

補修用ポリマーモルタルの硬化収縮 により導入される初期応力に関する研究

小俣 富士夫¹・川上 洵²・徳重 英信³

¹正会員 博士 (工学) ショーボンド建設(株) 北陸支店 技術部 (〒 902-0362 石川県金沢市古府 1-140)

²フェロー 工博 秋田大学教授 工学資源学部土木環境工学科 (〒 010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

³正会員 博士 (工学) 秋田大学講師 工学資源学部土木環境工学科 (同 上)

ポリマーモルタルは、その高い接着性能からコンクリート構造物の補修用材料として広く用いられているが、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、その硬化収縮が被補修体であるコンクリート部材に及ぼす影響を的確に評価することは重要である。

本研究は、ポリマーモルタルの硬化収縮特性を新たに開発した測定方法により定量的に評価し、さらに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明確に検討するために、ポリマーモルタルをALCまたはセメントモルタルに打ち継ぐ実験および解析を通して、2層構造の観点から硬化収縮特性の評価を行った。

Key Words : polymer mortar, setting shrinkage, effective strain, effective stress, crack

1. はじめに

従来、メンテナンスフリーと考えられていたコンクリート構造物も、塩害、凍害、アルカリ骨材反応などによる早期劣化^{1) - 5)}が指摘されるようになった。このような既設コンクリート構造物の補修に、各種のポリマーモルタルが使用されることが多い。ポリマーモルタルを用いたコンクリート構造物の補修を考慮すると、ポリマーモルタルの硬化収縮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固有応力に関する研究は、応力と変形の観点から非常に重要であるにもかかわらず、現在までほとんど行われていなかった。ポリマーモルタルの硬化収縮に伴う挙動を測定する既往の方法として、各種の接触型変位計を用いる方法^{6) - 8)}、埋込み型ゲージを用いる方法^{9) - 10)}、中心部に埋め込んだ鋼棒に貼付したひずみゲージによる方法¹¹⁾などが提案され、適用されてきた。しかし、接触型変位計を用いる方法には、変位計に内蔵されているバネなどの反発力による悪影響、

さらに脱型までの時間を要するなどの短所がある。また、埋込み型ゲージでは、モルタルの硬化開始後ある程度の強度が生じていないとひずみを感じせず、硬化初期段階での測定が不可能であることに加えて、ゲージが的確に測定できる供試体の厚さが必要である。さらに、鋼棒に貼付したひずみゲージによる方法では、鋼棒と供試体の面積比により拘束度合いが変わるために結果が異なるなど、どの方法も限られた条件下での測定は可能であるものの短所も併せ持っていた。

本研究では、最初に硬化収縮を精度良く測定するために、硬化に伴う変位量をレーザー変位計を用いることにより非接触で測定可能な装置、また、硬化に伴って生じる荷重の測定が可能である新たな装置¹²⁾を開発した。次に、一般的に補修に使用されている3種類のポリマーモルタル単体に対して、開発された装置を用いて、硬化に伴うひずみおよび応力を測定した実験結果¹²⁾について検討した。さらに、補修において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、コ

ンクリート部材に導入される初期応力を定量的に評価するために、2層構造としての梁部材による実験、解析および考察を行った。梁部材による実験および解析に際し、入力値としてポリマーモルタル単体のひずみおよび応力の測定結果を使用した。また、コンクリート部材に導入される初期応力を明確に測定するために、コンクリート部材として主に ALC を使用したが、一部の供試体にはセメントモルタルを用いた。なお、極めて初期の材齢を対象とするために、クリープによる影響は除外して検討を行うこととした。

2. 補修用ポリマーモルタルの硬化収縮特性

(1) 使用材料

コンクリート構造物の補修材料として一般に使用されている、次の3種類のポリマーモルタルを用い、硬化に伴う挙動を確認した。なお、補修によく用いられるエポキシ樹脂モルタルの硬化収縮は、本研究に用いたポリマーモルタルと比べ相対的に少ないことから本研究では対象としていない。

- ①不飽和ポリエステル樹脂 (UP)モルタル
- ②メチルメタクリレート樹脂 (MMA)モルタル
- ③グリセロールメタクリレート/スチレン樹脂 (GM/St)モルタル

不飽和ポリエステル樹脂モルタルは、比較的廉価な汎用タイプであるが、一般に硬化収縮が大きく、また、0℃以下の低温時には硬化に長時間を要するなどの短所を有している。なお、不飽和ポリエステル樹脂として、オルソ系不飽和ポリエステル樹脂を使用し、硬化剤にはメチルエチルケトンパーオキシド、促進剤にはナフテン酸コバルトおよび3級アミンを用いた。

メチルメタクリレート樹脂モルタルは、-20℃程度までの低温においても短時間での硬化が可能であり、また、優れた耐薬品性を有しているが、硬化収縮が大きいことに加え、酸素に対して硬化阻害を起こす危険性がある短所も有している。なお、メチルメタクリレート樹脂の硬化剤としてベンゾイルパーオキシド、促進剤として3級アミンを用いた。

グリセロールメタクリレート/スチレン樹脂モルタルは、-20℃程度までの低温においても短時間での硬化が可能であり、粘性が非常に小さく、メチルメタクリレート樹脂モルタルと比較して硬化収縮の低減が容易であるなどの特徴を有している。

Table 1 Physical properties of resins as binder

Type of resin	Specific gravity	Viscosity (mPa·s : at 20℃)
UP resin	1.05	330
MMA resin	0.99	200
GM/St resin	0.99	35

Table 2 Physical properties of aggregates and filler

Material	Specific gravity	Grading
Converter slag	Larger than 3.00	5mm-2.5mm
Silica sand	Larger than 2.50	5mm-0.3mm
Calcium carbonate	Larger than 2.60	Smaller than 0.15mm

Table 3 Flow of polymer mortars

Type of mortar	Flow value (mm)
UP mortar	120
MMA mortar	128
GM/St mortar	203

また、グリセロールメタクリレート/スチレン樹脂の硬化剤にはメチルエチルケトンパーオキシド、促進剤にはナフテン酸コバルトおよび3級アミンを用いた。

以上の3種類のポリマーモルタルともに、20分程度の可使時間を確保することを目標として、硬化剤や促進剤の添加量を調整した。

ここで、結合材としての3種類のポリマーの物性を Table 1 に示す。骨材にはすり減り抵抗性の大きい転炉スラグ、珪砂、充填材には炭酸カルシウムを使用し、すべて乾燥状態で用いた。使用した骨材および充填材の物性を Table 2 に、3種類のポリマーモルタルの20℃におけるフロー値 (JIS R 5201 準拠) を Table 3 に示す。ポリマー、骨材、充填材の重量配合比はすべて、結合材：転炉スラグ：珪砂：炭酸カルシウム = 1 : 4.74 : 2.58 : 1.88 とした。

