（54）高性能コンクリートを用いた孔あき鋼板ジベルの押抜き試験

山口　隆一[1]

[1]正会員　株式会社IHI　基盤技術研究所（〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1番地）
E-mail:ryuichi_yamaguchi@ihi.co.jp

本研究は高性能コンクリートを孔あき鋼板ジベルに適用した場合のずれせん断性能の評価を目的としている．評価手法は実験によるものとし、孔径50mmの孔あき鋼板ジベルの押抜き載荷試験を実施した．実験パラメータはコンクリート強度（30N/mm^2,90N/mm^2）および鋼繊維の有無（有：1.0vol.％混入）とした．

実験の結果、鋼繊維が無い場合の最大せん断耐力は圧縮強度にほぼ比例した．また、鋼繊維を混入することで最大せん断耐力は15％増加（コンクリート強度90N/mm^{2}の場合）した．

更に、本研究で鋼繊維を用いない場合の耐力を既往の耐力式と比較した結果、30N/mm^{2}の場合はよく一致したが、90N/mm^{2}の場合は既往の耐力式では危険側の評価を与える可能性があることが示された．

Key Words : *High Performance Concrete, Perfobond Strip, Push Out Test, Steel Fiber*

1. はじめに

現在、橋梁上部工における鋼桁とプレストレストコンクリート桁の接合部やラーメン橋脚部における上下部一体構造の接合部などの鋼・コンクリート複合構造は、狭隘な箇所にずれ止めや鉄筋が密に配置されることが多く、施工が困難となる場合がある．

これらの問題点を解決するため、コンクリート強度を増加させるなど、コンクリートの性能を高性能化してずれ止め 1 つあたりの受け持つせん断力を増加させ、構造を簡素化する手法が考えられる．

しかし、高強度コンクリートや高強度鋼繊維補強コンクリートなどの高性能コンクリートをずれ止め構造に適用した場合の性能評価を実施した例は少なく、定量化に至っていないのが現状である．

一般に鋼とコンクリートのずれ止め構造は頭付きスタッドジベルによるものや、孔あき鋼板ジベルによるものが挙げられるが、頭付きスタッドジベルはφ20mm 前後、高さ 150mm 前後の形状のものが道路橋示方書 [1]では標準とされている．

これらの形状の頭付きスタッドジベルを普通強度のコンクリートに適用した場合、その破壊モードはコンクリートの破壊ではなく、鋼スタッドの破壊となるため [2]、高性能コンクリートを頭付きスタッドジベルに適用したとしてもそのメリットが発揮されにくいものと思われる．

それに対し、孔あき鋼板ジベルは孔あき鋼板をせん断破壊させないように設計する [2]．要は、ずれ止め構造のせん断耐力はコンクリートの性能で決定するため、高性能コンクリートのメリットを活かすことが可能である．

よって本研究では、高強度コンクリートや高強度鋼繊維補強コンクリートなどの高性能コンクリートを孔あき鋼板ジベルに適用した場合のずれせん断性能の把握と、既往の耐力評価式との比較を目的とし、コンクリート圧縮強度および鋼繊維の有無をパラメータとした押抜き載荷試験を行った．また、実験終了後に試験体を切断し、その破壊性状を確認した．

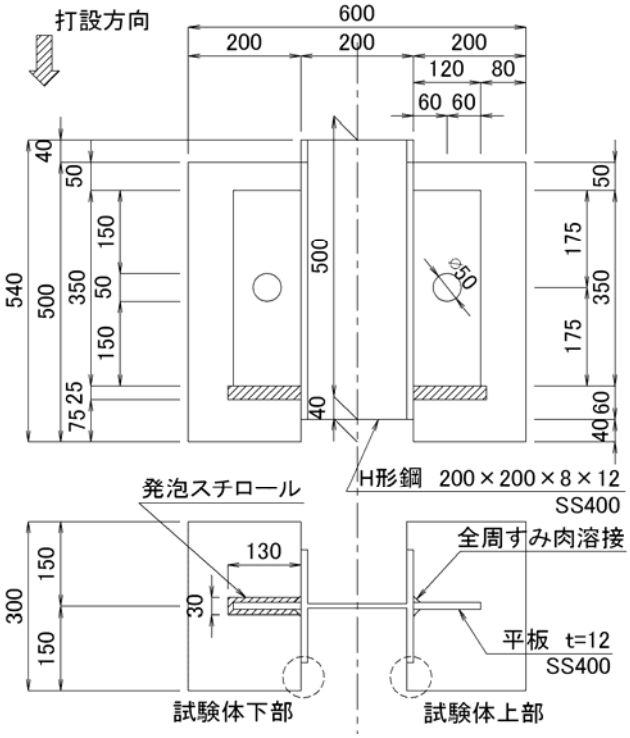
2. 実験概要

本研究で実施した押抜き載荷試験は、日本鋼構造協会「頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）[3]」を参照して行った．詳細を以降に示す．

