

研究成果報告書

研究開発課題名	乾燥収縮ひび割れを抑制するための中流動コンクリートに関する研究開発
研究総括者	若鈴コンサルタンツ（株）東京支店 支店長 奥田康博
研究開発組合	若鈴コンサルタンツ（株） バルチップ（株） （株）カテックス
試験研究機関	神戸大学大学院農業研究科

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

戦後から高度成長期にかけて整備されてきた基幹的農業水利施設の25%が耐用年数を迎え、老朽化が進行している。平成5～26年度の開水路に係る事故事例190件のうち、土木施設の劣化に関する事故件数が約80件と最も多く、事故事例はコンクリート水路の損傷（劣化などによる漏水や損傷等）が第一に挙げられている。また、水路トンネルにおいても、劣化による巻き立てコンクリートの剥離による事故事例が示されており¹⁾、補修補強工事は喫緊の課題である。しかしながら、以前であれば、農業水利施設のメンテナンスを、非灌漑期に実施可能であったが、近年、上水道や工業用水と併用されるケースも増加し、容易に断水できず補修補強工事は困難を極めている。

農業水利施設の現場打ちコンクリート構造物では、ひび割れが主要変状の一つであり、変状箇所からの漏水が二次的な劣化要因となっている。ひび割れは、コンクリートの配合、施工、構造物の使用状況、環境、構造物に作用する外力などの様々な条件により発生する。ひび割れの中でも、乾燥収縮によるひび割れは、硬化後あるいは乾燥開始後数か月の時期に発生しており、初期ひび割れのほとんどが、乾燥収縮ひび割れである²⁾。

前述した乾燥収縮ひび割れを抑制できれば、農業水利施設の事故防止と施設の長寿命化等に貢献することが期待できる。

中流動コンクリートは、橋梁やトンネルに採用される例が増加しており、施工性の改善が図られているが、長期にわたる耐クラック性を期待して混和材料（ポリプロピレン短繊維、膨張材、収縮低減剤）を添加する事例はまだないと思慮されることから、本事業では、施工性と耐クラック性の両方の改善が期待できる、先端的な配合コンクリートを開発する。

1) 山口康晴：国営農業水利施設の事故要因と対策に関する事例分析、農業農村工学会、水土の知、86(1)、pp. 27-30.

2) 農林水産省農村振興局整備部設計課：農業水利施設の長寿命化のための手引き、平成27年11月、pp. 3-3、3-4.

1. 2 事業の内容及び実施方法

本事業では、農業水利施設の補修・補強対策として、超長期にわたり耐クラック性能を有し、且つ施工性の良いコンクリートを開発する。

ここで、超長期とは、建築工事標準仕様書・同解説(日本建築学会)³⁾によると「超長期供用級の計画供用期間としておよそ 200 年」が示されている。さらに、「乾燥収縮率が 800μ 以下とすることによって有害なひび割れが発生しないレベルにほぼ制御できる」との記載がある。また、有害なひび割れ幅として、コンクリート標準示方書(土木学会)⁴⁾によると水密性を確保するひび割れ幅として 0.1mm が示されている。そこで、本研究では、超長期供用期間(およそ 200 年)、有害なひび割れ(幅 0.1mm 以下)の発生が抑制されること及び乾燥収縮率が 400μ 以下(コンクリート標準示方書に圧縮ひずみとして $3,500\mu$ が示されており、引張強度は圧縮強度の $1/10$ であることから、 $3,500 \times 1/10 = 350 \div 400\mu$)を確保することを目標とする。

3) 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. 7、p. 188.

4) 土木学会:コンクリート標準示方書、2017、p. 249.

(1) 耐クラック性能を有するコンクリートの開発

ポリプロピレン短繊維(以下、PP 短繊維と示す)、膨張材、収縮低減剤(以下、SRA と示す)を最適配合したコンクリートを作製する。作製したコンクリートは、「拘束されたコンクリートの乾燥収縮のひび割れ試験法(JIS A 1151)」に則った室内試験を実施して評価を行い、乾燥収縮ひび割れが長期に抑制される(耐クラック性能を有する)コンクリートを開発する。

(2) 施工性能を考慮したコンクリートの開発

PP 短繊維を配合したコンクリートは、スランプが小さくなり、施工性能は低下する。施工性能の低下は、作業量の増大や施工不良などに直結するため、解決すべき課題である。建築分野では、自己充填性を有する高流動コンクリート(スランプフロー: 55~65cm)が利用されるケースが見受けられる。しかしながら、高流動コンクリートは、流動性が非常に高いため、型枠に作用する側圧が大きくなり、型枠補強などのためにコストが増大することが懸念される。

そこで、本事業では、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間領域である中流動コンクリート(スランプフロー: 30~35cm)に、耐クラック性能を付与し、施工性能を考慮した乾燥収縮ひび割れが長期に発生しないコンクリートを開発する。

(3) 実証試験

実際の工事現場では、コンクリートの練り混ぜ方法や養生条件等が室内試験と異なるため、室内試験と現場で得られる結果に相違が生じる可能性がある。このため、本事業では、東播用水二期農業水利事業所で工事を予定した開水路区間にて現場実証試験を実施した。

(4) 機能監視

実証試験のコンクリート打設時に、コンクリート内部にひずみ計を設置し、コンクリートの挙動やひずみの発生状況等の機能監視を実施した。

(5) ひび割れ発生時期の推定式の検討

(4) のひずみ計のデータを時系列に整理し、回帰分析等によりひび割れ発生時期の推定式を検討する。

(6) 施工に関する手引き（素案）の作成

コンクリート本打設に至るまでの施工手順、施工管理、品質管理等をとりまとめたマニュアルを作成した。

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
コンクリートに PP 短繊維を配合した場合に施工性能が低下する問題点	- PP 短繊維の混入による施工性能の低下を抑制するためには、流動性の高いコンクリートが効果的である。 - 流動性に関しては、高流動コンクリートが最も効果大きい。しかし、型枠に作用する側圧が大きくなり、型枠補強など施工費用が増大する。このため、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間領域である中流動コンクリートを適用した。
室内試験の配合設計に対して、実証試験で要求される品質性能や施工性能を満足しない問題点	- PP 短繊維を混入したコンクリートは、JIS 規格に該当しない特殊なコンクリートである。実証試験において、室内試験の配合と同等の品質施工を確保するため、実証試験を行う前に実機試験を実施した。 - 実機試験では、室内試験の配合設計を基にコンクリートプラントで製造し、コンクリートに要求される性能を満足するかどうか確認した。 - 要求性能を満足しない場合は、各使用材料の投入量を変更し、要求性能を満足するまでコンクリートの作製を繰り返し行った。
ひび割れ発生時期の推定方法に関する問題点	- ひび割れ発生時期は、乾燥収縮ひずみの推定式を用いて推定し、本事業の目標値である 200 年後に設定した。 - 乾燥収縮ひずみの推定式は、土木学会や建築学会等が提案している代表的な 5 つの推定式を用いた。この他、本研究で得られた実測値より最小二乗法による回帰式から乾燥収縮ひずみを推定した。

1. 4 事業の実施体制

(1) 研究開発組合内の役割分担(◎)

研究開発の項目	事業実施主体 (新技術研究開発組合)		
	若鈴コンサル(株)	バルチップ(株)	(株)カテックス
耐クラック性能を有するコンクリートの開発	○	◎	○
施工性能を考慮したコンクリートの開発	○	○	◎
実証試験	◎	◎	◎
機能監視	◎	○	○
ひび割れ発生時期の推定式の検討	◎	○	○
施工に関する手引き(素案)作成	○	◎	◎
まとめ	◎	◎	◎

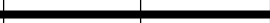
(注：表中の◎は主担当、○は担当)

(2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

研究開発の項目	試験研究機関
	神戸大学
耐クラック性能を有するコンクリートの開発	○
施工性能を考慮したコンクリートの開発	○
実証試験	◎
機能監視	◎
ひび割れ発生時期の推定式の検討	◎
施工に関する手引き(素案)作成	○
まとめ	○

(注：表中の◎は主担当、○は担当)

1. 5 事業の年度計画と実績

項 目	令和元年度		令和2年度		令和3年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
耐クラック性能を有する コンクリートの研究開発						
						
施工性能を考慮した コンクリートの開発						
						
実証試験						
						
機能監視						
						
ひび割れ発生時期の 推定式の検討						
						
施工に関する手引き (素案)作成						
						
まとめ						
						

注)  は計画、 は実績。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

(1) 耐クラック性能を有するコンクリートの開発

本事業では、ポリプロピレン短繊維（以下、PP 短繊維と示す）、膨張材、収縮低減剤（以下、SRA と示す）を最適配合したコンクリートを作製し、コンクリートのひび割れ抑制効果を確認するため、以下①②の試験を実施した。

①拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験（JIS A 1151：2011）

②リング試験（ASTM C 1581）

また、膨張材、収縮低減剤および短繊維を用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れが長期に発生しないメカニズムを解明するため、以下③④の試験を実施した。

③走査型電子顕微鏡観察（SEM-EDS 試験）

④細孔径分布測定（水銀圧入法）

1) コンクリートの配合

本事業で用いるコンクリートの配合は、以下のとおりである。

・配合①

「普通コンクリート」 初期湿布養生（7 日間）

一般的な農業水利施設のコンクリートである。

目標品質は、スランプ $12.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

・配合②

「普通コンクリート＋短繊維＋収縮低減剤＋膨張材」 初期湿布養生（7 日間）

普通コンクリートに、ひび割れ抑制効果が期待できる素材を添加したコンクリートである。目標品質は、短繊維混入前のコンクリートで、スランプ $12.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

・配合③

「中流動コンクリート＋短繊維＋収縮低減剤＋膨張材」 初期湿布養生（7 日間）

東日本、中日本、西日本高速道路㈱「トンネル施工管理要領」（繊維補強覆工コンクリート編）に定める中流動コンクリートを参考に高性能 AE 減水剤の使用によりコンステンシーを大きくした上、ひび割れ抑制効果が期待できる素材を添加したコンクリートである。

普通コンクリートよりも流動性が高いため、施工性も期待できる。

目標品質は、短繊維混入後のコンクリートで、スランプ $21.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

・配合④

「普通コンクリート＋短繊維＋収縮低減剤」 初期湿布養生（7 日間）

普通コンクリートに短繊維および収縮低減剤を添加したコンクリートである。収縮低減剤の効果を検証する。

・配合⑤

「普通コンクリート＋短繊維＋膨張材」 初期湿布養生（7 日間）

普通コンクリートに短繊維および膨張材を添加したコンクリートである。膨張材の効果を検証する。

試験①②は配合①②③のコンクリート、試験③④は配合②④⑤のコンクリートを用いて行う。

2) 拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験（JIS A 1151：2011）（試験①）

(i) 試験概要

(a) 拘束形鋼ひずみ（ひび割れ発生日数）

拘束膨張及び収縮は、JIS A 1151：2011「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」によった。

拘束形鋼ひずみは、コンクリートを拘束する鋼製枠のひずみであり、拘束形鋼に拘束されたコンクリートが、乾燥収縮することに起因する拘束形鋼の圧縮ひずみを測定する。コンクリートにひび割れが発生すると拘束形鋼に働く圧縮ひずみは解放されるため、ひび割れ発生時期を把握することが出来る。

本試験法における、拘束形鋼ひずみは、ひび割れ発生時期を把握する為の一つの指標である。拘束引張応力の算出にも用いることが出来る。

拘束形鋼測定用ワイヤストレインゲージ及び拘束収縮ひずみ測定用ゲージプラグ取付け位置の例を図 1 に示す。

拘束形鋼のひずみ測定(写真 1)は、図 1 に示すように、(株)東京測器研究所製のポリエステルひずみゲージ「PFL-20-11-5LJCT-F」によって拘束形鋼の中央 2 箇所について行った。

ひずみ値は、(株)東京測器研究所製のデータロガー「TDS-602」を用いて 30 分間隔で記録した。



写真 1 拘束形鋼のひずみ測定状況

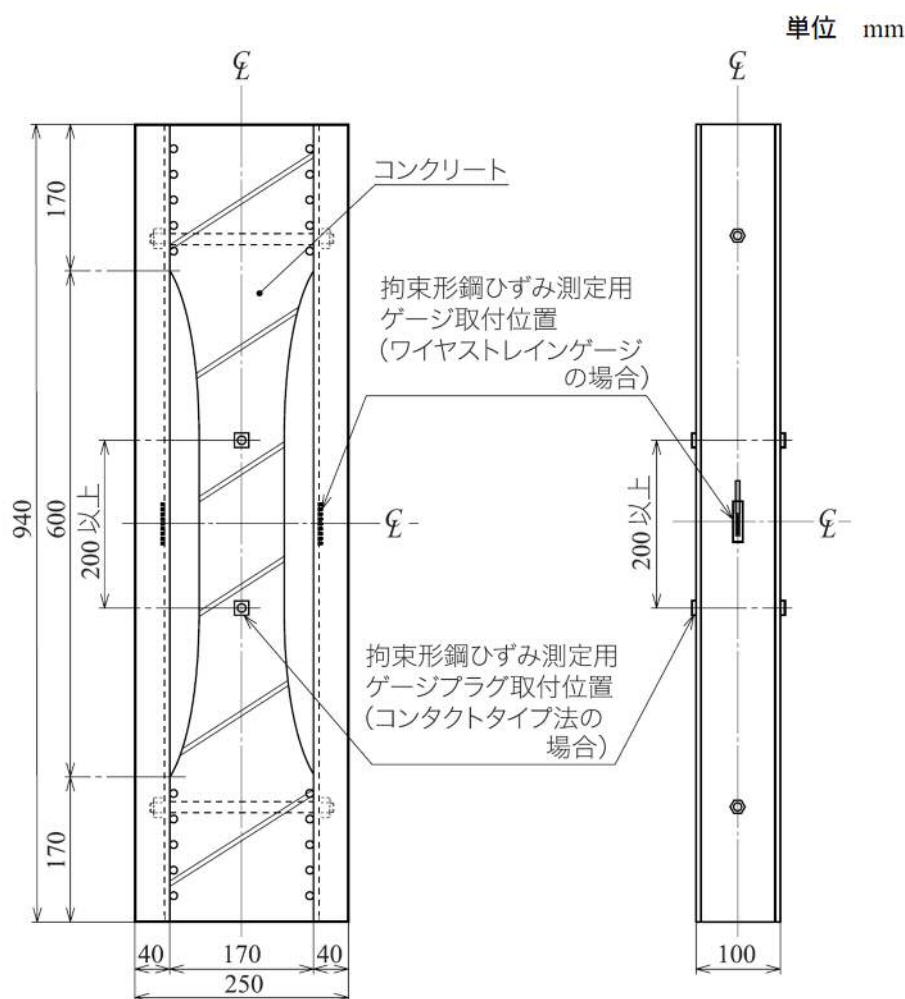


図1 拘束形鋼測定用ワイヤストレインゲージ及び
拘束収縮ひずみ測定用ゲージプラグ取付け位置の例

(b) 拘束収縮ひずみ

JIS A 1151:2011 「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」、附属書 A (参考)「拘束されたコンクリートの拘束収縮試験方法」によった。

本試験法において、拘束収縮ひずみとは、拘束されたコンクリートのひずみである。また、拘束されたコンクリートに働く拘束率を求めるための数値であり、引張クリープひずみの算出にも用いる。

拘束収縮ひずみ測定は、図2に示すように、供試体の打設面および底面の直線部の中央で行った(写真2)。標点間距離は200mmとした。

測定頻度は、乾燥開始7日までは1日1回、その後乾燥日数28日までは2日に1回、以降ひび割れが発生するまでは28日に1回測定することを標準とした。

JIS A 1129-2 の箇条6(計算)に従って算出した拘束収縮ひずみ測定用供試体の長さ変化率を拘束収縮ひずみとした。

長さ変化率は次式により算出した。

$$\varepsilon = \frac{(X_{01} - X_{02}) - (X_{i1} - X_{i2})}{L_0} \quad \text{式 (1)}$$

ここに、

ε : 長さ変化率 ($\times 10^{-6}$)

L_0 : 基長

X_{01} 、 X_{02} : それぞれ基準とした時点における標準尺および供試体の測定値

X_{i1} 、 X_{i2} : それぞれ時点 i における標準尺および供試体の測定値

ただし、 L_0 、 X_{01} 、 X_{02} 、 X_{i1} 、 X_{i2} の長さの単位は、同一とする。



写真 2 拘束収縮ひずみ測定状況

(c) 自由収縮ひずみ

JIS A 1151:2011 「拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」、附属書 A (参考) 「拘束されたコンクリートの拘束収縮試験方法」によった。

本試験法において、自由収縮ひずみとは、拘束されたコンクリートと同一条件におかれた拘束の無いコンクリートのひずみである。また、拘束されたコンクリートに働く拘束率を求めるための数値であり、引張クリープひずみの算出にも用いる。

拘束引張ひずみを誘発するため、自由収縮ひずみが大きい程拘束引張応力が大きくなる。

自由収縮ひずみの測定写真 2.3 は、供試体 (100×100×400mm 長方形体) の平行する二面の中央で行った。標点間距離は 200mm とした。

測定頻度は、乾燥開始 7 日までは 1 日 1 回、その後乾燥日数 28 日までは 2 日に 1 回、以降ひび割れが発生するまでは 28 日に 1 回測定することを標準とした。

JIS A 1129-2 の箇条 6 (計算) (式 1) に従って算出した自由収縮ひずみ測定用供試体の長さ変化率を自由収縮ひずみとした。

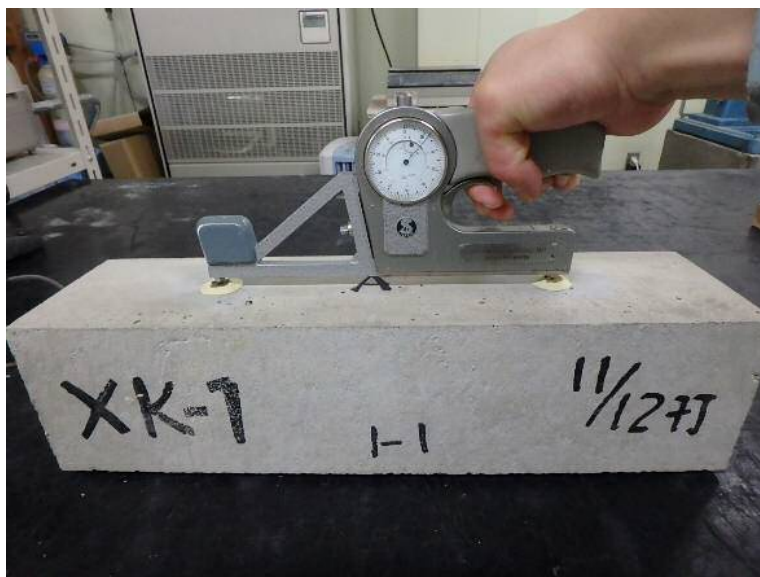


写真 3 自由収縮ひずみの測定状況

(d) 割裂引張強度

割裂引張強度は JIS A 1113 : 2018「コンクリートの割裂引張強度試験方法」によった(写真 4)。

本試験においては、割裂引張強度とは、ひび割れ発生強度の算出に用いる。割裂引張強度が大きい程ひび割れ発生がしにくい。

割裂引張試験は、乾燥開始 0、7、14、28 日およびひび割れ発生時に実施した。また、1 年以上乾燥させてひび割れ発生が確認されなかった配合は、乾燥 1 年時に試験を実施した。

載荷試験機は、株式会社前川試験機製作所製圧縮試験機「ACA-100A-F1 型」(最大容量 1000kN)を使用した。

割裂引張強度は、次式により算出した。

$$f_c = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times l} \quad \text{式 (2)}$$

ここに、

- f_c : 圧縮強度 (N/mm²)
- P : 試験機が示す最大荷重 (N)
- d : 供試体の直径の平均値 (mm)
- l : 供試体の長さの平均値 (mm)



写真 4 割裂引張強度試験状況

(e) 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度は、コンクリートの圧縮強度を求めるための試験で、硬化コンクリートの品質を表す代表的な数値である。JIS A 1108 : 2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」により試験を行った。静弾性係数試験は、静的载荷試験で得られる応力—ひずみ曲線の勾配で表される係数であり、コンクリート弾性を表す代表的な数値である。JIS A 1149 : 2017「コンクリートの静弾性係数試験方法」により試験を行った(写真 5)。

本試験においては、コンクリートの静弾性係数は、引張クリープの算出に用いられる。

圧縮強度および静弾性係数試験は、乾燥開始 0、7、14、28 日およびひび割れ発生時に実施した。また、1 年以上乾燥させてひび割れ発生が確認されなかった配合は、乾燥 1 年時に試験を実施した。

载荷試験機は、株式会社前川試験機製作所製圧縮試験機「ACA-100A-F1 型」(最大容量 1000kN)を使用した。

荷重は、圧縮試験機付属の油圧セルにより測定した。

縦ひずみは、株式会社東京測器研究所コンプレッソメータ「CM-10」により測定した。

荷重および縦ひずみの記録は、株式会社東京測器研究所製データロガー「TDS-630」を使用した。

圧縮強度および静弾性係数は、次式により算出した。

・圧縮強度

$$f_c = \frac{P}{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad \text{式 (3)}$$

ここに、 f_c : 圧縮強度 (N/mm²)
 P : 試験機が示す最大荷重 (N)
 d : 供試体の直径平均値 (mm)

・静弾性係数

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \times 10^{-3} \quad \text{式 (4)}$$

ここに、 E_c : 静弾性係数 (kN/mm²)
 S_1 : 最大荷重の 1/3 に相当する応力度 (N/mm²)
 S_2 : 縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力度 (N/mm²)
 ε_1 : S_1 のときの縦ひずみ
 ε_2 : 50×10^{-6} 縦ひずみ



写真 5 圧縮強度および静弾性係数試験状況

(f) 拘束率

拘束率とは、自由収縮ひずみに対する拘束収縮ひずみの比。拘束強さを表す指標であり、大きいほど拘束引張応力が大きくなる。

JIS A 1151 による拘束率は、0.4～0.8 の範囲になるとされている。これに対して実構造物における拘束率は条件によって大きく異なり、乾燥収縮ひび割れが問題となる建築物の壁部材では、0.2 から場合によっては 1 に近い値を示すことが報告されている。実構造物の乾燥収縮ひび割れ低減への資料としてこの規格の結果を供するには、試験と実構造物における拘束率の違いを定量的に把握することが必要である。

拘束収縮ひずみ測定用供試体における拘束の強さを表す拘束率を次式によって算出し、四捨五入によって有効数字 3 桁に丸めた。

各種ひずみの関係を図 3 に示す。

$$K_i = \frac{\varepsilon_i^f - \varepsilon_i^r}{\varepsilon_i^f} \quad \text{式 (5)}$$

ここに、
 K_i : 時点 i における拘束率
 ε_i^f : 時点 i における自由収縮ひずみ
 ε_i^r : 時点 i における拘束収縮ひずみ

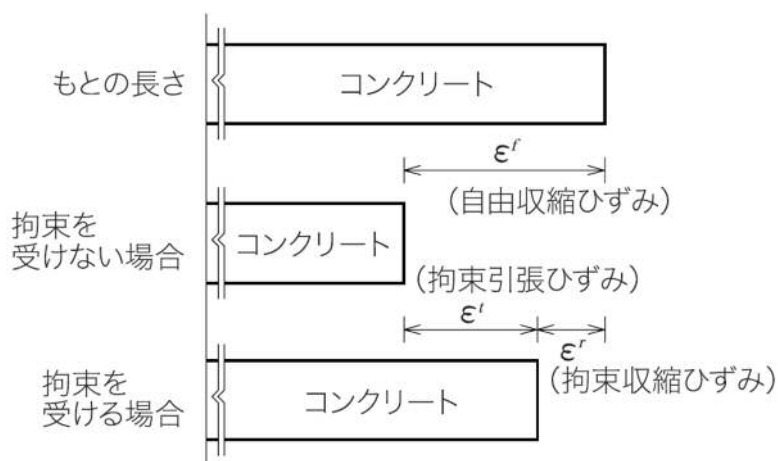


図 3 各種ひずみの関係

(ii) 試験結果

(a) 圧縮強度および静弾性係数試験試験

圧縮強度および静弾性係数試験結果を表 1、圧縮強度と乾燥日数の関係を図 4、静弾性係数と乾燥日数の関係を図 5 に示す。

配合②および配合③の圧縮強度は、材齢 28 日の時点で、配合①に比べて低い傾向にあるが、これは骨材などより剛性が低いポリプロピレン繊維が混入されていることによるものであり、繊維補強コンクリートの一般的な傾向であり、この傾向は本試験においても確認された。

