

論文 鉛直ループ継手の疲労強度に関する研究

梯 誠*¹・浜田 純夫*²・松尾 栄治*³・野村 貞広*⁴

要旨：本研究は、プレストレストプレキャスト床版の接合方法として、鉛直ループ継手を対象に、供試体を作製し、静的載荷試験および疲労試験を行い、プレキャスト部材の静的耐力および疲労耐力を検討したものである。その結果、適切な接合区間長によって鉛直ループ継手は十分な静的耐力を有し、疲労強度は引張鉄筋の疲労性状によって決定されること等を明らかにした。

キーワード：継手構造、終局耐力、200万回疲労強度、S-N曲線

1. はじめに

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。また道路示方書の床版に作用する設計自動車荷重（T荷重）が20tonf（196kN）から25tonf（245kN）へ増加されたことが床版の損傷へ与える影響も懸念されるところである。また損傷を受けた床版に対して取り換え工事が行われる場合は、その方法としてプレキャスト床版が用いられる場合が多い。一方、建設労働事情（労働者数の問題等）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。

プレキャスト床版に関する基礎的な研究は今なお十分ではなく、特に疲労強度に関する研究は殆どなされていない。本研究は設計時に最も重要と考えられる曲げ強度、特に曲げ疲労強度について検討したものである。疲労強度に関しては、従来からコンクリートの軸圧縮強度に関する研究、あるいは単純ばりに対する研究は多いものの、プレキャスト床版のように接合部を有する疲労強度の研究は皆無に等しい。本実験で用いた鉛直ループ継手は海外でもすでに架橋実績があるが、DIN等にもループ効果に関する明確な規定はない。また我国でも橋梁用プレキャスト床版にループ継手が用いられた例は少なく、設計上の規定もまったく整備されていないのが現状である。

そこで本研究では新規、あるいは打ち換えに対応できるプレキャスト床版の設計に寄与することを目的に鉛直ループ継手を対象とし、同型供試体の継手構造での静的載荷試験の結果をもとに、疲労試験を行い、従来からの疲労強度に関する研究と比較して検討を行った。また、過去著者が研究した鉄筋ラップ継手の疲労特性とも比較して検討をおこなった。

2. 供試体および実験方法

2.1 供試体

本実験で用いた供試体は、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-1に示すようなプレキャスト床版の一部を想定したものとした。実構造物における

*1 山口大学大学院 工学研究科社会建設工学専攻（正会員）

*2 山口大学教授 工学部社会建設工学科，Ph.D.（正会員）

*3 山口大学助手 工学部社会建設工学科，工博（正会員）

*4 （株）ピー・エス 技術開発部（正会員）

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 構造および PC 構造にする場合がある。供試体は、従来からよく用いられている継手区間長 30cm とした。

実験供試体のサイズは、実験室の規模および供試体数の関係から実際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際の床版厚に近い 18cm とした。

本研究に用いたコンクリートの配合表を表-1 に示す。また、その強度性状を表-2 に示す。一方、鉄筋は SD295 を用いた。その降伏強度と強度を表-2 に示す。配筋および断面諸元を図-2 に、また供試体の継手構造を図-3 にそれぞれ示す。

鉄筋ラップ継手構造供試体（供試体 LJ）の継手構造を図-4 に示す。供試体 LJ は、プレキャスト部から鉄筋を張り出させ、プレキャストコンクリートにて一体化をはかったものである。接合区間長は 40cm としている。

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 材料試験結果 (単位MPa)

コンクリート		鉄筋 (SD295A D16)			
圧縮強度	弾性係数	降伏点強度	引張強度	伸び (%)	
54.2	4.17 × 10 ⁴	343	510	23	

2.2 実験方法

荷重はスパン長および接合区間が等モーメントで、しかもせん断力も作用させるために図-5 に示すよう 2 点荷重とし、正弦波繰り返し荷重を 12cpm ~ 240cpm (0.2Hz ~ 4.0Hz) の間で試験機が対応する最高の周波数において実施した。研究によっては 2 点を継手区間の外側に荷重しているものもある。

