レーザー加工孔を有する高力ボルト摩擦接合継手の すべり耐力と疲労強度

Slip resistance and fatigue strength of friction type of high strength bolted connections with laser cutting holes

岩崎英治* ・山野達也** ・森 猛***

Eiji Iwasaki, Tatsuya Yamano, Takeshi Mori

*正会員 工博 長岡技術科学大学准教授 工学部環境・建設系 (〒 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1) **正会員 高田機工株式会社 技術研究所技術開発課 (〒 649-0111 和歌山県海南市下津町方 1375-1) ***正会員 工博 法政大学教授 工学部都市環境デザイン工学科 (〒 184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

Advantages of laser cutting over drill are the lack of physical contact and the reduction of operations in manufacture. However, loss of material at end-point of cutting line and heat-affected zone are happened. In order to evaluation the slip resistance and fatigue strength of friction type of high strength bolted connections with laser cutting holes, slip and fatigue tests are performed. The test results indicate that the slip resistance and fatigue strength of friction type high strength bolted connection with laser cutting holes are the same as that with drilling holes.

Key Words : laser cutting hole, friction type of high strength bolted connection, slip resistance, fatigue strength

キーワード : レーザー加工孔, 高力ボルト摩擦接合, すべり耐力, 疲労強度

1. はじめに

高力ボルト接合法には,摩擦接合,支圧接合そして 引張接合の3種類がある.これらのうち橋梁構造に最 も多く利用されているのは,高力ボルト摩擦接合継手 である.高力ボルト摩擦接合継手は高い軸力が導入で きる高強度のボルトにより,継手部の鋼材片を締め付 け,それにより生じた材間の摩擦抵抗によって荷重を 伝えるものであり,溶接継手とともに鋼構造物中に使 用される継手型式のなかで代表的なものである.

一般に,部材の切断加工にはガス切断法,プラズマ アーク切断法およびレーザー切断法などが用いられて いる.道路橋示方書 17.3.1 では,主要部材の切断は, 原則として自動ガス切断により行うものとし,品質が 確保される場合には,プラズマアーク切断法あるいは レーザー切断法等による自動切断を行ってもよいとさ れている.一方,孔あけを行う場合には,ドリル又は ドリルとリーマ通しの併用により行い,二次部材で板 厚が16mm 以下の材片の孔あけは押抜きによって行っ てもよいとされている.

押抜きせん断法¹⁾はパンチ孔加工法とも呼ばれ,パ ンチとダイスの間に被加工材を挟みこみ,せん断力を 与えて穴を開ける方法である.パンチ孔加工はドリル 加工に比べて加工速度が速く、工具の磨耗などのラン ニングコストが低い反面,孔加工の精度が悪いという デメリットもある.パンチ入り側で片落ちと呼ばれる 部材の落ち込みやパンチの出側でまくれなどの変形を 起こし,板が厚くなるに従い,精度が悪くなる傾向に ある.

一方,ドリル加工は被加工材よりも硬い材料を用い て表面を削り落としながら円形に切削を施す加工法で あり,パンチ孔加工に比べて加工速度や工具の磨耗と いう点で劣るが,孔の精度がよく,現在幅広く用いら れている孔加工法である.

ドリル孔加工やパンチ孔加工のほかに熱加工による孔 加工法としてガス孔加工,プラズマアーク孔加工,レー ザー孔加工が存在する.熱加工の原理は,鉄の酸化反 応による反応熱を利用したもので,一度,酸化反応が 始まるとその後,熱を与えなくとも切断が継続的に行 われるという原理を用いている.しかし,ガス孔は孔 形状や孔径の精度がよくないため高力ボルト孔として 用いられていない.一方,プラズマアーク孔加工は,あ る程度の板厚まではドリル孔に準じた孔加工が可能で あり,既設構造物の補修工事などにおいて作業空間の 取れない場所での新規の穴あけが必要な場合に用いら れることもある2).レーザー孔加工は,レーザービー ムを集光レンズで細かく絞って切断材料に照射するこ とで切断面を局部的に溶融し, レーザーと同軸に配置 したノズルからアシストガス(補助ガス)を噴き付け、 溶融物を吹き飛ばすことで狭い幅の高精度な切断を行 うことが可能である.これら熱加工のメリットは機械 的加工に比べて非接触加工であるために工具の磨耗が ない,材料の硬度に関係なく切断が可能であることな どが挙げられるが,熱加工による影響により,加工部 材の変形,加工周辺部の入熱硬化,加工精度などの懸 念がある.また,レーザーにより孔あけを行うと,始 終端部に溶損とよばれる大きな傷が発生する.

鋼道路橋の疲労設計指針³⁾では,高力ボルト摩擦接合 継手の疲労強度は B 等級であり,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.押し抜きせん断加工と同様に,レーザー 孔加工が設計で要求される機械的性質等の特性を確保 し継手強度が確保できるものであれば,鋼道路橋のボ ルト孔の加工法として適用できるものと考えられる.

