

論文 ポリマーモルタルにより補修されたコンクリート部材の応力と変形

徳重英信^{*1}・川上 洵^{*2}・外館英樹^{*3}・土居内一範^{*4}

要旨: ポリマーモルタルはコンクリート構造物の補修の際に広く用いられているが、ポリマーモルタルの硬化収縮、膨張に伴い、コンクリート部材に初期応力が発生し、変形を生じる。本研究では、コンクリート部材に不飽和ポリエステル樹脂を結合材としたポリマーモルタルを打ち継いだ場合に、ポリマーモルタルの硬化収縮によって、コンクリート部材との界面に生じるはく離、せん断力および部材の変形を、実験および解析によって検討を行ったものである。

キーワード: ポリマーモルタル, 補修, 2層構造, 固有応力, はく離, せん断力

1. はじめに

ポリマーモルタルはコンクリート構造物の補修材料として広く用いられている。しかし、セメントコンクリートと比較して一般に硬化収縮が大きく¹⁾²⁾³⁾⁴⁾、被補修体であるコンクリート部材に導入される初期応力を的確に評価することは重要であり、著者らは、実験および解析によって検討を行ってきている¹⁾²⁾³⁾。

本研究では、一般的に補修材料として使用されているポリマーモルタルを使用し、ポリマーモルタル単体の硬化収縮特性の測定を行った。さらに、ポリマーモルタルをコンクリート部材に打ち継ぐ場合を想定し、ポリマーモルタルとコンクリート部材の2層構造による実験および解析によって、コンクリート部材との界面に生じるはく離、せん断力およびコンクリート部材の変形の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用した樹脂は、コンクリート構造物の補修材料として一般的に使用されている、

不飽和ポリエステル樹脂(UP)であり、比重は1.05、粘度は330mPa・sである。骨材として転炉スラグとけい砂を、フィラーとして炭酸カルシウムを用いた。各々の比重は3.00、2.50および2.60であり、粒径は各々5-2.5、5-0.3および0.15mm以下である。これらを質量比で、樹脂:転炉スラグ:けい砂:炭酸カルシウム=1:4.74:2.58:1.88として配合を行い、ポリマーモルタルとした。打込み温度は20℃を標準とした。

また、ポリマーモルタルを打ち継いだコンクリート部材は、セメントモルタルを使用した。セメントモルタルの圧縮強度および曲げ強度はそれぞれ約45N/mm²および約7.5N/mm²を示し、弾性係数は約25kN/mm²である。

2.2 実験装置

(1) ポリマーモルタル単体の硬化時の挙動の測定

ポリマーモルタル単体の硬化収縮ひずみおよび応力について、非接触型のレーザー変位計を用いたひずみ測定装置¹⁾およびロードセルを用いた応力測定装置²⁾により測定を行った。供

*1 秋田大学講師 工学資源学部土木環境工学科 博士(工学)(正会員)

*2 秋田大学教授 工学資源学部土木環境工学科 工博(正会員)

*3 秋田大学大学院 鉱山学研究科土木環境工学専攻

*4 日本油脂(株)油化学研究所

試体の寸法は厚さ 25mm, 幅 25mm, 長さ 220mm である。

(2) ポリマーモルタルにより補修されたコンク

リート部材の変形挙動の測定

ポリマーモルタルの硬化収縮ひずみおよび応力により, 補修されたコンクリート部材に生じる応力と変形を測定した。Fig. 1 に示す供試体を用いて, 部材の支間中央部のたわみ, 支間中央部底面のひずみの測定を行った。また, ポリマーモルタルとコンクリート部材の界面におけるはく離に対する検討を行うため, 支点から 2cm 内側の界面付近でロゼットゲージによるひずみの測定を行った。供試体の寸法は全長 285mm, 幅 25mm, スパン 220mm である。ポリマーモルタルとコンクリート部材の総厚を 100mm とし, ポリマーモルタルの厚さを 25mm とした。

3. ポリマーモルタルの硬化特性を考慮した2層合成梁の応力解析手法

Fig. 1 に示す ϵ_{sh} は, ポリマーモルタルの硬化収縮によって生じる自由ひずみである。コンクリート合成部材の変形の解析は弾性理論^{5), 6)}に基づき, 部材中央部底面のひずみおよび部材中央部におけるたわみの検討を行った⁷⁾。

ポリマーモルタルとコンクリート部材との界面におけるせん断応力とピーリング応力の解析は, 2 つの物体を接着し, 温度変化を与えた場合の応力解析⁷⁾に基づいて行った。

