

破壊力学を適用した補修用積層化樹脂材の界面挙動に基づく材料設計

大 林 組 正会員○阿山泰久 神戸大学大学院 学生員 中西 誉
神戸大学工学部 正会員 宮本文穂 コ ニ シ 正会員 若原直樹

1.はじめに コンクリート構造物の表面補修に使用される積層化樹脂材の材料選定に際しては、樹脂材の種々の機能を主に評価する材料学的観点からのみ検討される場合が多く、力学的観点からの検討はほとんどなされていないというのが現状であり、今後、界面における応力集中特性等の改善に関する力学的指標を確立することが要求される場合が考えられる。本研究では、ひび割れを有するモルタル母材に3層の樹脂材を3層塗布した供試体(図1参照)を用い、外力として温度変化を受ける場合と曲げを受ける場合の界面における力学的挙動を、界面に破壊力学を適用することにより評価し、外力に対応した材料設計指標として破壊力学パラメータを用いた材料設計法の検討を行い、パラメータの定性的な評価、考察を行うものである。

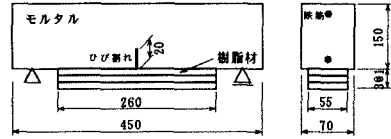


図1 供試体(単位mm)

2.破壊力学を適用した界面の力学的挙動の評価 積層化樹脂材の層間界面における力学的挙動を評価するための解析手法として2次元FEM解析を適用し、界面の接着特性のモデル化にはBond-link要素を導入した¹⁾。通常、破壊力学は図2のような均一材のき裂先端の応力解析および材料設計に用いられ、そのき裂先端の応力場、変位場はそれぞれのモードに対応する応力拡大係数に対してすべて相似となり、応力拡大係数が求まれば一意的に決まることになる²⁾。従って、応力拡大係数が破壊力学のパラメータとなり、疲労破壊、脆性破壊等の各種破壊現象あるいは挙動を特徴づけ、定量的に評価するのによく使われている。これに対し、異種材界面上のき裂問題に対する破壊力学は、均一材の破壊力学をそのまま適用することはできず、界面の破壊力学³⁾を適用する必要がある。本研究では、この破壊力学を界面に適用し、界面にき裂が生じたとしてその後のき裂進展および界面破壊に対するパラメータとして応力拡大係数を考えた。ここで、2つの等方性材料が接合された界面上のき裂を考える。それぞれの材料を1,2とし、その弾性係数、せん断弾性係数、ポアソン比を E_i, ν_i, μ_i とする。2つの材料の組み合わせにより決まる材料定数 ϵ を式(2)のように定義し、本研究では、FEM解析により得られた応力を用い、式(3)~(5)に示す外挿法を用いて応力拡大係数を求める手法を適用することとした。

$$\chi_i = (3 - \nu_i) / (1 + \nu_i) \quad (i=1, 2) \quad (\text{平面応力}) \quad (1)$$

$$[\sigma_y + i\tau_{xy}]_{\theta=0} = (K_I + iK_{II})(r/l)^{1/2} / \sqrt{2\pi r} \quad (2)$$

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \quad (3)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) \quad (4)$$

$$Q = \epsilon \ln(r/l), \quad l = 2a \quad (5)$$

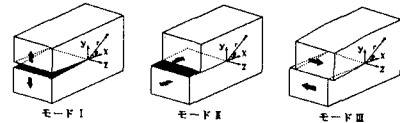


図2 破壊モード

ここで、式(5)中の a は、き裂長さである。なお、この場合の K_I, K_{II} は均一材中のき裂のモードI, モードIIの応力拡大係数 K_I, K_{II} と異なり、モードIとIIの基本変形モードと必ずしも対応しない。従って、ここでは界面き裂の応力拡大係数を算用数字を用いて K_I, K_{II} と表すことにする。また、エネルギー解放率 G は、き裂の進展に伴うポテンシャルエネルギーの解放率としての物理的意味を有し、応力拡大係数との関係は次式のようなになる。

$$G = \frac{1}{16 \cosh^2(\epsilon \pi)} \left\{ \frac{\chi_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\chi_2 + 1}{\mu_2} \right\} (K_I^2 + K_{II}^2) \quad (6)$$

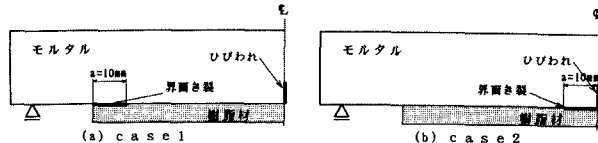


図3 界面き裂位置

実際に積層化樹脂材供試体に適用する場合の、応力集中が特に大きくなる荷重条件と界面き裂位置の組み合わせとして、温度変化を受ける場合は樹脂材端部に界面き裂がある場合(case1)、曲げを受ける場合はモルタルのひび割れ近傍に界面き裂がある場合(case2)について考えた(図3参照)。表1に示す3種類の樹脂材をそれぞれ3層組み合わせた5種類の供試体(表2参照)について得られた K_I, K_{II}, G の内、一例として K_{II} の値を表3に示す。これより、 K_{II} の値は負の値となっているが、この場合の符号については、単に界面のせん断方向破壊の方向の相違を示すものであり K_{II} の評価はその絶対値を用いて問題ないと考えられる。ここで、case1の K_{II} の値が各供試体の中で最も大きくなっており、case2の K_{II} の値はcase1の約1/2となっている。供試体MHMと供試体SHMを比較すると1層目の弾性係数が小さいほど K_{II} の値は小さくなっている。供試

