

論文

[1006] 超高強度コンクリートを用いた実大柱形模擬部材の強度発現性に関する検討

久保田昌吾\*1, 中根 淳\*2, 斉藤裕司\*3, 一瀬賢一\*4

1. はじめに

鉄筋コンクリート造超高層建物に用いる超高強度コンクリートの強度レベルは、年々超高強度化の傾向にあり、最近では設計基準強度（以下 $F_c$ と呼ぶ） $600\text{kgf/cm}^2$ 級コンクリートの実工事への適用も計画から実用化への段階に入ってきたように思われる。このような超高強度コンクリートを用いた柱部材強度は、普通強度レベルのコンクリートに比べて水和熱による温度上昇量が高く、材令4週から13週にかけての強度の伸びが小さくなるとともに、柱頭、柱脚部分の強度差が少なくなる傾向にある[1]など超高強度コンクリートの特性が部材強度にも影響しているように考えられる。

本報では、 $F_c$   $1,200\text{kgf/cm}^2$ 以上（ここでは、構造体コンクリートから採取したコア供試体の材令91日強度が $F_c$ 以上のものをいう）の超高強度コンクリートを用いて柱形実大模擬部材を製作し、(1) 水和熱による温度上昇量とコア強度の関係、(2) コアの採取方向（鉛直・水平）とコア強度の関係、(3) 柱部材の高さ方向の強度差とこれに影響を及ぼすと考えられる各種要因（水結合材比、骨材分離、空気量）との関係、(4) 部材から採取したコアの圧縮強度と各種管理用供試体強度との関係、などについて柱形部材に限定して強度発現性状を調査・検討した。

2. 実験概要

2. 1 試験の種類

表-1 試験の種類

No.	記号	骨材の組合せ	水結合材比 (%)
1	$Q_s-22$	$Q_s+Q_G$	22
2	$Q_s-20$		20
3	$A_s-22$	$A_s+Q_G$	22
4	$A_s-20$		20

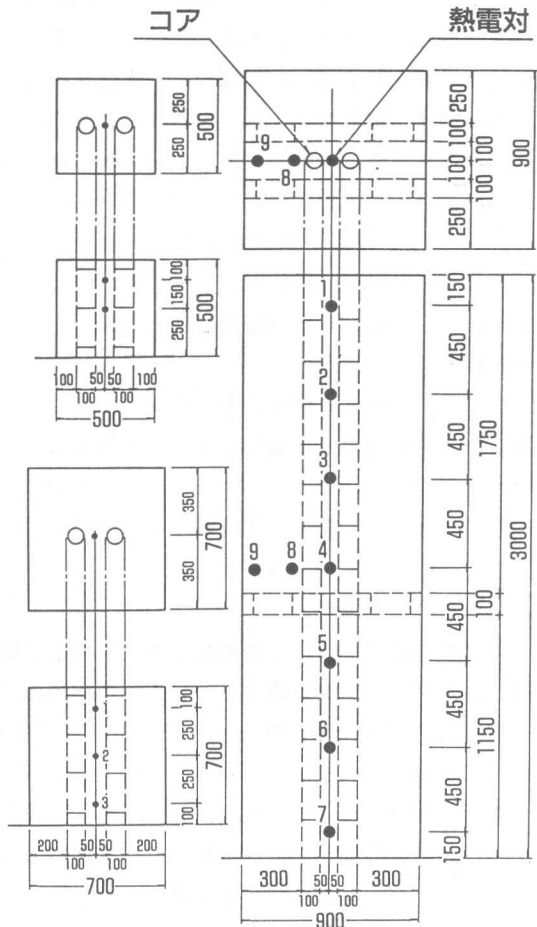


図-1 柱形実大模擬部材およびブロック試験体からのコア抜取り、内部温度測定位置

\*1 大林組技術研究所 建築第2研究室主任研究員（正会員），\*2 同 室長 工修（正会員），\*3 同 主任研究員 工修（正会員），\*4 同 研究員 工修（正会員）

