

U. D. C 624. 012

低熱ポルトランドセメントを使用した高強度コンクリートに関する研究

— 実大模擬柱実験および耐火性実験 —

大岡 督尚* 渡部 憲*

要約: 近々着工予定の新築工事で、設計基準強度が 84N/mm^2 の高強度コンクリートを採用する計画がある。当該計画工事に対応するためには、所要の性能（強度・耐火性）を有する構造体コンクリートの施工技術を確認し、国土交通大臣の認定を取得する必要がある。そこで、施工計画地に運搬可能なレディーミクストコンクリート工場を選定し、低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの実大模擬柱実験および異なる養生温度の供試体の強度試験を実施した。

実験結果より、W/C 算出式・構造体強度補正值（S 値）・気温による強度補正值（T 値）が明らかとなり、設計基準強度 84N/mm^2 までの高強度コンクリートの製造が可能となった。また、設計基準強度が 60N/mm^2 を超える場合の火災時における爆裂防止対策として、ポリプロピレン繊維を混入することが有効であることを耐火性実験により確認した。

キーワード: 高強度コンクリート、低熱ポルトランドセメント、実大模擬柱、耐火性、コンクリート温度

- 目次:**
1. はじめに
 2. 実験概要
 3. 試験体および養生方法
 4. フレッシュコンクリート試験結果
 5. 温度測定結果
 6. 圧縮強度試験結果および考察
 7. 耐火性実験結果および考察
 8. まとめ

1. はじめに

平成 12 年 6 月の建築基準法改正により、JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）に規定されていないコンクリート、例えば、呼び強度が 40 を超える高強度コンクリートやスランプフロー管理の高流動コンクリート、あるいは JIS 規定のない材料を使用したものなどは、国土交通大臣の認定を取得しなければ使用できなくなった。近々着工予定の新築工事で、設計基準強度が 84N/mm^2 の高強度コンクリートを採用する計画がある。この工事を受注するためには、大臣認定を取得する必要があるため、申請に必要な実験を実施した。

実験は、実大模擬柱実験および異なる養生温度での圧縮強度試験とし、管理用供試体強度と構造体コンクリート強度（コア強度）との関係や養生期間中の気温による強度補正值を確認した。また、設計基準強度が 60N/mm^2 を超える高強度コンクリートの場合、火災時に爆裂現象が生じるため、耐火性を維持するための対策が必要となる。そのため、爆裂防止対策としてポリプロピレン繊維を混入した高強度コンクリートについて、加熱試験を実施し、その効果を確認した。

2. 実験概要

2.1 実験工程

実験工程を表 1 に示す。実験は、夏期と冬期に分けて 2 回実施し、夏期実験では実大模擬柱のコア強度試験と養生温度を変えた供試体の強度試験を行い、冬期実験は実大模擬柱のコア強度および耐火性実験（加熱試験）を行った。なお、冬期実験では、簡易断熱養生供試体も作製した。

表 1 実験工程

夏期 実験	2002/8/29	コンクリート打設
	2002/9/7 (材齢 7 日)	圧縮強度試験 (標準養生供試体)
	2002/9/26 (材齢 28 日)	圧縮強度試験 (標準・ 35°C ・ 12°C ・ 5°C 供試体)
	2002/10/17~23	コア抜き・両端研磨
	2002/10/24~25 (材齢 56 日)	圧縮強度試験 (標準・ 35°C ・ 12°C ・ 5°C 供試体, コア中心部・コア端部供試体)
	2002/11/25~27	コア抜き・両端研磨
冬期 実験	2002/11/28~29 (材齢 91 日)	圧縮強度試験 (標準・ 35°C ・ 12°C ・ 5°C 供試体, コア中心部・コア端部供試体)
	2002/12/12	コンクリート打設
	2002/12/19 (材齢 7 日)	圧縮強度試験 (標準養生供試体)
	2003/1/9 (材齢 28 日)	圧縮強度試験 (標準・簡易断熱養生供試体)
	2003/1/30~2/5	コア抜き・両端研磨
	2003/2/6~7 (材齢 56 日)	圧縮強度試験 (標準・簡易断熱養生供試体, コア中心部, コア端部供試体)
	2003/3/6~11	コア抜き・両端研磨
	2003/3/12~13 (材齢 91 日)	圧縮強度試験 (標準・簡易断熱養生供試体, コア中心部, コア端部供試体)
2003/4/11~4/17	耐火性実験（加熱試験）	

*先端技術研究室

表2 使用材料

材料	種類	銘柄・産地（生産者）	品質
C：セメント	低熱ポルトランドセメント	太平洋セメント(株)	密度 3.22g/cm ³
S：細骨材	砂 5mm（硬質砂岩）60%	千葉県富津市産	表乾密度 2.60g/cm ³
	砕砂 5mm（石灰岩）40%	東京都奥多摩町氷川産	粗粒率 2.65
G：粗骨材1	碎石 2005（硬質砂岩）60%	東京都青梅市産	表乾密度 2.66g/cm ³
	碎石 2005（石灰岩）40%	埼玉県入間郡	実積率 60.0%
G：粗骨材2	碎石 2005（高強度用硬質砂岩）	東京都青梅市産	表乾密度 2.66g/cm ³
W：練混ぜ水	地下水	-	-
Ad：混和剤	高性能 AE 減水剤	レオビルド SP-8SB	ポリカルボン酸系
PP：繊維	ポリプロピレン	ダイワボウ PZ（大和紡績）	2.2dtex（18μm）×3mm

