

論文 施工時期が高強度コンクリートの強度発現に及ぼす影響

西田 朗*1・小澤 貴史*2・斉藤 丈士*3・飯生 昌之*4

要旨: 高強度コンクリートの強度発現に及ぼす施工時期の影響を把握するため、普通ポルトランドセメント使用の水セメント比35.0%のコンクリートで通年の模擬試験体実験を行った。この結果、部材の温度上昇量は打込み温度の上昇1°Cに対して中心部で0.74°C大きくなる結果となった。強度発現に関して、試験体から採取したコア強度は現場封かん養生強度より小さいことが確認された。また、28日標準養生強度に対する91日コア強度比は、1, 3月で比較的大きく、8, 9月の夏期および5, 10月の標準期でも小さくなった。

キーワード: 高強度コンクリート, 施工時期, 打込み温度, 温度履歴, コア強度

1. はじめに

高強度コンクリートは構造体中で高温の温度履歴を受けるため、構造体コンクリートと管理用供試体では強度発現が異なるとされている¹⁾。このため、あらかじめ実験により構造体を模擬した試験体から切り取ったコア供試体あるいはこれに類する強度特性を有する供試体の圧縮強度を求め、標準養生強度との関係を基に調合を決めるのが一般的である²⁾。その際、施工時期によっても構造体コンクリートが受ける温度履歴が異なることから強度発現傾向も異なるため、標準期、夏期および冬期の各時期に適宜実験を行い、それらの結果を基に調合設計を行うことが多い。しかし、実験を行う時期の規定はなく、施工時期の区別も曖昧であるのが現状である。

本論文は、こうした背景のもと、施工時期が高強度コンクリートの構造体中での強度発現に及

ぼす影響を把握し、調合設計を行う際の基礎資料を得ることを目的として、設計基準強度48~54N/mm²を想定した高強度コンクリートと、その比較のために設計基準強度27N/mm²相当の一般強度のコンクリートを使用して行った実験結果を取りまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

使用材料は表-1に示す通りで、セメントは一般強度のコンクリートとの比較を考慮して普通ポルトランドセメントとした。また、混和剤は高強度、一般強度ともポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用した。なお、通年での実験としたため、7~9月については遅延形の高性能AE減水剤を使用した。また、骨材は粗骨材、細骨材ともレディーミクストコンクリートで通常使用

表-1 使用材料

材料	種類		内容
セメント	N	普通ポルトランド	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3300~3360cm ² /g
粗骨材	G	鳥形山産砕石	密度 2.70g/cm ³ , 吸水率 0.59~0.71%, 実積率 60.8~61.2%
細骨材	S ₁	君津産山砂	密度 2.54~2.59g/cm ³ , 吸水率 2.01~2.15%, 粗粒率 2.24~2.32
	S ₂	田沼産砕砂	密度 2.60~2.61g/cm ³ , 吸水率 1.67~1.78%, 粗粒率 2.94~3.04
混和剤	AD	高性能AE減水剤	標準形 I種 (7~9月は遅延形使用), 密度 1.050~1.066g/cm ³

*1 清水建設(株)技術研究所 生産技術開発センター 工修(正会員)

*2 清水建設(株)技術研究所 生産技術開発センター 工修(正会員)

*3 (株)内山アドバンス 中央技術研究所(正会員)

*4 (株)内山アドバンス 柏工場(正会員)

表-2 コンクリートの調合

W/C (%)	目標スランプフロー /スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメ ント量 (kg/m ³)	容積 (リットル/m ³)			AD量 (C×%)
						S ₁	S ₂	G	
35.0	60±7.5	2.0±1.5	48.7	165	472	195	129	341	1.40~1.70
50.5	18±2.5	4.5±1.5	45.1	170	337	184	122	372	0.75~1.10

