

# 論文 長期的な高低変位を考慮した新幹線最長 スパンのPCエクストラドーゾド橋の設計

西 恭彦<sup>1</sup>・石井 秀和<sup>1</sup>・佐藤 貴史<sup>2</sup>・鳶那 幸治<sup>3</sup>・井上 翔<sup>2</sup>  
西澤 知孝<sup>4</sup>・荒津 大輔<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部

(〒231-8315横浜市中区本町6-50-1横浜アイランドタワー)

E-mail:nishi.tak-67y6@jrtr.go.jp

<sup>2</sup>正会員 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社

<sup>3</sup>独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社

<sup>4</sup>株式会社千代田コンサルタント 交通基盤事業部

PCエクストラドーゾド橋は、活荷重たわみの影響のほか、クリープ・乾燥収縮の影響、主桁や斜材の温度変化の影響により主桁の高低変位が生じる。動的軌道検測における軌道の高低変位は、活荷重作用時の主桁の高低変位を含んだ値として検出され、整備目標値である40m弦±7mmを上回ると軌道整備の対象とされる。本論文では、完成すると新幹線で最長となるスパン155mの3径間連続PCエクストラドーゾド橋の設計について、営業開始後の主桁の高低変位に起因した軌道の整備目標値超過に着目し検討を行った。その結果、営業開始時点で適切な軌道の上げ越し量を設定することにより、整備目標値を超過しない可能性を示した。

**Key Words :** *PC extradosed bridge, vertical deflection, 40m chord versine, control value for track maintenance, camber of the track*

## 1. はじめに

営業開始前の速度向上試験や維持管理の際に行われる軌道の動的検測の結果には、活荷重作用時の桁の高低変位が含まれる。桁の設計における高低変位の検討は、一般的には「鉄道構造物等設計標準 変位制限」<sup>1)</sup> (以下、変位制限標準と呼ぶ) に基づき、軌道整備が行われていることを前提として設計列車荷重によるたわみに対して行っている。しかし、スパンの長い橋りょうでは、列車荷重によるたわみが動的軌道検測の結果に与える影響が大きくなる可能性が示されている<sup>2)</sup>。さらに、PCエクストラドーゾド橋のように、クリープ・乾燥収縮や温度変化の影響を受けやすい構造形式の橋りょうでは、長期的な高低変位の影響も大きいと考えられる。新幹線で最長スパンとなる中央支間155mの3径間連続PCエクストラドーゾド橋<sup>3)</sup>の設計にあたり、構造物の長期的な高低変位を考慮して、軌道検測結果に与える影響を検討したので報告する。

## 2. 長スパンPC橋の高低変位

### (1) 桁の高低変位と軌道の高低変位の関係

変位制限標準に基づく常時の走行安全性、乗り心地に関する使用性の照査が、列車荷重によるたわみに対して行うのが一般的である一方、スラブ軌道等の直結系軌道の敷設にあたっては、コンクリート構造物に、軌道に影響を与えるようなクリープ、乾燥収縮、温度変化等による長期的な変形が生じないことを前提としている<sup>4)</sup>。また、軌道の施工においては、列車荷重によるたわみおよび敷設後のクリープ等による変形を考慮せずにレールレベルを設定し、それに基づいて静的仕上がり基準値を満たすように施工するのが一般的で、営業開始前の速度向上試験で検測車による動的軌道検測を行い、軌道の高低変位が整備目標値を超過する場合は、上げ越し量を設定して軌道整備を行っている。この際の高低変位の目標値は、新幹線鉄道の場合、通常は40m弦で±7mmである<sup>5)</sup>。これは、列車荷重によるたわみ等の桁の高低変位を含んで検測される値であるが、変位制限標準とは特に関連付

けられていない。桁も軌道も計画された縦断線形に平行に施工されていると仮定すると、桁のたわみは軌道の高低変位に相当するが、乗り心地に関する限界値を満たす桁のたわみ形状から40m弦高低変位量を計算すると、整備目標値である7mmを超過していることがある<sup>2)</sup>。

