

論文 高炉セメントコンクリートの強度発現性に及ぼす養生条件の影響

久我 龍一郎^{*1}・千葉 裕人^{*2}・久田 真^{*3}・岩城 一郎^{*4}

要旨：本研究では、高炉セメントコンクリートの強度発現性について、養生条件を変化させた場合の影響を含め整理した。また、従来の積算温度による評価の妥当性についても検証し、その問題点を指摘するとともに、これに代わる補正された積算温度算出法を提案した。この結果、高炉セメントコンクリートの強度発現性は、養生温度を始めとした養生条件に大きく影響を受け、従来の積算温度による評価では、養生温度が異なる場合に対して画一的に評価できないことが示された。さらに、これを解決するため本研究において提案した積算温度算出法により、精度良く評価される可能性があることが示された。

キーワード：高炉セメント、強度発現性、養生条件、積算温度

1. はじめに

近年、高炉セメントについて、耐アルカリ骨材反応性、水和熱の低減、高耐久性、などの様々な利点¹⁾から注目が集まっている。しかし、高炉セメントを用いたコンクリート（以下、高炉セメントコンクリート）の強度発現性は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート（以下、OPC コンクリート）に比べ、養生条件に対する依存性が大きいと言われている。さらに高炉セメントコンクリートは、特に低温下で凝結、及び強度発現が遅れる傾向があり、冬期などにおける強度増進が緩慢となる²⁾。また、OPC コンクリートと比較すると、高炉セメントコンクリートの強度発現性については、実験データの蓄積も十分とは言えず、総合的な強度発現予測式の構築がなされているとはいいがたい。結果東北地方などの寒冷地においては、高炉セメントコンクリートの使用に対しては消極的である。

そこで本研究においては、高炉セメントコンクリートの強度発現について、養生条件による影響も含め適切に評価する手法を確立することを目的とし、高炉セメント及び OPC コンクリ

ート供試体に対して 5℃、10℃、20℃、30℃の各恒温条件下において封かん養生を行い、また屋外変動気温下で封かん及び暴露状態で供試体を静置し、その強度発現性を評価した。また、高炉セメントコンクリートの強度発現性に対して積算温度による評価を与え、その問題点を示し、さらにその解決のために積算温度の算出を補正し、屋外試験に対する適用性について検証した。

表-1 使用材料

材料	種類	品質
セメント	高炉セメント B 種	密度 3.04 g/cm ³ 比表面積 3950cm ² /g
	普通ポルトランドセメント	密度 3.16 g/cm ³ 比表面積 3270cm ² /g
細骨材	山砂	密度 2.53g/cm ³
粗骨材	碎石	密度 2.85g/cm ³
混和剤	SP 剤 (高性能 AE 減水剤)	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体
	AE 剤	アニオン系界面活性剤

*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 学 (工) (正会員)

*2 前田建設工業株式会社 修 (工)

*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻助教授 博 (工) (正会員)

*4 日本大学 工学部土木工学科助教授 博 (工) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

記号	W/C	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A	
							SP 剤	AE 剤
BB30	30	48	170	567	747	887	8.79	
BB40	40	42	170	425	705	1067		0.17
BB50	50	42	170	340	735	1113		0.102
BB60	60	42	170	283	756	1144		0.085
OPC30	30	48	170	567	778	853	8.51	
OPC60	60	42	170	283	759	1150		0.071

表-3 各供試体の養生条件

配合	恒温 (封かん養生)	屋外 (封かん養生, 暴露養生)
BB30, BB60	5, 10, 20, 30°C	2004年7月 (月平均気温 23.8°C) 打設 2004年11月 (月平均気温 11.8°C) 打設
BB40, BB50		—
OPC30, OPC60	10, 20, 30°C	—

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究に使用した材料を表-1に示す。

2.2 実験方法

対象とした配合は、高炉セメント B 種を使用した水セメント比 30%の高強度コンクリート、及び 40%、50%、60%の普通強度コンクリート、及び OPC を使用した水セメント比 30%の高強度コンクリート、及び 60%の普通強度コンクリートの 6 種類とし、各々 BB30, BB40, BB50, BB60 及び OPC30, OPC60 と表記し、その配合を表-2に示す。各供試体に対し、表-3に示される恒温試験及び屋外試験の各養生条件を与えた。

