

(94) プレキャスト床版継手の静的および疲労強度に関する研究

山口大学大学院 工学研究科 正会員 ○石川 哲  
 (株) ピーエス 技術研究所 正会員 阿部宗人  
 山口大学工学部 Ph. D 正会員 浜田純夫  
 山口大学工学部 助教授 正会員 高海克彦

1. はじめに

近年、交通量の増加に伴い橋梁床版の損傷が問題になりつつある。また、T荷重が20tfから25tfになり<sup>1)</sup>、重車両が増加したことも今後損傷の増加につながると考えられる。損傷した床版の取り換えは施工期間の短縮、また、将来の労働力不足が予測される中、現場作業の省力化などからプレキャスト化が望まれるようになった<sup>2)</sup>。プレキャストプレストレスト床版は多くの利点を有しているが、施工の際に問題となるものの一つにプレキャスト床版相互の接合方法がある。本研究では合理的な接合方法の開発とともに、静的・疲労挙動の検討を行った。

2. 実験概要

(1) 供試体

供試体は図-1に示すように、プレキャスト床版の一部を想定した実験供試体とした。実験室の規模等から実物のサイズに近いものは不可能であったが、供試体断面の厚さは実際の床版厚に近いものとした。いずれの供試体においても断面中央にプレストレスを供試体全体に導入した。接合位置は、曲げモーメントを与える供試体とせん断を与える供試体とは異なる。これら供試体の概要を表-1および図-2に示す。表中の供試体番号の中において、PJは継手構造を有し後打ちコンクリートを打設する供試体、PMは直接供試体をマッチさせた供試体を表す。また、継手構造図を図-3に示す。導入したプレストレス応力度は37.0kgf/cm<sup>2</sup>であり、有効係数は0.798であったので有効プレストレス量は29.5kgf/cm<sup>2</sup>が得られた。

(2) 使用材料および力学的性質

実験供試体の作製に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。細骨材は海砂(脱塩砂)で比重2.58、粗骨材は碎石で比重2.70を用い、混和材はマイティー150をセメント量の0.3%とした。表-3に試験時の圧縮強度、割裂強度、曲げ強度およびヤング係数を示す。また、表-4にSI単位系への換算表を示す。鉄筋はSD30(SD295A)、PC鋼材はSBPR 95/110(SBPR 930/1080)を用いた。

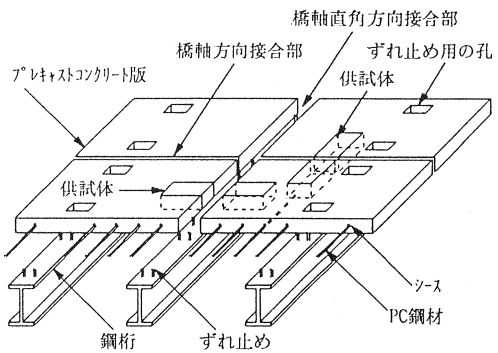


図-1 実験供試体モデル

表-1 供試体の概要

供試体番号	供試体数	接合位置 (cm)	接合長さ (cm)	荷重方法	特徴
PJ1	2	0	7	2点	鉄筋ラップ
PJ2	1	10	7	1点	鉄筋ラップ
PJ3	2	0	10	2点	鉄筋ラップ
PJ4	2	10	10	1点	鉄筋ラップ
PJ5	2	0	20	2点	ラップ部は水平ループ
PM1	8	0	0	2点	接合面は平面
PM2	2	10	0	1点	接合面は平面
PM3	1	40	0	1点	接合面は平面
PM4	2	0	0	2点	接合面は波形
PM5	1	40	0	1点	接合面は波形
PM6	1	0	0	2点	引張鉄筋が連続(スース)
PM7	1	0	1	2点	目地幅1cmにモルタルを打設
PM8	1	10	1	1点	目地幅1cmにモルタルを打設
PM9	2	0	0	2点	接合面にセメントペースト塗布
PM10	2	10	0	1点	接合面にセメントペースト塗布

