傍には一部水和過程にあるコンクリートが存在し、そこに降雨などによって水分が供給されることで水和反応が進行し、総有効細孔量が減少した可能性がある。

図-10 に示す総有効細孔量の測定結果から、せき板存置期間が短いほど、かつコンクリート表面に近いほど総有効細孔量は乾燥の影響を受けやすいことがわかる。これは、コンクリート表面(乾燥面)から50mm程度が乾燥による影響を受けるとした湯浅らの報告<sup>12)</sup>と符合する。

## 4.3 脱型時におけるコンクリートの圧縮強度

### (1) 所要強度が得られるまでの期間

JASS 5・19 節には、高強度コンクリートの脱型時における所要圧縮強度は $8\text{N}/\text{mm}^2$ と規定されている。この所要強度が得られるまでの期間を、須藤らの方法<sup>13)</sup>にて求めた等価積算温度と圧縮強度との関係から試算した。

図-12 に、 $5^\circ\text{C}$ および $20^\circ\text{C}$ 封かん養生供試体による材齢72hまでの圧縮強度と供試体温度に基づく等価積算温度との関係を示す。図-12 に示す回帰式は、凝結の終結以降の圧縮強度を対象として求めたものである。これらの回帰式に基づくと、圧縮強度 $8\text{N}/\text{mm}^2$ が得られるまでの等価積算温度 $Me$ はFc 48では $20.5^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 、Fc 80では $13.6^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ となる。これら等価積算温度 $Me$ から所要期間を求めると、表-10 のようになる。表-10 には、所要強度が得られるまでの日数とそれを丸めた存置期間を併記した。所要強度から定まるせき板存置期間は、Fc 48 で1日~2日、Fc 80 で0.5日~1.5日となった。

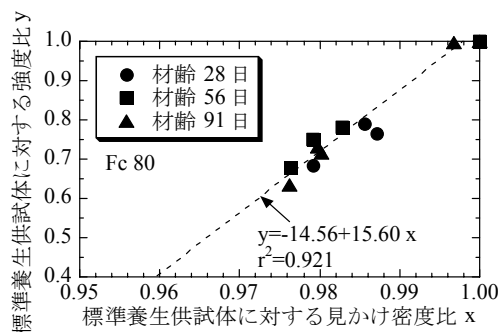
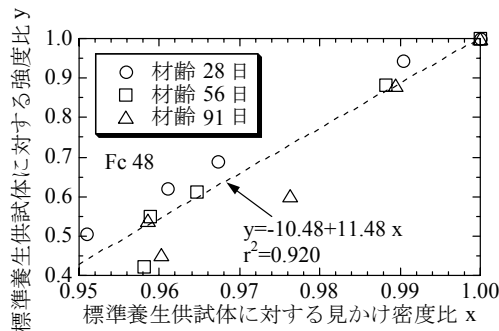


図-11 見かけ密度比と圧縮強度比の関係

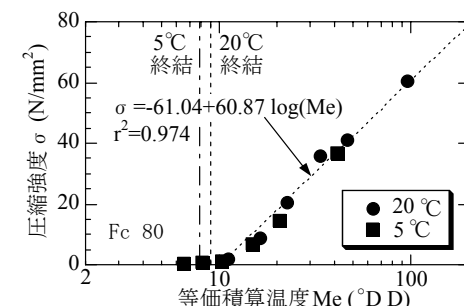
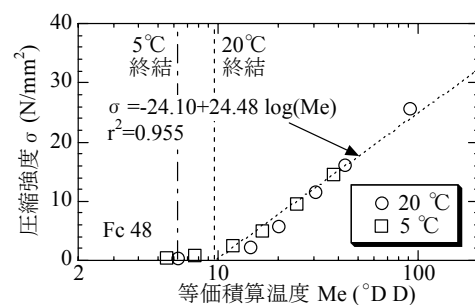


