

論文

[1022] モルタルの急速硬化によるコンクリート強度判定の一考察

正会員 ○川上 英男 (福井大学工学部)
 八木 淳一 (清水建設)
 脇 敬一 (福井大学工学部)

1. はじめに

コンクリートの強度判定において最も望ましいのは、コンクリートが打込まれる前に判定結果が得られることである。そうなれば、不適格なコンクリートの打込みを未然に防止出来るので品質確認のための手段から一歩進んで積極的な品質管理への道を開くことになる。

レデーミクストコンクリート工場から打込み現場まで、通常、積み込み 3 分、走行 10-50 分、待ち時間 5-15 分、荷卸し 5-10 分と言われている[1]。また走行時間の平均は 30 分前後とされている[2]。即ち、30-40 分で判定結果が得られれば、上記のように打込みの可否を指示できる場合が格段に増大するものと言えよう。さて コンクリート強度の早期判定法([3]-[5])の内、単位セメント量、単位水量、水セメント比の判定法は所要時間が 10-30 分、特に振動法では 1 分と極めて短く、上記の目的に適合するものであるが、その検査結果はコンクリートの製造過程における材料の計量を確かめるに留まっている。また、促進強度試験方法は硬化の過程をも含むものであるが、コンクリートを対象とする温水法では約 24 時間、モルタルを対象とする急速硬化法では約 120-80 分(うち高温養生 90-50 分)である[6]-[8]。

本報告はこのうちのモルタル急速硬化法に 沸騰水中30分養生を試みた結果(以下煮沸法と言う)について述べるものである。また20分養生の場合についても言及した。

2 煮沸法によるモルタルの急速硬化

2.1 試験方法・使用器具

モルタルまたはウェットスクリーンドモルタル 500 g を容器に入れ、急結剤を加えて電動ハンドミキサーで1分練り混ぜた後、鋼製単独型枠(31.6 x 31.6 x 120 mm)に詰め込む。これをレンジバックに入れ、急結剤添加から5分後に沸騰水中(ヒーター付き保温器)に入れる。30分経過後に取り出し、脱型し直ちに圧縮試験を行う。圧縮載荷はモルタル供試体の側面に対して 31.6 x 31.6 mm の耐圧板によって行う(載荷開始まで2分)。先ず供試体の中央部、次いで 端部に対し計3回の試験を行った。本実験では圧縮試験にはアムスラー型耐圧試験機(2 ton)を用いた。沸騰水を用いたのは高温養生と温度管理の容易さを図ったものであり、単独型枠はモルタル詰め込み及び脱型の迅速化を狙ったものである。煮沸養生状況と使用器具の概略を図1及び図2に示す。

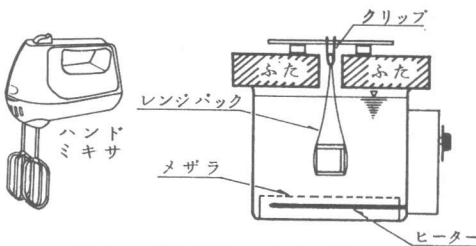


図1 試験器具・養生状況

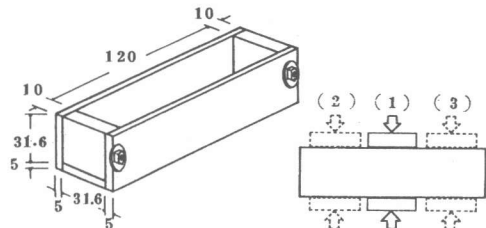


図2 型枠(mm)・載荷状況

2.2 使用材料・調合

使用材料を表1に示す。コンクリートの調合は軟練りと硬練り（目標 slump 18 cm, 8 cm）を対象とし、水セメント比は 65, 55, 45, 40 % の4種類とした。調合を表2に示す。

