

高力ボルト摩擦接合とする既設リベット継手の 部分取替え補修に関する解析的検討

Analytical study on repair method for existing riveted joints replaced some rivets by high strength bolts as frictional connection

橋本国太郎*, 山口隆司**, 北田俊行***

Kunitaro Hashimoto, Takashi Yamaguchi, Toshiyuki Kitada

*修士 (工学), 京都大学大学院助教, 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

** 博士 (工学), 大阪市立大学大学院准教授, 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本町 3-3-138)

*** 工博, 大阪市立大学大学院教授, 工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本町 3-3-138)

In case of the repair of a superannuated riveted joint, three methods are considered: 1. replacement of the superannuated rivets, 2. installing the bearing type of the bolts, and 3. installing the high strength bolts as the frictional joint. Using high strength frictional bolted connection is preferable method from the viewpoint of repair cost and easiness of repair works. However, the mechanical behavior of the riveted joint in which some rivets are replaced by the frictional bolted joint is not clear. The objective of this study is to investigate analytically the strength of the riveted connection replaced some rivets by the high strength bolts, and to discuss the applicability of such repaired riveted joint considering the number and the position of the replaced rivets. It is concluded from the analytical results that the strength of the repaired riveted connection by using high strength bolts is sufficient for a repairing method of superannuated riveted joints.

Key Words: riveted joints, high strength bolted frictional connection, repair

キーワード: リベット継手, 高力ボルト摩擦接合, 補修

1. はじめに

経年劣化により腐食したリベットの補修方法として以下の3つの手法が主に考えられる。①新しいリベットへの取替え, ②高力ボルト支圧接合, もしくは③高力ボルト摩擦接合への取替えなどである。ただし, ①に関しては, リベット材料の入手が困難であること, リベット打ちの熟練した施工者が昔に比べるとほとんどいなくなったこと, また, 周辺の騒音や火災発生の問題などが挙げられる。②に関しては, リベットの孔径(リベット呼び径+1.5mm)と支圧接合ボルトの基準径(ボルト呼び径+1.5mm)¹⁾との関係上, $\phi 22$ のリベットをM22支圧接合用高力ボルトに取替えることができるが, その他の $\phi 19$ や $\phi 25$ のリベットに合う支圧接合用ボルトがないことが問題である。これらの点を踏まえ, 材料入手のしやすさや補修のしやすさという観点から, ③の高力ボルト摩擦接合による取替え補修が現状では, 最良の方法と考えられる。また, 経済性および施工性の観点から,

全数取替えよりは, 部分的な取替えとしたほうが好ましい場合も多いと考えられる。

しかし, リベット接合の一部を高力ボルト接合で取替えた場合, 使用材料や荷重伝達機構が異なることからその降伏時, 終局時の挙動については不明な点も多い。具体的には, 部分的に高力ボルト摩擦接合に取り替えた場合に継手としてすべりが発生するのか, しないのか, また, リベットの支圧力がどの程度期待できるのか, さらにリベットがせん断破壊するのか否かといった点などがあげられる。

リベットの補修に関する最近の研究では, リベットの取替え順序を検討するための実験的な研究²⁾や, 高力ボルト摩擦接合継手のボルト孔に樹脂を充填し, ボルトの支圧を期待した取替え方法の提案³⁾などがあるが, リベットを高力ボルトに取り替えたことによる力学的挙動の違いやその詳細な挙動の検討までは行われていない。また, 35年経過したリベット継手の基本性能調査⁴⁾として, 既設リベット継手のせん断試験, および高力ボルト

支圧接合と高力ボルト摩擦接合に取替えた場合のせん断試験が行われており、古いリベットの取替えの可能性を実験的に検討している。ただし、対象とされたリベット継手が1種類のみであり、様々なプロポーシヨンの継手に対しての十分な検討がなされているわけではない。また、リベット全数を取り替える場合を想定しており、本研究で目的としているような、損傷した一部のリベットを高力ボルトに取替えるというものではない。

以上のことから、本研究では、リベット接合における一部のリベットを高力ボルト摩擦接合に取替えることが可能か否かを明らかにするために、力学的な挙動をFEM解析により検討する。

2. リベット継手の設計耐力の検討

リベット継手の破壊モードは、①リベットの支圧による降伏（以下、支圧先行型）、②リベットのせん断による降伏（以下、せん断先行型）、および③母材の引張による降伏（以下、母材降伏先行型）の3つである。リベット継手の設計では、母材を降伏させないことを前提にリベットの支圧強度、もしくは、せん断強度の小さいほうを継手の強度としている。リベット材料にはSV330とSV400という2種類の強度レベルのものがあ、それぞれ母材強度に応じて使い分けられている。母材強度がSS400もしくはSM400にはSV330、それ以上の強度の母材にはSV400が使用され、SV330およびSV400の

公称引張強度は、それぞれ330N/mm²および400N/mm²である。

本章では、上記のことを踏まえ、解析を行う前に、各強度レベルの継手の耐力値、および昭和48年度版の道路橋示方書⁵⁾に基づき、継手の許容力を算出し、高力ボルト摩擦接合による取替え補修が可能かどうかの検討を行なった。

