

# パーフォボンドリブ接合の側面かぶりの影響と引抜き耐力について

忽那 幸浩 \*1・奥野 博敏 \*2・白谷 智之 \*3・蛭名 貴之 \*4

## 1. はじめに

近年、耐久性と経済性の観点からウェブに波形鋼板を用いたプレストレストコンクリート（以下 PC という）箱桁橋の接合部にパーフォボンドリブ接合（以下 PBL 接合という）を用いる場合があり、関連した研究が行われている。日本道路公団においても、波形鋼板ウェブ橋に従来から用いられているアングルジベル接合と力学的特性および耐久性の観点から、同等あるいは同等以上の特性<sup>1)</sup>が明らかとなった PBL 接合が採用されつつある。事例としては、北海道縦貫自動車道の遊楽部川橋<sup>2)</sup>、第二東名高速道路の豊田東ジャンクション（以下、豊田東 JCT という）C ランプ第二橋などがある。

本稿は、この中の C ランプ第二橋で行われた接合部の実験について報告するものである。

## 2. 日本における波形鋼板ウェブの接合構造の変遷

日本で最初に採用された波形鋼板ウェブと床版の接合構造は、新開橋<sup>3)</sup>や銀山御幸橋<sup>4)</sup>にみる、頭付きスタッド接合（図 - 1 参照）であった。これは、一般的な鋼・コンクリート合成桁で用いられている接合構造である。

また、本谷橋<sup>5)</sup>においては図 - 2 に示すような埋込み接合が採用された。本構造は、波形鋼板の先端部に接合棒鋼をフレア溶接し、コンクリートジベル孔に貫通鉄筋を配置して直接コンクリート床版に埋込む構造である。次に、図 - 3 に示すようなフランスで実績のあるアングルジベル接合

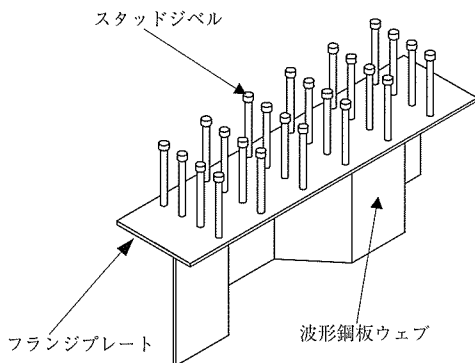


図 - 1 頭付きスタッド接合

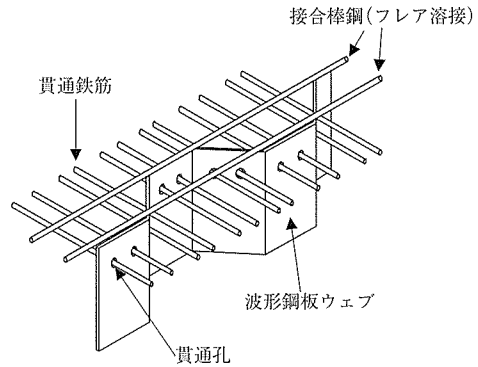


図 - 2 埋込み接合

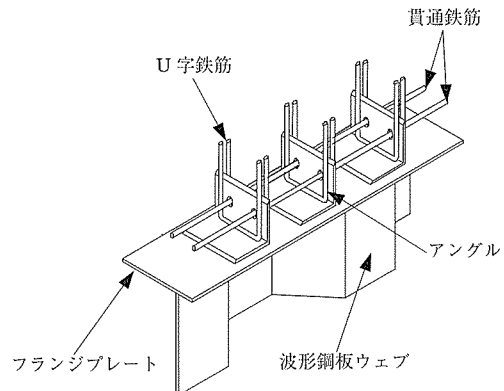


図 - 3 アングルジベル接合

が採用された。本構造は、ずれせん断力挙動に対してはアングルが抵抗し、アップリフトや首振り挙動に対しては貫通鉄筋と U 字鉄筋で抵抗する構造である。

その後、更なる耐久性、施工性および経済性を求めて、ツインパーフォボンドリブ接合（以下、Twin-PBL 接合という）およびフラスコ形パーフォボンドリブ接合（以下、F-PBL 接合という）が開発された。

## 3. C ランプ第二橋の接合構造

C ランプ第二橋は、橋長 244.0 m、支間 86.0 + 94.1 + 61.9 m の PC 3 径間連続ラーメン波形鋼板ウェブ箱桁橋であり、主桁断面は、標準桁高 3.700 m、柱頭部桁高 6.500 m の 2 室断面を有する橋梁である。また、P 2 橋脚は門型の

\*1 Yukihiko KUTUNA：日本道路公団 中部支社 構造技術課

\*2 Hirotohi OKUNO：日本道路公団 中部支社 豊田工事事務所

\*3 Tomoyuki SHIRATANI：ドービー建設工業(株) 西日本支社

\*4 Takayuki EBINA：ドービー建設工業(株) 技術センター

鋼製橋脚（コンクリートを充填）に波形ウェブ桁が結合される構造となっており、将来は、第二東名高速道路の下り線が橋脚の間を通ることとなる。

本橋は、波形鋼板ウェブと上床版の接合に Twin-PBL 接合（図 - 4（a）参照）、波形鋼板ウェブと下床版の接合に F-PBL 接合+頭付きスタッド接合（図 - 4（b）参照）を採用した特長を有している。

