

疲労き裂を有する鋼桁のき裂進展を考慮した残存耐荷力評価法の開発

神戸大学大学院工学研究科 准教授 橋本国太郎

1. はじめに

日本の鋼道路橋の多くは、高度経済成長期（1955～73年）に建設され、今後建設から約60～70年を迎えることとなる。自動車荷重の増大や交通量の増大、近年の自然条件の悪化など建設後の想定外の環境変化による腐食や疲労き裂も見つかり、今後、鋼橋の老朽化に伴い、事態はさらに深刻化するものと思われる。その一例として、2006年10月に国道25号山添橋（鋼3径間連続鈎桁橋、橋長128.02m、1971年竣工）の横桁下フランジが主桁ウェブに貫通する部位から、長さ1mを超えるき裂が発見された。き裂面の一部には脆性破壊の特徴が見られ、き裂全長のうち少なくともある範囲はき裂が一気に進展した可能性が高いと考えられている。

本研究の大きな目的は、このような疲労き裂を有する鋼橋について、残存耐荷力評価を簡単に行える方法を開発し、現場における緊急応急補修の必要性やそれらの対策時期を決定するための基礎的資料の提供としている。本論文では、その目的の第1段階として疲労き裂を有する鋼I桁部材に着目し、その残存耐荷力を解析的に評価し検討することが目的である。ここでは、実際に疲労き裂が発見された鋼桁を対象として、様々なき裂損傷を解析モデルで再現する。き裂のモデル化に関してはき裂進展も考慮した拡張有限要素法（XFEM）を用いて検討し、健全な場合と疲労き裂を有する場合についてそれぞれ比較しながら残存耐荷力を検討する。

2. XFEM による桁およびき裂のモデル化

2.1 XFEM

有限要素法（Finite Element Method）は、本来、連続体を対象とする離散化手法であるため、き裂面のような不連続領域をモデル化するには、き裂面における2重節点の導入、き裂先端近傍における要素分割の細分化や特異要素の使用、またき裂進展を考慮するには、き裂進展に伴うモデルの変化を考慮した複雑なリメッシュ処理を繰り返す必要がある。この従来のFEMによるき裂進展解析の問題点を解決したのが、近年提案された拡張有限要素法（eXtended FEM : XFEM）である。このXFEMは、従来のFEMの枠組みにおける数値解析手法であるにも関わらず、任意の局所的な領域において図-1に示すような要素内部に不連続性を含む高度な近似（エンリッチメント）の構成を可能とする。このため、き裂解析において要素と独立にき裂のモデル化が可能となり、上記した従来のFEMを用いたき裂進展解析における問題を回避することが可能となり、き裂解析の効率化が期待されている。

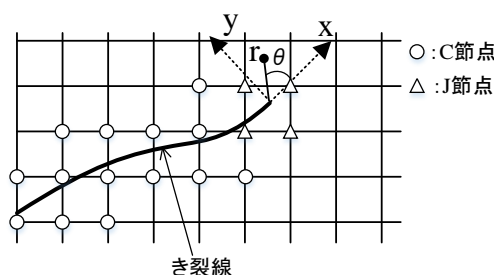


図-1 XFEM における節点のエンリッチ

き裂の発生は、エンリッチ要素での粘着応答の低下の開始を意味する。低下の過程は、応力またはひずみが指定されたき裂発生基準を満たしたときから始まる。き裂発生基準には、本研究で用いた有限要素解析コード ABAQUS では、最大主応力基準や最大主ひずみ基準などが使用できる。本研究における解析では、最大主ひずみ基準を用い実施した。また、き裂進展の方向は常に最大主ひずみ方向に直行する。このようなき裂の発生・進展基準を用いることでき裂の進展解析を行った。き裂の発生後の進展は破壊エネルギー G_c を基準とした応力と要素内の分離する変位（き裂開口量）の軟化勾配の関係で表現される。この関係は ABAQUS においてデフォルトで線形関係として与えられているため、本解析ではデフォルトの線形関係を用いた。また、本研究では破壊基準として、最大主ひずみ基準を 0.05 とし解析を行った。

