

論文 機械式定着を接合に用いたプレキャストウイングの破壊挙動

高橋 良輔^{*1}・島 弘^{*2}・國嶋 典裕^{*3}・近藤 和仁^{*4}

要旨：プレキャストウイングとボックスカルバート側壁の双方から突出した接合用の定着鉄筋を、機械式定着により両部材間の現場打ち鉄筋コンクリート柱へ定着して両部材を接合する新たな接合方法を対象とし、部材交差角の異なる実物大供試体の載荷実験によってその破壊挙動を検討した。その結果、現場打ち鉄筋コンクリート柱の端部から定着鉄筋の間でウイングの主鉄筋が降伏して曲げ破壊断面が形成されること、ウイングに生じる圧縮鉄筋に沿うひび割れが破壊挙動に影響を及ぼすことがわかった。また、破壊性状の考察で得られた知見を曲げ耐力算定に考慮することで、最大荷重を概ね評価することができた。

キーワード：プレキャスト、ウイング、カルバート、接合部、機械式定着

1. はじめに

プレキャスト（以降、PCa）ボックスカルバートにウイングを設ける場合、ウイングは現場打ちとすることが多かったが、さらなる生産性の向上を目指し、ウイングもPCaとする工法が望まれている。その接合方法として、機械式定着を接合に用いる方法が考えられる。機械式定着を適用することで、鉄筋加工や施工精度の面から生産性の向上が期待できる。

PCa ウイングとカルバートの側壁、双方から突出した鉄筋の先端に定着具を設置し、この鉄筋を現場打ちの鉄筋コンクリート柱（以降、定着柱）に定着して両部材を接合する。この場合、ウイングとカルバート、定着柱との接合面が構造上の弱点になると考えられる。また、同様に部材を直角方向に接合した PCa-CFT 複合カルバートの破壊挙動¹⁾では、接合部近傍における PCa 部材の主筋の途中定着が複雑な破壊性状の原因となることが示されている。本構造でも、このような細目が破壊性状に影響を及ぼす可能性も考えられる。そこで、本研究では PCa ウイングとカルバートを機械式定着によって接合した実物大供試体による載荷実験を行い、その破壊挙動と最大荷重の算定方法について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本実験で用いる供試体の諸元を表-1 に、供試体の形

状寸法を図-1 に示す。供試体は、PCa ボックスカルバートの壁部材（以降、BOX）と PCa ウイング部材（以降、ウイング）をそれぞれ交差角 60°、90°、120° で接合した実物大のものである。なお、ここでの交差角とは土中側になる方の角度であり、図中では No.1 供試体（60°）と No.2 供試体（90°）はウイングより下側が、No.3 供試体（120°）はウイングより上側が土中側となる。BOX とウイングからはそれぞれ平面内で 2 本、断面内で 6 本、合計 12 本の接合用の鉄筋（以降、定着鉄筋）が突出しており、これらは現場打ちコンクリートで製作される定着柱（図中の薄墨色の領域）にて定着、接合される。したがって、この定着柱は土中に設置されることとなる。図-2 は定着柱の形状寸法図である。ウイング側の定着鉄筋は部材軸方向の鉄筋を直角に折曲げて部材外側に突出しているが、BOX 側の定着鉄筋は、BOX 内部の折曲げ鉄筋と機械式継手により結合される。

BOX とウイングの断面寸法および諸元は 3 供試体で同一であり、また、定着鉄筋も D25、SD345 で同一である。ただし、交差角に応じて定着柱の断面寸法、定着鉄筋の定着長、BOX とウイングの長さが異なる。供試体の設計は、道路土工-カルバート工指針²⁾に準拠し、作用土圧の合力をウイングの BOX 側端部までの距離をモーメントアームとする作用モーメントに換算して、ウイング断面および定着鉄筋の定着長を設計した。

使用した材料の諸元を表-2 に示す。機械式継手と機

表-1 供試体諸元および実験結果

供試体	部材 交差角	定着 鉄筋	定着鉄筋の 定着長* (mm)	荷重 (kN)		接合位置モーメント (kNm)		変位 (mm)	
				降伏時	最大	降伏時	最大荷重時	降伏時 δ_y	荷重低下時期
No.1	60°	D25 SD345	503, 503	187.6	218.7	452.5	527.5	8.4	$4\delta_y \sim 5\delta_y$
No.2	90°		503, 503	176.9	213.8	262.7	317.5	7.2	$4\delta_y \sim 5\delta_y$
No.3	120°		523, 823	148.7	194.2	336.8	439.9	9.6	$3\delta_y \sim 4\delta_y$

