

論文の内容の要旨

論文題目 ひび割れ幅とコンクリートのひずみの計測を利用したコンクリートはり部材の健全性評価に関する研究

氏 名 恒國 光義

コンクリートは鋼などの他の建設材料と比較して、コストの優位性や成型の容易さなどから社会基盤などの広範囲の構造物に用いられ、わが国の経済の発展や国民の安全の確保に大きく寄与してきたことは周知の事実である。しかし、近年では、トンネル覆工コンクリートの剥落事故に見られるように、劣化の顕在化が社会的な問題となる場合も見られ、コンクリート構造物の維持管理の重要性が増している。土木構造物の代表的なものの一つであるコンクリート道路橋について見れば、橋長 15m 以上の橋の数は約 71,000 になり、その約半数が 1975 年頃の高度経済成長期後半までに架設されたものであり、既に架設から 35 年以上が経過して老朽化が進行している。また、1995 年の設計荷重の改定前に架設されたコンクリート橋が大半を占めることや、近年の交通量の増大、車両の重量化と相まって、今後、劣化した橋の数と、大規模な補修や架替えのための費用の増大が懸念されている。その一方で、到来する人口減少社会や高齢化社会により、建設投資は抑制される傾向にあることから、今後は、既存構造物の健全性を定量的に評価し、適切な補修や補強といった対策を講じることで延命化を図りながら供用していくことが必要となる。

現状のコンクリート構造物の維持管理における健全性の評価は、主に、点検員の目視による外観上の劣化の状態に基づいた、4 段階程度のグレーディングによる評価が中心であると考えられる。しかし、本研究で取り上げるプレストレストコンクリート（以下、「PC」と略す）はり部材のプレストレス力の低下や、鉄筋コンクリート（以下、「RC」と略す）はり部材の疲労の進行といった劣化については、外観上の状態だけでは判定が難しいこと

から、これらの健全性を定量的に評価するための技術の開発が急務であると考えられる。

PC はり部材の残存プレストレス力の評価については、鋼材の磁気特性の計測による PC 鋼材の緊張力の評価、コンクリートに設けた切欠きの変形の計測によるコンクリート応力の評価など、残存プレストレス力の絶対値を評価することが可能な技術も確立されている。しかし、前者は PC 鋼材へセンサを取付ける必要があることから、既設の内ケーブル方式への適用が難しく、後者は、切欠き周辺では応力が解放されることから既設構造物の同一断面で繰返して適用することができないといった課題がある。その他の方法として、PC 鋼材が破断するときの弾性波を計測することで、破断に伴うプレストレス力の低下を評価する方法もある。この方法は既設構造物への適用は容易であるが、供用途中からの適用した場合、破断した PC 鋼材の本数の合計が特定できないと、残存プレストレス力の絶対値を評価することができないことが課題となる。

そこで本研究では、既設 PC はり部材に適用が容易で、残存プレストレス力の絶対値を評価することが可能な手法の開発を目的とした。提案手法は、荷重の増分によって引張縁での圧縮応力がゼロとなったときに曲げひび割れが開口し、除荷した後には再び閉じるという挙動に着目して残存プレストレス力を推定するものである。実構造物と同様にプレストレス力を導入した基準試験体、プレストレス力をその 70%、30%とした 3 体の PC はり試験体を作製し、荷重増分時のひび割れ開口の評価方法や、残存プレストレス力の推定精度について検討を行った。基準試験体と、プレストレス力をその 70%とした試験体については、誤差 10%以下で残留プレストレスを推定することが可能であった。さらに、PC はり部材では、曲げひび割れが開口するまでは全断面有効の弾性体に近い挙動を示すことから、残存プレストレス力の推定に必要なひび割れ開口時の曲げモーメントと中立軸高さを、圧縮縁と引張縁のコンクリートのひずみを用いて、平面保持の仮定を利用して推定できることを示した。これは、一般的には煩雑で費用を要することになる実構造物での荷重の計測を行うことなく、残存プレストレス力の推定を可能にする方法を提案したものである。また、ひび割れ幅の計測には π 型変位計、圧縮縁と引張縁のコンクリートのひずみの計測にはひずみゲージを用いており、比較的安価で簡易的な計測であることから、多数の構造物への適用が可能であると考えている。

次に、架設から 40 年が経過した PC 道路橋へ本提案手法の適用を図った。対象橋は、延長約 1.1km、50 径間の PC 橋と鋼橋からなる高架橋であり、PC 橋は支間長 20m、片側 2 車線の単純ポステン T 桁橋である。全径間のうちの 6 径間で、1 本の主桁に最大 7 本の曲げひび割れが確認された。室内載荷試験と同様に支間中央付近のひび割れ幅、ひび割れ間のコンクリートのひずみについて、 π 型変位計とひずみゲージを用いて計測を行った。その結果、重量車の走行に対してひび割れが開口する挙動を、室内載荷試験と同様に捉えることができることを確認した。また、検討の結果、対象橋のプレストレス力は設計値の約 80%と推定され、確認された曲げひび割れの要因はプレストレス力の減少によるものであることを推察することができた。

