

論文 鉄筋が露出した小規模な RC 桁橋の 3 次元 FEM による構造診断

濱本 朋久^{*1}・神保 博紀^{*2}・根岸 伸治^{*3}

要旨：地方の市町村が管理する高度経済成長期に建設された大量の構造物も耐用年数を超過しており、補修・補強の対象となる構造物も加速度的に増加しているのが現状である。橋梁の維持管理として点検業務を進めるに当たり、鉄筋が露出した小規模な鉄筋コンクリート桁橋の点検結果として損傷範囲のみが確認され、更新対策の優先順位を評価している。しかし、その際に構造的な診断は実施されていない。そこで本研究では、鉄筋が露出した主桁断面を対象に、新設時に使用する専用ソフトと 3 次元有限要素ソフトウェアを比較検証し、活荷重の載荷方法を比較することで、3 次元有限要素解析の有効性を検証した。

キーワード：鉄筋コンクリート桁橋、鉄筋露出、3 次元 FEM、橋梁点検、小規模橋梁

1. はじめに

わが国の道路橋は、1950 年代後半から始まる高度経済成長期を中心に大量に建設され、一般に橋梁の寿命が 50 年程度と仮定するならば、多くの既存橋梁において鋼材およびコンクリートの劣化が進行している危険性がすでに高まっているのが現状である。また、わが国は成熟化社会を迎え、投資余力の減少等により土木構造物は建設主体から維持管理・延命化に移行している。明治・大正時代に建造された建造物や高度経済成長期に建設された大量の構造物も耐用年数を超過しており、補修・補強の対象となる構造物も加速度的に増加している。さらに、高齢化した構造物の割合が増加する中においても、住民の生命財産を守り、地域の安全・安心を確保しつつ、将来の維持管理・更新費用（ライフサイクルコスト）の縮減を一層進めることが必要である。加えて、予防保全の観点から戦略的に維持管理・更新を実施し、計画的な点検と点検結果に基づく補修・補強・更新を確実に実施するための長寿命化計画などによる予防保全マネジメントの強化が不可欠である。

一方、わが国の道路管理者は、道路法の改正を受けて、2014 年 7 月より、全ての橋梁やトンネル等について、5 年に 1 度、近接目視で点検を行い、4 段階で診断している¹⁾。また、地方の自治体が管理する高度経済成長期に大量に建設された小規模な橋梁も高齢となりながらも現役で活躍している。しかし、実際の橋梁点検では荷重条件・環境条件や施工条件等の不確実性から劣化を精度良く予測するのが難しいため、将来の定期点検ごとに維持管理計画の修正が必要となる。そして、維持管理計画を修正する場合、建設コストや健全度の変化が大きくなると予算の大きな変更が生じ、維持管理の運用に支障をきたす可能性が懸念される。例えば、写真-1 に示すような交通量の少ない鉄筋コンクリート（以下、RC と称す）

の桁橋において、被りコンクリートの剥落や鉄筋が露出している現状範囲を橋梁点検で調査しているが、損傷した断面における応力状態の構造的な診断は実施できていない。この原因は、実務設計に用いる専用ソフトでは、被りコンクリートの剥落や鉄筋が露出している条件に対する RC 断面の構造計算が適用範囲外であるためと考えられる。さらに、現状の長寿命化計画では、橋梁点検の結果を反映した予算を積算する段階に、当該の現場条件に不適合な劣化予測曲線が採用され、損傷していれば構造診断をせずに優先順位のみが高くなり、緊急対策の予算に計上されている。これでは、投資余力が減少している社会情勢に逆行しており、損傷している RC 断面の応力状態によっては「緊急対策不要で軽微な手当のみ案」の評価根拠が求められている。そこで、損傷している RC 断面の構造診断として、3 次元有限要素解析（以下、FEM と称す）ソフトウェアの適用も、評価根拠の有効な構造診断手法と考えられる。有賀ら²⁾は、新・旧のポンプ場が管路で連結されている複合構造を 3 次元 FEM でモデル化し、複雑な動的挙動を検証している。橋梁に関わらず新設や既設の重要なインフラ施設を対象に 3 次元 FEM でより詳細にモデル化することで構造的に検証している



