

プレストレストプレキャストコンクリート床版 接合部の曲げ疲労強度に関する基礎的研究

浜田純夫¹・阿部宗人²・阿部哲良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 博士(工学) ㈱ピー・エス 技術研究所所長 (〒170 埼玉県大宮市北袋町1-297)

³正会員 工修 五洋建設㈱ 技術研究所 (〒329-27 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

近年の交通量の増加により直接荷重を受ける橋梁床版の損傷は深刻な問題になりつつある。さらに車両重量の増加はこれに拍車をかけている。このため床版の架け換え工事が行われるようになり、取り換える床版にはプレストレストプレキャスト床版が最も多く施工されている。

そこで本研究においてはプレストレストプレキャスト床版を対象にした供試体を作製し、静的試験及び疲労試験を行い、プレキャスト部材の静的耐力及び疲労耐力を検討したものである。その結果、静的曲げ耐力は矩形応力ブロックを仮定した計算値を上回り、また疲労曲げ耐力も単一部材と同等であり、継目が存在するにも関わらず、ばらつきも単一部材と同等であることが判明した。

Key Words : *precast slab, prestressed slab, fatigue strength, probable fatigue strength, bridge slab*

1. まえがき

近年自動車交通量の増加および重量車両の増加もあり、直接荷重を受ける橋梁床版の損傷は深刻な問題になりつつある。また道路橋示方書の床版に作用する設計自動車荷重(L荷重)¹⁾が20tonf(196kN)から25tonf(245kN)へ増加されたことも損傷の増加になりかねない。損傷を受けた床版に対して取り換え工事も行われ、その取り換えの工事方法としてプレキャスト床版が用いられている。一方、建設労働事情(労働者数)の悪化も予想され、省力化の建設方法としてもプレキャスト床版が有力視されている^{2), 3)}。さらに、プレキャスト部材は管理された工場製品のため精度の良さと品質にばらつきの少ない点も見逃すことはできない。このため第2東名・名神高速道路においても採用の検討が行われている。しかし、新設橋梁にプレキャスト床版を用いることは現状においては経済性の面から利用を妨げられている。

床版の取り換え工事としてプレキャスト部材を用いることのもう一つの利点は同じ床版厚に対してより高い強度の床版を作成することが可能なことである。元の床版において損傷を生じたことは、取り換え後の床版耐力はより高いことが必要である。この

ことは現在までの鉄筋コンクリート床版はプレストレストコンクリート床版を用いるなどの工夫が要求されることを意味している。

プレストレストプレキャスト床版には図-1のように二つの方法が考えられており、その一つは橋軸直角方向にはプレテンションのプレストレストを導入し、橋軸方向にはポストテンションのプレストレストを導入する方法である。他の一つはプレキャスト床版の一方向にプレストレストを導入し、何らかの方法によって隣り合わせのプレキャスト床版を接合する方法である。我が国においては、PPCS工法を含め前者の報告が多くなされている。この二つの方法の他にもハーフプレキャストと見なされている工法がある。プレストレストコンクリートの埋設型枠を用い、現場で鉄筋配置を行いコンクリートを打設するプレストレストコンクリートと鉄筋コンクリートの合成床版である^{4)~8)}。この工法は従来の工法と比較して、工期的にも安全性の面からも優れているが、現場打設が多く含まれるため必ずしも工期の大幅な短縮とはならない。

プレストレストプレキャスト床版に関する研究は静的耐力および設計に関するものが多く、床版自体よりも合成桁に付随した床版(例えばPPCS工法)に関

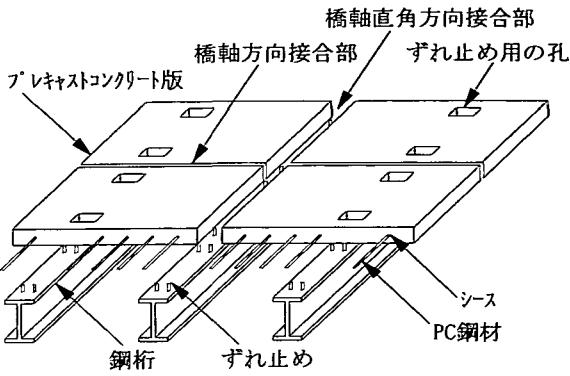


図-1 プレキャストプレキャスト床版

する研究が多い。このようなプレキャスト床版合成桁橋に関する研究については文献7), 9)にまとめられている。一方国外についてはM. Biswas, C. Slavis, およびJ. M. Barkerが詳しく報告している^{10)~12)}。最近ではIssaらが施工の現状を報告している^{13)~15)}。しかしながら、M. Biswas, C. Slavis, およびJ. M. Barkerの研究は施工方法に関する研究であり、強度に関する研究は報告されていない。また、PCIはこのように施工のみが進展する中で委員会を設け、2つの施工法に関する報告を行っている^{16), 17)}。我が国においてプレストレスを導入したプレキャスト床版は比較的多く用いられるようになっていながら、静的耐力を中心にした研究に基づいて設計および施工がなされている^{18)~26)}。橋梁床版として最も重要なプレキャストプレキャスト床版を対象にした疲労強度に関する研究は今なお少なく、主として安全性の確認の研究が多い²¹⁾。

単一の(プレキャストでない)プレキャストはりでは疲労に関する広範な実験的研究がW. J. Venutiにより行われている²⁷⁾。多数の実験データから統計的手法で処理し、荷重レベルと繰返し回数との関係を示している。一方、F. S. Opleらは角柱コンクリートに応力勾配を与えて曲げ応力と同等の応力分布形状で実験をおこなっている²⁸⁾。これと同様な実験を浜田²⁹⁾は軽量コンクリートに対して実験を行っている。さらに松下³⁰⁾は応力勾配を有する静的強度試験を行い、結果的には静的強度の比で表せば応力分布にかかわりなく、同一のS-N曲線で表せることを示した。これらの研究はいずれもPCはりを対象に研究したものであり、Opleらも松下らも数本のPCはりの実験を行っている。コンクリートおよび鉄筋それぞれの単一材料の疲労強度からコンクリート部材の疲労強度に適用する考え方について岡村³¹⁾は設計法を含めて論じている。また、ACIの

215委員会報告も1992年に改訂版がACI Concrete Manual of Practice³²⁾に掲載されている。これらの研究はいずれも完全な部材であってプレキャストプレキャスト部材のように継目や接合部を有するものではない。

このようにプレキャスト床版は発展途上にあるものの基礎的研究はほとんど行われていない。プレキャスト床版は現場の連続的に打設する床版と異なり、継目部(接合部)という大きな欠陥を有している。従って、このような欠陥が強度にどの様に影響を及ぼすかは注目すべきことである。前述した橋軸直角方向にプレテンションのプレキャスト床版に橋軸方向にポストテンションを導入したプレキャスト床版の工法は有望視されながら現在のところ接合部の疲労強度等種々の耐力に対する研究が行われていない。

そこで本研究においては、ポストテンションでプレキャスト床版を接合した場合最も注目すべき接合部の静的強度および疲労強度に関して実験的研究を行った。現在の床版の設計法においては、曲げ強度を対象に行っている。本来プレキャスト床版の欠陥に関する研究はせん断強度、特に押抜きせん断強度に関する強度も必要としているが、すべての強度において最も基本となり、設計上の基本ともなる曲げ強度に関する研究を対象とした。実験供試体は、無数に近い接合法の中で構造的にも施工法からも、最も合理的と考えられているプレキャスト部材を直接接合する方法に注目した。その結果、最初のプレキャスト部材を型枠にして次のプレキャスト部材を打設するいわゆるマッチキャストの供試体とした。また、施工を急ぐ床版の取換えの場合を考えて現場打ちをせず、さらにプレキャスト床版の接合部の特徴を最もよく表している、いわゆるドライジョイントとした。マッチキャストでドライジョイントの接合方法は現行で提案されている中では比較的危険側と見なされ、この研究結果は目地材を有する場合およびシアキー等を有する場合に適用可能と考えられる。このように、接合部は構造上弱点になりやすく、弱点から問題の生じる疲労に関するデータが最も必要となる。また、弱点を有する構造はたとえ平均的な強度が同等であったとしてもばらつきが大きくなる可能性がある。前述したように、過去から疲労強度はばらつきが生じやすいことが論じられており、本研究においてもばらつきについて特に検討を行ったものである。さらに、現行で行われている橋梁床版の曲げ強度に対する設計に寄与できることを目的として研究を行ったものである。この中には継手部の開きと繰返し回数についても調べ、耐久性の面から安全性についても検討を行った。

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/m 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MPa)

試験供試体	圧縮強度	割裂強度	曲げ強度	弾性係数 (×10 ⁴)
静的試験用	50.4	2.83	5.30	3.88
供試体数	21	21	21	7
変動係数	7.3	12.6	12.3	1.86
疲労試験用	51.8	2.97	5.21	3.87
供試体数	63	63	63	21
変動係数	0.41	1.80	1.40	6.27

注) 変動係数の単位は%

表-3 PC鋼棒の力学的性質(単位MPa)

	降伏点強度	引張強度	伸び (%)	ヤング係数 (×10 ⁴)	リライエーション (%)
規格	930 以上	1080 以上	5 以上	—	4.0 以下
試験	1079	1154	12	19.9	0.87