表3 コンクリート調合

打設時期 No.	種類	W/C (%)	粗骨材の最大 寸法 (mm)	スランプ ^a (cm)	空気量 (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
							C	W	S	G	PP	Ad	
夏1	冬1	L35	35	20	60	3.0	50.0	487	170	845	862	-	C×1.2%
夏2	冬2	L30	30	20	60	3.0	48.1	567	170	780	862	-	C×1.4%
夏3	-	L25	25	20	60	3.0	45.0	680	170	689	862	-	C×1.8%
夏4	-	L25(100)	25	20	60	3.0	45.0	680	170	689	862	-	C×1.8%
-	冬3												C×1.85%*
-	冬4	L25F(100)	25	20	60	3.0	45.0	680	170	689	862	2.0	C×1.9%**

*L25(100)の冬期実験の Ad は C×1.8%で混練後、C×0.05%を後添加

** L25F(100)は L25(100)の残りの部分に PP 繊維を 2.0kg/m³ 混入し、同時に Ad (C×0.05%) を後添加した。

2.2 コンクリート製造方法

- ・製造工場：神奈川秩父レミコン（株）本社工場
（神奈川県川崎市高津区久地 845-1）
- ・使用ミキサー：強制二軸型ミキサー
（光洋機械産業社製 3m³）
- ・混練量：1.25m³×2 バッチ（1種類当たり 2.5m³）
- ・練混ぜ時間：モルタル 60 秒 + 粗骨材投入後 60 秒
（W/C=25%は粗骨材投入後 120 秒）

2.3 実験場所

- ・実大模擬試験体打設：神奈川秩父レミコン（株）本社工場
- ・および供試体作製 敷地内（駐車場）
- ・コア抜き：技術研究所敷地内（打設 2 週間後、工場から移動）
- ・圧縮強度試験：技術研究所
神奈川秩父レミコン（標準養生のみ）
- ・耐火性実験：技術研究所

2.4 使用材料およびコンクリート調合

使用材料を表2に、コンクリート調合を表3に示す。

セメントは低熱ポルトランドセメントを用い、シリカフェーム等の混和材は用いていない。使用骨材は、通常の強度のコンクリートと同じ材料を用いることを基本としたが、W/C=25%の調合については、高強度用の硬質砂岩を用いた調合も実験した（表3の夏4・冬3・冬4）。

3. 試験体および養生方法

3.1 実大模擬柱試験体

図1に示すように、断面 1,000mm×1,000mm の柱を想定し、高さを 1,000mm として、上面および下面に厚さ 100mm の断熱

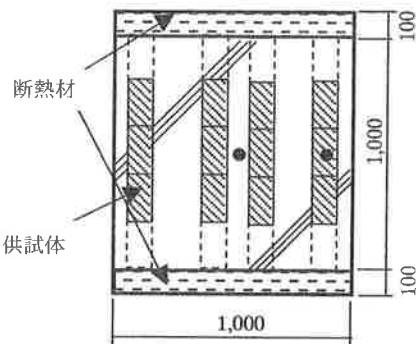
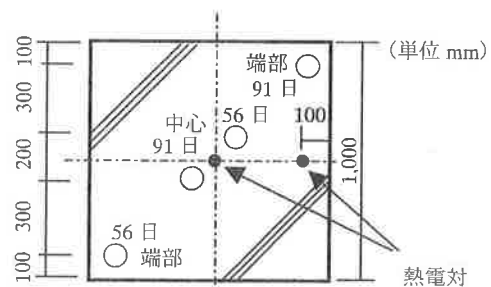


図1 実大模擬柱試験体形状寸法

材（発泡スチロール）を貼り付けた試験体とした。夏期実験・冬期実験ともに4体（4種類）作製した。型枠は12mm合板を用いた。なお、試験体のコンクリート温度を測定するため、T型熱電対を2箇所（冬期実験の1部は中央1箇所）に埋設し、30分間隔で打設後11日間温度測定を行った。同時に外気温も測定した。

3.2 コア供試体

圧縮強度試験用コア供試体は、材齢 56 日試験、材齢 91 日試験用とし、それぞれ断面中心部と端部の 2 カ所（計 4 カ所）から採取した。コア抜きは直径 100mm のコアビットを用い、縦抜きで試験体を貫通させた。その後、長さ 100cm のコアの両端約 20cm 部分を除いた中央部分から、高さ約 20cm のコア供試体を 3 本作製した。実大柱模擬試験体 1 体から合計 12 本のコア供試体を作製した。

3.3 簡易断熱養生供試体（冬期実験）

図 2 に示すようにブリキ製簡易モールド（サミット缶 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）にコンクリートを詰め込んだ供試体 18 本を 9 本 \times 2 段に並べ、6 面全面を厚さ 100mm の発泡スチロールで覆った。上段中央の供試体には熱電対を埋め込み、温度測定を行った。材齢 12 日以降は簡易断熱養生槽から取り出し、実験室内で養生した。

3.4 異なる養生温度での養生

プラスチック製簡易モールド（プラモールド $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）を用いて作製した供試体を、打設後 24~48 時間で脱型し、 $35^\circ\text{C} \cdot 12^\circ\text{C} \cdot 5^\circ\text{C}$ のポリタンク水槽で所定の材齢まで養生した。温度制御はポリタンクを設置した恒温槽の温度を $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $12^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ に設定して行った。

