

論文 Fc100N/mm²級の高強度コンクリートの強度発現に関する研究

河上 浩司^{*1}・西本 好克^{*2}

要旨: 設計基準強度(Fc)が100N/mm²クラスの高強度コンクリートの温度履歴と強度発現性状を確認するため、結合材として低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを用いたコンクリートで、練り上がり温度と養生温度を変化させ強度を確認するとともに、小型模擬試験体のコア強度を確認した。その結果、強度発現は水和反応の基点温度を0とした積算温度で評価することができ、その関係式は結合水材比(B/W)で整理がつく可能性を示した。また、初期高温履歴を受けるコア供試体の強度発現も、同一の方法で評価できることを確認した。

キーワード: 高強度コンクリート, 強度発現, 温度履歴, 積算温度

1. はじめに

近年、超高層RC建築物などの増加に伴い、高強度コンクリートの施工事例が増加している。また、比較的low層の建築物でも、柱スパンの長距離化や部材断面の縮小のため、コンクリートの設計基準強度は、上昇の一途をたどっている。

設計基準強度(Fc)が、60N/mm²級のコンクリートであれば、混和材を用いることなくセメント単体で、ワーカビリティや強度を確保することが可能である。また、結合材として低熱ポルトランドセメント(以下Lセメント)を用いた場合は、初期高温履歴の影響を受けにくく、安定して強度が増加することをこれまでに確認した¹⁾。一方、設計基準強度が80N/mm², 100N/mm², あるいは、それ以上となった場合、ワーカビリティや強度確保の観点から、シリカフューム(SF)やスラグ系混和材料の使用が不可欠となる。しかし、そのような高強度コンクリートについて、温度履歴と強度発現との報告はまだ少ない。

今回、筆者らは、低熱ポルトランドセメントの一部をシリカフュームで置換した超高強度コン

クリートを用いて、標準養生供試体、養生温度を変化させた封かん養生供試体、そして小型模擬試験体を作製し、その温度履歴と強度発現性状とを確認した。その実験結果より、設計基準強度が100N/mm²クラスの高強度コンクリートの、温度履歴と強度発現との関係について検討を行った。

2. 実験概要

本実験では、結合材水比(B/W=3.3~7.0)、練り上がり温度(約8.5~30)、および養生温度(5~35)をパラメーターとした。また、外気温の異なる3時期に小型模擬試験体を作製した。

2.1 コンクリート

使用材料を表-1に示す。結合材は、低熱ポルトランドセメントの10%をシリカフュームで置換したものを使用した。以下、コンクリートの配合は記号で表現する。

実験に使用したコンクリートの、目標練り上がり温度と養生条件を表-2に示す。今回の実験においては、コンクリートの粗骨材かさ容積を0.525m³/m³に、単位水量を150kg/m³に統一した。

表-1 使用材料

セメント	低熱ポルトランドセメント	L	密度 3.24g/cm ³	比表面積 3290cm ² /g
混和材	シリカフューム	SF	密度 2.2g/cm ³	比表面積 22.6m ² /g
細骨材	鬼怒川産川砂	S	表乾密度 2.58g/cm ³	吸水率 2.68% F.M 2.75
粗骨材	葛生産硬質砂岩碎石	G	表乾密度 2.67g/cm ³	吸水率 0.97% F.M 6.47
混和剤	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系	

*1 住友建設(株) 技術研究所 工修(正会員)

*2 住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

また、目標空気量は $2.0 \pm 1.0\%$ とした。

コンクリートの練り混ぜは、結合材と砂を空練り(10秒)した後、水を加え30秒後に混和剤を添加し、性状を確認しながら90~330秒間練り混ぜた。B/W=6.0では180秒で安定したが、7.0になると330秒ほど要した。その後、粗骨材を投入し180秒間練り混ぜた。

2.2 小型模擬試験体

小型模擬試験体による試験は夏期(標準期(秋期)、冬期)に行った。試験体寸法は、 $500 \times 500 \times 400\text{mm}$ とし、周囲を100mm厚の発泡スチロールを2枚重ねで覆った¹⁾。試験体のコンクリート温度は、試験体中心部に熱電対を配置し、30分間隔で測定した。コンクリート温度の測定期間は、試験体中心温度がほぼ外気温と一致するまでとし、同時期の外気温は、試験体付近で測定した。また、年間外気温は試験場所付近の百葉箱で測定した。

