橋梁の応急的な補修を想定した万力摩擦接合に関する基礎的実験

Exprimental study on emergency repair for bridge members using frictional connections by vises

橋本国太郎*,山口隆司**,北田俊行***,鈴木康夫****,山本 剛***** Kunitaro Hashimoto, Takashi Yamaguchi, Toshiyuki Kitada, Yasuo Suzuki, Tsuyoshi Yamamoto

*修士(工学),京都大学大学院助教,社会基盤工学専攻(〒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,工学研究科都市系専攻(〒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,工学研究科都市系専攻(〒558-8585大阪市住吉区杉本町 3-3-138)
****博士(工学),宇都宮大学助教,工学部建設学科(〒321-8585宇都宮市陽東 7-1-2)
*****国土交通省近畿地方整備局 近畿技術事務所(〒573-0166枚方市山田池北町 11-1)

In this study, it is proposed to use frictional connections by vises for the repair of bridge members, such as temporary joints in which corroded rivets or high strength bolts are replaced to new ones and for emergency repairs of members where fatigue cracks are detected. The tensile loading tests and the cyclic tensile loading tests are carried out to confirm the slip behavior of the frictional connections by vises. In the experiment, three types of specimens are prepared, a single frictional surface of vised joints, two frictional surfaces of vised joints and high strength frictional bolted connections. It is found that the vised frictional specimens have the same slip coefficient as that of the high strength bolted frictional specimens. However, it is necessary to investigate the appropriate value of installation torque for the vised frictional joints in case of the emergency repairs of bridge members.

Key Words: vises, frictional connections, emergency repairs キーワード: 万力, 摩擦接合, 応急補修

1. はじめに

近年, 架設後 40 年以上経過した鋼橋の増加とあいま って、それらの腐食や疲労といった問題が顕在化してき ており、橋梁部材の補修や補強などの維持管理技術に関 する研究の重要性が増してきている. 今後, 急激に増加 すると予想される老朽化した橋梁に対する補修や補強 方法の確立は急務である. 特に, 損傷発生時における応 急対策的な補修法の確立は、交通機能維持の観点からも、 重要な課題である. そのような橋梁の応急補修・補強法 の一つとして,疲労き裂部の補修¹⁾,腐食したリベット や高力ボルト継手部の取替え補修2,あるいは強度不足 の部材の応急補強などに、図-1に示すような万力を用 いた摩擦接合で仮止めする方法が考えられている.しか し、このような接合法の性能に関する詳細な検討はなさ れておらず、十分なすべり耐力を確保できるのか否か、 不明確な点も多い. しかしながら, 実際の部材接合法と して、一時的にでも適用するためには、これらの検討は 欠かせない.

そこで、本研究では、万力による摩擦接合継手のすべ



_____High Strength Bolts

(b) Temporary repair for corroded high strength bolts by vises

図-1 補修例

り耐力を、実際の使用条件に近い実験供試体を製作し、 載荷実験により確認することを目的としている.また、 その実験結果から実際の補修時に適用可能かどうかの 検討を行なう.



写真-1 使用した万力





写真-3 シャコ万力

表-1 実験供試体の内訳

実験供試体		接合面		万力	高力ボルト			載荷	設計すべり耐力*	すべり耐力/降
供試体名	数	数	処理方法	数(片側)	数(片側)	材質	径	方法	(kN)	伏耐力比*
V1	3	1	黒皮	2	0		_	単調		
V2	3	2	黒皮	2	0	-	_	単調	-	-
HB2	3	2	黒皮	0	2	F10T	M22	単調	205	0.413
V1-r	1	1	黒皮	2	0	-	-	繰返し	—	—
V2-r	1	2	黒皮	2	0	-	—	繰返し	—	—

*すべり係数0.25 として算定.



図-2 供試体概要(V1シリーズ,寸法単位mm)

2. 実験供試体

実験に使用した万力を写真-1に示す.本研究で使用 した万力はブルマン社製³⁾のもので,締め付け用ボルト により,被締結材を固定する構造となっている.万力本 体の材質はS45C,締め付け用ボルトの材質は,F10T高 カボルトに相当する強度を有している.締め付け用ボル トの先端は写真-2のような凹凸加工が施され,軸力導 入後にはボルトと被締結材との間ですべりが発生しに くい構造となっている. 仕様では, 導入軸力はトルク値 にて管理することになっており, その値は300N・m であ る. 本研究では,継手の板厚の合計が60mmとなるため, C-60型を使用した. このブルマン社製の万力は, 建設現 場の仮設部材の接合などで用いられている実績がある. 通常使用されているシャコ万力(写真-3)では, 導入 できる圧縮軸力がかなり小さい. しかし, 本研究で用い た万力は, 用いている材質が高力ボルト並みの高強度材 料であることから, 通常の高力ボルトと同等の圧縮軸力



図-3 万力のひずみゲージ貼位置および寸法(寸法単位:mm)

を導入できる可能性がある.ただし、仕様においては高 カボルトと同等の軸力を導入することを想定していな い.

