



既設高速鉄道PC桁橋の構造信頼性評価および維持管理手法に関する研究

福田, 圭祐

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2024-03-25

(Date of Publication)

2027-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8930号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100490155>

※ 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。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 _____ 福田 圭祐 _____

専 攻 _____ 市民工学専攻 _____

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

既設高速鉄道 PC 桁橋の構造信頼性評価および維持管理手法に関する研究

指導教員 _____ 森川 英典 _____

既設高速鉄道 PC 桁橋において、グラウト充填不足部における PC 鋼材の腐食が確認されており、構造安全性の低下が危惧されている。既設高速鉄道 PC 桁橋の健全度判定は、主に外観目視調査に基づいて実施されている現状にあるが、耐荷性能に多大な影響を及ぼす PC 鋼材の腐食や破断は外観変状に表れにくく、外観目視調査に基づき健全度を安全側に判定することは難しい。

そのことから、主ケーブルの腐食や破断を想定した既設高速鉄道 PC 桁橋の維持管理上の対策として、主ケーブルの腐食や破断による耐荷性能の低下を検知でき、検知後は早急に補強が可能な外ケーブル張力モニタリング方式が開発されている。しかし、コストを踏まえると、すべての既設高速鉄道 PC 桁橋に外ケーブル張力モニタリング方式を適用することは合理的な維持管理とは言い難く、構造安全性が低下するリスクが高い既設高速鉄道 PC 桁橋を対象に適用することが望ましい。そのためには、既設高速鉄道 PC 桁橋の耐荷性能に基づき健全度が判定され、対策が施されることが合理的な維持管理につながると考えられる。

PC 鋼材が腐食劣化した場合には、PC 鋼材の腐食程度および機械的性能低下のばらつきを考慮して構造安全性を評価することが重要となる。そのような構造安全性に影響を与える各種要因の不確定性を考慮できる評価手法として、信頼性指標 β による方法があり、ISO13822(構造物の設計の基本—既設構造物の診断)では、既設構造物に対して評価した信頼性指標 β を対策要否の判定指標として取り込むことを規定している。この信頼性指標 β に基づく既設高速鉄道 PC 桁橋の構造安全性評価に関する研究事例は見当たらない。

それらを背景として、本研究では、既設高速鉄道 PC 桁橋に対する健全度判定の信頼性向上と合理的な維持管理の構築に向けて、既設高速鉄道 PC 桁橋の構造信頼性評価手法およびそれらを用いた維持管理手法について研究を行ったものである。

第 1 章「緒論」では、既設高速鉄道 PC 桁橋の維持管理の現状と課題を概説し、本研究の目的と構成を示した。

第 2 章「既往の調査研究と本研究の位置づけ」では、本研究と関連がある既往研究を概観し、現時点における課題を整理した。そして、本研究で行った各検討の位置づけを明確にした。

第 3 章「既設高速鉄道 PC 桁橋の実働列車荷重の分析と実働列車荷重を考慮した構造信頼性評価に関する検討」では、既設高速鉄道 PC 桁橋の構造信頼性評価において、現況の実働列車荷重を考慮することを目的に、設計列車荷重によるたわみを算出するとともに、既設高速鉄道 PC 桁橋における列車通過時のたわみを計測し、両者のたわみを比較することで現況の実働列車荷重について分析を行った。

その結果、設計列車荷重によるたわみ解析値に対する実橋の列車通過時のたわみ計測値の比は、平均値約 0.30、変動係数約 10%であり、実橋の列車通過時のたわみ計測値は、設計列車荷重によるたわみに比べて、大幅に小さかった。その主たる要因は、軸配置および

車両の軽量化による軸重の違いであると考えられた。

そして、既設高速鉄道 PC 桁橋における現況の実働列車荷重による応答値は、設計列車荷重による応答値に対して、設計列車荷重によるたわみに対する実橋の列車通過時のたわみ計測値の比からなる列車荷重低減係数 γ_f を乗じて補正し、算出することを提案した。

また、現況の実働列車荷重と主ケーブルの破断を考慮して、曲げ破壊に対する信頼性指標 β を算出した。その結果、設計列車荷重を用いた場合に比べて、実働列車荷重を用いた場合のほうが信頼性指標 β が大きく、現況の実働列車荷重を考慮することで、より実状に即した構造信頼性を評価できると考えられた。

第4章「グラウト充填不足部の PC 鋼より線束の腐食劣化性状に関する実験的検討」では、グラウト充填不足部の PC 鋼より線束を模擬した供試体を作製して促進腐食実験を行うとともに、腐食させた PC 鋼より線に対して静的引張試験を実施し、グラウト充填不足部の PC 鋼より線束の腐食劣化性状について検討した。

