



# プレストレストコンクリート橋の維持管理を合理化するための点検・診断手法に関する研究

玉置, 一清

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2021-09-25

(Date of Publication)

2022-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8167号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008167>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



## 論文内容の要旨

氏 名 玉置 一清

専 攻 市民工学

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

プレストレストコンクリート橋の維持管理を合理化

するための点検・診断手法に関する研究

指導教員 森川 英典

2012年12月の笹子トンネルの落盤事故で尊い9名の人命が失われた翌年、日本のインフラが危機に瀕していることを目の当たりにした国交省はメンテナンス元年を宣言した。以降、インフラの維持管理を目的とした研究開発がIT企業を中心に数多く行われてきたが、いまだどれも実用化の目途が見えてこない。その原因として、国内の維持管理制度の保守的な体質が新技術の導入を妨げているという言い訳をよく耳にするが、インフラを管理する担当者は、老朽化がすすんだインフラの安全に不安を感じており、現行の維持管理制度に大きな変革を確実に求めている。実用化が進まない一番の問題点は、新技術の開発者は、高性能、高品質、高精度を求めることに主眼を置くがために自治体が持つ予算にコスト感が合わないことに加え、最も致命的な問題は、それでも導入しようとした時、結局、過酷な現場環境下では精密機器やシステムは故障を頻発し、その機器の維持管理にさらに大きな費用と労力を要するという本末転倒なことを繰り返したことにあると考える。

本研究は、第一に、現場で使える技術であることを主眼におき、開発および現場検証をすすめてきた。結果として、精密機械を現場に常設するのはリスクが高く、時期尚早と考え、情報は減るが、年1回程度の頻度で定期的に点検情報を得るという方針を基本とした。

また、これまでの点検・診断は経験豊富なベテラン技術者の高いスキルに頼り、なんとか保たれてきたが、少子高齢化によりその継承は怪しくなってきた。そのため、適切な点検・診断が難しくなり、曖昧な評価で問題先送りとするケースが多くなってきたと考える。本研究では、プレストレストコンクリート橋の点検・診断において、現場に持ち込み可能なICT機器または長期信頼性の高いセンサの常設により定量的かつ連続性のある点検データを取得し、それを設計値や構造解析と比較することで、経験によらない工学的な診断でエビデンスを確保することを検討した。現状の現場点検技術だけでは十分な確証が得られないプレストレストコンクリート橋のPC鋼材の腐食や残存プレストレスト量については、ばらつきを考慮した信頼性解析による評価を検討・提案した。各章の概要と得られた知見を以下に述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景として、国内の橋梁インフラの92%を管理する地方自治体は、これから迎える橋梁インフラの急速な高齢化に対して、予算不足や人員不足といった維持管理の制度、体制が抱える社会的課題から、維持管理コスト、労力を抑制するための省力化を強く求められている一方、近接目視を原則とする現行の点検手法では、点検後の診断に主観的要素が入り曖昧であること、車両走行による動的挙動や年間を通じての気温変化による影響が把握困難などの多くの技術的課題が残されていることを述べた。特に、プレストレストコンクリート橋の維持管理では、PC鋼材の腐食に伴うプレストレストの低下やASRの判定など、十分な点検・診断ができていない致命的な状況にあることを指摘した。このような背景・課題を踏まえた上で、本研究の目的を示した。第2章以降において、この省力化という社会的課題と、さらに労力を要する高度化という技術的課題の相反する命題

を解決する合理的な手法の提案を行った。

第2章「遠望目視点検を有効に機能させるためのICTツールの開発」では、定期点検等の結果、健全性の判定区分ⅠおよびⅡとなった、まだ十分に健全性が確保されている橋梁では、比較的成本のかからない遠望目視点検を基本とし、これを有効化する手法を提案した。遠望目視点検とは基本的に簡易点検であるため、その点検の品質、精度は点検技術者の技量に大きく依存する。そのため、高度な技術力が継承されていかないと成立しないと考えられ、2014年以降の定期点検の完全義務化の際に法定点検とは認められていない。そこで、点検の品質、精度が点検技術者の技量に依存するという課題をICTにより補うことで、比較的成本のかからない遠望目視点検を有効に機能させる。本研究では、データベースからダウンロードするだけで過去の点検データを容易に参照できる点検支援タブレットの開発、足場や高所作業車を使用しない遠方目視点検の死角を軽減するボール型ロボットカメラの開発、および遠方から撮影した全景写真から微小変状を検知するモアレ法による画像解析技術の基礎実験を行った。これらのICTツールから得られた点検情報は共通のデータベースに集約され、過去の点検データとの連続性を定量的に把握することで健全性の低下度を「見える化」する。これらのICTツールの大部分は、すでに実用化しており、点検業務の省力化を達成しながら、遠望目視点検（簡易点検）の品質、精度向上に貢献している。

