

寄稿論説

最近の橋梁に思うこと

Impression of Recent Bridges

東京大学名誉教授

Prof. of Emeritus, Univ. of Tokyo

奥村 敏 恵

Toshie OKUMURA



1. はじめに

最近数カ所の橋梁工場、製鋼工場を見る機会に恵まれた。少し前の一時期と比較すると、各工場ともに生産量が多くなっているのと、構造形も大型化、多様化し、ブロック製作が要求されるような方向がとられており、製作手法の合理化とそれに伴う工夫を凝らすことがその価値を高くしているのを見て、鋼橋および鋼構造に深いかわり合いを持ってきた一人としてある種の感慨を覚えた。こうした状態が今後も長く続くことを希望し、期待しながら今こそ現状に甘んじないで、もっと高い系統立った技術の正しい習得を心掛けると同時に、どんな条件にも耐えられる高い見識を持ちそれに基づいた製作工場の合理化および整備に力を尽くすように、その指導にあたる方に努めていただくことが大切ではないかと感じた。すなわち単なる生産性の向上のみではなく、質のよい付加価値の高いものをより合理的に生産する正しい途を模索し、それを正しい軌道の上に乗せるように努めていただきたいと感じた。それには正しい科学的知識の上に立って、それぞれの持ち場で実際に作業する工員に、全体の工程の流れの中で自分の仕事の位置づけを正しく理解させると同時に、前工程と後工程の連係を系統立った形で、その仕事の上に正しく生かすよう習慣づけることが大切ではないかと思う。

このようなシステムを正しく確立した工場が、次に来るかもしれない厳しい時期に耐え忍んで行く力を持つものと思う。

一方、溶接工をはじめとし、橋梁部材の組立に関係する多く工員の高齢化と若い人が育ち難い現状、さらに現場架設とからんで大型ブロックで組み立て輸送する傾向になっている点を見ると、好むと好まないとにかかわらず、合理的な製作の自動化システムの導入が問題となっ

てくることを前提として、より合理化した製作手法の開発を心掛けてほしい。そのためには今までも実行しておられることとは思うが、製作の流れにおける寸法精度にからんだ必要な関連性のあるデータを正しくとり、その相関性の分析を正しく行うことにより、次の改善を工夫し、その結果の評価をすることに努めることにより、それに合致した形での自動化システムの方向を模索することも必要ではないかと思う。

そうした立場より考えて、以下いささかの知見を述べてみることにする。

2. 橋梁の設計にからんで

わが国の科学技術のほとんどが外国からの輸入である。もちろんその多くがわが国で花を咲かせたものも見受けられる。いずれにしろ現時点において、わが国では多くの長支間橋梁が計画され実施に移されており、なお明石大橋をはじめとする世界最長支間の橋もわれわれの手で作ることができる、他国では見られない恵まれた状態にある。しかも瀬戸大橋をはじめとして多くの長支間の橋梁が製作架設されてきて、それに伴う豊富で貴重な体験とともに多くの評価が得られている。しかしこれに至るにはその間にあって決して容易でないさまざまな検討経過も積み重ねられており、多くの実験と試行錯誤の結果生み出された貴重な経験も得られている。一方、この際であるが故に、より一層ひきしめた心構えが大切である。その意味において基本に返ってものを考えること、すなわち歴史的に見たその発想の原点に返って設計の当初より、その架設地点の地域性を十分考慮した上で、次に続く製作・陸海上輸送・架設・維持管理を一貫したシステムとして配慮することを確立した形での正しい設計に反映することが望まれるわけである。すなわち設計時において少なくとも製作の正しい合理化を考慮したうえ

での気配りがとられることも大切と思う。

さて今後わが国の長大橋で多用されると考えられる吊橋・斜張橋は共にケーブルワイヤを使用する橋梁形式であり、共に支点上でタワーを使用する点では全く同じ形式であるが、力の伝達方式が異なることは今更ここで述べるまでもないことである。しかし念のため述べておくことにしたい。

前者はいわゆる補剛桁の重量を、あらかじめ作られた塔およびそれを通じて空中に渡したケーブルに、架設中ハンガーを通じて、均等にケーブルにあずける。このあずけられた重量が力のつり合いによってケーブルの張力となる。この伝達された張力が塔の上に設けられたサドルを通じて、水平反力を生じ、これが補剛桁の剛性増加につながってくる。