しているものである。

コンクリートの調合は表-2に示す通りで、高強度コンクリートは水セメント比35.0%、一般強度のコンクリートは水セメント比50.5%とした。

2.2 製造、打込みおよび養生

コンクリートは、東京近郊のレディーミクストコンクリート工場にて1~12月に毎月一回、いずれの調合も2.0m³/バッチで練り混ぜた。コンクリートはアジテータ車に積み込み、練り上がりから15分程度経過した時点でフレッシュ性状の測定、供試体採取を行った。その後図-1に示す型枠に打ち込み、材齢3日で側面の合板型枠を取り外した。試験体は材齢20日前後に東京都内に移動し、屋外でシートを掛けて養生した。なお、代表的な施工時期として4, 8, 10, 12月は各3バッチ練り混ぜ、それぞれのコンクリートで試験体を3体ずつ製作した。したがって、合計では各コンクリート20体ずつの模擬試験体を製作した。

2.3 測定

(1) フレッシュ性状

水セメント比35.0%のコンクリートでは、スランプフロー、50cmおよび停止フロー時間、空気量、コンクリート温度、水セメント比50.5%のコンクリートでは、スランプ、空気量、コンクリート温度の測定を行った。スランプフロー、スランプ、空気量はいずれも目標の範囲内であった。また、水セメント比35.0%のコンクリートの50cmおよび停止フロー時間はそれぞれ4~8秒、12~22秒の範囲であった。

(2) 温度履歴

図-1に示す試験体中心および表面部で、打込み直後から材齢14日までT熱電対を用いて温度測定を行った。また、外気温も同時に測定した。

(3) 圧縮強度

標準養生、現場封かん養生供試体について、材齢7, 28, 56, 91, 182, 365日で圧縮強度試験を行った。また、図-1に示すように材齢28, 56, 91, 182, 365日で試験体中心および表面部から各5個採取したコア供試体の圧縮強度試験を行った。

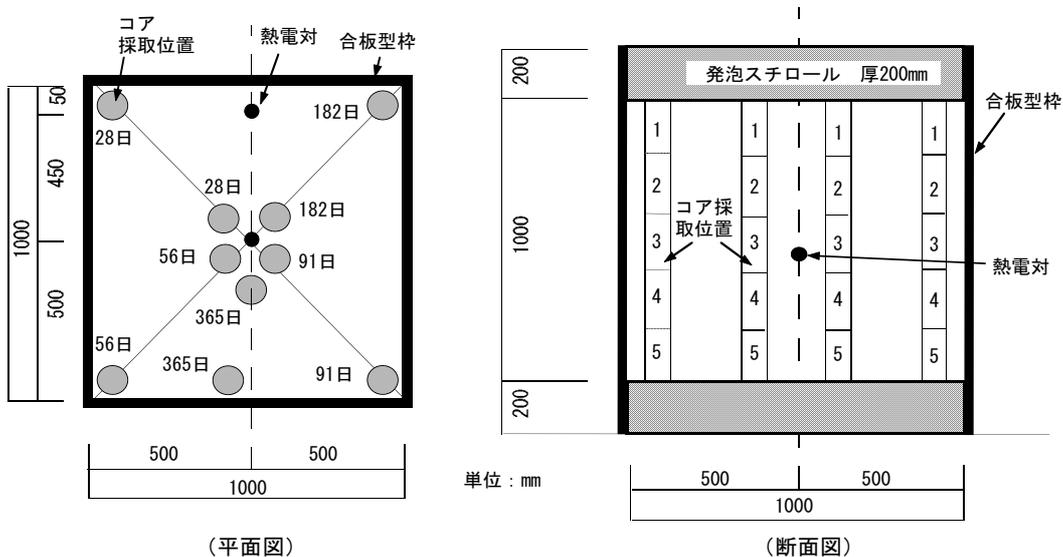


図-1 模擬試験体の概要

3. 実験結果および考察

3.1 温度性状

(1) 打込み温度

図-2は、各コンクリートの外気温と打込み温度の関係を示したものである。ここで打込み温度は、T熱電対で測定した打込み直後の表面部と中心部の温度の平均値とした。この図から、年間を通しての打込み温度は水セメント比35.0%の高強度コンクリートで15～35℃となり、打込み温度は外気温が10℃前後の冬期で7℃、20℃前後の標準期では5℃程度外気温より高くなる傾向を示した。また、外気温が30℃以上の場合には打込み温度は外気温と同程度であった。一般強度のコンクリートとの比較では高強度コンクリートのほうが若干高めの打込み温度となった。

