

橋梁技術の進歩と溶接技術

Progress of Welding Technology in Bridge Construction

倉田 幸宏 社会基盤セクターレジリエンスプロジェクト部 主幹 博士(工学) 技術士(建設部門)
猪瀬 幸太郎 技術開発本部生産技術センター溶接技術部 主査 博士(工学) 技術士(建設部門)

本稿では橋梁の進歩に果たした溶接技術について、その時代背景とともに総評した。近代日本の橋梁技術の歴史は1970年代以降については、第1期：長大橋時代、第2期：合理化橋梁時代、第3期：本格的な社会資本維持時代と扱うことができる。第1期では高強度鋼を高品質かつ高効率に接合するアーク溶接技術が長大橋の建設に貢献した。第2期では合理化橋梁に供する極厚高強度鋼材の接合技術が開発された。現在に至る第3期は技術提案のための独自性の高い研究開発が行われている。

This paper is a review of the progress of welding technology in bridge construction with its historical background after the 1970's. The recent history of bridge construction could be regarded as consisting of 3 periods. The "Large scale bridge construction period," the "Rational bridge construction period," and the "Full scale infrastructural maintenance period." During the 1st period, highly reliable and efficient arc welding methods contributed to large scale bridge construction. In the 2nd period, the welding process for thick, heavy high strength steel plates had been developed. From the beginning of the 3rd period to present, much original research and development has been executed for technical proposals by fabricators.

1. 緒 言

橋梁とは道路建設や鉄道敷設に当たり、河川や海峡など地形への対応や市街地の立体交差のため、それまで何もなかった空間に路面もしくは鉄道軌道を供することを目的とする構造物である。橋梁の性能とは空間の確保であり、近年の橋梁技術の性能評価において橋梁規模の大きさが一つの指標となっていた。そういう意味では世界初の金属製（鑄鉄）橋梁アイアンブリッジの橋梁支間長（橋脚、支承などによる支持間隔）が30m程度だったのが、その後200年以上経て建設された第1図に示す「明石海峡大橋」において橋梁支間長は1991mに到達している。この橋梁技術の進歩は、まさに重厚長大が大きな価値基準であった国内の時代背景を如実に表している。



第1図 「明石海峡大橋」
Fig. 1 "Akashi-Kaikyo Ohashi Bridge"

近代日本の橋梁技術の進歩と時代背景には大きな相関関係があり、大きく分けると1970～1995年までの「より遠くへ、より大きく！」の長大橋梁の時代、1995～2005年の「より合理的な、よりコストが安く！」の合理化橋梁の時代、2005～2015年の現在は「より社会ニーズを捉え、より独自性を！」の自由競争の時代となる。また、2013年には、国土交通省から「社会資本のメンテナンス元年」の方針⁽¹⁾が示され、今後の橋梁技術は「より維持管理性の優れた！」または、「橋梁の合理的な補修技術」そのものが求められる時代を迎えると考えられる。

また橋梁構造において、本体構造部材がどんなに高性能化しても、接合部が弱点となつては採用できないため、溶接などの接合技術と橋梁技術の進歩とは大きな相関関係にある。

本稿においては、前述した時代背景ごとに、橋梁の技術進歩に貢献した溶接技術を紹介して、最後に、今後のメンテナンス時代に期待される溶接技術について報告する。

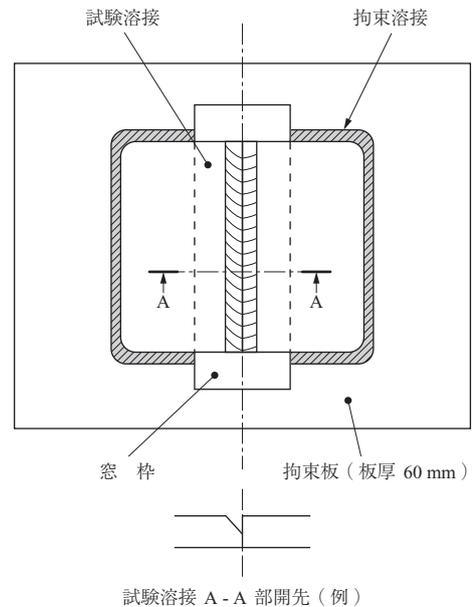
2. 「より遠くへ、より大きく！」の時代の溶接技術

長大橋梁の発展に欠かせなかった技術の一つに、まず鋼材の高強度化が挙げられる。橋梁が長大化する際に課題となるのは自重（死荷重）である。支間長を大きくするために鋼材重量が大きくなり、その重量を支えるために、さ

