

# 高強度コンクリートの力学特性に関する実験的研究

## Experimental Research of Dynamic Characteristics of High-Strength Concrete

河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI

西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO

本研究では、これまでに報告例の少ない圧縮強度  $100\text{N/mm}^2$  から  $180\text{N/mm}^2$  の範囲の超高強度コンクリートを対象に、圧縮強度のほか、引張強度、単位容積質量、および変形性能の各種力学特性について確認を行った。

その結果、力学特性について以下の知見を得た。1)力学特性は養生方法の影響を受けない。

2)力学特性は New RC 報告の延長として評価できる。

キーワード：高強度コンクリート、圧縮強度、力学特性

The various dynamic characteristics of high-strength concrete were investigated. The characteristics are the compressive strength, the tensile strength, the density and the transformation performance.

The results are as follows. 1) The dynamic characteristics are not influenced by the care method.

2) The dynamic characteristics can be evaluated as an extension of result of the New RC report.

**Key Words:** High-Strength Concrete, Compressive Strength, Dynamic Characteristics

### 1. はじめに

高強度コンクリートを使用する RC 構造物の設計基準強度 ( $F_c$ ) として、 $60\text{N/mm}^2$  が定着しこれまでに数多くの設計がなされている。

現在、構造設計に用いられている高強度コンクリートの力学的な特性は、主に旧建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」（通称 New RC，以下 New RC と称す）で得られた成果である。New RC は、実強度で  $100\text{N/mm}^2$  程度までの高強度コンクリートについて、確認実験を行い得られた成果である。すなわち、すでに施工例が増加しつつある設計基準強度  $100\text{N/mm}^2$  や、今後発生すると考えられる設計基準強度  $100\text{N/mm}^2$  を超える超高強度コンクリートは、New RC の主要検討範囲の外にあるといえ、New RC データの延長で評価することが可能であるか確認するとともに、データの蓄積を行う必要があると考えられる。

そこで、設計基準強度  $120\text{N/mm}^2$  の超高強度コンクリートの大臣認定を取得するための確認実験を行った際、併せていくつかの力学特性についても確認実験を行った。本報では実験結果について報告を行う。

### 2. 使用材料とコンクリート

使用材料とその諸物性を表-1に示す。結合材は、低熱ポルトランドセメント（Lセメント）を主たる結合材とし、シリカフューム（SF）を質量の内割りで10%置換した結合材（LSF）である。細骨材は鬼怒川産の川砂を使用し、粗骨材は葛生産の硬質砂岩を使用した。化学混和剤は、超高強度コンクリート用の高性能減水剤を使用した。この高性能減水剤は、JIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」に規定される試験方法である単位セメント量が  $320\text{kg/m}^3$  という条件では、使用量が少なすぎるため経時変化に関する規定が満足できず、規格上は減水剤に分類される。

コンクリートの調合概要を表-2に示す。性状の比較を容易にするため、単位水量と単位粗骨材かさ容積、そして目標空気を統一した。コンクリートの結合材水比（B/W）は、3.3 から 7.0 までの範囲で7水準とした。

コンクリートの練混ぜは、すべて  $100\ell$  の強制2軸ミキサを用いて行い、練混ぜ量は  $50\ell$  から  $80\ell$  の範囲とした。コンクリートの練混ぜ順序を図-1に示す。練混ぜ時間は、コンクリート性状を確認しながら調整したがモルタルが練り上がるまでの時間に大きな差がみられ、モルタル練混ぜに要する時間は、90秒程度から 300 秒と幅広

表-1 使用材料と物性

			諸物性			記号
			密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)		
結合材	セメント 混和材	低熱ポルトランドセメント	3.24	3290		L
		シリカフェューム	2.20	226000		SF
			表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	
骨材	細骨材	栃木県鬼怒川産 川砂	2.58	2.68	2.75	S
	粗骨材	栃木県葛生産 硬質砂岩砕石	2.67	0.97	6.47	G
化学混和剤		高性能減水剤	ポリカルボン酸系			SP

表-2 コンクリート概要

結合材種類	結合材水比 (B/W)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	目標空気量 (%)
LSF	3.3, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 7.0	150	0.525	2.0

