

論文 マイクロウェーブ波加熱養生によるコンクリート強度の即時判定に関する研究

星野 政幸*¹・伊東 敏幸*²・三浦 宏二*³

要旨；これまでコンクリート強度の早期判定に関する研究¹⁾は多く試みられている。日本コンクリート工学協会による「コンクリート品質の早期判定指針」²⁾にも各種の方法が提案されている。その中で最も時間の要しない塩酸溶解熱法の場合を例にとっても希釈熱の温度測定で精度の高い実験が要求されること及び石灰系の骨材は取り除かなければならないなど実用的には難点が多い。

この研究では簡便さを重視してウェットスクリーニングしたモルタルに急結剤を添加して市販の電子レンジで硬化させ強度を測定する方法をとった。急結剤を添加したモルタルは電子レンジで硬化させると30分程度で強度傾向が表れるようになりモルタル強度から材令3日、7日、28日のコンクリート強度の推定は可能となった。

キーワード：マイクロウェーブ波、急結剤、ウェットスクリーニングモルタル

1. はじめに

コンクリート構造物が強度不足のため竣工を目前にして取り壊される事例がある。このような場合、施工会社の責任のみならず管理責任も重大で社会的にも大きな影響を与える。取り壊しに至らないまでも打設後強度不足が指摘される場合はかなりの数にのぼるとされる。このようにコンクリートの強度不足が明らかになるのは一般には打設後数週間以上必要である。一般に、打設時にコンクリートの強度を直接判定して工事を進めることができれば計量の誤りなどによる強度不足のコンクリートを事前に排除することは可能となる。

2 実験概要

本研究の特徴は急結剤添加後のモルタルの加熱方法として電子レンジによるマイクロウェーブ波を用いた点にある。マイクロウェーブ波は赤外線と音波の間に位置する比較的波長の長い($\lambda = 10\text{cm}$)電磁波でX線や γ 線のような化学作用の強い電磁波とは異なり分子構造を変えたり、原子核に影響を及ぼすことはあり得ない³⁾と言われており、主に水分子を揺り動かす程度のエネルギーしか有していない。この実験では加熱時の温度むらを少なくするため上下4方向からマイクロウェーブ波を照射する業務用の1.6KWの電子レンジを使用した。

本装置の概要は以下に示す。

- ・発振周波数；2450 MHz ・上、下方；4管給電方式 ・所要電力；250V/20A
- ・オープン内法寸法；535x330x250mm ・試料架台；ターンテーブル方式

*1 北海道工業大学教授 工学部建築工学科、工博（正会員）

*2 北海道工業大学助手 工学部建築工学科（正会員）

*3 北海道工業大学助手 工学部建築工学科

表-1 使用した急結剤の成分表

急結剤	性状	比重	PH	成分(%)					
				Na ₂ SiO ₃	NaFSiO ₃	珪酸塩	金属塩	酸化剤	安定剤
ユニロン	液状	1.38	3.2	65	5	6	5	0.5	1

2 実験概要

2.1 実験方法

本実験は珪酸ナトリウム系の急結剤（ユニロン（株）小野田）（成分は表1に示す）を使用した。この実験ではモルタルの強度、コンクリートから採取したウェットスクリーニングモルタルの強度及びコンクリート強度の3者の相関性を検討している。まず、普通モルタルを使用して電子レンジの加熱時間6分、9分及び12分と加熱後の経過時間（圧縮強度試験までの）10分、20分及び30分を組み合わせ最も強度の安定する条件を見いだす。このように得

表-2 モルタルの調合表

W/C(%)	40	50	60	70
W(kg/m ³)	303	291	288	286
C(kg/m ³)	757	582	479	409
S(kg/m ³)	1113	1293	1389	1451
AE剤(cc/m ³)	3.09	1.88	1.41	1.01

表-3 コンクリートの調合表

W/C(%)	40	50	60	70
W(kg/m ³)	180	173	171	170
C(kg/m ³)	450	346	285	243
S(kg/m ³)	662	769	826	863
G(kg/m ³)	1041	1041	1041	1041
AE剤(cc/m ³)	1.84	1.12	0.84	0.60

られた加熱時間と加熱後の経過時間のもとで普通モルタルおよびウェットスクリーニングモルタルと標準養生したコンクリートとの間のそれぞれの強度の相関性を検討して実験式を導き出す。実験の手順は以下による。