2.3 圧縮強度試験

テストピースの強度確認は、材齢7、28、91日の3材齢を基本とし、表-2中()の条件では材齢

3、56日でも強度確認を行った。コア強度は材齢28、56、91日で確認した。

3. 本論の検討手順

本論の検討内容、およびその順序を図-1に示す。はじめに、標準養生供試体を対象に、強度関係式と練り上がり温度の影響を検討した。続いて、養生温度を変化させた封かん養生供試体で、養生温度と強度発現性状について評価を行った。ここまでの結果を基に、強度発現の評価手法として積算温度法を検証し、その結果がコア供試体の強度発現評価へ適応可能か確認を行った。

4. テストピースの強度発現性状

4.1 標準養生供試体

標準養生供試体のB/Wと圧縮強度との関係を図-2に示す。B/W=6.0と7.0との間で圧縮強度の差は小さくなり、長期材齢においては差がほとんど見られなくなった。すなわち、圧縮強度が骨材強度などの影響で限界値に近づいたものと考え

表-2 配合概要、作製試験体

配合名	W/B (%)	B/W	練り上がり温度	標準養生	封緘養生			コア
					5°C	20°C	35°C	
L30SF	30.0	3.3	20°C	●		●	●	○
L25SF	25.0	4.0	20°C	●		●	●	○
			30°C	○		○	○	○
L22SF	22.2	4.5	20°C	○				○
L20SF	20.0	5.0	10°C	○		○		○
			20°C	●	○	●	●	○
			30°C	○	○	○	○	○
L18SF	18.2	5.5	20°C	○				○
L16SF	16.7	6.0	20°C	●	○	●	●	○
			30°C	○		○	○	○
L14SF	14.3	7.0	20°C	●		●	●	○

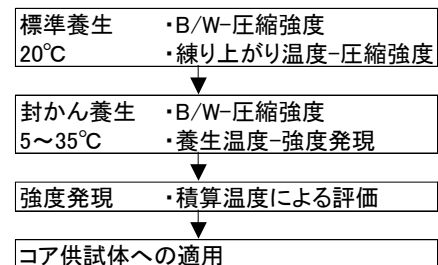


図-1 本論のフロー

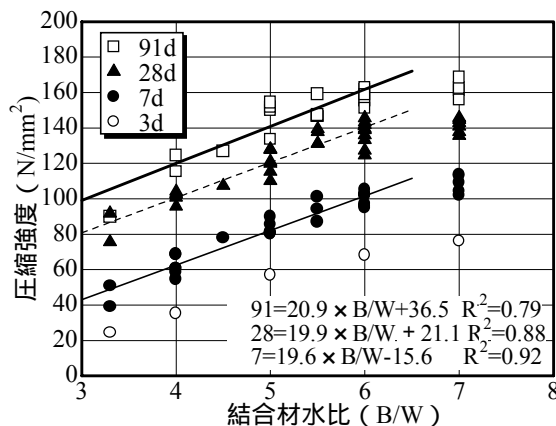


図-2 標準養生圧縮強度

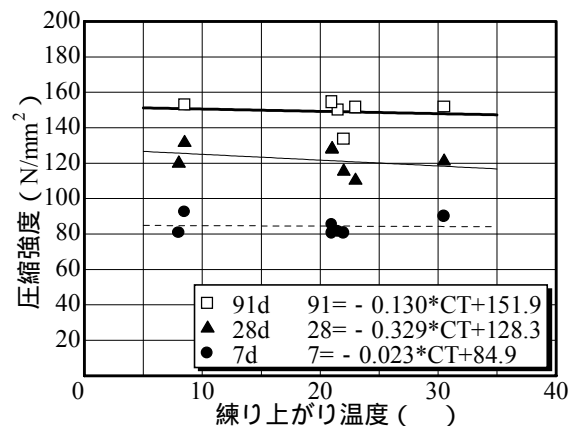


図-3 練り上がり温度 - 圧縮強度(B/W=5.0)

