

Fc200N/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}

菊田 繁美^{*1} 梅本 宗宏^{*1}
端 直人^{*2}

概 要

現在、首都圏において超高層 RC 造建築物の需要が拡大し、Fc150N/mm² 級の超高強度コンクリートが実用化されており、Fc200N/mm² 級についても研究が行われている。筆者らは、Fc200N/mm² 級の超高強度コンクリートの実用化を目的とした、室内試し練り実験および実機製造による小型柱実験を実施し、既に報告している。本研究は、3 シーズン（夏期、標準期、冬期）を通して、実機製造による実大模擬柱実験を実施した結果をまとめたものである。実験の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 目標のスランプフローおよび空気量を満足し、実施工が十分に可能なフレッシュ性状を得られた。
- (2) W/B = 12.5% において、断熱養生により所要の温度を確保することができ、いずれのシーズンにおいてもコア強度で 200N/mm² 以上を得られた。
- (3) コア供試体の圧縮強度分布は、おおむね正規分布を示した。

Study on Concrete in Structure for Ultra-High Strength Concrete of 200N/mm²

Yasuhiro IDO^{*1} Shigemi KIKUTA^{*1}
Munehiro UMEMOTO^{*1} Naoto HASHI^{*2}

The present time, the demand of the very high-rise reinforced concrete building is increasing in the capital, and ultra-high strength concrete of Fc150N/mm² is put in practical use, and the ultra-high strength concrete of Fc200N/mm² is studied. The authors have reported for the study on ultra-high strength concrete of Fc200N/mm². In this study, experiments about full-scaled column by actual production throughout the year are reported. The following results were obtained from analytical and experimental study.

- (1) Slump flow value and air content were satisfied the target, placing is possible enough.
- (2) About W/B=12.5%, temperature of concrete was able to obtain necessary temperature by adiabatic curing, and compressive strength of core specimens were 200N/mm² or more.
- (3) Compressive strength distribution of core test specimen was a normal distribution in general.

^{*1} 技術研究所 ^{*2} 建築工事技術部

^{*1} Technical Research Institute ^{*2} Architectural Engineering Dept.

Fc200N/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 菊田 繁美*¹
梅本 宗宏*¹ 端 直人*²

1. はじめに

現在、首都圏において超高層 RC 造建築物の需要の拡大にともない Fc150N/mm² 級の超高強度コンクリートが実用化されており、さらに Fc200N/mm² 級の超高強度コンクリートの研究・開発が行われている。また、コンクリートは高強度になると非常に脆性的な破壊をするため、鋼繊維を用いて靱性を改善した超高強度コンクリートの研究も行われている。筆者らも、200N/mm² 級超高強度コンクリートの実験を実施しており、鋼繊維を用いた超高強度コンクリートの室内試し練りおよび実機製造による小型柱におけるコア強度について報告している¹⁻³⁾。

本研究は、Fc200N/mm² 級超高強度コンクリートの実用化を目的とし、3 シーズン（夏期、標準期、冬期）において実機製造による実大模擬柱実験を行った。本報は、実験結果について報告する。

2. 実験計画概要

2.1 使用材料および調査

使用材料を表-1 に、調査条件を表-2 に、調査表を表-3 にそれぞれ示す。調査は、セメントはシリカフェーム混入セメントとし、さらに混和材（結合材）としてセメントに含まれるシリカフェームと比表面積の異なるシリカフェームをセメントの内割で 10% 置換し、水結合材比を 13.0、12.5、12.0% の 3 水準とした。また、すべての調査に収縮低減剤 10kg/m³ を練混ぜた水の一部として添加した。

2.2 試験体および試験項目

模擬柱試験体を図-1 に示す。柱試験体の寸法は、1000 × 1000 × h1050mm とした。柱試験体は、通常養生と断熱養生の 2 種類とし、型枠を在来の木製とした。

通常養生は、上下面に 150mm の断熱材を設置し、材齢 7 日で側面のせき板のみを脱型した。断熱養生は、上下面に加え側面の 4 面に 150mm の断熱材を設置し、材齢 27 日で側面を脱型した。試験項目を表-4 に示す。円柱供試体は、標準養生と簡易断熱養生のほかに 40℃ 温水養生を採取した。シリカフェームを添加した