表-1 には実験供試体の種類を、また、図-2 には実 験供試体の概要図を示す.実験供試体の母材ならびに連 結板の材質はSS400である.実験供試体は1面摩擦継手, 2 面摩擦継手、および高力ボルトによる2 面摩擦継手の 3 種類とし、すべり係数のばらつきを考慮して、1 種類 につき3体ずつの供試体を製作した. 製作した供試体の 総数は9体である.また、実際の適用にあたっては繰り 返し荷重の載荷が想定されることから、繰返し荷重を載 荷した実験も行なった.ただし、この繰返し実験は最も 厳しい状態を想定し、一度使用した万力摩擦接合の供試 体を再利用した. 高力ボルト摩擦接合継手は万力摩擦接 合との比較のために用意した.使用した高力ボルトは, サイズ M22, 材質 F10T である. また, 摩擦接合面の表 面処理は、表面処理をまったく行わない黒皮状態とした. この表面処理とした理由は、リベット継手部の取替え補 修時や疲労き裂部の応急補修に適用する場合、接合面処 理をしていない、もしくはできない場合が想定されるの で、接合面としてはすべり係数が低い接合面状態である 黒皮状態を採用した、母材厚 (28mm), 連結板厚 (16mm: 2 面摩擦, 32mm:1 面摩擦) および板幅 (100mm) 等は, 母材の降伏が生じないように、降伏する前にすべりが発 生するような設計としている.参考までに、表-1中に は、すべり耐力およびすべり耐力/降伏耐力比 β も記載 した.

なお、図-2 に示すように、万力を用いた供試体についても、ボルト穴を開けている.これは、高力ボルト摩擦接合継手の供試体と比較する際、すべり係数に対して、継手形状の影響を無くすためである.



写真-4 万力のキャリブレーション状況

3. 実験方法

実験は、通常の高力ボルト摩擦接合の試験と同様に、 軸力導入後、引張試験機にて、供試体にすべりが生じる まで、引張荷重を載荷する.高力ボルト摩擦接合供試体 の高力ボルトへの軸力の導入は、通常のトルク管理では なく、厳密に軸力を測定するため、事前にキャリブレー ションを行ない、所定の軸力に対するボルト軸平行部の ひずみ値を把握することで、所定の軸力を導入している. ここでは、高力ボルトの軸部にひずみゲージを2枚貼付 し、事前にキャリブレーションを行なった.一方、万力 供試体の締め付けボルトには、管理トルク値が300N・m と設定されている³.しかし、トルク係数が不明であり、 管理トルク値が導入されたときの軸力が不明である。そ のためすべり係数の算定等ができない、そこで、高力ボ ルトと同様にキャリブレーションを行なうことにした. 万力に使用されているボルトの軸部にはひずみゲージ





図-5 繰返し載荷のパターン

を貼るスペースが無いため、ひずみゲージは、万力本体 に貼ることとし、ひずみが大きく生じると予想される箇 所に貼付した.ひずみゲージの貼付位置を図-3に示す. キャリブレーションは写真-4に示すように、ボルトヘ ッドに圧縮力を加えて行なった.キャリブレーション結 果の一例を図-4に示す.図-4に示すように、荷重と ひずみとの関係は、線形挙動を示していることから、ひ ずみの値から導入軸力が推定できることがわかる.以下、 ひずみ値からキャリブレーション結果をもとに換算し た軸力を換算軸力と呼ぶ.

実験で測定する項目は、荷重、変位、および万力もし くは高力ボルトのひずみである. なお、変位は万能試験 機の変位、および図-2 中に示すように、クリップ式変 位計を母材と母材の間に2つ設置し、母材同士の相対的 な変位を測定した.

繰返し荷重の載荷は、単調載荷試験の結果から、その すべり荷重の半分程度の荷重を最大荷重、また、万能試 験機のチャックが緩まない程度の荷重 5~10kN を最小 荷重として、その荷重範囲で3回繰返した後、すべりが 生じなければ、すべりが生じるまで、荷重を単調増加さ せた.繰返しパターンを図-5に示す.



