

論文 鉄道プレストレストコンクリート橋りょうの 長期変形と対策に関する解析的検討

荒木 一徳¹・渡辺 健²・大野 又稔³

¹正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:araki.katsunari.90@rtri.or.jp(Corresponding Author)

²正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:watanabe.ken.08@rtri.or.jp

³正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:ono.yuto47@rtri.or.jp

近年、プレストレストコンクリート(PC)橋りょうの長期的な変形を算定する手法として、ファイバーモデルを用いた骨組み解析が提案されており、従来の1本梁モデルを用いた骨組み解析よりも精緻に長期変形を算定できることが報告されている。経験のない構造形式等で、PC橋りょうの長期変形が軌道整備に影響を及ぼす可能性がある場合、これを設計段階で適切に考慮し、軌道整備の調整代を確保しておく必要がある。本研究では、PC橋りょうの長期変形が軌道整備に与える影響を構造形式や構造諸元および軌道敷設時期等の条件ごとに整理し、設計時に軌道整備計画を行う場合における軌道整備への影響の検討に関するフローを提案した。

Key Words: prestressed concrete bridges, long-term behavior, railway truck maintenance

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート(以下、PC)橋りょうの長期的な変形(以下、長期変形)を算定する手法として、桁部分を3本の梁要素でモデル化した解析モデル(以下、ファイバーモデル)を用いた骨組み解析が提案され、従来の桁部分を1本の梁要素でモデル化した解析モデル(以下、1本梁モデル)よりも、精緻に長期変形を算定できることが報告されている¹⁾²⁾。コンクリートの収縮ひずみおよびクリープひずみは、降水等の気象条件や部位、部材寸法等に依存して生じる現象である。PC橋りょうの長期変形は、収縮ひずみやクリープひずみが桁の上面と下面で異なることで曲率が生じ、たわみとしてあらわれることが要因である。1本梁モデルでは、この部位ごとのひずみを表現できないが、ファイバーモデルでは部位のひずみを表現可能であるため、精緻に長期変形を算定できるものである。

鉄道構造物では、桁が変形すると、軌道面すなわち走行安全性や乗り心地等に影響を及ぼす可能性がある。車両の走行安全性や乗り心地は、車両、軌道、桁を一体的に考慮したうえで、それぞれに求める性能を定めて確保することが原則である。したがって、過大な長期変形の予測が余儀なくされる橋りょうに対して、機能を保持す

るための対処法は様々考えられる。もし、桁の変形を軌道で補う場合には、軌道の形式選定や保守の考え方が一つの検討事項となると考えられる。特に直結軌道では、バラスト軌道と異なり軌道整備の調整代が小さいため、その調整代を確保しておくなどの対応が求められると考えられる。

従来、PC橋りょうの照査では、不静定力や有効プレストレスの算定など、収縮およびクリープの影響を力でモデル化する場合、部位に依存した収縮ひずみ、クリープひずみの影響が小さいため、1本梁モデルを用いてきた経緯がある。単純桁等、汎用の構造形式において設計の省力化を実現するには、影響の度合いに応じてファイバーモデルを実施することが適切である。

本研究では、ファイバーモデルによる解析により、PC橋りょうに生じる長期変形が軌道整備に与える影響を、構造形式や構造諸元等の条件ごとに整理した。解析は、コンクリートの収縮ひずみに影響を与える粗骨材の収縮ひずみや、軌道整備時期等をパラメータとした。なお、軌道整備の考え方には、使用状況等に応じてそれぞれで設定されているが、本検討では、軌道整備に与える影響は、軌道整備の目安として用いられる40m弦正矢³⁾を参考にして検討することとした。

表-1 対象とした橋りょうの条件

橋りょう名称	桁形式	支間長 (m)	支間割	桁高 (m)	PC鋼材			設計時変形
					記号	呼び名	本数(本)	
橋りょう A	PC単純T形桁	26.2	—	1.80	SWPR7BL	12S12.7	12	上反り
橋りょう B	PC単純ホロー桁	29.0	—	1.50	SWPR7BL	12S12.7	32	たわみ
橋りょう C	PC単純下路桁	43.8	—	4.40	SWPR7BL	12S15.2	28	—
橋りょう D	PC単純箱桁	34.7	—	2.15	SWPR7AL	12S12.4	41	—
橋りょう E	3径間連続PCラーメン橋	254(82+90+82)	1:1:1程度	3.50	SWPR7BL	12S15.2	12	上反り
橋りょう F	3径間連続PCラーメン橋	178(47+85+47)	1:2:1程度	3.00	SWPR7BL	12S15.2	30	たわみ

