

整備新幹線 PC 橋梁の構造計画

— スパンの拡大に伴う対策 —

進藤 良則*¹・朝長 光*²

新幹線鉄道は、高速走行に対応したルート線形で計画されるため、河川、道路、鉄道とは鋭角で立体交差または近接する区間が多い。このため、上部構造にはスパンの拡大、厳しいたわみ制限に対応した桁剛性が必要である。しかし、剛性確保に伴う桁重量の増加は、耐震設計の強化と相まって基礎構造物の負担の増加、工事規模の増大のため、施工時の安全性および環境保全の確保に配慮した構造計画がより重要である。本稿は、整備新幹線の PC 橋梁に対して最近の構造計画について述べる。

キーワード：構造計画、新幹線、立体交差、たわみ

1. はじめに

鉄道構造物の構造計画は、建設ルート上のさまざまな制約条件に対して総合的に最適と考える構造物の形式および施工方法を決定する重要な作業である。新幹線鉄道は、曲線半径・縦断勾配などの制約が厳しく、大きな曲線半径と緩い縦断勾配でルートが敷かれるため、河川、道路、鉄道と鋭角で立体交差あるいは近接する橋梁や高架橋が増えている。このため、上部工はスパンが拡大し、高速走行に対応した厳しいたわみ制限のために剛性の確保が必要である。しかし、剛性確保に伴う桁重量の増加は、耐震設計の強化と相まって基礎構造物の負担の増加、工事規模の増大、施工時の安全性および環境保全の確保に大きな影響を与える。したがって、橋梁の構造計画は、設計・施工、環境保全への配慮がますます重要になっている。

本稿は、整備新幹線の PC 橋梁について最近の構造形式の選定および適用事例を紹介する。

2. PC 橋梁の構造計画

2.1 交差計画

(1) 河川との交差

河川橋梁の構造計画は、河川管理施設等構造令第 63 条に基づき、径間数、径間長、河積阻害率（新幹線は 7% 以下、やむを得ない場合は 8% 以下）、近接橋の特則にし

たがって実施している¹⁾。さらに、堤内地側の橋脚位置は、低水路の河岸法肩および堤防法先から 10 m（計画高水流量 500 m³/sec 未満は 5 m）以上離し、堤防法面延長線の下側にはフーチング（杭を除く）を設置しない 2H ルール²⁾の規定（図 - 1）がある。規定が適用され、堤体にピアアバットが設置できない場合は、堤防を乗り越えるため側径間が長くなる。この場合桁高も高くなり、PCT 桁や PC 箱桁の単純桁では堤防管理用道路の建築限界が確保できず、PC 下路桁や連続 PC 桁になる場合がある。図 - 2 (a) は、連続ラーメン橋の北陸新幹線手取川橋梁（石川県金沢市）である。

ピアアバットが設置できる場合は、側径間が短くできる。図 - 2 (b) は、ピアアバットを設置した九州新幹線大野川橋梁（熊本県宇城市）である。側径間が短い場合、列車荷重が中央径間に作用すると側径間がそり上がり、端支点部に負反力が生じるため、側径間長は中央径間長の 7 割程度が均整のとれた構造とされている。大野川橋梁は、負反力の発生を防止するため、側径間は桁端側の 5 割を充実断面としているが、この方法は中央径間のたわみを低減し、乗り心地を向上させている。一方、側径間が長い場合は、3.2 に後述するように桁端では軌道変位の照査が厳しくなる。

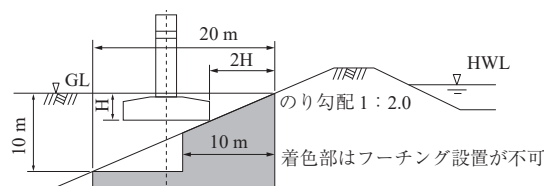


図 - 1 2H ルールの規定



図 - 2 河川との交差例



*1 Yoshinori SHINDO

(独) 鉄道建設・運輸施設
整備支援機構
設計部 設計第一課



*2 Hikaru TOMONAGA

(独) 鉄道建設・運輸施設
整備支援機構
設計部 設計第一課



図 - 3 馬桁一体 PC 桁橋



図 - 4 エクストラードズド橋（連続桁形式）

(2) 道路との交差

新幹線が道路を跨ぐ架道橋は、道路の建築限界高 4.5 m に余裕高を加えた 4.7 m（通行車両が限定される場合を除く）の桁下空頭を確保する必要がある。架設時は一時的に交通を止める必要がある。道路との交差角が鋭角で単径間の PC 桁で超えられない場合は、図 - 3 に示すように道路の左右に中間橋脚を設置した馬桁一体 PC 桁橋の適用が増えている。

