

蒸気養生されたコンクリートの圧縮強度について

中西正俊
鳥田専右

まえがき

コンクリートの蒸気養生に関してはすでに多くの研究成果が発表されており、予備時間（前置時間）、温度上昇こう配、最高温度、養生時間、その後の養生等について一応の指針も定められている。しかしながら蒸気養生を行なったコンクリートの長期強度の推移（標準養生コンクリート強度に対する強度比の低下、さらに絶対値の低下が考えられる）についての資料は少ないようである。そこで本研究は既往文献にとりあげられた各種要因が、長期強度（材令2年まで）に与える影響について検討を行なったものである。

また蒸気養生の目的である型枠の早期回転という条件に適合する養生方法を考えると、必然的に予備時間の短縮、高温度の養生ということになるが、これらが強度におよぼす悪影響は、従来の文献によってあきらかである。^{2)~4)}

しかしながら問題はその程度であり、強度低下が数量的にあきらかにされていれば、調合でカバーできることになる。この目的から調合および養生条件が与えられた場合、実験から得られたデータを用いて、各材令の強度の推定を試みた。

§1. とりあげた要因と水準

とりあげた要因と水準は表一に示すとおりである。

蒸気養生の時間構成は、建研の篠沢和久氏によるとつぎのようである。⁵⁾

- (イ). 前養生期間
- (ロ). 温度上昇期間
- (ハ). 最高温度継続期間
- (ニ). 温度下降期間
- (ホ). 後養生期間

水準 要因	1	2
A. 養生温度	60°C	80°C
B. セメント種類	早強ポルトランド	普通ポルトランド
C. 養生時間	3時間	5時間
(C. 冷却方法)	(徐冷)	(急冷)
D. 水セメント比	50%	65%
E. 混和剤の有無	ナシ	アリ (PH5)
F. スランプ	5cm	19cm
G. 予備時間	0.5時間	3時間

表一

(イ)は、予備時間または練り置き時間ともいわれる。(ロ)と(ハ)の合計を養生時間とすることもある。さらに(ニ)を加えて養生時間とすることもある。

Shideler J. J. は、最適養生方法をつぎのように規定している。²⁾

- ・練置時間：3時間以上
- ・温度上昇速度：22°C/h 以下
- ・養生温度：65~80°C
- ・養生時間：12時間（または所要強度の出るまで）

また Hanson J. A. はつぎのように規定している。³⁾

- ・打込から養生開始まで：5時間
- ・養生時間：13時間
- ・温度上昇率：22.2°C/h (40°F/h)
- ・最大温度：65.6°C (150°F)

また以前モルタルについて当研究所で行なった試験の結果⁶⁾の一部を分析すると表二のようになる。

本実験では要因および水準をつぎのように決めた。

予備時間については、3時間以上確保しないと強度上悪影響があるといわれているが、生産能率の向上を考えたとき、3時間は長すぎる。したがって水準を0.5および3時間ときめた。

記号	主効果	水準	材令別検定結果				備考
			直後	3日	7日	28日	
A	セメント種類	(1) 普通 (2) 早強	28.5**	45.2**	19.6**	—	・特性値は圧縮強度 ・くり返し数は6回 ・数字は寄与率 ・*危険率5%で有意 ・**同1%で有意
B	養生温度	(1) 50°C (2) 80°C	34.9**	32.8**	—	—	
C	温度上昇速度	(1) 20°C/h (2) 40°C/h	1.7**	—	7.8**	12.0*	
D	養生時間	(1) 3h (2) 5h	17.0**	6.8**	—	—	
A×B			8.7**	3.8**	—	9.6**	
B×C			1.2**	—	—	—	
A×D			1.2**	—	—	—	
B×D			3.0**	—	—	—	
C×D			0.5**	—	5.7*	—	

表-2

温度上昇速度については、強度にあまり影響しないという報告⁹⁾もあり、装置の技術上の問題もあるため今回は一定とした。具体的な数値は後に記す。

最大温度は100°C近くで行なった報告⁹⁾もあるが、この場合は加圧装置により変形を拘束した試験である。今回は大気圧下で無拘束の状態で行なうため、最大温度の1つは80°Cとした。Shideler J. J. の報告²⁾では65~80°Cで、また Hanson J. A. の報告では最適温度は65.6°C (150°F)、つぎに79.5°C (175°F) となっている、また前回当所で行なった試験の結果⁹⁾では50°C、80°Cについて行っており、分散分析の結果初期材令において高度に有意である。また JIS¹³⁾によると養生温度は65°C以下とされている。以上の考慮により水準は60°Cおよび80°Cとした。

養生時間は規定された養生温度の継続時間であるが、上昇に必要な時間も含めた。水準は前回の試験⁹⁾にならい、3および5時間とした。

温度下降速度(冷却方法)は養生時間とあわせて考えた。すなわち養生時間3時間のものは徐冷する(養生槽中で徐々に冷却し、養生開始から24時間後にとり出す)。また養生時間5時間のものは、上昇に必要な時間を含めて、所定養生温度で5時間保持した後、直ちに養生槽よりとり出したものである。

