

論文 拘束形態の異なる断面補修用モルタルの収縮ひび割れ特性

青木 優介^{*1}・鈴木 正志^{*2}・黒川 章二^{*3}・嶋野 慶次^{*4}

要旨: コンクリートの一軸引張試験から求めた有効弾性係数とひび割れ発生応力の実験式により, 使用材料および拘束形態の異なる場合の収縮応力とひび割れ発生が予測可能かどうか検討した。材料としてビニロンチップを含有する断面補修用モルタルを用い, 拘束度および断面寸法を変化させたリング型拘束収縮試験を行った。断面補修用モルタルの有効弾性係数とひび割れ発生応力は上述の実験式により算出し, これを用いてリング型拘束収縮供試体の応力解析を行い, 試験結果と比較した。その結果, 有効弾性係数の実験式により収縮応力は予測できるものの, ひび割れ発生応力は予測できない可能性が示唆された。

キーワード: 収縮ひび割れ, 有効弾性係数, リング型拘束試験, 繊維補強モルタル

1. はじめに

コンクリート部材における収縮ひび割れの発生を予測するためには, 収縮特性だけではなく, クリープを含む引張変形特性ならびにひび割れ発生条件が把握されていなければならない。

既報^{1),2)}において著者らは, 一軸引張条件下におけるコンクリートの有効弾性係数とひび割れ発生応力に及ぼす影響要因を分析し, それらの結果を反映した実験式により, 広範な条件下で行われたコンクリートの一軸拘束収縮試験結果が予測できることを報告している。

以上の研究には未だ多くの余地を残しているものの, 現時点で有している成果によりどの程度のひび割れ予測が可能であるかは, 段階的に確認しておく必要がある。特に, 部材の寸法や拘束形態, 使用材料等が変化した場合の予測は, 実構造物への適用をめざす過程において不可避な確認事項である。

本研究では, ビニロンチップを含有する断面補修用モルタルのリング型拘束収縮試験を行い, その応力導入過程およびひび割れの発生を上述の実験式より予測可能かどうか検討した。

2. 断面補修用モルタルにおける有効弾性係数とひび割れ発生応力

2.1 有効弾性係数とひび割れ発生応力の実験式

既報^{1),2)}にて著者らは, 載荷速度と乾燥条件を変化させたコンクリートの一軸引張試験を行い, その結果から, 一軸拘束されたコンクリートの有効弾性係数とひび割れ発生応力の実験式を定式化している。有効弾性係数の実験式を式(1)に, ひび割れ発生応力の実験式を式(2)に示す。

$$\frac{E_{ef}(S', t_d)}{E_{ef}(0,0)} = 1 - \frac{S'}{C_1 + C_2 S'} - \alpha \frac{t_d}{C_3 + C_4 t_d} - C_5 \alpha \frac{S'}{C_1 + C_2 S'} \frac{t_d}{C_3 + C_4 t_d} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_{cr}(t_d)}{\sigma_{cr}(0)} = 1 - \beta \frac{t_d}{D_1 + D_2 t_d} \quad (2)$$

式(1)にて, $E_{ef}(S', t_d)$: それまでに受けた引張応力強度比の時間積分値 S' , 乾燥時間が t_d であるコンクリートの有効弾性係数(MPa), $E_{ef}(0,0)$: 応力と乾燥を受けていないコンクリートの静弾性係数である。C1, C2, C3, C4, C5 は実験定数であり, 実験結果の回帰から C1=51.88(%・日), C2=3.359, C3=0.93(日), C4=8.09, C5=2.40 と求まっている。

*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科助手 工博 (正会員)

*2 東電工業株式会社 工務本部土木技術グループ 工修 (正会員)

*3 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科教授 工修 (正会員)

*4 木更津工業高等専門学校 技術支援センター (正会員)

式(2)にて、 $\sigma_{cr}(t_d)$ ：乾燥時間 t_d のコンクリートのひび割れ発生応力(MPa)、 $\sigma_{cr}(0)$ ：乾燥を受けていないコンクリートの引張強度であり、実験定数 D_1, D_2 は、 $D_1=2.19$ (日)、 $D_2=4.08$ と求まっている。

なお、式(1)(2)に含まれる係数 α, β は、部材断面寸法の影響を表すものであり、乾燥周長と部材断面積の比が $0.02(1/mm)$ の場合には $\alpha, \beta=1.0$ 、 $0.04(1/mm)$ の場合には $\alpha=1.5, \beta=1.3$ を用いる。

