

論文 鋼板を接着したコンクリート部材の温度応力と補強効果

小侯 富士夫*¹・川上 洵*²・徳田 弘*²・加賀谷 誠*³

要旨：鉄筋コンクリート構造物の補強方法の一つである鋼板接着工法に用いる接着材の物理的特性を要因として、熱的性質および補強効果の観点から検討を加えた。その結果、1)鋼板を接着したコンクリート部材に温度変化を与えた場合の温度応力の解析が十分可能である、2)セメント系の材料を接着材として用いると引張強度に限りがあることから適切ではない、3)著しく弾性係数の小さい材料を用いると合成構造とならず不適である、4)現状では通常使用している液状エポキシ樹脂が鋼板接着工法用の接着材として最適な材料である、5)接着材の厚さは可能な限り薄くするべきである、という結論が得られた。

キーワード：鋼板接着、温度応力解析、エポキシ樹脂、接着材、補強効果

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の曲げ耐力の向上等を目的として、コンクリート表面に鋼板を接着して補強する鋼板接着工法は、橋梁をはじめとして広く採用されている。鋼板で補強された構造は、コンクリートと鉄筋からなるRC部材、接着材、鋼板の3層からなる合成構造となっている。接着材には、優れた接着強度からエポキシ樹脂が使用される場合が多いが、その接着強度だけが着目され、他の性質とりわけ熱的性質を考慮した研究は十分とはいえなかった。

本研究では、接着材として3種類の材料を選定し、セメントモルタル梁に鋼板を接着した供試体に温度変化を与え、その影響に関して実験と温度応力解析を行った。さらに、温度変化を与えた実験を完了した供試体に曲げ載荷試験を行い、その補強効果に対して検討を加えた。

2. 温度変化を与えた実験の概要

2. 1 使用材料

セメントモルタルには、普通ポルトランドセメントおよび川砂を使用し、W/Cは65%とした。鋼板には3.2mm厚さのSS400を使用した。接着材には、①鋼板接着工法に通常使用される液状エポキシ樹脂（以下、「EP」と記す）②弾性係数を小さくして温度応力の低減を図ったゴム状弾性エポキシ樹脂（以下、「SEP」と記す）③EPと比較して熱膨張係数を1/4程度に低下させたポリマーセメントスラリー（セメントペースト+エポキシエマルジョン、以下、「PCS」と記す）の3種類を使用した。十分養生した3種類の接着材の試験温度と圧縮強度および弾性係数との関係を図-1に示す。また、使用材料の熱膨張係数などの物性を表-1に示す。

2. 2 供試体

供試体は、図-2に示すように10×10×40cmのセメントモルタル梁の両側面に3種類の接着材を用いて鋼板を接着したものである。

*1 ショーボンド建設(株)土木研究所課長(正会員)

*2 秋田大学教授 鉱山学部土木環境工学科、工博(正会員)

*3 秋田大学助教授 鉱山学部土木環境工学科、工博(正会員)

表-1 使用材料の物性

材 料 名	熱膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	弾性係数(-20°C)	引張強度(-20°C)
セメントモルタル	11.1	18.2 GPa	---
鋼 板	10.8	208.0 GPa	---
液状エポキシ樹脂(EP)	79.6	図-1参照	35.0 MPa
ゴム状弾性エポキシ樹脂(SEP)	130.0	"	1.2 MPa
ポリマーセメントスラリー(PCS)	18.5	"	5.1 MPa