この PBL 接合は、レオンハルト<sup>6)</sup>らによって提案された接合構造であり、せん断耐荷機構および疲労耐久性にすぐれていると報告されている。また、遊楽部川橋では、Twin-PBL 接合のずれせん断挙動、首振りモーメントに対する耐力および疲労耐久性の確認が行われている。

上床版側の Twin-PBL 接合は、孔あき鋼板を橋軸方向に

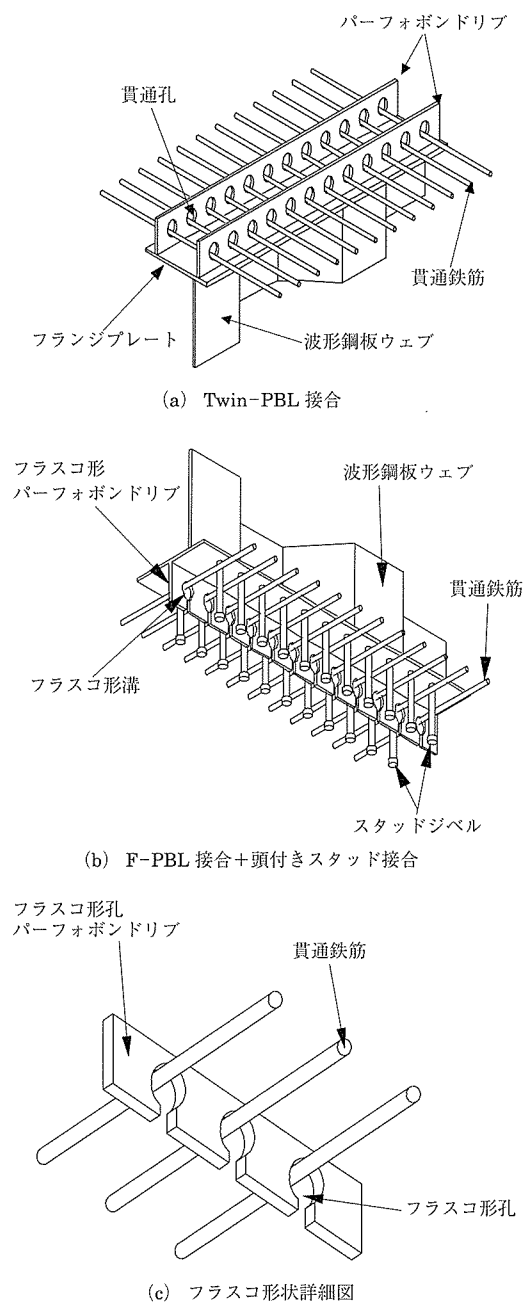


図 - 4 パーフォボンドリブ接合の概念図

2枚併設することにより、橋軸方向の水平せん断力の向上と接合部の橋軸直角方向の輪荷重にともなう首振り挙動に有効に抵抗できる構造である。この接合方法は、アングルジベル接合に比べ、接合構造の製作が省力化されるため、経済性に優れている。

また、下床版側は首振り挙動がきわめて小さいことやスタッドのみではブリージングによる耐力低下などが懸念されたため、F-PBL 接合と頭付きスタッド接合を併用した接合構造とした。ここで、コンクリートジベル孔形状をフラスコ形（図 - 4（c）参照）にしたのは、鉄筋の組立てを容易にし施工の省力化を意図したものである。

### 3.1 押抜き実験

本橋の主桁断面は張出し架設時の外ケーブルを上床版とウェブのハンチ部に定着させる構造としたため、ウェブに若干のコンクリート部を設けた断面形状（コンクリートエッジタイプ）となっている（図 - 5 参照）。このため、

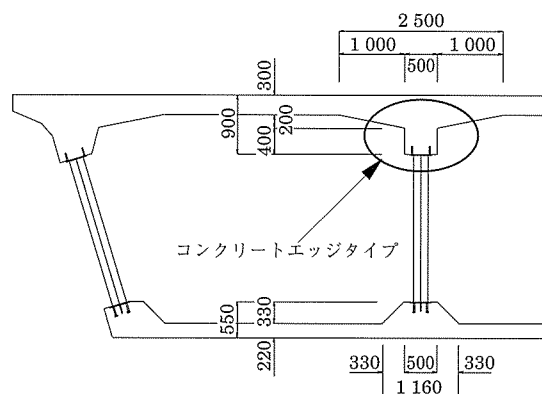


図 - 5 コンクリートエッジ断面

Twin-PBL 接合のリブ部における縁端距離の影響による、せん断耐力の低下が懸念された。そこで、これらの接合方法におけるせん断耐荷挙動を把握するため、押抜き実験（図 - 6 参照）を行った。実験は、以下の項目に着目し、水平せん断耐力の比較検討を行った。

- ① コンクリートの側面かぶり（図 - 7 参照）が、Twin-PBL 接合のせん断耐力に及ぼす影響。
- ② 鉄筋の施工性を考慮し、PBL の孔をフラスコ形状（図 - 8 参照）にした場合のせん断耐力。
- ③ 鉄筋の施工性を考慮し、PBL の孔を U 形状（図 - 9 参照）にした場合のせん断耐力。

#### (1) 押抜き実験概要

試験体の種類を表 - 3 に、試験体詳細図を図 - 10 にそれぞれ示す。

表 - 1 に示すとおり、試験体は、A タイプ～E タイプの 5 種類で、貫通鉄筋はすべて D 16 を配置した。A タイプ～D タイプまでは、上床版コンクリートと波形鋼板の接合を想定し、コンクリートの打設方向を正打ちとした。また、E タイプのみ下床版コンクリートと波形鋼板の接合を考慮したため、コンクリートの打設方向を逆打ちとした。

