

連続合成桁の設計上の課題（鉄道橋の例）

REC(勤：鉄道・運輸機構) 正員 保坂 鐵矢

○パシフィックコンサルタンツ 正員 武居 秀訓^{※1}

川崎重工業 正員 作川 孝一

1. はじめに

鉄道橋においては、騒音・振動対策として、コンクリート床版を有効利用した合成桁が、そして連続合成桁が採用されることが多い。昨今、連続合成桁の設計における話題はひび割れ制御設計に代表される、非常にデリケートな現象を厳密な解析により断面設計することが世の流れとなっている。著者らはこれまでの鉄道用連続合成桁を設計してきた中で注意すべき点あるいは問題となる点を整理し、今後の設計に役立てることができればと考え、ここに何点か報告する。

2. 連続合成桁の課題

(1)ひび割れ制御設計

連続合成桁における中間支点近傍のコンクリート床版のひび割れ制御は床版内の橋軸方向鉄筋量を増加させればよいが、長スパンになると通常の配筋ではひび割れ制御が困難になり、鋼上フランジを増厚させ、鉄筋の作用応力度を減少させることで、ひび割れ制御する方法を用いる例がある。その結果、長スパンの連続合成桁は、鋼とコンクリートとの構造的釣合いを無視した不経済な構造物となることが懸念される。しかし、これは連続桁でかつ完全合成構造であるが故に起こることであり、中間支点部のある範囲を床版と鋼桁のずれを許容する断続合成構造

とすれば、その断続区間の床版への作用引張力は平均化され、鋼上フランジを増厚する必要性はほとんどない。表-1 に示す支間 100m+100m の 2 径間連続合成桁を例に行った、完全合成タイプと断続合成タイプの比較結果からその違いは明らかである。ただし、この断続合成構造は床版と鋼桁間の摩擦や付着力に対する解析モデルと実構造との構造的評価が困難で、合成区間と断続区間の境界部剛ジベルへのせん断力の集中現象、断続区間に配置する柔ジベルの設計方法の確立など、実用化に向けての課題を残している。負曲げ領域のコンクリート床版のひび割れに対しては、一步一步、地道な実験や数値解析の積み重ねにより、鋼とコンクリートの釣合いのとれた、耐力的に余裕のある構造を創造する設計が必要であろう。

(2)ずれ止めとしてのスタッド

鉄道橋の連続合成桁に使用するずれ止めは構造的特徴から高い疲労強度と完全合成機能を確保できるバネ定数の大きなずれ止めが必要であり、正曲げ区間に馬蹄形ジベル、負曲げ区間に孔明鋼板ジベル（以降、PBL と称す）の使用を基本としてきた。一方、複線 2 主 I 断面合成桁すなわち合成少数主桁橋では、1 主桁 1 列の馬蹄形ジベルでは必要なせん断耐力が確保できないため、複数列設置可能なスタッドが例外的に用いられている。しかし、鉄道橋連続合成桁の全区間（正曲げ区間および負曲げ区間）にスタッドを使用した場合を想定してみると、連続桁の中間支点近傍の鋼上フランジには負曲げモーメントによりスタッドが点状に溶植された状態で引張応力が繰り返し作用する。つまり、鋼上フランジの引張応力とスタッドのせん断応力とが同時に作用する組合せ応力状態での疲労耐力が課題となる。これに関して、国内では疲労実験^{2), 3)}が行われ、疲労強度の評