*左はウイングから、右はボックス壁部から突出した鉄筋の定着長で、定着長の定義はコンクリート標準示方書〔設計編〕³⁾による。

*1 北海学園大学 工学部教授 博（工）（正会員）

*2 高知工科大学 システム工学群教授 工博（フェロー会員）

*3 共和コンクリート工業（株）技術研究所（正会員）

*4 共和コンクリート工業（株）技術研究所 所長（正会員）

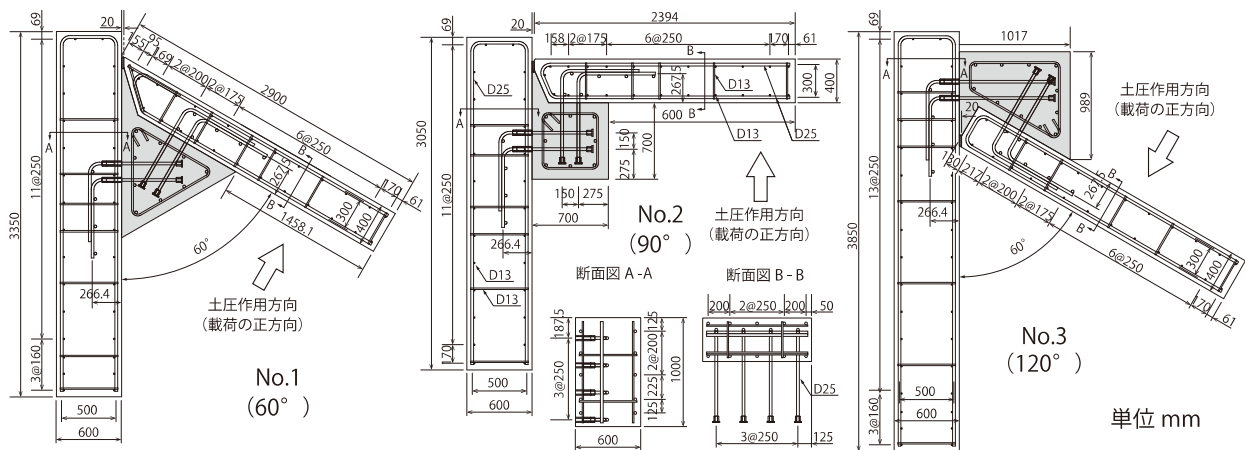


図-1 供試体形状寸法図

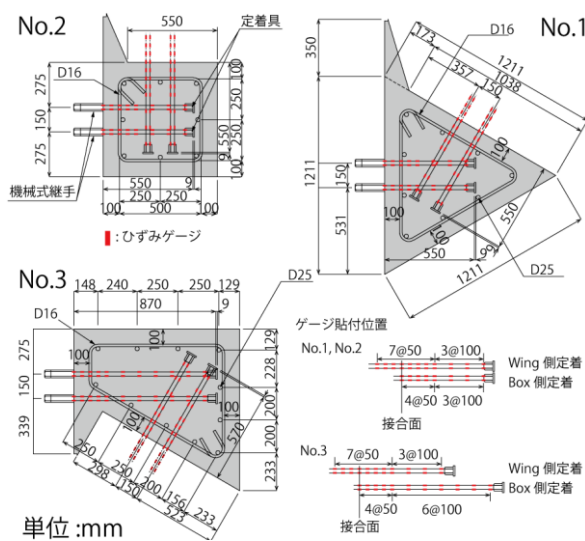


図-2 接合柱形状寸法図

表-2 材料諸元

鉄筋	種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)
	D25 SD345(定着)	401	585	232
	D25 SD345(主筋)	376	550	207
	D16 SD345	381	572	201
	D13 SD345	399	574	196

コンクリート	供試体	圧縮強度 (N/mm ²)			ヤング率 (kN/mm ²)		
		BOX	ウイング	定着柱	BOX	ウイング	定着柱
	No.1	50.5	57.2	27.5	30.2	35.9	26.8
	No.2	53.4	54.2	28.2	27.7	31.0	26.4
	No.3	57.8	55.5	30.6	27.4	28.5	26.7

機械式定着には嵌合式のものを採用するため、また、縦リブが無く付着を妨げずにひずみゲージを貼り付けできるため、ひずみゲージを貼り付ける主筋と定着鉄筋にはネジふし鉄筋を用いた。

