

# 垂直補剛材上端の疲労亀裂を低減させるスタッド配置

大倉一郎<sup>1</sup>・塩崎哲也<sup>2</sup>・福本晴士<sup>3</sup>・南荘淳<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

<sup>2</sup>学生会員 大阪大学大学院生 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 Ph.D. 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 阪神高速道路公団神戸第二建設部調査課 (〒650 神戸市中央区東川崎町1-3-3)

道路プレートガーダー橋の横桁を主桁に連結するコネクションプレートと中間垂直補剛材の上端に発生する疲労亀裂を低減させるスタッド配置を明らかにする。最初に、コンクリート床版と主桁の上フランジとの間の荷重伝達モデルを開発する。次に、この荷重伝達モデルが導入された有限要素解析によって、スタッドの配置間隔とコネクションプレートあるいは垂直補剛材の上端の局部応力の関係を調べる。最後に、著者らが過去に得た研究成果とこのスタッドの配置間隔と局部応力の関係を統合することにより、コネクションプレートと垂直補剛材の上端に発生する疲労亀裂を低減させるスタッド配置（合成プレートガーダー橋の場合）とスラブ止め配置（非合成プレートガーダー橋の場合）を明らかにする。

**Key Words:** fatigue, stud shear connector, concrete slab, girder, stiffener, connection plate

## 1. 序論

道路プレートガーダー橋において、図-1に示すような疲労亀裂が横桁と主桁の連結部に発生している<sup>1)</sup>。これらの疲労亀裂は次のように分類される。

タイプ1：横桁の上フランジと主桁の上フランジとの間のコネクションプレートで、コネクションプレートと主桁の上フランジとの間の隅肉溶接に発生する疲労亀裂。

タイプ2：コネクションプレートの上側のスカラップの縁から発生し、コネクションプレートを斜めに伝播する疲労亀裂。

タイプ3：コネクションプレートを主桁ウェブに連結する隅肉溶接のスカラップ内のまわし溶接の溶接止端から発生し、コネクションプレート側の溶接止端に沿って伝播する疲労亀裂。

タイプ4：主桁の上フランジとウェブとの間の隅肉溶接で、ウェブ側の溶接止端に沿って発生・伝播する疲労亀裂。

これらの疲労亀裂は対傾構と主桁の連結部にも発生している<sup>1), 2), 3)</sup>。さらに横桁あるいは対傾構

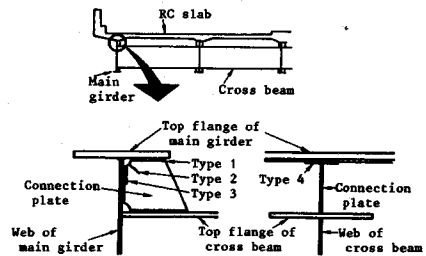


図-1 横桁と主桁の連結部に発生する疲労亀裂

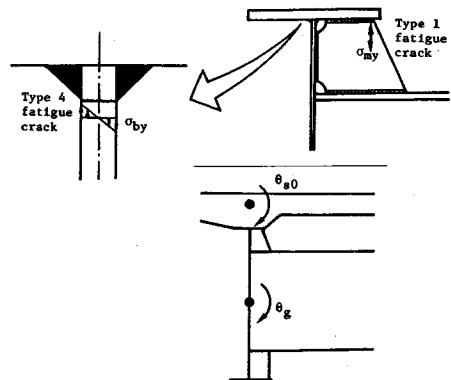


図-2 局部応力と回転角

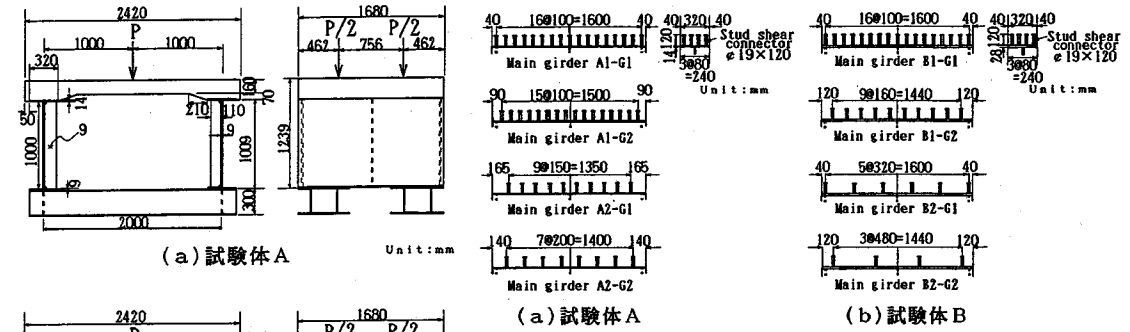


図-4 スタッドの配置

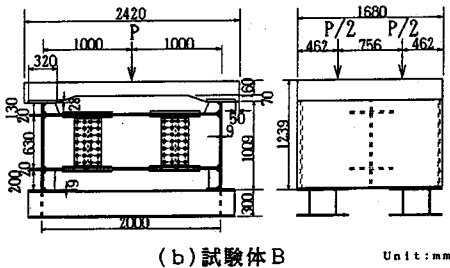


図-3 試験体

が取り付けられていない中間垂直補剛材の上端にも同種の疲労亀裂が発生している<sup>1)</sup>。したがって図-1に示す疲労亀裂は、横桁や対傾構の有無にかかわらず、コンクリート床版を支持するプレートガーダーの垂直補剛材の上端に特有な疲労亀裂であると言える。

著者らは、実橋の応力実測から、図-2に示すように、コンネクションプレートの上端に生じる鉛直方向の膜応力 $\sigma_{my}$ と主桁ウェブに生じる鉛直方向の板曲げ応力 $\sigma_{by}$ が、それぞれタイプ1とタイプ4の疲労亀裂に対して支配的な局部応力であることを明らかにした<sup>4), 5)</sup>。これらの局部応力はコンクリート床版の回転角 $\theta_{s0}$ と横桁の回転角 $\theta_g$ によって起こされる<sup>6), 7)</sup>。