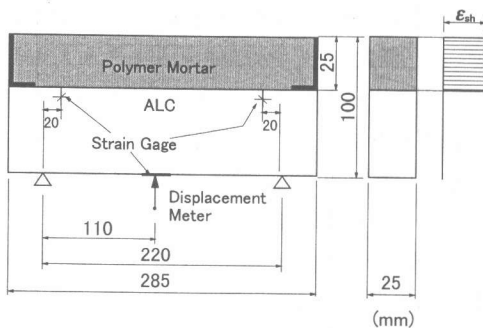


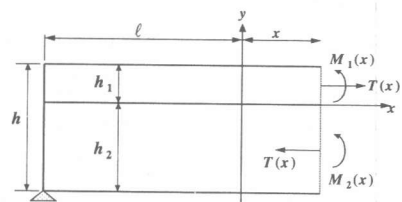
Fig. 1 Polymer mortar overlaid composite structure

以下に述べる解析手法において, 添字の 1, 2 はそれぞれ上層 (ポリマーモルタル部), 下層 (コンクリート梁部材) を表している。

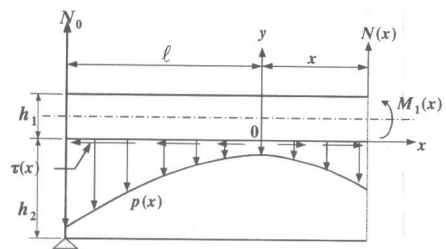
ポリマーモルタルとコンクリート部材が接着している 2 層構造において, ポリマーモルタルの自由ひずみが生じ, 平面保持が成り立つと仮定すると, Fig. 2(a) に示すように, 界面のせん断力, 軸力および曲げによる軸方向の変位と自由ひずみによる変位が釣り合うので,

$$\kappa \tau(x) - \lambda' \int_0^x T(x) d\xi + \frac{h^x}{2} \int_0^x \frac{d\xi}{\rho(\xi)} = \epsilon_{sh} x \quad (1)$$

ここで, $\kappa = \kappa_1 + \kappa_2$, $\lambda' = \lambda_1 + \lambda_2$, $h = h_1 + h_2$, $\rho(x)$ は曲率半径である。上層と下層が接着されて構成される部材に対して, 弾性係数 E , ポアソン比 ν , 厚さ h から軸コンプライアンス λ_1 , λ_2 が次式により求められる。なお, ポリマーモルタル部の弾性係数 E_1 は 4.2 節に述べる手法により求めている。



(a)



(b)

Fig. 2 Model of shearing stresses and peeling stresses occurring at interface between polymer and concrete

$$\lambda_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1 h_1} \quad (3)$$

$$\lambda_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{E_2 h_2} \quad (4)$$

また、界面コンプライアンス κ_1, κ_2 は、

$$\kappa_1 = \frac{2(1 + \nu_1)}{3 E_1} h_1 \quad (5)$$

$$\kappa_2 = \frac{2(1 + \nu_2)}{3 E_2} h_2 \quad (6)$$

次に、Fig2(a)に示すような2層構造において任意の断面でのつり合い方程式として、

$$M_1(x) + M_2(x) = \frac{h}{2} T(x) \quad (7)$$

ここで、任意断面に作用する曲げモーメント $M_1(x), M_2(x)$ は、次式で求まる。

$$M_1(x) = \frac{D_1}{\rho(x)} \quad (8)$$

$$M_2(x) = \frac{D_2}{\rho(x)} \quad (9)$$

D_1, D_2 は曲げ剛性であり、次式により表される。

$$D_1 = \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \nu_1^2)} \quad (10)$$

$$D_2 = \frac{E_2 h_2^3}{12(1 - \nu_2^2)} \quad (11)$$

式(8)~(11)を式(7)に代入することにより、2層構造の反りが次式により示される。

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{h}{2(D_1 + D_2)} T(x) \quad (12)$$

式(12)を式(1)に代入することにより、せん断応力 $\tau(x)$ の積分方程式が得られ、これを解くことにより、せん断応力 $\tau(x)$ が以下のように求められる。

$$\tau(x) = \frac{\varepsilon_{sh}}{\kappa \cdot k} \frac{\sinh(kx)}{\cosh(k\ell)} \quad (13)$$

