



## 縦断線形を考慮したキャンバーを設けたプレキャストプレストレストコンクリート桁橋 における製作・設計（後編）

— Fabrication and design of precambered precast, prestressed concrete bridge girders —

著：Richard Brice, Stephen J. Seguirant, Anthony Mizumori, and Bijan Khaleghi  
訳：会誌編集委員海外部会

プレキャストプレストレストコンクリート桁（以下、PCaPC 桁）は、道路の縦断線形に合わせるためにあらかじめ主桁にキャンバーを付けて製作することができる。これにより、床版ハンチ高で縦断線形を調整する必要がなくなるため、死荷重を軽減できる。主桁にキャンバーを付けた橋梁プロジェクトは、ワシントン州で主に建設されてきた。本稿では、キャンバーを付けた主桁（Pre-camber, 以下、プレキャンバー桁）における製作、設計、および運搬で配慮した項目について報告する。後編では、プレキャンバー桁における設計、架設および運搬で配慮した項目について報告する。

キーワード：プレキャストコンクリート、道路線形、キャンバー

### 4. 設 計

#### 4.3 標準設計の調整

非線形の鋼材配置による偏心がキャンバー量に影響を及ぼすため、標準設計の上げ越し量を調整する必要がある。たとえば、上げ越し時の桁が上に凸となる形状（以下、クレスト型）の桁に PC 鋼材を曲線配置した場合は、標準桁に比べ、PC 鋼材は水平軸に対して浅い角度となる。その結果、プレストレスの鉛直成分は標準桁よりも減少するため、せん断耐力も低下する。一方で、上げ越し時の桁が下に凸となる形状（以下、サグ型）の桁の場合は、標準桁に比べ PC 鋼材は水平軸に対する傾斜角が大きくなるため、せん断耐力が向上する。このため、検討時は曲線配置を考慮した偏心量を用いて、設計における応力度、曲げ強度、およびせん断強度などを確認する必要がある。

#### 4.4 桁のキャンバー量

過去の事例においても、標準設計における上げ越し量は、桁に生じる実際のそりを反映させている。直線配置した PC 鋼材の偏心量が一定となるため、曲率も各断面で一定となる。これらの曲率を桁の軸方向に沿って積分すると、標準設計とほぼ同様の初期キャンバーの方程式が得られる。また、曲線配置の場合も厳密には同じではないが、理論的な差は小さいことが知られている。

必要キャンバー量は、長期的に発生するキャンバー量の推定値に基づき決定する。ワシントン州運輸局（以下、WSDOT）と Concrete Technology Corp.（ワシントン州タコマの建設会社）は、自社開発のソフトウェアを使用して、長期的な桁のキャンバー量の上限値をほぼ正確に推定している。材料の変動特性を計算に反映させるため、WSDOT は材齢 120 日時点の推定キャンバー量を上限値、材齢 40 日時点の推定キャンバー量の 50% を下限値とする長期的な推定キャンバー量の範囲を設定している。

図 - 7 は、ワシントン州オーシャンショアーズに位置する South Razor Clam 橋（前編の図 - 1 より引用）の



図 - 1 プレキャンバー桁の架設状況（South Razor Clam 橋）※前編に掲載されている図を引用

キャンバー量の実測値と、計算による上限値、下限値をプロットしたものである。キャンバー量の実測値は、測定したキャンバー量から型枠製作時に考慮したそり（formed camber, 以下、フォームドキャンバー）を差し引くことで求められる。その実測値は、上限値と下限値のほぼ中央値となっている。このプロジェクトにおける上げ越しの主な目的は、桁下縁に最低限の鉛直方向のクリアランスを確保することであった。この場合、キャンバー量の下限値を用いて、必要最小限のフォームドキャンバー量を推定した。さらに、この下限値は、支間中央部の床版ハンチ高による最大死荷重の計算に使用された。桁の上縁が床版に突出することを防止する目的として、上限値は、支間中央部の床版ハンチ高を確保するために使用された。

架設時や運搬中に桁の上フランジに発生する過剰な引張応力を緩和するために、上縁側の PC 鋼材を仮定着（以下、仮設 PC 鋼材）させておく必要がある場合がある。仮設 PC 鋼材を桁上縁から一定の高さに保持し仮定着することは、実践的な手法とはいえない。そこで、仮設 PC 鋼材は、桁の製作時に上縁から一定の高さでシース内に配置したのち、プレストレスを導入した。プレストレスの導入は、安定性を考慮し、桁を製造床から吊り上げる直前、保管開始時の最初に吊り上げたあと、あるい

