

論文 超高強度繊維補強コンクリートを用いた孔あき鋼板ジベルの力学的特性に関する基礎研究

福浦 尚之^{*1}・田中 良弘^{*2}

要旨：超高強度繊維補強コンクリートの一つである反応性粉体コンクリートに孔あき鋼板ジベルを適用し、その力学的特性を把握するための基礎的な載荷実験を行った。実験より、本継手方法は拘束の小さい薄厚部材間の継手部に対して実用的なせん断耐力を発揮できる事が示された。

キーワード：孔あき鋼板ジベル，超高強度繊維補強コンクリート，複合構造，直接せん断

1. はじめに

近年、高強度コンクリートを用いた構造物が土木・建築の分野で数多く建設されるようになってきており、構造物の高性能化、軽量化及びコストダウンへの高強度コンクリートに対する期待が増している。超高強度繊維補強コンクリート（UHPFRC）は、最密充填されたセメントマトリックスに高強度の短繊維を混入した材料である。この材料の一つにフランスで開発された反応性粉体コンクリート（RPC）があり、国内での施工実績が報告されている¹⁾。このRPCは、圧縮強度 200N/mm^2 、曲げ強度 42N/mm^2 （ $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ 試験体）を有し、その高い材料特性により構造部材の薄厚化、軽量化を図ることのできる高性能材料である。

構造物の高性能化、軽量化及びコストダウンを図るためには、材料の高性能化とともに構造上の合理化が重要である。その有効な方法の一つとして複合構造化がある。これは、鋼-コンクリート複合構造など異種材料からなる部材同志を組み合わせて構造物を構成したり、プレキャスト部材を組み合わせる事により、構造物の各部に要求される性能を満足する材料を合理的に選定でき、かつ施工性の向上を図る事ができるためである。

複合構造物の実現のために開発すべき技術の

一つとして、部材間の接合方法が挙げられる。

接合部は構造上の弱部となりやすいが、この部分を合理化し制約を軽減する事で、各材料の性能を十分生かした複合構造物を建設する事ができる。従来より接合方法として種々の技術があるが、レオンハルトの提案した孔あき鋼板ジベルは、近年、鋼とコンクリートの接合方法として広く用いられている²⁾。

RPCは鋼繊維を含んだ超高強度コンクリートであり、孔あき鋼板ジベルとの組み合わせにより、簡易かつ高い伝達力特性を持つ接合部を構成できる可能性が有る。本研究では、孔あき鋼板ジベルとRPCを組み合わせた接合法に関して基礎的な実験を行い、せん断伝達特性を明らかにするものである。

2. 実験の概要

2.1 実験方法

孔あき鋼板ジベルの載荷実験は、従来よりずれせん断型の形式で行われている。本研究では、以下の理由により図-1に示すような圧縮型の載荷形式を採用した。

接合部の耐荷機構として、ずれせん断型に限らずより一般的な接合方法を目指している事。

従来方法では試験体が比較的複雑であるが、今回は基礎データの収集を目的として孔1つ

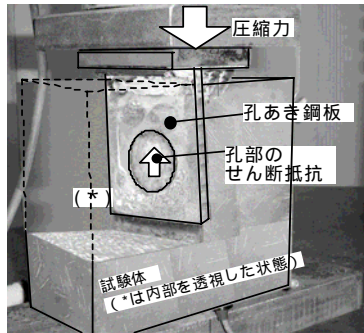
*1 大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 博士（工学）（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所 Ph.D.（正会員）

