

(15) 鋼管ジベルを用いたずれ止めの押し抜き試験

山本 将士¹・大久保 宣人²・中本 啓介³・橘 肇⁴・高林 和生⁵・中村 隆志⁶

¹正会員 片山ストラテック(株) 技術本部 技術課(〒551-0021 大阪市大正区南恩加島6-2-21)
E-mail:w.m-yamamoto@katayama-st.co.jp

²正会員 片山ストラテック(株) 技術本部 技術課(〒551-0021 大阪市大正区南恩加島6-2-21)
E-mail:okubo@katayama-st.co.jp

³正会員 (株)駒井ハルテック 生産本部 技術研究室(〒293-0011 千葉県富津市新富33-10)
E-mail:nakamotk@komaihaltec.co.jp

⁴(株)駒井ハルテック 橋梁設計部 東京設計課(〒110-8547 東京都台東区上野1-19-10)
E-mail:tachi@komaihaltec.co.jp

⁵(株)IHIインフラシステム 技術本部 開発部 プロジェクト1課(〒108-0023 東京都港区芝浦3-17-12)
E-mail:kazuo_takabayashi@iis.ih.co.jp

⁶(株)IHIインフラシステム 技術本部 建設部 計画課(〒590-0977 大阪府堺市堺区大浜西町3番地)
E-mail:takashi_nakamura@iis.ih.co.jp

鋼・コンクリート合成床版は、高い耐荷力および疲労耐久性などの特徴を有しており、安全性や施工性に優れていることから実橋への適用が増えている。著者らは、鋼管を用いた合成床版を開発し、鋼とコンクリートとのずれ止めには、剛なずれ止めとして長孔を設けた鋼板リブに鋼管を貫通させたずれ止め(鋼管ジベル)を採用している。既往の試験より、このずれ止めは、スタッドやPBLと同等以上の耐荷力を有し、かつ高い耐久性を確保していることを確認した。現在、床版厚に応じて2種類の鋼管を使い分けている。本論文では、鋼管ジベルの鋼管を統一して静的押し抜き試験を行った結果および既往のせん断耐力算定式との比較検討した結果について述べる。

Key Words : Steel concrete composite slab, shear connector, Perfobond Strip, steel pipe, push-out test

1. はじめに

近年、橋梁の合理化・省力化に伴い、鋼・コンクリート複合構造が増えている。鋼・コンクリート複合構造は、鋼とコンクリートの応力伝達を行うためにずれ止めが用いられる。ずれ止めには、スタッドなどの柔なずれ止めと、レオンハルトらが提案した孔あき鋼板ジベル(以下、PBL)¹⁾などの剛なずれ止めがあり、近年では、剛なずれ止めの研究・開発²⁾が数多く行われている。筆者らも、剛なずれ止めとして長孔を設けた鋼板リブに鋼管を貫通させたずれ止め(以下、鋼管ジベル)の開発を行った。この鋼管ジベルは、長孔に充填されたコンクリートと鋼管がずれ止めとして機能することにより、スタッドやPBLと同等以上の耐荷力を有し、かつ高い耐久性を確保していることを確認している³⁾。

現在、鋼管ジベルは、駒井ハルテック・片山ストラテック・IHIインフラシステムの3社で共同開発した鋼管を用いた鋼・コンクリート合成床版(以下、パイプスラ

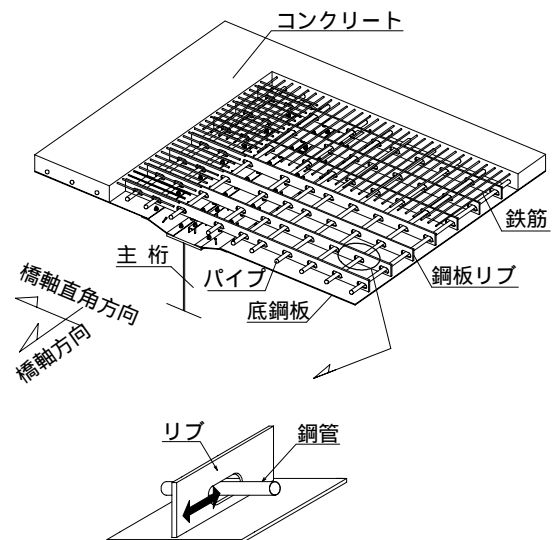


図-1 パイプスラブの概要図

表 - 1 試験体の種類

試験体名称 Type	鋼板リブ (mm)	鋼管 (mm)	鋼板リブの孔形状 (mm)	製作数 (体)
Type-1	PL170×16 (SM400)	配置せず	丸孔 φ85	1
Type-2			丸孔 φ70	1
Type-3			長孔 φ85×150	1
Type-4			長孔 φ70×125	1
Type-5		φ48.6×1.8 (材質:STK700相当)	長孔 φ85×150	3
Type-6			長孔 φ70×125	3