表-1には、本章で検討を行なったリベット継手における耐力の簡易計算値の試算結果の例を、また、表-2にはリベット継手の材質および母材板厚に対応した高力ボルト摩擦接合継手におけるすべり耐力の簡易計算値の試算結果を示す。なお、本研究において、継手の耐力の簡易計算値とは、ボルト1本あたりのすべり耐力の簡易計算値、リベット1本あたりの支圧耐力の簡易計算値、もしくは、せん断耐力の簡易計算値のことを意味する。また、本検討で用いたリベット継手および高力ボルト摩擦接合継手は、母材の降伏が起こらない十分な板幅を持つ継手と仮定した。したがって、継手耐力が母材の降伏耐力で決まることはないものとした。リベット継手の耐力の簡易計算値を求める算定式を式(1)および式(2)に、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の簡易計算値を求める算定式を式(3-a)および式(3-b)に示す。

① リベット継手の耐力簡易計算式

$$F_{rb} = 1.5 \cdot \sigma_y \cdot t \cdot d_r \quad (\text{支圧耐力}) \quad (1)$$

表-1 リベット継手の耐力の簡易計算値と許容力

	破壊モード	母材			リベット				支圧耐力 の簡易 計算値 (kN)	せん断耐 力の簡易 計算値 (kN)	許容支 圧力 (kN)	許容せん断力 (kN)
		材質	板厚 (mm)	摩擦面 数	材質	呼び径 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	許容支圧 応力 (N/mm ²)	許容せん 断応力 (N/mm ²)			
リベット継手	支圧先行型	SS400	12	2	SV330	22	195	240	110	77.2	118.6	63.4
	支圧先行型		16	2		22	195	240	110	103.0	118.6	84.5
	せん断先行型		22	2		22	195	240	110	141.6	118.6	116.2
	せん断先行型		28	2		22	195	240	110	180.2	118.6	147.8
	支圧先行型	SM490Y	12	2	SV400	22	235	320	150	93.1	142.9	84.5
	支圧先行型		16	2		22	235	320	150	124.1	142.9	112.6
	せん断先行型		22	2		22	235	320	150	170.6	142.9	154.9
	せん断先行型		28	2		22	235	320	150	217.1	142.9	197.1

表-2 高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の簡易計算値と許容力

	母材			ボルト				すべり耐力 の簡易計算 値 (kN)	許容力 (kN)
	材質	板厚 (mm)	摩擦面 数	材質	呼び径	すべり係数	導入軸力1* (kN/本)	導入軸力2* (kN/本)	
高力ボルト継手	SS400	12	2	F10T	M22	0.25	205	205	102.5
		16	2		M22	0.25	218	273	109
		22	2		M22	0.25	232	273	116
		28	2		M22	0.25	232	273	116
	SM490Y	12	2		M22	0.25	205	273	102.5
		16	2		M22	0.25	273	273	136.5
		22	2		M22	0.25	273	273	136.5
		28	2		M22	0.25	273	273	136.5
					M22	0.25	273	273	136.5
					M22	0.25	273	273	136.5

*導入軸力1は耐力の簡易計算値の算定に対して用い、導入軸力2は許容力の算定に対し用いた値である。

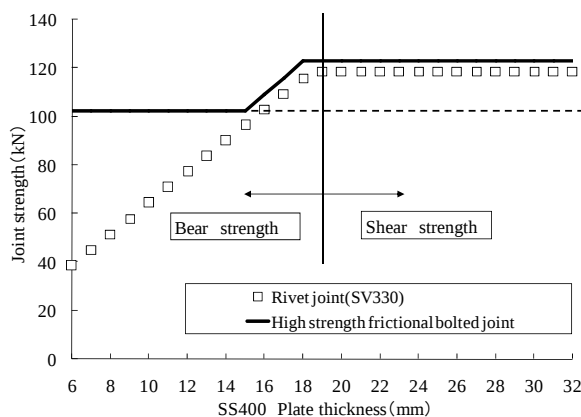


図-1 継手の耐力の簡易計算値と板厚との関係

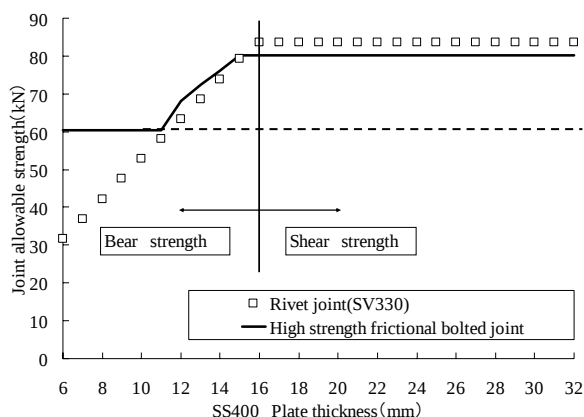


図-2 継手の許容力と板厚との関係

$$F_{rs} = 0.8 \cdot m \cdot \sigma_y \cdot \pi \cdot d_r^2 / 4 \quad (\text{せん断耐力}) \quad (2)$$

