

弾性合成桁橋の設計法について

— RC床版を有する鋼桁橋の大規模更新工事の救世主 —

ものつくり大学技能工学部建設学科教授 大垣 賀津雄

1. はじめに

これまで建設された鋼橋は鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版と記す）を有する鋼桁橋が主流である。近年、経過年数の増大、車両の大型化、および凍結防止剤の累積散布量の増大等から、RC床版の劣化が問題となっている。そこで、高速道路橋等の大規模更新工事では、RC床版をプレキャストPC床版に取替える工事が行われている。

この場合、頭付きスタッド（以下、スタッドと記す）等のずれ止めを密に配置することができず、現状では非合成桁設計を行わざるを得ないケースが多い^{1,2)}。しかしながら、図-1に示すような床版と鋼桁を接合しない非合成桁（重ね梁）は、実構造物への適用においてはあり得ないことであり、床版と鋼桁の接合には最小限必要なスタッド等が配置されており、表-1に示す不完全合成桁としての挙動であることは明らかである。

これまで不完全合成桁の理論的研究^{3~7)}が行われている。橋善雄先生は文献8)において、「不完全合成桁は、柔な結合材によって結合されていて、それらの中には弾性的なずれを生じさせるように設計されたものである。このような合成桁を弾性合成桁という。」と記されている。したがって、本文ではスタッドの数が少なく橋軸方向に一定な配置ケースを対象に、弾性合成桁と呼ぶことにする^{2,9)}。

近年、筆者らの共同研究グループにおいて、既往の研究データの分析、実験的な検討、および理論的な検討を行なって、弾性合成桁設計法の確立を図っている。本文では、これらの内容と展望を紹介する。

2. 弾性合成桁に関する研究

(1) 既往の研究

プレキャスト床版を用いた鋼桁橋では、スタッドの配置数が限定的であり、橋軸方向に一般的には一定間隔配置となるため、表-1に示す完全合成桁設計が困難であり、弾性合成桁挙動となる。この場合は、図-2に示すように、スタッドが

比較的少なく桁端や中間支点部も含めて一定配置とした弾性合成桁が有力な構造形式であると考えられる。この構造では、図-1に示すように床版と鋼桁間に相対ずれが生じるため、完全合成と非合成の中間的なひずみ分布となる。橋先生らの研究以降も、種々の弾性合成桁の研究が行われてきている^{3~7)}。しかしながら、これらの研究当時は計算機の発達が不十

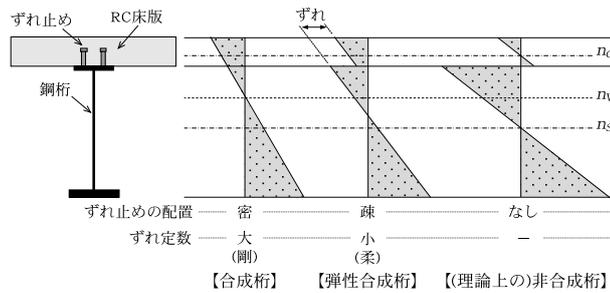


図-1 弾性合成桁におけるひずみ分布

表-1 連続合成桁の分類

分類		中間支点付近の考え方
完全合成桁	プレストレスする連続合成桁	鋼桁とRC床版が合成一体化して、中間支点部床版にもプレストレスにより、ひび割れを許容しない。
	プレストレスしない連続合成桁	負曲げ領域は鋼桁+鉄筋で抵抗し、鉄筋量でひび割れ幅を制御する設計法。
不完全合成桁	プレストレスしない連続合成桁	弾性合成桁
	断続合成桁	正曲げ領域を完全合成桁で、負曲げ領域の一部を非合成として設計する。
部分合成桁		死荷重の正曲げ領域を合成とし、負曲げ領域を非合成として設計する。

