

長大合成桁の設計計画に於ける構造的検討

(株) レールウェイエンジニアリング 保坂鐵矢^{*1}パシフィックコンサルタンツ (株) 八巻康博^{*2}パシフィックコンサルタンツ (株) 松尾 仁^{*2}

1. まえがき

合成桁の設計標準として昭和 38 年に制定された許容応力度法¹⁾は昭和 49 年²⁾、昭和 58 年³⁾、そして平成 4 年に制定された限界状態設計法⁴⁾に移行している。適用できる範囲は 150m 以下で、標準構造を前提とし与えられた設計手法や照査式（以下、簡易法）により断面力（作用力）や耐力（構造断面）を算定すれば良いとしている。現在、鉄道合成桁の最大支間は昭和 49 年に制定された設計標準²⁾による東北新幹線：荒川橋梁（図-1 参照、支間 86.6m）で、同時期の支間 102.4m の東北新幹線：新河岸川橋梁は軽量骨材コンクリートを用いた非合成桁を用いている。当時の標準では支間 86.6m が合成桁の限界と考えられていたが、現行の標準で長大支間 100m の合成桁としての適用性を検討した。

鋼・複合構造橋梁の経済性を現行の積算法で行うと鋼材重量に大きな比重が占められ、その低減が設計の目的のようになっている。このため、短絡的に床版厚を無理に薄くする構造が見られる。一般に床版厚は支間長に比例して厚くなるが、長大支間の合成桁に薄い床版を採用すると、静的挙動には支障が無いが動的挙動による高速運転下の列車走行性安全性や乗心地、耐疲労性等に支障が生じ長期的な耐久性を損なう恐れがある。動的挙動の解析手法や判断基準が明確にされていない現状において、適正な床版厚の選定には十分注意することが必要であろう。筆者らは最近開業したフランス TGV の鋼複合構造を見る機会があり、TGV 新幹線の鋼複合構造橋梁は合成桁（図-2 参照）やアーチ桁であっても、高速運転下における疲労耐性、列車走行性と乗心地の確保から既往の設計仕様に加え種々の精密解析や実験等を加え鋼桁のみならず軌道構造やコンクリート床版厚等にきめ細やかな配慮が加えられ実用化されている情報⁵⁾を得た。本稿では長大支間に合成桁を用いる上での構造的検討に求める要求性能を何において構造を定めるか、橋梁の剛性、特に床版厚さに着目して検討を行った。

2. 検討内容

支間 100m の長大合成桁の構造的検討として、対象を合成桁（完全合成桁）と軽量骨材コンクリートを用いた非合成桁とした。なお、軽量骨材コンクリートを用いた合成桁は在来線（阿佐線：物部川橋梁）⁶⁾で実用化しているが検討から除いた。

2-1 東北新幹線：荒川橋梁（支間 86.6m）の場合

合成桁の妥当性と設計標準の違いによる構造評価を表-1 に示す。活荷重は N-16、P-17 である。

当時の許容応力度法²⁾で検討すると、合成桁は床版厚 40 cm（コンクリート強度： $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ 、鋼断面積： $A_s=0.894\text{m}^2$ ）が最適断面で、床版厚を 25 cm にした非合成桁（ $f_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 、 $A_s=0.924\text{m}^2$ ）で、両者の比較は合成桁が 3.4% という僅差での有利性があるが、ほとんど同等と考えられる。つまり、これ以上の長大橋梁を非合成とした当時の判断が妥当であると確認できた。一方、設計断面を現行の限界状態設計法⁴⁾で試算すると、許容応力度法に比べて床版、上下フランジとも約 20% の余力があることが判り、2 回の改定を受けた現行設計標準の適用に、各改正に約 10% 程度の経済設計も目