## (2) 長スパンPC橋での高低変位の発生と対策

新幹線の直結系軌道を敷設したPC斜張橋では、クリープ・乾燥収縮に伴う累積的な高低変位、温度変化に伴う季節的に変動する高低変位による軌道への影響が報告されている。これらの長期的な高低変位への軌道保守上の対応は、通常はタイププレート上への鉄板の挿入により、軌道をこようして整正を行うが、それで不十分な場合は、厚底タイププレートへの交換や軌道スラブごとこようする検討を行うことになる<sup>6)</sup>。また、PCラーメン橋においては、季節的な軌道の高低変位が生じていて、軌道整備を行う時期によっては、再度の整備が必要となることが報告されている<sup>8)</sup>。原因としては、温度変化による主桁の伸縮、主桁と斜材の温度差、クリープ・乾燥収縮による継時的な変形が考えられる。

これらの影響を緩和するため、施工当時、新幹線鉄道橋として最長の支間となる橋長450m、支間150mの4径間連続PCエクストラードズド橋の設計・施工にあたって、以下のような対策を行っている<sup>10)</sup>。

- ・ ラーメン構造は、**図-1**に示すように、主桁の伸縮により剛結された橋脚が曲げ変形をするため、主桁の高低変位が生じる。支承構造として主桁の伸縮を橋脚で拘束しないようにする。ただし、支承構造とすると列車荷重によるたわみの影響が大きくなるため、**図-2**のような2線支承として支点部の回転変位を拘束する。
- ・ スパンが大きく、斜材等による補強が必要な場合は、斜材角度の浅いエクストラードズド橋とする。斜材角度が浅いため、斜材の伸縮による鉛直方向の変位が小さく、軌道面の高低変位への影響が小さい。
- ・ 斜材と主桁に温度差が生じると、斜材のみが伸縮して、主桁の高低変位の原因となる。斜材保護管の径を大きくし、鋼材のまわりの断熱効果を期待してグラウトで充填する。また、保護管の色を熱の影響を受けにくい白色系とする。

これらの対策により、供用開始後の軌道整備の回数は削減されたと考えられるが、設計上の検討は標準活荷重を用いて行っており、動的軌道検測との関係は明確でなかった。

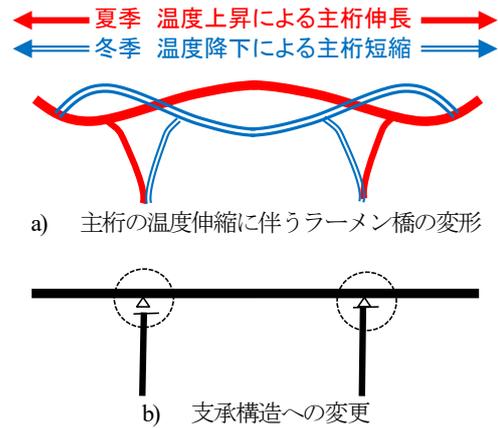


図-1 PC連続桁の温度伸縮による高低変位への対策

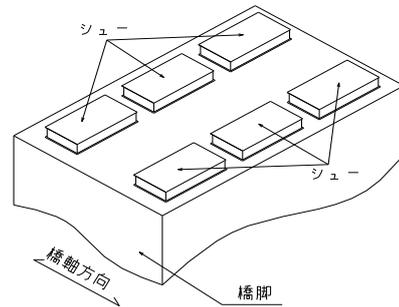


図-2 2線支承

## 3. 設計の概要

今回の検討対象の3径間連続PCエクストラードズド橋を**図-3**に示す。主な設計内容は**表-1,2**のとおりである。高低変位への対策は、PCエクストラードズド橋の事例を参考にしている<sup>10),11)</sup>。

