

(2) 種々の载荷条件下における孔あき鋼板ジベルのせん断破壊性状と疲労特性

木作 友亮¹・藤山 知加子²

¹正会員 株式会社 I H I 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: tomoaki_kisaku@ihi.co.jp

²正会員 法政大学准教授 デザイン工学部 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)
E-mail: fujiyama@hosei.ac.jp

本研究では、実構造物内に配置された孔あき鋼板ジベルの拘束状態を再現した载荷試験によって、種々の载荷条件を与えた際の破壊性状および疲労特性について検討した。まず、拘束条件を変化させた静的押抜き試験を実施し、拘束条件がせん断力-相対ずれ変位関係に与える影響について検討した。次に行った正負交番载荷試験では、正負交番作用がせん断破壊面を急速に平滑化させることを確認した。疲労载荷試験の結果と既往の実験結果から、孔あき鋼板ジベルのS-N線図を提示した。また、同じ荷重条件で疲労試験を行っても、疲労寿命が4オーダー異なる場合があることが明らかとなった。これは、試験体のせん断耐力を同一だと仮定して荷重条件を決定しているが、実際には孔内の粗骨材配置の影響により、試験体毎にせん断耐力が異なるためだと考えられる。ジベル孔のせん断破壊面の観察結果からは、板厚6.5mmの孔あき鋼板ジベルであっても、孔内コンクリートが二面破壊を呈する可能性が示唆された。

Key Words : *perfobond rib shear connector, side restraint, fatigue, reversal cyclic loading, smoothing*

1. はじめに

近年、鋼コンクリート複合構造のずれ止め的一种である孔あき鋼板ジベル（以下、PBLと略記する）は、様々な構造物に用いられている。PBLに関して、これまで様々な研究^{例えは1)}が行われてきた。しかし、多くの研究では、静的の押抜き载荷試験が行われており、正負交番载荷や疲労载荷の事例は少ない。実際の構造物に配置されたPBLでは、地震作用や交通車両による移動荷重によって、当然ながら正負交番荷重が作用する。また、鋼コ

ンクリート合成床版にもPBLが用いられており、これらは疲労の影響を考慮して設計する必要があると考えられる。PBLは、優れた疲労特性を有する^{2),3)}ことが報告されているが、合理的な設計を行うためには、PBLの疲労に関する知見を蓄積していくことが望ましいと考えられる。

そこで本研究では、様々な载荷条件下（押抜き载荷、正負交番载荷、静的载荷、疲労载荷）で試験を行い、拘束条件がPBLのせん断ずれ挙動や破壊性状に及ぼす影響について検討した。

図-1にPBLのせん断伝達に関する模式図を示す。PBL

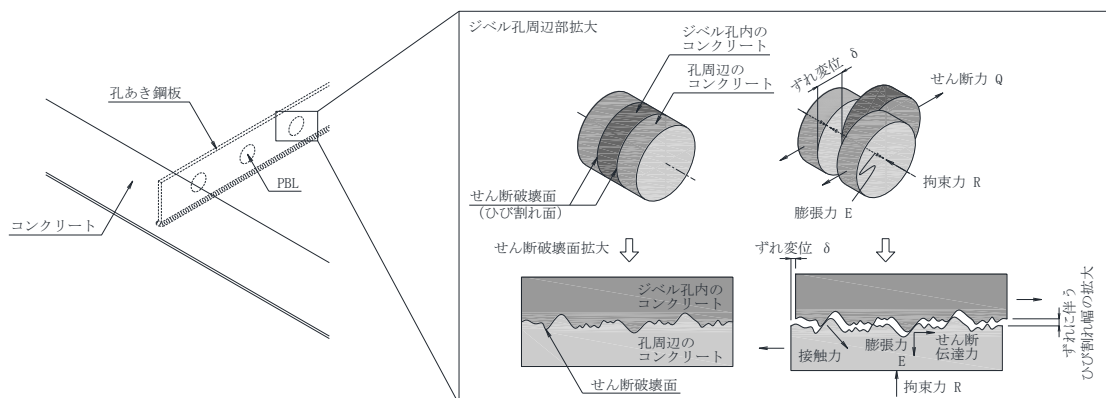


図-1 PBLのせん断伝達に関する模式図

のせん断破壊面は、孔内の粗骨材によって複雑な凹凸を有する。PBLにせん断力が作用した場合、孔内コンクリートと周辺のコンクリートに相対的なずれが生じ、せん断破壊面に直行する方向へひび割れが広がるとともに、孔あき鋼板に直交する方向へ膨張力が生じる。この膨張力を拘束する力（以下、拘束力と呼ぶ）があれば、PBLのせん断耐力は増加する¹⁾。このことから、実構造物に配置されたPBLのせん断ずれ挙動を把握するためには、PBLに作用する拘束力を載荷試験で再現することが重要となる。

合成床版のような厚さが薄い部材であっても、PBLには拘束力が作用すると考えられる。これは、図-2に示すように、多数の孔あき鋼板が並列配置されている場合、それぞれのPBLで生じる膨張力が干渉し、互いを拘束する状況となるためである。本研究では、こうしたPBL同士の拘束を相互拘束と定義する。実構造物に配置されたPBLの多くは、相互拘束の影響を受けると考えられることから、この影響を考慮して載荷試験を行った。

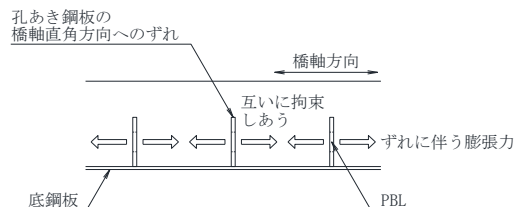


図-2 PBLの相互拘束（合成床版の例）

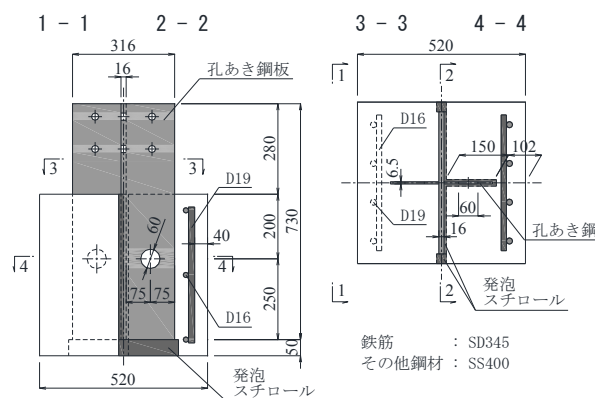


図-3 試験体の形状および寸法（シリーズII）

2. 実験方法

(1) 概要

本研究では、シリーズIとシリーズIIに分けて実験を行った。シリーズIでは、相互拘束および載荷方式（静的、疲労）を試験パラメータとした。シリーズIIでは、上記に加えて、試験体底面の拘束条件および載荷方向（押抜き、正負交番）について実験的に検討した。

