

RC 床版の上面増厚補強に用いられる MMA 樹脂 コンクリートの硬化収縮応力とクリープ係数の評価

Evaluation of Hardening Shrinkage Stress and Creep Coefficient of Methyl Methacrylate(MMA)
Resin Concrete used for Strengthening of Reinforced Concrete Slabs

澤田友治*, 堤下隆司**, 栗田章光***, 徳岡文明****

Yuji SAWADA, Takashi TSUTSUMISHITA, Akimitsu KURITA and Fumiaki TOKUOKA

- * 大阪工業大学大学院 博士前期課程 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)
 **工修 修成建設専門学校 土木工学科 (〒555-0032 大阪市西淀川区大和田 5-19-30)
 ***工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)
 **** トーメンコンストラクション(株) 営業本部 (〒104-0033 東京都中央区新川 1-8-6)

Due to the passing of the over-road vehicles and increasing the heavy traffics, nowadays also, there are many damage examples of the reinforced concrete slab. To respond this problem, the slab thickening method is used as one of the repairing methods for the damaged reinforced concrete slab. We have carried out the study of the strengthening methods, in which the slab thickness was increased by MMA resin concrete. MMA resin concrete has a large shrinkage strain according to the hardening. The purpose of this study, therefore, is to evaluate the stress and the creep coefficient due to the shrinkage of MMA resin concrete bonded to the reinforced concrete slab. The analytical and experimental results are presented and discussed herein.

Key Words: MMA resin concrete, Hardening shrinkage stress, Creep coefficient

1. まえがき

損傷 RC 床版の補修工法の一つとして、著者らは MMA 樹脂コンクリート(以下、樹脂コンクリート)と呼ばれる特殊コンクリートを用いた増厚補強工法について開発研究を行っている^{1)~4)}。この樹脂コンクリートは、①施工時の厳しい温度条件に対応できる、②防水機能を兼ね備えている、③硬化時間が早い、④付着強度が高い、⑤じん性に富んでいる等が長所として挙げられる⁵⁾。一方、硬化に伴い約 2500~3000 μ もの大きな収縮ひずみが発生することも同時に確認されている。普通ポルトランドセメントを使用した場合、コンクリートの乾燥収縮ひずみは 500 μ 程度であるから、樹脂コンクリートの硬化収縮ひずみはコンクリートの乾燥収縮ひずみの 6 倍程度に相当し、非常に大きな値であることがわかる。

上面増厚補強工法では、樹脂コンクリートを RC 床版に接着していることから、当然ながら硬化時に収縮ひずみが拘束され内部に引張応力が発生する。さらに、本工法では樹脂コンクリート内部に細径のメッシュ筋を配置することにより増厚部の剛性を高める構造としている。こ

れより、収縮ひずみは下面の RC 床版だけでなく、メッシュ筋によっても拘束され、内部に発生する引張応力がさらに増加することが予想される。また、硬化時間の早い樹脂コンクリートの場合、その収縮現象に伴う弾性係数の急激な経時変化の影響は、硬化収縮を考えるに当たって無視することができない要素である。

そこで、本研究では、硬化収縮に伴う樹脂コンクリートの弾性係数の経時変化を考慮した応力-ひずみ関係式を誘導し、拘束を受ける樹脂コンクリートの硬化収縮に伴う引張応力ならびにクリープ係数を評価することを目的とした。さらに、種々の拘束条件下における硬化収縮実験を行い、実験値との比較・検討を行った。本文では、その結果について報告する。

ただし、この樹脂コンクリートは熱可塑性樹脂で、その収縮現象はコンクリートのようなセメントペースト中の水分の逸散とは異なり、樹脂特有の性質によるものである。よって、拘束を受けた場合に内部に発生する引張応力をコンクリートの場合とは区別するために、ここでは特に硬化収縮応力(以下、収縮応力)と呼ぶことにする。

2. 硬化収縮解析

2.1 概説

今日まで、コンクリートの乾燥収縮に関する種々の予測式や解析法が提案されており、他方、レジンコンクリート等の特殊コンクリートについても同様な研究が行われている^{9)~11)}。しかし、本研究で用いている樹脂コンクリートは、上述したように初期材令時の弾性係数の経時挙動変化が著しく、当然ながらコンクリートに用いられてきた予測式では対応することが難しい。

そこで、本節では、弾性係数の経時変化と硬化収縮による応力緩和を同時に考慮したクリープ係数 η_D を誘導し、樹脂コンクリートの硬化収縮に伴う応力-ひずみ関係式を示すことにする。

2.2 硬化収縮に伴う MMA 樹脂コンクリートの 応力-ひずみ関係式

樹脂コンクリートの硬化収縮ひずみの進行は、著者らが行った数多くの実験結果より、指数関数的に進行するとみなして精度良く近似することができる^{12)~14)}。したがって、任意時刻 t における樹脂コンクリートの硬化収縮ひずみ(自由収縮ひずみ)は、次式のように表される。

$$\varepsilon_{s,t} = \varepsilon_{s,\infty} \{1 - \exp(-k_1 t)\} \quad (2.1)$$

ここに、

- $\varepsilon_{s,t}$: 時刻 t における硬化収縮ひずみ
- $\varepsilon_{s,\infty}$: 自由収縮ひずみの最終値
- k_1 : 硬化収縮の進行過程を表す無次元係数

任意時刻 t における樹脂コンクリートの硬化収縮に伴うクリープ係数 $\phi_s(t)$ が、硬化収縮ひずみの進行と相似であると仮定すると、硬化収縮ひずみはクリープ係数の関数として表される¹³⁾。これより、時刻 t_1 から任意時刻 t における硬化収縮ひずみは、次式のように表すことができる。ここに、 $\phi_s(\infty)$ は硬化収縮に伴うクリープ係数の最終値である。

$$\varepsilon_{s,t-t_1} = \varepsilon_{s,\infty} \frac{\phi_s(t) - \phi_s(t_1)}{\phi_s(\infty)} \quad (2.2)$$