可動支承はすべり支承であり、中間橋脚はダンパーストッパーとして地震時の水平力を負担する。固有周期は、固有値解析により求めているが、主桁の鉛直方向の変位が卓越する8次モードの固有周期は0.677秒であった。速度効果の衝撃係数 $i_\alpha$ は、「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物（以下、RC標準）」（平成16年版）<sup>12)</sup>付属資料4のノモグラムを用いて算定した。 $i_\alpha$ の算定に使用する部材のスパン $L_b$ は連続桁の簡易計算用の部材（応力影響）スパン75(m)<sup>13)</sup>、車両長 $L_v$ は実車両長25(m)とし、固有周期は1.4秒とした。構造物の固有周期は、大きいほど $i_\alpha$ が大きくなるが、現地の地盤種別がG4地盤であり、地震時の走行安全性に係る振動変位の照査<sup>1)</sup>による下部工の固有周期の上限が1.4秒程度となることから、それを上限値の目安として安全側に設定した。なお、固有周期が0.677秒のケースの速度効果の衝撃係数 $i_\alpha$ は、0.452である。

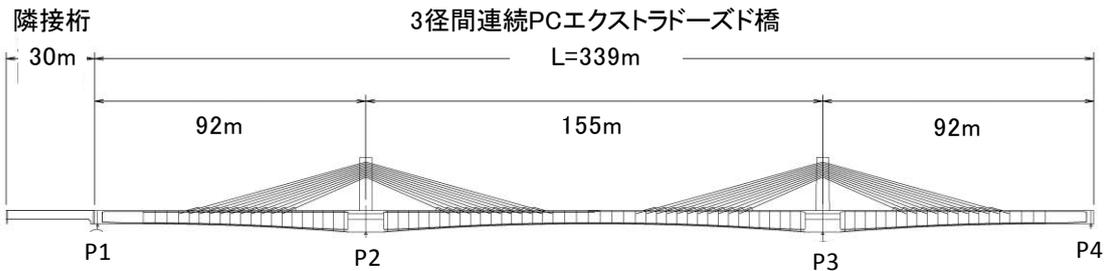


図-3 橋りょう一般図

クリープ、乾燥収縮は、RC標準（平成16年版）に示されている方法では、体積表面積比が適用範囲外になるため、RC標準（平成4年版）<sup>14)</sup>の式（解5.2.2），（解5.2.7）を使用した。設計段階で想定した工程を表-3に示す。計算上、クリープ乾燥収縮は30年で収束する。

#### 4. 高低変位の検討

##### (1) 軌道の高低変位を考慮した桁の高低変位の検討手法

変位制限標準に基づく列車荷重によるたわみの照査は、使用する活荷重や限界値が動的軌道検測の測定値および整備目標値と直接関連づけられていないため、その照査で用いた応答値を単純に40m弦に換算すると過大な値となる。そこで、活荷重の載荷範囲や軸重を動的軌道検測と同等の条件として検討する手法が提案されている<sup>2)</sup>。今回対象としたPCエクストラドーズド橋では、温度やクリープ・乾燥収縮による長期的な変形の影響も大きいと考えられるため、列車荷重とあわせて考慮することにした。検討条件としては、次のとおりである。

- ・ 部材の伸縮に影響する構造物の温度変化は年間を通して±15℃とした。
- ・ 日照等の影響により、全体の温度変化に加えて断面寸法等の条件が異なる斜材と主桁に生じる温度差<sup>11,13,14)</sup>は±15℃とした。
- ・ クリープ・乾燥収縮による変形は、施工中の上げ越しや速度向上試験等に伴う軌道整備が行われるものと考えて、営業運転開始時点（主桁中央併合後2年と想定）を0とし、それ以降の変位を考慮した。
- ・ 列車荷重は営業用車両に相当するH-13荷重の単線載荷とした。衝撃係数は、乗り心地に関する使用性で用いる値を適用した。
- ・ 橋脚付近の40m弦高低変位は、前後のスパンのたわみの影響を受けるため、隣接する桁の影響を考慮する必要がある。PCエクストラドーズド橋のスパン割と部材断面は線路方向に対称なので起点側、終点側のうち影響の大きい方のみで検

