

〔招待論文〕

省力化のための橋梁構造改良の提案

ALTERNATIVE DESIGN DETAILS TO FUTURE STEEL BRIDGE FABRICATION

寺田 博 昌*

By Hiromasa TERADA

Fabrication of structural steel bridge members in plants is carried out on a typical multi-item small production basis and its automation is unpromising, unlike one in the modern fabrication industry. Promotion of automation often encounters obstacles due to the low added-value of fabrication, hence many parts of members must be dependent on fabrication by hand. Due to this, the labor-saving approach to absorb yearly increasing personnel expenses and labor costs is yet to proceed. The approach to automation and labor-saving essentially requires steel bridge construction to change into one suitable for automation and one with less fabrication requirements. Total CIM concept from the design stage to fabrication stage is necessary in order to minimize the working at bad surroundings and to liberate workers from the drudgery of the so called 3K.

1. はじめに

鋼橋の生産は典型的な多品種小量生産であり、橋を構成する部材の大きさも大小さまざまである。また、加工の付加価値が小さいことから、自動化による経済効果は極めて低い。さらに、発注形態が詳細設計付きのものや、コンサルタントからの到来図に基づいた製作のみ（照査は含まれるが）のものなどさまざまで、生産に着手する前段階における取り扱いが異なることが多い。さらに発注機関毎に標準設計、標準構造詳細の違いもある。

これらの理由によって、家電製品、耐久消費財、自動車といった少品種多量生産品目を対象とする、近代加工産業におけるようなめざましい自動化は、望むべくもない。

そうしたなかでも、一部のファブリケーターではデーターを集中管理することによって誤作の防止や無駄な工程を省略する、NC機械の活用によって製品精度の向上や省力を図る等の努力が進められている。CAD/CAMの言葉は一般化し、各社ともその利用率を高めるためのソフト開発および自動化機器の採用に血眼になっている現状にあるとしても、現実には工場製作のうち、原寸、罫書き、切断、孔明けまでの、いわゆる前加工段階に対するものが大部分である。前加工段階は比較的自動化が図りやすく、設計データを利用したNC処理に向いているためである。工数的に考えると、組立、溶接、仮組立、塗装といった後加工工程のほうに多くの工数がかかるにも係わらず、ほとんど自動化は行なわれていない。せいぜい、溶接をサブマージ溶接、CO₂・MAG溶接へ自動化あるいは半自動化して、手溶接を少なくしている程度であろう。

特に箱桁については、組立・溶接が鋼橋を最終形状に整える重要な作業であるが、パネル組立て法にし

* 工博 (株)横河ブリッジ 研究所 (〒260 千葉市新港88)

ても、総組立て法にしても、箱内での作業が多いため作業効率が悪く、製作工程のネックとなるとともにコストブッシュの大きな要因となる。さらに箱内という劣悪な環境条件での作業を強いられる。

各社によって事情は異なるものの、労働力の高齢化および溶接の専門技能者の慢性的な不足、新規希望者の欠除といった労働事情を考えた場合、近い将来には箱断面桁の組立・溶接が不可能となる危惧さえある。このために、各社各々に工夫をこらし、ロボットの活用や製作のライン化、組立て方法の研究が進められているが、利用効率・投資効果に対する疑問、ライン化のための大がかりな機械装置および大きな占有面積を必要とすることなどのため、殆んど実用化されていない。

