

論文 200N/mm² 級超高強度コンクリートの構造体コンクリートに関する研究

井戸 康浩^{*1}・梅本 宗宏^{*2}・端 直人^{*3}

要旨：200N/mm² 級超高強度コンクリートを3シーズン（夏期・標準期・冬期）において、実機プラントで製造、模擬柱試験体を作製し、構造体コンクリートについて検討を行った。その結果、従来から指摘されている通り、シリカフュームを添加した超高強度コンクリートはコンクリート温度履歴によって強度発現が大きく異なることを確認した。材齢14日程度の初期材齢の高温履歴が強度増進に大きく寄与しており、断熱養生した柱試験体のコア強度は、いずれの打込み時期も200N/mm²以上の強度となった。また、通常養生の柱試験体のコア強度は、材齢1年も強度増進し、標準期および冬期の断熱養生と同等の強度となった。

キーワード：200N/mm²、超高強度コンクリート、温度依存性、強度分布、長期強度性状

1. はじめに

近年、首都圏での超高層建築物の需要が拡大し、Fc150N/mm² 級の高強度コンクリートが実用化されており、200N/mm² 級を超える超高強度コンクリートの研究も行われている。

本研究は、200N/mm² 級超高強度コンクリートの実用化を目的とし、コンクリートを実機プラントで製造し、模擬柱試験体を作製し、3シーズンの構造体コンクリートにおいて、養生温度の影響、強度分布、材齢1年の長期強度性状について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

使用材料を表-1に、調合条件を表-2に、調合表を表-3に示す。セメントは、シリカフューム混入セメントを使用し、さらに混和材として比表面積が7.4~10.5m²/gのセメントに含まれるシリカフューム（比表面積15.0m²/g以上）と異なる粒径が小さいシリカフュームを用いた。既報で報告しているとおり¹⁾、シリカフューム添加率20%で圧縮強度の増加が最大となると考えられるため、シリカフュームはセメントの内割で10%置換し、添加率が合計で約20%となるように調合設計を行った。水結合材比は、13.0、12.5、12.0%の3水準とし、すべての調合に収縮低減剤を練混ぜ水の一部として10kg/m³添加した。また、目標スランプは70cm、目標空気量は1.0%とした。

2.2 試験項目

試験項目を表-4に、模擬柱試験体（通常養生）を図-1に示す。フレッシュ性状は、練上がり時および荷卸

表-1 使用材料

種類	記号	物性等
セメント	C	シリカフューム混入セメント(密度=3.08g/cm ³)
水	W	上水道水
混和材	SF	シリカフューム（密度=2.2g/cm ³ ，比表面積=7.4~10.5m ² /g）
細骨材	S	硬質砂岩砕砂(表乾密度=2.59g/cm ³)
粗骨材	G	硬質砂岩砕石(表乾密度=2.64g/cm ³)
混和剤1	SP	特殊高性能減水剤（ポリカルボン酸系）
混和剤2	SRA	収縮低減剤（ポリエーテル誘導体）

表-2 調合条件

水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	シリカフューム置換率 (C×%)	収縮低減剤 (kg/m ³)
13.0 12.5 12.0	155	0.51	10	10

表-3 調合表

水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)*2						SP*1添加率 (B×%)
		W	C	SF	S	G	SRA	
13.0	29.1	155	1074	119	326	808	10	1.65
12.5	26.6	155	1116	124	287	808	10	1.70
12.0	23.1	155	1163	129	238	808	10	1.75

*1 SP添加率は、標準期における値とする。

*2 単位量の記号は、表-1使用材料の記号を参照。

し時に実施した。柱試験体は、図に示すように1000×1000×h1050mmとし、養生方法を通常養生と断熱養生の2種類とした。いずれの養生も上下面は、厚さ150mmの

*1 戸田建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 戸田建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

*3 戸田建設(株) 本社 建築工事技術部 工修 (正会員)

断熱材（発泡スチロール）を設置し、通常養生は、側面をせき板のみとし、材齢 7 日で脱型した。断熱養生は、上下面に加え側面の 4 面に厚さ 150mm の断熱材を設置し、材齢 27 日で側面を脱型した。コア供試体は図に示すように各材齢につき中央部と端部の 2 カ所からそれぞれ 5 本採取した。温度測定位置は、高さ方向の中心において、柱試験体中心と表面より 50cm 内側の 2 カ所を T 型熱電対により測定した。円柱供試体は、標準と簡易断熱養生 (JASS5 T-606) に加えて、40℃温水養生を採取した。