(1) 試験体および実験パラメータ

試験体は SS400 の H 形鋼のフランジの両側に SS400 の孔あき鋼板ジベル（孔数は 1 個）を溶接し、コンクリートブロックを打設した構造とした．

孔あき鋼板の孔径はφ50mm、板厚は 12mm とし、孔あき鋼板の端面にはその部分での支圧抵抗を避けるため、発泡スチロールを配置した．また、鋼材とコンクリートの界面の摩擦を除去するため、グリースを塗布した．



図－1　試験体外形図

試験体の外形図を図－1に示す.

孔あき鋼板の寸法や試験体の外形は全試験体で同一とした. また、コンクリートの打設方向は全ての試験体で H 形鋼の長手方向(荷重載荷方向)とした.

実験パラメータを表－1に示す.

本研究の実験パラメータは、コンクリート圧縮強度と鋼繊維の有無とし、コンクリート圧縮強度が 30N/mm^2 で鋼繊維の無いものを C30N シリーズ、コンクリート圧縮強度が 90N/mm^2 で鋼繊維の無いものを C90N シリーズ、コンクリート圧縮強度が 90N/mm^2 で鋼繊維を混入したものを C90F シリーズとした. 各シリーズとも 3 体作成し、2 体は単調増加載荷、1 体は漸増繰り返し載荷とした.

ここで、C90Fシリーズで使用した鋼繊維は、端部にフックを有するφ0.62mm、長さが30mmのものとし、その混入率は体積割合で1.0vol.%とした.

図－2　C90F シリーズのフレッシュ性状

図－3　載荷装置

C90Fシリーズで使用した高強度繊維補強コンクリートのフレッシュ性状を図－2に示す.

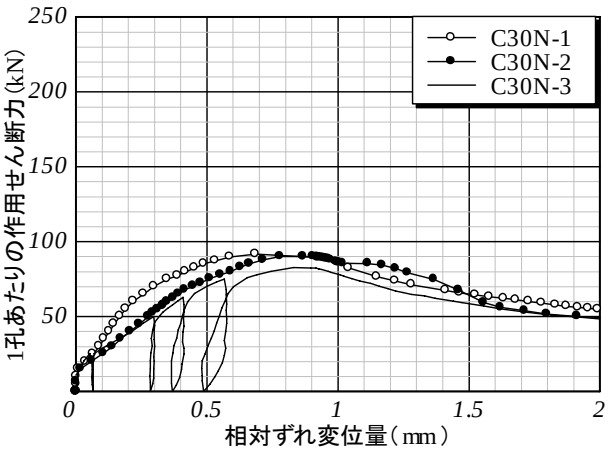
(2) 測定項目および載荷装置

測定項目は、載荷荷重および孔中心高さにおける鋼とコンクリートの相対ずれ変位量とした. また、載荷装置は1000kNのアムスラー型万能試験機を用いた.

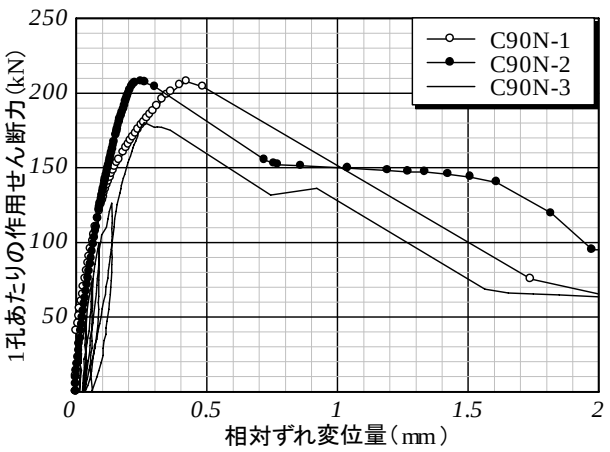
載荷装置図を図－3に示す.