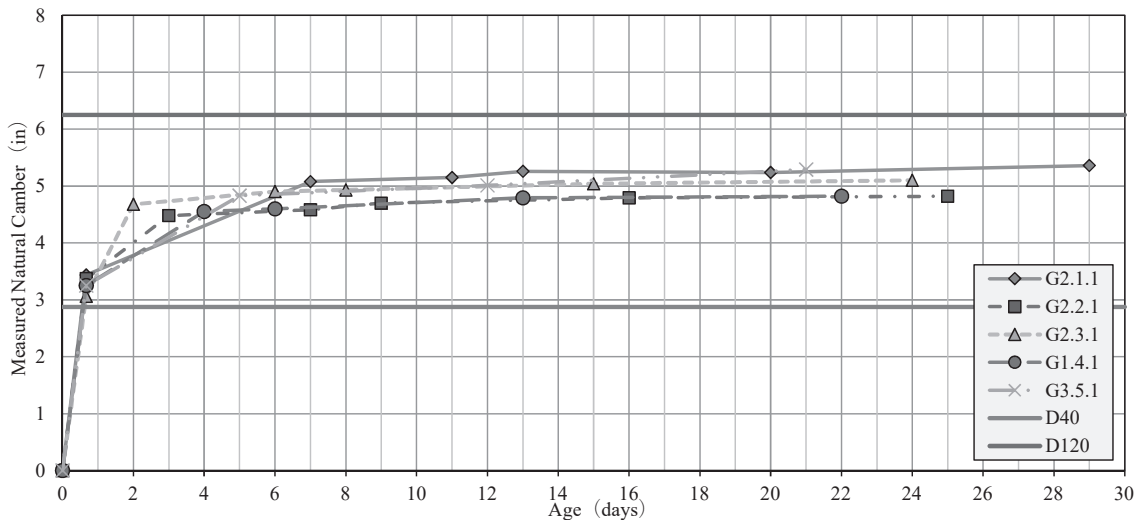


図 - 7 South Razor Clam 橋におけるキャンパー量の測定値

は運搬直前に実施するようにしている。

仮設 PC 鋼材を上縁に配置することで、桁下縁の圧縮応力が減少する。これにより、桁のキャンパー量を減少させ、長期クリープによるキャンパー量をわずかに減少させる。一旦、桁が架設され、仮設 PC 鋼材が切断されると、キャンパー量がわずかに回復する。しかしながら、仮設 PC 鋼材の緊張以降に桁が経時変化するため、一般に失われたキャンパー量がすべて回復するものではない。

仮設 PC 鋼材によって失われるキャンパー量は、仮設 PC 鋼材を含む基準キャンパー量および仮設 PC 鋼材が切断される想定時期における回復量を考慮した最終キャンパー量を計算し、元の基準値と比較することによって合理的に推定することができる。この仮設 PC 鋼材の影響が小さくなると予想される。

#### 4.5 床版ハンチ高の調整

プレキャンバー桁は、図 - 8 に示されるようにクレスト型やサグ型の縦断線形にほぼ合せることができる。これにより、床版ハンチ高の調整量、死荷重、および材料コストが低減される。

床版ハンチ高の調整は、フォームドキャンパー量を含めたすべてのキャンパー量により標準的な方法で計算される。プレキャンバー桁のハンチ寸法を設定する場合、設計者は前述のように標準キャンパー量の時間依存成分の変動を考慮する必要がある。

#### 4.6 PC 鋼材偏向具に作用する鉛直反力に対する設計

クレスト型キャンパーの形状により、直線配置の偏向具において下向き反力が発生する。コンクリートが養生され、応力が PC 鋼材からコンクリートに伝達されると、定着された PC 鋼材は、下縁フランジに圧縮力を発生させ、偏向具に垂直下向きの反力が発生する。これまでに製造された大部分のプレキャンバー桁は、この力に抵抗するための偏向具または補強鉄筋を追加配置していなかった。これは、プレストレスの拘束力によって発生する付着および摩擦が、下向きの反力に十分抵抗することが知られていたためである。偏向具（前編の図 - 3 より引用）に発生する反力においても同様である。しかし、桁における設計では、鉛直成分の反力を見込むという仮定で一般的に行われている。この仮定では、標準的な横拘束鉄筋とせん断補強筋に加えて、垂直補強筋を必要とする。垂直鉄筋は、210 MPa (30 ksi) の許容応力度で割った偏向具での反力に基づいて配筋を決定することができる。垂直鉄筋を偏向具のプレートに溶接することや、ウェブに垂直鉄筋を最低限延長することで、偏向具が桁に定着される。または、そのほかの定着方法やストラット・タイムモデルにより、この定着鉄筋における径や詳細を決定することが可能である。