2.2 断面補修用モルタルに対する実験式の適用

(1) 一軸拘束収縮試験による検証

本実験式の断面補修用モルタルに対する適用性を一軸拘束収縮試験により検証する。本研究で用いる断面補修用モルタルの構成を表-1に、温度 20°C で封かん養生した場合の圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数の経時変化を図-1に示す。一般的なコンクリートに比べて、強度の発現が早く、静弾性係数が低い特徴がある。

(2) 試験の概要

一軸拘束収縮供試体と自由収縮供試体の概要を図-2に示す。一軸拘束収縮供試体は、断面中心に配置した $\phi 24\text{mm}$ 丸鋼がモルタルの軸方向の収縮を拘束する仕組みである。丸鋼の両端 200mm 区間にはモルタルとの定着強化を狙った M22 ナットを 30mm 間隔で 6 個溶接しており、それ以外の区間は表面にパラフィンを塗布してモルタルとの付着を切っている。丸鋼の軸方向ひずみを測定すれば、試験区間のモルタル断面に導入されている収縮応力を算出できる。なお、本供試体の一軸拘束収縮試験としての成否は、試験区間のモルタルのひずみと丸鋼のひずみの一致を見ることで判定できる。図-3に各供試体の収縮ひずみを示す。両者はほぼ一致しており、本供試体は一軸拘束収縮試験として成立すると判定できる。自由収縮供試体は、拘束供試体の試験区間と形状を同じとしつつ、拘束を極力無くすよう断面中心に厚さ 2.7mm の塩化ビニール管を配置している。両端面はアルミテープによりシールした。両供試体ともに材齢 2 日まで封かん養生とした後、室温 $20 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 、湿度 $55 \pm 5.0\%$ の恒温室内で乾燥させた。

表-1 断面補修用モルタルの構成

W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
	W	C	S	Vi等	Ac等
43.5	221	507	1100	60	29

