

第5章 鋼床版の製作方法とその変遷

5-1 構造詳細の変化に対する製作上の対応

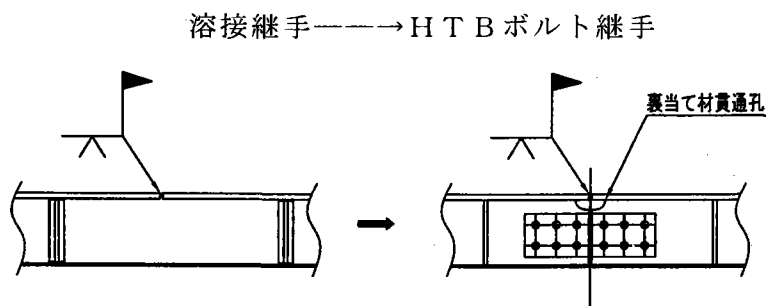
鋼床版桁は昭和30年代から本格的に用いられ、その後40年以上経過している。コンクリート系の床版に比べて軽量で、かつ現場施工期間を短縮できる鋼床版桁は都市部の高架橋や長大橋において多用されてきた。しかし近年の交通量及び大型車両の著しい増加もあり、疲労損傷の事例が報告されるようになり、疲労耐久性向上のため構造詳細も改良が加えられるようになった。

5-1-1 構造詳細の改良

主な改良点は下記の通りである¹⁾。

1) デッキプレートが現場溶接の場合の閉断面リブ現場継手形状

従来デッキプレートを溶接後、閉断面リブをはめ込み溶接していたが、裏当て金付き突き合せ溶接の疲労強度が低いことから、原則HTBボルトによる摩擦接合継ぎ手が標準となった。

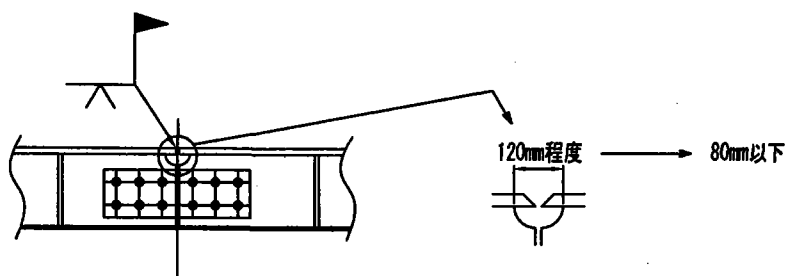


2) デッキプレートが現場溶接の場合、縦リブとデッキプレートの溶接部のスカーラップ長さ

従来120mm程度のスカーラップが設けられてきたが、デッキプレートの面外変形により、デッキプレート側の溶接止端部から疲労亀裂が発生しやすいことが確認されており、スカーラップを非破壊検査が可能な範囲で小さく(80mm以下)することになった。

(デッキプレートと横リブの溶接も同様)

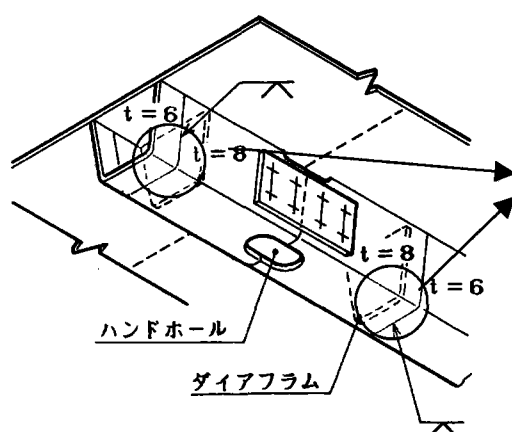
120mm程度 → 80mm以下



3) 閉断面リブの現場継手がHTBボルト継手の場合、閉断面リブの増厚

閉断面リブの現場継手がHTBボルト継手の場合、ハンドホールやボルト孔の断面欠損を補うため継手部の増厚を行ってきたが、裏当て金付き突き合わせ継手の疲労強度が確保されないという問題から、十分な防錆を確保した上でかつ継手位置を横リブ寄りに設置することで、増厚を行わないのが標準となった。