3.5 標準養生供試体

技術研究所で試験した供試体は、プラスチック製簡易モールドで作製し、実大模擬柱試験体付近で翌日まで養生し、24~48 時間で脱型した後、技術研究所の養生水槽（ $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ）で所定の材齢まで養生した。

神奈川秩父レミコンで試験した供試体は、鋳物の型枠（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）を用いて作製し、神奈川秩父レミコンの試験室に翌日まで保管し、翌日脱型後、神奈川秩父レミコンの養生水槽（ $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ）で所定の材齢まで養生した。

3.6 耐火性実験用供試体

耐火性実験は、冬期実験の L25(100)および L25F(100)の調査を対象とし、プラスチック製簡易モールドで供試体を作製し、以下に示す養生を行った。

- ①20℃水中養生：打設翌日に脱型後 20℃水中
- ②20℃封かん養生：打設直後に封かん、翌日から 20℃
- ③20℃気中養生：打設翌日に脱型後 20℃気中
- ④絶乾状態供試体：打設翌日に脱型後 20℃水中
加熱前に 105℃で 115 時間乾燥

各調査とも①から③の養生用に計 18 本ずつ供試体を採取し、加熱用に 2 本、圧縮強度試験用に 2 本、含水量測定用に 2 本用いた。④の養生は含水量測定用供試体を用い、L25(100)のみ加熱した。

4. フレッシュコンクリート試験結果

夏期実験のフレッシュコンクリートの試験結果を表 4 に、冬期実験の結果を表 5 に示す。冬期実験の L25 (100) の調査は、夏期実験の高性能 AE 減水剤添加量では十分なスランプフローが得られなかったため、 $C \times 0.05\%$ を後添加した。

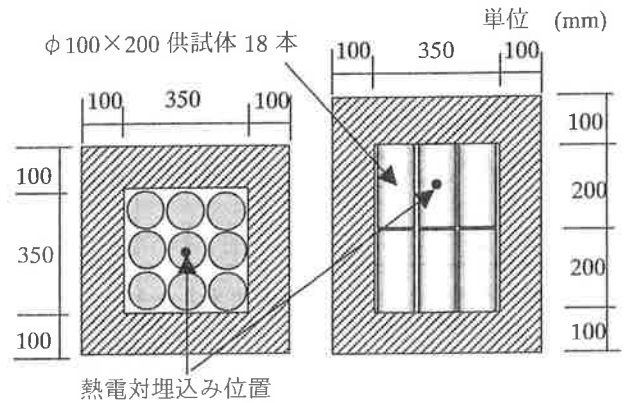


図 2 簡易断熱養生方法

表 4 フレッシュコンクリート試験結果（夏期実験）

種類	試験時期	スランプフロー (cm)	50cm 到達時間(秒)	空気量 (%)
L35	直後	60.5×59.5	5.8	2.3
L30	直後	61.0×62.5	4.3	2.2
	30 分後	74.0×73.0	5.2	—
	60 分後	72.0×71.0	7.1	2.1
L25	直後	55.0×55.0	7.2	2.4
L25 (100)	直後	51.0×50.5	6.1	2.2

表 5 フレッシュコンクリート試験結果（冬期実験）

種類	試験時期	スランプフロー (cm)	50cm 到達時間(秒)	空気量 (%)
L35	直後	63.0×62.0	4.1	2.0
L30	直後	66.0×64.5	4.7	2.2
	30 分後	68.5×68.5	4.2	2.0
	60 分後	70.0×69.0	4.1	2.3
L25	直後	52.5×50.0	12.5	2.1
(100)	0.05%追加	60.0×60.5	6.7	2.2
L25F (100)	L25(100)に PP0.1%投入 Ad0.05%添加	54.5×54.0	11.4	3.6

L25F (100) の調査は、L25 (100) の調査の試験体打設後、残りのコンクリートに PP 繊維 0.1%vol と高性能 AE 減水剤を $C \times 0.05\%$ 混入して製造した。

夏期実験・冬期実験ともに L30 の調査については、混練後 60 分経過までの経時変化を測定した。スランプフローは混練直後より、30 分後・60 分後の測定値の方が大きい。夏期は 30 分後がピークとなったが、冬期は 60 分までスランプフローの伸びが見られた。

