

樹脂注入による疲労き裂進展抑制に関する解析的検討

名古屋大学 学生員 吉嶺建史 学生員 北河一喜 正会員 館石和雄
 日本道路公団 正会員 鈴木永之 明星大学 正会員 鈴木博之

1. はじめに

近年、多くの橋梁に疲労損傷が見つかっている。疲労き裂が発見された場合、本格的な補修・補強工事が開始されるまでの間、き裂の進展を一時的に遅らせることが必要となる。現在、き裂の補修工法としてはストップホールを用いる方法があるが、これは部材が組み合わさった複雑な個所や、溶接線上などでは施工が困難である。そこで本研究では、容易にき裂進展を抑制できる方法として、疲労き裂に樹脂を注入する手法を提案し、有限要素解析により樹脂注入による疲労き裂進展抑制効果について検討した。

2. き裂進展抑制原理

図-1に示すように、引張応力 σ_0 が作用し、 δ_0 だけ開口したき裂に樹脂を注入し応力を除荷すると、き裂は完全には閉口せず、 δ_1 だけ残留変位がある状態で閉口が抑制される。再び応力 σ_0 が作用した時、 $\delta = \delta_0 - \delta_1$ が樹脂注入後のき裂開口量の変動幅となり、樹脂を注入することで δ を小さくすることができ、き裂進展を抑制することが可能であると考えられる。

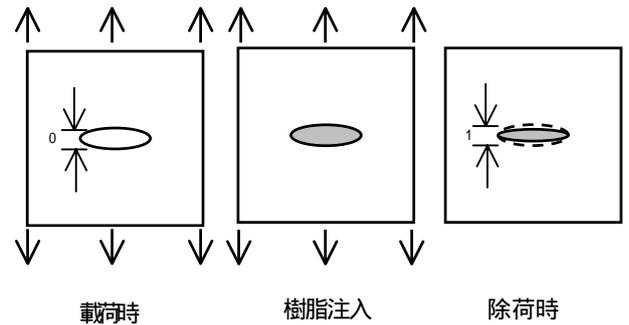


図-1 樹脂注入によるき裂の挙動

3. き裂先端まで樹脂が注入された場合の解析

3.1 応力拡大係数範囲の算出 図-2に示すような中央に貫通

き裂のある帯板の応力拡大係数はき裂中央の開口変位 δ を用いて以下の式(1)で表される。

$$K = \frac{\sqrt{\pi a} F(\xi) E'}{4aV(\xi)} \delta \quad (1)$$

$$\text{ここで、} \delta = (4\sigma a / E') \cdot V(\xi) \quad (2)$$

$$F(\xi) = \sqrt{\sec(\pi\xi/2)} \quad (3)$$

$$V(\xi) = -0.071 - 0.535\xi + 0.169\xi^2 + 0.020\xi^3 - 1.071(1/\xi)\log(1-\xi) \quad (4)$$

$$\xi = 2a/W \quad (5)$$

また、この状態はき裂面に一様に応力 σ が作用している状態（図-3）と力学的に等価な状態である。ここで、図-2の状態でき裂内に樹脂が存在した場合を考えて、応力 σ の除荷に伴い、樹脂には一様に圧縮応力 σ_p が作用すると仮定する。この時、樹脂の弾性係数を E_p とすれば、き裂中央での樹脂の変位 $\Delta\delta$ は応力とひずみの関係から以下のようになる。

$$\Delta\delta = -\sigma\delta / E_p \quad (6)$$

式(2)に式(6)を代入すると、応力の除荷に伴うき裂中央での変位は

$$\Delta\delta = -4\sigma^2 a(1-\nu^2)V(\xi) / EE_p \quad (7)$$

と表され、樹脂を注入したときの応力拡大係数範囲は理論的に次式のように求まる。

$$\Delta K_I = \frac{\sigma^2}{E_p} \sqrt{\pi a} F(\xi) \quad (8)$$

3.2 有限要素解析による検討

2節のき裂開閉挙動を有限要素解析で再現し、樹脂注入による疲労き裂進展抑制の効果を検討した。図-4に示すような CCT 試験片を対象とし、解析モデルは 1/4 モデルとした。要素は平面ひずみ要

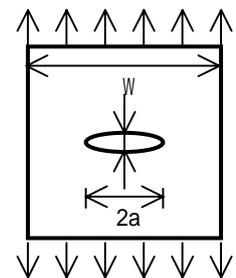


図-2 貫通き裂のある帯板の引張

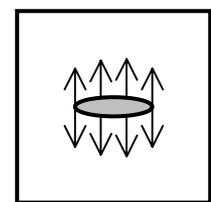


図-3 き裂面に一様応力

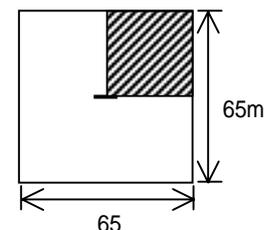


図-4 解析対象

キーワード: 疲労, き裂進展抑制, 樹脂, 応力拡大係数

連絡先: 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院環境学研究科 TEL 052-789-4620

