

論文 各種セメントを用いたコンクリートの強度発現に及ぼす養生温度の影響

因幡 芳樹*1・長田 浩治*2・洪 杰*3・嵩 英雄*4

要旨: 低熱ポルトランドセメントを中心に、各種のセメントを使用したコンクリートの養生温度の影響による強度発現性について検討した。低熱ポルトランドセメントは他のセメントと比較して養生温度の影響を受けやすいことやセメント製造メーカーによって強度発現性に差があることを確認した。また、JASS 5に規定される温度補正值との比較も行い、普通ポルトランドセメントにおいては補正值Tが5,10℃でやや不足することが分かった。

キーワード: 低熱ポルトランドセメント, 養生温度, 補正值 T, 圧縮強度, JASS 5

1.はじめに

これまでに養生温度の違いによる普通ポルトランドセメント、フライアッシュセメントや高炉セメントを使用した場合の強度発現性に関する研究結果は発表^{1) 2)}されているものの、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に新しく規定された低熱ポルトランドセメントに関しては、低温時における強度発現性状に関する研究³⁾は少なく、JASS 5⁴⁾においても気温による強度の補正值Tの標準値も示されていないのが現状である。

そこで、本報告では、低熱ポルトランドセメントを中心に各種セメントを用いたコンクリートの養生温度と養生方法の違いによる強度発現性に関する基礎的な検討を行った。

実験は、基礎的資料の収集が目的の<シリーズI>と、セメントの種類を増やし、W/Cの範囲を拡大した<シリーズII>の、2シリーズを行った。

2.実験概要

2.1 使用材料

実験で使用した材料を表-1に示す。

2.2 実験水準

実験の水準とコンクリートの性状を表-2に示す。フライアッシュセメントは、普通ポルト

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 市販品3種等量混合 $\rho = 3.16 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
	フライアッシュセメントB種 フライアッシュ量 15% $\rho = 3.00 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
	高炉セメントB種 I BB :スラグ量 45% $\rho = 3.04 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ II BBH:スラグ量 55% $\rho = 3.04 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ BBL:スラグ量 45% $\rho = 3.01 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
	低熱セメント I LP :T社製 $\rho = 3.22$ C:S量=55% II LPT:T社製 $\rho = 3.22$ C:S量=53% LPM:M社製 $\rho = 3.24$ C:S量=62%
細骨材	君津産山砂 / 上里産山砂 = 8/2 表乾密度=2.60 (g/cm ³) 吸水率=1.55% 粗粒率 =2.71
粗骨材	青梅産硬砂岩碎石 表乾密度=2.64 (g/cm ³) 吸水率=0.61% 粗粒率 =6.79
混和剤	AE減水剤・標準形 (リグニン系) 高性能 AE減水剤・標準形 (ポリカルボン酸系)
水	東松山市 水道水