表-1 主な設計内容

設計荷重	P-16標準活荷重
設計速度	260km/h
支間長	90m+155m+90m
主塔高、斜材段数	17.5m, 11段
斜材保護管仕様	φ200mm, グラウト方式, 白色
支承方式	P1: 可動, P2: 可動・2線シユール P3: 固定・2線シユール, P4: 可動
桁高	柱頭部7.0m, 支間部4.3m
固有周期	1次モード: 1.833秒 8次モード: 0.677秒
衝撃係数	0.582 ( $i_\alpha = 0.477, i_c = 0.071$ ) (走行安全性) 0.364 (複線) (使用性) 0.436

表-2 変位制限標準に基づくたわみの照査結果（応答値/限界値）

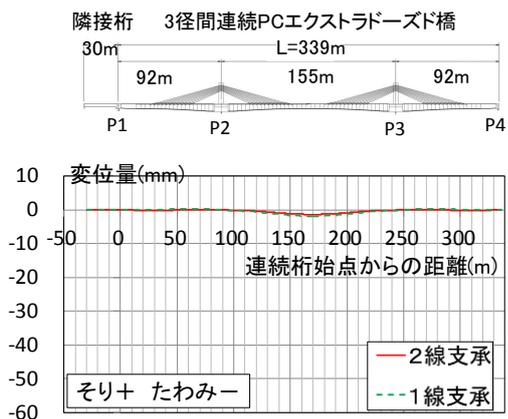
	側径間	中央径間
支間長(L m)	90m	155m
乗り心地	11.6mm/52.9mm 0.219	33.3mm/91.2mm 0.365
(限界値)	(L/1700)	(L/1700)
走行安全性	27.0mm/64.3mm 0.420	77.7mm/221.4mm 0.351
(限界値)	(L/1400)	(L/700)

表-3 想定した工程

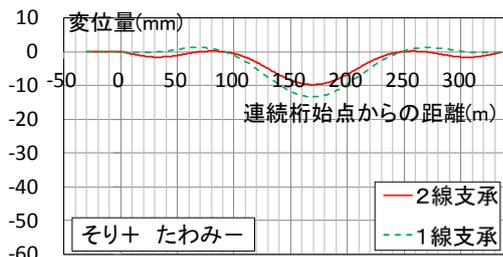
中央閉合からの期間	
128日	路盤コンクリート, 軌道載荷
2年 (730日)	営業運転開始
30年	変形が収束

討することとした。隣接桁の桁長は、起点側は30m、終点側は20mで、列車荷重によるたわみが大きく40m弦高低変位の大きくなる起点側を対象とする。隣接桁は列車荷重によるたわみのみを考慮する。

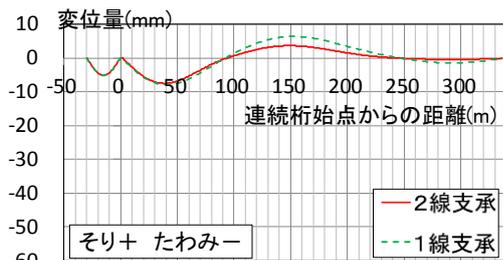
- ・ 列車荷重の載荷範囲は、P1橋脚から側径間までの検討を行うときは隣接桁と第1径間に載荷、P2橋脚付近から中央径間までの検討を行うときはP1橋脚からP3橋脚までの載荷とした。



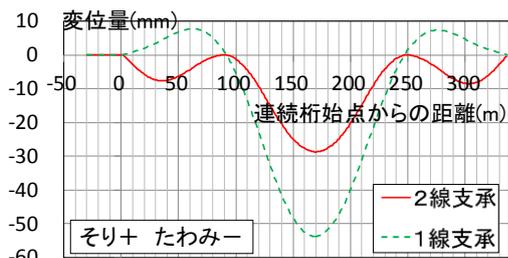
a) 温度上昇 (15°C) 時



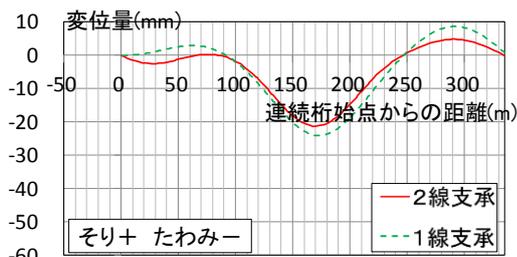
b) 斜材のみ温度上昇 (15°C) 時



c) クリープ・乾燥収縮収束時



d) 列車荷重載荷時 (隣接桁～P2間)



e) 列車荷重載荷時 (P1～P3間)

