

高力ボルトで当て板補修されたストップホールの簡易解析法

(株)横河ブリッジホールディングス 正会員 ○清川 昇悟 名古屋大学 正会員 判治 剛
(株)横河ブリッジホールディングス 正会員 加藤 遼二郎

1. 背景と目的

鋼橋に生じた疲労き裂に対して、き裂先端にストップホールを施工し、その後、き裂を覆うように高力ボルトで当て板を添接する補修方法がある。この補修では、疲労き裂の再発を防ぐため、ストップホールの応力集中を十分に低減させることが重要である。従来、有限要素解析によりこのような補修に対する効果確認が行われてきたが、既往検討では様々な解析モデル・解析手法が使われており、手法の標準化は図られていない。また、近年、摩擦接合継手の解析で適用され、高い再現性が確認されている摩擦接触を考慮した複合非線形解析は、研究レベルでは珍しくはなくなっているものの、実務への適用は難しく、実務の負担軽減を考えるとできるだけ簡易な解析手法が望ましい。

以上を踏まえ、本研究では、当て板補修されたストップホール
の応力集中を推定するための簡易な有限要素解析手法について検討を行った。

2. 静的載荷試験体と解析モデル

検討に用いた静的載荷試験体の諸元を図 1 に、試験ケースを表 1 に示す。疲労き裂を模擬したスリットの両端にφ18 のストップホールを施工している。試験体のストップホール壁のひずみはゲージ長 1 mm のひずみゲージで計測した。使用材料の機械的性質を表 2 に示す。当て板は 2 面摩擦で、六角高力ボルト (M16, F10T) を片側 2 行 2 列に配置した。接合面には無機ジンクリッチペイント (目標膜厚 75 μm) を塗布した。高力ボルトは設計軸力 106 kN, 締付軸力 117 kN でトルクレンチにより締付けした。

解析モデルは、部材間の摩擦接触を考慮した非線形解析モデル（以下、摩擦考慮モデル）と、それらを考慮しない線形解析モデル（以下、提案モデル）の2種類である。各モデルの詳細は後述する。解析モデルを図2に示す。解析コードはMSC/Marc2018を用いて、対称性を考慮した1/8モデルとした。

摩擦考慮モデルは、主板、当て板、座金およびボルトをそれぞれ独立した接触体として 8 節点ソリッド要素でモデル化し、それぞれの部材間での摩擦接触を考慮した。接合面の摩擦係数は 0.6、その他は 0.4 とした。構成則には、表 2 の値を用いてひずみ硬化を考慮したマルチリニア型の応力-ひずみ関係を与えた。ボルト軸力は、軸部下端に強制変位を与えて設計軸力 106 kN を作用させることで導入した。その他詳細は文献 1) を参照されたい。

当て板の接合面では、当て板への荷重伝達は概ね摩擦力が生じるボルト孔周辺の限られた範囲で生じている．そこで、ボルト孔近傍のある範囲において当て板と主板の節点を共有して荷重伝達させる線形解析モデルを考案した．提案モデルは主板と当て板をソリッド要素でモデル化し、接合面はボルト孔周辺の $2.5D=40\text{ mm}$ (D はボルト呼び径：

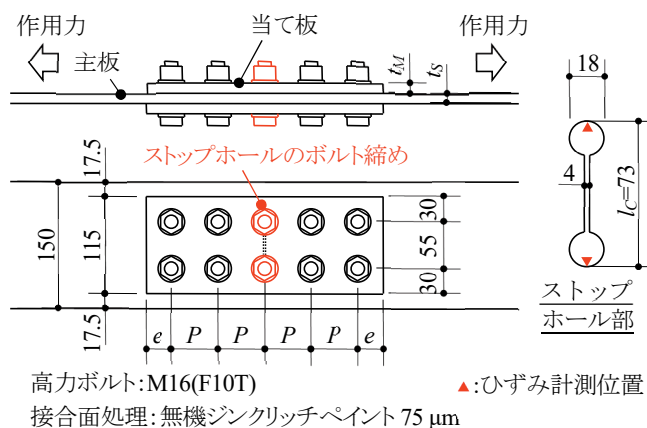


図1 試験体図 (単位: mm)

表1 試験ケース

No.	t_M (mm)	t_S (mm)	P (mm)	e (mm)	ボルト 締め
1	12	12	55	30	なし
2	12	6	55	30	
3	6	6	55	30	
4	6	12	55	30	
5	12	12	40	25	
6	12	12	55	30	あり
7	12	12	40	25	

