

## 論文 スプライス PC 構造に関する実験的研究について

今村 晃久<sup>\*1</sup>・毛利 忠弘<sup>\*2</sup>・天野 明子<sup>\*3</sup>・角田 與史雄<sup>\*4</sup>

要旨：工場製プレテンション・プレキャスト桁と場所打ちコンクリート部材をポストテンション鋼材で一体化を図った「スプライス PC 構造」は、基本的に既存技術によって成立する構造であるが、強度の異なるコンクリート打ち継目を有し、断面形状の急変を伴うため、打ち継目の安全性検証と設計手法検証が必要と考え、曲げとせん断に対する模型供試体を用いた繰り返し載荷実験を行った。本論ではその内、曲げに対するシリーズに対して、ひび割れ発生限界、終局耐力、復元力特性、さらに重ね継手とループ継手の比較に関する検証結果を述べる

キーワード：プレストレストコンクリート、打ち継目、重ね継手、ループ継手

## 1. はじめに

工場製プレテンション・プレキャスト桁と場所打ち部材をポストテンション鋼材で一体化を図った「スプライス PC 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を設計的検証<sup>4)</sup>で明らかにしてきた。本構造は従来 PC 技術の範疇であり、現行設計基準にて設計可能であるが、打ち継目部は強度の異なるコンクリートの接合である上に、断面剛性が急変することの影響により、一般部に比べてひび割れ分散性や耐力等の算定に何らかの配慮が必要と予想されたため、実験による検証を行うこととした。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験目的

現在の設計基準<sup>1)</sup>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り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

特に①を検討項目に挙げたのは、本構造が搬送限界に近い工場製プレキャスト桁の使用を想定しており、継手長を短く出来る可能性を検証するためである。本実験は曲げとせん断に対する検証のため、2セットの供試体を用意した。本論ではその内の曲げに対する検証の結果を述べるものとする。

## 2.2 供試体概要

実験には後打ち部断面形状の違い (I 型, 矩形) と、継手形式の違い (重ね継手, ループ継手) で M1～M5, さらに M4 と M5 に横方向ブ

\*1 ドーピー建設工業(株) 本社設計部設計課長 (正会員)

\*2 ドーピー建設工業(株) 本社設計部設計課長代理

\*3 ドーピー建設工業(株) 本社設計部設計課

\*4 北海道大学大学院工学研究科 工博 (正会員)

レストレスを導入したMC-1, MC-2の計7供試体を用意した。各々の供試体諸元を表-1に、供試体形状、鋼材配置図を図-1に示す。M-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-1 e) 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力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、今回の実験では洗

表-1 供試体諸元

供試体 NO.	記号	打継目の有無	断面形状		コンクリート強度(N/mm <sup>2</sup> )		鋼材有効緊張力(N/mm <sup>2</sup> )		鉄筋継手種類	側方拘束
			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		
1	M-1	無	I型	-	60	-	940	-	-	無
2	M-2	有	I型	I型	60	40	940	940	重ね	無
3	M-3	有	I型	I型	60	40	940	940	ループ	無
4	M-4	有	I型	矩形	60	40	940	940	重ね	無
5	M-5	有	I型	矩形	60	40	940	940	ループ	無
6	M-C1	有	I型	矩形	60	40	940	940	重ね	有
7	M-C2	有	I型	矩形	60	40	940	940	ループ	有

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材の種類	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	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

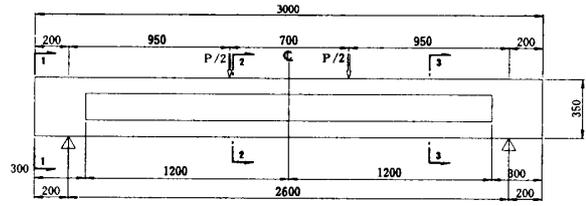
表-3 コンクリートの配合表

目標強度 (N/mm <sup>2</sup> )	粗骨材最大寸法 (mm)	砂/A (cm)	空気量 (%)	水セメント比 WC (%)	細骨材率 s/a (%)	単位置量 (kg/m <sup>3</sup> )					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混練剤	
A	60	20	8	40	32.2	41.0	150	466	708	1063	3.73
B	40	20	8	40	37.2	41.0	150	404	730	1083	3.23

