

# 論文 波形鋼板ウェブ橋に用いるずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究

立神 久雄\*1・田村 聖\*2・蛭名 貴之\*3・上平 謙二\*4

**要旨:** 筆者らは、波形鋼板ウェブ橋に用いる各種ずれ止め構造のせん断特性を把握する一連の実験を行って来た。さらに、高性能軽量骨材コンクリートに着目し、各種ずれ止め構造に対する、普通コンクリートとの比較を行った。今回は、パーフォボンドリブについてまとめるとともに、新たな実験として、波形鋼板ウェブ橋の上床版の首振り作用に対応できるずれ止め構造の押抜きせん断試験を実施したので、その結果と考察を報告するものである。

**キーワード:** 波形鋼板, 高性能軽量骨材, パーフォボンドリブ, 首振り, 接合部

## 1. はじめに

コスト削減をめざした省力化の流れを受けて、複合橋梁が脚光を浴びている。その中でも、PC箱桁橋（以下、PC橋という）のコンクリートウェブを波形鋼板に置き換え、自重の軽減やプレストレスの導入効率を向上させた波形鋼板ウェブPC橋の採用事例が増えている<sup>4)5)</sup>。

このような中、さらなる軽量化を考えた場合、高性能軽量骨材コンクリート（以下、HLAコンクリートという）と波形鋼板を組合せると、30～35%軽減<sup>6)</sup>することができる。

また、波形鋼板ウェブPC橋の採用事例の増

加にともない、本構造形式特有の現象である、接合部において発生する橋軸直角方向の曲げモーメントに抵抗する接合手法が提案<sup>3)</sup>されている。

本報告では、一連のHLAコンクリートと普通コンクリートを比較したパーフォボンドリブ<sup>2)</sup>による接合方法の研究をまとめると共に、図-1(b)に示すような、橋軸直角方向の曲げモーメントに抵抗する2枚パーフォボンドリブ（チャンネルタイプ）による接合手法を提案し、押抜きせん断試験を実施したので、その実験結果と考察を報告する。

