

(論文)

# 合成2主桁橋の床版結合部の橋軸直角方向応力

## Stress Due to Transverse Deformation in Two-Girder Composite Bridge



埴 洋二\*  
Yoji Hanawa



山田岳史\*(工博)  
Dr. Takeshi Yamada



内藤純也\*  
Junya Naito



沼田 克\*\*  
Katsu Numata



山田節也\*\*  
Setsuya Yamada

In order to clarify the load transfer mechanism, the stress developed at the connection to a concrete slab on a composite 2-l girder bridge was investigated using finite element structural analysis (based on the measured strain data of the studs and vertical stiffeners). Results showed that it was important to take into account the steps in the construction process in order to estimate the stress under the wheel loading. A stud model with node merge above the web proved to be an effective connection modeling method for FE analysis. A moment estimation equation to assess developed stress was also developed.

まえがき = 昨今の建設コスト縮減要求に対応して、道路橋においてプレストレストコンクリート(PC)床版を用いた鋼・コンクリート合成2主桁橋が多く建設されている。橋梁の断面設計時に床版剛性を考慮する必要のある合成桁橋においては、コンクリート床版と鋼桁との結合部は最も重要な構造要素の一つであるが、通常検討される結合部の橋軸方向の挙動に加え、床版の長支間化に伴い橋軸直角方向の挙動にも注意を払う必要があることが最近になって認識されてきた。スタッド配置の違いが結合部応力に影響することは指摘されているが<sup>1)</sup>、結合部での詳細な力の伝達機構は十分明らかにされたとは言えない。主桁のねじれが拘束される横桁位置において、模型試験の床版打設初期に床版にクラックが生じ、実橋のスタッド配置に配慮を加えた事例も報告されており<sup>2)</sup>、床版の耐久性、ずれ止めや鋼桁の疲労の面から、橋軸直角方向の挙動を明らかにし、評価する手法が求められている。

本稿では、異なるずれ止め配置による結合部の輪荷重載荷時の発生応力の違いを計測結果から示し、有限要素解析で鋼桁と床版の力の伝達機構を検討する。更に、横桁位置での鋼桁と床版の結合部に発生する応力を、簡易に評価する手法を提案する。

### 1. 橋軸直角方向の変形挙動

まず図1で橋軸直角方向の変形挙動を説明する。主桁間の床版上に荷重が載荷されると、床版に曲げ変形が生じ、横桁と横桁の間部では主桁全体が床版の変形に追従してハの字に変形する。横桁取付け位置付近では、この変形が横桁により拘束されるため、床版との結合部である上フランジ付近のみが床版に沿って変形することになる。この現象は、供用中の載荷荷重のみならず、建設過程での壁高欄や遮音壁の設置時、コンクリート床版への横締めプレストレス導入時などにも生じ、主桁間隔や床版の張出し部が長くなるとその影響が顕著になる。こ