2. 実験供試体

(1) 材料およびその性質

本実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。粗骨材として安山岩の砕石を、細骨材として脱塩の海砂を用いた。静的および疲労試験時の圧縮強度、割裂強度、曲げ強度およびヤング係数を表-2に示す。圧縮強度用の円柱供試体(100mmφ、200mm高)の数は静的および疲労試験用の各供試体に対し3個づつで静的試験供試体に対し21個、疲労試験供試体に対しては63個である。表-2において、ばらつきを変動係数として示した。PCとしてのプレキャストコンクリート強度は文献3)によれば原則として29.4MPa以上としている。しかし、現在の工場製品の多くが49MPa程度となっている。圧縮強度のばらつきを示す変動係数は実験室において練り上げたため標準的なものと考えられる。力学的には寄与しないが、鉄筋はSD295Aを用いた。PC鋼材はSBPR 930/1080でその性質を表-3に示す。

(2) 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

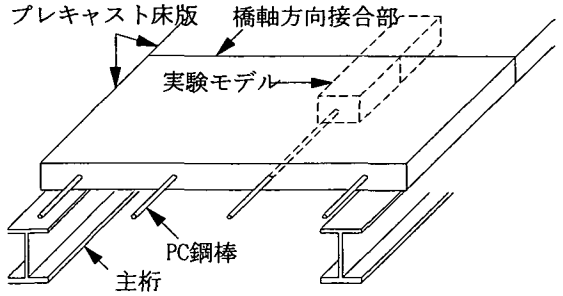


図-2 実験供試体モデル

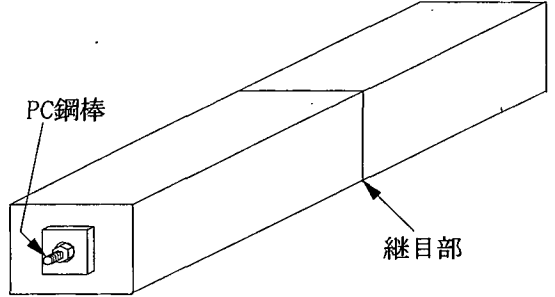
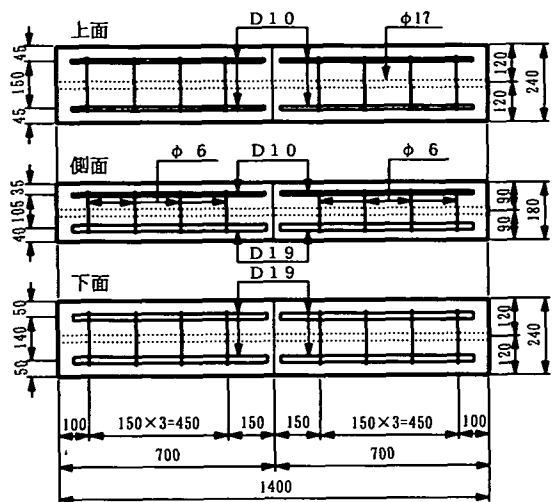
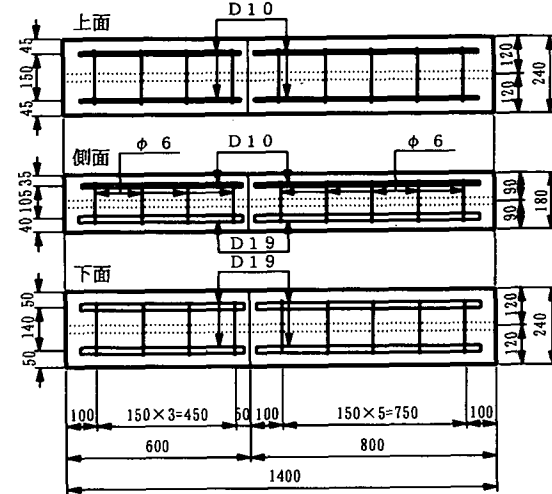


図-3 実験供試体

プレキャスト床版の一部を切り取って実験供試体(図-3)とした。プレキャスト床版といえども結果的には曲げモーメントに抵抗できるように設計されているものであり、現行の道路橋示方書においては単位幅(1m)当たりの曲げモーメントを求めて設計することとなっている。このようなことから、接合部付近の曲げ強度を知るために図-3のような供試体とした。実情に最も近いモデルで実験を行う必要があるが、実験室の規模、多数の同一供試体を作成する労力、同一条件を備えた養生などから、一般的に供試体は実際のモデルより小さくなる。しかし、基本的な寸法を保つ必要があり、本研究においては床版厚は実際に近い18cmとした。本来、床版には2軸の曲げのほか、せん断力も作用し、複雑な力が作用している。このような場合、それぞれの力をモデル化し、単純化することにより構造物の部分的な強度を知ることができる。このようなことから、実験供試体は実物に近いモデルとなるのが望ましいが、本研究のように継目部という一部分に照準を当てた場合、必要条件として継目部の挙動をよく表すことである。数多くの供試体からデータを得るためには供試体のサイズはおのずから限定される。本研究においては、あくまでプレキャスト床版の弱点である継手部に照準をおいたために図-3に示す供試体となった。このような供試体では版作用を表すことはできないが、最も厳しい外力の作用と見なすことができる。

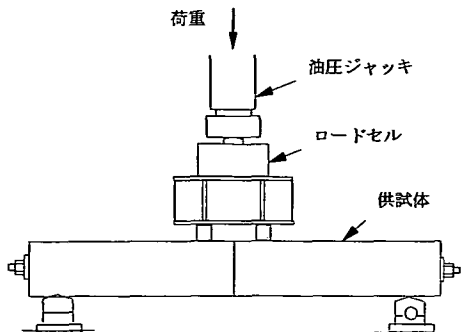


(a) MおよびFシリーズ

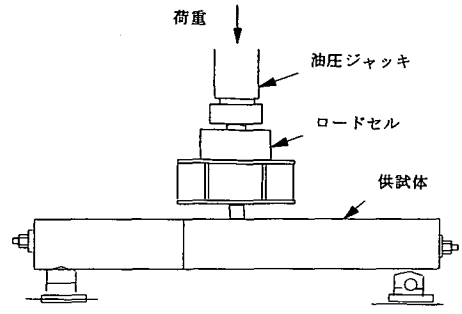


(b) MSシリーズ
図-4 供試体寸法

目地には多くの種類があるが、基本的には接合部が平坦、シアキーおよび目地材のいずれかである。本研究においては最もクリティカルと考えられる目地材のない平坦な端面を用いた。一方、目地材を有しない場合には、接合すべき二つの供試体を密着させるため、一方を型枠としたマッチキャスト方式を採用した。本来プレキャスト部材を用いる理由の一つとして施工の急速性がある。これを満足させるためには、施工手順の増加と目地材の養生期間を必要としないいわゆるドライ方式の方が望ましい。プレキャスト床版の中で最も危険側と考えられるドライ方式が適用可能となれば、従来からの目地材、シア



(a) MおよびFシリーズ(2点載荷)



(b) MSシリーズ(1点載荷)

図-5 載荷方法

キーを有するものも当然適用可能となる。本研究は床版の設計法を基にした曲げ強度を対象にしたものであり、試験供試体は図-4(a)とし、接合面のずれを検討するための供試体を図-4(b)とした。従って、図-4(b)はせん断力を与える供試体でもある。本来、床版においてははりのようなせん断応力状態およびせん断破壊現象はほとんど存在することなく、はりのせん断破壊に相当するのは押抜きせん断破壊である。本研究では、あくまで設計の対象となる曲げ強度に着目したものであり、参考のために図-4(b)に示すせん断面を有するはりでも実験を行った。

導入したプレストレスは3.63MPa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3.2MPaとなった。このプレストレス量は、床版に導入するプレストレス量に比較するといくらか小さい。これはあくまでも供試体サイズと鋼棒の関係によるものである。また、鋼棒(φ17mm、断面積2.27cm²)の配置は実際の設計例においては断面中央の場合と中央から下側になるものがある。本研究では床版厚を実際より小さめにしてあるため、鉄筋の配置上断面の中央に鋼棒を配置した。

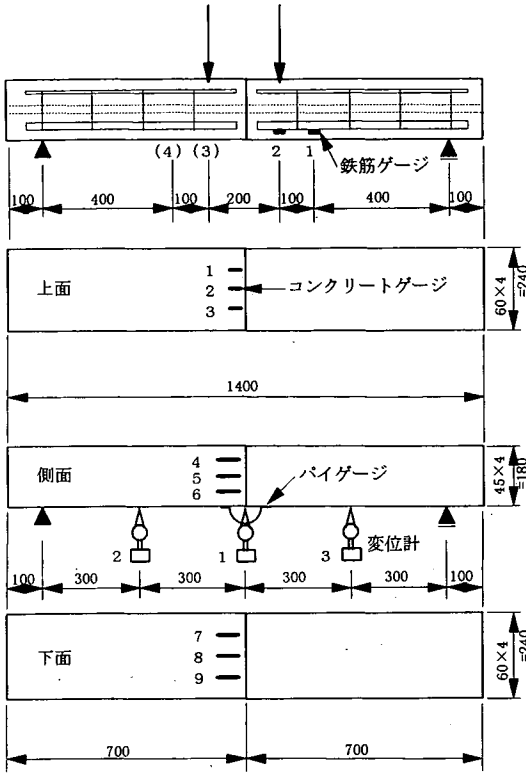


図-6 計測器具の位置

結局、本研究の目的は弱点を有する部材の疲労強度およびばらつきを調べるために、同一の供試体となった。

(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(MおよびFシリーズ)に対しては単純支持で2点載荷(図-5(a))とし、接合部のせん断力の影響を調べる目的の試験では接合部を桁中央から10cm離れた供試体(MSシリーズ)で行い、載荷位置は桁中央部で1点載荷(図-5(b))とした。本研究は曲げ疲労強度を対象としているため、支点付近に接合部を設けた供試体の試験は行わなかった。なお、図-5(a)、(b)の載荷方法は図-4(a)、(b)の供試体に対応するものである。せん断を対象にした供試体はあくまで破壊がどのように生じるかを検討するものであり、本来の床版の破壊のように押抜きせん断破壊をモデルにしたものではない。静的試験においては荷重を4.9kNずつ増加させながら計測を行った。