② 高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力簡易計算式

$$F_{bslip} = \mu \cdot m \cdot N \quad (\text{すべり耐力}) \quad (3-a)$$

$$N = \alpha \cdot \sigma_{by} \cdot A_{eb} \quad (\text{導入軸力}) \quad (3-b)$$

ここに、 σ_y : リベットの降伏点、 t : 母材板厚、 d_r : リベット呼び径、 μ : すべり係数、 m : 摩擦面数、 N : 導入軸力、 α : 低減係数、 σ_{by} : ボルトの降伏点 (900 N/mm², F10T)、 A_{eb} : ボルト有効断面積とする。

JIS 規格ではリベット材の降伏点の規格値が明示されておらず、また、文献5) で明記されている許容応力度は、母材の許容引張応力との比によって決められたもので、基準となるリベット材の降伏点もしくは引張強度から決められていない。そこで、本研究では、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力とリベット継手の降伏に対応する耐力を単純に比較するために、リベットの降伏点は、SV330 および SV400 において、それぞれ 195 N/mm² および 235 N/mm² を仮に設定した。この値は、同等の強度を持つ SS330 材および SS400 材の降伏点を参考としている。また、式 (2) における係数 0.8 は、文献5) および 6) にリベットのせん断強度は引張強度の 0.8~0.9 程度有しているという記述を参考とし、その最小値である 0.8 を用いた。

すべり係数については、文献5) によると、リベットの接合面はプライマー処理を施すこととされている。建設から数十年経っている実際のリベット継手接合面のすべり係数値は接合面の状態によって大きく異なり、不明である。そこで本研究では、高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針 (案) ⁷⁾ を参考に、すべり係数の最低値である 0.25 をすべり係数として採用した。しかし、表-1 からわかるとおり、設計上のすべり係数を 0.25 に設定した場合、リベット継手の支圧もしくはせん断で決まる耐力の簡易計算値と高力ボルト摩擦接

合継手のすべり耐力の簡易計算値を同等とするためには、高力ボルトの初期導入軸力を降伏耐力付近まで上乗せする必要があるが、降伏耐力まで高力ボルトを締め付ける耐力点法があり、確立されていることから、高力ボルトの降伏点付近までの軸力の導入は可能である。したがって、本研究では、高力ボルト摩擦接合継手の耐力の簡易計算値もしくは許容力がリベットの耐力の簡易計算値もしくは許容力に満たない場合、式 (3-b) に係数を乗じて、初期導入軸力を増加させ、高力ボルトの降伏点まで導入することができるものとして設計値の算出を行なった。ただし、導入軸力は、高力ボルト摩擦接合継手の耐力の簡易計算値もしくは許容力が、リベットの耐力の簡易計算値もしくは許容力を上回るように漸増させている。なお、リベット耐力の簡易計算値は支圧先行型の場合、母材の板厚によって変化する。

リベットおよび高力ボルト摩擦接合継手の許容力は、文献5) を参考に、すべり係数は 0.25 として算定した。リベットの許容力は、定められた許容応力に支圧断面積またはせん断断面積を掛け、いずれか小さい方の値を許容力とした。高力ボルト摩擦接合継手の許容力は、式 (3-a) を安全率 1.7 で割った値である。

リベット継手および高力ボルト摩擦接合継手の耐力の簡易計算値の試算結果を、図-1 および図-2 に示す。これは、表-1 および表-2 の板厚と耐力の簡易計算値もしくは許容力との関係を図化したものである。図-1 は継手の母材板厚と継手の耐力の簡易計算値との関係を示している。実線が高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の簡易計算値であり、□点がりベット継手の耐力の簡易計算値である。また、点線は、ボルト軸力を通常の設計軸力で算定した場合の高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の簡易計算値である。図-1 から、リベット材に SV330 を使用した場合、全ての板厚で高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の簡易計算値がりベット継手の耐力の簡易計算値を上回っており、ボルトによる取替えは可能であることがわかる。この傾向は、1 面せん