ただここで強調しておきたいことは、補剛桁の重量がハンガーを通じて均等にあずけられることである。したがってハンガーに生ずる引張り力は、支間のすべてにわたって同じ値であることが必要な条件となる。この条件を満足するように補剛桁・ハンガー系の架設をする点の配慮が必要条件であり、それに応じてケーブルの曲線も定まり、補剛桁の荷重体系も定められ、設計計算にはこの条件が前提となっている。したがってこの条件を満足する架設工法をとることが必要であり、架設工法によっていろいろな問題が起こる可能性も存在するので、これをうまく制御することが架設工法の拠り所となることを忘れてはならない。なおこのことは従来採用されている補剛桁の設計計算手順にも示されている点を強調しておきたい。

これに対し現在設計の対象となっている斜張橋は、連続桁の支点上に生ずる負曲げモーメントを軽減する目的で、支点上の塔と塔より斜めに張ったケーブルの組合せを用いている点である。そこに桁の荷重負担としての構造系が異なってくる点である。しかし耐風・耐震といった立場から見ると、同じケーブル構造としての配慮が必要であることを力説しておきたい。ただ全体系としてとらえるとき、その固有振動系の周期が違うことは配慮の必要がある。なお、ハンガーまたは斜張ケーブルについては、少なくとも架設中ロードセルを用いて架設中に变化する導入引張り力を計測することによって、架設施工の管理の助けとすることを勧めておきたい。使用するロードセルについては使用前に荷重照査検定試験を行って、その出力値の特性を十分確認しておくことも大切である。吊橋のハンガーに使用されるスパイラルロープは引張り力を受けるとねじりが生ずるし、平行線を含めたケーブルワイヤは上述のロープも同様にレラクゼーション現象が生ずることも忘れてはならない。特に後者は厳しい値を示すことに注意してほしい。

こうして見ると、吊橋および斜張橋には耐風、耐震設計が基本的に重要であるが、それとともにその安全性をさらに確保するために必要なことは、設計時に架設工法とからんで使用後の正しい、その力学的挙動を満足するためのきめの細かい配慮を行い、その目標性能を満足するようなシステム設計をすることが必要であることをここに強調しておきたい。

3. 橋梁の溶接製作にからんで

最近溶接の乱用が多くなる傾向を感じる。これが筆者の単なる杞憂であるならば幸いであるが、少しばかり私見を述べさせていただきたい。

溶接の一つの重要な問題点は、溶接熱による収縮変形と残留応力の生成である。残留応力の存在が鋼板の座屈および部材の柱材としての座屈に及ぼす影響については多くの研究成果があり、わが国の橋梁設計示方書にも、その許容応力度については基準が設けられ、それによる耐力の低下については一応の対応がなされているが、構造全体を考えると、果たして安全であるかどうか必ずしも明確にとらえられているとは思われない。このことは製作の誤差による溶接部の微細な欠陥、特に溶接熱によるひずみもたらした形状の不整に起因する耐力への影響が必ずしも考慮されていない場合が多いためである。

鉄道・道路併用橋(瀬戸大橋)の上、下弦材の箱形断面の部材組立のコーナー溶接(綴り合わせ溶接)に、部分レ形開先の溶接が使用された。この継手のルート部分に残ったブローホールに起因する疲労破壊にからんだ処置として、部分開先ルート部の間隔を0.5 mm以下に抑えてもらったことは多くの製作に携わった工場で経験されたことであり、超音波試験手法の改善進歩とからんで大きな収穫ではなかったかと思っている。しかしこの現象は鉄道橋に限ったものと思われ勝ちであるが、支間が大となり、交通量が増加していく傾向を考えると、必ずしもこれに安んじてはならないと思っている。

ただここで述べておきたいこととして、肝要な所には溶接特有の現象とからんで、溶接前の組立精度の合理的な確保に十分な注意を払ってほしいことを強調しておきたい。

一方、単なる局部的美観という個人的な考え方にとらわれて非常に無理な所に溶接継手を設けたりして、さらに表面仕上げを要求することが合理的かと疑問を持っている。このような個所は多分に合理的な非破壊検査が不可能であると思う。もちろん製作の手順を変えて工夫し、立派な溶接にすれば良い製品を作る可能性もあるので、強いて望まれるならば、その立場より正しい製作方法を模索することも必要であることは言うまでもない。しか

し鋼板そのものの寸法精度の限界もあり、鋼材の規格によってある幅の許容誤差が認められているし、平坦度その他の板としての精度の限界が法的には存在していることを忘れてはならない。強いて要求するならば、完全精度の高いものを規格料を払って強行するのも一策であるが、何か無駄な骨折りをしているように感じてならないことを取えて強調しておく。

