

論文 鋼板で補強されたコンクリート円筒部材の温度応力

小俣 富士夫^{*1}・川上 洵^{*2}・徳田 弘^{*3}・加賀谷 誠^{*4}

要旨：コンクリート製円筒部材の補強方法として外周に鋼板を接着する方法を対象とし、円柱供試体による補強効果および円筒部材による温度応力に関する実験的・解析的な検討を行った。その結果、1)セメントコンクリートでは圧縮および割裂試験において鋼板補強による耐力の向上が認められた、2)ポリマーモルタルでは圧縮試験においては耐力の向上が認められたが割裂試験では認められなかった、3)解析によって補強された円筒部材の温度応力の算定が可能である、4)セメントコンクリート円筒部材を鋼板で補強する場合、温度応力の観点から接着材厚さを薄くするべきである、という結論が得られた。

キーワード：円筒部材、鋼板接着補強、温度応力解析、エポキシ樹脂、補強効果

1. はじめに

平成7年の兵庫県南部地震を契機に、コンクリート構造物に対する補強が注目されている。鉄筋コンクリート橋脚では曲げ耐力およびせん断耐力の向上等を目的として、橋脚の外周に二つ割りまたは四つ割りにした鋼板を配置し溶接した後に、鋼板とコンクリートとの間隙にエポキシ樹脂や無収縮モルタルなどを注入し、鉄筋コンクリート橋脚と鋼板を一体化させる補強方法が一般に採用されている。管路などのコンクリート円筒部材に対して補強する必要がある場合、橋脚と同様に外周に曲面の鋼板を配置して補強する方法の適用が可能であると考えられる。

本研究では、セメントコンクリートおよびポリマーモルタルからなる円筒部材の外周に、鋼板を接着して補強する方法に対して、基礎的な補強効果を把握することを目的として、1軸方向圧縮試験および割裂試験を行い、補強効果に対する検討を行った。さらに、円筒部材の内外に温度差が生じる場合を想定して、鋼板で補強された円筒部材を外部から加温することにより発生する温度ひずみに対して、実験および解析[1]~[3]の両面から考察を加えた。

2. 補強効果に関する実験の概要

2. 1 使用材料

主たる材料として、セメントコンクリートおよびポリマーモルタルの2種類を用いた。セメントコンクリートには、普通ポルトランドセメント、最大寸法15mmの碎石および砕砂を使用し、水セメント比は37.9%とした。ポリマーモルタルには、不飽和ポリエステル樹脂、珪砂および炭酸カルシウムを使用し、その重量配合比は110:1921:215(kg/m³)である。なお、セメントコンクリート、ポリマーモルタルともに、実際に遠心力鉄筋コンクリート管などに広く使用されている材料である。また、鋼板は1.2mm厚さの熱間圧延軟鋼板SPHCを使用した。接着材には、通常橋脚の補強に使用されている液状エポキシ樹脂(厚さ3mm)を使用した。使用材料の物理的性質を表-1に示す。

-
- *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 秋田大学長、工博(正会員)
 - *4 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

セメントコンクリート			ポリマー（不飽和ポリエステル樹脂）モルタル				
圧縮強度	弾性係数	熱膨張係数	圧縮強度	弾性係数		曲げ強度	熱膨張係数
				(20℃)	(60℃)		
55.7 MPa	33.4 GPa	$10.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	83.2 MPa	18.6 GPa	12.1 GPa	27.0 MPa	$26.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
鋼板			エポキシ樹脂				
降伏点	引張強さ	弾性係数	熱膨張係数	引張強度	弾性係数	接着強度	熱膨張係数
286 N/mm ²	375 N/mm ²	202 GPa	$10.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	48.3 N/mm ²	2.81 GPa	14.3 N/mm ²	$79.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

2. 2 供試体および試験方法

圧縮試験および割裂試験に用いた供試体は、直径10cm×高さ20cmの円柱の無補強供試体、および円柱の外周に鋼板を配置して接着した補強供試体の2種類である。補強供試体の概要を図-1に示す。なお、鋼板はコアコンクリートのポアソン比の影響による横方向の変形を拘束することを目的として、両端面から1cm短くして高さを18cmとし、圧縮試験時に鋼板に直接荷重されることを避けた。また、圧縮試験用供試体には円周方向および軸方向のひずみを測定するために、相対するセメントコンクリート（またはポリマーモルタル）側面（補強供試体では、鋼板表面も同様）に直交させてひずみゲージを貼付した。また、割裂試験用供試体には垂直方向及び水平方向のひず

