(37) 二重合成 I 桁橋の N-M-Q相関曲線に関する検討

西岡 文吾¹·今川 雄亮²·大山 理³

¹学生会員 大阪工業大学大学院 工学研究科都市デザイン工学専攻(〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1) Email: m1m16106@st.oit.ac.jp

²正会員 工博 大阪工業大学特任講師 工学部都市デザイン工学科(〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1) Email: yusuke.imagawa@oit.ac.jp

³正会員 工博 大阪工業大学教授 工学部都市デザイン工学科(〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1) Email: osamu.oyama@oit.ac.jp

近年,構造物に対する合理化が求められている.その中で,橋梁の分野において新形式の鋼・コンクリート複合橋梁の研究および開発が積極的に進められており,一例として,二重合成 I 桁橋が注目されている.二重合成 I 桁橋は,連続桁橋の中間支点付近に発生する負曲げ域に下床版を配置することで,全径間にわたり断面が全塑性モーメントまで達することができる構造形式である.今後,二重合成 I 桁断面の照 査にあたり,曲げモーメント(M)およびせん断力(Q)が同時に作用する場合および本構造形式の長支間での 適用を目指しラーメン構造を採用した際,軸力(N),曲げモーメント(M)ならびにせん断力(Q)が同時に作用 する場合の相関式が必要となる.そこで,本文は,二重合成 I 桁断面におけるM-QおよびN-M-Q相関式を 誘導するとともにパラメーター解析を行い,その結果について報告する.

Key Words : double composite I girder bridge, ultimate loading carrying capacity, N-M-Q interaction

1. はじめに

近年、日本では、公共事業は増加傾向にあるが、材料 費の高騰などコスト面での課題が多く残っており、公共 事業のコスト削減が急務である.橋梁建設に関しても同 様に、コスト削減が求められている. そこで、鋼・コン クリート複合構造のさらなる合理化、省力化を目指し、 研究が盛んに行われるようになり、1980年代にドイツで 施工され始めた、鋼・コンクリート二重合成箱桁橋が注 目されている). しかし、箱桁橋の場合、製作コストが比 較的高価であるため,経済面を考慮すると,少数 I 桁橋 の方が優れており、そこで、現在注目されているのが、 図-1 に示す少数 I 桁橋に二重合成構造を適用した、鋼・ コンクリート二重合成 I 桁橋である². 本橋梁形式は, 下 コンクリート床版(以下,下床版と略記)を負曲げモーメン ト域に配置することで、コンクリートが打ち込まれてい ない圧縮側の自由突出部における局部座屈の発生に留意 すれば,限界状態設計法を適用した場合,安全性の照査 において、全断面全塑性モーメントまで達するコンパク



図-1 二重合成 I 桁橋の構造概要(中間支点領域)³⁾

ト断面として設計することが可能となる ³ ⁴. また,現在 まで 60m以下の長さが経済的とされてきた I 桁橋 ³に,二 重合成構造を適用することによって,支間の長大化が可 能となると想定される.

今後,鋼・コンクリート二重合成 I 桁橋のさらなる長



図-2 曲げモーメントのみが作用する二重合成 I 桁断面

支間での適用を視野に入れた際, ラーメン構造の採用が考 えられる. そこで, 軸力, 曲げモーメントならびにせん断 力が単独に作用する場合の照査だけでなく, 曲げモーメン トとせん断力, 軸力, 曲げモーメントならびにせん断力が, 同時に作用する場合の照査も必要となってくる.

そこで、本文は、二重合成断面に断面力がそれぞれ単独 または複数が同時に作用する場合の相関式を誘導するとと もに、数値計算を行い、その影響評価を行った結果につい て報告する.

2. 二重合成 I 桁断面における終局耐力相関式の誘導⁴

(1) 相関式の誘導条件

相関式を誘導するにあたり、以下の条件を設定する.