(2) 温度上昇量

図-3は、外気温、打込み温度、模擬試験体中心および表面部の最高温度の変動を示したものである。4、8、10、12月については各3体の試験体の平均値で示している。この図から、試験体の最高温度は、中心部、表面部とも打込み時の外気温または打込み温度にほぼ連動して上下する結果となった。一般強度のコンクリートと比較すると、高強度コンクリートではいずれの最高温度も高く、また中心部と表面部の温度差も大きくなる結果となった。つぎに、図-4は打込み温度と温度上昇量の関係をそれぞれのコンクリートの表面および中心部について示したものである。この図に示すように、コンクリートの温度上昇量は打込み温度が高いほど大きくなる傾向となった。梶田らの研究によると打込み温度が1℃上昇すると部材の最高温度は1.61℃上昇するとされており³⁾、打込み温度1℃の上昇に対する温度上昇の増加分は0.61℃である。本実験結果では、高強度コンクリートの場合に中心部で0.74℃、表面部で0.61℃の上昇となり、梶田らの結果とほぼ同等なものとなった。また、一般強度のコンクリートでは中心、表面部とも打込み温度1℃の上昇に対する温度上昇量の増加分は0.57℃となった。

打込み温度の上昇に伴い温度上昇量が増加した

原因については、打込み温度が比較的高い4～9月で最高温度に達する材齢が20～22時間であったのに対し、打込み温度が低い12～3月では最高温度に達する材齢が30～32時間程度となり、打込み温度が高いほど、温度上昇速度が増加したことに起因しているものと考えられる。