(2) ポリマーモルタルの硬化収縮に伴うひずみと応力の測定法

本研究で用いた変位量測定専用装置、および荷重検出専用装置を Fig.1 および Fig.2 に示す。試料モルタルを2つの装置に同時に打ち込むことにより、硬化収縮に伴う変位量と荷重が一度に測定できる特長を有している。

変位量測定専用装置は、テフロンシートを貼付した底板および側板、テフロンシートを貼付したアルミニウム製の変位量測定用L字型端子、レーザービーム変位計から構成されている。あらかじめ底板と側板を組み立てておき、変位量測定用L

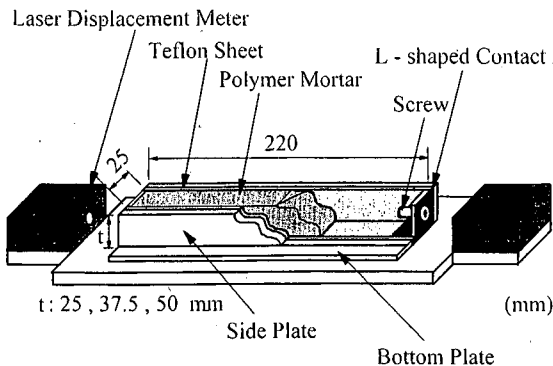


Fig.1 Non-contact type displacement measuring apparatus

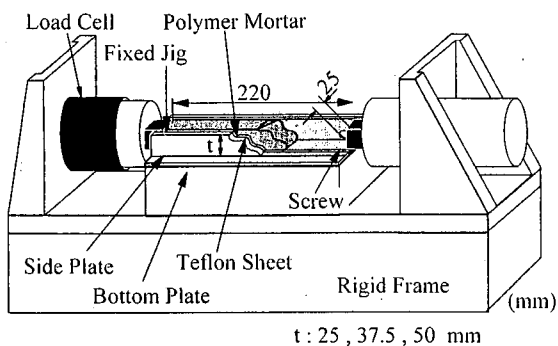


Fig.2 Load measuring apparatus

字型端子を自由に移動できるように両端部に設置する。このとき、試料モルタルが側板と変位量測定用L字型端子の間から流出しないように注意する。底板、側板、変位量測定用L字型端子によって形成された空間に試料モルタルを打ち込み、直ちに一定時間ごとにレーザービーム変位計によって変位量（収縮および膨張の双方に対応）を測定する。なお、変位量測定用L字型端子の内側には、試料モルタルとの付着を高めることを目的としてネジが設けられている。また、補修に使用されるポリマーモルタルの実際の施工厚さは薄い場合が多いことを考慮して、試料モルタルの厚さは25mm、37.5mm、50mmの3種類とし、幅は25mm、長さは220mmの一定とした。

荷重検出専用装置は、変位量測定専用装置と同様にテフロンシートを貼付した底板および側板を用いる。両端部は、インバル鋼（弾性係数 $=1.77 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、熱膨張係数 $=1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）製固定フレームに剛結された固定ジグとなっている。インバル鋼を用いた理由は、温度変化による装置自体の膨張収縮による影響を可能な限り排除するためである。片側の固定ジグにはロードセルが連結されており、硬化に伴う荷重（収縮による圧縮、

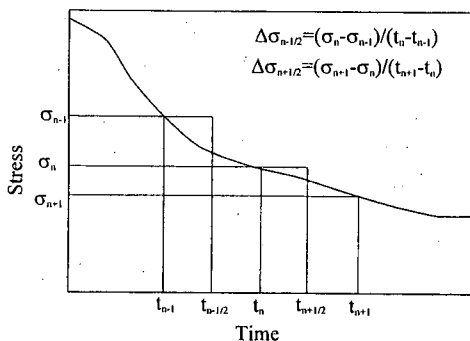
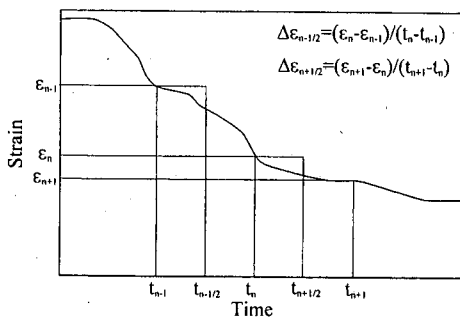


Fig.3 Increments of strain and stress

膨張による引張の双方に対応)の検出が可能である。また、変位量測定用L字型端子と同様に、固定ジグにも試料モルタルとの付着を高めることを目的としてネジが設けられている。試料モルタルの打込みは、変位量測定専用装置に打ち込むのと同時に行い、直ちに一定時間ごとに荷重を測定する。試料モルタルの寸法は、変位量測定専用装置と同様に厚さは25mm、37.5mm、50mmの3種類、幅は25mm、長さは220mmの一定とした。

この2つの装置の使用により、以下のことが可能となった。まず、Fig.3に示すように、時刻 t_n において荷重検出専用装置から検出される荷重 P_n と時刻 t_{n+1} において検出される荷重 P_{n+1} との差分を試料モルタルの断面積で除することにより、時刻 t_n から t_{n+1} の時間に生じた応力が算出される。同様に、変位量測定専用装置から測定される変位量の差分を試料モルタルの全長(220mm)で除することによりひずみが算出される。すなわち、極めて早期の材齢(脱型が不要)における応力とひずみの関係を得ることが十分可能となった。

(3) 実験結果

前述した装置を用いて、3種類のポリマーモルタルの打込み後の経過時間と変位量および荷重を測定した。なお、室温は 20°C とした。以下に、ポリマーモルタルごとに実験結果と考察を述べる。

