

整備新幹線のPC橋における性能照査型設計法の適用

鉄道・運輸機構 正会員 ○玉井 真一

鉄道・運輸機構 正会員 西 恭彦

鉄道・運輸機構 正会員 下津 達也

1. はじめに

鉄道のコンクリート構造物は平成16（2004）年以降、性能照査型設計法により設計されている。それ以前の平成4（1992）年から限界状態設計法が適用されていたので、性能照査型設計法への以降は形式的にはスムーズに行なわれたが、設計基準が性能規定となったことで設計者が橋梁の性能とは何かを認識する必要を生じた。本稿は性能照査型設計法への移行から10年が経過したのを機会に、整備新幹線の設計において考慮している事項を報告するものである。

2. 要求性能と限界状態

平成4年版の鉄道構造物等設計標準¹⁾では、設計の目的（安全、快適、耐久性など）を満足しなくなるすべての限界状態を検討すること、限界状態は終局、使用、疲労に区分して検討することが本文で規定され、解説に終局限界状態の例、使用限界状態の例が示されていた。平成16年版²⁾では、安全性、使用性、復旧性に対する要求性能を設定すること、要求性能に対して限界状態を設定し照査することが本文で規定され、解説に要求性能とそれを満足するような性能項目および性能項目の照査指標の例が示されている。すなわち、要求性能を前面に押し出し、限界状態の設定は設計者の判断に委ねられたのである。

そこで、鉄道・運輸機構では設計標準の解説を参考に、表-1のように要求性能と限界状態の対応を定めることから性能照査型設計法への移行作業を開始した。設計標準では耐久性は独立した要求性能ではなく、経時変化を考慮して性能照査を行うことが原則とされているが、機構では設計耐用期間内の材料劣化を一定のレベルに抑えることで性能照査には経時変化を考慮しない方法をとることとし、材料劣化が要求性能の照査に影響するような状態を限界状態とすることとした。

表-1 要求性能と限界状態の関係（地震時を除く）

要求性能	性能項目	限界状態	照査項目、検討項目
安全性	破壊	部材破壊の限界状態	曲げ、せん断、ねじり
	疲労破壊	疲労破壊の限界状態	曲げ、せん断（応力度）
	走行安全性	脱線の限界状態	たわみ、角折れ、目違い
	公衆安全性	公衆安全性の限界状態	耐久性の検討により満足する
使用性	乗り心地	乗り心地の限界状態	たわみ、角折れ、目違い
	外観	外観（ひび割れ）の限界状態	ひび割れ幅
	水密性	水密性の限界状態	一般に設定不要
	騒音・振動		部材厚、防音壁
復旧性	損傷	部材損傷の限界状態	曲げ、せん断
	軌道の損傷に関する復旧性	軌道面の不同変位による軌道の損傷	角折れ、目違い
(耐久性)*	ひび割れ	鋼材腐食に対するひび割れ幅の制限値	ひび割れ幅、応力度
	中性化	中性化深さの制限値	かぶり、水セメント比
	凍結融解		空気量、かぶり、水セメント比
	塩害	塩化物イオン濃度の制限値	かぶり、水セメント比、高炉セメント

* 設計標準では耐久性は独立した要求性能ではないため、括弧を付けた。

3. かぶりと水セメント比

平成4年標準ではコンクリートのかぶりと水セメント比は構造細目として仕様規定されていた。平成16年標準では表-1に示すように、中性化、凍結融解、塩害を考慮してかぶりと水セメント比の照査を行わなければならない。この照査は個々の構造物ごとに行うよりも、事前に標準的な条件を定めておくことが設計、施工の両面から便利であると考え、中性化と凍結融解を考慮したかぶりと水セメント比の標準を一覧表として作成した。表-2に温暖地における中性化を考慮した最小かぶりと最大水セメント比の変化を示す。RC桁は短スパン橋梁に用いられるので断面増による影響が小さいと考え、かぶりを増して中性化に対する抵抗性を持たせた。PC桁は断面増の影響を抑えるためにかぶりの増加を10mmとし、水セメント比を低下させた。

従来、RC構造物には設計基準強度、呼び強度とも24N/mm²を使用していたが、地域によっては呼び強度24N/mm²のコンクリートが中性化や凍結融解から要求される水セメント比の上限を満足しない場合が生じた。これらの地域では呼び強度を27 N/mm²に引き上げ、同時に設計基準強度も27 N/mm²に引き上げることとした。なお、レディーミクストコンクリート工場によっては水セメント比の上限を満足するためにさらに呼び強度を高めなければならない場合もある。

表-2 かぶりと水セメント比の変化 (温暖地)

	平成4年標準		平成16年標準	
	最小かぶり	最大水セメント比	最小かぶり	最大水セメント比
RC橋脚	50mm	65%	60mm	55%
RC桁	30mm	55%	50mm	55%
PC桁	30mm	55%	40mm	50%