2.3 コンクリート製造および試験体作製

コンクリートは、都内のレディーミクストコンクリート工場で製造した。コンクリートミキサは、水平 2 軸強制練りとし、モルタルを 300 秒練混ぜた後、粗骨材を投入し 180 秒練り混ぜ、トラックアジテータに積み込んだ。練混ぜ量は、1.5m³ または 2.0m³ とし、練混ぜ時間は、目視およびミキサの動力負荷により適宜調整した。練上がり後、フレッシュ性状を確認し、トラックアジテータにより試験場所に運搬した。30～45 分の運搬後、荷卸し時のフレッシュ試験を実施し、所要の性状を確認後、模擬柱試験体（以下、柱試験体）および円柱供試体にコンクリートを打ち込んだ。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

(1) フレッシュ試験

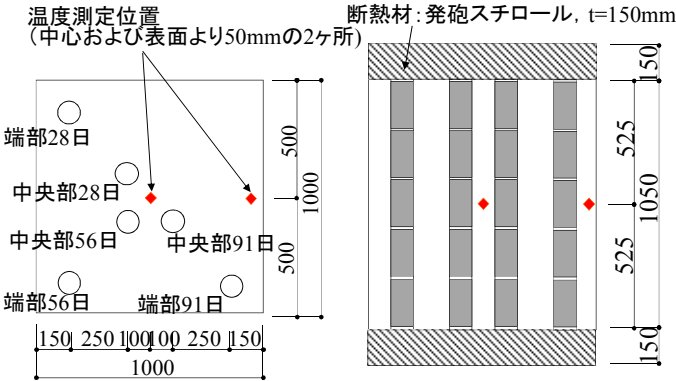
荷卸し時のフレッシュ試験の結果を表-5 に示す。いずれのシーズンにおいても目標値であるスランブフロー 70cm、空気量 1.0%をほぼ満足する結果となった。一部のスランブフロー値は、やや大きな値となったが、骨材の分離性状に問題ないと判断し、試験に供した。コンクリート温度は、調合に関わらず、打込み時期ごとに夏期は約 35℃、標準期は約 23℃、冬期は約 15℃となり、打込み時期ごとに 10℃前後変化している。塩化物量は 0.09kg/m³ 以下となっており、セメント量が 1000kg/m³ を超える調合においても、目標値を十分に満足した。

(2) コンクリート温度履歴

コンクリート温度履歴一覧を表-6 に、標準期の W/B =12.5%におけるコンクリート温度履歴を図-2 に示す。W/B=12.5%において、通常養生のコンクリート最高温度を比較すると、中央部では、夏期は 78.8℃、標準期は 57.9℃、冬期は 53.9℃となり、3 シーズンの中央部と端部の温度差は、12.9～14.5℃であった。断熱養生の中央部では、夏期は 94.9℃、標準期は 82.4℃、冬期は 78.9℃であり、中央部と端部の温度差は 3.1～3.8℃であった。厚さ 150mm の発泡スチロールによる断熱養生をすることで、外気温の影響を受けにくくなっており、通常養生より打込み後のコンクリート温度が大幅に上昇している。冬期

表-4 試験項目

分類	試験項目	試験方法ほか
フレッシュ コンクリートの性状	スランブフロー	JIS A 1150
	50cm フロー時間、停止時間	
	O ロート流下時間	JSCE-F-512
	空気量	JIS A1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	塩化物量	JASS5 T-502
硬化 コンクリートの性状	圧縮強度 円柱供試体（標準・簡易断熱・40℃温水） コア供試体（通常・断熱）	JIS A 1107, JIS A 1108 材齢 7・28・56・91・365 日（円柱供試体の簡易断熱は 7・365 日を除く、コア供試体は 7 日を除く）
	ヤング係数	JIS A 1149
	ポアソン比	ヤング係数と同時に測定（冬期のみ）
	コンクリート温度履歴	T 型熱電対による