- 1) コンクリート床版と鋼桁に、ずれは生じない.
- 2) コンクリート部分の軸方向力は、圧縮強度の 85%の 応力が作用する等価応力ブロックとし 9, 鋼部材の 軸方向力は、設計降伏強度の応力が作用するものと する(鋼の応力一ひずみ関係は、完全弾塑性モデル である).
- 3) コンクリートの引張強度は圧縮強度と比べ, 19-1/13 であるため、引張力が作用することで多くの場合ひ び割れが生じるため、引張力を受けるコンクリート 部分は無視することとする.ただし、床版内の橋軸 方向鉄筋は抵抗断面として考慮する.
- 4) せん断力は、全て鋼桁ウェブで負担するものとする.
- 5)応力分布の符号は、正を引張、負を圧縮とする.
- 6)断面は、全塑性モーメントまで達することができる コンパクト断面とする.

(2) 曲げ耐力

一例として、塑性中立軸が下床版内に存在する場合の終

局耐力相関式の誘導を行う.

曲げモーメントのみが作用する場合における二重合成 I 桁断面の応力分布を図-2に示す.

鉄筋の軸方向力 N_n 鋼の軸方向力 N_{ub} N_{ud} , $N_$

$$N_{r} = mnf_{yd}A_{r}$$

$$N_{u} = f_{yd}b_{u}t_{u}$$

$$N_{w1} = f_{yd}(x-t_{u}-h_{a})t_{w}$$

$$N_{w2} = f_{yd}(h_{au}+t_{u}+h_{w}-x)t_{w}$$

$$N_{\ell} = f_{yd}b_{\ell}t_{\ell}$$

$$N_{c\ell} = 0.85 f_{cd\ell}b_{c\ell}(h_{au}+t_{u}+h_{w}-x)$$

$$(1)$$

- ここに, x : 上床版上縁から下床版内に位置する塑性 中立軸までの距離(mm)
 - m:鉄筋の段数
 - n :1段に存在する鉄筋の本数
 - Ar: :鉄筋1本あたりの断面積(mm²)
 - *hau* : 上床版厚(mm)
 - *b*_{au}:上床版の有効幅(mm)
 - t_u : 上フランジ厚(mm)
 - b_u :上フランジ幅(mm)
 - h_w :ウェブ高(mm)
 - *t*_w : ウェブ厚(mm)
 - t_l :下フランジ厚(mm)
 - b_{ℓ} :下フランジ幅(mm)
 - *b*_c:下床版の有効幅(mm)
 - $f'_{cd,\ell}$: 下床版の設計圧縮強度(Nmm²)
 - f_{nd} : 鋼の設計降伏強度(N/mm²)
 - f_{vd} : 鉄筋の設計降伏強度(Nmm²)
 - Nr: :鉄筋の軸方向力(N)
 - N_u : 上フランジの軸方向力(N)



図-3 せん断力のみが作用する二重合成 I 桁断面

*N*_{w1}:ウェブの軸方向力(引張側)(N)
 *N*_{w2}:ウェブの軸方向力(圧縮側)(N)
 *N*_ℓ:下フランジの軸方向力(N)
 *N*_α:下床版の軸方向力(N)

つぎに,引張域の鉄筋,引張および圧縮域の鋼,圧縮域 の下床版の軸力のつり合いより,上床版上縁から塑性中立 軸位置までの距離 *x* は,以下の式から求めることができる.

$$x = \frac{N_{\ell} - N_{r} - N_{u} + f_{yd}t_{w}(2h_{cu} + 2t_{u} + h_{w})}{2f_{yd}t_{w} + 0.85f_{cd,\ell}b_{c\ell}} + \frac{0.85f_{cd,\ell}b_{c\ell}(h_{cu} + t_{u} + h_{w})}{2f_{yd}t_{w} + 0.85f_{cd,\ell}b_{c\ell}}$$
(2)

