

論文 機械式継手を用いたプレキャスト部材の接合面仕様がずれ挙動に及ぼす影響

吉田 貴彦*1・櫻庭 浩樹*2・古賀 裕久*3・小野 友彰*4

要旨：機械式継手を用いたプレキャスト部材の接合面仕様の違いに着目し、接合面のずれ挙動に関する載荷実験を実施した。接合面仕様としては、洗い出し処理、部材を安定して据え付けるための施工台座および接着剤塗布の有無に着目した。載荷実験の結果、洗い出し処理を施すことによってずれ発生荷重が向上し、ずれせん断強度が約 2 倍になることを示した。施工台座は、断面中央部に配置され洗い出し処理は施されていないが、本実験条件では洗い出し処理面と同程度のずれ抵抗を發揮した。接合面の外縁に塗布した接着剤は、ずれ抵抗の向上には寄与しないものの、ずれ発生時点では接合面の界面の開きに追従していることを示した。

キーワード：プレキャスト、機械式継手、接合面仕様、ずれ挙動、洗い出し

1. はじめに

コンクリート構造物の建設における生産性向上の観点から、プレキャスト部材の活用推進が期待されている。プレキャスト部材を用いたカルバートや擁壁等の道路構造物構築では、現地で部材を接合する工法が導入されることで、プレキャスト部材の適用範囲が拡大している。その横断方向の接合箇所では、生産性向上の観点からは、同一断面に機械式継手を集中させて配置することが望ましい。

このような背景から、土木研究所と道路プレキャストコンクリート製品技術協会では共同研究を行い、同一断面に機械式継手を配置した場合の曲げおよびせん断の耐荷性状に関して検討してきた¹⁾²⁾。また、正負交番載荷を受けた場合の耐荷性状を明らかにするため、横断方向に接合したカルバートの隅角部付近を再現した部材を用いた実験を行った³⁾。これらの実験から、同一断面に機械式継手を集中させた場合にも、接合部がない場合と同等の耐荷力と変形能を發揮できる可能性を示している。ただし、このような性能を發揮するための前提となる接合面の仕様については十分には検討できていなかった。

機械式継手の接合面仕様(写真-1)の実態を調査した結果、洗い出し処理を施していること、機械式継手の接合の際に部材を安定させて据え付けるための施工台座があること、接着剤を塗布して接合する場合があるがこれらの詳細は製造者によって異なっている。このような接合面仕様の違いは、接合面におけるずれ抵抗性に影響を及ぼすおそれがある。ずれ抵抗性が低下すると接合面が開きやすくなり、劣化因子の侵入によって、内部鋼材の腐食やコンクリートの劣化につながる事が考えられる。

なお、本研究では、荷重-変位関係において変位の挙動が急激に変化する時点をずれの発生と定義とし、その時点の荷重をずれ抵抗性として評価した。

そこで、プレキャスト部材の接合面仕様の違いがずれ抵抗性に及ぼす影響を検討するため、洗い出し処理、施工台座および接着剤の有無を実験パラメータとして、5種類の試験体を用いた載荷実験を行った。

2. 接合面のずれ挙動に着目した載荷実験

2.1 試験体

プレキャスト部材接合面のずれ抵抗性の検討にあたり、実施工の再現や粗骨材の噛み合わせの影響等を考えると、実大の断面を用いることが望ましい。このため、試験体の断面は、過去の正負交番載荷実験³⁾で用いた試験体と同じ諸元とした。試験体は、既往研究⁴⁾で接合面のずれ挙動を検討した試験体を参考に、L形ブロックと直方体ブロックを機械式継手により接合する形状とした。試験体形状を図-1a)に示す。このような試験体を用いて載荷を行うことで、接合面の違いがずれ挙動に与える影響を捉えられることが報告されている⁵⁾。試験体の配筋状況を図-1b)に示す。試験体の接合に用いた機械式継手は、等級 SA のモルタル充填継手とした。機械式

