

フライアッシュを混和した高強度コンクリートの強度・耐久性に関する研究

九州大学大学院 正会員 修士(工学) ○佐川 康貴  
 九州大学大学院 正会員 工学博士 松下 博通  
 関西大学 正会員 博士(工学) 鶴田 浩章  
 (株)安部工業所 正会員 中原 晋

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) は水セメント比が小さく、耐久性に富むとされているが、海岸構造物や凍結防止剤が散布される構造物のように塩化物イオンの供給を多く受ける場合には、塩害に対する抵抗性が問題となる。塩害対策の一つとして、高炉セメントやフライアッシュセメントといった混合セメントや高炉スラグ微粉末やフライアッシュといった混和材を用いる方法が考えられるが、コンクリートの初期強度の発現が遅れるため、蒸気養生を伴うプレテンション方式 PC にはこれらの材料はあまり適用されていない。

しかし近年、産業副産物の有効利用に対する意識の高まりから、高炉スラグ微粉末については、粉末度の高い高炉スラグ微粉末 6000 を用い、さらに水セメント比を 5%程度小さくすることで初期強度発現性および長期耐久性を改善した PC 部材が開発、実用化されている。その一方、フライアッシュを混和した高強度コンクリートを、蒸気養生を伴うプレテンション方式の PC へ適用することについてはほとんど検討が行われていない。そこで本研究では、フライアッシュを混和した高強度コンクリートの強度、変形性状、中性化および塩害に対する抵抗性について検討を行った。

2. モルタル試験による置換率・水結合材比の決定

本研究ではプレテンション方式の PC 工場製品への適用を目的としており、初期の強度発現が重要である。したがって、まず、フライアッシュを混和した場合に材齢 1 日の強度が早強ポルトランドセメントのみを使用した基準配合と同等以上となる配合を、モルタルの強度試験により実験的に求めた。

2.1 使用材料および配合

実験には表-1に示す通り、早強ポルトランドセメント、フライアッシュ II 種、海砂を使用した。フライアッシュはセメントに置換する形で用いた。置換率 0%で水セメント比 40%の配合を基準配合とし、水結合材比を 40, 34, 30, 27%, 置換率 (質量比) を 10, 20, 30%と変化させた。なお、単位水量を一定とし、モルタルフローが 210±5mm となるよう、混和剤の量を調節した。

2.2 実験方法

モルタル練混ぜおよび打込みは、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に従った。供試体の寸法は、4×4×16cm とした。打込み終了後、3 時間は湿空養生 (20℃) とし、その後、蒸気養生を行った。蒸気養生

表-1 使用材料

材料	種類・物性値
セメント	早強ポルトランドセメント 密度 3.14 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4570cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	フライアッシュ II 種 密度 2.32 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4510cm <sup>2</sup> /g
細骨材	海砂 (長崎県吉岐沖産) 表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.40%, 粗粒率 2.87
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

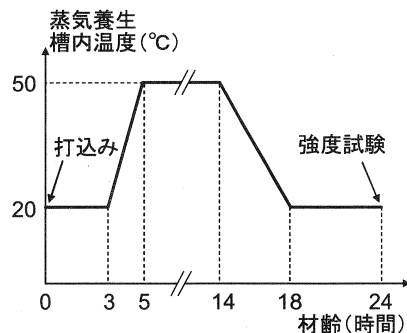


図-1 蒸気養生温度パターン

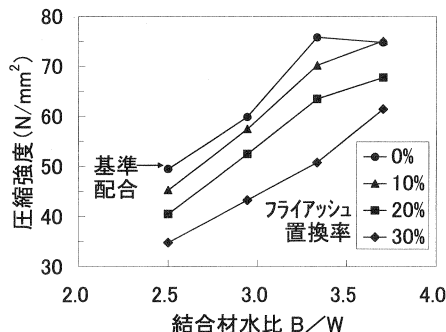


図-2 モルタル圧縮強度試験結果

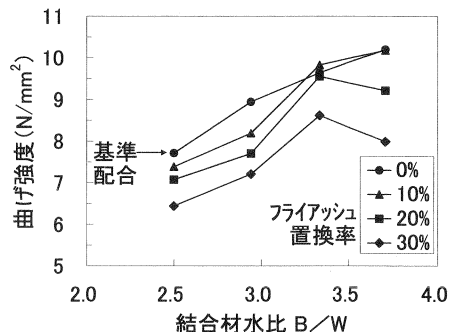


図-3 モルタル曲げ強度試験結果

の温度パターンを図-1に示す。材齢24時間で蒸気養生槽から供試体を取り出し、脱型後直ちにJIS R 5201の方法で曲げ強度試験(スパン12cm, 一点載荷), 圧縮強度試験(加圧面積4cm×4cm=16cm²)を行った。

