

整備新幹線用PCU形桁の開発に向けた検討

| | | | |
|---------------|-----|--------|--------|
| (独)鉄道・運輸機構 | 正会員 | 修(工学) | ○石川 太郎 |
| (独)鉄道・運輸機構 | 正会員 | 修(工学) | 井上 翔 |
| (公財)鉄道総合技術研究所 | 正会員 | 博士(工学) | 渡辺 勉 |
| (公財)鉄道総合技術研究所 | | 博士(工学) | 後藤 恵一 |

Abstract : PCU Girder is a girder construction method with factory-made PC main girders. It allows us to complete girders only by constructing cast-in-place cross beam and slab after installing main girders. So far, PCU girders have been adopted on several conventional lines such as Tsukuba Express Line and Narita Sky Access Line, mainly aiming at shortening process. But they have never been applied to the Shinkansen structures, except for Inari-Chitose Landscape Bridge near Toyama Station. Moreover due to sharp curve, the landscape bridge was designed assuming 160km/h train operation, less than maximum design speed of Projected Shinkansen Lines or 260km/h. In this paper, we examined vertical vehicle acceleration, vibration characteristics and deflection of girders while train passage, aiming at development of PCU girder that can withstand 260km/h train operation.

Key words : PCU Girder , Projected Shinkansen Lines , running safety, riding comfort

1. はじめに

PCU形桁は、工場製作した主桁を現場に運搬・架設し、場所打ちの横桁・床版等を施工して桁として完成させる工法である。これまで在来鉄道では、つくばエクスプレス線、成田新高速鉄道線で、主として工期短縮を目的として採用された実績がある。一方、新幹線鉄道では北陸新幹線、稲荷千歳高架橋での採用実績があるが(図-1)、当該箇所は富山駅付近の急曲線区間で最高速度が160km/hに抑制された箇所であった。すなわち本格的な高速走行が想定される箇所への適用実績はないのが実態である。鉄道橋は、列車からの加振周波数が桁の固有振動数に近づくと、共振が発生し急速にたわみが増大することが知られている(たとえば¹⁾)。本研究では、整備新幹線の設計最高速度である260km/hでの走行が可能なPCU形桁を開発することを念頭にしているが、既設PCU型桁の最高速度である160km/hから大きく速度が向上するため、260km/h走行時におけるPCU型桁の共振の有無あるいは列車走行性について事前に定量的に検討しておく必要がある。そこで本研究では、数値解析により、桁の振動特性や変位量、列車の走行安全性および車体加速度に関する照査等を行ったので、その結果について報告する。

2. 検討内容

2.1 検討対象

(1) 構造物

桁長20m, 5主桁のPCU形単純桁を対象とし、路盤コンクリート(図-2)(以下、路盤RC)の剛性を変化させて検討を行った。路盤RCは、床版の上面に施工されるスラブ軌道を支持する構造体であり、列車荷重を構造物に伝える機能を有

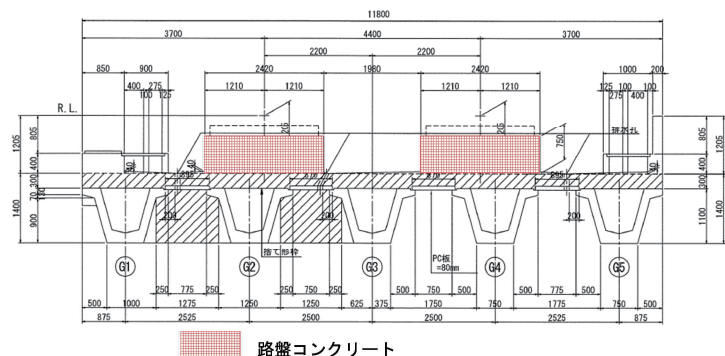


図-1 北陸新幹線、稲荷千歳高架橋PCU形桁断面

荷重として与えることで考慮した。

(2) 車両

マルチボディモデルにより、12両分のモデル化を行った。マルチボディモデルとは、それぞれ三次元剛体と仮定した車体、台車、輪軸をばねとダンパで結合した車両モデルを構成し、これを複数両連結した編成モデルである(図-4)。ばね定数および減衰定数は実車の諸元を基に設定している。実車では、各構成要素間に著大な相対変位を抑制するストッパーが設けられており、これを考慮できるようにばねの一部にはバイリニア形の非線形ばねを用いた(図-4)。

