

7.1 低炭素型セメントの利用技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：材料資源研究グループ（基礎材料）

研究担当者：渡辺博志、森濱和正、中村英佑

【要旨】

本研究課題では、低炭素型セメントを用いたコンクリート構造物の設計施工ガイドラインを提案することを目的として、国内 8 機関との共同研究を行っている。平成 24 年度は、低炭素型セメントを用いたコンクリートの特徴のうち、収縮・クリープ特性、強度特性と耐久性に養生条件が与える影響、断熱温度上昇特性を明らかにするための実験を行った。また、平成 23 年度から開始した暴露試験の供試体を使用して、低炭素型セメントを用いたコンクリートの材齢 1 年の強度特性について検討した。さらに、低炭素型セメントを用いたコンクリート構造物のライフサイクルをとおした CO₂ 排出削減効果の試算を行った。

キーワード：低炭素型セメント、混和材、収縮・クリープ、養生、断熱温度上昇特性、CO₂ 排出削減

1. はじめに

地球温暖化問題に対する世界的な関心の高まりを受けて、社会資本整備に伴って排出される CO₂ を削減するためのひとつの方策として、低炭素型セメントの利用が注目されている。低炭素型セメントは、コンクリートに使用するセメントの一部を産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材で置換したものである。混和材の混合率を高めることによりセメントの使用量を減少させ、コンクリート構造物の建設に伴って排出される CO₂ の相当量を削減できることが期待されている。しかしながら、低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度特性や耐久性の評価方法、構造設計に用いる設計用値、現場での施工方法などは必ずしも明確にされていない。また、CO₂ 排出削減効果を適切に算定する方法が整備されていないことも、低炭素型セメントの積極利用を妨げるひとつの要因となっている。

これらのことを背景として、本研究課題では、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなど混和材を多量に混合した低炭素型セメントの利用方法と CO₂ 排出削減効果の算定方法を規定した設計施工ガイドラインを提案することを目的として、国内 8 機関（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会、（株）大林組、大成建設（株）、前田建設工業（株）、戸田建設（株）、西松建設（株）、鉄鋼スラグ協会、電源開発（株）との共同研究を平成 23 年度から行っている。

平成 24 年度は、低炭素型セメントを用いたコンクリートの特徴のうち、下記の 5 項目に着目し、実験および試

算により検討を行った。

- (1) 収縮・クリープ特性
- (2) 強度特性と耐久性に養生条件が与える影響
- (3) 断熱温度上昇特性
- (4) 暴露供試体の材齢 1 年の強度特性
- (5) コンクリート構造物のライフサイクルをとおした CO₂ 排出削減効果

2. 低炭素型セメントを用いたコンクリートの収縮・クリープ特性

コンクリートの収縮ひずみは、水和反応に伴うセメントペーストの体積減少（水和収縮）とコンクリート内部の水分の消費による乾燥（自己乾燥）に起因する自己収縮と、水分の外部逸散や内部移動に起因する乾燥収縮によって生じる。また、クリープひずみは、持続荷重の作用するコンクリートで時間の経過とともに徐々に生じる。収縮とクリープは持続的かつ長期的に進行するため、コンクリート構造物のひび割れや変形などに多大な影響を与える。このため、構造設計では、収縮ひずみとクリープ係数を設計用値として入力し、プレストレストコンクリート構造物のプレストレストの減少量や不静定構造物の不静定力を計算している。ところが、低炭素型セメントを用いたコンクリートの収縮・クリープ特性は明確ではなく、特に道路橋の上部構造では低炭素型セメントの積極利用を妨げるひとつの課題となっていた。

H24 年度は、国内外の基規準類で採用されている収縮ひずみとクリープ係数の予測式の調査を行い、低炭素型

表-1 日米欧の基規準類における収縮ひずみとクリープ係数の予測式

| 予測式 基規準類 | 収縮ひずみ | クリープ係数 |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 【日本】 土木学会 2012年制定 コンクリート 標準示方書 | <p>◆JISA 1129 試験によらない場合、コンクリートの収縮ひずみの特性値 ε'_{sh} は次式により求める。</p> $\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left(W + \frac{45}{-20+30 \cdot c/W} \cdot \alpha \cdot \Delta \omega \right)$ <p>◆部材中におけるコンクリートの収縮ひずみの経時変化 $\varepsilon'_{sh}(t, t_0)$ は次式により求める。</p> $\varepsilon'_{sh}(t, t_0) = \frac{\frac{1-RH/100}{1-60/100} \varepsilon'_{sh,inf}(t-t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot \beta+(t-t_0)}$ | <p>◆クリープ係数 $\varphi(t, t')$ は次式により求める。</p> $\varphi(t, t') = \frac{4W \left(\frac{1-RH}{100} \right) + 350}{12+f'_c(t')} \cdot \log_e(t-t'+1) \cdot E_{ct}$ |
| 【日本】 日本道路協会 平成24年 道路橋示方書 | <p>◆乾燥収縮度 $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ は次式により求める。</p> $\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{s0} \cdot \beta_s(t-t_0)$ <p>◆影響する因子として、温度、湿度、仮想部材厚さを考慮している。</p> | <p>◆クリープ係数 $\varphi(t, t_0)$ は次式により求める。</p> $\varphi(t, t_0) = \varphi_{a0} \cdot \beta_d(t-t_0) + \varphi_{f0} \cdot \{\beta_f(t) - \beta_f(t_0)\}$ <p>◆影響する因子として、温度、湿度、セメント種類、仮想部材厚さを考慮している。</p> |
| 【日本】 JISA 1157: 2010 | X | <p>◆クリープ曲線式からクリープ係数 φ_t を求める場合は次式によって表す。</p> $\varphi_t = A' \log_e(t+1) + B'$ <p>◆ISO 1920-9: 2009 も同様の対数関数で単位クリープひずみを求めることとしている。</p> |
| 【米国】 ACI 209R-92 (Reapproved 2007) | <p>◆収縮ひずみ $\varepsilon_{sh}(t)$ は次式により求める。</p> $\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t}{f+t} \varepsilon_{sh}(u)$ <p>◆収縮ひずみの終局値 $\varepsilon_{sh}(u)$ は、養生条件、湿度、部材厚さ、V/S、スランプ、細骨材率、セメント量、空気量により補正する。</p> | <p>◆クリープ係数 v_t は次式により求める。</p> $v_t = \frac{t^{0.6}}{d+t^{0.6}} v_u$ <p>◆クリープ係数の終局値 v_u は、載荷材齢、養生条件、湿度、部材厚さ、V/S、スランプ、細骨材率、空気量により補正する。</p> |
| 【米国】 AASHTO LRFD 2010 | <p>◆収縮ひずみ ε_{sh} は次式により求める。</p> $\varepsilon_{sh} = k_s k_{hs} k_f \left(\frac{t}{61-4f'_{ct}+t} \right) 0.48 \times 10^{-3}$ <p>◆k_s は V/S に関する係数、k_{hs} は湿度に関する係数、k_f はコンクリート強度に関する係数である。</p> | <p>◆クリープ係数 $\varphi(t, t_i)$ は次式により求める。</p> $\varphi(t, t_i) = 1.9 k_s k_{hc} k_f \left(\frac{t}{61-4f'_{ct}+t} \right) t_i^{-0.118}$ <p>◆k_s は V/S に関する係数、k_{hc} は湿度に関する係数、k_f はコンクリート強度に関する係数である。</p> |
| 【欧州】 fib Model Code 2010 | <p>◆乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ は次式により求める。</p> $\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \left(\frac{t-t_s}{0.035 \cdot h^2 + (t-t_s)} \right)^{0.5}$ <p>◆乾燥収縮ひずみの最終値 $\varepsilon_{cds0}(f_m)$ は、コンクリート強度の関数である。</p> | <p>◆クリープ係数 $\varphi(t, t_0)$ は次式により求める。</p> $\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_H + (t-t_0)} \right]^{0.3}$ <p>◆クリープ係数の終局値 φ_0 は、湿度、仮想部材厚さ、コンクリート強度、載荷材齢の関数である。</p> |

※各予測式における記号の定義については各基規準類を参照されたい。

セメントを用いたコンクリートの収縮・クリープ特性を明らかにするための室内実験を開始した。

2. 1 国内外の収縮ひずみとクリープ係数の予測式

日米欧における主要な基規準類^{1)~6)}における収縮ひずみとクリープ係数の予測式の概要を表-1に示す。既存の国内外の基規準類では、収縮ひずみとクリープ係数の予

測式に様々なものが採用されていることが読み取れる。

収縮ひずみの予測式は、収縮ひずみの終局値と分数関数で表された収縮ひずみの進行度の積に、様々なパラメータの影響を乗じて収縮ひずみを予測する形式のものが多く、コンクリート標準示方書では、収縮ひずみの特性値と部材中におけるコンクリートの収縮ひずみの2種類

表-2 結合材の品質

| 記号 | 結合材の種類 | 密度 (g/cm ³) | 比表面積 (cm ² /g) | 化学成分 (%) | | | | | | |
|-----|---------------|----------------------------|------------------------------|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|
| | | | | ig.loss | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
| HPC | 早強ポルトランドセメント | 3.14 | 4570 | 0.88 | 15.35 | 4.11 | 2.55 | 70.07 | 1.26 | 3.14 |
| BS4 | 高炉スラグ微粉末 4000 | 2.89 | 4460 | 0.10 | 32.75 | 13.89 | 0.32 | 42.21 | 6.14 | 2.19 |
| BS6 | 高炉スラグ微粉末 6000 | 2.91 | 6020 | 0.10 | 32.27 | 13.82 | 0.54 | 42.22 | 6.21 | 2.89 |
| FA | フライアッシュ II 種 | 2.30 | 4280 | 2.7 | 56.0 | 28.9 | 4.3 | 2.2 | 0.9 | 0.4 |

表-3 コンクリート配合

| 配合 | W/B (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | s/a (%) |
|---------|------------|--------------------------|------------------|-----------|-----------|----------|-----|-----|------------|
| | | W | B=HPC+BS4+BS6+FA | | | | S | G | |
| | | | HPC | BS4 | BS6 | FA | | | |
| H40 | 40 | 165 | 413 | | | | 758 | 968 | 45.0 |
| H35B430 | 35 | | 330 | 141 (30%) | | | 700 | | 43.0 |
| H35B650 | | | 236 | | 236 (50%) | | 695 | | 42.9 |
| H35F20 | | | 377 | | | 94 (20%) | 682 | | 42.4 |

※混和材の単位量の () 内の値は各混和材の結合材に占める分量の割合を表示

※細骨材：密度 2.56g/cm³、吸水率 2.23%、粗骨材：密度 2.67g/cm³、吸水率 0.43%と 0.46%を均等に混合、最大寸法 25mm

※混和剤：高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸エーテル系を全配合で使用し、空気連行剤は高アルキルカルボン酸系をフライアッシュ使用配合、変性ロジン酸化合物系をその他の配合で使用

の予測式を明示している。前者は試験により収縮ひずみの特性値が得られない場合に用いられ、骨材の品質の影響を考慮するために骨材中に含まれる水分量を取り入れている。後者は試験などにより求めた収縮ひずみの最終値をもとに、部材の断面の厚さと外気の相対湿度の影響を考慮して収縮ひずみを予測する。道路橋示方書では、CEB-FIP Model Code 1978⁷⁾に基づく方法が採用されてきたが、平成 8 年版で予測式の形状と予測式に用いる数値が微修正された。欧米の予測式は分数関数で収縮ひずみの進行度を取り入れている点は共通しているが、分数関数の詳細や各パラメータの取扱い方法は様々である。

一方、クリープ係数の予測式は、対数関数を用いて長期的なクリープ係数を予測するものと、クリープ係数の終局値と分数関数で表されたクリープの進行度の積でクリープ係数を予測するものとに二分される。前者はコンクリート標準示方書や JIS A 1157、ISO 1920-9⁸⁾で採用されている。後者は主に欧米の基規準類で用いられているが、ここでも分数関数の詳細や各パラメータの取扱い方法は基規準類により異なっている。また、道路橋示方書では、クリープ係数の予測にも CEB-FIP Model Code 1978 に基づく方法が記載されている。

このように、収縮ひずみとクリープ係数の予測式は各国の基規準類によって異なるものが採用されている。この原因としては、コンクリートの収縮・クリープ特性に

関する研究が古くから行われてきたにもかかわらず、未だに統一的な知見や予測モデルが得られていないこと、いずれの予測式も過去の実験結果を回帰分析して導かれた経験式であることなどが考えられる。また、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなど混和材を用いた場合の影響については、いずれの基規準類においても明確な規定は行われておらず、既存の予測式の適用性は必ずしも明確ではないと考えられる。

2.2 実験の概要

低炭素型セメントを用いたコンクリートの収縮・クリープ特性を把握するため、H24 年度は、(1) 自己収縮と乾燥収縮に起因する収縮ひずみを明らかにするための材料試験と (2) プレストレストコンクリート構造物で想定される養生条件と載荷材齢を模擬した供試体を用いた収縮・クリープ試験を実施した。実験で用いた結合材の品質を表-2、コンクリート配合を表-3 に示す。ここでは、現場打ちのプレストレストコンクリート部材で低炭素型セメントを用いることを想定し、一般的なプレストレス導入材齢である材齢 3 日で圧縮強度が 30N/mm² 以上となり、配合間の水結合材比 (W/B) の差が過大とならないように、圧縮強度の発現を事前に確認して示方配合を決定した。この結果、結合材に早強セメントのみを用いる配合 (H40) では W/B=40% とし、結合材に高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いる配合 (H35B430、

表-4 材料試験と収縮・クリープ試験の内容

| 測定項目 | 材料試験の方法 |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 自己収縮ひずみ (AU) | <ul style="list-style-type: none"> ◆JCI「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」を参考として実施 ・□100×400mm 供試体 (各2体) のコンクリートひずみを埋込型ひずみ計で測定 ・コンクリート打設直後から封かんした後、終結後に脱枠し、20°C60%RHの恒温恒湿槽に静置 |
| 収縮ひずみ (LCD) | <ul style="list-style-type: none"> ◆JISA 1129 ダイヤルゲージ法に準拠して実施 ・□100×400mm 供試体 (両端面シール、各2体) の長さ変化 (ダイヤルゲージ法) と質量を材齢7、14、21、28、42、56、91、140、182日で測定 ・材齢7日まで20°Cで水中養生した後、20°C60%RHの恒温恒湿槽に静置 |
| 自己収縮ひずみ (LCS) | <ul style="list-style-type: none"> ◆収縮ひずみ (LCD) に占める自己収縮ひずみ (LCS) を測定するために実施 ・□100×400mm 供試体 (各2体) のコンクリートひずみを埋込型ひずみ計で測定 ・材齢7日まで20°Cで水中養生した後、直ちに封かんし、20°C60%RHの恒温恒湿槽に静置 |
| 測定項目 | 収縮・クリープ試験の方法 |
| 乾燥収縮ひずみ | <ul style="list-style-type: none"> ◆乾燥収縮ひずみを測定 ・□150×500mm 供試体 (両端面シール、各2体) のコンクリートひずみを埋込型ひずみ計で測定 ・材齢3日まで20°Cの室内で十分に湿らせた養生マットで被覆して湿潤養生した後、直ちに□150mmの両端面をアルミテープでシールし、温度と湿度の管理されていない室内に静置 |
| クリープひずみ | <ul style="list-style-type: none"> ◆圧縮を導入した供試体において、クリープひずみを測定 ・□150×500mm 供試体 (各2体) のコンクリートひずみを埋込型ひずみ計で測定 ・材齢3日まで20°Cの室内で十分に湿らせた養生マットで被覆して湿潤養生した後、温度と湿度の管理されていない室内に静置し、材齢3、7、28日で図-1の方法によりコンクリートに圧縮力を導入 |

