

(1) 孔内粗骨材のせん断抵抗に着目した 孔あき鋼板ジベル耐荷機構の基礎的研究

藤山 知加子¹・真部 洋大²・木作 友亮³・塩永 亮介³

¹正会員 法政大学准教授 デザイン工学部都市環境デザイン工学科

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)

E-mail:fujiyama@hosei.ac.jp

²正会員 大成建設株式会社 名古屋支店 土木部技術室

³正会員 株式会社IHI 基盤技術研究所

孔あき鋼板と粗骨材とのかみ合わせが孔あき鋼板ジベルのずれせん断挙動に及ぼす影響を明らかにするため、孔あき鋼板孔内での粗骨材の配置と数、強度、および試験体の外部拘束の有無をパラメータとした押抜き試験8ケース24体実施した。孔あき鋼板内に粗骨材を1つ以上配置することで、モルタル試験体に比べせん断剛性が上昇したが、3つ配置したケースでも1つ配置したケースでも孔内上縁の粗骨材が破断したため、最大せん断耐力、せん断剛性に関して両者に有意な差は確認できなかった。粗骨材を3つ配置し、かつ周囲にも粗骨材を配置したコンクリート試験体の場合、粗骨材は破断せず孔内破壊面の凹凸度が高くなったため、せん断剛性が顕著に大きかった。底面拘束を行っても最大せん断耐力の大幅な増加はなかったが、ずれ性能の向上がみられた。

Key Words : PBL, coarse aggregate, interlocking, shear resistance, shear stiffness, restraint condition

1. はじめに

鋼コンクリート複合構造のずれ止めのひとつである孔あき鋼板ジベル（以下PBL）は、鋼板に孔をあけ、コンクリートを充填することでずれ止めとなるものであり、頭付きスタッドよりも施工性がよく、疲労強度が高いといった理由から、近年広範に使用されている^{1) 2)}。また、実際に実構造物へ適用する際には、貫通鉄筋を配置するのが一般的とされている^{3) 4)}。

実構造物への適用のためには、ずれ止めを介した鋼とコンクリートのずれ剛性、最大せん断耐力を知ることが必要であり、これまで多くの実験研究が行われてきた^{5) 6) 7)}。これにより、せん断剛性や耐力だけでなく、鋼材とコンクリート間の応力を伝達する力が一定値を超えると、伝達力とずれ変位の関係は非線形になることも示され、そのせん断力—ずれ変位関係は複合構造標準示方⁸⁾に定式化されている。ただし、伝達力とずれ変位関係の曲線に影響を与える因子は数多く存在するため、依然として各種要因の影響度を定量的に評価するのは容易ではない。

その中で、筆者らはこれまで、PBLの伝達力とずれ変位関係に影響を与える因子のひとつとして、PBL孔内および周囲の粗骨材のかみ合わせ機構に着目し、3次元

FEMを用いて押抜きせん断試験を模擬した検討を実施してきた⁹⁾。その結果、モデルのコンクリートおよびPBL寸法の諸元は限られているものの、PBL孔内上縁付近に粗骨材を配置した場合、PBLのせん断耐力が上昇すること、さらに複数の粗骨材同士をかみ合うように配置すると、ポストピークのせん断が上昇することを、解析上で確認している。ただし、この感度解析では、粗骨材を弾性要素で離散的にモデル化しているが、粗骨材の周囲のモルタルについては、平均化されたコンクリートの構成則におけるヤング係数、ポアソン比を変更するという簡易な手法で表現していた。せん断力—ずれ変位関係のマクロ挙動の検討は行っているが、内部のひび割れ発生・進展状況といった損傷過程を適切に再現できているかどうかについては、パラメータが多いため、検討途上である。

そこで本研究では、さらに条件を簡易化するため、試験体コンクリートに配置していた内部拘束鉄筋を除き、載荷開始後せん断耐力のピークに至るまでのずれ—変位関係、せん断剛性、試験体側面変形に、PBL孔内および周囲の粗骨材の配置と硬さ、さらに底面拘束が及ぼす影響について、実験にて検討を行うものとした。また、破壊面の観察を詳細に行い、破壊形態からPBLのせん断伝達機構について、考察を行うものとした。

2. 実験概要

(1) 試験体条件

一枚板押抜き試験を行うものとした。本研究のパラメータと条件の一覧を表-1に示す。実験ケースは全8ケースとし、1ケースにつき3体の試験体を作製した。実験パラメータは、モルタル・コンクリートの圧縮強度、試験体内に配置するもの、底面拘束の有無としている。試験体内に配置するものは、粗骨材、鉄球とした。試験体名は図-1に示す通り、試験体材料、材料強度、試験体内に配置するもの、試験体番号の順に表している。

