

# 報告 150N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートに関する実用化研究

松本 信也<sup>\*1</sup>・大野 俊夫<sup>\*2</sup>・坂井 吾郎<sup>\*3</sup>・盛田 行彦<sup>\*4</sup>

要旨：自己収縮低減対策を施した 150N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートを実構造物に適用するため、ポンプ圧送性試験やコア強度試験体を用いた圧縮強度試験を実施した。その結果、従来のコンクリートと比較して、管内圧力損失は大きい、吐出量を適切に設定すれば、フレッシュ性状を大きく変化させることなく、良好なポンプ圧送性を得ることが確認された。また、コア強度試験体の圧縮強度は、高温履歴を受けた場合においても、長期材齢で標準養生と同等以上となることが確認された。

キーワード：超高強度コンクリート，ポンプ圧送性，水セメント比，圧縮強度

## 1. はじめに

近年，土木分野においても，コンクリート構造物の軽量（スリム）化，高耐久化，長寿命化等のニーズの高まりにより，設計基準強度 100N/mm<sup>2</sup> を超える超高強度コンクリートの需要が増加している。

これまで，著者らは，材齢 56 日で圧縮強度 150N/mm<sup>2</sup> 以上（設計基準強度 120N/mm<sup>2</sup> 以上）の超高強度コンクリートの開発を進めてきた。その際，圧縮強度の他に，以下の 3 点を開発の目標とした。

- (1) 自己収縮やセメントの水和熱が小さく，ひび割れ抵抗性に優れること
- (2) 施工性に優れること
- (3) 経済性に優れること

自己収縮については，これまで，粗骨材の一部に人工軽量骨材を使用すること，混和剤に収縮低減剤を使用すること，などにより 150N/mm<sup>2</sup> 以上の圧縮強度を確保しつつ，自己収縮を低減可能であることを確認している<sup>1)</sup>。一方，実用化で重要となる現場打ち工法への展開を考慮する場合，ポンプ圧送性に関する評価が不可欠であると考えられる。圧縮強度 100N/mm<sup>2</sup> 以下の高強

度コンクリートを対象とした場合には，一般的に，粘性の増大に伴い管内抵抗やポンプの圧送負荷が増大すること，圧送後の流動性や粘性が低下する傾向にあること等が知られている<sup>2)</sup>。しかしながら，設計基準強度 100N/mm<sup>2</sup> を超える超高強度コンクリートや人工軽量骨材を用いた超高強度コンクリートでは，ポンプ圧送性に関する報告が，極めて少ないのが現状である。

そこで，今回は，自己収縮を低減した超高強度コンクリートのポンプ圧送性をとりあげ，圧送におけるポンプの圧送負荷，管内抵抗，圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状，硬化性状の変化について検討を実施した。また，マッシュなコア強度試験体を用いた圧縮強度試験を実施し，マス養生下における強度発現性状についても検討を実施した。

## 2. 実験内容

### 2.1 実施時期

ポンプ圧送性試験は 2004 年 6 月，コア強度確認試験は 2004 年 8 月といずれも夏季に実施した。

### 2.2 コンクリートの仕様および使用材料

表 - 1 に本実験に使用したコンクリートの仕

---

\*1 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ主任研究員 工修（正会員）  
 \*2 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ上席研究員 工博（正会員）  
 \*3 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ主任研究員 工学（正会員）  
 \*4 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ研究員 工修（正会員）

様を、表 - 2 に使用材料を示す。人工軽量骨材以外は、全て市販の材料を使用した。

### 2.3 コンクリートの配合

表 - 3 にコンクリートの配合を示す。単位量当りの粗骨材容積 ( $G_{vol}$ ) は、300, 330L/m<sup>3</sup> とし、圧縮強度と自己収縮低減のバランスを考慮して、人工軽量骨材を 60L/m<sup>3</sup> (粗骨材容積率で約 20%確保) とした。また、これと併用して収縮低減剤を 0.5% ( $C \times \%$ ) 添加した。なお、基本配合は、コア強度試験に使用する配合とし、ポンプ圧送性試験では、より圧送条件を厳しくするため、粗骨材容積の多い配合とした。

### 2.4 コンクリートの製造方法

表 - 4 にコンクリートの製造方法を示す。練

表 - 1 コンクリートの仕様

項目	規格	備考
設計基準強度	120N/mm <sup>2</sup>	材齢 56 日
配合強度	150N/mm <sup>2</sup>	"
水セメント比	17%	
スランブフロー	650 ± 50mm	保持時間 120 分
空気量	1.5 ± 0.5%	
自己収縮量	100 ~ 200 × 10 <sup>-6</sup>	材齢 3 日

