

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：PC 桁の健全性評価のための PC 鋼材緊張力の非破壊監視システムの開発
- (2) 研 究 期 間：平成 29～30 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：加藤 佳孝（東京理科大学・教授）
- (4) 研 究 代 表 者 名：加藤 佳孝（東京理科大学・教授）
- (5) 共 同 研 究 者 名：恒國 光義（東電設計(株)・課長）
平間 昭信（飛島建設(株)・部長）
石塚健一（飛島建設(株)・特別研究員）
- (6) 補助金交付総額：17,074,000 円

(7) 技術研究開発の目的

本開発技術は、プレストレストコンクリート T 桁（以下、「PCT 桁」と略す）の PC 鋼材緊張力低下に伴う曲げひび割れ発生前を対象とし、コンクリート表面のひずみの計測に基づく PC 鋼材緊張力の変化の監視手法の開発と、実橋への適用性を検討する。これらの開発技術は、非破壊でかつ安価な計測によって、これまで外観だけでは評価することが困難である PC 桁の健全性を「見える化」とすると同時に、点検箇所重点化、あるいは点検の簡素化などによる維持管理費用の削減を目指すものである。さらに、既往開発技術である曲げひび割れ発生後の残存緊張力の絶対値の推定手法と組み合わせることで、残存緊張力を指標とした PCT 桁とした健全性を評価するシステムの開発を行う。

(8) 技術研究開発の内容と成果

平成 29 年度は、PCT 桁を模擬した要素試験体の載荷試験や FEM 解析によるシミュレーションを実施し、コンクリート表面の圧縮と引張のひずみによる見かけの中立軸と、PC 鋼材緊張力の関係について検討した。また、見かけの中立軸と PC 鋼材緊張力との関係の理論的な検証を行った。以下に検討成果を示す。

緊張力の低下による荷重と見かけの中立軸高さの関係の変化を検討するため、要素試験体の載荷試験を実施した。試験体の形状は図-1 に示すとおり、30×70×500cm（支間長 450cm）とした。PC 鋼材の緊張力は 450kN を導入率 100%として、定着具で調整しながら導入率を 50%まで 10%ずつ緊張力の低下を同一の試験体を用いて模擬した。そのため、シーす内にはグラウトを充填していない。なお、グラウトを充填した試験体（導入率 100%、50%）も作製し、本研究で設定した条件下では、グラウトの有無が試験結果に及ぼす影響は小さいことを確認している。PC 鋼材は端部がネジ式の PC 鋼棒とし、緊張力 100%の導入時に全断面圧縮となるように 2 段の直線配置している。試験ケースを表-1、試験体の材料定数を表-2 に示す。

載荷試験の状況を写真-1 に示す。載荷は、橋梁構造物の自動車荷重を想定して 1 点載荷とし、油圧ジャッキを用いて片振り載荷（荷重制御）で行った。それぞれの緊張力に対して載荷時の引張縁の応力が約 1N/mm^2 となるときの荷重を最大値として、静的に 3 回の繰返し載荷を行った。以降の結果は、3 回目の荷重増分時に着目している。

コンクリート表面のひずみを計測するため、長さ 90mm のコンクリート用ひずみゲージ

を前掲図-1 のように配置した。高さ方向については、圧縮側と引張側のそれぞれの主鉄筋と同じ高さで、断面のひずみ分布を詳細に計測するため、その間にも2段配置した。なお、載荷点の直下は、載荷版の影響を受けやすいことから、計測箇所には選定していない。

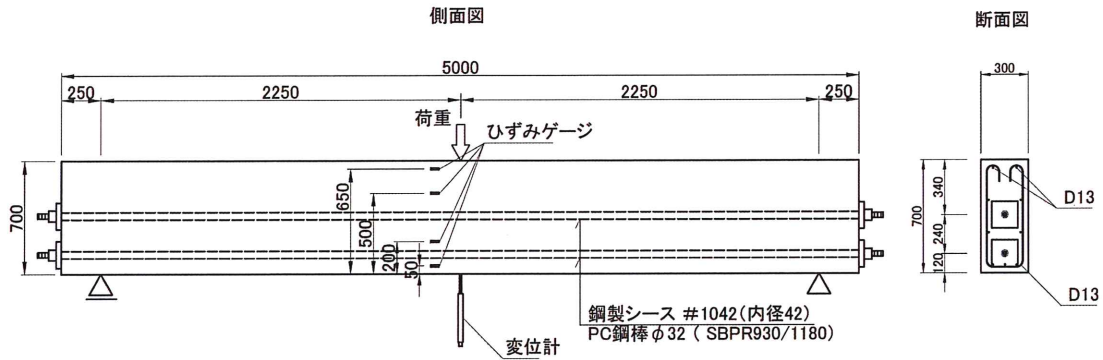


図-1 試験体の概略図 (単位 ; mm)

