

ドイツにおけるインテグラル鉄道橋の現状 — Integral Railway Bridges in Germany —

著：Steffen Marx, Prof. Dr.-Ing., Jacobs School of Engineering, University of California, San Diego, USA
Günter Seidl, Dr. Eng., SSF Ingenieure, Berlin, Germany

訳：会誌編集委員会海外部会*

ドイツでは、鉄道インテグラル橋は大きな位置を占めている。本稿は、インテグラルアバットを有する近年の発展と現在建設中の新線建設における長大橋への展望を述べる。

ドイツにおける鉄道建設では、支間長 20m 以下の RC ラーメン橋が 25 年以上にわたり採用されてきた。また、RC ラーメン橋の横取り工法による既設線への移動は経済性に優れた案である。後述するインテグラルアバットを有するより長い橋梁を含めたラーメン橋の成功例は、従来と異なる形で経済性を実現した。それらの優位な点を、Rednitztal 高架橋、Dresdner Bahn 高架ジャンクションおよび Saaleflut 川を跨ぐ合成構造の橋の事例をもとに述べる。

上記の成功例をもとに、殊に低コストでの橋梁建設、堅牢な構造物の建設および容易な維持管理に着目し、インテグラル橋が鉄道の新線建設に採用された。ラーメン橋の建設の出発点は、それまでの単純桁橋と比較した場合の非常に高いレベルの設計にあった。エアフルト (Erfurt) ~ハレ/ライプツィヒ (Halle/Leipzig) 間の橋梁群は、建設途中であり、インテグラル橋の適用の良い事例である。Scherkondetal 高架橋、Unstruttal 高架橋、Gänsebachtal 高架橋および Stöbnitztal 高架橋の事例から、長支間ラーメン橋の設計・施工の原則を細部まで見て取ることができる。

建設に際し、ラーメン橋の高い剛性、好ましい水平荷重伝達および支承の無い簡便な施工などの利点に関して過去の経験に基づき、包括的に議論され、品質の評価がなされた。

キーワード：インテグラル橋、セミインテグラル橋、ラーメン橋、鉄道橋、高速鉄道、合成構造

1. はじめに

ドイツでは、鉄道建設の初期からラーメン橋が建設されてきた。インテグラルアーチ橋は、1960 年代以降、コンクリート製のラーメン橋に取って代わられて来た (図 - 1)。

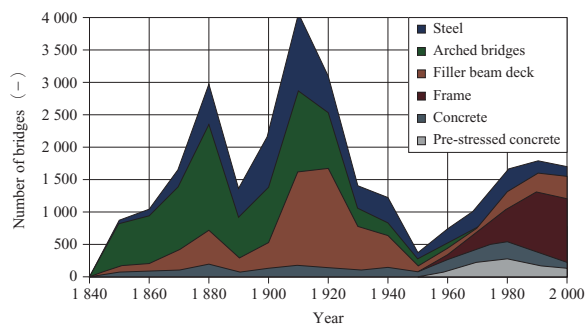


図 - 1 1840 年代以降に建設された橋梁の種別

(凡例 (上より)：鋼橋、アーチ橋、H 形鋼埋込みスラブ桁、ラーメン橋、RC 橋、PC 橋)

1970 年から 1990 年の間の鉄道建設の第 2 のピークでは、鉄道運営者の要求事項を満たし、下部工と切り離して上部工の取替えを可能とするため、主として支承を有する上部工が設計されていた。鉄道の運行に支障を来さないように、既設線の運行への影響を最小限としながら橋梁の取替えをするため桁製作を考慮した新たな施工法であった。

1980 年代のドイツでは、下部工と上部工からなるインテグラル形式のラーメン橋を横取りにより既設線に切り替える方法が開発された¹⁾。橋梁全体を横取りするために、橋台と上部工との一体化が必要とされた²⁾。この事例を端緒にラーメン橋は、中小支間橋梁に対して経済的であるとの評価を獲得した。これらのインテグラル橋は、RC 構造、PC 構造および鋼コンクリート合成構造であった。

ドイツにおける標準的な桁断面は、短支間では RC スラブ (図 - 2(a)) であり、中規模支間では T 桁である。長支間かつ桁下に水路、道路または鉄道が存在し、桁下空間の利用が困難な場合には、プレキャスト合成桁が用いられた^{3, 4)}。合成桁は、桁高を抑えることができる上、容易にインテグラル構造にすることができる (図 - 2(c))。

複線用の断面を有する橋梁が PC 構造または多主桁合成桁を用いて建設された (図 - 2(d), (e))。

2. 鉄道橋の要求性能

鉄道橋の耐荷力や剛性などの機能面における要求事項は、道路橋よりも遥かに高い。たとえば、活荷重のような鉛直荷重は、橋長により異なるが、活荷重は道路橋の 2 倍あるいは 4 倍にも達する (図 - 3)。

