

乾燥収縮率および静弾性係数の違いが 断面修復コンクリートにおけるひずみおよび応力発生に及ぼす影響

Effect of Drying Shrinkage and Static Modulus of Elasticity
on Strain and Stress in Patched Concrete

平田佳奈実¹・金侖美²・福山智子³

Kanami Hirata, Yunmi Kim and Tomoko Fukuyama

¹立命館大学学部学生 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Undergraduate Student, Department of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan University

²立命館大学助教 総合科学技術研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

³立命館大学准教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate Professor, Dept. of Architecture and Urban Design, College of Science and Eng., Ritsumeikan University

In general, a repaired concrete can re-deteriorate in few years because properties on drying shrinkage and static modulus of various patch materials and concrete are different, and stress generation on the repaired interface induces re-deterioration. In this study, we, therefore, examined the effect of drying shrinkage and static modulus on patch material and concrete on the strain and tensile stress, to understand the mechanism of re-deterioration. The experimental results indicated that the smaller static modulus of patch material gets the smaller tensile stress and makes the smaller interfacial peeling and surface cracking.

Keywords: *Drying shrinkage, Patch Material, Polymer Cement Mortar, Patched Concrete*

1. はじめに

日本におけるコンクリート産業は 100 年以上の長い歴史を持っており、多くの歴史価値を有するコンクリート系の構造物（以下、歴史的構造物）が国指定文化財に指定されている。しかし、建設後長時間経過している歴史的構造物には、環境条件や外力による経年劣化が懸念される。

一般に、ひび割れやセメントペースト組織の緩みなどによってコンクリート部材の性能が低下した場合は劣化した部分をはつり取って補修材（以下、断面修復材）で埋め戻す断面修復工法で補修するケースが多いが、補修後数年で補修表面部および補修界面部にひび割れや剥離などの劣化が生じたという早期劣化事例が近年報告されている¹⁾。

既往の研究²⁾によると、温度や湿度の変化といった使用環境の影響による既設コンクリートと断面修復材の体積変化が早期劣化の原因と挙げられている。特に断面修復材は使用材料の種類や使用比率が異なるため、乾燥収縮率や静弾性係数などの力学性能が様々であり、またコンクリートとも大きく異なるものがあることから、断面修復材と既設コンクリートとの力学性能の相対的な差異による体積変化の相互抑制や発生応力を

明らかにする必要があると考えられる。

本研究では、断面修復工法で補修を行った歴史的建造物の早期劣化防止の一環として、既設コンクリートと断面修復材の乾燥収縮率および静弾性係数の相対差を模擬した断面修復コンクリート試験体を対象に乾燥収縮試験を行うことで両材の相互拘束によるひずみおよび拘束応力を検討し、補修表面部および補修界面部におけるひび割れや剥離の発生低減について考察する。

2. 実験概要

(1) 実験計画

表 1 に実験計画を、図 1 に乾燥収縮試験に用いた試験体の様子を示す。試験項目は自由乾燥収縮試験および拘束乾燥収縮試験である。自由乾燥収縮試験³⁾は図 1(a)のような直方体の試験体を用いてコンクリートの時間経過に伴う自由ひずみを測定し、拘束乾燥収縮試験では図 1(b)、(c)のような円形の試験体を用いて異なる材料間の相互拘束による拘束ひずみを計測する。

ここでは、乾燥収縮率と静弾性係数が異なる 3 種のコンクリートを使用し、図 1(b)のように乾燥収縮しない材料である金属でコンクリートを拘束した場合と、図 1(c)のように乾燥収縮する材料であるポリマーセメントモルタル（以下、PCM）で拘束された場合について検討する。これにより、コンクリートと補修材間の相互拘束の程度を定量化する指標である拘束率と拘束ひずみによる拘束応力の関係を明らかにする。

コンクリートの調合や基礎性状を表 2、拘束体の基礎性状を表 3 に示す。コンクリートは単位水量 (W) を 165、175、185 (kg/m³)として調合設計をすることで乾燥収縮率と静弾性係数を調整した。また、金属リングは一般構造用炭素鋼管であり、拘束体の断面積により拘束率が変わるためリングの厚さを 3.5t、4.5t、6.5t (mm)の 3 種とする。