著者らは、コンクリート床版の回転角 $\theta_{s0}$ が疲労亀裂発生に与える影響を調べるために、実橋の横桁の上フランジから上部と橋軸方向に45cmの幅のコンクリート床版を有する試験体の疲労試験を実施した<sup>8), 9), 10)</sup>。そして、この試験体の静的荷重試験の結果と有限要素解析の結果との比較から、スタッド(合成プレートガーダー橋の場合)あるいはスラブ止め(非合成プレートガーダー橋の場合)を横桁連結部の直上に設けないことにより、局部応力を低減させることができる可能性を示した。

さらに、これを確認するために、著者らは、橋軸方向に広幅の168cmのコンクリート床版と2本の主桁から成る試験体の疲労試験を実施した<sup>11)</sup>。前述

したように、実橋においては、横桁あるいは対傾構が取り付けられていない中間垂直補剛材の上端にも疲労亀裂が発生している。したがって、この疲労試験では、横桁を有する試験体の他に横桁が取り付けられていない、垂直補剛材のみを有する試験体も作製した。

本論文は、この疲労試験の結果に解析を加えることにより、道路プレートガーダー橋のコンネクションプレートと垂直補剛材の上端に発生する疲労亀裂を低減させるスタッド配置を明らかにする。最初に、コンクリート床版と主桁の上フランジとの間の荷重伝達モデルを開発する。次に、この荷重伝達モデルが導入された有限要素解析によって、スタッドの配置間隔とコンネクションプレートあるいは垂直補剛材の上端の局部応力の関係を調べる。最後に、プレートガーダー橋の主桁と横桁の連結部の疲労亀裂に関して、著者らが過去に得た研究成果とこのスタッドの配置間隔と局部応力の関係を統合することにより、コンネクションプレートと垂直補剛材の上端に発生する疲労亀裂を低減させるスタッド配置(合成プレートガーダー橋の場合)とスラブ止め配置(非合成プレートガーダー橋の場合)を明らかにする。

## 2. 疲労試験の概要<sup>11)</sup>

疲労試験が行われた試験体を図-3に示す。図-3(a)の試験体Aは横桁が取り付けられていない垂直補剛材のみを有する試験体である。図-3(b)の試験体Bは横桁を有する試験体である。主桁間隔は2mで、コンクリート床版の橋軸方向の長さは168cmである。試験体Aでは、80cm間隔で3箇所垂直補剛材が設けられている。試験体Bでは、横桁から80cm離れた2箇所に垂直補剛材が設けられている。コンクリート床版の厚さは16cmで、軽量骨材



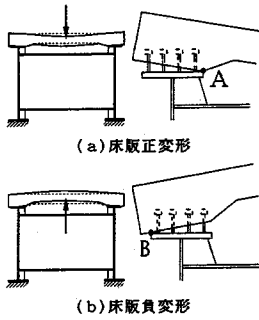


図-8 床版変形に対する、床版と主桁上フランジの間の変形挙動

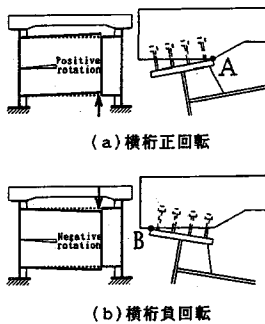
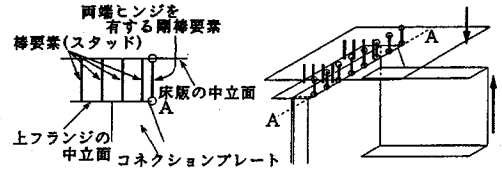


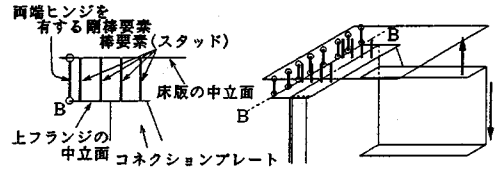
図-9 横桁回転に対する、床版と主桁上フランジの間の変形挙動

2章で述べた疲労試験に先立つ静的載荷試験において、図-8に示すように、床版正変形と床版負変形に対して、それぞれ、主桁の上フランジの点Aと点Bを支点として床版が回転しているように観察された。同様に、図-9に示すように、横桁正回転と横桁負回転に対して、それぞれ、主桁の上フランジの点Aと点Bを支点として主桁の上フランジが回転しているように観察された。

これらの観察に基づいて考案された床版と主桁の上フランジとの間の荷重伝達モデルを図-10に示す。図-10(a)は床版正変形と横桁正回転に対する荷重伝達モデルであり、図-10(b)は床版負変形と横桁負回転に対する荷重伝達モデルである。次章の有限要素解析において、コンクリート床版と主桁に対して使用される有限要素は板要素である。図-10(a)では主桁の上フランジの縁端A-Aの上フランジの中立面上の節点と床版の中立面上の節点が両端ヒンジの剛棒で連結され、図-10(b)では主桁の上フランジの縁端B-Bの上フランジの中立面上の節点と床版の中立面上の節点が両端ヒンジの剛棒で連結されている。スタッドに関しては、主桁の上



(a) 床版正変形と横桁正回転に対する荷重伝達モデル



(b) 床版負変形と横桁負回転に対する荷重伝達モデル

図-10 床版と主桁上フランジとの間の荷重伝達モデル

フランジの中立面上の節点と床版の中立面上の節点とが、スタッドの剛性を持つ棒要素で連結されている。

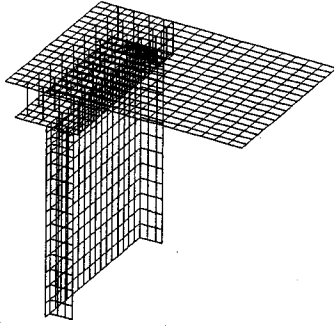
#### 4. スタッドの配置間隔と局部ひずみの関係

##### (1) 試験体の要素分割

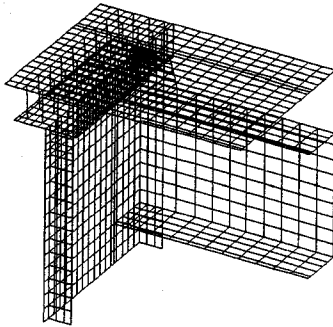
図-3の疲労試験が行われた試験体に対する要素分割を図-11に示す。図-11(a)と(b)は、それぞれ、試験体Aと、コンクリート床版に荷重が載荷された場合の試験体Bに対する要素分割である。図-4に示したように、試験体のスタッドの配置間隔は左右の主桁で異なる。しかし計算機の容量の制限から、試験体の1/4の部分が要素分割され、切断面に対称性の境界条件が設けられている。主桁のウェブと垂直補剛材の下端は固定されている。コンクリート床版に対して、載荷試験で採用された載荷位置と同じ位置で、かつ載荷試験で採用された載荷領域と同じ領域に等分布荷重を与える。

