

パーフォボンドリブのせん断耐力に関する基礎的研究

Foundamental Research on the Shear Strength of Rerfo-Bond Rids

上平謙二*, 蛸名 貴之**, 高橋恵悟***, 柳下文夫****

Kenji UEHIRA, Takayuki EBINA, Keigo TAKAHASHI and Fumio YAGISHITA

* ドーピー建設工業（株）技術センター副センター長（〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-6-16）

** ドーピー建設工業（株）技術センター研究員（〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-6-16）

*** アジア航測（株）道路・橋梁部設計第二課長（〒160-0022 東京都新宿区新宿4-2-18 新宿光風ビル）

**** 近畿大学理工学部土木工学科助教授（〒577-0818 東大阪市小若江3-4-1）

Mechanical performance of steel-concrete composite structures depends significantly upon the bond characteristics between steel member to concrete one. PC box girder bridge with corrugated steel web has recently become remarkable in Japan as one of the composite bridges attractive from viewpoint of both economy and esthetics. Main concern of this paper is placed on a new development of shear connectors between concrete slab and corrugated steel web in a PC Box Girder Bridge with corrugated steel plates. This paper is devoted to investigate the basic characteristics of perfobond strip placed on the bottom face of corrugated steel web. Push-out tests were carried out for composite specimens consisting of H-shaped steel beam with perfobond strips on its flanges and two concrete slabs. More 10 specimens were tested. Test parameters were size of specimen, hole diameter of perfobond strip, reinforcement within hole, casting direction of fresh concrete and so on. The data obtained are summarized in load-slip relation and bond strength consisting of concrete dowel, reinforcement and friction, and so on. Last, design equations to estimate the bond strength of perfobond strip placed on the bottom face of corrugated steel web are proposed.

key word : push-out test, perfobond strip, concrete dowel

1. まえがき

鋼・コンクリートの合成部材における力学的特性は、両者の付着特性に大きく依存している。最近、合成構造における両者の合成手法に関する研究は、盛んに行われ、種々な手法が開発されている。

特に、最近日本で建設され話題となっている波形鋼板ウェブ PC 橋は、PC 箱桁のウェブが波形鋼板で、上下にコンクリート床版を有する箱断面構造となっている。本構造の場合、波形鋼板には、曲げが伝達されず、せん断のみ伝達される特徴を有しており、波形鋼板に伝達されるせん断力は、完全にコンクリート床版に伝達されなければならない。従って、本合成構造においても、波形鋼板とコンクリート床版の合成手法に関する力学的特性を把握することは、非常に重要な問題である。

本研究は、上記波形鋼板ウェブ PC 橋のように、コンクリート床版が下側に配置されるような構造をも考慮し、コンクリート床版と鋼板との界面でのせん断伝達挙動に着目し、また、コンクリート床版と鋼板の界面へのコンクリート打設方向も考慮し、レオンハルトが提案したパーフォボンドリブの日本での実用化に向け、種々の押し抜き試験を実施した^{1), 2)}。

押し抜き試験は、H型鋼の両サイドに、コンクリート試験体を打設し、両者の界面には、パーフォボンドリブが溶接された試験体を用いた。そして、H型鋼の上縁から加力した。先ず始めに、基本性状を把握するため 20

体以上の縮小モデルにて、孔の大きさを変え、さらに鉄筋の有無によるせん断耐力への影響を把握し、次に、実構造に対する実際の寸法を有する 20 体以上の試験体で、孔の大きさ、貫通鉄筋の径、貫通鉄筋の位置を変更し、それらがコンクリートジベルのせん断耐力（以下、耐力とする）に及ぼす影響を把握すると共に、耐力式の提案まで行った。

また、パーフォボンドリブに突起付き鋼板（以下、縞鋼板）を併用した場合の適用性も同時に調べた。図-1 にパーフォボンドリブの概要図を示す。

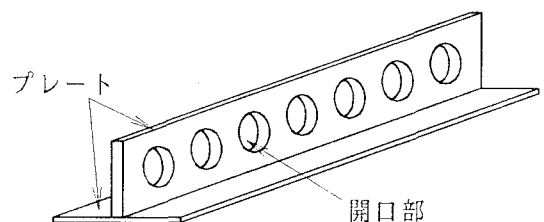


図-1 パーフォボンドリブの概要図

パーフォボンドリブは、孔を貫通したコンクリートが2面でせん断力に抵抗する。このため、パーフォボンドリブをずれ止めとして使用した場合の試験体の終局状態における挙動は、孔を貫通しているコンクリートのせん断破壊、コンクリートの支圧による破壊、およびパーフォボンドリブの孔と孔の間のプレートによるせん断破壊が考えられる。本試験では、このうちのコンクリート