(2) 実験方法

自由乾燥収縮試験は JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法) に準じ、温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿環境で実施した。試験体の寸法は 100×100×400 (mm)であり、両端部 (□100mm) の中心間距離の長さ変化を測定して自由ひずみを求めた (図 1(a))。

断面修復材の乾燥収縮のみを想定した試験体 (以下、単一体 ; S) は、外径が 114.3mm の金属リングを拘束体として使用し、金属リングの外側に外径が 202mm になるようコンクリートを打ち込んだものである (図 1(b))。金属リングの内径は 107.3mm (3.5t)、105.3mm (4.5t)、101.3 mm (6.5t)の 3 種であり試験体の高さは 40mm である。また、金属リングとコンクリートの界面付着はコンクリートによるものであり、コンクリートの養生のために 31 日間水中に静置し、金属リングは腐食を予防するために水中露出面にグリースを塗布した。

コンクリートと断面修復材両方の乾燥収縮を考慮した試験体 (以下、複合体 ; C) は PCM を拘束体として使用した。コンクリートを外径 298mm、内径 216mm、高さ 40mm の円形で作製し 14 日間水中養生を行った後、コンクリートの内側に PCM の内径が 140mm になるよう打設し、7 日間封緘養生、7 日間水中養生した (図 1(c))。また、PCM の打設時にコンクリートの内側面にプライマーを塗布して両材の付着性能を高めた。

単一体および複合体にはコンクリートの外側面と拘束体 (金属リング、PCM) の内側面にひずみゲージを 2 枚ずつ貼り付け、複合体の場合はコンクリートと PCM の界面にもひずみゲージを貼付している。ここで、コンクリートの外側面のひずみを外側ひずみ、拘束体の内側面のひずみを内側ひずみ、界面のひずみを界面ひずみとする。単一体の場合は拘束リングの乾燥収縮率が 0 ということと静弾性係数がコンクリートより非常に高く、厚さが小さいことから金属リングの内側ひずみを界面ひずみとして扱う。

拘束乾燥収縮試験は自由乾燥収縮試験と同様に温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿環境で行い、28 日目のひずみデータを取りまとめた。また、試験体条件ごとに 2 体ずつ測定し、ひずみゲージには水分の影響によるばらつき発生を防ぐために防水処理を行った。

表 1 実験計画

試験体条件		試験項目	検討項目
コンクリート	W165, W175, W185	自由乾燥収縮 拘束乾燥収縮	ひずみ 拘束率 応力
拘束体	金属リング (3.5t, 4.5t, 6.5t) PCM		

※ t: リングの厚さ (thickness)

表2 コンクリートの調合および基礎性状

区分	W/C	s/a	単位質量 (kg/m ³)				Air (%)	スランプ (mm)	ポアソン比	乾燥収縮率 (×10 ⁻⁶ , 28日)	強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)
			W	C	S	G					圧縮	引張	
W165	55.0	46.6	165	300	898	998	1.8	5.0	0.06	258.3	36.5	3.7	33.1
W175	52.5	45.0	175	333	843	998	1.6	14.5	0.09	369.59	44.4	2.7	36.7
W185	50.0	43.4	185	370	787	998	1.9	30.0	0.10	389.13	46.7	3.3	35.3

※ C: 普通ポルトランドセメント (密度: 3.16 g/cm³), S: 細骨材 (表乾密度: 2.64 g/cm³), G: 粗骨材 (表乾密度: 2.58 g/cm³)

表3 拘束体の基礎性状

区分	乾燥収縮率 (×10 ⁻⁶ , 28日)	強度 (N/mm ²)				静弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
		圧縮	引張	曲げ	付着		
金属リング	-	-	157	-	-	205	0.30
PCM	201 ^{*1}	56.2	2.9	8.4	1.4	58.8	0.15

