

レーザー溶接技術の社会インフラへの適用

Application of Laser Welding for Infrastructure

松本直幸 株式会社 IHI インフラシステム 開発部研究開発第 2 グループ
岡田誠司 株式会社 IHI インフラシステム 開発部 部長 博士（工学）
猪瀬幸太郎 技術開発本部技術基盤センター溶接グループ 担当部長 博士（工学） 技術士（建設部門）

近年、老朽化した社会インフラの効率的な補修技術の開発が求められている。レーザー溶接は入熱量が低く、ひずみの少ない溶接方法であり、昨今の機材の小型化、軽量化に伴い、現場での施工方法としても期待できる。IHI では新設の橋梁部材に対するレーザー溶接適用の実績を経て、現在、鋼部材へのレーザーき裂補修技術の開発を進めている。

Recently, efficient repair technology for infrastructure is required. Since laser welding has low heat input and little distortion, it can be expected to be used as a welding method on-site because of miniaturization and weight reduction. IHI has applied laser welding to bridge structures and has developed laser repair welding for the defect of infrastructure.

1. 緒言

道路の老朽化対策の本格実施に関する提言⁽¹⁾によると、全国約 70 万の橋梁のうち、建設後約 50 年を経過した橋梁の割合は、2023 年には 43%に増加するとの記述があり、老朽化した社会インフラの効率的な保全・補修技術に関するニーズは今後ますます拡大することが予測される。現在、橋梁などの陸上構造物においてき裂が発生した場合、き裂発生部分を十分に覆う形で添接板をボルトによって接合する当て板工法を施工することが多い。しかし、き裂進展部分の幾何学的な形状、部材寸法、施工を行う際の作業範囲によっては、当て板の施工が困難な場合もあり、き裂補修方法としてはほかの選択肢も必要である。

レーザー溶接は 1960 年代に開発され、以降ほかの溶接法とともに進歩を続けてきた。レーザー溶接の特徴は、① 高速で深溶込み溶接が可能である、② 溶接の熱影響が少ない、③ 溶接の熱変形が少ない、などがある。昨今は機材の小型化、軽量化も進んでおり、今後現場でのき裂補修技術として期待される。

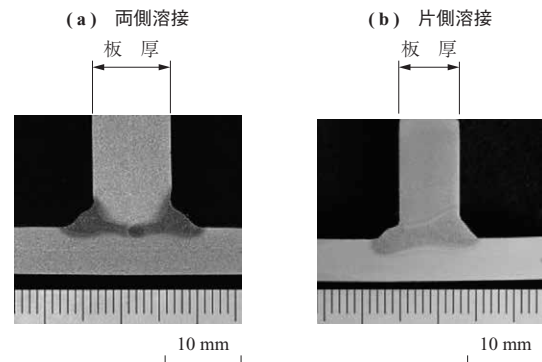
本稿では、これまでの橋梁に対するレーザー技術適用の取組みとして、レーザー溶接により製作した橋梁部材の実橋への適用や、現在検討を進めている鋼部材のき裂補修について紹介する。

2. 橋梁に対するレーザー技術適用の取組み

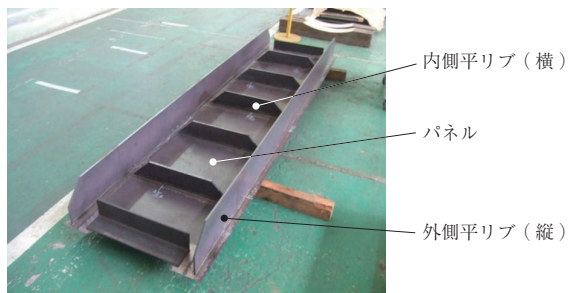
2.1 レーザークハイブリッド溶接

レーザーークハイブリッド溶接を用いて、長崎県諫早市の「本明川大橋」の歩道部に設置する橋梁パネルを製作し、適用した⁽²⁾。レーザーークハイブリッド溶接は、レーザー溶接、アーク溶接それぞれの長所を活かした溶接方法であり、施工裕度をもつ深溶込み溶接が可能となる。すみ肉溶接時の断面マクロ組織を第 1 図に示す。従来のアーク溶接と異なり深い溶込みとなり、融合不良のない良好な溶接部が得られる。