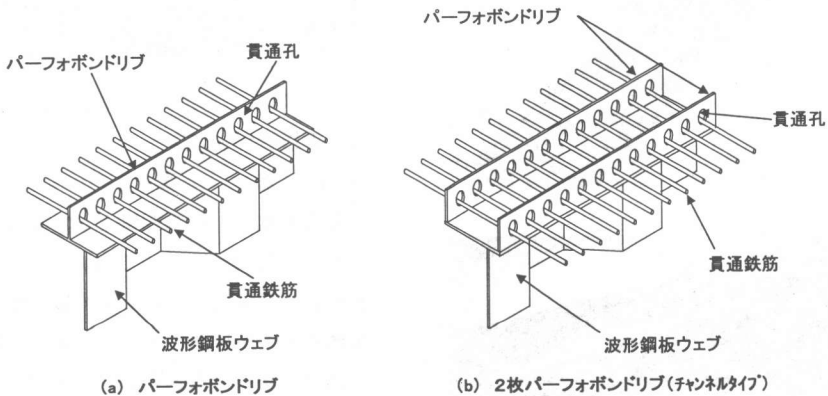


図-1 パーフォボンドリブ接合方法の概要図

\*1 ドーピー建設工業（株）技術センター 主任研究員（正会員）

\*2 ドーピー建設工業（株）技術センター 研究員（正会員）

\*3 ドーピー建設工業（株）技術センター 副主任研究員（正会員）

\*4 ドーピー建設工業（株）技術センター 技術センター長 工博（正会員）

表-1 供試体の種類

| 供試体     | ずれ止め種類    | 仕様        |       | コンクリート | 打設方向 |   |
|---------|-----------|-----------|-------|--------|------|---|
|         |           | 貫通孔径      | 貫通鉄筋  |        |      |   |
| 実験①     | TYPE2-1   | パ-フォント 1枚 | φ 80  | —      | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE2-2   | パ-フォント 1枚 | φ 80  | D 16   | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE2-3   | パ-フォント 1枚 | φ 80  | D 16   | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE2-4   | パ-フォント 1枚 | φ 60  | —      | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE2-5   | パ-フォント 1枚 | φ 60  | D 16   | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE4-1   | パ-フォント 1枚 | φ 80  | —      | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE4-2   | パ-フォント 1枚 | φ 60  | —      | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE7-1   | パ-フォント 1枚 | φ 80  | —      | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE7-2   | パ-フォント 1枚 | φ 60  | —      | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE7-3   | パ-フォント 1枚 | φ 40  | —      | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE8-1   | パ-フォント 1枚 | φ 40  | D 16   | 普通コン | 逆 |
|         | TYPE8-2   | パ-フォント 1枚 | φ 40  | D 16   | 普通コン | 逆 |
| TYPE8-3 | パ-フォント 1枚 | φ 60      | D19*2 | 普通コン   | 逆    |   |
| TYPE8-4 | パ-フォント 1枚 | φ 60      | D 29  | 普通コン   | 逆    |   |
| 実験②     | TYPEB-1   | パ-フォント 1枚 | φ 60  | D 16   | 軽量コン | 逆 |
|         | TYPEB-2   | パ-フォント 1枚 | φ 60  | D 16   | 軽量コン | 逆 |
|         | TYPEB-3   | パ-フォント 1枚 | φ 60  | D 16   | 軽量コン | 正 |
|         | TYPEB-4   | パ-フォント 1枚 | φ 60  | D 16   | 軽量コン | 正 |
| 実験③     | TYPEB-1-1 | パ-フォント 1枚 | φ 40  | D 16   | 軽量コン | 逆 |
|         | TYPEB-1-2 | パ-フォント 1枚 | φ 40  | D 16   | 軽量コン | 逆 |
|         | TYPEB-2-1 | パ-フォント 1枚 | φ 60  | D 16   | 軽量コン | 逆 |
|         | TYPEB-2-2 | パ-フォント 1枚 | φ 60  | D 16   | 軽量コン | 逆 |
|         | TYPEC-1   | パ-フォント 2枚 | φ 40  | —      | 軽量コン | 正 |
|         | TYPEC-2   | パ-フォント 2枚 | φ 40  | D 16   | 軽量コン | 正 |
|         | TYPEC-3   | パ-フォント 2枚 | φ 60  | —      | 軽量コン | 正 |
|         | TYPEC-4   | パ-フォント 2枚 | φ 60  | D 16   | 軽量コン | 正 |
| TYPEC-5 | パ-フォント 2枚 | φ 40      | —     | 普通コン   | 正    |   |
| TYPEC-6 | パ-フォント 2枚 | φ 40      | D 16  | 普通コン   | 正    |   |
| TYPEC-7 | パ-フォント 2枚 | φ 60      | —     | 普通コン   | 正    |   |
| TYPEC-8 | パ-フォント 2枚 | φ 60      | D 16  | 普通コン   | 正    |   |

2. 試験体の種類

試験体の種類を表-1 に示す。既に報告<sup>2)</sup>した実験①,②においては、孔径をφ40mm~φ80mm, 貫通鉄筋径を D16~D29, コンクリートは普通コンクリートと HLA コンクリートを用い、その打設方向も考慮した。また、今回の実験③において、TYPEC-1~TYPEC-8 は、先の図-1(b)に示した橋軸直角方向の曲げモーメントに抵抗する2枚パーフォボンドリブ (チャンネルタイプ) とした。写真-1 に、その試験体を示す。このTYPEC-1~TYPEC-8 は、ずれ止めは板厚 22mm, 高さ 150mm, 孔径 60mm または 40mm のパーフォボンドリブを片側あたり 2 枚配置した。また、橋軸直角方向貫通鉄筋 D16 を 1 本配置したものと、配置しないものを用意し、普通コンクリートと HLA コンクリートの比較も行った。ただし、実験③の TYPEC-1~TYPEC-8 は、上床版のみの接合方法を対象としたため、打設方向は正打ちのみとした。表-2 に、今回用いた HLA コンクリートの物理特性を示す。

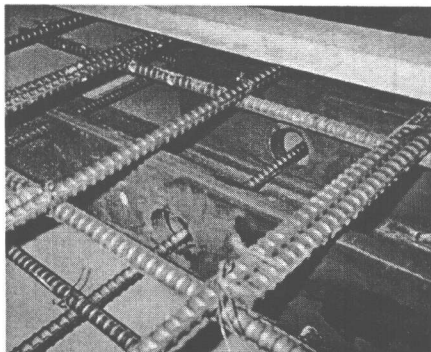
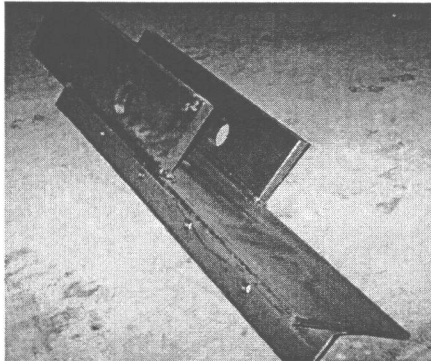