表1 各材料定数

	弾性係数(kgf/cm ²)	ポアソン比	線膨張係数(μ/°C)
モルタル	237,000	0.206	5.8
樹脂材H	25,100	0.419	95.1
樹脂材M	9,650	0.476	130.9
樹脂材S	5,900	0.401	104.9

表3 応力拡大係数 K_2 (単位kgf・cm^{-3/2})

	HMH	HMS	MHM	MSM	SHM
case1	-4.984	-4.131	-3.211	-2.092	-1.075
case2	-2.581	-2.352	-1.698	-1.154	-6.293E-01

表2 供試体の種類

供試体	樹脂材の種類
HMH	H/M/H
HMS	H/M/S
MHM	M/H/M
MSM	M/S/M
SHM	S/H/M

※樹脂材の種類の欄において各アルファベットは"1層目の樹脂材/2層目の樹脂材/3層目の樹脂材"を表す。

体MHMと供試体MSMを比較すると2層目の弾性係数が小さいほど K_2 の値は小さくなり、また、供試体HMHと供試体HMSを比較すると3層目の弾性係数が小さいほど K_2 の値は小さくなるのがわかる。つまり塗布する樹脂材の剛性が小さいほど K_2 の値は小さくなり、き裂の進展、界面破壊が生じにくいと考えられる。一方、エポキシ-解放率は、式(6)より剝離方向の K_{I2} も同時に考慮することとなり、エポキシ-解放率 G を用いて、本研究で対象とする界面でのせん断方向破壊のみに着目した考察を行うことはできないと考えられる。これらのことから、ここでの材料設計にあたっては応力拡大係数 K_2 を用いた最適材料設計を考案するものとする。

3. 界面挙動に基づく材料設計 上述2つのcaseについて、応力拡大係数 K_2 の支配パラメータとして考えられる各層樹脂材の弾性係数を用いたパラメータ解析を行い、 K_2 を各層弾性係数(E_1, E_2, E_3)で次式のようにモデル化した。

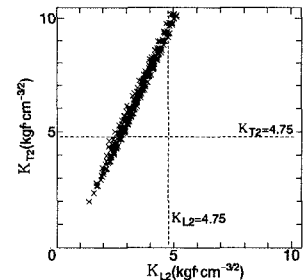
$$(case1) \quad K_{T2} = -1.700 \times 10^{-4} E_1 - 1.552 \times 10^{-4} E_2 - 6.754 \times 10^{-5} E_3 + 0.2723 \quad (\text{相関係数 } r = 0.9747) \quad (7)$$

$$(case2) \quad K_{L2} = -7.878 \times 10^{-5} E_1 - 6.058 \times 10^{-5} E_2 - 3.728 \times 10^{-5} E_3 - 0.3954 \quad (\text{相関係数 } r = 0.9625) \quad (8)$$

まず、case1については応力拡大係数 K_2 に対する各層樹脂材の弾性係数の感度は、 E_1 と E_2 の感度にはあまり差がないが、ほぼ $E_1 > E_2 > E_3$ という関係がみられる。応力拡大係数 K_2 が小さいほど破壊が起こりにくいということを考えれば、界面き裂の進展および界面破壊が起こりにくい組み合わせを考える場合、特に1,2層目の樹脂材の弾性係数をそれぞれ小さくするのが有効となる。また、case2についてもcase1の場合と同様の傾向があり、各層樹脂材の応力拡大係数 K_2 に対する感度は、ほぼ $E_1 > E_2 > E_3$ という関係になっている。この場合も界面破壊が起こりにくい組み合わせを考える場合、特に1層目の弾性係数を小さくすることが有効であり、2,3層目の弾性係数も小さいほうがよいことになる。次に、パラメータ解析結果より得られたそれぞれの樹脂材の組み合わせのもとの K_{T2} と K_{L2} の関係を図4に示す。これより、 K_{T2} と K_{L2} の間には明確な相関が見られ、ほぼ線形関係にある。また、 K_{T2} のほうが大きな値をとり、樹脂材の弾性係数の変化にともなう K_{T2} の変化量も大きくなっている。従って、界面き裂を考慮し、 K_2 を用いた材料選定を考える場合、温度変化を考慮した材料選定が重要となってくる。ここで、界面ではがれないという力学的要求性能に対する選定条件として $K_2 < 4.75 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-3/2}$ を設定し、図4にその適用範囲を示した。選定条件の設定に対しては今後実験等を通してさらに検討を行う必要はあるが、ここでは、このような選定条件を設けることで K_2 の傾向および材料設計の検討が行えると考えた。その結果、 K_2 の値が図4の左下の点線内の範囲にあるものが界面ではがれないという力学的要求性能に対する材料選定に対し、有効な組み合わせであると考えられる。従って、破壊力学に基づく K_2 を用いた材料選定としては式(7)(8)を用い、両式でともに K_2 に対する設計条件を満たす組み合わせを考えればよいことになる。

4. まとめ ①異種材界面に破壊力学を適用し、界面の力学的挙動の評価を行った。②本研究で用いた積層化樹脂材に補修を行った供試体に破壊力学を適用し、応力拡大係数、エポキシ-解放率を求めた結果、材料設計に用いるパラメータとして応力拡大係数 K_2 を用いることの妥当性を示した。③応力拡大係数 K_2 を樹脂材の弾性係数でモデル化し、 K_2 を用いた材料設計の考え方の提案を行った。

【参考文献】1)阿山, 宮本, 他: コンクリート補修用積層化樹脂材の材料設計に関する基礎的研究, 土木学会年次年次学術講演会講演概要集, Vol. 49, No.5, pp.729-727, 1994.9., 2)石田: き裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館, 1976., 3)結城: 界面の力学, 培風館, 1992.

図4 K_{T2} と K_{L2} の関係