図-11(c)は、横桁に荷重が載荷された場合の試験体Bに対する要素分割である。試験体の1/2の部分が要素分割され、切断面に対称性の境界条件が設けられている。左側のウェブの下端と垂直補剛材の下端が固定されている。2mの主桁間隔の間のコンクリート床版が要素分割され、コンクリート床版の右端に単純支持の境界条件が設けられている。主桁間隔の半分、すなわち1mの長さの横桁が要素分割され、横桁の端部に鉛直方向の強制変位を与える。

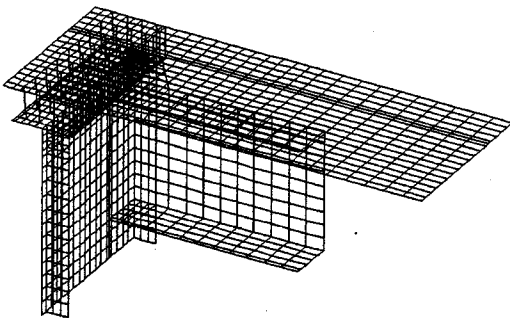
使用された有限要素は、1節点が6自由度から成る四角形または三角形の板要素である<sup>12)</sup>。前述の荷重伝達モデルに基づいて、コンクリート床版と主



(a) 試験体A



(b) コンクリート床版に荷重が載荷された場合の試験体B



(c) 横桁に荷重が載荷された場合の試験体B

図-11 試験体の要素分割

桁の上フランジとの間に両端ヒンジを有する剛棒とスタッドの剛性を持つ棒要素が設けられている。

(2)主桁ウェブの膜ひずみ  $\epsilon_{my}$  と板曲げひずみ  $\epsilon_{by}$  の分布

主桁の上フランジの下面より5cmほど下の位置の鉛直方向の膜ひずみ  $\epsilon_{my}$  と板曲げひずみ  $\epsilon_{by}$  の橋軸方向に沿う分布を図-12に示す。この分布は図-4の主桁B1-G1のスタッドの配置に対するもの

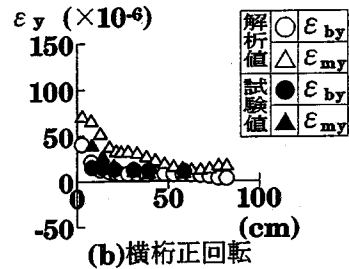
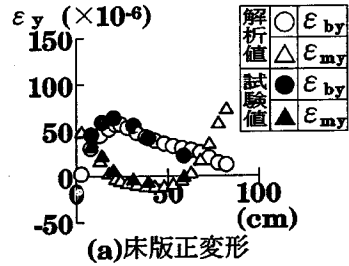
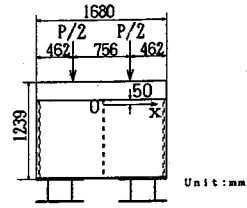


図-12 膜ひずみ  $\epsilon_{my}$  と板曲げひずみ  $\epsilon_{by}$  の橋軸方向に沿う分布 [主桁B1-G1]

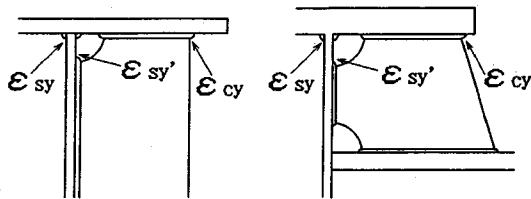
である。床版正変形に対して、 $\epsilon_{my}$  と  $\epsilon_{by}$  の解析値は各々の試験値に近い。横桁正回転に対して、 $\epsilon_{by}$  の解析値は試験値に近い。そして、 $\epsilon_{my}$  の解析値は試験値から少し離れているが、分布の傾向は同じである。

これより、前述の荷重伝達モデルが、コンクリート床版と主桁の上フランジとの間の荷重伝達を適切に表現していると言える。

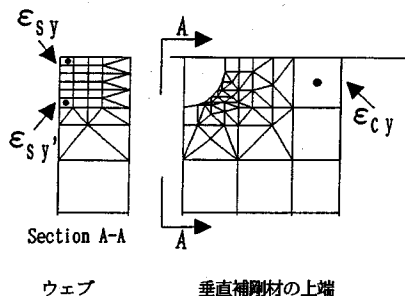
(3)着目ひずみとスタッドの配置間隔

スタッドの配置間隔とコネクションプレートあるいは垂直補剛材の上端の局部ひずみの関係を明らかにするために、両部材で着目するひずみを図-13に示す。次項で、静的荷重試験で得られたひずみと有限要素解析で得られるひずみの比較を行う。図-13(a)に示すように、静的荷重試験で与えられるひずみは次の通りである<sup>11)</sup>。

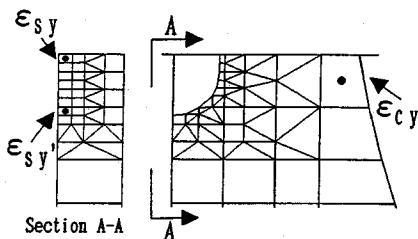
$\epsilon_{cy}$ : コネクションプレート (または垂直補剛材) の側面に貼付された応力集中ゲージが与える



