

論文 既設コンクリート道路橋の新しい応力照査手法

牧角龍憲*1・佐竹芳郎*2・城 秀夫*3・相良邦彦*4

要旨：国道3号線にて60年間供用された後に解体されることになったコンクリート道路橋（旧久留米大橋）において、実橋におけるトラック載荷と解体主桁の静的載荷試験を行い、実橋の実態を把握するに適切な評価手法について検討した。その結果、通常の供用状態の荷重条件下においては、従来のRC理論ではなくコンクリートの引張抵抗が存在する状態であることを明らかにし、それを考慮した新しい鉄筋応力の解析手法を提案するとともに、室内実験結果によりその妥当性を検証した。

キーワード：道路橋、耐荷力評価、RCはり、鉄筋応力、引張抵抗、応力解析

1. はじめに

既設コンクリート道路橋の維持管理あるいは新設計荷重に対応する補強検討において、コンクリート主桁の耐荷力をどのように評価・判定するかは重要な課題である。しかしながら、その判断材料となる実橋からのデータは、供用開始時の性状が不明であるとともに道路を供用しながらの限られた条件下でしか得られず、実際の耐荷力について正確な判断を行うことが容易でないのが現状である。また、供用中のコンクリート道路橋の多くは、現在の交通荷重より小さな車両荷重を用いて設計されているにもかかわらず、日常の供用において機能上ほとんど支障がないのが実態であり、計算上の状態とは明らかに違う性状を呈している。

これは、実際の部材においては作用断面力がひび割れ荷重よりやや大きい程度の大きさであり、それに対応する部材断面の状態は全断面有効ではないがコンクリートの引張抵抗をすべて無視するまでには至らない状態にあるためと考えられる。したがって、供用状態下のコンクリ

ート部材の実態を的確に把握するためには、実際に作用する断面力の範囲に対応する鉄筋コンクリートの応力解析手法を明らかにする必要がある。

一方、実橋におけるトラック載荷で耐荷性能を評価する場合、自重の曲げモーメントによる状態を計測できないという問題がある。すなわち、トラック載荷時の0点において部材にどれだけの応力が作用しているかが不明であるため、活荷重作用時の応力の絶対値が正確に把握出来ないことになる。

本研究は、以上の観点から、国道3号線にかかる久留米大橋を対象にして、解体して取り出したコンクリート主桁の静的載荷試験により曲げモーメント既知の状態での部材の挙動を把握し、曲げを受ける既設コンクリート部材における鉄筋応力の実態に対応した算定手法について検討し、コンクリートの引張抵抗を考慮した新しい応力解析手法を提案するとともに、実橋載荷試験結果との照合ならびに室内実験にてその妥当性を検証したものである。

*1 九州共立大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*2 長崎県土木部長（元建設省九州地方建設局福岡国道工事事務所長）

*3 (株)構造技術センター福岡支社技術部長

*4 (株)東京測器研究所福岡営業所

2. コンクリート道路橋の耐荷力調査における問題点

既設道路橋におけるコンクリート部材の耐荷力調査は、日本道路協会編道路維持修繕要綱(昭和53年) 4.3.3 および 4.3.5 に記述されている『耐荷力調査は、橋梁の現断面において現行示方書により応力計算を行い、その材料の許容応力度と比較して応力度の超過を調査することである。』に準じて行われている。

この現行示方書における応力計算の手法は、『コンクリートの引張強度は無視する。...したがって、鉄筋のみで部材断面に生じる引張力を負担するものとして、曲げモーメントに対する応力度の算出をしなければならない。』と記されている。

図-1に、部材に作用する断面力(曲げモーメント)と現行示方書による鉄筋応力計算値との関係を模式的に示す。鉄筋応力 σ は、死荷重による断面力 M_D と設計時の活荷重による断面