ブ)に採用している⁴⁾。図 - 1 に示すように、パイプスラブは、長孔を設けた鋼板リブと鋼管を格子状に配置した部材が鋼板パネルとコンクリートのずれ止めとして機能する。また、パイプスラブに用いるずれ止めの長孔形状および鋼管断面は、床版厚に応じて、鋼板リブの長孔φ85mm×150mmにφ60.5mmの鋼管を配置したものと長孔φ70mm×125mmにφ48.6mmの鋼管を配置したものがある。合理的な鋼管ジベルの設計および施工性の向上を配慮した場合、2種類の鋼管ジベルに対して鋼管をφ48.6mmに統一することが望ましい。そのため、長孔φ85mm×150mmにφ48.6mmの鋼管を設置したタイプを新たに考案した。本論文では、対象となる鋼管ジベルの静的押し抜き試験を行った結果および既往のせん断耐力算定式との比較検討した結果について述べる。

2. 試験概要

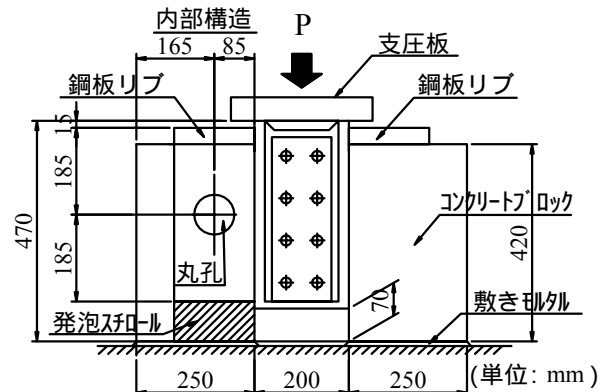
2.1 試験体の概要

試験体の種類を表 - 1、試験体の構造図を図 - 2 にそれぞれ示す。試験体は、孔形状および鋼管設置の有無による影響を確認するため、計18体製作した。リブ断面は、高さ170mm、板厚16mmとし、試験体の形状・寸法は頭付きスタッドの押し抜き試験方法⁵⁾を参考に決定した。

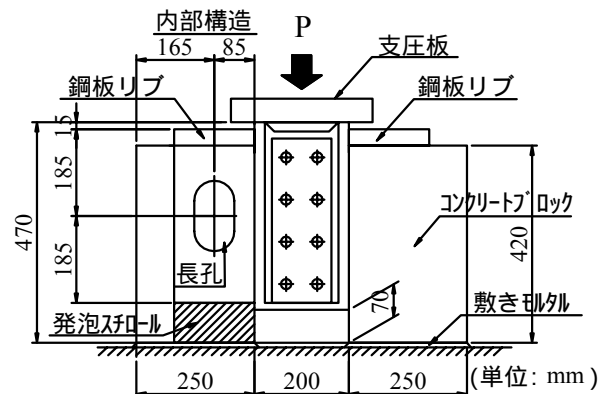
Type-1および Type-2は、PBLとのせん断耐力を比較するため、φ85mmおよびφ70mmの丸孔を設けた試験体とした。また、Type-3およびType-4は、丸孔および鋼管設置の有無による比較をするため、φ85mm×150mmおよびφ70mm×125mmの長孔をそれぞれ設けた試験体とし、Type-1～Type-4は各1体ずつ製作した。

Type-5およびType-6は、鋼管ジベルのせん断耐荷力およびじん性を確認するため、長孔φ85mm×150mmおよび長孔φ70mm×125mmにφ48.6mmの鋼管をそれぞれ貫通させた試験体とし、各3体ずつ製作した。鋼管の配置は、実構造と同条件になるように長孔に接触させる形とした。鋼管の端部は、実構造における鋼管の連続性に配慮した境界条件とするため、エンドプレートを設けた。