写真-5 載荷状況 (V1 シリーズ)

4. 実験結果およびその考察

実験状況を写真-5,実験結果を表-2に示す.また, 万力供試体の荷重と母材間の相対変位との関係の一例 を図-6および図-7に,荷重と万力の換算軸力との関 係を図-8および図-9に示す.また,高力ボルト摩擦 接合供試体の荷重とボルト換算軸力との関係を図-10 に示す.

表-2より、すべての供試体のすべり係数の平均値は 0.36であり、道路橋示方書で要求される0.4以下となり、 接合面処理を施していないすべり試験の結果としては、 妥当な結果であることがわかる.また、高力ボルト摩擦 接合供試体の結果と、2面摩擦の万力摩擦接合供試体の 結果を比較すると、ほぼ同等のすべり係数が得られてい る.しかし、高力ボルト摩擦接合供試体に比べ、2面摩 擦の万力摩擦接合供試体のすべり荷重が1/3~1/4程度と かなり小さい値であることがわかる.本実験では、万力 の管理トルク値である300N・mを導入しており、キャリ ブレーション結果から、軸力に換算すると50~70kN で ある.この導入軸力が高力ボルトの導入軸力(230kN程 度)に比べ、かなり小さいことから、このような結果と なったことがわかる.しかしながら、万力に使用してい

表-2 実験結果

シリーズ名	供試体名	導入軸力1	導入軸力2	すべり係数	すべり荷重	標準偏差	変動係数
	V1-1	79.37	73.07	0.434	66.43		0.099
3.71	V1-2	72.40	74.65	0.349	71.61	0.029	
V1	V1-3	71.02	65.39	0.360	68.81	0.038	
	Avg	74.26	71.04	0.38	68.95		
	V2-1	62.78	88.97	0.414	68.27		0.131
V9	V2-2	68.96	89.11	0.322	73.52	0.046	
V Z	V2-3	61.99	87.85	0.313	70.91	0.040	
	Avg	64.58	88.64	0.35	70.90		
	HB2-1	232.22	231.63	0.274	254.3	0.050	0.146
LID0	HB2-2	238.26	231.45	0.374	351.5		
TIDZ	HB2-3	234.08	223.25	0.386	353.2	0.050	
	Avg	234.85	228.78	0.34	319.67		
V1-r	V1-r	45.21	49.33	38.6	0.408	_	_
V2-r	V2-r	48.11	49.03	70.9	0.365	_	_



図-8 荷重 - 締め付けボルト換算軸力関係 (V1 シリーズ)

る締結用ボルトが高力ボルト相当の材料で構成されて いること、また、軸力導入時の万力のひずみ値が降伏ひ ずみに対して半分程度ということから、あと2倍程度の トルクの導入は可能であると考えられる.

それぞれのシリーズ毎の結果を見ると、表-2のすべ り係数の標準偏差から若干のばらつきは見られるが、鋼 構造接合資料集成⁴に記載されている、黒皮つき高力ボ ルト摩擦接合試験のすべり係数の標準偏差が0.07、変動 係数は0.21程度であり、本実験結果は、妥当な結果と考 えられる.また、図-6の万力供試体の荷重-変位関係 から、すべり後の荷重増加率に差異が見られるものの、 初期すべり後、荷重が徐々に増加していくという共通の 傾向を示している(V1-1およびV2-1の変位はクリップ 式変位計の不具合から測定できていない.).

さらに、図-8、図-9の荷重-締め付けボルト換算軸 カ曲線を比較すると、各シリーズ内では、増加率に差異 が見られるが、万力供試体では、すべり発生後に、換算 軸力が低下していき、V1シリーズではある荷重段階で、 増加に転じ、V2 シリーズでは変化しなくなる. なお、 V1-1 および V2-1 については初期すべり発生後、しばら





くして載荷を止めたため、換算軸力が増加し始めて以降 の挙動は計測していない.万力の換算軸力が低下する理 由として、ポアソン比の影響で母材は板厚方向にも弾性 変形し、板厚が減少した分、万力に作用している引張ひ ずみが減少したためと考えられる.また、V1 シリーズ では、換算軸力が増加しているが、これは、すべりが生 じ、継手の変位が増加していくに従い、万力自体がせん

-579-



写真-6 万力用ボルトによる圧痕

断変形もしくはねじり変形していき、ひずみゲージを貼付した部位のひずみも増加したためと考えられる。今回 のひずみゲージを貼付した位置では、万力本体にボルト 軸方向以外の力が作用した場合もひずみが増加するた め、注意が必要である。

また,高力ボルトの換算軸力の変化は、ほぼ同等な傾向を示していたため、図-10 に一例のみを示している. 図-10 から、ボルト換算軸力が徐々に減少し、すべり発生後、さらに換算軸力減少量が増加していく傾向にある. これらの荷重の変化やボルト換算軸力の変化の傾向は、 一般的に行われている高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験と同じ傾向であった.この高力ボルト換算軸力の 変化と V2 シリーズの換算軸力の変化とを比較すると、

すべり発生後,換算軸力が減少するなどの同様の傾向が みられる.このことからも、V1 シリーズの換算軸力の 増加は、ボルト軸方向力以外の力が発生していると推察 できる.