(2) 試験体基本条件

本研究の試験体諸元を図-2に示す。既往の研究⁹⁾で用いた解析モデルと同様に、厚さ9mmの鋼板に直径60mmの孔を1つ設けたものを200mm×200mm×200mmのコンクリートの躯体に埋め込んだものとする。型枠用合板を用い200mm×200mm×200mmの型枠を作製し、型枠内にスタイロフォームを配置し、その上に孔あき鋼板を設置した。さらに、鋼板表面の付着を切るため、テフロンシートを貼り付けた。また、モルタル打設前と打設後に平型レベルを用い、孔あき鋼板を試験体底面に対して垂直に設置した。

モルタルは、水セメント比45%とし、セメント：砂を体積比で1：2.5とした。コンクリートは水セメント比50%とした。試験体は全て打設後2日で脱型、その後14日間水中養生を行った後、押抜き試験を行った。

(3) 粗骨材の配置と底面拘束の状況

孔内に配置する粗骨材は、あらかじめPBL孔内上縁に接着剤で固定してから、モルタルの打設を行った。また、底面拘束は、試験体底面と底鋼板をエポキシ樹脂系接着剤で接着させることで再現した。打設前の粗骨材配置状況および接着剤による底面拘束の状況を図-3に示す。

(4) 载荷条件および計測条件

2000kN万能試験機を用いて変位制御で载荷を行った。孔あき鋼板上面に鉛直方向の荷重を与えた。荷重が低下し、0kNになるまで継続した。

計測項目は、荷重、载荷位置の変位、試験体側面のひずみ及び試験体側面の変位である。試験体側面のひずみ測定位置、試験体側面の変位測定位置を示した载荷時の状況を図-4に示す。試験体にひび割れが発生すると考えられる2面に、各3枚のひずみゲージを貼り付けた。位置は上縁から25mm、75mm、75mmの間隔で、一番下のひずみゲージは下縁からの高さが25mmである。また、孔あき鋼板面外方向の面の中心の変位を計測した。

表-1 実験条件一覧

実験ケース	試験体数	材料	圧縮強度 (N/mm ²)	孔内粗骨材	底面拘束の有無
M-57.5	3	モルタル	57.5	無し	無し
M-57.5-A1	3	モルタル	57.5	粗骨材1つ	無し
M-57.5-A3	3	モルタル	57.5	粗骨材3つ	無し
C-30.0-A3	3	コンクリート	30.0	粗骨材3つ	無し
M-45.4	3	モルタル	45.4	無し	無し
M-45.4-S1	3	モルタル	45.4	鉄球1つ	無し
M-45.4-R	3	モルタル	45.4	無し	有り
M-45.4-S1-R	3	モルタル	45.4	鉄球1つ	有り

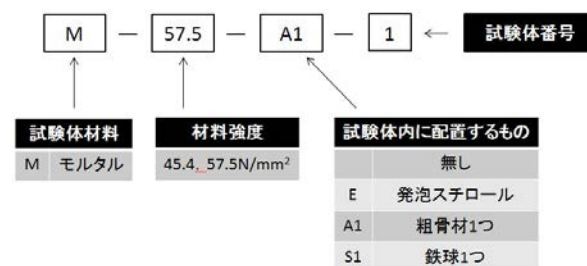


図-1 試験体名

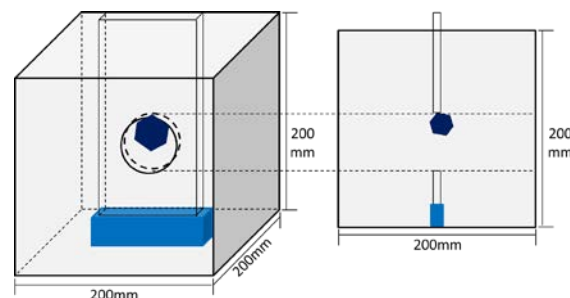


図-2 試験体寸法諸元

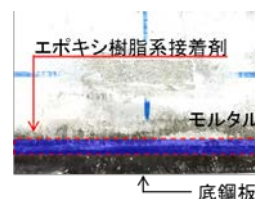


図-3 孔内粗骨材配置状況

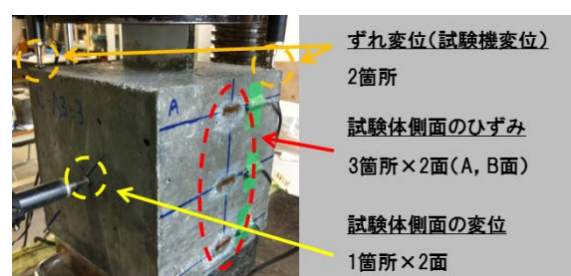


図-4 孔内粗骨材配置状況

3. 実験結果

(1) せん断力-ずれ変位関係

a) 最大せん断耐力, 最大ずれ変位

図-5にせん断力-ずれ変位関係の全結果を示す。最大せん断耐力は、M-57.5-A1-2 (図-5(b))を除いては、概ね100~125kNの値を示し、各試験パラメータの違いによる明確な差はみられなかった。ただし、破壊に至るまでの曲線形状はそれぞれ異なる特性をもっていた。