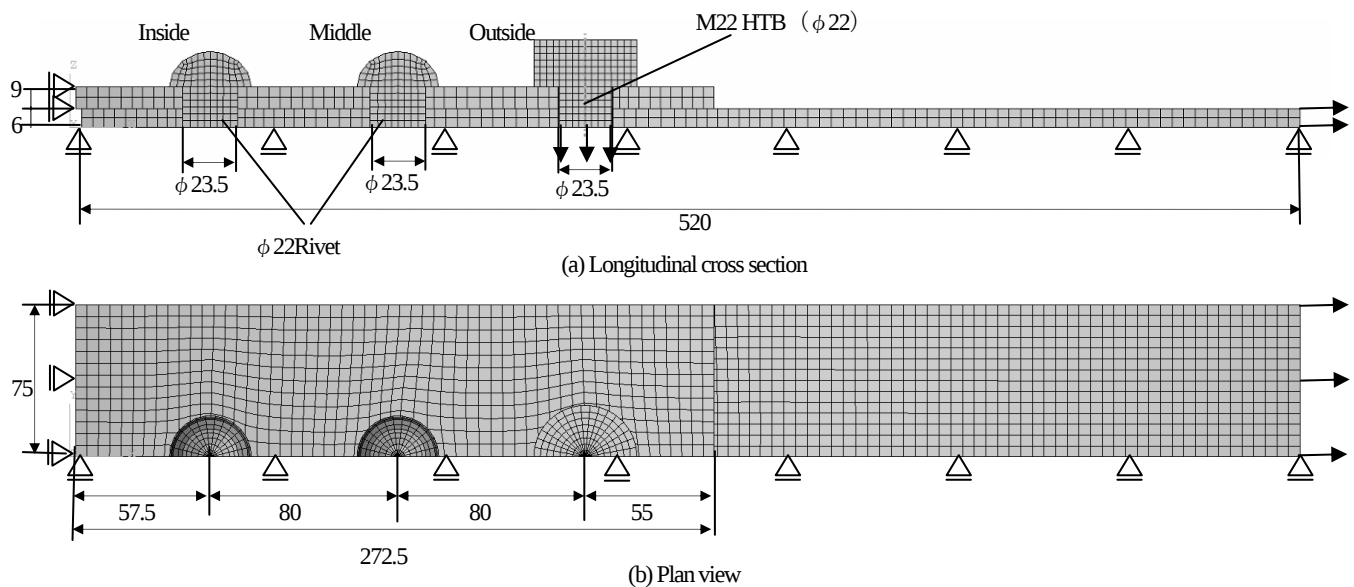


図-3 解析モデル (例: B-R2B1-O, 寸法単位 mm)

表-3 材料の機械的性質

部材・部品	材料	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
母材	SS400	235	400
連結板	SS400	235	400
リベット	SV330	195	330
高力ボルト	F10T	900	1000

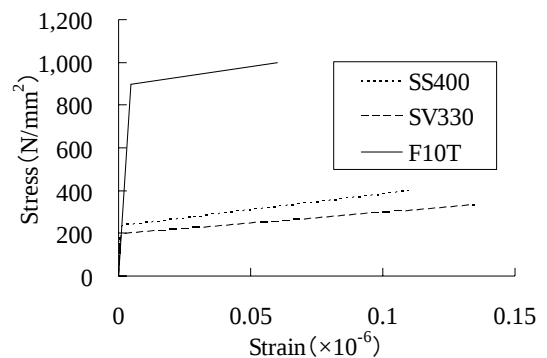


図-4 解析に用いた応力-ひずみ関係

断の場合やφ19 およびφ25 リベットの場合でも同様の結果であった。ただし、φ22 およびφ25 リベットで継手の材料が SM490 かそれ以上の強度のもの、およびリベット材料が SV400 の場合、リベット継手の耐力が高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の簡易計算値を上回る場合もでてきた(表-1, 2 参照)。これは、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の簡易計算値が、継手材料の強度に依存しないのに対し、リベット継手では、継手の耐力が、リベット材料の強度に依存し、材料強度が大きくなったためと考えられる。

図-2 には、母材板厚と継手の許容力との関係を示している。図-2 より、許容力レベルでリベット継手と高力ボルト摩擦接合継手とを比較すると、リベット継手の許容力のほうが大きい値となっているケースが多いことがわかる。特に、せん断先行型はすべて、リベット継手の許容力のほうが大きい。導入軸力を高力ボルトの降伏耐力付近の値としてもリベット継手の許容力の方が大きい。これらの理由として、リベットの許容力がリベットの降伏点もしくは引張強度によって決められてお

らず、母材の許容引張応力との比によって決められているためと考えられる。このことから、高力ボルト摩擦接合継手でリベット継手を補修する際、文献5) における許容応力を用いると、図-2 中の SS400 材のせん断先行型の母材板厚 16mm 以上の継手のように、補修できない継手も出てくることがわかる。これは、他の材質でも同様に補修できない継手があるので注意が必要である。ただし、高力ボルトの許容力の算定には、すべり係数値として、通常の 0.4 ではなく 0.25 を用いていることにも注意が必要である。なお、F10T 級の高力ボルトで補修できない場合は、F14T 級の超高力ボルトを使用することで、補修可能な範囲は大幅に増えると考えられる。

3. FEM 解析による補修継手の力学的挙動の検討

3.1 解析モデルおよびケース

本章では、2 章で検討を行なったリベット継手に対して、簡易計算で算出した耐力で補修可能な場合で、支圧先行型およびせん断先行型の 2 種類の継手を取り上げ、

高力ボルトに取替えた継手の力学的挙動を解析的に検討する。

FEM 解析には、汎用の FEM 解析コード ABAQUS® を使用した。解析モデルを図-3 に示す。図-3 に示すように、解析モデルは対称性を考慮し 1/8 モデルとした。継手の要素分割や高力ボルトのモデル化は文献(9) を参考とした。母材および連結板に用いた要素は 8 節点ソリッド要素、リベットおよび高力ボルトには 8 節点ソリッド要素および 6 節点ソリッド要素の両方を使用した。母材と連結板、ボルトとボルト孔、およびリベットとリベット孔の接触面にはすべり面を設定し境界非線形性を考慮した。解析の初期状態では、リベットとリベット孔 ($\phi 23.5$) との間は、隙間がなく、接触した状態とし、取替えた高力ボルトとリベット孔との間には、隙間を考慮して、それぞれモデル化した。解析に使用した材料の応力-ひずみ関係を図-4 に、機械的性質を表-3 に示す。各材料の応力-ひずみ関係はバイリニア型でモデル化し、降伏点は 2 章の継手耐力の検討で用いた値とした。解析は、高力ボルトに取替えたモデルでは、第 1 ステップでボルトに強制変位を与えることで初期軸力 (支圧先行型に対しては 205kN、せん断先行型に対しては 273kN) を導入し、第 2 ステップ以降で母材端部に強制