#### 4.7 支承部

桁下面と水平な支承部上面との間にプレキャンバー分の勾配差が生じる。支承部は、道路の等級による桁端勾

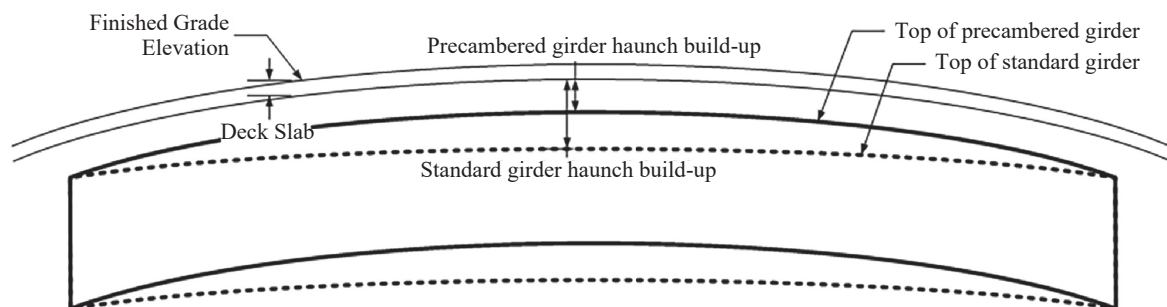


図 - 8 標準桁とプレキャンバー桁における床版ハンチ高の比較



図 - 3 PCa 部材に埋め込まれた特殊な偏向具  
※前編に掲載されている図を引用

配とキャンバーによる勾配  $4 \delta_{pc}/L$  を吸収しなければならない。ここで、 $\delta_{pc}$  は標準キャンバーおよびフォームドキャンバーを含むすべてのキャンバーである。AASHTO LRFD の橋梁設計仕様書は、桁の下面の水平方向への傾斜が  $0.01 \text{ rad}$  を超える場合、テーパプレートが必要とする。図 - 9 は、テーパプレートをも有する一般的な支承部の概略図を示す。

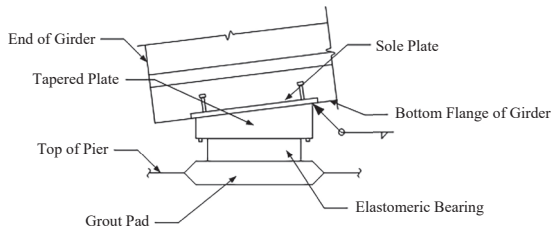


図 - 9 一般的な支承部の概略図

## 5. 架設および運搬

プレキャンバーを設けた PCaPC 桁橋の架設にはとくに注意が必要である。クレスト型のプレキャンバーにより、桁の重心が高くなり、横方向の曲げ応力が増加し、架設中の桁が横転しやすくなる。プレキャンバー桁の吊上げ位置を決定する際は、吊上げ位置を桁端部から支間中央側に移動させていくと、安定性が向上する。しかしながら、吊上げ位置を支間中央部により近くにした場合、死荷重モーメントが減少する。このことにより、上フランジの引張応力および下フランジの圧縮応力が増加し、架設のためだけにコンクリート強度を高くする必要が生じるため注意しなければならない。また、架設時の桁の重心が高いまま安定性を向上させるために、剛性のある吊上げ装置を使用することも可能である。

桁の運搬では、桁の重心位置とその安定性への影響を慎重に検討する必要がある。図 - 10 は運搬準備中のプレキャンバー桁を示す。クレスト型キャンバーによって桁の重心位置が運搬車両の回転中心位置よりも高くなり、安定性が低下する。

プレキャンバー桁の形状がクレスト型に湾曲しているため、桁の両端は運搬装置上の支持位置よりも低くなっており、これによって桁端部が運搬装置に干渉する可能性がある。支持位置を桁端部から内側へ移動させることで安定性が向上するが、桁端部がさらに運搬装置に干渉



図 - 10 運搬準備中のプレキャンバー桁

しやすくなる。仮支持材を使用して支持位置で桁を持ち上げることで、桁と運搬装置の干渉を避けることができるが、そうすると桁の重心が高くなり、安定性が低下する。仮支持材は運搬ルートにおける高さ制限の問題にも繋がる可能性がある。

PCI では、桁の安定性における懸念事項に対応するための推奨事例を公開している。プレキャンバーの影響は、これらの推奨事例では明確に扱われていないが、標準キャンバーの代わりにプレキャンバー（フォームドキャンバーと標準キャンバーの合計値）を用いることで解析手順に適応できる。

## 6. プロジェクト

プレキャンバー桁を用いたプロジェクトは、ワシントン州で主に建設されてきた（表 - 1）。これらのプロジェクトでは、 $L/723 \sim L/81$  ( $L$ : 支間) の大きささまざまなキャンバーが用いられている。

2002 年に Tukwila で建設された Interurban Trail 歩道橋（図 - 11）は、約  $0.61 \text{ m}$  ( $2.0 \text{ ft}$ ) のプレキャンバーがついており、これまでにワシントン州で建設されたなかで最大のプレキャンバー量を有する橋梁であった。

