各種セメントを用いたコンクリートおよびモルタルの促進中性化に関する研究

コンクリート　モルタル　促進中性化　各種セメント　養生方法 　　 　　中村　則清＊ 赤荻　満＊＊

阿部　道彦＊＊＊

１．はじめに

　鉄筋コンクリート造建築物の劣化現象のうち中性化については一般環境にある全てのコンクリート造建築物に起こりえる現象である。中性化進行に及ぼす要因には、外部温度・湿度・方位などの環境によるもの、セメント・骨材・混和材などの材料によるもの、水セメント比・単位水量・スランプなどの調合によるもの、締固め・養生などの施工によるものと多くのものがあり多角的に研究が行われている。中性化の試験方法としては、実構造物に近い環境で行われる暴露試験と炭酸ガス濃度を高めるなどにより短期間で試験結果を得ようとする促進中性化試験がある。促進中性化試験はJIS A 1153に定められており、試験体の養生方法や促進開始材齢については一つの方法しか規定されていない。そのため、セメントの種類が異なり強度発現性状が異なる場合においても同一の方法で実験研究が行われている。また、試験の対象はコンクリートのみとなっており、モルタルやペーストについては規定されておらず、研究は行われているが試験方法については統一されていないのが現状である。

　本研究では、モルタルによる促進中性化の試験方法を確立するための基礎的資料の作製を行うことを目的としており、コンクリートとモルタルの供試体を作成し両者の中性化に対する影響を把握し比較、検討を行う。

２．検討方法

　＊　：財団法人建材試験センター　修士（工学），＊＊：工学院大学大学院工学研究科建築学専攻

＊＊＊：工学院大学工学部建築学科（工博）

表1　要因と水準

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 要因 | 水準 | | | |
| コンクリート | | モルタル | |
| 水セメント比(%) | 50, 60, 70 | | | |
| フロー(mm) | (スランプ18cm) | | 160,200,240※ | |
| セメントの種類 | 普通ポルトランドセメント(N) | | | |
| 早強ポルトランドセメント(H) | | | |
| 中庸熱ポルトランドセメント(MB) | | | |
| 中庸熱ポルトランドセメント(MC) | | | |
| 低熱ポルトランドセメント(L) | | | |
| 養生条件  (D=日、W=週) | 20℃水中 | 4W | | |
| 20℃封かん | 1W, 4W, 8W, 13W | 1D,1W,4W | |
| 40℃封かん | 1W, 2W, 4W, 8W | 1W,4W | |
| ― | | 60℃封かん | 1W,4W |

※Nのみ

検討1では、コンクリート、モルタル各々で表に示す要因(水セメント比、フロー、セメント種類、養生条件)が中性化に及ぼす影響を把握し各種セメントの性能評価について検討を行う。検討2では、コンクリートとモルタルで中性化に対する影響に差があるのか検討を行うために中性化および中性化と圧縮強度の関係について両者で比較を行い、モルタルで促進中性化試験を行うことについて問題がないか検討を行う。検討3では、コンクリート(モルタル)が中性化することで理論上質量が増加することが知られており、促進中性化試験結果の確認が行えるように中性化試験時に質量を計測し質量増加から中性化深さの推定が可能であるかを検討する。

３．実験概要

３．１実験計画

表1に実験の要因と水準を示す。本実験では、コンクリートとモルタルの関係を調べるため両者の供試体を作製するものとする。水セメント比については50%、60%、70%の3水準を設けた。また、単位セメント量による違いを検討するために、フローについてはモルタルの普通セメントのみで160mm、200mm、240mmを設け単位水量で調節を行った。セメントについては、強度発現の違いを検討するため、普通、早強、中庸熱(B)、中庸熱(C)、低熱の5種類(以後図、表についてはN、H、MB、MC、Lと略記する)のポルトランドセメントを使用することにした。養生条件については、養生温度、養生期間の違いを検討するためコンクリートでは、JIS A 1153の試験方法を基に20℃水中は4週を設け、また、20℃封かんと40℃封かんを設けた。モルタルについては、高温での中性化の影響を検討するため60℃封かんを設けた。

