

[3] 蒸気養生によるコンクリート強度の早期判定

正会員 ○河野 清 (徳島大学工学部)
 正会員 水口裕之 (徳島大学工学部)
 新舎 博 (五洋建設技術研究所)
 中木一文 (五洋建設中国支店)

1. ま え が き

構造物に用いるコンクリートの設計基準強度、配合強度などは、一般に材令28日における圧縮強度を基準としているので、施工管理上の問題点として品質保証がコンクリートを打込んでから28日後になることがあげられる。土木学会コンクリート標準示方書188条の圧縮強度によるコンクリートの管理の条文に、コンクリートの管理は、一般の場合早期材令の圧縮強度で行うと規定されており、品質の判定は早ければ早いほど好都合である。

材令7日の圧縮強度で管理し、JASS5その他の式で28日強度を推定する方法も実用されていたが、早期判定法としては、推定時期ができるだけ早いこと、推定精度のよいこと、装置および取扱いの簡単なこと、養生条件の変動の少ないこと、再現性のよいこと、供試体数の少なくすむことなどを考えると、促進養生による方法がすぐれており、近年各国で研究され、実際の現場への適用が試みられている。^{1)~5)} 米国では、すでに1974年、ASTM C-684に温水養生、煮沸水養生、自熱養生等による試験方法が規定されている。わが国では、1977年日本コンクリート工学協会にコンクリート品質の早期判定研究委員会が設置され、早期判定に関して調査、研究を進め、問題点の把握を行っており、⁶⁾ 1979年2月にはコンクリート品質の早期判定に関するシンポジウムが行われて多くの研究成果が発表されている。その後、規準化が日本コンクリート工学協会が進められ、急速硬化強度試験方法(案)、温水法(70℃)による促進強度試験方法(案)などが提案されており、⁷⁾ これらの方法は取扱いが容易であり、一般の工事現場向きで、温度管理も簡単なので、今後各方面での積極的な利用が期待されている。

一方、コンクリート製品工場では、早期強度発現のため蒸気養生を一般に使用している。供試体を成形後、適当な前養生期間をとったのち、蒸気養生室を用いて型枠のまま促進養生を行うことができるし、実際の製品に合わせた養生条件の採用も可能である。また、小型の蒸気養生装置があれば、一般の生コン工場での管理に使用することもできる。温水養生に関する研究結果が多いのに比べて、蒸気養生装置を用いた報告はきわめて少ないので、蒸気養生によるコンクリート強度の早期判定について検討を行ったものである。

2. 実験の方法

(1) 使用材料とコンクリートの配合

普通ポルトランドセメント(比重=3.15, プレーン比表面積=3320 cm²/g, 28日圧縮強さ=415 kgf/cm²)を用い、粗骨材は鳴門市大麻町産で最大寸法20mmの砂岩碎石, 細骨材は吉野川産の川砂を用いた。使用骨材の物理試験結果を表-1に示す。なお、混和剤としてはAE剤(ビンソル)と減水剤(ボゾリスNo.5 LA)とを用いた。

表-1 使用した粗骨材および細骨材の物理試験結果

骨材の種類	ふるいを通るものの重量百分率 (%)									粗粒率 (FM)	比重	単位容積重量 (kg/m ³)	吸水率 (%)	含水率 (%)	空隙率 (%)	実積率 (%)	有機不純物試験
	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15								
碎石	100	71	42	3	0	0	0	0	0	6.64	2.59	1460	1.41	—	43.6	56.4	—
川砂				100	85	69	49	13	2	2.82	2.61	1700	1.18	0.30	34.7	65.3	合格

使用したコンクリートの配合は、単位セメント量を250~450kgの範囲で変えた表-2に示すプレーンコンクリート、AE剤を用いたもの(AEコンクリート)および減水剤を用いたもの(WRコンクリート)とした。なお、スランプは5~9cmとし、AEコンクリートではこのほかに12~16cmのスランプの大きい配合も加えた。