さらに, 塑性中立軸まわりのモーメントの合計より, 二 重合成 I 桁断面の全塑性曲げ耐力 *M*_pは, **式(3)**で与えられ る.

$$M_{p\ell} = N_r \left(x - y_r \right) + N_u \left(x - h_{cu} - \frac{t_u}{2} \right) + N_{w1} \frac{\left(x - h_{cu} - t_u \right)}{2} + N_{w2} \frac{\left(h_{cu} + t_u + h_w - x \right)}{2} + N_\ell \left(h_{cu} + t_u + h_w + \frac{t_\ell}{2} - x \right) + N_{c\ell} \frac{\left(h_{cu} + t_u + h_w - x \right)}{2}$$
(3)

(3) せん断耐力

せん断力のみが作用する二重合成 I 桁断面の応力分布を 図-3 に示す.

ここで、全塑性せん断力は以下の式で表される.

$$Q_{p\ell} = \tau_y A_w = \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} h_w t_w \tag{4}$$



ここに, Q_n : 全塑性せん断力(N)

A_w : ウェブの断面積(mm²)

(4) 軸耐力

圧縮軸力が作用する二重合成 I 桁断面における応力分布 を図4に示す.

コンクリートの軸方向力 N_{α} , N_{α} および鉄筋, 鋼の軸方 向力 N_{ν} , N_{ν} , N_{ν} , N_{ℓ} より, 全塑性圧縮軸力は以下の式で与 えられる.

$$N_{p\ell} = N_{cu} + N_{c\ell} + N_r + N_u + N_w + N_\ell$$
 (5)

なお、上床版の軸方向力 Nauの値を求める際、上床版の 断面積から橋軸方向鉄筋の断面積を差し引いている

(5) N-M-Q 相関式

二重合成 I 桁断面に圧縮軸力が作用した場合の N-M-Q 相関式の誘導を行う.

一例として,塑性中立軸がウェブ上に存在する場合の応力分布を図5に示す.このときの作用曲げモーメント *M* は次式で表される.

$$M = M_{p\ell} + 0.85 f'_{cd,\ell} b_{c\ell} \left(x + h_{c\ell} - h_{cu} - t_u - h_w \right)$$

$$\cdot \left(\frac{x}{2} - z - \frac{h_{cu} + t_u + h_w - h_{c\ell}}{2} \right)$$

$$+ 2 f_{yd,\varrho} t_w \left(x + h_{c\ell} - h_{cu} - t_u - h_w + d_4 \right)$$

$$\cdot \left(\frac{x}{2} - z - \frac{h_{cu} + t_u + h_w - h_{c\ell}}{2} + \frac{d_4}{2} \right)$$
(6)

また,作用軸力Nは、以下の式で表される.

$$N = 0.85 f'_{cd,\ell} b_{c\ell} \left(x + h_{c\ell} - h_{cu} - t_u - h_w \right) + 2 f_{yd,Q} t_w \left(x + h_{c\ell} - h_{cu} - t_u - h_w + d \right)$$
(7)



図-5 塑性中立軸がウェブ上に存在する時の二重合成 I 桁断面における応力分布

よって、式(6)と式(7)より、*N-M-Q*相関式は以下の式で表 すことができる.

$$\frac{M}{M_{p\ell}} + \alpha \left(\frac{N}{N_{p\ell}}\right)^2 + \beta \left(\frac{N}{N_{p\ell}}\right) + \gamma = 1$$
(8)

$$\alpha = \left(\frac{1}{4f_{yd,Q}t_w}\right) \frac{N_{p\ell}^2}{M_{p\ell}}$$
$$\beta = \left[-x + z\right]$$
$$-\frac{0.85f'_{cd,\ell}b_{c\ell}\left(x + h_{c\ell} - h_{cu} - t_w - h_w\right)}{2f_{yd,Q}t_w} \frac{N_{p\ell}}{M_{p\ell}}$$

