

論文

[1057] 急速硬化法による特殊水中コンクリートの強度推定について

正会員 ○佐藤 孝一 (熊谷組技術研究所)  
 正会員 石田 良平 (熊谷組技術研究所)  
 正会員 土田 達 (熊谷組技術研究所)  
 福本 茂雄 (熊谷組大阪支店)

1. はじめに

特殊水中コンクリートは通常のコンクリートに比べて、粘稠性、セルフレベリング性、水中分離抵抗性に優れており、各種大型海洋構造物への適用が増大している。

一方特殊水中コンクリートでは、その強度発現性が遅いことや水中に一旦打ち込まれたコンクリートが所要の品質を満たさなかった場合の対応が非常に難しいなどの点から、コンクリート硬化後の品質を代表する圧縮強度については、管理上なるべく早期にその判定を行えることが望ましい。

本研究は、特殊水中コンクリートの強度早期推定法として急速硬化法を試みたものであり、強度推定がコンクリート打ち込み前に終了することを前提に、推定に要する時間を1時間以内に設定した。本報は、その方策として試料の強度増進と安定化のために電子レンジを用いた場合の試験法の確立と強度推定法としての適用性を検討したものである。

2. 試験概要

2. 1 試験方法

強度推定試験方法のフローを図-1に示す。本試験法は試料モルタルの加熱方法として電子レンジを用いる点に特徴がある。電子レンジはマイクロ波を物体に照射し、その物体の分子を振動させることにより摩擦熱を発生させ加熱するという原理に基づいている。モルタルを電子レンジで加熱する場合には、モルタル中の水分子の振動が熱エネルギーに変化することになるが、加熱スピードが早いことと、モルタル自身が発熱するため表面部から内部まで一様な加熱が行えるという利点がある。加熱終了後、急速硬化強度を求めるための圧縮強度試験は40×40×74mm角柱供試体の側面を用い、載荷速度は0.2~0.3kg/cm<sup>2</sup>で行った。なお図-1のフローで〔 〕内の値は「3. 強度推定試験方法の検討」において決定した値を示している。

2. 2 試験機器

モルタルおよびモルタルと急結剤の練り混ぜにはホバート型ミキサーを、型枠は図-2に示す形

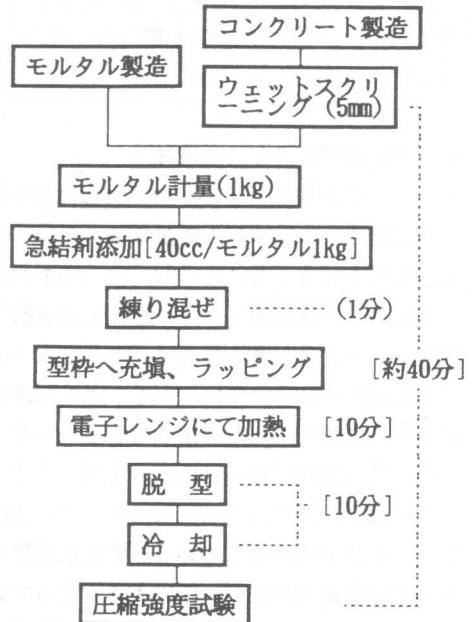


図-1 試験方法のフロー

状で電子レンジでの使用が可能なポリエチレン製のものを用いた。電子レンジ（T社製）の仕様を表-1に示す。

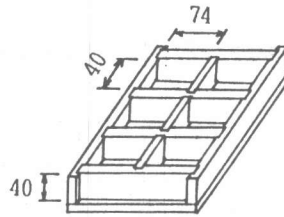


図-2 型枠の形状

表-1 電子レンジの仕様

電源	100V
定格消費電力	960W
高周波出力	500W/200W相当
発信周波数	2450 ±50MHz

### 2. 3 使用材料およびモルタル、特殊水中コンクリートの配合

モルタルおよびコンクリートに使用した材料は、普通ポルトランドセメント（比重3.16）、細骨材（陸砂、比重2.6）、粗骨材（碎石、比重3.0）、AE減水剤（ポゾリスN0.70）、高性能減水剤（ポゾリスUC-150）、特殊混和剤（USCA：セルロース系高分子化合物）であり、急結剤はケイ酸ナトリウム JIS3号品を用いた。試験に用いたモルタルおよび特殊水中コンクリートの配合を表-2に示す。