表-2 推定式を求めるために用いたコンクリートの配合

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤の単位量 (cc)
						水	セメント	細骨材	粗骨材	
Plain (13)	20	5-9	-	46.5	42	186	400	731	1076	-
				75.6	52	189	250	966	884	
A E (13)	20	5-9	4-5	42.0	39	168	400	672	1043	ビンソル80
				68.4	49	171	250	810	980	
W R (11)	20	5-9	4-5	46.3	39	185	400	654	1016	ビンソル80
				75.6	49	189	250	880	909	
W R (11)	20	5-9	4-5	44.2	39	168	380	678	1053	ポソリス3260
				74.8	49	172	230	908	938	

(2) コンクリートの練りませおよび供試体の成形

強制練りミキサを用いて最初の1分間でモルタルを練り、つぎに碎石を投入して1分30秒間コンクリートを練りませた。練りませ後、ミキサから排出したフレッシュコンクリートについてスランプおよび空気量試験を行ったのち、 $\phi 10 \times 20$ cmの円柱形型枠に詰め、8000 vpmの棒形振動機で締め固め成形し、圧縮強度試験用供試体（蒸気養生促進強度、標準養生7日強度、標準養生28日強度 各3個、計9個）を作った。

(3) 蒸気養生装置と蒸気養生条件および標準養生

成形後、蒸気養生を行う供試体は型枠のまま図-1に示す小型の蒸気養生装置（内寸法：幅73.5cm、奥行65cm、高さ60cm）に入れ、室内を20℃に保ち前養生を3.5時間とったのち、ヒーター調節器を操作して室内の温度上昇速度を17℃/hにとり3時間加熱し、最高温度70℃で9.5時間等温養生を行ったのち、ヒーターを切り換気孔を開いて2.5時間冷却した。蒸気養生の際のマチュリチーは0℃を基準として計算して約1000℃・hである。なお、標準養生供試体は、成形の翌日脱型し、以後所定材令の7日および28日まで20±2℃の水中養生を行った。

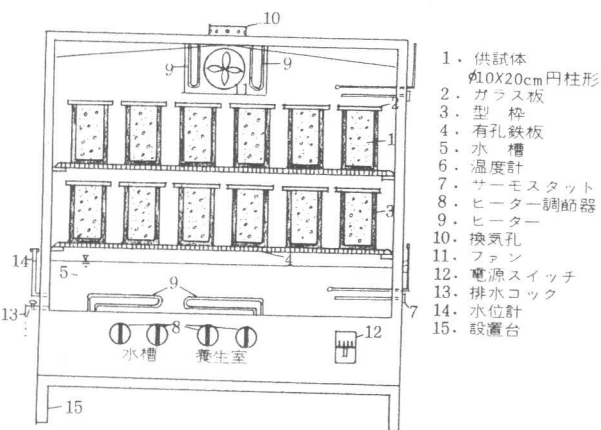


図-1 コンクリートの蒸気養生装置

(4) 材令と圧縮強度試験

所定の蒸気養生終了直後の圧縮強度すなわち促進強度を100t万能試験機によって測定した。なお、促進強度を求める供試体のキャッピングは、蒸気養生室で前養生期間中の2.5時間前後でセメントペーストを用いて行った。一方、標準養生供試体は、所定材令の7日と28日で水槽より取り出して試験に供し、これらの結果から促進強度と標準養生7日強度および28日強度との関係式を求めた。

(5) 28日標準養生強度の推定試験

促進強度と28日強度との関係式を用いて早期判定を試みるため、手持ちの材料でプレーンコンクリート、A Eコンクリート、W Rコンクリートについて12種の配合をランダムに練り、厳密な温度管理の下で、前述と同じ条件の蒸気養生を行い、促進強度から7日および28日強度を推定し、実測値との比較検討を行った。

3. 実験結果とその考察

(1) 蒸気養生による促進強度と標準養生7日および28日強度との関係

普通ポルトランドセメントを用いたプレーンコンクリート、A EコンクリートおよびW Rコンクリートについて、蒸気養生直後の促進強度を横軸に、標準養生7日および28日強度を縦軸にとって示すと図-2のとおりである。3種コンクリートについて、単位セメント量、水セメント比あるいはスランプの相違にかかわらず、蒸気養生による促進強度と標準養生強度との関係は、ほぼ直線上にプロットされている。したがって、各種コンクリートについて最小二乗法によって一次式を求め図に記入した。また、大部分の値が±5パーセントの範囲内に打点され、両者の相関係数を求めると、材令7日で0.987~0.996、材令28日で0.982~0.992と高い値を示している。

