

異常や劣化の定量的評価に向けた 橋梁変位モニタリング

渡邊 学歩¹

¹山口大学大学院 創成科学研究科 准教授.

地方自治体管理の中小規模橋梁の維持管理では、限られた予算下での効率的運用が課題であり、客観的・定量的な指標整備が不可欠である。解決策として、リアルタイムかつ定量的に健全性を評価できる点検支援技術が推奨される。本研究は小規模橋梁を対象に車両走行試験によるたわみモニタリングを実施し、車両通過時の加速度とたわみを用いて規格化たわみや剛性率といった指標の部材健全度評価への適用性を検討した。その結果、各指標が健全度と同様の傾向を示し有効性が示唆された。実測データ蓄積の第一歩として、将来の維持管理高度化に資する基盤を提供する。

キーワード：橋梁モニタリング、加速度センサー、たわみ、剛性率

1. はじめに

高度経済成長期に大量に建設された橋梁の多くが供用開始から 50 年を超え、老朽化が深刻化している。全国約 70 万橋以上の橋梁の 9 割以上は地方自治体管理の中小規模橋梁であり、維持管理費用は自治体の大きな財政的負担となっている。限られた予算の中で効果的に維持管理を行うには、補修・更新の優先順位を合理的に決定するための、客観的かつ定量的なデータの整備が重要である。

以上の背景から、近年では点検作業の効率化と判断の客観性向上を目的に、センサーモニタリング技術の導入が進められている。本技術は、橋梁の健全性をリアルタイムかつ定量的に評価し、近接目視点検における主観的判断を補完する有効手段として注目されている。一方で、センサーデータは橋梁の構造特性や測定条件といった要因に大きく影響され、計測値が橋梁ごとに大きく異なることから、単純な比較による健全性評価は困難である。この計測値の違いをいかに正規化し、劣化による性能低下を抽出するかが、モニタリング技術の実用化における重要な課題となっている。

センサーモニタリングに関する研究は多数報告されており、木下¹⁾らは、橋梁のたわみモニタリングの精度検証を通じて、広域適用性を示している。しかし、モニタリングデータから構造性能の変化を客観的に評価するための解釈手法に関する議論は限定的である。

そこで本研究では、地方自治体が管理する小規模橋梁を対象に、車両走行試験による振動モニタリングを実施し、センサーデータに見られる計測値の特性と、構造性能評

価への適用法について検討を行った。得られた知見を基に、将来的な維持管理への実装に資する定量的指標の蓄積と、統計的裏付けに基づく信頼性評価手法の構築を目指す。

2. 対象橋梁群および車両走行試験概要

(1) 対象とした橋梁群

本研究では、地方自治体が管理する小規模橋梁を対象として、山口県の A 市および B 市において橋梁を選定し、車両走行試験(詳細は 2.2 節で記述)を実施した。両市が管理する橋梁数は、A 市では 816 橋、B 市では 431 橋にのぼり、それぞれ約 8 割が支間長 15m 以下の小規模橋梁で構成されている。A 市では、山間部の遠隔地域(須金地区)にかかる交通量の少ない橋梁群(図-1 参照)を計測対象とした。これらの橋梁は代替路が確保されていない場合も多く、廃橋化により地域住民の生活に深刻な影響を及ぼすおそれがある。このため、橋梁の安全性を確保するために高い精度の点検が恒常的に求められる一方、地方自治体の管理する小規模橋梁は数が多く、維持管理コストの効率化が課題となっている。一方、B 市では比較的交通量のある橋梁群(図-2 参照)を対象に計測を行っており、異なる交通環境・地域条件下にある。図-3 に示す支間長と幅員の関係にあるとおり、A 市では橋梁の幅員が平均約 5m、最大でも 10m 程度と狭小であるのに対して、B 市では幅員 10m 以上の橋梁が多い。このように、地域的・構造的条件の異なる両市の橋梁を比較対象とすることで、様々な条件下におけるモニタリングデータの特性を多角的に分析することが可能であると