6 mmから8 mmに増厚——→6 mmのまま増厚なし。

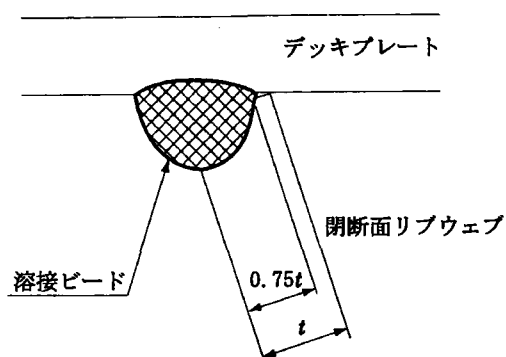


突き合わせ継手なしで $t = 6 \text{ mm}$ の板を通す。

4) デッキプレートと閉断面リブの溶接部における溶け込み規定

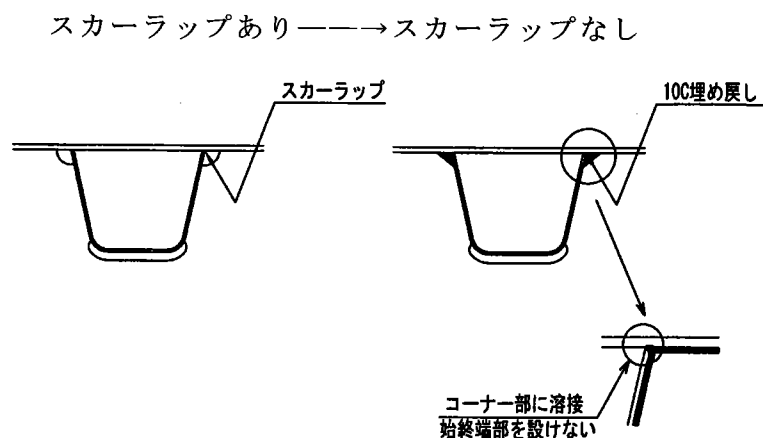
デッキプレートと閉断面リブの溶接部における溶け込み量確保がルート部における応力集中を緩和し、疲労亀裂予防に有効であることが確認されたため、リブ板厚の75%以上の溶け込み量を確保することが規定された。

規定なし——→75%溶込み確保



5) 縦リブ及び横リブがデッキ面で交差する箇所のスカーラップの有無

縦リブ及び横リブがデッキ面で交差する箇所は従来スカーラップが設けられていたが、スカーラップ近傍からの疲労亀裂を防止するために、スカーラップを無くし埋め戻すのが標準となった。この場合、閉断面リブとデッキプレートのすみ肉溶接部に大きな応力集中が生じるため、前頁のようにリブとデッキプレートの溶接部における溶け込み量確保が大切である。



6) 横リブまたは横桁の垂直補剛材とデッキプレートとの取り合い

横リブまたは横桁に設置される垂直補剛材がデッキプレートに溶接された構造では、輪荷重が溶接部の補剛材近傍に载荷された場合大きな応力集中を起こし、疲労亀裂の原因となることが確認されたので、垂直補剛材とデッキプレートには隙間(35mm)を設け、溶接しないことが標準となった。

特に規定なし——→35mm隙間をあけ溶接しない。

7) 横リブピッチ

今までの施工実績及び下記の条件で行った疲労試験等による構造検討例が多いことから横リブ間隔については2500mm以下が標準となった。

特に規定なし——→2500mm以下

8) 縦桁の配置

縦桁付きの垂直補剛材とデッキプレートの溶接部における疲労亀裂防止から、原則縦桁は配置しないのが標準となった。

特に規定なし——→大型車の輪荷重が常時载荷される位置直下には原則配置しない。

9) コーナープレート

コーナープレートとデッキプレートの溶接部における密着が確保できていないことによって生じる疲労亀裂防止より、コーナープレートは原則配置しないのが標準となった。

特に規定なし→大型車の輪荷重が常時載荷される位置直下には原則配置しない。

5-1-2 構造詳細の変遷

昭和30年代後半に本格的に用いられた鋼床版桁は当初T型の板リブやバルブプレートといった開断面の縦リブを使用した構造が主流だったが、昭和40年代後半になると経済性や断面性能の高さから閉断面リブが縦リブに用いられることが多くなってきた。その後の構造詳細の変遷を表す資料として、本州四国連絡橋公団における鋼床版の構造ディテールの変遷を下記に示す²⁾。

