

(29) 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

(株)ピー・エス 正会員 ○阿部 宗人
 山口大学 工学部 正会員 浜田 純夫
 山口大学 工学部 梯 誠
 (株) 熊谷組 石川 哲

1. はじめに

近年自動車交通量の増加によって、直接荷重を受ける橋梁床版の損傷は深刻な問題となりつつある。さらに、T荷重が20tonfから25tonfに増え¹⁾、従来よりも重車両の増加により床版の損傷は今後ますます増えるものと考えられる。このような床版の損傷の補修法は、急速施工や省力化が要求されるので床版をプレキャスト化し現場で接合する場合が多い。本研究は、プレキャスト床版の接合に関する、最も基本的な鉄筋の重ね継手について、静的・疲労挙動の検討を行った。RC構造の疲労限界状態の設計における疲労耐荷力は、一般に使用される鉄筋の疲労特性により定まるので鉄筋の疲労特性を定量的に把握しておくことが必要である。

2. 実験概要

(1) 供試体

実験に用いた供試体は、プレキャスト部材にはプレストレスを導入し、継手部は図-1に示すように、左右のプレキャスト部材から鉄筋を張り出し重ね合わせ、コンクリートを打設して一体化をはかったものである。後打ちコンクリート部の鉄筋継手としては、重ね継手とすることが望ましいが、鉄筋どうしを複数本、同時に密着させることは困難であるので長さ40cmの継手長をとったうえで、鉄筋どうしを水平に、ある間隔離した重ね継手とした。継手部は、図-2に示すように、RC構造による継手構造の中では最も基本的な継手である。

(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-1に示す。細骨材は海砂(脱塩砂)で比重2.58、粗骨材は砕石で比重2.70を用い、混和材はマイテール150をセメント量の0.3%とした。表-2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。

鉄筋はSD30(SD295A)、PC鋼材はSBPR95/110(SBPR930/1080)を用いた。

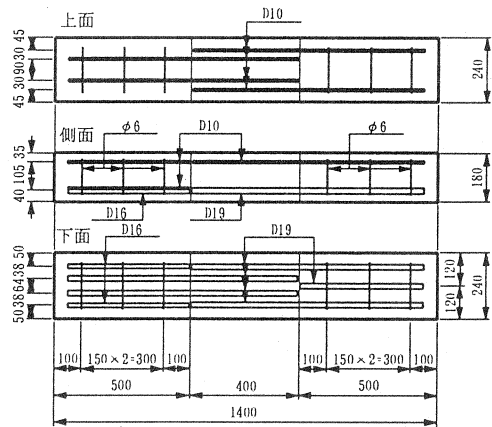


図-1 供試体概要

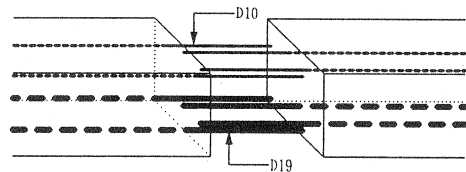


図-2 継手構造

表-1 コンクリートの配合表

| 水セメント比 W/C(%) | 細骨材率 S/a(%) | 単位量(Kg/m ³) | | | | |
|------------------|----------------|-------------------------|------|-----|------|------|
| | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和材 |
| 42.9 | 40 | 186 | 435 | 677 | 1008 | 1.31 |

表-2 コンクリートの力学的性質(kgf/cm²)

| 供試体数 | 圧縮強度 | 割裂強度 | 曲げ強度 | 弾性係数 (X10 ⁵) |
|------|-------|------|------|--------------------------|
| 42 | 579.9 | 36.5 | 60.4 | 4.26 |

(3) 載荷方法

載荷方法は、図-3に示すように2点支持2点載荷(スパン長120cm、載荷点は供試体中央より20cm離れた2か所の継目付近)とした。載荷荷重および本数は表-3に示すように、荷重幅比60%を6本、55%を7本50%を6本、またパイロットテストとして45%、40%を各2本ずつ行い正弦波繰返し荷重を0.5~5.0Hzの間で試験機が制御可能な最大の繰返し速度で載荷した。この間、 10^i ($i=0, 1, 2, \dots$) ごとに、200万回まで最小荷重から最大荷重までの間で静的試験を行った200万回を越えて破壊しなかったものについては残留強度試験を行った。