表 - 2 コンクリートの使用材料

材料名	記号	種類・物性等
水	W	水道水
セメント	C	シリカუმを混入したセメント, 密度: 3.08g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 6,000cm <sup>2</sup> /g 以上
細骨材	S	安山岩砕砂, 表乾密度: 2.60g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 1.88%, 粗粒率: 2.86
粗骨材	G	安山岩砕石, 表乾密度: 2.67g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 1.16%, 粗粒率: 6.76
	JL	人工軽量骨材 (石炭灰人工骨材) 表乾密度: 1.81g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 16.5%
混和剤	RA	収縮低減剤, 低級アルコール系
	SP	高性能 AE 減水剤, ポリカルボン酸系
	DA	消泡剤, アルコール系

表 - 3 コンクリートの配合

摘要	$G_{max}$ (mm)	スランブフロー (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	$G_{vol}$ (L/m <sup>3</sup> )	単位量(上段:kg/m <sup>3</sup> , 下段:L/m <sup>3</sup> )					RA (C × %)	SP (C × %)	DA (C × %)
						W	C	S	G	JL			
ポンプ圧送性試験	20	650 ± 50	1.5 ± 1.0	17.1	330	154	899	552	719	108	0.50	1.65	0.10
						154	292	209	270	60			
コア強度試験				17.0	300	155	912	608	634	109	0.50	1.60	0.10
						155	296	234	240	60			

混ぜ時間は、ミキサの負荷電流値を参考に決定した。また、ポンプ圧送性試験では、コンクリートの運搬をアジテータ車とし、ミキサ 2 バッチ分を合わせて 1 台当り合計 4.0m<sup>3</sup> とした。コア強度試験では、1 バッチごとに運搬し、ホッパー打設した。

### 2.5 コンクリートのポンプ圧送性試験

図 - 1 にポンプ圧送時の配管配置図を、写真 - 1 にその配管状況を示す。管径は、コンクリ

表 - 4 コンクリートの製造方法

項目	ポンプ圧送性試験	コア強度試験
使用ミキサ	強制 2 軸式 (容量: 5.0m <sup>3</sup> )	強制 2 軸式 (容量: 1.5m <sup>3</sup> )
練混ぜ量	2.0m <sup>3</sup> / バッチ	0.8m <sup>3</sup> / バッチ
練混ぜ手順	モルタル先練り 粗骨材投入	
練混ぜ時間	モルタル先練り: 120 秒 粗骨材投入後: 240 秒	

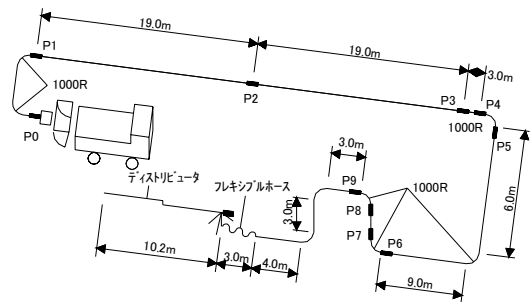


図 - 1 配管配置図



写真 - 1 配管状況写真

表 - 5 圧送性試験における測定項目  
および品質管理項目

測定項目	備考
設定(理論)吐出量	シリンダー容積と時間当たりのストロークタイムから算出
実吐出量	吐出量算定用の型枠打設に要した時間より算出
ポンプ主油圧	圧送が定常状態になった時に測定
ピストン前面圧	ポンプ主油圧とアンロード圧の差分をピストン前面圧換算比で除して算出
管内圧力	配管の圧力計により測定 (P0~P9)
スランプフロー	荷卸し時およびポンプ筒先で測定
空気量	
V <sub>75</sub> 漏斗流下時間	
単位容積質量	
圧縮強度 (7, 14, 28, 56, 91 日)	

ートポンプの吐出口周辺のテーパ管を除いて全て5B(125A)とした。また、ポンプ圧送時の各配管種別ごとの管内抵抗を測定するため、フラッシュダイヤフラム型圧力計を9箇所設置した(図-1中のP0~P9)。P0からP9までの配管実長は70.7m、土木学会「コンクリートのポンプ施工指針」に準じて算定した水平換算長さは97.3mである。なお、全配管の配管実長は約99m、水平換算長さは約145mである。

