

論文 各種セメントを用いたコンクリートの強度発現特性に及ぼす養生の影響

福留 和人*1・庄野 昭*2・古川 幸則*3

要旨: コンクリートが硬化後所要の性能を発揮するためには、硬化初期において適切に養生を行うことが重要である。本研究では、4種類のポルトランドセメントおよび2種類の混合セメントを用いたコンクリートを種々の条件下で養生し、養生条件が強度発現特性に及ぼす影響を把握した。さらに、保水状態および強度発現特性から、養生条件がセメントの水和反応に及ぼす影響を定量評価した。その結果、低熱型セメントほど養生条件の影響が大きいこと、保水状態がセメントの水和反応に及ぼす影響を考慮することで、種々の条件下での強度発現特性を評価可能であることを明らかとした。

キーワード: 養生, 圧縮強度, セメント鉱物, 水和反応, 給水養生, 保水率

1. はじめに

コンクリートが硬化後、所要の強度、耐久性、ひび割れ抵抗性等の性能を発揮するためには、硬化初期において適切に養生を行うことが重要であり、打込み後所要期間、適切な温度および湿度に保つ必要がある。特に、耐久性を確保する観点から、コンクリート表層部のかぶり部が所要の物質移動抵抗性を有している必要があるが、養生の良否が大きく影響することが容易に推察される。土木学会コンクリート標準示方書、建築学会 JASS5 等では、セメント種類、日平均気温、構造物の供用期間の級等に応じた湿潤養生期間の標準が示されている。しかしながら、中庸熱、低熱ポルトランドセメントに関しては、データも少ないことから湿潤養生期間の標準は示されていない。また、湿潤養生期間の標準は、経済性も考慮したおおよその目安である。

コンクリート構造物の性能をより高めるためには、できる限り長く養生を行うこと、また、水分逸散を防ぎ湿潤状態に保つだけでなく、積極的に水を供給し十分な水がコンクリート中に保たれた状態を維持すること（以下、給水養生）が重要である。ただし、やみくもに給水養生期間を延長することは、不経済であり、効果を適切に把握して養生期間を選定することが必要となる。また、セメントの種類によって効果が大きく異なることも予想される。

以上の様な観点から、本研究では、給水養生の延長がコンクリートの性能向上に寄与する効果を把握するために、供試体レベルの試験を実施した。セメントとして汎用的な4種類のポルトランドセメントおよび2種類の混合セメントを使用した一般的な性能のコンクリートを種々の条件下で養生し、養生条件が圧縮強度発現特

性に及ぼす影響を把握した。さらに、保水状態がセメント鉱物の水和反応に及ぼす影響を定量評価し、強度発現特性との関係を考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料の一覧を表-1に示す。セメントは、4種類のポルトランドセメント（以下、普通、早強、中庸熱および低熱セメント）および2種類の混合セメント（以下、高炉 B、フライアッシュ B）を使用した。ここで、普通セメントを用い、所要の分量のフライアッシュを混和材として混入したものをフライアッシュセメント B 種の位置付けとした。セメントおよびフライアッシュの品質を表-2 および表-3 に示す。その他の材料は、コンクリートを製造したレディーミクストコンクリート工場

表-1 使用材料

材料	種類	仕様	
セメント C	ポルトランドセメント	普通	密度 3.16g/cm ³
		早強	密度 3.14g/cm ³
		中庸熱	密度 3.21g/cm ³
		低熱	密度 3.22g/cm ³
	高炉セメント B 種	密度 3.04g/cm ³	
混和材	フライアッシュ F	JIS A 6201 II 種 密度 2.25g/cm ³	
細骨材	S	陸砂 (70%) 茨城県鹿島産	密度 2.60g/cm ³ 吸水率: 1.20%, F. M. 2.24
		砕砂 (30%) 栃木県佐野産	密度 2.70g/cm ³ , 吸水率: 1.18%, F. M. 3.07
粗骨材 G	砕石 茨城県石岡産	最大寸法 20mm 密度 2.67g/cm ³ , 吸水率: 0.55%, F. M. 6.54	
混和剤 Ad.	A E 減水剤	リグニンスルホン酸化合物	
	A E 剤	界面活性剤	