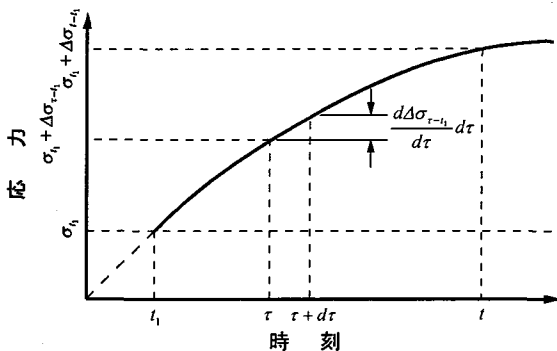


図-1 樹脂コンクリートの硬化収縮による応力変化

図-1 に示すような応力状態を想定し、硬化収縮による樹脂コンクリートの応力-ひずみ関係式を誘導する。図-1 より、時刻 t_1 から任意時刻 t までの樹脂コンクリートの硬化収縮によるひずみの変化量は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{s,t-t_1} = & \frac{\sigma_{t_1}}{E_a(t)} \{ \phi_s(t) - \phi_s(t_1) \} + \int_{t_1}^t \frac{\partial \Delta \sigma_{t-\tau}}{\partial \tau} \frac{1}{E_a(\tau)} d\tau \\ & + \int_{t_1}^t \frac{\partial \Delta \sigma_{t-\tau}}{\partial \tau} \{ \phi_s(t) - \phi_s(\tau) \} \frac{1}{E_a(\tau)} d\tau \\ & + \varepsilon_{s,\infty} \frac{\phi_s(t) - \phi_s(t_1)}{\phi_s(\infty)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

さらに、樹脂コンクリートの弾性係数の経時変化は次式で表されるものと仮定する。

$$E_a(t) = E_a f_{E_a}(t) \quad (2.4)$$

ここに、

- $E_a(t)$: 時刻 t における弾性係数
- E_a : 弾性係数の最終値
- $f_{E_a}(t)$: 弾性係数の経時変化を表す進行関数

また、硬化収縮においては初期着目材令 $t_1=0$ であるから、式(2.3)は式(2.4)を用いて次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{s,t} = & \frac{\Delta \sigma_t}{E_a f_{E_a}(t)} - \frac{1}{E_a} \int_0^t \Delta \sigma_\tau \frac{\partial \{1/f_{E_a}(\tau)\}}{\partial \tau} d\tau \\ & + \frac{1}{E_a} \int_0^t \Delta \sigma_\tau \frac{1}{f_{E_a}(\tau)} \frac{\partial \phi_s(\tau)}{\partial \tau} d\tau \\ & - \frac{1}{E_a} \int_0^t \Delta \sigma_\tau \frac{\partial \{1/f_{E_a}(\tau)\}}{\partial \tau} \{ \phi_s(t) - \phi_s(\tau) \} d\tau + \varepsilon_{s,\infty} \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで、第1項目は変動応力 $\Delta \sigma_t$ による任意時刻 t における弾性ひずみ、第2項目は時刻 $t_1=0$ から任意時刻 t の間で弾性係数の変化に伴う変動応力に対する弾性ひずみ、第3項目は硬化収縮に伴う変動応力に対するクリープひずみ、第4項目は時刻 $t_1=0$ から任意時刻 t の間で弾性係数の変化に伴う変動応力の硬化収縮に対するクリープひずみ、第5項目は時刻 $t_1=0$ から任意時刻 t に至るまでの自由収縮ひずみを、それぞれ表している。なお、式(2.5)中の進行関数 $f_{E_a}(t)$ は時間的な増加関数であり、その逆数を τ について偏微分した $\partial \{1/f_{E_a}(\tau)\} / \partial \tau$ は負の符号を含むことがわかる。したがって、第2項目および第4項目は、表記上、負の項であるが実際には正符号となる。例えば、第1項目と第2項目は変動応力の弾性ひずみを表しているが、任意時刻 t における弾性係数のみによって変動応力を除した第1項目だけでは、任意時刻 t 以前の弾性ひずみを過小評価しており、時刻 $t_1=0$ から任意時刻 t までの弾

性係数の変化に伴う弾性ひずみを総和した第 2 項目を加算することによって、正確な弾性ひずみの総量を算定することができる。これは、第 4 項目の硬化収縮に対するクリープひずみについても同様である。

また、硬化収縮に伴う変動応力 $\Delta\sigma_t$ が、任意時刻 t における樹脂コンクリートの硬化収縮に伴うクリープ係数の進行と相似であると仮定する¹³⁾。これより、任意時刻 t における硬化収縮によるひずみの変化量 $\Delta\epsilon_{s,t}$ は次式のようになり、樹脂コンクリートの硬化収縮に伴う応力-ひずみ関係式が得られる。

$$\Delta\epsilon_{s,t} = \frac{\Delta\sigma_t}{E_a f_{E_s}(t)} \{1 + \eta_D\} + \epsilon_{s,\infty} \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} \quad (2.6)$$

ここで、式(2.6)中の η_D は、弾性係数の経時変化と硬化収縮による応力緩和を同時に考慮したクリープ係数であり、これは式(2.5)を整理することにより次式で与えられる。

$$\eta_D = \frac{f_{E_s}(t)}{\phi_s(t)} \left[\int_0^t \frac{1}{f_{E_s}(\tau)} \left\{ \phi_s(\tau) \frac{\partial \phi_s(\tau)}{\partial \tau} \right\} d\tau - \int_0^t \frac{\partial \{1/f_{E_s}(t)\}}{\partial \tau} \left\{ \phi_s(\tau) + \phi_s(\tau) \{ \phi_s(t) - \phi_s(\tau) \} \right\} d\tau \right] \quad (2.7)$$

2.3 弾性係数の経時変化を表す進行関数

式(2.4)中の弾性係数の経時変化を表す進行関数 $f_{E_s}(t)$ は、弾性係数の経時変化の進行状況により異なるものである。現在まで、コンクリートにおける弾性係数の経時変化の近似には、指数関数を用いたもの、あるいは CEB-FIP Model Code 1990(MC-90)に規定されている式を用いたもの等がある^{15) ~ 17)}。樹脂コンクリートの場合、著者らが行った実験結果より、分数関数による近似が実験値に合致することがわかっており、次式で近似することとした¹⁸⁾。

$$f_{E_s}(t) = \frac{t}{(k_2 + k_3 t)} \quad (2.8)$$

ここに、

k_2, k_3 : 弾性係数の進行過程を表す無次元係数

3. 拘束を受ける MMA 樹脂コンクリートの硬化収縮解析

3.1 概説

上面増厚補強工法では、樹脂コンクリートの自由収縮ひずみは内部に配置したメッシュ筋および下面の RC 床版により拘束される。しかし、拘束条件の変化による樹脂コンクリート等への影響を解明するために、

上記の拘束条件に、メッシュ筋のみによって拘束される場合、下面の RC 床版のみによって拘束される場合を解析モデルとして加えた。ここでは、代表的な例としてメッシュ筋および RC 床版により拘束を受ける場合の解析手法について述べる。

3.2 断面力解析

解析には、硬化収縮により発生する断面力を各部材の断面力に分けて取り扱う分担断面力法を用いた¹⁰⁾。メッシュ筋は、樹脂コンクリートとのすべりのない軸力要素として増厚部に配置する。また、樹脂コンクリートの自由収縮ひずみは、それと等価な軸力要素として樹脂コンクリートの図心軸上に作用させた。ただし、樹脂コンクリートと RC 床版は平面保持の仮定が成立し、両者の間にずれが生じないものとした。