注) 接合位置の数値はスパン中央からの距離

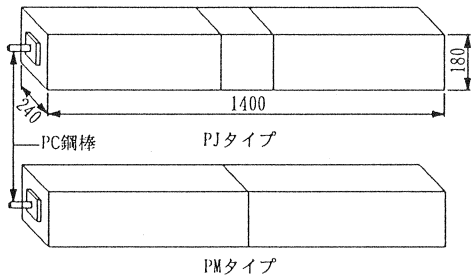


図-2 実験供試体概要

表-2 コンクリートの配合表

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/cm <sup>3</sup> )				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
42.9	40	186	435	677	1008	1.31

表-3 コンクリートの力学的性質 (kgf/cm<sup>2</sup>)

試験供試体	供試体数	圧縮強度	割裂強度	曲げ強度	ヤング係数 (×10 <sup>6</sup> )
静的試験用	81	514.6	28.9	54.1	3.95
疲労試験用	25	528.2	30.3	53.2	3.95

表-4 SI単位系への換算表

荷重	1tonf = 9.806 × 10 <sup>3</sup> N
モーメント	1tonfm = 9.806 × 10 <sup>3</sup> Nm
応力・ヤング係数	1kgf/cm <sup>2</sup> = 9.806 × 10 <sup>-2</sup> Mpa

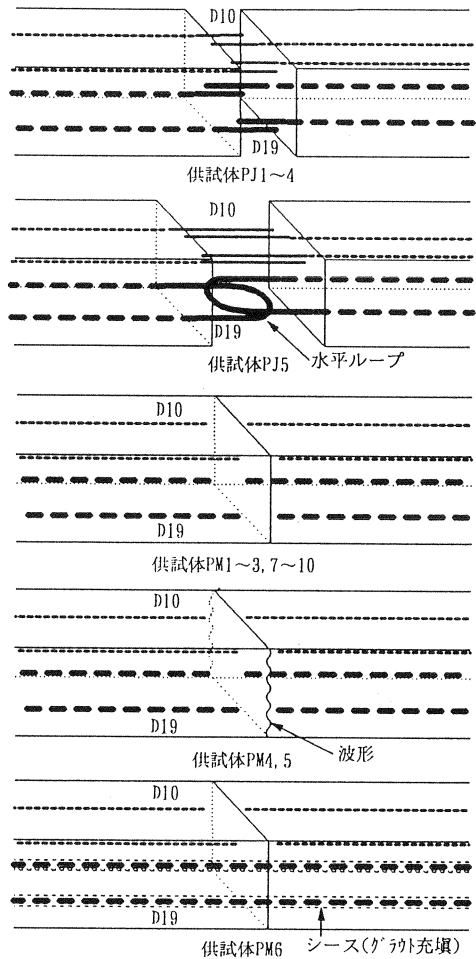


図-3 継手構造図

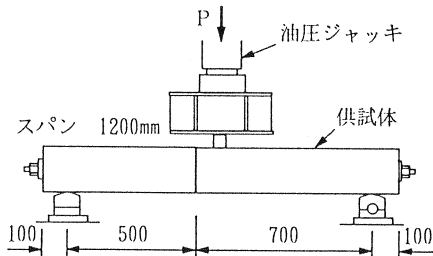


図-4(b) 荷重方法 (1点荷重)

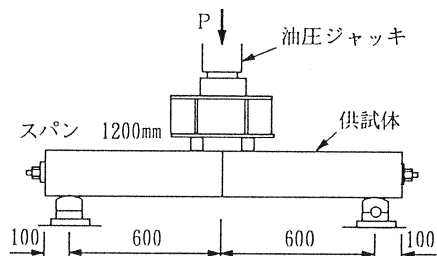


図-4(a) 荷重方法 (2点荷重)

(3) 荷重方法

荷重方法は、継手部が中央の供試体には図-4(a)に示すように純曲げが作用するように2点荷重とし、せん断の影響を調べる供試体として継手部をスパン中央から10cm、40cmずらした供試体には図-4(b)に示すように1点荷重とした。また、疲労試験では供試体PM1を試験対象とし、曲げを対象とすることより2点荷重とし、正弦波繰返し荷重を30～180cpm(0.5～3.0Hz)の間で試験機が制御可能な最大の繰返し速度で、荷重幅比65～70%(上限荷重は静的強度の75～80%、下限荷重は10%)を主に行った。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 静的試験

