

（株）神戸製鋼所 正員 岡本安弘 大阪大学工学部 正員 松井繁之  
近畿大学理工学部 正員 前田幸雄 （株）川田工業 正員 渡辺 洵

**1. まえがき** 近年、道路橋RC床版のひびわれ損傷が大きな問題となっている中で、鋼板とコンクリートを一体化した合成床版が再び注目されている。しかし、この種の床版構造におけるずれ止めの設計法はまだ確立されていない。これは輪荷重による床版内のスタッドに作用するせん断力の大きさ、分布、方向などが未だ明確にされていないためである。本研究は、合成床版の基本であるロビンソン型床版におけるスタッドに作用するせん断力の評価方法について、解析と実験を基にし考察を加えたものである。

**2. スタッドに作用するせん断力の評価方法** 最も基本的な一方向にせん断力を受けるスタッドについて説明する。図1は鋼板とコンクリートの接触面のずれを考慮した3次元FEM解析による合成版梁の鋼板上面の応力分布であるが、スタッド前後でジグザグ状の分布となっている。この局部応力からスタッドに作用するせん断力 $Q$ の大きさが評価できる。スタッド溶接止端形状による応力集中の影響を受けない範囲のスタッド近傍の鋼板の垂直応力は図2に示すように、はりの全体曲げ応力と、せん断力 $Q$ による局部応力とに分類でき、さらに、局部応力はスタッドの曲げに伴う局部曲げ応力と、スタッド基部の鋼板表面で作用する集中せん断力による軸方向応力とに分類できる。

次に、この局部応力についてスタッド付鋼板をモデルとして、より詳細な3次元FEM解析により調べた。せん断力 $Q$ の作用位置を鋼板表面、および、スタッドの鋼板表面から1cm, 2cm, 3cmの所に与えた4ケース(0, I, II, III)とした。図3に、スタッドを中心とした半径 $r=2\text{cm}$ の円周上における鋼板表面の法線方向の直応力分布を示す。 $Q$ の作用位置を上昇させるにつれて、局部曲げが大きくなり、応力は増加する。よって、この表面だけではせん断力の大きさはわからない。そこで、上下面の応力の平均 $\bar{\sigma}_r$ をとると、この局部曲げ応力成分は消去され、 $Q$ による軸方向応力のみが残る。

図4に $x$ 軸からの角度 $\phi$ と、このときの $\bar{\sigma}_r$ との関係を示すが、各ケースで若干の誤差が存在するが、ほぼ一致した。このことから、半径2cmの円周に沿って $\bar{\sigma}_r$ の $x$ 方向成分を積分したものは次式のように表現でき、力の釣合から $Q$ に等しくなる。

$$Q = 2\pi r \int_0^{\pi} \cos^2 \phi \{ \bar{\sigma}_r(\phi + d\phi) + \bar{\sigma}_r(\phi) \} d\phi \quad (1)$$

$t$ : 鋼板厚、 $r=2.0\text{ cm}$ 。

そして、 $\bar{\sigma}_r$ の関数形を図4より決定し、 $\bar{\sigma}_r$ の最大値( $\phi=0$ のときの $\bar{\sigma}_r$ ) $\bar{\sigma}_{r,\max}$ で整理する

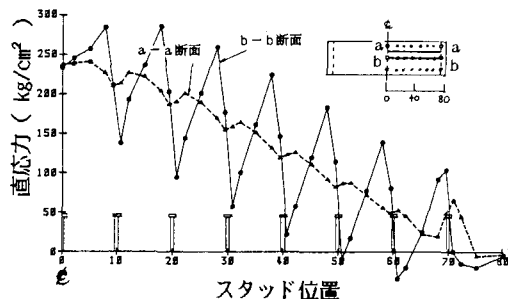


図1 鋼板上面の応力分布。

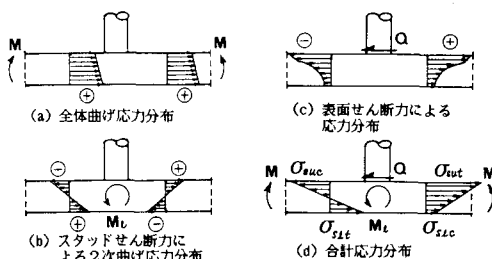


図2 鋼板上下面の応力分布の概要。

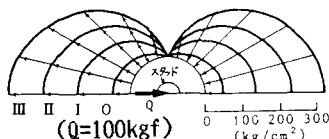


図3 鋼板上表面法線方向応力分布

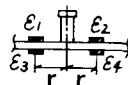


図5 スタッド近傍のひずみ測定位置。

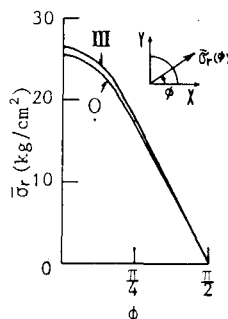


図4  $\bar{\sigma}_r - \phi$  関係 (スタッド間隔20cm)。

と次式のようになることがわかった。

$$Q = c \cdot t \cdot r \cdot \bar{\sigma}_{r, \max} \quad c = \pi \quad (2)$$

一方、 $\bar{\sigma}_{r, \max}$ は図5に示すせん断力の作用軸上のスタッド前後  $r$  cmでの上下面の4点のひずみを用いて、次式で表わせる。

$$\bar{\sigma}_{r, \max} = E_s \left( \frac{x+r}{x} \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} - \frac{x-r}{x} \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_4}{2} \right) / 2 \quad (3)$$