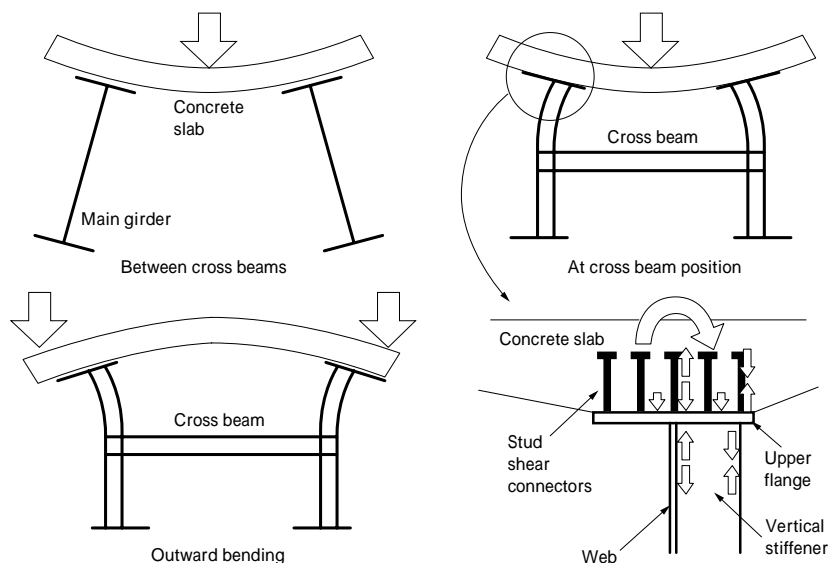


図1 橋軸直角方向の変形と力の伝達  
Fig. 1 Transverse deformation and force transfer

\*技術開発本部 機械研究所 \*\*都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部

の変形による橋軸直角方向の力は、床版と主桁間のずれ止めである頭付きスタッドの引抜き力、あるいは鋼フランジと床版の圧縮力により鋼主桁に伝えられ、応力集中の原因となる。

## 2. 静的輪荷重載荷試験と有限要素解析<sup>3)</sup>

### 2.1 静的輪荷重載荷試験

スタッドと横桁取付用垂直補剛材との相対位置関係と橋軸直角方向変形挙動により発生する応力との関係を調べるために、PC床版4径間連続合成2主プレートガーダ橋である東海北陸道日計平(ひばかりだいら)高架橋(日本道路公団)において静的輪荷重載荷試験が行われた。図2に対象橋梁の一般断面図を示す。測定点として、図3に示すとおりG1主桁側では垂直補剛材がスタッド列のほぼ真下に位置し、G2主桁側では垂直補剛材がスタッド列と列の間に位置する横桁C5を選んだ。垂直補剛材のこぼ面とスタッドにはひずみゲージを貼付け、45tonラフテレーンクレーン(総重量37ton、軸重18.8ton)を1台もしくは2台使用して、輪荷重載荷時のひずみの変化量を計測した。図4に、着目点において内曲げ及び外曲げが大きくなる載荷状態を示す。図5は輪荷重載荷時のひずみ変化の測定結果の例であり、スタッド列と列との間に垂直補剛材が配置されたG2主桁においては、スタッド列が垂直補剛材のほぼ真上となるG1主桁と比較して