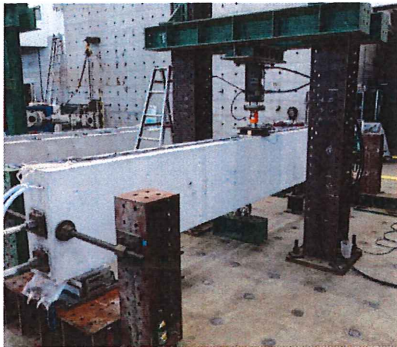


写真-1 載荷試験の状況

表-1 試験ケース

緊張力 (kN)	導入率 (%)	載荷荷重 (kN)
450	100	191
405	90	173
360	80	155
315	70	137
270	60	119
225	50	101

表-2 コンクリートとPC鋼棒の材料定数

対象	項目	数値	備考
コンクリート	圧縮強度	56 N/mm ²	試験結果
	弾性係数	3.4 × 10 ⁷ kN/m ²	推定
PC鋼棒	弾性係数	2.0 × 10 ⁸ kN/m ²	
	断面積	804.2 mm ²	
	シース	φ 42 mm	

緊張力を10%ずつ低下させた各試験ケースについて、荷重と見かけの中立軸の関係を一貫的に示したのが図-2 および図-3 である。導入率100%の荷重0kN時をひずみの初期値としたものが図-2 である。一方、図-3 は、緊張力がある程度低下した供用途中からの計測を想定して、導入率80%を初期値とした例である。いずれの場合も、初期値とした導入率では、荷重の増加に対して見かけの中立軸は概ね断面図心高さで一定となっている。導入率が低下すると、すべての荷重レベルに対して導入率の低下に伴い見かけの中立軸は上昇するが、荷重の増加に伴って断面図心に漸近している。同じ荷重に対する見かけの中立軸の変化量は、プレストレスの導入率の低下に伴って減少する傾向にあるが、導入率60%程度までは明確な違いが確認できる。これより、プレストレス導入率の低下が60%程度までの範囲では、本手法により10%の差で緊張力の低下を検知することが可能であると考えられる。また、ひずみの計測範囲の違いによる見かけの中立軸高さの比較を図-4 に示す。ひずみゲージによる局所的な計測と光ファイバによる桁高相当の一定区間の平均的な計測では、荷重に対する見かけの中立軸高さが同様な結果となっている。さらに、図-5 に示すように、例えば、試験体の載荷荷重50kN時の緊張力による中立軸高さの違いは、試験

体をモデル化した3次元FEM解析結果と同じ傾向にあり、計測方法の妥当性を確認した。

理論的検証として、弾性論に基づく力のつり合いから各プレストレス導入率に対する荷重と見かけの中立軸高さ関係を算出した。図-6に計算値と実験結果の比較を示す。両者とも、すべての荷重レベルに対してプレストレス導入率の低下に伴い見かけの中立軸は上昇するが、荷重の増加に伴って断面図心に漸近している。これより、見かけの中立軸高さの変化による緊張力低下の監視は妥当であると考えられる。なお、実験結果における荷重0kN時の見かけの中立軸高さが計算値と異なる理由として、実験では荷重が小さい領域で計測されたひずみに誤差が含まれるため、そこから算出される見かけの中立軸高さも精度が落ちるものと考えられる。

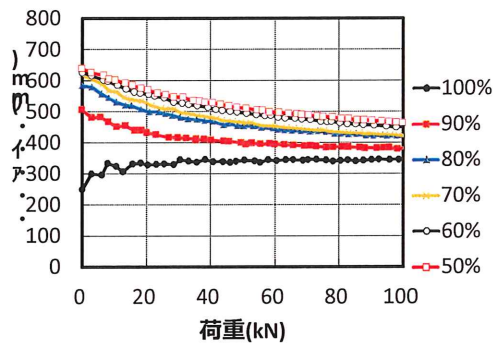


図-2 中立軸高さの変化(緊張力 100%)