蒸気養生後の養生については実験計画法上の因子とは考えず別に考えた。詳細は後に記す。

調査に関係ある因子としては、

- (1) セメントの種類
- (2) 骨材の種類・粒大

(3) 混和剤の使用の有無、使用の場合その種類

(4) 水セメント比

(5) スランプ

(6) セメント量

(7) 細骨材率

等が考えられる。

セメントの種類は普通ポルトランド、早強ポルトランド、高炉、シリカ、フライアッシュがあるが、高炉は前回の試験⁹⁾の結果から除外した。また水準数の制約から普通および早強ポルトランドとした。

骨材については今回は一定とした。

混和剤についてはリグニン系セメント分散剤使用の有無を水準にとった。

水セメント比は小、大の2つ、すなわち50および65%とした。

スランプは硬練りおよび軟練りの代表として、5および19cmとした。

なお調査は JASS 5 によった。したがってセメント量および細骨材率は水セメント比とスランプから定まる。

以上の結果、直交表は $L_{16}(2^{15})$ を使用することにした。

§2. 直交表へのわりつけと 実験の指示内容

直交表 $L_{16}(2^{15})$ へ表-3 に示すようにわりつけた。その結果具体的な実験の指示内容は表-4 に示すとおりである。

Col.	1	2	3	4	5	6	7	8
要因	A	B	A×B	C	A×C	B×C	D	E
Col.	9	10	11	12	13	14	15	
要因	A×E	F	e ₁₁	C×E	e ₁₂	A×G	G	

備考：A, B, ……は主効果（表-2 参照）

A×B, A×C, ……は交互作用

e₁₁, e₁₂ は第一次誤差項

表-3

実 験 No.	A	B	C	D	E	F	G	(C)	実 験 順 序
	養生温度	セメント 種 類	養生時間	w/c	混 和 剤	スランブ	予備時間	冷却方法	
1	60°C	早 強	3h	50%	ナシ	5cm	0.5h	徐 冷	14
2	60°C	早 強	3h	50%	PH5	19cm	3h	徐 冷	3
3	60°C	早 強	5h	65%	ナシ	5cm	3h	急 冷	2
4	60°C	早 強	5h	65%	PH5	19cm	0.5h	急 冷	5
5	60°C	普 ポ	3h	65%	ナシ	19cm	3h	徐 冷	1
6	60°C	普 ポ	3h	65%	PH5	5cm	0.5h	徐 冷	11
7	60°C	普 ポ	5h	50%	ナシ	19cm	0.5h	急 冷	7
8	60°C	普 ポ	5h	50%	PH5	5cm	3h	急 冷	16
9	80°C	早 強	3h	65%	ナシ	5cm	3h	徐 冷	12
10	80°C	早 強	3h	65%	PH5	19cm	0.5h	徐 冷	15
11	80°C	早 強	5h	50%	ナシ	5cm	0.5h	急 冷	6
12	80°C	早 強	5h	50%	PH5	19cm	3h	急 冷	4
13	80°C	普 ポ	3h	50%	ナシ	19cm	0.5h	徐 冷	8
14	80°C	普 ポ	3h	50%	PH5	5cm	3h	徐 冷	10
15	80°C	普 ポ	5h	65%	ナシ	19cm	3h	急 冷	9
16	80°C	普 ポ	5h	65%	PH5	5cm	0.5h	急 冷	2

表-4

種 類	比重	凝 結			安定性	ig. loss	MgO	SO ₃	
		ブレン (cm ² /g)	水量 (%)	始発 終結					
普通	3.16	3,290	27.0	2-25 3-39	良	0.6	1.5	1.7	
早強	3.12	4,190	29.0	2-22 3-18	良	0.9	1.2	2.6	
種 類	フロー	曲げ強度 (kg/cm ²)				圧縮強度 (kg/cm ²)			
		1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
普通	241	—	31.6	50.6	73.2	—	130	237	425
早強	242	29.8	48.4	62.5	84.8	105	216	329	466

表-5

§ 3. 使用した材料

3.1 セメント

セメントは小野田社普通および早強ポルトランドを使用した。試験成績は表-5に示すとおりである。(ただし製造会社報告による。)

3.2 骨 材

粗骨材は富士川、大井川産二種混合で25mm以下、比

粗骨材	ふるい (mm)	40	30	25	20	15	10	5	5以下
		通過率 (%)	100	100	99	70	44	7	2
細骨材	ふるい (mm)	5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.15	以下
		通過率 (%)	100	99	96	68	12	1	0