表2 使用材料の機械的性質

鋼種	板厚 (mm)	降伏応力 σ_{PY} (N/mm ²)	引張強度 σ_{PU} (N/mm ²)	伸び ε_{PU} (%)
SM490A	12	385	525	26
	6	454	572	21
高力ボルト				
種類 (H.T.B)	強度区分	降伏応力 σ_{BY} (N/mm ²)	引張強度 σ_{BU} (N/mm ²)	伸び ε_{BU} (%)
M16×70	F10T	1046	1085	18
M16×55	F10T	1033	1072	19
M16×50	F10T	1022	1072	20

16 mm) の矩形範囲にある節点を共有させ剛結している。その他の範囲は 2 重節点として部材間の接触は考慮しない。ストップホールにボルト締めした場合は、当て板の断面欠損量を合わせるため、当て板にはボルト締めのためのボルト孔をモデル化したうえで、ストップホール直上の $2.5D$ の範囲を他のボルト部と同様に節点共有させている。

共有範囲の大きさとした $2.5D$ は隣り合う座金が物理的に干渉しない寸法を考慮して決定したものであり、力学的な理由に基づき決定したものではない。また、実際の摩擦力作用範囲は円形であるが、モデル作成の簡略化のため矩形としている。検討に先立ち、 $h_1=h_2=12\sim 28\text{ mm}$ のモデル

キーワード 疲労き裂, 当て板補修, ストップホール, 有限要素解析

連絡先 〒261-0002 千葉県千葉市美浜区新港 88 (株)横河ブリッジホールディングス TEL:043-247-8411

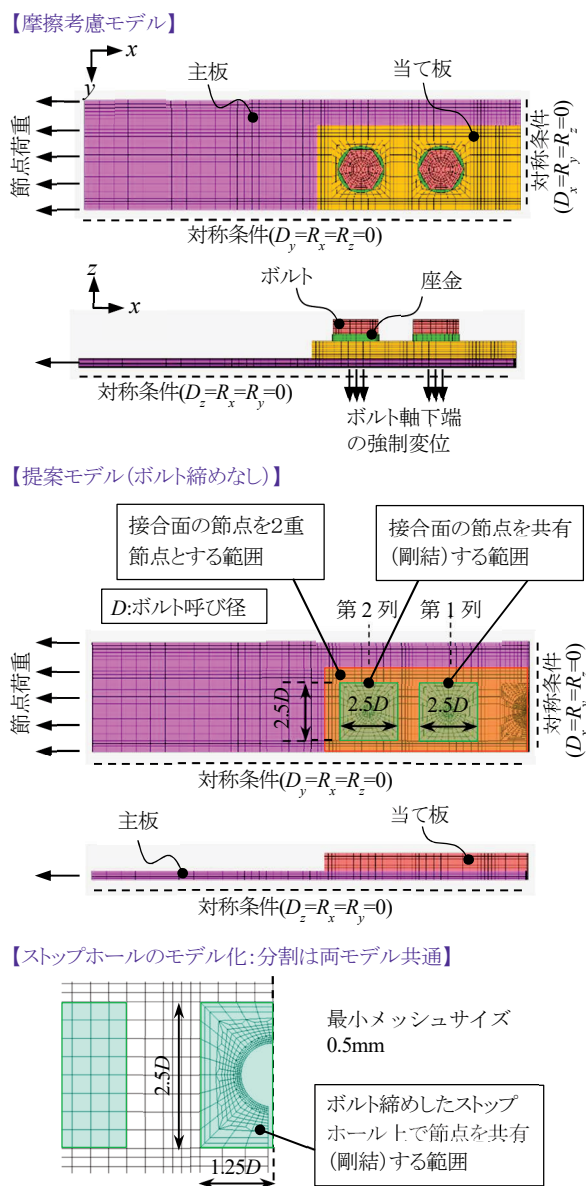


図2 解析モデル

で共有範囲の大きさの影響 (2.5~3.0D) を確認したが、結果の差は 10% 以下で、かつストップホール壁のひずみ ε_{SH} を安全側に推定することから、今回は 2.5D を採用した。なお、節点共有範囲のメッシュ分割が結果に影響しないことは事前解析で確認している。

3. 簡易解析手法の精度

図3に各試験体の公称ひずみ ε_n とストップボールひずみ ε_{SH} の関係を示す。図より、提案モデルは線形解析でありながら、摩擦考慮モデルと同程度に実験結果を再現できており、提案モデルの有効性が示された。

