

論文 試作した高炉セメントを用いたコンクリートの性質

横室 隆^{*1}・依田 彰彦^{*2}・神崎 隆男^{*3}・飯野 雅行^{*4}

要旨：市販されている高炉セメント B 種よりも比表面積を粗くし，スラグの分量および SO₃ 量を変化させ，試作した高炉セメントを用い実機で練混ぜたコンクリートについて，市販の普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントと比較検討した。その結果，試作した高炉セメントは高炉スラグの分量が多いほど，凝結時間は長くなり，温度上昇は普通ポルトランドセメントに比して，最高温度で 6 程度低減できる。また，20 水中養生した初期の圧縮強度は若干低い値を示すが，長期強度は高くなる。また，コアによる強度の増進は小さくなる。さらに，乾燥収縮率，塩分浸透深さは小さくなることなどを明らかにした。

キーワード：高炉セメント，温度上昇，圧縮強度，乾燥収縮率，中性化深さ，塩分浸透深さ

1. はじめに

近年，省資源・省エネルギーおよび地球環境保全などの観点から，多くの土木・建築構造物に高炉セメントが用いられている。高炉セメントを使用する目的は，コンクリートの温度ひび割れの低減，アルカリ骨材反応の抑制および化学的抵抗性に対して効果があることなどが挙げられる。しかし，高炉セメントをマスコンクリートに用いた場合，打込み条件によっては温度ひび割れの低減効果が十分に発揮されない場合がある。一般に，高炉セメントの比表面積は細かいほど初期材齢強度は増進するが，収縮の観点からみると粗いものほど低減される¹⁾。また，SO₃ 量が過大であると強度低下などの悪影響を生じることがある。しかし，SO₃ 量を適切な範囲で大きくすることにより，収縮および水和熱の低減が期待される²⁾。

本研究は，これらのことから高炉セメントの JIS 規定の範囲内で，比表面積が約 3,000cm²/g 程度，高炉スラグの分量および SO₃ 量を調整し，試作した高炉セメントを用い，実機で練混ぜたコンクリートについて，市販の普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種と比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

試作した高炉セメントは表 - 1 に示す，市販の普通ポルトランドセメント (N) に，表 - 2 に示す，せつこうが含まれていない高炉スラグ微粉末 (BF) と天然無水せつこう (密度 2.90g/cm³，比表面積 4,800cm²/g) を調整し SO₃ 量が 4% となるように混合した，BB40 (密度 3.04g/cm³，比表面積 3,220cm²/g，スラグ分量 40%)，および BB60

表 - 1 市販セメントの物性および化学成分 (%)

| セメント種類 | 記号 | 密度 (g/cm ³) | 比表面積 (cm ² /g) | 高炉スラグ分量 (%) | ig.loss | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O |
|--------------|----|-------------------------|---------------------------|-------------|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|-------------------|------------------|
| 普通ポルトランドセメント | N | 3.16 | 3,320 | 0 | 1.29 | 21.00 | 5.41 | 3.06 | 63.8 | 2.27 | 2.11 | 0.35 | 0.31 |
| 高炉セメント | BB | 3.04 | 3,920 | 40 | 1.02 | 24.68 | 8.62 | 2.36 | 56.8 | 3.52 | 1.67 | 0.33 | 0.31 |

*1 足利工業大学工学部建築学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*2 足利工業大学工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

*3 (株) デイ・シイセメント事業本部 (正会員)

*4 栃木県生コンクリート工業組合

表 - 2 高炉スラグ微粉末の物性および化学成分 (%)

| 混和材 | 記号 | 密度 (g/cm ³) | 比表面積 (cm ² /g) | ig.loss | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | S | Na ₂ O | K ₂ O |
|--------------|----|----------------------------|------------------------------|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|-------------------|------------------|
| 高炉スラグ 微粉末 | BF | 2.94 | 3030 | 0.02 | 33.43 | 15.20 | 0.93 | 41.41 | 6.15 | 0.85 | 0.24 | 0.10 |