目標とする設定吐出量は、超高強度コンクリートが、通常のコンクリートに比べて、練混ぜ時間が長く、製造能力が低下することから、15m<sup>3</sup>/h、25m<sup>3</sup>/h、35m<sup>3</sup>/hの3水準に設定した。表-5にポンプ圧送性試験における測定項目および品質管理項目を、表-6にコンクリートポンプの仕様を示す。コンクリートポンプは、圧送負荷が大きいことを想定して、吐出圧が最大クラスの油圧ピストン定置式ポンプを使用した。

2.6 コア強度試験

図-2にコア強度試験体の形状寸法と圧縮強度試験のコア供試体採取位置を、図-3に温度計測位置を示す。試験体は、一辺が1000mmの立方体とした。この周囲は、厚さ500mmの断熱材(発泡スチロール)で覆い、断熱状態に近い状態を再現した。また、試験体の温度履歴は、熱電対を設置して測定した。表-7に品質管理

表 - 6 コンクリートポンプの仕様

吐出シリンダー径	200
油圧シリンダー径	160
ストローク長	2,100 mm
シリンダー容積	65.9 L
ピストン比	1.6
理論最大吐出圧	22 MPa
理論最大吐出量	47 m <sup>3</sup> /h

表 - 7 コア強度試験における品質管理項目

項目	備考
圧縮強度	標準養生供試体: 材齢 7, 28, 56, 91 日 コア強度供試体: 材齢 28, 56, 91 日
コンクリート温度	材齢 28 日まで計測

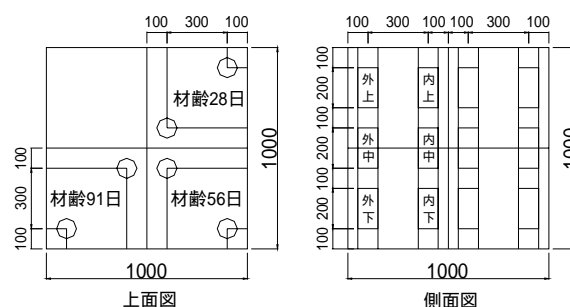


図 - 2 コア強度試験体の形状寸法と採取位置

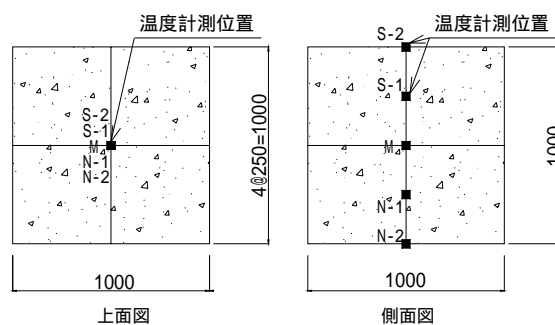


図 - 3 コア強度試験体の温度計測位置

項目を示す。なお、試験体の断熱材による養生は、材齢28日までとした。それ以降は、試験体を断熱材から取り外し、室内にて保管した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 実吐出量実績

表-8に設定吐出量の測定値、実吐出量等の測定結果を示す。設定吐出量は15.8、22.0、31.2m<sup>3</sup>/hであった。また、それに対応する実吐出

量は 13.1, 17.7, 25.0 m<sup>3</sup>/h であり, 吸引効率は 82.7~80.2%と吐出量の増減に対して, ほとんど変化しない結果となった。また, ピストン前面圧は, 最大の設定吐出量 31.2m<sup>3</sup>/h で 12.5MPa であり, ポンプの能力 (22MPa) に対して約半分の圧力であった。したがって, この設定吐出量の範囲では, 本コンクリートは, ポンプに余力を残した状態で, 順調にポンプ圧送ができたと考えられる。ただし, 一般的に使用される最大吐出圧 8MPa 程度以下のコンクリートポンプでは, 設定吐出量が 22.0m<sup>3</sup>/h 以上の場合, 圧送能力が不足すると思われるため注意を要する。

図 - 4 に設定吐出量に対する実吐出量とピストン前面圧の関係を示す。設定吐出量が 15.8~31.2m<sup>3</sup>/h の範囲では, 実吐出量やピストン前面圧との間に, ほぼ直線関係が認められた。したがって, この吐出量の範囲であれば, 吐出量の設定に比例して, 施工効率が増加すると思われる。

