

構造物躯体コンクリートの強度管理に関する研究（その5）

——強度差を生じさせる要因についての実験的検討——

SCCS 研究グループ

Strength Control of Concrete in Structures (Part 5)

——Experimental Studied on the Factors influencing Strength Differentials——

SCCS Research Group

Abstract

Since 1976, a number of field tests have been carried out during various seasons on model members with dimensions selected to be representative of those of actual buildings. From the results obtained, it may be pointed out that fairly large differences are observed between vertical members such as columns and walls. This report is devoted to explanations of factors influencing strength development of concrete in columns. The points studied are (1) differences in strength between reinforced columns and plain columns, and differences in strength according to placing speed, (2) correlations of core strength with consolidation force, consolidation quantity, water-cement ratio of fresh concrete, and with water-cement ratio, air content, moisture content, unit weight of hardened concrete, and (3) influence of initial curing conditions (up to 7-day age) on strength gain of concrete.

概 要

昭和51年から実施している一連の実大模擬部材コンクリートの実態調査結果では、柱・壁などの垂直部材コンクリートの高さ方向に強度差が認められた。本報では、これら強度差に及ぼす各種要因との因果関係を柱形模擬部材について述べた。検討項目は大別すると(1)有筋・無筋部材に於けるコア強度、および打上り速度の違いによるコア強度、の実態調査、(2)まだ固まらないコンクリートの圧密力、圧密量、水セメント比、および硬化コンクリートの水セメント比、空気量、含湿率、単位容積重量、などとコア強度の対応関係、(3)初期養生（材令7日まで）条件がコンクリートの強度発現におよぼす影響、などについてである。

1. はじめに

前報（大林組技術研究所報 No. 16, 1978）で述べた普通コンクリートの柱・梁・壁・床スラブ等の実大模擬部材に関する調査結果は、柱・壁などの鉛直部材と梁・床スラブなどの水平部材との間に、また、鉛直部材では高さ方向に強度差のあることが認められた。

本研究は、これらの実態調査結果を踏まえた上で、普通コンクリートの鉛直部材(柱)の強度差に及ぼす各種要因について検討を行なったものである。なお、これら一連の実態調査結果を整理するための補足実験として「コア抜き取りによる影響の実験的検討」（大林組技術研究所報 No. 17, 1978）、並びに「初期養生条件が強度に及ぼす影響」（本報の一部に記載されている）等について

併せて検討した。

2. 実験の目的と概要

2.1. 今回の実験目的

普通コンクリートの鉛直部材(柱)において、強度差に影響を及ぼす各種要因を詳細に検討することに主眼をおき、実験の目的を次のように決めた。

- (1) 有筋・無筋の部材におけるコンクリート強度の差異
- (2) 打上り速度がコンクリート強度に及ぼす影響
- (3) 部材内におけるまだ固まらないコンクリートの圧密力、圧密量の水セメント比（塩酸溶解熱法による）、および硬化コンクリートの水セメント比（セメント協会F-18法）、空気量、含湿率、単位容積重量、などとコア強度との関係

(4) 各種養生シリンダー強度とコア強度の関係

2.2. 実験の概要

当技術研究所構内に表-1のような柱形の実大模擬部材を3体製作し、各調査項目に従って実態調査を行なった。但し、打上り速度については、圧密量測定の場合上、当初計画した速度をかなり下まわる結果となった。なお、調査時期は、前期に実施した実験のうち秋季と同時期を選んで行なった。

2.2.1. 使用コンクリート 打込んだコンクリートは、前回の実験に用いたものと同一で、 $F_c=210 \text{ kg/cm}^2$ 、スランプ18cmの普通コンクリートである。生コンクリートの所要量は約 8 m^3 になるため、2台の生コン車で運搬したが、できるだけ均質なコンクリートを打込むようにするため、2台の生コン車から同時にコンクリートポンプ車のホッパー口へ排出し、攪拌しながら打込んだ。打込み中は、経時的にスランプ試験シリンダー供試体を採取して、コンクリート流れに品質上の変化があるか否かをチェックした。打込み後の養生は、仮設小屋にシートがけとし、型枠の脱型(3日後)、養生等は全て前回の実験条件を踏襲して行ない、通常の現場が行なっている程度(常用なみ)とした。

項目	実大模擬部材	管理用供試体
圧縮強度 (弾性係数)*	<ul style="list-style-type: none"> ● 抜き取りコアによる強度試験 <ul style="list-style-type: none"> ○ $10\phi \times 20\text{cm}$ ○ 上、中上、中下、下 ○ 材令 4W、13W (柱I、II、III) ● 非破壊試験法による強度の推定 <ul style="list-style-type: none"> ○ スーパーソニック法* ○ シュミットハンマー* (柱I、II、III) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 各種養生シリンダーの強度試験 <ul style="list-style-type: none"> ○ 標準養生(水中、気中) ○ 現場養生(水中、気中) ○ 供試体10ϕ、15ϕ (気中のみ) ○ 材令 1W(気中)、4W、13W
圧密力 圧密量	<ul style="list-style-type: none"> ● 土圧計によるコンクリート内部の圧力及び沈下量の測定 (柱II、III) 	
水セメント比	<ul style="list-style-type: none"> ● 打設後安息状態に達した時点のw/cの推定 <ul style="list-style-type: none"> ○ 塩酸溶解熱法 ○ 上、中上、中下、下 (柱I、II、III) ● 硬化コンクリートのw/cの推定 <ul style="list-style-type: none"> ○ F-18法 ○ 上、中上、中下、下 (柱I) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 模擬部材の測定箇所に対応するコンクリートのw/cの推定 <ul style="list-style-type: none"> ○ 塩酸溶解熱法 ○ 上、中上、中下、下に対応する試料 (柱I、II)
硬化コンクリートの空気量	<ul style="list-style-type: none"> ● 試験後のコア供試体について測定 <ul style="list-style-type: none"> ○ リニアトランス法 ○ ポロシメーター法* } ASTM C457-71 ○ 上、中上、中下、下 (柱I) 	
養生温度	<ul style="list-style-type: none"> ● 部材内部の温度測定 <ul style="list-style-type: none"> ○ 熱電対 (柱I、II、III) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 各種養生シリンダーの温度測定 <ul style="list-style-type: none"> ○ 熱電対
コンクリートの含湿率	<ul style="list-style-type: none"> ● 部材内部の湿潤度の測定 <ul style="list-style-type: none"> ○ エース親感湿度計* ○ 電極法 ○ 高さ方向の中央部 (柱I、II) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 気中養生シリンダーの湿潤度の測定 <ul style="list-style-type: none"> ○ エース親感湿度計* ○ 電極法
その他	<ul style="list-style-type: none"> ● 打設速度 (柱I、II、III) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 生コンの出荷時 荷卸し時 打設中の品質変化の調査*

*印の結果は今回発表せず

表-3 調査項目一覧表

2.2.2. 調査項目と方法 調査した項目は表-3に、測定位置は図-1~2に示した。今回は、柱部材の上下方向の強度差が何故生ずるかを究明するため、土圧計(2 kg/cm^2)を各測定点に中吊りさせて圧密力を、また、打

記号	部材寸法 (cm)	鉄筋の有・無	打上り速度m/hr		締め固め方法	
			計画	実施	計画	実施
I	80×80×400	有	40	8.1	流し込み	棒突き叩き
II		無	6	5.4	棒突き叩き	同上
III		無	40	8.7	流し込み	同上