ジベルのせん断強度に的をしぼり、その基本性状を把握するため、孔を一つのみとし、押し抜き試験を行った。

2. 試験体の種類

試験体の種類の一覧を表-1に、試験体の形状を図-2に示す。試験体は、実際の橋梁モデルを想定し、コンクリート厚さを25cm、骨材の最大寸法を20mmとした。ここで、TYPE1のスタッドは、道路橋示方書で標準とされ、道路橋で多く採用されている径22mm、長さ150mmを片側あたりにつき2本の配置とした。TYPE2およびTYPE3のパーフォボンドリブの形状は、板厚22mm、高さ150mm、孔径60mmまたは80mm(TYPE3-1のみ孔なし)とし、片側あたり1枚で計2枚設置した。

表-1 試験体の種類

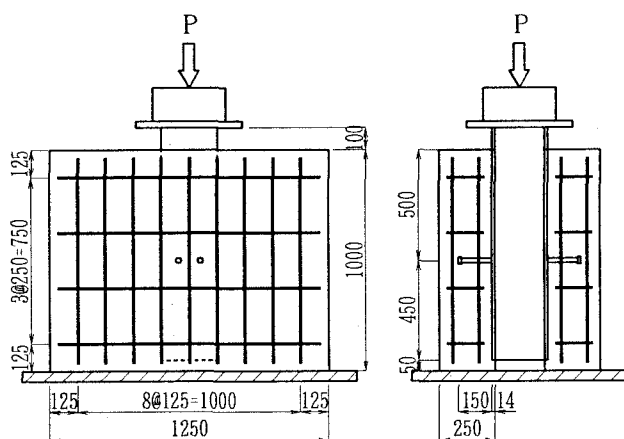
試験体の種類	スタッド本数	縞鋼板	鉄筋	孔径(mm)	貫通鉄筋位置
TYPE1	2本	—	—	—	—
TYPE2-1	—	—	—	φ80	—
TYPE2-2	—	—	有	φ80	上側(フランジ)
TYPE2-3	—	—	有	φ80	中心
TYPE2-4	—	—	—	φ60	—
TYPE2-5	—	—	有	φ60	上側(フランジ)
TYPE3-1	—	有	—	—	—
TYPE3-2	—	有	—	φ60	—
TYPE3-3	—	有	有	φ80	上側(フランジ)
TYPE3-4	—	有	有	φ60	上側(フランジ)

試験体は、3つのシリーズに分かれており、TYPE1のスタッド2本の場合におけるせん断耐力を基本として、TYPE2シリーズは、パーフォボンドリブタイプとし、TYPE3シリーズは、縞鋼板併用パーフォボンドリブタイプとした。