※Vi:ビニロンチップ Ac:アクリル樹脂

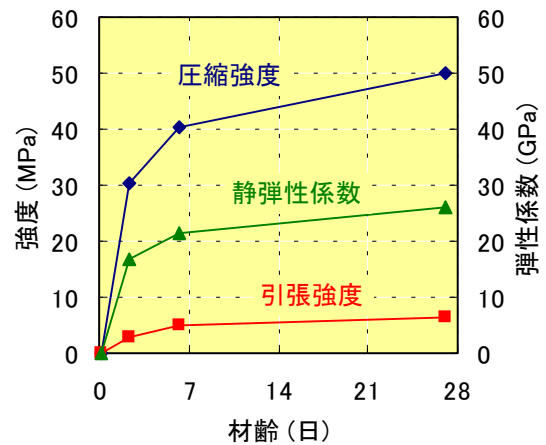


図-1 断面補修用モルタルの強度特性

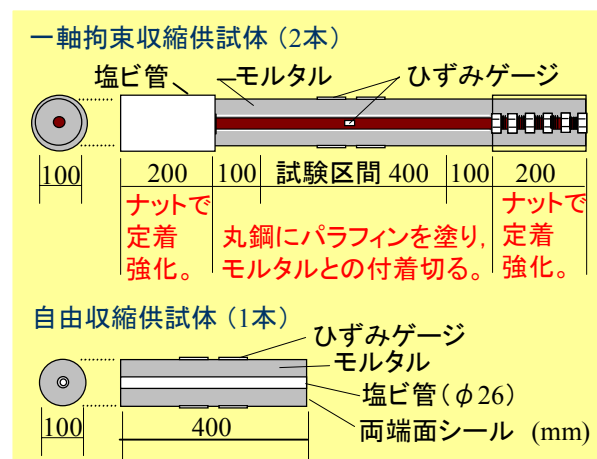


図-2 一軸拘束収縮供試体と自由収縮供試体

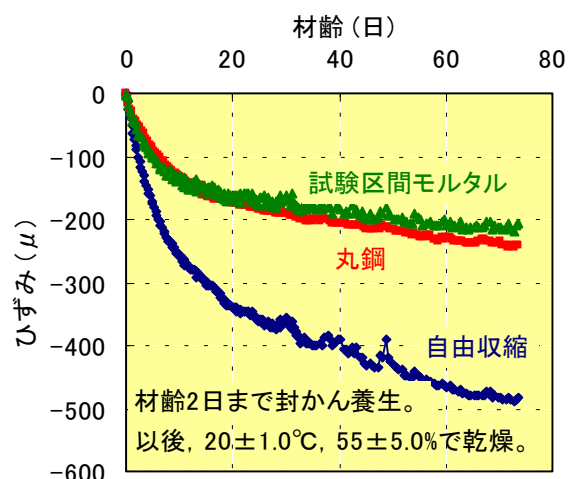


図-3 拘束・自由収縮供試体のひずみ

(3) 一軸拘束収縮試験結果の予測

丸鋼のひずみから算出したモルタルの収縮応力の経時変化を解析結果とともに図-4に示す。なお、本解析では時間ステップごとに自由収縮ひずみの増分を与え、モルタルと鋼棒の間では力の釣合いと変形の適合が成り立つと仮定し、鋼棒の弾性係数は $20.6 \times 10^4 \text{MPa}$ とし、モルタルの有効弾性係数は式(1)により与えながら収縮応力を計算した。収縮応力の解析値は実験値を若干下回るものの、その導入過程をほぼ予測できている。よって式(1)は、一軸拘束条件下ならば断面補修用モルタルに適用できるといえる。

一方、本供試体には材齢70日を越えた今もひび割れが発生していないため、式(2)より与えるひび割れ発生応力の適用性については検証できなかった。図-4には式(2)より計算されるひび割れ発生応力も記している。本供試体の収縮応力は、式(2)より計算されるひび割れ発生応力まで達しないと推測される。

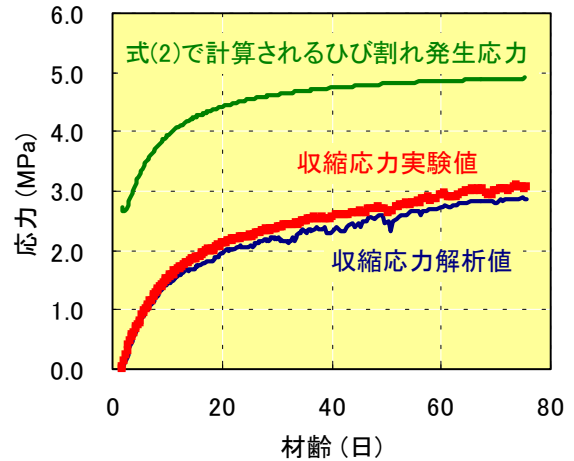


図-4 収縮応力の実験値と解析値の比較

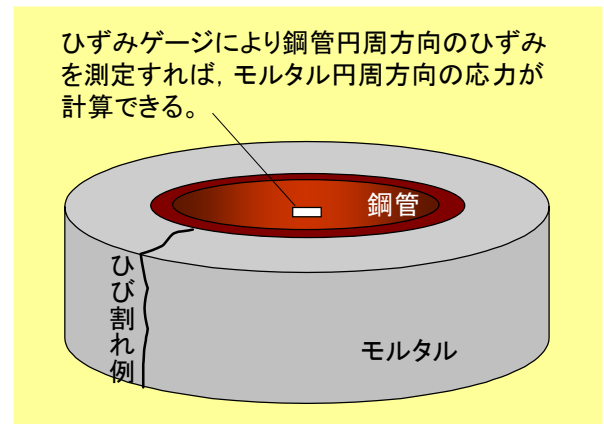


図-5 リング型拘束収縮供試体の概要

3. リング型拘束収縮試験

3.1 実験の概要

(1) 供試体の概要

拘束形態の異なる拘束収縮試験としてリング型拘束収縮試験を行った。供試体の概要を図-5に示す。本試験は、リング状の型枠内に打込まれたモルタルの収縮を、型枠を兼ねる内円鋼管により拘束する試験である。内円鋼管の円周方向のひずみを測定すれば、モルタルの円周方向の収縮応力を計算することができる。

幾つかある拘束収縮試験³⁾の中から本試験を採用した理由は、試験方法として比較的簡単であること、拘束材との定着長が問題とならないこと、(通常の一軸拘束収縮試験と違い)断面内に非対称な応力分布が形成されることである。

(2) 実験構成

リング型拘束収縮試験の実験構成を表-2に示す。モルタル厚さを38.3mm、鋼管厚さを6.0mmとした基準供試体に対し、鋼管厚さを8.0mmとして拘束度を上げた拘束大供試体、モルタル厚