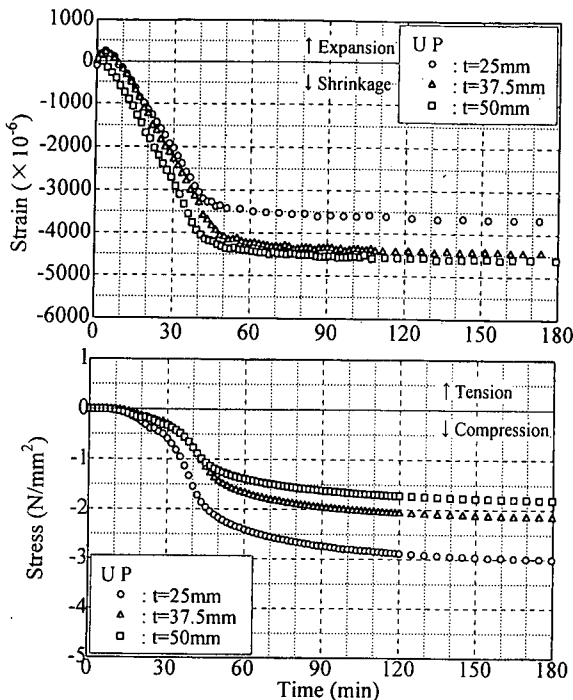


Fig.4 Strain-time and stress-time curves for UP mortar

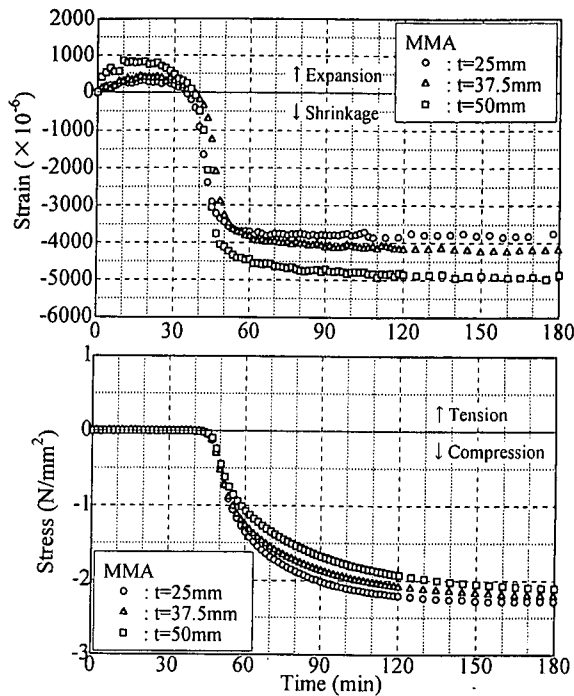


Fig.5 Strain-time and stress-time curves for MMA mortar

a) 不飽和ポリエステル樹脂モルタル

UPモルタルの打込み後の経過時間とひずみ(変位量を基長である220mmで除した値)および応力(荷重を断面積である6.25cm²で除した値)の関係をFig.4に示す。

Fig.4から、打込み後、若干の膨張を示すものもあるが、5分後には急激な収縮が生じている。その後、収縮は時間の経過にほぼ正比例して増えており、この傾向は45分後程度まで継続しているが、50分を越えた時点からは一定の状態となっている。180分後における収縮ひずみは、厚さ25mmの場合 -3500×10^{-6} 、厚さ37.5mmおよび50mmの場合には -4500×10^{-6} 程度であった。

また時間と応力の関係では、約10分後までは応力が生じていないが、10分を越えた時点から収縮による圧縮応力が生じ始め、50分後から圧縮応力の増加の割合は緩やかになるものの、120分後まで継続して圧縮応力が増加している。その後、ほぼ一定の状態となっており、180分後における圧縮応力は厚さ25mmの場合 3.0 N/mm^2 、37.5mmの場合 2.2 N/mm^2 、50mmの場合 1.8 N/mm^2 程度であった。以上のように、最初にひずみが発生し、それに遅れて応力が生じている。応力が生じるまでのひずみは、まだモルタルが流動体の状態で発生してい

ることになり、ひび割れを生じさせるなどの悪影響は及ぼさないと考えられるが、応力が生じた以後のひずみは何らかの影響を及ぼすと考えられる。なお、供試体中心部の温度は20℃から31℃まで上昇した。

b) メチルメタクリレート樹脂モルタル

MMAモルタルの打込み後の経過時間とひずみおよび応力の関係をFig.5に示す。

打込み後直ちに緩やかな膨張が生じ、20分後の時点で膨張のピークに達した後には緩やかな収縮に転じ、約40分後にゼロに戻り、その後急激な収縮へと変化した。収縮は約50分後まで直線的に変化し、約60分後以降ほぼ一定の状態となっている。180分後における収縮ひずみは厚さ25mmの場合 -3800×10^{-6} 、37.5mmの場合 -4100×10^{-6} 、50mmの場合 -5000×10^{-6} 程度であった。一方、時間と応力の関係では、約45分後までほとんど応力は生じていないが、45分を経過した時点から収縮による圧縮応力が生じ始めている。以降、60分後程度までは圧縮応力の急激な増加傾向を示しており、60分を経過した時点から緩やかな増加傾向に転じ、120分後以降ほぼ一定の状態となっている。180分後の圧縮応力は、3種類の厚さ共に $2 \sim 2.2 \text{ N/mm}^2$ 程度であった。また、UPモルタルとMMAモルタルは

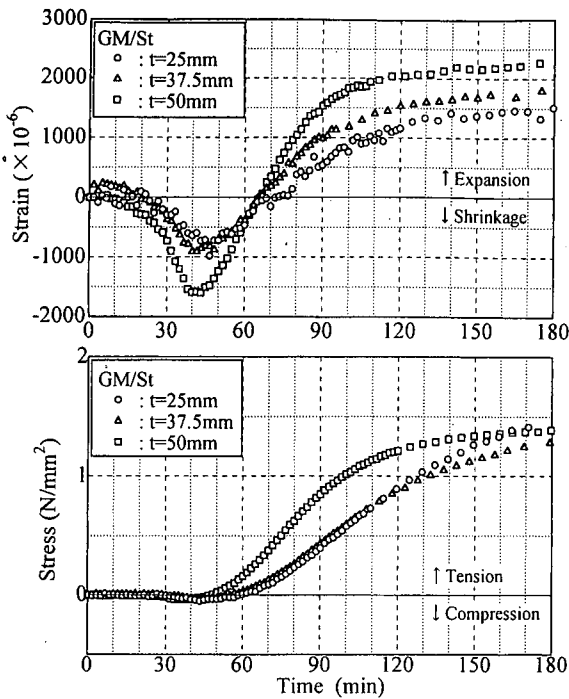


Fig.6 Strain-time and stress-time curves for GM/St mortar

最終的にほぼ同等の硬化収縮ひずみを示すが、その生じる過程に大きな相違があることが新たに開発した装置を用いることによって明らかになった。なお、供試体中心部の温度は 20℃から 36℃まで上昇した。

c) グリセロールメタクリレート/スチレン樹脂モルタル

GM/St モルタルの打込み後の経過時間とひずみおよび応力の関係を Fig.6 に示す。

GM/St モルタルは打込み後 15 分程度経過してから若干の収縮によるひずみが生じ、約 40 分後まで厚さによって $-700 \sim -1600 \times 10^{-6}$ 程度の収縮ひずみを示した後に膨張に転じた。これは、GM/St に含まれる収縮低減剤が 40 分後以降、効果を発揮し始めたためと考えられる。さらに、時間の増加と共に膨張は増え続け、その傾向は 100 ~ 120 分後程度まで続いた。180 分後における膨張ひずみは厚さ 25mm の場合 1500×10^{-6} 、37.5mm の場合 1900×10^{-6} 、50mm の場合 2300×10^{-6} 程度であった。すなわち、GM/St モルタルは UP モルタルおよび MMA モルタルと相違して、膨張域で収束することが大きな特徴である。

