リベットと高力ボルトを併用した継手の力学性状に関する基礎的研究

名古屋大学　学生会員　○鷲見俊哉　　正会員　判治剛　　フェロー会員　舘石和雄　　正会員　清水優
川田工業　正会員　長坂康史　　MK エンジニアリング　正会員　竹渕敏郎

1．研究の目的　腐食等により損傷したリベットを摩擦接合用高力ボルトに取り替えた場合，継手内に荷重伝達機構の異なるリベットと高力ボルトが共存することになるが，このような併用継手に関する研究は数少ない．本研究では，併用継手に対する引張試験と有限要素解析を行い，その力学性状や限界状態に関する基礎的な検討を行った．

2．試験体　リベットの降伏には，支圧による降伏とせん断による降伏が考えられ，リベット 1 本あたりの支圧降伏荷重 P_{rb} とせん断降伏荷重 P_{rs} は，それぞれ次式により計算できる [1),2)]．

$$P_{rb}=1.5\sigma_y t d_r \cdots(1) \qquad P_{rs}=0.75m\sigma_y \pi d_r^2/4 \cdots(2)$$

ここで，σ_y はリベットの降伏応力，t は板厚，d_r はリベット径，m はせん断面数である．

表-1　供試鋼材の機械的性質

鋼板(SM490Y)		
板厚(mm)	降伏応力	引張強度
9	488	542
12	418	543
19	444	543
リベット(SS400 相当)		
径(mm)	降伏応力	引張強度
19	376	494
高力ボルト(F10T)		
規格	降伏応力	引張強度
M20×65	1000	1043
M20×80	1012	1048

＊ 応力の単位は N/mm²

試験体は，リベットの支圧降伏が先行する A シリーズと，せん断降伏が先行する B シリーズの 2 種類とし，その形状および寸法を図-1，2 に，供試材料の機械的性質を表-1 に示す．リベットの値は同条件で製作したリベット継手から切り出した丸棒試験片による材料試験結果であり，その他はミルシート値である．上式より，リベット 1 本あたりの降伏荷重は A シリーズで 128.6kN，B シリーズで 160.0kN である．図中の右側の 1 行 3 列の継手が試験対象であり，昭和 39 年の鋼道路橋設計示方書に準拠している．左側はボルト継手とし，試験側が破断するまで降伏しないように設計した．リベットと高力ボルトの配置パターンを図-3 に示す．リベットの呼び径は 19mm であり，高力ボルトには F10T，M20 を用いた．

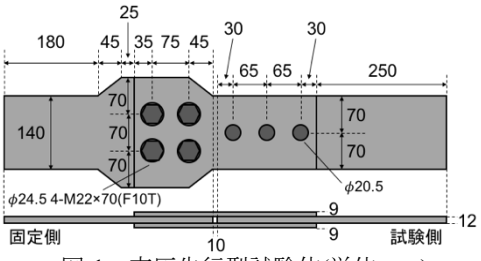

図-1　支圧先行型試験体(単位:mm)

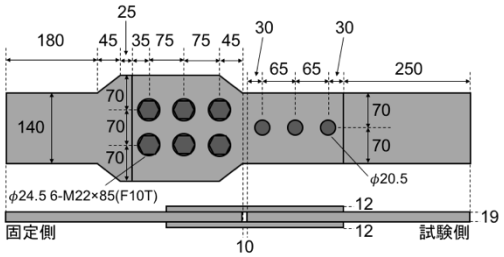

図-2　せん断先行型試験体(単位:mm)

試験体は，固定側を締結した後，リベットの打込み，高力ボルトの締付けの順序で組み立てた．リベット施工は熟練工が行い，打込み時のリベットの温度は 1000℃程度であった．同条件で製作したリベット継手に対して，文献 3)を参考に導入軸力を測定した結果，リベットには降伏軸力の約 76%の軸力が導入されていた．実橋のリベットを高力ボルトに取り替えた継手のすべり係数は 0.25 程度といわれていることから [4)]，試験側のボルト締結においては，設計ボルト軸力とすべり係数 0.25 から求められるすべり荷重（ボルト 1 本あたり 82.5kN）と同等のすべり荷重が得られるよう導入ボルト軸力を調整した．同じ鋼板を用いたすべり試験 [5)]の結果から，試験側のボルト軸力は 110kN とした．ボルトは頭部ひずみゲージ法により軸力を管理してトルクレンチで締め付け，1 週間以上経過後に載荷した．