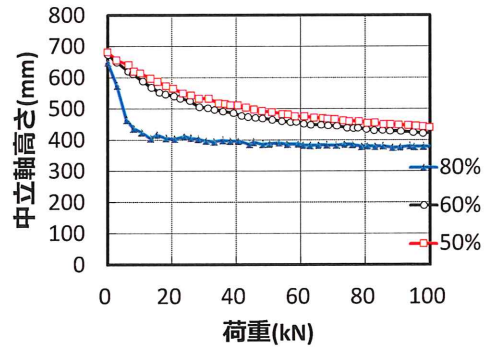
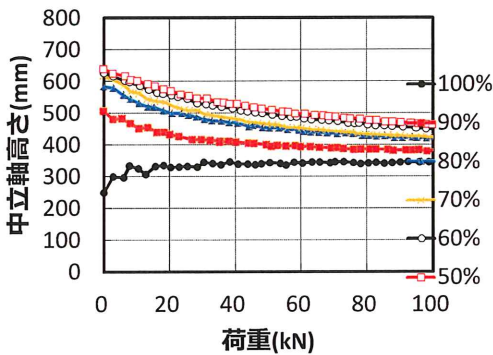
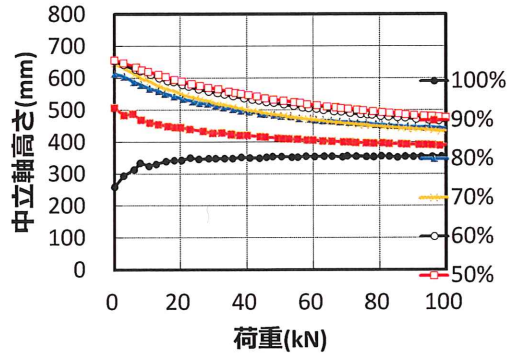


図-3 中立軸高さの変化(緊張力 80%)



(单独計測)



(平均計測)