ここで少し溶接ひずみに関する基本的な性状を述べておきたい。まず簡単に鋼板の上にアーク溶接ビードを一直線に引いたらどんな現象が起こるかを述べてみたい。

アーク溶接によって与えられた熱によって、発生アーク直下の鋼板は溶融する。熱伝導の法則によって、この熱は鋼板に伝播する。溶接の入熱量によって、その溶接熱によって鋼板に生ずる温度分布はいろいろと異なるが、少なくともアーク直下点よりの距離により鋼板に生ずる温度分布は一つの特徴ある性質を示す。理論的に言えば、スタートの近くのある部分を除くと、ビードを走らせる線より離れるに従ってその個所の最高到達温度は低くなる。学問的には準定常状態と呼ばれる温度分布の形状で、溶接ビードの進行とともに同じ温度分布の形で移動していく。一方鋼板は温度が上昇すると、その温度に依存した降伏点を示すので、ある温度以上になると降伏点が低下していき、500°~600°くらいの温度上昇を生ずる個所ではその個所の鋼板の降伏点は0となる。すなわちその近傍に生じた熱応力に抵抗ができずにいわゆるクリープすることになる。この性質のため特に溶接によって生じた鋼板の温度分布は位置および時間からんで、ある勾配を持った形となる。このため溶接ビード線より離れた最高到達温度の300°Cぐらい以下になる個所の弾性熱ひずみは、溶接ビード線付近の600°Cを超える高温の0降伏点の個所へ押してくることになる。このような特有な熱ひずみ現象が溶接することによって鋼板に生ずる結果として、溶接ビード付近の鋼材部分はふくらみを生ずる。こうした塑性変形は溶接後常温に戻ったときはそのままの形で残ることになる。この現象をup-settingと呼んでいる。したがって溶接ビード付近は縮まることになる。これにより溶接すれば鋼板には収縮ひずみが生ずる結果となる。これが局部的現象である点が問題である。

鋼板の片側にスチフナーを取り付け、これを隅肉溶接すると、その裏側の板面にやせ馬と呼ばれる現象が見られるのは、スチフナーと鋼板とを取り付けた隅肉溶接部の趾部に生ずるup-settingに起因するものである。したがってこのup-settingを溶接直後に除去するように工夫すれば、溶接することによって生ずる好ましくない収縮ひずみを除去することができることになる。

局部的に縮まった個所を伸ばしてやる。しかも例えば

単材の溶接後といった早い時期に行うような設備および工程を組むように工夫すれば、そのような欠陥はその後の工程では残留しないことになるので、そのような単材で組み立てた部材断面は溶接ひずみの影響が軽減されることになる。

一方、従来工場製作で組立溶接し、一つの部材を作りあげた後に、その構成する部材の板に生じた変形を矯正するために、ひずみ直しと称してスポットの加熱冷却(おきゅうすえ工法)を行っているようであるが、一応要求される設計どおりの形状は出来てはいるが好ましいことではない。すなわち形の出来た部材を構成する鋼板の局部に収縮塑性変形を与えることによっていわゆるひずみとりを行うことは、溶接された組立部材の鋼板に複雑な残留応力を残すことになる。これが使用開始後どんな影響を与えるかは厳密には説明できないが、安易に行った施工結果の経年変化には注目すべきであり、少なくとも合理的とは言えない。見掛けだけ形が整っているとしか言えないし、どこかにしわ寄せがあることは覚悟しておく必要がある。

最近水平スチフナーの回し溶接部に生じた微小割れまたはこれに基づく疲労割れへの発展が問題となっているようであるが、この基本的な溶接に伴う収縮ひずみの内蔵の結果にも着目してほしい。すなわち溶接の結果として部材を構成する鋼板の各所に内存する収縮ひずみに対する正しい認識が欠けていることが問題であると感じている。なおこの割れを防ぐためには、水平スチフナーと腹板の密着度、すなわち腹板の平坦度およびスチフナーの下部(腹板溶接面)の平坦度に対する製作精度に対してもっと関心を持つことが一つの前提となる。一方、鉛直スチフナーと水平スチフナーの腹板への取り付け溶接とのいずれを先行するかといった点の配慮も大切である。そのためには前述の不整に対する組立前の処置およびできるだけ対称な溶接を行うように考えることが肝要である。そういう点から見ると、鉛直スチフナーの左右の水平スチフナーの取り付け溶接を先行し、次に鉛直スチフナーの対称溶接を行うことが望ましい形ではないかと思っている。もちろんこれには前述の不整に対する組立前の正しい処置が前提となることを忘れてはならないと思う。