疲労試験では曲げ強度を対象とすることにより2

点載荷とし、正弦波繰返し荷重を30~180cpm(0.5~3.0Hz)の間で試験機が対応できる最大の繰返し速度とした。本研究における疲労試験機はサーボバルブを用いた試験機で、繰返し速度ははりの最大変位に大きく影響を受け、常に一定の繰返し速度とすることは困難であった。しかしながら、同一荷重においては同一の繰返し速度とした。最大荷重を変動させ下限荷重はすべての供試体で静的破壊荷重の10%とした。なお、通常用いられるように最大荷重も最小荷重も静的強度で除した最大荷重比および最小荷重比の表現を用い、またそれらの差は荷重幅比と表現されている。上限荷重は静的強度の75~80%(荷重幅比では65~70%)を中心とし、パイロットテストとして荷重幅比50および60%でも試験を行った。繰返し荷重における荷重の検定のためDynamic Strain Meterとパーソナルコンピュータを用いて確認した。本疲労試験においては 10^i ($i=0, 1, 2, \dots$)回の繰返しごとに静的試験を行った。荷重段階は静的試験と同様に行った。

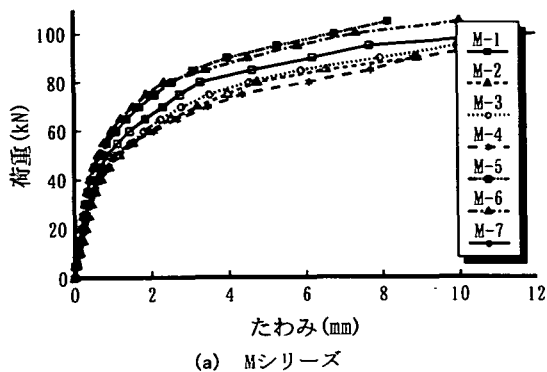
b) 測定方法

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、接合位置の開きはパイ型変位形で計測を行った。プレキャスト接合位置における開きは、いわば、最初からクラックを与えているのと同様である。当然ながら、接合位置以外のところにひび割れが生じる前に、この接合位置の開きが始まるものと予想される。また、この開き幅も接合が接合部全断面にわたっていることから、新たなひび割れよりも大きくなると考えられ、ひずみゲージで測定するパイ型変位計とした。静的試験においては各荷重ごとにひび割れを調べ、疲労試験では静的試験ごとにひび割れを調べた。

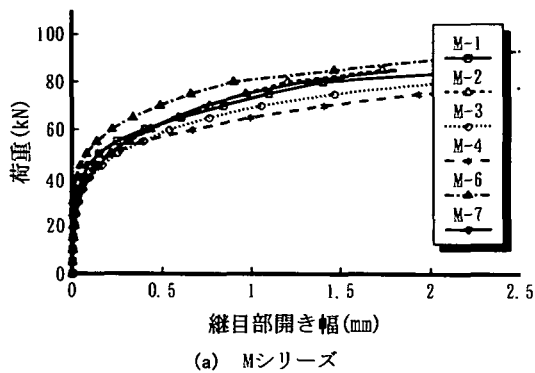
3. 静的試験結果および考察

(1) スパン中央の荷重-たわみ関係

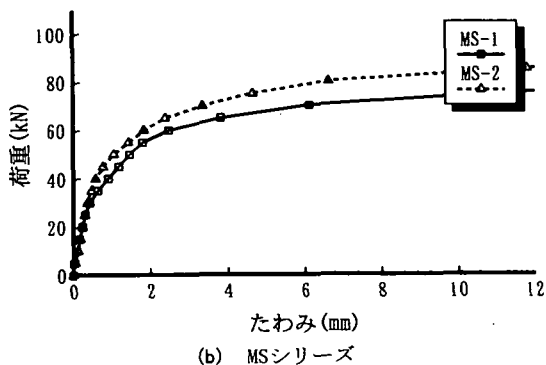
図-7(a)および(b)にスパン中央で接合した供試体および中央から10cmの位置で接合した供試体の荷重とたわみの関係を示す。荷重-たわみ曲線に差が生じるのはプレストレスを導入する場合、端部の平坦性の差などいくらかのプレストレスに差が生じたことによるものと考えられる。20kNまでのたわみは各供試体に差は生じていない。計算上、接合位置に開きが生じる荷重は、プレストレスがコンクリート断面に3.2MPa導入されているので、18.42kNとなる。また、接合部以外の位置におけるひび割れの生じる荷重は、コンクリートの曲げ強度を材料試験と同様に5.3MPaとすれば41.95kNである。このようなこと



(a) Mシリーズ

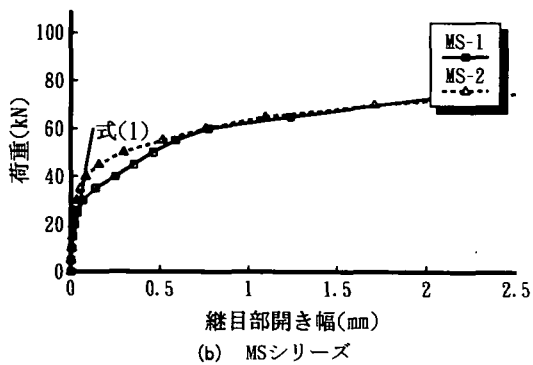


(a) Mシリーズ



(b) MSシリーズ

図-7 荷重-たわみ関係



(b) MSシリーズ

図-9 荷重-継目部開き幅関係

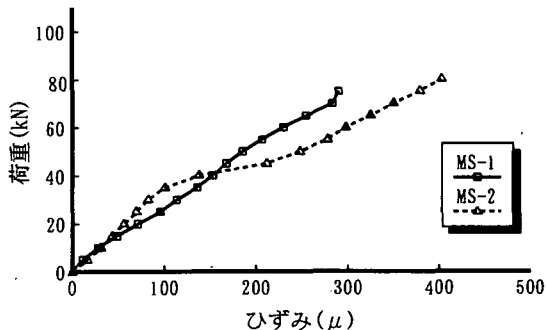


図-8 荷重-鉄筋ひずみ関係

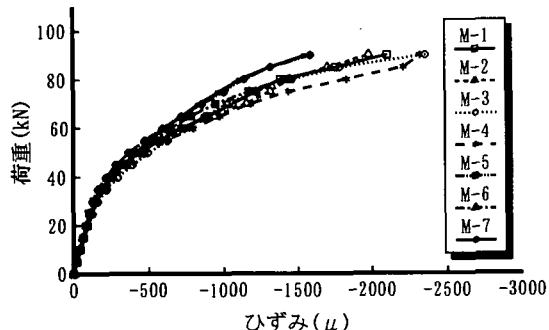


図-10 荷重-圧縮コンクリートひずみ関係

から、少なくとも20kN程度の荷重までは直線性を保っている。また、接合部開きおよびひび割れが、たわみに顕著に影響を与えるのは荷重が49.0kN以上となった。接合部がせん断を受ける供試体の荷重-たわみ関係は、最大曲げモーメントが生じる位置に接合位置が一致していないこと、さらに図-4(a)、(b)に示されるように実験供試体には継目位置で切断されている鉄筋が配置されているため、その断面の下段鉄筋がこれらの供試体に対していくらか作用していることから剛性が高くなっている。図-8は図-7(b)に対応するスパン中央の下段鉄筋のひずみを

示している。この図によれば荷重49.0kNの時、ひずみを応力に換算すると約44MPaの応力となっている。

(2) 荷重-継目部開き幅関係

図-9に荷重と継目部開き幅の関係を示す。継目部開きはあらかじめパイ型変位計を打ち継目の位置に取り付けて計測したものである。この開きは曲げひび割れとほぼ同等な性状を示すと考えることができるが、継目部が打継目であるためほとんど引張強度を有していないと考えられ、引張応力が生じると同時に開きが生じ始める。計算上開きが生じ始める荷

重は18.5kNであるが、目視できるような開きは20kN以上である。この開き幅が増加すると同時にたわみは上昇することになるが、図-9(a), (b)からもわかるように、顕著になるのは50kNからであり、開きが始まると同時にたわみに影響を与えるとは限らない。これは、開きあるいはひび割れは、一部の断面の性状であるのに対し、たわみははり全体の性状を示すからである。一方、せん断試験用供試体における開き幅は作用曲げモーメントが小さい分だけ小さくなる。また、この開きは当然ながら図-7(b)の荷重-たわみ関係にも影響を与え、たわみの急激な増加量は小さい。