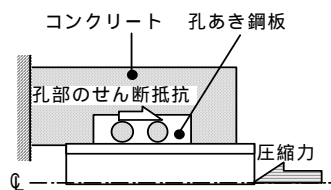
表 - 1 実験ケース及び結果

実験ケース	対象材料	孔径 (mm)	鋼板厚 (mm)	せん断面 (面)	試験体数 (体)	荷重 タイプ	せん断耐力 (kN)			
							試験値			平均値
R 30-2-C	RPC	30	12	2	3	圧縮	147	99	95	114
R 60-2-C	RPC	60	16	2	3	圧縮	394	397	469	420
R 30-1-C	RPC	30	12	1	3	圧縮	35	40	48	41
R 60-1-C	RPC	60	16	1	3	圧縮	135	113	102	117
R 70-1-T	RPC	70	9	1	3	引張	94	92	119	102
C 70-2-C(拘束小)	コンクリート	70	16	2	3	圧縮	171	167	164	96
C 70-2-C"(拘束大)	コンクリート	70	16	2	3	圧縮	90	109	90	167

テストピースの圧縮強度：202N/mm² (RPC)、47N/mm² (コンクリート)



a) 圧縮型荷重



b) 従来のずれせん断型荷重

図 - 1 荷重方法

に限定した簡易な試験方法を採用したい事。

この圧縮型の荷重形式は、従来よりの試験方法と比較して、基本的な破壊機構、伝達機構はほぼ同じ条件であると考えられる。これについては、既往実験結果との比較を行うものとする。

また、孔あき鋼板自体の耐力については、これまでの研究成果により十分解明されているため、実験の目的を孔あき鋼板孔部の RPC の耐力・変形特性の把握に絞り込んだ。穴開き鋼板は降伏せず弾性応力状態にとどめるために、鋼板材質に S45CN (機械構造用炭素鋼鋼材、規格降伏値 $\sigma_y=345\text{N/mm}^2$ 以上) を採用した。

2.2 実験ケース

表 - 1 に実験ケース及びコンクリートとの強度試験結果、表 - 2 に配合表、図 - 2 に試験体諸元及び計測箇所を示す。

実験ケース及び試験体諸元の設定については以下の点を考慮した。

従来コンクリートと RPC を用いた場合の比較を行うとともに、従来のずれせん断型の試験方法との整合性、及び鋼板孔まわりの拘束の影響について検討する。

表 - 2 配合表

a) RPC配合					単位: kg/m ³
水	セメント	珪石微粉末, シリカ, 他	鋼繊維 =0.2mm, L=15mm	減水剤	
180	818	1479	157	24	

b) コンクリート配合						単位: kg/m ³
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	Gmax	
175	408	747	965	4	20	

鋼板孔径は、実用的な寸法の上下限值とした。また、埋込まれる側のコンクリート部と RPC 部の寸法は、薄厚部材を想定して定める。

従来の孔あき鋼板ジベルは、鋼板孔の両面で 2 面せん断耐力が発揮される機構である。本研究では、このような埋め込み方式だけでなく鋼板孔に関する一面せん断耐力による接合法も念頭においた実験ケースを設定する。

非常に薄い部材同志の結合を目的とした接合法の耐力性状を得るために、孔あき鋼板を重ねた引張型の試験を行う。

計測項目は、荷重荷重及び鋼板側面のタップ穴から出した計測標点と試験機荷重ベッド間の変位である。荷重方法は、圧縮型については図 - 1 に示したように、1000kN アムスラー試験機を用いて鋼板上部に設けた荷重板に圧縮力を加えた。引張型については図 - 2 b) に示した鋼板の両端を 1000kN アムスラー試験機のチャックで挟み、引張力を加えた。

圧縮型の試験体については、鋼板先端及び荷重板が直接コンクリートと RPC に力を伝達しないようにクッション材を設置した。また、全試験体に共通して、鋼板とコンクリート/RPC 間の摩擦力の伝達を防止するために、鋼板表面にはボ

