

補剛材数低減による鋼橋製作の合理化効果 の評価法に関する一提案

南 邦明

正会員 榎サクラダ 技術開発室開発課(〒272-0002 千葉県市川市二俣新町21)

鋼橋の製作において、製作の合理化に関する考え方の一つとして、「補剛材の低減＝製作の合理化」という考え方が定着しているが、補剛材を手溶接で取り付けていた時代は妥当な考え方であった。しかし、今日では、垂直・水平補剛材の取り付けは、NCロボットで行われている。このため、ロボットによるパネル製作工程を明確にした上で、合理化を検討しない限り、補剛材の低減による製作の合理化効果を定量的に評価することはできない。本論では、まずパネル製作工程を説明し、次に、パネル製作ロボットを延べ9日間にわたり監視・計測して、各作業工程に必要な時間を明示した。そして、補剛材の低減が製作の合理化に及ぼす効果の定量的な評価手法を提案し、最後に、パネル製作における合理的な生産計画法を示した。

Key Words : fabrication, robotic process, rationality, reducing stiffener

1. はじめに

コスト縮減に向け、現在、鋼橋製作において、様々な合理化の試みが行われている。鋼橋製作の作業には、けがき、切断、孔明け、仮付け、溶接、ひずみ取り、組立てなどがあるが、全作業に占める溶接作業の比率は高く、製作の合理化を推進するには、溶接作業の合理化を図る必要がある。溶接作業の最も簡単な合理化手法としては、溶接延長を低減させることであるが、その際、「溶接長の低減率＝溶接作業工数の低減率」と誤解されることが懸念される。これは、溶接部位によっては自動機やロボットが適用されており、ロボットで行うのか、あるいは人手によって行うのかにより作業効率が大きく異なる。すなわち、どの部位の溶接長を低減させたのかによって、作業工数低減率が大きく異なる。

これまで、溶接延長の低減法とし、また合理化手法の一つとして、「補剛材の低減＝製作の合理化」という考えが定着しており、補剛材の省略に関する研究も数多く行われてきた。確かに、垂直・水平補剛材を被覆アーク溶接や、炭酸ガス溶接など人手によって行った場合では、溶接延長が1/2になれば、溶接作業時間もほぼ1/2となる。すなわち、ウェブに補剛材を溶接するパネル製作を人手によって行われていた1986年以前は、この考え方は妥当と考えられた。しかし、1987年以降パネル製作は、ほとんどの橋梁製作会社においてNCロボット(写真-1.2)で行われるようになった¹⁾。この作業工程の詳細については後で述べるが、図-1に示す作業が行われる。この中で、作業者が直接従事する作業工程は、①②工程のみであり、

それ以降は無人(自動)運転となる。その間、作業者は別の作業を行っていることもあって、溶接が終了しても直ちにパネルの搬出、次のパネルの搬入作業を行うことができず、必ず待機時間(⑤工程)が発生する。以上の①～⑤工程が、ウェブパネルの製作工程であり、1台のロボットで、1日に最大3パネルの製作が可能である。

パネル製作工程における作業時間の多くは、溶接時間(④工程)であることは言うまでもないが、仮に補剛材の数を減らしたとしても、①②工程は変わらず、影響があるのは③④工程のみである。すなわち、溶接延長が1/2になったとしても、無人運転で行う作業時間はほぼ1/2となるが、人手による作業が低減されるわけではなく、全パネル製作工程が1/2となるわけでもない。また、溶接時間は低減されたとしても、場合によっては、⑤工程の待機時間だけが多くなることも考えられる。しかし、補剛材数の大幅な低減により、1日に3パネルしか製作できなかったものが、4パネルの製作が可能になれば、製作の合理化が図られる。すなわち、これらの作業工程に必要な時間を明確に調べた上で、補剛材の低減による製作の合理化を議論しないかぎり、その効果を定量的に評価することはできない。

本論では、まずパネル製作工程を説明し、次に、延べ9日間(58パネルの製作)にわたり、3台のパネル製作ロボットを監視・計測して、各工程に必要な作業時間を明示した。そして、これらの計測結果をもとに、補剛材の低減が製作の合理化に及ぼす効果の定量的な評価手法を提案した。さらに、パネル製作工程における合理的な生産計画法を考察したので、これらの結果を報告する。