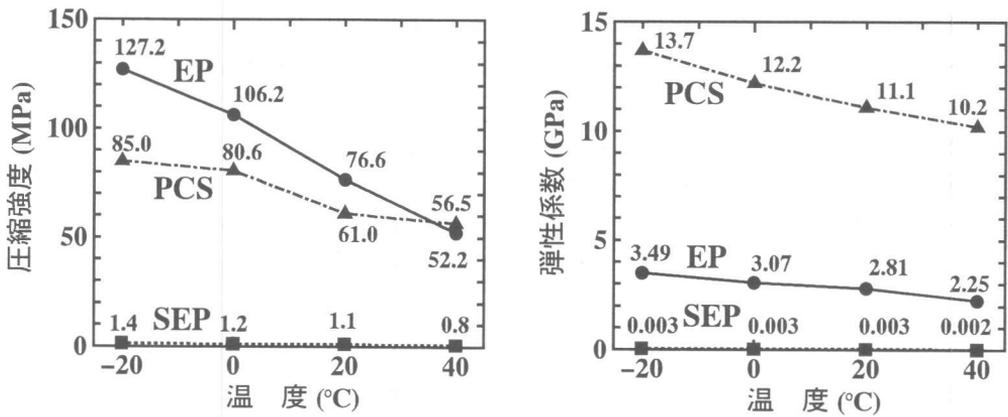


図-1 接着材の温度と圧縮強度および弾性係数の関係

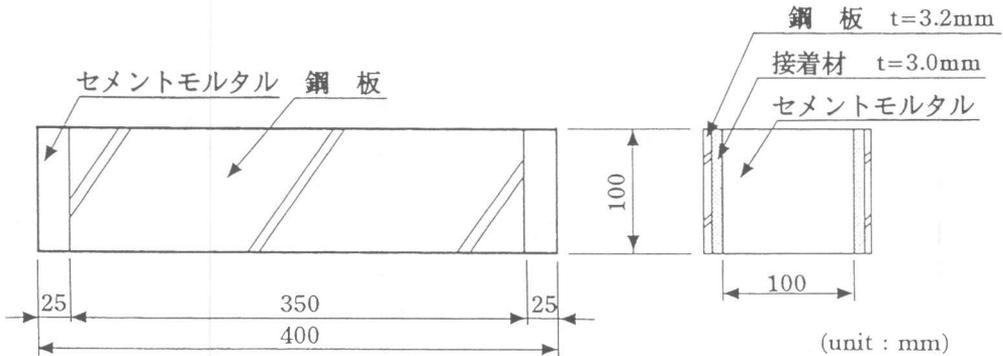


図-2 鋼板を接着した梁供試体

2. 3 試験方法

供試体を温度槽に設置して温度履歴(図-5参照)を繰り返し、鋼板表面のひずみを測定した。温度は、最初に130時間ほどの緩やかな履歴(+20°C→+40°C→+20°C→0°C→-20°C→0°C→+20°C)を2回繰り返し、その後に+40°Cと-20°Cを上下限温度とした急激な履歴を10回繰り返した。な

お、 -20°C および $+40^{\circ}\text{C}$ は日本の著しく低い気温と高い気温を想定したものであり、 0°C は氷点、 $+20^{\circ}\text{C}$ は常温を想定したものである。鋼板を両側面に接着したのは、曲げによる影響を生じさせないためである。また、温度変化による供試体部材軸方向の膨張収縮を妨げないように、供試体の下面にはテフロンシートを敷き、摩擦を出来るだけ生じさせないようにした。

3. 温度応力の解析

5層構造（鋼板+接着材+セメントモルタル+接着材+鋼板）の合成梁として温度応力の解析を行った。図-3に、接着材としてEPを用いて 40°C （ $+20^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ ）温度降下させた場合の解析例を示す。 ϵ_{free} は、各層を自由に膨張収縮させたときのひずみであり、 $\Delta\epsilon$ は合成梁とした場合のひずみの変化量である。 σ_{res} は ϵ_{free} を生じさせないための拘束応力であり、言い換えれば ϵ_{free} の符号を逆にして弾性係数を乗じたものである。また、 $\Delta\sigma$ は応力の変化量である。 σ は σ_{res} と $\Delta\sigma$ を合計したものであり、これが求める温度応力となる。[1]