垂直補剛材の上端                      コネクションプレート  
(a) 静的載荷試験で与えられるひずみ



ウェブ                      垂直補剛材の上端



ウェブ                      コネクションプレート

(b) 有限要素解析で与えられるひずみ

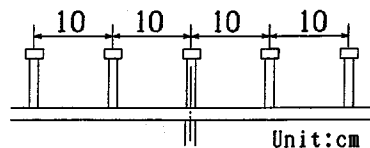
図-13 静的載荷試験で与えられるひずみと有限要素解析で与えられるひずみ

ひずみを直線外挿することによって得られる、まわし溶接のコネクションプレート側（または垂直補剛材側）の溶接止端の位置のひずみ

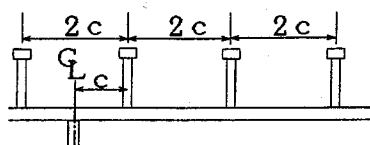
$\epsilon_{sy}$  : 主桁ウェブの外側表面に貼付された応力集中ゲージが与えるひずみを直線外挿することによって得られる、隅肉溶接のウェブ側の溶接止端の位置のひずみ

$\epsilon_{sy'}$  : コネクションプレート（または垂直補剛材）のスカラップ内の主桁ウェブの内側表面に貼付された応力集中ゲージが与えるひずみを直線外挿することによって得られる、スカラップのまわし溶接のウェブ側の溶接止端の位置のひずみ

図-13 (b) に示すように、有限要素解析で与え



(a) コネクションプレート（または垂直補剛材）の直上に設けられたスタッド



(b) コネクションプレート（または垂直補剛材）をまたいで設けられたスタッド

図-14 有限要素解析で考慮するスタッドの配置間隔

られるひずみは次の通りである<sup>12)</sup>。

$\epsilon_{cy}$  : コネクションプレート（または垂直補剛材）の上端の右端の要素中心の鉛直方向の膜ひずみ

$\epsilon_{sy}$  : 主桁ウェブの上端の左端の要素中心で、外側表面に対する鉛直方向の表面ひずみ

$\epsilon_{sy'}$  : コネクションプレート（または垂直補剛材）のスカラップと交差する位置の主桁ウェブの要素中心で、内側表面に対する鉛直方向の表面ひずみ

$\epsilon_{cy}$  と  $\epsilon_{sy}$  は、それぞれ、図-1に示したタイプ1とタイプ4の疲労亀裂を発生させる局部ひずみである。 $\epsilon_{sy'}$  は図-7で示したタイプ4'の疲労亀裂を発生させる局部ひずみである。

有限要素解析で考慮するスタッドの配置間隔を図-14に示す。図-14(a)では、コネクションプレート（または垂直補剛材）の直上にスタッドが設けられ、10cm間隔でスタッドが配置されている。このスタッド配置は、図-4の試験体の主桁A1-G1および主桁B1-G1のスタッド配置と同じである。図-14(b)では、コネクションプレート（または垂直補剛材）をまたいで2c=10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 80cm, 120cm, 160cmの間隔でスタッドが配置されている。したがって、コネクションプレート（または垂直補剛材）とこれに最も近いスタッドとの間の距離はc=5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 40cm, 60cm, 80cmである。

(4) ひずみ  $\epsilon_{cy}$ ,  $\epsilon_{sy}$ ,  $\epsilon_{sy'}$  とスタッドの配置間隔 c との関係

ひずみ  $\epsilon_{cy}$ ,  $\epsilon_{sy}$ ,  $\epsilon_{sy'}$  とスタッドの配置間隔

cとの関係をそれぞれ表-1, 2, 3に示す。これらの表の中の図の縦軸にはひずみの比が用いられている。解析値の $\epsilon_{0cy}$ ,  $\epsilon_{0sy}$ ,  $\epsilon_{0sy}'$ は、それぞれ、図-14(a)のスタッド配置に対する $\epsilon_{cy}$ ,  $\epsilon_{sy}$ ,  $\epsilon_{sy}'$ の値である。そして試験値に対しては、このスタッド配置と同じ配置を持つ、図-4に示す主桁A1-G1と主桁B1-G1の測定値が $\epsilon_{0cy}$ と $\epsilon_{0sy}$ に用いられている。ひずみの比が用いられる理由は次の通りである。

図-13から分かるように、静的載荷試験のひずみの位置と有限要素解析のひずみの位置が異なる。さらに図-13(b)から分かるように、有限要素解析では、主桁の上フランジとウェブの各板厚自身の存在が考慮されておらず、コネクションプレート（または垂直補剛材）を主桁の上フランジとウェブに連結する隅肉溶接、および主桁の上フランジとウェブとの間の隅肉溶接も考慮されていない。したがって表-4に示すように、静的載荷試験で与えられるひずみの大きさと有限要素解析で与えられるひずみの大きさは大きく異なる。そこで解析値と試験値の比較が行えるように、表-1, 2, 3の各図の縦軸にはひずみの比が用いられている。

表-4において、床版変形に関するひずみの値は、床版の2箇所には載荷された荷重の合計が98kNに対するものであり、横桁回転に関するひずみの値は、横桁の端部の回転角が0.0008radに対するものである。表-4(c)に示すように、試験体Aの床版変形に対して $\epsilon_{0sy}'$ の試験値が存在している。しかし、その値は非常に小さい。さらに試験値の $\epsilon_{sy}'$ の値も非常に小さく、 $\epsilon_{sy}'/\epsilon_{0sy}'$ の値が大きく変動したので、この値を表-3に載せていない。

表-1と2から分かるように、解析値のひずみの比の分布傾向は試験値のひずみの比の分布傾向に一致している。したがって静的載荷試験で考慮されなかったスタッドの配置間隔に対するひずみの値を有限要素解析から推定することができる。

表-1, 2, 3から、 $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$ ,  $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ ,  $\epsilon_{sy}'/\epsilon_{0sy}'$ の各ひずみ比とスタッドの配置間隔cとの関係に関して次の特徴が指摘できる。

[ $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$ とcの関係に関して]

- ①試験体AとBの床版正変形に対して、 $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$ はcに関係なくほぼ1である。
- ②試験体AとBの床版負変形に対して、cが大きくなると $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$ は低下し、cが約30cm以上になると $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$ はほぼ0になる。
- ③試験体Bの横桁正回転と横桁負回転に対して、cが大きくなると $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$ は徐々に低下する。

[ $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ とcの関係に関して]