写真-1 被りコンクリート剥落や鉄筋露出の損傷状況

*1 西日本工業大学 工学部 総合システム工学科 准教授 博士（工学）（正会員）

*2 関東測量株式会社 建設コンサルタント部

*3 公益財団法人 群馬県建設技術センター（元 群馬工業高等専門学校 環境都市工学科）

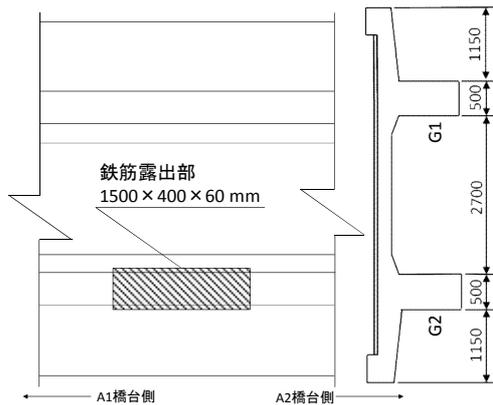


図-1 桁下下面の損傷状況

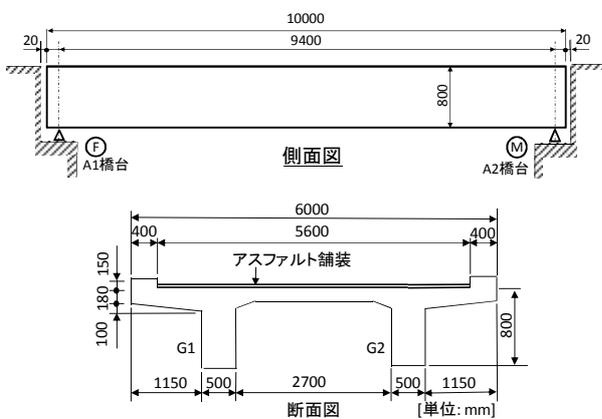


図-2 小規模橋梁の一般図

研究も増えている。しかし、国や県が管理する橋梁ではなく、地方の市町村が管理する重要度は低い最も地域に密着している老朽化した小規模な橋梁を対象に、橋梁点検結果を基に経年劣化などの損傷評価を定量的に判断する構造診断手法として3次元 FEM の有効性に関する研究はあまり実施されていない。なお、3次元 FEM における構造計算結果の実挙動に対する適合性に関しては、境界条件の適切な設定や強度試験などによる材料定数の信頼性が非常に大きな課題であると考えられる。本研究では、小規模な RC 断面を有する単純桁橋を対象に、新設の実務設計で使用する専用ソフトと3次元 FEM の構造計算結果を比較検討し、引張側軸方向主鉄筋の曲げ応力度を検証する。また、3次元 FEM の有効性を検証する目的で、鉄筋が露出した主桁断面を3次元 FEM でモデル化し、引張側軸方向主鉄筋の曲げ応力度に及ぼす影響についても検証を実施する。

2. 橋梁点検の現状

対象橋梁である地方の市町村が管理している小規模な橋の橋梁点検が数多く実施されている。普通河川を渡河する老朽化した RC 断面を有する既設の桁橋を対象に、

主桁の被りコンクリートが剥落している詳細な損傷状況を写真-1 に示す。また、主桁下面の損傷状況を図-1 に示す。図-1 より、主桁下面において鉄筋の露出が最大で長さ 1500×幅 400×厚さ 60mm 程度が確認できた。これより、橋梁点検から得られた情報に対する実務者の評価として「主桁に構造的な問題が生じる可能性がある。」とコメントを付して整理している。また、橋梁管理カルテの点検表における対策区分は8段階に区分されている。対策区分は、A0（異常なし）・A（損傷が軽微で補修を行う必要がない）・B（状況により補修を行う）・M（維持工事対応）・C1（予防保全の観点から速やかに補修する必要がある損傷）・C2（橋梁構造の安全性から速やかに補修する必要がある損傷）・E2（緊急対応）・E1（橋梁構造の安全性から緊急対応）に分けられている。