2.3 セメント水比とモルタルの急速硬化強度

モルタルの急速硬化強度を表2に示す。セメント水比(C/W)とモルタル圧縮強度(F_m)の関係を図3に示す。両者はほぼ直線的関係にあり、その回帰式は次のように表される。

$$F_m = 58.0 C/W - 75.1 \dots \dots \dots (1) \quad (\text{相関係数 } r = 0.98)$$

一方、セメント水比とコンクリート圧縮強度が通常直線関係にあるので、式(1)は煮沸法によるモルタルの急速硬化強度からコンクリート圧縮強度推定が可能であることを示している。

表1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 圧縮強度 344 ~ 376 kg/cm ²		
砂利*	5 ~ 20 mm	表乾比重 2.63,	吸水率 1.88 %
砂*	2.5 mm以下	表乾比重 2.58,	吸水率 2.35 %
微粒砂*	0.11 ~ 0.053 mm, 米(福井県九頭龍川産)		
豊浦標準砂			
急結剤	アルミン酸ソーダを含む無機成分 84 % 水酸化ナトリウム 16 %		

表2 調合 および モルタルの急速硬化圧縮強度

スランブ (cm)	W/C (%)	重量 (kg/m ³) ※				モルタル				ウエットスクリーンドモルタル			
		水	セメント	砂	砂利	各	個	平均	各	個	平均		
18 (軟練り)	65	190	292	897	941	16.0	17.5	17.0	16.8	26.0	27.0	26.5	26.5
	55	192	349	829	957	25.0	25.0	22.0	24.0	31.0	31.5	30.5	31.0
	45	200	444	731	957	49.5	54.0	51.5	51.7	52.5	52.5	49.5	51.5
	40	205	513	660	957	67.0	72.5	69.0	69.5	68.0	73.0	75.5	72.2
8 (硬練り)	65	163	251	936	1007	17.5	20.0	19.0	18.8	20.0	21.5	22.5	21.3
	55	164	298	879	1023	27.5	29.0	31.5	29.3	36.5	38.0	39.5	38.0
	45	168	373	809	1023	45.5	50.0	49.0	48.2	57.0	59.5	58.5	58.3
	40	172	430	749	1023	73.5	78.0	80.5	77.3	89.0	87.5	92.5	89.7

※: 5 ~ 10 mm, 10 ~ 15 mm, 15 ~ 20 mmの等量混合

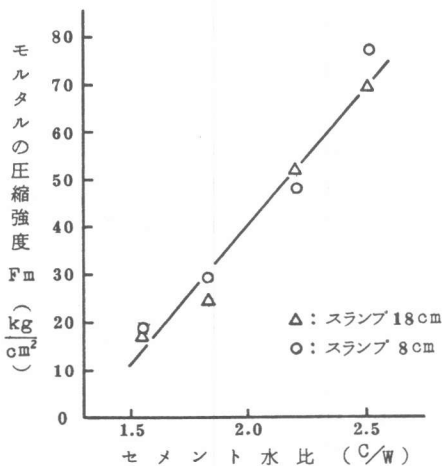


図3 セメント水比とモルタル強度 (F_m)

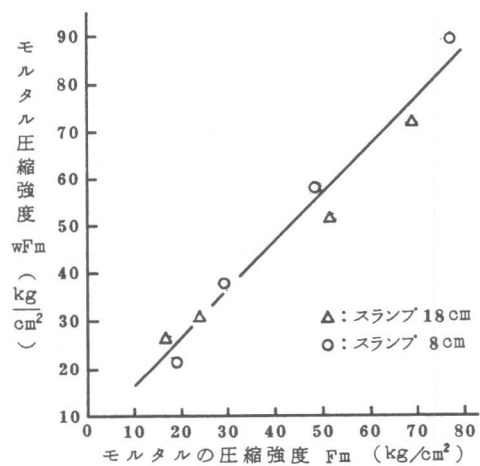


図4 ウエットスクリーンドモルタル強度(wF_m)とモルタル強度(F_m)