発生応力が著しく小さかった。これにより、スタッドが垂直補剛材から離れて配置されるとひずみが低くなることが確認された。

### 2.2 有限要素解析

静的輪荷重載荷試験結果を有限要素解析を用いて検討する。図6に解析モデルを示す。測定点付近の鋼桁はシェ

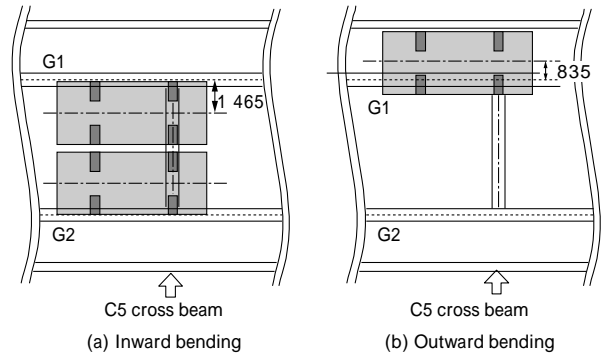


図4 クレーンの載荷位置  
Fig. 4 Loading configuration of cranes

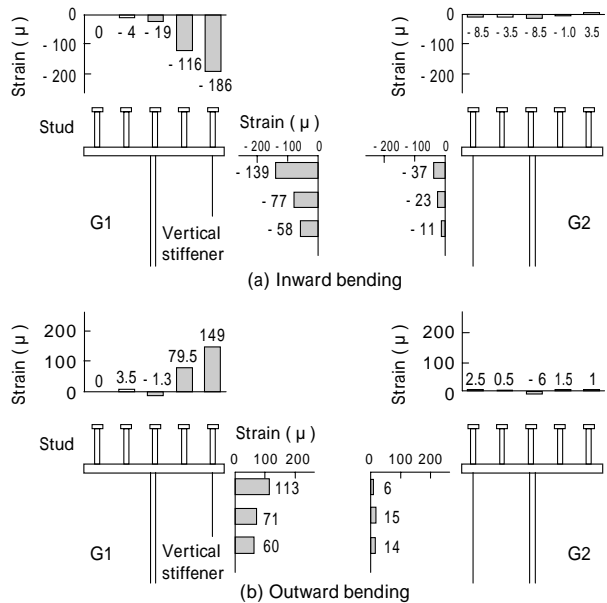


図5 輪荷重載荷時のひずみ変化  
Fig. 5 Strain variation due to wheel loading

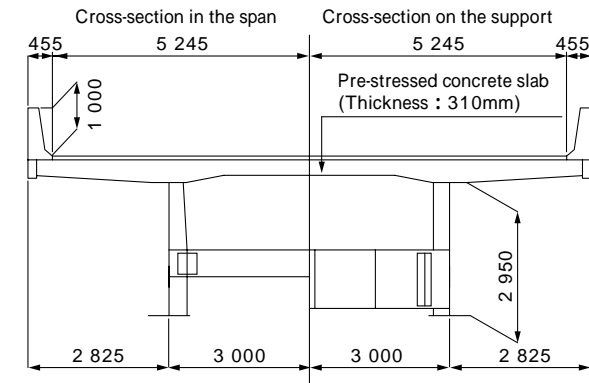


図2 対象橋梁の一般断面  
Fig. 2 General cross-section of bridge

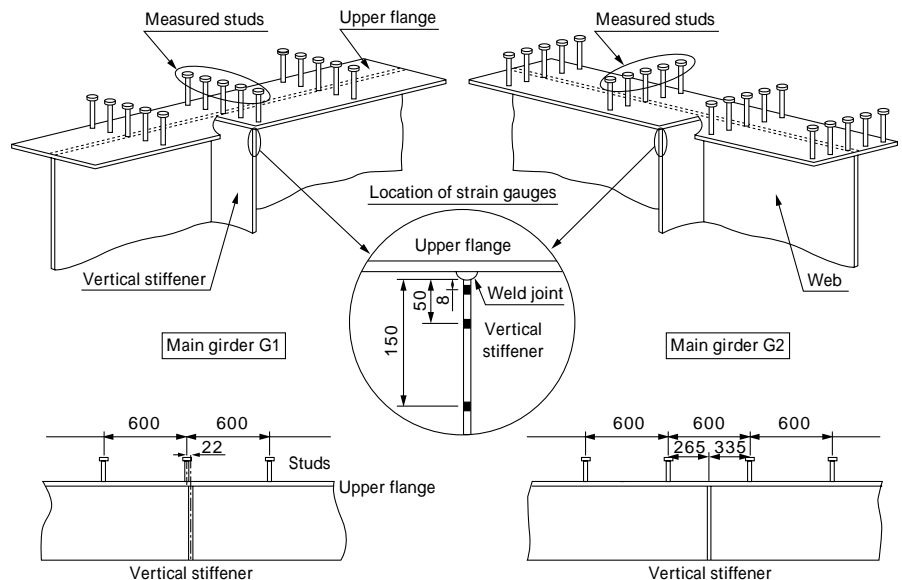


図3 ひずみゲージ貼付け位置  
Fig. 3 Location of strain gauges

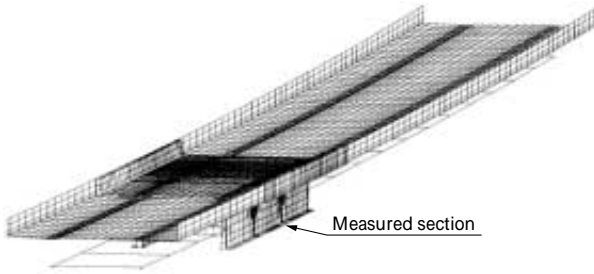


図6 解析モデル (A1 ~ P2)  
Fig. 6 Analysis model (A1 ~ P2)