(2) 試験体

本研究では、古川ら⁴⁾が提案した試験体を採用した。図-3に試験体の形状および寸法を示す。この試験体は、2分割されたコンクリートブロックの一面が鋼板に接しており、合成桁や合成床版の拘束条件を模擬するのに適している。試験体の作製が比較的容易であるが、CT鋼を用いた試験体⁵⁾のように、コンクリートの打設方向の影響を再現することはできない。

試験体の中央には、2つの孔あき鋼板を接合した十字型の鋼板（以下、十字型鋼板と呼ぶ）を配置した。円孔部を除き、十字型鋼板の表面には、ポリプロピレン製のテープを貼り付け、コンクリートとの付着を除去した。十字型鋼板の下には、コンクリート打設時に発泡スチロールを敷き、硬化後に発泡スチロールを除去することで空隙を設けた。孔あき鋼板の板厚は6.5mm、PBLの孔径はφ60mmとした。貫通鉄筋は配置していない。試験体の2面には、補強鉄筋（D16およびD19）を配置した。

シリーズIIの試験体は、引張力を負荷できるように、十字型鋼板の上部にボルト穴を設けた。シリーズIの試

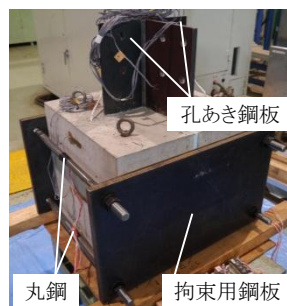


図-4 相互拘束の再現方法

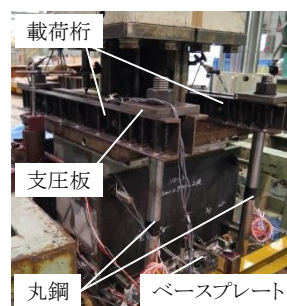


図-5 試験体の固定方法

験体には、こうしたボルト穴がなく、コンクリートブロックからの十字型鋼板の突出長さは100mmである。

(3) 拘束条件

相互拘束の影響を考慮するケースでは、図-4に示すように、孔あき鋼板に平行する試験体の2面を鋼板（以下、拘束用鋼板と呼ぶ）で拘束した。シリーズIでは、山形鋼を溶接して拘束鋼板を固定しているが、シリーズIIでは端部をねじ切りした丸鋼で固定し、他の試験体へも転用ができる構造に変更した。本研究では、こうした鋼板による側面の拘束のことを「側面拘束」と呼ぶ。シリーズIでは、型枠の役割を兼ね、コンクリート打設前に拘束用鋼板を設置した。シリーズIIでは、試験体が硬化してから拘束用鋼板を取り付けた。

正負交番載荷では、図-5に示すように、試験体の上面に載荷桁を設置し、載荷桁とベースプレートを丸鋼でつなぐことで引張力に抵抗できるようにした。

本研究では、試験体の底面を図-6に示すいずれかの条

件で拘束した。正負交番荷重を行う試験体は、試験体上面を下面と同条件で拘束した。本研究では、Type-Aを開き止め、Type-Bを摩擦拘束と呼ぶ。

(4) 試験ケースおよび配合

試験ケースを表-1に示す。シリーズⅠの静的荷重試験では、側面拘束がPBLのせん断ずれ挙動に与える影響を把握するため、側面拘束を有する3ケースに加え、側面拘束を有さない1ケースの試験を行った。シリーズⅡでは、側面拘束に加え、底面拘束を試験パラメータとした。また、シリーズⅡでは、押抜き荷重試験の他に正負交番荷重試験を行った。

疲労試験では、荷重範囲とせん断耐力の比（以下、 RQ と呼ぶ）をパラメータとした。この際のせん断耐力は、シリーズⅠがC-ST-1~C-ST-3の算術平均、シリーズⅡがC-ST-PUS-1の試験値とした。疲労荷重試験の最小荷重は、シリーズⅠが上記せん断耐力の5%、シリーズⅡが10%とした。疲労荷重試験の試験体は、全て側面を拘束し、底面を開き止めで拘束した。

コンクリートの配合は、いずれのシリーズも30-10-20Nとし、石灰系の膨張材を20kg/m³混和した。打設が完了した試験体は、7日間の湿潤養生を行い、その後は室温で保管した。強度試験用の供試体は、PBLの試験体と同じ環境で保管した。

(5) 計測方法および荷重方法

荷重試験の際には、十字型鋼板上部とコンクリートブロックの上面に2箇所ずつ変位計を設置し、両者の相対ずれ変位量を計測した。シリーズⅡは、これに加えて拘束用鋼板を固定している丸鋼、コンクリート表面、補強鉄筋のひずみを計測した。ひずみゲージの位置を図-7に示す。丸鋼は、長さ方向の中央にひずみゲージを貼り付けた。

本研究では、鉛直下向きの荷重およびずれ変位を負、上向きの荷重・ずれ変位を正と定義した。シリーズⅡでは、PBLの除荷・再荷重挙動を把握するため、荷重と除荷を繰り返しながら、ずれ変位を漸増させた。

シリーズⅠの疲労荷重試験では、一定回数に達した時点で、最小荷重までの範囲で静的押抜き試験を行い、各繰返し数のデータを取得した。シリーズⅡは、1回の静的荷重試験を行った後に、連続で疲労荷重を続けた。計測には、動ひずみ計を用いた。2~1000cycleの範囲は連続的に計測し、その後はインターバル計測を行った。

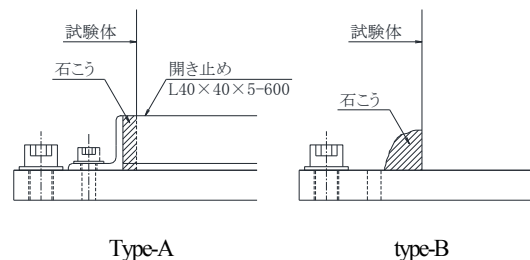


図-6 試験体底面の拘束条件

表-1 試験ケース

(1)シリーズⅠ				
No.	載荷方法	側面拘束	底面拘束	RQ
C-ST-1	静的（押抜き）	有り	Type-A	—
C-ST-2				
C-ST-3		無し		
C-ST-4				
C-FA-1	疲労（押抜き）	有り		0.80
C-FA-2				0.70
C-FA-3				0.60
(2)シリーズⅡ				
No.	載荷方法	側面拘束	底面拘束	RQ
C-ST-PUS-1	静的（押抜き）	有り	Type-A	—
C-ST-PUS-2			Type-B	
C-ST-PUS-3		無し		
C-ST-REV	静的（正負交番）	有り	Type-A	
C-FA-PUS-1	疲労（押抜き）			0.70
C-FA-PUS-2				0.60
C-FA-REV	疲労（正負交番）			0.60

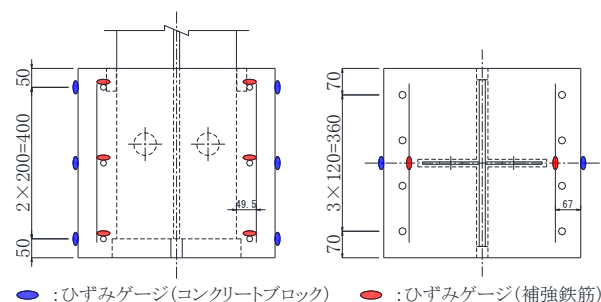


図-7 ひずみゲージの位置

表-2 強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
シリーズⅠ (材齢39日)	41.1	25.1	30
シリーズⅡ (材齢36日)	31.2	24.1	25