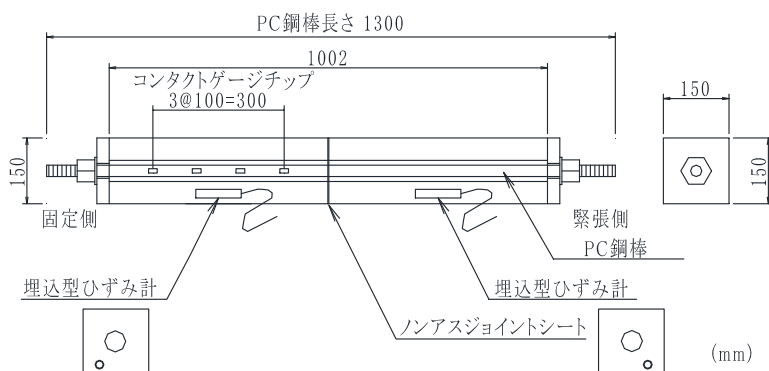


図-1 クリープ試験の供試体と圧縮力導入方法の概要

H35B650、H35F20) では $W/B=35\%$ とした。ただし、ここでは低炭素型セメントの使用がコンクリートの収縮・クリープ特性に与える影響を明らかにすることを主目的としたため、全配合で単位水量 ($165\text{kg}/\text{m}^3$) と単位粗骨材量 ($968\text{kg}/\text{m}^3$) を同一とした。なお、混和剤については、スランプ $12\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5\pm 1.5\%$ の目標値を達成できるように使用量を調整した。

2. 2. 1 材料試験の概要

材料試験と収縮・クリープ試験の内容を表-4 に示す。材料試験では、低炭素型セメントを用いたコンクリートの自己収縮と乾燥収縮に起因する収縮ひずみの特徴を明

確にするため、(1) JCI の「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」を参考とした自己収縮ひずみ (AU) の測定、(2) JIS A 1129 ダイヤルゲージ法に準拠した収縮ひずみ (LCD) の測定、(3) 上記 (2) に用いた供試体と同条件で製作した供試体の自己収縮ひずみ (LCS) の測定を行った。ここで、自己収縮ひずみ (LCS) の測定は、収縮ひずみ (LCD) を自己収縮あるいは乾燥収縮に起因する収縮ひずみに分離するために行った。

2. 2. 2 収縮・クリープ試験の概要

収縮・クリープ試験で用いた供試体は、現場打ちのプレレストコンクリート部材で低炭素型セメントを用

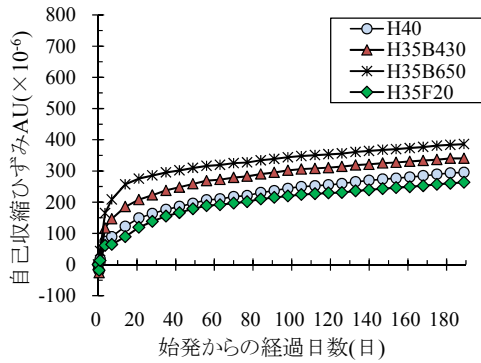


図-2 自己収縮ひずみ (AU)

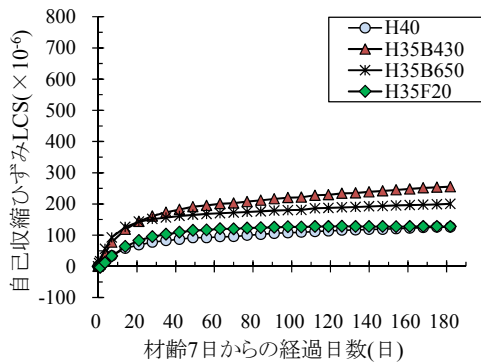


図-4 自己収縮ひずみ (LCS)

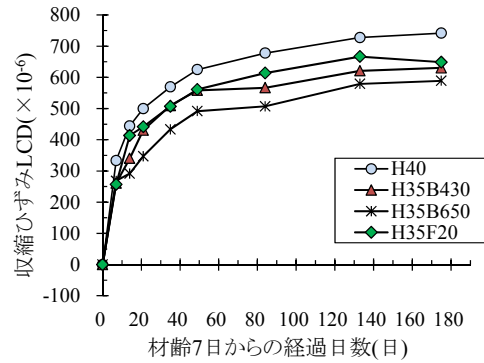


図-3 収縮ひずみ (LCD)

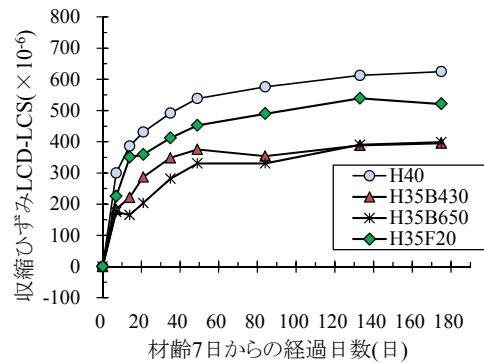


図-5 収縮ひずみ (LCD-LCS)

いることを想定し、材齢3日まで十分に湿らせた養生マットで被覆して湿潤養生を行い、その後は室内で気中養生を行った。クリープひずみを測定する供試体には、材齢3、7、28日の3時点で圧縮力を導入した。圧縮力の導入は、図-1に示すようにPC鋼棒を用いて2体の供試体を連結し、PC鋼棒に貼付したひずみゲージの値を参考として供試体に所定の圧縮力が導入されるようにPC鋼棒の緊張力を管理した。目標とする圧縮力は、圧縮力導入作業の直前に同条件で養生した円柱供試体（φ100×200mm）から得られた圧縮強度の測定値をもとに、材齢3日に圧縮力を導入した供試体では圧縮強度の約20%、材齢7、28日に圧縮力を導入した供試体では圧縮強度の約30%とした。その後、供試体に導入された圧縮力が目標値の-2%～+3%の範囲内に収まるように定期的にPC鋼棒の再緊張を行った。なお、乾燥収縮ひずみを測定する供試体もクリープひずみを測定する供試体と同条件とするため、断面中央に円形孔を有する形状とし、湿潤養生終了直後に□150mmの両端面をアルミテープでシールした。

2.3 実験の結果

2.3.1 材料試験の結果

自己収縮ひずみ (AU) の測定結果を図-2に示す。いずれの供試体においても、始発直後に僅かに膨張が生じ、

その後は収縮ひずみが約20日経過後までは急速に、これ以降は緩やかに増加した。始発から約180日経過後の自己収縮ひずみ (AU) は、早強セメント単味の供試体と比較すると、高炉スラグ微粉末を用いた供試体で大きく、フライアッシュを用いた供試体で若干小さくなった。

収縮ひずみ (LCD) と自己収縮ひずみ (LCS) の測定結果を図-3、4に、これらの差として算出した収縮ひずみ (LCD-LCS) を図-5に示す。ここでは材齢7日まで水中養生した供試体を用いて測定を行ったため、横軸を材齢7日からの経過日数とした。収縮ひずみ (LCD) は自己収縮と乾燥収縮の両方に起因する全収縮ひずみであり、自己収縮ひずみ (LCS) は自己収縮のみに起因する収縮ひずみである。このため、これらの差として算出した収縮ひずみ (LCD-LCS) は、乾燥収縮のみに起因する収縮ひずみとみなすことができる。この結果によると、自己収縮と乾燥収縮の両方に起因する収縮ひずみ (LCD) と乾燥収縮のみに起因する収縮ひずみ (LCD-LCS) の両方において、早強セメント単味の供試体よりも混和材を用いた供試体で収縮ひずみが小さくなった。混和材を用いることで乾燥収縮に起因する収縮ひずみが小さくなると考えられる。収縮ひずみ (LCD-LCS) に着目すると、この傾向は高炉スラグ微粉末を用いた供試体で特に顕著に現れたことがわかる。また、フライアッシュを用いた供

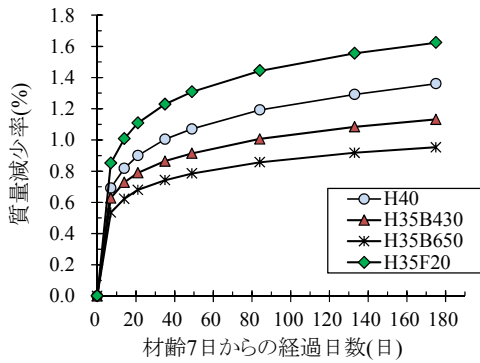


図-6 質量減少率

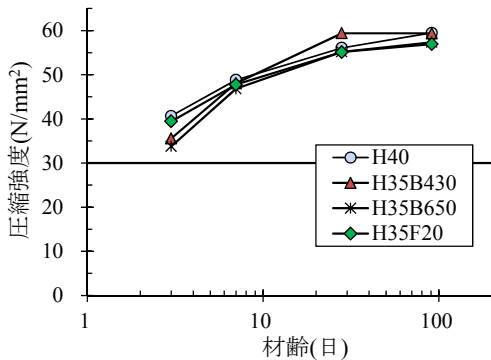


図-8 材齢3日まで湿潤養生した円柱供試体の試験結果

試体では、乾燥開始から約20日後までは早強セメント単味の供試体と比較して収縮ひずみ (LCD-LCS) の進展速度が小さくなったが、その後の両供試体の収縮ひずみ (LCD-LCS) の推移は概ね平行となった。

一方、自己収縮に起因する収縮ひずみ (LCS) は、図-2の結果と概ね同様であり、早強セメント単味の供試体と比較すると、高炉スラグ微粉末を用いた供試体で大きく、フライアッシュを用いた供試体で同程度となった。いずれの供試体においても、全収縮ひずみに占める自己収縮に起因するひずみの割合は乾燥収縮に起因するひずみよりも小さいと考えられるが、高炉スラグ微粉末を用いた供試体では自己収縮に起因する収縮ひずみの割合が比較的大きい。このため、高炉スラグ微粉末を用いる場合には、自己収縮による初期ひび割れの発生リスクを適切に評価することが必要であると考えられる。なお、図-2と図-4で自己収縮ひずみの絶対値が異なった原因としては、両測定で使用した供試体の養生条件が異なったことや、自己収縮の進展が材齢初期で急速であり、収縮ひずみの測定結果を整理する際の両グラフの基点が始発時と材齢7日時で異なったことなどが考えられる。

質量減少率の測定結果を図-6に示す。質量減少率を乾燥による水分の逸散量と仮定すると、早強セメント単味の供試体と比較して、高炉スラグ微粉末を用いた供試体では水分の逸散量が少なく、逆にフライアッシュを用い

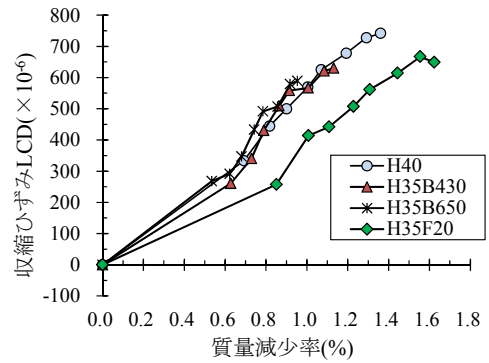


図-7 質量減少率と収縮ひずみ (LCD-LCS)

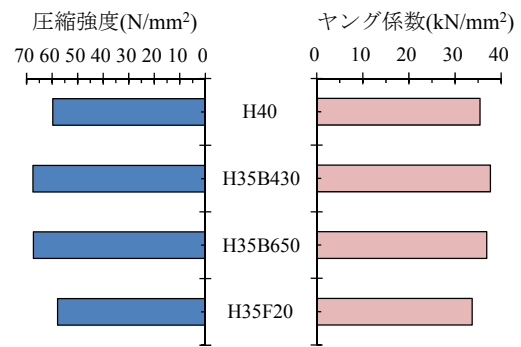


図-9 標準養生した円柱供試体の材齢28日の試験結果

た供試体では水分の逸散量が多くなった。フライアッシュを用いた供試体の水分の逸散量は乾燥開始から約20日後までで多く、これ以降の水分の逸散量の増加程度は早強セメント単味の供試体と概ね同等であった。この原因は、材齢初期ではフライアッシュのポズラン反応の進展が十分でなく細孔構造が粗であり、水分の逸散量が多くなったためではないかと推察される。

質量減少率と収縮ひずみ (LCD-LCS) の関係を図-7に示す。いずれの供試体においても、質量減少率が大きくなるほど乾燥収縮に起因する収縮ひずみ (LCD-LCS) が大きくなる傾向にあったが、厳密には結合材の種類によって挙動が異なった。高炉スラグ微粉末を用いた供試体では、他の供試体と比較して質量減少率が小さく、収縮ひずみ (LCD-LCS) も小さくなった。この原因は、水和反応での自由水の消費量が多かったことや細孔構造が緻密になったことで水分の逸散量が減少し、結果として乾燥収縮ひずみが小さくなったためと考えられる。一方、フライアッシュを用いた供試体は、早強セメント単味の供試体と比較して乾燥開始後初期の質量減少量が大きくなったが収縮ひずみ (LCD-LCS) は小さく、これ以降の両供試体のグラフは概ね平行に推移した。この原因については必ずしも明確ではないが、フライアッシュを用いた供試体では、乾燥開始後初期の細孔構造が粗であったため、この段階で生じた水分の逸散が乾燥収縮に起因す