*1 (株) 間組 技術研究所 コンクリートグループリーダー 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) 間組 土木事業本部 専門部長 (正会員)

*3 (株) 間組 土木事業本部 課長

表-2 セメントの品質

項目		試験値				
		普通	早強	中庸熱	低熱	高炉B
密度(g/cm ³)		3.16	3.16	3.21	3.22	3.04
比表面積(cm ² /g)		3,300	4,470	3,150	3,530	3,830
圧縮強さ N/mm ²	1 d	—	25.8	—	—	—
	3 d	29.8	46.3	20.4	—	21.7
	7 d	45.2	58.5	29.4	20.3	35.7
	28 d	65.2	69.5	59.8	59.9	61.2
	91 d	—	—	—	82.4	—
項目		カタログ値				
鉱物組成 (%)	C ₃ S	54	64	42	29	—
	C ₂ S	21	12	36	53	—
	C ₃ A	9	8	4	3	—
	C ₄ AF	9	8	13	9	—

表-3 フライアッシュの品質

項目		試験値
物理特性	密度(g/cm ³)	2.25
	比表面積(cm ² /g)	4,150
	45μふるい残分(%)	3.0
	フロー値比(%)	112
	活性度 指数	28日
91日		96
化学成分 (%)	強熱減量	0.7
	湿分	0.0
	SiO ₂	56.1

使用されている一般的な品質のものとした。

2.2 コンクリートの配合および練混ぜ方法

コンクリートの配合を表-4 に示す。水セメント比、単位粗骨材量および混和剤添加率を一定とし、所要のスランプが得られるようにセメントの種類に応じて単位水量を調整した。表に示すように、単位水量は、早強セメントでやや大きく、低熱型セメント、混合セメントでやや小さくなっている。

コンクリートの練混ぜは、レディーミクストコンクリート工場で行った。ミキサは、容量3.0m³の2軸強制練りミキサであり、材料一括投入後60秒間練り混ぜた。コンクリートの製造量は、3.5m³とし、1.75m³/バッチで2バッチ練り混ぜた。フライアッシュは、別途計量し、他の材料と同時に手動によりミキサに投入した。工場から試験体作製場所までのコンクリートの運搬は、トラックアジテータを用いた。運搬距離は、5km程度、運搬時間は、いずれも30分以内であった。

荷卸時のコンクリート温度は、21.0~23.0℃であり、スランプ、空気量が所要の値であることを確認した後、20℃の恒温室内で試験体の作製を行った。

2.3 コンクリートの養生方法

コンクリートの養生条件を表-5 に示す。湿潤養生条件のみ変化させ、養生温度は、全て20℃で一定とした。初期の湿潤養生期間(以下、示方書養生)は、2007年制定土木学会コンクリート標準示方書¹⁾の日平均気温15℃以上の場合に準じ、普通、早強セメントおよび混合セメントは、それぞれ、5日、3日および7日間とした。中庸熱、低熱セメントについては、セメントの圧縮強さが他のセメントと同等となる材齢まで湿潤養生を行うこととした。ここで、図中の矢印は、各セメントが同等の圧縮強さとなる材齢を表す。図-1 に材齢とセメントの圧縮強さの関係を示す。図に示すように、中庸熱セメントは、9日間、低熱セメントは、12日間とした。湿潤養生期間の影響を評価するために、所要の湿潤養生期間より短い短縮養生、および、給水養生期間を長く確保することによる効果を確認するために、給水養生期間を1,2および3週間とした条件で養生を行った。所要の養生終了後、試験までの期間、試験体は、20℃相対湿度60%の恒温恒湿質に保管した。なお、比較のために、試験までの期間標準水中養生する基準となる条件も採用した。

表-4 コンクリートの配合

セメント種類	スランプ(cm)	空気量(%)	水セメント比W/C(%)	細骨材率s/a(%)	単位量(kg/m ³)					粗骨材G	混和剤(×C%)
					水W	セメントC	フライアッシュF	細骨材S			
								S1	S2		
普通	8.0 ± 2.0	4.5 ± 1.5	55.0	43.1	157	286	—	561	241	1073	1.0
早強				42.9	159	289	—	556	238		
中庸熱				43.5	156	284	—	569	244		
低熱				43.7	154	280	—	575	246		
高炉B				43.4	153	279	—	567	243		
フライアッシュB				43.5	151	225	50	569	244		