らに鋼材が必要になる問題である。当時の技術者は、それらの課題を高張力鋼 (HT780) の使用によって解決を図った。1974年に完成した「港大橋」、1988年に完成した「瀬戸大橋」、1998年に完成した「明石海峡大橋」ではHT780が大量に用いられている。

高張力鋼を大量に用いた橋梁である「明石海峡大橋」の使用鋼種配置を第2図に示す。本橋ではHT780が多用されているが、すべての部材に対してではなく、設計荷重に応じさまざまな強度レベルの鋼種が配置されている。高張力鋼などの高性能な材料が使用される際には必ず、接合部にも相応な性能が求められ、結果、溶接技術は進歩してきた。

「明石海峡大橋」へのHT780の適用においては、鉄鋼メーカ、ファブリケータ（橋梁製造業者）による研究開発が数多く実施された⁽²⁾。特に現場溶接では施工環境の難易に関係なく工場溶接と同じ品質が要求され、鋼材の予熱の低減は重要な課題であった。一方、予熱条件は材料だけでなく施工条件、環境の影響も大きい。そこで実施工を模擬した溶接割れ試験による限界予熱条件が検討された。当時の割れ試験片の一例を第3図に示す⁽³⁾。これは多層溶接割れを対象とした検討であり、溶接方法はSAW (Submerged Arc Welding)、継手の拘束度は、 $R \approx 400 \cdot t$ (N/mm \cdot mm、ここで t は板厚mm)である。結果の一部を第4図に示す。また第4図には溶接金属の強度、拡散性水素量などから得た割れ防止予熱パス間温度も併せて示す⁽⁴⁾。角溶接と突合せ溶接では用いる溶接材料やフラックスが異なるため、溶接割れ防止温度にも違いがある。

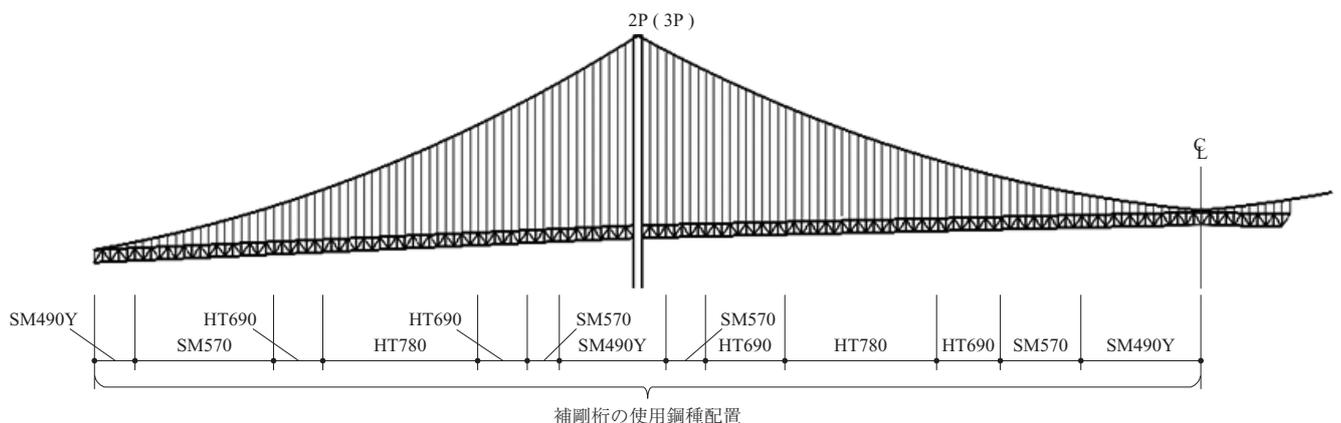


第3図 多層溶接割れ試験片⁽³⁾
Fig. 3 Test specimen of multilayer weld cracking⁽³⁾

また、本図よりパス間温度を50℃に保持することで割れは発生しないことも分かる。ただし本試験の雰囲気は10℃であり、寒冷地における施工については別途確認が必要である。