表 - 3 実機により練混ぜたコンクリートの調合と得られた結果

| セメント 種類 | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | 荷卸し時 | | | |
|------------|------------|------------|--------------------------|------|-----|------|--------------|------------|-----------------------|-------------|
| | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | スランプ (cm) | 空気量 (%) | コンクリートの練り 上り温度 () | ワーカ ビリティ |
| N | 53.9 | 44.8 | 168 | 312 | 803 | 1003 | 10.0 | 5.0 | 10.0 | 良 |
| BB | 53.0 | 45.0 | 168 | 317 | 802 | 992 | 11.5 | 3.5 | 9.0 | 良 |
| BB40 | 50.0 | 44.5 | 166 | 332 | 790 | 996 | 14.5 | 5.2 | 11.0 | 良 |
| BB60 | 48.0 | 44.0 | 165 | 344 | 774 | 996 | 10.0 | 4.4 | 11.0 | 良 |

[注]使用した化学混和剤量はセメント×1.0%添加した。

(密度 2.98g/cm³, 比表面積 3,130cm²/g, スラグ分量 60%) の 2 種類を試作した。

比較用セメントは, 表 - 1 に示す市販の普通ポルトランドセメント (N) および高炉セメント B 種 (BB) を用いた。細骨材は, 葛生産砕砂 (70%) と陸砂 (30%) の混合砂 (絶乾密度 2.56g/cm³, 粗粒率 2.73), 粗骨材は葛生産砕石 2005 (絶乾密度 2.63g/cm³, 最大寸法 20mm) を用いた。水は地下水, 化学混和剤は主成分がリグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸の複合体の AE 減水剤を用いた。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの目標強度は, 材齢 91 日で圧縮強度 27N/mm² を超えるものとし, 試し練りによって調合を定めた。そのコンクリートの水セメント比 (W/C), N は 54%, BB は 53%, BB40 は 50%, BB60 は 48% とした。また, スランプは 12±2.5cm, 空気量は 4.5±1.0% を目標とした。なお, これら実際に得られたコンクリートの調合を表 - 3 に示す。また, コンクリートの打込み時期は冬季に実施した。

2.3 生コン工場の練混ぜから荷卸しまで

生コン工場の練混ぜは 2 軸強制ミキサを用い, 1.5m³ 分に相当する化学混和剤を含む水, 細骨材および粗骨材の順に投入し, その後, セメントを入れ合計 2 分間練り混ぜた。このコンクリー

トをアジテータトラックで, 20 分かけて現場に輸送し, 荷卸し時におけるスランプ, 空気量およびコンクリートの練り上り温度を測定した。

3. 実験項目と方法

3.1 フレッシュコンクリートの性状

(1) スランプ

JIS A 1101 によった。

(2) 空気量

JIS A 1125 によった。

(3) ワーカビリティ

スランプ試験時にスランプしたコンクリートの形状や崩れ方などから目視によって判断した。

(4) プリーディング量

JIS A 1123 によった。

(5) 凝結

ASTM C 403 によった。

(6) 温度上昇

コンクリートの温度上昇は, 鋼製型枠 (100×100×100cm) を用い, 厚さ 10cm の発泡スチロールで内側全面を断熱し, その中心に銅 - コンスタントの熱電対を埋め込み, 10 日間の内部温度を測定した。

3.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

JIS A 1108 によった。なお, 20 水中養生は材

齢 7 日, 28 日, 91 日および 365 日で試験した。また, 現場水中養生および現場封かん養生は, 20 水中養生と同様, 翌日にキャッピングを施し, 翌々日に脱型し, 材齢 7 日, 28 日および 91 日で試験した。

(2) コアによる圧縮強度

上記 3.1 (6) の供試体を用い, JIS A 1107 によりコアを抜き取り強度試験した。なお, 材齢 28 日, 91 日および 365 日で試験した。

(3) 曲げ・引張および鉄筋との付着強度

曲げ強度は, JIS A 1106 によった。また, 引張強度は, JIS A 1113 によった。鉄筋との付着強度は 10 × 20cm の型枠を用い, その中心に D16 の鉄筋を配筋し, ASTM C 234 に準拠し試験した。なお, 各強度試験とも現場封かん養生とし, 材齢 91 日で試験した。

(4) 乾燥収縮率

JIS A 1129-1 により, 乾燥期間 52 週までの長さを測定した。なお, 基長は材齢 7 日とし, その乾燥収縮率を求めた。

(5) 中性化深さおよび鉄筋の発錆

図 - 1 に示す通りの供試体を用い, かぶり厚さ (2, 3, 4cm) の磨き鉄筋 (10) を配筋した。なお, 自然暴露した材齢 1 年の中性化深さと鉄筋の発錆について試験した。中性化深さの測定は, 長手方向に 10cm 厚に切断・清掃し, その断面にフェノールフタレインアルコール溶液 (1%) を噴霧し, 両側面計 40 ケ所をノギスを用いて測定し, 平均中性化深さを求めた。また, 鉄筋の発錆についてはこの供試体からコンクリートを研り, 鉄筋を取り出し発錆を肉眼で確認した。