表4-1 鋼床版の構造ディテール

橋 名	合成・非合成	横リブ 間 隔 (m)	縦桁(腹板) 間 隔 (m)	デッキ×Uリブ (mm)	縦リブの現場継手		横リブ交差部 スカラップ	縦リブ 溶込み	舗装厚 (mm)	完成 年
					溶 接 継 手	HTボルト継手				
因 島 大 橋	非合成	約2.0	3.5	12×300-220-6	裏当て金は両方仮付け	縦桁近辺のみ適用	あり	規定なし	65	1983
大 鳴 門 橋	"	2.12	3.5, 3.75	12×300-220-6	"	"	"	"	65	1985
瀬 戸 大 橋	"	1.9	3.5	12×300-220-6	"	"	"	"	75	1988
大 島 大 橋	合成箱桁	4.0	"	12×320-260-6	"	なし	下フランジ側 は一部孔埋め	"	65	1988
生 口 橋	合成2箱桁	2.0	10.5	12×320-260-6	"	なし	"	"	65	1991
明石海峡大橋	非合成	約1.75	3.5, 3.625	12×300-220-6	溶接継手なし	・スカラップ120mm ・リブ増し厚なし	孔埋め	75%以上	75	1998 予定
多々羅大橋	合成箱桁	2.5	6.38, 9.04	12~16× 320-260-8	・工場施工区間 ・開先側仮付け +シール溶接	・現場施工区間 ・スカラップ75mm ・リブ増し厚なし	"	75%以上 開先あり	65	1999 予定
米 島 大 橋	合成箱桁	3.0	13.5	12×320-260-6	溶接継手なし	・スカラップ75mm ・リブ増し厚なし	"	75%以上	65	1999 予定
新尾道大橋	合成箱桁	2.5	4.0, 6.5	12×320-260-6	溶接継手なし	・スカラップ75mm ・リブ増し厚なし	"	75%以上	65	1999 予定

5-1-3 製作上の対応

構造詳細の変遷に対する製作上の対応として、最も影響が大きかったのが前頁の4)と5)である。これについては平成14年に改訂された道路橋示方書・同解説 鋼橋編にて対応を義務づけている。

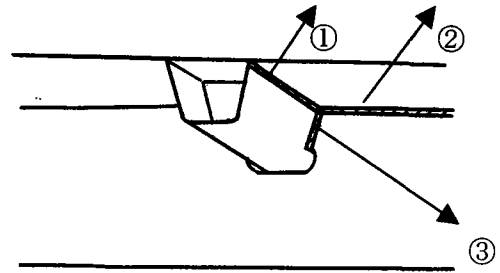
1) デッキプレートと閉断面リブの溶接部における溶け込み量75%確保に対して各ファブとも施工方法はまちまちだが、概ね下記の方法にて対処している。

- ・ 閉断面リブ(板厚6mm)に開先加工を行う。
- ・ 溶接施工試験によって所定の溶込み量を確保するために必要な溶接条件を決め、これを厳しく管理することにより溶け込み量を確保する。

2) 縦リブ及び横リブがデッキ面で交差する箇所のスカーラップ削除に対して

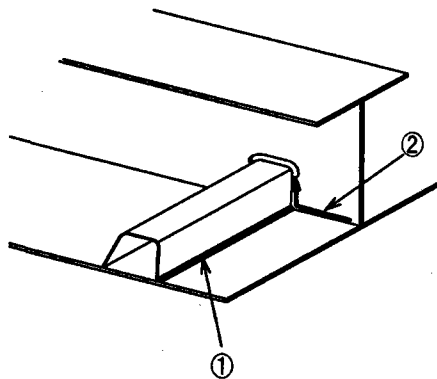
これにより、必ず横リブ取り付け前に縦リブとデッキプレートの溶接を連続して行う必要が生じたので、従来行われてきた「総組立工法」が採用しにくくなった。設備の進歩とともに「パネル工法」が鋼床版製作の主流となった。(詳細は次章参照)

また、右図の①(デッキと縦リブの溶接)
②(デッキと横リブの溶接)、③(縦リブと横リブの溶接)の溶接始末端部を集中させることができないので、各社溶接順序に留意しながら施工を行っている。

