

コンクリートの蒸気養生に関する研究

第2報「コンクリートの調合および蒸気加熱条件に関する基礎実験」

高橋 久雄
森 一
小松 晃

概 要

この報告は、打ち込み直後のコンクリートを100°C以下の常圧蒸気にて養生する際、圧縮強度におよぼす要因効果を調査する予備として、まづモルタルにて実験を行ない検討を行なったものである。

1. 実験方法

1.1. 実験計画

- (i) 無拘束状態における各種養生条件下の圧縮強度に及ぼす要因 (実験I)
- (ii) W/C, セメントの種別, 混和剤の影響による圧縮強度要因 (実験II)
- (iii) 拘束状態における各種養生条件下の圧縮強度に及ぼす要因 (実験III)
- (iv) Maturity および W/C と圧縮強度の関係 (実験IV)

以上4シリーズについて、表-1に示すごとく実験計画を立て、モルタルにて実験を行なったものである。

1.2. 使用材料および調合

材料はすべて恒温恒湿室に貯蔵し、計量の際、骨材の吸水量を測定して、単位水量, 単位砂量の補正を行ない、かつ、モルタル練り上がり温度が、20°Cとなるようにした。

使用した材料は、表-1(注)に示した。

さらに各実験における調合を表-2に示す。

1.3. 供試体製作および養生方法

供試体は、φ5×10cmのシリンダーを用いた。

蒸気養生時間は、実験I, II, IIIについては、maturity=300度・時となるようにし、実験IVでは、所定のMaturity となるまで、最高温度を保持するよう蒸気の供給を行なった。

各実験の蒸気養生サイクルは、図-1, 図-2, 図-3, および図-4に示す。

蒸気加熱温度の制御は、モルタル供試体内部に、白金抵抗管を埋め込み、図-5に示す制御装置にて、蒸

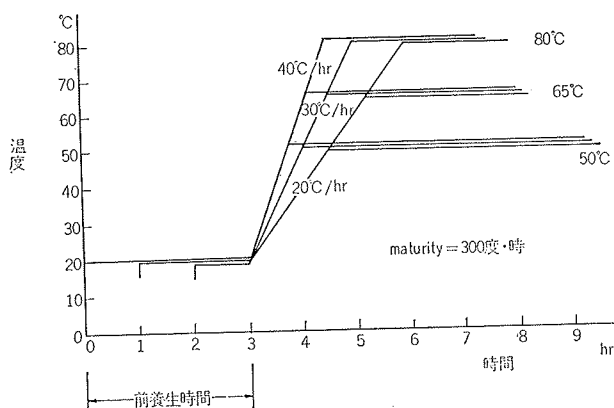
	要因	単位	水 準				わりつけ
実 験 I	単位水量	kg/m ³	320	340	360	4元配置 完備型 81組	
	前養生時間	hr	1	2	3		
	温度上昇勾配	°C/hr	20	30	40		
	最高温度	°C	50	65	80		
	セメント		普通ポルトランドセメント				
	W/C	%	65				
Maturity	°C·hr	300					
実 験 II	単位水量	kg/m ³	318	330	344.5	357.5	L ₆₄ (2 ⁶³) 直交表 一部追加法 96組
	W/C	%	60 65				
	前養生時間	hr	1	3			
	温度上昇勾配	°C/hr	20	30			
	最高温度	°C	65	80	95		
	セメントの種類		普通 早強 シリカ 高炉				
混和剤の種類		Plane P.10 P.5L V					
Maturity	°C·hr	300					
実 験 III	拘束量	鉄板7mm	5	10	完全		L ₂₇ (3 ¹³) 直交表 27組
	前養生時間	hr	1	2	3		
	温度上昇勾配	°C/hr	40	100	160		
	最高温度	°C	65	80	95		
	セメント		普通ポルトランドセメント				
	W/C	%	65				
単位水量	kg/m ³	360					
Maturity	°C·hr	300					
W/C	%	55	60	65			
実 験 IV	Maturity	°C·hr	150	250	350	450	2元配置 完備型 24組
	550	650	750	850			
	前養生時間	hr	2				
	温度上昇勾配	°C/hr	20				
	最高温度	°C	80				
	セメント		普通ポルトランドセメント				