2.2 実験方法

図-3 に部材交差角が 120° の No.3 供試体の荷重方法を示す。BOX とウイングの端部に鋼製ジグを介して油圧ジャッキをピンで接続し、供試体の開き方向と閉じ方向の交番荷重を行った。本実験では、土圧の作用方向を

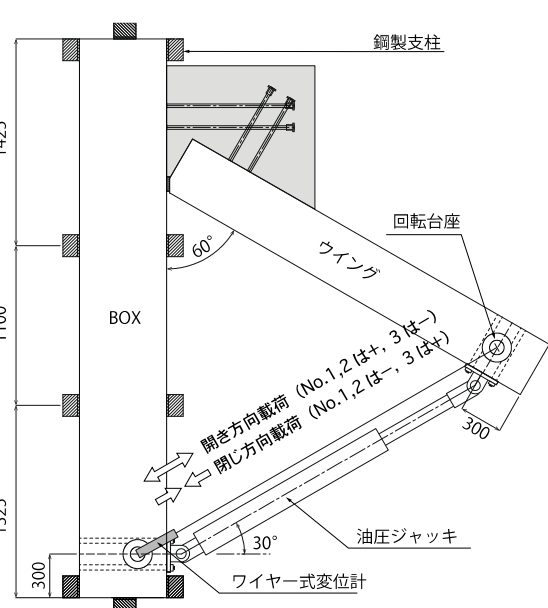


図-3 荷重方法 (No.3,部材交差角 120°)

正とし、逆方向を負とする。つまり、No.1 と No.2 では開き方向が正、No.3 では閉じ方向が正となる。交番荷重とするのは、地震時に負の方向でウイングと地盤との変位差によりウイングの地震時慣性力が作用する可能性と、その場合、負側の破壊進展が正側の破壊挙動に影響を及ぼすことが想定されるため、片押しでは想定できない損傷や、片押しより激しい破壊が生じる可能性を考えたためである。

荷重は供試体を鋼床版上に寝かせた状態で実施し、床による摩擦拘束を防ぐため、供試体と鋼床版の間に 2 枚重ねのフッ素樹脂シートを敷設した。また、BOX は複数の鋼製支柱により拘束した。

図-4 に荷重履歴を示す。正側は、設定荷重値に対する繰返しの後、主筋の降伏時における初期状態からの荷重点間の変位を δ_y として、 $n \delta_y$ ($n = 1, 2 \dots$) の変位を与えた。負側は設定荷重値に対する繰返しのみ行った。

正側の設定荷重は、土圧力による設計荷重値 (P_d)、

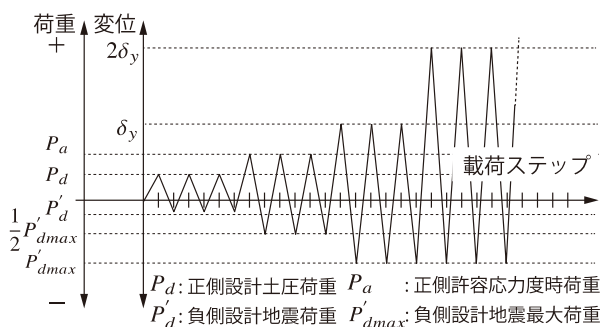


図-4 载荷履歴

鉄筋の許容応力度となるとき荷重値 (P_a) とし、この順で与えた。負側の設定荷重は、設計水平震度を 0.24 としてウイングの地震時慣性力の設計値 (P'_d)、最大値の $1/2$ ($1/2P'_{dmax}$)、最大値 (P'_{dmax}) とし、この順で与えた。最大値以降は、最大値を繰返した。したがって、载荷順序は、 $P_d \rightarrow P'_d \rightarrow P_a \rightarrow 1/2P'_{dmax} \rightarrow \delta_y \rightarrow P'_{dmax} \rightarrow 2\delta_y \rightarrow P'_{dmax}$ …となる。なお振幅は No.1 では 3 回ずつ与えたが、各繰返しの 2 回目以降で大幅な荷重低下等、挙動の変化が無いことを確認したため、No.2 と No.3 では同一振幅での繰返しを無くした。また、No.1 と No.2 では許容応力時の荷重でも問題なかったため、設計荷重の 2 倍程度でも接合部に問題が無いことを確認するために、No.3 では P_a の代わりに $2P_d$ を载荷した。载荷終了は最大荷重の 80% に荷重が低下する時点としていたが、最大荷重の 80% に低下する前に全供試体で $7\delta_y$ に到達したため、その時点で同一振幅の繰返しを行わず、終了した。

