

# RC 超高層建物用コンクリートに関する研究 (その3)

——水結合材比25%の超高強度コンクリートによる実大模擬施工実験——

中 根 淳 久保田 昌吾  
一 瀬 賢 一 仙 田 孝 志

## Experimental Study on High-Strength Concrete for High-Rise Reinforced Concrete Building (Part 3)

——Construction Test with Full-Scale Member Specimens  
Using Ultra-High-Strength Concrete of Water-Cement Ratio 0.25——

Sunao Nakane Shogo Kubota  
Ken-ichi Ichise Takashi Senda

### Abstract

A construction test with full-scale member specimens was performed using ultra-high-strength concrete. The following results were obtained from the experiments. (1) It is possible to produce ultra-high-strength concrete of  $W/(C+SF)=0.25$  using a high-range water-reducing agent at a commercial ready-mixed concrete plant and to ensure placeability for two hours after mixing. (2) Though ultra-high-strength concrete has higher viscosity and causes greater pumping load than normal-strength concrete, it is possible to pump it up to a height corresponding to more than 300 meters in terms of horizontal distance. This is without change in fresh concrete properties before and after pumping. (3) Core strengths of full-scale member specimens was assured to be over 700  $\text{kgf/cm}^2$  after 4 weeks, and over 800  $\text{kgf/cm}^2$  after 13 weeks.

### 概 要

水結合材比25%の超高強度コンクリートを使用して、実大模擬部材による施工実験を行ない、以下のことが明らかとなった。(1) 高性能減水剤を用いて  $W/(C+SF)=25\%$  のコンクリートを市中のレデーミクストコンクリート工場で製造でき、練り上がり後2時間までの流動性が確保できる。(2) 超高強度コンクリートは、普通強度のコンクリートに比べ粘性が高く、圧送負荷はやや高くなるが、実験の結果から水平換算距離300 m以上のポンプ圧送が可能である。また、圧送の前後においてフレッシュコンクリートの性質に変化はない。(3) 実大部材から抜き取ったコアの強度は、材令4週で700  $\text{kgf/cm}^2$ 、材令13週で800  $\text{kgf/cm}^2$  以上を確保できた。

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造超高層集合住宅では、設計基準強度(以下  $F_c$  と略す) 420  $\text{kgf/cm}^2$  までの高強度コンクリートが採用されるようになり、当社においても、西戸山タワーホームズ(25階建, 3棟)をはじめ、MKO マンション(41階建)の建設において使用している。今後更に高層のRC造建物の需要が予想され、今までより更に強度の高い超高強度コンクリートが必要となると考えられる。

この研究は、超高強度コンクリートの開発の第1段階として、現状のレデーミクストコンクリート工場で製造できる限界と思われる水結合材比25%のコンクリートを使用して、(1)プラントでの製造から運搬、打込みおよ

び養生に至る作業性の確認、(2)実大模擬部材による強度発現性状の把握、(3)各種施工方法の適用性などについて一連の検討を行なったものである。

## 2. 実験概要

### 2.1. 実験の組合わせ

実験は、シリーズI, IIに分けて実施した。

シリーズIでは、超高強度コンクリートのポンプ圧送性について調べた。実験のパラメータとしては、水結合材比(以下  $W/(C+SF)$  と略す) 3水準(25%, 30%, 50%), 圧送距離2水準(水平距離換算75 m, 150 m), 打設速度3水準(15, 25, 35  $\text{m}^3/\text{hr}$ )などを選定した。

シリーズIIでは、シリーズIの圧送試験結果に基づき、60階建RC超高層建物を想定した実大模擬部材(配筋あ

り)の施工実験を行なった。模擬部材の形状および寸法を図-1に示す。コンクリートは、 $W/(C+SF)=25\%$ として、市中レデーミクストコンクリート工場から出荷した。コンクリートの打設は、コンクリートポンプ(配管長さは、水平距離換算150m)およびバケットで行なった。バケットは、容量2.5m<sup>3</sup>で、無線により排出口の開閉およびパイプレタの作動が行なえる構造となっている。コンクリートの打設は、VH分離打設とした。また、超高強度コンクリートでは、単位セメント量が多くなるため、部材の中心温度が上昇するので、ひびわれの発生や長期強度の発現不良を防止する対策として、液体窒素によるコンクリートのクーリングも実施した。各実験の条件および組合せの一覧を表-1に示す。なお、実験は、(株)大林組技術研究所構内で、2月~3月にかけて実施した。