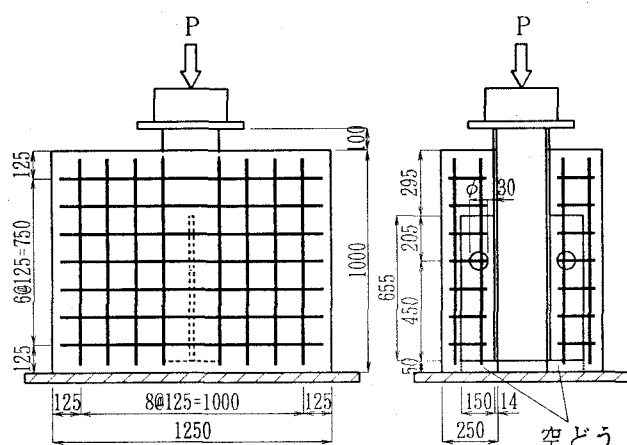
ここで、TYPE2シリーズの各試験体は以下のように決定した。

- ①TYPE2-1については、スタッド2本の場合のせん断耐力と等価となるように孔径をφ=80mmとし、コンクリートジベルのみの耐力を把握するために、孔を貫通している鉄筋(以下、貫通鉄筋)は、配置しないこととした。
- ②TYPE2-2については、孔径をφ=80mmとし、実際の橋梁における下床版の鉄筋配置を想定し、貫通鉄筋(D16)をフランジプレート側に1本配置した。
- ③TYPE2-3については、孔径をφ=80mmとし、コンクリートジベル内における貫通鉄筋の位置の相異による耐力の影響を把握するため、貫通鉄筋(D16)をコンクリートジベル中心位置に1本配置した。
- ④TYPE2-4については、孔径の相異による耐力の影響を把握するため、孔径をφ=60mmとし貫通鉄筋は配置していない。
- ⑤TYPE2-5については、TYPE2-3との耐力比較を目的として、貫通鉄筋(D16)を同様に配置し、孔径のみφ=60mm

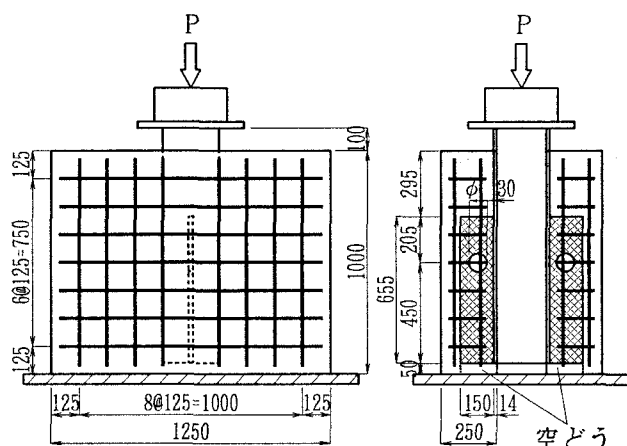
とした。



(a) TYPE 1



(b) TYPE 2 シリーズ



(c) TYPE 3 シリーズ

図-2 試験体の形状図

次に、TYPE3シリーズの各試験体は、すべて、コンクリートジベルの片側あたり片面1面の計2面を縞鋼板併用とし、さらに、縞鋼板の形状寸法は、TYPE3-2と同じとして以下のように決定した。

- ①TYPE3-1については、コンクリートジベル(孔)を無くし、縞鋼板のみの耐力の把握を目的とすることとした。
- ②TYPE3-2については、コンクリートジベル(孔径φ=60mm)の耐力と縞鋼板の耐力との累加強度が、スタッ

ド2本の耐力と等価となるように縞鋼板の形状寸法を決定した。この時、縞鋼板の耐力は、上中らの提案式から求められた耐力とした³⁾。また、貫通鉄筋は、配置しないこととした。

③TYPE3-3 については、縞鋼板併用時のコンクリートジベルの大きさによる耐力の影響を把握するため、孔径を $\phi=80\text{mm}$ とし、貫通鉄筋(D16)もフランジプレート側に1本配置した。

④TYPE3-4 については、TYPE3-3 との耐力比較を行うことを目的に、孔径を $\phi=60\text{mm}$ とし、貫通鉄筋(D16)もフランジプレート側に1本配置した。

試験体の仕様と特性値を表2に示す。

表-2 試験体の仕様と特性値

種類	仕様	試験時の特性値	
		圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²
TYPE1		57.5	34.9×10 ³
TYPE2-1		57.7	37.7×10 ³
TYPE2-2		54.1	34.8×10 ³
TYPE2-3		54.4	35.2×10 ³
TYPE2-4	$\sigma_{ck}=39.2\text{N/mm}^2$	57.4	37.4×10 ³
TYPE2-5	$E_c=30.4\times 10^3\text{N/mm}^2$	57.8	35.0×10 ³
TYPE3-1		57.3	37.0×10 ³
TYPE3-2		58.4	35.9×10 ³
TYPE3-3		63.0	39.3×10 ³
TYPE3-4		58.6	38.3×10 ³
スタッド	JIS B 1198 $\phi 22\text{mm}$	—	—
鉄筋	SD295A	—	—
鋼板	SS400	—	—

3. パーフォボンドリブの形状決定

パーフォボンドリブの板厚と孔径($\phi 60\text{mm}$)の決定に際しては、スタッドジベル2本による耐力と等価となるように決定したものである。

ここで、TYPE1のスタッド2本の耐力値は、Fisherの式により算出することとした⁴⁾。Fisherの式を式(1)に示す。

$$Q_u = 2 \times 0.5 \times A_s \times \sqrt{f'_c \times E_c} \quad (1)$$

ここに、 Q_u はスタッド2本の耐力(N)、 A_s はスタッド1本の断面積(mm²)、 f'_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 E_c はコンクリートのヤング係数(N/mm²)を示す。