- ①試験体AとBの床版正変形に対して、cが大きくなると $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ は低下する。特に試験体Aにおいて、cが約30cm以上になると $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ はほぼ0になる。
- ②試験体AとBの床版負変形に対して、約60cm以下のcにおいて $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ は1以上になる。しかし、cが約60cmを越えると急激に $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ は低下し、c=80cmでほぼ0になる。
- ③試験体Bの横桁正回転に対して、約50cm以下のcに対して $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ は1以上となり、cが約50cmを越えると $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ は低下する傾向を示す。横桁負回転に対して、cが大きくなると $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ は低下し、約30cm以上のcに対して $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ はほぼ0.7になる。

[ $\epsilon_{sy}'/\epsilon_{0sy}'$ とcの関係に関して]

$\epsilon_{sy}'/\epsilon_{0sy}'$ とcの関係に見られる特徴は $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ とcの関係に見られる特徴と同じである。

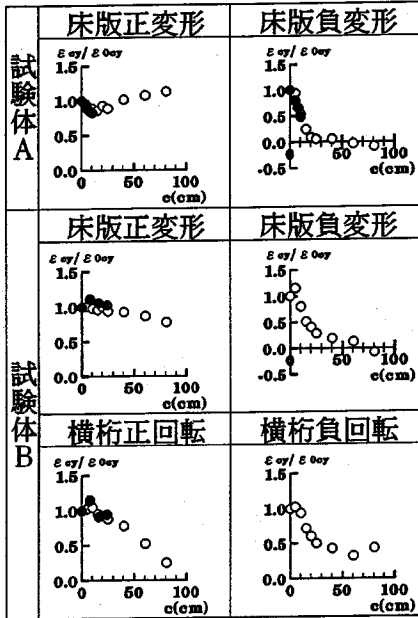
## 5. コネクションプレートと垂直補剛材の上端の疲労亀裂を低減させるスタッド配置(合成プレートガーダー橋の場合)とスラブ止め配置(非合成プレートガーダー橋の場合)

プレートガーダー橋の主桁と横桁の連結部の疲労亀裂に関して、著者らが過去得た研究成果と、前章で明らかにされた、スタッドの配置間隔と局部ひずみの関係を統合することにより、コネクションプレートと垂直補剛材の上端の疲労亀裂を低減させるスタッド配置(合成プレートガーダー橋の場合)とスラブ止め配置(非合成プレートガーダー橋の場合)を明らかにする。

### (1) 垂直補剛材の上端の疲労亀裂とスタッドの配置間隔

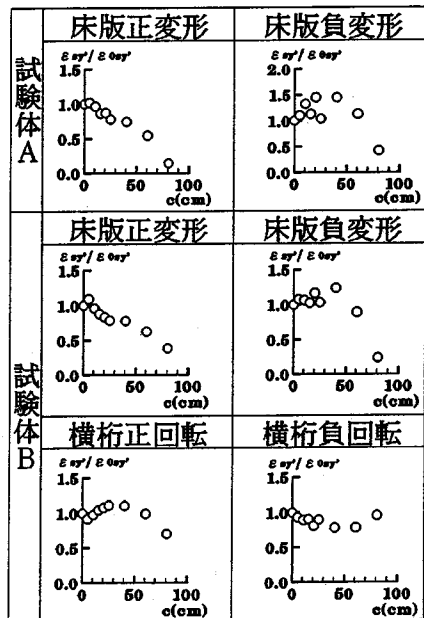
表-4(b)に示すように、試験体Aの床版正変形と床版負変形に対する試験値の $\epsilon_{0sy}$ はそれぞれ $154\mu$ と $-172\mu$ であり、両者の値の絶対値はお互いに近い値を示している。表-2に示すように、試験体Aの床版正変形の $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ はcが増加すると低下する。しかし床版負変形の $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ は、約60cm以下のcに対して1より大きく、試験値の $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ は約2に達している。 $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}=2$ に対して $\epsilon_{sy}$ は $-344\mu$ ( $=-172\mu \times 2$ )になる。この値の絶対値は、表-4(b)の試験体Bの床版正変形に対する $\epsilon_{0sy}$ の試験値 $670\mu$ の約半分である。

表-1  $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$ とCの関係



○ 解析値 ● 試験値

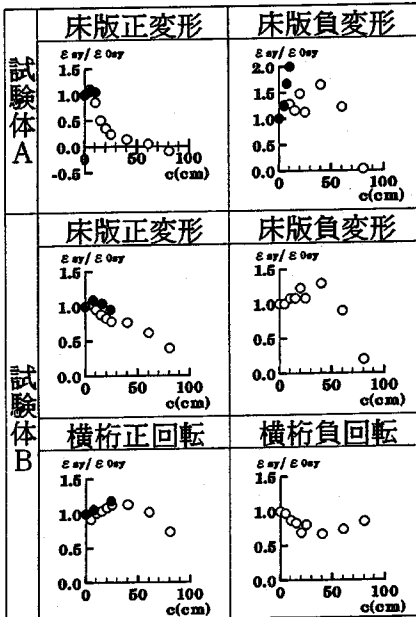
表-3  $\epsilon_{sy'}/\epsilon_{0sy'}$ とCの関係



○ 解析値 ● 試験値

表-4 静的荷重試験で与えられるひずみの大きさと有限要素解析で与えられるひずみの大きさ

表-2  $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ とCの関係



○ 解析値 ● 試験値

(a)  $\epsilon_{0cy} (\times 10^{-6})$

試験体A	床版正変形	床版負変形
	試験値	-1385 1217
試験体B	床版正変形	床版負変形
	試験値	-1146 —
試験体B	横桁正回転	横桁負回転
	試験値	-595 —
試験体B	横桁正回転	横桁負回転
	解析値	-515 437

(b)  $\epsilon_{0sy} (\times 10^{-6})$

試験体A	床版正変形	床版負変形
	試験値	154 -172
試験体B	床版正変形	床版負変形
	試験値	670 —
試験体B	横桁正回転	横桁負回転
	試験値	38 —
試験体B	横桁正回転	横桁負回転
	解析値	-230 194

(c)  $\epsilon_{0sy'} (\times 10^{-6})$

試験体A	床版正変形	床版負変形
	試験値	16 -6
試験体B	床版正変形	床版負変形
	試験値	— —
試験体B	横桁正回転	横桁負回転
	試験値	339 -369
試験体B	横桁正回転	横桁負回転
	解析値	-207 188