現在の橋梁部材製造ラインでは鋼板の切断において はレーザー切断が多く用いられている.直線切断にお いては機械的な切断加工に比べて加工精度がほぼ同等 のレベルにあることに加えて高速切断が可能であるこ とや工具の磨耗が無いことが大きなメリットとなって いる.一方,孔加工においてはドリル孔加工が多く用 いられている.そのため切断工程と孔あけ工程を別ス テージで行っている工場が多い.部材によっては多段 多列のボルト締めを行っているため,たくさんの円孔 が鋼板に開けられることもある.レーザーによる孔あ けが橋梁部材に適用できれば,切断と孔あけを同じス テージで行うことができ,工程間の運搬などの省力化 が可能であり,導入のメリットが大きい.

百瀬,堀川4)は、レーザー切断された鋼板の疲労強度 を実験的に調べ、レーザー切断された試験片の疲労強 度は,プラズマ切断やセーパーによる機械加工による 疲労強度と同等との結果を得ている.また,市川,正 木ら⁵⁾は,建築構造用の SN 材にレーザー加工を施し た高力ボルト摩擦接合部のすべり係数を実験的に調べ, ドリル孔加工によるすべり係数と同等であり,レーザー 切り込みの位置の違いによる影響も小さいことを明ら かにしている.しかし,溶接構造用のSM材にレーザー 孔加工を施した摩擦接合継手のすべり耐力,疲労強度 やレーザー加工孔の特性を調べた事例は少ない.そこ で,著者らは,レーザー加工孔を有する摩擦接合継手 のすべり耐力⁶⁾,レーザー加工孔を有する鋼板の疲労 強度⁷⁾,レーザー加工孔を有する摩擦接合継手の疲労 強度⁸⁾を調べている.本論文は,これらの結果を纏め 再構成したものである.

本論文は,レーザー孔の特性と,レーザー孔を有す る高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力,疲労強度を 明らかにするために,レーザー加工孔の形状,溶損ノッ チ形状,円孔付近の入熱硬化を示している.また,レー ザー孔加工で生じた円孔に溶損を有する鋼板とドリル 孔加工を施した鋼板を用いて製作した高力ボルト摩擦 接合継手試験体のすべり試験と疲労試験を行い,両者 のすべり耐力,疲労強度と破壊性状を検討している.さ らに,疲労強度に対する溶損位置の向きやそれらの組

表—1 試験体の種類(孔径	: <i>ϕ</i> 24.5mm , 各 1体)
---------------	----------------------------------

試験体	板厚 (mm)	材質	孔あけ
L12-400	12	SM400B	レーザー孔加工
L19-400	19	SM400B	レーザー孔加工
L25-400	25	SM400B	レーザー孔加工
L12-490	12	SM490YB	レーザー孔加工
L19-490	19	SM490YB	レーザー孔加工
L25-490	25	SM490YB	レーザー孔加工
L12-570	12	SM570TMC	レーザー孔加工
L19-570	19	SM570TMC	レーザー孔加工
L25-570	25	SM570TMC	レーザー孔加工
D19-400	19	SM400B	ドリル孔加工
D19-490	19	SM490YB	ドリル孔加工
D19-570	19	SM570TMC	ドリル孔加工

み合わせの影響についても検討している.

2. レーザー加工孔の特性

レーザーによる切断,孔加工では,写真-1(a)のようにレーザー照射開始点にクレータ状の溶損を生じる ことから,孔加工では孔の中央部からレーザー照射を 行い,細い孔を貫通させた後に,円状に切断し,始端 部と終端部を閉じて孔加工を行う.このとき,始端部 と終端部の会合位置の円孔壁面に,写真-1(b)のよう な溶損と呼ばれるノッチ状の傷を生じる.この原因は, レーザーが終端部付近にさしかかると,加工部分の容 積が相対的に減少するため,加工部分が高温になり,他 の切断溝幅に比べて終端のみが切断幅が広くなってし まうこと,アシストガスの噴射力も高温になった終端 部分に作用し過ぎること,また,終端付近で円孔内側 の材料の自重が溶融金属に作用し,落下する際に終端 付近の溶融金属を所定の円孔のサイズを越えて引っ張 り落としてしまうためと考えられている.

円孔終端部付近で,レーザー出力やアシストガスの 噴射力を調整したり,円孔始端と終端で孔形状が凹に なるように切断座標値を調整することで,溶損ノッチ をある程度抑えることも可能であるが,そのような調 整法は確立しておらず,検討の余地があることから,本 論文でのレーザー加工孔ではそのような調整は行って いない.

写真-2(a) にレーザー加工孔壁面と,比較のために 同写真(b) にドリル加工孔壁面の状況を示す.ドリル 加工孔では円周方向に沿った細かな溝が見られるのに 対して,レーザー加工孔では板厚方向にドラグライン と呼ばれる細かな溝が見られる.

2.1 試験体

レーザー孔加工は,ドリル孔加工と加工原理が異な り,加工孔の形状や表面粗さ,入熱硬化などの特性の 違いがある.そこで,これらの特性を明らかにするた



(a) 切断後の状況 (レーザー照射側 (表側) より撮影)



(b) 溶損ノッチ (裏側より撮影)

写真-1 レーザー切断の状況



(a) レーザー加工孔壁面



(b) ドリル加工孔壁面

写真-2 加工孔壁面の状況 (板厚 19mm)

めに,表-1のような3種類の板厚と3種類の材質を用 いた試験体のレーザー孔加工を行う.また,比較のた めに板厚19mmの鋼板を対象に,レーザー加工と同様 に3種類の材質の試験体のドリル孔加工も行う.なお, 橋梁部材切断用に用いられている一般的なレーザー切 断機の発振器出力は2kWから6kWであり,発振器出 力6kWの切断機では,板厚28mmの鋼材まで切断可 能とされている.