### 2.3 実験結果および考察

蒸気養生後(材齢24時間)におけるモルタルの圧縮強度および曲げ強度を、フライアッシュ置換率ごとに図-2, 図-3に示す。横軸は、普通コンクリートのセメント水比に相当する、結合材水比 B/W (水結合材比 W/B の逆数)を示す。これらの図より、結合材水比と強度はほぼ直線関係で表されること、置換率が増すごとに強度が低下していることが分かる。早強ポルトランドセメントのみを用い、W/Bが40%(B/W=2.50)の基準配合と同等の圧縮強度を得るためには、置換率20%の場合ではW/Bを35%(B/W=2.86)程度に、置換率30%の場合ではW/Bを30%(B/W=3.33)程度に下げることが明らかとなった。

## 3. フライアッシュを混和した高強度コンクリートの強度・静弾性係数

上記2.のモルタル試験において得られた結果より、所要の強度を満足し、かつフレッシュ時の粘性が著しく増大しない範囲の配合として、W/B=35%・置換率20%(記号35-20)およびW/B=30%・置換率30%(記号30-30)の配合を選定した。これらの配合でコンクリート供試体を作製し、圧縮強度試験を行い、W/B=40%・置換率0%(記号40-0)との比較を行った。

### 3.1 使用材料および配合

使用した材料のうち、粗骨材以外は表-1に示したものと同一である。粗骨材には砕石2005(表乾密度2.86g/cm³, 吸水率1.19%)を使用した。

コンクリートの配合は、単位水量一定の条件で目標スランプ10±2cm, 目標空気量2±1%が得られるよう、高性能AE減水剤の添加率を調整し、試験練りにより求めた。コンクリートの示方配合を表-2に示す。

### 3.2 実験方法

コンクリートの蒸気養生方法は、モルタル試験と同様とした。材齢24時間(1日)で脱型し、その後は温度20°C, 湿度60%の恒温恒湿室内に保管した。材齢1, 3, 7, 14, 28, 91日に圧縮強度試験(φ10×20cm), 曲げ強度試験(10×10×40cm)および引張強度試験(φ10×13cmの割裂試験)を行った。また、圧縮試験時にコンプレッションメータを用いて縦ひずみを測定し、静弾性係数を求めた。

表-2 コンクリートの示方配合

配合名	水結合材比 W/B (%)	フライアッシュ置換率 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m³)					
				水 W	結合材 B		細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
					セメント C	フライアッシュ F			
40-0	40	0	43	155	388	0	778	1144	B×0.60%
35-20	35	20	43	155	354	89	748	1099	B×0.60%
30-30	30	30	43	155	362	155	713	1048	B×0.65%

### 3.3 実験結果および考察

#### (1) 圧縮強度

図-4に各配合の圧縮強度の経時変化を示す。35-20について見ると、材齢7日までは40-0よりも小さいものの、それ以降では40-0と同等以上の強度となっている。また、30-30は材齢1日の時点から40-0と同等の強度が得られており材齢14日以降では40-0や35-20に比べて10%程度大きい値を示している。

PC製品工場では材齢1日でプレストレスを導入することが多いが、JISA 5373 付属書2 推奨仕様2-1「道路橋用橋げた」では、プレストレスを与えるときの圧縮強度を35 N/mm<sup>2</sup>以上としている。また、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕<sup>2)</sup>や道路橋示方書・同解説<sup>3)</sup>では、その値を30N/mm<sup>2</sup>以上と規定している。本実験で用いたコンクリートはいずれもこれらの値を満足しており、フライアッシュを混和した高強度コンクリートはPCに要求される圧縮強度を満足できることが分かった。さらに、工場出荷時(材齢14日)の圧縮強度を品質管理上、50N/mm<sup>2</sup>以上と規定することが多いが、本研究で用いたコンクリートは、この条件を満足することが可能であった。