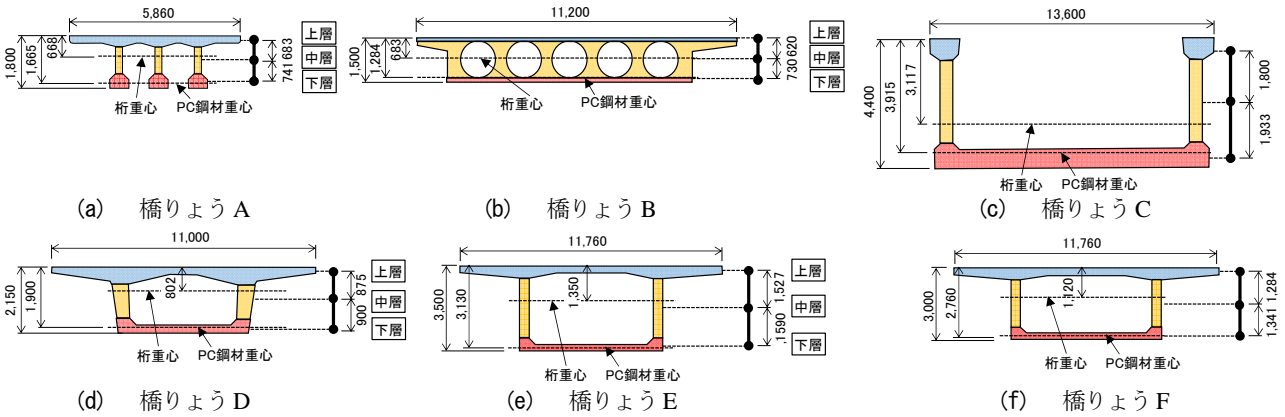


図-1 桁断面の概要図 (単位mm)

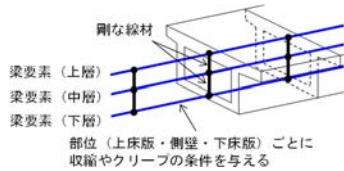


図-2 桁のモデル化概要

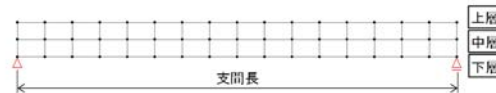


図-3 単純桁の解析モデル

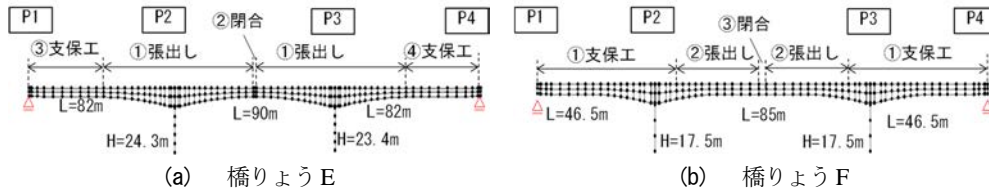


図-4 PCラーメン橋の解析モデル

2. PC 橋りょうの長期変形

(1) 対象とする橋りょうおよびモデル化手法

表-1 および図-1 に、本研究で対象とした橋りょうの条件および桁断面の概要図を示す。対象とする橋りょうは、PC単純桁および3径間連続PCラーメンとした。単純桁は、桁形式ごとに1ケースを選定し、PCT形桁、PCホロー桁、PC下路桁、PC箱桁の4ケースとした。なお、PC単純桁は、全てPC構造として設計された橋りょうである。支間長、桁高、PC鋼材等の諸元は、表-1 に示す通りである。3径間連続PCラーメン橋りょうは、鉄道のPCラーメン橋で多く採用されている構造形式である。橋りょうFは、支間割が1:2:1程度であり、鉄道のPCラーメン橋では多く採用されている支間割である。一方、橋りょうEは、支間割が1:1:1の橋りょうであり、採用事例は多くない支間割である。桁部分は、張出し施工

と支保工施工を併用して施工された橋りょうである。なお、図-1 (e), (f) は、中央径間の支間中央断面を示しているが、実際には桁高や鋼材配置、部材厚等が橋軸方向に変化している。解析では、断面等の変化を精緻に再現した。なお、どちらとも上側引張の場合はPC構造、下側引張の場合はPRC構造として設計された橋りょうである。

図-2 に桁のモデル化の概要を示す。桁は土木学会コンクリート標準示方書[設計編]⁴⁾に従いモデル化した。対象とする桁の断面を、図-1 に示すように上層・中層・下層で区分し、それぞれを梁要素でモデル化した。また、上層と中層、中層と下層は、それぞれ剛な線材要素で接続することで桁断面の平面保持を確保した。上層・中層・下層の鉛直方向の位置は、それぞれの部位重心位置とした。また、コンクリートの収縮・クリープは、水平方向の梁要素に導入した。

表-2 検討ケース

Case	モデル化	橋りょう名称	収縮ひずみ			クリープひずみ
			$\epsilon'_{sg}(\times 10^6)$	$H(\text{mm})$ (上層-中層-下層)	k_c (上層-中層-下層)	$RH(\%)$ (上層-中層-下層)
CaseA-3	ファイバー	橋りょう A	800	298-250-314	0.54-1.00-1.00	95-70-70
CaseA-1	仮想1本梁					
CaseB-3	ファイバー	橋りょう B	800	256-480-246	0.57-1.00-1.00	95-70-70
CaseB-1	仮想1本梁					
CaseC-3	ファイバー	橋りょう C	800	546-600-668	0.64-1.00-1.00	95-70-70
CaseC-1	仮想1本梁					
CaseD-3	ファイバー	橋りょう D	800	380-600-208	0.59-1.00-1.00	95-70-70
CaseD-1	仮想1本梁					
CaseE-3	ファイバー	橋りょう E	800	386-450-334	0.59-1.00-1.00	95-70-70
CaseE-1	仮想1本梁					
CaseF-3	ファイバー	橋りょう F	800	406-450-314	0.60-1.00-1.00	95-70-70
CaseF-1	仮想1本梁					