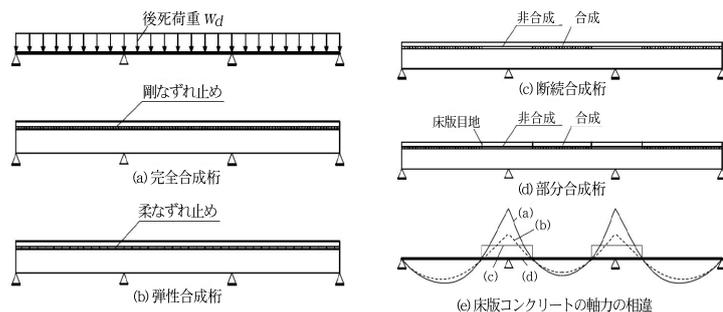


図-2 各種連続合成桁の構造と床版軸力の相違

分なことや、ずれ止めの種類が多く、そのバネ定数等の接合剛度の評価法が不明確であること等の問題もあり、設計実務に取り入れられていないのが現状である。

(2) 合成度合い評価

近年、上述の課題も解決できているので、弾性合成桁設計が可能な状況である。RC床版と鋼桁の合成度合いを表す指標として、古くからフレキシビリティ定数 s がある^{2, 5)}。ここで、スタッド1本あたりの鋼桁との相対ずれ剛性をずれ定数と呼び、橋軸方向1mあたりの相対ずれ剛性をバネ定数と呼んでいる。

$$s = \sqrt{(k_0 \times L_d) / (k \times m)} \quad (1)$$

ここに、 k_0 ：基準バネ定数1.96 (kN/mm/mm)、 k ：スタッド1本あたりのずれ定数 (kN/mm/本)、 m ：1列当たりのスタッド本数、 L_d ：ずれ止め間隔 (mm) である。

スタッドのずれ定数の設定方法は、プレキャスト床版を有するケースを想定して、版下モルタルの厚さやスタッドの軸径等を試験パラメータとした供試体を製作し、押抜き試験のデータから設定することができるようにまとめている^{10, 11)}。また、繰返し荷重を受けるとずれ定数も変化することを確認し、この影響を考慮している。

道路橋示方書の合成桁の規定に従ってスタッドを配置すると、 $s=1.0$ 以下になる。しかしながら、図-3に示すとおり、真の完全合成は $s=0.3$ 以下である。一般的なスラブアンカーを用いた非合成桁では $s=2.0$ 程度となる。 $s=7.0$ 程度で非合成になるが、これはあり得ない構造である。プレキャスト床版を用いる場合、例えば、橋軸方向に1.2m間隔に設けたスタッド箱抜き孔部に $\phi 22$ のスタッドを3本ずつ配置すると、 $s=1.5$ 程度となる。この場合、RC床版と鋼桁の接合は確保できており、合成桁に近い挙動をする。

(3) 弾性合成桁の理論と実験の比較

弾性合成桁の挙動を解明するため、理論計算^{12, 13)}と実験的な研究^{14, 15)}を実施して比較した。図-4は連続桁の床版軸力に関して、フレキシビリティ定数 s を変化させた場合の理論計算結果である。このような傾向になることは実験でも明らかにしている。

