

コンクリートの即時判定法に関する実験の推移と現状

建設・機械系（建設システム工学科） 浅野克彦

1. はじめに

阪神大震災以来、コンクリートの強度管理の重要性が叫ばれている中、最近特に不良コンクリートが打ち込まれた為にコンクリート構造物が取り壊される例が報道されている。このような場合の損害は莫大なものであり、社会的にもコンクリート構造物に対する著しい信頼度の低下、及びコンクリート技術に対する不信を招きかねない。通常、コンクリートの強度試験は材令 28 日に行われているが、その際に品質が不合格である事が判明した場合、そのコンクリートの除去及び補強の為にかかる費用は多大なものであり、工期も大幅に遅れる事になり、その損害は極めて大きい。その為、コンクリートの品質が極めて早期に判定出来る事が望ましい。

本報告は、素性の分からないコンクリートの良・不良を打設前に知る事を前提として、電子レンジ加熱によって1時間以内の即時にコンクリートの強度推定を行う為に行われてきた研究の推移と現状についてまとめたものである。

2. 研究の推移

当研究室では、95年度より2種類の促進養生法を用いてコンクリート強度の早期判定を行ってきた。促進養生法には、1時間以内で強度試験結果が得られる電子レンジを利用したマイクロ波（MW）養生法と、1週間後に高強度のコンクリートでも正確に強度推定が出来る24時間風呂を使用した温水養生法の2種類を行ってきた。

95年度～97年度までは、まずMW養生強度に影響を与えると思われる因子に関して、試験条件を様々に変化させてその最適値の組み合わせを決定する為に、MW養生法だけの予備実験を行った。続いて本実験では、同一のコンクリートに対してMW養生法と温水養生法を行い、同時に標準養生7日圧縮強度と標準養生28日圧縮強度の供試体を作製した。最後にそれぞれの強度値を比較し相関関係を調べるという研究の流れを組んだ。

<マイクロ波（MW）養生法>

95年度から始まったMW養生法には、1時間以内での強度試験が目標である為にキャッピングが不要な引張強度試験が採用された。既往の文献を参考にMW養生引張強度に影響を与えると思われる、電子レンジの性能の把握やMW加熱後の供試体の状態を確認する他に、加熱時間・同時加熱本数・徐冷時間・急結剤量・突き固め方法などを様々なパターンで組み合わせ予備実験を行い、最適と思われる実験条件を決定した。しかし、この引張試験用の型枠は脱型が非常に困難で時間を要する為、全体的に時間の管理があまり重要視されず、その為に強度のばらつきが大きかった。

96年度は、95年度の問題点を考慮して、MW養生法の強度試験に圧縮強度試験を採用し、キャッピングが不要な専用型枠を開発した。予備実験は、試験方法の変更に伴い、まず型枠の耐久性や脱型の容易さを確かめた。続いて実験条件の見直しを行ったが95年度の実験条

件をほぼ採用する事とし、更に時間の統一も徹底され、すべての供試体の実験条件が一定になった。しかし、予備実験の回数が不足気味で、最適な実験条件が選択されているか疑問が残った。また、急結剤添加後の供試体の状態（急速に固まり混練しにくい）など解決すべき問題も出てきた。この間、引張強度試験から圧縮強度試験へと試験方法の変更により、データの蓄積には至らなかった。

97年度は、MW養生法の圧縮強度試験に関して、専用型枠の一部を変更したものを使用し、引き続き実験条件の最適値を決める為に徹底的に予備実験を行った。そして加熱中の供試体の水分蒸発量を調べ、電子レンジ内位置の違いによる水分蒸発量の違いを発見し、その違いがMW養生圧縮強度に与える影響を明らかにした。

98年度の実験では、これまでに得られた試験条件をもとに、新しくターンテーブル方式の電子レンジを導入し電子レンジ内位置による供試体間の強度差を生じさせないように実験を行った。尚、これまでの実験より温水養生法ではある程度の相関を得る事が出来たので98年度の実験では温水養生法の実験は行わない事とした。本実験では、まず水セメント比40、50、65%のコンクリートで実験を行い、次に本来素性の分からないコンクリートでの強度推定である為、水セメント比を変え45、55、60%のコンクリートで実験を行い適応性を調べた。更に、MW養生圧縮強度に影響を与えると思われる新たな因子の抽出とその影響も考慮しながら実験を進めた結果、練り上がり温度がMW養生圧縮強度に影響を与える因子である事が判明した。