表－1　実験パラメータ

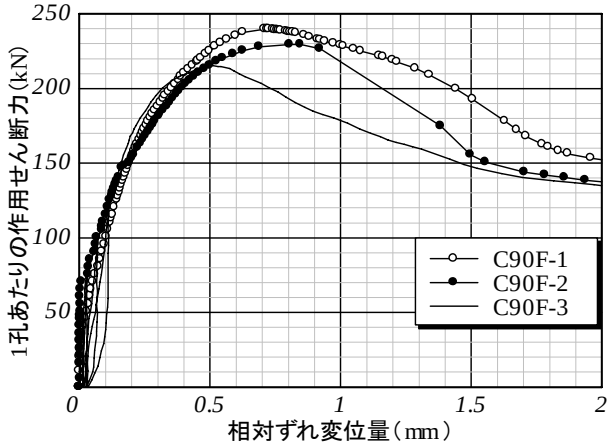
シリーズ名	試験体名	鋼繊維混入率(vol.%)	圧縮強度 目標(呼び)	(N/mm^2) 載荷試験時(材令 28 日)	弾性係数(kN/mm^2) 載荷試験時(材令 28 日)	割裂引張強度(N/mm^2) 載荷試験時(材令 28 日)	載荷方法
C30N シリーズ	C30N－1	0.00	30.0	35.0	21.0	3.14	単調増加
	C30N－2						
	C30N－3						漸増繰り返し
C90N シリーズ	C90N－1	0.00	90.0	91.1	32.5	3.87	単調増加
	C90N－2						
	C90N－3						漸増繰り返し
C90F シリーズ	C90F－1	1.00	90.0	91.3	33.3	8.16	単調増加
	C90F－2						
	C90F－3						漸増繰り返し



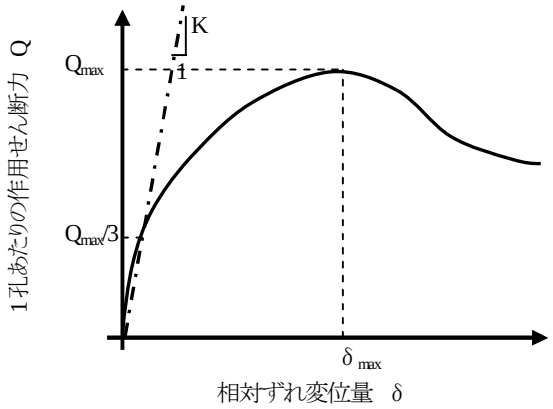
図－4　C30N シリーズ



図－5　C90N シリーズ



図－6　C90F シリーズ



図－7　概念図

表－2　実験結果一覧

試験体名	圧縮強度 (N/mm²)	孔径 (mm)	載荷方法	1孔あたりの最大せん断耐力 Q_{max} (kN)	最大ずれ量 δ_{max} (mm)	ずれ定数 K (kN/mm)
C30N－1	35.0	50	単調増加	91.8	0.686	334.9
C30N－2				90.2	0.780	214.7
C30N－3			漸増繰り返し	82.8	0.829	309.0
平均値				88.3	0.765	286.2
C90N－1	91.1	50	単調増加	207.7	0.424	2346.7
C90N－2				207.7	0.249	1638.2
C90N－3			漸増繰り返し	180.3	0.261	1310.4
平均値				198.6	0.311	1765.1
C90F－1	91.3	50	単調増加	239.8	0.710	1106.2
C90F－2				229.5	0.847	2163.3
C90F－3			漸増繰り返し	215.4	0.510	2852.8
平均値				228.2	0.689	2040.8