### 3.2 管内圧力損失

図 - 5 に設定吐出量と単位長さ当りの水平圧力損失の関係を示す。図中には, 土木学会「シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針 (案)」資料編に記載される, 水セメント比 25%のコンクリートでシリカフュームを混入した場合 (セメント量の 10%を顆粒状のシリカフュームで置換) と, シリカフューム無混入の場合のポンプ圧送データ<sup>3)</sup>を併記した。

本コンクリート (水セメント比 17%, シリカフューム混入, スランプフロ-600~700mm) の設定吐出量に対する水平圧力損失は, 水セメント比 25%のシリカフュームを混入したものに比べて大きく, 設定吐出量が増えるにつれ, その差は顕著となった。また, シリカフューム無混入に対しては, 設定吐出量が 30m<sup>3</sup>/h 以下の場合, 水セメント比が低いにも関わらず, 圧力損失が小さい結果となった。したがって, 本コンクリートのように, 水セメント比が小さいコンクリートでも, シリカフュームを混入し, そのボールベアリング効果によって, ポンプ圧送性が改善されることが確認された。

表 - 8 ポンプ圧送測定結果

目標設定吐出量 (m <sup>3</sup> /h)	15	25	35
設定吐出量の測定値 Q <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> /h)	15.8	22.0	31.2
実吐出量 Q (m <sup>3</sup> /h)	13.1	17.7	25.0
吸引効率 Q/Q <sub>0</sub> × 100 (%)	82.7	80.6	80.2
ピストン前面圧 (MPa)	5.0	8.1	12.5

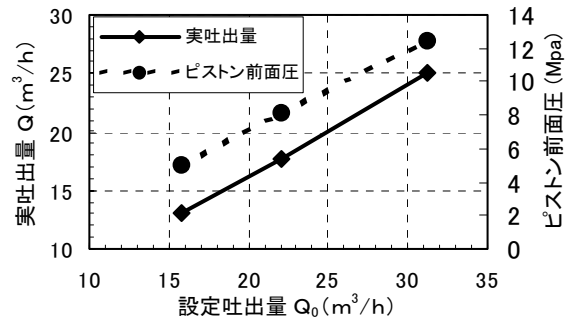


図 - 4 設定吐出量に対する実吐出量とピストン前面圧の関係

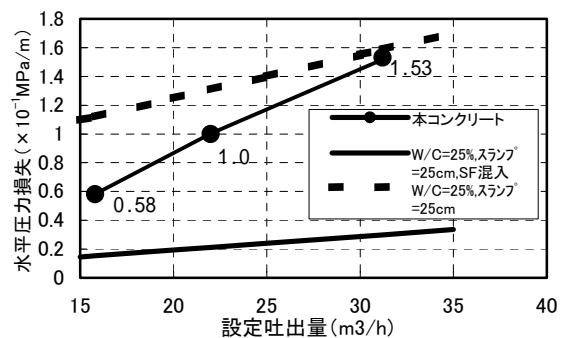


図 - 5 設定吐出量と水平圧力損失との関係

表 - 9 各配管種別の水平換算長

配管種別 (測定箇所)	単位	呼び寸法	実吐出量 (m <sup>3</sup> /h)	水平換算長 (m)
垂直管 (P7~P8)	1 m 当り	5B(125A)	13.1	1.5
			17.7	1.5
			25.0	1.3
垂直管下部ベント管 (P6~P7)	1 本 当り	5B(125A) 90° r=1.0m	13.1	3.0
			17.7	3.0
			25.0	3.1
垂直管上部ベント管 (P8~P9)	1 本 当り	5B(125A) 90° r=1.0m	13.1	4.6
			17.7	3.0
			25.0	2.5
水平ベント管 (P4~P5)	1 本 当り	5B(125A) 90° r=1.0m	13.1	0.0
			17.7	1.0
			25.0	0.6