表-2 リング型拘束収縮試験の構成

供試体 呼称	鋼管内径 (mm)	モルタル厚 (mm)	鋼管厚 (mm)	高さ (mm)
基準	306.5	38.3	6.0	
拘束大	302.5	38.3	8.0	
断面大	306.5	61.8	6.0	100
38自由	-	38.5	-	
62自由	-	62.0	-	

さを61.8mmとして断面寸法を大きくした断面大供試体で構成した。供試体数は各1体とした。

前章と同様に、式(1)を用いて収縮応力を解析するためには、モルタルの自由収縮試験が必要となる。今回は、鋼管とほぼ同じ外径をもつ塩化ビニール管を内円の型枠とし、厚さ38.5mm、62.0mmのリング型自由収縮供試体を作成した。内円の塩ビ管にはあらかじめ切れ目を入れておき、脱枠時に取り外せるようにした。供試体数は各1体とした。

(3) 養生・乾燥条件と測定項目

全ての供試体は、封かん状態としたまま打設後 24 時間で脱枠し、打設後 48 時間から乾燥を開始した。養生・乾燥を行った恒温室内の温度は $20 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 、相対湿度は $55 \pm 5.0\%$ であった。なお、今回の試験では、モルタル上下面（自由収縮供試体では内側面も）をシーリング剤+ビニールシートにより被覆し、乾燥面をモルタル外側面のみに限定している。

拘束収縮供試体については、鋼管の内側面とモルタル外側面の円周方向のひずみを 4 箇所測定した。自由収縮供試体については、モルタル内側面と外側面のひずみを 4 箇所測定した。測定は、鋼管については打設直後から、モルタルについては打設後 48 時間から開始した。

3.2 実験結果

(1) 拘束収縮供試体の応力

拘束収縮供試体の鋼管ひずみの経時変化を図-6 に示す。ここで、鋼管ひずみは内側面 4 箇所測定したひずみデータを平均した値である。

鋼管ひずみより、モルタルに導入されている円周方向の収縮応力が計算できる。ここでは、モルタル厚さを 10 分割し、それぞれの位置での円周方向の応力を式(3)により算出⁴⁾し、それらの値を平均してモルタル断面の平均応力を算出することにした。

$$\sigma(r) = \varepsilon_s E_s t r_1 \frac{\left(\frac{r_2}{r}\right)^2 + 1}{r_2^2 - r_1^2} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma(r)$ ：供試体中心点から半径方向に距離 r の位置でのモルタルの円周方向の応力(MPa)、 ε_s ：鋼管内側面のひずみ、 E_s ：鋼管の弾性係数(MPa)、 t ：鋼管厚さ(mm)、 r_1 ：供試体中心点からモルタル内側面までの距離(mm)、 r_2 ：供試体中心点からモルタル外側面までの距離(mm)である。

(2) 応力の経時変化とひび割れの発生

モルタル断面の平均応力の経時変化を図-7 に示す。いずれの供試体においても乾燥開始以前に自己収縮応力は導入されていない。図-6 からわかりづらいが、使用したモルタルには材

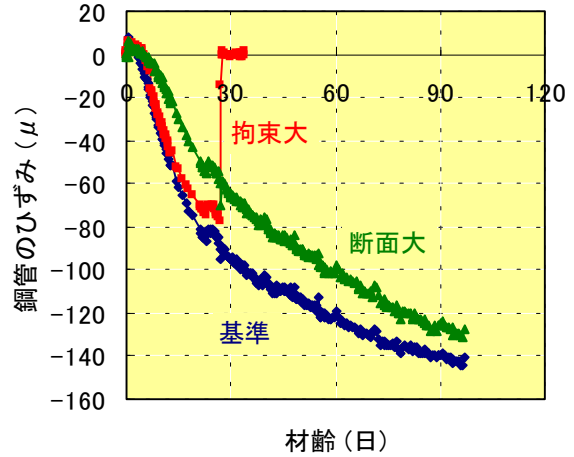


図-6 拘束収縮供試体の鋼管ひずみ

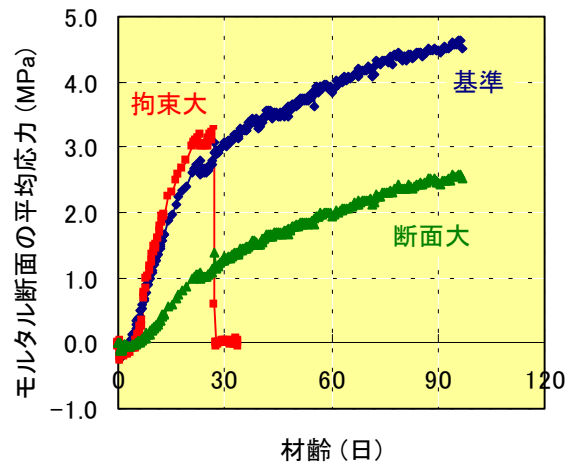


図-7 モルタル断面の平均応力



写真-1 拘束大供試体のひび割れ

齢ごく初期に膨張が生じることから、これが自己収縮を相殺したと考えられる。乾燥開始後は、それぞれ引張応力が漸増し始めるが、その速度は、拘束大>基準>断面大の順に大きくなっている。

