

タイトル	洗出し処理を施したコンクリート接合面のせん断挙動
著者	高橋，良輔；Takahashi，Ryosuke
引用	工学研究：北海学園大学大学院工学研究科紀要(24)：17-23
発行日	2024-09-30

研究論文

洗出し処理を施したコンクリート 接合面のせん断挙動

高 橋 良 輔*

Shear behavior of joint in concrete member connected by wash-out surface

Ryosuke Takahashi*

要 旨

鉄筋をずれ止めとして利用するプレキャスト構造の接合面において、接合面に洗出し処理を施した場合のせん断挙動の予測方法を確立するため、接合をモデル化し、その接合面に洗い出し処理を行った要素供試体に対し、洗出し処理面積とずれ止め筋の有無をパラメータとしてせん断載荷実験を行った。その結果、せん断方向の洗出し長さがせん断挙動に影響し、洗出し長さが短い場合には、洗出し面でのひび割れ発生後のせん断力が、洗出し無しのずれ止め筋単体の場合よりも小さくなることがわかった。また、洗出し長さが長い場合では、ずれ止め筋の有無にかかわらず、洗出し面でのひび割れ発生後におけるひび割れ面せん断応力を、コンクリート標準示方書の予測式は過大評価する可能性が示唆された。

1. 序論

鉄筋コンクリート部材のプレキャスト化は、施工における工程数や作業人員減少による産性の向上が期待できることから、今後さらに利用が拡大されることが予想される。プレキャスト部材のうち、特に大型化されたプレキャスト部材は運搬の制約などから、プレキャスト部材と場所打ちコンクリートを組み合わせたハーフプレキャスト化がなされている。このようなハーフプレキャスト構造を利用する際、プレキャスト部材と場所打ちコンクリートの一体性が構造物の力学挙動に大きく影響するため、プレキャスト部材と場所打ちコンクリートの接合面の性能が構造全体の性能に対して重要となってくる。

プレキャスト部材と場所打ちコンクリートの一体性を確保するため、接合面に作用するせん断力に対するずれ止めとして異形鉄筋を用いる方法がある。この方法は、補強鉄筋の一部をずれ止めとして利用できるという合理性を持っている。現在、非線形有限要素解析により不連続面を含む構造の性能評価が可能となっている。これにより、

従来、仕様规定的に剛で設計していた場合とは異なり、適切な鉄筋の配置や、接合面における破壊をも把握した設計が可能となる。そこで高橋ら¹⁾は、ずれ止めとして異形鉄筋を用いたプレキャスト接合面の性能評価を可能とすることを目的に、鉄筋を跨ぐ接合面を設けた要素供試体に対してせん断実験を行い、接合面の鉄筋のダウエル作用に対する精緻な力学モデルや、せん断耐力、せん断力-ずれ変位関係のマクロ式を構築した。この研究では、接合面のコンクリート間のせん断抵抗を無視しているが、実務ではプレキャストコンクリート接合面は、先打ち面に遅延剤を用いた洗出し処理によって現場打ちコンクリートと一体化処理がなされている。この接合面におけるコンクリート間のせん断抵抗を考慮した接合面のせん断挙動の予測方法については検討が不十分であり、未だ確立していない。

そこで本研究では、ずれ止めとして異形鉄筋を用い、洗出し処理を施したプレキャスト接合面のせん断実験を行い、コンクリート間のせん断挙動について検討した。

* 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻（社会環境系）
Graduate School of Engineering (Civil and Environmental Eng.), Hokkai-Gakuen University

