

負曲げを受ける合成床版を有する連続合成桁の挙動解明に関する実験的研究

長岡技術科学大学 西巻 宏晃

指導教員 長井 正嗣

1.研究背景

我が国では建設コスト削減の要請に応えるため、PC床版とともに、同じく耐久性の高い合成床版を有する連続合成桁の建設が増えている。連続合成桁では、中間支点付近に負の曲げモーメントが作用し、床版コンクリートがひび割れる原因となる。この負の曲げモーメントへの対応として、床版橋軸方向にプレストレスを導入してコンクリートのひび割れを防ぐ方法と、ひび割れの発生は許容するが、ひび割れ幅を許容範囲内に抑える方法(以下、ひび割れ幅制御設計)とがある。近年の動向としては、施工の省略化と更なるコスト削減の観点から、ひび割れ幅制御設計が主流になりつつある。

RC床版やPC床版を有する連続合成桁の中間支点付近の床版コンクリートのひび割れ幅を正確に計算するためには、テンションステイフィニング効果およびひび割れ状態(初期ひび割れ状態・安定ひび割れ状態)を考慮する必要があるとされている。^{2),9),14)}

一方、合成床版を有する合成桁のひび割れ幅に関しては、ひび割れ状態に着目した研究はほとんど見当たらないのが現状である。³⁾

また、合成桁では、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編にしたがってスタッド本数を計算すると、中間支

点付近のスタッド本数が多くなる。

その一方で、AASHTOやEurocodeなど海外の設計基準ではスタッドの設計法に関しても合理化が図られており、道路橋示方書Ⅱ鋼橋編より少ないスタッド本数で設計が成立する。

2.研究目的

本研究では、合成床版のひび割れ幅を精度よく計算するひび割れ幅制御設計法の確立ならびに中間支点付近のスタッド本数の削減の可能性について検討することを目的とする。

3.供試体および実験ケース

図-1に供試体概要および载荷要領を示す。供試体寸法として、鋼桁は桁長10400mm、桁高500mm、合成床版は、床版幅900mm、厚さは121.2mm(コンクリート厚:118.0mm、底鋼板厚3.2mm)である。

スタッド本数はAASHTO LRFDで設計する本数を用いて、次に示す3ケースの方法とした。

CASE1:全長に渡って床版と鋼桁を合成

CASE2:負曲げ域を非合成(断続合成)

CASE3:CASE1の負曲げ域のスタッド本数を減少(弾性合成)

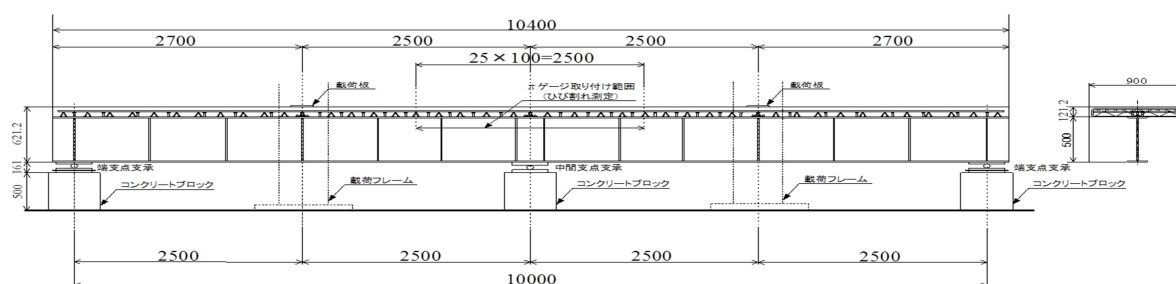


図-1 供試体形状および载荷要領

4. ひび割れ幅および鉄筋応力の算定方法

4.1 コンクリート床版¹⁴⁾

RC床版や橋軸方向にプレストレスしないPC床版のひび割れ幅および鉄筋応力は文献14)により精度よく求めることができる。以下に計算法の概要を示す。

(1) ひび割れ間隔

文献14)は、ひび割れ状態に応じたひび割れ間隔(L)を提案している。

a) 初期ひび割れ時

$$L = \frac{\sigma_{srII} \Phi}{2.7 f_{ctm} (1 + n \rho_s)} \quad (3.1)$$

b) 安定ひび割れ状態

本研究グループでは安定ひび割れ状態のひび割れ間隔は式(3.2)採用する。

b') 安定ひび割れ状態

$$L = 1.1 k_1 k_2 k_3 \{4C + 0.7(C_s - \Phi)\} \quad (3.2)$$

ここに、 k_1 は鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を示す係数で、一般に異形鉄筋の場合1.0として良い。 k_2 はコンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数で、式(3.4)による。