られる。そこで図中に示した材齢 7, 28日, 91日の回帰結果は $B/W=3.3 \sim 6.0$ の範囲の評価とした。今回, 一連の実験で得られた, 圧縮強度の範囲は 材齢28日で約80~170N/mm², 材齢91日では約100~180N/mm²であった。

$B/W=5.0$ のコンクリートについて 練り上がり温度と圧縮強度との関係を図 - 3 に示す。圧縮強度の回帰結果は, 練り上がり温度によらず, 各材齢でほぼ一定値を示す。

4.2 封かん養生供試体

養生温度を20℃とした封かん養生供試体の B/W と圧縮強度との関係を図 - 4 に示す。図中には封かん養生と標準養生の材齢 7日, 28日, ならびに91日の強度直線と 封かん養生の回帰式を併せて示した。20℃封かん養生強度は, 材齢 7日では標準養生より若干低い。しかし, 材齢28日以降では標準養生との差が 5~10N/mm²程度まで大きくなった。この理由として, 標準養生では外部からの水の供給があり, 封かん養生に比べ水和反応

が進行することが考えられる。しかし, 今回の実験では詳細な検討を行うまで至らなかった。

$B/W=5.0$ のコンクリートの, 養生温度と圧縮強度の関係を図 - 5 に示す。図中には各材齢での平均値を結んだ線を併せて示す。材齢 7日と28日の圧縮平均値は直線状となるが, 材齢91日では20℃養生強度が35℃養生強度と同等となった。

$B/W=5.0$ のコンクリートの, 材齢と圧縮強度の関係を図 - 6 に示す。養生温度が高いほど, 若材齢での強度発現が顕著である。5℃養生強度は, 初期強度発現は遅れるものの, 材齢91日では20℃養生28日強度とほぼ同値となった。

$B/W=5.0$ のコンクリートの 標準養生と封かん養生供試体の各材齢における圧縮強度を, 材齢28日強度に対する強度発現率として表した結果を図 - 7 に示す。標準養生と20℃封かん養生は, 各材齢での強度発現率はほぼ一致した。35℃封かん養生供試体では, 若材齢での強度発現が大きく, 長期材齢での増加が小さくなる傾向がある。

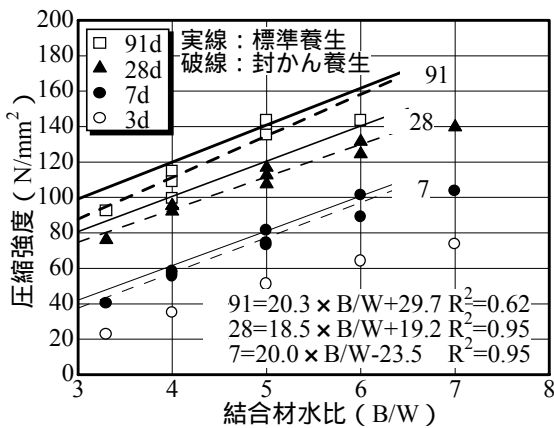


図 - 4 20℃封かん養生圧縮強度

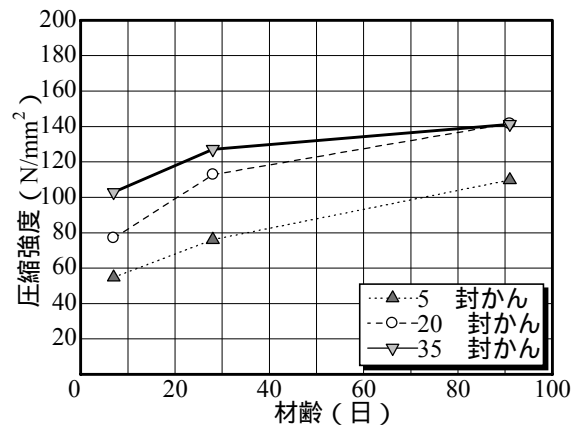


図 - 6 材齢 - 圧縮強度($B/W=5.0$)

