

## [2089] 突起付き H 形鋼を用いた合成桁の疲労特性

正会員 ○大竹 章夫（住友金属工業総合技術研究所）

正会員 高田 啓一（住友金属工業総合技術研究所）

## 1 まえがき

合成桁は、鋼とコンクリートとの両素材特性をうまく組合せ利用した構造で、今後とも多く用いられる工法である。合成桁での鋼とコンクリートの一体化には、その施工の容易さから、スタッドコネクタを使用するのが一般的で、既にその工法が世界的に定着した感があるが、この工法の問題点が全て解決されたわけではない<sup>[1]</sup>。例えば、スタッドの崩壊機構として、いわゆる K.Roik モデルが広く知られているが<sup>[2]</sup>、使用状態でも類似の耐荷機構になっているとすれば、鋼桁と床版との間に相対ずれが生ずることにより初めてスタッド側面にコンクリートから大きな支圧力が作用しシア伝達が可能となる。すなわち、スタッド工法では、ずれ変位を前提とせざるを得ず、このため、わが国の道路橋示方書のように、ずれによる合成効果の損失が大きくなならないとの観点から別途許容耐力を定める必要がある<sup>[3]</sup>。そもそも、スタッドはせん断変形に対して柔らかで高い靱性を示すが、この柔らかさと合成効果の確保とは相矛盾するものであり、この意味では、スタッドの特性を十分に活かしきってるとは言えない。

この研究は以上の観点より鋼とコンクリートのより優れた継手形式を見い出そうとして行っているもので、フランジ表面に突起を有する H 形鋼（以下、縞付 H 形鋼と呼ぶ）にスタッドコネクタを併用し、スタッドの変形能特性を生かしながら低荷重域での大きなずれ変位を抑えることを狙いとしている。未だ基礎研究段階であるが、押抜き及び桁試験を行い新しい考え方の合成桁の出現の可能性が期待できると考えられる結果が得られているので報告する。

## 2 押抜き試験

## 2.1. 試験体及び試験方法

試験に使用した縞付 H 形鋼の形状・寸法を図 1 に示す。

試験体の形状・寸法を図 2 および表 1 に示す。試験体には、形鋼に縞付 H 形鋼を用いた ES タイプと普通 H 形鋼を用いた PS タイプとがあり、それぞれ、スタッド間隔 ( $\rho$ ) を 150mm、300mm、600mm と変え、計 6 種類を用意した。使用スタッドはいずれも  $19\phi \times 130$ mm である。試験体数は各 4 体（ES-30 は 5 体）で、そのうち各 1 体は静的試験に、残りを片振疲労試験（ $0.1 \sim 1.0 \times P_{max}$  間の繰返し载荷、 $R=0.1$ ）に供した。

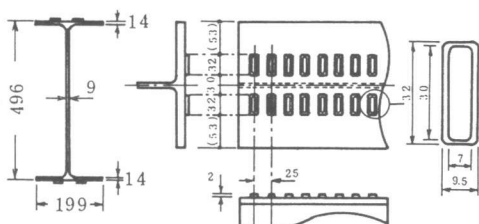


図 1 縞付 H 形鋼の形状・寸法

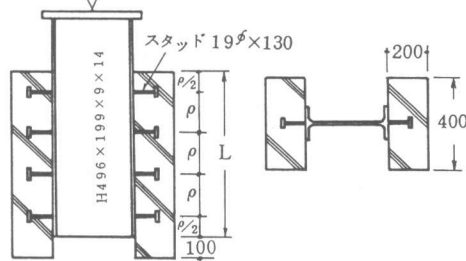


図 2 押抜き試験体の形状・寸法

表 1 押抜き試験体諸元

| 試験体   | L<br>(cm) | スタッド ( $19\phi \times 130$ ) |                    |
|-------|-----------|------------------------------|--------------------|
|       |           | 片側本数                         | 間隔: $\rho$<br>(mm) |
| ES-15 | 60        | 4                            | @150               |
| ES-30 | 120       | 4                            | @300               |
| ES-60 | 120       | 2                            | @600               |
| PS-15 | 60        | 4                            | @150               |
| PS-30 | 120       | 4                            | @300               |
| PS-60 | 120       | 2                            | @600               |