モルタルのみの試験体と、孔内に粗骨材を1つのみ配置した場合のせん断力-ずれ変位関係を図-5(a)および図-5(b)にて比較する。いずれもせん断力が10kNを超えた程度で、せん断剛性の変化点が見られた。この最初のせん断剛性低下のタイミングはほぼ同等であることから、孔内粗骨材の有無にかかわらず孔内のせん断破壊面は形成されると推察される。

次に、孔内に配置する粗骨材の強度に着目し、天然の粗骨材ではなく鉄球を配置した場合とモルタルのみ試験体との比較を図-5 (c)(d)に示す。鉄球の配置により最初のせん断剛性変化点後のせん断剛性の低下は小さく、天然骨材の場合よりも直線的な挙動を示しながら最大せん断耐力に至っていることが確認された。これは、天然骨材と異なり鉄球は球形状であり変形や破断も生じないため、孔内せん断破壊面形成後の鉄球による噛み合わせ抵抗が安定して得られたためと考えられる。

さらに、粗骨材同士のかみ合わせに着目するため、PBL孔内に粗骨材を3つ配置し、周囲をモルタルで充填したケースと、同様にPBL孔内に粗骨材を3つ配置し、周囲をコンクリートで充填したケースを比較した (図-5(e)(f))。孔内粗骨材3つとモルタルのケースでは曲線形状は粗骨材1つのものと類似しているが、コンクリートの試験体では、せん断力10kN程度でのせん断剛性変化

