



中国とドイツの高速鉄道橋の発展と課題における成果報告（前編）

— A Brief Review of Developments and Challenges for High-speed Rail Bridges in China and Germany —

著：Miao Su, Gonglian Dai, Steffen Marx, Wenshuo Liu, Sisi Zhang
訳：会誌編集委員会海外部会

中国、ドイツは高速鉄道橋の建設実績を多くもつ国である。両国では、鉄道橋の標準化した設計と施工方法により高速鉄道を急速に整備し、成功を取めてきた。それにもかかわらず、高速鉄道橋の継続した発展により、設計概念とエンジニアリング技術から新たな課題が明らかとなってきた。本稿では、中国とドイツの高速鉄道橋における最近の動向を紹介し、軌道構造と橋梁の発展について概説する。また、軌道構造における統合的な設計概念を示す過程で、直結軌道や上下部一体構造橋梁について紹介する。高速鉄道橋における発展の動向では、さらなる長支間化、橋体自重の削減、および鉄道の高速度を含む内容について報告する。前編では、高速鉄道橋における最近の動向および軌道構造の発展について報告する。

キーワード：高速鉄道，鉄道橋，直結軌道，統合的な設計概念，発展

1. はじめに

高速鉄道は快適で便利な交通手段であり、飛行機や高速道路と比較して輸送容量が大きく、エネルギー消費が少なく、より安全である。ヨーロッパ（たとえば、フランス、ドイツ、スペイン）や東アジア（たとえば、中国、日本、韓国）などの人口密度の高い地域では、高速鉄道が広範囲で発展し使用されてきた。ドイツはフランスに

次いで高速鉄道のサービスをヨーロッパで開始した国であり、1991年に最高速度280 km/hで走行するハノーファー-ヴェルツブルク高速新線でインターシティエクスプレス（以下、ICE）を開業した。

現在、ドイツの高速鉄道線の延長は改修した路線（Upgraded line）、一部のみ新路線（Partially new line）、すべて新路線（Fully new line）を含めて約1 228.8 kmである（表-1）。過去20年間で導入された中国の高速鉄道は、年間の乗客数が1.1億人まで延びた世界でもっとも広範なネットワークへと急速に発展した。中国において、2016年までに新設された高速鉄道線の延長は20 000 kmまで到達した。さらに、全長12 400 kmの中国全土の高速鉄道ネットワークは8路線の高速鉄道網（南北に4路線、東西に4路線）で構成されている（表-1）。

中国における高速鉄道の重要な特徴は、高速鉄道の構造物における橋梁の比率が比較的高く、たとえば、北京-上海間の高速鉄道で81%、広州-珠海間の高速鉄道で91%である。中国における主要な35の高速鉄道線の統計結果では、橋梁の平均比率がドイツで12.5%なのに対して約54%である（図-1）。この違いの主な理由は、両国における地形条件と建設速度の必要性にある。ドイツの比較的平坦な地形と比べて、中国の地形は亜熱帯沿岸地域、山岳地帯、および高原地帯となっているため、はるかに複雑である。高速鉄道の構造物に橋梁を多く適用することで、効率的な基礎沈下の制御、平滑性の確保および施工期間の短縮を図れる。中国における新設の高速鉄道橋の内訳は、標準スパンの単純桁橋が94%、連続桁橋、ラーメン橋、およびアーチ複合橋などそのほかのコンクリート橋が4%、鋼橋が1%となっている。しかし、ドイツでは、鉄道橋の種類が豊富で、主にWalzträger-in-Betonとして知られるプレファブ合成桁、コンクリート橋、鋼橋、複合橋、およびアーチ橋などがあげられる（図-2）。

表-1 中国とドイツにおける高速鉄道線

Country	Line	Type	Max. operating speed (km/h)	Length (km)		
Germany	Cologne-Aachen	Upgraded line	250	70		
	Hannover-Berlin	Partially new line	250	258		
	Nuremberg-Munich	Fully new line	300	171		
	Cologne-Frankfurt		300	180		
	Hannover-Würzburg		280	327		
	Mannheim-Stuttgart		280	99		
	Erfurt-Leipzig/Halle	300	124			
<i>Total</i>				1 229		
China	Beijing-Shanghai	Partially new line (four north-south corridors)	350	1 318		
	Beijing-Guangzhou		350	2 298		
	Beijing-Harbin		350	1 300		
	Hangzhou-Fuzhou		350	1 464		
	Xuzhou-Baoji	Partially new line (four east-west corridors)	350	999		
	Shanghai-Kunming		350	2 266		
	Qingdao-Taiyuan		250	770		
	Shanghai-Chengdu		350	1 985		
	<i>Total</i>					12 400