$$\begin{split} \gamma &= \left[-0.85 \, f_{cd,u}' b_{cu} \left(x + h_{c\ell} - h_{cu} - t_w - h_w \right) \right. \\ &\left. \cdot \left\{ \frac{\left(3x + h_{cu} + t_w + h_w - h_{c\ell} \right)}{2} - 2z + 0.85 f_{cd,\ell}' b_{c\ell} \right. \\ &\left. \cdot \frac{\left(x + h_{c\ell} - h_{cu} - t_w - h_w \right)}{4 f_{yd,Q} t_w} \right\} \right] \frac{1}{M_{p\ell}} \end{split}$$

ここで、断面に軸力が作用した際、曲げモーメントが作 用しない位置(以下、基準線と呼称)を求める必要がある. 全軸力による基準線位置に作用する曲げモーメントとそれ ぞれの軸方向力による曲げモーメントの合計は等しいので、 上床版上縁から基準線までの距離 z は以下の式から求める ことができる.

$$z = \frac{N_{cu} \frac{h_{cu}}{2} - N_{cr} y_r + N_r y_r + N_u \left(h_{cu} + \frac{t_u}{2}\right)}{N_{cu} - N_{cr} + N_r + N_u + N_w + N_\ell + N_{c\ell}} + \frac{N_w \left(h_{cu} + t_u + \frac{h_w}{2}\right) + N_\ell \left(h_{cu} + t_u + h_w + \frac{t_\ell}{2}\right)}{N_{cu} - N_{cr} + N_r + N_u + N_w + N_\ell + N_{c\ell}} + \frac{N_{c\ell} \left(h_{cu} + t_u + h_w - \frac{h_{c\ell}}{2}\right)}{N_{cu} - N_{cr} + N_r + N_u + N_w + N_\ell + N_{c\ell}}$$

3. 各相関式のパラメーター解析例

(1) 計算条件

二重合成 I 桁断面における各相関式を用いた数値計算を 行う上で対象とした二重合成断面を図-6 に示す.ここで、 鋼の材質は SM570-H材、鉄筋は DI9(SD345)、コンクリート の特性値は $f_d = 40$ N/mm²とし、各種材料の部分安全係数な どは表-1 に示す値とする ⁹.また、引張域のコンクリート は無視し、コンクリート中に存在する橋軸方向鉄筋のみを 考慮した場合、曲げモーメントのみが作用する断面におけ る塑性中立軸は、下床版下縁から 780mm となった.した がって、対象断面に曲げモーメントのみが作用するとき、 塑性中立軸は下床版内に存在しており、ウェブに局部座屈 が生じないことがわかる.

(2) 計算結果

各計算結果は、全塑性軸力、全塑性曲げモーメントおよ び全塑性せん断力で除し無次元化したものである.

a) M-Q相関曲線

軸力が作用しない、つまり、 $N/N_{pc}=0.0$ の場合の数値計 算から得られた M-Q 相関曲線を図-7 に示す. 同図には、 参考のため、二重合成断面と同じ断面寸法で、下床版を有 しない従来の合成断面における相関曲線およびユーロコー ド(Eurocode)[®]と鋼・合成構造標準示方書[®]によって規定され ている相関式より得た相関曲線も併せて示す.

図-7 より、二重合成断面より得た相関曲線は、 $Q/Q_{\chi}=$ 08 程度まで M/M_{μ} は緩やかな低下であったが、それ以降、急激に低下する結果となった.また、同図より、従来の合成断面は、 $Q/Q_{\chi}=10$ のとき $M/M_{\mu}=00$ となったが、二重合成断面において、 $Q/Q_{\chi}=10$ のとき $M/M_{\mu}=0.75$ となり、 Q/Q_{χ} の値が大きくなるにつれて、 M/M_{μ} の差が大きくなることがわかった.以上より、下床版を有する場合、コンクリートが寄与することで、下床版を有さない場合に比べて、

37-4

(9)

M/Mpは、大幅に低下しないことがわかった.