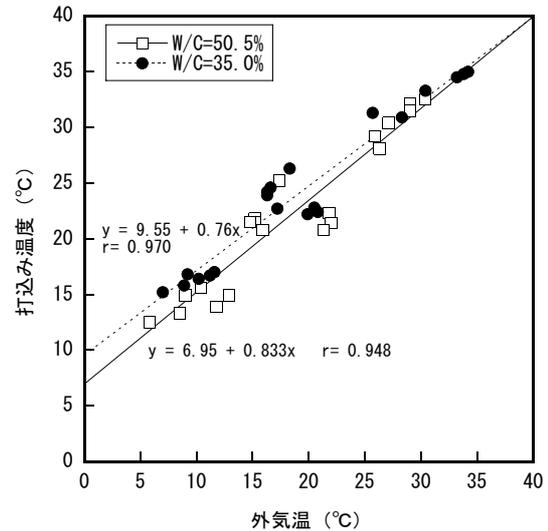


図-2 外気温と打込み温度の関係

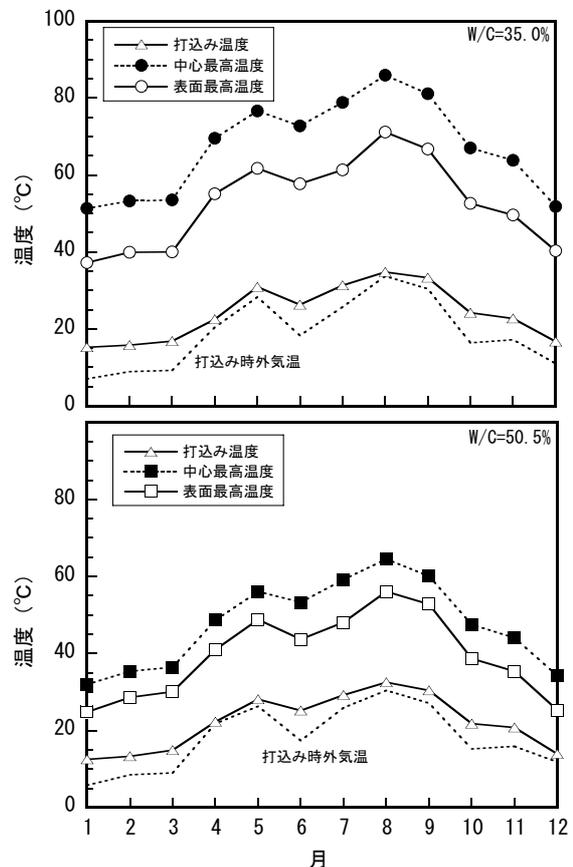


図-3 外気温、打込み温度と最高温度の変動

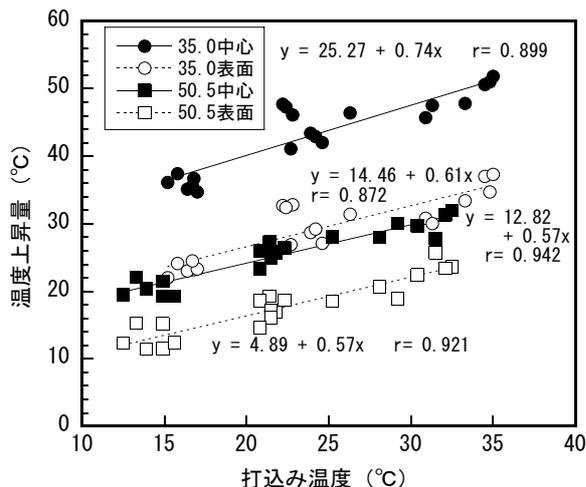


図-4 打込み温度と温度上昇量の関係

3.2 圧縮強度

圧縮強度試験結果の概要を表-3に示す。ここでコア強度は試験体中心および表面部から採取した合計10個のコア供試体強度の平均値を1データとした。また、表中の値はn=20として算出した。

(1) 標準養生強度

水セメント比35.0%の高強度コンクリートでは材齢28日の平均値が79.5N/mm²で、水セメント比50.5%のコンクリートでは35.2N/mm²となった。また、変動係数は水セメント比35.0%のコンクリートで9.2%、50.5%で9.6%となり両者の圧縮強度のばらつきは同程度であった。既往の報告⁴⁾に比較すると本実験の変動係数は若干大きめの値であるが、一回のコンクリート製造量が2ないし6m³と少ないこと、製造期間が1年間にわたることを考慮するとほぼ妥当な範囲内のばらつきに収まっているものと考えられる。

(2) 標準養生、現場封かん養生強度とコア強度

図-5は、表-3の標準養生、現場封かん養生、コア強度の強度発現を示したものである。この図から、水セメント比50.5%のコンクリートでは、いずれの材齢においても標準養生強度が最も高く、現場封かん養生強度とコア強度がほぼ同等の値を示した。しかし、水セメント比35.0%の場合には、いずれの材齢でも現場封かん養生強度がコア強度に比較して大きい結果となった。この結果から、年間を通じた大略の傾向では、一般強度のコンクリートでは現場封かん養生供試体をコア強

表-3 圧縮強度の概要

W/C (%)	供試体	材齢 (日)	平均値 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)
35.0	標準	7	64.6	4.9	7.6
		28	79.5	7.3	9.2
		56	85.1	7.2	8.5
		91	87.9	8.1	9.2
		182	91.9	7.8	8.5
	365	96.4	10.0	10.4	
	封かん	7	55.1	4.7	8.4
		28	72.6	7.0	9.6
		56	77.6	8.2	10.6
		91	81.3	9.3	11.5
		182	85.7	10.0	11.7
	365	90.9	13.3	14.6	
	コア	28	65.7	7.3	11.1
		56	69.8	7.7	11.0
		91	72.6	8.6	11.9
182		76.3	9.6	12.6	
365		81.7	11.6	14.2	
50.5	標準	7	25.2	1.8	7.3
		28	35.2	3.4	9.6
		56	37.8	3.3	8.7
		91	39.1	3.2	8.3
		182	40.7	3.2	8.0
	365	41.9	3.9	9.3	
	封かん	7	22.8	3.3	14.3
		28	31.6	2.1	6.6
		56	34.5	2.9	8.4
		91	36.2	3.3	9.1
		182	38.1	3.8	10.0
	365	40.7	4.8	11.9	
	コア	28	31.5	2.6	8.3
		56	34.7	3.0	8.6
		91	36.0	3.1	8.7
182		37.9	3.7	9.7	
365		39.9	4.1	10.2	