こうして思いつくままに書いてみると、昭和36年頃溶接の乱用に厳しい警告を与えたと同じように再びここでその警告を強調したいと痛感している。そのためには設計者にも製作現場を見るように努めてほしい。自分の設計がどんな形で実物化しており、その製作の難易にどのような影響を及ぼしているかを自身の目で確かめることは大切なことであると思う。

なお重ねて申しておきたいことは、構造物には必要な

正しい剛性と同時にある種の逃げを設けることも必要ではないかと思う。その意味においては下手な溶接設計には逃げもなければ、剛性もない。この結果は何らかの形で問題を発生する危険性を持っていることと了解してほしい。鋼材の靱性のみに頼っていてよいであろうか、後々の人々に対する責任だけは強く感じてほしいものである。

ついでに申したいことの一つとして、タワーに溶接を乱用することがよいであろうか、真剣に議論してほしいことと思う。

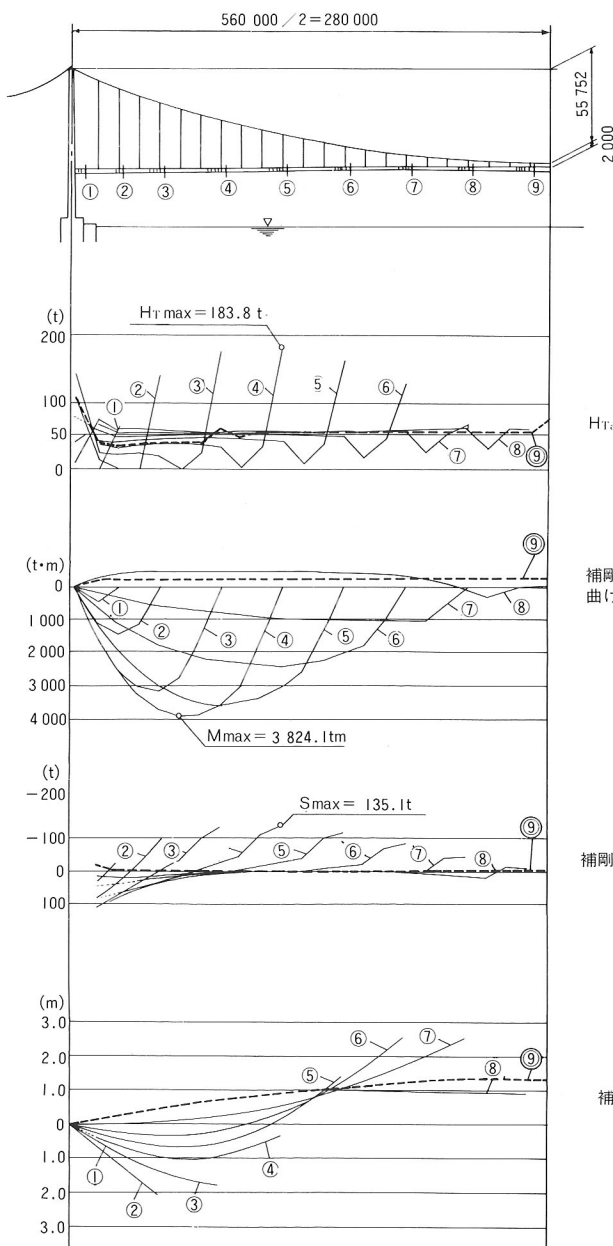
歴史ある諸外国の例として、筆者の見た限りでは、唯

一の例外はあるが、リベットまたはボルト結合のものがほとんどである。

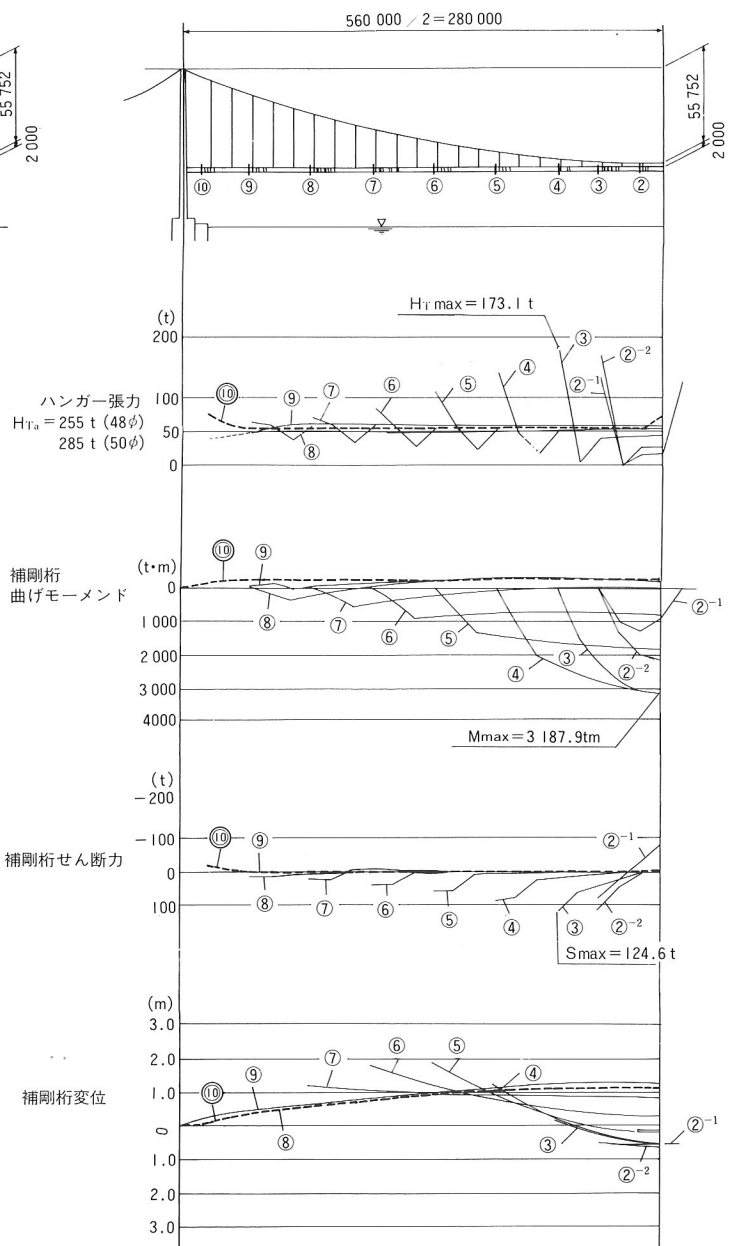
美観といった点でも、ゴールデンゲート橋の素晴らしさを誰も否定しないと思う。思うままに述べたことの真意を理解してもらうことができれば幸いである。

4. おわりに

気のつくままにいろいろなことを述べてきたが、筆者の長年の経験から見た一つの事象断面に対する私見を述べたわけであるが、わが国の鋼橋を中心とした橋梁建設が恵まれた状況にあるだけに、少しでも心してほしいこ