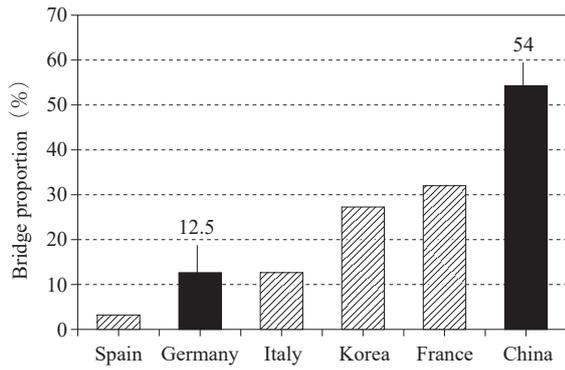


図 - 1 各国における高速鉄道橋の平均比率

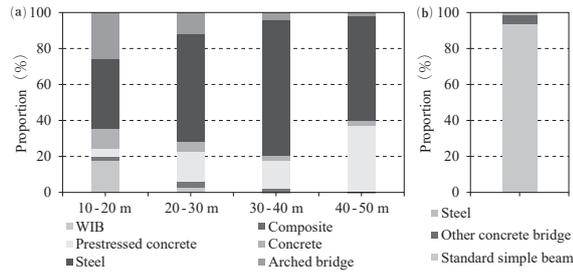


図 - 2 高速鉄道橋の種類 (a)ドイツ (b)中国

鉄道橋のもっとも重要な特徴の一つは、高速道路橋と異なり軌道構造の相互作用を設計過程と供用中に考慮しなければならないことである。たとえば、桁の温度変形と

曲げにより、レールと橋脚において付加応力と変形が生じる。さらに、高速鉄道橋の設計においては軌道の平滑性に関する高い要求性能が大きな課題である。これはとくにほとんどの国で使用されている直結軌道の高速鉄道線の場合であり、レールの位置が締結装置でしか調整できないためである。レールの変位が締結装置の調整範囲を超過すると、軌道の平滑性が高速列車の運転条件を満足できなくなるため、鉄道橋における軌道構造は全体システムの重要な部分である。本稿では、中国とドイツにおける軌道構造と橋梁の発展について概説する。軌道構造の統合的な設計概念に基づき、さまざまな軌道構造タイプと橋梁タイプにおける適用性について調査する。最後に、高速鉄道橋の将来の課題について言及する。

2. 軌道構造の発展

2.1 統合的な設計概念

軌道構造の主な設計概念を以下に示す。

- (1) 軌道による橋梁の影響を評価することは、レールの安全性、安定性、平滑性を確保するために必要不可欠である。つまり、軌道と橋梁は、設計過程において統合的な構造と見なされる。
- (2) 軌道と橋梁の種類、およびそれらを構築するために使用される材料は、機能、環境、地形の要件により決定する。
- (3) 合理的な軌道構造は、高性能、低コスト、低メンテナンス、そして意匠的でなければならない。

表 - 2 中国とドイツにおける軌道

No.	Diagram	China	Germany
1		CRTS Slab Type I	-
2		CRTS Bi-Block Sleepers Type I	RHEDA 2000 track
3		CRTS Slab Type II	Bögl track
4		CRTS Slab Type III	-

2.2 バラスト軌道および直結軌道

直結軌道は、中国とドイツの両国で、短径間と中径間の高速鉄道橋のほとんどでバラスト軌道よりも広く使用されている。これは、直結軌道には、構造高が低く、軽量であり、かつメンテナンスが容易であるという利点があり、レールをよりスムーズに安定して支持できるためである。直結軌道のコストはバラスト軌道の約2倍であるが、メンテナンスコストを削減できるため、10年以内に投資を回収することが可能である。直結軌道の技術は、1970年代から積極的に発展してきた。構造タイプは、主にコンクリートに埋め込まれたまくら木 (RHEDA, RHEDA 2000, Ziibin, LVT 軌道など)、プレキャストコンクリートスラブ (Bögl 軌道など)、アスファルトコンクリート路盤上のまくら木 (ATD 軌道など) で構成される。表 - 2 で示されるように、中国では、2005年からドイツのバラスト軌道の技術を導入し始めた。10年以上の発展を経て、中国鉄道路線システム (以下、CRTS) は以下の軌道で構成されている。

