

LRT および高速鉄道橋におけるフルスパンプレキャスト化施工（その2）

— Full-span precasting for light-rail transit and high-speed railway bridges Part 2 —

著：Marco Rosignoli
訳：会誌編集委員会海外部会*

構造上の特徴

載荷されたビームランチャーの概念は単純である。タイヤトロリーは、後方Cフレームにできるだけ近い位置まで主桁前方の吊り位置をもっていくために、架設桁後方のフレーム下を前進する。運転室は多くの場合、主桁の運搬を妨害せず、プレキャスト設備へ早く戻れるようにタイヤトロリーの後方に設置される。

前方ウインチ台車は、主桁の先端部を吊り上げて前方に移動し、タイヤトロリーの桁受は主桁の後方を支持し、タイヤトロリー上を前進する。桁受がタイヤトロリーの先端部に到達すると、後方ウインチ台車はトランスポーター（タイヤトロリー）を解放するために主桁の後方を吊りあげる。

主桁は所定の位置に移動し、床版の高さまで下げられる。ロードセルとステンレスのシムは配置の調節に使用される。主桁の配置には2時間から3時間を要し、ランチャーの再配置にはさらに2時間から3時間を要する。そのため、運搬路にそって工事用道路がある場合、毎日2～3本の主桁を配置することができる。プレキャスト設備はこのような生産性を確保するために計画された。

スプレッダービームは貫通したネジ付鋼棒により主桁に設置される。リフティングビームはホイストに常時接続されている。相互に接続された二つの吊り装置はタイヤトロリーの桁受のねじりヒンジを調整するために後方ホイストで使用される。前方ウインチ台車の独立した吊り装置は、主桁の引き出しや配置中のねじりを抑制する。

大規模な高速鉄道プロジェクトは、通常一般的な支間で設計されるが、いくつかの短い支間が生じることは避けられない。巻き上げ設備間の距離は一定ではないため、架設桁の前方支持脚と下支え式架設桁は位置調整のために橋軸方向にスライドする。歩廊はアクセスや保守・点検を容易にするために、架設桁・後方プラットフォーム・ウインチ台車・下支え式架設桁に設置されている。

後方Cフレームは後方に通り抜けられるように主桁より幅が広がっている。フレームはランチャーのねじり剛性の大部分を占め、架設桁・後方プラットフォーム・ホイスト・主桁の重量を受けもつ。支持シリンダーとフレーム基部の台車は、運搬の重量を直接伝達させるために完成した主桁のウェブ上に配置されている。

タイヤトロリーから高速鉄道用の主桁を吊りあげるには、ランチャーの後方プラットフォームの下に十分な垂直方向のクリアランスが必要である。その上、架設桁は

背が高く、これらの機材の高さは主桁の配置や揚重の際に横方向の安定性の問題を引き起こす可能性がある。複数のPC鋼棒が安定性の確保や風および作業による横方向の荷重に抵抗するために、架設桁と下支え式架設桁の固定に使用される。

支持および駆動機構

ほとんどの伸縮式ランチャーの架設桁は後方Cフレームと構造的に連続しており、前方支持脚上で支えられている。後方Cフレームは移動中に新しい主桁の上を進むが、通常、高速鉄道橋は大きな平面線形を有しているため、線形に追従するために回転する必要はない。移動中の前方脚は、下支え式架設桁上を移動し、主桁を配置しているあいだは、前方の脚頭部上で支持される。ホイストは、後方プラットフォームから前方脚を越え、前方横梁まで架設桁に沿って移動する。

主桁の配置の間、架設桁の前方脚と下支え式架設桁の後方脚は、ランチャーの支持構造と干渉することなく、主桁を下せるように、前方の脚頭部の前半分で支持されている。前方の支持脚は平面線形に追従するために回転し、架設桁に沿ってスライドする。橋軸方向の複動シリンダーが双方を動かす。機械的に固定されたロングストロークの複動シリンダーは、主桁配置時の架設桁の横方向の調整、床版上の台車の揚重、下支え式架設桁上の移動のため、後方Cフレームと前方脚に設置されている。

