ボルト接合された箱形ルーフ管に関する曲げ試験 その 2 - 数値解析 -

鉄道総合技術研究所　正会員　○富樫　陽太
鉄道総合技術研究所　正会員　中村　智哉
鉄道総合技術研究所　正会員　岡野　法之
鉄道総合技術研究所　正会員　津野　究
鉄道総合技術研究所　ﾌｪﾛｰ会員　小島　芳之

1. はじめに

函体推進・けん引工法は，低土被りの軌道直下地盤内を非開削で線路下横断トンネルを施工できる方法である。本工法では，地山の変形を抑制するため，箱形ルーフと呼ばれる鋼管が設置される。しかし，箱形ルーフが土被り圧や列車荷重を受けて**図 1** に示すようにボルト接合部を主とした曲げ変形を起こすことがあり，軌道変位発生の一因となっているがある。施工時の列車運行の安全性および地山の緩み抑制効果を高めるには，接合部を持つ鋼管が土圧などを受け曲げ変形する場合の力学挙動を詳細に把握する必要がある。本研究では，このようなボルト接合された鋼管に関し，曲げ変形および変形時のボルト軸力を正確に把握することを目的とし，簡易な弾性 FEM 解析アルゴリズムを構築し，有限要素モデルの解析結果と実物大の箱形ルーフの曲げ試験結果と比較を行った。

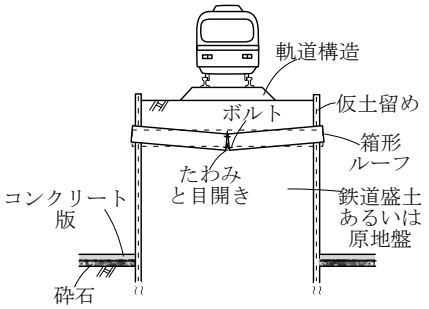


図 1　接合部を主体とした曲げ変形

図 2　曲げ試験 [1)]

2. ボルト接合された鋼管の弾性曲げ変形

図 1 の接合部を有する鋼管の弾性曲げ変形を把握するため，著者らは**図 2** に示す一連の実物大曲げ試験を行い，ボルトのトルクを 100Nm 増加させる毎に，たわみが約 3%抑制できることを示した [1)]。この曲げ試験時の接合部の力学挙動は**図 3** のように説明できる。**図 3(a)**の載荷を受けると，接合部は**図 3(b)**のように弾性変形し，**図 3(c)**のように載荷点近傍では接合面に直交する方向の圧縮応力が働くが，下端はボルトの軸力によって引張応力が働く。また接合部は不連続面であり，圧縮応力とボルトの引張応力の影響域以外は水平方向応力が作用しない。このようなボルト接合部を有する鋼管の荷重たわみ関係は**図 4** のように説明できる。同図のたわみ領域(i)では，初期ボルト軸力 N_{b0} が載荷時の軸力増分 ΔN_b よりも小さいため，ボルト近傍が接触する。逆に領域(ii)では，ΔN_b が N_{b0} を上回りボルト近傍も不連続面となる。従って，弾性変形の範ちゅうであっても領域(i)と(ii)で異なる荷重たわみ関係となる。なお，この曲げモードの変形では，上端のボルトが荷重たわみ関係に与える影響は小さいと仮定した。

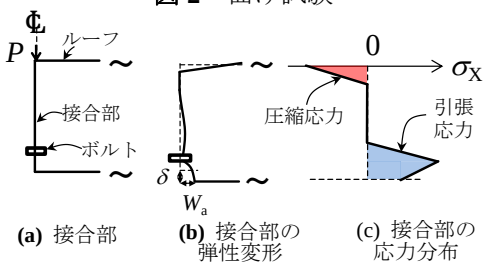


図 3　接合部の曲げ挙動

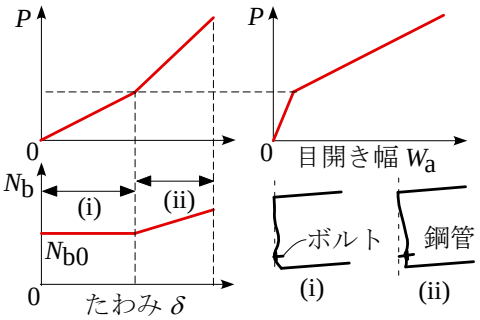


図 4　荷重たわみ関係

キーワード　steel pipe，joint，bending，earth pressure，FEM
連絡先　〒185-8540　東京都国分寺市光町 2-8-38　鉄道総合技術研究所　ﾄﾝﾈﾙ研究室　ＴＥＬ042-573-7266