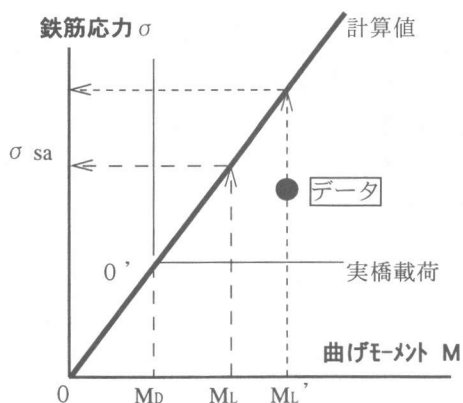


図-1 現行示方書による断面力と鉄筋応力との関係の模式図

力 M_L に許容値 σ_{sa} が対応する断面において、現行活荷重による断面力 M_L' が作用する場合には必ず許容値以上の鉄筋応力が算定されることになる。一方、実橋載荷試験などで得られる鉄筋応力計測データは、原点を $0'$ とする関係において計算値よりかなり小さな値を示すのが通常である。したがって、現行示方書の規定による鉄筋応力の算定は、実態を的確に把握する方法として妥当であるか否かを確認しておく必要があるといえる。

3. 解体桁の曲げ載荷試験における性状

旧久留米大橋は、筑後川に架かる橋長324.5mの国道橋で、図-2に示すようなゲルバー構造の2主桁コンクリート橋である。河川改修で架け替えられるのを利用して、解体されるゲルバー構造の吊り桁部を取り出して曲げ載荷試験を実施した。この試験の目的は、主桁単独の曲げ載荷試験により実際の部材の挙動を把握し、その結果と解体前の実橋におけるトラック載荷試験で得られたデータとを比較することにより、図-1の関係の M_D+M_L' に対応する鉄筋応力の的確な評価手法を検討することである。

実橋のゲルバー吊り桁部の長さは16.5mであるが、試験場までの運搬上の制約から中央部の長さ10mを切り出し、図-3のようにスパン9mの2点載荷で実施した。試験体の断面寸法を図-4に示す。スパン中央部の最下端の鉄筋をはりだして貼付したひずみゲージならびに鉄筋ひずみを計測した。また、下面全体が接地している状態でひずみを計測し、それを応力0点とした。

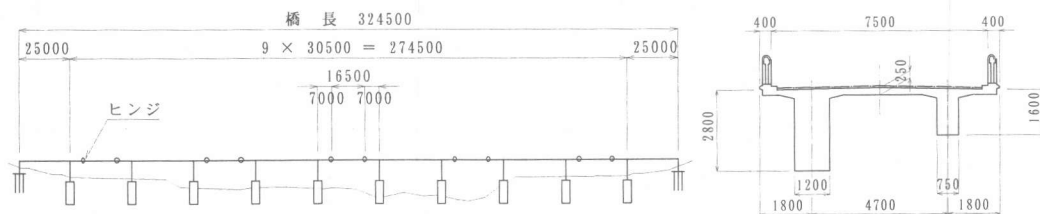


図-2 久留米大橋橋梁一般図

解体桁の荷重試験における曲げモーメントと鉄筋ひずみとの関係について、前述した現行示方書により算出した計算値と実測値とを比較して図-5に示す。図に見られるように、実測値は計算値に比べて明らかに小さく、実橋において作用していた曲げモーメント 2MNm ~ 3MNm の範囲内では、計算値の 40%程度の値になっている。すなわち、コンクリートの引張抵抗を無視する仮定で鉄筋応力を計算した場合には、実際の応力より2倍以上過大に算定することになり、換言すれば、実際の耐荷力を過小に評価することになる。