３．２使用材料および品質

　表2に使用材料と品質を示す。セメントの28日圧縮強度については、図1に示す通り早強、普通、中庸熱(B)、低熱、中庸熱(C)の順で強度が高くなった。中庸熱については、Bが強度発現の早いセメント、Cが強度発現の遅いセメントのものを使用した。細骨材については、コンクリートが大井川産陸砂、モルタルでは、セメント強さ試験用標準砂を使用した。粗骨材については、青梅産硬質砂岩砕石2005を使用した。混和剤については、コンクリートのみで使用しておりモルタルでは使用しなかった。

３．３調合およびフレッシュ性状

表4　調合およびフレッシュ性状(モルタル)

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 記号 | W/C (%) | 目標  フロー値 (mm) | 単位量(kg/m3) | | | フレッシュ性状 | |
|
| W | C | S | 空気量(%) | フロー(mm) |
| N50 F160 | 50 | 160 | 230 | 460 | 1596 | 4.5 | 159 |
| N50 F200 | 200 | 251 | 502 | 1505 | 3.8 | 198 |
| N50 F240 | 240 | 280 | 560 | 1380 | -0.1 | 237 |
| N60 F160 | 60 | 160 | 230 | 383 | 1660 | 3.8 | 161 |
| N60 F200 | 200 | 251 | 418 | 1575 | 3.3 | 211 |
| N60 F240 | 240 | 280 | 467 | 1458 | 0.9 | 246 |
| N70 F160 | 70 | 160 | 230 | 329 | 1705 | 4.4 | 155 |
| N70 F200 | 200 | 251 | 359 | 1625 | 4.8 | 189 |
| N70 F240 | 240 | 280 | 400 | 1514 | 3.5 | 251 |
| H50 | 50 | 200 | 251 | 502 | 1502 | 3.1 | 190 |
| H60 | 60 | 251 | 418 | 1573 | 4.4 | 203 |
| H70 | 70 | 251 | 359 | 1623 | 5.2 | 194 |
| MB50 | 50 | 251 | 502 | 1509 | 4.1 | 197 |
| MB60 | 60 | 251 | 418 | 1578 | 3.7 | 206 |
| MB70 | 70 | 251 | 359 | 1628 | 4.4 | 196 |
| MC50 | 50 | 251 | 502 | 1512 | 2.4 | 191 |
| MC60 | 60 | 251 | 418 | 1581 | 3.8 | 193 |
| MC70 | 70 | 251 | 359 | 1630 | 4.2 | 197 |
| L50 | 50 | 251 | 502 | 1513 | 2.2 | 205 |
| L60 | 60 | 251 | 418 | 1582 | 2.4 | 204 |
| L70 | 70 | 251 | 359 | 1631 | 3.5 | 203 |

　表3にコンクリートの、また、表4にモルタルの調合とフレッシュ性状を示す。コンクリートは、スランプ18±2.5cm、空気量4.5±1.0%になるように混和剤や単位水量で調節を行った。モルタルについては、空気量を2%に設定し、普通ポルトランドセメントの場合に所定のフローになるように単位水量を調整し調合を設定した。他のセメントについては普通ポルトランドセメントのフロー200mmの単位水量と同じ値で調合を計算した。

表2　使用材料および品質

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 種類 | 品質 |
| セメント | 普通ポルトランドセメント | 密度　3.16g/cm3、  比表面積 3300cm2/g |
| 早強ポルトランドセメント | 密度　3.14g/cm3  比表面積 4480cm2/g |
| 中庸熱  ポルトランドセメントB | 密度　3.21g/cm3  比表面積 3860cm2/g |
| 中庸熱  ポルトランドセメントC | 密度　3.21g/cm3  比表面積 3300cm2/g |
| 低熱ポルトランドセメント | 密度　3.22g/cm3  比表面積 3500cm2/g |
| 細骨材 | 大井川産陸砂  (コンクリート) | 絶乾密度 2.68g/cm3  吸水率 1.32%、粗粒率 2.87 |
| セメント強さ試験用標準砂  (モルタル) | 絶乾密度 2.64g/cm3  吸水率 0.42% |
| 粗骨材 | 青梅産硬質砂岩砕石2005 | 絶乾密度 2.63g/cm3  吸水率 0.74%、実積率 61.8% |