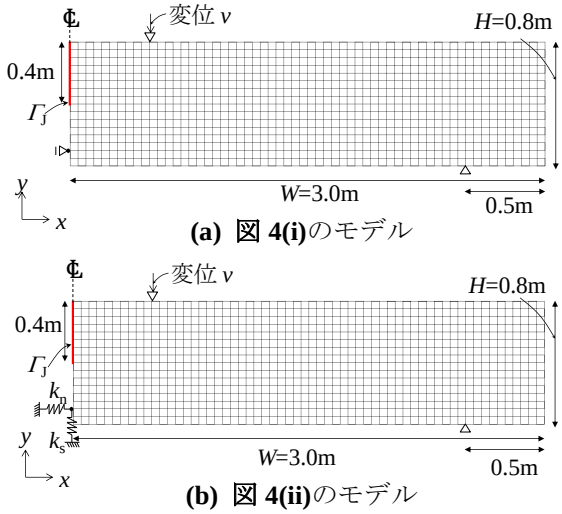
3. 接合部の力学挙動を表現する FEM 解析

2 章で説明した曲げ挙動を把握するために簡易な弾性 FEM 解析アルゴリズムを構築した。**図 4** の荷重たわみ関係を表現するための 載荷軸対称の FEM モデル [2] を**図 5** に示す。**図 5(a)**のモデルは，**図 4(i)**の場合の変形を表現できる。**図 5(b)**のモデルは**図 4(ii)**の変形を表現するため，ボルトにかかる軸力およびせん断力をばね要素で表現した。さらに，**図 3(b)**の接合部の力学挙動を適切に考慮するため，既往のひび割れ進展解析のプロセス[例えば 3)]を参考に，**図 6** の弾性解析アルゴリズムを構築した。このアルゴリズム（**図 6(a)**）では，まず，**図 5** の境界Γ_j（天端から 0.4m の範囲）で x 方向変位を拘束した状態で解析を行う。次に，不連続面の引張強さ=0MPa という仮定の下，Γ_j の下端から順次，引張応力が作用した i 節点の x 方向変位の拘束を外し，再計算する。最後に，該当節点が**図 3(c)**の圧縮応力域に達したときに計算終了を判定する。なお，FE 解析では，Γ_j に働く節点水平応力に近傍のガウス点で計算した応力の平均値を用い，等方弾性体のヤング率とポアソン比は，曲げ剛性 EI を 3 次元に合わせ，3.7GPa と 0.3 に設定した。また，変位載荷点の反力を得るため Lagrange の未定乗数法を有限要素方程式 **Ku=f** に組み込み，未定乗数$\lambda=P$ を返すようにした。

提案手法で計算した荷重たわみ関係の一例を**図 7** に示す。同図には，著者らによる曲げ試験の結果 [2]も示し，提案アルゴリズムが継ぎ手を有する鋼管の曲げ挙動を適切に表現し得ること，また今まで計測が難しかった曲げ変形時のボルト軸力が推定できることがわかる。なお，初期のボルト軸力 N_{b0} はトルク係数 K=0.15 を仮定したトルク法 [4]によって求め，FEM で得た N_b も上述の未定乗数法により求めた。

4. まとめ

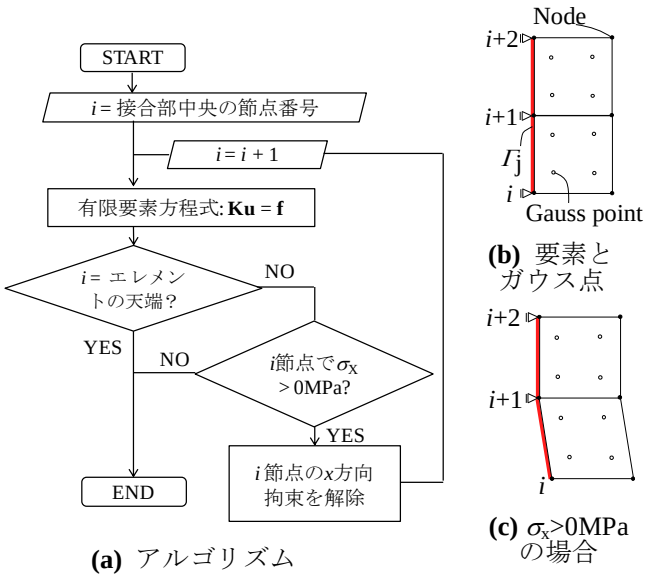
構築した弾性 FEM 解析アルゴリズムが，ボルト接合された鋼管の曲げ挙動を適切にシミュレートできることを示し，また同手法で今まで計測が難しかった変形時のボルトの軸力を推定できることも加えて示した。



(a) **図 4(i)**のモデル

(b) **図 4(ii)**のモデル

図 5 FEM モデル（平面ひずみ条件，4 節点要素）



(a) アルゴリズム

(b) 要素とガウス点

(c) σ_x>0MPa の場合

図 6 継ぎ手部の挙動を把握するアルゴリズム

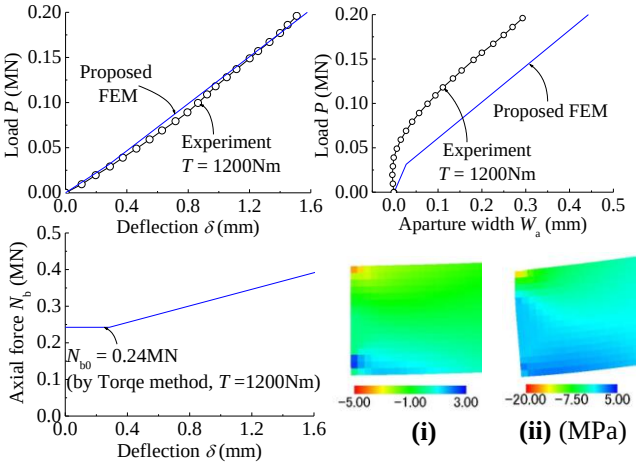


図 7 提案手法と実験の荷重たわみ関係比較

（**図 4(ii)**のばね定数 k_n =747MN/m, k_s = 0.33k_n）

参考文献

1) Togashi et al.: Bending test of the box form roof for underpass tunneling methods, *Proc. 6th China-Japan Geotech. Sym.*, 2015. (accepted) **2)**土木学会：計算力学の常識, pp.75-78, 丸善, 2008. **3)** 車谷ら：準脆性材料の離散ひび割れ進展解析手法の開発とその混合モードへの応用，土木学会論文集 A, Vol.65 No.1, pp.165-177, 2009. **4)** Bickford, J. H.: An introduction to the design and behavior of bolted joints, *Taylor and Francis Group*, pp.226-227, 1995.