*1: PCMの収縮による界面剥離を防ぐためにコンクリートより小さい乾燥収縮率のものとした。

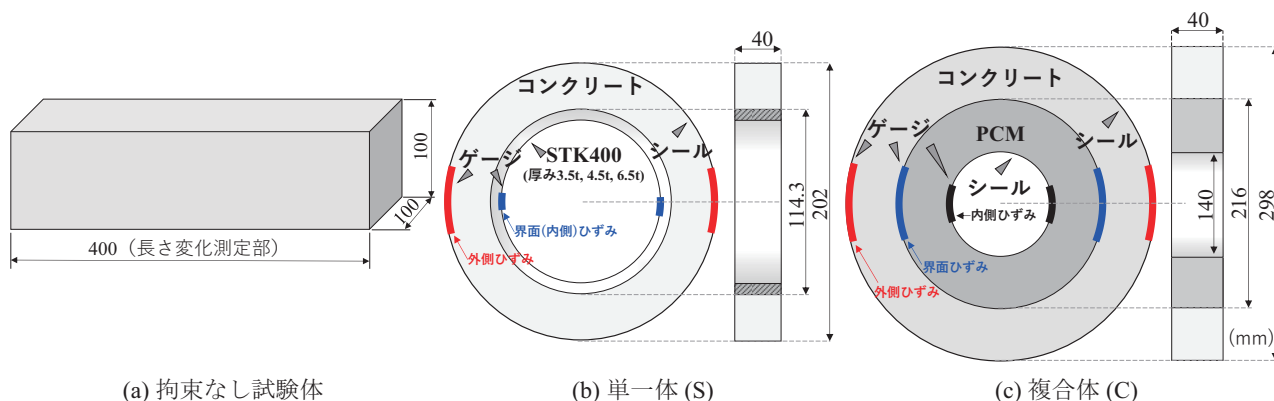


図1 試験体形状

(3) 拘束率と応力の算定

本報における拘束率 (ψ) は拘束体によるコンクリートの伸縮挙動の抑制程度を示す指標であり、式(1)のように自由乾燥収縮試験によって求められる拘束されていない時の自由ひずみ (ϵ_f) に対する、拘束乾燥収縮試験によって測定される拘束ひずみ (ϵ_r) の比で計算する。ここで、拘束ひずみは単一体および複合体の外側ひずみと界面ひずみの総称であり、拘束体により拘束程度が距離によって緩和されることを考慮して界面ひずみと外側ひずみの拘束率を求めた。

$$\psi = \frac{\epsilon_f - \epsilon_r}{\epsilon_f} \quad (1)$$

ここに、 ψ : 拘束率
 ϵ_f : 自由ひずみ
 ϵ_r : 拘束ひずみ

拘束応力 (σ_θ) は式(2)のように自由ひずみと拘束ひずみの差に静弾性係数をかけて計算する。ここで、静弾性係数は1軸加圧時の弾性限度内における応力とひずみの比例関数である (式(3))。

$$\sigma_\theta = (\epsilon_f - \epsilon_r) \times E_m \quad (2)$$

$$E_m = \frac{S_1 - S_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \times 10^{-3} \quad (3)$$

ここに、 σ_θ : 拘束応力 (N/mm²)
 E_m : 材料mの静弾性係数 (kN/mm²)
 S_1 : 最大荷重の1/3に相当する応力 (N/mm²)
 S_2 : 縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力 (N/mm²)
 ϵ_1 : S_1 の応力によって生じる縦ひずみ
 ϵ_2 : 50×10^{-6}

3. 実験結果とその考察

(1) 自由ひずみ変化および28日目の拘束ひずみと拘束率

図2にコンクリートの乾燥収縮による自由ひずみを示す。単位水量が大きいほど乾燥収縮が大きくなる結果が得られている。

図3に拘束乾燥収縮試験開始後28日目の界面ひずみおよび外側ひずみを示し、図4に界面拘束率と外側拘束率を示す。ここで、乾燥収縮によるひずみは収縮が大きいほど負の方向に大きくなるものである。

図3、図4の全体的な傾向として、単一体と複合体ともに界面および外側面におけるひずみと拘束率とは反比例する関係を示し、拘束が強いほど引張力が大きくなる結果が得られた。また、ひずみ変化と拘束率は外側面が界面より小さくなっている。これは、拘束体から遠くなるほど拘束程度が低減したためである。

金属リングの厚さが一定の場合、単一体の界面ひずみは、自由ひずみ(図2)と同様にコンクリートの単位水量が大きいほどひずみ変化が大きかった。また、界面の拘束率は既往の研究⁴⁾と同様にコンクリートの乾燥収縮率が小さいほど大きくなっている。一方で、外側のひずみと拘束率はコンクリートの乾燥収縮率との関係性が確認できなかった。

