ノックオフボルトのシミュレーションベースの破壊性能制御設計

高田機工株式会社 〇 (正会員) 尾寄 健人 永木 勇人 大前 暢 佐合 大 大阪大学大学院 (現 日揮㈱)森 浩基 庄司 博人 大畑 充

1. 緒 言

橋梁が地震動を受けた際,橋脚と橋桁間の支承には大きな水平力が作用する.これに対し,強地震動による橋梁の倒壊を防ぐために,想定外の外力が作用した場合に上部構造の橋桁と下部構造の橋脚を分離させ,水平力を低減させるノックオフ機能付きすべり支承の採用が提案されている¹⁾.ノックオフボルトを採用する場合,1支承当たり複数本使用されるノックオフボルトが,レベル1地震動では破断せず,レベル2地震動で確実にかつほぼ同時期にせん断破断するように設計することが重要である.すなわち,ノックオフボルトには,適切な耐せん断強度と,複数本のボルトで均等に荷重を受け持つための十分な変形能が要求される.

本研究では、ノックオフボルトが上記の要求性能を満足するための形状・寸法の設計指針を得るために、 ノックオフボルトの耐せん断強度と変形能、および破断挙動を予測するシミュレーション手法の構築を目的 とする.また、構築したシミュレーション手法に基づき、ボルト形状・寸法がせん断強度や変形能に及ぼす 影響について考察する.

2. ノックオフボルトのせん断試験および FEM 解析

2. 1 供試鋼材および供試体

供試鋼材として,建築構造用圧延棒 鋼 SNR400B を用いた. せん断試験に 用いた供試体の形状・寸法を図1に示 す.破断位置を限定するためボルトの 中央部に円周切欠き(ノッチ)を設け た. 切欠き深さ d, 内孔径 D₂を有す る試験片 A~D の4 種類を用いた.

2.2 せん断破断試験

供試体のせん断試験は専用の治具 を用いて上下方向から圧縮負荷をか けることで,供試体にせん断負荷をか ける構造とした(図2).

2.3 有限要素解析方法

供試体と同形状の解析モデルを用 い,ノックオフボルトのせん断試験を 模擬した Mises の降伏条件に従う三 次元弾塑性 FEM 解析を行った.試験 片は8節点6面体アイソパラメトリ ック要素,治具は4節点4辺形剛体要 素でモデル化した.切欠き底近傍の最



小要素寸法は,0.03 mm×0.03 mm とした.対称性を考慮してボルト側面 1/2 部分をモデル化した.解析ソル バには Abaqus Standard Ver. 6.12 を用い,一方の治具を完全拘束し,他方の治具にボルト軸に垂直方向に変位 を与えることでせん断負荷を与えた.

2. 4 せん断試験結果および解析結果

A~Dの供試体のせん断試験結果および FEM 解析結果の荷重-変位曲線の比較を示す(図3).最大荷重まで は実験結果と解析結果が概ね一致しているが、実験で最大荷重を示す変位レベルにおいても、解析では荷重 が上昇しており、実験における荷重低下はき裂発生・進展による切欠き底断面積の減少によるものであるこ とが示唆された.

キーワード:ノックオフボルト,レベル2地震動,き裂発生・進展シミュレーション,損傷制御設計, ノッチ付きボルト,延性損傷モデル

連絡先 〒649-0111 和歌山県海南市下津町方 1375-1 高田機工㈱技術研究所 TEL:073-492-4971

3. 延性損傷モデルに基づくノックオフボルトのせん断破断挙動の予測

本研究では、Shoji らによって提案された引張/せん断組合せ応力状態を考慮した延性損傷モデル²⁾を用い てき裂発生・進展シミュレーションにより最大荷重及び変形能,さらには破断に至るまでの荷重低下まで精 度良く予測することが示された(図4-1).一例として,図4-2にTypeAのき裂発生・進展シミュレーショ ンの結果を示す(0,180°はせん断方向を示す).最大荷重に至る前(Step-1)にはすでにき裂が90°側から発 生しており、最大荷重時(Step-2)には約45°~135°の範囲にき裂が発生した.Step-3では0°側および180° 側にもき裂が形成し、それらが負荷方向に平行にき裂が進展し、会合して破断(Step-4)に至った.また、 実供試体Aと類似の破面が得られた.



4. ノックオフボルトの性能に及ぼすボルト形状・寸法の影響

4. 1 切欠き底断面積と切欠き深さによるせん断強度及び変形能への影響

切欠き底断面積(A)と切欠き深さ(d)の影響を検討するため, 内孔径(D₂)を固定し,断面積を大きくしつつ切欠き深さを浅くす るシミュレーションを行った結果を図5に示す.断面積(A)の増加 に伴い,せん断強度が増加した.切欠き深さ(d)が浅くなるにつれ て変形能が増加することが示唆された.なお,内孔径(D₂)のみを 変化させた場合は変形能に影響はなかった.以上のことより,せん 断強度は切欠き底断面積に比例関係を示し,切欠き深さが浅くなる に従って,変形能が大きくなる傾向が示された.

4.2 ボルト形状・寸法による変形能の予測

最大荷重時における変形能(Ucr)は切欠き底でき裂が最初に発生する90°のひずみ集中に支配される.90°のひずみ集中は切欠き深さ (d)とボルトの軸半径(B)の比である切欠き深さ比(d/B)で決定 するため、変形能と切欠き深さ比は図6に示す関係が得られた. ボルトの形状パラメータである切欠き深さ比から変形能を概ね予測 可能であることが示された.

5. まとめ

本研究では、ノックオフボルトに要求される性能である、せん断強 度と変形能を予測するためのシミュレーション手法の構築を行った. 引張/せん断組合せ応力状態を考慮した延性損傷モデルに基づいたシ ミュレーションにより、き裂発生・進展挙動を再現することが可能で あり、せん断強度や変形能を精度良く予測可能であることを示した.



さらに、本シミュレーション手法に基づいて、ノックオフボルトのせん断強度と変形能に及ぼすボルト形状・ 寸法の影響について考察した.その結果、せん断強度は切欠き底断面積(A)に比例関係を示した.ボルトの 形状パラメータである切欠き深さ比(d/B)から変形能(Ucr)を予測可能であることが示された.

6. 参考文献

1) 佐合ほか: 既設支承をノックオフ機能付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) 庄司ほか: Damage model for predicting the effect of combined stress state on ductile fracture, Extended Abstrct of 19th International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics, (2019), 34