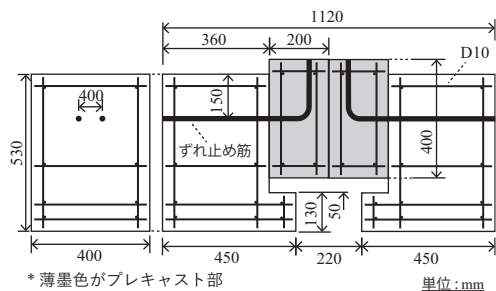


図1 供試体形状寸法

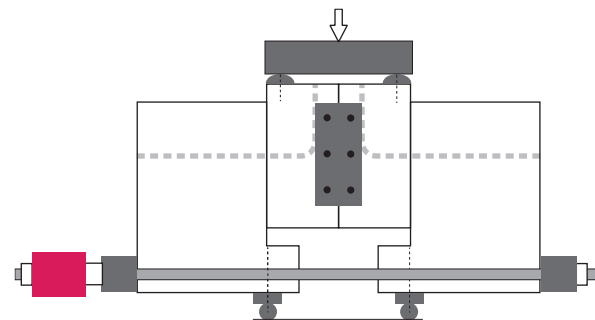


図2 荷重方法

表1 供試体諸元

No.	洗出し処理面積 幅 mm×高さ mm		ずれ止め筋	拘束力 (kN/本)	f_c' (N/mm^2)		最大せん断力 (kN)	破壊モード
	場所	PCa			場所	PCa		
RAW1	全面	400×350	D16	5	32.4	30.3	—	破壊せず
RAW2	全面	400×350			44.9	45.8	—	破壊せず
RPW1	部分	160×60			19.9	21.2	72.2	コンクリート
RPW2	部分	160×60			18.0	18.3	74.0	コンクリート
RPW3	部分	160×60			23.1	26.3	87.2	コンクリート
RPW4	部分	320×60			31.0	34.0	94.9	コンクリート
RPW5	部分	320×120			23.1	26.3	94.9	コンクリート
NPW1	部分	320×120	—	上下開き 制御	44.7	34.4	89.6	接合面ひび割れ
NPW2	部分	320×120			52.7	46.5	39.4	接合面ひび割れ
S16-f65 ¹⁾	—	—	D16	—	69.9	59.8	95.1	鉄筋破断

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本研究に用いた実験供試体は、高橋らの実験供試体¹⁾と同寸法とした。供試体のうち、RPW1の形状寸法を図1に、荷重方法を図2に示す。供試体は、鉄筋が突出した先打ちのプレキャストブロックに後打ちして現場打ちブロックを形成し、これをさらに2つ、添接板や後打ちコンクリートによって結合したものである。プレキャストブロック部に荷重し場所打ち部で支持をする。本供試体については文献1)に詳細が示されているため、それを参照されたい。実験供試体の一覧を表1に示す。実験パラメータは、接合面を跨ぐ接合鉄筋（以降、ずれ止め筋）の有無、洗出し処理面の面積とした。当初、接合面全面を洗出し処理としたRAW1、RAW2を実施したものの、ほとんどずれ変位を生じずに試験機の最大容量に達した。そこで、洗出し処理面積を小さくすることとしたが、洗出し処理面の影響を検討するのに妥当な面

積の大きさが不明確だったため、洗出し処理面積をパラメータとした。このことから、本稿では表1にRAW1、RAW2は示すが、後の議論ではこれらの結果は説明しない。

洗出し処理が無くずれ止め筋のみによるせん断抵抗と比較するため、洗出し処理面積以外同一の供試体諸元である高橋らの実験供試体のうちS16-f65の実験結果¹⁾を用いることとした。これも表1に示す。なおS16-f65の圧縮強度は本実験供試体の範囲に比べて大きい、ずれ止め筋のみによるせん断挙動で、ずれ止め筋破断で終局を迎える場合に圧縮強度はほとんど影響しないことが高橋らの実験から明らかとなっている。

洗出し処理は、型枠塗布型で洗出し深さ3mmの遅延剤をプレキャストブロック側の接合面となる型枠に基準値の100 g/m³を塗布し、打設12時間後に高圧洗浄機で行った。洗出し処理面以外の接合面のせん断抵抗を除くため、その領域にはフッ素樹脂シートを2枚重ねて敷設した。場所打ちブロックはプレキャストブロックの打設後24時間程度で打設した。養生方法は湿布養生とした。