(注) I) セメントの種類 小野田普通ポルトランドセメント, 小野田早強ポルトランドセメント, チチブシリカセメント, チチブ高炉セメント
II) 混和剤の種類 Plane: 無混入 P.10: ポゾリスNo.10 P.5L: ポゾリスNo.5L V: ビンゾール
III) 骨材 豊浦標準砂 比重: 2.61 室内乾燥吸水率: 0.71%

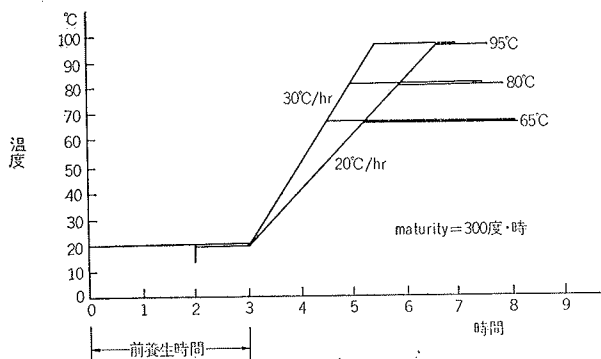
表-1 実験計画表

	No	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	砂 (kg/m ³)	W/C (%)
実験 I	1	320	492.3	1361.6	65
	2	340	523.1	1282.8	65
	3	360	553.8	1206.9	65
実験 II	1	318	530	1341	60
	2	330	550	1292	60
	3	344.5	530	1271	65
	4	357.5	550	1222	65
実験 III	360	553.8	1206.9	65	
実験 IV	1	304.6	553.8	1351.0	55
	2	332.3	553.8	1255.3	60
	3	360.0	553.8	1206.9	65

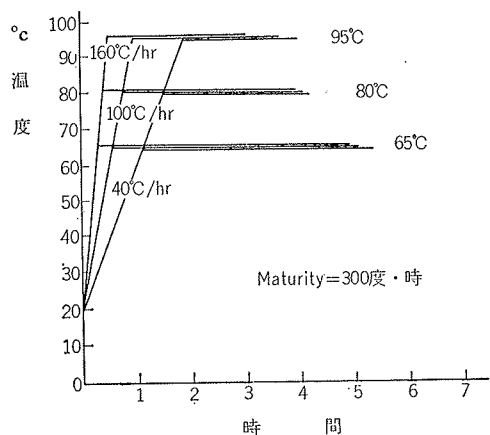
表一 調合表



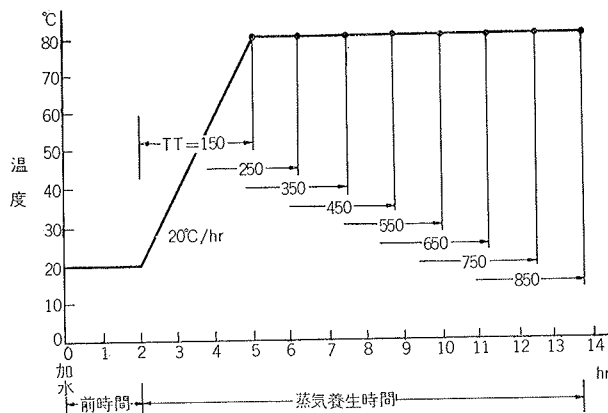
図一 蒸気養生サイクル(実験I)



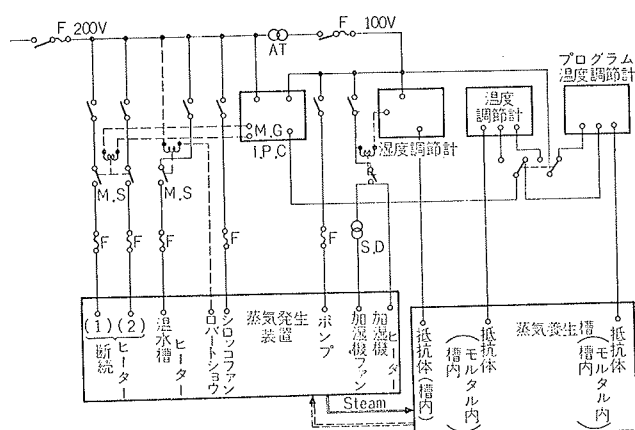
図二 蒸気養生サイクル(実験II)