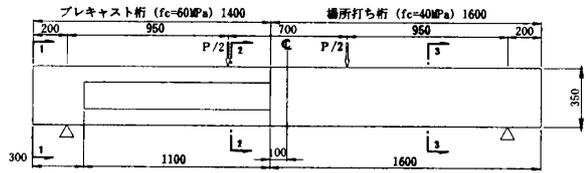
表-4 鋼材の緊張力

	鋼材の種類	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	初期緊張力 (N/mm <sup>2</sup> )	載荷時張力 (N/mm <sup>2</sup> )	
	プレテン	SWPR7A φ9.3	51.61	1705	1821	1030	924
	ポストテン	SWPR7A φ9.3	51.61	1705	1821	1200	935
	横拘束	SBPR930/1080 φ26	530.9	930	1079	600	570

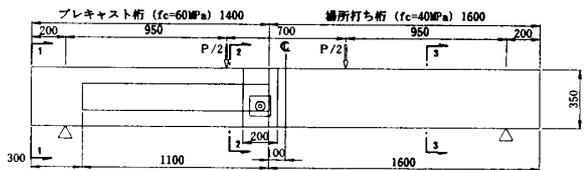
(注) : ポストテンションは片引きとし、Pull in 3mmを設定  
載荷時張力は計算値



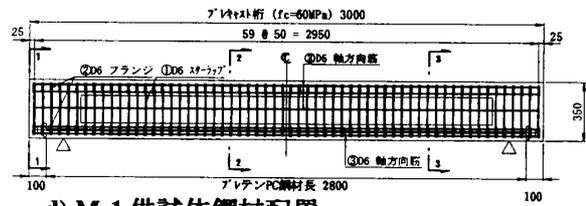
a) M-1, M-2, M-3 供試体形状 (M-1は一体打ち)



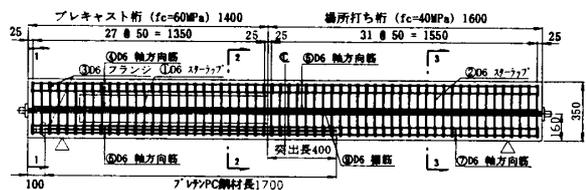
b) M-4, M-5 供試体形状



c) MC-1, MC-2 供試体形状



d) M-1 供試体鋼材配置



e) M-2~MC-2 供試体鋼材配置

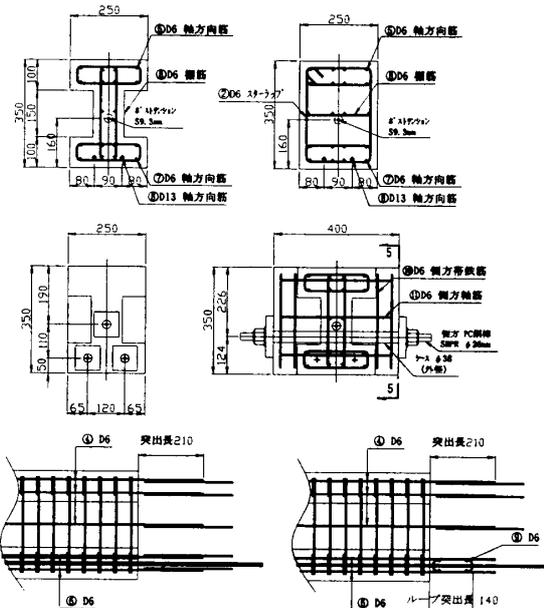


図-1 供試体形状、鋼材配置図

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-2~4 にまとめた。

### 2.3 載荷方法と耐力算定

荷重載荷位置は、打ち継目で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」<sup>1)</sup>の規定に基づいて行った。尚、せん断破壊が先行して発生しないように、せん断耐力が曲げ耐力の1.5倍以上になるよう設計した。その際の、部材係数 $\gamma_b$ 、材料係数 $\gamma_m$ については、1.0として計算を行った。表-5に示すコンクリート強度試験の結果を用いた耐力算定結果を表-6に示す。