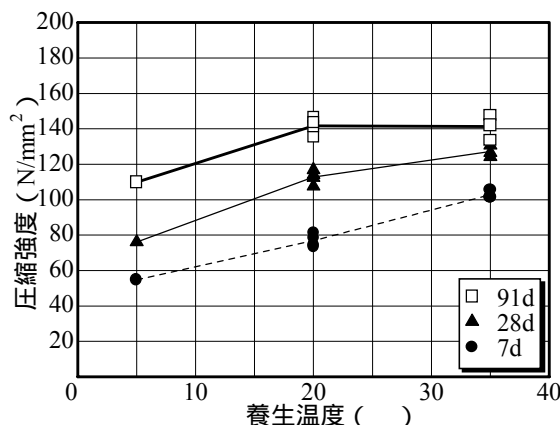


図 - 5 養生温度 - 圧縮強度($B/W=5.0$)

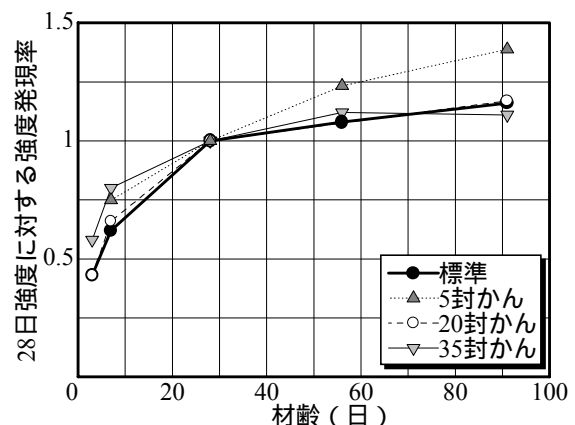


図 - 7 強度発現率($B/W=5.0$)

5 封かん養生供試体は、材齢28日以降の強度発現率が大きくなる傾向が見られた。

4.3 積算温度による強度発現評価

これまでに検討した養生方法と強度発現性状に関して、従来の積算温度算出式である式(1)、

$$M_{10} = (\quad +10) (^\circ D \cdot D) \quad (1)$$

で評価を行った。以下、従来の手法で計算した積算温度を M_{10} と示す。B/W=5.0のコンクリートについて、標準養生、ならびに封かん養生の検討結果を図-8に示す。図中には、標準養生と5封かん養生、そして35封かん養生の回帰結果を示す。20封かん養生は、標準養生に近い結果を示している。しかし、5封かん養生()の回帰式は標準養生に比べ小さく、35封かん養生()の回帰式は積算温度 M_{10} が小さいと標準養生より強度は高いが、 $1000^\circ D \cdot D$ を超えると低くなる。このように、同じ封かん養生でほぼ等しい積算温度であっても、養生温度が異なると、圧縮強度は異なることがわかる。また、標準養生回帰式に対する全試験体結果の寄与率 (R^2) を求めると、0.87となった。

今回の実験結果では、水和反応の基点を-10と設定する従来の積算温度法で、強度発現傾向を把握することはできるが、養生温度の影響を別途考慮する必要があると考えられる。そこで、水和反応の基点が0であると仮定して算出した積算温度 M_0 との関係式(2)、

$$M_0 = (\quad) (^\circ D \cdot D) \quad (2)$$

により強度発現の評価を行った。B/W=5.0のコンクリートの、各供試体の積算温度 M_0 と圧縮強度との関係を図-9に示す。図中には標準養生の回帰結果と95%信頼区間を併せて示す。

この結果、養生温度の異なる封かん養生についても、圧縮強度はほぼ標準養生の回帰式上にプロットされ、強度発現を概ね良好に評価を行うことができた。回帰式に対する全供試体結果の寄与率も、0.93と比較的高い値が得られた。

また、この積算温度 M_0 を用いた評価手法で、他の水結合材比のコンクリートについても、強度発現を良好に評価することができた。

ここで、各B/Wの標準養生の圧縮強度を回帰したときの、B/Wと回帰式の傾き b 、ならびに切片 a との関係を図-10に示す。 a と b は、それぞれB/Wに関する一次関数として表現することができ、その結果、コンクリート強度は積算温度 M_0 とB/Wとを変数とする式(3)、

$$n = (19.5 \cdot B/W - 138.3) + (-2.0 \cdot B/W + 66.3) \text{Log}_{10}(M_0) \quad (3)$$