TYPE2のコンクリートジベルの耐力値は、レオンハルトらによって提案されているずれ止めの提案式から算出した¹⁾。この提案式を式(2)に示す。しかしながら、この提案式は、コンクリートの圧縮強度を立方体供試体とした場合の式であり、これを円柱供試体に変換した場合の提案式は式(3)であり、本試験体のTYPE2の耐力値は式(3)から求めた⁵⁾。また、TYPE2において、孔に貫通させた鉄筋による耐力増加は、計算式においては考慮しな

いこととした。

$$Q_p = 2 \times \pi \times d^2 \times 0.25 \times 0.9 \times \sigma_{ck}' \quad (2)$$

ここに、 Q_p はパーフォボンドリブの2面耐力(N)、 d は孔の径(mm)、 σ_{ck}' はコンクリートの立方体強度(N/mm²)を示す。

$$Q_p = 2 \times \pi \times d^2 \times 0.25 \times 1.14 \times \sigma_{ck}' \quad (3)$$

ここに、 Q_p はパーフォボンドリブの2面耐力(N)、 d は孔の径(mm)、 σ_{ck}' はコンクリートの円柱体強度(N/mm²)を示す。

TYPE3の縞鋼板併用による耐力値は、TYPE2における式(3)から算出した耐力に、上中らの縞鋼板による耐力を累加して求めた^{3), 5)}。上中らの提案式を式(4)に示す³⁾。但し、この場合、コンクリートの側圧を0としている。

$$Q_s = 0.623 \times m \times \sigma_{ck} \times A_s \quad (4)$$

ここに、 Q_s は縞鋼板の付着による耐力(N)、 m は支圧面積比($=A_c / (\sqrt{2} \times S_c^2) = 0.0696$)、 A_c は突起投影面積($=78.5\text{mm}^2$)、 S_c は突起間隔($=28.3\text{mm}$)、 σ_{ck} はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 A_s は縞鋼板の面積(mm²)を示す。

4. 押し抜き試験方法

(1) 概要

パーフォボンドリブの試験体(TYPE2シリーズおよびTYPE3シリーズ)については、図-3に示すように、パーフォボンドリブ下面のコンクリートが、押し抜き試験時に抵抗しないように、あらかじめ抵抗部分のコンクリートを削除した。

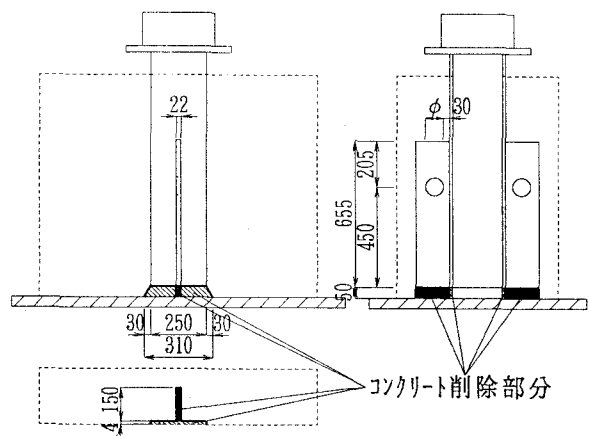


図-3 パーフォボンドリブ試験体の詳細図

試験体を設置する際には、試験体の下に石膏を敷くことにより左右の傾きの影響をなくすと共に、コンクリート下面の均整化を図った。また、H型鋼と試験機の載荷ヘッドとの間には、両フランジに均等に荷重が載荷されるように荷重分配桁を挿入するとともに、片側のフランジ上には球座を用いた。載荷状況を写真-1に示す。