また、時間と応力の関係を見ると、45 分後程度まではほとんど応力が生じていないが、45 分を経

過した時点から膨張による引張応力が生じ始めている。厚さ 25mm および 37.5mm の場合、150 分後程度まで引張応力は時間の増加にほぼ正比例して増加する傾向にあった。厚さ 50mm の場合には、120 分後程度まで引張応力は時間の増加に正比例して増加する傾向にあったが、以降は緩やかな増加に転じた。180 分後における引張応力は、3 種類の厚さ共に 1.4 N/mm^2 程度であった。以上の結果から、GM/St モルタルを用いた厚さ 25mm ~ 50mm の範囲では、厚さが増加するにつれて発生する膨張ひずみがわずかながら大きくなること、打込み後 180 分後以降ひずみはほぼ収束すること、応力が発生し始める時間に差異はないこと、引張応力の大きさはほぼ $1.3 \sim 1.4 \text{ N/mm}^2$ 程度であることが新たに提案した装置の適用によって明らかになった。なお、供試体中心部の温度は 20℃から 28℃まで上昇した。

3. ポリマーモルタルによるコンクリート部材の補修において硬化収縮がコンクリート部材の初期応力に及ぼす影響

前節において、提案した装置の適用により、ポリマーモルタルの硬化収縮特性を明らかにした。ここでは、ポリマーモルタルを既設コンクリート部材の補修に用いることを想定し、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導入される応力(ひずみ)をポリマーモルタルとコンクリート梁部材からなる 2 層構造¹⁰⁾として、実験および解析による検討を行った。

(1) ALC にポリマーモルタルを打ち継いだ実験

ポリマーモルタルをコンクリート部材の補修に用いる場合を想定し、ALC 梁の上に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り生じるたわみおよびひずみを連続的に測定した。ALC およびポリマーモルタルは幅 38mm、長さ 285mm とし、ポリマーモルタルの厚さによる影響を把握するために、ポリマーモルタルの厚さを 25mm、37.5mm、50mm の 3 種類とし、ALC とポリマーモルタルの合計の厚さは 100mm の一定とした。ALC はセメントコンクリートと比較して弾性係数が小さいために、たわみおよびひずみが強調され硬化収縮特性を明確に測定できること、さらにせん断強度に比較して曲げ強度が 1/3 程度と小さいために、2 層構造としての特性を明確

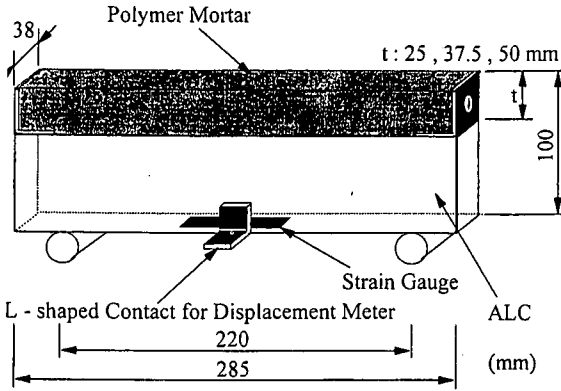


Fig.7 Experimental outline of two-layered beam using ALC

Table 4 Physical properties of ALC at 28 days curing

Specific gravity	0.67
Compressive strength	2.70 N/mm ²
Young's modulus	3.25 kN/mm ²
Flexural strength	0.58 N/mm ²
Shear strength	1.54 N/mm ²

に表せると考えて採用した。なお、ポリマーモルタルには前述の3種類を使用し、接着面にはウレタン系の専用プライマーを塗布した。実験条件として支間 220mm の単純支持、室温は 20℃、1条件での供試体は3個とした。また、側面に型枠を設けてポリマーモルタルを打ち込んだが、型枠内部にテフロンシートを貼付し、摩擦および付着による拘束を生じさせないようにした。なお、測定項目は、ALCの支間中央下面ひずみおよびたわみである。実験の概要を Fig.7, ALCの物性を Table 4 に示す。また、せん断強度は(社)日本道路協会発行の「道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料」¹³⁾に準拠して求めた。

(2) セメントモルタルにポリマーモルタルを打ち継いだ実験

(1)と同様ではあるが、コンクリート部材としてセメントモルタルを用いてUPモルタルを打ち継いだ実験も行った。ここでは、特に打継ぎ界面付近のせん断応力を測定するために、ロゼットゲージを貼付した。セメントモルタルおよびUPモルタルは幅 25mm、長さ 285mm とし、UPモルタルの厚さは 25mm、セメントモルタルの厚さは 75mm とした。なお、測定項目は、支点近傍の打継ぎ界面付近のひずみである。実験の概要を Fig.8, セメントモルタルの物性を Table 5 に示す。

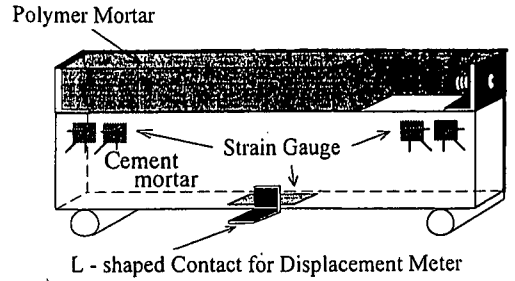


Fig.8 Experimental outline of two-layered beam using cement mortar

Table 5 Physical properties of cement mortar at 14 days curing

Compressive strength	45.0 N/mm ²
Young's modulus	25.0 kN/mm ²
Flexural strength	7.50 N/mm ²
Shear strength	8.90 N/mm ²

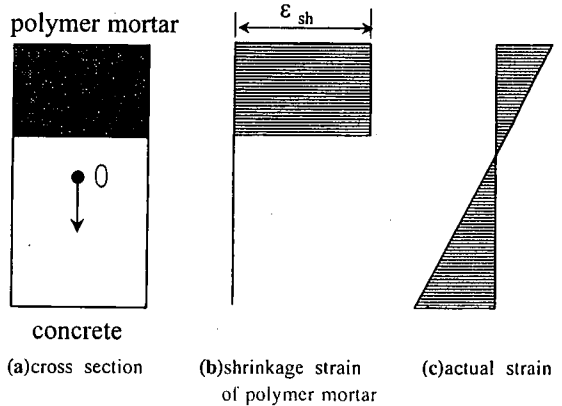


Fig.9 Cross section composed of polymer mortar and concrete

(3) ポリマーモルタルの硬化収縮を考慮した2層合成梁の応力解析

既存コンクリート部材とポリマーモルタルから形成される合成部材の断面を Fig.9 に示す。なお、以降の解析¹⁴⁾は、弾性理論に基づき平面保持の仮定が成立することを前提として計算を行った。