*1 断熱養生は上下面に加え側面の 4 面にも断熱材を (t=150mm) 設置。

図-1 模擬柱試験体（通常養生）

表-5 フレッシュ試験結果（荷卸し時）

時期	W/B (%)	スランブフロー (cm)	50cmフロー時間 (秒)	停止時間 (秒)	Oロート (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	塩化物量 (kg/m ³)
夏期	13.0	77.5	5.8	108.4	21.2	1.1	34	0.06
	12.5	71.5	9.5	120.4	40.4	1.1	35	0.05
	12.0	73.5	5.9	88.8	36.1	1.1	33	0.06
標準期	13.0	80.5	4.9	150.8	21.3	1.4	22	0.06
	12.5	71.5	9.8	125.6	39.2	1.2	23	0.05
	12.0	76.5	8.2	141.8	37.6	1.2	23	0.05
冬期	13.0	69.0	3.5	163.0	19.7	1.0	14	0.09
	12.5	78.5	6.6	180.0	21.6	1.2	16	0.09
	12.0	73.0	5.1	151.0	17.4	1.1	14	0.09

において、通常養生では中央部 53.9℃と端部 41.0℃に対して、断熱では中央部は 78.9℃、端部は 75.5℃となり、外気温が低い冬期でも柱試験体は高い温度履歴となった。

表-6 コンクリート温度履歴一覧

W/C (%)	測定箇所		夏期		標準期		冬期	
			最高温度(℃)	最高温度到達時間(h)	最高温度(℃)	最高温度到達時間(h)	最高温度(℃)	最高温度到達時間(h)
13.0	通常	中央	77.8	31.8	58.2	47.8	56.7	45.6
		端	62.6	29.6	44.4	46.1	44.0	50.8
	断熱	中央	96.4	54.8	82.9	71.1	78.2	67.0
		端	92.0	53.3	79.9	75.3	74.6	68.6
	簡易断熱		68.9	32.6	55.0	52.0	46.9	53.0
12.5	通常	中央	78.8	31.5	57.9	46.6	53.9	52.6
		端	64.3	28.2	43.7	43.9	41.0	49.0
	断熱	中央	94.9	57.7	82.4	66.6	78.9	77.5
		端	91.1	56.0	79.3	71.6	75.5	71.0
	簡易断熱		65.0	33.2	44.7	56.6	40.3	59.0
12.0	通常	中央	81.1	35.0	59.2	51.4	58.7	49.0
		端	65.5	31.3	46.0	51.0	45.4	50.4
	断熱	中央	94.4	55.8	81.7	71.9	81.2	69.5
		端	90.9	52.3	78.9	71.9	78.2	74.2
	簡易断熱		66.6	37.3	48.8	57.7	48.5	54.7

3.2 硬化性状

(1) 圧縮強度

W/B=12.5%の各打込み時期における圧縮強度試験結果を図-3、図-4、図-5に示す。コア強度の平均値は、中央部と端部を合わせた10本の平均値とする。標準は、いずれの打込み時期においても材齢91日でほぼ200N/mm²に達している。また、簡易断熱は、通常養生コアと同等以上となった。材齢91日において、通常養生コアは、夏期196.7N/mm²、標準期179.6N/mm²、冬期172.8N/mm²、断熱養生コアは、夏期225.7N/mm²、標準期209.9N/mm²、冬期205.3N/mm²となり、断熱養生することで目標強度である200N/mm²を満足できた。断熱養生は通常養生と比較して、夏期は29.0N/mm²、標準期は30.3N/mm²、冬期は32.5N/mm²大きくなり、30N/mm²程度圧縮強度が増加した。

打込み時期ごとの比較をすると、強度は、夏期、標準期、冬期の順となっており、コンクリート温度履歴およびコンクリート最高温度と同様な傾向となっている。これは、コンクリートが高温履歴を受け、シリカフェームのポズラン反応が促進されたためと考えられる。40℃温水養生は、材齢28日で断熱コアと同等以上の強度であり、筆者らが既に報告している通り¹⁾、高温履歴を受けた構造体コンクリート強度を円柱供試体により評価する場合は、従来の20℃水中の養生より、40℃温水の養生の方が適切に評価できると考えられる。また、断熱養生コアお

