

論文 型枠解体時期が構造体コンクリート強度に及ぼす影響

河上 浩司^{*1}・西本 好克^{*2}・榎田 佳寛^{*3}

要旨： 型枠解体時期が、高強度コンクリートを使用した構造体の内部強度分布に及ぼす影響を検討するため、模擬試験体による確認実験を行った。結合材種類は、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、そして低熱ポルトランドセメントにシリカフュームを混合したものである。実験の結果、普通ポルトランドセメントでは、初期高温履歴による強度低下と乾燥による部材表面の強度低下を確認できた。低熱ポルトランドセメントでは、温度履歴の影響は見られなかったが、乾燥による強度低下を確認できた。一方、シリカフュームを混合した場合は強度低下を確認できなかった。

キーワード： 高強度コンクリート、結合材種類、型枠解体材齢、強度発現

1. はじめに

構造体に打設されたコンクリートの圧縮強度は、部材の高さ方向や水平方向で一様でないことが知られている。特に、水平方向では、初期の温度分布や表面からの乾燥の影響で、強度変動を生じる可能性が高いにもかかわらず、水平方向の強度分布に関する研究報告は少ない¹⁾。

これまでに筆者らは、乾燥の影響が小さい部材中心部の温度履歴と強度発現に着目し、普通セメントでは、最高温度が高いほど長期強度増加が阻害されること、低熱セメントとシリカフュームの組み合わせでは、最高温度の影響は少なく、積算温度で強度発現を評価できることを確認した^{2),3)}。

本研究では、構造体内の水平方向におけるコンクリートの強度分布を把握するために、乾燥開始

材齢の異なる模擬試験体を作製し、強度確認を行った。その結果より、従来の温度履歴に加え、乾燥条件がコンクリートの強度発現や部材内の強度分布に与える影響について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験概要

実験の要因と水準を表-1に示す。今回の実験では主な検討要因を、結合材種類(3種類)、乾燥開始(型枠解体)材齢(4材齢)、および深さ方向(3種類)として圧縮強度発現の比較を行った。

使用材料を表-2に、配合計画を表-3に示す。配合名は、結合材種類と水結合材比との組み合わせで示す。化学混和剤は、L40ではAE減水剤を使用し、その他では高性能AE減水剤を使用した。

表-1 実験の要因と水準

結合材種類	普通ポルトランドセメント(N)	3種類
	低熱ポルトランドセメント(L)	
	L+シリカフューム(LSF)	
水結合材比	30%, 40% ^{*1)}	2種類
作製供試体	標準養生, 封かん養生, コア	3種類
型枠解体材齢	1, 3, 5, 7日	4材齢
試験材齢	7, 28, 91日 ^{*2)}	3材齢
コア採取位置	端面から75mm, 225mm, 375mm	3箇所
	^{*1)} 40%はLセメントのみ	
	^{*2)} 標準養生は材齢28日のみ	

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.15g/cm ³ 比表面積3300cm ² /g
	低熱ポルトランドセメント	密度3.24g/cm ³ 比表面積3240cm ² /g
混和材	シリカフューム	密度2.2g/cm ³ 比表面積 22.6m ² /g
細骨材	川砂(鬼怒川産)	表乾密度2.61g/cm ³ 吸水率2.68% FM 2.75
粗骨材	硬質砂岩碎石(葛生産)	表乾密度2.65g/cm ³ 吸水率0.97% 実積率58.9%
混和剤	AE減水剤, 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)	

*1 三井住友建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

なお、LSF30におけるシリカフュームの置換率は、質量で10%とした。

2.2 試験体作製方法

(1) 試験体形状

今回の実験において、製作した模擬試験体の形状を図-1に示す。模擬試験体は、大断面の柱や壁の一部を切り出した部分を模擬したもので、寸法は900×300×210mmである。両端面以外の4面は、ビニールと厚さ150mmの断熱材(発泡スチロール)で覆い、乾燥と放熱を防止した。両端面には鋼製型枠を用い、両端面からのみ放熱させている。端面の型枠は、表-1に示した所定の材齢で解体し、20℃60%RHに制御された養生室内で試験材齢まで静置、乾燥させた。なお、試験体中心部まで乾燥の影響が及ぶことはほとんどないと仮定し、両端面の型枠解体材齢を変えることで、一体の試験体で2種類の解体材齢における強度確認を行った。