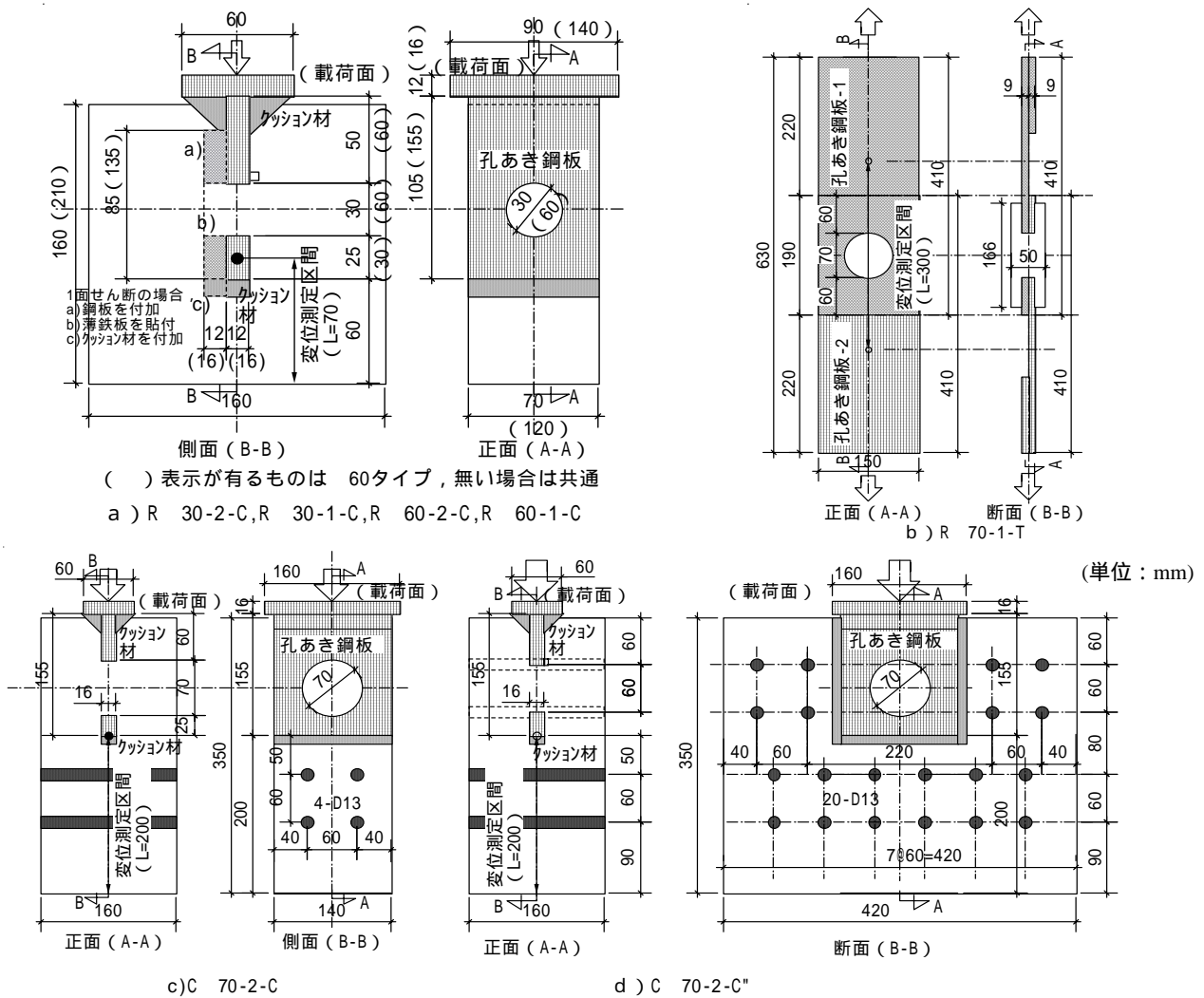


図 - 2 試験体諸元及び計測箇所

リエチレンフィルムを点接着した。

打設は、型枠内に孔あき鋼板を縦置きして固定した状態で、荷重載荷面側から縦打ちする方法で行った。RPCの打設においては、棒状パイプレータは鋼繊維が沈降する可能性があるので使用せず、木槌による型枠面の打撃、鉄筋棒による孔周辺の突き固めにより、鋼板孔部を確実に充てんし、鋼繊維の配向がランダムとなるようにした。

