

論文 有限要素法による補修用積層化樹脂材の界面特性評価と材料設計

中西 啓*¹・阿山泰久*²・宮本文穂*³・若原直樹*⁴

要旨 補修用積層化樹脂材が種々の外力を受ける場合について、その界面の応力集中に着目し、界面においてはがれないという力学的要求性能を満足する材料の選定指標を提案した。そして、その指標と樹脂材の弾性係数の関係を定性的に求め、パラメータ解析により材料選定を行った結果、下塗りは軟らかい樹脂、中塗りは温度変化を受ける場合は軟らかい樹脂で、曲げを受ける場合は硬い樹脂、上塗りは温度変化を受ける場合は考慮不要で、曲げを受ける場合は硬い樹脂を塗布するのがよいという結論を得た。

キーワード：積層化樹脂材，有限要素法，層間せん断応力，層間ばね定数，界面特性

1. はじめに

材料選定が材料学的観点と力学的観点の両方から行われるのが最良であることは明かである。しかし、樹脂材は2層もしくは3層構造で積層化して使用される場合が多く、下塗りは塗装系に対する母材の悪影響の防止と接着性の増加、中塗りは下塗りと上塗りに対する接着性を持ちつつ、伸び、防水性、遮塩性の確保、上塗りは耐候性の付加、色、つやを良くするといったように材料に対する要求性能が細分化してきている現状では、上記のような材料学的観点からのみ検討されるのが一般的となっており、力学的観点からの検討は行われていないと言っても過言ではない。そこで本研究(図1参照)では、コンクリート構造物の補修に用いられる積層化樹脂材が外力として曲げあるいは温度変化を受ける場合について、樹脂材端部とひびわれ周辺部の層間せん断(温度)応力の集中部に着目した界面における力学的挙動を有限要素法(FEM)により解析した。そして温度試験と曲げ試験により測定された樹脂材のひずみとFEM

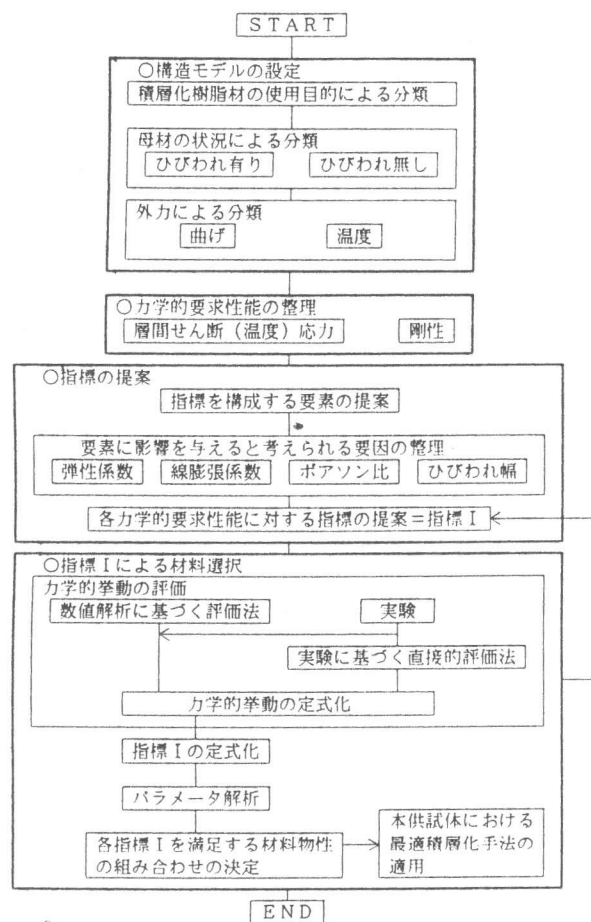


図1 本研究の流れ

*1 神戸大学大学院 自然科学研究科 建設学専攻 (正会員)

*2 (株)大林組

*3 神戸大学助教授 工学部 建設学科 (正会員)

*4 コニシ(株)大阪研究所

による数値解析により得られる樹脂材のひずみより層間せん断ばね定数を同定し、層間温度応力および層間せん断応力と樹脂材の弾性係数との関係を定性的に評価した。この結果を基に、材料設計上有効となる界面においてはがれないなどといった力学的要求性能に関する指標の確立を検討し、その指標による材料設計を試みた。