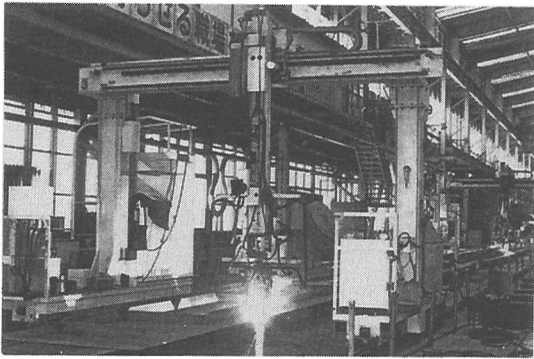


写真-1 パネル製作ロボット

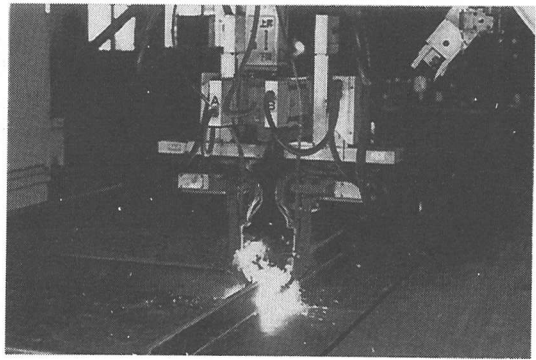


写真-2 パネル製作ロボットの溶接トーチ部

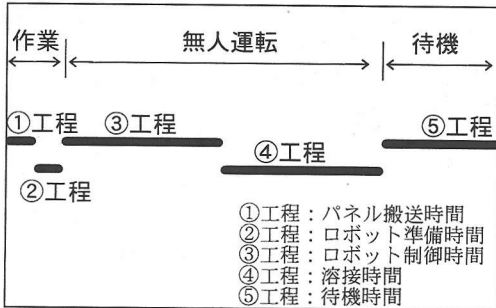


図-1 パネル製作における各作業工程

表-1 各作業工程の詳細

工程	作業内容
パネル搬送時間 (①工程)	・パネルの搬入, セット時間 ・パネルの搬出時間
ロボット準備時間 (②工程)	・パネル位置を教える時間 ・溶接トーチの整備時間 ・データ入力時間
ロボット制御時間 (③工程)	・ロボット移動時間 ・センシング時間 ・自動ノズル清掃時間
溶接時間 (④工程)	・溶接時間(アークタイム)
待機時間 (⑤工程)	・作業, クレーン待ち時間 ・異常停止による待機時間 ・その他の待機時間

2. ロボットによるパネル製作工程

鋼橋の製作において、これまで様々な箇所では自動機やロボットが適用されてきた³⁾。この中で、ウェブに垂直補剛材・水平補剛材を取り付けるパネル製作は、2電極の門型式NCロボット、あるいは多関節ロボットなどで行われている。橋梁製作工場によって機種などは多少異なるが、性能的には大きな違いはなく、これまでの調査によると、このようなロボットは我が国の93%の橋梁製作工場に適用されている²⁾。

図-1および表-1は、ロボットによるパネル製作の各作業工程を示したものである。作業は、まず①工程において、補剛材が仮付けされたパネル(ウェブ)を、このステージまで搬入し、適切な位置にセットする。部材のセットが完了すれば、②工程において、手動でパネルの対角線状のコーナー部2点をロボットに教え、部材とロボットの位置関係を認識させる。その後、自動溶接を行うための入力データをインプットする。これらのデータは、フロッピーディスクにより原寸データから溶接位置が入力される。さらに、手動でノズルの掃除を行ったり、ワイヤーの突き出し長さを適切にすると、溶接トーチ周辺の整備を行うロボット準備作業時間が生じる。

これが終われば、③工程に入り、無人(自動)運転となるので、作業者はこのステージから離れ、別の作業を行う。自動運転で行う作業時間には、溶接トーチが溶接位置まで移動する時間や、センシング作業を行うといったロボット制御時間が必要となる。センシング作業とは、ロボットがセンサーを用いて溶接位置を確認する作業であり、各溶接部位の始末端を検知することで、原寸データとのチェックを行う作業である。また、溶接長6m終了ごとに、ノズルに付着したスパッタを取り除く清掃作業が自動で行われる。そして、センシング終了後、自動溶接が始まる(④工程)。無人運転中の作業手順は、「ロボット移動→センシング→溶接→ノズル清掃→次の溶接部へ移動」といったサイクルで作業が行われるが、ここではデータ整理上③④工程に分けて示すこととした。そして、先にも述べたように、無人運転中、作業者は別の作業を行っているため、常にこの作業を監視しているわけではなく(常に監視していたのでは、ロボット化のメリットが発揮されない)、溶接が終了しても、直ちにパネルの搬出・搬入作業を行うことはできない。このため、⑤工程に示す作業待ち時間が必ず発生する。ただし、ロボットの稼働率を上げるために、待ち時間をできるだけ少なくするように考え、別の作業を行っている。それ

表-2 1パネル製作に必要な作業時間の計測結果の平均値

工程	作業時間(分)	割合(%)
パネル搬送時間 (①)	15	5.9
ロボット準備時間(②)	14	5.5
ロボット制御時間(③)	82	32.2
溶接時間 (④)	83	32.5
待機時間 (⑤)	61	23.9
合計	255	

でもこの時間が生じるのが現状である。⑤工程の待機時間には、上記の作業待ち時間の他にも、クレーンが他の作業で使用され、パネル溶接終了後、直ちに搬出作業を行いたくても、使用できないケースがあり、クレーン待ち時間などもある。さらに、⑤工程ではロボットの異常停止時間なども含まれている。この異常停止時間とは、例えば、運転中に溶接ワイヤーがなくなり、ワイヤードラムの交換に必要な時間や、ノズルにスパッタが付着し、シールドガスが適切な流量を放出できない場合には、ロボットは強制停止するので、その時の待機時間、さらに、これを回避する時間なども含まれている。実際には、この時間は④工程中に発生する時間であるが、異常停止を解除するには、作業者が手動で行う必要があるため、ここでは⑤工程に含めるものとした。また、その他の待機時間には、例えば、製作物件が変わった場合では、設置治具の段取り換えに必要な時間などがある。