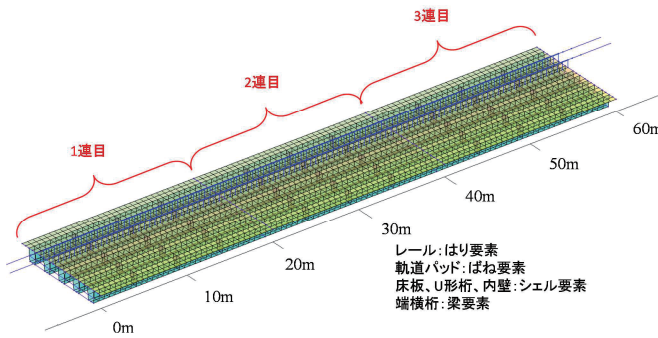


図-3 PCU桁解析モデル

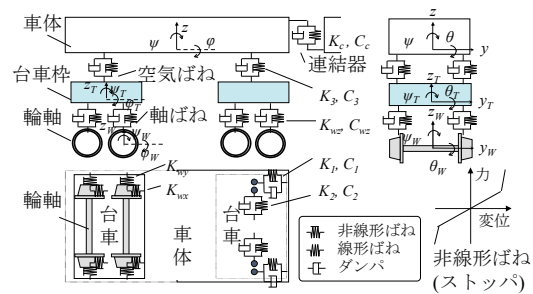


図-4 車両のモデル

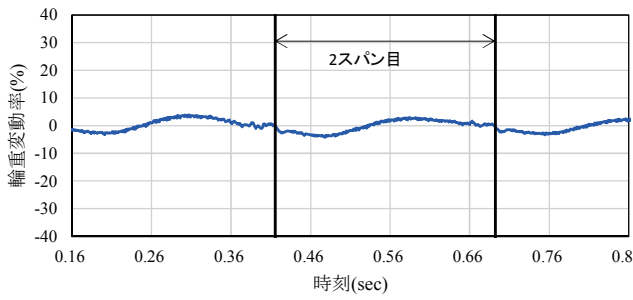
3. 検討結果

3.1 走行安全性の照査

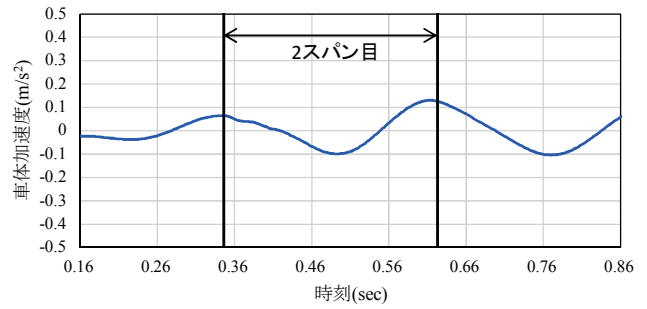
走行安全性に関する照査は、350%乗車時の輪重変動率を指標とし、鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)(以下、「変位制限標準」)³⁾に定める限界値である37%以下となることを確認することにより行った。ここに、輪重変動率とは脱線の可能性を判断するための指標で、輪重の減少量を静止輪重で除した値である。350%乗車時の輪重変動率は、空車時状態を再現した車両モデルで走行解析を行った結果を、空車時と350%乗車かつ複線載荷時の軸重の比率を用いて換算することにより算定している。図-5に最も厳しい条件となるCase1の260km/h走行時の1号車、7号車、12号車の輪重変動率を示す。先頭車と比較して後部の車両では、輪重変動率がより大きくなる傾向が見られた。図中に縦線で示した桁端部の通過時刻から、輪重変動率は桁に進入直後からスパン中央にかけて最小値を取り、スパン中央付近で最大値を取っている。これは、輪軸単体に着目すると、たわんだ桁の形状から、前の桁から離れる際に輪軸が浮き上がり、次の桁の中間部に着地するような挙動をしているためと考えられる。ただし、車体や台車枠との相互作用があるため、車輪踏面が軌道面から離れることはない。また、図-6にCase1で列車速度を50~400km/hの間で変化させて評価した輪重減少率の最大値を示す。いずれの車両でも輪重減少率は限界値を下回っており、走行安全性を満足していることを確認した。