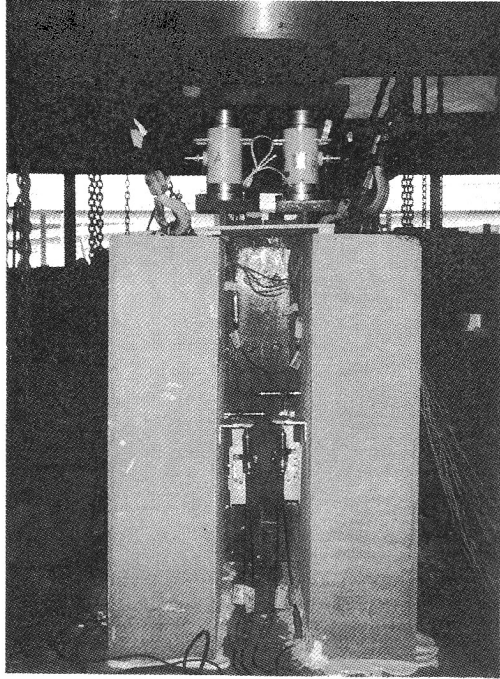


写真-1 載荷状況

載荷方法については、荷重制御とし、載荷は設計荷重(式(1)による計算上の耐力値の1/3と仮定)までは、漸増繰り返しを2回行い、その後破壊まで単調増加した。計測は、載荷荷重とともに、鋼フランジとコンクリート間の相対ずれを計測し、スタッドのひずみも計測した。さらに、パーフォボンドリブの貫通鉄筋についてもひずみゲージを貼り計測した。図-4に各試験体の計測位置詳細図、図-5に貫通鉄筋のひずみゲージ詳細図および図-6にスタッドのひずみゲージ詳細図を示す。

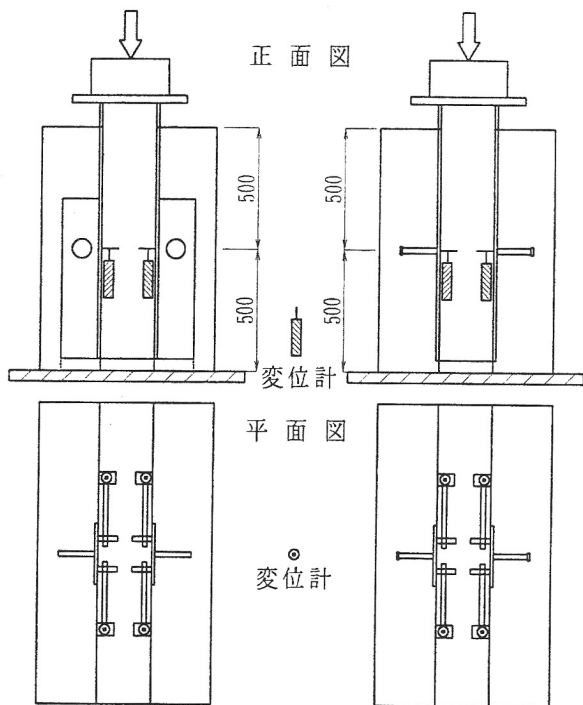


図-4 計測位置詳細図

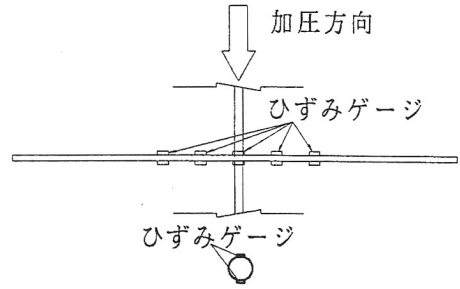


図-5 鉄筋のひずみゲージ位置

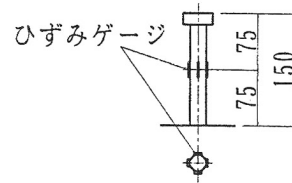


図-6 スタッドのひずみゲージ位置

(2) 試験結果および考察

図-7(a)にスタッド、図-7(b)にコンクリートジベルの孔径 $\phi 60\text{mm}$ 、図-7(c)にコンクリートジベルの孔径 $\phi 80\text{mm}$ および図-7(d)に縞鋼板のみによる押し抜き試験結果の荷重-相対ずれ関係を示す。なお、荷重については、左右の平均値を示し、相対ずれ量については、左右4ヶ所の平均値とした。

図-7(a)から、スタッドの耐力とずれについては、式(1)から求めた耐力($P=538.4\text{kN}$)よりも試験値($P=450.1\text{kN}$)が小さい値を示している。また、相対ずれに関しては、約5mmの時に最大荷重($P=450.1\text{kN}$)を示し、約14mmの時に急激に荷重低下がおこった。耐力と相対ずれ量に関しては、コンクリートの打設方向を下打ちとしたことにより、上打ち(上床版のスタッドの頭方向からコンクリートを打設する方向)の耐力と比較すると低下しており、また、相対ずれ量も設計荷重時レベルにおいて大きくなる現象を示した⁶⁾。