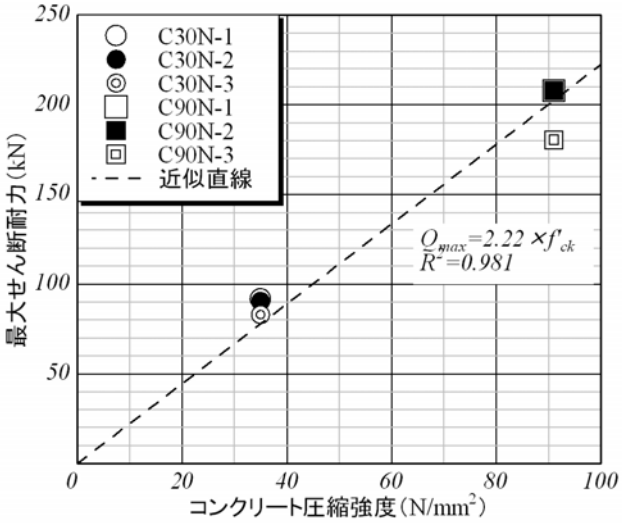
3.　載荷試験結果

(1) 作用せん断力と相対ずれ変位量の関係と結果一覧

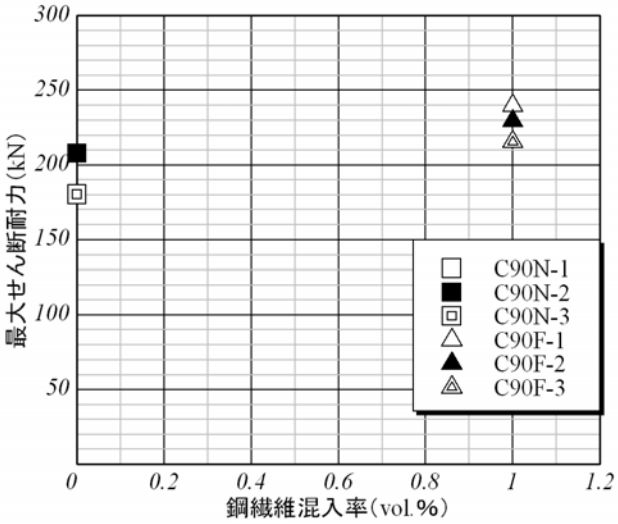
各シリーズの1孔あたりの作用せん断力と相対ずれ変位量の関係を図－4、図－5、図－6にそれぞれ示す.

また、各試験体のずれせん断性能（本研究では最大せん断耐力Q_{max}、最大ずれ量δ_{max}、ずれ定数Kとする.）をまとめた実験結果の一覧を表－2に示す.

ここで、Q_{max}は1孔あたりの作用せん断力の最大値、δ_{max}はQ_{max}における相対ずれ変位量、Kは作用せん断力－相対ずれ変位曲線におけるQ_{max}／3の初期割線とした. 概念図を図－7に示す.



図－8　コンクリート圧縮強度と最大せん断耐力の関係



図－9　鋼繊維混入率と最大せん断耐力の関係

(2) コンクリート圧縮強度の影響

図－8にコンクリート圧縮強度と最大せん断耐力の関係を示す．ここで、同図で比較対象としたのはコンクリートの圧縮強度のみが異なるC30NシリーズとC90Nシリーズとした．

図－8より、C90Nシリーズの最大せん断耐力はC30Nシリーズよりも大幅に増加し、本研究の結果ではコンクリート圧縮強度と最大せん断耐力の間にはほぼ比例関係があることが判った．

また、表－2よりC90Nシリーズの最大ずれ量およびずれ定数は、それぞれ平均でC30Nシリーズの0.41倍、6.17倍となった．これらは高強度コンクリートが普通コンクリートに比べて終局時のひずみが小さく、弾性係数が高いことに起因しているものと考える．

本研究では実験で得られたデータ数が少なく、最大ずれ量およびずれ定数には多少ばらつきがある結果となった．これらを定量化するためには今後、更にデータを蓄積する必要がある．