3.2 乗り心地の照査

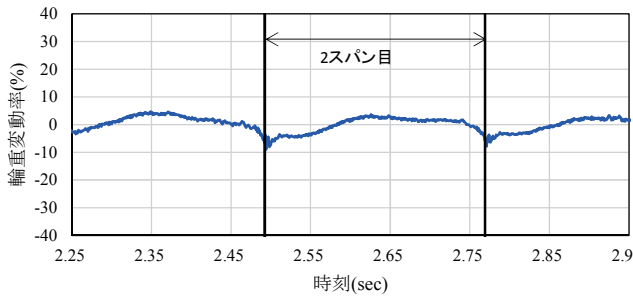
乗り心地に対する照査は、乗車率100%を想定した車両モデルを用い、変位制限標準³⁾に基づき鉛直方向の車体加速度が限界値 2.0m/s^2 を下回ることを確認することで行った。図-7にCase1の260km/h走行時の車体加速度を示す。また、図-8にCase1で列車速度を50~400km/hの間で変化させて評価した車体加速度の最大値を例に示す。輪重減少率(図-6)で見られる傾向と同様に、7号車、12号車では繰り返し加振により1号車と比較して桁振動の振幅が大きくなるため、速度により車体加速度の増減が大きくなる。いずれの車両でも限界値 2.0m/s^2 以下に収まっており、400km/hまでの範囲では乗り心地が確保されることを確認した。



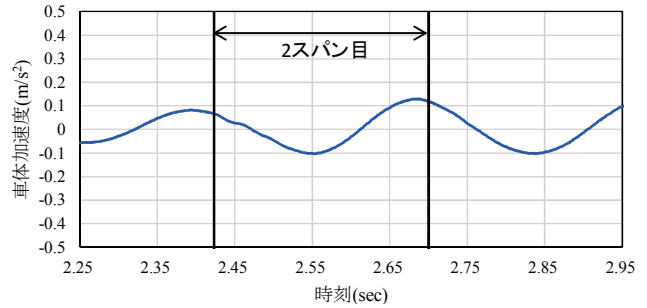
(a) 1号車



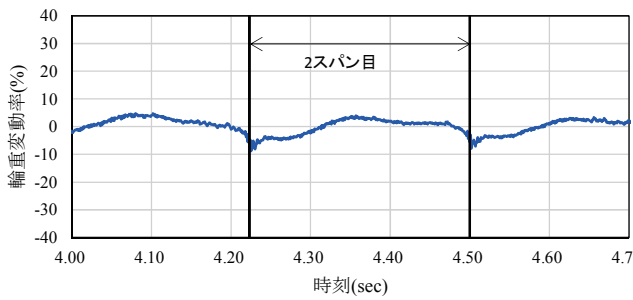
(a) 1号車



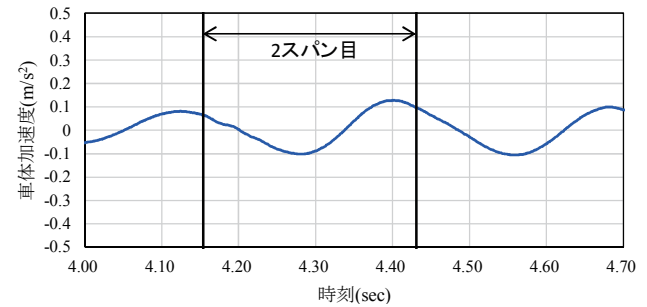
(b) 7号車



(b) 7号車



(c) 12号車



(c) 12号車

図-5 260km/h 走行時の輪重変動率の時刻歴波形 (Case1)