2. 4 ウェットスクリーンモルタルの急速硬化強度

先のモルタル圧縮強度 (F_m) とウェットスクリーンモルタルの圧縮強度 (wF_m) の関係を図4に示す。この関係に直線的関係を当てはめると次の回帰式が得られる。

$$wF_m = 1.01 F_m + 6.2 \dots\dots\dots(2) \quad (r = 0.98)$$

2. 5 コンクリート及びモルタル円柱試験体の28日圧縮強度

コンクリート及びモルタル (直径 10 cm 高さ 20 cm) の28日圧縮強度 (F_c , F_{m0}) を表3に示す。コンクリートの圧縮強度とセメント水比との関係を図5に示す。

両者の関係に一次式を当てはめると回帰式は次のようである。

$$F_c = 318 C/W - 268 \dots\dots\dots(3) \quad (r = 0.99)$$

2. 6 コンクリート28日強度とウェットスクリーンモルタル急速硬化強度の関係

ウェットスクリーンモルタルの急速硬化圧縮強度 (wF_m) と コンクリートの28日圧縮強度 (F_c) の関係を図6に示す。両者の関係の最小二乗法による回帰式を示すと次のようである。

$$F_c = 6.12 wF_m + 91 \dots\dots\dots(4) \quad (r = 0.96)$$

なお、文献[6]と同様な方法で F_c と C/W , F_m と C/W , wF_m と F_m の関係から間接的に F_c と wF_m の関係式を求めると次のようである。

$$F_c = 5.43 wF_m + 110 \dots\dots\dots(5)$$

2. 7 判定式

式(4)の関係にもとずいてコンクリート28日圧縮強度を推定するときの判定式を ” 強度判定式の作り方(案) ” [4] にしたがって求めると以下のものである。すなわち推定するコンクリートの圧縮強度の標準偏差を 20 kg/cm^2 , 危険率 (α) を 10 % とした場合の判定式は式(6)のように表される。これを図6に破線で示す。

$$\overline{F_c} = 6.12 wF_m + 49 \dots\dots\dots(6)$$

3 煮沸法における影響要因

3. 1 養生中のモルタル温度

モルタルの上面、端から4cmの位置に孔を明け、熱電対を挿入して断続的に供試体の温度を

表3 コンクリート及びモルタルの円柱試験体28日圧縮強度

	W/C (%)	※	圧縮強度 (kg/cm^2)				
			各 個				平均
軟練り	65	F_{m0}	289	288	—	—	289
		F_c	219	223	221	224	222
	55	F_{m0}	420	417	—	—	419
		F_c	321	334	340	332	332
	45	F_{m0}	546	532	—	—	539
		F_c	468	384	454	468	444
40	F_{m0}	621	642	—	—	632	
	F_c	502	532	499	509	511	
硬練り	65	F_{m0}	267	290	—	—	279
		F_c	191	210	212	220	208
	55	F_{m0}	388	411	—	—	400
		F_c	325	287	298	294	301
	45	F_{m0}	557	561	—	—	559
		F_c	418	410	453	515	449

(※ F_{m0} : モルタル強度, F_c : コンクリート強度)

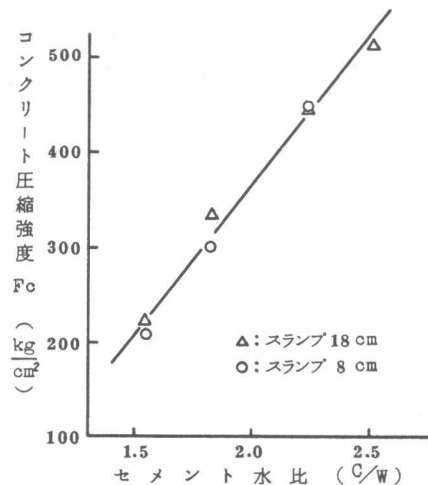


図5 セメント水比とコンクリート強度

計測した。モルタルの温度変化を図7に示す。レンジパック中の供試体型枠の姿勢が横向き、上向き、及び蒸気中の3例共ほぼ同じ温度上昇を示し、約10分で定温となっている。