载荷点間の変位として、各载荷位置の断面高さ中央の 2 点間の変位をワイヤ式変位計で計測した。変位計は回転可能なジグを介して供試体に設置した。また、鉄筋とコンクリート表面のひずみ、ウイングと定着柱の接合面の開きを計測した。鉄筋ひずみは BOX とウイングの主筋と定着鉄筋で計測し、曲げの影響を受けないように、ネジふし筋のひずみゲージが設置されているリブの無い側面を供試体側面に揃えた。定着鉄筋は、信頼性の点から 1 か所につき相対する 2 点のひずみを計測した。付着に影響しないようにひずみゲージの防水処理はリブの無い部分に収めた。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

表-1 に各供試体の実験結果を、図-5 に荷重-载荷点間変位関係を示す。各供試体、ウイングと BOX の長さが異なるため、3 体で最大荷重が異なる。荷重-载荷点間変位関係は 3 体とも概ね同様だが、No.1 と No.3 は降伏前のある荷重 (図中の A 点) で急激に変位が増加した後、剛性が低下している。No.2 では急激な剛性の低下のみ見られた。降伏後、3 体とも大きく剛性が低下して

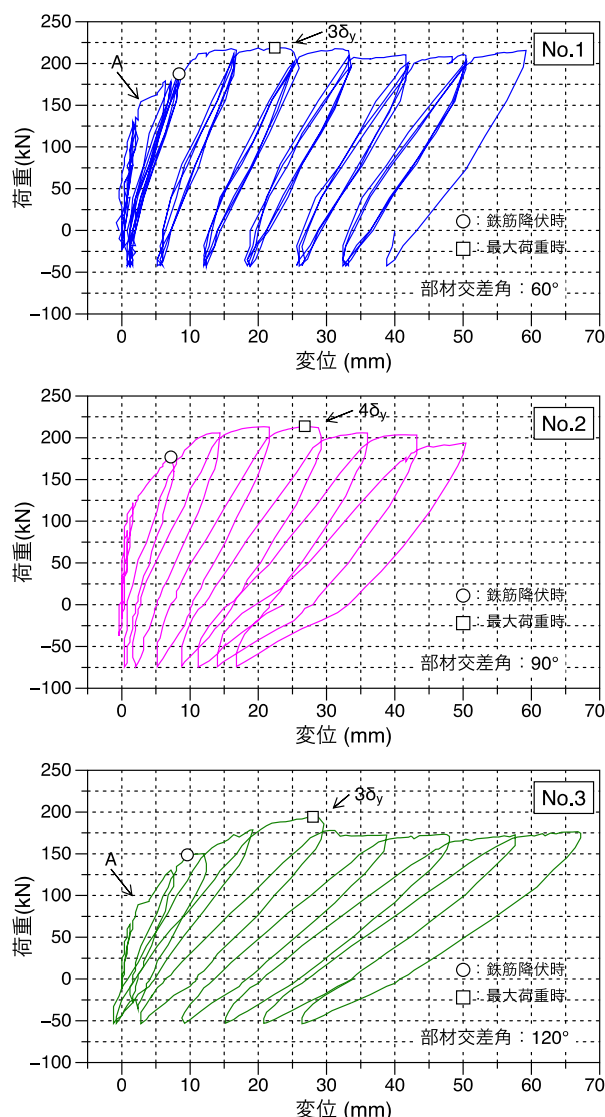


図-5 荷重-载荷点間変位関係

最大荷重に至るが、最大荷重後の荷重低下は緩やかで、 $7\delta_y$ に至るまで急激な荷重低下は見られなかった。このことから本構造は十分な靱性を有していることがわかる。

3.2 ひび割れ性状

図-6 に各供試体のひび割れ履歴を示す。 $1\delta_y$ の段階では各供試体でウイングに曲げひび割れが発生している。部材交差角が 60° の No.1、 120° の No.3 では、ウイング側の定着柱の端部 (以降、定着柱端) で発生したひび割れが、正側で引張側となるウイングの主筋に達し、主筋に沿って進展するとともに、曲げひび割れにも分岐している。No.1 では、主筋の位置から発生する曲げひび割れも確認できる。部材交差角が 90° の No.2 では、同様の主筋に沿ったひび割れは確認できないが、ウイングと定着柱との接合面に明確なひび割れが生じている。この主筋および接合面でのひび割れ発生により初期の剛性低下を生じ、また、主筋でのひび割れ発生が急激な変位の増加を生じていると言える。