## 2.2 試験結果

### 2.2.1. 静的試験

各試験体の結果を表2に、また、荷重～ずれ変形関係を図3に示す。図表中の応力 $S$ は、荷重 $P$ を形鋼とコンクリートとのトータル接触長さで除した値で、形鋼片側の単位長さ当りのせん断応力レベルを表している。表中のコンクリート圧縮強度 $F_c$ は、各試験体載荷時の値である。図から以下のことが判る。

- (1) スタッドとフランジ表面の突起との最大耐力に関する協同効果は少なく、最大荷重は主にスタッド量で決定される。<sup>(4,5)</sup>
- (2) 縞付H形鋼の適用によりコンクリートとの接合靱性が大きく損なわれることはない。
- (3) フランジ表面突起の効果は、剛性が著しく低下する降伏耐力(G.Y. 耐力：図3参照)時点以前の変形性状に現われる。普通H形鋼に比べ縞付H形鋼の方が明らかに変形が小さい。その結果、降伏耐力も上昇する。

図4は、普通H形鋼と縞付H形鋼の場合とでスタッド挙動がどのように違うのかを見るため、同形状試験体のスタッド根元のひずみの変化を荷重との関係で比較したものである。縞付H形鋼の方が普通H形鋼に比べスタッドの応力レベルが低いことが判る。以上のことから、双方の耐荷機構は図5のようになっているものと推定できる。すなわち、普通H形鋼の場合、初期載荷段階からスタッドには大きな曲げせん断変形を生じ根元に多大な応力が発生する。これに対し、縞付H形鋼ではせん断力は剛な突起前面の支圧応力で支えられ、スタッドの曲げ変形が制限され小さくなる。この間、スタッドは主にコンクリートと鉄骨とが離間しないように押える役割を果しているものと思われるが、動的荷重範囲でのその力は小さいもので済みそうである。

表2 押抜き試験体静的試験結果

| 試験体   | コンクリート<br>強度： $F_c$<br>( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) | $P_{\text{max}}$<br>(ton) | $S_{\text{max}}$<br>( $\text{kg}/\text{cm}$ ) |
|-------|----------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|
| ES-15 | 222                                                | 114.7                     | 956                                           |
| ES-30 | 277                                                | 116                       | 483                                           |
| ES-60 | 222                                                | 62.3                      | 260                                           |
| PS-15 | 222                                                | 103.4                     | 862                                           |
| PS-30 | 277                                                | 123                       | 513                                           |
| PS-60 | 232                                                | 55.5                      | 231                                           |

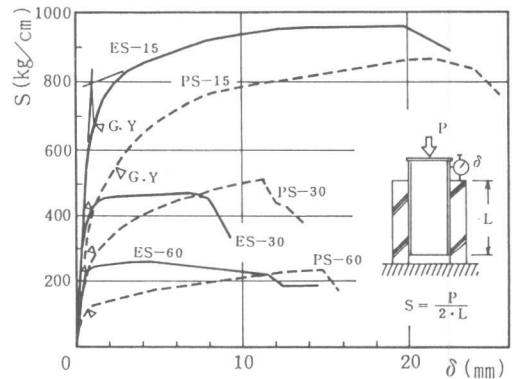


図3 荷重～変位関係

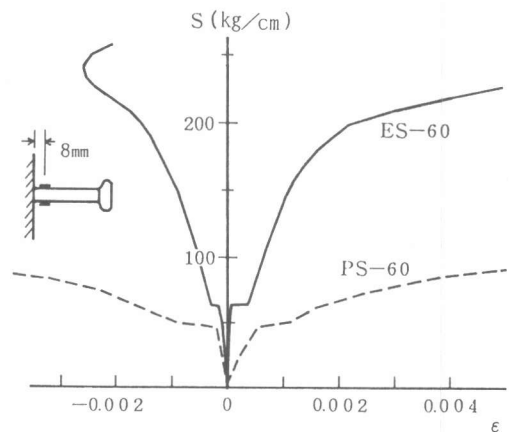


図4 荷重～ひずみ関係

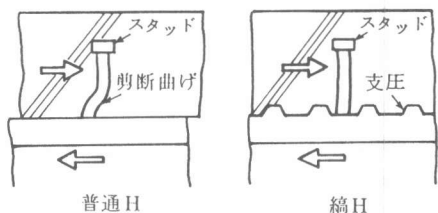


図5 せん断力伝達機構

## 2.2.2 疲労試験

試験結果を表3に示す。表中の  $S_r$  は形鋼片側の単位長さ当りのせん断応力振幅を、 $N_f$  は破壊までの荷重繰返し数を表している。破壊は、いずれの試験体も、スタッド根元の破断により生じた。

