

9 章 総括

9.1 PRC 橋の性能照査に関する考察

道路橋では、PRC 構造は衝突荷重又は地震の影響を考慮しない荷重の組合せに対して、計算上のひび割れを許容するという思想により、鉄筋量と PC 鋼材量を適切に設定した合理的な構造として提案されている。設計上の目標耐用期間内において十分な耐久性を確保するうえで許容されるひび割れ幅が設定されており、発生ひび割れ幅がこの許容ひび割れ幅以下となるようコンクリートの引張応力度が制御され、また疲労破壊に対する耐久性を確保するために内部鋼材の変動応力度が制御されている。しかしながら、供用期間内における長期の繰返し荷重によるひび割れ幅の経時変化やそれに伴う内部鋼材の変動応力の変化、発生ひび割れ幅が鋼材腐食に与える影響など、未だ解明されていない事象が多く、基準化に至っていないのが現状である。

そこで本研究では、実橋調査により、プレストレスが導入された部材の損傷実態の把握と疲労損傷の可能性の検証、及び供試体実験と解析を用いた荷重の繰返し载荷による疲労損傷の再現と疲労損傷要因の分析を行うことで、PRC 構造の設計手法と性能の関係について明らかにすると共に、性能照査において考慮すべき事項について検討することとした。

(1) 本研究により得られた知見

本研究ではまず「2 章 橋梁実態調査」において、実橋における疲労損傷の可能性を検証するために、長期間供用されている PRC 橋及び自動車交通の過酷な条件下で供用されている PC 橋の中から、特にひび割れ損傷の多い橋梁をそれぞれ 1 橋ずつ抽出し、損傷実態の把握と損傷要因の分析を行った。その結果、外観調査により確認されたひび割れは、コンクリートの材料性能の低下や外的環境に起因する劣化、構造的な不具合や想定以上の活荷重の影響、プレストレスの低下によるものである可能性は低く、ひび割れ性状やひび割れからの劣化因子の進入状況を勘案すると、疲労に起因したものである可能性を明確に否定することは出来ないことが示された。

一方「3 章 PC 橋と PRC 橋の概略比較設計」において、PC 構造に対する PRC 構造の相対的な疲労損傷リスクを分析するために、PC 構造及び PRC 構造それぞれの概略設計を実施し、設計思想が異なることによる応力状態の観点から疲労損傷の発生しやすさを比較した。その結果、PRC 構造は PC 構造と比較し、引張範囲内の主桁下縁応力振幅が 3 倍以上大きくなり、相対的に疲労損傷に対するリスクの高い構造であることが示された。この結果を受け、「4 章 PRC 橋のパラメータ解析」において、PRC 構造における疲労損傷のリスクを変動させる要因の分析を行った。その結果、PRC 構造のプレストレス導入度が PC 構造の 80% までであれば設計パラメータの変化は大きく影響しないものの、60~80% となった場合には、特に乾燥収縮度の相違によって鉄筋拘束力及びひび割れ幅の変化、断面の縁における引張応力度の増加量に影響を及ぼすと共に、活荷重による鋼材応力度の増加量が大きくなるなど、設計結果に大きな影響を与えることが分かった。乾燥収縮が不確実性の高い要素であるこ

とから設計時の想定と実際とに大きな乖離を生じる可能性があることや、鋼材応力度の増量が大きいことは内部鋼材の疲労に影響を及ぼす応力変動度が大きくなることを意味していることから、PRC 構造は、PC 構造と比較して疲労損傷のリスクが危険側に変動しやすい傾向にあることが示された。

2～4 章までの分析により、プレストレスが導入された実橋においてもコンクリートそのものの疲労によるひび割れの発生が生じること、及び理由の如何にかかわらず一度発生したコンクリートのひび割れが応力変動の繰り返しの影響を強く受けて進展することについてはいずれも生じ得ないとはいえない。特に仮に道路橋に対する現在一般的な設計手法による場合には、実橋において PRC 構造は PC 構造として設計された場合よりも疲労損傷を生じる可能性は相対的に高く、プレストレス導入量などの変動に対して疲労損傷を生じるリスクも相対的に危険側に変動しやすいことが示された。

