

1. 研究背景

近年、わが国の高度経済成長期に多数建設された社会基盤インフラ構造物が、施工当時の耐用年数を迎えてつある。Fig. 1 は、わが国における新規道路橋の建設数の推移である。今後、多くの道路橋が、一般的な耐用年数とされる既設 50 年を迎えようとしている。鋼橋においては、設計時に想定されなかった疲労損傷の問題が近年顕在化するなど、社会基盤インフラ構造物の合理的な維持管理の必要性が叫ばれている。Fig. 2 は、2006 年、奈良県山添橋において観察された損傷である。このケースでは、橋梁主桁の溶接端部より発生した疲労亀裂が進展した結果、脆性亀裂に遷移したものと見られている。橋梁全体に対して、疲労亀裂は極めて小さいスケールで発生する現象ながら、全体の崩落に繋がりがかねない極めて重大な損傷である。このような背景において、数値計算により、橋梁中の亀裂の進展性を直接評価することは、鋼橋の維持管理合理化に向けて非常に有意義であると考えられる。しかしながら、現状では、実橋梁モデルを対象として疲労亀裂進展解析を実施した研究は報告されていない。

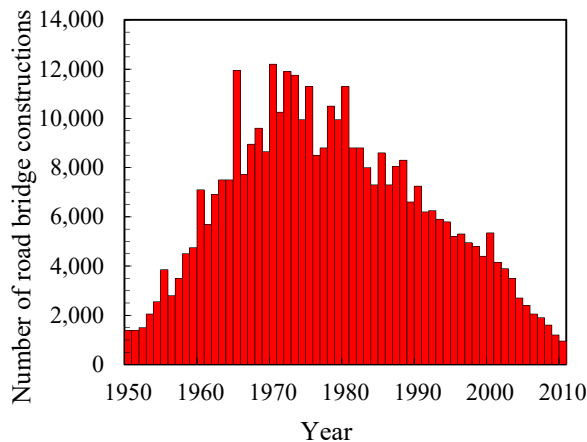


Fig. 1 Numbers of bridge construction



Fig. 2 Crack on Yamazoe Blidge

2. 研究目的

本研究では、これまで実現されていない、実鋼橋全体をモデル化した上での疲労亀裂進展解析を実施する。また、本研究では亀裂解析として拡張有限要素法 (XFEM) と呼ばれる解析手法を用いるが、実鋼橋の亀裂進展解析に向けて、近年提案されている XFEM 定式化を含めて精度やロバスト性に関する検証を行う。

3. 基礎理論

有限要素法は対象領域を要素分割することにより、システムティックに内部の近似を構成する k 数値解析手法である。

拡張有限要素法 (XFEM) は有限要素法の一般化手法である。拡張有限要素法の一般式を次式で示される。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}^{\text{std}}(\mathbf{x}) + \mathbf{u}^{\text{enr}}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

$\mathbf{u}^{\text{std}}(\mathbf{x})$ は通常の有限要素近似、 $\mathbf{u}^{\text{enr}}(\mathbf{x})$ は XFEM におけるエンリッチメントを表す。 $\mathbf{u}^{\text{std}}(\mathbf{x})$ および $\mathbf{u}^{\text{enr}}(\mathbf{x})$ はそれぞれ次式で示される。

$$\mathbf{u}^{\text{std}}(\mathbf{x}) = \sum_{i \in N} \phi_i(\mathbf{x}) \mathbf{u}_i \quad (2)$$

$$\mathbf{u}^{\text{enr}}(\mathbf{x}) = \sum_{i \in N^{\text{enr}}} \phi_i(\mathbf{x}) \Psi(\mathbf{x}) \mathbf{a}_i \quad (3)$$

N は全節点集合、 N^{enr} はエンリッチメント節点集合を表す。 $\phi_i(\mathbf{x})$ は有限要素近似において節点 i に縁リッチメントされる内挿関数であり、 \mathbf{u}_i は通常の有限要素近似の節点自由度である。 $\Psi(\mathbf{x})$ は XFEM におけるエンリッチメント関数であり、 \mathbf{a}_i は対応する近似自由度である。XFEM ではエンリッチメント関数において導入する既知の関数である。上式に示したように、XFEM におけるエンリッチメントは節点単位で定義されるため、標準の節点とエンリッチメント節点を含む要素が不可避免的に存在する。このような要素を Blending Elements (BE) と呼び、その内部において収束精度が低下することが知られている。BE の模式図を Fig. 3 に示す。図中に blending elements の凡例によって示される領域において近似精度が低下する。