コンクリート供試体はφ100mm×200mmの円柱供試体を用いた。各供試体は、恒温においては打込み後直ちに 5°C、10°C、20°C、30°Cの各恒温機内に封かん状態で静置し、屋外においては打込み後 24 時間 20°C 恒温室において封かん養生後、封かん状態のまま屋外変動気温下に静置した。コンクリート温度は、熱電対を挿入した供試体を別途用意し、測定した。各供試体に対し、

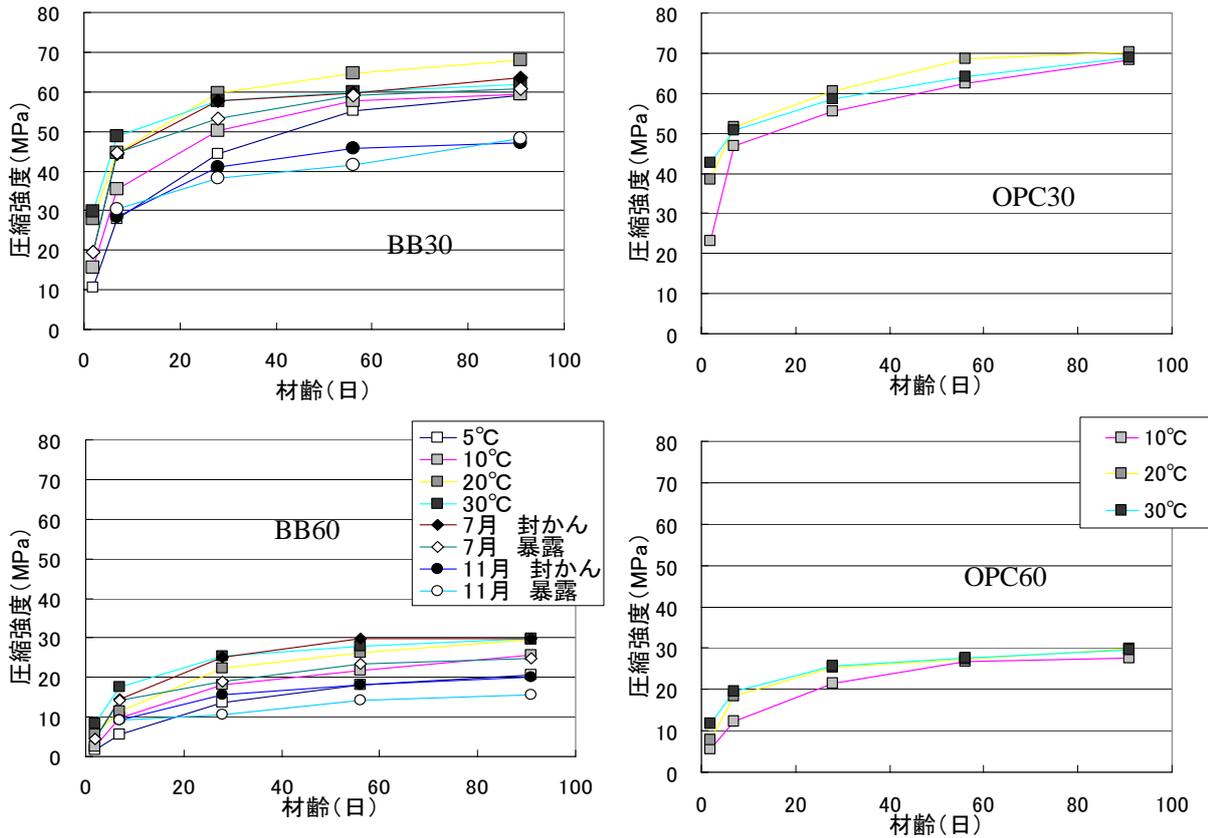
材齢 2 日、7 日、28 日、56 日、91 日において JIS A 1108 に準じ圧縮強度試験を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 各養生条件に対する強度発現性

本研究によって得られた高炉セメントコンクリート及び OPC コンクリートの各養生条件に対する強度発現結果を、BB30, BB60, OPC30, OPC60 について各々図-1に示す。

図-1において、コンクリート供試体の強度発現性に対する養生温度の影響について比較すると、セメント種及び水セメント比によらず、低温養生よりも高温養生の方が、すなわち養生温度が高いほど、強度発現性は大きくなっている。また、この養生温度による強度発現性の差は、OPC コンクリートよりも高炉セメントコンクリートの方が大きくなっている。一般に、OPC コンクリートに比較して、高炉セメントコンクリートの強度発現性は、温度への依存が高いと言われている。本研究においても高炉セメントコンクリートの強度発現性は、強度発現性の温度