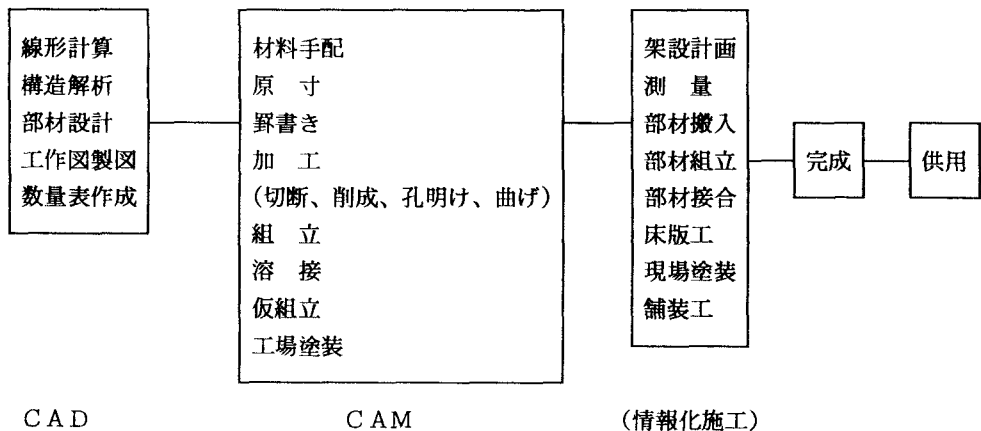
仮組立についても、この作業は屋外作業であり、ほぼ架設現場と同じだけの人手がかかるので、自動化が図ればメリットは大きい、その反面、最も自動化が困難な部分である。橋を構成する各部材の寸法管理を向上させて仮組立を省略化するという積極的な姿勢が必要となるが、現状では一部の会社の取り組みに終わっており、業界全体としての取り組みは遅れている。

以上のように、鋼橋の製作分野における自動化は、定型的な製品を多量に作っている産業と比べると非常に遅れている。その理由として、鋼橋の構造がリベットによる集成から溶接による集成に移行したり、CADが採用されたりといった技術的進歩があったとしても、より作り易い構造、省力化を考えた構造に関する研究・提案がなく、従前通りの人手を多量に要する構造からの脱皮がなかったことが挙げられる。

前述のように、これまでの構造を踏襲する限り、いずれかは熟練作業員の不足によって、鋼橋、特に箱断面桁は生産不可能な事態の到来さえ心配される。そのためには、従来からの構造や製作方法を見直し、箱断面内での溶接作業を極力少なくしたり、あるいはロボット・自動溶接の適用に適した構造としたり、更に簡便な仮組立精度検査手法を確立するための研究に早急に着手する必要がある。

2. 設計・製作工程と自動化

図－1に、鋼橋の一般的な設計・製作・架設工程を示し、次いでそれらの自動化の現状を述べる。



図－1 設計・製作・架設の各種工程

図－2には、例として鋼床版鋸桁および箱桁について、CAD/CAM化の状況を示す。主に鋼橋専門ファブ19社について、社内・社外のいずれにしても、CAD/CAM化、自動化を開発完了したか、予定している会社の比率を示したものである¹⁾。

C A D		C A M		
座標計算	9 5 %	板取り	9 5 %	
構造解析	9 0	罫書き	7 5	前加工
設計計算	9 0	孔明け	9 0	
主構造製図	6 5	溶接	2 5	後加工
付属物製図	6 0	仮組立	0	
数量計算	9 5	検査資料	9 0	

図－2 C A D／C A M化、自動化の比率

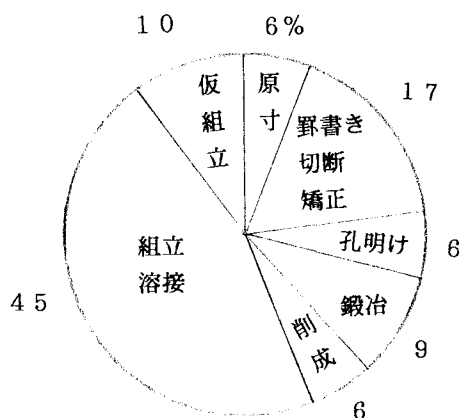
すなわち、設計についてはかなりの部分がC A D化が図られ、合理化努力が進められているものの、製図については未だ自動製図化は6 5 %程度であって、手作業に頼る面が多いことが判る。構造解析、設計計算の自動設計システムのデータが有効に製図に利用されず、その結果、工場製作時には新たに製作用のデータ入力が必要なることを示している。したがって、実情はC A D⇒C A Mの流れではなく、各工程単独の処理がなされていることになる。