図-1 に示す損傷の評価は、前述の C1 で評価されている。これは、C2 で評価する構造的な診断は実施しておらず、鉄筋が露出している現場目視を重要視して、E2 ないし E1 に区分することも考えられる。しかし、実務者が C2 や E2 や E1 に評価した場合、更新予算を把握している管理者が更新計画を変更することになる。したがって、実際に大きく損傷している場合でも、更新予算に配慮して橋梁管理カルテに記載される損傷区分を C1 程度に限定しているのが現状である。これでは、現場写真などを更新しているだけで実務者による構造診断が全くなされていないため、安全性などに配慮したよりの確で総合的な判断ができていないと考えられる。そこで、橋梁点検に加えて、実務者が構造的に安全であることを判断するために、経年劣化などの鉄筋が露出している損傷評価の構造診断手法として、3次元 FEM の有効性を検討する。

3. 解析条件

3.1 対象橋梁の構造諸元

図-2 に、対象橋梁の側面および上部構造の断面を示す。解析対象橋梁の構造諸元は、交通量の少ない二等橋と想定し、橋梁形式は単純 T 桁で、桁長 $L=10.00\text{m}$ 、有効幅員 $B=6.00\text{m}$ 、支間（スパン）長 $\ell=9.40\text{m}$ 、主桁高 $h=0.80\text{m}$ 、桁遊間 $g=0.02\text{m}$ を設定した。

3.2 RC 断面の簡易計算式および専用ソフト

まず、RC 断面の簡易式で計算する前提条件の4項目を、以下に示す。① 弾性論を用いる。すなわち、材料（鉄筋およびコンクリート）はフックの法則に従う。② 歪みは中立軸からの距離に比例する。すなわち、ベルヌーイの平面保持の仮定が適用できる。③ コンクリートの引張応力は無視する。すなわち、引張応力はすべて鉄筋で負担する。④ 鉄筋 E_s およびコンクリート E_c の弾性係数は一定とし、弾性係数比 ($n=E_s/E_c$) は 15

$$\sigma_c = \frac{2M}{k \cdot j \cdot b \cdot d^2} \quad (1)$$

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s \cdot j \cdot d} \quad (2)$$

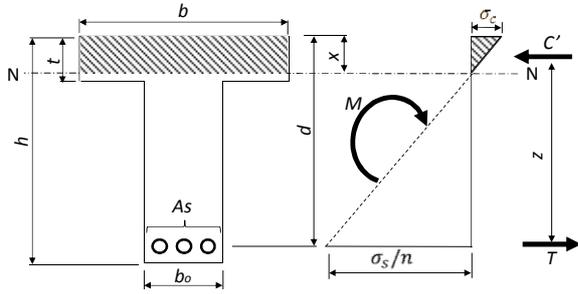


図-3 単鉄筋 T 形断面の応力分布

とする。また、T形断面（中立軸がフランジにある場合）の簡易計算式として、図-3に示す応力分布からコンクリートの曲げ圧縮応力度 σ_c と鉄筋の曲げ引張応力度 σ_s は、当時の参考図書³⁾から(1)式および(2)式により算定する。

ここで、 M は設計曲げモーメント、 h は桁高、 t は突縁（フランジ）厚、 b は突縁幅、 b_0 は腹部（ウェブ）幅、 d は有効高、 A_s は引張鉄筋の断面積、 N は中立軸、 p は引張鉄筋の鉄筋比、 k は中立軸比、 j は応力中心間の距離、 z は合力間距離、 x は圧縮縁から中立軸までの距離である。

この条件では引張側にコンクリートが実在するが、コンクリートの引張応力が非常に小さいために安全側の設計手法として合理的な条件設定と考えられる。しかし、コンクリートが健全である新設のRC断面計算には適しているが、経年変化としてコンクリートの剥落や鉄筋が露出したRC断面計算に対応しにくい。実務設計の専用ソフトは、前述する前提条件を踏襲したRC断面計算ソフト⁴⁾を使用する。