A タイプおよび B タイプは PBL のリブの縁端距離に着目

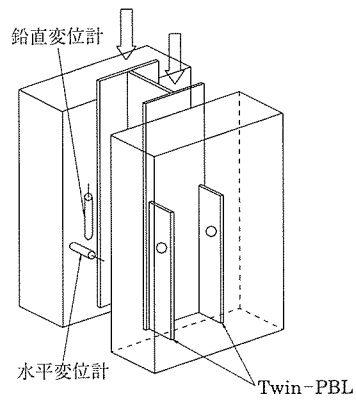


図 - 6 押抜き実験概要図

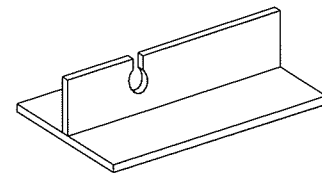


図 - 8 フラスコ形状の概要図

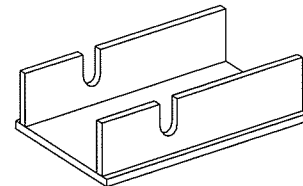


図 - 9 U 形状の概要図

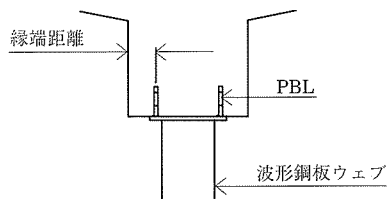


図 - 7 Twin - PBL と縁端距離の関係

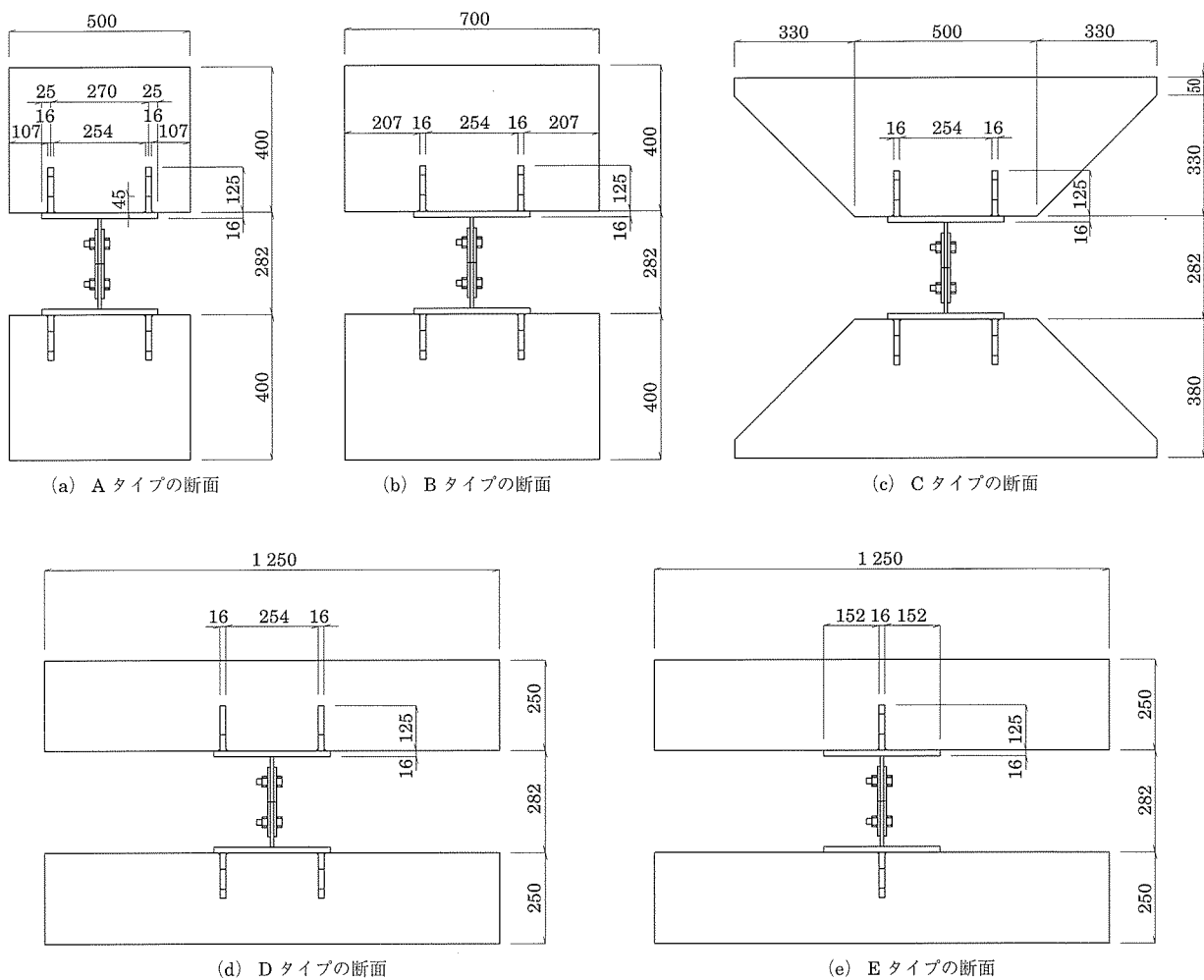
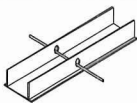
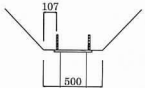
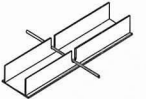
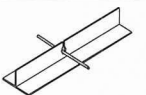