この BE における問題に対し、近年新たな XFEM 定式化が提案されている。特に、Fries によって提案された重み付き XFEM は効果的な方法として多くの適用が報告されている。それに対し、Shibanuma et al. は重み付き XFEM の収束精度の不完全性を理論解析により明らかにし、本来の収束精度を保証する PU-XFEM と呼ばれる XFEM 定式化を提案した。本研究では近年提案されたこれらの XFEM 定式化を

平面の破壊力学問題，板曲げの破壊力学問題に適用し，亀裂進展解析に向けた精度検証を行った。

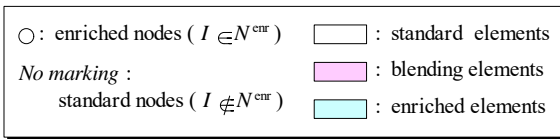
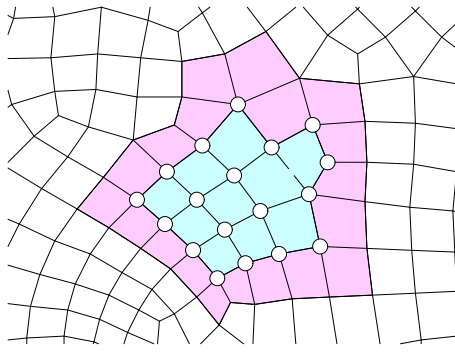


Fig. 3 Blending element in XFEM analysis

4. 平面破壊力学問題における XFEM の精度およびロバスト性評価

XFEM の平面破壊力学問題への適用における精度検証を実施した。Fig. 4 および Fig. 5 は理論解が既知である2つの平面破壊力学問題に関して解析を実施したエネルギー誤差ノルムである。

いずれの解析においても PU-XFEM が最小の誤差を示した。

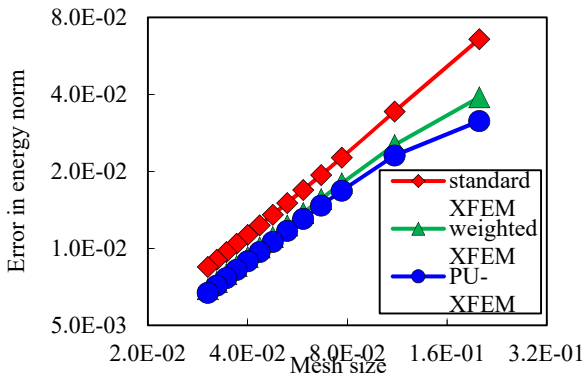


Fig. 4 Numerical results on Mode σI

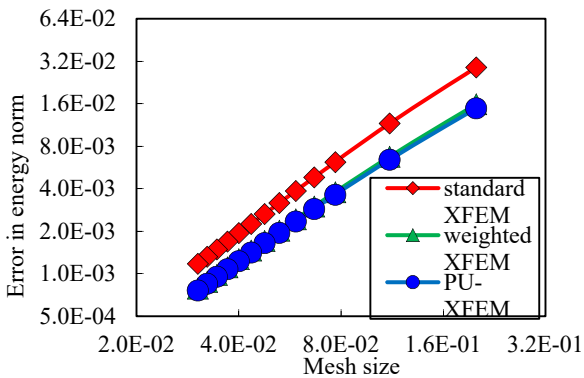


Fig. 5 Numerical results on Mode σII

5. 板曲げ破壊力学問題における XFEM の妥当性検証

次に，亀裂解析プログラムの開発に向けて，板曲げ破壊力学における XFEM の妥当性検証を実施した。Fig.6 は，XFEM 解析により得られた板曲げ問題における亀裂近傍の変位場である。貫通亀裂を含む平板の板曲げ問題において評価される破壊力学パラメータをそれぞれ，Fig.7 および Fig.8 に示す。