図-7 260km/h走行時の鉛直方向の車体加速度 (Case1)

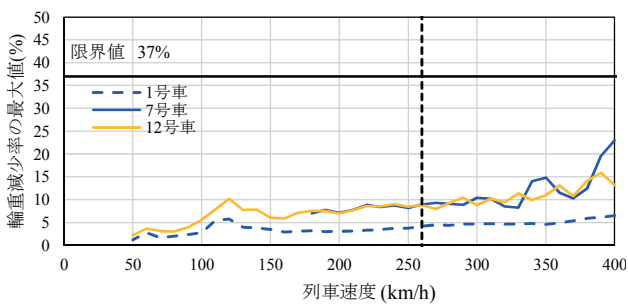


図-6 列車速度と輪重減少率の最大値

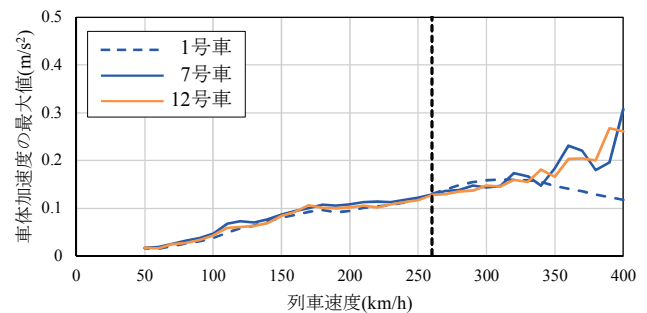


図-8 列車速度と車体加速度の最大値 (Case1)

3.3 衝撃係数の妥当性の検討

鉄道構造物では、動的な衝撃荷重の静的応答(列車荷重)に対する割合として、衝撃係数を考慮して設計を行っている⁴⁾。設計では、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」)⁴⁾に定める式(1)で、速度効果の衝撃係数 i_v と車両動揺の衝撃係数 i_c を考慮した衝撃係数 i を算定するが、本検討は速度効果の衝撃係数 i_v に絞って検討した。

$$i = (1 + i_\alpha)(1 + i_c) - 1 \quad (1)$$

速度効果の衝撃係数 i_α は式(2)により算定した速度パラメータ α と、車両長 L_v および桁のスパン L_b の比からノモグラムを用いて求める。

$$\alpha = \frac{v}{7.2n_0 \cdot L_b} \quad (2)$$

ここに、 v は列車の走行速度、 n_0 は桁の基本固有振動数であり、式(3)により算定する。

$$n_0 = \frac{\pi}{2L_b^2} \cdot \sqrt{\frac{EI \cdot g}{D}} \quad (3)$$

EI は桁の曲げ剛性、 g は重力加速度、 D は桁の単位長さあたりの死荷重である。

整備新幹線のコンクリート単純桁の設計では、衝撃係数(以下、設計衝撃係数)を算定する場合に限り、路盤RCや地覆等の非構造部材の桁全体の剛性への寄与を考慮して剛性補正係数 k (表-2)を設定している(たとえば5, 6)。この剛性補正係数により、桁の曲げ剛性を補正して設計衝撃係数を算定する(式(4))。

$$n_0 = \frac{\pi}{2L_b^2} \cdot \sqrt{\frac{kEI \cdot g}{D}} \quad (4)$$

Case1~3の車両と鉄道構造物の動的相互作用解析の結果から、軌道直下のG2桁スパン中央部で式(5)により評価したたわみに関する衝撃係数 i_v を図-9に示す。