硬化収縮現象が発生し、自由収縮ひずみがメッシュ筋および RC 床版により拘束されるとき、断面内には不静定な分担断面力の変化が発生することになる。いま、図-2 に硬化収縮によって発生する時刻 $t_1=0$ から任意時刻 t に至るまでのひずみ分布を示す。これより任意時刻 t における力のつり合い条件式は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{a,t} + \Delta N_{c,t} + \Delta N_{r,t} &= 0 \\ \Delta M_{a,t} + \Delta M_{c,t} - \Delta N_{c,t} \cdot e &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

ここに、

$\Delta N_{a,t}, \Delta M_{a,t}$: 時刻 $t_1=0$ から任意時刻 t までに变化する樹脂コンクリートの分担軸力および曲げモーメント
 $\Delta N_{c,t}, \Delta M_{c,t}$: 時刻 $t_1=0$ から任意時刻 t までに变化する RC 床版の分担軸力および曲げモーメント
 $\Delta N_{r,t}$: 時刻 $t_1=0$ から任意時刻 t までに变化するメッシュ筋の分担軸力

また、樹脂コンクリートの図心 B における任意時刻 t における変位の適合条件式は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta_{a,t} &= \Delta\theta_{c,t} \\ \Delta\epsilon_{a,t} &= \Delta\epsilon_{c,t} = \Delta\epsilon_{r,t} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

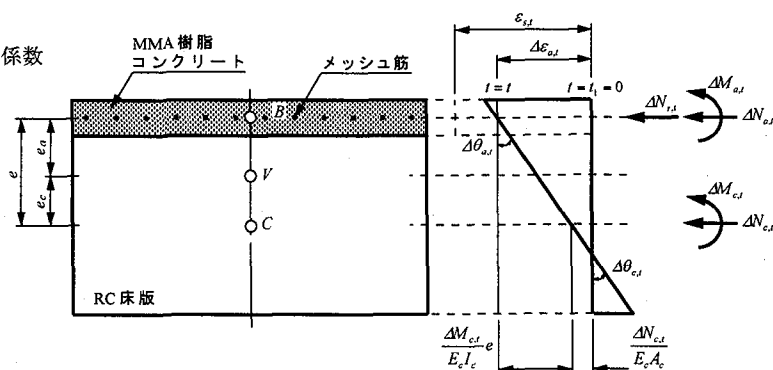


図-2 硬化収縮に伴う各部材のひずみ分布

ここに、

$\Delta\theta_{o,t}, \Delta\theta_{c,t}$: 時刻 $t_1 = 0$ から任意時刻 t までに変化する樹脂コンクリートおよびRC床版の曲率

$\Delta\epsilon_{o,t}, \Delta\epsilon_{c,t}, \Delta\epsilon_{r,t}$: 時刻 $t_1 = 0$ から任意時刻 t までに変化する樹脂コンクリート、RC床版およびメッシュ筋のひずみ

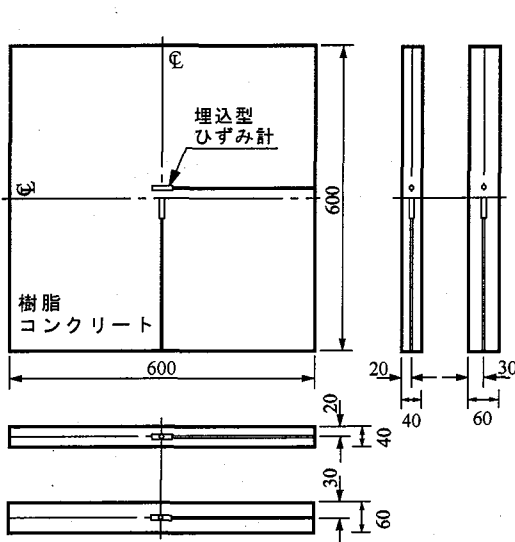
本工法における硬化収縮に伴う各分担断面力の変化量は、図-2 より、力のつり合い条件式(3.1)、変位の適合条件式(3.2)、および硬化収縮に伴う応力-ひずみ関係式(2.6)を用いて求めることができる。さらに、求めた分担断面力より各部材に発生する応力度も算定することができる。

また、メッシュ筋のみ、あるいはRC床版のみの拘束を受ける場合の解も同様に求めることができる。

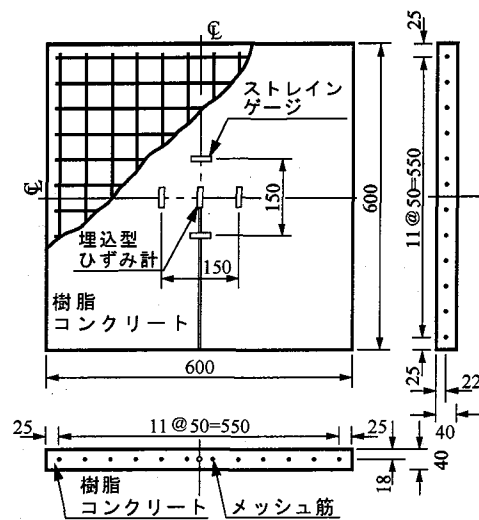
4. 硬化収縮実験

本実験は、種々の拘束条件下における樹脂コンクリートの収縮挙動を把握することにある。また、拘束を受ける樹脂コンクリートの硬化収縮現象を解明するためには、樹脂コンクリートの弾性係数の経時挙動も明らかにしなければならない。ここでは、上記の収縮実験および弾性係数の経時変化試験について述べる。

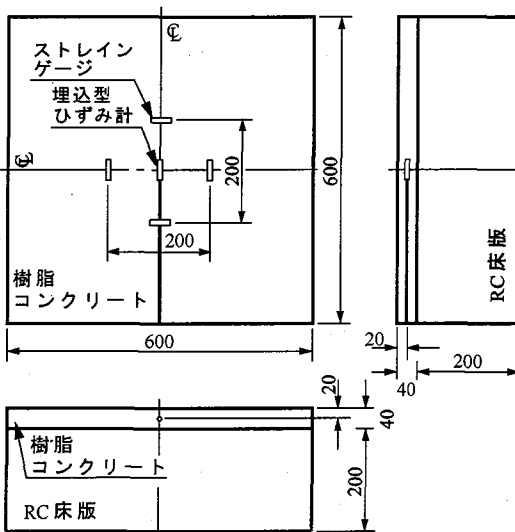
なお、樹脂コンクリートは骨材の配合、添加材料および温度等によって、その硬化速度や性質を異にする。それら全てについて徹底的に追求するためには、膨大な数の実験、時間そして経費が必要となる。そこで、本実験では、代表的な性質を示す一配合のものに的を絞ることとした。その配合を表-1 に示す。