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} \quad (3.3)$$

ここで f'_c コンクリートの圧縮強度である。 k_3 は引張鋼材の段数を表す数字であり、式(3.4)による。

$$k_3 = \frac{5(m+2)}{7m+8} \quad (3.4)$$

ここで、 m は引張鋼材の段数である。

(2) ひび割れ幅

初期ひび割れ時および安定ひび割れ状態のひび割れ間隔を用いて、ひび割れ式は式(3.5)、式(3.6)で与えられる。なお、文献14)では、初期ひ

び割れ状態におけるMの増加量の間比例関係が成り立つとして、初期ひび割れ状態におけるひび割れ幅は初期ひび割れ時のひび割れ幅ひび割れ幅と安定ひび割れ幅移行時のひび割れ幅の間をMの増加量に応じて補間している。

式(3.5)の β_m および式(3.6)の β はコンクリートと鉄筋の付着の程度を表すパラメータである。鉄筋とコンクリートの付着が強固な場合には β_m や β が大きくなり、結果としてひび割れ幅は小さく計算される。式(3.6)の安定ひび割れ状態においては、荷重の繰返しによる付着の低下を考慮して、 $\beta_m=0.2$ で用いられている。

a) 初期ひび割れ時

$$w_M = L \left(\frac{N_{CR}}{E_s A_s} - \frac{\beta_m N_{CR}}{E_s A_s} - \epsilon_{csd} \right) \quad (3.5)$$

b) 安定ひび割れ状態

$$w_M = L \left(\frac{M}{E_s I_{st}} y_{sr} + \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \alpha_{st} \rho_s} - \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \rho_s} - \epsilon_{csd} \right) \quad (3.6)$$

ここに、 ϵ_{csd} はひび割れ発生後のコンクリートの収縮によるひび割れ幅を考慮するための乾燥収縮度、 y_{sr} は「鋼桁+鉄筋」断面の図心から上側配力鉄筋までの距離である。

また、中本ら¹⁸⁾、木村ら¹⁹⁾によれば、式(3.5)、式(3.6)で求めたひび割れ幅は、コンクリート床版付きの合成桁の負曲げ実験で得られた最大ひび割れ幅よりも小さく、式(3.1)、式(3.2)のひび割れ間隔に乗じる鉄筋ひずみとして、平均ひずみの代わりに最大ひずみを用いると、計算と実験の最大ひび割れ幅が良く一致したと報告されている。そこで、本研究グループでは、初期ひび割れ時と安定ひび割れ状態の最大ひび割れ式を式(3.7)、式(3.8)により求めるものとし、式(3.5)、式(3.6)で求めたひび割れ幅を平均ひび割れ幅と呼ぶこととする。

c) 初期ひび割れ時の最大ひび割れ幅

$$w_{\max} = L \left(\frac{N_{CR}}{E_s A_s} - \varepsilon_{csd} \right) \quad (3.8)$$

d) 安定ひび割れ状態の最大ひび割れ幅

$$w_{\max} = L \left(\frac{M}{E_s I_{st}} y_{sr} + \frac{\beta f_{ctm}}{E_s \alpha_{st} \rho_s} - \varepsilon_{csd} \right) \quad (3.9)$$

4.2) 鉄筋応力

主桁作用による鉄筋応力は初期ひび割れ状態について式(3.10)で、安定ひび割れ状態について式(3.11)で求める。

(a) 初期ひび割れ状態

$$\sigma_M = \frac{N_{CR}}{A_s} \quad (3.10)$$

(b) 安定ひび割れ状態

$$\sigma_M = \frac{M}{I_{st}} y_{sr} + \frac{\beta f_{ctm}}{\alpha_{st} \rho_s} (\beta = 0.4) \quad (3.11)$$

コンクリートのひび割れ幅を計算する式(3.7)、式(3.9)では安定ひび割れ状態で $\beta=0.2$ としているのに対して、式(3.11)では $\beta=0.4$ としているのは、荷重繰返しによる β の低下を考慮しないことで、鉄筋を安全側に評価するためである¹⁴⁾。

