

5 章 疲労性状の現状

5.1 疲労損傷

材料に繰り返し応力が加わると、その応力が静的な強度を下回った状態であっても、材料が突然損傷あるいは破壊することがある。これを一般的に疲労損傷あるいは疲労破壊という。RC 部材、PRC 部材、PC 部材はコンクリートと鋼材の複合材料であり、これら部材の疲労損傷を考える場合には、コンクリートの疲労、鋼材の疲労、コンクリートと鋼材の付着部分の疲労とに分けて考える必要がある。部材を構成する材料及び部材としての疲労性状については、これまで多くの研究が行われてきており、コンクリートの圧縮または曲げに関する疲労性状、鋼材の疲労性状、付着に関する疲労性状、RC はり部材や床版部材の疲労性状については、多くの知見が得られている。一方、プレストレスを導入した部材の疲労性状とプレストレスとの関係性についての知見は少なく未だ不明点が多い。これは、プレストレスが導入された構造物や部材の疲労損傷が問題となった事例の報告がこれまで少ないことから、それ程問題視されて来なかったことが影響していると考えられる。

本章は、これまで得られている疲労損傷に関する多くの知見から、疲労性状の現状についての基本的な項目をまとめたものである。

5.2 既往の研究

5.2.1 材料特性に関する知見

(1) コンクリートの疲労特性

コンクリートの疲労特性については未だ完全に解明されているわけではないものの、過去の研究により多くの知見が得られている。その一例を以下に記す。

① 疲労破壊メカニズムについて

- ・ コンクリートの疲労破壊は、マトリックスと粗骨材粒子界面の遷移帯における高い応力集中により発生したひび割れが発端となり、漸次部材の断面積を減じ、最終的にはマトリックスの破壊に至る¹⁾。
- ・ 湿潤状態にあるコンクリートの圧縮疲労は、主にセメントペースト部における水の移動によるC-S-H及び水酸化カルシウム等の侵食あるいは溶出によるものであり、繰返し荷重の増加に伴い遷移帯における微細ひび割れの発生も加わる²⁾。

② 疲労強度と疲労寿命

- ・ コンクリートの疲労破壊強度、応力振幅、平均応力それぞれと疲労寿命の対数値とは、直線関係にある。また、コンクリートの疲労破壊ひずみは、載荷応力、疲労寿命、荷重振動周波数に因らず、コンクリート種類により一定となる³⁾。
- ・ コンクリートの疲労強度は、コンクリートの静的強度に対する比で表現することができる。また、コンクリートの平均疲労寿命は、繰返し応力の最大応力比 S_1 及び最小応力比 S_2 の影響を受ける⁴⁾。

③ 疲労後の耐荷性能及び変形性状

- ・ 疲労試験終了後の残存耐力試験によって、疲労試験を行った試験体と疲労試験を行っていない試験体とを比較すると、主筋の初期降伏時の荷重は大きく低減するものの、最大耐力及び変位については明確な差は現れない⁵⁾。
- ・ 繰返し荷重下におけるコンクリートの最大ひずみ及び残留ひずみは、各繰返し応力における疲労寿命 N に対する繰返し回数 n の比である n/N が、0.1程度までの初期繰返しで急激に増加し、その後緩やかな一定勾配を保ちながら増加した後、 n/N が 0.8～0.9程度から再び急激な増加を示して破壊に至る⁶⁾。
- ・ 疲労破壊強度以下の動的繰返し荷重下において生じるコンクリートひずみの経時変化は、繰返し荷重の上限荷重に等しい一定持続荷重を載荷されたコンクリートのク

リープひずみを用いて表すことができる⁷⁾。

(2) 鉄筋の疲労特性

材料としての鉄の疲労に関する研究は従来から行われ、多くの知見が得られており、また表面形状が複雑な異形鉄筋や曲げ加工された鉄筋、コンクリートに埋め込まれた鉄筋など RC 部材に使用される鉄筋の疲労特性についても多くの研究結果が報告されている。以下に、RC 部材に使用される鉄筋の疲労特性に関する知見の一例を示す。

