

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 21 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 北海道大学

氏 名 : 佐倉亮

研究課題名 : 土木鋼構造連結部の長期変形特性と保有耐力推定のためのクリープ変形
挙動の解明

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

土木鋼構造連結部の長期変形特性と保

有耐力推定のためのクリープ変形挙動の解明

Clarification of creep deformation behavior for estimating long-term deformation properties and remaining strength of steel structure connections

北海道大学大学院 助教 佐倉 亮

（研究計画ないし研究手法の概略）

1 はじめに

土木鋼構造物の現場連結部には、高力ボルト摩擦接合継手（以下、摩擦接合継手）が多く用いられている．本研究で対象とするクリープ変形は、図1に示す、長期的に外力（構造物の自重など）が作用すると発生する、部材の軸方向の変形（塗装のせん断変形）である．構造物の使用性や安全性を評価するためには、この蓄積されたクリープ変形を把握する必要がある．また、摩擦接合継手のすべり耐力はクリープ変形やボルト軸力などの長期的な性状変化に大きく影響を受けるため、摩擦接合継手の残存保有耐力の解明には、クリープ変形挙動の解明が必要不可欠である．加えて、長期的に発生するクリープ変形と地震などによって発生する瞬間的なすべり損傷を区別し、すべり損傷を受けた継手部のすべり耐力やその後の変形特性の把握を行う．これにより、リユース可能な鋼部材・継手部の評価・開発にも繋がり、合理化設計のみならず、LCCや低炭素化社会への貢献も見込まれる．

摩擦接合継手のクリープ挙動について、既往研究^{1,2)}では様々な表面処理のクリープ挙動を調査し、接合面処理を無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンク）とした場合、クリープ変形が蓄積した場合の長期すべり係数 μ_{perm} が標準すべり試験より得られた標準すべり係数 μ_{sta} の80%となることが報告されている．しかしながら、摩擦接合継手を構成するボルトの呼び径や軸力、本数などの影響は明らかとなっていない．さらに、摩擦接合継手のすべり挙動は接合面処理方法に大きく影響を受け、さらには施工される国や施工者によっても変化することから、我が国の施工条件で製作された摩擦接合継手の挙動の把握が求められる．

本研究では、摩擦接合継手の長期クリープ変形の定量評価およびすべり耐力への影響を解明し、摩擦接合継手の残存保有耐力を定量的に評価することを目的に、導入ボルト軸力、ボルト本数、ボルトの呼び径をパラメータとしたステップ載荷実験と拡張クリープ実験を行った．

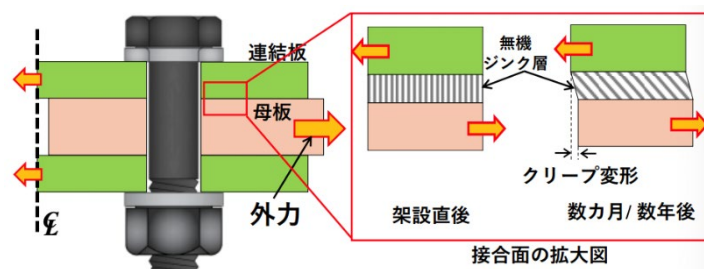


図1 クリープ変形のイメージ図

2. 試験概要

2.1 供試体と実験装置

供試体の形状を図2に、載荷装置と供試体の設置状況を写真1に示す。写真1に示すように、載荷装置は供試体、チャック、載荷フレーム、センターホールジャッキ、それらを繋ぐPC鋼棒から構成される。

接合面の処理方法は、ショットブラスト（Sa1 1/2）後に無機ジンクを目標塗膜厚 75 μ m で塗布した。ステップ載荷実験に先立ち、標準すべり試験（M16*2-100%，3 体）を実施した。得られた標準すべり係数 μ_{sta} の平均は 0.621 であった。表1に示すように、実験パラメータはボルトの呼び径、ボルトの本数、導入軸力とした。

2.2 ステップ載荷実験と拡張クリープ実験

ステップ載荷実験は、標準すべり係数 μ_{sta} より算出した標準すべり耐力 R_s の60%の荷重を載荷し、その荷重を40分間保持する。実験終了条件は、計測する相対変位が0.15mm以上もしくははすべりによる荷重低下が発生した時とし、上記条件が確認されるまで、標準すべり耐力 R_s の5%を追加し、その荷重を40分間保持するステップを繰り返す。拡張クリープ実験は、一定の荷重を2週間保持し、相対変位の挙動を評価した。ステップすべり係数 μ_{step} はステップ載荷実験のすべり荷重から算出し、長期すべり係数 μ_{perm} は拡張クリープ実験において50年後に相対変位0.3mmを満足した荷重から算出した。

図2に示すように、載荷実験中の計測項目は、ボルト軸力、載荷荷重（遊間部ひずみゲージ）、母板-連結板間の相対変位である。母板-連結板間の相対変位は、母板縁端部から10mm位置とボルト間中央において計測した。載荷速度は1kN/sとし、計測間隔は3秒に1回とした。