図 - 10 押抜き試験体詳細図

表 - 1 押抜き試験体の種類

|       | 試験体の種類                                                                            | リブのかぶり<br>(mm) | ずれ止めの種類                                                                                                      | 貫通鉄筋 | 打設方向 |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
| A タイプ |  | 107            | <br>Twin-PBL<br>円孔<br>φ 55  | D16  | 正打ち  |
| B タイプ |  | 207            | <br>Twin-PBL<br>円孔<br>φ 55  | D16  | 正打ち  |
| C タイプ |  | 107<br>+ハンチ    | <br>Twin-PBL<br>円孔<br>φ 55  | D16  | 正打ち  |
| D タイプ | 標準                                                                                | —              | <br>Twin-PBL<br>U 形<br>φ 55 | D16  | 正打ち  |
| E タイプ | 標準                                                                                | —              | <br>F-PBL<br>フラスコ形<br>φ 55  | D16  | 逆打ち  |

し、リブの縁端距離が、せん断耐力に及ぼす影響を把握することを目的とし、C タイプは、ハンチを設けたことによるせん断耐力への影響を把握することを目的とした。

D タイプは、PBL の孔を U 形にしたことによるせん断耐力への影響を把握すること、E タイプは、PBL の孔をフラスコ形にしたことによるせん断耐力への影響を把握することを目的とした。

A ～ D タイプに用いた Twin-PBL 接合のリブ高さ  $h$  とリブ間隔  $b$  の関係は、 $b/h = 2.16$  で統一させることとし、試験体に用いたリブ厚 ( $t = 16$  mm)、リブ高さ ( $h = 125$  mm)、リブ間隔 ( $b = 270$  mm) については、実橋を想定し決定した。試験体に使用した材料は、鋼部材が SS 400、鉄筋は SD 345 であり、コンクリートについては圧縮強度試験（試験日材齢）より得られた結果を表 - 2 に示す。

表 - 2 コンクリートの材料特性

|                               | A タイプ               | B タイプ               | C タイプ               | D タイプ               | E タイプ               |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 設計基準強度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | 40                  |                     |                     |                     |                     |
| 圧縮強度<br>( $\text{N/mm}^2$ )   | 52.6                | 52.1                | 50.8                | 51.0                | 54.8                |
| ヤング係数<br>( $\text{N/mm}^2$ )  | $3.02\text{E} + 04$ | $2.91\text{E} + 04$ | $3.01\text{E} + 04$ | $2.91\text{E} + 04$ | $3.09\text{E} + 04$ |

表 - 3 実験結果と PBL 土木学会式との比較

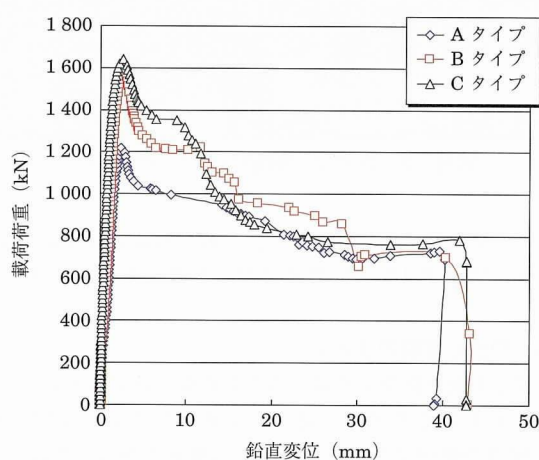
| 試験体   | 圧縮強度<br>( $\text{N/mm}^2$ ) | PBL 枚数<br>(全体) | PBL 土木<br>学会式① | 平均実験値<br>② | 比率<br>②/① |
|-------|-----------------------------|----------------|----------------|------------|-----------|
| A タイプ | 52.6                        | 4              | 1 151.2        | 1 174.0    | 1.02      |
| B タイプ | 52.1                        |                | 1 143.1        | 1 494.2    | 1.31      |
| C タイプ | 50.8                        |                | 1 122.2        | 1 501.5    | 1.34      |
| D タイプ | 51.0                        |                | 1 125.4        | 1 766.8    | 1.57      |
| E タイプ | 54.8                        | 2              | 593.3          | 986.0      | 1.66      |

## (2) 押抜き実験結果

A ～ C タイプの荷重－変位曲線を図 - 11 に示す。図中の荷重は、左右の合計値を示し、鉛直変位量は、4 箇所 の平均値を示す。また、各試験体の実験結果と PBL 土木学会式<sup>7)</sup>との比較を表 - 3 に示す。図 - 11 および表 - 3 より Twin-PBL 接合のリブの縁端距離が少ない A タイプのみ、最大せん断耐力が小さいことがわかる。この要因は、破壊時の試験体の側面に発生したクラック（写真 - 1 参照）から、Twin-PBL 接合のリブの縁端距離が少なかったためと考えられる。

D タイプの荷重-変位曲線を図 - 12 に示す。また、破壊時の状況を写真 - 2 に示すが、この状況写真から明らかに、D タイプではフランジプレートに座屈が生じたため、試験を途中で中断する結果となった。この原因は、PBL の孔を U 形としたため引抜き（アップリフト）の拘束機能を有していないためと考えられる。