コンクリートの単位水量が一定の場合、単一体の界面ひずみは、金属リングの厚さが厚くなるほど収縮によるひずみの変化量が小さくなっており、拘束率は大きくなる傾向がある。これは、拘束体の厚さが大きくなるとコンクリートの収縮によって発生する円の中心方向の圧縮力に耐える金属リングの断面積が大きくなり、コンクリートの収縮が抑制されたためである。一方、外側面におけるひずみ変化量および拘束率は界面と同様に金属リングの厚さとの関係を示すと予想されたが、金属リングの厚さを6.5tとした試験体のコンクリート表面に乾燥収縮によるひび割れが発生したため金属リングの厚さとの関係性がみられなかった。

複合体の場合は界面および外側でのひずみと拘束率にコンクリートの単位水量との関係が明確に得られなかったが、同一コンクリートの単一体より収縮によるひずみ変化量が大きく、拘束率は小さかった。これは、複合体の拘束体であるPCMがコンクリートとともに外気に晒されることで乾燥収縮し、コンクリートの乾燥収縮を妨げる拘束程度が低減したためである。また、単一体の場合は内側と外側のひずみ差が最大 200×10^{-6} 程度であったが、複合体の場合は 100×10^{-6} 程度の違いとなった。このことから、拘束体が乾燥収縮する場合は内側と外側のひずみ差も小さくなることがわかる。

(2) 28日目の拘束率と応力の関係

図5に拘束乾燥収縮試験開始後28日目の単一体および複合体の界面と外側面における応力と拘束率の関係を示す。ここで、応力は自由ひずみと拘束ひずみで計算した拘束応力である(式(2))。また、界面の応力が外側の応力より大きい場合に界面剥離、外側の応力が界面の応力より大きい場合に表面ひび割れが生じると想定する。

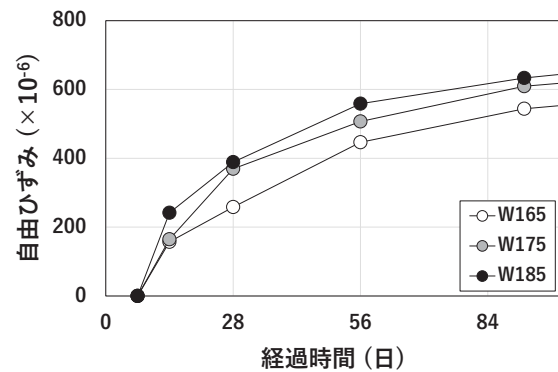


図2 時間経過に伴う自由ひずみの変化

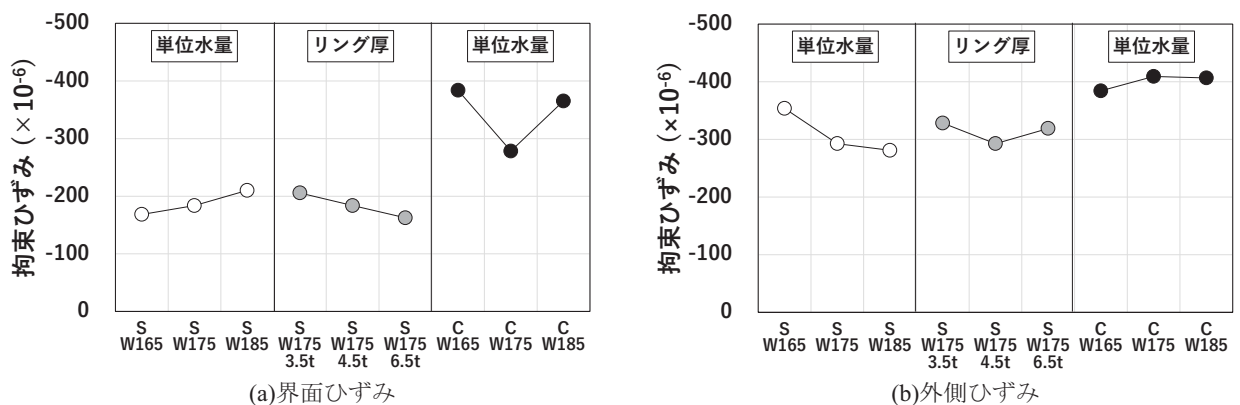


図3 単位水量と拘束リングの厚さおよび複合体のひずみ (28日目)