細骨材2水準、水結  
合材比2水準を組合  
せた計4種類（表-1  
参照）とした。

2. 2 使用材料、調  
合と試験体の製作  
使用材料は、普通ポ  
ルトランドセメント、  
超微分末混和材シリカ  
フューム（比重：2.2、

比重面積：195000cm<sup>2</sup>/g、SiO<sub>2</sub>：92.1%）、  
シリカを主成分とする細・粗骨材（以下Q<sub>s</sub>、  
Q<sub>a</sub>と呼ぶ）、アルミナを主成分とする細骨  
材（以下A<sub>s</sub>と呼ぶ）およびナフタリン系高  
性能AE減水剤を用いた。調合は、水結合材  
比22、20%、細骨材Q<sub>s</sub>、A<sub>s</sub>を組み合わせ  
た合計4種類（表-2参照）である。実験に用  
いた部材の形状は柱形（0.9×0.9×3.0m、無  
筋）とし、1種類につき各1体とブロック  
試験体（□0.5m、□0.7m）をQ<sub>s</sub>-22、20の  
2種類につき各2体ずつ製作した。（図-1  
参照）

生コンクリートは市中の生コンプラントで  
製造し、約40分かけて運搬した後、試験体近  
傍までポンプ圧送のうえバケツ打ち（振動  
締固め）とした。なお、本実験は4月～11月  
にわたって実施したものである。

### 2. 3 試験項目

管理用供試体については標準水中、現場水中養生の圧縮強度（試験材令1，4，13週）を、柱  
形、およびブロック試験体については部材内部の履歴温度（T熱電対）と鉛直・水平方向から抜  
き取ったコアの圧縮強度をそれぞれ図-1に示す要領で調査した。そのほか部材から採取した  
コア供試体を用いて、(a) 水結合材比（Q<sub>s</sub>、A<sub>s</sub>-20の各4ヵ所—セメント協会法）、(b) 粗骨材面  
積率（全種類につき各7ヵ所—画像処理）、(c) 空気量（全種類につき各8ヵ所—リニアトラバ  
ース法）、(d) 単位容積質量（全種類につき各13ヵ所）、(e) 総細孔量（全種類につき6～7ヵ所—水  
銀圧入法）などを併せて測定した。

## 3. 実験結果と考察

### 3. 1 温度上昇量とコア強度の関係

図-2に柱形実大模擬部材（Q<sub>s</sub>-22，20）中心部（No.4）の温度履歴を示す。コンクリートの  
練り上がり温度は21～22℃で、温度上昇量はQ<sub>s</sub>-22，20ともに大差なく47～48℃である。また、

表-2 コンクリートの調合およびフレッシュコンクリートの品質

記号	目 標 スランブ (cm)	目 標 空気量 (%)	水結合 材 比 (%)	細骨 材率 (%)	調 合 (kg/m <sup>3</sup> )						フレッシュコンクリートの品質*				
					W	C	Ad	S	G	Sp Cx (%)	SI (cm)	FI (cm)	Air (%)	Temp (°C)	
Q <sub>s</sub> -22	25	1	22	37	150	613	69	597	1019	2.9	25.5	51.0	2.4	21.5	
Q <sub>s</sub> -20	25	1	20	36	150	675	75	558	996	3.6	23.5	43.8	2.1	22.5	
A <sub>s</sub> -22	25	1	22	37	150	613	69	746	1017	3.2	28.0	67.8	0.9	20.5	
A <sub>s</sub> -20	25	1	20	36	150	675	75	697	996	4.3	26.0	56.8	2.3	21.0	

