

当て板補修された疲労き裂ストップホールにおけるボルト締めの効果

(株) 横河ブリッジ 正会員 ○清川 昇悟 名古屋大学 正会員 判治 剛
名古屋大学 正会員 清水 優 名古屋大学 フェロー 館石 和雄

1. はじめに

鋼構造物の疲労き裂の補修対策として良く用いられるストップホールは、高力ボルトで締めることによってその効果が高まることが知られている。このボルト締めの効果は、ボルト締めの有無によるストップホール部の応力集中係数の比である応力緩和係数で表すことができ、その推定式は既往研究により提案されている¹⁾。しかし、ストップホールに当て板補修が併用されている場合のボルト締めの効果については明らかでない。そこで、本稿では当て板補修されたストップホールのボルト締めによる応力緩和係数を求めることを目的として、静的載荷試験および有限要素解析による検討を行った結果を報告する。

2. 静的載荷試験

図1に試験体図を、使用材料の機械的性質を表1に示す。主板の中央に疲労き裂を模擬したスリットを設け、その両端にφ18mmのストップホールを施工した。ストップホール縁の板厚中心位置の円周方向の応力に着目し、ストップホール応力 σ_{SH} としてゲージ長1mmの1軸ひずみゲージで計測した。表2に試験ケースを示す。パラメータはボルト締めの有無と当て板のボルト配置(ボルトピッチ P およびはしあき e)である。No.3とNo.4は既設部材と干渉する狭い範囲での当て板を想定し、ボルト配置を道路橋示方書で規定される最小値より狭くした(以下、狭配置という)ケースである。なお、ボルト締めのないケースでは、当て板にはボルト締めのための孔明けをしていない。

σ_{SH} と公称応力 σ_n の関係を図2に示す。グラフの直線部分の傾きがストップホールにおける応力集中係数 α_{SH} を意味する。グラフには有限要素解析の結果も併せて示す(解析手法は後述)。通常のボルト配置であるNo.2はNo.1より若干 α_{SH} が小さく、ボルト締めの効果が認められる。一方、狭配置であるNo.4の実験値についてはNo.3より α_{SH} が大きく、ボルト締めの効果がみられなかった。解析値についてみると、No.3において実験値との乖離が比較的大きいが、 α_{SH} の増減傾向は実験値と同じ傾向を示していた。

3. 有限要素解析

当て板の形状パラメータがボルト締めの効果に与える影響を明らかにするため、有限要素解析を実施した。解析パラメータを表3に示す。板やボルトは全てソリッド要素でモデル化した。材料構成則は弾塑性型とし、ひずみ硬化を考慮した応力ひずみ関係を与えた。降伏応力等の機械的性質の値は規格値とした。部材間の摩擦接触を考慮し、接合面の摩擦係数は0.5とした。解析モデルは対称条件を用いた1/8モデルとし、ボルト軸の下端に強制変位を与え所定の設計軸力を導入した。その後、モデルの両端に $\sigma_n=100\text{N/mm}^2$ となる引張荷重を与えた。その他、解析手法

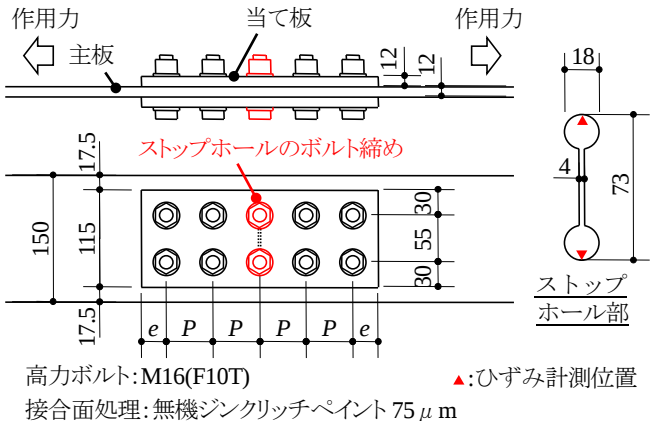


図1 試験体図 (単位: mm)