表 1 圧縮強度および静弾性係数試験結果

乾燥日数	材 齢	試験項目	配合① 普通	配合② 普通+PP 短繊維 +膨張材 +収縮低減剤	配合③ 中流動+PP 短繊維 +膨張材 +収縮低減剤
0 日	7 日	圧縮強度 (N/mm ²)	22.5	21.3	21.8
		静弾性係数 (kN/mm ²)	24.3	23.5	24.5
7 日	14 日	圧縮強度 (N/mm ²)	29.3	27.5	28.3
		静弾性係数 (kN/mm ²)	25.0	25.8	25.7
14 日	21 日	圧縮強度 (N/mm ²)	30.5	28.0	28.3
		静弾性係数 (kN/mm ²)	25.0	25.8	25.3
28 日	35 日	圧縮強度 (N/mm ²)	34.6	31.3	32.0
		静弾性係数 (kN/mm ²)	26.8	27.1	27.3
34 日 配合① ひび割れ発生	41 日	圧縮強度 (N/mm ²)	34.7	—	—
		静弾性係数 (kN/mm ²)	26.3	—	—
364 日 配合②、③	371 日	圧縮強度 (N/mm ²)	—	40.3	38.9
		静弾性係数 (kN/mm ²)	—	29.1	29.2

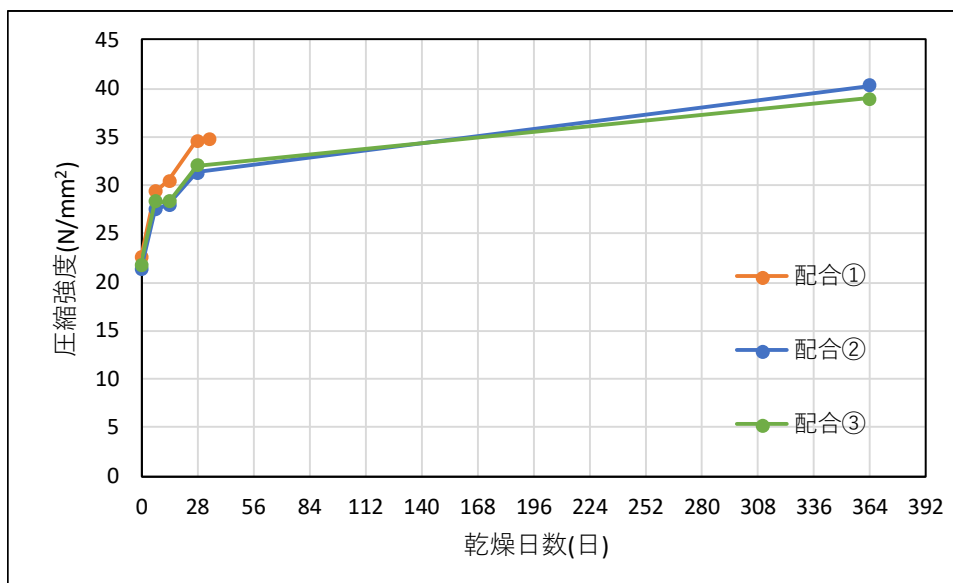


図4 圧縮強度と乾燥日数の関係

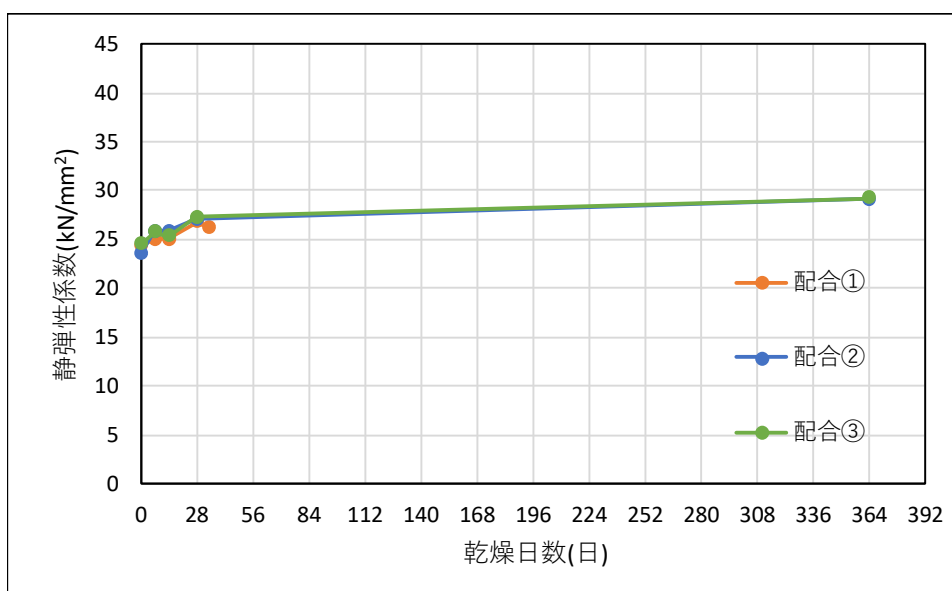


図5 静弾性係数と乾燥日数の関係

- 配合① 「普通コンクリート」 初期湿布養生
- 配合② 「普通コンクリート+PP 短繊維+収縮低減剤+膨張材」 初期湿布養生
- 配合③ 「中流動コンクリート+PP 短繊維+収縮低減剤+膨張材」 初期湿布養生

(b) 割裂引張強度試験

割裂引張強度試験結果を表 2、引張強度と乾燥日数の関係を図 6 に示す。配合②および配合③の引張強度は、材齢 28 日の時点で、配合①に比べて低い傾向にあるが、圧縮強度と同様に、繊維補強コンクリートの一般的な傾向であり、この傾向は本試験においても確認された。

表 2 割裂引張強度試験結果

乾燥日数	材齢	引張強度 (N/mm ²)		
		配合① 普通	配合② 普通 +PP 短繊維 +収縮低減剤 +膨張材	配合③ 中流動 +PP 短繊維 +収縮低減剤 +膨張材
0 日	7 日	2.29	2.16	2.15
7 日	14 日	2.61	2.50	2.51
14 日	21 日	2.89	2.74	2.60
28 日	35 日	2.95	2.98	2.75
34 日 配合① ひび割れ発生	41 日	3.30	—	—
364 日 配合②、③	371 日	—	3.76	3.26

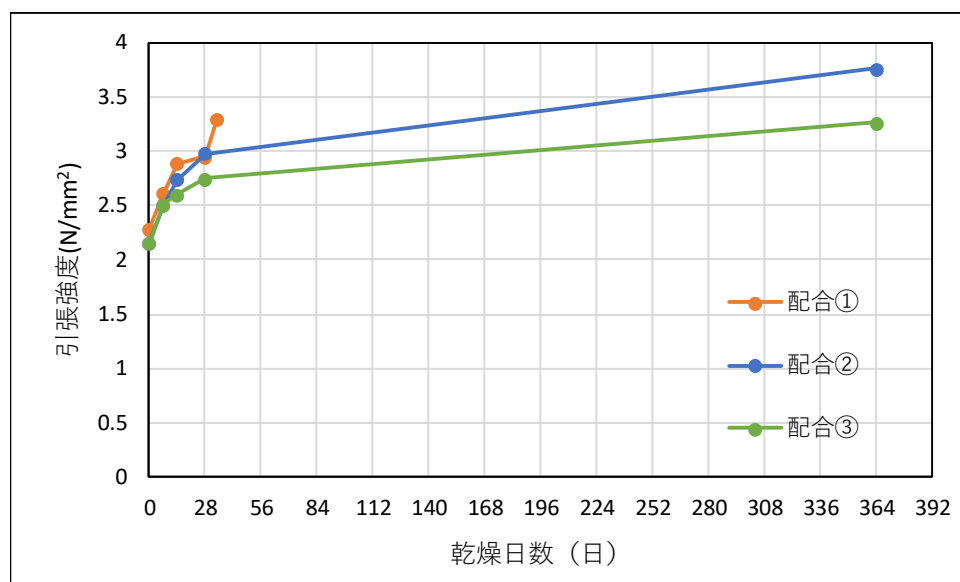


図 6 引張強度と乾燥日数の関係

(c) 自由収縮ひずみ測定

自由収縮ひずみ測定は、供試体を材齢 7 日より温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室に静置し乾燥を開始した。測定頻度は乾燥開始 7 日までは 1 日 1 回、その後乾燥日数 28 日までは 2 日に 1 回、以降ひび割れが発生するまでは 28 日に 1 回程度測定することを標準とした。

自由収縮ひずみ測定結果を表 3、自由収縮ひずみと乾燥日数の関係を図 7 に示す。

自由収縮ひずみは、配合①が乾燥日数 364 日で -763×10^{-6} であるのに対して、配合②は $-488 \sim -458 \times 10^{-6}$ 、配合③は $-484 \sim -459 \times 10^{-6}$ と収縮の小さい値であった。また、配合②と配合③のひずみは同様の傾向であることが確認できる。このことから、配合②および配合③は高いひび割れ抑制効果が期待される。

表 3 自由収縮ひずみ測定結果

コンクリート自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)								
配合① 普通			配合② 普通+PP短繊維 +収縮低減剤+膨張材			配合③ 中流動+PP短繊維 +収縮低減剤+膨張材		
No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-32	-21	-32	14	12	13	5	-3	4
-53	-46	-60	-3	-7	1	-3	-19	-8
-72	-73	-88	-10	-34	-12	-24	-35	-14
-134	-123	-142	-28	-45	-25	-33	-41	-34
-161	-151	-164	-48	-61	-33	-40	-43	-46
-171	-168	-187	-57	-63	-47	-52	-47	-50
-206	-202	-222	-72	-83	-57	-67	-73	-65
-247	-239	-258	-87	-102	-69	-74	-83	-68
-274	-259	-282	-99	-107	-86	-89	-103	-87
-297	-282	-298	-101	-101	-93	-104	-112	-97
-332	-311	-334	-117	-127	-99	-107	-122	-107
-357	-339	-363	-145	-151	-128	-107	-134	-124
-377	-352	-377	-137	-140	-133	-124	-135	-123
-398	-379	-401	-158	-161	-132	-138	-148	-139
-421	-404	-423	-167	-173	-148	-158	-164	-153
-436	-417	-438	-163	-182	-148	-157	-169	-157
-469	-443	-464	-184	-193	-159	-163	-176	-162
-479	-463	-482	-181	-204	-174	-178	-189	-178
-535	-514	-529	-226	-227	-203	-193	-206	-193
-589	-569	-578	-264	-264	-239	-239	-256	-239
-627	-610	-620	-312	-308	-286	-283	-307	-288
-648	-627	-637	-315	-327	-297	-304	-316	-301
-680	-660	-665	-348	-360	-328	-333	-350	-330
-695	-672	-678	-366	-367	-345	-347	-359	-346
-709	-684	-684	-391	-395	-371	-374	-391	-367
-719	-697	-703	-407	-417	-387	-392	-411	-395
-756	-728	-729	-434	-444	-409	-412	-441	-421
-746	-724	-725	-440	-458	-424	-427	-446	-433
-772	-741	-742	-459	-469	-438	-440	-457	-438
-774	-748	-749	-466	-478	-446	-448	-467	-448
-770	-744	-749	-467	-477	-451	-459	-474	-458
-779	-754	-757	-482	-488	-458	-459	-484	-468

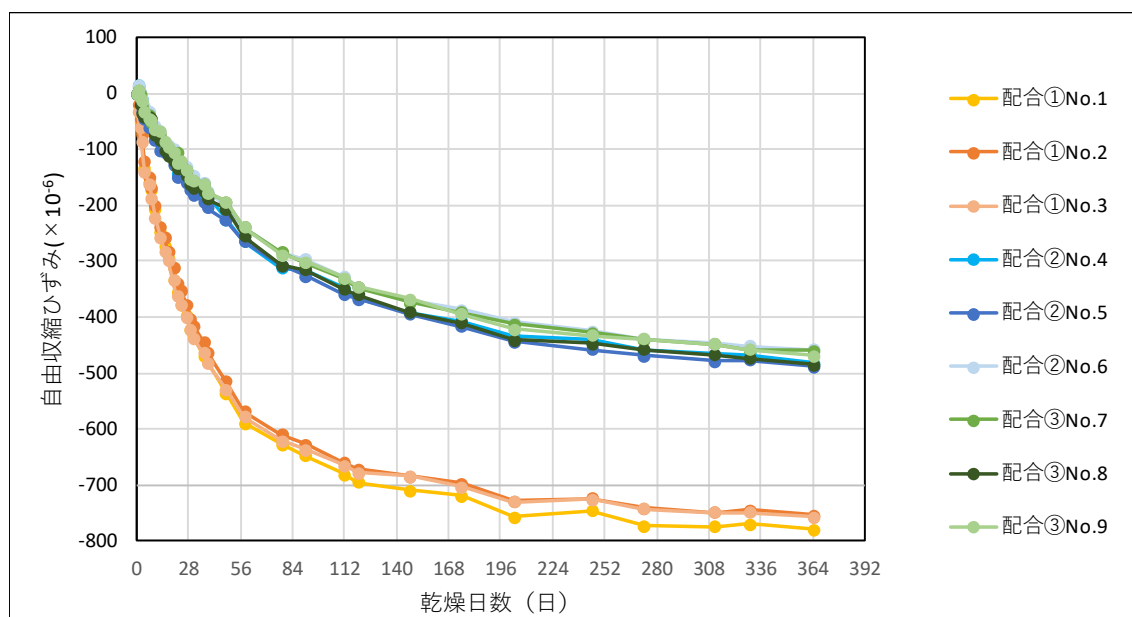


図 7 自由収縮ひずみと乾燥日数の関係

- ・ 配合① 「普通コンクリート」 初期湿布養生
- ・ 配合② 「普通コンクリート+PP 短繊維+収縮低減剤+膨張材」 初期湿布養生
- ・ 配合③ 「中流動コンクリート+PP 短繊維+収縮低減剤+膨張材」 初期湿布養生

(d) 拘束収縮ひずみ測定

拘束収縮ひずみ測定は、供試体材齢 7 日より温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室に静置し乾燥を開始した。測定頻度は乾燥開始 7 日までは 1 日 1 回、その後乾燥日数 28 日までは 2 日に 1 回、以降ひび割れが発生するまでは 28 日に 1 回測定することを標準とした。

拘束収縮ひずみ測定結果を表 4、拘束収縮ひずみと乾燥日数の関係を図 8 に示す。

拘束収縮ひずみは、配合①は約 -180×10^{-6} 程度のひずみでひび割れが発生していることが確認された。これに対し乾燥日数 364 日において、配合②は $-302 \sim -257 \times 10^{-6}$ 、配合③は $-293 \sim -246 \times 10^{-6}$ のひずみを示したがひび割れは確認されていない。これは、コンクリート内部のポリプロピレン繊維がひび割れ抑制に寄与している可能性が考えられる。

表 4 拘束収縮ひずみ測定結果

乾燥日数 (日)	拘束収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)								
	配合① 普通			配合② 普通+PP短繊維 +収縮低減剤+膨張材			配合③ 中流動+PP短繊維 +収縮低減剤+膨張材		
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-34	51	17	9	42	-17	23	43	7
2	-17	7	14	4	9	-24	6	37	-13
3	-46	-25	-2	1	44	-49	0	10	-20
4	-54	-38	-4	12	44	-37	17	9	-10
7	-42	-63	-35	-25	-5	-101	-5	-21	-14
8	-68	-46	-29	2	3	-70	-57	19	-33
10	-77	-78	-51	-24	10	-61	-23	4	-25
13	-111	-98	-68	-47	-9	-87	-38	-39	-26
15	-126	-130	-84	-61	-38	-103	-44	-37	-48
17	-144	-143	-104	-64	-50	-115	-64	-55	-72
20	-163	-155	-107	-68	-60	-124	-59	-48	-66
22	-172	-174	-112	-69	-62	-122	-58	-46	-90
24	-180	-179	-134	-91	-83	-142	-82	-69	-79
27	-174	-183		-84	-79	-125	-71	-73	-89
29	-194	-192		-108	-102	-145	-95	-85	-98
31	-189	-191		-95	-81	-131	-98	-76	-93
36	-194			-122	-101	-148	-101	-85	-114
38	-184			-117	-98	-153	-103	-94	-100
48				-123	-108	-144	-114	-97	-112
58				-147	-143	-181	-143	-126	-133
78				-183	-164	-213	-179	-158	-173
91				-190	-162	-217	-179	-163	-193
112				-212	-174	-242	-213	-198	-214
119				-208	-213	-247	-221	-205	-224
147				-236	-213	-242	-213	-202	-223
175				-257	-261	-281	-255	-228	-246
203				-285	-276	-292	-249	-232	-277
245				-288	-267	-304	-247	-243	-269
273				-297	-277	-305	-260	-254	-294
311				-282	-258	-292	-245	-256	-269
330				-284	-257	-305	-233	-259	-283
364				-286	-273	-302	-246	-270	-293

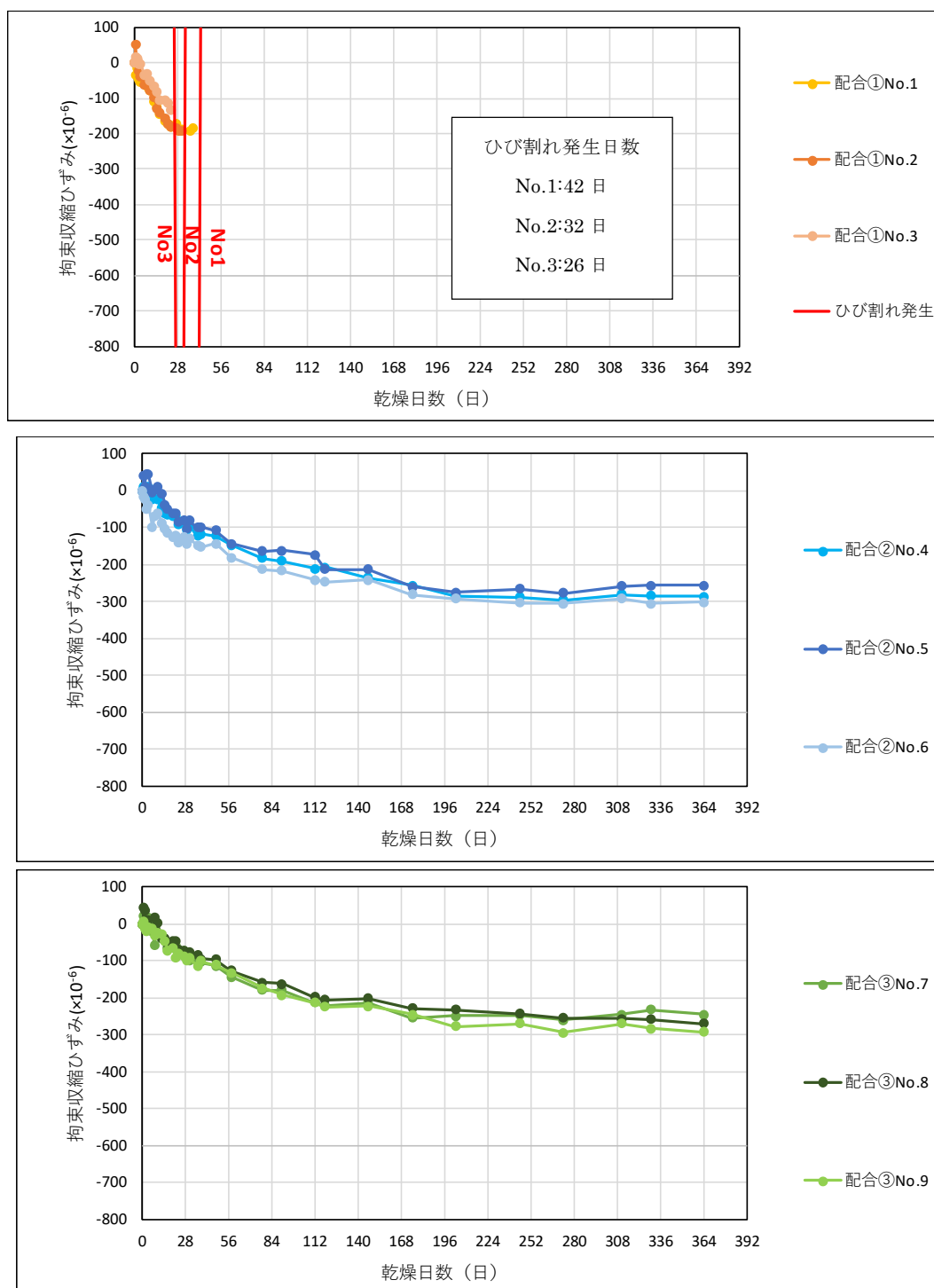


図8 拘束収縮ひずみと乾燥日数の関係

- 配合① 「普通コンクリート」 初期湿布養生
- 配合② 「普通コンクリート+PP 短繊維+収縮低減剤+膨張材」 初期湿布養生
- 配合③ 「中流動コンクリート+PP 短繊維+収縮低減剤+膨張材」 初期湿布養生

(e) 拘束形鋼のひずみ測定

拘束形鋼のひずみ測定は、供試体材齢 7 日より温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室に静置し乾燥を開始し、ひずみ測定頻度は 30 分間隔とした。

拘束形鋼のひずみと乾燥日数の関係を図 9 に示す。

ひび割れ発生日は、拘束形鋼のひずみの値が変曲したときとし、配合①No1 が乾燥日数 42 日、配合①No2 が乾燥日数 32 日、配合①No3 が乾燥日数 26 日であることが確認された。

配合②および配合③においては乾燥日数 364 日現在においてもひび割れが発生していない。

このことから配合②および配合③は高いひび割れ抑制効果が確認された。

また、配合②と配合③のひずみは同様の傾向であることが確認された。

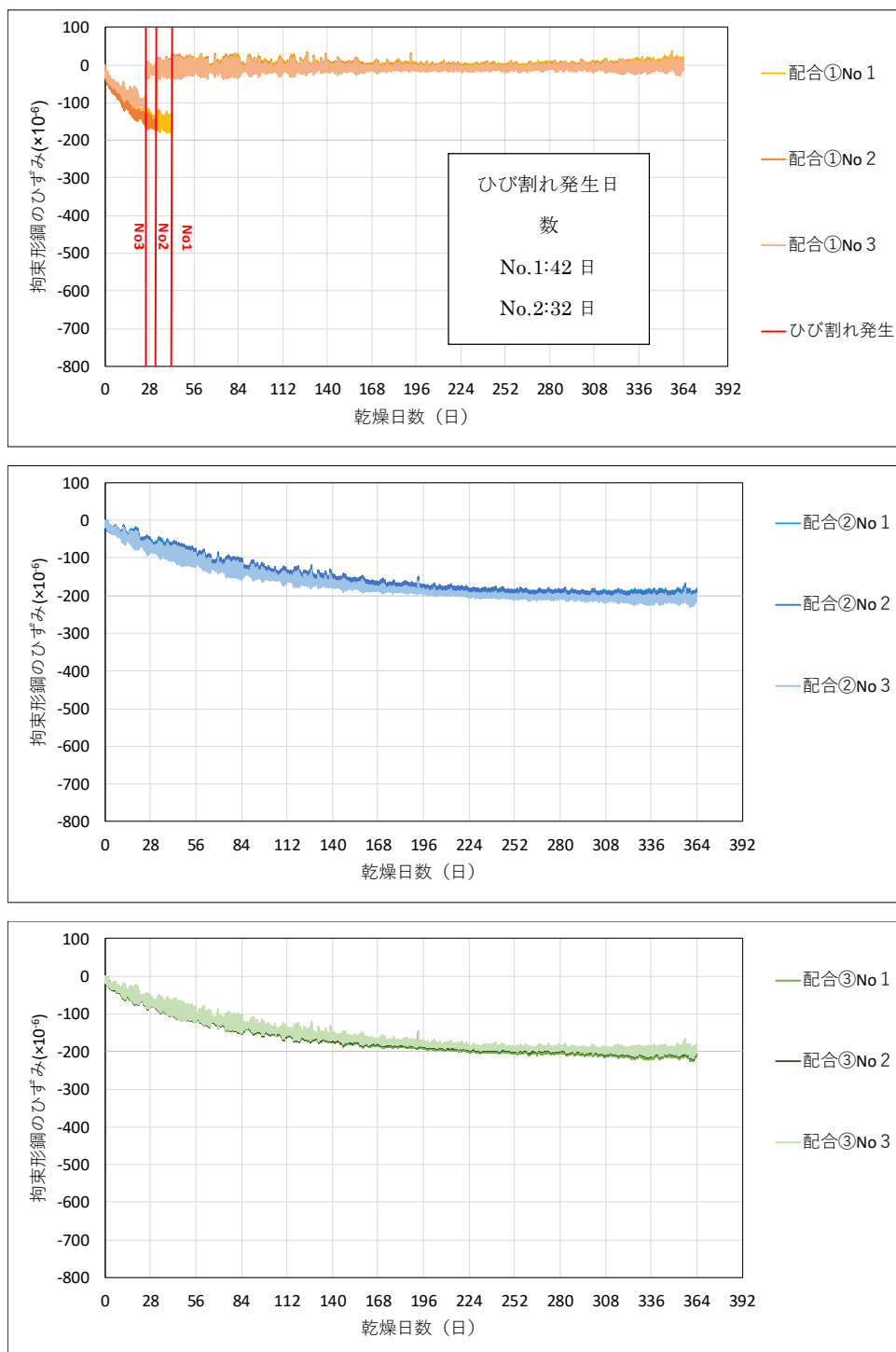


図9 拘束形鋼のひずみと乾燥日数の関係

- 配合① 「普通コンクリート」 初期湿布養生
- 配合② 「普通コンクリート+PP 短繊維+収縮低減剤+膨張材」 初期湿布養生
- 配合③ 「中流動コンクリート+PP 短繊維+収縮低減剤+膨張材」 初期湿布養生