表-5 養生条件

養生条件	記号	備考 (養生方法)
標準水中養生 (20℃)	標準水中	コンクリート性能の基準：材齢28日標準水中養生 ・脱枠後20℃標準水中養生
示方書養生+気中 (20℃, 相対湿度60%)	示方書	実構造物の養生 (降雨の影響を受けない構造物) ・示方書養生期間まで, ポリエチレンシートで覆い湿潤に保つ ・示方書湿潤養生期間後脱枠し, 恒温恒湿室に保管
短縮養生+気中 (20℃, 相対湿度60%)	短縮	養生を怠った場合 (標準示方書の60%) ・示方書養生期間の60%まで, 示方書養生と同様に養生 ・示方書湿潤養生期間の60%経過後脱枠し, 恒温恒湿室に保管
短縮養生+標準水中7日間+気中	給水 1 W	給水養生の延長の効果の確認 ・示方書養生期間の60%まで, 短縮養生と同様に養生 ・給水養生終了後, 所定期間20℃標準水中養生後, 恒温恒湿室 (20℃, 相対湿度60%) に保管
短縮養生+標準水中14日間+気中	給水 2 W	
短縮養生+標準水中21日間+気中	給水 3 W	

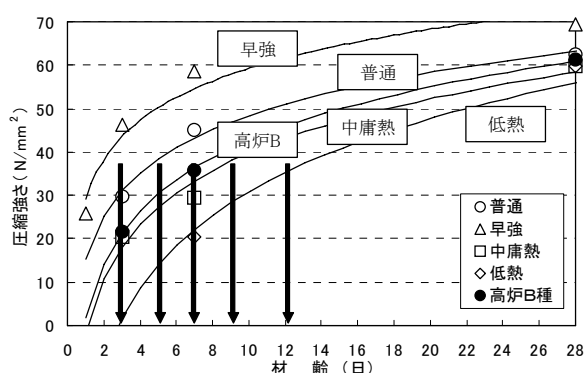


図-1 材齢とセメントの圧縮強さの関係

2.4 試験項目および試験方法

表-6 に試験項目および試験方法を示す。

表-6 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
圧縮強度	JIS A 1108, φ10×20cm 材齢7, 28, 91, 182日および初期養生終了時
試験体質量	打込み直後, 脱枠時および圧縮強度試験時

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度試験結果

図-2 に材齢と圧縮強度の関係を示す。いずれの場合も, 初期の湿潤養生以降気中養生した条件 (示方書および短縮) では, 長期的な強度増進は, ほとんど見られない。特に, 中庸熱, 低熱セメントなどの強度発現の遅いセメントを用いた場合には, 水中養生との差が大きい。今回, 中庸熱, 低熱セメントでは, セメントの圧縮強さの試験結果から, 他のセメントと同等の圧縮強さが得られるまで湿潤養生期間を延長したが, 構造物の条件によっては, より長い湿潤養生期間を確保することが必要であると考えられる。高炉B, フライアッシュBの場合,

普通セメントの場合とほぼ同様な強度発現が見られており, 普通セメントより2日間長く湿潤養生することがほぼ妥当であると言える。いずれのセメントも水中養生期間を延長することによって強度増進が大きくなっており, 効果は明確である。その効果は, 早強セメントほど大きく, 低熱型セメントほど小さくなっている。混合セメントでは, 高炉Bで水中養生期間の延長の効果が大きく, 早強セメントについてその効果は大きい。それに比してフライアッシュでは, その効果は小さい。これは, フライアッシュのポゾラン反応は長期にわたって進行することによると考えられる。

3.2 質量変化率測定結果

図-3 に材齢と質量変化率の関係を示す。また, 材齢と共に吸水が生じる標準水中養生の保水率を100%として, 質量変化率から保水率を算定した。図-4 に材齢と保水率の関係を示す。なお, 保水率の算定に当たって水和に伴う自由水量の低減は考慮していない。