表-1 柱形実大模擬部材の寸法と製作方法

粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ(cm)	空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(kg/m ³)	単位水量(kg/m ³)	セメント(kg/m ³)	細骨材(kg/m ³)	粗骨材(kg/m ³)	AE減水剤(kg/m ³)
20	18	4	59.3	45.7	185	312	794	967	0.312

使用材料 ●細骨材：鬼怒川、秩父産の混合
最大寸法：2.5mm、表乾比重：2.58、FM：2.64
●粗骨材：秩父、青梅産の混合
最大寸法：20mm、表乾比重：2.64、FM：6.67

表-2 コンクリートの調査

抜き取り位置	材令(週)		4	13
	内側	外側		
上部	内側	外側	8	4
	内側	外側	8	4
中部(上)	内側	外側	8	4
	内側	外側	8	4
中部(下)	内側	外側	8	4
	内側	外側	8	4
下部	内側	外側	8	4
	内側	外側	8	4
合計			64	32

表-4 コアの抜き取り位置と本数

養生その他の条件		試験材令(週)		供試体数(本)		
		10φ	15φ	10φ	15φ	
標準養生 (20°C一定)	水中	4	—	15	—	
		13	—	10	—	
	気中	1	1	5	5	
		4	4	15	15	
現場養生	水中	4	—	15	—	
		13	—	10	—	
	気中	1	1	5	5	
		4	4	15	15	
時系列	有筋	上部相当	4	—	3	—
		中部相当	4	—	3	—
		下部相当	4	—	3	—
	無筋	上部相当	4	—	3	—
		中部相当	4	—	3	—
		下部相当	4	—	3	—
同上(遅い)	無筋	4	—	3	—	
合計				131	60	

表-5 各種養生シリンダーの種類と採取本数

込み後の土圧計の沈下量から圧密度を測定した。部材内部におけるまだ固まらないコンクリートの水セメント比は、安息状態に達した時点で型枠面から深さ 10~20 cm の試料を採取し、塩酸溶解熱法により測定した。硬化後のコンクリートについては、柱 I の上・中上、中下、下の各コア供試体の一部を化学分析して求めた。なお、分析に用いたコア供試体については、リニアトラバース法により空気量をも併せて測定し、部材内部の上下方向における空気量の変化を調査した。コンクリート内部の湿分は、前回使用したエース鋭感湿度計に加え今期より電極法も併用して使用した。電極法は、アクリル板に固定した 2 本のステンレス棒間の電極抵抗を求め、更にその比抵抗とコンクリート湿分の関係 (校正曲線) から湿分を測定するものである。コンクリートの養生温度は熱電対 (C-C) によった。

2.2.3. コア供試体の採取および試験方法 図-1 に示すように、柱形部材の高さ方向を 4 ブロックに分け、それぞれのブロックより材令 4 週時に 4 本、13 週時に 2 本ずつ合計 24 本をコアボーリングした。圧縮試験用供試体の作製は、コア長さ 80 cm を 4 分割して、10φ×20 cm とした。抜き取り方向は、強度上の方向性が大きく認められないという前期の検討結果に基づいて水平方向

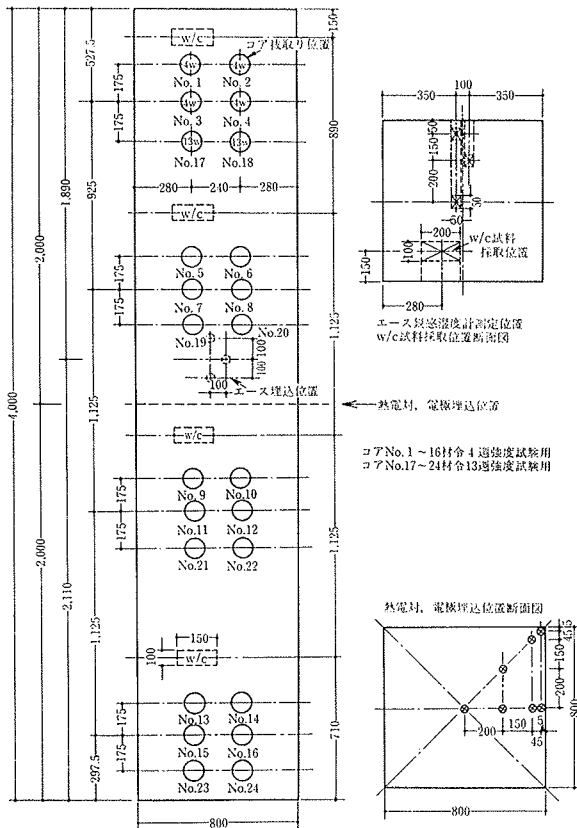


図-1 コア供試体、W/C 試料の採取位置、およびエース鋭感湿度計、電極、熱電対の埋込位置

とした。但し、今回新たに加えた有筋部材については、無筋の場合と対比することを考慮して方向性の試験を併せて行なった。

コア圧縮供試体の数は、柱の 1 部材につき材令 4 週 64 本、13 週 32 本であるが、採取直後に直径、高さ、重量を計測し、硫黄キャッピングを施した。供試体の湿潤の程度は、前期と同様に部材内の湿潤度を保持するように努めた。即ち、コア供試体はキャッピングを施した後、圧縮試験するまでの間、濡れウエスで覆い、湿分の逸散を防いだ。

弾性係数はコア供試体の半数について、コンプレッションメーターを使用して測定したが、今回は紙面の都合により省いた。

有筋の柱体は、通常使用されている程度の配筋量 (主筋 16-D25, フープ 13 φ@100) としたが、コア供試体を抜取る際に鉄筋を切断することがないように、あらかじめ主筋、帯筋の位置を明確にし、あるいは帯筋のピッチを採取位置のみ大きくした。

3. 実験結果と考察

3.1. 部材間および部材内の部位による強度差

柱部材から抜き取ったコア供試体の部位別圧縮強度試験結果 (材令 4, 13 週) を表-6 に、また、これらコア

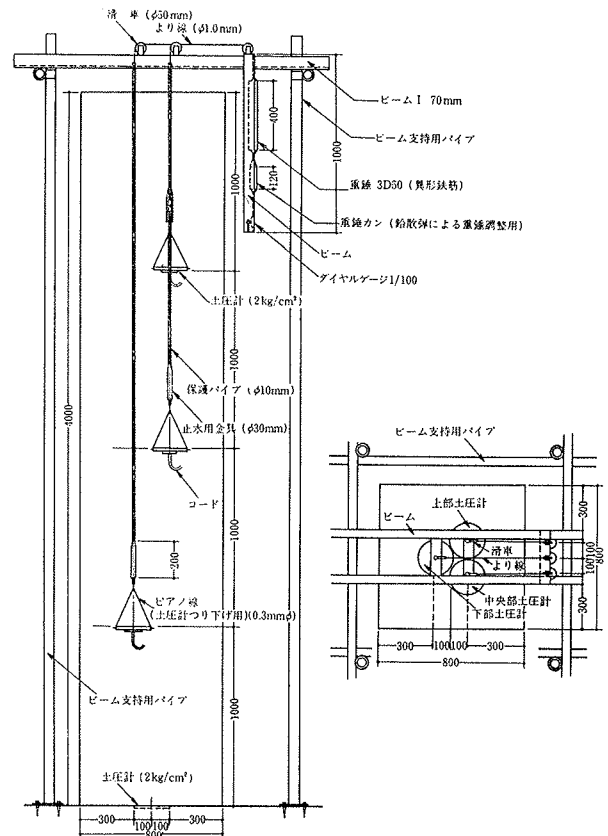


図-2 圧密度、圧密度の測定方法

強度の分散分析結果(材令4週)を表一7に示す。これらの結果によれば、柱部材間及び高さ方向の部位間に有意差が認められた。

柱部材間では、柱Ⅲ(無筋)上部の強度が他の柱Ⅰ、Ⅱ上部に比べて17~27kg/cm² 高目に発現しており、この強度差が有意差ありという結果を招いたものと考えられる。この様な強度差を生じた原因は、柱Ⅲ上部コンクリートを打設する際のポンプ圧送に若干のトラブルを生じたため打設所要時間が長目となり、やや硬目のコンクリートを打設したこと起因しているものと推察される。