「6 章 供試体実験と FEM 解析による疲労損傷要因の分析」では、プレストレス導入度の異なる複数のはり供試体を用いた疲労実験と FEM 解析から、桁部材を模擬した曲げ応力の繰り返し発生状況における疲労現象の再現を試みるとともに、設計実務への反映を念頭に疲労耐久性と関わりの深い要因の抽出の観点でその結果について考察を行った。その結果、データ数が少なく信頼性には課題があるものの、プレストレスを導入した梁部材についての曲げ応力の繰り返し状態におけるコンクリート表面で計測されるひずみ振幅の規模と繰り返し回数の関係がいわゆるマイナー則にあてはめて整理できる可能性があることが明らかになった。すなわちデータ数を増やして信頼性を検証する必要はあるものの、プレストレスを導入した梁部材について曲げ応力の繰り返しに対する疲労損傷の可能性を、着目する部材断面の変動応力振幅と繰り返し回数からある程度推定できる可能性がある。

「7 章 コンクリート部材の曲げひび割れ幅制御に関する検討」では、はり供試体を用いた載荷試験によるひび割れ幅や分散性等のひび割れ性状の確認及び荷重載荷を持続することによる乾燥収縮やクリープの影響によるひび割れ幅の長期変化について検討を行い、PRC 構造や RC 構造で発生を許容している曲げひび割れについて、ひび割れ性状やひび割れ幅の長期的な変化傾向の把握を行った。その結果、導入プレストレス量が異なっても、ひび割れ本数やひび割れ間隔に顕著な違いは表れなかった。これは 2 章の実橋調査における調査対象の PC 橋で確認されたひび割れが、調査対象の PRC 橋で確認されたひび割れと比較してひび割れ間隔が広く、ひび割れが局所化していたという傾向とは異なるものであった。またプレストレス導入の有無により、載荷直後のひび割れ幅と長期的なひび割れ幅の変動傾向に若干の違いはあるものの明確な相関関係は得られなかったことから、7 章の実験の範囲においてはプレストレス有無の影響は明確とはならなかった。

「8 章 ひび割れ幅が鋼材腐食に与える影響」では、曲げひび割れを意図的に導入した RC 供試体の暴露試験により、ひび割れ部への塩分浸透とひび割れが鋼材腐食に及ぼす影響についての検討を行い、7 章の結果も踏まえて曲げひび割れの存在が内部鋼材の腐食の観

点からの耐久性に及ぼす影響の把握を行った。その結果、塩害環境と区分されるような塩分環境下では、ひび割れ幅の大小にかかわらず比較的早期に塩化物イオンがひび割れ部より侵入し、鋼材の腐食を生じる恐れの見点ではひび割れ幅の大小による差は大きくないことが確認された。一方で、そのような場合でもコンクリートのかぶり厚さを確保することによる鋼材腐食の抑制効果は顕著であり、かぶり厚さの確保が厳しい塩分環境下においても内部鋼材の腐食防止に効果があることが示された。

(2)性能照査に関する考察

道路橋のコンクリートの曲げ部材において、静的にはひび割れが生じない範囲での応力の繰り返しによってコンクリート部材に疲労によるひび割れが生じる可能性については本研究では明確な知見が得られなかった。一方で既に発生しているひび割れに対しては応力変動の繰り返しに伴ってひび割れの進展がみられ疲労による損傷の拡大が生じうると考えられた。そしてこのようなコンクリート部材の曲げひび割れの進展にかかわる要因としては、既存あるいは先行して発生したひび割れ先端部で応力変動が卓越し、それらによってコンクリートの微視的な破壊が進むことによるひび割れが進展することが主たる要因と考えられた。これに加えてひび割れ部近傍でのコンクリートと内部鋼材の付着応力の変動繰り返しによる付着の劣化が生じるとこれによってもひび割れ先端部の応力変動は大きくなる可能性が高く、このような現象も疲労現象の一端として損傷拡大に寄与するものとも推定できる。図 9.1.1 に推定される疲労損傷メカニズムを示す。