2.2 解析モデル

解析モデルは図-2 に示す鋼 I 桁をシェル要素でモデル化した。材料は SM400 とし、材料特性として、降伏点を 235 N/mm²、引張強さを 400 N/mm² とし、ヤング率 E は 200,000N/mm²、ポアソン比 ν は 0.3 とした。応力-ひずみ関係は降伏点を塑性開始点としたバイリニア型で与えた。

初期不整には、初期たわみと残留応力があるが、本論文の主な解析では、初期たわみのみを考慮した。本論文で検討するようなき裂を有する鋼桁の残留応力に関する研究成果や XFEM 解析におけるき裂を有する鋼桁の残留応力に関する研究結果が不十分であるが、残留応力を考慮した方が精度の高い結果が得られることが既往の研究により明らかである。そのため、各章でのき裂進展を考慮しないき裂 Case1 における残留応力の有無における解析結果を示すこととした。また、解析モデルは、水平補剛材ありと水平補剛材なしの 2 モデルを作成した。

载荷は桁端部に強制回転角を与える曲げ負荷モデルと、強制変位を与えるせん断負荷モデルの 2 種類とした。

き裂のモデル化は図-3 に示すように、ウェブにき裂を導入したケース（3 章）では、き裂の進展方向と長さを変化させた。フランジにき裂を導入したケースは 4 章で紹介する。また、耐荷力解析中にき裂の進展を考慮した場合と、考慮しない場合の 2 種類の解析を実施した。き裂の進展を考慮した場合、上述した XFEM を用いるが、その場合はき裂先端のみを XFEM によりモデル化し、その他のき裂部位は通常の FEM により 2 重節点でモデル化した。き裂進展しないモデルでは、すべて FEM により 2 重節点でき裂をモデル化している。き裂進展を行う部位に関してはソリッド要素によるモデル化が必要であるため、き裂先端部の XFEM を用いる部位のみソリッド要素でモデル化した。

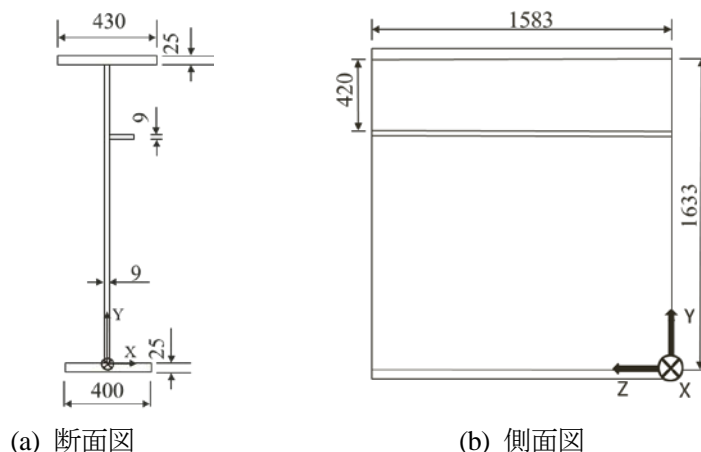


図-2 解析モデル

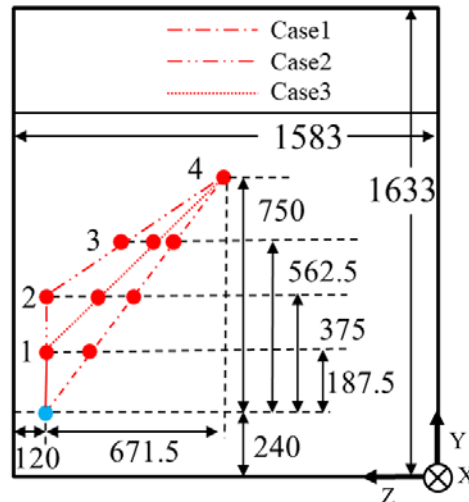


図-3 ウェブき裂モデル

3. ウェブにき裂を有する鋼桁の残存耐荷力評価

3.1 解析ケース

解析ケースは、前述したように、載荷荷重、補剛材の有無、き裂進展の有無、き裂の進展方向（3 ケース）および長さ（4 ケース）を変化させた 96 ケースを基本とし、残留応力の有無を検討するため 20 ケース追加した。解析名は初めの文字はき裂進展有のケースでは XFEM とし、き裂進展なしのケースでは Case とした。この文字の次に来る数字が図-2 の進展方向を表し、次の数字が図-2 におけるき裂長さを表す。なお、載荷荷重や補剛材の有無によっての解析名の違いは区別していない。