表 - 9 に各配管種別の実吐出量と水平換算長との関係を示す。ここで, 水平換算長は, 水平管の 1m 当りの圧力損失と各配管 1m 当り, また

は、1本当りの圧力損失の比から算定している。

垂直管は、実吐出量が 13.1 ~ 25.0 $m^3/h$  の場合、その増減に関わらず、水平換算長は 1.3 ~ 1.5m とほぼ一定の値となった。そのため、土木学会「コンクリートのポンプ施工指針」に記載される普通コンクリートのように、吐出量の増加に伴い、水平換算長が減少する傾向<sup>4)</sup>は、明確には認められなかった。また、垂直管の前後に設置したベント管の垂直管下部は、水平換算長が 3.0 ~ 3.1m とほぼ一定の値となり、垂直管と同様の傾向を示した。一方、垂直管上部では 4.6, 3.0, 2.5m となり、実吐出量の増加に伴い、水平換算長が短くなる傾向を示した。これらのことから、垂直管および垂直管下部のベント管では、管内のコンクリート質量が吐出量の増減に関係なく作用するのに対し、垂直管上部のベント管では、吐出量が増加するにつれ、管内のコンクリート重量の影響が小さくなり、水平換算長が短くなるものと推察される。

水平ベント管の水平換算長は 1.0m 以下となり、水平管の圧力損失とほぼ同等、あるいは、それ以下の結果となった。これは、本コンクリートは、粘性が高く、材料分離抵抗性が大きいため、曲がり配管部での粗骨材によるロッキングが生じにくくなり、スムーズな流動性が得られたためと推察される。

### 3.3 コンクリートのフレッシュ性状

表 - 10 に圧送前後におけるフレッシュ性状の変化を示す。ポンプ圧送後のスランプフローは、実吐出量が 13.1 $m^3/h$  の場合、ポンプ圧送前に比べ

て 30mm 大きくなり、17.7, 25.0 $m^3/h$  では 30, 55mm の低下が確認された。そこで、実吐出量が 25.0 $m^3/h$  の場合では、圧送後のスランプフローの低下が若干大きいものの、17.7 $m^3/h$  以下の場合では、その変化量が 30mm 程度と僅かであることから、この吐出量の範囲では、所要の流動性を大きく損なうことなく圧送可能であると考えられる。

一方、500mm フロー到達時間、フロー停止時間、 $V_{75}$  漏斗流下時間は、全ての吐出量についてポンプ圧送後の方が低下した。このことから、ポンプ圧送によってコンクリートの粘性が減少するものと推察される。ただし、粘性の減少に伴い材料分離抵抗性が損なわれる傾向は見受けられなかった。

空気量は、変化量が -0.4 ~ +0.6 と小さいが、実吐出量が 17.7 $m^3/h$  以上となる場合には、僅かに増加する傾向があった。

以上より、本コンクリートは、吐出量を適切に設定することにより、フレッシュ性状を大きく変えることなく圧送可能であると考えられる。

### 3.4 コンクリートの硬化性状

図 - 6 に実吐出量と材齢 56, 91 日における圧

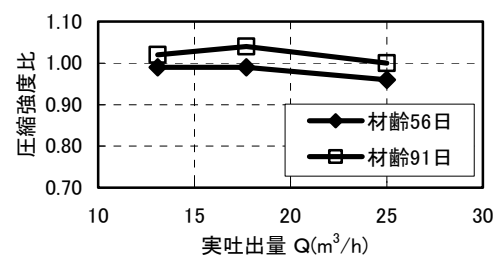


図 - 6 実吐出量と圧縮強度比の関係

表 - 10 圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状の変化

設定吐出量 (m³/h)	実吐出量 (m³/h)	採取条件または変化量	スランプフロー (mm)	500mm フロー到達時間 (sec)	フロー停止時間 (sec)	$V_{75}$ 漏斗流下時間 (sec)	空気量 (%)	C.T ( )
15.8	13.1	圧送前	615	13.7	80.0	31.9	1.6	30.0
		圧送後	645	10.6	77.0	25.8	1.2	31.5
		<b>変化量</b>	<b>+30</b>	<b>-3.1</b>	<b>-3.0</b>	<b>-6.1</b>	<b>-0.4</b>	<b>+1.5</b>
22.0	17.7	圧送前	700	10.0	88.4	22.3	1.3	30.5
		圧送後	670	7.9	73.7	18.2	1.9	32.0
		<b>変化量</b>	<b>-30</b>	<b>-2.1</b>	<b>-14.7</b>	<b>-4.1</b>	<b>+0.6</b>	<b>+1.5</b>
31.2	25.0	圧送前	645	10.8	76.1	46.5	1.3	30.0
		圧送後	590	10.5	66.6	28.6	1.9	32.0
		<b>変化量</b>	<b>-55</b>	<b>-0.3</b>	<b>-9.5</b>	<b>-17.9</b>	<b>+0.6</b>	<b>+2.0</b>