2.2. 測定項目と測定方法

測定項目と方法は、表-2に示すとおりである。

圧送試験では、油圧ピストン式のコンクリートポンプを使用した。配管および管内圧力の測定位置を図-2に示す。

2.3. 調合条件および使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを用い、シリカフェームを単位セメント量の10%内割で混入した。調合条件および使用材料を表-3に示す。また各コンクリートの調合を表-4に示す。

2.4. コンクリートの製造

コンクリートは、実験現場まで約30分で運搬可能なレデーミクストコンクリート工場において、容量3m<sup>3</sup>の強制練りパン型ミキサを用いて製造し、練り混ぜ時間は、通常の2~3倍とした。

2.5. 供試体の採取

強度試験用供試体は、標準水中養生(以下標水)、現場水中養生(以下現水)、現場封緘養生(以下現封)、現場気

シリーズ	水セメント比 (%)	冷却の有無	打設方法	圧送距離 (m)	部材名	コンクリート供試体番号
I	50	無	ポンプ	75	床	I-50-A
	25					I-25-A
	30			I-30-B		
	25			I-25-B		
	25**			I-25-B <sub>2</sub>		
II	25	無	ポンプ	150	柱	II-25-P1
					はり	II-25-P2
					柱	II-25-N1
			バケット	はり	II-25-N2	
				柱	II-25-C1	
				はり	II-25-C2	

B<sub>2</sub>:2時間練り置き後測定

表-1 実験条件および組合せ

シリーズ	測定項目	測定方法など
I	<ul style="list-style-type: none"> <li>フレッシュコンクリートの性質 (スランプ, 空気量, フロー, 温度)</li> <li>圧縮強度試験 (圧送前後の標水)</li> <li>ポンプ管内圧力測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>JISによる</li> <li>材令 (1週, 2週, 4週, 13週)</li> <li>圧力ゲージ(5点)</li> </ul>
II	<ul style="list-style-type: none"> <li>フレッシュコンクリートの性質 (スランプ, 空気量, フロー, 温度)</li> <li>圧縮強度試験 (標水, 現水, 現気, 現封)</li> <li>コア強度試験 (垂直方向)</li> <li>試験体の中心温度測定</li> <li>異なった打設工法の比較</li> <li>冷却効果の確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>JISによる</li> <li>材令 (1週, 2週, 4週, 8週, 13週)</li> <li>材令 (4週, 13週)</li> <li>C-C熱電対(各試験体4点)</li> <li>コア強度で比較</li> <li>コア強度で比較</li> </ul>

表-2 測定項目と測定方法

水セメント比	25, 30, 50
出荷時スランプ	21cm
打込み時スランプ	21cm
空気量	4%以下
セメント	普通ポルトランドセメント
混和材	シリカフェーム
細骨材	粗目(荒川産) 3 : 細目(佐原産) 1
粗骨材	石灰石(名栗産) 1 : 川砂利(荒川産) 1
混和剤	スランプロス低減形高性能AE減水剤

表-3 調合条件および使用材料

水結合材 (%)	細骨材 (%)	単位容量重量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		水	セメント	シリカフェーム	細骨材	粗骨材	A剤	B剤
50	45.6	176	352	—	801	977	—	3.66
30	36.0	167	501	56	581	1055	13.925	—
25	35.0	150	540	60	581	1089	25.800	—