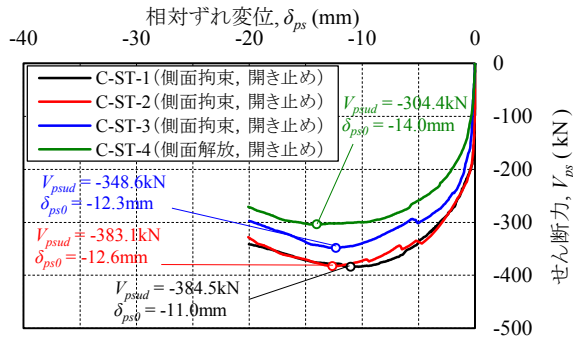


図-8 せん断力-相対ずれ変位関係 (シリーズ I)

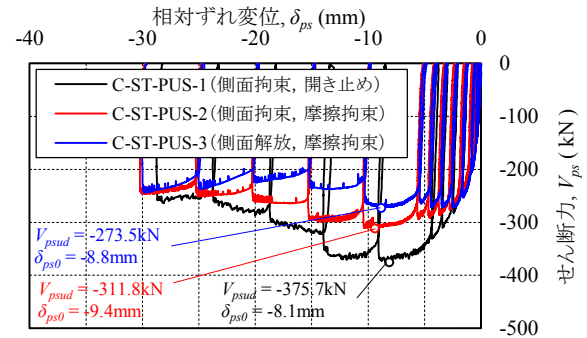


図-9 せん断力-相対ずれ変位関係 (シリーズ II)

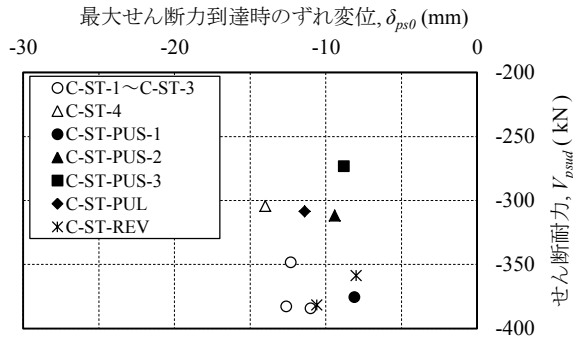


図-10 V_{psud} と δ_{psd0} の関係

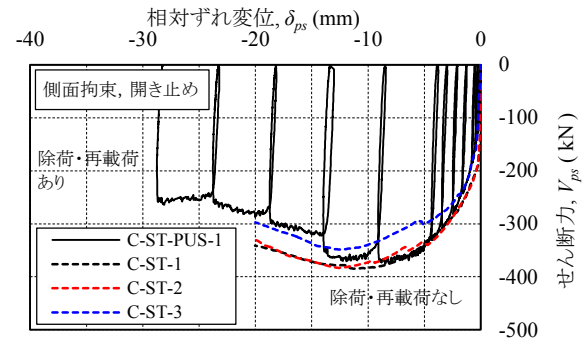


図-11 せん断力-相対ずれ変位関係 (C-ST-PUS-1, C-ST-1~3)

3. 静的載荷試験の結果および評価

(1) 強度試験の結果

強度試験の結果を表-2に示す。強度試験は、PBLの載荷試験の開始にあわせて行った。コンクリートの強度は、シリーズ I の方が高く、シリーズ I の圧縮強度が 41.1N/mm^2 、シリーズ II が 31.2N/mm^2 であった。

(2) せん断力-相対ずれ変位関係

C-ST-1~4 (シリーズ I) のせん断力-相対ずれ変位関係を図-8に、C-ST-PUS-1~3 (シリーズ II) のせん断力-相対ずれ変位関係を図-9に示す。縦軸には2孔合計のせん断力 V_p 、横軸には十字鋼板とコンクリートブロックの相対ずれ変位 δ_{ps} を示した。

シリーズ I のせん断耐力 V_{psud} は、側面拘束を有する C-ST-1~C-ST-3 が $348.6 \sim 384.5\text{kN}$ (平均 372.1kN)、側面拘束を有さない C-ST-4 が 304.4kN であった。上記の結果から、側面拘束によってせん断耐力が $14.5 \sim 26.3\%$ 増加することを確認した。

一方、シリーズ II では、側面拘束と開き止めを施した C-ST-PUS-1 が 375.7kN のせん断耐力を示した。これは、C-ST-1~C-ST-3 の平均せん断耐力に近い。また、底面を摩擦拘束とした C-ST-PUS-2 は 311.8kN 、側面拘束を有さない C-ST-PUS-3 は 273.5kN であった。この結果から、側面拘束によってせん断耐力が 14.0% 増加し、開き止めによって 20.5% 増加することを確認した。側面拘束の効果は、シリーズ I の方が大きいことが分かる。これは、シリーズ II とは違い、シリーズ I の拘束用鋼板は、付着力

が作用するためだと考えられる。

本研究では、貫通鉄筋を有さない PBL を対象としているが、側面拘束や開き止めを有さないケースであっても、せん断力が急低下する挙動を示すことはなかった。

各試験体のせん断耐力 V_{psud} と最小せん断力到達時のずれ変位 δ_{psd0} の関係を図-10に示す。 V_{psud} と δ_{psd0} の間に明確な関係性は見出せない。中島ら⁶⁾が述べているように、PBL のせん断耐力には、孔内に存在する粗骨材の大きさや配置が影響を与える。特に大きい粗骨材が破壊した時に、最小せん断力を示すと考えられるため、この大きい粗骨材が孔内のどこに配置されているかによって、 δ_{psd0} が変動すると推測される。

(3) ポストピーク挙動に与える除荷、再載荷の影響

図-11に側面拘束および開き止めを有する C-ST-PUS-1、C-ST-1~3 のせん断力-相対ずれ変位関係を示す。除荷・再載荷の有無に関わらず、せん断耐力 (最小せん断力) までの包絡線に大きな違いは見られない。しかし、せん断耐力に到達した後は、除荷・再載荷を繰り返した C-ST-PUS-1 の方が、せん断力が減少する傾向を示した。ピーク後にせん断耐力が減少するのは、孔内コンクリートのせん断破壊面が平滑化するためだと考えられる。

この点について、さらに以下で分析する。図-12に C-ST-1~4 の $V_p/V_{psud} - \delta_{ps}$ 関係、図-13に C-ST-PUS-1~3 の $V_p/V_{psud} - \delta_{ps}$ 関係を示す。縦軸は、せん断力 V_p をせん断耐力 V_{psud} で除して無次元化している。除荷・再載荷を行わない C-ST-1~4 は、試験が終了した時点でも、試験体の拘束条件やせん断耐力によらず V_p/V_{psud} が 0.9 程度を示す。