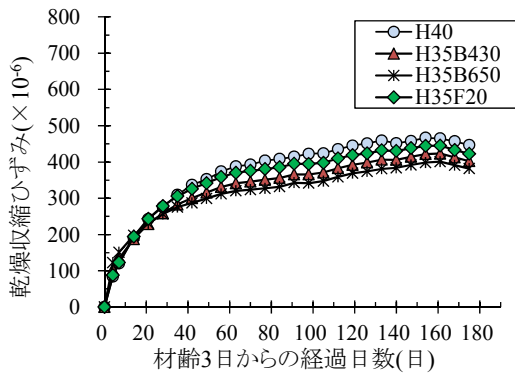


図-10 乾燥収縮ひずみ

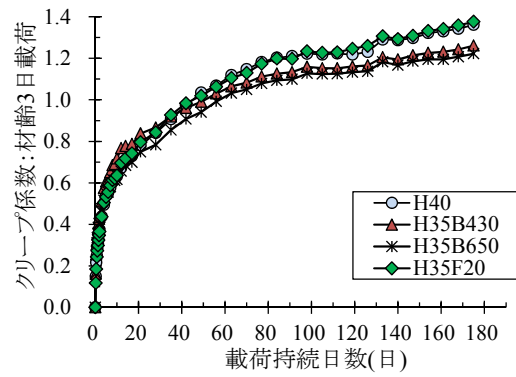


図-11 クリープ係数：材齢3日载荷

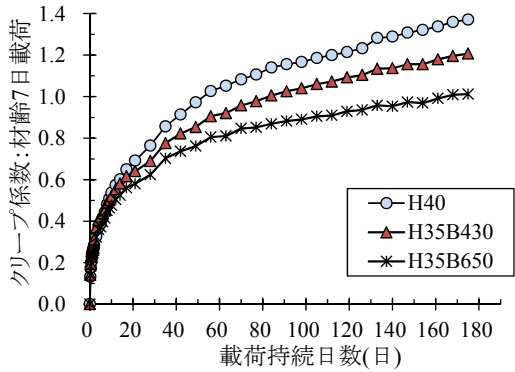


図-12 クリープ係数：材齢7日载荷

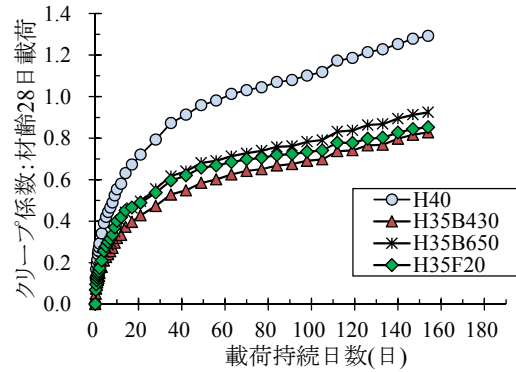


図-13 クリープ係数：材齢28日载荷

る収縮ひずみには必ずしも寄与しなかったためではないかと推察される。いずれにしても、今回の実験結果に基づく、質量減少率と収縮ひずみ (LCD-LCS) の関係は厳密には結合材の種類によって異なっており、水分の逸散量と乾燥収縮ひずみの関係も結合材の種類ごとに異なる可能性があると考えられる。

2. 3. 2 収縮・クリープ試験の結果

収縮・クリープ試験におけるコンクリートの圧縮強度試験の結果を図-8、9 に示す。ここでは、収縮・クリープ試験に用いた角柱供試体と同条件で養生を行った円柱供試体 (φ100×200mm) で材齢3、7、28、91日 (図-8)、標準養生を行った円柱供試体 (φ100×200mm) で材齢28日 (図-9) に圧縮強度試験を行った結果を示す。圧縮強度はJIS A 1108、ヤング係数はコンプレッソメータを用いてJIS A 1149に準拠して測定を行った。圧縮強度は、材齢3日では早強セメント単味の供試体とフライアッシュを用いた供試体で高炉スラグ微粉末を用いた供試体よりも若干大きくなったが、材齢7日以降では結合材の種類による差が小さくなった。また、材齢28日まで標準養生を行った場合、高炉スラグ微粉末を用いた供試体で圧縮強度とヤング係数が大きくなる傾向にあった。

乾燥収縮ひずみの材齢182日までの測定結果を図-10に示す。収縮・クリープ試験では材齢3日まで湿潤養生を行い、その後は温度と湿度の管理されていない室内に

表-5 材齢10,000日のクリープ係数の予測値

| 载荷開始 材齢 | H40 | H35B430 | H35B650 | H35F20 |
|------------|-----|---------|---------|--------|
| 3日 | 2.3 | 2.1 | 2.0 | 2.3 |
| 7日 | 2.3 | 2.0 | 1.7 | — |
| 28日 | 2.2 | 1.4 | 1.6 | 1.5 |

※材齢7日で载荷を開始したH35F20はゲージ不良のため未記載
※材齢182日までの測定結果を用いた予測値

供試体を静置したため、ここでは横軸を材齢3日からの経過日数とした。なお、材齢182日までの室温の測定値は最大26.9℃、最低8.8℃、平均16.2℃、湿度の測定値は最大77.9%RH、最低16.5%RH、平均44.3%RHであった。乾燥収縮ひずみは、前掲の図-3の収縮ひずみ (LCD) の結果と同様に、早強セメント単味の供試体と比較して混和材を用いた供試体で小さくなる傾向にあった。ただし、図-3と図-10の絶対値を比較すると、図-3の材料試験よりも図-10の収縮・クリープ試験で乾燥収縮ひずみが小さくなり、結合材の種類による差が小さくなった。この原因としては、材料試験よりも収縮・クリープ試験に用いた供試体の断面寸法あるいは部材厚さが大きく、乾燥の影響が小さくなり乾燥収縮に起因する収縮ひずみが小さくなったことや、両供試体の養生条件やグラフの横軸の基点の違いなどが考えられる。

材齢3、7、28日の時点で圧縮力を導入して得られたク

クリープ係数の材齢182日までの推移を図-11～13に示す。クリープ係数は、圧縮力を導入した供試体で測定されたコンクリートひずみから乾燥収縮ひずみ(図-10)を差し引いてクリープひずみに換算した後、これを供試体に導入した圧縮応力で除し、標準養生した材齢28日の円柱供試体のヤング係数(図-9)を乗じることにより算出した。ただし、材齢7日に圧縮力を導入したフライアッシュを用いた供試体は、ひずみゲージの不良により測定不能となったため、本報告書には結果を記載していない。材齢182日までの結果によると、材齢3日で圧縮力を導入した供試体のクリープ係数は、早強セメント単味の供試体とフライアッシュを用いた供試体と同程度となり、高炉スラグ微粉末を用いた供試体ではこれよりも若干小さくなる傾向にあった。先述したように、圧縮強度は材齢3日では高炉スラグ微粉末を用いた供試体で他の供試体よりも小さく、その後は結合材の種類による差が小さくなった。すなわち、高炉スラグ微粉末を用いた供試体では早強セメント単味の供試体やフライアッシュを用いた供試体よりも長期の強度発現が大きく、クリープ係数が小さくなったのではないかと考えられる。一方、材齢7、28日で圧縮力を導入した供試体のクリープ係数は、早強セメント単味の供試体と比較して混和材を用いた供試体で小さくなり、この傾向は特に材齢28日に圧縮力を導入した供試体で顕著に現れた。先述したように、圧縮強度は材齢7、28、91日では結合材の種類による差が小さくなったが、混和材を用いた供試体では材齢の進行とともに細孔構造が緻密になりクリープによるひずみが生じにくくなったためではないかと推察される。

また、図-10～13を精査すると、乾燥収縮ひずみとクリープ係数の両方において、概ね同時期に結合材の種類による差が現れ始めたことが読み取れる。各グラフの横軸の基点は、図-10と11で材齢3日、図-12で材齢7日、図-13で材齢28日であり、乾燥収縮ひずみとクリープ係数の両方で結合材の種類による差が明確に現れるのは、どのグラフにおいても材齢30日前後となった。すなわち、乾燥収縮とクリープに起因するひずみの長期的な挙動は結合材の種類によって異なり、この差が明確に現れるのは載荷材齢にかかわらず概ね同時期であった。乾燥収縮とクリープに起因するひずみの挙動は密接に関係しているものと考えられる。

材齢182日までの測定結果を対象として、表-1のJISA1157を参考として対数関数を用いて回帰分析を行い、材齢10,000日の時点におけるクリープ係数を予測した結果を表-5に示す。これまでに示した実験結果と同様に、圧

縮力を導入する材齢が遅くなるほど、早強セメント単味の供試体と混和材を用いた供試体のクリープ係数の差が大きくなり、混和材を用いた供試体のクリープ係数が小さくなる傾向にあった。ただし、図-11～13のクリープ係数の推移を精査すると、材齢182日の時点においてもクリープが進展していると考えられるため、今後も試験を継続してデータを蓄積した上でクリープ係数の将来予測を行う必要があると考えられる。

2.4 まとめ

低炭素型セメントを用いたコンクリートの収縮・クリープ特性を明らかにするため、基礎的な材料試験と現場打ちのプレストレストコンクリート部材を模擬した供試体を用いた実験を行った。この結果、低炭素型セメントの使用により乾燥収縮に起因する収縮ひずみは小さくなったが、高炉スラグ微粉末を用いた場合には自己収縮に起因する収縮ひずみが大きくなった。また、材齢182日までの測定結果によると、低炭素型セメントを用いたコンクリートのクリープ係数は、材齢3日に圧縮力を導入した場合は早強セメント単味の供試体と同程度か小さくなり、材齢7、28日に圧縮力を導入した場合は早強セメント単味の供試体よりも大幅に小さくなることがわかった。ただし、クリープ係数の長期的な推移については、材齢182日以降もクリープが進展しているため、今後も実験を継続して検討を行う必要がある。

3. 低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度特性と耐久性に養生条件が与える影響

コンクリートを施工する際には、打込み後からの一定期間、コンクリートを適切な温度と湿潤状態に保つことにより、有害な作用の影響を受けることを防ぎ、コンクリートが所用の品質を確保できるように養生を行うことが必要である。混和材を混合した低炭素型セメントを用いたコンクリートでは、セメント単味のコンクリートと比較して、材齢初期の強度発現が遅く、長期的な強度発現や耐久性に材齢初期の養生条件が与える影響が大きいことなどが指摘されている。とりわけ、混和材の混合率を高めた低炭素型セメントを用いる場合には、これらの影響がより顕著に現れる可能性がある。しかしながら、低炭素型セメントを用いた場合に材齢初期の養生で担保されるコンクリートの品質や湿潤養生期間の設定方法は明確でなく、低炭素型セメントを積極利用する際の施工上の課題となっていた。

平成24年度は、国内外の主要な基規準類の文献調査を行い、材齢初期の養生で確保するコンクリートの品質と

表6 日米欧の基規準類における養生で確保するコンクリートの品質と湿潤養生日数に関する規定内容

| 基規準類 | 湿潤養生日数に関する規定内容 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|-------------------|--------|-----------|------|--------|------|------|----------|------|------|------|------|-----|------|-------|------|------|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| <p>【日本】 土木学会 2012年制定 コンクリート 標準示方書</p> | <p>◆養生はコンクリートが所要の品質（強度、耐久性、ひび割れ抵抗性、水密性、鋼材を保護する性能、美観等）を確保できるように行うこととし、湿潤養生期間の標準を規定。</p> <table border="1" data-bbox="480 353 1380 479"> <thead> <tr> <th>日平均気温</th> <th>普通ポルトランドセメント</th> <th>混合セメントB種</th> <th>早強ポルトランドセメント</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15℃以上</td> <td>5日</td> <td>7日</td> <td>3日</td> </tr> <tr> <td>10℃以上</td> <td>7日</td> <td>9日</td> <td>4日</td> </tr> <tr> <td>5℃以上</td> <td>9日</td> <td>12日</td> <td>5日</td> </tr> </tbody> </table> | 日平均気温 | 普通ポルトランドセメント | 混合セメントB種 | 早強ポルトランドセメント | 15℃以上 | 5日 | 7日 | 3日 | 10℃以上 | 7日 | 9日 | 4日 | 5℃以上 | 9日 | 12日 | 5日 | | | | | | | | | | | | |
| 日平均気温 | 普通ポルトランドセメント | 混合セメントB種 | 早強ポルトランドセメント | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15℃以上 | 5日 | 7日 | 3日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10℃以上 | 7日 | 9日 | 4日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5℃以上 | 9日 | 12日 | 5日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>【日本】 土木学会 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの 施工指針</p> | <p>◆高炉スラグ微粉末の置換率とブレン値に応じた湿潤養生日数を次の定義により規定。 『普通セメントのみを使用した水セメント比が45～55%のコンクリートにおいて、材齢28日に対する圧縮強度比が50%程度に達する材齢を基準として、対応する同じ水結合材比で普通セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換した場合に、同等の圧縮強度比となるのに必要な湿潤養生日数の目安を、気温とコンクリートの養生温度が同じ場合について求めた結果』</p> <p>◆養生期間中のコンクリートの表面温度を10℃以上に保つことを原則とすること、早強セメントの使用により湿潤養生期間を短縮できるが別途検討が必要であること、材齢7日まで湿潤養生を行った場合に材齢91日の圧縮強度が28日間の湿潤養生を行った場合と同程度となったことなどを記載。</p> <table border="1" data-bbox="518 763 1342 913"> <thead> <tr> <th rowspan="2">日平均気温</th> <th>30～40%置換</th> <th colspan="2">50%置換</th> <th>55～70%置換</th> </tr> <tr> <th>4000</th> <th>4000</th> <th>6000</th> <th>8000</th> <th>4000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>17℃</td> <td>6日以上</td> <td>7日以上</td> <td>7日以上</td> <td>6日以上</td> <td>8日以上</td> </tr> <tr> <td>10℃</td> <td>9日以上</td> <td>10日以上</td> <td>9日以上</td> <td>8日以上</td> <td>11日以上</td> </tr> <tr> <td>5℃</td> <td>12日以上</td> <td>13日以上</td> <td>12日以上</td> <td>10日以上</td> <td>14日以上</td> </tr> </tbody> </table> | 日平均気温 | 30～40%置換 | 50%置換 | | 55～70%置換 | 4000 | 4000 | 6000 | 8000 | 4000 | 17℃ | 6日以上 | 7日以上 | 7日以上 | 6日以上 | 8日以上 | 10℃ | 9日以上 | 10日以上 | 9日以上 | 8日以上 | 11日以上 | 5℃ | 12日以上 | 13日以上 | 12日以上 | 10日以上 | 14日以上 |
| 日平均気温 | 30～40%置換 | | 50%置換 | | 55～70%置換 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4000 | 4000 | 6000 | 8000 | 4000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17℃ | 6日以上 | 7日以上 | 7日以上 | 6日以上 | 8日以上 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10℃ | 9日以上 | 10日以上 | 9日以上 | 8日以上 | 11日以上 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5℃ | 12日以上 | 13日以上 | 12日以上 | 10日以上 | 14日以上 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>【日本】 土木学会 フライアッシュを用いたコンクリートの 施工指針（案）</p> | <p>◆普通セメントを用いてフライアッシュⅡ種を20～30%程度置換したコンクリートでは、同一養生条件下の普通セメントのみを使用したコンクリートと比較して日平均気温が約15℃で2日以上、10℃以下で5日以上養生日数を増加させることを標準とすること、養生期間中のコンクリートの表面温度を10℃以上に保つことを原則とすることなどを記載。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>【日本】 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 2009</p> | <p>◆湿潤養生期間を計画供用期間の級に応じて規定し、厚さ18cm以上の部材で早強、普通および中庸熱ポルトランドセメントを用いる場合はコンクリートの圧縮強度が10N/mm²以上（短期、標準）、15N/mm²以上（長期、超長期）に達したことを確認すれば湿潤養生を打ち切ることができること、脱枠時の圧縮強度が上記の値以上であれば強度（材齢28、91日）と耐久性（中性化）を確保できることなどを記載。</p> <table border="1" data-bbox="427 1249 1433 1373"> <thead> <tr> <th>計画供用期間の級</th> <th>早強ポルトランドセメント</th> <th>普通ポルトランドセメント</th> <th>中庸熱および低熱ポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>短期、標準</td> <td>3日以上</td> <td>5日以上</td> <td>7日以上</td> </tr> <tr> <td>長期、超長期</td> <td>5日以上</td> <td>7日以上</td> <td>10日以上</td> </tr> </tbody> </table> | 計画供用期間の級 | 早強ポルトランドセメント | 普通ポルトランドセメント | 中庸熱および低熱ポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種 | 短期、標準 | 3日以上 | 5日以上 | 7日以上 | 長期、超長期 | 5日以上 | 7日以上 | 10日以上 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 計画供用期間の級 | 早強ポルトランドセメント | 普通ポルトランドセメント | 中庸熱および低熱ポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 短期、標準 | 3日以上 | 5日以上 | 7日以上 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 長期、超長期 | 5日以上 | 7日以上 | 10日以上 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>【米国】 ACI 308R-01 Guide to Curing Concrete</p> | <p>◆セメントの種類により養生期間の最低日数の推奨値を規定し、強度の確保が重要な構造物では材齢28日の圧縮強度の70%が得られるまで養生を継続することが望ましく、一般的なセメントでは7日間の養生でこれを確保できる場合が多いこと、規定された養生期間を遵守することで強度に加えて耐久性も確保できることが多いが、耐久性の確保が重要となる構造物では試験等を行って養生期間を設定することが望ましいことなどを記載。</p> <table border="1" data-bbox="422 1581 1441 1675"> <thead> <tr> <th>セメントの種類</th> <th>普通セメント (Type I)</th> <th>耐硫酸セメント (Type II)</th> <th>早強セメント (Type III)</th> <th>低発熱セメント (Type IV)</th> <th>混合セメント</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>養生期間の最低日数</td> <td>7日</td> <td>10日</td> <td>3日</td> <td>14日</td> <td>Variable</td> </tr> </tbody> </table> | セメントの種類 | 普通セメント (Type I) | 耐硫酸セメント (Type II) | 早強セメント (Type III) | 低発熱セメント (Type IV) | 混合セメント | 養生期間の最低日数 | 7日 | 10日 | 3日 | 14日 | Variable | | | | | | | | | | | | | | | | |
| セメントの種類 | 普通セメント (Type I) | 耐硫酸セメント (Type II) | 早強セメント (Type III) | 低発熱セメント (Type IV) | 混合セメント | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 養生期間の最低日数 | 7日 | 10日 | 3日 | 14日 | Variable | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>【欧州】 EN 13670:2009 Execution of concrete structures</p> | <p>◆養生は、プラスチック収縮の最小化、表層の強度の確保、表層の耐久性の確保、苛酷な気象条件や凍結、振動、衝撃、損傷から保護するために実施することを記載。</p> <p>◆養生期間はコンクリートの表層の品質の発現の関数となること、表層の品質の発現は圧縮強度とマチュリティの関係に基づくこと、マチュリティの計算は表層から最大で10mmの位置のコンクリート温度か雰囲気の日平均温度を使用すること、リバウンドハンマーを使用しての評価も可であることなどを記載。</p> <p>◆材齢28日の圧縮強度の35、50、70%のうち、いずれの強度が確保できるまで養生を行うかによって『養生クラス』を設定し、『コンクリートの強度発現の速さ』と『気温』に応じて『最低湿潤養生日数』を規定。『養生クラス』は、環境条件や材料、かぶりに応じて設定することを記載。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