次に、E タイプの荷重-変位曲線も図 - 12 に示すが、D タイプのようなフランジプレートの座屈現象は生じることな

図 - 11 A, B, C タイプの P- $\delta$  曲線

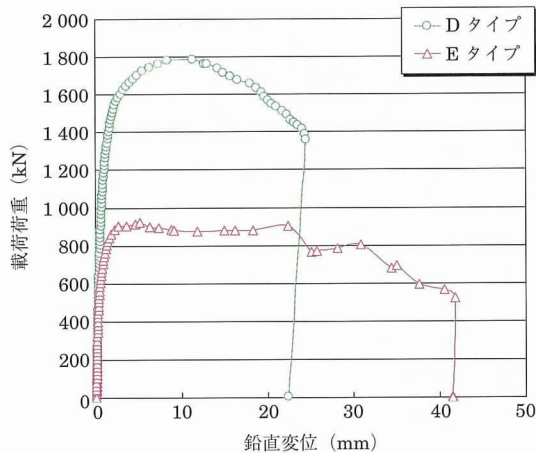
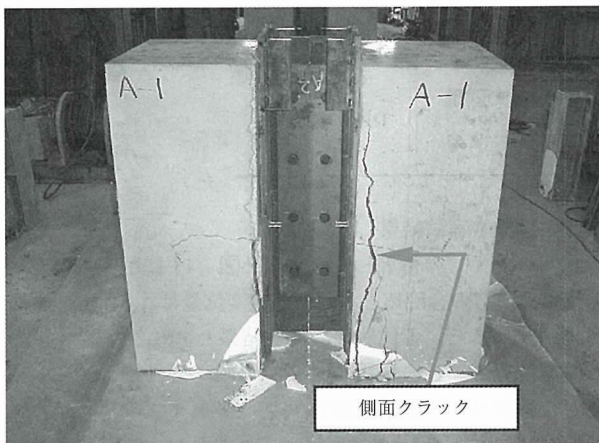
図 - 12 D, E タイプの P- $\delta$  曲線

写真 - 1 A タイプ試験体の破壊状況

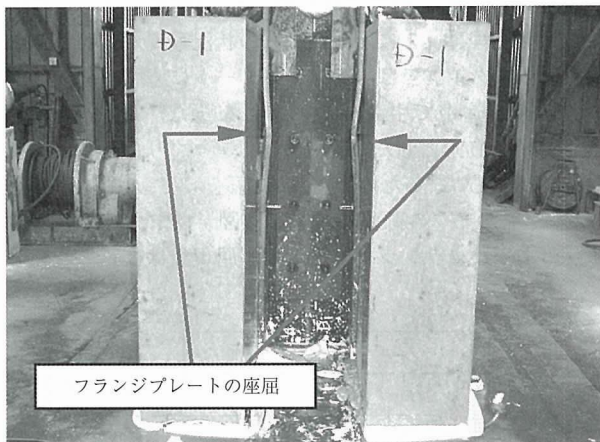


写真 - 2 D タイプ試験体の FP の座屈

く、ずれせん断により破壊した。今回の押抜き実験からは、引抜き（アップリフト）の拘束機能を有していたと考えられる。

### (3) 押抜き実験のまとめ

本押抜き実験結果より以下のことが明らかとなった。

- ① B および C タイプに比べ、A タイプのように PBL の縁端距離が少ない場合は、せん断耐力が低下する。また、A タイプは PBL 土木学会式との比較では、ほぼ

等しい結果（比率＝1.02）となったが、B および C タイプの結果や過去の押抜き実験結果では 1.3 倍程度の耐力を有することが確認されている。したがって、実設計で A タイプのように PBL の縁端距離が少ない接合形式を用いる場合、安全率が 1.3 倍程度確保できるように PBL 土木学会式を低減する必要がある。

- ② D タイプのように孔の形状を U 形にした場合は、引抜き（アップリフト）の拘束機能を有していないことがわかった。このため実際の橋梁に用いた場合は、首振りモーメントに対する抵抗性がない。
- ③ E タイプのように孔の形状をフラスコ形にした場合は、引抜き（アップリフト）の拘束機能および十分なせん断耐力も有している。

### 3.2 引抜き実験

本橋の下床版側の接合部には、施工の省力化から F-PBL 接合が採用されている。押抜き実験結果からは、引抜き（アップリフト）の拘束機能を有していると考えられるが、ここでは、フラスコ形状の純粋な引抜きに対する抵抗力の確認を行う。

周知のように、通常の鋼・コンクリート合成桁橋のずれ止めのように、設計上はせん断力しか受けない場合でも、ずれ止めには引抜き（アップリフト）に抵抗力を有していなければならない。EUROCODE 4 PART 1, 6.6 Shear Connection<sup>8)</sup> では、引抜き耐力は終局せん断耐力の 1 / 10 以上なければならないと規定しており、通常の頭付きスタッドはこの規定を十分満足しているが、それ以外の形式のずれ止めを採用する場合には、この規定を遵守しなければならない。また、わが国の土木学会鋼構造物設計 PART B 合成構造物<sup>9)</sup> では、ずれ止めには頭付きスタッドを用いることを原則にしている。