図1　各種セメントの28日圧縮強度

表3　調合およびフレッシュ試験結果(コンク)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 種類 | W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m3) | | | | フレッシュ性状 | | |
|
| W | C | S | G | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 単位容積 質量 (kg/m3) |
|
| N50 | 50 | 45.1 | 178 | 356 | 815 | 966 | 20.0 | 4.6 | 2315 |
| N60 | 60 | 46.4 | 180 | 300 | 858 | 966 | 18.5 | 4.7 | 2319 |
| N70 | 70 | 49.4 | 178 | 254 | 936 | 933 | 19.5 | 4.9 | 2277 |
| H50 | 50 | 44.8 | 180 | 360 | 804 | 966 | 20.5 | 5.2 | 2291 |
| H60 | 60 | 46.1 | 182 | 303 | 848 | 966 | 20.0 | 4.8 | 2289 |
| H70 | 70 | 49.2 | 180 | 257 | 927 | 933 | 20.0 | 4.9 | 2280 |
| MB50 | 50 | 45.2 | 178 | 356 | 818 | 966 | 17.8 | 5.0 | 2285 |
| MB60 | 60 | 46.6 | 179 | 298 | 865 | 966 | 17.8 | 5.2 | 2284 |
| MB70 | 70 | 49.3 | 180 | 257 | 931 | 933 | 19.8 | 5.1 | 2274 |
| MC50 | 50 | 45.3 | 178 | 356 | 820 | 966 | 18.5 | 5.0 | 2329 |
| MC60 | 60 | 46.6 | 179 | 298 | 866 | 966 | 18.2 | 4.8 | 2324 |
| MC70 | 70 | 50.1 | 181 | 259 | 945 | 917 | 18.2 | 4.7 | 2309 |
| L50 | 50 | 45.6 | 176 | 352 | 830 | 966 | 20.0 | 5.0 | 2341 |
| L60 | 60 | 47.0 | 176 | 293 | 879 | 966 | 19.5 | 4.5 | 2345 |
| L70 | 70 | 49.2 | 181 | 259 | 929 | 933 | 19.1 | 5.2 | 2317 |

40mm

40mm

160mm

100

mm

100

mm

200mm

中性化促進面

中性化促進面

シール面

シール面

コンクリート

モルタル

図2　供試体詳細

３．４供試体作製および促進中性化試験方法

　図2に供試体の詳細を示す。コンクリートについては100×100×200(mm)の角柱供試体を作製し、モルタルについてはセメント物理試験で使用される40×40×160(mm)の角柱供試体を作製した。中性化と圧縮強度の関係を調べるため、コンクリートではφ10×20cm、モルタルではφ5×10cmの円柱供試体も同時に作製した。コンクリートの養生は、水中養生するものは脱型後標準水中養生を材齢28日まで行った後に乾燥を行った。封かん養生のものは脱型後乾燥しないようにラップをして所定の期間まで温度20℃、湿度60%R.H.の恒温恒湿室で養生を行った後に乾燥を行った。モルタルについてもコンクリートと同様の方法で養生を行った。乾燥は上記の恒温恒湿室で行ったが、期間はコンクリートがJIS A 1153に基づき28日、モルタルについては定期的に質量を計測し質量が一定になった時点で促進中性化を開始した。モルタルの質量変化率を図3に示す。水中養生については約28日、封かん養生については約14日で質量は一定となった。



図3　乾燥期間と質量増減率の関係

コンクリート

モルタル



図4　促進材齢と中性化深さの関係

　促進中性化試験はJIS A 1153に準じて行った。

４．結果および考察

４．１ 検討1 セメントの物性把握

４．１．１ 促進材齢と中性化深さの関係

　図4に促進材齢と中性化深さの関係の例として水セメント比50%の中庸熱セメントCを使用したコンクリートとモルタルの場合を示す。促進材齢は、平方根の逆数で示している。促進材齢と中性化深さは、コンクリート、モルタル共に一部を除きほぼ直線的な関係であることが確認され、養生の違いによる傾向の差はみられなかった。他のセメントについても同じ傾向がみられた。このため今後は、促進材齢と中性化深さの関係から直線回帰式(1)を導き出し係数a(中性化速度係数)で比較、検討を行っていく。

y=ax・・・(1)

ここに y:中性化深さ(mm)

　　　 a:中性化速度係数(mm/√t)

x:促進材齢(√t)