いずれの場合も, 初期の湿潤養生以降気中養生した条件 (示方書および短縮養生) では, 比較的早い段階で水分逸散が進行し, 大きな質量減少が生じている。給水養生の延長により, 若材齢における保水率が高くなると共に, 長期的な低下も抑制されている。質量変化率, 保水率の変化は, セメントの種類により差が見られ, 早強セメントほど小さく, 低熱型セメントほど大きくなっている。低熱型セメントでは, 質量変化速度も大きく, 材齢28日程度でほぼ収束している。混合セメントでは, 高炉Bの質量変化が小さく, 他のセメントに比べて高い保水率となっている。フライアッシュBは, 高炉Bより質量変化は大きい, 普通セメントとほぼ同様の傾向となっている。示方書および短縮養生では, 材齢28日以降, 強度増加は, ほぼ停止しており, 保水率50%程度まで水分が逸散すると, セメントの水和は, 見かけ上停止するものと推察される。

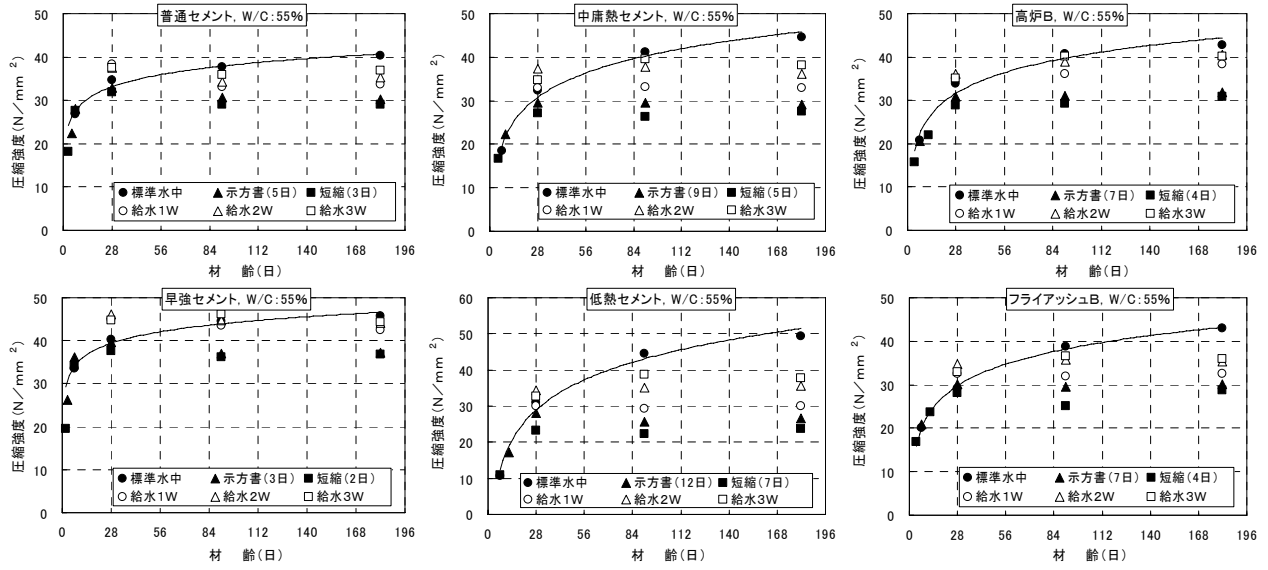


図-2 材齢と圧縮強度の関係

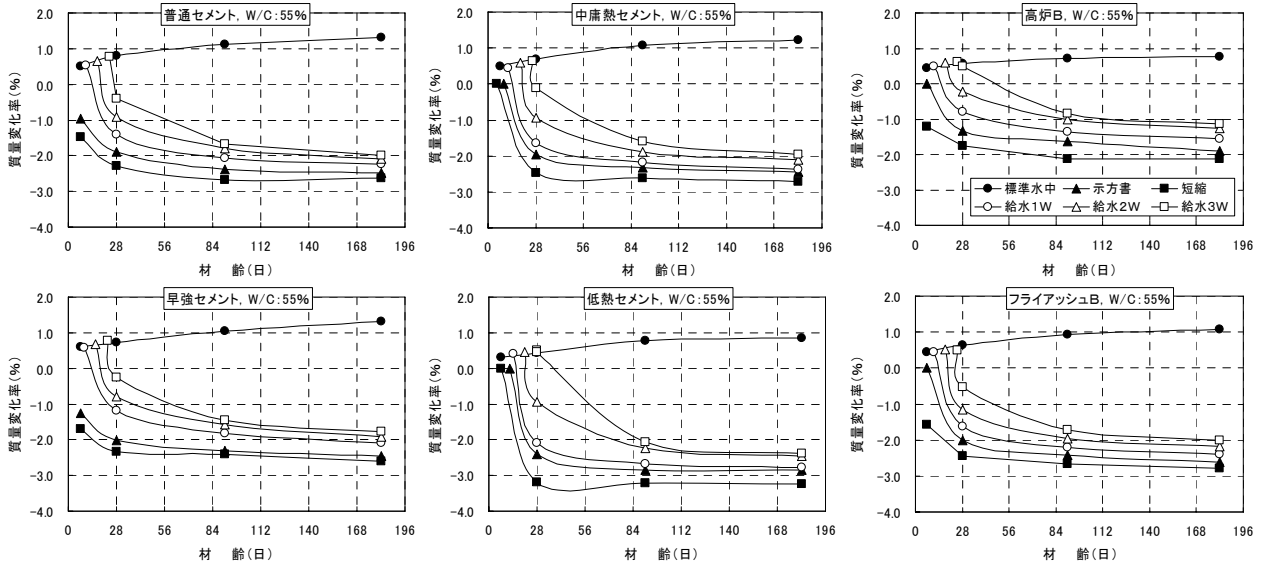


図-3 材齢と質量変化率の関係

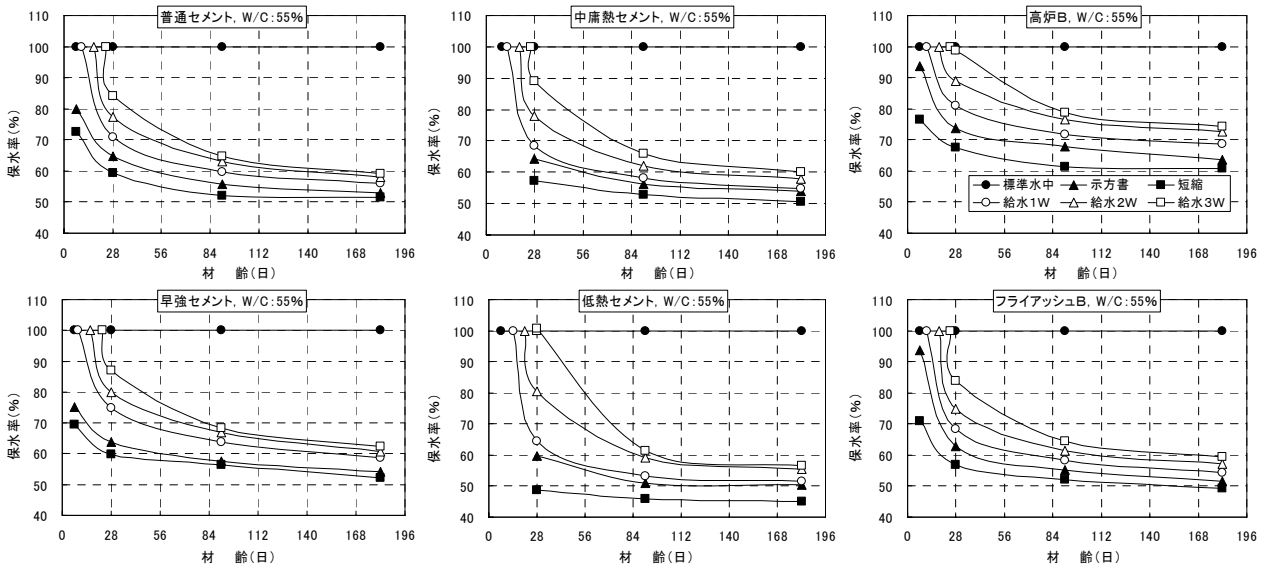


図-4 材齢と保水率の関係

4. 養生条件が水和反応に及ぼす影響の評価