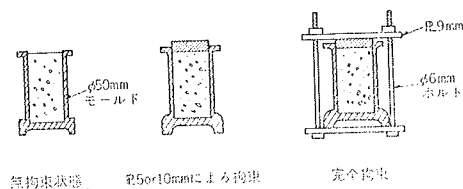
図三 蒸気養生サイクル(実験III)



図四 蒸気養生サイクル(実験IV)



図五 蒸気加熱サイクル自動制御機構



図六 拘束方法

気の温度を自動制御した。

蒸気養生終了後は、直ちにドアを開け、20°C空気にて脱型し、所要材令まで温度20°C、湿度60%の恒温恒湿室にて空中養生を行なった。

標準養生供試体は、所要材令まで20°C、60%空中養生とした。

実験IIIにおけるモルタルの拘束方法は、図一六に示すように、まだ固まらないモルタル上に鉄板を乗せて、そのまま蒸気養生槽に入れ、養生した。

2. 実験結果および考察

2.1. 実験 I

この実験では、コンクリートの主要な性状に影響を

及ぼすと思われる単位水量, 前養生時間, 温度上昇勾配, 最高温度について, Maturity=300度・時として実験を行ない, その主効果と2重, 3重交互作用の圧縮強度に及ぼす影響を調査したものである。

2.1.1. 分散分析 各種養生条件で蒸気養生を行なったモルタルの, 材令, 脱型時, 28日の圧縮強度について, 4元配置完備型の分散分析を行なった結果は, 表一3, 表一4である。なお材令56日についても分散分析を行ない, また, 単位水量について, 標準養生供試体のバラツキをなくすため, 標準養生圧縮強度を共変量とした共分散分析を行なった。この結果, 分散分析では, 単位水量, 最高温度共に各材令において高度な有意差が認められた。温度上昇勾配は, 脱型時では, 5%の危険率で有意であったが, 28日, 56日材令では0.5%以上の有意差が現われている。前養生時間については, 脱型時では有意差が認められないが, 28日, 56日では5%の危険率で有意差が現われた。

交互作用については, 単位水量と最高温度, 最高温度と温度上昇勾配の間に有意差が認められた。単位水

量と温度勾配は, 10%の危険率で有意であった。

共分散分析では, 単位水量は, 脱型時で有意差のあったものが, 28日, 56日では全く有意差は認められない。交互作用では, 最高温度と単位水量との間に有意差が認められるが, 分散比は長期材令ではしだいに小さくなる。

2.1.2. 母平均の推定 分散分析の結果有意差の認められた主要因について母平均の推定を行なった結

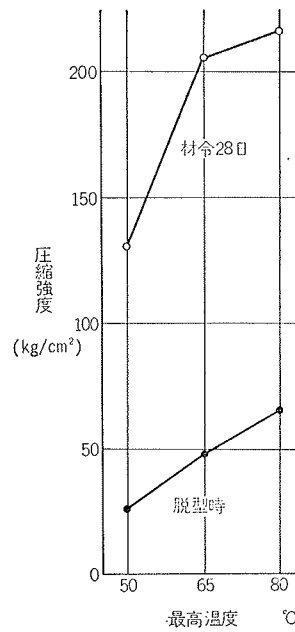
要因	自由度	変動	不偏分散	分散比
単位水量(A)	2	21972.6189	10986.309	122.4***
最高温度(B)	2	52848.2393	26424.120	245.7***
温度勾配(C)	2	1037.2941	518.647	5.8**
前時間(D)	2	626.4681	313.234	3.5*
A×B	4	1930.8701	482.718	5.4***
A×C	4	1480.1287	370.032	4.1**
A×D	4	299.5269	74.882	—
B×C	4	463.4727	240.868	2.7*
B×D	4	169.1415	42.286	—
C×D	4	273.8324	68.458	—
A×B×C	8	2511.9805	313.998	3.5°
A×B×D	8	145.040	18.130	—
A×C×D	8	224.0081	28.001	—
B×C×D	8	679.9092	84.988	—
e	16	1433.2559	89.578	—