高さ方向の強度差については、昭和51年度に実施した一連の実験結果と同様下部へ向うに従って強度が高くなる傾向にあり、その傾向は材令4週より13週の方がより顕著に現われている。なお、これら高さ方向の強度差に及ぼす影響因子は圧密力であろうと考えられるが、詳細については3.4.4.で述べているので参照されたい。一方、柱断面の内外の強度差および横方向の強度差には有意差が認められていない。前回の実験結果では柱下部の外側の強度が内側に比べて高いという傾向にあったが、今回は材令13週で若干その傾向が見られた。即ち、上部では全ての柱について内側の強度が高く、柱Ⅲを除く中以下では外側の強度が内側より高い傾向にあって、下部はその傾向が顕著である。これは前報の考察でも述べているが、打設時の圧密力による型わく周辺部からの脱水現象が要因の一つとなっているのではなかろうかと考える。柱Ⅲについては、他のⅠ、Ⅱ柱とやや異なる点が見受けられるが、これも打設時に上部で一時打止めにした影響が現われたものと思われる。

3.2. 有筋・無筋における強度差

3.2.1. 水平コア強度 材令13週における水平コア強度の分散分析結果を表一8に示す。ここで材令13週の数を用いて分析した理由は、3.1.でも述べた様に柱Ⅲの上部コア強度(材令4週)に異状と思われる傾向が認められたため、試料採取位置を若干離してある材令13週コア強度により分析を行った。この結果によれば、部材内における部位間(高さ方向)、および部位内の交互作用の双方に有意差が認められたが、柱部材間には強度差が認められなかった。ここで有意となった部材内の部位間における強度差は、図一4を見ても判かるとおり圧密力の影響を受けて上部から下部へ向って強度が増大している。これは、前報の実験結果及び既存の文献等においても確認されている一般的な傾向で、有筋の場合においても例外でないことが判った。また、部材間と部位間の強度電係については、鉄筋の有・無による部位別強度発現の傾向が若干異なっている。即ち、無筋の場合は上部と中上部の強度がほぼ同じで、中部より下部へ向って直線

材令		試料数	kg/cm ²						
			柱Ⅰ(有筋)		柱Ⅱ(無筋)		柱Ⅲ(無筋)		
			強度	標準偏差	強度	標準偏差	強度	標準偏差	
4週	上	内	8	204	16.3	220	10.6	231	20.3
		外	8	205	17.7	209	8.0	233	12.5
		平均	16	205	16.4	214	10.6	232	16.6
	中上	内	8	233	16.9	222	14.2	219	13.4
		外	8	220	7.9	226	12.1	222	13.5
		平均	16	227	14.4	224	12.9	220	13.0
	中下	内	8	224	14.3	230	9.6	240	8.7
		外	8	230	13.2	237	14.9	236	22.4
		平均	16	227	13.6	233	12.6	238	16.6
	下	内	8	246	11.6	241	15.4	245	16.1
		外	8	241	29.3	235	12.4	246	14.0
		平均	16	243	21.7	238	13.9	245	14.6
全平均	64	225	21.5	227	15.4	234	17.5		
13週	上	内	2	252	12.4	244	9.9	265	8.7
		外	2	245	14.2	241	11.1	250	13.6
		平均	4	249	12.9	243	9.9	257	13.1
	中上	内	2	264	5.0	255	7.7	260	13.3
		外	2	274	13.4	259	6.1	247	19.9
		平均	4	268	10.0	257	6.8	254	17.1
	中下	内	2	260	7.5	266	26.1	285	9.0
		外	2	264	4.6	267	3.7	278	17.4
		平均	4	262	6.4	267	17.2	282	13.3
	下	内	2	315	22.6	298	11.8	301	4.6
		外	2	345	16.5	306	8.0	330	9.9
		平均	4	330	24.2	302	10.2	316	17.1
全平均	16	278	35.6	267	24.8	277	29.1		

表一6 コンクリートコア圧縮強度試験結果 (材令4, 13週)

要因		S.S	d.f	M.S	F-retio	F-test
要因	A	2582.52	2	1291.26	4.05*	(5%)3.55
	B	16518.30	3	5506.10	17.25**	(1%)5.09
	C	972.51	3	324.17	1.02	—
	D	71.29	1	71.29	0.22	—
	E	5.00	1	5.00	0.02	—
交互作用	A×B	5809.44	6	968.24	3.03*	(5%)2.66
	A×C	1309.85	6	218.31	0.68	—
	A×D	83.35	2	41.68	0.13	—
	A×E	407.21	2	203.61	0.64	—
	B×C	2285.43	9	253.94	0.80	—
	B×D	237.52	3	79.17	0.25	—
	B×E	1102.65	3	367.55	1.15	—
	C×D	458.40	3	152.80	0.48	—
残差	C×E	2540.60	3	846.87	2.65	—
	D×E	497.30	1	497.30	1.56	—
計		5745.15	18	319.18		
		64693.82	191	338.71		

要因A:柱Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ間の強度差
 要因B:高さ方向(上、中上、中下、下)の強度差
 要因C:ブロック間の強度差
 要因D:断面の内外の強度差
 要因E:断面の横方向の強度差

表一7 コア強度分散分析結果(材令4週)

的に増大しているが、一方、有筋の場合は中上部と中下部がほぼ同一で、上部が低く下部が高い強度を示している。この様な傾向を示した理由は、有筋について圧密力圧密量などの詳細な測定を行っていないため裏付けとなる資料には乏しく、有筋の場合の配筋による影響が現わ

れたものか、若しくは供試体のバラツキによるものかは明らかでない。なお、配筋箇所におけるコンクリート組織の乱れも見当らなかつた。

3.2.2. 垂直コア強度 表-9に前回実施した柱形無筋部材の垂直コア強度(中心部)を、また、表-10に今期実施した有筋柱の垂直コア強度(中心部)を各々水平コア強度と対比して示した。この結果によれば、双方ともに部位(高さ方向)にかかわらず、垂直コア強度の方が水平コア強度に比して1~8%程高く、有筋・無筋の差異は認められない。

3.3. 打上り速度がコンクリート強度に及ぼす影響

打上り速度の異なる柱IIとIIIの強度差について行なった分散分析結果を表-11に、また、図-5に高さ方向とコア強度の関係を示す。

これらの結果によると、柱部材間と部位間に有意差が認められた。このうち柱部材間については、図-5を見ても分かる通り、中上部を除いた他の部位では打上り速度の速い方が強度増となっており、また、材令4週より13週の方が顕著に現われている。しかし、双方の強度差を裏付ける圧密力、圧密量、水セメント比などの測定結果を見ても明確な差は認められず、圧密力のみについて言えば、むしろ打上り速度の遅い方が若干値は大きくなっており、コア強度との対応がつかない結果となっている。しいて理由付けをすれば、先にも述べた柱IIIの養生条件(柱IIIは他の柱に比べて日照・通風の影響を受けやすい位置にある)によるものと考えざるを得ない。