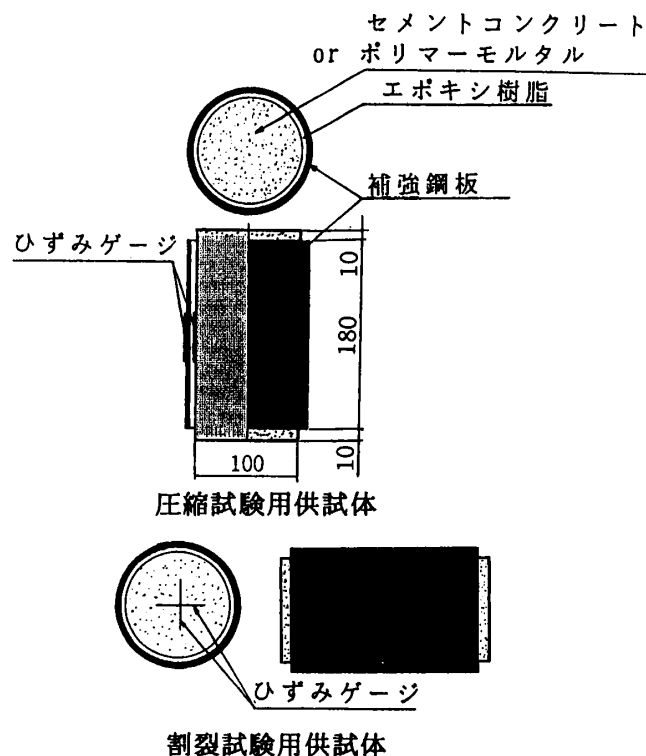


図-1 圧縮および割裂試験用供試体

みを測定するために、両端面にひずみゲージを貼付した。なお、圧縮試験はJIS A 1108に、割裂試験はJIS A 1113に準じて行った。測定項目は、荷重およびひずみである。

3. 補強効果に関する実験結果と考察

各供試体の荷重とひずみの関係を図-2に示す。図-2から圧縮試験においては、ポリマーモルタル無補強供試体の軸方向最大ひずみが、セメントコンクリート無補強供試体の最大ひずみの5倍程度の値を示している。またセメントコンクリートの補強供試体は、無補強供試体と比較して同一荷重におけるひずみが2/3程度と小さい値を示しており、補強効果が現れている。一方ポリマーモルタルにおいても、無補強供試体のひずみの4/5程度の値を示しており、同様に補強効果があることがわかる。

また、割裂試験においては、ポリマーモルタル無補強供試体の最大横ひずみは、セメントコンクリートの6倍程度の値を示しており、大きな伸び能力を有していることがわかる。セメントコンクリートにおいて、同一荷重における補強供試体のひずみは無補強供試体のひずみの3/4程度の小さな値を示しており、補強効果がうかがえる。ただし、両者の最大ひずみに大きな差異は