開きをひび割れと見なし、ひび割れ幅をコンクリート標準示方書に基づいて求めると次式となる。

$$w = k \{4c + 0.7(c_s - \varphi)\} \frac{\sigma_{pe}}{E_p} \quad (1)$$

ここで、 k は定数で1.3、 c はかぶり(cm)、 $c_s - \varphi$ は鋼材間のクリアランス、 σ_{pe} はPC鋼材の応力の増分、 E_p は鋼材のヤング係数である。ちなみに、環境上の問題でひび割れがPC鋼材まで進展するときの断面応力から得られる計算上の荷重は線形弾性範囲とすれば34.0kNと求められる。このとき、鋼材の応力増分は16.4kNとなり、 $w = 0.0543\text{mm}$ が得られる。図-9(a)によれば、 $P = 34.0\text{kN}$ の時に開き幅はおおよそ0.05mm程度であり、示方書のひび割れ幅を求める式はほぼ妥当なことがわかる。許容ひび割れ幅 w_a は一般の環境に対して $0.004c$ (cm)で与えられ、 $c = 9\text{cm}$ であるので、 $w_a = 0.036\text{cm} = 0.36\text{mm}$ となる。これに相当する荷重は53.9kN程度で、計算上の開きが発生する荷重(18.4kN)の2.86倍であり、腐食の影響は小さいことがわかる。

(3) 荷重-圧縮コンクリートひずみ関係

荷重と圧縮コンクリートひずみの関係を図-10に示す。コンクリートの圧縮ひずみは継目部開きに相当影響され、開きが生じ始めるおおよそ30kNの荷重から圧縮ひずみが大きくなり始める。ひずみは接合部の近くで計測され、開きによる断面の減少の影響が大きい、たわみが大きい影響を受けていないのははり全体の挙動を示すために一箇所の挙動に作用されていないことを意味している。図-9および図-10からわかるように、継目部開き幅と圧縮コンクリートのひずみは類似の傾向を示している。例えば、40kNから60kNまでの開き幅は40kNまでの開きの4倍程度で、圧縮ひずみは約3倍である。これに対し、たわみは2倍程度と小さい。

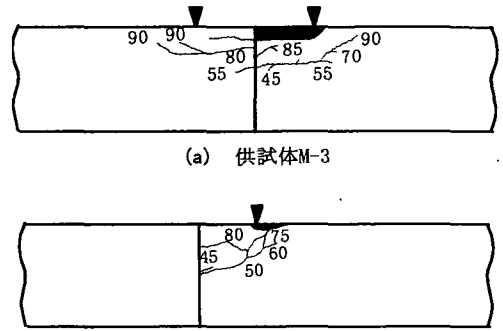


図-11 ひび割れ図

注) 図中の数値はひび割れが生じた時の荷重(kN)

(4) ひび割れ性状

図-11(a)および(b)に代表的なひび割れ図を示す。スパン中央接合部のはりでは30kN程度から接合部の開きが生じ始め、荷重の増加に伴い開きが進展し、開き自体も大きくなった。荷重が約50kNのときPC鋼棒の上側付近に水平のひび割れが生じ始めた。このひび割れは荷重の増加と共にさらに進展したが、破壊時のひび割れとは関連していない。破壊はコンクリート圧縮部の破壊により生じ、典型的なひび割れパターンであった。一方、せん断試験用の供試体においても接合部の開きが生じ、最大曲げモーメントの位置での下面から進展する曲げひび割れは生じなかった。スターラップの影響もあるが、破壊時にひび割れは継目部から最大曲げモーメント方向に進展し、ほぼ曲げ2点載荷の供試体M-3の破壊と同じパターンであった。従って、この供試体はせん断面を有しながらせん断破壊には至っていない。

(5) 終局耐力について

前述したようにすべての供試体は上縁コンクリートの破壊によって終局状態となった。ひび割れ発生モーメント、破壊荷重の実験および計算モーメント、実験値と計算値との比を表-4に示す。

破壊モーメントの計算値はコンクリート標準示方書に示されるように、コンクリート断面に対して矩形応力ブロックを仮定し、鋼の降伏強度としてロットの試験値を用いた。スパン中央に接合部を有する供試体Mシリーズの破壊モーメントの平均値は24.2kNmとなり、標準偏差は0.99kNmで変動係数は約0.040(4%)となった。コンクリートおよび鋼の強度のばらつきを考えれば、この変動係数は決して大きいとは考えられない。一方、実験値と計算値の比の最大値は1.36、最小値は1.21、平均値は1.27となっ

表-4 静的試験結果

供試体名	実験値			計算値	
	開き発生モーメント (kNm)	破壊荷重 (kN)	破壊曲げモーメント (kNm)	破壊曲げモーメント (kNm)	実験値 計算値
M-1	8.5	96.0	24.0	19.1	1.25
M-2	4.6	93.1	23.3	19.1	1.22
M-3	6.2	96.0	24.0	19.1	1.26
M-4	7.6	92.1	23.0	19.1	1.21
M-5	7.6	103.9	26.0	19.1	1.36
M-6	8.5	101.0	25.3	19.1	1.32
M-7	5.4	95.1	23.8	19.1	1.25
平均値	7.0	97.0	24.2	19.1	1.27
変動係数	18.2		4.1		
MS-1	7.4	82.3	24.7	22.9	1.08
MS-2	2.9	89.2	26.8	22.9	1.17
平均値	5.2	85.3	25.8	22.9	1.13

注) 変動係数の単位は%

た. せん断試験用供試体の曲げ耐力は、曲げ試験用供試体の曲げ耐力より大きい実験値を示している。本来は接合部において下段鉄筋(引張鉄筋)は不連続であるので、最大曲げモーメントの生ずる位置に対してこの下段に配置されている鉄筋は接合部の位置まで近いため有効に作用しにくい。しかしながら、結果的には図-8からわかるように、この下段鉄筋もある程度引張応力が作用し、曲げ耐力に寄与したものと考えられる。そこで、計算値は下段鉄筋が降伏したものととして求めることとした。このようにして計算値を求めても、実験値は計算値を上回った。この供試体において最大曲げモーメントの生じる位置でひび割れが生じなかったことは、コンクリート下縁に計算結果と同様のひずみが生じていないことを示している。つまり、下段鉄筋は必ずしも降伏しているとは限らないことにもなる。このような結果から、せん断試験用供試体における実験値と計算値の比は曲げ試験用のそれより小さくなったものと考えられる。また、当然のことではあるが一般の設計においては下段に配置された鉄筋を曲げ強度に含めるものではない。

4. 疲労試験結果と考察

(1) 疲労破壊回数と破壊形式

表-5に疲労破壊試験の結果を順序統計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表示する。ここで生存確率は次式で表される。

表-5 疲労試験結果

供試体名	荷重幅比 (%)	r	破壊回数 N(10 ⁴)	log N	生存確率 P	破壊パターン
F1- 1		1	0.10	3.00	0.800	C
F1- 2	75	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		1	0.12	3.08	0.825	C
F2- 2	70	2	0.20	3.30	0.750	C
F2- 3		3	0.45	3.65	0.675	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		1	0.95	3.98	0.909	C
F3- 2	65	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	S
F3- 6		6	104.02	6.02	0.455	S
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		1	200>	6.30	—	—
F5- 2	50	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S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。

$$P = 1 - r / (m + 1) \quad (2)$$

上式で、rは順序統計量で、mは同一条件で試験を行った供試体総数である。ここで、荷重幅比(最大荷重と最小荷重の差と静的強度の比)50%および60%の試験も行ったのは最初のパイロットテストとしての供試体であった。

破壊は供試体F3-5および6のみがPC鋼棒の破壊を生じ、他の供試体の破壊はコンクリートの破壊によるものであった。ただし、この二つの供試体は鋼棒に作用する応力を測定する目的でサンドペーパーで表面を研ぎ、ひずみゲージを貼り付けたものであり、この軽い研磨が影響を及ぼしたと考えられる。W. Venutiのプレストレストコンクリートはりの疲労

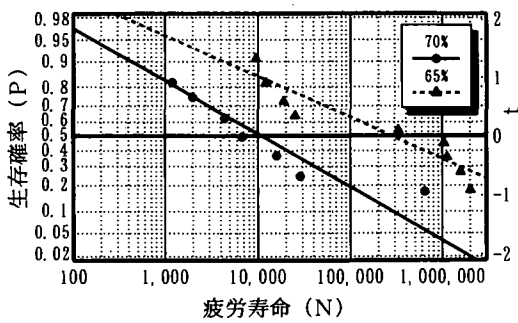


図-12 生存確率～疲労寿命関係

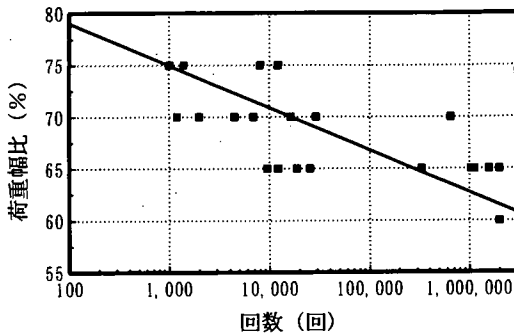


図-13 S-N曲線

強度の研究によれば低荷重の繰返し荷重を受ける供試体は鋼棒が疲労破壊し、高荷重ではコンクリートの疲労破壊となっている。ただし、彼の研究は1965年に発表されており、その当時の鋼材と現在の鋼材が異なっていることが考えられる。さらに彼の研究では本研究と異なり、プレストレスト鋼棒の位置が下からはり高の1/3に対し、本研究ではプレキャスト床版を対象としているため鋼棒は断面中央に配置されている。しかし、このような条件の違いがあるものの結果的には同様な傾向を示した。

