

種々のプレキャスト床版継手の静的挙動 およびその実用性に関する研究

浜田純夫¹・阿部宗人²・石川 哲³

¹正会員 Ph.D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

²正会員 株式会社ピー・エス 技術研究所所長 (〒330 埼玉県大宮市北袋町1-297)

³正会員 工修 株式会社熊谷組 北関東支店 (〒331 埼玉県大宮市大成町2-226)

交通量の増加および自動車荷重の増大により橋梁床版はますます過酷な状態にさらされている。そのため多くの床版がより強い床版に取り替えられつつある。従来のRC床版を増厚することなしに再びRC床版を打設するには多少無理があり、プレストレストコンクリートの適用が望まれている。また、新設の橋梁でも省力化のため用いられる様になっている。

本研究においてはプレキャスト床版が開発される中で、それぞれの特性について研究を試みるものである。また、特に静的耐力および耐久性に注目して種々の継手構造に対して実験を行った。その結果RC構造、PC構造のいくらかの継手は耐荷力、耐久性の一つの要素であるひび割れ特性ともに優れていた。

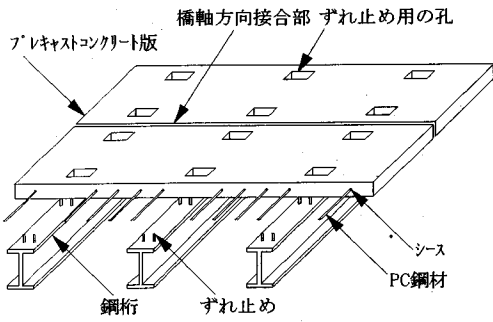
Key Words : precast concrete slab, prestressed concrete slab, strength, joint, durability, crack, crack opening

1. まえがき

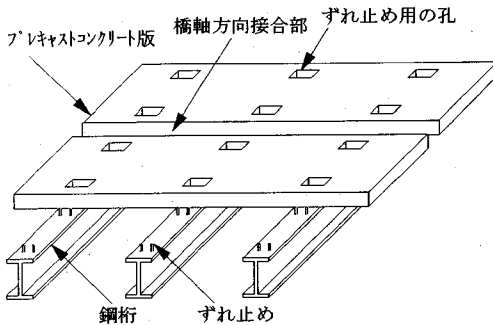
交通量の増加に伴い橋梁床版の損傷が問題になって以来数年が経った。また、T荷重が20tfから25tfに増え¹⁾、従来よりも重量の大きな重車両の増加により、床版の損傷は今後ますます増加すると考えられる。損傷を受けた床版の取り換えは工事の急速性を要することからプレキャスト床版の期待が高まった。また、将来の労働力の不足から現場の労働を削減するため、プレキャスト化が叫ばれるようになった²⁾。最近では、プレキャスト床版を埋設型枠として用い、現場打ち鉄筋コンクリートを打設する床版はハーフプレキャスト床版と呼ばれ、よく用いられている³⁾。ハーフプレキャスト床版はプレキャストと現場打ちの半々という解釈もされるが、米国ではプレキャスト床版厚と現場打設の厚さが半々という意味でhalf depth precast slabとも表現されている。ハーフプレキャスト床版の研究はKluge⁴⁾および江本ら⁵⁾が研究しており、さらに上田ら⁶⁾はプレキャスト床版と打設コンクリートの付着性状に関する研究を行っている。野村らは鉄筋の接合方法として、スパイラル鉄筋を拘束筋として用いて接合性の向上をはかっている⁷⁾。また、渡辺はハーフプレ

キャスト工法を自身の研究に基づいて全体的な視野で解説を行っている^{8), 9)}。今井¹⁰⁾も同様に最近の利用に対して報告を行い、また、PCIはこの工法を詳しく紹介している¹¹⁾。ただし、ハーフプレキャストはプレキャスト床版自身には継手を有さないことが利点の一つであるが、現場での鉄筋組立とコンクリート打設が必要である。特殊な接合方法としては、埋め込んだ鋼板を添接板を用いてボルトで連結している例もある¹²⁾。

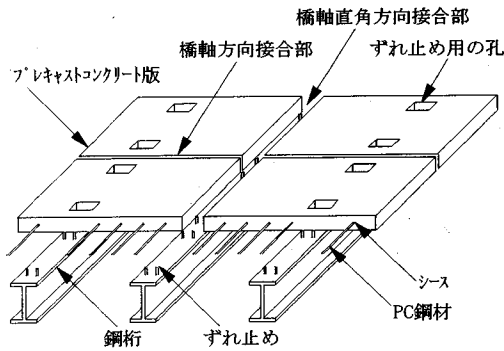
現場打ちコンクリートを打設しないプレキャスト床版は施工上大きさに限界があり、必ず床版どうしを接合する必要がある。それらの接合方法は大きく分類すると次の2種類となる。その一つは、図-1(a)に示されるようにプレストレスト床版を橋軸直角方向に細長い板とし、橋軸方向にポストテンションの鋼棒でストレスを与える方法である。また、図-1(b)のように橋軸方向にはプレストレスを導入せず不連続な板で一方向板として設計を行う方法、あるいは鉄筋等を張り出して鉄筋コンクリートとして接合する方法等も提案されている。プレキャストプレストレスト合成床版工法(PPCS工法)は、橋軸方向にプレストレスを導入して接合する方法の一つとみなすことができる¹³⁾。他の一つは米国で比較的良好に用



(a) プレストレストを導入する床版



(b) 一方向板のみのプレキャスト床版



(c) 橋軸上で接合するプレキャスト床版

図-1 プレキャストプレストレスト床版

いられているが、図-1(c)に示すように主桁に載せることができる長さのプレキャスト床版を主桁上で主桁直角方向にRC構造として接合する方法である。我国においてはプレキャスト床版の研究は中井らおよび松井らにより行われ、強度、クリープに関する一連の実験研究が行われている^{(14)~(19)}。また、藤井も同様の研究を行っている²⁰⁾。明橋らは将来損傷を受けた床版の取り換えを考えたプレストレストプレキャスト床版の開発を試みている²¹⁾。国外において

は、プレキャスト床版の適用に関する調査研究をBiswasおよびBarkerが発表している^{22), 23)}。Issaらは、プレストレストプレキャスト床版の適用性に関して現状の調査結果を発表している^{11), 24)~26)}。また、PCIも施工方法について報告している²⁷⁾。継手部をプレキャスト部材から鉄筋を張り出してループ状にしている床版も提案されており、これに関する研究は前田ら²⁸⁾、橋ら²⁹⁾、中井ら³⁰⁾および佐藤ら³¹⁾が行っている。従来の研究は継手部を有しないハーフプレキャスト床版、プレストレストにより接合されているプレキャスト床版およびループ鉄筋による継手を有するプレキャスト床版の3種類がほとんどである。

前述のように、プレキャスト床版の接合方法には基本的に2種類あり、その一つはプレストレスト用鋼棒で一体化した接合方法であり、他の一つはプレキャスト部材に埋め込まれた鉄筋を定着区間まで延長し、後打ちコンクリートで接合する方法である。本研究においては継手を有するプレキャスト床版を対象とし、前述したこれら2種類の基本的な接合方法で従来から提案されている種々の接合方法、および新たに提案した接合方法に対し終局耐力を中心に静的な性状を調べた。このため継手を有しないハーフプレキャスト床版は対象としないこととした。