試験体Bにおいて、局部ひずみ $\epsilon_{sy}$ に起因するタイプ4の疲労亀裂が発生しなかった。したがって試験体Aにタイプ4の疲労亀裂が発生する可能性は小さいと考える。

表-4(c)に示すように、試験体Aの床版正変形と床版負変形に対する試験値の $\epsilon_{0sy}$ はそれぞれ $16\mu$ と $-6\mu$ である。表-3に示すように、試験体Aの床版正変形の $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ はcが増加すると低下する。しかし床版負変形の $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$ は、約60cm以下のcに対して1より大きく、約1.5に達している。 $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}=1.5$ に対して $\epsilon_{sy}$ は $-9\mu$ ( $=-6\mu \times 1.5$ )になる。このひずみの大きさで、 $\epsilon_{sy}$ に起因するタイプ4'の疲労亀裂は発生しないと考える。

以上の考察から、垂直補剛材の上端の疲労亀裂の発生順序は、タイプ1の疲労亀裂が発生し、この疲労亀裂の伝播、すなわち垂直補剛材の上端と主桁上フランジとの破断が主桁ウェブの応力を増加させ、タイプ4またはタイプ4'の疲労亀裂を発生させると考える。したがって垂直補剛材の上端のタイプ1の疲労亀裂を起こさせる局部ひずみ $\epsilon_{cy}$ を小さくさせるスタッドの配置間隔を考える。

表-4(a)に示すように、試験体Aの床版正変形と床版負変形に対する試験値の $\epsilon_{0cy}$ はそれぞれ $-1385\mu$ と $1217\mu$ であり、両者の値の絶対値はお互いに近い値を示している。表-1に示すように、試験体Aの床版正変形の $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$ はcに関係なくほぼ1である。したがって床版正変形に対して、スタッドの配置間隔は $\epsilon_{cy}$ の増減に影響せず、タイプ1の疲労亀裂の発生に影響しない。他方試験体Aの床版負変形の $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$ はcの増加とともに急激に低下し、約20cm以上のcに対してほぼ0になる。したがって床版負変形に対して、スタッドの配置間隔を広くすることにより $\epsilon_{cy}$ を低下させ、タイプ1の疲労亀裂を低減させることができる。

図-15(a)に示すように、5本主桁のプレートガーダー橋において、主桁 $G_1$ と $G_2$ の間に荷重が存在する場合、主桁 $G_3$ 、 $G_4$ 、 $G_5$ の直上のコンクリート床版の回転角は主桁 $G_1$ と $G_2$ のそれと比較して非常に小さい<sup>6), 7)</sup>。主桁 $G_1$ の垂直補剛材の上端は床版正変形を受け、主桁 $G_2$ の垂直補剛材の上端は床版負変形を受ける。図-15(b)に示すように、主桁 $G_2$ と $G_3$ の間に荷重が存在する場合、主桁 $G_1$ 、 $G_4$ 、 $G_5$ の直上のコンクリート床版の回転角は主桁 $G_2$ と $G_3$ のそれと比較して非常に小さい<sup>6), 7)</sup>。主桁 $G_2$ の垂直補剛材の上端は床版正変形を受け、主桁 $G_3$ の垂直補剛材の上端は床版負変形

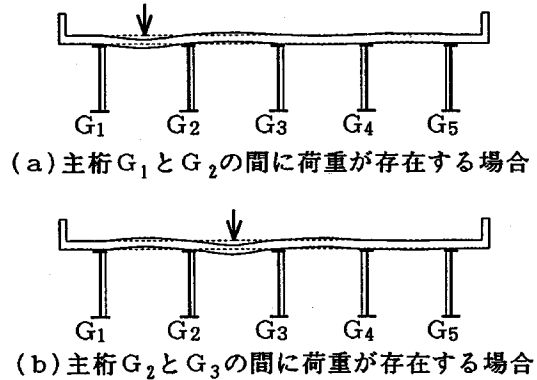


図-15 プレートガーダー橋の垂直補剛材の上端が受ける床版変形

形を受ける。このように実橋においては、外主桁の垂直補剛材の上端は床版正変形のみを受け、中主桁の垂直補剛材の上端は床版正変形と床版負変形を受ける。

前述のスタッドの配置間隔とタイプ1の疲労亀裂の発生の関係を考慮すると、実橋の外主桁の垂直補剛材のタイプ1の疲労亀裂の低減に対して、スタッドの配置間隔を広くすることは効果がない。中主桁の垂直補剛材に対しては、スタッドの配置間隔を広くすることによって、床版負変形に対する $\epsilon_{cy}$ を低下させ、タイプ1の疲労亀裂を低減させることができる。

## (2)コネクションプレートの疲労亀裂とスタッドの配置間隔

過去、著者らは、プレートガーダー橋の主桁と横桁の連結部の疲労亀裂に関して次のことを明らかにした。外主桁の横桁連結部においては、タイプ1とタイプ4の疲労亀裂がそれぞれ独立に発生する<sup>8), 9), 10)</sup>。中主桁の横桁連結部においては、タイプ1の疲労亀裂の伝播、すなわちコネクションプレートと主桁上フランジとの破断が主桁ウェブの応力を増加させ、タイプ4の疲労亀裂を発生させる<sup>8), 9), 10)</sup>。タイプ1の疲労亀裂の発生に対してコンクリート床版の回転の影響が大きく、横桁の回転の影響は小さい<sup>13), 14), 15)</sup>。タイプ4の疲労亀裂の発生に対してコンクリート床版の回転と横桁の回転が同程度に影響する<sup>13), 14), 15)</sup>。

これらの事実から、外主桁のコネクションプレートに対しては、タイプ1、タイプ4、タイプ4'の疲労亀裂をそれぞれ起こさせる局部ひずみ $\epsilon_{cy}$ 、