(2) S-N曲線

表-5に与えられる生存確率Pを対数正規分布確率紙上にプロットした値と疲労寿命の関係を図-12に示す。破壊回数がガウス分布に従うと仮定するもの、指数分布に従うと仮定するもの、およびMcCallモデル³³⁾のようにべき乗を用いた関数に従うと仮定するものとした研究があるが、阪田ら³⁴⁾、松下ら³⁵⁾および井上ら³⁶⁾は圧縮強度の試験結果から破壊確率分布の適合性に関する研究をそれぞれの実験データを用いて行っている。その結果対数正規分布は比較的よく合うことを示している。図-12から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い、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ない途中で試験を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にある。いま、文献36)を参考にして縦軸tを累積確率の標準変量とし、横軸を破壊回数の対数log Nとして、これらの関係を最小自乗法を用いて求めると次式が得られる。なお、この標準変量tと累積確率Pとの関係は、

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp(-\xi^2/2) d\xi$$

であり、 $t=0$ の時、生存確率は50%、 $t=1$ の時、84.135%である。

$$S_r = 70\% \text{ に対して } t = 3.30 - 0.816 \log N \quad (3)$$

$$S_r = 65\% \text{ に対して } t = 3.48 - 0.632 \log N \quad (4)$$

この式は直線式と実験値のt軸方向の差($t-t_i$)の自乗和の最小値から得られたものである。一般には縦座標の最小自乗和を考えるが、横軸の最小自乗和を考えると、つまりlog N軸方向の差 $\log N - \log N_i$ の自乗和の最小値に基づいて求めると異なった式が得られ、次式で表される。

$$S_r = 70\% \text{ に対して } t = 3.65 - 0.902 \log N \quad (5)$$

$$S_r = 65\% \text{ に対して } t = 3.82 - 0.700 \log N \quad (6)$$

式(3)および(4)に基づけば標準偏差σは荷重幅比が70%のとき1.23、60%のとき1.58が得られる。松下ら³⁵⁾は46本の同一応力に対する普通コンクリートの圧縮疲労試験で0.76～1.48を得ている。また阪田ら³⁴⁾および井上ら³⁶⁾は同様の実験に対し標準偏差はそれぞれ0.46～0.57、および0.39～0.49となっている。従来の研究は欠陥のない、最も単純な等応力分布の圧縮疲労強度試験に基づいたばらつきであるが、本実験で用いられた供試体はコンクリート強度、応力勾配、PC鋼棒の位置、接合面の位置など多くのばらつきの要因を有している。このようなことから標準偏差は当然大きくなると考えられる。さらに、本研究において標準偏差が単一の圧縮疲労試験結果より大きくなったのは、接合面だけの問題のみならず、養生期間など疲労試験期間内に全て一定の条件を満足させきれないことから生じている。例えば、3Hzで200万回繰返すと7.7日かかり、さらにその間に7回の静的試験を行えば10日間にもなる。特に曲げ試験のように変位が大きくなると、試験機に大きい負荷がかかり、繰返し周期はますます小さく

なる。これは軸圧縮試験のようにストロークの小さい試験と大きく異なる点である。なお、 $S_r=75\%$ に対してはデータが少ないので破壊確率を検討するのは信憑性にもとることとなり検討していない。

図-13に荷重幅比 S と破壊回数 N の関係を示す。式(5)および(6)から得られた平均値を用いると $S-N$ 曲線は次のように求まる。

$$S_r = 83.34 - 3.236 \log N \quad (7)$$

Venutiは $S-N$ 曲線を両対数で示し、次のように与えている。

$$\log S_{\max} = 0.060 - 0.0525 \log N \quad (8)$$

ここで S_{\max} は最大荷重で、最小荷重は10%としている。

一方、本研究の著者の一人浜田は破壊に至らない供試体のデータの取り扱い方法として次のように提案している³⁷⁾。いま、 n 個の供試体の内 m 個が規定回数(この場合200万回)以内に破壊したとすると、それらの平均値 χ および標準偏差 σ は次のように得られる。

$$\chi = \sum_{i=1}^{m+1} f_i \cdot x_i \quad (9)$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^{m+1} g_i \cdot x_i \quad (10)$$

ここで、 f_i および g_i は次に定義される。

$$f_i = \frac{\sum_{j=1}^{m+1} \left\{ G\left(\frac{j}{n+2}\right) \right\}^2 - G\left(\frac{i}{n+2}\right) \sum_{j=1}^{m+1} G\left(\frac{j}{n+2}\right)}{(m+1) \sum_{j=1}^{m+1} \left\{ G\left(\frac{j}{n+2}\right) \right\}^2 - \left\{ \sum_{j=1}^{m+1} G\left(\frac{j}{n+2}\right) \right\}^2} \quad (11)$$

$$g_i = \frac{(m+1)G\left(\frac{i}{n+2}\right) - \sum_{j=1}^{m+1} G\left(\frac{j}{n+2}\right)}{(m+1) \sum_{j=1}^{m+1} \left\{ G\left(\frac{j}{n+2}\right) \right\}^2 - \left\{ \sum_{j=1}^{m+1} G\left(\frac{j}{n+2}\right) \right\}^2} \quad (12)$$

上式中の関数 $G(x)$ は正規分布関数 $P(-\infty < x \leq x_i)$ の逆関数である。文献³⁷⁾は n が11までの f_i および g_i の値を数表にして表している。この数表を用いて平均値 χ および標準偏差 σ を求めると、表-6のように得られる。

表-6 平均値および標準偏差の計算表

順序 統計量	$N_i (10^4)$	$\log N_i$	f_i	g_i
1	0.95	3.98	0.030	-0.313
2	1.21	4.08	0.060	-0.196
3	1.88	4.27	0.081	-0.114
4	2.54	4.40	0.099	-0.047
5	33.40	5.52	0.155	0.047
6	104.40	6.02	0.130	0.072
7	112.04	6.05	0.145	0.131
8	157.03	6.20	0.161	0.192
9	200.00*	6.30	0.179	0.250
10	200.00*	-	-	-

$\chi = \sum (\log N_i) f_i = 5.56$
 $\sigma = \sum (\log N_i) g_i = 1.13$
 *印は非破壊データ

確率紙から得られた荷重幅比65%の $\log N$ の平均値は5.51が与えられているのに対して、浜田の提案方法では表-6に与えられるように5.56が与えられている。これは200万回で破壊しなかったデータの取り扱い方の差を示しているが、いずれも非破壊データを含めているため両者の間にはほとんど差が生じない。また、この結果を用いて $S-N$ 曲線を求めると、次式ようになる。

$$S_r = 85.69 - 3.711 \log N \quad (13)$$

本研究においては床版を対象にしているため、下限荷重を静的強度の10%としたが、下限荷重が異なるときにはGoodmanの修正図が適用されている。

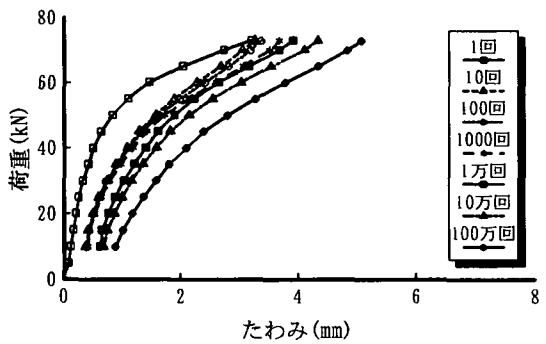
(3) 200万回疲労強度

実際の橋梁設計においては疲労強度として200万回疲労強度が用いられることが多い。また、研究者により最大荷重を対象にした疲労強度と最大荷重幅(最大荷重から最小荷重を差し引いた荷重)を対象にした疲労強度があるが、多くの場合後者となっている。本研究で論ずる疲労強度は他者の研究でも最大荷重幅比で統一するためその値も併記する。本研究において式(13)から200万回疲労強度を求めると、静的強度の62.3%が得られる。コンクリートの圧縮疲労強度もOpleの研究によれば65.3%(応力幅比55.3%)が求められており、他の研究者も同様な値が得られている。Opleをはじめとする無筋コンクリートの実験においては応力度を用いその強度を表示し

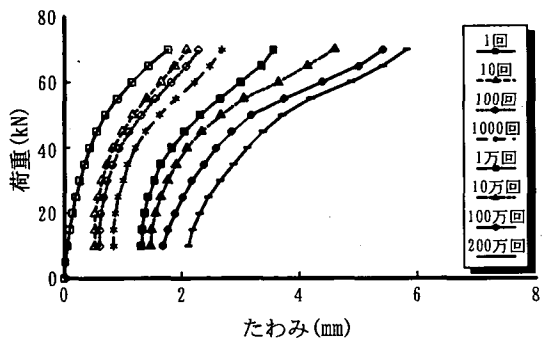
ている。したがって本研究のように桁に対する場合には曲げモーメントあるいは荷重を用いて強度を表している場合とおのずから異なることに注意する必要がある。Venutiの継目のない完全なプレストレストコンクリートはりの疲労強度によれば静的強度の約53.6% (荷重幅比43.6%)を示している。ただし、Venutiの用いた供試体はプレストレスによる応力を三角形分布としている。本研究の接合面を有するプレキャスト部材の疲労強度はVenutiらの供試体の疲労強度よりかなり大きい結果となった。さらにVenutiはばらつきとして200万回疲労強度の標準偏差として荷重幅比で表し約6.5%を示している。本研究において荷重幅比65%のばらつきをそのまま用いると、200万回疲労強度の標準偏差は荷重幅比で表すと最大荷重の4.9%となる。この結果変動係数を求めるとVenutiの実験結果では12.1%に対し、本研究結果では7.9%となり、継目を有するプレキャスト部材の疲労強度のばらつきの方がむしろ小さくなった。また、本研究の静的試験の変動係数が4.1%であるのと比較するとおよそ2倍になっているが、疲労試験の性質上当然のことと考えられる。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はりと少なくとも同程度の強度を有し、特に大きいばらつきもないと考えられ、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。