4.提案手法 (底鋼板の取り扱い)

前述のコンクリート床版のひび割れ幅、鉄筋応力の計算法をもとに、合成床版の計算法を提案する。

(1) 文献14)の方法はRC床版やPC床版を対象としており、合成床版へ適用する場合には底鋼板の取り扱いを明確にしておく必要がある。本研究グループでは、底鋼板を継手によって橋軸方向に連続させる場合の底鋼板の取り扱いとして、以下を提案する。

- a) 合成床版の底鋼板は鋼桁、コンクリート、鉄筋と一体となって曲げ荷重に抵抗すると考える(桁断面に算入する底鋼板断面を低減しない)
- b) ひび割れ幅、鉄筋応力の計算において、底鋼

板は床版の配力鉄筋の一部、または、鋼桁の上フランジの一部に換算する。具体的には、式(4.1)に示すように、底鋼板を床版の配力鉄筋として働く部分と、鋼桁上フランジとして働く部分に分けて考えるための係数 η を導入する。 η により底鋼板の断面積を按分し、これらを鉄筋の断面積と鋼桁上フランジの断面積に換算して計算を進める。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{鉄筋寄与分} : \eta A_l \\ \text{鋼桁上フランジ寄与分} : (1-\eta) A_l \end{array} \right. \quad (4.1)$$

ここに、 A_l は底鋼板の全断面積を表す。

なお、底鋼板の継手にすべりが生じると η が低下すると考えられるので、設計荷重レベルにおいては底鋼板の継手にすべりを生じさせないことを前提とする。

5. 実験結果

1) 荷重-変位関係(載荷点直下)

図-2に載荷点の荷重-変位関係を示す。荷点直下の荷重-変位関係に関して、CASE1, CASE2, CASE3のいずれも、載荷終了時点(800kN)までの剛性がほぼ一致していた。この結果より、スタッド本数を削減したことによる剛性の低下は認められなかった。

2) ひび割れ幅

図-3に(a)CASE1, (b)CASE2, (c)CASE3, (d)3ケース比較の曲げモーメント-ひび割れ幅関係を示す。3ケースのひび割れ幅の実験値の比較を示す。(d)図から、初期ひび割れ上におけるひび割れ幅はCASE2>CASE3>CASE1となったが、3ケースで大きな差は確認できなかった。これは、ずれ止めがひび割れの起点となっていることが考えられるため、初期ひび割れ状態においては、スタッドがひび割れ幅に影響を与える可能性がある。また、本研究グループの提案