この図(b)において、 ϵ_{sh} はポリマーモルタルがコンクリートと付着していない場合の硬化収縮によって生じる自由なひずみである。このひずみを拘束すると仮定すると、式(1)に示される拘束応力 σ_{res} が生じる。また、図(c)はポリマーモルタルとコンクリートとに十分な付着があり、平面保持している場合のひずみ分布である。

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

ここで、 E_p はポリマーモルタルの弾性係数であり、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。

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

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

式(1)を式(2)および式(3)に代入して

$$\Delta N = -E_p \int \varepsilon_{sh} dA \quad (4)$$

$$\Delta M = -E_p \int \varepsilon_{sh} y dA \quad (5)$$

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拘束力を解除すると、軸ひずみ $\Delta \varepsilon_0$ と曲率 $\Delta \psi$ は次式によって与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_0 \\ \Delta \psi \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_c(AI - B^2)} \begin{bmatrix} I & -B \\ B & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\Delta N \\ -\Delta M \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 A 、 B 、 I はそれぞれ基準点Oについて換算された断面積、断面一次モーメント、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:

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

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、スパン L および曲率 $\Delta \psi$ から次式によって計算される。

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

一方、ポリマーモルタルとコンクリート部材とが合成された部材において、その界面に生じるせん断応力 $\tau(x)$ は Fig.10 に示すようにモデル化でき、ポリマーモルタルが硬化収縮ひずみを生じた場合のつり合い方程式は次式により示される¹⁵⁾。

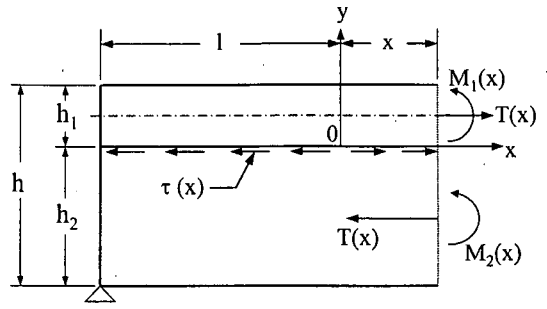


Fig.10 Analytical model of shear stress between polymer mortar and concrete

せん断応力 $\tau(x)$ は Fig.10 に示すようにモデル化でき、ポリマーモルタルが硬化収縮ひずみを生じた場合のつり合い方程式は次式により示される¹⁵⁾。

$$\kappa \tau(x) - \lambda' \int_0^x T(\xi) d\xi + 1/2 h \int_0^x \{ d\xi / \rho(\xi) \} = \varepsilon_{sh} x \quad (15)$$

ここで、 $\kappa = \kappa_1 + \kappa_2$ 、 $\lambda' = \lambda_1 + \lambda_2$ 、 $h = h_1 + h_2$ 、 ξ は図中の区間 x 内における任意の微小区間である $d\xi$ までの距離、 $\rho(\xi)$ は曲率半径である。また、 κ は界面コンプライアンス、 λ は軸コンプライアンスであり、各層の弾性係数 E 、ポアソン比 ν 、厚さ h より次式により求まる。

$$\kappa_1 = 2(1 + \nu_1)h_1 / (3E_1) \quad (16)$$

$$\kappa_2 = 2(1 + \nu_2)h_2 / (3E_2) \quad (17)$$

$$\lambda_1 = (1 - \nu_1^2) / (E_1 h_1) \quad (18)$$

$$\lambda_2 = (1 - \nu_2^2) / (E_2 h_2) \quad (19)$$

次に、Fig.10において、任意断面に対するつり合い方程式は次式により示される。

$$M_1(x) + M_2(x) = (h/2)T(x) \quad (20)$$

ここで、 $M_1(x)$ 、 $M_2(x)$ はそれぞれ上層および下層断面上に作用する曲げモーメントであり、次式により示される。

$$M_1(x) = D_1 / \rho(x) \quad (21)$$

$$M_2(x) = D_2 / \rho(x) \quad (22)$$

また D_1 、 D_2 は曲げ剛性であり、次式により示される。

$$D_1 = E_1 h_1^3 / \{12(1 - \nu_1^2)\} \quad (23)$$

$$D_2 = E_2 h_2^3 / \{12(1 - \nu_2^2)\} \quad (24)$$

したがって、式(21)~式(22)を式(20)に代入することにより、曲率半径 $\rho(x)$ は次式により示される。

$$\rho(x) = \{2(D_1 + D_2)\} / h T(x) \quad (25)$$

また、式(25)を式(15)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、それを解くことによりせん断応力 $\tau(x)$ が次式により求められる。

$$\tau(x) = \varepsilon sh / (k \kappa) \cdot \sinh(kx) / \cosh(kl) \quad (26)$$

ここで、 $k^2 = \lambda \kappa$ 、 $D = D_1 + D_2$ 、

$\lambda = \lambda' + h^2 / 4D$ である。

(4) ALC に打ち継いだ実験・解析結果と考察

3種類のポリマーモルタルの打込み直後からの経過時間と支間中央のたわみ、および経過時間と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以降に示す。なお、解析に用いる応力の増分とひずみの増分は、次のようにして求めた。荷重が生じるまでのひずみは無視し、荷重が生じた時点でのひずみを0として換算ひずみを求め、次式で算出した。

$$\{\sigma/\varepsilon\}_{i+1} = (\sigma_{i+1} - \sigma_i) / (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)$$

ここで、 σ は応力、 ε はひずみを表し、 i は時間ごとに区切った序数であり、 $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ とする。なお、 σ/ε は式(10)および(12)の E_p に該当する。

a) UPモルタルを用いた実験・解析結果と考察

UPモルタルをALCに打ち継いだ実験結果と解析結果をFig.11に示す。

時間-ひずみの関係および時間-たわみの関係において、打込み後50分程度経過するまでの実験値と解析値は良い一致をみている。時間-ひずみの関係において、時間の経過に伴ってひずみの測定値は増加するが、打込み後35~50分経過した時点で $400 \sim 600 \times 10^{-6}$ を示した後に急激な減少を示した。実験終了後に目視観察を行った結果、支間中央付近のALC側面下部にFig.12に示す鉛直ひび割れがあることが確認された。