図-1 山口県A市の計測橋梁



図-2 山口県B市の計測橋梁

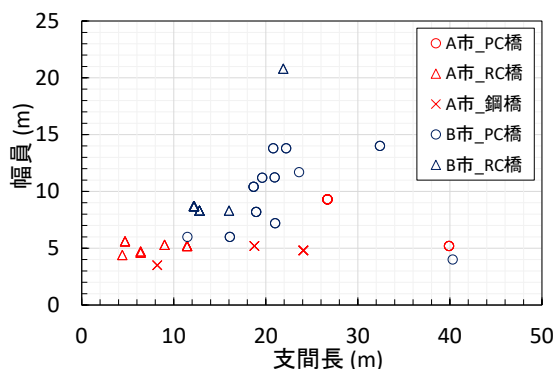


図-3 対象橋梁の支間長と幅員の相関

考えた。

(2) 車両走行試験によるたわみモニタリング概要

本試験では、図-4 に示すように総重量約 4t の小型クレーン付き車両を用いて、橋桁中央を時速約 20km で低速走行させた際の加速度およびたわみを計測した。各橋梁において、図-5 に示すように支間中央部の両端（左右）の地覆上にセンサーを設置し、各径間につき 3 回計測を行っている。ただし、交通量や橋梁の初期微動等の影響により、一部の計測で図-6 に示すような明確なたわみ応答が得られず、分析に供するのに十分なデータが取得できない場合があった。その結果、最終的な分析対象とした有効な計測データ数は、A 市において 10 橋（49



図-4 車両走行試験の様子（A 市：長谷橋）

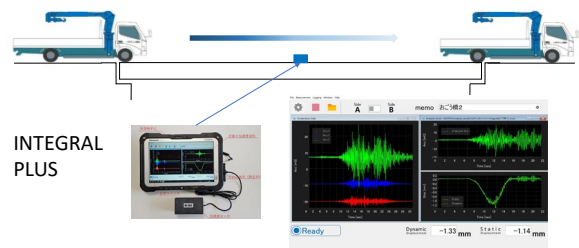


図-5 たわみモニタリング概略図

データ），B 市において 14 橋（41 データ）の合計 24 橋（90 データ）となった。

なお、本試験では、国土交通省の点検支援技術性能カタログ案²⁾に掲載されている「INTEGRAL PLUS³⁾」（図-5 参照）を使用した。このシステムは、計測された加速度を二階積分することで自動的にたわみを算出し、その過程で生じる積分誤差を自動的に補正するアルゴリズムを備えている。計測後には加速度およびたわみの時系列データ（図-6 参照）をタブレット上で即時確認でき、効率的な現場データ取得を可能にした。

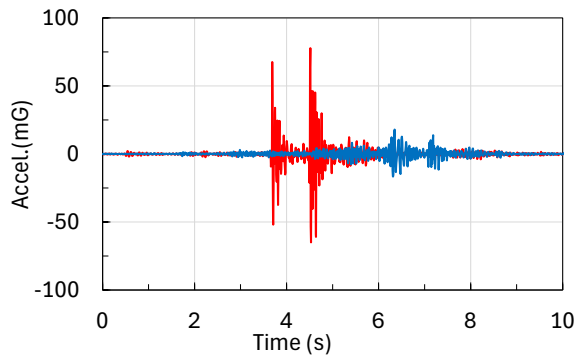
3. たわみ結果の整理と規格化

(1) たわみ計測結果の詳細分析

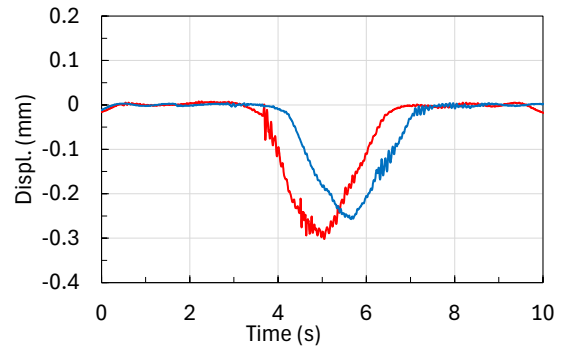
車両走行に伴い発生した加速度から算出されたたわみについて整理を行った。図-7 には、橋桁の支間長と算出されたたわみとの関係を、橋種および上部構造の部材健全度別に示している。RC 橋においては、支間長に比例してたわみが増加する傾向が見られたが、その値は最大でも約 0.2mm にとどまった。一方、鋼橋は幅員が狭くスレンダーな構造のため剛性が低く、大きなたわみが計測された。特に、図-8 に示す小郷橋（A 市）では、1mm を超えるたわみが確認された。PC 橋は、RC 橋や鋼橋と比較して高い剛性を有することからたわみは小さいと予想されたが、同程度の支間長を有する RC 橋と比較しても、大きなたわみを示す橋梁が一部に見られた。