後方Cフレームの台車の油圧モーターは移動の第一段階で下支え式架設桁上にランチャーを押し出す。また、台車の垂直シリンダーが平面支持の調整を行う。変位センサーと圧力弁は、プログラミングされたコンピューターで自動制御される。新しい脚頭部に前方の支持脚を固定した後、前方ウインチ台車と補助ホイストは1.2スパン型の下支え式架設桁を再配置するために使用される。完全な2スパン型の下支え式架設桁は、一般的に自走する。

品質および生産性

プレキャストコンクリート桁の架設には、2～3時間を要する。架設桁の再配置には、さらに2～3時間を要し、1基の架設桁で1日あたり3本の主桁の架設がなされてきた。しかしながら、エレクトロニクスの生産性はプレキャスト製造設備、タイヤトロリーの数とスピード、橋長と輸送経路および載荷したタイヤトロリーが移動できる交差用盛土^{〔訳注〕}の有無の影響を受ける。

ビームランチャーは、輸送における最終過程といえるがその生産性は、架設速度に影響を与えることはほとんどない。

主桁は荷重に抵抗できる状態となった直後に順次、輸送・架設がなされる。桁に載荷される荷重強度から、養生時間と必要な保管用プラットフォームが決定される。背の高い門型クレーンは、プレキャスト施設において桁を積み重ねたり、養生中の桁上空で桁完成した桁をトロリーに積み込むために用いられる。

エレクションラインは、ジャストインタイム輸送に合わせて設計され、保管用プラットフォームは養生時間とともにプレキャスト部材製作の製作速度を考慮して設計される。

タイヤトロリーのスピードは、交差する盛土が無い場合の長大橋の施工速度を決定することもある²⁾。タイヤトロリーは、軽量であるため通常、門型キャリアよりも早く、また桁は吊り下げられるのではなく、支持されているため桁との共振が発生せず、ビームランチャーを用いた架設時間も短い。桁の輸送後、トロリーは桁架設の間にプレキャストヤードまで戻ることができるためサイクル時間が短い。十分な強度を有する交差用の盛土部が無ければ、相互に桁を受け渡すことができないため、複数のトロリーを用いても時間短縮はできない。

タイヤトロリーにより輸送される場合のビームランチャーによる桁架設は、架設桁を桁の輸送に用いることはできず、トロリーの方が安定的に素早く輸送できるため、橋長が長い場合に適する。短支間かつ多径間の橋梁では、門型キャリアが下支え式架設桁を土工部から持ち上げて次の架設地点へと輸送するため、門型キャリアの方が適している。エレクションラインの移送には解体が不要であり、桁輸送が直ちに開始できるためジャストインタイムに設計されたプレキャスト設備の手待ちを最小化できる。

最後に、タイヤトロリーを用いた桁輸送は、仕上げ工を遅らせ、コスト増となる橋面上の他の機材を不要にする。

構造物 - 機材の相互作用

構造物 - 機材の相互作用は、この種の洗練された機材では比較的単純である。架設される桁は、輸送中は両端で支持され、据付時には両端で吊り下げられる。これは、タイヤトロリー・機材の梁および主桁の剛性に関係なく、負の曲げモーメントの発生を防止する。桁後方のねじりに対するヒンジは、輸送中および架設中のねじりを防止する。また、動的荷重による振動は普通の支持地盤上にある場合、この種のゆっくりとした機材では低レベルに留まる。

各車軸に作用する軸重は、電子制御にて平準化される。タイヤトロリーは門型キャリアよりも軽量で局部載荷するために、より長い養生期間が必要となるが、桁とトロリーの重量は、桁に沿っては広がらない。

ポジションセンサーは、次に架設される桁がウェブ上

に載荷されるように車輪のアライメントを制御する。フルオートマチックでドライバーなしでトロリーが橋に沿って移動するものも存在する。

それぞれの主桁の前方の横桁は、架設桁の後方Cフレームを載せることができ、かつアンカーのためのタイダウンも定着できるような構造詳細となっている。架設桁およびタイヤトロリーが高速鉄道橋の橋脚や基礎の設計を決定づけることはほとんどない。

後方のCフレームは、架設桁の位置を調整している間に新しい桁の上を移動していく。メインフレームは単純支持されるため、後方の支持反力は正確に予測できる。新しい桁の正曲げモーメントはタイヤトロリーにより生じるものよりも通常は小さいが、集中荷重が生じるために大きなせん断力が作用する。後方の支持反力は、ウィンチトロリーを前方に移動させることにより減じることができる、ただしこの操作は下支え式架設桁への作用荷重を増加させる。