「普通モルタル」

- 1) 水セメント比、40、50、60及び70%の各モルタルを用意する。
(空気量5%になるようにAE剤量1.011/m³-3.09 1/m³加える。調合表は表2に示す)
- 2) 急結剤を添加し30秒練り混ぜる。
- 3) 型枠へ充填し、ラップフィルムでラッピングする。
- 4) 電子レンジにて加熱する。
- 5) 冷却（スタイロフォーム製の養生箱に入れて行う）
- 6) 型枠より脱型する。
- 7) 圧縮強度試験を行う。

「コンクリート及びウェットスクリーニングモルタル」

- 1) 水セメント比40、50、60及び70%の各コンクリートを練る。
(スランプ18cm、空気量4.5%になるようにAE剤量0.60 1/m³-1.84 1/m³加える。調合表は表3に示す)
- 2) ウェットスクリーニングにより各コンクリートを5mm篩で篩ってモルタルをつくる。
- 3) これより前項の（普通モルタル）2)-7)の操作を同様に行う。

モルタル用の型枠は電子レンジで加熱するため耐熱プラスチック（ポリカーボネート）製の40x40x160mmの2連型枠を用いた。試験体数はそれぞれ4個ずつとし、荷重速度は毎秒80Kgとした。

3. 実験結果と考察

3.1 最適加熱条件の決定

図-1及び図-2は、水セメント比40%のモルタルに急結剤をセメント量の20%添加した場合で電子レンジの加熱時間とモルタルの強度との関係を示す。この実験では電子レンジから取り出し後、高温のため直ちに圧縮強度試験は出来ないため10分、20分及び30分の経過時間を経て圧縮強度試験を行うこととした。

図-1より、加熱9分まではいずれの経過時間においても強度は増加している。加熱9分から12分では強度が低下したり増加の傾向が鈍るなどがみられる。このことは、9分以上の加熱は硬化組織にとってかえって脆弱化をまねく場合があることを示している。

図-2より経過時間20分まではいずれも強度は増加する傾向を示すが、加熱時間9分と12分ではほとんど差がみられない。経過時間30分になると加熱時間9分が最も強度が大きく加熱時間6分は9分の約60%程度しか増加していない。このため本研究は電子レンジの加熱時間を9分とし加熱後圧縮強度試験までの経過時間を20分としてコンクリートの強度の推定を進めた。

3.2 モルタルの急速硬化強度とコンクリート強度との関係

図-3は普通モルタルにおける急結剤添加量10, 20, 30及び40%でのセメント水比とモルタルの圧縮強度の関係を示す。急結剤添加量20%が最も強度は低いがセメント水比の増加に伴う強度増加は添加量20%において最も直線に近くセメント水比を反映した強度性状を示していると思われる。

図-4はウェットスクリーニングモルタルにおける急結剤添加量10, 20, 30及び40%でのセメント水比とウェットスクリーニングモルタルの圧縮強度の関係を示す。急結剤添加量20%と10%で強度が逆転する場合もあるが普通モルタル同様セメント水比と強度の直線性は添加量20%においてすぐれており、セメント水比を反映している添加量と考えられる。急結剤は適当量添加することにより安定した強度が得られるが、添加量40%など過剰な添加は急激な発熱をもたらし、硬化物の組織自体は脆弱化すると考える。この結果からコンクリートの強度判定に用いるモルタル及びウェットスクリーニングモルタルの急結剤添加量は20%を採用して実験を進めることとする。

図-5より急結剤量20%で普通モルタルとウェットスクリーニングモルタルの強度の比較を行う。ウェットスクリーニングモルタルの方が普通モルタルより全体的に約10%大きい値を示している。この原因はコンクリート中の水分がウェットスクリーニングすることにより粗骨材に付着した水分がモルタル中より抜けその分モルタルの水量が少なくなるためと思われる。

