

(23) スプライス PC 構造に関する実験的研究について

ドービー建設工業(株) 本社設計部 正会員 今村 晃久
 同 上 正会員 ○毛利 忠弘
 同 上 正会員 天野 明子
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 角田 與史雄

1. はじめに

橋梁上部工におけるコスト縮減への一つの回答として、工場製プレテンション・プレキャスト桁と場所打ち桁をポストテンション鋼材で一体化をした「スプライス PC 構造」を提案し、設計的検証を行ってきた。その結果、本構造が設計的に十分な安全性を有していること、適用支間 40m~60m において場所打ち箱桁構造に対して 20%近いコスト縮減効果があること等が確認出来た。本構造を構成する各々の要素は、従来の PC 技術の範疇にあり、それ故、現行設計基準による設計で十分に対応可能であるが、打ち継目部は、強度の異なるコンクリートを打ち継いだ上に、断面剛性が急変する影響により、一般部に比べてひび割れ分散性・疲労特性・耐力等の算定に何らかの配慮が必要となることが予想された。また、本構造の施工の特徴として、プレキャスト部材を単純桁として架設した後に場所打ち部を打設してプレキャスト桁の仮支点を撤去するために、打ち継目部にずれせん断力が発生することに対する検証も必要と考えた。そこで、打ち継目部の部分模型による静的繰返し載荷実験を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 実験目的

現在の設計基準では、片持ち張出し施工等で不可避なコンクリート打ち継目に対して、適切な鉄筋継手と連続した PC 鋼材の配置を前提として、通常断面と同様の手法による設計が可能である。しかし、本構造は先に述べたように従来とは異なる打ち継目を有している上に、打ち継目部の PRC 設計も視野に入れている。そこで、履歴復元力特性とエネルギー吸収性能の確認に加え、以下に示す項目の影響の把握を目的として、継目部を再現した模型に対する静的繰返し載荷実験を行うこととした。

- ① 重ね継手とループ継手の比較
- ② 断面急変の影響
- ③ コンクリート強度(付着強度)が異なることの影響
- ④ 接合部横桁の拘束効果

表-1 供試体諸元

供試体			打ち継目の有無	断面形状		コンクリート強度(N/mm ²)		鋼材有効張力(N/mm ²)		鉄筋継手の種類	側方拘束(横桁)	備考
Sr.	NO.	記号		プレキャスト部	後打ち部	プレキャスト部	後打ち部	プレテンション	ポストテンション			
曲げ破壊先行	1	M-1	無	I型	-	60	-	940	-	-	無	プレテン基準はり
	2	M-2	有	I型	I型	60	40	940	940	重ね継手	無	打ち継-継手-強度差
	3	M-3	有	I型	I型	60	40	940	940	ループ継手	無	打ち継-継手-強度差
	4	M-4	有	I型	矩形	60	40	940	940	重ね継手	無	打ち継-継手-断面変化
	5	M-5	有	I型	矩形	60	40	940	940	ループ継手	無	打ち継-継手-断面変化
	6	M-C1	有	I型	矩形	60	40	940	940	重ね継手	有	打ち継-継手-断面変化-横拘束
	7	M-C2	有	I型	矩形	60	40	940	940	ループ継手	有	打ち継-継手-断面変化-横拘束
せん断破壊先行	8	S-1	無	I型	-	60	-	940	-	-	無	プレテン基準はり
	9	S-2	有	I型	I型	60	40	940	940	重ね継手	無	打ち継-継手-強度差
	10	S-3	有	I型	I型	60	40	940	940	ループ継手	無	打ち継-継手-強度差
	11	S-4	有	I型	矩形	60	40	940	940	重ね継手	無	打ち継-継手-断面変化
	12	S-5	有	I型	矩形	60	40	940	940	ループ継手	無	打ち継-継手-断面変化