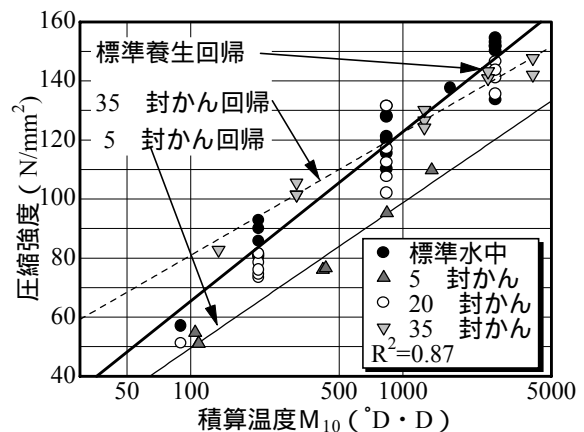


図-8 積算温度 M_{10} - 圧縮強度

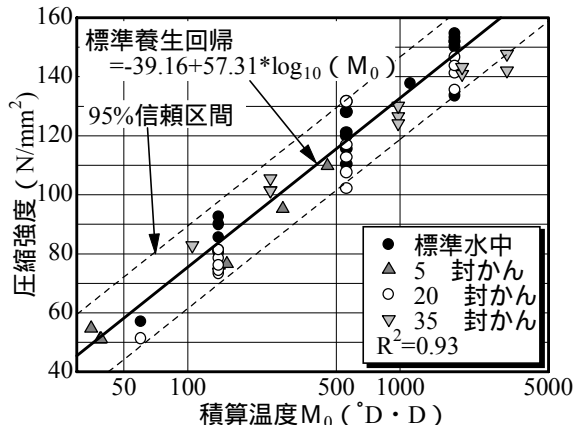


図-9 積算温度 M_0 - 圧縮強度

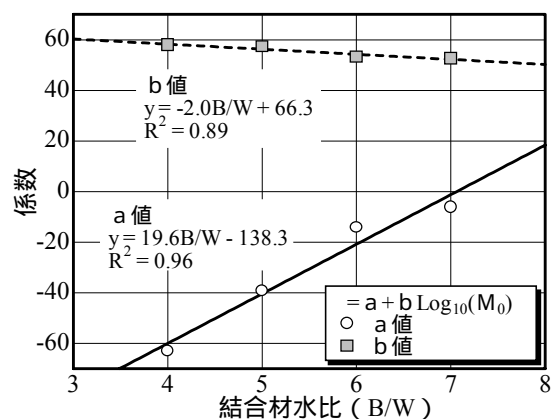


図-10 回帰式係数

で整理することができた。

この推定式により、養生方法や供試体の温度履歴、ならびに各供試体の養生温度によらず、積算温度 M_0 により各材齢での圧縮強度を整理できるものと考えられる。

5. 小型模擬試験体

5.1 温度履歴

小型試験体の発熱性状、ならびに温度履歴から逆解析により求めた最終温度上昇量 K と、温度上昇速度係数を表 - 3 に示す。

コンクリート最高温度は40～80 の範囲に分布している。コンクリート温度は35～60時間で最高温度に到達し、その後下降して約500時間で周囲外気温となり、ほぼ気温と同様の推移を示した。

温度上昇量 K は、 B/W が大きいほど大きく、単位結合材量当たり0.073 / B となった。上昇速度係数は、練り上がり温度が高い程、また B/W が大きいほど大きな値となり、1.5～2.5の範囲となった。

5.2 圧縮強度

小型試験体から採取したコア強度と B/W との関係を、練り上がり温度毎に整理した結果を図 - 11 に、最高温度毎に整理した結果を図 - 12 に示す。図中には、コア強度28日の回帰結果を実線で、標準養生の回帰結果を破線(28日)および一点鎖線(91日)で併せて示した。これらの図より、コア強度は