幅員の広い高規格道路上の架道橋には、PC ラーメン橋やエクストラードズド橋（図 - 4）を適用する場合が多い。架設は張出し架設が一般的であり、設計段階で移動式作業車が道路空頭を確保するための検討を行う。なお、平成 30 年 4 月に重要物流道路制度が創設され、これに指定された道路の構造基準は、高さが 4.5 m から 4.8 m に引き上げられており、今後はこれに対応した構造計画が必要になっている。

(3) 鉄道との交差

新幹線が鉄道を跨ぐ線路橋は、交差部の高さや幅、電線との離隔、除雪や保守に必要な余裕空間を確保している。

架設による列車の運休は不可能であり、架設は夜間の線路閉鎖間合の短時間作業となる。PC 箱桁や下路桁には押出し架設、PCT 桁にはクレーン架設またはエレクションガーダー架設が用いられる。

2.2 橋梁構造の選定

(1) 単純 PC 桁形式³⁾

適用頻度が高い桁長 25 ～ 45 m の単純桁については、PCT 桁を 5 m 刻みで標準設計しており、中小河川や道路との交差箇所に適用される。標準設計の PCT 桁は、25 ～ 35 m が複線 4 主桁、40 ～ 45 m が複線 6 主桁である。

北陸新幹線稲荷千歳高架橋（富山県富山市）は、新幹線の両側が営業線で挟まれた近接区間であり、10 連の単純



図 - 5 桁式高架橋（連続 PC 桁）

PCU 桁 $L = 20$ m がある。桁断面は場所打ちの張出し床版を無くすため、プレテンション U 桁 5 本の上に現場施工の床版を合成した構造である。なお、U 桁はクレーンによって架設している。

(2) PC ラーメン橋

PC ラーメン橋は、橋脚と桁との剛結部を有するため、耐震性に優れており、とくに多脚固定の場合は、たわみの低減にも効果があることから、優先的に適用している。しかし、剛結橋脚の柱頭部は桁高が高く、柱の高さが低い場合、地震時の設計において躯体の変形性能が確保できないと応答震度が高くなる。したがって、地震時の水平力が低い橋脚に集中しないための検討を行う。常時の設計では緊張に伴う桁の弾性短縮、クリープ・乾燥収縮、温度収縮に伴い、側径間の剛結橋脚に生じる不静定力および可動支承のせん断変形が大きいことに留意している。

(3) 連続 PC 桁橋

橋脚の柱高が低く PC ラーメン橋の適用では耐震設計が困難となる場合は、連続 PC 桁とすることがある。図 - 4 は、連続桁形式のエクストラードズド橋である北陸新幹線細坪架道橋（石川県加賀市）である。

北陸新幹線今村新田高架橋（新潟県糸魚川市）は、支間長 32 ～ 37 m の 4 径間または 5 径間連続 PC 箱桁橋 10 連で構成されている。箱桁断面は等桁高であり、斜めウェブを採用している（図 - 5）。架設は移動式支保工で行った。

(4) 馬桁一体 PC 桁橋

馬桁一体 PC 桁橋は、連続桁の中間支点である馬桁が交差構造物を跨ぐため、中間橋脚の荷重負担がとくに大きい。そこで、地震時水平力が中間橋脚に集中しないために端支点橋脚にダンパー式ストッパーを適用し、すべての橋脚で地震時の水平力を分担する構造設計が多い。

2.3 耐震構造計画と地震時の走行安全性

桁遊間部に生じる不同変位には、角折れと目違いがある。新幹線は列車速度が高いため「鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限」⁴⁾（以下、変位標準）では、L1 地震時の走行安全性を確保するために不同変位の限界値が厳しい。とくに、隣接構造物と地震時の動的特性が相違する箇所、不整形地盤の箇所では、スパンが長い桁式高架橋を適用することで下部工の変位差に伴う不同変位を小さくしている。