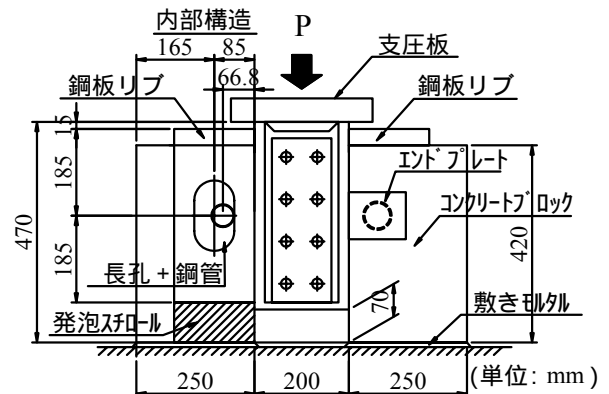
試験体を製作する際、コンクリートの打込み方向を実



(a) 丸孔構造 [Type-1, Type-2]



(b) 長孔構造 [Type-3, Type-4]



(c) 鋼管ジベル [Type-5, Type-6]

図 - 2 試験体構造図

構造に合わせるため、正立の状態にしてコンクリートを打設し、コンクリート硬化後に添接板を用いて、H型部材のウェブを高力ボルトで接合した。リブの下方には発泡スチロールを設置し、リブ下端の断面が載荷荷重に抵抗しないように配慮した。フランジとコンクリートの接触面には剥離剤を塗付することにより、付着力を完全に除去し、載荷初期からせん断応力がずれ止めに伝達されるようにした。なお、使用したコンクリートの仕様を表-2に示す。

2.2 試験方法

押し抜き試験の荷重載荷は、5,000kNの油圧ロードセル付きジャッキを用いた。試験体は、載荷面と支持面が平行を保ち偏心載荷が生じないように調整モルタルを用いて設置した。試験方法はJSSC(案)⁵⁾に従い、最大変位が4mmまでは荷重制御による漸増繰り返し載荷とし、それ以降は変位制御による単調載荷とした。

変位計の配置を図-3に示す。コンクリートとH型部材との相対ずれは、4側面に配置したコンクリートと鋼フランジとの相対ずれを高感度変位計で計測し、データの整理には4側面での平均値を用いた。

2.3 既往のせん断耐力算定式による評価方法

鋼管ジベルのせん断耐力をPBLと比較するため、既往の式により確認する。既往の研究において、PBLに関するせん断耐力算定式はいくつか提案されている。保坂ら²⁾は、孔あき鋼板の板厚、孔内に通す貫通鉄筋の有無およびフランジ面に配置する孔あき鋼板の枚数の影響を把握するために押し抜き試験を実施し、回帰分析の結果、貫通鉄筋が無い場合の式(1)および貫通鉄筋が有る場合の式(2)を提案している。式(2)の第1項目は、孔と貫通鉄筋の間にあるコンクリートの実面積に対するせん断耐力、第2項目は貫通鉄筋が受け持つせん断耐力をそれぞれ示す項である。

$$Q_u = 3.38d^2 \times (t/d)^{1/2} \times f'_{cu} - 39.0 \times 10^3 \quad (1)$$

$$Q_u = 1.45 \left\{ (d^2 - \phi^2) \cdot f'_{cu} + \phi^2 \cdot f_{st} \right\} - 26.1 \times 10^3 \quad (2)$$

Q_u : 孔1個当たりのせん断耐力 (N)

f'_{cu} : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t : リブ板厚 (mm)

d : 孔径 (mm)

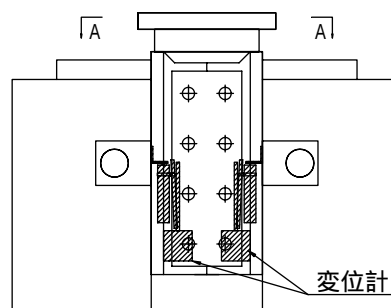
ϕ : 貫通鉄筋径 (mm)

f_{st} : 貫通鉄筋の引張強度 (N/mm²)