2. 有限要素法による積層化樹脂材界面の力学的挙動解析

従来の研究[1]では平面骨組み解析法および微分方程式法と実験を併用して界面における力学的挙動を解析した。しかし、母材にひびわれを有するモルタルを用いた供試体の場合、従来の解析手法ではその解析が困難であると考えられるので、本研究では界面の付着特性を表す要素としてBond-link要素を導入した2次元FEM解析を用いた。Bond-link要素は接着力を接点力として評価するものである。供試体は図2に示すように単純支持状態(スパン40cm)でモルタルの下面に樹脂材を1層あるいは3層塗布したものである。本解析では解析精度を良くするためにZooming法の適用を試みた。すなわち、まず初めに全体を粗く分割した要素モデルで計算し、これによって得られた各節点を界面近傍を含めて部分的に細かく分割した要素モデルに強制変位として与えて計算することにより界面での層間せん断応力を精度よく解析した。従来の研究[1]ですでに解析精度が確認されている平面骨組み解析(FRAME)の結果と本研究で新たに適用を試みたFEM解析による解析結果を比較することにより精度の検証を行う。温度変化を受ける場合についての層間温度応力分布の比較を図3に示す。これより両手法の解析結果はほぼ一致しておりFEM解析を用いても十分な解析結果が得られることが確認できる。そして、この解析結果のひずみ分布と実験より得られるひずみ分布から層間せん断ばね定数を同定し、その層間せん断ばね定数を用いて層間せん断応力および層間温度応力を求めた。

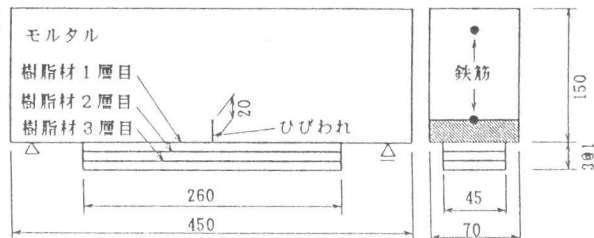


図2 供試体の形状・寸法 (単位mm)

Figure 3: Comparison of interlayer temperature stress distribution. The graph plots interlayer temperature stress (kgf/cm²) on the y-axis (0 to 8) against the distance from the resin layer end (cm) on the x-axis (0 to 10). Two data series are shown: F.E.M (filled circles) and FRAME (open circles). Both series show a sharp increase in stress near the resin end (0-2 cm), reaching a peak of approximately 6 kgf/cm², and then rapidly decreasing to near zero by 5 cm. The F.E.M and FRAME results are nearly identical.

図3 層間温度応力分布の比較

3. 界面における力学的挙動の検証および評価

3.1 実験の概要

本実験では、母材であるモルタルにあらかじめ人工ひびわれを導入し、弾性係数の異なる3種類のエポキシ樹脂材(H, M, S)を1層塗布したものを2体ずつと、エポキシ樹脂材3層の組み合わせを変えて塗布したもの(HMS, SHM)を2体ずつの計10体作成し、温度応力試験を行った後に同じ供試体を用いて曲げ試験を行った。さらに、母材であるモルタルの弾性係数とポアソン比を求めるためにモルタル供試体の圧縮試験を行うとともに、エポキシ樹脂材の弾性係数とポアソン比を求めるために引張試験(温度10℃と20℃のそれぞれで引張速度0.04mm/minと0.02mm/min)を行った。

3.2 実験結果および考察

圧縮（引張）試験より得られたモルタルおよび樹脂材の弾性係数とポアソン比を表1に示す。次に温度応力試験より、供試体に塗布された樹脂材1層目のひずみから樹脂材ダミーのひずみを減じた値を真のひずみとし、これをまとめて表2に示す。これより、樹脂材端部ではひずみが小さく、端部からある程度離れると一定の大きさに漸近することがわかる。これは、端部になるほど母材の拘束が小さくなる結果であると考えられる。また、ひびわれ位置を除くひびわれ近傍でのひずみの変化はほとんどみられない。樹脂材ダミーの温度変化によるひずみより

表1 樹脂材の弾性係数とポアソン比

樹脂の種類	弾性係数 kgf/cm ²	ポアソン比
H	25100	0.42
M	9650	0.48
S	5900	0.40
平均	—	0.43

表2 温度試験ひずみ結果 (μ)

供試体	ひずみ測定位置（樹脂材端部からの距離）						
	9mm	17mm	67mm	92mm	112mm	120mm	130mm
H	702.3	735.3	762.8	737.3	741.3	765.8	584.8
M	1080.0	1084.0	1122.0	1111.0	1124.0	1168.0	906.0
S	691.2	720.2	724.2	695.7	700.2	747.2	639.7
HMS	687.8	746.8	751.8	746.3	771.3	791.8	677.8
SHM	190.8	465.8	800.8	843.8	—	780.3	—

