

論文 高炉スラグ微粉末の混和が高強度コンクリートの中性化に及ぼす影響

祝井 健志^{*1}・松下 博通^{*2}・近田 孝夫^{*3}・前田 悦孝^{*4}

要旨 : PC 構造物に適用されるような高強度領域のコンクリートを対象とし、高炉スラグ微粉末の混和や、養生条件が中性化の進行に及ぼす影響について検討した。その結果、高炉スラグ微粉末 6000 の混和、脱型後の湿潤養生期間は促進中性化の比較的初期に大きく影響すること、高炉スラグ微粉末を混和した高強度コンクリートの中性化深さは基準とする無混和のコンクリートに対する強度比で整理でき、適切な湿潤養生により無混和と同等以上の強度を確保することで、中性化に対する十分な抵抗性を確保できることが明らかとなった。

キーワード : 高炉スラグ微粉末, 中性化, 高強度コンクリート, 蒸気養生, 湿潤養生

1. はじめに

近年、飛来塩分や道路に散布される凍結防止剤によるプレストレストコンクリート (PC) の塩害劣化が顕在化しており、その対策の一つとして高炉スラグ微粉末の適用が図られている¹⁾。

近年では比表面積を高めた高炉スラグ微粉末 6000 を使用することで、早期強度発現性が改善され、蒸気養生を施したものは材齢 1 日でプレストレス導入強度を十分に満足でき、適切な初期養生を施すことにより長期的にも安定した強度増進を得られることが確認されている²⁾。

高炉スラグ微粉末の混和が中性化の進行に及ぼす影響については既に多くの検討がなされているが、PC 構造物に適用されるような高強度領域において蒸気養生を施した場合については、高炉スラグ微粉末の混和や養生条件が中性化の進行に及ぼす影響は明らかではない。

また、中性化はそれ自体が鉄筋腐食に影響を及ぼすと同時に、塩化物イオンの濃縮を引き起こすことで鉄筋の腐食傾向を増大させることが懸念されるため、塩害対策としての十分な性能を発揮させるためには、中性化に対しても十分

な抵抗性を確保する必要がある。

本研究は、製作工程において蒸気養生を必要とする PC 構造物を対象とし、高強度コンクリートの中性化に及ぼす高炉スラグ微粉末の混和、蒸気養生条件及び脱型後の湿潤養生の影響について検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

本研究で使用した材料を表 1 に示す。また、コンクリートの配合を表 2 に示す。早強ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートの水セメント比は、PC 工場で採用されている設計基準強度 49N/mm^2 の配合を参考にして 40% とした。高炉スラグ微粉末 6000 を混和したコンクリートについては、材齢 1 日でプレストレス導入強度を満足することが確認されている配合として、スラグ置換率を 50% とし、水結合材比を早強ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートより 5% 低く設定した配合²⁾を主な検討対象とした。また、水結合材比を早強ポルトランドセメントのみを使用した場合と同一とした

*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 新日鐵高炉セメント (株) 技術開発センターセンター長 博士 (工学) (正会員)

*4 新日鐵高炉セメント (株) 技術開発センターグループリーダー 博士 (工学) (正会員)

配合及び高炉スラグ微粉末 4000 を混和した配合についても一部検討に加えた。配合はスランブ 10±2.5cm, 空気量 2.0±1.0%を満たすように試験練りを行い決定した。

以下、本文中では表-2の記号を使用し、早強ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートを「早強単味」、高炉スラグ微粉末を混和したものを「スラグ混和」と表記した。

2.2 供試体の作製

供試体は圧縮強度試験用にφ10×20cmの円柱供試体を、促進中性化試験用に10×10×40cmの角柱供試体を使用した。打込み後、供試体は後述する養生を行った後、材齢35日まで温度20℃, 相対湿度60%の恒温恒湿室に静置した。また、角柱供試体は材齢35日から42日までの間に打設時側面以外の4面をエポキシ樹脂で被覆した。

2.3 養生の条件

蒸気養生の温度パターンを図-1に示す。また、脱型後の養生方法を表-3に示す。蒸気養生の温度は積算温度をほぼ一定とし、温度を高めて強度発現を促進した場合と温度上昇を抑えて養生の時間を長くとした場合を比較するため、最高温度を45℃, 55℃, 65℃とする3つの温度パターンを設定した。脱型時間は10~24時間とし、脱型後の湿潤養生の影響について調べるため、脱型後の水中養生期間を変化させた。