門型キャリア

プレキャストコンクリート桁用の門型キャリアは、2基のホイストを支持する鋼製箱桁で繋がれた2基のトラクターとで構成される。このトラクターは、電子制御のモーター付きの車輪が備え付けられている。なかには、±90°の角度で回転でき、個別に90°曲がった状態で駆動できるものも存在する。両方のタイプの門型キャリアとも架設をする際に、2スパン分の下支え式架設桁と組み合わせて用いられる。パワーバックユニット、油圧システム、油圧槽およびホイストウィンチは、下支え式架設桁上で操作している間、前方のトラクターを軽くするために、後方側の端部に備え付けられる(図-14)。



図 - 14 ビボットトラクター付き 31.5 m - 単線 U 桁用の門型輸送機 (58 m, 3200 kN)

製作台から桁を取り出す工程は、複雑な操作をとる。キャリアは、桁に沿って動かされ、油圧の支持具の上でトラクターは持ち上げられて90°回転される。トラクターは、横方向の安定性を確実にするために回転させる。ただし、キャリアが±90°回転できるのであればトラクター自体の回転は不要である。キャリアは、桁上で横方向に動き、型枠装置から桁を吊上げ、輸送ルートに再び戻り戻ってきた時と逆の手順で操作される。保管用プラットフォームに桁を荷卸しする作業と最終架設地点

へと輸送するための桁の取出し作業とが何度も繰り返される。

下支え式架設桁の門型キャリア

桁ウェブ上か単線用U桁内のキャリアの動作を自動運転システムにより調整する。キャリアはその自重とプレキャストコンクリート桁の重量を橋梁の2スパン以上に分担させる。車軸ラインの軸重は梁のたわみを補うように均等化している。エレクションラインの先端では、キャリアの前方トラクターは2スパン型下支え式架設桁の後方まで到達している。

下支え式架設桁は、エレクションスパンの橋脚先端や次の橋脚で調整できる脚上フレームを支持した剛性のある箱桁である。ストロークの長いシリンダーまたは脚は、橋脚後方で下支え式架設桁の後方を支持する。脚上フレームは平面的配置調整のために支持シリンダーを格納して連結式支持桁受を支える。下支え式架設桁の後方をキャリアの前方トラクターに合わせるために、複動シリンダーにより横方向に桁受を移動させる。脚上フレームは地上からクレーンを使わずに自ら再配置するために下支え式架設桁から吊り下げられる。

駆動桁受は下支え式架設桁に沿って移動し、キャリアの前方トラクターのための垂直支持シリンダーに含まれる。下支え式架設桁は後方に張出される。そのあと、桁受はトラクターを支持するために既設橋梁の先端へ後ろ向きに移動させる(図-15)。桁受は独立操作でパワーバックユニットと油圧システムを動かしている。位置センサーにより下支え式架設桁に沿った桁受の位置を感知する。



図 - 15 下支え式架設桁の後方張出しの電動桁受

キャリアは桁受上に前方トラクターを置くために前方に動かし、桁受の垂直シリンダーは桁から車輪を持ち上げるために伸びている。前方トラクターが橋脚先端を超えるまでのあいだ、支持桁受の油圧モーターと後方トラクターはキャリアを下支え式架設桁に沿って同時に動かしている(図-16)。

主桁架設位置に到達した後に、キャリア下の空間が確保できるまでのあいだ、下支え式架設桁の支持台車にロ



図 - 16 門型キャリアによる主桁配置状況

ックをかけないで、桁受の駆動により下支え式架設桁を前方に逆押しする。後方トラクターは、下支え式架設桁を再配置しているあいだ(図-17)、橋軸方向の移動を制限する。この操作のあいだ、フル2スパン型下支え式架設桁は、脚上フレームを再配置する必要がある。駆動桁受のパワーバックユニットは、位置調整するために脚上フレームの油圧システムを供給する。