変位によって引張力を与えている。リベットのみのモデルでは、軸力は導入せず、母材端部に強制変位による引張力を与えた。実際のリベット打ち込み時には、熱の影響で軸力が多少なりとも入ると考えられるが、設計時には、軸力の影響を考慮しないため、本解析でも考慮しないこととした。しかしながら、実用化が可能であることが明らかになった段階で、この点についても、明らかにしておく必要がある。また、実際の補修時には、リベット取り外しの際、一時的に他のリベットに、荷重が分担されるが、本論文では、取替え後の耐力を算定することが目的であるため、本解析では、取替え時の一時的な荷重分担の影響は考慮していない。

解析に導入した摩擦係数は 0.28 とした。これは、設計におけるすべり係数が、すべり荷重を導入軸力で割った値であることに対し、摩擦係数はすべり荷重をすべり荷重時の軸力で割った値ということ、また、摩擦接合継手では弾性内においてもポアソン比による板厚減少の影響により、すべり係数と導入した摩擦係数は必ずしも一致しないためである。そのため、本解析では、すべり耐力の簡易計算値と解析値がほぼ同等となるよう摩擦係数を調整している。

解析ケースを表-4 に示す。それぞれのケースに対し

表-4 解析ケース

破壊モード	ケース名	リベット本数 (本)	ボルト本数 (本)	取替え位置	導入軸力 (kN)	母材板厚 (mm)	すべり耐力/ 降伏耐力比 β	継手耐力の 簡易計算値 (kN)	継手耐力の 解析値 (kN)
支圧先行型	B-R3B0	3	0	—	—	12	—	231.7	230.8
	B-R2B1-O	2	1	外側1本	205	12	—	256.9	220.7
	B-R2B1-M	2	1	中間1本	205	12	—	256.9	240.1
	B-R2B1-I	2	1	内側1本	205	12	—	256.9	239.2
	B-R1B2-OM	1	2	外中2本	205	12	—	282.0	265.5
	B-R1B2-MI	1	2	内中2本	205	12	—	282.0	278.4
せん断先行型	B-R0B3	0	3	全て	205	12	0.871	307.2	314.1
	S-R3B0	3	0	—	—	28	—	355.8	373.8
	S-R2B1-O	2	1	外側1本	273	28	—	373.7	368.3
	S-R2B1-M	2	1	中間1本	273	28	—	373.7	373.2
	S-R2B1-I	2	1	内側1本	273	28	—	373.7	359.7
	SR1B2-OM	1	2	外中2本	273	28	—	391.7	397.5
	S-R1B2-MI	1	2	内中2本	273	28	—	391.7	397.0
	S-R0B3	0	3	全て	273	28	0.492	409.6	421.3

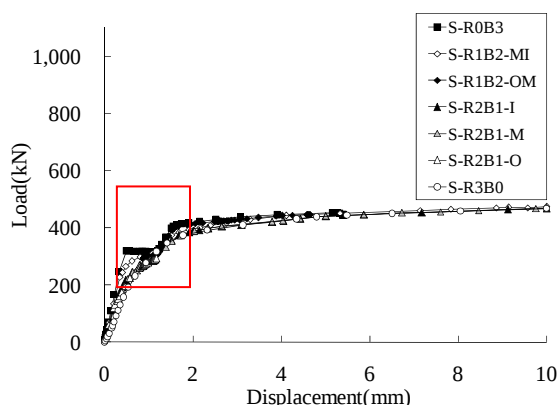


図-5 荷重-変位関係 (支圧先行型)

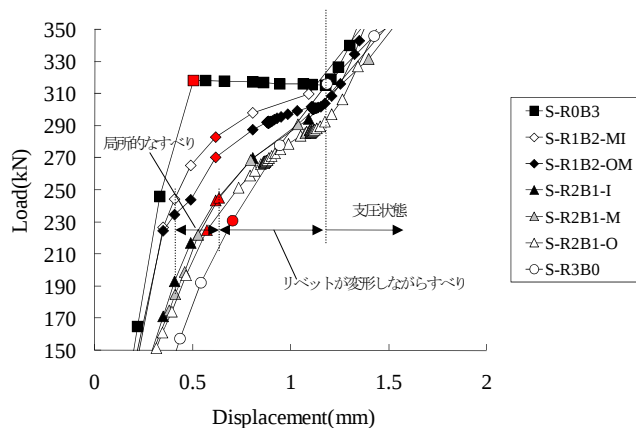


図-6 耐力付近の拡大図 (支圧先行型)