計測方法の違いによる中立軸高さの評価の比較

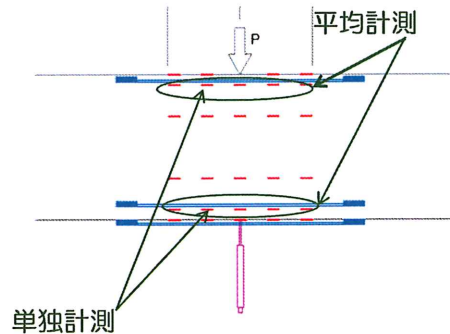


図-4 ひずみの計測範囲の違いによる見かけの中立軸高さの比較

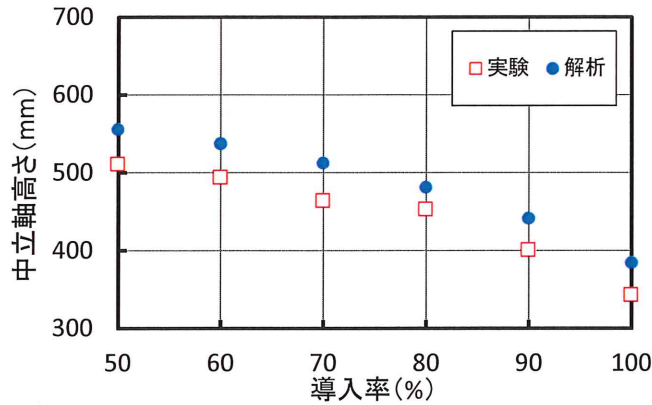


図-5 載荷荷重 50kN 時における緊張力の違いによる中立軸高さの変化

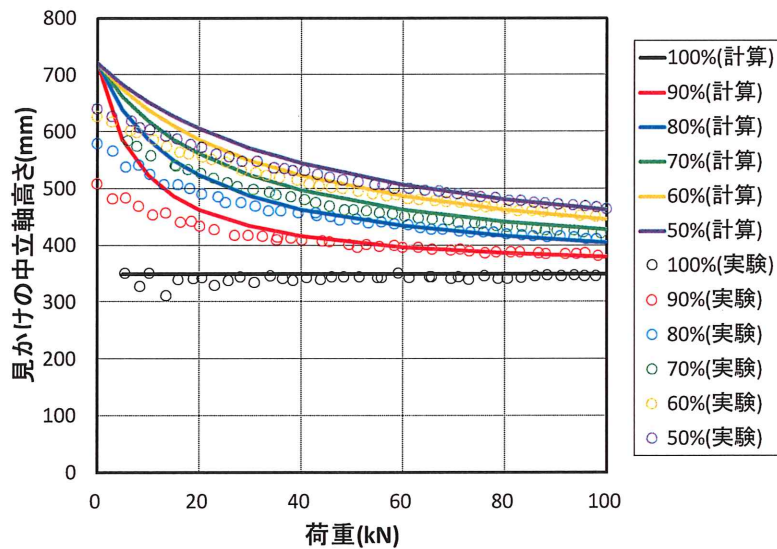


図-6 計算値と実験結果の中立軸高さの比較

平成 30 年度は、載荷試験や実橋の計測を実施し、実際の構造物への適用性を検討した。平成 29 年度に実施した要素実験の試験体は、桁高に対して桁長が短く、PC 鋼材も断面の図心付近に直線配置されており、現実的な構造部材との相違が見られた。そのため、実際の橋梁に近い諸元の試験体により載荷試験を実施し、緊張力の低下による荷重と見かけの中立軸高さ関係の変化が評価可能であることを確認した。また、供用中の橋の計測を実施し、計測箇所、自動車の走行位置の違いに着目した見かけの中立軸の計測の検証を行った。さらに、既往開発技術である曲げひび割れ発生後のひび割れ幅の計測を併用した PC 鋼材緊張力の絶対値の推定技術と総合することで、PC 鋼材適用性を確認した。以下に検討成果を示す。

試験体の形状は図-7 に示すとおり、30×70×800cm (支間長 750cm) とした。PC 鋼材の緊張力は 850kN を導入率 100%として、平成 29 年度と同様に定着具で調整しながら導入率を 70%および 50%に対する緊張力の低下を同一の試験体を用いて模擬した。そのため、シーす内にはグラウトを充填していない。PC 鋼材は F110 型の PC 鋼より線とし、緊張力 100%の導入時に全断面圧縮となるように配置している。試験ケースを表-3、試験体の材料定数を表-4 に示す。

載荷試験の状況を写真-2 に示す。載荷は、橋梁構造物の自動車荷重を想定して 1 点載荷とし、油圧ジャッキを用いて片振り載荷（荷重制御）で行った。それぞれの緊張力に対して載荷時の引張縁の応力が約 1N/mm^2 となるときの荷重を最大値として、静的に 3 回の繰返し載荷を行った。以降の結果は、3 回目の荷重増分時に着目している。

コンクリート表面のひずみの計測は、長さ 90mm のコンクリート用ひずみゲージを用いて行い、前掲図-7 のように配置した。高さ方向については、圧縮側と引張側のそれぞれの主鉄筋と同じ高さで、断面のひずみ分布を詳細に計測するため、その間にも複数配置した。また、支間中央から離れた桁端部に対しても同様にひずみゲージを配置した。

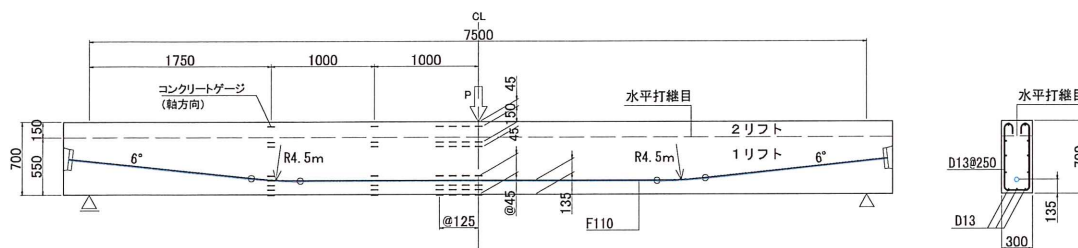


図-7 試験体の概略図（単位；mm）



写真-2 載荷試験の状況

表-3 試験ケース

緊張力 (kN)	導入率 (%)	載荷荷重 (kN)
834	100	97
613	70	66
434	50	45

表-4 コンクリートと PC 鋼棒の材料定数

対象	項目	数 値	備 考
コンクリート	圧縮強度	50 N/mm^2	試験結果
	弾性係数	$3.5 \times 10^7\text{ kN/m}^2$	試験結果
PC 鋼より線	弾性係数	$2.0 \times 10^8\text{ kN/m}^2$	
	断面積	650.3 mm^2	
	シース	$\phi 45\text{ mm}$	

