

高強度コンクリートジベルを用いた鋼・コンクリート接合方法の 2面せん断実験による基礎的研究

The Basic Study of Steel-Concrete Joint Method with High-Strength Concrete Strip
by Test of Double Shear

竹之井 勇 ISAMU TAKENOI
篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI
三加 崇 TAKASHI SANGA
浅井 洋 HIROSHI ASAI

孔あき鋼板ジベルにおいて、高強度コンクリートを使用してジベル数を減らすことが考えられるが、接合部を含むコンクリート部材全体に高強度コンクリートを使用しなければならず不経済である。そこで、接合部のみを高強度化させるため、孔あき鋼板ジベルにあらかじめ製作した高強度コンクリートジベルを用い、せん断耐力の向上を試みた。その結果、高強度コンクリートジベルや鋼管充填コンクリートジベルによってせん断耐力の向上が図れることを明らかにした。

キーワード：孔あき鋼板ジベル，高強度コンクリートジベル，鋼管充填コンクリートジベル

However using high-strength concrete for perfo-bond strip decreases the required number of strip; this method may not be economical by use considerable amount of high-strength concrete around perfo-bond strip. This study deals with the methods of joints using prefabricated high-strength concrete strip and steel pipe strip filled with concrete for perfo-bond strip to minimize the amount of high-strength concrete. The test result demonstrated that these method using high-strength concrete locally could increase the share strength of joints.

Key Words: Perfo-Bond Strip, High-Strength Concrete Strip, Steel Pipe Filling Concrete Strip

1. はじめに

鋼材とコンクリートの接合部では、力を確実に伝達する性能が要求され、頭付きスタッドや孔あき鋼板ジベルなどの接合方法が多く用いられている。貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルは、鋼板孔内のコンクリートが鋼板と貫通鉄筋によって三次元的に拘束されてせん断力に抵抗する。初期剛性は大きいですが、せん断力が大きくなるに従ってずれ変位が大きくなり、最大せん断力に達してからは、緩やかに減少するのが特徴である。また、鋼板に設けた孔に鉄筋を貫通させ、鋼板周囲の部材と一緒にコンクリートを打設するため、施工が容易であることも利点とされている。しかしながら、実構造物など大きなせん断力が作用する部材では、ジベルを群配置してせん断力に抵抗することになる。その際、確実に孔内部にコンクリートが充填されたことを確認することが困難であり、

貫通鉄筋の配置も容易ではなくなる。さらに孔内のコンクリート強度や貫通鉄筋径によってせん断耐力が決まるが、高強度コンクリートを使用してせん断耐力の増加を図る方法は、接合部を含むコンクリート部材全体に高強度コンクリートを使用しなければならず不経済である。そのため、接合部のみを高強度化させ、ジベル配置数の減少など施工の簡素化・省力化を図ることができれば、より合理的な接合が可能であると考えられる。

そこで本研究では、接合部の高強度化と施工の省略化を目的として、あらかじめ高強度コンクリートなどで作製した円柱型ジベルを鋼板の孔内に配置した接合方法について、基本的性能を把握するために2面せん断実験を実施した。円柱型ジベルは、あらかじめ製作できるため高強度コンクリートや繊維補強コンクリートを用いることが容易であり、鋼管にコンクリートを充填した鋼管充填コンクリートジベルなど、さまざまな補強を施すこと

も可能であり、それらの違いについて検討を行った。

2. 実験の概要

試験体形状を図-1に示す。試験体中央はH形鋼を2分割した鋼板とし、コンクリートブロックに埋まる箇所に厚さ16mmの孔付き鋼板を溶接している。両側のコンクリートにおいては、コンクリートと接触するH形鋼のフランジ面にはコンクリートとの付着を排除するためにグリースを塗布して図に示す方向でコンクリート打設を行った。実験時には鋼板をボルトで接続して一体化して、2面せん断実験を行った。

また試験体の種類を表-1に示す。試験体は、従来の孔あき鋼板ジベルタイプ (No.1~3)、高強度モルタルで円柱を製作したコンクリートジベルタイプ (No.4~7, 13)、鋼管に高強度モルタルを充填した鋼管充填コンクリートジベルタイプ (No.8~12, 14) に分類することができる。