シアトル・マリナーズとシアトル・シーホークスのスタジアム間に建設された州道 519 号 Royal Brougham 橋（図 - 12）は、主に橋梁の下を通る線路における鉛直方向のクリアランスを確保するためプレキャンバーが設けられた。ただし、橋梁の縦断線形は隣接する立体駐車場へのアクセスを踏まえてアメリカの関係法令を満足する必要があり、プレキャンバー量に上限を設けた。キャンバーの変化量を範囲内に収めるため、施工時の調整対応として、支承部のテーパプレートによる調整案、またはプレキャンバーが大きくなる範囲をスパン内の鉛直方向に余裕のある箇所に移動させる案が提案された。最終的には、すべての桁のキャンバーが意図した範囲内に収まり、施工時の調整対応を行うことなく橋梁が完成した。

Marshall Avenue 橋（図 - 13）は、Tacoma 臨港道路および隣接する鉄道線路上に架橋されており、鉛直方向のクリアランスが主な懸念である。臨港道路上に架橋されている主径間の縦断線形は、橋台から支間中央部は直線形状で、支間中央部から橋脚はクレスト型の曲線形状で設計された。型枠において、橋台から支間中央部は標準キャンバーを補正したサグ型キャンバーを考慮すること



で最終的な縦断線形が直線形状となり、もう一方の支間中央部から橋脚はクレスト型キャンバーを考慮することで最終的な縦断線形がクレスト型の曲線形状となった。

この型枠におけるキャンバーの考慮は見事に成功し、PCaPC 桁が与える多様性を改めて示している。

### 7. 設計ツール

最近 WSDOT は、プレストレストコンクリート桁（以下、PC 桁）用のソフトウェアプログラム PGSuper と、一般的なプレキャストコンクリート桁における安定性解析用のソフトウェアプログラム PGStable を更新しており、そこにはプレキャンバーの影響が考慮されている。PGSuper と PGStable は、WSDOT が提供する BridgeLink サイト (<http://www.wsdot.wa.gov/eesc/bridge/software>) から利用可能な設計ツールである。

### 8. 結 論

プレキャンバーは、PCaPC 桁橋の製造と設計に使用されている。これは、桁橋の道路縦断線形に合せ、厳しい鉛直方向のクリアランス要件を満たし、場所打ちコンクリート床版の上部構造における床版ハンチ高さの死荷重を減らす効果的な手法である。以下に結論を示す。

- ・プレキャンバー桁の製造と設計は、多少難解ではあるものの標準的な桁とそれほど大きな違いはない。
- ・PCaPC 桁の未だ活用されていない用途への認識を高めるため、プレキャンバー桁の製造と設計における技術的知識の共有に寄与した。
- ・コンピュータソフトウェアツールは容易に利用でき、プレキャンバー桁の設計に対する障害は取り除かれて

表 - 1 ワシントン州におけるプレキャンバー桁を用いた橋梁プロジェクト

Bridge	Girder length $L$ , ft	Formed camber $\delta_{rc}$ , in.	$\delta_{rc}/L$
Tonquin Avenue Bridge	146.0	21.5	1/81
South Razor Clam Bridge	118.8	17.3	1/83
Interurban Trail Pedestrian Bridge*	167.5	22.3	1/90
State Route 519 Royal Brougham Bridge	123.5	13.4	1/111
South Lander Bridge	114.0	10.3	1/134
Marshall Avenue Bridge*	137.5	10.5	1/157
Burlington Northern Bridge	186.8	13.0	1/172
NW Dogwood Street Bridge*	93.1	5.6	1/199
State Route 167 Eighth Street Bridge	180.7	3.0	1/723
Skagit River Bridge*	163.1	-4.4	-1/447

Note: 1 in. = 25.4 mm; 1 ft = 0.305 m. \*Denotes bridges using decked bulb-tee girders. All others used a cast in-place deck.

いる。

プレキャンバー桁を検討する際は、技術者は桁の運搬に関する制限を評価し、また地元の PCa メーカーと相談して、製造能力を判断する必要がある。



図 - 11 Interurban Trail 歩道橋



図 - 12 州道 519 号 Royal Brougham 橋



図 - 13 Marshall Avenue 橋

This article was first issued in PCI Journal (Precast Concrete Institute Journal), 2020, May-June, page 64-77  
<https://doi.org/10.15554/pci65.3-02>

- \* : 会誌編集委員会海外部会委員
- 松島 史弥 (首都高速道路 ㈱)
- 渡邊 秀知 (㈱ ピーエス三菱)
- 佐藤 千鶴 (㈱ 銭高組)
- 田中 慎也 (㈱ IHI インフラ建設)
- 中村 香央里 (鹿島建設 ㈱)

【2021 年 9 月 16 日受付】