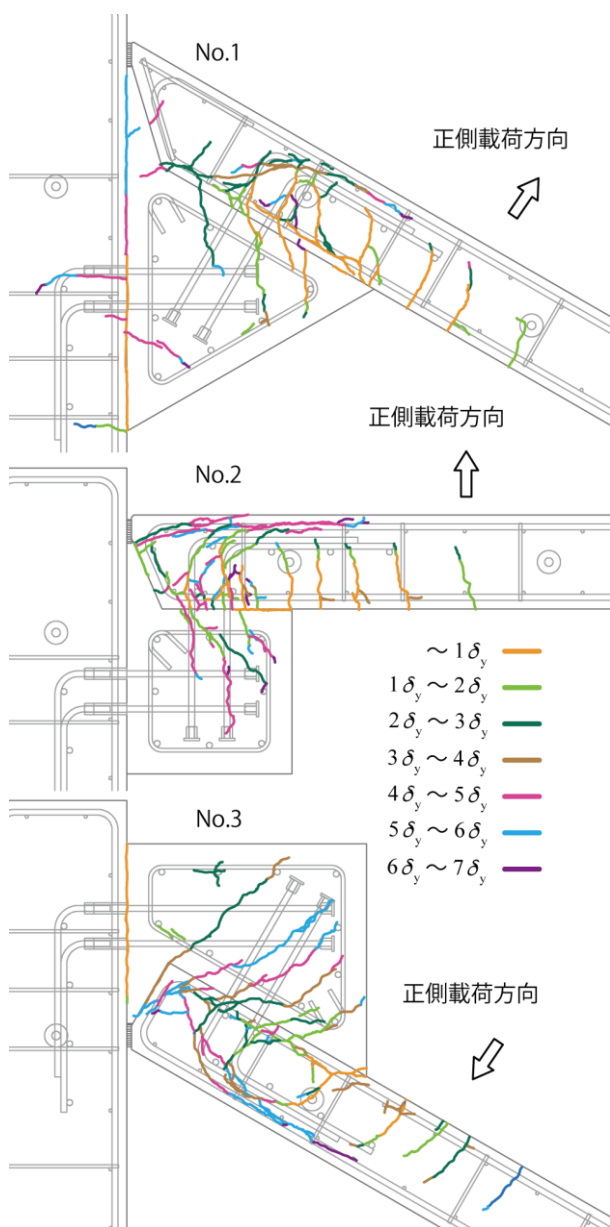


図-6 ひび割れ履歴

その後、全ての供試体で、 $2\delta_y \sim 4\delta_y$ の間に定着鉄筋に沿ったひび割れの進展が観測された。No.1とNo.3では、そのひび割れ進展とほぼ同時期にウイングのBOX側端部から正側載荷で圧縮縁に向かう斜めのひび割れが進展している。この斜めのひび割れは、定着鉄筋の折り曲げ付近で定着鉄筋に沿ったひび割れと合流し、圧縮側主筋に沿って進展している。このひび割れ進展時期に荷重が低下していることから、このひび割れ進展に関連する力学機構の変化が耐荷力を決定していると考えられる。

部材交差角が 90° のNo.2供試体でもウイングのBOX側端部から圧縮鉄筋に沿ったひび割れは発生するが、起点がよりBOXとの境界かつ圧縮縁に近い。このため、起点から圧縮側鉄筋に沿う形となっている。また、 $5\delta_y$ の段階で圧縮縁にも至っている。このウイング端部から