試験体内部の温度履歴は、図-1に示すように試験体断面の中心線に沿った位置に熱電対を配置(T1~T4)し測定を行った。

(2) 作製手順

試験手順の概要を図-2に示す。コンクリートは、100Lの強制2軸ミキサで練り混ぜを行った。試験体は、各結合材で解体材齢が1日と3日とな

る3試験体をシリーズ1、解体材齢が5日と7日の3試験体をシリーズ2として製作を行った。同一シリーズ内の3試験体のコンクリート品質を一定とするため、70Lずつ3回に分けて練り混ぜたコンクリートを傾胴ミキサで混合して、フレッシュ試験や試験体製作に使用した。

(3) コア供試体

コア供試体は、JIS A 1107に準じて図-1に示す位置から12本を湿式のコアドリルを用いて採取した。コア供試体は、試験体端面から2本ずつを一組とし、外側から表面、中間、そして中心と称する。コア採取後は、研磨による成形を行い、JIS A 1108に準じて圧縮試験を行った。以後、コア供試体は型枠解体材齢と採取位置とで区別する。

3. 実験結果および考察

3.1 温度履歴

各試験体で測定された材齢7日までの温度履歴を図-3に示す。また、コア採取位置での推定最高温度とその到達時間を表-4に示す。ここで、コア採取位置での推定温度履歴は、コア採取位置を挟む2つの熱電対の測定結果を平均して算出した。

試験体内のコンクリート温度は、結合材種類や結合材水比に関係なく打設後5~6日ではほぼ室

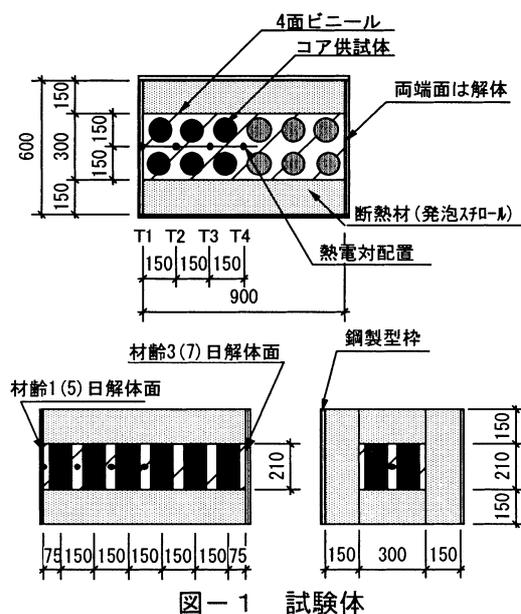


図-1 試験体

表-3 コンクリート配合

配合記号	W/B (%)	B/W	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)				
					W	C	SF	S	G
N30	30.0	3.3	44.8	3.0	160	533	0	750	937
L40	40.0	2.5	42.1	4.5	183	458	0	693	968
L30	30.0	3.3	45.2	3.0	160	533	0	762	937
LSF30	30.0	3.3	50.8	3.0	150	450	50	873	858

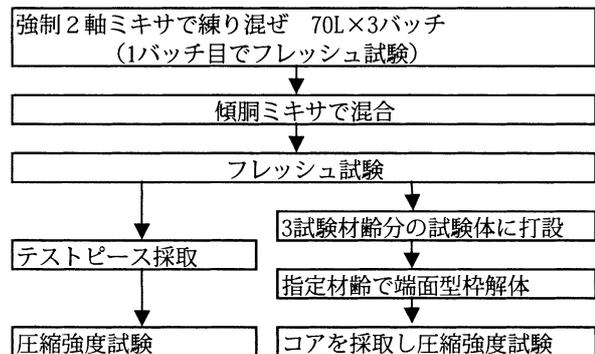


図-2 試験手順

温まで低下し、以降は20℃前後で推移した。試験体中心部(T4)の最高温度は、N30では70℃となったが、L40、L30、そしてLSF30では45～50℃であった。試験体中心部における温度上昇量を結合材100kgあたりで評価すると、N30では8.2℃となり、その他ではどれも4.2℃程度であった。