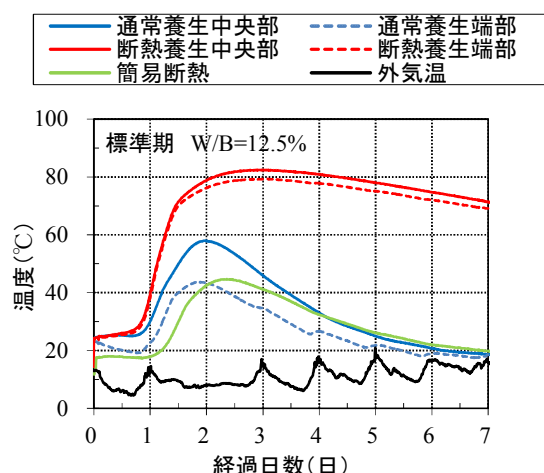


図-2 コンクリート温度履歴（夏期）

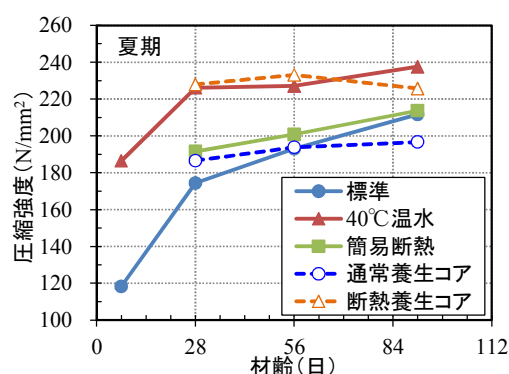


図-3 圧縮強度試験結果（夏期）

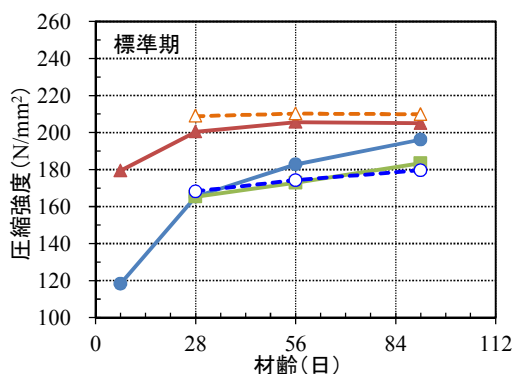


図-4 圧縮強度試験結果（標準期）

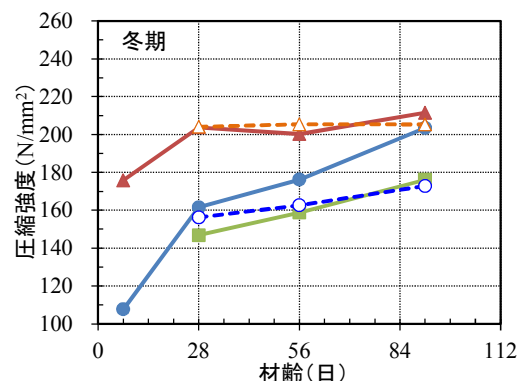


図-5 圧縮強度試験結果（冬期）

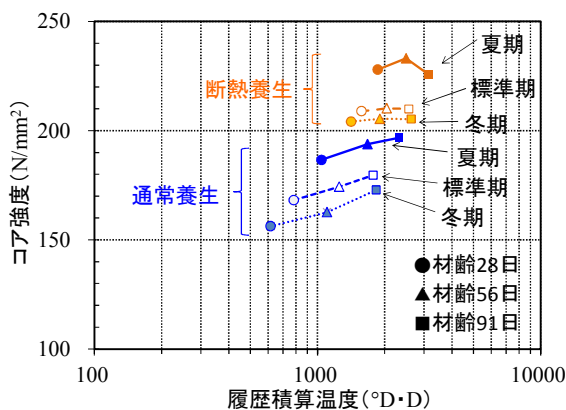


図-6 コア強度と履歴積算温度の関係

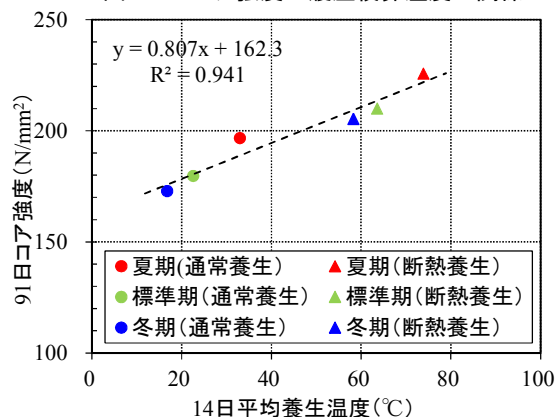


図-8 91日コア強度と14日平均養生温度の関係

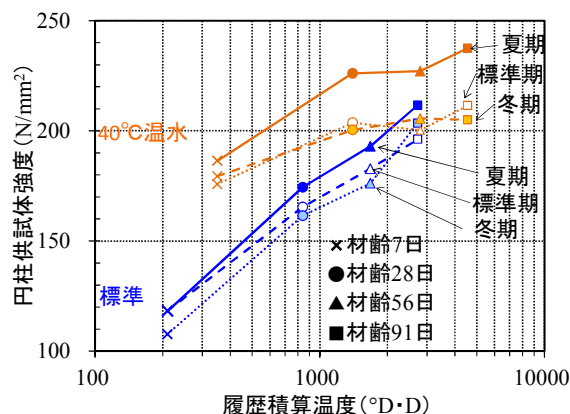


図-7 円柱供試体強度と履歴積算温度の関係

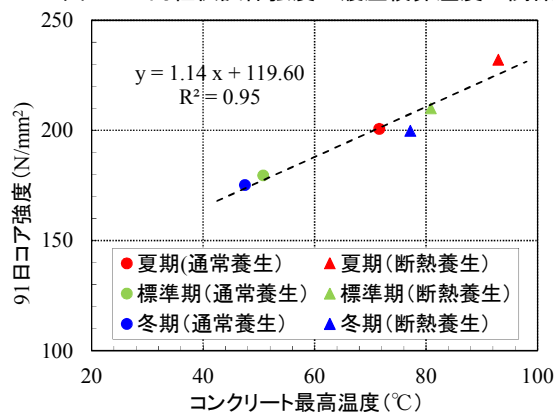


図-9 91日コア強度とコンクリート最高温度の関係

よび 40℃温水養生は、材齢 28 日以降の強度増進はほとんど見られなかった。図には示していないが、W/B＝13.0%および 12.0%も概ね同様の傾向となった。

(2) コンクリート温度と圧縮強度の関係

W/B=12.5%の各打込み時期におけるコア強度と履歴積算温度の関係を図-6 に、円柱供試体強度と履歴積算温度の関係を図-7 に示す。履歴積算温度は、式 (1) より算出した。

$$M_{10} = \sum_{i=1}^n (T + 10) \Delta t \quad (1)$$