(6) 塩分浸透深さおよび鉄筋の発錆

図 - 2 に示す通りの供試体を用い, かぶり厚さ (5, 6, 7cm) の磨き鉄筋 (10) を配筋した。なお, 海中に 1 年間浸せきした, 塩分浸透深さと鉄筋の発錆について試験した。塩分浸透深さの測定は, 長手方向にドライ用コンクリートカッターを用い, 10cm 厚に切断し, その断面にフルオレセインナトリウム溶液と硝酸銀溶液を噴霧し, 白

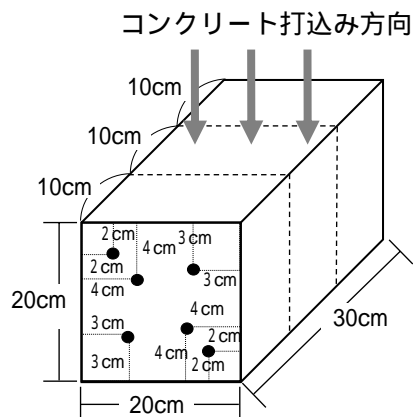


図 - 1 自然暴露したコンクリートの供試体

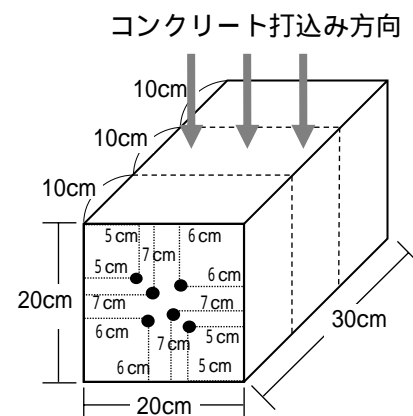


図 - 2 海中に浸せきしたコンクリートの供試体

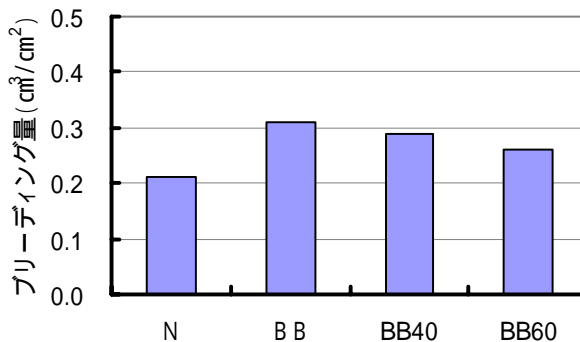


図 - 3 ブリーディング量

色に変色した部分の深さの両側面 40 ケ所をノギスを用いて測定し, その平均浸透深さを求めた。また, 鉄筋の発錆については, 上記 3.2 (5) と同様の方法で確認した。

4. 実験結果と考察

(1) ワーカビリティー

各種セメントを用いたフレッシュコンクリートの結果を表 - 3 に示す。荷卸し時のスランプおよび空気量は目標とした値が得られ, ワーカ

ピリティーは良好であった。

(2) プリーディング量

各種セメントを用いたコンクリートの最終プリーディング量を図 - 3 に示す。この図から N に比して、他のコンクリートのプリーディング量は若干多くなっているが、いずれのコンクリートとも JASS 5 の目標値 $0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下となっている。

(3) 凝結

各種セメントを用いたコンクリートの凝結を図 - 4 に示す。この図から BB の始発は 775 分、終結は 1,065 分となっている。これに対して、BB40 は始発で 25 分、終結で 5 分、BB60 は始発で 150 分、終結で 310 分といずれも長くなっている。これは高炉スラグの分量が多いほど、さらには、比表面積が粗くなっているため始発・終結とも長くなったものと考ええる。

(4) 温度上昇

コンクリートの温度上昇を図 - 5 に示す。この図から N の最高温度は 44.9°C 、BB は 42.6°C 、BB40 は 41.7°C 、BB60 は 38.8°C となっている。このことから、N に対して最高温度は BB40 では約 3°C 、BB60 では 6°C と低くなる。従って、試作した高炉セメントの温度上昇は小さくなる。

