

高力ボルト摩擦接合継手の構造諸元が応力集中に与える影響

名古屋大学 (株) 横河ブリッジ 正会員
名古屋大学 正会員

○清川 昇悟
清水 優

名古屋大学 正会員 判治 剛
名古屋大学 フェロー 館石 和雄

1. はじめに

高力ボルト継手は溶接継手に比べて疲労強度が高く、鋼橋において疲労損傷が問題となることが少ないため、疲労強度に関する研究報告も近年は少ない。しかし、ボルト配置や板厚など継手の構造諸元が疲労強度に与える影響については未解明な部分もあり、また、ボルト強度等級 S14T など新しい材料の適用も今後は広がっていくことから、これらの要因が疲労強度に与える影響について検討することは意義があると考えられる。

本稿では、高力ボルト摩擦接合継手を対象として、疲労設計曲線の変遷をレビューするとともに、有限要素解析により構造諸元が継手に生じる応力集中に与える影響を検討することで、その疲労強度について考察する。

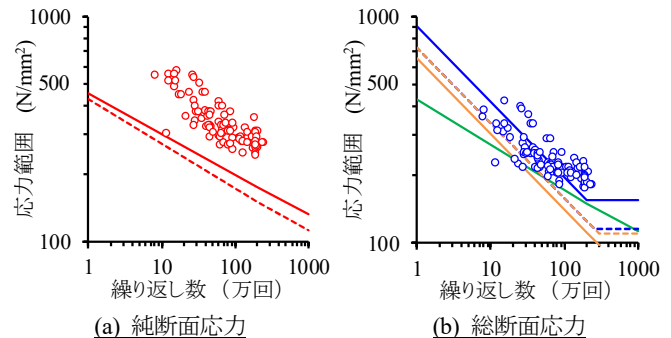
2. 疲労設計曲線の変遷

図1に過去の疲労試験結果¹⁾と各種疲労設計曲線の比較を示す。1974年に制定された日本鋼構造協会(JSSC)の疲労設計指針²⁾では純断面応力で設計曲線が規定されており傾きを表す係数 $m=5.6$ であった。1989年の改定³⁾で総断面応力での設計曲線に変わるとともに、他の継手の等級とあわせて $m=3$ に変更された。また、多列継手の疲労試験結果⁴⁾が反映され、表1のようにボルト列数 N_b で区分されるようになった。鉄道橋の指針も、数値は若干異なるがほぼ同様の変遷をたどり⁵⁻⁶⁾、現在は JSSC と同じ曲線が用いられている。図より、過去の指針の設計曲線は疲労試験結果に対して安全側の評価を与えるが、現行の設計曲線である JSSC-B 等級は 1 等級程度危険側の評価を与えることがわかる。また、Eurocode⁷⁾や AASHTO⁸⁾の設計曲線はボルト列数による区分はなく、JSSC-C 等級と同程度の曲線であり、試験結果に対して概ね安全側の評価を与える。

3. 解析方法

有限要素解析のモデル諸元と解析条件を図2に示す。材料の構成則は弾塑性とし、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 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⁹⁾。

図3に主板の直応力コンター図の一例を示す。最大応力は添接板との接触範囲の近傍に生じ、ボルト孔中心から見て作用力に対し斜め方向に位置する。摩擦継手に発生するフレットングき裂はこの位置を起点とし、作用力方向の応力の影響を受ける¹⁰⁾。よって、以降ではこの位置での最大応力を公称応力で除した応力集中係数 α に着目して各パラメータの影響について分析する。なお、基本ケースと同等の諸元を持つ疲労試験を別途行い、着目位置からフレットングき裂が生じることを確認している。



- 日本鋼構造協会(1974)²⁾: $\Delta\sigma_f=176 \text{ N/mm}^2$, $m=5.6$
- - - 土木学会(1974)⁵⁾: $\Delta\sigma_f=150 \text{ N/mm}^2$, $m=5$
- 土木学会(1983)⁶⁾: $\Delta\sigma_f=150 \text{ N/mm}^2$, $m=5$
- 日本鋼構造協会(1989~)³⁾: $\Delta\sigma_f=155 \text{ N/mm}^2$, $m=3$ (JSSC-B)
- - - 日本鋼構造協会(1989~)³⁾: $\Delta\sigma_f=125 \text{ N/mm}^2$, $m=3$ (JSSC-C)
- Eurocode (2005)⁷⁾: $\Delta\sigma_f=112 \text{ N/mm}^2$, $m=3$ * $\Delta\sigma_f$ は 200 万回
- - - AASHTO (2012)⁸⁾: $\Delta\sigma_f=125 \text{ N/mm}^2$, $m=3$ 疲労強度