99年度は、意図的に練り上がり温度を変化させ（混練水などによる調整）、すべての実験で練り上がり温度を測定し、実験データの蓄積を図るとともに、練り上がり温度がマイクロ波養生圧縮強度に与える影響を調べ、練り上がり温度の適用範囲を見つけることに重点をおき実験を行った。基本的に試験工程は実験データの蓄積のため98年度に用いられた試験工程を用いた。また、実験条件では、作業の簡略化や急結剤の低減を試み、実験データの蓄積を行った。その結果、極端に練り上がり温度の低いコンクリート（特に10℃以下）では、水セメント比の違いによるMW養生圧縮強度の差が明確に現れなくなる事が確認された。

<温水養生法>

温水養生法に関しては良好な成果が得られた。温水養生7日圧縮強度と標準養生28日圧縮強度との相関性は極めて良く、3年間すべてを通じての相関係数も0.983であり良好であった。また、試験日が異なる実験においてもほぼ等しい強度値が得られ、更にこの強度値がいずれの場合も標準養生28日圧縮強度の約80%以上になる事から、温水養生法が高い再現性を有する事がわかった。

3. 研究の方針

3.1 研究の目的

2000年度では、99年度同様に意図的（混練水などによる調整）に練り上がり温度を変化させ、すべての実験で練り上がり温度を測定し、実験データの蓄積を図る。また、99年度で実験データの少ない低温での実験回数を増やし、練り上がり温度が低温でのMW養生圧縮強度に与える影響を調べるとともに、本研究での低温の適応練り上がり温度を調べる。また、

2000年度はデータの蓄積を目的としている為、試験工程・実験条件は99年度と同様とした。最終的に練り上がり温度を考慮してMW養生圧縮強度を補正し、標準養生28日圧縮強度との相関関係を求めることによりコンクリート強度の即時判定についての実用性を検討する。

3. 2 実験計画

<実験条件>

- ・コンクリートは10リットルを機械練りする
- ・使用コンクリートはAEコンクリートで、AE剤はビンゾールを用いる
- ・AE剤量は、水セメント比40%、50%、65%で、それぞれ0.07%、0.06%、0.05%
- ・水セメント比40、50、65%のコンクリートを使用する
- ・急結剤量を3.5包
- ・剤添置き時間は18分間とする
- ・徐冷時間は19分～28分(3分間隔)とする
- ・練り上がり温度を測定する
- ・徐冷容器にタッパーを用いる
- ・標準養生28日圧縮強度供試体を作製する
- ・練り上がり温度の調整のため、保冷剤・ドライアイスを用いて冷却する

<実験の流れ>

1. 骨材、水、AE剤、セメントを計量する
2. コンクリート10リットルを機械練りで混練する
(骨材+セメントで空練り1分間、水及びAE剤を加えて本練り2分間)
3. 混練後、練り上がり温度を測定する
4. コンクリートを5kg採取しマイクロ波養生法(詳細はマイクロ波養生法手順を参照)を開始する
5. マイクロ波養生法と並行して、同一コンクリートでスランプ試験と空気量試験を行う
6. 5. の各試験に引き続き標準養生28日圧縮強度供試体を4本作製する
7. 翌日キャッピングを行う
8. 翌々日、脱型・重量測定・型枠清掃組立を行い20℃の養生槽で標準養生を開始する
9. 材令28日(脱型より26日後)で圧縮強度試験を実施する

<マイクロ波(MW)養生法の手順>

1. 5kgに計量されたコンクリートに急結剤を3.5包(21g)混入し、素早く混練(練りさじで2分間)する
2. 混練されたコンクリートを更に2.5kgに計量し、それぞれ目分量で2等分する
3. あらかじめ下面にラッピングを施され、突き台にセットした4つの型枠に4等分されたコンクリートをそれぞれ充填する
4. 50回の突き数で突き固めを行い、上面を角形突き棒でならす
5. 型枠上面にラッピングを施し重量を測定する
6. 4本全てを電子レンジに入れ、所定の剤添置き時間(18分)後に8分間マイクロ波加熱を