(2) 規格化（無次元化）に基づくたわみ評価

たわみの大きさは、橋梁の構造形式や支間長、断面剛性などの構造的条件下に強く依存するため、単純な実測値の比較のみでは剛性や構造的特徴を適切に評価すること



(a) 加速度応答



(b) たわみ応答

図-6 車両走行時の橋桁応答の例

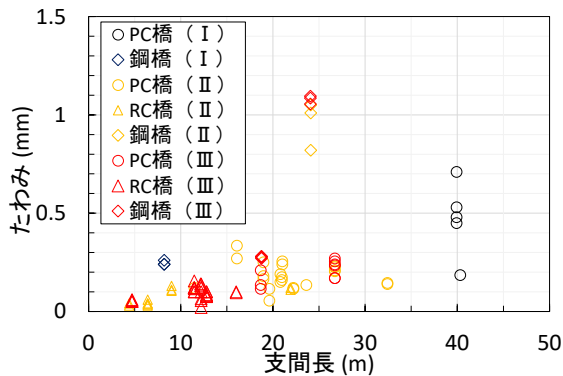


図-7 支間長別のたわみ（橋種，健全度別）



図-8 小郷橋（鋼橋，A市）

が困難である．そこで，各橋梁の構造特性を考慮した相対的評価を目的とし，単純支持梁における中央たわみの理論式（式(1)参照）に基づき，実測たわみを理論たわみで無次元化する規格化を行った．ただし，恵比須橋においては連続桁橋であるため構造特性が単純桁橋と大きく異なることから，本論文における規格化および 4.3 節で後述する規格化剛性の比較検討からは除外した．なお，恵比須橋の実測たわみデータ自体は図-7 等で利用している．これにより，異なる構造形式・支間長を有する橋梁間においても，構造性能の相対比較が可能となり，剛性の差異を明確に評価することを試みた．

$$\delta = PL^3/48EI \quad (1)$$

$$\delta' = \delta_m/(PL^3/48EI) = 48EI \cdot \delta_m/PL^3 \quad (2)$$

ここで， δ ：たわみ（m）， P ：車両重量（N）， L ：支間長（m）， EI ：曲げ剛性（Nm²）， δ' ：規格化たわみ（m）， δ_m ：実測たわみ（m）である．

式(2)に示す規格化たわみ δ' は，車両走行試験により得られた実測たわみ δ_m を理論たわみ δ で無次元化したものであり，構造形式や寸法の異なる橋梁間でもたわみ特性の相対比較を可能にする．特に，規格化たわみ δ' の値が1を超える場合，実測たわみが理論たわみを上回っていることを意味し，部材の劣化が示唆される．したがって，規格化たわみが1を超えた橋梁については，部材健全性に関する追加の調査や詳細な評価が必要であると判断される．

