

論文 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

皆川 淳^{*1}・佐藤 幸恵^{*2}・榎田 佳寛^{*3}・河上 浩司^{*4}

要旨：構造体コンクリートの強度は同一断面内において中心部と表面部で相違があることはよく知られており、その原因としてコンクリート内部の温度および含水状態の影響が指摘されている。本研究では比較的断面の大きい構造体を想定した模擬部材を製作し、それらの影響を検討した結果、初期高温履歴を受けたコンクリートの長期材齢における20℃一定の養生のコンクリートに対する強度の比は水セメント比が大きいコンクリートの方が小さくなること、普通強度コンクリートでは結合水量と圧縮強度に相関性があるが、高強度コンクリートでは結合水量のみで圧縮強度が決まるわけではないことを明らかにした。

キーワード：コア供試体, 埋込供試体, 温度履歴, 含水率, 見かけの結合水率

1. はじめに

コンクリートの強度は構造体の内部で一様ではなく、高さ方向における上部と下部、水平断面における中心部と表面部などで変動することが知られている¹⁾²⁾。この原因として高さ方向の主たる変動としてブリーディングや圧密の影響があり、水平方向の変動として構造体内部におけるコンクリートの温度履歴、含水状態の相違などの影響が指摘されている。それらの影響をあわせて把握することは構造体コンクリートの強度を管理する上で重要である。

本研究は、特に同一の水平断面内のコンクリート強度発現の変動を調べたものであり、比較的断面の大きい柱あるいは壁などを想定した模擬部材を製作し、部材内部の位置による温度変化、含水状態の変化、強度発現の違いをコア供試体を用いて試験した。また、標準養生供試体および20℃封かん養生供試体との比較、コア供試体と同一温度履歴の封かん養生供試体との比較を行い、構造体コンクリートの強度発現に及ぼす温度および含水状態の影響について検討した。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
W/C (%)	30,40,60
供試体の種類	部材コア供試体 部材温度履歴追従養生供試体 標準養生供試体 20℃封かん養生供試体
部材位置	表面, 中間, 中心
材齢(日)	3 [※] , 7, 28, 91

※W/C60%の材齢3日は強度試験用の部材を作製していない。

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
細骨材	鬼怒川産川砂 表乾密度：2.58g/cm ³ 吸水率：2.68% FM：2.75 実績率：65.5%
粗骨材	葛生産砕石 表乾密度：2.67g/cm ³ 吸水率：0.97% FM：6.47 実績率：60.1%
混和剤	種類 高性能AE減水剤 成分 ポリカルボン酸エーテル系の複合体
	種類 AE減水剤 成分 アルキルアリルスルホン酸化合物及びポリオール複合体

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

*2 宇都宮大学大学院 工学研究科エネルギー環境科学専攻 工修 (正会員)

*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*4 住友建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

表-3 計画調合

W/C (%)	目標スラブ (cm)	目標Air (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				混和剤	
				W	C	S	G	種類	添加率
30	23	3.0	43.8	160	533	724	963	高性能AE減水剤	C×1.2%
40	18	4.5	40.6	183	458	657	995	AE減水剤	C×0.4%
60	18	4.5	45.8	175	292	813	995	AE減水剤	C×0.4%

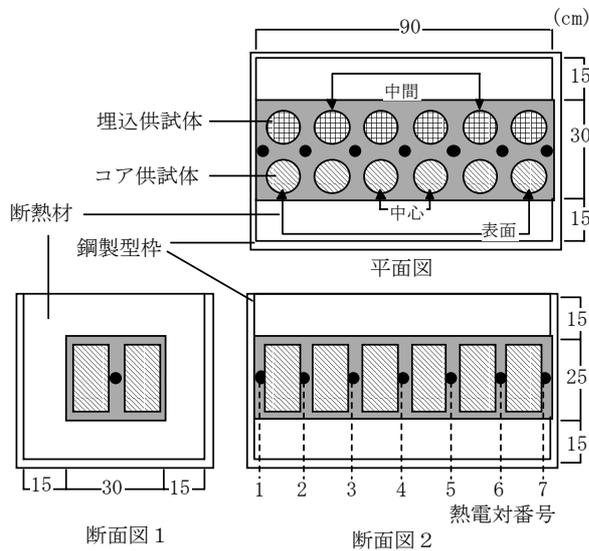


図-1 模擬部材の概要

表-4 コア抜き位置の最高温度
および最高温度到達時間

W/C (%)	最高温度 (°C)			最高温度到達時間 (h)		
	表面	中間	中心	表面	中間	中心
30	55.0	68.9	75.5	13.0	15.0	16.5
40	48.6	60.6	66.8	20.0	20.0	20.0
60	37.0	44.1	47.8	21.8	21.8	22.3