表中 I はシリーズ I, II はシリーズ II を示す

*1 サンフロー (株) 技術部 部長代理

*2 サンフロー (株) 技術部 課長

*3 工学院大学 大学院

*4 工学院大学 工学部 建築学科 教授 工博

表-2 実験水準及びコンクリート性状

シリーズ	コンクリート種類	記号	セメント	混和剤	W/C (%)	s/a (%)	単位量		スランブ ^o (cm)	スランブ ^o フロー (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
							水	セメント				
I	AE 減水剤 コンクリート	OP-50	普通 ポルト	AE 減水剤	50	47.2	175	350	18.0	—	5.0	43.0
		OP-60			60	47.6	176	293	18.5	—	4.9	31.4
		OP-50H		高 AE 減水剤	50	47.6	165	330	20.5	—	4.5	43.7
		LP-50	低熱 ポルト	AE 減水剤	50	48.6	165	330	18.5	—	4.7	33.7
		LP-60			60	49.9	165	275	18.5	—	4.8	24.6
		FB-50	フライアッシュ B種	AE 減水剤	50	46.7	174	348	18.5	—	4.1	36.5
		FB-60			60	48.2	175	292	18.5	—	4.7	27.2
		BB-50	高炉 B種	AE 減水剤	50	47.1	174	348	18.0	—	4.5	41.2
BB-60	60	48.4			175	292	18.5	—	4.4	31.7		
II	AE 減水剤 コンクリート	NP-40	普通 ポルト	AE 減水剤	40	42.7	185	463	18.5	—	4.1	55.6
		NP-50			50	47.0	172	344	18.0	—	4.8	41.9
		NP-65			65	49.7	173	266	18.5	—	5.0	23.9
		LPT-40	低熱 ポルト	AE 減水剤	40	45.3	170	425	18.0	—	4.2	49.5
		LPT-50			50	48.1	165	330	18.0	—	4.3	35.6
		LPM-50			50	48.1	165	330	18.5	—	4.6	26.9
		BBH-40	高炉 B種	AE 減水剤	40	42.5	182	455	18.0	—	4.1	38.6
		BBH-50			50	46.9	170	340	18.0	—	4.1	31.6
	BBL-50	50			46.9	171	342	18.0	—	4.0	35.4	
	高流動 コンクリート	NHP-40	普通 ポルト	高 AE 減水剤	40	46.7	185	463	—	62.5	4.0	38.2
		NHP-50			50	51.7	172	344	—	59.0	4.1	35.4
		LHP-40	低熱 ポルト	高 AE 減水剤	40	51.6	172	430	—	50.0	4.7	40.3
		LHP-50			50	53.6	172	344	—	58.0	4.5	30.6
		NHPB-40	高炉 B種	高 AE 減水剤	40	51.2	170	425	—	62.0	4.8	37.2
		NHPB-50			50	53.3	170	340	—	52.5	4.4	30.1

注：圧縮強度は標準養生，材齢 28 日強度の値を示す

ランドセメントに J 社製のフライアッシュを 15% 内割り混合した。高炉セメントは、シリーズ I では T 社製の BB セメントを、シリーズ II では普通ポルトランドに S 社製の高炉スラグ微粉末を各々の割合で内割り混合したものを使用した。また、高流動コンクリートの LHP は LPT，NHPB は BBH と同じセメントを用いた。

2.3 コンクリートの調合

シリーズ I では、W/C=50,60%の調合とし、目標スランブは 18cm，高性能 AE 減水剤コンクリートについては 21cm とした。細骨材率および単位量は、日本建築学会のコンクリートの調合設計指針・同解説⁵⁾の参考調合表に基づいて試し練りによって定めた。

シリーズ II では、シリーズ I の結果を基に W/C=40,50%の調合を中心に実験した。高流動コンクリートは目標フローを 55~60cm とし、単位水量は NHP は NP と同じ水量とした。LHP

の単位水量は試し練りの結果より NP-50 と同じ水量とし、NHPB も同様に BBH-50 の値を用いた。

2.4 コンクリートの練混ぜ及び試験方法

予め 20℃の室温下において調整した材料を用いて、コンクリートの練上がり温度が 20℃となるように行った。練混ぜは強制 2 軸ミキサにて、1 バッチ 100 リットルの練混ぜ量とした。

圧縮・引張強度試験の供試体は、φ 10 × 20cm の円柱供試体とし、水中養生供試体には鋼製型枠を使用し、封緘養生供試体には軽量型枠を用いて成形した。供試体は成型後、5,10℃養生供試体は 15℃で 24 時間養生後脱型し、20,30℃養生供試体は 20℃で 24 時間養生後脱型し、その後各々の条件下で試験日まで養生した。封緘養生は、20℃のみで、供試体は、軽量型枠の上面をラップフィルムを用い、ビニールテープでシールして封緘養生とした。

3. 試験結果

3.1 シリーズ I の結果

(1) 積算温度と圧縮強度の関係

図-1 に W/C=50% の水中養生条件下の材齢と圧縮強度の関係を、図-2 に W/C=50,60% の水中養生時の積算温度と圧縮強度の関係を示す。図-2 の図中の曲線は、 $\sigma = A \cdot \ln(M) + B$ (σ : 圧縮強度, M: 積算温度, A, B: 定数) で表される指数関数で示した各々のデータの近似曲線である。