RPCは打設後3日間湿潤状態にて静置し、その後90分、48時間の熱養生を行ってから試験を行った。コンクリートは早強セメントを使用し、湿潤状態にて静置して材齢7日で試験を行った。

3. 実験結果

表・1に各ケースでのせん断耐力、図 - 3に荷

重-変位関係を示す。荷重-変位関係の初期の立ち上がり部で勾配が緩やかになっているが、変位計測において載荷ベッドと試験体とのなじみ分を除去していないことによるものである。各ケースでの破壊に至る性状は以下の通りである。

R 30-2-C

最大耐力に至るまで荷重-変位関係は、ほぼ線形関係に有る。破壊荷重の直前に内部より異音が発生し、音が大きくなるとともに破壊し急な荷重低下に至った。1つのケースについては残留強度を確認(最大荷重の30%程度)した上で徐荷し、他の2つのケースについては荷重低下した時点で徐荷し試験を終了した。

最大荷重に至るまで、試験体各部にはひび割れは目視で確認されなかった。他のC 70-2-C'を除くすべてのケースで同様であった。

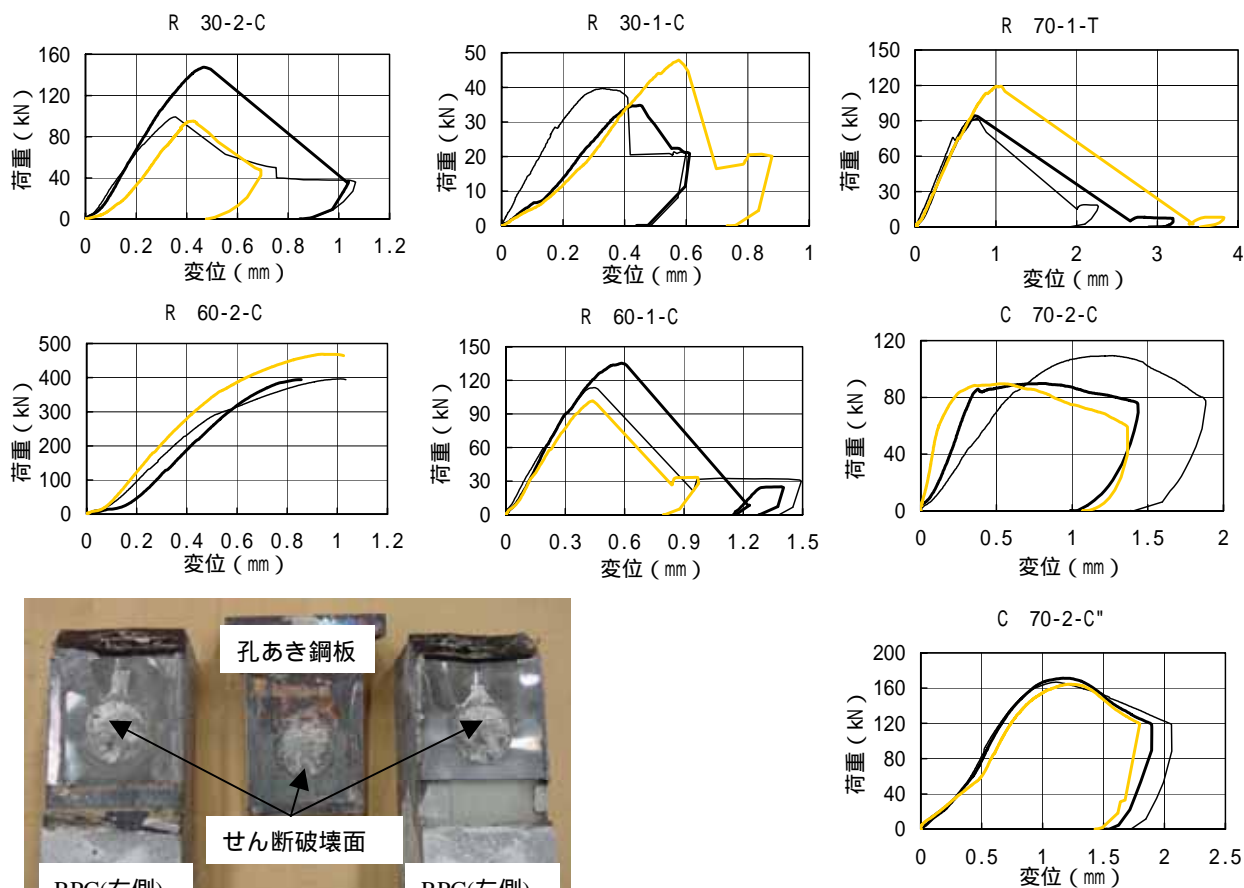


図 - 3 荷重-変位関係

図 - 4 せん断破壊面状況 (R 30-2-C)