以上の作業手順でパネル製作は行われ、1日に最大で3パネル(3枚のウェブパネル)の溶接を行っているが、多くの橋梁製作工場では、生産性を向上させるため、3パネル目(1日の最終パネル)の溶接は、作業者が退社後、無人運転で行い(以下、夜間運転)、翌日にパネルの搬出作業を行うようにしている。

3. パネル製作における各作業時間の計測

(1) 計測の概要および計測方法

パネル製作における各作業工程を明確にするため、観測対象とした工場の3台のパネル製作ロボット³⁾を、延べ9日間、合計58パネルの作業を観察し、補剛材の溶接に必要な各作業時間を計測した。なお、文献2)のアンケート調査で示されているが、計測したロボット機種は、各橋梁製作工場でも多く適用されている機種である。

対象とした橋梁は、1桁が2橋、箱桁が1橋の合計3橋とした。また、計測実施日は、3台のロボットがフル稼働状態の時のみとした。計測は9:00~17:30までの作業であり(作業者は時間外労働を行わないことを前提)、さらに、昼休み時間内も自動溶接は行われているので、昼休み時間も含めた作業時間とした。

(2) 計測結果

作業は、3台のロボットを1名のオペレーターが操作し、パネル搬送時のみ2名の作業員で行っていた。ロボットが稼働中、作業員はこのステージ近くで別の作業を行っており、溶接が終了した場合や、異常停止が発生した場合などでは、できるだけ早くその対応が行えるよう考慮されていた。

表-2は計測結果を平均し、1枚のパネルを溶接するのに必要な作業時間を示したものである。ただし、先にも述べたように、就業時間終了後も、溶接作業は夜間運転を行っており、その時の③④工程の時間は明確でない。このため、夜間運転を行ったパネルは、平均時間から除いて算出した。

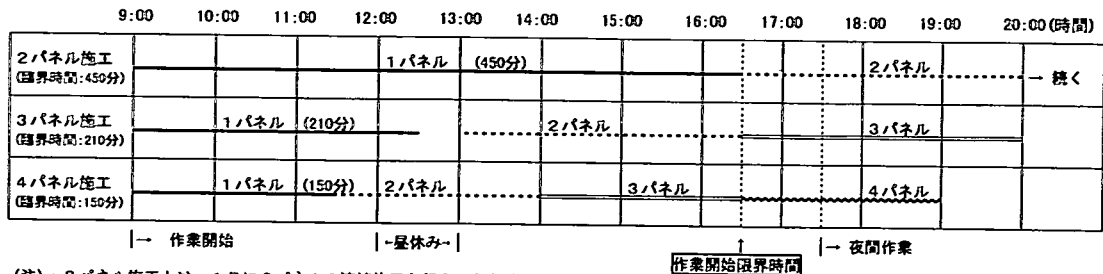
表-2に示すように、1枚のパネルを溶接するのに必要な作業時間は、平均すると255分であった。まず、①工程におけるパネルの搬送時間は、このステージ近くで補剛材の仮付け溶接を行っており、ここから部材を搬送するので、多くの時間を必要とせず、搬入と搬出とを合わせて15分、全作業時間の5.9%であった。

②工程におけるロボット準備時間は14分であり、パネル位置をロボットに教える時間とデータ入力時間で9分、溶接トーチの整備時間で5分であった。人手による作業として、①②工程合わせて29分となり、全作業時間の11%に過ぎなかった。

③工程におけるロボット制御時間として、ロボットが1つの部材の溶接終了後、次の溶接部へ移動する時間は平均すると1回当たり65秒、センシング時間は1箇所につき132秒、自動ノズル清掃時間は1回当たり226秒を要していた。これらの時間は、1つのパネルで合わせて平均82分であり、溶接時間と同等の時間が必要となっていた。例えば、桁高が190cmの橋梁では、垂直補剛材の長さはスカラップ開口部を除けば180cmとなるが、この部材をロボットで行うとすれば、溶接時間は309秒(溶接速度を35cm/minとして)、ロボット制御時間は310秒(65+132+226/2(2部材に1回の清掃時間として))となり、ほぼ同じ時間となる。これより部材が長ければ、溶接時間の割合が高くなり、短ければその逆となる。

④工程の溶接時間は83分、全体の32.5%の作業時間となっており、言い換えるとアークタイム率が32.5%であった。通常、人手で行った場合、アークタイム率として、20~25%程度であり、人手の1.3~1.6倍となった。また、溶接作業を2電極ロボットで行っていることを考えると、作業効率はロボットで行えば人手の2.6~3.2倍となる。ただし、ここでは夜間運転を考慮していないので、これを考慮すると、さらに作業効率は高くなる。