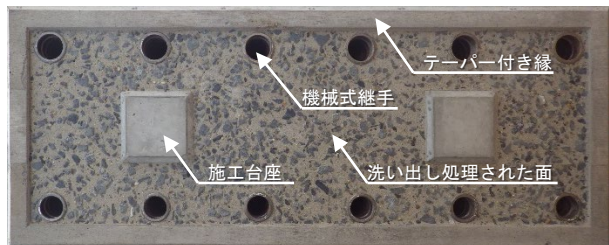


写真-1 接合面仕様の例

*1(国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 交流研究員 修士(工学) (正会員)

*2(国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3(国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*4(一社) 道路プレキャストコンクリート製品技術協会 技術委員会指針部会 カルバート工分科会委員 修士(工学)

継手の長さおよび外径は、D19用は285mmと49mm、D22用は325mmと53mmである。接合面は幅20mm程度の目地を有しており、L型ブロックと直方体ブロックを製作した後に、モルタルを継手及び目地部をモルタルで充填して一体化させた。モルタルの施工概要を図-1c)に示す。機械式継手におけるモルタル注入口と排出口は、鉛直上に向いている。図-2に示す通りモルタル充填の際に目地部のシーンを円滑に行うために接合面の端部にはテーパを付けた縁を設けている。この縁は、型枠形状を工夫してコンクリートを打ち込むことで形成している。

試験体の設計は、直方体ブロックを片持ち梁とみなし、接合面にずれが生じる前に引張鉄筋（引張鉄筋比0.7%）が降伏しないように配筋を検討して行った。

コンクリートは、呼び強度40、スランプ15cm、粗骨材の最大寸法20mmのレディミクストコンクリートとし、28日以上気中で養生してから実験に供した。コンクリートの配合を表-1に示す。載荷実験にあわせて実施した圧縮強度および引張強度の試験の平均値を表-2に示す。モルタル充てん継手用のモルタルは、製造時基準強度80N/mm²のものを使用した（表-2）。接着剤は、湿気硬化型の1成分型エポキシ樹脂系を使用し、モルタル施工前に塗布した。使用した引張鉄筋D22の降伏強度は、385N/mm²であった。

2.2 接合面仕様と粗度の測定

接合面仕様は、洗い出し処理、施工台座および接着剤の有無をパラメータとして、表-3に示す5種類とした。Case1は、洗い出し処理、施工台座および接着剤が無い場合であり、比較用に用いた。Case2は、Case1に対して洗い出し処理を施し、その影響を検討するために用いた。Case3は、Case2に対して施工台座を設けたものであり、その影響を検討するために用いた。Case3は、過去の正負交番載荷実験³⁾の試験体接合面と同じ仕様であり、実構造で用いることを想定したものである。Case4は、Case3に対して施工台座の面積を大きくしてその影響を検討したものである。最後に、Case5はCase1に対して外側の縁に接着剤を塗布してモルタルを充填したものである。Case1~4では、外側の縁同士は直接接触せず、シーリング材を目地の表面に配置してモルタルを充填した。これに対してCase5は外側の縁同士を直接接着するため、図-2b)に示す通り接着剤が塗布できるように縁の寸法を調整した。なお、目地の幅は、Case5も含めてすべて20mmとして条件が変わらないようにした。

洗い出し処理後の表面に対し、粗度の測定を行った。測定方法は、断面の幅が1000mmと大きいことや試験体の製作ヤードでの測定が必要であったことから、既往研究⁵⁾を参考に型取りゲージを用いた測定を行っ