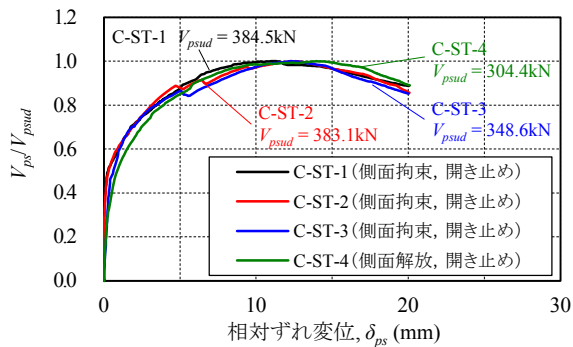


図-12 $V_p/V_{psud}-\delta_{ps}$ 関係 (C-ST-1~4)

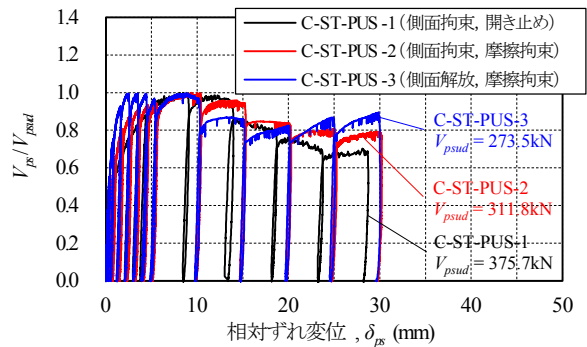


図-13 $V_p/V_{psud}-\delta_{ps}$ 関係 (C-ST-PUS-1~3)

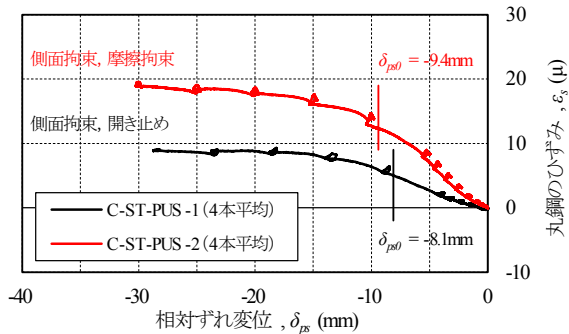


図-14 丸鋼ひずみ $\epsilon_s-\delta_{ps}$ 関係 (C-ST-PUS-1~2)

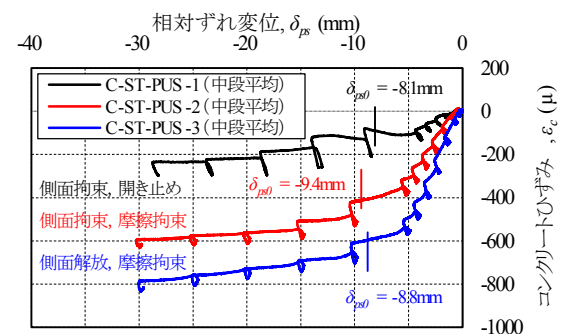


図-15 コンクリートひずみ $\epsilon_c-\delta_{ps}$ 関係 (C-ST-PUS-1~3)

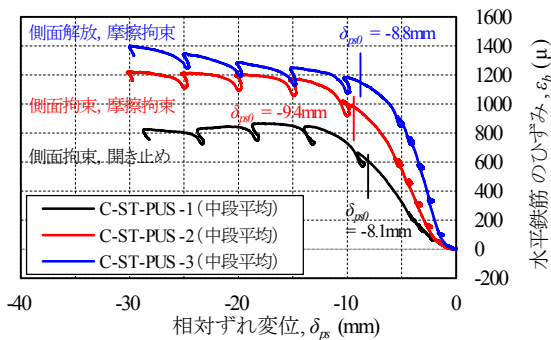


図-16 水平鉄筋ひずみ $\epsilon_b-\delta_{ps}$ 関係 (C-ST-PUS-1~3)

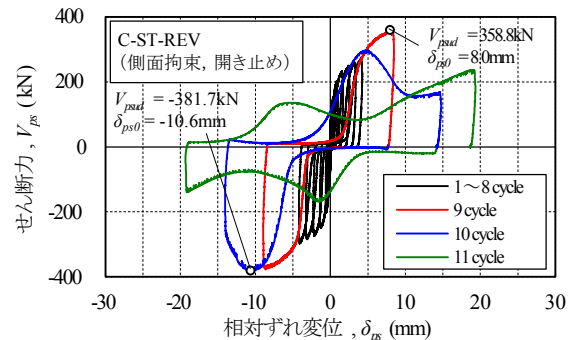


図-17 せん断力-相対ずれ変位関係 (C-ST-REV)

一方、除荷・再載荷を繰り返したC-ST-PUS-1~3は、試験終了時の V_p/V_{psud} が試験体毎に異なる。せん断耐力の小さいC-ST-PUS-3は、試験終了の時点で V_p/V_{psud} が0.9程度を示すが、せん断耐力の大きいC-ST-PUS-1は、 V_p/V_{psud} が0.7程度まで低下する。これらの結果から、除荷・再載荷を行った場合は、ピーク後にせん断破壊面の平滑化が促進されること、せん断破壊面の平滑化は、せん断耐力または拘束力の影響を受けることが明らかとなった。せん断耐力に到達するまでは、せん断破壊面に大きな荷重を負担できる凹凸が存在するため、平滑化の進行が抑制されるのだと考えられる。

(4) ひずみ

C-ST-PUS-1~3のひずみ計測値と相対ずれ変位の関係を図-14から図-16に示す。丸鋼のひずみは4本の平均、コンクリートおよび水平鉄筋のひずみは、中段の平均値を示した。丸鋼および水平鉄筋は引張方向のひずみを示すが、コンクリート表面には圧縮ひずみが生じる。これ

らの計測結果から、作用する拘束力が大きい試験体ほど、生じるひずみは大きくなり、せん断耐力に到達した後もひずみは増加を続けることが確認された。

(5) 载荷方法の影響

正負交番载荷を行ったC-ST-REVのせん断力-相対ずれ変位関係を図-17に示す。正負交番载荷では、負側（押抜き側）から先に载荷した。負側のせん断耐力は-381.7kN（10cycle）であり、正側のせん断耐力である358.8kN（9cycle）より6.0%高い値を示す。10cycle目に負側のせん断耐力に到達した後は、正側のせん断力は296.7kNまでしか上昇しない。11cycle目はさらに低いせん断力を示し、せん断力が上昇と下降を繰り返す複雑な挙動を示した。これらの結果から、正負交番载荷を受けた場合には、せん断破壊面の平滑化が押抜き载荷よりも促進されると理解できる。10~11cycleでせん断力-相対ずれ変位関係が波打つのは、せん断破壊面の凹凸の破壊と新たな噛み合わせの発生が繰り返されるためだと考え

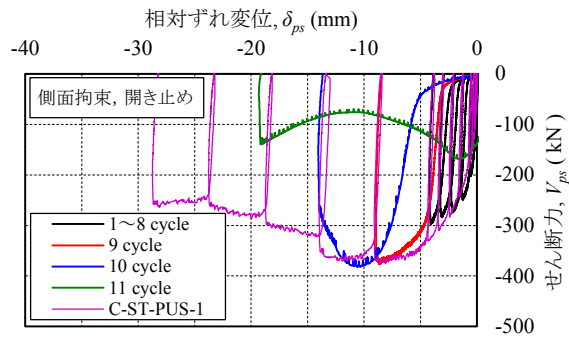


図-18 セン断力ー相対ずれ変位関係 (C-ST-PUS-1, C-ST-REV)