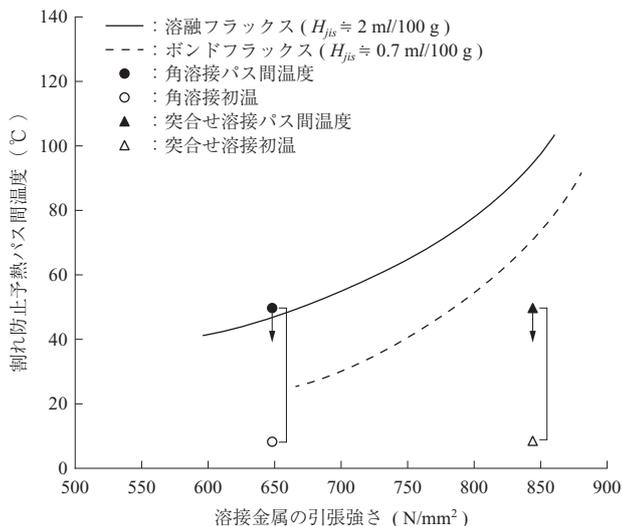
3. 「より合理的な、よりコストが安く！」の時代の溶接技術

西川らが「ミニマムメンテナンス橋に関する検討」⁽⁵⁾を発表した以降に旧道路公団を中心に、それまでの橋梁工事における材料費ミニマムの設計から、維持管理費・加工費ミニマムの設計に切り替わった工事が大量に発注された。いわゆる少主桁橋の普及である。第5図に鋼桁の架



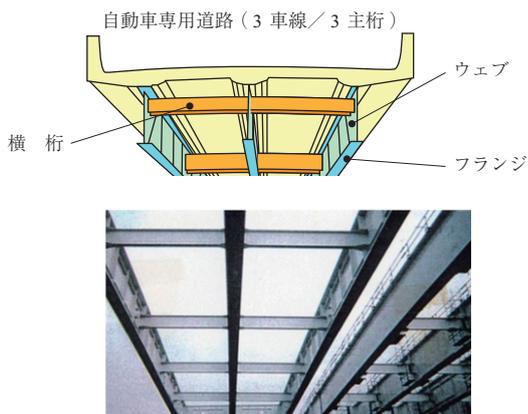
(注) ・1 ケーブル：φ 5.23 mm (ワイヤ外形) × 127 本 × 290 ストランド
 ・引張強さ：1 760 N/mm²
 ・SM***：非調質鋼
 ・HT***：高張力鋼
 ・*P：主塔

第2図 「明石海峡大橋」の使用鋼種配置
Fig. 2 Steels used in “Akashi-Kaikyo Ohashi Bridge”



試験条件
 ・鋼材 : P_{CM} (溶接割れ感受性粗成) = 0.23%
 C_{eq} (炭素当量) = 0.47%
 ・雰囲気温度 : 10°C
 ・雰囲気湿度 : 60%
 ・繰返し : 2体/1条件

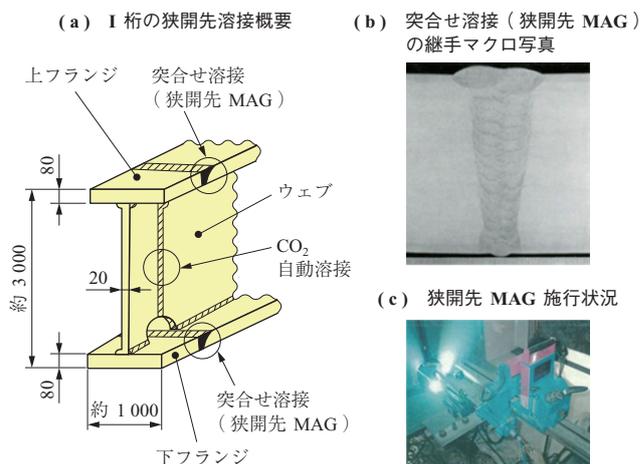
第4図 角溶接および突合せ継手多層溶接割れ防止予熱温度⁽⁴⁾
 Fig. 4 Preheating temperature for preventing multilayer weld cracking in corner welds and butt weld joints⁽⁴⁾