ウェットスクリーニングモルタルと普通モルタルの強度の間には(1)のような実験式が導かれた。

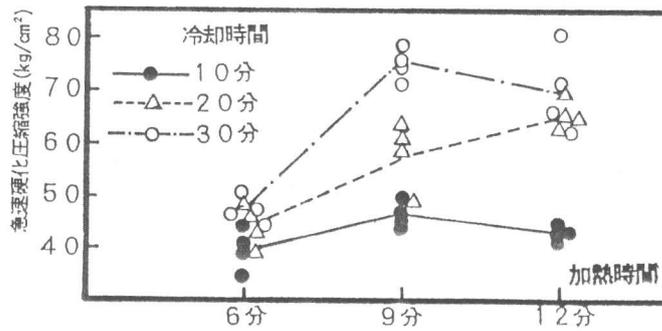


図-1 加熱時間と圧縮強度の関係

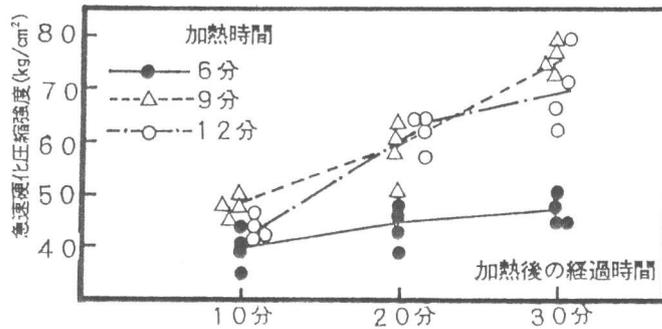


図-2 加熱後の経過時間と圧縮強度の関係

$$\sigma_m = 0.89\sigma_{m_0} + 6.20 \dots \dots \dots (1)$$

但し、 σ_m ; ウェットスクリーニングモルタルの強度(Kg/cm²)

σ_{m_0} ; 普通モルタルの強度(Kg/cm²)

両者の間には相関係数0.97と極めて良い相関関係がみられる。更に、両者はセメント水比にほぼ完全に比例している。よってコンクリート強度推定式はこの関係を用いて求める。

図-6、図-7は、それぞれコンクリート4週強度とセメント水比及び、普通モルタルとセメント水比の関係を示す。セメント水比とそれぞれの圧縮強度 σ_{28} 、 σ_{m_0} は(2)式及び(3)式のように導き出される。

$$\sigma_{28} = 251.6c/w - 180.1 \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_{m_0} = 26.7c/w - 20.6 \dots \dots \dots (3)$$

但し、 σ_{28} ; コンクリートの4週強度(Kg/cm²)

(2), (3)式の連立により普通モルタル(σ_{m_0})とコンクリートの4週強度(σ_{28})の関係式(4)が得られる。

$$\sigma_{28} = 9.4\sigma_{m_0} + 13.9 \dots \dots \dots (4)$$

(4)に(1)式の普通モルタルとウェットスクリーニングモルタルの関係式を代入すると、ウェットスクリーニングモルタルからの強度推定式(5)が得られる。

$$\sigma_{28} = 10.6\sigma_m - 52.0 \dots \dots \dots (5)$$

ここで行った計算は、材令28日の強度推定式であるが、同様の手順で材令3日、7日及び14日の強度推定式も得られる。

普通モルタルによる強度推定式

$$\sigma_3 = 5.1\sigma_{m_0} - 35.2$$

$$\sigma_7 = 7.1\sigma_{m_0} - 25.1$$

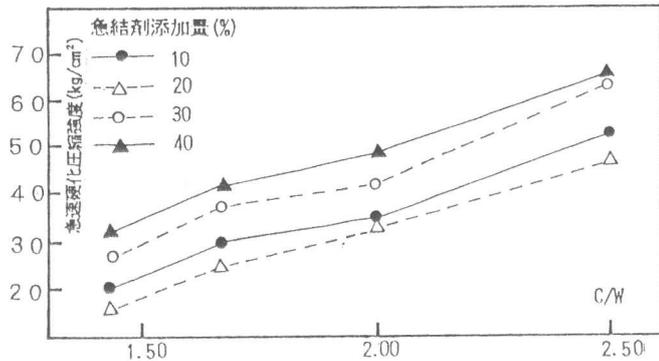


図-3 各急結剤添加量でのセメント水比と圧縮強度の関係 (普通モルタル)

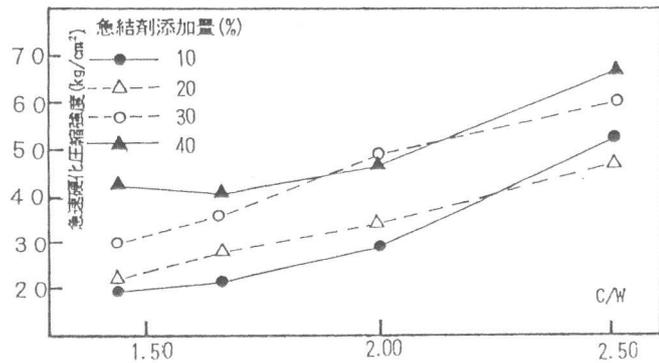


図-4 各急結剤添加量でのセメント水比と圧縮強度の関係 (ウェットスクリーニングモルタル)

