

# 論文 高速列車走行時におけるコンクリート桁の動的挙動に関する研究

金田 淳<sup>\*1</sup>・小林 薫<sup>\*2</sup>

**要旨**：列車走行速度の向上により桁の動的応答の変化が想定されるため，高速走行時の桁の動的挙動を把握することが必要となっている。そこで，桁の動的挙動を解析的に把握することを試みた。桁と列車の動的相互作用を考慮した二次元モデルによる動的挙動解析を実施した結果，桁の曲げ剛性の値により結果が大きく変化し，桁の曲げ剛性の算定を梁・スラブ・路盤コンクリートの断面から求めた場合の解析値は，曲げ剛性を梁・スラブの断面から求めた場合に比べて実測値に近い値を示すことがわかった。

**キーワード**：動的挙動，衝撃荷重，共振，固有振動数，曲げ剛性

## 1. はじめに

鉄道列車の最高走行速度は，技術の進歩と共に向上しており，現在も最高速度向上の取り組みが行われている。既に営業が開始されている路線において，設計最高速度を上回る速度域まで最高速度を向上する場合，構造物の動的応答が変化することが想定されるため，速度向上の影響について検討し，適切な対策を講ずることが必要となる。高速走行に伴い構造物に生ずる影響を検討するためには，高速走行時の構造物の動的挙動を把握することが重要となる。

コンクリート桁の設計<sup>1)</sup>において動的挙動の影響は衝撃荷重という形で考慮されてきた。衝撃荷重とは，列車の走行により構造物に生じた動的な応答のうち，静的応答に対する増加部分のことをいう。設計において衝撃荷重は列車荷重に衝撃係数を乗じた値として算定される。衝撃係数とは，桁スパンや車両の軸距，列車の最高速度等により異なる係数で，式(1)により定義されている。

$$i = \frac{f_d - f_s}{f_s} \quad (1)$$

ここに， $i$ ：衝撃係数

$f_d$ ：動的な応力またはたわみの最大値

$f_s$ ：静的な応力またはたわみの最大値

衝撃荷重に関する研究は19世紀より実施され

ている。そして，蒸気機関車，電気機関車，電車といった走行車両の変化や，走行速度の向上，新たな形式の橋桁構造の採用等の技術の変化に応じて，衝撃荷重の主たる原因も変化してきている。

これまでの研究において衝撃荷重が極端に大きくなる要因のひとつとして共振現象が考えられている。これは，桁の固有周期と近い周期で外乱が桁に作用することで，桁の振幅が増大し，衝撃荷重が大きくなるものである。共振の発生により，変形量の増加に伴う乗り心地の低下や，疲労強度の低下といった問題が懸念される。周期的に構造物に加わる外乱の要因として，蒸気機関車の動輪の不釣合重錘によるハンマーブローや，走行車両の固有周期による振動，車両の蛇行動波長，軸配置による軸荷重載荷等が考えられてきた。

これらの周期的作用のうち，軸配置による軸荷重載荷の影響は，走行車両や走行速度の変遷と共に大きくなってきた。昭和39年に新幹線が開業したことより，軸重，軸距がほぼ等しい車両により編成された列車による高速走行が開始された。軸距が等しいことは，軸荷重載荷の周期性強まったことを，列車の高速化は構造物への軸荷重載荷の作用周期が短くなったことを意味する。一方で，新幹線の設計列車荷重は，機

\*1 JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 課員 (正会員)

\*2 JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 課長 博 (工) (正会員)

関車荷重を考慮している在来線の設計列車荷重と比べ、小さな軸重となっているため、構造物は比較的にスレンダーな構造となっており、固有振動数が小さな構造物も建設されている。その結果、一部の構造物については、軸荷重載荷の作用周期と桁の固有周期が近接し、このことが原因と推定されるひび割れ変状が発生する事象<sup>2)</sup>が見られた。この事象をきっかけに、桁の設計において、共振等の動的応答が問題視され、詳細に検討<sup>2)</sup>されるようになってきた。

このような背景をもとに、本研究は列車高速走行時のコンクリート桁の動的挙動を解析的に把握することを目的として実施している。本論文は、列車走行時のコンクリート桁の動的挙動測定、動的挙動解析を実施し、剛性の違いが列車高速走行時の動的挙動に及ぼす影響について検討したものである。

## 2. 検討対象とした桁構造物の概要

検討対象は、1980年代に営業を開始した新幹線のコンクリート桁とした。これらの桁は先に述べたひび割れ発生事象を受け、動的挙動の影響を意識した設計方針<sup>3)</sup>となっている。