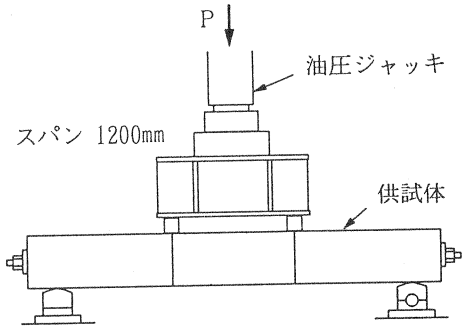


図-3 載荷方法

3. 実験結果および考察

(1) 疲労破壊とS-N線図

表-3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、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せる。

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

上式で、 γ 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40%および45%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る。破壊は供試体RF1-1からRF1-4およびRF2-1からRF2-3がコンクリートの破壊であり、他の供試体は引張鉄筋の破断による破壊であった。西林らの継目のない一体RC梁の研究²⁾では上限荷重比が高いほどコンクリートの圧縮疲労を生じ、上限荷重比が低いと鉄筋の疲労破断により破壊するとしている。本実験においても同様に、荷重幅比が大きい場合はコンクリートの破壊、荷重幅比が小さい場合は鉄筋の破断による破壊であったが、コンクリートが破壊する場合は圧縮疲労破壊ではなく継手部の引張側コンクリートの破壊となっている点が一体の梁の疲労破壊とは異なる。表-3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-4に示す。井上らの研究³⁾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 $\log N$ として、 $\log N$ 軸方向の差($\log N - \log N_1$)の自乗和の最小値を最小自乗法を用いて求めると次式を得る。

表-3 疲労試験結果

| 供試体名 | 荷重幅比 (%) | γ | 破壊回数 N(10^4) | $\log N$ | 生存確立 P | 破壊 パターン |
|-------|----------|----------|---------------------|----------|-----------|------------|
| RF1-1 | 60 | 1 | 0.07 | 2.85 | 0.857 | C |
| RF1-2 | | 2 | 0.07 | 2.87 | 0.714 | C |
| RF1-3 | | 3 | 0.10 | 3.00 | 0.571 | C |
| RF1-4 | | 4 | 0.56 | 3.75 | 0.429 | C |
| RF1-5 | | 5 | 29.94 | 5.48 | 0.286 | S |
| RF1-6 | | 6 | 49.09 | 5.69 | 0.143 | S |
| RF2-1 | 55 | 1 | 0.70 | 3.85 | 0.875 | C |
| RF2-2 | | 2 | 1.88 | 4.28 | 0.750 | C |
| RF2-3 | | 3 | 6.99 | 4.84 | 0.625 | C |
| RF2-4 | | 4 | 43.50 | 5.64 | 0.500 | S |
| RF2-5 | | 5 | 63.86 | 5.81 | 0.375 | S |
| RF2-6 | | 6 | 68.10 | 5.83 | 0.250 | S |
| RF2-7 | | 7 | 89.00 | 5.95 | 0.125 | S |
| RF3-1 | 50 | 1 | 58.51 | 5.77 | 0.857 | S |
| RF3-2 | | 2 | 68.88 | 5.84 | 0.714 | S |
| RF3-3 | | 3 | 87.70 | 5.94 | 0.571 | S |
| RF3-4 | | 4 | 164.63 | 6.22 | 0.429 | S |
| RF3-5 | | 5 | 177.78 | 6.25 | 0.286 | S |
| RF3-6 | | 6 | 200 > | 6.30 | 0.143 | - |
| RF4-1 | 45 | 1 | 96.92 | 5.99 | 0.677 | S |
| RF4-2 | | 2 | 159.52 | 6.20 | 0.333 | S |
| RF5-1 | 40 | 1 | 200 > | 6.30 | - | - |
| RF5-2 | | 2 | 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鉄筋の破断を示している。

$$S = 60\% \text{ に対して } t = 2.54 - 0.645 \log N \quad (2)$$

$$S = 55\% \text{ に対して } t = 4.51 - 0.872 \log N \quad (3)$$

$$S = 50\% \text{ に対して } t = 16.8 - 2.770 \log N \quad (4)$$

t の定義からわかるように t が 0 のとき、生存確立 P(N) は 50% となる。この結果、標準偏差 σ は荷重幅比が 60% のとき 1.55、55% のとき 1.00、50% のとき 0.35 が得られる。本実験のように接合部を有する曲げ試験に対しては当然標準偏差は大きくなるものと考えられる。しかしながら、S=50% の場合は全ての供試体が鉄筋の破断によって破壊しており、その標準偏差は 0.35 と小さい。なお、S=40% に対してはデータが少ないので破壊確率の検討はしていない。