表-4より、表面コアと中心コア採取位置との温度上昇量の差は、N30で約20℃、L30で約10℃、そしてL40とLSF30では9℃弱となった。また、両コア採取位置での最高温度到達時間の差は、N30では3時間となったが、他は1.5時間、ないし2時間と短い。

3.2 圧縮強度

圧縮試験結果を表-5に示す。L30では試験体間で空気量が異なったため、別途行った試験に基づいて、空気量による圧縮強度の補正を行った。

なお、コア供試体の強度発現性状は、試験体製作シリーズごとに、対応する封かん養生28日強度を基準にした強度比として評価を行う。

(1) 普通ポルトランドセメント(N30)

N30試験体のコア強度発現について、強度比の評価した結果を図-4、ならびに図-5に示す。図-4には封かん養生の強度発現を併せて示し、主に材齢と強度発現について、封かん養生との比

較から検討を行う。図-5は、解体材齢別に各試験材齢での強度比を示したもので、部材内の強度分布傾向を検討する。図中には、材齢7日と91日における部材内の強度分布傾向を直線で示した。なお、その他の試験体についても、上記の2つの手法で検討を行う。

図-4からコア強度発現を検討すると、材齢7日では、強度比は封かん養生強度を若干下回る程度である。しかし、その後のコア強度増加量は小さく、材齢28日、91日では封かん養生強度を大きく下回る。また、コア強度のばらつきは、材齢7日から28日にかけて一度小さくなるが、材齢91日では、ばらつきがまた大きくなる試験体が見られる。

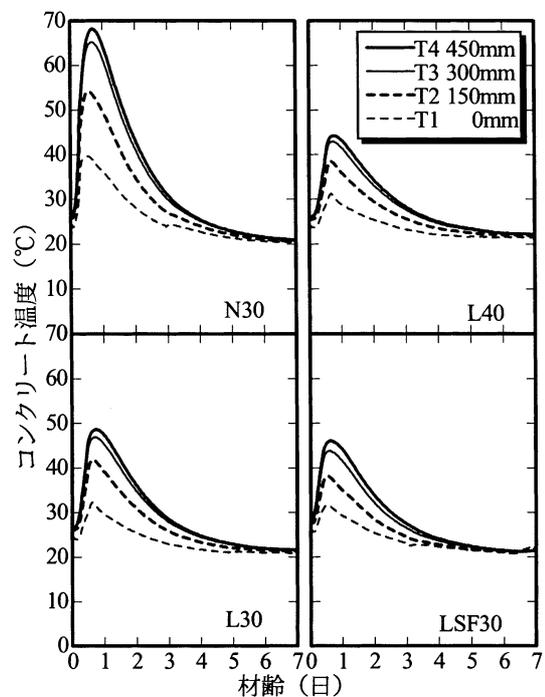


図-3 試験体温度履歴

表-4 温度測定結果

配合	初期温度(°C)	最高温度(°C)			到達時間(h)		
		表面	中間	中心	表面	中間	中心
N30	24.7	48.4	61.1	67.3	13.5	15.0	16.5
L40	25.3	34.9	40.7	43.6	16.0	16.0	17.5
L30	25.7	37.1	44.4	47.9	14.5	15.5	17.5
LSF30	24.8	34.4	40.1	43.1	15.0	16.0	17.0

