

論文 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

小俣富士夫^{*1}・川上 洵^{*2}・徳重英信^{*3}・土居内一範^{*4}

要旨：ポリマーモルタルを用いてコンクリート構造物を補修する場合、ポリマーモルタルの硬化特性によって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、および変形挙動の定量的評価が重要である。本研究では、最初に膨張性ポリマーモルタル単体の硬化特性である、ひずみ、応力および温度の経時変化を明らかにした。このポリマーモルタルを用いて既存コンクリート部材に打ち継いだ場合の梁としての力学的挙動を、実験および解析により明らかにした。

キーワード：ポリマーモルタル、2層構造、固有応力、補修

1. はじめに

ポリマーモルタルは高い接着強度、引張強度、曲げ強度を有しており、コンクリート構造物の補修に打ち継いで使用されることが多い。また、ポリマーモルタルは、ポリマーの種類、配合、および使用温度などに応じて固有の硬化収縮特性を有している¹⁾。ポリマーモルタルは一般に硬化時に収縮を伴い、コンクリート部材に初期応力が導入される。この初期応力の検討は重要であるにもかかわらず、十分に研究がなされていないのが現状であった²⁾。

本研究は、最初に、実際の補修に使用されている膨張性ポリマーモルタルを用いて、その硬化に伴って生じるひずみ、応力および温度を測定した。次に、この測定されたデータを入力値とし、ポリマーモルタルによって補修されたコンクリート部材を想定し、ポリマーモルタルとコンクリート部材からなる2層構造として、コンクリート部材に導入される初期応力および変形に関して、実験および解析の両面から検討した。また、供試体の厚さを変化させて、その影響に関しても検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用した樹脂は、グリセロールメタクリレート/スチレン(GM/St)であり、比重は0.99、粘度は35mPa・sである。骨材として転炉スラグと珪砂を、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5-2.5、5-0.3、0.15mm以下である。これらを重量比で、樹脂：転炉スラグ：珪砂：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の変形挙動を明確にするために既存コンクリートとしてALCを用いた。その圧縮強度は2.7N/mm²、曲げ強度は0.57N/mm²、弾性係数は3250N/mm²である。

2.2 実験装置

2.2.1 ポリマーモルタル単体の硬化時の挙動の測定

ポリマーモルタルを用いてコンクリート部材を補修する場合、補修厚さが応力・変形に大き

*1 ショーボンド建設(株)北陸支店 技術課長 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 秋田大学助手 工学資源学部土木環境工学科 博士(工学)(正会員)

*4 日本油脂(株)油化学研究所

く影響すると思われる。そこで、ポリマーモルタル単体の供試体サイズを変えて硬化挙動を実測した。本実験では、ポリマーモルタル単体について、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⁾を使用し、硬化時に発生するひずみ、応力および発熱温度を測定した。供試体は幅および長さを25mm, 220mmの一定とし、厚さは25, 37.5, 50mmの3種類とした。

2.2.2 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挙動の測定

ポリマーモルタルの硬化時に発生するひずみにより、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。実験はFig.1に示す供試体を用いて、部材の支間中央部のたわみ、ならびに支間中央部底面のひずみの測定を行った。供試体のサイズは全長285mm, 幅38mm, スパン220mmであり一定とした。ポリマーモルタルとALC部材の総厚は100mmとし、ポリマーモルタルの厚さを、25, 37.5および50mmの3種類とした。

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

既存コンクリート部材にポリマーモルタルを打ち継いだ合成部材の断面をFig.2に示す。なお、解析は弾性理論⁴⁾に基づくが、応力-ひずみ関係が経時変化するので、Step by Step法を採用した。この図において、 ϵ_f はポリマーモルタルの硬化時における収縮または膨張を示す自由ひずみである。

このひずみを拘束するとき、拘束応力 σ_{res} が生じる。

$$\sigma_{res} = -E_p \epsilon_f \quad (1)$$

ここで、 E_p はポリマーモルタルの弾性係数であり、ポリマーモルタル部において、応力の合力は基準点Oでの軸力 ΔN と曲げモーメント ΔM により表すことができる。