*** 1%危険率 * 5%危険率 ** 2.5%危険率

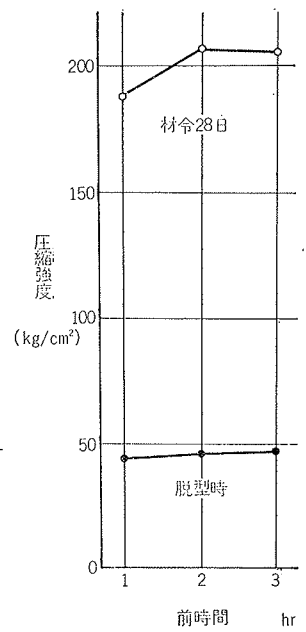
表一3 脱型時分散分析表

要因	自由度	変動	不変分散	分散比
A	2	694266.3828	347130.1914	196.2***
B	2	54469.2539	27234.6270	15.4***
C	2	147663.7129	73831.8565	41.7***
D	2	16565.0637	8282.5319	4.7*
A×B	4	45611.4531	11402.8633	6.4***
A×C	4	8532.9375	2133.2344	1.2
A×D	4	6859.8203	1714.9551	—
B×C	4	20597.0957	5149.2739	2.9
B×D	4	5401.2393	1350.3098	—
C×D	4	4146.6246	1036.6606	—
A×B×C	8	45910.5078	5738.8135	3.24*
A×B×D	8	2313.3438	289.1680	—
A×C×D	8	7030.3359	878.7920	—
B×C×D	8	9426.5078	1178.3135	—
e	16	28318.6250	1769.9141	—

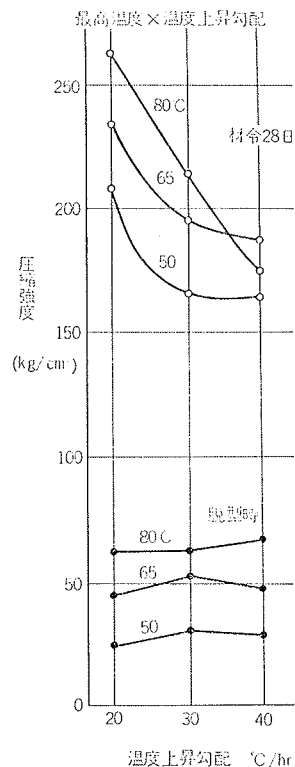
表一4 28日分散分析表



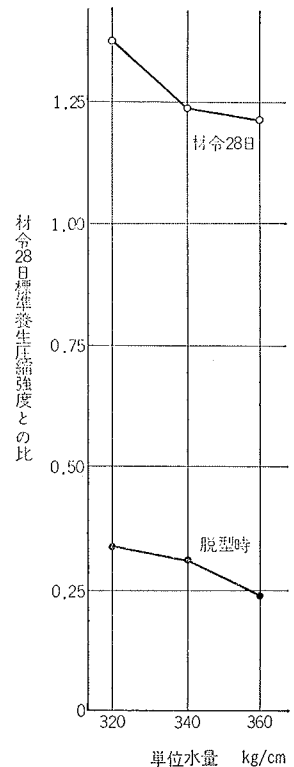
図一7 最高温度



図一8 前養生時間



図一9 温度上昇勾配



図一10 単位水量

果を図一7, 図一8, 図一9, 図一10に示す。

この結果, 各要因について考察すると, 単位水量については, W/C が一定のため, 単位水量が増加すれば, 単位セメント量も増加する。そのため圧縮強度の絶対値では, 単位水量の多い方が各材令共強度は高い。しかしながら標準養生供試体との比では, 単位水量の少ない方が強度比が大きくなっている。このことから蒸気養生には, 単位水量を少なくした方が有利であると言える。特に最高温度の高い場合では, この事が顕著である。