(5) 圧縮強度

各種セメントを用いたコンクリートの圧縮強度を図 - 6 に示す。材齢 7 日の N の圧縮強度は $16.3\text{N}/\text{mm}^2$ 、BB は $13.9\text{N}/\text{mm}^2$ 、BB40 は $11.9\text{N}/\text{mm}^2$ 、BB60 は $11.3\text{N}/\text{mm}^2$ となっている。これは、高炉スラグの分量が多くなっているため、初期強度が低くなったものと考ええる。しかし、材齢 28 日でみると BB は $22.0\text{N}/\text{mm}^2$ 、BB40 は $23.9\text{N}/\text{mm}^2$ 、BB60 は $24.5\text{N}/\text{mm}^2$ と逆に高くなっている。また、目標とした圧縮強度 $27\text{N}/\text{mm}^2$ は、いずれのコンクリートとも、材齢 91 日で目標強度を超えている。さらに、材齢 365 日でみると、高炉スラグの分量が多いものほど潜在水硬性が発揮されたためか、長期強度は高くなっている。次に、20 水中養生と現場水中養生の圧縮強度の関係を図 - 7 に示す。同様に、現場封かん養生およびコ

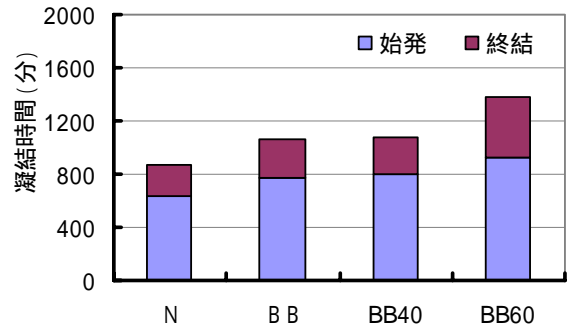


図 - 4 凝結

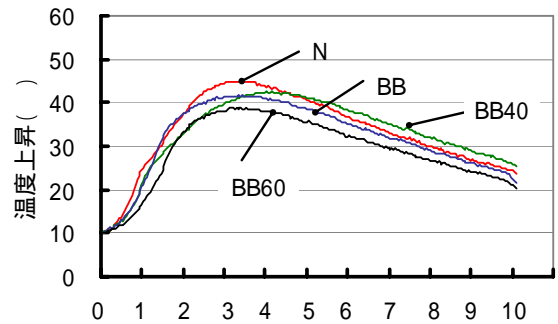


図 - 5 温度上昇

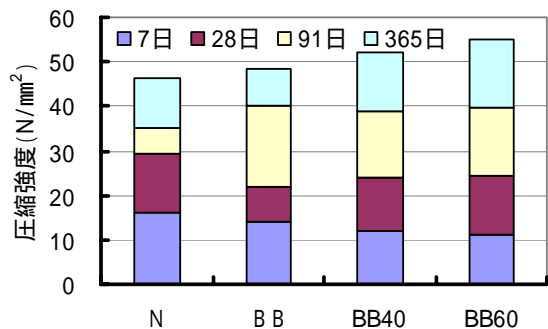


図 - 6 20 水中養生の圧縮強度

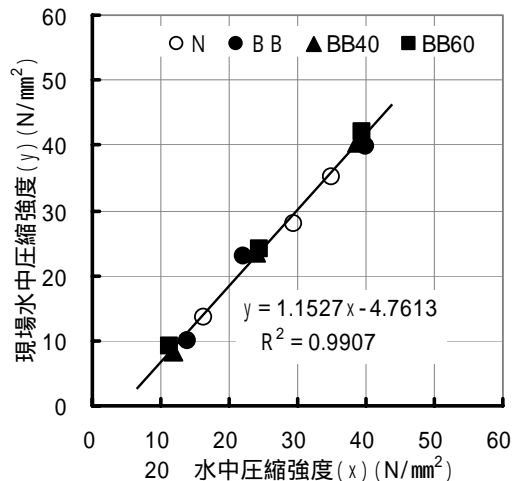


図 - 7 各養生と圧縮強度の関係 (1)

表 - 4 各種セメントコンクリートの各強度

| セメント種類 | 曲げ強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 鉄筋との 付着強度 (N/mm ²) |
|--------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| N | 4.7 | 2.2 | 8.7 |
| BB | 4.9 | 2.4 | 9.3 |
| BB40 | 4.8 | 2.3 | 8.7 |
| BB60 | 5.0 | 2.5 | 9.4 |