ここに、 M_{10} ：履歴積算温度 (°DD)， T ：材齢 n 日のコンクリート温度 (°C)， Δt ：コンクリート温度が T (°C) である期間 (日) とする。柱試験体のコンクリート温度は、材齢 28 日までは、柱試験体の中心部と端部の平均値とし、材齢 29 日以降は、柱試験体温度は外気温とほぼ同等であるため、外気温より算出した。

コア強度および円柱供試体ともに、全体的な傾向は、履歴積算温度が大きいくほど強度は大きくなっているが、打込み時期と養生による差が非常に大きく影響している。材齢初期に高温履歴を受けて 1000°DD を超えた断熱は、28 日以降の強度の伸びがほとんど見られない。40℃温水養生も同様に材齢 28 日の 1000°DD を超えた付近から強度の伸びがほとんど見られない。一方、コア強度の通常と円柱供試体の標準は、1000°DD を超えても強度が大きく増加しているが、同等の積算温度を受け

た断熱と 40℃温水より、強度は小さくなっている。

91 日コア強度と 14 日平均養生温度の関係を図-8 に、91 日コア強度とコンクリート最高温度の関係を図-9 に示す。ここで平均養生温度は、上記の履歴積算温度を平均養生温度に換算し直したものである。14 日平均養生温度が高いほどコア強度が増加する傾向があり、強い相関 (寄与率 $R^2=0.941$) があつた。図には示していないが材齢 28 日も同様であつた。また、コンクリート最高温度との関係も強い相関を示しており、強度増進に寄与するのは時間と温度の積である履歴積算温度だけでなく、コンクリート最高温度も大きく影響していると考えられる。セメントは低熱系をベースしにあり、シリカフューム添加量が 20%程度含まれており、温度依存性が大きくいたためである。以上より、材齢 14 日程度までの材齢初期に高温履歴を受けると圧縮強度は大きく増進すると考えられる。