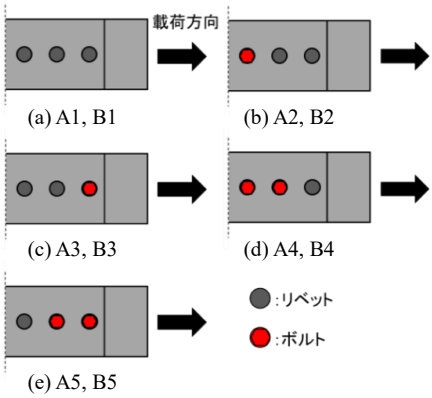

図-3　配置パターン

3．引張試験　引張試験は変位制御で行い，試験体が破断するまで載荷した．試験体 A1，A4 における荷重と試験側変位の関係を図-4，5 に示す．ここでは，荷重-変位関係が線形挙動から非線形的な挙動に移り変わるとき（以下，降伏限界）と破断時（以下，終局限界）に着目する．リベットのみの試験体 A1 では，リベットの降伏とともに徐々に勾配が変化しているのに対し，高力ボルトを併用した試験体 A4 では，摩擦接合継手でみられる変位の急増や荷重の一時的な低下が確認された．このように，リベット継手と併用継手では降伏限界時の挙動が異なることがわかる．

キーワード　リベット継手，高力ボルト摩擦接合継手，併用接手，降伏限界状態，終局限界状態
連絡先　〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 TEL：052-789-4620

© Japan Society of Civil Engineers

図-6 に示す 5 パターンの破断形式を想定し，各形式の破断荷重の計算値と，実験における破断形式と最大荷重の関係を表-2 に示す．リベットのせん断破壊荷重は式(2)の降伏応力を引張強度に読み替えて求めた．ボルトのせん断破壊荷重と母材の端抜け破断荷重は文献 6)を基に計算した．各破断荷重を累加して求めた計算値が最小となる破断形式は実験結果と対応しており，想定される破断形式に対する計算値を比較することで併用継手の終局限界状態を予測できる可能性が示された．

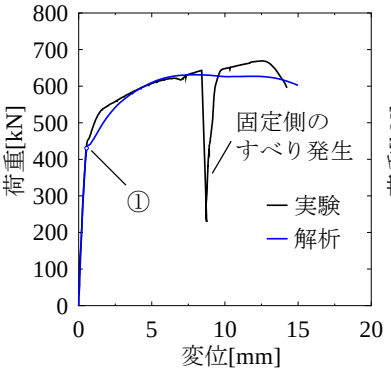

図-4　荷重-変位関係(試験体 A1)

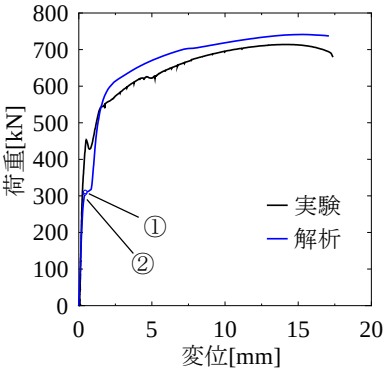

図-5　荷重-変位関係(試験体 A4)

表-2　計算値と実験値との比較

試験体	実験		計算値(kN)				
	破断形式	最大荷重(kN)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
A1	(e)	669	779	630	1043	829	616
A2	(e)	702	779	813	1043	829	616
A3	(a)	725	779	813	1043	1012	799
A4	(a)	714	779	996	1043	829	799
A5	(a)	742	779	996	1043	1012	982
B1	(b)	730	1233	630	1651	1190	730
B2	(e)	832	1233	815	1651	1190	730
B3	(b)	872	1233	815	1651	1375	915
B4	(e)	957	1233	1000	1651	1190	915
B5	(b)	1064	1233	1000	1651	1375	1100