表-1 完全合成桁と断続合成桁の中間支点部の検討結果

| | | 完全合成桁 | | 断続合成桁 | |
|-----------------------------|--------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| 設計曲げ モーメント (kN・m) | 合成前死荷重 | -212500 | | -212500 | |
| | 合成後死荷重 | -140000 | | -140000 | |
| | 列車荷重 | -82892 | | -82892 | |
| | 衝撃 | -10840 | | -10840 | |
| 概略断面 | 床版 | 8632 × 300 | | 8632 × 300 | |
| | 上フランジ | 5036 × 63 | | 5036 × 37 | |
| | 腹板 | 5200 × 25 | | 5200 × 25 | |
| | 下フランジ | 4836 × 36 | | 4836 × 39 | |
| 概略断面積 | | 9338.40 (1.000) | | 7998.40 (0.857) | |
| 終局限界状態の照査 | | 応力度 | 安全度 | 応力度 | 安全度 |
| 応力度 (N/mm ²) | 上側鉄筋 | 114.8 | 0.413 | 115.9 | 0.417 |
| | 下側鉄筋 | 106.7 | 0.384 | 106.5 | 0.383 |
| | 上フランジ | 209.3 | 0.659 | 291.9 | 0.920 |
| | 下フランジ | -324.5 | 0.978 | -323.6 | 0.975 |
| ひび割れ幅の照査(mm) | | 0.197 < 0.2 | | 0.198 < 0.2 | |

注) 床版内鉄筋は、D22×100の2段配筋としている。

キーワード：鉄道橋，連続合成桁，ひび割れ制御，断続合成，複合加力，合成応力

※1 〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1

TEL 03-3344-0744

FAX 03-3344-0806

価式が示されているが、国内の道路橋・鉄道橋の設計基準には、曲げとせん断による相関強度式が示されていない。表-2 はスタッド溶接部の疲労設計の結果および文献2)による組合せ応力状態を考慮した相当応力を示している。繰返し疲労の照査で考慮する曲げによる作用応力範囲に対して、相当応力範囲は 2.5 倍以上となることから、通常の疲労設計では安全となる継手でも、組合せ力を考慮するとかなり大きな応力が作用することに注意が必要である。鉄道橋の合成桁設計標準は単純合成桁に関する基準であるため、スタッドを溶植した鋼上フランジが引張応力を受ける状態は想定していなかった。今後、鉄道橋連続合成桁に対して、全長にわたってスタッドを使用するような場合には、この組合せ力を考慮した疲労設計を実施する必要がある。そして、より高い疲労耐力を有するずれ止めを含めた構造を選定することが重要であろう。

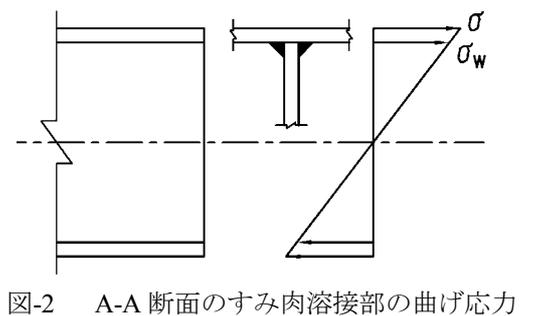
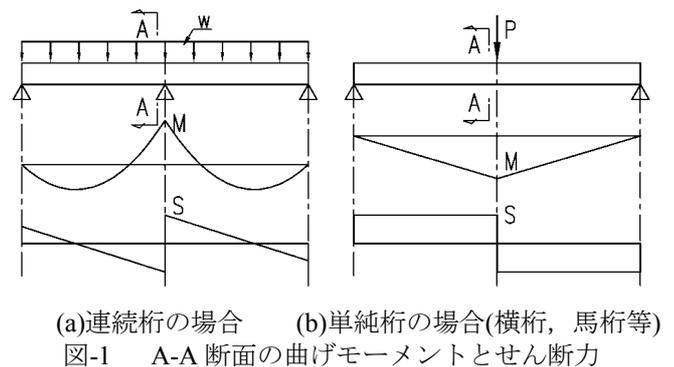
表-2 曲げ応力とせん断応力の疲労照査（支間 30m+40m+30m の連続合成桁）