素，最小要素サイズは 0.05mm とした．以下に解析方法を示す(図-5 参照)．

Step-1：解析モデルに引張応力 σ を作用させき裂を開口させ，この時の開口量を δ_0 とする

Step-2：無応力状態で Step-1 のき裂が開口した状態の変位分布を有するモデルを作成する

Step-3：き裂部分に樹脂に相当する要素を作成する

Step-4：このモデルを応力 σ で圧縮しき裂の閉口を再現し，この時の開口量を δ_1 とする

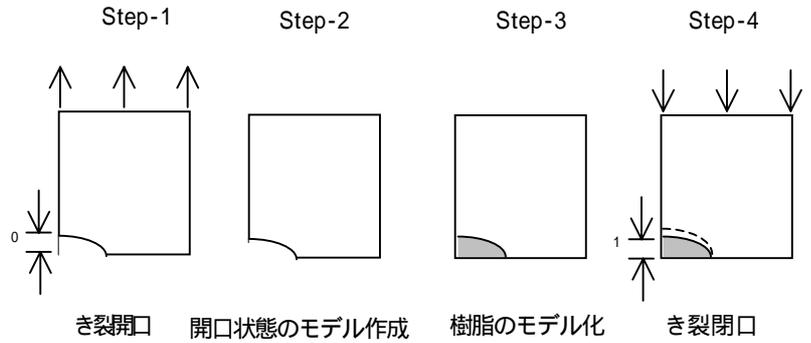


図-5 解析手順と開閉口挙動

$\delta_0 - \delta_1$ が樹脂注入後のき裂開口量の変動幅となるので，式(1)からそれに対応する応力拡大係数範囲を計算した．き裂長を 10mm とし，樹脂注入時の作用応力と樹脂の弾性係数を変化させた時の解析結果を図-6 に示す．縦軸は応力拡大係数範囲，横軸は樹脂の弾性係数である．弾性係数 0 とは樹脂が無い場合の応力拡大係数範囲である．図-6 より，樹脂の弾性係数が 2500MPa 以上であれば，応力拡大係数範囲を非常に小さくすることができ，疲労き裂進展抑制に十分な効果が期待できる．この解析方法はき裂が開口した状態の有限要素モデルを圧縮することでき裂の閉口を再現しており，得られるき裂開口変位は正確な値ではない．そこで上記の方法により求められる応力拡大係数範囲と，式(8)により求められるそれとを比較し，本解析の妥当性を検証した．結果を図-6 に示す．図中の実線が式(8)により求めた応力拡大係数範囲の理論値である．これより理論値と解析値がほぼ一致していることが分かる．したがって，本解析方法は妥当であるといえる．

4. 樹脂の浸透範囲を考慮した有限要素解析

4.1 樹脂の浸透範囲と接続外挿法による応力拡大係数範囲の算出 2 節ではき裂先端まで樹脂が一樣に存在する場合を対象としたが，実際はき裂先端まで樹脂を注入することは困難であると考えられる．き裂の途中までしか樹脂が浸透しない場合，き裂先端には空隙が存在することとなる．そこで樹脂の浸透範囲を考慮した有限要素解析を行った．ここでは，樹脂の浸透範囲として図-7 に示す $a'/a(\%)$ を定義する．このような状態の応力拡大係数範囲を明示的に求める式はないため，有限要素解析結果をもとに，接続外挿法により応力拡大係数範囲を算出した．

4.2 解析結果 き裂長 10mm，応力 50MPa とし，樹脂の浸透範囲を変化させ解析を行った時の解析結果を図-8 に示す．樹脂の浸透範囲が減少するに従い，応力拡大係数範囲は大きくなっていることが分かる．また，樹脂の弾性係数が 2500MPa 以上であれば，2 節と同様に応力拡大係数範囲はほぼ一定の値をとる．次に，樹脂の弾性係数を 20000MPa とし，樹脂の浸透範囲を変化させた時の解析結果を図-9 に示す．浸透範囲が 0~25%，90~100%の間での応力拡大係数範囲の減少が著しく，樹脂注入による疲労き裂進展抑制効果は，樹脂の浸透範囲に大きく依存していることが分かる．

5. まとめ

本研究を通して以下の結論を得た．

- 1)樹脂注入による疲労き裂進展抑制効果は，樹脂の弾性係数が 2500MPa 以上であれば十分な効果が期待できる．
- 2)樹脂がき裂の途中までしか浸透していない場合でも効果は期待できるが，樹脂の浸透範囲に大きく依存する．

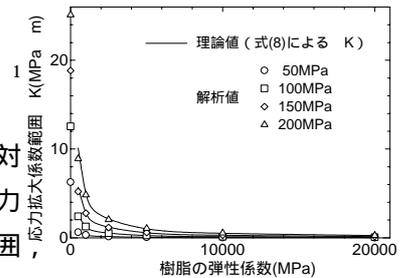


図-6 解析結果

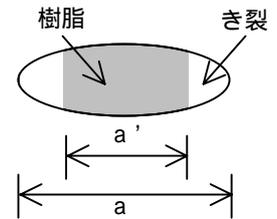


図-7 樹脂の浸透範囲

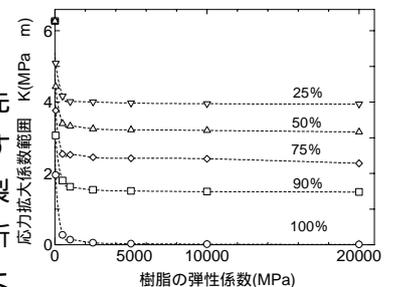


図-8 樹脂の弾性係数と応力拡大係数範囲

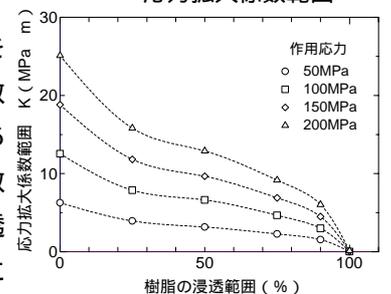


図-9 樹脂の浸透範囲と応力拡大係数範囲