試験体は, 図-1 のような 155mm×380mm の鋼板に, M22 サイズのボルト孔を想定して, ϕ 24.5mm の孔を 10 個ずつ加工する.この内,図示のような 3 個の加工 孔を対象に,孔形状(径,同軸度,円筒度,直角度,真 円度)と表面粗さを測定するための円筒状の試験体①, 断面マクロと入熱硬化による硬さ分布を測定するため に,溶損部を含めて割断した試験体②,溶損部の形状を 測定するために,溶損部を残して割断した試験体③を 作成する.レーザー孔加工には,発振器最大出力 6kWの CO_2 レーザーとアシストガスに酸素を用いた切断機 (LMXIII30-TF6000B:日酸 TANAKA 製)を用いる.

2.2 加工孔の形状

加工孔の精度を確認するために,マイクロメーター を用いて,図-1の試験体①の最小径,最大径を測定す



図-2 内径,表面粗さおよび硬さの測定位置

る.測定位置は図-2に示すようにレーザー照射側を表面として,表面から1mmの部分,板厚中央,裏面から 1mmの部分とする.図-3に最小径,最大径の測定結 果を示す.ドリル孔は最大径,最小径がほぼ同じであ り,孔径にばらつきが少ない.一方,レーザー孔は表 側では,最大径と最小径はほぼ同じであるが,中央と 裏側の最大径は大きい.これは溶損ノッチが板厚の中 央部から裏側に生じるためである.また,板が厚くな るほどレーザー孔の最大径が大きくなる傾向にある.

道路橋示方書 17.3.1 によると,摩擦接合用のボルト 孔の径の許容差は+0.5mmと規定され,1 ボルト群の 20%に対しては+1.0mmまで認めてもよいとされてい る.レーザー加工孔の最小径はいずれの板厚,材質に



図-1 試験体概略図



図-3 加工孔の径

おいても許容差+0.5mm 以内に収まっているが,板厚 19mm と 25mm の試験体の最大径は,許容差を越えて いる.各試験体の一つの孔径の結果ではあるが,許容 差の規定は,部材の有効断面積を算定する際のボルト 呼び径に+3mm を加えた径を用いることと関連してい ること,溶損ノッチの位置は,レーザー孔加工時に制御 可能なことから,溶損ノッチの位置を引張力の作用方 向に合わせる.すなわち,継手部の応力照査のための 断面から溶損ノッチの位置をずらすことで,レーザー 加工孔の径は示方書の規定の意図を満足できると考え られる.

レーザー加工時に発生する溶損部の形状を調べるために,図-1に示す試験体③に,印象材を用いて型をとり,型の形状から溶損形状を計測する.図-4に溶損深 さと溶損幅の測定結果を示す.溶損部深さと幅は,材



図-4 溶損ノッチ形状



質と板厚に依存し,強度の高い鋼材ほど小さく,厚い 鋼材ほど大きくなる傾向にある.レーザー照射側(表 側)については溶損幅,深さは小さいが,中央と裏側で 溶損が大きくなっている.

試験体①を用いて,図-2のように,レーザー加工孔



図-6 表面粗さ (R_a) とうねり (W_{CM})

とドリル加工孔の表面から 1mm の位置,板厚中央,裏 面から 1mm の位置の円周方向の表面粗さの計測を行 う.図-5(a)のように溶損ノッチ部を避けた A 部と B 部を測定し,平均値をその部位の表面粗さとする.ド リル加工孔では,同図(b)のように計測を行う.また, ドリル加工孔は円周方向に沿った細かな溝が発生する ため,板厚方向の表面粗さも測定する.このとき,板 厚方向に3分割し,それぞれ,表側,中央,裏側の計 測値とする.図-6に,算術平均粗さ Ra,ろ波うねり W_{CM}を示す.

レーザー加工孔の円周方向の表面粗さは,表面で大 きく,中央部と裏面では,ドリル加工孔の板厚方向の 表面粗さと同程度であり,板が厚くなるほど,表面粗 さも大きくなる傾向にある.一方,レーザー加工孔の うねりは,ドリル加工孔に比べて大きく,その値は表 面に比べて裏面で大きい.これは写真-2(a)のように 板厚方向に筋状の溝が発生し,その溝は表面では細か く,裏面では粗くなっているためである.

レーザー加工孔のゆがみを調べるために,試験体①を 用いて,同軸度,円筒度,直角度と真円度の測定も行っ たが,その精度はドリル加工孔とほぼ同程度であった.