正曲げを受ける弾性合成桁の荷重実験において、支間中央部鋼桁下フランジのひずみが 500μ (設計荷重時)における鋼桁とRC床版の相対ずれ変位を図-5

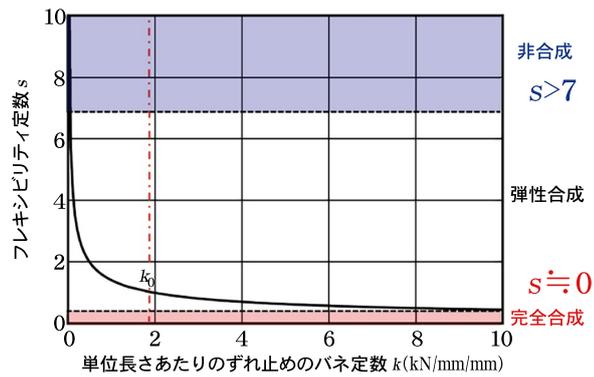


図-3 フレキシビリティ定数とバネ定数の関係

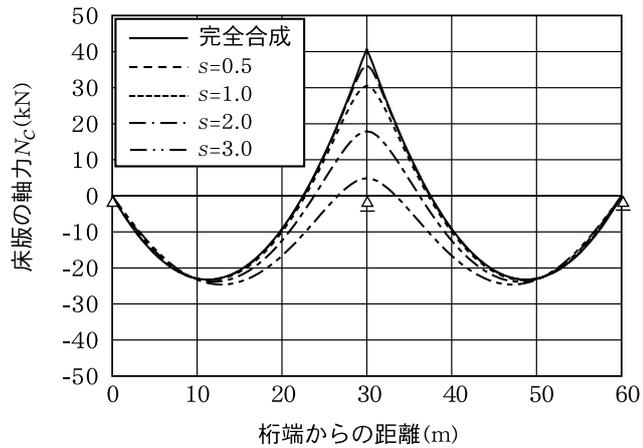


図-4 中間支点部の床版軸力変化

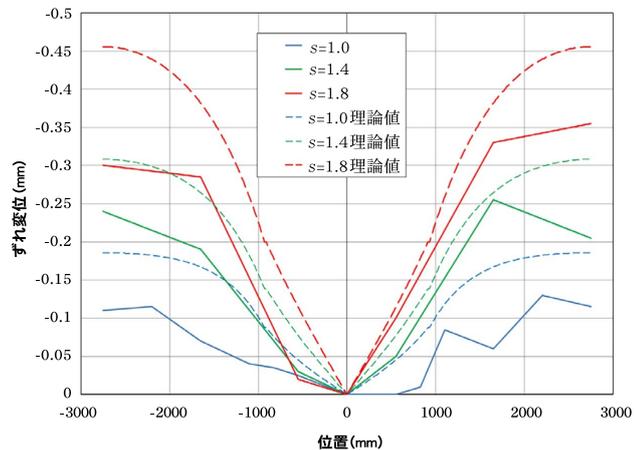


図-5 鋼桁と床版の相対ずれ変位 (鋼桁下フランジ500 μ 時)

に示す。実験値と理論値ともに、 s が大きくなるほど相対ずれが大きくなることわかる。すべての供試体は共通して支間中央部では相対ずれがゼロに近く、端部に向かうほど相対ずれが大きくなることわかる。完全合成桁の場合、理論上相対ずれがゼロになるが、合成桁設計 ($s=1.0$) のCASEは、設計荷重レベルでも0.1~0.2mm程度の相対ずれが生じて

おり、弾性合成桁挙動をすることがわかる。

3. 弾性合成桁設計

(1) 設計計算方法

① 理論式による計算

弾性合成桁の挙動は、ずれ止めのバネ定数に依存したせん断遅れ理論によって評価されている。せん断遅れ理論による

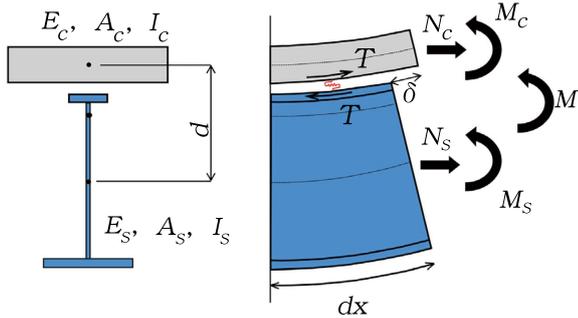


図-6 弾性合成桁の微小区間のつり合い

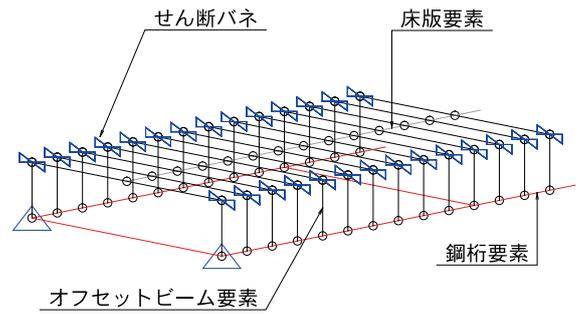


図-7 解析モデル参考図

鋼桁の分担軸力 N_s に関する基礎微分方程式は、図-6の微小区間の力のつり合いから与えられる。この計算は簡単なEXCEL表計算を用いて各種検計業務に利用できる。

②係数処理による簡易設計

弾性合成桁であっても、現状の非合成桁設計のフレキシビリティ定数 s が2.0程度であることを考えると、その挙動は完全合成桁に近いと考えられる。そのため、正曲げ部は鋼桁+床版、負曲げ部は鋼桁+鉄筋断面として完全合成桁として計算を行い、性能照査においては安全側となるように構造解析係数¹⁶⁾を考慮した設計方法が考えられる。

③オフセットビームとバネを用いた構造解析

図-7に示すような立体骨組解析を用いた弾性合成桁設計システムを構築しており、その解析方法は実施設計で適用可能である。床版と鋼桁の接合部のスタッドのバネ定数を立体骨組解析モデルに導入し、本設計システムによる計算と、理論式による計算との比較を行った。その結果、両者は一致することが分かった¹⁶⁾。すなわち、活荷重の影響線解析が行える計算システムを用いて、弾性合成桁の設計計算を行うことができることとなる。