(f) 拘束率

各種ひずみと拘束率測定結果を表 5、拘束率と乾燥日数の関係を図 10、各種ひずみと乾燥日数の関係を図 11 に示す。

配合①において乾燥日数 17 日以降ひび割れ発生まで拘束率が 0.550 程度で推移しているのに対して、配合②および配合③は乾燥日数 364 日において 0.450 程度の値で推移していることから、配合②および配合③に働く拘束力が低いことが確認された。

また、各種ひずみと乾燥日数の関係より、配合①は拘束引張ひずみが拘束収縮ひずみより高い値であり、ひび割れ発生材齢には -204×10^{-6} であったのに対して、配合②および配合③は拘束収縮ひずみより低い値であり、乾燥日数 364 日時点においても -200×10^{-6} 程度であることから、配合②および配合③に働く収縮力は小さいことが確認された。

表 5 各種ひずみと拘束率測定結果

乾燥 日数 (日)	配合① 普通				配合② 普通+PP短繊維 +収縮低減剤+膨張材				配合③ 中流動+PP短繊維 +収縮低減剤+膨張材			
	拘束 収縮 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	自由 収縮 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束 引張 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束率	拘束 収縮 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	自由 収縮 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束 引張 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束率	拘束 収縮 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	自由 収縮 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束 引張 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束率
1	11	-28	-40	1.40	11	13	2	0.128	24	2	-22	-11.2
2	1	-53	-54	1.03	-4	-3	1	-0.222	10	-10	-20	2
3	-24	-78	-53	0.687	-1	-19	-17	0.929	-3	-24	-21	0.863
4	-32	-133	-101	0.759	6	-33	-39	1.194	5	-36	-41	1.15
7	-47	-159	-112	0.706	-44	-47	-4	0.077	-13	-43	-30	0.690
8	-48	-175	-128	0.728	-22	-56	-34	0.611	-24	-50	-26	0.523
10	-69	-210	-141	0.673	-25	-71	-46	0.646	-15	-68	-54	0.785
13	-92	-248	-156	0.628	-48	-86	-38	0.446	-34	-75	-41	0.542
15	-113	-272	-158	0.583	-67	-97	-30	0.308	-43	-93	-50	0.538
17	-130	-292	-162	0.554	-76	-98	-22	0.224	-64	-104	-41	0.390
20	-142	-326	-184	0.565	-84	-114	-30	0.265	-58	-112	-54	0.485
22	-153	-353	-200	0.568	-84	-141	-57	0.403	-65	-122	-57	0.468
24	-164	-369	-204	0.554	-105	-137	-31	0.229	-77	-127	-51	0.398
27	ひび割れ発生				-96	-150	-54	0.361	-78	-142	-64	0.452
29					-118	-163	-44	0.273	-93	-158	-66	0.415
31					-102	-164	-62	0.377	-89	-161	-72	0.447
36					-124	-179	-55	0.308	-100	-167	-67	0.401
38					-123	-186	-64	0.342	-99	-182	-83	0.455
48					-125	-219	-94	0.428	-108	-197	-90	0.454
58					-157	-256	-99	0.386	-134	-245	-111	0.452
78					-187	-302	-115	0.382	-170	-293	-123	0.419
91					-190	-313	-123	0.394	-178	-307	-129	0.419
112					-209	-345	-136	0.394	-208	-338	-129	0.383
119					-223	-359	-137	0.380	-217	-351	-134	0.382
147					-230	-386	-155	0.441	-213	-377	-165	0.436
175					-266	-404	-137	0.390	-243	-399	-156	0.391
203					-284	-429	-145	0.384	-253	-425	-172	0.405
245					-286	-441	-154	0.396	-253	-435	-182	0.419
273					-293	-455	-162	0.400	-269	-445	-176	0.395
311					-277	-463	-186	0.445	-257	-454	-198	0.435
330					-282	-465	-183	0.437	-258	-464	-205	0.443
364					-287	-476	-189	0.479	-270	-470	-201	0.427

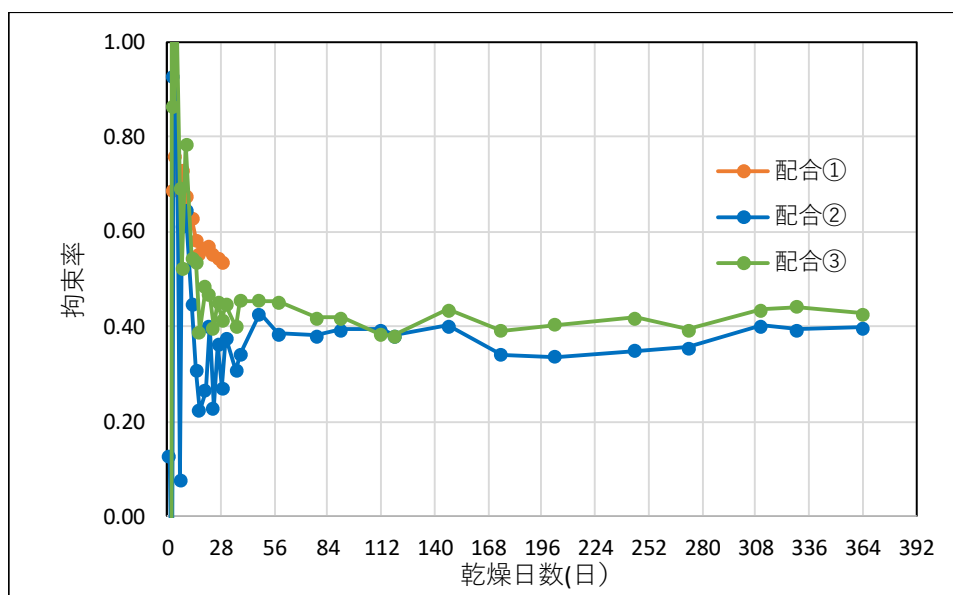


図10 拘束率と乾燥日数の関係

- ・ 配合① 「普通コンクリート」 初期湿布養生
- ・ 配合② 「普通コンクリート+PP 短繊維+収縮低減剤+膨張材」 初期湿布養生
- ・ 配合③ 「中流動コンクリート+PP 短繊維+収縮低減剤+膨張材」 初期湿布養生

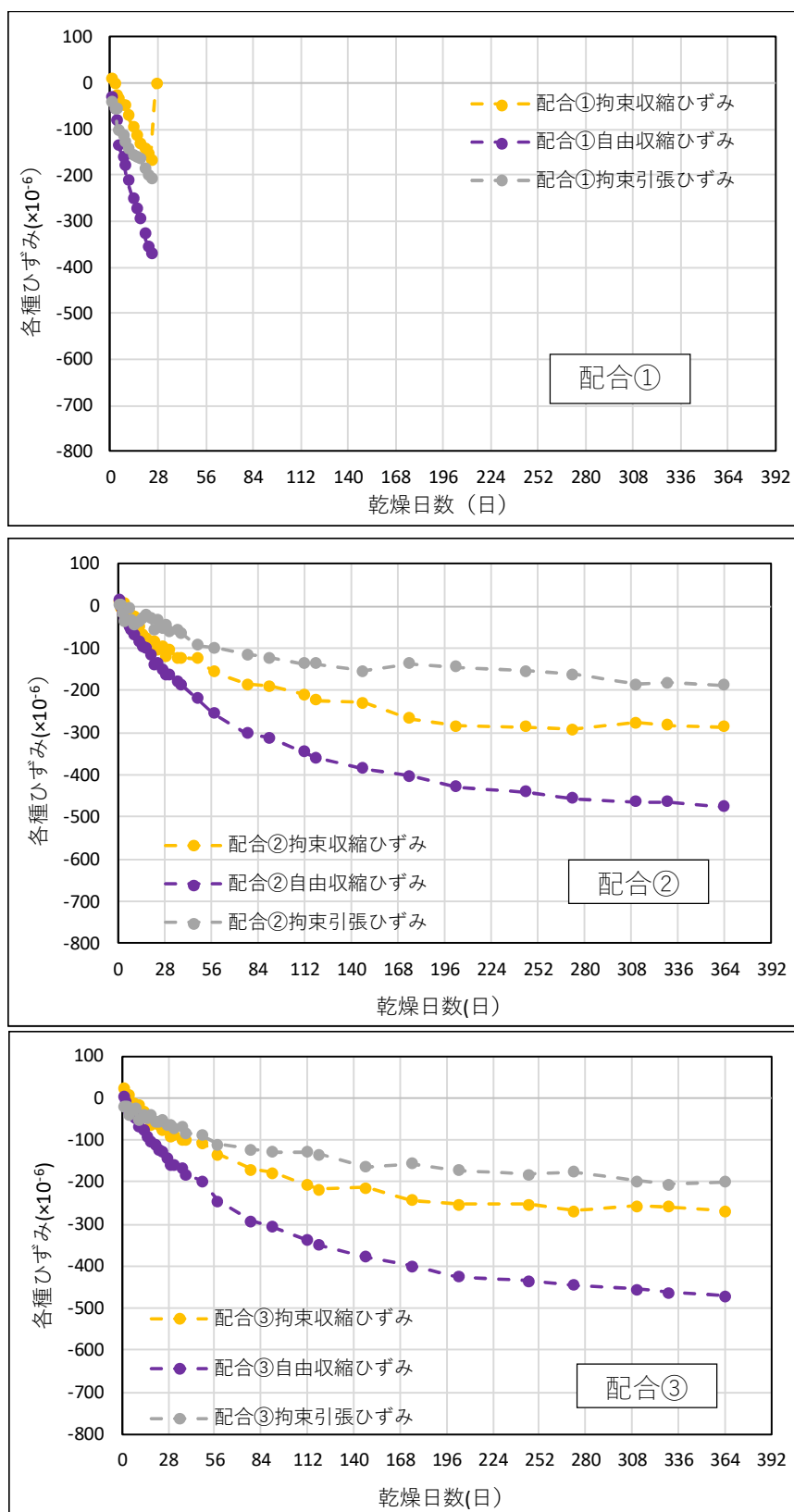


図11 配合毎の各種ひずみと乾燥日数の関係

3) リング試験 (ASTM C 1581) (試験②)

(i) 試験概要

リング試験は、ASTM C 1581「Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage」に準拠した。

鋼製リングの周囲のコンクリートが収縮すること起因する鋼製リングの圧縮ひずみを測定する。コンクリートにひび割れが発生すると鋼製リングの拘束は解放されるため、ひび割れ発生時期を把握することが出来る。

過去の実験より、恒温恒湿槽内の位置によって、供試体を受ける風量および温度などに差が生じることが懸念されたため、測定位置による影響が最小になるように月に1回程度槽内で位置替え（ローテーション）を行った。

ローテーションのイメージを図 12 に示す。

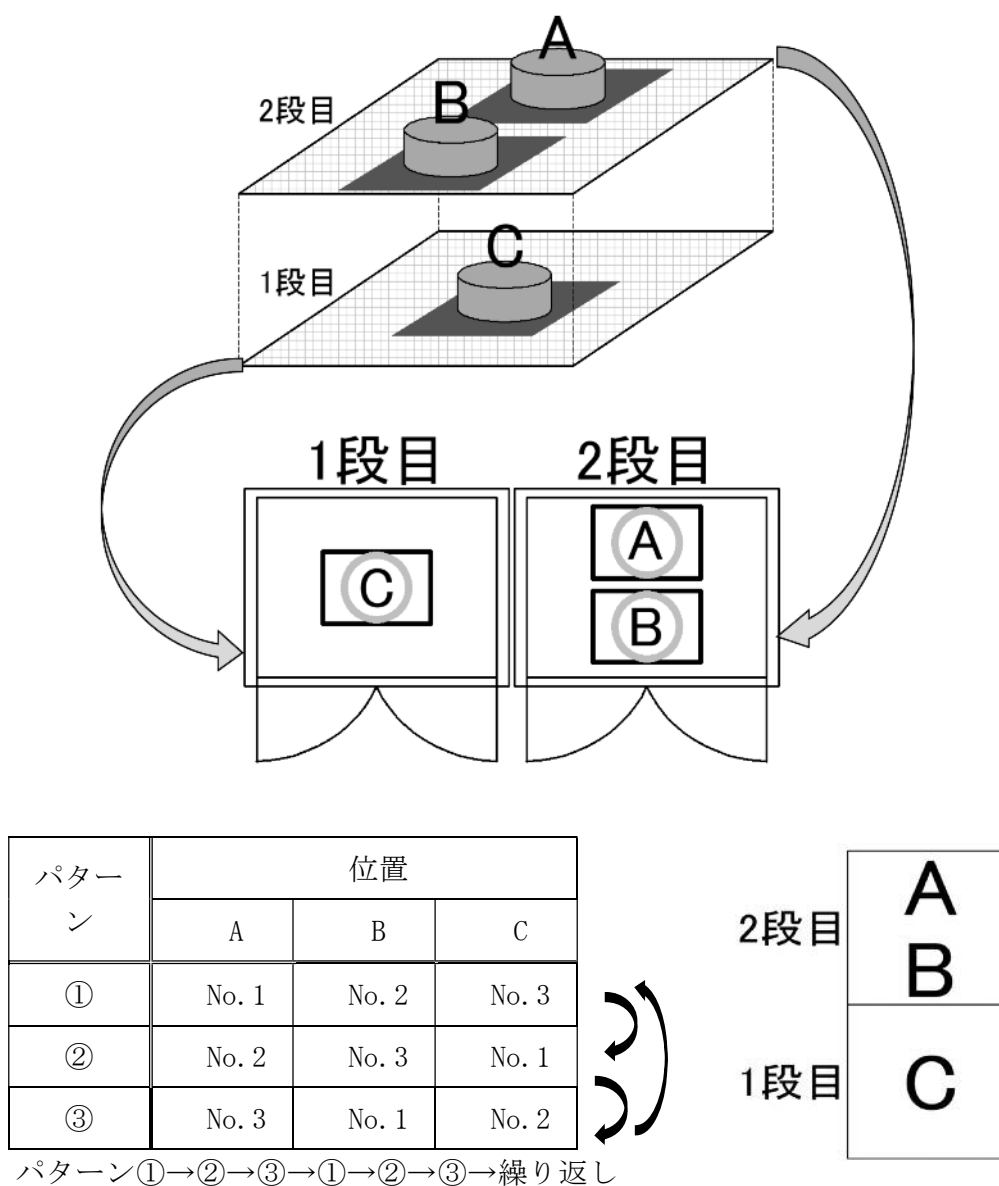


図12 リング試験ローテーションのイメージ図

ひずみ測定は、内側のリング高さ方向中央部に(株)東京測器業務所製のポリエステルひずみゲージ「PFL-20-11-5LJCT-F」を縦横 180° に 2 箇所ずつ計 4 箇所について行った(写真 6)。

ひずみ値は(株)東京測器業務所製のデータロガー「TDS-530」を用いて 20 分間隔で記録した(写真 7)。

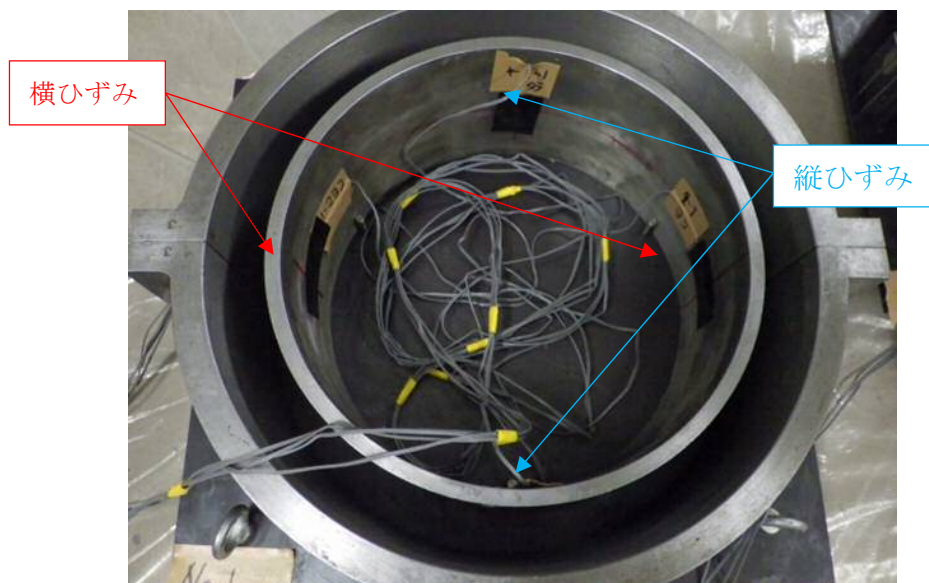


写真 6 リング試験ひずみ測定位置



写真 7 リング試験測定状況

リング試験型枠を図 13 に示す。

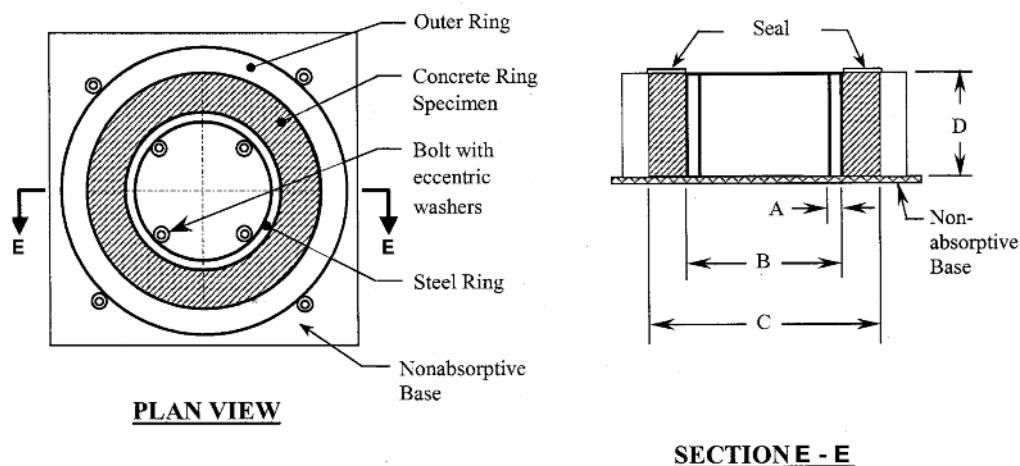


Figure Dimensions	SI Units	Inch-Pound Units
A	$13 \pm 1 \text{ mm}$	$0.50 \pm 0.05 \text{ in.}$
B	$330 \pm 3 \text{ mm}$	$13.0 \pm 0.12 \text{ in.}$
C	$405 \pm 3 \text{ mm}$	$16.0 \pm 0.12 \text{ in.}$
D	$150 \pm 6 \text{ mm}$	$6.0 \pm 0.25 \text{ in.}$

図13 リング試験型枠

(ii) 試験結果

リング試験供試体は、2020年6月9日（乾燥材齢210日）に、目視観察によってひび割れが確認されたことから、リング試験と同じ養生環境で管理していた、供試体作製日、配合、温度及び湿度管理が同じφ10×20cmのコンクリート円柱供試体の圧縮強度および静弾性係数試験を2020年6月9日に実施した。

リング試験のコンクリート打設からひび割れ発生までの日数を表6、鋼製リングのひずみ（ローテーションによるノイズを補正および推定したひずみ）と乾燥日数の関係を図14に示す。

目視観察および鋼製リングひずみの変曲点より、リング試験供試体は平均乾燥日数が191日付近でひび割れ発生と考えられる。

このことから配合③（中流動+PP短繊維+収縮低減剤+膨張材）は、ひび割れ抑制効果が高いことが確認された。

表6 コンクリート打設からひび割れ発生までの日数

種別	No	打設日時	ひび割れ日時	ひび割れ発生時 圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ発生時 静弾性係数 (kN/mm ²)	ひび割れ 幅 (mm)	ひび割れ 深さ (mm)	コンクリート打設 からひび割れ発生 までの日数 (日)	平均 乾燥日数 (日)
中流動 +繊維B +収縮低減剤 +膨張材 +湿潤養生	1	2019/11/12 12:12	2020/4/30 17:59	39.8	27.5	0.04	36 (貫通)	170.40	190.56
	2		2020/5/28 5:59			0.04	13	197.90	
	3		2020/6/2 17:26			0.04	10	203.38	

注：ひび割れ発生日時は、ひずみ計測値から判断

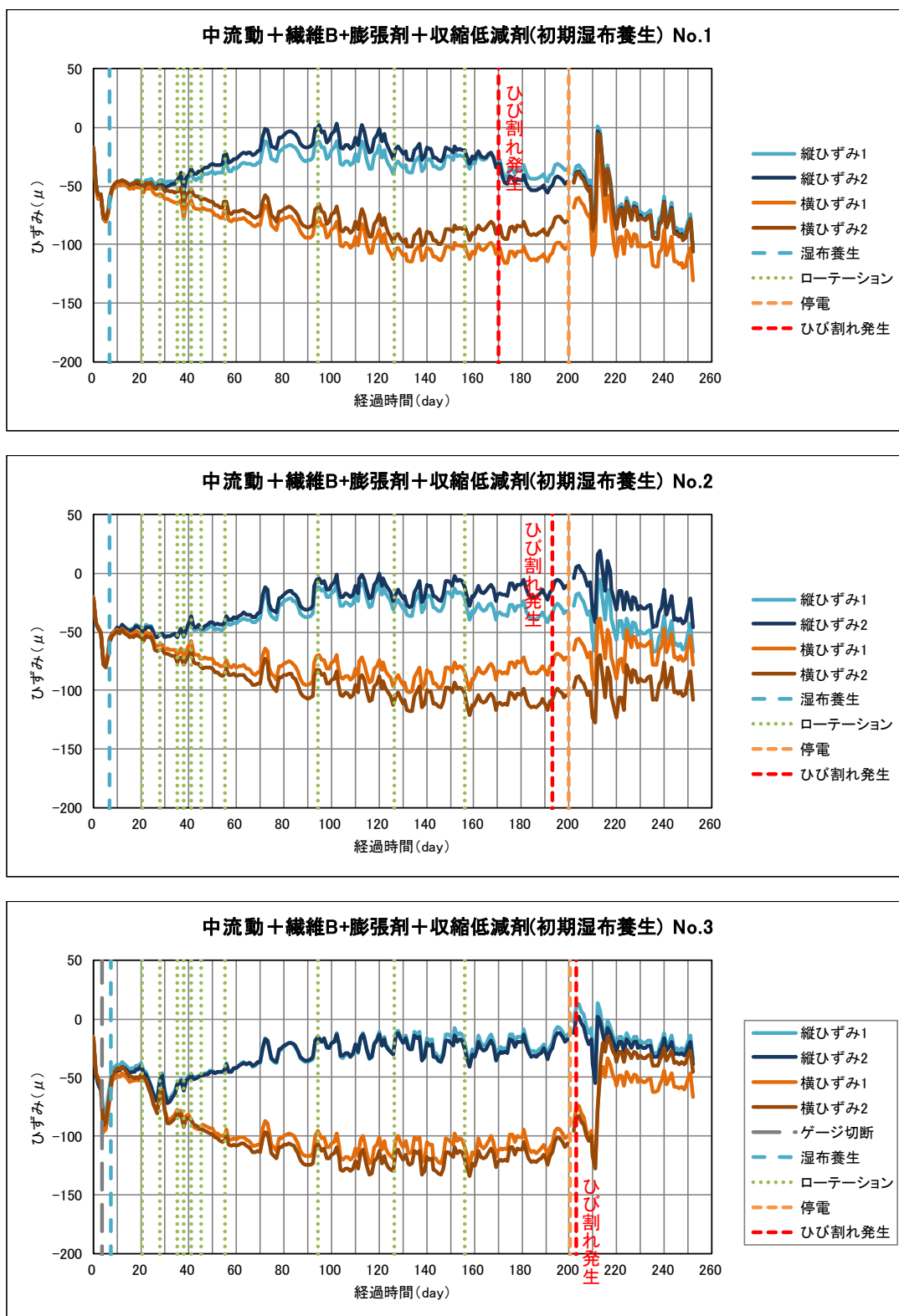


図14 鋼製リング日平均ひずみ（ローテーションによるノイズを補正
および推定したひずみ）と乾燥日数の関係

3) 走査型電子顕微鏡観察 (SEM-EDS 試験) (試験③)