(4) 荷重と中央点のたわみ関係

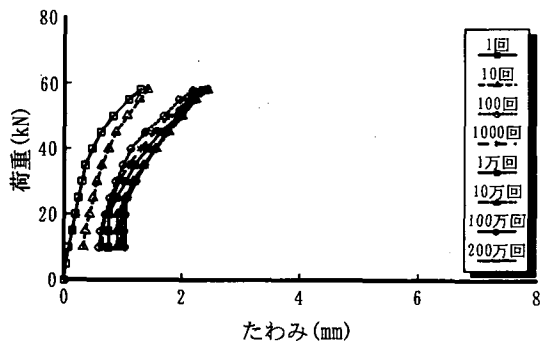
図-14(a)～(c)に荷重幅比65%で破壊した供試体(供試体F3-8)、荷重幅比65%で破壊しない供試体(供試体F3-10)および荷重幅比50%の供試体(供試体F5-1)の荷重-たわみ関係を示す。これらの曲線からもわかるように、いずれの供試体も繰返し回数とともに曲げ剛性が減少している。しかしながら、供試体F3-10のように繰返し回数1,000回と10万～200万回とではやや異なった挙動を示している。つまり、10万回における荷重-たわみ関係において全断面が有効に抵抗するような小さい荷重では剛性は大きい。しかし、最大荷重付近ではわずかながら剛性の回復がみられる。この現象は供試体F3-8においても似ている。全く同様な現象は後に示す荷重-開き関係および荷重-ひずみ関係にも現れている。Venutiも同様な現象を示し、繰返し回数の増加はある種のひずみ硬化、つまり応力の再分配を生み出しているものと思われる。現行示方書においても疲労限界状態に対しコンクリート部分の応力分布は矩形



(a) 供試体F3-8



(b) 供試体F3-10



(c) 供試体F5-1

図-14 荷重-たわみ関係

ブロックとして扱うことになっている。さらに示方書ではこのブロックの重心の位置が、三角形応力分布の重心の位置と同じとしている。本研究では繰返し回数に伴う応力分布まで詳しく調べていないものの、1,000回までの応力分布とは異なった分布になると考えることもできよう。一方、供試体F5-1は50%の荷重幅比(最大荷重比60%)を受けている供試体であるが、200万回目のたわみ-荷重関係は最初のた

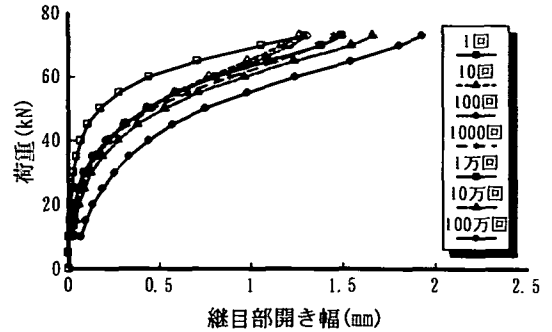
わみ-荷重関係に残留のたわみ(ここでは最小荷重時の残留たわみの意味で残留の定義とする)を加えたものとほぼ同等になる。残留たわみは残留ひび割れおよび供試体の最初の載荷の際の摩滅およびセッティングによるものと考えられる。いずれにしても他の供試体F3-8, F3-10に比較するとほとんど疲労の影響を受けていないと考えられる。

(5) 荷重-継目部開き幅関係

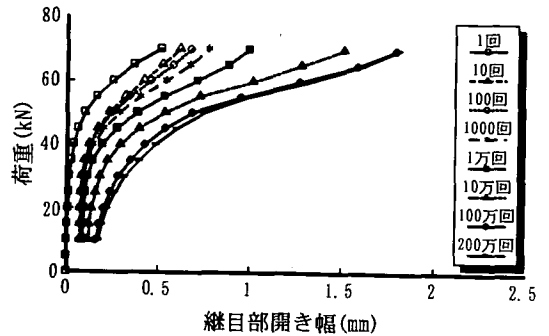
継目部開き幅と荷重の関係を図-15(a)~(c)に示すが、残留開き幅は各供試体において必ずしも規則性を持っていない。この残留開き幅は開きが生じた後もセメント分微粒子や細骨材が分離し、くさびの作用をすることにより生じたものと考えられる。継目部開き幅は供試体F3-8とF3-10では初期の荷重では異なっているが、繰返し回数100万回では類似の性状を示している。しかしながら、供試体F3-8のみ約157万回で破壊した。従って、供試体F3-10は200万回で破壊しなかったものの疲労限のように永久に破壊しない供試体とは考えにくい。これに対し、供試体F5-1は200万回載荷の時残留開き幅こそ生じるものの、200万回の荷重-開き幅の曲線は初回の荷重-開き幅曲線とほぼ同じである。このような供試体においては、ほぼ疲労限以下の荷重の作用と見なして差し支えないと考えられる。しかしながら、このような荷重が作用する場合でも最大荷重時において開きが生じる場合には、必ず残留の開きが存在しその幅は相当大きくなる。つまり、一般のひび割れと異なり、継目部を有することはいかなる鉄筋もなく、この継目部にひび割れが集中し、近傍の部分においてはコンクリートの鉄筋への付着力もなく、コンクリートに応力が伝達されないことから近傍の部分にはひび割れが生じない結果になる。このため、近傍の位置にひび割れが生じず、通常ひび割れ幅よりもいくらか大きいことが予想される。この事実をみれば、示方書におけるひび割れ幅の計算には残留ひび割れ幅はなく、今後検討の必要もあろう。

(6) ひび割れパターン

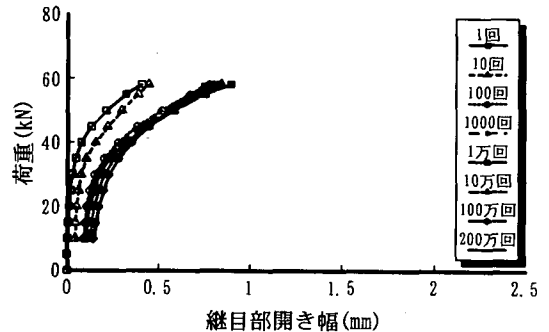
図-16に疲労破壊を生じた典型的な供試体(供試体F3-8)のひび割れパターンを示す。この供試体は157万回で破壊に至ったものである。初回の繰返しからわずかな水平ひび割れがPC鋼棒の上部に生じ、そのひび割れは繰返し回数の増加とともにさらに水平に進展していく。これは静的載荷試験の時のひび割れによく似た現象であるが、静的載荷の場合にはひび割れは荷重の増加とともに上方に向かう。終局時にはコンクリートの圧縮部の破壊となった。この破壊



(a) 供試体F3-8



(b) 供試体 F3-10



(c) 供試体 F5-1

図-15 荷重-継目部開き幅関係

パターンは静的試験による破壊とほぼ同様なパターンであった。全ての供試体においてほぼ同じようなひび割れパターンであった。Venutiはひび割れに関して特に論述はしていないが、示された写真から、かなり小さい間隔のひび割れが生じていることがわかる。従って、継目が存在する場合としない場合のひび割れパターンは大きく異なり、プレキャスト部材では継目部分にひび割れが集中したのと同様とみなすことができる。

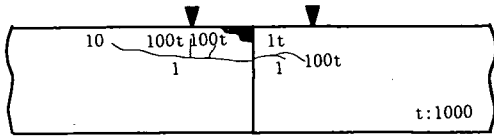


図-16 ひび割れ図(供試体F3-8)
注)数値は繰返し回数 N

表-7 疲労試験後の静的耐力(残留耐力)と静的耐力との比較

供試体名	载荷回数 $N_{2\sigma}$ (10^4)	残留強度 R (kN)	静的耐力 S (kN)	R/S (%)
F5-1	200	103.9	97.0	1.07
F5-2	200	100.9	97.0	1.04
F5-3	270	99.0	97.0	1.02
平均		100.9	97.0	1.04
F4-1	200	108.8	97.0	1.12
F3-9	200	107.8	97.0	1.11
F3-10	209	104.9	97.0	1.08
平均		106.8	97.0	1.10

(7) 疲労試験後の未破壊供試体の静的耐力

疲労試験によって破壊しない供試体に対して静的試験を行った。その結果を表-7に示す。この結果からわかるように、疲労試験後の静的耐力は前もって行った静的耐力と比較して大きい値を示している。考え方の一つとして静的強度が大きいから疲労破壊しなかったとも考えられる。しかし、前もって行った静的試験結果の変動係数は4.1%であり、 σ (標準偏差)の範囲は97.51kNから101.0kNを考えても疲労試験後の静的耐力がほとんどの供試体で越えていることは偶然誤差とは考えにくい。しかも、荷重幅比の大きい供試体ほど静的強度の増大は大きい。このようなことから疲労試験により鋼棒にひずみ硬化を生じて降伏強度が上昇するか、コンクリートの応力分布が変化し(例えば作用応力の重心が上方に変化)抵抗モーメントの増大が生じたことも考えられる。