図 - 17 下支え式架設桁の配置状況

橋梁下部の敷鉄板は、架設時に設置される。3枚のプレートは適切な高さでセットされ、4枚目のプレートは4~5mm(0.16~0.20インチ)低くセットされる。敷鉄板に置かれる4つのロードセル上に主桁をのせる。ステンレスシムで支持反力を調節した後に、主桁を持ち上げ、ロードセルを除去し、主桁を定位置に配置する。最後に、新しい配置サイクルのために新側の主桁上で前方トラクターを解放するために下支え式架設桁を駆動桁受により後進させる。

下支え式架設桁の操作は、トラクターの車輪間で高く広いクリアランスを必要とする。この必要条件は、タイヤトロリーに比べて優れている門型キャリアの長所の1つである。タイヤトロリーは桁ウェブ上に荷重をのせる。しかし、機材がキャリアの到着で床版のセンターラインに配置されるならば、キャリアの高いクリアランスによ

り桁を早く準備することが可能となる。

構造上の特徴

4基のリフティングビームは、底面から貫通させたボルトによりプレキャストコンクリート桁に設置される。桁端部のリフティングビームはねじれヒンジを設けるために相互接続している。しかしその一方で、桁端部の2つのリフティングビームはねじれを抑制するために独立させている。

門型キャリアには2台のホイストを備えている。1台は固定用に、もう1台はより短いスパンに対処するために主桁に沿って移される。パワーバックユニット、油圧槽、ホイストウインチは下支え式架設桁にかかる荷重を減らすために、キャリア後部に配置される。キャリアは、プレキャスト施設内の長い運搬ルートにより主桁を移動させる。構造・機械部品は長期間相当な荷重がかかるため、これらの機械は高品質であることが必要不可欠である。

門型キャリアはビームランチャーより背が高い。下支え式架設桁と駆動桁受はタイヤトローリーより背が高く、主桁も長スパンのため、タイヤトローリーより背が高い。プレキャストコンクリート桁は振動を防ぐため架設桁と密着させられる。そして、門型キャリアと架設桁の合成重心の位置が高くなる。トラクターの車輪は桁のウェブに沿って設置され、車軸間隔の狭さが水平方向の安定性を失う可能性がある。単線用U桁のほうがより安定性を失う可能性がある。なぜならば、U型桁の構造上、車軸間隔がより狭くなるからである。また、タイヤの影響により水平方向の一次固有振動数がより低くなる。

高速鉄道橋は、横断勾配が左右対称のため、タイヤトローリーは水平を保って輸送される。プレキャスト施設内そして交差用通行用盛土の輸送ルートにおいても、最小の横断勾配で水平が保たれる。

下支え式架設桁の支持部材は最大剛性により設計される。複線用箱桁の橋上フレームは単線用U桁の橋上フレームより高く強い。下支え式架設桁後方の架設桁の桁には定着の際に必要なに応じて追加の補強が行われる。

これらの機械の弱点は水平方向の安定性と適用できる支間にかぎりがあることである。トローリーにより輸送される主桁の長さは、主桁とランチャーの耐荷力に支配される。門型キャリアの場合、長スパンの主桁であるため、下支え式架設桁はより高さが必要となる。またより合成重心の位置が高くなるため、輸送時の安定性を失う可能性が高くなる。下支え式架設桁用の高さのある橋上フレームもまた安定性に劣る。また長いランチャーは、主桁降下時、前方の脚頭部の前半分における下支え式架設桁後方の支持を困難とする。

支持と駆動機構

油圧式モーターが両方のトラクターを動かす。後方トラクターは橋軸方向の荷重の不釣り合いを最小とするため、下支え式架設桁の駆動桁受に連動して動く。圧力バ

ルプと下支え式架設桁に沿った位置センサーによる情報が、プログラムにより自動制御されたランチャーのコンピュータにフィードバックされる。

基本的な役割としてねじれ剛性を確保するためがあるため、下支え式架設桁は箱型であり、ねじれをコントロールするためダイヤフラムが密に設置されている。下支え式架設桁は均一な断面をもち、前方脚により支持される。中央の橋上フレームはもっとも荷重がかかる支持材であり、前方の脚頭部の前半分に定着される。主桁の架設時においては、前方のトラクターの荷重が中央の橋上フレームに伝達される。前方の橋脚が細い場合には、ブラケットに補強が必要となることもある。