2.3 加工孔付近の硬さ

レーザー孔加工では,レーザービームによる鋼材の 局部的な溶解と,アシスト酸素ガスによる酸化反応熱 により,切断が行われることから,加工部周辺の入熱 硬化が懸念される.そこで,図-1の試験体②を用いて ビッカース硬さ試験を行う.硬さ計測部位は図-2のよ うに,表面と裏面から1mm内部の位置と,板厚中央 であり,この部位について板幅方向に孔内面から1mm の区間を0.1mmピッチ,孔内面から2mm以遠の区間 は1mmピッチで計測を行う.また,板厚方向には,孔 内面から0.5mmの位置を表面から裏面に1mmピッチ で計測を行う.

図-7と図-8にそれぞれ,板幅方向と板厚方向のビッ カース硬さの分布を示す.ドリル加工孔では,板幅方 向,板厚方向とも,ビッカース硬さは100から200Hv であるが,レーザ加工孔では,レーザ照射を受ける表面 に比べて,裏面の方が入熱硬化が顕著に現れている.板 が厚いほど裏面の硬化が大きく,また,SM400B材に比 べて SM490YB 材で硬化が著しい. 一方, SM570TMC 材では,硬化の程度は低いことが分かる.また,溶損 部付近が孔の反対側に比べて硬化が大きい.冷間割れ を避けるには,熱影響部の硬さを350Hv以下に抑える ことが推奨されている⁹⁾. SM570TMC 材の硬さは,孔 内面で 350Hv 程度であり冷間割れが懸念される領域は 見られない.しかし,SM400B材,SM490YB材では, 350Hvを超える領域が,板中央から裏側の孔内面から 0.5mm 程度の領域に存在し,板厚 25mm の SM490YB 材では,溶損側の孔内面から1mm 前後の領域で350Hv を超えている.

3. 摩擦接合継手のすべり耐力

レーザー孔加工は,ドリル孔加工と同様に加工精度 が良く,ゆがみも少ない.しかし,局部的な入熱によ る孔内面近傍の硬化と溶損ノッチが生じる.そこで, レーザー孔加工の継手性能を明らかにするために,す べり試験を行う.表-2のように,鋼材にSM400B材, SM490YB 材, SM570TMC 材を用い, レーザー孔加工 とドリル孔加工を行った鋼材を F10T-M22 の高力ボル トにより接合した試験体を作成する.各試験体の諸元 を図-9 に示す. 試験体の形状は, すべり係数を 0.4 と したときのすべり耐力の設計値と純断面の設計降伏耐 力の比が,ほぼ0.9になるように決めている.すべり 係数を実験により確認する際のすべり降伏耐力比とし て 0.65 が推奨されている¹⁰⁾が,本論文は実施工でのド リル加工孔とレーザー加工孔のすべり耐力の比較を行 うことを目的とするため、すべり耐力が降伏耐力に接 近した状態で実験を行う.なお,試験体の鋼表面はグ リッドブラスト処理 (SIS Sa2.5) を行い,ドリル孔加工 についてはバリ取りを行っている.母材と添接材の溶 損ノッチが重なると,ボルト軸力による有効接触面が 減少する懸念があることから,溶損ノッチが重ならな いように組み立てる.なお,溶損ノッチは板幅方向(後 述の溶損角 90 度) に位置するようにレーザー孔加工を 行っている.

すべり耐力試験は、トルク法により締め付け軸力が 設計ボルト軸力の1.1倍となるように締め付け作業を 行った後、12時間から18時間程度経過した後に実施 している.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いる.



-997-

表-2 試験体の種類(各3体)

			すべい降伏
試験体	材質	孔あけ	耐力比 (β)
L400	SM400B	レーザー孔加工	0.913
L490	SM490YB	レーザー孔加工	0.876
L570	SM570TMC	レーザー孔加工	0.879
D400	SM400B	ドリル孔加工	0.913
D490	SM490YB	ドリル孔加工	0.876
D570	SM570TMC	ドリル孔加工	0.879





(c) 試験体 L570(D570)

図-9 試験体形状

試験は万能試験機を用いて行い,計測データは弾性 域では 50kN 毎に記録し,降伏耐力またはすべり耐力 に近づくと 20kN 毎に記録を行っている.ただし,す べる瞬間の計測データを取ることはむづかしいことか ら,すべった瞬間の荷重は,万能試験機のピーク値を 用いる.

図-10 にすべり試験の一例として SM570TMC 材を 用いた試験体の上下母材間の開口変位と,継手外側の 円孔部を通る断面の母材ひずみを示す.荷重が725.2kN に達すると継手下側がすべり 300kN ほど荷重が低下し, 1.3mm ほど開口変位が増加している.さらに載荷する と731.6kN の荷重で継手上側が滑っている.この試験 体では,継手の上下が各1回滑っているが,試験体に よっては,複数回すべることもある.SM570TMC 材は 降伏点が明確に現れないので,無載荷時に0.2%ひずみ を通り,初期弾性係数に相当する勾配の直線を伸ばし たときに,荷重ひずみ曲線と交差する点を降伏耐力と すると,この試験体は,母材が降伏前に滑っていると 見做せる.

