

論文 孔をフラスコ形状にしたパーフォボンドリブ接合の引抜き耐力に関する実験的研究

蛭名 貴之*1・忽那 幸浩*2・立神 久雄*3・園田 恵一郎*4

要旨：従来から用いられている円形孔のパーフォボンドリブと孔をフラスコ形状にしたパーフォボンドリブの引抜き（アップリフト）耐力を把握するため、引抜き実験を実施した。その結果、フラスコ形の引抜き耐力は、円形の75%程度であることがわかった。既往の設計規準を参照すれば、本引抜き実験で用いたフラスコ形状は、合成桁橋のずれ止めに要求される引抜き耐力を十分保有していることが明らかとなった。

キーワード：円形パーフォボンドリブ，フラスコ形パーフォボンドリブ，引抜き実験

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 とする）箱桁橋の接合部にパーフォボンドリブ（以下 PBL とする）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 PC 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が明らかとなり¹⁾、PBL 接合が採用されつつある。例えば、北海道縦貫自動車道の遊楽部川橋、第二東名高速道路の豊田東ジャンクション C ランプ第2橋（以下、豊田東 JCT とする）などの事例がある。

PBL は施工時において、孔に鉄筋（以下、貫通鉄筋とする）を通す作業が必要になるが、下床版側の場合は、床版形状より、貫通鉄筋を配置してから側枠をセットしている。また、ウェブが傾斜している場合は、箱桁内から貫通鉄筋を配置しなければならないが、ハンチ筋が手前にあり、設置に時間を要することが予想された。このため、PBL の貫通鉄筋配置における施工の省力化を図るため、PBL の孔の形状を円形からフラスコ形（図-1 参照）への変更を考えた。

これにより、先に、下床版の鉄筋組み立て作業を行い、その後、波形鋼板ウェブを上から落としこむことが可能となり、施工の省力化が図れることがわかった。しかしながら、孔をフラスコ形にしたため、引抜かれる方向に開口があり、引抜きに対する抵抗が低減されることが懸念された。

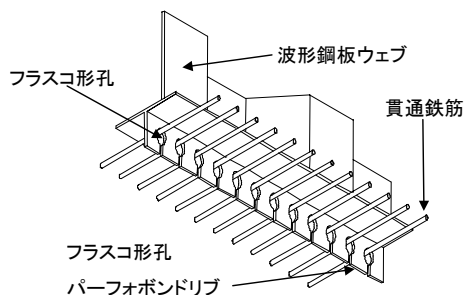


図-1 フラスコ形パーフォボンドリブ

周知のように、通常の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）抵抗力を持たせねばならない。EUROCODE4 PART1, 6.6 Shear Connection²⁾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

*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 日本道路公団 中部支社 構造技術課 課長代理 工修

*3 ドーピー建設工業（株） 技術センター 副センター長 工博（正会員）

*4 大阪工業大学 工学部 土木工学科 教授 工博（正会員）

めの採用には、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³⁾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。

本研究は、フラスコ形 PBL の引抜き耐力を把握するため、円形 PBL とフラスコ形 PBL の引抜き実験を実施し、両者を比較するとともに、得られた実験値と PBL 土木学会式⁴⁾との比較検討も同時に行い、フラスコ形 PBL の波形鋼板ウェブ PC 橋等の合成桁橋への適用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体の種類

引抜き実験に使用した試験体の種類を表 1 に示す。試験体は、円形の PBL およびフラスコ形 PBL の 2 タイプ、孔径は円形およびフラスコ形とも $\phi 60$ 、貫通鉄筋を D16、フラスコ形の開口幅 (図 2 参照) を 30mm とし、各タイプとも 3 体ずつ製作した。開口幅の 30mm は、実橋の貫通鉄筋の最大径が D22 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、 56N/mm^2 、粗骨材の最大寸法は 20mm、PBL の仕様は SM490YB (降伏強度 414N/mm^2 、引張強度 527N/mm^2)、鉄筋は SD345 (降伏強度 395N/mm^2 、引張強度 577N/mm^2) とした。

表 1 試験体の種類

種類	孔径 (mm)	開口幅 (mm)	貫通鉄筋	数量 (体)	孔の形状
TYPE1	$\phi 60$	0	D16	3	円
TYPE2	$\phi 60$	30	D16	3	フラスコ