表-7 実験の内容

| 対象項目 | 実施内容 |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 圧縮強度 | ◆脱型時、湿潤養生終了時、材齢7、28、91日で、JISA 1108に準拠して測定 材齢91日以降で土木研究所の屋外に供試体を暴露し、平成25年度に材齢1年の測定を実施予定 |
| ヤング係数 | ◆材齢28、91日で、コンプレッソメータを用いてJISA 1149に準拠して測定 材齢91日以降で土木研究所の屋外に供試体を暴露し、平成25年度に材齢1年の測定を実施予定 |
| 中性化抵抗性 | ◆JISA 1153に準拠して促進中性化試験を実施 促進中性化面は片側の側面(100×400mm)のみとし、養生条件によらず材齢56日から試験を開始 ◆材齢91日以降で土木研究所の屋外と屋内に暴露し、実環境での中性化深さを測定予定* |
| 塩化物イオン浸透抵抗性 | ◆非常定・電気泳動試験 ¹⁵⁾ により塩化物イオンの浸透速度を測定 ◆材齢91日以降で新潟の暴露試験場に供試体を暴露し、実環境で塩化物イオン拡散係数を測定予定** |
| 凍結融解抵抗性 | ◆材齢28日まで標準養生した供試体でJISA 1148に準拠して凍結融解試験を実施 測定は凍結融解サイクル0、30、60、90、120、150、180、240、300、…、660回後に実施 |

※中性化と塩化物イオン浸透に関する暴露試験では、H23年度に開始した暴露試験¹⁵⁾と同様の□100×200mmの角柱供試体を使用

湿潤養生日数に関する規定内容を比較整理した。また、低炭素型セメントを用いて養生条件の異なるコンクリート供試体を製作し、養生条件の違いが強度特性と耐久性に与える影響について検討した。

3.1 国内外の養生に関する規定内容

日米欧の主要な基規準類^{9)~14)}における養生に関する規定内容の概要を表-6に示す。養生で確保するコンクリートの品質や湿潤養生日数は基規準類によって異なり、これらの特徴を簡潔に要約すると次の3点となる。

- (1) 養生で確保するコンクリートの品質としては様々なものが規定されていたが、いずれの基規準類においても湿潤養生日数を検討する際に考慮すべき品質として強度特性と耐久性を取り上げていた。
- (2) 混和材を混合した低炭素型セメントを用いる場合、セメント単味の場合と比較して湿潤養生期間を長くすることが求められ、低温時にはさらに延長する必要があることを規定しているものがあつた。
- (3) 高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを高混合する場合(C種相当以上)や2種類以上の混和材を同時に混合する場合(三成分系、四成分系)、早強セメントをベースセメントとして用いる場合などの湿潤養生日数については明確な規定が存在しなかった。

これらのことを踏まえると、既存の基規準類で対象としていない種類の低炭素型セメント(C種相当以上、三・四成分系、早強セメントベース)を積極利用していくためには、実験により材齢初期の養生条件の違いがコンクリートの強度特性と耐久性に与える影響を明確にし、湿潤養生日数の適切な設定方法を検討しておくことが不可欠であると考えられる。

3.2 実験の概要

平成24年度に開始した実験の内容を表-7に示す。低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度特性と耐久性に養生条件が与える影響を明らかにするため、養生条件の異なるコンクリート供試体を多数製作し、特に圧縮強度と中性化抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響に着目して検討を行った。また、同時に製作して材齢28日まで標準養生を行った供試体を用いて凍結融解試験を行い、低炭素型セメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性を把握するための基礎データを得た。なお、平成24年度の実験では、練混ぜ、打込み、養生は20°Cに管理された室内で行った。

実験で用いた結合材の品質を表-8、コンクリート配合とフレッシュ性状を表-9に示す。ここでは主に鉄筋コンクリート構造物で低炭素型セメントを使用することを想定し、普通セメント単味の供試体を基本に、JIS R 5211に規定された高炉セメントB種(50%)とC種(70%)に相当する分量の高炉スラグ微粉末を混合した供試体とJIS R 5213に規定されたフライアッシュセメントB種(20%)とC種(30%)に相当する分量のフライアッシュを混合した供試体を製作した。また、C種に相当する分量の高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混合した供試体では、ベースセメントの違いによる影響を検討するため早強セメントを用いた供試体と、水結合材比(W/B)の違いによる影響を検討するためW/B=35%とした供試体も製作した。なお、ここでは混和材の種類と混合率、ベースセメントの種類、水結合材比が養生条件と強度特性、耐久性の関係に与える影響を検討することを主目的としたため、全配合で単位水量(165kg/m³)と

表-8 結合材の品質

| 記号 | 結合材の種類 | 密度 (g/cm ³) | 比表面積 (cm ² /g) | 化学成分 (%) | | | | | | |
|-----|--------------|----------------------------|------------------------------|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|
| | | | | ig.loss | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
| OPC | 普通ポルトランドセメント | 3.16 | 3200 | 2.00 | 15.46 | 4.75 | 3.35 | 68.08 | 1.00 | 2.07 |
| HPC | 早強ポルトランドセメント | 3.14 | 4630 | 1.11 | 14.18 | 4.48 | 2.88 | 70.21 | 1.02 | 2.89 |
| BS4 | 高炉スラグ微粉末4000 | 2.89 | 4460 | 0.10 | 32.89 | 14.30 | 0.32 | 42.28 | 5.71 | 2.00 |
| FA | フライアッシュII種 | 2.30 | 4280 | 2.7 | 56.0 | 28.9 | 4.3 | 2.2 | 0.9 | 0.4 |

表-9 コンクリート配合とフレッシュ性状

| 配合 | W/B (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | s/a (%) | 試験値 | | |
|--------|------------|--------------------------|------------------|-----|-----------|-----------|-----------|------|------------|------------|------------|--------------|
| | | W | B= PC+BS4+BS6+FA | | | | S | G | | SL (cm) | AIR (%) | TEMP (°C) |
| | | | OPC | HPC | BS4 | FA | | | | | | |
| N50 | 50 | 165 | 330 | | | | 827 | 968 | 47.2 | 11.0 | 4.8 | 20.1 |
| N50B50 | | | 165 | | 165 (50%) | | 815 | | 46.8 | 12.0 | 4.5 | 20.9 |
| N50F20 | | | 264 | | | 66 (20%) | 807 | | 46.6 | 12.0 | 5.0 | 20.1 |
| N50B70 | | | 99 | | 231 (70%) | | 810 | | 46.6 | 9.5 | 3.8 | 21.1 |
| N50F30 | | | 231 | | | 99 (30%) | 797 | | 46.2 | 12.0 | 4.4 | 21.0 |
| H50B70 | | | | 99 | 231 (70%) | | 809 | | 46.6 | 11.5 | 4.9 | 19.4 |
| H50F30 | | | | 231 | | 99 (30%) | 796 | | 46.2 | 12.0 | 4.8 | 20.9 |
| N35B70 | | | 35 | 165 | 141 | | 330 (70%) | | | 688 | 968 | 42.6 |
| N35F30 | 330 | | | | | 141 (30%) | 670 | 42.0 | 14.5 | 5.4 | | 21.0 |

※混和材の単位量の () 内の値は各混和材の結合材に占める分量の割合を表示

※細骨材：密度 2.56g/cm³、吸水率 2.23%、粗骨材：密度 2.67g/cm³、吸水率 0.43%と 0.46%を均等に混合、最大寸法 25mm

※混和剤：W/B=35%配合でポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤、W/B=50%配合でリグニンスルホン酸系の AE 減水剤を使用、フライアッシュ使用配合で高アルキルカルボン酸系の空気連行剤、その他の配合で変性ロジン酸化合物系の空気連行剤を使用

※試験値：スランプ (SL、JISA 1101 に準拠して測定)、空気量 (AIR、JISA 1128 に準拠して測定)、温度 (TEMP、練上り直後)

表-10 供試体の養生条件

| 養生条件 | 記号 | 養生方法 | 対象配合 | | | | | | | | |
|------|-----|--------------------------|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | N50 | N50 B50 | N50 F20 | N50 B70 | N50 F30 | H50 B70 | H50 F30 | N35 B70 | N35 F30 |
| 標準養生 | W | 材齢 28 日まで 20°C の水中で水中養生 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 気中養生 | D | 脱型後から室内で気中養生 | | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 湿潤養生 | C5 | 材齢 5 日まで湿潤養生した後、室内で気中養生 | ● | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | C7 | 材齢 7 日まで湿潤養生した後、室内で気中養生 | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | C10 | 材齢 10 日まで湿潤養生した後、室内で気中養生 | | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | C14 | 材齢 14 日まで湿潤養生した後、室内で気中養生 | | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

※いずれの養生条件・配合の供試体も、打込み直後から翌日まで封かん養生した後、十分に湿らせた養生マットで被覆して湿潤養生し、材齢 3 日に脱型して所定の養生条件 (W、D、C5、C7、C10、C14) で養生を行い、その後は試験時まで 20°C60%RH の室内に静置
 ※屋外暴露用の供試体は材齢 91 日以降でつくば (土木研究所) と新潟の暴露試験場で暴露を開始

単位粗骨材量 (968kg/m³) を一定とした。

供試体の養生条件を表-10 に示す。普通セメント単味の場合と B 種相当の分量の混和材を混合した場合については、既にコンクリート標準示方書で湿潤養生日数の標準が規定されているため、これを参考として、普通セ

メント単味の場合は標準養生 (W) と材齢 5 日まで湿潤養生 (C5) を行った供試体、B 種相当の分量の混和材を混合した場合は標準養生 (W) と材齢 7 日まで湿潤養生 (C7) を行った供試体を製作した。一方、C 種相当の分量の混和材を混合した場合には、標準的な湿潤養生日数