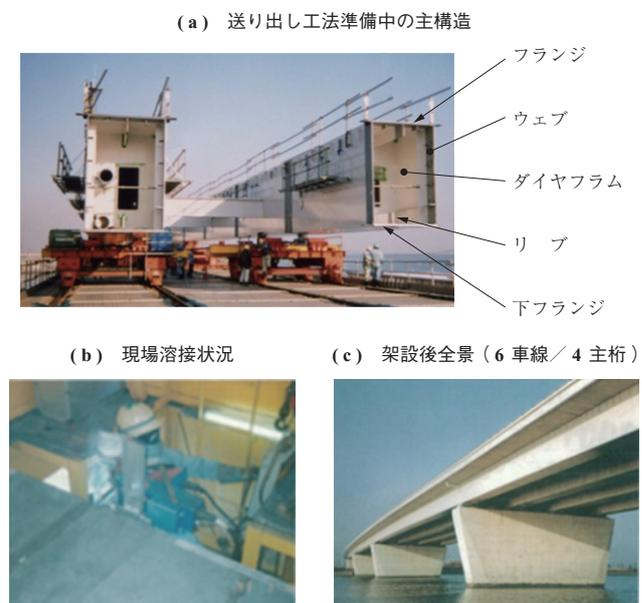
第5図 少主桁橋の概要図
 Fig. 5 Schematic diagram of bridge with few main girders

設が完了した段階の少主桁橋を示す。鋼材量よりも製作工数削減を優先して設計したI桁橋梁であり、主桁本数、補剛材は最小限にとどめ、対傾構、下横構はない。主桁本数が少ないため、主桁にSM570を用いても極厚板(80~100mm)が必要となる場合が多く、列数の制約によって高力ボルト接合ができないため、現場での主桁連結は溶接となっており、溶接量を減らすために狭開先溶接⁽⁶⁾が採用された。第6図に狭開先溶接概要を示す。

このような少主桁橋はI桁形式が一般的ではあるが、箱桁形式の実績もある。第7図に箱断面少数主桁橋梁の状況を示す。従来桁よりも箱桁幅が少なく、フランジは板厚99mmのSM570が用いられている。本橋では予熱フ



第6図 狭開先溶接概要 (単位: mm)
 Fig. 6 Profile of narrow gap welding (unit: mm)

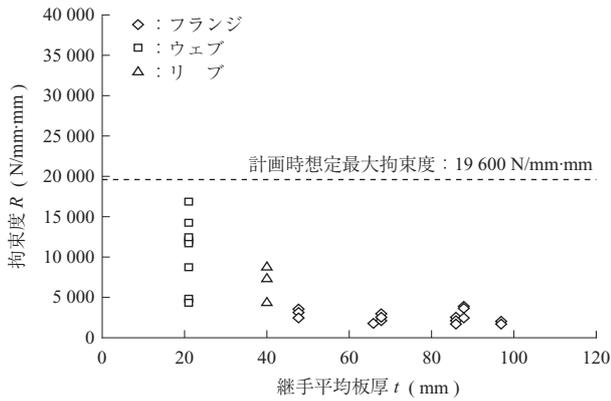


第7図 箱断面少数主桁橋梁の架設状況
 Fig. 7 Erection of bridge having box-shaped cross section with few main girders

リー鋼が用いられているが、主桁の板厚は極めて厚く、かつ箱断面桁であるため、実物大の部材を用いた溶接施工試験が実施された。第8図に示すように継手の拘束度も実測されており、採用した予熱フリー鋼SM570材が十分対応できる範囲であることが確認された⁽⁶⁾。

4. 「より社会ニーズを捉え、より独自性を！」の時代の溶接技術

2005年に公共工物品確法(公共工事の品質確保の促進に関する法律)が施工されると、①疲労強度の向上②溶接時の予熱フリー化③圧縮荷重に対する最高耐荷力の向上、などが社会のニーズとして望まれる。このため、材料、施工、設計などさまざまな観点から技術提案がなさ



第 8 図 箱断面少数主桁橋梁の継手拘束度⁽⁶⁾

Fig. 8 Constraining degree of welding joint in bridge having box-shaped cross section with few main girders⁽⁶⁾