４．１．２　フロー(単位セメント量)について



図5　フローと中性化速度係数の関係

　図5にはフローと中性化速度係数の関係を示す。 本実験では、フローによる中性化速度係数の差は小さく、フローの影響よりも水セメント比や養生方法の影響のほうが大きくなることがわかった。

４．１．３　各種セメントについて

　図6に水セメント比と中性化速度係数の関係を養生条件別に示す。各種セメントの例として左図には20℃封かん1週を、右図には60℃封かん1週を示している。本実験で使用したセメントの品質(28日強度)で比較を行うと圧縮強度と中性化には密接な関係があることから、中庸熱セメントC、低熱セメント、中庸熱セメントB、普通セメント、早強セメントの順で中性化が小さくなると予想される。左図では予想とほぼ同じ傾向がみられたが、右図や他の養生では予想と違い、養生によって違う傾向がみられ比較することが難しいため全ての養生を1つの系列にまとめて検討を行うこととした。養生を1つの系列にまとめたものを図7、8に示す。



20℃封かん1週 60℃封かん1週

図6　水セメント比と中性化速度係数の関係

コンクリート



図9　封かん期間と中性化速度係数の関係

図7にはコンクリート、図8にはモルタルの普通セメントの中性化速度係数とその他のセメントの中性化速度係数の関係を示す。コンクリートについては水セメント比ごとに共通したセメントによる差はみられず中性化について比較することができなかった。モルタルについては、水セメント比にかかわらず低熱セメント、中庸熱セメントC、普通セメント、中庸熱セメントB、早強セメントの順に中性化が小さくなる結果となった。予想していた順番とは若干の違いはあったもののほぼ同じ傾向がみられた。

４．１．４封かん期間について

モルタル



図8　Ｎと各種セメントの中性化速度係数の関係

　図9にコンクリートの封かん期間と中性化速度係数の関係を示す。例として中庸熱セメントBの封かん温度20℃、60℃をあげているが封かん期間が長くなるにつれて中性化は小さくなることが確認された。養生温度を高くしても同じ傾向がみられ他のセメントについても同じ傾向がみられた。

　図10にモルタルの封かん期間と中性化速度係数の関係を示す。例として普通セメントを示しているが傾向はコンクリートとほぼ同じで期間が長くなるにつれて中性化は小さくなることが確認され他のセメントについても同じ傾向がみられた。1部養生温度が高いものや強度発現の早いセメント(普通セメント、早強セメント)については、封かん期間1週と4週ではほぼ同じ値を示したものが存在した。

４．１．５封かん温度について

コンクリート



図7　Ｎと各種セメントの中性化速度係数の関係

モルタル

普通ポルトランドセメント



図10　封かん期間と中性化速度係数の関係

　図11にコンクリートの封かん温度と中性化速度係数の関係を示す。普通と低熱の場合について普通は、養生温度が高くなっても中性化には影響がないことが確認され、早強についても同じ傾向がみられた。強度増進の早いセメントについては養生温度による影響がないと考えられる。低熱については養生温度が高くなるにつれて中性化が小さくなることが確認された。中庸熱2種類についても同じ傾向がみられ、強度増進の遅いセメントについては、養生温度を高くすると化学反応が促進され強度が出ることで密実なコンクリートになり中性化が抑えられたと考えられるため強度増進の遅いセメントについては養生温度を高くすることが有効である。

　図12に早強と低熱の場合についてモルタルの養生温度と中性化速度係数の関係を示す。早強は、コンクリートと同様に養生温度が高くなっても中性化に影響はみられなかった。養生温度60℃についても20℃、40℃とほぼ同等の値が得られた。強度増進の早いセメントは温度の影響をほとんど受けないことがわかった。低熱の場合もコンクリートと同様に養生温度が高くなるにつれて中性化が遅くなることが確認された。養生温度60℃では、20℃、40℃より小さくなったが、水セメント比50%では養生温度による差はほとんどみられなかった。中庸熱2種類についても同じ傾向がみられ、強度発現の遅いセメントについては水セメント比が高くなると養生温度を高くすることで中性化が小さくなることがわかった。

４．１．６養生条件について



図12　封かん温度と中性化速度係数の関係(モルタル)

図15 積算温度と中性化速

度係数の関係(ﾓﾙﾀﾙ)