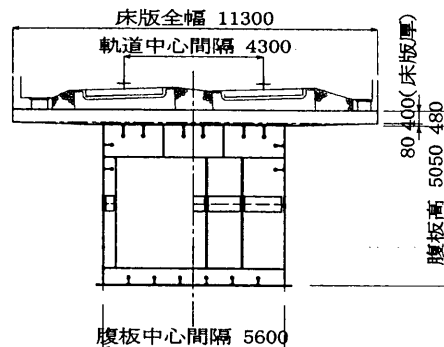


図-1 荒川橋梁断面図

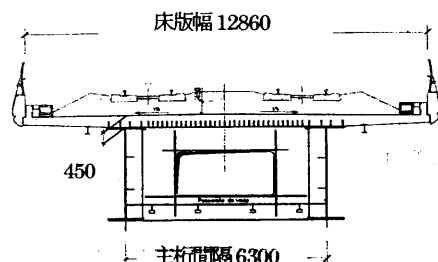


図-2 TGV の橋梁の例

表-1 荒川橋梁（支間 86.6m N・P 荷重）・比較表

設計方法	許容応力度		限界状態
	普通	軽量	普通
構造種別	コンクリート種別		普通
	桁種別		合成桁
	床版の強度の特性値 (N/mm ²)		40
断面諸元	床版厚 (cm)		40.0
	鋼桁断面積 (SM570) (m ²)		0.894
	断面 2 次モーメント		4.784
安全率: $\rho \leq 1.0$ 許容応力度法の場合 $\rho = \text{発生応力度} / \text{許容応力度}$	床版		0.965
	上フランジ		0.995
	下フランジ		0.990

と確認できた。一方、設計断面を現行の限界状態設計法⁴⁾で試算すると、許容応力度法に比べて床版、上下フランジとも約 20% の余力があることが判り、2 回の改定を受けた現行設計標準の適用に、各改正に約 10% 程度の経済設計も目

キーワード：長大合成桁、東北新幹線荒川橋梁、非合成桁、床版厚、TGV

※ 1 〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1 TEL 045-222-9083 FAX 045-222-9102

※ 2 〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1 TEL 03-3344-0626 FAX 03-3344-0806

的としていたことが伺える。

2-2 長大支間（支間 100m）の場合

(1) 設計標準（限界状態設計法）による比較

現行標準（限界状態設計法）⁴⁾、構造断面（複線 1 箱形式）、死・活荷重等を荒川橋梁と同条件、 $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ で試算した比較を表-2 に示す。最も合理的で経済的な合成桁（以下、最適合成桁とする）は床版厚 45cm ($A_s=0.973\text{m}^2$) である。しかし、床版厚 25cm

表-2 支間100m桁(N・P荷重)・比較表

構造 種別	設計方法		限界状態設計法		
	コンクリート種別		普通コンクリート		
	桁種別		合成桁	合成桁	非合成桁
断面 種別	床版の強度の特性値 (N/mm^2)		40	40	—
	床版厚 (cm)		45.0	25.0	25.0
	鋼桁断面積(SM570) (m^2)		0.973	1.315	0.991
	断面2次 モーメント	$I_s =$ (m^4)	5.310	7.353	5.447
		$I_v =$ (m^4)	9.508	8.788	—

(同 1.315m^2) でも最適合成桁に比べ 35% の鋼材重量の増加が見られるが合成桁として構造が成立する（上フランジ厚 103mm）。一方、非合成桁（同 0.991m^2 ）も床版厚さ 25cm で最適合成桁と 2% 増でほぼ同等の評価が見られた。ちなみに、コンクリート強度を $f_{ck}=50\text{N/mm}^2$ で床版厚を 25cm で算定すると最適合成桁と 5% 増であるがほぼ同等の評価ができるが、このように長大支間でも、高強度で薄い床版厚の合成桁は解析上で成立するが、鋼とコンクリートの釣合いの中での温度、クリープ、乾燥収縮などの検討や列車荷重等動的挙動に対する安全性に危惧される構造で、TGV の例を引くまでも無く詳細検討の上、採用すべき構造である。

(2) 活荷重の違いによる比較

現行標準⁴⁾で、電車荷重 (M 荷重: 新幹線貨物荷重: N より軽い)、道床式軌道荷重で比較した。合成後の荷重が小さいことから (1) 項と異なった結果となった (表-3 参照)。最適合成桁 ($A_s=0.634\text{m}^2$) は床版厚 25cm、 $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ である。床版厚 40cm にすると $f_{ck}=32\text{N/mm}^2$ 、 $A_s=0.674\text{m}^2$ となり最適合成に比べ約 6% 増と若干の差が見られた。荷重が小さい M 荷重では床版厚 40cm より厚 25cm に有利性がみられたが、桁剛性で比較すると 19% 減で、(1) 項で述べたように、このような長大橋に用いるには種々の検証が必要と思われる。