2. 実験方法

2.1 実験計画

表-1に実験の要因と水準, 表-2に使用材料, 表-3に計画調合を示す。空気量は空気量調整剤, 消泡剤を用いて調整した。

2.2 供試体の作製

模擬部材は90×30×25cmの寸法で, 図-1に示すように両端面を鋼製型枠とし, 底面および側面を厚さ15cmの断熱材(発泡スチロール)で形成した型枠中に, コンクリートを打ち込み, さらに上面をならした後, 直ちに厚さ15cmの断熱材で被い, 製作した。両端面の鋼製型枠は材齢7日に取り外し, 自由乾燥とした。コア供試体は図-1に示す位置からJIS A 1107に準じて6本を

模擬部材から湿式のコアドリルを用いて直接切り取り, それぞれを切り取り位置に応じて2本1組とし, 表面, 中間, 中心とした。コア供試体と同一温度履歴の封かん養生供試体も図-1に示す通り, コア供試体と同一温度履歴を受けると考えられる位置にφ10×20cmの鋼製軽量型枠を埋め込み(以後, 埋込供試体と記す), その中にコンクリートを打ち込み, 上面にふたをして, 水分の移動はない状態とした。中央部分には熱電対を埋設し, 測定位置は7カ所とした。上記の試験体の他に強度管理用の供試体としてφ10×20cmの標準養生供試体, 封かん養生供試体を作製し, 養生温度を20°C一定とした。

2.3 測定項目および測定方法

測定項目は, 圧縮強度, コンクリートの温度履歴, コンクリートの含水率である。コア供試体, 埋込供試体は成形後, 直ちに試験を行った。圧縮強度はJIS A 1108に準じて試験を行い, コンクリートの含水率は, 圧縮強度試験後の破碎供試体の中央部塊をバットに採取し, 105°Cの乾燥機で恒量になるまで加熱し, 加熱前後の質量差から計算によって求めた。

3. 実験結果

3.1 温度分布

図-2に模擬部材内部温度の経時変化, 表-4にコア抜き位置の最高温度および最高温度到達時間を示す。熱電対の位置と供試体の位置が違うので, コア供試体位置の両側面の温度を平均して求めた。W/C30%のコンクリートとW/C60%のコンクリートを比較すると, 中心部で最高温度の差は30°C程度, 表面部で20°C程度あり, 水セメント比の違いによる最高温度の差は部材中心部で顕著に現れた。また, 同調合で中心部と表面部を比較した場合, 最高温度の差はW/C30%