基本的な考え方として、桁の断面は設計最高速度とした 260km/h までの範囲で共振現象を回避できるだけの剛性を持たせることとなっている。これは、桁の固有振動数  $n$  が列車による加振振動数  $N$  の 1.2 倍以上となるように、桁の剛性を規制することで実現されている。ここで、加振振動数  $N$  は式(2)で求められる。

$$N = \frac{v}{3.6L} \quad (2)$$

ここに、

$v$  : 列車速度 (km/h)

$L$  : 列車長と軸距によって、桁スパン ( $l$ ) で決まる値で、検討路線開業時に使用されていた車両の場合以下の値となる。

$$l \leq 5\text{m} \cdots \cdots L = 2.5\text{m}$$

表-1 構造種別毎の桁数

構造種別	記号	桁数
T桁 (RC)	C t	13323
T桁 (PC)	C t p	1340
箱桁 (RC)	C b	426
箱桁 (PC)	C b p	404
スラブ桁	C s d	146
合成桁	G c	142
合成箱桁	G b	33
その他の構造		60
合計		15781

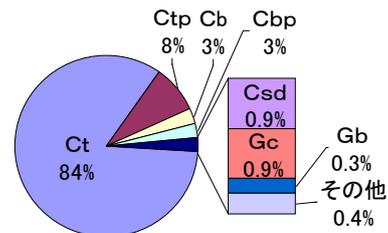


図-1 構造種別毎の割合

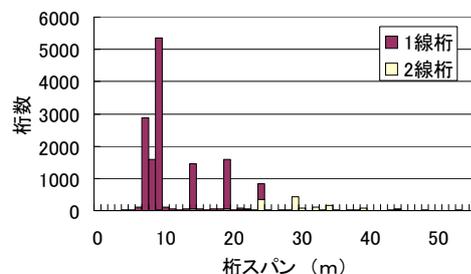


図-2 桁スパンと桁数

$$5 < l < 15\text{m} \cdots \cdots L = 7.5\text{m}$$

$$l \geq 15\text{m} \cdots \cdots L = 25.0\text{m}$$

以上のように、桁構造物の固有振動数を把握することが、列車高速走行に伴う桁の共振現象の発生を予測する上で重要となる。検討対象とした桁構造物のうち代表的な桁を選定するとともに、固有振動数の確認を行った。新幹線構造物のうち、同一時期に設計されたおよそ 500km の区間の桁構造物を対象として、表-1 に構造種別毎の数量を、図-1 に桁の構造種別毎の桁数について、桁総数に対する割合を調査した結果を示す。桁構造物の総数は 15781 連となっており、そのうちの約 90% を T 型桁で占めていることがわかる。続く 6% を箱桁が占めており、以下スラブ桁、合成桁の順となっていることがわかる。

図-2 は桁スパンと桁数の関係を示したものである。桁数の計数にあたっては、各桁のスパ

ンをm単位で四捨五入し、1m毎に桁数として整理した。高架橋と高架橋を結ぶスパン9mの単線桁が最も多い。また、標準設計に用いられているスパン9,14,19,24,29mの桁数が突出しているがわかる。

これらの結果より、数量が突出しているスパンのT桁、箱桁に着目して固有振動数を算定した。図-3は桁スパンと固有振動数の関係を構造別に整理したものである。なお、桁の固有振動数の算定は式(3)によった。<sup>1)</sup>

$$n = \frac{\pi}{2L_b^2} \cdot \sqrt{\frac{EI \cdot g}{D_1 + D_2}} \quad (3)$$

ここに、n:基本固有振動数(Hz)

$L_b$ :桁スパン

EI:桁の曲げ剛性

g:重力加速度

D1:単位長さ当たりの固定死荷重

D2:単位長さあたりの付加死荷重

図-3中の点線は設計最高速度を360km/hとして式(2)により求めた加振振動数を示している。一部の桁の固有振動数は、360km/h走行時の加振振動数を下回っており、今後の速度向上により360km/h運転が実施される場合、詳細な検討が必要になるといえる。