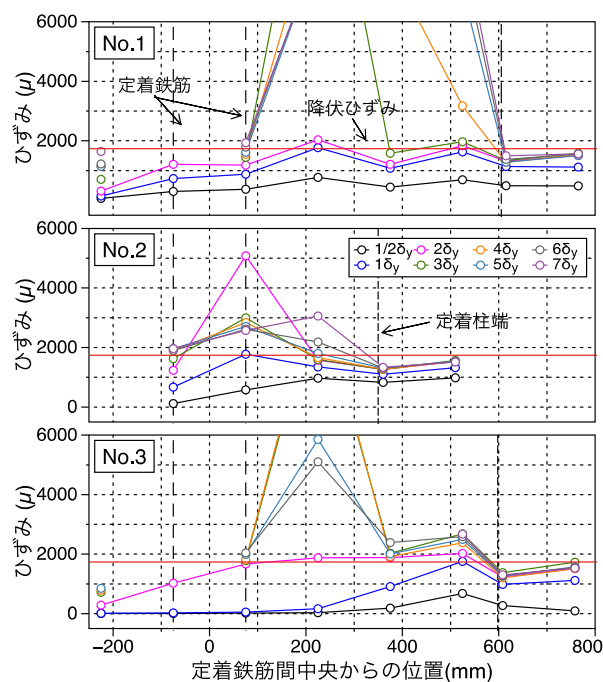


図-7 ウイングの主鉄筋ひずみ分布

のひび割れは、起点が圧縮合力作用位置に関係していると考えられる。ウイング引張縁における定着鉄筋からBOX側端部までの距離がNo.1では530mm程度、No.3で501mm程度なのに対し、No.2のみ275mmと小さいことから、圧縮合力作用位置がBOXとの境界に近くなったと考えられる。またBOX側のウイング端部の形状も各供試体で異なっており、これも影響した可能性がある。

以上より、初期はウイングの曲げひび割れが進展するが、最終的には圧縮主筋に沿ったひび割れの進展により荷重低下することが、ひび割れ性状から示された。

3.3 ウイングの主鉄筋ひずみ

図-7は正側載荷時に引張側となるウイングの主鉄筋のひずみ分布である。ひずみの計測位置は、2本の定着鉄筋の中間位置を0とし、BOX側を負、ウイングの載荷端側を正とした。

定着柱とウイングが完全に一体化している場合、鉄筋はウイング断面のみでモーメントに抵抗する定着柱端のウイング載荷端側で降伏するはずである。一方、実験結果では全ての供試体でこの位置で降伏せず、定着柱端から定着鉄筋の間で降伏した。どの供試体も、降伏前である $1/2\delta_y$ の段階において、ひずみはこの区間の定着柱端近傍でほぼ最大となり、BOX側に向かって小さくなっている。その後、定着柱端から載荷端側の定着鉄筋の間で降伏に達している。これは、図-6のひび割れ履歴図における、No.2の接合面ひび割れとNo.1とNo.3の主筋に沿ったひび割れの発生に見られるように、載荷の早い段階で定着柱とウイングが定着柱端側から分離するためと考えられる。主筋に沿ったひび割れが発生するNo.1

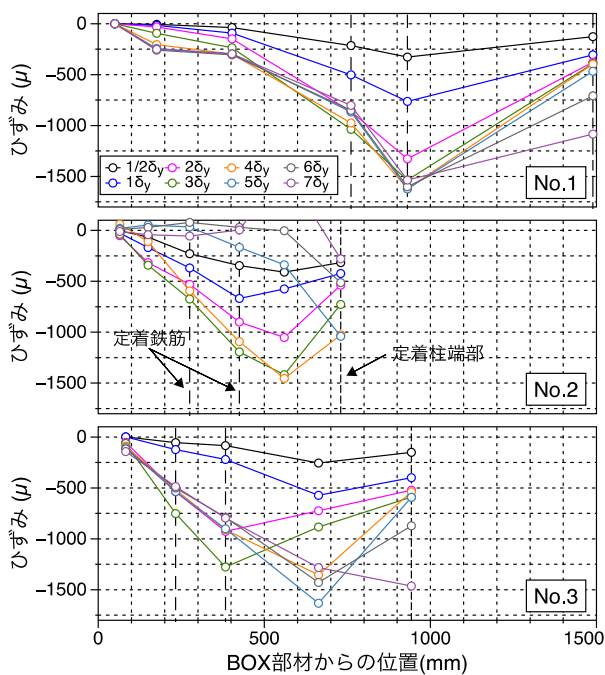


図-8 ウイングのコンクリートひずみ分布

と No.2 では $1\delta_y$ の段階において、定着柱端から定着鉄筋にかけてひずみ分布の勾配がほぼ 0 となり、付着が消失しており、それにより $3\delta_y$ 以降ではこの区間のひずみが極めて大きくなった。一方、No.3 では $2\delta_y$ で付着が喪失しているように見えるがひずみ分布のピーク位置が定着鉄筋位置にシフトしており、他の 2 体ほどこの区間の付着は喪失していないと考えられる。

3.4 ウイングの圧縮縁コンクリートひずみ分布

図-8 は正側載荷時に圧縮側となるウイングの圧縮縁のコンクリートひずみ分布である。ひずみの計測位置は、BOX とウイングとの接合位置を原点とした。圧縮縁のコンクリートひずみも、図-7 で示される主筋ひずみが最大となる位置に対応し、定着柱端からウイング載荷端側の定着鉄筋の間で最大となる。ただし、ひずみの増加は $3\sim 5\delta_y$ で頭打ちとなった。当初はこの区間において曲げ破壊が進行するが、 $3\sim 5\delta_y$ 以降で破壊機構が変化するためだと考えられる。図-6 のひび割れ履歴図に示されるように、全供試体とも $3\sim 5\delta_y$ から圧縮鉄筋に沿ったひび割れが進展している。そのため、このひび割れ進展により破壊機構が変化し、ひずみが増加しなくなった可能性が考えられる。