順序	作業	時間
1	結合材と細骨材を投入して空練り	10秒
2	混和剤を添加した水を入れてモルタル練り	90~300秒
3	粗骨材を投入して本練り	90~180秒

図-1 練混ぜ手順

表-3 検討養生

検討事項		供試体種類		
		標準養生	20℃封かん	コア
圧縮強度		○	○	○
割裂引張強度		○		
単位容積質量		○	○	○
静弾性係数		○	○	○
ポアゾン比		○		
最大荷重時の歪み		○	○	○

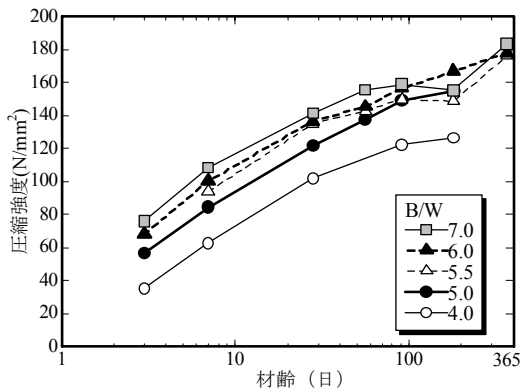


図-2 標準養生の強度発現

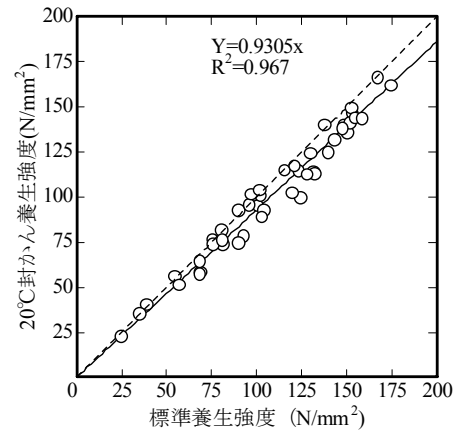


図-3 標準養生と封かん養生

い。一方、粗骨材を投入してからの本練りは90~180秒で充分であった。

### 3. 実験結果

確認を行った硬化コンクリートの力学特性や物性と、供試体種類の一覧を表-3に示す。コア供試体は、500×500×400mmの無筋コンクリートを厚さ100mmの断熱材で二重に覆った小型試験体より、湿式のコアマシンを用いて採取し、切断、研磨を行った。各確認事項についての結果は圧縮強度を基準として評価を行う。

検討に当たっては、過去に確認実験を行った普通ポルトランドセメント（Nセメント）や、Lセメントのデー

タを必要に応じて併せて示す。

#### (1) 圧縮強度

標準養生供試体の強度発現の一例を図-2に示す。材齢1年までの範囲では、圧縮強度は結合材水比（B/W）に関わらず材齢に伴い増加する傾向にあることを確認できる。若材齢では、圧縮強度に結合材水比の差が明確に現れるが、長期材齢では、結合材水比の差は小さくなる。特に、材齢365日になると結合材水比が5.5以上の3割合では、圧縮強度は180N/mm<sup>2</sup>に達しほぼ一致している。

標準養生強度と20℃封かん養生強度との関係を図-3に示す。両者の間にはよい相関関係がみられ、式（1）に

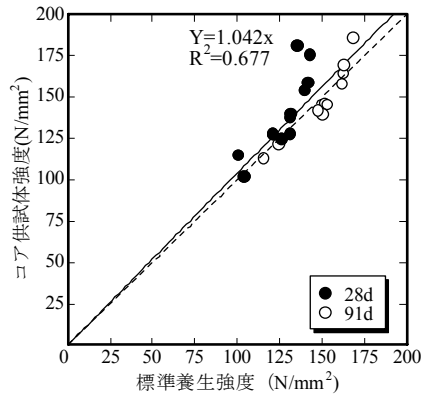


図-4 標準養生とコア

示す原点を通る一次式で回帰できた。

$$y = 0.9305x \quad (1)$$

y : 20℃封かん圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

x : 標準養生圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

今回の実験では、20℃封かん養生強度は標準養生強度に比べ、約 7% 強度が低くなるという結果が得られた。若材齢から、組織が非常に密となる超高強度コンクリートであっても、標準養生では周囲の水が供試体内部に浸透し、封かん養生と比較して強度増加をもたらしたと考えられる。