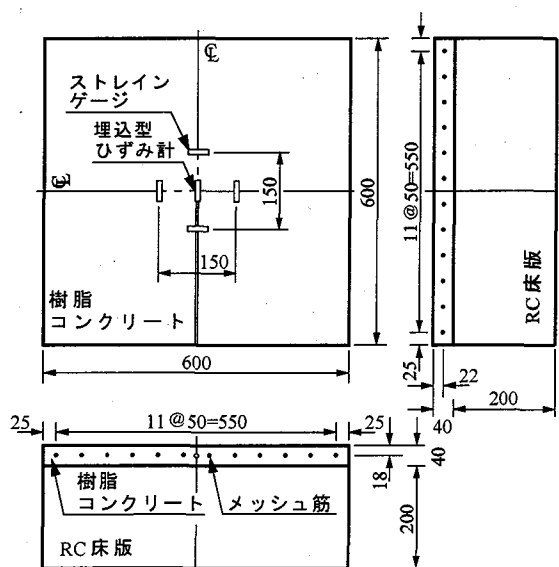
(a) Type A



(b) Type B(φ4@50mm)



(c) Type C



(d) Type D(φ4@50mm)

図-3 実験供試体の形状寸法の一例 (単位; mm)

表-1 MMA 樹脂コンクリートの配合

材料名	規格	配合率 (wt%)	備考
天然骨材	15~5mm	35.0	川砂利
"	5mm 以下	17.0	"
"	4 号	12.0	珪砂
"	7 号	8.0	"
人工骨材	0.2mm 以下	12.0	硬質粒状スラグ
微粉骨材	#300	6.0	炭酸カルシウム
バインダー	MMA 樹脂	10.0	常温重合型

また、表-2 に実験供試体の諸元、図-3 に実験供試体の形状寸法の一例を示す。

表-2 実験供試体の諸元

No.	Type	拘束条件	備考
No.1	Type A	拘束無し (自由収縮)	t=40mm
No.2			t=60mm
No.3	Type B	メッシュ筋のみの 拘束	t=40mm, $\phi 4@50\text{mm}$
No.4			t=60mm, $\phi 4@100\text{mm}$
No.5			t=60mm, $\phi 4@50\text{mm}$
No.6			t=60mm, $\phi 6@50\text{mm}$
No.7	Type C	床版のみの 拘束	t=40mm
No.8			t=60mm
No.9	Type D	メッシュ筋+床版 の拘束	t=40mm, $\phi 4@50\text{mm}$
No.10			t=60mm, $\phi 4@100\text{mm}$
No.11			t=60mm, $\phi 4@50\text{mm}$
No.12			t=60mm, $\phi 6@50\text{mm}$

収縮実験は拘束条件によって 4 つの Type に分類しており、Type A は拘束無し(自由収縮ひずみの測定)、Type B はメッシュ筋のみの拘束を受ける場合、Type C は床版のみの拘束を受ける場合、Type D はメッシュ筋および RC 床版の拘束を受ける場合とした。各 Type とも増厚量は 40mm と 60mm の 2 ケースとし、メッシュ筋の拘束を受ける Type B と Type D では $\phi 4$ および $\phi 6$ のメッシュ筋を 50mm ピッチで配置した。増厚量 t=60mm、 $\phi 4$ の場合については 100mm ピッチの供試体も製作した。

樹脂コンクリートの純粋な自由収縮ひずみを測定するためには、供試体に作用する拘束力の影響を小さくする必要がある。上面増厚補強のように増厚部が薄層の場合には、その影響は特に顕著であると思われ、測定に用いるひずみ計自身による拘束も無視することはできない。そこで、本実験では自由収縮ひずみの測定に、全長 34mm、 $\phi 12$ の細径の埋込型ひずみ計を使用し、ひずみ計による収縮ひずみへの影響が小さくなるように配慮した。また、樹脂コンクリート表面にストレインゲージを貼付し、表面ゲージによって埋込型ひずみ計の挙動確認を行った。その結果、表面ゲージは埋込型ひずみ計とほぼ同様な推移を示しており、自由収縮ひずみの測定は精度良く行えたものと思われる。他の供試体については、メッシュ筋、RC 床版上縁および樹脂コンクリート表面にストレインゲージを貼付し、各ひずみ量の測定を行った。測定は、全ての供試体で、打設後 3 時間までは 10 分ごと、10 時間までは 30 分ごと、140 時間までは 1 時間ごと、300 時間ま

では 2 時間ごと、それ以降は 3 時間ごとに実施した。なお、Type C および Type D にて使用した RC 床版の材令は約 8 年であることから、RC 床版の乾燥収縮による断面各部のひずみへの影響は皆無に等しいと考えられる。

また、野外における測定の場合、雨、日射等の不確定要素が測定値に影響するため、本実験は外気温、湿度ともに常に一定の環境下である地下室内で測定を行った。したがって、測定値は外気温および湿度の変化による影響をほとんど受けていないものと思われる。ただし、樹脂コンクリートは、打設約 1 時間後に樹脂コンクリート内部の温度が重合反応による発熱に伴って約 50℃まで上昇する。そのため、樹脂コンクリート内部の温度を熱電対により測定し、測定値に対して温度補正を行った。また、打設時刻とは硬化剤を混入した時刻とした。なお、図-3 に示す実験供試体は、Type A 以外、増厚量 t=40mm の場合であるが、t=60mm の場合も、t=40mm の場合と同様に、メッシュ筋および埋込型ひずみ計を増厚部の純断面図心位置に配置することとした。

弾性係数の経時変化試験は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いて、打設 2、4、8、16、24、36、48、72 時間後の縦ひずみ、および横ひずみを測定することにより行った。試験は各時間ごとに 3 体ずつ行ったが、測定値のばらつきは少なく、試験は精度良く行えたものと思われる。

5. 数値解析結果と実験結果の比較・検討

5.1 自由収縮ひずみ-材令関係

樹脂コンクリートの自由収縮ひずみ-材令関係(Type A)を図-4 および図-5 に示す。これより、自由収縮ひずみは式(2.1)を用いて回帰分析を行った結果、実験値に対して非常に精度良く近似できることがわかる。また、自由収縮ひずみの最終値は増厚量に関係なく 2860μ の一定値であったが、無次元係数 k_1 は増厚量によって差異がある。これは、打設直後の自由収縮ひずみの推移が若干ではあるが、増厚量の変化に伴って異なるためである。しかし、実験値および解析値は、増厚量に関係なく打設後約 24 時間で収束することが確認できる。なお、後述の表-3 に、図-4、図-5 および図-6 の近似関数に用いた諸数値、および本解析に用いたその他の数値を示す。