$$i_v = \frac{\delta_v}{\delta_0} - 1 \quad (5)$$

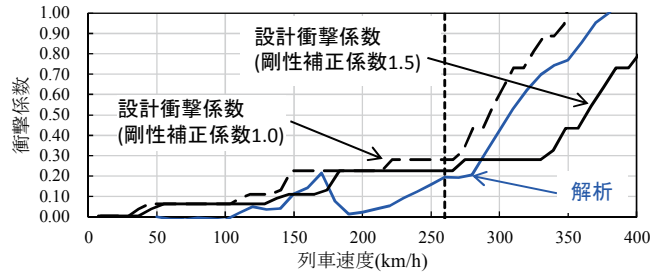
ここに、 δ_v は列車速度 v のときのたわみ、 δ_0 は列車荷重を静的に載荷した場合のたわみである。また、図中には設計衝撃係数($k=1.5$ (PC箱桁と類推)、 $k=1.0$)も併せて示す。Case1~3それぞれ、170km/h、180km/h、190km/h付近に衝撃係数のピークがあり、共振が発生していることが分かる。桁の固有振動数 f と共振速度 v には、式(6)の関係がある。

$$v = f \cdot L_v \quad (6)$$

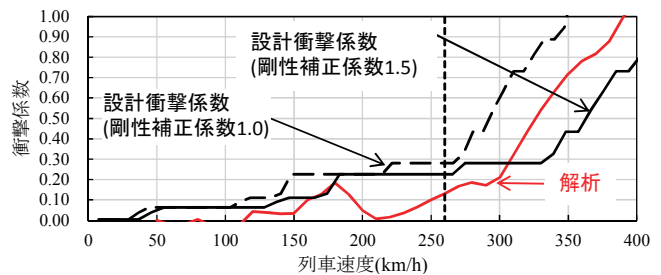
ここに L_v は25.0mである。Case1を例に考察すると、別途実施した桁の固有値解析の結果(図-10)から、1次モードは桁が上下に反りたわみするモードであり、固有振動数は $f=5.7$ Hzであった。これを式(6)に代入すると、共振速度は513km/hであるが、この $1/n$ 速度 (n は整数)においても1次の固有振動モードに対する n 次共振が発生する。すなわち車両の連結部分が1回通過する度に、桁が n 回振動する。2

表-2 剛性補正係数

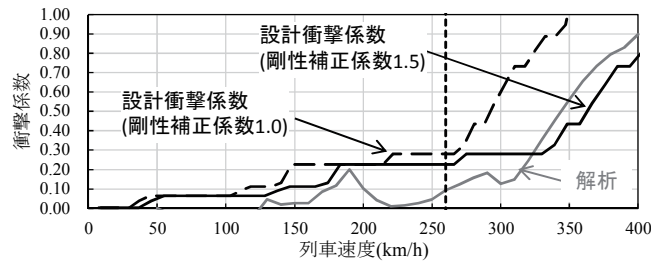
| | 剛性補正係数 k |
|---------|------------|
| PPCT 形桁 | 2.0 |
| PPC 箱桁 | 1.5 |



(a) Case1 (路盤RC厚h=350mm, 剛性非考慮)



(b) Case2 (路盤RC厚h=350mm, 剛性考慮)



(c) Case3 (路盤RC厚h=750mm, 剛性考慮)

図-9 列車速度と衝撃係数(G2桁スパン中央)