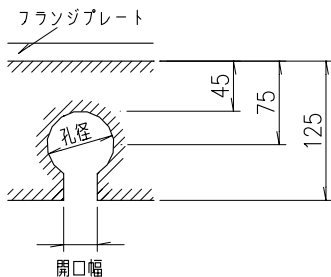


図 2 開口幅と孔径

2.2 試験体の寸法

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 の試験体と載荷枠詳細図を図 3 に示す。

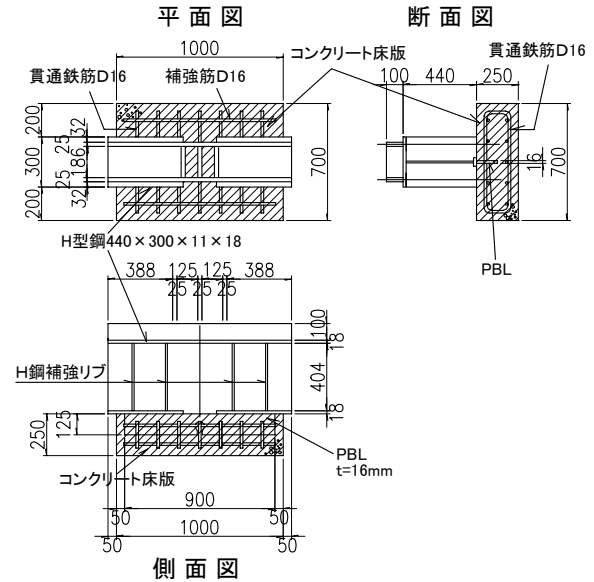


図 3 試験体と載荷枠詳細図

図 3 より試験体は、一般的な PC 箱桁橋の床版厚を想定し、コンクリートの厚さを 250mm、PBL のリブ高さ h 、板厚 t および孔の位置は、豊田東 JCT で採用された形状と同じ $h=125\text{mm}$ 、 $t=16\text{mm}$ 、孔の中心位置はフランジプレート表面から 75mm (図 2 参照) とした。また、H 型鋼 ($440 \times 300 \times 11 \times 18$) に PBL を溶接し、荷重載荷時にフランジに曲げが働かないよう、フランジ間および 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 の孔一つ当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。

2.3 引抜き実験の概要

引抜き実験の概要図を図 4 に示す。引抜き実験装置は、H 型鋼の下フランジ部に $\square 200 \times 125$ の切り欠きを設け、そこに 2 台の 500kN 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。

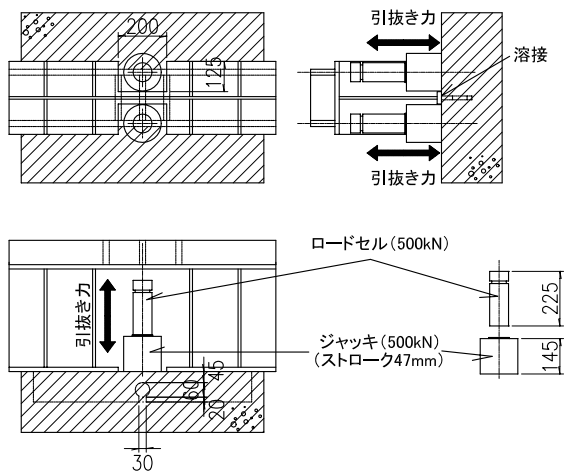


図-4 引抜き実験概要図

2.4 変位計およびひずみゲージ設置状況

変位計は、図-5に示すように左右のロードセル直上の補強リブに変位計を設置した。

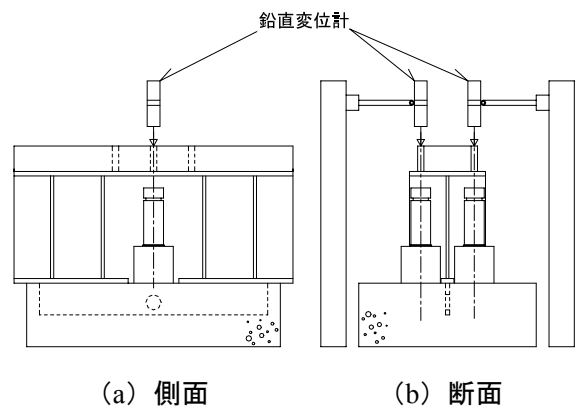


図-5 変位計設置状況図

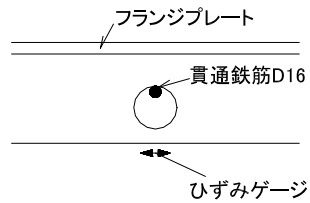


図-6 円形 PBL のゲージ貼付位置図

PBL に作用する引抜き力をモニターするために、ひずみゲージを図-6に示すように円形 PBL では、孔の中心位置のリブ天端（フランジプレートの反対側）に貼付し、フラスコ形 PBL では、図-7に示すように開口部側のリブ天端