図-4 単ケースの高低変位量(mm) (そりが正)

- 2線支承とする場合の解析は、P2、P3橋脚の中心から起点側、終点側各々2.75mの位置にゴム支承の鉛直バネを考慮して行い、中心位置に鉛直バネを配置した1線支承の場合の結果と比較した。

応答値の算定は2次元骨組み構造解析により行った。営業運転開始時点における、活荷重を載荷していない状態での接点の高さを0として求めた高低変位量を桁のそり・たわみとした。また、桁の橋軸方向に40m離れた2点の高低変位を結んだ弦の midpoint とその位置での高低変位との差によって40m弦高低変位を求めることができる。これらは、線形範囲での検討のため、検討は単独の作用のみを考慮して骨組み構造解析で求めた単ケースの応答値を合算して行うことができる。

## (2) 高低変位の検討結果

温度上昇 (+15°C) 時、斜材のみ温度上昇 (+15°C) 時、クリープ・乾燥収縮収束時 (中央径間連結後30年後とし2年後からの変位量)、列車荷重載荷時の各ケースの変位量を図-4に、これらの作用を組み合わせた場合の変位量の最大値を表-4に示す。+はそり、-はたわみである。なお、線形範囲での検討のため、温度降下時は正負を反転させればよい。

図-4 a) によると、1線支承、2線支承の場合に共通して主桁の全体的な温度変化による桁の高低変位は、その他の作用の影響による高低変位に比較して小さい。これは、主桁の伸縮を橋脚で拘束しない支承構造とした効果だと考えられる。

図-4 b), c) のように、斜材のみ温度上昇やクリープ・乾燥収縮による高低変位は、1線支承の場合、中央径間のたわみが大きくなり、その影響で側径間がそりあがるような変形をする。側径間については、高低変位を改善する効果があるように見えるが、表-4に示す中央径間のたわみによる40m弦高低変位量が、列車荷重と組合わせたケースで軌道の整備目標値を大きく上回るため、不適当であると考えられる。以上より、斜材と桁との温度差、クリープ・乾燥収縮による高低変位の影響は、2線支承の採用によって緩和することができるといえる。

なお、表-4に示す通り、本検討結果のそり・たわみの最大値は、変位制限標準の乗り心地に関する使用性のたわみの限界値を超えていないが、40m弦高低変位では軌道の整備基準値を超過している。

## (3) 上げ越しの検討

以上の検討により、営業運転開始後、クリープ・乾燥収縮の収束までに中央径間、側径間で各1回程度の軌道整備 (軌道のこう上) が必要になると考えられる。図-5に示すようにあらかじめ軌道のレールレベルを上げ越して設定することで、桁の高低変位に起因する軌道整備を回避することができるか検討する。なお、桁たわみの実績が設計よりも小さい場合、設定した上げ越し量が過大でレールレベルを下げる軌道整備が必要になる可能性があるが、軌道のこう上に比べて困難であることから、上

表-4 橋りょうの各位置で最大となる高低変位

そり・たわみ量 (mm)		
列車荷重範囲	隣接桁～P2	P1～P3
検討位置	側径間	中央径間
2線支承	-16.64	-60.94
1線支承	-8.53*	-92.98

\*列車荷重+全体温度降下+斜材のみ温度降下  
 その他は列車荷重+全体温度上昇+斜材のみ温度上昇+クリープ・乾燥収縮収束後

40m弦高低変位量 (mm)

列車荷重範囲	隣接桁～P2		P1～P3	
	P1付近	側径間	P2付近	中央径間
2線支承	8.75	-5.93	5.97	-8.62
1線支承	5.21**	-3.01	5.72	-11.05