PC 鋼より線束断面内での局部腐食発生状況は、シースと PC 鋼より線や PC 鋼より線同士の間隙で発生しやすく、局部腐食深さもそのような領域で大きくなる傾向にあった。PC 鋼より線の断面減少率は、促進腐食期間が長くなるにつれて、増加する傾向にあり、各 PC 鋼より線間でのばらつきも多くなる傾向にあった。また、PC 鋼より線間の断面減少率の相関関係は、概ね正の相関関係にあり、促進腐食期間が長くなるにつれて、正の相関関係が弱くなる傾向にあった。

質量減少率および断面減少率が 5% 程度の PC 鋼より線では、最大引張荷重は JIS 規格値程度、破断時伸びは JIS 規格値を上回っており、破断面では、絞り切れが見られ、健全 PC 鋼より線と類似していた。質量減少率および断面減少率が 10% の PC 鋼より線では、最大引張荷重と破断時伸びともに JIS 規格値を下回っており、破断面においても、絞りがほぼ確認できず、局部腐食を起点に破断が進展しており、脆性的な破断性状であったと推察された。PC 鋼より線の質量減少率および断面減少率の増加に応じて、最大引張荷重および破断時伸びが低下する傾向にあり、破断時伸び残存率の低下率は、最大引張荷重残存率に比べて、非常に大きかった。また、1 本の PC 鋼より線単独で腐食させた既往の実験結果と比較すると、質量減少率 10% 程度の場合では、PC 鋼より線束として腐食させた本実験結果のほうが最大引張荷重残存率と破断時伸び残存率ともに低かった。

そして、上記の実験結果をもとに、グラウト充填不足部における PC 鋼より線束の腐食劣化評価手法として、PC 鋼より線束の腐食状況をもとに、健全も含め 3 つの腐食劣化レベル (0_c , I_c , II_c) を設定し、腐食劣化レベルごとに設定した各 PC 鋼より線の断面減少率の確率分布モデルを用いて評価して、断面減少率より各 PC 鋼より線の最大引張荷重と残存引張力を算出し、各々足し合わせて PC 鋼より線束の最大引張荷重と残存引張力を評価する手法を提案した。

第5章「実働列車荷重およびPC鋼より線束の腐食劣化を考慮した既設高速鉄道PC桁橋の構造信頼性評価に関する検討」では、第3章で示した実働列車荷重を考慮した既設高速鉄道PC桁橋の構造信頼性評価手法、および第4章で示したグラウト充填不足部のPC鋼より線束の腐食劣化評価手法を用いて、山陽新幹線の標準設計PCI桁橋を対象に主ケーブルの腐食劣化程度に応じた既設高速鉄道PC桁橋の曲げ破壊および曲げひび割れに対する構造信頼性を信頼性指標 β に基づいて評価した。

主ケーブルが健全もしくは全主ケーブルが劣化レベルⅠ_cの場合、曲げ破壊および曲げひび割れに対して大きな安全余裕を有していた。全主ケーブルが劣化レベルⅡ_cに至ると、PC鋼より線に破断が多く発生し、曲げ破壊に対する信頼性指標 β_f は目標信頼性指標を下回るケースが多く確認されるとともに、曲げひび割れに対する安全余裕をほぼ消失している状態にあった。また、PC桁断面内の全主ケーブルの断面減少率の増加に応じて、曲げ破壊および曲げひび割れに対する信頼性指標 β_f 、 β_c が低下する傾向にあった。

永久作用下における曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c 'は、主ケーブルが健全もしくは全主ケーブルが劣化レベルⅠ_cの段階では大きな安全余裕を有していた。全主ケーブルが劣化レベルⅡ_cの段階では、永久作用下における曲げひび割れに対する安全余裕はほぼ消失している状態にあった。また、全主ケーブルが劣化レベルⅡ_cの段階では、曲げ破壊に対する信頼性指標 β_f と永久作用下における曲げひび割れに対する信頼性指標 β_c 'が同程度の値を示しており、永久作用下での曲げひび割れの発生と同時期に曲げ破壊に至る可能性が高く、外観目視検査では、耐荷性能の低下が軽微な段階で曲げひび割れを検出することは困難であることが指摘された。

第6章「既設高速鉄道PC桁橋の構造信頼性評価に基づく維持管理手法に関する提案」では、山陽新幹線における主ケーブルの調査結果を用いた構造信頼性評価手法を提案した。そして、実際の主ケーブルの調査結果例を用いて構造信頼性評価を試行した結果、曲げ破壊および曲げひび割れに対して十分な安全余裕を有していることが確認された。