の両脇にそれぞれ貼付した。また、1例として図-8に円形 PBL の貫通鉄筋のひずみゲージ貼付位置図を示す。図-8 (b) に示すように、ひずみゲージの貼付位置は、円形 PBL およびフラスコ形 PBL とともに、PBL を中心に左右2ヶ所、引抜かれる方向の上下（合計4箇所）にそれぞれ貼付した。

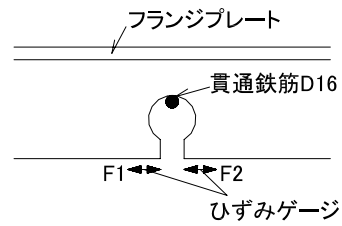


図-7 フラスコ形 PBL のゲージ貼付位置図

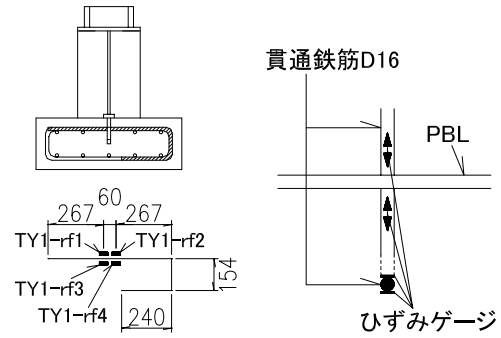


図-8 貫通鉄筋のゲージ貼付位置図

2.5 荷重方法

引抜き実験の荷重（引抜き）状況を写真-1に示す。荷重は、手動ポンプ式の油圧ジャッキを用いて実施した。



写真-1 荷重（引抜き）状況

また、荷重方法は、PBL 土木学会式から求められる終局せん断耐力の 1/3 を使用限界荷重と想定し、これを 3 回繰り返す、その後、破壊まで荷重した（図-9 参照）。

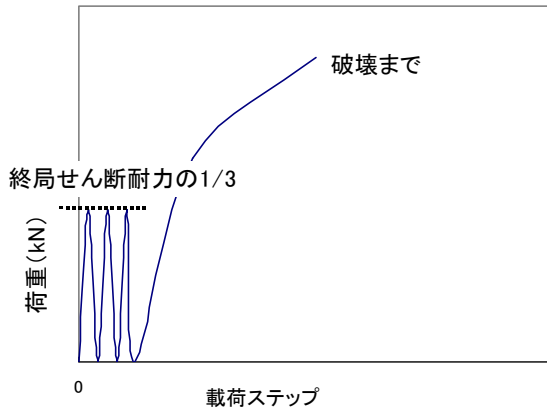


図-9 荷重方法

3. 実験結果と考察

3.1 P- δ 曲線

本引抜き実験の各試験体の最大引抜き耐力の結果を表-2 に、また、1 例として TYPE1-2 および TYPE2-1 の荷重（引抜き力 P）と鉛直変位（ δ ）の関係を図-10 にそれぞれ示す。

ここで、図-10 に記載されている終局せん断耐力 $\times 1/10$ のラインは、前述したように EUROCODE4 PART1, 6.6 Shear Connection に記載されている規定である。

図-10 から、前述の終局せん断耐力の 1/3 の荷重（使用限界荷重相当値）では、TYPE1-2（円形 PBL）および TYPE2-1（フラスコ形 PBL）ともに鉛直変位量が発生していないことがわかる。

最大引抜き力に到達するまでの剛性は、TYPE1-2 の方が TYPE2-1 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、TYPE1-2 よりも TYPE2-1 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。その他の試験体においても同様な傾向を示している。

実験は、鉛直変位量が 40mm 程度に達するまで荷重したが、試験体の破壊性状は、円形 PBL

およびフラスコ形 PBL とともに貫通鉄筋の破断およびコンクリート部のクラックは発生せず、鉛直変位のみが進行し実験を終了した。

表-2 から最大引抜き力 P_{ave} （平均値）の値に関しては、円形 PBL ($P_{ave}=258.3\text{kN}$) はフラスコ形 PBL ($P_{ave}=198.4\text{kN}$) 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最も引抜き耐力が小さかった TYPE2-3：フラスコ形 PBL ($P_{min}=170.7\text{kN}$) においても、EUROCODE4 PART1, 6.6 Shear Connection の規定を十分に満足している。