同一水セメント比で比較した場合、LP, BB の圧縮強度は温度の影響を受けやすい傾向にあった。材齢 91 日の圧縮強度をセメント別に比較すると、LP, BB の場合 20N/mm² 程度の差が生じていた。LP については、材齢 28 日で温度差による強度の差が 30N/mm² 程度もあり、温度の影響が大きいことがわかった。OP は材齢 91 日で強度の伸びがほぼ止まっているが、他のセメント、特に LP についてはさらに強度が増進

する傾向にあると推定される。

また、積算温度と圧縮強度は、一般に材齢 28 日から材齢 91 日までは高い相関があるとされ、回帰分析の結果、OP, FB は高い相関があることがわかったが、BB, LP についてはいずれの W/C においても、ややばらつく傾向にあった。LP は積算温度が低い場合には、強度発現性が低いものの、長期にわたって強度の増進が認められた。

(2) 標準養生と封緘養生(20°C)の強度比

図-3 に、各々のセメントの標準養生 28 日強度に対する封緘養生の強度比を示した。OP, BB の場合、強度比は封緘養生 56 日においてほぼ 100% に達し、FB においては 91 日で 100% となった。LP の場合は材齢 28 日で達しており、標準養生と封緘養生の差は認められなかったが、その後の長期材齢において強度の増進効果が大きく他のセメントとは違う傾向となった。

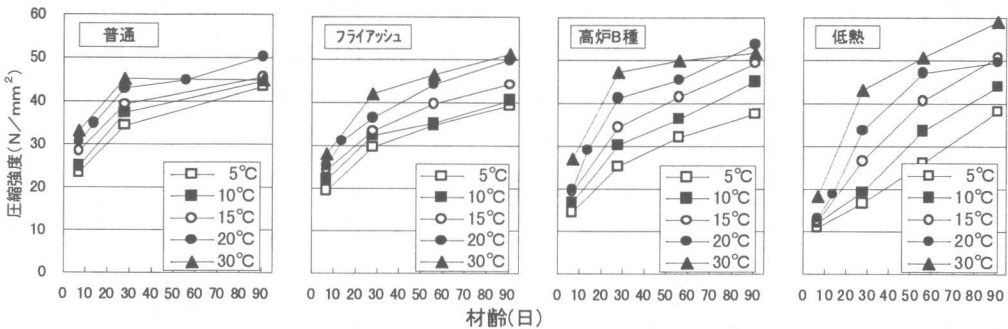


図-1 養生温度による材齢と圧縮強度 (水中養生・W/C=50%)

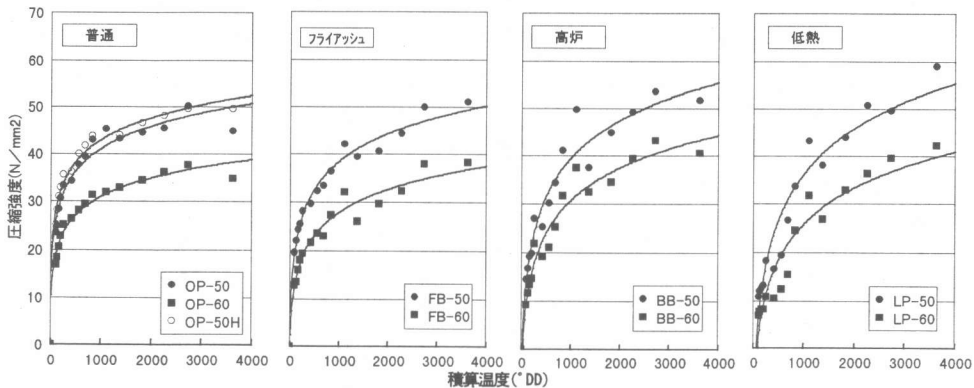


図-2 積算温度と圧縮強度

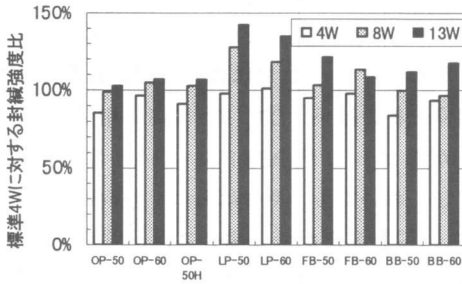


図-3 各調合の標準養生28日を基準とした封緘養生の強度比

3.2 シリーズIIの結果

(1) 積算温度と圧縮強度の関係

図-4に W/C=50%の水中養生条件下の材齢と圧縮強度の関係を、図-5に W/C=40,50,65%の水中養生時の積算温度と圧縮強度の関係を示す。

シリーズIと同様に W/C=50%の調合において各セメントを比較すると、LPMが温度の影響を最も受けやすく、養生温度10℃と30℃の材齢28日で30N/mm²程度、材齢56日においても25N/mm²程度の差を生じている。これは、