表-6

重2.66, 吸水率1.01%, ふるい分け試験結果は表-6に示す。

細骨材は鬼怒川産で1.2mm以下、比重2.60, 吸水率1.53%, ふるい分け試験結果は表-6に示す。

3.3 混和剤

混和剤はセメント分散剤を使用した。主成分はリグニンスルホン酸塩である。以下記号 PH5 で示す。なお試料は製造会社より提供されたものである。

なお混和剤 PH5 の使用量はセメント重量の 0.5% とし、調合の補正はつぎのようにした。

有効水量 —15%
セメント量 —10%
S/A —1%

§ 4. コンクリートの調合

実験に用いたコンクリートの調合および実際に得られたスランブを表-7 に示す。

§ 5. 試験方法

5.1 試験体作成計画

実験 No.	セメント	w/c (%)	スランブ (cm)	混和剤	S/A (%)	有効水量 (l/m ³)	重 量 (kg/m ³)			実際に得られたスランブ (cm)
							セメント	砂	砂 利	
1	早 強	50	5	ナシ	37.0	164	328	694	1,210	5, 2
11										7, 6.5
7										20.5
13	普 通	50	19	ナシ	35.3	200	400	608	1,141	19
(18)										(21)
8	普 通	47.2	5	PH5	36.0	139	295	681	1,235	9, 15
14										1.5, 4
2	早 強	47.2	19	PH5	34.3	170	360	603	1,120	23
12										19
(17)										(17)
3	早 強	65	5	ナシ	39.0	164	252	757	1,210	1, 2
9										0, 4.5
5										21
15	普 通	65	19	ナシ	38.5	196	302	699	1,141	18.5
(19)										(20)
6	普 通	61.4	5	PH5	38.0	139	227	741	1,235	2, 2
16										2, 6
4	早 強	61.4	19	PH5	37.5	167	272	688	1,120	20
10										20
(20)										(17)

表-7

記 号	養 生 方 法	材 令						
		直 後	24時間	1 週	4 週	13 週	1 年	2 年
(A)	蒸気養生後空中(屋外)養生	○	○	○	○	○	○	○
(B)	蒸気養生後標準養生				○		○	
(C)	空中(屋外)養生				○		○	
(D)	標準養生			○	○	○	○	○

表-8

表-8に示す。

試験体の大きさは10φ×20cmとし、作業能率向上のため紙製テストピースモールド¹⁸⁾を使用した。くり返し数は2として1回あたり32個、回数は16回であるから総数は32×16=512(当初計画分)である。

記号	蒸気養生中の状態
(A), (B)	供試体の上部コンクリートは、蒸気にじかに接している
(A'), (B')	供試体上部をビニールシートでシールしコンクリートに蒸気がじかに接しないようにする

表-9

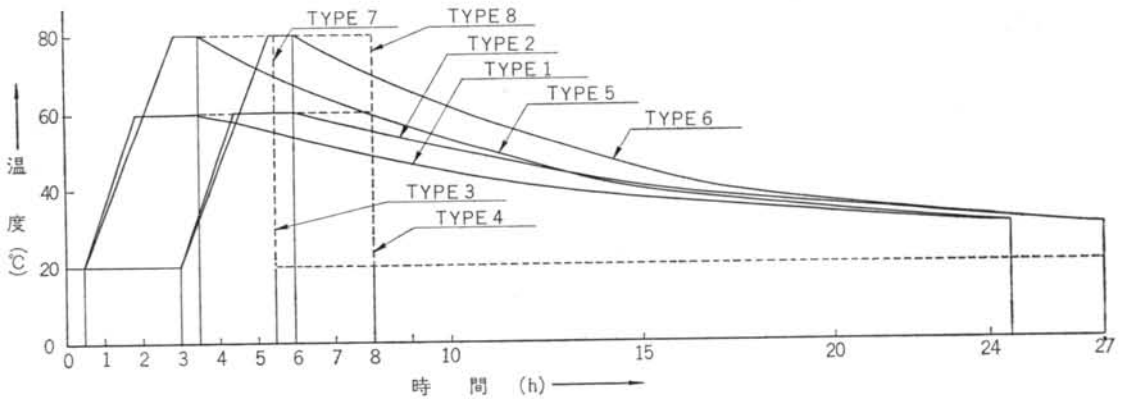


図-1

TYPE	実験 No.	予備時間 (h)	養生温度 (°C)	養生時間 (h)	温度上昇率	温度下降曲線	T: 温度(°C) t: 時間(h)
1	1, 6	0.5	60	3	30°C/h	$T = 40 e^{-0.071(t-3.5)} + 20$	
2	2, 5	3	60	3	〃	$T = 40 e^{-0.071(t-6)} + 20$	
3	4, 7	0.5	60	5	〃	—	
4	3, 8	3	60	5	〃	—	
5	10, 13	0.5	80	3	26°C/h	$T = 60 e^{-0.086(t-3.5)} + 20$	
6	9, 14	3	80	3	〃	$T = 60 e^{-0.086(t-6)} + 20$	
7	11, 16	0.5	80	5	〃		
8	12, 15	3	80	5	〃		

表-10

ただし実験 No. 10, 12, 13, 15において, A, B(養生記号)をさらにつぎの2通りに分割した。内容は表-9に示す。

(追加分の実験 No. は17, 18, 19, 20とした。)

この分割による供試体の増加分は72個であり、供試体の合計は512+72=584個である。

5.2 試験装置

蒸気養生箱は内部寸法55cm×79cm×40cm, 内容積約174lのもので熱源は1.5kwの電熱線による。内部温度の測定はCC線を使用し、横河製自動平衡電位差記録計によって記録した。実測の結果は、図-1および表-10に示すとおりである。