図-5 に荷重幅比 S と破壊回数 N の関係を示す。

式(2)、(3)、(4) 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。

$$S = 78.98 - 4.748 \log N \quad (5)$$

図-5 を見てわかるように、10万回を境にしてコンクリートが破壊した供試体と鉄筋が破断して破壊した供試体に分かれている。従って、コンクリートが破壊した供試体と鉄筋が破断した供試体において、それぞれの S-N 線図を最小自乗法によって求めると式(6)、(7) のようになる。また、これらの S-N 線図を図-6 に示す。図からわかるように 200万回疲労強度は鉄筋の疲労強度により定まってくる。

コンクリートが破壊する場合

$$S = 72.92 - 4.147 \log N \quad (6)$$

鉄筋が破断する場合

$$S = 221.18 - 28.681 \log N \quad (7)$$

(2) 鉄筋の疲労性状

鉄筋の破断により破壊した供試体について、打継目部において計測した引張鉄筋ひずみより、鉄筋の応力を計算し、その応力と破壊回数の関係を図-7 に示す。本実験より得られた S-N 線図は次式で表される。

$$\log S = 4.378 - 0.139 \log N \quad (8)$$

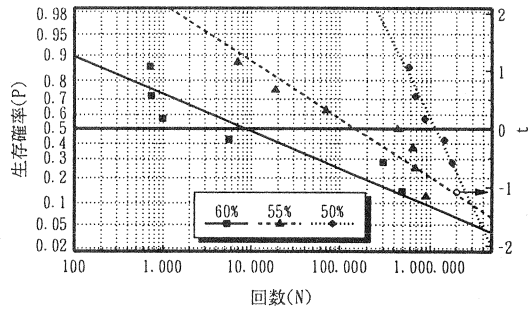


図-4 生存確率-疲労寿命

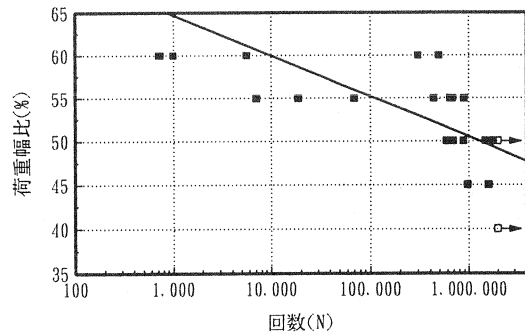


図-5 S-N線図

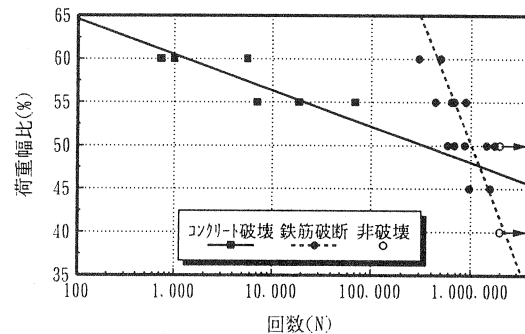


図-6 S-N線図(破壊状態別)

また、河野らの研究⁴⁾によるとSD295AにおけるS-N線図は次式で表される。

$$\log S = 4.063 - 0.121 \log N \quad (9)$$

これらの関係において、各回数における応力は本実験の方が高くなっているが、これは鉄筋径等の実験条件が異なるためと考えられ、このことを除けば両者のS-N線図の性状はほぼ同様の傾向を示している。従って、本実験において、鉄筋が破断して破壊に到る場合は、鉄筋の疲労性状に従っていることがわかる。

また、スターラップが添溶接されている主鉄筋の疲労強度は、ワイヤーでスターラップが結合されている主鉄筋の疲労強度よりもかなり小さくなる。⁵⁾ 本実験で用いた供試体は、プレキャスト部において打継目から10cmのところにスターラップを添溶接しており、全ての供試体がこの位置付近での鉄筋破断を生じており、溶接の影響が大きいことがうかがえる。

(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。本研究において式(7)から200万回疲労強度を求めると、静的強度の40.5% (上限荷重比では50.5%) が得られる。

国分、岡村らの鉄筋コンクリート梁の研究⁶⁾によれば、JIS規格に合致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、疲労面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。本実験では、200万回疲労強度は上限荷重で50.5%となり、単純な梁の場合を大幅に下回った。溶接による疲労強度の低下は約10%と言われており、本実験でも鉄筋の破断はプレキャスト部のスターラップの溶接位置で破断していることから、鉄筋の疲労強度では、この溶接が大きく影響していたと考えられる。従って、200万回強度では、継目部の影響はほとんどなく、鉄筋の疲労強度によって決まると考えられる。200万回の繰返し荷重後の静的強度は、平均19.3tonfとなり静的強度の平均17.7 tonfを上回ったが、200万回を越えたものが3体しかないため、耐力が増加したかどうかは判断できない。