3.2 残留応力の有無による耐荷力の違い

ここでは、き裂進展を考慮しないモデルの健全（き裂無し）モデルとき裂有りの Case1 に対して、残留応力の有無が耐荷力にどのような影響を及ぼすか検討を行った。

補剛材の有無と曲げ負荷およびせん断負荷の場合で検討したが、曲げ負荷ではほぼ残留応力の影響がなく、残留応力があっても耐荷力はほとんど変化しないことがわかった。一方、せん断負荷の場合、補剛材無のケースに関しては、残留応力を入れることで、耐荷力が若干変化することがわかったが、その変化量は 5%程度であり、ほとんど変化がないと言える。

3.3 曲げ負荷を受ける鋼桁の解析結果

曲げモーメント M (N・mm) と回転変位 θ (rad) の関係を図-4 に示す。ここでは、補剛材なしの場合を示している。なお、X-のケースはき裂進展を考慮したモデル、Case のモデルはき裂進展を考慮しないシェル要素のみのモデルを表している。

図-3 に示す補剛材なしのケースにおいて、き裂進展を考慮したモデルと考慮していないモデルとを比較すると、その荷重経路にあまり変化がなく、き裂進展を考慮することにより最大耐荷力は約 2~3%の減少となることがわかった。このことからウェブのき裂進展の考慮が曲げ耐荷力に与える影響が少ないことがわかる。また、変形図を確認したところ、すべてのケースでき裂の進展が起こっていないことを確認している。さらに、ウェブき裂の方向や長さが曲げ耐荷力にほとんど影響を及ぼさないことがわかった。そこで 4 章では、曲げ負荷の場合のみ引張フランジ側に亀裂がある場合について検討した。

なお、ここでは図に示していないが、補剛材ありの XFEM モデルでは、解の収束性が悪く、最大曲げモーメントが出る前に解析が発散した。ただし、き裂進展を考慮した解析は、き裂進展を考慮しない解析値のすぐ下を通る経路で解析が進んでいたことから、ほぼ同じもしくは若干小さい耐荷力を示すものと考えられる。なお、補剛材がある方が、き裂長さによって耐荷力が若干変化することがわかった。