2.2 供試体概要

先行して載荷実験を行った M-5、S-5 の形状、鋼材配置を図-1 に示す。実験には後打ち部の断面形状と、継手形式の違いで曲げ用 (M1~M5)、せん断用 (S1~S5) に各々5種類の供試体、鉄筋継手の付着強度に対する横拘束プレストレスの影響を判断するための供試体 (M-C1、M-C2) を2体の計12種類の供試体を用意した。各々の供試体諸元を表-1 に示す。M-1、S-1の基準梁は下縁側全長にわたりプレテンション鋼材を、その他については、図-1a、1b に示すプレテンション鋼材とポストテンション鋼材を配置した全長3.0mの単純梁とした。プレテンション部は部材長1.6mと短く、プレテンション鋼材の緊張ロスが発生するため、桁端部に定着体を設けて、ロスを減少させるよう配慮した。打ち継目側については、実橋と同様に定着体を設けずにプレテンション鋼材を突出させた。尚、打ち継目部は洗い出しのみの処理とした。使用した材料及び、強度特性については、表-2 にまとめた。

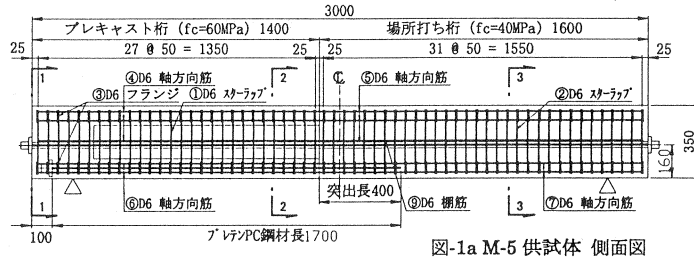


図-1a M-5 供試体 側面図

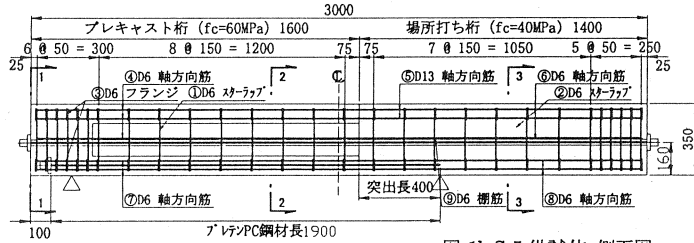


図-1b S-5 供試体 側面図

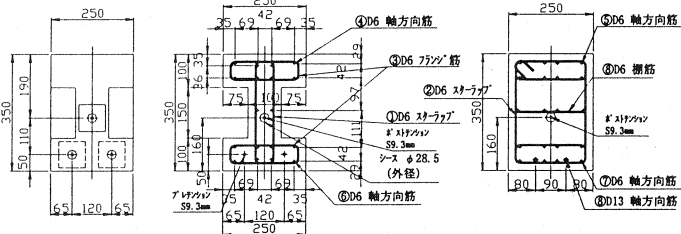


図-1c M-5 供試体 断面図

図-1 M-5、S-5 供試体

2.3 載荷方法と耐力算定

荷重載荷位置は、曲げ供試体、せん断供試体それぞれについて、打ち継目で想定する破壊がおこるように定めた。図-2には載荷位置と共に、断面力の作用状態も表示した。載荷位置を決定する際の終局耐力の算定は、「土木学会コンクリート標準示方書 設計編」の規定に基づいて行ったが、せん断耐力の算定に当たっては、せん断スパン比 (Ls/d) が、左側 1.56、右側 1.25 と小さいため、式-1 によりせん断スパンの影響

表-2 供試体の材料特性

表-2a 鋼材の機械的性質

鋼材の種類	断面積 (mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
SWPR7A φ9.3	51.61	1705	1821	195	6.2
SD295A D6	31.67	375	516	210	27
SD295A D13	126.7	354	490	210	27

表-2b コンクリートの配合表

	設計基準強度 (N/mm ²)	粗骨材最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
プレキャスト部	60	20	8	4.0	32.2	41.0	150	466	708	1063	3.73
後打ち部	40	20	8	4.0	37.2	41.0	150	404	730	1093	3.23

表-2c コンクリートの力学的特性

部位	時期	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
プレキャスト部	(1)	7	46.5			
	(2)	16	57.2			
	(3)	26	64.2	3.30	33.60	0.17
後打ち部	(2)	4	33.6			
	(3)	20	42.6	2.50	27.40	0.17