$$\sigma_{14} = 9.0\sigma_{m0} - 21.4$$

$$\sigma_{28} = 9.4\sigma_{m0} + 13.9$$

ウェットスクリーニングモルタルによる強度推定式

$$\sigma_3 = 5.8\sigma_m - 70.9$$

$$\sigma_7 = 8.0\sigma_m - 74.8$$

$$\sigma_{14} = 10.2\sigma_m - 84.6$$

$$\sigma_{28} = 10.6\sigma_m - 52.0$$

普通モルタル ((4)式) から各材令の推定式を

$$\sigma_x = A\sigma_{m0} + A'$$

ウェットスクリーニングモルタル ((5)式) からの各材令の推定式を

$$\sigma_x = B\sigma_m + B' \quad \text{とする。}$$

係数A、B及び定数項A'、B'と各材令との回帰式から材令(D)をパラメータに近似式を求めると

普通モルタルにおいて

$$A = 5.64e^{0.021D} \quad \text{及び}$$

$$A' = 1.90D - 41.69$$

ウェットスクリーニングモルタルにおいて

$$B = 6.37e^{0.021D} \quad \text{及び}$$

$$B' = 0.81D - 81.12 \quad \text{となる。}$$

以上より急速硬化した普通モルタル及びウェットスクリーニングモルタルから同一調合のコンクリートの任意の材令(D)における強度推定式は(6)式及び(7)式になる。

$$\sigma_x = (5.64e^{0.021D})\sigma_{m0} + (1.90D - 41.69)$$

.....(6)