標準養生強度とコア強度との関係を図-4に示す。原点を通る一次式で回帰すると式(2)となり、コア強度は標準養生より高い傾向にある。

$$y = 1.042x \quad (2)$$

y : 20℃封かん圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

x : 標準養生圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

また、材齢28日と91日のどちらの材齢においても、高強度になるほどコア強度と標準養生強度との差が大きくなり、その傾向は、特に材齢28日においてより顕著にみられる。このように、特殊な強度発現がみられる原因として、コアを採取した小型試験体では、初期の水和熱により試験体最高温度が50～70℃にまで到達するなど、初期高温履歴を受けていることが考えられる。しかし、温度履歴が、強度発現に与える影響についての定量的な検討は今後の課題である。

## (2) 割裂引張強度

標準養生を行った供試体について、圧縮強度と割裂試験による割裂引張強度との関係を図-5に示す。図中の白抜きのプロットは、結合材をLSFとした本実験における超高強度コンクリートの結果を示している。一方、黒塗りのプロットは、過去に行ったNセメントの結果を示している。本実験において、割裂引張試験に用いた供試体の寸法はφ100×200mmで、JIS A 1113「コンクリート

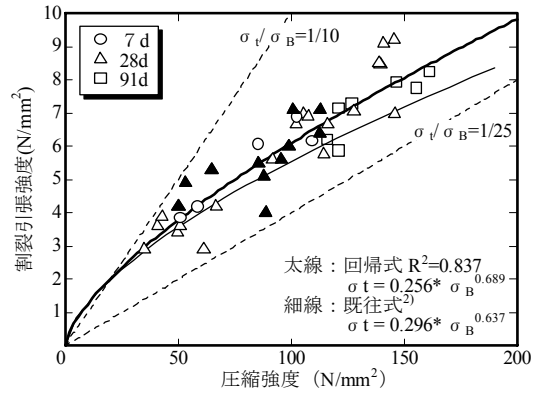


図-5 圧縮強度と割裂引張強度

の割裂引張強度試験方法」(1999)に試験に用いる円柱供試体の直径として定められている、粗骨材の最大寸法の4倍以上、かつ15cm以上という規定より小さい。しかし、供試体寸法がφ150×200mmとφ100×200mmでは、得られる割裂引張強度は同等とみなすことができるという報告<sup>6)</sup>があることから、今回は供試体寸法に起因する影響はないと仮定して検討を行った。

今回の実験で、圧縮強度と割裂引張強度との関係を示す回帰式(図中太線)は、式(3)で表された。

$$\sigma_t = 0.256 \times \sigma_B^{0.689} \quad (3)$$

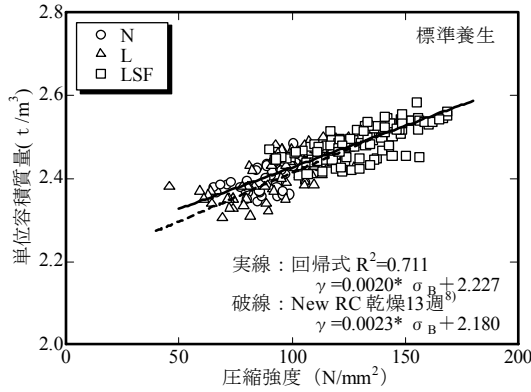
$\sigma_t$  : 割裂引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_B$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