拘束大供試体においては、材齢 27 日時点で断面平均応力が約 3.3MPa に達し、写真-1 に示すようにモルタル断面を貫通するひび割れが発生した。図-1 を見ると、この時点での引張強度は約 6.6MPa であることから、引張応力強度比にして 50% でひび割れが発生したことになる。基準供試体および断面大供試体については、材齢 100 日を過ぎた今もひび割れは発生していない。

4. リング型拘束収縮試験結果の予測

(1) 予測解析のフロー

予測解析のフローは、2 章で行った一軸拘束収縮試験の場合と同様である。すなわち、時間ステップごとに自由収縮ひずみの増分を与え、モルタルと鋼管の間では力の釣合いと変形の適合が成り立つと仮定し、鋼管の弾性係数は $20.6 \times 10^4 \text{MPa}$ とし、モルタルの有効弾性係数は式(1)によって与えながら収縮応力を計算した。

自由収縮ひずみの経時変化を図-8 に示す。図には 38 自由供試体、62 自由供試体の内側面 4 箇所、外側面 4 箇所のひずみの平均値を示しているが、解析には内外両面の平均値を使用した。

(2) 養生期間中の自己収縮応力履歴の影響

既報⁹⁾では、養生期間中に受けた自己収縮応力の履歴がコンクリートの有効弾性係数とひび割れ発生応力に影響を及ぼすとして、それぞれの実験式中の静弾性係数と引張強度を一律低下させている。今回の場合、いずれの拘束収縮供試体においても養生期間中の自己収縮応力履歴が確認されなかったため、このことは無視する。

(3) 実験結果と解析結果の比較

リング型拘束収縮供試体の収縮応力について、実験値と解析値の比較を図-9 に示す。断面大供試体では若干のずれが見られるものの、解析値の応力導入過程は実験値とほとんど一致している（基準供試体については完全に重なっている）。これらの結果から、コンクリートの一軸引張試験より求めた有効弾性係数の実験式により、拘束形態の異なるリング型拘束収縮試験の応力導入過程を精度よく予測できるといえる。

