

吊橋補剛桁の架設工法

Erection Method of Stiffening Girder of Suspension Bridge

高 橋 幸 雄*
Sachio TAKAHASHI

吊橋の補剛桁架設工法を考えた場合、色々な面からの分類があるが、これを大別すると、

- I. 架設部材の大きさ形状による工法の分類
- II. 架設に使用する架設設備による工法の分類
- III. 補剛桁の架設順序による工法の分類

に大別でき、これらの各分類の中で色々な工法が考えられるので、それらについて以下に述べ、最後に共通した重要な問題である補剛桁の閉合方法について述べる事にする。

1. 架設部材の大きさ形状による工法の分類

架設部材の大きさ、形状により架設工法を分類すると

- 1) 大ブロック工法
- 2) 面材架設工法
- 3) 単材架設工法

の3工法に分けられ、以下に各工法の施工方法、特色について述べる。

1-1 大ブロック工法

補剛桁を1～2パネルの大型ブロックに、地上又は合船上等で組立てを行ない、吊上げ、架設する工法であり、この工法は工期の面に於て、他の工法に比べ短縮できるメリットがある反面、架設機械に大型設備が必要とされ、その他桁下の条件により、施工の可能性が左右される工法である。施工実績としては、平戸大橋、南海大橋（韓国）、ベエラザノ・ナロウズ（アメリカ）、マキナック（アメリカ）、サラザール（ポルトガル）等がこの工法にて架設されている。

1-2 面材架設工法

補剛桁がトラス形式の場合、このトラス部材の主構部材、横構部材を1～2パネルの面材にて架設する工法であり、この工法の場合既設桁の上に架設設備を設置して、

次々と架設を行なうことができるので、桁下の地形形状等にあまり束縛されずに施工でき、工期面に於ても、地上にて面材の組立てを行なうことが出来るので、比較的早く行なえる工法である。施工実績としては、関門橋がこの工法にて架設されている。

1-3 単材架設工法

補剛桁がトラス又は鉸桁形式の場合、このトラス部材、鉸桁部材を1部材ずつの単位で、既設の部材に取付けながら架設していく工法であり、部材重量を最少単位で架設するために、架設設備が小さなもので施工出来るメリットがある反面、施工工期は非常に長くなり、施工期間中の耐風対策にも色々問題がある。施工実績としては、フォース橋（イギリス）、その他中小吊橋の架設に多く採用されている。又、面材架設工法に於ても最後の中央部閉合だけは単材にて架設する場合が多い。

以上、架設部材の大きさ、形状にて分類した、架設工法の特色について述べたが、最近の特色としては、大型架設設備の開発が進み、大きな部材にて架設を行ない、現場施工期間をできるだけ短縮する傾向にあり、ブロック架設工法の採用が多くなっている。

2. 架設に使用する架設設備による工法の分類

架設に使用する架設設備にて架設工法を分類すると、

- 1) リフテングクレーン工法
- 2) 三脚デリッククレーン工法
- 3) ケーブルクレーン工法
- 4) 大型クレーン等による工法
- 5) その他特殊設備による工法

の5工法が現在考えられる工法であり、以下にその方法、特色について述べる。

2-1 リフテングクレーン工法

この工法は、既に架設されている吊橋本体のメインケ

*川田建設機工務部長大橋課係長

ケーブルを利用して、補剛桁の架設を行う吊橋独特の架設工法であり、吊橋のメインケーブル上の補剛桁架設位置に、部材吊上げ用クレーン（リフティングクレーン）を固定させ、このクレーンにて、桁下の架設位置に運搬されてきた部材を吊上げ、正規の位置に架設する工法であり、この工法は主に大ブロック工法の場合に採用される工法で、施工に当っては特に桁下条件が問題となる。すなわち、架設位置の桁下が海上の場合、海上閉鎖が行なえるか？、海流等を考慮した場合、部材を運搬してきた船を海上に固定できるか？、又桁下が陸上の場合、桁下位置に部材の搬入、組立てができるか？、というような条件により、この工法の採用が左右される。