(i) 試験概要

走査型電子顕微鏡観察 (SEM-EDS 試験) は、走査型顕微鏡 (株式会社日立ハイテクノロジー製) (写真 8) を用いて、形態の観察を行った。また、エネルギー分散型 X 線分析装置 (株式会社堀場製作所製) を用いて、組成分析を行った。



写真 8 走査型電子顕微鏡観察 (SEM-EDS試験) 状況

試験に用いる試料は、以下の手順により選別および前処理を行った。

①平成30年度の基礎研究により作製した拘束膨張および収縮試験供試体

(10x10x40cm) から、コンクリートカッターでコンクリート片を切り出し、真空乾燥を行った。

②真空乾燥後のコンクリート片から観察箇所を選別し、試験用試料とした。

(ii) 試験結果

走査型電子顕微鏡による観察結果を、次々頁以降 SEM 写真 1-1~SEM 写真 3-3 に示す。また、エネルギー分散型 X 線分析による定量分析結果を表 7 に示す。

本試験に使用したコンクリート用膨張材 (太平洋ハイパーエクспанエクспан構造用) は、酸化カルシウム (CaO) が主成分であり、酸化カルシウムと水 (H_2O) が反応して水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) が結晶化することによりコンクリートを適度に膨張させる。

今回の分析においては、定量分析結果より、配合②および配合⑤の酸化カルシウム (CaO) 量の多い部分がある。走査型電子顕微鏡による観察においても、配合②の空隙中には SEM 写真 1-3 の様な水酸化カルシウムの六角板状結晶が確認されたことから、膨張材の効果が確認された。

また、酸化アルミニウム (Al_2O_3)、二酸化ケイ素 (SiO_2)、酸化第二鉄 (Fe_2O_3) を比較した場合、いずれの成分においても配合②が最も少ないことから、配合②が最も水分子との結合が進み、コンクリート内部の水の分散を抑制する効果が働いたのではないかと推測される。

表 7 EDS 定量分析結果

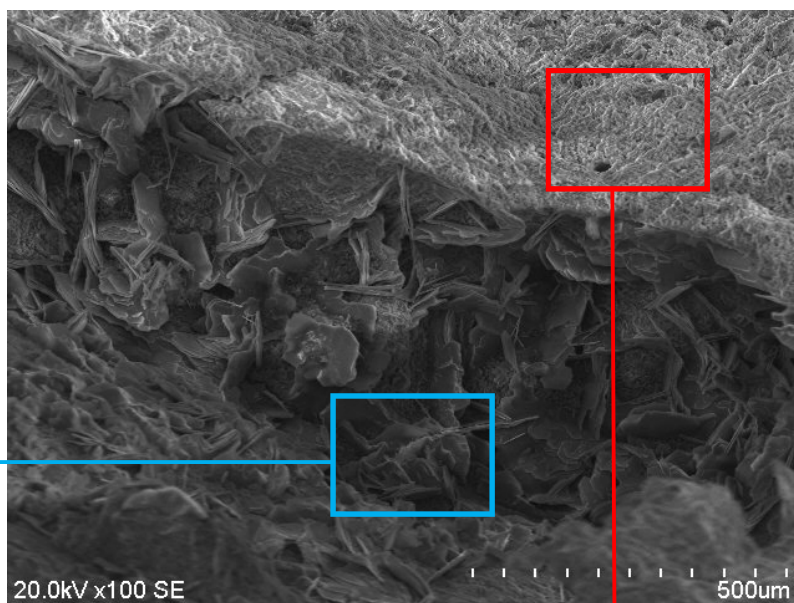
試料	測定箇所	定量分析結果									
		酸化アルミニウム (Al_2O_3)		二酸化けい素 (SiO_2)		三酸化硫黄 (SO_3)		酸化カルシウム (CaO)		酸化第二鉄 (Fe_2O_3)	
		各値	平均値	各値	平均値	各値	平均値	各値	平均値	各値	平均値
配合②	①	6.21	4.10	27.11	20.91	2.49	2.02	60.65	70.73	3.53	2.24
	②	3.81		28.13		3.56		61.32		3.18	
	③	2.27		7.50		0.01		90.21		0.01	
配合④	①	5.01	4.99	27.06	22.49	2.31	2.39	61.84	65.91	3.78	4.21
	②	4.64		19.37		2.99		68.55		4.46	
	③	5.33		21.05		1.88		67.34		4.40	
配合⑤	①	8.01	5.82	24.56	21.94	1.04	1.59	64.06	68.09	2.33	2.56
	②	5.63		27.63		3.73		59.13		3.88	
	③	3.82		13.63		0.00		81.07		1.48	

- ・ 配合② 「普通コンクリート＋短繊維＋収縮低減剤＋膨張材」 初期湿布養生
- ・ 配合④ 「普通コンクリート＋短繊維＋収縮低減剤」
- ・ 配合⑤ 「普通コンクリート＋短繊維＋膨張材」 初期湿布養生

SEM 写真 1-1

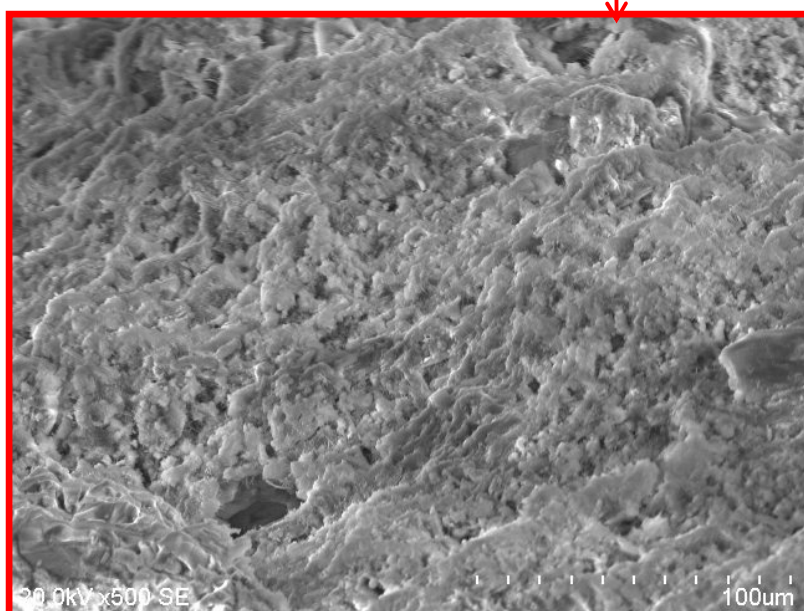
試料：配合②
100 倍
EDS 測定箇所①

□ : SEM 写真 1-2 撮影位置
□ : SEM 写真 1-3 撮影位置



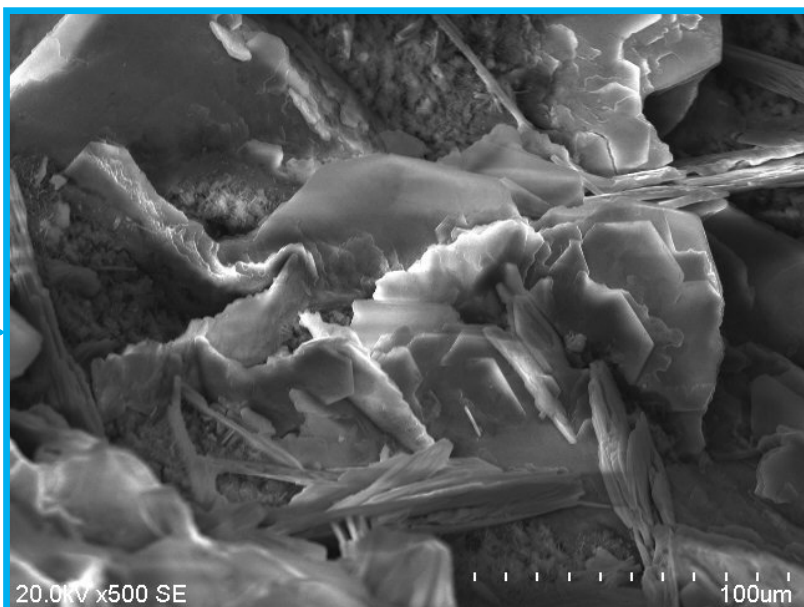
SEM 写真 1-2

試料：配合②
500 倍



SEM 写真 1-3

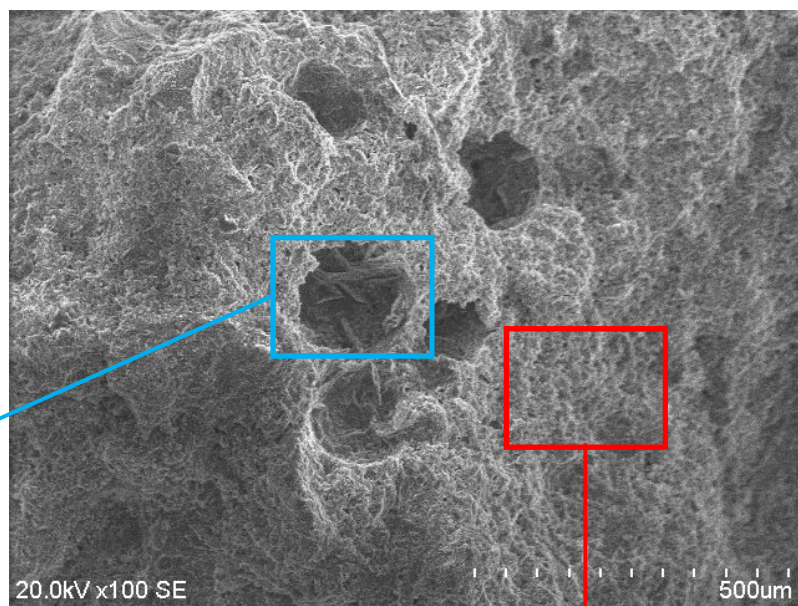
試料：配合②
500 倍



SEM 写真 2-1

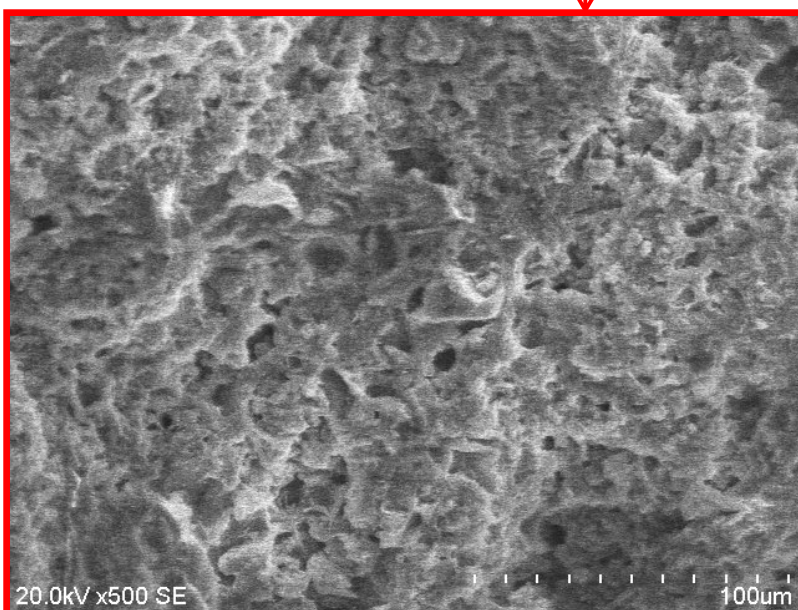
試料：配合④
100 倍
EDS 測定箇所①

□ : SEM 写真 2-2 撮影位置
□ : SEM 写真 2-3 撮影位置



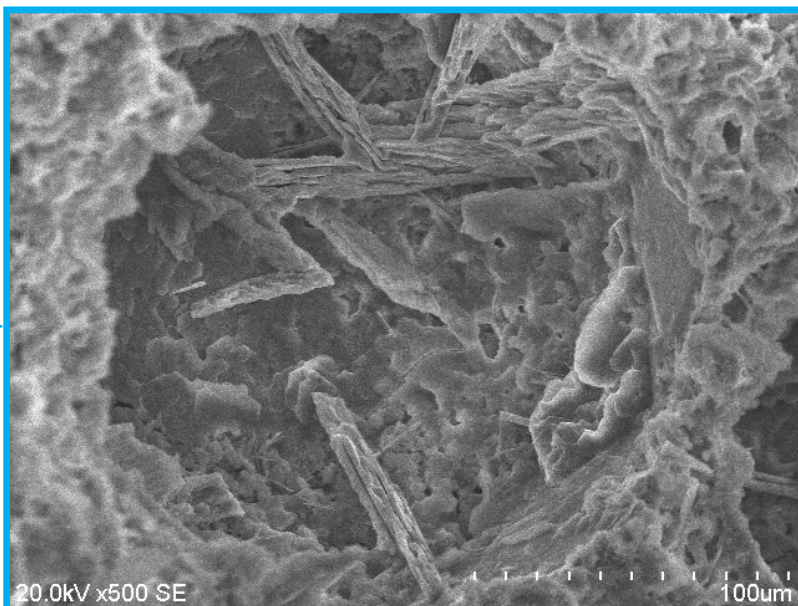
SEM 写真 2-2

試料：配合④
500 倍
EDS 測定箇所②



SEM 写真 2-3

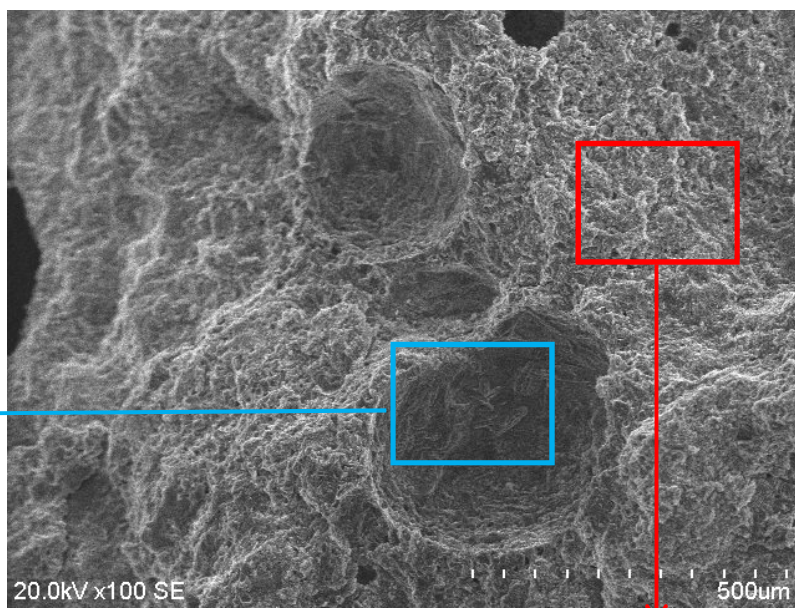
試料：配合④
500 倍
EDS 測定箇所③



SEM 写真 3-1

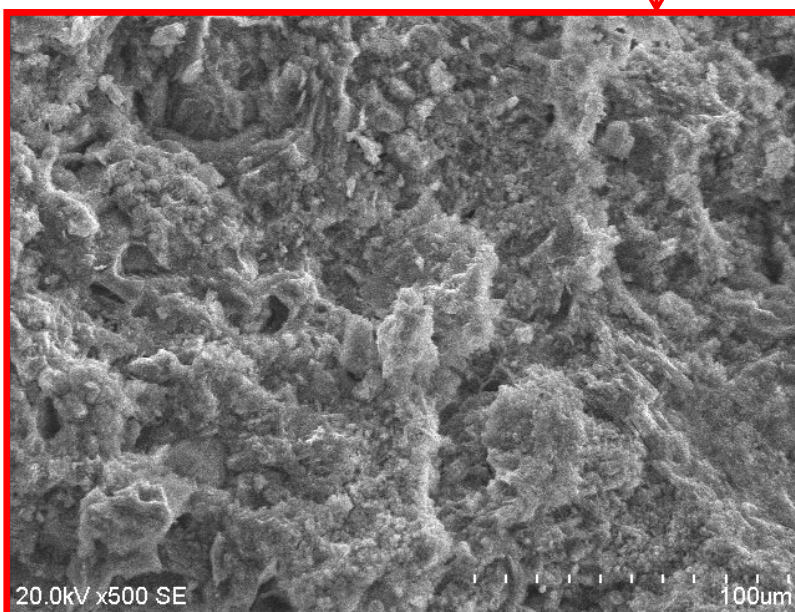
試料：配合⑤
100 倍
EDS 測定箇所①

□ : SEM 写真 3-2 撮影位置
□ : SEM 写真 3-3 撮影位置



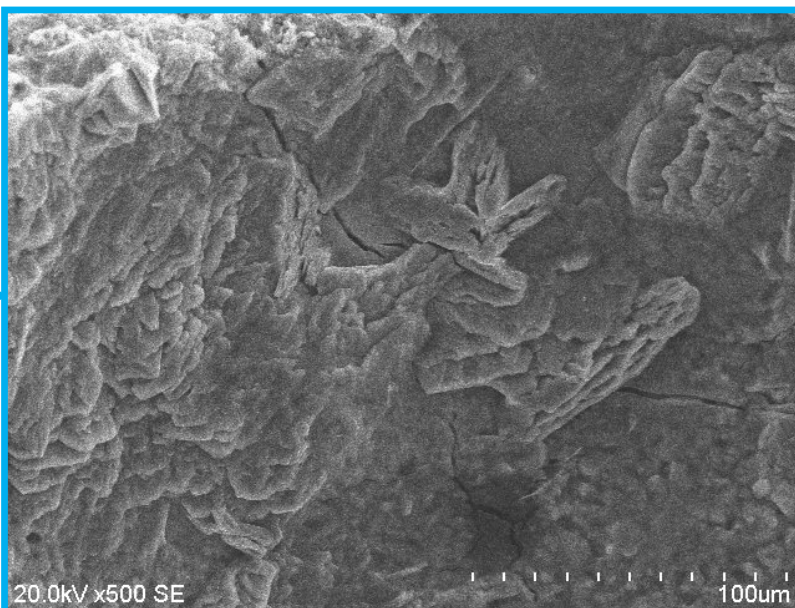
SEM 写真 3-2

試料：配合⑤
500 倍
EDS 測定箇所②



SEM 写真 3-3

試料：配合⑤
500 倍
EDS 測定箇所③



4) 細孔径分布測定（水銀圧入法）（試験④）

細孔径分布測定（水銀圧入法）は、日本コンクリート工学会「コンクリートの試験・分析マニュアル」（2000 年 5 月）5.3.7 微構造／組織の分析、(3) 空隙率、細孔径分布の測定方法、F-3 水銀圧入法(p125)に準拠する。試験装置及び試験手順の詳細を以下に示す。

(i) 試験装置

試験装置は、水銀圧入方式自動ポロシメータ（マイクロメリティックス社製）（写真 9）を使用した。

本装置の低圧部では、試料の真空排気、試料セルへの水銀注入、窒素ガス圧による圧入測定が行われる。高圧部では、油圧による圧入測定が行われる。加圧によって細孔中に侵入した水銀の量(圧入量)は、試料容器内の水銀柱の変位から求められる。

この変位は、水銀と試料容器の管壁にある電極間の静電容量の変化から求める。

水銀圧入法では、水銀に加わる圧力は、水銀が侵入し得る細孔直径と反比例の関係にあり、順次圧力を加えていけば、より小さい細孔にまで水銀が侵入することになり、その細孔直径は 2 種類の物性(表面張力と接触角)さえ既知であれば、一般的に決定することができる。

つまり、圧力を変化させ、その際の水銀液面の変位を測定すれば、細孔分布を得ることができる。



写真 9 細孔径分布測定（水銀圧入法）状況

(ii) 試験手順

(a) 試料の調整方法

- ① 試料を鉄乳鉢で粗粉碎し、網ふるいによってふるい分け、5～2.5mm に粒度調整を行った。
- ② ①の試料を真空凍結乾燥装置に投入し、1 週間以上 D-dry 法により乾燥させた。
- ③ ②の乾燥後、試験直前までデシケーター中に保存した。

(b) 細孔径分布の測定

(a) の試料を採取・計量し、水銀圧入方式自動ポロシメータ（マイクロメリティックス社製）を用いて細孔径分布の測定を行った。

細孔径分布の測定は、1 試料につき 2 回測定した。

(iii) 測定結果

細孔径分布測定結果は、表 8 及び次頁以降の図 16 および図 17 にそれぞれ示す。

また、細孔の分類および測定方法と関連するコンクリートの物性を図 15 に示す。

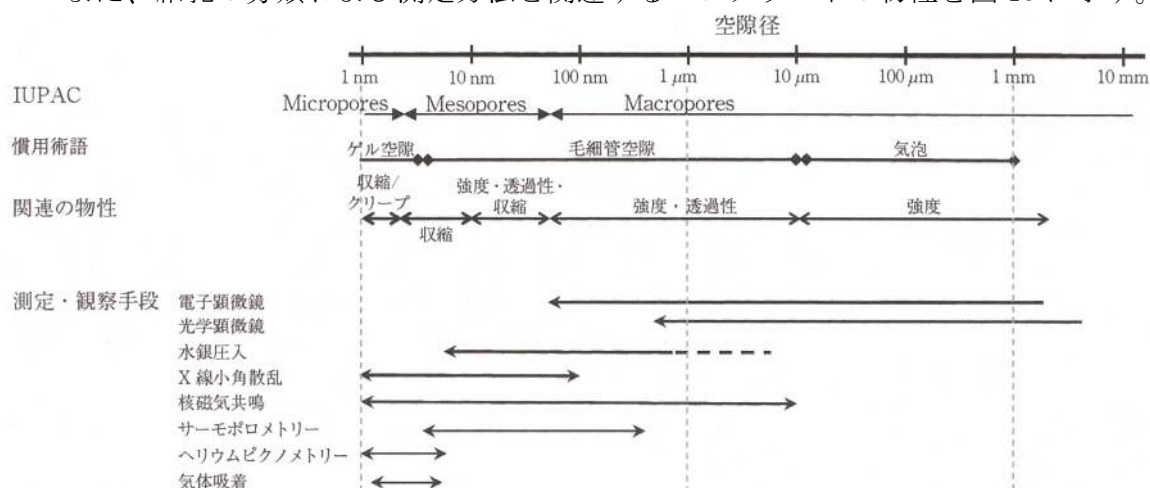


図15 細孔の分類および測定方法と関連するコンクリートの物性

本試験に使用した収縮低減剤は、毛細管張力を弱めることによりコンクリートの乾燥収縮を低減させる。

今回の分析結果からは、配合②および配合④は $0.01\mu\text{m}$ 付近の細孔空隙が多いのに対して配合⑤は少ない。上図より、毛細管空隙は $0.01\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 付近の空隙と考えられる。また、 $0.001\mu\text{m} \sim 0.1\mu\text{m}$ 付近の空隙がコンクリートの収縮に作用することから、これは収縮低減剤の効果と推測される。

総細孔容積を比較した場合、配合②および配合⑤は同程度であるのに対して配合④は大きい。このことから、配合②および配合⑤は、膨張材と湿潤養生によりコンクリートの水密性が向上し、密実になったものと考えられる。

中心径を比較した場合、配合②<配合④<配合⑤の順で大きい。細孔分布曲線においては、配合②は小さい径のものが多く大きな径のものは少ない。また、細孔径量曲線においても配合②細孔容積の累計が最も小さい値で推移している。以上のことから、配合②が最もコンクリート内部の水の分散が少ないのではないかと推測される。

表 8 細孔径分布測定結果

試料名	総細孔容積 ($\times 0.01\text{cm}^3/\text{g}$)	比表面積 (m^2/g)	平均径 (μm)	中心径 (μm)
配合②	7.93	12.77	0.0124	0.0479
配合④	8.89	14.39	0.0124	0.0604
配合⑤	7.84	9.58	0.0164	0.0776

平均径および中心径は、細孔の半径を示す。

- ・ 配合② 「普通コンクリート＋短繊維＋収縮低減剤＋膨張材」 初期湿布養生
- ・ 配合④ 「普通コンクリート＋短繊維＋収縮低減剤」
- ・ 配合⑤ 「普通コンクリート＋短繊維＋膨張材」 初期湿布養生