図-5、6に荷重-たわみ関係図を示す。これらによると供試体PJ1~4、PM1、2、4、7~10ではほぼ同様な曲線を描いており、曲げにおいては波形(供試体PM4)の効果は見られず、曲げとせん断力が作用する場合においても曲げとほぼ同様に作用していたと考えられる。これらの供試体は荷重初期段階ではプレストレスの効果により、たわみ、打継目部開きとも抑制されているが、荷重が4.5tonf程度を越えると継目部が開き有効断面が低下するため、たわみ、打継目部開きとも急増していることがわかる。供試体PJ5は他の単純に鉄筋をラップさせた供試体より降伏点が高かったが、これは鉄筋をループさせたことにより腹圧力が働いたためであると考えられる。また、供試体PM6も引張鉄筋が連続しているため降伏点が高かった。供試体PM3、5では、接合面を波形にした供試体PM5が僅かに耐力が上回った以外は、ほぼ同様に微増しており降伏点が見られないまま破壊していることからせん断破壊であると考えられる。

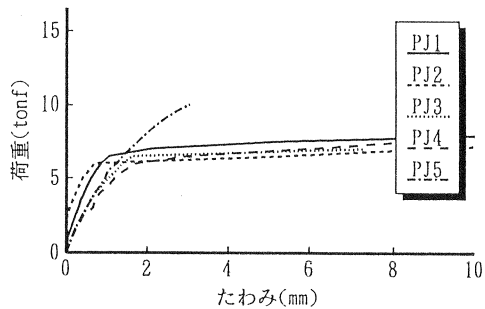


図-5 荷重-たわみ関係

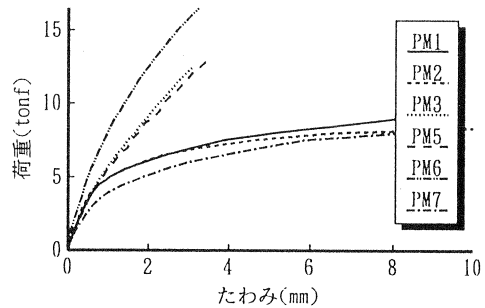


図-6 荷重-たわみ関係

ひび割れ図を図-7~10に示す。供試体PJタイプでは、接合区間の引張鉄筋位置付近に水平ひび割れが入りさらにプレキャスト部PC鋼棒位置付近から水平ひび割れが生じ、最終的には上部が圧壊した。ただし、供試体PJ5(図-7)ではプレキャスト部に曲げひび割れが見られた。これは、腹圧力により供試体がより一体化されたためと考えられる。供試体PM1、4、7、9(図-8)では継目が開いた後継目部PC鋼棒位置付近から水平ひび割れが生じ、荷重が高くなるにつれて載荷点の方へ進展し、終局時には圧縮側が圧壊した。また、供試体PM2、8、10では被載荷側のみに水平ひび割れがPC鋼棒位置付近から生じ、その後載荷点に向かってひび割れが進展し終局時には圧縮側が圧壊した。供試体PM3、5では載荷点直下付近から曲げひび割れが生じ、荷重が高くなると継目部のPC鋼棒付近から載荷点に向かい一気にひび割れが生じ破壊した。ただし、接合面を波形にした供試体PM5(図-9)では後打部(非載荷側)にもひび割れが生じたが、これは接合面を波形に加工することによりせん断力の伝達があったためと考えられる。供試体PM6(図-10)では引張鉄筋が連続しているため他の供試体とは異なり、引張側から曲げひび割れが生じ、引張側から圧縮側中央に向かって進展し終局時には圧

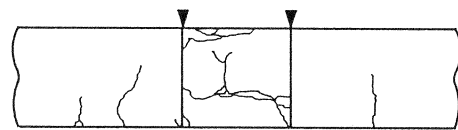


図-7 ひび割れ図(供試体PJ5)