最高温度については, 80°Cまでは, 各材令とも, 温度が高い程, 強度は増進するが, 温度勾配との間に交互作用が見られる。

温度上昇勾配は, 脱型時では, 勾配の急な方が, わづかに強度が高いが, 28日以後では, 勾配の急なものは, 強度の増進が著るしく悪い。特に高温の場合, この傾向は, 著るしい。

前養生時間は, 脱型時では, 大きな差は認められないが, 28日以後では, かなり大きな有意差が現われ, 長い方が有利である。

2.2. 実験II

この実験は, W/C, セメントの種類, 混和剤を変えた場合, 実験Iにて調査した養生条件にどのような影響を与えるかを, 主として調査したものである。なお実験Iにおいて, 最高温度は80°Cまで脱型時および長期材令とも温度の高い方が有利であるという結果が得られたため, この実験では最高温度を95°Cまで上げた場合どのような傾向となるかも合わせて検討した。また温度上昇勾配は実験Iの結果から40°C/hrを除いた。

2.2.1. 分散分析 材令, 脱型時, 28日のおのおのについて, $L_{64}(2^{63})$ 1部追加型直交表によって実験を行ない, 分散分析を行なった結果, 前養生時間は, 脱型時, 28日ともに高度な有意差が認められた。

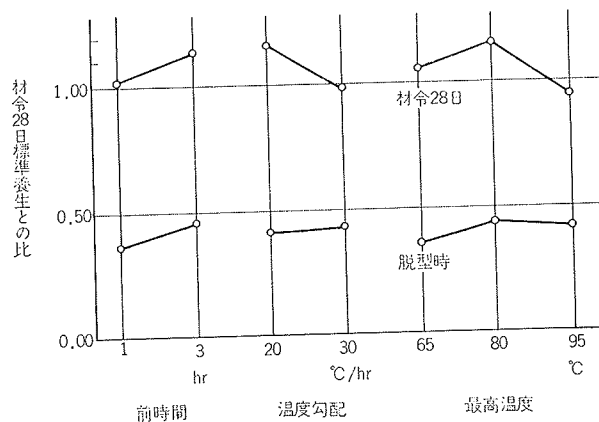
温度上昇勾配は, 脱型時には危険率5%の有意差であるが28日では, 危険率0.5%の有意差が認められた。最高温度は, 80°Cと95°Cの間には差は認められないが, 65°Cと80°Cの間に高度な有意差が表われた。W/C (単位セメント量一定) は, 脱型時では有意差は, 認められないが28日で高度に現われた。

また養生条件の交互作用は, 実験Iの場合と同様, 最高温度と温度上昇勾配との間に, 材令28日において高度な有意性が認められた。

セメントの種別については, 各材令とも主効果に高度な有意性があるが, 養生条件との交互作用は認められない。これは, セメントの種類が変わっても, 最適蒸気養生条件は変わらない事を示めている。

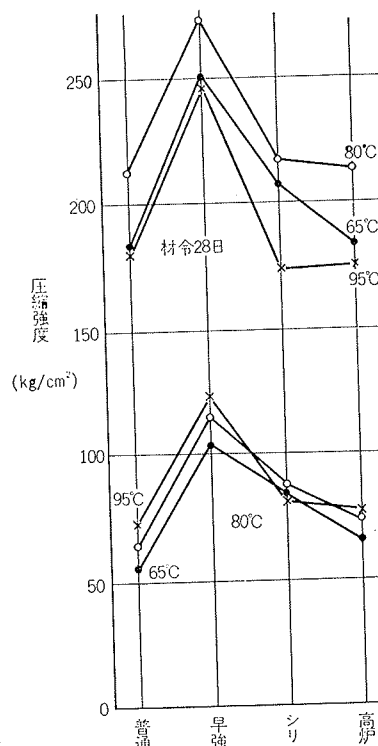
混和剤の種別では, 主効果に高度な有意性が見られるが, 養生条件との交互作用は, 温度上昇勾配との間にわずかに見られる程度である。