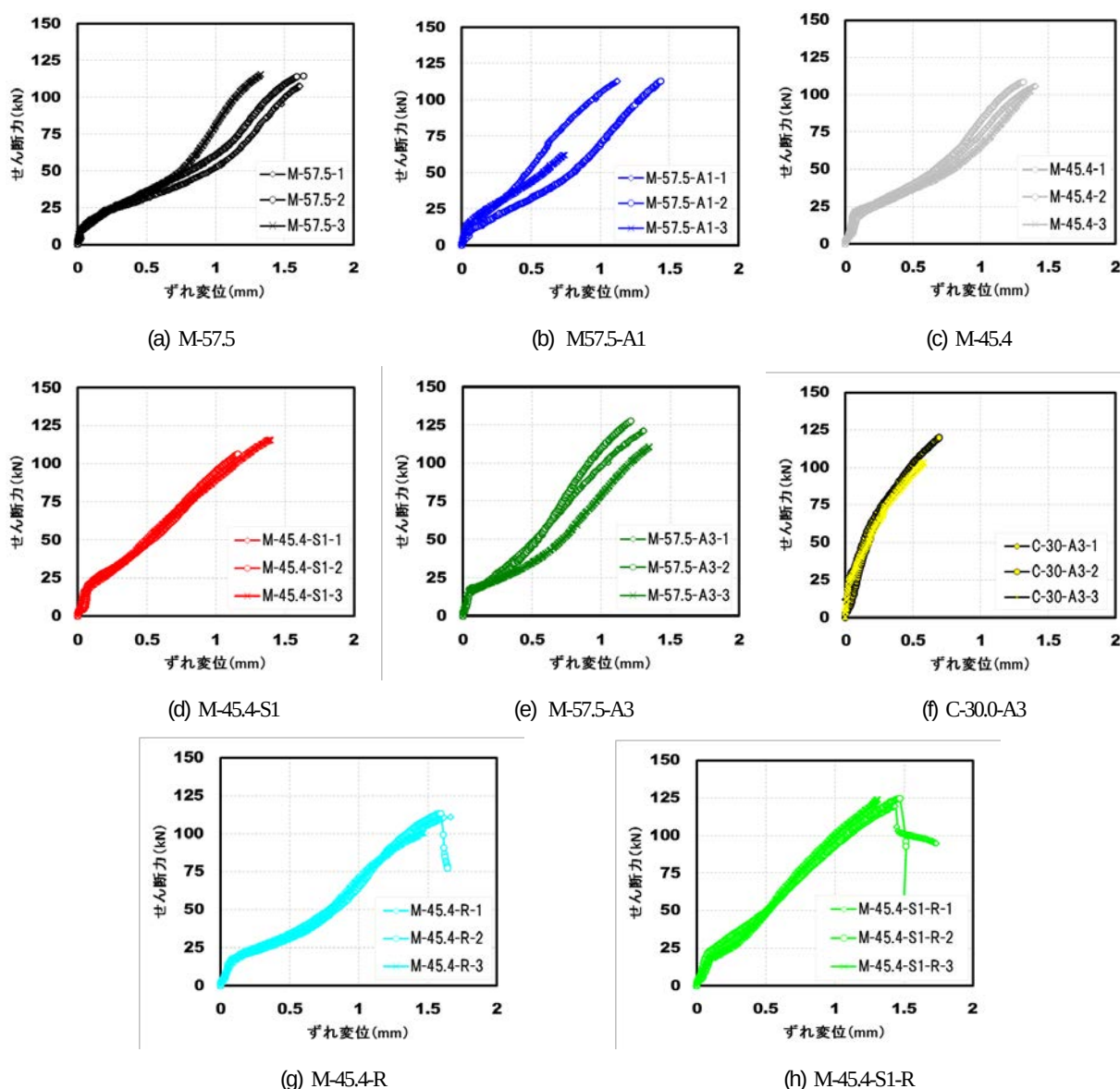


図-5 せん断力-ずれ変位関係

点はみられず、高いせん断剛性を保ったまま最大せん断耐力に達した。これは、試験体全体で粗骨材同士のかみ合わせにより押し込み力を負担できるため、孔内にせん断破壊面が形成されても急激な耐荷機能の低下がなかったものと考えられる。

最後に、底面拘束の有無の影響を調べるため、孔内鉄球の有無とともに比較を図-5(g)(h)に示す。荷重20kN程度での最初のせん断剛性変化に関しては、図-5(a)~(e)でみられたのと同様であり、底面拘束の有無による影響はみとめられない。一方で、底面拘束がある場合は最初のせん断剛性変化後の低下が比較的小さくより直線的な挙動を示し、また最大せん断耐力記録時のずれ変位が比較的大きい傾向にあった。さらに、そのうち2体では、最大せん断耐力到達後一旦耐力は低下するが、その後もいくぶん荷重を保持する傾向がみられた。

(2) 破壊形態

a) 試験体貫通ひび割れ発生方向

いずれの試験体においても、载荷に伴って試験体側面のひび割れ貫通する前後にPBLのせん断耐力が急激に低下して、破壊に至った。ただし、同条件で行った要素試験においても、試験体表面で観察されるひび割れ発生状況が異なるものがあったため、まず破壊形態を整理することとした。ひび割れ進展方向を試験体上面から観察し、ひび割れ進展方向A、B、C、Dによって破壊形態を区分した。図-6に、実際に観察された破壊形態7種類のスケッチを、表-2に各破壊形態を生じた試験体名を示す。

表-2より、PBLの側面に両側にひび割れを生じる破壊形態ABが14体と最も数が多く全体数の約6割、側面の片側のみにひび割れを生じる破壊形態Aあるいは破壊形態Bの5体も含めると19体で全体数の約8割にあたる。底面を拘束した試験体M-45.4-S1-Rシリーズでは、側面方向の