図一 各養生条件による各配合の強度発現性

に対する依存性が大きくなるという結果を得た。ここで、高炉セメントコンクリートの強度発現性に対する乾燥条件の影響を比較すると、封かんの方が暴露よりも強度発現性が大きくなっている。これは、暴露中の乾燥の影響によりコンクリート供試体中の水分が逸散し、水和反応に寄与する水分が失われ、長期的な強度発現性が停滞したことによると考えられる。ここで、本研究において得られた強度発現結果に対して、積算温度により評価すると、積算温度は式(1)により算出される。

$$M = \sum (\theta_z + 10) \times z \quad (1)$$

ここに、 M : 積算温度 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{時間}$)、 z : 材齢 (時間)、 θ_z : 材齢 z におけるコンクリートの温度 ($^{\circ}\text{C}$) である。

本研究における高炉セメントコンクリートの強度発現性を積算温度により評価し、BB30, BB40, BB50, BB60 の各配合に対する結果を図-2に示す。さらに、各養生温度による強度発現

性を画一的に評価するため、封かんされた各供試体の強度発現性に対して式(2)に示される分数関数による近似曲線を与えた。

$$F'c = aM / (M + b) \quad (2)$$

ここに、 $F'c$: コンクリート圧縮強度 (MPa)、 a , b : 各配合に対して決定される係数であり、係数 a はコンクリート供試体の終局的な強度を表す係数であり、係数 b はコンクリート供試体の強度発現速度を表す係数である。

図-2において、コンクリート供試体の積算温度-強度発現性関係は、各配合とも、概ね式(2)による分数関数による近似曲線上に現れている。しかし、養生温度について比較すると、 5°C , 10°C 及び11月の冬期の低温養生による供試体の強度発現性は近似曲線の下側に、 20°C , 30°C 及び7月の夏期の高温養生による供試体の強度発現性は近似曲線の上側に分布する傾向が見られる。また、この傾向は、水セメント比が大きい配合ほど顕著に現れている。これは、高炉セメント