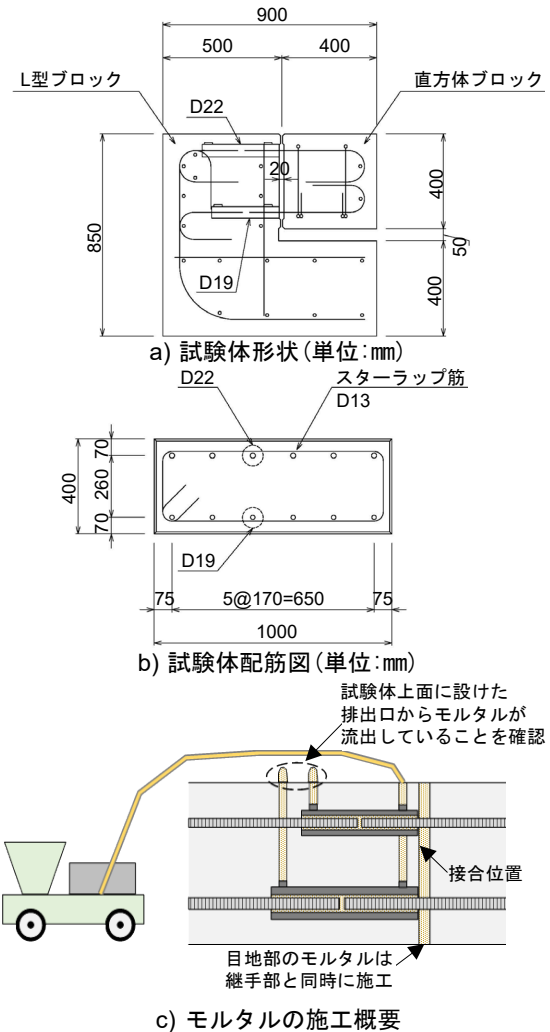


図-1 試験体の形状、試験体配筋図およびモルタルの施工概要

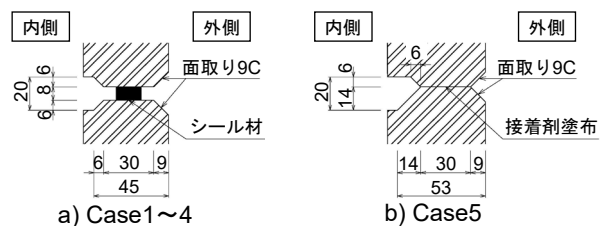


図-2 接合面端部の詳細断面図(単位:mm)

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
40.3	42.6	165	409	719	1004

表-2 材料物性値

材 料	σ_c	σ_t	σ_a
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
コンクリート	61.7	3.8	—
モルタル	94.0	7.2	—
※接着剤	65.0	17.0	14.5

σ_c :圧縮強度, σ_t :引張強度, σ_a :引張せん断強度, ※メーカー測定値

た。本研究では、幅 150mm の型取りゲージを使用し、Case2～4 の試験体の接合面において長さ 900mm の一測線（表-3）を 6 回に分けて測定を行った。接合面に押し当てた後のゲージ形状の画像を取得し、その画像を CAD で処理して凹凸の最大値の中間高さ（平均値）を基準線として高さの変化を求めた。得られたゲージ高さのデータから JIS B 0601 による最大高さ粗さ（Rz）および十点平均粗さ（RzJIS）を算定した。その結果、それぞれ 2.8～3.2mm および 1.7～2.1mm であり、Case2～4 で洗い出し程度の違いは大きくなかった。洗い出し処理を行っていない Case1, 5 は、型枠面であることから表面が平滑であり、型取りゲージでは凹凸の測定はできなかった。

2.3 荷重方法と変位・ひずみの測定方法

荷重方法ならびに変位およびひずみの測定方法を図-3 に示す。荷重点には、幅 400mm、板厚 40mm、奥行 1000mm の鋼板を設置し、この上に奥行き 1000mm の荷重治具を設置して荷重を行った。荷重アクチュエータには、偏心がないように、奥行き 1000mm を超える荷重梁を取り付けて、直方体ブロック全体を荷重した。

接合面のずれ変位を測定するため、直方体ブロックの正面と背面の上下端より 135mm の位置にカンチレバ型変位計を合計 4 台設置した。接合面の水平方向の変位を測定するために直方体ブロック背面側の上下端部より 50mm の位置には変位計を 2 台設置した。