のコンクリートで 20°C 程度，W/C60% で 10°C 程度となり，W/C30% のコンクリートの方が部材位置による温度の違いが大きいことが分かる。

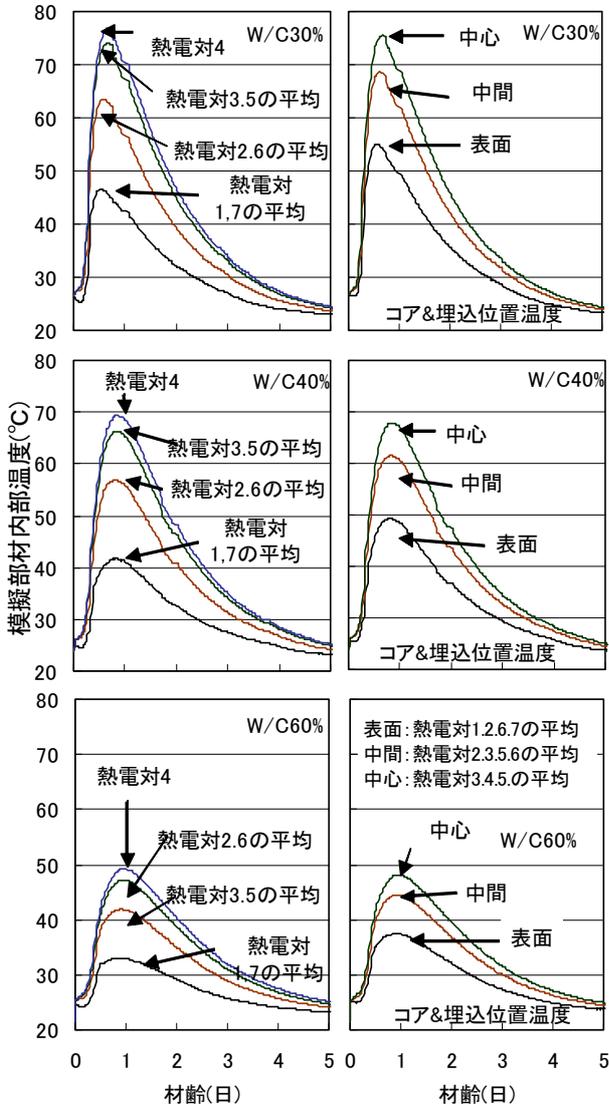


図-2 模擬部材内部温度の経時変化

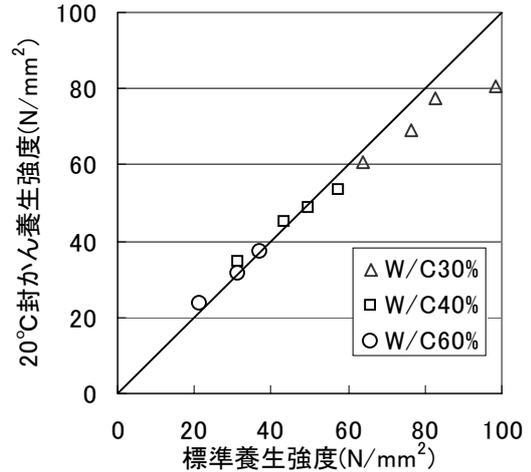


図-3 標準養生強度と 20°C 封かん養生強度の関係

3.2 強度発現

表-5 に圧縮強度試験結果および積算温度計算結果，図-3 に標準養生強度と 20°C 封かん養生強度の関係を示す。圧縮強度が 50 N/mm² 程度までは標準養生強度と封かん養生強度はほぼ同じであるが，60N/mm² を越えるあたりから，標準養生強度が封かん養生強度に比べて大きくなる傾向にある。標準養生と封かん養生は温度条件が同一であるため，この強度差は水分によるものであり，水セメント比の小さい高強度コンクリートではセメント量に対して単位水量が少ないのでその後の湿潤養生が重要となってくる。図-4 に積算温度と圧縮強度の関係を示す。コア供試体，埋込供試体ともに，積算温度が大きくなるにつれ，20°C 封かん養生強度と差が生じて

表-5 圧縮強度試験結果および積算温度計算結果

W/C (%)	材 齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)									積算温度 (D°D)		
		標準養生	封かん養生	コア			埋込			20°C 一定	表面	中間	中心
				表面	中間	中心	表面	中間	中心				
30	3	63.7	60.6	65.7	68.3	68.0	66.5	67.7	70.5	90	148	171	183
	7	76.2	69.3	65.5	62.2	70.3	67.9	69.9	73.9	210	286	313	328
	28	82.5	77.4	72.4	74.9	75.1	75.1	71.0	72.9	840	959	987	1002
	91	98.6	80.8	80.7	74.6	77.3	74.8	76.2	71.9	2730	2849	2877	2892
40	3	31.3	34.4	40.4	43.0	44.3	40.3	42.7	44.2	90	144	165	176
	7	43.3	45.1	42.8	43.7	44.0	40.3	41.1	39.7	210	283	310	324
	28	49.8	48.7	48.7	47.0	46.2	45.1	45.1	45.1	840	930	958	973
	91	57.7	53.4	45.9	47.5	46.7	44.8	39.7	40.1	2730	2820	2848	2863
60	7	21.7	23.6	24.0	23.9	24.1	20.9	21.7	21.8	210	263	281	291
	28	31.6	31.2	31.4	28.0	29.1	24.8	24.7	24.5	840	905	924	936
	91	37.2	37.1	36.7	35.7	29.6	31.9	31.2	29.7	2730	2795	2814	2826