そこで、本実験では F-PBL 接合が上記の引抜き耐力を有しているかを確認するために、引抜き実験を行った。

#### (1) 引抜き実験概要

引抜き実験に使用した試験体の種類を表 - 4 に示す。試験体は、円形 PBL およびフラスコ形 PBL の 2 タイプとし、孔径は円形およびフラスコ形とも  $\phi 60$ 、貫通鉄筋を D 16、フラスコ形の開口幅（図 - 13 参照）を 30 mm とした。この開口幅の 30 mm は、実橋の貫通鉄筋の最大径が D 22 であることを想定し決定した。また、各試験体のコンクリートの圧縮強度は、56 N / mm<sup>2</sup>、粗骨材の最大寸法は 20 mm、PBL の仕様は SM 490 YB（引張強度 527 N / mm<sup>2</sup>）、鉄筋は SD 345（引張強度 577 N / mm<sup>2</sup>）とした。

試験体は、フラスコ形 PBL および円形 PBL とも孔の形状以外はすべて同一とした。一例としてフラスコ形 PBL の試験体を図 - 14 に示す。

図 - 14 に示すように、試験体は一般的な PC 箱桁橋の床版厚を想定してコンクリートの厚さを 250 mm、PBL のリブ高さ  $h$ 、板厚  $t$  および孔の位置は、C ランプ第二橋で採用された形状と同じ  $h = 125$  mm、 $t = 16$  mm、孔の中心位置はフランジプレート表面から 75 mm（図 - 13 参照）とした。また、H 型鋼（440 × 300 × 11 × 18）に PBL を溶接し、荷重載荷時にフランジに曲げが作用しないように、フラン

表 - 4 押抜き試験体の種類

| 種類     | 孔 径<br>(mm) | 開口幅<br>(mm) | 貫通鉄筋 | 数量<br>(体) | 孔の形状 |
|--------|-------------|-------------|------|-----------|------|
| TYPE 1 | φ 60        | 0           | D 16 | 3         | 円    |
| TYPE 2 | φ 60        | 30          | D 16 | 3         | フラスコ |

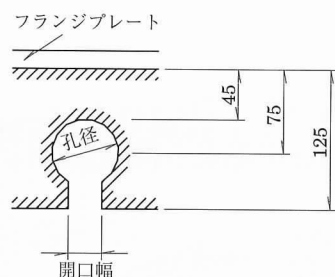


図 - 13 開口幅と孔径

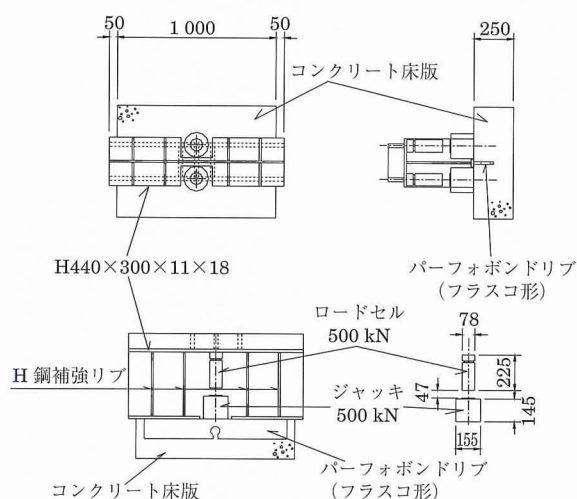


図 - 14 引抜き試験体および実験概要

ジ間およびPBLと反対側のフランジには補強リブを設置した。本引抜き実験では、PBLの孔一つあたりの引抜き耐力を把握するため、孔の個数を1試験体1個とし、フランジプレートとコンクリートの付着が耐力に影響しないようにビニールを貼付し、縁切りを行った。なお、本試験は下床版側を想定したものであるため、試験体のコンクリート打設は逆打ちで行った。

引抜き実験装置は、H型鋼の下フランジ部に□200×125の切り欠きを設け、そこに2台の500 kNジャッキとそれぞれにロードセルを設置し引抜き力を作用させた。

## (2) 引抜き実験結果

本引抜き実験の最大引抜き耐力を表-5に、荷重-変位曲線を図-15にそれぞれ示す。図-15に記載されている1/10×終局せん断耐力のラインは、前述したようにEUROCODE 4 PART 1, 6.6 Shear Connectionに記載されている規定である。

円形PBLおよびフラスコ形PBLとも、終局せん断耐力の1/3の荷重（使用限界荷重相当値）では、鉛直変位量が発生していないことがわかる。また、最大引抜き力に到達

表 - 5 引抜き試験結果

| 試験体種類     | 実験値<br>(kN) | 平均値<br>(kN) | MAX 値<br>(kN) | MIN 値<br>(kN) |
|-----------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| 円形 OBL    | TYPE 1-1    | 236.1       | 258.3         | 277.0         |
|           | TYPE 1-2    | 277.0       |               |               |
|           | TYPE 1-3    | 261.9       |               |               |
| フラスコ形 PBL | TYPE 2-1    | 229.7       | 198.4         | 170.7         |
|           | TYPE 2-2    | 194.9       |               |               |
|           | TYPE 2-3    | 170.7       |               |               |