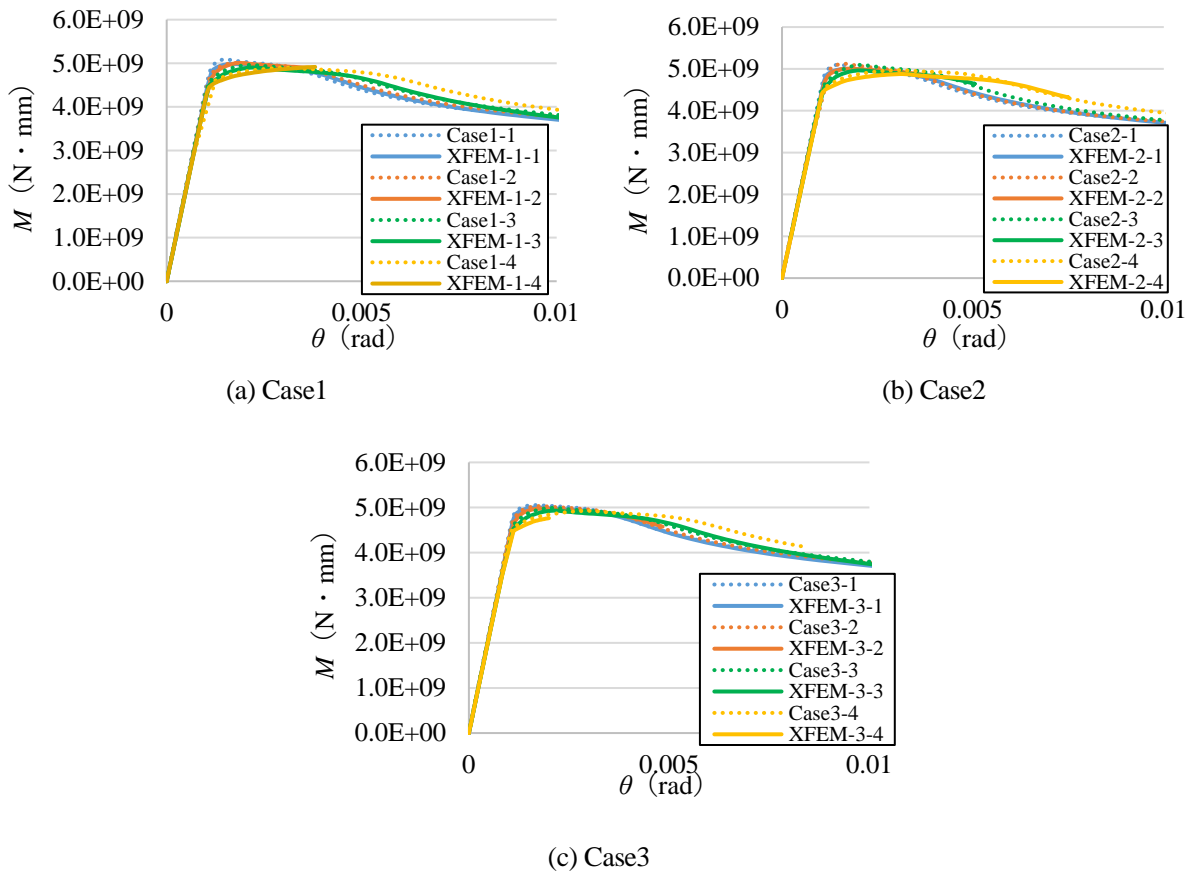


図-4 曲げモーメントー回転角関係

3.4 せん断負荷を受ける鋼桁の解析結果

解析結果として、図-5 に補剛材なしの荷重 - 変位関係を示し、図-6 には、き裂長さと耐荷力の関係を示している。また、図-7 にき裂進展時のコンター図を示す。

図-5 および図-6 より、き裂の長さによって、耐荷力が大きく変化することがわかる。せん断負荷の場合、き裂が長くなり、ある長さ以上（き裂長さ/桁高さ比 0.3 以上）になると耐荷力が大きく減少することがわかった。

図-7 より、き裂進展を考慮するモデルと考慮しないモデルにおいて、き裂進展を考慮した場合のほうが、耐荷力がわずかながら上がっている。図-6 からわかるように最大荷重時では補剛材なしモデルのき裂が最も長くなったケースのみき裂が進展しており、腹板の座屈よりもき裂進展が先行しているため耐荷力が低下した。しかし、き裂が進展する前に腹板の座屈が先行しているモデルでは耐荷力が上昇していた。進展を考慮しない場合、き裂先端の応力集中が大きくなりウェブの座屈に影響を及ぼしているため、最大耐荷力が小さく出ている。また、き裂進展を考慮すると最大荷重がより小さい変位で出ているのは、き裂先端の応力の影響で最大荷重がより早く達したためと考えられる。

最大荷重時のミーゼス応力分布より、き裂進展を考慮していないモデルでは、上下フランジの端部

が応力集中しているのに対し、き裂進展を考慮したモデルでは上下フランジ端部には、応力集中が見られないことがわかった。このことから、き裂進展を考慮し、き裂先端の応力が分配することにより応力集中部が発生しにくくなり耐荷力に影響したと考えられる。