PBL1~3は、従来の孔あき鋼板ジベルの形状で、左右の埋め込み鋼板にφ53mmの孔を1箇所ずつ設け、それぞれD10, D19, D22の貫通鉄筋を孔の中心に配置した。No.4のHC以降の試験体は、コンクリートジベル、鋼管充填コンクリートジベルを孔あき鋼板に挿入し、荷重の際にジベルが鋼板に接触するように配置して隙間をエポキシ樹脂で充填した。また、ジベル長はNo.13, 14以外は200mmとし中心を孔あき鋼板位置に配置して表裏100mmずつ突出させた。

HCとUFCは、高強度モルタルで製作したジベルを用いてせん断耐力増大を目的としたタイプである。HCは、圧縮強度約120N/mm²の高強度モルタルで製作したジベルを配置した試験体であり、UFCはせん断耐力以降の荷重低下を徐々にもたらし、脆性的な破壊を抑えることを目的として鋼繊維 (φ0.2mm, 長さ22mm以下) を混入し

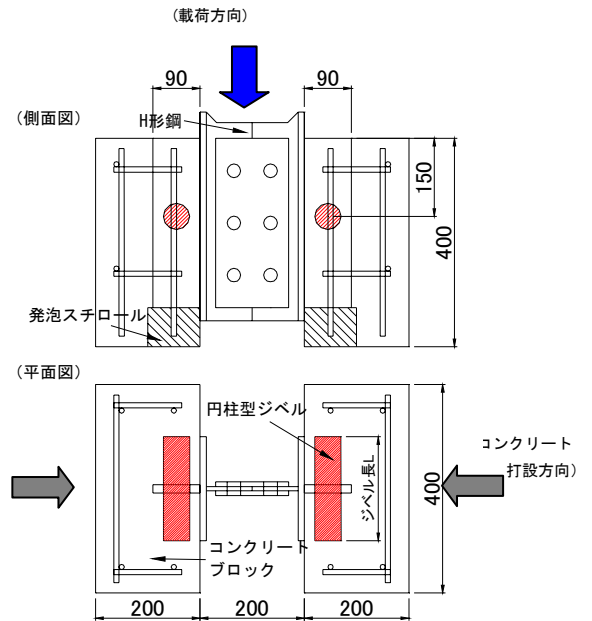
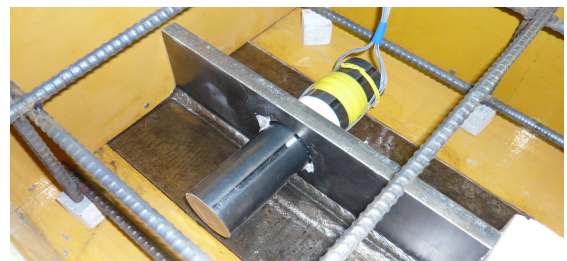


図-1 試験体形状



(コンクリートジベルタイプ)



(鋼管充填コンクリートジベルタイプ)

