HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ

学校法人北海学園 北 海 学 園 大 学 北 海 斎 科 大 学

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	 髙橋,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

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

洗出し処理を施したコンクリート 接合面のせん断挙動

髙橋良輔*

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 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、仕様規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 載荷方法

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		
RAW1	全面	400×350	D16	D16	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 ト 開 さ 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-f651)	_	_	D16	_	69.9	59.8	95.1	鉄筋破断

表1 供試体諸元

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、載荷方法を図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 ロック部に載荷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が,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100g/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.



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±0.5kN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.



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60mm×160mm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7 せん断力-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 に働くと考えると、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 が重ね合せできるような傾向を見せている.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解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PRW3~5, 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2mm 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2mm 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2mmから想定 される骨材の露出高さ1mm は今回用いた遅延剤 の洗出し深さ3mm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 か,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 カ-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.

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

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

ここに,

- au_{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60mm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 120mm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 のせん断ずれるとして式(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】

- 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