(4) 荷重-中央点のたわみ

図-8に荷重幅比55%の供試体の荷重-たわみ関係を示す。1回目から10回目の载荷の間に残留たわみが大きく増加しており、その後は比較的増加が小さくなっている。また、曲線の傾きは剛性を表していることとなるが、1回目より10回目の方が剛性が高くなっている。これは、下限荷重(静的破壊荷重の10%)においてはひびわれ等により初载荷の状態に戻ることができないが、载荷回数が10回程度であれば上限荷重時におけるひびわれの進展や残留ひずみの増大はあまりみられず、初载荷の上限荷重時の状態に近い値へ向かおうとするために剛性が見かけ上高くなる。しかしながら、载荷回数の増加につれ下限荷重時のみならず、上限荷重時におけるひずみ等は増大

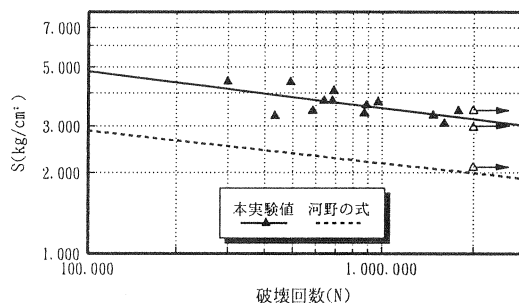


図-7 S-N線図(鉄筋応力と破壊回数)

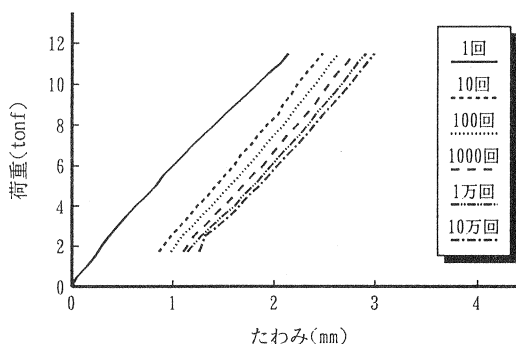


図-8 荷重-たわみ関係

し、ひびわれも進展するため剛性は初荷重の状態に近づくこととなる。また、剛性が初荷重の状態に近づいたたわみ量が3mm程度となるとコンクリートの破壊や鉄筋の破断による破壊の場合にかかわらず供試体はすべて破壊する傾向がある。従って、たわみ量および剛性からある程度疲労寿命を予測することが可能であると考えられる。

(5) ひびわれ性状

コンクリートが破壊した供試体および鉄筋破断により破壊した供試体のひびわれ図を、図-9に示す。

コンクリートが破壊した供試体は、継手部およびプレキャスト部にひびわれが生じると、回数の早い段階でひびわれが進み、継手部の引張側コンクリートが剥落して破壊に至り、静的荷重の場合と同様のひびわれ性状を示した。鉄筋の破断により破壊した供試体の継手部およびプレキャスト部に生じるひびわれは静的荷重の場合と変わりはないが、10万回以上になるとひびわれの進展は見られなくなる。しかしながら、継手部の圧縮鉄筋位置に生じる水平ひびわれは、静的荷重の場合より進展する傾向にある。

これは圧縮疲労のためであるが、結果的には圧縮疲労による破壊はしなかった。

(6) 打継目部開き幅と繰返し回数の関係

図-10に最大荷重を与えたときの継目部開き幅と $\log N$ の関係を示す。ただし、開き幅の値は、2箇所の打継目部の開き幅の合計とした。

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-10には初回と1,000回載荷の時の継目部開き幅を示す。図から初回および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との関係は次式で与えられる。

$$\text{初回} \quad W_j = 1.034 - 0.0625 \log N \quad (10)$$

$$1,000\text{回} \quad W_j = 1.401 - 0.0982 \log N \quad (11)$$

これらの式の分散値は初回に対し0.004、1,000回に対し0.006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10.0tonfの荷重の時、変動係数が0.127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。式(10)または(11)により疲労破壊を生じる繰返し回数を推定することが可能である。

例えば、初回の開き幅が0.64mmであれば、疲労破壊の繰返し回数は200万回と推定できる。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。