表-5 圧縮強度試験結果

配合	材齢(日)	シリーズ1 圧縮強度(N/mm ²)									シリーズ2 圧縮強度(N/mm ²)								
		標準	封緘	模擬試験体コア						標準	封緘	模擬試験体コア							
				1日解体			3日解体					5日解体			7日解体				
				表面	中間	中心	表面	中間	中心			表面	中間	中心	表面	中間	中心		
N30	7		58.9	56.2	56.8	54.7	48.2	51.0	55.5		62.1	55.6	54.5	51.4	57.0	55.1	60.8		
	28	70.5	67.7	54.3	53.8	57.3	52.7	55.1	53.4	72.7	70.3	59.3	59.9	57.2	62.3	59.9	59.7		
	91		75.1	61.2	62.1	63.2	70.7	59.1	64.8		81.9	71.0	65.4	65.3	71.2	65.3	62.1		
L40	7		17.4	21.0	23.1	26.2	22.0	26.2	25.7		17.7	20.3	25.7	25.8	20.5	25.3	27.2		
	28	50.3	43.1	41.5	48.2	45.7	38.3	45.5	46.4	48.4	43.3	41.4	42.9	41.6	36.9	44.6	44.0		
	91		61.0	56.1	67.9	65.6	58.5	65.0	67.0		58.0	55.1	57.8	58.7	55.8	59.3	59.4		
L30	7		29.2	38.7	43.8	43.6	37.5	42.8	44.5		33.6	37.6	45.5	44.5	38.2	43.5	43.3		
	28	68.2	54.2	55.6	55.9	56.9	56.9	59.7	60.1	72.5	56.5	57.4	57.7	57.0	55.7	55.1	55.5		
	91		72.4	67.4	70.1	68.8	70.0	73.4	74.0		76.4	73.1	70.5	72.4	73.1	72.3	72.5		
LSF30	7		43.0	51.4	59.4	56.8	45.6	55.8	53.0		41.6	53.9	60.0	67.2	54.0	60.3	67.1		
	28	75.7	75.3	69.9	69.8	67.0	68.5	66.5	66.9	80.2	80.2	81.4	82.3	75.8	84.4	80.5	75.6		
	91		94.3	87.5	85.6	86.9	80.5	81.0	80.2		102.9	96.3	98.1	96.3	104.1	102.9	101.0		

図-5より、強度分布の傾向を直線の勾配から評価すると、材齢7日では勾配に統一性が見られず、部材内の強度分布傾向を判断するのは難しい。一方、材齢91日における部材内の強度分布を評価すると、解体材齢が3日以降の試験体では、直線が右下がりとなり、表面コア強度が高く内部が低くなる傾向が確認できた。

部材内の強度分布について強度発現率の検討を行う。材齢91日コアの強度発現率は、内部側(中間と中心)では約90%でほぼ一様である。一方、表面コアは解体材齢が3日以降の試験体では100%以上で、表面コアと中心コアの強度差は5~10N/mm²程度となる。この強度差は既往の報告¹⁾と一致している。しかし、1日解体試験体の表面コアの強度比は内部と同様に90%となった。

表面コアは初期高温履歴を受けないために、本来は長期強度が増加する傾向にあると考えられる。しかし、1日解体試験体の表面コアだけは、型枠の早期解体により乾燥の影響を大きく受け、表面コアの強度低下が起きたものと考えられる。

(2) 低熱ポルトランドセメント(L40)

L40試験体について、コア強度比を評価した結果を図-6,ならびに図-7に示す。

図-6より、コアの材齢7日強度は、初期発熱の影響を受けて、封かん養生より高くなることが確認できる。封かん養生に対する増加率は、内部側コアでは約20%(約10N/mm²)で、温度上昇量が比較的小さい表面部コアでは約10%であった。材齢28日,ならびに91日では、内部側コア強度は封かん養生と同等以上となる。