鉄筋ひずみを計測した位置に曲げひび割れは発生していたが、その幅は微細であった。そのような場合には、コンクリートの引張抵抗が無視できない大きさで機能していることが十分に考えられる。この引張抵抗としては、ひび割れがRC断面としての中立軸位置まで達していない場合の引張域コンクリートの抵抗あるいはテンションステイフネスとしてのひび割れ断面での引張抵抗などが考えられ、後者はせん断ひび割れの設計において既に適用され、曲げにおいても非線形解析などに取り入れられている。しかしながら、これらの抵抗のいずれの影響が大きいかについては明確ではなく今後の検討が必要であるため、ここでは、この引張抵抗を考慮する仮定として実態を把握するに適切でかつ簡便な手法について考察した。

図-6に、ひび割れ発生以降もコンクリートがある一定の大きさの引張抵抗を有すると仮定した場合（RC断面2）、すなわちひび割れ発生以降の曲げモーメント増分に対してRC理論を適用する仮定での計算値を示す。その際、コンクリートの引張抵抗としての曲げモーメントは、主桁コアの圧縮強度 43N/mm^2 から推定した引張強度 3N/mm^2 にコンクリート下縁応力となる値（1.65MNm）とした。

図にみられるように、コンクリートの引張抵抗を考慮した理論値と測定値は、かなりの範囲

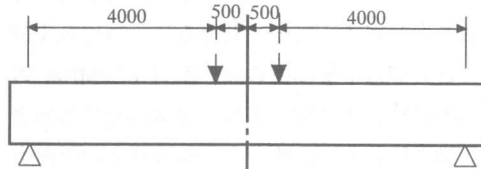


図-3 静的荷重試験方法

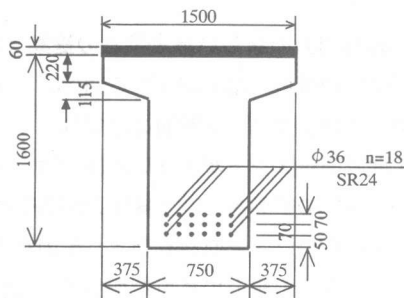


図-4 試験体の断面寸法

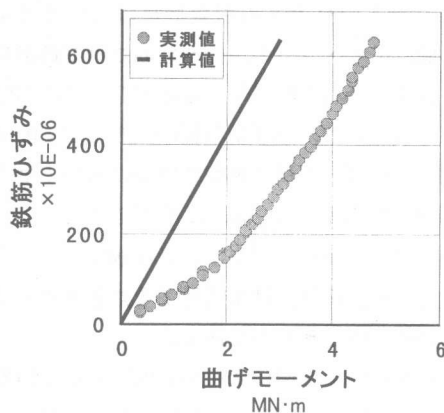


図-5 解体主桁の鉄筋ひずみ計測結果

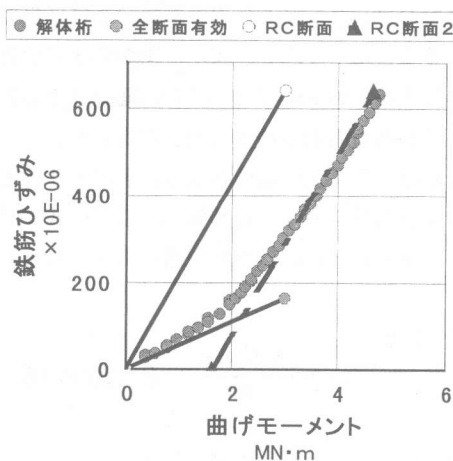


図-6 鉄筋ひずみの挙動と理論値との関係

にわたって近似しており、前述の仮定が有効であることが認められる。ちなみに、図に示す荷重の最大値は本解体桁の曲げ耐力 6.58MNm の約 2/3 に相当する値であり、通常の道路橋の供用状態下において、そのような大きさの断面力が作用することはあり得ない大きさである。

4. 鉄筋応力の新しい算定手法の提案 [1]