\*打設時のコンクリートの品質を示す。

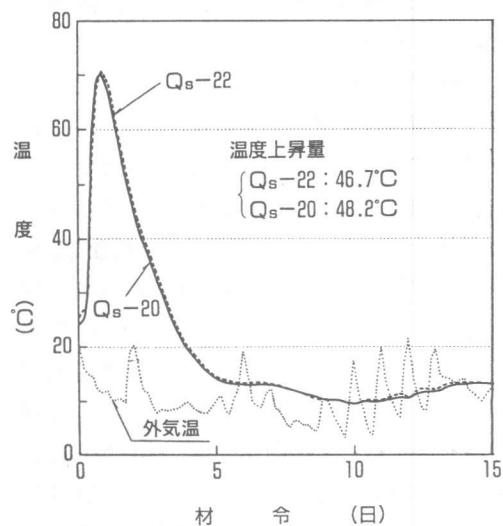


図-2 柱形模擬部材のコンクリート  
温度履歴（中心部-No.4）

図-3に実大模擬部材およびブロック試験体から採取したコア強度とそれぞれの温度上昇量の関係を、図-4に温度上昇量とコア強度の伸びを示した。温度上昇量とコア強度の関係は、水結合材比22% - 13W に高い相関性 ( $\gamma=0.99$ )が見られた他は相関係数も低く明確な関係が得られなかった。

また、温度上昇量とコア強度の伸びについてもコンクリートの種類、温度上昇量の大小にかかわらず材令4週から13週にかけて10~17%の伸びが見られ、温度上昇量のコア強度への影響は認められない。これは、コンクリートの打設時期が気温の低い春季であったため、最高温度、温度上昇量ともに高温に至らなかったことに起因しているものと推察される。

### 3.2 抜取り方向(鉛直・水平)とコア強度の関係

図-5にコアの抜取り方向(鉛直・水平)とコア強度の関係を示す。普通コンクリートの場合は、鉛直方向に比べて水平方向の強度が5%程度[2]低くなると言われているが、高強度・超高強度コンクリートの場合は一般的に粘性が高く、ブリージングが生じにくいため骨材下面に水隙となって残るようなことが少なく、コア強度の異方性は少ないものと思われていたが、本実験結果では鉛直方向強度に対する水平方向強度が $Q_s$ 骨材使用で0.93~0.97、 $A_s$ 骨材使用では0.99~1.03となり $Q_s$ 骨材使用の水平方向に約5%の低減が認められ、超高強度コンクリートにおいても普通コンクリートと同様な傾向を示すことが分かった。

### 3.3 柱部材の高さ方向の強度のばらつきと水結合材比、骨材分離、空気量、総細孔量ほかの関係

高強度・超高強度コンクリートの場合は、普通強度レベルのコンクリートの場合とは異なり、上下方向の強度差が小さく[1]なる傾向にある。これは、3.2でも述べたとおり、高強度・超高強度コンクリートは粘性が高く、圧密に伴う上下方向の水分移動が抑制されることに起因しているものと考えられている。しかし、本実験結果(表-3参照)では全般的に柱頭部の材令4週コア強度が柱脚部に比べて140~240 $\text{kgf/cm}^2$ 低く、その標準偏差は柱頭部の