接合面付近のひずみ挙動を測定するため、直方体ブ

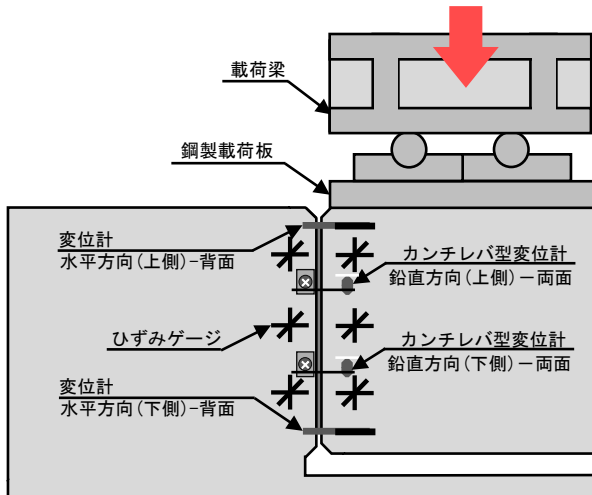


図-3 荷重状況と各測定機材設置

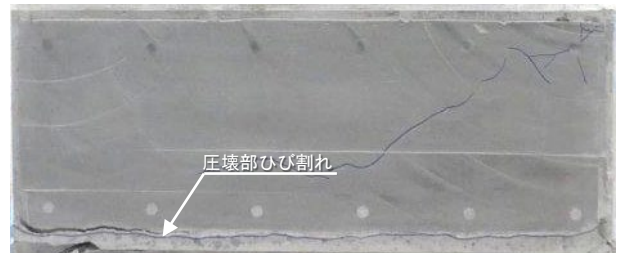
ックと L 形ブロックの正面の接合面付近 6 箇所、三軸方向にひずみゲージを貼り付けた。

3. 接合面のずれ挙動に着目した荷重実験結果と考察

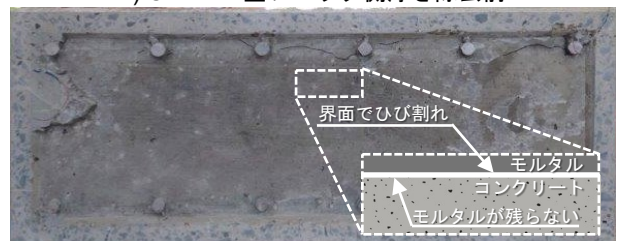
3.1 破壊までの全体挙動

荷重-ずれ変位の関係を図-4a) に示す。変位は、正の値が鉛直下向きを表す。いずれの試験体も 400kN 程度以下の荷重レベルで剛性が低下し、接合面付近にひび割れは認められなかった。ひび割れの発生状況は試験体によらず同様であり、Case3 の例を図-5a) に示す。その後、1300～1400kN 程度の荷重レベルで剛性が急激に低下している。前者の剛性低下は目視では確認できない接合面にずれが生じた影響と考えられ、3.3 節で考察する。

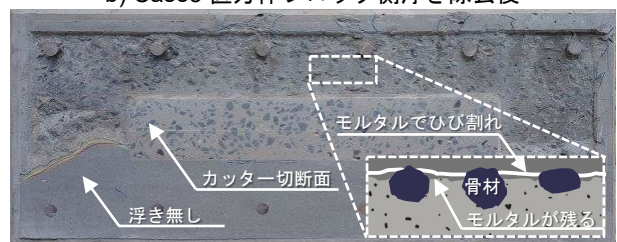
後者の剛性低下は、直方体ブロックを片持ち梁とし、引張鉄筋の降伏応力の試験値を用いて算定した降伏荷重が 1350kN 程度であることから、鉄筋の降伏によるものと考えられる。Case1 と Case5 は、剛性の急激な低下と



a) Case1 L型ブロック側浮き除去前



b) Case5 直方体ブロック側浮き除去後



c) Case4 直方体ブロック側浮き除去後

写真-2 荷重試験後の接合面切断面

表-3 接合面仕様のケース

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
洗い出し処理	無	有	有	有	無
施工台座	無	無	有	有	無
接着剤	無	無	無	無	有
接合面イメージ					