表-2 各試験体の最大引抜き耐力

試験体種類		実験値 (kN)	平均値 (kN)	MAX値 (kN)	MIN値 (kN)
円形PBL	TYPE1-1	236.1	258.3	277.0	236.1
	TYPE1-2	277.0			
	TYPE1-3	261.9			
フラスコ形PBL	TYPE2-1	229.7	198.4	229.7	170.7
	TYPE2-2	194.9			
	TYPE2-3	170.7			

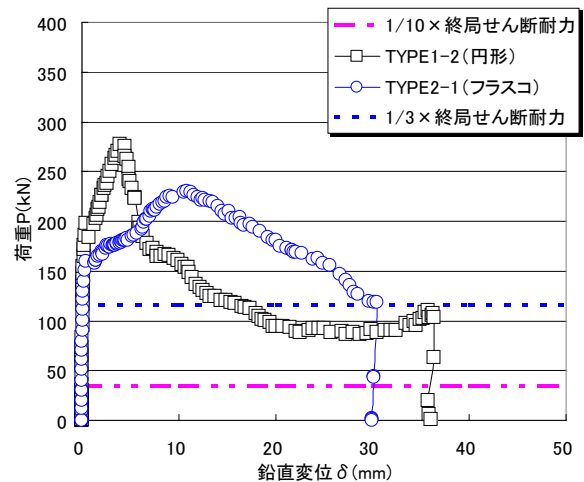


図-10 P- δ 曲線

3.2 PBL のひずみと荷重の関係

円形 PBL のひずみ（図-6 参照）と荷重との関係を図-11 に示す。また、フラスコ形 PBL のひずみ（図-7 参照）と荷重との関係は TYPE2-1~TYPE2-3 と同様な傾向を示しているため、1 例として TYPE2-1 のみを図-12 に示す。

図-11 から、荷重が 80kN を超えてからひずみの増加量が大きいことがわかる。また、全ての試験体において、円形 PBL の孔の中心位置のリブ天端（ひずみゲージ添付位置）側は、引張領域であることがわかる。

図-12 からは、荷重が終局せん断耐力の 1/3 の荷重（約 120kN）に至るまでは、ひずみ測定値に変化がなく、その後の変化量も円形 PBL に比べ小さいことがわかる。また、フラスコ形 PBL はリブに開口部があるため、断面剛性が小さく、その箇所を中心に逆 V 字形に変形するため、ひずみゲージ添付位置側では、曲げ圧縮領域になったと考えられるが、ひずみ測定値は小さい。

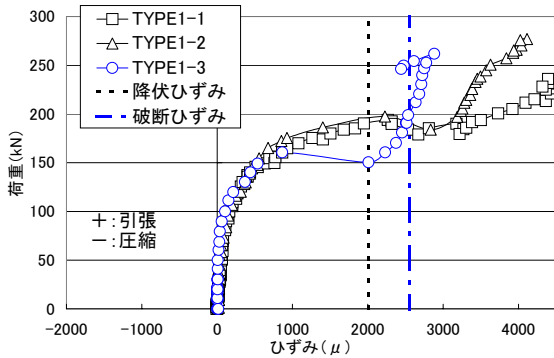


図-11 荷重-PBL ひずみ関係（円形）

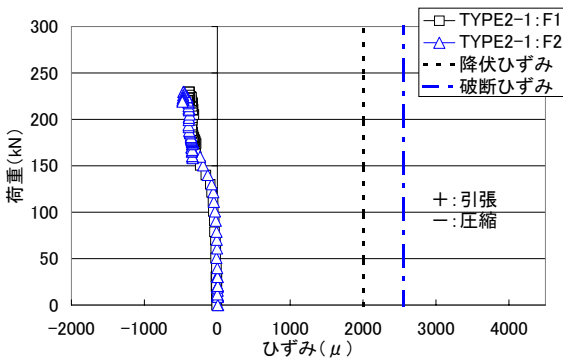


図-12 荷重-PBL ひずみ関係（フラスコ形）

3.3 貫通鉄筋のひずみと荷重の関係

円形孔に配置した貫通鉄筋のひずみと荷重との関係は TYPE1-1～TYPE1-3 と同様な傾向を示したため、1 例として TYPE1-2 のみを図-13 に示す。また、フラスコ形孔に配置した貫通鉄筋のひずみと荷重との関係も TYPE2-1～