図1 既往研究の疲労試験結果¹⁾ ($N_b \leq 4$) と疲労設計曲線表1 現行の高力ボルト摩擦継手の疲労強度³⁾

疲労強度等級	200万回疲労強度 $\Delta\sigma_f$ (N/mm ²)	傾きを表す係数 m	適用
B	155	3	$1 \leq N_b \leq 4$
C	125	3	$5 \leq N_b \leq 15$
D	100	3	$16 \leq N_b$

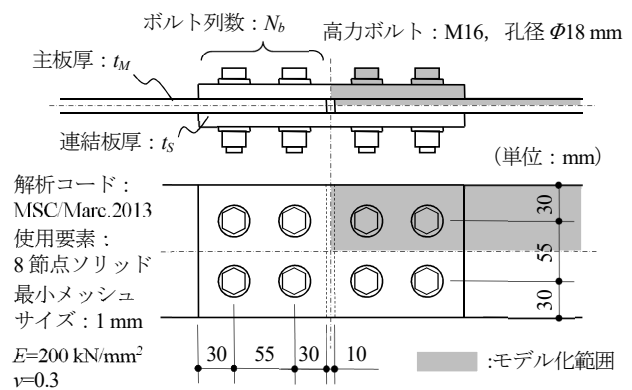
* N_b : ボルト列数

図2 解析モデル(基本ケース)の諸元と解析条件

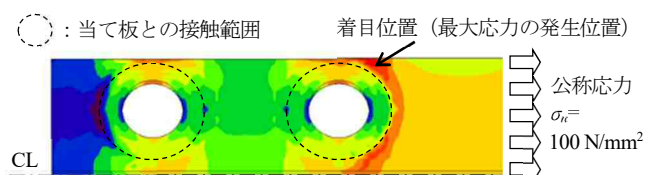


図3 主板の直応力コンター図

キーワード 高力ボルト, 摩擦接合, 疲労強度, 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

4. 解析結果

(a) ボルト列数 N_b の影響

図4にボルト列数のみを2から16まで変化させた場合の α の変化を示す。図より、列数は α に影響しないことが分かる。図中には端部ボルト（1列目）位置での連結板の荷重分担率 γ を合わせて示すが、 γ も列数による影響は小さく、一定である。端部ボルト位置の摩擦力により連結板へ伝達される力が列数の影響を受けないため、 α にも変化がみられなかったと考えられる。

一方、表2には列数とともに板厚を変化させた結果を示すが、板厚が大きくなるほど α が大きくなっている。列数により強度区分を分ける根拠となった過去の多列継手の疲労試験体は列数と共に板厚も増加しており⁴⁾、そのため列数により疲労強度が変化した可能性がある。実際の構造物において、多列継手は厚板に適用されるため、現行の規定でも実用上問題はないが、ボルト継手の強度区分は列数ではなく板厚で区分する方がより合理的と考えられる。

なお、現行の規定ではボルト継手は板厚効果による補正の対象ではないが、板厚補正係数 C_t と α との関係は図5に示すようにほぼ直線であり、ボルト継手の板厚による疲労強度の低下を C_t で整理できる可能性がある。

(b) 鋼材強度の影響

鋼板の鋼種とボルト強度をパラメータとして α への影響を調べた。結果を表3に示す。ボルト強度が大きくなるほど、また鋼種が低強度材になるほど α は大きくなる傾向にある。軸力の違いによるボルト孔周辺の接触圧の変化が影響していると考えられる。S14Tの適用による α の増加はF10Tと比較して最大でも20%以下であり、疲労設計曲線における各強度等級間の疲労強度の差は約25%であるから、今回のケースにおいてはS14Tの適用による疲労強度への影響は1等級以内に収まる程度と想像される。

(c) 砲台配置の影響

引張部材では、端部ボルト位置の孔引きによる断面欠損を小さくするため砲台配置が良く用いられる。ここでは、図6に示す2つのパターンの砲台配置を対象として α への影響を調べた。比較ケースはボルト本数および配置、板厚を変化させ、連結板の板厚 t_s は主板厚 t_M の1/2とした。