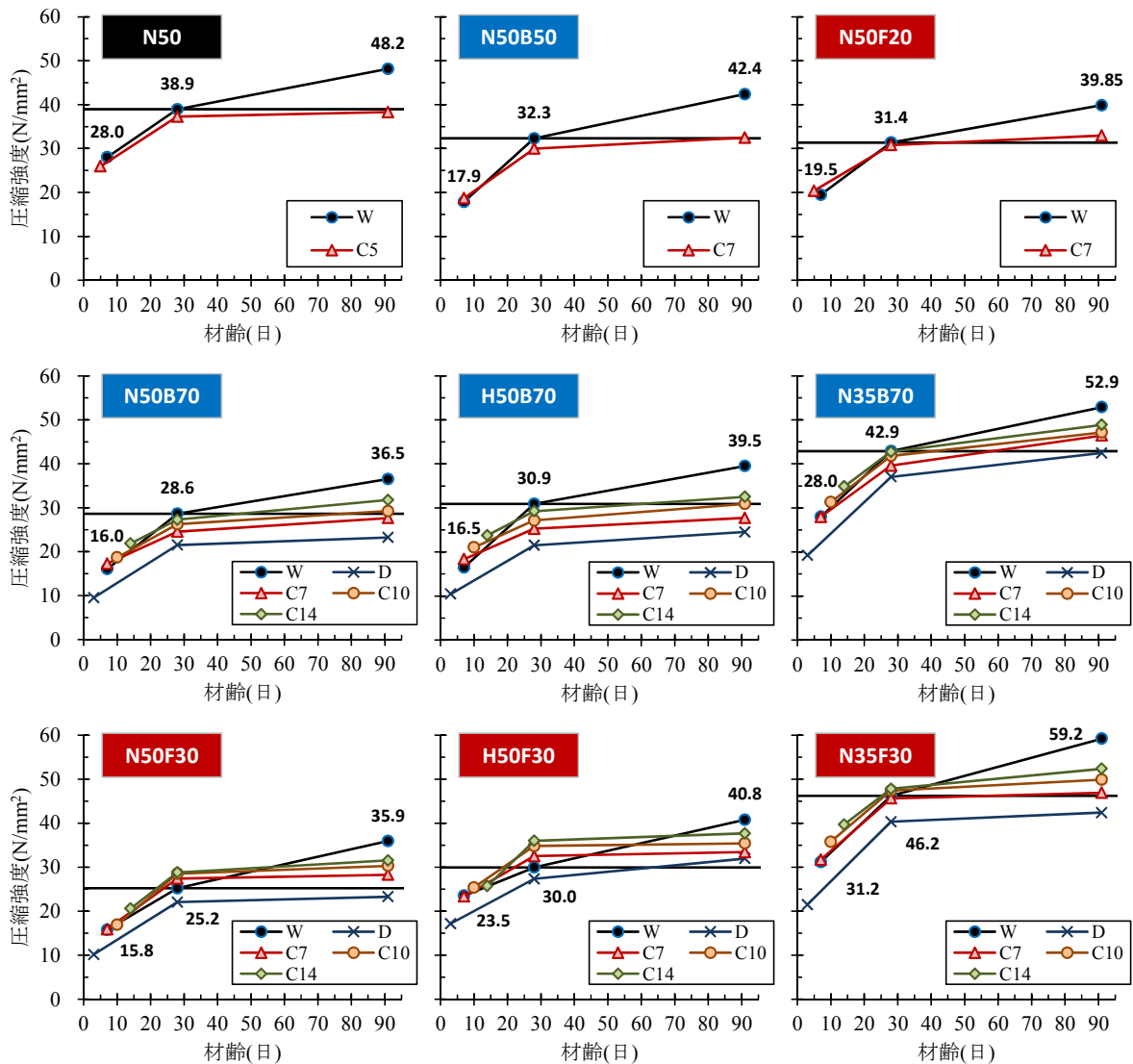


図-14 配合・養生条件ごとの圧縮強度の推移

※グラフ中の直線は標準養生を行った供試体の材齢28日の圧縮強度、数字は標準養生を行った供試体の圧縮強度を表示

が規定されていないため、養生条件の違いによる影響を明らかにするため、標準養生(W)、脱型直後から気中養生(D)、材齢7、10、14日まで湿潤養生(C7、C10、C14)など多様な養生条件の供試体を製作した。

3.3 実験の結果

3.3.1 養生条件が圧縮強度に与える影響

各配合の養生条件ごとの圧縮強度の推移を図-14に示す。グラフ中の直線は標準養生を行った供試体の材齢28日の圧縮強度、数値は標準養生を行った供試体の圧縮強度を示す。いずれの配合と養生条件においても、材齢の進展とともに圧縮強度が増加したことがわかる。各配合の標準養生を行った供試体の圧縮強度を比較すると、W/B=50%の場合、C種相当の分量の高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを混合した供試体(N50B70、N50F30)では普通セメント単味の供試体(N50)と比較

して圧縮強度が小さくなる傾向にあった。しかし、水結合材比を低減してW/B=35%とすることにより(N35B70、N35F30)、W/B=50%の普通セメント単味の供試体と同等以上の圧縮強度が得られた。

また、早強セメントをベースセメントとして用いた供試体の圧縮強度に着目すると(H50B70、H50F30)、同量の混和材を普通セメントに混合した供試体(N50B70、N50F30)よりも圧縮強度が大きくなる傾向にあったことがわかる。このため、混和材を高混合した供試体で材齢初期の圧縮強度の低下を避けるための対策としては、水結合材比を低減することや早強セメントをベースセメントとして用いることが有効であると考えられる。ただし、高炉スラグ微粉末を70%混合した供試体ではフライアッシュを30%混合した供試体よりもセメントの使用量が少なく、早強セメントの使用による圧縮強度の改善効果が

相対的に小さくなった点には注意が必要である。

材齢91日の圧縮強度に着目すると、いずれの配合においても湿潤養生期間を長くするほど圧縮強度が大きくなっており、材齢初期の養生条件とその後の圧縮強度の発現が密接な関係にあったことが読み取れる。ただし、湿潤養生期間を長くすることで得られる圧縮強度の増加量は徐々に逡減する傾向にあった。若干のばらつきが認められるが、湿潤養生期間を材齢3日から材齢7日に延長した場合と材齢10日から材齢14日に延長した場合とでは、前者よりも後方で圧縮強度の増加量が小さくなる傾向にあった。

一方、材齢28日の圧縮強度に着目すると、混和材の種類によって異なる傾向が得られたことがわかる。高炉スラグ微粉末を用いた供試体では養生期間を長くするほど圧縮強度が大きくなったが、フライアッシュを用いた供試体では材齢28日まで標準養生を行った供試体よりも材齢7~14日まで湿潤養生を行った供試体で圧縮強度が大きくなった。この原因については、現時点では必ずしも明確ではないが、圧縮強度試験に用いた供試体の含水状態が影響したのではないかと考えられる。図-6に示したように、フライアッシュを混合した供試体ではセメント単味や高炉スラグ微粉末を混合した供試体よりも乾燥開始後の質量減少量が大きく、水分の逸散量が多くなると考えられた。一般に湿潤養生後に乾燥させたコンクリートでは湿潤養生直後のコンクリートよりも圧縮強度が大きくなることが知られており、乾燥による水分の逸散量の多いフライアッシュを用いた供試体ではこの影響が材齢28日の試験結果に顕著に現れたのではないかと考えられる。ただし、その後の材齢91日の試験結果では、フライアッシュを用いた供試体でも標準養生を行った供試体の圧縮強度が最も大きくなった。

3. 3. 2 圧縮強度に着目した湿潤養生日数の検討

先述したように、コンクリート標準示方書では、普通セメント単味の場合に5日、B種相当の分量の混和材を混合する場合に7日を湿潤養生日数の標準として規定している。図-14によると、N50、N50B50、N50F20では、上記の標準的な養生日数で湿潤養生を行った供試体の圧縮強度は、材齢28日の時点では標準養生を行った供試体の圧縮強度よりも劣ったが、材齢91日の時点では標準養生を行った材齢28日の圧縮強度と概ね同程度となった。すなわち、圧縮強度の観点からは、コンクリート標準示方書で規定されている標準的な湿潤養生日数は、材齢91日の時点において、標準養生を行った材齢28日の供試体の圧縮強度と概ね同等の圧縮強度を得るために必要な湿

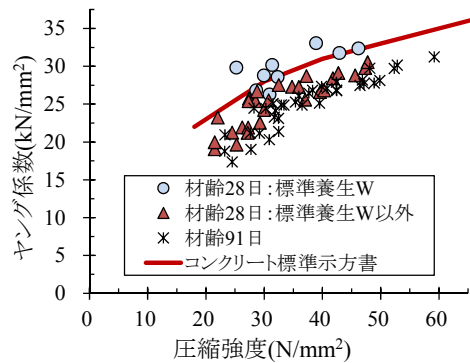


図-15 圧縮強度とヤング係数

潤養生日数を示しているのではないかと考えられる。

このことを踏まえると、C種相当の分量の混和材を混合した供試体においても、同様のアプローチにより、圧縮強度の観点から湿潤養生日数を設定することができる。まず、C種相当の分量の高炉スラグ微粉末を混合した供試体のうち、N50B70とH50B70では材齢10日、N35B70では材齢7日まで湿潤養生を行うことにより、材齢91日の時点の圧縮強度が標準養生を行った材齢28日の供試体の圧縮強度と同等以上になる。すなわち、圧縮強度の観点からは、水結合材比が同一であれば、高炉スラグ微粉末の混合率をC種相当まで高める場合にはB種相当の場合よりも養生期間を長くすることが必要となるが、水結合材比を低減することで養生期間を短縮できる可能性があると考えられる。次に、C種類相当の分量のフライアッシュを混合した供試体については、N50F30とN35F30では材齢7日、H50F30では材齢3日まで湿潤養生を行うことが必要となる。フライアッシュを用いた供試体ではベースセメントの種類によって湿潤養生の必要日数が異なったが、この原因は、セメントの使用量が高炉スラグ微粉末を用いた供試体と比較して多く、早強セメントの使用により早期に圧縮強度が発現したためではないかと考えられる。また、フライアッシュを用いた供試体では、水結合材比を低減しても、同程度の湿潤養生日数が必要となった。ただし、上記は圧縮強度のみに着目して検討であるため、湿潤養生日数を設定する際には後述する耐久性面への影響も考慮する必要がある。

なお、平成24年度の実験では材齢91日までの圧縮強度を得たが、その後、同時に製作した供試体を土木研究所の屋外に暴露した。このため、平成25年度に材齢1年の圧縮強度試験を行い、材齢初期の養生条件が低炭素型セメントを用いたコンクリートの長期的な強度発現に与える影響を実環境下で検討する予定である。

3. 3. 3 圧縮強度とヤング係数の関係

材齢28、91日の圧縮強度とヤング係数の関係を図-15

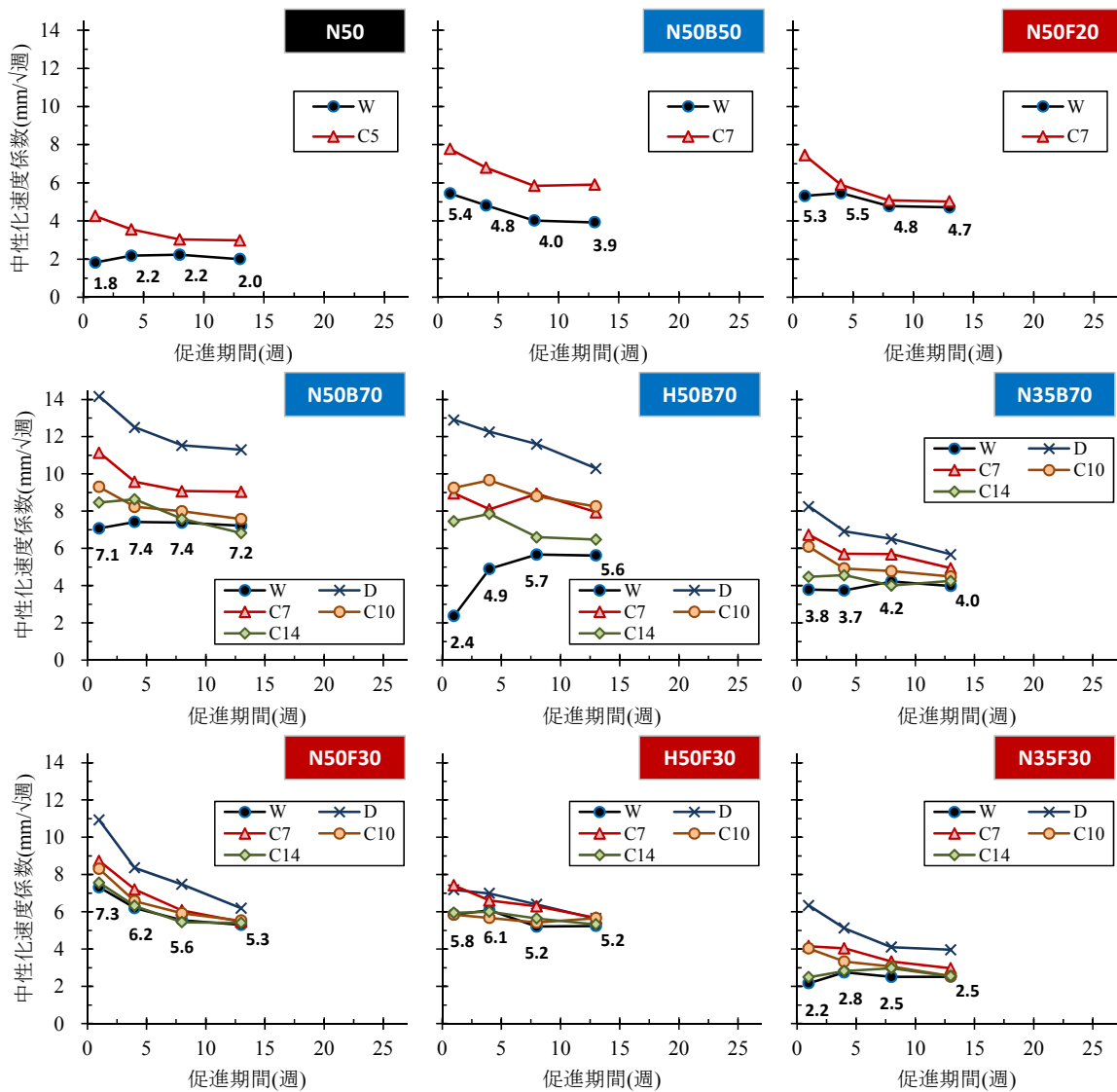


図-16 配合・養生条件ごとの中性化速度係数の推移

※グラフ中の数字は標準養生した供試体の中性化速度係数を表示

に示す。参考のため、コンクリート標準示方書に記載された圧縮強度とヤング係数の関係も併記する。標準養生を行った供試体で養生終了直後の材齢 28 日に得られた圧縮強度とヤング係数の関係は、コンクリート標準示方書に示されたものと概ね一致した。一方、標準養生以外の養生を行った供試体を室内に静置して材齢 28 日で得られた結果と全供試体の材齢 91 日で得られた結果は、コンクリート標準示方書に示された圧縮強度とヤング係数の関係よりも下側にプロットされた。この原因については、試験時の供試体の含水状態の違いなどが考えられるが、現時点では必ずしも明確ではない。ただし、養生条件の異なる供試体においても、材齢 28 日と材齢 91 日の圧縮強度とヤング係数の関係は概ね線形関係にあった。