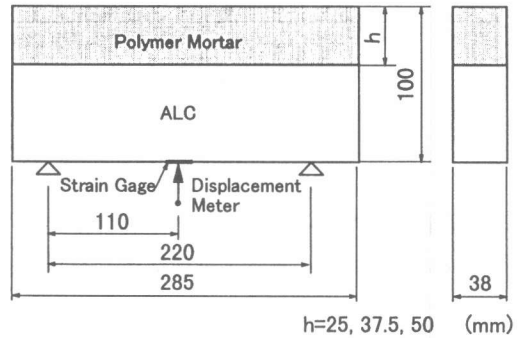


Fig.1 Polymer mortar overlaid composite structure

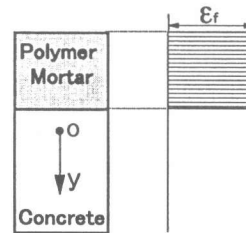


Fig.2 Cross-section of a composed of polymer mortar and concrete

$$\Delta N = \int \sigma_{res} dA \quad (2)$$

$$\Delta M = \int \sigma_{res} y dA \quad (3)$$

式(1)を式(2)および(3)に代入して

$$\Delta N = -E_p \int \epsilon_f dA \quad (4)$$

$$\Delta M = -E_p \int \epsilon_f y dA \quad (5)$$

拘束力を基準点Oにおいて、軸力 $-\Delta N$ と曲げモーメント $-\Delta M$ を作用させることにより解除すると、軸ひずみ $\Delta \epsilon_0$ と曲率 $\Delta \psi$ は次式によって与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_0 \\ \Delta \psi \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_c(AI - B^2)} \begin{bmatrix} I & -B \\ -B & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\Delta N \\ -\Delta M \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 A , B , I はそれぞれ、基準点Oを含むコンクリート部材の断面諸量を基準に換算した、断面全体の断面積、断面一次モーメント、

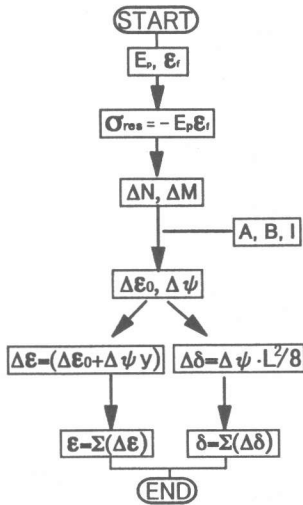


Fig.3 Flow chart of structural analysis

断面二次モーメントであり、 E_c はコンクリートの弾性係数である。合成断面においては、 A, B, I はそれぞれ以下のように表される。

$$A = A_c + (E_p/E_c)A_p \quad (7)$$

$$B = B_c + (E_p/E_c)B_p \quad (8)$$

$$I = I_c + (E_p/E_c)I_p \quad (9)$$

各層に対応する応力は次式によって得られる。

ポリマーモルタル：

$$\Delta\sigma = E_p \{ \Delta\varepsilon_0 + (\Delta\psi)y \} \quad (10)$$

コンクリート：

$$\Delta\sigma = E_c \{ \Delta\varepsilon_0 + (\Delta\psi)y \} \quad (11)$$

実際に生じる応力は σ_{res} と $\Delta\sigma$ の合計であり、

ポリマーモルタル：

$$\sigma = E_p \{ -\varepsilon_f + \Delta\varepsilon_0 + (\Delta\psi)y \} \quad (12)$$