写真-1 ジベル配置状況

表-1 試験体の種類

No	記号	ジベル	ジベル径 (mm)	補強仕様	ジベル強度 (N/mm ²)	コンクリート強度 (N/mm ²)
1	PBL1	PBL-D10	φ 53.0	貫通鉄筋D10, 一体打ち	35.2	35.2
2	PBL2	PBL-D19	φ 53.0	貫通鉄筋D19, 一体打ち	47.9	47.9
3	PBL3	PBL-D22	φ 53.0	貫通鉄筋D22, 一体打ち	47.9	47.9
4	HC	高強度モルタル	φ 51.8	—	115.3	50.2
5	UFC	超高強度繊維補強モルタル	φ 51.8	鋼繊維 (繊維体積混入率1.75Vol%)	213.3	38.5
6	HCS1	高強度モルタル+鉄筋	φ 51.8	鉄筋D10	115.3	50.2
7	HCS2	高強度モルタル+鉄筋	φ 51.8	鉄筋D22	129.0	38.5
8	CFT1	高強度モルタル+鋼管①	φ 48.6	鋼管 φ 48.6 (t=2.3mm)	129.0	50.2
9	CFT2	高強度モルタル+鋼管②	φ 48.6	鋼管 φ 48.6 (t=3.5mm)	129.0	38.5
10	CFT2S	高強度モルタル+鋼管②+鉄筋	φ 48.6	鋼管 φ 48.6 (t=3.5mm), 鉄筋D16	129.0	38.5
11	CFT2PC	高強度モルタル+鋼管②+PC	φ 48.6	鋼管 φ 48.6 (t=3.5mm), 鋼材 φ 16	129.0	38.5
12	CFT3	高強度モルタル+鋼管③	φ 48.6	鋼管 φ 60.5 (t=3.2mm)	129.0	38.5
13	UFCM	超高強度繊維補強モルタル (L=100)	φ 51.8	鋼繊維 (繊維体積混入率1.75Vol%)	213.3	38.5
14	CFT2M	高強度モルタル+鋼管② (L=100)	φ 48.6	鋼管 φ 48.6 (t=3.5mm)	129.0	38.5

た圧縮強度200N/mm²以上の繊維補強モルタルで作製したコンクリートジベルを配置した試験体である。

No.6のHCS1以降は、120N/mm²高強度モルタルのコンクリートジベルを基本とし、鉄筋や鋼管を付加してさらなるせん断耐力の向上と脆性的な破壊を抑えることを目的とした試験体である。HCS1とHCS2は、高強度モルタルのコンクリートジベルの中心にジベル長200mmと同じ長さの貫通鉄筋D10、D22を配置した試験体である。CFT1は外径48.6mm、厚さ2.3mmの鋼管（STK400）に高強度モルタルを充填したジベルを配置した試験体である。CFT2はCFT1に対して孔径を変えず、厚さを3.5mmに増した鋼管、CFT3は孔径60.5mm、厚さ3.2mmの鋼管に高強度モルタルを充填したジベルを配置した試験体である。CFT2Sは、CFT2の鋼管充填コンクリートジベルに鉄筋D16を中心に配置した試験体である。CFT2PCはさらなる拘束効果を目的としてφ16mm全ネジ鋼材に張力を与えて鋼管の中心に配置し、鋼管内に高強度モルタルを充填して硬化後に張力を解放して鋼管充填コンクリートにプレストレスを導入した。導入張力は、ジベル1本当たり20kNとした。これらは鋼管内に鉄筋などを配置することで、さらなるせん断耐力の向上や脆性的な破壊を防ぐ効果を期待した。

UFCMとCFT2Mは、ジベル長を100mmと短くして、孔あき鋼板位置に中心を配置して表裏50mmずつ突出させた。ジベル長の違いがせん断耐力、ずれ変位に与える影響を把握することを目的とした試験体である。

荷重は、日本鋼構造協会による頭付きスタッドの押し抜き試験方法¹⁾を参考に、ずれ変位が2.0mmまで0.2mm増すごと、2.0mmから4.0mmまでは0.5mm増すごとに荷重・除荷の漸増繰り返し荷重とし、それ以降は、破壊に至るまで単調荷重とした。また両側コンクリートが外側に移動して耐力に影響を及ぼすことを避けるためにコンクリートの下端にストッパーを設けた。

3. 実験結果

(1) せん断耐力について

荷重実験結果の一覧を表-2に示す。最大荷重は荷重時の全荷重で表し、ジベル1箇所当たりの荷重は全荷重を1/2にした数値である。最も荷重が大きかったのはCFT3であり、ジベル1箇所当たり491.3kNを示した。破壊形状は、実験終了後にコンクリート内部のジベルを観察したところ、コンクリートジベルは鋼板とコンクリートの界面に沿ってせん断破壊していた。鋼管充填コンクリートジベルは、コンクリートジベルと同様のせん断破壊やジベルが大きくせん断変形した状態で先にジベル下のコ