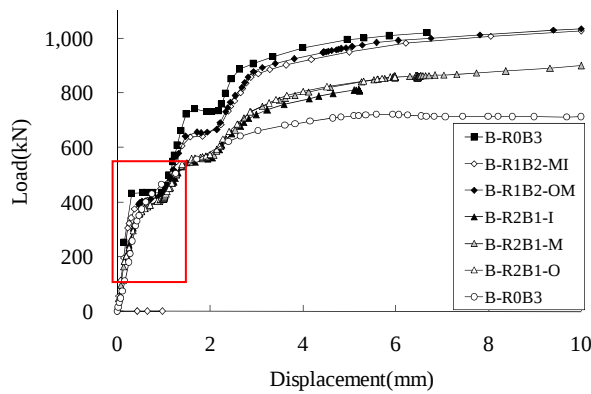


図-7 荷重－変位関係（せん断先行型）

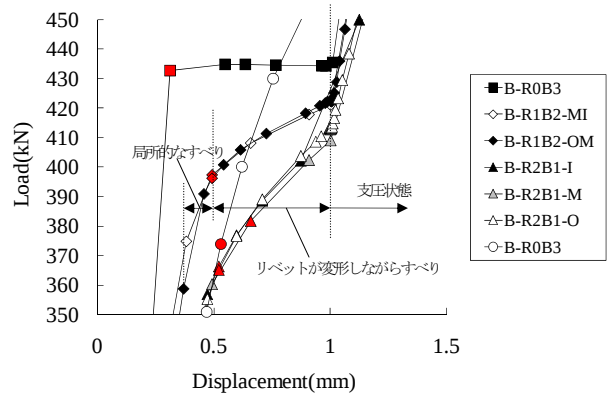


図-8 耐力付近の拡大図（せん断先行型）

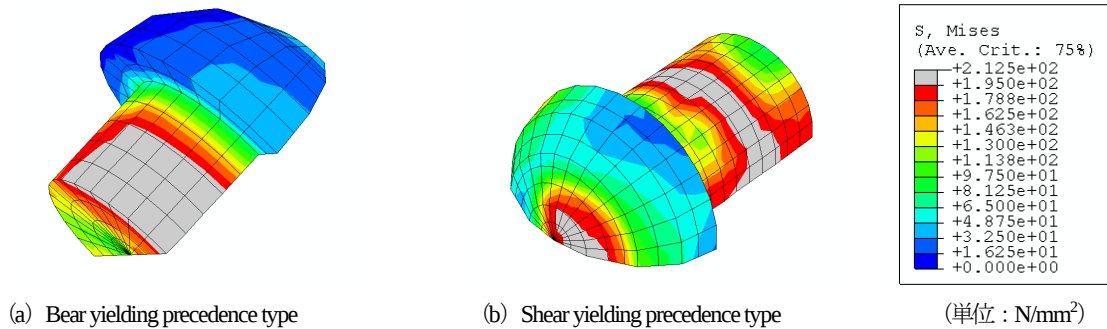


図-9 リベットの相当応力コンター図（降伏時）

て、取替え本数の影響を調べるため、片側1本のみボルトに取り替えた場合、2本取り替えた場合、および全数取り替えた場合の3種類のケースを対象とし、さらに、その取替え位置の影響を調べるため、ボルトの位置を変化させたケースも考え、計14ケースとした。解析ケース名は、破壊モード（B（支圧）もしくはS（せん断））－片側リベット本数（R）－片側ボルト本数（B）－取替え位置（I（内側）、M（中間）、O（外側））のようにしている。例としてS-R1B2-OMというのは、せん断先行型でリベットを1本、中および外側の2本をボルトに取り替えたケースという意味である。リベットには、呼び径がφ22、材質がSV330のものを使用した。また、取替えに使用したボルトはM22で、材質がF10Tのものである。

表-4中には、式(1)～(3)より求めた、リベット継手および高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の簡易計算値を、また、部分的に取替え補修した継手の耐力の簡易計算値も示す。部分的に取替え補修した継手の耐力の簡易計算値の算定は、式(4)に示すように、単純に、高力ボルト1本あたりのすべり耐力の簡易計算値 F_{slip} とリベット1本あたりの耐力の簡易計算値 F_r を求め、継手に使用されている各々の本数の和とした。

$$F = n_b \cdot F_{slip} + n_r \cdot F_r \quad (\text{部分取替えの継手耐力}) \quad (4)$$

ここに、 n_b ：高力ボルト本数、 n_r ：リベット本数。

3.2 FEM解析における継手耐力の定義

本節では、FEM解析における継手耐力の定義を明確にする。まず、高力ボルト摩擦接合のみの継手耐力は、継手の接合面にすべりが生じたときの荷重と定義した。次に、リベットのみの継手耐力は、支圧先行型の場合は、リベット全数の支圧力作用面全面の要素が、降伏点以上の応力となったときの荷重であり、せん断先行型の場合は、リベット全数のせん断力作用面全断面の要素が降伏点以上の応力となったときの荷重と定義した。さらに、補修継手の場合は、接合面のすべり、リベットの支圧面の降伏、もしくは、せん断面の降伏の3つの場合のいずれかが、先行して起こる場合と同時に起こる場合があると想定される。同時に起こる場合は、そのときの荷重を継手の耐力と定義した。先行して接合面のすべり、もしくは、リベットの降伏が生じた場合、そのときの荷重ではなく、その全てのイベントが生じたときの荷重を継手の耐力と定義した。具体的には、先行して接合面のすべりが生じ、その後、残りのリベット全数の支圧面が降伏したときの荷重を継手耐力とした。