今回十分な結果が得られなかった打上り速度とコア強度の関係、および有筋柱の圧密力等について今後更に検討を加える必要があると考えらる。

3.4. 柱の上下方向の強度差に及ぼす要因の検討

本筋では、柱部材の上下方向の強度差が、どのような要因によって惹起されるのかを明らかにするために、要因として○単位容積重量、○水セメント比(打設中、安息後、硬化後)、空気量(硬化後)、圧密力、圧密ひずみを取りあげ、これら諸要

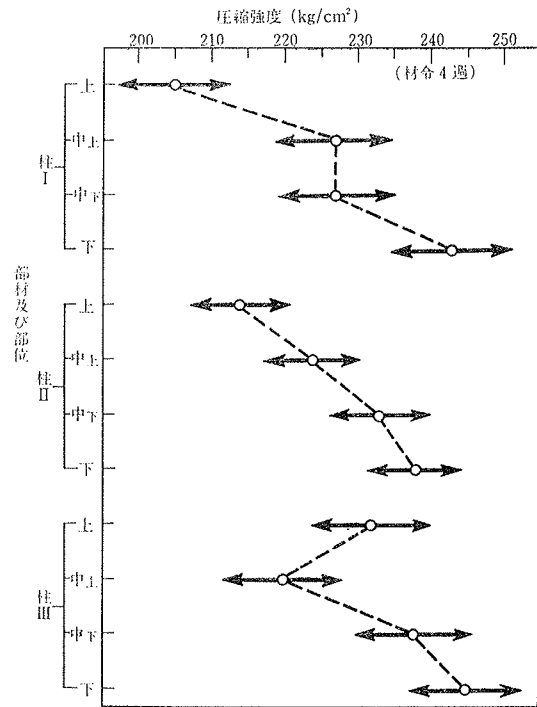


図-3 部材・部位別の各母平均の信頼区間の推定(95%)

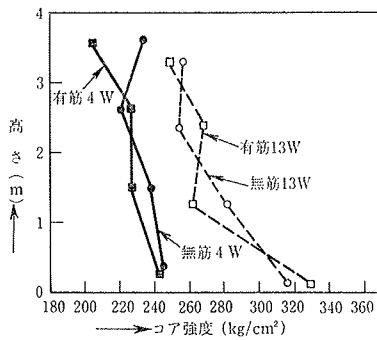


図-4 有筋・無筋における高さ とコア強度の関係

部位	タテ強度 A(kg/cm ²)	ヨコ強度 B(kg/cm ²)	差(kg/cm ²) (A-B)	差の比率(%) (A-B)/B×100
上部	329	305	24	7.9
中部	308	297	11	3.7
下部	333	322	11	3.4

注) 表中の強度は、各部位につき4本の平均値を示す。

表-9 部位別水平・垂直コア強度(無筋)(前期実施分)

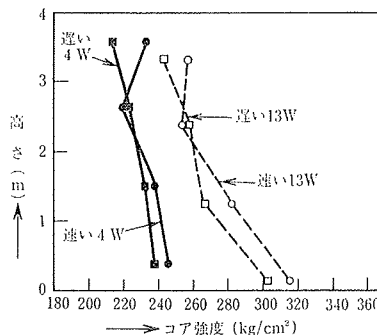


図-5 打上り速度の遅速における高さ とコア強度の関係

	S.S	d.f	M.S	F-ratio	F-test	
要因	A	0.53	1	0.53	0.002	—
	B	47691.3	3	15897.1	68.37**	(1%)4.86
	C	2233.9	7	319.1	1.37	—
交互作用	A×B	2837.6	3	945.9	4.07*	(5%)3.07
	B×C	5046.7	21	240.3	1.03	—
	A×C	3298.4	7	471.2	2.03	—
残差	4882.9	21	232.5			
計	65991.3	63				

要因A: 柱I・II間の強度差
 要因B: 高さ方向(上、中上、中下、下)の強度差
 要因C: ブロック間の強度差

表-8 有筋・無筋におけるコア強度分散分析結果(材令13週)

部位	タテ強度 A(kg/cm ²)	ヨコ強度 B(kg/cm ²)	差(kg/cm ²) (A-B)	差の比率(%) (A-B)/B×100
上部	263	253	10	4.0
中上部	281	264	17	6.4
中下部	275	260	15	5.8
下部	318	315	3	1.0

注) 表中の強度は、各部位につき4本の平均値を示す。

表-10 部位別水平・垂直コア強度(有筋)(今期実施分)

	S.S	d.f	M.S	F-ratio	F-test	
要因	A	1640.25	1	1640.25	8.367**	(1%)8.02
	B	34019.63	3	11339.67	57.844**	(1%)14.87
	C	748.75	7	106.96	0.546	—
交互作用	A×B	990.63	3	330.21	1.684	—
	B×C	4061.38	21	193.40	0.987	—
	A×C	1388.25	7	198.32	1.012	—
残差	4116.88	21	196.04			
計	46965.77	63				

要因A: 柱II・III間の強度差
 要因B: 高さ方向(上、中上、中下、下)の強度差
 要因C: ブロック間の強度差

表-11 打上り速度の遅速におけるコア強度分散分析結果

因と柱の上中下間の強度差との相関および各要因間の相関を検討し、柱の上下方向の強度差におよぼす影響因子の推察を試みた。

3.4.1. 柱の上中下間の強度差の実態 既に、昭和51年度に実施した表記研究の一連の実験結果では、柱などの垂直部材の上下方向には、上部が弱く、下部が強いという強度差の生ずる傾向のあることを述べた。図-6は昭和52年度に行った実験および昭和51年度に行った実験結果のうち、柱について上下方向の強度差の実態を示したもので、打設された時期によって強度差の特徴に差異が認められるものの、柱の上部に比較して下部の強度が高いという傾向は共通のものである。

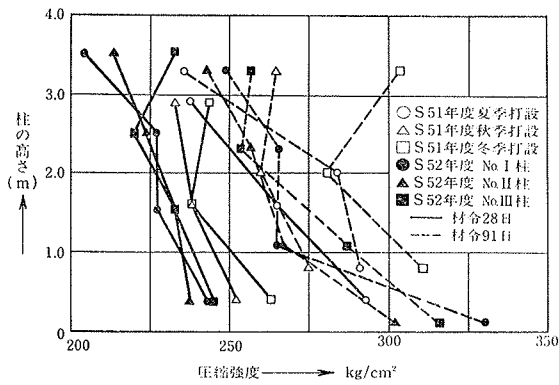


図-6 柱の上下方向の強度差の実態

3.4.2. 要因としてとりあげたデータの扱い方 強度差に影響をおよぼすと思われる各要因のデータの性格は以下の通りである。

a. 単位容積重量

単位容積重量はコア供試体の強度試験時の重量を体積で除して算出したのでコア強度と対応している。

b. 水セメント比 (打設中, 安息後, 硬化後)