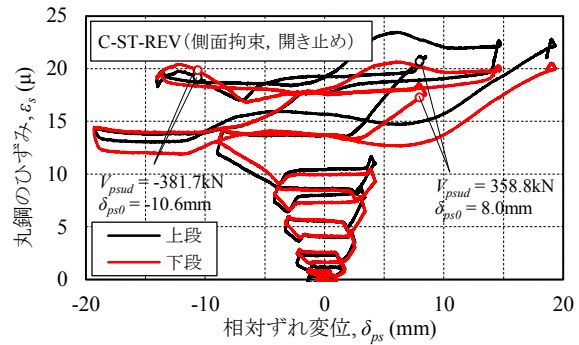


図-19 丸鋼ひずみ ϵ_s ー δ_{ps} 関係 (C-ST-REV)

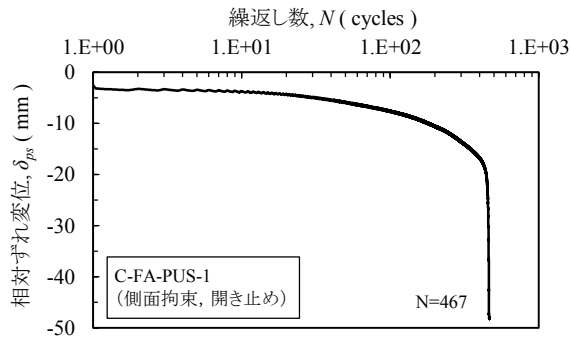


図-20 相対ずれ変位ー繰返し数関係 (C-FA-PUS-1)

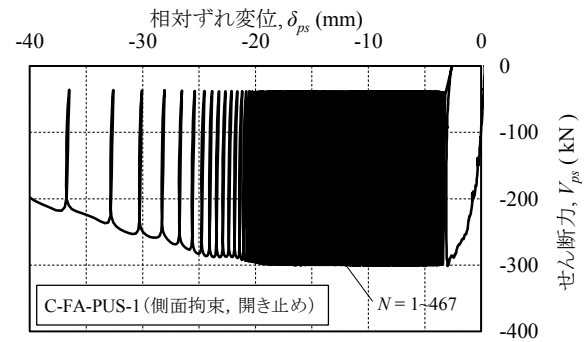


図-21 セン断力ー相対ずれ変位関係 (C-ST-PUS-1, $R/Q=0.70$)

られる。こうした凹凸の破壊が繰り返されることによって、せん断破壊面の平滑化が進行すると考えられる。

11cycle目は、せん断耐力に到達した時点の相対ずれ変位である δ_{ps0} 付近で、低いせん断力を示し、それ以外の0~5mmや15~20mmで高いせん断力を示す傾向が見られた。この傾向は、正負両側で共通している。これは、せん断耐力を示した時点で、 δ_{ps0} 付近で噛み合う凹凸の大部分が平滑化されることを示唆している。

また、押抜き载荷と同様に、せん断耐力の小さい正側の方が、最大の相対ずれ変位に達した際に、高いせん断力を示す傾向が確認された。

図-18は、C-ST-PUS-1とC-ST-REVのせん断力ー相対ずれ変位関係を重ね合わせたものである。せん断耐力に達するまでは、両者のせん断力ー相対ずれ変位関係の包絡線に差が見られない。

図-19には、C-ST-REVの丸鋼ひずみと相対ずれ変位の関係を示す。丸鋼ひずみは、正側のせん断耐力に到達した後、増減を繰り返す。コンクリート表面および水平鉄筋のひずみにも同様の傾向が見られた。このことは、せん断破壊面の凹凸の破壊、新たな噛み合わせの発生に伴って、PBLの膨張力が変動することを示している。

4. 疲労载荷試験の結果および評価

(1) 押抜き载荷

$R/Q = 0.70$ としたC-FA-PUS-1の相対ずれ変位 δ_{ps} と繰返し数 N の関係を図-20に示す。C-FA-PUS-1は、 $N = 467$ に達し

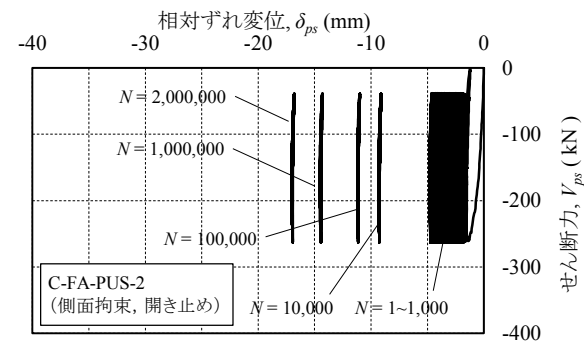


図-22 セン断力ー相対ずれ変位関係 (C-ST-PUS-2, $R/Q=0.60$)

た時に、相対ずれ変位が急増して疲労破壊に至った。本研究では、このように相対ずれ変位の急増した時点を経済破壊と定義した。

C-FA-PUS-1 ($R/Q = 0.70$) とC-FA-PUS-2 ($R/Q = 0.60$) のせん断力 V_{ps} と相対ずれ変位 δ_{ps} の関係を図-21および図-22に示す。各cycleの载荷で生じた相対ずれ変位は、除荷後も大きく減少することなく、相対ずれ変位が残留する。これは、PBLの相対ずれ変位の多くが塑性成分であることを示している。残留した相対ずれ変位は、载荷の繰返しによって累積していく傾向を示す。

$N = 467$ で疲労破壊に至るC-FA-PUS-1は、相対ずれ変位が20mmに達した時点から、1cycleあたりの相対ずれ変位量の増分が大きくなり、設定した最小荷重に追従できなくなった。

1Cycle目と2cycle目以降では、同じ荷重範囲でもせん断ずれ挙動が異なる。1cycle目では、1回の载荷で1.2~2.6mmの相対ずれ変位が残留するが、2cycle以降は载荷1

回あたり0.003mm (C-FA-PUS-2) ～0.05mm (C-FA-PUS-1) しか残留ずれ変位が増加しない。このような、PBLの疲労応答は、コンクリートのひび割れ面のせん断疲労応答⁷⁾に類似している。また、円形鋼管を用いたPBL⁸⁾でも同様の傾向を示すことが報告されている。

(2) 正負交番荷重

正負交番の疲労荷重試験を行ったC-FA-REVのせん断力 V_{ps} と相対ずれ変位 δ_{ps} の関係を図-23に示す。押抜き⁹⁾の疲労荷重試験と同じく、繰返し数の増加に伴って、相対ずれ変位が増加していく傾向を示す。正負交番荷重の場合は、除荷後に逆方向へ荷重しているため、残留変位の累積というよりは、正負両側で噛み合わせの破壊が徐々に進行していると考えた方が自然である。繰返し数が増えるにつれ、正側と負側の移動距離が増加することも、このことを示唆している。