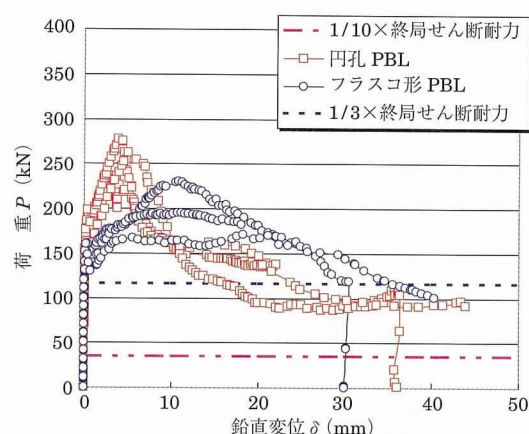


図 - 15 引抜き試験の P-δ 曲線

するまでの剛性は、円形PBLの方がフラスコ形PBLよりも大きいことがわかる。さらに、最大引抜き力を越えてからは、円形PBLよりもフラスコ形PBLの方が荷重の低下率が少なく、じん性が高い挙動を示す結果となった。

実験は、鉛直変位量が40 mm程度に達するまで載荷したが、円形PBLおよびフラスコ形PBLともに貫通鉄筋の破断は発生しなかった。

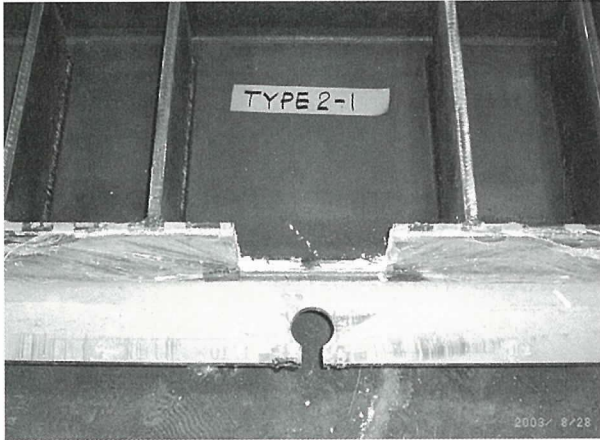
表-5から最大引抜き力 $P_{ave}$ （平均値）の値に関しては、円形PBL（ $P_{ave}=258.3$  kN）はフラスコ形PBL（ $P_{ave}=198.4$  kN）の1.3倍程度の引抜き耐力があることがわかる。また、本引抜き実験の結果でもっとも引抜き耐力が小さかったTYPE 2-3：フラスコ形PBL（ $P_{min}=170.7$  kN）においても、EUROCODE 4 PART 1, 6.6 Shear Connectionの規定を十分に満足していることを確認した。

本引抜き実験終了後、各試験体のコンクリートをはつり、PBLのリブ本体および貫通鉄筋の損傷状況を確認した。1例として写真-3にフラスコ形PBLのコンクリートはつり後の損傷状況を示す。

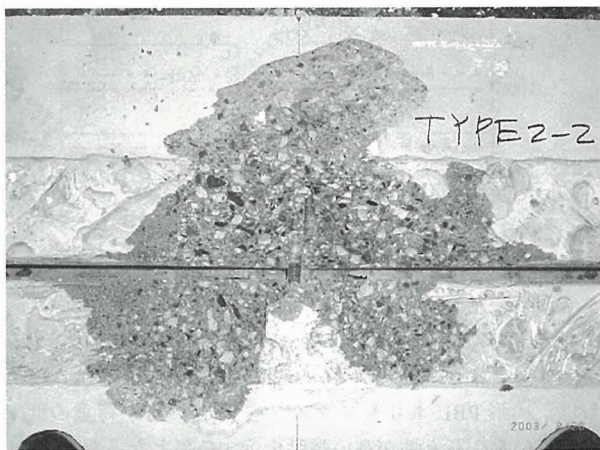
写真-3からは、PBLの孔近傍の損傷および変形を確認することはできなかった。これは、円形PBL試験体においても同様であった。

また、貫通鉄筋は、多少変形していたが、破断することではなくコンクリート部に埋め込まれていた（写真-3（b）参照）。円形PBL試験体においては、フラスコ形PBLよりも貫通鉄筋の変形量は大きかったが、破断はしていなかった。

以上より、引抜き耐力はコンクリートのダウエル作用によって支配されていると判断できる。



(a) TYPE 2-1



(b) TYPE 2-2

写真-3 フラスコ形 PBL の損傷状況

### (3) 引抜き実験のまとめ

本引抜き実験を実施するにあたり、国内および国外におけるずれ止めの引抜き力に関する規定を調査した結果、国内においては土木学会鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物に、海外においては EUROCODE 4 PART 1, 6.6 Shear Connection に関連した規定があった。これらの規定を考慮し、本引抜き実験の結果から以下のことが明らかとなった。

- ① フラスコ形 PBL の引抜き耐力は円形 PBL の 75 % 程度あり、この値は EUROCODE 4 PART 1 が合成桁橋のずれ止めに要求した規定、すなわち終局せん断耐力の 0.1 以上の引抜き強度（アップリフト強度）を十分満足している。
- ② PBL 土木学会式による終局せん断耐力の 1/3（使用限界荷重相当値）と同程度の引抜き力の作用時には鉛直変位（引抜き変形）は発生せず、十分な剛性を有していた。
- ④ 貫通鉄筋の効果は上述の使用限界荷重相当値を超えた時点より現われた。したがって、設計上必要な引抜き力は、コンクリートのダウエル作用のみで十分発揮できることがわかった。