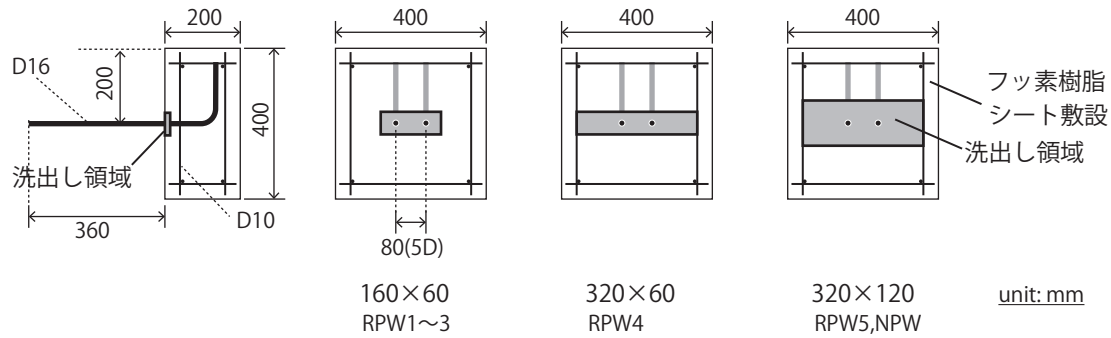


図3 洗出し処理面

2.2 載荷方法

RAW シリーズおよび RPW1~4 は、図 2 に示すようにいずれもローラー支持とし、横方向拘束力が $5.0 \pm 0.5 \text{ kN}$ となるように制御して載荷を行った。横方向拘束力を与えるのは、拘束が無い場合に場所打ちブロックが回転し接合面下側が開くと共に、曲げにより期待しない破壊形態となることがあり¹⁾、これを防ぐためである。そのため、拘束力は供試体下側に与えるようにしている。供試体の両外側に貫通孔を有する H 形鋼を設置してネジふし筋を貫通孔に通し、一方の端部は H 形鋼に定着、もう一方の端部と H 形鋼の間にはセンターホールジャッキを設置し、ネジふし筋に引張力を導入する反力によって横方向拘束力を導入した。RPW5 は、ローラー支持だが横方向拘束力の制御はせず、上下の開きが同一になるように拘束力を制御した。NPW シリーズは床面支持とし、供試体と床面との摩擦を除くために床面上にフッ素樹脂シートを二重で敷設し、その上に供試体を設置した。横方向拘束は、RPW5 と同様に開き制御とした。

2.3 計測項目

変位は図 4 に示すように、場所打ちブロックの上下の水平方向移動量、接合面上下の開き、ずれ止め筋位置 (NPW も同じ位置) のずれ変位を変位計にて計測した。これらはいずれも 2 つの側面 (紙面に向って手前と奥) で計測している。接合面のずれ、開き計測に用いる変位計は治具を介し接着剤によって供試体に固定した。

横方向拘束力はセンターホール荷重計により計測した。

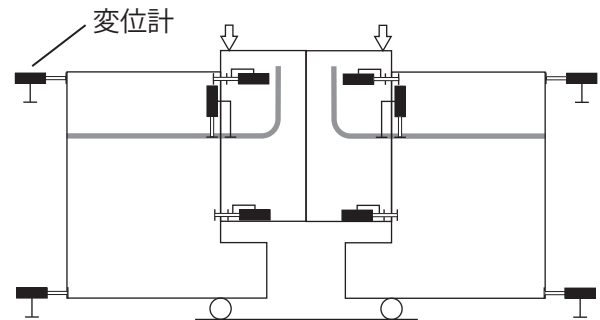


図4 変位計測位置

3. 実験結果および考察

3.1 せん断力-ずれ変位関係

図 5 ~ 図 7 に各供試体のせん断力-ずれ変位関係を示す。なおここでのずれ変位は 4 箇所の計測値の平均値であり、せん断力はずれ止め筋 1 本あたりのせん断力として載荷荷重を 4 で除した値である。洗出し面積が $60 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ で等しい 3 供試体 SPW1~3 と S16-f65 との比較 (図 5) では、載荷開始後、ずれ変位を生じずにせん断力のみ増加し、あるせん断力からずれ変位が生じる挙動は一致する。洗出し面の無い S16-f65 では最もせん断力が小さい 25 kN でずれ変位が生じ始め、次いで RPRW1 と RPRW2 が 35 kN から、最後に RPW3 が 43 kN でずれ変位が生じ始める。RPW1~3 と S16-f65 の差は、洗出し処理面におけるひび割れ発生を表していると考えられる。RPRW1 と RPRW2 に比べて圧縮強度の高い RPW3 がこの差が最も大きいことも、このことを定性的に裏付けている。RC はりのせん断挙動や RC 壁の面内せん断挙動においては、せん断ひび割れ面でずれ変位が生じると、骨材の噛み合せによるせん断伝達作用が同様に働く。ひび割れ発生

