高力ボルト摩擦接合継手の連結板減肉とすべり耐力評価に関する解析的検討

川田工業株式会社　○大城泰樹
琉球大学　田井政行，下里哲弘
宮地エンジニアリング株式会社　山下修平

1. はじめに

鋼橋の損傷事例はいくつか確認されているが，その中でも高力ボルト摩擦接合継手部で重度の腐食減肉が生じ，大規模な補修・補強が行われるケースが数多く報告されている．今後も増加する腐食鋼橋を適切にメンテナンスするためにも高力ボルト摩擦接合継手の腐食減肉に対するすべり耐力評価法の構築が求められる．

高力ボルト摩擦接合継手の腐食減肉とすべり耐力に関する研究はこれまでにいくつか行われている．山下ら[1)]は，写真 1 に示すような連結板の特徴的な減肉形状に着目し，ボルト孔近傍の減肉量を用いたすべり耐力評価法を提案している．しかしながら，限られた継手形式や減肉形状に基づく手法であり，汎用的な評価手法の構築が求められる．

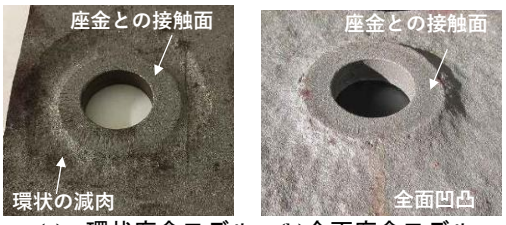
そこで本研究では，腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手の解析モデルの構築と，連結板の腐食減肉をパラメータとしたパラメトリック解析を行い連結板の腐食とすべり耐力の評価法について基礎的検討を行う．

2. 腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手の解析モデル

(1) 解析モデルと解析手法

図 1 に解析モデル寸法を示し，図 2 に要素分割例を示す．モデルは既往の研究[1)]の試験体を対象としており，1 行 2 列 2 面摩擦試験体で，すべり強度／母板降伏強度比 β 値が 0.8 以下のすべり先行型となる寸法とする．それぞれの部材間には接触を定義し，等方性クーロン摩擦モデルを用いてすべり挙動を再現する．なお，本解析では，すべりまでの挙動を検討するためにすべり後の挙動に大きく影響する動摩擦係数については設定していない．また，固定側とすべり側を設け，すべり側ですべりが先行するように固定側の軸力を 315kN（SHTB ボルト想定）とする．8 節点 solid 要素を用い，要素サイズは 0.5～2mm 程度としている．連結板の 2 種類の腐食減肉形状は，レーザー計測により得られたデータをもとに図 3 に示すような解析モデルで再現している．

解析では，先ず，試験時に計測したボルト軸力 246kN をボルト軸部に与えた．その後，引張荷重を作用させるためすべり側の母板端面側に強制変位を与え，連結板と母板間ですべりを発生させた．材料特性は，母板および連結板，高力ボルトともにヤング率を 2.0×10^5 N/mm²，ポアソン比を 0.3 としている．各部材の降伏応力は母材を 415 N/mm²，新材連結板を 396 N/mm²，実腐食連結板を 447N/mm²，高力ボルトを 900 N/mm²とする．ここで，母板および連結板の降伏応力値は，試験片の引張試験[1)]を行い，算出した値である．なお，本解析に用いた解析コードは汎用有限要素解析ソフト ABAQUS2017 を用いている．