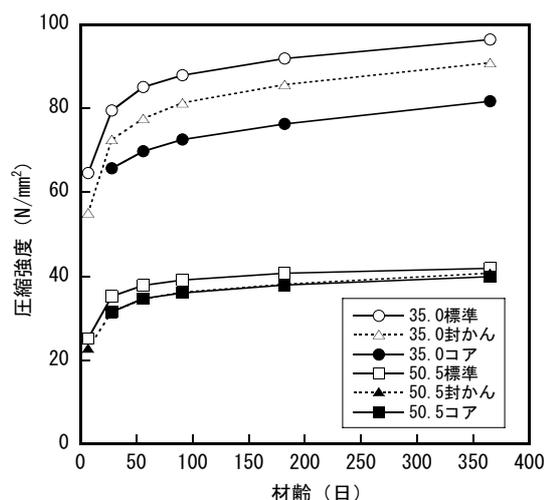


図-5 材齢と圧縮強度の関係

度と同等の強度特性を有する供試体と見なして差し支えないものと判断される。一方、高強度コンクリートでは現場封かん養生強度をそのまま構造

体コンクリート強度の推定値とすると危険側の判定になるものと考えられる。

(3) コア強度の変動

材齢 28 日標準養生強度に対するコア供試体の強度比は図-6 に示すように月毎に異なり、水セメント比 35.0% のコンクリートの場合に材齢 91 日では 1~3 月の冬期で比較的大きく、夏期の 8、9 月さらに一般には標準期とされる 5、10 月でも小さめの値となった。また、材齢 91 日から 365 日までの強度比の増加は 5~9 月の比較的暑い時期に打ち込んだコンクリートで小さく、10~4 月に打ち込んだコンクリートで大きくなる傾向が認められた。一方、水セメント比 50.5% のコンクリートでは、打込み時期の違いによる材齢 91 日の強度比の傾向は明確ではなかった。

(4) 部材内のコア強度の分布

図-7 は、水セメント比 35.0% のコンクリートについて、中心部コア強度と表面部コア強度の差を材齢毎に示したものである。ここで、それぞれの強度は 5 個のコア供試体強度の平均値とした。この図によると、材齢 28 日では 11~3 月に打ち込んだコンクリートで表面部に比較して中心部の強度が高いかあるいは同等程度であるが、4~10 月に打ち込んだコンクリートでは表面部のほうが強度が高い結果となった。材齢 91 日では 7~10 月で材齢 28 日と同様に表面部が高く、それ以外の月では表面部と中心部の強度差が材齢 28 日と比較して小さくなるかあるいは大小関係が逆になる結果となった。材齢 365 日では、7~11 月に打ち込んだコンクリートで表面部と中心部の強度差はほぼなくなったが、12~6 月に打ち込んだコンクリートでは中心部のほうが高い結果となった。一方、図-8 に示すように水セメント比 50.5% のコンクリートの材齢 28、91 日では施工時期による傾向は明瞭ではなかった。材齢 365 日では、水セメント比 35.0% の場合と類似の傾向を示した。

図-9 は、部材内のコア強度の分布をより定量的に評価するために、水セメント比 35.0% のコンクリートについて中心部の最高温度が中心部と表面部のコア強度差に及ぼす影響を材齢毎に示した