図 5 より、単一体と複合体の拘束率と応力は殆ど比例関係を持っていることが確認できた。また、単一体の応力より複合体の応力が小さく、外側面よりは界面の応力が大きい値を示した。これは、金属リングによる拘束（単一体）の場合、PCM による拘束（複合体）に比べて界面におけるひずみの抑制が大きく、それに伴い応力が大きくなり、ひずみの結果と同様に界面から離れるほど拘束程度が低減した結果である。また、外側面と界面とも単一体の金属リングの厚さおよびコンクリートの単位水量が小さいほど応力が小さくなる傾向を示している。

一方、コンクリートの単位水量を変えた場合の単一体の界面における拘束率と応力の関係は反比例関係を示している。これは、乾燥収縮によるコンクリートの応力が材料自体の乾燥収縮率だけではなく静弾性係数の影響を含んでいるため、乾燥収縮率が小さくても静弾性係数が大きいと発生する応力が大きくなった結果である。

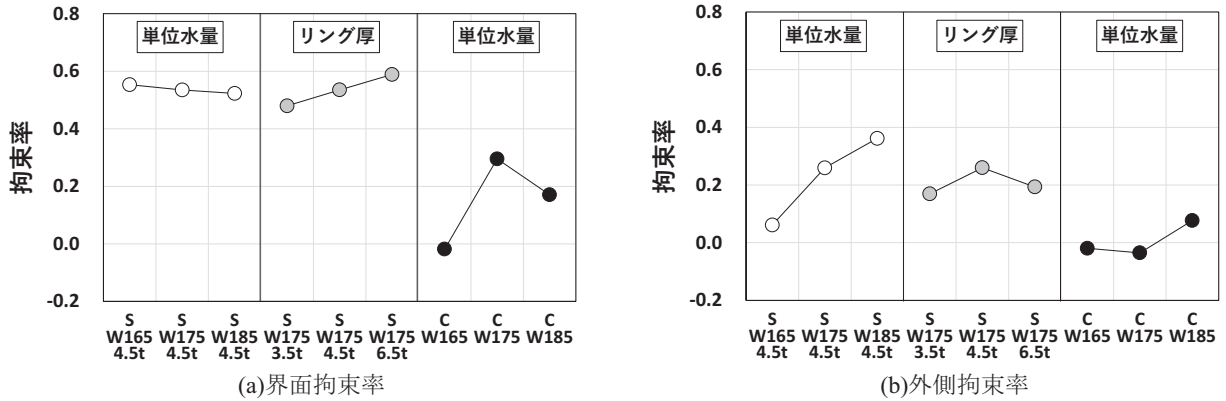


図 4 単位水量と拘束リングの厚さおよび複合体の拘束率 (28 日目)