鉄筋塑性域での静的繰り返し載荷に際しては、継目部の変位量で制御し、2.5mm, 5mm, 7.5mmの各段階で除荷した後、破壊まで載荷した。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

#### 3.1 供試体破壊性状

載荷実験の結果を表-7にまとめる。7体の供試体の内、MC-1のみが場所打ち部載荷点で破壊したが、継目の無いM-1を含め、その他は全て継目位置で破壊した。M-1（一体打ち）、M-2（重ね継手）、M-5（ループ継手）に対する載荷実験終了後のひび割れ状態を図-4に示す。継目を有する供試体M-2~M-5はいずれも、継目

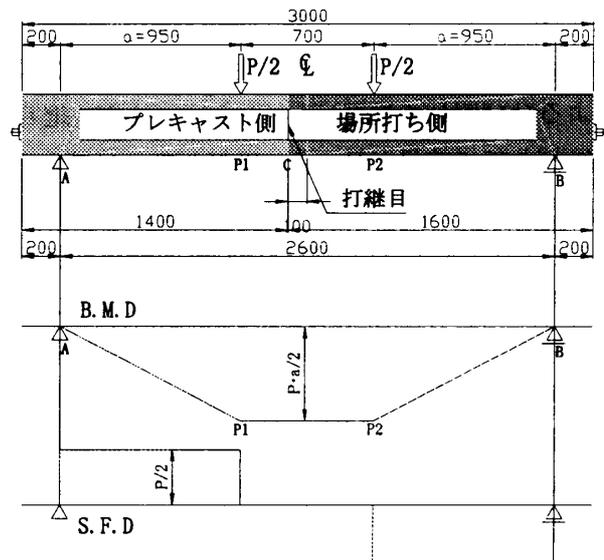


図-2 載荷方法

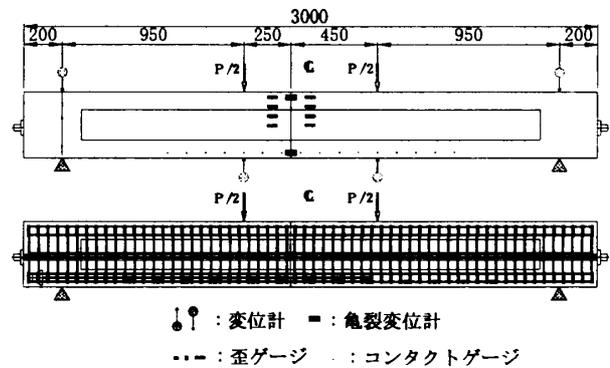


図-3 計測項目

表-5 強度試験結果

		プレキャスト側	後打ち側
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
弾性係数	設計用値	3.50E+04	3.10E+04
	M-5	3.36E+04	2.74E+04
	M-1~MC-2	3.65E+04	3.04E+04
圧縮強度	設計基準強度	60.0	40.0
	M-5	64.2	42.6
	M-1~MC-2	72.6	50.0

