

目違いを有する箱桁下フランジの高力ボルト摩擦接合継手における
締付け順序が締付け軸力とすべり耐力に与える影響

大阪市立大学大学院 学生員 〇頼 健鵬

大阪公立大学大学院 正会員 山口 隆司

1. はじめに

鋼橋の現場接合方法の1つである高力ボルト摩擦接合継手（以下、継手）において、施工誤差によって目違いが生じる可能性が高い。文献 1)では、母板の目違い量 1mm を有する短冊状継手（母材厚：75mm）すべり耐力は、目違いがない継手に比べて 20.2%低下することが報告されている。一方、実鋼箱桁の継手において、複数行列配置となるため、継手に目違いを有する場合に、ボルト本数や締付け順番よって、ボルト軸力やすべり耐力に影響を及ぼす可能性がある。

本研究では、鋼箱桁下フランジ継手部を対象に、FEM 解析より締付け順序が個々のボルト軸力とすべり耐力に与える影響を評価する。

2. 解析概要

解析ソルバーには Abaqus/Standard2022²⁾を用い、境界非線形性を考慮した弾塑性有限変位解析を行った。材料特性について、母板には SM490Y、ボルトおよび座金には S10T を用い、加工硬化係数 $E/100$ のバイリニア型で JIS 規定の公称値を参考とした構成則を与えた。

解析モデルと境界条件を図-1 に示す、実橋図面を参考に箱桁下フランジの摩擦接合継手部をすべて 8 節点低減積分ソリッド要素でモデル化した。モデル化範囲は構造対称性を考慮して橋軸直角方向の 1/2 とし、対称面には対称条件を付与した。目違いの存在が軸力とすべり耐力に与える影響を安全側に評価するため、下フランジの板厚方向の変位を拘束している。座金-ナット間は接点共有とし、母板-連結板間、連結板-座金、ボルト軸部とボルト孔およびボルトヘッド間にはそれぞれ 0.50, 0.01 の摩擦係数を付与した。載荷荷重の最大値をすべり荷重とした。

継手の構造諸元を表-1 に示す。解析ケースの一覧表と締付け順序を図-2 に示す。解析ケースについては、目違いの有無および、締付け順序（締付け行・列の順番）を変化させている。解析ステップは、6割締め、本締め、強制変位の作用として、軸力導入はボルト 1 本ずつ行った。また、図-1 に示すように解析モデルは 4

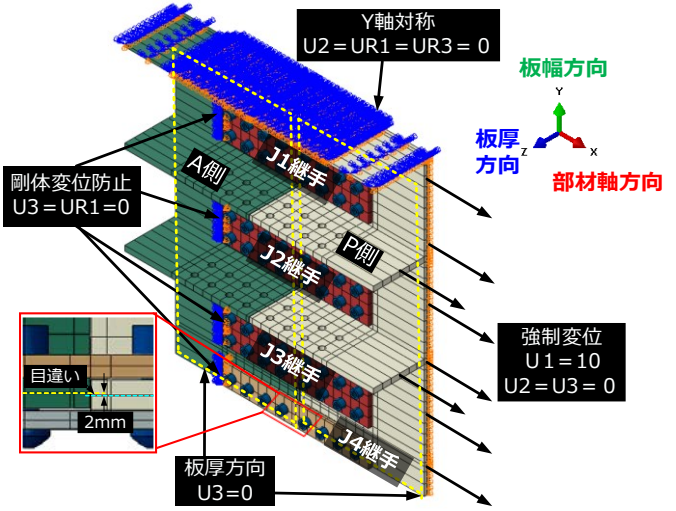


図-1 解析モデルと境界条件（単位：mm）

表-1 構造諸元

母板厚 t_m (mm)	連結板厚 t_s (mm)	連結板幅 w_{s1} (mm)	連結板幅 w_{s2} (mm)	孔径 d_o (mm)	ピーチ p (mm)	ゲージ g (mm)	ボルト本数 n	設計ボルト軸力 N_d (kN)	設計すべり係数 μ_d	設計すべり耐力 P_{sd} (kN)
23	17	1270	320	24.5	75	80	52	205	0.5	10660