行う。

7. 加熱終了後に型枠のまま重量を測定する。その後素早く型枠から脱型し、供試体を 1 本ずつタッパーに収めて、養生ボックスで徐冷を行う
8. 所定の各材令ごと 3 分間隔で、養生ボックスから供試体を取り出し、高さを測定してから圧縮強度試験を行う(取り出す毎に、ボックス内の温度を測定する)

3. 3 使用材料・使用器具

<使用材料>

- ・ セメント：日鐵ポルトランドセメント(普通ポルトランドセメント)
日鐵セメント株式会社製(比重 $\rho = 3.16$ 、強度 $K = 400\text{kgf/cm}^2$)
- ・ 粗骨材：川砂利(最大寸法 25.0mm、表乾比重 2.81、吸水率 1.68%、実積率 63.9%)
- ・ 細骨材：川砂(粗粒率 2.46、表乾比重 2.70、吸水率 1.42%、含水率 0.50%)
- ・ AE 剤：ピンゾール
- ・ 急結剤：プルーフィックス 3(PF-3) 株式会社エヌエムビー社製
1 包内容量(6.0g)
成分 水酸化ナトリウム(16%)
アルミン酸ソーダを含む無機成分(84%)

※99 年度、2000 年度の調合計算結果を表-1 に示す。

表 2 調合計算結果(重量調合)

| | | | 99年度 | | | 2000年度 | | |
|--------|-------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 水セメント比 | % | W/C | 40 | 50 | 65 | 40 | 50 | 65 |
| 水 | Kg/m ³ | W | 192.1 | 177.8 | 175.5 | 199.8 | 186.2 | 178.8 |
| セメント | Kg/m ³ | C | 480.3 | 355.6 | 270.0 | 499.5 | 372.3 | 275.0 |
| 細骨材 | Kg/m ³ | S | 577.8 | 705.2 | 802.2 | 522.4 | 669.7 | 792.7 |
| 粗骨材 | Kg/m ³ | G | 1085.7 | 1104.2 | 1086.6 | 1134.2 | 1132.4 | 1111.7 |
| AE剤 | cc | | 3.36 | 2.12 | 1.36 | 3.50 | 2.23 | 1.38 |

<使用器具>

- ・ マイクロ波加熱装置：業務用電子レンジ(三洋電機株式会社製 EM-1600)
 - 定格電圧 単相 200V
 - 定格消費電力 3,000W(高周波出力 1,600W時)
 - 高周波出力 1,600W~160W相当
 - 加熱方式 ターンテーブル方式
 - 発信周波数 2,450MHz
 - 外形寸法 幅 610×奥行 493×高さ 420(mm)
 - 加熱室有効寸法 幅 374×奥行 413×高さ 246(mm)
 - ターンテーブル寸法 ϕ 360(mm)

- ・ 型枠：メタクリル樹脂板(厚さ 8mm)を独自に高速切断機、レーザーカッターなどを用いて4枚一組の組立型枠に加工したもの。

(型枠作製協力：室蘭テクノセンター)

材質 三菱レイヨン社製アクリライト(メタクリル樹脂板)

内法寸法 縦 75×横 75×高さ 150(mm)

4. 分析

4. 1 分析の概要

分析は、単回帰分析と重回帰分析を用いて解析を行う。これまでの実験結果から、練り上がり温度がMW養生圧縮強度に大きな影響を与えている為、練り上がり温度を考慮に入れた分析を行う。分析に使用するデータは99年度、2000年度の同一実験条件で行われたものを使用する。

<解析の手順>

- ① 各水セメント比での練り上がり温度とMW養生圧縮強度の関係を、二次式 $\sigma_{MW} = at^2 + bt + c$ とし、定数項 a,b,c についてそれぞれをセメント水比 X を説明変数として単回帰分析を行い、各定数項を二次式に代入し1つの関係式①を求める。グラフを図-1に示す。

$$\sigma_{MW} = (-0.1445X + 0.0692)t^2 + (6.3606X - 2.4712)t + (-37.619X + 19.678)$$

… 関係式①

X：セメント水比

σ_{MW} ：マイクロ波養生圧縮強度(kgf/cm²)