表-3 すべり耐力試験結果						
≐#≣全/★ 2□ 등		すべり耐力		すべり係数		
19.17月	19,11	上側	下側	上側	下側	平均
L400-1	下側	468.4	444.4	0.571	0.542	
L400-2	上側	460.6	444.4	0.562	0.542	0.545
L400-3	上側	477.8	382.7	0.583	0.467	
D400-1	上側	432.2	464.0	0.527	0.566	
D400-2	上側	426.8	438.6	0.520	0.535	0.539
D400-3	下側	450.8	437.6	0.550	0.534	
L490-1	上側	476.3	484.1	0.581	0.590	
L490-2	上側	457.7	503.7	0.558	0.614	0.587
L490-3	下側	505.7	458.8	0.617	0.560	
D490-1	上側	429.2	396.9	0.523	0.484	
D490-2	上側	444.9	461.1	0.543	0.562	0.547
D490-3	下側	486.6	470.4	0.593	0.574	
L570-1	下側	731.6	725.2	0.595	0.590	
L570-2	上側	725.2	757.5	0.590	0.616	0.588
L570-3	下側	683.1	716.9	0.555	0.583	
D570-1	上側	699.2	657.1	0.568	0.534	
D570-2	下側	732.6	689.9	0.596	0.561	0.562
D570-3	上側	656.1	711.5	0.533	0.578	

表-3 に各試験体のすべり耐力, すべり耐力を設計ボ ルト軸力で除したすべり係数と, 平均すべり係数を示 している.継手部のすべりは,上側の母板または下側 の母板がすべり,その後,もう一方の母板,あるいは 引き続き同じ側の母板が滑る.表中の上側,下側のす べり耐力は,その側の初めに滑ったすべり耐力を示し ている.

表より3種類の鋼種共に,レーザー孔加工による平 均すべり係数は,ドリル孔加工による値を下回るもの はなく,ほぼ同等の値を得ていることから,レーザー 孔加工による継手のすべり耐力は,ドリル孔加工と同 程度といえる.

4. レーザー加工孔を有する鋼板の疲労強度

レーザー孔加工は,ドリル孔加工と同様に加工精度 が良く,ゆがみも少ない.しかし,局部的な入熱によ る孔内面近傍の硬化,板厚方向のドラグラインと溶損 ノッチの発生がある.そこで,これらが疲労強度に及 ぼす影響を明らかにするために,円孔を有する鋼板の 疲労試験を行う.

レーザー孔加工とドリル孔加工により SM490YB 材 に, ϕ 24.5mm の孔あけを行った図-11 のような鋼板を 用いて疲労試験を行う.レーザー孔加工では,引張力 の作用する方向と溶損ノッチの位置が,図示のように 0度,30度,60度,90度の角度になるように作成する.

疲労試験には,動的能力±500kNの電気油圧サーボ 式材料試験装置を用い,上限荷重を400kNとした片振 り繰り返し荷重下で行う.繰り返し荷重の総断面に対す る変動応力範囲は,80,100,140N/mm²とし,繰り返 し速度は80,100N/mm²で10Hz,140N/mm²で7Hz とし,条件の同じ試験体を2体ずつ疲労試験を行う.



疲労試験の前に,レーザー孔加工を行った各試験体 の溶損ノッチ部の形状を調べる.この測定は,印象材を 用いてノッチ部の型を採り,その型を板厚方向に2mm 毎にスライスし,それを拡大投影機で観察することに より行う.ノッチの幅と深さの計測結果を図-12に示 す.裏面のノッチの深さは約0.2mmから2.5mm,ノッ チ幅は約2mmから7mmの範囲にあり,ノッチ深さは 疲労試験の結果,疲労亀裂の起点は,ドリル孔加工 とレーザー孔加工で溶損ノッチ角度が0度,30度,90 度のすべての試験体で,純断面が最小になる鋼板中央 の円孔壁(90度試験体での起点は溶損ノッチ部に一致) にあり,溶損ノッチ角度が60度の試験体では,半数の 試験体に鋼板中央の円孔壁ではなく,溶損ノッチ部に 疲労亀裂が生じている.

図-13 に応力範囲と疲労寿命の関係を示し,図-14

表−4 溶損ノッチ形状と疲労寿命					
****	溶	応力	溶損ノ	疲労	
 訊 缺 1 本 名	損	11111111111111111111111111111111111111	後の	アスヘ	一方市
	角	(N/mm^2)	(mm)	クト比	(回数)
L60-140-1	60	140	0.73	0.156	96,760
L60-140-2	60	140	1.25	0.357	62,470
L60-100-1	60	100	0.65	0.114	360,043
L60-100-2	60	100	1.4	0.341	217,991
L60-80-1	60	80	1.8	0.456	442,875
L60-80-2	60	80	0.5	0.147	4,231,286†
L90-140-1	90	140	0.35	0.167	57,845
L90-140-2	90	140	0.35	0.100	67,129
L90-100-1	90	100	1.93	0.371	137,896
L90-100-2	90	100	1.6	0.427	129,084
L90-80-1	90	80	0.9	0.305	267,809
L90-80-2	90	80	0.22	0.063	727,348

† 未破断



図-15 溶損角 60 度の試験体の寸法

に応力範囲が100N/mm²のときの各試験体の疲労寿命 を示す.図-14より,ドリル孔加工を施した試験体の 疲労寿命が最も長く,溶損角が0度と30度の試験体は ドリル加工の試験体より若干短い.溶損角が60度の試 験体は,亀裂の起点の位置により疲労寿命が異なるが 平均すると,溶損角が0度と30度の試験体より短い. また,溶損角90度の試験体は,これらの試験体の中で 最も疲労寿命が短い.これらの違いは,レーザー加工 孔のドラグラインと溶損部の位置による影響のためで ある.