A剤:高性能AE減水剤 B剤:AE減水剤

表-4 コンクリートの調合

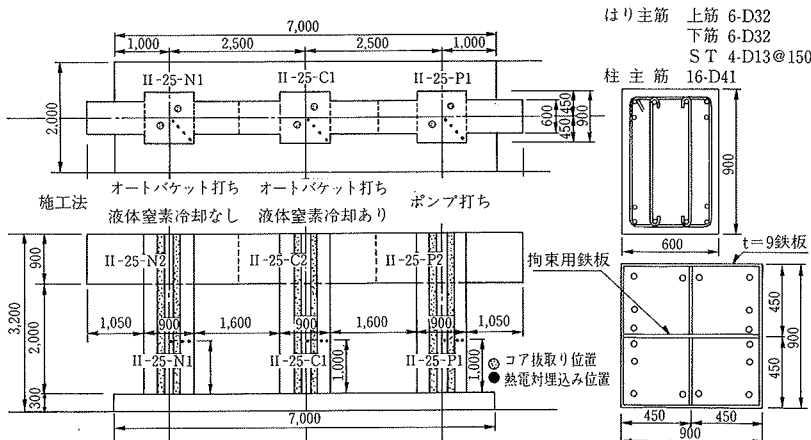


図-1 模擬部材の形状および寸法

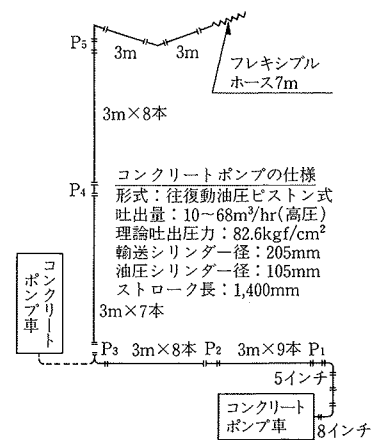


図-2 配管および圧力測定位置

中養生（以下現気）を行なうシリンダーと実大模擬部材から抜き取るコアとした。供試体の大きさは、 $\phi 10 \times 20$  cmとした。

実大模擬部材からのコアは、鉛直方向から抜取することを原則とした。コアの抜取り位置およびコンクリート温度の測定位置は、先に示した図-1に示す。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. ポンプ圧送性

コンクリート圧送時における管内圧力損失結果を表-5に示す。また管内圧力と圧送距離との関係の例を図-3、4に示す。

$W/(C+SF)=25\%$ 、 $30\%$ のコンクリートの管内圧力損失は、配管1m当たり $0.14 \sim 0.18$  kg/cm<sup>2</sup>となり、 $W/C=50\%$ の管内圧力損失 ( $0.11$  kg/cm<sup>2</sup>) に比べて、 $0.03 \sim 0.07$  kg/cm<sup>2</sup>/m大きい。これは、スランプ値が同程度であっても、超高強度コンクリートの場合、コンクリートの粘性が増すため、管内圧力損失が若干大きくなったものと考えられる。この $W/(C+SF)=25\%$ 、 $30\%$ における管内圧力損失は、普通強度のコンクリートのスランプ10 cm前後のものに相当している。また、圧送圧力は、普通コンクリート同様、配管長に比例する関係が得られた。圧送速度と管内圧力との関係は、圧送速度が大きくなるに従い、若干高くなる程度である。この実験で用いたコンクリートポンプの能力から圧送限界を推定すると水平換算距離で約360 mということになる。

番号	配管長さ (m)	試験時期	管内圧力損失 (kg/cm <sup>2</sup> /m)		
			15m <sup>3</sup> /hr*	25m <sup>3</sup> /hr*	35m <sup>3</sup> /hr*
I-50-A	75	技研着直後	0.11	0.11	0.12
I-25-A			0.14	0.15	0.18
I-30-B			0.15	0.15	0.17
I-25-B	150	技研着直後	0.17	0.16	0.17
I-25-B <sub>2</sub>			2時間後	—	0.16

\*: コンクリート圧送量 (m<sup>3</sup>/hr)