本研究では、RC はり部材の疲労の進行評価についても検討を行っている。RC はり部材の疲労進行の評価手法としては、圧縮コンクリートや引張鉄筋といった構成材料の S-N 線式を用いた線形累積損傷則がある。この方法では、材料の応力振幅や繰返し回数が必要となることから実構造物では連続した計測が必要となり、かつ、引張鉄筋の応力振幅を計測するためにはかぶりコンクリートのはつりを伴うことから、既設構造物に適応する上では労力を要する。また、コンクリートや補強鋼材を対象として、線形破壊力学の破壊靱性パラメータを用いた疲労亀裂進展則に基づく進行の予測方法もあるが、パラメータの妥当性や、コンクリート内部の補強鋼材の亀裂の進展を知るためのはつり作業を必要とする。一方、部材の挙動に基づく疲労進行の評価手法として、圧縮コンクリートのサイクリックリープと弾性係数の低下、引張域のひび割れと部材の断面 2 次モーメントの低下を用いた評価があるが、応力振幅や繰返し回数を知るための連続した計測が必要となる。また、上述の線形累積損傷則も同様であるが、既設構造物へ適用する場合、構造物の供用開始からの疲労の累積が不明であるといった課題があり、計測開始時点からの疲労の進展の予測にとどまる場合が多いのが現状であると考えられる。

そこで本研究では RC はり部材を対象として、繰返しを受ける初期からの疲労の損傷の進行を、応力振幅や繰返し回数を計測することなく評価できる手法の構築を目的とした。手法の構築に当たって、まず、引張鉄筋比を 0.66~1.29% とした 3 体の RC はり試験体を作製し、室内での疲労試験を行っている。繰返し载荷に対するたわみ増大、ひび割れ性状、圧縮域コンクリートの損傷などを分析している。その結果、従来から用いられている引張域のひび割れと有効断面 2 次モーメントの低下に加えて、本研究では繰返し载荷に伴う圧縮コンクリートの弾塑性挙動を考慮したときの载荷時の最大たわみと残留たわみの関係によって疲労の進行をモデル化した。ただし、既設構造物では部材のたわみを計測することは、計器の設置や費用の面から難しい場合が多い。そこで、本研究では、ひび割れ幅から推定した引張鉄筋のひずみと、圧縮縁コンクリートのひずみを用いて平面保持を仮定したときの計測断面の曲率をたわみの代替指標として用いている。さらに、一定の圧縮縁のひずみ（例えば 100μ ）での曲率と、残留曲率の関係を用いることで、部材に作用する荷重を計測することなく疲労の進行を評価する方法も提案している。

次に、最大荷重や载荷速度、断面の異なる繰返し载荷試験結果に対して、上述の提案手法による疲労の進行の評価を行った。その結果、最大荷重や载荷速度が異なる場合であっても、一定の圧縮ひずみに対する曲率と残留曲率との関係の差は小さいと考えられ、断面に作用する荷重や繰返し回数を用いることなく疲労の進行を評価することができる可能性を示した。

ここでの試験体の計測も PC はり部材と同様に、ひび割れ幅は π 型変位計、圧縮縁のひずみはひずみゲージを用いており、比較的安価で多数の構造物への適用が容易な計測方法を目指している。

本研究では、曲げひび割れを有するプレストレストコンクリートおよび鉄筋コンクリー

トはり部材を対象として、残存プレストレスの推定方法や、疲労の進行の評価方法の構築を図った。PC はり部材の残存プレストレス力の推定では、従来の手法では困難であった既設構造物での絶対値の推定を可能とした。また、RC はり部材の疲労の進行評価では、残留変形と荷重載荷時の最大変形の関係に基づいて、繰返し荷重を受ける初期からの疲労の進行を評価できる可能性を示した。また、いずれの手法も、ひび割れ幅とコンクリート表面のひずみの計測を利用したものであり、 π 型変位計やひずみゲージといった簡易的な計測器具を用いることが可能である。また、提案手法は、断面の曲げモーメントや荷重の計測を行う必要がないことから、同種の劣化が生じた複数の既設構造物への適用が比較的容易で安価な方法であり、定量的な健全性評価に基づく維持管理に資するものであると考えている。今後の課題として、PC はり部材では軸方向鉄筋量の影響、PC および RC はり部材ともに、丸鋼や異形鉄筋といった鋼材種の影響、あるいは鉄筋の腐食の影響を明らかにする必要があると考える。