表-4 に溶損ノッチの荷重作用方向との角度が 60 度 と 90 度の試験体の溶損形状と疲労寿命を示す.これよ り溶損ノッチのアスペクト比 (=ノッチ深さ/ノッチ幅) の大きな試験体は,小さな試験体に比べて疲労寿命が 短いことが分かる.図-15 には,溶損角度 60 度の試 験体の溶損ノッチ幅と深さの関係を,各試験体毎に示 している.溶損角度 60 度の試験体は,疲労亀裂の起点 が板中央部の孔壁と,溶損部に混在していたが,この 図より,溶損ノッチのアスペクト比(図中の原点を通る 直線の勾配)が小さい試験体は,板中央部から破断し, 勾配の大きな試験体は溶損部から破断する傾向が見ら

	溶損角 鋼材		応力範囲	疲労寿命	
	(度)	組合せ	(N/mm^2)	(回数)	
LI0-250-1	0	一致型	250	737,711	
LI0-250-2	0	一致型	250	157,516*	
LI0-200-1	0	一致型	200	3,080,138	
LI0-200-2	0	一致型	200	9,149,009	
LR0-250-1	0	相反型	250	628,700	
LR0-250-2	0	相反型	250	804,567	
LR0-200-1	0	相反型	200	10,000,000†	
LR0-200-2	0	相反型	200	$9,\!611,\!438$	
LI90-250-1	90	一致型	250	139,361	
LI90-250-2	90	一致型	250	95,257*	
LI90-200-1	90	一致型	200	306,384	
LI90-200-2	90	一致型	200	(失敗)	
LR90-250-1	90	相反型	250	144,056*	
LR90-250-2	90	相反型	250	$151,\!665^*$	
LR90-250-3	90	相反型	250	$156,\!666*$	
LR90-250-4	90	相反型	250	110,892*	
LR90-200-1	90	相反型	200	483,253	
LR90-200-2	90	相反型	200	425,703	
D-250-1	ドリ	ル加工	250	476,679	
D-250-2	ドリル加工		250	615,002	
D-200-1	ドリ	ル加工	200	1,933,917	
D-200-2	ドリ	ル加工	200	2,060,000	
* すべり先行 † 未破断					

表-5 摩擦接合試験休の疲労試験

れる.

以上の試験結果より,円孔を有する鋼板の疲労強度 は,ドラグライン,溶損ノッチ角度とノッチ形状の影 響を受けることが分かる.

5. 摩擦接合継手の疲労強度

摩擦接合継手のすべり耐力試験に使用したものと同 じ形状の SM490YB 材の試験体を用いて,溶損部の角 度の違いと,母材と添接材の溶損部の向きの違いによる 摩擦接合継手の疲労特性の違いを調べるために,図-16 のように,溶損部と荷重の作用方向との角度が0度の 場合と90度の場合について,母材と添接材の溶損部の 位置が一致する溶損部一致型と,溶損部の位置が逆に なる溶損部相反型,さらに比較のためにドリル孔加工 を行った試験体を使用する.

疲労試験には,動的能力 ±500kN の電気油圧サー ボ式材料試験機を用いる.繰り返し荷重の下限荷重を 10kN(総断面応力 6.57N/mm²)とし,総断面応力範囲 を 250N/mm² と 200N/mm²,繰り返し速度は 5Hz か ら 8Hz とし,繰り返し回数が 1000 万回に達しても疲 労破壊しなければ,試験を終了する.

表-5 に,疲労試験に用いた試験体と疲労寿命を示す. 疲労破壊の前にすべりが先行した試験体が幾つかある. 応力範囲 250N/mm²,溶損角90度の相反型試験体は2 体ともすべりが先行したため,2体追加して試験を行っ ている.

添接材の破断や亀裂は見られず,疲労破壊は継手外



図-16 摩擦継手の疲労試験体



(a) 母材破面 (上段:突合せ側,下段:引張側)





(b) 表面破断位置(c) 裏面破断位置写真-3 母材破面と破断位置 (LI0-200-1 試験体)

側の母材の孔壁中央(純断面積最小位置)あるいは,孔 周辺に生じた.ドリル孔加工の試験体では,すべて孔 壁中央から破断している.溶損角0度のレーザー孔加 工による試験体では,写真-3のように母材の継手部外 側の孔周辺から破断する試験体と写真-4のように孔壁 中央のドラグラインと呼ばれる板厚方向に見られるす じ状のうねりから破断する試験体がほぼ半数ずつ見ら れる.図-17に疲労破断位置の模式図を示す.孔周辺 からの破断には,起点と見られる部分に茶色のさびを 確認できることから,フレッティングと呼ばれる母材 と添接材の接触部が相互に僅かに滑ったためと考えら れる.溶損角90度の試験体では,写真-5のように,す べての試験体で溶損部から破断している.図-18に疲 労破断位置の模式図を示す.