生じていない。

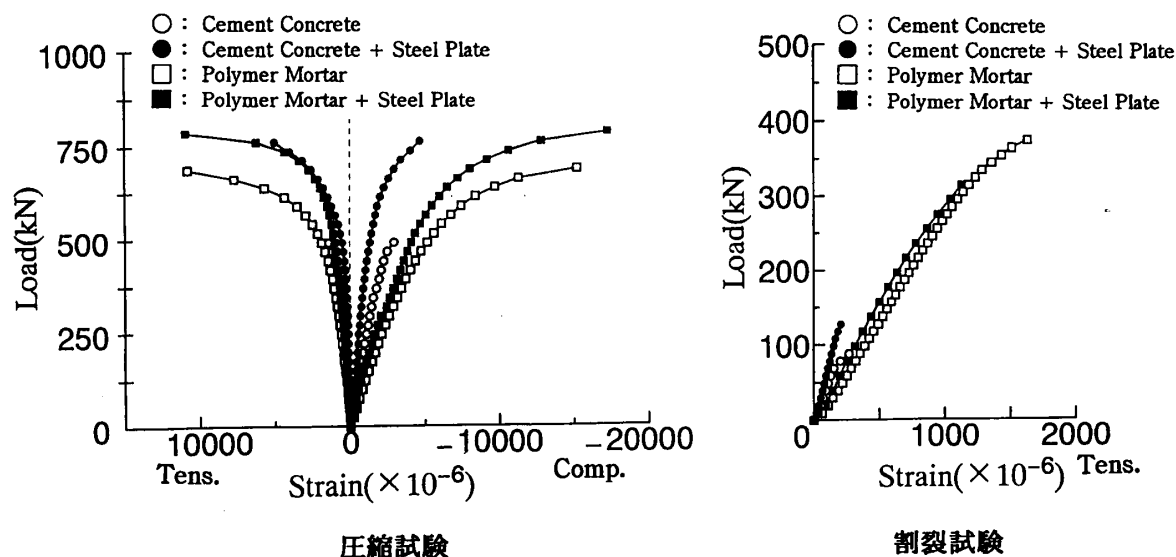


図-2 荷重とひずみの関係

圧縮試験における最大荷重（最大応力）、および割裂試験におけるひび割れ発生荷重（コアコンクリートにひび割れが生じる荷重）を表-2に示す。数値は、同一条件の3体の平均値である。

表-2 圧縮試験および割裂試験の結果

材 料 種 類	項 目	圧 縮		割 裂
		最大荷重 (kN)	最大応力 (N/mm ²)	ひび割れ発生荷重 (kN)
セメントコンクリート	無補強供試体	466.8	59.4	9.23
	補強供試体	778.6	99.1	12.82
ポリマーモルタル	無補強供試体	681.1	86.7	36.90
	補強供試体	780.6	99.4	35.00

表-2から、圧縮試験におけるセメントコンクリートとポリマーモルタルの無補強供試体の最大応力（圧縮強度）を比較する。本研究で用いたセメントコンクリートも一般のセメントコンクリートと比較して高強度ではあるが、ポリマーモルタルはさらにセメントコンクリートの1.5倍程度の強度を示しており、圧縮強度における優位性を示している。つぎに、同一材料における無補強供試体と補強供試体の最大荷重を比較する。セメントコンクリートにおいては、補強供試体は無補強供試体の1.67程度の値を示しており、鋼板による補強効果が高いことがわかる。無補強供試体と補強供試体との最大荷重の差311.8kNは、補強供試体においてコアコンクリートが圧縮力を受けたときにポアソン比によって生じる横方向の変形を鋼板が拘束する力、この力を内圧と考えて計算される鋼板の負担する荷重325kNとほぼ一致する。一方、ポリマーモルタルにおいては無補強供試体の1.15倍程度の値しか示しておらず、セメントコンクリートに比較すると補強効果は小さいといえる。これはセメントコンクリートやポリマーモルタルの強度と、鋼板の厚さとの比率（セメントコンクリート = $59.4 / 1.2 = 49.5$, ポリマーモルタル = $86.7 / 1.2 = 72.25$ ）が関係しているのではないかと考えられる。

つぎに、割裂試験におけるセメントコンクリートとポリマーモルタルの無補強供試体の最大荷重を比較する。ポリマーモルタルはセメントコンクリートのほぼ4倍程度の値を示しており、圧縮強度よりもさらに著しい優位性を示している。また、無補強供試体と補強供試体を比較すると、

セメントコンクリートでは無補強供試体の1.4倍程度の値を示したが、ポリマーモルタルではほぼ同じような最大荷重を示した。すなわち、ポリマーモルタルを用いた割裂試験においては、鋼板による補強効果はほとんど認められない。

4. 円筒部材の温度変化による実験の概要

4. 1 使用材料および供試体

2. 1に示した材料と同一のものを使用した。供試体は、内径200mm、肉厚27mm、長さ460mmの円筒であり、JIS A 5303 に示す呼び径200mmの遠心力鉄筋コンクリート管と同形状のものを用い、所定の長さ460mmに切断したものである。なお、本研究においては無筋とした。また、2. 2と同様に円筒部材だけの無補強供試体、円筒部材の周囲に鋼板を配置して接着した補強供試体の2種類を用いた。補強供試体の概要を図-3に示す。図に示すように、供試体の外面および内面に円周方向および軸方向のひずみゲージを貼付した。また、ひずみゲージの位置には、温度を測定するために銅-コンスタンタン熱電対を配置した。