試験終了後、試験体を切断し孔周辺の破壊状況を観察した。(図 - 4) 鋼板孔部の両面で明瞭なせん断面が形成されており、2面せん断破壊が生じている事が確認できた。せん断面の鋼繊維は切れているものと抜け出しているものが混ざっていた。鋼板孔内部のRPCは、比較的健全であり、圧壊により粉砕されている部分は確認できなかった。他のすべてのケースについても、孔まわりの破壊性状は同じであった。

R 60-2-C

最大耐力に至るまで荷重-変位関係は、ほぼ線形関係に有るが、孔径の小さいR 30-2-Cより早い段階で勾配がなだらかになり始めた。R 30-2-Cより大きな破壊音とともに急な荷重低下に至り、荷重値が0となり試験を終了した。

R 30-1-C

最大耐力に至る荷重-変位関係は、R 30-2-Cと同様である。最大荷重後の残留強度は、最大荷重の40~60%程度であった。試験終了後の観察よ

り、鋼板孔部には明瞭なせん断面が形成されており、1面せん断破壊が生じている事が確認できた。孔径を変えたR 60-1-Cも同様であった。

R 60-1-C

最大耐力に至る荷重-変位関係は、R 30-1-Cと同様である。破壊時の異音はR 30-1-Cよりも大きく、最大荷重後の残留強度は、最大荷重の20~30%程度であった。

R 70-1-T

最大耐力に至るまで荷重-変位関係は、ほぼ線形関係に有る。破壊荷重の直前に内部より異音が発生し急な荷重低下に至った。最大荷重後の残留強度は、最大荷重の10%程度であった。試験終了後の観察より、鋼板孔部では鋼板が重なった面で明瞭な1面せん断破壊が生じている事が確認できた。