技術的には、部材の吊上げ時に、吊上げ用クレーンをメインケーブルに固定するが、この時の、荷重によるケーブルの変形、固定位置のケーブルの損傷、又、吊上げブロック重量が重くなるとクレーン自体の自重もかなり大きなものになるため、このクレーンの移動時に発生するケーブルの損傷、クレーン移動時のケーブルバンドの乗越し方法、等が問題となる。施工実績としては、平戸大橋、南海大橋等がこの工法にて架設されている。

2-2 三脚デリッククレーン工法

この工法は、既に架設された補剛桁上にデリッククレーンを設置し、このクレーンにて、次々と部材を架設しながら前に進めて行く工法で、補剛桁上にデリッククレーン用軌条を敷設し、この上にクレーンを組立て、このクレーンを移動させながら架設を進めて行く。桁の吊上げ時には、クレーンを既設桁に固定させ、クレーン反力をこの既設桁に取り、架設を行なうのが通常である。架設位置までの部材運搬は、既設桁上に敷設した軌条上を台車にて架設クレーンの作業半径内まで運搬するのが一般的に行なわれている方法である。

このデリッククレーンによる架設工法は、主に面材架設、単材架設の場合に採用される工法であり、この工法で架設する場合、部材は既設桁上を運搬できるため、桁下の地形条件に左右されずに施工を進める事が行えるメリットがある。現在この種の架設クレーンの吊上げ能力は、約30ton程度のものがMaxと考えられ、これ以上の能力であると、クレーン自体の構造上の問題点と共に、クレーンの乗る既設桁の架設時応力のオーバー等、色々の問題がおこる事も予想される。架設実績としては、関門橋がこの工法にて面材架設を行っている。

2-3 ケーブルクレーン工法

この工法は、吊橋本体の構造物とは別に、架設用ケーブルクレーンを設置し、このケーブルクレーンを使用して、架設を行う工法であり、通常、吊橋主塔上にケーブルクレーン用仮設タワーを設置し、このタワー間にクレーン用ワイヤーロープを張り渡し、このワイヤーロープのアンカーは、吊橋アンカーレッヂに埋め込まれたケーブルクレーン用アンカーフレームに定着させ、このワイヤーロープに吊上げ用キャリアシステムを取付け、ケーブルクレーンシステムとして完成させ、このケーブルクレーンシステムにより、部材の吊上げ、運搬、架設を行なう。

一般の橋梁にケーブルクレーンシステムを設置する場合、ケーブルクレーン用タワー、ケーブルクレーン用アンカー設備に多くの費用がかかるが、吊橋に、このケーブルクレーンシステムを設置する場合、吊橋の主塔、アンカーレッヂを利用してこのクレーン設備を作る事ができるので非常に有効である。又、このケーブルクレーンシステムを吊橋のメインケーブル架設前に設置すれば、このシステムを利用して、キャットウォークの設置、メインケーブルの架設、補剛桁の架設、その他ほとんどの作業を別の施工設備を設置する必要なく施工できるので、この点に於ても有効な工法である。

しかし、ケーブルクレーンシステムの主ワイヤーロープサグ、ワイヤー径、等に限度があり、センタースパンに於て、250m～300m程度の吊橋が、このケーブルクレーン工法で、有効に施工できる限界と思う。又、ケーブルクレーンの吊上げ能力も、25ton以上になるとクレーンの主ワイヤーロープ径が大きくなりすぎ、施工上取扱いが困難となるため、25ton程度が、有効に施工できる限界と考えられる。施工実績としては、上若生子橋、現在施工中のマガビット吊橋（フィリッピン）、等中央径間200m～250m程度の吊橋にて多く施工されている。

2-4 大型クレーン等による工法

吊橋の補剛桁架設時には、吊橋のメインケーブル、キャットウォーク設備、等が空中に設置されているため、これらが障害となり、補剛桁を大型クレーンにて、架設した例は今まで少ない。しかし、桁下条件が良く、架設位置の真下に部材の組立て、又は組立てた部材の搬入ができる場合には、大型クレーンにて部材の一括吊上げを行い、架設する工法も考えられる。特に最近、トラッ

クレーン、フローティングクレーン共、機種の大型化が進み、トラッククレーンでは 250 ton~300 ton 吊、フローティングクレーンでは 3000 ton 吊クラスのクレーンも使用されている。吊橋の架設に於ても桁下の条件さえ良ければ、これら大型クレーンを使用して架設する事も可能である。