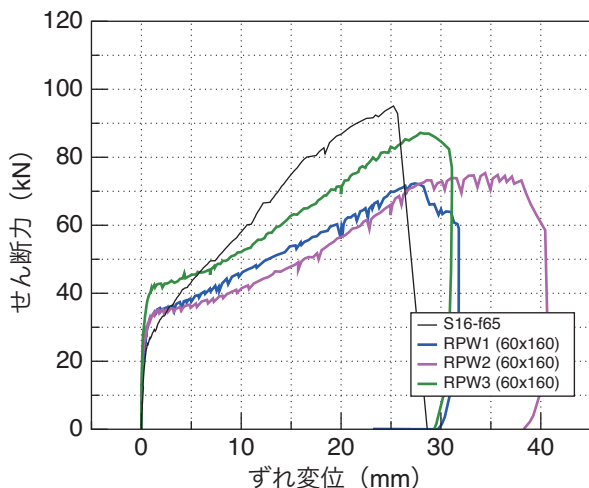


図5 セン断力-ずれ変位関係 (RPW1~3)

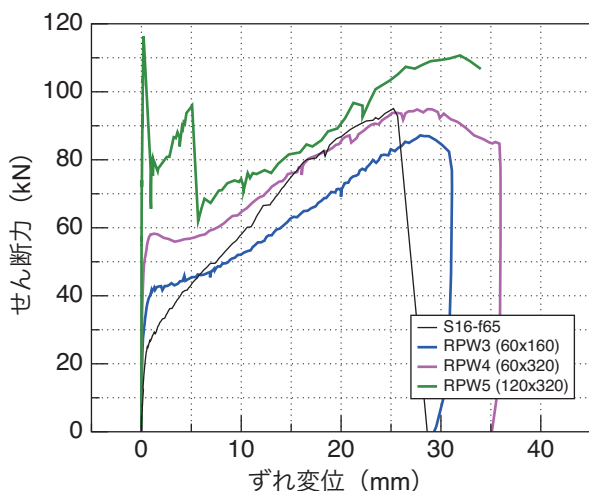


図6 セン断力-ずれ変位関係 (RPW3~5)

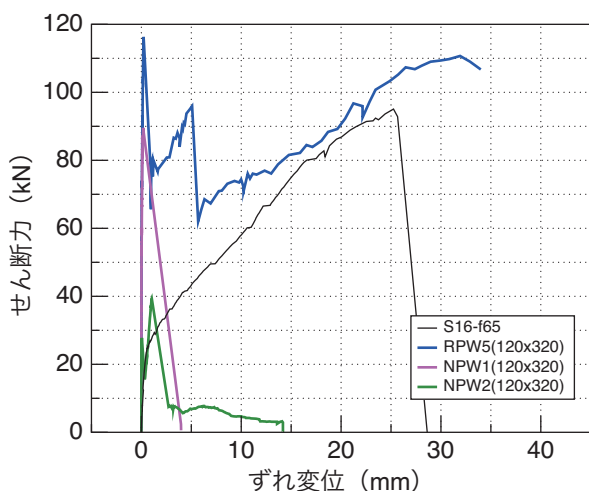


図7 セン断力-ずれ変位関係 (RPW5, NPW1~5)

後の洗出し処理面でもこのせん断伝達作用が同様に働くと考え、ずれ変位が生じた後のせん断力は、せん断伝達作用+ずれ止め筋せん断抵抗となる。しかしながら、SPWの3体はいずれもこのせん断力がずれ止め筋のみのせん断抵抗を示すS16-f65のせん断力よりも比較的小さいずれ変位の段階で下回っている。この原因の1つとして、ずれ止め筋が十分にせん断抵抗できていない可能性が考えられる。なおこの3体はいずれもずれ止め筋が破断せずに終局を迎えており、最大せん断力はS16-f65よりも小さくなった。