図6は、繰返し数  $N$  による鉄骨とコンクリートスラブとの間のずれ変形の変化を普通H形鋼の場合と縞付H形鋼の場合とで比較したものである。両試験体の寸法および繰返し荷重レベルは同じである。図の  $\delta_{\max}$  は  $P_{\max}$  時のずれ変位を、 $\delta_{\min}$  は  $P_{\min}$  ( $0.1 \times P_{\max}$ ) 時のずれ変位を示している。普通H形鋼の場合、初期荷重時点から大きいずれ変形を示し、しかも、繰返し荷重毎にずれ変形を急速に増しているのが判る。これに対し、縞付H形鋼では、ずれ変形が絶対量、増加率とも小さく、破壊近くまで一定に保たれることが判る。疲労寿命も長い。

図7に、各試験体の  $S_r - N_f$  関係をまとめて示す。縞付H形鋼の方が普通H形鋼より下り勾配が緩やかで、突起の効果は低応力振幅域となる程大きくなることが判る。当然ながら、スタッド間隔の粗い程縞付H形鋼による疲労性能向上効果は大きくなり、スタッド間隔150mmでは2～7倍の疲労寿命向上であるが、間隔600mmでは5～400倍にもなる。

以上の試験結果から、スタッドと縞付H形鋼との疲労強度に関する協同効果のパラメトリックスタディを行い下式を得た。

$$\log_{10} \beta r = -0.159 \log_{10} N_f + 0.54 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{ここに: } \beta r = \frac{S_r}{F_c(1+4.5d^2/\rho)}$$

$S_r$  : せん断応力振幅 ( $\text{kg/cm}$ )

$F_c$  : コンクリート圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )

$d$  : スタッド軸径 ( $\text{cm}$ )

$\rho$  : スタッド間隔 ( $\text{cm}$ )

表3 押抜き試験体疲労試験結果

| 試験体     | コンクリート<br>強度: $F_c$<br>( $\text{kg/cm}^2$ ) | $P_{\max}$<br>(ton) | $S_r$<br>( $\text{kg/cm}$ ) | $N_f$<br>(cycles) |
|---------|---------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|
| ES-15-1 | 233                                         | 40                  | 300                         | 108,000           |
| ES-15-2 | 230                                         | 30                  | 225                         | 285,000           |
| ES-15-3 | 233                                         | 15                  | 113                         | 22,100,000        |
| ES-30-1 | 285                                         | 55                  | 206                         | 234,000           |
| ES-30-2 | 236                                         | 45                  | 169                         | 238,000           |
| ES-30-3 | 290                                         | 40                  | 150                         | 2,587,000         |
| ES-30-4 | 295                                         | 30                  | 113                         | 16,190,000        |
| ES-60-1 | 213                                         | 30                  | 113                         | 78,000            |
| ES-60-2 | 250                                         | 25                  | 93.7                        | 420,000           |
| ES-60-3 | 235                                         | 20                  | 75.0                        | 14,940,000        |
| PS-15-1 | 238                                         | 40                  | 300                         | 58,000            |
| PS-15-2 | 233                                         | 30                  | 225                         | 138,000           |
| PS-15-3 | 256                                         | 15                  | 113                         | 3,138,000         |
| PS-30-1 | 285                                         | 55                  | 206                         | 18,000            |
| PS-30-2 | 290                                         | 40                  | 150                         | 60,000            |
| PS-30-3 | 295                                         | 30                  | 113                         | 221,000           |
| PS-60-1 | 208                                         | 30                  | 113                         | 15,000            |
| PS-60-2 | 214                                         | 20                  | 75.0                        | 36,000            |
| PS-60-3 | 239                                         | 15                  | 56.3                        | 59,000            |