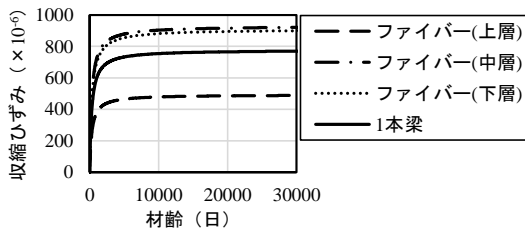


図-5 収縮ひずみの経時変化

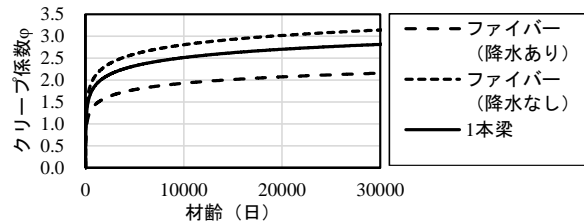


図-6 クリープ係数の経時変化

図-3 に、単純桁の解析モデルを示す。対象とする桁は、固定・可動を有する支承構造である。固定支承は、鉛直および水平を固定、回転をフリーとし、可動支承は、鉛直方向を固定、水平、回転方向をフリーとした。また、施工は、コンクリート打設から 8 日後に PC 鋼材を緊張し、打設から 10 日後に脱型および支保工を撤去、打設から 108 日後に版上荷重を載荷することとした。

図-4 に PC ラーメン橋の解析モデルを示す。端部橋脚の P1,P4 は可動支承により桁と接続しているため、橋脚のモデル化は行わず、鉛直方向を固定、水平、回転方向をフリーの支点モデル化した。また、図中に施工方法およびその順序も併せて掲載している。対象橋りょうは段階施工であるため、打設後の日数に応じた収縮およびクリープの影響を考慮するために、施工ステップを忠実に再現した。橋りょう E は、施工開始から 250 日に張出し施工を開始し、591 日に中央閉合後、645 日までに支保工施工を完了し、755 日に版上荷重を載荷して施工完了となる。橋りょう F は、施工開始から 180 日に支保工施工を開始、442 日から張出し施工を開始し、484 日に中央閉合後、575 日に版上荷重を載荷して施工完了となる。

(2) 検討ケース

表-2 に検討ケースを示す。本研究では、対象橋りょう、収縮ひずみおよびクリープ係数の経時変化をパラメータとした。なお、CaseA-1 は、CaseA-3 における上層、中層、下層の収縮ひずみおよびクリープひずみの平均値

を各層に与えることにより、断面内のひずみ差が生じないケースとした。これは、断面内のひずみ差を表現できない従来の 1 本梁モデルを再現するためであり、CaseA-1 と CaseA-3 を比較することにより、ファイバーモデルと 1 本梁モデルの違いの傾向を確認できる。以降、CaseA-1 等の断面内のひずみ差が生じない解析モデルを「仮想 1 本梁モデル」とする。

コンクリートの収縮ひずみおよびクリープ係数は、上層が降水の影響を受ける場合を設定した。

収縮ひずみの経時変化は、渡辺ら²⁾による DuCOM-COM3^{3),4)}を用いた解析的検討により得られた、式(1)~式(7)より設定した。

$$\epsilon'_{cs}(t,t_0) = \epsilon'_{cs\infty} \times [(t-t_0)/\{\beta+(t-t_0)\}] \tag{1}$$

$$\epsilon'_{cs\infty} = k_r \times 600 \times (H/H_k)^{-1/10} \times k_c \times (W/B)^{1/2} \times (RH/100)^{-1} \times k_{t0} \times k_{sg} \tag{2}$$

$$k_r = 1.0 \text{ (常時乾燥)} \tag{3}$$

$$= 0.8 \text{ (乾湿繰返し, } H=1000 \text{ mm)}$$

$$= 0.6 \text{ (乾湿繰返し, } H=400 \text{ mm)}$$

$$= 0.5 \text{ (乾湿繰返し, } H=200 \text{ mm)}$$

$$k_c = 1.0 \text{ (N, BB)} \tag{4}$$

$$= 0.9 \text{ (FB)}$$

$$k_{t0} = -0.16 \times \log(t_0/7) + 1 \tag{5}$$

$$k_{sg} = 0.0007 \times (\epsilon'_{sg} - 400) + 1 \tag{6}$$

$$\beta = 2700 \times (H/H_k)^{1/3} \times (W/B)^3 \tag{7}$$

ここに、 $\epsilon'_{cs}(t,t_0)$: 材齢 t_0 から t までのコンクリートの収縮ひずみ($\times 10^6$)、 t : コンクリートの材齢(日)、 t_0 : コンク

リートの乾燥開始時材齢(日)($1 \leq t_0 \leq 365$), ε'_{∞} : 収縮ひずみの最終値($\times 10^6$), k_r : 水掛かりの程度の影響を表す係数, RH : 外気相対湿度(%), ($55 \leq RH \leq 85$), k_c : セメント種類の影響を表す係数, H : 部材厚(暴露面間の距離)(mm) ($100 \leq H \leq 1000$), H_k : 標準部材厚 (mm) (=400mm), k_0 : 乾燥開始時材齢の影響を表す係数, k_{ag} : 粗骨材の収縮の影響を表す係数, ε'_{ag} : 骨材の絶乾状態における収縮ひずみ($\times 10^6$) ($0 \leq \varepsilon'_{ag} \leq 1200$), β : 収縮ひずみの経時変化特性を表す項, W/B : 水結合材比($0.35 \leq W/B \leq 0.50$), である. なお, 本研究では, RH は, 47 都道府県の平均的な相対湿度である 70%, W/B は 50% とし, k_r , H , ε'_{ag} は表-2 に示す通りとした.