水セメント比はコア供試体の採取位置, 強度試験時の材令とは必ずしも対応していないので、柱の上, 中上, 中下, 下の代表値という扱いをした。

c. 硬化後の空気量

硬化後の空気量についても前項の水セメント比と同様の扱いをした。

d. 圧密力

圧密力については図-7に示すように、打設高さに応じて刻々変化するが、打設終了直後の測定値をコア採取位置に換算したものをを用いた。

e. 圧密ひずみ

圧密量は打設終了後から安息状態に達するまでに図-8のような変化を示すが、これを各土圧計間のスパンで除して、圧密ひずみとした。

3.4.3. 検討の方法 検討は表-12~13に示すコア強

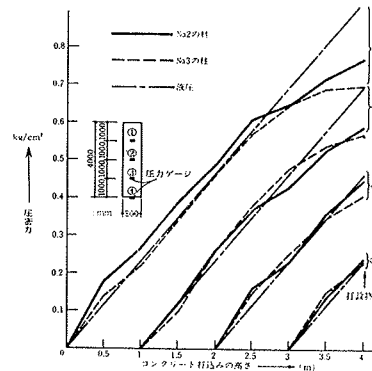


図-7 圧密力の実測値

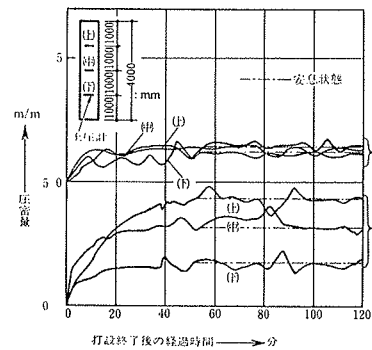


図-8 圧密量の実測値

度および各種要因のデータにもとづいて、コア強度と各要因、および各要因間の単相関分析を材令4週, 材令13週強度に関連して行い、コア強度と相関の高い要因を調査し、柱の上下方向の強度差を誘発している原因を推察した。さらに各要因間の相関を検討することにより裏づけを試みた。

3.4.4. 相関分析の結果と考察

コア強度と各要因との単相関および各要因間の単相関分析を材令4週,

13週のコア強度に関連して行った結果を表-3に示す。表中材令の13週の項にのみ結果の示してあるのは、特に試験時材令とは関係のない要因間の組み合わせについての

No.	No.								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
I	上	204.6	2.248	63.7	59.9	67.6	2.09	(0.101)	(0.9)
	中上	227.2	2.260	64.1	62.7	62.7	1.65	(0.236)	(0.9)
	中下	227.1	2.273	63.6	60.4	61.2	1.81	(0.482)	(0.1)
	下	243.1	2.285	62.8	61.5	63.4	1.38	(0.650)	(1.3)
II	上	214.4	2.259	63.7	63.9	-	-	0.166	0.0
	中上	223.9	2.256	61.8	60.0	-	-	0.317	1.2
III	中下	233.4	2.277	62.1	61.4	-	-	0.513	1.4
	下	237.5	2.279	62.2	61.5	-	-	0.701	1.7
IV	上	-	2.223	-	60.8	-	-	0.101	0
	中上	220.4	2.231	-	62.5	-	-	0.296	0
V	中下	237.7	2.257	61.8	57.2	-	-	0.482	0.1
	下	245.1	2.252	-	61.9	-	-	0.650	1.3

表-12 データ表 (材令4週)

No.	No.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
柱の別	位置	kg/cm ² 平均コア 強度	kg/l 平均単位 容積重量	% 打設中の 水セメント比	% 硬化後の 水セメント比	% 硬化後の 空気量	kg/cm ² 圧密力	×10 ⁻³ 圧密ひずみ
	位置							
I	上	248.8	2.216	63.7	59.9	67.6	2.09	(0.162)
	中上	268.1	2.268	64.1	62.7	62.7	1.65	(0.343)
	中下	262.0	2.268	63.6	60.4	61.2	1.61	(0.557)
	F	329.7	2.304	62.8	61.5	63.4	1.39	(0.681)
II	上	242.7	2.238	63.7	63.9	-	-	0.169
	中上	256.8	2.266	61.8	60.0	-	-	0.372
	中下	266.9	2.265	62.1	61.4	-	-	0.578
	F	301.7	2.297	62.2	61.5	-	-	0.718
III	上	237.5	2.232	-	60.8	-	-	0.162
	中上	233.6	2.253	-	62.5	-	-	0.343
	中下	281.9	2.269	61.8	57.2	-	-	0.557
	下	316.0	2.274	-	61.9	-	-	0.684

表-13 データ表
(材令13週)

要因の組合せ	材令	材令 28 日			材令 91 日		
		相関係数	定数	比例定数	相関係数	定数	比例定数
y	x						
1	2	0.5267	-767.65	440.456	0.8527	-2273.44	1124.61
"	3	-0.5564	692.03	-7.387	-0.3456	923.93	-10.352
"	4	-0.1355	286.35	-0.944	-0.0557	329.55	-0.9116
"	5	-0.7121	487.64	-4.113	-0.2686	501.57	-3.5217
"	6	-0.9946	314.83	-53.096	-0.8146	443.27	-98.734
"	7	0.9371	208.92	48.925	0.8760	226.93	100.100
"	8	0.5804	223.38	8.552	0.6151	257.17	21.003
2	3	-0.3095	2.46	-0.003	-0.4258	2.84	0.009
"	4	0.0309	2.24	0.000	-0.0936	2.34	-0.001
"	5	-0.6525	2.52	-0.004	-0.4957	2.55	-0.004
"	6	-0.9504	2.35	-0.051	-0.9950	2.40	-0.075
"	7	0.6266	2.23	0.054	0.9184	2.22	0.087
"	8	0.3169	43.76	336.447	0.7808	2.25	0.022
3	4	-	-	-	0.5436	46.85	0.263
"	5	-	-	-	0.0301	63.17	0.006
"	6	0.5499	61.85	1.010	0.5499	61.85	1.010
"	7	-0.6574	63.31	-2.324	-0.6655	63.48	-2.387
"	8	-0.4814	62.75	-0.489	-0.4814	62.75	-0.489
4	5	-	-	-	-0.4545	74.27	-0.206
"	6	-0.5520	65.02	-2.316	-0.5520	65.02	-2.316
"	7	-0.2383	61.96	-2.054	-0.2713	62.23	-2.388
"	8	0.0140	61.12	0.037	-0.1292	61.12	0.037
5	6	-	-	-	0.7763	51.65	7.176
"	7	(-0.6890)	(66.77)	(-7.973)	(-0.7126)	(67.42)	(-8.464)
"	8	(-0.0582)	(84.00)	(-1.064)	(-0.1292)	(63.92)	(-0.558)
6	7	(-0.9492)	(2.14)	(-1.190)	(-0.9362)	(2.21)	(-1.203)
"	8	(-0.7088)	(1.80)	(-0.331)	(-0.7088)	(1.80)	(-0.331)
7	8	0.7736	0.228	0.2361	0.7651	0.29	0.229

注) ()内は柱IIIの値を柱Iにおきかえて求めた値

表-14 単相関分析の結果

単相関分析結果で、他の組み合わせについては何らかの形で強度試験時材令に關係している。

a. コア強度と各要因との相関

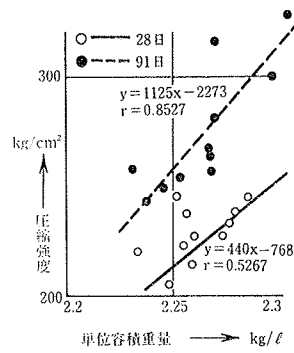


図-9 単位容積重量と強度

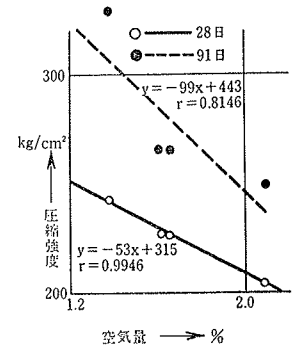


図-10 硬化後の空気量と強度

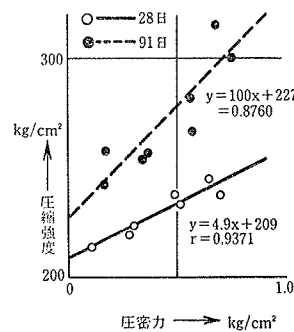


図-11 圧密力と強度

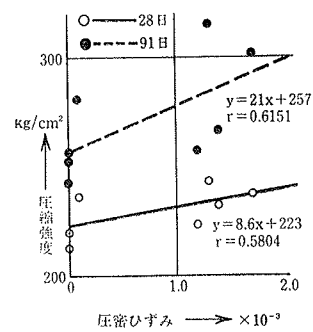


図-12 圧密ひずみと強度

コア強度と相関の高い要因を表-3の結果から取り出してみると、材令4週については単位容積重量、硬化後の空気量、圧密力であった。また材令13週については単位容積重量、圧密力および若干相関度は低下するが、圧密ひずみであった。すなわち材令4週13週を通じておおむねコア強度と相関の高かった要因としては、単位容積重量、硬化後の空気量、圧密力および若干相関度は低下するが圧密ひずみがあげられることが分かった。