図-7より部材内強度分布を検討をおこなう。材齢7日では型枠解体材齢に関係なく、圧縮強度の分布は右上がりで一様な傾向を示している。また、中心と表面とのコア強度の差も全試験体で15%程度で一致している。ここで、コア採取位置での最高温度差は約9℃と小さいにもかかわらず、初期養生温度の差が、若材齢での強度発現に大きな影響を与えている。材齢91日になっても、部材内の強度分布は右上がりに変化はないが、材齢1,3日解体試験体では、直線の勾配が材齢7日より

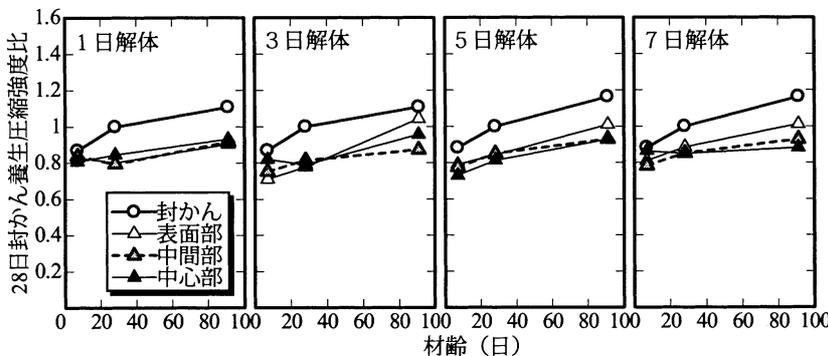


図-4 強度発現率(N30)
(材齢による発現率の推移)

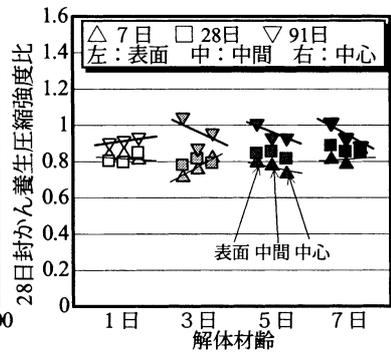


図-5 強度発現率(N30)
(材齢・採取位置による整理)

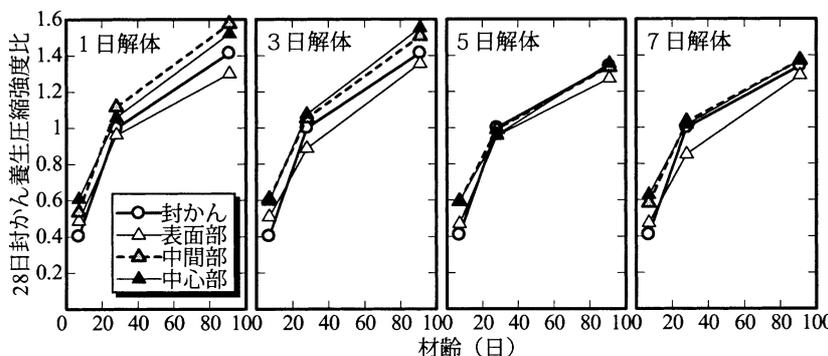


図-6 強度発現率(L40)
(材齢による発現率の推移)

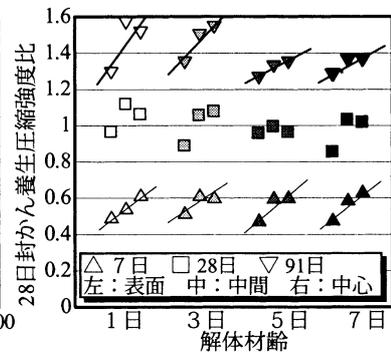


図-7 強度発現率(L40)
(材齢・採取位置による整理)

更に大きくなり、試験体内の強度変動が更に大きくなったことを示している。

表面コアの中心コアに対する強度低下率を比較すると、1日解体試験体では低下率は20%に及んだが、5日解体以降の試験体では約10%に低減している。両コアの強度差は、1日解体では9.5N/mm²だが、3日で8.5N/mm²、5日と7日では4N/mm²以下となった。型枠存置期間の長期化が、表面コアの乾燥による強度低下防止に有効に働いていると考えられる。