2-5 その他特殊設備による工法

過去に於ける吊橋の補剛桁架設は、前述の、2-1~2-3の工法によるものがほとんどであった。しかし今後、本四連絡橋の明石海峡大橋の様な超大型吊橋の施工方法を考えた場合、従来施工されていた工法では、色々と問題があり、新しい施工方法を開発しなければ、この施工はむずかしいものと考えられる。

明石海峡大橋の場合、センタースパンが 1580 m で計画されており、桁下の海峡は船舶の通行が多く、海上からの部材取込みは不可能と考えられる。又、関門橋で行った様に、既設桁上に軌条を敷設し、面材、単材部材にて運搬する事も大変である。この様な超大型吊橋の場合、できるだけ大きなブロックで架設を行い、少しでも工期の短縮をさせる様に考えなければならない。

この様な事を考えた場合、従来の架設工法にとらわれない、まったく新しい架設工法を開発しなければ、施工できないものと思われる。

たとえば、

- ㊤ 既設補剛桁を利用して、補剛桁下に架設する大ブロックを吊下げ、架設位置まで運搬し、架設位置に於てエレクションガーダーの様なフレームを利用して、架設ブロックを押出し、メインケーブルにセットした吊込み設備を利用して、ハンガーケーブルに取り付けて行く様な工法。
- ㊤ メインケーブル上を、架設ブロックを吊ったまま移動して、架設位置まで大ブロックを運搬し、そのままハンガーケーブルに取り付け、架設のできる様なリフティングクレーンの開発。

等が現在検討されている工法の一例である。

3. 補剛桁の架設順序による工法の分類

補剛桁を架設して行く桁の順序と進行方向で架設工法を分類すると

- 1) 主塔より中央部、両アバットに張出して行く工法
- 2) 主径間中央部、および両アバット部より主塔に向かって架設する工法。

の2工法があり以下にその特色を述べる。

3-1 主塔より中央部、両アバットに張出して行く工法

架設する桁を主塔より、主径間中央部、両アバット方向へ張出して行く工法であり、この順序で架設を行う場合、架設部材を比較的地型条件の良い、主塔取付け部から架設して行くので、部材架設用設備の設置、部材の取込み、等が容易に行なえる。又、架設部材の運搬も、主塔を利用して取込み、既設桁上を利用して、容易に運搬でき、足場、安全設備、連絡設備等の設置も、主塔をベースとして行なえるので施工しやすい場合が多い。この様に、施工しやすい場所から架設を行い、架設した桁を利用して、次々と施工して行く方法が取れるので、有利な工法である。

しかし、補剛桁の変形や架設途中での桁に入る応力の影響から見た場合、色々な問題が考えられる。だがこの主塔より、両側に張出して行く工法は、単材架設、面材架設、ブロック架設のいずれの工法でも施工が可能であり、使用架設設備の面からも束縛される事が少ないので、施工実績としてはこの工法の採用例が多い。

関門橋（面材）、フォース橋（単材）、マキナック橋（ブロック）、サラザール橋（ブロック）等がこの工法で施工されている。

3-2 主径間中央部、および両アバット部より主塔に向かって架設する工法

主径間中央部、および両アバット部より架設を始め、主塔に向かって次々と架設していく工法であり、純理論的な見地からするとこの架設順序は、補剛桁の変形や応力に与える影響からみて、勝れた利点が考えられるのであるが、架設方法が単材や面材の架設に対して不向きであり、又、最初の部材の架設位置が主径間中央部と言う、比較的桁下条件の悪い場所から始めるため、架設設備の設置、足場等安全設備の設置、作業員の配置、等段取り面から考えても不利な事の多い工法である。

しかし、施工面の優劣だけで施工法を決定する事はできず、げんにベラザノナロウズ橋、サンフランシスコオークランドベイ橋などはこの工法にて架設が行なわれて

いるし、BOX桁を採用したセバン橋や、韓国の南海大橋など、架設中のたわみ変形がより厳しく効いてくるタイプの吊橋では、いずれも中央より、主塔へ向って攻めるといふ、この工法が採用されている。