2.4 試験方法

促進中性化試験は、温度40℃, 相対湿度60%, CO₂濃度7%の環境下で行った。また、中性化に及ぼす乾湿の影響を調べるため、促進中性化6日と20℃水中浸漬1日を交互に繰り返す乾湿繰返し試験を行った。試験は材齢42日に開始した。

本試験は試験時期の異なる二つのシリーズで行った。シリーズ1では蒸気養生条件や配合条件を変化させ、シリーズ2では蒸気養生条件を一定とし、蒸気養生後の養生方法を変化させた。

2.5 測定項目及び方法

(1) 圧縮強度

JIS A 1108 に準じて、材齢42日に促進中性化試験開始前の圧縮強度試験を行った。

表-1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント 密度:3.14g/cm ³
高炉スラグ微粉末	B6 比表面積:6030cm ² /g, 密度:2.91g/cm ³ B4 比表面積:4000cm ² /g, 密度:2.91g/cm ³
化学混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
細骨材	西浦産海砂:相ノ島産海砂=2:1 密度:2.59g/cm ³
粗骨材	北九州市門司区産砕石2005 密度:2.72g/cm ³

表-2 コンクリートの配合

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	BFS	S	G	SP
H35B6	35	41	145	207	207	740	1119	2.48
H40	40	42	145	363	—	782	1134	2.90
H40B6	40	42	145	181	181	777	1127	2.17
H35B4	35	41	145	207	207	740	1119	2.48

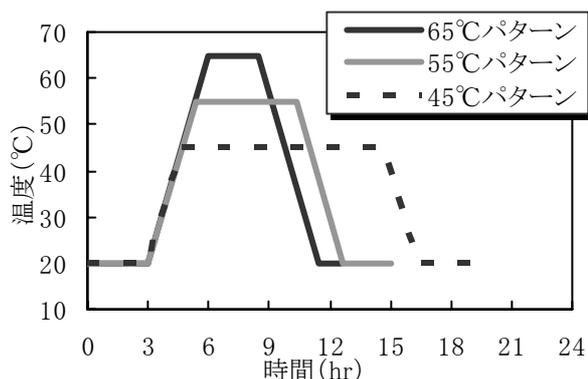


図-1 蒸気養生の温度パターン

表-3 脱型後の養生方法

記号	脱型後の養生方法
W0	気中
W3	3日まで水中→気中
W28	28日まで水中→気中

気中:温度20℃, 湿度60%RH 水中:水温20℃

(2) 中性化深さ

測定時に供試体を試験装置から取り出し、5cmの厚さに割裂した後、フェノールフタレイン1%エタノール溶液を噴霧して未着色の部分を中性化部として中性化深さの測定を行った。

(3) 細孔径分布

中性化による硬化体組織の変化を調べるため、水銀圧入式ポロシメータにより細孔径分布を測定した。測定試料は供試体表面から0~5mm部

分から約 5mm 角のモルタル片を採取した。

(4) 粉末 X 線回折

中性化の進行による水和物の変化を調べるため粉末 X 線回折を行った。細孔径分布測定用と同様に採取したモルタル片をメノウ鉢の中でアセトンに浸して軽く摩砕し、懸濁液に浮遊するペースト分をろ過して試料とした。

3. 試験結果及び考察

3.1 圧縮強度試験結果

図-2 に促進中性化試験前の供試体の圧縮強度を示す。製作時期の異なるシリーズ 1, シリーズ 2 では配合, 供試体の作製方法を同一としたが, 圧縮強度に差異が生じた。しかし, 基準とする H40-W0 の圧縮強度との強度比で考えると同一条件のコンクリートの強度比はシリーズ間で大きな差は見られなかった。

3.2 促進中性化試験結果

図-3 に配合の異なる供試体の促進中性化 13 週における中性化深さを示す。これらは蒸気養生の保持温度を 55°C とし, 打込み後 16 時間で脱型を行ったものである。脱型後, 直ちに気中に静置した場合, スラグ混和の中性化深さはいずれも H40 より大きくなった。また, 材齢 3 日まで水中養生行った場合, H35B6 の中性化深さは H40 と同等であったが, H40B60 はこれらには及ばなかった。よって本研究の範囲では, 初期養生期間が短い場合, H40 と同等の中性化抵抗性を有する配合は H35B6 のみであった。