5. 温度測定結果

温度測定結果の一覧を表 6 に、各測定点の温度履歴を図 3 および図 4 に示す。

実大模擬柱中心部における、コンクリートの打設時温度から最高温度までの上昇量は、以下に示すとおりであった。

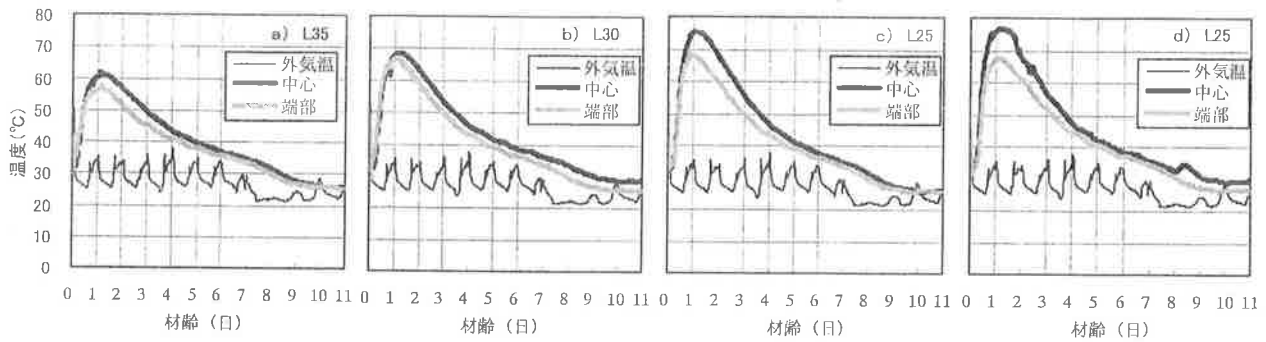


図3 温度測定結果（夏期実験）

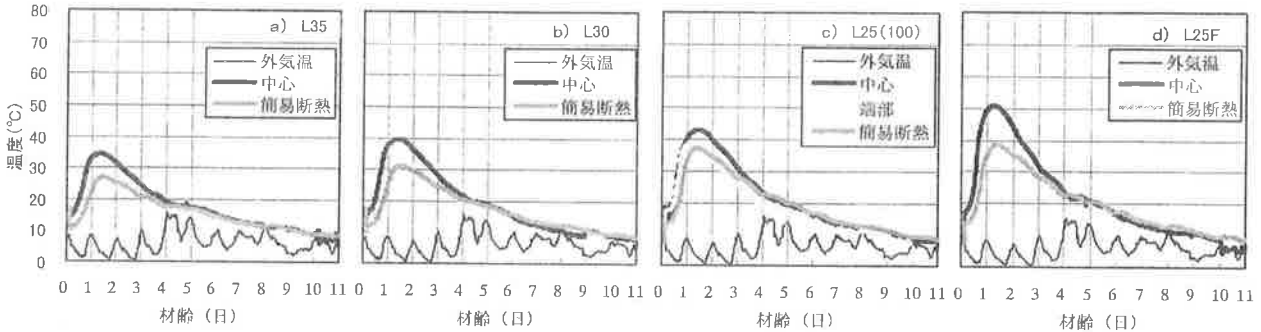


図4 温度測定結果（冬期実験）

表6 温度測定結果一覧

時期	コンクリート種類	打設時温度(°C)		コンクリート最高温度(°C)		
		コンクリート温度	外気温	模擬柱中心部	模擬柱端部	簡易断熱
夏期実験	L35	30.0	35.0	61.7	57.4	—
	L30	30.0	34.0	68.3	66.9	—
	L25	31.0	34.0	75.3	69.1	—
	L25(100)	31.5	35.0	76.8	67.4	—
	平均外気温 27.7°C (打設から11日経過まで)					
冬期実験	L35	13.0	11.0	34.2	—	26.7
	L30	14.0	11.0	39.5	—	31.2
	L25(100)	16.0	11.0	42.9	38.9	37.1
	L25F(100)	16.5	11.0	50.7	—	38.5
	平均外気温 6.1°C (打設から11日経過まで)					

表7 標準養生供試体圧縮強度試験結果

(神奈川秩父レミコンで実施) 単位 N/mm²

材齢	種類	C/W	夏期実験	冬期実験
28日	L35	2.86	70.6	68.2
	L30	3.33	83.3	79.8
	L25	4.00	95.5	—
	L25(100)	4.00	100.3	105.0
	L25F(100)	4.00	—	100.0
56日	L35	2.86	79.6	82.8
	L30	3.33	90.9	96.9
	L25	4.00	102.5	—
	L25(100)	4.00	109.7	116.7
	L25F(100)	4.00	—	115.0
91日	L35	2.86	88.6	88.1
	L30	3.33	98.0	101.4
	L25	4.00	108.7	—
	L25(100)	4.00	116.3	136.3
	L25F(100)	4.00	—	130.3

夏期実験 L35 : 31.7°C 冬期実験 L35 : 21.2°C
 L30 : 38.3°C L30 : 25.5°C
 L25 : 44.3°C L25(100) : 26.9°C
 L25(100) : 45.3°C L25F(100) : 34.2°C

簡易断熱養生供試体温度は、実大模擬柱のせき板から 10cm の位置で測定した温度（端部）と、ほぼ同じであった。今回の実験結果から、厚さ 10cm の発泡スチロールで覆った簡易断熱養生方法は、低熱ポルトランドセメントを用いて冬期に施工する場合、柱部材外周 10cm の位置の養生温度に相当することが判明した。