(2)弾性合成桁設計の特徴

弾性合成桁設計の特徴をまとめると、以下のとおりである。

- ①正曲げモーメント領域の鋼桁は、ほとんど合成桁に近い挙動を示す。
- ②中間支点部の負曲げモーメント領域は、床版に作用する軸引張力が合成桁設計より低下する。そのため、鋼桁+鉄筋断面で断面力算出と応力照査可能となる。

- ③非合成桁設計でも弾性合成挙動であり、おおむね $s=2.0$ を確保できている。
- ④弾性合成桁の桁端部付近のスタッドに作用する水平せん断力は橋軸方向に分担が広がり、密なスタッド配置の必要性が緩和される。
- ⑤ずれ止めの押抜きせん断試験データ等を整理しており、ずれ止めのバネ定数を与え、弾性合成桁を適切に評価可能である。
- ⑥弾性合成桁の設計計算システム化が整ってきており、係数処理による簡易設計や立体骨組解析による詳細設計を行うことができる。

4. おわりに

近年、大規模更新工事等で床版取替えが行われているが、その際に、狭い箱抜き孔に多くのスタッドを配置していたり、桁端部のみ場所打ち床版にしてスタッドを多く配置しているケースが見られる。弾性合成桁設計を行うことにより、これらの課題を解決できる可能性がある。規則正しいスタッド配置にすれば、合理的な設計に結び付くと確信している。RC床版と鋼桁の接合部性能を確保できる程度にスタッドを配置することも同時に考え、上述のような合成桁のメリットを活かせる設計法であるといえる。

近い将来、弾性合成桁設計が、RC床版を有する鋼桁橋の主たる設計法になると想定しており、すでに実橋での適用を行える段階である。日本から世界に弾性合成構造を発信して、優れた考えを示す時期が来たと考える次第である。

【参考文献】

- 1) 大垣：既設合成桁の床版取替えにおける設計・施工上の課題について、第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集、2018。
- 2) 土木学会：連続合成桁における床版取替技術の現状と展開、複合構造レポート17、2021.9
- 3) 山本：不完全合成桁の曲げ理論、土木学会論文集、No.67、1960。
- 4) 橋、安達：不完全合成桁について、土木学会論文集、No.112、1964。
- 5) 小松、佐々木：不完全合成格子桁橋の理論と近似計算法について、土木学会論文報告集、第329号、1983.1
- 6) 中井、山内、袴田、酒造、山本：プレキャスト床版を用いた負の曲げモーメントを受ける弾性合成桁の実験研究、土木学会構造工学論文集、Vol.1.34A、1988.3
- 7) 中島、溝江：不完全合成桁の不完全度の簡易推定法、土木学会論文集、No.537/1-35、1996。
- 8) 橋：連続合成桁橋、理工図書、1966。
- 9) 大垣、Pham、石川、今川、大久保：弾性合成桁橋の設計法、橋梁と基礎、Vol.57、No.9、2023。
- 10) 今川、大垣、Pham、石川、大久保：弾性合成桁設計における頭付きスタッドのずれ定数の評価に関する一検討、日本鋼構造協会、鋼構造年次論文報告集、第31巻、2023。
- 11) 中村、今川、大垣、小林、石川、藤本、岩井、大久保：プレキャスト床版を有する弾性合成桁におけるスタッドのずれ定数に関する実験的研究、第16回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム、(3)、2025。
- 12) 石川、Pham、大垣、今川、大久保：頭付きスタッドを用いた弾性合成桁の水平せん断力の評価に関する研究、土木学会構造工学論文集Vol.70A、2024。
- 13) 石川、大垣、今川、藤本、岩井、大久保、趙：弾性合成桁に生じるたわみの理論解析、第16回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム、(21)、2025。
- 14) 大垣、小林、石川、今川、服部、喜多、岩井、大久保：プレキャスト床版を有する弾性合成桁の中間支点部挙動に関する実験研究、鋼構造年次論文報告集、第32巻、2024。
- 15) 小林、大垣、藤本、岩井、石川、今川、大久保、趙：プレキャスト床版を有する弾性合成桁の正曲げ挙動に関する実験研究、第16回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム、(1)、2025。
- 16) 大久保、趙、石川、大垣、今川、藤本、岩井：弾性合成桁の理論に基づく設計法の検討、第16回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム、(14)、2025。