第3章「FBG光ファイバひずみセンサによるモニタリング点検システム」では、健全性の判定区分がⅡかⅢか判定が難しい段階の橋梁、ならびに建設年度が1990年以前のプレストレストコンクリート橋のように、グラウト不良等の劣化要素が潜在化している可能性が高いが近接目視点検ではその検出が困難である橋梁に対して、高度な橋梁技術者が選定した重要点検箇所長期信頼性の高いFBG光ファイバひずみセンサを設置し、これまで目視点検では困難であった、曲げひずみ等の微小な変化や車両走行時の動的挙動に基づく点検診断を可能にする構造物モニタリングシステムおよび、その運用方法、評価方法を提案した。これまで、モニタリングの普及に大きな課題であったセンサの長期信頼性については、劣化の懸念のない材料のみで構成するFBG光ファイバひずみセンサを開発し、そのひずみ検出精度および長期測定における温度補償について検証した。モニタリングには大きなコストがかかるという課題については、比較的ゆっくりとした劣化進行に対しては、測定システムの常設や電源工事が必要となる常時モニタリングを適用せず、測定の都度に測定器、バッテリーを現場に持ち込む定期モニタリングによる運用を提案し、そのコスト比較および定期モニタリングによる評価方法を示した。年1回程度の定期モニタリングによる主な評価項目は以下である。

- ① 静ひずみの経時変化 ⇒ プレストレス低下の検知、ASR等の材料異常の有無
- ② 試験車走行時の動的挙動 ⇒ 主桁剛性の評価、支承回転機能障害の有無
- ③ 走行車両解析(Bridge Weigh in Motion) ⇒ 活荷重の実態把握、過積載車の有無・頻度

地方自治体と連携した実橋検証により、現時点では、対象とした橋梁に劣化の進行がないことの確かなエビデンスを得ることができた。また同時に、Bridge Weigh in Motionにより、地方自治体が管理する橋梁が過酷な重交通下に晒されていることを明らかにした。

第4章「モニタリングを用いた既存プレストレストコンクリート橋の信頼性評価」では、第3章のモニタリングにより得られたデータを活用し、プレストレストコンクリート橋の曲げひび割れ発生率を評価する手法を提案した。新設設計と同様に、活荷重としてB活荷重が作用するとして評価すると、信頼性が成り立たないケースでも、モニタリングおよびBridge Weigh in Motionにより実際の活荷重を把握することで、信頼性を高く評価することが可能であることを示した。モニタリングを用いた曲げひび割れの信頼性評価は、交通量の変化や、構造的な劣化の進行度合いなど、評価レベルの変化を評価する指標であり、現時点ではこの指標値にきい値を設けることは難しいが、指標値の小さい順または、この指標値の変化量を指標として予防保全を実施する優先順位とするなどの活用が見込まれる。

第5章「結論」では、各章で得られた知見を要約するとともに、本研究の結果を踏まえて、プレストレストコンクリート橋の合理的な維持管理に向けた今後の課題と展望について取りまとめている。

|  |   |    |       |
|--|---|----|-------|
| 氏名   | 玉置 一清                                     |    |       |
| 論文<br>題目   | プレストレストコンクリート橋の維持管理を合理化するための点検・診断手法に関する研究 |    |       |
| 審査委員   | 区分  | 職名 | 氏名    |
|  | 主査  | 教授 | 森川 英典 |
|  | 副査  | 教授 | 澁谷 啓  |
|  | 副査  | 教授 | 芥川 真一 |
|  | 副査  |    |       |
| 要 旨  |   |    |       |
| <p>既設プレストレストコンクリート（以下、PC）橋は、PC 鋼材のグラウト充填不足などの初期欠陥を有すること、PC 鋼材の定着端部からの凍結防止剤等に起因する塩水が浸入すること、などの要因により腐食・破断が生じる事例が多発している。また外観目視による PC 鋼材腐食の検出が困難であることにより、点検により PC 鋼材の腐食損傷が検出できないまま破断に至ってしまうケースも多くある。一方、橋梁の点検・診断に ICT 技術などを含む新技術の導入が試みられつつあるが、実務上の課題が多く、実用化に至っていないのが現状である。</p> <p>そこで、本研究では、PC 橋の点検・診断において、現場に持ち込み可能な ICT 機器または長期信頼性の高いセンサの常設により定量的かつ連続性のある点検データを取得し、それを設計値や構造解析と比較することで、経験によらない工学的な診断でエビデンスを確保することを検討した。現状の現場点検技術だけでは十分な確証が得られない PC 橋の鋼材腐食や残存プレストレス量については、センサ応答に基づきばらつきを考慮した信頼性解析による評価を検討・提案した。本論文はこれらの研究成果を取りまとめたものであり、全 5 章より構成されている。本論文の第 1 章から第 5 章までの概要は以下のとおりである。</p> <p>第 1 章「序論」では、本研究の背景として、国内の道路橋の 92% を管理する地方自治体は、これから迎える道路橋の急速な高齢化に対して、予算不足や人員不足といった維持管理の制度、体制が抱える社会的課題から、維持管理コスト、労力を抑制するための省力化を強く求められている一方、近接目視を原則とする現行の点検手法では、点検後の診断に主観的要素が入り曖昧であること、車両走行による動的挙動や年間を通じての気温変化による影響が把握困難などの多くの技術的課題が残されていることを述べた。特に、PC 橋の維持管理では、PC 鋼材の腐食に伴うプレストレスの低下や ASR の判定など、十分な点検・診断ができていない致命的な状況にあることを指摘した。このような背景・課題を踏まえた上で、本研究の目的を示した。</p> <p>第 2 章「遠望目視点検を有効に機能させるための ICT ツールの開発」では、定期点検等の結果、健全性の判定区分 I および II となった、まだ十分に健全性が確保されている橋梁では、比較的成本のかからない遠望目視点検を基本とし、これを有効化する手法を提案した。遠望目視点検とは基本的に簡易点検であるため、その点検の品質、精度は点検技術者の技量に大きく依存する。そのため、高度な技術力が継承されていかないと成立しないと考えられ、2014 年以降の定期点検の完全義務化の際に法定点検とは認められない。そこで、点検の品質、精度が点検技術者の技量に依存するという課題を ICT により補うことで、比較的成本のかからない遠望目視点検を有効に機能させる。本研究では、データベースからダウンロードするだけで過去の点検データを容易に参照できる点検支援タブレットの開発、足場や高所作業車を使用しない遠方目視点検の死角を軽減するボール型ロボットカメラの開発、および遠方から撮影した全景写真から微小変状を検知するモアレ法による画像解析技術の基礎実験を行った。これらの ICT ツールから得ら</p> |   |    |       |