図-8 に導入率 100% の荷重 0kN 時をひずみの初期値としたときの荷重と見かけの中立軸高さの関係を示す。図-9 は、緊張力がある程度低下した供用途中からの計測を想定して、導入率 70% を初期値とした例である。両者とも、載荷点近傍におけるひずみの計測結果である。いずれの場合も、初期値とした導入率では、荷重の増加に対して見かけの中立軸高さは概ね断面図心高さで一定となっている。導入率が低下すると、すべての荷重レベルに対して導入率の低下に伴い見かけの中立軸は上昇するが、荷重の増加に伴って断面図心に漸近している。同じ荷重に対する見かけの中立軸の変化量は、プレストレスの導入率の低下と伴に減少する傾向が確認できる。また、断面位置の違いによる見かけの中立軸高さの比較を図-10 に示す。支間中央付近の計測と桁端部（桁の約 1/4）の計測では、荷重に対する見かけの中立軸高さが同様な結果となっている。これより、載荷点から離れた位置においても荷重の増加に対する見かけの中立軸高さを評価可能であると考えられる。以上のことから、実際の橋梁に近い諸元の試験体においても見かけの中立軸高さの計測による緊張力の低下の監視が可能であるものと考えられる。

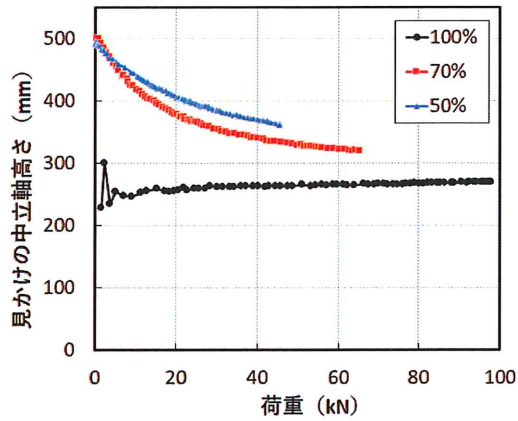


図-8 中立軸高さの変化(緊張力 100%)

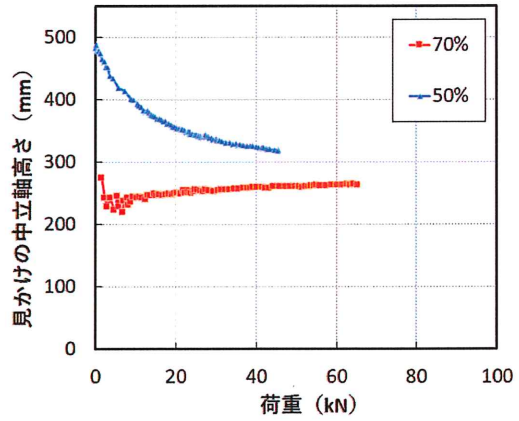
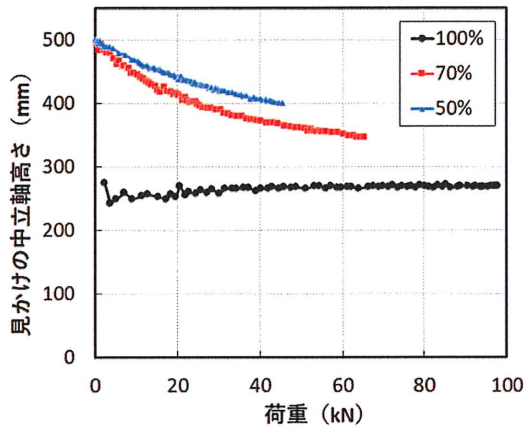
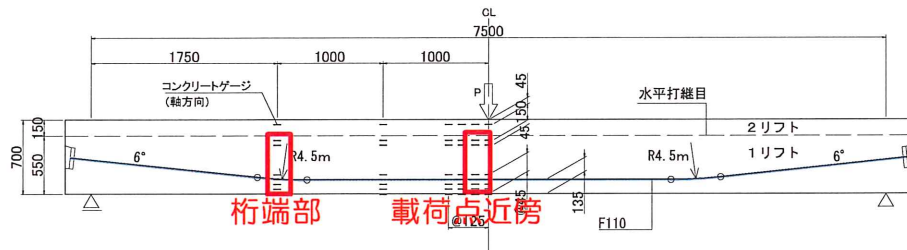
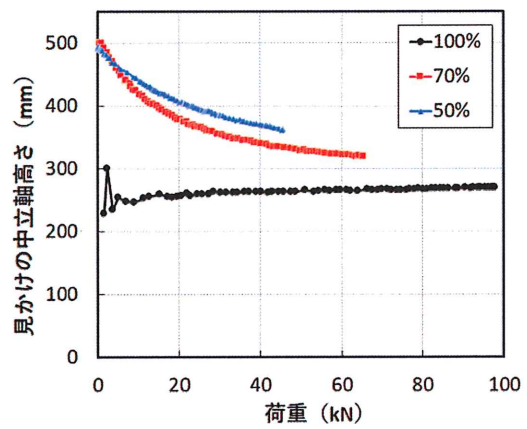