図13 養生期間と中性化速

度係数の関係(コンク)



図16養生条件別中性化速度係数(モル)



図14養生条件別中性化速度係数(コン)



図11　封かん温度と中性化速度係数の関係(コンク)

　図13に養生期間と中性化速度係数の関係を示す。水セメント比70%の場合、養生期間4週では低熱などの強度発現の遅いセメントは普通よりも大きい値となっており短期間ではセメントが持っている潜在能力が発揮できていないことがわかる。養生期間13週では、普通と同等の値になっていることから長い時間をかけることでセメントの潜在能力が十分に発揮できていることが確認できた。そのため養生温度を高くすることで、短期間で養生期間13週と同じ中性化の値が得られるか検討を行う。図14にコンクリートの養生条件別の中性化速度係数を示す。20℃13週と同じ値となる養生条件は、セメントの種類にかかわらず40℃4週であった。その他の養生期間1週、2週では値が大きくなり、8週では小さな値となっているため4週が妥当であると考えられる。モルタルについても同じ手法で検討を行っていくが本実験ではまだ13週の実験結果が出てないため、図15の積算温度と中性化速度係数の関係より養生期間13週(2730°Ｄ・Ｄ)の値を推定し比較検討を行った。結果を図16にモルタルの養生条件別の中性化速度係数として示す。モルタルについてもコンクリートと同様の傾向がみられ、20℃13週と同じ値となる養生条件は、セメントの種類によらず40℃4週であった。モルタルでは、60℃につても検討を行っており、40℃4週とほぼ同じかそれ以下の値を示しているものの60℃の養生槽を持っている試験所は少ないため40℃4週が実用を考えれば妥当であると判断される。



図18　圧縮強度と中性化速度係数の関係

４．２　検討２　コンクリートとモルタルの比較

４．２．１　中性化速度係数の比較



図19　質量変化量と中性化深さの関係

　図17の左にモルタルとコンクリートの中性化速度係数の関係を示す。これによるとコンクリートのほうが中性化が早いことがわかった。参考文献1)は、両者で同じ水セメント比を使用しており、参考文献2)では水セメント比と供試体寸法で同じものを使用している。本実験では、参考文献よりもモルタルに対するコンクリートの比率が大きな値となっているが同じ傾向がみられた。本実験で用いたコンクリートとモルタルでは、混和剤の有無の影響があるため空気量による補正を行うこととした。図17の右には補正したものを示し、参考文献と比較すると比率が低くなりモルタルとコンクリートは空気量の補正を行うことでほぼ同じ中性化の結果が得られることがわかった。



　　　補正前 　　　補正後

図17　モルタルとコンクリートの中性化速度係数の関係

４．２．２　圧縮強度と中性化速度係数の関係

　図18に圧縮強度と中性化速度係数の関係を示す。コンクリート、モルタル共に相関係数約0.8、圧縮強度が大きくなると中性化が小さくなる傾向が確認された。同一圧縮強度の場合中性化はモルタルよりもコンクリートのほうが大きくなった。

４．３　検討3　質量測定による中性化の推定



図20　実測値と推定値の関係

図19に質量変化量と中性化深さの関係を示す。水セメント比70%の早強と低熱の場合を示したが、両者ともに相関が良くその他の水セメント比、セメントにおいても相関が良かった。図20に推定結果と実測値の関係を示す。全体的には両者の相関が良く質量変化を中性化深さの測定結果の確認に用いることは可能であると考えられる。

５.　まとめ

（１）セメントの物性および養生条件の影響の把握

・モルタルにおいてL≒MC＞N＞MB＞Hの順で中性化は小さくなる。

・養生温度が高くなると、また、養生期間が長くなると中性化は小さくなった。

・20℃13週は40℃4週で同じ中性化深さが得られる。

（１）コンクリートとモルタルの比較

・モルタルとコンクリートは空気量の補正を加えることでおおよそ同じ中性化深さが得られる。

（３）質量測定による中性化の確認

・質量変化を中性化深さの測定結果の確認に用いることが可能である。

参考文献

1. 阿部他：コンクリートの中性化試験方法の評価に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第409号,1990,3の実験時に作製したモルタルのデータ
2. 島添他：モルタル・コンクリートの中性化速度に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.14,No.1,1992,pp.895-900