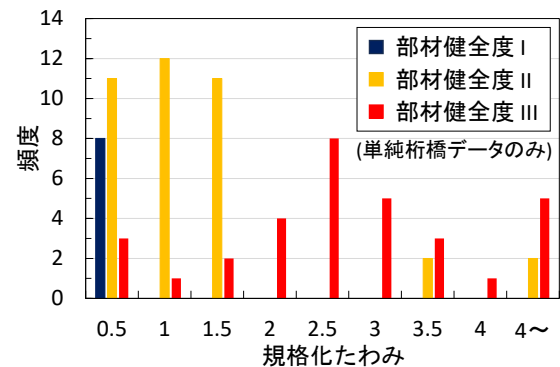
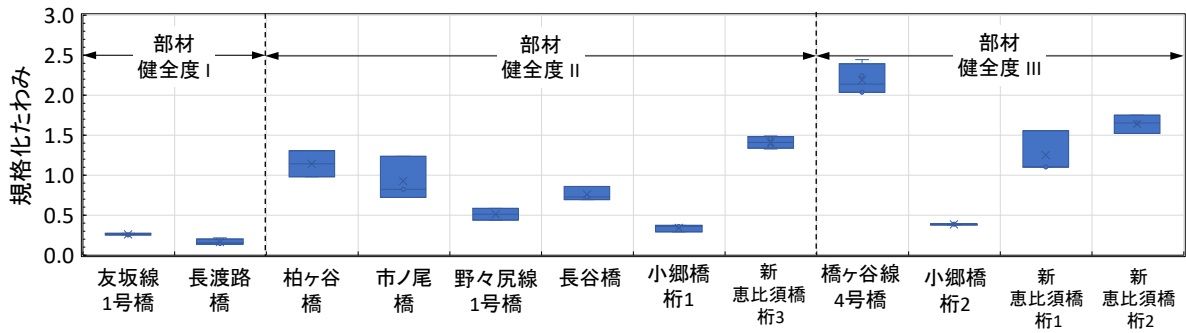


図-9 健全度別の規格化したたわみ

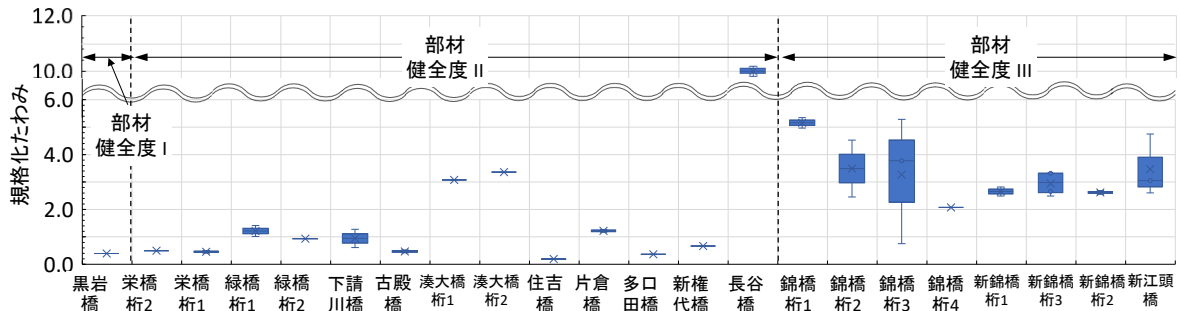
(3) 規格化たわみ結果の評価

図-9 に規格化たわみの評価結果を部材健全度別に示す．部材健全度Ⅰの橋梁は規格化たわみが0.5以下に収まる一方，部材健全度Ⅱの橋梁は一部を除き1.5以下の範囲に分布している．対して，部材健全度Ⅲの橋梁は規格化たわみが2.5以上の大きな値を示す領域に集中している．この結果から，規格化たわみが大きくなるほど部材健全度が低下する傾向が明確に示され，点検結果との整合性が確認された．

図-10 は，規格化たわみの評価結果を橋梁別，部材健全度別に整理し，A市，B市のそれぞれについて示す．



(a) A市橋梁



(b) B市橋梁

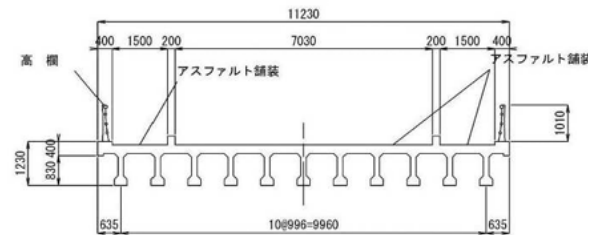
図-10 単純桁橋における橋梁別の規格化たわみ



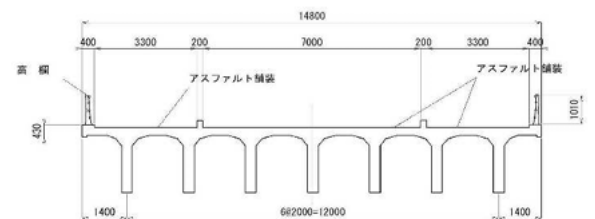
図-11 新恵比須橋 (PC 橋, A市)