鉄道橋における過積載をとまなわない許容荷重内での車両通過確率は、比較すると道路橋よりも高い。ドイツにおけるいくつかの路線では、一日あたり 300 本超の旅

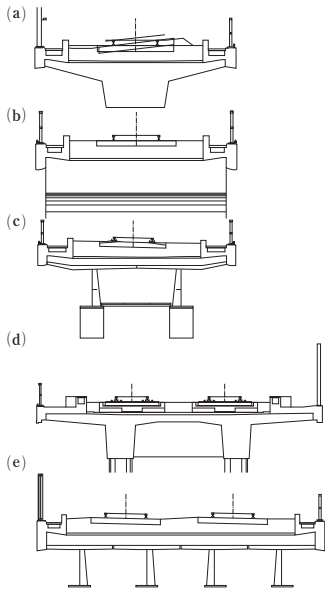


図 - 2 鉄道ラーメン橋の代表的な断面形状

(a) 短支間用の RC 桁橋 (単線), (b) 中規模支間用の RC 桁橋 (単線), (c) 支間長 30 m-45 m の場合の工場製合成桁橋 (単線用), (d) PC2 主桁橋 (複線用), (e) 支間長 30 m-45 m の場合の工場製合成桁 (複線用)

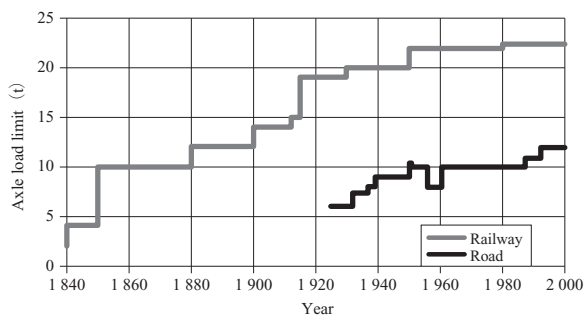


図 - 3 1840 年以降の軸重の増加

客列車, 100 本超の貨物列車の列車運行がなされており, これは鉄道橋に対して非常に高い荷重が作用していることを意味する。

水平荷重は鉛直荷重よりもさらに厳しい。とくに, 列車の減速や加速にともなう制動荷重は道路橋の 14 倍にも達し, 長大鉄道橋において顕著である。長大橋の橋脚のほとんどの場合, 設計上の構造全体の決定要素となる。

鉄道橋に対しては, これらの大きな荷重のほか, 列車荷重下における変形や振動などの観点からの要求事項が加わった。主に高速鉄道では, 同一の軸間距離を有する長い列車が橋梁と激しく共振することがあるため, 列車荷重による動的挙動を考慮する必要がある。とくに, 高速列車では重大な共振問題を引き起こす可能性がある。

3. ラーメン橋

これらの高い要求が, インテグラルおよびセミインテグラル鉄道橋の設計上の特色につながっている。一般的に, インテグラル形式の耐荷挙動は, その橋梁の全体的

な耐荷挙動が機能して荷重分配や変形・振動を低減するため, 支承上に設置される上部工よりも非常に有利である。

ドイツでは, 橋軸方向荷重の耐荷挙動により, インテグラルおよびセミインテグラル橋が区別されている。

インテグラル橋は, 下部工の全自由度が支点および橋台で剛結されている。温度変化は, 上部工の図心における引張力又は圧縮力によって変換される ($e_{ges} = e_T - e_{el} = 0$)。拘束条件下においてほぼ完全な膨張変形をする場合, 発生する力は橋長に関係しないが, 上部工の軸方向剛性に線形的に依存する。上部工に生じた引張力および圧縮力が橋台に吸収され, 橋軸方向では橋脚にほとんど力が発生しない。

したがって, インテグラル橋は橋台が非常に高い水平耐荷力を有している。実際は, 橋台に一定のフレキシビリティ (たわみ性) が残るため, 橋長が極端に短いインテグラル橋では, 温度変化による水平力がほとんど発生しない。

橋長が長ければ長いほど, 橋台の剛性の影響が小さくなる。温度変化によって発生する水平力は, 理論的限界値 $N = EA_{aT} \Delta T$ に近づく。したがって, インテグラル橋は, 主として橋長が非常に短い橋梁だけでなく, 非常に長い橋梁にも適している。しかしながら, 上部工の軸方向剛性はできるだけ小さくしなければならない。これは, 短いスパンの場合, 断面積の低減により実現され, プレストレスの導入無しでひび割れの低減が可能となる。