(8) 継目部開き幅およびコンクリートのひずみと繰返し破壊回数の関係

ひび割れパターンでも記述したようにプレキャスト部材の曲げひび割れは一般のPCと異なり、継目部に集中している。従って、繰返し破壊回数(N)と最大荷重時の継目部の開き幅はいくらか相関関係が存在すると考えられる。図-9によれば荷重と開き幅の関係から理論上導くのは困難であるが、図-17に最大荷重を与えたときの継目部開き幅と $\log N$ の

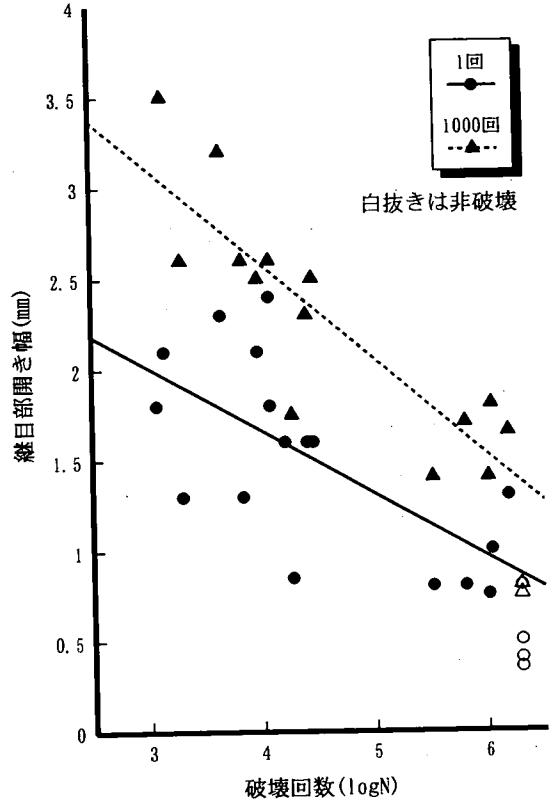


図-17 初回および1,000回繰返し時の継目部開き幅と破壊回数(N)との関係

関係を示す。各繰返し回数の時の継目部開き幅を調べるのは困難であるので、図-17には初回と1,000回載荷の時の継目部開き幅を示す。全ての実験供試体から得られたデータではないが、計測した供試体の全データを示している。図-17によれば初回および1,000回時の最大荷重を受けたときの継目部開き幅と、その供試体が破壊した回数の関係は次式で与えられる。

$$\text{初回} \quad w_j = 3.060 - 0.350 \log N \quad (14)$$

$$1,000\text{回} \quad w_j = 4.470 - 0.485 \log N \quad (15)$$

実験データはこれらの直線式に対して分散値が初回では0.151、1,000回では0.074が得られる。静的試験における荷重と開き幅の関係として78.4kNの荷重の時、変動係数が0.517となっていることを考えれば、いずれの式も分散値は小さい。これらの式の一方では疲労破壊を生じる繰返し回数を推定するものである。例えば、初回の開き幅が0.85mmであれば、疲労破壊の繰返し回数は200万回と推定できる。

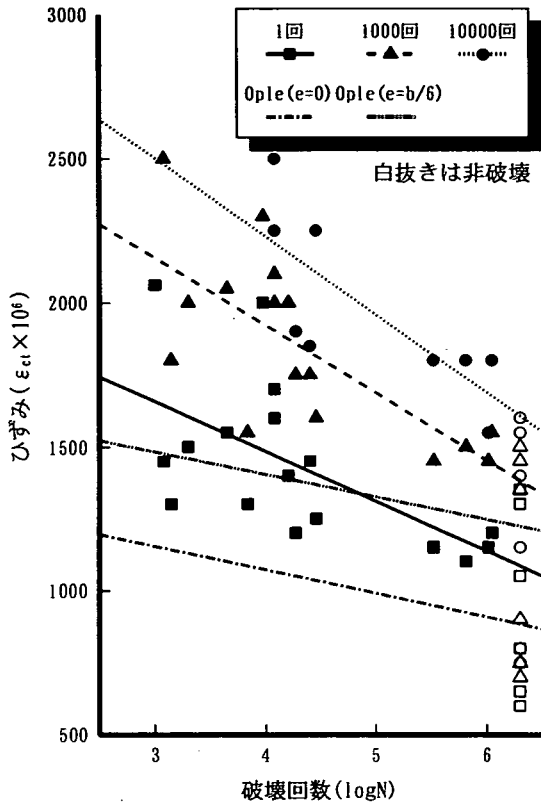


図-18 初回, 1,000回および1万回繰返し時のコンクリート上縁ひずみと破壊回数(N)との関係

1,000回繰返した後測定すれば, さらに良い精度で推定できることも意味している. ただし, この継目部の開き幅はプレストレスの導入応力と応力分布にも影響され, 本研究結果が全ての供試体に適用できるとは限らない. しかしながらプレキャスト部材の構造では開き幅が繰返し破壊回数に大きい相関性のあることを示している.

継目部の開きはやや一般性に欠けるのに対し, どのような供試体に対しても共通性のあるコンクリートひずみと破壊回数の関係を検討する必要がある. 図-18に最大荷重時のコンクリートひずみ ϵ_{ct} と $\log N$ の関係を示す. コンクリート部分が疲労破壊した供試体が多いため, コンクリートのひずみと破壊繰返し回数との関連性が認められよう. この関連も継目部開き幅と同様に破壊回数の対数 $\log N$ と直線関係になっており, 次式で与えられる.

$$\text{初回} \quad \epsilon_{ct} = 10^{-6}(2,302 - 206 \log N) \quad (16)$$

$$1,000\text{回} \quad \epsilon_{ct} = 10^{-6}(3,152 - 309 \log N) \quad (17)$$

$$1\text{万回} \quad \epsilon_{ct} = 10^{-6}(4,001 - 425 \log N) \quad (18)$$

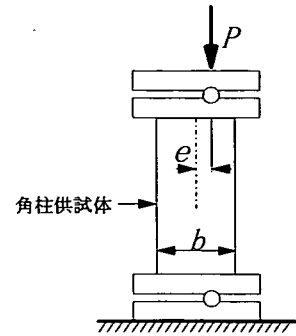


図-19 Opleの実験

破壊したデータから200万回のひずみを求めると, 式(16), (17)および(18)から初回, 1,000回, 1万回繰返し後のひずみはそれぞれ1080, 1380および1600($\times 10^{-6}$)が得られ, これらは200万回疲労強度の推定値を求めることもできる. しかしながら, 200万回時にそれらのひずみでは未破壊の供試体も存在しており, 継目部開き幅と破壊回数との関係の方がよい結果を与えている. なお, Venutiを始め, ほとんどの文献でこれらの関連性が示されていないが, Opleの実験(図-19)は参考にできよう. Opleは角柱に偏心荷重を作用させて応力勾配をもたらし, はりの応力分布と近似させた. 応力勾配を持つ角柱供試体の応力は, 等応力を受ける円柱供試体の応力-ひずみ関係から求めている. 彼の示している応力-ひずみ関係とS-N曲線からひずみと破壊荷重の関係を求めると次式を得る.

$$e=0\text{に対し,} \quad \epsilon_{ct} = 10^{-6}(1,400 - 82 \log N) \quad (19)$$

$$e=b/6\text{に対し,} \quad \epsilon_{ct} = 10^{-6}(1,720 - 79 \log N) \quad (20)$$

この式は本実験の初回におけるひずみに相当するもので, 本実験の結果と比較すると破壊回数に対しやや低いひずみとなっている. Opleの実験は偏心量 e を供試体幅 b の0, 1/18および1/6にして行っているが, その結果, はりに最も近い応力分布に近似させるため偏心量 e を幅 b の0および1/6倍の実験結果を示したものである. 偏心量が小さいと破壊回数に対するひずみは小さくなっている. 本実験とOpleの実験結果はやや異なるが, ほぼ類似になっていると考えられる. 前述したはりによる強度の比較よりはこのひずみによる比較の方が近いと考えることができる. 若干の差は試験供試体の差異にも関連しているものと考えられる. また本研究の範囲内のコンクリートに適用したひずみであり, 今後ひずみと疲労強度の関係の資料が増すことが期待される.