写真-1 TYPEC-4 試験体

表-2 HLA コンクリートの物理特性

| 使用材料 | 種類             | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) |
|------|----------------|-------------------------|
| セメント | C 早強ポ-ルランドセメント | 3.13                    |
| 細骨材  | S 大井川産砂        | 2.62 (表乾密度)             |
| 粗骨材  | G 人工軽量骨材       | 1.18 (絶乾密度)             |
| 混和剤  | SP 高性能AE減水剤    |                         |
|      | AE AE助剤        |                         |

3. 押抜き実験方法

3.1 概要

載荷方法は、荷重制御とし、設計耐力の 1/3 まで 20 kN ピッチによる漸増繰返し載荷法を 3 回行い、最後は、同ピッチで最大せん断耐力と破壊モードが確認できるまで載荷を繰返した。計測は、載荷荷重とともに、鋼フランジとコンクリートの間の鉛直方向および水平方向の相対ずれを計測した。また、パーフォボンドの押し抜かれる側のコンクリートを発砲スチロールで削除した。図-2 に試験体のずれ量計測位置図を示す。

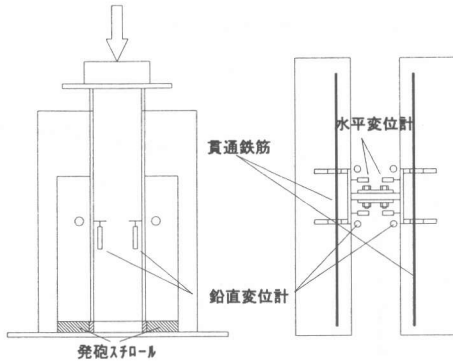


図-2 鉛直・水平ずれ量の計測位置

### 3. 2 貫通鉄筋拘束効果を考慮した耐力式

各試験体のせん断耐力値を評価するにあたり、既報の論文に新たにパーフォボンドリブの耐力式<sup>2)</sup>を提案したが、今回は、それをを用いてパーフォボンドリブの耐力を評価する。以下に、貫通鉄筋拘束効果を考慮した評価式を示す。

・コンクリートジベル

$$Q_c = 1.1 \times \phi^2 \times \{-0.818 \times (\phi / \phi_{40}) + 2.691\} \times \sigma_c \quad (1)$$

ここに、 $Q_c$  はコンクリートジベルのみのせん断耐力、 $\sigma_c$  はコンクリートの圧縮強度、 $\phi$  は孔径、 $\phi_{40}$  は孔径 40mm を示す。

・貫通鉄筋拘束効果

$$\Delta Q = 1.1 \times \phi^2 \times \{12.966 \times p - 0.312\} \times \sigma_c \quad (2)$$

ここに、 $\Delta Q$  はコンクリートジベル 1 個当たりのせん断耐力増加分、 $\sigma_c$  はコンクリートの圧縮強度、 $p$  は貫通鉄筋比(貫通鉄筋の断面積とコンクリートジベル 2 面分の断面積の比)を示す。

以上より、貫通鉄筋の拘束効果を考慮したコンクリートジベルのせん断耐力の算定は、式(3)で評価できる。

$$Q = Q_c + \Delta Q \quad (3)$$

ここに、 $Q$  は貫通鉄筋の拘束効果を考慮したコンクリートジベルのせん断耐力を示す。

また、今回提案した 2 枚パーフォボンドリブ(チャンネルタイプ)は式(3)を 2 倍した式(4)により耐力算出した。

$$Q = 2(Q_c + \Delta Q) \quad (4)$$

以上の評価式は、既報の論文<sup>2)</sup>でも述べているが、コンクリートジベルの孔径の適用範囲は 40mm~80mm であり、貫通鉄筋の断面積とコンクリートジベル 2 面分の断面積の貫通鉄筋比は、0.03 以上の場合に有効となる。また、レオンハルトらの研究<sup>1)</sup>では、安全係数(0.7)を考慮した式を提案しているが、上記の式においても安全係数(0.7)を考慮した式となっている。

