

レーザー孔を用いた高力ボルト摩擦接合継手の残存軸力とすべり耐力

建設構造研究室 吉田 直広
指 導 教 官 岩崎 英治
長井 正嗣

1. 序論

橋梁用鋼板の切断方法として、ガス切断法、プラズマアーク切断法およびレーザー切断法が一般的である。この中でレーザー切断法は、最も加工精度が良く、歪みを少なくする切断方法として用いられている。また、最近、板厚が 20mm を越える切断能力を持ったレーザー切断の開発がされた。このことより、レーザー切断機を導入する橋梁会社が多くなっている。レーザー切断は、輪郭切断のほか、孔あけ加工も可能であるがレーザー加工をしたボルト孔の継手性能が明確でないため実用化されていない。

現在の鋼橋製作メーカーの製造ラインは、切断工程と孔あけ工程を別ステージで施工し、各工程間の部材ハンドリングは、作業者がローラコンベアやクレーン等を操作し、工程毎に作業原点位置指示を行い施工するのが一般的である。したがって、今後の製造ライン合理化のためには、各工程間のハンドリング自動制御が必須であるが、橋梁の構造部材は、形状寸法が各工事で異なる大型多品種少量生産部材であるため、部材ハンドリング作業の自動制御を適用しづらい特徴がある。一方、今回のレーザー孔あけの品質およびコスト課題が解決されれば、切断・孔あけ工程の 1 ステージ作業が可能となり、1 つの製造方法として無人化作業が実現できることとなる。

現行の道路橋示方書では、主要部材の切断、切削は原則として自動ガス切断により行うものとし、品質が確保された場合に、プラズマアーク切断法あるいはレーザー切断法などによる自動切断法を用いてよいとされている。また、孔あけについては、所定の径に孔あけする場合は、ドリル又はドリルとリーマ通しの併用によるものとし、二次部材で板厚 16mm 以下の材片の孔あけは、押し

抜きにより行ってよいとされている。鋼道路橋の疲労設計指針においては、孔を押し抜きせん断加工した場合、強度等級を 1 等級低減すれば適用可能とされている。

これらのことより、レーザー切断による孔あけ加工が、設計で要求される機械的性質などの特性を確保し、継手強度が確保できれば、押し抜きせん断加工同様に用いることが可能であると判断できる。また、レーザーによる局所的な入熱により孔周りの硬化や、溶損ノッチが入るといった問題があるため、これらが継手性能に与える影響を明らかにする必要がある。そこで本研究では残存軸力とすべり耐力に着目して、レーザー加工の高力ボルト摩擦接合継手への適用が可能であるか検討を行う。

2. レーザー切断による孔あけの概要

レーザー切断による孔あけ加工は、中央に貫通孔を通した後に所定の径となるように切断するため、写真-1 のような切断状況になる。また、切断の最後に孔内の鋼材が多少ずれることがあり、写真-2 のような溶損ノッチが残ることがある。本研究ではこのような比較的大きな溶損ノッチがある試験体も省かず試験を行っている。



写真-1 切断状況



写真-2 溶損ノッチ

レーザ切断による孔あけ加工は、ドリル孔と異なり切断時に孔周辺に入熱硬化が生じる。参考資料として、表-1 にガス切断、プラズマアーク切断、レーザ切断の入熱量比較を示す。

表より、レーザ切断の入熱量は、ガス切断に比べて 1/5 程度の値であることが分かる。また、鋼橋技術研究会施工部会で行った硬さ試験によると、孔内面より 0~1.0mm の範囲において硬化が見られる。これらは熱影響による硬化と考えられ SM400B、SM490YB において顕著に現れている。SM570TMC については硬化の度合いが低くドリル孔における硬化と同程度であることが確認されている。

表-1 入熱比較量

切断条件	平均温度 上昇 ()	計測吸熱量 (kJ)	単位吸熱量 (J/mm ²)
ガス	183	85.3	22.5
プラズマ	75	28.2	7.3
レーザ	56.8	15.3	4.1

3. 試験体

本研究で用いた鋼材は、SM400B、SM490YB、SM570TMC の 3 種類である。孔あけはレーザ加工のほかに、一般的なドリル加工のものを用いている。また、すべり耐力試験では、すべてのケースでバリ取りを行っているが、残存軸力試験ではレーザ加工、ドリル加工ともにバリ取りを行ったものとバリ取りを行わないものを用いた。

高力ボルトは M22F10T のボルトの軸部をグラインダーやヤスリで削り、ひずみゲージを貼り付けたのち、ゲージ部分をコーティングしたものをを用いる。

試験体の形状は、母板 19mm、添接板 12mm を用い、この他の試験体形状はすべり耐力 P_s と降伏耐力 P_y の比から定義されるすべり降伏耐力比

が 0.9 前後になるように求めている。なお、すべり耐力 P_s を算出する際には、すべり係数として 0.4 を用いている。また、レーザ加工の場合、溶損ノッチの影響を見るため接触断面が最小になるように配置した。締付けはトルク法で行った。

