

異種材料間界面破壊における界面構成則のモデル化

○東京大学 正 会員 松本 高志*

1. はじめに

構造物の補修・補強においては補修・補強材料を既設構造物に接合することが必要であり、この際異種・異齢となる二材料の間に界面を形成することが不可避となる。延命年数の保証された効果的な補修・補強を実現するには構造物において補修・補強材料と既設部分との一体性が必要であり、つまりは耐久的な材料間界面を形成することが必要である。界面の破壊特性に関するパラメータとしては、荷重条件、異種・異齢となる二材料の材料特性値、界面の幾何的形狀などが挙げられる。本研究では材料間界面の破壊について界面破壊力学に基づき異種材料間の界面破壊のモデル化を行い、実験結果との比較によりその妥当性を検証するものである。

2. 界面構成則のモデル化

通常ひび割れの進展と破壊を取り扱う際にはモードⅠによる取り扱いがなされる。引張とせん断が同時に作用する混合荷重下におけるひび割れに対しても、骨材や繊維による伝達応力が無い場合にはモードⅠの方向へひび割れが進展していくことが知られている。しかしながら、界面に存在するひび割れの進展と破壊を取り扱う際には、引張とせん断が同時に作用する混合荷重下にあるひび割れの混合モード進展と破壊を考慮しなければならない。これは材料間界面が界面を成す二材料に比べて破壊靱性値が低いことにより、ひび割れがモードⅠの方向へ進展するよりは界面に沿って進展するほうが破壊基準を満たしやすいことによる。

混合モード進展を考える際にまず必要となるのは混合モード下での破壊靱性値である。混合モード下での破壊靱性値は従来行われてきた純引張や純せん断での付着試験を包含するものとなり、引張とせん断の相対的な大きさにより決まるモード混合度の関数でなければならない。試験方法としては引張とせん断の混合度を自由に設定できる Brazilian nut もしくは梁の非対称載荷により行われる[1]。

次に必要となるのは解析に適用するためのモデルである。本研究では以下に幾つかの仮定の上で単純化したモデルを提示する。

① 破壊は Mohr-Coulomb の規準に従う。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} + \frac{\tau}{\tau_0} = 1 \quad (1)$$

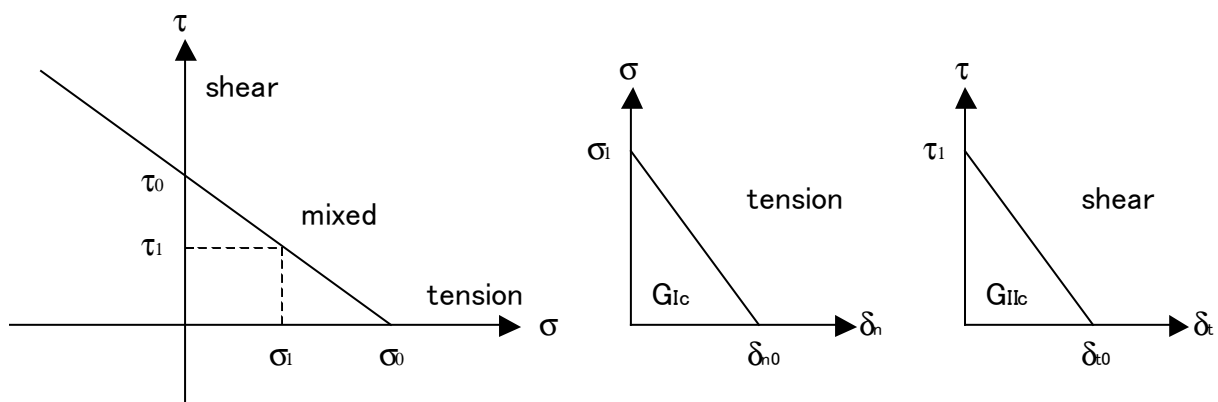


図 1 界面構成則

* キーワード：界面破壊、補修・補強、構成則

連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL：03-5841-6092 FAX：03-5841-7496

- ② 引張とせん断の構成則は線形軟化するものとし、
引張りとせん断の限界変位は一定とする。

$$\sigma = \sigma_1 \left(1 - \frac{\delta_n}{\delta_{n0}} \right) \quad \tau = \tau_1 \left(1 - \frac{\delta_t}{\delta_{t0}} \right) \quad (2)$$

よって界面破壊靱性値 Γ はモード混合度 ψ の関数として以下のようにあらわせる。

$$\Gamma \left(\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_1}{\sigma_1} \right) \right) = \frac{1}{2} \sigma_1 \delta_{n0} + \frac{1}{2} \tau_1 \delta_{t0} \quad (3)$$