断層を跨ぐ箇所については、構造物が損傷した場合の復旧に対する作業性・迅速性などから、単純桁による桁式高

架橋を適用する場合がある。単純PC桁の場合、落橋防止装置である鋼角ストッパーに加えてコンクリートブロックを橋脚側に設置することがある。

3. PC形式の選定

3.1 PC構造とPPC構造

PC形式には、ひび割れを生じさせないPC構造、ひび割れの発生を許容するPPC（PRC）構造がある。PRC構造はRC構造からプレストレスを加えるようにしたもの、PPC構造はPC構造からひび割れを許容するようにしたものとして区別する場合がある。

軌道の保守に影響するPC桁のたわみは、主にクリープ変形に起因するものである。一般に、PC構造の桁はそり上がり、PPC構造の桁はたわむ傾向がある。新幹線にスラブ軌道を適用して以降、スラブ軌道はそり上りの対応が困難であること、および経済性の観点から、T桁および箱桁はPPC構造としている。

下路桁については、下スラブの横締め鋼材定着部である主桁下部にひび割れが発生しないためにPC構造としている。プレキャストセグメント工法の桁についても、セグメント間は鉄筋が不連続であるため、接合面に目開きが生じないように圧縮力を残したPC構造としている。

連続桁は、支点上の負の曲げモーメントにより、桁上面にひび割れが発生することを避けるため、支点上をPC構造、支間部をPPC構造にしている。馬桁一体橋については、馬桁を含めてPC構造としている。押出し架設の桁は、支点上を桁が移動しても桁上面にひび割れが生じないレベルのPC構造としている。

3.2 PC桁のたわみ

(1) 活荷重によるたわみ

活荷重による桁たわみの限界値は、変位標準に準じている。新幹線構造物は、列車が高速で安全に走行する性能（走行安全性）および乗り心地（使用性）を確保する観点から、たわみの限界値が在来線よりも厳しい。

たわみの応答値は、主に列車荷重の静的な応答と列車走行に伴う動的な応答があり、静的な応答に対する動的な応答倍率が衝撃係数である。したがって、衝撃係数が大きい桁は、たわみが大きくなる。

動的な応答には、速度効果と車両動揺がある。構造計画で重要になるのは、列車と桁の共振によって応答が増幅する速度効果の衝撃である。共振の影響因子は、列車速度、車両長 L_v 、桁のスパン長 L_b 、桁の固有振動数である。単純桁の衝撃係数は、設計最高速度が高く、固有振動数が小さく、 L_b/L_v が整数倍のときに大きい傾向がある。衝撃係数を下げる（固有振動数を高める）には、桁高を高くして桁剛性を上げる検討を行う。桁下空頭が確保できない場合は連続桁化の検討を行う。

(2) 軌道と桁たわみの関係

鉄道PC橋は、桁のたわみ、クリープ変形が乗り心地、軌道保守に与える影響が大きい。PCラーメン橋、エクストラードード橋のように、スパンが長い橋梁は、活荷重による桁のたわみが限界値以内であっても、乗り心地や軌道