表-2d 鋼材の緊張力

	鋼材の種類	断面積 (mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	初期緊張力 (N/mm ²)	載荷時張力 (N/mm ²)
プレテンション	SWPR7A φ9.3	51.61	1705	1821	1030	924
	SWPR7A φ9.3	51.61	1705	1821	1200	935
横方向拘束	SBPR 930/1080 φ26	530.9	930	1079	600	570

(注) : ポステンションは片引きとし、Pull in 3mmを設定

(1) : プレテンション導入時, (2) : ポステンション導入時, (3) : 荷重載荷時

を考慮した。尚、部材係数 γ_b 、材料係数 γ_m については、1.0 として計算を行った。

$$\beta_{Ls} = 0.75 + 1.4 / (Ls / d) \quad \text{----- 式-1}$$

ここに、 β_{Ls} : せん断スパン比によるせん断耐力の割増係数
 Ls : せん断スパン
 d : 有効高さ

耐力の計算結果を表-3 に示す。

鉄筋塑性域での静的繰返し载荷に際しては、継目部の変位量で制御した。曲げ供試体については、2.5mm、5mm、7.5mm の段階で、せん断供試体については、0.5mm、1mm、2mm で除荷し、その後破壊まで载荷した。尚、供試体には図-3 に示すように、歪ゲージ、コンタクトゲージ、変位計、亀裂変位計を設置し、計測を行った。

3. 実験結果と考察

先行して载荷実験を行った M-5、S-5 の結果を述べる。図-5 に各々の供試体の実験後におけるひび割れ状況を示す。図-4 には、実験値予測のため、先立って行った汎用非線形 FEM 解析ソフト「ADINA」によるシミュレーション結果を示す。

3.1 破壊性状

(a) 曲げ供試体 M-5

打ち継目でひび割れが発生した後、後打ち部、プレキャスト部の順にひび割れが発生した。荷重増加によるひび割れの進展は、プレキャスト部、打ち継目、後打ち部で差異が見られ、後打ち部では新たなひび割れが発生しながら進展していくのに対して、

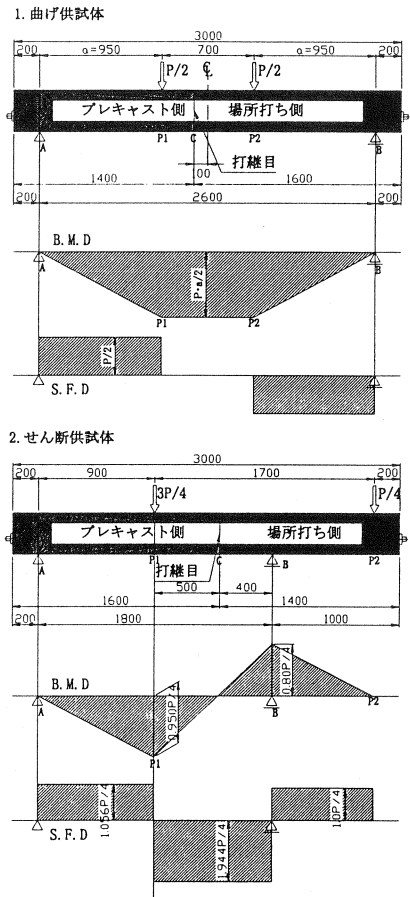


図-2 荷重方法

表-3 耐力計算結果

Sr.	No.	記号	区間	プレキャスト部 (fck=60N/mm ²)					打ち継目				後打ち部 (fck=40N/mm ²)						
				曲げ耐力 Mu	曲げ耐力時 せん断力 S	せん断耐力		耐力		曲げ耐力 Mu	せん断伝達耐力 Vcw	耐力		曲げ耐力 Mu	曲げ耐力時 せん断力 S	せん断耐力		耐力	
						Vu (A~P1)	(P1~C)	(曲げ) Pm (P1)	(せん断) Ps (A~P1)			(曲げ) Pm (C~P2)	Pcw			Vu (C~B)	(曲げ) Pm (C~P2)	(せん断) Ps (P2~B)	
1	M-1	P1~C	74.3	78.2	135.0	156.4	270.1												
2,3	M-2,M-3	P1~C	87.8	92.5	140.3	184.9	280.6	85.8	361.3	180.7	722.6	C~P2	86.8	91.3	131.1	182.6	262.3		
4,5	M-4,M-5	P1~C	87.8	92.5	140.3	184.9	280.6	85.8	361.3	180.7	722.6	C~P2	86.8	91.3	131.1	182.6	262.3		
6,7	M-C1,C2	P1~C	87.8	92.5	140.3	184.9	280.6	85.8	361.3	180.7	722.6	C~P2	86.8	91.3	245.4	182.6	490.8		