(3) 低熱ポルトランドセメント(L30)

L30試験体について、コア強度比を評価した結果を図-8、ならびに図-9に示す。

図-8より、コア供試体の材齢7日強度は、初期発熱の影響を受けて、封かん養生より高くなることが確認できる。封かん養生に対する増加率はL40とほぼ同値で、内部側のコアでは約20%となり、表面コアでは約10%であった。材齢28日、ならびに91日では、コア強度は封かん養生と同等か若干低い程度であり、表面コアにおいても極端な強

度低下は確認できなかった。この結果、部材内位置による強度のばらつきは、L40に比べて小さくなる傾向にある。

図-9より部材内強度分布を検討する。材齢7日での圧縮強度の分布傾向は右上がり、内部側の強度が表面コアと比べて高い。その強度比の差は、L40より若干小さい10%程度であった。材齢28日、ならびに91日における分布傾向をみると、直線の傾きは小さく、圧縮強度は試験体内ではほぼ均一に近い状態にあると評価できる。材齢1日と3日解体試験体では、表面コアは内部側のコアに比べ若干の強度低下が見られるが、その強度低下の程度はL40より小さい。

ここで、材齢1日、ならびに3日解体試験体の表面コアに見られる強度低下は、乾燥の影響によると考えられる。しかし、低下量はわずかであることから、乾燥の影響であると確定するためにはコアの含水率の検討を行うなど、更なる検討を要すると思われる。

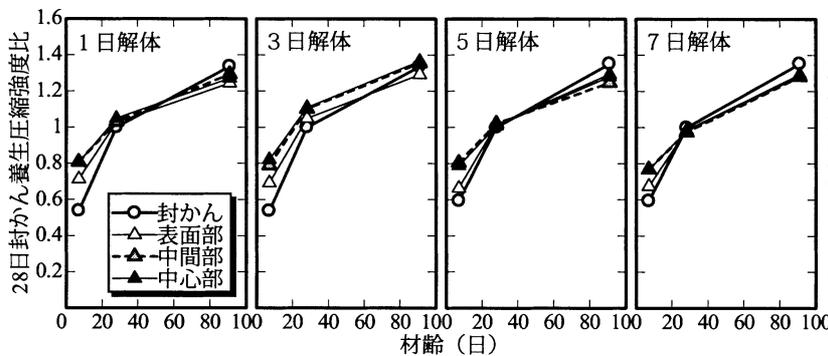


図-8 強度発現率(L30)

(材齢による発現率の推移)

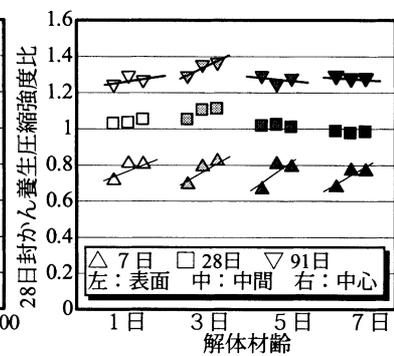


図-9 強度発現率(L30)

(材齢・採取位置による整理)

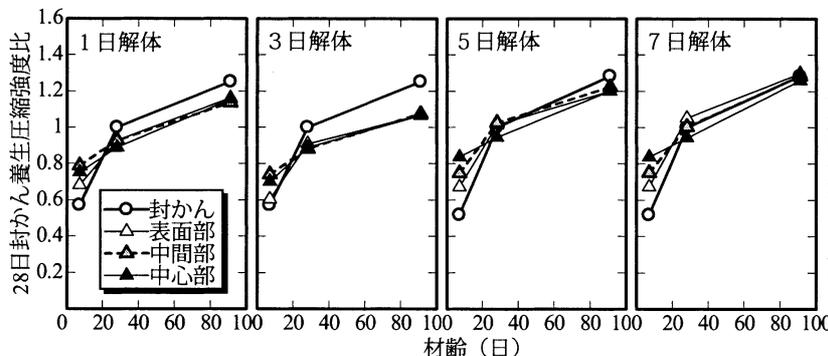


図-10 強度発現率(LSF30)