セミインテグラル橋では, 上部工は橋台や必要に応じて橋脚上の支点で橋軸方向の移動が可能となるように設置されている。

耐荷挙動は, とくに拘束力下でインテグラル橋の挙動と基本的に区別することができる。曲げ抵抗をもつように上部工と結合された橋脚は, 橋軸方向に大きく変形するため, 上部工はほぼ自由に伸びたり, 縮んだりすることができる。橋脚は, その曲げ剛性および変形可能な長さ依存する大きな拘束力の影響を受ける。したがって, 大きな拘束力を避けるため, 橋脚はスレンダーでかつフレキシブルでなければならない。

一方, 下部工は, 減速や加速によって発生する橋軸方向荷重を安全に, また, 大きな変形が生じないように分散しなければならない。セミインテグラル道路橋の制動荷重は, 通常, すべての橋脚に均等に分散される (図 - 4 (a))。極端に大きい水平力が作用する鉄道橋の場合は, この構造では不十分である。とくに大きな水平力が作用するセミインテグラル鉄道橋では, 水平荷重のほとんどを吸収することができ, 高い剛性を有する固定部の設計を必要とする。この固定部は, 橋台や橋梁の中央に設置される特定のストラットにより施工される (図 - 4 (b), 4 (c))。

これによって, 他の橋脚への水平力の作用は拘束力のみとなる。曲げ剛性を低減するため, 橋脚が極端にスレンダーでなければならない。極端にスレンダーでありながらも, 多くの場合, これらの橋脚は有効座屈長が低減

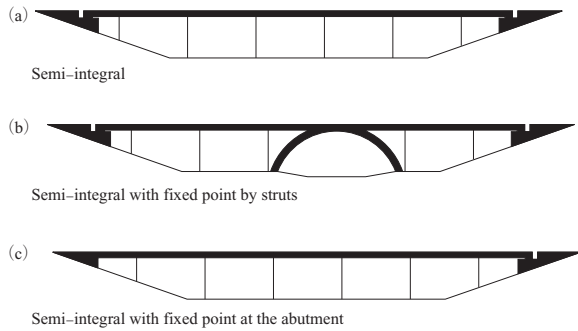


図 - 4 異なる固定点を有するセミインテグラル橋

(a) すべての橋脚への荷重分散, (b) 中心部に設置されたストラットによる荷重分担, (c) 片方の橋台への結合

されることにより, 脚頭部に支点が設置される通常橋脚よりも構造破壊の危険性が低い。

高さおよび曲げ剛性によって, 長い固定支間長を有する橋脚は, 上部工と剛結することができる。

十分考え抜いた施工工程(後述する「溪谷橋」の節を参照)やコンクリートヒンジを採用することで, 支間方向の交通荷重の計算を通じて支点部の鉄筋をある一定の量まで低減できるように, 脚接合部の拘束力を低減することができる⁵⁾。

ラーメン橋では, 拘束力を詳しく計算しなければならない。しかし, それらは十分発展した設計概念や入念に考えられた施工により制御することができる。

一方, インテグラル形式の耐荷構造は, 静的および動的荷重の分配に有利である。上部工や支点部のような単独の構造部材は, 通常の鉄道橋よりもスレンダーにすることができる。スレンダーな構造部材でありながらも, 荷重分配時における高い不静定次数や関連する耐荷部材の寄与によって, 高い耐荷力と堅牢性をもたらす。

さらに, 幅広いパラメータ解析によって, インテグラル形式の耐荷構造は高いじん性をもつことが示されており, 過載荷時や地盤または材料係数の不確定性に対しても非常に強い構造であることを示している。高速鉄道のラーメン橋の場合は, 上下部一体構造によって下部工を振動システムに組み入れるため, 厳しい荷重下にある構造物の動的挙動に対して有利に働く。これによって, 剛性の増加をもたらす, また, 振動が直接地盤に伝達することによって, 減衰機構が大幅に向上する。複数径間の桁の場合は, 隣接径間の振動が互いに影響し合い振動が消去されるため, 列車荷重による支承上の共振は, 一径間の桁よりも生じにくい。

4. 中小支間のラーメン橋の事例

4.1 概要

図 - 5 の支間長の分布から, 大部分(約 3/4)の橋梁の支間長が 15 m 以下であることが分かる。中小支間のものは, 本節で例示する。比較的長い高架橋は「溪谷橋」の節で論ずる。