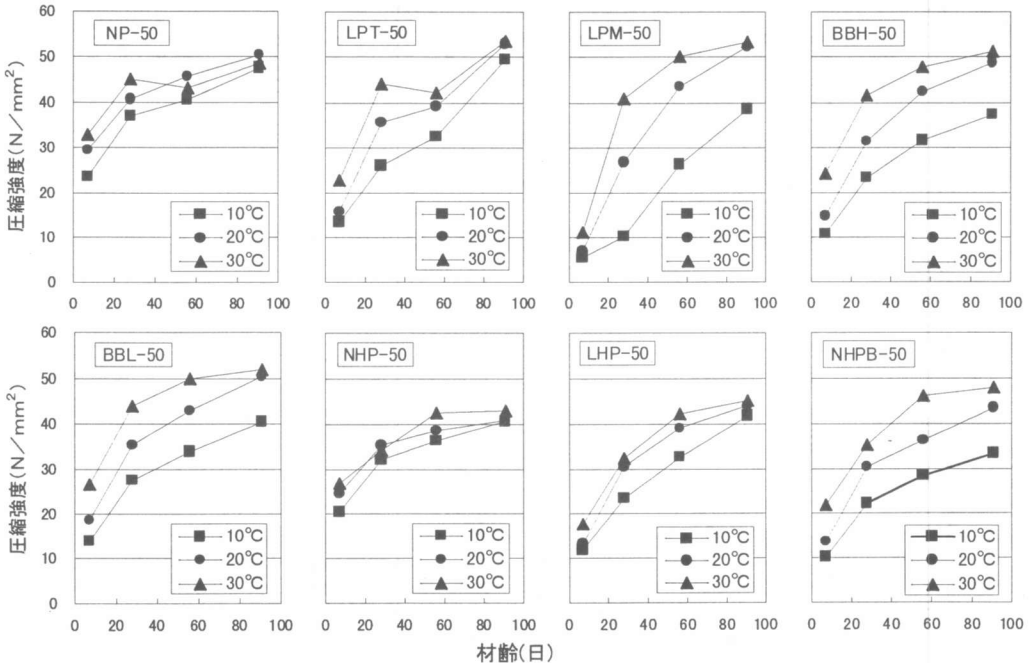


図-4 材齢と圧縮強度の関係 (水中養生・W/C=50%)

他のセメントと比較して低温養生での強度発現性が特に低いためである。また同じ低熱セメントでもLPTは、NPと同様な強度発現性であることからセメント製造メーカーの違いによって差が生じたものと推定される。養生温度の影響を次に受けているBBH,BBL,NHPBは、スラグ混入量の違いによる強度発現性の差はあまり見られないものの、養生温度が10℃と30℃とでは材齢によらず15N/mm²程度のほぼ一定の強度差となった。

高流動コンクリートと一般コンクリートを比較すると、W/C=50%では、圧縮強度に大きな差はなく、ほぼ同じような強度発現傾向にあった。

また、積算温度と圧縮強度の関係はいずれも高い相関があるものの、セメントの種類によって得られる近似曲線は大きく違った。低熱セメントは普通セメントと比較して、積算温度500°DD程度までの圧縮強度の増加が緩やかで、長期にわたって強度増進が見られた。ただし、積算温度が小さい場合には、近似曲線より下側に圧縮強度がプロットされることが多く、他のセ