斜線: 洗い出し処理, 点線: 接着剤塗布, 破線: 粗度の測定位置

同時に破壊が生じた。Case2～Case4 は、1700kN 程度の荷重を示しているが、Case3 は 1680kN に達した後に破壊が生じ、Case2 と Case4 は試験機の最大載荷容量に到達したため除荷したものである。

洗い出し処理が無い Case1 と Case5 に対し、洗い出し処理がある Case2～Case4 で荷重が増加したのは、鉄筋降伏後の抵抗機構が異なり、洗い出し処理がその前提条件であると推察される。載荷スパンに対して断面高さが小さいためにストラット-タイのような抵抗機構が発現していたと思われるが、本研究は最大荷重ではなく、ずれ抵抗性を評価することを目的としているため詳細な考察は省略する。

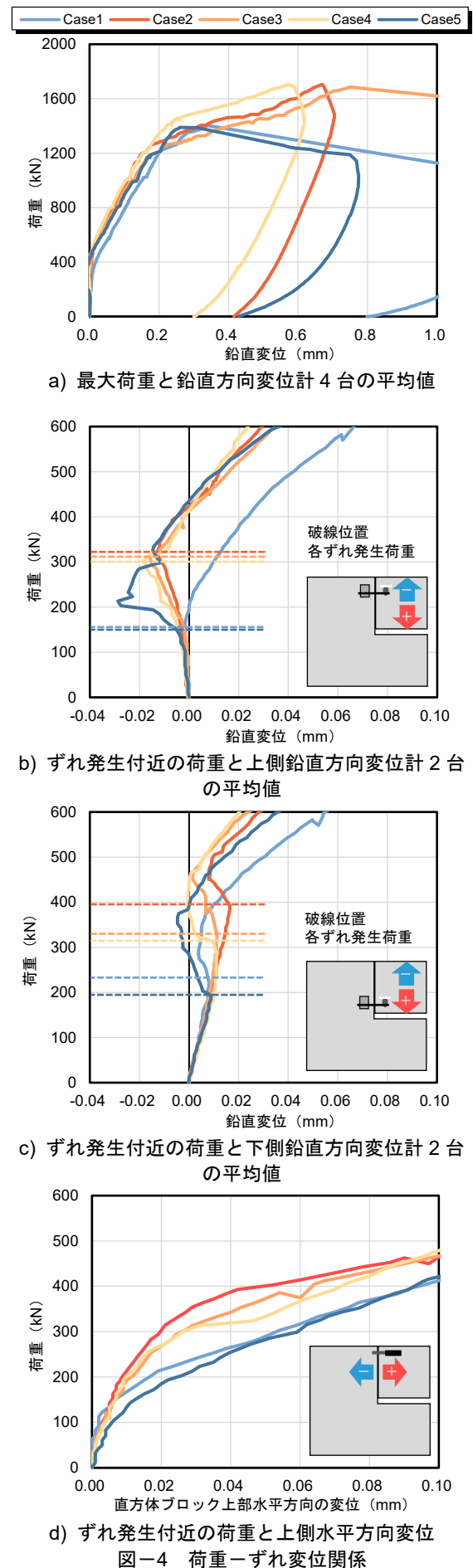
3.2 載荷後の接合面の観察

載荷終了後にコンクリートカッターを用いて接合面を切断し、切断面の観察を行った。写真-2a) に示すように圧縮側テーパ付き縁(図-2)に水平ひび割れが生じていた。これは破壊が確認された Case1, Case3 及び Case5 に共通したひび割れであり、テーパ付き縁が圧壊したと推察される。

さらに写真-2b), c) に示すように切断面の浮きが確認された部分を除去して観察を行った。Case1 と Case5 では充填モルタルとコンクリートの界面の浮きが顕著であり、打撃により容易にモルタルが剥離し、接合面にモルタルは残らなかった。Case2～Case4 では浮きは認められたものの、打撃により容易にモルタルは剥離せずに、洗い出し処理面の骨材間にモルタルが残っていた。以上から、洗い出し処理の有無の影響で、ひび割れ状況が異なっていたことから、充填モルタルとコンクリートの界面の付着性状が異なっていたことが確認され、ずれが発生した状況が異なっていたと推察される。