縮強度比の関係を示す。ここで、圧縮強度比とは、吐出量ごとに採取したポンプ圧送後のコンクリートの圧縮強度を圧送前の圧縮強度で除した値であり、いずれも標準水中養生を実施している。材齢 56 日の圧縮強度比は、0.96～0.99 であり、材齢 91 日では 1.00～1.04 と、いずれの場合もほぼ同等となることが確認され、実吐出量 13.1～25.0m<sup>3</sup>/h の範囲の場合、吐出量の違いによる強度の変化は認められなかった。

### 3.5 高温養生下の強度発現性状

図 - 7 にコア強度試験体の温度履歴、図 - 8 にコア強度試験体より採取した供試体の圧縮強度を示す。図 - 7 より、本コンクリートの打込み温度は 33 であり、中央断面の上部から下部にわたり、材齢 2 日で最高温度 95 程度に達した。その後、温度は緩やかに下降し、養生終了の材齢 28 日では 50 前後となった。図 - 8 より、材齢 28, 56, 91 日におけるコア強度試験体の圧縮強度は、158, 167, 168N/mm<sup>2</sup> 前後であり、標準養生の圧縮強度 144.1, 145.6, 157.1N/mm<sup>2</sup> と比較して、強度が大きくなる結果となった。これらのことから、本コンクリートは、高温履歴を受けた場合においても、長期材齢で標準養生と同等以上の強度を有することが確認された。

### 4. まとめ

水セメント比 17%、スランプフロー 650 ± 50mm の自己収縮低減を施した超高強度コンクリートのポンプ圧送性試験およびコア強度試験によって、以下のことが明らかとなった。

- (1) 実吐出量 13.1～25.0m<sup>3</sup>/h の範囲では、吸引効率は 80.2～82.7% とほぼ一定であり、吐出量の設定に比例して施工効率が増加する。
- (2) 実吐出量の増加に伴い、スランプフローが低下する傾向がある。ただし、実吐出量 17.7m<sup>3</sup>/h の場合、その低下は僅かであった。
- (3) 実吐出量の増加に伴い、圧送後の 500mm フロー停止時間、フロー停止時間、V<sub>75</sub>漏斗流下時間は短くなり、コンクリートの粘性が低下すると推察された。ただし、材料分離抵抗性

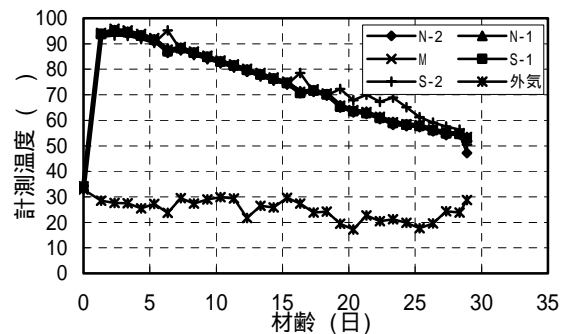


図 - 7 コア強度試験体の温度履歴

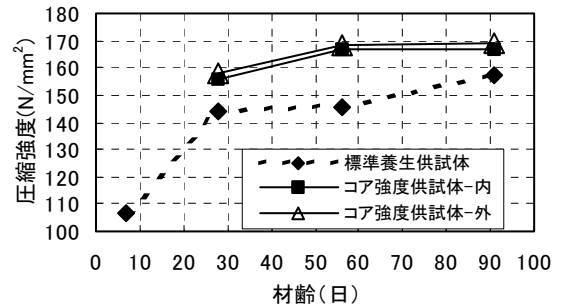


図 - 8 コア強度供試体の圧縮強度

が損なわれる傾向は見受けられなかった。

- (4) 人工軽量骨材を用いた超高強度コンクリートであっても、吐出量を適切に設定すれば、圧送後のフレッシュ性状を大きく変化することなく良好なポンプ圧送性が得られた。
- (5) 本コンクリートは、シリカフューム無混和のコンクリートに比べて、管内圧力損失は小さく、ポンプ圧送性の改善効果が認められた。
- (6) 高温履歴を受けた場合においても、圧縮強度は、長期材齢 (91 日) でも標準養生と同等以上となった。

### 参考文献

- 1) 高田和法ほか：超高強度コンクリートの自己収縮低減に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，2003
- 2) 谷口秀明ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，2000
- 3) 土木学会：シリカフュームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案)，資料編，pp.123-125
- 4) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針「平成 12 年版」，p.18