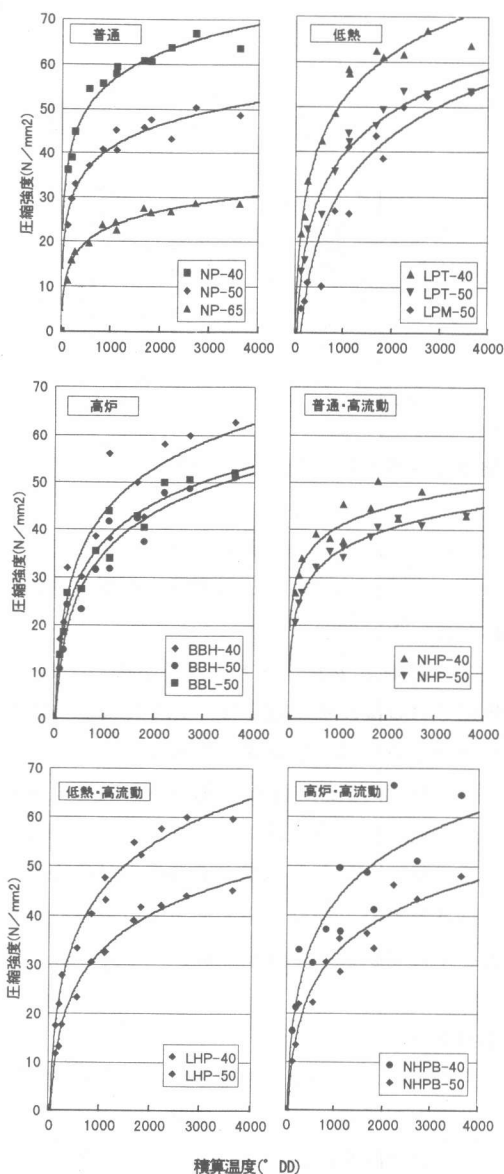


図-5 積算温度と圧縮強度(水中養生)の関係

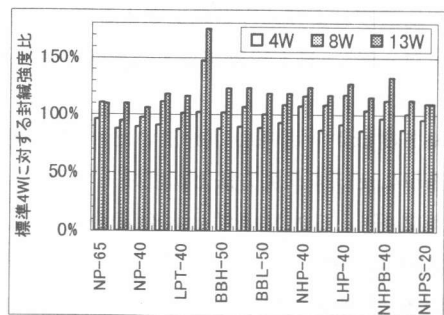


図-6 各調合の標準28日強度を基準とした封緘養生の強度比

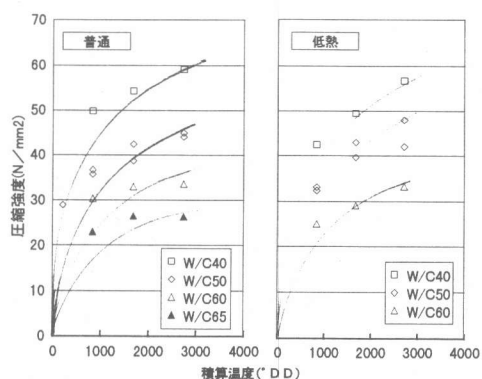


図-7 積算温度と圧縮強度(封緘養生)の関係

メントとは組成の違いによる圧縮強度の発現状況が違うことによると推定される。また高炉セメントも同様に W/C にかかわらず長期にわたって強度の増進傾向が認められたが、試験データにばらつきが生じていた。

(2) 標準養生と封緘養生(20℃)の強度比

図-6 にシリーズIIに於ける各々のセメントの標準養生 28 日強度に対する封緘養生の強度比を示す。NP-50,40 を除いて、いずれのセメントにおいても強度比は封緘養生 56 日にて 100% に達しており、低熱セメントは 100 ~ 110% 程度の強度比で、特に LPM-50 においては標準養生 28 日の値が低いこともあり封緘養生 56 日では 140% 以上の高い値を示した。これは、C₂S 量が多いことによる材齢 28 日強度発現の遅れが原因と考えられる。

3.3 シリーズ I, II の結果

(1) 積算温度と封緘養生強度の関係

図-7 に封緘養生した場合の積算温度と圧縮強度の関係を、シリーズ I, II の両方のデータで示す。封緘養生においても普通ポルトランドセメントと低熱セメントは、水中養生と同じような傾向を示しており、1680° DD (20℃養生, 材齢 56 日) において、どちらのセメントとも封緘養生の値が、約 10N/mm² 低い値となっている。