a) 塔よりスパン中央へ架設する場合



b) スパン中央より塔側へ架設する場合

図-1 吊橋の架設順序による断面力の相違

とを述べたつもりである。多くの工場では製作の真剣な肉づけ、特に自動化システムの開発に意を注いでおられる現実には敬意を表する者であるが、なお一層科学的な目でさらに合理化するよう希望するものである。

最後になったが、吊橋または斜張橋にボックス断面(鋼床版)を採用する方向にあるが、その架設および現場溶接についてさらに検討してもらう必要がある。このためある完成された橋で、事前に検討された架設にからんだ資料を掲載させていただくことにより、その手掛かりにしていただければ、勝手に利用したことがお許し願えるものと思う。よろしくご配慮いただければ幸いである。

すなわち図-1の結果により、図-1b)のスパン中央より塔側へ架設する工法を採用されたことと、各ブロックの端面は、床の最終のたわみ曲線の法線方向にとることが前提であることを強調しておきたい。

なおセバーン橋で経験したリブプレートに生じた疲労割れについては十分配慮してほしい。そのためには現場施工で、リブが完全に真っすぐに通りをよくすることに留意し、それに容易な設計および施工管理をすることが肝要であることを強調しておきたい。ここでも無理な溶接採用は注意すべきであろう。もちろんこの場合のリブは鋼床版に取り付けたUリブを対象に考えていることと、鋼床版の溶接を否定するものでないことを念のため申し添えておきたい。

いずれにしても、今後さらにその建設が予想される大支間吊橋および斜張橋には、設計の当初より架設工法の十分な検討を前提として、その計画を進めてほしいことをさらに重ねて述べておく。何らかの参考になれば幸いである。