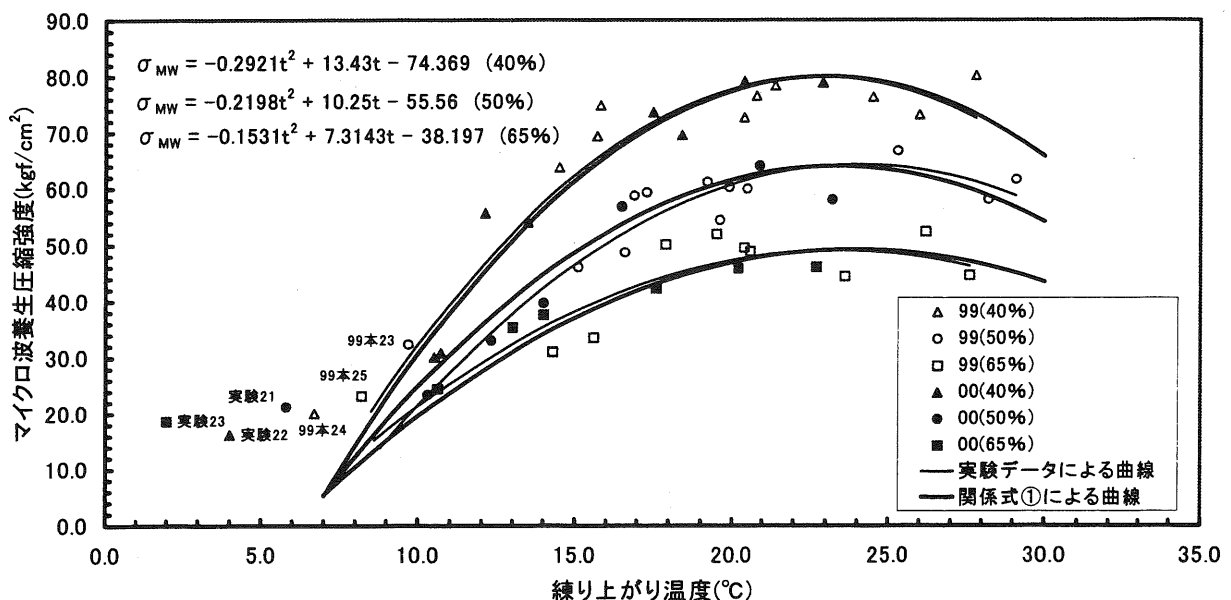


図-1 練り上がり温度とマイクロ波養生圧縮強度の関係

- ② 関係式①より練り上がり温度を考慮に入れたMW養生圧縮強度の補正を行う。

※標準養生 28 日圧縮強度供試体が 20℃の水中養生されている事から、基準となる練り上がり温度を 20℃とし MW 養生圧縮強度を補正する。尚、補正 MW 養生圧縮強度を σ_{MW20} とする。

- ③ 補正された MW 養生圧縮強度、練り上がり温度、空気量を用いて重回帰分析を行い、強度推定式①を求める。求められた強度推定式より標準養生 28 日圧縮強度の強度推定を行う。

$$\sigma_{28} = 3.41378 \sigma_{MW20} + 0.05858t - 0.49867A + 51.56579 \quad \dots \text{推定式①}$$

(重相関係数 $R = 0.8337$)

σ_{28} : 推定標準養生 28 日圧縮強度(kgf/cm²)

σ_{MW20} : 補正マイクロ波養生圧縮強度(kgf/cm²)

t : 練り上がり温度(℃)

A : 空気量(%)

5. 結果と考察

99 年度、2000 年度の実験結果より、練り上がり温度が MW 養生圧縮強度に影響を与えることが確認された為、練り上がり温度を考慮に入れた分析を行った。

練り上がり温度と MW 養生圧縮強度の関係式を求める時の実験データとして練り上がり温度が 10℃以上のデータを用いた。その理由として、練り上がり温度が 10℃以下での MW 養生圧縮強度は、水セメント比の違いに関係なくほぼ一定の値を示す傾向にある為である。