れ、これに対応した研究開発が行われている。ここでは一例としてレーザー・アークハイブリッド溶接について報告する。

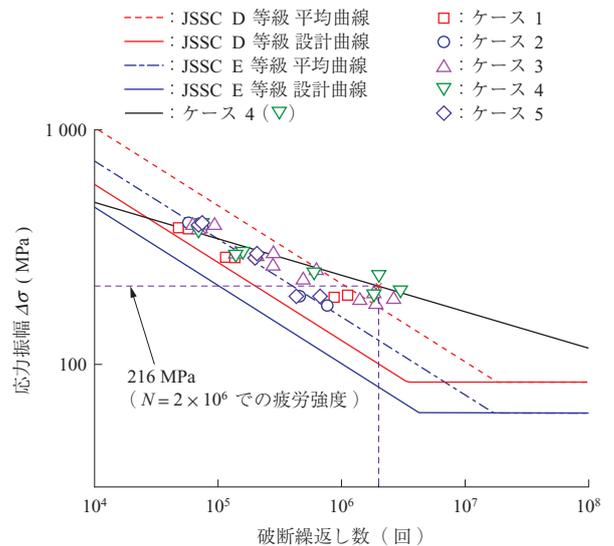
第 9 図にレーザー・アークハイブリッド溶接トーチを、第 10 図にこれを用いて製作した荷重非伝達型すみ肉溶接継手の疲労強度を示す。溶接条件を最適化することによって、疲労強度は向上する。レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた場合、① 疲労強度の支配因子は溶接脚長の止端半径とフランク角であること ② 止端半径は小さい方が、フランク角は大きい方が荷重非伝達型すみ肉溶接継手の疲労強度に寄与すること、を確認した⁽⁷⁾。フランク角を小さくするには、溶接ワイヤの送給量に対して、十分な入熱を行うことが有効である⁽⁸⁾。

アーク溶接の場合はフランク角が小さくなるとのど厚も減少し、継手の接合強度が低下する。しかしレーザー・アークハイブリッド溶接はのど厚が厚くなり、深い溶込みによっても強度を確保できるため、フランク角の減少による強度の低下はない。

橋梁分野においてレーザー溶接技術は、試験的ではあるが



第 9 図 レーザーアークハイブリッド溶接トーチ
Fig. 9 Laser and arc hybrid welding torch



(注) JSSC * 等級：一般社団法人日本鋼構造協会疲労強度等級

第 10 図 荷重非伝達型すみ肉溶接継手疲労強度の改善

Fig. 10 Fatigue strength improvement in non-load bearing fillet welded joint

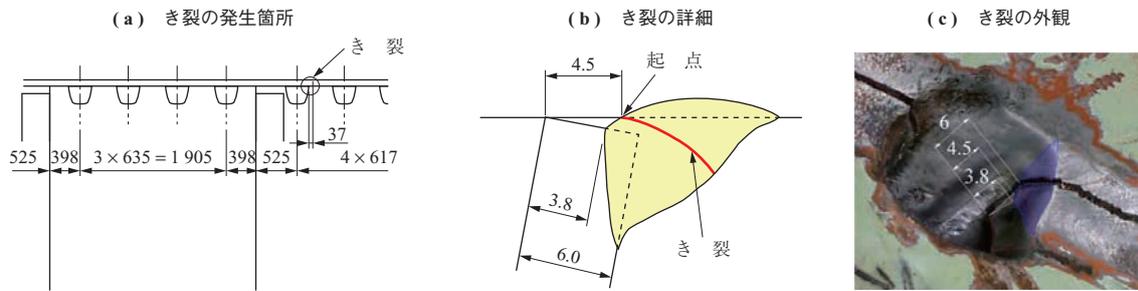
実橋製作にも用いられている。レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた橋梁部材は 2007 年に製作されている⁽⁹⁾。また、これとは方式が異なるが、同じくレーザー溶接技術であるレーザーホットワイヤ溶接を用いた橋梁部材は 2009 年に製作された⁽¹⁰⁾。どちらの橋梁も製作架設後すぐに供用され、現在に至っている。