### 3. コンクリート桁の動的挙動検討

#### 3.1 対象構造物

対象桁の選定にあたっては、桁の固有振動数に着目した。動的挙動の測定が可能な桁の中から固有振動数の低い、表-2に示す三種類の桁について検討を行うこととした。

#### 3.2 動的挙動測定概要

ここで、動的挙動測定方法について説明する。

図-4に、測定方法の概要を示す。

測定は、図-4に示すように測定対象桁のスパン中央部にワイヤー、リング式変位計を取り付け、列車走行に伴う鉛直変位を記録する。変

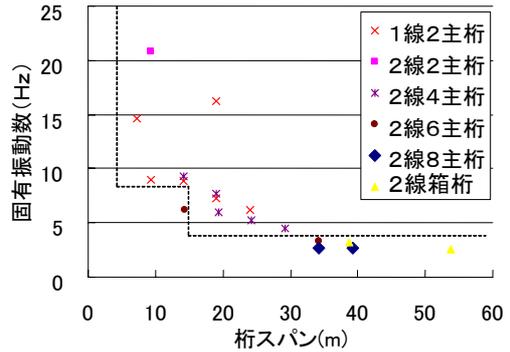


図-3 桁スパンと固有振動数の関係

表-2 対象構造物

桁	スパン (m)	構造形式	固有振動数 (Hz)
桁1	24.2	複線 PCI 桁(8主桁)	3.6
桁2	29.2	複線 PCI 桁(4主桁)	5.1
桁3	50.0	複線 PRC 箱桁	2.4

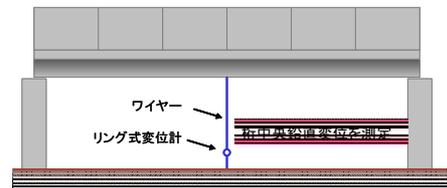


図-4 測定方法概要図

表-3 走行条件

桁	車両	走行速度
桁1	Aタイプ10両編成とBタイプ6両編成の併結	275 km/h
桁2	Aタイプ10両編成	約260~360 km/h
桁3	Aタイプ10両編成	約210~260 km/h

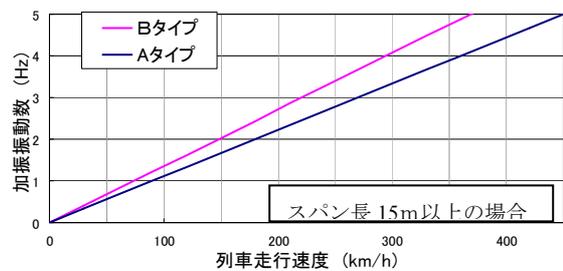


図-5 速度と加振振動数の関係

位計からの出力はデータロガーに接続し、サンプリング周波数を2000Hzとして連続的に記録した。

また、動的挙動測定の対象とした列車の走行条件について表-3に示す。ここで、Aタイプの車両は車両長が25mの新幹線専用車両で、Bタイプの車両は車両長が20.5mの新在直通用の車両である。これらの車両の走行速度と加振振動数の関係を図-5に示す。

#### 3.3 解析方法の概要

解析は新幹線車両の荷重列モデルを移動荷重

として、コンクリート桁の構造モデル上を移動させる方法で行う。列車、構造物間の動的相互作用の影響を考慮するため、サブストラクチャー法による移動荷重の解析を行うこととした。

サブストラクチャー法の概要は次のとおりである。

- ・列車系と構造物系を分離して各々の系を個別の運動方程式で定式化する。
- ・列車系と構造物系とは適合条件を元に自由度間の外力と強制変位加振で連結し、各々の系に対する相互作用として計算させる。

図-6にサブストラクチャー法の概念図を示す。

(1) 解析モデル

解析モデルは、二次元モデルとした。以下に列車モデルと構造物モデルの詳細を示す。

(a) 列車モデル

本解析で使用した列車モデルの概念を図-7に示す。各車両は、車体と台車そして車軸をモデル化した節点および梁要素と、車体・台車間、台車・車軸間の振動特性と減衰特性をそれぞれモデル化したバネ要素、ダンパー要素にて構成されている。また、各車両間は上下方向のバネ要素、ダンパー要素で結ばれている。節点要素に質量、バネ要素にバネ定数、ダンパー要素には減衰係数、そして梁要素には曲げ剛性を設定した。

なお、車両のモデル化はAタイプ、Bタイプそれぞれについて行い、動的挙動測定時に走行した車両の代表的な諸元から、節点座標や節点質量を定めた。厳密には、各車両の乗車人数や、車両諸元により号車毎の質両は異なってくるが、今回の解析では、全ての号車が同一質量であるとして解析している。

(b) 構造物モデル

本解析で使用した構造物モデルの概念を図-8に示す。コンクリート桁は一樣な断面をもつ棒部材として梁要素でモデル化した。列車モデルと同様、節点には質量を、梁要素には曲げ剛性を設定した。