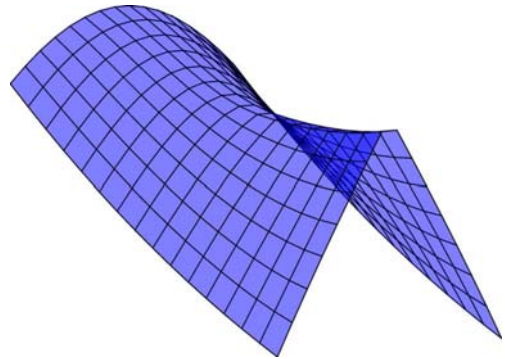


Fig.6 Numerical result of deformation of cracked plate bending problem

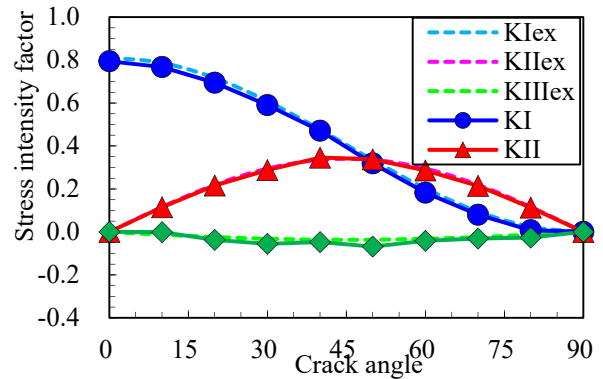


Fig. 7 Numerical results of stress intensity factors for $t/a = 1$

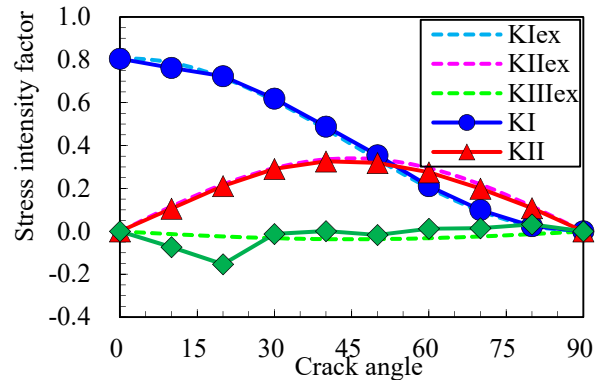


Fig. 8 Numerical results of stress intensity factors for $t/a = 2$

以上の精度検証より、本研究では板曲げ成分に関して標準の XFEM 定式化を用いて、亀裂進展解析プログラムを開発することとした。

6. 汎用有限要素法ソフトウェアへの 3 次元平板 XFEM 要素の実装

実鋼橋を対象とした疲労亀裂進展解析に向けて汎用有限要素法ソフトウェアに 3 次元平板 XFEM 要素を実装し、全体として亀裂解析を実行できるプログラムを開発した。開発プログラムのフローチャートを Fig. 9 に示す。

続いて、開発した汎用ソフト連成プログラムの精度検証を行った。Fig. 10 は板曲げ問題において評価される亀裂の破壊力学パラメータを、亀裂長さに対する板厚比に対してプロットしたものである。破線は解析解であり、赤で示した系列が本開発プログラムにより得られた値である。

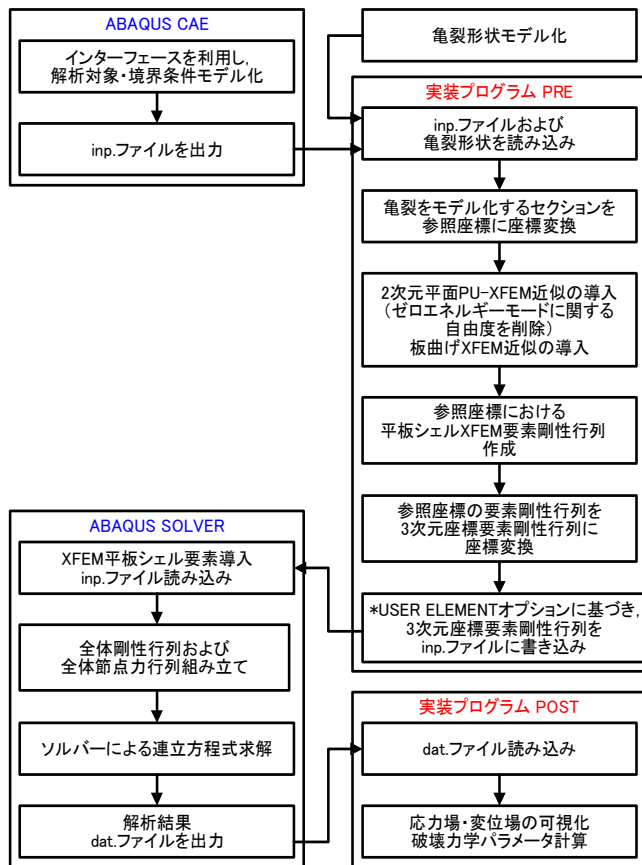


Fig. 9 Flowchart of Implementation of XFEM into Abaqus

7. 実鋼橋亀裂進展解析

開発した疲労亀裂進展解析プログラムを用い、これまで実現されなかった実鋼橋を対象とした疲労亀裂進展解析を実施した。ケーススタディーとして、姫路大橋を解析対象とした。姫路大橋の全体図を Fig. 11 に示す。本解析では、赤枠で示した下り車線第 6 径間のモデル化を行った。