- ・ Slab Type I : 日本の新幹線におけるバラスト軌道 (図 - 3(a))
- ・ Bi-Block Sleepers Type I : ドイツの RHEDA2000 の直結軌道 (図 - 3(b))
- ・ Slab Type II : ドイツの Bögl (ベーグル) 社に基づいた直結軌道 (図 - 3(c))
- ・ Slab Type III : 中国が独自に研究した直結軌道

直結軌道における軌道と橋梁の相互作用は、レールとバラストの間の締結装置の抵抗だけでなく、界面の挙動 (たとえば、プレキャストコンクリートスラブとセメントアスファルトモルタル層または自己圧縮コンクリート層の界面) にも関連するため、バラスト軌道よりもはるかに複雑である。したがって、直結軌道は、構造全体の

一部と見なされ、高速鉄道橋の設計プロセスで橋梁とともに考慮する必要がある。荷重伝達構造の観点からまとめると、軌道構造は次の3つのタイプに分類できる: バラスト軌道 (Ballasted), 不連続直結軌道 (Discrete ballastless), 連続直結軌道 (Continuous ballastless) (表 - 3)。最初の2つのタイプでは、レールの付加応力、レールとスラブ (または直結軌道) 間の相対変位、およびスラブの端部回転を低減するために、レール用伸縮装置を橋梁に設置する必要がある。国際鉄道連合 (以下、UIC) コードで指定されているように、橋梁の伸縮長において、バラスト軌道の鋼橋で 60 m、コンクリート橋で 90 m を超える場合は、レール用伸縮装置 (以下、RED) を設置する必要がある。不連続直結軌道では、RED の設置の要否を判断するために、特定の評価を行う必要がある。しかしながら、連続直結軌道の場合、軌道と橋梁の相互作用は、地盤の2層とポリエチレンフィルムの層で構成され、橋梁と直結軌道構造の間に設置された「スライド層」によって大幅に減少する。したがって、この直結軌道構造を採用した橋梁には、RED を設置する必要はない。たとえば、杭州 - 長沙間の高速鉄道において、支間割り 75 + 4 × 135 + 75 m の江蘇省金湖県の連続桁橋の伸縮長が 378 m であるが、RED が設置されていない。これにより、軌道構造の建設とメンテナンスが大幅に簡素化され、軌道の平滑性が確保され、レールの耐用年数が延伸する。ドイツが提案した「縦吊スラブまくら木」の概念設計は、基本的な考え方は連続直結軌道に非常に良く似ているが、まだ実施されていない。現在、北京 - 上海間の高速鉄道、北京 - 武漢間の高速鉄道、上海 - 長沙間の高速鉄道などの中国の高速鉄道でのみ使用されている連続直結軌道は、「CRTS Slab Type II」だけである。