図-9 中立軸高さの変化(緊張力 70%)



桁端部(桁の約1/4)



載荷点近傍

図-10 断面位置の違いによる見かけの中立軸高さの比較

計測対象とした橋梁の全体図を写真-3に、主桁の側面図および断面図を図-11、図-12に示す。対象橋は、桁高1.4m、支間長20mの6本の主桁(T型断面)で構成されている。両端の耳桁には壁高欄が設置されており、中央分離帯を境に片側2車線の道路橋となっている。計測径間は、目視により変状が見られない比較的健全な径間を選定した。

表-5に計測概要を示す。計測断面の違いによる影響を把握するために、「G1桁の支間中央」、「G1桁の側方(横桁近傍)」、「G2桁の支間中央」の3断面を対象とした(図-11参照)。また、計測器の設置は桁の圧縮側(上フランジ下面)および引張側(桁下面)の2点を基本とした。計測器は、長さ60mmのコンクリート用ひずみゲージと評点距離0.7mの光ファイバ(支間中央のみ)を用いた。載荷荷重として、20tラフタークレーン1台(前輪軸重:100kN、後輪軸重:100kN)を走行車線および追越車線に対してそれぞれ2回ずつ走行させ、走行位置の違いによる計測結果のばらつきを確認した。



写真-3 対象橋の全体図

表-5 計測概要

桁No	断面	計測器		計測器の設置箇所
		f ^{※1}	g ^{※1}	
G1	中央	○	○	壁高欄(1900) ^{※2} 圧縮側(1100) ^{※2} 引張側(0) ^{※2}
	側方	—	○	圧縮側(1100) ^{※2} 引張側(0) ^{※2}
G2	中央	○	○	

※1 f: 光ファイバ, g: ひずみゲージ

※2 ()内の数値は桁下面からの高さ(mm)を示す

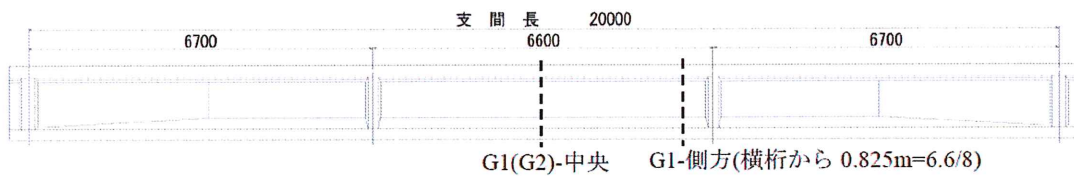


図-11 側面図

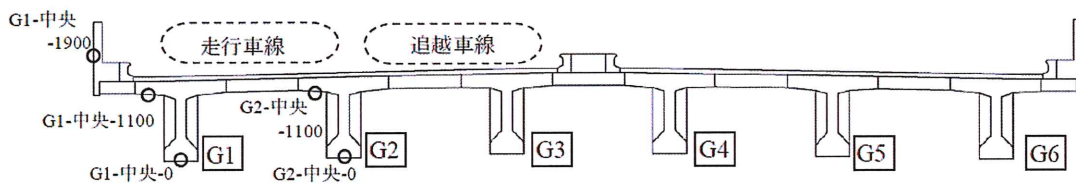


図-12 断面図(支間中央)

計測位置の影響は、引張側のひずみの計測結果から検討する。光ファイバにより計測した、G1 桁および G2 桁の支間中央における引張側の計測ひずみの時刻歴を図-13 に示す。同図は、試験車が走行車線を通過したケースの計測結果である。G2 桁のひずみは、G1 桁よりも 20μ 程度小さいものの、試験車の走行に対して G1 桁と同様にひずみが計測されている。また、ひずみゲージにより計測した、G1 桁の支間中央および側方における引張側のひずみの時刻歴を図-14 に示す。同図より、断面の違いによりひずみのピーク発生時刻が異なるが、側方のひずみは試験車の走行に対して支間中央と同様に計測されていることが分かる。以上のことから、中桁の支間中央および耳桁の側方部においても、耳桁の支間中央と同様にひずみを計測することが可能であると考えられる。