このうち単位容積重量、圧密ひずみについては材令4週強度に対するよりも材令13週強度に対する方が相関が高く、硬化後の空気量、圧密力については材令13週強度に対するよりも材令4週強度に対する方が相関が高い結果となっている。図-9~12はこれらの要因と強度との関係を示したものである。

b. 各要因間の相関

表-3の結果から、相関度の高い要因間の組み合わせを取り出してみると、材令4週では、単位容積重量と圧密力・硬化後の空気量、硬化後の水セメント比と圧密力、硬化後の空気量と圧密力、圧密力と圧密ひずみ、さらに若干相関度は低下するが硬化後の水セメント比と圧密力であった。材令13週では単位容積重量と圧密力・硬化後の空気量、硬化後の空気量と圧密力、圧密力と圧密ひずみ、さらに相関度は前述の組合せより低下するが、単位容積重量と打設中の水セメント比、打設中の水セメント

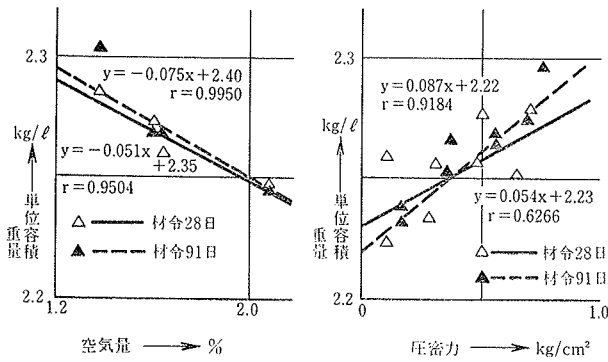


図-13 硬化後の空気量と単位容積重量

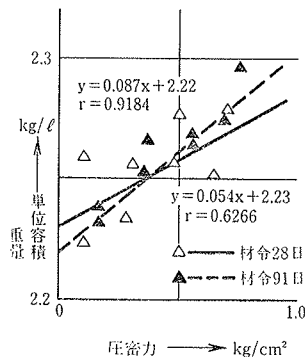


図-14 圧密力と単位容積重量

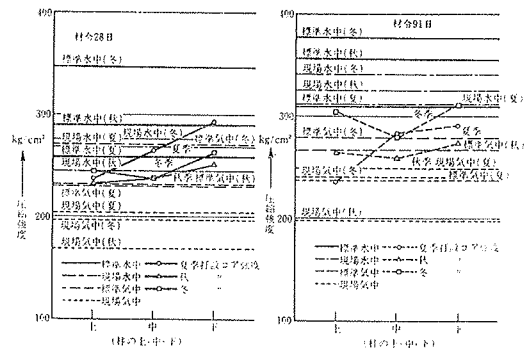


図-17 各種養生供試体強度と柱部材のコア強度の関係 (前回：昭和51年度)

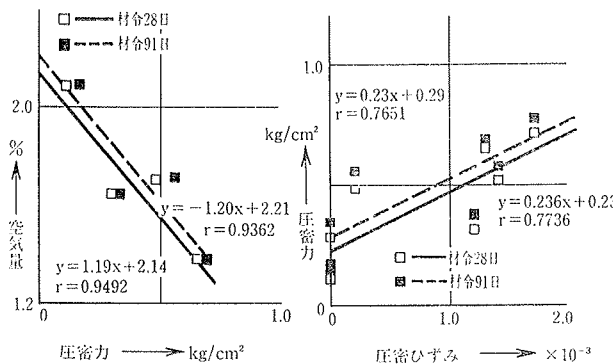


図-15 圧密力と硬化後の空気量

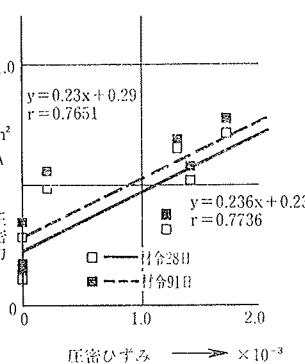


図-16 圧密ひずみと圧密力

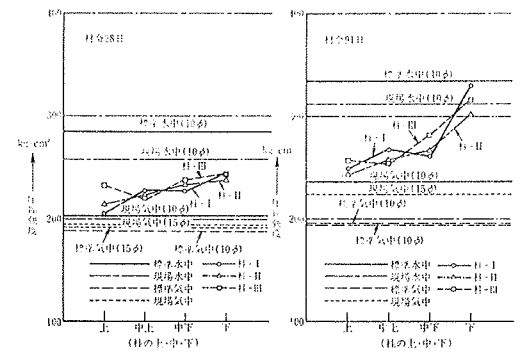


図-18 各種養生供試体強度と柱部材のコア強度の関係 (今回：昭和52年度)

比と安息後の水セメント比，打設中の水セメント比と圧密力，硬化後の水セメント比と硬化後の空気量，硬化後の水セメント比と圧密力であった。すなわち材令4週13週を通じて相関度の高い要因の組合せは単位容積重量と圧密力および硬化後の空気量，硬化後の空気量と圧密力および圧密ひずみ（柱Ⅲの値を柱Ⅰに置きかえて相関分析を行った），圧密力と圧密ひずみであった。図-13～16はこれら要因間の関係を示したものである。

c. 上中下の強度差の発生機構の推察

前項のコア強度と各要因との相関，各要因間の相関分析の結果から，柱の上中下間の強度差は，打設時のコンクリートの自重による圧密力によって，上中下間の内部組織の緻密さに差異が生じ，さらに水和反応が進行している際の圧密力によって上中下間の水和反応の状態にも差異が生じ，結果として，上下中間に強度差を生じたものと解釈するのが現時点では妥当と思われるが，内部組織変化の詳細と強度との関係については，今回の実験の範囲では明らかにすることはできず。今後の検討課題であろう。しかし今回の実験において，従来定性的にしか推察されなかった圧密力と強度との関係を定量的に把握できたので，今後の検討方向をより明確にすることができた。