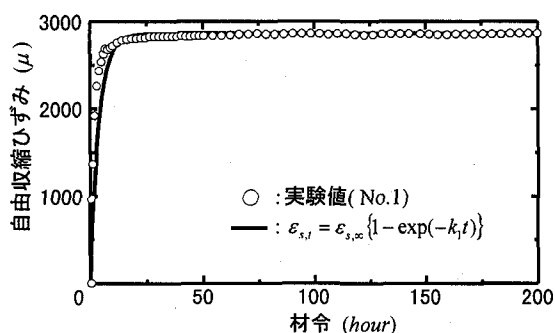


図-4 自由収縮ひずみ-材令関係(Type A, t=40mm)

5.2 弾性係数の経時変化

図-6 に樹脂コンクリートの弾性係数の経時変化を示す。樹脂コンクリートの弾性係数は、初期材令から急激に増加し、打設後約 24 時間ではほぼ一定値を呈することが確認できる。本解析では、弾性係数の挙動を追跡するための進行関数に、式(2.8)に示す分数関数を用いて回帰分析を行った。これより、分数関数による近似は、特に打設直後の実験値に対して、非常に合致した挙動を呈することがわかる。

表-3 数値解析条件

弾性係数 (kgf/cm ²)	樹脂コンクリート	E_a	2.10×10^4
	メッシュ筋	E_{sm}	1.90×10^6
	コンクリート	E_c	2.22×10^5
無次元係数	t=40mm	k_1	0.260316
	t=60mm	k_1	0.281603
	弾性係数	k_2	2.5606147
		k_3	1.0284449
自由収縮ひずみの最終値		$\varepsilon_{s,\infty}$	2860×10^{-6}

5.3 拘束下における断面各部のひずみ変化

種々の拘束条件下における断面各部のひずみ-材令関係を、クリープ係数 $\phi_s(\infty)$ をパラメータとして Type ごとに算出した。さらに、内部に発生する引張成分の収縮応力を求めた。

図-7 および図-8 に Type B におけるメッシュ筋のひずみ-材令関係を示す。Type B における実験値は、いずれのケースにおいても打設後約 10 時間で最大値を示し、約 200 時間後にはほぼ一定値となることを確認できる。これは、打設直後は樹脂コンクリート内部の温度が急激に上昇するため、実験値がその影響を顕著に受けることになるが、10 時間以降は約 20℃の一定値を示すためである。ここで、No.3 と No.5 は増厚量のみが異なるケースであるが、No.5 のメッシュ筋のひずみは No.3 のひずみより約 120 μ 大きな値を示しており、断面の増加によって内部に発生するひずみが増加することがわかる。解析では、自由収縮ひずみを等価軸力へ換算し、断面各部のひずみを算出している。すなわち、断面が増加すると当然ながら等価軸力も増加するという解析上の仮定が、No.5 のメッシュ筋のひずみが No.3 のひずみを上回ることから確認することができる。また、Type B における No.3、No.4、No.5、および No.6 のクリープ係数は、それぞれ 1.8、3.1、1.5、および 1.8 程度であると推定される。

表-4 に Type B における樹脂コンクリートに対するメッシュ筋の割合(以下、鉄筋比 p =メッシュ筋断面積/樹脂コンクリート断面積)の変化に伴うメッシュ筋のひずみ等への影響を示す。これより、鉄筋比すなわちメッシュ筋による拘束量が大きくなるにつれて、メッシュ筋のひずみが小さくなることを確認できる。しかし、収縮応力は、No.4 以外は鉄筋比の増加に関わらず、約 2.9kgf/cm²の一定値を示している。これは、クリープ係数が拘束量によって異なるためであるが、この程度の鉄筋比の変化であれば、内

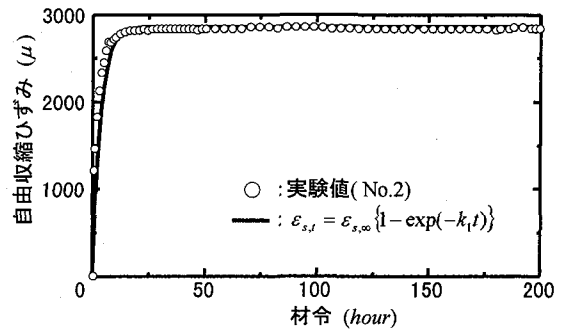


図-5 自由収縮ひずみ-材令関係(Type A, t=60mm)

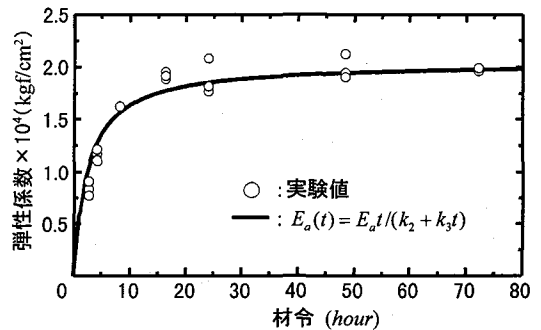


図-6 弾性係数の経時変化

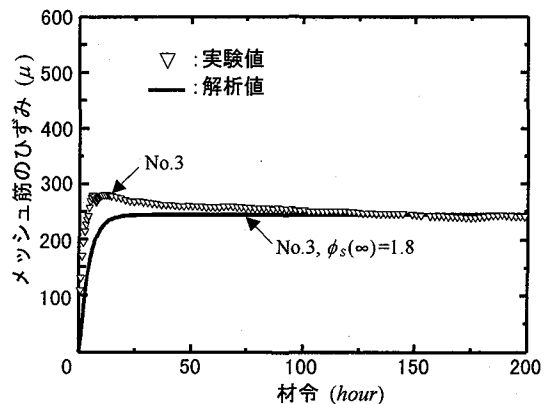


図-7 メッシュ筋のひずみ-材令関係(Type B, t=40mm)

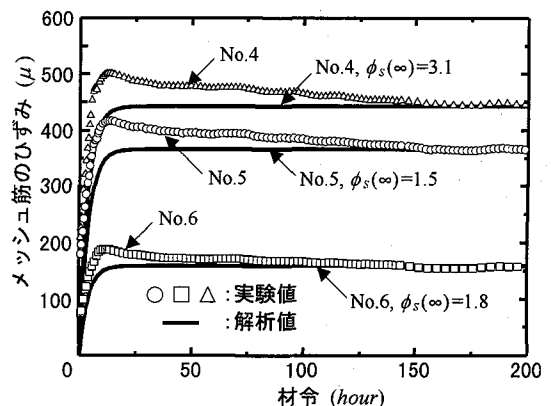


図-8 メッシュ筋のひずみ-材令関係(Type B, t=60mm)