3. 3. 4 養生条件が中性化抵抗性に与える影響

促進中性化試験の促進 1、4、8、13 週後の各時点で得

られた中性化速度係数を図-16 に示す。グラフ中の数値は標準養生を行った供試体の中性化速度係数である。これらの数値を比較すると、W/B=50%で普通セメントをベースセメントとして用いた供試体では、中性化速度係数は、普通セメント単味の供試体 (N50) よりも B 種相当の分量の混和材を混合した供試体で大きく (N50B50、N50F20)、C 種相当の分量の混和材を混合した供試体ではさらに大きくなった (N50B70、N50F30)。水結合材比とベースセメントが同じであれば、混和材の混合率を高くするほど、中性化速度係数は大きくなった。

高炉スラグ微粉末を 70%混合した供試体とフライアッシュを 30%混合した供試体はいずれも C 種相当の分量の混和材を混合した供試体であるが、セメントの使用量が大幅に異なるため、これらの供試体では湿潤養生日数の長短が中性化速度係数に与える影響が異なった。高炉ス

ラグ微粉末を70%混合した供試体では、フライアッシュを30%混合した供試体よりもセメントの使用量が少なく、養生条件の影響を敏感に受けると考えられるため、湿潤養生日数の長短による中性化速度係数の差が大きくなった。このため、混和材の混合率を高めてベースセメントの使用量を少なくした低炭素型セメントを用いたコンクリートでは、養生条件が促進中性化試験の結果に多大な影響を与え、湿潤養生日数の長短による中性化速度係数の差が明確に現れると考えられる。また、早強セメントをベースセメントとして用いる場合には、水和反応が早期に進展するため材齢初期の圧縮強度の発現と中性化抵抗性の向上の双方を期待でき、水結合材比を低減する場合には、単位結合材量の増加による中性化抵抗性の向上を期待できる。これらの効果はいずれの混和材を用いた供試体においても確認することができたが、特にフライアッシュを30%混合した供試体では明確に現れた。

図-16 で促進期間ごとの中性化速度係数の推移を精査すると、若干のばらつきが認められるが、湿潤養生日数の短い供試体では試験開始後初期の中性化速度係数が大きく、材齢28日まで標準養生を行った供試体では試験期間にかかわらず中性化速度係数が概ね一定となる傾向にあった。すなわち、湿潤養生期間を短くした供試体ではコンクリート表層の品質が標準養生を行った供試体よりも劣っており、養生条件の違いによる供試体表層の品質の差が促進中性化試験の結果に現れたのではないかと考えられる。

図-14 と図-16 のN50、N50B50、N50F20の結果を比較すると、コンクリート標準示方書の標準的な日数の湿潤養生を行うことで得られるコンクリートの品質は、圧縮強度試験と促進中性化試験で異なる傾向にあったことが読み取れる。図-14によると、標準的な日数の湿潤養生を行うことで、材齢91日の時点の圧縮強度が標準養生を行った材齢28日の供試体の圧縮強度と概ね同等となった。一方、図-16によると、標準的な日数の湿潤養生を行った供試体の中性化速度係数は標準養生を行った供試体よりも大きくなった。促進中性化試験の結果を参考として湿潤養生日数を設定する際には、圧縮強度のように標準養生を行った供試体と同等の品質を確保できる湿潤養生日数を設定することは困難と考えられる。このため、標準的な湿潤養生日数が定められていない結合材において、促進中性化試験の結果をもとに湿潤養生日数を検討する方法としては、次の2種類の方法が考えられる。ひとつの方法としては、まずN50、N50B50、N50F20で標準的な日数の湿潤養生を行った場合に標準養生を行った

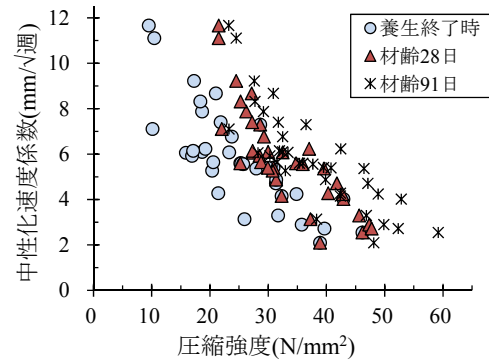


図-17 圧縮強度と中性化速度係数：材齢

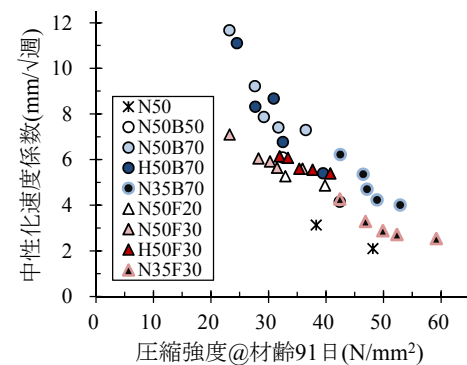


図-18 圧縮強度と中性化速度係数：結合材

場合と比較してどの程度の割合の中性化速度係数が得られるかを明確にした上で、対象とする結合材で標準養生を行った供試体と同程度の割合の中性化速度係数が得られる湿潤養生日数を特定することが挙げられる。もうひとつの方法としては、湿潤養生日数を延長することで得られる中性化速度係数の低下程度が概ね一定となる時点を特定し、これを湿潤養生の終了時とすることが考えられる。この点については、平成25年度に促進26週後の結果を図-16に追加し、最終的な中性化速度係数を算出して検討を行う予定である。

3.3.5 圧縮強度と中性化速度係数の関係

圧縮強度と中性化速度係数の関係を図-17に示す。圧縮強度は、養生終了時、材齢28、91日の3時点で得られた値であり、中性化速度係数は促進13週までの促進中性化試験の結果を回帰分析して求めた値である。各時点の圧縮強度と促進中性化試験で得られた中性化速度係数は概ね線形関係にあり、圧縮強度が大きいくほど中性化速度係数が小さくなった。

次に、配合ごとの材齢91日の圧縮強度と中性化速度係数の関係を図-18に示す。先述したように圧縮強度と中性化速度係数は概ね線形関係にあったが、厳密な見方をすれば、結合材の種類により圧縮強度と中性化速度係数の関係は異なる。例えば、普通セメント単味の供試体

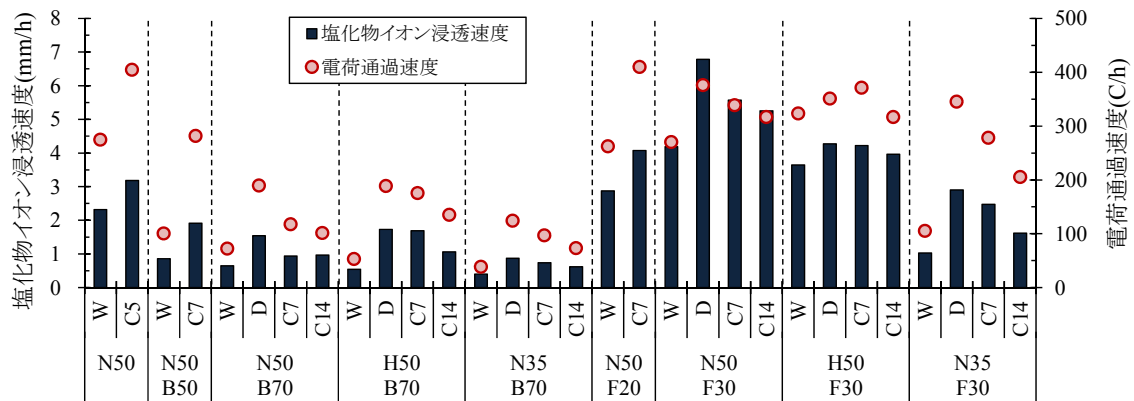


図-19 塩化物イオン浸透速度と電荷通過速度

(N50)、高炉スラグ微粉末を70%混合した供試体(N50B70)、フライアッシュを30%混合した供試体(N50F30)の3者では、同一の圧縮強度であってもセメントの使用量が少ないほど中性化速度係数が大きくなる傾向にあった。しかし、圧縮強度と中性化速度係数が概ね線形関係となることも事実であり、セメントの使用量あるいは混和材の混合率の違いによる影響を十分に把握した上であれば、圧縮強度からおおよその中性化抵抗性を簡易に推定することも可能ではないかと考えられる。

なお、促進中性化試験はCO₂濃度5%、室温20℃、湿度60%RHの環境で実施するため、一般的な土木構造物が置かれる環境よりも苛酷な条件下で試験を行うこととなり、促進中性化試験で得られる結果が実環境下におけるコンクリートの中性化抵抗性とどのような関係にあるか明確でない。このため、促進中性化試験に用いた供試体と同時に製作した暴露供試体を材齢91日以降で土木研究所の屋外と屋内に暴露し、実環境下で材齢初期の養生条件が低炭素型セメントを用いたコンクリートの中性化抵抗性に与える影響を検証することとした。平成25年度以降で暴露供試体の解体調査を行い、促進中性化試験の結果の妥当性について検討する予定である。

3.3.6 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

非定常・電気泳動試験で得られた塩化物イオンの浸透速度と通電により供試体中を流れた電荷の通過速度を図-19に示す。平成23年度の報告書¹⁵⁾では通電時間の異なる3体の供試体の塩化物イオン浸透深さから拡散係数を算出する方法を提案したが、平成24年度の実験では、1体の供試体で得られた塩化物イオン浸透深さを通電時間で除して塩化物イオン浸透速度を算出し、これを用いて養生条件の違いが塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響を比較することとした。電荷の通過速度は、通電中に測定した電流を換算して積算通過電荷量とし、これを通電

時間で除して電荷通過速度とした。供試体はφ100×100mmの型枠を用いて製作した。養生条件の違いが塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響を明らかにするため、脱枠後に型枠底面を上面として所定の養生を行い、材齢91日以降で型枠底面側から厚さ50mmとなるように供試体を切断し、型枠底側を非定常・電気泳動試験での塩化物イオンの浸透面とした。通電時間は、通電中に塩化物イオンが供試体を貫通しない範囲内で、なるべく長くなるように6~18時間で設定した。

若干のばらつきが認められるが、いずれの配合においても、養生期間を長くするほど、塩化物イオン浸透速度が小さくなり、塩化物イオン浸透抵抗性が向上したことがわかる。結合材の種類に着目すると、塩化物イオン浸透速度は、高炉スラグ微粉末を用いた供試体で小さく、フライアッシュを用いた供試体で大きくなる傾向にあった。これまでに示した圧縮強度や中性化と異なり、塩化物イオン浸透抵抗性については混和材の種類の影響が顕著に現れた。また、フライアッシュを用いた供試体では塩化物イオン浸透速度が大幅に大きくなったが、この原因は今回の測定を材齢91日経過直後で行ったためと考えられる。このように、塩化物イオン浸透抵抗性は結合材の種類や試験時の材齢の影響を受ける可能性が高く、これらの影響により供試体の内部で固定化される塩化物イオンや供試体の内部へ浸透する塩化物イオンの量が大きく異なると考えられる。このため、同時に製作した供試体を材齢91日以降で屋外に暴露しており、平成25年度に、材齢初期の養生条件が材齢1年経過後の塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響を検討する予定である。

また、電荷通過速度も塩化物イオン浸透速度と同様に、養生期間を長くするほど小さくなった。しかし、結合材の種類や水結合材比によって塩化物イオン浸透速度と電荷通過速度の大小関係は異なっており、結合材の種類が

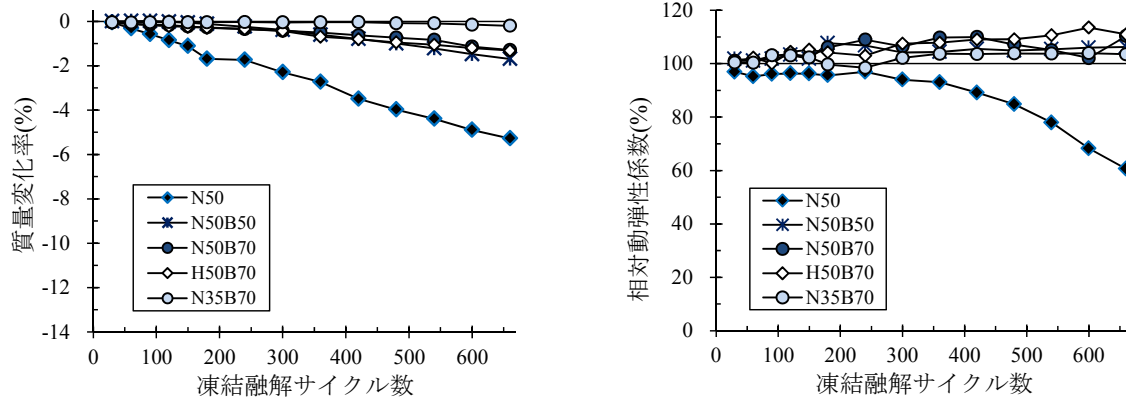


図-20 質量減少率と相対動弾性係数：高炉スラグ微粉末使用配合

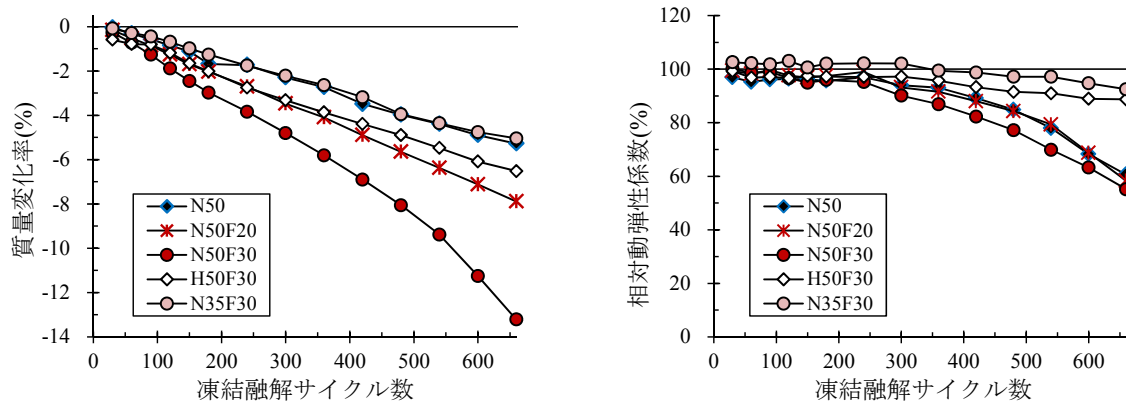


図-21 質量減少率と相対動弾性係数：フライアッシュ使用配合

異なる場合には電荷通過速度のみでは塩化物イオン浸透抵抗性を適切に評価できない恐れがある点には注意が必要である。

なお、材齢初期の養生条件が塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響を実環境で把握するため、同時に製作した暴露供試体を材齢 91 日以降で新潟の暴露試験場に暴露した。平成 25 年度以降で、暴露供試体の解体調査を行い、材齢初期の養生条件が低炭素型セメントを用いたコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響について実環境で得られたデータを用いて検討を行う予定である。