No.2 では $5\delta_y$ 以降、定着柱端からウイング載荷端側の定着鉄筋の間の区間のひずみが大幅に減少している。これもひび割れ履歴図に示されるように、 $5\delta_y$ の段階でウイングの BOX 側端部からのひび割れが急激に発達し、圧縮縁に達して貫通していることから、圧縮側かぶり部分の断面が有効ではなくなった可能性を示している。

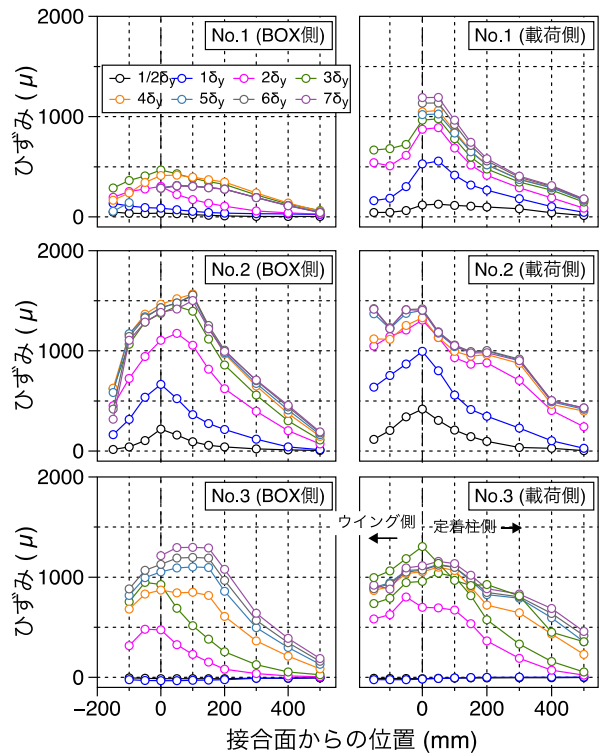


図-9 定着鉄筋のひずみ分布

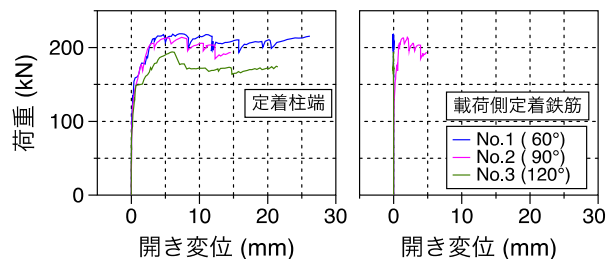


図-10 接合面の開き

3.5 接合面挙動

図-9 にウイングの定着鉄筋のひずみ分布を示す。いずれの定着鉄筋もひずみの増加は頭打ちとなり、 $7\delta_y$ に至るまで降伏には至らなかった。また、概ね山なりのひずみ分布形状を保っており、定着破壊にも至っていないと言える。

No.1 と No.3 では、 $2\delta_y$ で、それまでほぼ 0 だったひずみが急激に増加しているが、部材交差角が 90° の No.2 では降伏前から接合面で比較的大きなひずみが生じている。これは接合面でのひび割れの有無によると考えられる。図-10 は、定着柱端部とウイングの定着鉄筋位置において、接合面を跨ぐように設置したパイゲージによる接合面開き変位の計測結果である。No.2 では荷重 130kN 程度の時点で、定着柱端部と載荷側定着鉄筋位置でほぼ同時に開きが生じている。これは、ひび割れ図にあるように、定着柱端から定着鉄筋にかけて接合面のひび割れが発生したためと確認できる。一方、No.1 と No.3 では、定着柱端部の接合面で開きは生じるが、

表-3 最大荷重の算定値

供試体	No.1 (60°)			No.2 (90°)			No.3 (120°)		
破壊断面位置	定着柱端	定着鉄筋		定着柱端	定着鉄筋		定着柱端	定着鉄筋	
載荷点までの距離 m	1.27	1.88		1.4	1.75		1.56	2.16	
断面高さ mm	400		362.5	400		362.5	400		362.5
断面 M 耐力 kNm	332	339	279	317	324	268	376	369	308
最大荷重計算値 kN	300.6	208.2	171.7	320.6	261.7	216.5	278.5	197.8	164.9
最大荷重実験値 kN	218.7			213.8			194.2		
最大荷重 計算値/実験値	1.37	0.95	0.79	1.50	1.22	1.01	1.43	1.02	0.85