⑤工程の待機時間は、平均すると61分となった。また、異常停止は、センシング中にトーチが部材に接触して停止するケースや、ノズルにスパッタが付着し、シールド



(注)：2パネル施工とは、1日に2パネルの溶接施工を行うことを言う。

図-2 1日に製作可能なパネル数と作業時間の関係

ガスが適切に出ないことが原因で発生したケースなどがあつた。

これらの作業時間の中で、①⑤工程は工場の生産ラインによって、また②③工程はロボットの機種によって若干異なる。しかし、各橋梁製作工場とも生産性を向上させるために、①⑤工程をできる限り短縮させるように配慮している。また、ロボット機種も性能的に大きな違いはない。これらのことを考えると、橋梁製作工場によって、各作業時間に違いが生じたとしても、その差は少ないものと考えられる。

以上、延べ9日、58パネルの作業を計測した結果であるが、ロボット1台当たり、1日で2パネルの製作が行われた日が最も多く、平均すると1日に2.2枚のパネル溶接が行われた。また、1パネル当たりの溶接長は、平均すると56.24mであつた。

4. パネル製作に必要な作業時間の算定式

本章では、前章の計測結果から、1枚のパネル製作に必要な作業時間を求める算定式を提示した。

算定に当たっての設定条件として、1パネル当たりの固定時間 {パネル搬送時間(①工程)、ロボット準備時間(②工程)、待機時間(⑤工程)} は、溶接長に関わらず90分とした。これは、仮に補剛材の数を減らしたとしても、①②工程は変わらず、また⑤工程も1枚のパネルの製作にあたり平均的に待機時間が発生するとすれば、溶接長が低減されたとしてもこの値は変わらない。そこで、固定時間は表-2に示す計測結果をもとに、①②⑤工程を合わせた値とした。次に、溶接時間は溶接長に比例することとは言うまでもないが、ロボット制御時間も同様である。ただし、ロボット制御時間の中で、センシング時間と移動時間は、正確には材片数に比例するが、ここでは、これらの時間も溶接長に比例するものと考え、計測結果から、単位溶接長当たりのロボット制御時間は、溶接時間と同じ時間が必要であるものとした。また、溶接トーチは、2電極とした。

以上の条件から、1枚のパネル製作に必要な作業時間として、以下の算定式が得られる。

$$T=2.0 \times (L/2) \div v + 90 \quad (1)$$

ここに、T: 1枚のパネル製作に必要な作業時間(min)
 L: 溶接長(全補剛材長さの2倍)(cm)
 V: 溶接速度(cm/min)

5. 合理化効果の評価手法の提案

(1) 概要

パネル製作工程における作業時間の多くは、ロボット制御時間(③工程)と溶接時間(④工程)であつたが、仮に補剛材の数を減らしたとしても、前章で述べたように①②⑤工程は変わらず、影響があるのは③④工程のみである。すなわち、溶接長が1/2になったとしても、無人運転で行うロボット制御時間や溶接時間はほぼ1/2となるが、人手による作業が低減されるわけではなく、全パネル製作工程が1/2となるわけでもない。また、多くの橋梁製作工場では、1日に行う最終パネルの溶接作業は、就業時間外に無人運転(夜間運転)で実施しており、箇々のパネル作業時間によっては、1日当たりのパネル製作数量に違いが生じない場合もある。しかし、溶接延長の低減量によっては、これまで1日に最大で3パネルの製作しかできなかったものが、4パネルの製作が可能になれば、製作の合理化が図られることとなる。

本章では、パネル製作工程を考慮し、補剛材数の低減が製作の合理化に及ぼす効果の定量的な評価手法を提案する。

(2) 評価手法の考え方

図-2は、1日に施工可能なパネル数を考慮し、1枚のパネル製作に必要な最大作業時間(以下、臨界時間)とその時の1日のタイムスケジュールを示したものである。ただし、2パネル施工(1日に2パネルの施工を行う)の臨界時間は450分(7.5時間)としたが、現実的には、この

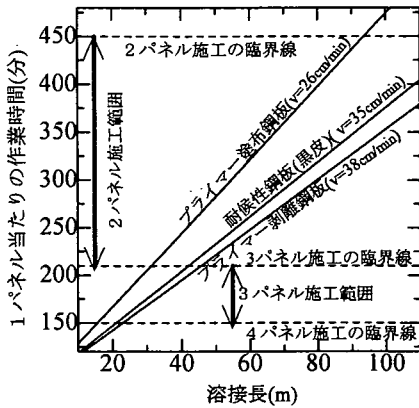


図-3 溶接速度を考慮した作業時間と溶接長の関係

ような時間が必要な補剛材数の多いパネルは非常に少ないと言えるが、ここでは比較のため、2パネル施工の最大値も示すこととした。なお、図-2で示すタイムスケジュールは、以下の前提条件から成り立っている。