表-6 供試体の耐力計算結果

No.	記号	プレキャスト側 (fck=60N/mm <sup>2</sup> )					打ち継目				場所打ち側 (fck=40N/mm <sup>2</sup> )				
		曲げ耐力 Mu (kN·m)	曲げ耐力時せん断力 S (kN)	せん断耐力 Vu (kN)	耐力		曲げ耐力 Mu (kN·m)	せん断伝達耐力 Vcw (kN)	耐力		曲げ耐力 Mu (kN·m)	曲げ耐力時せん断力 S (kN)	せん断耐力 Vu (kN)	耐力	
					(曲げ)	(せん断)			(曲げ)	(せん断)				(曲げ)	(せん断)
1	M-1	74.4	78.3	137.8	156.6	275.6									
2,3	M-2,M-3	88.1	92.7	143.4	185.5	286.8	85.9	400.0	180.8	800.0	70.1	73.8	135.1	147.6	270.2
4	M-4	88.1	92.7	143.4	185.5	286.8	85.9	400.0	180.8	800.0	70.1	73.8	250.9	147.6	501.8
5	M-5	88.0	92.6	141.4	185.3	282.8	85.8	371.3	180.6	742.6	69.9	73.6	246.9	147.2	493.8
6,7	M-C1,C2	88.1	92.7	143.4	185.5	286.8	85.9	400.0	180.8	800.0	70.1	73.8	250.9	147.6	501.8

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、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、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、継目の下縁が開きはじめ、除荷時においても継目は閉じなかった。その後の荷重増荷により継目の開口が大きくなり、V字型に変形し上側コンクリートが圧縮破壊した。また、残留変位を最大変位で除した値を復元率と定義し、計算値を表-8 に示すが、除荷後の変形復元率が、基準供試体 M-1 に比べて一様に低い傾向にあった。横拘束を有する MC-1, MC-2 については、計測値は他と同様の傾向があるものの、目視による継目のひび割れ発生は遅く、継手の違いにより破壊箇所が異なった。ループ継手を有する全供試体共、継手位置にひび割れは発生しておらず、重ね継手のものに比べ継目のひび割れ成長が早いという特徴を有していた。

3.2 考察

実験値と計算値の比較を表-9 に示す。

(a) ひび割れ発生について

継目の荷重-ひび割れ幅の関係を図-5、さらに図-5の内、荷重初期の様子を図-6 に示す。M-2 ~M-5 供試体では、最初のひび割れ発生が荷重荷重 30 kN 付近で継目の位置において確認された。荷重荷重・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  $-2.3\text{N/mm}^2$  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。図-6 に示すように、各供試体共、ひび割れ発生限界が低く、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。しかし、横拘束のある MC-1, MC-2 では、ひび割れ発生荷重に若干の改善が見られた。

(b) 継手性状について

重ね継手とループ継手の比較では、重ね継手

表-7 実験結果のまとめ

供試体名	継目有無	ひび割れ発生荷重 $P_{cr}$ (kN)	1) 鉄筋初降伏 $P_{y0}$ (kN)	最大荷重 $P_u$ (kN)	2) 破壊箇所	3) 破壊形態	降伏変位(載荷点)		終局変位(載荷点)		
							プレキャスト側 $\delta_s$ (mm)	後打ち側 $\delta_t$ (mm)	プレキャスト側 $\delta_s$ (mm)	後打ち側 $\delta_t$ (mm)	
1	M-1	無	80	111	220	A	a	1.9	2.1	13.6 <sup>5)</sup>	14.7 <sup>5)</sup>
2	M-2	有	29	100	202	A	a	2.2	2.2	27.4	25.9
3	M-3	有	30	105	197	A	a	2.6	2.5	26.1	26.8
4	M-4	有	30	103	200	A	a	2.3	2.3	22.0	21.2
5	M-5	有	32	99	179	A	a	4.5	4.5	42.1	41.5
6	MC-1	有	42 <sup>6)</sup>	104	156	B	b	2.0	2.2	14.1	22.0
7	MC-2	有	40	105	202	A	a	1.9	2.0	15.1	15.7

- 1) 初降伏荷重は、引張最外縁の鉄筋が降伏歪みとなる荷重
- 2) A: 打ち継目, B: 場所打側載荷点
- 3) a: 圧縮部破壊, b: 荷重値の上昇が無くなり載荷終了
- 4) 終局変位は、最大荷重~除荷における最大変位
- 5) M-1 供試体の終局変位値は、最大荷重における変位とした。
- 6) MC-1 供試体は場所打側載荷点破壊だが、本数値は継目の値