既設高速鉄道PC桁橋の主ケーブルのグラウト充填状況および腐食状況の調査結果、およびそれらの調査結果を用いた構造信頼性評価結果に応じた既設高速鉄道PC桁橋に対する4つの維持管理シナリオを提案し、各維持管理シナリオで実施すべき耐久性向上策および構造安全性向上策を示した。

第7章「結論」では、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の課題や展望について示した。

氏名	福田 圭祐		
論文 題目	既設高速鉄道 PC 桁橋の構造信頼性評価および維持管理手法に関する研究		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	森川 英典
	副 査	教 授	芥川 真一
	副 査	准教授	三木 朋広
	副 査		
	副 査		
印			
要 旨			
既設高速鉄道 PC 桁橋において、PC 鋼材の腐食が確認されており、構造安全性の低下が危惧されている。既設高速鉄道 PC 桁橋の健全度判定は、主に外観目視調査に基づいて実施されているが、耐荷性能に多大な影響を及ぼす PC 鋼材の腐食や破断が外観変状に表れにくく、外観目視調査に基づき健全度を安全側に判定することは難しい。そのことから、PC 鋼材の腐食や破断を想定した既設高速鉄道 PC 桁の維持管理上の対策として、外ケーブル張力モニタリング方式が開発されている。しかし、コストを踏まえると、すべての橋梁に外ケーブル張力モニタリング方式を適用することは合理的とはいえず、PC 鋼材の腐食の進行、破断が生じやすく、構造安全性が大きく低下するリスクが高い橋梁を対象に適用することが望ましい。そのためには、構造安全性に基づき健全度が判定され、対策が施されることが合理的な維持管理につながると考えられる。信頼性指標 B に基づく既設 PC 桁橋の構造安全性評価に関する研究については、PC 道路橋を対象とした研究事例はあるものの、PC 鉄道橋を対象とした研究事例は見当たらない。 以上を踏まえて、本研究では、既設高速鉄道 PC 桁橋に対する健全度判定の信頼性向上と合理的な維持管理の構築に向けて、既設高速鉄道 PC 桁橋の構造信頼性評価手法およびそれらを用いた維持管理手法について研究を行ったものである。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 7 章より構成されている。本論文の第 1 章から第 7 章までの概要は以下のとおりである。 第 1 章「序論」では、既設高速鉄道 PC 桁橋の維持管理の現状と課題を概説し、本研究の目的と構成を示した。 第 2 章「既往の調査研究と本研究の位置づけ」では、本研究と関連がある既往研究を概観し、現時点における課題を整理した。そして、本研究で行った各検討の位置づけを明確にした。 第 3 章「既設高速鉄道 PC 桁橋の実働列車荷重の分析と実働列車荷重を考慮した構造信頼性評価」では、既設高速鉄道 PC 桁橋の構造信頼性評価において、現況の実働列車荷重を考慮することを目的に、設計列車荷重によるたわみを算出するとともに、既設高速鉄道 PC 桁橋における列車通過時のたわみを計測し、両者のたわみを比較することで現況の実働列車荷重について分析を行った。そして、既設高速鉄道 PC 桁橋における現況の実働列車荷重による応答値は、設計列車荷重による応答値に対して、設計列車荷重によるたわみに対する実橋の列車通過時のたわみ計測値の比からなる列車荷重低減係数 y_f を乗じて補正し、算出することを提案した。また、現況の実働列車荷重と主ケーブルの破断を考慮して、曲げ破壊に対する信頼性指標 B を算出した。その結果、設計列車荷重を用いた場合に比べて、実働列車荷重を用いた場合のほうが信頼性指標 B が大きく、現況の実働列車荷重を考慮することで、より実状に即した構造信頼性を評価できると考えられた。 第 4 章「グラウト充填不足部の PC 鋼より線束の腐食劣化性状に関する実験的検討」では、グラウト充填不足部の PC 鋼より線束を模擬した供試体を作製して促進腐食実験を行うとともに、腐食させた PC 鋼より			