4.2 RC ラーメン橋

以下では, 全長 100 m を越えるドイツの最初の長支間

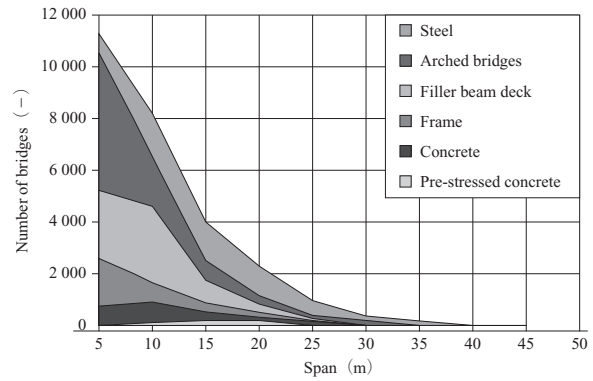


図 - 5 構造種別毎の最大支間長の分布

ラーメン橋の最新の建設事例により, 施工方法や耐荷挙動を説明する。1999 年から供用しているニュルンベルク近くの Rednitztal 鉄道橋の例を見ると, 閉ラーメン構造の長所が明確に分かる。最初に支承を有する連続桁として計画された橋梁に対する代替案として, 全長約 170 m の 7 径間連続ラーメン構造(支間長: 18.00 m + 26.96 m + 26.98 m + 26.77 m + 26.58 m + 26.36 m + 18.00 m)が設計された(図 - 6)。

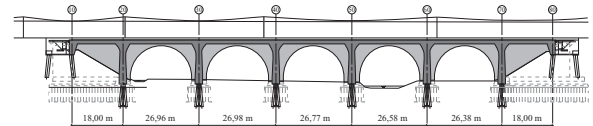


図 - 6 全長約 170 m のラーメン構造を持つ Rednitztal 高架橋

とくに制動荷重による大きな水平力が作用するため, 小さな変形に抑える基礎構造, 橋脚および剛結部を含む複雑な耐荷構造が必要とされる。(図 - 7)。設計上, 決定的となる水平力が, 上部工と下部工の剛結によって小さな変形をともなって地盤へと伝達される(図 - 8, 9)。温度や支点沈下のようなひずみ速度の遅い応力に対し, 単純な静的地盤反力係数が適用された。また水平交通荷



図 - 7 Rednitztal 高架橋の背景の旧橋の石造アーチ橋と前景の RC ラーメン橋構造の新橋の組合せ(石造アーチ橋は建設後 100 年経過し, RC 橋に置き換えられている)

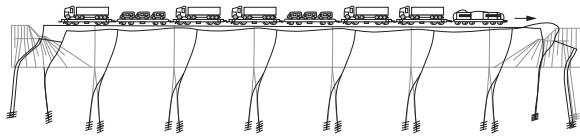


図 - 8 制動荷重によるラーメン構造の動的挙動



図 - 9 橋脚や橋台と上部工が剛結された Rednitztal 高架橋

重に対しては、最大で静的地盤反力係数の3倍の動的地盤反力係数が適用された。

この形式の構造の他の例として、Mainbachtal 高架橋、Schwabachtal 高架橋がある⁷⁾。特異な例としては、ベルリンのDresdner Bahn 高架ジャンクションがある。極端な斜角を有する立体交差は、長方形の端部をもつ長い立体交差とすることで解決された。上部工に剛結された門型ラーメンと、ラーメン端部に背割り式に2列の橋脚を導入することによって(図-10)、通常の構造形式と比較して非常に多くの建設資材量が節約された。上部工の桁高を抑えなければならないとき、桁下交差部のクリアランスは、橋軸方向にアーチ状の変断面とすることにより可能となる。この例としては、Glienicke Weg 道路を跨ぐ鉄道路線の一部として建設されたベルリンのラーメン橋がある。桁断面は、図-2(b)に示されるような断面である。支間長26.20mの上部工は、スレンダーな変断面であり、桁高は、支間中央で1.00m(桁高/支間比=L/26)、橋台部で1.75m(桁高/支間比=L/15)である(図-11)。このラーメン構造は、良好な施工品質と高密度地盤のため、直接基礎上に作られた。

4.3 合成ラーメン橋

1998年以降の600を超える構造物で、プレキャスト合成桁の利用は、道路橋の建設において経済的に効率が良いことが証明されている^{3, 4)}。2001年以降、この方法は鉄道橋においても実施されてきている。2径間連続ラーメン橋の一例として、ザーレ川(River Saale)に架かる、単線で1径間32.5mの2径間変断面構造の橋がある(図-12)。プレキャスト合成桁と下部工を剛結構造とすることによって、上部工の桁高は支間中央で1.80mに低減された。ラーメン構造は、支承を有する構造形式よりも鉄道の制動荷重をよりよく分配するため、場所打ち杭の