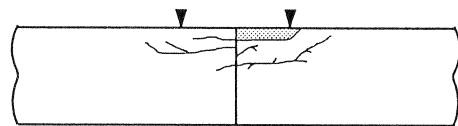


図-8 ひび割れ図(供試体PM1)

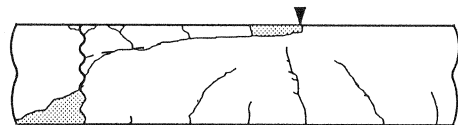


図-9 ひび割れ図(供試体PM5)

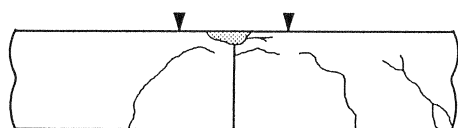


図-10 ひび割れ図(供試体PM6)

上図において、▼は載荷点、■は剥落部を示す。

表-5 終局荷重と計算値

供試体 番号	実 験 値			計算値	
	開き発 生モーメント (tonfm)	破壊 荷重 (tonf)	破壊曲 げモーメント (tonfm)	破壊曲 げモーメント (tonfm)	実験値 計算値
PJ1	1.19	7.9	1.97	1.78	1.11
PJ2	1.13	7.8	1.95	1.78	1.09
PJ3	1.00	9.0	2.25	1.78	1.26
PJ4	1.05	8.5	2.56	1.78	1.43
PJ5	1.00	10.3	2.58	2.14	1.21
PM1	1.08	9.7	2.43	1.95	1.25
PM2	1.35	8.8	2.63	2.34	1.13
PM3	1.20	12.6	3.78	4.07	0.93
PM4	1.13	8.8	2.19	1.95	1.13
PM5	1.20	13.2	3.96	4.07	0.97
PM6	1.88	18.7	4.68	4.07	1.15
PM7	1.06	8.4	2.10	1.78	1.18
PM8	0.94	8.3	2.08	1.78	1.17
PM9	0.88	7.5	1.88	1.78	1.05
PM10	0.90	7.5	1.87	1.78	1.05

縮側が圧壊した。

表-5に終局耐力の実験値と計算値を示す。ほとんどの供試体において実験値が計算値を上回っていた。これによれば、供試体全体にプレストレスを導入していれば、継手構造の有無に関わりなく十分な耐力が得られることがわかる。特に、継手構造にループを用いたり、引張鉄筋を連続させる手法は高い耐力、たわみおよび打継目の開きの抑制を得るのに効果的である。供試体PM3、5が計算値を下回る結果となったが、これはスパン中央で引張鉄筋が降伏する前にせん断破壊が生じたことによるものと考えられる。

(2) 疲労試験

先に述べたように静的試験を行った供試体の中から施工の面から有利な供試体PM1について疲労試験を行った。表-6に疲労試験の結果を統計順序量の順に示し、破壊回数の対数、生存確率、および破壊形式を合わせて示す。表-6に与えられた生存確率Pを対数正規分布確立し上にプロットした値と疲労寿命の関係を図-11に示す。これよりわかるように疲労寿命Nの対数と対数正規分布に基づく生存確率が直線に近く、疲労破壊回数Nは対数正規分布に従うと仮定できる。このような仮定に基づけば、その直線の生存確率50%が平均疲労寿命となる。この手法の利点は疲労破壊を生じずに途中で打ち切ったデータが存在するときに簡単に平均寿命を得られることである。井上ら<sup>3)</sup>の研究を参考に、縦軸tを正規分布に基づいて標準偏差σで座標を表し、横軸を破壊回数の対数logNとし、logN軸方向の差(logN<sub>i</sub>-logN<sub>j</sub>)の自乗和の最小値に基づいて求めると次式を得る。