純引張と純せん断の時には以下ようになる。

$$\Gamma(\psi = 0^\circ) = \frac{1}{2} \sigma_0 \delta_{n0} = G_{Ic} \quad (4)$$

$$\Gamma(\psi = 90^\circ) = \frac{1}{2} \tau_0 \delta_{t0} = G_{IIc} = \frac{G_{Ic}}{\lambda} \quad (5)$$

最終的には以下の関係式を得る。

$$\frac{\Gamma}{G_{Ic}} = \left[\frac{1 + \frac{1}{\lambda'} \tan \psi}{1 + \lambda'' \tan \psi} \right] \quad (6)$$

ここで

$$\lambda' = \frac{\delta_{n0}}{\delta_{t0}} \quad \lambda'' = \frac{\sigma_0}{\tau_0} \quad \lambda = \lambda' \lambda'' \quad (7)$$

である。

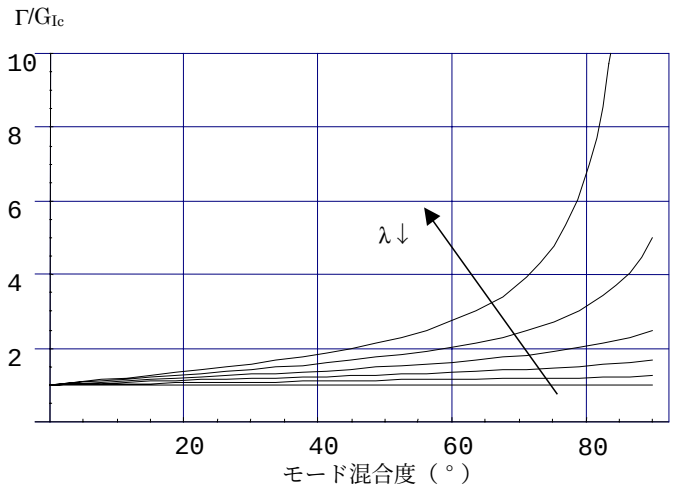


図 2 破壊靱性値とモード混合度の関係($G_{Ic} < G_{IIc}$)

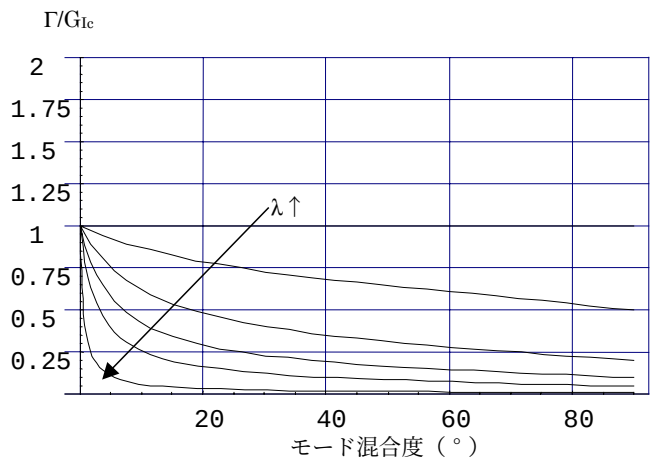


図 3 破壊靱性値とモード混合度の関係($G_{Ic} > G_{IIc}$)

3. 破壊靱性値とモード混合度の関係

以上より界面構成則より破壊靱性値とモード混合度の関係を得ることが出来る。図 2 と 3 では、図 1 での限界変位 δ_{n0} と δ_{t0} を等しいとしている。図 2 はせん断による破壊靱性値が引張によるものより大きいとした場合であり、せん断モードに移るにつれて破壊靱性値が増大する傾向はアルミニウム／エポキシ樹脂などの二材料間界面にて観察されている。一方図 3 は逆の場合であり、コンクリート／ポリマーモルタルにおける界面にて計測されている[2]。

4. まとめ

材料間界面におけるひび割れの破壊靱性値とモード混合度についての関係を単純な界面構成則のモデル化より導き出した。実験による構成則の検証などが必要であるが、有限要素法などにおいて本モデルの適用を試みている[2]。今後の課題としては、界面の幾何的形狀がひび割れ先端での破壊靱性値に及ぼす影響、ひび割れ面での伝達応力が応力拡大係数低減させる影響、の二点を考慮する必要がある。

- [1] Lim, Yun Mook: Interface fracture behavior of rehabilitated concrete infrastructures using engineered cementitious composites, Ph. D Thesis, Department of Civil and Engineering, The University of Michigan, 1996.
- [2] 磐田吾郎、松本高志：ポリマーモルタル／コンクリート間界面剥離の実験と解析、土木学会第 56 回年次学術講演会、2001