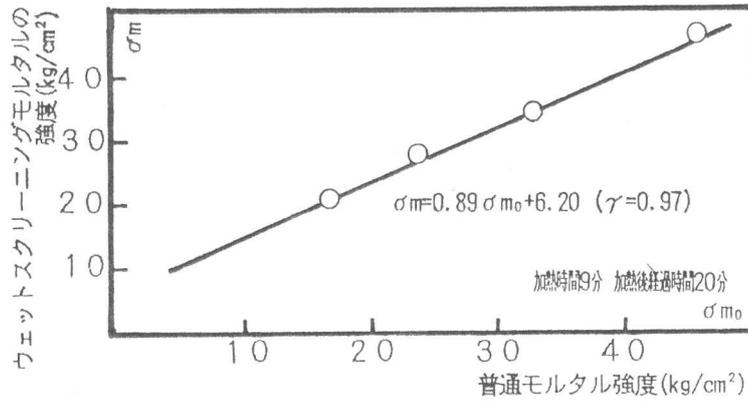


図-5 加熱養生したウェットスクリーニングモルタルと普通モルタルの関係

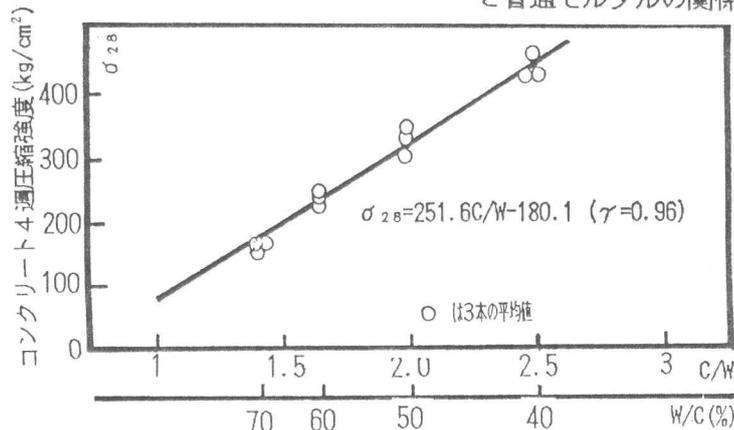


図-6 コンクリートの4週強度とセメント水比の関係

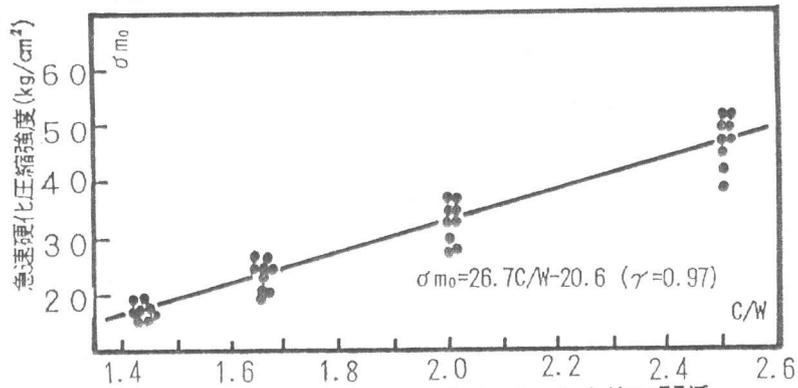


図-7 普通モルタルとセメント水比の関係

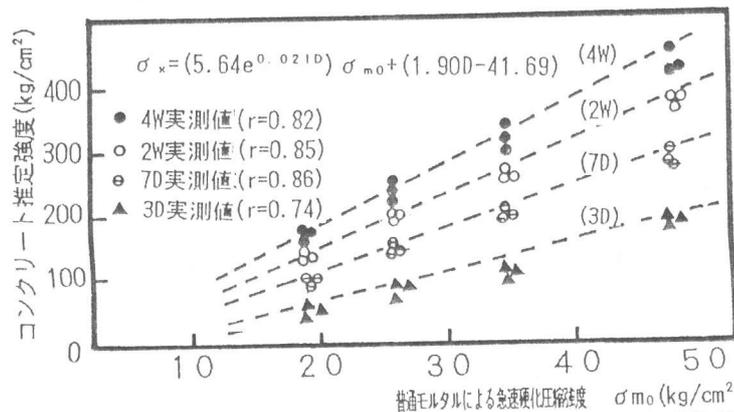


図-8 コンクリート強度推定回帰曲線とコンクリート実測値 (普通モルタル)

$$\sigma_x = (6.37e^{0.021D}) \sigma_m + (0.81D - 81.12) \dots (7)$$

但し、 σ_x ; 任意の材令におけるコンクリート強度(Kg/cm²)
D; 材令(日)

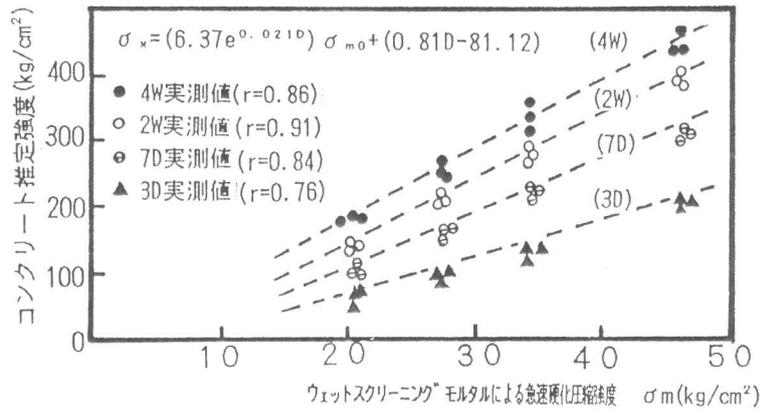


図-9 コンクリート強度推定回帰曲線とコンクリート実測値 (ウェットスクリーニングモルタル)

図-8及び図-9はそれぞれ普通モルタルとコンクリート強度との関係式及びウェットスクリーニングモルタルとコンクリート強度との関係式を

示す。直線上の点はいずれも今回の実験で得られたコンクリート強度の実測値を示す。いずれも推定強度とコンクリートの実測値はほぼ近い値($r=0.74-0.91$)を示す。普通モルタルとコンクリート強度及びウェットスクリーニングモルタルとコンクリート強度との相関性の比較ではウェットスクリーニングモルタルの方がやや優れている。しかし、実用的にはいずれのモルタルにおいてもコンクリート強度は推定できる。

4. 結論

マイクロウェーブ波を用いてコンクリート強度を短期間に推定する早期判定法について以下の結論が得られた。

マイクロウェーブ波による加熱時間は9分とし圧縮強度試験までの経過時間を、20分とすることで安定した急速硬化圧縮強度が得られる。

急結剤添加量は、セメント重量の20%添加することでコンクリートと急速硬化圧縮強度に、優れた相関を示す。

材令別のコンクリート強度の推定式を求めたことによりウェットスクリーニングモルタル又は普通モルタルのいずれの急速硬化強度からも任意の材令のコンクリート強度を実用的な精度($r=0.74-0.91$)で推定することが可能である。

参考文献

- 1) 池田尚治：急速硬化によるコンクリート強度即時判定法に関する研究、土木学会論文集、第225号、pp. 103-112, 1976. 11
- 2) 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」技報堂、pp. 13-94, 1985. 3
- 3) 肥後温子：「電子レンジの科学」柴田書店、pp. 8-26, 1990. 6