コンクリート：

$$\sigma = E_c \{ \Delta\varepsilon_0 + (\Delta\psi)y \} \quad (13)$$

また、合成部材の支間中央のたわみ δ は次式によって計算される。

$$\delta = \Delta\psi \cdot L^2/8 \quad (14)$$

以上の解析フローをFig. 3に示す。

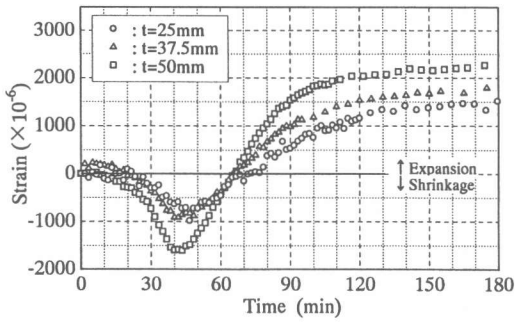
4. 実験および解析結果と考察

4.1 ポリマーモルタル単体の硬化特性

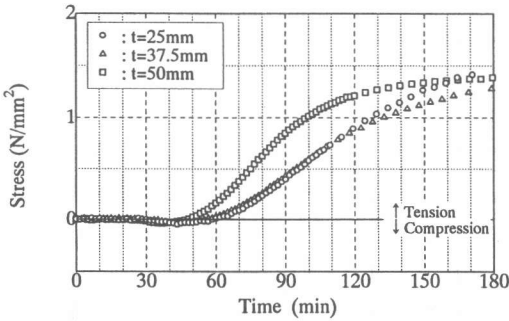
ひずみ測定装置¹⁾および応力測定装置²⁾によって測定したGM/St単体の硬化に伴って生じるひずみ、応力、および供試体中心部の温度をFig.4に示す。打込み直後からの時間とひずみ（両端の変位量/供試体の全長（220mm））をみると、3種類の厚さともに打込み後15分程度まではほとんどひずみが生じていないが、その後には収縮ひずみが生じ、約45分後に収縮の最大値を示した後に膨張に転じた。この膨張は120分後まではほぼ直線的に増加した後に漸増し、180分後にはほぼ一定の数値を示した。また、厚さが大きくなるにつれて大きな膨張ひずみが発生している。このように、GM/Stは、不飽和ポリエステル樹脂モルタルなどに代表される一般的なポリマーモルタルのような収縮挙動は示さず、硬化に伴って膨張を示すことが大きな特徴であり、この膨張挙動を有効に活用することが考えられる。次に、時間と応力（発生荷重/供試体の断面積）の関係においては、3種類の厚さともに打込み後45分後まではほとんど応力は生じていないが、その後には膨張による引張応力が生じ、150分後まで緩やかに推移する傾向を示し、180分後にほぼ一定の値となっている。さらに、180分後の応力は、厚さが変化してもほとんど一定の数値であった。また、時間と発熱温度の関係においては、厚さが大きくなるほど高い発熱温度を示したが、最高発熱温度に達する時間はほぼ同一であった。

4.2 ポリマーモルタルをALCに打継いだときの合成梁の挙動

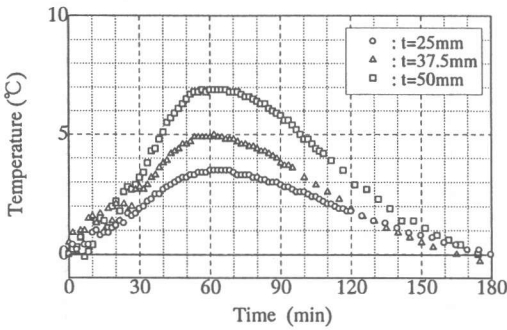
4.1で得られたデータを入力値とした解析に際して、Fig.5に示すように時間を細分化して求めた、ポリマーモルタル単体の微小時間内



(a)



(b)



(c)

Fig.4 Strains -, stresses - and temperatures - time curves

のひずみの増分 $\Delta \epsilon_{n-1/2}$, $\Delta \epsilon_{n+1/2}$, および応力 $\Delta \sigma_{n-1/2}$, $\Delta \sigma_{n+1/2}$, またこれらの値から算出される微小時間内の E_p の増分を使用した。ここで, 4.1 で得られた結果において, 応力が生じるまでのひずみは無視し, 応力が生じ始めた時点でのひずみを0とした。なお, 本解析では硬化に要する時間が短時間であるので, クリープによる応力緩和は考慮していない。

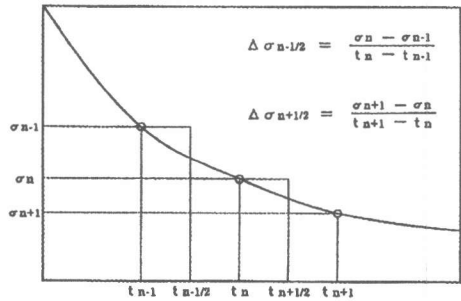
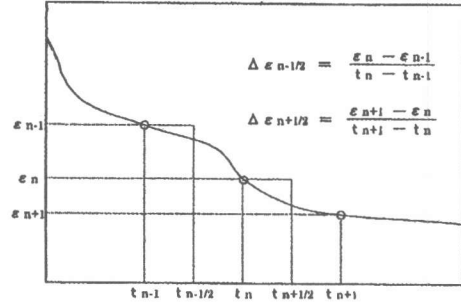