図-12 等価積算温度と封かん養生供試体強度の関係



表-10 所要強度が得られるまでのせき板存置期間

温度 (°C)	Fc 48		Fc 80	
	所要日数	存置期間	所要日数	存置期間
5	1.67	2日	1.11	1.5日
10	1.23	1.5日	0.82	1日
15	0.91	1日	0.61	1日
20	0.68	1日	0.45	0.5日
25	0.59	1日	0.39	0.5日

(2) 圧縮強度と長さ変化との関係

図-13に、柱試験体脱型時における20°C封かん養生供試体による圧縮強度と終局長さ変化率との関係を示す。両者の関係は指数関数で表すことができ、脱型時の圧縮強度は、長さ変化率に対する評価指標になりうる事が判明した。また、図-13から、標準供試体の長さ変化率を基準とすると、長さ変化率がこの基準を下回る時点での封かん養生供試体強度は、Fc 48では約2N/mm<sup>2</sup>、Fc 80では約12.5N/mm<sup>2</sup>と算定される。このことから、JASS 5・19節に規定される所要強度8N/mm<sup>2</sup>は、長さ変化に影響を及ぼさない脱型時強度の目安になると考えられる。

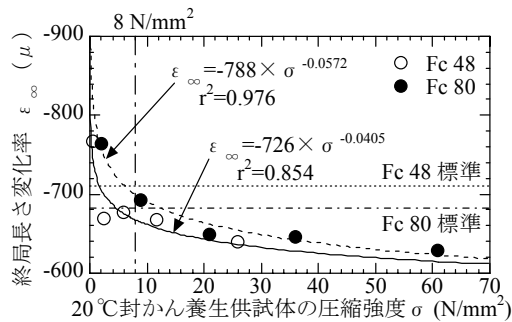


図-13 封かん養生供試体強度と終局長さ変化率の関係

4.4 細孔量による評価

細孔量は、コンクリートの微細組織における緻密さを表す指標であるため、強度特性や耐久性を評価するのに有効である<sup>12)</sup>など。そこで、採取試料(側面コア)に対して求めた総有効細孔量と、端部コアの圧縮強度および中性化速度係数との関係について検討した。

(1) 圧縮強度

図-14に、端部コアの圧縮強度と試験体側面から8mmおよび68mmに位置する試料の総有効細孔量との関係を示す。図-14に示すように、総有効細孔量と圧縮強度の関係は、設計基準強度や材齢にかかわらず一つの指数関数で表すことができ、しかも側面に最も近い8mmの試料よりも端部コアの中心位置に近い68mmの方が、両者の関係を表す寄与率が高くなっている。このことから、コア供試体の中心近傍における総有効細孔量によってコア強度の推定が可能と考えられる。

(2) 中性化深さ

図-15に、材齢28日に採取した側面コアによる中性化

速度係数と試験体側面から8mmおよび68mmに位置する試料(促進中性化試験に供していない試料)の総有効細孔量との関係を示す。両者はいずれの位置においてもほぼ直線関係にあり、寄与率は試験体表面に近い試料ほど高くなっている。すなわち、中性化の進行は、圧縮強度の場合とは異なり、最も表面に近い位置におけるコンクリートの総有効細孔量によって評価可能と言える。

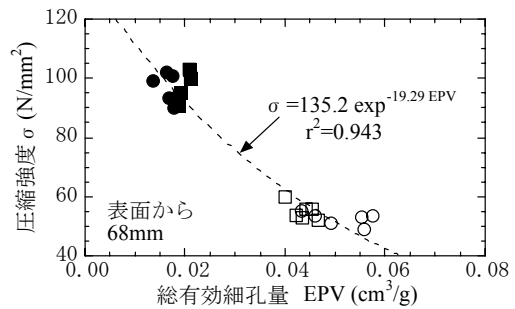
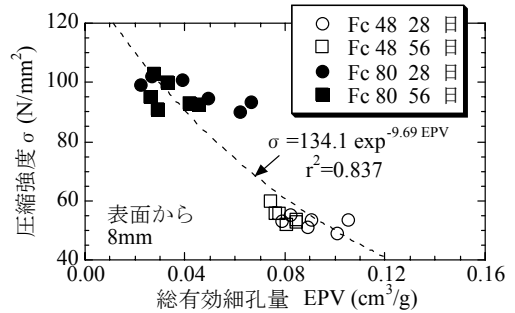