3.3 解析結果およびその考察

表-4中には解析で得られた継手耐力を記している。また、支圧先行型およびせん断先行型の各ケースの荷重－変位関係を、図-5、6および図-7、8にそれぞれ示す。変位は継手に与えた強制変位量である。図-6および図-8は、図-5および図-7の耐力付近の拡大図で

表-5 継手耐力が決まるまでのシナリオ

破壊モード	ケース名	継手耐力が決まるまでのシナリオ
支圧先行型	B-R3B0	<u>リベットの全支圧面の降伏</u>
	B-R2B1-O	取替えボルト穴付近の局所的なすべり→ <u>リベットの全支圧面の降伏</u> →リベットが変形しながらすべりだす→ボルトの支圧状態
	B-R2B1-M	
	B-R2B1-I	取替えボルト穴付近の局所的なすべりと同時にリベットの全支圧面の降伏 →リベットが変形しながらすべりだす→ボルトの支圧状態
	B-R1B2-OM	
	B-R1B2-MI	
せん断先行型	B-R0B3	<u>明確なすべりの発生</u>
	S-R3B0	<u>リベットのせん断作用面の降伏</u>
	S-R2B1-O	取替えボルト穴付近のすべり→ <u>リベットのせん断作用面の降伏</u> →リベットが変形しながらすべりだす→ボルトの支圧状態
	S-R2B1-M	
	S-R2B1-I	取替えボルト穴付近のすべりと同時にリベットのせん断作用面の降伏 →リベットが変形しながらすべりだす→ボルトの支圧状態
	SR1B2-OM	
	S-R1B2-MI	
	S-R0B3	<u>明確なすべりの発生</u>

*太字下線で表示している部分が継手の耐力と定義した。

ある。図-6 および図-8 中には継手耐力となる荷重を赤色で記している。支圧先行型およびせん断先行型におけるリベット降伏時の相当応力コンター図の一例を図-9 に示す。図-9 に示すような状態となったときを、リベットの支圧力作用面全面の要素が降伏点以上の応力状態 (図-9 (a))、またはせん断力作用面全断面の要素が降伏点以上の応力状態 (図-9 (b)) とした。

まず、支圧先行型の解析結果の考察を行う。表-4 より、支圧先行型では、高力ボルトのみの B-R0B3 およびリベットのみの B-R3B0 とともに、解析によって算出された耐力がほぼ耐力の簡易計算値と一致しており、良好な解析結果が得られていることがわかる。また、部分的に取り替えたケースの耐力の簡易計算値と解析値を比較すると、概ね傾向はとらえているが、解析値では、取替え位置によって差異がみられる。1 本取替えのケースにおいて、図-5, 6 から、ほとんど同じ挙動をしているが、耐力に若干の差異がみられる。外側1本取替えのケースがリベットのみのケースや、他の2ケースの耐力に比べ小さい値となり、耐力の簡易計算値とも差が大きくなっている。また、他の2ケースの解析における耐力はほぼ同じ値となった。この原因として、外側を高力ボルト摩擦接合に取替えたモデルでは、継手のすべり耐力/降伏耐力比 β が0.87ということが影響し、外側のボルト孔付近に局所的な降伏が発生し⁹⁾、リベットが降伏する前にすべりが生じ、それに伴い、他のケースに比べ耐力が小さくなったと考えられる。また、表-5 には、継手耐力が決まるまでのシナリオを示す (1 本取替えを例に各イベントを図-6, 8 中にも示した)。表-5 より、リベット降伏の前に、ボルト孔周辺の局所的なすべりが発生しており、その後、リベットの降伏が生じ、リベット降伏後もリベットの変形とともに徐々にすべり続けている。この、局所的なすべりの発生は、ボルト孔付近の局所的な降伏に起因したものである。なお、この局所

的なすべりの発生は、接合面のボルト孔付近の変位量を抽出し判定した。2 本取替えのケースでは、B-R1B2-I および B-R1B2-O の2 ケースとも、リベットのみのケースの耐力を上回っており、高力ボルトのみのすべり耐力に近い値となる。また、耐力の簡易計算値とも近い値となった。その2 ケースを比べると耐力に差異が見られ、外側中間を取り替えたケースのほうが、耐力が小さい。これも、1 本取替えのケースと同様に外側ボルト孔の局所的な降伏が影響している。さらに、2 本取替えのケースもすべりは生じている。こちらのケースでは、1 本取替えに比べ、すべりが明確に生じており、取替えボルト孔周辺の局所的なすべりが生じた直後、リベットが降伏し、その後、継手全体の明確なすべりが発生している。

せん断先行型については、表-4 および図-7, 8 から高力ボルトのみの S-R0B3 およびリベットのみの S-R3B0 において、解析値と耐力の簡易計算値は、概ね一致している。また、部分取替えのケースにおいても、解析値を耐力の簡易計算値と比較すると、概ね傾向をとらえていることがわかる。1 本取替えの3 ケースでは、耐力値に差異が見られ、中間を取り替えたケースの耐力が、リベットのみのケースの耐力とほぼ同等であったが、その他の位置に高力ボルトを配置したケースは、リベットのみのケースの耐力をわずかに下回っていることがわかる。この原因としては、高力ボルト支圧接合継手の研究¹⁰⁾で報告されているが、継手に作用するせん断力に対して、全てのボルトが均等に抵抗しているのではなく、内側と外側のボルトがより多くのせん断力を継手に伝達していることが示されており、部分的に取替えた継手においても、同様のことが考えられる。また、2 本取替えケースについては、いずれのケースも、リベット継手の耐力値を上回っており、ほぼ同じ挙動を示していることがわかる。このことから、せん断先行型では、母材ボルト孔周辺の局所的な降伏の影響はあまり無いと