試験体の形状を図-1、種類を表-2 に示す。

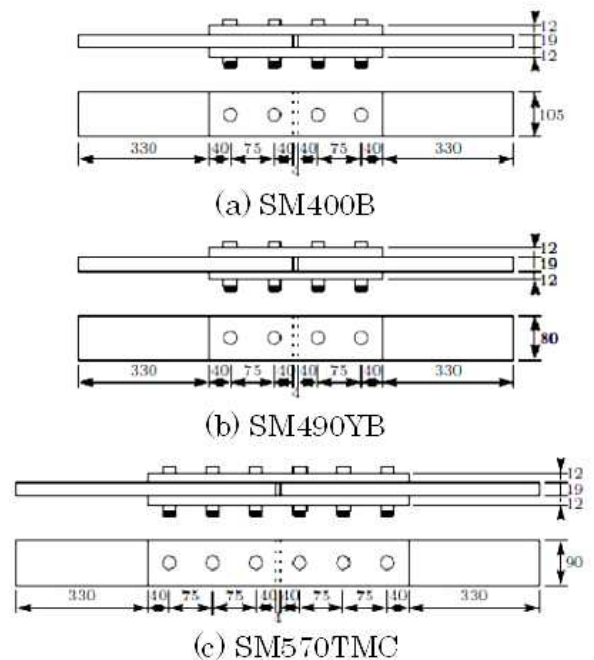


図-1 試験体形状

表-2 試験体の種類

材質	孔あけ	試験体番号
SM400B	レーザ孔	1L-1 ~ 5
	ドリル孔	1D-1 ~ 5
SM490YB	レーザ孔	2L-1 ~ 5
	ドリル孔	2D-1 ~ 5
SM570TMC	レーザ孔	3L-1 ~ 5
	ドリル孔	3D-1 ~ 5

4. 残存軸力試験

残存軸力試験は、ボルト締め付け作業直後から1ヵ月間実施した。鋼材は、孔周りのバリ取りを行った4シリーズと行わない5シリーズを使用し、データ計測は6分、12分、24分...25日、30日のように適当な間隔で行った。一例として、図-2にSM400Bの試験結果を示す。

今回の実験では、どのケースも残存軸力率が96~98%であり、導入軸力の違いによる差はあるが、レーザ加工、ドリル加工の違い、バリ取りの有無による違いはみられなかった。また、全てのケースにおいて1ヵ月の時間経過ではリラクゼーションは収束していなかったため、回帰分析を行ったところ、100年後の残存軸力率はレーザ加工の最も小さいものでも95%程度であり、安全上の問題はないことが分かる。ここでも、レーザ加工とドリル加工の大きな違いは見られなかった。表-3に計測期間で最も小さくなった残存軸力率と100年後の残存軸力率を示す。

表-3 残存軸力率

試験体	計測値	100年後
1L-4	97.23	95.75
1L-5	97.75	96.72
1D-4	96.62	95.15
1D-5	96.4	94.27
2L-4	97.04	95.73
2L-5	97.14	95.53
2D-4	97.43	96.78
2D-5	97.77	97.24
3L-4	97.88	96.60
3L-5	97.40	95.70
3D-4	98.11	97.53
3D-5	97.65	96.66

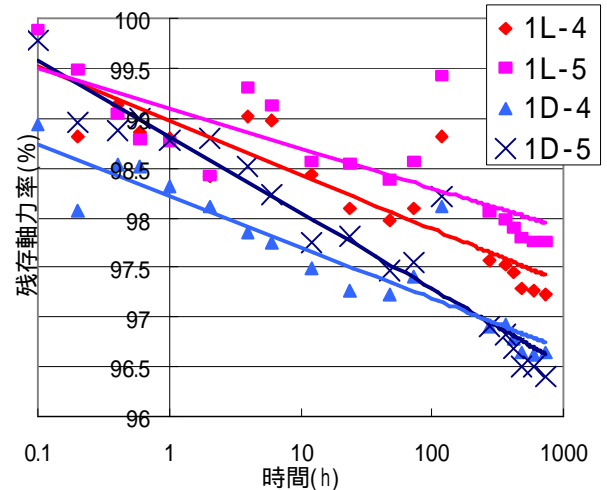


図-2 残存軸力率 (SM400B)

5. すべり耐力試験

すべり耐力試験は、ボルト締め付け作業後、12時間から18時間程度経過した後、万能試験機を用いて行った。すべりは、継手部が滑ったときに発生する大きな音、または開口変位の急激な増加と共に荷重が減り始めたことで判断しており、すべりの上下は目視により確認している。