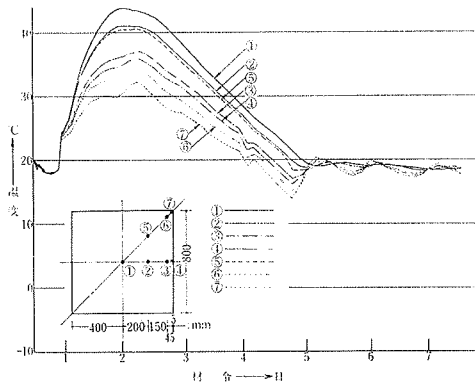
3.5. 各種養生供試体強度とコア強度との関係

本節では構造体の強度管理を目的とした各種養生供試体強度とコア供試体強度との関係を検討した。

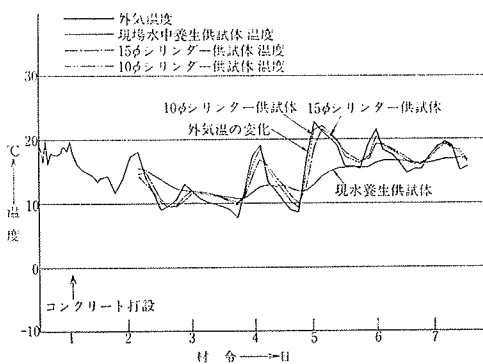
既に昭和51年度実施の実験において，各種模擬部材のコア強度と各種養生供試体強度の実態が明らかにされており，強度管理としてはシーズンによらず現場封かん養生供試体強度と現場気中養生供試体強度との算術平均値として推定した方が実情に即している点が報告されている。本項では圧密力によって上下方向に強度差の生ずる柱部材のコア強度と各種養生（特に現場水中，現場気中）供試体強度との関係を前回および今回（昭和52年度実施）の結果と合わせて検討した。

前回の柱部材のコア強度と各種養生供試体強度との関係を図-17に，今回の場合を図-18に示した。なお各種養生供試体は，実際面での適用を考慮して，現場気中，現場水中，標準気中，標準水中についての結果を示した。

これによると，前回および今回の場合ともばらつきはあるが，概略の傾向として，材令4週，13週の場合とも，柱部材の上部強度は現場気中養生供試体強度とおおむね同一か大きい傾向を示し，柱部材の下部強度は現場水中養生供試体強度とおおむね同一か小さい傾向が認められた。すなわち柱部材の上下間の強度差の範囲は，概略現場気中養生供試体強度（上部強度に近似）と現場水中養生



図—19 柱部材の初期の温度履歴



図—20 各種養生供試体の初期の温度履歴

生供試体強度（下部強度に近似）との差の範囲内に含まれることを実態として明らかにすることができた。

これらの結果を既往の研究を含めて考慮した場合、現状としては柱部材の強度を現場気中養生および現場水中養生供試体強度の範囲内に含まれるものとして把握するのが実際と思われるが、強度管理という点では今後さらに検討の必要があろう。

3.6. コンクリート温度および含水率と強度との関係

前節では柱部材の上中下間の強度差を惹起する主要因として、上下方向に温度、含水率の差がないものとして、圧密力をあげたが、本節では、コンクリートの温度履歴および含水率の変化がコンクリート強度に与える影響を今回得られた結果について検討した。

3.6.1. 温度の実測結果

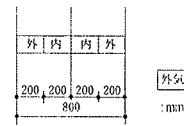
a. コンクリートの温度履歴について

柱部材のコンクリート温度は、図—19に示すように材令初期の温度上昇が大きく、中心部の温度は最高40°Cにまで達している。しかし材令4~5日になると部材温度は外気温変動に追随するようになる。

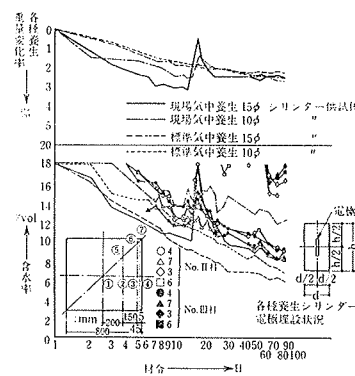
一方寸法の小さい各種養生供試体については柱部材におけるような初期の温度上昇は認められず図—20に示すように、成型直後から外気温変動に追随する傾向となっ

養生体の種別	養生体の種別	養生日		
		7	28	91
柱—I	内	258	713	1660
	外	246	698	1650
	全体	249	701	1651
柱—II	内	264	721	1691
	外	252	705	1672
	全体	255	709	1678
柱—III	内	265	735	1710
	外	251	716	1701
	全体	254	720	1701
標準気中	10φ	205	822	2681
	15φ	202	815	2636
標準水中	10φ	206	836	2726
	15φ	176	625	1564
現場気中	10φ	173	623	1575
	15φ	171	590	1456
現場水中	10φ	171	590	1456
外気温		190	607	1506

注) 内・外はコア供試体と下図のように対応している。



表—15 積算温度の実測結果 (°DD)



図—21 含水率の測定結果

中養生供試体よりも大 となった。現場気中養生の場合には、養生中に吸水し、これが重量変化および含水率の変化となって表われている。また柱部材については材令13週までについては、ごく表層部分の乾燥は進むが、内部の乾燥はきわめて遅いことが判明した。

3.6.3. コンクリート温度および含水率と強度との関係

本節ではコンクリート強度発現の要因としての温度および含水率が支配的と思われるシリンダー供試体についてのみ検討を試みた。すなわち柱部材の場合には、前述したように、強度発現に及ぼす影響因子として、温度含水率の他に圧密力の影響がかなり支配的と思われるため、検討対象から外している。

a. 温度とコンクリート強度との関係

ここではコンクリートの含水率の相違を無視して、積算温度と強度との単相関分析を材令4週と13週について行ない、積算温度の強度に対する相関度を調べた。相関分析の結果は、図—22に示す通りで、4週、13週とも各種養生供試体全部について求めた結果ではきわめて相関度が小さく、さらに4週と13週を包含してもやや相関度

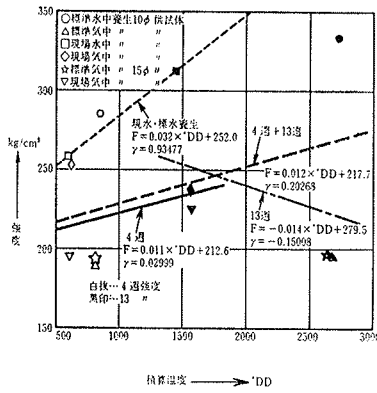


図-22 積算温度と強度との関係

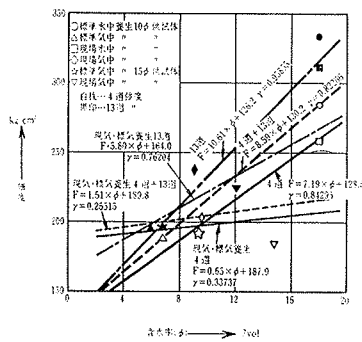


図-23 含水率と強度との関係

が高くなるものの相関があるとはいえない結果となった。しかしながら含水状態に差がなければ現場水中養生および標準水中養生供試体強度と積算温度との相関が高いことからコンクリート強度は積算温度に支配されることが裏づけられる。

b. 含水率とコンクリート強度との関係

ここでいう含水率とは強度試験時のコンクリート内部の含水状態のことであり、今回の実験では供試体中央に埋込んだ電極および供試体重量の測定によって把握した。本項では電極法により得られた各種養生供試体強度と含水率との関係を単相関分析を行なって調べた。単相関分析の結果は図-23に示す通りで4週、13週とも積算温度の場合とは異なりかなり高い相関度を示す結果となり、今回の実験条件の範囲では積算温度よりも試験時の含水率の方が各種養生供試体強度に対しては支配的であったといえよう。

しかし、乾燥の比較的進行している、現場気中、および標準気中養生供試体について強度と含水率との関係を求めたところ、13週時については相関度が高かったが、4週時には相関度が低かった。これは今回の実験の場合、現場気中養生供試体が養生中に吸水したためと考えられ、乾燥が連続的に進行しない場合には、含水率と強度の関係も必ずしも相関が高いとはいえない場合のあるこ