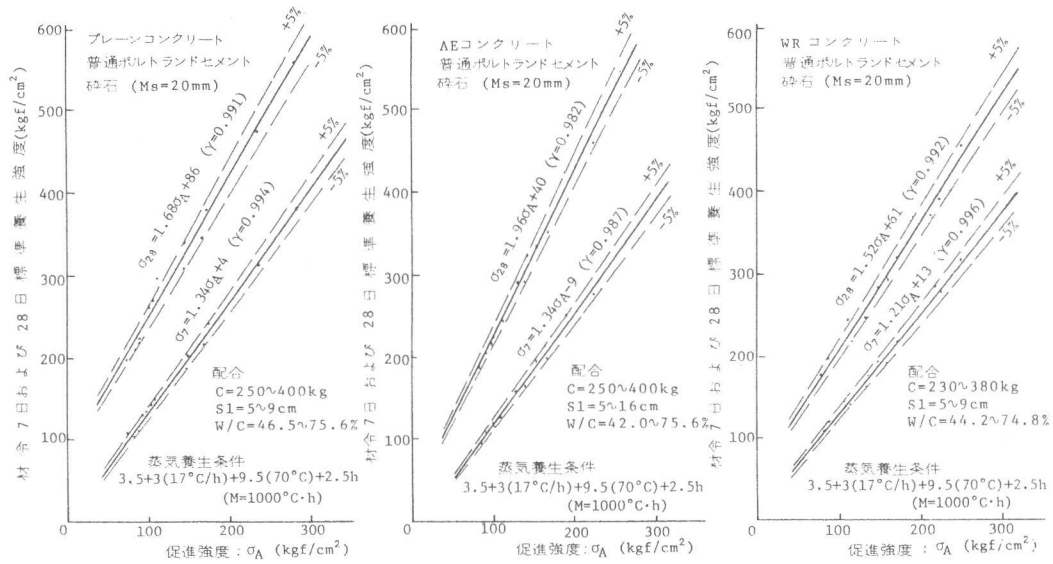


図-2 各種コンクリートの蒸気養生による促進強度と標準養生7日および28日強度との関係

プレーンコンクリートとAEコンクリートとを比較すると、同じ促進強度に対する材令7日の標準強度は、前者が後者に比べてやや高くなるが、材令28日では促進強度が200 kgf/cm²以上になった場合、逆にAEコンクリートのほうがやや大となる傾向がある。また、プレーンコンクリートとWRコンクリートとでは、材令7日では大差ないが、材令28日への伸びのやや小さいWRコンクリートは、28日ではプレーンコンクリートより強度が低くなる傾向がみられる。これは、減水剤を用いたコンクリートの蒸気養生による強度発現、連行空気量の影響などのためと考えられ、コンクリートの種類によって両強度の関係式は多少異なってくる。とくに、蒸気養生による脱型時の強度発現はセメントの種類によってかなり相違する⁸⁾ので注意しなければならないし、温水槽を用いた促進強度によるコンクリート強度の早期判定で普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントとを比較し報告した⁵⁾いずれにしても、工場で使用するセメント、骨材、混和材料など同一材料を用いたコンクリートについて、両者の関係式を求めておけば28日標準強度をかなり良い精度で推定することが可能である。

一般に水セメント比の範囲が広くなり強度の範囲が広がると促進強度と標準強度との関係を指数式その他の曲線式で示している報告もある¹⁾が、本実験でえられた促進強度75~250 kgf/cm²程度の範囲では、一次式で示しても実用上問題ないと思われる。促進強度と標準強度との関係式を求める場合、コンクリートの成形温度、養生温度などの強度発現の様相に影響する要因の管理については、試験の際に十分に注意しなければならない。