Sr.	No.	記号	区間	プレキャスト部 (fck=60N/mm ²)					打ち継目			後打ち部 (fck=40N/mm ²)										
				曲げ耐力 Mu	曲げ耐力時 せん断力 S	せん断耐力		耐力			曲げ耐力 Mu	せん断伝達耐力 Vcw	耐力		曲げ耐力 Mu	曲げ耐力時 せん断力 S	せん断耐力		耐力			
						Vu1 (A~P1)	Vu2 (P1~C)	(曲げ) Pm (P1)	(せん断) Ps1 (A~P1)	(せん断) Ps2 (P1~C)			(曲げ) Pm (B)	Pcw			Vu1 (C~B)	Vu2 (B~P2)	(曲げ) Pm (B)	(せん断) Ps1 (C~B)	(せん断) Ps2 (B~P2)	
8	S-1	P1~C	74.1	105.9	76.3	105.7	312.0	289.1	217.4			361.3		1083.9	C~B	-92.4	154.0	147.8	93.4	462.1	304.1	373.5
9,10	S-2,S3	P1~C	87.5	125.0	78.9	97.2	368.3	299.0	199.9			361.3		1083.9	C~B	-97.4	162.3	121.7	79.4	487.0	250.3	317.8
11,12	S-4,S-5	P1~C	87.5	125.0	78.9	97.2	368.3	299.0	199.9			361.3		1083.9	C~B	-97.4	162.3	192.9	116.5	487.0	396.8	466.0

プレキャスト部ではひび割れ間隔が大きく、最初に入ったひび割れの幅が増大していった。プレキャスト部最下縁の鉄筋が降伏歪みを超えたあたりから、打ち継目の下縁が開きはじめ、除荷時においても打ち継目は閉じなかった。その後の荷重増大により打ち継目の開口が大きくなり、V字型に変形し、載荷荷重 179 kN で上側コンクリートが圧縮破壊した。

(b) せん断供試体 S-5

本供試体では、最初後打ちコンクリート側支点の上縁に曲げひび割れが発生し、その後、プレキャスト区間のウェブにほぼ 45° の角度でせん断ひび割れが発生した。荷重増加に伴い、これらひび割れは進展を続け、引き続きプレキャスト部の載荷点下側に曲げひび割れが発生した。このひび割れは載荷点に向かって成長し、先のウェブせん断ひび割れも上下フランジに達した。この時点でも、接合部のずれと、後打ちコンクリート部のせん断ひび割れは発生していなかった。3回目の載荷で計算上の耐力レベルの 1.5 倍に相当する 300kN まで載荷したが、既に発生したひび割れの進展は認められるものの、打ち継目部になんら変化は起こらなかった。荷重を除荷した際も、変位量はほぼ完全に復元した。最終的には耐力力のほぼ 2 倍に当たる 424.4kN で、打ち継目を斜めに横切るせん断ひび割れが入り、せん断破壊に至った。