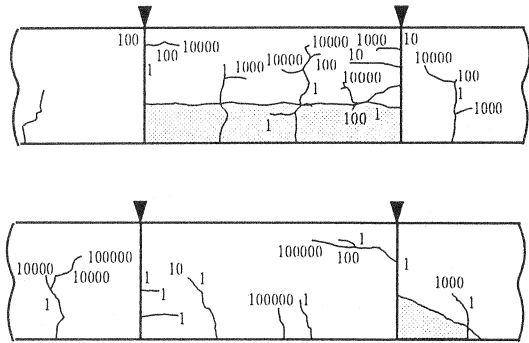


図-9 ひびわれ図

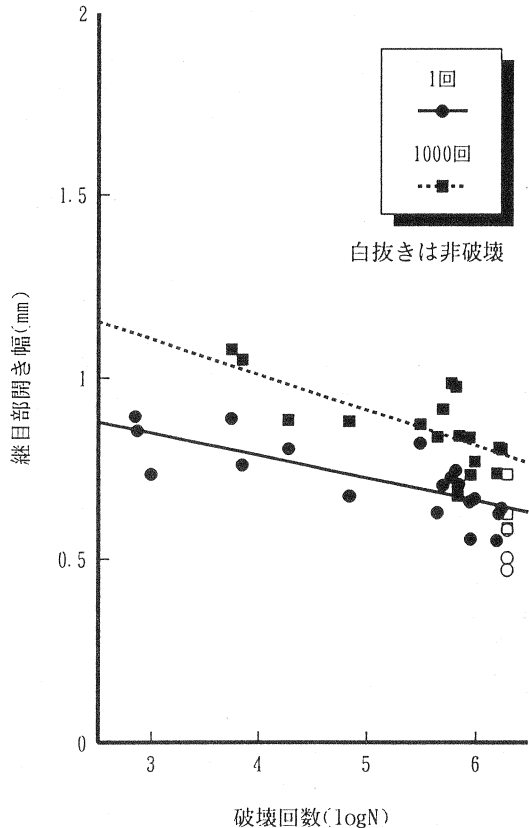


図-10 初回および1,000回繰返し時の打継目部の開き幅と破壊回数との関係

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べきであるが、本実験においてはコンクリートが圧縮疲労により破壊に至ることはなかったため、たとえ相関性が認められたとしてもあまり信憑性の高いものとはならないと考えられる。むしろ本実験においては、鉄筋の破断による破壊が多いことから鉄筋のひずみから疲労破壊回数を推定することが望ましいといえる。

4. まとめ

- (1) 静的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30%程度大きいため、接合区間が鉄筋の基本定着長をとれる長さであれば、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ことができる。
- (2) プレキャスト部材の継手付近の曲げ疲労強度は、繰返し荷重の荷重幅比が比較的大きいときには継手部の引張側コンクリートの剥落が繰返し回数の低い段階で起こるので考慮が必要である。
- (3) 繰返し荷重の荷重幅比が低い場合は、引張鉄筋の破断によって破壊する。従って、RC構造による継手構造の200万回疲労強度は鉄筋の疲労性状によって決定される。また、圧縮コンクリートのひずみは小さく、圧縮疲労による破壊は起きない。
- (4) 本実験における全ての供試体において、鉄筋の破断位置は主鉄筋にスターラップを添着接した位置において破断した。このことから、最大曲げモーメントが作用する付近における鉄筋の加工、溶接等は疲労強度におよぼす影響が大きいことがわかる。
- (5) 初回および1000回繰返し後の打継目の開き幅と疲労破壊回数は大きな相関性が認められた。一般的には疲労破壊回数の検討には、コンクリートのひずみが適用されるが、本実験では圧縮疲労破壊はおきなかったためコンクリートのひずみから推定することは好ましくないと考えられる。
- (6) 200万回繰返し荷重を受けた継手部を有する梁の静的強度に関しては今後の検討課題とするが、初載荷の梁の静的強度を越える可能性がある。

本実験は、RC構造による一継手のみに対して検討を行ったが、継手構造が最も基本的であることから、他のRC継手構造の検討の場合に参考あるいは適用が可能であると考えられる。

なお、静的試験の結果・考察について、紙面の都合上から掲載できなかったことをお詫言します。

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) 西林、井上、加古、阪田：鉄筋コンクリートはりの曲げ疲労特性に関する研究、セメント技術年報、35 昭56.
- 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、土木学会論文報告集、NO. 451/V-17, PP. 59-67, 1992.
- 4) 河野他：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
- 5) 岸谷、西沢他：疲労、技報堂出版、1987. 9.
- 6) 国分、岡村：高強度異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリートはりの疲労に関する基礎研究、土木学会論文集、第122号、PP29-41、1965. 10.