部に発生する収縮応力に対する影響は微少であることがわかる。

図-9 に Type B における鉄筋比 p -クリープ係数 $\phi_s(\infty)$ 関係を示す。これより、Type B においては、鉄筋比が増加するにつれてクリープ係数は減少する傾向にあることがわかる。これは、拘束量が大きくなるほど、硬化収縮に伴って内部に発生するひずみが小さくなるためである。

表-4 鉄筋比 p とメッシュ筋のひずみの関係(Type B)

No.	鉄筋比 p (%)	メッシュ筋のひずみ(μ) (200 時間時)	クリープ係数 $\phi_s(\infty)$	収縮応力 (kgf/cm ²)
No.4	0.209	443 (446)	3.1	1.8
No.5	0.419	366 (367)	1.5	2.9
No.3	0.628	245 (242)	1.8	2.9
No.6	0.943	159 (157)	1.8	2.8

*メッシュ筋のひずみの()内は実験値

図-10 に Type C における RC 床版上縁のひずみ-材令関係を、図-11 および図-12 に Type D における RC 床版上縁のひずみ-材令関係を示す。上述の No.3 と No.5 のケースと同様に、No.7 と No.8、および No.9 と No.11 は、それぞれ増厚量のみが異なるケースである。この両ケースからも、断面の増加によって内部に発生するひずみが増加することが確認できる。また、RC 床版上縁のひずみより算出した Type C における No.7 および No.8 のクリープ係数は、それぞれ 0.1 および 0.3 程度、Type D における No.9、No.10、No.11、および No.12 のクリープ係数は、それぞれ 0.3、0.2、0.3、および 0.6 程度であると推定される。

表-5 に Type C および Type D における鉄筋比の変化に伴う RC 床版上縁のひずみ等への影響を示す。

表-5 鉄筋比 p と床版上縁のひずみの関係
(Type C, Type D)

No.	鉄筋比 p (%)	床版上縁のひずみ(μ) (200 時間時)	クリープ係数 $\phi_s(\infty)$	収縮応力 (kgf/cm ²)
No.7	-	35 (35)	0.1	7.5
No.8	-	48 (49)	0.3	6.0
No.10	0.209	50 (52)	0.2	6.5
No.11	0.419	45 (46)	0.3	6.0
No.9	0.628	29 (28)	0.3	6.4
No.12	0.943	35 (35)	0.6	5.0

*床版上縁のひずみの()内は実験値

これより、樹脂コンクリートを RC 床版に接着した場合においても、増厚部にメッシュ筋を配置し拘束量を増加させることによって、内部に発生するひずみは僅かではあるが減少することがわかる。しかし、収縮応力は、Type C では約 6.8kgf/cm²、Type D では約 6.0kgf/cm² であり、ほぼ同程度の値で推移していることから、メッシュ筋の有無、すなわち鉄筋比の増加にほとんど影響されないことがわかる。これは、Type C および Type D は樹脂コンクリートを RC 床版に接着しているためであり、メッシュ筋に

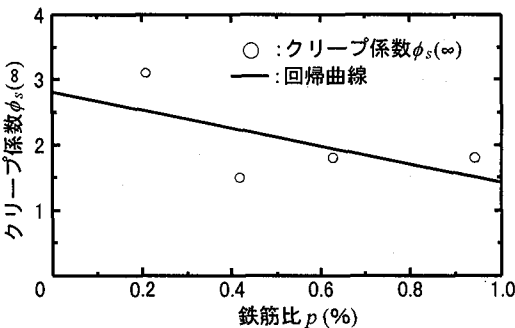


図-9 鉄筋比 p -クリープ係数 $\phi_s(\infty)$ 関係(Type B)

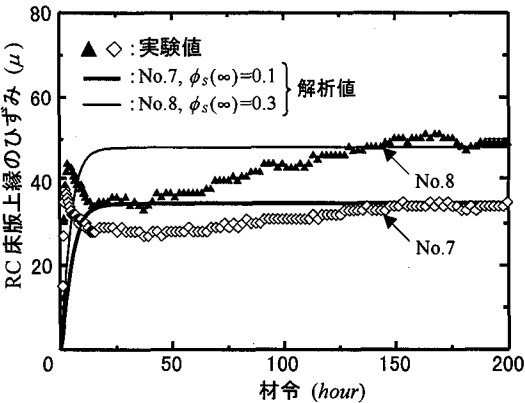


図-10 RC 床版上縁のひずみ-材令関係(Type C)

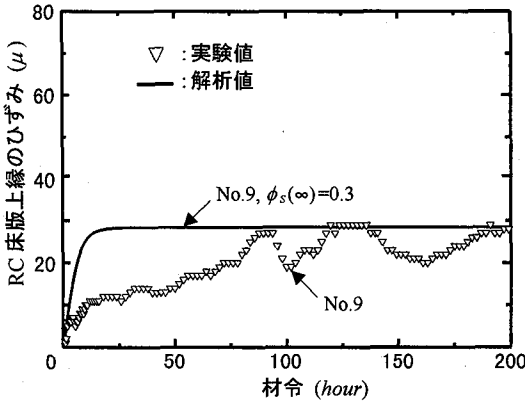


図-11 RC 床版上縁のひずみ-材令関係(Type D, $t=40\text{mm}$)

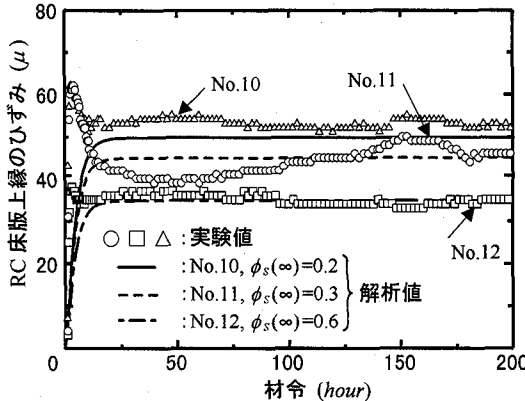


図-12 RC 床版上縁のひずみ-材令関係(Type D, $t=60\text{mm}$)

よる拘束量に比して RC 床版による拘束量が大きいため、メッシュ筋による拘束作用がほとんど影響しないことに起因する。さらに、拘束力は接着母体の剛度に依存することが、このことから推察される。

図-13 に Type D における RC 床版上縁のひずみから算出した鉄筋比 p -クリープ係数 $\phi_s(\infty)$ 関係を示す。これより、Type D における RC 床版上縁のひずみから算出したクリープ係数は、鉄筋比が増加するにつれて増加することがわかる。ただし、No.12 のクリープ係数は、他の供試体に比して大きい、これは、拘束量の増加に関わらず、内部に発生するひずみが若干ではあるが増加することに起因する。