製作した歩道部材の形状を第 2 図に示す。レーザーークハイブリッド溶接を適用したのは、パネルの縦横に配置される平リブの溶接であり、内側のリブを溶接した後に、



第 1 図 レーザークハイブリッド溶接によるマクロ組織
Fig. 1 Macrograph of laser arc hybrid welding



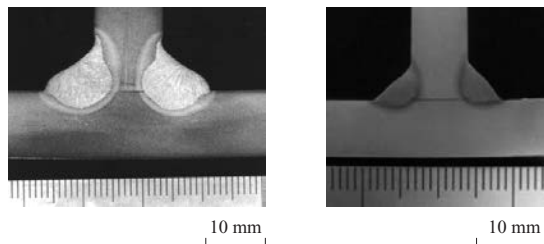
第 2 図 レーザアークハイブリッド溶接により作製した橋梁パネル
Fig. 2 Laser arc hybrid welded bridge panel

外側のリブを溶接した。外側のリブについては、効率性向上のため、部材の外側から 1 パスで溶接した。実部材についてビード外観検査、超音波探傷検査を実施し、実橋梁へ設置した。

2.2 レーザホットワイヤすみ肉溶接

レーザホットワイヤすみ肉溶接を用いて、都市高速道路の車道を支える鋼コンクリート合成床版製作に適用した⁽³⁾。レーザホットワイヤすみ肉溶接は、所要の脚長が得られる程度にスポット径を大きくしたレーザ光を照射し、加熱電源により加熱したワイヤを供給することで、低入熱なすみ肉溶接を実現する溶接方法である。従来のアーク溶接よりも小変形、高速溶接というレーザ溶接の利点を保持しつつ、高い施工性を実現できる。断面マクロ組織を第 3 図に示す。熱伝導型溶接であり、溶接金属はアーク溶接継手と同じようにのど厚が形成される。そのため荷重伝達機構はアーク溶接継手と同じであり、施工管理も主に目視と脚長管理によって行うことができる。本施工方法の実用化のため、継手要素、部材要素の各種性能試験を行

(a) アーク溶接 (b) レーザホットワイヤすみ肉溶接



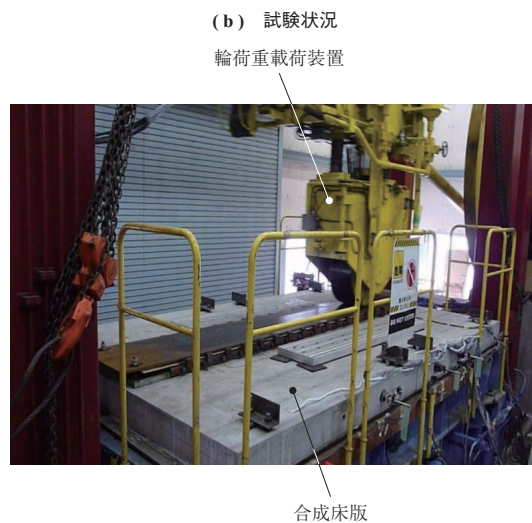
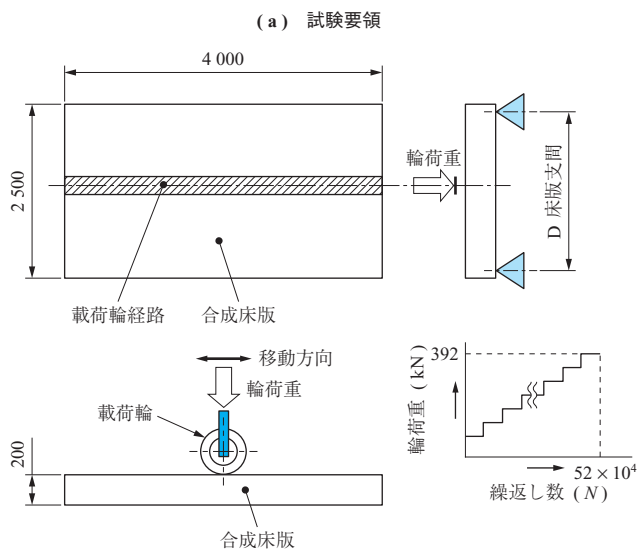
第 3 図 レーザホットワイヤすみ肉溶接によるマクロ組織
Fig. 3 Macrograph of laser hot wire fillet welding