本研究における実験結果と、高炉スラグ微粉末をPCに用いた既往の研究<sup>4)</sup>における結果を比較すると、図-5に示す通りとなる。骨材の種類や蒸気養生条件が異なるため、単純には比較できないが、本研究におけるフライアッシュを混和した高強度コンクリートの圧縮強度は、高炉スラグ微粉末を置換率50%で用いた場合とほぼ同等の強度が得られることが明らかとなった。

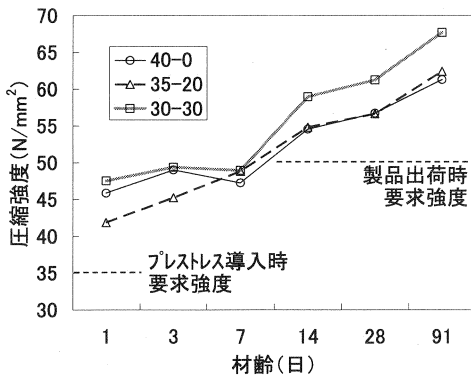


図-4 コンクリート圧縮強度試験結果

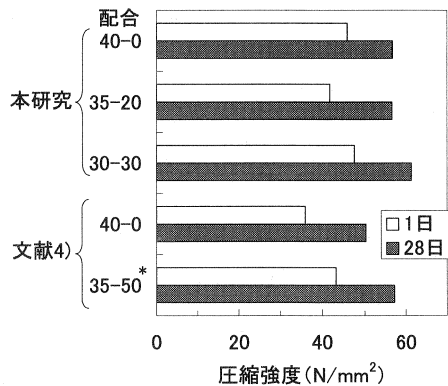


図-5 コンクリート圧縮強度試験結果

\* W/B=35%, スラグ置換率50%

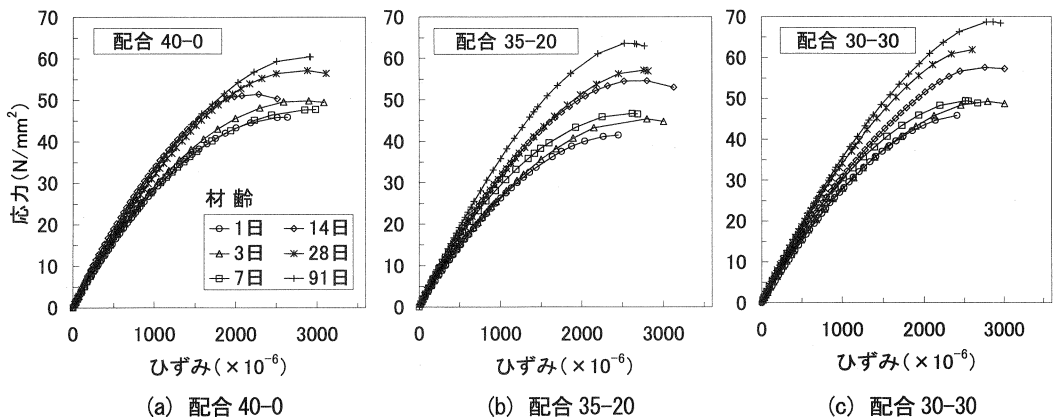


図-6 コンクリートの応力-ひずみ関係

(2) 応力-ひずみ関係・静弾性係数

各配合の応力-ひずみ関係の例を図-6に示す。図より、応力-ひずみ曲線の形状に大きな差異は認められず、フライアッシュの混和は、最大応力時のひずみの値に大きな影響を及ぼさないことが分かる。

図-7に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。なお図中には、土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]に示される設計値を実線で示している。静弾性係数はフライアッシュ混和による差はほとんど無く、また、その値は土木学会の設計値により予測できることが分かった。

(3) 引張強度・曲げ強度

圧縮強度と引張強度および曲げ強度の関係を、図-8に示す。なお図中には土木学会コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>の設計式による予測値を実線で示している。本研究の範囲内では、30-30の曲げ強度が若干低い値を示したものの、フライアッシュ混和による大きな差は認められなかった。