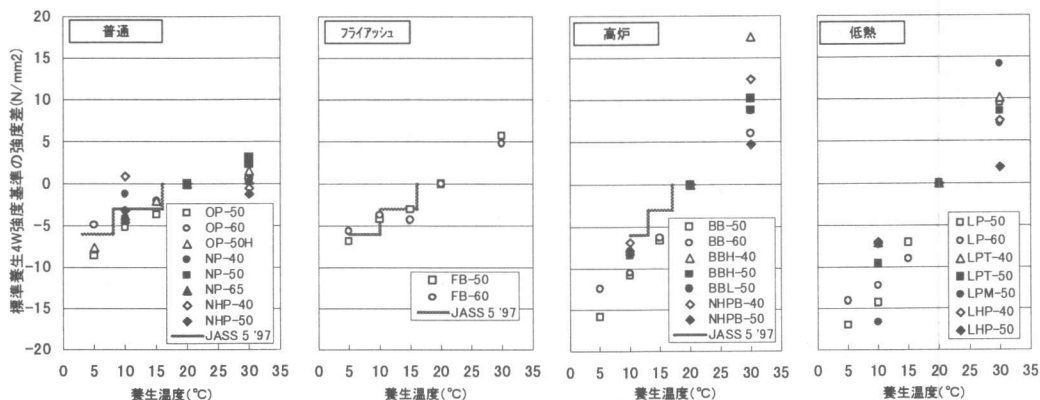


図-8 養生温度と標準養生28日強度を基準とした強度差の関係

(2) JASS 5に示す温度補正值Tの比較

図-8に標準養生、材齢28日の圧縮強度を基準とした各養生温度による強度差の比較図を示す。

(1) 普通ポルトランドセメントの場合、基準に対する強度差は比較的小さく、 $+3.2 \sim -8.7\text{N/mm}^2$ の範囲であったが、W/C50%の10°C、5°Cに於いてはJASS 5に示される補正值では、若干の強度不足が生じていた。

(2) フライアッシュセメントの場合、W/Cによらず温度補正值Tの標準値は概ね適切であると考えられた。

(3) 高炉セメントの場合、基準に対する強度差は $+17.1 \sim -15.9\text{N/mm}^2$ とかなり大きかった。とくに、低温時に於ける強度差を補正值Tと比較すると $4.5 \sim 9.9\text{N/mm}^2$ の差があり、10°C以下では基準値よりかなり低い強度を示した。

(4) 低熱セメントの場合、基準に対する強度差は $+14.1 \sim -17.1\text{N/mm}^2$ のとかなり大きな範囲であった。従って、低熱セメントの場合、低温時の補正值設定には注意が必要であると考えられた。

4.まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

(1) 低熱セメントは積算温度が小さい場合は強度の発現が小さいものの、積算温度が大きく

なれば普通ポルトランドセメントのように圧縮強度の伸びが頭打ちにならず強度の増進が長期にわたった。

(2) 普通ポルトランドセメントのJASS 5に規定される温度補正值Tは、5,10°Cの養生温度においてやや不足する場合があった。

(3) 今回の実験からは、低温時において低熱セメントは強度発現性が小さく、メーカーにより強度発現性が異なるので、その使用は極力避けるべきである。やむを得ず使用する場合は、事前の十分な検討が必要である。

参考文献

- 1) 高育海ほか：各種養生条件におけるコンクリートの強度発現性状に関する一実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp299-300，1985
- 2) 川瀬清孝ほか：高強度マスコングクリートの構造体の予想平均温度および強度発現に関する研究(第1報～第4報)，日本建築学会大会講演梗概集，pp525-532，1989
- 3) 因幡芳樹ほか：各種セメントを用いたコンクリートの強度発現に及ぼす養生方法と温度の影響(第1報～第2報)，日本建築学会大会講演梗概集，pp297-300 1999
- 4) JASS 5，日本建築学会，1997
- 5) コンクリートの調合設計指針・同解説，日本建築学会，1995