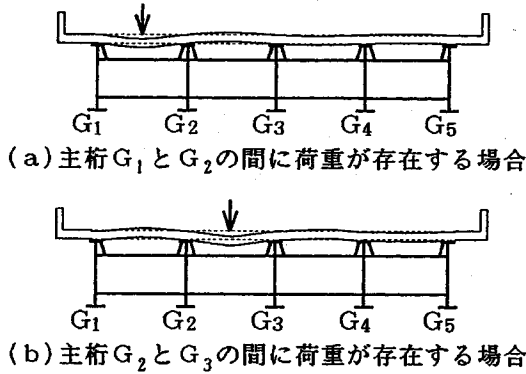


図-16 プレートガーダー橋のコネクションプレートが受ける床版変形

$\epsilon_{sy}$ ,  $\epsilon_{sy}'$  を小さくさせるスタッドの配置間隔を考える。中主桁のコネクションプレートに対しては、タイプ1の疲労亀裂を起こさせる  $\epsilon_{cy}$  を小さくさせるスタッドの配置間隔を考える。 $\epsilon_{cy}$  に対しては床版変形の影響のみを考え、 $\epsilon_{sy}$  と  $\epsilon_{sy}'$  に対しては床版変形と横桁回転の両者を考慮する。

図-16 (a) に示すように、5本主桁のプレートガーダー橋において、主桁  $G_1$  と  $G_2$  の間に荷重が存在する場合、主桁  $G_3$ ,  $G_4$ ,  $G_5$  の直上のコンクリート床版の回転角は主桁  $G_1$  と  $G_2$  のそれと比較して非常に小さい<sup>6), 7)</sup>。主桁  $G_1$  のコネクションプレートと主桁  $G_2$  の左側のコネクションプレートは床版正変形を受け、主桁  $G_2$  の右側のコネクションプレートは床版負変形を受ける。図-16 (b) に示すように、主桁  $G_2$  と  $G_3$  の間に荷重が存在する場合、主桁  $G_1$ ,  $G_4$ ,  $G_5$  の直上のコンクリート床版の回転角は主桁  $G_2$  と  $G_3$  のそれと比較して非常に小さい<sup>6), 7)</sup>。主桁  $G_2$  の右側のコネクションプレートと主桁  $G_3$  の左側のコネクションプレートは床版正変形を受け、主桁  $G_2$  の左側のコネクションプレートと主桁  $G_3$  の右側のコネクションプレートは床版負変形を受ける。

外主桁の位置における横桁の回転は、これに隣接する中主桁との相対的な鉛直変位差によって正回転と負回転が生じる。

以上の考察より、外主桁のコネクションプレートでの  $\epsilon_{cy}$  は床版正変形のみによって起こされ、中主桁の左右の各コネクションプレートの  $\epsilon_{cy}$  は床版の正変形と負変形によって起こされる。外主桁のウェブの  $\epsilon_{sy}$  と  $\epsilon_{sy}'$  は床版正変形と横桁の正回転と負回転によって起こされる。

表-1 に示すように、試験体Bの床版正変形の  $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$  は  $c$  に関係なくほぼ1である。したがって外主桁のコネクションプレートのタイプ1の疲労亀裂の低減に対して、スタッドの配置間隔を広くすることは効果がない。試験体Bの床版負変形の  $\epsilon_{cy}/\epsilon_{0cy}$  は  $c$  の増加とともに急激に低下し、 $c=25\text{cm}$  で0.3になる。したがって中主桁のコネクションプレートに対しては、スタッドの配置間隔を広くすることによって、床版負変形に対する  $\epsilon_{cy}$  を低下させ、タイプ1の疲労亀裂を低減させることができる。

表-2 と 3 に示すように、試験体Bの床版正変形の  $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$  と  $\epsilon_{sy}'/\epsilon_{0sy}'$  は  $c$  の増加とともに徐々に減少する。しかし横桁正回転の  $\epsilon_{sy}/\epsilon_{0sy}$  と  $\epsilon_{sy}'/\epsilon_{0sy}'$  は約50cm以下の  $c$  に対してそれぞれ1以上となる。したがって外主桁のウェブのタイプ4とタイプ4'の疲労亀裂の低減に対して、スタッドの配置間隔を広くすることによる効果は、実橋で生じる床版正変形と横桁正回転の量に依存する。

(3) コネクションプレートと垂直補剛材の上端の疲労亀裂を低減させるスタッド配置 (合成プレートガーダー橋の場合) とスラブ止め配置 (非合成プレートガーダー橋の場合)

本章の(1)項と(2)項で明らかにしたように、プレートガーダー橋の中主桁に対して、垂直補剛材とコネクションプレートの直上からスタッドを遠ざけて配置することにより、タイプ1の疲労亀裂を低減させることができる。

通常、スタッドの配置間隔は合成桁のずれ止め設計によって決められる。すなわち鋼桁の上フランジとコンクリート床版の間に働く橋軸方向のせん断力に抵抗できるようにスタッドの配置間隔が決められる。したがって合成プレートガーダー橋の中主桁のタイプ1の疲労亀裂を低減させるためには、合成桁のずれ止め設計によって決められたスタッドの配置間隔で、垂直補剛材とコネクションプレートの直上から可能な限りスタッドを遠ざけて配置する。

過去に著者らが行った横桁連結部の疲労試験で、コネクションプレートの直上にスラブ止めが用いられた試験体に、図-1 に示すような疲労亀裂が発生した<sup>8), 9), 10)</sup>。したがって図-1 に示す疲労亀裂は非合成プレートガーダー橋にも発生する可能性がある。非合成プレートガーダー橋の中主桁のタイプ1の疲労亀裂を低減させるためには、垂直補剛材とコネクションプレートの直上から可能な限りスラ

ブ止めを遠ざけて配置する。

スタッド（合成プレートガーダー橋の場合）あるいはスラブ止め（非合成プレートガーダー橋の場合）を垂直補剛材と横桁連結部の直上から遠ざけて配置することは、これまでのプレートガーダー橋の製作になら付加費用を必要としない。したがって、これは疲労亀裂の防止対策として有効な手法と考える。

## 6. 結論

過去行われた橋軸方向に168cmのコンクリート床版と2本の主桁から成る試験体の疲労試験の結果に解析を加えることにより、道路プレートガーダー橋のコネクションプレートと垂直補剛材の上端に発生する疲労亀裂を低減させるスタッド配置（合成プレートガーダー橋の場合）とスラブ止め配置（非合成プレートガーダー橋の場合）を明らかにした。本研究の主な結論は次の通りである。