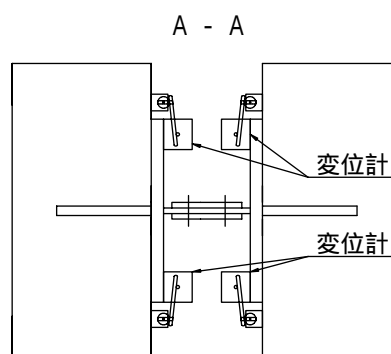
本試験において Type-1 ~ Type-4 は式(1)により評価を行う。なお、Type-3およびType-4の孔径 d は載荷方向に直交する長孔の短径を用いる。

表-2 コンクリートの仕様

圧縮強度	$\sigma_{28}=41.1\text{N/mm}^2$
スランプ	10.5cm
空気量	4.4%
セメントの種類	普通セメント
最大粗骨材寸法	20mm
混和剤	AE減水剤



(a) 側面図



(b) 断面図

図-3 変位計の配置

表-3 孔径および貫通鉄筋径

試験体名称 Type	孔径 d (mm)	貫通鉄筋径 ϕ (mm)		算定式による Q_u (kN)	
		第1項	第2項	式(1)	式(2)
Type-1	85.0	-	-	396.5	-
Type-2	70.0	-	-	286.4	-
Type-3	85.0	-	-	396.5	-
Type-4	70.0	-	-	286.4	-
Type-5	85.0	48.6	18.4	-	698.6
Type-6	70.0	48.6	18.4	-	468.8

Type-5およびType-6は長孔に鋼管を挿入した構造であり、式(2)の条件と同様となることからこの式を用いて本試験のせん断耐力の評価を行う。孔径 d は載荷方向に直交する長孔の短径を用いる。また、貫通鉄筋に対して第1項の ϕ は鋼管の外径、第2項の ϕ は鋼管を貫通鉄筋の断面積と等しくなる径に換算した値とする。また、貫通鉄筋の引張強度は鋼管の引張強度とする。孔径と貫通鉄筋径の換算値を表-3に示す。

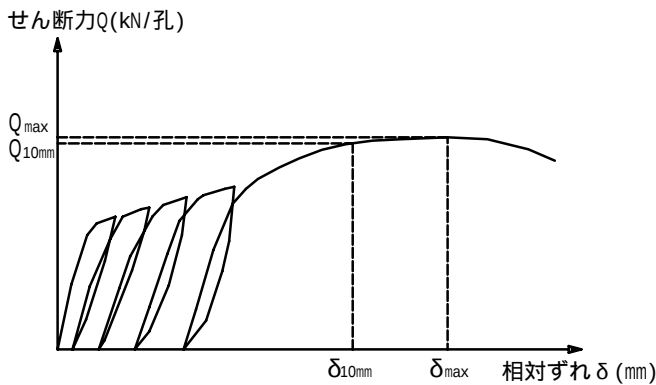


図 - 4 荷重 - 相対ずれ関係の模式図

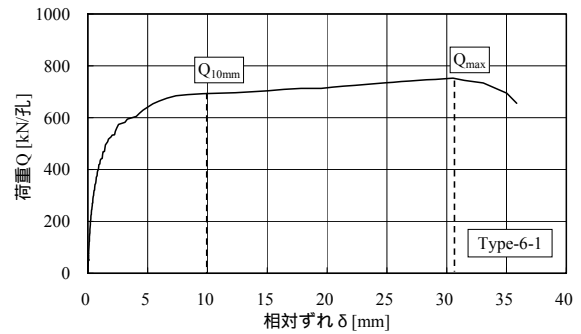


図 - 5 Type-6 による荷重 - 相対ずれ関係例

表 - 4 試験結果一覧

試験体名称 Type		最大荷重 Q_{max} [kN/孔]	最大ずれ量 δ_{max} [mm]	せん断耐力 Q_{10mm} [kN/孔]	算定式による 計算値 [kN]	$Q_{max}/$ 計算値	$Q_{10mm}/$ 計算値
Type-1		574.1	2.63	574.1	396.5	1.45	1.45
Type-2		461.9	3.34	461.9	286.4	1.61	1.61
Type-3		578.5	6.75	578.5	396.5	1.46	1.46
Type-4		562.4	7.06	562.4	286.4	1.96	1.96
Type-5	1	735.0	19.6	685.0	698.6	1.05	0.98
	2	738.9	11.0	579.1	698.6	1.06	0.83
	3	782.8	18.4	735.7	698.6	1.12	1.05
	平均	752.2	16.3	666.6	698.6	1.08	0.95
Type-6	1	752.6	30.5	694.5	468.8	1.61	1.48
	2	625.7	11.1	625.3	468.8	1.33	1.33
	3	763.0	19.8	712.9	468.8	1.63	1.52
	平均	713.8	20.5	677.6	468.8	1.52	1.45