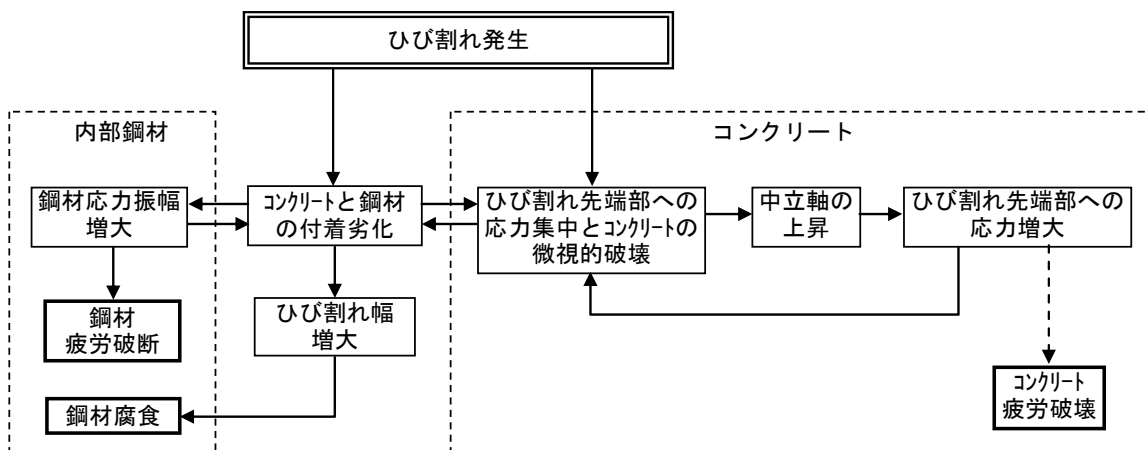


図 9.1.1 推定される疲労損傷メカニズム

以上、本研究で得られた知見と既存の道路橋の設計に用いられるコンクリート部材の設計法から、PRC 構造の主桁を道路橋示方書及びコンクリート標準示方書に準拠して設計するにあたって、設計上の目標とする所要の耐久性能を定量的に照査する方法について今後の方向性と実現可能性については以下の通りと考えられる。

a) 許容ひび割れ幅

PRC 構造の主桁の設計において、現在の設計基準類で想定している衝突荷重又は地震の影響を考慮しない荷重の組合せに対して計算上発生するひび割れ幅に対しては、ひび割れ幅の照査を行う必要がある。例えば土木学会では、鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値として、かぶり c を用いて表 9.1.1 で算出し、計算により算出される曲げひび割れ幅がこの限界値を超えないことを照査することとしている。

表 9.1.1 鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値 w_a (mm) ¹⁾

鋼材の種類	鋼材の腐食に対する環境条件		
	一般の環境	腐食性環境	特に厳しい腐食性環境
異形鉄筋・普通丸鋼	0.005c	0.004c	0.0035c
PC鋼材	0.004c	—	—

ここで本研究の供試体実験 (6章) より、荷重の繰返し荷重載荷の影響によりひび割れ幅は徐々に増大していく可能性が高いと考えられ、実験結果ではひび割れ幅増加量のオーダーは、最大荷重として許容ひび割れ幅応力度相当の荷重を 2×10^6 回繰返す条件下 (B55-200) において 0.1mm 程度であった (図 6.3.21)。このことから、現在一般的に行われている PRC 構造の設計手法による場合には、設計上の目標期間に対して繰返し載荷される荷重等による応力変動の繰返しに対して見込まれるひび割れ幅の増加を考慮して変動応力の規模を抑制するなど具体的な耐久性への配慮を行うことが所要の耐久性を保証するために有効であると考えられる。