表3 線膨張係数(1/°C)

種類	線膨張係数
樹脂-H	9.50E-5
樹脂-M	1.31E-4
樹脂-S	1.05E-4
モルタル	5.81E-6

単位温度当たりのひずみ増分を求め、これにひずみゲージの温度保証値（線膨張係数： $\alpha=70 \times 10^{-6}$ (1/°C))を加えることにより樹脂材の線膨張係数とした。表3にその値をまとめて示す。

表4 曲げ試験ひずみ結果 (μ)

供試体	ひずみ測定位置（樹脂材端部からの距離）						
	9mm	17mm	67mm	92mm	112mm	120mm	130mm
H	28.0	30.0	36.5	27.5	28.5	126.5	933.0
M	28.0	30.0	40.0	14.0	0.0	73.0	139.0
S	24.5	25.5	27.0	16.5	7.0	123.0	1010.0
HMS	31.5	35.5	40.0	52.0	69.0	298.0	305.5
SHM	16.0	27.5	55.5	112.0	—	370.5	—

また曲げ応力試験による樹脂材1層目のひずみを表4にまとめて示す。これより温度変化を受ける場合大きく異なり、樹脂材端部ではひずみの変化はほとんどないが、ひびわれ近傍およびひびわれ上ではかなり急激に変化して大きな値を示していることがわかる。これは曲げによりひびわれ幅が大きくなることによって、ひびわれ上面の樹脂が引っ張られるためであると考えられる。

3.3 界面での力学特性の評価

3.3.1 層間せん断ばね定数と界面での力学的挙動の評価

FEM解析を適用し同定した層間せん断ばね定数を表5に示す。表中の k_{01} は母材と樹脂材1層目

表5 層間せん断ばね定数(kgf/cm²)

供試体	温度 k_{01}	曲げ k_{01}
H	1.34E+5	1.05E+5
M	5.05E+4	1.55E+4
S	1.20E+4	9.00E+3
HMS	1.84E+5	1.70E+5
SHM	2.70E+3	2.00E+3

の間の層間せん断ばね定数である。ここでの曲げ荷重は導入ひびわれが進展する近傍の荷重(750kgf)で解析を行った。表5より温度試験

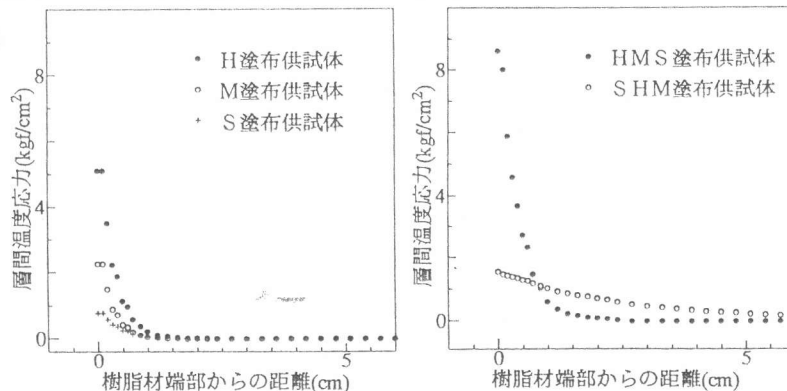


図4 樹脂材端部からの層間温度応力分布

と曲げ試験により得られた層間せん断ばね定数を比較すると多少の違いはあるもののほぼ同様の値を示していると考えられ、曲げにおいても温度と同じばね定数を用いてもよいと考えられる。従って、解析では両者の平均値を層間せん断ばね定数として用いた。1層塗布供試体の結果は弾性係数の大きい供試体ほど層間せん断