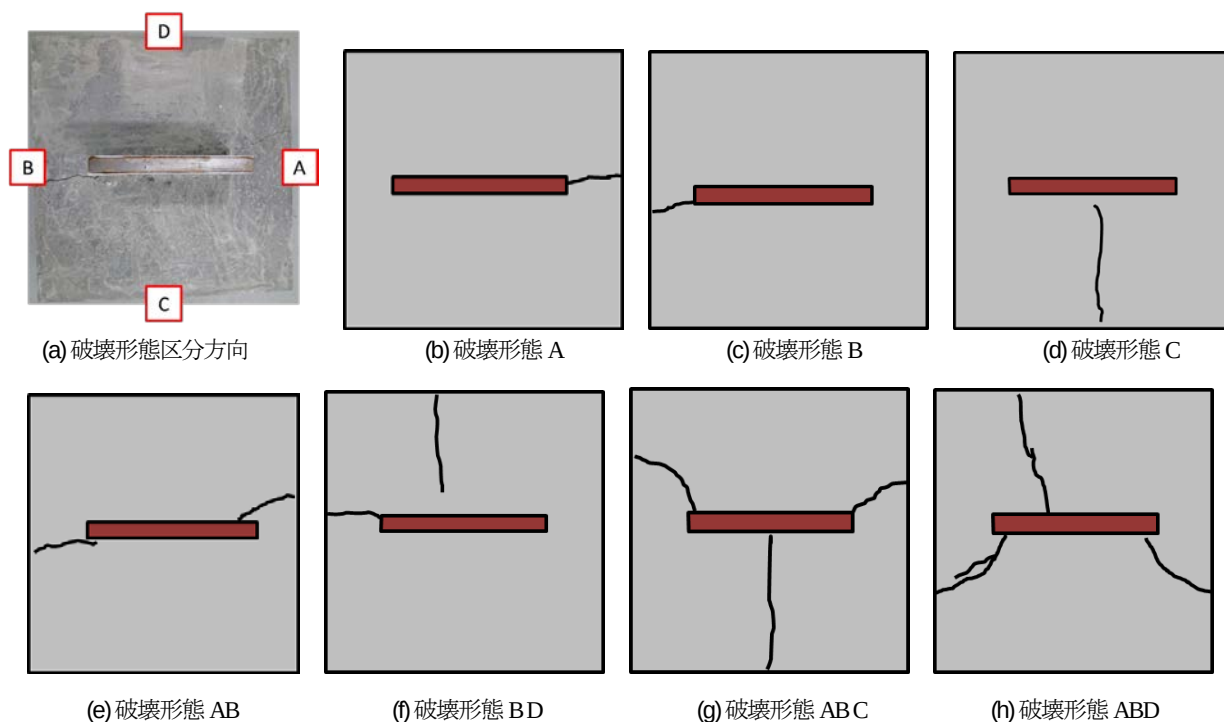


図-6 試験体貫通ひび割れによる破壊形態の区分

表-2 破壊形態の分類

破壊形態	A	B	C	AB	BD	ABC	ABD
試験体名	M57.5-A1(1)	M-57.5(2)	M-45.4(2)	M-57.5(1)	M-45.4-S1-R(1)	M-45.4-S1-R(1)	M-45.4-S1-R(3)
	---	M57.5-A1(2)	M-45.4-S1(3)	M-57.5(3)	---	---	---
	---	M57.5-A1(3)	---	M-45.4(1)	---	---	---
	---	C-30.0-A3(2)	---	M-45.4(3)	---	---	---
	---	---	---	M-45.4-S1(1)	---	---	---
	---	---	---	M-45.4-S1(2)	---	---	---
	---	---	---	M-57.5-A3(1)	---	---	---
	---	---	---	M-57.5-A3(2)	---	---	---
	---	---	---	M-57.5-A3(3)	---	---	---
	---	---	---	C-30.0-A3(1)	---	---	---
	---	---	---	C-30.0-A3(3)	---	---	---
	---	---	---	M-45.4-R(1)	---	---	---
	---	---	---	M-45.4-R(3)	---	---	---
	---	---	---	M-45.4-S1-R(2)	---	---	---

ひび割れに前・後面のひび割れを伴う特有の破壊形態（破壊形態BD, ABC, ABD）が見られた。側面ひび割れ貫通後も拘束によってひび割れ面に噛合せが生じることから、急激には耐荷機構を失なわないと考え载荷を続けた結果、新たなひび割れが前・後面に生じた。前面のみにひび割れを生じる破壊形態Cの2体については、試験体の条件が異なることから、破壊形態の観察のみでは損傷過程は推察できない。

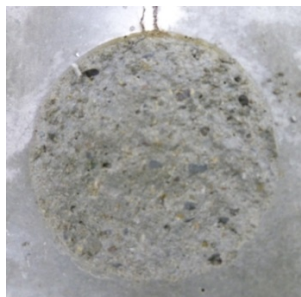
b) 孔内せん断破壊面の確認

図-7に载荷後に試験体を割って確認したPBL側と試験体

側の破壊面の例を、各ケースについて示す。粗骨材を配置しないM-57.5, M-45.4, およびM-45.4-Rシリーズでは、いずれもPBL両面で孔内全面で凹凸の少ないひび割れ面が観察された（図-7(a)(c)(g)）。粗骨材を1つだけ配置したM-57.5-A1では、粗骨材自体が破断していた（図-7(b)）。粗骨材を3つ配置した場合は、周囲をモルタルで充填したM-57.5-A3では粗骨材1つの場合と同様に孔上縁に接着した粗骨材が破断していたが（図-7(e)）、粗骨材を3つ配置しかつコンクリートを用いた試験体C-30.0-A3は、PBLに沿った平面から大きく凹凸したひび割れ面



(a) M-57.5



(b) M-57.5-A1



(c) M-45.4



(d) M-45.4-S1



(e) M-57.5-A3



(f) C-30.0-A3



(g) M-45.4-R



(h) M-45.4-S1-R



図-7 孔内せん断破壊面の例

が形成されていた（図-7(f)）。

孔内に鉄球1つと底面拘束を与えたM-45.4-S1-Rでは鉄球を噛み合わせていない側のせん断面で破壊に至り、孔の面外方向にひび割れが貫通する結果を示した（図-7(h)）。図-6の破壊形態BD, ABC, ABDに相当するものである。

(3) 試験体側面ひずみ

せん断力と試験体側面のひずみに孔内粗骨材が与える影響を確認するため、図-8に各ケースにおける側面ひずみの例を示す。粗骨材を配置していない M-57.5および M-45.4では、PBL孔の高さに近い中部のひずみが 100μ 程度で最も大きく、上部、下部の順で小さく、また最大せん断耐力記録直前にひずみが減少に転じていた（図-8(a)(c)）。この傾向は反対側の面でも同様であった。これに対し、粗骨材を1つ配置したM-57.5-A1では上部と中部のひずみは中段、下段に対して上段が小さい傾向にあ