2. 4 ずれ止めの評価

荷重 - 相対ずれ関係の模式図を図 - 4, 荷重 - 相対ずれ関係例を図 - 5 にそれぞれ示す。既往の研究でのせん断特性を評価する指標としては大きく分類して 2 種類ある。1 つは押し抜きせん断試験での最大荷重 Q_{max} により評価する方法, もうひとつは, 相対変位 10mm までの最大荷重 Q_{10mm} により評価する方法である²⁾。例えば, 試験の制約により Q_{max} が現れる前に終了する場合もあり, Q_{max} の定義が不明確な部分がある。さらに, 図 - 5 に示すように, 本試験でも相対ずれが 10mm 以降で最大荷重となる場合がある。式(1)および式(2)の基となったデータの多くは Q_{10mm} であり, 鋼管ジベルのせん断耐力の比較も Q_{10mm} で行う。

3. 押し抜き試験結果

3. 1 試験結果および荷重 - 相対ずれ

押し抜き試験結果を表 - 4 に示す。なお, 表内の印の Q_{10mm} は, Q_{max} が相対ずれ 10mm 以内に存在するため

$Q_{max}=Q_{10mm}$ となっている。

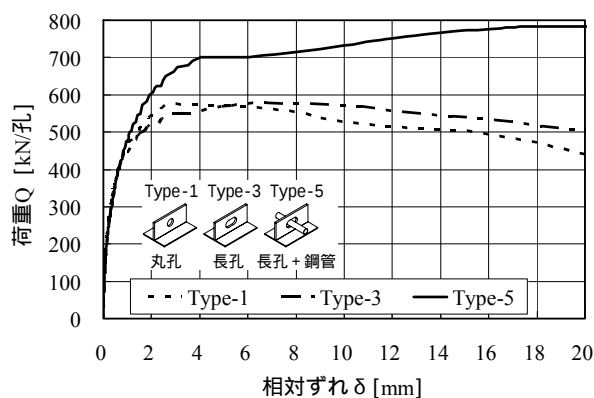
各試験体の代表的な荷重 - 相対ずれ曲線を図 - 6 に示す。図 - 6 (a)は孔径φ85 タイプ, 図 - 6 (b)は孔径φ70 タイプにおける丸孔構造, 長孔構造および鋼管ジベルの比較をそれぞれ行った結果である。試験は, 全試験体において, 最大ずれ可能量(70mm)まで押し抜いた状態で終了している。また, この図に示す線は, 漸増繰り返し載荷の各ステップでの最大値の包絡線である。

以下に表 - 4 および図 - 6 に関する考察を行う。

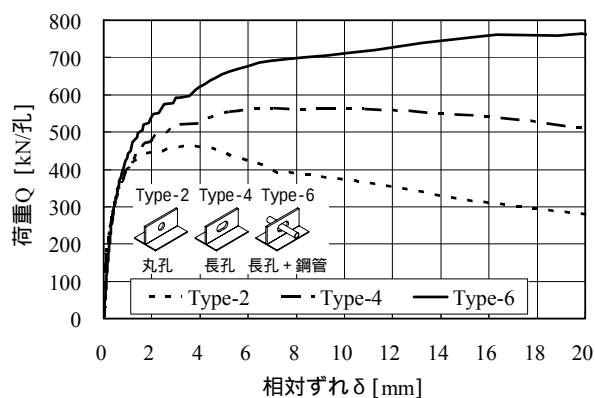
(1) 丸孔構造と長孔構造の比較

孔形状による挙動の差を孔幅φ85 およびφ70 においてそれぞれ確認する。まず, 表 - 4 より Type-1 と Type-3 を比較すると Q_{max} は概ね同じであり, δ_{max} は Type-3 の方が 2.5 倍程度大きい値を示している。一方, Type-2 および Type-4 の比較をすると, Type-4 の方が Q_{max} で 1.2 倍, δ_{max} で 2.1 倍程度大きい値となっている。