4. フライアッシュを混和した高強度コンクリートの乾燥収縮・クリープ性状

PCの乾燥収縮やクリープによる変形状は、有効プレストレスの大きさに影響を及ぼす。したがってフライアッシュの混和が乾燥収縮やクリープに及ぼす影響について明らかにする必要がある。そこで、上記3.で強度試験を行ったコンクリートと同じ配合のコンクリートを用いて、乾燥収縮およびクリープについて検討した。

4.1 実験方法

使用材料、コンクリートの配合および蒸気養生条件は3.と同じである。供試体寸法は乾燥収縮試験、クリープ試験ともに10×10×40cmの角柱供試体とした。

乾燥収縮試験では、材齢24時間で脱型し、ただちに供試体を恒温恒湿室(温度20℃、湿度60%)に移し、基長を測定し、長さ変化の測定を開始した。長さ変化の測定は、コンパレータ法により行った。また、乾燥収縮ひずみの測定と同時に、供試体の質量を測定した。

クリープ試験では、材齢24時間で脱型し、ただちに供試体を恒温恒湿室(温度20℃、湿度60%)に設置したクリープ試験機にセットし、荷重を加えた。クリープ試験機は、高さ約120cmの金属製の試験フレーム内に供試体を縦に2本設置できるもので、一定の持続荷重を作用させることができるようアキュムレータを接続したものである。載荷応力は、35-20の配合の1日強度の約30%である13.3N/mm<sup>2</sup>とし、すべての配合で同じとした。長さ変化の測定はコンタクトゲージ法(標点距離100mm)とコンクリート表面に貼付したひずみゲージで測定する方法とを併用した。

4.2 実験結果および考察

(1) 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮ひずみの経時変化を図-9に示す。本研究の範囲内では、フライアッシュを混和することで乾燥収縮ひず

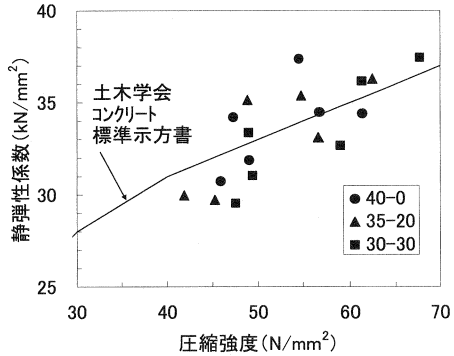


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

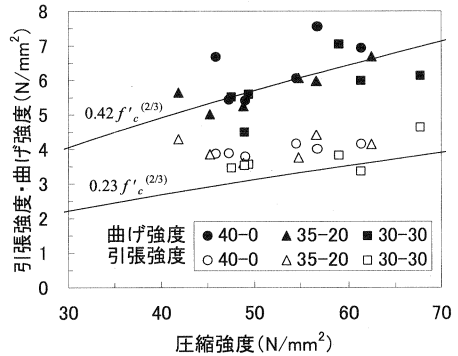


図-8 圧縮強度と引張・曲げ強度の関係

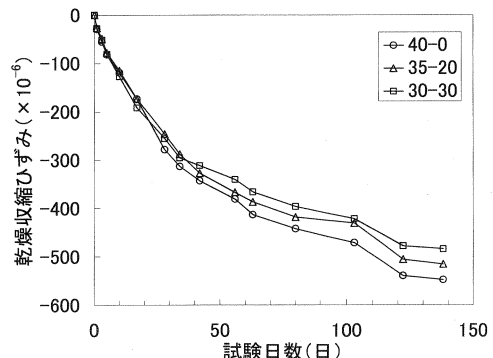


図-9 乾燥収縮ひずみの経時変化

みは小さくなったが、その差は大きなものではなかった。

(2) クリープ試験結果

クリープひずみの経時変化を図-10に示す。クリープひずみは、クリープ試験供試体から得た全ひずみから乾燥収縮試験供試体の乾燥収縮ひずみを差し引くことによって求めた。図より、クリープひずみはフライアッシュを混入した場合の方が大きいものの、その差は大きいものではない。また、クリープ係数の経時変化を図-11に示す。クリープひずみと同様にフライアッシュを混和した方が大きくなっているが、土木学会コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>ではプレストレスを導入するときの材齢が4~7日で屋内環境の場合、クリープ係数の設計値は2.4となっており、実験結果ではこの値を下回っている。以上より、フライアッシュ混和によるクリープ性状への悪影響はないと考えられる。