ここで、ALC梁単独の曲げ荷重試験によって、確認された曲げひび割れ発生時の支間中央下面のひずみは 568×10^{-6} であり、ALC下面のひずみの急激な減少はUPモルタルの硬化収縮によってもた

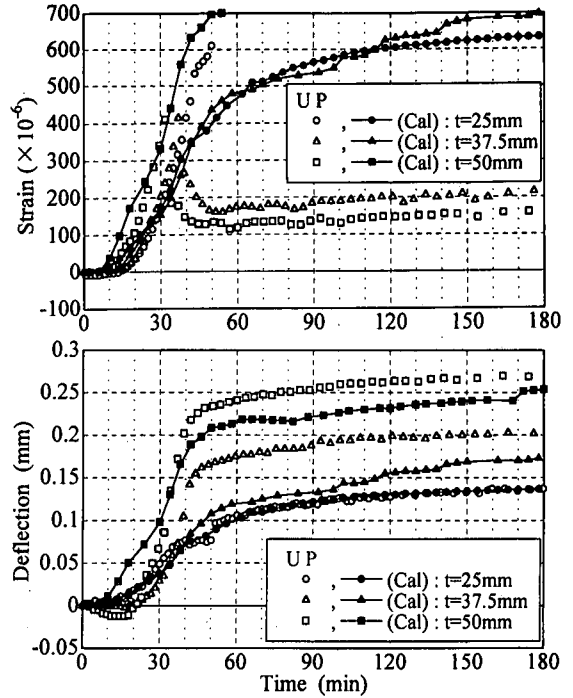


Fig.11 Midspan deflection and underside strain development for UP mortar

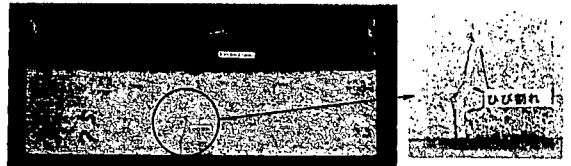


Fig.12 Crack of ALC (UP mortar : height=25mm)

らされたALCの曲げひび割れによるものと考えられる。また、たわみにおいても、打込み後35~50分経過した時点まで時間の経過に伴ってたわみが増加していたが、それ以降ほとんど変化していないのは、ひずみと同様に曲げひび割れによる影響と考えられる。また、打込み後35~50分経過する時点、すなわちひび割れが生じるまでの、たわみおよびひずみの実験値と計算値は比較的良好な一致をみている。用いた時間-ひずみ関係、時間-応力関係および解析方法の妥当性を表している。

b) MMAモルタルを用いた実験・解析結果と考察
MMAモルタルを用いた実験および解析結果をFig.13に示す。

時間-ひずみの関係から、打込み後45分が経過するまでひずみはほとんど生じていないが、45分

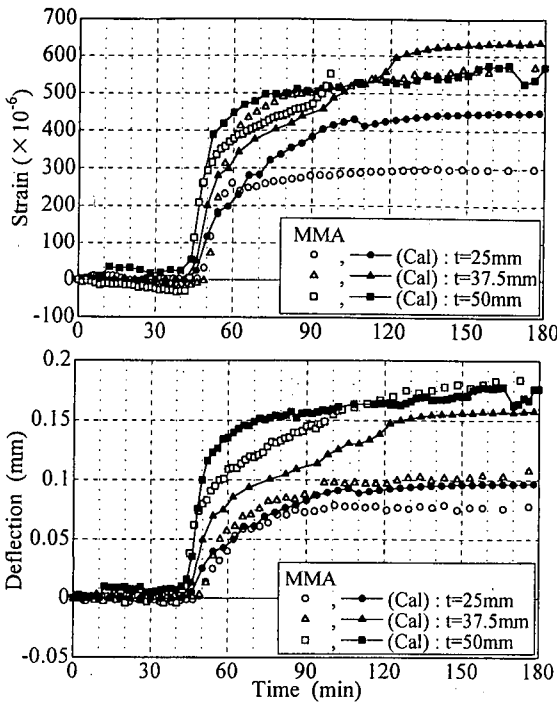


Fig.13 Midspan deflection and underside strain development for MMA mortar

後に降急激なひずみが生じ、60分後以降、ひずみは緩やかな増加に転じた。MMAモルタルの厚さが25mmの場合、ひずみは 300×10^{-6} 程度でほぼ一定の状態となったが、厚さ37.5mmおよび50mmの場合には、100分後の時点においてひずみが 500×10^{-6} 程度に達し、以降ほぼ一定の状態となった。したがって、MMAモルタルの厚さ37.5mmおよび50mmの場合、この時点でALC下面にひび割れが生じたと考えられる。一方、たわみにおいても、ほぼ45分後までたわみは生じておらず、45分後以降から60分後まで時間の増加と共に増加し、90分後以降、たわみはほぼ一定の状態となっている。また、ひずみおよびたわみ共に、実験値と計算値とは比較的良好一致を示している。

c) GM/S tモルタルを用いた実験・解析結果と考察

GM/S tモルタルを用いた実験および解析結果をFig.14に示す。

時間-ひずみの関係において、打込み後40分が経過するまでひずみはほとんど生じていないが、40分後以降、負のひずみすなわち圧縮ひずみが生じた。これは、GM/S tモルタルが膨張性のポリ

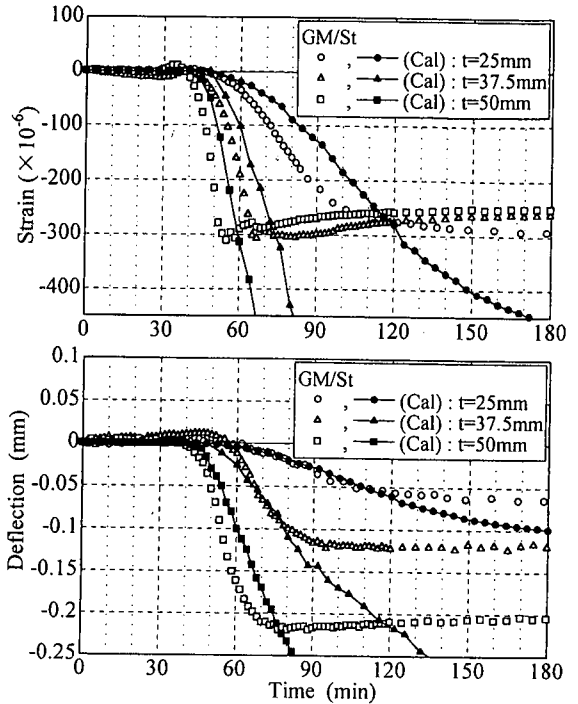


Fig.14 Midspan deflection and underside strain development for GM/St mortar

マーモルタルであるため、上に反る状態になるからである。GM/S tモルタルの厚さ25mmの場合には、110分後以降、厚さ37.5mmの場合には65分後以降、厚さ50mmの場合には50分後以降、ひずみはほぼ一定の状態となった。一方、たわみにおいては、40~50分が経過するまで負のたわみは生じておらず、それ以降、時間の増加と共にたわみが増加している。ここで、GM/S tモルタル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。GM/S tモルタルの厚さ25mmの場合には、110分後以降、厚さ37.5mmの場合には80分後以降、厚さ50mmの場合には70分後以降、たわみはほぼ一定の状態となった。これは、GM/S tモルタルの膨張によってALCの上面にひび割れが生じたためと考えられる。実験の終了後に、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分後付近まで良好一致をみている。したがって、ひび割れが生じるまでの範囲内において、GM/S tモルタルの硬化に伴って生じるたわみを解析で十分推定できることが明らかになった。