表 - 3 初期発熱

試験日	B/W	練り上がり温度(°C)	最高温度(°C)	最高温度到達時間(h)	温度解析係数	
					K	α
2001 6/14	5.0	22.0	64.8	47.7	50	2.25
	5.5	22.5	68.9	40.6	54	2.30
	6.0	22.0	68.7	43.1	55	2.40
	7.0	23.0	71.9	50.4	58	2.40
8/7	5.0	23.0	65.6	53.5	50	2.20
	5.5	22.5	70.4	52.3	54	2.20
	6.0	23.5	73.3	44.6	57	2.40
	7.0	25.5	78.2	43.4	59	2.50
9/19	4.0	19.0	59.5	37.0	46	1.90
	4.0	29.5	66.5	35.8	42	2.10
	5.0	8.5	54.5	51.5	50	2.20
	5.0	21.5	65.8	46.8	42	2.25
	6.0	29.5	76.3	41.5	50	2.55
10/2	3.3	19.0	55.0	35.5	37	1.80
12/20	4.0	8.0	43.8	57.9	40	1.40
	5.0	8.0	51.0	53.9	47	1.75
	6.0	11.5	57.6	41.0	51	2.40

B/W と相関が認められるが、この関係は練り上がり温度や最高温度など、温度履歴に影響されていることがわかる。

すなわち、練り上がり温度が15 未満あるいは最高温度が60 未満の場合、コア強度は各 B/W において低い値となっている。特に、冬期において練り上がり温度が低く B/W が小さい調合では、最高温度も低く強度発現が遅れる結果となっている。一方、練り上がり温度が20 程度以上で、最高温度が60 以上の場合には、コア28日強度はいずれの場合も標準28日強度を上回り、 B/W が大きい程標準91日強度に近づいている。また、練り上がり温度が22 程度、最高温度70 となった $B/W = 6.0$ の調合においては、材齢7日のコア強度が約138 N/mm^2 となり、標準28日強度の85%以上の強度発現が認められた。

以上のように、コア強度も封かん養生供試体と同様、温度履歴により強度の発現状況は異なる。

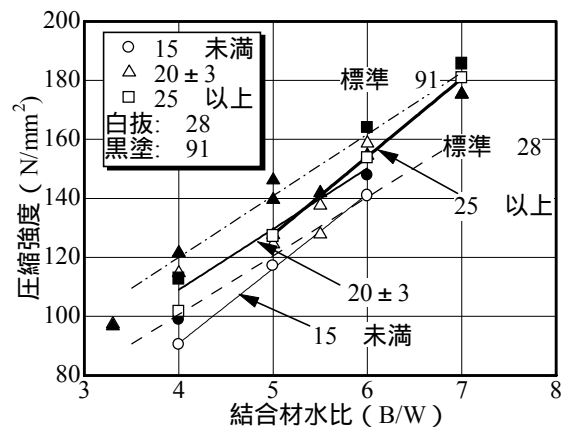


図 - 11 コア強度(練り上がり温度から整理)

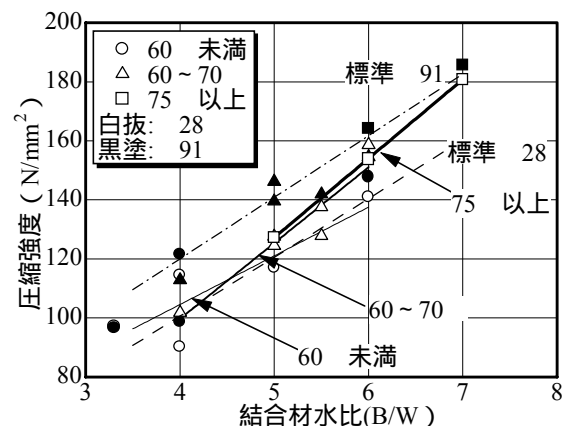


図 - 12 コア強度(最高温度から整理)

5.3 提案手法による強度発現評価

B/W=5.0のコア供試体の強度発現を、 t_0 を基点とする積算温度 M_0 によって評価した結果を図-13に示す。図中の実線、破線は標準養生強度の回帰直線、ならびに95%信頼区間である。コア供試体強度は、概ね信頼区間内にある。初期高温履歴を受け、また養生温度も一定でない模擬試験体のコア供試体についても、積算温度 M_0 により標準養生と同等に評価することができた。