洗出し処理面積が異なる3供試体SPW3~5とS16-f65との比較(図6)では、洗出し処理面積が大きくなるごとにずれ変位が生じ始めるせん断力が大きくなり、前述のようにこのせん断力が洗出し処理面でのひび割れ発生であることを示している。ずれ変位が生じ始めるせん断力のRPW4とS16-f65との差は、RPW3とS16-f65との差のほぼ2倍と洗出し処理面積の倍率と同等であるが、RPW4とRPW5ではそのようにならず、RPW5はRPW4に対して2倍以上に大きくなる。このことから、せん断方向における洗出し処理面の挙動に対する影響は幅方向とは異なること、また洗出し処理面の長さに応じて変化することがわかる。また、せん断方向の洗出し処理面積が大きいRPW5では、急激なせん断力減少に伴うピークが2回見られる。実験ではこのせん断力急減ごとに大きな割裂音が観測されていることから、この急減時に急激なひび割れ発生、進展が生じたと考えられる。このことからひび割れ発生メカニズムもせん断方向の洗出し処理面の長さによって変化すると考えられる。

図7は、ずれ止め筋の有無による比較である。ずれ止め筋の無いNPW1は急激にせん断力が大きく減少して終局に至った。このとき大きな割裂音を生じたため、洗出し処理面におけるひび割れ貫通と断定した。なお、せん断力減少後もせん断力は0にはならず、ずれ変位の増加に対して10 kN程度で一定のせん断力となっていたが、供試体形状による変位計測の限界を迎えたため実験を終了している。NPW2もNPW1とほぼ同様の挙動ではあるが、一度、割裂音を生じて急激にせん断力が減少した後、再びせん断力が増加し、再度の割裂音とせん断力減少を生じた後、せん断力が一定となっている。

NPW1のひび割れ発生せん断力と、同一洗い出

し処理面積面積でずれ止め筋を有する RPW5 のひび割れ発生せん断力の差は 25 kN 程度で、洗出し処理面の無い S16-f65 のずれ変位開始せん断力とほぼ一致し、ずれ止め筋と洗出し処理面の挙動が重ね合わせできるような傾向を見させている。一方、NPW2 ではひび割れせん断力が大幅に小さく、RPW5 のひび割れ発生せん断力との差は、S16-f65 のずれ変位開始せん断力をはるかに上回る結果となっている。また、NPW2 のコンクリート圧縮強度は NPW1 よりも高く、定性的に矛盾する結果となっている。この原因については今回の実験結果の範囲では説明することができなかった。

3.2 接合面の開き挙動

図 8 に RPW3~5, NPW の接合面の開き変位を示す。なおここで示す開き変位は、供試体両側面（図 4 の紙面手前と奥側）の平均値である。

洗出し処理面のせん断方向長さが 60 mm と小さい RPW3 と RPW4 はいずれも、左右の接合面の上部があるせん断力で大きく開き始め、開き変位が 2 mm 程度となったあとは変化しなくなる挙動を示した。接合面が開き始めるせん断力は、RPW3 が 40 kN 程度、RPW4 が 60 kN 程度と、せん断力-ずれ変位関係において、ずれ変位が増加し始めるせん断力に一致している。急激な開口を示していないため、ひび割れ発生直後は急激にひび割れ開口せず、ずれ変位の増加に応じてひび割れ面において骨材同士が相互に乗り上げることでひび割れが開く、すなわち接合面開きが増加する。さらに相互の骨材が完全に乗り上がった後は開き変位は一定となり、その変位の値は骨材の露出高さに依ると考えられる。今回、開き変位が 2 mm 程度で一定になったのはこのような機構によると考えられ、また開き変位の一定値 2 mm から想定される骨材の露出高さ 1 mm は今回用いた遅延剤の洗出し深さ 3 mm に収まることから、本想定はおおむね妥当であると言える。なお、下側の開き量が小さいのは、拘束力が供試体の下側で載荷されていることによる。

洗出し処理面のせん断方向長さが 120 mm と大きい RPW5 は RPW3, RPW4 とは異なり、大きな荷重低下と共に左上接合面で開き変位が急激に 0.5 mm 程度増加している。その後は、左上接合面の開きがせん断力の上昇と共に大きく増加する。さらに、2 回目のせん断力低下と同時に右上