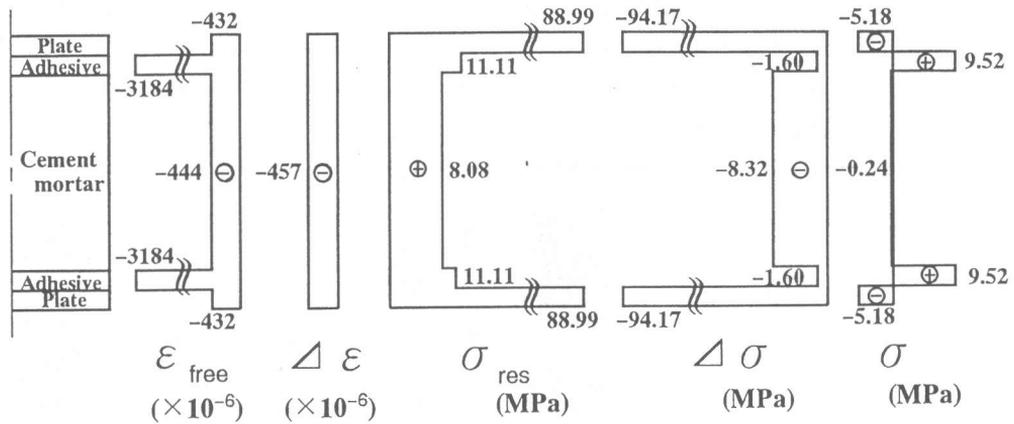


図-3 EPを用いて 40°C 温度降下させた場合の温度応力解析

4. 曲げ載荷試験の概要

温度変化を与えた実験が完了した梁供試体の片側の接着材界面付近セメントモルタルをコンクリートカッターで切断し、図-4に示すように3等分点曲げ載荷試験を行った。

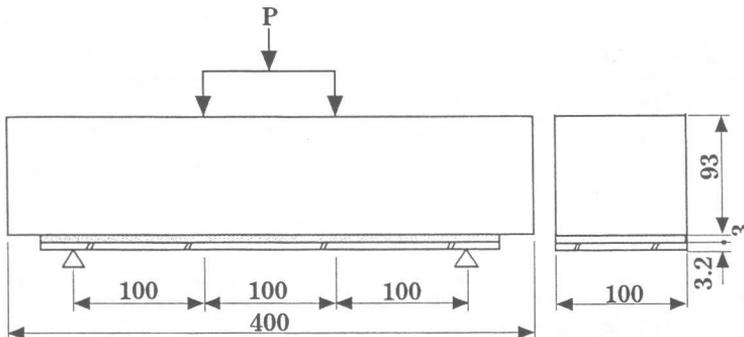


図-4 3等分点曲げ載荷試験

5. 結果と考察

5. 1 温度変化を与えた実験結果と温度応力解析結果および考察

時間と供試体中心温度との関係、および接着材にEPを用いた場合の時間と鋼板表面のひずみの関係を図-5に示す。鋼板表面のひずみは温度変化に良く追従しており、図-3に示す40℃(+20℃→-20℃)温度降下させた場合の解析ひずみである -457×10^{-6} と実験値 -448×10^{-6} (図-5中の80~100時間付近また220~240時間付近)は、良い対応を示している。また、接着材にPCSEを用いた場合も同様に、解析ひずみである -447×10^{-6} と実験値 -440×10^{-6} は良い対応を示している。ここで、接着材にEPとPCSEを用いて温度を変化させた場合の、温度差と鋼板応力および接着材応力の解析結果を図-6に示す。40℃温度降下させた場合($\Delta T = -40^\circ\text{C}$)をみると、鋼板応力および接着材応力共にEPがPCSEより大きい値を示している。しかし、EPの接着材応力9.52MPaが引張強度35MPaに対して十分余裕があるのに比較して、PCSEの接着材応力4.02MPaは引張強度5.1MPaとほぼ等しく、温度変化が40℃より大きくなる場合にはPCSE自体にひび割れが生じる危険性がある。このことから、鋼板接着工法の接着材としては、EPがPCSEよりも優位であると考えられる。また、40℃温度降下させた場合($\Delta T = -40^\circ\text{C}$)の、接着材の厚さと鋼板応力および接着材応力の解析結果を図-7に示す。この図から接着材の厚さを薄くすると、接着材応力はわずかながら大きくなるが、鋼板応力が著しく減少する。このことから、接着材の厚さは可能な限り薄くするべきであると考えられる。