定着鉄筋位置では $7\delta_y$ に至るまで接合面で開きが生じていない。これは、定着柱端部では接合面にひび割れは生じるが、そこからはウイングの主鉄筋に沿って進展するためである。したがって、No.1 と No.3 ではウイング主鉄筋に沿ったひび割れが、定着鉄筋に到達する $2\delta_y$ 以降に定着鉄筋にひずみが生じたと考えられる。

この他、ひずみのピーク位置のシフトや、接合面近傍で付着低下を示す緩やかひずみ勾配が見られるが、これらの挙動について各供試体間の違いによる明確な傾向は見られなかった。

4. 破壊荷重の算定

以上より、ウイングの圧縮主筋に沿ったひび割れが進展するまではウイング単体の曲げ破壊挙動に近く、荷重低下する時点は曲げ降伏後であるから、鉄筋のひずみ硬化前であれば荷重は比較的最大に近いと考えられる。また、その破壊断面は定着鉄筋と定着柱端部の間となる。そこで、定着柱端とウイング載荷端側の定着鉄筋位置を破壊断面とし、ウイングの曲げ破壊荷重をコンクリート標準示方書³⁾の曲げモーメントと軸方向力を受ける部材の断面耐力算定方法に基づいて計算した。本実験では正側の載荷時に、No.1 と No.2 では軸引張力が、No.3 では軸圧縮力が働くため、計算では油圧ジャッキの軸とウイング部材軸との交点に油圧ジャッキ方向の荷重が作用するとしてこれらの軸力を考慮した。

表-3 における断面高さが 400mm のケースが破壊荷重の計算結果である。No.1 と No.3 では、破壊断面を定着鉄筋位置とすると計算値は実験値に概ね一致した。一方、No.2 は、破壊断面が定着鉄筋位置の場合でも、計算値は実験値を 20%程度上回った。

No.2 ではウイングの BOX 側端部から圧縮鉄筋に沿ったひび割れが貫通し、同時に大幅にコンクリート圧縮ひずみが低下したため、圧縮側のかぶりが有効断面ではなくなったと考えられる。そこで、圧縮側かぶりを無視して計算したところ、断面高さが 362.5mm のケースに示されるように No.2 の計算値と実験値はほぼ一致した。

一方、No.1 と No.3 では、当然、過小評価となるが、少なくとも圧縮側かぶりを無視すれば、今回の接合方法によるプレキャストウイングの最大荷重を概ね正しく予測できるか、安全側の予測をできることがわかった。

No.2 でのウイング BOX 側端部から圧縮縁に至るひび割れ進展が生じた原因が、部材交差角の影響であることを示す明確なデータは今回得られなかった。一方、ウイング内の定着主筋から BOX までの寸法が、No.2 は No.1 と No.3 より小さく、それが原因である可能性が考えられる。この原因の解明については今後の課題である。

5. 結論

本研究では、PCa ウイングとカルバート側壁から突出した鉄筋を、機械式定着により現場打ちの定着柱に定着して接合した、PCa ウイングの破壊性状について載荷実験による検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 降伏前の段階でウイングと定着柱の接合面におけるひび割れと、定着柱端部を起点とし引張主筋に沿ったひび割れが生じ、その結果、定着柱端部と定着鉄筋の間で鉄筋降伏が生じる。
- (2) ウイング内の定着鉄筋から圧縮主筋に沿ったひび割れ進展、または、ウイングのカルバート側壁側端部から圧縮縁に至るひび割れにより荷重が低下する。
- (3) ウイング載荷端側の定着鉄筋位置で曲げ破壊するとし、ウイングの圧縮かぶりを無視した有効断面を仮定すれば、この PCa ウイングの最大荷重を概ね正しく評価できるか、または、安全側に評価できる。

参考文献

- 1) 高橋良輔，島弘，松岡智，水上繁樹：途中定着を有する CFT-PCa 複合カルバートの接合部挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，pp.715-720，July.2022
- 2) 日本道路協会：道路土工—カルバート工指針（平成 21 年度版），日本道路協会，Apr.2010
- 3) 土木学会コンクリート委員会：2022 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，土木学会，Mar.2023