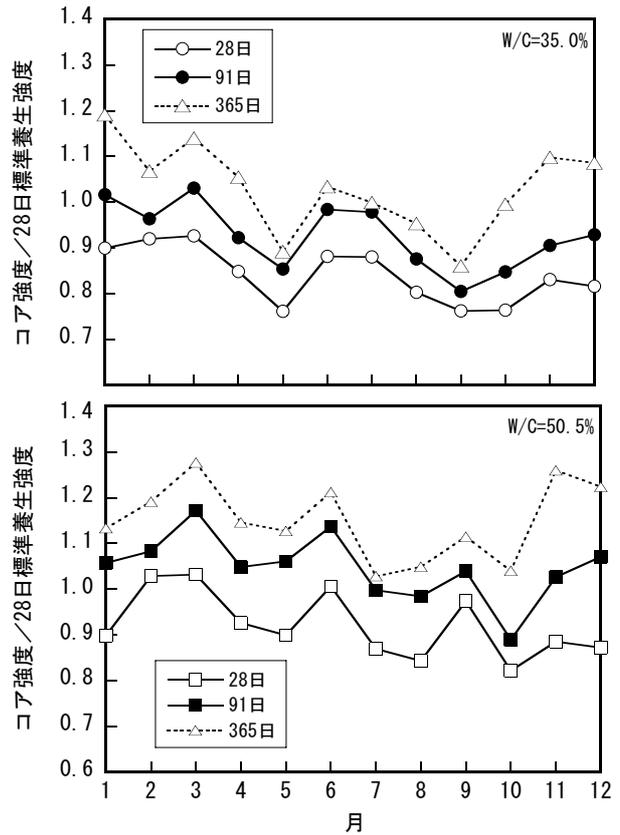


図-6 材齢 28 日標準養生強度に対するコア強度比の変動

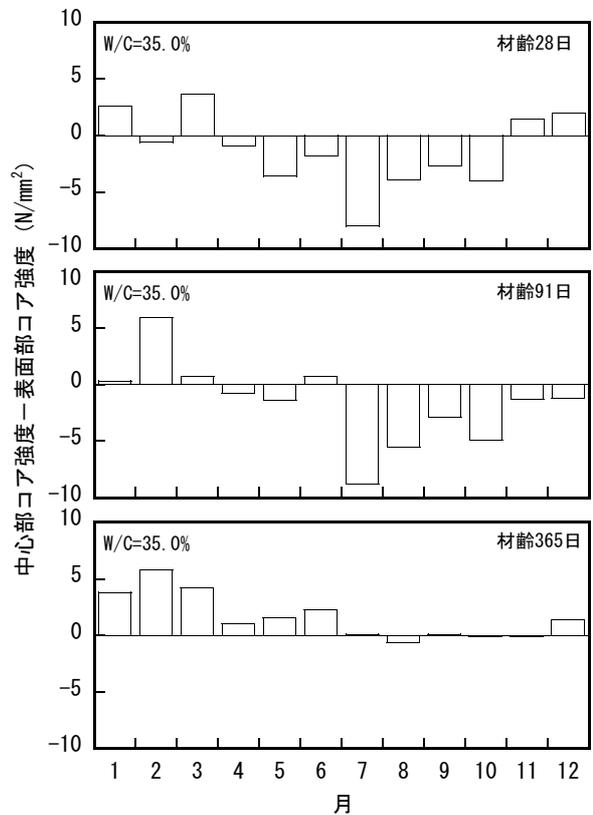


図-7 中心部と表面部のコア強度差 (W/C=35.0%)

ものである。図中のプロットはばらつきが大きいものの、全体的な傾向として、材齢28、91日では中心部の最高温度が60°C程度を超えると表面部と中心部のコア強度の大小関係が逆転することが分かる。このことから、本実験で対象とした高強度コンクリートでは、調合設計の対象となる材齢91日までの部材のコア強度の評価には、単に施工時期だけではなく中心部が受けた温度履歴を考慮して、コアの採取位置やコア強度の代表値を検討する必要がある。