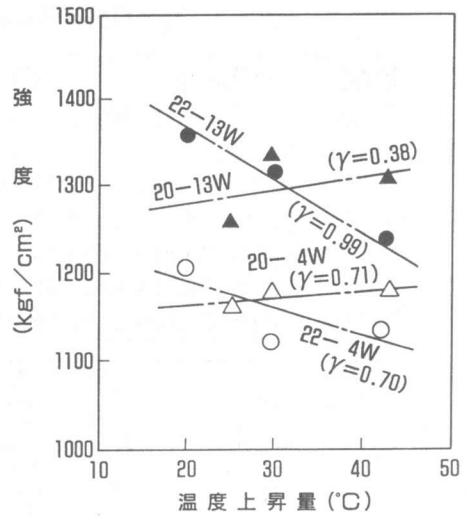


図-3 温度上昇量とコア強度の関係

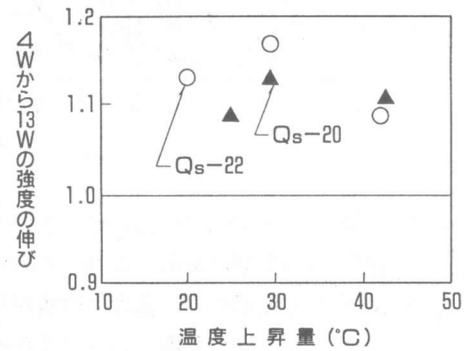


図-4 温度上昇量と材令4週から13週強度の伸びと関係

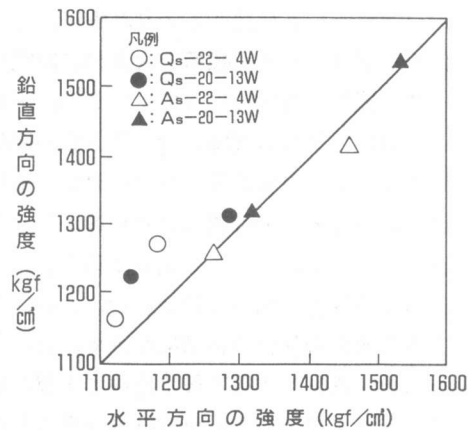
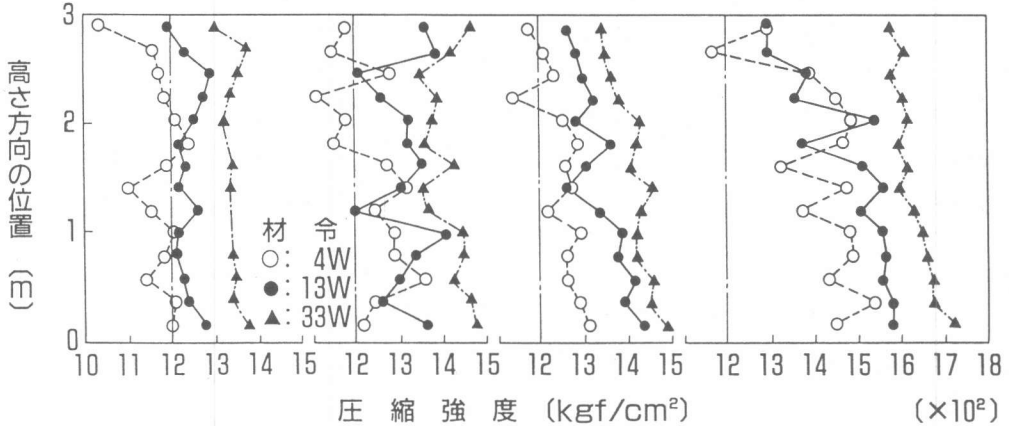


図-5 コアの抜き取り方向(鉛直・水平)とコア強度の関係

表-3 管理用供試体およびコア供試体の圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

種類		Q <sub>s</sub> -22	Q <sub>s</sub> -20	A <sub>s</sub> -22	A <sub>s</sub> -20
コア	4W	1,173 (σ=50.8, N=14)	1,231 (σ=69.7, N=14)	1,246 (σ=48.3, N=14)	1,418 (σ=97.6, N=14)
	13W	1,231 (σ=31.6, N=16)	1,313 (σ=63.0, N=14)	1,339 (σ=58.7, N=14)	1,486 (σ=107, N=14)
	33W	1,344 (σ=24.0, N=13)	1,431 (σ=58.7, N=32)	1,419 (σ=57.1, N=28)	1,633 (σ=58.2, N=27)
標水	4W	1,324 (σ=46.0, N=3)	1,308 (σ=19.7, N=3)	1,366 (σ=48.9, N=3)	1,524 (σ=33.3, N=3)
	13W	1,503 (σ=27.3, N=3)	1,557 (σ=19.0, N=3)	1,571 (σ=25.8, N=3)	1,710 (σ=5.9, N=3)
現水	4W	1,212 (σ=46.0, N=3)	1,219 (σ=34.2, N=3)	1,262 (σ=52.0, N=3)	1,365 (σ=12.0, N=3)
	13W	1,552 (σ=39.4, N=3)	1,543 (σ=29.5, N=3)	1,580 (σ=38.1, N=3)	1,720 (σ=27.0, N=3)