道路橋の供用状態で作用する曲げモーメントに対するコンクリート断面の応答は、

①曲げモーメントが小さい範囲では、全断面有効としての挙動を、②下縁応力が引張強度を越えた時点では、全断面有効としての状態から鉄筋に対する引張力の負担が増加する挙動を、③さらに大きな曲げモーメントの範囲では、コンクリートの負担する引張抵抗は一定のままで、曲げモーメントの増分を鉄筋だけで負担する挙動を、それぞれ示すと仮定する。この引張抵抗の仮定には、ひび割れ幅の大きさが支配的要因になるが、実橋の供用状態下においては曲げひび割れの幅は 0.2mm 以下がほとんどで、その程度のひびわれ幅まではほぼ適用できると考えている。また、供用状態下を対象とするので、鉄筋も弾性範囲内である。

これらの関係を図-7に模式的に示しているが、①の状態は全断面有効の断面剛性を用いて、③の状態は、従来のRC断面の剛性を用いてかつそれをコンクリートの引張抵抗だけシフトさせることにより示し、また、①から③の状態に移行する②の状態では、その断面剛性を①および③の各断面剛性の中間値と仮定した。

したがって、①～③の各状態における曲げモーメントと鉄筋応力との関係は、以下の式で求められるそれぞれの傾き α を用いて示される。

状態① :

$$\alpha_1 = \frac{n(d-X_g)}{I_g} \quad 0 < M < M_{ct}$$

状態③ :

$$\alpha_3 = \frac{n(d-X_{cr})}{I_{cr}} \quad M_r < M$$

鉄筋応力 σ

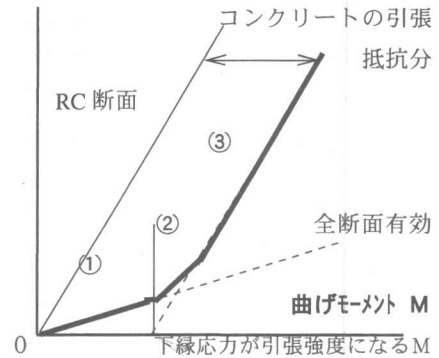


図-7 提案手法の模式図

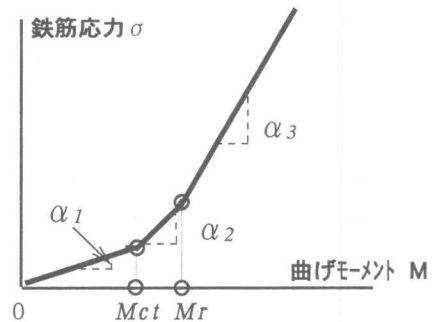


図-8 傾き α と境界M

状態② :

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1 + \alpha_3}{2} \quad M_{ct} < M < M_r$$

また、鉄筋応力 σ は以下の式で算定される。

$$\begin{aligned} \sigma &= \alpha_1 M & 0 < M < M_{ct} \\ &= \alpha_2 M + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{2} M_{ct} & M_{ct} < M < M_r \\ &= \alpha_3 (M - M_{ct}) & M_r < M \end{aligned}$$

各状態の境界となる曲げモーメントは以下のとおりに算出される。

$$M_{ct} = \frac{f'_{ct} \times I_g}{h - X_g}, \quad M_r = \frac{\alpha_1 + \alpha_3}{\alpha_3 - \alpha_1} M_{ct}$$

ここに、 n : ヤング係数比、 d : 有効高さ、 X : 中立軸高さ、 I : 断面二次モーメント、 h : 高さ、 f'_{ct} : コンクリートの引張強度、添字 g : 全断面有効、 cr : RC断面

解体桁荷重試験および実橋荷重試験における曲げモーメントと鉄筋ひずみとの関係について、前述の算定手法を用いて求めた理論値と実測値とを比較して、図-9および図-10に示す。図-9の解体桁における比較にみられるように、新しい算定手法による計算値は実測値にほぼ近似していることが認められる。

