鋼橋の疲労亀裂進展シミュレーション手法の開発とその維持管理への応用

プロジェクトリーダー

坂野　昌弘　（関西大学工学部　教授）

プロジェクトメンバー

産

（社）日本橋梁建設協会

学

関西大学　工学部　都市環境工学科

京都大学大学院　工学研究科

官

国土交通省　近畿地方整備局　道路部

国土交通省　近畿地方整備局

（道路部、大阪国道事務所、近畿技術事務所）

鋼橋の疲労亀裂進展シミュレーション手法の開発とその維持管理への応用

研究の目的

経年した鋼橋に発生する疲労亀裂を対象として、その発生および進展挙動を精度よく予測できる解析手法およびプログラムを開発することで、疲労亀裂を生じた鋼橋の補修・補強および点検等の維持管理の合理化に役立てることを目的とする。。

研究の概要

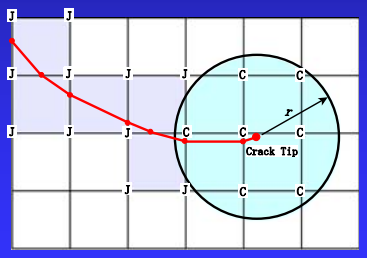
鋼橋に生じる疲労亀裂のうち、特に数の多い鋼床版縦リブと横リブの交差部から横リブに伝播した疲労亀裂を対象とし、その発生および進展挙動を精度よく予測できる拡張有限要素法（X-FEM）に基づいた解析手法を開発する。更に、その妥当性を実験および実橋における疲労亀裂進展状況との比較・検討により検証する。

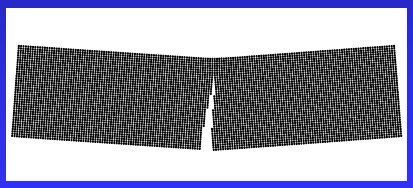
活動の期間

平成19年3月～平成21年3月

鋼橋の疲労亀裂進展シミュレーション手法の開発とその維持管理への応用

本研究では、拡張有限要素法（X-FEM）を用いて、疲労き裂進展解析プログラムの開発をおこないます。これにより、実橋梁の安全性評価への適用を視野に入れた研究をおこないます。左下図は、X-FEMによるき裂の表現の概念図、右下図は、き裂進展にともなう試験片の変形図を示します。





安治川橋の概要

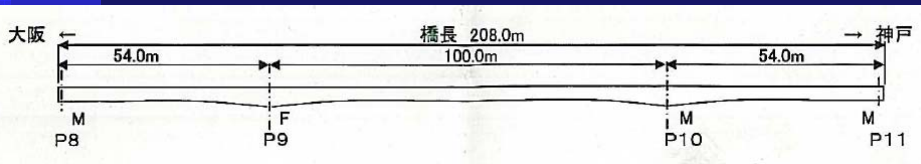
○橋梁概要

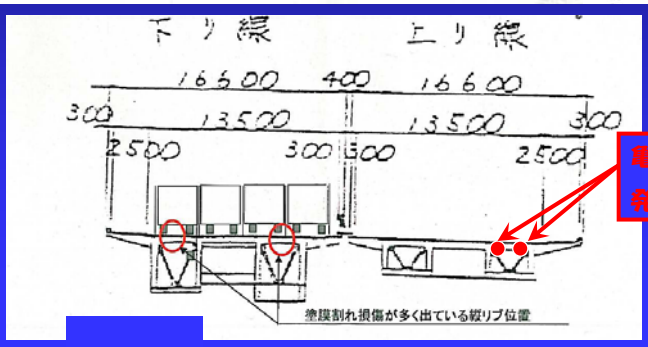
橋梁名称：安治川橋下り、安治川橋上り
路線名：一般国道43号　現道
完成年度：1961
等級：1等橋
橋梁形式：鋼3径間連続鋼床版箱桁橋（P8～P11）
橋長：208.0m（54.0＋100.0＋54.0m）
幅員：下り（2.5+13.5m）、上り（13.5+2.5m）