表-1 使用材料

種類	記号	物性等
セメント	C	シリカフェーム混入セメント (密度 = 3.08g/cm ³)
混和材	SF	シリカフェーム (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

表-2 調査条件

W/B (%)	単位水量 (kg/m ³)	G かさ容積 (m ³ /m ³)	SF 置換率 (C × %)	収縮低減剤 (kg/m ³)
13.0	155	0.51	10	10
12.5				
12.0				

*1 目標スランプフロー：70 ± 10cm、目標空気量：1.0 ± 1.0%。

表-3 調査表

調査名	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SRA
			W	C	SF	S	G	
U13.0	13.0	29.1	155	1074	119	326	808	10
U12.5	12.5	26.6	155	1116	124	287	808	10
U12.0	12.0	23.1	155	1163	129	238	808	10

◆ 温度測定位置 (中心および表面より 50mm の 2ヶ所)

断熱材 (発泡スチロール, t=150mm)

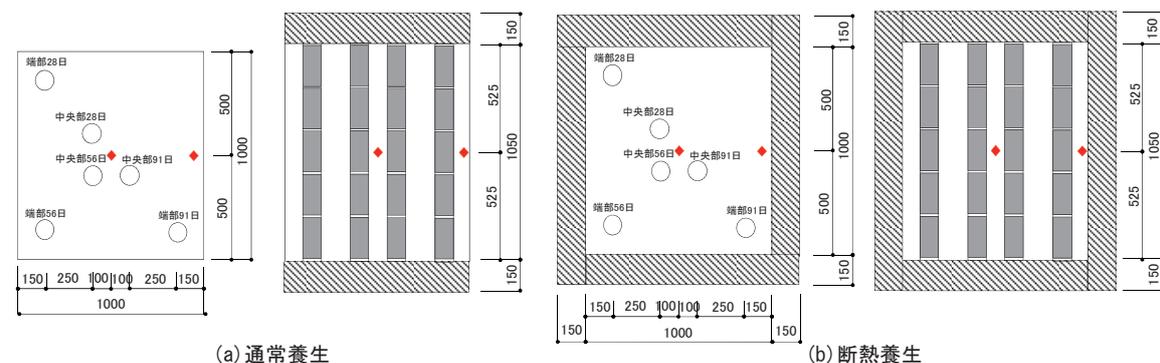


図-1 模擬柱試験体

*¹ 技術研究所 *² 建築工事技術部

低水結合材比のコンクリートは、標準養生では材齢91日で十分に強度発現せず、40℃温水養生のように高い温度履歴を与えることでコア強度と同程度の強度となり、適切に評価できるためである^{3,4)}。コア供試体は試験材齢を28・56・91日とし、図-1に示すように、1試験体で中央部と端部の2カ所でそれぞれ5個ずつ採取した。また、ヤング係数およびポアソン比（冬期のみ）を測定した。コンクリート温度履歴は、柱試験体の高さ中央において、試験体中心部と表面から50mm内側の2カ所で測定した。

2.3 コンクリートの製造

コンクリートは、東京都内のレディーミクストコンクリート工場で製造した。コンクリートの練混ぜは、モルタルを300秒練り混ぜた後、粗骨材を投入し180秒練り混ぜ、アジテータ車へ積み込んだ。練混ぜ時間は、目視およびミキサの電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、アジテータ車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、円柱供試体の採取および模擬柱試験体にコンクリートを打ち込んだ。

表-4 試験項目

分類	試験項目	試験方法等
フレッシュコンクリートの性状*1	スランプフロー	JIS A 1150
	50cm フロー、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、コア供試体）	JIS A 1107 JIS A 1108 材齢7・28・56・91日
	ヤング係数	JIS A 1149
	ポアソン比	
	コンクリート温度履歴	T型熱電対による