(材齢による発現率の推移)

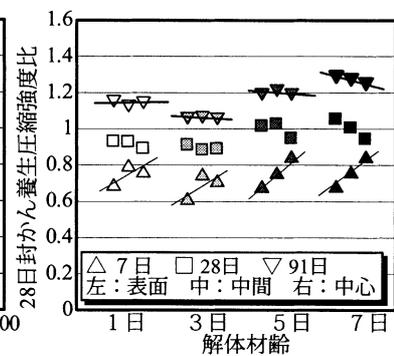


図-11 強度発現率(LSF30)

(材齢・採取位置による整理)

(4) 低熱セメント+シリカフューム(LSF30)

LSF30試験体について、コア強度比を評価した結果を図-10, ならびに図-11に示す。LSF30では、試験体の作製シリーズ間で大きな強度差が生じた。材齢91日における圧縮強度を比較すると、材齢5, 7日解体試験のコンクリート強度は、1, 3日解体試験のコンクリート強度より10N/mm²程度大きい。試験体間の差が大きいことから、主に試験体内の強度分布について検討を行うこととした。

図-10よりコア強度発現推移を検討すると、型枠解体材齢とは関係なく、材齢7日では中心コアの強度はL40やL30試験体と同様に高くなる。特に材齢5, 7日解体試験体では、表面から中心に向けて順に強度が高くなり、積算温度を反映した強度分布を示している。材齢28日では中心コア強度が低くなる試験体もあるが、材齢91日では各試験体で採取位置によるコア強度のばらつきは小さくなった。

図-11からも、材齢7日では、部材内部側のコアがより高強度となることが確認できる。材齢28日では、5, 7日解体試験体だけでなく、1, 3日解体試験体においても中心コアの強度が若干低くなっている。材齢91日でも中心コアの強度はわずかに低くなるが、試験体内で圧縮強度はほぼ均一となることが確認できた。なお、LSF30では、材齢1日解体試験体の表面コアであっても、強度低下は確認できなかった。

シリカフュームを混合することで、温度上昇量が小さいために水和反応が遅れると考えられる表層部においても、ごく初期材齢から緻密な組織が形成されると推測される。その結果、表面コアの採取位置に、強度低下を起すほどの乾燥の影響は及んでいないと考えられる。

5. まとめ

高強度構造体コンクリートの、長期材齢下における水平方向の強度分布について、以下の知見を得た。

- 1) 強度分布傾向は結合材種類により異なる。
また、その傾向は以下のようにまとめられる。
- 2) 普通ポルトランドセメント
 - ・部材中心部の強度が低下する傾向にある。
 - ・早期解体は表面で乾燥の影響を受ける。
- 3) 低熱ポルトランドセメント
 - ・部材内強度は均一となる傾向にある。
 - ・早期解体は表面の強度低下を起す。
 - ・乾燥の影響度は水セメント比が低いほど少ない。
- 4) 低熱ポルトランドセメント+シリカフューム
 - ・部材内強度は均一となる傾向にある。
 - ・早期解体が強度へ与える影響は小さい。

なお、本論は、限られた条件と試験結果から検討を行った結果である。今後は、みかけ含水率などのデータの充実を行い、水分移動など別の観点からの検討に取り組む所存である。

参考文献

- 1) 皆川 淳ほか：構造体中でのコンクリート強度発現の変動に関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24, No.1, pp.945-950, 2002.6
- 2) 西本好克ほか：高強度コンクリートの強度補正值に関する実機試験による検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1, pp.1055-1056, 2002.8
- 3) 河上浩司，西本好克：Fc100/mm²級の高強度コンクリートの強度発現に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.369-374, 2002
- 4) 佐藤幸恵，梶田佳寛：高強度コンクリートの構造体中での圧縮強度の変動，日本建築学会構造系論文集，No.562, pp.9-14, 2002.12