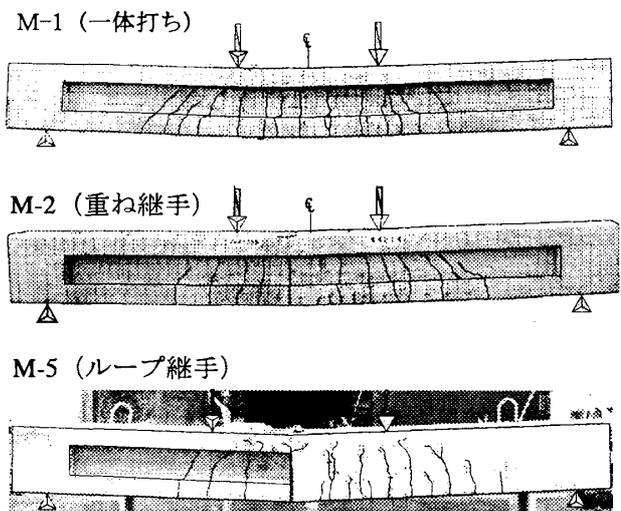


図-4 実験終了後のひび割れ状況

表-8 載荷点変位と復元率

	プレキャスト側			場所打ち側		
	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)	復元率	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)	復元率
M-1	14.7	7.1	0.51			
M-2	27.4	19.8	0.27	25.9	18.7	0.28
M-3	26.1	18.9	0.28	26.8	19.2	0.28
M-4	22.0	13.1	0.40	21.2	12.9	0.40
M-5	42.1	36.9	0.12	38.8	33.8	0.13
MC-1	14.1	7.7	0.45	22.0	14.0	0.36
MC-2	15.1	8.2	0.46	15.7	8.4	0.47

表-9 実験値と計算値の比較

供試体名	着目箇所	実験値			計算値			
		曲げひび割れ $P_{cr}$ (kN)	鉄筋初降伏 $P_{y0}$ (kN)	最大荷重 $P_u$ (kN)	曲げひび割れ $P_{cr}$ (kN)	鉄筋初降伏 $P_{y0}$ (kN)	最大荷重 $P_u$ (kN)	
1	M-1	中央	80	111	220	83	112	157
2	M-2	継目	29	100	202	39	74	186
3	M-3	"	30	105	197	39	74	186
4	M-4	"	30	103	200	39	74	186
5	M-5	"	32	99	179	39	74	185
6	MC-1	場所打	42	104	156	39	74	148
7	MC-2	継目	40	105	202	39	74	186

を有する供試体で、継手部にひび割れが発生しているが、ループ継手部にはひび割れは生じていなかった。これは、ループ継手が互いに引張られることで、ループ継手内に荷重による引張り力が低減される（圧縮応力が生じている）領域が形成されるため、継手部の歪みが継目部に集中し、M-5 のように大きなひび割れに成長したと思われる。尚、同じループ継手を有するM-3とM-5の比較でも、特にM-5のひび割れ幅が大きいことについては、図-7に荷重-変位の関係について実験値とADINAによる非線形解析の結果を示すが、解析値とM-5の実験値が近く、解析上で引張り鉄筋の付着切れが生じていたことから考えて、M-5供試体の載荷時材令が40日程若いために他と比較して若干強度が低く、それに伴う付着強度も低かったため、プレキャスト側の引張り鉄筋の付着切れがM-3より早期に起こったと思われる。

(c) 変位復元特性について

鉄筋塑性域での静的繰り返し載荷による荷重-変位の関係(載荷点変位)を図-8に示す。M-1に比べ、荷重を除荷した時の残留変位が大きく、RC構造に近い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 $0.87\text{N}/\text{mm}^2$ 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。この点に関しても横拘束がある場合には、M-1に近い挙動を示している。