(a)　環状腐食モデル　(b)全面腐食モデル
写真 1　連結板の腐食減肉例

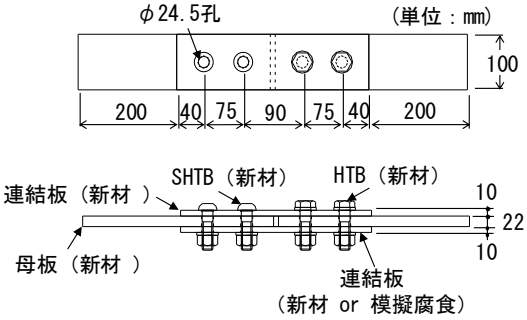


図 1　試験体寸法図

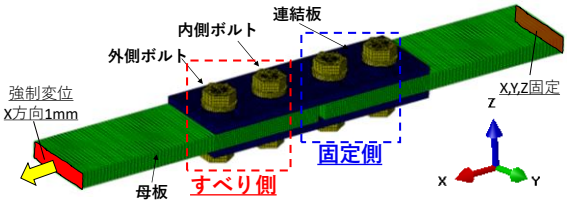
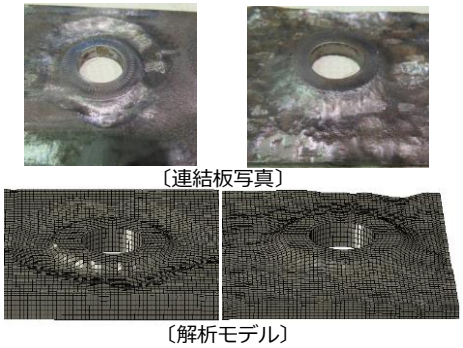


図 2　解析モデル



(a)環状腐食　　(b)全面腐食
図 3　実腐食連結板のモデル化

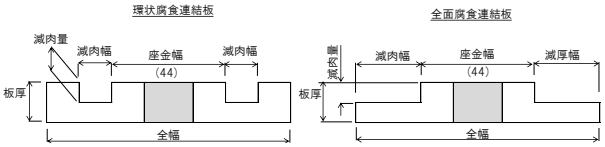


図 4　連結板減肉断面図

(2) 解析パラメータ

文献 1 で示されている腐食連結板のすべり耐力に対する評価指標の確立を目的として，減肉形状と減肉量を図 4 のように簡易的に設定し，表 1 に示す減肉ケースの連結板のモデルを作成した．これらの連結板を表 2 に示す連結板の組合せで検討を行った．

キーワード：腐食連結板　FEM 解析　すべり耐力　高力ボルト摩擦接合継手
連絡先：〒764-0017　香川県仲多度郡多度津町西港町 17　川田工業株式会社　四国工場

© Japan Society of Civil Engineers

表 1　腐食減肉ケース

連結板タイプ	板厚	板幅	材質	減肉幅	減肉量	βcs	連結板マーク
新材型	10	100	SM490Y	0	0	0.70	N(0.70)
環状型	10	100	SM490Y	15	1	0.70	R(0.70)
					5	0.81	R(0.81)
					8	0.92	R(0.92)
				18	3	0.78	R(0.78)
					4	0.81	R(0.81)
					5	0.86	R(0.86)
					6	0.90	R(0.90)
					7	0.95	R(0.95)
全面型	10	100	SM490Y	28	1	0.73	U(0.73)
					3	0.88	U(0.88)
					4	0.97	U(0.97)
					5	1.08	U(1.08)
					6	1.23	U(1.23)
					7	1.41	U(1.41)

表 2　解析パラメーター覧

連結板マーク	N(0.7)	R(0.80)	R(0.9)	R(1.0)	R3	R4	R5	R6	R7	U(0.8)	U(0.9)	U(1.0)	U(1.2)	U6mm
N(0.7)	○(基準)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
R(0.80)				○								○		
R(0.9)														
R(1.0)				○									○	
R3														
R4														
R5														
R6														
R7														
U(0.8)				○									○	
U(0.9)														
U(1.0)														
U(1.2)													○	

3.　解析結果（モデル妥当性と耐力評価法）

(1)　モデル妥当性

図 5 に実腐食モデルによる解析結果および実験結果から得られた，基準モデル（黒線），環状モデル（青線），全面モデル（赤線）の荷重－開口変位関係と内側ボルトの軸力低下率を示す．荷重-開口変位関係は各ケース共に初期挙動からすべり耐力まで概ねすべりの挙動を再現出来ている．軸力挙動は低下幅が大きく見られた内側ボルトの軸力に着目する．軸力の低下挙動についても荷重－開口変位関係と同様に高い再現性であるといえる．

以上の結果より，実腐食形状をモデル化した本解析モデルは実験の挙動を十分に再現できており，妥当性があると判断する．また，本モデルを用いて腐食連結板を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力評価を行う．

(2)　すべり耐力評価法

文献 1 で提案されている連結板の腐食減肉形状とすべり耐力評価の指標は図 6 に示す半ドーナッツ状の評価範囲を図 7 に示す腐食換算断面積を用いて評価している．この評価法をもとに，本研究で行ったパラメトリック解析結果を文献で示される腐食連結板を用いたすべり試験結果と本解析で得られた結果を図 8 にプロットする．同図の縦軸は保有すべり耐力 P_h と基準すべり耐力 P_b との比としてすべり荷重比 Sr とし，横軸を連結板片面のすべり耐力 P_{cb} と腐食減肉が大きい片側連結板の降伏耐力 F_{cy} の比として β_{CS} としている．