A市の結果を見ると、部材健全度Ⅰ判定の橋梁は規格化たわみの値が0.5以下に収まっており、部材健全度と整合する結果が得られた。部材健全度Ⅱ判定の橋梁では、新恵比須橋(図-11 参照)の桁3で1を超える値が確認され、目視点検に基づく部材健全度判定よりも劣化がより進行している可能性が示唆される。一方、部材健全度Ⅲ判定を示す橋梁では、小郷橋の桁2で1を下回る値が確認された。一般的に、鋼橋は鋼材の使用効率が高く部材剛性が高い。しかし、小郷橋はスレンダーかつ断面寸法が小さいことから実測たわみは計測橋梁中最も大きい値を示し、規格化たわみは1を下回る結果となった。これは当該橋梁のようなスレンダーな部材の挙動を単純な梁理論で評価する際の限界、あるいは断面寸法の小ささに起因する理論計算時のパラメータ誤差感度の高さが、理論たわみを過大に評価したためと推察される。

B市の結果では、部材健全度Ⅲ判定の橋梁で規格化たわみが概ね1を超える値を示し、判定結果の妥当性が確認されたが、最大値が5を超えA市の2倍以上であること



(a) 湊大橋



(b) 長谷橋

図-12 B市の各橋梁断面図

から、データの扱いには慎重を要する。一方、図-12に示す部材健全度Ⅱ判定の湊大橋や長谷橋でも規格化たわみが非常に大きな値を示した。これらの橋梁はプレテンション方式のPCT桁である可能性が高く、特に長谷橋では一般図から断面の形状を正確に把握しづらく、理論たわみ算出における断面二次モーメントに不確かさが含まれる可能性がある。特にPCT桁のような複雑な断面では、断面二次モーメント (I) の計算がフランジ厚やウェブ高といった寸法に大きく依存する。仮に図面の不鮮明さからこれらの寸法を誤って読み取った場合、その影響はI値の計算過程で増幅され、結果として理論たわみの計算値が実測値と大きく乖離する要因となり得る。このように、構造特性の精度は、規格化たわみ評価において極

めて重要であり、正確な断面図に基づく構造判別と断面性能算出を行うことで、より信頼性の高い部材の健全性評価が可能となる。

4. 曲げ剛性の推定と各手法による比較評価

(1) たわみと振動数を用いた曲げ剛性の推定手法

車両走行試験によって得られたたわみおよび加速度から算出した固有振動数を用いて、橋桁の曲げ剛性を推定して、剛性低下の有無について評価を行う。

橋桁に生じるたわみを δ_m 、車両重量を P 、支間長を l とした場合、単純支持梁に対する中央たわみに基づく曲げ剛性 EI は、式(3)により推定される。

$$EI = Pl^3 / 48\delta_m \quad (3)$$

一方、橋桁の固有振動数を示す卓越角円振動数 ω [rad/s]と、単位長さ当たりの部材質量 ρA [kg/m]とすると、式(4)により曲げ剛性が推定されることから、両手法を用いて曲げ剛性を算出した。

$$EI = \frac{\omega^2 \rho A l^4}{\alpha} \quad (4)$$

ここで、 α は梁の支持条件と振動モードに依存する係数である。本研究では、1次モードを対象とし、理論値に基づき係数を1とした。

以上の2手法により得られた曲げ剛性を比較して、橋梁の状態に応じた剛性評価の妥当性を検証する。

(2) たわみ・固有振動数より算出した曲げ剛性評価

図-13 には、たわみ・固有振動数から算出した曲げ剛性の平均値と支間長の関係を示す。いずれの橋種においても、支間長が大きくなるほど曲げ剛性が増加する傾向が見られた。また PC 橋および RC 橋においては、同程度の支間長であっても橋梁ごとに平均曲げ剛性に大きな差が確認された。この差異は、PC 橋における設計の自由度（プレストレス導入量や断面形状）や、RC 橋における経年劣化や補修歴、鉄筋量の違いなどに起因する可能性がある。