4. 2 実験方法

20℃の実験室内に置かれた供試体の外周に、1.5mm厚さのフレキシブルなシート状発熱体を密着して加温した。供試体の上下面には、断熱することを目的として、独立気泡のポリエチレン発泡体を取り付けた。なお、シート状発熱体は120V仕様のシリコンラバーヒーターであり、外面の温度がほぼ60℃となるようにした。供試体外面および内面の温度が定常状態になるまで継続して加温し、定常状態になったことを確認してから加温を停止した。測定項目は経過時間と所定の位置のひずみおよび温度であり、加温開始と同時に測定を開始し、加温停止後供試体がほぼ室温になった時点で終了した。なお、ひずみは、温度変化による膨張収縮が小さい石英ガラス（熱膨張係数 $=0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）を基準にして校正している。

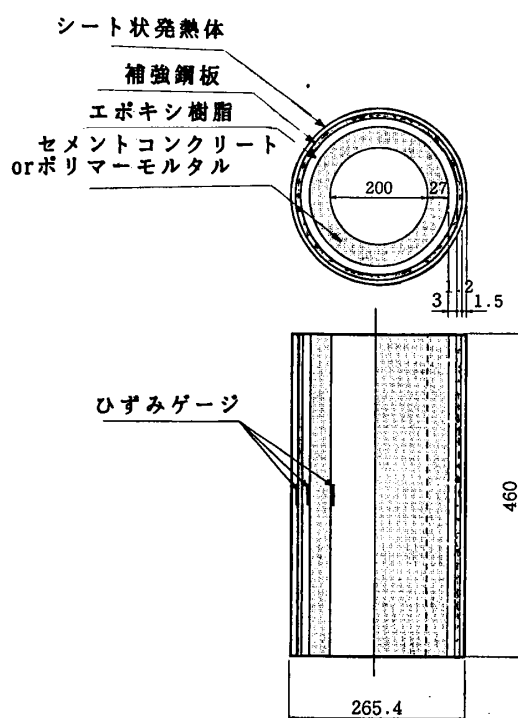
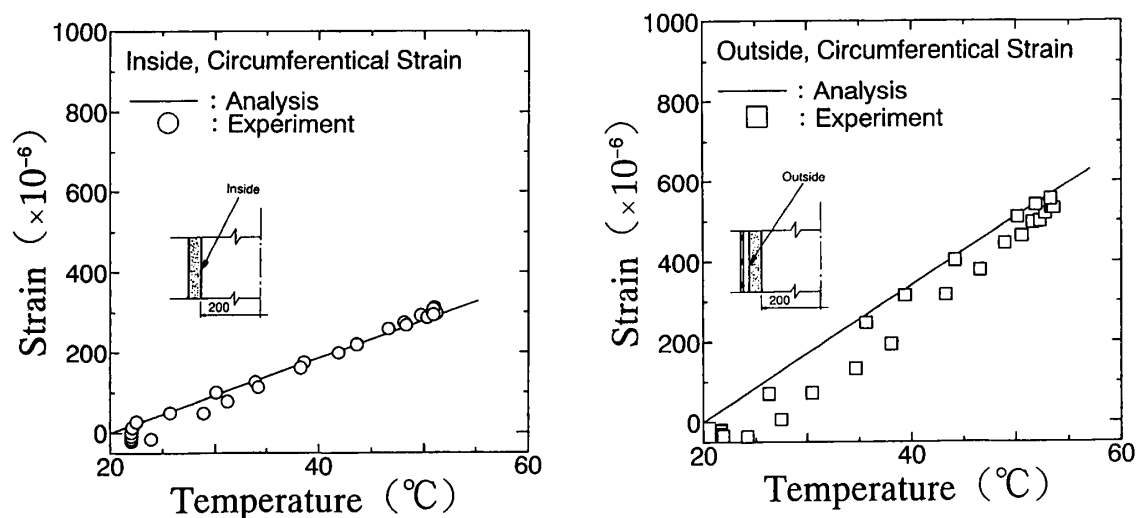