3.3 3次元有限要素のモデル化

既設橋梁の修繕対策を実施する上で、鉄筋露出や被りコンクリートが剥落した状態について、現時点での応力状態を検証する必要がある。鉄筋が露出したRC断面では、RC断面の簡易計算式や専用ソフトが適用できないため、図-4に示すような3次元FEMのモデルを構築し、損傷したRC断面に対する構造的な診断を実施する。本数値解析では、3次元FEMのソフトウェアであるMIDAS⁵⁾を適用する。昭和40年代に建設された当該の道路橋は、鉄筋コンクリート道路橋設計示方書⁶⁾に準拠して設計されている。二等橋を想定した主桁のコンクリート設計基準強度である σ_{ck} として、建設当時の σ_{ck} は 24.0N/mm^2 と想定されるが、点検現場での反発強度試験を実施しておらず、経年劣化や建設時代に用いられてい

たプレテン桁⁷⁾のRC部材である中埋コンクリート強度（ 20.0N/mm^2 以上）を考慮して、本検討の σ_{ck} は 21.0N/mm^2 とした。RC断面を有する桁橋の3次元有限要素のモデルは、コンクリートを8節点アイソパラメトリックソリッド要素（8積分点）でモデル化し、鉄筋は梁要素（1積分点）でモデルを構築した。図-5に示すように鉄筋をモデル化した。鉄筋要素の結合条件として、床版は埋め込み鉄筋とし、着目している主桁は鉄筋露出のモデル化を考慮してコンクリート要素に共有節点で接続させた。鉄筋およびコンクリートの応力とひずみの関係は、既設の対象橋梁が許容応力度法により設計されており、鉄筋露出やコンクリート剥落などの経年劣化に着目しているため、本検討の応力とひずみの関係は弾性でモデル化した。材料定数の一覧を、表-1に示す。弾性係数の設定は橋梁点検に加えて現場状況や強度試験などを考慮すべきであるが、本検討では 24.0N/mm^2 の一般値から安全側に低減した 21.0N/mm^2 の一般値を採用することとし、コンクリートを $2.35 \times 10^4\text{N/mm}^2$ とし、鉄筋は $2.01 \times 10^5\text{N/mm}^2$ とした。ポアソン比は、コンクリートで0.2、鉄筋で0.3とした。コンクリートの単位体積重量は、 2.30kN/m^3 とした。鉄筋の単位質量は、D25で 3.98kg/m 、D13で 0.995kg/m とした。支点条件として、A1橋台側を固定支承とし、A2橋台側を可動支承とした。本研究の境界条件は、支承下面を鉛直方向に固定とした。