2.2.2. 母平均の推定 分散分析の結果有意差の認められた主な要因について母平均の推定を行なった結果を図一11, 図一12, 図一13, 図一14に示めす。



図一11 養生条件

この結果, 蒸気養生条件については, 実験Iの場合と同様の傾向を示めし, 前養生時間は長い程良く, 温度上昇勾配は, 脱型時では勾配の急な程強度は高いが28日では, 勾配の急なものは, 強度の増進が悪い。最高温度は, 80°Cまで温度の高い程強度は高いが, 95°Cまで温度を上げると, 強度は, 脱型時, 28日共下がる。W/Cは今回の実験では大きな差は認められなかった。



図一12 セメントの種別

セメントの種別については, 蒸気養生は, 早強ポルトランドセメントが最適であるが, シリカセメントもかなり有効である。シリカセメントは, 28日強度では, 普通ポルトランドセメントとほとんど同じ強度であるが, 脱型時では約20%強度が高い。

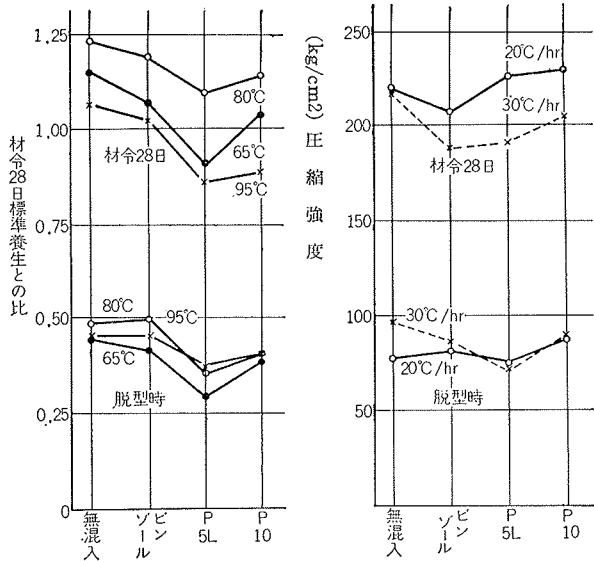


図-13 混和剤×最高温度 図-14 混和剤×温度勾配

混和剤については、養生条件との間に大きな交互作用は認められないが、しかし温度上昇勾配との間に、わずかな差が認められ、脱型時では、混和剤無混入のモルタルは、20°C/hrより30°C/hrの方がかなり高い強度を示しているにもかかわらず、混和剤混入モルタルは、両者の間に差が認められない。また28日では混和剤混入モルタルの方が、無混入のモルタルより温度上昇勾配が高くなった場合の強度低下が大きい。また主効果については、混和剤無混入のモルタルが、標準養生との比で最も高い値を示めた。

2.3. 実験Ⅲ

本実験では、まだ固まらないコンクリートを拘束したまま蒸気養生を行なう場合の、拘束量および前養生時間、温度上昇勾配、最高温度を要因として、前2回の実験同様 Maturity=300 度・時として実験を行ない、これら要因の主効果および交互作用を検討したものである。

2.3.1. 分散分析 材令、脱型時、28日のおのおのについてL₂₇(3¹³)型直交表により実験を行ない、分散分析を行なった結果を表-5、表-6に示す。

この結果、拘束量は、脱型時、28日とも危険率5%で有意となった。前養生時間は各材令とも高度な有意性が認められた。温度上昇勾配は、脱型時では有意差は現われないが28日で5%の危険率で有意差が認められた。最高温度は、脱型時では高度の有意差が認められたが28日では、有意差は認められない。拘束量と養生条件との間の交互作用は認められなかった。

2.3.2. 母平均の推定 分散分析の結果主効果のみに有意水準が現われたため、主効果の各水準について母平均の推定を行なうと図-15、図-16、図-17、図

要因	S	φ	V	F
拘束量 (A)	2853	2	1426.5	8.53**
前養生時間 (B)	3877	2	1938.5	11.6***
温度上昇勾配 (C)	800	2	400.0	2.39
最高温度 (D)	11331	2	5665.5	33.9**
A×B	101	4	25.25	—
A×C	278	4	69.5	—
A×D	661	4	165.25	—
e	1004	6	167.5	—
TOTAL	20905	26		