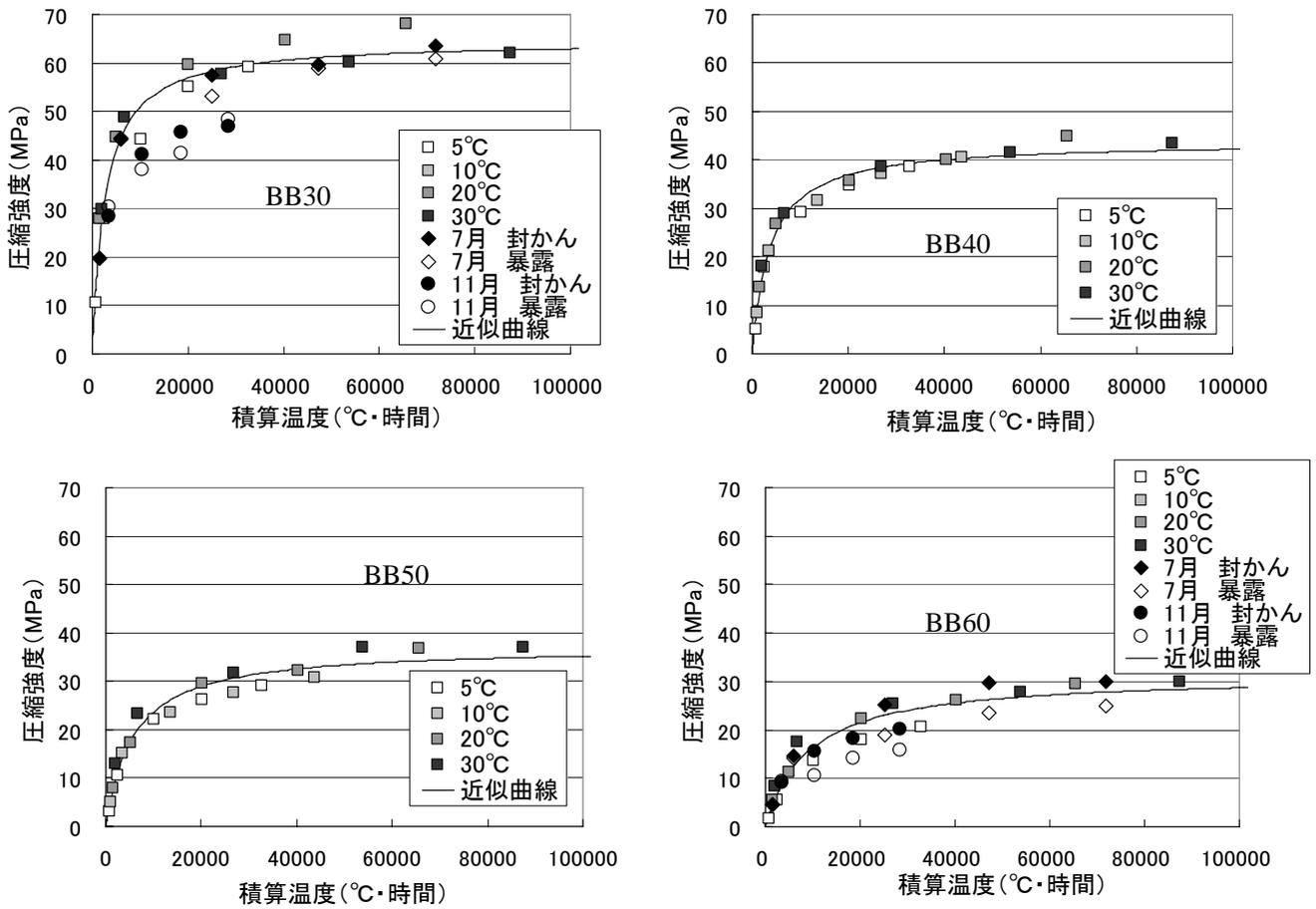


図-2 積算温度による各配合の強度発現性の評価

コンクリートの強度発現性は OPC コンクリートに比べ、低温養生における強度発現性の遅延が顕著であるためと考えられる。このような温度依存性を持つ高炉セメントコンクリートの強度発現性に対して、式(1)により評価すると、図-2に示される通り、低温養生について過大評価、高温養生について過小評価を与えてしまう可能性があることが示唆された。これらのことから、高炉セメントコンクリートの強度発現性は、従来の積算温度による評価では、養生温度が異なる場合に対して精度良く評価できないことが示された。ここで、この傾向は水セメント比が大きい配合ほど大きいことが示された。

また、各配合に対する近似曲線中の係数を表-4に示し、各係数について比較すると、水セメント比が小さい配合ほど係数 a は大きく、係数 b は小さくなっている。係数 a は各配合の終局的な強度を表す係数であるため、強度発現性の大きい低水セメント比の配合ほど、係数 a は大き

くなったと考えられる。また、係数 b は各配合強度発現速度を表す係数であるため、強度発現速度の大きい低水セメントの配合ほど、係数 b が小さい値となったと考えられる。

表-4 各配合に対する近似曲線の係数

	BB30	BB40	BB50	BB60
係数 a	64.6	43.7	37.2	31.3
係数 b	2700	3670	5720	9090

3.2 積算温度の補正による強度発現性評価

本研究では、高炉セメントコンクリートの強度発現性について、養生温度が異なる場合に対しても画一的に評価するため、積算温度の底を補正する。すなわち、(式)1における底 10 を補正し、高温養生に対する積算温度を相対的に大きく、低温養生に対する積算温度を相対的に小さく評価することにより、養生温度が異なる場