表-2 モルタルおよびコンクリートの配合

W/C (%)	モルタル								コンクリート										
	S/C (%)	テ-ブル70- (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					(l/m <sup>3</sup> )			s/a (%)	スラブ70- (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				(l/m <sup>3</sup> )		
			W	C	S	特殊混和剤	AE減水剤	高性能減水剤	W	C			S	G	特殊混和剤	AE減水剤	高性能減水剤		
4.5	124	220	347	771	960	3.63	1.93	11.6	4.0	500	220	489	609	1054	2.30	1.22	7.3		
5.0	147	225	347	694	1022	3.71	1.74	10.4	4.0	500	215	430	633	1096	2.30	1.08	6.5		
5.5	171	230	346	630	1078	3.79	1.57	9.4	4.0	500	210	382	654	1132	2.30	0.96	5.7		
6.0	177	235	361	601	1064	3.77	1.51	9.0	4.0	500	220	367	649	1123	2.30	0.92	5.5		
6.5	201	240	359	552	1111	3.84	1.38	8.3	4.0	500	215	331	666	1153	2.30	0.83	5.0		

### 3. 強度推定試験方法の検討

#### 3. 1 急結剤量がモルタルの凝結特性に及ぼす影響

本試験法では急結剤添加混練後、型枠への充填成形を行うことになるが、その際モルタルの凝結が急速な場合には、型枠充填成形が困難となることが考えられる。そこで水セメント比55%のモルタルについて、急結剤添加量別に、急結剤添加混練後の時間とプロクター貫入抵抗値の関係を求めた。その結果を図-3に示す。図中の急結剤量はモルタル1kg当たりの添加量を示している。貫入抵抗値の増加率は急結剤量が多いほど大きくなっているが、いずれの急結剤量においても10分以内では貫入抵抗値は0となっている。強度推定試験において、モルタル試料の型枠充填、成

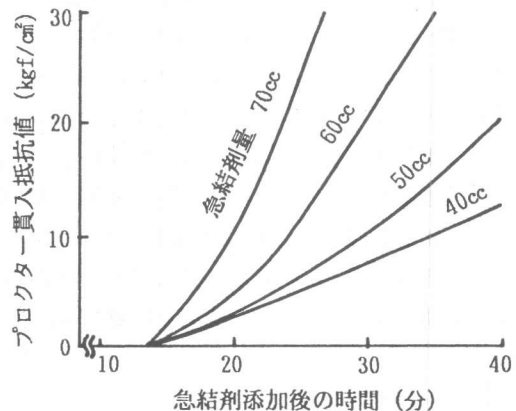


図-3 急結剤量とプロクター貫入抵抗値

形に要する時間は5分程度であり、図中に示す急結剤量の範囲では型枠充填、成形に支障はないことがわかった。なお急結剤量70ccのモルタルについては、練り上がり粘性が高く密実な型枠充填に難があるため、実用的には急結剤量は60cc以下が適当である。

### 3. 2 試験体加熱時間および冷却時間が急速硬化強度に及ぼす影響

電子レンジによる試験体の加熱および電子レンジから取り出した後圧縮強度試験を行うまでの冷却時間が急速硬化強度に及ぼす影響について試験した結果を図-4に示す。この図は水セメント比55%のモルタルに急結剤を40ccおよび60cc添加した場合の、加熱時間、冷却時間による急速硬化強度の違いを示したものである。加熱時間については、いずれの場合も加熱時間10分までは強度が増加し、15分では逆に強度が低下している。このことは加熱10分で、セメント、急結剤による短期的な反応がほぼ終結し、それ以上の加熱は逆に硬化組織の脆弱化を招くことによるものと考えられる。次に冷却時間の影響について見ると、冷却時間による急速硬化強度の差は全体的に少なく、特に加熱時間が10分以上ではその差は2 kgf/cm<sup>2</sup>以内となっている。

また急結剤量を40ccとした場合の、水セメント比（水準：45%、55%、65%）と冷却時間（水準：10分、20分、30分）を要因とする二元配置の反復実験を行った結果、表-3の分散分析表に示すように冷却時間は急速硬化強度に全く影響しないことがわかった。さらに試験日を変えた反復実験による影響もないことから、再現性も良好であることが確認できた。上記の結果から、これ以降の試験では電子レンジによる加熱時間および、電子レンジから取り出した後圧縮試験までの冷却時間はそれぞれ10分とすることとした。