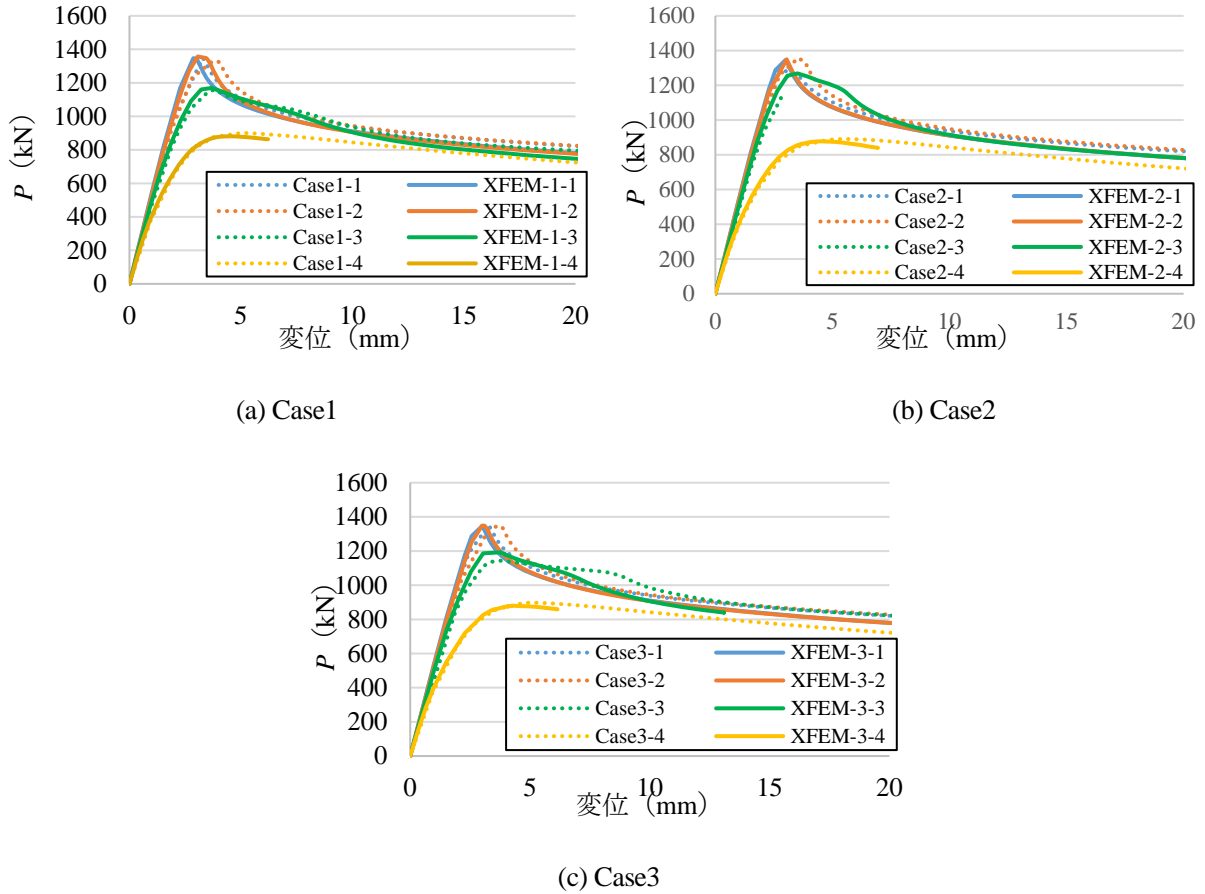


図-5 荷重—変位関係

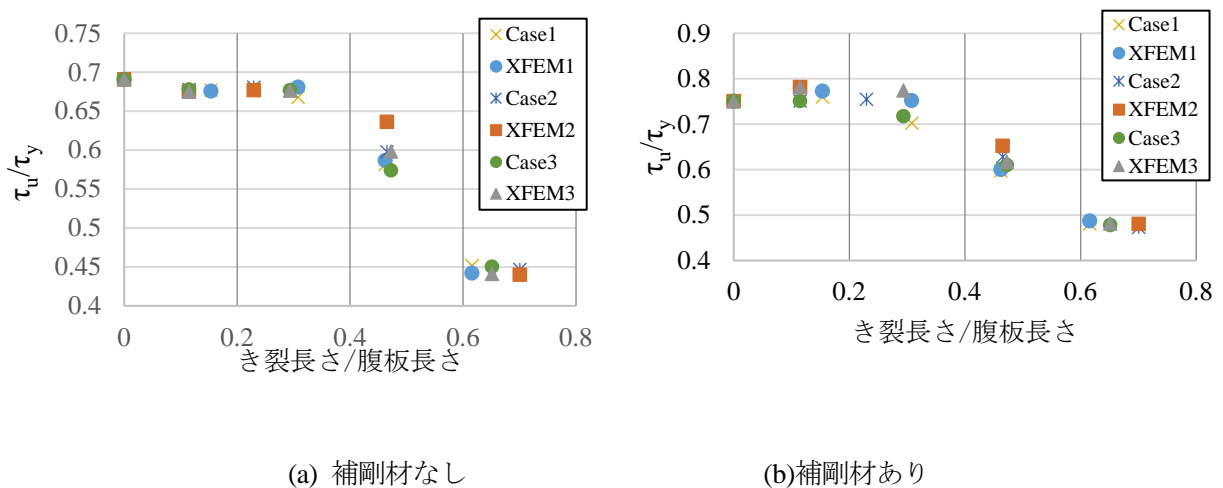


図-6 耐荷力とき裂長さの関係

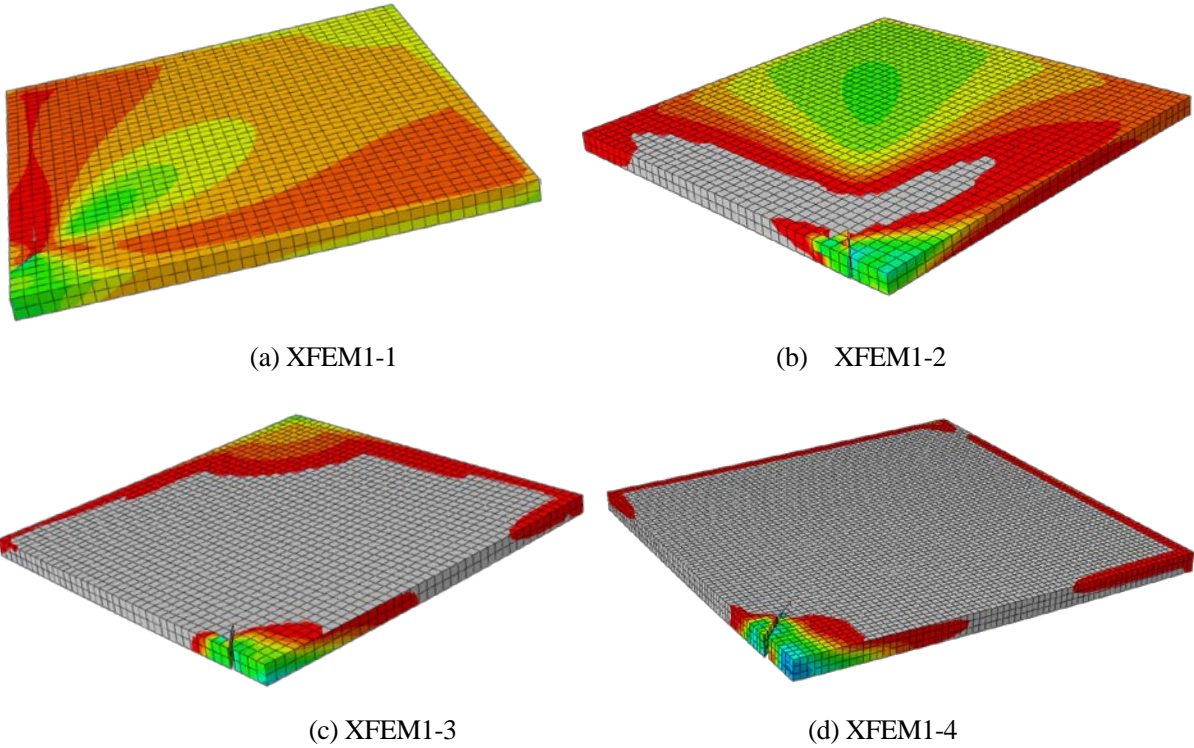


図-7 最大荷重時ミーゼス応力分布（ソリッド部，補剛材なしモデル）

4. フランジにき裂を有する鋼桁の残存耐荷力

4.1 解析モデルおよびケース概要

図-8 にき裂の概要を示す．図-8(a)に示すき裂の下にある数字は Case△もしくは XFEM△の三角の数字を示し，赤点の左下の数字は，Case△-○もしくは XFEM△-○の丸の数字を示し，き裂はウェブおよびフランジの中央まで進展したモデルを考える．XFEM を用いたソリッド要素は，フランジ側のき裂先端の両端に使用し，それ以外の領域をシェル要素でモデル化した．境界条件および荷荷条件は第 2 章で示したものを使用する．