3.2 考察

(a) 曲げ供試体 M-5

最初のひび割れ発生が載荷荷重 32.3 kN で打ち継目の位置において確認された。

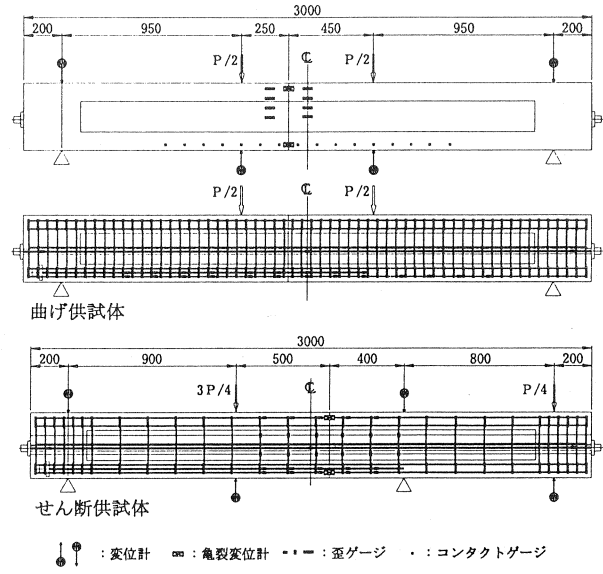
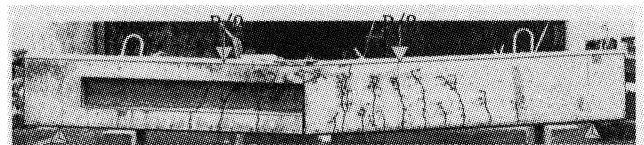


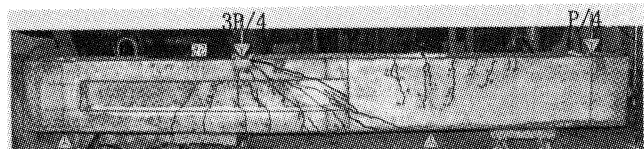
図-3 計測項目



図-4 非線形解析による変形状とひび割れ状況



曲げ供試体



せん断供試体

図-5 実験終了後のひび割れ状況

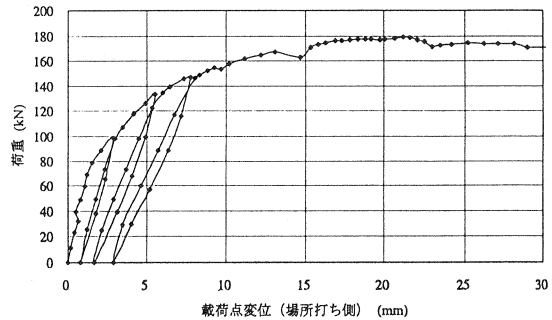
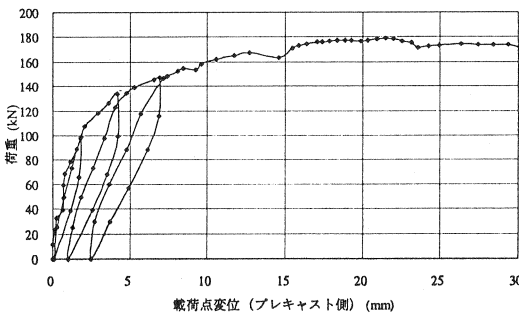


図-6 M-5 供試体 載荷点の荷重-変位の関係

載荷荷重・プレストレス力から下縁コンクリート応力度を計算すると -2.26N/mm^2 であり、コンクリートの引張強度 $f_{tk}=-2.69\text{N/mm}^2$ ($=0.23f_{ck}^{2/3}$)の約84%程度であった。打ち継目のコンクリート引張強度は一体打ちに比べ低いことが改めて確認された。鉄筋塑性域での静的繰返し載荷による荷重-変位の関係(載荷点変位)を図-6に示す。荷重を除荷した時に残留変位が見られ、RC構造と同様のヒステリシスを描いた。エネルギー吸収性能はよいものの、当初に意図したポストテンションによる復元力特性が生かされない結果となった。これは、PC鋼材を引張

縁ではなくほぼ断面図心に配置したため、引張鉄筋位置でのプレストレス力は 0.87N/mm^2 と直接に鉄筋を押し戻す力が不足したのが原因と考えられる。最大耐力は 178.9kN でほぼ計算値とほぼ一致しており、じん性率(最大変位/降伏変位)は10以上となった。上部構造のじん性は特にラーメン構造で要求されるが、本構造を適用しても構造上の安全性は確保できるものと考えられる。ひび割れ幅と下縁鉄筋の歪みの関係を図-7に示す。載荷荷重 117.9kN で打ち継目の開口が顕著($w=0.6\text{mm}$)に見られたが、プレキャスト部の鉄筋歪みが継目から 40cm の範囲で降伏歪み($\epsilon_{sy}=1790\mu$)を超えているのに対して、ひび割れは継目部以外に1本しか見られなかった。載荷終了後に鉄筋継手部(ループ継手)のコン