\*\*列車荷重+全体温度上昇+斜材のみ温度上昇,  
 その他は列車荷重+全体温度上昇+斜材のみ温度上昇+クリープ・乾燥収縮収束後

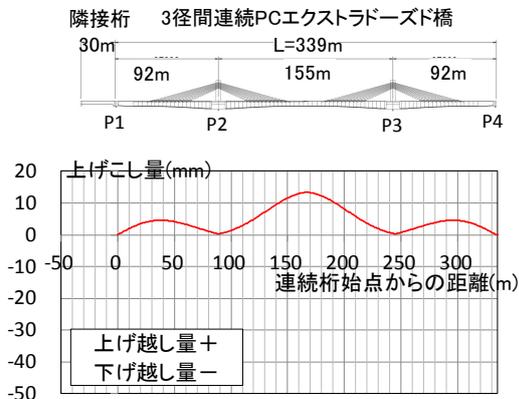


図-5 仮定した上げ越し量

上げ越し量が過大とならないように配慮する。本橋と同様の横断構成である新幹線PCエクストラード橋の列車荷重によるたわみの測定結果から推定した桁剛性が、設計上考慮されている値の2倍程度であるという報告<sup>15)</sup>があることから、桁剛性を2倍として検討した。図-5は、桁剛性を2倍として営業運転開始の時点での列車荷重によるたわみ量分を上げ越すと仮定したものである。この状態から、営業運転開始時点、クリープ・乾燥収縮収束時点の高低変位(そり・たわみ)、40m弦高低変位を算出した結果を図-6に示す。図-6 a-2), a-4), b-2), b-4)に示した40m弦高低変位は、横軸の位置を中心として前後それぞれ20mの位置を結んだ弦からの高低変位を示している。よって、40m弦高低変位の値が正であれば、桁の変位は上に凸のそり形状、負であれば下に凸のたわみ形状であると考えられる。いずれの状態でも、動的軌道検測時に相当する40m弦高低変位は、軌道の整備目標値7 mm以内となる結果となった。

構造物の変形は、コンクリートの線膨張係数、弾性係数、クリープ係数、土木工事・軌道工事の工程による死荷重の載荷時期、軌道検測の時期等の影響を受けるが、設計段階ではこれらを仮定して検討しているため、実際の軌道の上げ越し量の設定は、土木工事・軌道工事の実工程など施工状況や、施工中の変位計測結果を踏まえて

行う必要がある。また、設定した上げ越し量のうち、路盤コンクリート等の土木構造物で行う量と、軌道工事で行う量は、軌道の調整可能な範囲を踏まえて配分する必要がある。

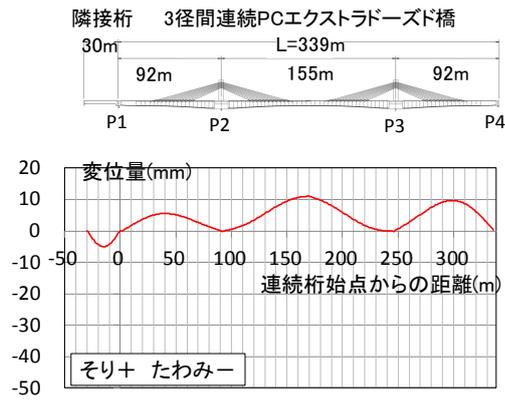
## 5. まとめ

新幹線で最長スパンとなる中央支間155 mの3径間連続PCエクストラード橋の設計にあたり、構造物の長期的な高低変位を考慮して、軌道に与える影響を検討した。その結果、以下のような知見を得ることができた。