表-1 材料定数の一覧

	コンクリート	鉄筋
弾性係数 (N/mm^2)	2.35×10^4	2.01×10^5
ポアソン比	0.2	0.3
密度 (kgf/m^3)	2350	7850

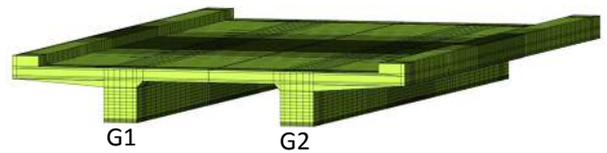


図-4 T桁橋の3次元有限要素モデル

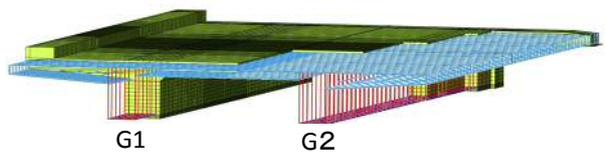


図-5 RC断面の鉄筋モデル

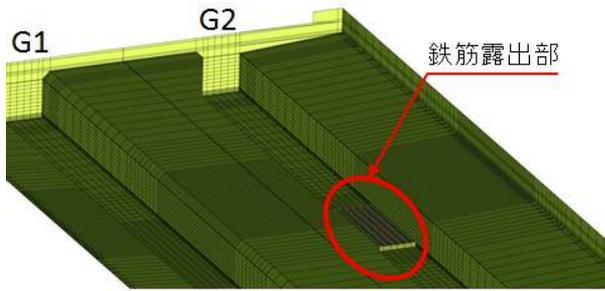


図-6 被りコンクリートが剥落した(鉄筋露出)モデル

次に、図-6に示す鉄筋露出のモデル化は、G2桁のスペン中央部に、延長 1.5mの範囲で被りコンクリートが剥落した状態と考え、鉄筋が露出したモデルを直方体として要素で分割したコンクリートのソリッド要素を控除することで疑似的に設定した。また、二等橋の主鉄筋として実績では普通丸鋼と考えられるが、本検討では建設当時の断面積を勘案して異形鉄筋(SD295A)のD25×5本を設定し、スターラップはD13ctc250とした。本検討では、鉄筋腐食は考慮しない。

3.4 荷重条件・荷重ケースおよび許容応力度

実務設計で主桁を設計する活荷重は、L 荷重により最も不利な条件を設定している。また、活荷重載荷時で主桁断面が決定されているが、建設時に区分されている一等橋と二等橋が現時点で不明確なケースが多く確認されている。本検討の活荷重は、昭和 40 年代で交通量が少ない二等橋(TL-14相当)の自動車荷重を推定し、架橋位置での交通量調査や大型車両調査等も未実施であることより、安全側の等分布 $q=200.0\text{kN/m}^2$ に換算して作用させた。活荷重の荷重パラメータを、図-7に示す。Case-1は車道の有効幅とし、Case-2は損傷している主桁の片側車線とし、Case-3は自動車の軸重幅である 1.75m相当を考慮したレーン荷重を設定した。次に、鉄筋の許容曲げ引張応力度 σ_{sa} は 180.0N/mm^2 とした。

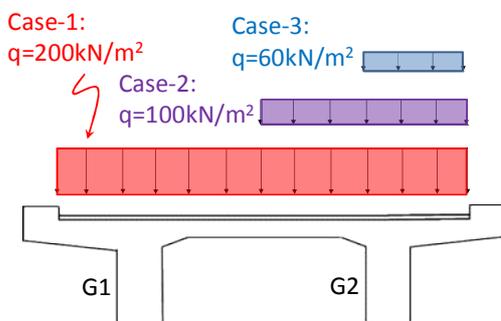


図-7 活荷重の荷重パラメータ

4. 解析結果および考察

G2桁のウェブ下面のみ鉄筋が露出しているRC断面を対象に、3次元FEMの有効性を解析的に検証した。まず、

RC断面の計算手法として、簡易計算式と3次元FEMの応力状態について、引張側軸方向主鉄筋の曲げ応力度を検証した。次に、3次元FEMを用いて鉄筋露出をモデル化し、活荷重の荷重方法による引張側軸方向主鉄筋の曲げ応力度に及ぼす影響に関して検証した。さらに、被りコンクリートが剥落したモデルによる引張側軸方向主鉄筋の曲げ応力度に及ぼす影響に関して検証した。なお、本解析結果は、RC断面を有する桁橋に限定し、照査位置はスペン中央部における引張側軸方向主鉄筋の曲げ応力度に着目した。

4.1 RC断面の計算手法による主鉄筋への影響

まず、RC断面の計算手法として、以下に示すような3手法が考えられる。

- ① 簡易計算式を用いる方法(簡易式と呼称)
- ② 実務設計の専用ソフト(専用ソフトと呼称)
- ③ 3次元有限要素モデル(3次元FEMと呼称)