(3) コア供試体強度分布

W/B=12.5%のコア強度のばらつきを表-7 に、コア供試体強度の累積強度分布を図-10 に示す。図中の曲線は、それぞれの平均値および標準偏差を用いた正規分布曲線を示す。圧縮強度の分布は高強度になるほど、正規分布が崩れバラツキが大きくなる場合があると報告されているが⁴⁾、歪度がマイナス側に偏る傾向は見られず、今回の構造体コンクリートの試験結果では、概ね正規分布に

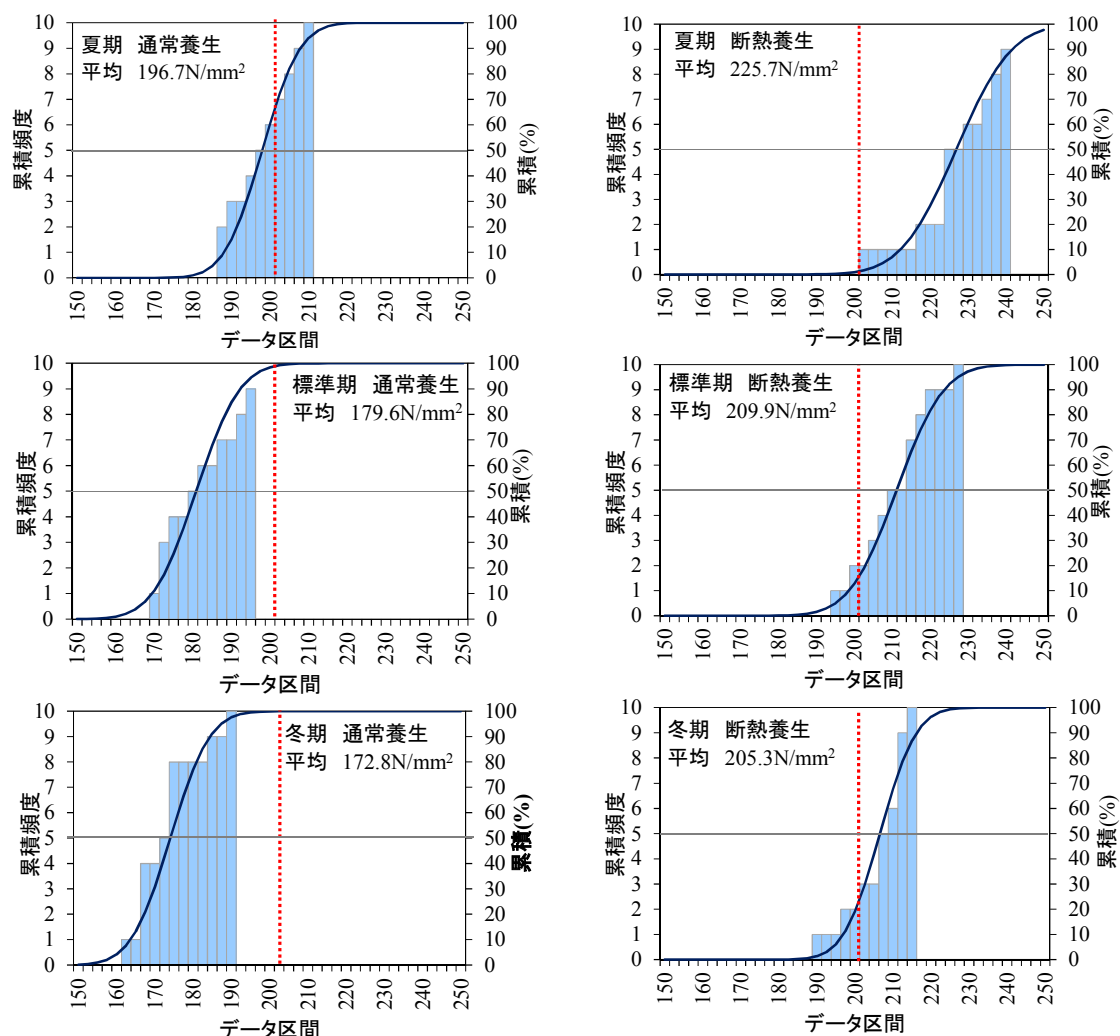


図-10 コア供試体の累積強度分布 (W/B=12.5%)