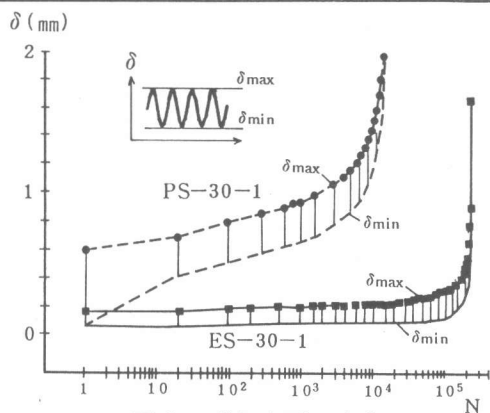


図6 ずれ変形の変化

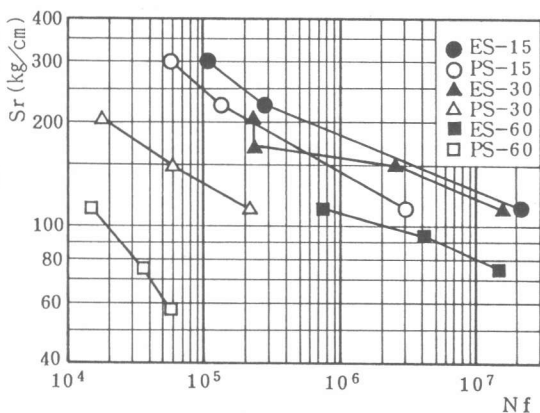


図7  $S_r \sim N_f$  関係

図8に(1)式と試験結果とを比較しながら示す。実験数、実験範囲とも限られているため、(1)式の妥当性を結論することはできないが、全体にわたり本試験結果をよく表していることが判る。

図9に、普通H形鋼での試験結果をスタッドの単位軸面積当りのせん断応力振幅  $\tau_r \sim Nf$  関係でまとめて示す。スタッド間隔があまり大きすぎると疲労強度が低下するとの傾向が観察される。<sup>[5,6]</sup>

### 3 桁試験

#### 3.1. 試験体及び試験方法

試験体の形状・寸法を図10に、試験体毎の諸元を表4に示す。試験体には、縞付H形鋼にコンクリートスラブを打設しただけのもの（スタッド併用なし、EOGタイプ）、縞付H形鋼とスタッドを併用したもの（スタッド間隔750mm一列、ESGタイプ）、普通H形鋼にスタッドを溶接した従来形のもの（スタッド間隔250mm一列、PSGタイプ）の3種類を用意した。試験体数は、EOGタイプ3体、ESGタイプ3体、PSGタイプ2体の計8体である。使用コンクリートは同一であったが、試験時期によりコンクリート圧縮強度が表のように変化している。