表-3 支間96.1m桁(M荷重)・比較表

構造 種別	設計方法		限界状態設計法	
	コンクリート種別		普通コンクリート	
	桁種別		合成桁	合成桁
断面 種別	床版の強度の特性値 (N/mm^2)		40	32
	床版厚 (cm)		25.0	40.0
	鋼桁断面積(SM570) (m^2)		0.634	0.674
断面 種元	断面2次 モーメント	$I_s =$ (m^4)	3.235	3.492
		$I_v =$ (m^4)	5.221	6.434

若干の差が見られた。荷重が小さい M 荷重では床版厚 40cm より厚 25cm に有利性がみられたが、桁剛性で比較すると 19% 減で、(1) 項で述べたように、このような長大橋に用いるには種々の検証が必要と思われる。

3、試設計の結果と考察

- (1) 最大支間 86.6m (荒川橋梁) は当時の設計法によると合成桁と非合成桁の境界で、合成桁としての判断が妥当であったことが確認でき、且つ、建設以来経年の活荷重の履歴から構造安全性の確認がなされている。
- (2) 限界状態設計法での支間 100m 合成桁の実用化は床版厚 45cm、 $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ で計画する限りにおいては構造的な可能性が判断される。又、荷重の軽い電車荷重 (M 荷重) の場合でも 40cm 程度の床版厚は必要と推測される。
- (3) 高強度コンクリートの利用が可能になると支間 100m、床版厚 25cm でも合成桁が成立するが、2-2 (1) で述べた様に、詳細検討を必要とする構造であり、設計者は無意識に採用する事無く、求める性能を照査 (構造耐力のみならず列車の走行性、疲労耐性等から耐久性確保等) を行い採用すべき構造である。
- (4) 長大支間で軽量骨材コンクリートを用いた非合成桁は最適合成桁に比べ、ほぼ同等の鋼材断面となり、死荷重の軽減が下部工の耐震性向上、経済性向上に寄与する結果が示された。しかし、非合成桁としての機能を確保するためにはコンクリートと鋼桁との付着や定着材など構造ディテールの採用が必要である。安易に採用すると弾性合成桁構造となり床版の損傷等、耐久性を損なう恐れがある。

以上より、床版厚は合成桁の剛性に大きく寄与すること等から適切な厚さが求められる。実績や本検討等から床版有効厚 45cm、 $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ 程度で検討する限り、100m 支間の長大合成桁の実用化も可能であると判断される。経済性から一概に床版を薄くしたり、非合成桁とする場合は精度の高い解析や動的挙動を含めた試験・解析等、耐力確保の検証、そして解析に適応した構造ディテールの選定が必要であろう。最近、耐震設計から用いられている連続合成桁についても、まだまだ設計上解明すべき事項がある。複合構造の耐力はコンクリート強度のバラツキ、ヤング係数、クリープ、乾燥収縮等々、施工に左右される要因が多い。コンクリートの打設順序によって床版にクラックが生じる等がある。近年、テンションスティフニングなどにより鉄筋量を減少させ、床版を薄くする研究もなされている。適用に当たっては前述の不明要因等多々ある中で、解析至上主義にこれまでの設計標準の思想や実績を十分考慮すべきである。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道、合成桁鉄道橋設計示方書案 解説、昭和 38 年、2) 日本国有鉄道、建造物設計標準 (鋼とコンクリートとの合成鉄道橋) および解説、昭和 49 年、3) 建造物設計標準解説・鋼とコンクリートとの合成構造、昭和 58 年、4) 運輸省監修、鉄道構造物等設計標準・同解説、鋼・合成構造物、平成 4 年、5) たとえば、Bulletin Ponts Me'talliques, OUT No19,1999、6) 保坂、山田、中野、鋼繊維軽量コンクリートを用いた連続合成鉄道橋、コンクリート工学 Vol.38.No.6.2000.6、pp24-30