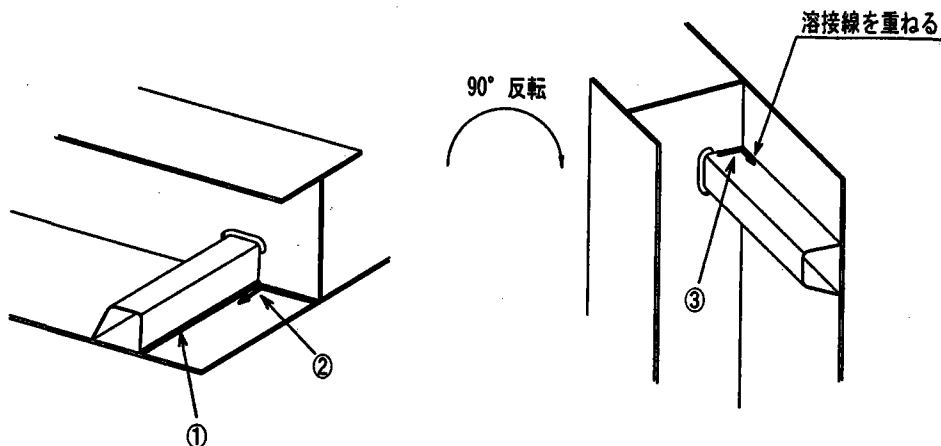


上図の溶接3線(①、②、③)における溶接施工は概ね下記の方法に大別される。

a) ①の溶接を行った後、②の下向き溶接を行い連続して③の立向き溶接を行う。この方法は部材を上下反転した状態で①～③の溶接を行えるので、安定した状態で作業ができる。また、パネル状態に横リブを取り付けた状態で、ロボットを使用して連続溶接を行うファブもある。



b) ①の溶接を行った後、②の溶接を下向きで行い①の溶接線にラップしたところで止める。その後部材を90度回転し③の溶接を下向きで行い、①の溶接線にラップしたところで溶接を止める。この方法によると全ての溶接を下向きで行える。



5-2 鋼床版組立方法

鋼床版の製作方法は、溶接を中心とした設備の自動化とともに進歩してきた。従来、鋼床版（鋼床版を有する鈑桁、箱桁、側・中央床版）製作の主流となっていたのは、通称「総組立工法」と呼ばれる工法で、部材（補剛材、リブ等）を組立溶接にて総組立した後に全ての溶接を行うものだった。当時、この工法が主流を占めていた理由として、技術的に溶接における変形量の把握が十分ではなく、溶接後の矯正作業が困難であったのと、製作コストの中で人件費の占める割合が比較的少なかったことなどが上げられる。しかし、昭和60年ごろを境に「パネル工法」と呼ばれる工法が主流になってきた。この工法はウェブ、デッキプレートに補強リブ、補剛材を先に溶接し歪矯正後、ウェブパネルとデッキパネルの組立を行うものです。パネル工法が採用されるようになった理由として下記のようなことが挙げられる。

5-2-1 ガスシールドアーク溶接の普及

昭和50年代半ばにガスシールドアーク溶接が普及し、簡易台車といった走行装置が開発されるとともに一気にガスシールドアーク溶接を用いた自動化が進みパネル工法が増えた。