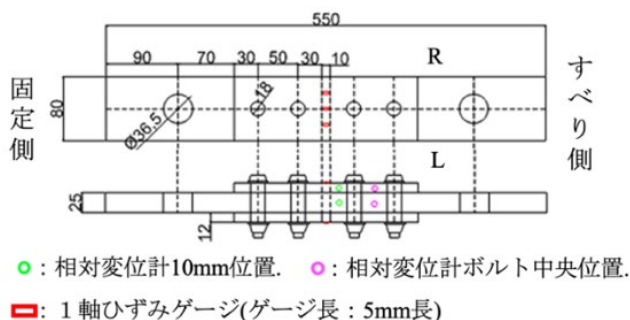


図2 供試体の形状（M16を例に）

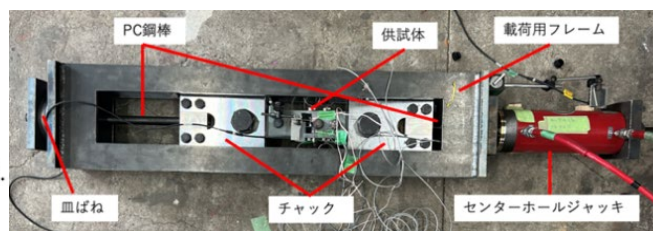


写真1 実験装置の設置状況

表1 実験ケースと拡張クリープ実験結果

実験	ケース名	ボルトの呼び径	ボルト本数	N_i / N_d	体数
ステップ載荷 実験	M16*2-100%	M16	2	100%	3
	M16*2-50%		2	50%	3
	M16*1-100%		1	100%	3
	M20*1-100%		1	100%	3
拡張クリープ 実験	M16*2-100%	M16	2	100%	2
	M16*1-100%		1	100%	1
	M20*1-100%	M20	1	100%	1

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 結果および考察

3.1 ステップ試験

ステップ載荷実験の荷重-変位-時間関係の結果（M16*2-50%-3）を図 3 に、同実験で得られたステップすべり係数とすべり荷重時の相対変位をそれぞれ図 4 と図 5 に示す。

図 3 より、載荷荷重が標準すべり耐力 R_s の 90%以上になると、荷重を保持している間においても相対変位が増加する挙動を示し、クリープ変形の発生が確認された。図 4 より、M16*2-100%、M16*2-50%のステップすべり係数と標準すべり係数の比 $\mu_{\text{step}}/\mu_{\text{sta}}$ はそれぞれ 84.9%~110%、86.2%~110%であり、平均はそれぞれ 101.3%、98.4%となった。このことからボルト軸力の大きさがステップすべり係数に及ぼす影響は小さいと考えられる。M16*1-100%と M20*1-100%の $\mu_{\text{step}}/\mu_{\text{sta}}$ の平均は、それぞれ 85.9%、119.1%となり、ボルト本数が 1 本になることで 14.1%減少、軸径が M16 から M20 に大きくなることで 19.1%増加する結果となった。M16*2-50%のステップ載荷実験のすべり時の相対変位 δ_{fin} は 0.035mm であり、M16*2-100%の 0.069mm のほぼ半分となった。

3.2 拡張クリープ試験

拡張クリープ実験における荷重-変位-対数時間関係の結果（M16*2-100%）を図 6 に示す。表 2 に 2 週間後の相対変位 δ_2 と 50 年後の予測相対変位 δ_{50} を示す。

図 6、表 2 より、載荷開始から 1~2 週間の範囲における変位-時間関係の接線から外挿した 50 年後の相対変位は 0.063mm であり、Eurocode³⁾で規定される許容変形限界量である 50 年後の変位が 0.3mm を下回った。全ての実施した 3 つのケース全てで 50 年後の変位が 0.3mm 以内に収まり、長期すべり係数 μ_{perm} は標準すべり係数 μ_{sta} の 80%~90%となった。

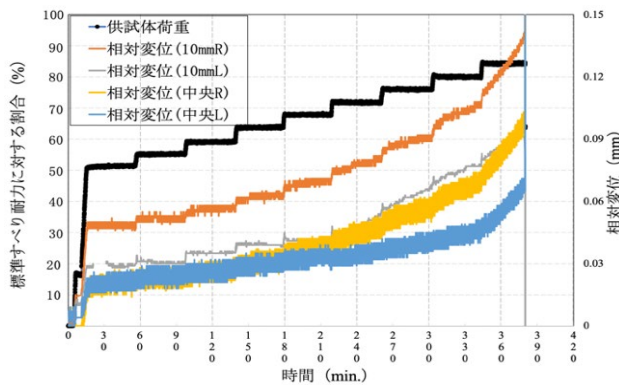


図 3 荷重-変位-時間関係（ステップ）

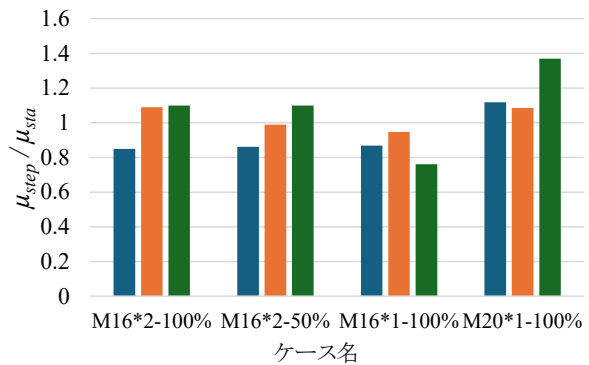


図 4 ステップすべり係数

表 2 拡張クリープ実験結果

実験	ケース名	載荷荷重 (R_s に対する割合)	δ_2 (mm)	δ_{50} (mm)
拡張クリープ 実験	M16*2-100%	80%	0.0475	0.0630
		90%	0.0735	0.0814
	M16*1-100%	80%	0.0411	0.423
	M20*1-100%	90%	0.0504	0.0619