練り上がり温度と MW 養生圧縮強度の関係式は、練り上がり温度が 10℃～20℃では練り上がり温度の増加に伴う MW 養生圧縮強度の増加が見られ、練り上がり温度 20℃以上では練り上がり温度の増加に伴う MW 養生圧縮強度の増加が見られないため一次曲線ではなく二次曲線を用いた。分析では、練り上がり温度と MW 養生圧縮強度の関係式からセメント水比を変数にする事により 1 本の関係式を導き出した。この関係式より練り上がり温度が 20℃での MW 養生圧縮強度を推定する事によって、MW 養生圧縮強度の練り上がり温度によるばらつきを補正する事ができた。しかし、練り上がり温度の低い範囲での MW 養生圧縮強度を補正する場合、少しの強度差が補正後大きな強度差をもたらしてしまう為、練り上がり温度が低温での実験データの取り扱い方に注意が必要である。この事から、本研究では、練り上がり温度 11℃以下の実験データを標準養生 28 日圧縮強度の推定には用いなかった。

標準養生 28 日圧縮強度の強度推定には、説明変数に補正 MW 養生圧縮強度、練り上がり温度、空気量を用いて重回帰分析を行った。その結果、標準養生 28 日圧縮強度に大きく影響を与えている説明変数は補正 MW 養生圧縮強度であり、練り上がり温度、空気量は、標準養生 28 日圧縮強度に与える影響がとても小さい事がわかった。そこで重回帰分析(推定式①)と補正 MW 養生圧縮強度だけを説明変数とした単回帰分析(推定式②)の相関係数を比較すると 0.0001 の違いしかない。この為、説明変数に MW 養生圧縮強度だけを用いる事により推定式の簡略化を図る事ができる。グラフを図-2 に示す。

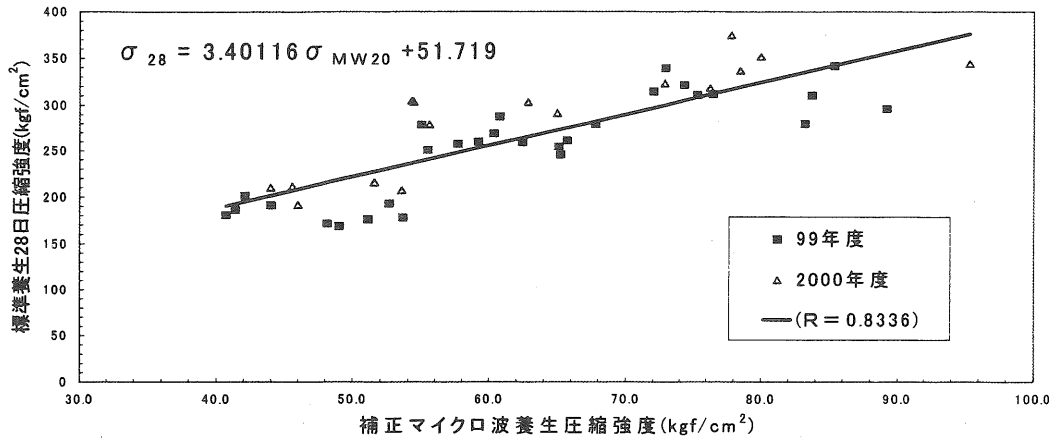


図-2 補正マイクロ波養生圧縮強度と標準養生28日圧縮強度の関係

$$\sigma_{28} = 3.40116 \sigma_{MW20} + 51.719 \quad \dots \text{推定式②} \quad (\text{重相関係数 } R = 0.8336)$$

σ_{28} : 推定標準養生28日圧縮強度(kgf/cm²)

σ_{MW20} : 補正マイクロ波養生圧縮強度(kgf/cm²)

補正MW養生圧縮強度から導き出された強度推定式②で、低温での練り上がり温度を考慮して練り上がり温度 11℃以上の実験データで強度推定を行った結果、相関係数は 0.8336 となった。実験データの数が多しや低温での実験データが多い事により相関係数は低めの値となっているが、練り上がり温度による補正を行う事によって標準養生 28 日圧縮強度を推定する事は強度判定という点から考えると満足できる結果といえる。分析結果一覧を表-2に示す。

6. おわりに

本研究では、電子レンジ加熱によるコンクリート強度の即時判定を目的とし、急結剤にブルーフィックス3を用いて様々な試験法の改善を試み、即時判定法の実用性を検討してきた。これまでの研究から、マイクロ波(MW)養生法の試験法はほぼ確立されたものであると言えるだろうが、本研究で導き出された強度推定式によって標準養生28日圧縮強度を推定する事は、誤差が大きいものなどがある為に少し難しいと思