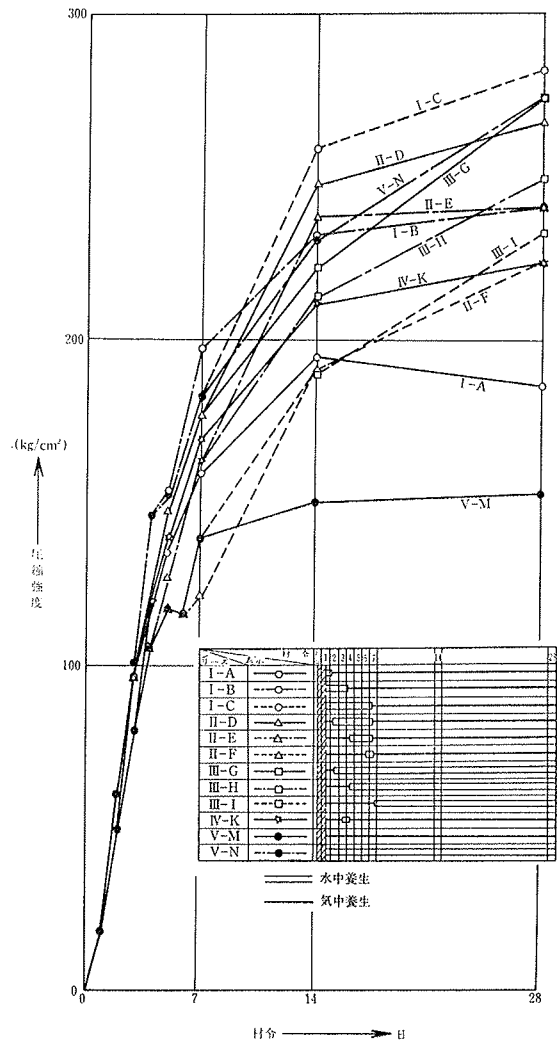


図-24 初期養生条件と強度

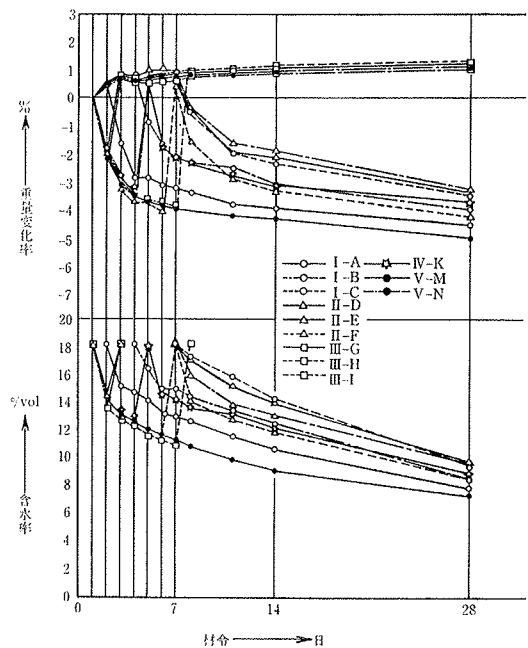


図-25 含水率の測定結果

とが推察された。この点を補足するため特に材令1週までに、初期養生条件（含水状態）を変化させたときの強度性状について追加実験を行なったので次項にその結果を述べる。

c. 初期養生条件が強度に及ぼす影響について

温度を20℃（一定）とし、材令1週までの間に、湿潤あるいは乾燥の時期および期間を変化させ、1週以後乾燥あるいは湿潤状態で養生した場合の強度試験結果を材令4週までについて示したのが図-24である。また各養生条件の供試体の含水率の経時変化を、電極法によって測定した結果を重量変化と併せて図-25に示した。

この結果、初期養生条件によって、材令的な特徴が認められる。すなわち材令1週での強度はI-Bが最大値を示し、II-Fが最小値となり、材令2週、4週についてはI-Cが最大値を示し、V-Mが最小値となり、これより完全気中養生の強度増進が小さく、水中養生期間の長いものほど増進が大であることがわかる。

特に材令4週強度については成型直後より材令1週までの水中養生以後気中養生のI-Cが最大値を示し、成型直後より気中養生したV-Mが最小値を示した。また材令1週までの湿潤時期と4週強度との関係については、I、IIシリーズおよびIV-Kの結果で比較すると、同一湿潤期間のI-BとII-Eはほぼ同一の強度を示したが、I-AとII-Fでは同一湿潤期間であるにもかかわらずII-Fの方が強度が大であった。これらの事実を比較し考察すると、主たる養生条件が気中養生の場合、その養生中に水分を補給する時期が長期強度に与える影響の大きいことが分かる。すなわち初期材令の段階では、成型後初期の供試体の保水量の多い時期に湿潤状態にするよりも、ある程度乾燥の進んだ時期（II-F供試体の場合含水率が約12%/vol）に湿潤状態にする方が強度増進に有利であることが推察された。

また含水率の測定結果では、気中養生期間の長いものほど乾燥程度が大きく、I~IVシリーズ供試体の材令4週での含水率は、養生中の湿潤期間の長短によって若干の差（2%/vol程度）はあるものの、比例的に強度を説明できるほどの差ではなく、この結果からも養生中の湿潤条件が強度に与える影響の大きいことがわかる。

4. まとめ

本実験では、数少ない試験体を利用して多くの調査を

行ったため初期の目的を十分達成したとは言い難い面もあるが、以下に調査結果の概要を箇条書きで述べる。

- (1) 今回の打設条件下で製作した模擬部材の有筋・無筋間には強度差が認められなかった。
- (2) 打上り速度の施工条件にもよるが、本実験の結果では速度の差異が強度に有意差を生ずるという結果を得た。
- (3) 柱部材内で測定した各種要因のうち、圧密力及び硬化コンクリートの空気量が柱部材の上下方向の強度差に大きく寄与していることが分かった。
- (4) 柱部材の上下方向の強度差は現場気中養生シリンダー供試体強度と現場水中養生シリンダー供試体強度の範囲内に含まれる。
- (5) 今回の実験条件の範囲では、各種養生供試体（シリンダー供試体）強度は、積算温度よりも試験時の含水率との相関が高かった。
- (6) シリンダー供試体による追加実験では、強度は材令初期の養生条件すなわち湿潤時期および湿潤期間の影響を顕著に受けることが判明した。
- (7) 有筋・無筋の上・下間における強度差（材令13週）は約60 kg/cm²で、打設速度の遅い場合でもかなりの強度差があることが認められた。従って、打設条件によってはより大きな強度差が生じることも考えられるので、実際の施工にあたっては、これらの強度性状を念頭において施工する必要がある。

参考文献

- 1) 高橋, 他: 構造体コンクリートの強度管理に関する研究（その1~5）, 日本建築学会学術講演梗概集, (昭和52.10)
- 2) 神田, 吉田: コンクリート打込後の柱断面における水セメント比の分布性状, セメントコンクリート, No. 342, (1975.8)
- 3) 笠井, 他: 壁, 柱コンクリートの高さ方向の性状変化に関する研究（第1報~第6報）, 日本建築学会学術講演要旨集, (昭和37.9, 昭和38.9)
- 4) 大野, 他: 構造体コンクリートの品質変動について, 日本建築学会北海道支部研究報告集, (昭和49.3)
- 5) 洪, 他: 電極法によるコンクリート含水量の測定, 日本建築学会学術講演梗概集, (昭和51.10)
(文責: 久保田昌吾, 永井康淑, 長尾覚博)