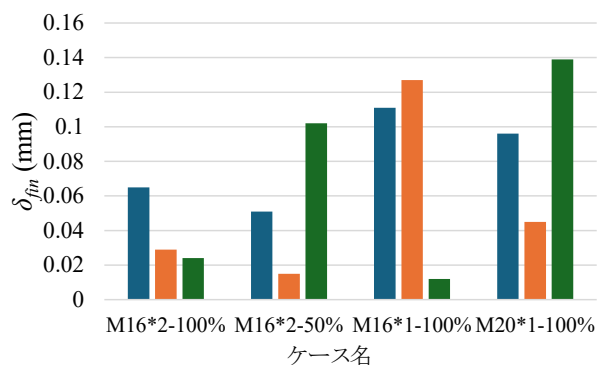


図5 すべり時の相対変位（ステップ）

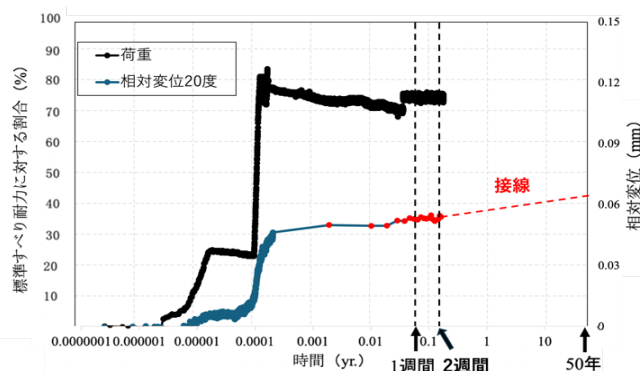


図6 荷重-変位-対数時間関係（クリープ）

3.3 まとめ（残存保有耐力評価）と展望

国内で施工された摩擦接合継手の長期残存すべり耐力を評価するため，導入ボルト軸力，ボルト本数，ボルトの呼び径を変化させたステップ載荷実験と拡張クリープ実験を行った．それらがすべり係数および長期残存すべり耐力に及ぼす影響に対して得られた結果は以下の通りである．

- 1) 基本ケースである M16*2-100%のステップすべり係数 μ_{step} は，標準すべり係数 μ_{sta} の101.3%となり，大きな影響は見られなかった．
- 2) ボルト軸力を100%から50%に半減させても，ステップすべり係数 μ_{step} はほぼ一致し，それらのすべり時相対変位も軸力の変化割合と一致した．ボルト軸力の影響は小さいことがわかったが，ボルト本数や呼び径などの構造諸元は μ_{step} に影響を及ぼす可能性があることが示唆された．
- 3) 拡張クリープ実験より，長期すべり係数 μ_{perm} は標準すべり係数 μ_{sta} の90%となることがわかった．
- 4) 1)~3)より，50年後の摩擦接合継手の長期残存すべり耐力耐力は，標準すべり係数から算出したすべり耐力の90%以上であることが示唆された．
- 5) 一方で，クリープ変形が発生する無機ジンクリッチペイントの層厚は施工誤差によって大きく変動する．したがって，それら施工誤差がクリープ変形および長期すべり係数に及ぼす影響についてデータを蓄積することが重要であることがわかった．

（発表論文）

- 1) 五十嵐聖芽，佐倉亮，松本高志：無機ジンクリッチペイントを塗装した高力ボルト摩擦接合継手の長期クリープ挙動評価のためのステップ載荷実験，土木学会北海道支部論文報告集，2026.1
- 2) 五十嵐聖芽，佐倉亮，松本高志：無機ジンクリッチペイントを塗装した高力ボルト摩擦接合継手の長期クリープ挙動評価，令和8年度土木学会年次学術講演概要集，2026.9（発表予定）

参考文献

- 1) Ebert, R. Glienke, M. Dörre: Ultra-long-term slip-resistance and comments to the test procedure determining the slip factor, Journal of Constructional Steel Research 161 (2019) 171–186.
- 2) RFCS-SIROCO Project, Research Program of the Research Fund for Coal and Steel-Technical Group: TG8:” SIROCO-Execution and Reliability of Slip Resistant Connections for Steel Structures using CS and SS” (No, RFSR-CT-2014-00024), Final Report and Deliverables, duration: 2014-2018, 2019.
- 3) European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 3, Design of Steel Structure, Part 1.8, Design of Joints, EN 1993-1-8, 2024.