しかし、プレキャスト部から張り出した鉄筋を調べるのに大きな問題はないと判断したために図

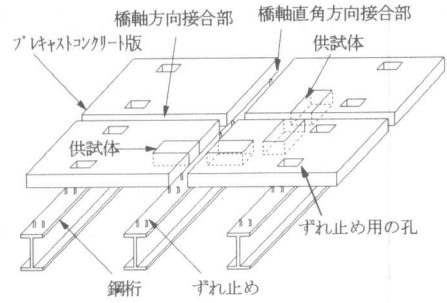


図-1 実験供試体モデル

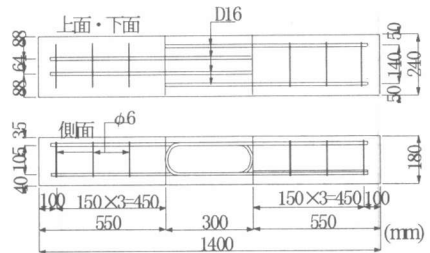


図-2 供試体の配筋および断面諸元

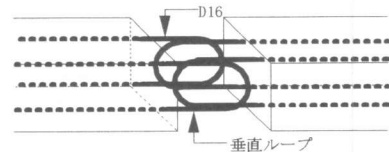


図-3 継手構造 (供試体 VL)

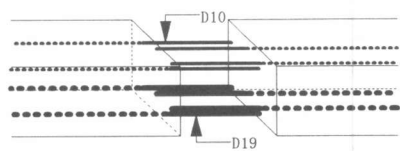


図-4 継手構造 (供試体 LJ)

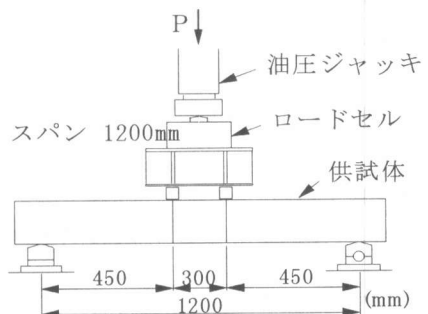


図-5 荷重試験方法

-5 の様な点に載荷することとした。

静的強度を求めるために4体の同型供試体を静的載荷試験で破壊し、破壊荷重の平均を静的強度とした。下限荷重はすべての供試体で静的強度の10%とし、最大荷重を変動させて静的強度との比で表示した。最大荷重と最小荷重の差を荷重幅といい、その幅と静的荷重の比を荷重幅比とすることにする。表-3に各荷重幅比における載荷荷重を示す。

載荷回数が、1, 10, 100, 1000, 1万, 10万, 100万に達するごとに、下限荷重から上限荷重の間で静的載荷試験を行い、5kN刻みにたわみや各ひずみの測定を行った。また、各回数ごとにひび割れの進展状況の観測を目視にて行った。

表-3 各荷重幅比における載荷荷重

荷重幅比 (%)	下限荷重 (kN)	上限荷重 (kN)
55	12.7	82.9
50	12.7	76.5
45	12.7	70.1

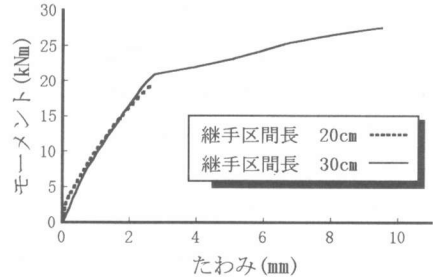


図-6 モーメント-たわみ関係

3. 実験結果および考察

3.1 静的載荷試験結果および考察

前述のように疲労試験を行うために同型の供試体を静的載荷試験にて破壊した。また、継手区間長の違いによる比較を行うために、継手区間長 20cm の供試体も作製し静的載荷試験を行った。