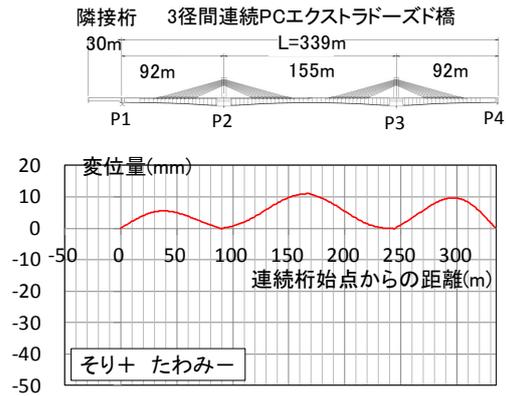
- 今回、検討した橋りょうについても、変位制限標準により活荷重たわみに対する照査を行うと制限値内になる場合でも、動的軌道検測による整備目標値を超える可能性があることがわかった。
- 軌道の整備目標値を考慮して提案された活荷重たわみの検討手法について、クリープ・乾燥収縮、温度変化の影響も考慮して検討できることが分かった。
- 今回検討した橋りょうについて、全体的な温度変化による高低変位は小さく、桁の伸縮を拘束しない支承構造の効果が確認された。
- 斜材と桁との温度差、クリープ・乾燥収縮による高低変位の影響は、2線支承の採用によって緩和することができた。
- 営業開始時点で軌道の上げ越しを適切に行えば、クリープ・乾燥収縮の収束まで、活荷重や温度変化を伴っても、桁の高低変位による影響が軌道の整備目標値を超えないようになる可能性を示した。

## 参考文献

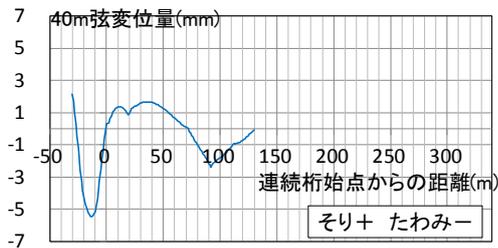
- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限，2006。
- 2) 下津達也，玉井真一：整備新幹線における長大橋りょうのたわみの検討について，第14回鉄道工学シンポジウム，2014。
- 3) 齋藤真秀，長谷川利晴：新幹線最長スパンとなるエクストラード橋の設計・施工計画～北陸新幹線細坪架道橋～，日本鉄道施設協会誌，第56巻，第3号，2018。
- 4) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造，2014。
- 5) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構鉄道建設本部青森新幹線建設局：東北新幹線工事誌（八戸・新青森間），2012。
- 6) 田口正智，小山内正廣，田中成徳，矢内一嘉，堀内篤：新幹線スラブ軌道における低下工法の実施について，土木学会第55回年次学術講演会，2000。



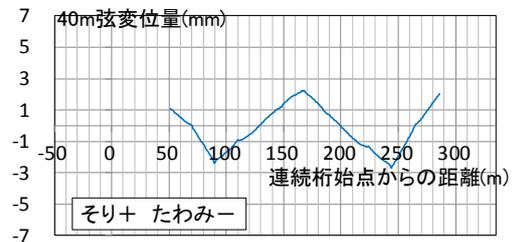
a-1)営業開始時点, 温度降下 (-15°C)  
+斜材温度降下 (-15°C) のそり・たわみ(mm)



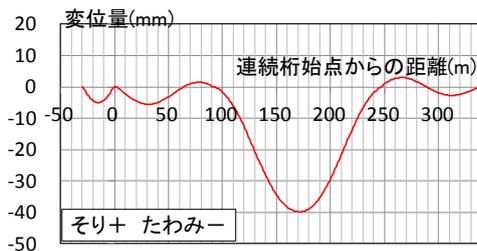
b-1)営業開始時点, 温度降下 (-15°C)  
+斜材温度降下 (-15°C) のそり・たわみ(mm)



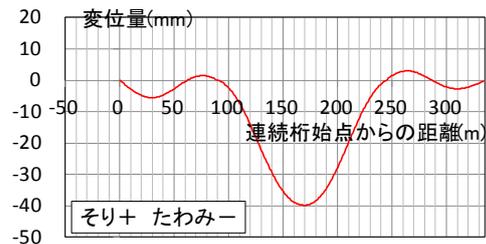
a-2)営業開始時点, 温度降下 (-15°C)  
+斜材温度降下 (-15°C) の40m弦高低変位(mm)