5. メンテナンス時代に求められる溶接技術について

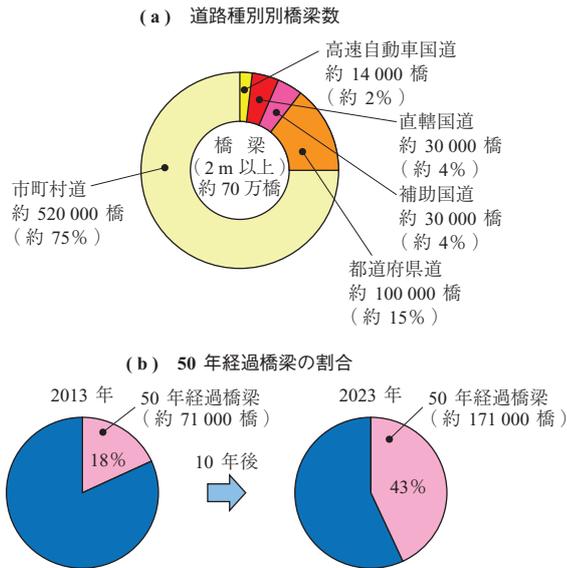
道路の老朽化対策の本格実施に関する提言⁽¹¹⁾によると、全国約 70 万橋の橋梁のうち、建設後 50 年を経過した橋梁の割合は、10 年後には 43%に増加するとの記述があり、今後、早急に老朽化道路のメンテナンスの取組みを強化すべきと提言している。

2000 年ごろから、交通量の多い橋梁を中心として鋼床版に疲労損傷が数多く報告されている⁽¹²⁾。これらの損傷の多くは、主要な溶接部であるデッキプレートと U リブの溶接部に生じるき裂である。これにはルート部からデッキプレートに進展するき裂と、ルート部から溶接ビードを貫通するき裂(第 11 図)⁽¹³⁾の 2 種類が報告されている。これらの疲労き裂には多くの研究が行われており、疲労実験や解析などで発生メカニズムについては多くの論文⁽¹²⁾で考察されている。

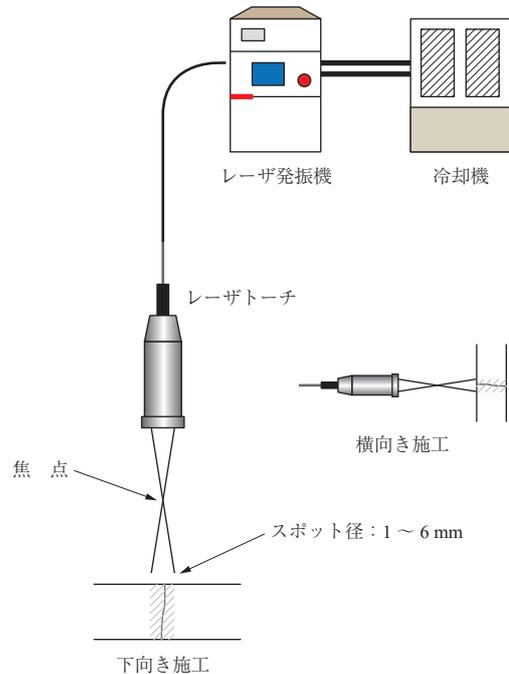
しかしながら、すでに損傷した部位の合理的な補修方法は、まだ確立されていない現状がある。これらの疲労損傷は供用開始後 20 年程度で顕在化されてくる傾向にあり、第 12 図に示す老朽化橋梁の現状を勘案すると、今後は、溶



第 11 図 鋼床版デッキプレート損傷事例⁽¹³⁾ (単位: mm)
 Fig. 11 Example of damage of steel floor deck plate⁽¹³⁾ (unit: mm)



第 12 図 老朽化橋梁の現状⁽¹¹⁾
 Fig. 12 Current state of aging bridges⁽¹¹⁾



第 13 図 レーザによる疲労き裂補修概念図
 Fig. 13 Conceptual diagram of fatigue crack repairing by using laser

接による補修技術の開発が望まれる。また前述したレーザー溶接技術の応用も期待される。第 13 図にレーザー光による疲労き裂補修の概念図を示す。文献 (14)、文献 (15) では施工技術、施工部位の特性について報告されている。

金らの「高経年鋼材の溶接性および継手の機械的特性評価」⁽¹⁶⁾において、老朽化橋梁に対する溶接補修に関する報告がされている。そのなかで補修・補強を必要としている橋梁に使用されている鋼材は、当時の製鋼技術からして、現在の鋼材に比べ、品質が劣るものと考えられると述べられている。さらに経年材に対し、化学成分分析を行った結果、経年材は SM400A に比べ、P (りん), S (硫黄) は多く含まれているが、Si (けい素) が少ない。P や S が多いと、鋼材のじん性や溶接性を低下させるとともに、溶接割れが懸念されるため、老朽化橋梁に対する溶接補修を採用するに当たっては、経年材に対する配慮が必要と述べられている。