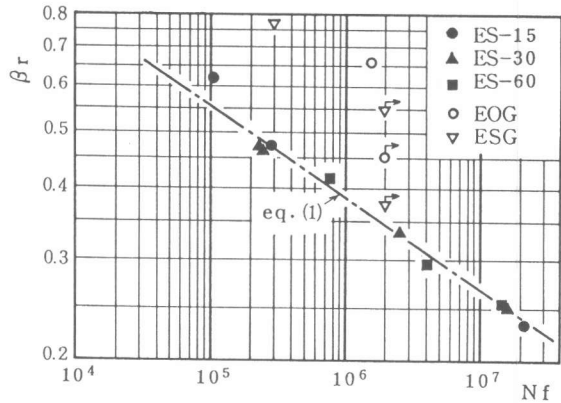


図8  $\beta_r \sim Nf$  関係

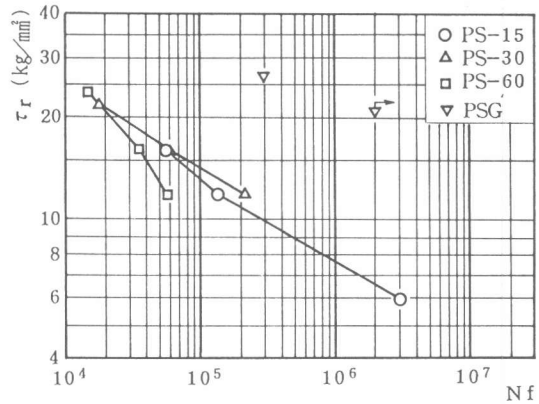


図9  $\tau \sim Nf$  関係

表4 桁試験の試験体諸元および試験結果

| 試験体   | スタッド<br>16 $\phi$ ×100<br>間隔(mm) | コンクリート<br>強度: Fc<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Pmax<br>(ton) | Smax<br>(kg/cm) | 繰返し<br>载荷数 | 結 果 概 要                                                  |
|-------|----------------------------------|-------------------------------------------|---------------|-----------------|------------|----------------------------------------------------------|
| EOG-1 | 無 し                              | 247                                       | 15            | 140             | 200万       | 繰返し試験後, P=27tですべる<br>繰返し数160万回ですべり増大<br>初回よりすべる          |
| EOG-2 |                                  | 253                                       | 21            | 195             | 200万       |                                                          |
| EOG-3 |                                  | 258                                       | 26            | 241             | 1万         |                                                          |
| ESG-1 | @750mm                           | 260                                       | 15            | 140             | 200万       | 繰返し試験後, P=44tですべる<br>繰返し試験後, P=42tですべる<br>繰返し数30万回ですべり増大 |
| ESG-2 |                                  | 266                                       | 21            | 195             | 200万       |                                                          |
| ESG-3 |                                  | 277                                       | 26            | 241             | 80万        |                                                          |
| PSG-1 | @250mm                           | 272                                       | 21            | 195             | 200万       | 繰返し試験後, P=42tですべる<br>繰返し数30万回ですべり増大                      |
| PSG-2 |                                  | 281                                       | 26            | 241             | 80万        |                                                          |

それぞれの試験体には、荷重レベルを変数として、一定の片振繰返し正曲げ荷重 ( $P_{max} \sim 3 \text{ ton}$  間) が載荷されたが、繰返し数 200 万回に達しても顕著な損傷が認められない試験体では、そこで繰返し試験を中止し、静的載荷により残存耐力を調べることにした。

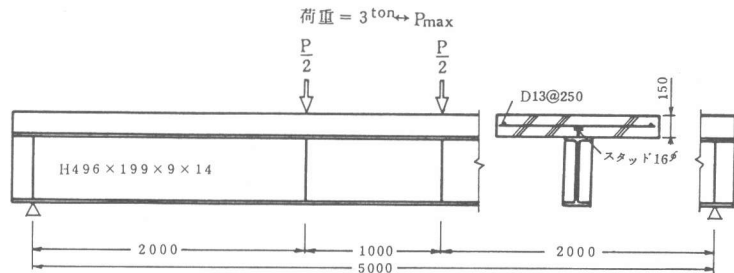


図 10 桁試験の試験体および試験方案

### 3. 2. 試験結果

表 4 に試験結果を合わせて示す。表中の  $S_{max}$  は  $P_{max}$  時のコンクリートスラブと鉄骨との間に作用する形鋼単位長さ当りのせん断応力の計算値 (コンクリートのヤング係数には実測値を用いた) である。

押抜きと合成桁の試験形式による耐力機構上の大きな違いは、押抜き試験では釣合上形鋼とコンクリートとの間に必然的に作用する離間力を、合成桁では必ずしも考える必要のないことである。事実、EOG タイプの試験体でもかなりの耐力能力があり、EOG-1 の結果から、スタッドなしでも  $S_{max} = 140 \text{ kg/cm}$  (突起形成幅 10 cm 内の単位面積当りのせん断応力では  $\tau_{max} = 14 \text{ kg/cm}^2$  に相当) 200 万回の繰返し応力に耐えられることが判る。初回ですべりを生じた EOG-3 の結果からこの試験体の静的耐力は 26 ton 程度であることが判るが、EOG-1 は同程度の残存耐力を残しており、繰返しによる損傷をほとんど受けていないことになる。

ESG タイプ試験結果から、間隔が 750 mm とかなり粗いが、スタッドを併用すると疲労性能がさらに上がり、200 万回の繰返しによっても損傷の認められない疲労強度を  $S_{max} = 200 \text{ kg/cm}$  ( $\tau_{max} = 20 \text{ kg/cm}^2$ ) とすることができると判る。ESG タイプの試験結果をスタッドを 3 倍にした普通 H 形鋼の PSG タイプの結果と比較すると、ほぼ同じような疲労性能を示していることが判る。

押抜き試験結果と比較するため、図 8 に EOG タイプ ( $\rho = \infty$ ) と ESG タイプの結果を、図 9 に PSG タイプの結果を合わせてプロットした。いずれも、合成桁試験での結果が押抜き試験性能を強度で 2 倍程度上回っており、合成桁に対し押抜き試験性能はかなりの下限値を与えている<sup>(6)</sup>。今後この隔たりをうめていく必要があるが、合成桁の継手強度設計に際し、押抜き試験による (1) 式を用いても安全であるといえる。