交通量(H17)：19008/h12　大型車混入率 32.9%
設計基準：昭和39年道路橋製作示方書（改訂）
設計荷重：TL－20

1）

安治川橋一般図及び断面図

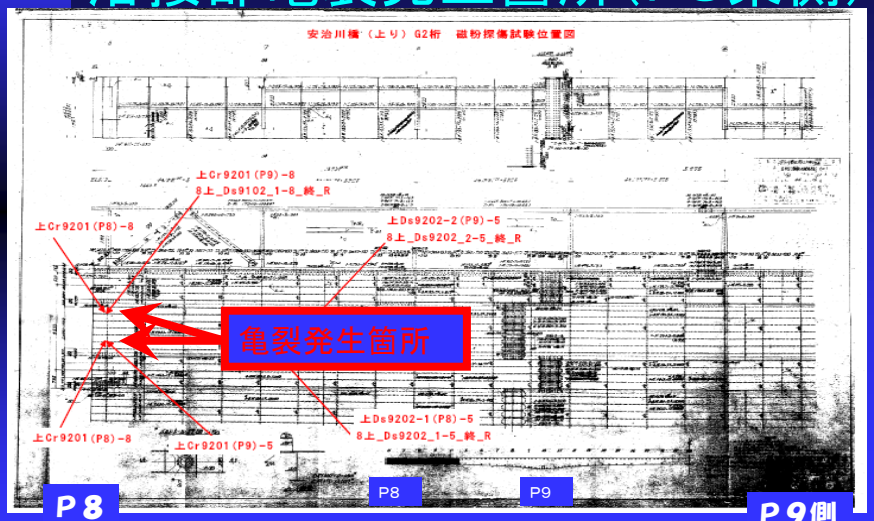




安治川橋
安治川渡河部（P9～P10）

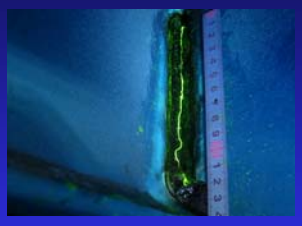


溶接部亀裂発生箇所（P8東側）



バルブリブ溶接部亀裂状況（P8上り神戸側）1／2





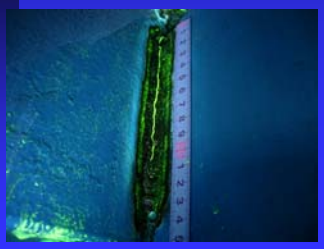
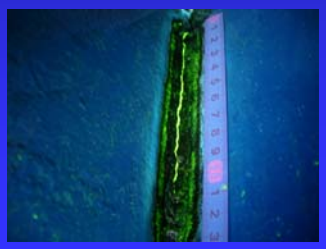




バルブリブと横リブを隅肉溶接している箇所で溶接部に亀裂発生、溶接の亀裂は貫通している

バルブリブ溶接部亀裂状況（P8上り神戸側）2／2



拡張有限要素法(X-FEM)による疲労き裂進展シミュレーション

京都大学大学院工学研究科
社会基盤工学専攻
宇都宮智昭
柴沼一樹
金久隆弘

研究背景

構造物の老朽化

↓

疲労き裂の発生・成長

↓

疲労き裂の成長予測

↓

適切な対策

研究概要・目的

疲労き裂進展シミュレーション

↑

X-FEM（拡張有限要素法）

従来のき裂進展過程



交互に行う必要

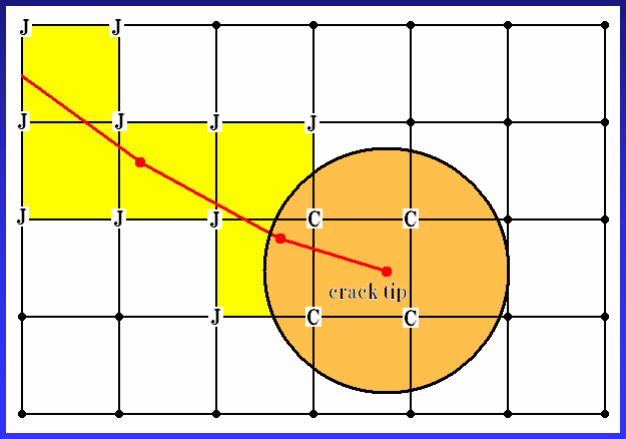
非常に効率の悪い計算処理

拡張有限要素法(X-FEM)