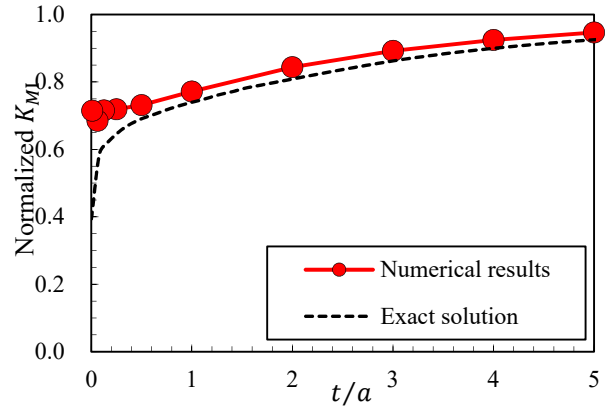


Fig. 10 Validation of implementation of XFEM for plate bending fracture mechanics

実鋼橋における疲労損傷は数 100m の大規模構造物におけるわずか数 mm 以下の亀裂を対象にその危険性を評価する必要があるため、解析対象である姫路大橋をグローバルモデルおよびサブモデルの 2 個のモデルを弱連成させることで解析を実現した。Fig.12 にグローバルモデル・サブモデルを示す。

および走行車線上の交通をモデル化した。本研究では、応力拡大係数と呼ばれる亀裂駆動力を表す破壊力学パラメータを評価することにより、亀裂の進展挙動をモデル化した。ここでは、2 次元平面問題と板曲げ問題が重畳するような、板厚方向に応力拡大係数が分布する問題において、巨視的な亀裂進展をモデル化する亀裂進展則を提案した。

以上のモデル化に基づき、これらのモデル化に基づき、これまで実現されていなかった実鋼橋における疲労亀裂進展解析を初めて実施した。Fig. 13 に得られた亀裂進展経路、Fig. 14 に応力拡大係数の推移、Fig. 15 に载荷回数に伴う亀裂長さの推移の計算結果を示す。構造ディテール形状や、その橋梁全体における所在箇所、車両通過位置を考慮した上で、橋梁の疲労損傷危険性を定量的に評価できることが示された。さらに、姫路大橋において実際に施工された補強工法の効果を、亀裂進展性により、直接的かつ定量的に評価した。

8. 結論

本研究では、これまで実現されなかった実鋼橋を直接的に対象とした疲労亀裂の進展解析を実現するために、XFEM の平面破壊力学問題および板曲げ破壊力学問題の適用性に関しての基礎的な検討を実施し、その結果を考慮して汎用ソフトウェアへの実装による疲労亀裂進展解析プログラムを開発した。

本解析プログラムを用いた検証により、構造ディテール形状や、その橋梁全体における所在箇所、車両通過位置を考慮した上で、橋梁の疲労損傷危険性を定量的に評価できること、さらには補強工法の効果を、直接的かつ定量的に評価できることが示され、その有効性が確認された。