4. パラメトリック解析

パラメトリック解析のモデルでは、主板幅を当て板幅+3000 mm、主板長さを当て板長さ+1000 mm とした。これにより、主板のサイズに対して安全側の評価となる。また、使用する高力ボルトは M22 (F10T)、導入軸力は 165 kN とした。その他の解析条件は静的載荷試験体の解析と同様とした。図 4 にストップホールのはずれ集中 (ϵ_{SH}/ϵ_n) の比較を示す。両モデルの誤差は 10% 以内と小さく、検討したパラメータ範囲で提案モデルは摩擦考慮モデルの結

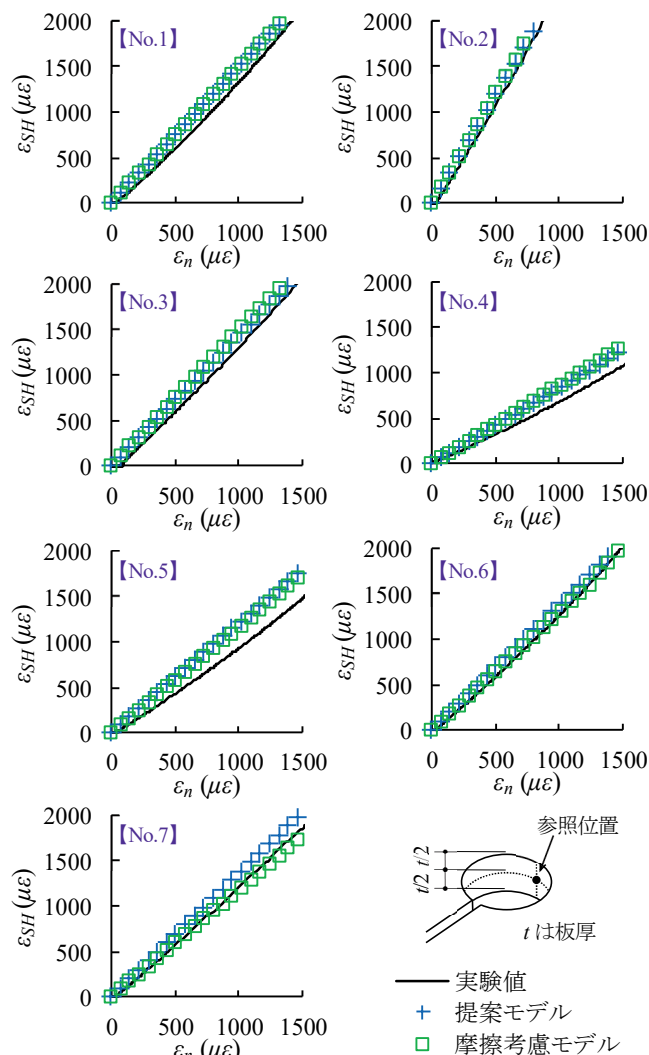


図3 各試験体のストップホールひずみ

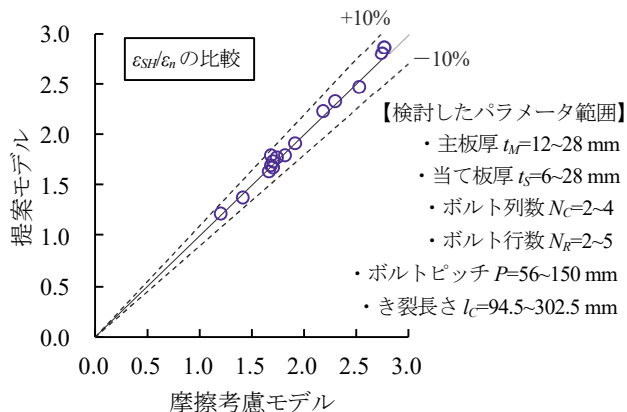


図4 パラメトリック解析結果

果と良く一致することが示された.

謝辭

本検討は（一社）日本鋼構造協会「鋼橋の強靱化・長寿命化研究委員会 疲労強度研究部会（Ⅱ期）（委員長館石和雄，部会長穴見健吾）」の活動の一部として実施したものである。ここに記して関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 清川昇悟, 舘石和雄, 判治剛, 清水優, 中山裕也: 当て板によるストップホール部の応力集中低減効果, 構造工学論文集 Vol.64A, pp.435-444, 2018.3.