図-5 に収縮ひずみの経時変化の例を示す. ここで, 「1 本梁」は, 「ファイバー (上層)」, 「ファイバー (中層)」, 「ファイバー (下層)」の平均値としている. 収縮ひずみは橋りょう A の値としたが, その他の橋りょうにおいても, 収縮ひずみの最終値は概ね同程度となることを別途確認している.

クリープひずみは, 土木学会コンクリート標準示方書 [設計編: 標準] の予測式に従い, 設定した. 本研究では, 降水の影響を構造物表面に液状水が直接作用するのではなく, 外気の相対湿度 95% を与えることで表現した. すなわち, 上層-中層-下層の外気相対湿度 RH を 95-70-70% とした.

図-6 にクリープ係数の経時変化を示す. 「ファイバー (降水あり)」は上層, 「ファイバー (降水なし)」は中層および下層のクリープ係数を示す. また, 収縮ひずみの場合と同様に, 「1 本梁」は, 上層, 中層, 下層の平均値とした.

(3) 解析概要

本研究では, 図-3 および図-4 に示した解析モデルに対し, 各ステップにおける変位量を算定した. 作用は, 死荷重 (固定死荷重と付加死荷重), プレストレス, 収縮, クリープを考慮した. 解析は, 施工開始から 80 年後まで実施した.

(4) 単純桁の長期変形

図-7~図-9 に, 版上載荷から 80 年後に生じている支間中央の鉛直変位を示す. なお, 橋りょう C は, 橋りょう D と同様の傾向であった. SH はコンクリートの乾燥収縮および自己収縮により生じる変位を示しており, 鉄筋の拘束による影響, 収縮に起因するプレストレスロスや不静定力による影響が考慮されている. また, CR はクリープにより生じる変位を示しており, 有効プレストレスの変化に伴う変形や不静定力により生じるクリープ変形を示している. SH+CR は収縮により生じる変位とクリープにより生じる変位の合計値を示している.

収縮による鉛直変位は, 全てのケースにおいて, 仮想 1 本梁モデルでわずかに鉛直下向き (以下, たわみ) の変位が生じる. これは, 鉄筋の拘束や収縮に起因するプレストレスロスが要因である. なお, 鉄筋の拘束による影響は小さく, 収縮に起因するプレストレスロスが多く割合を占めることを別途確認している. また, ファイバーモデルでは, 鉛直上向き (以下, 上反り) となる. この要因は, 図-5 に示したように, 上層は降水の影響を受けることにより収縮ひずみが小さく, これにより断面内にひずみ勾配が生じ, 桁全体に上向きの曲率が発生するためである.

クリープによる鉛直変位は, ファイバーモデルと 1 本梁モデルで同程度となった. 橋りょう A, D では, 上反りとなることに対し, 橋りょう B ではたわみとなった. 主な要因は, 有効プレストレスによる上反りと死荷重によるたわみに対するクリープ変形のバランスである.

収縮とクリープによる鉛直変位の合計は, クリープによる変位方向の向きおよび収縮とクリープそれぞれによる変位の絶対値により傾向が異なる.

ここで, 図-10 に有効プレストレス, 死荷重それぞれにより生じる曲げモーメントの関係を示す. 桁の構造形式ごとに色分けしている. 有効プレストレスによる曲げモーメントは, 有効プレストレス力にコンクリート断面と PC 鋼材の重心間の距離を乗じることで簡易的に求めた. ここで, 有効プレストレス力は, 緊張力に PC 鋼材の断面積を乗じ, さらに有効係数 η を乗じて算定した. 有効係数 η は, 平均的な値である 0.85 とした. 図-10 には, 表-1 に示した PC 単純桁以外の 3 例も併せて掲載している. 図中の 1:1 の線より下側, つまり有効プレストレスの影響が大きい橋りょう A および D は, クリープによる上反りが生じている. また, 検討対象ではない 1:1 の線より下側となる PCT 形桁も同様に上反りが生じることを別途確認している. これらより, クリープによる長期変形は, 断面形状や鋼材配置等により上反りかたわみかを推定できると想定される. なお, PC 構造の橋りょうは, 施工時および施工後において, コンクリートや PC 鋼材に作用する応力度に制限値を設けているため, 同規模の橋りょうであれば, 死荷重と PC 鋼材の配置の関係が大きく変わることは想定しづらい. そのため, クリープによる長期変形が上反りになるか, また, 絶対値が収縮による長期変形と比較して大きいかにより, 長期変形の傾向を推定することができる.

(5) PC ラーメン橋の長期変形

図-11 に PC ラーメン橋の鉛直変位を示す. 変位は, 版上載荷から 80 年後までの変位としており, 単純桁と同様に鉛直下向きを正としている. また, 単純桁の場合, 支間中央が変位最大となることが明らかなため, 横軸を

経過日数とした。しかし PC ラーメン橋では、変位分布を把握するため、横軸を橋軸方向の接点位置とした。

支間割が 1:2:1 程度の支間割である橋りょう F では、仮想 1 本梁モデルとファイバーモデルの変位は概ね同様の傾向となり、側径間で上反り、中央径間でたわみとなった。中央径間における収縮による鉛直変位は、仮想 1 本梁モデルよりもファイバーモデルの方が大きくなった。これは、仮想 1 本梁モデルとファイバーモデルで不静定力は同じだが、ファイバーモデルでは断面内にひずみ差が生じるためであり、仮想 1 本梁モデルとファイバーモデルの変位の差がひずみ差により生じる変位となる。なお、支間長が異なるが、橋りょう F と同様に 1:2:1 程度の支間割の他の橋りょうにおいても同様の傾向となることを別途確認している。