No.	養生	材 令						
		直後	24h	1W	4W	13W	1年	2年
1	(A)	37	187.5	198	246.5	321	342.5	377
	(B)				281.5			361
	(C)				197			369
	(D)			259	315	345	380.5	431
2	(A)	45	179.5	214.5	300.5	329	358.5	377
	(B)				183	264		
	(C)				283.5	311.5		
	(D)			256	287.5	336	423	424.5
3	(A)	39.5	90	119.5	138	180	200	193.5
	(B)				152			213
	(C)				166			
	(D)			147.5	184	257.5	262.5	282.5
4	(A)	12.5	82	119.5	161.5	170	221	197.5
	(B)				130.5	257		
	(C)				264			331
	(D)			207.5	262	286	341	365.5
5	(A)	15.5	120.5	195	207.5	263	290	292
	(B)				240	312		
	(C)				228.5	338.5		
	(D)			117.5	218.5	326.5	349.5	368
6	(A)	5	49	80.5	118	182	176	209
	(B)				110			219.5
	(C)				116			211
	(D)			65.5	152	204	218.5	240
7	(A)	45.5	107.5	155	210	260	302	348.5
	(B)				219.5			396
	(C)				173.5			433
	(D)			162.5	310	370	416	498.5
8	(A)	46	94	168	217	294	283	286.5
	(B)				241			318
	(C)				223			356.5
	(D)			150.5	274.5	325	356.5	350

注) 養生欄の記号は表-8, 表-9 参照
単位: kg/cm²

表-11 圧縮強度試験結果 (その1)

§ 6. 試験結果

試験結果は表-11に示すとおりである。(ただし試験体2個の平均値である)。

No.	養生	材 令						
		直後	24h	1W	4W	13W	1年	2年
9	(A)	30	102.5	151	160	211	207	244
	(B)				161			
	(C)				185.5			306
	(D)			183.5	187	314	328	320.5
10	(A)	11	99.5	140.5	157	188	191	169
	(A')	8	79.5	199	204	255	241	227
	(B)				131			214.5
	(B')				179.5			196.5
11	(A)	151	183.5	210.5	256	322.5	371	372
	(B)				264.5			375
	(C)				271.5			424
	(D)			279.5	336.5	360.5	375.5	391.5
12	(A)	133.5	216.5	207	261	304.5	345.5	381
	(A')	150.5	218.5	254.5	333	382	383.5	451.5
	(B)				218			428
	(B')				255			473
13	(A)	36.5	110.5	167	193	259	282.5	323.5
	(A')	42.5	120.5	187	210.5	274	270.5	337.5
	(B)				167.5			363
	(B')				210			368
14	(C)				274			423
	(D)			170.5	291.5	377	428	442
	(A)	16	157.5	138	184.5	251.5	264.5	298.5
	(B)				146.5			363.5
14	(C)				205.5			358
	(D)			153	316	345.5	384.5	490

表-11 圧縮強度試験結果 (その2)

No.	養生	材 令						
		直後	24h	1W	4W	13W	1年	2年
15	(A)	47	77.5	121.5	176	224	213	261.5
	(A')	48.5	89.5	146	192	244	219	295
	(B)				199			291.5
	(B')				194.5			301.5
	(C)				214.5			288
	(D)			116.5	247	318	357	364
16	(A)	24	65.5	99	113.5	173	178.5	164
	(B)				136			189
	(C)				176			255
	(D)			94.5	197	239.5	242	299.5

表一11 圧縮強度試験結果(その3)

表一12に分散分析の結果を示す。養生温度は初期において有意であるが、長期材令ではきかない。養生時間においても同様のことがいえる。しかしながらこの2つの交互作用は各材令共に有意であり、既往の文献¹⁴⁾と一致する。セメントの種類は材令1年位まで有意のようである。水セメント比が各材令ともに有意であることは当然であるが、混和剤の使用は初期および長期材令で有意である。スランブおよび予備時間は中間材令においてのみ有意である。

交互作用のうち“養生温度×養生時間”の有意なことは前に記したが、“養生温度×セメント種類”、“セメント種類×養生時間”は材令直後のみで有意である。“養生温度×混和剤の有無”、“養生時間×混和剤の有無”、“養生温度×予備時間”はほとんど有意差はない。

したがって初期材令で高い強度を必要とするときは、

- ① 養生温度は高くする
- ② 早強セメントを使用する
- ③ 養生時間は長くする
- ④ 水セメント比は小さくする
- ⑤ 分散剤は使用しない
- ⑥ スランブは関係しない
- ⑦ 予備時間は関係しない