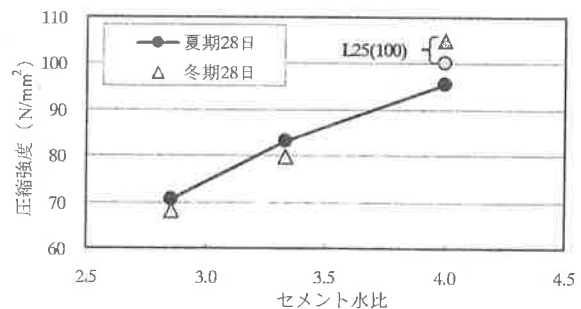


図5 セメント水比と圧縮強度との関係

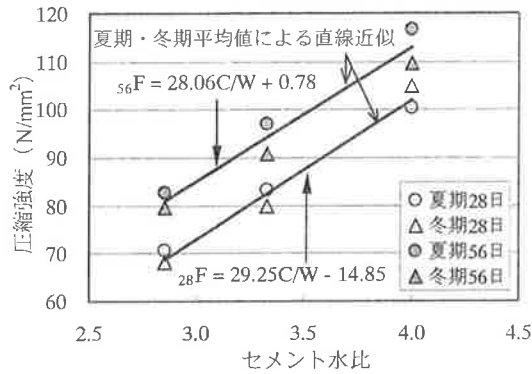


図6 セメント水比と圧縮強度との関係式

表10 コンクリートの養生温度による強度補正值

m	n	コンクリートの打込みからn日までの期間の 予想平均養生温度(°C)				
		18以上	14以上 18未満	11以上 14未満	8以上 11未満	6以上 8未満
28	28	18以上	14以上 18未満	11以上 14未満	8以上 11未満	6以上 8未満
28	56	8以上	5以上 8未満	3以上 5未満	2以上 3未満	—
28	91	2以上	—	—	—	—
56	56	19以上	16以上 19未満	13以上 16未満	11以上 13未満	8以上 11未満
56	91	9以上	7以上 9未満	5以上 7未満	2以上 5未満	—
補正值 mT_n (N/mm ²)		0	3	6	9	12

m: 調合管理材齢 (日), n: 構造体強度管理材齢 (日)

表11 コア供試体圧縮強度試験結果

種類	C/W	夏期実験 コア圧縮強度 (N/mm ²)						冬期実験 コア圧縮強度 (N/mm ²)					
		材齢 56 日			材齢 91 日			材齢 56 日			材齢 91 日		
		中心	端部	平均	中心	端部	平均	中心	端部	平均	中心	端部	平均
L35	2.86	71.3	69.2	70.2	73.4	73.0	73.2	56.7	52.4	54.6	64.8	55.8	60.3
L30	3.33	71.0	78.6	74.8	81.3	84.3	82.8	69.8	65.3	67.5	82.2	67.6	73.4
L25	4.00	82.4	82.5	82.4	97.4	95.1	96.0	—	—	—	—	—	—
L25(100)	4.00	94.1	93.9	94.0	101.9	101.7	101.8	92.2	85.0	88.6	97.9	95.2	96.8
L25F(100)	4.00	—	—	—	—	—	—	86.3	83.0	84.7	92.2	91.1	91.8

6. 圧縮強度試験結果および考察

6.1 セメント水比と圧縮強度との関係

神奈川県秩父レミコンで実施した標準養生供試体の圧縮強度試験結果を表7に示す。また、図5にセメント水比と圧縮強度との関係を示す。図5の●シンボルが、粗骨材に硬質砂岩 60% + 石灰岩碎石 40%を使用した調合 (L35, L30, L25) であるが、セメント水比 3.33 以上では、それ以下と比較して強度増加の割合が小さくなる。このことから、セメント水比が 3.33 を超える (W/C30%未満) 調合においては、高強度用硬質砂岩を 100%用いる調合を採用した方が良い。

図6にセメント水比と圧縮強度との関係式を示す。関係式は、夏期試験結果と冬期試験結果の平均値を用いて直線近似した。なお、セメント水比が 4.0 の場合は L25(100)の試験結果を用いた。

表8 異なる養生温度の圧縮強度試験結果 (技研で実施)

コンクリート 種類	養生温度 (°C)	圧縮強度(N/mm ²)		
		28日	56日	91日
L35 W/C=35%	35	72.2	68.7	84.1
	20	63.2	73.0	80.2
	12	54.6	65.4	76.3
	5	45.8	57.7	66.6
L30 W/C=30%	35	79.8	84.3	94.0
	20	74.4	83.7	87.8
	12	65.7	76.3	87.7
	5	57.6	67.8	79.1
L25 W/C=25%	35	88.6	87.5	101.6
	20	78.5	92.1	101.2
	12	78.7	88.7	96.1
	5	68.9	81.8	88.2
L25(100) W/C=25% 砂岩 100%	35	95.0	92.6	102.5
	20	85.8	102.4	106.7
	12	77.9	84.7	98.5
	5	72.6	75.0	89.2

表9 養生温度の違いによる平均強度差

(20°C養生の強度 - 各養生温度の強度)

m	n	記号 mT_n	強度差 (N/mm ²)			
			5°C	12°C	20°C	35°C
28	28	$28T_{28}$	14.2	6.2	0.0	-8.4
28	56	$28T_{56}$	4.9	-3.3	-12.3	-7.8
28	91	$28T_{91}$	-5.3	-14.2	-18.5	-20.1
56	56	$56T_{56}$	17.2	9.0	0.0	4.5
56	91	$56T_{91}$	7.0	-1.9	-6.2	-7.8

m: 調合管理材齢 (日), n: 構造体強度管理材齢 (日)

6.2 気温によるコンクリートの強度補正值 (T値)