また、本研究においては種々の継手について変形性能、継目部の開き、ひび割れパターン等の力学的挙動を調べ、それぞれの継手の実橋への適用性について検討を行うことを目的としたものである。プレキャスト床版接合部の長さはそれぞれの目的に応じて決められており、橋軸方向の接合方法と橋軸直角方向の接合方法は設計上いずれの曲げモーメントにも抵抗できる強度を必要としている。この意味においては共通の供試体で実験が可能となる。接合区間長は長ければどのような方法でも接合が可能ではあるが、プレキャスト部分がPC構造、継手区間がRC構造と別構造になるために、また主桁上での継手構造は上フランジ幅より小さいことが適切であるために接合区間長は短く取ることが望ましい。本研究においては主桁上での継手、主桁と直角方向での継手の双方の適用を考え、接合区間長には一応の制限を設けて実験を行うこととした。このようなプレキャスト部材の接合においては耐力のみならず、雨水に常にさらされる可能性にある床版に対しては、耐久性の観点からひび割れ性状が重要になってくる。このため本研究では継目部付近のひび割れパターンとひび割れ幅(継目部の開き幅)にも注目した。従って、本研究は、従来から情報不足となっている種々のプレキャスト床版の接合方法の適用性、つまり、強度、

ひび割れおよび変形性能を調べることを目的として行なったものである。本実験で対象にしたプレキャスト床版の中には、現場打ち鉄筋コンクリートの継手方法とみなして、ハーフプレキャスト工法も含まれている。ただし、埋設型枠のようにプレキャスト部材に接合を期待していない場合は対象としないこととし、プレキャスト部材が力学的に寄与する場合のみを対象とした。

2. 実験供試体および実験方法

(1) 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-1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を用いた。混和剤としてAE減水剤をセメント量の0.3%とした。

静的試験時の圧縮強度、割裂強度、曲げ強度および弾性係数を表-2に示す。配合は同一であったものの、各供試体に対し3個ずつの供試体を用いて材料試験を行った。また、鉄筋はSD295Aを用い、PC鋼材は17mm, B種1号, SBPR 930/1080でその性質を表-3に示す。また、参考のため表-4にSI単位系への換算表を示す。

(2) 実験供試体

プレキャスト床版の継手部の強度に関する実験によく用いられているように、図-2に示されるようなプレキャスト床版の一部を想定した実験供試体とした。この継手部は、橋軸直角方向接合部はRC構造で、橋軸方向接合部はRC構造とPC構造にする場合がある。また、供試体のサイズは実験室の規模および実験に必要な供試体の個数の関係から実物のサイズに近いものは不可能であった。しかしながら供試体断面の厚さは寸法効果として大きく影響するため、また継手構造の可能性も検討する必要があるため実物の床版厚に近いものとした。

プレキャスト床版部材の接合方法には、前述したように基本的に2種類ある。その一つは、継手部において何らかの形で鉄筋コンクリート構造となっている接合方法、他の一つはプレストレストコンクリート構造を適用した接合方法である。本研究においては、これらの接合方法をそれぞれRC法およびPC法と呼ぶこととする。また、接合部に後打ちコンクリートを必要とする工法と、必要としない工法に分類できる。しかしRC法では常に継手区間部に後打ちコンクリートが必要であり、PC法のようにマッチキャストで接合することはほぼ不可能なことである。従って、接合方法を大きく分類するとこれらを組み

表-1 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 ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
42.9	40	186	435	677	1008	1.31

表-2 コンクリートの力学的性質(単位kgf/cm²)

供試体数	圧縮強度	割裂強度	曲げ強度	ヤング係数 (×10 ⁵)
129	487.6	31.7	53.6	3.82

表-3 PC鋼棒の力学的性質(単位kgf/mm²)

規格と試験	降伏点強度	引張強度	伸び (%)	ヤング係数 (×10 ³)	リラクション (%)
規格	94.9	110.2	5	—	1.5
	以上	以上	以上		以下
試験	110.1	117.8	12	20.3	0.87

表-4 SI単位系への換算表

荷重	1tf	=9.806kN
モーメント	1tf・m	=9.806kNm
応力・ヤング係数	1kgf/cm ²	=9.806×10 ⁻² Mpa

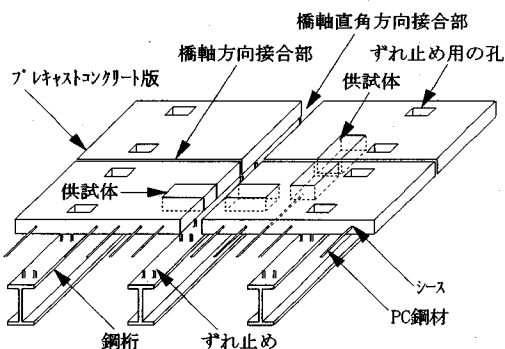


図-2 実験供試体モデルの選び方

合わせて3種類となる。また、供試体の分類とはならないが、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もあり、それらは供試体断面は同じであるが接合位置が異なる。これら供試体の概要を図-3(a)~(d)および表-5に示す。表中の供試体番号の中でRおよびPはそれぞれRC法およびPC法を、JおよびSMはそれぞれ接合部に後打ちコンクリートを打設する供試体および直接供試体どうしをマッチさせている供試体を示している。供試体RJ5の鉄筋の