一方で、支間割が 1:1:1 程度の橋りょう E の場合、仮想 1 本梁モデルではたわみが側径間で最大、ファイバーモデルではたわみが中央径間で最大となり、変位が最大となる箇所が異なった。仮想 1 本梁モデルと比較してファイバーモデルでは、断面内に生じるひずみ差により、中央径間のたわみが大きくなり、その影響で橋脚が支間中央側に回転するため、側径間よりも中央径間のたわみが大きくなることを別途確認している。なお、橋りょう F の場合、側径間が相対的に短いため、橋りょう E とは異なり側径間のたわみが小さいと推察される。また、表-1 に示す通り、仮想 1 本梁モデルは、設計時点で変形とも傾向が異なり、解析モデル影響を受けやすい諸元であると推察される。

(6) 軌道整備に与える影響

長期変形が、PC 桁の軌道整備に与える影響を検討する。本研究では、版上載荷に軌道敷設が含まれており、軌道敷設の時点では、軌道が鉛直方向に一定の勾配で敷設されることとし、版上載荷から 80 年後までの変位が軌道の変位と同等とした。また、軌道整備の目安として用いられる 40m 弦正矢を指標として用いた。図-12 に版上載荷から 80 年後における 40m 弦正矢を示す。40m 弦正矢は収縮とクリープの合計としている。なお、表-2 に掲載したケースに加え、骨材の絶乾状態における収縮ひずみ $\epsilon_{\text{乾}}$ が 400×10^{-6} の場合も検討ケースとした。支間長が 40m 以下の単純桁の場合、支間中央のたわみとした。PC ラーメン橋の場合、任意の 40m を設定し、正矢が最大となる値を算定した。

橋りょう B, C では、ファイバーモデルよりも仮想 1 本梁モデルの 40m 弦正矢が大きくなった。これは、図-8 に示したように、クリープによるたわみの影響が大きく、収縮による変位がファイバーモデルでは上反り、仮想 1 本梁モデルではたわみとなり、ファイバーモデルでは収縮とクリープによる変位が逆向きになることが要因であ

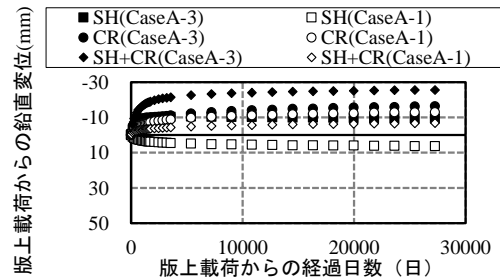


図-7 鉛直変位の経時変化 (橋りょう A)

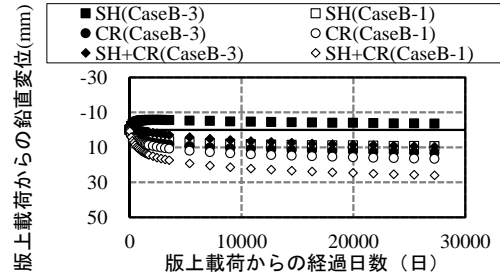


図-8 鉛直変位の経時変化 (橋りょう B)

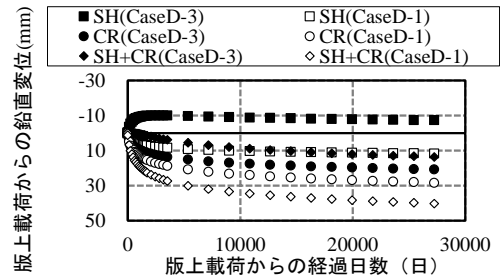


図-9 鉛直変位の経時変化 (橋りょう D)

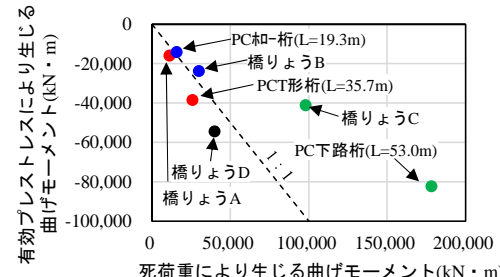


図-10 曲げモーメントの関係

る。なお、骨材の絶乾状態における収縮ひずみ $\epsilon_{\text{乾}}$ による影響は、PC ラーメン橋を含めたすべての橋りょうで比較的小さいことを確認した。

橋りょう A では、ファイバーモデルよりも仮想 1 本梁モデルの 40m 弦正矢が小さくなった。これは、橋りょう B, C とは異なり、クリープによる変位が上反りであり、ファイバーモデルでは収縮とクリープによる影響がどちらも上反りとなるためである。

橋りょう D では、ファイバーモデルと仮想 1 本梁モデルで正負が逆転した。橋りょう A と同様に、ファイバーモデルにおける収縮による影響およびクリープによる影響はどちらも上反りだが、橋りょう A とは異なり、仮想 1 本梁モデルにおける収縮によるたわみの影響がクリープによる上反りの影響よりも大きいことが要因である。