## 4. おわりに

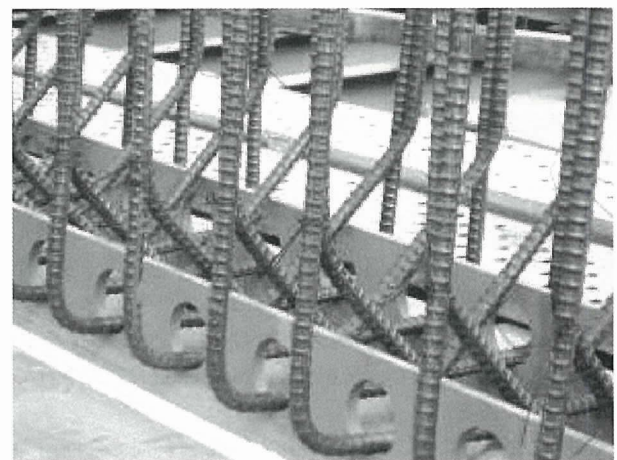
第二東名高速道路の豊田東 JCT・C ランプ第二橋は、平成 15 年 12 月の工事着手以来、順調に進捗し、平成 16 年 12 月に完成を迎えた。写真-4 に完成写真を示す。また、写真-5 に Twin-PBL 接合の施工状況、写真-6 に F-PBL 接



写真-4 C ランプ第二橋の完成

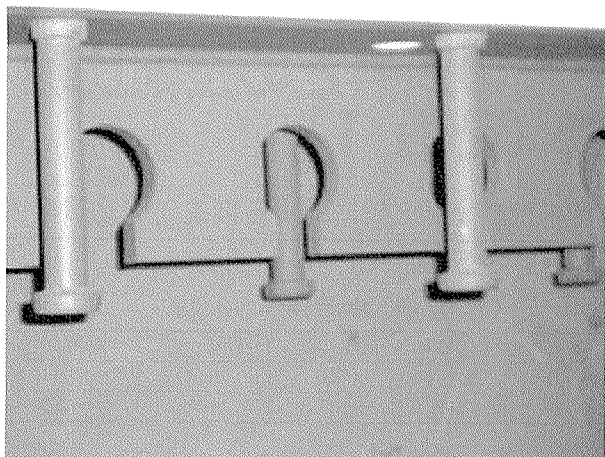


(a) Twin-PBL

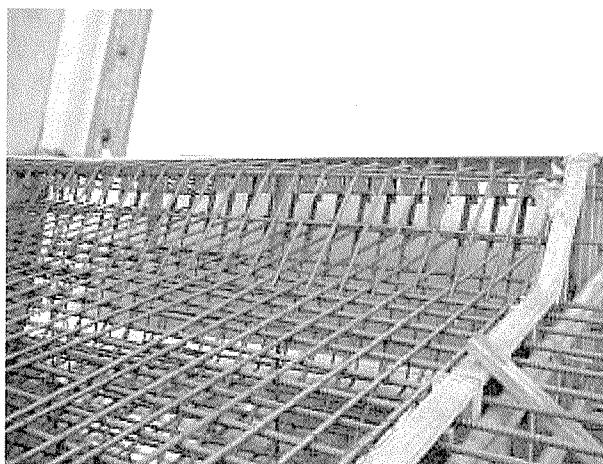


(b) Twin-PBL 接合

写真-5 Twin-PBL 接合



(a) F-PBL + 頭付きスタッド



(b) F-PBL の配筋状況

写真 - 6 F-PBL 接合

合+頭付きスタッド接合の施工状況を示す。

複合橋梁の施工は、これからも増えてくると思われ、本報告が複合橋梁の設計、施工の一助とれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 角谷務, 池田尚治: 長支間を有する波形鋼板ウェブ PC 橋の波形鋼板とコンクリート床版の新しい接合構造について, プレストレストコンクリート, pp.79 ~ 86, Vol.45, No.3, 2003 年 5 月
- 2) 東田典雅, 中村元, 金子人之, 吉田政宏, 立神久雄, 蛭名貴之: 遊楽部川橋の設計・施工, 橋梁と基礎, Vol.38, No.7, 2004 年 7 月
- 3) 近藤昌泰, 清水洋一, 大浦 隆, 服部政昭: 波形鋼板ウェブを有する PC 橋-新開橋-, プレストレストコンクリート, Vol.37, No.2, pp.69 ~ 78, 1995 年 3 月
- 4) 加藤照己, 芦塚憲一郎, 加藤卓也, 日高重徳: 本谷橋 (波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋) の設計について, 第 7 回プレスト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, プレストレストコンクリート技術協会, pp.747 ~ 752, 1997 年 10 月
- 5) 石黒互, 村田嘉広, 須合孝雄: 松の木 7 号橋 (銀山御幸橋) の設計と施工, プレストレストコンクリート, pp.5 ~ 14, Vol.38, No.5, 1996 年 9 月
- 6) Fritz Leonhardt, Wolfhart Andra, Hans-Peter Andra und Wolfgang Harre : Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, BETON-UND STAHLBETONBAU, pp.325 ~ 331, 1987 年
- 7) 土木学会 (新形式の鋼・コンクリート複合橋梁調査研究小委員会孔あき鋼板ジベル WG), 孔あき鋼板ジベル設計マニュアル (案), 2001 年 11 月
- 8) Eurocode 4 : FINAL DRAFT prEN, 1994 年 1 月
- 9) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, pp.80 ~ 81, 平成 9 年版

【2005 年 5 月 12 日受付】