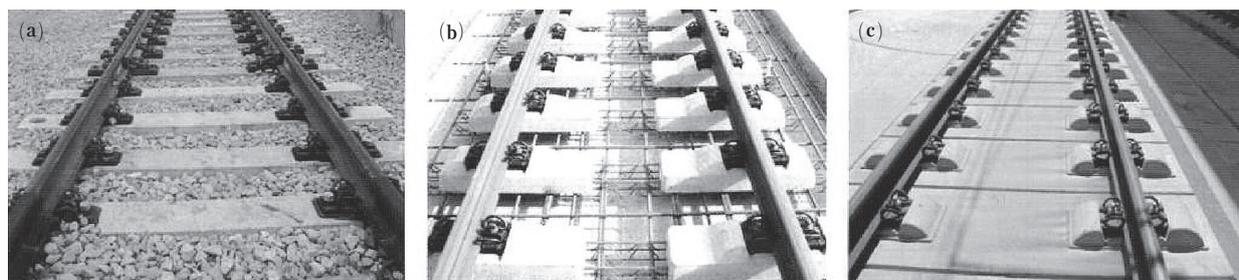


図 - 3 (a) バラスト軌道 ; (b) ドイツの RHEDA2000 ; (c) 中国の CRTS Slab Type II

表 - 3 軌道タイプ

Track type	Diagram
Ballasted	
Discrete ballastless	
Continuous ballastless	

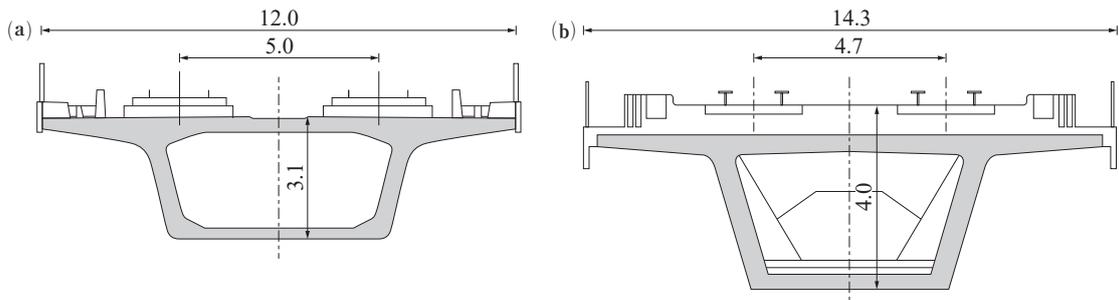


図 - 4 標準的な単純桁 (a)中国 (b)ドイツ (単位 m)

2.3 単純桁, 連続桁, 上下部一体構造橋梁

中国のほとんどの高速鉄道橋は、標準的なコンクリート単純桁橋である（支間長 20, 24, 32 m など）。また、河川や高速道路を横断する必要がある場合は、標準的なコンクリート連続桁橋が一般的に使用される。さまざまな地形条件に適応するために、支間割り 32 + 48 + 32 m, 40 + 56 + 40 m, 40 + 64 + 40 m, 48 + 80 + 48 m, および 60 + 100 + 60 m を含む一連の径間で設置されている。標準化された設計や施工により、的確な品質管理と工期短縮が可能である。ドイツでは高速鉄道橋の建設当初において、とくに高架橋（例：25 m）と渓谷橋（例：44 m, 58 m）では、標準的な単純桁橋が採用された。図 - 4 は、それぞれ 32 m と 44 m の中国とドイツの標準的な単純桁橋の断面を示している。

地形の利点, 経済の発展, および長年培われた設計手法により, ドイツにおける短径間と中径間の高速鉄道橋の発展は近年ますます多様化している。注目すべきは, 1980 年代に発展した上下部一体構造橋梁である。多径間で単純支持された橋梁と比較して (図 - 5), 上下部一体構造橋梁は, 支承構造を省略することができる。鉄道橋には, 完全一体型と半一体型の 2 種類がある。前者が上部構造と橋脚・橋台が剛結となっていることに対し, 後者が上部構造と橋台に 1 つの支承または両橋台に支承を有していることに違いがある。

図 - 6 は, ドイツにある 2 橋の半一体型の渓谷鉄道橋を示している。変断面箱桁（支間中央で桁高 2 m）の場合, シェルコンデタル高架橋は, 桁高支間比 $l/h = 22$ （標準支間長 $l = 44$ m）と, 非常にスレンダーな外観である。中国の支間長 32 m の高速鉄道標準の単純桁橋の桁高支間比は 10.4 であり, 非常にスレンダーな外観であることは注目に値する。ガンセバツハタル高架橋には, 柱に一体で接続されたダブルウェブのプレストレス T 型桁がある。桁高支間比 12 というスレンダーさ（平均支間長 24.5 m, 桁高 2.08 m）にも関わらず, 上部構造の視覚的なスレンダーさは, 細長い支柱によりバランス良く収まっている (図 - 6 (b))。ドイツのエンジニアリング技術は, 急速な建設を優先する中国とは対照的に, 構造の革新と経済を配慮している。