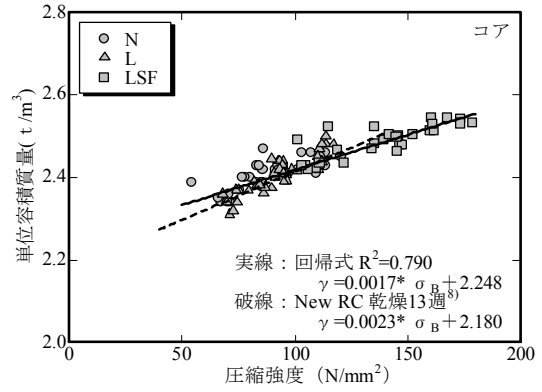
本実験での回帰線は、既往の研究報告<sup>2)</sup>による回帰線より若干高いが差は小さく、ほぼ一致していると判断できる。差が生じた原因としては、骨材種類の違いや粒径の影響などが考えられる。New RC 報告書<sup>8)</sup>において、圧縮強度に対する引張強度の比は、1/10～1/25の範囲にあり、高強度になるほど引張強度の比は小さくなっていくと報告されている。図-5中に、1/10と1/25の直線を示すと、本実験の結果もNew RC 報告の範囲内にあり分布傾向も一致している。今回、引張強度の比は、圧縮強度が100N/mm<sup>2</sup>では約1/16で、圧縮強度が180N/mm<sup>2</sup>では約1/20となった。

## (3) 単位容積質量

コンクリートの圧縮強度と、単位容積質量との関係について、標準養生供試体(a)とコア供試体(b)に分けて図-6に示す。なお、図中にはNセメントや、Lセメントを用いた高強度コンクリートの結果を併せて示す。今回、圧縮強度と単位容積質量との関係には、標準養生供試体とコア供試体という養生方法の差は確認できなかったため全試験結果を対象に回帰を行うと、圧縮強度と単位容積質量との関係は式(4)で表された。

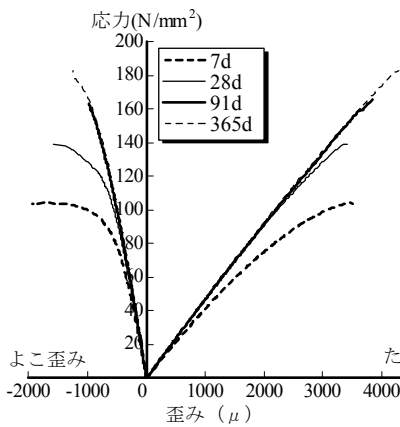


(a) 標準養生供試体

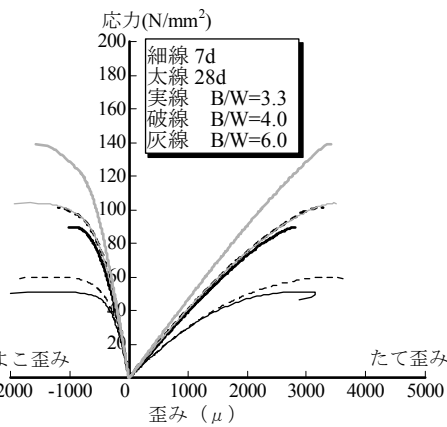


(b) コア供試体

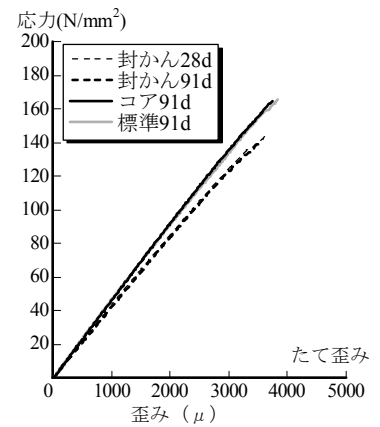
図-6 圧縮強度と単位容積質量



(a) 標準養生 (材齢の相違)



(b) 標準養生 (結合材水比の相違)



(c) 養生の相違

図-7 応力-歪み曲線

$$\gamma = 0.0019 \times \sigma_B + 2.235 \quad (4)$$

$\gamma$  : 単位容積質量 (t/m<sup>3</sup>)

$\sigma_B$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

本検討の回帰線は、New RC 報告による回帰線<sup>8)</sup>とほぼ一致している。回帰式によると、コンクリートの圧縮強度と単位容積質量関係はほぼ直線状となり、圧縮強度が50N/mm<sup>2</sup>から180N/mm<sup>2</sup>まで増加すると、単位容積質量はおおよそ2.35t/m<sup>3</sup>から2.60t/m<sup>3</sup>近くまで増加する。しかし、養生方法にかかわらず実験値は回帰線に対して±0.10t/m<sup>3</sup>程度という大きなばらつきの範囲を持っている。