つぎに、Eurocodeでは、ウェブの降伏強度 f_{dw} の低減係数 ρ を以下のように示している.

$$f_{yd,w} = (1 - \rho) f_{yd}$$
(10)

$$\rho = 0 \qquad \left(\frac{Q}{Q_{p\ell}} \le 0.5\right) \qquad (11)$$

$$\rho = \left(\frac{2Q}{Q_{p\ell}} - 1\right)^2 \quad \left(\frac{Q}{Q_{p\ell}} > 0.5\right) \tag{12}$$

また,鋼・合成構造標準示方書では,曲げモーメントお よびせん断力が同時に作用する場合の合成断面力に対する 照査式(4 乗則式)が規定されており,以下にその式を示す.

$$\left(\frac{M}{M_{p\ell}}\right)^4 + \left(\frac{Q}{Q_{p\ell}}\right)^4 = 1.0 \tag{13}$$

Euroxcde および鋼・合成構造標準示方書における相関式 は従来の合成桁橋を対象としており、今回の比較は参考値 であるが、今後、二重合成 I 桁橋の簡易的な相関式の提案 を行う必要があると考える.

b) N-M-Q 相関曲線

数値計算より N-M-Q 相関曲線を図-8 に示す. 同図には, $Q/Q_{\mu}=00, Q/Q_{\mu}=0.7$ ならびに $Q/Q_{\mu}=0.9$ のせん断力が同時に作用したときの相関曲線も併せて示している.

図-8より、本断面は、 N/N_{μ} が約 02 となるとき、3つの 曲線において M/M_{μ} は最大値を示している.つまり、 N/N_{μ} = 02 のとき、塑性中立軸は、全圧縮軸力作用時にモーメン トが作用しない位置(2.(5)、図-5 における z の位置)に存在 することがわかる.

つぎに、*NM* 相関曲線の面積(以下,安全領域と呼ぶ)を, 一例として $Q/Q_{R}=09$ の場合を図-8に示す。断面力が*NM-Q* 相関曲線の内側,すなわち,原点側に入る時,安全性の 照査を満たすこととなる.

4. 照查例

単独の断面力で照査された試設計結果¹⁰を参考に,今回 誘導を行った*NM-Q*相関式を用いて,二重合成 I 桁断面 の照査を行う.対象橋梁の断面および側面を図-9 および図 -10 に示す.ここで,鋼の材質,鉄筋径と材質ならびにコ ンクリートの特性値はパラメーター解析に用いたものと同 様とし,部分安全係数の値も表-1 に示す値とする.本断面 における断面力における単独の照査結果を表-2 および軸力,



図-6 二重合成断面(単位:mm)

| 表-1 | 部分女主徐叙" | | | | | |
|-----|---------|--|--|--|--|--|
| | | | | | | |

| | 合成前死荷重 | 1.10 |
|--------|----------------------|------|
| 作用係数γf | 合成後死荷重 | 1.20 |
| | 活荷重 | 1.20 |
| 荷重 | 1.65 | |
| 構造 | 1.00 | |
| 材料係数ym | コンクリートγ _c | 130 |
| | 鋼材ys | 1.05 |
| | 鉄筋yr | 1.00 |
| 音 | 1.10 | |
| 構 | 1.10 | |



曲げモーメントならびにせん断力が同時に作用していることを考慮した場合の相関曲線を図-11 にそれぞれ示す.図-11には表2で得た照査結果を併せて示している.

表-2 より、軸力およびせん断力に比べ、曲げモーメントの値が大きく、支配的であった.また、文献 10)より、曲 げモーメントのみの照査において、照査値は 1.0 となって いるが、軸力、曲げモーメントならびにせん断力が同時に 作用する場合、図-11 より、*N-M-Q* 相関曲線内に存在する ことがわかる.