4.1 セメント鉱物の水和率による圧縮強度発現の評価

養生条件が強度発現特性に及ぼす影響を評価するに当たり、ポルトランドセメントを用いた時のセメント鉱物の水和率と圧縮強度との相関性を調べた。圧縮強度は、水分供給が十分でセメントの水和反応が良好に進行すると考えられる標準水中養生の測定結果とした。セメント鉱物の水和率は、図-5 に示す Lea^{2), 3)} による反応速度の測定例を使用した。ここで、主要鉱物である C₃S および C₂S (以下 Ca-Si 鉱物) の水和のみ考慮し、セメント中の水和した Ca-Si 鉱物の質量割合 (以下、Ca-Si 鉱物水和率) により評価することとした。Ca-Si 鉱物水和率は、表-2 に示す鉱物組成および図-5 の水和率から算定した。Ca-Si 鉱物水和率と普通セメントの標準水中養生における材齢 28 日の圧縮強度に対する比 (以下、圧縮強度比) の関係を図-6 に示す。長期材齢の水和率が高い領域では、セメントの種類にかかわらず Ca-Si 鉱物水和率と圧縮強度比は、高い相関が見られる。また、それぞれのセメントで Ca-Si 鉱物水和率と圧縮強度比は線形関係にあり、Ca-Si 鉱物水和率による評価は、おおよそ妥当であると考えられる。しかしながら、若材齢の水和率の低い領域では、セメントの種類で差が見られる。