① 疲労強度

- ・ 鉄筋の疲労強度は、応力振幅、最大または最小応力度の影響を受けるものの、その影響はコンクリートの場合よりも小さく、設計に用いる疲労強度は、永久荷重作用による応力度を含んだものが提案されている⁸⁾。

② 疲労強度に及ぼす鉄筋表面形状の影響

- ・ D25 以下ではふしの立ち上がり部の形状による応力集中が支配的となり、ここに適当な曲率を設けることで応力集中が著しく緩和され、疲労強度が改善される⁹⁾。
- ・ D51 では径に比例してふし間隔を広くすれば、支圧力として鉄筋に付加される応力は大きくなり、はりとしての疲労強度は低下する。一方、ふし間隔を狭くすると鉄筋の応力集中によって鉄筋の疲労破断が起こりやすい¹⁰⁾。

③ 疲労強度に及ぼす鉄筋径の影響

- ・ 鉄筋の疲労強度は、直径が大きくなるに連れて次第に低下していく。この理由は明確となっていないものの、圧延による材質の不均一がその原因の一つと推測される¹¹⁾。

④ 疲労強度に及ぼす鉄筋曲げ加工の影響

- ・ 曲げ加工を行った部分の疲労強度は著しく低下し、引張破断は曲げの内側を起点として発生する。これは、鉄筋折曲げ部には局所的な応力集中によって鉄筋全体に作用する応力振幅の 2 倍以上の応力振幅が作用することが主要因である¹²⁾。

(3) コンクリートと鉄筋の付着疲労

RC 部材におけるコンクリートと鉄筋の間には付着力が作用しているため、引張力に対して鉄筋と共にコンクリートも抵抗する。しかし、RC 部材に繰り返し荷重が載荷され、コンクリートと鉄筋との間の付着性能が低下した場合、コンクリートが力を分担しなくなることで耐力が低下すると同時に、鉄筋単体の疲労寿命も短くなることが予想される。コンクリートと鉄筋の付着疲労に関する知見の一例を以下に示す。

① 付着疲労メカニズム

- ・ 付着の悪化は、鉄筋に接するコンクリートのひずみの累積によって進行し、次第に鉄筋とコンクリートとの相対すべりが増大し、ひび割れを生じさせることによって破壊に至る。また荷重振幅に変化がない場合には、付着の悪化はその最初のサイクルで大きく、荷重振幅が増大する場合には変化する最初のサイクルで大きくなる¹³⁾。
- ・ 鉄筋の付着疲労が発生した場合、鉄筋ひずみ、ひび割れ幅、たわみは急激に増大する傾向がある¹⁴⁾。

② 付着疲労に及ぼす鉄筋表面形状の影響

- ・ 付着性能が低くなる条件、すなわちふしと鉄筋軸とのなす角度が小さい、ふしの取付部その他が滑らか、ふしの高さが低い等の鉄筋を用いた場合、はりのひび割れ幅は載荷回数の増加に伴い著しく増大し、その部分で鉄筋が疲労破断しやすい⁹⁾。

5.2.2 構造特性に関する知見

(1) 梁部材の疲労特性

一方向の繰り返し荷重を受ける RC 部材に関しては、従来から多くの研究が行われており、梁部材の疲労強度は、構成材料であるコンクリートと鉄筋とに密接に関連していることが分かっている。以下に知見の一例を示す。