要素形状とき裂を独立に考える

リメッシュ処理の回避

節点属性



要素内の変位

C属性節点

$$\mathbf{u}^e = \sum_{i=1}^{m} \phi_i(\mathbf{x})\mathbf{u}_i + \sum_{i\in C} \phi_i(\mathbf{x}) \sum_{k=1}^{4} \gamma_k(\mathbf{x})\mathbf{c}_i^k + \sum_{i\in J} \phi_i(\mathbf{x}) H(\mathbf{x})\mathbf{b}_i$$

Crack Function $\gamma_k(\mathbf{x}) \quad (k = 1, \Lambda, 4)$

$$\gamma_1(\mathbf{x}) = \sqrt{r}\cos\frac{\theta}{2} \qquad \gamma_2(\mathbf{x}) = \sqrt{r}\sin\frac{\theta}{2}$$

$$\gamma_3(\mathbf{x}) = \sqrt{r}\sin\frac{\theta}{2}\sin\theta \qquad \gamma_4(\mathbf{x}) = \sqrt{r}\cos\frac{\theta}{2}\sin\theta$$

要素内の変位

J属性節点

$$\mathbf{u}^e = \sum_{i=1}^{m} \phi_i(\mathbf{x})\mathbf{u}_i + \sum_{i \in C} \phi_i(\mathbf{x}) \sum_{k=1}^{4} \gamma_k(\mathbf{x})\mathbf{c}_i^k + \sum_{i \in J} \phi_i(\mathbf{x}) H(\mathbf{x}) \mathbf{b}_i$$

Jump Function $H(\mathbf{x})$

$$H(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & (\mathbf{x} \in \Omega_+) \\ -1 & (\mathbf{x} \in \Omega_-) \end{cases}$$