*1フレッシュ試験は、練上がり時および荷卸し時に実施した。

表-5 フレッシュ試験結果

調査名*1	スランプフロー (cm)	50cm フロー 時間 (秒)	停止時間 (秒)	O ロート (秒)	空気量 (%)	C.T. (°C)	塩化物量 (kg/m ³)
SU13.0	77.5	5.8	108.4	21.2	1.1	34	0.06
SU12.5	71.5	9.5	120.4	40.4	1.1	35	0.05
SU12.0	73.5	5.9	88.8	36.1	1.1	33	0.06
HU13.0	80.5	4.9	150.8	21.3	1.4	22	0.06
HU12.5	71.5	9.8	125.6	39.2	1.2	23	0.05
HU12.0	76.5	8.2	141.8	37.6	1.2	23	0.05
WU13.0	69.0	3.5	163.0	19.7	1.0	14	0.09
WU12.5	78.5	6.6	180.0	21.6	1.2	16	0.09
WU12.0	73.0	5.1	151.0	17.4	1.1	14	0.09

*1 調査名のSは夏期、Hは標準期、Wは冬期を表す。

3. フレッシュコンクリートおよび温度履歴の結果

打ち込み時のフレッシュ試験結果を表-5に示す。いずれのシーズンにおいても、スランプフロー70±10cm、空気量1.0±1.0%の目標値をほぼ満足する結果となった。

3シーズン（夏期、標準期、冬期）におけるコンクリート温度履歴（W/B=12.5%）を図-2に、コンクリート最高温度（W/B=12.5%）を表-6に示す。通常養生の中央部の最高温度を比較すると、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。断熱養生の中央部の最高温度では、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。断熱養生することで、通常養生よりコンクリート温度が上昇し、また、外気温の影響を受けにくくなり、冬期においても夏期と同等なコンクリート温度履歴を与えることができる。今回は、図に示していないが、その他の水結合材比13.0%および12.0%についても、12.5%とほぼ同様な傾向の温度履歴となった。

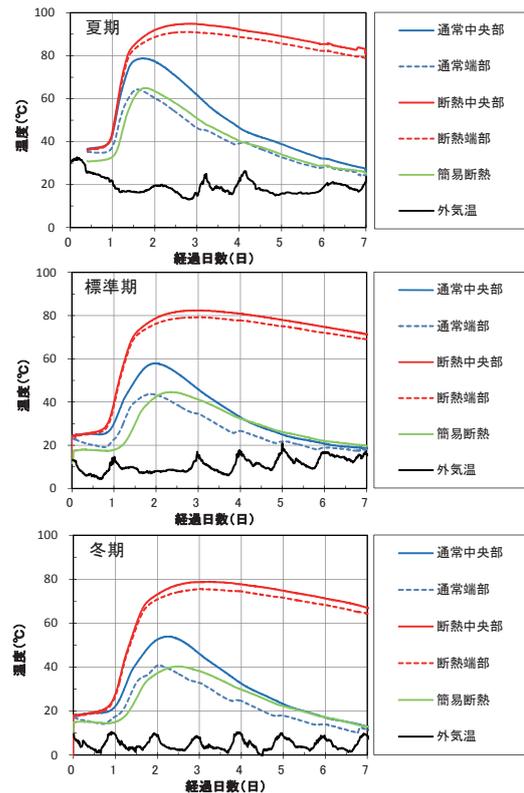


図-2 コンクリート温度履歴 (W/B=12.5%)

表-6 コンクリート最高温度 (W/B=12.5%)

打ち込み時期	通常養生		断熱養生		簡易断熱
	中央部	端部	中央部	端部	
夏期	78.8	64.3	94.9	91.1	65.0
標準期	57.9	43.7	82.4	79.3	44.7
冬期	53.9	41.0	78.9	75.5	40.3