近い分布を示した。強度分布が崩れる原因の1つとして、供試体の成形不良が挙げられるため、すべての供試体を両面研磨し、平行度、直角度を検査し、できる限り強度低下の要因を排除して試験を行ったことが正規分布になったと要因の一つと考えられる。また、変動係数の平均値は4.5%であり、 $\text{Fc}130\text{N/mm}^2$ 程度の構造体コンクリートの変動係数の5%程度と比較しても⁵⁾ほぼ同等の値となり、 $\text{Fc}200\text{N/mm}^2$ 級においても、変動係数は大きくならないと考えられる。柱試験体の中央部と端部における圧縮強度差とコンクリート温度差の関係を図-11に示す。コンクリート温度差 12°C 以上ある通常は、圧縮強度差が 10N/mm^2 を超えているのに対して、温度差が 4°C 程度の断熱は、圧縮強度差が概ね 10N/mm^2 以下となり、コンクリート最高温度差を小さくすることで、柱試験体の中での強度差が小さくなると考えられる。

(4) ヤング係数

ヤング係数と圧縮強度の関係を図-12に示す。また、JASS5のヤング係数推定式(骨材種類によって定まる補正係数 $k_1=1.0$ 、混和材種類によって定まる補正係数 $k_2=0.95$ とした)を併せて図中に示す。 200N/mm^2 を超える領域においてもヤング係数は推定式の $\pm 10\%$ の範囲であ

表-7 コア強度のばらつき (W/B=12.5%)

打込み 時期	養生	圧縮 強度 (N/mm^2)	標準 偏差 (N/mm^2)	変動 係数 (%)	尖度	歪度
夏期	通常	196.7	7.7	3.90	-1.446	-0.077
	断熱	225.7	11.5	5.10	1.323	-0.992
標準期	通常	179.6	8.9	5.00	-1.271	0.548
	断熱	209.9	9.8	4.70	-0.141	-0.007
冬期	通常	172.8	8.1	4.70	0.872	1.018
	断熱	205.3	7.5	3.70	1.280	-1.259

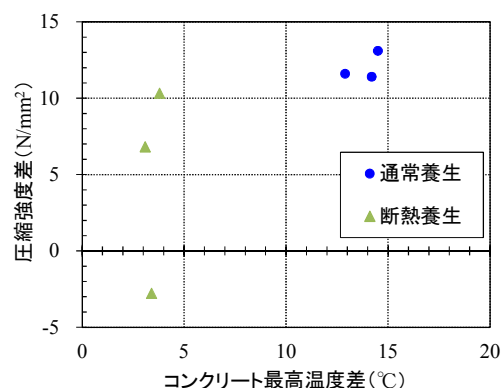


図-11 柱試験体の中央部と端部における圧縮強度差とコンクリート温度差の関係 (W/B=12.5%)

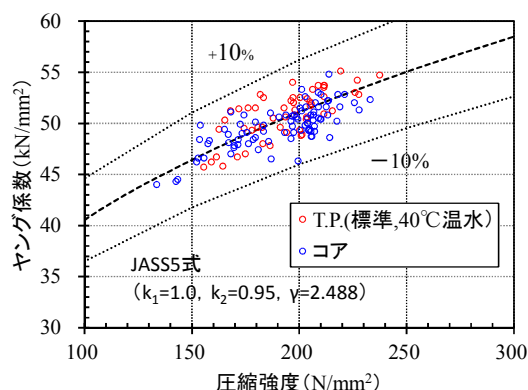


図-12 ヤング係数と圧縮強度の関係

り、JASS5 のヤング係数推定式を適用することが可能と考えられる。

(5) ポアソン比

ポアソン比と圧縮強度の関係を図-13 に示す。高い温度履歴を受けた 40℃温水養生およびコアは、標準養生と比較してやや小さくなる傾向が見られた。140N/mm² 以上の領域においては、すべての結果を回帰して求めた実験式は、野口式より小さい値となった。