万力摩擦接合において、1 面摩擦と2 面摩擦との場合 を比較すると、1 面摩擦のほうが2 面摩擦に比べ、すべ り係数が大きいことがわかる(表-2). これは、1 面摩 擦の場合、万力のボルト先端の凹凸部分が鋼板に食い込 み、それによってせん断抵抗が増したと考えられる.2 面摩擦では、万力のボルト先端部が母材に直接食い込む ことがないため、1 面摩擦に比べ、せん断力に対する抵 抗が小さくなったと考えられる.写真-6 に実験終了後 の万力用ボルトが食い込んだ痕の接合面を示す.これを 見ても、ボルト先端がしっかりと食い込んでいたことが わかる.

さらに、図-6から、1面摩擦および2面摩擦ともに、 最初の主すべりが生じた時、荷重が大きく減少し、その 後、すべりを何度も起こしながら荷重が徐々に増加して いるのがわかる.この荷重の増加の理由として、実験後 に供試体を調べたところ、1面摩擦の場合、万力が母材 および連結板の側面に当たっていたこと、また、万力先 端が母材および連結板に食い込んでいるため、変位が大

きくなるに従い、万力ボルトのせん断剛性が加わること も要因の一つと考えられる.2 面摩擦の場合も、万力が 連結板の側面に当たっていたことがわかった. また, 万 力の設置位置が供試体の中心線から少しずれていたこ ともあり、すべりが進行し、母材が引っ張られると、万 力が連結板に当たり、万力のねじりもしくはせん断の剛 性が継手に加わることで、荷重-変位曲線に影響したと 推測できる. 万力が連結板もしくは母材に当たらなかっ た場合は、1 面摩擦においては、万力用ボルト先端が母 材に食い込んでいることから、万力の剛性も加わり、荷 重は多少増加すると考えられる.一方,2面摩擦では、 すべりが生じた後,母材が徐々に抜け出していくため, 荷重は一定値のまま、もしくは減少した後、一定値に収 束しながら、変位が増大していくと考えられる.また、 今回の実験で1 面摩擦の場合,対称断面ではないため, 2 面摩擦に比べ、曲げの影響が生じる. ただし、本実験 における供試体の母材、連結板の板厚が厚いため、曲げ の影響があまり生じなかったと考えられる.しかし、今 後,薄い板を1面摩擦で使用する際は、曲げの影響を検 討する必要がある.

表-2より, 繰返し載荷がすべり係数に与える影響は, すべり荷重よりも小さい荷重範囲の繰返しでは, ほとん どないと考えられる. 図-7より, 繰り返し載荷の供試 体では, 初期すべりが発生した後の挙動が, 単調載荷の 供試体と違い, 小刻みな荷重の変動がほとんどなく, す べり音もほとんどなかったことがわかる. 特に, 供試体 V2-rでは, 荷重の低下やすべり音など明確なすべり挙 動が見られなかったが, 70kN 付近から徐々に変位が大 きくなっていた. また, 初期すべり後の微少すべりがな くなっていた. これは, 繰り返し荷重を載荷した供試体 が, 一度単調載荷に使用した供試体を再使用したため, その分, 接合面が平滑化していたためと考えられる.

5. 補修時における使用方法の検討

これまでの実験結果を踏まえ,高力ボルトならびにリ ベット取替えの補修時や疲労き裂の応急補修時に,万力 摩擦接合が適用できるかどうかの検討を行なった.

まず,高力ボルト摩擦接合継手の取替え補修時の場合, 実験結果でも比較したとおり,M22高力ボルトを使用し た摩擦接合継手に対して,万力摩擦接合のすべり荷重が 1/3~1/4であった.つまりM22高力ボルト1本に対して, 現状の万力用ボルトの管理トルク値300N・mでは,万力 が3~4個必要であることがわかる.

リベット継手の補修時でも上述の考えと同様にリベ ット1本あたりの負担荷重に対して、必要な万力の数を 算出し、補修時に継手がすべらないよう配置しなければ ならない.ただし、リベット継手の場合、継手の設計が すべりではなく、リベットの支圧もしくはせん断による 設計となっている. 摩擦接合継手と支圧接合継手では, 荷重伝達機構が異なるため,その力学的挙動に違いがあ る可能性がある. そのことを十分に検討して,万力を使 用する必要があると考えられる.