図 - 6 より, 長孔構造の初期段階における挙動は, 丸孔構造と同じであり, 相対ずれ 7mm 程度を超えるまで荷重の低下はない。以上より, 長孔構造は丸孔構造と比

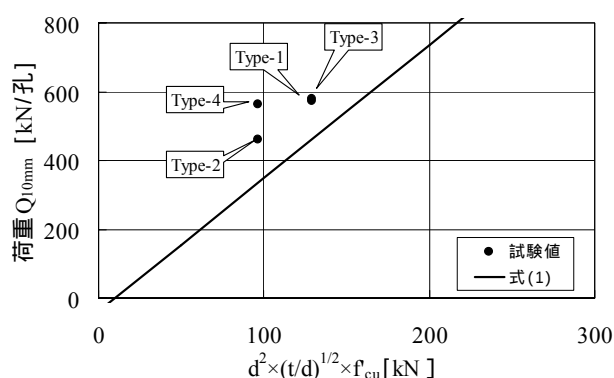


(a) 孔径φ85 タイプ

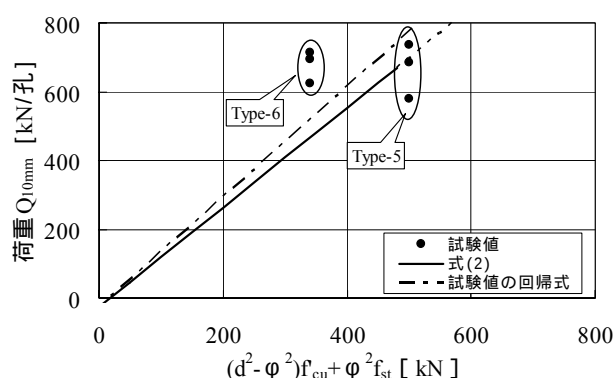


(b) 孔径φ70 タイプ

図 - 6 荷重 - 相対ずれ関係



(a) Type-1 ~ Type-4 および式(1)の比較



(b) Type-5, Type-6 および式(2)の比較

図 - 7 Q_{10mm} による既往のせん断耐力式との比較

較してせん断耐力およびじん性が同等以上となる構造であることが確認できる。

(2) 長孔構造と鋼管ジベルの比較

鋼管設置の有無による挙動の差を確認する。表 - 4 より、Type-5 は Type-3 と比較して Q_{max} は 1.2 倍、 δ_{max} は 1.5 倍以上、それぞれ増加している。また、Type-6 においても Type-4 と比較して、 Q_{max} で 1.2 倍、 δ_{max} で 1.5 倍以上それぞれ増加している。

図 - 6 より、鋼管ジベルの初期段階における挙動は長孔と概ね同じであり、相対ずれが 10mm 以上進行しても荷重の低下はみられない。以上より、鋼管ジベルは長孔構造と比較してせん断耐力およびじん性がより向上することがわかる。

(3) 丸孔構造と鋼管ジベルの比較

丸孔構造と鋼管ジベルの挙動を確認する。表 - 4 より、Type-5 は Type-1 と比較して、 Q_{max} で 1.3 倍、 δ_{max} は 4 倍以上である。また、Type-6 は Type-2 と比較して、 Q_{max} で 1.5 倍、 δ_{max} は 3 倍以上である。以上より、鋼管ジベルは、鋼管を φ48.6mm に統一した場合においても丸孔構造以上のせん断耐力と高いじん性を有していることが確認できる。

(4) せん断耐力に対する考察

鋼管ジベルは、 Q_{10mm} までは PBL と同様に、載荷方向に直交する幅を抵抗範囲としたコンクリートせん断面積に依存する。その後、荷重の増加に対しては鋼管による抵抗が増加するため耐力の低下を緩和するものと推測される。

(5) Q_{10mm} と Q_{max} の比較

鋼管ジベルは Q_{10mm} 以降においてもせん断耐力を保持しており、 Q_{max} が相対ずれ 10mm 以降に現れる。そのため、 Q_{10mm} と Q_{max} の関係について整理すると、 Q_{max} は Q_{10mm} と比較して Type-5, Type-6 の平均値とともに約 1.1 倍大きくなっていることがわかる。