破断していない母材を対象に磁粉探傷試験を行うと, 溶損角0度の試験体やドリル孔加工の試験体には亀裂 は見られないが,溶損角90度の試験体では,応力範



(a) 母材破面 (上段: 突合せ側, 下段: 引張側)



(b) 表面破断位置
 (c) 裏面破断位置
 写真-4 母材破面と破断位置 (LR0-250-1 試験体)

囲 250N/mm² の試験体のすべてと, 200N/mm² の試 験体の一部に写真-6のような溶損部からの亀裂が見ら れる.

図-18 には,母材継手外側の溶損ノッチの形状も記載している.深さと幅の大きな溶損を有する円孔から破断することが多いが,磁粉探傷試験結果によると,破断していない母材の円孔にも亀裂が発生していることや,溶損部の大きさやアスペクト比と疲労寿命に関連が見られないことから,摩擦接合継手の疲労強度には,溶損部の形状の影響は少ないように思われる.

図-19(a),(b) にそれぞれの応力範囲毎の各試験体の 疲労寿命を示す.疲労寿命をドリル孔加工による試験 体と比較すると,滑りの先行した試験体 LIO-250-2 は 疲労寿命が極端に短くなっているが,それ以外では,溶 損角0度の試験体はドリル孔加工による試験体と同等 かこれ以上の寿命になっている.ドリル孔加工を有す る摩擦接合継手の疲労等級はB等級である³⁾ので,溶









損角0度のレーザー孔加工を有する摩擦接合継手の疲 労等級もB等級と見做してもよいと考えられる.一方, 溶損角90度の試験体は,ドリル孔加工の試験体より 疲労寿命が短くなり,D等級程度の疲労寿命になって いる.また,すべりが先行する試験体ではD等級を下 回っている.

LI90-200-1

(a) 母材破面 (上段: 突合せ側, 下段:引張側)

写真-5 母材破面と破断位置 (LI90-200-1 試験体)

写真-6 母材円孔部の磁粉探傷 (LI90-250-1 試験体)

LI90-200-1

(c) 裏面破断位置

(b) 裏面

LI90-200-1

(b) 表面破断位置

(a) 表面

母材と添接材の溶損部の位置を合わせた溶損部一致 型と,溶損部の位置が逆になる溶損部相反型による疲 労強度には,明確な違いは確認できない.

試験体名		左溶損	破断の様子	右溶損
	最大アスペクト比	0.433		0.444
L 100 950 1	平均アスペクト比	0.212		0.239
L190-250-1	最大深さ	1.7 0 0		0.600
	最大幅	4 .5 0 0		3.000
	最大アスペクト比	0.333		0.591
LI90-250-2	平均アスペクト比	0.155		0.362
	最大深さ	1.000		2.4 0 0
	最大幅	4.800		5.5 0 0
	最大アスペクト比	0.559		4.3 0 0
I IQ0-200-1	平均アスペクト比	0.401		1.855
1150 200 1	最大深さ	2.200		1.100
	最大幅	5.40 0		0.333
	最大アスペクト比	0.667		0.357
L R90-250-1	平均アスペクト比	0.266		0.225
LI(50 250 1	最大深さ	1.600		1.600
	最大幅	4.500		4.8 0 0
	最大アスペクト比	0.375		0.348
L R90-250-2	平均アスペクト比	0.176	$ \land \land \land \land $	0.142
1100 200 2	最大深さ	0.500		1.1 0 0
	最大幅	2.700		4.2 0 0
	最大アスペクト比	0.40 0		0.222
LR90-200-1	平均アスペクト比	0.153		0.118
2100 200 1	<u>最大深さ</u>	0.600		0.600
	最大幅	3.000		3.5 0 0
	最大アスペクト比	0.486		0.385
LR90-200-2	半均アスペクト比	0.304		0.251
	最大深さ	1.7 0 0		0.900
	<u>最大幅</u>	4 .4 0 0		3.200
LR90-250-3 (追加)	最大アスペクト比	0.333		0.357
	半均アスペクト比	0.137		0.216
	最大深さ	1.100		0.600
	<u>最大</u> 幅	5.000		2.500
1 000 050 1	<u>最大アスペクト比</u>	0.526		0.500
LR90-250-4 (追加)	半均アスペクト比	0.392		0.323
	最大深さ	2.000		1.500
	最大幅	3.800		3.800

図-18 摩擦接合継手の疲労破断図 (溶損角 90 度)

6. まとめ

本論文は,レーザー加工孔と溶損ノッチの形状,円 孔付近の入熱硬化の特性を調べた.また,レーザー孔 加工で生じた溶損を有する鋼板とドリル孔加工を施し た鋼板を用いた高力ボルト摩擦接合継手試験体のすべ り試験と疲労試験を行い,両者のすべり耐力と疲労強 度を比較することで,レーザー孔加工の適用性を検討 した.

以下に各検討項目ごとに得られた知見をまとめる.