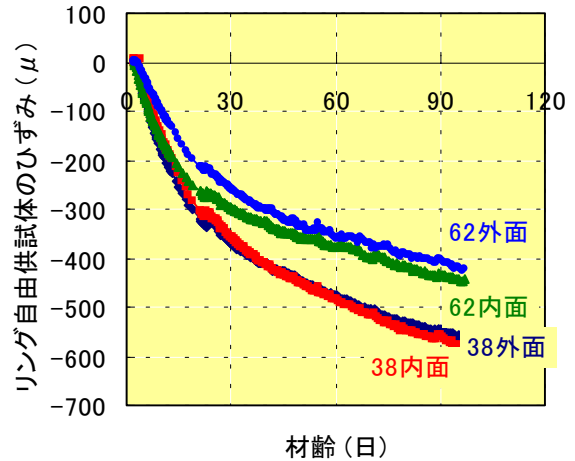


図-8 リング型自由収縮供試体のひずみ

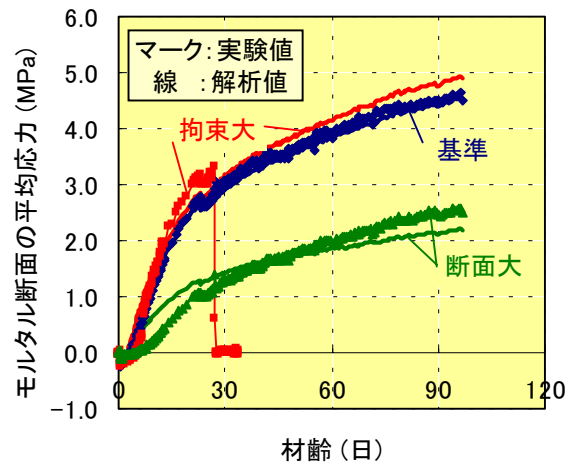


図-9 収縮応力の実験値と解析値の比較

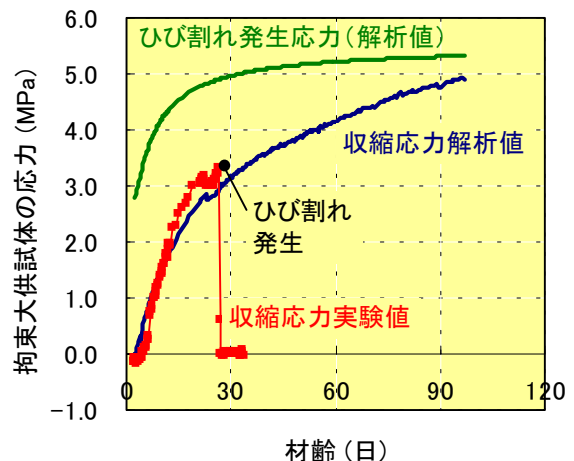


図-10 ひび割れ発生応力の比較（拘束大）

一方、ひび割れ発生応力についてはひび割れが発生した拘束大供試体のみ解析との比較が可能である。拘束大供試体のひび割れ発生応力について、実験値と解析値の比較を図-10 に示す。

実験値のひび割れ発生時点（応力が急減し 0 に戻る点）における応力が約 3.3MP a であるのに対し、同時点におけるひび割れ発生応力の解析値は約 4.9MP a と実験値を大きく上回っている。1 例のみの結果だが、コンクリートの一軸引張試験より求めたひび割れ発生応力の実験式では、使用材料および拘束形態の異なるリング型拘束収縮試験のひび割れ発生応力を予測できない可能性が高い。この原因について考察する。

今回用いた断面補修用モルタルの引張強度は材齢 27 日で約 6.6MP a と比較的高い。既報²⁾で予測してきた一般的なコンクリートの引張強度は概ね 2.0~4.5MP a であり、本モルタルのような高引張強度のコンクリートには、実験式が適用できない可能性がある。また、既報²⁾で予測してきた供試体は全て対称な乾燥面を持つ一軸拘束収縮供試体であり、これとリング型拘束収縮試験ではひび割れの発生過程が異なり、実験式が適用できない可能性がある。今後、本モルタルを用いてひび割れの発生する一軸拘束収縮試験を行うことにより、問題点が明確になると考えている。

5. まとめ

コンクリートの一軸引張試験から求めた有効弾性係数とひび割れ発生応力の実験式により、断面補修用モルタルを用いたリング型拘束収縮試験の収縮応力とひび割れの発生を予測可能かどうか検討した。結果を以下にまとめる。

- (1) コンクリートの一軸引張試験から求めた有効弾性係数の実験式により、断面補修用モルタルの一軸収縮拘束試験における収縮応力の導入を予測できた。
- (2) リング型自由収縮試験を行った結果、乾燥させた外側面と乾燥を防いだ内側面では、収縮ひずみの差はほとんど無かった。

- (3) コンクリートの一軸引張試験から求めた有効弾性係数の実験式より、断面補修用モルタルのリング型拘束収縮試験における収縮応力の導入を予測できた。
- (4) コンクリートの一軸引張試験から求めたひび割れ発生応力の実験式では、断面補修用モルタルのリング型拘束収縮試験におけるひび割れ発生応力を予測できない可能性が高い。

謝辞

本実験を行うにあたり、木更津高専環境都市工学科山中奈穂氏をはじめ卒業研究生にご協力を頂いた。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 青木優介, 下村 匠: 乾燥収縮ひび割れ抵抗性評価のためのコンクリートの引張変形特性およびひび割れ発生条件に関する検討, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.135-148, 2003.5
- 2) 青木優介, 下村 匠: 一軸線拘束されたコンクリートにおける乾燥収縮応力の導入過程の解析とひび割れ発生の予測, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.149-162, 2003.5
- 3) 濱永康仁, 佐藤嘉昭, 上田賢司, 清原千鶴: ひずみ制御機能を備えた収縮ひび割れ試験装置の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.519-524, 2004.6
- 4) 日本コンクリート工学協会コンクリートの自己収縮研究委員会: コンクリートの自己収縮委員会報告書, 2002.9
- 5) 青木優介, 下村 匠: 自己収縮による応力履歴がコンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, CD-ROM, 2002.6