表-2 実験結果一覧

No	記号	最大せん断力(kN)		最大せん断力時ずれ変位(mm)
		最大荷重	ジベル1箇所あたり	
1	PBL1	371.7	185.9	0.98
2	PBL2	542.8	271.4	6.41
3	PBL3	628.7	314.3	9.17
4	HC	471.7	235.9	0.80
5	UFC	609.2	304.6	1.21
6	HCS1	586.0	293.0	0.72
7	HCS2	534.7	267.3	6.07
8	CFT1	715.4	357.7	3.78
9	CFT2	921.4	460.7	5.72
10	CFT2S	925.3	462.6	6.08
11	CFT2PC	917.8	458.9	4.85
12	CFT3	982.5	491.3	7.62
13	UFCM	621.2	310.6	1.01
14	CFT2M	912.3	456.1	8.42



写真-2 コンクリートジベル (UFC) 破壊状況



写真-3 鋼管充填コンクリートジベル (CFT1) 破壊状況

表-3 孔あき鋼板ジベルタイプの設計せん断耐力比較

算定式		単位 (kN)		
		PBL1 (D10)	PBL2 (D19)	PBL3 (D22)
計算値	① (土木学会 複合構造設計基準 ²⁾) $V_{psud}=(1.85A-26.1 \times 10^3)/\gamma_b$ (1) $A=\pi(d^2-\phi^2) f_{cd}/4+\pi\phi^2 f_{td}/4$ (2)	183.5	353.9	416.8
	② (鉄道構造物等設計基準 ³⁾) $Q_{ud}=(1.85A-106.1 \times 10^3)/\gamma_b$ (3) $A=\pi(d^2-\phi^2) f_{cu}/4+\pi\phi^2 f_{td}/4$ (4)	90.5	273.9	336.8
	③ (波形鋼板ウェブPC橋計画マニュアル ⁴⁾) $V=2 \times (\pi \cdot \phi^2) / 4 \times 1.14 \sigma_{ck}$ (5)	177.1	240.9	240.9
実測値		185.9	271.4	314.3

d: 孔径(mm), φ: 鉄筋径(mm), f_{cd} , f_{cu} , σ_{ck} : コンクリート設計基準強度 (N/mm²)
 f_{td} , f_{td} : 貫通鉄筋の設計引張強度 (N/mm²), γ_b : 部材係数 (=1.0)

ンクリートが破壊したケースが見られた(写真-2,3)。また、各試験体で最大荷重時のずれ変位が異なるため、併せて記載した。

孔あき鋼板ジベル(PBL1~3)については、表-3に示すように設計せん断耐力の算定式がいくつか提案されており、実験結果と算定式による計算値を比較した。算定式①²⁾は実験値より得られた算定式であり、算定式②³⁾は算定式①の下限値を包絡するようにシフトさせた式である。また算定式③⁴⁾はレオンハルトの設計思想が基本となっており、貫通鉄筋が考慮されていない。今回の実験結果ではPBL1については、算定式①の設計値とはほぼ一致しているが、鉄筋径がD19, D22と大きくなると設計値より下回り、算定式②の設計値に近い結果となった。算定式③では貫通鉄筋が考慮されないため、鉄筋径が異なるPBL2とPBL3の設計せん断耐力が同値となり、実測値とは整合しない結果となった。

(2) せん断力とずれ変位の関係

せん断力とのずれ変位の関係を図-2に示す。図-2(a)は、孔あき鋼板タイプとコンクリートジベルタイプの実験結果を示す。孔あき鋼板ジベルの鉄筋径が太いタイプのPBL2, PBL3は、ずれ変位を伴いながらせん断力が増加していき、ずれ変位6mm以降に最大荷重に達している。また、コンクリートジベルの圧縮強度が高いHCや鋼繊維を混入したUFCの最大せん断力は、孔あき鋼板ジベルタイプとあまり変わらない結果となった。しかし、孔あき鋼板ジベルタイプの最大せん断力時のずれ変位が6mm以上であるのに対し、HC, UFCは最大せん断力時のずれ変位が1mm程度である。ずれ変位が小さい領域では、孔あき鋼板ジベルタイプよりも高いせん断力を示すことが分かる。また貫通鉄筋が配置されていないタイプのHC, UFC, 貫通鉄筋が細径D10のHCS1は、PBL1と同様にずれ変位1mm程度で最大荷重に達した後、せん断力が減少している。その際、UFCのせん断力の減少は緩やかであり、鋼繊維の抵抗によると考えられるが、HCとHCS1のせん断力は急激に低下しており、コンクリートジベルに脆性的な破壊が生じた。

