

円周切欠き付ボルトのせん断延性破壊挙動の検討（その2）有限要素法解析

高田機工(株) ○（正会員）永木 勇人（正会員）尾寄 健人
大前 暢（正会員）佐合 大
大阪大学大学院 森 浩基 庄司 博人 大畑 充

1. 緒 言

橋梁が強地震動を受けた際の倒壊防止のために、上部構造（橋桁）と下部構造（橋脚）を分離させて水平力を低減させるロックオフ機能付き支承が提案されている^{1,2)}。これは、上部構造と支承の締結に円周切欠き付ボルトを採用し、レベル1地震動では破断せず、レベル2地震動で確実にせん断破断させるものである。前報³⁾では、内孔を有する円周切欠き付ボルトのせん断破断試験を行い、内孔径がせん断破断挙動に及ぼす影響について検討した。

本研究では、円周切欠き付ボルトのせん断破断挙動について、有限要素法による数値解析的検討を行うこととした。前報³⁾と同様、外径を一定として切欠き底断面積が一定となるように円周切欠き深さと内孔径を変化させた四種類のボルトを対象に、弾塑性FEM解析により試験片の応力・ひずみ状態を解析することで、円周切欠き付ボルトのせん断破断挙動の考察を行った。

2. 解析対象および解析条件

前報³⁾で用いた Type A から Type D の円周切欠き付ボルト試験片を対象として、せん断試験を模擬した三次元弾塑性FEM解析を行うことで、切欠きからの延性き裂の発生挙動に着目してせん断破断挙動に及ぼす切欠き部断面形状の影響を検討することとした。

図1に解析モデルの要素分割の例を示すように、試験片を8節点6面体アイソパラメトリック要素で、治具を4節点4辺形剛体要素でモデル化した。対称性を考慮して、1/2部分をモデル化している。解析ソルバにはABAQUS Standard Ver. 6.12を用いた。実験と同様のせん断負荷を与えるため、図1中に示すJig Bを完全に拘束し、Jig Aに強制変位を与えた。なお、解析には実験で用いたSNR400Bの平滑丸棒引張試験で得られた真応力 s －真ひずみ e 曲線から決定した相当応力 $\bar{\sigma}$ －相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ 曲線を用いた。

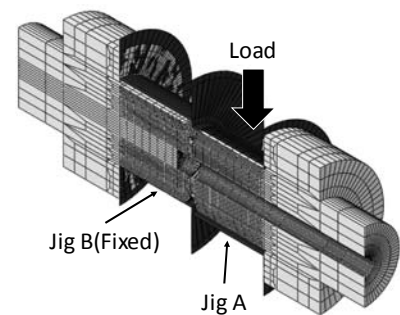


図1 ボルト解析モデルの要素分割

従来から、切欠き底からの延性き裂の発生は、局所相当塑性ひずみ一定条件に従うことが報告されている。せん断負荷を受ける場合にも第一近似的に本クライテリオンが適用できるものと仮定して検討することとし、本材料の延性き裂発生限界ひずみを取得した。限界値の取得方法の詳細は文献4)を参照されたい。複数本のJIS 4号シャルピー試験片を用いた静的三点曲げ負荷・除荷試験により得られた荷重点変位と発生した最大延性き裂長さの関係（図2）と、弾塑性FEM解析による荷重点変位と切欠き底の相当塑性ひずみの関係（図3）から、本材料の延性き裂発生限界ひずみは $(\bar{\epsilon}_p^{cr})_{cr} = 1.31$ であることがわかった。本限界値を参照して、以下の考察を行う。

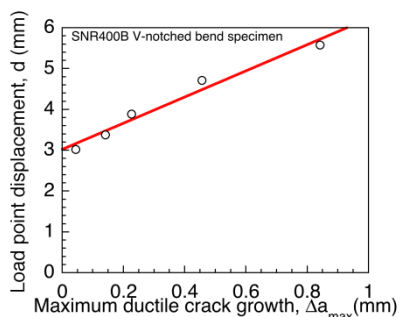


図2 延性き裂発生限界荷重点と変位

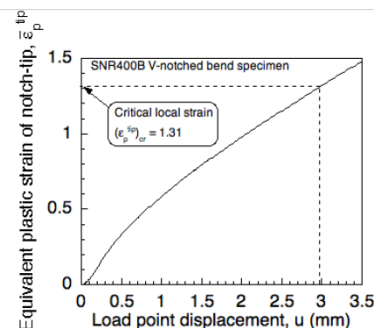


図3 延性き裂発生限界ひずみ

3. 結果及び考察

3. 1 切欠き底の相当塑性ひずみ履歴

解析および実験により得た荷重-変位曲線（点線）と、 0° 、 180° （変位方向）および 90° （変位直角方向）における切欠き底表面の相当塑性ひずみの最大値の履歴（実線）について、Type B、D の試験片を代表例として図 4 に示す。最大荷重までの荷重-変位曲線は実験と解析でよく一致しており、本解析の妥当性が示された。空隙率が小さく変形能の小さい Type B 試験片（および Type A 試験片）では、ボルト全周の切欠き底ではほぼ等しい相当塑性ひずみの増加履歴を呈した。一方、空隙率が大きく変形能の大きかった Type D 試験片（および Type C 試験片）では、 90° 、 180° 位置の切欠き底において相当塑性ひずみ増加傾向に大きな差は見られないが、それに対して 0° 位置でのひずみ増加が顕著にみられた。すなわち、変位方向にある 0° と 180° 位置においてひずみの増加傾向に大きな差が見られることがわかった。さらに、 0° 位置では約 1.65mm の変位を与えたときに、切欠き側面にて急激な塑性ひずみ増加を呈し、これはその位置での治具の接触によるものであることがわかった。