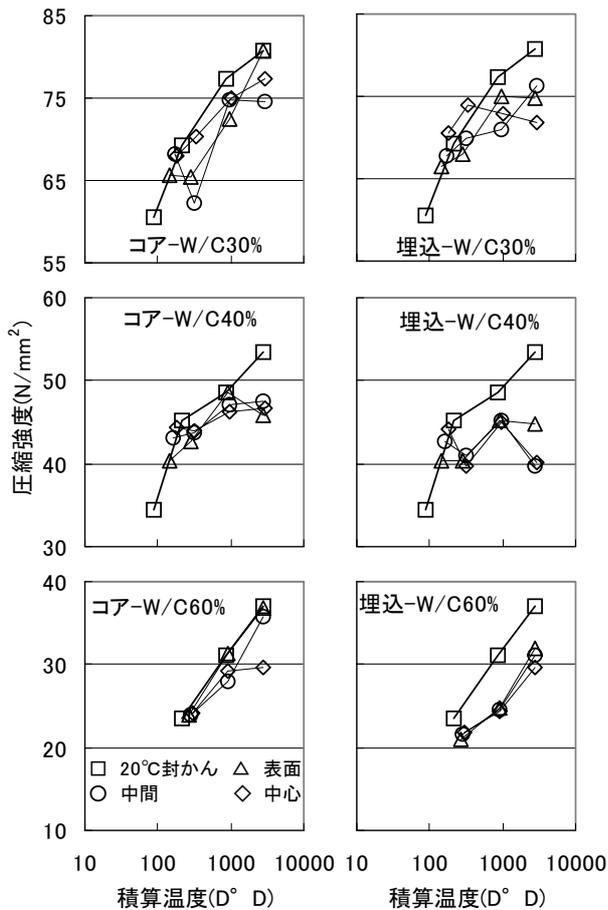


図-4 積算温度と圧縮強度の関係

きており、初期材齢に高温履歴を受けると長期材齢になって強度増進が少ないということが分かる。

3.3 最高温度による影響

図-5 に最高温度と 20°C一定の養生のコンクリートに対するコア供試体及び埋込供試体の強度の比の関係を示す。20°C封かん養生と埋込供試体はどちらも水分の影響が同じなので、温度の影響のみで表される。初期材齢では高温の影響を受けて水和反応が促進され、埋込供試体強度の方が大きくなるが、同調合の場合、長期材齢になると最高温度がより高いほど 20°C封かん養生強度に対する埋込供試体強度比は小さくなる。調合別で比較すると W/C60%のコンクリートが最高温度の影響を受けやすく、W/C 30%のコンクリートでは最高温度が大きいものの、20°C封かん養生に対する強度比は 0.9 倍程度にとどまっている。一般に最高温度が高いほど強