## 4 試験結果のまとめ

### 4. 1. 押抜き試験

- (1) スタッドとフランジ表面の突起との最大耐力に関する協同効果は少なく、最大荷重はほぼスタッド量で決定される。
- (2) 縞付 H 形鋼の適用によりコンクリートとの接合靱性が大きく損なわれることはない。
- (3) 縞付 H 形鋼の適用により、スタッド根元の応力およびずれ変形を小さくし、継手の使用限界耐力を最大荷重近くまで上げることができる。

- (4) 従来のスタッド継手では、繰返し載荷毎にずれ変形を累積していきながら破壊にいたる。これに対し、縞付H形鋼を用いると、ずれ変形は絶対量、増加率とも小さくなり、破壊近くまでずれ変形が小さく一定に保たれ、疲労寿命も永くなる。
- (5) 縞付H形鋼突起の効果は低応力振幅域となる程、また、スタッド間隔の粗い程大きくなる。スタッド間隔 150mm では 2～7 倍の、600mm では 5～400 倍の疲労寿命の向上効果が得られた。
- (6) 縞付H形鋼継手の疲労強度の実験式を得た。

#### 4. 2. 桁試験

- (7) 突起形成面に作用するせん断応力が  $\tau_{\max} = 14 \text{ kg/cm}^2$  程度以下であれば、スタッドを併用せずとも、縞付H形鋼単独で200万程度の繰返しには充分耐え得るとの結果を得た。
- (8) 縞付H形鋼適用により使用スタッド量を数分の一にまで低減できる可能性がある。
- (9) 合成桁に対し、押抜き試験疲労性能は、強度レベルで約 2 倍の下限值を与えた。

### 5 むすび

以上、合成桁の鋼とコンクリートとの接合部位での性能向上を目的として、表面に突起を付けた形鋼を用いた場合の疲労特性を調べた実験を報告した。結果は、従来のスタッド工法で一つの問題であった、低荷重域でのずれ変位の増大が大幅に改善され、継手疲労強度の向上が計れることを示している。この性能を活かせば、従来工法に存在した最大耐力と使用限界耐力との間の大きなギャップを少なからず縮めることが可能であり、例えば、静的耐力と疲労耐力とを分けて考えて、おのおのの限界状態を想定した、経済設計につながる可能性もある。また、鋼板とコンクリートの複合構造においても、本実験と同様のことが言えそうであることは想像に難くない。

本論は、コンクリートスラブが圧縮状態にある場合を対象にして、単純なモデル試験により、その特性を概括したものである。実用に供するまでには、より現実的な条件下で種々の検討を重ねて行く必要があるが、他の応力条件下での応用展開も含め、複合技術開発の基本要素の一つと考え育てて行きたい。

#### <参考文献>

- [1] 前田 幸雄： 合成桁のせん断結合に関する考察、昭和59年度首都高速道路公団委託、鋼とコンクリートの合成構造に関する調査研究報告書、土木学会、p.p.8-14、1985
- [2] K.Roik, G.Hanswille: Beitrag zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Kopfbolzendubeln, Der STAHLBAU, p.p.301-308, 1983
- [3] 日本道路協会： 道路橋示方書(11 鋼橋編)、p.p.233-257、1982
- [4] B.Kato, S.Sakamoto, F.Ohtake, K.Takada, K.Okuto, H.Nose : Composite Beams Using Newly Developed H-Shaped Steel with Protrusions, IABSE-Symposium, p.p.309-316, 1985
- [5] 高田 啓一、加藤 勉、坂本 傑、大竹 章夫：縞付H形鋼による鉄筋コンクリート部材への軸力伝達性状、日本建築学会大会講演梗概集、p.p.1437-1438、1986
- [6] 阿部 英彦：鉄道用合成桁のずれ止めに関する実験的研究、日本国有鉄道技術研究報告、No.961、1975
- [7] 平城 弘一、栗田 章光、赤尾 親助：スタッドの押抜きにおよぼす影響因子に関する基礎的研究、土木学会、合成構造の活用に関するシンポジウム、p.p.81-89、1987