3. 3. 7 凍結融解抵抗性

凍結融解試験で得られた質量減少率と相対動弾性係数を図-20、21 に示す。ここでは、材齢 28 日まで標準養生を行った供試体を対象として、養生終了直後から凍結融解試験を開始した。また、供試体製作時に測定した練上り直後のフレッシュコンクリートの空気量はいずれも $4.5 \pm 1.0\%$ の範囲内にあった (表-9)。

凍結融解試験の結果は、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュのいずれを混和材に用いたかによって異なる結果となった。高炉スラグ微粉末を用いた供試体では、普通セメント単味の供試体と比較して、質量減少率は小さく、相対動弾性係数は大きくなる傾向にあった。材齢

28 日の圧縮強度 (図-14) は、N35B70 以外では、普通セメント単味の供試体よりも小さくなったが、高炉スラグ微粉末を用いた供試体の凍結融解試験の結果は普通セメント単味の供試体よりも良好な結果となった。特に、相対動弾性係数は凍結融解サイクル 660 回後でも試験開始前より増加した。この原因としては、高炉スラグ微粉末を用いた供試体では細孔構造が緻密となったこと、凍結融解作用によって供試体が劣化する一方で、試験中に供試体が水中に置かれて高炉スラグ微粉末の潜在水硬性による水和反応が進んだことなどが考えられる。

一方、フライアッシュを用いた供試体では、普通セメント単味の供試体と比較して、質量減少率は N35F30 以外で大きく、相対動弾性係数は N50F30 で小さくなった。N50F20 と H50F30 では材齢 28 日以降の圧縮強度が概ね同程度であるが、凍結融解試験による劣化の程度は N50F20 で大きくなっており、フライアッシュを用いた供試体でも圧縮強度の大小と凍結融解抵抗性の良否は必ずしも一致しなかった。また、N35F20 以外では、高炉スラグ微粉末を用いた供試体のように相対動弾性係数が試験開始前よりも増加することはなかった。

今回の実験では高炉スラグ微粉末を用いた供試体と比較してフライアッシュを用いた供試体では凍結融解抵抗

性が劣る結果となったが、この原因は材齢 28 日まで標準養生を行った直後で凍結融解試験を開始したため、フライアッシュのポズラン反応が十分に進展していなかったことなどが考えられる。なお、フライアッシュを用いた供試体の凍結融解サイクル 300 回後の相対動弾性係数は 90 以上であり、今回の実験の範囲内ではフライアッシュを用いたコンクリートも十分な凍結融解抵抗性を有していたと考えられる。

3. 4 まとめ

低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度特性と耐久性に養生条件が与える影響を把握するため、平成 24 年度は、養生条件を実験パラメータの中心に据えて、混和材の種類と混合率、ベースセメントの種類、水結合材比を変化させた供試体を用いた実験を行った。この結果、圧縮強度、中性化抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性は、上記の各パラメータによる影響を受けることを明らかにした。平成 25 年度以降の暴露供試体での試験結果も踏まえた上で、低炭素型セメントを用いたコンクリートの湿潤養生日数の設定方法を検討する予定である。

4. 低炭素型セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇特性

部材断面が大きいコンクリート構造物はコンクリートの打込み量が多く、セメントの水和発熱による内部温度の上昇量が大きくなり、温度上昇時や降下時の体積変化によりひび割れが発生することがある。特に水結合材比が小さく単位結合材量の多いコンクリートを用いる場合には、上述したセメントの水和発熱に加えて、自己収縮に起因するひび割れの発生確率も高くなる。このため、ひび割れの発生確率を評価する方法としてマスコンクリートのひび割れ制御指針¹⁶⁾が制定され、既に複数のセメントの断熱温度上昇特性や自己収縮ひずみの予測式が規定されている。しかし、早強セメントをベースセメントとした場合や C 種相当以上の混和材を混合した場合、2 種類以上の混和材を同時に用いた場合については、これらの予測式は示されていない。混和材を混合した低炭素型セメントはセメントの使用量が少ないため、コンクリート打込み後の温度の上昇速度あるいは上昇量を小さくすることで若材齢のひび割れの発生リスクを低減できる可能性があるが、この効果を適切に評価するためには、断熱温度上昇特性や自己収縮ひずみの予測式を確立することが必要となる。

そこで、平成 24 年度は、プレストレストコンクリート構造物に低炭素型セメントを用いることを想定し、早強

セメントをベースセメントとして用いた 4 種類の配合を対象に、断熱温度上昇特性の予測式を提案するための基礎データを収集することを目的として、断熱温度上昇量の測定を行った。

4. 1 実験の概要

実験で用いた結合材の品質を表-11、コンクリート配合とフレッシュ性状を表-12 に示す。混和材の使用の有無が断熱温度上昇特性に与える影響を明らかにするため、ここでは、水結合材比 (40%)、単位水量 (165kg/m³)、単位粗骨材量 (968kg/m³) を一定として、混和材の混合率を高炉スラグ微粉末 4000 ブレーンで 30%、高炉スラグ微粉末 6000 ブレーンで 50%、フライアッシュ II 種で 20%とした。断熱温度上昇量の測定は、シリコンオイルを熱媒として用いた断熱温度上昇試験装置を使用した。コンクリートの練混ぜは室温 20°C に管理された室内で行い、フレッシュ性状を確認した後、直ちに断熱温度上昇試験装置に設置して測定を開始した。

4. 2 実験の結果

断熱温度上昇量の測定結果を図-22 に示す。混和材を用いた場合、早強セメント単味の場合と比較して、測定開始直後の断熱温度の上昇速度が小さくなる傾向にあり、混和材の使用による効果が現れたと考えられる。ただし、材齢 7 日の時点の断熱温度上昇量を早強セメント単味の場合と比較すると、高炉スラグ微粉末 6000 ブレーンを 50%置換した場合に大きくなり、高炉スラグ微粉末 4000 ブレーンを 30%置換した場合に同程度になり、フライアッシュ II 種を 20%置換した場合に小さくなった。

平成 24 年度の実験では、単位結合材量を 413kg/m³、コンクリートの練上がり温度を 20°C とし、早強セメントをベースセメントとしたコンクリートの断熱温度上昇特性について基礎的なデータを得た。断熱温度上昇量の予測式を提案するためには単位結合材量とコンクリートの練上がり温度をパラメータとした測定を行う必要があり、この点については平成 25 年度以降の実験で検討する予定である。

5. 低炭素型セメントを用いたコンクリートの材齢 1 年の強度特性

5. 1 実験の概要

低炭素型セメントを用いたコンクリートの長期的な強度特性を把握することを目的として、平成 23 年度に開始した暴露試験¹⁵⁾で土木研究所の屋外に暴露している円柱供試体 (φ100×200mm) を用いて、材齢 1 年の圧縮強度試験を行った。供試体は、混和材の混合率やベースセ

表-11 結合材の品質

| 記号 | 結合材の種類 | 密度 (g/cm ³) | 比表面積 (cm ² /g) | 化学成分 (%) | | | | | | |
|-----|---------------|----------------------------|------------------------------|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|
| | | | | ig.loss | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
| HPC | 早強ポルトランドセメント | 3.14 | 4570 | 0.88 | 15.35 | 4.11 | 2.55 | 70.07 | 1.26 | 3.14 |
| BS6 | 高炉スラグ微粉末 6000 | 2.91 | 5960 | 0.09 | 32.13 | 13.87 | 0.60 | 42.36 | 5.68 | 2.83 |
| BS4 | 高炉スラグ微粉末 4000 | 2.89 | 4560 | 0.08 | 32.69 | 13.35 | 0.33 | 42.48 | 6.29 | 2.11 |
| FA | フライアッシュ II 種 | 2.30 | 4280 | 2.7 | 56.0 | 28.9 | 4.3 | 2.2 | 0.9 | 0.4 |

表-12 コンクリート配合とフレッシュ性状

| 配合 | W/B (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | s/a (%) | 試験値 | | | |
|---------|------------|--------------------------|------------------|-----------|-----------|----------|-----|------------|------|------------|------------|--------------|
| | | W | B=HPC+BS4+BS6+FA | | | | S | | G | SL (cm) | AIR (%) | TEMP (°C) |
| | | | HPC | BS4 | BS6 | FA | | | | | | |
| H40 | 40 | 165 | 413 | | | | 758 | 968 | 45.0 | 14.0 | 5.2 | 20.8 |
| H40B430 | | | 289 | 124 (30%) | | | 749 | | 44.7 | 14.5 | 4.5 | 22.4 |
| H40B650 | | | 206 | | 206 (50%) | | 745 | | 42.9 | 14.5 | 4.7 | 22.4 |
| H40F20 | | | 330 | | | 83 (20%) | 734 | | 42.4 | 12.5 | 5.5 | 21.1 |

※混和材の単位量の（ ）内の値は各混和材の結合材に占める分量の割合を表示

※細骨材：密度 2.56g/cm³、吸水率 2.23%、粗骨材：密度 2.67g/cm³、吸水率 0.43%と 0.46%を均等に混合、最大寸法 25mm

※混和剤：ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤、フライアッシュ使用配合で高アルキルカルボン酸系の空気連行剤、その他の配合で変性ロジン酸化合物系の空気連行剤を使用

※試験値：スランプ (SL、JISA 1101 に準拠して測定)、空気量 (AIR、JISA 1128 に準拠して測定)、温度 (TEMP、練上り直後)

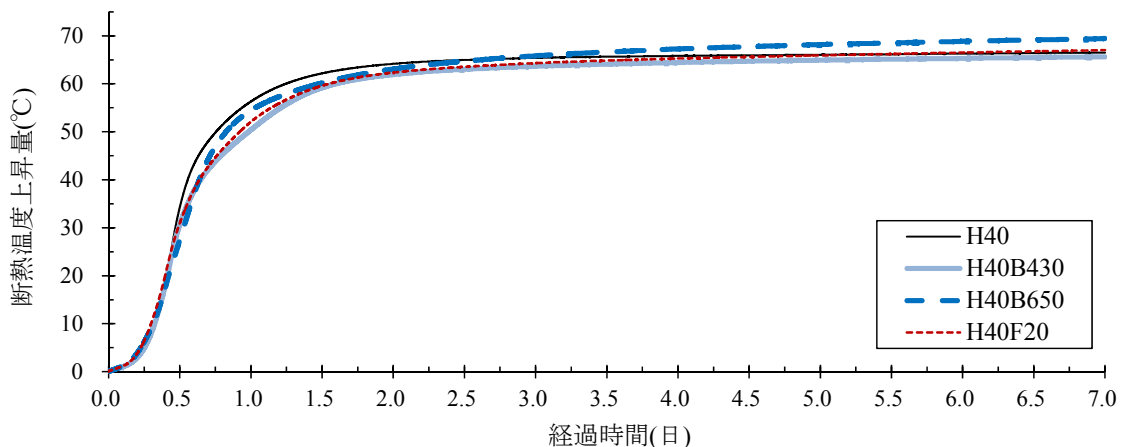


図-22 断熱温度上昇量

メントの種類、水結合材比などが異なる 26 種類の配合であり、材齢 91 日以降で土木研究所の屋外に暴露したものである。圧縮強度は JIS A 1108、ヤング係数はコンプレッソメータを用いて JIS A 1149 に準拠して測定した。

5. 2 実験の結果

材齢 1 年までの圧縮強度を図-23 に示す。材齢 91 日までの結果によると、混和材を混合した供試体の圧縮強度は、セメント単味の供試体の圧縮強度よりも小さくなり、この差は混和材の混合率を高くするほど大きくなる傾向にあった。材齢 1 年の結果によると、B 種相当の分量の混和材を混合した供試体の圧縮強度は、セメント単味の

供試体の圧縮強度と概ね同等となった。混和材を用いた供試体では材齢 91 日から 1 年までの圧縮強度の増加量が大きく、材齢の経過とともに圧縮強度の長期的な発現を期待できると考えられる。ただし、C 種類相当以上の混和材を混合した供試体の圧縮強度は材齢 1 年の時点でもセメント単味の供試体よりも小さい。C 種相当以上の混和材を混合した供試体でセメント単味の供試体と同等の圧縮強度を確保するためには、水結合材比や単位水量を低減するなどの対策が必要になると考えられる。

また、材齢 28 日、91 日、1 年の時点における圧縮強度とヤング係数の関係を図-24 に示す。ここでは、コンク

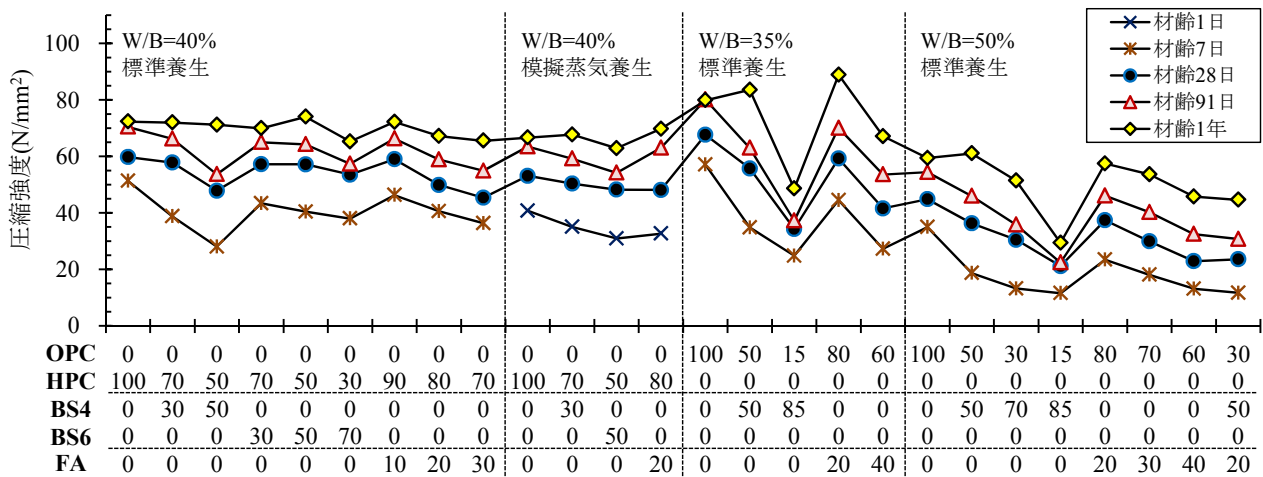


図-23 材齢1年までの圧縮強度

※グラフ下の数字は、OPC、HPC、BS4、BS6、FA の各結合材の使用割合を質量%で表示

リート標準示方書における圧縮強度とヤング係数の関係も併記する。材齢1年の圧縮強度とヤング係数の関係は、コンクリート標準示方書に記載されている関係と概ね同様であり、ヤング係数の長期的な推移は圧縮強度から推定できる可能性があると考えられる。