§7. 検 討

7.1 蒸気養生後空中養生を行なったもの

Col.	要 因	寄 与 率, F 検 定 結 果													
		直 後		24 h		1 W		4 W		13 W		1 年		2 年	
1	A (養生温度)	-	9.4 *	-	1.1	+	—	+	0.8	+	—	+	0.8	+	—
2	B (セメント種類)	+	11.6 *	+	19.4 *	+	10.6 *	+	8.8 *	+	1.1	+	4.8 *	+	0.3
3	A×B	-	7.4 *	-	—	-	2.6	-	0.3	-	1.1	-	0.5	-	0.3
4	C (養生時間)	-	21.4 *	+	0.7	+	0.5	+	—	+	0.2	-	—	+	—
5	A×C	+	11.2 *	+	8.0 *	+	4.8 *	+	8.5 *	+	10.3 *	+	8.6 *	+	7.7 *
6	B×C	-	3.4 *	-	0.8	+	—	+	—	+	—	-	0.1	-	—
7	D (水セメント比)	+	24.8 *	+	46.2 *	+	37.3 *	+	54.4 *	+	64.8 *	+	64.8 *	+	67.3 *
8	E (混和剤の有無)	+	2.5 *	+	—	+	3.7 *	+	0.3	+	2.0 *	+	2.7 *	+	5.8 *
9	A×E	-	0.3	+	3.7 *	+	—	-	0.1	-	—	+	—	-	—
10	F (スランブ)	+	—	-	0.1	-	4.0 *	-	6.9 *	-	—	-	2.4 *	-	1.8
11	e ₁₁	+	—	-	0.3	-	0.4	-	0.6	-	—	-	1.7 *	-	—
12	C×E	-	—	+	—	+	2.3	+	—	+	—	+	0.1	+	—
13	e ₁₂	-	—	+	0.4	+	1.0	+	1.2	+	1.6	+	0.9	+	—
14	A×G	-	0.2	+	—	-	3.3 *	-	0.1	-	0.3	-	0.2	+	0.5
15	G (予備時間)	-	0.3	-	3.0 *	-	3.4 *	-	4.4 *	-	3.3 *	-	0.4	-	1.6

表一12 分散分析(特性値:蒸気養生圧縮強度)

注) 符号: + 水準1の方が特性値が大きい

- 水準2の方が特性値が大きい

* 危険率5%で有意 * 危険率1%で有意

長期材令における強度の低下すなわち材令2年の強度が材令1年のそれより下廻るものはNo. 3, 4, 10, 16 (表-11参照)であるが、これらに共通な要因は表-4によると $w/c (=65\%)$ のみである。

7.2 標準養生強度に対する蒸気養生強度の比率

比率A/D (蒸気養生強度/標準養生強度)を各材令別に示したものが表-13である。またこの値を特性値として分散分析した結果を表-14に示す。

蒸気養生強度を特性値とした分析結果(表-12)とはほぼ類似した傾向を示している。その中でも交互作用“養生温度×養生時間”が各材令共に高度に有意な点は注目される。したがって蒸気養生を行なってその後空中養生されたコンクリートの強度が、長期材令でなるべく標準養生強度近くに保つためにはつぎのようにすればよい。

- ① 養生温度は低い方がよい
- ② セメント種類はどちらでもよい
- ③ 養生時間は関係しない
- ④ 水セメント比は小さい方がよい
- ⑤ 分散剤の使用は関係しない
- ⑥ スランプは小さい方がよい
- ⑦ 予備時間は関係しない

No.	各材令別強度比 (A/D)				
	1 W	4 W	13 W	1 年	2 年
1	0.765	0.785	0.93	0.90	0.88
2	0.84	1.045	0.98	0.85	0.89
3	0.84	0.755	0.70	0.76	0.685
4	0.575	0.62	0.595	0.645	0.54
5	1.66	0.95	0.81	0.83	0.795
6	1.15	0.775	0.89	0.805	0.875
7	0.955	0.68	0.70	0.725	0.70
8	1.12	0.795	0.905	0.795	0.85
9	0.825	0.855	0.67	0.635	0.76
10	0.675	0.56	0.625	0.615	0.535
11	0.755	0.76	0.895	0.985	1.95
12	0.995	0.85	0.93	0.74	0.755
13	0.98	0.665	0.685	0.655	0.73
14	0.90	0.585	0.73	0.69	0.61
15	1.045	0.665	0.705	0.60	0.72
16	1.075	0.575	0.725	0.74	0.66

表-13

Col.	要因	寄与率, F 検定結果														
		1 W		4 W		13 W		1 年		2 年						
1	A	+	1.7	+	12.5	**	+	6.0	*	+	10.8	**	+	4.0		
2	B	-	39.3	*	+	3.6	*	+	—	+	1.2	*	+	—		
3	A×B	-	6.5	*	-	3.4	-	2.3	-	-	1.2	-	-	4.2		
4	C	+	0.3	+	3.2	+	+	—	-	—	—	+	—	—		
5	A×C	+	11.0	*	+	15.7	*	+	35.6	*	+	23.3	*	+	25.5	*
6	B×C	-	1.0	+	—	+	+	—	*	-	0.6	*	+	—		
7	D	-	0.9	+	1.5	+	+	23.9	*	+	13.1	*	+	12.3	*	
8	E	+	0.6	+	1.5	-	-	1.0	+	+	—	+	+	4.2		
9	A×E	+	1.1	-	3.6	*	-	—	+	+	—	-	-	9.1	*	
10	F	-	—	-	—	+	+	3.1	+	+	10.8	*	+	6.6	*	
11	e ₁₁	-	—	-	—	+	+	0.9	-	-	0.3	+	+	—		
12	C×E	+	3.3	*	+	—	+	—	-	-	—	+	+	—		
13	e ₁₂	-	—	-	2.5	-	-	—	+	+	—	-	-	—		
14	A×G	-	2.4	-	0.1	-	-	—	-	-	5.6	*	-	0.1		
15	G	-	9.0	*	-	23.4	*	-	2.5	+	—	-	-	—		