### 3. 3 実験結果および考察

表-3 に各試験体のせん断耐力値を示す。表中の耐力値は、各試験体の左右の合計値を示す。ただし、TYPEC-3、TYPEC-4 および TYPEC-8 は、載荷装置の性能上、途中で載荷を中止した。

各試験体とも、実験値が設計耐力を下回ることはなく、先に示した式(3)および式(4)により十分に評価できると考える。

図-3 に参考として、2 枚パーフォボンドリブ(チャンネルタイプ)の荷重-鉛直変位図線を示す。この図から、相対ずれ量は最終耐力の 1/3 相当値では、殆どずれが生じていないことがわかる。また、TYPEC-1 は貫通鉄筋を配置しておらず、TYPEC-2 は D16 の貫通鉄筋を配置しており、両者を比較すると貫通鉄筋の効果として耐力越えてからもじん性が確保されることがわかる。

### 4. 横方向曲げモーメントに対する試設計

ここでは、図-4 および図-5 に示すモデル橋を設定して、今回提案した 2 枚パーフォボンドリブ(チャンネルタイプ)の水平せん断力と接合部に発生する橋軸直角方向の曲げモーメントに対する試設計を行った。この試設計あたり、設計せん断力は、水平せん断力と橋軸直角方向の曲げモーメントにより発生する鉛直方向のせん断力を合成したせん断力を用いた。

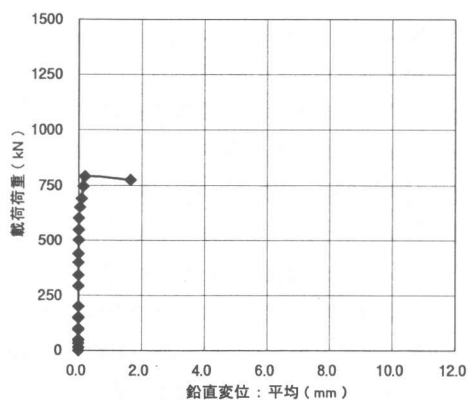
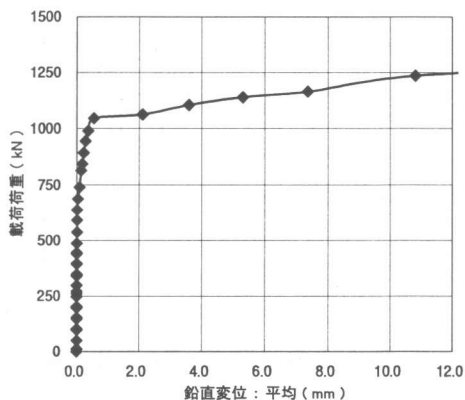
P- $\delta$  曲線(TYPEC-1)P- $\delta$  曲線(TYPEC-2)