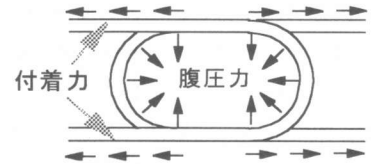


図-7 供試体 VL の腹圧力と付着力

(1) 曲げモーメント-たわみ関係

同じ継手構造をもち、継手区間長の異なる供試体の、標準的な曲げモーメントと供試体中央部のたわみの関係を図-6に示す。この関係からもわかるように、両方の供試体は 20kNm 付近までは同様の性状を示しているが、継手区間長 20cm の供試体は降伏点が表れず破壊にいたっている。継手区間長 30cm の供試体に降伏点が表れたのは、図-7のように、腹圧力だけでなく、継手区間が長く鉄筋の付着力でも、曲げモーメントに抵抗したためである。したがって、鉛直ループ継手では 30cm の継手区間長の方が有効であった。

(2) 終局耐力について

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。計算値は鉄筋の降伏強度の規格値、コンクリートの圧縮強度は実験値から求めた値とし、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行って得られたものである。表-4からわかるように、いずれの供試体も実験値が計算値を50%以上は上回り、鉄筋の定着長を十分とる

表-4 静的載荷試験結果 (区間長 30cm)

供試体	実験値		計算値	実験値 / 計算値
	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)	
1	125.5	28.24	17.89	1.58
2	121.6	27.36	17.89	1.53
3	126.5	28.46	17.89	1.59
4	137.3	30.89	17.89	1.72
平均	127.7	28.73	17.89	1.61

ことができれば、継目を有する梁でも静的強度の場合、必ずしも弱点とならないことがわかった。なお、本研究のように鉄筋量が比較的小さいと鉄筋の破壊時にひずみが大きくなる。降伏強度が規格値より大きい上に、ひずみ降下域に達して破壊時の鉄筋の応力は降伏強度の規格値よりかなり高かったと考える事ができよう。破壊荷重は鉄筋の応力に相当影響されるために強度が上昇したものと考えられる。また、破壊時のひび割れ図を図-8(a)に示す。

3. 2 疲労試験結果および考察

(1) 疲労破壊回数と破壊形式

表-5 に鉛直ループ供試体 (VL 供試体) 疲労破壊試験の結果を示し、破壊回数の対数および破壊形式を合わせて表示する。また、疲労試験を行い、コンクリートの圧壊で破壊した供試体のひび割れ図を図-8(b)に示す。現在まで疲労試験の終了した供試体 12 体のうち、破壊は、コンクリートの破壊である供試体 VL1-1、および 200 万回まで破壊しなかった供試体 VL3-4 を除いて引張側鉄筋の継目部付近での疲労破断による破壊であった。継目のない単純な鉄筋コンクリート梁では、上限荷重比が高いほどコンクリートの圧縮疲労破壊を生じ、上限荷重比が低いほど鉄筋の疲労破断によって破壊する現象が示されている。供試体 VL においても、比較的荷重幅比が高く、破壊回数の少ない供試体 VL1-1 がコンクリートで破壊していることから、供試体 VL でも、継目のない単純な鉄筋コンクリート梁と同様な破壊形式になると考えられる。ただし、供試体 VL1-1 はコンクリートの圧縮疲労破壊ではなく、静的破壊の破壊状況と同様の破壊性状を呈し、ループが互いに鉛直方向にずれる形で破壊している。

(2) S-N 曲線

表-5 より与えられる各荷重幅比(S_r)と破壊回数(N)の関係(S-N 曲線)を図-9 に示す。縦軸を荷重幅比とし、横軸を破壊回数の対数 $\log N$ として、これらの関数を横軸の最小二乗を考えて、つまり軸方向の差 ($\log N - \log N_i$) の二乗和の最小値に基づいて求めると次式が得られる。

$$S_r = 144.1 - 16.67 \log N \quad (1)$$

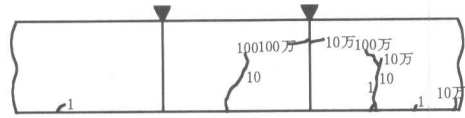


図-8(a) ひび割れ図 (VL1-1)

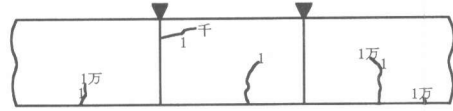


図-8(b) ひび割れ図 (VL2-4)