るが、全体に 50μ に満たない比較的小さいものであった。また最大せん断耐力記録時にひずみも最大値を示している（図-8(b)）。鉄球を1つ配置したM-45.4-S1では、傾向はM-57.5-A1と同じであったが、ひずみの数値は全体的にM-57.5-A1よりも大きかった。

孔内に粗骨材を3つ配置したM-57.1-A3（図-8(e)）とコンクリート試験体C-30.0-A3（図-8(f)）を見ると、いずれも上部、下部のひずみは 50μ に満たない比較的小さいものであるが、最大せん断耐力直前に、試験体中部のひずみが突出して増加していた。鋼板から孔内上縁の粗骨材に伝達された力がさらに接触す周囲の粗骨材に伝わることによって、押し広げ力が大きくなり孔の高さの位置で側面へのひび割れの貫通に寄与、貫通と同時に耐荷機構が失われたことが伺われる。

底面を拘束することによる影響を確認するため、底面拘束のみのM-45.4-Rと孔内に鉄球を1つ配置したM-45.4-

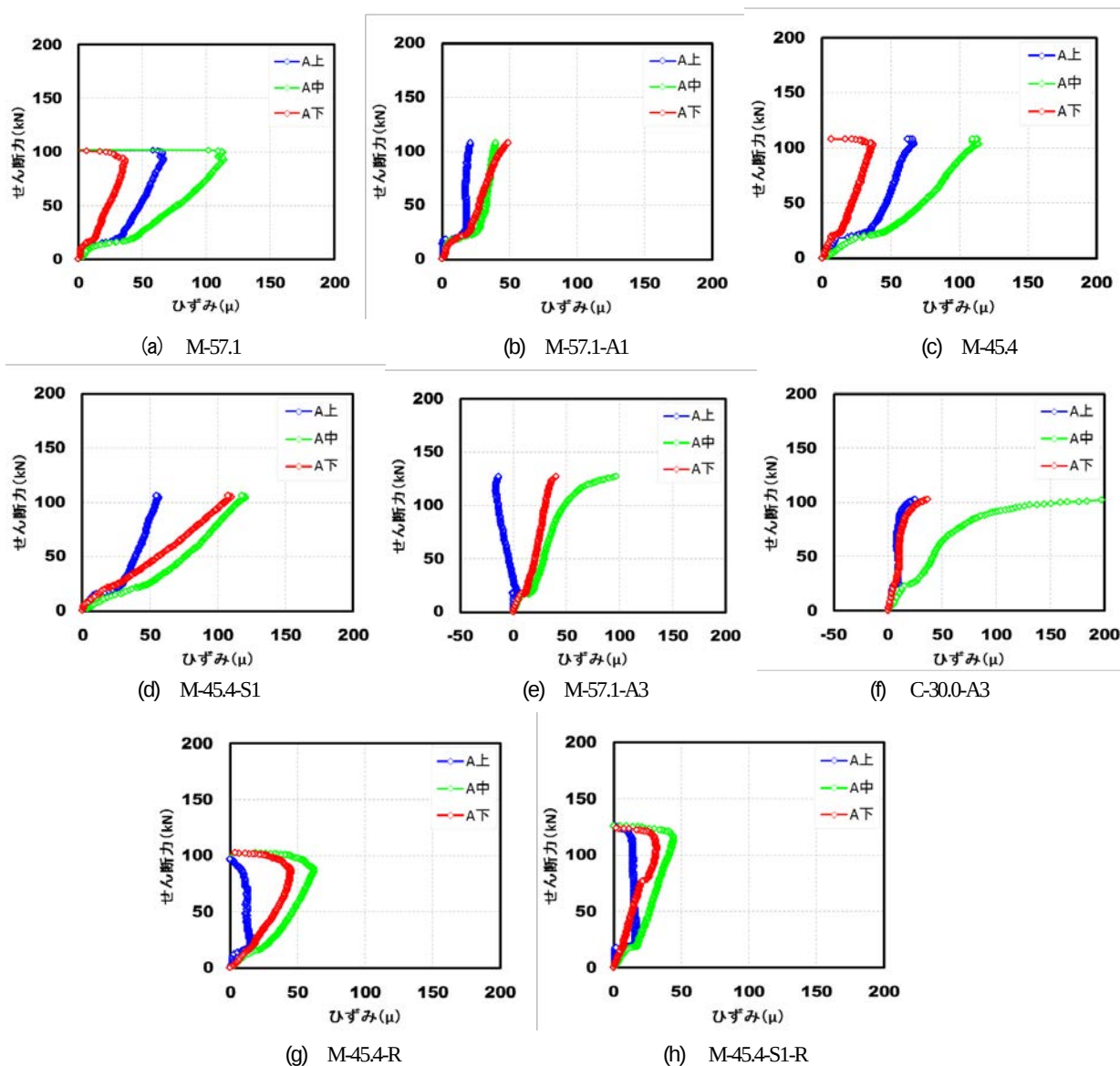


図-8 せん断力ー試験体側面ひずみの例

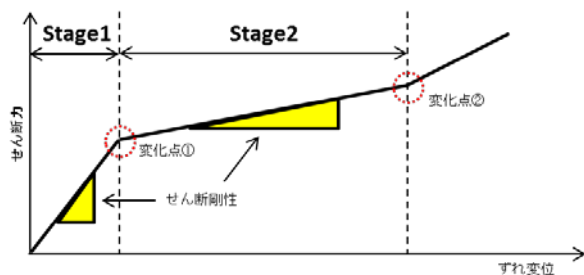


図-9 せん断力-試験体側面ひずみの例

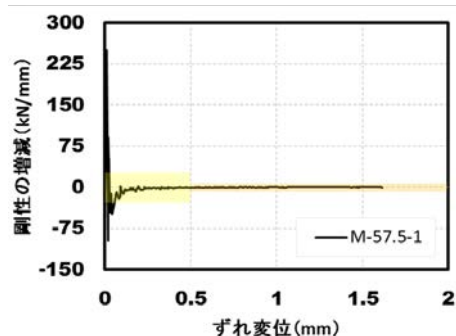
S1-Rの例を図-8(g)および図-8(h)に示す。いずれも底面の拘束を与えるとひずみの値が全体的に小さくなることだけでなく、最大せん断耐力記録直前にひずみが減少に転じるというモルタルのみの試験体でみられた傾向（図-8(a)(c)）が認められた。

4. 考察

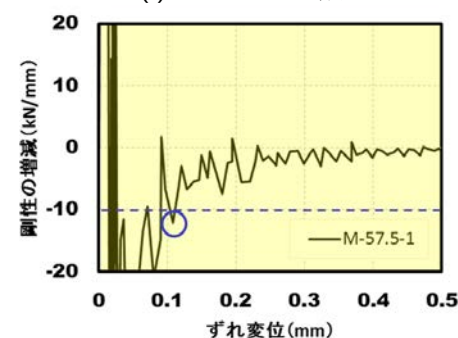