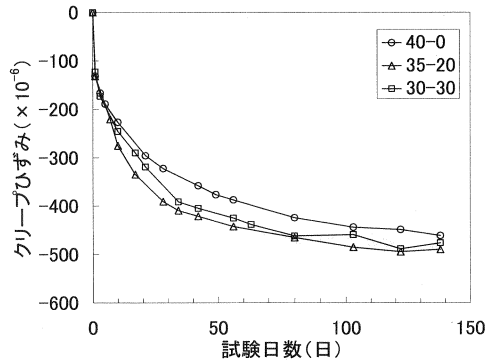


図-10 クリープひずみの経時変化

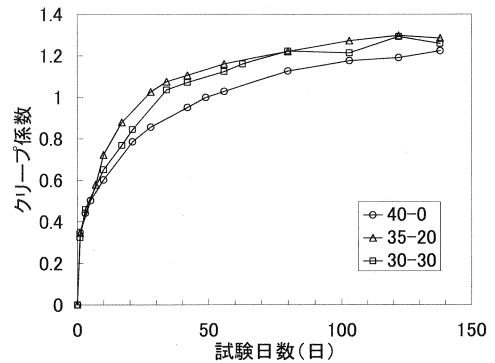


図-11 クリープ係数の経時変化

5. フライアッシュを混和した高強度コンクリートの  
中性化・塩分浸透性状

フライアッシュを混和した高強度コンクリートを実際の構造部材あるいは構造物に適用するためには、耐久性について明らかにする必要がある。そこで本研究では、中性化速度および塩分浸透速度について検討を行うため、フライアッシュを混和した高強度コンクリートの促進中性化試験および塩水噴霧乾燥試験を行った。

5.1 実験方法

使用材料、コンクリートの配合および蒸気養生条件は3.と同じである。試験機のスペースの都合上、本研究では、40-0および35-20の2配合のみについて試験を行った。供試体は10×10×40cmの角柱供試体とし、試験開始材齢は35日とした。なお、炭酸ガスあるいは塩化物イオンの侵入方向を1方向に限定するため、試験開始直前の約1週間の期間で、打設時の側面以外の4面をエポキシ樹脂でコーティングした。なお、供試体は1つの配合につき、2体ずつ用意した。

促進中性化試験の環境条件は、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に従い、温度20℃、湿度60%、CO<sub>2</sub>濃度5%とした。試験開始から1, 2, 3, 6ヶ月の時点で供試体を試験装置から取り出し、端部から厚さ5cmの厚さで割裂した。割裂面に1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧し、未着色領域を中性化部とし、その深さを1cm間隔でノギスで測定し、それらの平均値を中性化深さとした。

塩水噴霧乾燥試験は、12時間塩水噴霧、12時間乾燥の乾湿繰返し試験とした。塩水は濃度3.5% (NaCl換算)で、温度は30℃とした。また、乾燥時の温度も30℃とした。促進中性化試験と同様に、試験開始から1, 2, 3, 6ヶ月で供試体を試験装置から取り出し、端部から厚さ5cmの厚さで割裂し、0.1mol/l硝酸銀水溶液を噴霧した。白色に変色した部分を塩分浸透部とし、その深さを1cm間隔でノギスで測定し、それらの平均値を塩分浸透深さとした。

(1) 促進中性化試験結果

中性化深さの測定結果を図-12に示す。なお、横軸は試験期間の平方根を示している。一般的に、フライアッシュを混和したコンクリートは単位セメント量が減少すること、またポズラン反応によりCa(OH)<sub>2</sub>が消費されることにより、普通コンクリートよりも中性化速度が大きくなるとされている。本実験においてもフ