計測項目は、開口変位、中央部ボルト直上の母材のひずみ、端部ボルト直上の添接板ひずみ、端部母材ひずみとした。また、各ケース1体づつ高力ボルトの軸ひずみを計測している。

計測データは弾性域で5tf毎に記録し、すべり耐力に近づくと2tf毎、中央部ボルト直上の母材のひずみが1000 μ を越えたところで100 μ 毎に記録している。また、中央部ボルト直上の母材のひずみが10000 μ を越えたところで载荷を打ち切っている。ただし、滑る瞬間の計測データを採用することは難しいことから、滑った瞬間の荷重は、万能試験機のピーク値を用いる。

表-4に各試験体のすべり耐力、すべり係数と平均すべり係数を示している。また、一例として、図-3、4にSM570TMCのすべり試験結果を示す。

表より3種類の鋼種共に、レーザ加工による平均すべり係数はドリル加工によるものを上回り、ほぼ同様の値を得ていることから、ドリル加工と同程度の機能を有していることが分かる。

図より，すべり挙動はレーザ加工，ドリル加工のどちらも，一度大きなすべりが発生して，小さなすべりが断続的に起こり，逆側が大きくすべる。その後，再び小さなすべりが断続的に発生し，すべりが収束した後，降伏するということが分かる。

表-4 すべり耐力試験結果

試験体	すべり耐力 (tf)	すべり係数	平均すべり係数
1L-1	45.35	0.543	0.563
1L-2	47.00	0.563	
1L-3	48.75	0.584	
1D-1	44.10	0.528	0.526
1D-2	43.55	0.522	
1D-3	44.65	0.535	
2L-1	48.60	0.582	0.567
2L-2	46.70	0.559	
2L-3	46.82	0.561	
2D-1	43.80	0.525	0.548
2D-2	45.40	0.544	
2D-3	48.00	0.575	
3L-1	74.00	0.591	0.589
3L-2	74.00	0.591	
3L-3	73.15	0.584	
3D-1	71.35	0.570	0.556
3D-2	70.40	0.562	
3D-3	66.95	0.535	

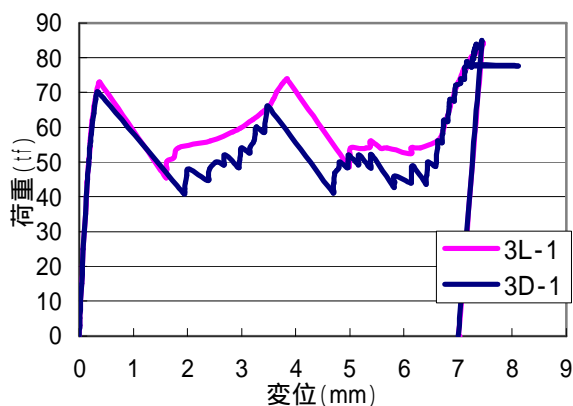


図-3 荷重-変位関係 (SM570TMC)

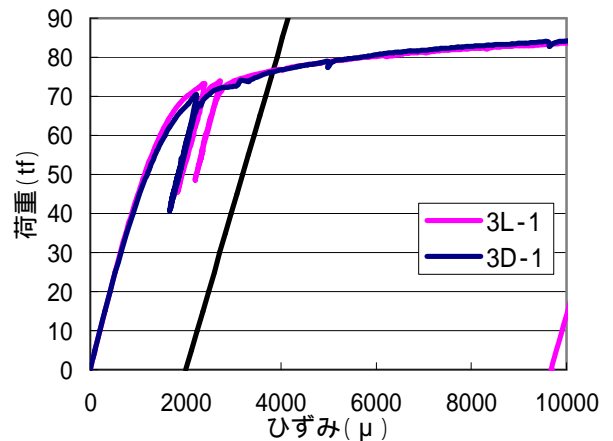


図-4 中央部 荷重-ひずみ関係 (SM570TMC)

6. 結論

残存軸力試験の結果，残存軸力はレーザ加工，ドリル加工の違い，バリ取りの有無による違い，鋼種による違いはみられなかった。

すべり耐力試験の結果，レーザ加工特有の溶損ノッチの影響は見られず，すべての鋼種でレーザ加工による平均すべり係数はドリル加工による値を下回るものではなくほぼ同様の値を得ていた。

また，入熱硬化の大きな SM400B，SM490YB と小さな SM570TMC の間に大きな傾向の違いは見られず，レーザによる入熱硬化の影響は少ないことが分かる。

以上のことから，残存軸力とすべり耐力に関しては，レーザ加工はドリル加工と同程度の機能を有し高力ボルト摩擦接合継手に適用できるといえる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説, I 共通編, 鋼橋編, 2002
- 2) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針, 2002
- 3) 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.1737-1747, 2005.3.