い、製品の性能と安全性を確認した。輪荷重載荷試験状況を第 4 図に示す。これは車両荷重を模擬した試験であり、段階的に荷重を増加しつつ 52 万回の移動荷重を載荷する。試験後は鋼部材とその継手の変状の有無を念に検査し、損傷が生じていないことを確認した。製作した合成床版は、都市高速道路の一部として供用し、約 10 年が経過しようとしている。

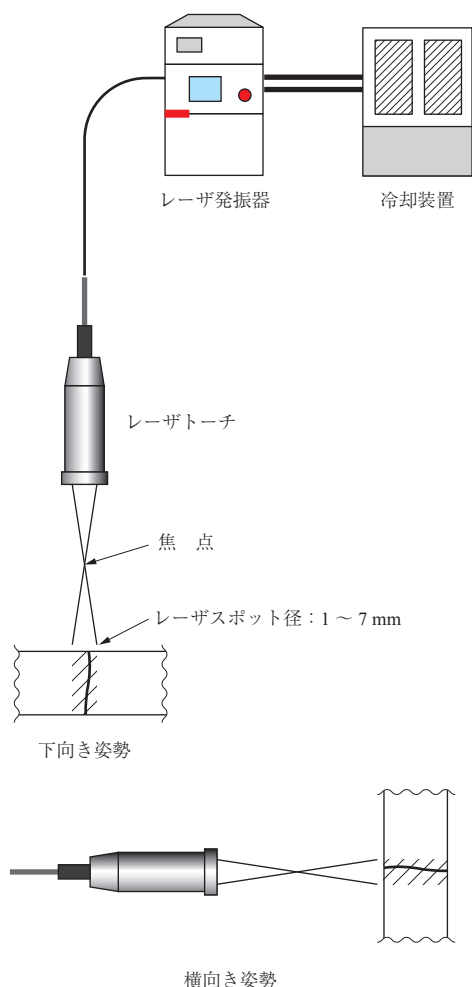
3. レーザき裂補修溶接検討

3.1 レーザき裂補修概念

新設の橋梁部材に対するレーザ技術適用の実績を踏まえ、近年問題となっている老朽化インフラに対するレーザき裂補修溶接へと展開を図っている⁽⁴⁾。レーザき裂補修溶接のモードを第 5 図に示す。主な装置構成としては、レーザ発振器、冷却装置、レーザトーチである。レーザ光は光ファイバによって施工部位まで伝送され、レーザトーチによって集光される。エネルギー密度を上げたレーザ光



第 4 図 輪荷重載荷試験状況 (単位: mm)
Fig. 4 Overview of endurance test (unit: mm)



第5図 レーザき裂補修溶接模式図
Fig. 5 Schematic illustration of laser repair welding

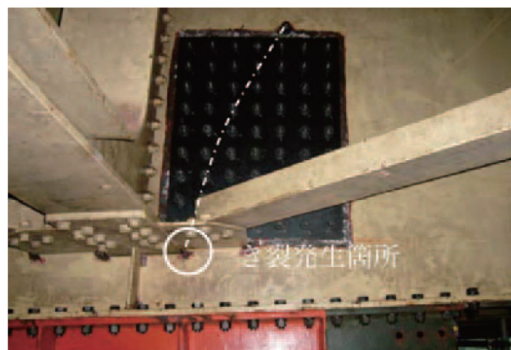
を照射し、き裂とその周囲を溶融する。光ファイバは、出力やファイバコア径にもよるが、100 m 以上の伝送が可能であるため、レーザー発振器および冷却装置の設置位置から離れた補修施工箇所まで光ファイバを敷設し、レーザーき裂補修溶接を行うことができる。施工姿勢は、たとえば鋼床版に生じたデッキ貫通疲労き裂を補修する場合は下向き、主桁腹板に生じた疲労き裂などの場合は横向き（横進施工）となる。深い溶込みを得る場合のレーザー溶接で