図-5のせん断力-ずれ変位関係より、全体をコンクリートとしたC-30A3を除く他の試験体では、せん断剛性の変化点が2箇所存在すると考えられる。そこで、せん断剛性の変化点2箇所を定義し、本試験体のせん断剛性の変化を定量的に検討するものとした（図-9）。まず、せん断力-ずれ変位関係における各プロットのずれに伴うせん断剛性の増減を求めた例を示す（図-10 (a)）。これより、1つ目のせん断剛性の変化点は、せん断剛性が -10kN/mm 以下になった点とし、2つ目のせん断剛性の変化点は、せん断剛性が $+0.5\text{kN/mm}$ 以上になった点とすることにした（図-10 (b),(c)）。なお、C-30A3ではステージ区分が明確ではないものの、参考のため同様の手法でせん断剛性を検討することとした。

図-11(a)に、ステージ1におけるせん断剛性を示す。ステージ1では、モルタルのみの試験体よりも、孔内に粗骨材、鉄球を1つ配置した試験体のほうが、せん断剛性が低い値を示した。粗骨材を3つ配置したケースでは、モルタルに比べてせん断剛性が高いものも低いものもあって結果はばらついた。粗骨材を1つ配置した場合のみ明らかに初期せん断剛性が低下した原因として、粗骨材、鉄球は孔内上縁に接着剤で接着してため、打設後のブリーディングによって粗骨材下に脆弱層が形成され、かつその影響が粗骨材3つに比べて顕著にあらわれたと考えられる。一方、全体をコンクリートとしたC-30A3では、モルタル試験体よりも明らかに初期せん断剛性は高いことが確認された。

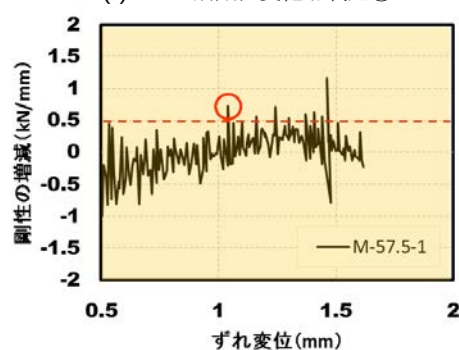
次に、ステージ2におけるせん断剛性を図-11(b)に示す。ステージ1とは逆に、モルタルに比べて粗骨材、鉄球を1つ孔あき鋼板と接着させた場合に、わずかではあるがセ