これは、比表面積等の差異によりセメントの種類によって初期の水和速度に差があるためと考えられる。この初期の水和速度の差異を修正するために、図-6 に示す普通セメントの Ca-Si 鉱物水和率と圧縮強度比の関係に合致するように、その他のセメントの材齢 28 日までの Ca-Si 鉱物水和率に補正係数を乗じた。図-7 に材齢と補正係数の関係を、図-8 に補正係数×Ca-Si 鉱物水和率と圧縮強度比の関係を示す。初期の水和率の補正を行うことでセメントの種類によらず Ca-Si 鉱物水和率と圧縮強度比は、一定の関係で表すことが可能である。

4.2 保水状態が水和反応に及ぼす影響の評価

4.1 で得られた Ca-Si 鉱物水和率と圧縮強度比の関係を基準として、各養生条件における圧縮強度の測定結果から、保水状態がセメントの水和反応に及ぼす影響を評価することとした。反応物質である水の濃度を表す保水率を指標値とし、保水率と反応速度が比例関係にあると仮定して保水状態の影響を評価した。なお、水和に寄与しない水の存在も考慮して、ある保水率に達すると水和反応は停止するとして、図-9 に示すように保水率に応じて水和率を低減することとした。ここでは、計算の簡略化のために、式(1)に示すように、材齢 t_n から t_{n+1} の水和率の増分を図-5 に示される基準の水和率の増分に低減係数 β を乗じることで算定し、順次累積することで、水和率を算定した。