図-10 対象橋梁の側面(単位:mm)

5. まとめ

本論文は、二重合成 I 桁断面における *M-Q* および *N- M-Q* 相関式を誘導するとともにパラメーター解析を行った.

今回の数値計算結果より、以下のことが明らかになった.

- 軸力が作用していない M-Q 相関の照査において、 二重合成 I 桁断面と従来の合成桁断面を比較する と、下コンクリート床版が寄与することで、合成 桁断面に比べ二重合成 I 桁断面の M / M_{pt}は、大幅 に低下しない。
- パラメーター解析において、Q/Q_{pt}=0.0の安全領域の面積を基準としたとき、Q/Q_{pt}=0.7の場合、約11%、Q/Q_{pt}=0.9の場合、約24%減少しているため、相関関係を考慮した照査を行う場合は留意する必要がある。
- 3) 試設計を用いた照査例から、曲げモーメントのみの照査において、その値は1.0となったが、N-M-Q相関曲線内に存在することより、同時に断面力が作用している場合でも安全性の照査を満足することを確認することができた。



表-2 単独の断面力における照査結果

| | 軸力 | 曲げ | せん断力 | |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--|
| | (kN) | (kN • m) | (kN) | |
| 作用力(S _d) | 7.49×10 ³ | 1.61×10 ⁵ | 8.70×10 ³ | |
| 耐力(R_d) | 178×10 ³ | 1.61×10 ⁵ | 31.6×10 ³ | |
| $\gamma_i S_d / R_d$ | 0.042 | 1.000 | 0.275 | |

参考文献

- 栗田章光,大山 理,マーカスルートナー:二重合成連 続箱桁橋の現状と課題,第4回 複合構造の活用に関する シンポジウム講演論文集, pp.45-57, 2001.8.
- 大山 理,大久保宣人,夏秋義広,栗田章光:ラーメン 形式の鋼・コンクリート二重合成 I 桁橋の提案,第5回 複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集,pp.29-32,2003.11.
- 3) 大山 理, 栗田章光:二重合成2主I桁橋の下コンクリート床版に配置された鉛直および水平スタッドの静的および疲労挙動に関する研究,構造工学論文集 Vol.57A, pp.978-986, 2011.3.
- 4) 土木学会:基礎からわかる複合構造―理論と設計―, pp.71-78, 丸善㈱, 2012.3.

- 5) (社)日本橋梁建設協会:新しい鋼橋の誕生Ⅱ, 2003.5.
- 6) 小林和夫:基礎土木工学シリーズ 6 コンクリート工学 第4版, pp.48-50, 森北出版(株), 2012.3.
- 1) 土木学会:複合構造シリーズ 01 複合構造物の性能照査 例, pp.3-15, 丸善㈱, 2006.1.
- CEN : Eurocode 4-design of composite steel and concrete structure-Part 1-1 : General rules and rules buildings, prEN 1994-1-1, 2002.
- 9) 公益社団法人 土木学会:2016年制定 鋼・合成構造標準示 方書(総則編・構造計画編・設計編),2016.7.
- 木部謙吾,大山理,大久保宣人,栗田章光:(CS2-001)
 二重合成複合ラーメンI桁における下コンクリート床版の施工法と試設計,pp.41-42,土木学会第64回年次学術講 演会,2009.9.

N-M-Q Interaction of Cross Sections in Steel-Concrete Double Composite Girder Bridges

Bungo NISHIOKA, Yusuke IMAGAWA and Osamu OHYAMA

The composite structures with steel and concrete have been extensively used to Japanese bridges. However, there are some disadvantages in the range of intermediate supports. Therefore, recently, a double composite structure is also watched in Japan. This is a structure of composite I girder bridges with lower concrete slab which is one of the major characteristics of double composite structures. For designing this structure, under the action of each sectional forces and each combination should be confirmed at which all cross section is in full plastic. Therefore, in this paper, the cross-sectional interaction relationships are discussed and numerical results are reported.