ル要素, 床版はソリッド要素, スタッドははり要素でモデル化した。床版と主桁との結合部は, 3通りの簡易的なモデル化をして比較を行った(図7)。ウェブ上合成モデルとは, スタッド位置のみで床版とフランジとを結合させたスタッドモデルに加え, ウェブ上のフランジ節点と同位置の床版節点とを同一としたものである。これは接触状態を考慮した事前の自重載荷解析により, 施工完了状態で, 既にウェブ上に高い接触圧が作用していることを考慮したものである。

図8には図4で示した内曲げ載荷のG1側1台のみ載荷した条件でのスタッドのひずみ変化量の計測値及び解析値を, 図9にこば面でのひずみ変化量の計測値及び解析値を示す。完全合成モデルでは, 床版と鋼桁との力の伝達が主に接触面で行われるため, 計測結果と異なってスタッド要素には力がほとんど伝達されない。スタッドモデルでは, 実測とほぼ近い傾向を捉えられているものの, コンクリートとフランジの支圧が無視されているの

で, G2桁側でのウェブ上のスタッド応力に違いが出ている。施工完了時の自重の影響を考慮したウェブ上合成モデルでは, この点で実測値に近い値を出しているといえる。同図には床版とフランジの接触を考慮し, 輪荷重載荷前の死荷重(床版自重と壁高欄荷重)の影響を考え合わせた詳細接触解析結果も示しているが, この値は実測値と良く一致している。

これらの解析結果より以下のことが推測できる。施工終了時には, ウェブ付近のコンクリートが圧縮力を伝達し, 内側スタッドが引張りになる外曲げ状態にある。輪荷重載荷時には, 外曲げが緩和されてスタッド引張り軸力が減少するとともに, 鉛直荷重によりコンクリート支圧面積が増加して圧縮力やモーメントを伝えている。

これらの検討結果を元に設計段階でこの挙動を簡易に評価できる手法を以下に提案する。

### 3. 結合部の簡易応力評価方法の提案<sup>4)</sup>

#### 3.1 拘束モーメント

図10は床版の1自由度ねじりはりへのモデル化の概念図である。左右ほぼ対称な合成2主桁橋を対象とし, 1主桁分を考える。橋軸直角方向の力の伝達は主に床版のねじれ挙動によるものと捉えて, 以下の釣合い関係と境界条件が導かれる。

$$\cdot \text{死荷重} : G_c J_c \cdot - \frac{D}{l} = - M_D / l \dots\dots\dots(1)$$

$$[\text{横桁位置で} = \frac{G_c J_c}{C/2}, \text{横桁間中央で} \cdot = 0]$$

図7 床版 - 主桁間のモデルの概念図  
Fig. 7 Schematical description of connection modeling between steel and concrete