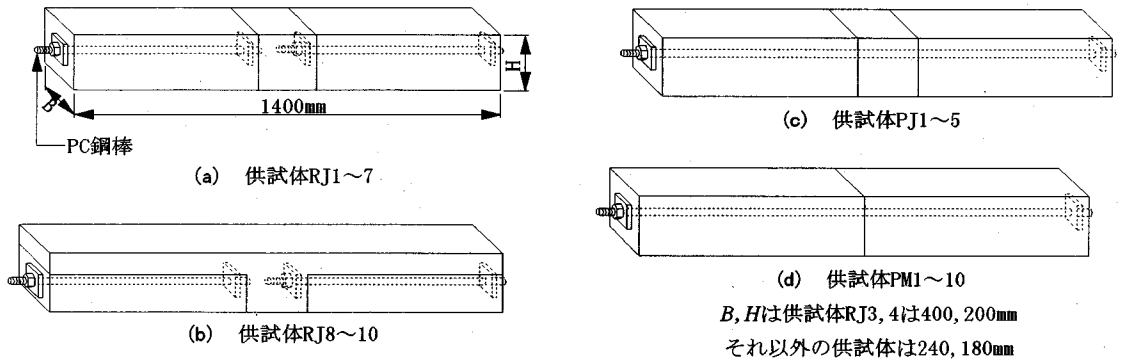


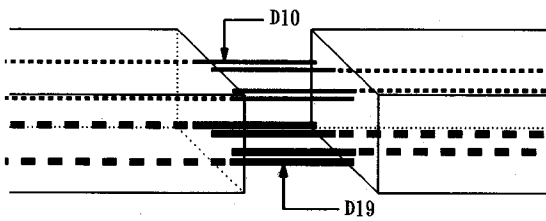
図-3 供試体の名称と概要

表-5 供試体の概要

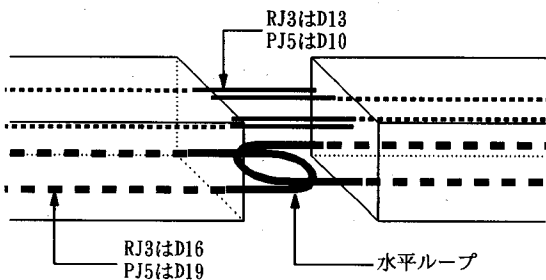
供試体番号	供試体数	接合位置 (cm)	接合長さ (cm)	載荷方法	PC鋼棒の位置 (cm)	鉄筋量 (cm ²)	特徴
RJ1	3	0	20	2点	9.0	7.157	鉄筋ラップ
RJ2	3	30	20	1点	9.0	7.157	鉄筋ラップ
RJ3	2	0	20	2点	9.0	13.01	ラップ部の鉄筋を水平ループに加工
RJ4	2	0	20	2点	9.0	15.89	ラップ部の鉄筋を垂直ループに加工
RJ5	1	0	20	2点	9.0	7.157	接合する際、埋設シースに鉄筋(全長110cm)を挿入
RJ6	1	0	20	2点	9.0	7.157	カット部を設け鉄筋(全長140cm)を配置しモルタルを打設
RJ7	1	0	20	2点	9.0	7.157	RJ6の鉄筋(全長60cm)の両端をワッシャーとボルトで固定
RJ8	1	0	20	2点	6.5	7.157	ハーフプレキャスト、プレキャスト部は13cm厚
RJ9	1	0	20	2点	6.5	7.157	ハーフプレキャスト、プレキャスト部は13cm厚で表面に処理
RJ10	1	0	20	2点	4.5	7.157	ハーフプレキャスト、プレキャスト部は9cm厚
PJ1	2	0	7	2点	9.0	7.157	鉄筋ラップ
PJ2	1	13.5	7	1点	9.0	7.157	鉄筋ラップ
PJ3	2	0	10	2点	9.0	7.157	鉄筋ラップ
PJ4	2	15	10	1点	9.0	7.157	鉄筋ラップ
PJ5	2	0	20	2点	9.0	7.157	ラップ部の鉄筋を水平ループに加工
PM1	8	0	0	2点	9.0	0	ドライジョイント、接合面は平面
PM2	2	10	0	1点	9.0	7.157	ドライジョイント、接合面は平面
PM3	1	40	0	1点	9.0	7.157	ドライジョイント、接合面は平面
PM4	2	0	0	2点	9.0	0	ドライジョイント、接合面は波形
PM5	1	40	0	1点	9.0	7.157	ドライジョイント、接合面は波形
PM6	1	0	0	2点	9.0	5.730	ドライジョイント、引張鉄筋が連続(シース)
PM7	1	0	1	2点	9.0	0	目地幅1cmにモルタルを打設
PM8	1	10.5	1	1点	9.0	7.157	目地幅1cmにモルタルを打設
PM9	2	0	0	2点	9.0	0	接合面にセメントペースト塗布
PM10	2	10	0	1点	9.0	7.157	接合面にセメントペースト塗布

注1) 供試体名において先頭の文字がRの場合はプレキャスト部のみに、Pの場合は供試体全体にプレストレスを導入したもの。

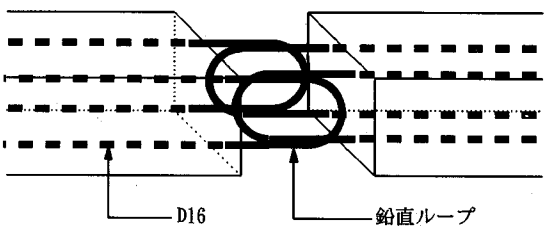
注2) 接合位置の数値はスパン中央から接合区間中央までの距離、鋼棒の位置は供試体下縁からの距離、鉄筋量は最大曲げモーメントが作用する区間における鉄筋の最小断面積としている。



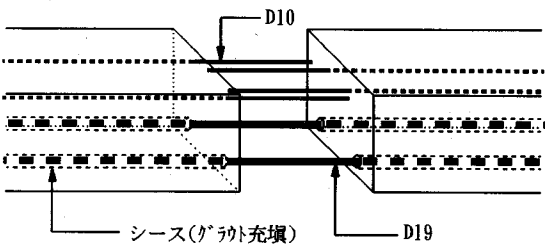
(a) 供試体RJ1, 2



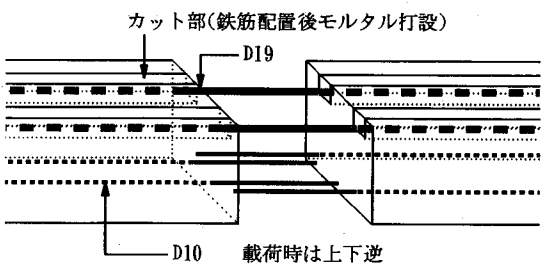
(b) 供試体RJ3, PJ5



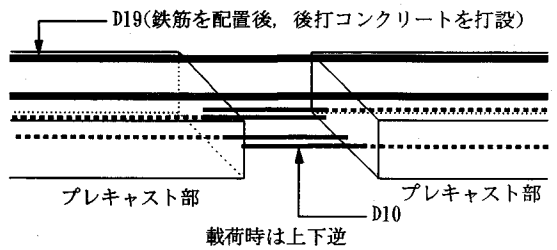
(c) 供試体RJ4



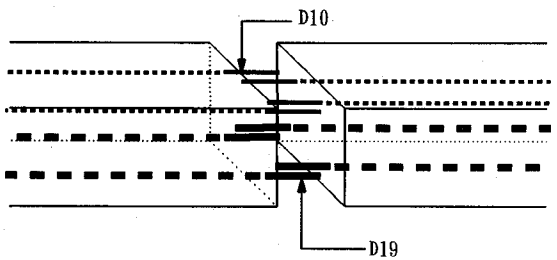
(d) 供試体RJ5



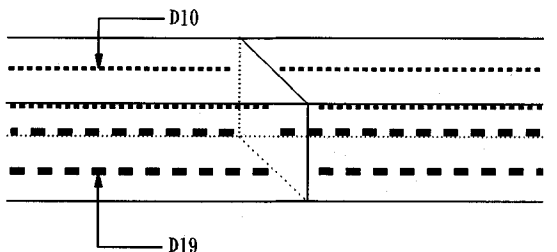
(e) 供試体RJ6, 7



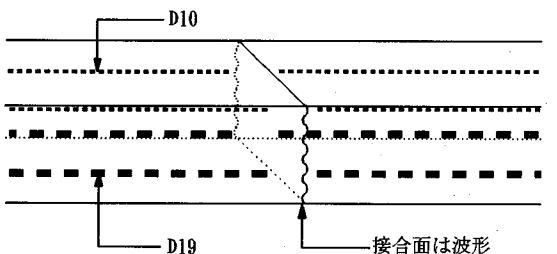
(f) 供試体RJ8~10



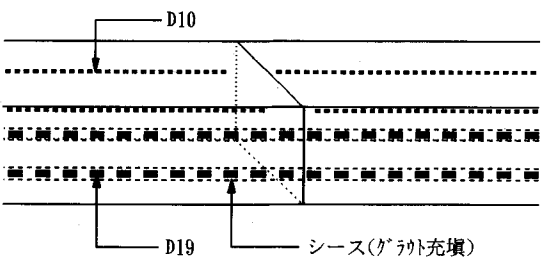
(g) 供試体PJ1~4



(h) 供試体PM1~3, 7~10

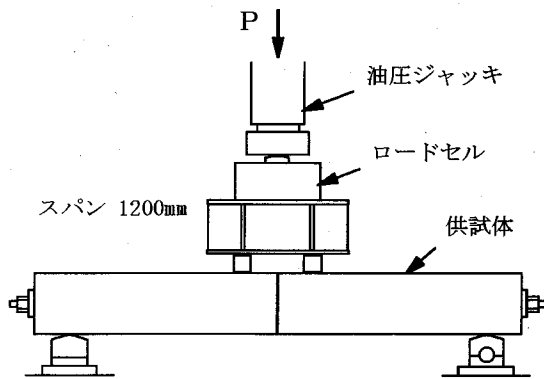


(i) 供試体PM4, 5

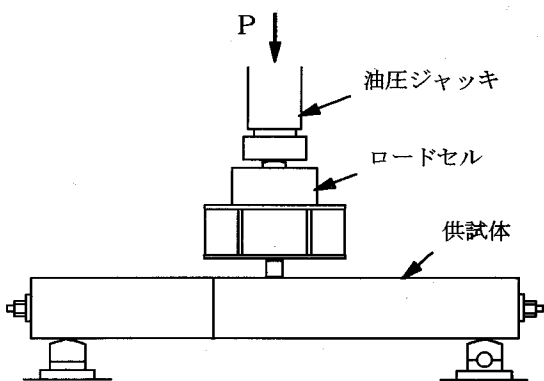


(j) 供試体PM6

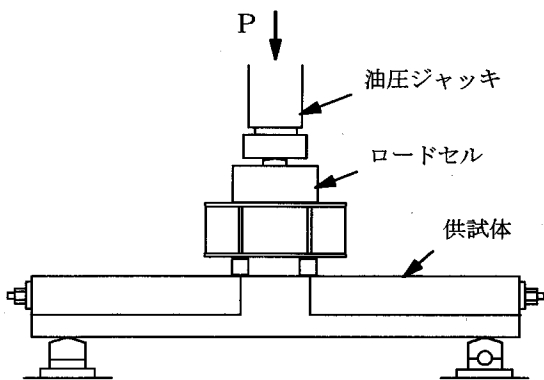
図-4 継手構造概略図(後打部は含んでいない)