3.2 養生時間とモルタル圧縮強度

4種の水セメント比のモルタル（硬練り用）に対し3段階の養生時間における圧縮強度を試験した。表4に結果を示す。図8に養生時間と圧縮強度の関係を示す。概して養生時間が長くなる程、圧縮強度が増加しており、その増加の割合は水セメント比が小さくなる程大きいものとなっている。すなわち20 - 30分程度の範囲では、特に低水セメント比において養生時間に正確を期す必要があることが示されている。

3.3 圧縮試験時間

表4の圧縮強度の値は左から圧縮試験の順に並べてある。強度は後の方が高くなる傾向にある。同表の末尾には各3本の平均値に対するそれぞれの値の比を求め、その平均値を示してあ

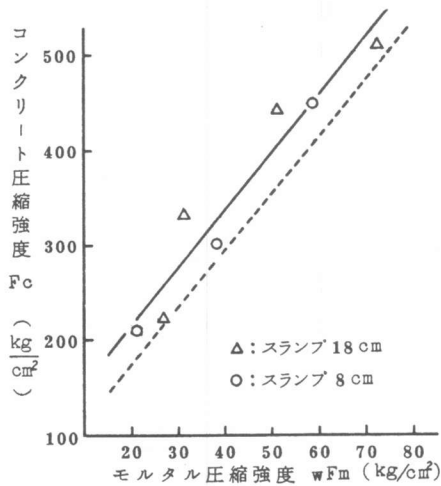


図6 モルタル強度(wFm)とコンクリート強度(Fc)

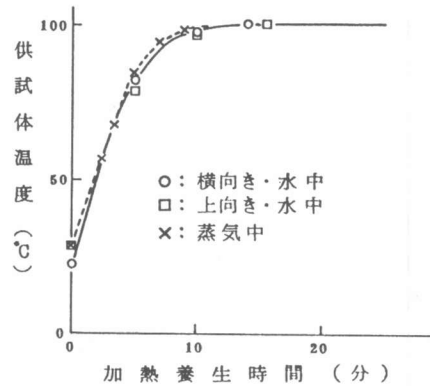


図7 モルタルの温度上昇

表4 養生時間とモルタル強度(Fm)

W/C	養生時間 (分)	圧縮強度 (kg/cm ²)			
		各個	平均	各個	平均
65	20	10.5	13.5	13.5	12.5
	30	14.0	13.0	17.5	14.8
	40※	12.0	12.0	13.0	12.3
55	20	25.5	30.0	29.0	28.2
	31	29.0	29.5	33.0	30.5
	44	33.0	29.5	37.5	33.3
45	20	40.0	44.5	46.5	43.7
	35	56.0	52.5	61.5	56.7
	49	66.0	70.0	69.0	68.3
40	20	59.0	67.0	66.5	64.2
	35	80.5	82.5	88.0	83.7
	50	83.0	90.0	91.5	88.2
強度比		0.94	0.99	1.07	

(※:養生中レンジパックに水もれが生じた)

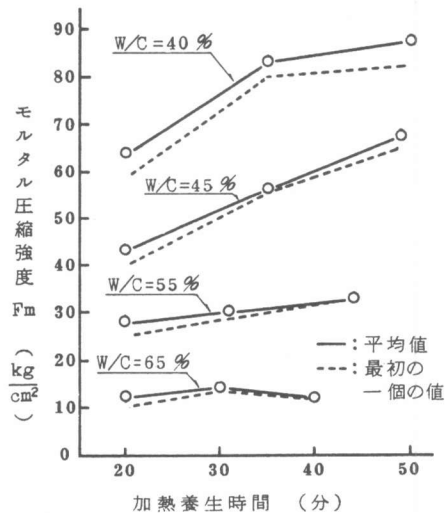


図8 養生時間とモルタル強度(Fm)