(9) 実験結果と設計について

本研究から得られた結果から、プレストレストプレキャスト床版の設計値を検討する。本実験結果において、200万回疲労強度は静的強度の62.3%であった。また、変動係数 V が7.9%であるので $2V$ の範囲(2.3%の危険側)で検討すれば、54.5%となる。また、 $3V$ (0.1%の危険側)では46.6%となる。この46.6%は荷重幅比であり、最大荷重比(疲労強度における最大荷重と静的強度の比)で表せば静的強度の56.6%となる。一方、フルプレストレスの状態では設計するとすれば、16.7kN(静的強度の17%)であり、安全率は平均値に対し4.21倍となる。また、接合部の開きがPC鋼材まで進展する荷重は34.0kN(静的強度の35%)である。この値は断面の応力分布において、鋼棒の位置の応力の総和がゼロになることから求められる。この結果を用いても平均値に対し、2.06倍の安全率となる。また、 $3V$ の危険率を考えたフルプレストレス状態の安全率は3.29倍であり、継目部開きがPC鋼材まで進展する荷重に対し1.61倍である。

継目部開き幅でも論じたように、荷重幅比50%(最大荷重比60%)の供試体F5-1(図-15(c))では、開き幅は200万回繰返したときには0.85mmまで達している。この開き幅は一般の環境の許容値 $0.004c$ (cm)(=0.36mm)を越している。この開き幅が0.36mmとなるのは計算上最大荷重がほぼ39.2kNの時である。これは逆に静的試験においては開きがPC鋼材に達する荷重である。最大荷重を受けるときに最大荷重が小さければ小さいほど、残留開き幅および最大開き幅が小さいことが予想される。このようなことから、継目部開きがPC鋼材に達する荷重での設計が可能と考えることができよう。本研究における供試体では、この荷重は前述したように34.0kNである。なお、現行の設計法ではフルプレストレスで行っており、18.4kNに相当している。

5. あとがき

プレキャスト床版に関する基礎的な研究は少なく、特に疲労強度に関する研究はほとんどない。本研究は設計時に最も重要と考えられる曲げ強度、特に曲げ疲労強度の研究を行ったものである。従来からコンクリートの軸圧縮疲労強度に関する研究は多いものの、曲げ疲労強度に関する研究は少ない。特にプレキャスト床版のように接合面を有する疲労強度の研究はなく、従来の完全な床版と同等に扱って設計が行われていた。そこで本研究ではプレストレストプレキャストコンクリート床版の設計に寄与することを目的に、従来からの疲労強度に関する研究と対

比して検討を行うとともに、継目部開き幅およびコンクリート上縁のひずみと繰返し回数について検討を行ったものである。本研究から得られた結論は以下のようなになる。

- (1) 静的試験の結果として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考えられる。また、示方書のひび割れ推定式は本実験結果ともよく合うことがわかった。プレキャスト床版のようにあらかじめ接合面の存在する部材ではその部分の開きが生じるが、疲労試験結果からもわかるようにこの開きはプレストレスのために閉じることになる。その意味では、プレキャスト部材を床版として用いる場合にはプレストレスの導入が望ましい。
- (2) 静的な実験値は矩形応力ブロックを仮定した終局計算値より20%程度大きいので、プレキャスト部材のように継目部を有する場合でも終局耐力の計算法として矩形応力ブロックを用いることができる。
- (3) プレキャスト部材の継手付近の曲げ疲労強度は単一のプレストレストコンクリートはりの疲労強度と同等であり、継手部を有しても疲労強度の低下につながらないことが判明した。また疲労強度のばらつきも継手があるにもかかわらず、大きい差が生じないことが判明した。
- (4) 開き幅について静的試験の結果からは示方書の式がそのまま当てはまるものの、繰返し載荷の場合には残留の開きが存在する。このため、最大荷重時において開き幅が大きい場合には残留開き幅に注意する必要がある。
- (5) ひび割れパターンは従来の研究とは相当異なり、継目部分に集中し、曲げひび割れがあまり生じない。
- (6) 初回および1,000回繰返し後の継目部開き幅と疲労破壊の関係、およびコンクリート上縁ひずみと疲労破壊の関係は大きい。継目部開き幅と疲労破壊との関係の方が大きい関連性を示す。一般論として疲労破壊に対し、静的な最大コンクリートひずみが適用される可能性もあるが、この関係からも疲労破壊回数は推定できるものと考えられる。
- (7) 200万回繰返し荷重を受けたプレストレストはりの静的強度は初載荷のはりの静的強度を越えることを示した。

なお、最近移動荷重による疲労強度の実験も行わ

れるようになっている。しかし、このような大がかりな実験は、強度およびそのばらつきを調べるような研究には莫大な時間と労力を要するため、安全率の確認としてこのような実験を行うのが適切のように考えられる。また、本研究は強度のばらつきを調べるため、一供試体にとどまった。今後も必要と考えられる供試体があれば、改めて研究の必要がある。しかし、本研究は一応危険と考えられる供試体に外力が作用しているものとして実験を行ったものである。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、実験を共同に行った山口大学工学部兼行啓治技官、熊谷組石川哲、山口大学大学院生梯誠、卒業生原詩良、伊藤剛の諸君に協力を得た。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 学：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) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 今井 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.
- 8) Kluge, R.W., and Sawyer, H.A.: Interacting Pretensioned Concrete Form Panels for Bridge Decks, *PCI Journal*, Vol.20, No.3, pp.34-61, May-Jun.1975.
- 9) 中井 博編：プレキャスト床版合成桁の設計：施工，森北出版，1986.6.
- 10) Biswas, M.: Precast Bridge Deck Design Systems, *PCI Journal*, Vol.20, pp.40-93, Mar.-Apr.1986.
- 11) Slavis, C.: Precast Concrete Deck Modules for Bridge Deck, *PCI Journal*, Vol.17, No.4, pp.120-135, 1983.
- 12) Barker, J.M.: Research, Application and Experience with Precast Prestressed Bridge Deck Panels, *PCI Journal*, Vol.20, pp.66-85, Dec.-Nov.1975.
- 13) 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.
- 14) Issa, M.A., Idriss, A.T., Kaspar, I.I., and Khayyat, S.Y.: Full Depth Precast and Precast Prestressed Concrete Bridge Deck Panels, *PCI Journal*, Vol.40, No.1, pp.59-80, Jan.-Feb.1995.
- 15) Issa, M.A., Yousif, A.A., Kaspar, I.I., and Khayyat, S.Y.: Field Performance of Full Depth Precast Concrete Panels in Bridge Deck Reconstruction, *PCI Journal*, Vol.40, No.3, pp.82-108, May-Jun.1995.
- 16) PCI Committee on Bridges: Prestressed Concrete Bridge Deck Panels, *PCI Journal* Vol.32, No.2, pp.26-45, 1987.
- 17) PCI Bridge Producers Committee: Recommended Practice for Precast Concrete Composite Bridge Deck Panels, *PCI Journal* Vol.33, No.2, pp.67-109, 1988.
- 18) 藤井智弘，梶川康男，前川幸次，榎谷 浩：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.
- 19) 中井 博，岸田博夫，竹中裕文：プレキャスト床版を用いた合成桁の耐火性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.31A，pp.395-408，1985.3.
- 20) 中井 博，竹中裕文，喜田 浩：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的実験的研究，構造工学論文集，Vol.32A，pp.81-92，1986.3.
- 21) 吉田 博，榎谷 浩，井原朋美，藤井智弘：横溝されたプレキャストコンクリート版の静的挙動に関する研究，構造工学論文集，Vol.32A，pp.93-105，1986.3.
- 22) 中井 博，藤井 学，渡辺英一，竹中裕文：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.
- 23) 中井 博，渡辺英一，竹中裕文，林 圭一：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実験，構造工学論文集，Vol.33A，pp.285-298，1987.3.
- 24) 松井繁之，中井 博，梶田文雄，竹中裕文：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力に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.34A，pp.275-284，1988.3.
- 25) 中井 博，山之内幸裕，梶田文雄，酒造敏広，山本竜太郎：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.
- 26) 明橋克良，佐々木保隆，御子柴光春，大谷祥三：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.
- 27) Venuti, W.J.: A Statistical Approach to the Analysis of Fatigue Failure of Prestressed Concrete Beams, *ACI Journal*, Vol.62, No.11, pp.1375-1394, Nov.1965.
- 28) Ople, F.S., and Hulsbos, C.L.: Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient, *ACI Journal*, Vol.63, No.1, pp.59-82, 1966.
- 29) 浜田純夫，成岡昌夫：軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集第176号，pp.83-88，1971.
- 30) 松下博通，牧角龍憲：プレテンションPCばりの疲労に関する研究，セメント技術年報，Vol.32，pp.477-481，1978.
- 31) 岡村 甫，二羽淳一郎：鉄筋コンクリート部材の疲労，コンクリート工学，Vol.21，No.1，1983.
- 32) ACI Committee 215: Consideration for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading, *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1, 1994.
- 33) McCall, J.T.: Probability of Fatigue Failure of Plain Concrete, *ACI*, No.55, pp.233-240, 1958.

- 34) 阪田憲次, 木山英郎, 西林新蔵: 統計処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究, 土木学会論文報告集第198号, pp. 107-114, 1972.
- 35) 松下博通, 徳光善治: 生存確率を考慮したコンクリートの圧縮強度に関する研究, 土木学会論文報告集第284号, pp. 127-138, 1979.
- 36) 井上正一, 西林新蔵, 吉野 公: 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, 土木学会論文報告集, No. 451/V-17, pp. 59-67, 1992.
- 37) 浜田純夫, 中川健治, 成岡昌夫: 疲労試験における途中打ち切りデータの処理に関する研究, 土木学会論文報告集, 第189号, pp. 99-105, 1971.

(1996. 2. 2 受付)

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE BENDING FATIGUE STRENGTH OF PRESTRESSED PRECAST CONCRETE SLAB

Sumio HAMADA, Muneto ABE and Tetsuyosi ABE

Increase of traffic volume in recent years results in serious deterioration of the bridge slab, which is directly subjected to track loads. The precast prestressed slabs are employed for newly built bridges in order to save human power.

The present study describes static and fatigue strengths based on the test results obtained from the specimens subjected to the prestressed precast concrete slab. Consequently, the static test result is greater than the computational result based on the rectangular stress block of concrete, and the fatigue test result of the slab is equivalent to that of the monolithic slab.