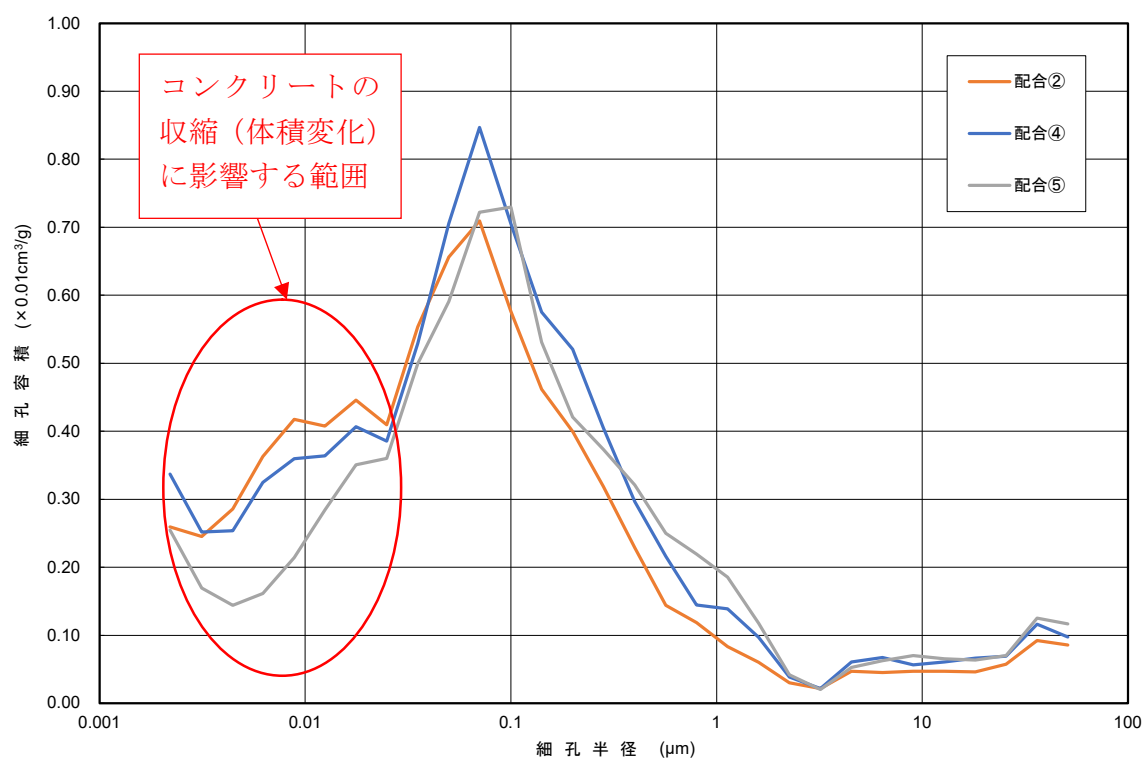


図16 細孔径分布曲線

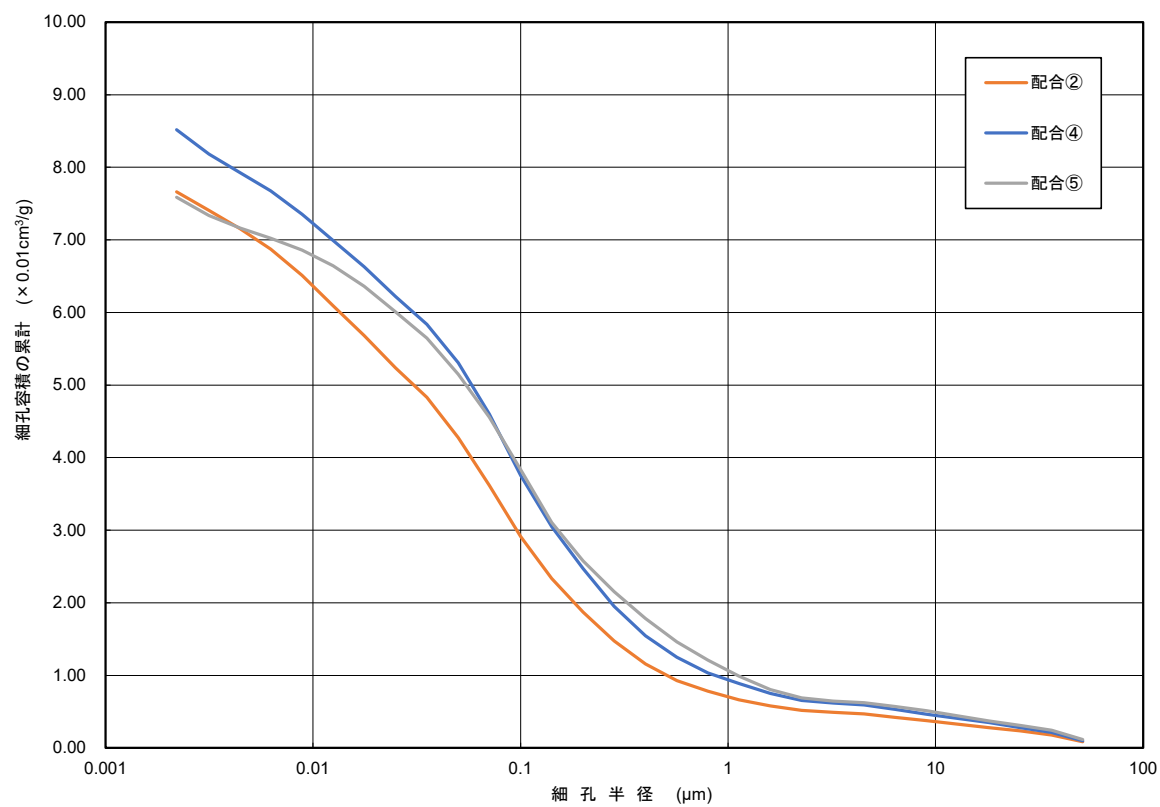


図17 積算細孔量曲線

(2) 施工性能を考慮したコンクリートの開発

(1) の配合③「中流動コンクリート+短繊維+収縮低減剤+膨張材」について、耐クラック性能を付与し、施工性能を考慮した乾燥収縮ひび割れの抑制効果を確認するため、以下の試験を実施した。

試験方法「コンクリート用膨張材」(JIS A 6202 : 2017)

附属書 B (参考) 膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法における
「B 法 膨張及び収縮を対象とした試験方法」

1) 膨張コンクリートの拘束膨張および収縮試験

(i) 試験概要

JIS A 6202:2017「コンクリート用膨張材」、附属書 B (参考) 膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法における「B 法 膨張及び収縮を対象とした試験方法」によった。

基長の算出は次式により算出した。

$$X_0 = X_{01} - X_{02} \quad \text{式 (6)}$$

ここに、 X_0 : 基長 (mm)
 X_{01} : 基長測定時における標準器の測定値 (mm)
 X_{02} : 基長測定時における標準器具の測定値 (mm)

材齢 7 日までは温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中養生を行い、その後、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室内に静置し乾燥を開始した。

拘束膨張率の測定 (写真 10) は、脱枠時、材齢 2 日および材齢 7 日とした。

長さ変化率の測定は、乾燥開始より 1 週、4 週、8 週、3 ヶ月、6 ヶ月、9 か月、12 か月、とした。

拘束膨張率は次式により算出した。

$$L_r = \frac{X_0 - (X_{i1} - X_{i2})}{L} \quad \text{式 (7)}$$

ここに、 L_r : 長さ変化率【膨張率】 ($\times 10^{-6}$)
 L : A 法の場合は 360 (mm)、B 法の場合は 385 (mm)
 X_0 : 基長 (mm)
 X_{i1} : 測長材齢 i における標準器の測定値 (mm)
 X_{i2} : 測長材齢 i における供試体の測定値 (mm)

長さ変化率は次式により算出した。

$$\varepsilon = \frac{(X_{01} - X_{02}) - (X_{i1} - X_{i2})}{L_0} \quad \text{式 (8)}$$

ここに、 ε : 長さ変化率 ($\times 10^{-6}$)
 L_0 : 基長
 X_{01} 、 X_{02} : それぞれ基準とした時点における標準尺および供試体の測定値

X_{i1} 、 X_{i2} : それぞれ時点 i における標準尺および供試体の測定値
ただし、 L_0 、 X_{01} 、 X_{02} 、 X_{i1} 、 X_{i2} の長さの単位は、同一とする。



写真10 膨張コンクリートの拘束膨張および収縮試験状況

(ii) 試験結果

拘束膨張および収縮試験結果を表 9 に、長さ変化率と材齢の関係を図 18 に示す。
試験結果より、配合③は打設後 7 日の間に適度に膨張していることが確認出来る。
これによりコンクリートの収縮が抑制されていることが確認された。

表 9 拘束膨張および収縮試験結果（平均値）

種別	標準養生（水中 20℃）			乾燥状態（温度 20℃、相対湿度 60%）						
	脱枠時	材齡 2 日	材齡 7 日	1 週	4 週	8 週	3 ヶ月	6 ヶ月	9 ヶ月	12 ヶ月
	長さ変化率（膨張）			長さ変化率（収縮）						
	（×10 ⁻⁶ ）									
配合 ③	8	14	17	9	1	-6	-12	-18	-23	-24

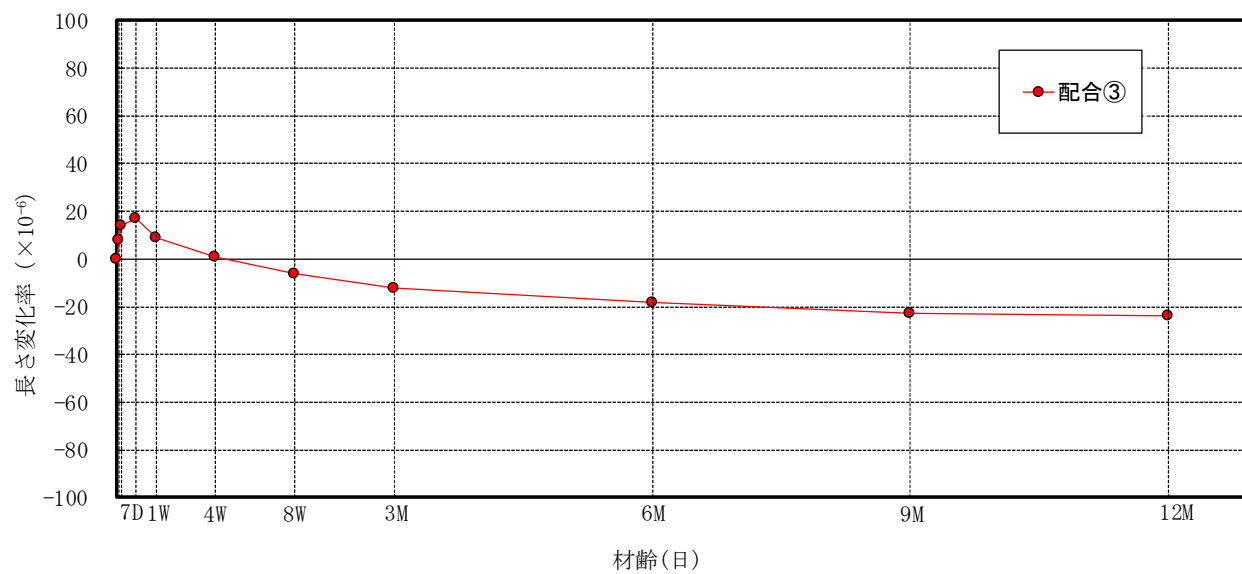


図18 長さ変化率と材齢の関係

(3) ひび割れ発生時期の推定式の検討

1) ひび割れ発生時期の推定方法

(i) 200 年後の乾燥収縮ひずみの推定

200 年後の乾燥収縮ひび割れの発生時期の推定は、民間研究活動として令和元年度に実施したコンクリートの自由収縮試験 (JIS A 1132)、拘束されたコンクリートのひび割れ試験 (JIS A 1151) で得られた乾燥収縮ひずみの実測値と、推定式における 200 年後の乾燥収縮ひずみと比較した。

(a) 供試体

ア. 配合

配合は、以下に示す 3 種類である。供試体数は各 3 本ずつである。

- ① 普通コンクリート
- ② 普通コンクリート+繊維B+膨張材 (EX) +収縮低減剤 (SRA)
- ③ 中流動コンクリート+繊維B+膨張材 (EX) +収縮低減剤 (SRA)

イ. 供試体寸法

自由収縮ひずみ…100×100×400 mmの角柱供試体

拘束収縮ひずみ…250×1000×100 mmのダンベル供試体

ウ. 測定頻度

材齢7日までは温度20度、相対湿度60%の室内で湿布養生

材齢7日で脱型し、その後、温度20±2度、相対湿度60±5%の恒温恒湿室で乾燥開始

測定頻度：乾燥開始7日（材齢14日）までは1日1回

乾燥開始 28 日（材齢 35 日）までは 2 日に 1 回

(b) 検討に使用したデータ分類

各配合におけるコンクリート自由収縮ひずみとコンクリート拘束収縮ひずみの実測期間を下表に示す。

表10 各配合のひずみ実測期間

配合分類	配合内容	自由収縮ひずみ	拘束収縮ひずみ
配合①	普通コン	乾燥日数 364 日まで	ひび割れ発生日まで
配合②	普通コン+短繊維+EX+SRA	乾燥日数 364 日まで	乾燥日数 364 日まで
配合③	中流動コン+短繊維+EX+SRA	乾燥日数 364 日まで	乾燥日数 364 日まで

(c) 乾燥収縮ひずみ推定検討に使用した推定式

本研究では、多数提案されている乾燥収縮ひずみ推定式のうち、代表的な以下の①～⑤の 5 つの推定式を用いる。併せて、本研究で得られた実測値を基に、最小二乗法によって求めた⑥指数関数フィッティング法による回帰式についてもひずみの推定に用いる。

- ①土木学会提案の最乾燥収縮ひずみ推定式：土木学会式
- ②建築学会提案の最終乾燥収縮ひずみ推定式：建築学会式
- ③桜田氏らによる提案式（改良建築学会式）：改）建築学会式
- ④CEB モデル：CEB 式
- ⑤今本氏らによる提案式：外挿法（直角双曲線）
- ⑥指数関数フィッティング法による回帰式：回帰式

推定式は実測で得られたひずみ値を基に、最終乾燥収縮ひずみを求めるものが多い。ここでは、本研究が超長期の供用期間として、200 年に渡って耐クラック性能を有するコンクリート開発を目的としていることから、いずれも 200 年後の値を求めることとした。

表11 各推定式で求めるひずみ値

推定式	推定値
①土木学会式	式で求められる 200 年後の乾燥収縮ひずみ値
②建築学会式	式で求められる 200 年後の乾燥収縮ひずみ値
③改）建築学会式	式で求められる 200 年後の乾燥収縮ひずみ値
④CEB 式	式で求められる 200 年後の乾燥収縮ひずみ値
⑤外挿法	外挿法により求めた 200 年後の値
⑥回帰式	指数関数フィッティングで求めた 200 年後の値

(d) ひずみ実測値

試験で得られた自由収縮ひずみ及び拘束収縮ひずみの実測値は、下表のとおりである。

表12 自由収縮ひずみ実測値

乾燥日数 (日)	コンクリート自由収縮ひずみ														
	配合①					配合②					配合③				
	No. 1	No. 2	No. 3	平均	標準偏差	No. 1	No. 2	No. 3	平均	標準偏差	No. 1	No. 2	No. 3	平均	標準偏差
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-32	-21	-32	-28	5.19	14	12	13	13	0.82	5	-3	4	2	3.56
2	-53	-46	-60	-53	5.72	-3	-7	1	-3	3.27	-3	-19	-8	-10	6.68
3	-72	-73	-88	-78	7.32	-10	-34	-12	-19	10.87	-24	-35	-14	-24	8.58
4	-134	-123	-142	-133	7.79	-28	-45	-25	-33	8.81	-33	-41	-34	-36	3.56
7	-161	-151	-164	-159	5.56	-48	-61	-33	-47	11.44	-40	-43	-46	-43	2.45
8	-171	-168	-187	-175	8.34	-57	-63	-47	-56	6.60	-52	-47	-50	-50	2.05
10	-206	-202	-222	-210	8.64	-72	-83	-57	-71	10.66	-67	-73	-65	-68	3.40
13	-247	-239	-258	-248	7.79	-87	-102	-69	-86	13.49	-74	-83	-68	-75	6.16
15	-274	-259	-282	-272	9.53	-99	-107	-86	-97	8.65	-89	-103	-87	-93	7.12
17	-297	-282	-298	-292	7.32	-101	-101	-93	-98	3.77	-104	-112	-97	-104	6.13
20	-332	-311	-334	-326	10.40	-117	-127	-99	-114	11.59	-107	-122	-107	-112	7.07
22	-357	-339	-363	-353	10.20	-145	-151	-128	-141	9.74	-107	-134	-124	-122	11.15
24	-377	-352	-377	-369	11.79	-137	-140	-133	-137	2.87	-124	-135	-123	-127	5.44
27	-398	-379	-401	-393	9.74	-158	-161	-132	-150	13.02	-138	-148	-139	-142	4.50
29	-421	-404	-423	-416	8.52	-167	-173	-148	-163	10.66	-158	-164	-153	-158	4.50
31	-436	-417	-438	-430	9.46	-163	-182	-148	-164	13.91	-157	-169	-157	-161	5.66
36	-469	-443	-464	-459	11.26	-184	-193	-159	-179	14.38	-163	-176	-162	-167	6.38
38	-479	-463	-482	-475	8.34	-181	-204	-174	-186	12.81	-178	-189	-178	-182	5.19
48	-535	-514	-529	-526	8.83	-226	-227	-203	-219	11.09	-193	-206	-193	-197	6.13
58	-589	-569	-578	-579	8.18	-264	-264	-239	-256	11.79	-239	-256	-239	-245	8.01
78	-627	-610	-620	-619	6.98	-312	-308	-286	-302	11.43	-283	-307	-288	-293	10.34
91	-648	-627	-637	-637	8.58	-315	-327	-297	-313	12.33	-304	-316	-301	-307	6.48
112	-680	-660	-665	-668	8.50	-348	-360	-328	-345	13.20	-333	-350	-330	-338	8.81
119	-695	-672	-678	-682	9.74	-366	-367	-345	-359	10.14	-347	-359	-346	-351	5.91
147	-709	-684	-684	-692	11.79	-391	-395	-371	-386	10.50	-374	-391	-367	-377	10.08
175	-719	-697	-703	-706	9.29	-407	-417	-387	-404	12.47	-392	-411	-395	-399	8.34
203	-756	-728	-729	-738	12.97	-434	-444	-409	-429	14.72	-412	-441	-421	-425	12.12
245	-746	-724	-725	-732	10.14	-440	-458	-424	-441	13.89	-427	-446	-433	-435	7.93
273	-772	-741	-742	-752	14.38	-459	-469	-438	-455	12.92	-440	-457	-438	-445	8.52
311	-774	-748	-749	-757	12.03	-466	-478	-446	-463	13.20	-448	-467	-448	-454	8.96
330	-770	-744	-749	-754	11.26	-467	-477	-451	-465	10.71	-459	-474	-458	-464	7.32
364	-779	-754	-757	-763	11.15	-482	-488	-458	-476	12.96	-459	-484	-468	-470	10.34

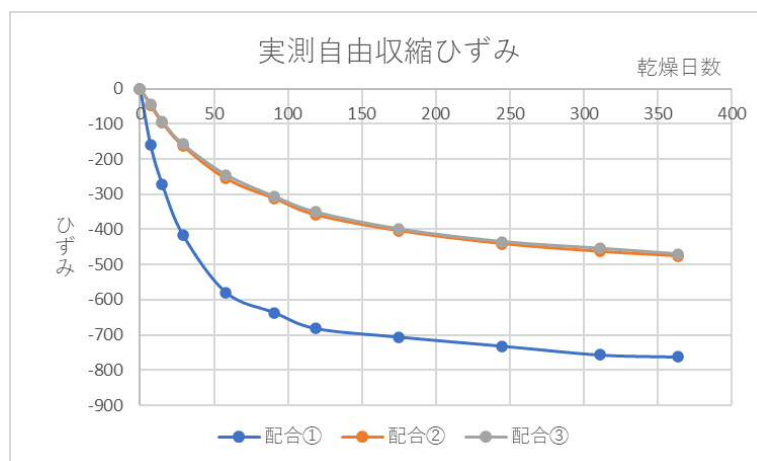
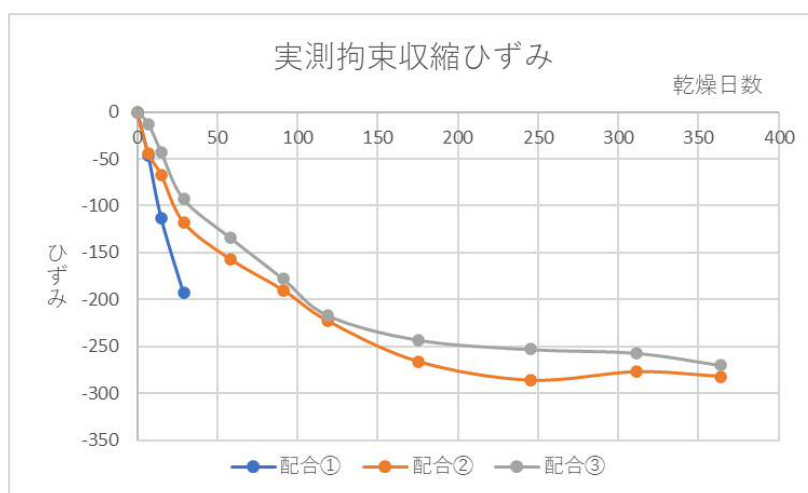


表13 拘束収縮ひずみ実測値

乾燥日数 (日)	コンクリート拘束収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)														
	配合①					配合②					配合③				
	No. 1	No. 2	No. 3	平均	標準偏差	No. 1	No. 2	No. 3	平均	標準偏差	No. 1	No. 2	No. 3	平均	標準偏差
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-34	51	17	11	35	9	42	-17	11	24	23	43	7	24	15
2	-17	7	14	1	13	4	9	-24	-4	15	6	37	-13	10	21
3	-46	-25	-2	-24	18	1	44	-49	-1	38	0	10	-20	-3	12
4	-54	-38	-4	-32	21	12	44	-37	6	33	17	9	-10	5	11
7	-42	-63	-35	-47	12	-25	-5	-101	-44	41	-5	-21	-14	-13	7
8	-68	-46	-29	-48	16	2	3	-70	-22	34	-57	19	-33	-24	32
10	-77	-78	-51	-69	12	-24	10	-61	-25	29	-23	4	-25	-15	13
13	-111	-98	-68	-92	18	-47	-9	-87	-48	32	-38	-39	-26	-34	6
15	-126	-130	-84	-113	21	-61	-38	-103	-67	27	-44	-37	-48	-43	5
17	-144	-143	-104	-130	19	-64	-50	-115	-76	28	-64	-55	-72	-64	7
20	-163	-155	-107	-142	25	-68	-60	-124	-84	28	-59	-48	-66	-58	7
22	-172	-174	-112	-153	29	-69	-62	-122	-84	27	-58	-46	-90	-65	19
24	-180	-179	-134	-164	21	-91	-83	-142	-105	26	-82	-69	-79	-77	6
27	-174	-183	26日目ひび	-179	5	-84	-79	-125	-96	21	-71	-73	-89	-78	8
29	-194	-192		-193	1	-108	-102	-145	-118	19	-95	-85	-98	-93	6
31	-189	-191		-190	1	-95	-81	-131	-102	21	-98	-76	-93	-89	9
36	-194	32日目ひび		-194	0	-122	-101	-148	-124	19	-101	-85	-114	-100	12
38	-184			-184	0	-117	-98	-153	-123	23	-103	-94	-100	-99	4
48	42日目ひび					-123	-108	-144	-125	15	-114	-97	-112	-108	8
58						-147	-143	-181	-157	17	-143	-126	-133	-134	7
78						-183	-164	-213	-187	20	-179	-158	-173	-170	9
91						-190	-162	-217	-190	22	-179	-163	-193	-178	12
112						-212	-174	-242	-209	28	-213	-198	-214	-208	7
119						-208	-213	-247	-223	17	-221	-205	-224	-217	8
147						-236	-213	-242	-230	12	-213	-202	-223	-213	9
175						-257	-261	-281	-266	10	-255	-228	-246	-243	11
203						-285	-276	-292	-284	7	-249	-232	-277	-253	19
245						-288	-267	-304	-286	15	-247	-243	-269	-253	11
273						-297	-277	-305	-293	12	-260	-254	-294	-269	18
311						-282	-258	-292	-277	14	-245	-256	-269	-257	10
330						-284	-257	-305	-282	20	-233	-259	-283	-258	20
364						-286	-257	-302	-282	19	-246	-270	-293	-270	19



(e) 各推定式による乾燥収縮ひずみの推定

ア. 自由収縮ひずみ

配合①②③の推定ひずみ値は、以下のとおりであり、配合②③は配合①より小さい値を示している。

配合①「普通コンクリート」 推定ひずみ値 $=-810\sim-860$ ($\times 10^{-6}$)

配合②「普通コンクリート+混和材」 推定ひずみ値 $=-500\sim-540$ ($\times 10^{-6}$)