設計から製作までの各工程を連続して処理しようとする、いわゆる「一貫システム」が望ましいのは当然であるが、構造形式の種類多さ、複雑な構造詳細の存在のため、膨大な入力データとなるし、ソフトの規模が大きくなり、ミスが発生しやすくなる、システムの運用に熟練が必要になる、開発コストも膨大になる等の問題がある。

製作に関しては、前加工段階まではかなりの高率で曲がりなりにもC A M化、自動化が図られているが、溶接になると2 5 %、仮組立では0 %とほとんどC A M化、自動化がなされておらず、あくまで人手が中心である。

次に、一般的な箱桁製作に要するこれまで（C A D／C A M化以前）の直接工数を各工程毎に図一3に示す。

組立、溶接および仮組立の3工程が、全工数の半分近くを要している。特に、組立・溶接は全製作工数に占める比重が飛び抜けて多いことが判るし、この工程の効率化が最重要であることは明らかである。



図－3 所要製作工数比率

3. 箱桁の製作上の問題点

図－4に全産業における溶接材料の生産量、溶接工の人数および溶接工一人当りの溶接材料生産量の推移を示す²⁾。7 0年までは溶接工、溶接材料とも上昇の一途にあり、溶接の需要の伸びとそれに伴う労働力の確保がバランスしていたと言える。ところが、7 0年以降は溶接工の人数は下降に入り、9 0年には6 5年当時の人数にまで減少している。これは3 Kを嫌う若年技能者の現場離れや熟練者の高齢化が進んだためと考えられる。溶接材料の生産量は、年間の変動はあるものの、平均すれば4 0万トンのレベルを維持している。また、アーク溶接機は標準自動機の生産台数の伸びが著しいと言われている。

したがって、溶接工一人当たりの溶接材料量の増大、すなわち、溶接施工の生産性の向上は結局、被覆棒溶接から高溶着効率、高電流化を計ったCO₂、MAG溶接などの半自動溶接へ移行したことによって実現されたことになる。CO₂、MAGの半自動溶接は溶接のスピードは早いものの、所詮手動溶接であり、熟練した溶接作業者に頼らざるをえない。労働省需給調査において、91年時点での溶接工の不足率28.4%から、さらに図-4に示されたような溶接工の減少がこのまま続くとすれば、溶接作業者の確保はますます困難になり、鋼橋の製作に支障をきたすことになる。

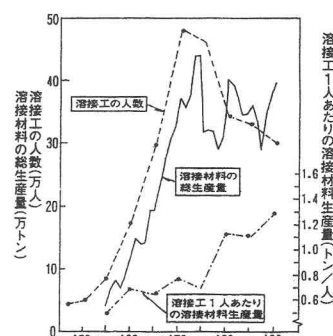


図-4 溶接関連項目の変化²⁾

図-5には、作業員の作業姿勢と疲労度の関係を示す³⁾。また、写真-1に鋼箱桁内の作業状況を示す。箱桁の寸法は様々であるが、高さあるいは幅が1m以下の断面は決して少なくない。溶接作業では、この姿勢の悪さによる疲労度に、遮光および耐熱の保護具と防塵マスクの着用による疲労が重なり、劣悪な作業環境におかれる。これらのことより、鋼橋のなかでも特に箱桁の溶接施工は、“きつい”、“きかない”、“危険”の3Kの代表的なものといえる。

作 業 姿 勢 姿勢状況	変 面 視 図		所 要 空 間 (標準寸法) (m)			補正率 (%) (比較)	
	側面視	正面視	高さ	幅	長さ	基準	基準
制約なしに自由に作業が出来る。			1.8	0.8	1.0	100	1.0
少し体をかがめたままでない作業が出来ない。			1.5	0.8	1.0	80	1.5
膝を深く折曲げてしゃがまない作業が出来ない。			1.2	0.8	1.0	50	1.2
膝を深くか、尻を滑かない作業が出来ない。			1.0	1.0	1.0	40	1.1
俯伏か仰向けで下腿を伸ばさない作業が出来ない。			>0.6 俯伏 仰向 <0.6		0.8	1.6	2.0