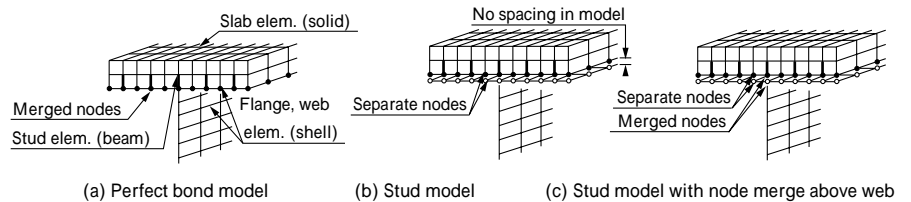


図8 スタッド軸ひずみの変化量  
Fig. 8 Axial strain variation of studs

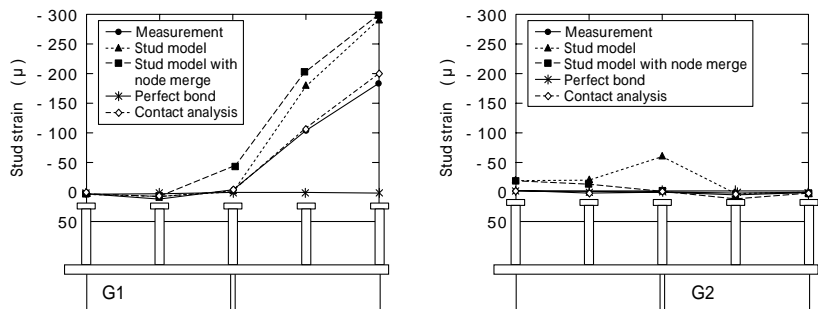
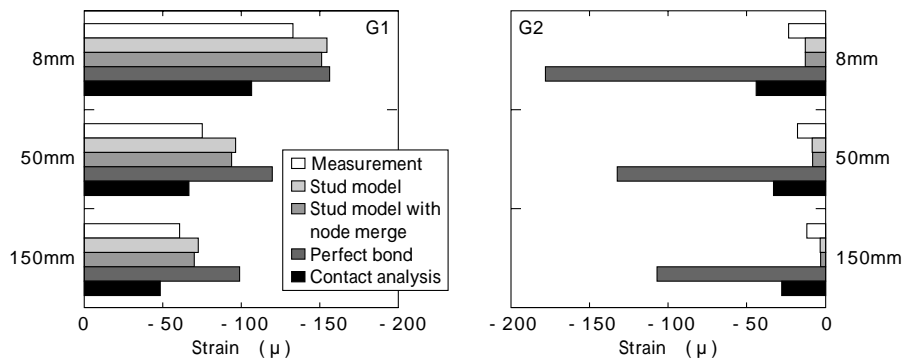


図9 こば面のひずみの変化量  
Fig. 9 Strain variation on edge



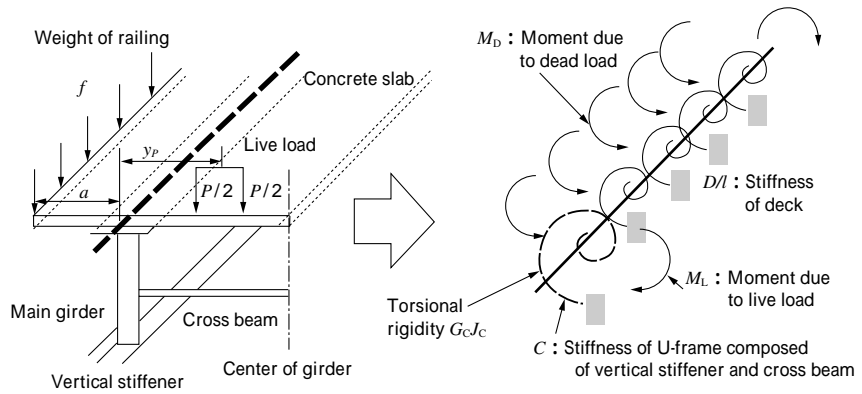


図10 合成桁のねじり梁へのモデル化  
Fig.10 Modeling of composite girder as torsion beam

$$\cdot \text{活荷重} : G_C J_C \cdot \frac{D}{l} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$[\text{横桁位置} = \frac{1}{C/2}(G_C J_C \cdot M_L/2), \text{横桁間中央} = \frac{G_C J_C \cdot l}{C/2}]$$

ここで、 $G_C$ :床版のせん断弾性係数、 $J_C$ :床版半幅のねじれ定数、 $\alpha$ :ねじれ角、 $b$ :主桁間隔、 $l$ :横桁間隔である。 $C$ は横桁 垂直補剛材(有効なウェブ含む)からなるU形フレームの曲げ剛性、 $D$ は横桁間幅の床版の曲げ剛性である。死荷重によるモーメント  $M_D$  は、壁高欄荷重  $f$  による  $-fal$  ( $a$ :張出し長)のほか、床版支間部と張出し部の重量や横締めプレストレスの不均衡モーメントを適宜考慮するものとする。活荷重によるモーメント  $M_L$  は集中活荷重  $P$  及びウェブからの集中活荷重中心位置  $y_p$  を用いて、

$$M_L = P y_p (\text{外曲げ}), = P y_p (b - y_p) / l (\text{内曲げ}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

と表される。活荷重は、内曲げの照査時には主桁間に、外曲げの照査時には張出し部に載荷されるものとする。上記方程式を解いて、横桁の拘束モーメント  $M_b$  は、

$$M_b = M_D \frac{2 - 2 \exp A}{A - B + (A + B) \exp A} + M_L \frac{A(A + B) - A(A - B) \exp 2A}{(A^2 - B^2)(1 - \exp 2A)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\approx \frac{C}{C + D} (M_D + M_L) \quad \dots\dots\dots(5)$$