図-14 および図-15 に Type D におけるメッシュ筋のひずみ-材令関係を示す。ここで、No.9 と No.11 は増厚量のみ異なるケースであり、これより、断面の増加によって内部に発生するひずみが増加することが再度確認できる。また、メッシュ筋のひずみより算出した Type D における No.9、No.10、No.11、および No.12 のクリープ係数は、それぞれ 0.2、0.1、0.1、および 0.2 程度であると推定される。

表-6 に Type D における鉄筋比の変化に伴うメッシュ筋のひずみ等への影響を、図-16 に Type D におけるメッシュ筋のひずみから算出した鉄筋比 p -クリープ係数 $\phi_s(\infty)$ 関係を示す。

表-6 鉄筋比 p とメッシュ筋のひずみの関係(Type D)

No.	鉄筋比 p (%)	メッシュ筋のひずみ (μ) (200 時間時)	クリープ係数 $\phi_s(\infty)$	収縮応力 (kgf/cm^2)
No.10	0.209	55 (60)	0.1	7.0
No.11	0.419	54 (52)	0.1	7.0
No.9	0.628	31 (32)	0.2	6.9
No.12	0.943	46 (47)	0.2	6.5

*メッシュ筋のひずみの()内は実験値

これより、鉄筋比の増加に伴うメッシュ筋のひずみの変化は、RC 床版上縁のひずみの変化ほど大きくなく、拘束量の増加に伴うひずみの減少は微少であると言える。さらに、メッシュ筋のひずみより算出したクリープ係数は、鉄筋比の増加に関わらずほとんど同じ値を呈している。したがって、Type D における RC 床版上縁のひずみから算出した場合と同様に、メッシュ筋による拘束量の増加に伴うクリープ係数への影響は、樹脂コンクリートを RC 床版に接着することによって小さくなることがわかる。収縮応力に関しても同様のことが言え、Type D におけるメッシュ筋のひずみより算出した収縮応力は、鉄筋比の変化に関わらず 6.9kgf/cm^2 程度のほぼ一定値を呈している。

Type D におけるクリープ係数および収縮応力は、RC 床版上縁のひずみから算出した場合、メッシュ筋のひずみから算出した場合とともに同程度の値を示しており、このことから、2つの着目点から求めたクリープ係数および

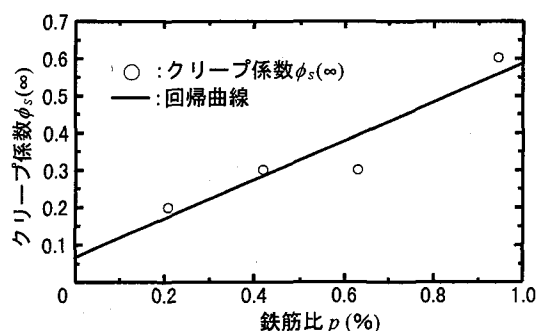


図-13 鉄筋比 p -クリープ係数 $\phi_s(\infty)$ 関係
(Type D, RC 床版上縁のひずみより算出)

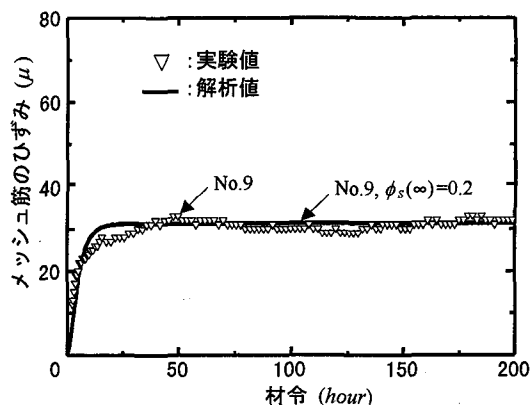


図-14 メッシュ筋のひずみ-材令関係(Type D, $t=40\text{mm}$)

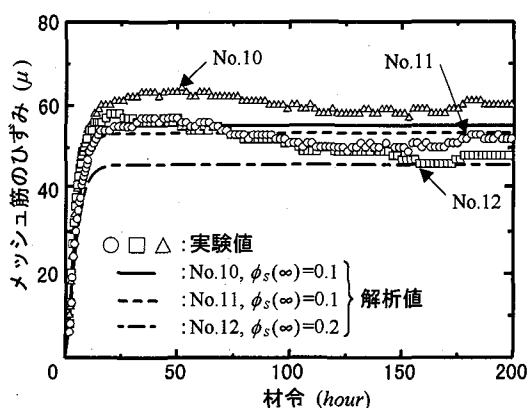


図-15 メッシュ筋のひずみ-材令関係(Type D, $t=60\text{mm}$)

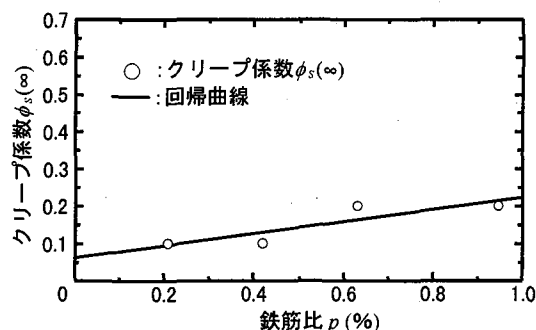


図-16 鉄筋比 p -クリープ係数 $\phi_s(\infty)$ 関係
(Type D, メッシュ筋のひずみより算出)

収縮応力が妥当な値であることが推察される。また、表-4、表-5、および表-6より、RC床版による拘束を受けることによって、収縮応力は 3.7kgf/cm^2 程度増加することが確認できる。上述したように、樹脂コンクリートをRC床版に接着することによって、メッシュ筋の有無の影響はほとんど無視することができるから、当然ながら、収縮応力の増加量はType C、Type Dともにほぼ同じ値となる。他方、クリープ係数についてもRC床版の有無によって大きな差異が生じることがわかる。Type Bにおけるクリープ係数が1.5~3.1で推移しているのに対し、Type CおよびType Dにおけるクリープ係数は0.1~0.6で推移している。これは、RC床版の剛度がメッシュ筋の剛度よりもはるかに大きいため、RC床版による拘束を受けることによって、内部に発生するひずみが著しく小さくなることに起因する。

6. 設計への拡張

今日まで、コンクリートの乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\phi_s(\infty)$ は、持続応力に対するクリープ係数、特にフロークリープ係数 ϕ_{fc} と同等であるものとして取り扱われてきた。また、現在では、合成桁における版のコンクリートの乾燥収縮に伴うクリープ係数として、 $\phi_s(\infty) = 2.0\phi_{fc}$ が道路橋示方書Ⅱ鋼橋編にて規定されている¹⁹⁾。しかし、この補正係数2.0には明確な根拠はなく、 $2.0\phi_{fc}$ は今日においても乾燥収縮に伴うクリープ係数として使用されているのが現状である。