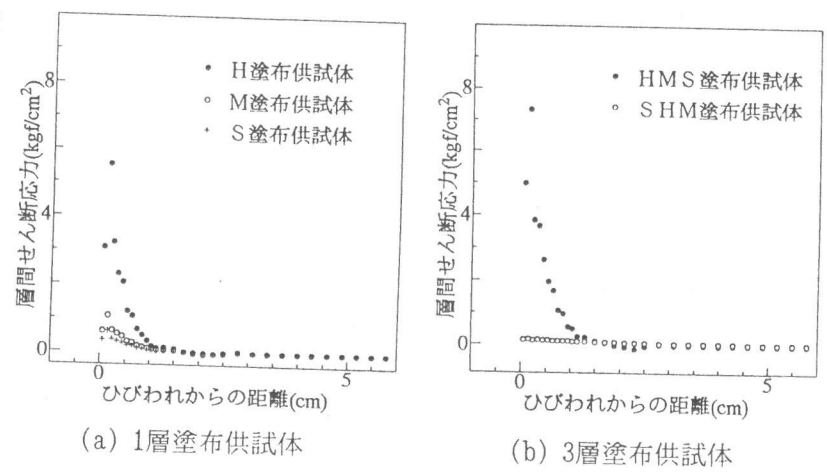


図5 ひびわれ位置からの層間せん断応力分布

断ばね定数も大きくなっている。平均した層間せん断ばね定数を用いて計算した層間温度応力分布と層間せん断応力分布を図4、図5に示す。両図より温度変化を受ける場合は樹脂材端部でのみ応力集中が起こり、ひびわれ近傍ではほとんど応力集中はないことがわかる。これに対して曲げを受ける場合はひびわれ近傍で応力集中が起こり、樹脂材端部では応力集中はほとんどみられないことがわかる。図4(a)、図5(a)を見る限り、弾性係数の大きい樹脂を塗布した供試体ほど応力集中部の最大値は大きくなっている。また、応力の集中幅は温度と曲げではそれほど変化がなく約1~2cmとなっている。さらに両図の(b)と比較すると、応力集中幅は1層塗布のものよりも3層塗布のものの方が大きくなる傾向がみられる。

3.3.2 層間せん断ばね定数のモデル化

図4(a)、図5(a)より、3.3.1で述べたように樹脂材の弾性係数と層間せん断応力の間には相関があると考えられ、力学的挙動を評価する上で樹脂材の弾性係数が重要なパラメータとなってくると思われる。そこで、まず層間せん断ばね定数 k_{ij} と樹脂材の弾性係数 E_i の関係を線形に仮定し、得られた関係式を一例として母材と樹脂材1層目の間で求めたものが次式である。

1層塗布供試体： $k_{01}=4.947E_1-6297.818$ 相関係数： $r=0.966$ (1)
 3層塗布供試体： $k_{01}=7.109E_1-1.352E_2-3.978E_3+35455.073$ 相関係数： $r=0.996$ (2)

4. 界面での力学特性を考慮した材料選定手法の提案

4.1 指標の提案

応力集中部に着目し、応力分布と樹脂材端部（あるいはひびわれ部）からの距離が囲む面積を界面破壊（はがれ）に対する指標 $A\tau$ として提案する。これは最大応力点付近の応力値と勾配を同時に考慮しており、この面積が界面破壊に必要なエネルギーに対してどの程度となっているかで界面破壊の有無を評価できるとものと考えられる。すなわち、この面積が小さいほどクラック伝播が拡大して界面破壊に至る可能性は小さいであろうと考えられる[1]。なお、指標を無次元化するにあたり、樹脂材端部からの距離に対しては樹脂厚で除した値を用いた。また、層間温度応力 τ_T に対しては母材の拘束熱応力 $\sigma=E\cdot\alpha\cdot t$ を、層間せん断応力 τ_L に対しては母材の平均せん断応力 τ_{mean} で除した値をそれぞれ用いた。

4.2 パラメータ解析

4.2.1 ポアソン比によるパラメータ解析

図6にポアソン比を3種類に変化させた場合の層間せん断応力分布の比較を示す。これより、ポアソン比を変化させても層間せん断応力はほとんど変化しないことがわかり、指標 $A\tau$ に対するポアソン比の影響はほとんどないと言える。