る。この試験では毎秒 1-2 kg/cm² と比較的遅い荷重速度であった。2 番目, 3 番目の供試体では試験を待っている間に水和が進行し強度増加を招いたものと思われる。この差を小さくするには荷重速度を上げる必要がある。図 8 には最初の試験値を破線で示してある。破線も実線と同様の傾向にあるので試験時間の影響を除去するには急速硬化供試体の強度として、この最初の値を採用し、2 番目, 3 番目の値は確認用とすることが考えられる(後述参照)。

3. 4 圧縮強度に及ぼす微粒砂添加の影響

急結剤添加時に豊浦標準砂, または微粉砂を 16 g 添加した場合を無添加の場合と比較した試験結果を表 5 に示す。無添加の場合に比べて砂を添加した場合の方が圧縮強度がやや大きくなる傾向があるが、この実験では強度のバラツキ(各 3 個の圧縮強度の変動係数)に対する砂添加の効果は豊浦標準砂, 微粉砂とも明瞭には認められなかった。

4 モルタル煮沸法のコンクリート強度推定精度

本実験の範囲では式(4)の相関係数(r)は 0.96 で、この点に関する限りでは 70°C 90 分あるいは 80°C 50 分養生の場合[8]とほぼ同様である。また、推定精度を検討するため実測値に対する推定値の比を求めた結果を表 6 に示す。式(4)を用いた場合、実測値に対する推定値の比は、平均値 1.01, 標準偏差 0.093, 変動係数 9.24% である。先に 3.3 で急速硬化強度値として 3 個の圧縮強度のうち一番目の値を採用することに触れた。この場合について同様に検討すると、コンクリート強度(Fc)とモルタル強度(wFm)の回帰式は(4')となる。

$$F_c = 6.47 wF_m + 83 \dots \dots \dots (4') \quad (r = 0.97)$$

この結果によると相関係数(r)は 3 本の平均値を用いた場合とほぼ同じであり、(推定値/実測値)の値では、平均値 1.01, 標準偏差 0.0785, 変動係数 7.77% となり、3 本の平均値を用いた場合より良い精度を示している。図 9 はこれらの値を正規分布として比較したもので

表 5 砂添加とモルタル強度(Fm)

スランブ cm (W/C %)	砂無添加 平均				豊浦標準砂添加 平均				微粒砂添加 平均			
	圧縮強度* (変動係数)				圧縮強度* (変動係数)				圧縮強度* (変動係数)			
18 (65)	12.4	11.0	12.0	11.8 (5.00)	10.0	10.0	12.0	10.7 (8.79)	10.4	9.1	11.2	10.2 (8.53)
18 (40)	75.0	66.0	77.9	73.0 (6.95)	76.5	73.8	75.9	75.4 (1.54)	80.0	77.0	82.7	79.9 (2.92)
8 (65)	15.0	12.8	16.2	14.7 (9.59)	14.4	18.2	16.0	16.2 (9.63)	14.3	18.2	16.0	16.2 (9.88)
8 (40)	78.1	74.8	81.7	78.2 (3.61)	82.0	77.5	82.8	80.8 (2.88)	78.5	77.3	89.6	81.8 (6.77)

(※: kg/cm²)

表 6 コンクリート強度の推定値と実測値

スランブ (cm)	W/C (%)	実測値 平均 (kg/cm ²)	3 個の平均値			第 1 番目の強度		
			推定式 (4) による			推定式 (4') による		
			推定値	推定式 実測値	平均	推定値	推定式 実測値	平均
18 (軟練り)	65	222	253	1.14	平均	251	1.13	平均
	55	332	281	0.85	1.01	284	0.86	1.01
	45	444	406	0.91	標準偏差	423	0.95	標準偏差
	40	511	533	1.04	0.0933	523	1.02	0.0785
8 (硬練り)	65	208	221	1.06	変動係数	212	1.02	変動係数
	55	301	324	1.08	9.24%	319	1.06	7.77%
	45	449	448	1.00		452	1.01	