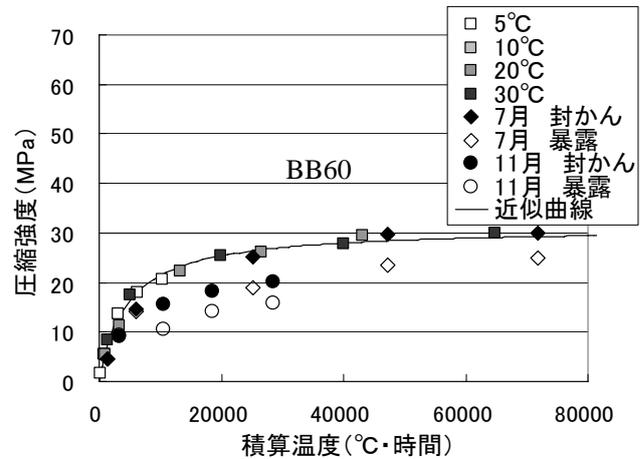
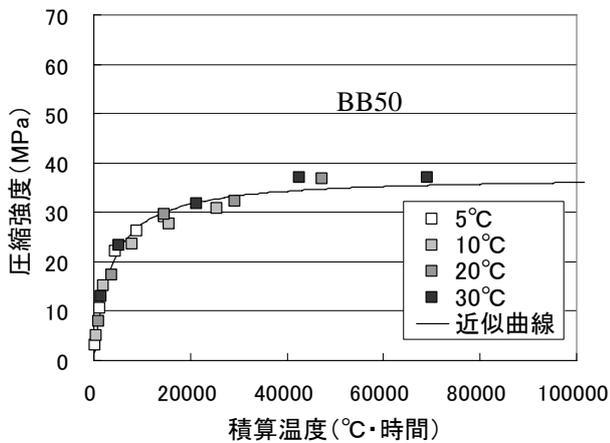
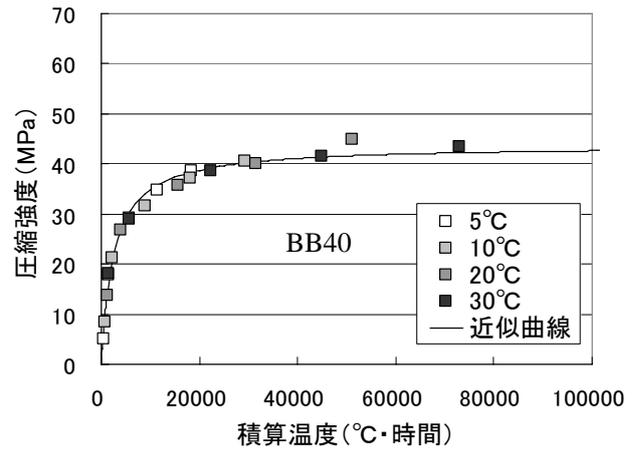
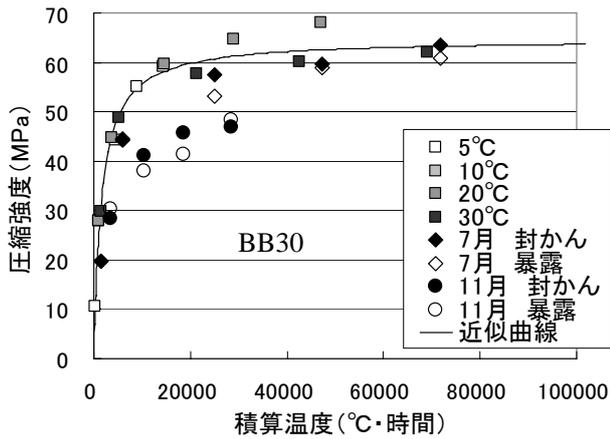


図-3 補正積算温度による各配合の強度発現性の評価

合に対しても近似曲線により精度よく近似することを試みる。各配合に対して(式2)による分数関数による近似曲線について最小二乗法により最適な底及び近似曲線の係数 a 及び b を決定し、この結果を図-3 に示す。またこれらの最適な底並びに近似曲線中の係数を表-5 に示す。

図-3 において、いずれの配合も、養生温度によらず、概ねすべての供試体の強度発現性が、近似曲線により精度良く近似されている。これにより、図-2 における低温養生によるものの方が高温養生によるものよりも、同一積算温度に対する強度発現性が小さくなる傾向が改善されていることが明らかである。

また、表-5 に示されるように、配合によって最適な底が異なったのは、各配合の強度発現性の温度依存性の大きさの違いによると考えられる。各配合の強度発現性の温度依存性の大きさの違いは水セメント比に関係すると考えられる

表-5 各配合に対する最適な底及び近似曲線の係数

	BB30	BB40	BB50	BB60
最適な底	1.59	3.41	1.65	-0.295
係数 a	64.7	43.7	37.3	31.1
係数 b	1640	2560	3540	4510

ため、各配合に対する底について、水セメント比との関係を図-4 に示す。普通強度の配合については、水セメント比が大きいほど底は小さくなり、この範囲については一次直線に近似できるが、高強度の BB30 の配合についてはこの傾向から逸脱している。一般に、38%を下回る低水セメント比では、可能な範囲の最大の水和は 100% 未満であり、普通強度コンクリートの範囲の高水セメント比とはセメントの水和機構に違いが生じると言われている。このため、水セメント比の比較的大きい普通強度の範囲では、水セメ