図-5 作業姿勢と疲労度³⁾

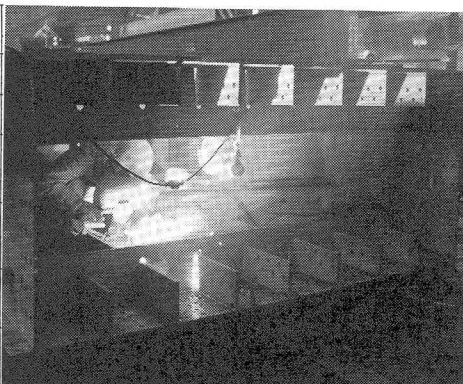


写真-1 箱桁の製作状況

箱桁の組立・溶接(図-6)は、これまで主に2種類の方法が採られてきた。パネル工法と総組工法である。前者は、あらかじめ上・下のフランジ材とウェブ材にリブあるいは補剛材を本溶接し、それらのパネルの溶接による変形を機械的に矯正した後に、ダイアフラムをゲージ材として箱断面に組み立てるものである。箱断面形成後の箱内での溶接量は後者より少ないが、矯正の工数を要する。後者は、各パネルともすべて仮付け溶接の状態では箱断面に集成し、その後で、箱内外の全溶接を行なう方法である。この方法では、断面の拘束があって、本溶接後の矯正を必要としないが、箱内の溶接量がパネル工法の倍近くなる。このように両工法ともそれぞれ一長一短があり、また各ファブリケーター、工場の得手不得手もあって、各製作会社の判断に

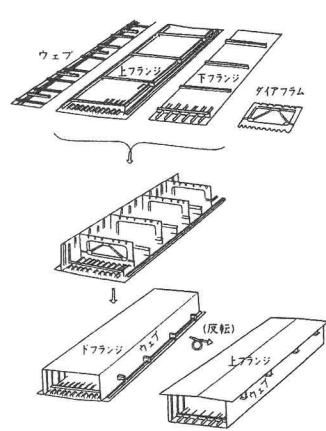


図-6 箱桁の組立方法

任されている。ただし、いずれの方法を採用するとしても、フランジとウェブにまたがる溶接、すなわちフランジ・ウェブの首溶接、ダイヤフラム、横リブ、補剛材の取り付け溶接などのために、かなりの箱内溶接作業が必要となる。さらに、ダイヤフラムをゲージ材として使用するため、ダイヤフラム開口部の補強材をパネル状態で本溶接できず（溶接変形が発生）、これら補強材の溶接も箱内での溶接作業となる。フランジ・ウェブの首溶接線以外は、全てリブや補剛材で分断された短い両側溶接であり、その始端と終端には狭隘な空間での回し溶接が要求される。溶接姿勢も、反転回数が制限されるような断面形状では、下向き、水平、立て向き、上向きの全姿勢になることが多い。

また、近年の景観重視の傾向は、製作の難易・可能精度や製作時の作業安全を無視した無理な断面形状さえ要求しており、作業の劣悪化に拍車をかけている。

4. 箱桁製作の作業改善、省力化への提案

業界内でも、現在鋼橋製作の自動化への動きは急である。基本的には少しでも箱内での溶接量を減らすべく、パネル工法の採用に踏み切る会社は多い。この場合、パネルの自動組立装置、多電極自動溶接装置およびパネル矯正装置を直列に並べ、コンベアあるいはクレーンで部材をこれらの装置を通して流れ作業とする、いわゆるライン化施工が中心である。ただし、総組立および総組後の溶接は装置が大きなものとなるため、また他のラインの作業速度と整合が取れないためにライン化から除外されることが多い。

図－7に、このようなパネルライン化を図った場合の標準的な箱桁一本（部材長10m、箱内溶接総延長500m）当りの製作工数の試算結果を示す。

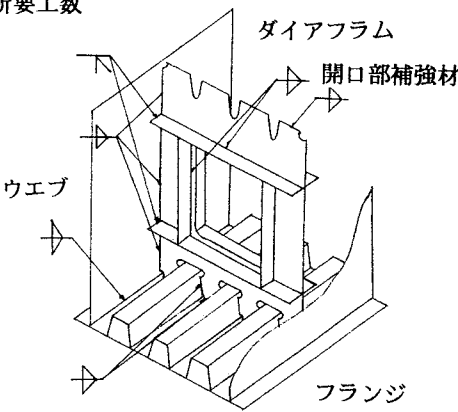
パネルライン化工法		[参考]	総組立工法	
パネル自動組立	12%			
パネル自動溶接	2			
パネル矯正	4			
総組立	24		総組立	33%
総組後溶接	58		総組後溶接	86
100%			119%	