|   |       |
|---|-------|
| 氏名  | 玉置 一清 |
| <p>れた点検情報は共通のデータベースに集約され、過去の点検データとの連続性を定量的に把握することで健全性の低下度を「見える化」することができる。これらの ICT ツールの大部分は、すでに実用化しており、点検業務の省力化を達成しながら、遠望目視点検（簡易点検）の品質、精度向上に貢献している。</p> <p>第 3 章「FBG 光ファイバひずみセンサによるモニタリング点検システム」では、健全性判定区分が II か III か判定が難しい段階の橋梁、ならびに建設年度が 1990 年以前の PC 橋のように、グラウト不良等の劣化要素が潜在化している可能性が高い近接目視点検ではその検出が困難である橋梁に対して、高度な橋梁技術者が選定した重要点検箇所長期信頼性の高い FBG 光ファイバひずみセンサを設置し、これまで目視点検では困難であった、曲げひずみ等の微小な変化や車両走行時の動的挙動に基づく点検診断を可能にする構造物モニタリングシステムおよび、その運用方法、評価方法を提案した。これまで、モニタリングの普及に大きな課題であったセンサの長期信頼性については、劣化の懸念のない材料のみで構成する FBG 光ファイバひずみセンサを開発し、そのひずみ検出精度および長期測定における温度補償について検証した。モニタリングには大きなコストがかかるという課題については、比較的ゆっくりとした劣化進行に対しては、測定システムの常設や電源工が必要となる常時モニタリングを適用せず、測定の都度に測定器、バッテリーを現場に持ち込む定期モニタリングによる運用を提案し、そのコスト比較および定期モニタリングによる評価方法を示した。年 1 回程度の定期モニタリングによる主な評価項目は以下である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 静ひずみの経時変化 ⇒ プレストレス低下の検知、ASR 等の材料異常の有無</li> <li>② 試験車走行時の動的挙動 ⇒ 主桁剛性の評価、支承回転機能障害の有無</li> <li>③ 走行車両解析(Bridge Weigh in Motion) ⇒ 活荷重の実態把握、過積載車の有無・頻度</li> </ul> <p>地方自治体と連携した実橋検証により、現時点では、対象とした橋梁に劣化の進行がないことの確かなエビデンスを得ることができた。また同時に、Bridge Weigh in Motion により、地方自治体が管理する橋梁が過酷な重交通下に晒されていることを明らかにした。</p> <p>第 4 章「モニタリングを用いた既存プレストレストコンクリート橋の信頼性評価」では、第 3 章のモニタリングにより得られたデータを活用し、プレストレストコンクリート橋の曲げひび割れ発生の確率を評価する手法を提案した。新設設計と同様に、活荷重として B 活荷重が作用するとして評価すると、信頼性が成り立たないケースでも、モニタリングおよび Bridge Weigh in Motion により実働荷重を把握することで、信頼性を高く評価することが可能であることを示した。モニタリングを用いた曲げひび割れの信頼性評価は、交通量の変化や、構造的な劣化の進行度合いなど、評価レベルの変化を評価する指標であり、現時点ではこの指標値にしきい値を設けることは難しいが、指標値の小さい順または、この指標値の変化量を指標として予防保全を実施する優先順位とするなどの活用が見込まれる。</p> <p>第 5 章「結論」では、各章で得られた知見を要約するとともに、本研究の結果を踏まえて、PC 橋の合理的な維持管理に向けた今後の課題と展望について取りまとめている。</p> <p>以上、本研究は、プレストレストコンクリート橋について、その維持管理を合理化するための点検・診断手法について研究したものであり、ICT ツールを用いた遠望目視点検手法、FBG 光ファイバひずみセンサを用いたモニタリング点検システム、モニタリングを用いた信頼性評価について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の玉置一清は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。</p> |       |