図-4 に H35B6-W0 の蒸気養生の温度パターン及び脱型時間を変化させた場合の中性化深さの経時変化を示す。図中の記号は, 蒸気養生の最高温度と脱型時間の組み合わせを示している。図-4 からは中性化の進行に大きな差異は認められず, 本試験の蒸気養生の温度パターン及び脱型時間の範囲では, これらの条件が中性化の進行に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

図-5 に蒸気養生後の水中養生期間を変化させた H35B6, H40 の中性化深さの経時変化を示す。これらは蒸気養生の保持温度を 55°C とし,

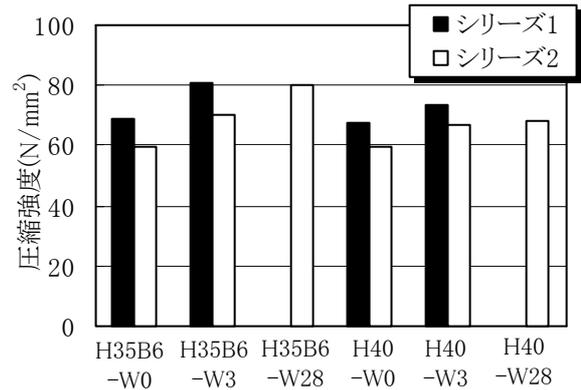


図-2 促進中性化前の圧縮強度

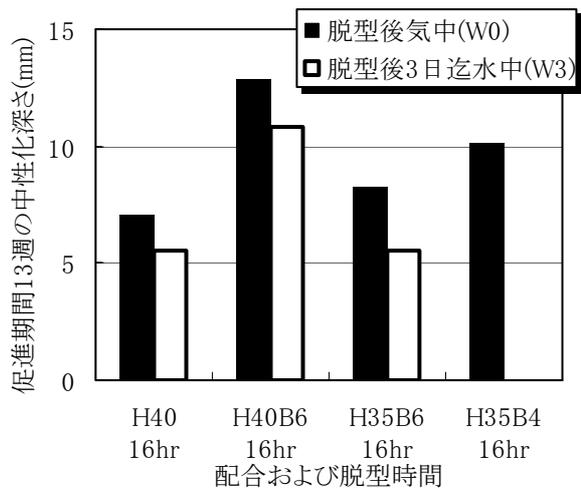


図-3 配合が異なるコンクリートの促進期間 13 週の中性化深さ

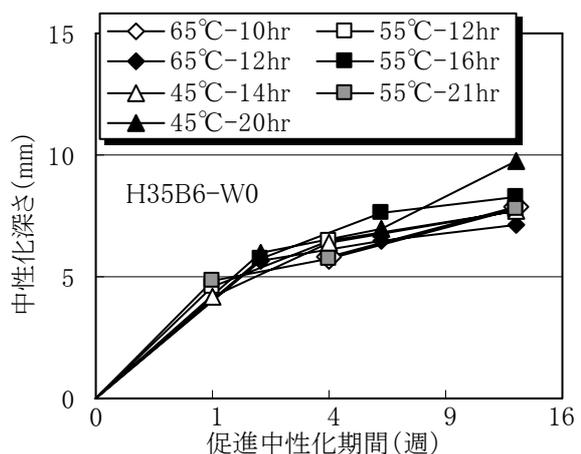


図-4 蒸気養生温度と脱型時間を変化させたコンクリートの中性化深さの経時変化

打込み後 16 時間で脱型を行ったものである。H35B6, H40 共に脱型後の水中養生期間が長いほど中性化深さは小さくなった。また, 水中養生期間に関わらず促進中性化 6 週以後は中性化深さの増加は小さく, 水中養生期間が中性化の進

行に及ぼす影響は促進試験初期において大きいことが分かる。この傾向は特に H35B6 に顕著であった。図-3 からも示されたように、本実験の範囲では蒸気養生後の水中養生期間を 3 日以上とすることで H35B6 は H40 と同等の中性化抵抗性を有することができるものと考えられる。

以上より、高炉スラグ微粉末 6000 を混和した場合、水結合材比を 35% とし、蒸気養生を施した上で、適切な湿潤養生を施すことにより、高い中性化抵抗性を確保できるものと考えられる。