3.3 ずれ発生時点の挙動

ずれが発生したと考えられる荷重レベルと直方体ブロックの上側と下側のカンチレバ型変位計の平均値との関係を図-4b), c) に示す。本研究では、変位の挙動に着目し、変位が急激に変化する点をずれ発生時点と捉えている。この定義の妥当性について、以下で考察する。変位は、正の値が鉛直下向きを表す。上側カンチレバ型変位計の平均値の挙動から、Case5 の絶対値がやや大きいものの、200～300kN 程度まではいずれの試験体もわずかに負の値を示していた。荷重を大きくすると、Case5 では 140kN 程度から傾きが急激に小さくなった。その後、全ての Case で変位の方向が反転して鉛直下向き方向の変位を示している。下側カンチレバ型変位計の平均値の挙動から、最初は鉛直下向きに変位していたことが確認できる。その後、変位の方向が反転して鉛直上向き方向の変位を示し、さらに荷重が増加すると鉛直下向き方向の変位を示している。直方体ブロックの上側と下側の変位



の挙動から、変位が急激に増加またはその方向が反転する際にずれが生じたものと推察される。各 Case でずれが生じたと考えられる時点を図-4b), c)に破線として示す。この点は、次節でさらに考察する。

荷重と直方体ブロック上側の水平変位の関係を図-4d)に示す。水平変位の正の値は、接合面が開く方向である。また、直方体ブロック下側の水平変位は図示していないがほとんど生じておらず、ほぼゼロであったため、接合面が開く方向に変位していることがわかる。また、荷重が大きくなるにつれて傾きは小さくなっており、傾きが小さくなる点は上述の鉛直方向の変位が反転する時点と概ね対応している。以上から、直方体ブロックは、鉛直方向にずれるだけではなく、時計回りに回転していたと考えられる。図-4b), c)において鉛直上向きに変位した要因について、直方体ブロックが回転したことを踏まえて幾何学的に説明できるかを検討したが困難であった。また、変位が微小であることから、カンチレバ型変位計自体の傾きの影響も確認したが、いずれも問題なく設置されていた。鉛直方向上向きに変位が生じた理由は不明ではあるが、全試験体共通で生じた挙動であるため相対的な比較はできると判断した。

3.4 ひずみ挙動

Case2 においてずれが発生したと考えられる前後の荷重レベル 200kN 付近と 400kN 付近の主ひずみを図-6 に示す。主ひずみの絶対値は、10~100 μ 程度である。200kN 付近の結果から、最小主ひずみは鉛直軸に対して時計回りにやや傾いており、直方体ブロックに作用した荷重は、接合面に対してやや斜めに伝達されていたと考えられる。400kN 付近の結果から、L 形ブロック側最上部の最小主ひずみの角度の変化が大きくなることが確認できる。ずれの発生により、荷重伝達の向きが変化したと推察される。各試験体の L 形ブロック側最上部の最小主ひずみの角度の結果を図-7 に示す。最小主ひずみの角度は、鉛直軸を起点に時計回りを正としたものである。角度の変化の度合いは異なるものの、いずれの試験体も荷重初期には 20~30 $^{\circ}$ 程度であったものが、200kN~400kN の荷重レベルには 35~70 $^{\circ}$ 程度に変化している。角度の変化が顕著となる荷重レベルは、前節で示した変位が急激に増加またはその方向が反転する荷重レベルと概ね対応している。このため、変位が急激に増加またはその方向が反転する荷重点をずれが発生したものと捉え、接合面のずれ抵抗性を評価することとした。

3.5 ずれ抵抗性の評価

ずれ発生荷重と施工台座を除いた接合面の面積比の関係を図-8 に示す。ずれ発生荷重は、図-4b), c)において、変位が急激に増加またはその方向が反転した時点の荷重とし、各 Case の上側・下側変位計の平均変位で該