1) 横桁あるいは対傾構が取り付けられていない中間垂直補剛材の上端の疲労亀裂の発生順序は、垂直補剛材にタイプ1の疲労亀裂が発生し、この疲労亀裂の伝播、すなわち垂直補剛材の上端と主桁上フランジとの破断が主桁ウェブの応力を増加させ、主桁ウェブにタイプ4またはタイプ4'の疲労亀裂を発生させる。したがって垂直補剛材の上端の疲労亀裂は、タイプ1の疲労亀裂を防止することによって他の疲労亀裂は防止される。

2) 外主桁の垂直補剛材の上端のタイプ1の疲労亀裂の低減に対して、スタッドの配置間隔を広くすることは効果がない。中主桁の垂直補剛材に対しては、スタッドの配置間隔を広くすることによって、タイプ1の疲労亀裂を低減させることができる。

3) 外主桁の横桁連結部のコネクションプレートのタイプ1の疲労亀裂の低減に対して、スタッドの配置間隔を広くすることは効果がない。外主桁の横桁連結部の主桁ウェブのタイプ4と4'の疲労亀裂の低減に対して、スタッドの配置間隔を広くすることによる効果は、実橋で生じる床版正変形と横桁正回転の量に依存する。中主桁のコネクションプレートに対しては、スタッドの配置間隔を広くすることによって、タイプ1の疲労亀裂を低減させることができる。

4) 以上の研究成果を総括すると、コネクションプレートと垂直補剛材の上端の疲労亀裂を低減させることに関して、スタッドの配置間隔を広くすることは、中主桁に対しては効果があるが外主桁に対して

はない。

5) 中主桁のコネクションプレートと垂直補剛材の上端の疲労亀裂を低減させるスタッド配置（合成プレートガーダー橋の場合）とスラブ止め配置（非合成プレートガーダー橋の場合）は次の通りである。合成プレートガーダー橋の場合、合成桁のずれ止め設計によって決められたスタッドの配置間隔で、垂直補剛材とコネクションプレートの直上から可能な限りスタッドを遠ざけて配置する。非合成プレートガーダー橋の場合、垂直補剛材とコネクションプレートの直上から可能な限りスラブ止めを遠ざけて配置する。

## 参考文献

- 1) 大倉一郎：鋼橋の疲労，東洋書店，pp.175-227，1994。
- 2) Kato, S., Yoshikawa, O., Terada, H. and Matsumoto, Y.: Studies on fatigue damages based on strain measurement of a highway bridge, 土木学会論文集, 第362号, pp.199-208, 1985.
- 3) Miki, C., Takenouchi, H., Mori, T. and Ohkawa, S.: Repair of fatigue damage in cross bracing connections in steel girder bridges, 土木学会論文集, 第404号, pp.53-61, 1989.
- 4) Okura, I., Hirano, H. and Yubisui, M.: Stress measurement at cross beam connections of plate girder bridge, *Tech. Reports of Osaka Univ.*, Vol.37, No.1883, pp.151-160, 1987.
- 5) Okura, I. and Fukumoto, Y.: Fatigue of cross beam connections in steel bridges, *IABSE, 13th Congress, Helsinki, Finland*, pp.741-746, 1988.
- 6) 大倉一郎, 指吸政男, 平野浩: プレートガーダー橋の横桁連結部の局部応力と3次元挙動の関係, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.373-382, 1987.
- 7) Okura, I., Yubisui, M., Hirano, H. and Fukumoto, Y.: Local stresses at cross beam connections of plate girder bridges, 土木学会論文集, 第392号, pp.111-119, 1988.
- 8) Okura, I. and Fukumoto, Y.: Fatigue of cross-beam connections in plate girder highway bridges, *IABSE, Workshop, Lausanne, Switzerland*, pp.167-176, 1990.
- 9) 大倉一郎, 井上博之, 福本嘸士, 山田靖則: プレートガーダー橋の横桁連結部の疲労試験, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.989-998, 1992.
- 10) Okura, I. and Fukumoto, Y.: Fatigue tests of cross-beam connections in plate girder highway bridges, *Proceedings of the First World Conference on Constructional Steel Design, Acapulco, Mexico*, pp.466-469, 1992.
- 11) 大倉一郎, 坂本洋, 塩崎哲也, 福本嘸士, 南荘淳: プ

- プレートガーダー橋の垂直補剛材の上端の局部応力と疲労亀裂, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1087-1100, 1994.
- 12) NEC : A C O S ソフトウェア複合構造解析システム説明書< I S A P >, FXI52-10, 1989.
- 13) Okura, I., Takigawa, H. and Fukumoto, Y.: Structural parameters governing fatigue cracking at cross-beam connections in plate girder highway bridges, *Tech. Reports of Osaka Univ.*, Vol.39, No.1980, pp.289-296, 1989.
- 14) Okura, I., Takigawa, H. and Fukumoto, Y.: Structural parameters governing fatigue in highway bridges, 土木学会論文集, 第410号, pp.253-256, 1989.
- 15) 大倉一郎, 瀧川浩之, 福本晴士: プレートガーダー橋の横桁連結部の疲労亀裂を支配する構造パラメータ, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.921-928, 1989.

(1994.11.30 受付)

## ARRANGEMENT OF STUD SHEAR CONNECTORS TO REDUCE FATIGUE CRACKING AT THE TOP OF VERTICAL STIFFENERS

Ichiro OKURA, Tetsuya SHIOZAKI, Yuhshi FUKUMOTO and Atushi NANJYO

The arrangement of stud shear connectors to reduce fatigue cracking at the top of plates to connect a cross beam to main girder, so-called connection plate, and at the top of vertical stiffeners in plate girder highway bridges is presented. A model for the transfer of load between a concrete slab and a top flange of a main girder is developed. By the finite element analysis in which this load-transfer-model is introduced, the relation between the spacing of stud shear connectors and the local stresses in connection plates and vertical stiffeners is investigated. Combining this relation and the research results we obtained in the past provides the arrangement of stud shear connectors for composite plate girders as well as that of slab anchors for noncomposite plate girders to reduce the fatigue cracking in connection plates and vertical stiffeners.