用いるレーザースポット径は、数百 μm 程度に集光して施工することが一般的であるが、き裂は板厚に対して垂直に発生しているとは限らないことから、本施工ではレーザースポット径を1~7 mm 程度に大きくすることにより、施工性（狙い裕度）を向上させる。ただし、スポット径を拡大し、かつ板厚を貫通させるエネルギー密度を保持するにはレーザー出力の増加が必要となる。

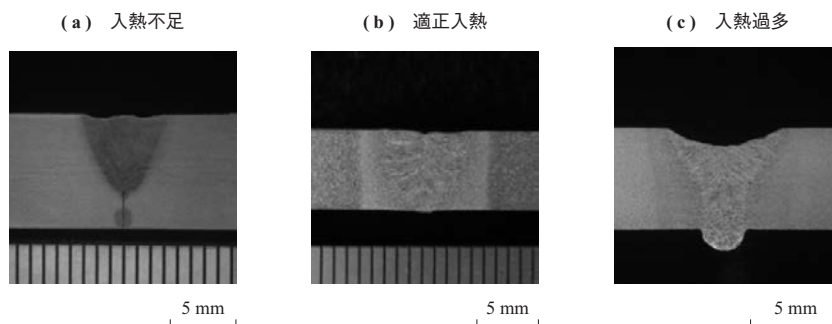
実橋におけるき裂発生・当て板補強状況の一例を第6図に示す⁽⁵⁾。これは主桁の腹板に長さ約1100 mm のき裂が発見された事例である。き裂は横桁の下フランジが貫通する主桁腹板のスリットを起点とし、鉛直斜め方向に進展している。このようなき裂は、応急処置として、ストップホール施工の後に、き裂部への当て板補強が施工される。レーザーき裂補修溶接を適用した場合、自重の増加、孔明け作業をなくして、直接補修溶接が可能となる。

3.2 施工検討結果

レーザーき裂補修溶接に関する基礎検討として、ワイヤ防電加工により模擬き裂を作製したSM鋼材に対する施工検証を行った。施工断面マクロ組織の一例を第7図に示す。入熱量が不足している場合は、模擬き裂が残存する。入熱量の増加に伴い、溶込み深さは増加し、片側からの施



第6図 き裂の当て板補強状況⁽⁵⁾
Fig. 6 Patch reinforcement of the crack⁽⁵⁾



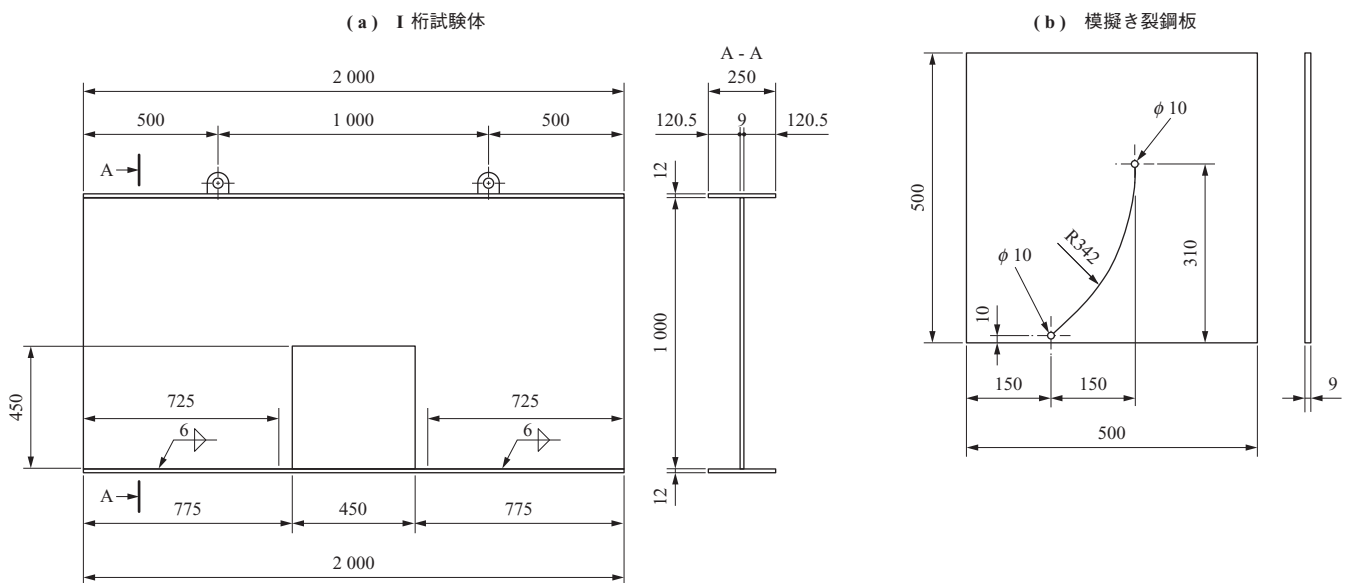
第7図 レーザ補修溶接断面マクロ組織
Fig. 7 Macrograph of laser repair welds