#### (4) 変形能力

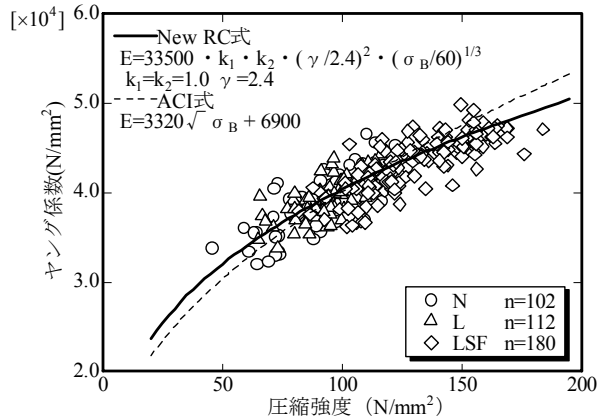
##### a) 歪み量

コンクリートの応力歪み曲線の例を図-7に示す。左から、結合材水比が6.0で標準養生を行った供試体を4材齢で比較した結果(a)、3種類の結合材水比の標準養生供試体を比較した結果(b)、および、結合材水比が6.0で3種の養生を行った供試体を比較した結果(c)である。

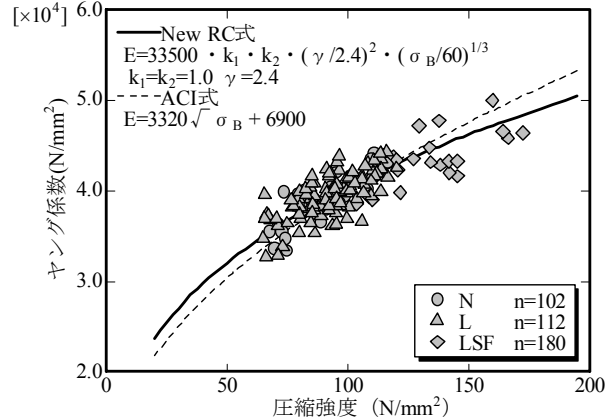
(a)において、たて歪み曲線をみると、低応力範囲にみられる直線部分の勾配は、材齢7日より材齢28日以降のほうが大きく、材齢28日以降は一致している。また、材齢91日と365日では、応力歪み曲線はほとんど直線状となり、曲線部分がないまま脆性的に破壊する。高強度コンクリートでは、最大荷重時のたて歪み量と破壊時のたて歪み量が一致する。たて歪み量は材齢に伴う強度発現とともに増加し、長期材齢においては3500μ以上に達した。

よこ歪み曲線もたて歪みと同様に材齢に伴い直線的になる。また、最大荷重時のよこ歪み量は、たて歪み量とは逆に最大応力の増加に伴い減少していく傾向が確認できた。

(b)において、結合材水比が比較的小さいコンクリートの応力歪み曲線は、若材齢時は勾配が小さく曲線的で、最大荷重に近づいたときの歪みの増加量が多い。同一材齢であれば結合材水比が大きいほど、同一結合材水比であれば材齢が大きくなるほど、応力ひずみ曲線の直線部分の勾配は大きくなり、また、より脆性的になる。



(a) 標準養生供試体



(b) コア供試体

図-9 圧縮強度とヤング係数

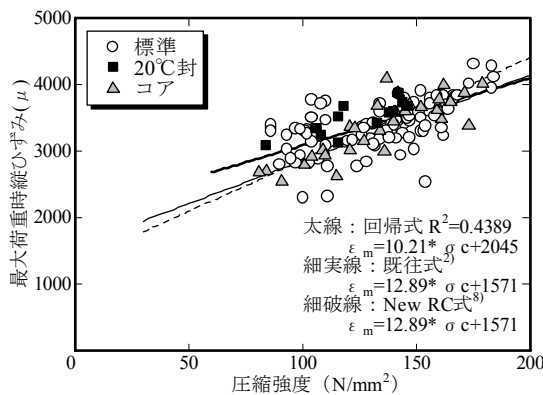


図-8 圧縮強度と最大荷重時歪み

(c) において、今回の実験では応力ひずみ曲線には養生の差はほとんど現れていないことが確認できる。また、圧縮強度がほぼ等しい標準養生供試体とコア供試体の応力ひずみ曲線は一致した。

