

神戸大学大学院 学生員 ○中西 誉 大林組 正会員 阿山泰久
 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. 目的 コンクリート補修用積層化樹脂材が曲げあるいは温度変化を受ける場合の界面での力学挙動に基づき、界面においてははがれないといった要求性能を満たす材料設計の指標として、著者ら¹⁾は従来より $A\tau_r$, $A\tau_L$ を提案している。この指標はFEM解析などを利用して求めた層間せん断(温度)応力分布の積分値であり、この値が大きいと界面においてははがれ易いという考えに基づくものである。しかしこの指標には十分な理論的裏付けがあるとは言い難い面がある。そこで本研究は破壊力学の分野において用いられている応力拡大係数 K の考法を導入することによって指標 $A\tau_r$, $A\tau_L$ に材料選定指標としての信頼性を与えることを試みたものである。

2. 応力拡大係数の概説²⁾ 異種材界面にき裂が存在する場合、応力拡大係数は均一材中のき裂の場合とは異なる。応力拡大係数の定義においてはき裂開口形(モードⅠ)、面内せん断形(モードⅡ)、面外せん断形(モードⅢ)の3つの破壊モードが考えられる。本研究では、2次元有限要素法を適用して解析するためモードⅠ、Ⅱの場合を対称として考え、図1に示すようにそれぞれの材料を1,2とし、その弾性係数、せん断弾性係数、ポアソン比をそれぞれ $E_i, G_i, \nu_i (i=1,2)$ とする。

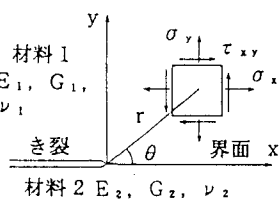


図1 界面き裂先端の応力の定義

$\theta=0$ の異種材界面上の応力分布は以下の式で表されることが明らかになっている。

$$[\sigma_y + i\tau_{xy}]_{\theta=0} = \frac{K_1 + iK_2}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l}\right)^{\varepsilon} = \frac{K_1 + iK_2}{\sqrt{2\pi r}} \left\{ \cos\left(\varepsilon \ln\left(\frac{r}{l}\right)\right) + i \sin\left(\varepsilon \ln\left(\frac{r}{l}\right)\right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 $K_1 + iK_2$ は界面き裂の複素応力拡大係数であり、 $l=2 \times a$ はき裂長さである。式(1)より応力拡大係数はき裂先端での値であるので以下のように書ける。

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma \cos Q + \tau \sin Q) \quad (2) \quad K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (-\sigma \sin Q + \tau \cos Q) \quad (3)$$

ここで、 $Q = \varepsilon \ln\left(\frac{r}{l}\right)$, $\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{\kappa_1/G_1 + 1/G_2}{\kappa_2/G_2 + 1/G_1}\right) = \frac{1}{2\pi} \ln \alpha$, $\kappa_i = \frac{3-\nu_i}{1+\nu_i}$ (平面応力)

モードⅠ、Ⅱの応力拡大係数は、破壊時の応力拡大係数を K_{Ic} , ($i=1,2$) とすると、以下の条件を満たす。

$$K_i \leq K_{Ic} \quad (4)$$

ゆえに K_i が小さい方が破壊が起こりにくいことになる。

3. 積層化樹脂材界面での応力拡大係数 解析には過去の実験¹⁾で使用したものと同様のモデル(450×150×70mm)を用い、図2に示すように、単純支持状態で温度変化(-10℃)を受ける場合と中央集中荷重(750kgf)を受ける場合(供試体下面に樹脂H, M, Sを塗布した3種類で、樹脂材端部およびひびわれ近傍の界面にき裂長 $a=10\text{mm}$ のき裂を

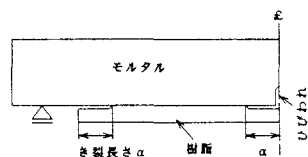


図2 供試体の形状

表1 各種樹脂材の材料定数一覧

入れた。)のそれぞれのモデルを解析し、表1に示す材料定数と解析結果の界面上の応力を用いて、応力拡大係数の比較を行った。まず温度変化を受ける場合、材料定数を式(2)(3)に直接代入して応力拡大係数を求めるこ

	$E(\text{kgf/cm}^2)$	ν	$G(\text{kgf/cm}^2)$	κ	α
モデル	237000	0.2	98750	2.333	0.0
樹脂H	25100	0.4	8956	1.857	0.622
樹脂M	9700	0.47	3290	1.721	0.614
樹脂S	5900	0.39	2122	1.878	0.553

Homare NAKANISHI, Yasuhisa AYAWA, Ayaho MIYAMOTO, Naoki WAKAHARA

とはできないので、回帰式を求めこれを外挿することにより応力拡大係数の値 (kgf/mm^2) を求めた。その結果は表2になる。この

表2 応力拡大係数(温度変化)

樹脂	K_1	K_2
H	-13.0×10^{-3}	83.0×10^{-3}
M	-7.6×10^{-3}	29.0×10^{-3}
S	-5.0×10^{-3}	14.0×10^{-3}