強度が低い A<sub>s</sub>-20 で約 100 kgf/cm<sup>2</sup>、そのほかは概ね 30 ~ 70 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲にある。なお、この傾向は材令の経過とともに柱頭部のコア強度に改善が見られ、材令 8 ヶ月では上下方向の強度差が少なくなっている。

本実験に用いたコンクリートは、単位水量を 150 kg/m<sup>3</sup> に抑えて高性能 A E 減水剤の使用によって流動性（施工性）を確保しているため、Fc420 kgf/cm<sup>2</sup> レベルのコンクリートに比べてより粘性が高く、スランプ、スランプフローの目標値を大きめに設定している。そこで、流動性増大に伴って生じる (a) 水結合材比の変化、(b) 粗骨材の沈降、(c) 空気量の変化、のほかコンクリートの総細孔量、コアの単位容積質量等が、柱部材の高さ方向の位置により相違があるかどうかを調査した。以下にこれらの調査結果を述べる。(a) 水結合材比の変化：図-6 に Q<sub>s</sub>-20, A<sub>s</sub>-20 における高さ

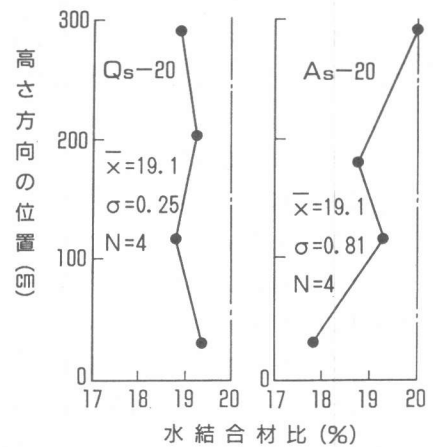


図-6 高さ方向の位置と水結合材比の関係

方向の水結合材比分析結果を示す。Q<sub>s</sub>-20 における上下間のばらつきは 1% 以内で大差なかったものの、A<sub>s</sub>-20 では下部に比べて上部が約 2% 大きい。コア強度と水結合材比の相関係数はいずれも低く、相関ありという結果は得られなかったものの、A<sub>s</sub>-20 については材令 13 週強度においても上下間に若干の強度差が認められることから水結合材比の変化がコア強度に影響していることが予想される。(b) 粗骨材の沈降：図-7 に高さ方向から採取したコアの粗骨材面積率を

示す。結果はQ<sub>s</sub>-20の柱頭部の粗骨材面積率が平均値に比べて約4.6%小さく、柱脚部に向かって徐々に大きくなる傾向を示したほかは柱頭部の粗骨材の沈降は見られず、粗骨材面積率とコア強度の間にも相関性は認められなかった。(c) 空気量の変化；図-8に高さ方向の位置と空気量の関係を示す。ここでいう空気量とは、直径が0.01mm以下の微細な空気泡を面積比で示したものである。測定結果は全般的に見て0.5~2%の範囲にあって、上下方向におけるばらつきも認められず、コア強度との相関係数も低い。(d) 総細孔量；図-9に高さ方向とコンクリートの総細孔量の関係を示す。総細孔量はコンクリートの種類によって異なり、Q<sub>s</sub>-22, 20ではおよそ0.016~0.019CC/gの範囲にあって、コア強度の高いA<sub>s</sub>骨材使用の方が総細孔量が多い。また、全般的に柱頭部の総細孔量が多く、柱脚部に向うにつれて減少の傾向にある。なお、コア強度と総細孔量の間には相関性は認められなかった。そのほか、下部の方が単位容積質量が大きく、強度も若干下部の方が大きい。