図-14 には、両手法により算出された曲げ剛性の相関について示す。両手法による評価値は概ね一致する傾向が見られたが、橋梁によっては差異が生じるケースも確認された。例えば、RC 橋である新錦橋では、両手法で異なる傾向が見られ、錦橋（RC 橋）、新江頭橋、湊大橋（ともに PC 橋）では、たわみから算出した曲げ剛性の方が高く評価された。この差異は各手法の特性に起因し、振動数を用いた評価では構造全体の拘束条件の影響で剛性が過大に、たわみによる評価では、車両走行位置の偏心によりセンサーで得られる最大たわみが増加し、結果として剛性が過大に評価される可能性がある。このように、各手法の特性と限界を理解することが重要である。

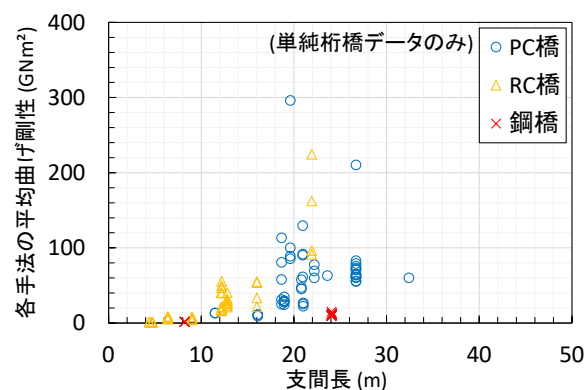


図-13 各手法から算出した平均曲げ剛性

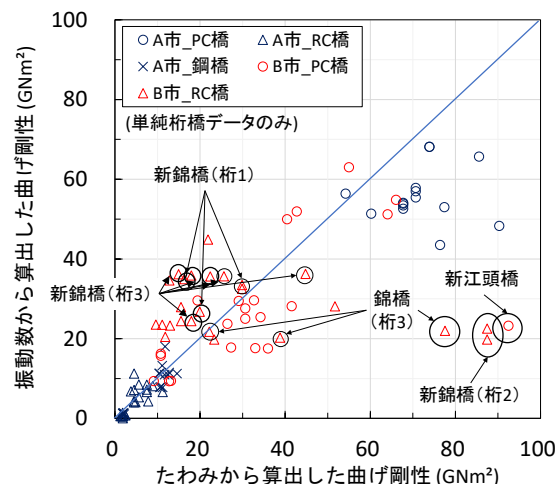


図-14 たわみ・振動数から算出した曲げ剛性

(3) 曲げ剛性の規格化による評価

たわみから算出した曲げ剛性が、健全な状態と仮定した理論上の剛性との一致度を評価するため、両者の比を「剛性率」と定義し、健全性評価の指標として用いた。剛性率は以下の式(5)により定義した。

$$R_{EI} = \frac{EI_m}{EI_t} \times 100(\%) \quad (5)$$

ここで、 R_{EI} は剛性率、 EI_m は式(3)により算出された実測たわみに基づく曲げ剛性、 EI_t は一般図より算出した理論曲げ剛性を示す。

図-15 には、たわみから算出した橋桁の曲げ剛性を、一般図に基づき求めた理論曲げ剛性で規格化した剛性率を示す。部材健全度と剛性率の間には一部矛盾する例もあるが、地域や構造特性によらず、部材健全度Ⅰでは100%以上、部材健全度Ⅱでは100%前後、部材健全度Ⅲでは100%未満となる傾向が確認された。PCT 桁を有する新恵比須橋(図-11、図-15(a)参照)の桁3では、健全度Ⅱでありながら健全度Ⅲに分類される桁1、2と同様の値を示しており、外観から判別が困難な内部劣化が疑われる。同様に PCT 桁を有する湊大橋や長谷橋も50%前後の低い剛性率を示しており、再試験や詳細な点検による更なる検討が必要と考えられる。