疲労き裂開閉口現象

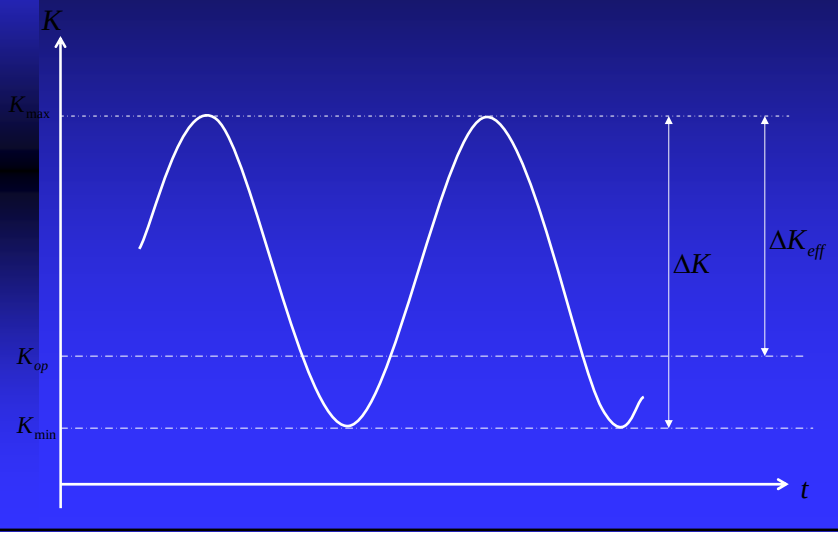
疲労き裂

応力拡大係数の変動範囲ΔK

ただし

開閉口挙動 ⇒ 開口部分のみ進展に寄与ΔK_{eff}

応力拡大係数範囲ΔK



有効応力拡大係数範囲ΔK_{eff}

応力拡大係数範囲・・・ $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$

⇩

応力比・・・ $R = R_K = K_{\min} / K_{\max}$

⇩

き裂開口比・・・ $U = \min\{1.0/(R_0 - R) - K_0/\Delta K, 1.0\}$

$R_0 = 0.9, K_0 = 4.0$

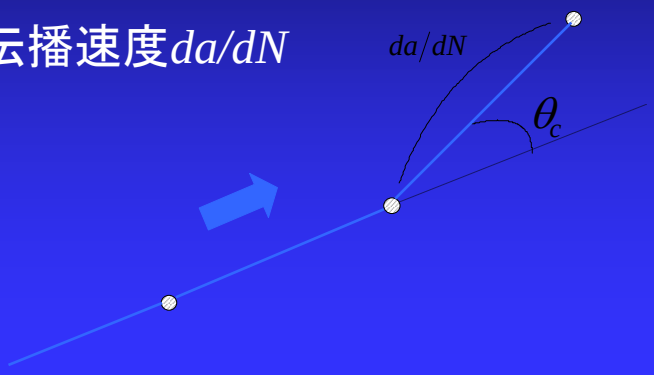
⇩

有効応力拡大係数範囲・・・ $\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K$

進展経路

進展方向 θ_c

伝播速度da/dN



最大周方向応力説

陽的解法

き裂進展方向 ⟺ 周方向応力最大の方向

一致すると仮定

伝播速度

伝播則



日本鋼構造協会の疲労設計指針

$$da/dN = 1.5\times10^{-11}\left(\Delta K_{I,eff}^{2.75} - \Delta K_{th}^{2.75}\right),\ \Delta K_{th} = 2.9$$

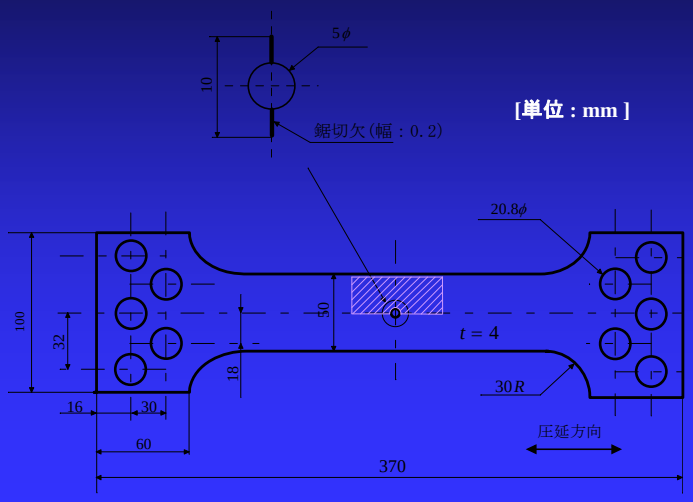
$$\left(\ da/dN : m/cycle\ \ ,\ \ \Delta K, \Delta K_{th} : MPa\sqrt{m}\ \right)$$