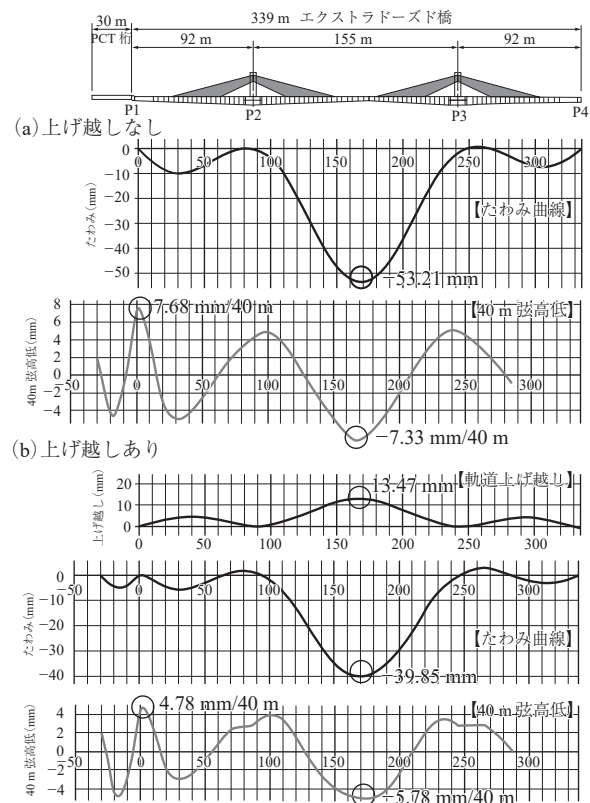


図 - 6 たわみ曲線と40m弦高低

保守の面で好ましくない場合がある⁵⁾。

軌道変位は軌道検測車を走らせて測定されるが、測定値には、軌道自体の変位および列車走行に伴う動的な変位が含まれている。軌道保守の要否は、測定結果を40m弦高低（40mの糸をレールにあてたときの midpoint の糸とレールとの離れ）に変換した値と軌道整備目標値 $\pm 7\text{ mm}$ を比較して判断されるため、変位標準の桁のたわみの限界値とは異なっている。

図 - 6 は、橋長339（92 + 155 + 92）mのエクストラードード橋に対して40m弦高低を照査した例である。クリープ終了時の活荷重による中央径間のたわみは53.2 mm、40m弦高低の換算値は7.33 mmである。起点側の隣接桁（単純PCT桁）を含めた40m弦高低の換算値は、桁端で7.68 mmであり、どちらも目標値 $\pm 7\text{ mm}$ を超えている。そこで、列車荷重によるたわみ相当分を軌道敷設時に上げ越すことで目標値を満たすようにしている。このように整備新幹線の橋梁設計では、変位標準のたわみの照査に加え、隣接桁を含めた40m弦高低を照査している。

(3) 分岐器との関係

分岐器は、種々の構造部材で構成されており、列車の進行方向を振り分ける可動部（ポイント部）をもつ精密な構造物である。この理由から分岐器の配置は、ラーメン高架橋上もしくは一体型コンクリート路盤上にするを原則としている。構造計画上やむを得ずPC桁上に配置する場合は、分岐器の不具合を防止するため、一般の桁よりもたわみの制限値は厳しく、40m弦高低の制限値は複線載荷で $\pm 7\text{ mm}$ としている。

表 - 1 整備新幹線の PC 斜張橋・エクストラード橋・斜版橋

橋梁名	線名	支間長 (m)	上部工形式	支承配置	支間比	主塔高	桁架設	竣工
第 2 千曲川 B	北陸	2 @ 133.9	2 径間連続 PC 斜張橋	M+R+M	—	65.0m	張出し	1996
屋代南 Bv	北陸	64.2+2 @ 105+64.2	4 径間連続 ED 橋	M+R+R+R+M	0.61	12.0m	張出し	1996
屋代北 Bv	北陸	54.3+90+54.3	3 径間連続 ED 橋	M+R+R+M	0.60	10.0m	張出し	1996
川内川 B	九州	76.3+68.5+96+94.8	4 径間連続 PC 斜版橋	M+DM+DF+DM+M	1.11, 0.99	12.0m	張出し	2002
三内丸山 Bv	東北	74.2+2 @ 150+74.2	4 径間連続 ED 橋	M+DM+R+DM+M	0.49	17.5m	張出し	2008
大野川 B	九州	30+2 @ 113+30	4 径間連続 ED 橋	M+DM+R+DM+M	0.27	15.0m	張出し	2009
神通川 B	北陸	85+2 @ 128+85	4 径間連続 ED 橋	M+DM+DF+DM+M	0.66	15.0m	張出し	2012
細坪 Bv	北陸	90+155+90	3 径間連続 ED 橋	M+DM+DF+M	0.58	17.5m	張出し	施工中

4. 構造形式の特徴と適用事例

4.1 PC 斜張橋

新幹線の PC 斜張橋は、北陸新幹線第 2 千曲川橋梁に適用され、スパン 133.9 m は当時のコンクリート鉄道橋では最長であった。PC 斜張橋は、活荷重によるたわみ、クリープ・乾燥収縮による変形、温度変化に伴う斜材の伸縮がエクストラード橋よりも大きい。また、高い主塔や斜材の保守、軌道の維持管理が難しいため、整備新幹線ではその後の採用がない。