条件A：夜間運転を行う。

条件B：就業時間は8:30～17:30(8時間労働)とする。

条件C：最終パネル作業開始限界時間は、16:30とする。

条件D：1日に製作するパネル溶接長は、各パネルとも一定とする。

まず、条件Aについては、多くの橋梁製作工場で夜間運転を行っている。しかし、休日前などでは夜間運転を行わないこともあるが、ここでは常に行うこととした。次に、条件Bについて、就業時間は8:30～17:30とし、朝の30分はミーティング時間で1日の作業開始を9:00とした。条件Cでは、1日の最終パネルの作業開始限界時間を16:30とし、この時間までにその前のパネル作業が終了した場合、最終パネルは夜間運転を実施できるものとした。作業開始限界時間を16:30とした理由は、次に製作するパネルの作業準備時間(①②工程)に29分必要であり、また、その日の作業の後片付けに30分必要と考えたからである。次に、夜間運転で行うパネルは、溶接長の影響をほとんど受けなくなると言える。また、就業時間内に行うパネルの溶接時間(溶接長)が短ければ製作パネル枚数が多くなる。しかし、溶接長でパネルの製作順序を決めることはなく、溶接長に関わらず、任意に選べる条件とする必要がある。このため、条件Dを設定し、1日に行う箇々のパネルの溶接長を一定と考えた。以上の前提条件で、パネル製作のタイムスケジュールを設定すると図-2となる。

3パネル施工の臨界時間は、210分(3.5時間)であり、これを超えた場合、例えば作業時間が240分(4.0時間)の場合では、2枚目のパネル作業終了時間が17:00となる。

表-3 鋼板の表面処理と溶接速度の関係(すみ肉溶接脚長 5mm)

鋼板の表面処理	銘柄	溶接速度
プライマー塗布鋼板	DW-300	26 (cm/min)
プライマー剥離鋼板	MX-Z200	38 (cm/min)
耐候性鋼板(黒皮)	DW-50W	35 (cm/min)

表-4 合理化効果の評価判定基準(臨界溶接長) (8時間労働)

鋼板の表面処理	臨界溶接長(m)		
	2パネル施工	3パネル施工	4パネル施工
プライマー塗布鋼板	93.6 \geq	31.2 \geq	15.6 \geq
プライマー剥離鋼板	136.8 \geq	45.6 \geq	22.8 \geq
耐候性鋼板(黒皮)	126.0 \geq	42.0 \geq	21.0 \geq

そして、17:30までの30分間は後片付けに必要な時間となり、次に製作するパネルの準備は行えない。このため、夜間運転は行えず、1日に2枚のパネルしか製作できない。すなわち、450分(7.5時間)の作業時間を有する2パネル施工と同じとなる。言い換えると、補剛材の取り付けに450分を必要とするパネルが、240分の作業時間となるパネルへと変更させたとしても、製作の合理化とはならない。しかし、作業時間が210分のパネルへと補剛材が低減されれば、製作の合理化が可能となる。同様に、3パネル施工から4パネル施工となる210分から150分へと作業時間が低減されれば、製作の合理化が図られる。

以上のように、補剛材数の低減による製作の合理化を評価する考え方として、1日に製作できるパネル製作数量の増加率で考える必要がある。

(3) 評価基準の算定

図-3は、式(1)を図式化し、縦軸には作業時間、横軸には溶接長の関係で示したものである。溶接条件については、橋梁製作工場によって若干異なり、また、使用する溶接材料によっても異なる。通常、鋼材の表面処理状態により溶接材料が選定され、ここでは表-3に示す溶接条件を用いた。なお、図面上では、すみ肉溶接脚長(以下、脚長)が4mmとなつていても、通常の作業では、脚長5mmを目標に溶接条件が決められ、これらは脚長5mmの条件である。以上の作業条件における臨界溶接長(例えば、2パネル施工から3パネル施工へと移行する溶接長)を示したものが、表-4である。通常、ウェブパネルでは、プライマーが塗布された状態のまま補剛材の取り付けが行われ、例えば、プライマー塗布鋼板を使用した場合では、溶接長が31.2～93.6mの間では、溶接長に関わらず2パネル施工であり、この間で溶接長を低減させたとしても合理化とはならないことを意味している。

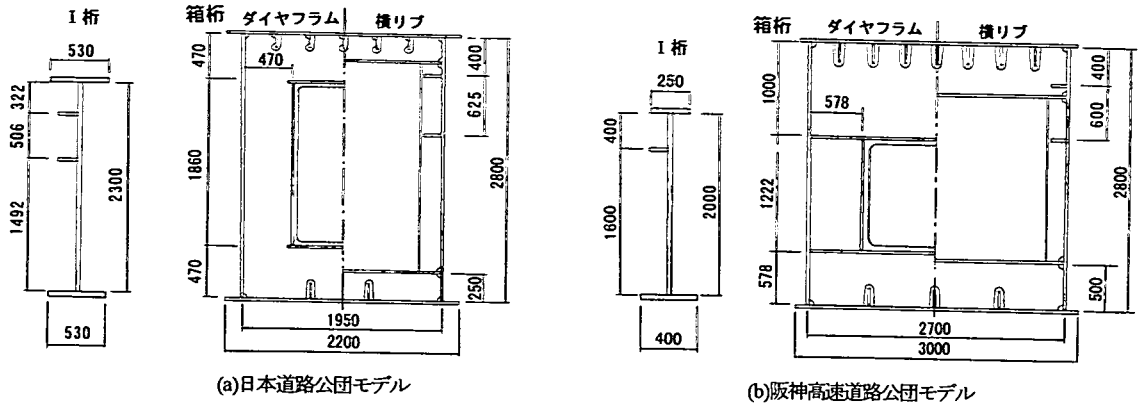


図-4 シミュレーションモデルの断面図

表-5 シミュレーションモデル

橋梁形式	日本道路公団		阪神高速道路公団	
	I桁	箱桁	I桁	箱桁
部材長	12.940m	11.600m	12.000m	11.270m
ウェブ高	2.300m	2.800m	2.000m	2.800m
垂直補剛材間隔	1.438m	1.452m	1.225m	1.335m
補剛材 材片数	垂直	9	6	10
	水平	20	18	10
溶接長	垂直	41.40m	28.74m	39.20m
	水平	47.74m	43.45m	21.58m
溶接長の合計	89.14m	72.19m	60.78m	67.00m