計算手法に関する本検討では、鉄筋が露出していない健全なモデルとして、二等橋相当の活荷重を作用させて発生する曲げモーメントに対して、スペン中央部における曲げ応力度について上述の計算手法を実施した結果を、図-8に示す。簡易計算式の曲げ応力度は 164.5N/mm^2 となり、専用ソフトの曲げ応力度は、 164.2N/mm^2 となった。これは、引張側のコンクリートは無視しているため、大きな差異は確認できなかった。これに対して、3次元FEMでモデル化した解析結果は 152.7N/mm^2 となり、簡易計算式や専用ソフトによる曲げ応力度に比べて7.2%程度低減された。この差異は、弾性係数比の相違や引張側のコンクリートを考慮している影響と考えられる。加えて、本解析では、設定した自動車荷重の活荷重に対して曲げモーメントが最大となるスペン中央部に限定しているが、簡易計算式と専用ソフトにおける許容曲げ応力度に対する余裕は約9%に対して、3次元FEMにおける許容曲げ応力度に対する余裕は約15%と大きく改善されている。これより、維持管理を計画する構造診断では、境界条件や損傷のモデル化に留意する必要があるが、3次元FEMの計算手法は有効であると考えられる。

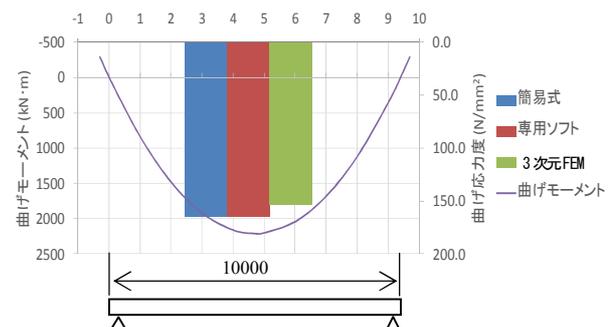


図-8 RC断面の計算手法の比較

さらに、コンクリート要素の全断面有効による曲げ応力度の余裕は、活荷重の大型化や経年劣化などの不測の事態に対するある程度の保険として考えられ、架橋現場におけるより詳細な調査や物理試験による条件設定が求められる。

4.2 活荷重の載荷方法による露出した主鉄筋への影響

G2 桁のスパン中央部における鉄筋が露出した RC 断面の曲げ応力度に着目して、活荷重の載荷方法をパラメータとした解析を実施した。Case-1 の変形を、図-9 に示す。なお、鉛直方向の変形は 5 倍で表示した。二等橋の TL-14 相当となる自動車荷重を車道の有効幅に載荷した場合は、G2 桁のスパン中央における鉄筋露出による撓みは 18.55mm となった。次に、橋軸直角方向に活荷重の載荷幅を半分にした Case-2 の変形を、図-10 に示す。この図より、G2 桁のスパン中央部における鉄筋露出による撓みは 20.71mm となった。これは、鉄筋が露出している G2 桁側に活荷重を載荷しているため、Case-1 の撓みに比べて改善されなかった。これらに対して、小規模な二等橋である重要度と現場の交通状況を勘案すると、花火大会などによる渋滞も発生しないことから、自動車の軸重幅である 1.75m 相当をレーン載荷した Case-3 の変形を、図-11 に示す。この図より、G2 桁のスパン中央部における鉄筋露出による撓みは 3.42mm となった。この結果から、Case-1 と Case-2 の結果に比べて、撓みは大きく改善されていることが確認できた。これらより、重要度が低く交通量が少ない地方の市町村が管理する小規模な橋梁に限定して、より現実的な活荷重の載荷方法を設定することは、構造診断を実施する有効な手法であると考えられる。

次に、G2 桁のスパン中央部に鉄筋が露出した RC 断面の曲げ応力度について言及する。表-2 に、各ケースの G2 桁のスパン中央部における曲げ応力度を示す。まず、Case-1 では 219.0N/mm^2 となり、許容曲げ応力度を 21.7% 超過した。また、Case-2 では 217.3N/mm^2 となり、許容曲げ応力度を 20.7% 超過した。これは、被りコンクリートが剥落して鉄筋が露出したことが影響していると考えられる。これらに対して、交通量が少ない現地状況から、活荷重の載荷幅を自動車幅に限定した Case-3 では 37.0N/mm^2 となり、許容曲げ応力度を満足する結果になった。このように、鉄筋が露出した損傷状況でも、現状の交通状況を勘案した構造診断を実施することで、緊急性の対策区分を決定する判断材料に反映できることが確認できた。しかし、本検討における活荷重の載荷方法は一つの提案モデルである。ただし、道路管理者は、緊急対策不要とする構造的な評価根拠として、あらゆる可能性を模索する必要がある。