表1 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
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

表2 試験ケース

No.	ボルト 締め	P (mm)	e (mm)	試験体数	着目した パラメータ
1	なし	55	30	3	基本ケース
2	あり	55	30	1	ボルト締め
3	なし	40	25	1	狭配置
4	あり	40	25	1	狭配置+ ボルト締め

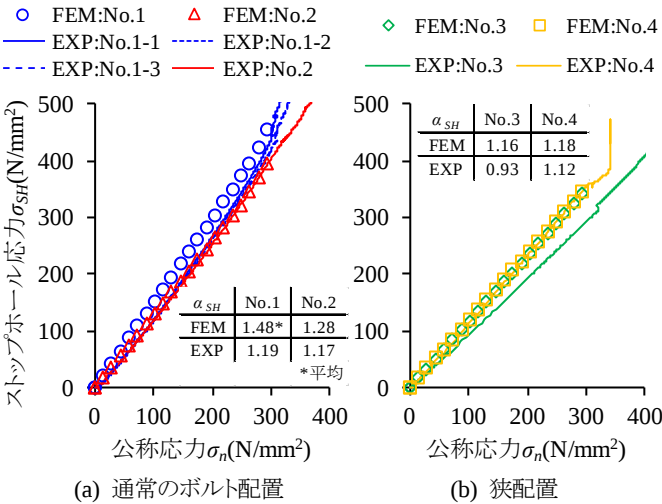


図2 ストップホールの応力

キーワード 疲労き裂, 当て板補修, ボルト締めストップホール, 応力集中係数

連絡先 〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町 2-3 (株)横河ブリッジ TEL:072-280-5707

の詳細は文献2)を参照されたい。

本検討では、当て板がある場合のボルト締めによる応力緩和係数 γ_s を以下の式(1)で定義し、解析結果より求めた。

$$\alpha_{SH,s+b} = \gamma_s \cdot \alpha_{SH,s} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_{SH,s+b}$ は当て板補修し、さらにボルト締めしたストップホール部の応力集中係数であり、 $\alpha_{SH,s}$ は当て板補修したストップホールの応力集中係数である。

(a) 板厚の影響 (図3)

γ_s は板厚とストップホール径 M の比と概ね線形的相关がある。また、主板と当て板を併せた総締め付け厚より、当て板厚のみで整理したほうが、主板厚の違いに寄らず同一の直線状にプロットされている。

(b) き裂長さの影響 (図4)

横軸はボルト呼び径 D で無次元化して示している。グラフより、き裂長さの影響は見られない。

(c) ボルトピッチの影響 (図5)

横軸はボルト呼び径 D で無次元化して示している。グラフより、両者は累乗関数で概ね近似される関係にある。ボルトピッチ P が小さいほど γ_s は1.0に近づき、ボルト締めの効果が薄れる。この傾向は、板厚やボルト径の違いに関わらず同様にみられ、特に、 P が最も小さいケース($P=54\text{mm}$)では γ_s が1.0を超え、ボルト締めしたほうがストップホールの応力集中が大きい結果となっている。これは実験における狭配置試験体でも見られた傾向である。

当て板の上からボルト締めを行う場合、当て板にそのための孔をあける必要があるが、この孔あけによる当て板の断面欠損がストップホールの応力を増加させ、当て板による補修効果にマイナスに働く。当て板による補修効果は狭配置の場合に大きくなるが、そのような場合にはこの断面欠損の影響が特に顕著に表れ、ボルト締めによる応力低減効果は小さくなったと推察される。