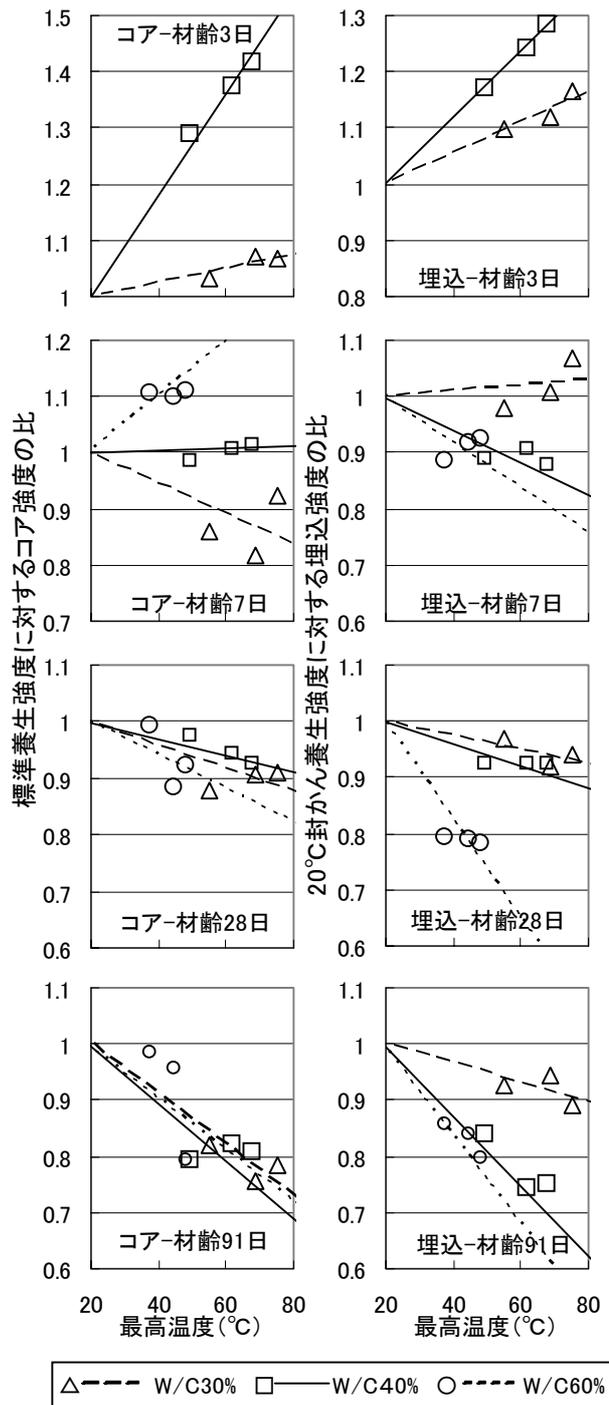


図-5 最高温度と 20°C一定の養生のコンクリートに対する強度の比の関係

度増進が少ないと言われているが、W/C の小さいコンクリートほど最高温度の影響は小さいという報告等もある³⁾。今回の実験結果においても最高温度の影響は W/C 30%のコンクリートが一番小さい結果となった。W/C40%, 60%のコンクリートは W/C 30%のコンクリートと比べて、最高温度そのものの値は小さいものの、初期高温

履歴の影響を非常に受けやすく、最高温度による強度比の低下は著しくなった。W/C が 40%以上のコンクリートを夏期に打込む際や大断面部材内では通常よりも最高温度が大きくなりやすく、強度管理用供試体に対する強度比が極端に小さくなる可能性があり、強度管理上の留意点としなければならない。標準養生強度に対するコア供試体強度の比は温度の影響の他に水分の影響もあり、最高温度のみで強度の比を説明することは難しい。

3.4 コア供試体と埋込供試体

図-6 にコア強度と埋込強度の関係を示す。50N/mm² 程度まではコア強度は埋込強度よりも大きくなる傾向にあるが、70~80 N/mm² になるとコア強度と埋込強度との間に相違がみられなかった。表-6 に単位容積質量と含水率の測定結果、図-7 に見かけの結合水量の差と圧縮強度の差の関係を示す。見かけの結合水量差は

$$\begin{aligned} & (\text{単位水量}) \pm (\text{吸水} \cdot \text{乾燥による水分量の変化}) \\ & = (\text{見かけの結合水量}) + (\text{含水量}) \end{aligned}$$

という関係から、(単位水量)は調合値、(吸水・乾燥による水分量の変化)はコア供試体と埋込供試体の単位容積質量の差、(含水量)は実験値を用いて算出した。見かけの結合水量の差の値は結合水量の理論値からみて、大きいものもあるが、W/C40%、60%のコンクリートはコア供試体と埋込供試体の見かけの結合水量の差が大きいほど圧縮強度の差も大きい傾向が認められる。