注) 記号は表-12参照

表-14 分散分析表(特性値:強度比(A/D))

7.3 その後の養生方法による差

蒸気養生後の養生は表-8に示したように、
 (A) 蒸気養生後空中(屋外)養生
 (B) 蒸気養生後標準養生
 の2種について行なった。

表-11において材令4wで(A)>(B)のもの8回、
 (A)<(B)のもの8回、材令2年で(A)>(B)のもの1
 回、(A)<(B)のもの11回である。

したがって蒸気養生後の養生を空中で行なった場合と
 水中で行なった場合の強度上の差は、材令4w程度では
 差がないようであるが、さらに長期材令になるとあきら
 かに差がみられる、すなわちその後の養生を水中で行な
 った方が強度は大である。

なお参考までに蒸気養生を行わないものに対しても
 水中養生(D)と空中養生(C)の差を比較したが、若干の
 試験誤差に基因すると考えられるものを除いて(D)>
 (C)であり、従来の文献¹⁵⁾と一致する。

7.4 ビニールシートの有無による強度の差

表-11のデータにより、ビニールシートの有無と材令
 を要因、強度を特性値として2元配置分散分析の結果
 のうち、ビニールシートの有無の検定結果を表-15に示
 す。実験回数が少ないため詳細は不明であるが、早強セ
 メントを使用し、かつ分散剤を使用した時は、有意すな
 わちビニールシートによりコンクリートに蒸気がじかに
 接しないようにした方が強度が高い。普通セメントを使用
 し、かつ分散剤を使用しない場合には有意差はない。

No.	検定結果	A	B	C	D	E	F	G
10	*	80°C	早強	3h	65%	PH5	19cm	0.5h
12	**	〃	〃	5h	50%	PH5	〃	3h
13	—	〃	普通	3h	50%	—	〃	0.5h
15	—	〃	〃	5h	65%	—	〃	3h

注) 記号は表-12参照

表-15

§ 8. 与えられた調査、 養生条件からの強度の推定

8.1 推定式について

今回の実験に用いた因子は7つで、水準は各々2つと
 りあげたことはすでに述べた。このすべての組み合わせ

を考えると $2^7=128$ (回)となる。この128回の実験を行な
 うかわりに実験計画法を用いて16回の実験ですませたわ
 けであるが、実験精度の点では128回の実験と全く同一
 であることは実験計画法の考え方から明らかである。し
 たがって16回の実験の結果を用いて128回の実験結果を
 推定することは可能であると考えられる。

特性値(ここでは圧縮強度)の観測方程式¹⁶⁾を考え
 ると、つぎようになる。

$$y_i = m + aA_i + bB_i + ab(AB)_i + cC_i + ac(AC)_i + bc(BC)_i + dD_i + eE_i + ae(AE)_i + fF_i + E_{11}(e_{11})_i + ce(CE)_i + E_{12}(e_{12})_i + ag(AG)_i + gG_i \dots \dots (1)$$

($i=1\sim 16$)

記号の説明:

特性値: y_i

未知数(表-16に示す)

- 一般平均: m
- 主効果: a, b, c, d, e, f, g
- 交互作用: ab, ac, bc, ae, ce, ag
- 誤差項: E_{11}, E_{12}

定数(水準1のとき+1, 水準2のとき-1とする)

- 主効果: $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i, G_i$
- 交互作用: $(AB)_i, (AC)_i, (BC)_i, (AE)_i, (CE)_i, (AG)_i$
- 誤差項: e_{11}, e_{12}

材令 未知数	材令						
	直後	24h	1W	4W	13W	1年	2年
m	43.4	120.0	155.3	193.8	245.8	264.1	281.6
a	-12.7	-6.4	1.0	6.1	4.1	7.5	4.9
b	14.0	22.4	14.8	16.3	7.5	15.4	7.4
ab	-11.3	-1.4	-8.2	-4.6	-7.4	-6.6	-7.4
c	-19.0	5.6	5.3	2.1	4.8	-0.1	4.8
ac	13.8	14.8	10.5	16.1	19.1	20.3	22.7
bc	-7.8	-6.0	6.6	3.8	4.2	-4.7	-1.8
d	20.4	34.4	27.0	39.9	47.0	54.6	65.4
e	6.8	2.5	9.4	4.6	9.3	11.9	20.0
ae	-3.2	10.4	1.2	-4.0	-3.2	0.1	-3.6
f	0.1	-4.0	-9.7	-14.6	-3.9	-11.3	-12.3
E_{11}	1.0	-4.6	-5.0	-5.4	-1.7	-9.9	-5.2
ce	-1.6	2.2	7.8	1.3	3.7	4.6	2.9
E_{12}	-1.4	5.1	6.1	7.0	8.5	7.9	1.4
ag	-2.6	2.3	-9.0	-4.1	-5.3	-5.2	8.1
g	-3.1	-9.6	-9.0	-11.8	-11.4	-6.1	-11.5