ある。ちなみに文献[8]によると、変動係数は70°C 90分養生の場合6.4%，80°C 50分養生の場合8.3%と報告されている。検討対象とした調合範囲や資料の数が異なるので、これらの結果と本実験結果を比較するのは必ずしも適当とは言えないがおおよその参考としてこれらの場合を図9に破線で示した。

なお式(6)と同様に判定式(6')を得る。

$$\bar{F}_c = 6.47 wF_m + 51 \dots\dots\dots(6')$$

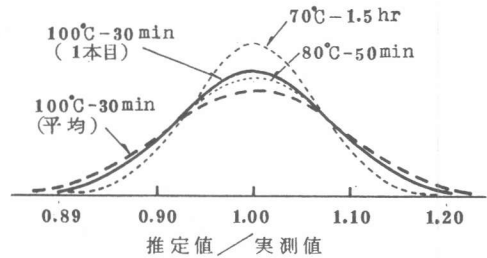


図9 (推定値/実測値)の分布

5 養生時間20分の場合の検討

養生時間20分については硬練り調合のモルタル強度(F_m)だけの試験結果が得られている。これとコンクリート強度(F_c)によって養生時間30分の場合と同様の検討を行った。急速硬化モルタル強度としては上述の理由から一番目の強度値を用いた。結果は次のようである。

$$F_m = 48.4 C/W - 64 \dots\dots\dots(1'') \quad (r = 0.99)$$

$$F_c = 6.43 wF_m + 113 \dots\dots\dots(5'')$$

式(5'')はF_mとwF_mが硬練り30分養生の場合と同様の関係にあるとして求めたものである。式(1'')が示すようにモルタル強度F_mとセメント水比が直線関係にあるので、20分養生の場合もコンクリート強度推定の可能性を持つものとして今後検討に値すると考えられる。

6 むすび

以上の検討からモルタルの煮沸法による急速硬化強度からコンクリート28日圧縮強度を判定する可能性が見出された。また試験操作時間の正確さが大切であること、第一番目のモルタル強度を対象とし2, 3番目を確認資料とする方が判定精度が良くなることなどの特徴も明らかとなった。今後広範囲の実験による検証が望まれる。

コンクリート製造における計量精度の向上、自動化の普及に伴って、その品質早期判定の重点は経常的な品質変動より偶発的な事故の発見と防止に移りつつあるとも言えよう。その意味でコンクリート打ち込み前に判定出来る迅速性が重要であり、本報告のモルタル煮沸法はその一つの可能性を示すものである。

謝辞

コンクリートの早期迅速試験について、池田尚治教授、笠井芳夫教授、十代田知三教授、椎名国雄教授から種々ご意見を戴いたことに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会 "コンクリート技術の要点'88" p.112.
- [2] 日本コンクリート会議 "コンクリート施工における問題点", 1971, pp.71-73.
- [3] 日本コンクリート工学協会 "コンクリート品質の早期判定指針" 1985.
- [4] 日本建築学会 "コンクリートの早期迅速試験方法集" 1985.
- [5] 神田衛ほか: 振動を利用してまだ固まらないコンクリートの水セメント比を検出する方法, コンクリート工学, Vol.19, No.8, Aug.1981, pp.105-112.
- [6] 池田尚治: 急速硬化によるコンクリート強度即時判定方法に関する研究, 土木学会論文報告集 第255号, 1976年11月, pp.103-112.
- [7] 池田尚治: コンクリート強度即時判定方法の実用化に関する研究, 土木学会論文報告集 第266号, 1977年10月, pp.123-134.
- [8] 磯目貞則ほか: コンクリート強度即時判定方法に関する試験(その1)-(その3), 日曹マスタービルダーズ研究所報 創刊号 1978, No.3 1980.