表-6 水平補剛材の段数低減による溶接長と溶接長比率

橋梁形式	日本道路公団		阪神高速道路公団	
	I桁	箱桁	I桁	箱桁
2段	材片数	29	24	30
	溶接長	89.14m	72.19m	82.36m
1段	材片数	19	15	20
	溶接長	65.27m	50.47m	60.78m
	比率	73.22%	69.91%	73.80%
0段	材片数	9	6	10
	溶接長	41.40m	28.74m	39.20m
	比率	46.44%	39.81%	47.60%

注) 材片数および溶接長は垂直補剛材と水平補剛材の合計

(4) 合理化の評価手法の提案

補剛材の低減による製作の合理化効果を明確にするには、材片数や溶接長の低減量を求めることは言うまでもないが、それだけでなく、1日に製作できるパネル数量が増加するのかどうかを明確にしない限り、補剛材の材片数を低減させても、製作の合理化が図れないケースが生じるものと考えられる。

合理化効果の評価手法として、補剛材数の低減前の溶接長と低減後の溶接長を、それぞれ式(1)に代入し、1枚のパネル製作に必要な作業時間を算出する。その際、溶接速度は、鋼板の表面処理状態(使用する溶接材料)から求める。そして、図-2に示すタイムスケジュールを考慮して、1日に製作できるパネル数量が増加するのかどうかを明確にすることで、合理化効果を定量的に評価することができる。

6. 合理化効果のシミュレーション

(1) 概要

補剛材の低減が製作の合理化に及ぼす効果を調べるため、4つのモデルを対象に補剛材の低減シミュレーションを行った。対象としたモデルは、日本道路公団、およ

び阪神高速道路公団の標準設計図集²⁰⁾から抜粋したI桁とRC床版箱桁の1枚のウェブパネルとした。図-4、表-5には、対象としたモデルを示す。なお、これらの詳細については、各標準図集を参照にされたい。

(2) シミュレーション方法

シミュレーション方法は、各モデルの垂直補剛材を一定とし、水平補剛材の段数を変化させた。対象モデルの水平補剛材の段数は、阪神高速道路公団のI桁を除き、2段であり、これを1段、さらに0段(水平補剛材を省略)とした場合の溶接長を計算して、これを式(1)に代入し、算出された作業時間から1日に製作可能なパネル数量を求め、水平補剛材の低減による合理化効果を調べた。なお、阪神高速道路公団のI桁は、水平補剛材が一段であるので、同量の水平補剛材がもう1段あるものとして、シミュレーションを行った。また、使用ワイヤーおよび溶接条件は、表-3に示す条件を用いることとした。

(3) シミュレーション結果

水平補剛材の低減による材片数、溶接長および溶接長比率を計算した結果を表-6に示す。

材片数で見た場合、水平補剛材の段数の低減により、平均すれば1段とすることにより63%、0段(水平補剛

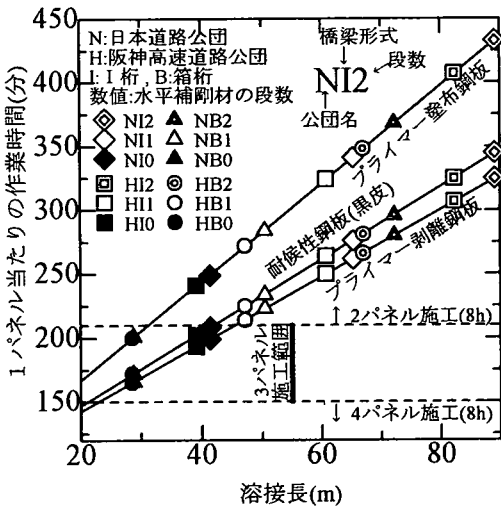


図-5 シミュレーション結果I(8hの場合)

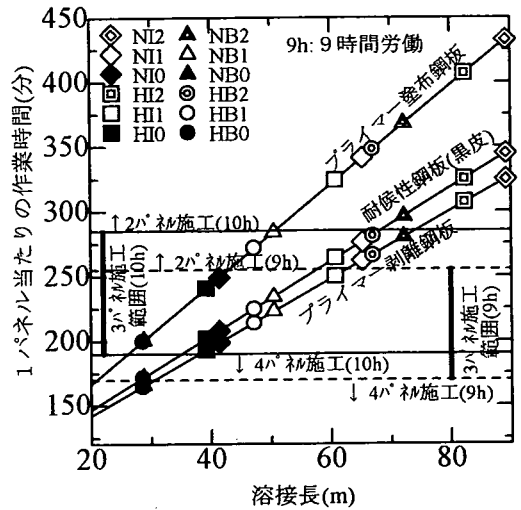


図-6 シミュレーション結果II(9h,10hの場合)