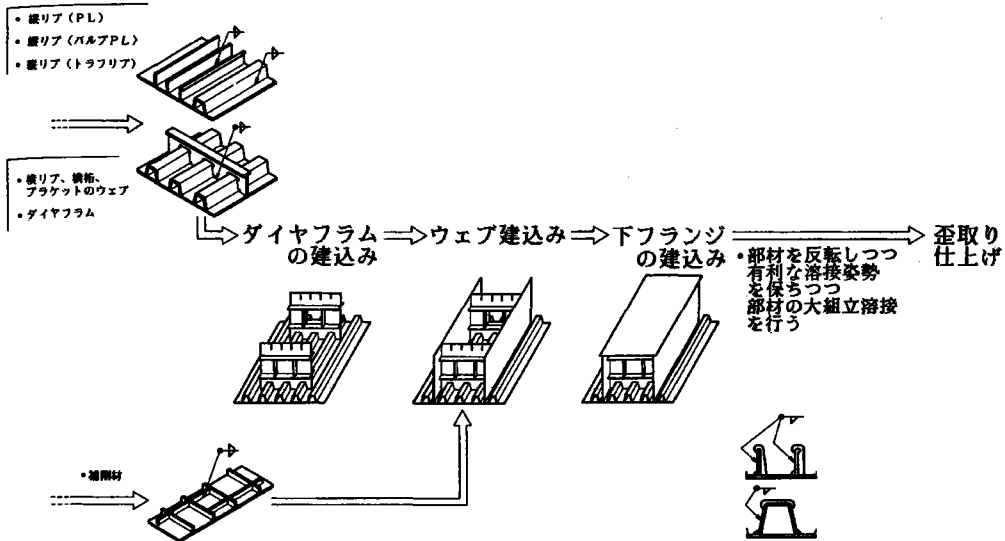
5-2-2 構造詳細の変化

鋼床版の疲労損傷対策から、縦リブ及び横リブがデッキ面で交差する箇所のスカーラップをなくす構造が主流になってきたことにより、総組立工法が事実上困難になってきた。

現在では、ほとんどのファブでパネル工法が採用されている。これにより鋼床版溶接の高能率化を図れるだけでなく、箱桁内など狭隘な場所での溶接を減らすことができ、品質の安定及び安全衛生面にも大きく寄与することになった。

組立て工程

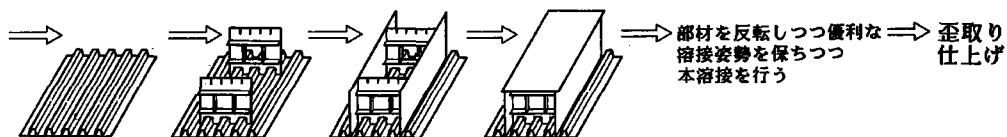
パネル工法の場合



組立て工程 (パネル工法の場合)

総組立工法の場合

下図の手順で仮付けによる組立を行う



主な溶接箇所

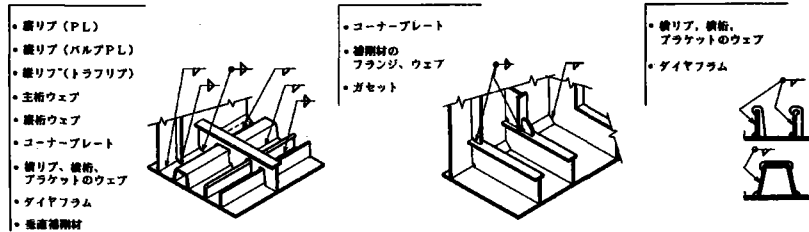
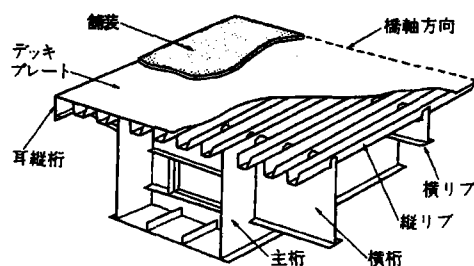


図 5 - 1 パネル工法と総組立工法の比較 (3) より抜粋)

5-3 使用材料

鋼床版は下図に示す通り、縦リブ・横リブで補剛したデッキプレート上に舗装を施した床版であり、直接輪荷重を受けることや、活荷重応力の占める割合が大きいことを考慮し、各部材の使用材料は疲労を考慮して決定する必要がある。



5-3-1 デッキプレート

デッキプレートは縦リブ・横リブが溶接で取り付けられることから、溶接によるひずみが少ない構造とする必要がある。また、車道部の鋼床版については舗装に悪影響を与えないように、輪荷重によるたわみ制限値として最小板厚が決定されており、道路橋示方書 8.4.5 において最小板厚を 12mm と規定している。このため通常は 12mm 以上で設計され、使用材質は SM400A～SM570 まで採用事例がある。

5-3-2 縦リブ

縦リブは、横リブ腹板で連続性が断たれる場合疲労強度上問題があり、通常横リブを貫通して連続する構造が採用されている。縦リブの形状は、下図に示す通り開断面・閉断面があるが、1976 年以降には、平鋼、バルブプレート、U リブを主体に使用されるようになった。



(a) 平鋼断面



(b) バルブプレート断面
(球平形鋼断面)