図-7(b)と(c)から、コンクリートジベルの耐力と相対ずれ量については、以下のことがわかった。

①パーフォボンドリブおよび縞鋼板併用パーフォボンドリブにおける、貫通鉄筋の有無による耐力への影響は、孔径 $\phi 80\text{mm}$ では、貫通鉄筋がジベル中心位置にあるTYPE2-3だけが耐力低下を示し、孔径 $\phi 60\text{mm}$ では、貫通鉄筋がフランジプレート側に配置されていたTYPE2-5だけが耐力低下を示した。このことは、貫通鉄筋が障害となりパーフォボンドリブの孔に粗骨材が、うまくまわっていないためと推測される。ただし、貫通鉄筋の効果としては、耐力を越えてからも、じん性が確保されることがわかった。

②縞鋼板併用パーフォボンドリブの耐力は、パーフォボンドリブのみの場合よりも耐力が増し、この場合も貫通鉄筋があれば、耐力を越えてからも、じん性が確保されることがわかった。

図-7(d)から、縞鋼板のみの耐力と相対ずれについては、以下のことがわかった。

①設計荷重時レベル（耐力の1/3相当）では、相対ずれ量はほとんど発生していない。

②式(4)から求められた値と試験値との耐力比較では、試験値が、かなり大きめの値を示した。これについては、縞鋼板がコンクリートでまかれた形になっているため、何らかの側圧効果が期待できるためであろう。

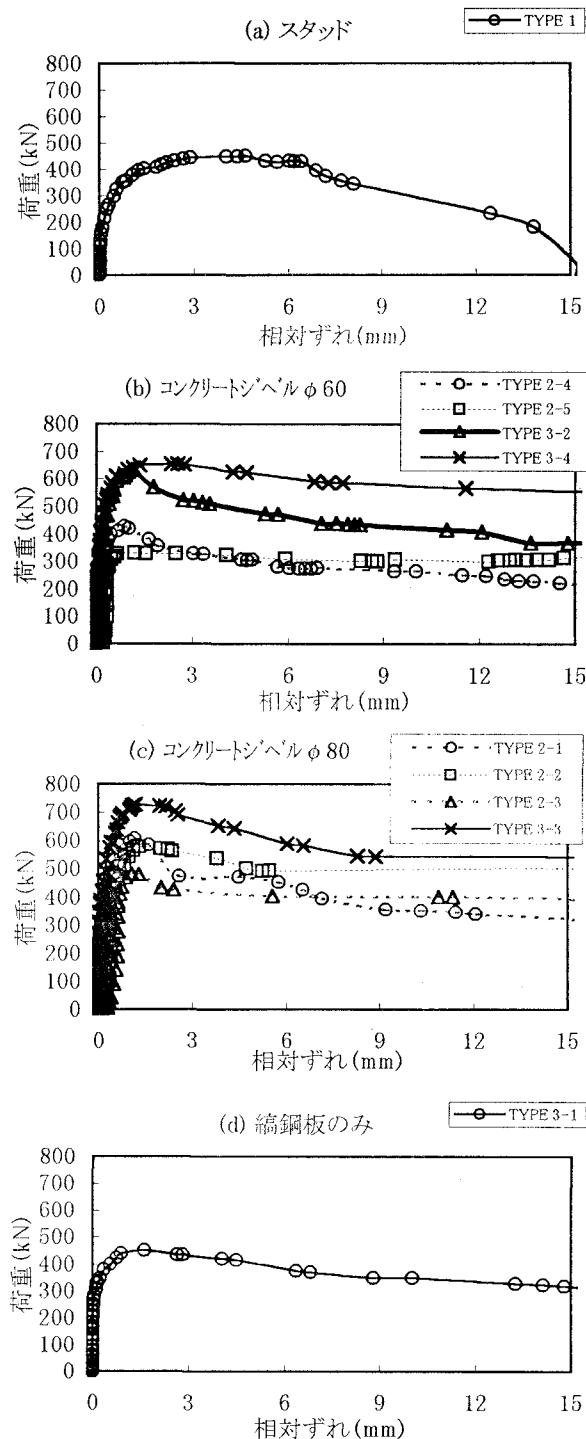


図-7 荷重-相対ずれ曲線

また、図-8(a)にφ80mmにおいて貫通鉄筋をフランジプレート側に配置した場合の鉄筋のひずみ量と荷重の関

係を示し、図-8(b)にφ80mmにおいて貫通鉄筋を孔の中心に配置した場合の鉄筋のひずみ量と荷重の関係をそれぞれ示す。なお、この場合の鉄筋のひずみ量とは、図-5に示すように押し抜き方向における2枚のゲージの平均値を示している。