養生温度を変えて水中養生した供試体の圧縮強度試験結果を表8に示す。温度 20°Cの試験結果は、技術研究所で行った標準養生供試体の結果である。

W/C が 25%~35%の範囲では、養生温度の変化による強度低下や増加において、W/Cの違いによる顕著な傾向は見られなかった。したがって、4種類の強度を平均し、20°C水中養生供試体と各養生温度供試体の強度差 (mT_n) を算出した。その算出結果を表9に示すが、この値を基に、コンクリートの養生温度による強度補正值 (mT_n) を 3N/mm²ごとに設定すると表10のようになる。調合管理材齢 (m) を 28日とし、構造体強度管理材齢 (n) を 91日とした場合は、JASS5に示されている通常強度のコンクリートの補正值と同じであるが、nを28日あるいは56日とする場合は、通常強度のコンクリートより大きな補正值を設定する必要がある (通常強度では最大 6N/mm²)。

表 12 標準養生供試体とコア供試体の強度差

種類		$_{28}S_{56}$	$_{28}S_{91}$	$_{56}S_{56}$	$_{56}S_{91}$	$_{91}S_{91}$
夏期 実験	L35	0.4	-2.6	9.4	6.4	15.4
	L30	8.5	0.5	16.1	8.1	15.2
	L25	13.1	-0.5	20.1	6.5	12.7
	L25(100)	6.3	-1.5	15.7	7.9	14.5
冬期 実験	L35	13.6	7.9	28.2	22.5	27.8
	L30	12.3	6.4	29.4	23.5	28.0
	L25(100)	16.4	8.2	28.1	19.9	39.5
	L25F(100)	15.3	8.2	30.3	23.2	38.5

*: $_{m}S_n$ = 材齢 m 日標準養生強度 - 材齢 n 日コア強度

6.3 構造体コンクリートの補正值 (S 値)

コア強度試験結果を表 11 に示す。表 7 に示した標準養生供試体圧縮強度と表 11 のコア強度平均値との差を求めると、表 12 のようになる。低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートを夏期に打設した場合、材齢 91 日のコアは材齢 28 日の標準養生供試体と同等以上の強度発現が期待できるが、冬期に打設した場合は強度が不足する傾向があり、今回の実験でも同様な傾向が見られた。

材齢 28 日の標準養生強度より材齢 91 日のコア強度が高く、その差が比較的大きい場合は、材齢 56 日の標準養生強度で調合設計した方が経済的である。しかし、今回の実験結果においてはその差がほとんど無いため、材齢 28 日で調合設計せざるを得ない。図 7 に建築学会大会 (1987~2003 年) および建設省総プロ NewRC 平成 4 年度報告書を対象として調査した、低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの構造体補正強度 ($_{28}S_{91}$) を示す。同時に今回の実験結果もプロットしているが、これらの図から $_{28}S_{91}$ は、以下に示す値に設定する必要があると考える。なお、強度の上限値は今回のコア強度から、バラツキを考慮して設計基準強度 84N/mm^2 以下とした。

- 夏期打設の場合 (日平均気温 20°C 以上, $5/27\sim 10/4$)
 $39\text{N/mm}^2 \leq F_c \leq 84\text{N/mm}^2$: $_{28}S_{91} = 0\text{N/mm}^2$
- 標準期打設の場合 (日平均気温 10°C 以上 20°C 未満, $3/25\sim 5/26, 10/5\sim 12/3$)
 $39\text{N/mm}^2 \leq F_c \leq 60\text{N/mm}^2$: $_{28}S_{91} = 0\text{N/mm}^2$
 $60\text{N/mm}^2 < F_c \leq 84\text{N/mm}^2$: $_{28}S_{91} = 3\text{N/mm}^2$
- 冬期打設の場合 (日平均気温 10°C 未満, $12/4\sim 3/24$)
 $39\text{N/mm}^2 \leq F_c \leq 60\text{N/mm}^2$: $_{28}S_{91} = 3\text{N/mm}^2$
 $60\text{N/mm}^2 < F_c \leq 84\text{N/mm}^2$: $_{28}S_{91} = 6\text{N/mm}^2$

6.4 簡易断熱養生供試体強度

表 13 および図 8 に冬期実験で実施した簡易断熱養生供試体の圧縮強度と柱模擬部材のコア強度との関係を示す。簡易断熱養生供試体の圧縮強度は、コア強度とほぼ等しい値を示し、コア強度の平均値との差は $-1.0\sim 1.8\text{N/mm}^2$ であった。

このことから、冬期の実験においては今回実施した簡易断熱養生方法で構造体強度の管理が可能であると考えられる。ただし、今回の結果では、簡易断熱養生供試体の圧縮強度の方が平均コア強度より大きい傾向があるため、 $\Delta F = 3\text{N/mm}^2$ を設定する必要がある。

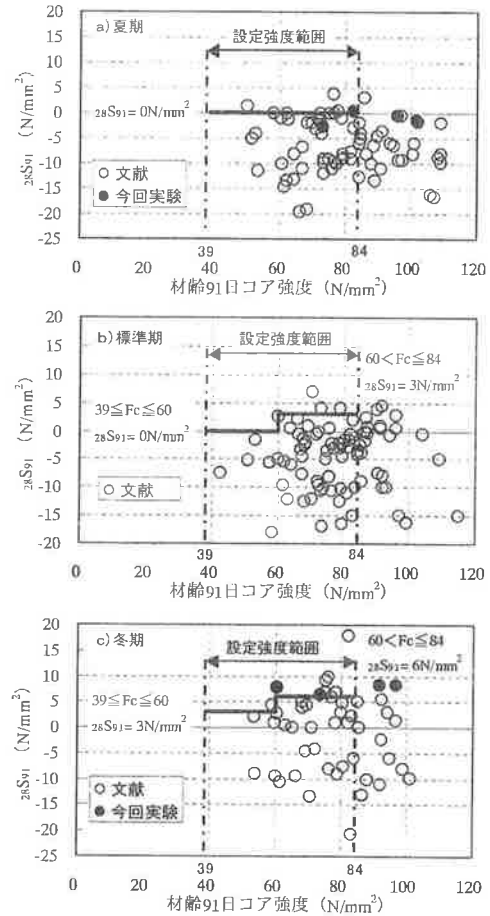


図 7 低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$)