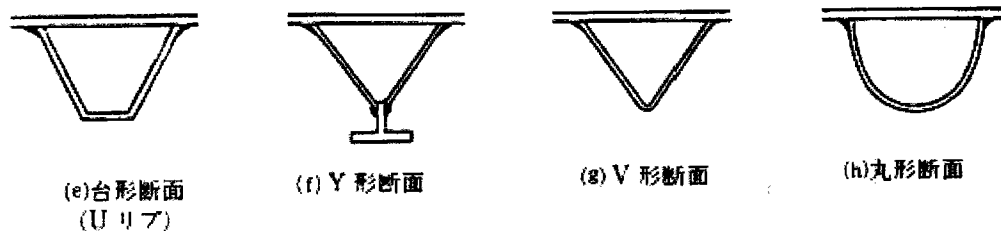


(c) 山形鋼断面



(d) T 形断面

開断面縦リブの形状



開断面縦リブの形状

この内 U リブは、リブの鋼性が大きく荷重配分が良い・密閉断面であり防食上好ましい・取付時の溶接歪が少ないなどの利点から鋼床版では主流となっているが、曲線桁などで曲線加工が必要な場合や、U リブ間隔の調整が必要な部位には、平鋼、バルブプレートが使用されている。縦リブの最小板厚は道路橋示方書 8.4.6 において 8mm と規定されているが、U リブをはじめとする閉断面リブでは、腐食環境が良好な箇所に限り最小板厚が 6mm とできる。なお、標準的に使用されるサイズは下記の通りである。

- ・ U リブ 320×240×6-40、300×260×6-40、320×240×8-40、320×260×8-40
- ・ バルブプレート 180×9.5、200×10、230×11、250×12
- ・ 平鋼 各種使用が可能

なお、2000 年頃より合理化鋼床版が採用されるようになったが、デッキプレートを厚く（18mm 等）し、かつ大型トラフリブを組み合わせることで、工場製作時の省力化や維持管理費の削減が図られるなどの利点がある。

5-4 設備

昭和 60 年ごろから橋梁の発注量の増大とともに、各ファブリケーター共に生産性の向上及び品質の安定を目指して、自動化に向けた動きが活発になってきた。

5-4-1 デッキプレートとリブの溶接

昭和 50 年代以前における溶接工法は被覆アーク溶接及びサブマージアーク溶接が主流だった。この時期、被覆アーク溶接棒を使用したグラビティー溶接及び多電極サブマージアーク溶接法（ラインウエルダー）を用いて自動化を推進してきたファブもあったが、グラビティー溶接による自動化には限界があり、また、当時のラインウエルダーは非常に大掛かりなものになっていた。昭和 50 年代半ばのガスシールドアーク溶接の普及とともに、ガスシールドアーク溶接を用いた多電極自動溶接が盛んになった。多電極溶接装置には大きく分けて下記の 2 種類があり、いずれも昭和 60 年ごろから本格的に導入されている。

1) 簡易走行台車を複数台使用

簡易走行台車と溶接電源、溶材を乗せた移動式台車を組み合わせた多電極溶接装置で比較的簡単に多電極の溶接ができ、設備に汎用性を持たせやすい。開先の倣いは立て板倣い等の機械的倣いを中心である。

2) 多間接アーク溶接ロボットを複数台使用

多関節アーク溶接ロボットを複数機用いた多電極溶接装置で、トーチの数が増える
と大掛かりなものとなる。開先の倣いはアークセンサー等が中心で、ノズルクリーナ
ー等と組み合わせて品質が安定した高速自動溶接が可能である。また、縦リブ端部の
始末端処理を行えるロボットもある。