### 3. 3 急結剤量が急速硬化強度に及ぼす影響

水セメント比45~65%のモルタル（各水セメント比におけるモルタル配合は同一）に急結剤

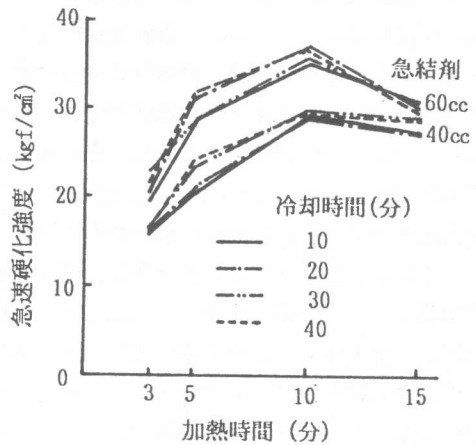


図-4 電子レンジ加熱、冷却時間と急速硬化強度

表-3 分散分析表

要因	S	$\phi$	V	F <sub>0</sub>
一次単位				
R	32.81	1	32.81	3.43
W/C : A	5298.45	2	2649.23	277.12**
一次誤差:e <sub>1</sub>	19.11	2	9.56	9.95*
二次単位				
冷却時間:B	1.67	2	0.84	0.88
交互作用:AXB	10.77	4	2.69	2.80
二次誤差:e <sub>2</sub>	4.79	6	0.96	
計	5367.59	17		

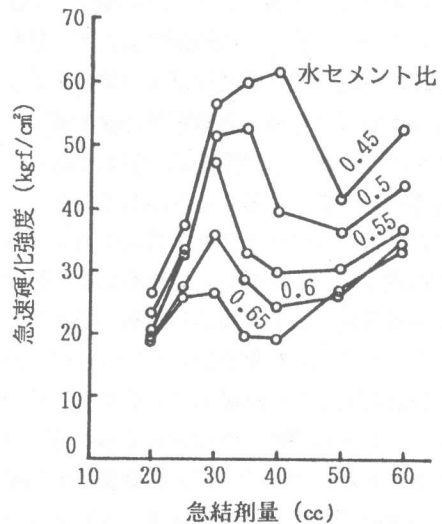


図-5 急結剤量と急速硬化強度

を20~60cc添加した時の急速硬化強度と急結剤量の関係を図-5に示す。急速硬化強度は同一水セメント比においては、最初急結剤量の増加に伴いその値も増大するが、急結剤量30~40ccでピークを示した後徐々に下降し、その後また強度が増大するという傾向を示している。この傾向は水セメント比の大小にかかわらず同様となっている。また水セメント比と急速硬化強度の関係では、全体的に水セメント比が小さい程急速硬化強度は大きな値を示しているが、その強度差は急結剤量によって異なっている。急速硬化強度によって強度推定を行う場合には、水セメント比による強度差が大きい程推定精度は向上することとなる。そこで水セメント比による強度差が明確に現れている、急結剤量30、40、50cc添加の場合のセメント水比と急速硬化強度の関係について検討を行った。図-6にその関係を、表-4に各々の回帰式、相関係数を示すが、水セメント比による急速硬化強度の差は急結剤量40ccの場合に最も大きくなっている。この結果より、本試験法ではモルタル1kg当たりの急結剤添加量を40ccとしてこれ以降の検討を行った。

次に図-7は水セメント比55%のモルタルに急結剤を添加し、電子レンジによる加熱を行わずに20℃恒温室で養生を行った試験体の強度を示したものである。この結果によれば、材令6時間では急結剤量と強度は直線関係にあるが、材令が9時間になると急結剤量40ccで強度ピークが現れ、それ以上の急結剤を加えた場合には強度発現性が低下することを示している。このことから図-5に示す急結剤量による急速硬化強度の変動は、セメントと急結剤による硬化反応がある程度進行した場合に特有の現象であり、電子レンジにより加熱を行った場合には、短期的な硬化反応がほぼ終結しているため、その影響がより顕著に現れたものと考えられる。そこで図-5に示すモルタル1kg当たりの急結剤量を、各配合におけるセメント量と急結剤量の比に置き換えて表した結果を図-8に示す。この図によれば急速硬化強度は〔急結剤量：A〕／〔セメント量：C〕が10%前後で最大となり、各水セメント比における急速硬化強度はほぼリニアな関係となっている。また図中一点鎖線で示した線は、