橋りょう F では、40m 弦正矢が最大となる中央径間において、ファイバーモデルよりも仮想 1 本梁モデルの

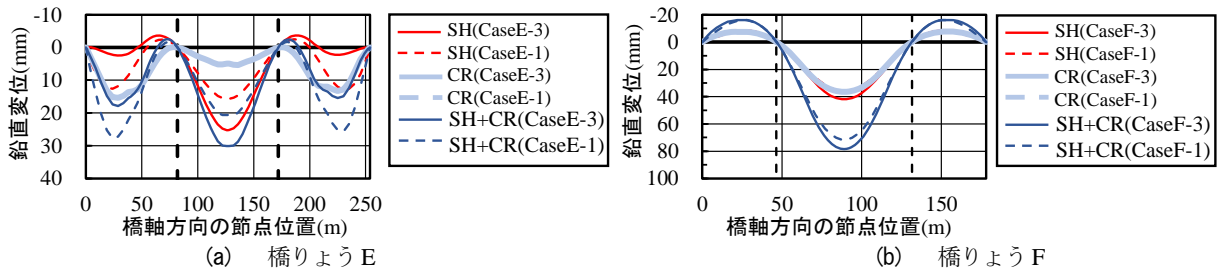


図-11 PC ラーメン橋の解析モデル

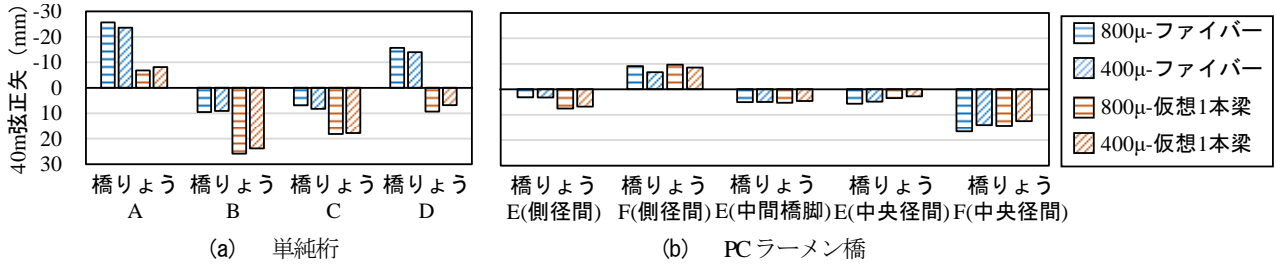


図-12 各橋りょうにおける40m弦正矢

表-3 各橋りょうの軌道整備回数

	軌道整備回数				軌道整備回数の差分			
	ファイバー		仮想1本梁		「ファイバー」-「仮想1本梁」		「+0年」-「+2年」	
	+0年	+2年	+0年	+2年	+0年	+2年	ファイバー	1本梁
橋りょうA	3	1	0	0	3	1	2	0
橋りょうB	1	1	3	2	-2	-1	0	1
橋りょうC	0	0	2	1	-2	-1	0	1
橋りょうD	2	0	1	0	1	0	2	1
橋りょうE	側径間	1	1	1	1	0	0	0
	中間橋脚	1	1	1	0	1	0	1
	中央径間	1	0	0	0	1	0	1
橋りょうF	側径間	1	0	1	1	0	1	0
	中央径間	3	2	3	1	0	1	2

注1) 軌道整備回数の赤字は、3回以上の場合を示す。注2) 軌道整備回数の差分の赤字は、3回以上の場合を示す。注3) 軌道整備回数の差分の青字は1回以下の場合を示す。注4) 軌道整備回数が負の場合、ファイバーモデルよりも仮想1本梁モデルの軌道整備回数が多いことを示す。

40m 弦正矢が小さくなった。これは、断面内のひずみ差が要因と想定される。また、全体的にモデル化の手法による影響はそれほど大きくなかった。

橋りょう E では、40m 弦正矢が最大となる箇所がファイバーモデルと仮想 1 本梁モデルで異なる。これは、(5) に示したように支間割が要因であると想定され、モデル化による影響が大きい橋りょうであった。また、図-11 に示すように、橋りょう F では中間橋脚付近で変位が生じないが、橋りょう E では中間橋脚付近で変位が生じており、軌道整備や乗り心地に影響すると想定される。

表-3 に、各橋りょうの軌道整備回数を示す。図-12 において、骨材の絶乾状態における収縮ひずみ ϵ_{sg} による影響が小さいことを確認したため、 800×10^6 のケースのみ掲載している。軌道整備回数は、40m 弦正矢に対し、軌道整備の目安となる 7mm で除した値とした。また、40m 弦正矢は、軌道敷設時を 0 としており、軌道敷設時期の影響を受けることとなる。そこで、表-3 には、軌道敷設を 2 年遅くした場合の結果も掲載した。なお、鉄道構造物の場合、橋りょうごとに軌道を敷設せず、広範囲の橋りょうに対してまとめて軌道を敷設する場合が多

く、施工順序が早い橋りょうの場合、軌道敷設までに比較の日数が経過することとなる。また、標準的な軌道装置は、高さの調整代が 20mm である。軌道整備回数が 2 回の場合、40m 弦正矢は、14mm~21mm であり、標準的な軌道装置で調整できる高さと同程度以下となる。そのため、ここでは、軌道整備回数が 2 回以下か、3 回以上に着目した。

軌道整備回数は、橋りょう A, B および F の中央径間で標準的な軌道装置による高さ調整ができない回数となった。ただし、全ての橋りょうにおいて、軌道敷設時期が「+0 年」の場合であり、軌道敷設時期が「+2 年」の場合、全ての橋りょうで軌道整備回数は 2 回以下となった。

解析モデルによる違いを確認すると、橋りょう B および C では、ファイバーモデルよりも仮想 1 本梁モデルの方が軌道整備回数が増える計算結果となった。橋りょう A および D では、ファイバーモデルでは、収縮による影響とクリープによる影響は同じ向きであり、どちらも上反りとなる。しかし、仮想 1 本梁モデルにおける収縮によるたわみの絶対値の影響により、橋りょう A では上反り、橋りょう D ではたわみとなり、その傾向が異な