また、図-10にみられるように、既知の荷重の荷重による実橋主桁の挙動についても的確に算定することが可能であることがわかる。実橋荷重試験においては、スパン端部の測点1、スパン2/5点の測点2およびスパン中央の測点3において、位置や方向を変えた数通りのトラック荷重荷重による鉄筋ひずみを測定した。各測点位置における部材断面の主鉄筋量は設計断面力の大きさに応じて異なるため、測点1および測点2のそれはスパン中央の測点3のそれぞれ1/3および2/3の鉄筋量であり、それにより図-10に示す理論値も異なる関係が示されている。作用する断面力についても同様に各測点位置において異なるため、実橋荷重における原点となる、死荷重による曲げモーメントの大きさは各測点で異なっている。そのように断面剛性や死荷重モーメントの大きさが異なる状況であっても、図-10にみられるように、いずれの測点においても理論値は実測値にほぼ近似した関係を示していることがわかる。

これらの結果から、提案する算定手法は、供用状態下のコンクリート部材の実態を的確に把握するに妥当な手法であると判断される。

5. 室内実験による提案手法の検証

幅20cm、高さ28cm、鉄筋比0.8% (3D13)の長方形断面を有するRCはりをも、スパン2.8mで荷重点間隔60cmの中央2点荷重で曲げ試験を行った。鉄筋ひずみは、各鉄筋に30cm間隔でかつ鉄筋相互で10cmづつずらして貼付したひずみゲージにより、任意のひび割れ位置での挙動が確実に把握できるようにして計測した。

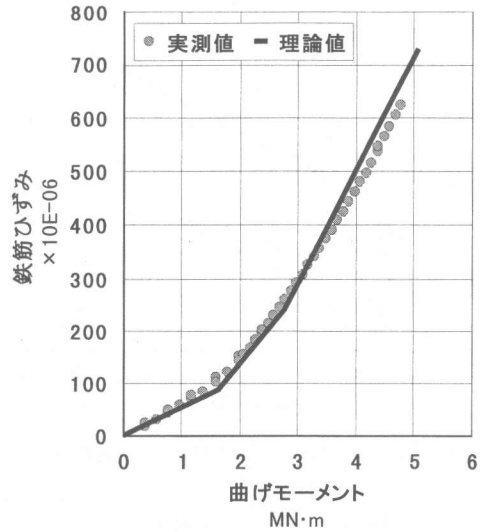


図-9 解体桁における提案手法との比較

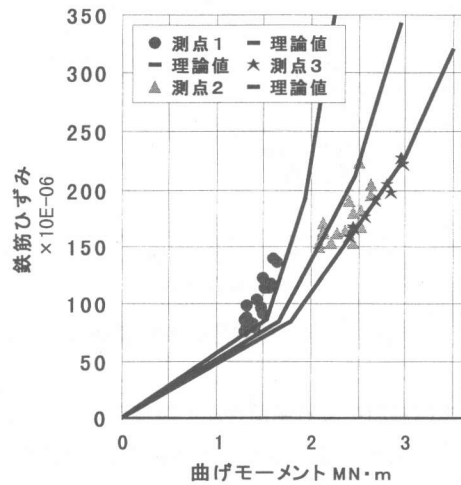


図-10 実橋トラック荷重試験における測定結果と提案手法理論値との比較

静的荷重試験の結果を図-11に示す。ひび割れ荷重の約2倍近くの荷重まで提案式が実験値に一致することがわかる。次に、同じはりでも、ひび割れ荷重前後の荷重を2Hzで8万回繰り返し載荷した後に静的荷重試験をした結果を図-12に示す。鉄筋ひずみを測定した位置には、ひび割れが発生しているにもかかわらず、鉄筋応力の測定値はRC断面の仮定による値よりも本提案式の値に近いことがわかる。