図－7 パネルライン化工法の所要工数

図－7より、総組立工数に比べると、パネルライン化によって19%の省力化が可能になる。しかし、このために、3～5億円の設備投資を要する。パネル自動組立にかなりの工数を要しているのは、溶接ピットを防止する上で、プライマー除去が必要なためである。これまで以上に耐ピット性に富んだ溶接材料の開発が必要なることを表している。

また、パネルライン化を図ったとしても、ライン外の作業となる総組立、総組立後溶接の両工数は、全体工数の82%を占めており、自動化とは到底言えない。

図－8にパネル工法を採用した場合の溶接の種類を示



図－8 箱内溶接の種類

す。鋼床版構造を含めて箱桁の1部材長を10mとすると、この部材には1～2枚のダイアフラムと3～6枚の横リブが入ることになる。したがって、箱桁部材の両側端面からはブラインドになる溶接箇所が多く存在する。前述したように、これらの溶接線はリブあるいは補剛材に分断された短い溶接であるし、その始末端にはスカーラップ内の回し溶接も必要である。フランジ・ウェブの首溶接も、箱内面ではダイアフラム、横リブ、補剛材等の邪魔板によって連続自動溶接はできない。このため、数人の溶接作業者が狭隘な箱内に入り、劣悪な作業環境の下での溶接作業を強いられている現状にある。勿論、この点を改善すべく、各社において懸命の努力が進められている。

現状構造をそのまま踏襲するとした場合の自動溶接装置の案を図-9に示す。図-9に示すように、先ず1辺を開放したU組の状態では3辺の溶接を行ない、その後箱断面を形成して残りの1辺の溶接を行なうものである。U組状態では2～4台の自動溶接装置を同時に動かして、下向き、立向きの溶接をNCデータにしたがって行なわせる。箱断面形成後に反転して、水平方向に伸縮できるアーム先端に溶接トーチを設置して自動下向き溶接を行なう。この方法にも、組立作業が2段階となり、作業が煩雑であるし、U組溶接後の変形に対する検討も必要である等の問題がある。