また、猪瀬らによる「老朽既設鋼構造物補修溶接へのレーザー・アークハイブリッド溶接適用検討」⁽¹⁷⁾において

は、経年橋梁などの調査実績に基づき、化学成分や強度などを再現した供試鋼を用いて溶接補修のための実験を実施し、割れ感受性や継手性能を検証した。

これらの事からも、メンテナンス時代における溶接技術の課題の一つとしては、低性能鋼材の入手、再現した鋼材での溶接実験が必要と考える。

6. 結 言

近代橋梁技術の進歩と溶接技術について、時代背景に照らし合わせて紹介してきたが、橋梁技術と溶接技術は車の両輪のように切磋琢磨して発展してきた。本稿においては紙面の都合によって筆者が良く知るところの溶接技術の紹介にとどまっているが、実際のところは調査しきれないレベルでの研究が数多く存在することはご理解願いたい。

参考文献

- (1) 国土交通省：社会資本メンテナンス元年 老朽化への対策と長寿命化への挑戦 国土交通 No. 122 2013年10月
- (2) たとえば，一般社団法人日本橋梁建設協会：鋼橋技術の変遷 虹橋 Vol. 72 2008年5月 p. 5
- (3) 中西保正，井元 泉，焼野保雄：HT780 高張力鋼の溶接 石川島播磨技報別冊橋梁特集号 1995年4月 pp. 51 - 57
- (4) 矢竹 丘，百合岡信孝，片岡隆一，常富栄一：鋼材の溶接遅れ割れの研究（第3報）溶接金属ミクロ割れ・横割れの防止 溶接学会誌 第50巻3号 1981年3月 pp. 291 - 296
- (5) 西川和広，村越 潤，中嶋浩之：ミニマムメンテナンス橋に関する検討（橋梁特集） 土木技術資料 第38巻9月 1996年9月 pp. 56 - 61
- (6) 中西保正，猪瀬幸太郎：やさしい橋の溶接技術第2回各種溶接法と特徴 橋梁と基礎 第43巻第12号 2009年12月 pp. 37 - 41
- (7) 猪瀬幸太郎，神林順子，阿部大輔，松本直幸，杉野友洋，金 裕哲：レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた HT780 すみ肉溶接継手の疲労強度改善 溶接学会全国大会講演概要集 第89集 2011年8月 pp. 214 - 215
- (8) 猪瀬幸太郎，神林順子，阿部大輔，松本直幸：レーザーホットワイヤ溶接を用いたすみ肉溶接継手施工と疲労強度 溶接学会全国大会講演概要集 第92集 2013年3月 pp. 158 - 159
- (9) 猪瀬幸太郎，大脇 桂，中西保正，宮地 崇，藪野真史，小川勝治：レーザー・アークハイブリッド溶接の歩道部鋼床版部材への適用 土木学会第63回年次講演会講演概要集 2008年9月 pp. 815 - 816
- (10) 猪瀬幸太郎，阿部大輔，大脇 桂，大畑和夫，岡田誠司，倉田幸宏，金 裕哲：半導体レーザーを用いたホットワイヤ隅肉溶接継手の性能確認 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集 2010年8月 pp. 967 - 968
- (11) 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
- (12) たとえば，村越 潤，梁取直樹，宇井 崇：既設鋼床版の疲労耐久性向上技術に関する研究 国立研究開発法人土木研究所 2008年10月
- (13) 齊藤史朗，川畑篤敬，井口 進，宮下 敏，杉山裕樹：ビード貫通き裂の発生した鋼床版 Uリブ溶接部の形状について 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集 2011年9月 pp. 315 - 316
- (14) 猪瀬幸太郎，松本直幸，阿部大輔，神林順子，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 土木学会年次学術講演会概要集 第68集 2013年8月 pp. 699 - 700
- (15) 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集 第94集 2014年4月 pp. 82 - 83
- (16) 金 裕哲，堀川裕史，上野康雄：高経年鋼材の溶接性および継手の機械的特性評価 - 既設橋梁の溶接を用いた補修・補強に関する研究（I） - 鋼構造論文集 第12巻第46号 2005年6月 pp. 19 - 25
- (17) 猪瀬幸太郎，神林順子，阿部大輔，松本直幸，金裕哲，廣畑幹人：レーザー・アークハイブリッド溶接の割れ防止に関する実験的検討 溶接構造シンポジウム 2011 講演論文集 2011年11月 pp. 93 - 96