図-2(b)は高強度モルタルに鉄筋、鋼管を付加したタイプの試験結果を示す。鋼管充填コンクリートジベルを使用することで、鉄筋を付加したタイプよりも最大せん断力は大きく増加したことが分かる。また、鋼管充填コンクリートジベルは、ずれ変位の増加に伴い、せん断力がさらに増加して最大せん断力時のずれ変位は約4~8mm程度となっており、十分な変形性能が期待できる。その後のずれ変位に対しても、急激な荷重低下は見られず、脆性的な破壊を抑えることができると考えられる。

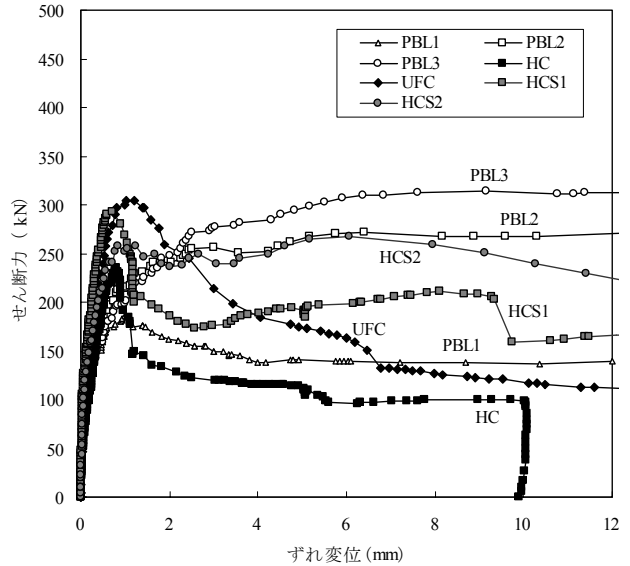


図-2(a) 孔あき鋼板ジベルとコンクリートジベル

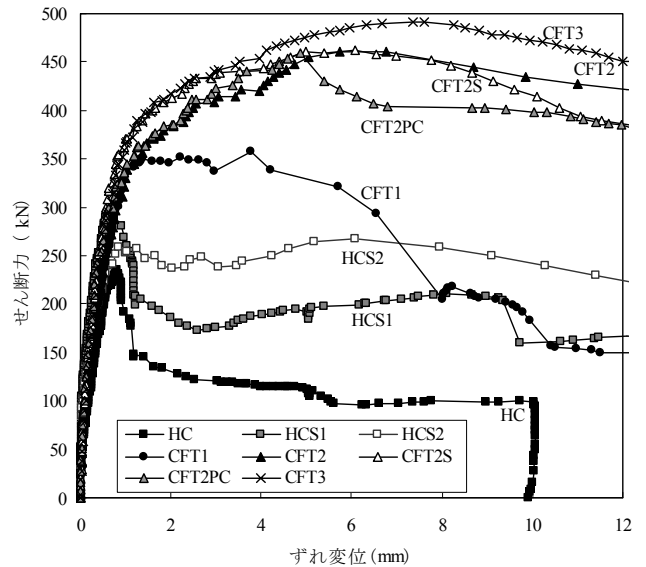


図-2(b) 高強度モルタルを使用したジベル

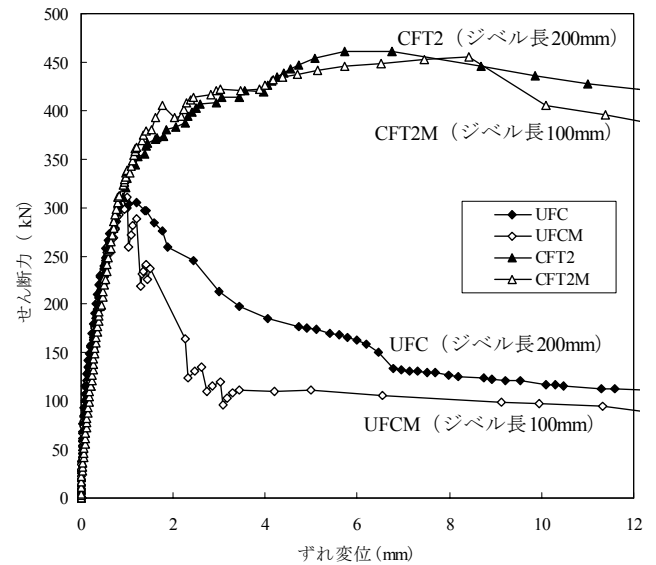


図-2(c) ジベル長が異なる試験体の比較

鋼管の種類が異なるCFT1, CFT2, CFT3では、鋼管の厚さや鋼管径を大きくすることで最大せん断力が増加し、さらにその後の急激な荷重低下も抑える効果が認められる。一方、鋼管内に鉄筋D16を配置したCFT2S, さらにプレストレスを導入したCFT2PCでは、CFT2に対してせん断力、ずれ変位とも大きな差はなく、明確な効果は見られなかった。

図-2(c)はジベル長を変化させた試験体を比較した結果を示す。コンクリートジベルタイプ、鋼管充填ジベルタイプともジベル長を鋼板面から5cm程度まで短くしても、せん断耐力とずれ変位の挙動に影響がないことが分かり、ジベル部材の簡素化が期待できる結果となった。UFCは最大せん断力後の荷重の低下がUFCMよりも緩やかであるが、これはジベル長の影響ではなく鋼繊維の向きなどが影響したと考えられる。