3.3 促進中性化に及ぼす乾湿の影響

図-6 に、促進中性化 6 日と水中浸漬 1 日を交互に繰り返したコンクリートの中性化深さの経時変化を示す。図中の記号 C は促進中性化を継続した場合を、C→W は乾湿繰返しを行った場合を示している。また、横軸の累積促進中性化期間とは促進中性化試験機内に静置した期間の累積を表したものである。

すべての配合において促進中性化を継続したものに比べて乾湿繰返しを行ったものの方が中性化深さは小さく、乾湿繰返しを行ったものは、促進 1 週以後の中性化深さがほとんど増加していないことが分かる。これは、定期的に水分が供給されることによってコンクリート表層の含水率が高く保たれたため、二酸化炭素の拡散が抑制されたこと、表層へカルシウムイオンが逆拡散したことなどの影響であると考えられる³⁾。また、中性化の進行に及ぼす乾湿の影響はスラグ混和において顕著であった。高炉スラグ微粉末の混和が中性化に及ぼす影響は、屋外のように定期的に水分が供給される環境では、促進中性化環境で評価される場合と比べて小さくなるものと推察される。

なお、H40B6-W3 C は水セメント比がやや高いこともあり、促進 13 週の時点では、H35B6-W3 C のように中性化速度が減少する時期に達していないものと考えられる。