図-14 総有効細孔量と端部コア強度の関係

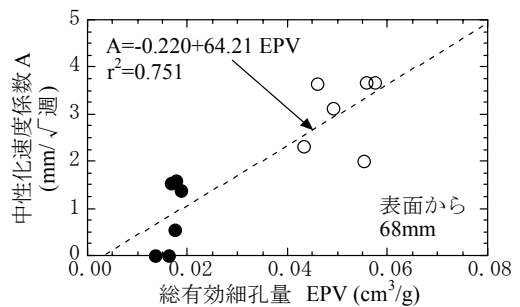
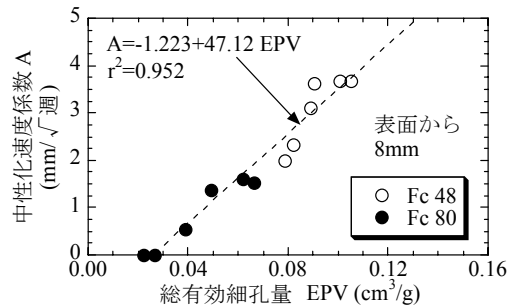


図-15 総有効細孔量と中性化速度係数の関係

## § 5. まとめ

中庸熟ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートに対し、強度発現性にとって厳しく、かつ乾燥によって耐久性に影響を及ぼす可能性のある冬期において、せき板存置期間が躯体コンクリートの品質に及ぼす影響を明らかにするため、設計基準強度の異なる2種類の高強度コンクリートを用いた実験を行った。

本検討の範囲で得られた主な知見を、以下に示す。

### (1) 圧縮強度に及ぼす影響

・Fc 48、Fc 80 のいずれのコンクリートも、せき板存置期間(8h~72h)は、外気温の影響が大きい部材端部から採取したコアの圧縮強度には影響を及ぼさない。これは、せき板存置期間が異なった場合でも、強度発現に寄与する積算温度の差がごくわずかであったことが理由としてあげられる。

・小断面の円柱供試体が材齢初期から湿度50%の乾燥状態に曝されると、標準養生供試体の見かけ密度に対する乾燥を受けた供試体の見かけ密度の比が低下するのに比例して圧縮強度の比も低下した。これは、水和に必要な水分が逸散したためと推定される。したがって、高強度コンクリートが所定の性能を発揮するためには、打込み直後からの湿潤養生が重要であることが確認された。

### (2) 耐久性に及ぼす影響

・せき板存置期間は、コンクリートの凝結が十分に終結していれば終局長さ変化率には影響しない。これは、凝結の終結前後においては、コンクリートの組織が十分に形成されておらず、コンクリート表面からの水分逸散量が多くなるためと考えられる。

・促進中性化試験結果から、中性化の進行はせき板存置期間が短いほど速くなる傾向にある。しかし、せき板存置期間が34h程度以上になると、中性化の進行はせき板存置期間の影響をほとんど受けない。

・柱試験体表面近傍において、せき板存置期間が短くなるにしたがって総有効細孔量は多くなるが、その影響を受ける範囲は表面から50mm程度までで、それ以上内部

側になるとせき板存置期間の影響はほとんど見られない。

・総有効細孔量の測定結果から、高強度コンクリートが冬期の屋外にて乾燥状態に曝されたとしても、降雨などによって水分が供給されると、表面近傍でコンクリートの組織が緻密化する可能性がある。

### (3) 総有効細孔量による評価

柱試験体から採取したコア(構造体コンクリート)の圧縮強度は、コア供試体の中心近傍における総有効細孔量によって評価できる。これに対し、中性化速度係数は、柱試験体の表面に最も近い位置における総有効細孔量によって評価できると考えられる。