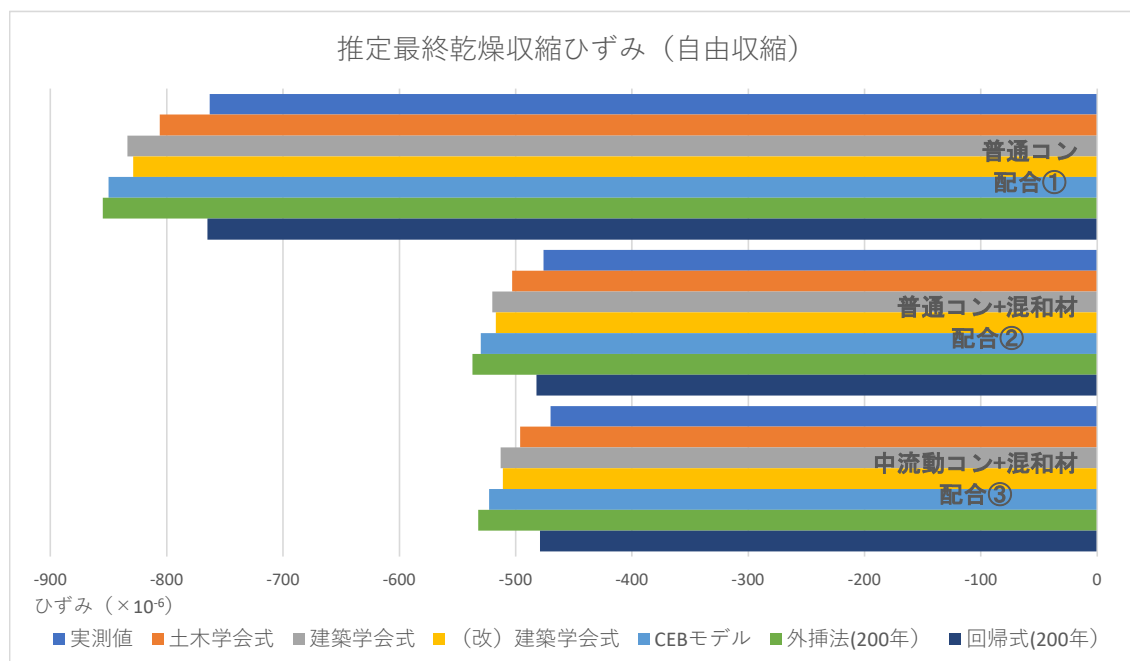
配合③「中流動コンクリート+混和材」 推定ひずみ値 $=-500\sim-530$ ($\times 10^{-6}$)

これは、膨張材 (EX) +収縮低減剤 (SRA) を配合したことで乾燥収縮量が小さくなっている影響と見られる。

各推定式の推定ひずみ値を低い順で見ると、「回帰式」、「土木学会式」、「(改)建築学会式」、「建築学会式」、「CEB モデル」、「外挿法」の順となる。回帰式は乾燥日数 364 日時点の実測値からのひずみ値の増加が -10 ($\times 10^{-6}$) 以下と極めて小さい結果となった。その他推定式は、更に乾燥が進むと実測値から $-30\sim-90$ ($\times 10^{-6}$) 程度のひずみ値の上昇が推定できる。

表14 200年後の乾燥収縮ひずみ (自由収縮ひずみ)

配合		自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)						
		実測値	土木学会式	建築学会式	(改) 建築学会式	CEBモデル	外挿法(200年)	回帰式(200年)
配合①	普通コン	-763	-806	-834	-829	-850	-855	-765
配合②	普通コン+混和材	-476	-503	-520	-517	-530	-537	-482
配合③	中流動コン+混和材	-470	-496	-513	-511	-523	-532	-479



イ. 拘束収縮ひずみ

拘束収縮ひずみは配合①が早期にひび割れが発生したため、配合②及び③の結果を整理した。配合②③の推定ひずみ値は、以下のとおりである。

配合②「普通コンクリート+混和材」 推定ひずみ値 $=-300\sim-370$ ($\times 10^{-6}$)

配合③「中流動コンクリート+混和材」 推定ひずみ値 $=-290\sim-340$ ($\times 10^{-6}$)

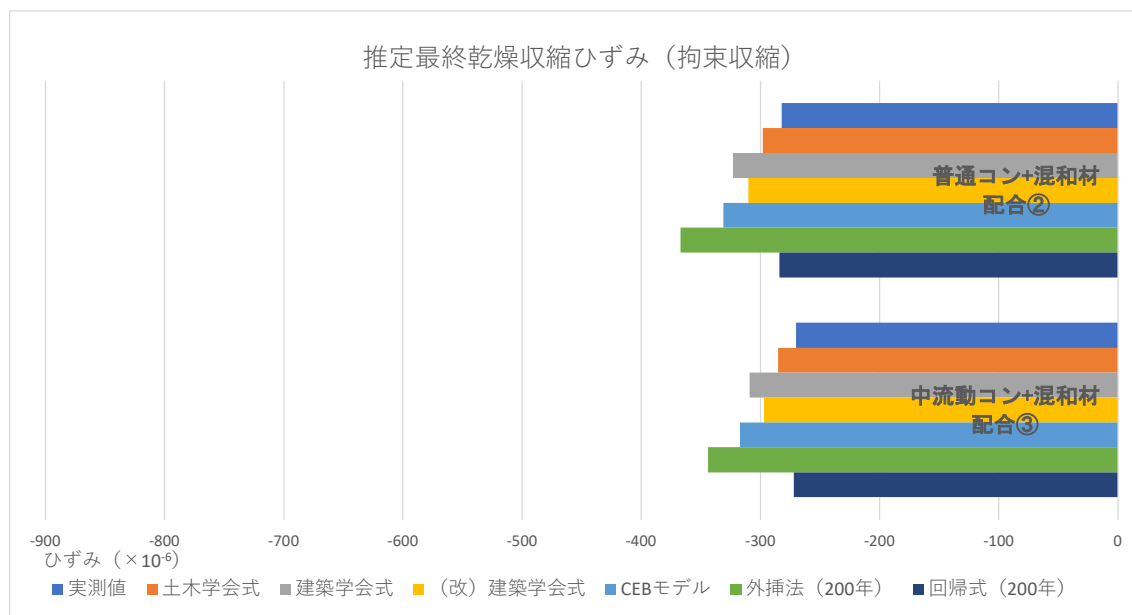
配合②及び配合③を比較すると、配合③の実測ひずみ値が小さかったために推定ひずみ値もわずかに小さい傾向となっている。

各推定式の推定ひずみ値の傾向は、自由収縮ひずみと同様に、「回帰式」、「土木学会式」、「(改) 建築学会式」、「建築学会式」、「CEBモデル」、「外挿法」の順で大きくなっていく。

実測値からさらに乾燥が進むと $-2\sim-80$ ($\times 10^{-6}$) 程度のひずみ値の上昇が推定される。

表15 乾燥収縮ひずみ (拘束収縮ひずみ)

配合		拘束収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)						
		実測値	土木学会式	建築学会式	(改) 建築学会式	CEBモデル	外挿法 (200年)	回帰式 (200年)
配合②	普通コン+混和材	-282	-298	-323	-310	-331	-367	-284
配合③	中流動コン+混和材	-270	-285	-309	-297	-317	-344	-272



(f) 乾燥ひずみ推定値の乾燥日数別の推移

ア. 自由収縮ひずみ

「土木学会式」「建築学会式」「(改) 建築学会式」「CEB モデル」で求めた値は、乾燥日数におけるその時点の推定値の推移とした。

「外挿法」は、364 日間の乾燥日数の CEB モデルの算出推定乾燥収縮ひずみ値を用いて、直角双曲線グラフの係数を算出して作成したグラフ値で、他の算定方式と異なる。

各推定式とも配合①、配合②、配合③において、乾燥日数が進むごとのひずみの推移は概ね同様の变化傾向を示しており、自由収縮ひずみの推定において、各推定式による差はほとんど見られない。

配合①の「普通コンクリート」は、各推定式のひずみ値が乾燥日数 50 日程度で概ね収束しているのに対して、配合②及び配合③は収束までの乾燥日数は 175 日程度要している。これは、配合②及び③が配合①に比べてひずみ実測値が緩やかに上昇を続けているためであり、膨張材 (EX) 及び収縮低減剤 (SRA) を配合したコンクリートの乾燥収縮ひずみを精度よく推定するためには、少なくとも半年程度はひずみ値の実測が必要と考えられる。

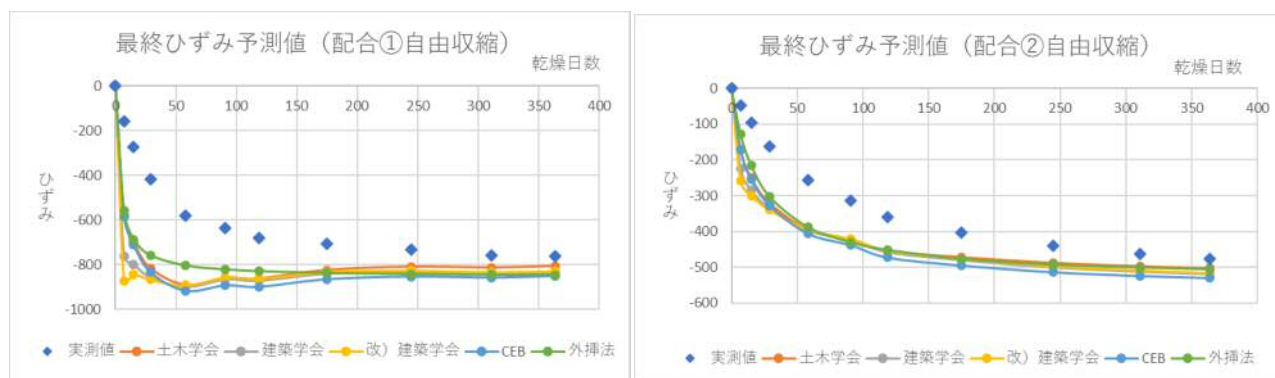


図19 乾燥収縮ひずみ（自由収縮ひずみ）推定値（左：配合①、右：配合②）

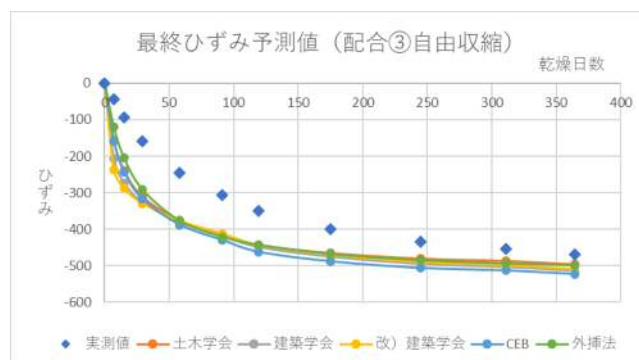


図 20 乾燥収縮ひずみ（自由収縮ひずみ）推定値（配合③）

イ. 拘束収縮ひずみ

拘束収縮ひずみにおける推定値においては、自由収縮ひずみよりも各推定式でばらつきが見られ、「土木学会式」が小さい値を示し、「CEB モデル」と「外挿法」が若干大きい値を示している。

「土木学会式」と「CEB モデル」との乾燥日数 364 日における推定収縮ひずみ値の差は、配合②の場合、33 ($\times 10^{-6}$)、配合③の場合 32 ($\times 10^{-6}$) 程度となっている。各推定式のひずみ値が収束するまで、配合②及び配合③は乾燥日数 150 日程度を要している。

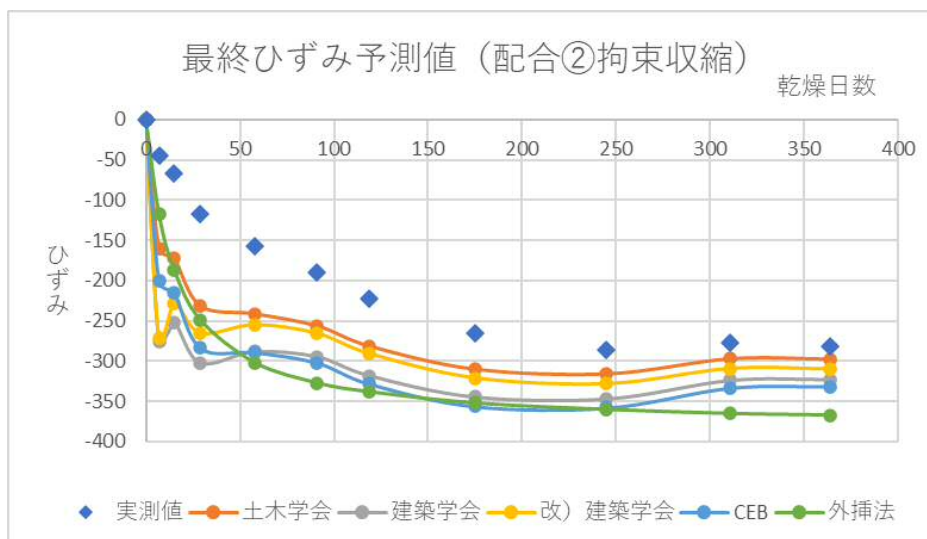


図21 乾燥収縮ひずみ（拘束収縮ひずみ）推定値（配合②）

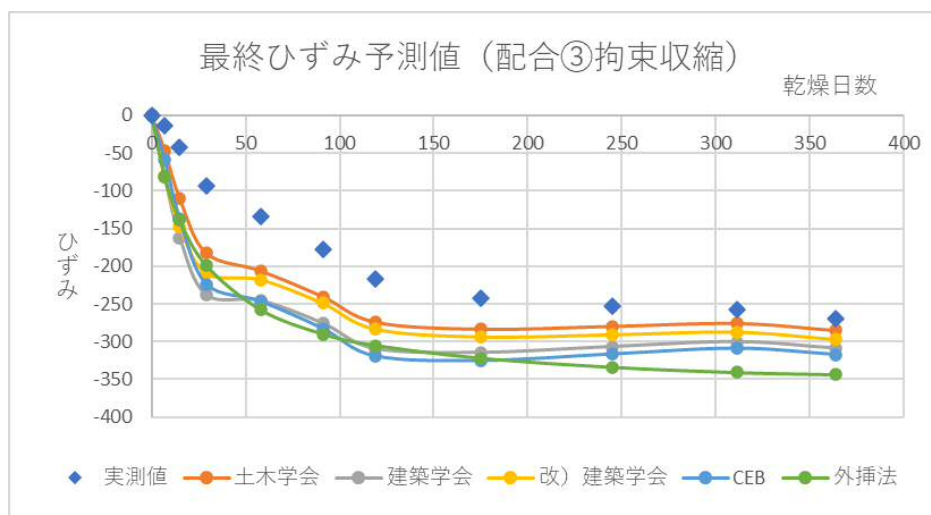


図22 乾燥収縮ひずみ（拘束収縮ひずみ）推定値（配合③）

表16 乾燥収縮ひずみ（自由収縮ひずみ）の推定値推移（配合①）

乾燥日数	自由収縮ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）					
	実測値	土木学会	建築学会	改) 建築学会	CEB	外挿法
0	0	0	0	0	0	0
7	-159	-579	-762	-873	-584	-560
15	-272	-700	-798	-842	-711	-686
29	-416	-817	-857	-867	-834	-758
58	-579	-891	-899	-893	-917	-804
91	-637	-860	-866	-857	-892	-821
119	-682	-861	-871	-862	-898	-829
175	-706	-823	-840	-833	-865	-837
245	-732	-809	-832	-826	-853	-842
311	-757	-812	-839	-834	-857	-845
364	-763	-806	-834	-829	-850	-846

表17 乾燥収縮ひずみ（自由収縮ひずみ）の推定値推移（配合②）

乾燥日数	自由収縮ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）					
	実測値	土木学会	建築学会	改) 建築学会	CEB	外挿法
0	0	0	0	0	0	0
7	-47	-171	-225	-258	-173	-128
15	-97	-250	-285	-300	-254	-215
29	-163	-320	-336	-340	-327	-303
58	-256	-394	-398	-395	-405	-388
91	-313	-422	-425	-421	-438	-431
119	-359	-453	-458	-454	-473	-452
175	-404	-471	-481	-477	-495	-477
245	-441	-487	-501	-498	-514	-493
311	-463	-497	-513	-510	-524	-501
364	-476	-503	-520	-517	-530	-506

表18 乾燥収縮ひずみ（自由収縮ひずみ）の推定値推移（配合③）

乾燥日数	自由収縮ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）					
	実測値	土木学会	建築学会	改) 建築学会	CEB	外挿法
0	0	0	0	0	0	0
7	-43	-157	-206	-236	-158	-120
15	-93	-239	-273	-288	-243	-205
29	-158	-310	-326	-329	-317	-291
58	-245	-377	-381	-378	-388	-377
91	-307	-414	-417	-413	-430	-421
119	-351	-443	-448	-444	-462	-443
175	-399	-465	-475	-471	-489	-468
245	-435	-481	-494	-491	-507	-485
311	-454	-487	-503	-500	-514	-494
364	-470	-496	-513	-511	-523	-499

表19 乾燥収縮ひずみ（拘束収縮ひずみ）の推定値推移（配合②）

乾燥日数	拘束収縮ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）					
	実測値	土木学会	建築学会	改）建築学会	CEB	外挿法
0	0	0	0	0	0	0
7	-44	-160	-275	-272	-201	-118
15	-67	-172	-253	-229	-215	-187
29	-118	-232	-302	-266	-284	-249
58	-157	-242	-288	-255	-289	-302
91	-190	-256	-294	-266	-302	-327
119	-223	-282	-318	-291	-328	-338
175	-266	-310	-345	-321	-356	-352
245	-286	-316	-347	-328	-358	-360
311	-277	-297	-324	-309	-333	-365
364	-282	-298	-323	-310	-331	-367

表20 乾燥収縮ひずみ（拘束収縮ひずみ）の推定値推移（配合③）

乾燥日数	拘束収縮ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）					
	実測値	土木学会	建築学会	改）建築学会	CEB	外挿法
0	0	0	0	0	0	0
7	-13	-47	-81	-80	-59	-82
15	-43	-111	-162	-147	-138	-139
29	-93	-183	-238	-209	-224	-199
58	-134	-206	-246	-218	-247	-258
91	-178	-240	-276	-249	-283	-290
119	-217	-274	-310	-283	-319	-305
175	-243	-283	-315	-293	-325	-322
245	-253	-280	-307	-290	-317	-334
311	-257	-276	-300	-287	-309	-341
364	-270	-285	-309	-297	-317	-344

表 21 各推定式における乾燥収縮ひずみ計算表

コンクリート自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

記号	項目	単位	普通	普通＋短繊維	中＋短繊維
W	単位水量	kg/m ³	175	175	175
C	単位セメント量	kg/m ³	270	270	270
G	単位骨材量	kg/m ³	1,819	1803	1802
t	材齢	日	371	371	371
t ₀	乾燥開始齢	日	7	7	7
t _s	乾燥日数	日	364	364	364
V	体積	mm ³	4,000,000	4,000,000	4,000,000
S	表面積	mm ²	180,000	180,000	180,000
V/S	体積表面積比	mm	22.22	22.22	22.22
A _c	断面積	mm ²	10,000	10,000	10,000
u	周長	mm	400	400	400
D	仮想厚さ	mm	50	50	50
ε_{sh}	乾燥収縮ひずみ		-763	-476	-470
土木学会	$\varepsilon_{sh\infty}$	ひずみ最終値	-806	-503	-496
建築学会	$\varepsilon_{sh\infty}$	ひずみ最終値	-834	-520	-513
改) 建築学会	$\varepsilon_{sh\infty}$	ひずみ最終値	-829	-517	-511
CEB	$\varepsilon_{sh\infty}$	ひずみ最終値	-850	-530	-523
外挿法		200年後ひずみ予測値	-855	-537	-532
回帰式		200年後ひずみ予測値	-765	-482	-479

拘束収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

記号	項目	単位	普通	普通＋短繊維	中＋短繊維
W	単位水量	kg/m ³	175	175	175
C	単位セメント量	kg/m ³	270	270	270
G	単位骨材量	kg/m ³	1,819	1803	1802
t	材齢	日	31	371	371
t ₀	乾燥開始齢	日	7	7	7
t _s	乾燥日数	日	24	364	364
V	体積	mm ³	15,980,000	15,980,000	15,980,000
S	表面積	mm ²	541,600	541,600	541,600
V/S	体積表面積比	mm	29.51	29.51	29.51
A _c	断面積	mm ²	17,000	17,000	17,000
u	周長	mm	540	540	540
D	仮想厚さ	mm	63.0	63.0	63.0
ε_{sh}	乾燥収縮ひずみ		-164	-282	-270
土木学会	$\varepsilon_{sh\infty}$	ひずみ最終値		-298	-285
建築学会	$\varepsilon_{sh\infty}$	ひずみ最終値		-323	-309
改) 建築学会	$\varepsilon_{sh\infty}$	ひずみ最終値		-310	-297
CEB	$\varepsilon_{sh\infty}$	ひずみ最終値		-331	-317
外挿法		200年後ひずみ予測値		-367	-344
回帰式		200年後ひずみ予測値		-284	-272

(g) ひび割れ推定式の概要

各推定式の概要を以下に示す。

《①土木学会式》

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = [1 - \exp \{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \varepsilon_{sh\infty}$$

$\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥収縮ひずみ

$\varepsilon_{sh\infty}$: 乾燥収縮ひずみの最終値

t : 材令 (日)

t_0 : 乾燥開始材齢 (日)

W : 単位水量 (kg/m^3)

C : 単位セメント量 (kg/m^3)

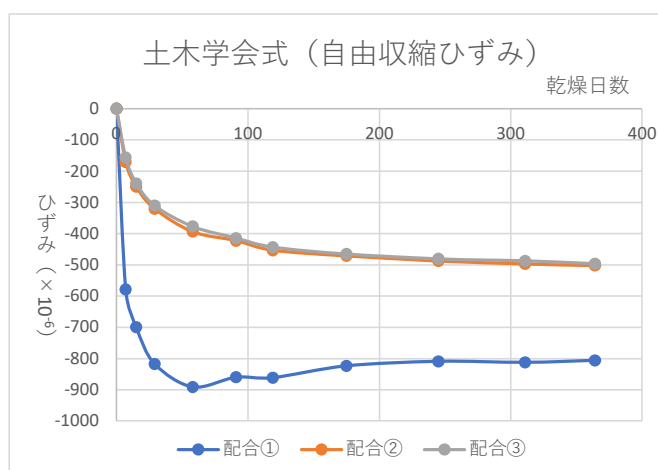
G : 単位骨材量 (kg/m^3)

h : 相対湿度(%)

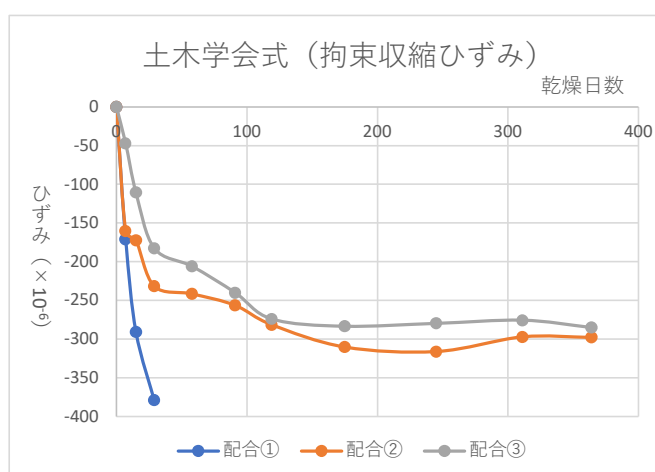
V : 体積 (mm^3)

S : 外気に接する表面積 (mm^2)

V/S : 体積表面積比 (mm)



乾燥日数	自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)		
	配合①	配合②	配合③
0	0	0	0
7	-579	-171	-157
15	-700	-250	-239
29	-817	-320	-310
58	-891	-394	-377
91	-860	-422	-414
119	-861	-453	-443
175	-823	-471	-465
245	-809	-487	-481
311	-812	-497	-487
364	-806	-503	-496



乾燥日数	拘束収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)		
	配合①	配合②	配合③
0	0	0	0
7	-171	-160	-47
15	-291	-172	-111
29	-379	-232	-183
58		-242	-206
91		-256	-240
119		-282	-274
175		-310	-283
245		-316	-280
311		-297	-276
364		-298	-285

図23 土木学会式による乾燥収縮ひずみ

《②建築学会式》

$$\varepsilon_{sh\infty} = \frac{\varepsilon_{sh}(t_s)}{\left(\frac{t_s}{0.16(V/S)^{1.8} + t_s}\right)^{1.4(V/S)^{-0.18}}}$$