### 3.4 管理用供試体強度とコア強度の関係

表-3に各種養生管理用供試体強度とコア強度の平均値を、また、図-11~12には標準水中養生強度とコア強度、現場水中養生強度とコア強度の関係をそれぞれ示す。コンクリートの種類別強度比較ではA<sub>s</sub>骨材使用の強度が高く、高強度化に大きく寄与していることが分かる。管理用供試体強度とコア強度の関係については、標準水中養生強度に比べてコア強度は4週で0.89~0.94、13週で0.80~0.87の範囲にあってコア強度が低い。一方、現場水中養生強度とコア

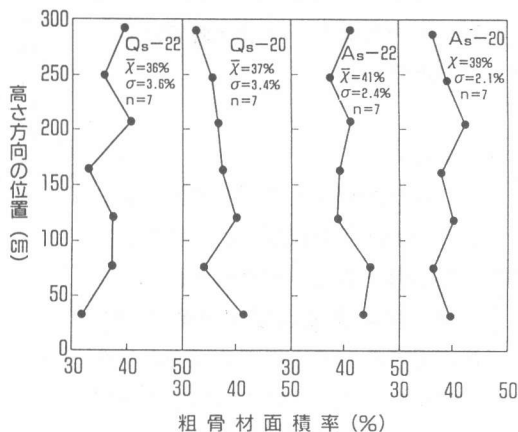


図-7 高さ方向の位置と粗骨材面積率の関係

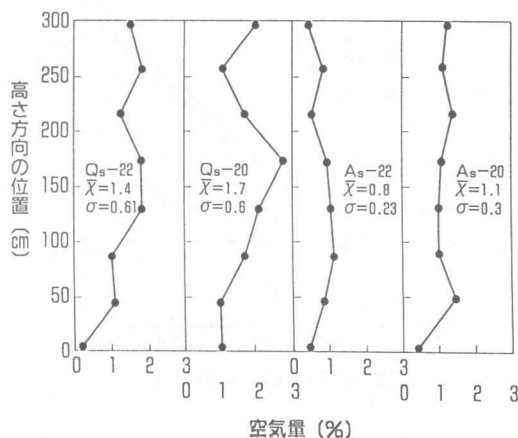


図-8 高さ方向の位置と空気量の関係

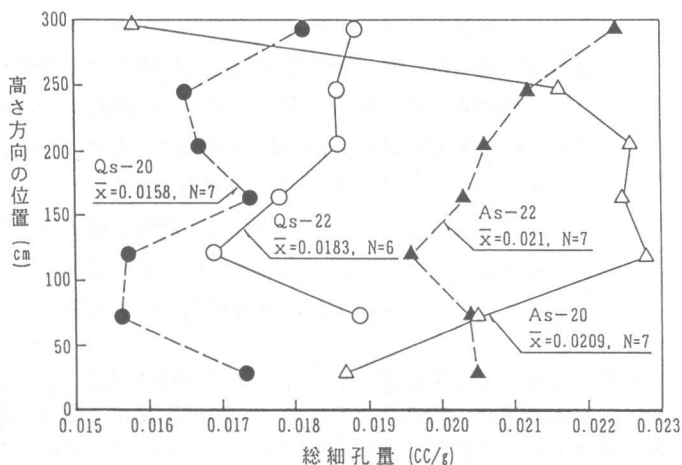


図-9 高さ方向の位置と細孔量の関係

強度の関係は、4週で0.96~1.04、13週で0.79~0.87となり、材令4週では双方ともに強度差がない。

4. まとめ

Fc1, 200kgf/cm<sup>2</sup>以上の超高強度コンクリートの柱形部材の強度性状を調査した結果、概略以下のことが分かった。

- (1) 水和熱による温度上昇量が50℃(最高温度約70℃)以下の場合、材令4週から13週にかけて10%以上の強度の伸びが期待できる。

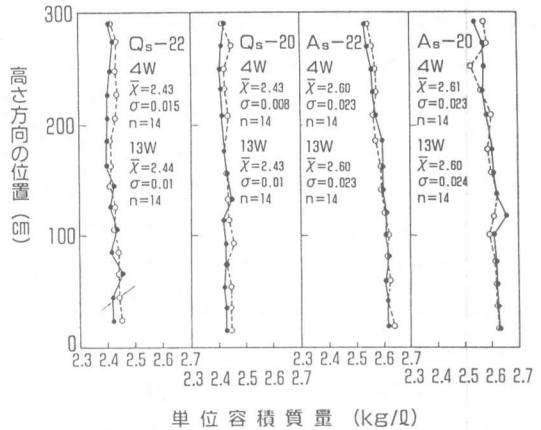


図-10 高さ方向の位置と単位容積質量の関係