ここで、 $k^2 = \lambda / \kappa$ 、 $\lambda = \lambda' + h^2 / 4D$ である。

Fig2(b)に示すように、界面におけるピーリング応力 $p(x)$ は、2層構造の任意の断面におけるつり合い方程式を考えると、

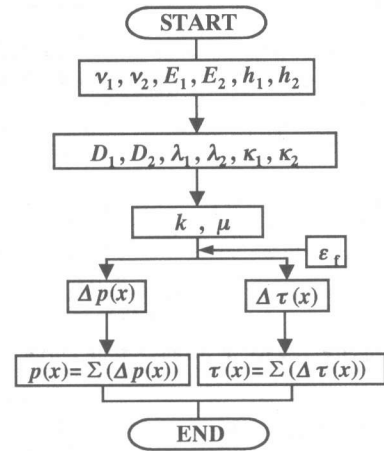


Fig.3 Flow chart of structural analysis

$$\begin{aligned} (x + \ell) N_0 - \int_{-x}^{\ell} p(\xi') d\xi' & \\ & = M_1(x) - \frac{h_1}{2} T(x) = -M_2(x) + \frac{h_2}{2} T(x) \\ & = \mu T(x) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 $\mu = \frac{h_2 D_1 - h_1 D_2}{2D}$ 、 $D = D_1 + D_2$ である。

式(14)を微分することにより、上層と下層における境界面に生じるピーリング応力 $p(x)$ が求められる。

$$p(x) = \frac{\mu}{\kappa} \varepsilon_{sh} \frac{\cosh(kx)}{\cosh(k\ell)} \quad (15)$$

以上の解析フローを Fig.3 に示す。

4. 実験および解析結果と考察

4.1 ポリマーモルタル単体の硬化特性

ひずみ測定装置¹⁾および応力測定装置²⁾によって測定したポリマーモルタル単体の硬化収縮ひずみ、応力および発熱温度を Fig.4 に示す。打込みから約 10 分後に収縮ひずみが発生し、約 60 分で 4000×10^{-6} 一定値となった。応力は、収縮による圧縮応力が緩やかに生じ、約 150 分後には一定の値となり、約 3N/mm^2 を示した。また、最高発熱温度は打込みから約 50 分後に約 6°C となった。

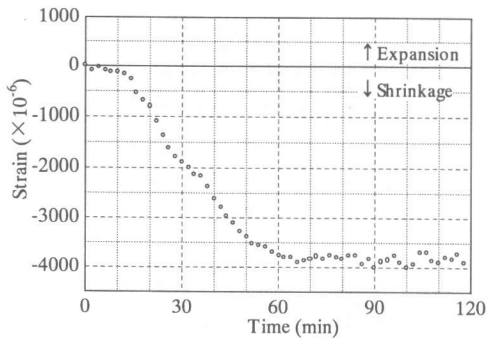


Fig.4(a) Setting Strain - time curve

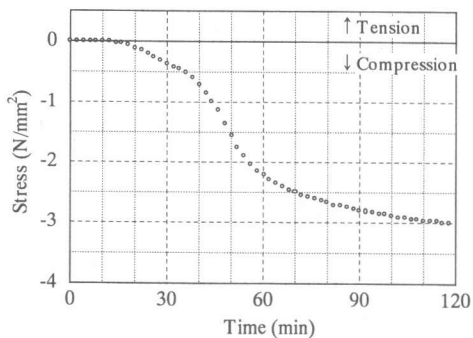


Fig.4(b) Setting stress - time curve

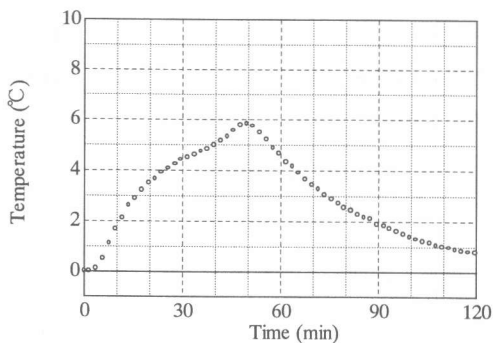


Fig.4(c) Temperature - time curve

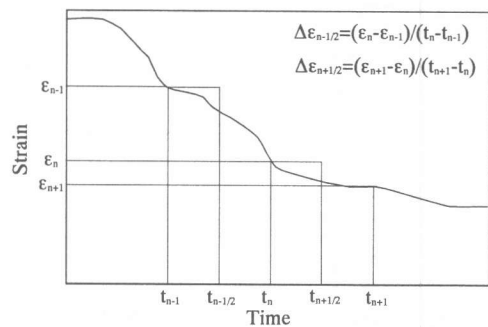
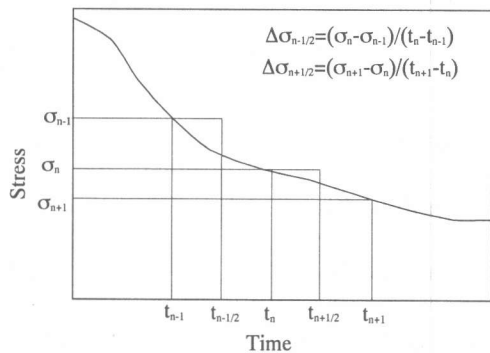