なお、蒸気養生による促進強度、標準養生7日強度および28日強度はそれぞれ供試体3個の平均値で示したが、試験値の変動係数の範囲と平均値を示すと表-3のとおりである。この結果にみられるように促進強度のばらつきは標準養生と大差なく、良好な結果がえられており、工程管理に使用することは十分に可能と思われる。すなわち、蒸気養生後の促進強度について目標値と管理限界を定め品質管理を行えば、早期にアクションをとることができ、経済配合の選定、脱型時期の管理などにもきわめて好都合といえる。なお、蒸気養生室内の厳密な温度管理は非常に大切である。

表-3 試験値の変動係数 (%)

養生条件 変動係数	蒸気養生 促進強度	標準養生強度	
		7日	28日
範囲	0.1 - 8.8	0.2 - 9.1	0.4 - 8.0
平均値	3.3	3.1	3.1

(2) 標準養生7日強度と28日強度との関係

標準養生7日強度(σ₇)を横軸に28日強度(σ₂₈)を縦軸にプロットとして両者の関係を求めると、コンクリートの種類によって、多少傾向は異なるが、次式がえられる。

プレーンコンクリートの場合 : $\sigma_{28} = 1.24 \sigma_7 + 84$

AEコンクリートの場合 : $\sigma_{28} = 1.45 \sigma_7 + 56$

WRコンクリートの場合 : $\sigma_{28} = 1.26 \sigma_7 + 44$

プレーンコンクリートの場合について7日強度と28日強度との関係式を示すと図-3のとおりである。JASS5では圧縮強度のばらつきを考慮し安全側の値を推定する式となっているので低目となる。28日強度が250~400 kgf/cm²の一般的なコンクリートでは、吉田徳次郎博士の最大値を与える式³⁾と比較的よく一致している。また、直線の勾配がやや異なるが、川砂利で求めた関係式⁵⁾ともよく合った結果となっている。いずれにしても、使用材料の変動が少なければ、7日強度からかなり精度よく28日強度を予測することが可能である。

(3) 7日強度および28日強度の推定について

プレーンコンクリート4種、AEコンクリート4種、WRコンクリート4種をランダムに練り、3.5+3(17℃/h)+9.5(70℃)+2.5hの蒸気養生条件で厳密な温度管理のもとで蒸気養生を行いその直後の促進強度を求め、先に求めた促進強度と標準養生7日強度および28日強度との関係式を用いて強度推定を試み実測の7日および28日強度と比較した。結果を示した表-4にみられるように7日強度の推定誤差は4.0%、28日強度は3.9%であり比較的良好な値といえる。前に報告した温水養生の生コン工場への適用結果⁵⁾より良い結果がえられているのは、推定試験実施を1か月ほどずらしたが、使用セメント、使用骨材等の差が少なかったためと考えられる。また、7日強度から28日強度の推定結果も示したが、

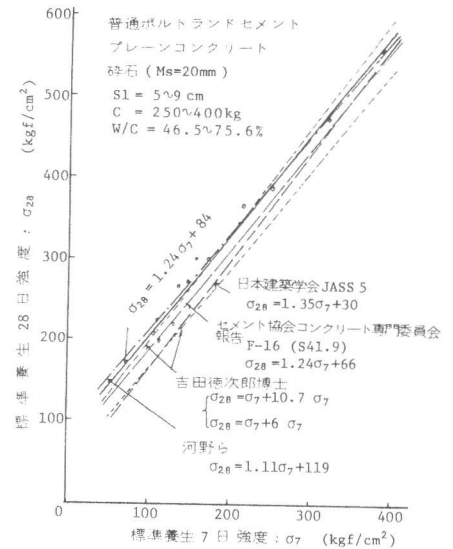


図-3 標準養生7日強度と28日強度との関係

表-4 7日および28日圧縮強度の推定値と実測値との比較

4.1%の推定誤差となっており、促進強度と差のない結果となっている。結局、実際の工場で使用している材料と配合で数多く供試体を作り推定式を求め、強度発現に影響する条件の管理を厳密に行って促進強度を求めれば、数%以内のかなり高い精度で推定ができると思われる。