TYPE2-3 と同様な傾向を示したため、1 例として TYPE2-1 のみを図-14 に示す。

図-13 から、終局せん断耐力の 1/3 の荷重（約 120kN）に至るまでは貫通鉄筋ひずみは発生せず、この現象は図-10 の結果と整合しており、貫通鉄筋の効果は、この荷重を超えて終局状態に至る領域において現われていることがわかる。また、200kN 付近で、ひずみ測定値が一度減少していることがわかる。これは、図-11 の結果から PBL が降伏域に達し、応力が解放されたためであると考えられる。また、ひずみ測定値は、すべて引張挙動を示していることから、貫通鉄筋は、ほぼ張力場になっていることがわかる。

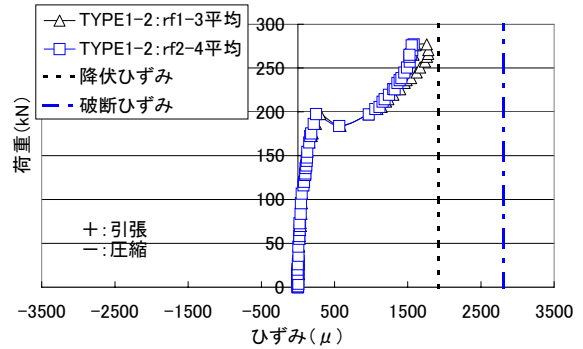


図-13 荷重-貫通鉄筋ひずみ関係（円形）

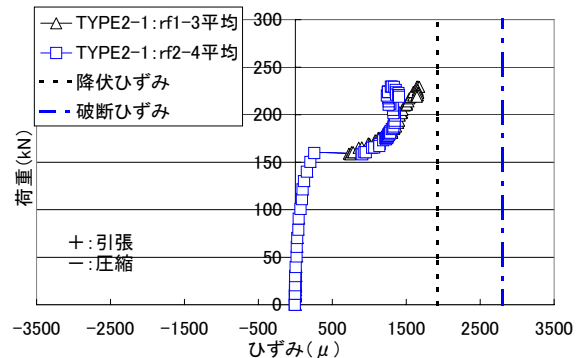


図-14 荷重-貫通鉄筋ひずみ関係（フラスコ形）

次に、図-14 からは、図-13 と同様に、終局せん断耐力の 1/3 の荷重（約 120kN）に至るまでは貫通鉄筋ひずみは発生していない。その後、170kN 付近で荷重が下がるが、再び荷重増加をし、それとともにひずみも増加しているこ

とがわかる。これは、170kN 付近においてフラスコ形に充填されているコンクリートにズレか、ひび割れが発生し、応力が解放されたものと考えられる。

3.4 破壊状況

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することとした。1 例として写真-2 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。

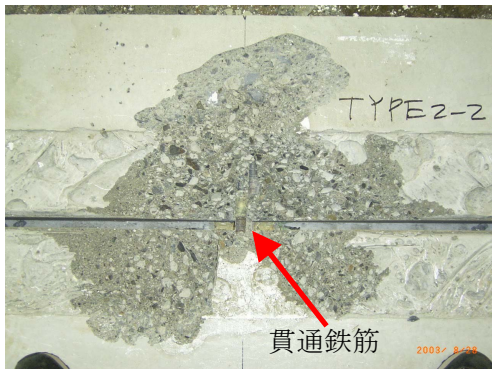
写真-2 からは、PBL の孔近傍の損傷および変形を確認することはできなかった。これは、円形 PBL 試験体においても同様であった。

また、貫通鉄筋は、多少変形していたが、破断することなくコンクリート部に埋め込まれていた(写真-2 (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せん断伝達作用によって支配されているといえる。



(a) TYPE2-1



(b) TYPE2-2

写真-2 フラスコ形 PBL の損傷状況

4. 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 EUROCODE4 PART1, 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 の耐力の 75% 程度あり、この値は EUROCODE4 PART1 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ことがわかった。
- (2) 土木学会式⁴⁾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。
- (3) 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せん断伝達作用のみで十分発揮できることがわかった。

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) Eurocode4: FINAL DRAFT prEN 1994-1-1
- 3) 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
- 4) 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