図 - 10 背割り式2列橋脚と門型ラーメンを用いた最新の交差構造



図 - 11 ベルリンにおける支間26.20mの門型ラーメン橋

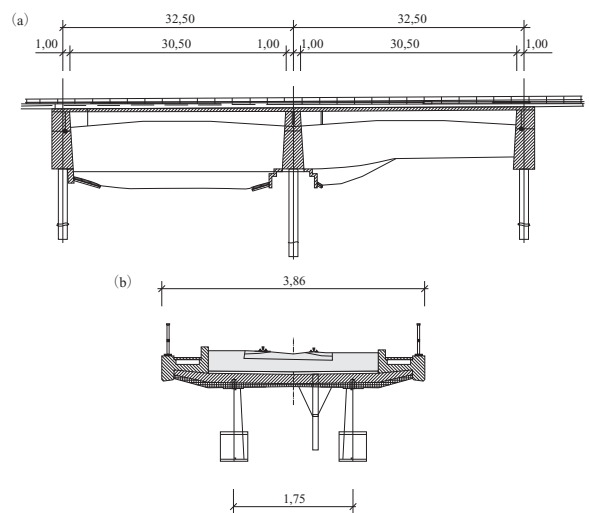


図 - 12 2径間連続のザーレ川橋(2@32.50m)
(a)側面図, (b)断面図 (単位 m)

低減に繋がっている。スレンダーな変断面の上部工は景観上も好ましい(図-13)。

5. 溪谷橋

5.1 概要

インテグラル橋またはセミインテグラル橋の構造のよ



図 - 13 ザーレ川に架かる 2 径間連続ラーメン橋

うなラーメン橋は、優れた機能性、耐久性と同時に低メンテナンスコストと高い美的デザインのため、ドイツ鉄道株式会社 (Deutsche Bahn AG) のドイツ高速鉄道において、より多くの支持を得ている。最近、エアフルト (Erfurt)~ハレ/ライプツィヒ (Halle/Leipzig) 間に新たに構築された路線上で、いくつかの高架橋が、新しい設計コンセプトに基づいて建設されている。以下に具体例を示す。

5.2 Scherkondetal 高架橋

橋台 (図 - 4(c)) で固定されているセミインテグラル橋の一例が Scherkonde 溪谷 (図 - 14, 15) を交差する 576.5 m の長大高架橋である。細長い橋脚と良好な窪みのある地形のため、従来よりも橋長が長いにもかかわらず、橋脚の大部分で上部構造と一体的に結合することが可能となった。

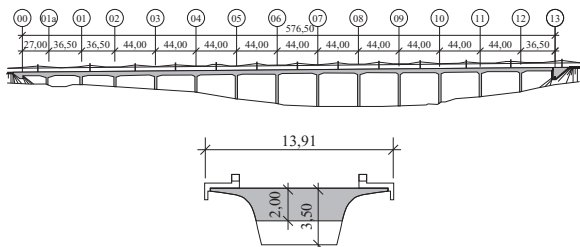


図 - 14 Scherkondetal 高架橋の側面図および断面図



図 - 15 Scherkondetal 高架橋

加速と減速による力の吸収を確実にする変形の少ない橋梁の水平固定点は、高さの低い橋台 (図 - 14, 左) と上部構造との接続により、構造全体の曲げ剛性を向上させることによって可能となった。

大きな変位のため、13 橋脚中、端部 2 橋脚には滑り支承を設けるとともに高さの高い橋台を設計する必要があった。

長大支間を有する鉄道橋で最も用いられる箱桁橋に代わるものとしてハンチ部を有する変断面構造が考案された。

この柱頭部付近の変断面部と橋脚および上部構造の等桁高部の曲げ剛性の接続により、44 m の標準支間でありながら、支間中央で 2.0 m と非常に低い構造高を可能にした。高速鉄道橋としては非常に高い $L/D = 22$ の桁高支間比にもかかわらず、変形や振動を制限することにおいてすべての要求性能を満たす。本橋は、非常に剛性が高く、高い総耐荷性能を持っているが、RC または PC 鉄道高架橋の通常のどっしりとした外観に比べてすっきりとした外観となっている。図 - 16 では、従来の支承を有する連続桁構造とラーメン構造との比較を示す。