工で模擬き裂を完全溶融することができる。ただし、下向き姿勢で、入熱量が過多の場合、重力の影響により溶融金属が溶け落ちやすく、施工裕度は狭い。対象板厚に応じて、レーザースポット径や入熱量の最適化が必要となる。一方、横向き姿勢の場合、重力の影響が少なくなることから、溶け落ちは発生せず、安定した溶接部が得られる。

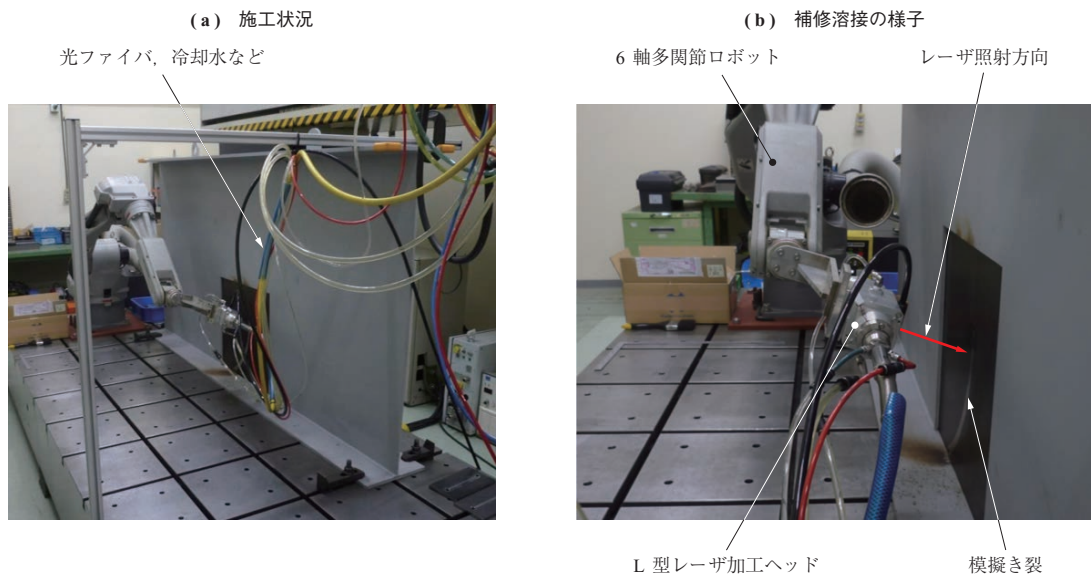
次に、I桁腹板のき裂をレーザー補修溶接する模擬施工を行った。I桁模擬き裂試験体形状を第8図に示す。腹板の一部をくり抜いたI桁試験体を製作し、くり抜き部に模擬き裂を入れた鋼板を設置した。き裂鋼板には板厚9mmのSM490材（JIS G 3106規格）にワイヤ放電加工によ

り模擬き裂を入れたものを用いた。6軸多関節ロボットに、レーザー光をミラーにより直角に折り返すL型レーザー加工ヘッドを保持させ、曲線状に入った模擬き裂の補修溶接を実施した。施工状況を第9図に示す。L型レーザー加工ヘッドを用いているため、狭隘箇所での施工も可能である。