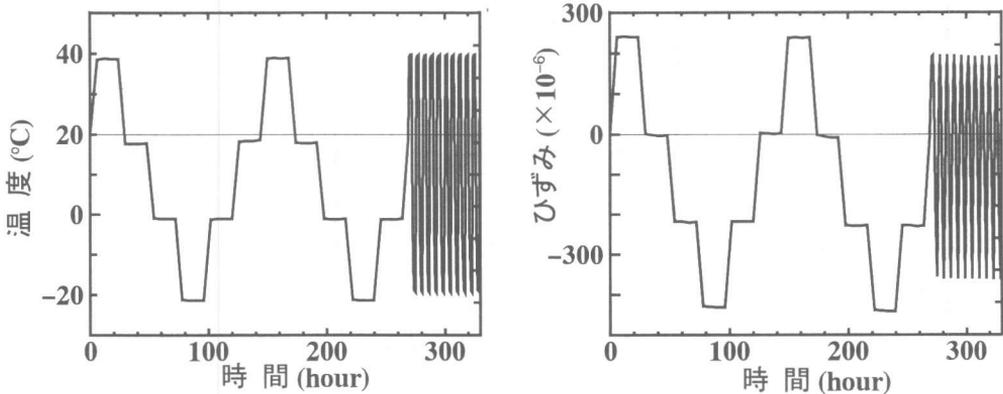


図-5 時間と供試体中心温度および鋼板表面ひずみの関係

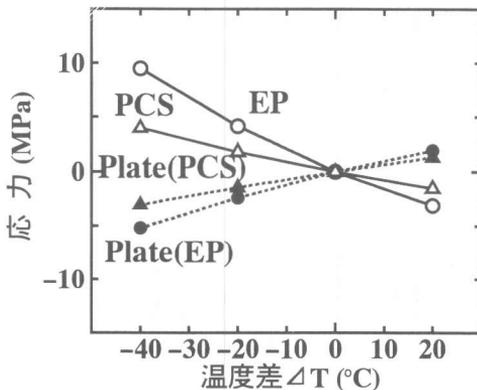


図-6 温度差と応力解析結果

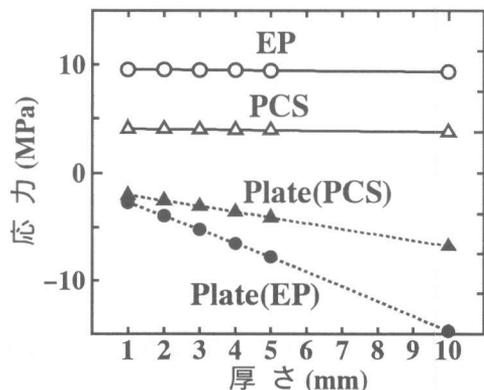


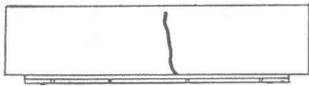
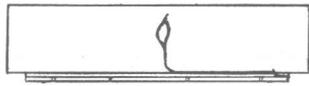
図-7 接着材の厚さと応力解析結果

5. 2曲げ載荷試験結果および考察

各供試体のひび割れ発生荷重、最大荷重および破壊形態を表-2に、荷重と支間中央変位の関係を図-8に示す。

各供試体の破壊状況について述べる。EPは、大きな衝撃音と共に支点から載荷点に向かってひび割れが発生し荷重が急激に低下し破壊へと至った。SEPは、鋼板と接着材、セメントモルタルと接着材の両界面とも剥離等は発生せず、セメントモルタル本体に曲げひび割れが発生し破壊した。PCSは、最初に鋼板端部で鋼板とPCSとの間に水平ひび割れが発生し、徐々に支間中央に向かって進展し、セメントモルタル本体が曲げ破壊を起し終局へと至った。

表-2 曲げ載荷試験結果

使用接着材	ひび割れ発生荷重	最大荷重	破壊形態
EP	49.0 kN	49.0 kN	
SEP	11.8 kN	12.8 kN	
PCS	21.6 kN	33.3 kN	