(a) 2点載荷



(b) 1点載荷



(c) 2点載荷(供試体RJ8~10)

図-5 載荷方法

シースへの埋め込み量は45cmとし、定着長は鉄筋径の23.7倍で基本定着長より長くした。鉄筋をシースにセットした後グラウトを行った。供試体RJ6, 7のコンクリートをカットして鉄筋を配筋しているが、配筋後モルタルを打設して一体化した。供試体PJおよびPMタイプはいずれも断面中心にPC鋼棒を用いて

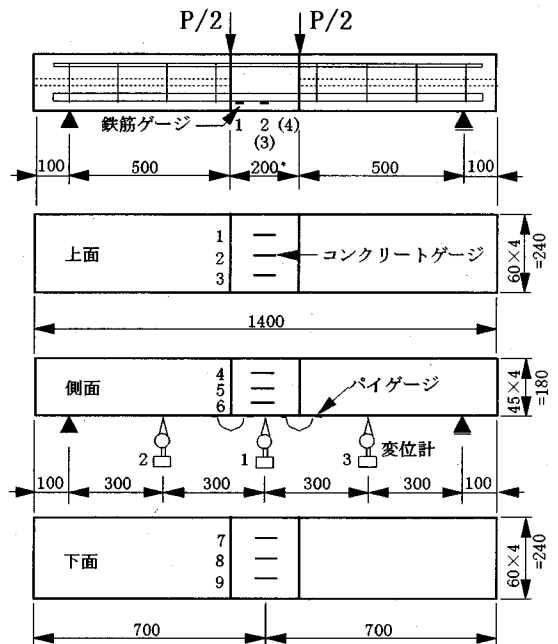


図-6 計測器具の位置

いるが、供試体RJタイプはプレキャスト部のみにPC鋼棒を用いている。結局、従来から実用化されている継手方法の他に、新たに提案できる方法を含めて45供試体となった。本研究においては主桁上の接合の場合も考え、また橋軸と直角方向に継手を有する場合にもプレキャスト部分と継手部分それぞれPCおよびRC構造と異なることもあるためできるだけ短い区間で対応することを目的とするため20cmを最大とした。橋軸直角方向に継手を有する場合には当然20cm以上の場合もあり得るが、本研究では一応継手長さの制限を設けた上で供試体を作製した。接合部分の継手構造部分を図-4(a)~(j)に示す。これらの継手構造において鉄筋コンクリート構造の供試体RJタイプは橋軸直角方向および橋軸方向の双方を対象にしたものである。橋軸方向とその直角方向では曲げモーメントが逆になる。つまり、主桁支点とした負の曲げモーメントが作用し、負の曲げを作用させる実験の時には上下逆にして載荷する必要がある。一方、PC鋼棒による継手を持つ供試体PJおよびPMは橋軸方向に接合部を持つ床版を対象としたものである。

導入したコンクリートのプレストレスによる応力度は37.0kgf/cm²でクリープ、乾燥収縮、およびリラクセーションによる応力の減少量から有効係数を求めると0.882であった。この結果、有効プレストレス量は32.6kgf/cm²が得られた。

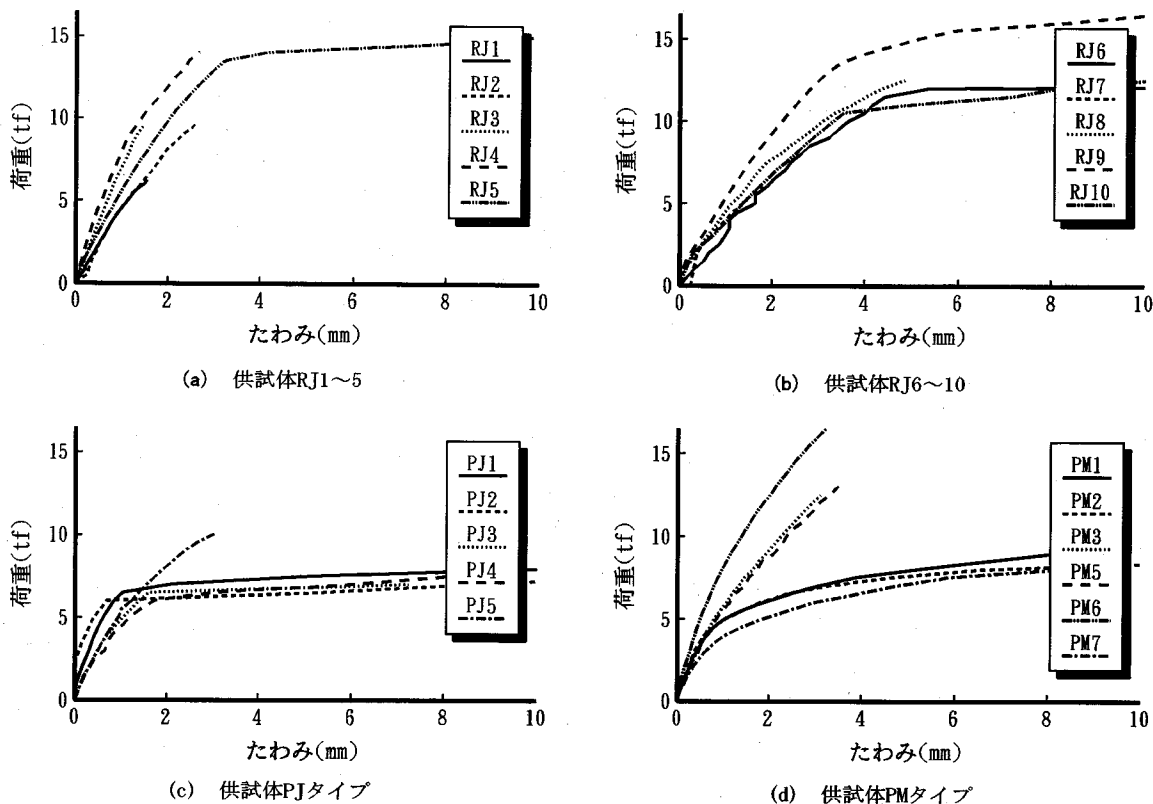


図-7 荷重-たわみ関係

(3) 実験方法

a) 載荷方法

本研究において曲げ強度を調べる目的の供試体に対しては単純支持で2点載荷(図-5(a))で試験を行い、接合部のせん断を調べる目的の供試体では接合部をスパン中央から10cm~40cm離れた。載荷位置はスパン中央部で1点載荷(図-5(b))で試験を行った。負の曲げを受ける供試体では、一般的には供試体を上下逆にして載荷を行っている。従って、供試体RJ6~10は主鉄筋である引張鉄筋が下側になる(図-5(c)参照)。静的試験においては荷重を0.5tfづつ増加させながら計測を行った。

b) 測定方法

図-6に計測器具の位置を示す。変位はカンチレバー式の変位計、ひずみはひずみゲージ、接合部の開きはパイ型変位計で計測を行った。各荷重ごとに測定を行うとともにひび割れを調べた。