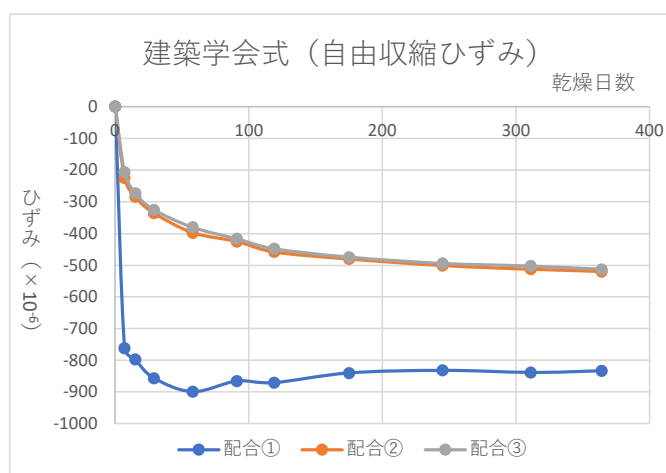
$\varepsilon_{sh\infty}$: 最終乾燥収縮ひずみ (短期の乾燥収縮試験の実測値から算出する場合)

$\varepsilon_{sh}(t_s)$: t_s における乾燥収縮ひずみの実測値、

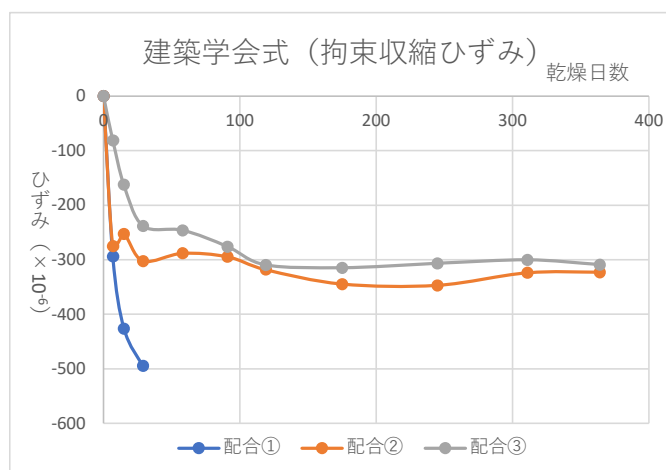
t_s : 乾燥期間(= $t - t_0$)

V : 体積 (mm³)

S : 外気に接する表面積 (mm²)



乾燥日数	自由収縮ひずみ(× 10 ⁻⁶)		
	配合①	配合②	配合③
0	0	0	0
7	-762	-225	-206
15	-798	-285	-273
29	-857	-336	-326
58	-899	-398	-381
91	-866	-425	-417
119	-871	-458	-448
175	-840	-481	-475
245	-832	-501	-494
311	-839	-513	-503
364	-834	-520	-513



乾燥日数	拘束収縮ひずみ(× 10 ⁻⁶)		
	配合①	配合②	配合③
0	0	0	0
7	-294	-275	-81
15	-426	-253	-162
29	-495	-302	-238
58		-288	-246
91		-294	-276
119		-318	-310
175		-345	-315
245		-347	-307
311		-324	-300
364		-323	-309

図24 建築学会式による乾燥収縮ひずみ

《③桜田らによる提案式（建築学会式（改））》

（桜田道博，川端智亮，鈴木雅博，太田高史：コンクリート標準示方書に基づいた乾燥収縮ひずみの早期判定方法，株式会社ピーエス三菱，技報第 8 号，2010）

$$\varepsilon_{ds\infty} = \frac{\varepsilon_{ds}(t_s) \cdot \left[\frac{4 \cdot W \cdot \sqrt{V/S}}{100 + 0.7 \cdot t_0} + t_s \right]}{t_s}$$

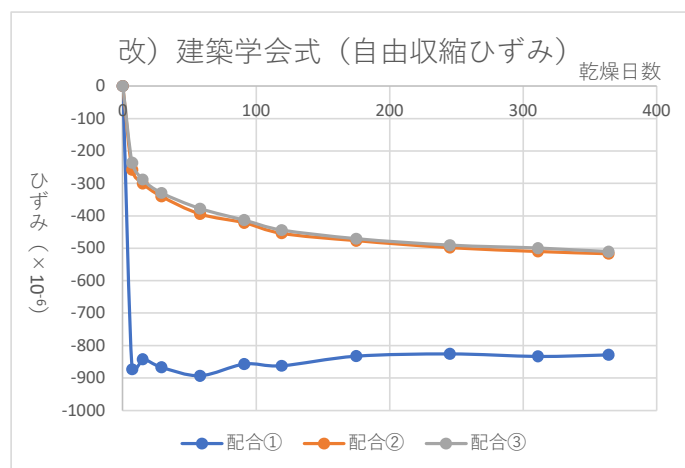
$\varepsilon_{d,fin}$ ：最終乾燥収縮ひずみ（短期の乾燥収縮試験の実測値から算出する場合）

$\varepsilon_{ds}(t_s)$ ： t_s における乾燥収縮ひずみの実測値、

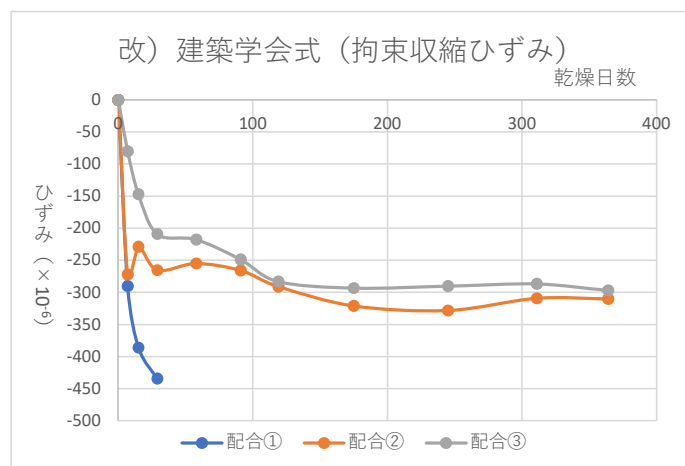
t_s ：乾燥期間(= $t - t_0$)

V ：体積（ mm^3 ）

S ：外気に接する表面積（ mm^2 ）



乾燥日数	自由収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)		
	配合①	配合②	配合③
0	0	0	0
7	-873	-258	-236
15	-842	-300	-288
29	-867	-340	-329
58	-893	-395	-378
91	-857	-421	-413
119	-862	-454	-444
175	-833	-477	-471
245	-826	-498	-491
311	-834	-510	-500
364	-829	-517	-511



乾燥日数	拘束収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)		
	配合①	配合②	配合③
0	0	0	0
7	-290	-272	-80
15	-386	-229	-147
29	-434	-266	-209
58		-255	-218
91		-266	-249
119		-291	-283
175		-321	-293
245		-328	-290
311		-309	-287
364		-310	-297

図25 建築学会式（改）による乾燥収縮ひずみ

《④CEB 式》

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} \cdot \beta_s(t - t_0)$$

$$\beta_s(t - t_0) = [(t - t_0) / (0.035 D^2 + (t - t_0))]^{0.5}$$

$\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥収縮ひずみ

$\varepsilon_{sh\infty}$: 乾燥収縮ひずみの最終値

$\beta_s(t - t_0)$: 乾燥収縮ひずみ経時変化特性を表す項

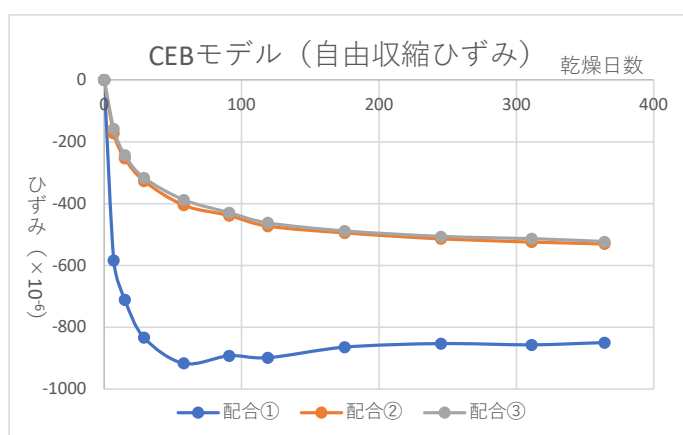
t : 材齢 (日)

t_0 : 乾燥開始材齢 (日)

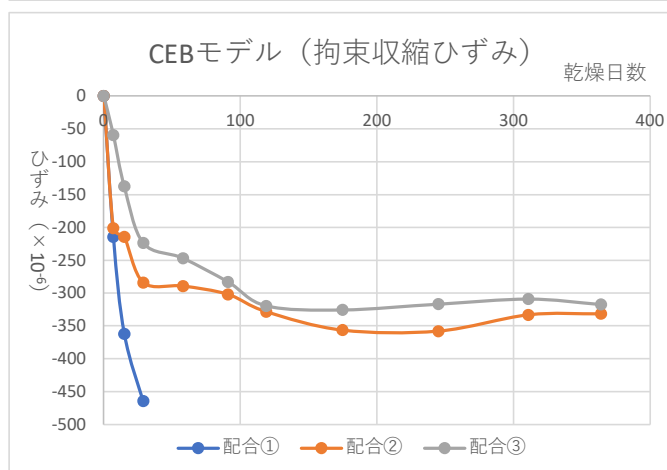
D : 部材の仮想厚さ , $D = 2 A_c / \mu$ (mm)

A_c : 部材の断面積 (mm²)

μ : 外気に接する部分の周長 (mm)



乾燥日数	自由収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)		
	配合①	配合②	配合③
0	0	0	0
7	-584	-173	-158
15	-711	-254	-243
29	-834	-327	-317
58	-917	-405	-388
91	-892	-438	-430
119	-898	-473	-462
175	-865	-495	-489
245	-853	-514	-507
311	-857	-524	-514
364	-850	-530	-523



乾燥日数	拘束収縮ひずみ(×10 ⁻⁶)		
	配合①	配合②	配合③
0	0	0	0
7	-215	-201	-59
15	-362	-215	-138
29	-464	-284	-224
58		-289	-247
91		-302	-283
119		-328	-319
175		-356	-325
245		-358	-317
311		-333	-309
364		-331	-317

図26 CEB式による乾燥収縮ひずみ

《⑤今本らによる提案式（外挿法）》

（今本啓一，石井寿美江，閑田徹志，百瀬晴基，藤森啓祐：短期データに基づくコンクリートの乾燥収縮ひずみ予測に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第602号，pp. 15-20，2006）

前述の4つ推定式は，該当する短期測定の実データのみを用いて最終乾燥収縮ひずみを推定しているのに対して、外挿法は当該短期データすべてに対し CEB 式を用いて最終値を外挿推定し，双曲線により最小自乗近似し，最終乾燥収縮ひずみ推定値を得る方法である。（下図参照）

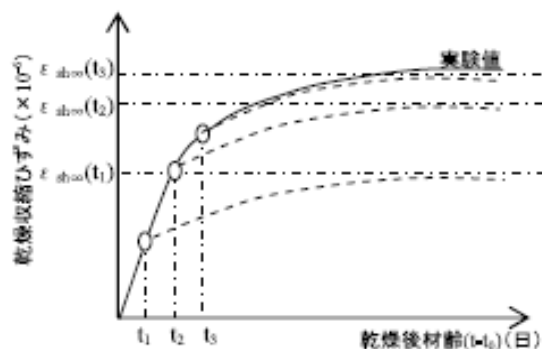


図-1 ステップ1の模式図

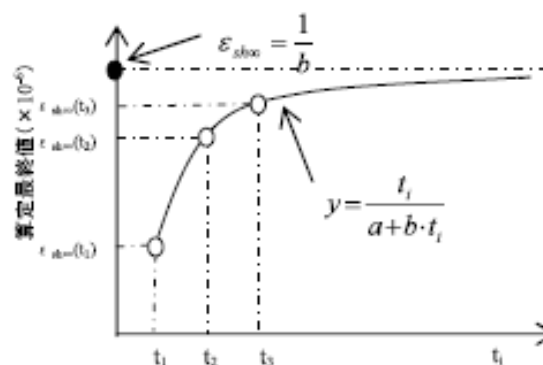


図-2 ステップ2の模式図

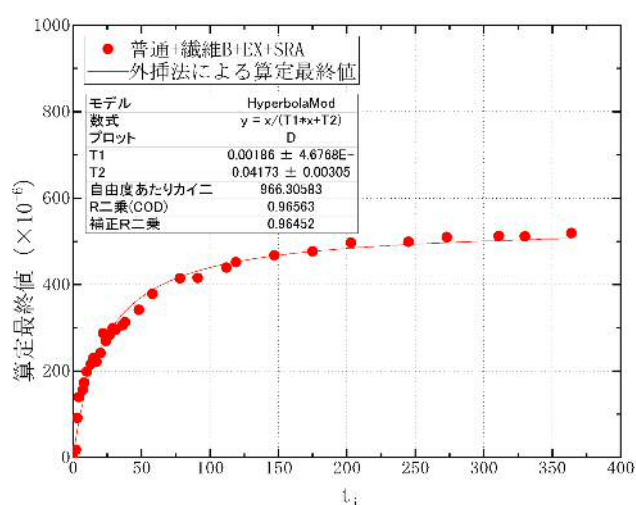
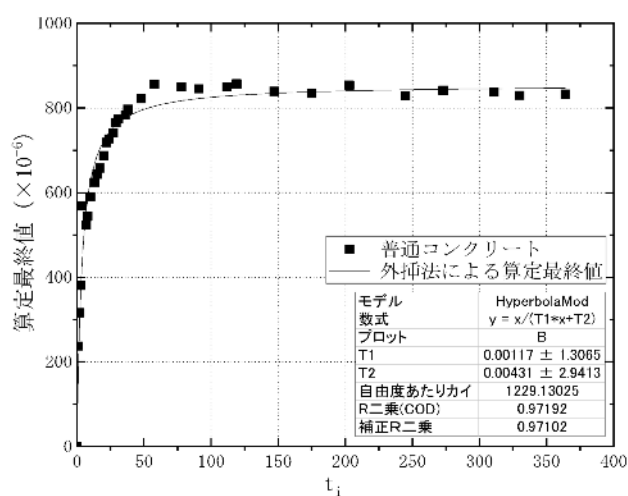


図27 外挿法による自由収縮ひずみ回帰式（左：配合①、右：配合②）

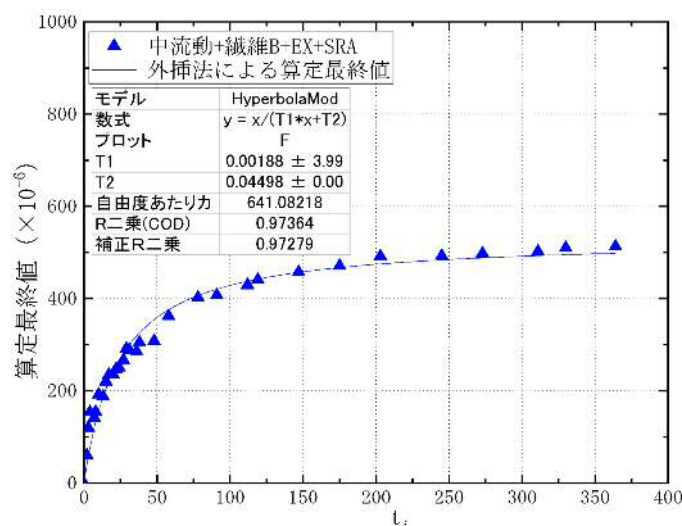


図28 外挿法による自由収縮ひずみ回帰式 (配合③)

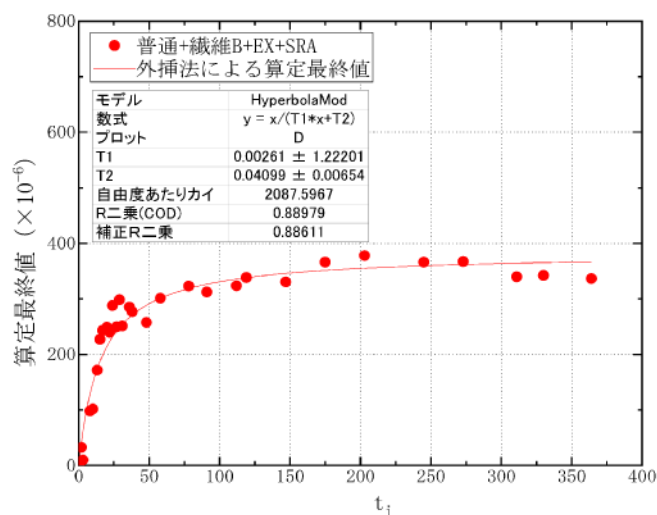
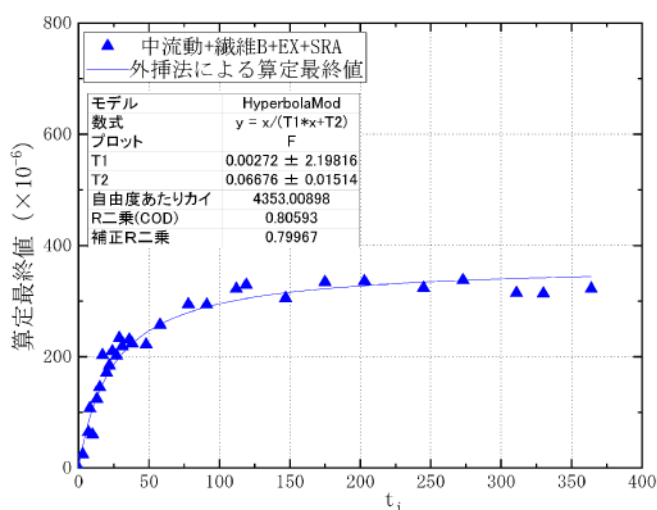


図29 外挿法による拘束収縮ひずみ回帰式 (左：配合②、右：配合③)

回帰式より、超長期供用年として示される 200 年後のひずみ値の推定を行った。回帰式の漸近線である $\varepsilon_{d\infty} = 1/b$ の値 (最終乾燥収縮ひずみ値) は、乾燥日数 200 年後の推定ひずみ値 ($t_i=73000$ での推定値) とほとんど変わらない結果となった。

表22 回帰式による推定値

区分	乾燥日数	自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)			拘束収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	
		配合①	配合②	配合③	配合②	配合③
実測値	364 日後	-763	-476	-470	-282	-270
回帰式による推定値	364 日後	-846	-506	-499	-367	-344
	200 年後	-855	-537	-532	-383	-368
	最終値	-855	-538	-532	-383	-368

《⑥指数関数フィッティング法による回帰分析》

本研究で得られた実測値を基に、最小二乗法による回帰式を求める。得られた回帰式は以下のとおりである。

《自由収縮ひずみ》

配合①： $\varepsilon_{ds}(t_s) = 765e^{(-0.02t_s)} - 765$

配合②： $\varepsilon_{ds}(t_s) = 482e^{(-0.01t_s)} - 482$

配合③： $\varepsilon_{ds}(t_s) = 479e^{(-0.01t_s)} - 479$

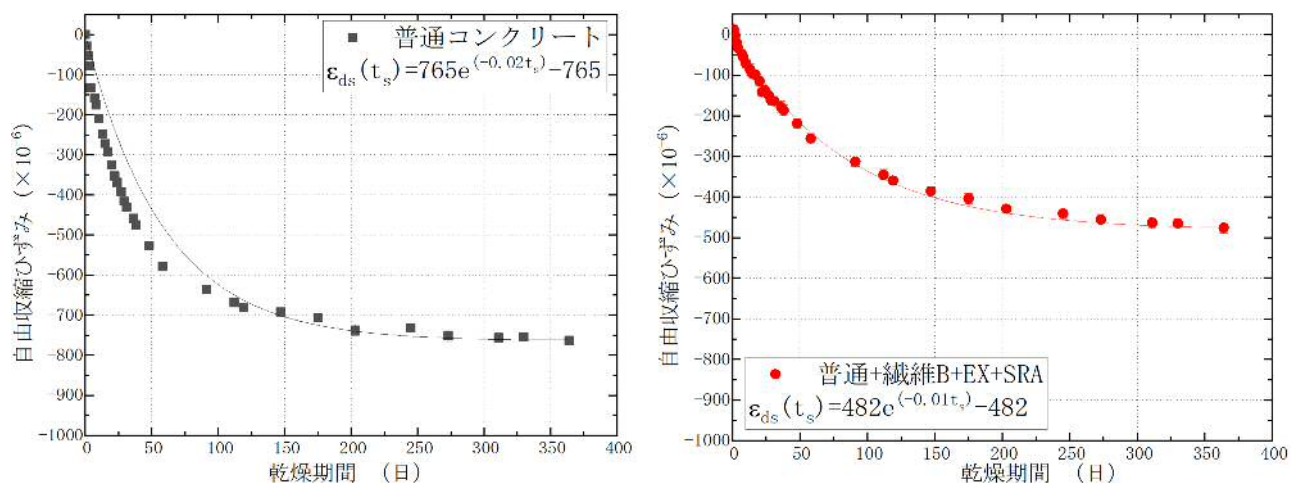


図30 自由収縮ひずみ回帰式 (左：配合①、右：配合②)

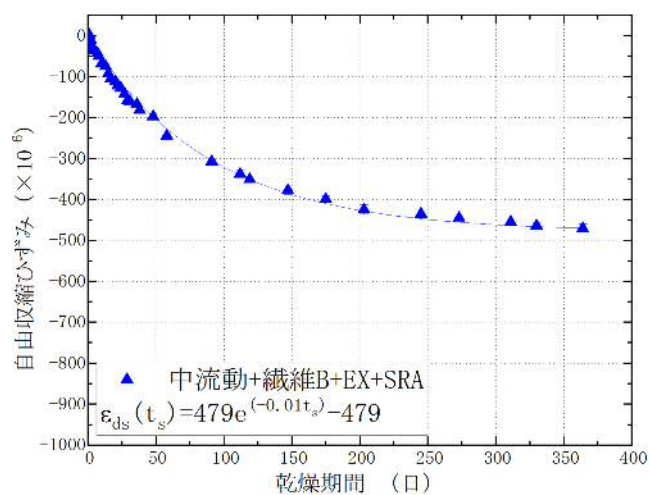


図31 自由収縮ひずみ回帰式 (配合③)

《拘束収縮ひずみ》

$$\text{配合②} : \varepsilon_{ds}(t_s) = 284e^{(-0.01t_s)} - 284$$

$$\text{配合③} : \varepsilon_{ds}(t_s) = 272e^{(-0.01t_s)} - 272$$

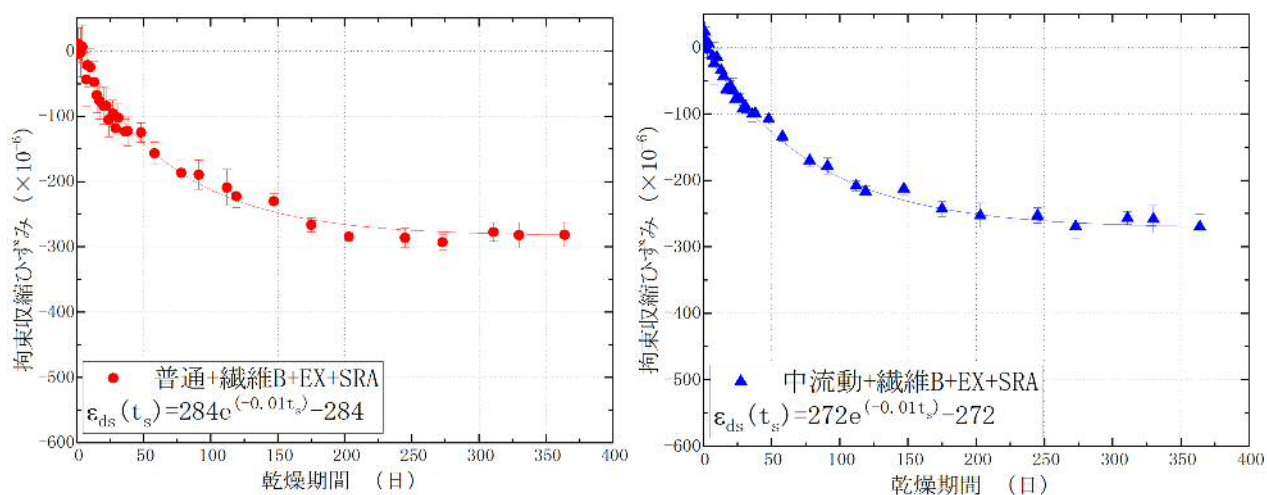


図32 拘束収縮ひずみ回帰式（左：配合②、右：配合③）

回帰式より、超長期供用年として示される 200 年後のひずみ値の推定を行った。回帰式の漸近値（最終乾燥収縮ひずみ値）は、乾燥日数 200 年後の推定ひずみ値（ $t_s=73000$ の推定値）と全く同じ結果となった。

表23 回帰式による推定値

区分	乾燥日数	自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)			拘束収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	
		配合①	配合②	配合③	配合②	配合③
実測値	364 日後	-763	-476	-470	-282	-270
回帰式による推定値	364 日後	-764	-469	-466	-277	-265
	200 年後	-765	-482	-479	-284	-272
	最終値	-765	-482	-479	-284	-272