$$R(t_{n+1}) = R(t_n) + \beta \cdot (R(t_{n+1}) - R(t_n)) \quad (1)$$

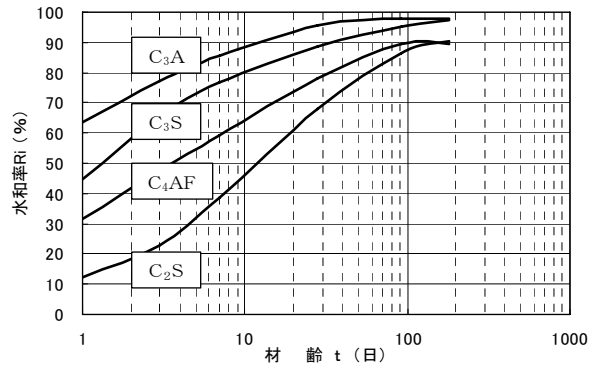


図-5 セメント鉱物の水和速度^{2), 3)}

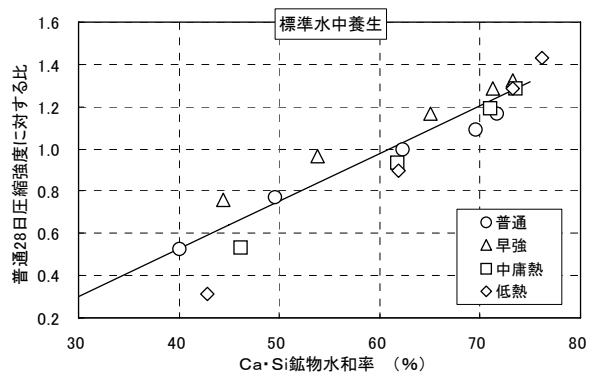


図-6 Ca-Si 鉱物水和率と圧縮強度の関係

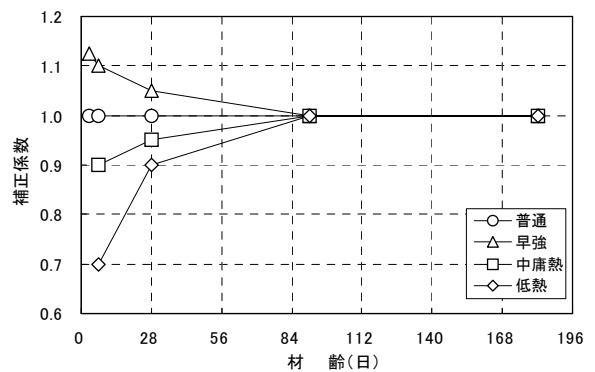


図-7 材齢と補正係数の関係

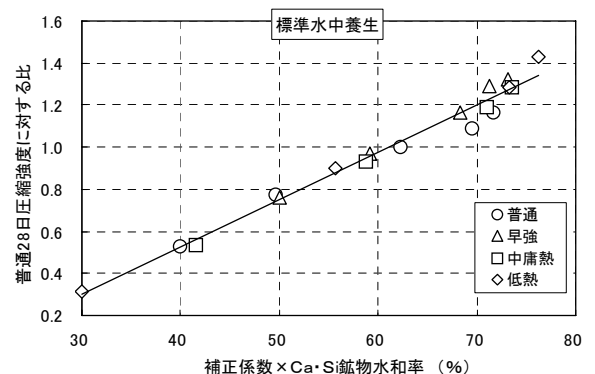


図-8 補正係数×Ca-Si 鉱物水和率と圧縮強度の関係

ここで、 $R_j(t)$ および $R(t)$ は、それぞれ材齢 t における養生条件 j の水和率および基準の水和率を示す。なお、保水率は、材齢 t_n と t_{n+1} の平均とし、材齢 $t=3, 7, 28, 91$ および 182 日の 5 ステップで水和率を算定した。

圧縮強度および保水率の測定結果から、図-8 に示す関係と一致するようにセメント毎に水和停止保水率を設定し、Ca-Si 鉱物水和率を算定した。

図-10 に補正係数×Ca-Si 鉱物水和率と圧縮強度比の関係を示す。若干ばらつきは見られるが、各種養生条件が強度発現特性に及ぼす影響をおおよそ推定することが可能である。なお、セメントの強度発現特性に起因していると考えられるが、水和停止保水率は、低熱型セメントほど高く、早強セメントほど低くなっている。