これらの図からわかるように、貫通鉄筋をフランジプレート側に配置した場合には、荷重の増加に伴いコンクリートジベル内の鉄筋に引張作用が働き、コンクリートジベルのせん断破壊とほぼ同時に鉄筋も破断した。一方、貫通鉄筋を孔の中心に配置した場合には、荷重の増加に対し、僅かに鉄筋のひずみ増加が見られ、コンクリートジベルのせん断破壊時には、鉄筋ひずみが降伏ひずみ程度まで発生した。しかしながら、今回の鉄筋比（貫通鉄筋の断面積/コンクリートジベルの断面積=0.040）の範囲では、鉄筋による拘束効果は見られず、耐力増加は見られなかった。

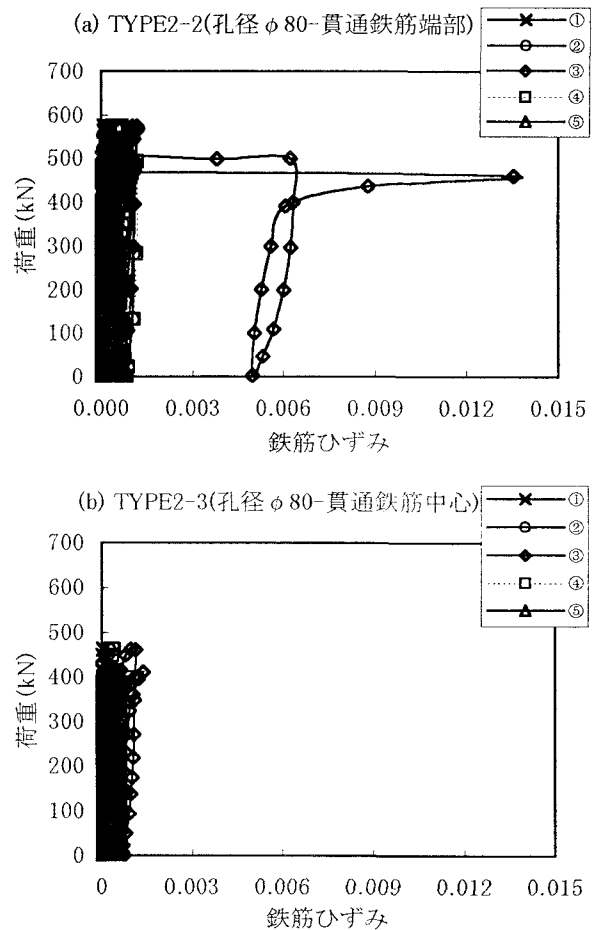


図-8 荷重と鉄筋ひずみ曲線

5. コンクリートジベルの耐力式の検討

レオンハルトら¹¹⁾によれば、コンクリートの実際の圧縮強度 (σ_c) と最大荷重によるコンクリートジベルのせん断応力度 (τ_c) には、 $\tau_c = 1.3 \cdot \sigma_c$ の関係があるとされている。この関係式を基本として、レオンハルトらは、強度減少要因 (0.7) を考慮して、式(2)としている。

本試験でのコンクリートの圧縮強度 (σ_c') と最大荷重によるコンクリートジベルのせん断応力度 (τ_s) の関係式を $\tau_s = k \cdot \sigma_c'$ とすると、その関係は表-3 のとおりとなった。ここで、「(2) 試験結果および考察」より、鉄筋の挿入によってコンクリートジベルに粗骨材がうまくまわらなかったために耐力低下を引き起こしたと考えられる TYPE2-3 と TYPE2-5 を除くと、孔径の小さい $\phi 60\text{mm}$ に関しては、 $\tau_s = 1.3 \cdot \sigma_c'$ が成り立ち、孔径の大きい $\phi 80\text{mm}$ に関しては、 $\tau_s = 1.0 \cdot \sigma_c'$ の関係が成り立つことがわかった。この関係式に強度減少要因 (0.7) を考慮し、レオンハルトらの提案式にあてはめると、コンクリートジベルの耐力は、孔径 $\phi 60\text{mm}$ は式(5)、孔径 $\phi 80\text{mm}$ は式(6)より求められることがわかった。

$$Q_p = 2 \times \pi \times d^2 \times 0.25 \times 0.9 \times \sigma_{ck} \quad (5)$$

$$Q_p = 2 \times \pi \times d^2 \times 0.25 \times 0.7 \times \sigma_{ck} \quad (6)$$