続いて、小型模擬試験体について、提案式(3)でB/Wと積算温度 M_0 から、コア供試体の強度推定を行った。コア強度と推定強度の関係を図-14に示す。図中にはコア強度=推定強度の直線と、その直線に対する95%信頼区間を示した。この結果から、提案式(3)でコア供試体についても、その強度発現を評価できているといえる。

6. まとめ

本論において、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを結合材として用いた超高強度コンクリートについて、以下の知見が得られた。

- 1)標準養生を行った場合、B/W=6.0まではB/Wと圧縮強度は比例関係にある。
- 2)練り上がり温度が高いと強度はやや低下する傾向にあるが、その影響は比較的小さい。
- 3)養生温度が高いほど、初期材齢での強度が高くなるが、長期的な強度増加は小さくなる。
- 4)養生方法によらず、 t_0 を基点とした積算温度 M_0 を用いて、コンクリート強度を精度よく推定できる。また、積算温度 M_0 を用いてコア強度についても推定できることを示した。

以上の知見より、実構造物においても結合材水比、および部材寸法、施工時期を考慮し積算温度 M_0 を与えることにより、任意の材齢における構造体コンクリートの圧縮強度を推定することが可能である。

なお、これらの知見は限られた範囲内の実験により得られたものであり、今後さらにデータを蓄積し、精度の向上、適用範囲の拡大を行っていく所存である。

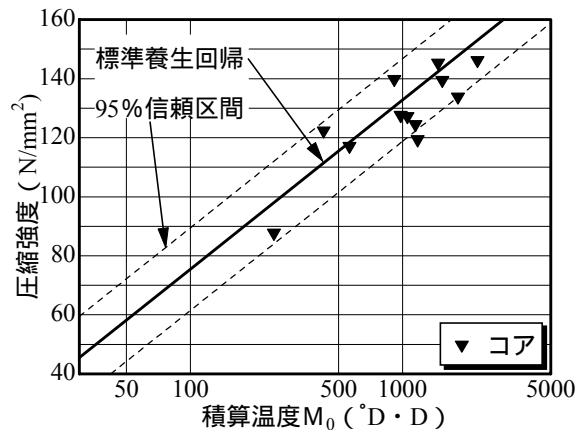


図-13 積算温度 M_0 - コア強度

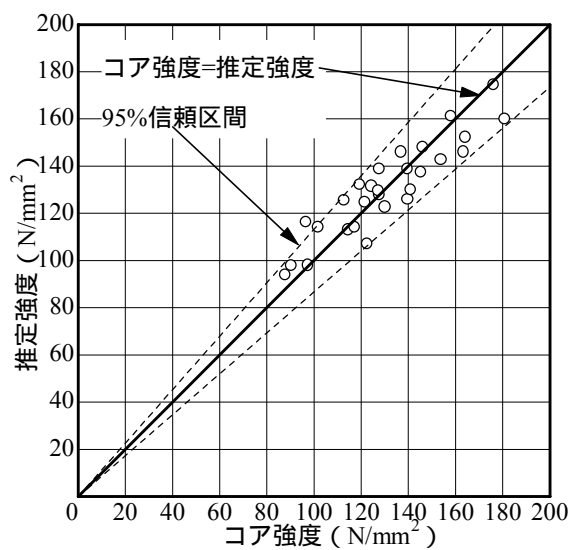


図-14 コア強度 - 推定強度

謝辞 本研究を行うにあたり御協力を頂いた住友大阪セメント(株)、(株)ポゾリス物産の諸氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)河上浩司ほか：高強度コンクリートの初期発熱と強度発現生に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1057-1062，2001
- 2)河上浩司，西本好克：高強度コンクリートの最高温度と強度発現生に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.113-114，2001.9
- 3)榊田佳寛ほか：低発熱形セメントを用いたコンクリートの平均養生温度による強度補正值，日本建築学会構造系論文集，第535号，pp7-12，2000.9
- 4)杉山央，榊田佳寛：積算温度方式を応用した初期高温履歴コンクリートの強度推定，日本建築学会構造系論文集，第538号，pp21-28，2000，12