1,000cycleまでは、 $\delta_{ps} = 0\text{mm}$ が履歴曲線の中心となるが、繰返し数の増加するにつれて、中心が負側へ移動し、5,400cycleでは $\delta_{ps} = -4\text{mm}$ が履歴曲線の中心となる。図-17に示した静的荷重試験の結果とは異なり、せん断力の低下は現れない。このことは、正負交番荷重であっても、荷重レベルが小さければ、せん断破壊面の平滑化がほとんど進行しないことを示している。

(3) 疲労寿命に関する考察

図-24には、C-FA-1～3およびC-FA-PUS-1～2の相対ずれ変位 δ_{ps} と繰返し数 N の関係を示す。 $R/Q = 0.70$ で荷重したC-FA-PUS-1は467cycle、 $R/Q = 0.80$ で荷重したC-FA-1は350,000cycleで相対ずれ変位が急増し、疲労破壊に至った。他に疲労破壊した試験体はなかった。C-FA-PUS-1とC-FA-2は、どちらも $R/Q = 0.70$ で荷重しているが、疲労寿命は4オーダー異なっている。このことから、PBLの R/Q と疲労寿命の関係は、大きなバラツキを有するものであると判断される。静的荷重試験と疲労荷重試験の試験体は、同一のせん断耐力を有していると仮定して荷重条件を決定しているが、実際には孔内の粗骨材配置の影響でせん断耐力が異なる。このことが疲労寿命がバラツキに影響を与えていると考えられる。

R/Q と繰返し数 N の関係を図-25示す。本研究の実験結果に加え、児島³⁾、平ら²⁾の疲労荷重試験結果もプロットしている。児島らは、D13の貫通鉄筋を有する孔径55mm、孔あき鋼板の厚さ12mmで試験を行っており、普通コンクリートに加えて、軽量コンクリートでも試験を行っている。平らの試験は、孔径35mm、孔あき鋼板の厚さ12mmで行われている。 $R/Q = 0.60$ 以下で疲労破壊に至った試験体は1体もなく、 $R/Q = 0.70$ では疲労破壊に至る試験体と至らない試験体があることが分かる。このことから、PBLの疲労寿命は R/Q に敏感であり、また $R/Q =$

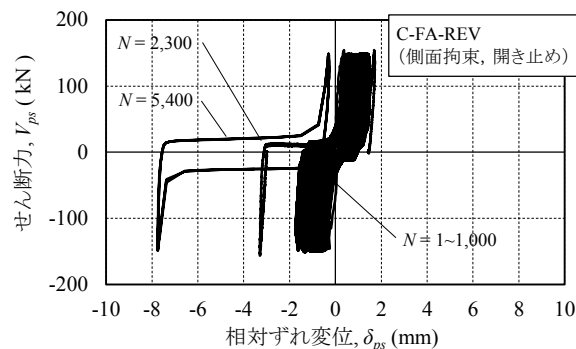


図-23 せん断力-相対ずれ変位関係 (C-FA-REV)

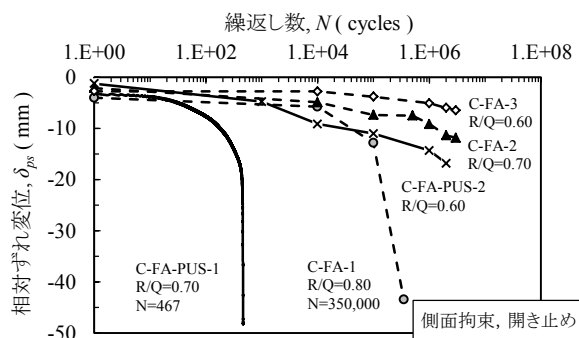


図-24 相対ずれ変位-繰返し数関係 (C-FA-1～3, C-FA-PUS-1～2)

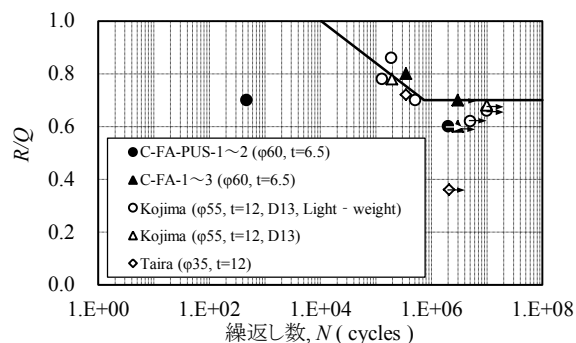


図-25 R/Q -繰返し数関係

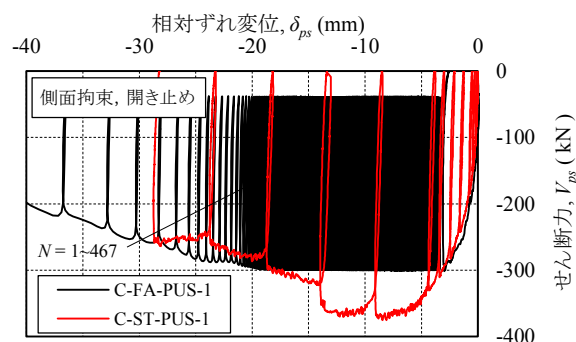


図-26 せん断力-相対ずれ変位関係 (C-ST-PUS-1, C-FA-PUS-1)

0.70程度がPBLの疲労限度である可能性が示唆された。 $R/Q = 0.70$ 以上の範囲では、特異的な値を示すC-FA-PUS-1の試験結果を除外すれば、概ね直線で近似できることが

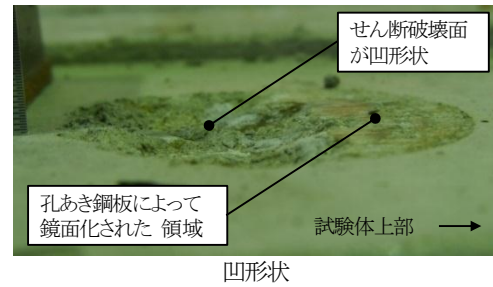
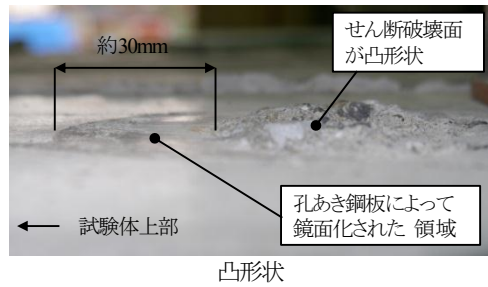


図-27 セン断破壊面の観察結果 (C-ST-PUS-1)

表-3 セン断破壊面の形状 (C-ST-PUS-1～3)

No.	C-ST-PUS-1	C-ST-PUS-2	C-ST-PUS-3
1	凸形状	凹形状	凹形状
2	凹形状	凹形状	凹形状
3	凹形状	凹形状	凹形状
4	凹形状	凹形状	凹形状