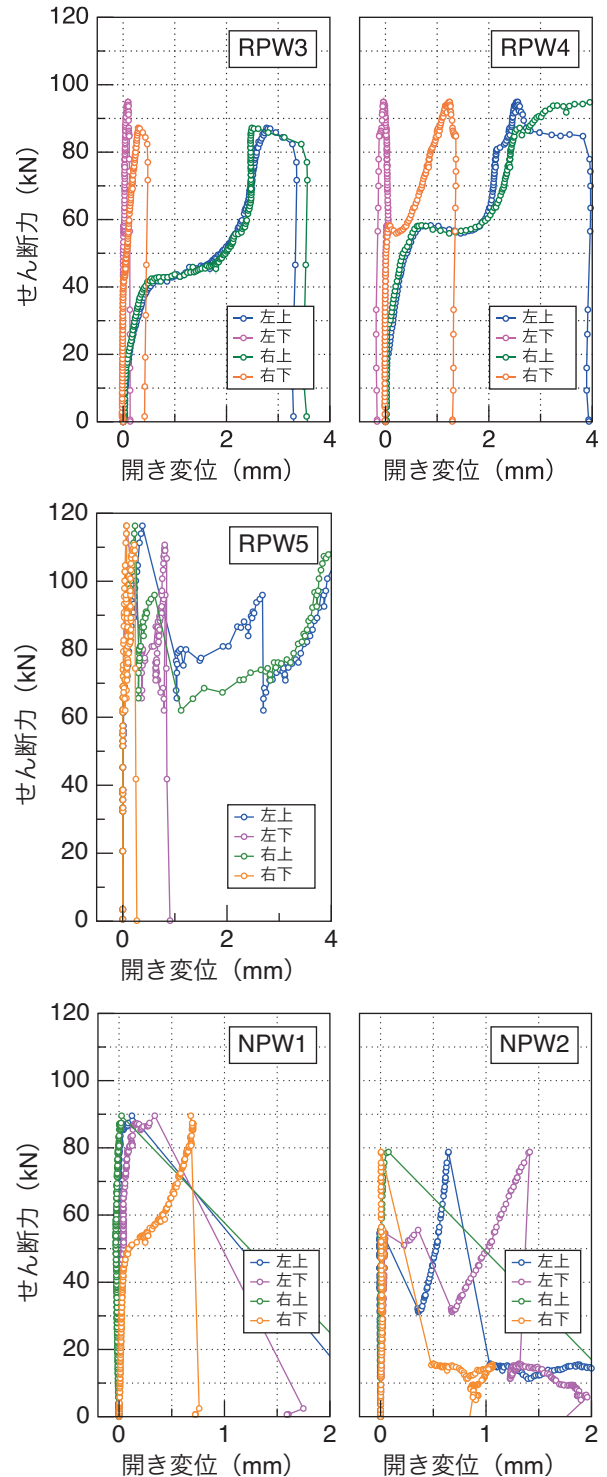


図 8 せん断力-開き変位関係

接合面で開き変位が急激に 0.5 mm 程度増加する。このことから、せん断方向の洗出し処理長さが長い RPW5 では、ひび割れ発生と同時に急激なひび割れ開口が生じ、また、ひび割れ発生時期は左右の接合面で異なっていた、ということがわかる。

ずれ止め筋の無い NPW1, NPW2 はいずれも、大きな荷重低下と共に開き変位が急激に増加している。これは洗出し処理面のせん断方向長さが RPW5 と同じため、この長さが原因とも考えられるが、ひび割れ後も接合面を結合するずれ止め筋が無いことが原因である可能性も考えられる。また、NPW1 では両接合面のひび割れ発生は同時だが、NPW2 では最初の荷重低下で左接合面、次の荷重低下で右接合面の開き変位が急増しており、ひび割れ発生時期は左右の接合面で異なっていたことがわかる。

以上より、洗出し処理面のせん断方向長さによってひび割れ挙動も異なる可能性が示唆された。また、洗出し処理面のせん断方向長さが長い場合、ずれ止め筋が無い場合に左右の接合面のひび割れ発生が同時にならない場合があり、その場合、ひび割れ後の挙動の平均化が困難である。せん断力-ずれ変位関係の検討のためには、洗出し処理面のせん断方向長さを長くするのがよいことは、せん断力-ずれ変位関係の実験結果で示されている。そのため、ひび割れの生じる接合面を1つにするなど、ひび割れ挙動の平均化が容易な方法に改善する必要がある。