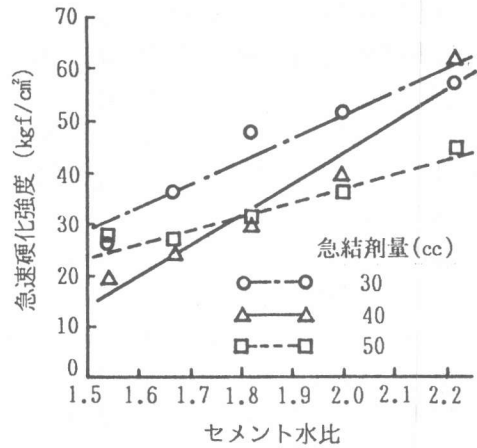


図-6 セメント水比と急速硬化強度

表-4 セメント水比と急速硬化強度の関係

急結剤量	30 cc	40 cc	50 cc
回帰式	$y=43.5x-36.7$	$y=43.5x-36.7$	$y=43.5x-36.7$
相関係数	0.96	0.97	0.97

x: セメント水比  
y: 急速硬化強度

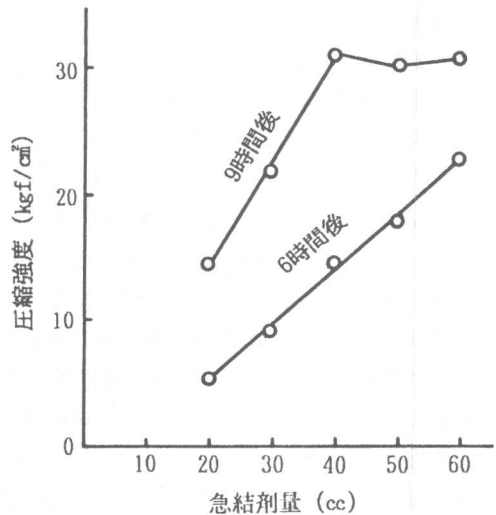


図-7 20℃養生における急結剤量とモルタル強度

水セメント比55%のセメントペーストに砂を加えてS/Cを0~1.71に変化させた表-5に示す配合のモルタル(1kg)に、急結剤40ccを一律に添加した場合の急速硬化強度とA/Cの関係である。この関係においても水セメント比一定のモルタルに20~60ccの急結剤を添加した場合(図-8中○—○)と同様、急速硬化強度はA/C10%近傍で最大となっており、その傾向も近似したものとなっている。上記結果は急速硬化強度が水セメント比だけではなくA/Cにも依存していることを示唆している。つまり試料モルタル1kgに一律40ccの急結剤を加えた場合、同一水セメント比のモルタルであっても、そのモルタル中のセメント量によりA/Cが変化し急速硬化強度が変動することを示している。しかし通常強度推定を行う場合、試料モルタル中のセメント量は未知であるためA/Cを一定とすることは不可能であり、モルタル重量に対して一定量の急結剤を添加することとなる。その場合の急速硬化強度の変動

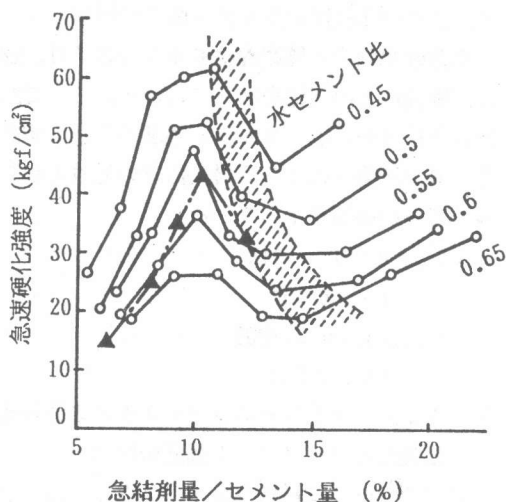


図-8 急結剤量/セメント量と急速硬化強度

表-5 図-8△---△のS/CとA/C

△---△ W/C=55%	
S/C	0.0 0.25 0.50 0.75 1.50 1.71
A/C(%)	6.3 7.3 8.3 9.3 12.7 13.1

について以下に検討を加える。表-6 各水セメント比における特殊水中コンクリートのS/C, A/C

本強度推定法で対象としている特殊水中コンクリートでは、その品質、流動性確保のため、一般的に単位水量は

W/C (%)	45	50	55	60	65
S/C	1.16~1.63	1.32~1.85	1.49~2.07	1.65~2.30	1.82~2.52
A/C (%)	10.4~12.3	11.3~13.4	12.2~14.5	13.0~15.6	13.9~16.7

200~230kg/m³、s/aは40~45%の範囲で配合設計がなされている。<sup>5)</sup>この配合条件で各水セメント比におけるS/Cの範囲およびそれに対応する急結剤量40ccの場合のA/Cの範囲を算定すると表-6の通りとなる。このA/Cの範囲を図-8中に示すと点線で囲まれた部分となる。点線部分のA/Cによる変動を見ると水セメント比55%以上ではその差はほとんどなく、50%以下ではその差は大きくなっている。しかしいずれの場合もA/Cの変化による強度変動に対して、水セメント比による強度差の方が卓越している。このことから試料モルタル1kgに対して一律40ccの急結剤を添加し、その急速硬化強度により強度推定を行うことは実用上問題ないと言える。