表-2 分析結果一覧

| 年度 | 実験名 | W/C (%) | 温度 (°C) | 圧縮強度(kgf/cm ²) | | | | 推定値/実測値 |
|--------|--------|---------|---------|----------------------------|-------|---------|-------|---------|
| | | | | MW養生 | | 標準養生28日 | | |
| | | | | 実測値 | 補正值 | 実測値 | 推定値 | |
| 99年度 | 予備実験7 | 65 | 17.9 | 50.04 | 53.61 | 177.6 | 234.1 | 1.32 |
| | 予備実験8 | 50 | 16.9 | 58.66 | 65.71 | 261.0 | 275.2 | 1.05 |
| | 予備実験9 | 40 | 15.8 | 74.86 | 89.21 | 295.7 | 355.1 | 1.20 |
| | 予備実験10 | 50 | 19.2 | 61.10 | 62.42 | 258.8 | 264.0 | 1.02 |
| | 予備実験12 | 65 | 20.4 | 49.48 | 49.01 | 168.4 | 218.4 | 1.30 |
| | 本実験2 | 40 | 21.4 | 78.33 | 76.47 | 311.3 | 311.8 | 1.00 |
| | 本実験3 | 65 | 20.6 | 48.78 | 48.11 | 171.1 | 215.3 | 1.26 |
| | 本実験4 | 50 | 19.6 | 54.41 | 54.98 | 278.7 | 238.7 | 0.86 |
| | 本実験5 | 40 | 20.4 | 72.65 | 72.03 | 314.5 | 296.7 | 0.94 |
| | 本実験6 | 65 | 19.5 | 51.93 | 52.62 | 193.1 | 230.7 | 1.19 |
| | 本実験7 | 50 | 19.9 | 60.19 | 60.33 | 268.8 | 258.9 | 0.96 |
| | 本実験8 | 40 | 20.8 | 76.50 | 75.32 | 310.4 | 307.9 | 0.99 |
| | 本実験9 | 50 | 20.5 | 59.87 | 59.21 | 259.4 | 253.1 | 0.98 |
| | 本実験10 | 50 | 17.3 | 59.25 | 65.08 | 254.3 | 273.1 | 1.07 |
| | 本実験11 | 50 | 16.6 | 48.65 | 55.45 | 250.5 | 240.3 | 0.96 |
| | 本実験12 | 40 | 15.7 | 69.36 | 83.23 | 279.5 | 334.8 | 1.20 |
| | 本実験13 | 65 | 15.6 | 33.54 | 40.70 | 180.5 | 190.1 | 1.05 |
| | 本実験14 | 50 | 15.1 | 46.03 | 57.69 | 257.4 | 247.9 | 0.96 |
| | 本実験15 | 40 | 14.5 | 63.77 | 83.72 | 310.0 | 336.5 | 1.09 |
| | 本実験16 | 65 | 14.3 | 31.00 | 41.39 | 186.4 | 192.5 | 1.03 |
| | 本実験17 | 50 | 25.3 | 66.65 | 65.21 | 245.4 | 273.5 | 1.11 |
| | 本実験18 | 40 | 27.8 | 80.17 | 85.37 | 341.5 | 342.1 | 1.00 |
| | 本実験19 | 65 | 26.2 | 52.34 | 51.10 | 175.9 | 225.5 | 1.28 |
| | 本実験20 | 50 | 28.2 | 58.05 | 60.76 | 287.4 | 258.4 | 0.90 |
| | 本実験21 | 40 | 24.5 | 76.33 | 74.34 | 320.9 | 304.6 | 0.95 |
| | 本実験22 | 65 | 23.6 | 44.36 | 42.09 | 200.9 | 194.9 | 0.97 |
| | 本実験26 | 50 | 29.1 | 61.54 | 67.80 | 279.2 | 282.3 | 1.01 |
| | 本実験27 | 65 | 27.6 | 44.58 | 44.01 | 190.8 | 201.4 | 1.06 |
| 本実験28 | 40 | 26.0 | 73.17 | 72.95 | 339.3 | 299.8 | 0.88 | |
| 2000年度 | 実験1 | 50 | 23.2 | 57.92 | 55.57 | 278.8 | 240.7 | 0.86 |
| | 実験2 | 40 | 22.9 | 78.83 | 76.23 | 317.5 | 311.0 | 0.98 |
| | 実験3 | 65 | 22.7 | 46.03 | 43.98 | 209.6 | 201.3 | 0.96 |
| | 実験4 | 40 | 20.4 | 79.17 | 78.51 | 336.3 | 318.7 | 0.95 |
| | 実験5 | 40 | 18.4 | 69.51 | 72.87 | 322.8 | 299.6 | 0.93 |
| | 実験6 | 40 | 17.5 | 73.59 | 79.98 | 351.4 | 323.7 | 0.92 |
| | 実験7 | 65 | 17.6 | 42.29 | 45.97 | 191.3 | 208.1 | 1.09 |
| | 実験8 | 50 | 16.5 | 56.76 | 64.97 | 291.3 | 272.7 | 0.94 |
| | 実験12 | 50 | 14.0 | 39.68 | 54.39 | 303.2 | 236.7 | 0.78 |
| | 実験13 | 40 | 12.1 | 55.62 | 95.31 | 343.8 | 375.9 | 1.09 |
| | 実験14 | 65 | 13.0 | 35.35 | 53.52 | 207.1 | 233.7 | 1.13 |
| | 実験15 | 50 | 12.3 | 32.97 | 54.25 | 304.0 | 236.2 | 0.78 |
| | 実験17 | 40 | 13.5 | 53.99 | 77.82 | 374.7 | 316.4 | 0.84 |
| | 実験18 | 65 | 14.0 | 37.61 | 51.55 | 215.3 | 227.0 | 1.05 |
| | 実験19 | 50 | 20.9 | 63.98 | 62.83 | 302.9 | 265.4 | 0.88 |
| | 実験20 | 65 | 20.2 | 45.79 | 45.56 | 211.2 | 206.7 | 0.98 |