次に、ひずみの計測から自動車等の動的荷重の作用に対する見かけの中立軸高さの算定の可能性について検討した。光ファイバ計測による、G1 桁の支間中央における載荷荷重に対する見かけの中立軸高さを図-15 に示す。なお、最大荷重に達するまでの荷重の値は不明であるため、横軸は引張ひずみとしている。同図より、引張ひずみの増加（載荷荷重の増加）に伴い見かけの中立軸高さが 1.0m 前後に収束していく傾向が見られる。これより、動的な荷重に対しても見かけの中立軸高さを算定可能であると考えられる。なお、圧縮側のひずみを計測するために、可能な限り断面図心高さよりも上側で計測することが望ましいと考えられる。

光ファイバにより計測した G1 桁の支間中央における、走行ケースの違いによる見かけの中立軸高さの比較を図-16 左図に示す。また、図-16 右図は各走行ケースにおける最大引張ひずみ発生時の見かけの中立軸高さとその平均値（破線）を示している。図-16 左図より、見かけの中立軸高さは引張ひずみが 10μ 程度からひずみの増加に伴い一定値に収束する傾向となっており、走行ケースの違いによらず同様な結果となっている。また、図-16 右図より追越車線を走行したケースは走行車線のケースよりも最大引張ひずみが 20μ 程度小さくなるが、計測結果から算出された見かけの中立軸高さの差は、最大でも 10% 以下（走行 2 回目と追越 2 回目の比較）である。以上のことから、試験車の走行位置の違いにより、計測ひずみの大きさは異なるものの、自動車荷重に対するひずみ計測のばらつきが小さいことを確認した。