LSFシリーズにおけるコンクリートの圧縮強度と、最大荷重時のたて歪み量との関係を図-8に示す。図-7において、応力歪み曲線には養生方法による差は確認できなかったため、図中には検討を行った全ての養生方法の結果を併せて示している。養生方法にかかわらず、たて歪み量は、大きなばらつきを持っているが圧縮強度の増加とともに増加する傾向があり、圧縮強度が 120N/mm<sup>2</sup> を超えると最大荷重時のたて歪み量が4000 μを超える結果もみられる。すべての試験結果について、圧縮強度と最大荷重時のたて歪み量との関係を回帰すると式(5)で表された。

$$\epsilon_m = 10.12 \times \sigma_B + 2078 \quad (5)$$

$\epsilon_m$  : 最大荷重時のたて歪み ( μ )

$\sigma_B$  : 圧縮強度 ( N/mm<sup>2</sup> )

本実験の回帰結果を既往式<sup>2)</sup>やNew RC式<sup>8)</sup>と比較すると低強度域で若干の相違がみられる。これは、既往の研究<sup>2)</sup>やNew RC<sup>8)</sup>では、圧縮強度が50N/mm<sup>2</sup>以下の低強

度域までを検討範囲としているため、低強度範囲の試験値を反映したと考えられる。今回の実験で主要な検討領域としている 100N/mm<sup>2</sup> 以上の範囲に限れば、今回帰結果は既往式やNew RC報告との間に大きな差はないと判断できる。

b) ヤング係数

標準養生供試体とコア供試体について、それぞれ圧縮強度とヤング係数との関係を図-9に示す。なお、ヤング係数は1/3割線法により算出した。図中には、LSFとともに、NセメントとLセメントの結果を併せて示している。標準養生供試体とコア供試体ともに、ヤング係数は圧縮強度が同じでも最大で10000N/mm<sup>2</sup>に及ぶ大きなばらつきを持っている。圧縮強度とヤング係数の関係は、結合材の種類によって連続性が途切れることはなく、また、標準養生とコアという養生方法の違いも確認できなかった。

図中に示した関係式は、式(6)で表されるNew RC式の係数 $k_1$ ,  $k_2$ に1.0を入力し、単位容積質量 $\gamma$ に2.4を入力した結果と、式(7)で表されるACI式である。

$$E = 33500 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{1/3} \quad (6)$$

$$E = 3320 \sqrt{\sigma_B} + 6900 \quad (7)$$

E : ヤング係数 ( N/mm<sup>2</sup> )

$k_1$  : 粗骨材に関する係数

$k_2$  : 結合材に関する係数

$\gamma$  : 単位容積質量 ( t/m<sup>3</sup> )

$\sigma_B$  : 圧縮強度 ( N/mm<sup>2</sup> )

なお、New RC式は、シリカフュームを混和材として用いたLSFシリーズは、 $k_2$ には0.95を入力するべきであるが、NセメントやLセメントと併せて検討を行ったため、今回は1.0を入力した曲線を示した。

既往の算定式である，New RC 式と ACI 式のどちらの式を用いても，圧縮強度とヤング係数との関係を概ね評価できるが，圧縮強度が 120N/mm<sup>2</sup> 以上の超強度領域になると，ACI 式は実験値よりも高めの値を示すようになる。一方，New RC 式では前述の係数を入力すると，広い強度範囲で実験値を良好に評価できている。

c) ポアソン比

標準養生供試体の，圧縮強度とポアソン比との関係を図-10に示す。図中には，式(8)で表される本実験での回帰線と，既往の研究<sup>2)</sup>による回帰線とを併せて示す。

$$\nu = 0.000314 \times \sigma_B + 0.178 \quad (8)$$

$\nu$  : ポアソン比

$\sigma_B$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

両回帰線はほとんど一致しており，ポアソン比は，圧縮強度の増加に伴い直線的に大きくなる傾向があることを確認できる。また，試験結果のばらつきも比較的小さい。本回帰式では，ポアソン比は圧縮強度が 50N/mm<sup>2</sup> では 0.19 程度となり，150N/mm<sup>2</sup> では 0.23 程度となった。