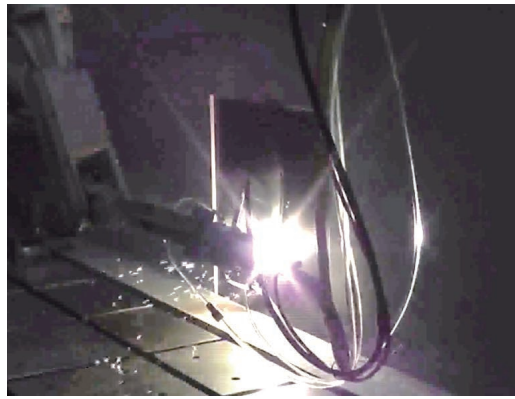
また、スポット径2mm、レーザー出力10kW、溶接速度0.9m/minで模擬施工を実施した溶接状況を第10図に示す。溶接は下進施工とした。施工中は細かいスパッタの発生は見られるが、き裂鋼板表面への付着はほとんどなく、安定した施工が可能であった。溶接結果を第11図に示す。表裏面ともに安定したビードが得られ、断面マクロ



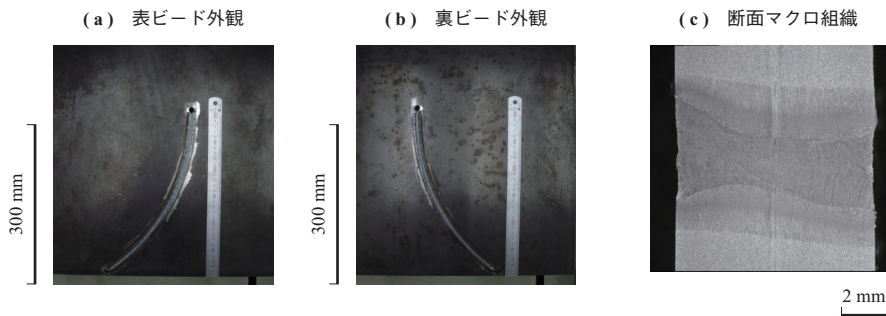
第8図 I桁模擬き裂試験体（単位：mm）
Fig. 8 Mock up crack structure of I beam (unit : mm)



第9図 レーザ施工状況
Fig. 9 Overview of laser welding



第 10 図 I 桁試験体に対するレーザー補修溶接
 Fig. 10 Demonstration of laser repair welding for I beam structure



第 11 図 レーザき裂補修溶接結果
 Fig. 11 Laser repair welding results

組織に欠陥がなく良好である。

4. 結 言

これまでの橋梁に対するレーザー技術適用の取組みとして、レーザー溶接により製作した橋梁部材の実橋への適用や、現在進めている鋼部材のき裂補修検討の概要について紹介した。レーザー光によるき裂の熔融除去が可能であることを確認したが、本検討は板厚に対して垂直に入った一定幅のき裂を模擬した施工であり、実際のき裂性状に対する補修溶接についての検討は継続している。また、現地で施工するには、現場施工機材の仕様検討・開発が必要であり、今後は実橋適用に向け、より具体的なターゲット部材を選定しつつ、部材に対応した施工方法、ハンドリングマシンの開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 社会資本整備審議会 道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014年4月
- (2) 猪瀬幸太郎，神林順子，井戸伸和，大脇 桂，宮地 崇：レーザー・アークハイブリッド溶接の橋梁部材への適用，IHI 技報，Vol. 49，No. 1，2009年3月，pp. 60 - 63
- (3) 猪瀬幸太郎，杉野友洋，松本直幸，大脇 桂，大畑和夫：レーザーホットワイヤすみ肉溶接の開発と都市高速橋梁への適用，IHI 技報，Vol. 52，No. 1，2012年3月，pp. 59 - 63
- (4) 猪瀬幸太郎，松本直幸，神林順子，阿部大輔，大畑和夫：鋼構造物に生じたき裂のレーザー補修技術開発，溶接学会全国大会講演概要，第94集，2012年，pp. 82 - 83
- (5) 公益社団法人日本道路協会：道路橋補修・補強事例集 2009年版，p. 152