表-5 管内圧力損失測定結果

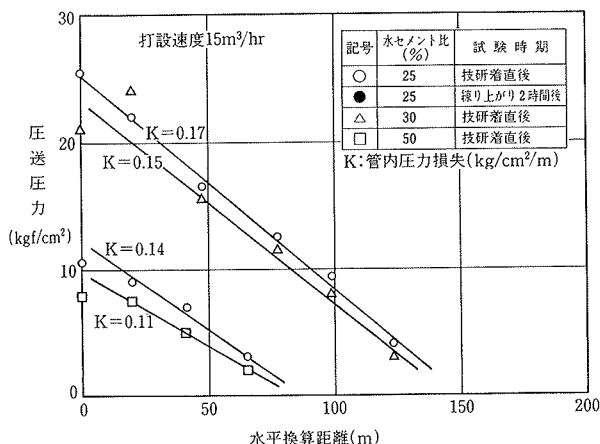


図-3 ポンプの圧送圧力と圧送距離との関係

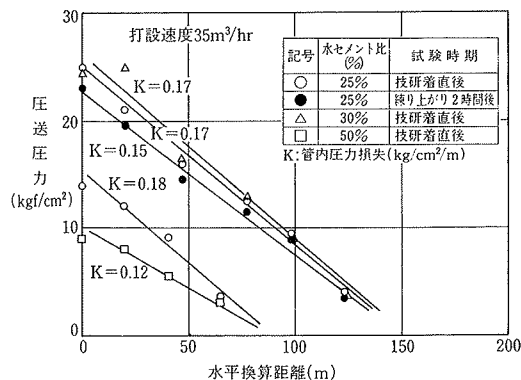


図-4 ポンプの圧送圧力と圧送距離との関係

#### 3.2. フレッシュコンクリートの性質

フレッシュコンクリートの性質を表-6に示す。シリーズIの $W/(C+SF)=25\%$ のコンクリートは、練り上がり直後から圧送前までにスランプが若干大きくなる傾向があり、圧送前の目標スランプ21 cmをオーバーした。普通強度のコンクリートの場合、スランプが21 cmを超えるとモルタルと骨材が分離しやすいが、このコンクリートでは、スランプが25 cm程度となっても分離を起こさない。これは、単位容積当たりのモルタル量が多くなり、更に高性能AE減水剤を大量に使用することにより、コンクリートの粘性が極めて高くなるためと考えられる。

圧送前後における品質変化を比較するとスランプは、

番号	採取時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	フロー値 (mm×mm)	コンクリート温度 (°C)
I-50-A	圧送前	19.0	2.4	319×308	12.0
	圧送後	21.0	4.0	410×396	12.0
I-25-A	練上がり後	24.5	2.8	—	—
	圧送前	25.0	1.1	620×610	13.2
	圧送後	25.0	1.0	680×670	15.5
I-30-B	練上がり後	20.0	2.2	—	—
	圧送前	20.0	1.4	335×329	15.7
	圧送後	21.5	1.1	364×357	17.0
I-25-B	練上がり後	21.0	2.6	—	—
	圧送前	23.5	1.3	505×505	17.6
	圧送後	24.0	1.5	510×500	19.3
I-25-B <sub>2</sub>	練上がり後	22.0	—	—	—
	圧送前	25.5	2.8	610×590	17.5
	圧送後	24.2	0.7	540×500	19.0
II-25-P1	出荷時	23.0	2.3	—	—
II-25-P1	圧送前	25.0	2.6	530×540	16.0
	圧送後	25.0	2.6	530×530	16.0
II-25-N1	冷却前	24.0	3.2	—	—
II-25-C1	冷却後	24.0	1.5	490×500	20.0
II-25-P2	冷却後	24.0	1.0	480×500	10.0
	出荷時	22.0	1.6	—	—
II-25-P2	圧送前	23.0	1.5	440×420	20.0
	圧送後	23.0	1.5	440×440	20.0
II-25-N2	冷却前	21.0	2.6	—	—
II-25-C2	冷却後	22.5	1.0	420×430	22.0
	冷却後	21.5	0.9	430×420	12.0

表-6 フレッシュコンクリートの性質

普通コンクリート同様ほとんど変化しないことが確認された。また、空気量については、時間の経過に伴い低下した。これは、使用した高性能 AE 減水剤の性質によるものと考えられる。

### 3.3. 硬化コンクリート

3.3.1. 試験体の強度 シリーズ I における圧縮強度は、図-5 に示すように圧送前後においてほぼ等しいかむしろ圧送後のほうが高い。このことから、超高強度コンクリートをポンプ圧送しても強度面において特に問題がないことが分かった。

シリーズ II における各種養生供試体の圧縮強度試験結果を図-6 に示す。標水養生の場合、材令 4 週で平均 865 kgf/cm<sup>2</sup>、材令 13 週で 949 kgf/cm<sup>2</sup> となった。

材令 4 週の荷卸し時標水養生の圧縮強度に対する各養生における強度の割合を表-7 に示す。材令 4 週では、各養生共に標水に比べ 14~16% 程度低い。しかし、材令 13 週では、どのような養生条件下であっても材令 4 週の標水強度を確保できる。また、各養生の材令 4 週に対する強度の伸びは、標水養生では、8 週以降の強度の伸びがないけれども、その他の養生では、8 週で 11~19%、13 週で 23~36% とかなりの強度の増進が認められた。これは、コンクリートの打設時期が比較的寒い時期に行なわれ、強度発現がゆっくり進んだためによるものと考えられる。