3.3 ひび割れ面せん断伝達モデルの適用性

RC はり部材のせん断挙動や RC 壁部材の面内せん断挙動における、ひび割れ面に沿う方向の骨材噛み合せによるせん断伝達応力は、コンクリート標準示方書において、ひび割れ面のずれ変位とひび割れ面での直交方向の開きの関係式として、以下のように示されている。

$$\tau_{st} = f_{st} \cdot \beta^2 / (1 + \beta^2) \quad (1)$$

$$\beta = \delta / \omega \quad (2)$$

ここに、

τ_{st} ：せん断応力（N/mm²）

f_{st} ：ひび割れ面のせん断伝達強度（N/mm²）で、以下の式で表される。

$$f_{st} = 3.81 \cdot f_c^{1/3}$$

ω ：ひび割れ面での直交方向の開き

δ ：ひび割れ面でのせん断ずれ

ずれ止め筋を有する洗出し処理を施した接合面

において、単純にひび割れ発生後はずれ止め筋のせん断挙動とひび割れ面のせん断挙動の重ね合わせが成立つと仮定すれば、高橋らのずれ止め筋のせん断力-ずれ変位関係に式(1)により算定されるひび割れ面のせん断伝達力を足し合せれば、接合面のせん断力が算定可能となる。

せん断方向の洗い出し処理長さ 60 mm の場合は、図 5 より、ずれ止め筋と洗出し処理面のせん断抵抗の合計がずれ止め筋単体のせん断抵抗を下回り、この算定方法が成立たないことが明らかである。そこで、せん断方向の洗い出し処理長さ 120 mm の RPW5 とせん断補強筋の無い NPW に対して、洗出し処理面をひび割れ面と仮定して、ずれ変位、開き変位、ひび割れ面におけるせん断応力の関係の実験値と計算値の比較を行った。

計算値は、実験における接合面開きをひび割れ面での直交方向開き ω 、ずれ変位をひび割れ面でのせん断ずれ δ として式(1)および(2)を適用してせん断応力を求めた。せん断応力は、左右の接合面に対して求めたせん断応力の平均せん断応力とした。RPW5 の実験値は、RPW5 のせん断力から S16-f65 の同一ずれ変位時のせん断力を減じた値を洗出し処理面積で除して求め、NPW1 と NPW2 の実験値は単に荷重を洗出し処理面積で除して求めた。このようにして求めた、洗い出し処理面をひび割れ面と仮定したときのひび割れ面せん断応力とずれ変位の関係を図 9 に示す。なおせん断応力は圧縮強度の影響を除くため、圧縮強度より求めたひび割れ面のせん断伝達強度で除した正規化せん断応力とした。また、本来はひび割れ発生前の変位をひび割れ発生後から除く必要があるが、今回はひび割れ発生が複数回生じる場合など挙動が複雑であったため除かずに算定した。RPW5 と NPW1 ではひび割れ時点の開き変位、ずれ変位は非常に小さいことからその影響は小さいと考えられる。

図 9 の上段に示す PRW5 の比較結果では、ひび割れ後のひび割れ面せん断応力を計算値が過大評価している傾向が見られる。図 9 の中段に示す、ずれ止め筋のない NPW1 の比較結果では、実験値はひび割れ発生によってせん断応力が減少するが、計算値は逆にひび割れ後にせん断応力が増加している。これは、ひび割れ発生後、実験においてひび割れの開き対するずれ変位が大きくなったため、計算上せん断伝達応力が増加したことによる。図 9 の下段に示す NPW2 の場合も、1 回