(3) 圧縮強度とせん断耐力の関係

図-3に各試験体のジベル圧縮強度とせん断耐力の関係を示す。図中に複合構造標準方書²⁾より貫通鉄筋を有さない場合の設計せん断耐力を算出する式(6)を用いてジベル圧縮強度40N/mm²のせん断耐力計算値を合わせてプロットした。

(貫通鉄筋を有さない場合)

$$V_{psud} = (4.31A - 39.0 \times 10^3) / \gamma_b \quad (6)$$

$$A = \pi d^2 (t/d)^{1/2} f'_{cd} / 4 \quad (7)$$

その計算値を含めて貫通鉄筋を有さない試験体においては、高強度の領域でせん断耐力は増加しているが、式(6)と実験結果とは一致していない。そこで、棒部材のせん断耐力式⁵⁾からせん断耐力が圧縮強度の1/3乗に比例するものとして回帰した結果を式(8)と図中に示す。

$$V_c = 0.023 A_c \cdot f_c^{1/3} \quad (8)$$

V_c : コンクリートが負担するせん断耐力 (kN)

A_c : コンクリート断面積 (mm²)

f_c : ジベルの圧縮強度 (N/mm²)

これよりジベルの圧縮強度を40N/mm²から210N/mm²に高めればせん断耐力は約1.7倍の増加が期待できる。貫通鉄筋を有する試験体では、貫通鉄筋がD10の場合は圧縮強度の増加によってせん断耐力が大きくなっているが、貫通鉄筋を大きくしたD22の試験体の場合では、せん断耐力は同程度であり、鉄筋径に見合う拘束効果は認められなかった。