アによる圧縮強度の関係を図 - 8 および図 - 9 に示す。20 水中養生に対して同一材齢における圧縮強度で除した値の圧縮強度比を求めると、現場水中養生および現場封かん養生したその値は、材齢の経過に伴い、0.75 ~ 1.04 倍と大きくなっている。しかし、コアによるその値は、材齢の経過に伴い 0.94 ~ 0.76 倍と小さな値となっている。これは、水分供給条件の差異により水和があまり進行しなかったものと考ええる。

(6) 曲げ・引張および鉄筋との付着強度

材齢 91 日における各強度を表 - 4 に示す。表から、曲げ強度、引張強度および鉄筋との付着強度はいずれも、N に比して、試作した BB40 および BB60 の高炉セメントは同程度ないし若干大きい値となっている。これは長期材齢のため、高炉セメント特有の潜在水硬性が発揮されたためと考える。

(7) 乾燥収縮率

各種セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮率を図 - 10 に示す。この図から初期の 1 週の N は 2.1×10^{-4} 、BB は 2.0×10^{-4} 、BB40 は 1.8×10^{-4} 、BB60 は 1.7×10^{-4} となっている。これは従来の高炉セメントよりも、BB40 および BB60 のものは、高炉スラグの比表面積を粗くしたため、収縮率が小さくなったものと考ええる。さらに、4 週でみると、いずれのコンクリートとも同程度の収縮率を示しているが、52 週の長期材齢になると、BB40 および BB60 のものは収縮率が低減されている。これは、自己収縮率と乾燥収縮率がいまって小さくなったものと考ええる。また、このことはこれまでに報告³⁾している実験室実験の

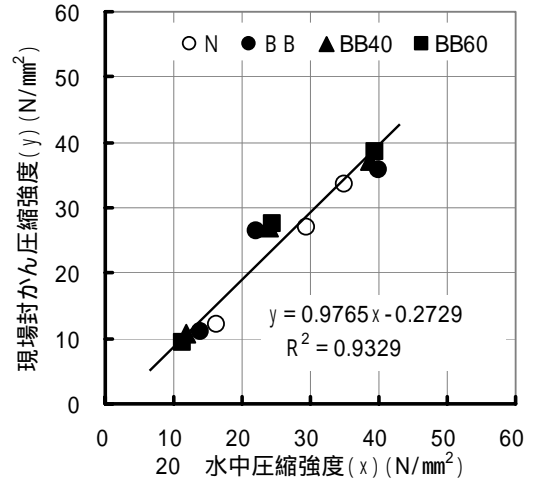


図 - 8 各養生と圧縮強度の関係 (2)

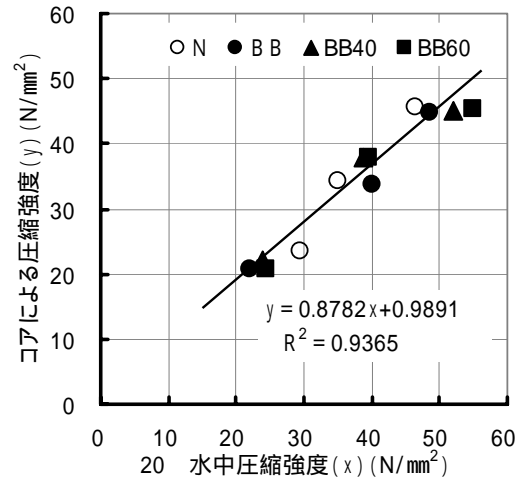


図 - 9 各養生と圧縮強度の関係 (3)