表-7 1日の作業時間と各パネル施工の臨界時間との関係

労働時間 (hour)	臨界時間(min)		
	2パネル施工	3パネル施工	4パネル施工
8h	450	210	150
9h	510	255	170
10h	570	285	190

材の省略)とすれば29%の比率となった。一方、溶接長で見た場合も同様に、平均すれば1段とすることで72%(70~74%)、0段とすれば44%(40~48%)の比率となり、水平補剛材の段数を低減すれば、大きな溶接長低減が現れる。

図-5は、表-6の結果を式(1)に代入し、水平補剛材の段数を低減させた場合の溶接長と1パネルの製作に必要な作業時間の関係を示したものである。また、図中の臨界時間は、図-2のタイムスケジュールで示した8時間労働(8h)のものである。まず、プライマー塗布鋼板を使用した場合には、溶接速度が最も遅いこともあって、水平補剛材を1段減らしても、すべてのケースで2パネル施工であり、合理化効果は得られない結果となった。さらに、水平補剛材を省略した場合でも、1桁では2パネル施工であるが、箱桁では3パネル施工となった。次に、耐候性鋼板やプライマー剥離鋼板では、溶接速度の違いは少なく、傾向もほぼ一致していた。両者ともに、1段減らしてもすべてのデータで2パネル施工と変わりはなく、0段とすれば全ケースで3パネル施工となった。

以上のように、補剛材の材片数を低減させた場合、溶接長の低減率のみで合理化を検討すれば、効果は必ず現れると言える。しかし、実際の作業工程を考慮した場合、水平補剛材を1段低減させた程度では、製作できる

パネル数量の違いはなく、水平補剛材を省略しない限り合理化効果は得られない結果となった。

7. 考察

(1) 製作の合理化を可能にさせる生産計画

前章のシミュレーションで示したように、水平補剛材の材片数を低減させたとしても、多くのケースで合理化効果が得られない結果となった。このため、これまでとは異なる生産計画法を考える必要がある。

補剛材の低減による製作の合理化が実現できると考えられる生産計画法として、その日に行う箇々のパネルの溶接長から1日の作業時間を算定し、パネル製作数量を増加させるのに必要な作業時間を明確にした上で、オペレーターの1日の労働時間(残業時間も含めた)を検討する方法が考えられる。

図-2に示したタイムスケジュールは、8時間労働(8h)で検討したものであるが、これと同様に時間外労働も考慮した場合の各パネル施工における臨界時間を検討すると、表-7となる。また、前章で示したシミュレーションに労働時間を考慮して整理した結果が、図-6である。これらの結果が示すように、8時間労働(図-5)では、水平補剛材を1段とした場合では、すべてのケースで合理化効果が得られなかったが、労働時間が増えることで、1日に製作可能なパネル数量が増加するケースが生じてくる。すなわち、労働時間を考慮すれば、合理化効果が得られる結果となった。

ただし、ここで示した生産計画は、あくまでもパネル製作のみ考慮した計画であるので、必ずしも最適な計画

表-8 労働作業時間を考慮した合理化効果の評価判定基準

鋼板の表面 処理	労働 時間 (hour)	臨界溶接長(m)		
		2バ秒 施工	3バ秒 施工	4バ秒 施工
プライマー 塗布鋼板	8h	93.6 \geq	31.2 \geq	15.6 \geq
	9h	109.2 \geq	42.9 \geq	20.8 \geq
	10h	124.8 \geq	50.7 \geq	26.0 \geq
プライマー 剥離鋼板	8h	135.8 \geq	45.6 \geq	22.8 \geq
	9h	159.6 \geq	62.7 \geq	30.4 \geq
	10h	182.4 \geq	74.1 \geq	38.0 \geq
耐候性鋼板 (黒皮)	8h	126.0 \geq	42.0 \geq	21.0 \geq
	9h	147.0 \geq	57.8 \geq	28.0 \geq
	10h	168.0 \geq	68.3 \geq	35.0 \geq

法であるとは言えない。なぜなら、パネル製作のみ急がせたとしても、後工程(例えば、ひずみ矯正)で待ち時間が生じる場合では、部材の置き場を検討しなければならないという課題が生じる。また、パネル製作工程のみで、クレーンのオペレータにも時間外労働を行わせることが必要となると言った問題も発生する。このため、全体の作業を考えた上で、ここで示した生産計画法の適用を検討する必要がある。

(2) 労働時間を考慮した合理化効果判定基準

表-8は、表-7の臨界時間を式(1)に代入して求めた各労働時間における臨界溶接長を示したものである。生産計画時にこれらのデータを用いれば、その日に行うパネル数量を明確にすることができる。すなわち、これらの値が、合理化効果の評価判定基準となる。