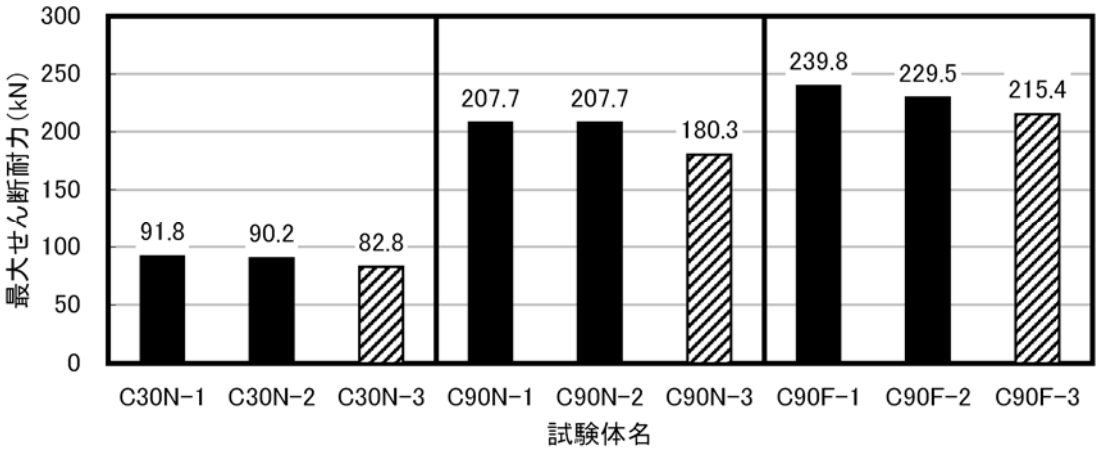
(3) 鋼繊維混入の影響

図－9に鋼繊維混入率と最大せん断耐力の関係を示す．ここで、同図で比較対象としたのはコンクリート圧縮強度がほぼ同等で、鋼繊維混入率が異なるC90NシリーズとC90Fシリーズとした．

図－9および表－2より、最大せん断耐力の平均値はC90Nシリーズで198.6kN、C90Fシリーズで228.2kNとなり、鋼繊維を1.0vol.%混入することで、最大せん断耐力は15%増加する結果となった．

また、表－2より鋼繊維を混入したC90Fシリーズの最大ずれ量およびずれ定数は、実験で得られたデータにややばらつきがあるが、それぞれ平均でC90Nシリーズの2.21倍、1.16倍となった．

本研究では鋼繊維を混入することで、最大せん断耐力、最大ずれ量、ずれ定数の全てにおいてずれせん断性能が向上する結果となった．これらは鋼繊維がせん断力を負担することで、荷重伝達性能や変形性能が向上したことに因るものであると考える．



図－10　載荷方法による最大せん断耐力の違い

(4) 載荷方法の影響

図－10 に全試験体の最大せん断耐力を示す．ここで、図中の塗りつぶしたものは単調増加載荷であり、斜線を施したものは漸増繰り返し載荷である．

これらより、単調増加載荷した試験体に比べて、漸増繰り返し載荷した試験体の最大せん断耐力は、総じて低下する結果となった．また、その低下率は C30N-3 で 9%、C90N-3 で 13%、C90F-3 で 8%であった．

本研究で得られたこのような最大せん断耐力の低下は、既往の報告[4]でも見られ、その最大せん断耐力の低下率も概ね一致している．

また、これらの耐力低下の原因は、繰り返し荷重が作用することによってひび割れ面のせん断伝達性能が徐々に低下することに起因するものと考える．

4. 破壊状況

載荷試験終了後、C90N-1試験体のコンクリートブロックに生じたひび割れの状況を図－11に示す．同図に見られるように、ひび割れはH形鋼に垂直でかつ孔あき鋼板とほぼ同じ面に沿って発生した．また、これらのひび割れはコンクリートブロックの下端まで貫通しており、これらのコンクリートブロックのひび割れ状況は全試験体で同一であった．

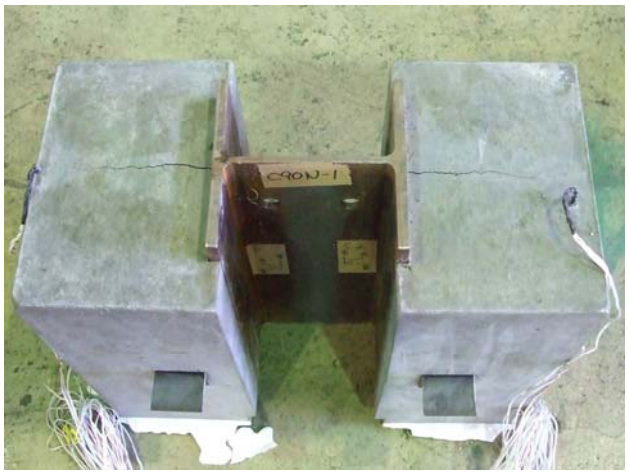
更に本研究では、載荷試験終了後の全試験体のコンクリートブロックをコンクリートカッターによって切断し、ジベル部近傍の破壊状況を目視によって確認した．

ジベル部近傍の破壊状況を表－3に示す．

普通コンクリートであるC30Nシリーズのジベル部近傍の破壊状況（図－12）は、既往の研究成果[5] と同様、鋼板表面とほぼ同一面でのコンクリートの2面せん断破壊であった．