$E_s$  : 鋼板の弾性係数

$x$  : はりの支点から着目するスタッドまでの距離。

以上から、この4つのひずみが実験的に評価できると、式(2)、(3)より作用せん断力が推定できる。

### 3. 実験の概要

上記推定法の妥当性を確認するため、単純なはり供試体と版供試体を用いて静的荷重実験を行った。

$\phi 13 \times 100$  mm のスタッドを使用し、その間隔を10cmと20cmの2種類とした。さて、実橋に合成床版を適用した場合、自動車は任意の位置を走行するため、コンクリートの曲げひびわれは床版全面に生じると予想され、この状態下でのスタッドの挙動を調べる必要がある。このため複数の荷重位置を設置し、ある荷重段階の荷重を全荷重点に順次作用させる移動繰返し荷重法を採用した。

### 4. 実験結果とせん断力の評価

図6にはり供試体の鋼板上面のひずみ分布を示す。初期の荷重段階ではほぼ全断面有効のはり理論値と等しいが、徐々に付着が切れ、ひびわれが生じ始めるとジグザグ状の分布となり、3次元FEM解析通りとなった。図6(a)は上面で、(b)は下面の結果である。下面ではせん断力による応力が減少するため、ジグザグ振幅量は減少する。

さて、荷重-たわみ、荷重-ひずみ、荷重-ずれの各曲線において、各変形量が急変する時点、すなわち、限界状態時におけるはり供試体の  $Q$  の評価例を表1に示す。表中、不完全合成理論値は、鋼・コンクリート間にせん断バネ（リンク要素）を挿入してずれを表現したFEM板曲げ解析結果で、リンク要素の軸力である。ここで、リンク要素のバネ定数  $k$  には限界状態における推定せん断力  $Q$  とずれの実測結果から求めた  $k = 1.5 \times 10^4$  kg/cm を用いた。各結果にはバラツキはあるが、実測による値と計算値とはよく一致している。一方、慣用のはり理論値は推定せん断力  $Q$  の約2倍となっている。

以上のことは2軸応力下にある板供試体についてもいえることを確認した。最終的に、合成床版におけるスタッドに作用するせん断力  $Q$  は  $k = 1.5 \times 10^4$  kg/cm とした不完全合成理論に基づいた板曲げ解析による結果とほぼ一致すると言える。

### 5. スタッドのバネ定数と抵抗せん断強度について

供試体床版におけるスタッドの作用せん断力を評価するに必要な  $k$  を既往の押し抜きせん断試験結果から得ることを検討した結果、I.M.Viest の限界ずれ 0.076mmにおける荷重-ずれ曲線の接線に一致した。ゆえに、任意のスタッド径に対する  $k$  も、この接線勾配をもって表現してよいと考えられる。一方、抵抗せん断強度は、同曲線の限界ずれに対応する限界せん断力  $Q_{\max}$  としてよいと思われる。これは、BS5400の限界せん断力に近い値である。

最後に、床版作用におけるスタッドの間隔は、鋼板の応力が降伏応力に達してたわみが急増し始める時、最大スタッドせん断力が  $Q_{\max}$  に達するよう設計すれば最適であると考えられる。ただし、さらに疲労強度に関する照査が必要であることは論を待たない。

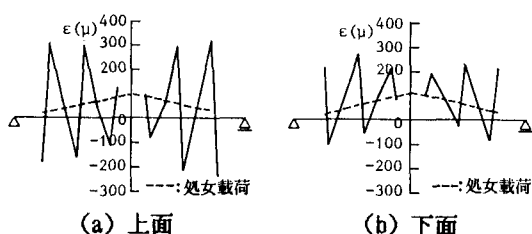


図6 鋼板表面のひずみ分布  
(スタッド間隔20cm, 2ton)。

表1 スタッドに作用するせん断力の評価結果 (スタッド間隔10cm)。

| BS 1 のスタッド配置 |        |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|
|              |        |        |        |
| 計 算 値        | スタッド E | スタッド C | スタッド B |
| 評 価 値        | 503    | 543    | 406    |
| 不完全合成理論値     | 574    | 562    | 417    |
| 完全合成理論値      | 969    | 969    | 969    |

(単位: kgf)