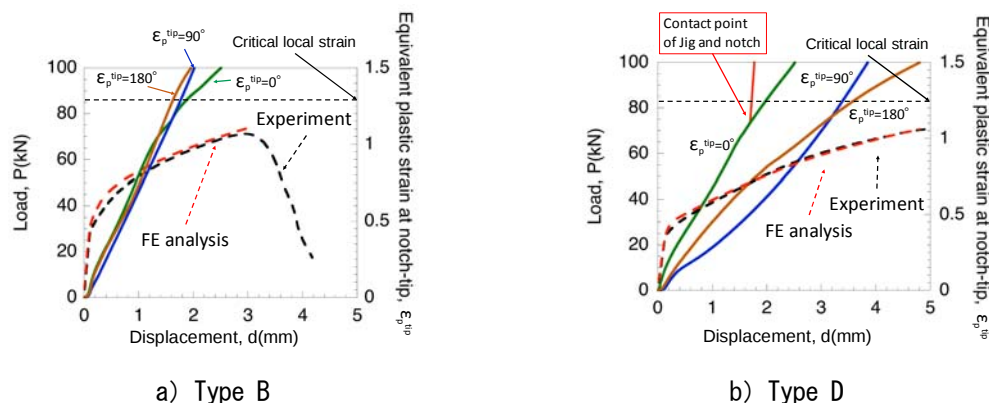


図 4 荷重-変位と相当塑性ひずみ-変位の関係

3. 2 延性破断挙動の考察

図 5 に、実験と解析の結果から、推察された延性き裂の発生・進展から破断に至るまでの挙動を模式的に示した。延性き裂の発生が局所相当塑性ひずみ一定条件 ($(\bar{\epsilon}_p^{\text{tip}})_{cr} = 1.31$) に従うものとする、図 4 に示した結果から、Type B 試験片ではボルト全周にわたって切欠き底からほぼ同時期に延性き裂が発生したと推察される。破面観察の結果からも、その後、延性き裂は負荷方向に沿って進展してボルト中央で連結することにより、返りが生じることなく破断に至ったことが示唆された。一方、Type D 試験片では、 0° 位置の切欠き底の相当塑性ひずみが延性き裂発生限界ひずみに達する前に、切欠き側面での治具との接触部でのひずみが先行して限界ひずみに達しており、切欠き底とは異なる側面部において延性き裂が発生・進展することが示唆された。これが、変形能の大きかった Type D 試験片の破面において、 0° 位置にて返りが生じた原因であることが推察された。

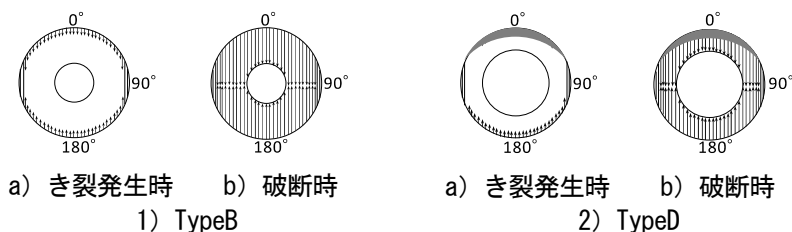


図 5 延性き裂発生から破断までの挙動の模式図

4. 結 言

本研究では、せん断負荷を受ける円周切欠き付ボルトの切欠き底の力学状態を弾塑性 FEM 解析により算定し、き裂発生挙動を考察した。(1) ボルト全周にわたって切欠き底からほぼ同時期に延性き裂が発生し、負荷方向に沿って進展してボルト中央で連結することで返りが無い破面を呈する。(2) 返りの発生原因は、切欠き側面に治具が接触することで切欠き底とは異なる側面部において延性き裂が発生・進展したためである。

5. 参考文献

- 1) 佐合ほか：既設支承をロックオフ機能付きすべり支承に改造した耐震補強工事，第 67 回土木学会年次学術講演会，2012
- 2) 森ほか：円周切欠き付ボルトのせん断延性破壊挙動の解明，溶接構造シンポジウム 2017 講演論文集，2017
- 3) 尾寄ほか：円周切欠き付ボルトのせん断延性破壊挙動の検討（その 1）実験，第 73 回土木学会年次学術講演会，2018
- 4) 大畑ほか：損傷挙動観察に基づく延性き裂発生・進展特性を支配する鋼材機械的特性の解明，鉄と鋼，2008