実験と解析結果を比較すると，どちらも右肩下がりの傾向を示しており，連結板減肉に伴うすべり耐力の低下挙動を表している．しかし，βcs が 1.1 付近から実験と解析において若干の乖離が見られている．これは，連結板が腐食減肉するとすべり現象よりも連結板の降伏耐力が支配的となることが考えられ，このような高力ボルト摩擦接合継手の解析による再現性が低いことが要因である．また，本解析モデルでの適応範囲は βcs が 1.1 未満までが妥当であり，1.1 以上については h 解析モデルの改良が必要であると考えられ，今後の課題とする．

4.　結論

本研究で得られた知見を以下に示す．

1)　本解析モデルより，連結板の実腐食減肉に伴うすべり耐力の低下が確認でき，解析モデルの妥当性が示された．

2)　連結板の腐食減肉をパラメータとしたパラメトリック解析より，βcs と Sr の関係は実験結果と同様に右肩下がりの傾向を示している．

3)　Bcs が 1.1 を超えると，実験と解析に若干の乖離があり，連結板の降伏が支配的となるにつれて解析での再現性が低くなっており，解析モデルの改良が今後の課題である．

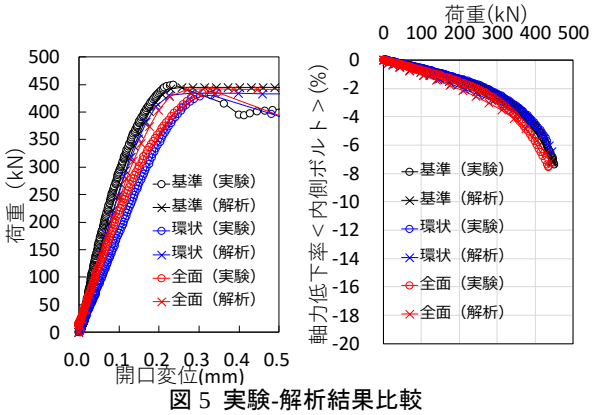


図 5 実験-解析結果比較

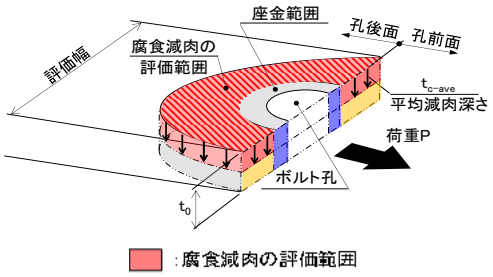
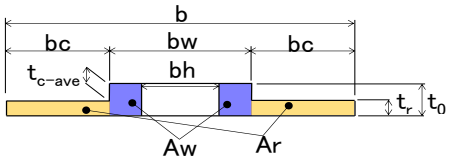


図 6　連結板評価範囲 [1)]



腐食換算断面積 Ac = Ar + Aw

図 7　腐食換算断面積 [1)]

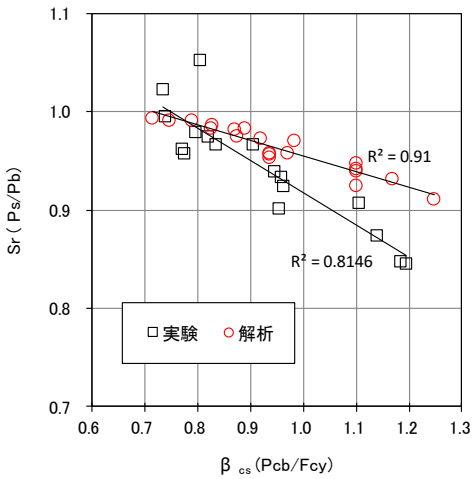


図 8　Sr と β_{CS} の関係

【参考文献】

1)　山下ら：高力ボルト摩擦接合継手における連結板の腐食減肉形状とすべり耐力特性に関する研究，土木学会論文集 A1, Vol.74 No.3, pp.359-375, 2018.

© Japan Society of Civil Engineers