① 曲げ疲労特性

- ・ JIS 規格に適合する異形鉄筋を用いた場合、異形鉄筋を用いた RC 梁の 200 万回疲労強度はその静的強度の 60～80% 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。また、引張鉄筋が 2 段配置されていると全ての梁で下側鉄筋が先に疲労破断し、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ほうが有利となる傾向がある¹⁵⁾。
- ・ PRC を除いた PC 部材では、通常の使用状態では曲げひび割れを許容していないため、変動荷重による PC 鋼材の応力振幅は非常に小さく、PC 鋼材に付着がある場合、疲労破壊はほとんど起こらない。しかし、通常の使用時に曲げひび割れを許容する PRC 部材、あるいは PC 部材でも曲げひび割れが発生するような変動の大きな繰り返し荷重を受ける場合には、RC 部材と同様の疲労性状を示し、疲労破壊の危険がある¹⁶⁾。
- ・ 梁部材の疲労破壊は、主として引張鉄筋の疲労破断によって生じ、またこの鉄筋の破断強度は、材質よりもその鉄筋表面形状に大きく影響される。また、所要のせん断補強がされた試験梁部材はスパン中央部で引張鉄筋が疲労破断するが、スターラップ量をそこから 1/2 にした試験梁部材ではせん断スパン部で引張鉄筋が疲労破断する場合があります、またその疲労強度も若干小さくなる¹⁴⁾。

② せん断疲労特性

- ・ 鉄筋比 1.02% の梁のせん断疲労実験から以下のようなことがわかっている。
 - a) V/V_c が 0.6 以下の場合には、斜めひび割れは発生せず、曲げによる鉄筋の疲労破断により破壊する。
 - b) M/M_s が 0.7 以下の場合には、斜めひび割れ発生後の疲労破断により破壊する。
 - c) M/M_s が 0.7 以上の場合には、せん断圧縮破壊が生じる。
 - d) V/V_c が 0.6 以上かつ M/M_s が 0.8 以上では、斜め引張破壊が生じる。

※ここに、 V ：静的斜めひび割れ発生時のせん断力

V_c ：せん断耐力

M_s ：曲げ破壊耐力

静的破壊時における破壊形態がせん断スパン比によって変化すると同様に、疲労

破壊についても破壊形態はせん断スパン比によって異なるが、これは必ずしも静的
載荷時と一致するものではない¹⁵⁾。

- ・ PC 梁部材においては、せん断スパン内の斜めひび割れの発生によってせん断破壊を生
じることがあるが、RC 梁部材に比べて優れたせん断疲労抵抗を有する。しかし、せん
断スパンが短い梁部材では、PC 鋼材の付着疲労で破壊することがあり、1000 回程度
の繰り返し荷重で付着劣化が生じる場合もあることが指摘されている¹⁶⁾。
- ・ 繰り返し荷重載荷により、コンクリートが受け持つせん断力の負担割合は減少し、せん
断補強筋に掛かる応力度は増加する。スターラップの疲労破断箇所は、部材の破壊面
である斜めひび割れに沿うことがほとんどであり、スターラップの疲労強度は、母材
の疲労強度と曲げ加工された部分の疲労強度との間となる¹⁷⁾。

③ 変形特性

RC 梁部材に繰り返し荷重が載荷された場合、下記の要因によりたわみは増大する。

- ・ 繰り返し荷重下におけるクリープ現象
- ・ ひび割れの発生及び進展による剛性低下
- ・ 鉄筋とコンクリート間の付着劣化による剛性低下

しかしながら、これらに関する研究はそれほど多くないのが現状である。以下に一例を
示す。

- ・ RC 部材の長期たわみは、上限荷重に相応する静的な持続荷重が作用すると仮定し、ク
リープ解析の適切な方法を用いることにより、高い精度で推定できる¹⁵⁾。

(2) 床版部材の疲労特性

① RC 床版の疲労特性

- ・ RC 床版の静的荷重載荷環境下における破壊形態は、道路橋の床版のように荷重が小さな面積に集中的に作用する場合には押し抜きせん断破壊が生じる。これに対し繰り返し荷重載荷環境下では、変動応力の繰り返しの影響が RC 床版に微視的な疲労ダメージとして蓄積され、それが一定レベルに達した部分においてひび割れ（破壊）が顕在化するものと推測される。輪荷重移動載荷試験の結果から、RC 床版の疲労損傷は概ね以下のような過程で進行する¹⁸⁾。