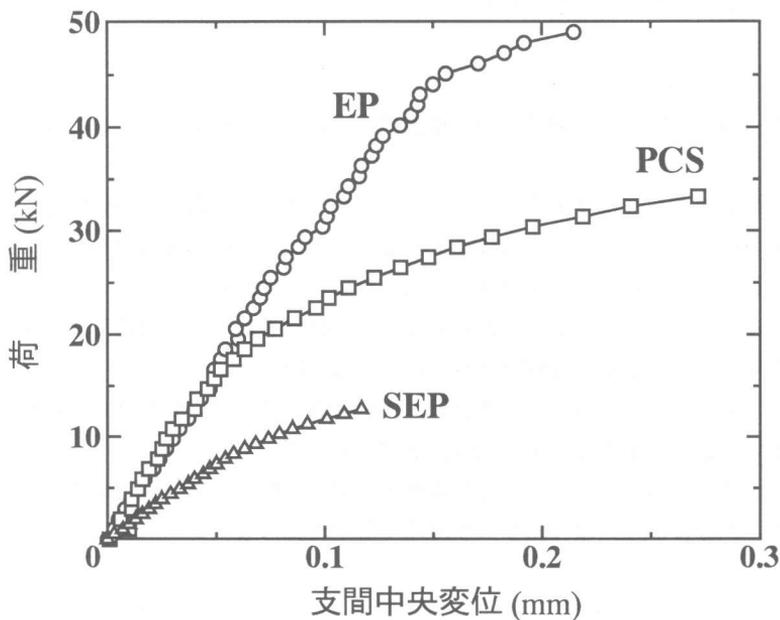


図-8 荷重と支間中央変位

次に、図-8をみると、SEPを接着材として用いた梁は、他の梁と比較して同一荷重時の変形量が大きく、合成梁としてではなく重ね梁としての傾向を示している。さらにこの梁の最大荷重は12.8kNであり、他の2種類の梁の1/3~1/2程度の小さい値を示している。また、PCSを用いた梁は20kN付近から変形量が増大し始めており、合成梁としての機能が失われていく傾向にある。EPを用いた梁は40kN付近までほぼ一定の変形性状を示しており、合成梁としての機能を十分保持している。

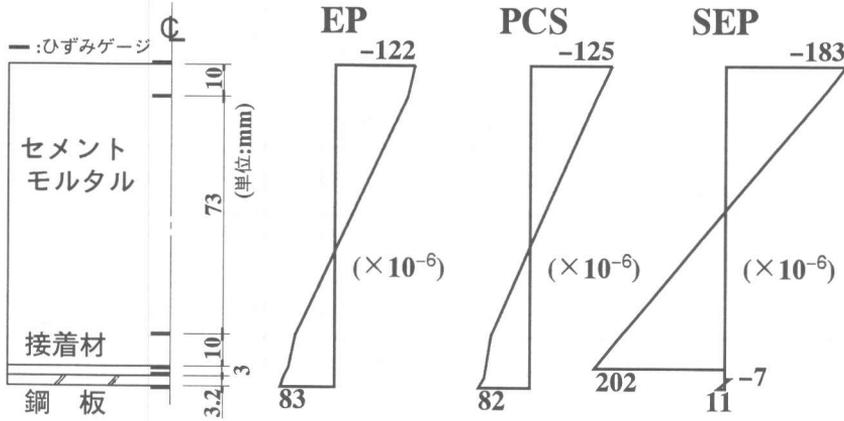


図-9 断面内ひずみ分布

荷重が9.8kNの時の支間中央における断面内のひずみ分布を図-9に示す。この図からもわかるように、EPとPCSを用いた梁は、セメントモルタルと鋼板が一体化した合成梁として機能しているが、SEPを用いた梁は重ね梁となっていることが明らかである。このことから鋼板接着工法用の接着材としてSEPは不適であると判断される。

6. まとめ

鋼板接着工法の接着材に関して温度応力と補強効果の観点から検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- 1) 鋼板を接着したセメントモルタル梁に対して、温度変化を与えた場合の鋼板のひずみの実験値と温度応力の解析によるひずみの値は良く対応しており、温度応力の解析が十分可能である。
- 2) ポリマーセメントスラリーを接着材として用いた場合、温度降下が著しいと接着材自体にひび割れが生じる危険性がある。また、合成梁としての機能を最後まで保持することができず、鋼板接着工法用の接着材として適切な材料であるとは言い難い。
- 3) 著しく小さい弾性係数を持つゴム状弾性エポキシ樹脂を接着材として用いた場合、合成梁としての機能を果たさず、鋼板接着工法用の接着材として不適である。
- 4) 現状では、一般的に用いられている液状エポキシ樹脂が鋼板接着工法用の接着材として最適である。また、接着材の厚さは可能な限り薄くするべきである。

参考文献

- 1) Ghali, A. & R. Favre 著、川上洵・樫福浄ほか訳：コンクリート構造物の応力と変形、技報堂出版、pp. 21~65、1994