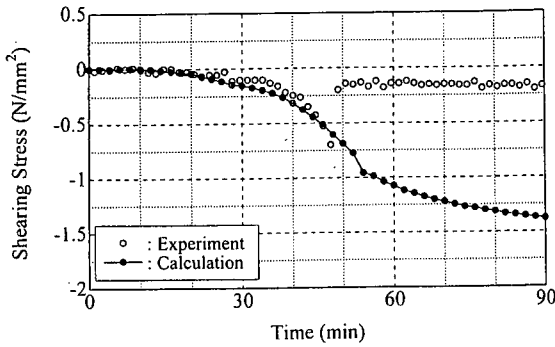


Fig.15 Shear stress development for UP mortar

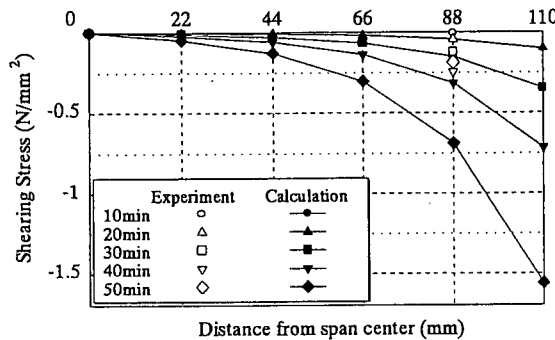


Fig.16 Shear stress distribution for UP mortar

(5) UPモルタルをセメントモルタルに打ち継いだ実験および解析結果と考察

UPモルタルをセメントモルタルに打ち継いだ場合における、打込み後の経過時間とせん断応力との関係を Fig.15 に、供試体軸方向におけるせん断応力の分布を Fig.16 に示す。

UPモルタルの打込み後 45 分程度まで実験値と解析値はほぼ良い一致をみている。45 分程度以降、実験値と解析値が相違しているのは、付着界面付近に生じるせん断ひび割れによるものと考えられる。以上の結果、せん断ひび割れが生じるまでの範囲内において、せん断応力も解析で十分推定できることが明らかになった。

以上、述べてきたように、2.(2)で示した変位量測定専用装置と荷重検出専用装置を使用して得られた結果、および3.(2)で示した解析方法を用いることにより、ポリマーモルタルで補修した場合において、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導入される初期応力、および変位の算定が可能であることが明らかになった。

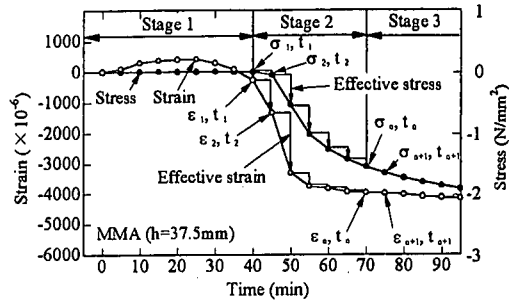


Fig.17 Strain-time and stress-time curves for UP mortar

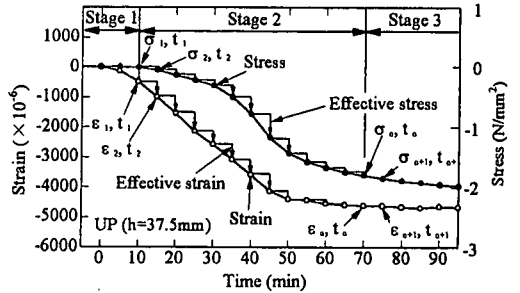


Fig.18 Strain-time and stress-time curves for MMA mortar

4. ポリマーモルタル単体のひずみおよび応力とコンクリート部材に打ち継いだ場合に導入される応力との関係

2. において得られたUPモルタルおよびMMAモルタル単体の時間とひずみとの関係、時間と応力との関係を併せて表したものを Fig.17 および Fig.18 に示す。

これらの図に関して、以下のように考察できる。まず、打込み直後から応力が生じる時刻 t_1 までの領域を Stage 1、応力が生じ始めた時刻 t_1 からひずみの変化が 0 に近くなる時刻 t_n までの領域を Stage 2、時刻 t_n 以降の領域を Stage 3 とする。Stage 1 においては、応力が発生していないので、生じたひずみは無視できるものとして取り扱う。Stage 3 においては、ひずみの変化が 0 に近いので、コンクリート部材に対して新たな応力をほとんど導入させないものとして取り扱う。すなわち、コンクリート部材にポリマーモルタルを打ち継いだ場合、Stage 2 だけが被補修体に初期応力として影響を及ぼすと考える。Fig.17 および Fig.18 において、Stage 2 における時刻 t_i において生じたひずみ ϵ_i から時刻 t_{i-1} に生じたひずみ ϵ_{i-1} を差し引いたひずみ（本研究では「実効ひずみ」と定義する）が考慮すべきひずみである。同様に応力に対して

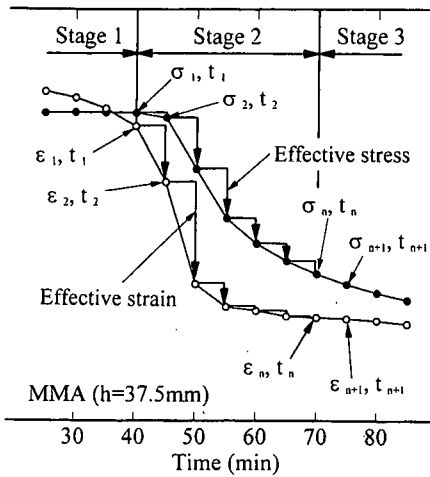


Fig.19 Strain-time and stress-time curves for MMA mortar

も、「実効応力」として取り扱う。ここで、Fig.18の Stage 2 の一部を拡大した Fig.19 に実効ひずみと実効応力を示す。

以上、述べてきたように、補修用材料であるポリマーモルタルの硬化収縮によりコンクリート部材に導入される固有応力の検討に際して、収縮ひずみを論じるだけでは不十分であり、本研究で提案した実効ひずみを考慮した時間とひずみとの関係、実効応力を考慮した時間と応力との関係、さらに実効ひずみおよび実効応力の積で表される仕事量が、固有応力推定の重要な要素になると考えられる。すなわち、補修用ポリマーモルタルの「時間-ひずみ」および「時間-応力」の特性を的確に捉えることが、被補修体に導入される固有応力の検討に関して、極めて重要な基礎資料となる。本研究における3種類のポリマーモルタルにおいても、それぞれの樹脂の特性を表す実効ひずみと実効応力が得られ、Step by Step法の使用により固有応力の推定もある程度可能であり、ポリマーモルタルを新たに開発する場合に有効であると考えられる。