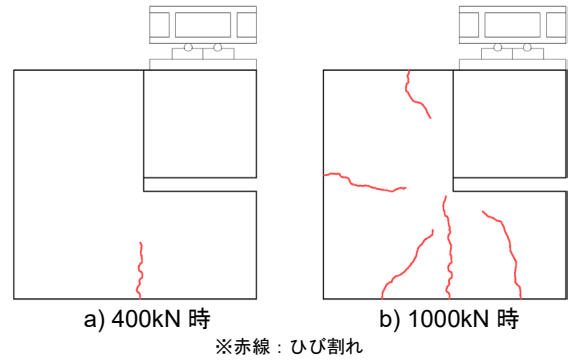


図-5 Case3 背面側ひび割れ図

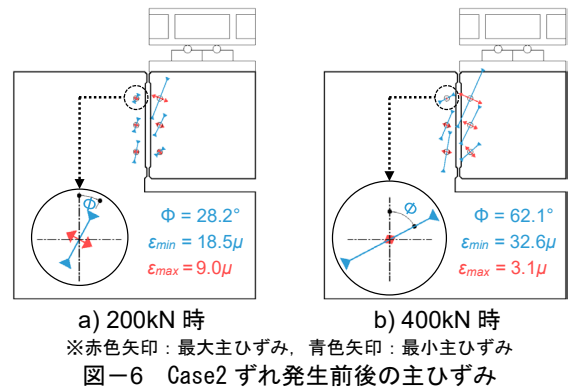


図-6 Case2 ずれ発生前後の主ひずみ

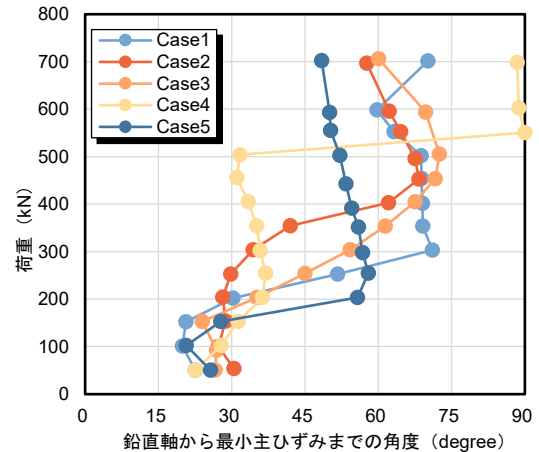


図-7 荷重-最小主ひずみ角度の関係

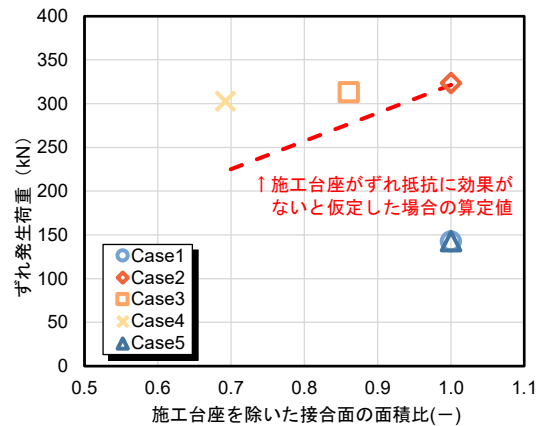


図-8 ずれ発生荷重-施工台座を除いた接合面の面積比の関係



写真-3 Case5 接合面ひび割れ状況 (1000kN 時)

当する時点の荷重の最小値を採用した。施工台座を除いた接合面の面積比は、各試験体の施工台座を除いた接合面積を施工台座がない Case2 の接合面積 (910×310mm) で除して求めたものである。なお、いずれの試験体でもテーパー付き縁の面積部分は除いている。

Case1 と Case5 のずれ発生荷重は、いずれも約 140kN である。この荷重を接合面積で除した値をずれせん断強度と定義すると、0.5N/mm² となる。Case2, Case3 および Case4 のずれ発生荷重は、それぞれ、約 320kN, 約 310kN および約 300kN 程度であった。Case2 のずれ発生荷重を接合面積で除すと、ずれせん断強度は 1.1N/mm² となる。