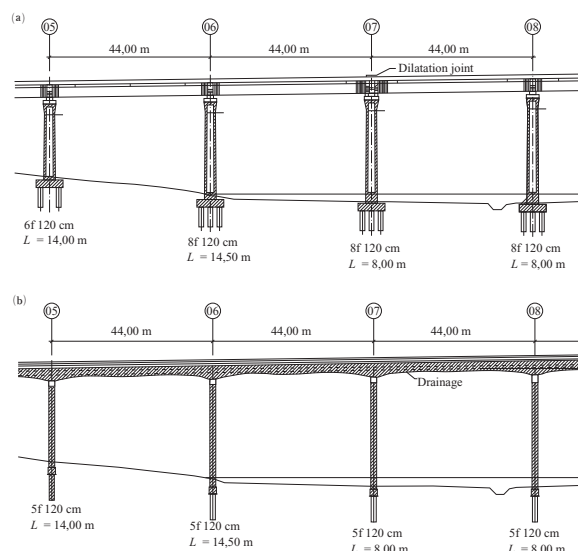


図 - 16 連続桁構造とラーメン構造の高架橋の側面図

建設技術の選択と同様に耐力設計に関して非常に重要なのは、プレストレス、クリープ、収縮や上部構造の温度変化による支点の拘束力を最小化することである。したがって、ラーメン橋脚は、複数列の杭ではなく、単列杭上に築かれており、その結果、複数列杭の大きな基礎の回転剛性と水平抵抗を低減することができる。検討の結果、橋脚コンクリートの非常に低いヤング率と上部構造の非常に高いヤング率は、コンクリート配合の選択の基準として考慮された。最終段階の橋脚の傾きを最小にするために、ラーメン橋脚の一部を右橋台の方向に 100 mm まで斜めに施工するとともに、個々の上部構造の部分の打設する前に、架設術を使用して 100 mm まで更に弾性的に偏向させた。

さらに、施工順序は、右側の橋台を仮固定点として架設桁を用いて左側に向かわせる方法が選択された。架設桁移動の最後のステップの後、固定点は最終ステージで左の橋台に移行された。

この施工技術には、最初、右橋台方向へのラーメン橋脚の変形を引き起こすプレストレス、クリープ、収縮の減少により生じる上部構造の弾性短縮が主桁に圧縮力を与えることとなり、これが固定点の変更後に反對方への変形を引き起こすという大きな利点がある。

したがって、橋脚接合部の水平変形と曲げモーメントが著しく減少し、ほとんどの橋脚で鉄筋量を最小化できることとなる。Scherkondetal 高架橋は、卓越した技術革新と設計から施工まで一貫した新しいコンセプト実現により出版社⁸⁾のエンジニアリング賞を受賞している。

5.3 Unstruttal 高架橋

全長 2 668 m で谷底から約 50 m 上に線路を有する Unstruttal 高架橋はヨーロッパで最大の PC 鉄道橋の一つである。高架橋の耐荷構造は、全長 580 m × 4 連の伸縮装置と支承を有しない 10 径間連続ラーメン橋で構成されている。連続桁の中央に、アーチ状のストラットが橋軸方向の水平固定点を形成するように設計されている (図 - 4 (b), 17, 18)。



図 - 17 アーチ状のストラット

アーチクラウン部は上部構造の箱桁断面と結合されており、高い剛性が確保されている。アーチ間距離は、レール締装置の推定膨張長さを考慮して決められている。

橋梁の橋軸直角方向では、アーチの基礎部を広げてより高い橋軸直角方向の安定性と耐荷性能を向上させた。橋軸直角方向に作用する交通、風、温度による力を橋軸方向軸力とともにアーチに伝達させることができる。4 連の橋の両端部には、3 径間連続ラーメン橋が接続されており、標準支間長は 58 m である。

41 基の橋脚は、非常にスレンダーな壁式橋脚であり、効率的に主桁直角方向の剛性を高める一方、橋軸方向では、温度変化による変形を分配させるのに十分なフレキシビリティを有する。

特徴的なのは、桁端部の背割り式橋脚である。これは橋軸長さ 0.40m の構造上のジョイントにより分離されて



図 - 18 Unstruttal 高架橋の橋脚断面

おり、版桁の端部は厚さ 0.60 m の細長い壁式橋脚と一体化している。26 m の壁式橋脚は、支承を必要とせずに、上部構造の温度による変形を吸収する。施工時には、脚頭部の変形を減らすために、端部橋脚をプレストレス、クリープと乾燥収縮後の上部構造の収縮する方向と反対に前もって変形させておくため、背割り式橋脚の隙間は、仮締付けがなされた。上部構造の施工・緊張後の仮締付けは、橋軸方向にほぼ自由変形するため解放された。

非常に大きな水平荷重が伝達されるアーチ拱台の変形を小さな変形に抑えることは困難である。したがって、基礎一箇所につき、直径 1.8 m の場所打ち杭が 21 本施工された。

上部工の断面は、すでに多くのドイツの鉄道会社の高架橋で使われている PC 単純箱桁断面であり、大部分が架設桁により施工された。ただし、アーチと結合される箇所ではアーチの支保工と上部工の支保工が必要となった。本施工法では、アーチを架設桁の支点として用いることが可能となり、段取り替えることなく、アーチクラウン部を架設桁が通過することができた。

5.4 Gänsebachtal 高架橋

Gänsebachtal 高架橋は、Unstruttal 高架橋に類似した、個々の構造区間の中央に固定支間を設けることによって剛性を高めたセミインテグラル構造の橋梁である (図 - 19)。本橋は、谷底から 9 m ~ 19 m の高さにある非常に緩やかな勾配を有した橋長 1 012 m の長い橋梁である。この橋梁の 1 連あたりの橋長は、橋脚上に生じる応力を抑制するために非常に短くなっており、おおむね 112 m に限定された。それとともに、レールの伸縮による軌道の連続性を阻害する要因が排除された。すべての構造区間の継ぎ目上 (訳者注) 112 m ごとの構造区間の遊間上) で連続軌道スラブを用いた構造を採用したことは運行の安全や構造物の維持管理に有利であった。