図-3 温度変化を受ける供試体

5. 温度変化を与えた実験結果と考察

実験の結果、セメントコンクリートのみの供試体の場合、円筒内面のひずみは温度上昇29.2℃に対して円周方向ひずみ 298×10^{-6} 、軸方向ひずみ 341×10^{-6} を示しており、解析[3]に基づく円周方向ひずみ 347×10^{-6} とほぼ近似した値である。円筒外面の円周方向のひずみは、内面に比較して若干ばらつくものの、温度上昇38.4℃における解析値が 446×10^{-6} であるのに対して実験値 482×10^{-6} を示しており、ほぼ対応しているといえる。ポリマーモルタルのみの供試体の場合もセメントコンクリートのみの場合と同様に、温度上昇28.3℃における円周方向の内面ひずみ解析値 782×10^{-6} に対して実験値 683×10^{-6} 、温度上昇43.1℃における円周方向の外面ひずみ解析値 1150×10^{-6} に対して実験値 1069×10^{-6} と比較的良好な対応を示している。またセメントコンクリートに鋼板を接着した供試体の場合、温度上昇27.7℃における円周方向の内面ひずみ解析値 278×10^{-6} は実験値 271×10^{-6}

と良く対応している。セメントコンクリート無補強供試体の内面、およびポリマーモルタル補強供試体の外面の温度とひずみの関係を、代表的な例として図-4に示す。



セメントコンクリート無補強供試体内面 ポリマーモルタル補強（鋼板）供試体外面

図-4 温度とひずみの関係

以上述べてきたように、解析[3]によって円筒部材の温度ひずみおよび温度応力の算定が可能である。つぎにこの解析方法を用いて、鋼板を接着して補強したセメントコンクリートおよびポリマーモルタル円筒部材の円周方向における温度応力の算定結果を図-5に示す。なお、図-5には、接着材であるエポキシ樹脂の厚さを3mmおよび10mmとした2種類の場合の結果を示している。ここで橋脚補強などの仕様[4]において、樹脂の厚さは一般に4mm程度を標準としているが、若干薄くなる場合を考慮して3mm、コンクリート表面の不陸などにより厚くなる場合を考慮して10mmを選定した。また、温度には実測値である鋼板表面温度 57.6°C （温度上昇 37.6°C ）および円筒内面温度 49.3°C （温度上昇 29.3°C ）を用いた。

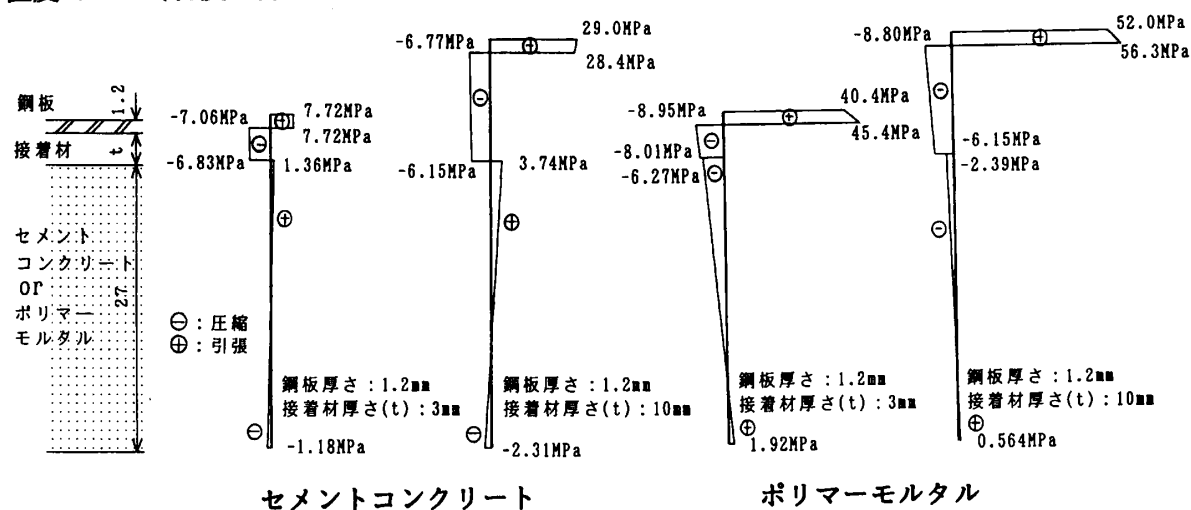


図-5 温度応力の解析結果

図-5から、セメントコンクリート円筒部材の外周に鋼板を接着して補強する場合、接着材の厚さが10mmであると接着材との界面に生じる円周方向のコンクリート応力は 3.74MPa であり、コンクリートの引張強度である 2.88MPa を越えるために軸方向のひび割れが生じると考えられる。つぎ