3.4 促進中性化による硬化体組織の変化

図-7 に促進中性化前および促進中性化期間 26 週に採取したコンクリート表面 0~5mm 部分

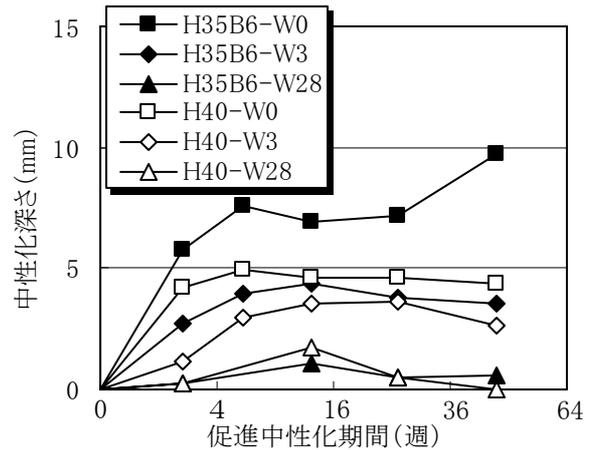


図-5 脱型後の水中養生期間を変化させたコンクリートの促進中性化試験結果

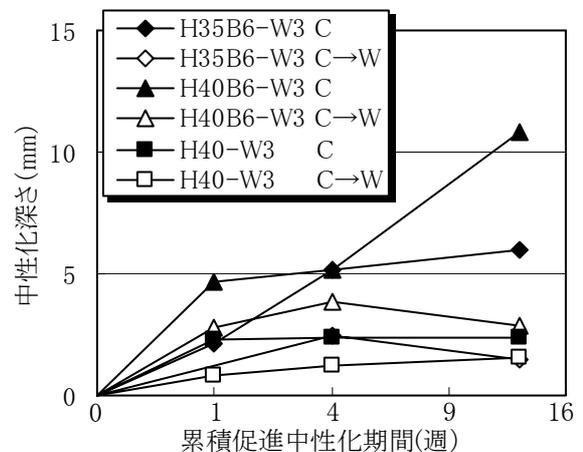


図-6 乾湿繰返しを行ったコンクリートの中性化深さの経時変化

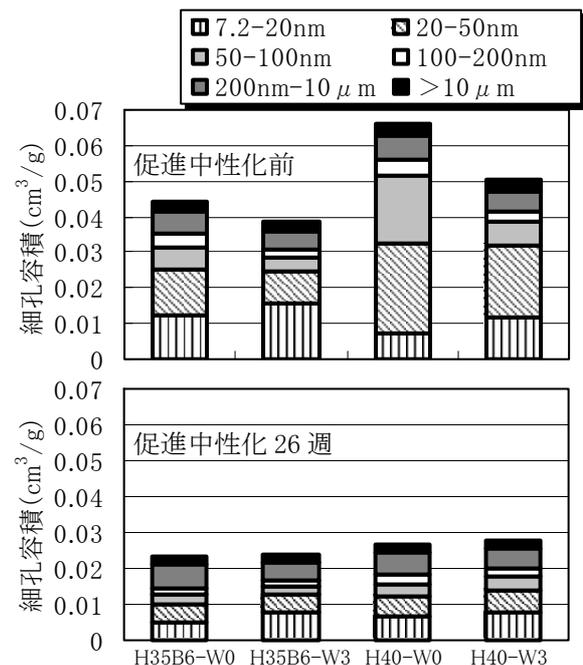


図-7 促進中性化前後の細孔径分布の変化

の細孔径分布測定結果を示す。図中では、細孔径の範囲を6つに区分し、各範囲における細孔容積を示した。

図-7より、スラグ混和、早強単味ともに促進中性化前後では細孔容積が大きく減少していることが確認される。蒸気養生後の湿潤養生の有無により促進中性化前の細孔容積には差が認められるが、促進中性化26週においては顕著な差は認められない。また、細孔容積の減少はスラグ混和に比べて早強単味に顕著であった。

図-8に促進中性化13週の硬化体のX線回折結果を示す。図より、H40については供試体内部の未中性化部分において多量の水酸化カルシウムの生成が確認され、中性化部分においては炭酸カルシウムのピークが確認される。このことから、H40の細孔容積の減少は、水酸化カルシウムから炭酸カルシウムが生成される際の体積膨張により、硬化体組織が緻密化したためと考えられる⁴⁾。一方、H35B6は水酸化カルシウムの生成量が少なく、生成する炭酸カルシウムの種類はカルサイトに比べバテライトの割合が多いことが分かる。バテライトはCaO/SiO₂比の小さいC-S-Hが炭酸化することによって生成されやすく、CaO/SiO₂比の小さいC-S-Hは炭酸化の際に多量の水を放出し、粗大な空隙が増加するとの報告もなされている⁵⁾。しかし、本試験では炭酸化による粗大な空隙の増大は認められなかった。

3.5 蒸気養生を施した高強度コンクリートの 中性化と強度の関係

中性化の進行は圧縮強度と関係が深く、圧縮強度を指標に用いた中性化の予測式も提案されている⁶⁾。本試験では図-2に示したように、シリーズ1とシリーズ2では同一条件であるコンクリートの圧縮強度に差異が生じた。しかし、前述したように基準とするH40-W0との強度比で考えると同一条件のコンクリートの強度比はシリーズ間で大きな差は見られなかったため、それぞれのシリーズごとにH40-W0の圧縮強度に対する強度比を求めた。図-9に蒸気養生を

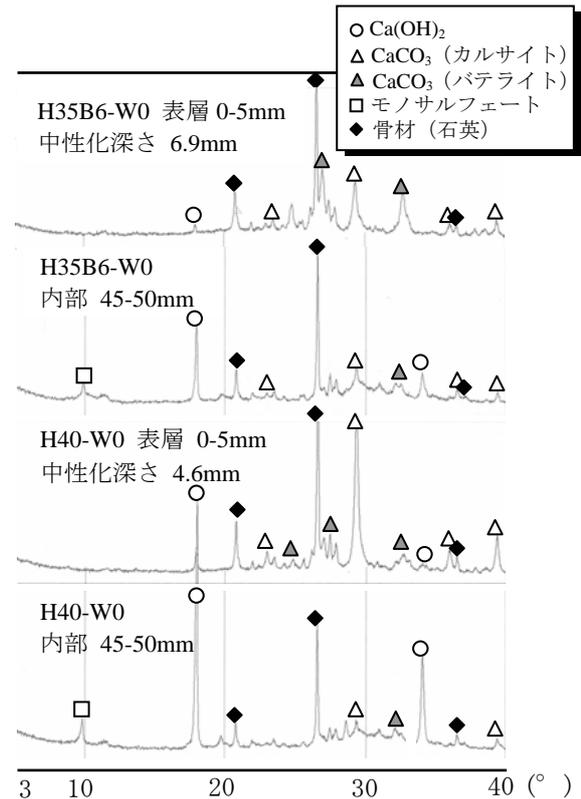


図-8 促進中性化13週の硬化体の
粉末X線回折結果

施したコンクリートの促進中性化前のH40-W0の圧縮強度に対する強度比と促進中性化13週の中性化深さの関係を示す。スラグ混和、早強単味ともに強度比と中性化深さには直線的な関係が見られる。また、強度比が同一であっても、スラグ混和は早強単味と比べて中性化の進行は早いことが分かる。本試験の範囲では、スラグ混和、早強単味それぞれの中性化深さはH40-W0に対する強度比により整理することができ、本検討ではこの強度比を中性化深さの指標に用いた。