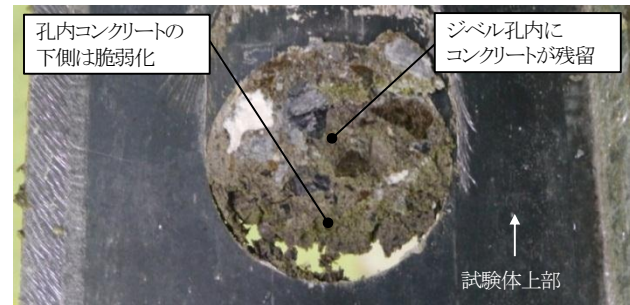


図-28 孔内に残留したコンクリート (C-ST-PUS-1)

分かる。ただし、図-25は条件の異なる試験結果を整理したものであることに注意が必要である。

(4) 静的載荷と疲労載荷の比較

C-ST-PUS-1とC-FA-PUS-1のせん断力ー相対ずれ変位関係を図-26で比較した。C-FA-PUS-1の最小荷重である-300.6kNまでは、静的載荷と疲労載荷に挙動の違いは見られないことが分かる。その後、C-ST-PUS-1が約13mm、C-FA-PUS-1が約20mmの相対ずれ変位に達した時点から、せん断破壊面の平滑化の兆候が現れる。この際の繰返し数は、C-ST-PUS-1が9回、C-FA-PUS-1が約450回であり、この時点で大きな荷重を負担できる凹凸が破壊されたと推察される。疲労載荷の場合には、一度せん断破壊面の平滑化が始まるとすぐにせん断破壊面の噛み合わせが失われ、疲労破壊に至ると考えられる。

5. ジベル孔のせん断破壊面観察

(1) 概要

載荷試験が終了した試験体は、コンクリートカッターで切断し、コンクリートブロック側および孔あき鋼板側のせん断破壊面を観察した。

(2) コンクリートブロック側の破壊状況

C-ST-PUS-1のコンクリートブロック側のせん断破壊面を図-27に示す。せん断破壊面は、粗骨材を含む複雑な凹凸を有しており、コンクリートブロックから外側に膨らんでいるケース（以下、凸形状と呼ぶ）と凹んでいるケース（以下、凹形状と呼ぶ）が確認された。表-3にC-

ST-PUS-1～3のせん断破壊面の形状を整理した。凹形状が多く、凸形状はC-ST-PUS-1の1箇所のみであった。

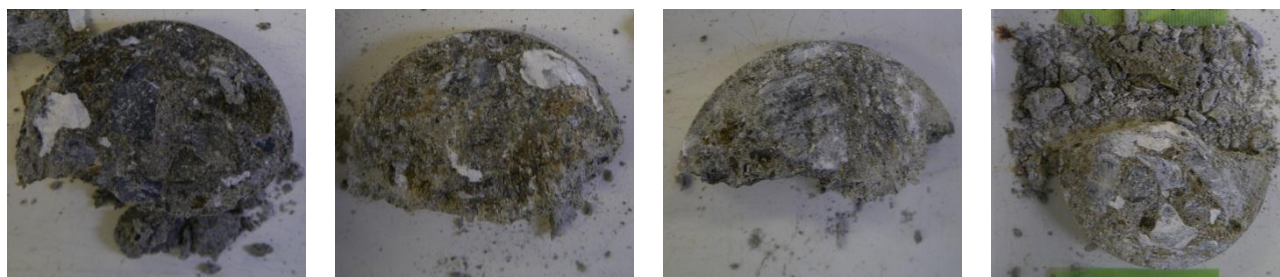
せん断破壊面の試験体上部に近い領域は、光沢を有する平面となっていた（以下、この現象を鏡面化と呼ぶ）。この領域の高さは約30mmであり、載荷試験のストロークと一致していた。鏡面化した領域は、凹形状、凸形状に関わらず存在していた。凸形状の場合は、孔あき鋼板で凸部が切削されて鏡面化に至ると考えらる。凹形状の場合は、破壊された凹凸が粉化し、それが鋼板から圧力を受けて圧着された結果、鏡面化するのだと推測される。

こうした鏡面化は、大きい拘束力が作用するPBLに特有の現象だと考えられる。大きい拘束力が作用するPBLは、コンクリートブロックにひび割れが発生したとしても、孔内コンクリートに生じた貫通ひび割れの幅が拡大しない。これにより、孔あき鋼板がコンクリートブロックに押しつけられて、せん断破壊面が鏡面化されと考えられる。鏡面化した領域は、噛み合わせによるせん断伝達がほとんど生じないと考えられる。

(3) 孔あき鋼板側の破壊状況

C-ST-PUS-1の孔あき鋼板側のせん断破壊面を図-28に示す。孔内にコンクリートが残留しているため、ジベル孔部のコンクリートは、二面せん断破壊を呈していると判断される。これまで、孔あき鋼板の板厚が8mm以下の場合は、一面せん断破壊が生じると考えられていた⁹⁾。しかし、本研究の結果から、孔あき鋼板の板厚が6.5mmと薄い場合であっても、二面せん断破壊となることが確認された。孔内コンクリートの破壊形態には、PBLに作用する拘束力が影響を与えている可能性がある。

また、C-ST-PUS-1の孔内コンクリートは、下側が脆弱



C-ST-PUS-1

C-ST-PUS-2

C-ST-PUS-3

C-ST-REV

図-29 採取した孔内コンクリート (C-ST-PUS-1～3, C-ST-REV)

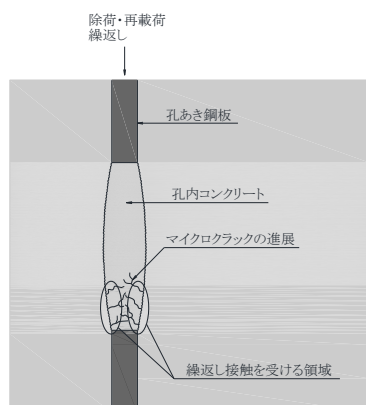
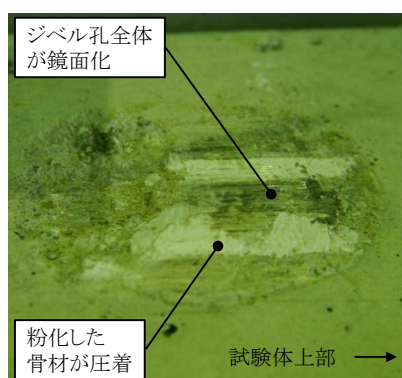
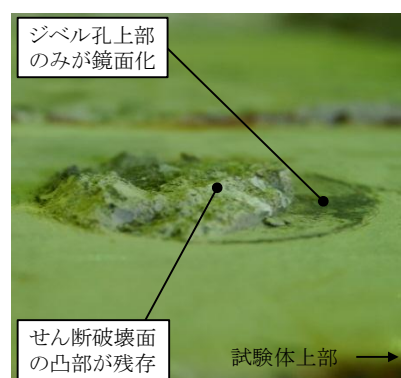


図-30 押抜き載荷時のジベル孔の模式図



C-FA-PUS-1



C-FA-PUS-2

図-31 せん断破壊面の観察結果 (C-FA-PUS-1～2)