なお、今後は、材齢3年の時点で圧縮強度試験を行い、低炭素型セメントを用いたコンクリートの長期的な強度特性を把握する予定である。

6. 低炭素型セメントを用いたコンクリート構造物のライフサイクルをとしたCO₂排出削減効果

コンクリート構造物の建設に伴って発生するCO₂排出量を定量的に評価するため、コンクリートの各構成材料の製造段階で排出されるCO₂排出量のインベントリーデータが様々な機関で作成されている^{17)、18)}。また、社会資本全般を対象としてライフサイクルをとしたCO₂排出量を定量的に評価する試みも行われている¹⁹⁾。しかしながら、低炭素型セメントの使用により、コンクリート構造物のライフサイクルでどの程度のCO₂排出削減効果が得られるかについては必ずしも明確にされていない。

平成24年度は、プレストレストコンクリート構造物を対象とした既存のCO₂排出量の試算結果²⁰⁾を参考として、低炭素型セメントの使用により、コンクリート構造物のライフサイクルをとしたCO₂排出削減効果を定量的に把握することを試みた。

6.1 試算の概要

平成24年度の試算では下記の5項目を前提条件とした。

- (1) 試算対象は、文献20)に準拠し、上部構造（プレストレストコンクリート構造、3構造形式）、下部構造（鉄筋コンクリート構造）、舗装で構成される道路橋

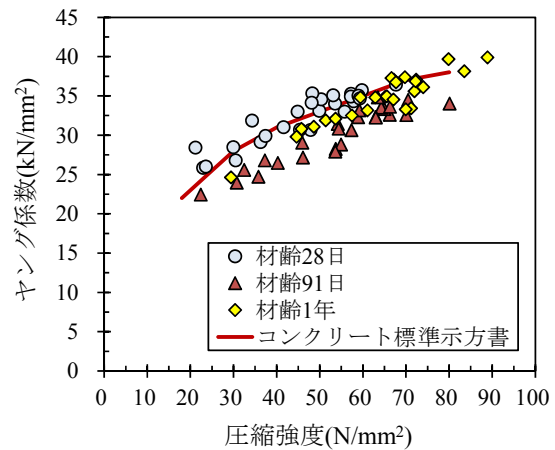


図-24 圧縮強度とヤング係数：材齢1年まで

とした（表-13）。

- (2) CO₂排出量は、建設時（使用材料、施工、輸送）、供用時（舗装の維持補修、輸送）、解体撤去時（解体、輸送）の各ステージで排出されるCO₂排出量を積み上げ計算した。
- (3) 供用年数は100年とし、供用期間中に上部構造と下部構造の補修は行わないものとした。
- (4) コンクリート配合は、セメント単味、高炉スラグ微粉末使用、フライアッシュ使用で2種類ずつ計6種類とした（表-14）。上部構造ではプレストレス導入時の圧縮強度を確保することが重要となるため、第2章の収縮・クリープ試験の示方配合（表-3）を参考に、セメント単味でW/B=40%、混和材を用いる場合でW/B=35%とし、混和材の混合率はB種類相当とした。下部構造では混和材の使用の有無にかかわらずW/B=50%とし、混和材の混合率はC種類相当とした。
- (5) 施工や供用、解体撤去の方法はセメント単味と混和

表-13 試算対象

| No. | 上部構造 | 下部構造 | 舗装 |
|-----|-----------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| 1 | PC 単純プレテンT 桁橋 橋長 20.8m、橋幅 10.7m=0.6+9.5+0.6 | 直接基礎 橋脚高 10m | 10年に1回表層切削オーバーレイと 全層打ち替えを交互に実施 |
| 2 | PC 連結ポステンT 桁橋 橋長 78m、桁長 75m=3@25m、橋幅 10.7m=0.6+9.5+0.6 | | |
| 3 | PC 連続箱桁橋 橋長 202m=1+4@50+1、橋幅 10.7m=0.6+9.5+0.6 | | |

表-14 試算で想定したコンクリート配合と各構成材料の CO₂ 排出原単位

| 対象 部材 | 配合 | W/B (%) | 単体量 (kg/m ³) | | | | | | | s/a (%) | |
|-----------------------------------------------|---------|------------|--------------------------|------------------|-------|-----------|-----------|----------|------|------------|------|
| | | | W | B=HPC+BS4+BS6+FA | | | | | S | | G |
| | | | | HPC | OPC | BS4 | BS6 | FA | | | |
| 上部 構造 | H40 | 40 | 165 | 413 | | | | | 758 | 968 | 45.0 |
| | H35B650 | 35 | | 236 | | | 236 (50%) | | 695 | | 42.9 |
| | H35F20 | | | 377 | | | | 94 (20%) | 682 | | 42.4 |
| 下部 構造 | N50 | 50 | | | 330 | | | | 827 | | 47.2 |
| | N50B470 | | | | 99 | 231 (70%) | | 810 | 46.6 | | |
| | N50F30 | | | | 231 | | | 99 (30%) | 797 | | 46.2 |
| CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t) | | | — | 766.6 | 766.6 | 26.5 | 26.5 | 19.6 | 3.7 | 2.9 | — |

※CO₂ 排出原単位：文献17)の値を使用。フライアッシュは、文献18)で輸送過程を考慮した JIS 灰利用の CO₂ 排出原単位として 23.0kg-CO₂/t、JIS 灰の分級に伴う CO₂ 排出原単位として 6 kg-CO₂/t が報告されているが、今回は同一文献の値を使用

表-15 試算におけるコンクリート配合の組み合わせ

| No. | 選定条件 | 上部構造 | 下部構造 |
|-------|------------|---------|---------|
| C 単味 | セメント単味 | H40 | N50 |
| BS 使用 | 高炉スラグ微粉末使用 | H35B650 | N50B470 |
| FA 使用 | フライアッシュ使用 | H35F20 | N50F30 |

材を用いたコンクリートで同様とし、CO₂ 排出削減効果は表-15 の3種類の配合選定（セメント単味（C 単味）、高炉スラグ微粉末使用（BS 使用）、フライアッシュ使用（FA 使用））によるもののみとした。

6. 2 試算の結果

CO₂ 排出量の試算結果を図-25 に示す。ここでは、3種類の上部構造の構造形式ごとに結果を示す。いずれの構造形式においても、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを混合した低炭素型セメントを用いることにより、コンクリート構造物のライフサイクルをとおした CO₂ 排出量を削減できることがわかる。また、いずれの構造形式においても、使用材料の製造に由来する CO₂ 排出量が最も多く、セメント単味の場合には全体の約 6 割を占めた。低炭素型セメントを用いる場合、セメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換することにより、セメントの使用量を減少させ、使用材料の製

造に由来する CO₂ 排出量を削減できる。使用材料の製造に由来する CO₂ 排出量はコンクリート構造物のライフサイクルの中でも最も CO₂ 排出量が多い部分であり、低炭素型セメントの使用により極めて高い CO₂ 削減効果を期待することができると考えられる。なお、橋長が長いほど CO₂ 排出量は多くなったが、この原因は、構造形式が大規模なものになるほど、使用材料の製造時や施工時、供用時、解体撤去時など全ステージでの CO₂ 排出量が多くなったためである。

図-25 の CO₂ 排出量の試算結果をセメント単味の場合を 100%として整理した結果を図-26、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いることによって得られる CO₂ 排出削減効果を整理した結果を表-16 に示す。これらの結果によると、今回の試算条件下では、高炉スラグ微粉末の使用で 18~21%程度、フライアッシュの使用で 5~7%の CO₂ 排出削減効果が得られることがわかる。高

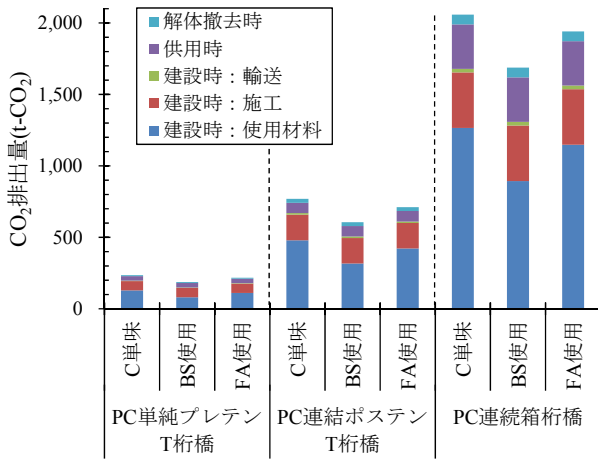


図-25 CO₂排出量の試算結果：排出量の比較

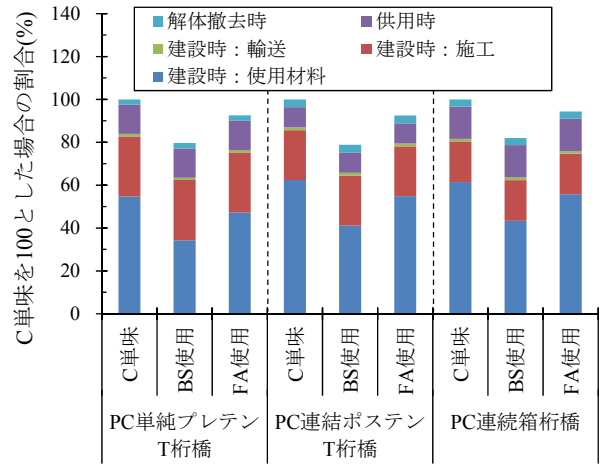


図-26 CO₂排出量の試算結果：セメント単味に対する比率

炉スラグ微粉末とフライアッシュでCO₂排出削減効果が異なった原因は、どちらの混和材を用いるかによって混和材の混合率とセメントの使用量が異なったためである。このため、混和材の混合率を今回の試算で仮定した条件よりも高めることが可能であれば、さらに多くのCO₂排出削減効果を得ることができると考えられる。

7. まとめ

本研究課題では、低炭素型セメントを用いたコンクリート構造物の設計施工マニュアルを提案することを目的として検討を行っている。平成24年度の検討結果を以下にまとめる。

- (1) 早強セメントをベースセメントとした低炭素型セメントを用いたコンクリートの収縮・クリープ特性の概略を把握することができた。ただし、材齢182日以降でも乾燥収縮ひずみとクリープひずみの増加が続いているため、乾燥収縮ひずみとクリープ係数の長期的な推移については、平成25年度以降も実験を継続して検討を行う予定である。
- (2) 低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度特性と耐久性に養生条件が与える影響を把握することができた。また、これにベースセメントの種類、混和材の種類と混合率、水結合材比が与える影響についても検討した。なお、同時に製作した供試体を用いて暴露試験を開始し、平成25年度以降に、材齢1年の強度特性や実環境下における中性化抵抗性と塩化物イオン浸透抵抗性に養生条件が与える影響について検討する予定である。
- (3) 断熱温度上昇試験を行うことにより、早強セメントをベースセメントとした低炭素型セメントを用いた

表-16 CO₂排出削減効果

| No. | PC 単純 プレテン T 桁橋 | PC 連結 ポステン T 桁橋 | PC 連続 箱桁橋 |
|-------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| BS 使用 | 20.4%↓ | 21.2%↓ | 18.0%↓ |
| FA 使用 | 7.5%↓ | 7.5%↓ | 5.7%↓ |

コンクリートの断熱温度上昇特性を把握することができた。

- (4) 平成23年度から開始した暴露試験の供試体を活用して、低炭素型セメントを用いたコンクリートの材齢1年までの強度特性を把握することができた。
- (5) 上部構造、下部構造、舗装で構成される道路橋を対象として、低炭素型セメントの使用により、コンクリート構造物のライフサイクルをとおして得られるCO₂排出削減効果を定量的に確認することができた。平成25年度は、収縮・クリープ試験を継続するとともに、平成23年度から暴露を開始した暴露供試体の解体調査、温度履歴が低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度発現と収縮特性、ひび割れ抵抗性に与える影響について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕、2013
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書（I共通編・IIIコンクリート橋編）・同解説、2012
- 3) JIS A 1157:2010：コンクリートの圧縮クリープ試験方法、2010
- 4) ACI Committee 209：Prediction of Creep, Shrinkage, and

7.1 低炭素型セメントの利用技術の開発

- Temperature Effects in Concrete Structures、ACI 209R-92 (Reapproved 1997)、1997
- 5) AASHTO : AASHTO LRFD Bridge Design Specifications、Fifth Edition、2010
 - 6) fib : Model Code 2010、First complete draft - Volume 1、fib bulletin Vol.55、2010
 - 7) CEB : CEB-FIP Model Code for Concrete Structures、CEB Bulletin No.125E、1978
 - 8) ISO : ISO 1920-9、Testing of Concrete – Part 9: Determination of creep of concrete cylinders in compression、2009
 - 9) 土木学会 : 2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]、2013
 - 10) 土木学会 : 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針、コンクリートライブラリー86、1996
 - 11) 土木学会 : フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案)、コンクリートライブラリー94、1999
 - 12) 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、2009
 - 13) ACI Committee 308 : Guide to Curing Concrete、ACI 308R-01、2001
 - 14) CEN : Execution of concrete structures、BS EN 19670:2009、2009
 - 15) 渡辺博志、森濱和正、中村英佑 : 低炭素型セメントの利用技術の開発、独立行政法人土木研究所平成 23 年度報告書、2012
 - 16) 日本コンクリート工学協会 : マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008、2008
 - 17) 土木学会 : コンクリートの環境負荷評価 (その 2)、コンクリート技術シリーズ 62、2004
 - 18) 日本コンクリート工学協会 : コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究小委員会報告書、2010
 - 19) 国土交通省国土技術政策総合研究所 : 社会資本のライフサイクルをととした環境評価技術の開発、国総研プロジェクト研究報告、第 36 号、2012
<http://www.nilim.go.jp/lab/dcg/lca/database.htm>
 - 20) プレストレスト・コンクリート建設業協会 環境負荷低減対策部会 : PC 構造物の環境負荷低減への取組み-PC 構造物の建設に伴う CO₂ 排出量の見える化、2011

DEVELOPMENT OF UTILIZATION TECHNIQUES FOR LOW CARBON CEMENTS

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Materials and Resources Research
Group (Concrete and Metallic
Materials Research Team)

Author : WATANABE Hiroshi

MORIHAMA Kazumasa

NAKAMURA Eisuke

Abstract : The objective of this collaborative research project with eight organizations is to develop a guideline for design and construction of reinforced and prestressed concrete structures utilizing low carbon cements. In this fiscal year, the project team conducted experiments to clarify effects of using the low carbon cements on the following concrete properties: shrinkage and creep, strength and durability of concrete after different curing procedures, and adiabatic temperature rise. Additionally, the compressive strength of concrete specimens exposed in Tsukuba for one year was measured to investigate strength development of concrete fabricated with the low carbon cements for the long term. Moreover, carbon dioxide reduction created by the use of the low carbon cements was estimated throughout the lifecycle of three concrete structures.

Keywords : low carbon cement, supplementary cementing material, shrinkage and creep, curing concrete, adiabatic temperature rise, carbon dioxide reduction