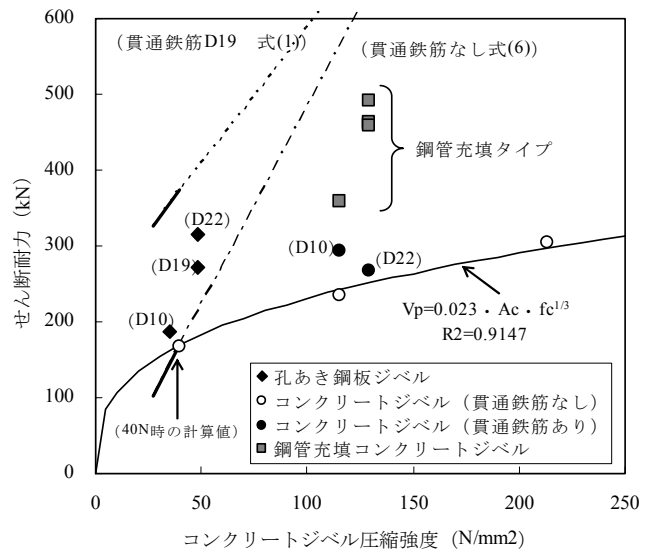


図-3 ジベル圧縮強度とせん断耐力の関係

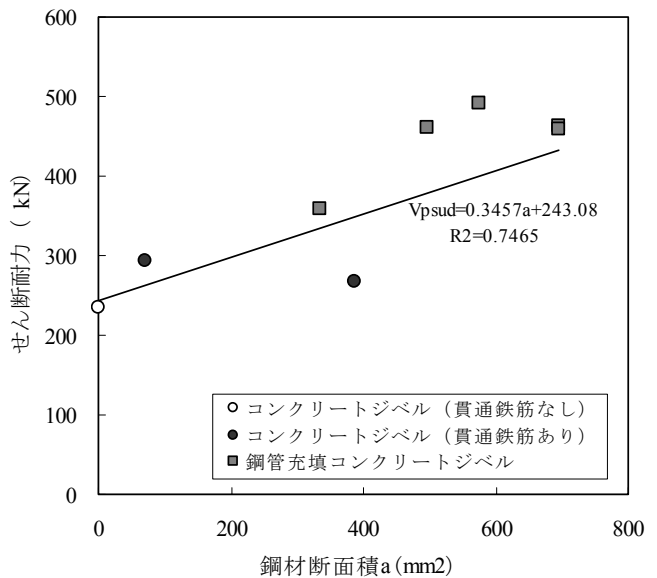


図-4 鋼材断面積とせん断耐力の関係

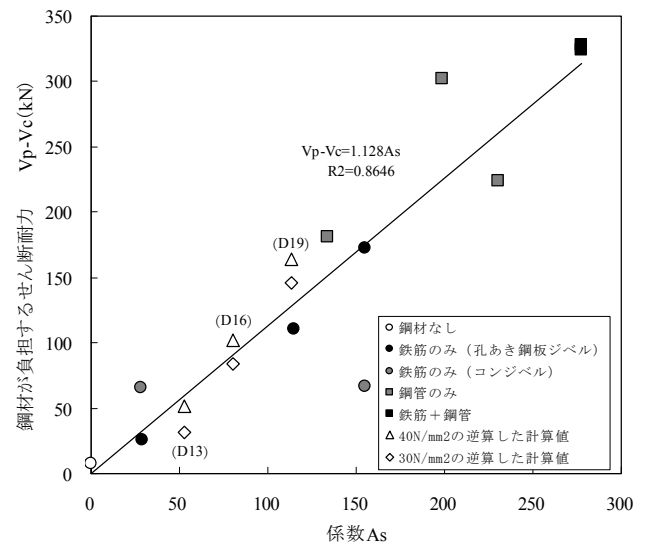


図-5 係数 As と鋼材分が負担するせん断耐力

(4) 鋼材断面積がせん断耐力に及ぼす影響

次に高強度モルタルをジベルに使用した試験体において、図-4に鋼材断面積とせん断耐力の関係を示す。鋼材断面積の算出は、例えばCFT2Sであれば鋼管と鉄筋の断面積を加算した面積とした。高強度モルタルに貫通鉄筋を配置したHCS1, HCS2の場合は、鋼材断面積が大きくなってもせん断耐力に差は見られないが、鋼管充填タイプでは鋼材の断面積に比例して、せん断耐力は高くなる傾向を示しており、鋼管による効果が期待できることが認められた。