線に対して静的引張試験を実施し、グラウト充填不足部の PC 鋼より線束の腐食劣化性状について検討した。PC 鋼より線束断面内での局部腐食発生状況は、シースと PC 鋼より線や PC 鋼より線同士の隙間で発生しやすく、局部腐食深さもそのような領域で大きくなる傾向にあった。PC 鋼より線の断面減少率は、促進腐食期間が長くなるにつれて、増加する傾向にあり、各 PC 鋼より線間でのばらつきも多くなる傾向にあった。また、PC 鋼より線間の断面減少率の相関関係は、概ね正の相関関係にあり、促進腐食期間が長くなるにつれて、正の相関関係が弱くなる傾向にあった。PC 鋼より線の質量減少率および断面減少率の増加に応じて、最大引張荷重および破断時伸びが低下する傾向にあり、破断時伸び残存率の低下率は、最大引張荷重残存率に比べて、非常に大きかった。また、1 本の PC 鋼より線単独で腐食させた既往の実験結果と比較すると、質量減少率 10%程度の場合では、PC 鋼より線束として腐食させた本実験結果のほうが最大引張荷重残存率と破断時伸び残存率ともに低かった。そして、上記の実験結果をもとに、グラウト充填不足部における PC 鋼より線束の腐食劣化評価手法として、PC 鋼より線束の腐食状況をもとに健全も含め 3 つの腐食劣化レベル(0, I, II)を設定し、腐食劣化レベルごとに設定した各 PC 鋼より線の断面減少率の確率分布モデルを用いて評価して、断面減少率より各 PC 鋼より線の最大引張荷重と残存引張力を算出し、各々足し合わせて PC 鋼より線束の最大引張荷重と残存引張力を評価する手法を提案した。

第 5 章「実働列車荷重および PC 鋼より線束の腐食劣化を考慮した既設高速鉄道 PC 桁橋の構造信頼性評価に関する検討」では、第 3 章で示した実働列車荷重を考慮した既設高速鉄道 PC 桁橋の構造信頼性評価手法、および第 4 章で示したグラウト充填不足部の PC 鋼より線束の腐食劣化評価手法を用いて、山陽新幹線の標準設計 PCI 桁橋を対象に主ケーブルの腐食劣化程度に応じた既設高速鉄道 PC 桁橋の曲げ破壊および曲げひび割れに対する構造信頼性を信頼性指標 B に基づいて評価した。主ケーブルが健全もしくは全主ケーブルが劣化レベル I の場合、曲げ破壊および曲げひび割れに対して大きな安全余裕を有していた。全主ケーブルが劣化レベル II に至ると、PC 鋼より線に破断が多く発生し、曲げ破壊に対する信頼性指標 B_f は目標信頼性指標を下回るケースが多く確認されるとともに、曲げひび割れに対する安全余裕をほぼ消失している状態にあった。また、PC 桁断面内の全主ケーブルの断面減少率の増加に応じて、曲げ破壊および曲げひび割れに対する信頼性指標 B_f 、 B_g が低下する傾向にあった。永久作用下における曲げひび割れに対する信頼性指標 B'_g は、主ケーブルが健全もしくは全主ケーブルが劣化レベル I の段階では大きな安全余裕を有していた。全主ケーブルが劣化レベル II の段階では、永久作用下における曲げひび割れに対する安全余裕はほぼ消失している状態にあった。また、全主ケーブルが劣化レベル II の段階では、曲げ破壊に対する信頼性指標 B_f と永久作用下における曲げひび割れに対する信頼性指標 B'_g が同程度の値を示しており、永久作用下での曲げひび割れの発生と同時期に曲げ破壊に至る可能性が高く、外観目視検査では、耐荷性能の低下が軽微な段階で曲げひび割れを検出することは困難であることが指摘された。

第 6 章「既設高速鉄道 PC 桁橋の構造信頼性評価に基づく維持管理手法に関する提案」では、山陽新幹線における主ケーブルの調査結果を用いた構造信頼性評価手法を提案した。そして、実際の主ケーブルの調査結果例を用いて構造信頼性評価を試行した結果、曲げ破壊および曲げひび割れに対して十分な安全余裕を有していることが確認できた。既設高速鉄道 PC 桁橋の主ケーブルのグラウト充填状況および腐食状況の調査結果、およびそれらの調査結果を用いた構造信頼性評価結果に応じた既設高速鉄道 PC 桁橋に対する 4 つの維持管理シナリオを提案し、各維持管理シナリオで実施すべき耐久性向上策および構造安全性向上策を示した。

第 7 章「結論」では、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の課題や展望について示した。

以上、本研究は、既設高速鉄道 PC 桁橋について、実働荷重特性の評価、鋼材腐食特性の解明、構造信頼性評価とそれらに基づく合理的維持管理手法について検討したものであり、既設高速鉄道 PC 桁橋の維持管理のあり方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位論文評価基準を満たしており、学位申請者の福田圭祐は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。