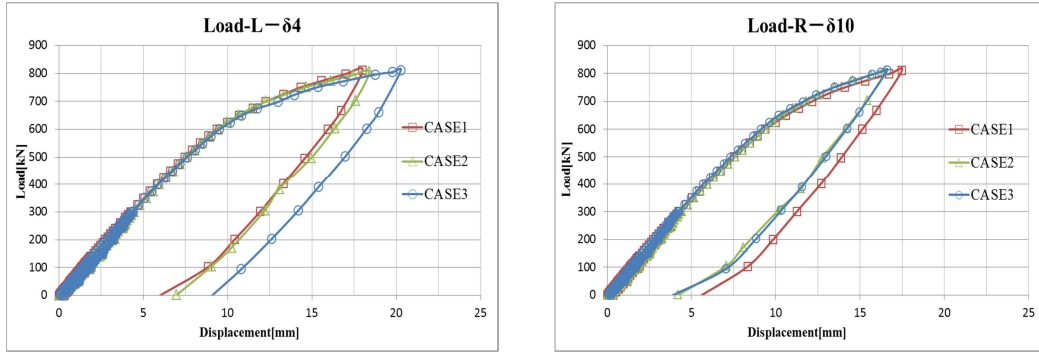
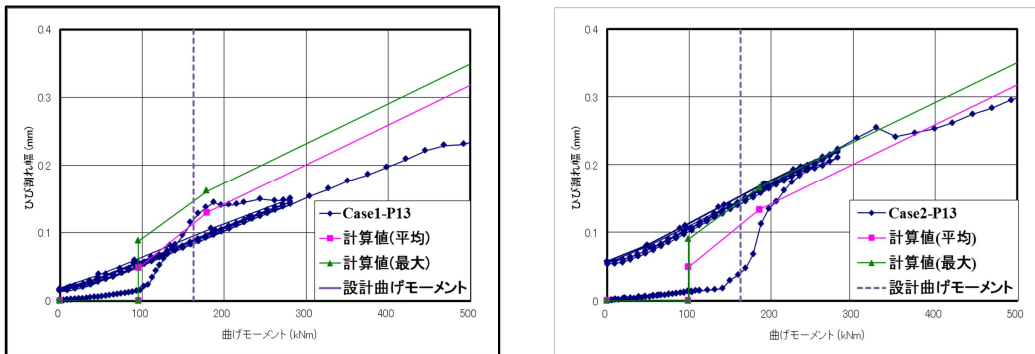
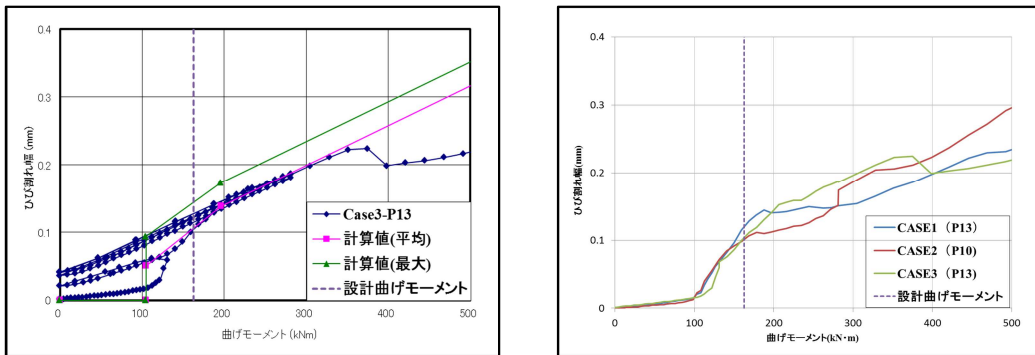


図-2 荷重-変位関係



(a)CASE1

(b)CASE2



(c)CASE3

(d)3 ケース比較(実験値)

図-3 曲げモーメント - ひび割れ幅関係($\eta=0.4$)

手法により、係数 η を導入した結果 CASE1 では、 $\eta=0.4$ 、CASE2、CASE3 では $\eta=0.2\sim0.4$ とした時、ひび割れ幅を精度良く計算できた。

6. まとめ

- (1) スタッド本数を削減したことによる剛性の低下は認められなかった。
- (2) スタッドはひび割れの起点となっているこ

とが考えられることから、スタッドの密度が初期ひび割れ状態におけるひび割れ幅に影響を与える可能性がある。

(3) 底鋼板断面積を按分する係数 η を導入したことにより、ひび割れ幅を精度良く計算でき、また、本研究で対象とした実験ケースでは $\eta=0.4$ とした時、最も精度良く計算できた。

(4) ひび割れ幅の実験値の比較から、本研究グループで対象として3ケースでは、初期ひび割

れ状態（安定ひび割れ状態移行前）のひび割れ幅の大きさは、CASE2>CASE3>CASE1 となったが、その差はほとんどなかった。

参考文献

- 2) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書 総則編・構造計画編・設計編，2007
- 3) 合成床版合成桁の負曲げ部ひび割れ幅に関する実験と解析，構造工学論文集，土木学会，vol.58A，pp1099-1101，2012.3
- 9) G.Hanswille：Cracking of concrete mechanical models of the design rules in Eurocode4,Conf.Report,Composite Construction in Steel and Concrete III(ed. by C.D.Bucker and B.M.shahrooz),pp.420~433, ASCE,1977
- 14) 長井正嗣，奥井義昭，岩崎英治：連続合成桁の初期ひび割れ状態を考慮したひび割れ幅，鉄筋応力算定法の一提案，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.283-292，2004.4
- 18) 中本啓介，長井正嗣，奥井義昭，岩崎英治，細見雅生：負曲げを受ける合成桁のひび割れ挙動に関する実験的研究，構造工学論文集 vol.49A,pp.1142-1152,2003.3
- 19) 木村充，長井正嗣，細見雅生，奥井義昭：連続合成桁のひび割れ幅とケミカルプレストレスに関する実験的検討，vol.52A,pp.1039-1046,2006.3