注・・印 5%の危険率にて有意・10%*** 1%

表-5 脱型時強度分散分析表

要因	S	φ	V	F
拘束量 (A)	9270.51	2	4635.25	6.25**
前養生時間 (B)	39581.15	2	19790.57	26.7***
温度上昇勾配 (C)	9522.35	2	4711.17	6.43**
最高温度 (D)	7295.59	2	3647.79	4.92*
A×B	357.02	4	8.25	—
A×C	67.278	4	143.19	—
A×D	2139.97	4	534.99	—
e	4449.42	6	741.57	—
TOTAL	73288.69	26		

表-6 28日強度分散分析表

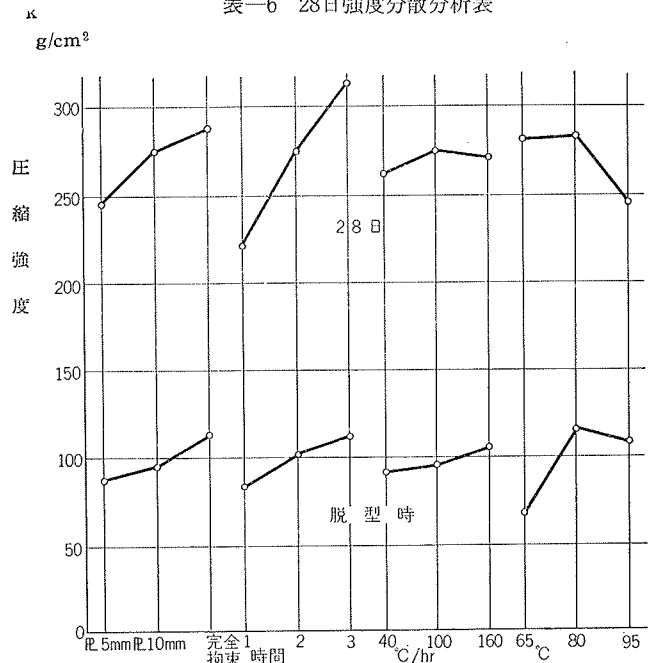


図-15 拘束量 図-16 前養生時間 図-17 温度上昇勾配 図-18 最高温度

18のごとくなる。この結果、拘束量については、無拘束の場合に比較して、R5 mm 程度の拘束で約25%の強度増進が認められるが拘束量をR10mmとしても大きな効果は得られない。前養生時間は、脱型時、28日共長い方がよい。これは鉄板を長く乗せておくとブリージングが起り、W/Cを小さくする事にもよると考えられる。温度上昇勾配は、脱型時では急な方が良く、28日では大きな差は認められない。これは無拘束の場合と異なり、急速加熱を行なっても長期強度に影響を及

ばさない事を示めている。最高温度は、脱型時、28日とも80°Cまでは温度の高い方が強度は出ているが、95°Cでは強度は落ちている。

2.4. 実験IV

前述の実験I, II, により求められた最適と思われる養生条件(表一1の各要因における水準参照)により Maturity および W/C を変えた場合の圧縮強度の変動を調査したものである。