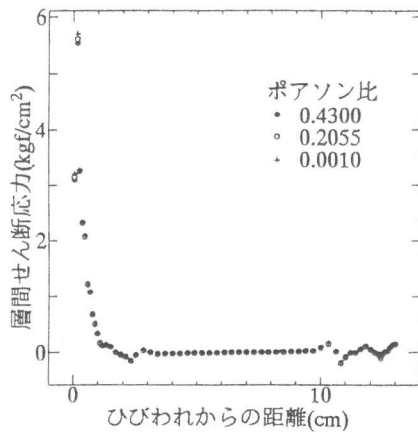


図6 パラメータ解析 (ポアソン比) による層間せん断応力分布

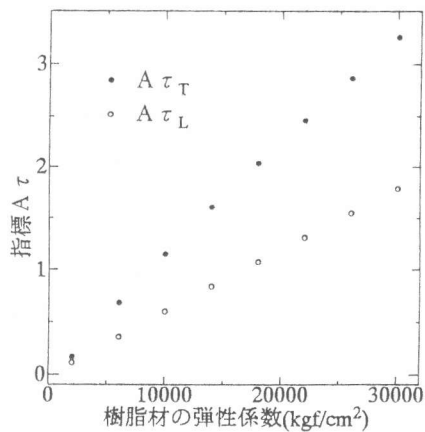
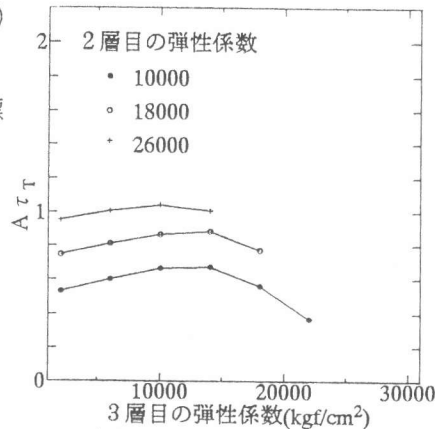


図7 $A\tau$ と弾性係数の関係

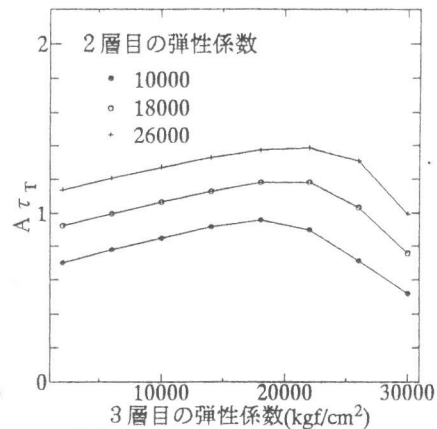
4.2.2 弾性係数によるパラメータ解析

3.3.2で定式化した式(1)と式(2)を用い、樹脂材の弾性係数を変化させて指標 $A\tau$ を求めた。ここで、温度変化の場合の指標を $A\tau_T$ とし、曲げ荷重の場合の指標を $A\tau_L$ と表すことにする。1層塗布供試体についての指標 $A\tau_T$, $A\tau_L$ と樹脂材の弾性係数の関係を図7に示す。こ

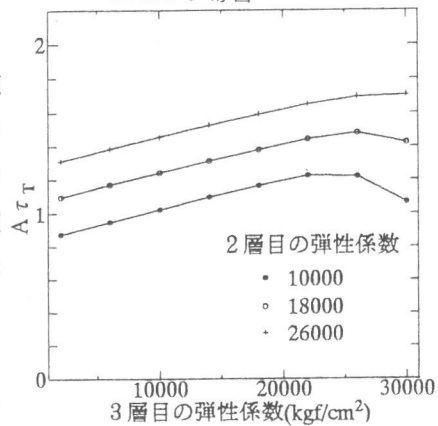
れより両方とも指標 $A\tau$ と弾性係数はほぼ線形関係にあることがわかる。次に3層塗布供試体について指標 $A\tau$ と弾性係数の関係を図8(a)~(c)および図9(a)~(c)にまとめて示す。図8(a)と図9(a)に示すように、1層目の樹脂材の弾性係数が小さいものはグラフが途中で途切れた状態となっている。これは前述の式(2)を用いてばね定数を決定したため、2,3層目が大きくなるとばね定数 k_{01} が負となり、現実にはそぐわない結果となるのでそれらの値は除いたためである。以下、各指標 $A\tau_T$, $A\tau_L$ ごとに解析結果を考察する。指標 $A\tau_T$ について、図8(a)~(c)より、1層目あるいは2層目の弾性係数が大きいほど指標 $A\tau_T$ は大きくなり、また3層目については3層目の弾性係数が1層目の弾性係数と同じかそれ以下では指標 $A\tau_T$ と弾性係