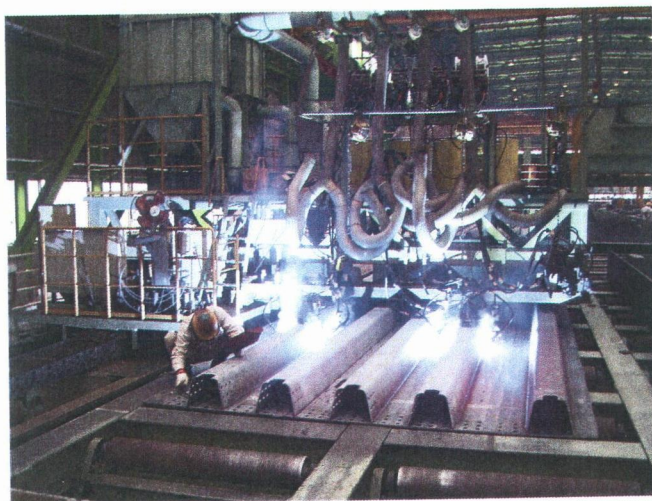


写真 5 - 1 多電極溶接装置を用いた閉断面リブの溶接

多電極溶接装置の導入に伴い、これら溶接装置と、縦リブの組立装置及び溶接後の
矯正を行うプレスとを組み合わせパネルラインとして設備を固定するファブも増えて
きた。

ライン上で各装置間の移動をコンベヤで行うことにより、クレーン作業を減らしよ
り能率的な生産が可能となった。また、矯正用のプレスにローラー型のプレスを用い
ることにより、従来困難であったパネル長さ方向の曲がり（特にバルブプレート）の
矯正も容易に行えるようになった。

5-4-2 横リブと縦リブ及びデッキプレートの溶接

横リブと縦リブ及びデッキプレートの溶接部は特に箱桁の場合、自動化が困難とさ
れ大組立完了後に、ガスシールドアーク溶接にて行うのが一般的である。ファブによ
ってはパネルに横リブをつけた状態で大組立前にロボット等を使用して自動溶接を行
っている会社もある。

5-5 溶接材料

昭和50年代後半にガスシールドアーク溶接が橋梁の製作に多く用いられるようになった理由として、溶接外観及びワイヤー送給性の良いフラックス入りワイヤーが開発されたことが挙げられる。ガスシールドアーク溶接の芯線にはソリッドワイヤーとフラックス入りワイヤーがあり、いずれも昭和40年前後に国内で実用化された。当時のソリッドワイヤーはビード外観があまり良くなく、フラックス入りワイヤーも吸湿及びワイヤー送給性に問題があり、橋梁ではあまり使用されず、被覆アーク溶接及びサブマージアーク溶接が主流だった。昭和55年前後に市場にでてきたフラックス入りワイヤーはすみ肉溶接ビード外観が良好で橋梁の厳しい品質要求を満たすことができた。図4に代表的なファブにおける溶接材料使用比率の変遷を示す。⁴⁾

また、昭和62年には充填フラックスが金属粉主体のメタル系のフラックスワイヤーが商品化され、溶接機の自動化と相まって、より高能率なすみ肉溶接が可能となった。

その他、鋼床版の溶接施工上、下記の事項を意識して溶接材料が開発されてきた。

5-5-1 耐プライマー性

パネル工法で縦リブを連続溶接する場合ピット等いかになくすかが問題になる。そのため、黒皮及びプライマーを全て取り除いて施工するファブもあるが、その労力を減らすために、プライマーの状態で溶接を行っても耐ピット性にすぐれた溶接材料の開発が望まれてきた。