表-6 疲労試験結果

供試体名	荷重幅比 (%)	r	破壊回数 N(10 <sup>4</sup> )	log N	生存確率 P	破壊パターン
F1- 1	75	1	0.10	3.00	0.800	C
F1- 2		2	0.14	3.15	0.600	C
F1- 3		3	0.80	3.90	0.400	C
F1- 4		4	1.21	4.08	0.200	C
F2- 1	70	1	0.12	3.08	0.825	C
F2- 2		2	0.20	3.30	0.750	C
F2- 3		3	0.45	3.65	0.625	C
F2- 4		4	0.69	3.84	0.500	C
F2- 5		5	1.62	4.21	0.375	C
F2- 6		6	2.90	4.46	0.250	C
F2- 7		7	65.10	5.81	0.175	C
F3- 1	65	1	0.95	3.98	0.909	C
F3- 2		2	1.21	4.08	0.818	C
F3- 3		3	1.88	4.27	0.727	C
F3- 4		4	2.54	4.40	0.636	C
F3- 5		5	33.40	5.52	0.545	P
F3- 6		6	104.02	6.02	0.455	P
F3- 7		7	112.04	6.05	0.364	C
F3- 8		8	157.03	6.20	0.273	C
F3- 9		9	200>	6.30	0.181	-
F3-10		10	200>	6.30	-	-
F4- 1	60	1	200>	6.30	-	-
F5- 1	50	1	200>	6.30	-	-
F5- 2		2	200>	6.30	-	-
F5- 3		3	200>	6.30	-	-

注1) 荷重幅比=(最大荷重-最小荷重)/静的強度  
 注2) 破壊パターンのCおよびPはそれぞれコンクリートの破壊および鋼棒の破断を意味している。

$$S=70\% \text{ に対して、 } t=3.65-0.902\log N \quad (1)$$

$$S=65\% \text{ に対して、 } t=3.82-0.700\log N \quad (2)$$

図-12に疲労試験の結果から得られた破壊回数Nと荷重幅比Sの関係を示す。式(1)、(2)から得られた平均値を用いるとS-N曲線は次式のように求められる。

$$S=85.69-3.711\log N \quad (3)$$

これより200万回疲労強度を求めると静的強度62.3%が得られる。Ople<sup>4)</sup>の研究によればコンクリートの圧縮強度の200万回疲労強度は65.3%が与えられており、Venuti<sup>5)</sup>の継目のないPC梁においては56.3%(ただしPCによる応力分布は異なる)を示している。このようなことから継目を有するプレストレスを導入したプレキャストコンクリートの疲労強度は、継目のないプレストレストコンクリート梁と同程度の強度を有し、一般のプレストレストコンクリート床版と同様な設計が可能と考えられる。

図-13に荷重たわみ関係を示す。これは荷重幅比70%の供試体F2-5であるが、1回目から10回目の载荷に間に残留たわみが大きく増加しているのがわかる。また、1回目の载荷では線形変位をする弾性領域が4tf付近まであり、その後上に凸な曲線を描く塑性領域が存在しているが、载荷回数が進むにつれて弾性領域が低下し塑性領域に下に凸な曲線が現れるようになる。これは、コンクリートに鋼材と同じようなひずみ硬化現象が起こったと考えられる。また、荷重-たわみ曲線の傾きは剛性を表すが、1回目から10回目の载荷の間に剛性が大きく低下していた。これは1回目の载荷時にひび割れが生じ有効断面が低下したためと考えられる。

図-14に典型的なひび割れ図を示す。これは157万回で破壊に至った供試体F3-8のひび割れ図であるが、初回の繰り返しから僅かな水平ひび割れがPC鋼棒上部に生じ、そのひび割れは载荷回数と共に水平に進展し、終局時には圧縮部の破壊となった。水平ひび割れから進展する垂直ひび割れ以外は静的試験による破壊とほぼ同様であった。

200万回を越えても破壊しなかった供試体については残留強度試験を行った。その試験結果を表-7に示す。全体で約1割の強度増加が見られ、特に荷重幅の大きい供試体で顕著に見られた。これは疲労試験により、PC鋼棒にひずみ硬化を生じるか、コンクリートの応力分布が異なり抵抗モーメントの増大が生じたものと考えられる。