解析結果を図7に示す。砲台配置とすることで端部ボルト孔周辺の応力集中が矩形配置に比べて大きくなる。表4に各ケースの α の値を示す。ボルトが鋭角に配置されるパターン2のほうが α の増加量は大きい。しかし、矩形配置に対する増加の割合は最も大きい $t_M=28$ mmのケースで約11%であり、等級の変更を伴うほどの疲労強度への影響はないと思われる。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：鋼構造接合資料集成，技報堂，1977。
- 2) 日本鋼構造協会：日本鋼構造協会疲労設計指針・同解説（案），JSSC, vol.10, No.101, pp.22-34, 1974
- 3) 日本鋼構造協会：疲労設計指針（案），JSSC テクニカルレポート No.14, 1989。
- 4) 阪本ら：多列高力ボルト摩擦継手の疲労試験，第39回土木学会年次学術講演会，I-121, pp.241-242, 1984。
- 5) 土木学会：鋼鉄道橋設計標準解説，1974。
- 6) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，1983。

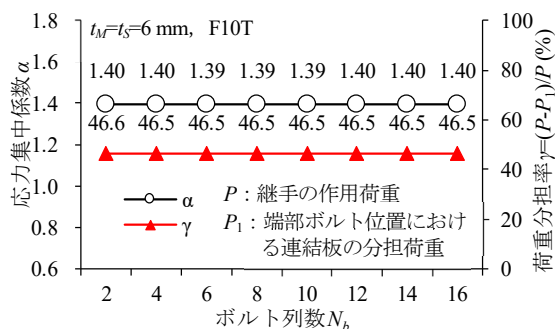


図4 ボルト列数 N_b の影響

表2 板厚が α へ与える影響

ボルト列数	$t_M=16$ mm	$t_M=32$ mm	$t_M=64$ mm
$N_b=4$	1.81	2.40	2.96
$N_b=8$	1.81	2.39	2.96
$N_b=12$	1.81	2.37	2.99

$t_s=t_M/2$, F10T

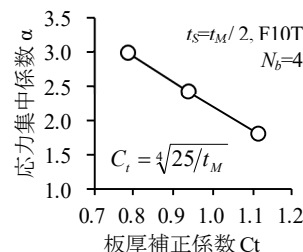


図5 α と C_t の関係

表3 鋼種とボルト強度が α へ与える影響 ($N_b=4$)

ボルト強度等級	$t_M=6$ mm, $t_s=3$ mm		$t_M=t_s=6$ mm		*(括弧)はF10Tに対する比率
	SM400	SM570	SM400	SM570	
F8T	1.25 (0.95)	1.25 (0.97)	1.29 (0.96)	1.29 (0.97)	
F10T	1.32 (1.00)	1.29 (1.00)	1.33 (1.00)	1.33 (1.00)	
S14T	1.59 (1.20)	1.52 (1.18)	1.57 (1.18)	1.43 (1.07)	

グレー：S14Tの使用はSM570材に限られるため、参考値

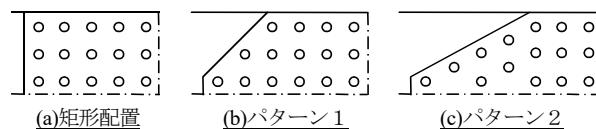
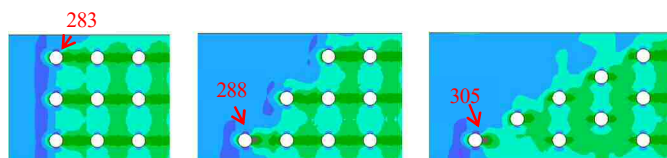


図6 砲台配置のパターン(ボルト本数30本の場合)



SM490, $t_M=36$ mm, $t_s=18$ mm, M16(F10T), $\sigma_F=100$ N/mm²

図7 直応力のコンター図と最大発生応力 (単位:N/mm²)

表4 砲台配置が α に与える影響

ボルト本数	24		30		36	
	$t_M=28$ mm		$t_M=36$ mm		$t_M=44$ mm	
	α	比率	α	比率	α	比率
矩形配置	2.54	1.00	2.83	1.00	2.94	1.00
パターン1	2.62	1.03	2.88	1.02	2.99	1.02
パターン2	2.81	1.11	3.05	1.08	3.11	1.06

- 7) European Committee for Standardization (CEN): Eurocode3, Design of Steel Structures, Part1.9 Fatigue, EN 1993-1-9, 2005。
- 8) AASHTO: LFRD Bridge Design Specifications, 2012。
- 9) 清川ら：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。
- 10) 吉野ら：アルミニウム合金板摩擦接合継手のフィレットイング疲労亀裂発生に影響する因子，土木学会第67回年次学術講演会，I-272，pp.543-544，2012。