また本研究の結果、高強度コンクリートであるC90Nシリーズや高強度鋼繊維補強コンクリートであるC90Fシリーズの破壊状況（図－13）は、普通コンクリートと同一であることがわかった．

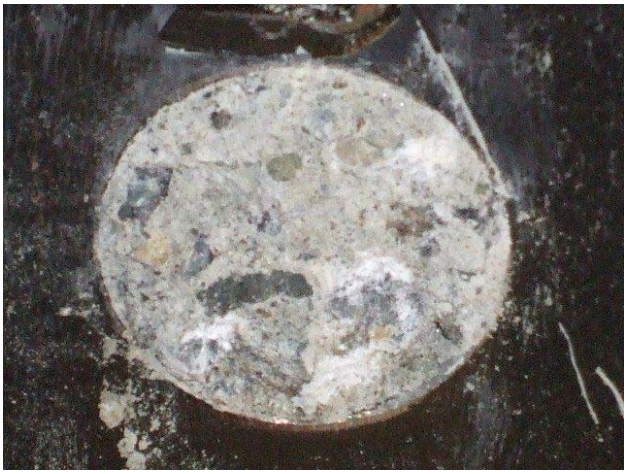
特に、鋼繊維を混入した C90F シリーズは破壊面に多数の鋼繊維が目視で確認され（図－13）、これらがずれせん断性能の増加に寄与したものと考えられる．



図－11　コンクリートブロックのひび割れ状況

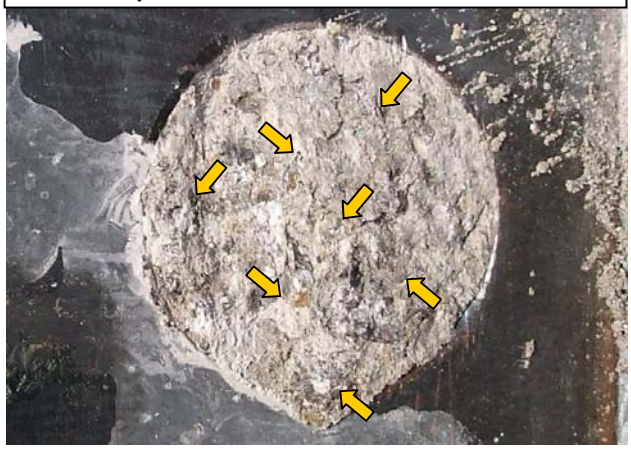
表－3　ジベル部近傍の破壊状況

試験体名	ジベル部近傍の破壊状況
C30N－1	鋼板表面とほぼ同一面での コンクリート２面せん断破壊
C30N－2	
C30N－3	
C90N－1	鋼板表面とほぼ同一面での コンクリート２面せん断破壊
C90N－2	
C90N－3	
C90F－1	鋼板表面とほぼ同一面での コンクリート２面せん断破壊
C90F－2	
C90F－3	



図－12　C30N-2 の破壊状況

図中の↖は目視で確認できた一部の鋼繊維を示す．



図－13　C90F-1 の破壊状況

5. 既往の耐力式との比較

本章では、鋼繊維を混入しないC30NシリーズとC90Nシリーズの試験体の最大せん断耐力と既往の耐力式との比較を行う．ここで、既往の耐力式は文献[5]より実験値を重回帰分析することで得たもの（式1）および実験値のばらつきの下限値を包括したもの（式2）とした．式1、式2およびそれらの適用範囲を以下に示す．

$$Q_u = 3.38d^2\left(\frac{t}{d}\right)^{0.5} \cdot f_{cu} - 39\times10^3 \qquad (式1)$$

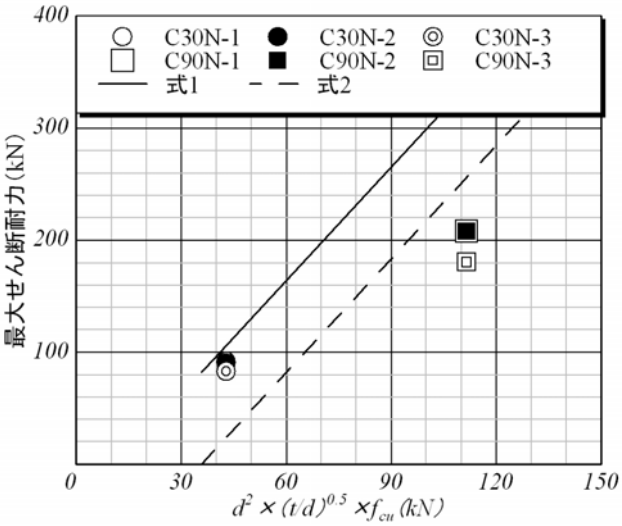
$$Q_u = 3.38d^2\left(\frac{t}{d}\right)^{0.5} \cdot f_{cu} - 121\times10^3 \qquad (式2)$$

$$35.8\times10^3 < \left(\frac{t}{d}\right)^{0.5} \cdot f_{cu} < 194.0\times10^3$$