ント比が大きいほど高炉セメントコンクリートの強度発現性の温度依存性が大きくなり、最適な底は小さくなる。これに対し、水セメント比の非常に小さい高強度では、普通強度の範囲とは異なる水和機構により、最適な底は普通強度コンクリートの傾向から逸脱したと考えられる。

また、表-5 に示される各配合に対する近似式中の係数 a は各配合の終局的な強度を表す係数であり、係数 b は各配合の強度発現速度を表す係数であるため、両係数について、水セメント比との関係を図-5 に示す。図-5 において、水セメント比が小さいほど係数 a は大きくなり、普通強度コンクリートの範囲では一次直線に近似できる。これは、水セメント比の比較的大きい普通強度の配合では、水セメント比が小さいほどコンクリート供試体の強度発現性が大きくなることで係数 a は大きくなり、水セメント比の非常に小さい高強度の配合では、普通強度の配合とは異なる水和反応機構により、係数 a は普通強度の傾向から逸脱したと考えられる。また、図-5 において、水セメント比が大きいほど係数 b は大きくなり、一次直線に近似できる。これは、水セメント比が大きいほど強度発現速度が小さくなることで、係数 b が大きくなったと考えられる。このことから、配合の水セメント比により、積算温度算出における最適な底、近似式中の各係数を決定できる可能性が示唆された。これらのことから、水セメント比の影響を考慮することで、高炉セメントコンクリートの強度発現性について、その温度依存性も考慮した総合的な予測式が確立できる可能性が示唆された。

4. 結論

高炉セメントコンクリートの強度発現性について、養生条件を変化させた場合の影響を含め整理した。この結果、高炉セメントコンクリートの強度発現性は、養生温度を始めとした養生条件に大きく影響を受け、従来の積算温度による近似式での評価では、養生温度が異なる場合

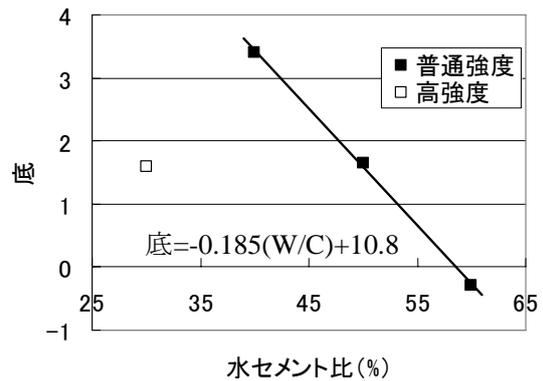


図-4 各配合に対する最適な底

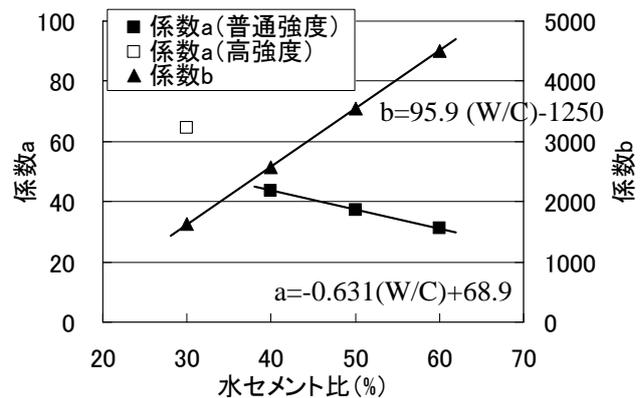


図-5 各配合に対する近似曲線中の各係数

に対して画一的に評価できないことが示された。さらに、これを解決するため本研究において底を補正した積算温度算出法による近似式での評価により、養生温度の違いによる近似の精度が改善される可能性があることが示された。

参考文献

- 1) 岩城一郎, 澤井洋介, 三浦尚: 高炉スラグ混和コンクリートの強度発現に及ぼす配合及び温度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, 2000, pp127-132
- 2) 佐藤幸恵, 榎田佳寛, 前田悦孝, 新沼大史: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの各種温度条件下における強度発現, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004, pp147-152

謝辞: 本研究の一部は、社団法人東北建設協会の助成金を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。