Fig.5 Increment of strain and stress



ル単体の微小時間内におけるひずみの増分 $\Delta \varepsilon_{n-1/2}$, $\Delta \varepsilon_{n+1/2}$, および応力の増分 $\Delta \sigma_{n-1/2}$, $\Delta \sigma_{n+1/2}$, を用いた. ポリマーモルタルの弾性係数の増分は, 微小時間内の応力の増分をひずみの増分で除した微小時間内の E_1 の増分を使用した.²⁾ なお, 4.1 で得られた測定結果において, 応力が生じるまでのひずみを無視し, 応力が生じ始めた時点でのひずみを 0 として入力値とした.

(1) 支間中央部底面におけるひずみとたわみの実験, 解析結果と考察

打込み直後からの支間中央部のたわみ, および支間中央部底面のひずみについての実験結果と解析結果を Fig.6 に示す.

打込みから約 10 分後より, 時間の経過に伴いひずみの測定値は引張側で増加し, 打込み後 45 分経過した時点で約 75×10^{-6} を示した後に変化がみられなくなった. また, たわみにおいても打込み後約 45 分経過した時点まで増加し

4.2 ポリマーモルタルをコンクリート部材に打継いだときの合成梁の挙動

ポリエステルポリマーモルタルをコンクリート部材に打ち継いだ場合の応力と変形の実験結果と解析結果について述べる.

なお, 解析に用いた応力およびひずみの増分は, 4.1 で得られたデータを入力値とし, Fig.5 に示すように細分化して求め, ポリマーモルタ

たが、それ以降ほとんど変化がみられなかった。

打込みから約 45 分までは、支間中央部底面のひずみ、たわみともに実験値と計算値は良い一致を示している。しかし、この後実験値は解析値を下まわり、また、45 分から 50 分にかけて実験値は急激に変化した。

(2)2層部材の界面における応力に関する実験および解析結果と考察

ポリマーモルタルとコンクリート部材の界面付近に発生するせん断応力およびピーリング応力の測定結果と解析結果を Fig.7 に示す。なお、それぞれの応力の正負は、Fig.2(b)の定義に従っている。また、それぞれの実験値は Fig.1 に示す支点から 2cm 内側に貼付したひずみゲージから算出したものである。

界面付近のせん断応力の測定値は時間の経過に伴って増加するが、打込み後約 45 分で約 0.5N/mm² を示した後に値が急激に変化した。解析値は約 45 分までは実験値とほぼ一致している。ピーリング応力も同様に、打込み後約 45 分経過した時点まで時間の経過に伴い増加し、その後急激に値が減少した。解析値は実験値を下まわっており、この挙動については今後検討が必要である。

また、実験終了後に供試体を目視で観察したところ、ポリマーモルタルとコンクリート部材の界面に沿って、両端部から支間中央方向に向かってひび割れを確認した。

Fig.6 および Fig.7 において、実験値と解析値が打込みから約 45 分以降一致しなくなった要因は、この時点で平面保持が成り立たなくなったことが考えられ、実験結果からも、ポリマーモルタルとコンクリート部材の界面で、ポリマーモルタルの収縮によってはく離が生じたことが影響したものと考えられる。

以上のように、コンクリート部材をポリマーモルタルを用いて補修を行った場合、ポリマーモルタルの硬化収縮ひずみおよび応力がコンクリート部材に導入され、コンクリート部材に変形を生じることが実験および解析によって明ら

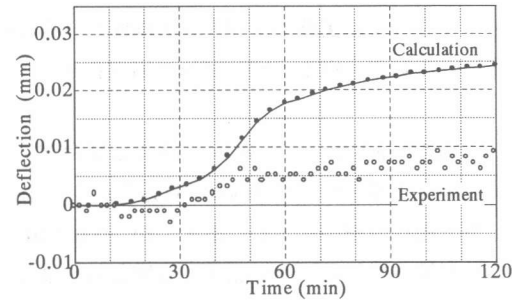
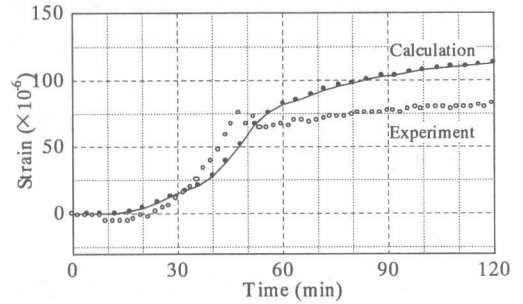