化しており、触れると容易に崩れてしまう状態であった。

(4) 脆弱化する領域

孔内コンクリートが脆弱化する領域は、荷重方向と相関性が見られた。採取した孔内コンクリート (C-ST-PUS-1～3およびC-ST-REV) の写真を図-29に示す。押抜き載荷したC-ST-PUS-1～3は、共通して孔内コンクリートの下側が脆弱化していた。正負交番載荷したC-ST-REVは、どちらのジベル孔も上側が脆弱化していた。

押抜き載荷時のジベル孔の模式図を図-30に示す。図-30は、孔内コンクリートが凸形状であると仮定している。この状態で、除荷・再載荷の荷重履歴を受けると、孔内コンクリートの下部が繰返しコンクリートブロックに接触する。この繰返しにより、孔内コンクリートの下部にマイクロクラックが進展し、その結果脆弱化すると考えられる。

(5) 疲労載荷試験における破壊状況

C-FA-PUS-1およびC-FA-PUS-2のコンクリートブロック側のせん断破壊面を図-31に示す。N = 467で疲労破壊に至ったC-FA-PUS-1は、ジベル孔全体が鏡面化しており、せん断破壊面の噛み合わせが完全に失われていることが確認された。また、破壊された骨材が粉化し、それがせん断破壊面に圧着した痕跡が認められた。

2,000,000回載荷しても疲労破壊に至らなかったC-FA-PUS-2は、せん断破壊面の鏡面化が一部の領域に留まっ

ており、ジベル孔の下部に大きな凸部が残存していた。大きい拘束力が作用するPBLは、こうした凸部が完全に破壊された時に疲労破壊に至ると考えられる。

6. まとめ

本研究では、荷重条件がPBLのせん断ずれ挙動や破壊性状に及ぼす影響について実験的に検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 拘束条件を変化させた押抜き載荷試験により、PBLのせん断耐力が側面拘束によって14.0～26.3%、底面の開き止めによって20.5%増加することを確認した。
- (2) PBLが除荷・再載荷を繰り返す場合、せん断耐力に到達した後のせん断破壊面の平滑化が促進されることが明らかとなった。また、せん断破壊面の平滑化は、せん断耐力またはPBLに作用する拘束力の影響を受けることが分かった。
- (3) 正負交番載荷試験のせん断力-相対ずれ変位関係では、せん断耐力に達した後、せん断力が上昇と下降を繰り返す複雑な挙動を示した。これは、せん断破壊面において、凹凸の破壊と新たな噛み合わせの発生が繰り返されるためだと考えられる。これにより、正負交番載荷では、一方向の載荷に

比べて、せん断破壊面の平滑化が促進されることが分かった。

- (4) 正負交番载荷を受けたPBLは、せん断耐力を示したずれ変位付近において、他の領域よりもせん断耐力が低下する傾向を示した。これは、このずれ変位付近で噛合う凹凸の大部分が、せん断耐力を示した際に平滑化されたためだと考えられる。
- (5) 静的と疲労の正負交番試験の結果から、正負交番载荷であっても、荷重レベルが十分に小さければ、せん断破壊面の平滑化がほとんど進行しないことが確認された。
- (6) 同じ荷重条件で载荷した場合であっても、疲労寿命が4オーダー異なる場合があった。これは、粗骨材配置の影響で各試験体のせん断耐力が異なっていたために、実際には同じ荷重条件で試験を行えていなかったことが原因だと推察される。またこの結果から、PBLの R/Q と疲労寿命の関係は、大きなバラツキを有するものであることが示された。
- (7) 既往の疲労試験結果との比較から、 $R/Q = 0.70$ 程度が、PBLの疲労限度である可能性が示唆された。また、S-N線図において、 $R/Q = 0.70$ 以上の範囲は、直線で近似できることが確認された。
- (8) 孔あき鋼板の板厚が6.5mmと薄い場合であっても、孔内コンクリートが二面せん断破壊を呈することが明らかとなった。また、孔内コンクリートの破壊形態には、拘束力が影響する可能性がある。
- (9) 大きい拘束力が作用するPBLでは、除荷・再载荷の繰返しにより、孔内コンクリートの一部が脆弱化することが分かった。また、押抜き载荷を例にとり、脆弱化のメカニズムを示した。
- (10) $N = 467$ で疲労破壊したC-FA-PUS-1は、ジベル孔全体が鏡面化しており、 $N = 2,000,000$ 回でも疲労破壊しなかったC-FA-PUS-2は、せん断破壊面に凸部が

残存していた。これらの結果から、こうした凸部が完全に破壊された時点で、PBLが疲労破壊に至ると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会複合構造委員会：複合構造ずれ止めの抵抗機構の解明への挑戦，土木学会，pp.94-95，2014.8
- 2) 平陽平，天野玲子，大塚一雄：孔あき鋼板ジベルの疲労特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1503-1508，1997.6
- 3) 児島哲朗ほか：軽量骨材コンクリートを用いたジベル押抜きせん断疲労試験，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，Vol.59，No.1，pp.1357-1358，2004.9
- 4) 古川祐輔，藤井堅，道菅裕一，山口詩織：孔あき鋼板ジベルの押し抜き試験における各種パラメータのずれ耐力力への影響，第 9 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，Vol.9，pp.58-65，2011.11
- 5) 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，JSSC テクニカルレポート No.35，1996.11
- 6) 中島章典，橋本昌利，小関聡一郎，鈴木康夫：拘束度の高い押抜き試験に基づく孔あき鋼板ジベルの強度評価，第 9 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，Vol.9，pp.49-57，2011.11
- 7) Gebreyouhannes, E., Kishi, T., & Mackawa, K. : Shear fatigue response of cracked concrete interface. Journal of Advanced Concrete Technology, pp. 365-376, Vol.6, No.2, Jun. 2008
- 8) 中山和弥，山口隆一，古内仁，上田多門：スリット入り鋼パイプを用いた新型ずれ止めの疲労性状に関する実験的検討，第 9 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，Vol.9，pp.111-118，2011.11
- 9) 保坂鐵矢，平城弘一，小枝芳樹，橘吉宏：鉄道用連続合成桁に用いるずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1497-1504，1998.3

SHEAR FAILURE PROPERTIES AND FATIGUE CHARACTERISTICS OF PERFOBOND RIB SHEAR CONNECTOR UNDER THE VARIOUS SORTS OF LOADING CONDITION

Tomoaki KISAKU and Chikako FUJIYAMA

The failure mode and fatigue mechanism of perfibond rib shear connector (PBL) were investigated by various loading tests those simulated the restraint condition of PBL in actual structure. Static push-out tests were conducted under several different restraint conditions to examine the influence of restraint conditions on the shear force-slip relation. Observation of cracked surface in perforation after the loading tests indicated that the reversal cyclic tests accelerated smoothing of rough crack surface. The fatigue lives obtained from identical loading condition were scattered in 10000 times different. The SN curve of the PBL was formed based on both the past and our experimental results. The observation of cracked surface in perforation after the loading indicated that the concrete dowel can be broken along two crack plains, even if thickness of PBL is 6.5mm thin.