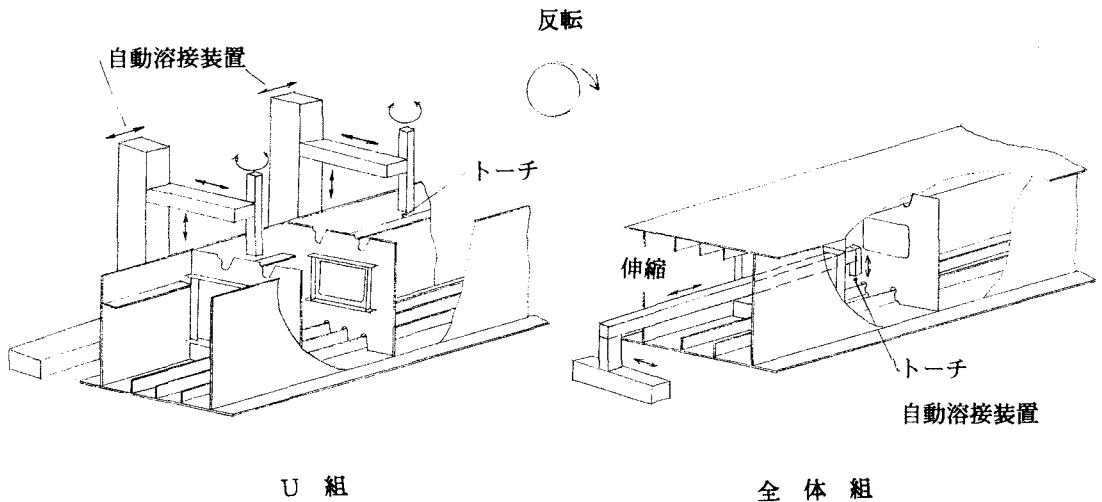


図-9 箱桁の自動溶接装置案

図-9は単なる試案である。これ以外にも、可搬式のロボット溶接機を用いて、ティーティングブレイバック方式で下向き・立向き溶接を行なうことも考えられるが、いずれにしても橋ごとに異なる断面寸法や溶接詳細・種類に対応できるような汎用性に富んだ自動溶接装置の開発には、膨大な開発投資と設備投資を必要とするはずである。

以上述べてきたように、これまでの懸命の努力にもかかわらず、箱断面の集成に当たっては未だ手溶接作業が中心であり、作業環境の改善、生産効率の向上の点から見て、ネックになっている。この理由は、これまで設計段階では構造詳細決定に際して製作への考慮がなく、製作サイドだけが与えられた構造に対処することを考えていたためである。

何回も述べているように、箱断面の構造は薄肉補剛構造の代表的なものであって、薄肉のフランジ・ウェブとリブ、補剛材、ダイアフラム、横リブなどで溶接集成されているが、この構造は溶接集成が一般化

した昭和30年代から何ら見直されていない。人手の慢性的な不足時代、高齢化社会に既に移行し始めた現在、設計面からの構造詳細の見直しと製作面からの溶接の自動化を早急に図る必要があるの考えるのは筆者だけであろうか。

現在考えられる問題点および改善提案を以下に列記する。

- ① フランジ・ウェブ首溶接の効率化 (図-10)
 - ・箱外面からの片面自動溶接の採用
 - 部分溶け込み溶接
 - 裏波溶接
- ② 箱内面溶接量の減少
 - ・ダイアフラムリブ (開口部補強用) の先付けあるいは接着接合 (図-11(a))
 - ・ダイアフラム、横リブ構造の変更
 - ボルト接合 (図-11(b))
 - ・ディテールの変更
 - スカーラップ、回し溶接の省略
- ③ 溶接設計の考え方の変更
 - ・すみ肉溶接最小脚長の変更 (例、フランジと縦リブの溶接)
 - ・断続溶接の採用
 - ・ダイアフラム-フランジ・ウェブ溶接の片面溶接化
- ④ コンパクト断面の採用
- ⑤ 箱内面自動あるいはロボット溶接装置の開発

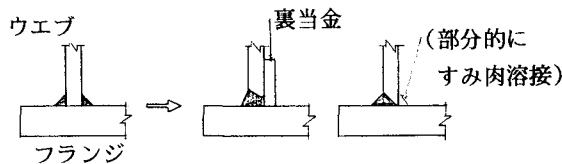
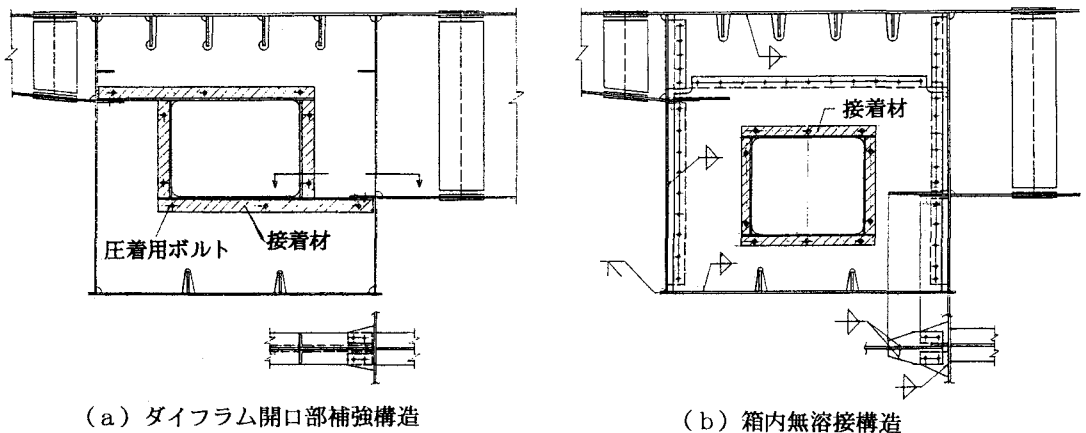