疲労き裂進展シミュレーション

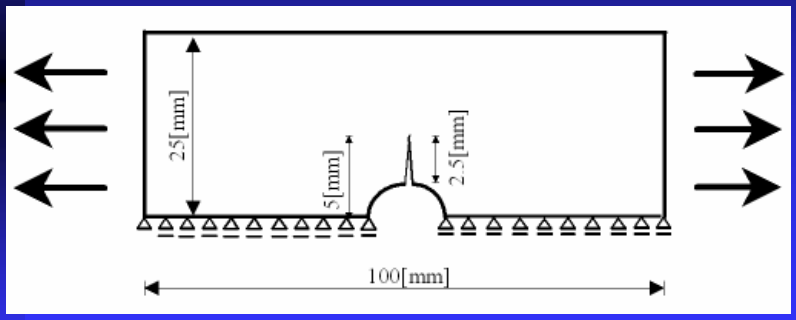


疲労試験との比較

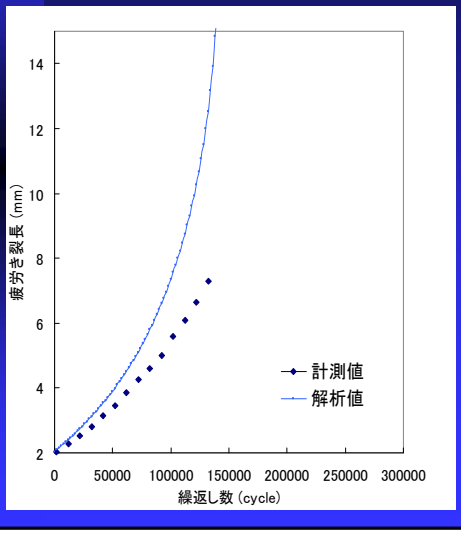
疲労試験


5φ
10
鋸切欠(幅：0.2)
[単位：mm]
20.8φ
100
32
50
18
t = 4
30R
16
30
60
370
圧延方向

解析モデル


25[mm]
5[mm]
2.5[mm]
100[mm]

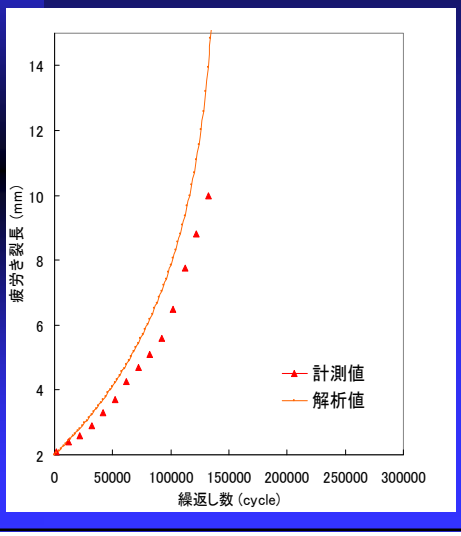
解析結果



R=0.05

R	最大荷重(kN)	最小荷重(kN)
0.05	23	1.15
0.3	31	9.3
0.5	36	18

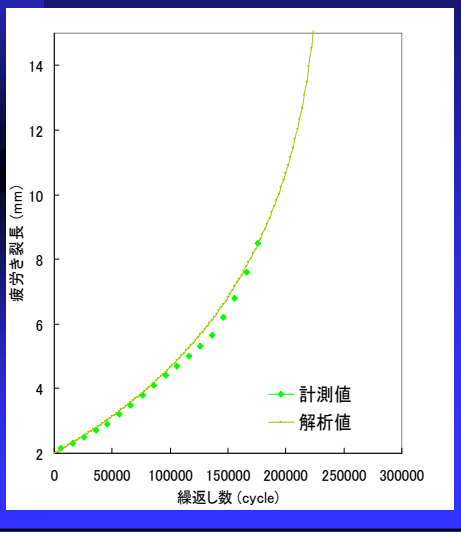
解析結果



R=0.3

R	最大荷重(kN)	最小荷重(kN)
0.05	23	1.15
0.3	31	9.3
0.5	36	18

解析結果

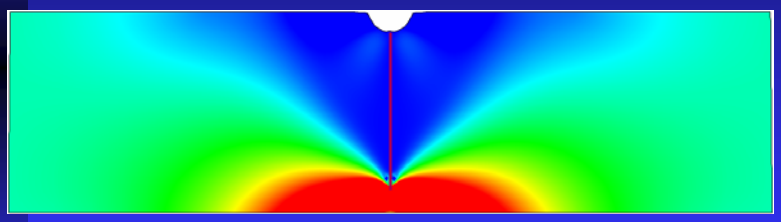


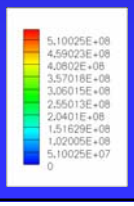
R=0.5

R	最大荷重(kN)	最小荷重(kN)
0.05	23	1.15
0.3	31	9.3
0.5	36	18

疲労き裂進展シミュレーション

step000





結論

- モードⅠ破壊下での疲労き裂進展シミュレーションを行った
- 応力比の大きい場合
  - → ほぼ正確に実験を再現
- 応力比の小さい場合
  - → 比較的大きな差異
  - → 採用した式、係数が安全側に設定

今後の課題

- 応力比の小さい場合
- 変動荷重条件
- 曲線き裂への適用性
- より複雑な構造系への適用性