また、本研究の一部で梁部材を ALC として実験したことによって、ポリマーモルタルの硬化収縮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。

なお、本研究において用いた3種類のポリマーモルタルの発熱温度上昇は、MMAモルタルの場合が最大で 16℃程度ではあるが、その影響が含まれている。硬化初期（流動体）における熱膨張係

数が正確に測定できれば、発熱による影響を除外した真の硬化収縮特性が得られると考えられる。

5. 結論

コンクリート部材をポリマーモルタルで補修する場合、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導入される初期応力を定量的に評価することを目的として、ポリマーモルタル単体の硬化収縮に伴って生じるひずみと応力に関する実験、ポリマーモルタルとコンクリート部材との2層構造としての実験および解析による検討を行った。その結果、本研究の範囲内において以下の結論が得られた。

(1) 提案した変位量測定専用装置を用いることにより、厚さが薄い場合においても、ポリマーモルタルの硬化過程に生じるひずみに関して、膨張、収縮共に打込み直後からの連続的な測定が可能となった。

(2) 提案した荷重検出専用装置を用いることにより、厚さが薄い場合においても、ポリマーモルタルの硬化過程に生じる応力に関して、膨張、収縮共に打込み直後からの連続的な測定が可能となった。

(3) これらの2つの装置を使用して得られたデータを入力値として、ALC 梁にポリマーモルタルを打ち継いだ合成梁を解析した結果と実験結果は、ALC にひび割れが生じるまでの範囲内で良好一致を示した。すなわち、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導入される初期応力、および変位の算定が可能となった。

(4) 梁部材を ALC として実験したことによって、ポリマーモルタルの硬化収縮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。

(5) セメントモルタル梁に不飽和ポリエステル樹脂モルタルを打ち継いだ実験および解析により、セメントモルタルにせん断ひび割れが生じるまでの範囲内で、打継ぎ界面付近に生じるせん断応力が十分推定できることを明らかにした。

(6) ポリマーモルタルの硬化収縮によりコンクリート部材に導入される固有応力の検討に際して、収縮ひずみを論じるだけでは不十分であり、本研究で提案した実効ひずみを考慮した時間とひずみとの関係、実効応力を考慮した時間と応力との関係を検討することの重要性を明らかにした。

参考文献

- 1) Fukuda, S., Fujiwara, T., Shoya, M., Kawakami, M. and Omata, F. : Durability of prestressed concrete bridges in the north-east district of Japan, ACI SP 170, pp.1447-1465, 1997.
- 2) Omata, F., Kawakami, M., Tokuda, H. and Kagaya, M.: The current status of maintenance/management of concrete structures in Japan, Proceedings of concrete in the service of mankind, concrete repair, rehabilitation and protection, Dundee, UK, pp.757-766, 1996.
- 3) 片脇清士:塩害とひびわれ, セメント・コンクリート. No.451, pp.94-102. 1984.
- 4) 藤原忠司:コンクリートの凍害に関する劣化外力の評価方法, 土木学会論文集, No.451/VI -15, pp.111-120. 1991.
- 5) 小柳治, 六郷恵哲, 石田裕哉:アルカリ骨材反応によるひび割れとRC部材の性状, セメント技術年報, No.39, pp.352-355. 1985.
- 6) Ohama, Y., Demura, K. and Komiyama, M. : Length change of polyester resin concrete, plastic mortars, sealants and caulking compounds, ACS symposium, Series 113, American chemical society, pp.67-78, 1979.
- 7) Ohama, Y. and Demura, K. : Apparatus for measuring the length change of polymer (or resin) concrete, The journal of the college of engineering of Nihon University, Series A, V.20, pp.47-50, 1979.
- 8) ACI 548.5R : Curing shrinkage test, guide for polymer concrete overlays, p.25, 1994.
- 9) 大濱嘉彦, 出村克直, 小宮山正:ポリエステルレジコンクリートの強度などの性状に及ぼすステレン-ポリエステル比の影響, 材料, Vol.29, No.318, pp.266-271. 1980.
- 10) Omata, F., Kawakami, M., Wakayama, S. and Yamamura, H.: Thermal stress and setting shrinkage stress of concrete members repaired by polymer mortar, Proceedings of the VIIIth international congress on polymers in concrete, Oostende, Belgium, pp.113-118, 1995.
- 11) Nguyen Van Loi, 内田裕市, 林富士男, 小柳 治: ポリエステルR E C硬化収縮と拘束応力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.663-668, 1994.
- 12) Omata, F., Kawakami, M., Tokushige, H. and Moriyoshi, A. : Setting shrinkage and setting stress of polymer mortar, ACI SP 171, pp.607-624, 1997.
- 13) 日本道路協会 : 道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料, pp.90-91. 1987.
- 14) A.Ghali and R.Favre 著, 川上 洵, 櫻福 浄ほか訳 : コンクリート構造物の応力と変形, 技報堂出版, pp.21-65, 1994.
- 15) Suhir, E. : Stresses in adhesively bonded bi-material assemblies used in electronic packaging, Proceedings of materials research society symposium, vol.72, Palo Alto, California, USA, pp.133-138, 1986.

(1999. 5. 31 受付)

STUDY ON STRAIN AND STRESS DUE TO SETTING SHRINKAGE OF POLYMER MORTAR USED FOR REPAIR OF CONCRETE STRUCTURES

Fujio OMATA, Makoto KAWAKAMI and Hidenobu TOKUSHIGE

Polymer mortar is generally used for repairing concrete structures. However, its behavior in the setting characteristics has not fully been explored.

In this study, shrinkage strain and stress in the setting process of polymer mortar with three kinds of resin were measured with an original test apparatus incorporating a non-contact type displacement meter and load cells.

Then, stress and deformation of two-layer composite beams composed of polymer mortar and ALC were investigated. Furthermore, from the viewpoint of energy at setting of polymer mortar, characteristics of polymer mortars used were discussed.