C 70-2-C

最大耐力に至るまで荷重-変位関係は、ほぼ線形関係に有る。最大荷重後の荷重低下は緩やかであり、残留強度を確認する前に徐荷し試験を

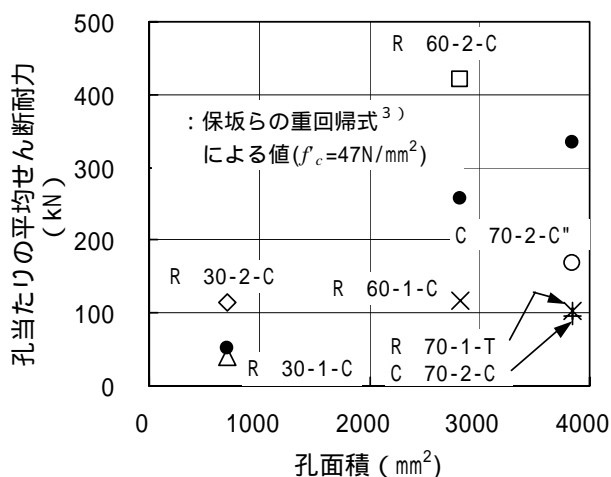


図 - 5 平均せん断耐力

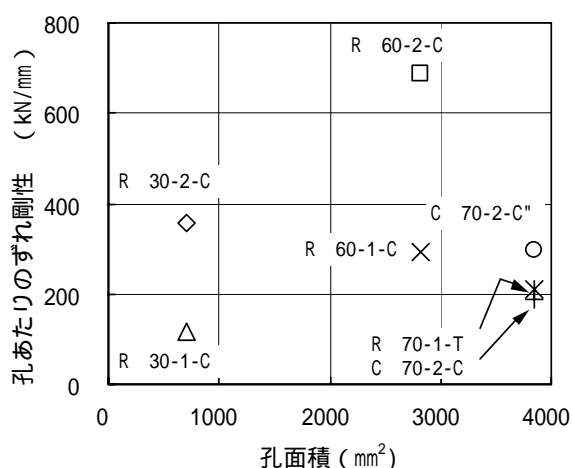


図 - 6 孔あたりのずれ定数 (K)

終了した。鋼板孔部では明瞭な2面せん断破壊が生じている事が確認できた。せん断断面は粗骨材が割れているものもあり、RPCに比べて凹凸が大きかった。

C 70-2-C''

最大耐力に至るまで荷重-変位関係は、ほぼ線形関係に有る。最大荷重後の荷重低下及び破壊面の状況はC 70-2-Cと同様である。このケースでは、最大荷重に至る直前に鋼板に平行なコンクリート表面の鋼板孔位置のほぼ中央に縦ひび割れが発生した。試験体切断後のせん断断面には、この表面の縦ひび割れと連続している縦ひび割れを観察できたが、表面の方がひび割れの長さ・幅ともに大きなものであった。

4. 実験結果の考察

4.1 せん断耐力

図 - 5 に各実験ケースの平均せん断耐力と孔面積の関係を示す。参考値として、今回実験でのコンクリート強度 $f'_c = 47\text{N/mm}^2$ での各孔径に対応するせん断耐力を、保坂ら³⁾による貫通鉄筋のない場合の平均せん断耐力を重回帰式から求め、図中に併記した。

コンクリートを対象とした C 70-2-C, C 70-2-C''のせん断耐力値は、既往の重回帰式での値に比較して低い値になっている。この理由として、まず既往値は比較的マッシブなコンクリート中に埋め込まれた孔あき鋼板を対象として

求められているが、今回実験では鋼板まわりの拘束がそれほど大きくないために、既往値を下回っているものと考えられる。このことは、C 70-2-CとC 70-2-C''を比較すると、より拘束の少ない前者の方がせん断耐力値が低くなっている事からも推察される。もう一つの理由として、試験方法の違いが挙げられるが、その理由については今後検討していく必要が有る。

RPCを用いた2面せん断タイプのせん断耐力は、同じ孔あき鋼板を用いたコンクリート強度 $f'_c = 47\text{N/mm}^2$ に対応した既往値よりも大きな値を示している。コンクリートを対象としたC 70-2-C, C 70-2-C''のせん断耐力値が同強度での既往値を下回っている事と考え合わせると、本ケースではRPCの圧縮強度 202N/mm^2 を反映した大きなせん断耐力が発揮されている事が分かる。RPCを用いて従来のずれせん断方式の実験を行った場合には、今回実験結果より大きなせん断耐力が得られるものと考えられる。

RPCを用いた1面せん断タイプのせん断耐力は2面せん断タイプの試験結果と比較して36% (30), 28% (60)といずれも半分以下の値であった。1面せん断となることで、せん断面積が半分になるだけでなく、孔あき鋼板まわりの応力状態が変化し、拘束が弱まった事が理由と考えられる。構造的に最も拘束が弱い引張タイプのR 70-1-Tのせん断耐力は、より孔面積が小さく同じ1面せん断タイプのR 60-1-Cの