注) 寒冷地では凍結融解に対する抵抗性を付すため、かぶり+10mm、水セメント比-2%とする

4. 列車荷重の衝撃係数

鉄道車両は静止状態での軸重が軌道の負担力を超えないように設計されているため、構造物の応答値の算定精度は高いと考えられ、限界状態設計法や性能照査型設計法の導入がスムーズであった一因と考えている。ただし、高速鉄道では列車の走行に橋梁が共振する現象が発生することがあり、この影響を衝撃係数として考慮することで、応答値の算定精度を高める必要がある。ここで算定精度が高いとは性能照査に用いる応答値の算定値が、実際に桁に生じる応答値の最大値を上回っているという意味で使用している。

平成4年標準では、桁の剛性の最低値を示すことで共振が生じないようにする仕様規定の下で、衝撃係数が一覧表として示されていた。ただし、剛性の最低値を下回る桁を設計せざるを得ない場合は、衝撃係数の算定方法が解説に示されていた。これに対して平成16年標準では桁の剛性と列車速度に応じて広い範囲の衝撃係数が算定できるようなノモグラムが示されており、共振の可能性に応じて適切な衝撃係数が算定できるようになった。

一例として、表-3に同一設計条件の標準設計桁 (PPC-T形桁) の衝撃係数と桁高の変化を示す。

表-3 PPC-T形桁の衝撃係数と桁高の変化

橋長 (m)	主桁数	平成4年標準		平成16年標準			
		桁高 (m)	衝撃係数	桁高変更前		桁高変更後	
				桁高 (m)	衝撃係数	桁高 (m)	衝撃係数
25	4	1.9	0.600*	1.9	0.592	←	←
30	4	2.1	0.600*	2.1	0.407	←	←
35	4	2.4	0.503	2.4	0.393	←	←
40	6	2.4	0.529	2.4	0.835	2.6	0.627
45	6	2.9	0.481	2.9	1.567	3.1	0.949

* 衝撃係数の上限値を0.6とする

衝撃係数は式(1)に示す速度パラメータの影響を受けるとされている。式(1)で桁の固有振動数は断面剛性とスパンから求めることができるが、桁の実効的な断面剛性は軌道構造や防音壁の影響を受けることが知られている。そこで、過去に建設した区間の試運転時に測定した桁の固有振動数を分析したところ、桁断面の剛性を設計値の2倍に補正すれば実測に近い固有振動数を求められることが明らかとなった³⁾。表-3の平成16年標準による衝撃係数はこのようにして求めたものであるが、40m桁、45m桁の衝撃係数が0.835、1.567と大きくなったため、桁高を0.2mずつ増加させることで衝撃係数を低下、すなわち共振の危険性を低下させた。

$$\alpha = \frac{v}{7.2 n \cdot L} \quad (1)$$

ここに、 α : 速度パラメータ, v : 最高速度(km/h), n : 桁の固有振動数(Hz), L : 桁のスパン(m)

5. 長スパン連続桁のたわみ

鉄道の橋梁では、過大なたわみが生じると走行安全性の低下や乗り心地の低下が懸念される。本来、走行安全性は車両の輪重変動、乗り心地は車体の加速度により定量的に評価されるものであり、橋梁と列車の相互作用解析により輪重変動や車体加速度をシミュレートするシステムも用意されているが、すべての橋梁の設計でシミュレーションを行うことは現実的ではない。そこで、平成16年標準では走行安全性、乗り心地のそれぞれを満足するための桁たわみの制限値を性能照査を満足するためのみなし仕様として示している。

たわみの制限値は、単純桁が連続する状態を模擬した半波長正弦波の列を車両モデルが通過するシミュレーションによって設定されている。したがって、単純桁のたわみ制限としては適切であるが、連続桁の場合は車両が載る位置により桁のたわみ形状が変化するため、制限値自体は適用可能とされているものの、さらなる乗り心地の向上のためには連続桁のたわみ形状を考慮する必要があるものと考えている。

連続桁では列車が1径間目に入ることによって2径間目がそり上がり、列車が2径間目まで達すると1径間目がそり上がり始める。このように連続桁上の列車は自らが乱した軌道上を走行すると考えられることから、桁たわみの制限に軌道変位の制限値を導入することを試みた。鉄道車両は1~1.5Hzの固有振動数を有する。速度260km/hの新幹線は1秒間に72m進むため60~80mの波長で軌道が変位していると車両の振動が共振して乗り心地が低下すると言われている。そのため半波長40mの変位を管理する40m弦正矢法による軌道整備が行われており、40m弦の整備目標値は高低方向で±7mmとされている。

図-1に示す3径間連続桁⁴⁾について、各点のたわみ最大値は図-2のようになる。この図は各点のたわみの影響線が正になる部分にのみ列車荷重を載荷して求めたものであり、たわみ値が制限値を超えないという仕様規定の照査には適しているが、実際の連続桁のたわみ形状を表しているのではない。