2) ひび割れ発生時期の推定

(a) ひび割れ発生条件となるひずみ値の設定

本研究では、超長期供用期間(およそ 200 年)、有害なひび割れ(幅 0.1mm 以下)の発生が抑制されることを目標に乾燥収縮率が 400μ 以下を当初からの指標と考えてきた。これは、コンクリート標準示方書において圧縮ひずみとして $3,500\mu$ が示されており、引張強度は圧縮強度の $1/10$ であることから、 $3,500 \times 1/10 = 350 \div 400\mu$ によるものである。

しかし、「(1) 耐クラック性能を有するコンクリート ①拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験 (JIS A 1151 : 2011)」における自由収縮ひずみの測定結果では、いずれの配合も乾燥日数 364 日で $470 \sim 760\mu$ と指標値の 400μ を超える自由収縮ひずみが計測されているにもかかわらず、すべての供試体でひび割れは確認されなかったことから、本研究条件におけるひび割れ発生時のひずみ値は 760μ よりも大きいと考えられる。

ここで、建築工事標準仕様書・同解説(日本建築学会)によると、乾燥収縮率を 800μ 以下とすることによって有害なひび割れが発生しないレベルにほぼ制御できる、とされていることから、ひび割れ発生時期推定に用いる自由収縮ひずみ値は「 **800μ** 」と設定する。

(b) ひび割れ発生時期の推定

200 年後の乾燥収縮ひずみ(自由収縮ひずみ)の推定結果は、下表のとおりである。**いずれの推定式においても、配合②及び配合③でひび割れ発生の指標値となる「 800μ 」を大きく下回り、 500μ 前後の結果となっている。本研究のコンクリートは、超長期に渡って有害なひび割れを生じないコンクリートであることが確認できた。**

表24 乾燥収縮ひずみ(自由収縮ひずみ)

配合		自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)						
		実測値	土木学会式	建築学会式	(改) 建築学会式	CEBモデル	外挿法(200年)	回帰式(200年)
配合①	普通コン	-763	-806	-834	-829	-850	-855	-765
配合②	普通コン+混和材	-476	-503	-520	-517	-530	-537	-482
配合③	中流動コン+混和材	-470	-496	-513	-511	-523	-532	-479

(4) 施工に関する手引き(素案)の作成

本事業で検討した結果を基に、超長期ひび割れ抑制効果のあるコンクリートの配合例を提案し、施工現場への早期普及・拡大を図るため、施工に関する手引き(素案)を取りまとめた。

1. 7 実証試験（現場適用）の概要、結果、課題等

実証試験は、東播用水二期農業水利事業所で工事を予定している開水路区間にて現場実証試験を実施した。

コンクリートは、以下の 3 ケースを対象とした。

配合①：普通コンクリート

配合②：普通コンクリート + PP 短繊維 + 収縮低減剤 + 膨張材

配合③：中流動コンクリート + PP 短繊維 + 収縮低減剤 + 膨張材

実証試験の実施手順は、以下のとおりである。

1) 配合選定

3 ケースのコンクリートは、同一レディーミクストコンクリート工場 (JIS 規格取得工場) の製品 (同一骨材、セメント、混和剤等) を使用した。レディーミクストコンクリート工場内試験室で試験練りを実施し、運搬距離を考慮した配合を選定した。

2) 実機試験

実機試験は、コンクリートの本打設に準じた機械配置、施工手順により、試験練りでの性状が得られることを確認するため実施した。

3) コンクリート本打設

コンクリートの本打設は、均しコンクリートを打設後、計測機器（ひずみ計、データロガー）を所定の位置に設置し、コンクリート本打設を行った。

本打設と同じコンクリートの供試体を作製し、材齢 7 日の圧縮強度試験（配合①②③）及び曲げ靱性試験（配合②③）を実施した。

配合①②③のコンクリートは、次頁図のバレル 3 ～ 5 で各 1 バレル打設した。

配合①：バレル 4（打設日：令和 3 年 3 月 4 日）

配合②：バレル 5（打設日：令和 3 年 3 月 11 日）

配合③：バレル 3（打設日：令和 3 年 3 月 12 日）

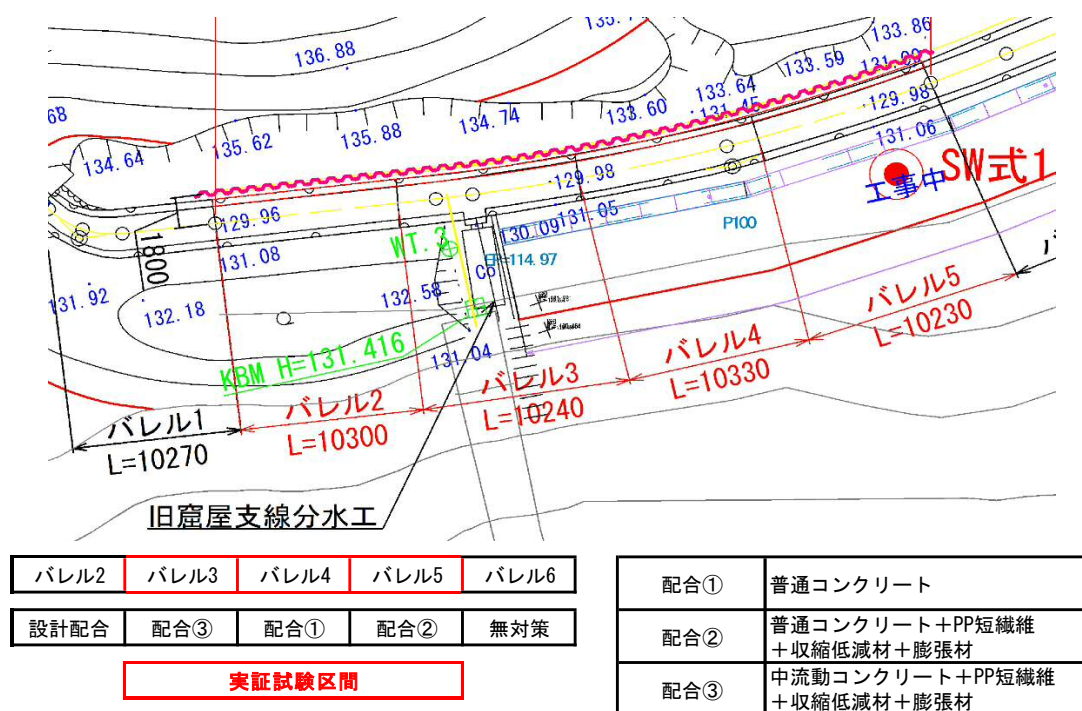


図 33 現場実証試験平面図

施工断面は、下図のとおりである。

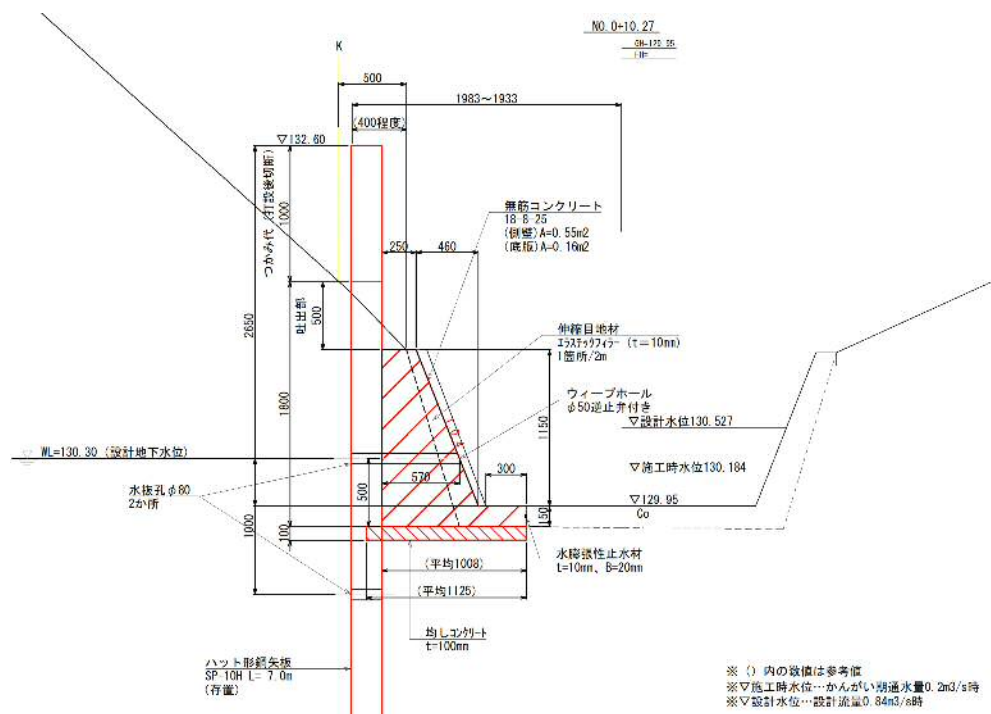


図 34 施工断面

1. 8 機能監視の概要、結果、課題等

機能監視は、コンクリート打設時において、下図に示す位置に埋設型ひずみ計を設置して、次頁図の監視計測システムにより、硬化過程における挙動測定、端部・中央、拘束・無拘束側のひずみ測定を行い、配合別、部位別の乾燥収縮ひび割れ抑制効果の定量的評価を行った。

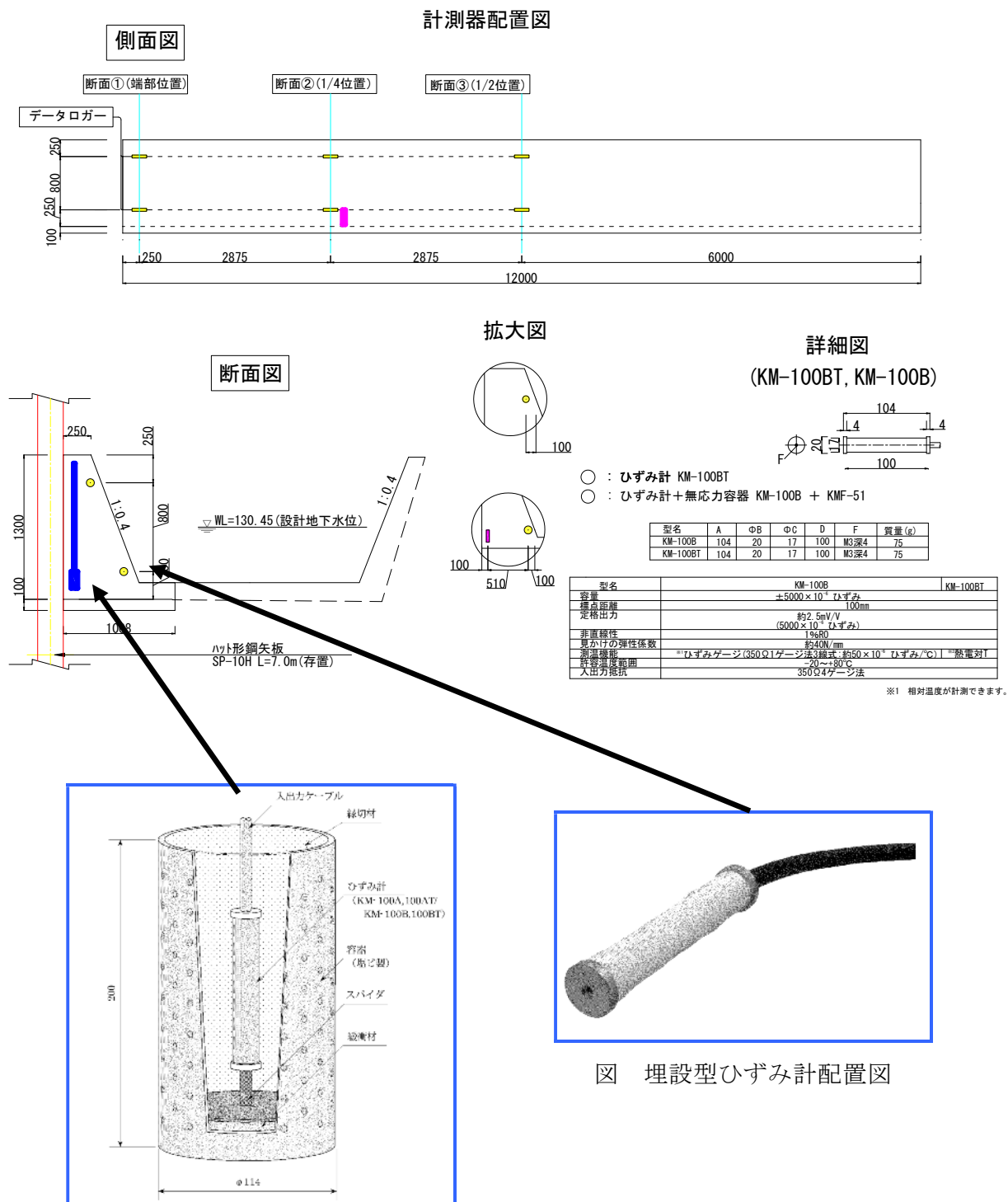


図 無応力配置図及び詳細図

図 35 埋設型ひずみ計設置予定図

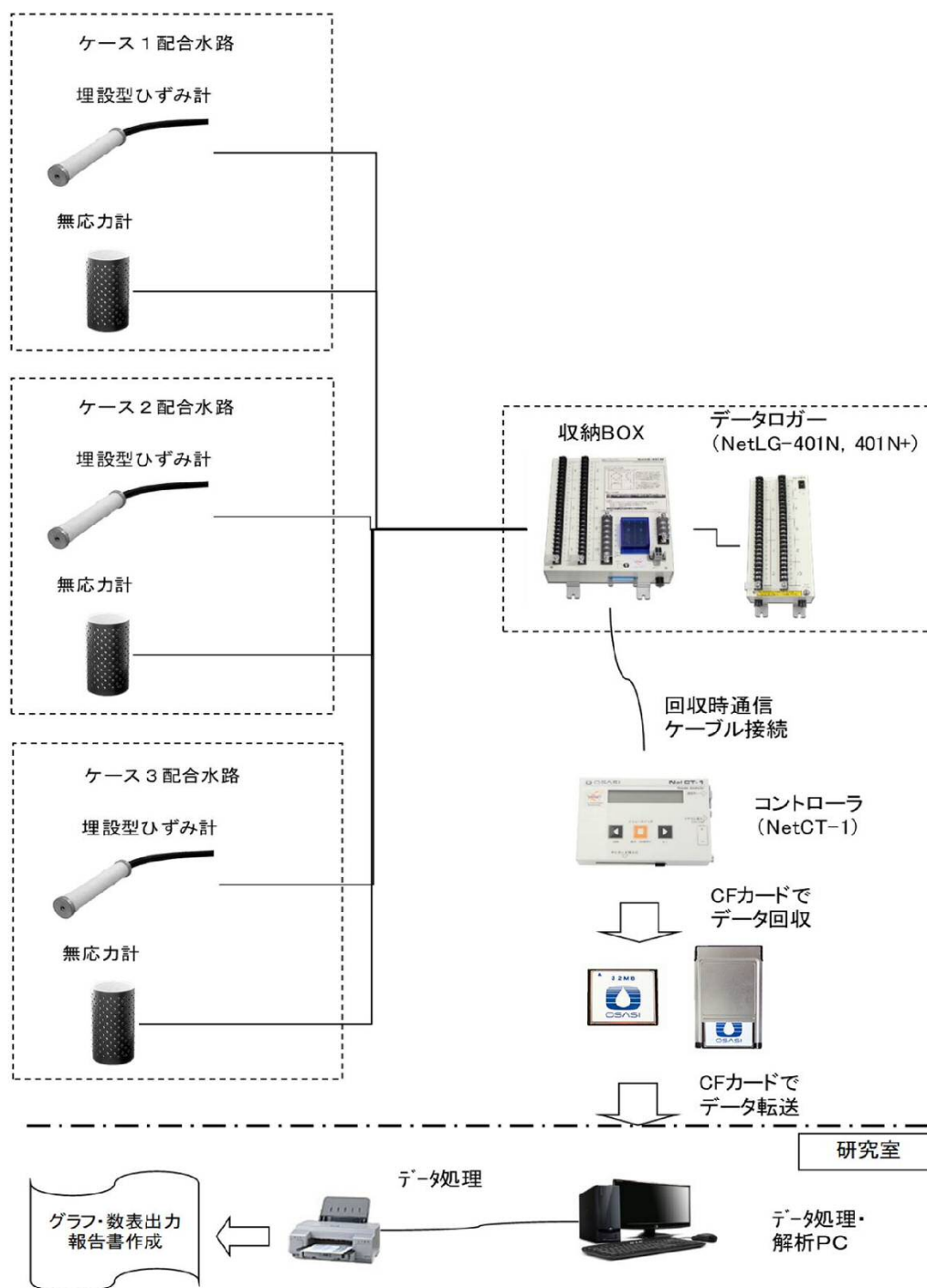


図 36 監視計測システム図

ひずみ計測は、データロガーによって1時間間隔で計測した。計測期間は、コンクリート打設の令和3年3月15日から、データロガーを撤去する令和4年3月18日の直前まで、約1年間の計測データが得られた。

2 事業の効果

2. 1 成果の内容

- ①混和材料として、ポリプロピレン短繊維、膨張材、収縮低減剤を配合したコンクリートの性状に関する情報が得られた。
- ②コンクリートの乾燥ひずみの試験として、試験方法としてのリング試験の適用性についての知見が得られた。
- ③中流動コンクリートを土木へ適用する際のメリットやデメリットを明確にすることにより、中流動コンクリートの普及可能性が期待される。
- ④農政局、大学を含めた意見交換を通じて、新技術適用（中流動コンクリート、混和材料の適用、乾燥ひび割れ試験方法（リング試験）等の効果）に関し普及が図られた。
- ⑤「乾燥収縮ひび割れを抑制するための混和材料を配合した中流動コンクリートの施工の手引き」として取りまとめることにより、混和材料を配合したコンクリート施工の普及及び中流動コンクリート施工の普及が期待される。
- ⑥提案したコンクリートによる施設施工の普及により、水利施設の長寿命化が図られることが期待される。

2. 2 目標の達成度

（1）成果から得られる効果

- ① 本研究では、農業水利施設に適用可能な超長期にわたり耐クラック性能を有し、且つ施工性の良いコンクリートの開発を目的とし、コンクリートに混和材料としてポリプロピレン短繊維、膨張材、収縮低減剤を配合し、硬化したコンクリートの性質を確認した。また施工性向上のため、中流動コンクリートに同様の混和材料を配合し、硬化したコンクリートの性質を確認した。（乾燥収縮ひび割れを抑制するための中流動コンクリートの開発）
- ② 普通コンクリート、普通コンクリートに混和材料を配合、中流動コンクリートに混和材料を配合した場合について、リング試験及び JIS A 1151 の拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験等により、普通コンクリートに比べ、普通コンクリートの混和材料を配合、中流動コンクリートに混和材料を配合した場合は、ひび割れ発生時期がかなり遅くなることが試験では、確認された。
- ③ 現場実証試験では、普通コンクリートに対し、中流動コンクリートの打設時間が短くなることが確認された。

（2）従来技術との比較

1）比較する従来技術

従来の一般的な土木材料である普通コンクリートを従来技術とした。

2）従来技術に対する優位性

①経済性

イニシャルコストを比較した場合、混和材料やコンクリートの材料費が高価となるため割高となる。しかし、超長期供用期間（およそ 200 年）のひび割れ補修工事が不要となるため、ランニングコストを含めた対策費用は、従来工法より安価となる（次頁表参照）。

表25 配合①及び配合③のコスト比較(イニシャルコスト+ランニングコスト)

単位：円

配合	項目	イニシャル コスト A (円)	ランニングコスト				合計 A + B
			ひび割れ 延長 (m/m3)	ひび割れ 補修単価 (円/m)	200年間の 補修回数	補修費 B (円)	
①	普通コンクリート	20,005	1.29	6,000	8	61,920	81,925
③	中流動コンクリート +PP短繊維+膨張材 +収縮低減剤	31,692					31,692

注) ひび割れ延長は、水路内面積 1m² 当り 50 cm のひび割れ発生を想定した延長である。

②工程

混和材料(PP 短繊維+膨張材+収縮低減材)を配合したコンクリートは、生コン工場では標準品として登録されていない。このため、コンクリート本打設の前に現場試験練り及び実機試験を行う必要があり、従来工法より工程は増加する。

しかし、中流動コンクリートは、流動性が良いため、コンクリートの打設時間が短縮される。

③品質

従来技術に比較して、長期の耐クラック性能を有するコンクリートとなる。

④安全性

材令 28 日時点の圧縮強度は、従来技術に比べ若干低い値となる傾向がある、しかし、繊維補強コンクリートの一般的な傾向であり、安全性に問題はない。

⑤施工性

従来工法と比較して、コンクリートの打設時間が若干短縮するが確認された。しかし、中流動コンクリートの特徴として、型枠補強が必要となることが想定される。

⑥周辺環境への影響

従来工法と同様である。

2. 3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

(1)適用範囲

- ・殆どの無筋コンクリートに対し、適用が可能である。
- ・鉄筋コンクリートへの適用も可能と考える(ただし、本研究の範囲外となる。)
- ・中流動コンクリートは、施設形状が直線とならない場合に対して施工上有利となることが考えられる。(流動性が従来技術に比べ向上)

(2)留意点

- ・中流動コンクリート施工では、コンクリート本打設の前に実機試験が必要となる。
- ・中流動コンクリート施工の場合は、型枠の補強について検討が必要となる。

3 普及活動計画

3. 1 想定される利用者

- ・設計、工事発注段階では、発注者、設計コンサルタント、農業水利施設造成事業者（国、県等地方自治体）
- ・施工段階では、建設会社
- ・研究段階では、大学、研究機関
- ・技術開発段階では、素材メーカー

3. 2 利用者への普及啓発等の方法

- ・「乾燥収縮ひび割れを抑制するための混和材料を配合した中流動コンクリートの施工の手引き」として取りまとめ、公表する。
- ・農業土木事業協会等主催の新技术研修会を利用した広報活動を行う。
- ・農業土木学会等へ、技術報文として投稿する。
- ・農林水産省のホームページに詳細なデータも含め報告書として掲載
→研究機関の基礎資料としての活用が期待される。

3. 3 利用者に対するサポート体制、参考資料等

- ・混和材料（特に短繊維）に関して、材料選定の考え方、使用方法等に関するサポートを行う。
- ・施工方法に関して、設計段階における材料採用の適否、現場諸条件による問題点の事前抽出、施工方法の段階におけるサポートを行う。

3. 4 特許・実用新案等の申請予定

- ・農業水利施設保全補修ガイドブックへの登録を検討している。

4 研究総括者による自己評価

審査の ポイント	着眼点	申請時 計画目標 ^{注1}	自己評価 ^{注2}	自己評価 の理由 ^{注3}
目標の 達成度	・効果 (従来技術に 対する優位性)	・耐クラック性能 を有するコン クリート ・施工性能を考慮 したコンクリ ート	①：優れている B：概ね妥当 C：不十分	・従来工法と比 較して、ひび 割れ発生を大 幅に遅らせ、 かつ打設時間 の短縮を図る コンクリート を開発した。
	・信頼性 (品質、精度、安 全性、耐久性等)	・耐クラック性能 を有するコン クリート	①：優れている B：概ね妥当 C：不十分	・ひび割れに対 して高耐久性 のコンクリ ートを開発し た。
	・適用範囲・適用 条件等	・無筋コンクリ ート構造物	①：広範囲に適用 B：概ね妥当 C：限定的	・殆どの無筋コ ンクリートに 適用可能
普及の 可能性	・想定される利用 者への普及啓 発の方法	農政局、事業所、 大学を含めて勉 強会や意見交換 を実施予定であ る。	①：十分な利用が見込まれる B：概ね妥当 C：限定的	・農業農村工学 会への報文投 稿、学会発表 を行い技術の 普及啓発に取 り組んだ。
	・利用者に対する サポート体制 (設計・積算・施 工等の参考資料、 相談窓口等)		A：十分に整備されている ②：概ね妥当 C：改善が必要	・施工の手引き を作成し、公 表する。
総 合 コ メント ^{注4}	混和材料(ポリプロピレン短繊維、膨張材、収縮低減剤)を配合したコンクリートの性状に関する情報が得られ、耐クラック性能を有しかつ施工性に優れるコンクリートを開発した。 基本的にひび割れ対策が不要となり、ランニングコスト低減に寄与する。			

注1) 成果報告書に記載の研究開発目標を記載する。

注2) 評価結果欄は、A・B・Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入(○付け)する。

注3) 自己評価の理由を記載する。

注4) 総合的なコメントを記載する。

5 今後の課題及び改善方針

- ・鉄筋コンクリートへの適用条件は現時点では不明であり、今後の研究が必要である。
- ・中流動コンクリートへの理解の普及が必要である。
- ・現場実証試験における長期継続観測の実施により、実用面での性能がさらに明らかにされる。