クリートを切断して付着状況を確認したが、割裂ひび割れはなく健全な状態で定着されていた。ひび割れ幅は鋼材表面の形状により大きな影響を受けるが、実験に使用したD6鉄筋の表面形状は溝切処理だけで付着特性が劣っていたため、プレキャスト部の鉄筋が抜け出し、継目が開く原因となったと考えられる。継目部のひび割れの実験値と計算値の比較を図-8に示す。計算値はひび割れ幅の算定式¹⁾により継目部の鋼材付着性を $k=2.0$ としたが実験値とよく一致し、同式により打ち継目部のひび割れ幅の推定が可能と思われる。

(b) せん断供試体 S-5

静的繰返し載荷による荷重-変位の関係(載荷点変位)を図-9に示す。計算せん断耐力 199.9kN に対して 300kN のレベルでも、残留変位が殆ど存在しない。腹部ひび割れ発生後においても、除荷後の残留変位が無いのは通常PC桁と同様の特徴であり、この点において打ち継目の影響は確認出来なかった。また、せん断

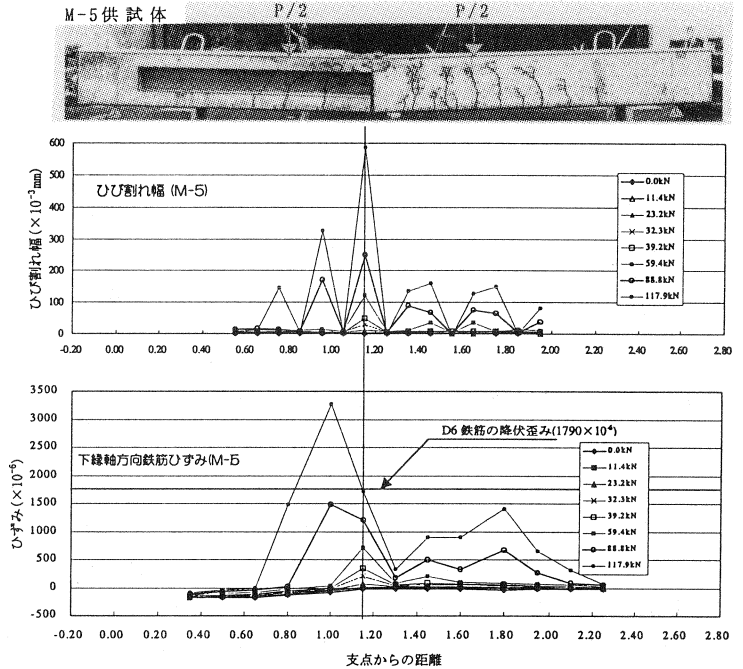


図-7 M-5 供試体 ひび割れ幅と下縁鉄筋の歪みの関係

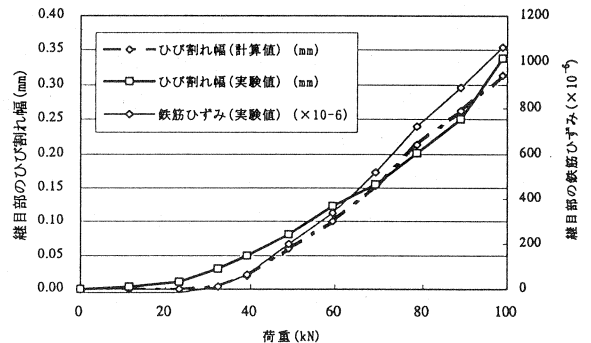


図-8 M-5 供試体 打ち継目ひび割れ幅と荷重の関係

表-4 実験値と計算値の比較

	実験値 kN	計算曲げ耐力			計算せん断耐力	
		プレキャスト部 kN	打ち継目 kN	後打ち部 kN	プレキャスト部 kN	後打ち部 kN
曲げ供試体 M-5	178.9	184.9	180.7	182.6	280.6	262.3
せん断供試体 S-5	424.4	368.3	-	486.9	199.9	396.8