3. 試験結果および考察

(1) 荷重-たわみ関係

図-7(a)~(d)に荷重とたわみの関係を供試体RJ、

PJ, PMそれぞれについて示す。なお、供試体PM4, 8~10は、供試体PM1, 2, 7と同様な関係を示したので省略している。大きな特徴としては次の3つのパターンに分けられる。第一に、プレキャスト部のみにプレストレスを導入した供試体RJタイプでは、たわみは直線的に増加した後、急激に増大し破壊に至るといパターンである。第二に、供試体全体にプレストレスを導入した供試体PJ, PMタイプでは、載荷初期段階においては剛性が大きく、その後徐々に降伏する曲線を描き破壊に至るといパターンである。第三には、引張鉄筋が連続した供試体RJ5~10, PM6では不連続の供試体より終局強度が高くなるパターンである。これらの他には次のような傾向がある。引張鉄筋が不連続であってもループ状に張り出した鉄筋を持つ供試体RJ3, 4, PJ5では、単純に鉄筋をラップさせた供試体より終局強度が高かった。また、曲げとせん断力が作用するように継目を10cmずらした供試体PJ2, 4, PM2, 8, 10は、継目が中央の供試体とほとんど差はみられなかった。しかし、主にせん断力が作用するように継目を40cmずらした供試体PM3, 5では大きいたわみがみられないまま破壊に至っていることから、せん断による

破壊であることがわかる。このような供試体でも終局耐力は、他の同等の供試体より大きくなっている。これは断面の下段に配置された鉄筋が曲げモーメントの最大となるスパン中央部付近で曲げ強度に寄与しているからである。

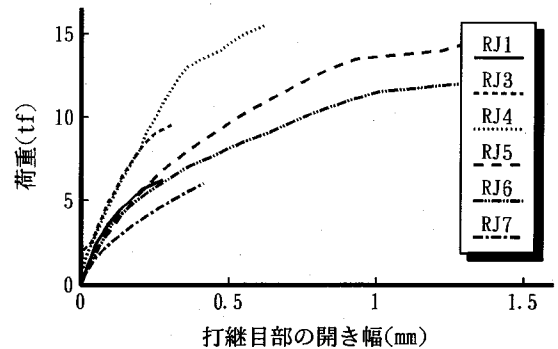
図-7(a)の荷重-たわみ曲線からもわかるように、鉛直ループ継手を有する供試体RJ4は大きい強度とある程度の変形性能を有している。この手法は施工も簡単であり、極めて有効な方法と考えられる。このほか、シースを埋設し、鉄筋を差し込んだ後グラウトした継手を有する供試体RJ5も鉄筋コンクリートと同様な荷重-たわみ関係を有している。また、プレキャスト部材の上面に後打ちコンクリートを有する供試体RJ8~10のうち、プレキャスト部材の表面を付着が大きくなるようにしている供試体RJ9も同様に十分な変形性能を有している。

RC法による継手を有する供試体に比較するとPC法による継手を有する供試体は曲げ(スパン中央の継手)に対しいずれも十分な変形性能を有している。

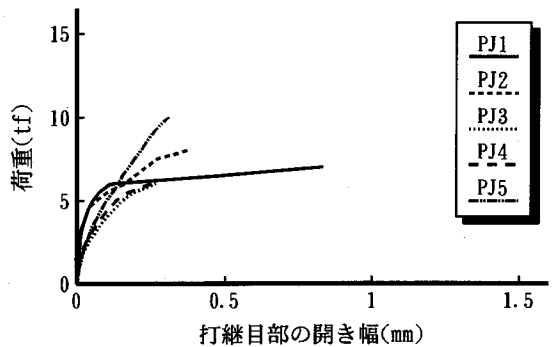
(2) 荷重-打継目部の開き幅関係

図-8(a)~(c)に荷重とコンクリートの打継目部の開き幅の関係を供試体RJ, PJ, PMそれぞれの供試体について示す。なお、供試体PM8~10は、供試体PM1, 2, 4, 7と同様な関係を示したので省略している。また、一部供試体(供試体RJ2, 8~10および供試体PM3)は計測が不備であった。はり全体にプレストレスを導入した供試体PJ, PMタイプは載荷初期段階において開きが抑制されている。引張鉄筋が連続した供試体においては不連続の供試体より開きが抑制されているが、全体にプレストレスを導入した供試体ほどの抑制効果は得られていないことがわかる。従って供試体PM6が開き、たわみともに抑制効果に優れていることがわかる。また、継目を40cmずらした供試体PM5(ただし計測器の破損を防ぐため8tfまでのデータ)では継目はほとんど開くことなく破壊に至った。

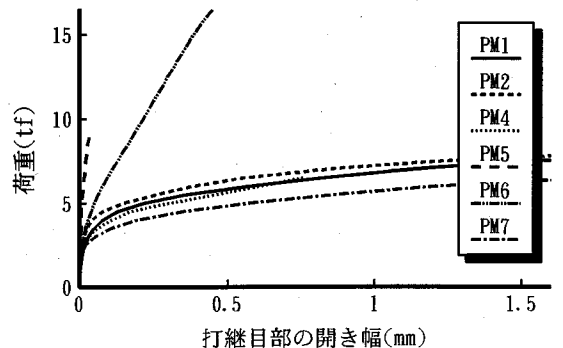
打継目部の開きとひび割れには多少の差異はあるものの、ほぼ同様のものとみなすことができると思われる。しかし、新旧コンクリート打継面においてあらかじめコンクリートにひび割れを与えているのと同様であり、打継目のないコンクリートよりもひび割れに対しては厳しい条件となる。その意味においては、プレストレスを導入した継手構造の方が有利となる。床版における環境条件について特に示方書には規定されていないが、融雪のため塩化カルシウム等のいわゆる凍結防止剤を散布する橋梁においては、床版中の鉄筋には相当厳しい環境条件となり



(a) 供試体RJタイプ



(b) 供試体PJタイプ



(c) 供試体PMタイプ

図-8 荷重-打継目部の開き幅関係

得る。そのような場合においては、かぶりを c としたとき、 $0.0035c$ の基準を守る必要も生じてくる³²⁾。本研究において特に設計荷重を定めていないので、基準に対する適応性の論議をするものではない。しかし、RCタイプの継手構造部分の上面が引張を受ける場合にはひび割れ制限に合うように鉄筋量を増すこと、かぶりを増すことあるいは床版上に防水工を設けるなどの防食に関する対応が必要な継手構造もある。示方書の規定の $0.0035c$ の限界ひび割れ幅が

$c=4\text{cm}$ とすれば 0.14mm (0.014cm)となる。一方、鉄筋の応力が 1400kgf/cm^2 となる荷重は、 3.8tf が弾性計算上($n=15$ とした計算)得られる。荷重が 3.8tf のときの打継目部開き幅は供試体RJ5が 0.10mm 、供試体RJ6が 0.12mm 、さらに供試体RJ4に対しては 0.08mm 程度である。従って、垂直ループを有する供試体RJ4は開き幅を相当小さく抑えることができる。この理由の一つにループ鉄筋の上側部分が圧縮に有効に作用すると考えられる。

供試体PJおよびPMタイプは、フルプレストレッシングの考え方を適用すれば、打継目部開き幅は関係なくなる。しかし、計算上PC鋼棒までひび割れを許容すれば、コンクリートの引張強度を無視した弾性計算においては 3.47tf の荷重となる。このときの打継目部の開き幅は図-8から、約 0.06mm であることがわかる。また、スパン中央に継手を有する供試体のひび割れは、荷重が 1.88tf から開始する。これは図-8(c)の開きの開始とほぼ同一であり、藤井らの研究²⁰⁾でも同様なことが認められている。このようなことから、ひび割れ幅関係に関しては、PC鋼棒による継手構造は当然有利であることがわかる。