ここで、Q_u；1孔あたりの最大せん断耐力（N）
d ；孔径（mm）
t ；鋼板厚（mm）
f_{cu} ；コンクリート圧縮強度（N/mm^2）

図－14 に C30N シリーズと C90N シリーズの最大せん断耐力と既往の耐力式との比較を示す．これらはいずれも既往式の適用範囲内である．

図－14 より、C30N シリーズは式 1 とほぼ一致した．しかし、C90N シリーズは下限値を包括した式 2 よりも小さくなった．これは、式 1 および式 2 の根拠となった実験データの圧縮強度の最大値が 57.6N/mm^2 であり、今回のような高強度コンクリート（圧縮強度 91.1N/mm^2）は含まれていないことが原因であると思われる．



図－14　既往の耐力式との比較

本研究では、上述にある適用範囲を満たしていても圧縮強度が大きい場合には、式1および式2を適用すると危険側の評価となる可能性がある結果となった．

6. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に示す．

(1) 本研究の結果、コンクリート圧縮強度と最大せん断耐力の間にはほぼ比例関係があることが判った．また、C90Nシリーズの最大ずれ量およびずれ定数は、それぞれ平均でC30Nシリーズの0.41倍、6.17倍となった．これらは高強度コンクリートが普通コンクリートに比べて終局時のひずみが小さく、弾性係数が高いことに起因しているものと考える．

(2) 鋼繊維を1.0vol.%混入することで、最大せん断耐力は15%増加する結果となった．また、鋼繊維を混入したC90Fシリーズの最大ずれ量およびずれ定数は、実験で得られたデータにややばらつきがあるが、それぞれ平均でC90Nシリーズの2.21倍、1.16倍となった．これらは鋼繊維がせん断力を負担することで、荷重伝達性能や変形性能が向上したことに因るものであると考える．

(3) 単調増加載荷した試験体に比べて、漸増繰り返し載荷した試験体の最大せん断耐力は、総じて低下する結果となった．また、その低下率はC30N-3で9%、C90N-3で13%、C90F-3で8%であった．これらの耐力低下の原因は、繰り返し荷重が作用することによってひび割れ面のせん断伝達性能が徐々に低下することに起因するものと考える．

(4) ジベル部近傍の破壊状況は全試験体において、鋼板表面とほぼ同一面でのコンクリートの2面せん断破壊であった．特に、鋼繊維を混入したC90Fシリーズは破壊面に多数の鋼繊維が目視で確認され、これらがずれせん断性能の増加に寄与したものと考えられる．

(5) 鋼繊維を含まない試験体の最大せん断耐力と既往の耐力式とを比較すると、C30Nシリーズはほぼ一致した．しかし、高強度コンクリートであるC90Nシリーズを既往の耐力式で評価すると、危険側の評価を与える結果となった．これは、既往の耐力式の根拠となった実験データの圧縮強度の最大値が57.6N/mm^{2}であり、今回のような高強度コンクリートは含まれていないことが原因であると思われる．

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, pp.338-339, 2002.
2) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書設計編, pp.257-258, 2007.
3) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）,pp.1-24,1996.
4) 北海道大学大学院　上田多門：石川島播磨重工業株式会社受託研究　孔あき鋼板ジベルの付着特性に関する研究　成果報告書　平成 10 年度
5) 保坂、光木、平城、牛島、橘、渡辺：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 2000.3

THE PUSH-OUT TEST OF PERFOBOND STRIP USING HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Ryuichi YAMAGUCHI

The purpose of this study is to investigate the shear transfer capacity of perfobond strip. In this paper, the effects on shear transfer capacity of perfobond strip are discussed based on results of push-out test which have parameters such as compressive strength of concrete and the content ratio of steel fibers.

From the experimental results the shear transfer capacity was related in proportion to the compressive strength of concrete and increased by 15% adding the steel fibers.