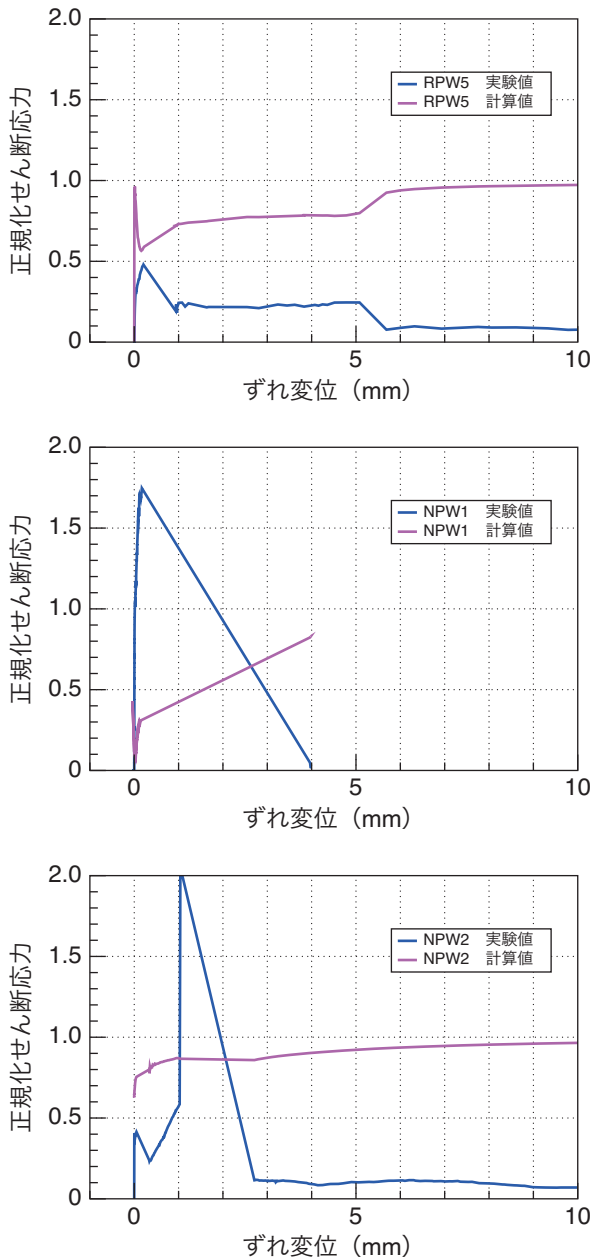


図9 正規化せん断応力-ずれ変位関係（計算値）

目のひび割れ発生後を見ると RPW5 と同様に計算値は実験値を過大評価している。また、2 回目のひび割れ以降も同様である。なお、2 回目のひび割れ発生はずれ変位が大きい段階であり、せん断応力算定において含まれるひび割れ前の変位の影響が考えられるが、図8 から2 回目のひび割れを生じる左側接合面は、ひび割れ前にはほとんど開いておらずその影響はわずかと考えられる。

以上のことから、本実験結果からは断定はできないが、示方書のひび割れ面せん断応力算定式は、プレキャスト構造接合部における洗出し処理面のひび割れ後のせん断応力を過大評価する可能性があると言える。示方書のひび割れ面せん断応力算定式は、RC はり部材の曲げせん断載荷時や RC 壁のせん断載荷時など、ひび割れ面に作用するせん断応力レベルが小さい段階が適用範囲の式と考えられる。一方、今回の実験では接合面のせん断載荷であり、ひび割れ発生後、ひび割れ面には急激に大きなせん断応力が作用する。したがって、作用せん断応力のレベルが適用範囲外である可能性が、示方書式が本実験結果を過大評価する理由の1つとして考えられる。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) プレキャスト接合面の洗出し処理面のせん断方向長さが、接合面のせん断挙動に影響すると考えられる。
- (2) プレキャスト接合面の洗出し処理長さが小さい場合、ずれ止め筋と洗出し処理面を合わせたせん断抵抗は、ひび割れ発生後においては、ずれ止め筋単体のせん断抵抗よりも小さくなる。
- (3) コンクリート標準示方書におけるひび割れ面のせん断応力算定式は、ひび割れ発生後の洗出し処理面のせん断を過大評価する可能性がある。洗出し処理面にひび割れを同時かつ均一に生じさせること、および、ひび割れ後に各接合面に均一に載荷することは困難であるため、今後、接合面を1つにした実験や、鉄筋を細径にしてひび割れの挙動をより支配的にした実験等で、さらに適用性を確認する必要がある。

【参考文献】

- 1) 高橋良輔，島弘，松岡智，土屋智史：ハーフプレキャスト RC 構造の接合面における接合鉄筋のせん断力-ずれ変位関係，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol. 77, No.1, 1-14, 2021.
- 2) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2023