表-16

(1)式を16元1次連立方程式と考え、定数には直交表からの数値を、特性値には実験結果を代入して解いた結果得られた未知数の値を各材令別に示すと表-16のようである。初期材令として直後、中間材令として4週、長期材令として2年の3材令についてこの計算式によって求めた値と実験値を対比したのが表-17である。ただし、この推定は本実験の範囲内で成立するものである。

No.	材令直後		材令4週			材令2年			
	計算値 y	実験値 y'	y'/y	y	y'	y'/y	y	y'	y'/y
1	37.2	37	1.00	244.9	246.9	1.01	381.2	377	0.99
2	44.4	45	1.01	302.1	300.5	1.00	374.0	377.5	1.01
3	37.0	39.5	1.07	150.3	138	0.92	200.0	193.5	0.97
4	15.0	12.5	0.83	149.1	1161.5	1.08	190.8	197.5	1.04
5	17.8	20.5	1.15	195.1	207.5	1.06	285.4	292	1.02
6	2.6	5	1.93	130.3	118	0.91	215.4	209	0.97
7	45.2	45.5	1.01	211.7	210	0.99	345.0	348.5	1.01
8	46.4	46	0.99	215.7	217	1.01	300.2	296.5	0.99
9	29.4	30	1.02	161.5	160	0.99	240.2	244	1.02
10	11.4	11	0.97	155.5	157	1.01	172.6	169	0.98
11	153.6	151	0.98	243.7	256	1.05	365.4	372	1.02
12	131.2	133.5	1.02	273.7	261	0.95	387.8	381	0.98
13	34.0	36.5	1.07	205.7	193	0.94	330.4	323.5	0.98
14	18.4	16	0.87	172.1	184.5	1.07	292.0	298.5	1.02
15	47.4	47	0.91	174.3	176	1.01	265.2	261.5	0.99
16	23.4	24	1.03	115.1	113.5	0.99	160.0	164	1.03

表-17

8.2 推定式の応用例

蒸気養生の目的は強度の発現を促進し、部材の生産性を高めることにある。

温度 (°C)	セメント 種類	時間 (h)	w/c (%)	混和剤	スランブ (cm)	予備時間 (h)	材令別強度 (kg/cm ²)			
							直後	24 h	4 W	2年
80	早強	5	50	ナシ	5	0.5	153.6	173.8	243.7	365.4
80	早強	5	50	ナシ	5	3	154.6	197.6	259.1	404.6
80	早強	5	50	ナシ	19	0.5	153.4	181.8	272.9	390.0
80	早強	5	50	ナシ	19	3	154.4	205.6	288.3	429.2
80	早強	5	50	PH5	5	0.5	130.4	194.0	229.1	324.0
80	早強	5	50	PH5	5	3	131.4	217.8	244.5	363.2
80	早強	5	50	PH5	19	0.5	130.2	202.0	258.3	348.6
80	早強	5	50	PH5	19	3	131.2	225.8	273.7	387.8

表-18

さて、型枠の脱型時にはかなりの強度が要求され、一般には120~150kg/cm²といわれている。¹⁾ いま材令直後の圧縮強度が120kg/cm²以上あるものの、調合および養生条件の組み合わせを、表-16の値を使用して128回の組み合わせの中からえらび出した。その組み合わせは表-18に示すとおりである。

これら組み合わせに共通してみられる要素は、

- (1) 養生温度：80°C
- (2) セメント種類：早強
- (3) 養生時間：5時間
- (4) 水セメント比：50%

である。

混和剤は使用しない方がよい。スランブは5cmより19cmの方がよいようである。予備時間は0.5hより3hの方が若干強度が上廻っているが、生産能率を向上させるため0.5hとする場合は必要に応じて強度低下を調合で補えばよい。

8.3 推定式の一般化

8.1で行なった推定は強度そのものを特性値とするため、使用した材料が特定のものであるから一般的ではない。そのため特性値を強度ではなく、標準養生4週強度に対する比率として8.1と全く同様な方法で未知数を求めて計算式を作り、これに既往文献の実験内容を用いて計算した値と、そのときの実験値を比較したものを表-19に示す。一部のものを除くと、かなりよく一致している。

なおこの計算では養生温度70°Cの場合、60°Cと80°Cの場合の平均値を計算値とした以外、水準は本実験で設定したもののうち一番近いものを用いて行なった略算であり、各因子について多水準の点に関する計算式を用いて精算すれば、なお一層実験値と一致すると思われる。