コンクリートの種類	蒸気養生促進強度 (kgf/cm ²)	7日強度推定値 (kgf/cm ²)	7日強度実測値 (kgf/cm ²)	28日強度の推定値 (kgf/cm ²)			28日強度の実測値 (kgf/cm ²)
				促進強度から	7日強度から	JASS 5式から	
Plain 1	85 [0.6]	118 (-4.1)	123 [1.1]	229 (2.7)	239 (6.3)	196 (-12.1)	223 [5.3]
Plain 2	111 [0.9]	153 (2.0)	150 [0.7]	272 (5.0)	270 (4.2)	233 (-10.0)	259 [1.0]
Plain 3	146 [3.7]	194 (8.5)	212 [3.0]	331 (7.5)	347 (12.7)	316 (-2.6)	308 [0.3]
Plain 4	179 [1.5]	244 (-5.4)	258 [2.5]	387 (-3.7)	404 (-0.5)	376 (-6.0)	402 [1.8]
AE 1	74 [4.7]	90 (-10.0)	100 [2.9]	185 (-1.6)	201 (6.9)	-	188 [3.5]
AE 2	84 [2.8]	104 (-4.6)	109 [4.0]	205 (-10.9)	214 (-6.9)	-	230 [2.3]
AE 3	114 [7.8]	144 (1.4)	142 [0.7]	263 (-0.8)	262 (-1.1)	-	265 [3.0]
AE 4	181 [0.1]	234 (0.4)	233 [1.0]	395 (4.8)	394 (4.5)	-	377 [2.8]
WR 1	105 [2.5]	140 (6.1)	132 [1.6]	221 (1.8)	210 (-3.2)	-	217 [2.7]
WR 2	120 [1.4]	158 (-2.5)	162 [3.0]	243 (-2.0)	248 (0)	-	248 [2.4]
WR 3	170 [2.0]	219 (-1.8)	223 [2.4]	315 (-3.7)	325 (-0.6)	-	327 [3.4]
WR 4	215 [1.0]	273 (-0.7)	275 [1.5]	388 (1.8)	390 (2.1)	-	382 [4.6]
平均値	[3.0]	(4.0)	[4.3]	(3.9)	(4.1)	(7.7)	[2.8]

注, []: 供試体3個の変動係数 (z), (): 推定誤差 (%)を示す。

4. まとめ

蒸気養生による促進強度と標準養生7日あるいは28日強度との関係はコンクリートの種類によって多少相違するが、一次式で示すことができ、両者の関係式を用いて標準養生強度の早期判定が可能である。蒸気養生条件を厳密に管理して促進強度を求め、この値による28日標準強度の推定誤差は、標準養生7日からの推定誤差とほぼ同じである。蒸気養生装置を用いた早期判定法は、成形後早い時期に型枠のまま養生できる利点があり、また脱型時期の管理等にも使用できるので、製品工場において今後十分な活用を期待したい。

参考文献 1) RILEM Symposium by Correspondence. Bull. RILEM No 31, pp.156~243 (June, 1966).
 2) 十代田知二, "コンクリートの強度促進試験法について" コンクリート工学 Vol.15, No 1, pp.35~41 (Jan., 1977).
 3) 柳田 力, "コンクリート品質の早期判定方法" セメントコンクリート No 341, pp.2~10 (July, 1975).
 4) 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 No 255, pp.103~112 (Nov., 1976).
 5) 河野 清, 梶野 洋, 木下幸一, "促進強度によるコンクリート強度の早期判定について", セメント技術年報 Vol.21, pp.428~434 (1967).
 6) JCIコンクリート品質早期判定法研究委員会, "コンクリート品質の早期判定法に関する概況", コンクリート工学 Vol.7, No 1, pp.1~15 (Jan., 1979).
 7) JCIコンクリート品質早期判定法研究委員会, "コンクリート品質の早期判定法規準案について", コンクリート工学 Vol.19, No 10, pp.3~11 (Oct., 1981).
 8) 河野 清, 新倉 博, 荒木謙一, "蒸気養生の際のマチュアチャーと圧縮強度との関係について", セメント技術年報 Vol.28, pp.274~277 (1974).
 9) 吉田徳次郎, "コンクリートおよび鉄筋コンクリートの施工方法" pp.527, 528 (昭和31年2月).