### (4) 湿潤養生期間

実験で用いた塗装合板製のせき板はほとんど透水しない<sup>14)</sup>ため、せき板が存置されればコンクリートは概ね湿潤状態が保持される。低温で乾燥した冬期において、せき板存置期間を72h程度としても、中庸熟ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートは強度発現性や耐久性に影響を受けなかったことから、JASS 5・19節に規定される普通ポルトランドセメントを用いた場合の湿潤養生期間と同等としてよいと考えられる。

### (5) 圧縮強度の評価

PCa部材の製作を想定した場合、脱型時に所定の強度が得られていないとPCa部材の隅角部などが損傷する恐れがあるが、脱型時強度は、須藤らが提案した等価積算温度を用いれば、低温時においても高精度での推定が可能である。

本編では、せき板存置期間が中庸熟ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの強度性状や耐久性に及ぼす影響に関して実験的検討を行った。しかし、試験体の曝露条件である温度や湿度が今回の実験条件よりも低い場合の強度性状、中性化や長さ変化以外の耐久性性状(耐凍結融解性や塩化物イオンの浸透に対する抵抗性など)、早期脱型したPCa部材の力学性状やひび割れ抵抗性などについては未解明である。これらの点については、今後の検討課題としたい。

#### <参考文献>

- 1) 陣内浩、早川光敬、黒岩秀介：“実用化を迎えた設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup>級超高強度コンクリートの性能”、セメント・コンクリート、No.678、pp.10-16、2003.8
- 2) 日本建築学会：“建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所における鉄筋コンクリート工事”、2001
- 3) 笠井芳夫：“極く早期脱型するコンクリートの強度に関する実験研究（その1）”、日本建築学会論文報告集、第180号、pp.17-23、1971.1
- 4) 和泉意登志、阿部道彦：“せき板存置期間と初期養生が高強度コンクリートの品質に及ぼす影響（New RC 実大施工実験 その17）”、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、pp.331-332、1992.8
- 5) 西田朗、山崎庸行、太田達見、森田武、小澤貴史ほか：“超高強度コンクリートの実用化と品質管理（その1～その4）”、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.525-532、2004.8
- 6) 吉野利幸、鎌田英治、田畑雅幸、柳敏幸：“空隙構造依存性に基づくコンクリート強度推定法に関する研究 ー第1報 圧縮強度と空隙構造の関係ー”、日本建築学会論文報告集、第312号、pp.9-17、1982.2
- 7) Branson, D.E., Christiason, M. L.：“Time Dependent Concrete Properties Related to Design - Strength and Elastic Properties”、Creep, and Shrinkage, American Concrete Institute SP-27, pp.257～277, 1971
- 8) 塩見伊津夫、榊田佳寛、阿部道彦、安田正雪：“高強度コンクリートの乾燥収縮特性に影響を及ぼす諸要因の検討”、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.487-492、1992
- 9) 森大介、池永博威、石神忍、山田雅章：“高強度コンクリートの乾燥収縮に関する研究”、セメント・コンクリート論文集、No.46、pp.690-695、1992
- 10) 岸本均、岸谷孝一、江口清、牧野真之、西川秀則：“超高強度現場打ちコンクリートの研究 その13) 超高強度コンクリートの長期性状（実験概要および圧縮強度、乾燥収縮、中性化）”、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、pp.323-324、1994.9
- 11) 阿部道彦、榊田佳寛、田中斉、柳啓、和泉意登志、友澤史紀：“コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究”、日本建築学会構造系論文報告集、第409号、pp.1-10、1990.3
- 12) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇、大川原修：“乾燥条件が微少セメントペーストの水和、細孔構造及び強度の及ぼす影響”、日本建築学会構造系論文集、第505号、pp.15-21、1998.3
- 13) 須藤由美子、桂修、吉野利幸：“氷点下におけるコンクリート強度増進に関する研究”、北海道立寒地住宅都市研究所 調査研究報告 平成11年度、No.101-OR、pp.1-22、2000.3
- 14) 太田達見、山崎庸行、榊田佳寛：“かぶりコンクリートの性状に及ぼす各種要因に関する実験的研究”、日本建築学会構造系論文集、第572号、pp.1-8、2003.10