上下部一体構造橋梁は, 広く浅い渓谷における建設に適している。橋軸方向に拘束しない細い橋脚とスレンダーな上部構造を組み合わせることで, 橋梁の径間は一般的

に短くなる。しかしながら, 橋台は橋軸方向を固定する特別な処置を必要とし, 一体構造橋梁が長いほど, 特殊な処置に要する費用も構造物全体の費用と比較して少なくなる。設計過程において上部構造, 下部構造および環境の調整に配慮することで, 軌道構造の上下部一体構造

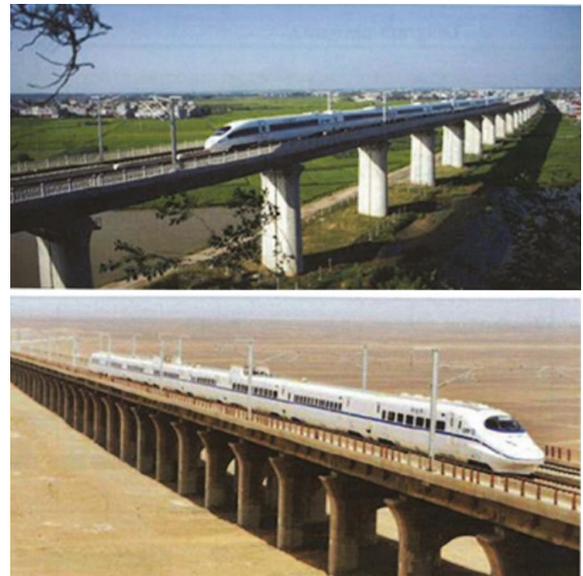


図 - 5 中国の多径間で単純支持された橋 (写真: Miao su, Gonglian Dai)



図 - 6 ドイツの上下部一体構造橋梁: (a) Scherkondetal 高架橋, (b) Gänsebachtal 高架橋 (写真: Steffen Marx)

は高速鉄道橋において具現化されてきた。支承を有する一般的な橋梁と比較し、上下部一体構造橋梁は非常に効率的で、構造的、耐久性、維持管理性、および経済性に優れる。単純桁および連続桁橋梁が上下部一体構造橋梁のように多様に発展してきた点から考えると、標準化された設計を常時使用しないことにより独創的で革新的な橋梁の構造が将来的に出現してくることは明らかである。

※ 6号へと続く

This article was first issued in SEI (Structural Engineering International), 2019, February, page 160-166

* : 会誌編集委員会海外部会委員
堀内 祐樹 (首都高速道路(株))
渡邊 秀知 (㈱ピーエス三菱)
佐藤 千鶴 (㈱錢高組)
田中 慎也 (㈱IHI インフラ建設)
森田 遼 (鹿島建設(株))

【2020年7月27日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

コンクリート橋・複合橋 保全マニュアル 2018年7月

本工学会 PC 技術規準委員会「PC 橋の維持管理マニュアル作成委員会」は、道路橋を効率的に点検、保全するために、2018年3月に策定しました。本マニュアルは、国内で採用されているコンクリート橋、PC 橋および複合橋の各種形式の道路橋を網羅しており、また、それらの橋梁付属物を含め、過去の変状事例や実験結果をもとに、最新の知見に基づいて構造物ごとに取りまとめています。第一線の橋梁技術者必携のマニュアルと言えます。是非お手元に置いてご活用ください。



I 編 基本編	8 章 複合トラス橋
1 章 総則	9 章 斜張橋・エクストラロードード橋
2 章 構造物が果たすべき機能	10 章 吊床版橋
3 章 保全の方法	
II 編 共通編	IV 編 付属物・付帯工編
1 章 コンクリート橋	1 章 支承
2 章 鋼桁および鋼部材	2 章 伸縮装置
III 編 個別構造物編	3 章 落橋防止システム
1 章 プレテンション方式プレキャスト桁橋	4 章 排水装置
2 章 ポストテンション方式プレキャスト桁橋	5 章 防水システム
3 章 場所打ち桁橋	V 編 参考資料編
4 章 プレキャストウェブ橋	V-i コンクリート構造物および鋼構造物の変状と特徴
5 章 鋼橋のPC床版	V-ii 評価および判定方法、判定結果に基づく対策事例
6 章 混合桁橋	V-iii 技術の変遷
7 章 波形鋼板ウェブ橋	

(全 421 ページ)

定 価 7,480 円 (税込) / 送料 500 円

会員特価 6,300 円 (税込) / 送料 500 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