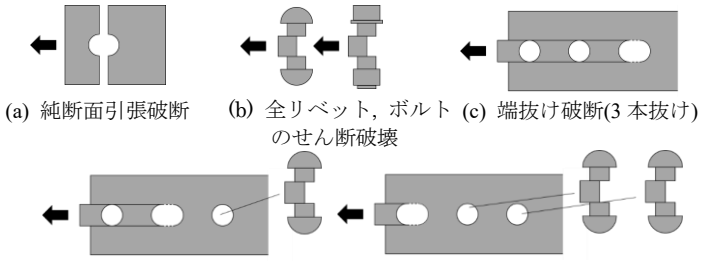

図-6　想定される破断形式

4．併用継手の再現解析　引張試験を模擬した有限要素解析により降伏限界時の力学性状を確認した．解析モデルは対称性を考慮した 1/4 モデルとし，その例を図-7 に示す．解析には ABAQUS Ver.6.14 を用い，材料や境界の非線形を考慮した複合非線形解析とした．リベットの構成則は材料試験結果を基に決定し，その他は文献 7)を基に与えた．主板と連結板の接合面の摩擦係数は予備実験結果から 0.385 とし，その他の接触面は 0.001 とした．リベットと高力ボルトの下端に強制変位を与えて軸力を導入した後，主板端部に引張変位を与えた．

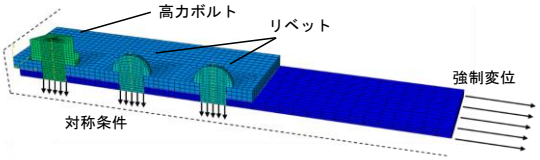

図-7　解析モデル(試験体 A2)

表-3　各試験体の降伏限界荷重

試験体	状態	解析値(kN)	計算値(kN)
A1	リベット 3 本の降伏	430	386
A2	ボルト 1 本のすべり +リベット 2 本の降伏	375	340
A3		370	340
A4	ボルト 2 本のすべり +リベット 1 本の降伏	310	294
A5		303	294
B1	リベット 3 本の降伏	467	480
B2	ボルト 1 本のすべり +リベット 2 本の降伏	385	402
B3		387	402
B4	ボルト 2 本のすべり +リベット 1 本の降伏	316	325
B5		317	325

図-4，5 には解析結果も併記している．解析は実験をおおむね再現できており，実験でみられた降伏限界時の挙動も確認できる．解析における降伏限界時の状態と荷重を表-3 にまとめる．ここで，リベットの降伏とは支圧またはせん断を受けるリベット軸周りの要素がすべて降伏点以上の応力となった状態とし，ボルトのすべりとはボルト位置での主板と連結板間の相対変位が 0.2mm 以上となった状態とした．図中にはすべてのリベットが降伏した時点を①，すべてのボルト位置ですべりが生じた時点を②として示している．なお，リベットの降伏やボルトのすべりは外側から内側の順で生じていた．どの試験体もリベットに降伏，ボルトにすべりが生じて降伏限界に達している．表中には，累加が成り立つと仮定してリベット 1 本あたりの降伏荷重と高力ボルト 1 本あたりのすべり荷重から計算した降伏限界時の荷重も示しているが，配置パターンの違いによらず計算値は解析値と同程度である．よって，降伏限界に対しても，想定しうる降伏やすべりに対する荷重の累加により併用継手の降伏限界荷重を算出できる可能性があるといえる．

5．まとめ　本研究では，リベットと高力ボルトを併用した継手に対する引張試験と有限要素解析を行い，限界状態時の力学的挙動や荷重を検討した．その結果，想定しうる降伏やすべり，破断に対する荷重を累加することにより，それらを予測できる可能性を示した．

参考文献　1) 橋本ら：構造工学論文集, Vol.54A, pp.555-562, 2008. 2) Kulak ら：Guide to design criteria for bolted and riveted joints Second edition, 2001. 3) Wilson ら：Tension tests of rivets, 1930. 4) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物補修・補強・改造の手引き, 2007. 5) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工ガイドブック, 2018. 6) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針, 2012. 7) 日本鋼構造協会：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン, 2006.

© Japan Society of Civil Engineers