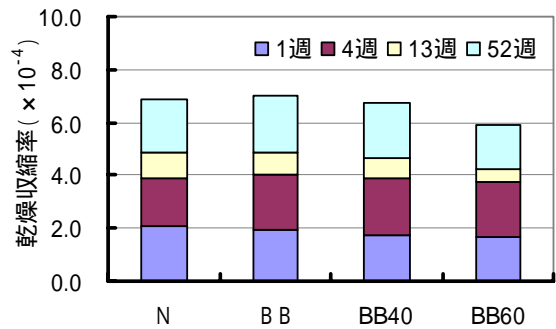


図 - 10 乾燥収縮率

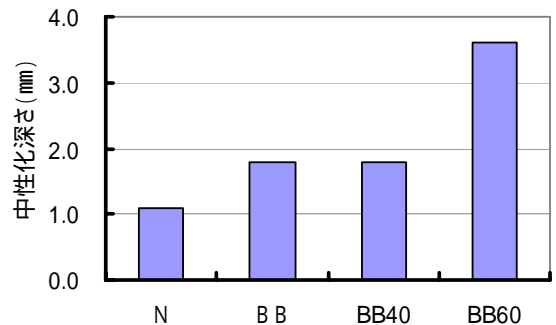


図 - 11 中性化深さ

結果と同様の傾向を示している。

(8) 中性化深さおよび鉄筋の発錆

各種セメントを用いたコンクリートの中性化深さを図 - 1 1 に示す。自然暴露した材齢 1 年の N は 1.1mm, BB は 1.8mm, BB40 は 1.8mm, BB60 は 3.6mm となっている。ここで, BB60 のものは他の高炉セメントに比して 2 倍の値になっている。これは, スラグの分量が 60% と多量に入っているためと考える。従って, 高炉スラグの分量が多いほど, 中性化深さは大きくなる。なお, 材齢 1 年までの鉄筋の発錆は, 現在のところ認められていない。

(9) 塩分浸透深さおよび鉄筋の発錆

海中に浸せきした, 各種セメントを用いたコンクリートの塩分浸透深さを図 - 1 2 に示す。この図から N は 7.2mm, BB は 5.7mm, BB40 は 5.4mm, BB60 は 5.0mm となっている。従って, 高炉スラグの分量が増すほど塩分浸透深さは小さくなる。この理由は, 高炉スラグの分量が多いほど, ポルトランド量が増え, 表層でフリーデル氏塩として塩化物イオンが固定され, 塩化物イオンの浸透が抑制されたものと考えられる。なお, 材齢 1 年までの鉄筋の発錆は, 現在のところ認められていない。

5. まとめ

市販されている高炉セメントを JIS 規格の範囲内で比表面積を粗くし, SO_3 量を調整し, さらに高炉スラグの分量を変化させ, 試作した高炉セメントを実機によって練混ぜたコンクリートについて, 市販の普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種と比較検討した結果, 次のことが明らかとなった。

- (1) ブリーディング量は, いずれのコンクリートとも同程度である。
- (2) 凝結は, 高炉スラグの分量が多いものほど始発・終結とも長くなる。
- (3) 温度上昇は, 普通ポルトランドセメントに比して, 試作した高炉セメントは 6 程度低減できる。

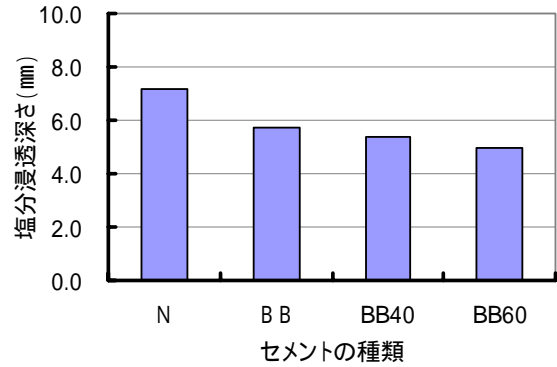


図 - 1 2 塩分浸透深さ

- (4) 圧縮強度は, 高炉スラグの分量が多いほど, 初期では若干低い値を示すが, 長期では高くなる。また, 現場水中養生および現場封かん養生したコンクリートの強度は, 材齢の経過に伴い増進するが, コアによる強度の増進は小さい。
- (5) 曲げ・引張および鉄筋との付着強度は, 普通ポルトランドセメントに比して, 同程度ないしは若干大きい値となる。
- (6) 乾燥収縮率は, 高炉スラグの分量が多いほど, 初期および長期とも低減される。
- (7) 中性化深さは, 高炉スラグの分量が多いほど大きくなる。
- (8) 塩分浸透深さは, 高炉スラグの分量が多いほど, その浸透深さは小さくなる。
- (9) 鉄筋の発錆は現在のところ, いずれのコンクリートとも認められない。

参考文献

- 1) 原田克己, 松下博通, 後藤貴弘: 水和熱を考慮した高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみ特性, コンクリート工学論文集, Vol.14, No.1, pp.23-33, 2003.7
- 2) 宮澤伸吾, 大澤友宏, 廣島明男, 鯉淵 清: 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.487-492, 2005.6
- 3) 横室 隆, 依田彰彦, 廣島明男, 神崎隆男: 各種セメントを用いたコンクリートの耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.677~682, 2006.7