に、接着材の厚さを1mmから10mmに変化させた場合の所定位置の温度応力に対する解析結果を図-6に示す。図-6から接着材の厚さが7mm程度を越えると、コンクリート外面（図中の○—○）に軸方向のひび割れが生じる危険性があることがわかる。以上のことから、セメントコンクリート円筒部材の外周に鋼板を接着して補強する場合、接着材としてエポキシ樹脂を用いるのであれば、温度応力の観点から接着材の厚さを可能な限り薄くするべきであると考えられる。

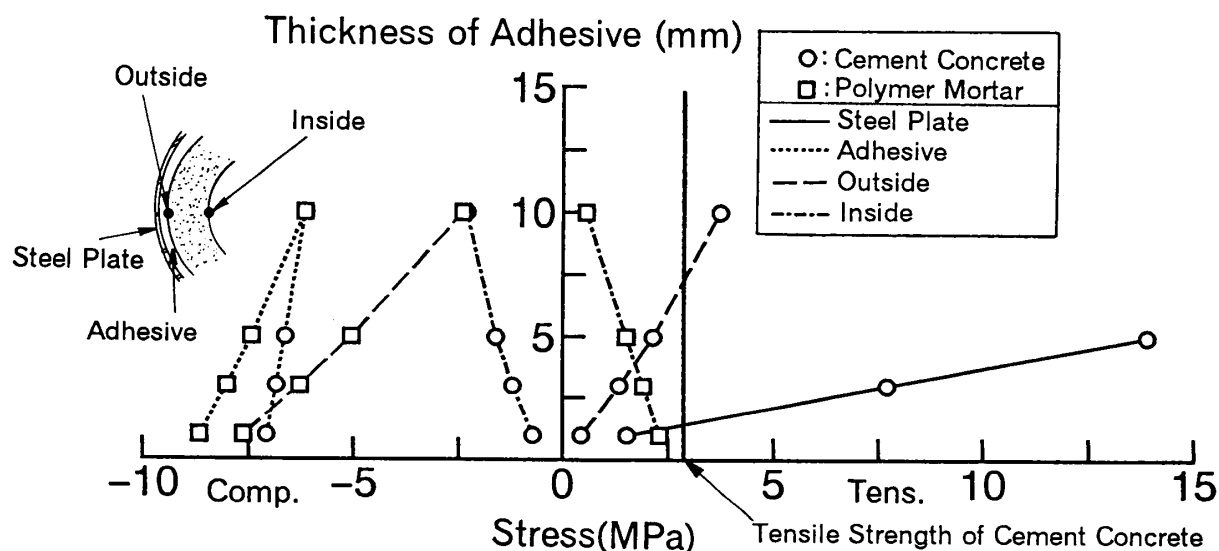


図-6 接着材の厚さを変化させた場合の温度応力

6. まとめ

セメントコンクリートおよびポリマーモルタル製円筒部材の外周に鋼板を接着する補強方法に対して、補強効果および温度応力を検討した結果、以下の結論が得られた。

- 1) セメントコンクリート円筒部材を鋼板で補強すると、圧縮および割裂試験において耐力の向上やひずみの低減という補強効果が認められた。
- 2) ポリマーモルタル円筒部材を鋼板で補強すると、圧縮試験において若干の耐力向上がみられた以外、明確な補強効果は認められなかった。
- 3) 鋼板で補強された円筒部材に対して、外部から加温する場合に生じるひずみの実験値と解析値は対応しており、解析での算定が可能である。
- 4) セメントコンクリート円筒部材の外周に鋼板を接着して補強する場合、接着材としてエポキシ樹脂を使用するのであれば、温度応力の観点から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. and Favre, R. 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
- [2] 小俣富士夫、川上洵、徳田弘、加賀谷誠：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp.887-892、1995.6
- [3] 浅井隆一、川上洵、加賀谷誠、水城康男：RC曲線部材の温度応力解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.383-388、1993.6
- [4] 阪神高速道路公団：道路構造物の補修要領、第2部、コンクリート構造物、p162、1990.6