図-3 2枚パーフォボンドリブの荷重—鉛直変位図

表-3 各試験体のせん断耐力値

| 供試体     | 圧縮強度<br>( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 弾性係数<br>( $\text{kN}/\text{mm}^2$ ) | 実験値<br>②<br>(kN) | 設計耐力                         |            |                            |                         | 比率<br>②/① |       |
|---------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|------------------------------|------------|----------------------------|-------------------------|-----------|-------|
|         |                                    |                                     |                  | Qc<br>コンクリート<br>トジベル<br>(kN) | p<br>貫通鉄筋比 | $\Delta Q$<br>拘束効果<br>(kN) | $\Sigma Q$<br>①<br>(kN) |           |       |
| 実験①     | TYPE2-1                            | 57.6                                | 37.6             | 1211.3                       | 856.0      | 0.000                      | 0.0                     | 856.0     | 1.415 |
|         | TYPE2-2                            | 54.1                                | 34.8             | 1152.5                       | 803.6      | 0.020                      | 0.0                     | 803.6     | 1.434 |
|         | TYPE2-3                            | 54.4                                | 35.2             | 1160.3                       | 807.9      | 0.020                      | 0.0                     | 807.9     | 1.436 |
|         | TYPE2-4                            | 57.3                                | 37.3             | 852.6                        | 664.7      | 0.000                      | 0.0                     | 664.7     | 1.283 |
|         | TYPE2-5                            | 57.7                                | 35.0             | 815.4                        | 669.3      | 0.035                      | 65.5                    | 734.8     | 1.110 |
|         | TYPE4-1                            | 50.0                                | 30.8             | 1205.4                       | 742.4      | 0.000                      | 0.0                     | 742.4     | 1.624 |
|         | TYPE4-2                            | 51.8                                | 31.8             | 819.3                        | 601.1      | 0.000                      | 0.0                     | 601.1     | 1.363 |
|         | TYPE7-1                            | 51.5                                | 31.1             | 1111.3                       | 765.3      | 0.000                      | 0.0                     | 765.3     | 1.452 |
|         | TYPE7-2                            | 49.0                                | 31.6             | 764.4                        | 568.4      | 0.000                      | 0.0                     | 568.4     | 1.345 |
|         | TYPE7-3                            | 48.9                                | 33.4             | 497.8                        | 322.1      | 0.000                      | 0.0                     | 322.1     | 1.546 |
|         | TYPE8-1                            | 52.8                                | 32.4             | 670.3                        | 348.4      | 0.079                      | 132.5                   | 480.9     | 1.394 |
|         | TYPE8-2                            | 49.9                                | 31.7             | 668.4                        | 328.9      | 0.079                      | 125.1                   | 454.0     | 1.472 |
| TYPE8-3 | 45.5                               | 30.4                                | 1409.2           | 527.0                        | 0.101      | 360.6                      | 887.7                   | 1.588     |       |
| TYPE8-4 | 46.1                               | 29.4                                | 1336.7           | 535.1                        | 0.114      | 424.3                      | 959.4                   | 1.393     |       |
| 実験②     | TYPEB-1                            | 41.7                                | 20.3             | 674.2                        | 483.5      | 0.035                      | 47.3                    | 530.9     | 1.270 |
|         | TYPEB-2                            | 41.5                                | 20.3             | 607.0                        | 481.2      | 0.035                      | 47.1                    | 528.3     | 1.149 |
|         | TYPEB-3                            | 41.5                                | 20.3             | 841.3                        | 481.2      | 0.035                      | 47.1                    | 528.3     | 1.592 |
|         | TYPEB-4                            | 44.3                                | 22.8             | 1017.8                       | 513.7      | 0.035                      | 50.3                    | 564.0     | 1.805 |
| 実験③     | TYPEB-1-1                          | 59.5                                | 25.5             | 1041.4                       | 392.3      | 0.079                      | 149.2                   | 541.5     | 1.923 |
|         | TYPEB-1-2                          | 59.5                                | 25.5             | 1077.3                       | 392.3      | 0.079                      | 149.2                   | 541.5     | 1.989 |
|         | TYPEB-2-1                          | 59.5                                | 25.5             | 1161.9                       | 689.9      | 0.035                      | 67.6                    | 757.5     | 1.534 |
|         | TYPEB-2-2                          | 59.5                                | 25.5             | 1219.4                       | 689.9      | 0.035                      | 67.6                    | 757.5     | 1.610 |
|         | TYPEC-1                            | 58.2                                | 23.9             | 792.2                        | 767.4      | 0.000                      | 0.0                     | 767.4     | 1.032 |
|         | TYPEC-2                            | 58.2                                | 23.9             | 1361.2                       | 767.4      | 0.079                      | 292.0                   | 1059.4    | 1.285 |
|         | TYPEC-3                            | 66.7                                | 26.0             | 1378.9                       | 1546.8     | 0.000                      | 0.0                     | 1546.8    | 中断    |
|         | TYPEC-4                            | 66.7                                | 26.0             | 1383.8                       | 1546.8     | 0.035                      | 151.5                   | 1698.2    | 中断    |
|         | TYPEC-5                            | 46.5                                | 30.7             | 972.5                        | 613.1      | 0.000                      | 0.0                     | 613.1     | 1.586 |
|         | TYPEC-6                            | 46.5                                | 30.7             | 1368.7                       | 613.1      | 0.079                      | 233.3                   | 846.4     | 1.617 |
| TYPEC-7 | 54.5                               | 32.1                                | 1383.1           | 1263.8                       | 0.000      | 0.0                        | 1263.8                  | 1.094     |       |
| TYPEC-8 | 54.5                               | 32.1                                | 1432.4           | 1263.8                       | 0.035      | 123.8                      | 1387.6                  | 中断        |       |