と求められる。ここで、 $A = Dl/G_C J_C$ 、 $B = 2D/C$  である。

近似式(5)は、床版曲げ剛性ばねと横桁 垂直補剛材からなるU形フレームの曲げ剛性ばねからなる並列ばね系にモーメントが作用したときに、後者にかかる曲げモーメントを表すと解釈することができる。なお式(5)は  $A = 1.5 \sim 2$  (主桁間隔 6m, 横桁間隔 10m, 床版張出し長 2m, 床版厚 300mm 程度) で式(4)の良い近似値を与えることを確認している。

図11は、主桁間隔 6m, 横桁間隔 10m, 床版幅 10m の合成主桁橋を、主桁と床版はシェル要素、結合部材は剛なはり要素でモデル化し、壁高欄荷重を作用させた有限要素解析により求めた、結合部モーメントの橋軸方向分布である。はりモデルでは、拘束モーメント  $M_b$  は横桁位置 1 点で伝えられるが、同図から実際は隣接する結合部材からも伝達していることがわかる。表1に結合部材の全モーメントと式(4),(5)とを比較する。近似式(5)は、式(4)とも、有限要素解析結果とも良い一致を示す。従って、近似式(5)で求めた拘束モーメントを有効なスタッド列数  $m$  (図11では4.1列)で割れば、ス

タッド1列あたりのピークモーメントを求めることができる。このスタッドの有効列数  $m$  は結合部材間隔を変えて上記と同様の解析を行い、内曲げ・外曲げの活荷重載荷時、壁高欄荷重載荷時のうちで最も小さい値を採用して、図12のとおりに定めることとした。

### 3.2 応力算出

以下に応力を算出する方法を提案する。まず式(6),(7)により、スタッド1列あたりのモーメント  $M$  と鉛直方向力  $N$  を、内曲げと外曲げが最大となる活荷重載荷

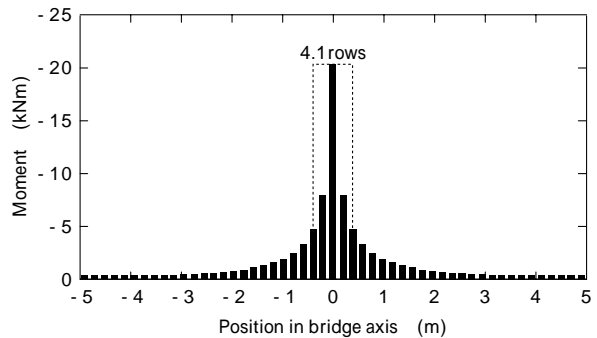


図11 結合部材のモーメント分布  
Fig.11 Moment distribution of connection elements

表1 拘束モーメント (kN・m)

Table 1 Constrained moment (kN・m)

	FEM	Eq.(4)	Eq.(5)
Dead load	- 83.7	- 85.3	- 90.9
Live load (outward)	- 33.8	- 37.0	- 34.1
Live load (inward)	62.8	68.9	63.6

Positive value : Inward bending

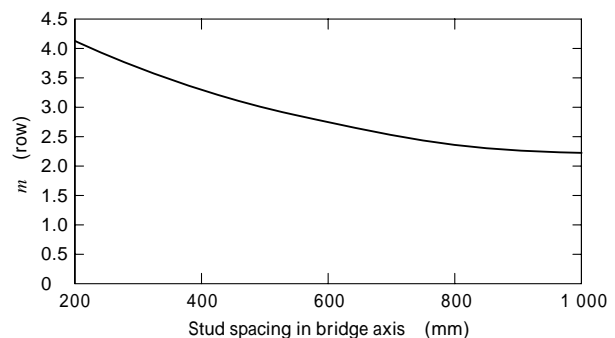


図12 スタッド間隔による係数  $m$

Fig.12 Moment reduction coefficient  $m$  in relationship with stud spacing

表2 1列あたりのモーメントと軸力の予測

Table 2 Estimation of moment and axial force of a row of studs

	D + PS	D + PS + L (1 vehicle)	D + PS + L (2 vehicle)
$M (kN \cdot m)$	- 6.3	1.8	7.8
$N (kN)$	- 30.8	- 64.9	- 99.1