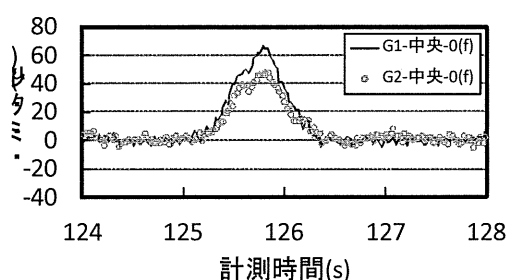


図-13 桁の違いによる計測ひずみの比較

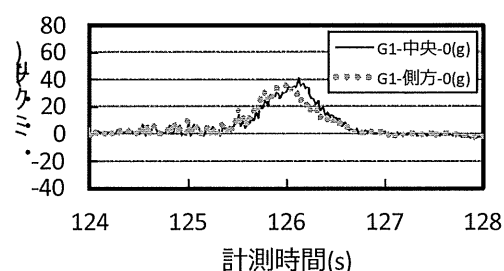


図-14 計測断面の違いによる計測ひずみの比較

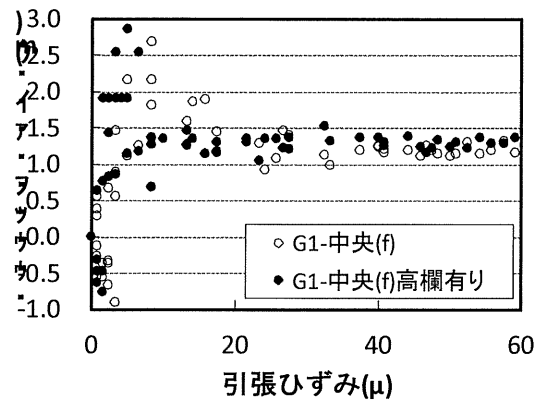


図-15 荷重と見かけの中立軸高さの関係

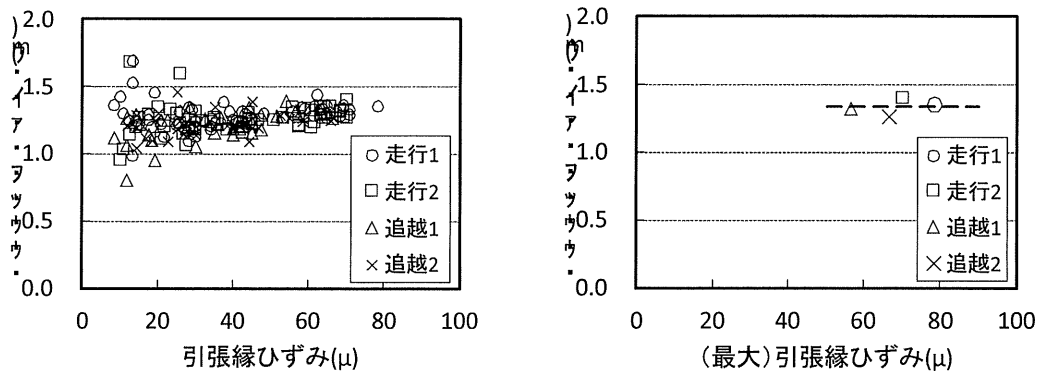


図-16 走行ケースの違いによる見かけの中立軸高さの比較

本研究より、残存緊張力によらず、ひずみの計測開始後から緊張力が低下した場合に、曲げひび割れ発生前のPCT桁においては、図-8～図-10に示すように緊張力の低下に伴い同一荷重に対する見かけの中立軸高さが上昇する。道路橋では、自動車が常時通行しているため、その平均的な見かけの中立軸高さの変化を観測することにより、定性的にプレストレス力の低下を評価可能である。その後、残存緊張力の低下等により曲げひび割れが発生した桁においては、既往開発技術によりプレストレス力を定量的に評価可能である。

平成29年度から平成30年度における本研究の主な成果は以下の通りである。

- ① PCT 桁を模擬した要素試験の緊張力を、100%～50%に変化させたときの载荷試験を行った結果、コンクリート表面の圧縮と引張ひずみから算出した見かけの中立軸がPC鋼材緊張力に応じて異なることを確認した。
- ② PC鋼材緊張力と見かけの中立軸高さの変化の関係について、弾性論に基づく理論解と载荷試験結果は同様な傾向を示しており、見かけの中立軸高さの計測による残存緊張力の監視は妥当であることを明らかにした。
- ③ 供用初期に相当する緊張力100%からの計測だけでなく、緊張力が供用中に低下した状態、例えば80%からの計測でも、上記①の見かけの中立軸の違いを把握することが可能である。

- ④ 圧縮側と引張側のひずみの計測は、ひずみゲージ、あるいは光ファイバでも可能であることを確認した。
- ⑤ 支間長 20m、6 主桁（上下 4 車線）の PCT 単純桁を計測した結果、自動車荷重を利用した見かけの中立軸の計測が可能であることを確認するとともに、計測断面および自動車走行位置による見かけの中立軸高さの計測結果の違いは小さいことを確認し、開発手法の実橋への適用が可能であることを示した。
- ⑥ PC 鋼材の残存緊張力の低下に起因して生じる曲げひび割れの発生前における見かけの中立軸による緊張力の変化の監視方法、および曲げひび割れ発生後における既往開発の緊張力の絶対値の推定方法を総合し、残存緊張力を指標とした PCT 桁の健全性評価の流れを構築した。

(3) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
第 73 回年次学術講演会講演概要集 (No. V P1135-1136)	H30. 08. 01	土木学会	石塚 健一
International Conference of Asian Concrete Federation (Study on Evaluation Method for Prestress Force Change of PC Girder Based on Surface Strain Distribution)	H30. 11.	Asian Concrete Federatio	江口 康平
第 28 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム (投稿中)	R1. 11.	プレストレストコンクリート工学会	小林 賢司

(4) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
なし				

(5) 成果の実用化^{*}の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

本研究開発手法は、以下の理由から、今後、増加が予想される老朽化した PC 桁や、技術者の不足が予想される地方自治体の PC 桁に対して、十分、実用化を図っていただけるものと考えられる。

- ① PCT 桁表面の圧縮側と引張側の 2 点のひずみの計測を利用していることから、非破壊手法であり、かつ簡易的である。
- ② 上記①と関連して、高度な専門技術、特殊技術を要しない。
- ③ 計測計器を設置した後は、任意時点での計測と評価が可能であり、繰返して計測を行うことで、計測精度の向上を図ることが可能である。

(12) その他

低コストで、特殊技術を必要としない本研究開発手法を全国に展開することにより、重要度・緊急度等に応じて、適切な対策（補強、補修、通行規制、監視強化等）を行い、現在のインフラストックを適切に維持管理することが可能となる。