4. 硬化コンクリートの実験結果

4.1 圧縮強度

W/B=13.0、12.5、12.0%の各季節における圧縮強度試験結果を図-3に示す。W/B=12.5%において、標準養生は、各季節とも材齢91日ではほぼ200 N/mm²に達しており、簡易断熱養生は、通常養生コアと同等以上となった。材齢91日では、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、200N/mm²を満足した。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32.8N/mm²大きくなり、断熱養生することにより、約30N/mm²圧縮強度が増加した。打ち込み時期ごとの比較では、夏期、標準期、冬期の順に強度は大きくなり、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。断熱養生コアおよび40℃温水養生は、材齢28日以降の強度増進はほとんどなかった。W/B=13.0%および12.0%においても、12.5%と同様な傾向がみられた。W/B=12.5%の各季節におけるコア強度と積算温度の関係を図-4に示す。ここでの積算温度は、材齢28日までは柱試験体の中心部と端部の平均温度より日平均養生温度を求めて積算した値とし、材齢29日以降は外気温により日平均気温として積算した値とした。全体的には積算温度が大きいほど高いコア強度を示しているが、打設季節と養生の影響が大きく、材齢28日以降の強度増進は、通常養生で積算温度の増加につれて10.1~16.6N/mm²増加するが、断熱養生ではほとんど増加しない。91日コア強度と14日平均養生温度の関係を図-5に示す。ここで平均

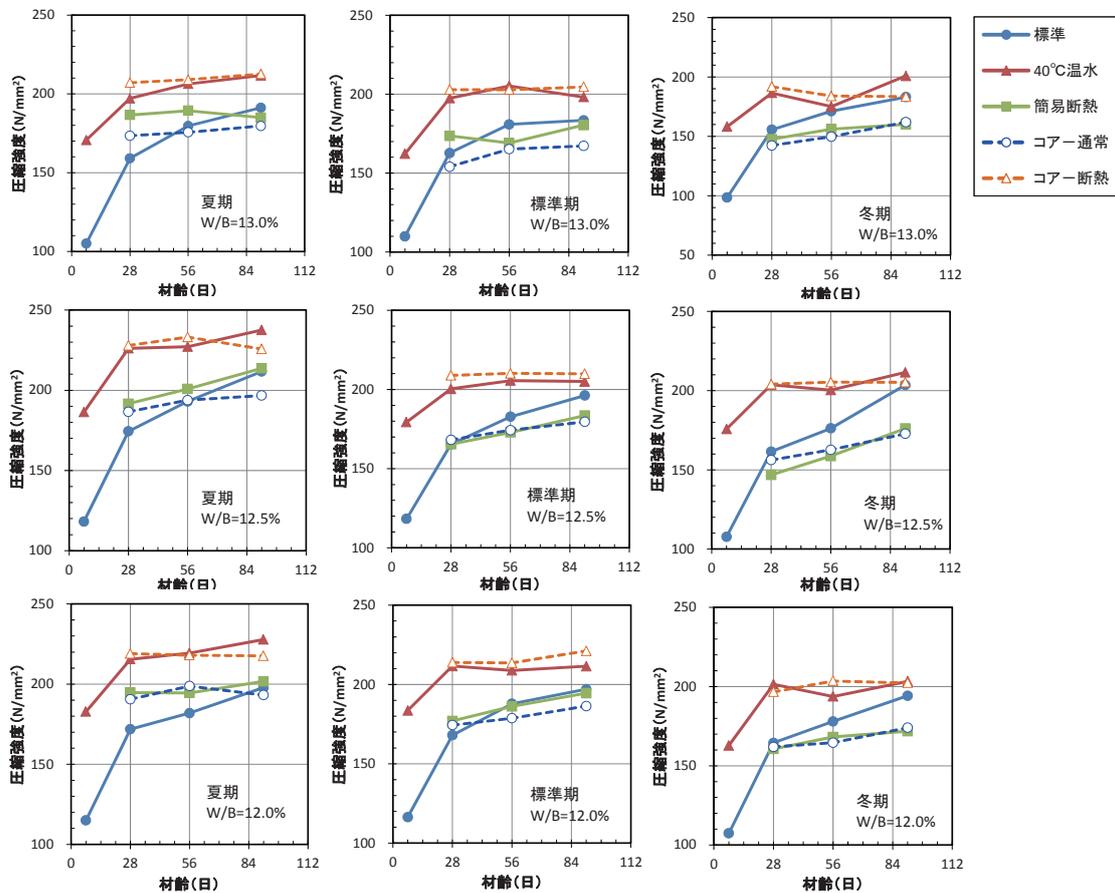


図-3 圧縮強度試験結果 (W/B=13.0、12.5、12.0%)