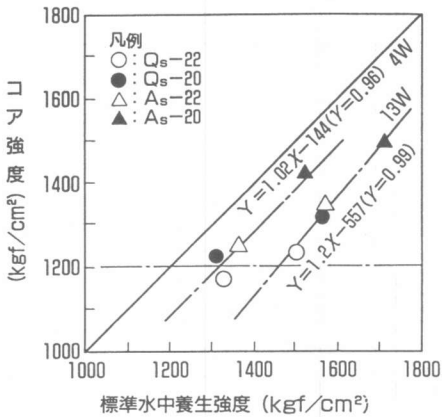


図-11 標準水中養生強度とコア強度の関係

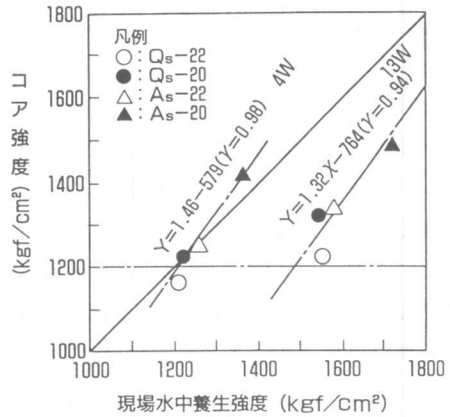


図-12 現場水中養生強度とコア強度の関係

- (2) コア強度の異方性については、超高強度コンクリートにおいても鉛直方向の強度に比べて水平方向の強度が5%ほど低くなるケースがある。
- (3) 上下方向におけるコア強度は全般的に柱頭部がやや低く、柱脚部へ向かうにしたがって高い。上下間の強度差は材令4週で140~240kgf/cm<sup>2</sup>で、中でもAs骨材使用が顕著である。コア強度の標準偏差はAs-20が100kgf/cm<sup>2</sup>で大きいものの、総平均値では約65kgf/cm<sup>2</sup>程度である。なお、このような上下方向の強度差は材令の経過とともに減少の傾向にある。また、高さ方向のコア強度と水結合材比、粗骨材面積率、空気量、総細孔量、および単位容積質量の関係は、いずれも高い相関性は認められなかった。

今後はコンクリートの水和に伴う組織について究明する予定である。

[参考文献]

- 1) 日本建築学会；高強度コンクリートの技術の現状 1991.1 P161~162
- 2) 日本建築学会；構造体コンクリート強度に関する動向と問題点 昭和62年11月 P141~142
- 3) 柿崎正義；水和熱は高強度コンクリートの強度発現にどう影響するか セメントコンクリート 1992.6
- 4) 中根、久保田、斉藤、一瀬；RC超高層建物用コンクリートに関する研究(その13, 15) 日本建築学会大会講演梗概集(北陸) 1992.8