ライアッシュを混和した 35-20の方が中性化深さが大きくなるという結果にはなったものの、大きな影響はないと考えられる。

また、試験期間 3ヶ月まではいわゆるルート t 則に従っているものの、それ以降は中性化があまり進行しない結果となった。

(2) 塩水噴霧乾燥試験結果

塩分浸透深さの測定結果を図-13に示す。試験期間 1ヶ月まではほぼ同等となったが、それ以降はフライアッシュ混和の有無により差が認められた。試験期間 6ヶ月では、フライアッシュ混和により塩分浸透深さが3分の2程度にまで抑制されていることが分かる。

よって、従来の早強セメントのみを用いたコンクリートと強度が同等の場合、フライアッシュを用いた PC 部材には、優れた塩分浸透抵抗性を付与できると考えられる。

6. まとめ

本研究では、フライアッシュをプレテンション方式の PC 部材に適用するため、それを混和し、蒸気養生を行った高強度コンクリートの基本的性質について実験的に明らかにした。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

(1) 水セメント比 40%の早強ポルトランドセメントのみ

を用いたコンクリートと同等の初期強度を得るためには、フライアッシュ置換率を 20%とするには水結合材比を 35%程度に下げることが必要。また、フライアッシュ置換率を 30%とするには、水結合材比を 30%に下げることが必要。さらに、フライアッシュを混和したこれらのコンクリートの長期強度は早強セメントのみの場合と同等以上となる。

(2) フライアッシュを混和した高強度コンクリートの静弾性係数、引張強度、曲げ強度には、フライアッシュの混和が及ぼす影響は小さく、また、いずれも土木学会の設計式で予測可能である。

(3) フライアッシュを混和した高強度コンクリートの乾燥収縮、クリープ性状は、早強セメントのみの場合と同等である。

(4) フライアッシュを混和した高強度コンクリートの中性化抵抗性は早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートに比べて若干低下するものの、塩分浸透抵抗性は大幅に向上する。

以上の結果より、フライアッシュを適用した PC 部材は、副産物の有効利用および塩分浸透抵抗性の向上の2つのメリットを有することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 石田裕一, 江崎守, 坂本賢次, 松下博通: 高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 橋の設計・施工—熊本高森線 俵山4号橋—, プレストレストコンクリート, pp.45-51, Vol.42, No.3, 2000.5
- 2) 土木学会: 2002年制定コンクリート標準示方書 [施工編], p.192, 2002.3
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (I 共通編・III コンクリート橋編), p.348, 2002.3
- 4) 鶴田浩章, 松下博通, 吉富泰一, 前田悦孝: PC 桁に適用した高炉スラグ微粉末混和コンクリートの収縮・クリープ性状, コンクリート年次論文集, Vol.22, No.3, pp.793-798, 2000.6
- 5) 土木学会: 2002年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], p.28, 2002.3
- 6) 土木学会: 平成8年制定コンクリート標準示方書 [設計編], p.19, 1996.3
- 7) 土木学会: 2002年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], p.21, 2002.3
- 8) 土木学会: 2002年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], p.34, 2002.3

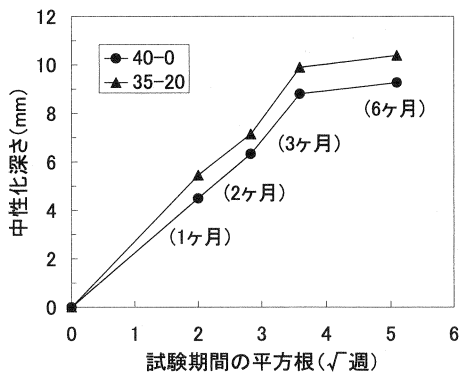


図-12 中性化深さ

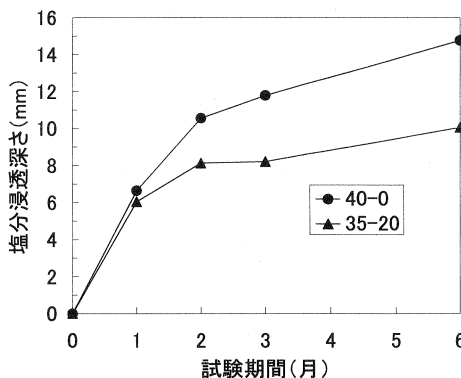


図-13 塩分浸透深さ