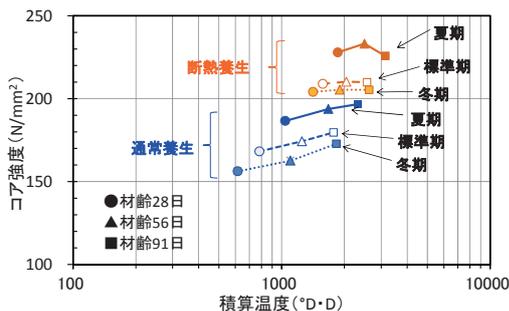


図-4 コア強度と積算温度の関係 (W/B=12.5%)

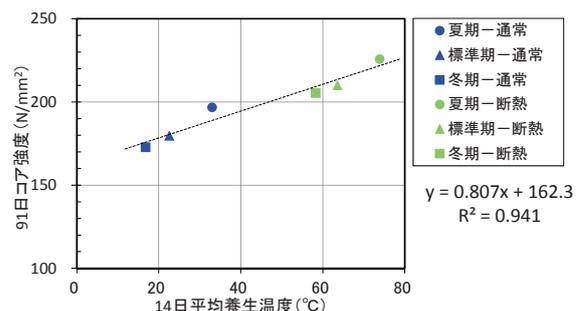


図-5 91日コア強度と14日平均養生温度の関係

養生温度は、上記の積算温度を平均養生温度に換算しなおしたものである。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 $R^2=0.941$ ）があった。また、図には示していないが材齢28日も同様であった。したがって、材齢14日までの初期に高温履歴を与えることで圧縮強度が大きく増進すると考えられる

4.2 コア供試体圧縮強度分布

W/B=12.5%におけるコア供試体圧縮強度の累積度数分布を図-6に示す。図中に平均値、標準偏差、尖度、歪度、正規分布曲線（それぞれの平均値および標準偏差を用いた）を示す。高強度コンクリートでは、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⁵⁾、今回の試験結果では、おおむね正規分布に近い分布を示した。また、変動係数の平均値は4.5%であり、Fc130N/mm²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⁶⁾ほぼ同等の値となり、Fc200N/mm²級においても、変動係数は大きくならないと思われる。

4.3 ヤング係数

ヤング係数と圧縮強度の関係を図-7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）をあわせて図中に示す。200N/mm²を超える領域においてもヤング係数は推定式の±10%の範囲であり、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。

4.4 ポアソン比

ポアソン比と圧縮強度の関係を図-8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みられた。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⁷⁾より小さい値となった。

5. まとめ

本研究では、200N/mm²級超高強度コンクリートの実用化を目的とし、3シーズンにおいて実大柱実験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- 1) Fc200N/mm²級超高強度コンクリートにおいても、スランプロー70±10cm、空気量1.0±1.0%の目標値を満足し、所要のフレッシュ性状を得られた。
- 2) 柱試験体の温度履歴は、断熱養生をすることで、通常養生より温度が上昇し、冬期においても夏期と同等な温度履歴を与えることができた。