次に、施工台座の効果について考察する。施工台座がずれ抵抗に効果がないと仮定すると、Case2 で得られたずれせん断強度に施工台座を除いた接合面の面積を乗ずることで、ずれ発生荷重を算定できると考えられる。この算定結果を図-8 に赤破線で示している。実験結果と算定結果を比較すると、施工台座がある Case3 と Case4 は、算定値よりもずれ発生荷重が大きい。直方体ブロック側と L 形ブロック側の施工台座はモルタル施工時に接触し、施工台座周囲はモルタルで充填されて拘束されるため、施工台座は、ある程度のずれ抵抗を発揮したと考えられる。本実験の接合面仕様の範囲では、Case2~4 のずれ発生荷重の相違は 20kN 程度とわずかであり、図-4 のずれ変位が反転する挙動も類似していることから、これらの接合面仕様の挙動は同等と考えられる。

最後に、接着剤の効果について考察する。Case5 はテーパー付き縁に接着剤を塗布して接合したものであり、接着剤の引張せん断強度 (メーカー測定値 14.5N/mm², 表-1) に塗布面積を乗じると約 1100kN となる。実験において、接着剤とコンクリート界面のひび割れ (写真-3) を目視で確認できたのは約 1000kN であり、算定値と概ね対応する。ずれ発生荷重は 140kN ではあったが、約 1000kN までは変形に追従していたと考えられる。接着剤はずれ発生荷重の向上には寄与しないものの、ずれの量がわずかであれば接合部界面の開きからの劣化因子の侵入抑制には寄与すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、プレキャスト部材接合面仕様の違いがず

れ抵抗性に及ぼす影響を検討するため、洗い出し処理、施工台座および接着剤の有無を実験パラメータとした 5 種類の試験体を製作し、接合面のずれ挙動に着目した載荷実験を実施した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- 1) 本研究では、荷重-変位関係において、変位が急激に増加またはその方向が反転した時点の荷重をずれ発生荷重と定義して評価を行った。洗い出し処理を施したことにより、ずれ発生荷重が向上してコンクリートと充填モルタルとのずれせん断強度は約 2 倍となり、洗い出し処理の効果は大きいことを示した。
- 2) 接合面の中央部付近に施工台座を設けた場合のずれ発生荷重を比較した結果、本実験で検討した範囲の施工台座であれば、洗い出し処理面と同等のずれ抵抗性を示した。
- 3) 接合面の外縁に塗布した接着剤は、鉛直下向きの載荷によるずれ発生荷重の向上には寄与しないものの、ずれ発生時点では界面の開きに追従しており、劣化因子の侵入抑制には寄与すると考えられた。

なお、本研究は、(国研) 土木研究所と (一社) 道路プレキャストコンクリート製品技術協会が実施している「プレキャスト製ボックスカルバートの接合部に対する耐荷性能の評価に関する共同研究」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 櫻庭浩樹, 古賀裕久, 高松芳徳, 井上幸一: 同一断面に機械式継手を用いたプレキャスト部材接合部の曲げ挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.613-618, 2019
- 2) 櫻庭浩樹, 古賀裕久, 小野友彰, 高松芳徳: せん断スパン内に機械式継手を配置したプレキャスト部材接合部の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, pp.553-558, 2024.7
- 3) M. Ohsumi, T. Ono, Y. Takamatsu, and A. Hiroe: Experimental study on in-plane seismic resistance of precast box culverts, Proceedings of World Conference on Earthquake Engineering, Jul.2024
- 4) 土木研究所, プレストレスト・コンクリート建設業協会: 橋梁用プレキャスト PC 部材の接合技術に関する共同研究報告書 (II) - ずれ止め鉄筋及びスタッドの挙動 -, 第 370 号, 2008
- 5) 金森拓也, 川邊翔平, 森充広: 型取りゲージを用いた水路の摩耗測定手法の効率化に向けた画像解析プログラムの開発, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 22 巻, 1039, 2022.10