レーザー加工孔の特性

- 円孔の始点と終点の会合点にノッチ状の溶損部が 生じ、この溶損ノッチの幅、深さは、鋼種と板厚 に依存し、厚くなるほど大きくなり、強度の大き な鋼材ほど小さくなる傾向にある.また、ノッチ 深さは、ノッチ幅の半分以下である.
- 溶損ノッチの深さは、ボルト孔の許容差を越える ことがある.しかし、溶損ノッチの位置は、孔あ け時に制御可能であり、ボルト孔を通る有効断面 積が大きく減少することはない.
- 溶損ノッチ部以外の部分の表面粗さは、レーザー 照射側ではドリル加工孔に比べて大きいが、板厚 中央部や裏側では同程度である.レーザー加工に よるドラグラインが生じるため、円孔表面のうね りはドリル加工孔に比べて大きい.

 レーザー孔加工による入熱硬化は、レーザー照射 側より、裏側の方が大きく、厚い板ほど顕著であ るが鋼種により硬化の程度は異なる、半径方向の 入熱硬化は孔表面より0.5mm程度の範囲で顕著で あり、溶損部では硬化の領域は広がり、鋼種や板 厚に依り1mm前後になる場合もある。

摩擦接合継手のすべり耐力

 3種類の鋼種について,すべり試験を行った結果, レーザー孔加工による摩擦接合継手のすべり耐力 は,ドリル孔加工による結果と比べて劣る試験体 は少なく,レーザー孔加工による摩擦接合継手の すべり性能は,ドリル孔加工によるものと同等で ある.

円孔を有する鋼板の疲労強度

 溶損ノッチ角度を変えた加工孔を有する試験体の 疲労試験を行った結果,荷重作用方向からの角度 が小さいほど疲労強度は上昇し,溶損部から破断 した試験体の疲労寿命は,溶損ノッチのアスペク ト比に依存する傾向にある.

摩擦接合継手の疲労強度

- 溶損角0度の試験体では,孔壁中央のドラグラインから破断の生じるものと,孔周辺から破断するものが混在する.一方,溶損角90度の試験体では,溶損ノッチ部から破断し,破断しなかった母材の円孔の多くに,溶損部を起点とする亀裂が見つかった.
- 疲労強度は溶損部の角度に依存するが,溶損部の 深さやアスペクト比などの形状の影響は少ない.
- 溶損角0度の試験体の疲労等級は、ドリル孔加工による摩擦接合継手の疲労等級と同等であり、B 等級と見做してもよいと考えられる.一方、溶損角90度の試験体の疲労等級はD等級程度である.

以上のことから,レーザー加工孔を有する高力ボル ト摩擦接合継手のすべり性能は,ドリル孔加工による 継手と同等であり,また,加工時に溶損部を荷重作用 方向に合わせることで,レーザー加工孔を有する摩擦 接合継手の疲労強度もドリル孔加工による継手と同等 とすることができる.橋梁の実部材の接合にレーザー 孔加工を適用する際には,溶損部の位置の制御と接合 部の主応力の方向の把握が重要である.

謝辞:本研究は,鋼橋技術研究会施工部会の中の活動として行ったものである.本研究を行うに当たり,施 工部会孔あけWGメンバー南邦明氏(鉄道・運輸機構,元サクラダ),高坂正人氏(川崎重工業),川北省二 氏(片山ストラテック),小林卓氏(川鉄橋梁鉄構),佐 藤芳男氏(新日本製鐵),安藤佳毅氏(瀧上工業),鈴木 信貴氏(巴コーポレーション),藤岡正彦氏(日本橋梁) には,橋梁部材加工時の実務上の問題点の指摘,レー ザー加工に関する有益な意見を頂いた.ここに記して 謝意を表します.

- 参考文献
- 三木千寿,森 猛,稲沢秀行,中村賢造:押し抜きせん断加工孔を用いた高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度, 土木学会論文集,第410号/I-12, pp.345-350, 1989.10.
- 2) 日本鋼構造協会:鋼構造物における孔加工法の現状と各 種関連規定類の見直しについて、JSSC レポート、No.2, 1987.1.
- 3) 日本道路協会:鋼道路橋の疲労設計指針,2002.3.
- 4) 百瀬敏彦,堀川浩甫:レーザ切断材の疲労強度,土木学会 第46回年次学術講演会,I-185, pp.408-409, 1991.9.
- 5) 市川祐一, 正木豪, 中込忠男, 佐野義美: レーザ加工された 高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に関する実験的研究,

日本建築学会学術講演梗概集, C-1, Vol.2002, pp.957-958, 2002.

- 6) 岩崎英治,吉田直広,森 猛,南 邦明,鈴木信貴,安藤 住毅:レーザ孔を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべ り耐力,土木学会第60回年次学術講演会,I-185, pp.367-368, 2005.9.
- 7)森 猛,岩崎英治,山野達也,高坂正人:レーザ孔を 有する鋼板の疲労強度,土木学会第60回年次学術講演会, I-184, pp.365-366, 2005.9.
- 8) 大高章広,森 猛,山野達也:レーザー孔を有する高 カボルト摩擦接合継手の疲労試験,第33回土木学会関東 支部技術研究発表会, I-005, (CD-ROM), 2006.3.
- 9) 大田孝二, 深沢 誠:橋と鋼,建設図書, 2000.2.
- 10) 土木学会鋼構造委員会: 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案),鋼構造シリーズ15,土木学会,2006.12.

(2008年9月18日受付)