以上の結果から、一部例外はあるものの、剛性率と点

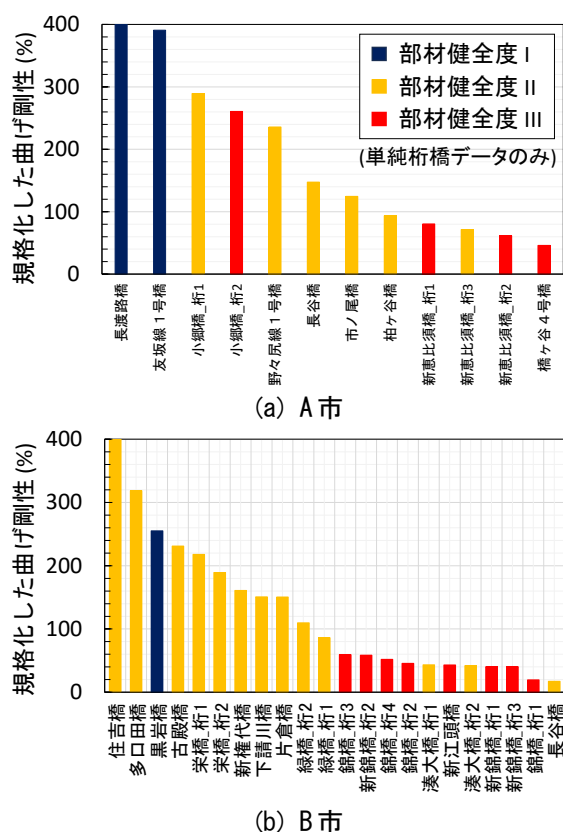


図-15 コンクリート総断面を仮定した曲げ剛性
規格化したたわみの曲げ剛性（剛性率）

なお、本研究で用いた部材健全度は、主桁や床版等から上部構造を評価した指標であり、損傷の種類や位置によって橋桁中央のたわみへの影響は異なる可能性がある。しかし、本研究ではこの包括的な「健全度」と算出した劣化率とのマクロな相関傾向の確認を目的としており、図 1-15 に示したのはその全体的な傾向である。今後、個々の橋梁の詳細な健全度評価には、損傷の種類や位置を力学的に分析することが重要である。

本研究では、地方自治体が管理する小規模橋梁を対象として、車両走行試験に基づくたわみ計測を通じて、健全度の定量的評価手法の検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- 規格化たわみ δ_m の導入により、橋梁間の比較が容易となり、部材健全度Ⅲの橋梁においては δ_m が1を超える傾向が確認され、部材健全度評価に資する定量的指標としてその有効性が示唆された。
- たわみから算出した曲げ剛性を理論値で規格化した剛性率についても、部材健全度ⅠおよびⅡの橋梁で剛性率が概ね100%以上、部材健全度Ⅲの橋梁では100%未満を示す傾向が認められ、部材健全度を評価する指標としてその有効性が示唆された。
- 一方、湊大橋および長谷橋といったPC橋（PCT桁）において、規格化たわみが点検結果と大きく異なる結果を示した。これは点検調書の図面の解像度が低く、断面形状の把握が困難であり曲げ剛性が正しく評価できず、規格化たわみの評価に影響を及ぼした可能性が高いと考えられる。
- 本研究の知見は、地方自治体管理の小規模橋梁維持管理における実用的指標確立の貴重な資源であり、今後のデータ活用への道筋を示す。

謝辭

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「スマートインフラマネジメントシステムの構築」（管理人：土木研究所）によって実施されました。本研究で行った車両走行試験においては、ご協力頂きました各自治体の技術主管課の方々には、各種のインフラ維持管理データならびにフィールド提供のご協力を賜りました。また、トキワコンサルタント株式会社の中野浩策様には、車両走行試験時に現場にて多大なご協力を賜りました。この方々の快いご協力により車両走行試験を実施することができました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木下 幸治, 菅沼 久忠：加速度応答を用いた橋梁たわみモニタリング技術の検証と広域計測の試み, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.2, No.1 pp.233-238, 2023.
- 2) 国土交通省；点検支援技術性能カタログ；
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/>
- 3) 橋梁たわみ計測サービス INTEGRAL PLUS®：
<https://ttes.co.jp/service/integral/> (2025 年 3 月時点)