表-2 G2 桁のスパン中央部における曲げ応力度

	曲げ応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)
Case-1	219.0	180.0
Case-2	217.3	
Case-3	37.0	

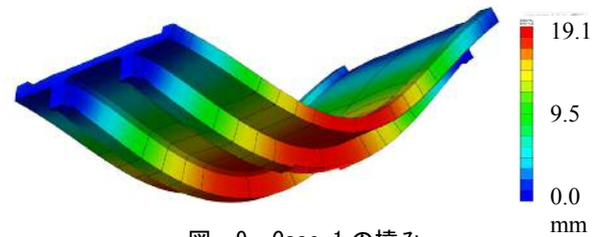


図-9 Case-1 の撓み

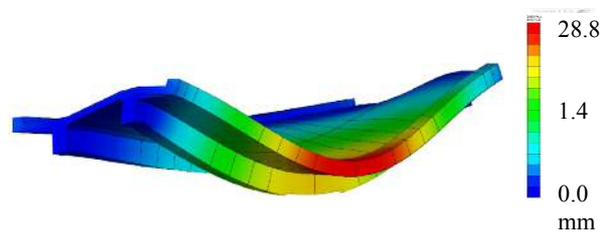


図-10 Case-2 の撓み

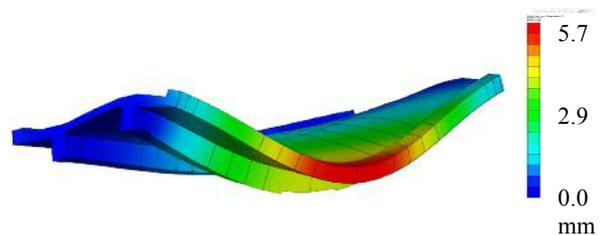


図-11 Case-3 の撓み

4.3 鉄筋が露出したモデルによる主鉄筋曲げ応力分布

G2 桁のスパン中央部に、延長 1.5m の範囲に鉄筋が露出した RC 断面を直方体に疑似したモデルである 3 次元 FEM に対して、前節で述べた活荷重の Case-3 について主鉄筋の曲げ応力分布を言及する。Case-3 における鉄筋の変形を、図-12 に示す。また、鉄筋が露出しているモデルとして、被りコンクリートが剥落している部分における主鉄筋の曲げ応力度を、図-13 に示す。図-13 より、被りコンクリートの剥落部分が直方体であるため、スパン中央部で曲げ応力度は最大となるが、鉄筋が露出している境界部（端部）で約 65.6% の曲げ応力度が急激に増加していることがわかる。これは、3 次元 FEM ではコンクリートが全断面有効であるが、コンクリート要素が欠損すると鉄筋の曲げ応力度に大きな負担になっていると考えられる。3 次元 FEM において鉄筋露出のモデル化は可能であるが境界部の応力分布に留意する必要がある、今後検討する予定である。