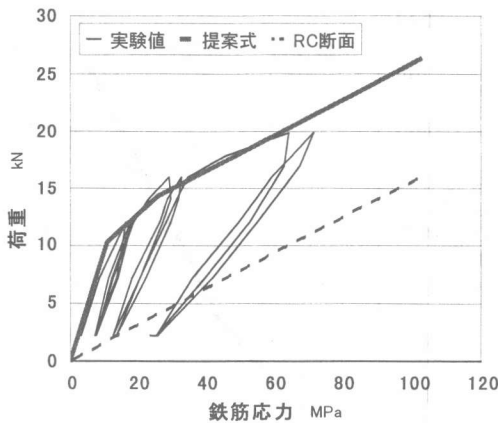


図-11 RCはりの静的載荷試験結果

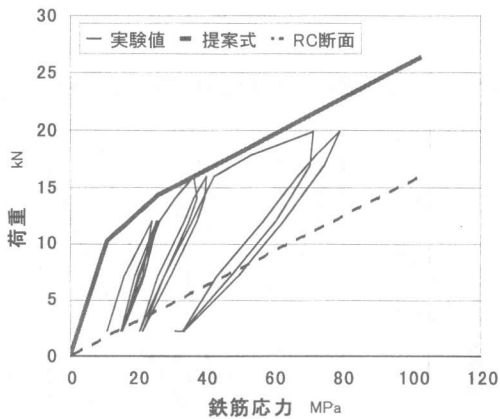


図-12 繰り返し載荷後の試験結果

6. 実橋載荷による耐荷性能の評価手法

本久留米大橋は、種々の調査結果から健全状態にあると判断された。そのようなコンクリート主桁において実橋載荷試験を実施した場合には、鉄筋応力の算定値と実測値とはほぼ一致することが望ましい。すなわち、健全な状態が理論的にも的確に推定できるとするならば、実測値がその理論計算値に比べて大きいか否かにより、所要の機能を保持しているかどうかの評価判定が容易に行えることになる。図-13に示すように、実橋載荷で得られた測定値が実際の部材の挙動としての計算値より大きい場合には耐荷機能が低下している状態にあると判断されることになる。一方、実測値が計算値より小さい場合には、付加構造物により剛性が増して

いる状態あるいは支承部等の影響で構造形式が変化した状態にあると判断されることになる。したがって、健全でかつ所要の耐荷機能を保持している状態を的確に把握できるとするならば、その関係と異なるような鉄筋応力の測定結果から橋梁部材の耐荷性能を評価することが可能になるといえ、本提案手法はその検討に際して有効であると考えられる。

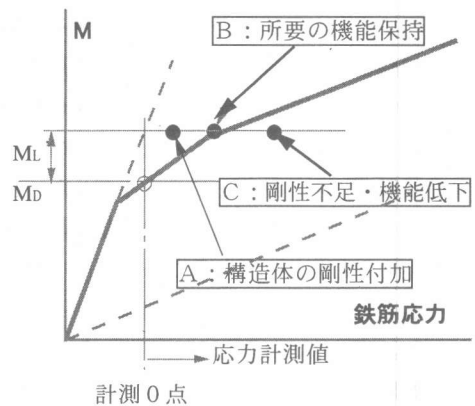


図-13 実橋載荷による耐荷性能評価の概念図

7. まとめ

- 1) 供用状態下のコンクリート道路橋においては、コンクリートの引張抵抗は無視出来ない状態にあり、それを考慮した手法により応力解析を行う必要がある。
- 2) ひび割れ発生以降もある程度の大きさの曲げモーメントまでは、コンクリートが一定の引張抵抗を負担すると仮定して新しく提案した手法は、実橋の耐荷性能を評価する際に有効な一手法である。

最後に、本研究は建設省福岡国道工事事務所の多大な協力を得て、九州橋梁・構造工学研究会「長年月供用されたコンクリート橋の調査方法に関する分科会」の活動として行ったものであり、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 牧角ほか：既設コンクリート道路橋主桁の供用荷重下における耐荷性能の評価手法について、構造物の診断に関するシンポジウム論文集，pp.5-10，1998