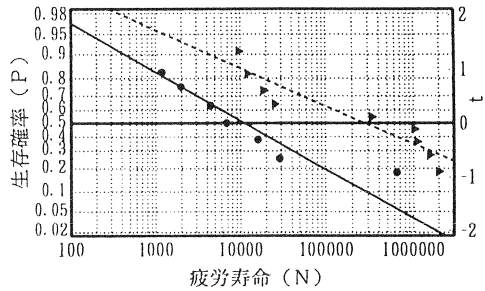


図-11 生存確率～疲労寿命関係

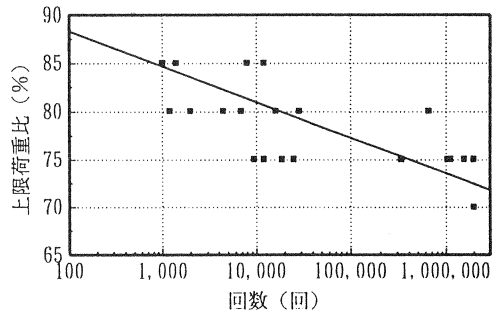


図-12 S-N曲線

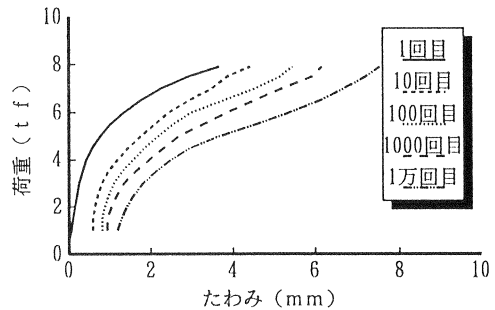


図-13 荷重-たわみ関係

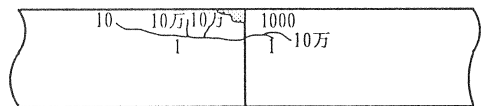


図-14 ひび割れ図

4. あとがき

本研究はプレキャストプレストレスト床版継手部分を対象にした梁部分に関する研究である。本研究から得られた結論は以下のようになる。

- (1) ひび割れ曲げモーメントの実験値は計算値より大きく、プレストレスを導入した接合方法は耐久性に対して有効な方法といえる。
- (2) 特に継手構造を持たなくとも静的、疲労強度ともに十分な強度を有しており、疲労強度に対して継目が弱点とはなっていないことが判明した。
- (3) 200万回繰返し荷重を受けたプレストレスト梁の静的強度は、初載荷の梁の静的強度を越えることが判明した。

また、今後さらに継手構造を改良し施工上難点の少ない工法を模索する必要があり、その継手構造に対して静的および疲労挙動の検討を行う必要がある。

最後に、本研究を行うに当たって、山口大学工学部兼行啓治技官、修論生および卒論生各位の御協力を得た。ここに深謝します。

表-7 疲労試験後の残留耐力

供試体名	載荷回数	残留強度	静的耐力	R/S (%)
	N (10 <sup>4</sup> )	R (tonf)	S (tonf)	
F5-1	200	10.6	9.9	1.07
F5-2	200	10.3	9.9	1.04
F5-3	270	10.1	9.9	1.02
平均		10.3	9.9	1.04
F4-1	200	11.1	9.9	1.12
F3-9	200	11.0	9.9	1.11
F3-10	209	10.7	9.9	1.08
平均		10.9	9.9	1.10

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ・Ⅲ共通編・コンクリート橋編、1994. 2.
- 2) 藤井：土木におけるプレキャスト化の現状と将来、コンクリート工学Vol. 30, No. 11, pp12-15, 1992.
- 3) 井上、西林、吉野：コンクリートの圧縮疲労特性と疲労強度の特性値に関する研究、土木学会論文集報告集、No. 451/V-17, pp. 59-67, 1992.
- 4) Ople, F.S., and Hulsbos, C.L.: Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient, ACI Journal, Vol. 63, No. 1, pp59-82, 1966
- 5) Venuti, W.J.: A Statistical Approach to the Analysis of Fatigue Failure of Prestressed Concrete Beams, ACI Journal, Vol. 62, No. 11, pp1375-1394, Nov. 1965.