他方、樹脂コンクリートによる上面増厚補強を実設計に供するためには、コンクリートと同様に設計に用いるクリープ係数の定量化が必要である。本解析より、上面増厚補強のタイプではクリープ係数が0.2程度であることがわかったが、設計においてはクリープ係数を小さく設定することによって安全側に評価することができる。したがって、設計に用いるクリープ係数を0.1と仮定し、断面を単位幅に換算して収縮応力を求めた結果、約 7.5kgf/cm^2 であった。この樹脂コンクリートの引張強度は常温で約 55kgf/cm^2 であり、約14%の初期引張応力が発生することになる。これより、実構造物に反映させた場合においても増厚部に発生する収縮応力は引張強度に比して小さく、硬化収縮による部材への影響は小さいことがわかる。

7. 結論

本研究では、樹脂コンクリートの材料特性を実験により確認するとともに、硬化収縮に伴う樹脂コンクリートの弾性係数の経時変化を考慮した応力-ひずみ関係式を誘導した。さらに、硬化収縮実験を行い、拘束を受ける樹脂コンクリートの硬化収縮に伴う収縮応力およびクリープ係数を、種々の拘束条件下において評価した。本研究から明らかになった事項は以下のとおりである。

- (1)樹脂コンクリートの自由収縮ひずみは、増厚量に関係なく指数関数を用いて精度よく近似できることがわかった。また、自由収縮ひずみは、打設後24時間程度で収束することが確認できた。
- (2)樹脂コンクリートの弾性係数は、打設後24時間程度でほぼ一定となり、その挙動は分数関数を用いることによって精度良く評価できることがわかった。
- (3)全てのTypeにおいて、増厚部に発生するひずみの変化は、増厚量の増加とともに大きくなることがわかった。これは解析値とも合致しており、本解析で用いた仮定の有効性を確認することができた。
- (4)メッシュ筋のみの拘束を受ける場合においては、増厚部に発生するひずみは鉄筋比の増加に伴って減少する傾向にあるが、拘束作用は接着母体の剛度が支配的であることから、RC床版の拘束を受けることによって、鉄筋比の増加に伴うひずみの減少量は僅かになることがわかった。すなわち、RC床版による拘束作用が、メッシュ筋による拘束作用を大きく上回ることが確認できた。
- (5)樹脂コンクリートの硬化収縮に伴うクリープ係数は、メッシュ筋のみの拘束を受ける場合においては約1.7、上面増厚補強のタイプにおいては約0.2であることがわかった。クリープ係数の減少は、RC床版の拘束を受けることにより、内部に発生するひずみが著しく小さくなることに起因する。
- (6)収縮応力は、メッシュ筋のみの拘束を受ける場合で約 2.9kgf/cm^2 、RC床版のみの拘束を受ける場合で約 6.8kgf/cm^2 、メッシュ筋およびRC床版の拘束を受ける場合で約 6.4kgf/cm^2 であることがわかった。RC床版の拘束を受けることによって、収縮応力が 3.7kgf/cm^2 程度増加すること、収縮応力に対するメッシュ筋の影響がほとんど無視できることが確認できた。
- (7)上面増厚補強の設計においては、クリープ係数を0.1と仮定することにより安全側に評価できることがわかった。この場合、増厚部に発生する収縮応力は約 7.5kgf/cm^2 であり、実構造物下においても硬化収縮による部材への影響は小さいことが確認できた。

最後に、本研究では樹脂コンクリートを上面増厚補強に用いた場合の収縮挙動を示したが、実設計へ反映させるためには硬化収縮に伴うクリープ係数のデータベースの構築が必要である。今後はこの種の追加試験を実施し、拘束条件の変化によるクリープ係数および収縮応力への更なる影響評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 栗田章光：アクリル樹脂コンクリートと補強筋による床版増厚補強工法の開発研究、大阪工大摂南大学・八幡工学実験場・構造実験センター報告書、1992.3
- 2) 堤下隆司、栗田章光、桜井忠雄、小西偉夫：アクリル樹脂

- コンクリートによる損傷 RC 床版の増厚補強設計について(続), 土木学会第 47 回年次学術講演会, 1992.9
- 3)堤下隆司, 栗田章光, 徳岡文明, 小西偉夫: アクリル樹脂コンクリートによる道路橋 RC 床版の増厚補強工法, コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム, 1992.10
- 4)堤下隆司, 栗田章光, 澤田友治, 徳岡文明: 道路橋 RC 床版の上面増厚補強に用いられるメタクリル樹脂コンクリートの疲労寿命の評価, 土木学会第 53 回年次学術講演会, 1998.10
- 5)トーマンコンストラクション株式会社: ドーログード AQ, 1995.7
- 6)H.Rüsch, D.Jungwirth (百島弘信訳): コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, 鹿島出版会, 1976
- 7)山崎竹博, 宮川邦彦, 渡辺 明: 補強されたレジンコンクリートの硬化収縮応力算定に関する研究, 土木学会論文集, 1982.2
- 8)瀬野靖久, 末吉良敏, 栗田章光: コンクリートの乾燥収縮に伴うクリープ係数の評価, 土木学会第 43 回年次学術講演会, 1988.10
- 9)中井 博, 栗田章光: 鋼・コンクリート合成構造のクリープ・乾燥収縮解析における種々の基礎式に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.36A, 1990.3
- 10)栗田章光: 回復クリープの影響を考慮した鋼・コンクリート合成桁橋の経時挙動に関する研究, 大阪市立大学学位論文, 1992.9
- 11)A.Ghali, R.Favre (川上 洵, 樫福 浄他訳): コンクリート構造物の応力と変形, 技報堂出版, 1995
- 12)堤下隆司, 栗田章光, 徳岡文明, 小西偉夫: 内部拘束を受けるメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮について, 土木学会平成 6 年度関西支部年次学術講演会, 1994.5
- 13)堤下隆司, 栗田章光, 徳岡文明, 小西偉夫: RC 床版に接着したメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.33, 1994.6
- 14)堤下隆司, 栗田章光, 徳岡文明: RC 床版に接着したメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮現象の解析と実験, 土木学会第 49 回年次学術講演会, 1994.9
- 15)橋場 盛, 森田信彦, 児島孝之: 複合コンクリート舗装版の収縮応力に関する検討, コンクリート工学論文集, 1993.1
- 16)CEB-FIP, Model Code for Concrete Structures, 1990(MC-90), 1993
- 17)栗田章光, 松本一朗, 法堂英記: PC 軌道桁におけるクリープ・乾燥収縮に関する研究, 大阪工大摂南大学・八幡工学実験場・構造実験センター報告書, 1994.3
- 18)澤田友治, 栗田章光, 堤下隆司, 徳岡文明: RC 床版の上面増厚補強に用いられるメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮に関する研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会, 1998.10
- 19)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 1996.12

(1998 年 9 月 18 日受付)