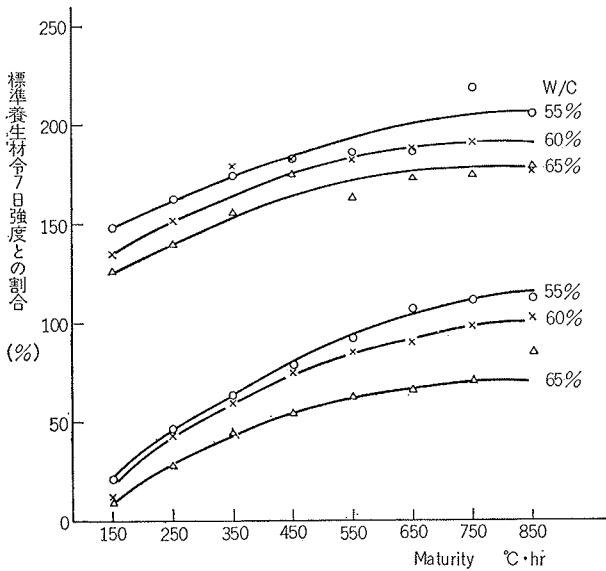


図-19 Maturity と圧縮強度の関係

実験結果を図-19に示めたようにこの実験における条件下では、圧縮強度は、Maturityの増加に従い、W/C別に脱型時、28日とも規則的な増加傾向を示している。W/C別に考察すると、脱型時では、W/C=65%のモルタルは、Maturity 500度; 時以上としてもそれ程効果はないが、W/C=55%のモルタルは、850度; 時以上でも、まだ強度が増加する可能性がある。材令28日では、W/Cが変わっても Maturity の強度に及ぼす影響は、同じ傾向にあり Maturity=350度; 時までは強度が増進しそれ以上では各 Maturity ともほぼ同一の強度である。

3. まとめ

以上各実験について得られた結果を総合的にまとめると次の関係が言える。

3.1. 無拘束状態の場合

(i)最高温度 脱型時には、80°Cまでは、常に高い方が有利であるが、95°Cでは温度勾配、混和剤の影響をうけて不利になる場合が生ずる。長期材令では、80°C以下においても、温度勾配の影響をうけ、95°Cでは全般に不利となる。その他の要因の影響はあまり受けない。

(ii)温度上昇勾配 脱型時では勾配の高い方が強度は高いが、30°C/hrと40°C/hrではその差はわづかである。しかし、30°C/hr以上とした場合は、長期材令における強度の伸びが著しく低下する。この傾向は、空気を連行する混和剤を混入した場合、養生温度の高い場合特に顕著である。その他の要因の影響はあまりない。

(iii)前養生時間 1~3時間に変化させた場合、長いほうが、脱型時、長期材令とも有利となるが、その差はわづかであり、1時間でも悪影響はみられない。

(iv)単位水量 実験はモルタルで行なったため単位セメント量の影響が現われ絶対値では単位水量の多い方が有利な結果となったが、標準養生分との強度比では明らかに単位水量の増加による不利が認められている。

(v)混和剤 脱型時および長期材令とも、P₀ No. 10 および VI, No. 5L 混入のモルタルはともに無混入のものより不利となる。特に連行空気量の多いものはその傾向が著しいようである。

(vi)セメント セメントの圧縮強度に対する有意性は、脱型時には、早強、シリカ、普通、高炉の順となり、長期材令では、早強、普通、シリカ、高炉の順となるが、普通とシリカの差は、わづかである。

(vii)Maturity 実験I, IIの結果からも明らかなように、Maturityを一定にしても各種養生条件により脱型時、および長期材令における圧縮強度は、大きく変動する。しかしながら実験IVに見られるごとく、ある条件下では、Maturity—強度、の概念は成り立ち、養生計画上最も重要な要因であるので、今後コンクリートで定量的に求める必要がある。

3.2. 拘束状態の場合

(i)最高温度 傾向は、無拘束状態の場合と同じであるが、95°Cにおける強度低下は、前者より幾分有利となる。なお拘束量の影響は、はっきり認められない。

(ii)温度上昇勾配 一般に拘束量に関係なく、脱型時では、勾配の高い方が強度は高いが、その差はわづかである。長期材令では温度上昇勾配の影響はなくなる。

(iii)拘束量 脱型時、長期材令とも拘束量の増加に伴ない、圧縮強度は増加する。無拘束状態とR5mm厚をのせた場合で約20%程度、R5mmとR10mmで約10%程度の差が認められる。

これら基礎実験により、各種養生条件、セメント、混和剤、調合等における要因効果が判明したので、今後は、コンクリートによる実験にて、これらの要因に対する定量的なものを見出し、養生計画を行なう上の資料を作製するつもりである。コンクリートにおいては粗骨材の影響が相当あると思われるので、モルタルで行なった結果と必ずしも一致するとは考えられない。