表 13 簡易断熱養生供試体強度とコア強度との関係

種類	材齢 56 日 (N/mm^2)			材齢 91 日 (N/mm^2)		
	簡易	コア	差	簡易	コア	差
L35	54.6	54.6	0.0	61.2	60.3	0.9
L30	68.3	67.5	0.8	74.5	73.4	1.1
L25(100)	89.8	88.6	1.2	95.8	96.8	-1.0
L25F(100)	86.5	84.7	1.8	92.0	91.8	0.2

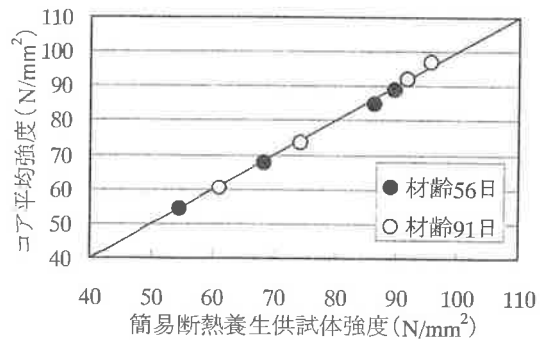


図 8 簡易断熱養生供試体強度とコア強度との関係

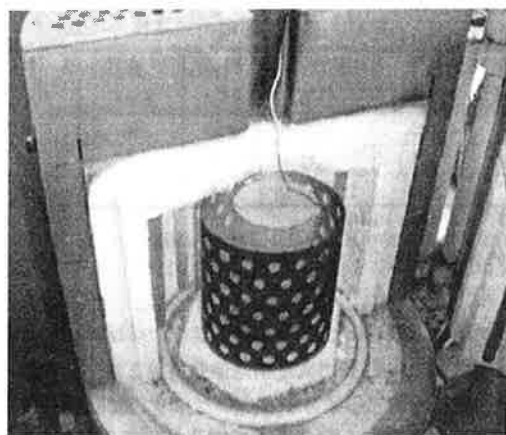


写真1 加熱供試体設置状況

7. 耐火性実験結果および考察

7.1 加熱方法

表 14 に示す電気炉を用い、供試体（φ10×20cm）をステンレス製の孔のあいた筒の内部にセットし、1本ずつ加熱した（写真1参照）。加熱速度は、図9に示す標準加熱曲線（JIS A 1304）に準じた。電気炉の設定温度は、ステンレス筒内部の温度が JIS 曲線になるよう設定した。図9にステンレス筒内部の温度を実測した例（L25F（100）封かん）を示すが、ほぼ JIS 曲線の値となっている。

7.2 加熱時のコンクリート物性

加熱時のコンクリート物性を表 15 に示す。

圧縮強度および単位容積質量は、水中>封かん>気中の順に大きく、養生条件の違いによる影響が顕著に現れている。しかし、水中養生供試体の含水率は、封かん養生や気中養生より小さい結果となった。吸水率測定のため、105℃で 115 時間乾燥させたが、圧縮強度が 100N/mm² を超える高強度コンクリートのため、セメントペーストの組織が緻密となり、十分に乾燥しなかったと考えられる。30 分加熱後の質量減少率を L25F(100) で測定した結果、水中（9.0%）、封かん（8.2%）、気中（6.7%）であり、水中養生供試体が最も大きかった。

7.3 実験結果および考察

表 16 に加熱時の供試体爆裂の有無を示す。爆裂防止対策を施した L25F(100)の調査は、いずれの養生条件においても爆裂は発生せず、対策の効果が確認できた。未対策の L25(100)の調査では、20℃水中養生を行った試験体だけ爆裂が生じた。爆裂音はステンレス筒内の温度で 550～700℃のときに確認された。

L25(100)の水中養生試験体だけ爆裂が発生した原因として、内部に残存している遊離水および水和生成物から離脱した結晶水の気化膨張圧を、コンクリート組織が緻密化していることにより開放できなかったと考える。高強度コンクリートの火災時の爆裂は、一般にこの緻密化が主原因と言われている。

L25F(100)は水中養生試験体においても爆裂を起こさなかったのは、混入したポリプロピレン繊維が高温になると溶融し、水分の気化圧を外部に開放する働きをしたためである。各化学

表14 電気炉（中外エンジニアリングCSF-100-200）

炉型式	急速昇温電気炉
使用温度範囲	常用 930℃ 最高 1100℃
温度制御方式	P I Dプログラム制御
温度検出端	熱電対 [R]
内寸法	φ100×H200mm
重量	4 kg / 1ヶ (グロス)
発熱体	エレマGR-162015 φ16 10本
ヒータ容量	7 kw