表-5 疲労試験結果

供試体名	荷重幅比 (%)	破壊回数 $N (10^4)$	$\log N$	破壊パターン
VL1-1	55	6.50	4.81	C
VL1-2		14.09	5.15	S
VL1-3		40.80	5.61	S
VL1-4		51.52	5.71	S
VL2-1	50	30.33	5.48	S
VL2-2		30.86	5.49	S
VL2-3		44.03	5.64	S
VL2-4		142.21	6.15	S
VL3-1	45	44.82	5.65	S
VL3-2		62.58	5.80	S
VL3-3		85.58	5.93	S
VL3-4		200.00	6.30	-

注) 破壊パターンのCはコンクリートの破壊、Sは鉄筋の破断をそれぞれ示している。

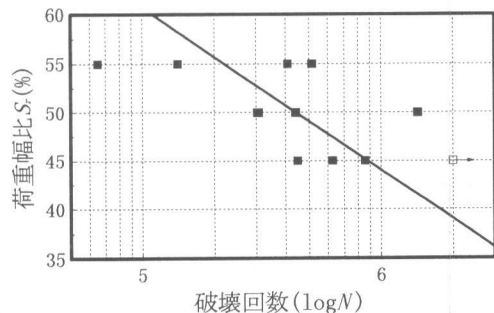


図-9 S-N 曲線

また、この S-N 曲線を図-9 中に直線で示す。式(1)から、この供試体の 200 万回疲労強度を求めることができる。

(3)鉄筋の疲労性状

本実験では供試体 VL1-1 および供試体 VL3-4 を除くすべての供試体が、鉄筋の疲労破断によって破壊にいたっている。また、引張鉄筋の破断位置は継手部付近に集中している。そこで、鉄筋の破断により破壊した供試体を対象に、継目部における引張鉄筋のひずみを、1 回目の载荷における上限荷重時に測定し、その値より鉄筋の応力を計算し、その応力と破壊回数の関係を図-10 に示す。本実験より得られた S-N 曲線、および本学で過去に行われた鉄筋ラップ継手（供試体 LJ 系）の S-N 曲線は次式で表されている[2]。ここで、 S_g ははりの実験から求められたひずみにヤング係数を乗じたものである。

$$\text{供試体 VL} \quad \log S_g = 3.370 - 0.139 \log N \quad (2)$$

$$\text{供試体 LJ} \quad \log S_g = 3.050 - 0.084 \log N \quad (3)$$

また、河野らの研究[3]による SD295A の直接引張における S-N 曲線は次式で表される。

$$\log S = 3.054 - 0.121 \log N \quad (4)$$

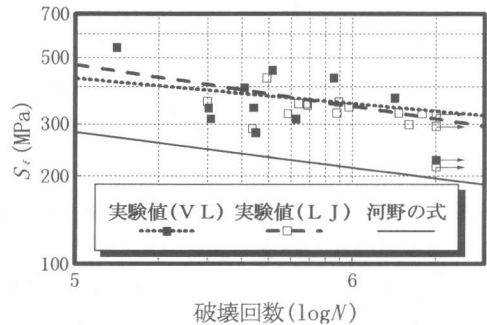


図-10 鉄筋の応力と破壊回数における S-N 曲線

図-10 中に 3 つの S-N 曲線を示す。これらの関係において、各繰返し回数における応力は本実験および鉄筋ラップ継手構造供試体の方が高くなっている。これは河野らの実験が直接引張でそのまま応力を受けるのに対し、本研究においては曲げ供試体であるため、また、本研究で用いられた鉄筋と河野らが用いた鉄筋にいくらかの差があるためにこの差が生じたことが予想される。これら 3 実験の実験結果から、鉄筋ラップ継手供試体、および鉄筋ループ継手供試体の S-N 曲線はほぼ同等であることがわかった。

本実験で得られた S-N 曲線と河野らの S-N 曲線の性状が類似しているので、本実験で鉄筋が疲労破断によって破壊にいたる場合は、鉄筋の疲労性状にしたがっていることがわかる。また、設計に関してコンクリート構造の限界状態設計法（案）[4]では、河野らの実験に基づいて、河野らの S-N 曲線よりさらに下方に設計値の S-N 曲線を提案している。したがって、これらの S-N 曲線から疲労破壊回数の推定は十分可能であると考えられる。