4. 応力緩和係数の推定

解析結果より、 γ_s はボルトピッチ P と当て板厚 t_s の影響が大きいことが明らかとなった。この二つのパラメータを説明変数とし、重回帰分析により γ_s の推定式を求めた。

$$\gamma_s = 1.23 - 0.053(M/t_s) - 0.067(P/D) \quad (2)$$

式(1)および式(2)を用いて、解析の全ケースを対象として $\alpha_{SH,s+b}$ を推定した結果を図6に示す。なお、式(1)における $\alpha_{SH,s}$ は筆者らの過去の研究で求めた推定式により算出しており、詳しくは文献2)を参照されたい。また、 $\alpha_{SH,s}$ の算出の際に、ストップホール位置断面における当て板のボルト孔(ボルト締めのためのボルト孔)による断面欠損は考慮しておらず、孔明けによる断面欠損の影響は式(2)に含まれていることに注意されたい。

図6より、ボルト径の異なるケースを含め、推定値と解析値は精度よく一致しており、今回検討した範囲では、提案した推定式は概ね妥当だと考えられる。

謝辞

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(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) 森猛, 白井聡也, 佐々木一哉, 中村充: 添え板ボルト締めス

表3 解析ケース (下線が基本パラメータ)

パラメータ	記号	単位	設定値	備考
ストップホール径	M	mm	18, <u>24.5</u>	
ボルト呼び径	D	mm	16, <u>22</u>	
主板厚	t_M	mm	<u>12</u> ,20	
当て板厚	t_s	mm	6, <u>12</u> ,16,20,28	
き裂長さ	l_C	mm	92,5,120, <u>164.5</u> , 234.5,304.5	
ボルト列数	N_C		<u>2</u>	
ボルト行数	N_R		2, <u>3</u> ,4,5	き裂長さに合わせ変化
ボルトピッチ	P	mm	56, <u>70</u> ,100,150 (50,70,100)	括弧はM16のピッチ

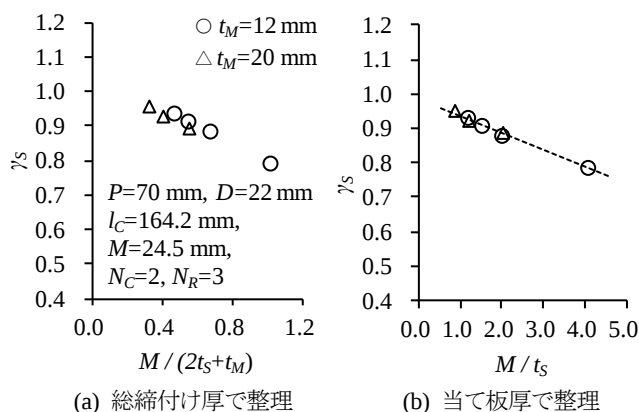


図3 板厚の影響

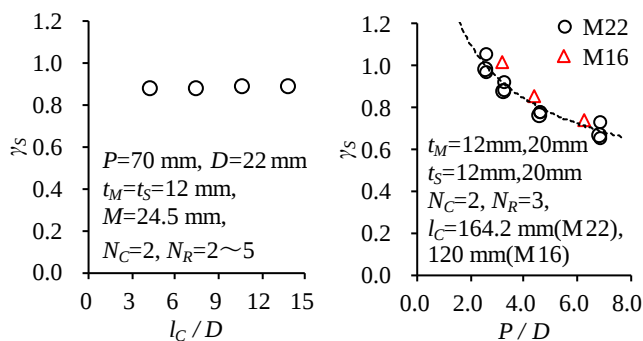


図4 き裂長さの影響

図5 ボルトピッチの影響

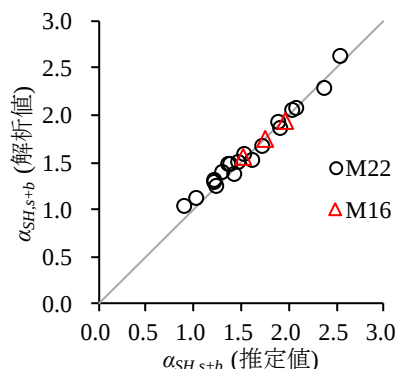


図6 応力集中係数の推定結果

トップホール法による主桁横桁交差部の疲労き裂の補修, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.3, pp.493-502, 2011.

- 2) 清川昇悟, 館石和雄, 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.