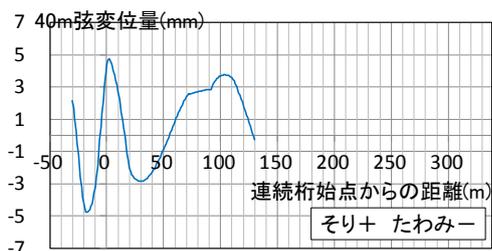
b-2)営業開始時点, 温度降下 (-15°C)  
+斜材温度降下 (-15°C) の40m弦高低変位(mm)



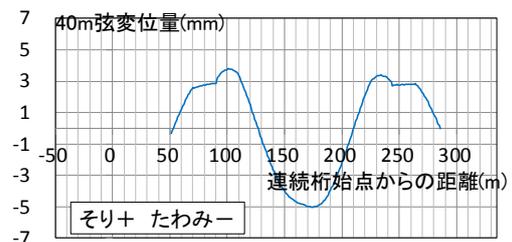
a-3)クリープ・乾燥収縮収束時点,  
温度上昇 (+15°C) +斜材温度上昇 (-15°C)  
のそり・たわみ(mm)



b-3)クリープ・乾燥収縮収束時点,  
温度上昇 (+15°C) +斜材温度上昇 (-15°C)  
のそり・たわみ(mm)



a-4)クリープ・乾燥収縮収束時点,  
温度上昇 (+15°C) +斜材温度上昇 (-15°C)  
のみ 40m弦高低変位(mm)



b-4)クリープ・乾燥収縮収束時点,  
温度上昇 (+15°C) +斜材温度上昇 (-15°C)  
のみ 40m弦高低変位(mm)

a) 列車荷重を隣接桁~P2間に載荷

b) 列車荷重をP1~P3間に載荷

図-6 上げ越しを考慮した高低変位量 (そりが正)

- 7) 田中淳一, 小松朗, 秋山あかね: 北陸新幹線 PC 斜張橋の経年特性, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 2010.
- 8) 小早川輝雄: 長大橋りょうにおける軌道管理の取組

- み, 新線路, 第 68 巻, 第 12 号, 2014.
- 9) 畠山拓也: 長大橋梁における軌道整備手法の研究, 新線路, 第 69 巻, 第 1 号, 2015.
- 10) 玉井真一, 田中健, 鈴木隆, 坂本貴嗣: 新幹線最大

- スパンを有するエクストラドーゾド PC 橋の設計・施工—東北新幹線 三内丸山架道橋—, コンクリート工学, 第 46 巻, 第 7 号, 2008.
- 11) 玉井真一, 千葉寿: エクストラドーゾド橋の変位計測, プレストレストコンクリート技術協会第 20 回シンポジウム論文集, 2011.
- 12) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 2004.
- 13) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限 性能照査の手引き, 2006.
- 14) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 1992.
- 15) 曾我部正道, 下津達也, 後藤恵一, 進藤良則: 鉄道 PC エクストラドーゾド橋の剛性評価, プレストレストコンクリート工学会第 24 回シンポジウム論文集, 2015.
- (2018.4.6 受付)

## DESIGN OF THE PC EXTRADOSED BRIDGE WITH THE LONGEST SPAN FOR SHINKANSEN, JAPANESE HIGH SPEED RAIL, CONSIDERING LONG TERM VERTICAL DEFLECTION

Takahiko NISHI, Hidekazu ISHII, Takashi SATO, Koji TOBINA, Sho INOUE,  
Tomotaka NISHIZAWA and Daisuke ARATSU

Vertical deflection of girder of PC extradosed bridges produced by not only train load and impact load but also effect of concrete creep, shrinkage, temperature change and temperature difference between girder and stay cable is not negligible. When vertical track deflection measured by track inspection car, including vertical deflection of girder produced by train load and impact load, exceeds  $\pm 7$  mm measured by 40m chord versine as control value for maintenance, track maintenance is needed. In this thesis, the vertical deflection of the girder is examined in relation to the track deflection not exceeding the control value for maintenance, in the design of the 3-span continuous PC extradosed bridge with the longest span (155 m) for shinkansen, Japanese high speed rail. From those results, possibility not to exceed the control value for maintenance due to the proper camber of the track at the start of the operation is proposed is shown.