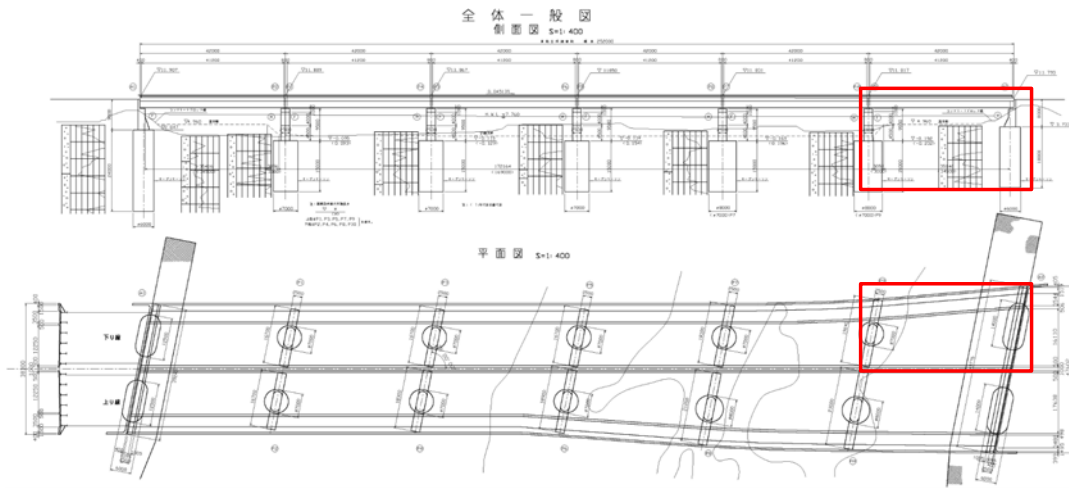
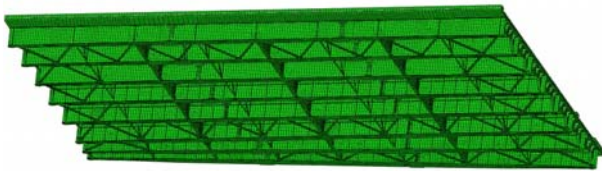
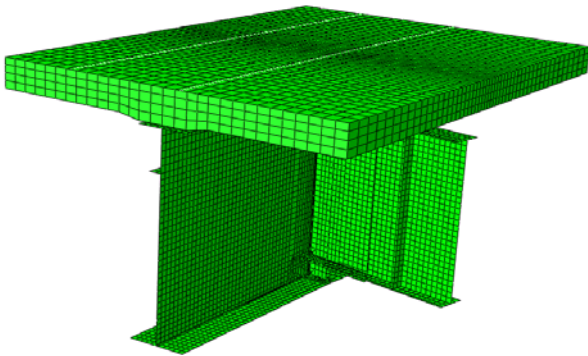


Fig.6 General drawing of Himeji Bridge



(a) Global model of 6th span of Himeji Bridge



(b) Sub-model for XFEM analysis

Fig. 12 Finite element model of Himeji Bridge

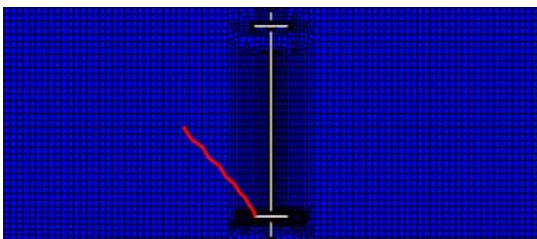


Fig. 13 Crack propagation path

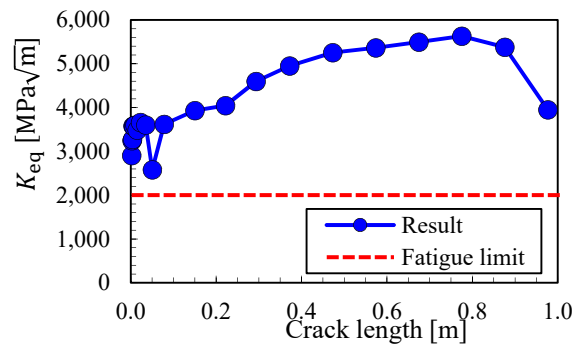


Fig. 14 Transition of stress intensity factor

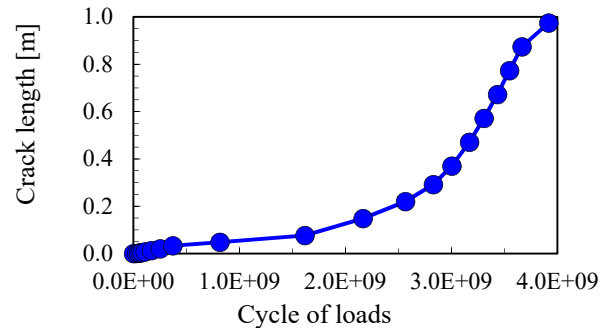


Fig. 14 Relationship between crack length and cycle of load

参考文献

- [1] Belytshko, T. and Black, T.: Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.45, pp.602-620, 1999
- [2] J. M. Melenk, I. Babuska: The partition of unity finite element method: Basic theory and applications, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.39, pp.289-314, 1996
- [3] 柴沼一樹, 宇都宮智昭, 栗飯原周二, XFEM 近似の不完全性の修正 (第1報: 一般形の定式化と理論誤差解析), 計算工学会論文集, 2011 (2011) Paper No.20110004