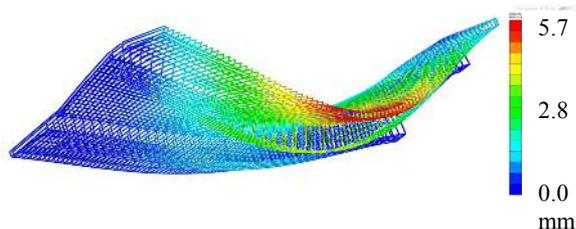


図-12 Case-3における鉄筋の変形

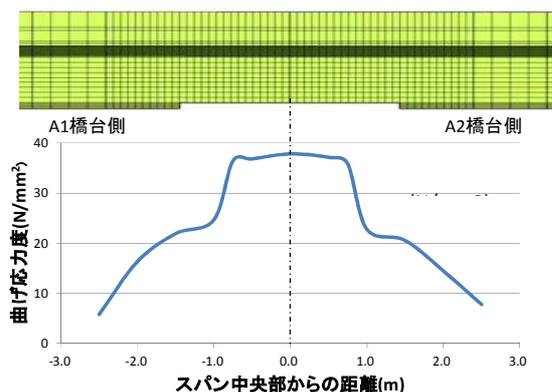


図-13 鉄筋露出部における主鉄筋の曲げ応力度

5. 結論

本研究では、老朽化により鉄筋が露出した小規模な鉄筋コンクリート断面を有する単純桁橋を対象に、新設の実務設計で使用する専用ソフトと3次元有限要素解析の構造計算結果を比較検討し、引張側軸方向主鉄筋の曲げ応力度を検証した。また、3次元有限要素解析の有効性を検証する目的で、鉄筋が露出したG2桁の鉄筋コンクリート断面を3次元有限要素でモデル化し、活荷重の載荷方法をパラメータとし、鉄筋露出部の曲げ応力分布を検証した。本研究で得られた知見を、以下に示す。

- (1) 鉄筋コンクリート断面の応力照査として、簡易計算式と実務設計で用いられる専用ソフトを比較検討した結果、専用ソフトの曲げ応力度は引張側のコンクリートを無視している簡易計算式と同程度の曲げ応力度が確認できた。
- (2) 本検討では曲げモーメントが最大となるスパン中央部に対する照査に限定し、簡易計算式と専用ソフトにおける許容曲げ応力度に対する余裕は約9%に対して、3次元有限要素(3次元FEM)における許容曲げ応力度に対する余裕は約15%と大きく改善された。これより、活荷重載荷に限定して、実務者が構造的に安全であることを判断するために、経年劣化などの鉄筋が露出している損傷評価の構造診断手法として3次元有限要素解析の有効性が確認できた。
- (3) 活荷重の載荷方法による露出した主鉄筋への影響について、レーン載荷(Case-3)の撓みは3.42mmとなった。この結果は、車道の有効幅載荷(Case-1)と片側車線載荷(Case-2)に比べて、大きく改善されていることが確認できた。これらより、重要度が低く交通量が少ない市町村が管理する小規模な橋梁に限定して、より現実的な活荷重の載荷方法を設定することは、構造診断を実施する有効な条件設定であると考えられる。
- (4) G2桁のスパン中央部に鉄筋が露出したRC断面の曲げ応力度は、活荷重の載荷幅を自動車幅に限定したCase-3で 37.0N/mm^2 となり、許容曲げ応力度を満足する結果となった。鉄筋が露出した損傷状況でも、現状の交通状況を勘案した構造診断を実施することで、緊急性の判断材料に反映できることが確認できた。
- (5) 鉄筋が露出したモデルによる主鉄筋応力分布について、レーン載荷(Case-3)の結果、スパン中央部で曲げ応力度は最大となるが、鉄筋露出の境界部(端部)で約65.6%の曲げ応力度が急激に増加していることが確認できた。3次元FEMでは、鉄筋露出のモデル化は可能であるが、境界部の応力分布に留意する必要がある、今後検討する予定である。

本研究では鉄筋露出を考慮した鉄筋コンクリート断面を有する主桁の曲げ応力度に着目したが、今後は主桁のせん断応力度や材料の非線形性を考慮した床版のひび割れに関しても検討する予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路法施行規則の一部を改正する省令，2014.7
- 2) 有賀義明，石川嵩，猪子敬之介，大嶽公康，成田健太郎，竹原和夫：新・旧ポンプ場間の地震時相対変位に関する三次元動的解析，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol. 69，No. 4，pp. 491-500，2013.2
- 3) 清野茂次，神山立男：T桁橋の設計，オーム社，1965.12
- 4) フォーラムエイト：RC断面計算 操作ガイダンス，ver. 8，2016.9
- 5) MIDAS IT：Analysis Manual of midas FEA，ver360R1，2014.6
- 6) 日本道路協会：鉄筋コンクリート道路橋設計示方書，1964.6
- 7) 日本道路協会：プレストレストコンクリート道路橋示方書，1968.3