考えられる。また、表-5に示すように、すべり現象は、こちらのシリーズでも見られ、1本、2本取替えのケース共に、支圧先行型のシリーズとほぼ同じ挙動を示していた。

4. まとめ

本研究では、高力ボルト摩擦接合として腐食などにより損傷したリベット継手のリベットの一部を高力ボルトに取替えた補修継手の簡易計算耐力値の検討、ならびに力学的挙動をFEM解析によって検討を行った。本研究で得られた主な結果、および今後の課題を以下に示す。

- 1) 道路橋示方書で与えられる許容応力度を用いてリベット継手、ならびに、それに対応する高力ボルト摩擦接合継手の許容力を、すべり係数0.25を用い、それぞれ試算した結果、高力ボルトへの取替え補修ができない場合が多く存在することを明らかにした。また、リベット材の降伏点を、同等の一般鋼材と同じSV330で 195N/mm^2 、SV440で 235N/mm^2 と仮定し、耐力の簡易計算値を試算した結果、ほとんどのケースで高力ボルト摩擦接合による取替えが可能であり、許容力による検討結果に比べ、補修可能なケースが増大することがわかった。
- 2) FEM解析にて全数もしくは部分的に高力ボルト摩擦接合に取替えたリベット継手の耐力を算出した結果、1本取り替えの場合と、2本取り替えの場合との比較では、2本取替えの方が、耐力が大きくなり、全て高力ボルトとした高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に近くなることが明らかになった。また、取替え位置の影響で、耐力に3~8%程度の差異が見られた。
- 3) 部分的にリベットを高力ボルト摩擦接合に取り替えたケースでは、高力ボルトの周辺ですべりが生じており、1本取替えのケースでは、ボルト孔周辺の局所的なすべりの後、リベットの降伏、その後リベットの変形と共に継手全体のすべりが発生するという挙動を見い出した。2本取替えのケースでは、局所的なすべりが発生すると同時にリベットが降伏し、その後、リベットが変形しながら、継手全体の明確なすべりとなっていくことが明らかになった。
- 4) リベットを高力ボルト摩擦接合に取り替える位置によって、継手耐力に若干の違いが見られた。これは多列の継手において、さらに顕著に出てくる可能性があり、今後、実際の適用を考えるにあたっては多列継手の場合の検討が必要であることがわかった。

- 5) 部分取替え継手の解析結果より、1本取替えの場合、継手耐力が元のリベット継手の耐力値を下回るケースがあり、注意が必要である。2本取替えの場合、すべてのケースで、リベット継手の耐力値を上回り、取替え補修は可能であることがわかった。
- 6) 部分的に取替え補修をした場合、耐力の簡易計算値と解析による耐力値とが概ね一致したことから、本研究で用いたすべり耐力とリベット耐力、それぞれの値を単純に足し合わせる簡易な算定方法で、部分的に取替えた場合の継手の耐力を、ある程度予測できることを明らかにした。
- 7) 本研究では、解析的に検討を行なったが、その際、リベット継手のすべり係数やリベット材の降伏点を仮定している。今後は、載荷実験を行い、種々の仮定値を用いている解析結果の検証を行うとともに、必要なら、その高精度化について検討する必要があることがわかった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：支圧接合用打込み式高力ボルト・六角ナット・平座金のセット，1983.
- 2) 柿本祥子，藤井 堅，皆田 理，勝野壽男，梶本勝也，田中雅人：腐食したリベットのHT ボルト取替え補修における継手の力学挙動，土木学会第 57 回年次学術講演会，I -274，pp.547-548，2002.9.
- 3) 川合幸三，寺尾圭史：樹脂を注入した高力ボルト継手の支圧挙動に関する実験的研究，土木学会第 57 回年次学術講演会，I -127，pp.253-254，2002.9.
- 4) 内藤 繁，高橋和也，斉藤行雄，所 真吾：35 年間使用したリベット継手の基本性能調査，土木学会第 62 回年次学術講演会，I -248，pp.491-492，2007.9.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（昭和 48 年度版），II 鋼橋編，1973.2.
- 6) 日本鋼構造協会：鋼構造接合資料集成ーリベット接合・高力ボルト接合，技報堂，1977.
- 7) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），2006.12.
- 8) Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. : ABAQUS / Standard User's Manual Volume I -III Ver.6.5, 2005.
- 9) 山口隆司，森 猛，橋本国太郎：高力ボルト摩擦接合継手のすべり強度/降伏強度比とすべり係数に関する検討，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1737-1748，2005.3.
- 10) 谷口佑也，亀井義典，奈良敬：高力ボルトの列数が支圧接合の荷重伝達機構に及ぼす影響，土木学会第 62 回年次学術講演会，I -243，pp.481-482，2007.9.

（2007 年 9 月 18 日受付）