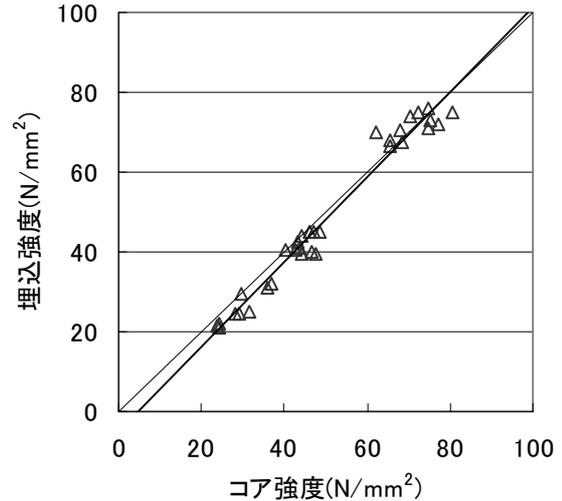
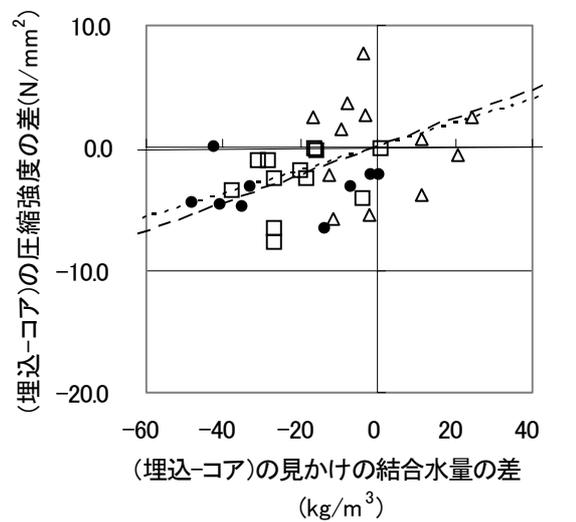


図-6 コア強度と埋込強度の関係



△ — W/C30% □ - - - W/C40% ● - - - W/C60%

図-7 (埋込-コア)の見かけの結合水量差と圧縮強度差の関係

表-6 単位容積質量と含水率測定結果

W/C (%)	材齢 (日)	単位容積質量(g/cm ³)									含水率(%)								
		標準養生		封かん養生		コア			埋込			標準養生		封かん養生		コア		埋込	
		表面	中間	表面	中間	中心	表面	中間	中心	表面	中間	中心	表面	中間	中心	表面	中間	中心	
30	3	2.44	2.43	2.43	2.42	2.42	2.44	2.44	2.44	5.14	4.99	4.79	4.75	4.87	4.82	4.86	4.84		
	7	2.46	2.46	2.46	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44	5.32	4.80	4.71	4.96	4.78	5.17	5.09	5.08		
	28	2.43	2.43	2.43	2.43	2.44	2.43	2.44	2.43	5.24	4.64	4.52	4.55	4.57	4.66	4.71	4.76		
	91	2.44	2.42	2.44	2.44	2.43	2.43	2.43	2.43	5.15	5.05	4.75	4.61	4.78	5.02	4.96	4.94		
40	3	2.37	2.37	2.36	2.38	2.38	2.36	2.36	2.36	6.88	6.46	6.10	5.97	5.82	6.02	6.06	5.89		
	7	2.35	2.35	2.36	2.35	2.34	2.33	2.33	2.34	6.11	5.75	5.98	5.77	5.98	5.92	5.91	5.51		
	28	2.33	2.31	2.35	2.35	2.35	2.31	2.33	2.32	6.21	5.42	5.85	5.84	6.24	5.66	5.72	5.75		
	91	2.35	2.31	2.34	2.34	2.34	2.31	2.31	2.32	6.29	5.69	5.40	5.73	5.56	5.84	5.90	5.77		
60	7	2.31	2.30	2.31	2.30	2.31	2.31	2.30	2.31	7.67	6.80	6.85	6.53	6.58	7.22	7.41	6.97		
	28	2.30	2.30	2.33	2.35	2.35	2.31	2.32	2.31	7.25	6.49	6.31	6.31	6.30	6.33	6.53	6.53		
	91	2.32	2.31	2.34	2.35	2.34	2.31	2.30	2.30	7.16	6.57	5.89	6.04	6.31	6.62	6.57	6.50		