3.3.2. コア強度 部材から抜取ったコアの強度試験結果を図-7 に示す。材令 4 週の場合、柱部材が 703~803 kgf/cm<sup>2</sup>、はり部材が 740~853 kgf/cm<sup>2</sup> を得た。また、材令 13 週の場合、柱部材、はり部材それぞれ 800~954 kgf/cm<sup>2</sup>、819~939 kgf/cm<sup>2</sup> となり、最も強度の低いところでも材令 4 週で 700 kgf/cm<sup>2</sup>、材令 13 週で 800 kgf/cm<sup>2</sup> を確保できた。打込み方法の影響は、柱部材の 4 週強度で検討すると、バケツ打ちの場合が 746 kgf/cm<sup>2</sup>、ポンプ打ちの場合が 726 kgf/cm<sup>2</sup> となり、両者に差のないことが分かった。

柱部材における部位と強度との関係は、上下間において普通強度のコンクリートに見られるような大きな強度差がなく、材令 4 週強度の上下方向の標準偏差は、20

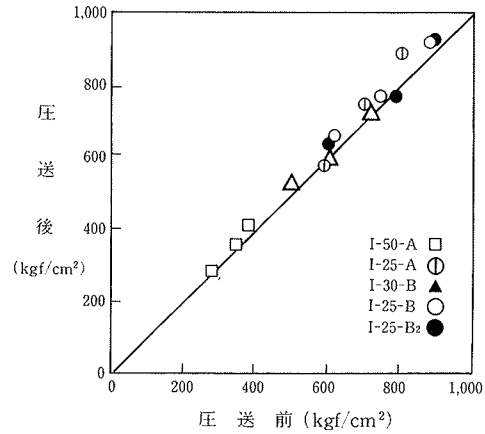


図-5 圧送前後におけるコンクリート強度

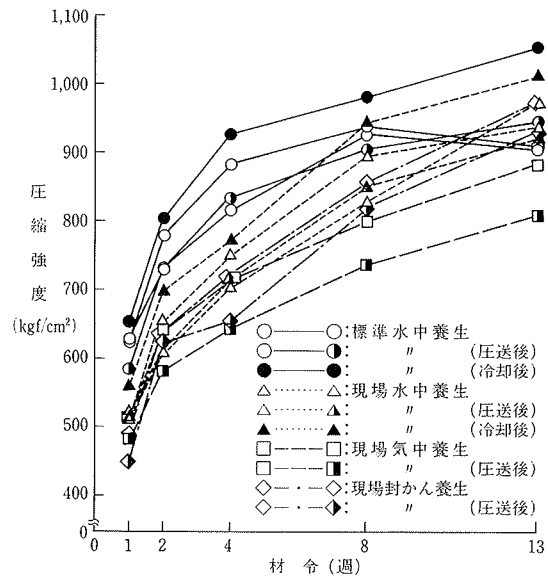


図-6 圧縮強度試験結果

養生方法	採取時期	標水4週に対する比較			材令4週に対する比較		
		4 週	8 週	13 週	4 週	8 週	13 週
標準水中養生	荷卸し時	100	109	110	100	109	110
	圧送後	98	107	111	100	109	114
	冷却後	109	116	127	100	106	117
現場水中養生	荷卸し時	86	102	113	100	119	132
	圧送後	85	100	109	100	118	129
	冷却後	91	111	119	100	122	131
現場空中養生	荷卸し時	85	94	104	100	111	123
現場封緘養生	荷卸し時	84	101	115	100	119	136

表-7 圧縮強度の比較

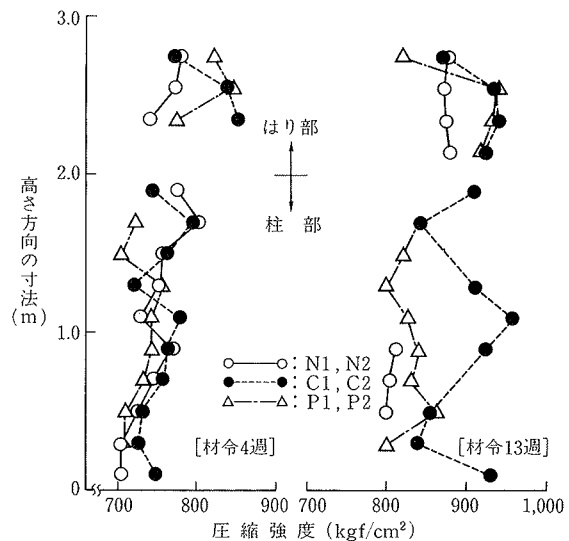


図-7 コア供試体の圧縮強度試験結果

～30 kgf/cm<sup>2</sup>であった。超高強度コンクリートの場合、セメント量が多いうえに、単位水量が少なく、それに加えて高性能減水剤を使用しているためコンクリートの粘性が極めて高くなる。このため、ブリージングが少なく、圧密に伴う上下方向の水分の移動が抑制されるからであると考えられる。