- ① 1 方向（支間方向）ひび割れの存在または発生
- ② ひび割れの 2 方向化（格子化）
- ③ ひび割れの進展（ひび割れ密度の上昇）
- ④ ひび割れ部などでの段差、角落ちの発生
- ⑤ 押し抜きせん断破壊の発生

- ・ RC 床版疲労押し抜きせん断破壊に対する上限荷重の静的破壊荷重に対する比率 S_0 と載荷回数 N の対数値とは直線関係にある¹⁹⁾。
- ・ RC 床版の疲労損傷は、曲げひび割れ面のスリット化によるせん断抵抗の低下後、横せん断及びねじりせん断による応力集中により促進され、最終的に貫通する²⁰⁾。

② PC 床版の疲労特性

- ・ プレストレスを導入した床版供試体では、たわみがほぼ直線的に漸増する寿命期間が長く、ひび割れ面相互の擦り合わせがプレストレスによって抑制され、せん断剛性の低下速度が小さくなる。プレストレスを導入した床版供試体では、活荷重たわみが引張側コンクリートを無視したたわみに達してから、押し抜きせん断破壊に至るまでの寿命が短い²¹⁾。

5.3 まとめ

プレストレスが導入されたはり部材における疲労特性は、プレストレスを導入することにより、RC はり部材と比較して変化することが予想される。以下に、土木学会コンクリート標準示方書²²⁾（以下「コンクリート標準示方書」と記す）において提案されている設計疲労強度が、プレストレスの導入によりどのような影響を受けるかを考察する。

- コンクリートの圧縮疲労に対して

コンクリート標準示方書では、一定の繰返し荷重载荷を受けるコンクリートの設計疲労強度 f_{rd} は、疲労寿命 N と永久荷重による応力度 σ_p の関数として、次式で表されている。

$$f_{rd} = k_{1f} f_d \left(1 - \sigma_p / f_d\right) \left(1 - \frac{\log N}{K}\right) \quad (5-1)$$

ただし、 $N \leq 2 \times 10^6$

ここに、 f_d : コンクリートの設計強度

k_{1f} : 応力方向に関する係数

圧縮及び曲げ圧縮の場合 $k_{1f} = 0.85$

引張及び曲げ引張の場合 $k_{1f} = 1.0$

K : コンクリートの種類や状態に関する係数

水で飽和される場合 $K = 10$

軽量骨材コンクリートの場合 $K = 10$

その他の一般の場合 $K = 17$

はり部材にプレストレスを導入することにより、PC 鋼材の極端な偏心配置を行っていない限り、はり部材の上縁及び下縁の圧縮応力は RC 構造に比べて増加することとなる。(5-1)式より、永久荷重による応力度 σ_p は大きくなり、設計疲労強度 f_{rd} は小さくなることから、コンクリートの圧縮疲労に対するリスクは高まる方向と言える。

- 鋼材の引張疲労に対して

コンクリート標準示方書では、鋼材の設計疲労強度 f_{srd} 、 f_{prd} と疲労寿命 N の関係は、次式で表されている。

$$\text{(異形鉄筋)} \quad f_{srd} = 190 \frac{10^a}{N^k} \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}}\right) / \gamma_s \quad (5-2)$$

$$\text{(PC 鋼材)} \quad f_{srd} = 280 \frac{10^{ar}}{N^k} \left(1 - \frac{\sigma_{pp}}{f_{pud}}\right) / \gamma_s \quad (5-3)$$

ここに、 σ_{sp} 、 σ_{pp} : 永久荷重による鋼材の応力度

f_{sud} 、 f_{pud} : 鋼材の設計引張強度

プレストレスを導入することにより、永久荷重による鋼材位置における引張応力はRC構造に比べて減少する。(5-2)式あるいは(5-3)式より設計疲労強度 f_{srd} あるいは f_{prd} は増加することから、鋼材の引張疲労に対するリスクは低くなる方向と言える。