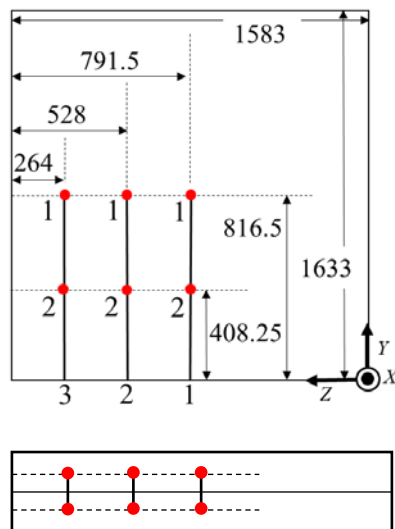


図-8 解析モデルの概要

4.2 残留応力による耐荷力の違い

残留応力については、3章と同様に、き裂進展を考慮しないモデルの健全と Case1-1 に対して、残留応力の有無が耐荷力にどのような影響を及ぼすのか検討を行った。その結果、3章と同様に残留応力の有無によって耐荷力はほとんど変わらなかった。

4.3 曲げ負荷を受ける鋼桁の解析結果

補剛材なしモデルのフランジにき裂進展を考慮しない場合および考慮した場合での、曲げモーメント M (N・mm)と回転変位 θ (rad)の関係を図-9 に示す。Case のモデルはき裂進展を考慮しないシェル要素モデル、X のケースはき裂進展を考慮したモデルを表している。

図-9 より、フランジのき裂は、き裂位置によって耐荷力へ影響することが分かり、フランジ端にき裂が発生した場合よりも中央にき裂が発生した場合のほうが耐荷力に影響を及ぼす。また、き裂進展を考慮した方が、考慮しないものに比べ耐荷力が小さくなり、荷重ピークが早い段階で出ていることがわかる。

また、最大曲げモーメント時の XFEM1 のソリッド要素のミーゼス応力分布を図-10 に示す。図-10 から耐荷力は、き裂進展がある程度進展してから最大値が出ていたことが分かった。

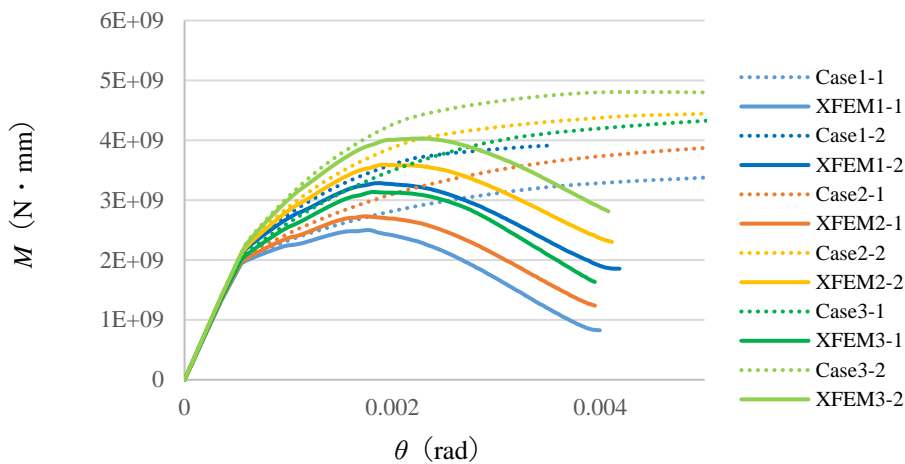
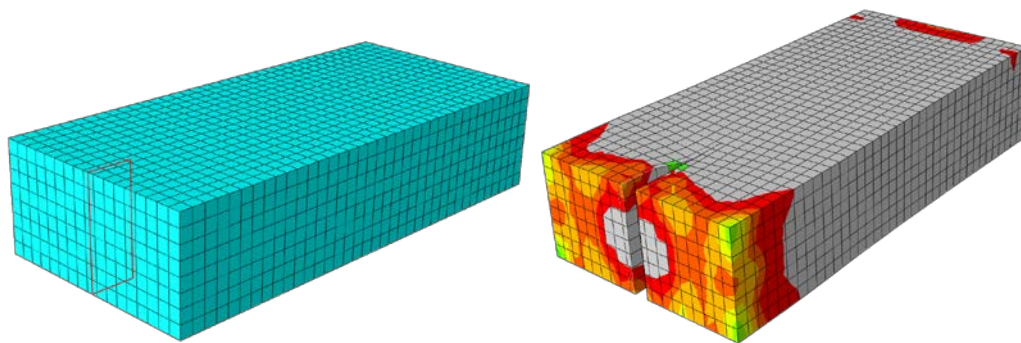