D : Dead load, PS : Prestress of slab, L : Wheel load

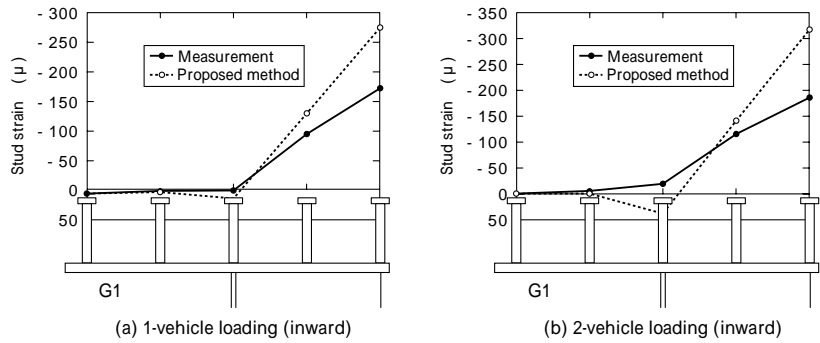


図13 G1桁のスタッドひずみの変化量  
Fig.13 Estimation of stud strain variation of G1 girder

位置に対して求める。

$$M = \frac{1}{m} \frac{C}{C+D} (M_D + M_L) \dots \dots \dots (6)$$

$$N = \frac{p_s}{l} N_D + \frac{1}{m} P \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $N_D$  は1主桁あたりの横桁間  $l$  の床版・壁高欄などの死荷重、 $p_s$  は応力照査位置でのスタッド間隔、 $N_L$  は活荷重である。そして、床版とフランジの結合部において線形ひずみ分布を仮定し、引張り側のコンクリートを無視した断面で、上記  $M$  及び  $N$  を満たすスタッド軸応力及びコンクリート支圧応力を算出して、照査に用いるものとする。ただし、垂直補剛材が主桁内側にのみある場合は、内側のスタッドのみが有効であるとする。

表2に実測を行った上記橋梁での輪荷重下のモーメントと鉛直方向力を提案手法により予測した値を示す。死荷重下では外曲げ状態であったが、1台の輪荷重下でも内曲げとなる結果となった。図13に輪荷重下でのG1桁側のスタッドひずみの変化量の測定結果と提案手法による値との比較を示す。提案手法で求まる接触状態は、内曲げとなると、鉛直方向力でコンクリートが全面支圧状態となる。全面が有効になるとモーメントが上昇しても応力の上昇は小さい。そのため、1台載荷と2台載荷の場合とでスタッドひずみの違いは曲げモーメントの違い程大きくない。この傾向は測定結果と合っており、また

本手法による評価は測定結果より安全側であるといえる。

むすび = 得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 合成2主桁橋において、スタッド配置が床版と鋼桁の結合部の橋軸直角方向応力に影響を与え、定量的な評価を行う上では架設段階の応力を考慮するのも重要であることがわかった。
- 2) 有限要素解析による簡易な評価として、ウェブ上合成モデルが有効であることを示した。
- 3) 設計面から床版と鋼桁結合部における応力を簡易に照査できる手法を提案し、輪荷重に対し安全側の評価を行えることを確認した。

なお本研究を行うにあたって、ご指導を賜りました日本道路公団水口和之氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 塙 洋二ほか：橋梁と基礎，Vol.33, No.1 (1999) p.15.
- 2) 本間淳史ほか：橋梁と基礎，Vol.36, No.10 (2002) p.2.
- 3) 山田岳史ほか：土木学会第55回年次学術講演会(2000) I-A284.
- 4) 塙 洋二ほか：土木学会第56回年次学術講演会(2001) I-A195.