減速と加速によって生じるレールの応力は、主に設計段

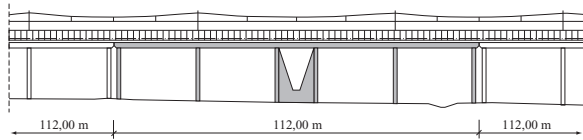


図 - 19 各標準区間におけるインテグラル橋の構造概念

階で設定される橋梁の橋軸方向剛性に依存している⁹⁾。
 要求性能を満たすための補強は、視認性を向上させるために可能なかぎり窪ませたシェル状のRC構造物によって実施された。地形条件から、橋梁に高さの変化があるため、シェル状の構造物は非常に異なった荷重状態となる。それぞれの1連の橋梁が異なった十分な剛性を確保するためにシェル状の構造物は図 - 20 に示すように10 ~ 12 m の範囲で支間を変化させた。



図 - 20 水平方向に固定された上部構造

横方向においても、それぞれの区間端部の橋脚連結部の補強において窪ませたシェル状のRC壁による同様の原理が応用された。

桁高 2.08 m の PC 2 主版桁橋で構成された複線用の上部構造は、円形の RC 橋脚に剛結されている。RC 橋脚は、構造区間端部の接続部では直径 1.00 m で、構造区間の中央では 1.10 m である (図 - 21)。

平均支間が 24.50 m の上部構造は桁高 / 支間比が 1/12 で、PC 2 主版桁橋の比率としてはむしろ低い値である。

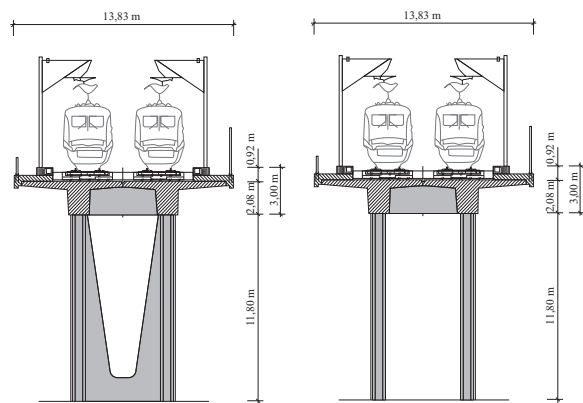


図 - 21 直角方向固定の橋脚と標準橋脚の断面図

この原因は、ノンバラスト軌道の高速鉄道橋の変形や振動の限界値を確保するために非常に大きな剛性が必要となるためである。この実績は、スレンダーな形状では必要性能を満足させることが不可能なことを示している。

その一方で、図 - 22 で明確なように、スレンダーな橋脚と固定支間のおかげで、上部構造の美観は非常に優れている。



図 - 22 高桁高にも係わらず優れた美観

5.5 溪谷橋の更なる調査

セミインテグラル高架橋を新しい設計概念どおりに実現させるための総合的な試験を実施した。この試験は、実績が少ないなかでの初期の施工であることと、すべての構造部材が剛結によって互いに作用する影響を確認するために行われた。コンクリートと地盤の剛性パラメータ、クリープ・収縮挙動、とくにひび割れの形状は多くの組合せによって変化する。また、それらの組合せの効果は新しい限界値を与えるためのレールの応力と同様に、変形と振動の観点から解析された。解析では、セミインテグラル構造は大きく変化する入力値に対してさえも強固な挙動を示すことや、耐荷重設計で剛性の関係性が非常によく調和するように全体を適切に検討した場合には、荷重による挙動において非常に高い機能性を有することが示された。

高速路線の鉄道橋特有の課題は、動的挙動の評価である。40 m 以上の支間を有する橋梁では、上部工の重量や剛性が大きいと、列車荷重の影響は比較的小さい。加えて、長支間の場合には、1 径間に複数の軸荷重が載荷され、共振を起こすような調和のとれた載荷状態が生じない。

これとは対照的に、25 m までの短い支間では非常に慎重な解析と列車通過時の共振を防止する構造の適応が必要となる。

ヨーロッパの高速モデル HSLM A01 から A10 は、主にいわゆる“length above buffers (緩衝装置上の長さ)”や車輪の距離を考慮してそれぞれ異なっている。この違いは動的解析に臨界励起周波数の広い範囲をもたらす。250 km/h 以上の速度で、この範囲は調整のみでは制御することができず、一般的に 1 次共振の危険性を増幅させる。この場合、非経済的で非効率的な構造高さが必要となる。このため、一部の列車や速度の場合、橋梁のあるレベルの励起を許容するモデルとせざるをえない。しか