4. 補剛桁の閉合

吊橋補剛桁の架設工法を、部材形状、架設設備、架設順序で大別し、それぞれの中で考えられる工法の、施工方法、特長、実績について述べてきたが、最後に、吊橋補剛桁の架設上で重要な問題として、中央径間の閉合をどのように行なうか、という問題があるので、以下にこの閉合について述べる。

閉合方法の適否は、吊橋の施工上最も重要な問題の一つである。

従来の一一般の架設手順では、床版等は後死荷重とされて、補剛桁の閉合後施工されている。そのために吊橋として完成した時の姿に較べ、閉合時には主塔は死荷重の少ない分だけ両側に開き、主ケーブルサグが浅くなり、補剛桁の上面部は開き過ぎ、下面部では狭くあたって、スムーズな閉合をむずかしくしてきた。これまではこうした事態に対して、

- ① やむなくそのままの姿で、閉合する部材の長さを現場合せで決めて取付ける。
- ② 閉合される両端部にサーチャージを行ったり、上面部部材を引張ったり、下面部部材を押ししたりして、閉合部材を取付ける。

といった方法が、とられてきた。これらはいずれもあまり良い方法とは云い難く、とくに①の方法では閉合後に載荷される死荷重が、そのまま補剛桁内に残留し、時には桁のキャンバー自体も、設計されたものとは、かけはなれたものになることが考えられ、中には、特に中央付近でキャンバーの大きい、いわゆる「キューピーの頭」と称す、最も好ましくない傾向になる場合もある。

こうした欠点を少しでも補おうとしたのが②の方法である。しかしこの方法でも、閉合される局部に限られた取扱いとなるため、決して十分なものとはなりえず、結局最後には閉合すべき部材をいじることになり勝ちで、①に指摘した欠点を完全に補ないがたい。

この様に、主塔部から架設を進行させるという手順では、中央での閉合の時点で問題が生ずることになる。このためにベエラザノナロウズ橋、サンフランシスコオー

克蘭ドベイ橋では、施工上のハンデをおしてまで先ず、主径間中央部から架設を開始して、主塔側へ進め、閉合という作業を省く工法が取られている。継手部に現場溶接を必要とする、セバン等のBOX桁タイプの吊橋が、同様な架設順序を選ばざるを得なかった理由もここにある。

それでは、設計理論通りの形状で閉合するためには、主径間中央部から架設を開始する以外に手段がないかと言うと、そうではなく、次の様な手順で架設を行えば、主塔側から架設を進行させても設計理論通りの形状で閉合を行なう事ができる。

- ① 中央径間の補剛桁の両端は、架設進行中、主塔又は沓と固定せずに、自由しておく。
- ② 閉合部材架設時に、主塔基部又はアバットに、ジャッキ又はタンバックルを設置しておき、補剛桁を引込み、下面部部材取付け位置の間隔を正規の寸法と一致させる。(閉合前の下面部部材取付け位置は正規の寸法より狭くなっているため)
- ③ 部材をクレーンにて吊り、所定位置に落とし込んで、下面部部材を連結する。
- ④ 部材の上面部にジャッキ又はタンバックルを設置し、補剛桁の上面部部材を引きよせて、上面部部材も連結する。この時の引込み力が大きすぎる時は、補剛桁両端の沓位置を上方向にジャッキでもち上げて、引込力を補助する事も出来る。
- ⑤ 補剛桁に取付けるすべての部材を取付け、HTボルト等もすべて締付を行なう。
- ⑥ 補剛桁の両端部をジャッキにより引きおろし、沓に固定することにより、後死荷重に相当するプレストレスが導入されて閉合完了となる。

以上、閉合について説明しましたが、閉合前の部材取付け位置の開き、ジャッキでの引込み力、閉合後の補剛桁と沓との開き、沓に固定させるための引き下げ力、等については、正確な吊橋の諸元さえわかれば、我々としては今日コンピューターにより、すべて解析する事ができるまでにいたっている。

このような詳細な架設計算と適切な閉合方法を行なうことによって、閉合時に補剛桁には後死荷重分に相当する逆向きの応力をプレストレスとして与え、吊橋完成時には死荷重に対して無応力とする工法を、「吊橋のプレストレス工法」と称している。