(3) ひび割れ性状

図-9(a)~(n)にそれぞれの供試体の破壊後のひび割れ図を示す。供試体RJ, PJおよびPMタイプにそれぞれの特徴があるのでタイプ別に論議する。

a) 供試体RJタイプ

プレキャスト部のみにプレストレスを導入し引張鉄筋が不連続な供試体RJ1, 2, 3, 4(図-9(a)~(c))では、継目が開いた後に接合部に集中してひび割れが生じた。特に供試体RJ1(図-9(a))では、接合部の引張鉄筋位置に水平ひび割れが生じ破壊時にはコンクリートが剥落を起こすケースもあった。また、供試体RJ2(図-9(b))では載荷側のプレキャスト部にもひび割れがPC鋼棒付近から載荷点に向かって進展し、最終的には供試体RJ1と同様に接合部のコンクリートが剥落して破壊した。引張鉄筋が連続している供試体RJ5, 6(図-9(d))では、接合部中央から曲げひび割れが生じ、その後主に接合部内でひび割れは進展し、圧縮側のコンクリートの圧壊によって破壊した。また、引張鉄筋の両端をワッシャーで固定した供試体RJ7(図-9(e))は、ワッシャーで固定した部分から大きくひび割れが発生し破壊した。ハーフプレキャストの供試体RJ8~10では、後打ち部である引張側のコンクリートに多数のひび割れが生じ、その後は接合部付近でひび割れが進展した。ずれ止め処理を施した供試体RJ9(図-9(f))では後打ち部の剥離は見られず、プレキャスト部にもひび割れが進展し

ていることから、ずれ止めによってずれ止めの処理をしていない供試体RJ8, 10より一体化されていた。

b) 供試体PJタイプ

供試体PJ1, 3(図-9(g))では接合部の引張鉄筋位置に水平ひび割れが生じ、さらにPC鋼棒位置付近からプレキャスト部に水平ひび割れが生じ、最終的には圧縮側が圧壊した。また、曲げとせん断力が作用するように継目を 10cm ずらした供試体PJ2, 4(図-9(h))では、接合部に水平ひび割れが生じた。その後、載荷側のプレキャスト部のPC鋼棒位置付近から載荷点に向かってひび割れが進展した後、圧縮側が圧壊した。張り出した鉄筋を水平にループさせた供試体PJ5(図-9(i))は、接合部に水平ひび割れが生じるのはPJ1, 3と同様であったが、プレキャスト部にも曲げひび割れが生じた。これはループ鉄筋の腹圧力の影響(図-10)により、引張力がある程度伝達されプレキャスト部にも曲げひび割れが生じたと考えられる。

c) 供試体PMタイプ

供試体PM1, 4, 7, 9(図-9(j))では、継目が開いた後PC鋼棒位置付近からひび割れが生じた。その後、荷重が高くなるにつれてひび割れは載荷点の方へ進展し、最終的には圧縮側が圧壊した。継目を 10cm ずらした供試体PM2, 8, 10(図-9(k))では、PC鋼棒位置付近から載荷点に向かいひび割れが進展し、その後上部が圧壊して破壊した。また、 40cm ずらした供試体PM3, 5(図-9(l), (m))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。供試体PM3は継目部の下部分はせん断ひび割れの延長となっているのに対し、波形の接合面を持つ供試体PM5は継目部を通り越し、連続的なひび割れとなって後打ち部(非載荷側)にもひび割れが生じた。このことより接合面を波形に加工することによってせん断力の伝達があったことがわかる。供試体PM6(図-9(n))については引張鉄筋が連続しているため他のPMタイプとは異なっている。PC鋼棒位置付近からのひび割れは発生せず、ひび割れは引張側から上部中央に向かって進展し、最終的には圧縮側が圧壊して破壊した。

d) 全体的なひび割れ性状に対する考察

以上のひび割れ性状を簡単にパターン化すると次のようになる。引張鉄筋が連続している供試体(供試体RJ5, 6, 8~10, PM6)では供試体RJ7を除き、曲げひび割れが生じ最終的には上部が圧壊した。プレキャスト部のみにプレストレスが導入されており引張鉄筋が不連続な供試体すなわちRJタイプの供試体では、接合部にひび割れが生じ最終的には接合部分

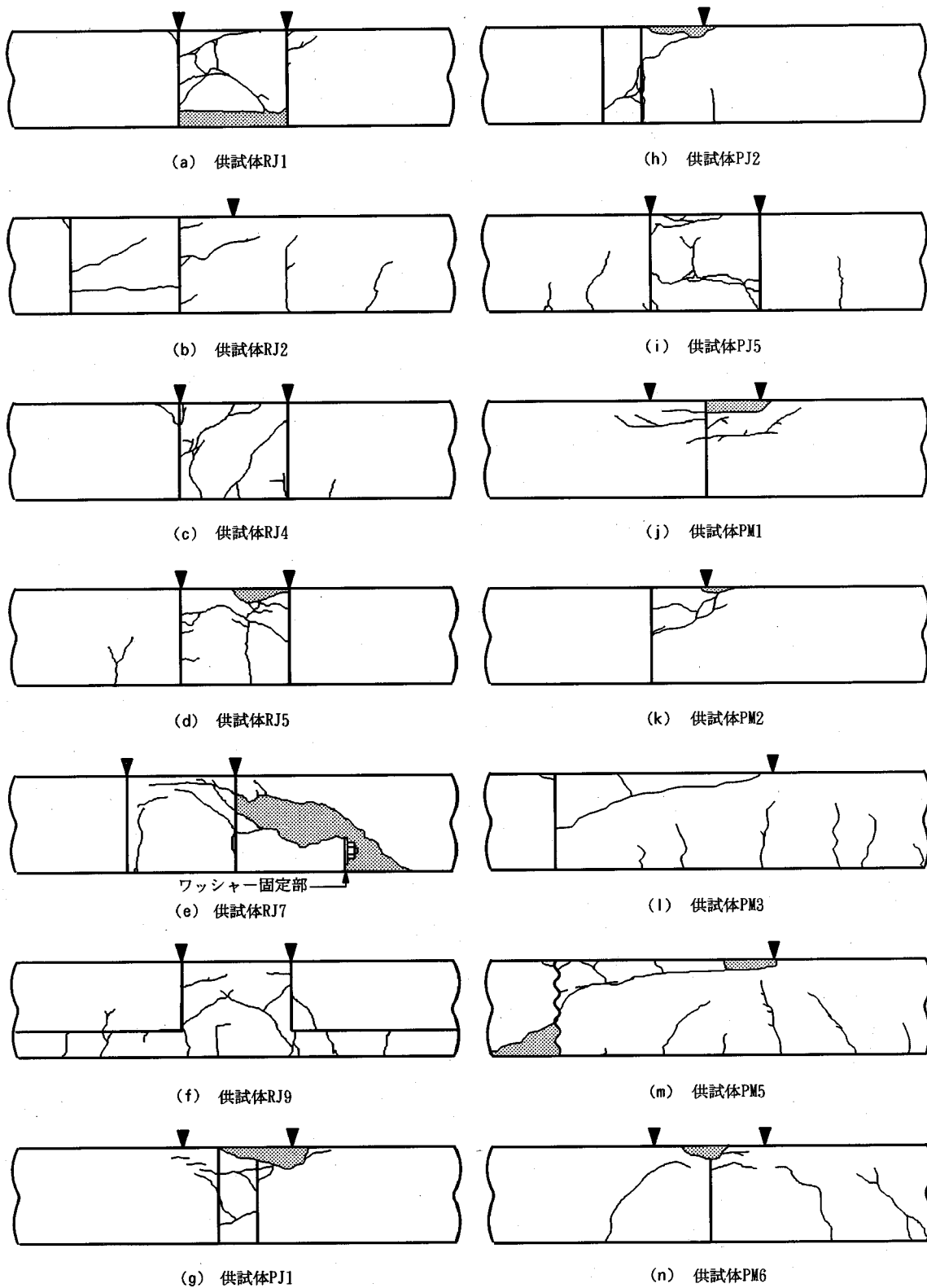


図-9 ひび割れパターン(上図において、▼は載荷点、▨は剥落部を示す)