表3 応力拡大係数(曲げ載荷)

樹脂	K_1	K_2
H	-8.0×10^{-3}	63.0×10^{-3}
M	-1.8×10^{-3}	25.0×10^{-3}
S	-0.3×10^{-3}	12.0×10^{-3}

解析は温度変化を与えているので基本的にはせん断方向の力による破壊(モードII)であり、また基本的に応力拡大係数は負の値をとらないので、剥離方向の破壊パラメータ(モードI) K_1 はここでは考慮にいれず、面内せん断方向の破壊パラメータ(モードII)の K_2 のみについて考える。これを見る限り柔らかい樹脂材を塗布する方が応力拡大係数 K_2 の値は小さく、破壊は起こりにくいことが推察できる。同様にして、曲げを受ける場合の応力拡大係数を表3に示す。この場合も K_1 の値は負を示しているので、 K_2 の値のみを考慮に入れると温度変化を受ける場合と同様に柔らかい樹脂の塗布が適していると推測される。

4. 材料選定指標と応力拡大係数の相関 上記と同じモデルで層間温度応力分布および層間せん断応力分布を求めると図3、図4のようになる。本研究で用いた従来の材料選定指標はこの層間応力の分布面積 A を無次元化したものであり、界面の破壊に寄与するパラメータと考えている。面積 A より指標 $A\tau_r$ と指標 $A\tau_L$ を求めると表4および表5の結果が得られる。表2と表4および表3と表5より K_2 と指標 $A\tau_r$ 、 $A\tau_L$ のそれぞれの相関の

表4 指標 $A\tau_r$

樹脂	H	M	S
$A\tau_r$	1.02	0.41	0.28

表5 指標 $A\tau_L$

樹脂	H	M	S
$A\tau_L$	3.85	1.88	1.05

有無を示したものが図5および図6である。これより両件とも標本数は少ない

がほぼ1次の線形関係を持つことがわかる。式

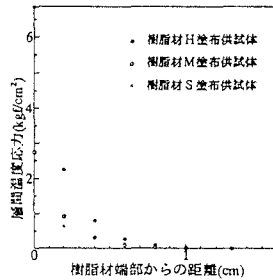


図3 層間温度応力分布

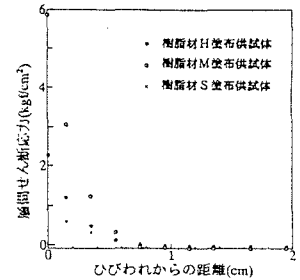


図4 層間せん断応力分布

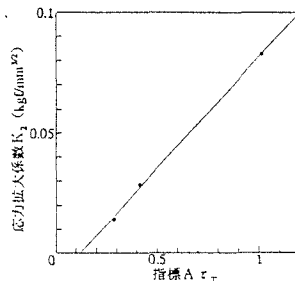


図5 $A\tau_r$ と K_2 の相関図

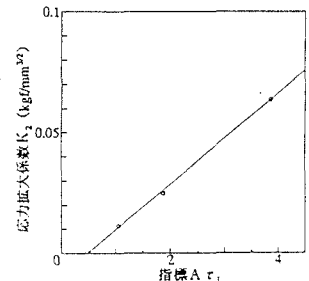


図6 $A\tau_L$ と K_2 の相関図

(4)より応力拡大係数は小さい方が破壊しにくいことが明かであるので、指標 $A\tau_r$ と $A\tau_L$ も小さい方が界面において破壊が起こりにくく、大きいほど破壊が起こりやすいということが言える。ゆえに層間温度応力および層間せん断応力の分布面積 A を無次元化した指標 $A\tau_r$ と $A\tau_L$ を界面ではがれないと言う力学的要求性能を満足する材料設計のための指標とする事の妥当性が明らかになったと考える。また、図5より温度変化を受けた場合のこれらの相関を回帰した直線は式(5)で与えられ、図6より曲げを受けた場合の相関を回帰した直線の式は式(6)で与えられる。これらより破壊時の応力拡大係数の値を求めることによって指標 $A\tau_r$ と $A\tau_L$ の限界値が明らかになり、材料選定にある一定の範囲が与えられることになる。

$$K_2 = 9.3E - 2 \times A\tau_r - 1.1E - 2 \quad (5)$$

$$K_2 = 1.9E - 2 \times A\tau_L - 8.9E - 3 \quad (6)$$

5. まとめ 本研究で明かとなった事項をまとめると以下ようになる：① 温度変化あるいは曲げを受ける場合の材料選定指標 $A\tau_r$ および $A\tau_L$ と応力拡大係数 K_2 は線形関係にある。② 指標 $A\tau_r$ および指標 $A\tau_L$ と応力拡大係数 K_2 を考慮にいれると同一荷重下では硬い樹脂材Hがもっともはがれやすく、柔らかい樹脂材Sがもっともはがれにくいという結論に至る。④ 破壊時の応力拡大係数が求まれば、指標の限界値が設定でき材料選定が行いやすくなる。

参考文献 1)結城良治：界面の力学，培風館，1992.7. 2)宮本ら：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第5巻第2号1994.7.