4.2 エクストラード橋

外観は PC 斜張橋の主塔を低くした形状であるが、斜張橋の外ケーブルは、桁の死荷重を負担するのにに対し、エクストラード橋は、死荷重と活荷重の多くを桁剛性が負担するため、外ケーブルが負担する活荷重が小さい。したがって、斜材定着具の疲労振幅も小さく、通常の定着具が使用できるため経済的である。

新幹線では、北陸新幹線屋代架道橋が最初の事例である。東北新幹線三内丸山架道橋では最大スパン 150 m を達成し、その後、九州新幹線大野川橋梁、北陸新幹線神通川橋梁、北陸新幹線細坪架道橋（施工中）にも適用している。

4.3 PC 斜版橋

PC 斜版橋は、エクストラード橋の斜材をコンクリートで覆った構造である。エクストラード橋よりもコンクリート重量が増えるため、耐震設計には不利であるが、桁のたわみが小さく、斜材の応力変動が少ない利点をもつ。PC 斜版橋は、塩害地域で斜材の保護が必要な場合、たわみを低減する場合に適用される。整備新幹線では主桁を箱形にした九州新幹線川内川橋梁がある。

4.4 フィンバック橋

フィンバック橋は、下路桁の主桁を変断面とし、桁図心に対して PC 鋼材の偏心量を大きくすることで 60 ～ 80 m の長支間に対応した構造である。桁下面を一定にすることで桁下空間の確保が難しい場合に対応できる。北陸新幹線に適用した姫川橋梁 $L = 462$ m は、7 径間連続 PC フィンバック中路桁橋である。

4.5 波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋

PC 箱桁のウェブに波形鋼板を用いることで自重を低減し、ウェブに配置できない PC 鋼材は、外ケーブルとして箱桁内に配置した構造である。軽量でプレストレスの導入効率がよい利点がある。鉄道橋で初めて北陸新幹線黒部川橋梁で騒音の問題が少ない河川中央部に 6 径間連続波形鋼板ウェブ PC 橋 $L = 344$ m を適用したがその後の適用はな

い。

4.6 GRS 一体橋梁

GRS (Geo-synthetic Reinforced Soil) 一体橋梁は、補強土橋台と門形ラーメンが融合した橋梁である。補強土橋台は、耐震性の高い補強盛土と橋台壁が伸縮可能な盛土補強材（ジオテキスタイル）を介して一体化した構造であり、列車走行に伴う橋台背面盛土の沈下も小さい。門形ラーメンには支承が無いため、耐震性および維持管理性に優れる。

九州新幹線原種架道橋 $L = 30$ m（長崎県諫早市）は、上部工に初めて PC 構造を採用した GRS 一体橋梁である。PC 構造の適用にあたっては、PC 鋼材の緊張が完了した PCT 桁を架設したあと、橋台と PC 桁を一体化することで PC 桁のクリープおよび温度収縮に伴う盛土補強材の伸びを低減している。

4.7 PC 下路桁

スパンが 50 m を超える単純 PC 下路桁は、ウェブ高が大きくなるため、桁上部にアーチが付いたランガー橋とし、ウェブ高を抑制している。積雪地ではアーチ上の着雪対策が生じるため、温暖地の九州新幹線で数橋のみに適用した。

高さが低い補強土橋台が下路桁を支持する場合、地震時水平力を固定支承側のみで負担すると補強土橋台の安定性の照査が困難となる。この対応策として九州新幹線永昌架道橋 $L = 33$ m（長崎県諫早市）では、可動側にもダンパー式ストッパーを適用して水平力を両補強土橋台が負担する設計としている。

5. おわりに

鉄道構造物は、建設されると長年にわたり使用されることから、構造計画は何時の時代も重要なテーマである。機構では、これからも沿線住民と利用者に親しまれる構造物を建設していけるよう、鉄道橋の技術開発を進めている。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター編：改定解説・河川管理施設等構造令平成 12 年 1 月
- 2) 建設省河治発第 40 号、平成 6 年 5 月 31 日
- 3) 山東徹生、河瀬日吉：北陸新幹線（長野・金沢間）の PC 桁の設計について、プレストレストコンクリート vol.56, No.2, 2014
- 4) 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, pp.72-76, 106-110. 丸善株式会社, 2006
- 5) 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 18 回鉄道工学シンポジウム, 2014

【2020 年 12 月 21 日受付】