側面図

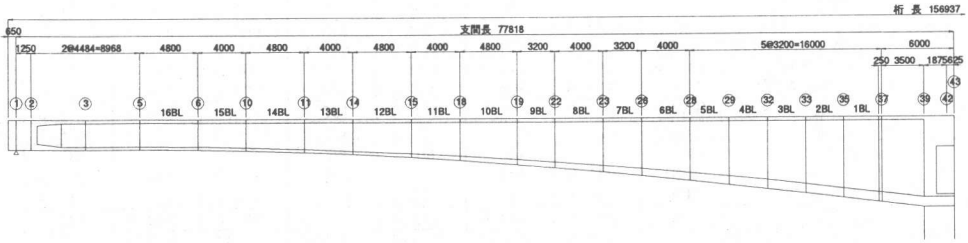


図-4 試設計に設定したモデル橋

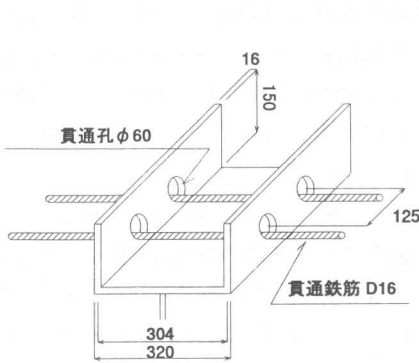


図-5 上床版の接合部構造

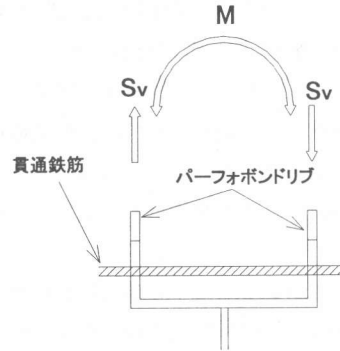


図-6 貫通鉄筋の評価方法

本試設計では鋼製のパーフォボンドリブのせん断およびコンクリートジベルの割裂破壊ではなく、コンクリートジベルのせん断が決定的な要因となることを基本とした<sup>14)</sup>。

式(5)、式(6)、および式(7)に設計せん断力の算出式を示す。また、図-6に鉛直方向せん断力の概念図を示す。

$$Sh = Sd \times Q / I \quad (5)$$

$$Sv = M / (2 \times bu) \quad (6)$$

$$S = \sqrt{(Sh^2 + Sv^2)} \quad (7)$$

ここに、Sh は設計水平せん断力、Sd は断面に作用するせん断力、Q は主桁の断面 1 次モーメント、I は主桁の断面 2 次モーメント、Sv は設計鉛直せん断力、M は橋軸直角方向の設計曲げモーメント、bu は橋軸直角方向の貫通孔間隔、S は水平方向せん断力と鉛直方向せん断力を合成したせん断力を示す。試設計結果を表-4に示す。

今回の試設計では、図-5 で設定した、貫通孔φ60、貫通孔の橋軸方向間隔 125mm、貫通孔の橋軸直角方向間隔 304mm のディテールで計算を行ったが、表-4 に示すように各断面とも橋軸方向の必要貫通孔間隔は 125mm 以上であり、今回提案した 2 枚パーフォボンドリブ（チャンネルタイプ）は、波形鋼板と上床版の接合形式として水平せん断力および橋軸直角方向の曲げモーメントに十分に抵抗する構造であると考えられる。