Fig.6 Midspan deflection and underside strain development

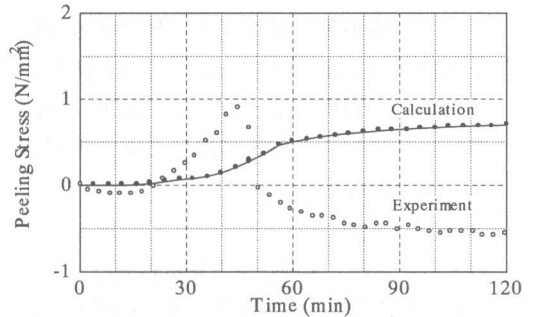
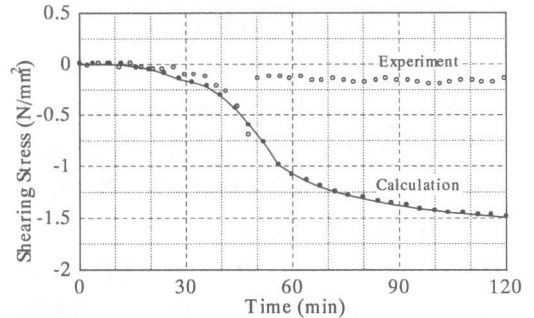


Fig.7 Shearing stresses and peeling stresses development

かになった。また、コンクリート部材の変形が部材の支間中央部底面にひび割れを生じない程度であっても、ポリマーモルタルとコンクリート部材の界面ではく離を生じることが、実験および解析によって明らかとなった。

5. まとめ

ポリマーモルタルを用いてコンクリート部材を補修する場合に、ポリマーモルタルの硬化特性によってコンクリート部材に導入される初期応力に関して、実験および解析の両面から検討を行った結果、以下の結論が導き出された。

- (1)不飽和ポリエステル樹脂（UP）を結合材に用いたポリマーモルタルは、打込みから約10分で硬化収縮が発生し、最大で約 4000×10^{-6} の収縮ひずみと約 3N/mm^2 の収縮応力を呈した。
- (2)セメントモルタルをコンクリート部材として用い、ポリマーモルタルをコンクリート部材に打ち継いだ実験を行った。その結果、ポリマーモルタルの硬化収縮によってコンクリート部材に変形が生じ、また、コンクリート部材とポリマーモルタルの界面ではく離が生じた。ポリマーモルタルとコンクリート部材からなる2層構造の応力と変形に関する解析結果と実験結果は、はく離が生じるまでほぼ一致した。
- (3)ポリマーモルタルとコンクリート部材の界面ではく離を検討するために、2層構造としての応力解析に加えて、界面付近でのせん断応力およびピーリング応力に関して実験および解析を行った。その結果、せん断応力の実験値と解析値ははく離が生じるまでは一致した。

以上のように、実験結果と解析結果は、ポリマーモルタルとセメントモルタルとの界面におけるはく離が生じるまでの間において良い一致を示した。すなわち、時間とともに変化するポ

リマーモルタルの硬化収縮ひずみおよび応力を入力値として応力解析を行うことにより、コンクリート部材に導入される応力と変形の算定が可能である。

[参考文献]

- 1)徳重英信, 小俣富士夫, 川上 洵, 加賀谷 誠: ポリマーモルタル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.19, No.1, pp.583-588, 1997
- 2)小俣富士夫, 川上 洵, 徳重英信, 土居内 一範: 膨張性ポリマーモルタルにより補修されたコンクリート部材の応力と変形, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.829-834, 1998
- 3)Omata, F., Kawakami, M., Tokushige, H., and Moriyoshi, A.: Setting Shrinkage and Setting Stress of Polymer Mortar, ACI SP-171, pp.607-624, 1997
- 4)Koyanagi, W., Uchida, Y., Nguyen, L. V. : Internal Stress due to Setting Shrinkage in Polyester Resin Concrete, Proc. of the 8th International Congress on Polymers in Concrete, pp.435-440, 1995
- 5)Peschke, H. J.: Stress and Strain Analysis between Cementitious Concrete and Polymer Concrete, Proc. of the 3rd International Congress on Polymers in Concrete, pp.477-479, 1981
- 6)Ghali, A. and Favre, R.著, 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, pp.21-65, 1994
- 7)Suhir, E.: Stress In Adhesively Bonded Bi-material Assemblies Used in Electronic Packaging, Proc. of the Materials Research Society Symposium, Vol.72, pp.133-138, 1986