(a) せん断剛性の増減

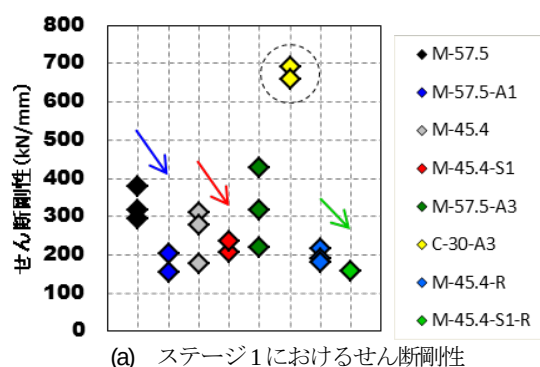


(b) せん断剛性変化点判定①

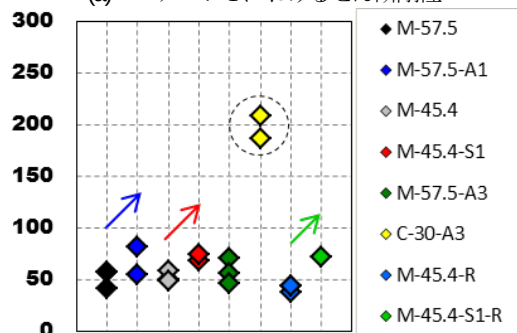


(c) せん断剛性変化点判定②

図-10 せん断剛性の検討方法



(a) ステージ1におけるせん断剛性



(b) ステージ1におけるせん断剛性

図-11 ステージごとのせん断剛性

せん断剛性が高いという傾向が得られた。また、粗骨材を3つした場合、モルタルよりも全体的にせん断剛性は高い傾向であったが、粗骨材1つのものと比べて顕著な差はみとめられない。また、全体をコンクリートとしたC-30A3では、他のモルタル試験体よりも明らかにせん断剛性が高いことがあらためて確認された。

5. 結論

孔あき鋼板孔内での粗骨材の配置と数、強度、および試験体の外部拘束の有無をパラメータとした押抜き試験8ケース24体実施し、せん断力-ずれ変位関係、破壊形態（試験体、PBL孔内破壊面）、試験体ひずみを分析した。以下に結論をまとめる。

- (1) 内部拘束鉄筋のない本実験条件では、PBL孔内上縁付近に粗骨材を配置しても、PBLの最大せん断耐力の上昇はわずかであった。
- (2) PBL孔内に粗骨材を配置することで、せん断剛性が上昇することを、ステージ区分ごとの分析にて定量的に確認することができた。
- (3) その原因として、孔内ひび割れ面の形成後、孔内の粗骨材、鉄球の存在により凹凸が生じるため凹凸面のかみ合わせによりせん断剛性が高くなったことが、孔内は断面の観察より推察された。
- (4) 底面拘束は、最大せん断耐力の数値には大きな影響を及ぼさなかったが、急激な破壊を防ぐためせん断耐力ピーク後にもいづらか変形を観察できた。本研究の実験検討で得られた知見については、今後数

値解析にて検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 中島章典：鋼コンクリート複合構造のずれ止めについて、第9回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，S24-S28，2011
- 2) 保坂鐵矢，杉本一朗：鉄道における最近の鋼・コンクリート複合橋梁，橋梁と基礎，Vol.7，2000
- 3) グエンミンハイ，中島章典，橋本昌利，鈴木康夫：孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼす貫通鉄筋の効果に関する研究，第10回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，29-1-29-8，2012
- 4) 山口隆一，中村善彦，古内仁，上田多門：拘束状態におけるスリット入り鋼パイプを用いたずれ止めの性能評価，土木学会第67回年次学術講演会講演概要集，CS35-36，2012
- 5) 日本建築学会：鋼コンクリート構造接合部の応力伝達と抵抗機構，p.31-33
- 6) 土木学会：複合構造ずれ止めの抵抗機構の解明への挑戦，p.94，2014.8
- 7) 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へのずれ耐力への影響，第9回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.58-65，2011
- 8) 土木学会：2009年制定複合構造標準施工方書，p.67，2009.12
- 9) Yota Manabe, Chikako Fujiyama, Tomoaki KISAKU, Ri-yousuke Shionaga : Influence of Coarse Aggregates on the Shear Resistance of Perfobond Rib Shear Connector, Journal of Procedia Engineering, 95, 454-464, 2014.

FUNDAMENTAL STUDY OF PERFOBOND RIB SHEAR CONNECTOR FOCUSING ON ROLE OF COARSE AGGREGATES IN PERFORATION

Chikako FUJIYAMA, Yota MANABE, Tomoaki KISAKU and Ryosuke SHIONAGA

The push-out tests of perfobond rib shear connector (PBL) were conducted for 24 specimens on 8 cases to clarify the effects of interlocking of coarse aggregates and PBL with the parameter of the number and material of coarse aggregates in perforation and restraint condition of bottom side. Putting one or more coarse aggregates in perforation made the shear stiffness of PBL system stronger, even though it didn't have positive impact on the shear carrying capacities due to splitting of coarse aggregates. Both shear capacity and shear stiffness of PBL were increased by the combination of three coarse aggregates in perforation and dispersed coarse aggregates surrounding the perforation rib. Restraint condition of bottom of specimen improved performance of slip of PBL.