プライマーについても塗料メーカーにより耐ピット性の良い機能性プライマーの開発もあり、プライマーを除去せずに溶接を行うファブもある。

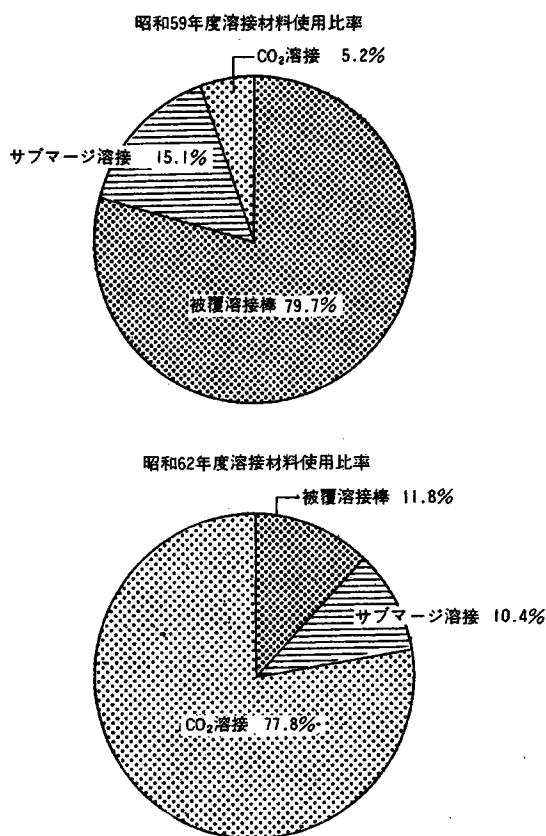


図4-2 溶接材料使用比率の変遷

* CO₂溶接はガスシールドアーク溶接に含まれる。

5-5-2 全姿勢で良好なビード外観

縦リブと横リブとの溶接を立向き溶接にて行うファブがある。特に構造詳細の変化により横リブとデッキプレートとの溶接から連続して縦リブと横リブの溶接が行なわれようになると、立向きでも良好なビード外観が望まれるようになった。昭和50年代半ばに商品化されたワイヤーは基本的に全姿勢溶接が可能なものだったが、溶接材料メーカーによっては下向きから立向きに連続して溶接しても良好なビード外観が保持できることを意識してワイヤーを開発した。(平成16年)

5-5-3 深溶け込み用ワイヤー

閉断面リブとデッキプレートとの溶接において、閉断面リブ板厚の75%以上の溶け込みを要求されるようになってから、深溶け込みを意識したワイヤーが開発された(平成13年)。これにより閉断面リブに開先を取らずに溶け込み量を確保しているファブもある。

5-6 品質管理

5-6-1 鋼床版の現状

鋼床版は薄板を溶接で組み立てる構造であり、製作過程において溶接による欠陥や変形が生じやすい問題がある。また、自動車荷重を直接受けて主構造に伝達するため、活荷重による応力変動に起因する疲労損傷が発生しやすいといえる。このため鋼床版では疲労損傷を考慮した様々な構造ディテールが採用されているが、製作時の溶接不良(ブローホール、溶け込み不良、アンダーカット、スラグ巻き込みなど)が疲労強度に与える影響は大きいといえる。このため、製作時には溶接部表面および、溶接内部についての検査を実施することで溶接品質を確保している。

5-6-2 溶接部表面の検査

一般的に採用されている代表的な試験方法は下記の通りである。

1) 目視試験

主に目視により溶接外観の検査を行う。アンダーカット、オーバーラップ、ピットなどの有無を判定し、適正な溶接形状であることを確認する。

2) 磁粉探傷試験

磁粉探傷試験は、細かい磁粉を用いて適切に材料を磁化し、鉄の表面又はその近傍に割れ等の欠陥がある場合に、不連続部を支持する模様を形成させることにより欠陥を判定する方法である。

3) 浸透探傷試験

浸透探傷試験は、溶接部表面の微細な傷を拡大して検出することを目的とし、開口したきずには毛細管現象により液体が浸透することを利用した方法であり、浸透液などの探傷剤を使用してきずの存在を発見する方法である。

5-6-3 溶接内部の検査

上記の試験では検出できない溶接内部の検査としては、以下の方法が代表的である。

1)放射線透過試験

放射線透過試験(RT)は、X線を透過した部位に内部欠陥が存在すると、フィルムに欠陥が撮影されることを利用して、主に主要部材の突合せ継手部に適用される検査方法である。

2)超音波探傷試験

超音波探傷試験(UT)は、超音波を溶接部位に入射し、傷からの反射エコーを捉えて、内部きずの寸法や位置を推定する方法である。

道路橋示方書では、完全溶込みの突合せ溶接継手においては、内部きずに対する非破壊試験は放射線透過試験、超音波探傷試験のいずれかを実施し、部材の圧縮・引張等の応力方向に応じて検査継手数が規定されている。鋼床版の場合、デッキプレート
の突合せ溶接箇所には通常放射線透過試験(RT)が採用されており、RTの適用が困難な部位における完全溶け込み溶接箇所については、超音波探傷試験(UT)により溶接部の検査を行う。また、鋼床版の現場突合せ溶接箇所においては、工場溶接と同様の方法で非破壊検査を行うが、工場製作時と比較して欠陥が生じやすいことを考慮し、溶接始末端部、中間部、ワイヤ継ぎ部について重点的に検査を行うことが要求されている。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針、平成14年3月
- 2) 大橋、藤井、村瀬：鋼床版の疲労を考慮したディテールの改良、橋梁と基礎(97-4)
- 3) 土木学会：鋼床版の疲労、鋼構造シリーズ4(1990.9)
- 4) 成宮、伊藤：橋梁製作におけるパネル組立工法と自動化システム「PASシリーズ」、
宮地技報 No.5