Fig.5 Increments of strain and stress

GM/StをALCに打ち継いだ場合の打込み直後からの経過時間と支間中央のたわみ, およびALC下面のひずみの関係のそれぞれの実験結果と解析結果をFig.6~Fig.8に示す。

Fig.6に示すように, 厚さ25mmの場合, 50分後付近まで負のたわみは生じておらず, 50分後以降から時間の増加とともにたわみが緩やかに増加している。ここで, GM/Stは硬化に伴って膨張するポリマーモルタルであり, 負のたわみとして表現している。また, 120分後以降, たわみはほとんど変化していない。これは, GM/Stの膨張によってALC上面にひび割れが生じたためと考えられる。実験が終了した後に目視観察を行った結果, ALC上面にひび割れが生じていることが確認された。また, 実験値と解析値は, ひび割れが生じたと考えられる120分後まで良い一致をみている。次に, 支間中央のALC下面のひずみにおいて, たわみと同様に50分後以降, 負のひずみが生じており, 90分後まで時間とともに増加している。120分後以降, ひずみはほぼ平衡状態となっている。これらの

結果からコンクリート部材の上面にGM/Stを打ち継ぐと、GM/Stの膨張によってコンクリート部材は上に凸の形になり、すなわちケミカルプレストレスが導入されたのと同様の効果が期待され、上載荷重に対して有利になると考えられる。

Fig.7の厚さ37.5mmの場合、50分後以降から時間の増加とともにたわみが増加している。80分後以降、時間の増加に対してたわみはほとんど変化しなくなり、100分後以降ほぼ一定の値を示している。続いて、ALC下面のひずみは、たわみよりも早く50分後以降発生しており、65分後まで時間とともに増加している。65分後以降、ひずみはほぼ一定の状態となっている。これは、65分後においてALC上面にひび割れが生じたためと考えられる。ここで、時間とたわみの関係から推察されるひび割れ発生時刻と、時間とひずみの関係から推察されるそれとを比較すると、時間とひずみの関係から推察されるひび割れ発生時刻の方が早い。すなわち、時間とひずみの関係は時間とたわみの関係と比較して、ひび割れの発生を敏感に感知すると考えられる。また、たわみおよびひずみともに、実験値と計算値とは比較的良い一致をみている。

Fig.8の厚さ50mmの場合、45分後以降から時間の増加とともにたわみが急激に増加しており、80分後以降ほぼ平衡状態となっている。一方、ALC下面のひずみは、45分後以降発生しており、50分後まで時間とともに増加し、それ以降ほぼ平衡状態となっている。また、実験値と計算値は大略一致していると考えられる。

ここで、GM/Stの厚さと打込み直後から180分経過した時点までの間に生じた最大たわみとの関係をFig.9に示す。厚さが増加すると最大たわみは大きくなり、その関係はほぼ直線で表現できる。

4. 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

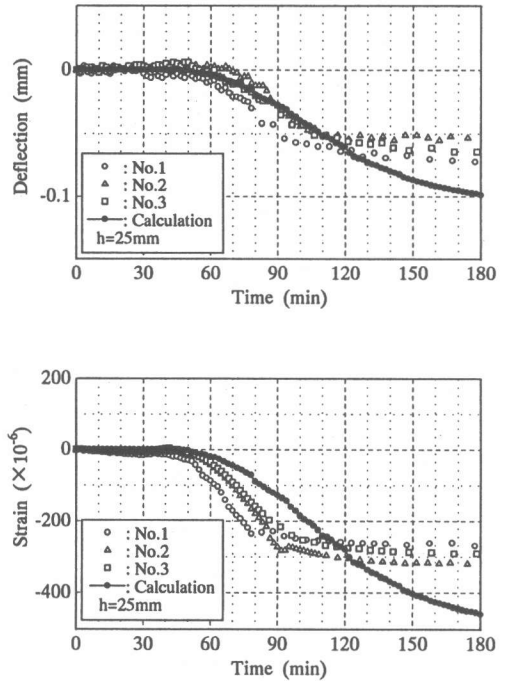


Fig.6 Midspan deflection and underside strain development (h=25mm)