耐力については、計算値 97.2kN (耐力: 199.9kN) に対して実験値は 206.3kN (荷重値: 424.4 kN) となり、これは矩形断面部のせん断耐力の計算値 116.5 kN に比べてもかなり安全側の値であった。このような結果となった理由としては、スパン内に反曲点のある荷重としたためディーブームとしてのアーチ耐荷機構が形成されたこと、また、耐力評価式において、I型断面における上下フランジの影響が考慮されていないこと、軸力(ポストテンション)の影響による耐力増加分が少なめに見積もられていること等が考えられる。

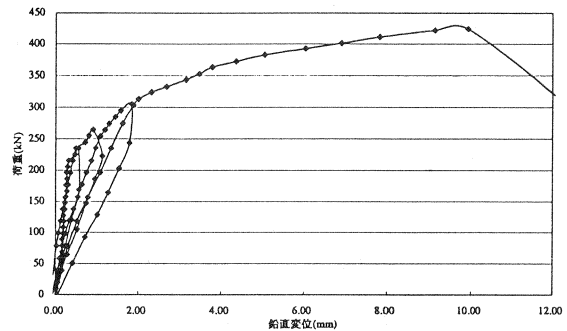


図-9 S-5 供試体 プレキャスト側荷重位置の鉛直変位

4. まとめ

スプライスPC構造の特徴であるプレテンション・プレキャスト桁と後打ちコンクリートをポストテンション・ケーブルで一体化を図った構造における接合部の性状把握を目的として、小型模型供試体に対する曲げとせん断力の繰り返し荷重実験を行い、その実験の範囲内で得られた知見を以下に述べる。

- (1) 打ち継目のひび割れ発生荷重は、一体打ちとして計算した値の84%であり、ひび割れ発生限界の算定に際し、コンクリートの引張強度の低減係数が必要である。
- (2) 打ち継目におけるひび割れ幅の算定は、鋼材の付着特性値 k を適切に選ぶことにより、土木学会式¹⁾で推定可能である。実験で使用した異形鉄筋 D6 と PC 鋼材 $\phi 9.3$ の併用で $k=2.0$ となった。
- (3) 打ち継目の塑性域での変形状として、実験では打ち継目に曲率が集中して大きな開口となったが、鉄筋継手の付着性状が良好で横拘束筋が密に配置されていれば、一般の RC 構造と同様にじん性に富んだ性状を示す。
- (4) 打ち継目の処理は、付着のある軸方向鋼材があれば一般的な洗い出しで十分な耐力を有しており、打ち継目のせん断耐力・せん断伝達耐力は、土木学会式¹⁾で安全側の値を示す。
- (5) 後打ちコンクリート内のループ継手の性能は、プレテンション桁内の通常鉄筋の付着力を上回っており、重ね継手に比べても十分な安全性を有していると考えられる。

[謝辞]

プレテンション、ポストテンション併用という複雑な供試体作成に当たり、ドーピー建設工業(株) 関東工場の近藤隆二氏、森田誠治氏、深沢一宏氏に多大なる協力を戴いた。実験に際しては、北海道大学大学院 工学研究科の内 仁助手に貴重なご指導を、さらに、同大学院生 小山聰君、藤本直史君、高橋良輔君の御協力を戴いた。また、解析の実施にあたり(株)構造計画研究所の川上 誠氏に貴重な御助言を戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 : コンクリート標準示方書 設計編 平成8年制定
- 2) 二羽淳一郎、山田一宇、横沢和夫、岡村 甫 : せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価 土木学会論文集 第372号/IV-5、p167~176
- 3) 伊藤忠彦、山口隆裕、池田尚治 : プレキャストセグメントはりの曲げせん断特性に関する実験的研究 プレストレストコンクリート Vol.39、No.1、p83~96
- 4) 今村晃久、毛利忠弘、石戸良平、加地 久 : スプライス PC ホロー構造の特性について 第8回 プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集 p203~208