2スパン型下支え式架設桁は、地上のクレーンを使用せずに橋上フレームの再配置が必要となる。油圧式のモーターもしくはホイストにより、下支え式架設桁に沿って橋上フレームを移動させることにより、鉛直方向支持と水平方向の位置を調整できる。ほとんどの装置は駆動桁受のパワーバックユニットを動力とする。橋上フレームは浮き上がりを防ぐため、脚頭部に固定される。

駆動桁受は、パワーバックユニットのもと、鋳鉄製の車輪と台車により構成される4つの装置により下支え式架設桁を往復する。トラクターの支持は、台車を通じて直接荷重が伝達される。いくつかの車輪には、上り勾配での滑りを防ぐため、モーターが備えられている。

性能と生産性

門型キャリアは、作業のほとんどを主桁の輸送に費やす。主桁の揚重時間が1、2時間、主桁の降下時間が3、4時間に対し、輸送ルートが長い場合は主桁の輸送に丸1日を費やすことがある。長い輸送ルートのサイクルを維持するため、非載荷時は倍のスピードで移動する。スピードのあるものは費用がかかり、荷重による振動のために安定性に劣る。



図 - 18 複線用箱桁用の強固な橋上フレーム
(写真提供：VSL)

プレキャスト設備が二つの製造ラインを有する場合、製造ラインごとに門型キャリアが割り当てられる。二つの橋梁を同時に建設するために二つのキャリアと二つの下支え式架設桁が使用されることもある。交差用盛土が輸送ルートに沿って確保できる場合には、一つの橋の架

設スピードを倍増させるために一般的な下支え式架設桁と二つのキャリアを併用することもできる。日常的なオペレーション作業には燃料補給、製作台から保管用プラットフォームへの主桁の移動、さらには保管用プラットフォームから輸送ルートに向かうための主桁の回収などが含まれる。

盛土やトンネルで分断された複数の橋梁建設時には、門型キャリアの利用が第一の選択肢となることが多い。門型キャリアは盛土上で下支え式架設桁を持ち上げ、隣の橋台まで解体や地上クレーンを使うことなく移動させることができる。主桁の架設を速やかに再開できることで、プレキャスト設備からのジャストインタイム輸送が可能になっている。

トラクターはシングルホイールもしくはダブルホイールとなる。シングルホイールの場合はタイヤ径を大きくする必要があり、ホイール間隔により軸重が大きくなる。しかし橋軸直角方向においては、シングルホイールは中央クリアランスを最大化できるので主桁輸送時の床版上での機材保管に有利となる。どちらのタイプであっても±90度独立式操舵か、より小さい操舵角度とトラクターの90度回転との組合せで設計される。

プレキャスト設備において門型キャリアが大型吊上げ機を必要とするのはほとんどない。完成した橋の上に荷重をバランスよく分配できるため、保管用プラットフォームの数も少なく済む。荷重を不均等に分散させないように最低限の横断勾配と凸凹の無い表面が求められる。旋回トラクター付きキャリアの操舵半径が比較的大きくなるため、保管用プラットフォームは通常のタイヤトローリが使われるプレキャスト設備にみられる典型的な行列型配置ではなく、放射線状配置となる。

橋台へアクセスできないとき、もしくはプレキャスト設備と橋面の標高差が大きい場合は、二つの門型クレーンを用いて主桁を床版上に揚重する(図-19)。この場合、輸送手段としてタイヤトローリを選択するのが好ましい。設置される4本の主桁がビームランチャーとタイヤトローリ組み立てのための作業プラットフォームとなる。タイヤトローリは作業プラットフォーム上を往来して、架設方向に向かってランチャーを進行させる。輸送ルートに沿って交差用盛土がある場合は複数のタイヤトローリにより作業効率を高めることができる。



図 - 19 高架上架設ライン用のフルスパン架設プラットフォーム

架設設備による構造物への影響

門型キャリアは主桁の端部を吊り上げて輸送および設置を行う。これによってキャリア、床版そして下支え式架設桁の剛性によらず負の曲げモーメントの発生を回避している。主桁の片側端部にあるねじれヒンジによってねじれの発生を防ぎ、通常の滑らかな支持面(凸凹が少ない)を低速移動するこの機械においては動的荷重(移動時の荷重)の増幅は一般的に小さいものとなる。