ここに、 Q_p はパーフォボンドリブの2面耐力 (N)、 d は孔の径 (mm)、 σ_{ck} はコンクリートの設計基準強度 (N/mm^2) を示す。

また、貫通鉄筋が入っているコンクリートジベルの耐力については、式(5)、式(6)よりもそれぞれ 20% 程度の耐力低下を考慮する必要がある。

表-3 圧縮強度とせん断応力度の比較

試験体の種類	孔径 ϕ (mm)	①圧縮強度 σ_c' (N/mm^2)	②せん断応力度 τ_s (N/mm^2)	比率 (②/①)
TYPE2-1	80	57.7	60.3	1.05
TYPE2-2	80	54.2	57.4	1.06
TYPE2-3	80	54.4	48.0	0.88
TYPE2-4	60	57.4	75.4	1.31
TYPE2-5	60	57.8	58.3	1.01

6. まとめ

本試験から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 相当) では、ずれがほとんど発生していないことがわかり、ずれ止めとしての十分な性能を有していることがわかった。

②貫通鉄筋の有無による耐力への影響については、粗骨材がうまくまわらないために、耐力低下を引き起こすと推測される。しかしながら、貫通鉄筋の効果として、耐力を越えてからも、じん性が確保されることがわかった。

③縞鋼板併用パーフォボンドリブの耐力は、パーフォボンドリブのみの場合よりも耐力が増加し、この場合も貫通鉄筋があれば、耐力を超えてからも、じん性が確保されることがわかった。しかしながら、耐力増加にはつながっていない。

④本試験結果によれば、コンクリートジベルの孔径を考慮した耐力は、式(5)、式(6)で表されることがわかった。さらに、貫通鉄筋がある場合のコンクリートジベルの耐

力は、式(5)、式(6)にそれぞれ安全係数として 0.8 程度を考慮すればよいことがわかった。

以上のことから、パーフォボンドリブをずれ止めとして使用した場合においては、スタッドジベルに対して十分な耐力があり、ずれ止めにも十分な性能を有することがわかった。しかしながら、貫通鉄筋が耐力に悪影響を及ぼす可能性があることと、コンクリートジベルの孔径が大きくなると耐力低下を引き起こす可能性があることがわかった。これらの耐力低下の要因については、さらに検討を行う予定である。

7. あとがき

今後、さらに試験体を増やし、コンクリートジベルの孔径の相異による耐力への影響を総合的に把握するとともに貫通鉄筋のひずみから横方向 (貫通鉄筋方向) による応力状態を把握し、さらにコンクリートジベル中の鉄筋量による拘束効果の把握を行い、レオンハルトらの提案式との整合性を検討する予定である¹⁾。

本研究は、土木学会鋼構造委員会「鋼橋床版の調査研究小委員会」の活動として行われた。

謝辞： 本試験に際し、多大なご助力をいただいた近畿大学理工学部の学生諸君に、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) 平城弘一: 頭付きスタッドの静的および疲労強度と設計法に関する研究, 1990
- 3) 上中宏二郎, 鬼頭宏明, 上平謙二, 園田恵一郎: 突起付鋼板と頭付きスタッドを併用した付着せん断システムの評価, コンクリート工学年次論文報告集 Vol20, No3, pp853 ~ 858, 1998
- 4) Jorgen G. Ollgaard, Roger G. Slutter and John W. Fisher : Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete, pp55 ~ 64, 1971
- 5) Wayne S. Roberts, Robert J. Heywood: An Innovation To Increase The Competitiveness of Short Span Steel Concrete Composite Bridges, pp1161 ~ 1166, 1994
- 6) 上平謙二, 鈴木史郎, 松野茂彦, 園田恵一郎: 波形鋼板ウェブ PC 橋の鋼板とコンクリート床版の合成手法に関する研究, 第 52 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, pp118 ~ 119, 1997