ただし、この判定基準は、図-2で示したタイムスケジュールの前提条件で行い(さらに、労働時間を考慮)、また、算定式(1)および表-3の溶接条件を用いたケースである。このため、すべての橋梁製作工場における精度の高い評価判定基準であるとは必ずしも言えないが、各橋梁製作工場において、溶接条件やタイムスケジュールの前提条件に大きな違いはないと思われる。また、使用しているロボット機種および溶接材料が異なっても、臨界溶接長に大きな違いは生じないものと考えられる。もし、各橋梁製作工場における精度の高い値を算定するには、これまでに述べてきたことと同様の手順で式(1)を算定し、各工場で行っている溶接条件で、臨界溶接長を算出すればよい。

8. 結論

- 1) 本論では、パネル製作工程における各作業時間の計測結果をもとに、1枚のウェブパネルの製作に必要な作業時間を求める算定式(1)を提示した。

- 2) 補剛材の材片数を低減させても、パネル製作工程における人手による作業は減らないが、ロボットによる無人運転時間は、補剛材の低減率に比例して作業時間は短縮される。この無人運転時間は、全作業時間の65%であった。
- 3) 補剛材の低減による製作の合理化を評価する考え方として、溶接長の低減率のみで考えるのではなく、1日に製作できるパネル製作数量の増加率も考慮する必要がある。
- 4) 補剛材の低減による製作の合理化効果を定量的に評価する手法として、低減前の溶接長と低減後の溶接長から、1枚のパネル製作に必要な作業時間をそれぞれ算出した上で(算定式(1)を用いて)、1日に製作できるパネル数量が増加したのかどうかを明確にし、合理化効果を確認する必要がある。
- 5) シミュレーション結果で示したように、材片数を低減させたとしても、合理化効果が得られないケースが多く発生した。合理化を実現させるには、溶接長から、その日の作業時間を算定し、パネル製作数量が増加できる労働時間(残業時間を設定)を設定する必要がある。
- 6) 本論では、1日の労働時間を考慮した合理化効果の評価判定基準(臨界溶接長)を示した(表-8)。

9. おわりに

本論では、補剛材の低減による溶接作業に及ぼす合理化効果について述べてきた。これは、先にも述べたように、鋼橋製作において、全作業工程に占める溶接作業の比率が高いからである。しかし、補剛材の低減によって、その他の作業にも、合理化効果が生じるものと考えられるので、ここでは、切断、組立て(仮付け)、およびひずみ矯正作業について述べる。

切断作業では、補剛材の低減により作業量は低減される。しかし、補剛材などの2次部材は、シェアリング会社から切り板(必要寸法に切断された鋼板)で購入するケースが多い。その際の購入単価は、一般に重量(トン)当たりの価格で購入するので、材片数に依存しない。また、2次部材を切断する場合には、プレーナー(切断する装置)は1度に10数本の切断トーチで行われ、補剛材は、同じ幅や長さの部材が多いこともあって、一般的に作業効率はいよい。

組み立て作業(仮付け作業)では、補剛材の低減によって、作業量は低減される。これは、人手による作業であり、部材数が1/2になれば、組み立て作業もほぼ1/2となる。今回、組立て作業の計測も行ったが、部材の搬送時間など仮付けに必要なすべての時間を含め、1部材当たりの作業時間は、平均すると6分であった。

ひずみ矯正作業は、大きく分けて、プレス矯正(冷間加工)と加熱矯正(熱間加工)に分けられる。両者ともに、人手によって行われるので、合理化に寄与すると言える。しかしながら、矯正作業を定量的に評価するのは非常に困難であると考えられる。

謝辞：本論をまとめるにあたり、数々の有益なご意見、ご助言を賜りました東京工業大学の三木千壽教授に感謝致します。

参考文献

- 1) 鋼橋技術研究会：ロボット研究部会報告書,1997.6.
- 2) 鋼橋技術研究会：施工部会報告書Ⅱ, 1998.12.
- 3) 南 邦明, 押山和徳：橋梁・鉄骨製作における省力化と今後の課題, 溶接技術, Vol.46, pp.94-98, 1998.12.
- 4) 泉 敏之：門型ロボットGT-5000の機能拡充, 溶接だより技術がいと(神戸製鋼所), No.277, pp.1-7, 1993.5.
- 5) 日本道路公団：構造物標準設計図集(鋼橋編), 1981.4.
- 6) 阪神高速道路公団：鋼構造物標準図集, 1991.4.

(2002. 4. 10 受付)

AN EVALUATION METHOD ON THE EFFECT OF THE RATIONALIZATION BY REDUCING THE STIFFENERS IN STEEL BRIDGES

Kuniaki MINAMI

In this study, the author concerns with the method for reducing the cost by reducing the stiffeners. In the fabrication, for installing stiffeners to a web panel is generally carried out by robotic welding. However, reducing stiffeners are not possible on the quantitative evaluation in respect of the effect of the rationalization, as long as the process of robotic welding is not clarified. In this paper, for the purpose of quantitative evaluation on the effect of the rationalization by reducing the stiffeners, the process of robotic welding was observed for 9 days. The time necessary for each stage of work was investigated. From this result obtained in this study, we suggest the evaluation method by reducing the stiffeners.