3.2 既往のせん断耐力算定式との比較

Type-1 ~ Type-4 と式(1)の比較および Type-5, Type-6 と式(2)の比較を行った結果を図 - 7 に示す。図中の縦軸は試験値、横軸は $(d^2 - \phi^2) \cdot f'_{cu} + \phi^2 \cdot f_{st}$ を示す。なお、式(2)において既往のデータの横軸が最大 480kN であったため、それ以降は破線で示している。

図 - 7 (a)より、Type-1 ~ Type-4 のせん断耐力は式(1)に対して安全側の結果となっている。相関係数は式(2)

に対して 0.7 であり、貫通鉄筋の無い場合については式(1)よりある程度の評価は可能である。

図 - 7 (b)より、Type-6 のせん断耐力は式(2)に対して安全側の結果であり、Type-5 は 3 体のうち 1 体は小さい値となっているが残り 2 体は概ね一致している。Type-5 および Type-6 の回帰式を式(2)を基にして算出すると、傾きは 1.6 となる。つまり、式(2)の傾き 1.45 に対して 1.1 倍となる。

4. 鋼管ジベルのせん断耐力算定式

鋼管ジベルは、 Q_{10mm} よりも Q_{max} が 1.1 倍増加すること、式(2)に対して鋼管ジベルのせん断耐力は 1.1 倍の傾きを有することが確認された。これより、 $Q_{max} = Q_{10mm}$ とすると、式(2)を基にして鋼管ジベルのせん断耐力算定式を以下の式により示すことができる。

$$Q_u = 1.45k_1k_2 \left\{ (d^2 - \phi^2) \cdot f'_{cu} + \phi^2 \cdot f_{st} \right\} - 26.1 \times 10^3 \quad (3)$$

$$k_1 = 1.1, \quad k_2 = 1.1$$

k_1 : 鋼管ジベルの Q_{10mm} / Q_{max}

k_2 : 試験値の回帰式の傾き / 式(2)の傾き

5. おわりに

本論文では、対象となる鋼管ジベルの静的押し抜き試験を実施し、既往のせん断耐力算定式との比較検討を行った。以下にその結果を示す。

- 1) 孔形状の比較を行った結果、長孔構造はせん断耐力およびじん性が丸孔構造と同等以上となることを確認した。
- 2) 鋼管設置の有無について比較を行った結果、鋼管ジベルは、せん断耐力およびじん性が長孔構造よ

り向上することを確認した。

- 3) 今回実施した 2 種類の鋼管ジベルのせん断耐力は鋼管を $\phi 48.6mm$ に統一した場合においても、大きな差はみられなかった。また、試験値と評価式による比較により、PBL と同等以上のせん断耐力を有し、かつ高いじん性を有することを確認した。
 - 4) 鋼管ジベルの静的押し抜き試験結果より、鋼管ジベルのせん断耐力算定式を提案した。しかし、この式は、本試験データのみであり、少ないデータ数により示したものである。今後、データ数を充実し、長孔形状や鋼管のパラメータの検討を行うことで精度を向上させていきたいと考えている。
- なお、本構造の疲労性能については現在検討中である。

参考文献

- 1) Fritz Leonhardt et al.: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, 1987.
- 2) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴, 橘吉宏, 渡辺滉: 孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1593-1604, 2000.3.
- 3) 田中正明, 中本啓介, 大久保宣人, 栗田章光: 鋼板リブと鋼管を用いたずれ止めに関する研究, 第 5 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.251 ~ pp.256, 2003.11.
- 4) 大久保宣人, 中本啓介, 田中正明, 松井繁之: 鋼管ジベルを用いた鋼・コンクリート合成床版に関する実験的研究, 第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.97-102, 2003.6.
- 5) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押し抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状, JSSC テクニカルレポート, No.35, 1996.11.

EXPERIMENTAL STUDYS ON STRENGTH OF SHEAR CONNECTER USING PIPE DOWELS

Masashi YAMAMOTO, Nobuhito OKUBO, Keisuke NAKAMOTO,
Hazime TATIBANA, Kazuo TAKABAYASHI and Takashi NAKAMURA

Steel concrete composite slab has features such as high load bearing ability and durability, are increasingly applied to the bridges from the fact that safety and construction. The authors have developed a composite slab using a steel pipe, steel and concrete shear connector and has adopted the structure with steel ribs and steel pipe. From previous studies, shear connector, or better than having a load bearing ability of the stud and PBL was confirmed that the higher durability. In this paper, we describe the push-out test results of pipe dowel being static.