b) 鋼材の疲労強度

内部鋼材の疲労耐久性については、鉄筋などの鋼材の疲労強度に関する知見がこれまでも得られており、これらを安全側となるように準用することである程度信頼性の高い疲労照査が行えるものと考えられる。例えば土木学会では、永久荷重作用時と疲労荷重作用時の応力度差として算出される変動応力度が、下記式 9.1.1²⁾により求まる設計疲労強度 f_{srd} を超えないことを照査することとしている。

$$f_{srd} = 190 \frac{10^a}{N^k} \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}} \right) / \gamma_s \quad (\text{式 9.1.1})$$

ただし、疲労寿命 $N \leq 2 \times 10^6$

ここに、 σ_{sp} : 永久荷重による鋼材の応力度

f_{ud} : 鉄筋の設計引張強度で、材料係数を 1.05 として求める

γ_s : 鉄筋に対する材料係数で、一般に 1.05 とする

a 及び k : 試験により定まる等価繰返し回数別の値

なお、これらの技術資料で想定されている荷重状態と道路橋示方書などの適用基準に求められる荷重条件とは必ずしも一致しないため、これらを準用して設計上の目標期間に対する耐久性照査にあたっては荷重条件が基準の要求に適合するものとなるようにしなければならないことに注意が必要である。

9.2 まとめ

本研究の実施によって、PC 構造あるいは PRC 構造のようにプレストレスが導入された構造であっても、何らかの理由で一旦ひび割れが入ると、引張応力が発生する荷重が繰り返されることで、ひび割れは分散することなく進展し、ひび割れ位置における鋼材の疲労や腐食を引き起こす危険性は明確に否定出来ないことが示された。特に PRC 構造のようにプレストレス導入度が PC 構造の 60～80%程度に抑えられている場合には、乾燥収縮という不確実性の高い要因により、鉄筋拘束力やひび割れ幅という疲労損傷に関わる要素が大きくばらつき、設計時の想定と実際とに大きな乖離を生じる可能性があること、及び活荷重による鋼材応力度の増加量が大きくなることで疲労損傷リスクが危険側に変動しやすい傾向にあることが示された。

したがって、曲げ部材においては、ひび割れの有無が疲労耐久性を大きく左右することになるため、PC 構造のようにひび割れを許容しない構造とするか、一時的にでもひび割れを生じる可能性の高い部材においては、ひび割れ分散性を確保しひび割れの進展を抑える配慮が必要であると言える。またコンクリートと鋼材の付着劣化がひび割れの進展を助長する可能性があることから、付着劣化を抑えることも必要であると言える。

現在提案されている PRC 構造の設計手法では、鉄筋量と PC 鋼材量を適切に設定することにより、条件によっては道路橋示方書などの技術基準に規定される PC 構造あるいは RC 構造として設計した場合よりも、耐久性を含む様々な要求性能を実現しつつ経済的で合理的な構造とできる可能性はある。一方で、耐荷力上有効断面として考慮しているコンクリート部位及び内部鋼材に、PC 構造として設計した場合に比べて相対的に大きな応力変動及び引張応力の発生を生じさせることが多く、設計供用期間中のひび割れ発生の可能性及びひび割れが発生した場合のそれらの拡大進展の程度も PC 構造に比べて大きいと考えられる。このように、プレストレスを導入する部材であっても、荷重条件によって引張応力の発生を許容する場合には、それによって実際にひび割れが生じる可能性の程度や、仮にひび割れが生じた場合にそれが想定される応力変動の繰返しに対して進展する可能性、及びその程度から所要の耐荷力が設計で考慮する期間に維持されることの確実性について考慮することが必要である可能性がある。

【9章 参考文献】

- 1) 2007年制定 コンクリート標準示方書 設計編、p. 113、土木学会
- 2) 2007年制定 コンクリート標準示方書 設計編、p. 58、土木学会