る。解析モデルによる影響を受けやすい構造と考えられる。橋りょう F では、着目位置により軌道整備回数が仮想 1 本梁モデルの方が多いか、ファイバーモデルの方が多いか異なるが、その影響は小さい。

橋りょう E では、ファイバーモデルと仮想 1 本梁モデルで軌道整備回数は大きく変わらない。ただし、図-11 (a) に示したように最大変位が生じる箇所が異なるため、解析による影響を受けやすい橋りょうと考えられる。軌道敷設時期による違いを確認すると、橋りょう A、橋りょう D および橋りょう F の中央径間で 2 回となり、これらの橋りょうは、軌道敷設時期の影響を受けやすい構造諸元の橋りょうと推察される。

3. 解析手法の提案

長期変形は、将来的な軌道整備に影響をおよぼすが、その影響の度合いに応じてファイバーモデルを用いた解析を実施することが適切である。そこで、本研究により得られた結果を用いて、橋りょうの構造諸元や構造形式、軌道敷設時期および軌道整備の実施頻度に応じて、設計時に軌道整備への影響を検討するかを整理した。

図-14 に、軌道整備への影響の検討に関するフローを示す。図-14 に示す軌道狂いの標準値は、標準的な軌道装置で軌道整備可能な値とし、軌道整備回数が 2 回以下の場合を軌道狂いが標準的かどうかの目安とした。

軌道整備を頻繁に実施可能な場合、設計時に軌道整備への影響の検討は省略することとした。例として、バラスト軌道を有する橋りょうが考えられる。

軌道整備を頻繁に実施できないが、軌道狂いが標準値以下であり、一般的な構造形式等の条件の場合、設計時に軌道整備への影響の検討は省略してもよいこととした。ここで、一般的な構造形式等の条件とは、構造形式や PC 鋼材の配置を含む構造諸元、スパン、支間割、材料特性、気象条件等により判断し、採用事例が多く、過度なたわみが生じた等の報告がない諸元とする。本研究の検討の結果、PC 単純ホロー桁や、PC 単純下路桁および PC 単純箱桁の場合で、直結軌道を有する橋りょうや、PC 単純 T 形桁や支間割が 1:2:1 の PC ラーメン橋の場合で、軌道敷設まで比較的期間が長い橋りょうが該当する。

軌道整備を頻繁に実施できないが、軌道狂いが標準値以下であり、一般的な構造形式等の条件ではない場合、設計時において、軌道整備への影響の検討を推奨することとした。本研究では、支間割が 1:1:1 の PC ラーメン橋が該当する。PC ラーメン橋は、橋脚に作用する不静定力の増大を防ぐため、中央径間と比較して側径間を短くすることが一般的である。

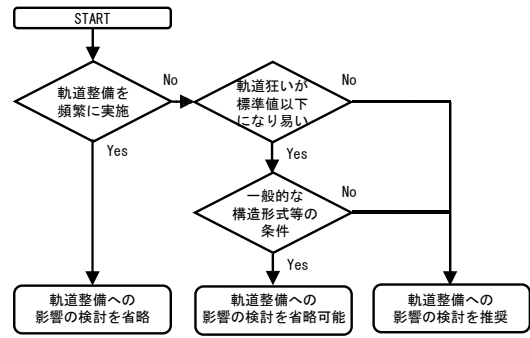


図-14 軌道整備への影響の検討に関するフロー
表-3 単純桁の構造諸元

		PCT形桁		PC箱桁	PC短-桁		PCT路桁	
幅(m)		5.9	5.9	11.4	15.4	11.2	13.6	14.6
スパン(m)		26.2	35.7	34.7	19.4	29.0	43.8	53.0
桁高(m)		1.8	3.2	2.2	1.0	1.5	4.4	5.0
桁高スパン比		1/15	1/11	1/16	1/19	1/19	1/10	1/11
部材厚 H(m)	上層	0.30	0.29	0.38	0.35	0.26	0.55	0.80
	中層	0.25	0.40	0.60	0.37	0.48	0.60	0.60
	下層	0.31	0.29	0.31	0.25	0.25	0.67	0.67
PC 鋼材	記号	SWPR7BL		SWPR7AL	SWPR7BL		SWPR7BL	
	呼び名	12S12.7		12S12.4	12S12.7		12S15.2	
	本数	12本	16本	45本	28本	32本	28本	40本

表-4 PC ラーメン橋の構造諸元

		3径間連続PCラーメン橋			
幅(m)		11.8	11.8	11.9	13.8
橋長(m)		254.0	178.0	137.4	118.0
支間長(m)		82.90/82	46.5/85.46.5	35.2/67.35.2	30.5/8.30
支間割		1:1:1程度	1:2:1程度	1:2:1程度	1:2:1程度
桁高*(m)		3.5	3.0	2.5	2.5
桁高スパン比*		1/26	1/30	1/36	1/36
部材厚 H*(m)	上層	0.38	0.41	0.40	0.40
	中層	0.45	0.45	0.45	0.58
	下層	0.33	0.31	0.29	0.29
PC 鋼材*	記号	SWPR7BL			
	呼び名	12S15.2		12S12.7	
	本数	12本	30本	26本	26本

*:中央径間の支間中央の値を示す。

軌道整備を頻繁に実施できず、軌道狂いが標準値以上の場合、設計時に軌道整備への影響の検討を推奨することとした。本研究では、PC 単純 T 形桁および支間割が 1:2:1 の PC ラーメン橋の場合で、軌道敷設まで比較的期間が短い橋りょうが該当する。