(4)200 万回疲労強度

実際の橋梁計算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。本研究において式(2)より 200 万回強度を求めると、静的強度の 39.0%（上限荷重比では 49.0%）が得られる。同様に供試体 LJ では、静的強度の 40.5%（上限荷重比では 50.5%）が得られる。国分、岡村の鉄筋コンクリート梁（継目のない単純な梁）の研究[5]では JIS 規格に合格する異形鉄筋を用いた場合、梁の 200 万回疲労強度はその静的強度の 60~80%（上限荷重）であり、梁の疲労強度に及ぼす断面形状、鉄筋の配置および鉄筋比の影響は小さいこと、疲労強度からは細径鉄筋の多段配置よりも太径鉄筋の少段配置の方が有利であることなどが明らかにされている。本実験および供試体 LJ の実験ではいずれも 10~30% 下回った。RC 構造の継目を有する継手構造では、プ

レキャスト部材と後打ちコンクリートとの開きがひび割れとなって集中したために、継目付近の引張鉄筋に負担が大きくなったと考えられる。このため、梁全体としての200万回疲労強度の低下が起こったと考えられる。

また、表-4に示すように本実験の供試体は、静的強度が、非常に大きいものである。そのため、上限荷重が高く設定されてしまい、それにより200万回疲労強度は低い値に決定される。上記の供試体VLの200万回疲労強度である曲げモーメント14.05kNmは、表-4での等価応力ブロックを用いて得られた計算値の破壊モーメントの平均値17.89kNmの78.5%になり、継目のない単純な梁と同等の性能を示していることになる。

4. まとめ

(1) 静的載荷試験による耐力の実験値は、矩形応力ブロックを仮定した終局耐力計算値より60%程度大きいので、継手区間長が鉄筋の基本定着長を考慮した長さであれば、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とかなり安全側に求められる。

(2) プレキャスト部材の継手付近の曲げ疲労強度は、繰り返し荷重の最大荷重が高い場合は、継手部のループの鉛直ずれによるコンクリート破壊が生ずるが、本研究では最大荷重が低い強度に対して実験を行い、その結果、引張鉄筋の破断によって破壊した例が多く、鉛直ループ継手構造の200万回疲労強度は鉄筋の疲労性状によって決定される。

(3) 200万回強度は、継目のない単純な鉄筋コンクリート梁の200万回疲労強度をかなり下回る結果となったが、矩形応力ブロックを仮定した終局耐力計算値に対する200万回の計算強度は、継目のない単純な鉄筋コンクリート梁の200万回疲労強度と同等かそれ以上となり、一概に鉛直ループ継手構造供試体の200万回疲労強度が単純な鉄筋コンクリート梁よりも低いとはいえない。

(4) 継目部を有する場合においても鉄筋の疲労性状は、単純な梁の鉄筋の疲労性状と同様な性状を示した。本実験における全ての供試体において、鉄筋の破断は継目部付近の主鉄筋で生じている。これは、継目部の開きによって、継目部付近の引張鉄筋に負担がかかっていると判断できる。

(5) 鉛直ループ供試体は、鉄筋ラップ構造供試体とともに、初回鉄筋ひずみと破壊回数には相関関係が認められ、鉄筋のひずみから破壊回数を推定することが可能である。

参考文献

- [1]中井 博ほか：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
- [2]阿部宗人，浜田純夫 ほか：鉄筋の重ね継手を有するプレキャスト床版の曲げ疲労試験，プレストレスコンクリート技術協会，第6回シンポジウム論文集，1996.10
- [3]河野 ほか：異形鉄筋の疲れ強度に関する研究，コンクリートライブラリー第2号
- [4]土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法(案)，コンクリートライブラリー第52号，1983.11
- [5]国分正胤，岡村 甫：高強度異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリートばりの疲労に関する基礎的研究，土木学会論文集，第122号，pp.29-41,1965.10
- [6]岸谷孝一ほか：疲労，時報堂出版，1987.9