しながら、この振動の範囲は、補強材やコンクリートの疲労限界以下にとどまるように、既存の減衰構造や構造部材の適切な寸法によって、非常に低い値に抑制しなければならない。

6. 結 論

インテグラル高架橋は、とくに新しい構造ではない。すべての歴史的なアーチ橋は、この基本的な考え方に基づいており、何千年・何世紀にもわたるそれらの存在により、この構造の驚くべき堅牢性と耐久性が証明されている。近代のアーチ橋は、ラーメン構造もしくは一般的なインテグラル構造である。それらの構造物は、耐荷重思想が思慮深いものである場合、非常に経済的であり、ほぼ維持管理の必要がない。またスレンダーな外観にもかわらず、非常に高い剛性を有している。

インテグラル構造の荷重に対する挙動の利点を活かし、また耐荷構造を可視化すると、設計過程においてほぼ自動的に、追加の予算を生じることなく美観に優れた構造物を設計することになる。適切な構造概念を選定するには、“Leitfaden Gestalten von Eisenbahnbrücken (鉄道橋の設計の手引き)¹⁰⁾”が参考になる。

最近の鉄道橋、とくに高速鉄道線の要求性能は非常に高く、道路橋に比べて設計に付加的な努力を必要とする。インテグラル橋の設計では、支承を用いることで上部工と下部工をほぼ分けて検討できる通常の橋梁と比較して、個々の耐荷要素のさまざまな相互作用のためにさらに設計的な努力が必要となる。

しかしながら、優れた設計だけでなく、それらの構造物の総合的な経済性の改善は、これらの追加の努力を完全に正当化することとなる。これは、新しく建設されたエアフルト～ハレ/ライブツィヒ間の高速鉄道線だけでなく、既存のドイツ鉄道網でのドイツ鉄道のインテグラル橋・セミインテグラル橋の成功例によって証明されている。

参考文献

- 1) Verfahren und Einrichtung zum Verschieben von Bauteilen, insbesondere von Brückenbauteilen, 1989, Patent DE 3419449 C2.
- 2) Gunzelmann H, Stumpf D. Eisenbahnüberführung in Neustadt (Weinstr.), Aufweitung in unkonventioneller Bauweise, Der Eisenbahningenieur, Heft 10, 1989.
- 3) Schmitt V, Seidl G. Eisenbahnbrücken in Stahlverbundbauweise, Stahlbau 79, Heft 3, 2010, 159-166.
- 4) Weizenegger M. Hybrid frame bridge over river Saale, Merseburg, Germany. Struct. Eng. Int. 2003; 13 (3): 197-181.
- 5) Marx S, Schacht G. Concrete Hinges— Historical Development and Contemporary Use, 3rd Congress of the International Federation for Structural Concrete (fib), Washington DC, May 29-June 2, 2010, 20p.
- 6) Seidl G, Braun A. VFT-WIB-Brücke bei Vigaun-Verbundbrücke mit externer Bewehrung, Stahlbau 78, Heft 2, 86-93.
- 7) Braun A et al., Rahmentragwerke im Brückenbau, Beton- und Stahlbetonbau 101, Heft 3, 2006, 187ff.
- 8) Marx S, Krontal L, Bätz S, Vehlou A. Die Scherkondetalbrücke, die erste semi-integrale Talbrücke der DB AG auf der Neubaustrecke Erfurt-Leipzig/Halle VDE 8.2. Beton- und Stahlbetonbau 2010; 105; Heft-3: S.~134-141. doi:10.1002/best.201090021.
- 9) Schenkel M, Goldack A, Schlaich J, Kraft S. Die Gänsebachtalbrücke, eine integrale Talbrücke der DB AG auf der Neubaustrecke Erfurt-Leipzig/Halle. Beton- und Stahlbetonbau 2010; 105; Heft-9: 590-598.
- 10) Schlaich J, Schmitt V, Marx S. u. a. : Leitfaden Gestalten von Eisenbahnbrücken. 1. Auflage; Berlin: DB AG Dezember, 2008.

原 典

Steffen Marx and Günter Seidl : *Integral Railway Bridges in Germany*, Structural Engineering International, Vol.21, No.3, IABSE, Zurich, pp.332-340, Aug. 2011.
doi:10.2749/101686611X12994961034534

This article was first published in English in *Structural Engineering International*, SEI, Vol.21, No.3, IABSE, Zurich, pp.332-340, Aug. 2011.
IABSE: www.iabse.org

* : 会誌編集委員会海外部会委員
秋山 博 (株) 銭高組
白浜 寛 (鹿島建設 (株))
數本 篤 (首都高速道路 (株))
田中 慎一 (株) IHI インフラ建設
横田 剛 (株) ピーエス三菱

【2014年2月6日受付】