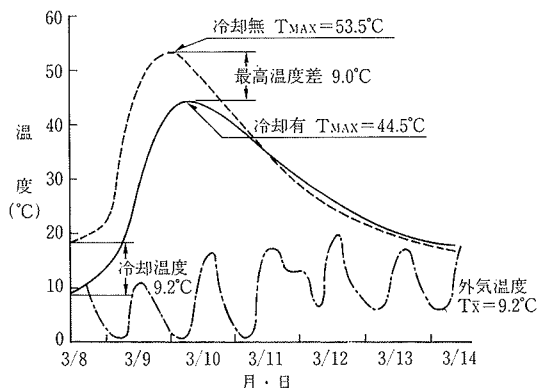


図-8 柱部材中心部の温度履歴

### 3.4. コンクリートの温度履歴

柱部材 N1, C1 の中心部におけるコンクリート温度を図-8 に示す。型枠に打設直後のコンクリートの温度差は、9.2°Cであり、40～45時間後にはそれぞれ最高温度（冷却無し：53.5°C、冷却あり：44.5°C）に達している。最高温度における温度差は、冷却温度幅とほぼ等しい9.0°Cとなった。

冷却の有無によるコア強度の差は、図-7 に示したように材令13週で、平均 70 kgf/cm<sup>2</sup>程度冷却したものの強度が高い。コンクリートの長期強度発現には、打設後の温度上昇を押えることが有効である。今回の実験は、比較的寒い時期であるため、冷却無しでも55°C程度と最高温度が高くないが、暑中に打設する場合には、更に効果があることが期待される。

### 3.5. 積算温度

材令4週までの積算温度と圧縮強度との関係を図-9 に示す。今

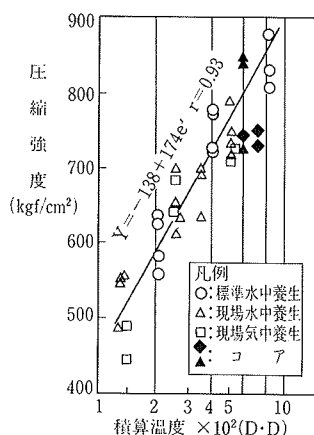


図-9 圧縮強度と積算温度との関係

回のように比較的寒い時期に打設され最高履歴温度が高くないときには、積算温度と圧縮強度とはほぼ比例関係にあり、積算温度が 500 D<sup>2</sup>D を超えれば、700 kgf/cm<sup>2</sup> を確保できることが分かる。

## 4. まとめ

この実験では、水結合材比25%の超高強度コンクリートを用いて実大模擬部材による施工性と強度発現性状について検討し、以下のことが明らかとなった。

- (1) W/(C+SF)=25%のコンクリートを市中の生コン工場で設備を変更することなく製造でき、高性能 AE 減水剤を用いることにより、練り上がり後2時間までスランプが低下することなく運搬できる。
- (2) 超高強度コンクリートのポンプ圧送性は、普通強度のものに比べ粘性が高く、圧送負荷もやや高くなるが、水平換算距離約 160 m を容易に圧送でき、圧送前後のコンクリートの品質に変化のないことが確認できた。また圧送限界を推定すると水平換算距離で 360 m まで可能であることが分かった。

- (3) 柱・はり部材から採取したコアの強度は、最も強度の低いところで材令4週で 700 kgf/cm<sup>2</sup>、材令13週で 800 kgf/cm<sup>2</sup> 以上を得ることができた。

## 付記

この研究は、当社『RC 超高層住宅研究開発グループ（リーダー：本店 建築設計管理部 樋口元一 部長）』との合同実験の成果をまとめたものであることを付記します。また、実験の計画および実施にあたり、助言ならびに協力を頂いた当委員会関係者各位に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 中根 淳, 他: 大林組高層 RC システム (OHRC-21) の施工性に関する研究, 大林組技術研究所報, No. 33, (1986), pp. 42～46
- 2) 久保田 昌吾, 他: RC 超高層建物用コンクリートに関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 35, (1987), pp. 93～97
- 3) 中根 淳, 他: RC 超高層建物用コンクリートに関する研究(その2)―柱部材を用いた設計基準強度 600 kg/cm<sup>2</sup> の強度確認実験―, 大林組技術研究所報, No. 37, (1988), pp. 68～72