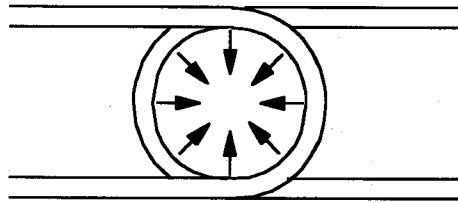


図-10 腹圧力

が破壊する。供試体全体にプレストレスが導入されている供試体(PJ, PMタイプ)のほとんどが、ひび割れを継目部開きで吸収し、曲げひび割れはほとんど生じず、PC鋼棒位置付近からひび割れが生じ圧縮側が圧壊して破壊する。継目部をずらした結果、せん断の影響が大きくなる供試体(供試体PM3, 5)の接合部では、継目部のPC鋼棒位置付近から載荷点に向かって一気にひび割れが生じ破壊する。しかし、これらの供試体は破壊直前までは、引張鉄筋が連続している供試体と同様な曲げひび割れが生じる。このような供試体はスパン中央の引張鉄筋が有効に働くため破壊荷重は大きい。このことを考えると荷重の位置によりひび割れの生じ方が異なると考えられ、繰返し載荷(疲労)荷重を適用する場合には、移動荷重あるいは定点載荷を移動させての疲労試験も必要となる。

(4) 終局耐力について

表-6に計算値と本実験で得られた実験値を示す。計算値は、鉄筋の降伏強度およびコンクリートの圧縮強度は実験値から求められた値とした。コンクリートの応力分布および合力の位置は等価応力ブロックを用いたコンクリート標準示方書と同じ仮定をして得られたものである。この計算値は圧縮鉄筋も含まれており、垂直ループは引張鉄筋と同量の圧縮鉄筋となっている。PC鋼棒の降伏強度はミルシートの強度を用い、供試体PJおよびPMタイプの終局曲げ強度の計算はコンクリート標準示方書に基づいた。また、供試体PM3, 5および6はいずれも引張鉄筋の引張強度が含まれている。また、せん断耐力の計算値も現行示方書の設計計算法に基づいた。現行示方書では安全係数を用いるが、ここでは全て1.0とした。ここで、接合面および接合部分のせん断補強筋は、必ずしも完全に等間隔で配置されていないが、平均的な手法で間隔を求めている。

供試体全体にプレストレスを導入した供試体は実験値が計算値を上回っており、また、引張鉄筋が連続した供試体においても実験値が計算値を上回る終局耐力を得た。ただし、供試体PJ5の終局耐力は3つの観点から選択されたもので、それらはPC鋼棒だけ

表-6 終局荷重と計算値

供試体 番号	実 験 値			計算値	実験値 計算値
	開き発 生モーメント (tf・m)	破壊 荷重 (tf)	破壊曲 げモーメント (tf・m)	曲げ耐力 [せん断耐力]	
RJ1	1.00	5.6	1.41	2.11	0.67
RJ2	1.00	9.6	2.87	2.11	1.36
RJ3	2.36	9.8	2.44	2.30	1.06
RJ4	2.48	15.8	3.88	2.84	1.39
RJ5	0.63	15.3	3.83	2.57	1.49
RJ6	0.75	12.8	3.20	2.57	1.25
RJ7	—	6.1	1.52	2.50	0.61
RJ8	0.88	12.7	3.17	2.57	1.23
RJ9	0.75	16.3	4.08	2.66	1.53
RJ10	1.38	12.9	3.23	2.66	1.21
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	1.95	1.35
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

注1) 計算値の曲げ耐力の単位は tf・m, せん断耐力の単位は tf

注2) ()内の数値はせん断耐力の計算値と実験値との比

注3) *印はせん断破壊

が引張材として作用する場合、水平ループのみが引張材として作用する場合、およびPC鋼棒と水平ループ鉄筋がともに引張材として作用する場合である。

これらの観点における耐力はそれぞれ1.78tf・m、2.14tf・mおよび4.07tf・mである。もともと水平ループ鉄筋のみの継手は供試体RJ3のように耐力的には強くない。従って、PC鋼棒と水平ループ鉄筋がともに引張材として貢献するとは考えられず、表-6においては水平ループのみ有効とした耐力を示した。PC鋼棒と水平ループ鉄筋の双方を引張材とした場合の実験値/計算値は0.63となる。このように、水平ループの継手は望ましくないことがわかる。

供試体全体にプレストレスを導入し引張鉄筋が連続という両方の特性を合わせ持つ供試体PM6は高い耐力を得ている。これに対し、プレキャスト部のみにプレストレスが入っており、引張鉄筋が不連続な供試体RJ1は実験値が計算値を下回った。これは接合長が20cmと短く、鉄筋の付着長が足りないことが影響している。また、供試体RJ4は計算値をかなり上回っているが、これはループ状に鉄筋を加工したことにより、そのループ内において腹圧力(図-10)が働いているために高い耐力が得られたと考えられる。供試体PM3、5において終局耐力が計算値を下回っているのは、せん断による破壊のためであると考えられる。

せん断耐力を調べるための供試体の耐力は、RC法においてはいずれの供試体も曲げ耐力の計算値を越している。20cmのラップを有する供試体においても曲げには十分抵抗できないが、せん断区間に継手を有するとき(供試体RJ2)には曲げにも抵抗できることを示している。接合部をずらしたPC法において、曲げ耐力が大きいのは鉄筋が有効に作用するためである。接合部がせん断を受ける供試体においては、供試体PM3およびPM5を除いて、せん断破壊が生じる前に曲げ破壊が生じている。これらの供試体においては、ひび割れからのみではなく曲げ耐力を越した上でせん断耐力に至る前に破壊している。中には、当然のことではあるが、せん断耐力を越していない供試体もある。一方、供試体PM3、5はせん断耐力を相当上回って荷重が増加したが、計算上の曲げ耐力に到達する前にせん断で破壊している。しかしながら、実験値は計算せん断耐力の1.36、1.42と大幅に上回っている。このことを考えれば、接合部はせん断に対し弱点になっていないと判断できる。

これらの供試体は接合長が20cmと制限した上での実験であるため、この範囲内では十分な耐力を得られなくても、場合によっては十分な接合長をとれる場合や、曲げよりもせん断耐力に対処する必要のある場合には十分な耐力を得られることもある。小林らの研究³³⁾によればD16の主鉄筋に対し、40cmの接合長であれば普通の鉄筋コンクリートとほぼ同等の耐

力となることを示している。また、終局耐力はあくまでも曲げを受ける場合であり、この結果により適用性の優劣を付けることは望ましくないが、20cmの継手長でのRC法における接合方法に対しては垂直ループの継手は極めて有効であることが判明した。中井らの研究³⁰⁾でもループ継手に関する強度について論じている。継手区間長を32cmおよび24cmとした供試体を用いて実験を行い、普通の鉄筋コンクリートよりも同等以上の強度を有することを示している。シース中に鉄筋を挿入する方法も付着長が十分取れるという意味においては有効であるが、それだけ施工の繁雑さがでてくる。いずれにしても、継手は長いほど有効であるが、プレテンションを用いたプレキャスト板を用いるときには継手部分が異なった構造となる。つまり、プレキャスト部材の間はRC構造とせざるを得なくなり、異種構造の組み合わせという複雑な構造形式となる。この意味からも接合長は短い程良いと考えられ、本研究は接合長を20cmに限定した。

4. 結論

本研究における実験は、接合区間長を制限して行った実験ではあるが、その中で得られた結論は以下のものである。

- (1) たわみおよびひび割れ幅ともにPC法(PJ, PMタイプ)とRC法(RJタイプ)では異なっており、PC継手構造では載荷初期の段階でたわみ、ひび割れともに小さく供用荷重を受ける場合に特に防食に注意することなく利用できるものと考えられる。RC継手構造では継目部開きが生じるが、鉄筋の許容応力の範囲内では許容ひび割れ幅の範囲になる継手設計法もあり、中でも垂直ループ継手は開き幅は小さく、また曲げ耐力も大きい。
- (2) 継手がせん断力を受けても特に弱点にはならない。
- (3) ひび割れパターンは継手構造およびせん断の作用により異なり、鉄筋が連続している場合やPC継手構造になっているときは、コンクリートの圧壊により破壊に至る。
- (4) PC継手構造、RC継手構造ともにほとんどの供試体で計算上の終局耐力を越している。しかし、一部の供試体では継手区間が短いために計算上の耐力まで到達していない。