図-9 曲げモーメントー回転角関係 (補剛材なし)



(a) 初期き裂先端 (b) 最大応力時のき裂先端

図-10 最大荷重時ミーゼス応力分布 (ソリッド部, 補剛材なしモデル)

5. まとめ

本研究は、き裂を有する鋼桁を想定し、曲げもしくはせん断を受ける際の耐荷力特性を FEM 解析およびき裂進展を考慮した XFEM 解析によって検討した。以下では、本研究で得られた内容をまとめる。

- 1) ウェブにき裂を有する鋼桁の残留応力の有無による耐荷力の違いはほとんどない。曲げ荷重を受ける桁よりもせん断荷重を受ける桁のほうが耐荷力の違いは大きくなった。
- 2) 曲げ荷重を受けウェブにき裂を有する桁の解析では、水平補剛材を考慮しき裂進展を考慮することで解析が複雑になり、最大荷重が出る前に解析が収束しなかった。補剛材の有無に関係なくき裂進展を考慮しても、き裂進展を考慮しないシェルモデルとほぼ同じ耐荷性能を示す。曲げ荷重を受ける桁についてはウェブに発生したき裂が耐荷力に及ぼす影響が少ない。これは、曲げによって発生する応力が小さく、き裂進展よりも圧縮フランジの座屈が先行するため、残存耐荷力にき裂進展の影響が少なかったためと考えられる。
- 3) せん断荷重を受けウェブにき裂を有する桁では、き裂があることで残存耐荷力が低下することがわかった。また、き裂長さが長いと耐荷力は低下する。さらに、き裂進展を考慮することにより耐荷力が少し上がる傾向を示した。き裂の進展よりも座屈が先行しているとき、耐荷力があがり、き裂の進展が座屈よりも先行しているときは耐荷力が下がる傾向があった。
- 4) 曲げ荷重を受けフランジにき裂を有する桁の解析では、き裂位置によって耐荷力への影響が変わっていた。フランジ端にき裂が発生した場合よりも中央にき裂が発生した場合のほうが耐荷力は大きく減少する。
- 5) ウェブのみに発生したき裂では、き裂の長さが曲げ耐荷力に及ぼす影響は大きくないが、下フランジに進展したき裂の場合、ウェブのき裂長さが上フランジの応力分布などに影響を与えるため、き裂長さが耐荷力に大きく影響を及ぼしていた。

今後の課題として、本解析の 3 次元なき裂の進展解析において要素分割サイズにより解析精度や収束性の確保が困難になるといった課題があるためそれらの改善が必要である。また、曲げとせん断の組合せ荷重におけるき裂を考慮した解析も行う必要がある。

参考文献

- 1) 三木千壽：橋梁の疲労と破壊，朝倉書店，2011
- 2) 森 猛：鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術，JSSC，No44,2002
- 3) 金仁浩，山口隆司，北田俊行，中村智昭：ソールプレート周辺にき裂を有する鋼橋 I 桁端部のせん断耐荷力特性に関する基礎的研究，土木学会論文集 A，Vol.64 No.4，841-856，2008
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善出版，2017
- 5) Dassault Systemes Simulia Corp：ABAQUS2018 Analysis user's guide，2018
- 6) 土木学会・鋼構造委員会座屈設計ガイドライン改訂小委員会：座屈設計ガイドライン改訂第 2 版，丸善，2005
- 7) 星野加奈，橋本国太郎：き裂を有する鋼板の曲げおよびせん断耐荷力に関する解析的検討，鋼構造年次論文報告集，第 24 巻，pp.351-358，2016
- 8) 足立湧人，橋本国太郎：疲労き裂を有する鋼 I 桁の残存耐荷力に関する解析的研究，鋼構造年次論文報告集，第 26 巻，pp.486-493，2018