図-10 フランジ-ウェブ溶接



(a) ダイアフラム開口部補強構造

(b) 箱内無溶接構造

図-11 箱桁改良構案

これらは全て、関連しあうものであるが、個別に見てみると、①については技術的に可能であり、組立や溶接の製作上の利点が確認されれば、比較的容易に採用できるものである。②については、鋼重や工種の増加を伴うが、作業環境の改善を考えれば十分にペイするはずである。③は示方書の規定に抵触する項

目であるが、鋼構造関係者の研究努力によって可能になるかも知れない。④についても、これまでの最適設計＝最小重量設計の考え方を改め、本当に経済的で耐久性に富んだ構造物とする立場にたてば、可能性はあろう。⑤については、その実現には長い期間とロボットあるいは溶接機メーカーと我々橋梁技術者の協力が必須であるが、いずれは採用に向かうことは間違いない。

前述したパネルライン化に併せ、このような設計構造面からの改変と製作サイドの自動化に対する取り組みによって社会的なニーズに合った箱桁橋が確立されよう。

仮組立は、複雑な部材細部の干渉や組立上の問題点を、実際の現地架設に先立って、目視によって確認する最も確実な検査と考えられてきた。しかし、この作業は、広大な用地と重機設備、仮設器材を必要とするし、さらに天候に左右される屋外での高所作業であって、労働災害と背中合せの苛酷な仕事である。このため、若年労働者から敬遠されがちであるし、鉋桁、箱桁、トラス、アーチ等多品種小量生産物のため自動化もままならない。

CAD/CAMデータにしたがって製作された各部材は、ある一定の寸法精度内に納まっているはずである。したがって、仮組立をして形状を確認した後で調整加工を加え、所定の製品精度に橋全体を整形するといった面倒な作業は現実にはほとんど不要のはずである。現在進歩が著しい写真測量技術や画像処理技術とコンピュータシュミレーション手法を組み合わせることによって、各部材の単品精度から橋全体の完成形状を推定することは可能である。誤差は、添接板や継手部の孔位置を調整することによって吸収される。このような部材計測による仮組立、および仮組立検査が一般的になれば、製品精度の向上、経済性の向上といった直接的な効果とともに、3Kの追放や作業安全性の向上のような間接的な効果も大きいことは疑う余地がない。

5. まとめ

従来、鋼橋の構造については主にその力学的な性状に関しての研究が中心であって、製作や架設を考えた構造に関する研究は皆無である。時代の変遷とともに、鋼材費よりも加工費の全体コストに占める割合が高くなってきた現状では、鋼重量に拘るよりも製作、架設の費用まで含めた全体コストで、最適な鋼橋の構造を考える必要がある。さらに、労働力の高齢化、若年労働者の3K業種離れに直面していることを考えると、従来の構造になんらかの改変を加えないかぎり、製品が出来なくなる心配さえある。

これまでこのような提案は、製作会社の合理化や採算性の向上を諮るための“手を抜く”提案と受け取られがちであった。鋼橋の製作サイドから見た現実にはるかに厳しいもので、“費用をかけても自動化を進め、作業環境を改善したい”、“手を抜くのではなく、手仕事をなくしたい”との認識である。

もちろん、構造物の耐荷安全性、耐久性、維持管理性を蔑ろにするような構造改変は許されるものではない。そのような構造力学的な要求と自動製作に適した構造を開発するため、関係者の協力を望みたい。

製作サイドからの問題提起をしたが、今後の研究開発になんらか利するところがあれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会 鋼構造委員会資料：橋梁CAD/CAMの現状について、1989. 5
横河技術情報
- 2) 日刊工業新聞 91. 12. 17 溶接特集
- 3) (社)日本橋梁建設協会：鋼橋補修工事の問題について 一施工事例とその対策一 昭和60. 6
(1992年 1月14日受付)