上記のように、継手構造に対する適用性がある程度判明したものの、今後更に継手方法を改良し施工上難点のない工法を模索する必要がある。また、本研究は静的耐力に的を絞る、種々の継手構造に対し

て検討を行ったもので、今後床版全体としての強度および繰返し載荷の研究の必要性がある。本研究はこの繰返し載荷試験の前段階の実験であり、それぞれの継手に対し適用の可能性を調べたものである。

謝辞：本研究を実施するにあたり、実験を共同に行った山口大学工学部兼行啓治技官、当時大学院生渡邊豊彦(平成3年修了現横河ブリッジ)、釣修之(平成4年修了現前田建設工業)、阿部哲良(平成6年修了現五洋建設)、梯誠(現大学院生)および卒論生各位のご協力を得た。ここに深謝します。

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，pp. 12-15，1992.
- 3) PPCS協会：PPCS工法，プレストレストコンクリート，Vol. 33，特別号，pp. 25-30，1991.
- 4) Kluge R.N. and Sawyer, H.A.: Interacting Pretensioned Concrete Form Pannels for Bridge Decks, *PCI Journal*, Vol. 20, No. 3, pp. 34-61, May-Jun. 1975.
- 5) 江本幸雄，渡辺明，出光隆：PC板埋設型枠を用いた合成床版に関する研究，土木学会論文報告集，No. 360/V-3，pp. 31-40，1985. 8.
- 6) 上田多門，辻幸和：PC合成床版工法に用いるPC板上面の表面形状，土木学会論文報告集，No. 384/V-7，pp. 143-149，1987. 8.
- 7) 野村，原，睦好，町田：プレキャスト型枠コンクリート工法における鉄筋の接合法に関する実験的研究，コンクリート工学年次学術論文集，Vol. 15，No. 2，pp. 259-264，1993.
- 8) 渡辺明：床版工事の近代化とPC合成床版工法，土木学会論文報告集，No. 414/V-12，1990. 2.
- 9) 渡辺明：PC合成床版工法とその活用，コンクリート工学，Vol. 24，No. 10，pp. 1-14，1986. 10.
- 10) 中井弘：最近の合成床版工法，コンクリート工学，Vol. 33，No. 8，pp. 5-15，1995. 8.
- 11) Special Report for PCI Bridge Producer Committee: Recommended Practice for Precast Concrete Composite Bridge Deck Pannels, *PCI Journal*, Vol. 33, No. 2, pp. 67-109, Mar.-Apr. 1988.
- 12) 南，沼沢，木田，恩田，高松：茶志別橋の床版打換工事，橋梁と基礎，84-5，pp. 37-44，1984. 5.
- 13) 中井編：プレキャスト床版合成桁の設計・施工，森北出版，1986. 6.
- 14) 中井，岸田，竹中：プレキャスト床版を用いた合成桁の耐荷性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 31A，pp. 395-408，1985. 3.
- 15) 中井，竹中，喜田：プレキャスト床版を用いた合成桁の自動車走行のもとにおける耐久性の実験的研究，構造工学論文集，Vol. 32A，pp. 81-92，1986. 3.
- 16) 中井，藤井，渡辺，竹中：プレキャスト床版を用いた合成桁のクリープ現象に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 33A，pp. 275-284，1987. 3.
- 17) 中井，渡辺，竹中，林：プレキャストコンクリート床版合成桁のクリープ・リラクゼーションに関する基礎的考察，構造工学論文集，Vol. 33A，pp. 275-284，1987. 3.
- 18) 中井，中井，梶田，竹中：プレストレスを導入するプレキャスト床版の継目部の連続性と耐荷力に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 34A，pp. 275-284，1988. 3.
- 19) 中井，山内，梶田，酒造，山本：プレキャスト床版を用いた負の曲げモーメントを受ける弾性合成桁の実験的研究，構造工学論文集，Vol. 34A，pp. 285-296，1988. 3.
- 20) 藤井，梶川，前川，榎谷：プレキャストコンクリートはり接合部の曲げ挙動に関する研究，コンクリート工学年次学術論文集，Vol. 12-2，pp. 257-262，1990.
- 21) 明橋，佐々木，御子柴，大谷：部分取替可能なプレキャスト・プレストレスト床版に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 40A，pp. 1287-1300，1994. 3.
- 22) Biswas, M.: Precast Bridge Deck Design Systems, *PCI Journal*, Vol. 20, pp. 40-93, Mar.-Apr. 1986.
- 23) Barker, J.M.: Research, Application and Experience with Precast Prestressed Bridge Deck Panels, *PCI Journal*, Vol. 20, pp. 66-85, Dec.-Nov. 1975.
- 24) Issa, M.A. and Yousif, A.A.: Construction Procedures for Rapid Replacement of Bridge Decks, *Concrete Int. ACI*, Vol. 17, No. 2, pp. 49-52, Feb. 1995.
- 25) Issa, M.A., Idriss, A.T., Kaspar, I.I. and Khayyat, S.Y.: Full Depth Precast and Precast Prestressed Concrete Bridge Deck Pannels, *PCI Journal*, Vol. 40, No. 1, pp. 59-80, Jan.-Feb. 1995.
- 26) Issa, M.A., Yousif, A.A., Kaspar, I.I., and Khayyat, S.Y.: Field Performance of Full Depth Precast Concrete Pannels in Bridge Deck Reconstruction, *PCI Journal*, Vol. 40, No. 3, pp. 82-108, May-Jun. 1995.
- 27) PCI Committee on Bridge: Precast Prestressed Concrete Bridge Deck Pannels, *PCI Journal*, Vol. 40, No. 1, pp. 82-108, May-Jun. 1995.
- 28) 前田，橋，柳澤，志村，梶川：合成桁斜張橋・プレキャスト床版の設計法とループ状重ね継手の耐久性に関する研究，構造工学論文集，Vol. 36A，pp. 1305-1312，1990. 3.
- 29) 橋，牛島，大澤，梶川，越後：ループ継手を有するプレキャスト床版接合部の耐久性試験，川田技報，Vol. 15，pp. 56-61，1996. 1.
- 30) 中井，川口，柳澤，阪野，鍵和田：プレキャストRC床版ループ鉄筋重ね継手の強度および疲労に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 41A，pp. 1069-1076，1995. 3.
- 31) 佐藤，清水，高橋：RCプレキャスト床版の耐荷力および耐久性試験，宮地技報，No. 11，pp. 4-12，1995.
- 32) 土木学会：コンクリート標準示方書，設計編，1991年9月.
- 33) 小林，伊藤，近藤，横田：プレキャスト部材の接合目地部における鉄筋の重ね継手に関する研究，第4回コンクリート工学年次学術論文集，pp. 421-424，1982.

(1995. 7. 24 受付)

STUDY ON THE STATICAL BEHAVIOR AND APPLICABILITY OF PRECAST SLAB JOINTS

Sumio HAMADA, Muneto ABE and Tetsu ISHIKAWA

Recent increases of the traffic volume and load provide a severe condition to the bridge slab, which results in replacement of the deteriorated bridge slab to a stronger slab.

The present study aims to obtain the behavioral information of the precast slab system subjected to bending, and focuses to the static strength and crack width of the joint part of precast slabs. Test results indicated that some of the reinforcing joint systems, especially a vertical loop system, have both sufficient strength and less crack width, and that prestressing joint systems have also more strength than the strength evaluated from the JSCE Concrete Standard Specification.