文献 No.	温度 (°C)	セメント 種類	時間 (h)	w/c (%)	混和剤	スランブ (cm)	予備時間 (h)	A/D ₄ w			y y ₀
								材令	実験値 y	計算値 y ₀	
(3)	65.6	普通	3	32.3	ナシ	5	3	1w	.79	.879	.90
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.89	.986	.90
	79.5	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1w	.80	.626	1.27
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.88	.735	1.20
	65.6	早強	〃	38.9	〃	〃	〃	1w	.78	.860	.91
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.87	.994	.87
	79.5	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1w	.78	.766	1.01
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.88	.862	1.02
(6)	50	普通	3	65	ナシ	19	0	1w	.49	.48	1.02
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.82	.78	1.05
	〃	〃	5	〃	〃	〃	〃	1w	.49	.48	1.02
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.94	.78	1.21
	80	〃	3	〃	〃	〃	〃	1w	.45	.52	.87
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.71	.77	.92
	〃	〃	5	〃	〃	〃	〃	1w	.48	.52	.92
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.74	.77	.96
(7)	70	普通	5	52	ナシ	10	3	24h	.69	.585	1.18
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1w	.85	.753	1.13
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.99	.861	1.15
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	13w	.99	1.20	.82
	〃	〃	〃	57	〃	〃	〃	24h	.53	.536	1.02
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1w	.74	.756	.98
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.92	.839	1.09
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	13w	.87	1.193	.73
	〃	〃	〃	61.6	〃	〃	〃	24h	.42	.485	.86
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1w	.68	.758	.89
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.84	.815	1.03
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	13w	.95	1.19	.80
(17)	65	普通	3	55	ナシ	8±1	0.5	1w	.58	.683	.85
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.75	.815	.92
	〃	〃	〃	50	PH10	〃	3	1w	.69	.722	.96
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4w	.97	.976	1.00

表-19

つぎのとおりである。

- ・養生温度（初期のみ）
- ・セメント種類
- ・養生時間（初期のみ）
- ・水セメント比
- ・分散剤使用の有無
- ・養生温度と養生時間の交互作用

§9. 結論

本実験の範囲であきらかになった点はつぎのとおりである。

(1) 蒸気養生後に空中養生を行なったコンクリートの圧縮強度に、影響を与える因子および因子間交互作用は

また、調合および養生条件から各材令における圧縮強

度を推定できる式を得た。

(2) 一部のものに長期材令における強度低下がみられた。これに共通した要因と水準は $w/c=65\%$ である。

(3) 標準養生強度に対する蒸気養生強度の比率に影響を与える因子および交互作用について分析した結果、ほぼ(1)と同じ結果が得られた。

(4) 蒸気養生後の養生を空中で行なったものと、水中で行なったものの比較では材令4週では差がないが、長期材令になると前者は後者より低強度となる。

(5) ビニールシートによりコンクリート面に蒸気が接しないようにした場合、一部に有意差がみられた。

§ 10. む す び

今回は圧縮強度のみについて試験したが、予備時間を少なくして高温度の養生を行なった場合、強度低下はないようであるが、耐久性については別に検討せねばならない。

また、Maturity Factor と圧縮強度の関係については現在検討中であるので、別の機会に発表したい。なお数値計算は企画室計算課の I. B. M. によった。

<参考文献>

- 1) JASS 10 (日本建築学会、建築工事標準仕様書：壁式プレキャスト鉄筋コンクリート工事)
- 2) Shideler, J. J. : "Low Pressure Steam Curing" Journal of A. C. I. (1963-8)
- 3) Hanson, J. A. : "Optimum Steam Curing Procedure in Precasting Plants" Journal of A. C. I. (1963-1)
- 4) Higginson, E. C. : "Effect of Steam Curing on the Important Properties of Concrete" Journal of A. C. I. (1961-9)
- 5) 篠沢和久 : "蒸気養生コンクリートの強度" 昭和40年度建研秋季講演会聴講資料
- 6) 烏田専右, 鈴木忠彦 : "セメントモルタルの大気圧下高温蒸気養生と強度との関係" 清水建設研究所報, 第1号 (昭和37年4月)
- 7) 渡辺三郎 : "プレキャスト版用コンクリートの蒸気養生について" 日本住宅公団職員論文集 (昭和39年度版)
- 8) 河野清 : "プレキャストコンクリートの硬化促進に関する RILEM の報告 (その1, その2)" 小野田研究報告, 第63, 64号 (昭和40年4, 6月)
- 9) 向井毅 : "コンクリート製品の高温促進養生に関する研究 (その1, その2)" 日本建築学会論文報告集, 第119, 120号 (昭和41年1, 2月)
- 10) 岩崎岩雄他 : "蒸気養生を行ったかた練りコンクリートの圧縮強度と収縮" セメント・コンクリート (1962-4)
- 11) 郡道夫他 : "蒸気養生時間と養生温度の変化がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響" セメント技術年報 (昭和36年)
- 12) 平野生三郎他 : "大気圧下におけるコンクリートの蒸気養生に関する研究" セメント技術年報 (昭和29年)
- 13) JIS A 5303—1956 : 遠心力鉄筋コンクリート管
- 14) 西林新藏他 : "コンクリートの高温高圧養生に関する2, 3の考察" セメント技術年報 (昭和38年)
- 15) 近藤泰夫, 坂静雄監修 : "コンクリート工学ハンドブック" 朝倉書店
- 16) 田口玄一 : "実験計画法" 丸善
- 17) 大石他 : "蒸気養生がコンクリートの耐凍結融解性におよぼす影響" セメント技術年報 (昭和40年)
- 18) 土谷耕介 : "紙製テストピースモールドの開発" 日本建築学会論文報告集, 第66, 69号