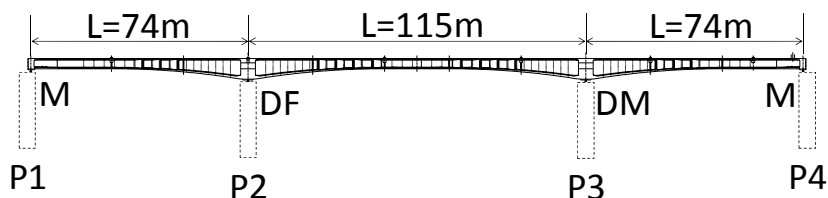


図-1 3径間連続桁

実際のたわみ形状は図-3のように先頭車の位置により変化し、1径間目に乗っている列車は自らの重さでそり上がっている第2径間を押し下げながら通過することがわかる。図-4は図-3のたわみ形状について40m弦正矢量を計算したものである。すべての載荷位置で40m弦は7mm以内となっており、連続桁のたわみ

形状が乗り心地に影響しないことが照査できた。

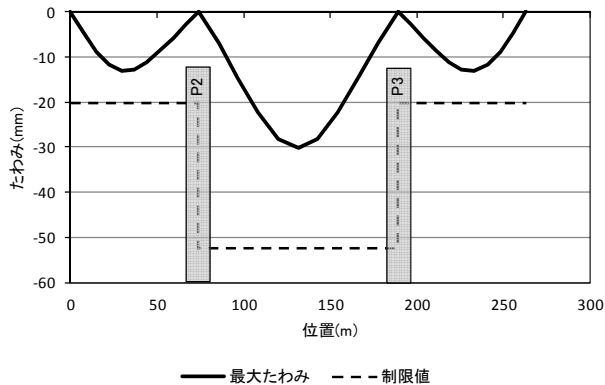


図-2 たわみの最大値

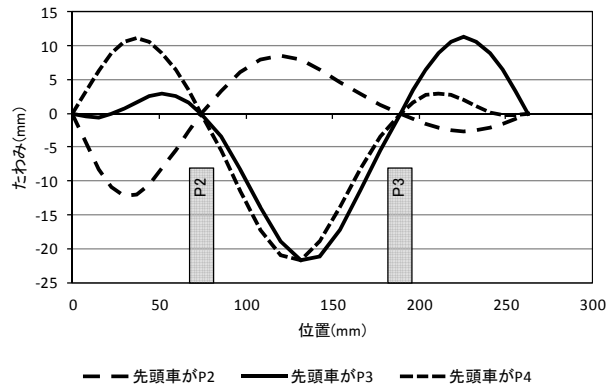


図-3 列車位置と連続桁のたわみ形状

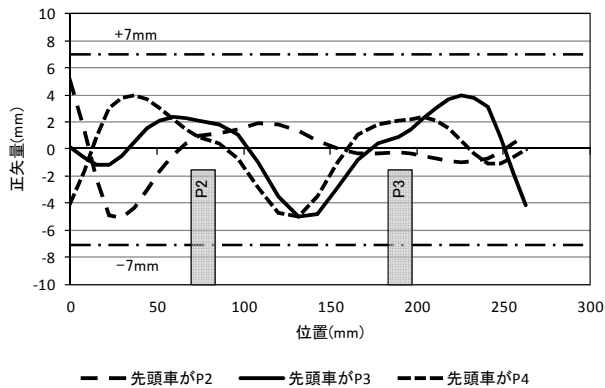
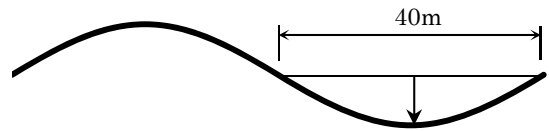


図-4 連続桁のたわみ形状の40m弦正矢量



6. おわりに

性能照査型設計法は高度な設計法であり、これを適用することにより経済的な設計が可能になるという意見があるが、実際は仕様設計における許容値や限界値にも性能を考えた設定がなされていたため、設計法の変化により成果物の姿が大きく変わるわけではない。標準設計桁の例のように応答値の精度が上がることで桁高が大きくなる事例もある。

筆者らは、性能照査型設計法の長所は個々の設計者に想像力を要求することであると考えている。限界状態の設定では日常の使用や経年により橋梁に何が起こるかを想像しなければならない。また、鉄道では路線上に連続する構造物（橋梁、盛土、トンネルなど）の性能を一定以上に揃えなければ路線としての性能を確保することができない。設計の自由度が高い中で、真に必要な限界状態を設定し、組織内や線区内で考え方を統一するためには、発注者側の技術者が方針を示すことが必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，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年10月
- 2) 国土交通省鉄道局監修，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年4月
- 3) 進藤良則，千葉寿，山洞晃一，石徳隆行：新幹線新規開業区間における単純PC桁のたわみ測定結果に関する考察，第20回PCシンポジウム論文集，2011年10月
- 4) 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，土木学会第18回鉄道工学シンポジウム論文集，2014年7月