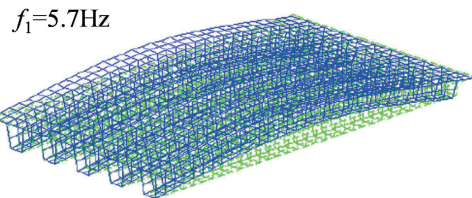


図-10 PCU形桁の1次固有振動数と振動モード

次共振, 3次共振の速度は, それぞれ257km/h, 171km/hであるので, 図-9(a)のピークは3次共振によるものと考えられる。

図-9(a)より, Case1では式(5)により評価した衝撃係数は, 設計衝撃係数($k=1.0$)で概ね包絡されていることが判る。170km/h付近で局所的に同速度の設計衝撃係数を上回るピーク値があるが, 260km/hで算定した設計衝撃係数($k=1.0$)と比較すると小さい。しかしながら, 列車速度が260km/hを超えた直後から衝撃係数が急激に増大する傾向が認められ, 応答値が大きくなる可能性がある。したがって, Case1は現行の整備新幹線の単純桁の設計の枠組みを適用すると, 現在の設計最高速度に対して設計計算上余裕のない設計となると考えられる。一方で350mm厚の路盤RCの剛性を考慮したCase2(図-9(b))では, 急激に衝撃係数が増大する速度帯が約290km/h以上の領域となり, 現行の整備新幹線の設計最高速度に対しては余裕のある設計となる。また, 180km/h付近のピーク値に着目して設計衝撃係数と比較すると, 剛性補正係数は $k=1.5$ 程度が妥当であると考えられる。路盤RCが350mmの場合, 実現象としてはCase2(図-9(b))の挙動に近いと考えられ, 設計最高速度である260km/hまでは $k=1.5$ とすることで衝撃係数を安全側に評価し, かつ合理的な設計とすることができる。さらに750mm厚の路盤RCの剛性を考慮したCase3(図-9(c))では, 衝撃係数が急激に増大する速度帯が約320km/h以上の領域となり, より余裕の大きい設計となっている。同様に設計衝撃係数と比較すると, Case3でも剛性補正係数は $k=1.5$ 程度が妥当であると考えられる。

以上より, PCU形桁は温暖地や散水消雪区間等で路盤RCが薄い箇所への適用には設計時に注意を要するが, 北海道新幹線, 北陸新幹線などで採用される貯雪区間で, 路盤RCが一定の厚さを有し, かつ260km/h走行を想定する箇所では, 従来のPC箱桁と同様の考え方で衝撃係数を算定して問題ないと考えられる。

4. まとめ

本検討では実車の車両諸元を用いてPCU形桁の走行シミュレーションを実施し, 桁の変位量, 鉛直方向の車体加速度を評価し, 照査を行った。その結果, 整備新幹線の設計最高速度である260km/h走行に着目した場合, PCU形桁は所定の性能を満足することを確認した。また, PCU形桁の設計に, 整備新幹線の衝撃係数算定方法を適用した場合の妥当性について検討を行った。その結果, 260km/h走行を想定する場合, 路盤RCが一定の厚さを有する箇所であれば, 従来のPC箱桁と同様の考え方で問題がないことが確認された。ただし, 温暖地などの路盤コンクリートが薄い箇所に適用する場合, 300km/hを超えるような高速走行区間に適用する場合には, 整備新幹線の単純桁の設計方法では, 設計計算上現実的な安全率が確保されない可能性が示唆された。これについては今後の検討材料としたい。

参考文献

- 1) 曾我部, 松本, 藤野, 涌井, 金森, 宮本: 共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究, 土木学会論文集, No. 724/I-62, pp. 83-102, 2003. 1, 2) 涌井, 松本, 松浦, 田辺: 鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No. 513/I-31, pp. 129-138, 1995. 4,
- 3) 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), 平成18年2月, 4) 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), 平成16年4月, 5) 進藤, 山洞, 朝長: 北海道新幹線(新青森・新函館北斗間)の新設桁のたわみ測定結果に関する考察, 第20回鉄道工学シンポジウム, 2016. 7, 6) 進藤, 山洞, 朝長: 北海道新幹線(新青森・新函館北斗間)におけるPC桁のたわみに関する考察, プレストレストコンクリート工学会 第25回シンポジウム論文集, pp. 467-470, 2016. 10