軌道整備への影響を検討する場合、部位に依存した収縮ひずみやクリープひずみを考慮することが重要である。これを評価できる手法として、本研究で用いたファイバーモデルを用いた骨組み解析、および DuCOM-COM3 を用いた有限要素解析が報告されている。なお、本研究によると、1 本梁モデルによる骨組み解析でもファイバーモデルと同等の結果を示した場合もあるが、条件に応じてこの傾向は異なるため十分留意しなければならない。

表-3 および表-4 に別途確認を行ったケースを含め、検討を実施した橋りょうの諸元を示す。図-14 のフローチャートは、本研究で検討した結果から得られたものである。検討対象橋りょうと橋長や支間長、支間割、部材厚、桁高、PC 鋼材の配置、施工条件等の条件が大きく異なる場合、軌道整備回数に与える影響も異なる可能性があるため、全ての橋りょうに適用可能なわけではないことに留意し、設計時における軌道整備への影響の検討実施や解析手法を選定する必要がある。

4. おわりに

本研究では、PC 橋りょうを対象とした解析により、長期変形が軌道整備に与える影響を構造形式や構造諸元および軌道敷設時期等の条件ごとに整理し、設計時における軌道整備への影響の検討が必要かを整理した。得られた結果を以下に示す。

- 1) PC 単純ホロー桁やPC 単純下路桁およびPC 単純箱桁の場合で、直結軌道を有する橋りょうや、PC 単純 T 形桁や支間割が 1 : 2 : 1 の PC ラーメン橋の場合で、軌道敷設まで比較的期間が長い橋りょうは、施工開始から 80 年後における 40m 弦正矢が比較的小さい値であったため、設計時での軌道整備に関する影響は小さいと考えられる。
- 2) PC 単純 T 形桁や支間割が 1 : 2 : 1 の PC ラーメン橋の場合で、軌道敷設まで比較的期間が短い橋りょうでは、施工開始から 80 年後における 40m 弦正矢が比較的大きい値であった。このような場合には、計画的な維持管理を行うために、設計時に軌道整備に関する影響を検討することが望ましい。
- 3) 支間割が 1 : 1 : 1 の PC ラーメン橋は、一般的な支間割ではなく、施工開始から 80 年後における 40m 弦正矢が比較的小さい値であったが、解析モデルによる変形性状に違いがみられた。このような場合には、計画的な維持管理を行うために、設計時に軌道整備に関する影響を検討することが望ましい。

また、本研究における対象橋りょうとの構造諸元や施工条件の違いを確認し、解析手法を選定することが望ましい。

REFERENCES

- 1) 渡邊忠朋, 土屋智史, 坂口淳一, 笠井尚樹: 断面の部位

- 別に時間依存変形を考慮した線材モデルによる PC 橋梁の長期たわみ解析, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.207-226, 2013. [Watanabe, T., Tsuchiya, S., Sakaguchi, J. and Kasai, N.: FRAME ANALYSIS OF LONG-TERM DEFLECTION FOR PC BRIDGES CONSIDERING TIME DEPENDENT BEHAVIOR ON EACH PART OF SECTION, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.69, No.2, pp.207-226, 2013]
- 2) 渡辺 健, 中村麻美, 石田哲也, 渡邊忠朋: 混合セメントおよび水掛かりの影響を考慮したコンクリートの収縮ひずみ予測式の提案, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.78, No.1, pp.105-120, 2022.3. [Watanabe, K., Nakamura, M., Ishida, T. and Watanabe, T.: PREDICTION EQUATION FOR SHRINKAGE STRAIN OF CONCRETE CONSIDERING THE EFFECT OF MIXED CEMENT AND SUPPLIED WATER, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.78, No.1, pp.105-120, 2022.3.]
- 3) 古川 敦, 新幹線の軌道技術管理, RRR, 2011.3.[Furukawa, A.: *Shinkansennokidougijutsukanri*, RRR, 2011.3.]
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2017.3. [JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS: STANDARD SPECIFICATIONS FOR CONCRETE STRUCTURES – 2017, DESIGN, 2017.3.]
- 5) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale modeling of concrete performance –integrated material and structural mechanics, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.2, pp.91-126, 2003.
- 6) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Taylor and Francis, 2008.
- 7) 荒木一徳, 渡辺健, 石田哲也: プレストレストコンクリートラーメン橋りょうの長期変形に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.693-701, 2022年3月. [Araki, K., Watanabe, K. and Ishida, T.: Analytical study on long-term deflection of prestressed concrete ridged-frame bridge, *Journal structural engineering*, Vol.68A, pp.693-701, 2022. 3.]

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

ANALYTICAL STUDY ON LONG TERM DEFLECTION AND COUNTERMEASURES OF RAILWAY PRESTRESSED CONCRETE BRIDGES

Katsunari ARAKI, Ken WATANABE and Yuto ONO

Recent years, a frame analysis using a “Fiber model” has been proposed for calculating the long-term deflection of prestressed concrete bridges, so-called PC bridges. A frame analysis using the fiber model has been reported more accuracy than usual frame analysis using single beam element. If the long-term deflection of PC bridge will affect the track maintenance due to inexperienced structural types, etc., this should be taken into account in the design. In this study, the effects of long-term deflection of PC bridges on track maintenance are summarized for each structural type, structural specification, and timing of track installation, and the flow chart that is useful for making the design of track maintenance was proposed based on the study of the effects on track maintenance.