87%であることから、拘束の影響がせん断耐力に大きな影響を与えている事が推察される。

4.2 変形性状及びずれ剛性

図 - 3 より荷重と変形の関係は、最大荷重までほぼ線形的な挙動を示したが、最大荷重以後については、RPC を用いたケースでは急な荷重低下を生じた。RPC は、鋼繊維を有していることからその引張特性は靱性に富むものであるが、今回の試験対象範囲での直接せん断破壊モードに対しては、引張特性と同様な靱性は発揮されないと考えられる。但し、複数の孔を持つ孔あき鋼板の場合には、1 孔あたりのせん断耐力が低下する可能性があるものの、各孔の荷重分担が異なってくることで複合した破壊進展モードとなり、最大荷重後の荷重低下性状は改善されるものと推定される。

図 - 6 に孔あき鋼板部でのずれ定数 (K) を示す。ずれ定数は、せん断耐力の 1/3 荷重点の初期割線の傾きとされている⁴⁾。今回の実験では、載荷ベッドと試験体間のなじみが除去されていないので、ずれ定数を最大荷重の 20% から 80% 区間のずれ剛性として算定した。その際、孔あき鋼板の孔部より下の RPC あるいはコンクリート部分の弾性変形分を計測された変形より除去して、ずれ剛性を算定した。拘束程度の高いコンクリートのケース C 70-2-C”で 300kN/mm が得られたが、既往のずれせん断型の試験より得られているずれ定数³⁾よりも低い値になっている。この理由としては、せん断耐力の検討の場合と同様に、拘束の程度が異なる点、試験方法の違いによる点、載荷ベッドと試験体間のなじみの影響が十分除去できていない点が考えられる。

RPC を用いた場合は、コンクリートタイプより大きなずれ剛性が得られており、RPC が高強度であることによりずれ剛性が通常のコンクリートの場合より高くなる結果が得られた。RPC の 1 面せん断の場合には、せん断耐力の検討の場合と同様に剛性は、半分以下の値になるが、その低減率は耐力の場合より小さい。ずれ剛性はせん

断耐力に至るまでの平均的な挙動を表すものであり、せん断面積の低減率 50% に近い値が得られているものと考えられる。

5.まとめ

本研究では、超高強度繊維補強コンクリートである RPC に孔あき鋼板ジベルを適用してその耐力、変形性状に関する基礎的な載荷実験を行った。以下に本研究より得られた知見を示す。

実験より、本継手構造は拘束の小さい薄厚部材間の継手部に対して実用的なせん断耐力を発揮できる事が示された。従来コンクリートの孔あき鋼板ジベル接合と比較すると最大耐力以降に脆性的な破壊モードを示すが、適切な安全係数を設定することで安全性を確保した設計が可能であると考えられる。

今後は、実験データの蓄積によりせん断耐力式の設定・ずれ定数の高精度化、及び解析シミュレーションによる変形性状・破壊進展のメカニズムの解明を行い、RPC 部材間の継手方法を開発していく予定である。その際、これらの諸特性は、継ぎ手周辺の拘束、せん断伝達面の数が大きな影響を及ぼすことから、効率的な開発を行っていくためには、実構造物への適用する際の具体的な部材寸法、継手方法を念頭に置く必要がある。

参考文献

- 1) 田中良弘, 武者浩透, 大竹明朗, 下山良秀: 超高強度繊維補強コンクリートによる PC 歩道橋の設計施工法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.1603-1608, 2002
- 2) 土木学会 鋼構造委員会: 孔あき鋼板ジベル設計マニュアル(案), 2000.11
- 3) 保坂鐵矢, 光木 香, 他: 孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.44A, pp.1497-1504, 2002.3
- 4) 日本鋼構造協会: 頭付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, 1991