(6) 長期強度性状

W/B=12.5%の材齢 1 年までの圧縮強度試験結果を図-14 に示す。コア強度において、断熱養生は強度の増進はまったく見られなかったが、通常養生は材齢 1 年後も強度が増進し、断熱養生の標準期および冬期とはほぼ同程度の強度となった。断熱養生の夏期と標準期の圧縮強度はやや低下しているが、圧縮強度試験のばらつきの範囲で変動していると考えられる。円柱供試体では、材齢 1 年の 40℃温水は強度が増加しているのに対して、標準は強度増進がまったく見られなかった。

4. まとめ

200N/mm² 級超高強度コンクリートを実機プラントで製造し、3 シーズンにおいて、構造体コンクリートについて検討を行った結果、以下の知見を得られた。

- (1) 断熱養生をして構造体コンクリートの材齢初期に高温履歴を受けると、通常養生より圧縮強度は 30N/mm² 程度上昇した。91 日コア強度は、材齢初期の平均養生温度やコンクリート最高温度と非常に高い相関があり、材齢初期 14 日程度に高い温度履歴を受けると圧縮強度増進に大きく寄与すると考えられる。
- (2) Fc200N/mm² 級超高強度コンクリートにおいても、ヤング係数は JASS5 のヤング係数推定式を適用できる。
- (3) 140N/mm² 以上の領域のポアソン比は、野口式より小さい値となった。
- (4) 材齢 1 年の長期強度性状を確認したところ、コア強度の通常養生は 91 日以降も強度が増進し、夏期を除

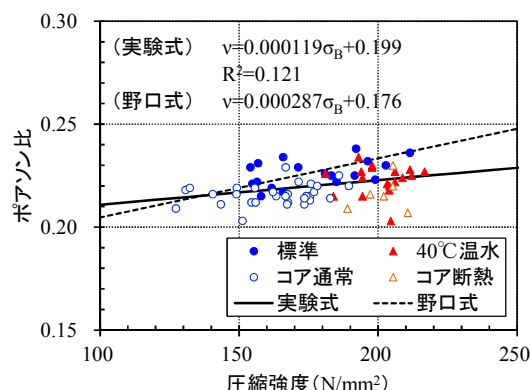


図-13 ポアソン比と圧縮強度の関係

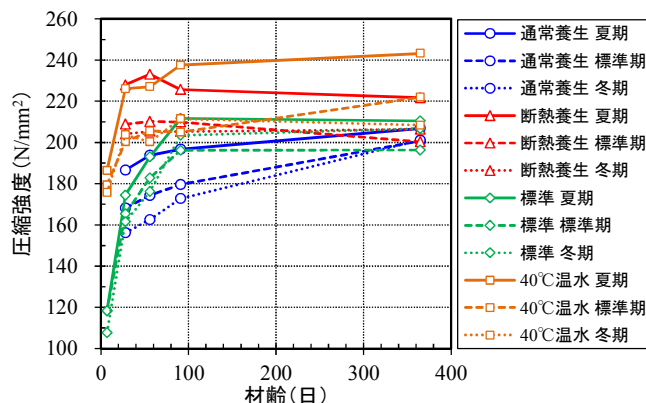


図-14 材齢 1 年までの圧縮強度結果 (W/B=12.5%)

く断熱と同程度の強度となった。

200N/mm² 級の超高強度コンクリートの圧縮強度は、材齢初期の養生条件が大きく影響するため、今後は実施工時における養生温度の影響等に関して検討していく予定である。

参考文献

- 1) 井戸康浩, 菊田繁美, 梅本宗宏, 端直人: 200N/mm² 級超高強度コンクリートの基礎的研究 (その 1 試練り実験) 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), A-1, pp.997-998, 2010.9
- 2) 石中正人, 山中英明, 鳴瀬浩康: シリカフェーム混合セメントにおける加熱養生時の強度発現性に及ぼす最高温度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.91-96, 2008
- 3) 橋田浩, 黒田泰弘, 山崎庸行: CEB-FIP モデルを改良した高強度コンクリート構造部材の力学特性発現モデル, 日本建築学会構造系論文集, pp.9-14, 1998.11
- 4) 鈴木澄江, 梶田佳寛: コンクリートの圧縮強度レベルと確立分布性状, 日本建築学会構造系論文集, pp.1-6, 2004.4
- 5) 一瀬賢一, 川口徹: 超高強度コンクリートの構造体コンクリート強度発現性状, コンクリート工学年次論文集, vol.26, No.1, pp.393-398, 2004