土木学会コンクリート標準示方書[施工編]では、ポルトランドセメントを使用し、水セメント比を50%以下とした場合には中性化の照査を省略してよいとされており、優れた中性化抵抗性を有するコンクリートの基準であると考えられることができる。そこで、早強単味の水セメント比50%のコンクリートを材齢28日まで水中養生したもの(H50-W28)の中性化深さを基準として、蒸気養生を施した高強度コンクリートの中性化深さと比較した。

早強単味の中性化深さは脱型後の水中養生の有無によらず H50-W28 の中性化深さより十分に小さく、スラグ混和の中性化深さが H50-W28 より小さくなる強度比は 1.0 程度であった。また、スラグ混和の中性化深さの変動を考慮して、上限 95% 信頼限界線について見ると、H40-W0 に対する強度比は約 1 割程度大きくなる。本研究の範囲では、H40-W0 に対する強度比が 1.1 以上となったのは H35B6 の配合で脱型後の水中養生期間を 3 日以上としたものであった。

以上より、蒸気養生を施したスラグ混和は脱型後に適切な初期の湿潤養生期間を設けることにより、無混和と同等以上の強度を確保することで、中性化に対する十分な抵抗性を確保できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグ微粉末 6000 を混和した高強度コンクリートの中性化深さは早強ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートよりも大きくなるが、促進中性化 6 週以後の中性化深さの増加は小さくなった。また、脱型後、適切な湿潤養生を施すことにより両者は同等の中性化深さとなった。
- (2) 本試験の蒸気養生条件の範囲では蒸気養生の温度パターンや脱型時間が中性化の進行に及ぼす影響は小さい。
- (3) 周期的に水分が供給される環境では、促進中性化環境と比べて中性化に及ぼすスラグ混和の影響は小さくなった。
- (4) 高炉スラグ微粉末 6000 を混和したコンクリートは早強ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートと比べて炭酸化による表層部の細孔容積の減少は小さかったが、粗大な空隙の増大は生じなかった。
- (5) 高炉スラグ微粉末 6000 を混和したコンクリートの中性化深さは基準とするコンクリートに対する強度比で整理でき、強度比を同等以上とすることで、十分な中性化抵抗性を有

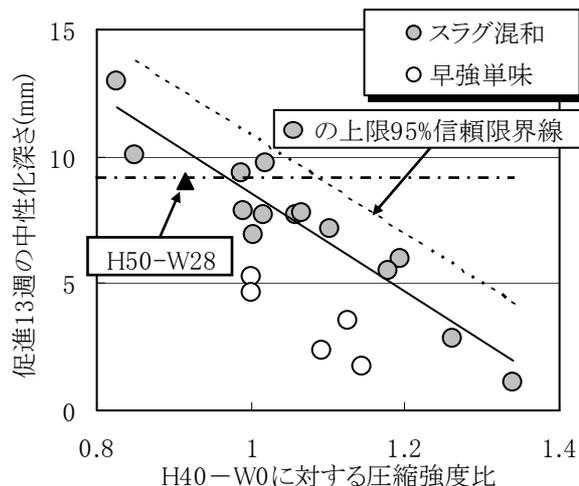


図-9 促進中性化前の圧縮強度と促進中性化 13 週の中性化深さの関係

することができるものと考えられる。

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B) (研究代表者；九州大学 松下博通 No.14350235)の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発，1998.3
- 2) 尾上幸造ほか：高炉スラグ微粉末を混和した高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす養生条件の影響，第 12 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.173-176，2003.10
- 3) 大賀宏行ほか：乾湿繰返しを受けるコンクリートの中性化に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.43，pp.418-423，1995.12
- 4) 佐伯竜彦ほか：中性化によるコンクリートの微細組織の変化，土木学会論文集，Vol.13，No.420，pp99-108，1990.8
- 5) 坂井悦郎ほか：高炉スラグセメントの炭酸化反応，第 21 回セメントコンクリート研究討論会論文報告集，No.29，pp29-34，1994.
- 6) 大賀宏行ほか：促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価，土木学会論文集，Vol.8，No.390，pp.225-233，1988.2