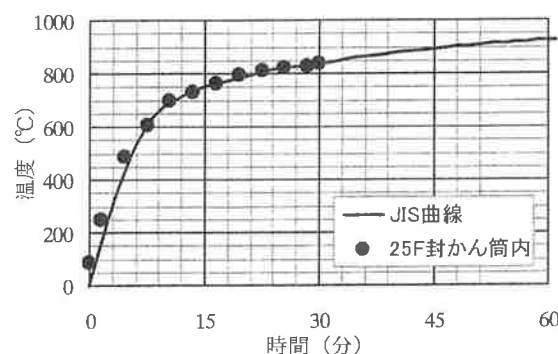


図9 JIS 標準加熱曲線と炉内温度測定結果

表 15 加熱時のコンクリート物性（材齢 125 日）

種類	養生方法	含水率 (%)	単容質 (t/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)
L25(100) W/C25% 繊維なし	水中	2.10	2.47	122
	封かん	3.04	2.45	108
	気中	2.49	2.40	78.5
	水中後絶乾	0.00	2.41	—
L25F(100) W/C25% PP 繊維	水中	2.16	2.40	117
	封かん	3.62	2.39	105
	気中	2.93	2.34	76.2

表 16 加熱時の供試体爆裂の有無

種類	養生方法	No.	加熱時間 (分)	爆裂の有無	爆裂温度 (°C)
L25(100) W/C25% 繊維なし	水中	1	60	有	550～700℃
		2	30	有	550～700℃
	封かん	1	30	無	—
		2	30	無	—
	気中	1	30	無	—
		2	60	無(崩壊)	—
	水中後絶乾	1	60	無(崩壊)	—
		2	60	無(崩壊)	—
L25F(100) W/C25% PP 繊維 2kg/m ³	水中	1	30	無	—
		2	30	無	—
	封かん	1	30	無	—
		2	30	無	—
	気中	1	30	無	—
		2	60	無(崩壊)	—

繊維の熱特性を表 17 に示すが、これらの中でポリプロピレン繊維が爆裂防止に最も有効である。

20℃水中養生試験体でも、加熱前に乾燥させた試験体においては、爆裂は発生しなかった。このことから、十分緻密な組織をもったコンクリートにおいても、内部の遊離水が少なければ爆裂を防止できることが確認できた。この現象を利用し、高強度コンクリートの爆裂防止対策として、硬化後にコンクリート表面を乾燥させる技術もあるが、コスト高になる。

爆裂が生じなかった試験体においても、60分加熱を行ったものは、加熱後室温まで温度が下がるとぼろぼろに崩壊した。セメント水和物は700℃以上になるとCa(OH)₂やCaCO₃が分解するので、著しく強度が低下する。今回の実験で60分加熱を行ったものは、試験体内部まで700℃以上に達したと想定される。

8. まとめ

神奈川秩父レミコン(株)本社工場で製造する低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、実大模擬

謝 辞

実大模擬柱実験を行うに当たって、神奈川秩父レミコン(株)およびボゾリス物産(株)の方々に多大な協力をいただきました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会大会学術講演梗概集、(低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの実大柱実験データ)、1987~2003年
- 2) 建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」:3章施工に関する研究 施工WG、平成4年度高強度コンクリート分科会報告書、平成5年3月
- 3) 太田他:耐爆裂性能を有する高強度コンクリートに関する研究(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.939-940、2000年9月

A STUDY OF HIGH-STRENGTH CONCRETE USING LOW-HEAT PORTLAND CEMENT - REAL SIZE COLUMN MODEL TEST AND HEATING TEST -

T.Oh-oka and K.Watanabe

The newly building project using concrete having $F_c=84\text{N/mm}^2$ specified strength are progressing. For deal with construction of the project, we have to establish construction technique of high-strength concrete.

The real size column model test and the heating test of high-strength concrete are carried out. According to these tests, the following results were clarified.

- 1) The relation between W/C and strength of concrete, the relation of concrete strength between specimen under standard curing and core specimen of structure, and the relation of concrete strength between specimen under standard curing and specimen under various temperature water curing were clarified.
- 2) Using low-heat portland cement, high-strength concrete having $F_c=84\text{N/mm}^2$ specified strength can be manufactured in Kanagawa Chichibu ready mixed concrete factory.
- 3) The high-strength concrete ($F_c>60\text{N/mm}^2$) with mixing short cut fiber of polypropylene have high fire endurance.

表 17 各化学繊維の熱特性

繊維種類	密度 (g/cm ³)	軟化点 (°C)	融点 (°C)	質量減少率 (%)	
				300°C	500°C
PP	0.9	150	170	50	90
PVA	1.3	200	225	3	85
AC	1.15	250~325	分解	10	30

PP:ポリプロピレン繊維

PVA:ビニロン(ポリビニルアルコール)繊維

AC:アクリル繊維

柱のコア強度試験および異なる養生温度の供試体の強度試験を実施した結果、W/C算出式・構造体強度補正值(S値)・気温による強度補正值(T値)が明らかとなり、設計基準強度84N/mm²までの高強度コンクリートの製造が可能となった。

また、冬期に限定されるが、簡易断熱養生供試体によって構造体コンクリート強度を推定する方法を確立した。

設計基準強度が60N/mm²を超える高強度コンクリートの場合、ポリプロピレン繊維を体積で0.1%混入することにより、火災時の爆裂を防止できることを耐火性実験により確認した。