解析ケース	目違い量 (mm)	締付け順序
0-base	0	行ごと．1行目中：P1→P2→P3→P4 (青色)
2-row1-t-in	2	行ごと．4行目中：P13→P14→P15→P16 (赤色)
2-row1-b-in		行ごと．1行目中：P2→P3→P4→P1
2-row2-t-in		行ごと．4列目中：P4→P3→P2→P1 (緑色)
2-row4-t-out		列ごと．1列目中：P1→P5→P9→P13 (橙色)
2-line-t-in		

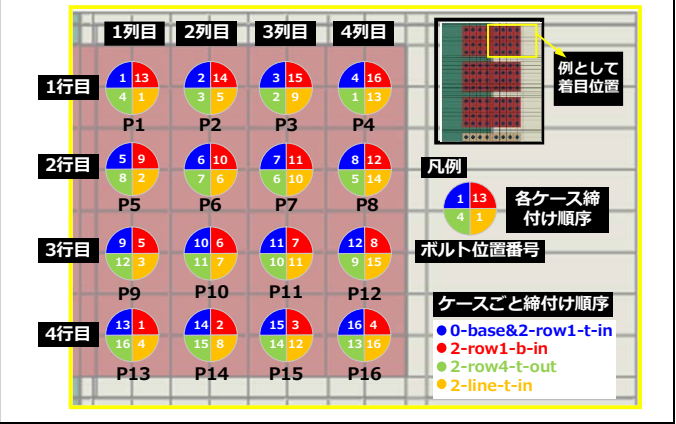


図-2 締付け順序

つの継手(J1～J4)で構成されているが、J1～J3 継手の締付けが現場で同時に行うと想定し、各継手の軸力は順序を従って締付けを行い、現場の施工手順と同様に耳

桁 J4 は最後に行った。

3. 解析結果

J1~J3 継手の締付け軸力の変動がほぼ一致したことから、ここでは J1 継手を例として各ボルトにおける締付け完了後の軸力を図-3 に示す。行ごと締付けケース(2-line-t-out)を例として P1 ボルトにおける各行の締付け完了時の軸力変動を図-4、P1 ボルト孔付近 A 点と B 点における目違い量の変化率を図-5 に示す。ここでは、目違いの変化率は板厚方向の平均変位と目違い量で算出し、軸力低下率 η は式(1)より算出した。

$$\eta = \left(1 - \frac{N_1}{N_0}\right) \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

N_1 :締付け完了時ステップにおける各ボルトの軸力 (単位: kN)

N_0 :ボルトの導入軸力 (単位: kN)

図-3 より、締付け完了時の各軸力低下率に着目すると、すべてのケースにおいて 1 列目(P1, P5, P9, P13)の軸力低下率が 20%程度と最も大きい。図-4 に示すよう、1 行目の締付けが完了していても、2 行目の締付けによって 1 行目の P1 ボルトの軸力低下率は、2.6%から 21.8%まで変化した。軸力変動の原因は、図-5 に示すよう、1 列目ボルト位置の母板-連結板間の隙間が存在するため、2 行目の締付けによって 1 行目の 1 列目ボルト(P1)位置の板厚方向の変形が大きいことがわかる。そのため、1 列目ボルトの軸力低下が最も大きくなったと考えられる。

各ケースのすべり耐力の一覧を表-3 に示す。表-3 より、目違い有ケースにおいて、締付け順序の違いが軸力総和とすべり耐力に及ぼす影響は小さいことがわかる。目違いの存在によって内側ボルト(P1, P5, P9, P13)の軸力が 20%程度低下したが、継手のボルト本数が多いため、目違いが 0mm のケースに比べて軸力総和は最大 2.8%の低下となった。一方、すべり耐力は最大 7.7%低下し、軸力総和の低下量より大きい。これは、図-6 の締付け完了時の接触状態からわかるように、目違いが存在することで、母板-連結板間の接触の偏りに起因して材間圧縮力が減少するため、すべり耐力の低下率が大きいと考えられる。