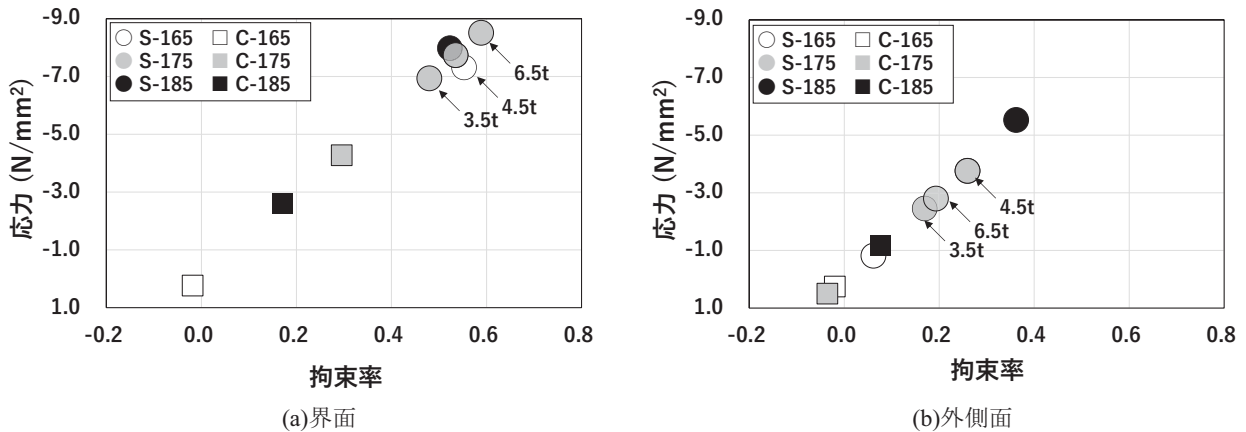


図 5 拘束率と応力の関係

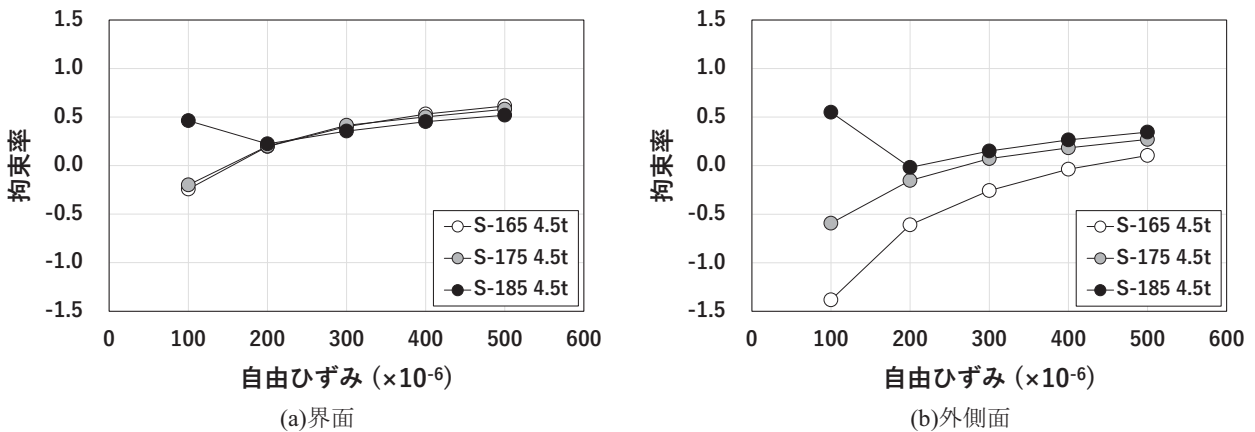


図 6 拘束率にコンクリートの静弾性係数が及ぼす影響

(3) コンクリートの静弾性係数が拘束率に及ぼす影響

図 6 に拘束なしコンクリートの自由ひずみを基準とした単一体の拘束率を示す。ここで、コンクリートの静弾性係数は W185 が 35.3 kN/mm^2 であり、W175 が 36.7 kN/mm^2 で最も大きく、W165 が 33.1 kN/mm^2 で最も小さい。自由ひずみ 500×10^{-6} を基準とした拘束率は、界面の場合はコンクリートの静弾性係数との関係がみられなかった。一方、外側面の場合は S-W165 の拘束率が最も小さく S-W175 と S-W185 がより大きい拘束率を示した。この結果から拘束率とコンクリートの静弾性係数に関係があると考えられ、拘束率が拘束応力と比例関係を持つことから、静弾性係数の高い拘束体との拘束応力を低減するにはコンクリートの静弾性係数を小さくすることが有効であるといえる。

4. まとめ

本研究では歴史的建造物の断面修復工法による補修において補修部の早期劣化発生の防止のために、既設コンクリートと断面修復材の力学性能の相対差および両材の相互拘束によるひずみ発生や拘束率と拘束応力の関係を検討し早期劣化発生低減について考察した。その結果、既設コンクリートと断面修復材の相互拘束による拘束率は両材の界面で最も大きいのが、断面修復材の静弾性係数の増加に伴い拘束率および拘束応力が大きくなることから、断面修復材の静弾性係数を小さくすることでひび割れ発生などの早期劣化が低減できる。また、断面修復材と既設コンクリートの乾燥収縮率を同程度にすることで両者のひずみ差が低減できるため、早期劣化予防が可能となる。

参考文献

- 1) 宮永憲一他：床版上面の断面修復材における乾燥収縮についての実験的研究，土木学会第68回年次学術講演会，pp.311-312，2013.
- 2) 加藤誠司：コンクリート断面修復部の変形・強度特性,技術開発ニュース,No.159,pp.13-14,2018.8
- 3) Gizyowski, M. and Shah, S. P.: Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete, *ACI Material Journal*, Vol.57,No.2,pp.138-148,1990.
- 4) 島弘他：円環状試験体を用いた乾燥収縮が拘束される応力履歴下におけるコンクリートの引張クリープの測定，土木学会論文集E，65(4)，pp.477-489，2009.10.