| | | 複線載荷 | | 下り線載荷 | | 上り線載荷 | |
|--------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 曲げ | せん断 | 曲げ | せん断 | 曲げ | せん断 |
| 作用応力度 | 最大値 | 243.3 | 53.0 | 229.8 | 47.7 | 192.8 | 26.4 |
| | 最小値 | 164.8 | 15.7 | 168.4 | 16.8 | 169.4 | 17.0 |
| 繰返し疲労の照査 | a_1, a_2 | --- | --- | 0.782 | 0.825 | 0.299 | 0.251 |
| | 複線載荷考慮係数 f_2 | 0.796 | 0.825 | --- | --- | --- | --- |
| | 繰返し数考慮係数 f_1 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| | $\alpha_c (= f_1 \cdot f_2)$ | 0.796 | 0.825 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| | 作用応力範囲 $\Delta\sigma_d, \Delta\tau_d$ | 62.5 | 30.8 | 61.3 | 30.8 | 23.5 | 9.4 |
| | $\Delta\sigma_{fo}, \Delta\tau_{fo}$ (強度等級:E) | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 |
| | $\alpha_a (= CR \cdot Ct)$ | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| | 疲労許容応力範囲 $\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R$ | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 | 80.0 |
| 安全性の照査 | 0.664 | 0.327 | 0.651 | 0.327 | 0.250 | 0.100 | |
| 文献2)による相当応力範囲 σ_e | | 163.0 | | 161.3 | | 56.2 | |

- 注) 1. a_1, a_2 は、(1線載荷時の応力範囲) / (複線載荷時の応力範囲) を示す。
 2. $\Delta\sigma_{fo}$: スタッドの取り付く主板断面に対する 2×10^6 回基本疲労許容応力範囲
 3. $\Delta\tau_{fo}$: スタッド溶接ののど断面に対する 2×10^6 回基本疲労許容応力範囲
 4. 安全性の照査: $\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \cdot \Delta\sigma_d / \Delta\sigma_R = 0.85 \times \Delta\sigma_d / \Delta\sigma_R$

(3) 中間支点部のフランジと腹板とを連結する溶接

フランジと腹板とを連結するすみ肉溶接は主としてせん断応力を伝えるものであるが、図-1 のように、連続桁の中間支点近傍および単純桁でも横桁や馬桁などでは、曲げとせん断が卓越するため、せん断応力の検算だけでなく、曲げ応力 σ_w (図-2) を考慮した検算が必要であると考えられる。道路示方書では、曲げ応力 σ_w とせん断応力を組合せた照査式が示されているが、図-2 のフランジ首部溶接の照査方法が明確でない。鉄道橋では曲げ応力が作用する場合には、合成応力に対する検算を行っている。少数主桁橋や長スパン化傾向の箱桁橋の中間支点部では、合成応力度が大きくなるため、鉄道橋の許容応力度設計法 (例えば、昭和 58 年制定) に示されたすみ肉溶接量の算定方法 (σ_w は図-2 に示す値で、許容応力度 σ_a は基本許容応力度を用いる。) が、安全な設計であると考えられる。規定内容が道路と鉄道で違いがあり、運用において矛盾があること等に注意して設計にあたるべきである。



3. おわりに

橋桁の設計・施工は経済性、供用期間における耐久性の確保が重要なことである。連続合成桁は、床版ひび割れに対する耐久性・ジベル構造の疲労耐力など、現行標準の適用外の照査が必要である。仕様設計から性能設計への移行は益々技術者の技量が問われる時である。本課題提供が今後の設計の参考になれば幸いである。

「参考文献」1)保坂鐵矢, 武居秀訓, 辻角学: 断続合成形式の長支間連続合成桁への適用性について, 第 59 回土木学会年次学術講演会, 2)梶川靖治, 前田幸雄: 組合せ荷重下におけるスタッド溶接フランジの疲労強度の評価, 土木学会論文集 第 362 号 / I-4 (1985.10), 3)保坂鐵矢, 平城弘一, 梶田智子, 高田嘉秀: 曲げ変形を拘束したスタッド付鋼板の複合加力疲労試験, 第 60 回土木学会年次学術講演会, (2005.9 講演予定), 4)保坂鐵矢, 辻角学, 松尾仁, 久保武明, 仕様設計から性能設計に到る鉄道用合成桁の課題, (2005.9 講演予定)