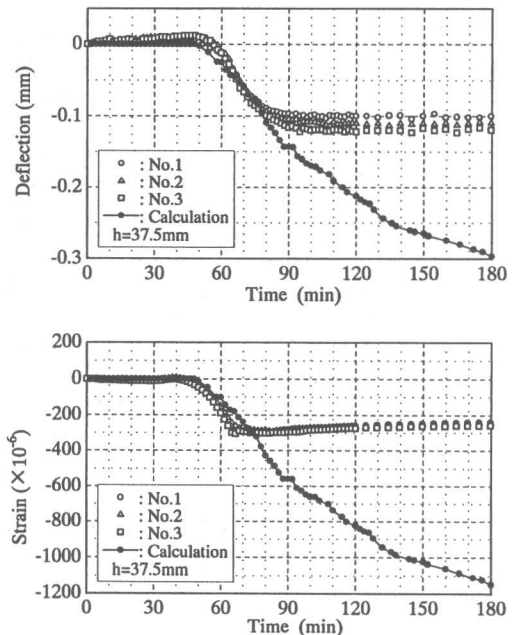


Fig.7 Midspan deflection and underside strain development (h=37.5mm)

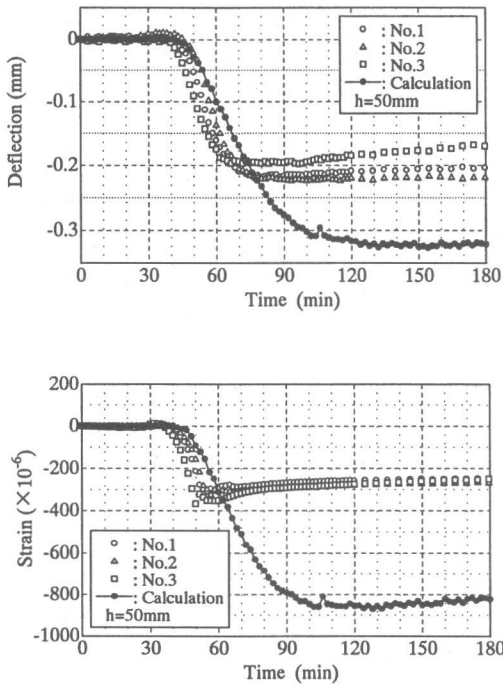


Fig.8 Midspan deflection and underside strain development (h=50mm)

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、2層構造として実験および解析の両面から検討を加えた結果、以下の結論が導き出された。

- 1) 使用したポリマーモルタルであるGM/Stは、不飽和ポリエステル樹脂などを用いたモルタルが大きな硬化収縮を示すのに対し、硬化に伴って膨張するために、コンクリート部材に打ち継ぐ場合を考慮すると、コンクリート部材にケミカルプレストレスが導入されることになり、上載荷重に対して有利になると考えられる。
- 2) ALCをコンクリート部材として実験したことによって、ポリマーモルタルの硬化特性により生じるひずみが明確に測定でき、導入された大きなひずみはALCのひび割れとして目視でも観察できた。
- 3) GM/Stの厚さが増加すると、負のたわみは大きくなり、その関係はほぼ直線で表現できた。

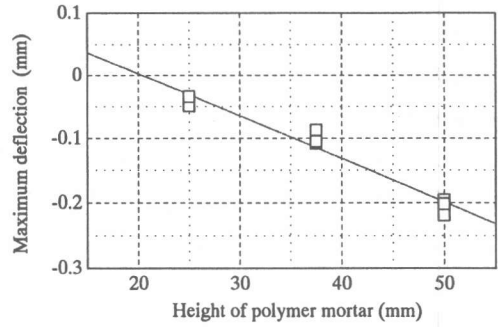


Fig.9 Relationship between deflection and height of polymer mortar

- 4) 実験結果と解析結果は、ALCにひび割れが生じるまでの間において良い一致をみた。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ひずみおよび応力を入力値として、コンクリート部材に導入される初期応力、および変位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)Omata, F., Kawakami, M., Tokushige, H., and Moriyoshi, A.: Setting Shrinkage and Setting Stress of Polymer Mortar, ACI SP-171, pp.607-624, 1997
- 3)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
- 4)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
- 5)Ghali, A. and Favre, R. 著, 川上 洵, 榎福 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