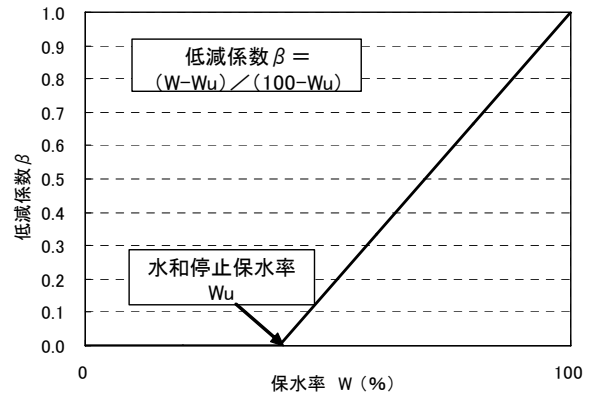


図-9 保水率と補正係数の関係

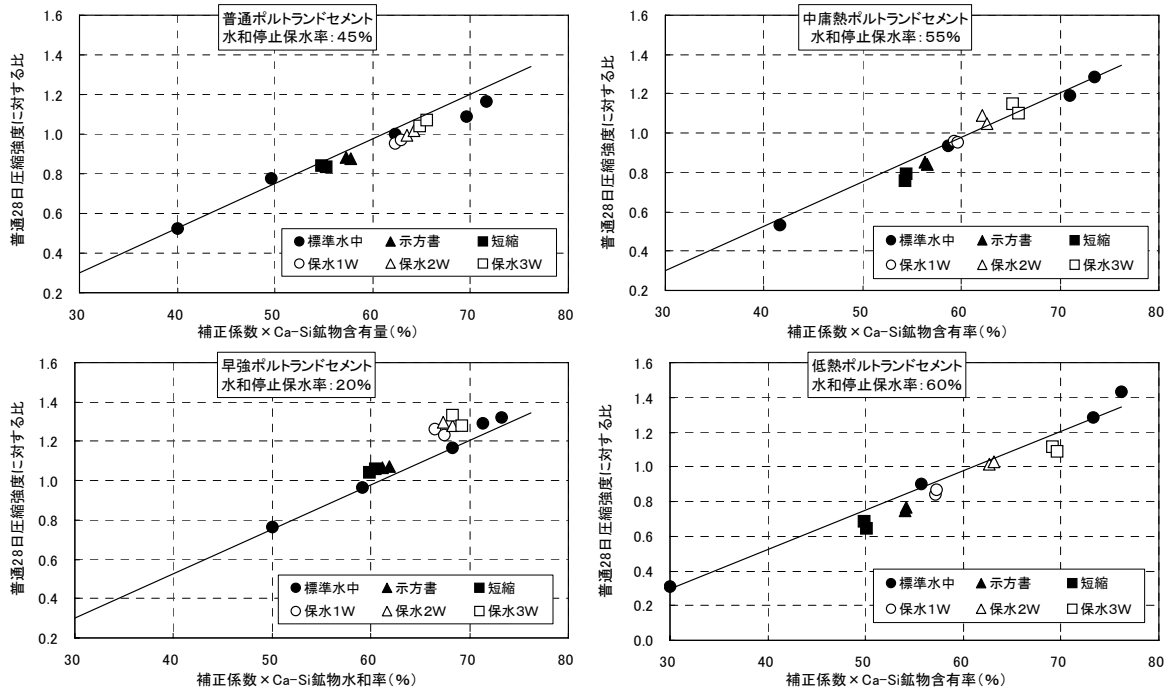


図-10 補正係数×Ca-Si 鉱物水和率と圧縮強度の関係

5. まとめ

本研究では、給水養生の延長がコンクリートの性能向上に寄与する効果を把握するために、4種類のポルトランドセメントおよび2種類の混合セメントを用いたコンクリートを種々の条件下で養生し、圧縮強度特性を把握した。結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 養生条件が圧縮強度発現特性に及ぼす影響は、セメントの種類により異なり、低熱型セメントほど影響が大きい。
- (2) 水分の逸散は、早強セメント、高炉 B が小さく、低熱型セメントほど大きい。
- (3) 水中養生を基準とした保水率が 50%程度まで低下すると圧縮強度の増進は、ほぼ停止する。

- (4) 初期の水和速度を補正し、さらに、保水状態がセメント鉱物の反応に及ぼす影響を考慮して Ca-Si 鉱物水和率を算定することで養生条件が圧縮強度発現に及ぼす影響を評価することが可能である。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 制定コンクリート標準示方書施工編，pp.126～129，2007.12
- 2) F.M.Lea：The Chemistry of Cement and Concrete 3rd Edition, Ed. Arnold, London, pp.243,1970
- 3) コンクリート工学協会：反応モデル解析研究委員会報告書(1)，pp.37～48，1996.5