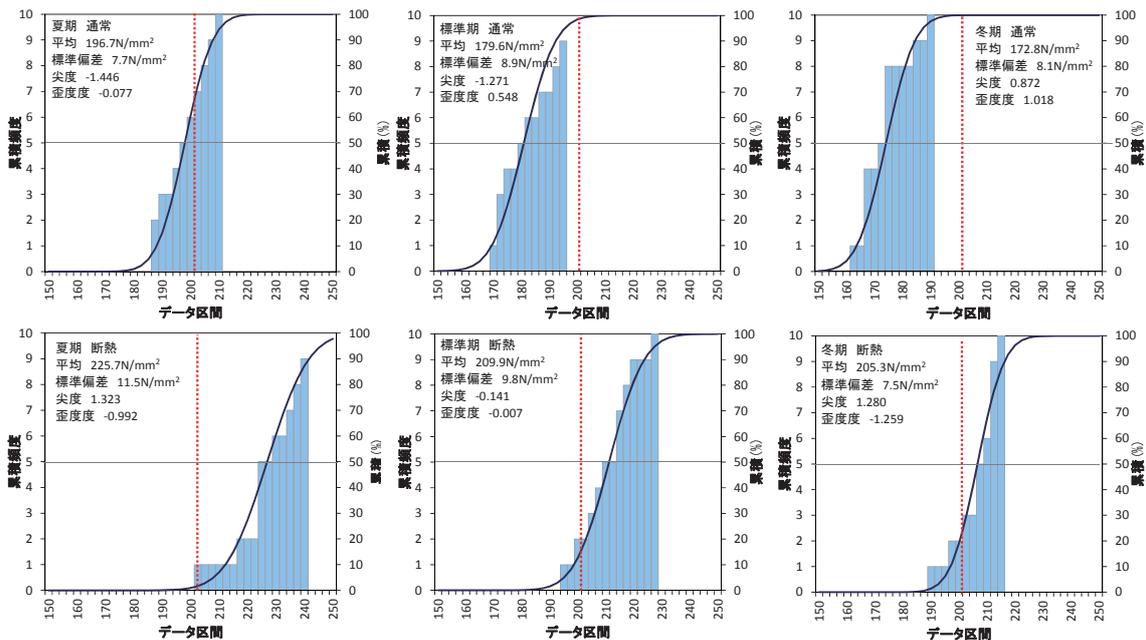


図-6 コア供試体圧縮強度の累積度数分布 (W/B=12.5%)

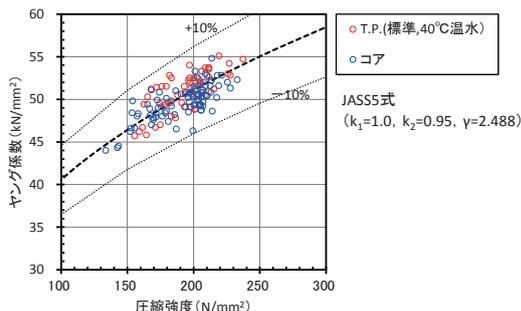


図-7 ヤング係数と圧縮強度の関係

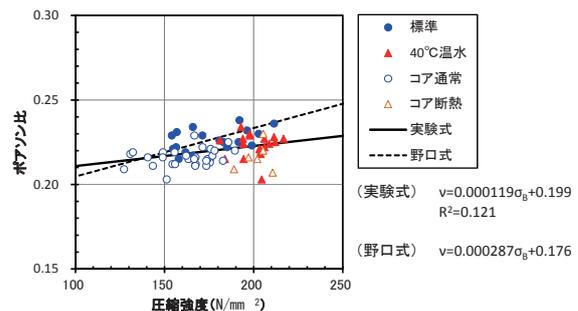


図-8 ポアソン比と圧縮強度の関係

- 3) 断熱養生で構造体コンクリートに材齢初期に高温履歴を与えることで、通常養生より圧縮強度は 30N/mm^2 程度上昇し、いずれの季節も 200N/mm^2 以上を得られた。
- 4) コア供試体圧縮強度の分布は、おおむね正規分布を示した。
- 5) $\text{Fc}200\text{N/mm}^2$ 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。
- 6) 140N/mm^2 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。

参考文献

- 1) 井戸他：鋼繊維補強した超高強度コンクリートの基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、A-1、pp.527-528、2008.9
- 2) 井戸他： 200N/mm^2 級超高強度コンクリートの基礎的研究（その1 試し練り実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、A-1、pp.997-998、2010.9
- 3) 梅本他： 200N/mm^2 級超高強度コンクリートの基礎的研究（その2 実機製造・小型柱実験）、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、A-1、pp.999-1000、2010.9
- 4) 石中他：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
- 5) 鈴木他：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
- 6) 一瀬他：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
- 7) 野口他：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係、日本建築学会構造系論文集、第472号、pp.11-16、1995.6

謝辞

本研究を行うにあたり、晴海小野田レミコン、竹本油脂ならびに TRD に協力を得ました。付記して謝意を表します。