以上のように、プレストレスを導入することにより、梁部材の疲労特性はRC部材と比較し変化することが予想されるものの、それによるリスク変動を一概に予測することは難しい。これまでにプレストレスの導入量と梁部材のコンクリートの曲げ圧縮疲労、鋼材の曲げ引張疲労、コンクリートと鋼材の付着疲労等との関連性の検証を行った既往の研究は少なく、未だ不明な点は多い。

【5章 参考文献】

- 1) 井上 正一：コンクリートの圧縮疲労特性と部材設計への適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 451/V-17，pp. 59～67，1992. 8
- 2) 菅田 紀之、尾崎 昶：各種コンクリートの疲労強度および疲労破壊性状に関する研究，土木学会論文集，No. 669/V-50，pp. 1-16，2001. 8
- 3) 畑野 正、渡辺 啓行：周期的圧縮荷重によるコンクリートの疲労破壊，土木学会論文集，No. 185，pp. 51-60，1971. 1
- 4) 松下 博通、徳光 善治：生存確立を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文集，No. 284，pp. 127-138，1979. 4
- 5) 田中 宏昌他：35年間供用されたラーメン高架橋縦梁の耐力・疲労に関する研究，土木学会論文集，No. 700/VI-54，pp. 31-43，2002. 3
- 6) 松下 博通、牧角 龍憲：繰返し圧縮強度を受けるコンクリートの変形状，コンクリート工学年次講演会論文集 1 巻 pp. 77-80，1979
- 7) 阪田 憲次他：繰返し荷重下におけるコンクリートの変形特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 1，pp. 603-608，1992
- 8) (社)土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法試案，コンクリート・ライブラリー第 48 号，pp. 18-19，1981. 4
- 9) 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研究，土木学会論文集，No. 122，pp. 29-41，1965. 10
- 10) 山崎 徳也他：太径鉄筋 D51 の単体および RC はりにおける疲労特性，土木学会論文集，No. 278，pp. 123-131，1978. 10
- 11) 国分 正胤、岡村 甫：太径鉄筋の使用に関する研究，土木学会論文報告集，No. 202，pp. 103-113，1972. 6
- 12) 岡村 甫：曲げ加工した太径鉄筋 D51 を用いたはりの疲労性状，土木学会コンクリート・ライブラリー第 40 号，pp. 44-47，1975. 6
- 13) 田 正範、島田 静雄：鉄筋とコンクリートの付着に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 217，pp. 87-98，1973. 9
- 14) 国分 正胤他：各種の高張力異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリート大型ばりの疲労に関する研究，土木学会論文集，No. 122，pp. 51-74，1965. 10
- 15) 岸谷 孝一、西澤 紀昭他：コンクリート構造物の耐久性シリーズ（疲労），技報堂出版，1986 年 4 月
- 16) 小林 和夫、井上 晋：プレストレストコンクリート工学，国民科学社，2006 年 6 月
- 17) 上田 多門、岡村 甫：疲労荷重下のスターラップの挙動，コンクリート工学論文集第 19 巻，第 5 号，pp. 101-116，1981. 5
- 18) 玉越 隆史他：道路橋コンクリート系床版の疲労耐久性評価法に関する研究，第 5 回道路橋床版シンポジウム，土木学会，2006 年

- 19) 角田 与史雄、藤田 嘉夫：RC スラブの疲労押抜きせん断強度に関する基礎的研究，土木学会論文集 No. 317, pp. 149-157, 1982. 1
- 20) 岡田 清他：道路橋鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷と疲労性状，土木学会論文集 No. 321, pp. 49-61, 1982. 5
- 21) 東山 浩士、松井 繁之：橋軸方向プレストレスしたコンクリート床版の走行荷重に対する疲労耐久性に関する研究，土木学会論文集 No. 605/I-45, pp. 79-90, 1998. 10
- 22) (社)土木学会：コンクリート標準示方書[設計編] 2007 年制定