4. まとめ

高強度コンクリートの強度発現に及ぼす施工時期の影響を把握するため、普通ポルトランドセメント使用のコンクリートで通年の模擬試験体実験を行った。本実験で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 高強度コンクリートの打込み温度は、低温時ほど外気温に比較して高く、また、一般強度のコンクリートよりもやや高めの値となった。
- (2) 部材の温度上昇量は打込み温度が高いほど大きくなり、高強度コンクリートでは打込み温度の上昇1°Cに対して、温度上昇量の増加が中心部で0.74°C、表面部で0.61°Cとなった。
- (3) 一般強度のコンクリートでは現場封かん養生強度とコア強度が同等の値となったが、高強度コンクリートではコア強度が現場封かん養生強度よりも小さな値となることが確認された。
- (4) 高強度コンクリートでは、28日標準養生強度に対する91日コア強度比は、1、3月で比較的大きく、8、9月および5、10月で小さくなった。
- (5) 高強度コンクリートでは、施工時期により部材内部の強度発現傾向が異なった。また、調合設計の対象となる材齢91日までの部材のコア強度の評価には、中心部が受けた最高温度を考慮して検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高強度コンクリートの技術の現状，1991.1

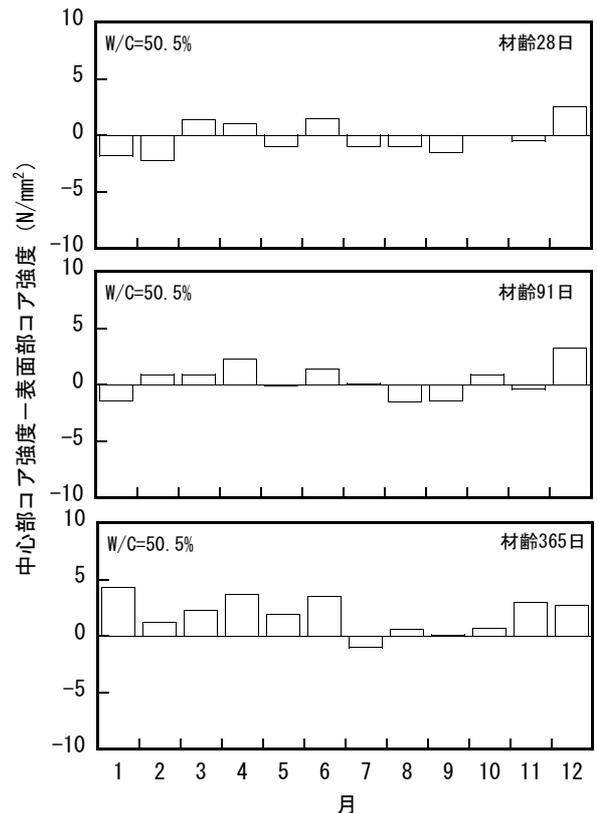


図-8 中心部と表面部のコア強度差 (W/C=50.5%)

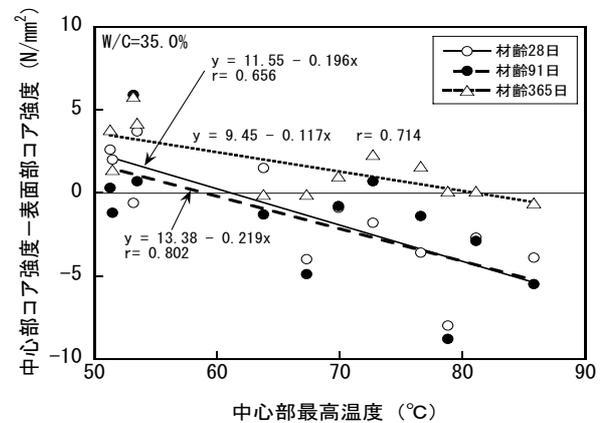


図-9 中心部最高温度と強度差の関係

- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2003.2
- 3) 梶田佳寛，佐藤幸恵，友澤史紀：高強度コンクリートの構造体中での強度発現性と調合強度，日本建築学会構造系論文集，No. 537，pp. 13-20，2000. 11
- 4) 福士 勲，横山昌寛：高強度コンクリートの品質変動特性に関する実態調査，セメント・コンクリート，No. 538，pp. 25-33，1991. 12