(a) 1層目の弾性係数が10000の場合



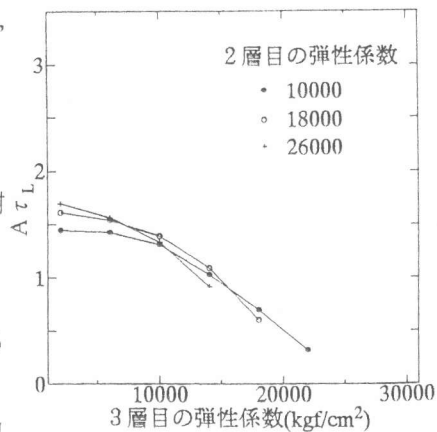
(b) 1層目の弾性係数が18000の場合



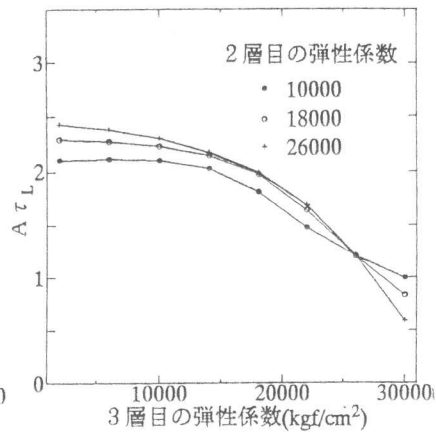
(c) 1層目の弾性係数が26000の場合

図8 $A\tau_T$ と弾性係数の関係

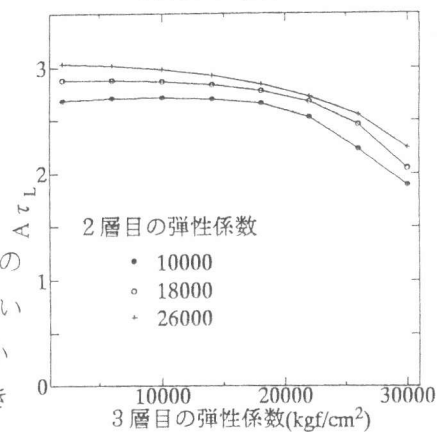
数は正の相関がみられるが、3層目の弾性係数が1層目の弾性係数より大きくなると負の相関がみられるようになる。ゆえに、1,2層目の樹脂材の弾性係数が小さい方が良いことが明かとなる。また、3層目に関してはある値を境にして相反する傾向が出ている。しかし、3層目は1,2層目に比べると弾性係数を変化させても指標



(a) 1層目の弾性係数が10000の場合



(b) 1層目の弾性係数が18000の場合



(c) 1層目の弾性係数が26000の場合

$A\tau_L$ の変動に及ぼす影響は小さいように思われる。よって、3層塗布の場合は必要な断面剛性の確保ということを考慮にいれないのであれば、全層に軟らかい樹脂を塗布した方が界面ではがれないと言った要求性能を満足する可能性は高いという結論に至る。一方、指標 $A\tau_L$ について図9(a)~(c)より、1層目の弾性係数が大きくなるほど指標 $A\tau_L$ は全体的に大きくなっているのがわかる。ここで、図9(a),(b)では、3層目の弾性係数が小さい場合、2層目の弾性係数が大きくなるほど指標 $A\tau_L$ は大きくなっており、3層目の弾性係数が大きい場合、2層目の弾性係数が大きくなるほど指標 $A\tau_L$ は小さくなっている。この傾向は

1層目が軟らかいほど顕著である。また、図9(c)では1層目と同様、図9 $A\tau_L$ と弾性係数の関係2層目も弾性係数が大きいほど指標 $A\tau_L$ は大きくなっている。さらに、3層目に注目すると、弾性係数が大きいほど指標 $A\tau_L$ は小さく、この変化は1層目が軟らかいほど顕著である。よって、曲げを受ける場合の層間せん断応力に対しては、1層目には軟らかい樹脂を、3層目には硬い樹脂を塗布する方が良く、2層目に関しては3層目が硬く1層目が軟らかい場合には硬い樹脂を塗布する方がよいという結論に至る。

5. まとめ

以下、本研究により得られた結果を示す。①温度変化を受ける場合は樹脂材端部で、曲げを受ける場合はひびわれ近傍で層間応力の集中がみられ、樹脂材の弾性係数と層間応力の集中部の大きさは線形関係にある。②ポアソン比の層間応力に対する影響はほとんどない。③樹脂材を3層積層する場合下塗りは軟らかい樹脂が良く、中塗りは温度変化を受ける場合は軟らかい樹脂が良く、曲げを受ける場合は硬い樹脂が良い。上塗りに関しては温度変化を受ける場合はその影響は考慮するに値しないが、曲げを受ける場合は硬い樹脂を塗布する方が良い。

参考文献

- 1) 宮本文徳・森川英典・木村聡文・若原直樹：コンクリート補修用積層化樹脂材の力学的挙動と材料設計に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.5，No.2，1994.7