最後に、疲労き裂に対して応急的な補修をする場合, I桁の下フランジなどの自由突出部材に対して補修を行 うことになると考えられるが、この場合も下フランジに 使用されている高力ボルト継手と比較して 3~4 倍の個 数が必要になってくると考えられる.そのため、万力を 設置できるスペースの検討も必要である.

実際の適用にあたっては、設置スペースの問題が生じ てくることもあり、できるだけ万力の個数を減らすこと が望ましい.万力の個数を減らすには、導入軸力を万力 の仕様である300N・m以上導入しなければいけない.現 状の導入トルク300N・mに対し、万力に発生するひずみ は700~900µである.万力本体の材質S45Cでは基準降 伏点が345N/mm²であることから降伏ひずみは1725µと なる.したがって、現状の導入トルクである300N・mの 2倍程度の600N・mは導入が可能であり、そのときの導 入軸力は100~140kNである.M22高力ボルトと同等の 軸力を導入するには、そのさらに2倍程度の軸力を導入 する必要がある.したがって現状の万力では、高力ボル ト並みの軸力を導入するのは不可能であり、万力本体の 構造的な改良、もしくは万力本体の材質をSCM材

(SCM440 で基準降伏点 835N/mm²) にするなど材質の 変更が必要である.

しかしながら,損傷が小さい部材の応急補修や,損傷 はないが強度不足の部材の応急補強では,着目部材の 100%の断面力の伝達は必要でない.このような場合には, 不足している断面力にもよるが,現状の万力でも十分に 利用できる場合もあると考えられる.また,現状の万力 では,万力が挟みこめるような 200mm 程度の突出幅を 持つ自由突出部材に適用は可能である.

6. まとめ

本研究では、疲労き裂の応急的な補修や、高力ボルト やリベット継手部の取替え時の仮止めなどとして、万力 摩擦接合を使用することを提案し、その接合法における 代表的な力学挙動であるすべり挙動を明らかにするた めに実験的検討を行なった。得られた結果、および今後 の課題を以下に示す。

- 黒皮付きの接合面を有する万力摩擦接合(2面)は 高力ボルト摩擦接合(2面)の場合と同様のすべり係 数が得られることがわかった。
- 2) 万力摩擦接合において1面摩擦と2面摩擦とを比較 すると、1面摩擦のほうが、①すべり係数が大きい、 ②すべり後、万力の換算軸力が増加するといった特

徴があることがわかった.これらの理由として,万 カ用ボルトのせん断抵抗の影響,ならびに万力のせ ん断,もしくは,ねじりによるひずみの増加が原因 であると考察した.

- 3) 万力摩擦接合において、すべり発生後、荷重が増加 している理由として、1 面摩擦の場合、万力が母材お よび連結板に、2 面摩擦の場合、万力が連結板にあたり、継手に万力自体の剛性が付加されたことが原因 と考えられる。
- 万力の管理トルク値 300N・m では、高力ボルトの 1/4~1/3 程度のすべり荷重しか得られないことを明 らかにした。
- 5) 繰返し載荷を行なったが, すべり荷重の半分程度の 荷重であれば, すべりは発生せず, 使用上問題ない ことを確認した.
- 6) 高力ボルト摩擦接合継手および疲労き裂の補修に際しては、現状の万力において、定められたトルクを導入する場合、万力の使用本数が高力ボルトに対して多くなることがわかった.そのため、設置する万力の個数を減らすには、現状の導入トルク値を見直し、高力ボルト並みの軸力を導入できるよう、構造的もしくは材料的な万力の改良が必要であることを明らかにした.しかし、現状の万力でも、少しでも応力を低減する必要のある場合や、主桁下フランジに代表される200mm程度の突出幅を持つ自由突出部材など限定された部材などでは、適用は可能であると考えられる.
- 7)実構造物への適用にあたっては、万力に導入される 軸力の確認方法、低下特性についても検討しておく 必要がある.

謝辞

本研究で行なった実験では、大阪市立大学大学院橋梁 工学研究室の学生諸君に多大な協力を得た.ここに記し て感謝の意を表します.

参考文献

- 坂野昌弘,尾山 淳,中野大治,並木宏徳: 亀裂を生じた鉄道古桁の高性能万力による補強,土木学会第57回 年次学術講演会概要集,I-180, pp.359-360, 2002.9.
- 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) ブルマン株式会社:ブルマン工法技術資料.
- 4) 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.

(2007年9月18日受付)