5. まとめ

一連の実験から波形鋼板ウェブ橋の床版の接合部において、パーフォボンドリブをずれ止めとして使用した場合の性状について、以下のことがわかった。

- ① 設計荷重時レベル（耐力の 1/3）では、パーフォボンドリブは、ずれがほとんど発生してい

表-4 橋軸方向:必要貫通孔間隔

| 終局荷重時                  |                  | 2      | 5      | 10     | 18     | 23      | 28      | 32      | 36      |
|------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 水平せん断                  | せん断力 (kN)        | 5571.1 | 3118.0 | 2939.0 | 7485.0 | 11330.0 | 14030.0 | 16876.0 | 22442.0 |
|                        | 水平せん断力 (kN/m)    | 2598.8 | 1431.4 | 1284.0 | 2417.9 | 2810.6  | 2973.2  | 3131.5  | 2895.6  |
| 首振り                    | 設計曲げモーメント (kN・m) | 127.9  | 115.7  | 120.4  | 116.0  | 109.8   | 106.6   | 103.7   | 174.3   |
|                        | 貫通孔間隔 (mm)       | 304.0  | 304.0  | 304.0  | 304.0  | 304.0   | 304.0   | 304.0   | 304.0   |
|                        | 鉛直せん断力 (kN/m)    | 210.3  | 190.3  | 198.0  | 190.8  | 180.6   | 175.3   | 170.5   | 286.7   |
| 合成せん断力 (kN/m)          |                  | 2607.3 | 1444.0 | 1299.2 | 2425.4 | 2816.4  | 2978.4  | 3136.1  | 2909.8  |
| 貫通孔径 (mm)              |                  | 60     | 60     | 60     | 60     | 60      | 60      | 60      | 60      |
| コンクリートヘル Q (kN)        |                  | 231.9  | 231.9  | 231.9  | 231.9  | 231.9   | 231.9   | 231.9   | 231.9   |
| 鉄筋拘束効果 $\Delta Q$ (kN) |                  | 111.1  | 111.1  | 111.1  | 111.1  | 111.1   | 111.1   | 111.1   | 111.1   |
| 合計耐力 (kN)              |                  | 343.0  | 343.0  | 343.0  | 343.0  | 343.0   | 343.0   | 343.0   | 343.0   |
| 橋軸方向:必要貫通孔間隔 (m)       |                  | 0.263  | 0.475  | 0.528  | 0.283  | 0.244   | 0.230   | 0.219   | 0.236   |

ないことがわかった。

② パーフォボンドリブの耐力は、式(3)および式(4)で評価できることがわかった。

③ 今回提案した2枚パーフォボンドリブ(チャンネルタイプ)接合形式は、上床版の接合構造とし水平せん断力および橋軸直角方向の曲げモーメントに十分に抵抗する構造であると考え。

最近の軽量コンクリートの研究において、例えば、田村らの研究<sup>6)7)8)</sup>においては、せん断応耐力特性、PC定着部耐力特性などを確認しており、また、本研究においては、接合部の性状も確認でき、軽量コンクリートを用いた波形鋼板ウェブ橋の実現に一步近づいたと考える。

今後、2枚パーフォボンドリブ(チャンネルタイプ)接合構造の横方向性状および水平せん断力・橋軸直角方向の曲げモーメントの合成作用などの検討を行っていきたいと考える。

**謝辞:** 2枚パーフォボンドリブ(チャンネルタイプ)接合構造の試験体製作にあたり、高性能軽量骨材コンクリートの配合・打設に多大なご助力を頂いた太平洋セメント(株)研究本部の前堀伸平氏に、この場を借りて感謝の意を表します。

**参考文献**

1) Fritz Leonhardt, Wolfhart Andra, Hans-Peter Andra und Wolfgang Harre : Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, BETON-UND

STAHLBETONBAU, pp325~331, 1987年

2) 新谷英司, 蛭名貴之, 上平謙二, 柳下文夫: 波形鋼板とコンクリート床版の結合方法に関する実験的研究, 第9回プレレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集 pp91~96, 1999.10.

3) 山中圭介, 山本昌孝, 鈴木真, 小林和夫: 波形鋼板ウェブPC橋(中野高架橋その1工事)の設計概要, 第10回プレレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集 pp1~5, 2000.10.

4) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会: 波形鋼板ウェブPC橋—計画マニュアル(案), 1998.10.

5) (社)プレレストコンクリート技術協会, 複合構造設計施工基準(案), 1999.12

6) 田村聖, 立神久雄, 上平謙二, 石川雄康, 前堀伸平: 高性能軽量骨材コンクリートおよび波形鋼板を用いたPC橋の試設計, 土木学会第55回年次学術講演会概要集, pp.670-671, 1999.10.

7) 前堀伸平, 田村聖, 岡本享久, 羽淳一郎: 高性能軽量骨材コンクリートを用いた大型PCはりのせん断耐力性状, 軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.95-100, 2000.8.

8) 田村聖, 前堀伸平, 濱田譲, 羽淳一郎: 高性能軽量骨材コンクリートを用いたPC定着部の耐力特性, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.22, No.3, pp.871-876, 2000.6.