一方、W/C30%のコンクリートについては結合水量の差と圧縮強度の差の関連は認められなかった。この理由として、W/C30%以下となるようなコンクリートの圧縮強度は単に結合水量の大小で決まるわけではなく、その形成される組織の違いが大きく影響するものと考えられる。

3.5 部材内の位置による比較

図-8 に部材内の位置と圧縮強度の関係を示す。コア供試体、埋込供試体ともに部材内位置による圧縮強度に明確な差が認められなかった。しかし、実際の構造体のコア強度を調べた場合、同断面内において圧縮強度が一様ではない例も多数存在し、今回の結果のみで部材内での圧縮強度に差がないと断定することは難しいと思われる。部材中心部では初期材齢に高温履歴を受けるため、水和反応が急激に進み、部材表面部と比べ相対湿度が低下し、中心部への湿分の移動が起こり、圧縮強度の増進がみられるが、部材表面部では乾燥と湿分の移動の影響により、部材中心部より圧縮強度が低くなると考え、今回の実験を行った。しかし、湿度の影響は、正確な測定が難しく、今回の実験のみでは正確に現象を把握することができなかった。今後はデータを蓄積し、構造体強度に及ぼす諸因子を多角的に解明することを課題としたい。

4. まとめ

構造体コンクリートの強度変動に及ぼす温度及び含水状態の検討を行った結果、本研究の範囲では以下のようなことが明らかとなった。

- 1) 水セメント比が大きいコンクリートほど最高温度の影響を受けやすく、長期材齢で 20℃一定で養生したコンクリートに対する強度の比は小さくなる。
- 2) 水セメント比が大きいコンクリートでは見かけの結合水量と圧縮強度の相関性がみられるが、W/C30%のコンクリートでは圧縮強度と見かけの結合水量との関係は明確ではなかった。
- 3) 今回の実験では部材内の水平断面での位置による強度の差は明確には認められなかった。

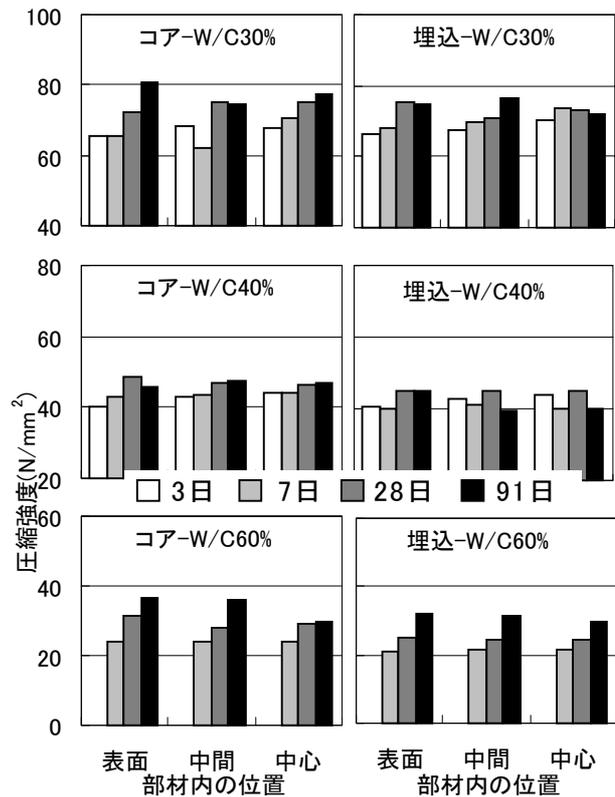


図-8 部材内の位置と圧縮強度の関係

謝辞

本研究を遂行するにあたり、住友建設(株)の西本好克氏、宇都宮大学卒論生の大沼薫春君、小泉信一君にご協力を受けました。また論文のとりまとめに際し、宇都宮大学助手の中村成春氏、宇都宮大学大学院博士後期課程の萩原伸治氏に貴重な助言をいただきました。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点，1987.11
- 2) 杉山雅：構造体コンクリートの力学的性状に及ぼす乾燥の影響に関する研究，学位請求論文，1980
- 3) 陣内浩，黒岩秀介，早川光敬：初期に高温履歴を受ける高強度セメント硬化体の強度発現性状と微細構造，日本建築学会構造系論文集 No542，pp39-46，2001