4. まとめ

本実験によって得られた，超高強度コンクリートの強度発現と，各種物性についての知見を以下にまとめる。

- 1) 圧縮強度 標準養生に比べ 20℃ 封かん養生は，7% 程度強度が小さくなる。コア強度は標準養生と単純に比較できないが，標準強度より高い傾向にある。
- 2) 割裂引張り強度 圧縮強度の増加に伴い増加するが，圧縮強度に対する比は減少していく。
- 3) 変形能力 最大荷重時のたて歪み量は圧縮強度に比例し 4500 $\mu$  に達する。また，高強度になるほど応力歪み曲線は直線状になる。
- 4) ヤング係数 圧縮強度の増加に伴い増加する。ヤング係数は，New RC 式に単位容積質量 2.4 を入力すると比較的良好に評価できる。
- 5) ポアソン比 圧縮強度の増加に伴い増加する。
- 6) 単位容積質量 圧縮強度の増加に伴い増加していき 180N/mm<sup>2</sup> のコンクリートでは 2.55t/m<sup>3</sup> に及ぶ。

今回，確認した超高強度コンクリートの力学特性や実験値の回帰線には，養生方法による相違は確認できなかった。また，New RC 報告や既往研究報告とほぼ一致し New RC の延長で概ね評価できると判断された。

今後は，これまでに確認できていない物性，収縮量やクリープについての確認実験を行い，超高強度コンクリートの硬化物性についてさらに検討を行う所存である。

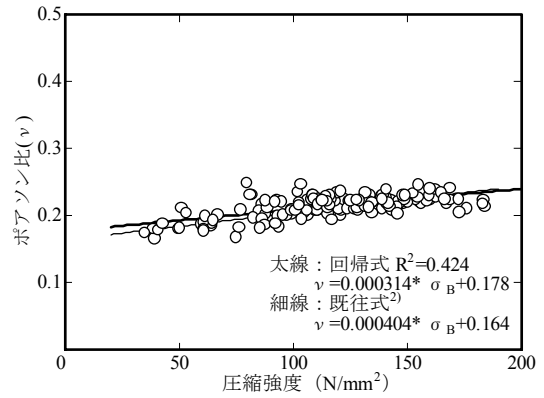


図-10 圧縮強度とポアソン比

謝辞：本プロジェクトを行うに当たり，貴重なアドバイスをいただきました宇都宮大学榊田佳寛教授，貴重なデータやサンプルを提供していただきました，住友大阪セメント(株)，東京SOC(株)芝浦工場，(株)ポゾリス物産，および日本シーカ(株)の関係諸氏に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 榊田佳寛，佐藤幸恵ほか：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，第 537 号，pp13-20，2000.11
- 2) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学性状との関係，日本建築学会構造系論文集，第 472 号，pp11-16，2000.11
- 3) 河上浩司，西本好克：Fc100N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度コンクリートの強度発現性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.369-374，2002
- 4) 河上浩司，西本好克ほか：高強度コンクリートの初期発熱と強度発現性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol23，No.2，pp.1057-1062，2001
- 5) 西本好克，河上浩司：構造体コンクリート強度の管理手法(その3) - 超高強度コンクリートの強度発現と強度補正值の算出方法 -，住友建設技術研究所報，No.29，pp.97-104，2002
- 6) 陣内 浩，榊田佳寛ほか：コンクリートの割裂引張試験における供試体寸法の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.713-714，2003.9
- 7) 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，1997，2003
- 8) 建設省総合技術開発プロジェクト 鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発，平成 4 年度 高強度コンクリート分科会報告書，1993.3