(5) せん断耐力算定式の提案

実験結果よりせん断耐力の算定式を検討した。(3)節では貫通鉄筋を有さない場合のせん断耐力は式(8)によりジベルのコンクリート断面積と圧縮強度の1/3乗に比例することが認められた。そこで、式(9)のように、各試験体において全体のせん断耐力から式(8)によって算出されるコンクリートが負担するせん断耐力を差し引いて貫通鉄筋や鋼管の鋼材部分が負担しているせん断耐力を算出し、それと式(10)によって算出した鋼材の断面積と引張強度を乗じた係数 A_s との関係を求めた。その結果を図-5に示す。

$$V_p - 0.023 A_c \cdot f_c^{1/3} = k \cdot A_s \quad (9)$$

$$A_s = (a1 \cdot f_{ud} + a2 \cdot f'_{ud}) / 1000 \quad (10)$$

$a1$: 貫通鉄筋の断面積 (mm^2)

$a2$: 鋼管の断面積 (mm^2)

f_{ud} : 貫通鉄筋の設計引張強度 (N/mm^2)

f'_{ud} : 鋼管の設計引張強度 (N/mm^2)

貫通鉄筋を有するコンクリートジベルタイプの1点を除いて鋼材が負担するせん断耐力は、鋼材に関する係数 A_s にほぼ比例して増加している。直線による近似式を図中に示しており、係数 k は1.128となった。また、図中に孔あき鋼板ジベルのせん断耐力算定の式(3)、式(4)を用いて算出したジベルの圧縮強度30, 40 N/mm^2 、貫通鉄筋径がD13, D16, D19のせん断耐力から、式(8)より算出したコンクリート負担分を差し引いて逆算した鋼材分のせん断耐力をプロットしたが、ほぼ実験結果の近似式に近い値を示しており、従来の耐力算定式との整合を確認することができた。

その結果、高強度コンクリートジベル強度や鋼管充填コンクリートの効果を考慮したせん断耐力算定式(11)で各試験体のせん断耐力を評価することが確認できた。

$$V_p = 0.023 A_c \cdot f_c^{1/3} + 1.128 A_s \quad (11)$$

4. まとめ

孔あき鋼板ジベルに高強度コンクリートジベルや鋼管充填コンクリートジベルを用いて2面せん断実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 貫通鉄筋がないコンクリートジベルのせん断耐力は、コンクリートジベルの圧縮強度に応じて増加するが、圧縮強度に比例した増加は期待できない。
- ② 鋼管充填コンクリートジベルにすることで、せん断耐力を増加し、さらに十分な変形性能を有して脆性的な破壊を緩和することができる。
- ③ コンクリートジベル、鋼管充填コンクリートジベルともジベル長を200mmから100mmまで短くしてもせん断力とずれ変位の関係はほとんど変わらず、材料の省略化・簡素化が期待できる。
- ④ ジベル内の鋼材断面積を大きくすることで、せん断耐力を大きくできる。
- ⑤ コンクリートジベル、鋼管充填コンクリートジベルのせん断耐力算定式を提案した。

以上より、コンクリートジベルに超高強度コンクリートや鉄筋、鋼管充填などを付加することで、孔あき鋼板ジベルと同等以上の性能が得られることが明らかになった。今後、これらの接合方法を用いて部材実験等により、群配置による挙動などの性能を確認する。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）とスタッドに関する研究の現状，pp.1-18, 1996
- 2) 土木学会：2009年制定複合構造標準示方書，pp.59-67, 2009
- 3) 鉄道総研：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物，pp.668-674, 2009
- 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，pp.42-44, 1998
- 5) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書設計編，pp.132-141, 2008
- 6) 保坂鐵矢，光木 香，平城弘一，牛島祥貴：孔あき鋼板ジベルのせん断強度評価式と設計法に関する研究 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1265-1272, 2002
- 7) 古内仁，上田多門，鈴木 統，田口秀彦：孔あき鋼板ジベルのせん断伝達耐力に関する一考察，第6回複合構造の活用に関するシンポジウム，pp.26-1-26-8, 2005