われる。しかし、現場において明らかに異常と思われるコンクリートを判定するための強度判定という点から考えると、満足のいく結果であると言える。MW養生法において練り上がり温度を考慮に入れる事は大変重要であり、今後練り上がり温度の許容範囲を明確にする事によって、より信頼性のある判定法となるであろう。

また、本報告の判定法他に、急結剤混入後の混練難度を考慮に入れ、更に時間的にも短く判定する手法として、急結剤にケイ酸ナトリウム溶液（水ガラス）を用いた手法についても研究が進められている事も追記しておく。こちらは普通ポルトランドセメントの他に、高炉セメントB種、早強ポルトランドセメントに関する実験も行われており、より素性の分からないコンクリートに対する幅広い判定の手法として、また試験方法の容易さを求める新たな手法として近年研究が始められたものである。

参考文献

1. 「促進養生によるコンクリート強度の早期判定に関する基礎的研究」
室蘭工業大学 修士論文 平成8年度：谷口 和久
2. 「電子レンジを利用したコンクリート強度の早期判定に関する実験的研究」
室蘭工業大学 修士論文 平成9年度：木村 雄一
3. 「促進養生によるコンクリート強度の早期判定方法に関する研究」
室蘭工業大学 卒業論文 平成7年度：佐原 淳、中村 光良
4. 「促進養生によるコンクリート強度の早期判定方法に関する研究」
室蘭工業大学 卒業論文 平成8年度：五反田 貴、末永 浩平
5. 「促進養生によるコンクリート強度の早期判定に関する実験的研究」
室蘭工業大学 卒業論文 平成9年度：高橋 庸介、山本 譲
6. 「電子レンジを利用したコンクリート強度の早期判定法に関する実験的研究」
室蘭工業大学 卒業論文 平成10年度：板谷 匠、伊藤 輝、谷本 泰一
7. 日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」
8. JCI-R2「コンクリート品質の早期判定指針」
社団法人 日本コンクリート工学協会 昭和60年3月
9. 「電子レンジを用いた急速硬化法によるコンクリートの強度推定」
日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）平成2年10月
：佐藤 孝一、田中 健治郎、石田 良平、堀 誠治
10. 「電子レンジ加熱によるコンクリート強度の即時判定法に関する実験的研究」
室蘭工業大学 修士論文 平成11年度：高橋 庸介
11. 「電子レンジ加熱によるコンクリート強度の即時判定法に関する研究～練り上がり温度の影響」
室蘭工業大学 修士論文 平成12年度：谷本 泰一