(c) ひび割れ幅について

継目部のひび割れ幅の実験値と計算値の比較を図-9に示す。計算値はひび割れ幅の算定式<sup>1)</sup>において、 $k=2.0$ とすることで継目部の鋼材付着性状を考慮したが、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。

(e) 最大耐力について

最大耐力に関しては、M-5供試体が計算値の

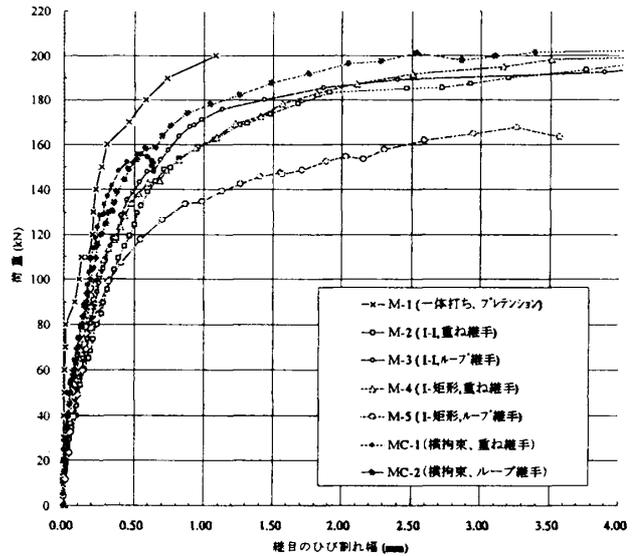


図-5 継目の荷重-ひび割れ幅関係

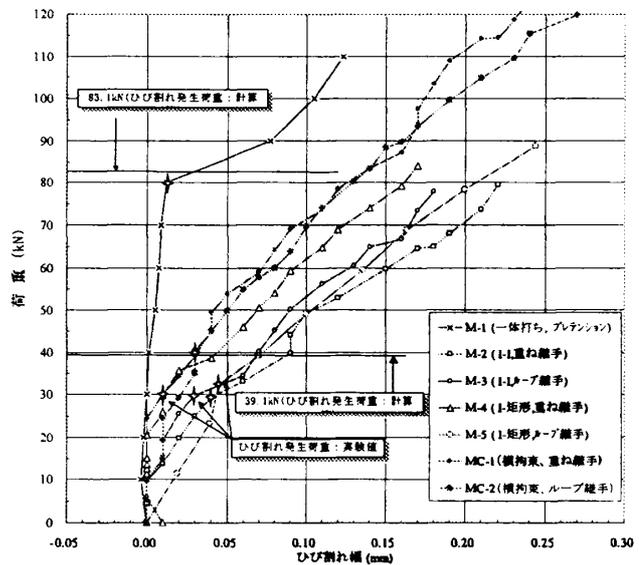


図-6 継目の初期荷重-ひび割れ幅

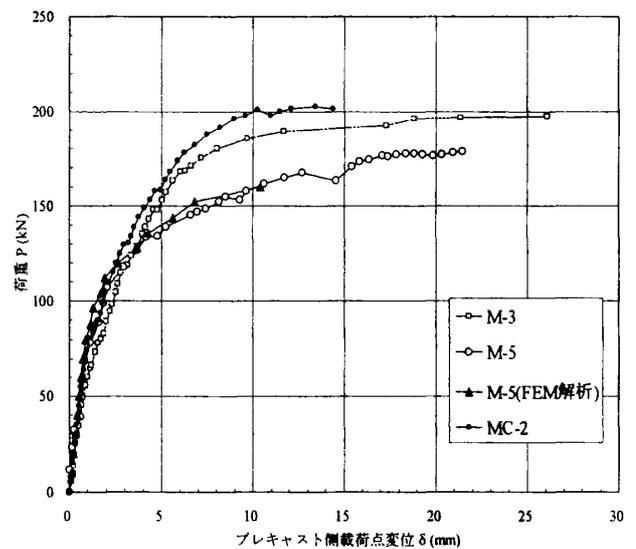


図-7 プレキャスト側載荷点の荷重-変位関係

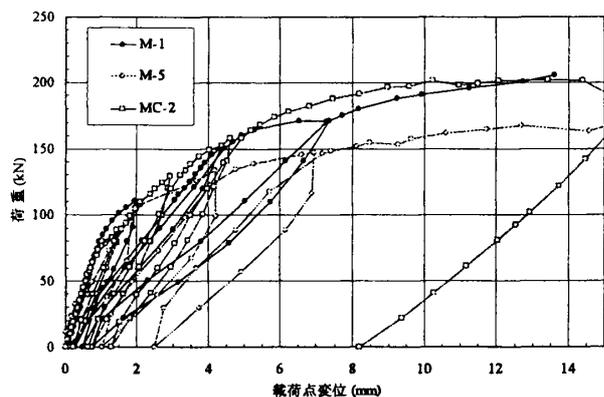


図-8 プレキャスト側載荷点の荷重-変位履歴

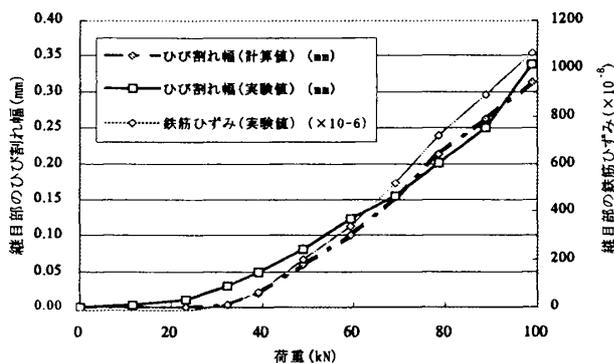


図-9 M-5 継目ひび割れ幅と荷重の関係

97%となった以外は、全ての継目を有する供試体で5~9%程度計算値を上回っており、本構造の継目部における終局耐力は一般部と同程度と考えることができる。

#### (f) じん性率について

最下縁鉄筋降伏時の変位を供試体の降伏変位とした場合のじん性率は概ね 10 程度という結果となった。よって、特にじん性を要求されるラーメン構造にも本構造の適用が可能と考える。

## 4. まとめ

本構造の特徴は、ひび割れ発生限界は低い、一般部と同程度の終局耐力は有しているということであるが、これは本構造の特徴というよりは、打ち継目を有する構造の特徴と考えられ、ひび割れを内部的に有している構造と言える。本実験の範囲内で得られた知見を以下に述べる。

(1) 横拘束の無い供試体のひび割れ発生荷重は、計算値の 84%程度であり、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) 横拘束のある打ち継目のひび割れ発生荷重は計算値とほぼ一致し、MC-1 供試体が場所打ち側で破壊したことから明確な効果が確認出来たが、荷重-ひび割れ幅の関係は他と同様であり、設計的に考慮するには、今後の定量的検証が必要である。
- (3) 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<sup>1)</sup>で推定可能である。本実験では、異形鉄筋 D6 と PC 鋼材  $\phi 9.3$  の併用で  $k=2.0$  となった。
- (4) 終局耐力については、継目を有していても現状の計算手法で対応可能である。
- (5) ループ継手の継手強度は重ね継手に比べて高いと考えられるが、耐力の効果は認められず、集中して使用する場合には、ループ継手の特性が継目に悪影響を及ぼす可能性があると思われる。今後、この点に関する検証が必要と考える。

## 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, 山田一字, 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/V-5, pp.167~176
- 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, pp.83~96
- 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 pp.203~208
- 5) 今村晃久, 毛利忠弘, 天野明子, 角田與史雄 : スプライス PC 構造に関する実験的研究について, 第 9 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 pp.115~120