キャリアによる荷重が高速鉄道橋の橋脚と基礎の設計の支配的要因になることはまれであり、架設設備による構造物への影響で問題となるのは主に床版への荷重である。トラクターは互いに距離があり、キャリアはタイヤトローリより重いものの、主桁とキャリアの荷重は2スパンにわたりバランスよく分配される。床版の養生期間に応じた許容荷重を超えないようトラクターの全長が決められ、床版のたわみによる荷重集中を防ぐため、論理的なプログラムコントローラーを用いて軸荷重を均等化している。

左右ホイールがウェブ上を走行するようセンサー制御を行っている。運転手無しでウェブ上を走行できるよう完全に自動化されたキャリアもある。門型キャリアは風による振動を受けやすく、高所での強風は主桁運搬の大きな障害となる。

架設設備による構造物への影響は隣接構造物から派生することもある。急斜面を伴う山岳地帯では、橋梁の橋台はトンネル坑門と一緒にすることが多い。トンネル内を通過するために設計された特殊キャリアが、下支え式架設桁に設けられた吊り下げ式プラットフォームによって下支え式架設桁の駆動桁受上に乗ることもある。

[訳者注]

交差用盛土：プレキャスト桁を運搬し、橋体上に荷揚げする位置に設けられ、トローリで橋面上にプレキャスト桁を運搬するために設けられるものと思われる。

参考文献

- 1) Rosignoli, M. 2011, "Industrialized Construction of Large Scale HSR Projects : the Modena Bridges in Italy", *Structural Engineering International* 21 (4) : 392-398
- 2) Rosignoli, M. 2013, *Bridge Construction Equipment*, London, UK, ICE Publishing
- 3) Vion, P., and J. Joing. 2011 "Fabrication and Erection of U-Through Section Bridges" *Structural Engineering International* 21 (4) : 426-432
- 4) Rosignoli, M. 2012, "Modena Viaducts for Milan-Naples High-Speed Railway in Italy." *PCI Journal* 57 (4) : 50-61
- 5) Rosignoli, M. 2010, "Self-Launching Erection Machines for Precast Concrete Bridges" *PCI Journal* 57 (4) : 50-61
- 6) Meyer, M. 2011, "Underslung and Overhead Gantries for Span by Span Erection of Precast Segmental Bridge Decks" *Structural Engineering International* 21 (4) : 399-405
- 7) American Segmental Bridge Institute (ASBI), 2008, *Construction Practice Handbook for Segmental and Cable-Supported Bridges*, Buda, TX : ASBI

- 8) Rosignoli, M. 2011, "Bridge Erection Machines" In *Encyclopedia of Life Support Systems*, Chapter 6.37.40, 1-56, France : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)
- 9) Rosignoli, M. 2007, "Robustness and Stability of Launching Gantries and Movable Shuttering Systems – Lessons Learned", *Structural Engineering International* 17 (2) : 133-140
- 10) Hewson, N. R. 2003, *Prestressed Concrete Bridges : Design & Construction*, London, UK : Thomas Telford
- 11) Rosignoli, M 2002, *Bridge Launching*, London, UK, Thomas Telford
- 12) Liu, Y. 2012, "Erection Prefabricated Beam Bridges in a Mountain Area and the Technology of Launching Machines", *Structural Engineering International* 22 (3) : 401-407

原 典

Marco Rosignoli : *Full-Span Prestressing for Light-Rail Transit and High-Speed Railway Bridges*, PCI Journal, Vol.59, No.2, Precast/Prestressed Institute, Chicago, USA pp.49-61, Spring 2014

This article was first issued in PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute) Journal, Spring 2014, Volume 59, Number 2, page 49-61

* : 会誌編集委員会海外部会委員

秋山 博 (株) 銭高組

横田 剛 (株) ピーエス三菱

三浦 廣高 (株) 鹿島建設

田原 徹也 (株) 首都高速道路

田中 慎也 (株) IHI インフラ建設

【2016年3月5日受付】



刊行物案内

PC 技術規準シリーズ

PC 構造物高耐久化ガイドライン

2015年4月

定 価 4,800 円 / 送料 300 円

会員特価 4,000 円 / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会 編
技報堂出版