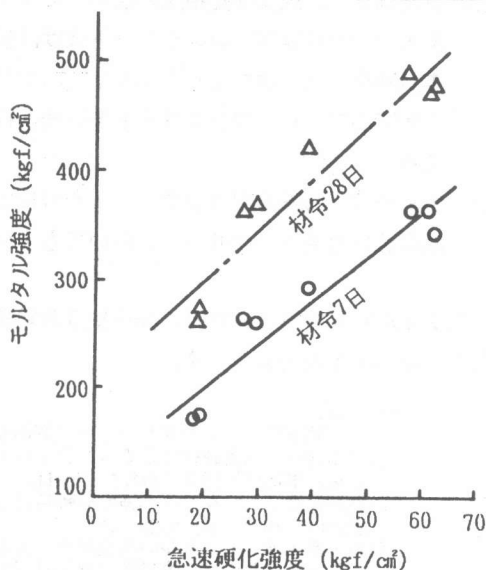


図-9 急速硬化強度とモルタル強度

#### 4. 急速硬化強度とモルタル強度の関係

急速硬化強度と標準養生モルタルの7日、28日圧縮強度との関係を図-9に示す。ここで急速硬化強度を $f'_{m0}$ 、モルタル強度を $f'_m$ とすると、最小自乗法による回帰式は次の通りとなり極めて良い相関を示している。

$$f'_{m7} = 4.06f'_{m0} + 118 \quad \text{-----(1)}$$

$$(\gamma = 0.96)$$

$$f'_{m28} = 4.62f'_{m0} + 207 \quad \text{-----(2)}$$

$$(\gamma = 0.95)$$

#### 5. ウェットスクリーニングモルタルの急速硬化強度とコンクリート強度の関係

コンクリート試料をウェットスクリーニングして得られたモルタルの急速硬化強度( $f'_{c0}$ )と、標準養生を行ったコンクリートの圧縮強度( $f'_c$ )の関係を図-10に示す。なおコンクリート供試体は気中作製供試体を用いている。急速硬化強度とコンクリート圧縮強度の最小自乗法による回帰式は次の通りとなり、モルタルの場合と同様極めて良い相関を示している。

$$f'_{c28} = 6.05f'_{c0} + 110 \quad \text{-----(3)} \quad (\gamma = 0.97)$$

#### 6. 結論

電子レンジを用いた急速硬化法による特殊水中コンクリートの強度推定について以下の結論が得られた。

- (1) 電子レンジによる加熱10分、その後圧縮強度試験までの冷却時間を10分とすることで、安定した急速硬化強度が得られる。
- (2) 急結剤量は、強度推定精度の点からモルタル試料1kgに対して40ccとした結果、急速硬化強度とモルタル強度、コンクリート強度は極めて良い相関を示した。
- (3) 本試験法によればウェットスクリーニングから強度試験までの強度推定に要する時間は40分と短時間であり、コンクリート製造後、打設までの間に強度推定を終了させることが可能である。
- (4) 本報告は、特殊水中コンクリートを対象に強度早期推定法の検討を行ったものであるが、本試験法は普通コンクリートにおいても十分適用可能と考えられる。

なお本試験を行うにあたり、関西空港連絡橋作業所 弘中 学、打屋恵士の諸氏の協力を得ました。記して謝意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 日本建築学会：コンクリートの早期迅速試験方法集，1985。
- 2) 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. 11月，p103～112
- 3) 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. 10月，p123～134
- 4) 川上英男他：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，コンクリート工学年次論文報告集，第11巻，1989，p147～152
- 5) (財) 沿岸開発技術研究センター：水中不分離性コンクリート・マニュアル，1990

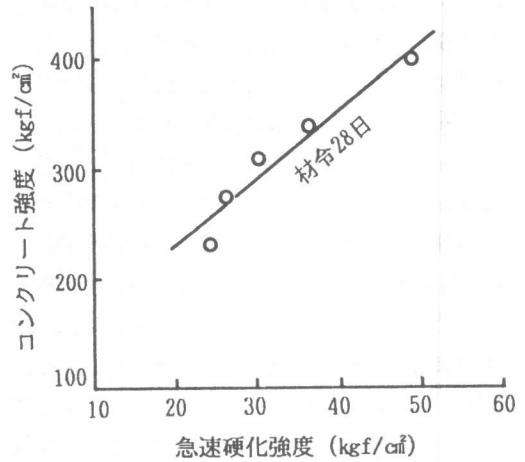


図-10 ウェットスクリーニングモルタルの急速硬化強度とコンクリート強度