2-line-t-in ケースにおける締付け完了時の接触コンタを図-7(a)(b)、軸力総和およびすべり耐力の比較を図-7(c)に示す。図-7 より、締付け順序によって接触状況に大きな違いはなく、軸力総和およびすべり耐力においても違いは見られなかった。これは、連結板が片持ち梁のように変形するため、目違い量と縁端距離など構

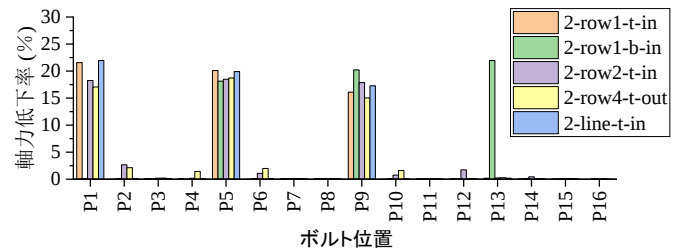


図-3 締付け完了後の軸力

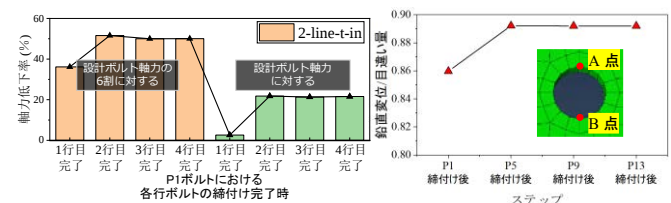
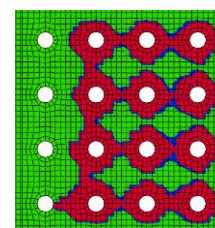


図-4 P1 ボルトの軸力変動

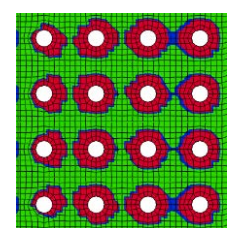
図-5 目違いの変化率

表-3 すべり耐力一覧表

ケース	設計ボルト 軸力総和 /kN	すべり試験 前軸力総和 /kN	すべり 耐力 /kN	すべり時 軸力総和 /kN	すべり係 数 μ_1	すべり係 数 μ_2	摩擦係数 μ_3
0-base	10660	10561	9563	9641	0.45	0.45	0.50
2-row1-t-in		10385	8882	9063	0.42	0.43	0.49
2-row1-b-in		10283	8829	8992	0.41	0.43	0.49
2-row2-t-in		10262	8827	8987	0.41	0.43	0.49
2-row4-t-out		10289	8828	8999	0.41	0.43	0.49
2-line-t-in		10286	8831	8995	0.41	0.43	0.49

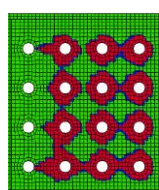


(a)目違い有

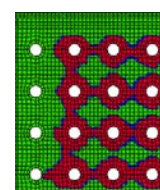


(b)目違い無

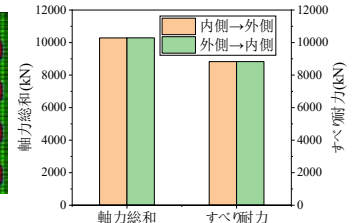
図-6 締付け完了時の母板-連結板間の接触コンタ



(a)4 列目
→1 列目



(b)1 列目
→4 列目



(c)総軸力とすべり耐力

図-7 締付け順序の比較

造諸元から決められる連結板が有する変形機能も制限されたと推察される。

4. まとめ

本研究で対象とした鋼箱桁連結部の下フランジ継手においては、目違いの有無による締付け軸力の総和とすべり耐力は 176kN(2.8%), 736kN(7.7%)低下した。また、目違いを有する中で締付け順序を変更しても継手の構造諸元から連結板の変形能力が決まるため、締付け軸力とすべり耐力はほぼ変化しなかった。

【参考文献】

- (1) 高井俊和, 山口隆司, 山階清永: 高力ボルト摩擦接合継手の目違いがすべり耐力に与える影響に関する解析的研究, 構造工学論文集 Vol.61A, pp.605-613, 2015.
- (2) Dassault Systems : Abaqus 2022ja オンラインドキュメンテーション, 2022