モデルの分割数は50とし、桁の質量に、梁、

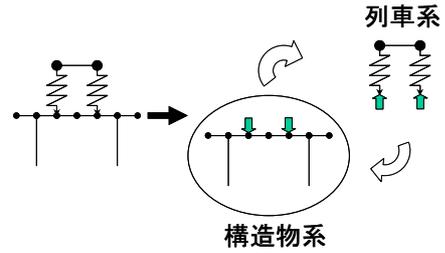


図-6 サブストラクチャー法の概念図

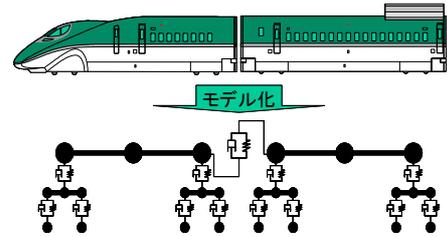


図-7 列車モデル

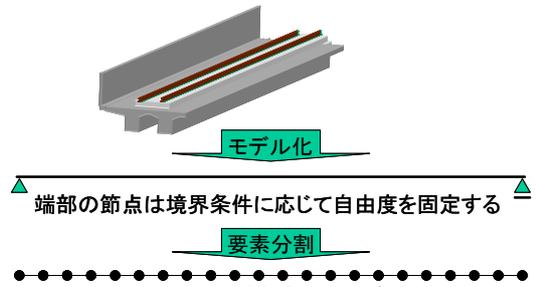


図-8 構造物モデル

表-4 曲げ剛性の設定

	剛性A	剛性B	剛性C
ヤング係数	設計標準による規定値		
断面二次モーメント算定断面			実測データより剛性を逆算
桁1	4.46E+07	6.69E+07	7.12E+07
桁2	1.76E+08	1.99E+08	2.74E+08
桁3	5.61E+08	6.50E+08	8.24E+08

スラブおよび路盤コンクリートの断面積に単位体積重量と桁スパンを乗じた値、軌道質量、高欄質量を考慮した。節点質量には桁の質量を節点数で等分した値を設定した。

構造物の減衰特性は、剛性比例減衰を減衰定数が2%となる値に設定した。これは、近年測定されたコンクリート桁の減衰定数の概ね下限となっている値である。<sup>1)</sup> また、解析刻みは0.005秒とし、ニューマーク法のβ値を0.25として解析を実施している。

解析に用いる曲げ剛性の算定方法は表-4に示す3通りとした。剛性Aは設計においてたわ

みの検討をする場合の曲げ剛性であり、曲げ剛性の算定にあたり、梁とスラブの断面のみを考慮している。剛性Bは付帯構造物の影響を考慮したものである。曲げ剛性に影響を与える部材として、レール、高欄、地覆、軌道スラブ、路盤コンクリートが考えられるが、目地や継目等の影響を考えるとこれらの断面が全て有効となるとは考えにくい。そこで、今回は付帯構造物として地覆と路盤コンクリートを考慮した曲げ剛性について検討を行うこととした。剛性Cは実測データの自由振動部分より推定した固有周期から曲げ剛性を逆算したものである。剛性Cは剛性A、Bに比べると大きな値を示している。これは、剛性A、Bでは考慮しなかった付帯構造物の影響、コンクリートのヤング係数の違いが原因と推定される。

列車速度については、実測データの測定列車速度にあわせた解析を実施することを基本としたが、異なる速度の測定データがある桁2、桁3については、速度変化に伴う桁挙動の変化の傾向についても比較するため、測定列車の走行速度以外の速度についても解析を行った。桁毎の解析条件を表-5に示す。

### 3.4 検討結果

図-9に桁1の実測値と解析値の桁中央鉛直変位と時刻の関係を示す。曲げ剛性を剛性Aとした場合の解析結果は実測値との差が大きいことがわかる。剛性Aでの解析結果と実測値について、負側の最大変位に着目すると、解析値が実測値の約4倍となっている。また、全振幅の最大値に着目すると解析値は実測値の約7倍となっている。曲げ剛性を剛性Bとした場合、剛性Cとした場合、桁中央変位の挙動は、実測値とほぼ同様の挙動を示しており、解析結果と実測値を比較的精度よく再現しているといえる。

図-10、11は桁2、3の実測値と解析値について、列車の走行速度と、桁中央変位の最大値の関係を示したものである。図中にひし形プロットされている各点は実測値を示しており、曲線は解析結果を示している。解析結果より、

表-5 解析パラメーター

桁	剛性の設定			列車速度の設定	
	桁1	A	B	C	275km/h
桁2	A	B	C	30~240km/h (30km/h 毎)	
				240~500km/h (5km/h 毎)	
				500~700km/h (10km/h 毎)	
桁3	A	B	C	30~240km/h (30km/h 毎)	
				240~500km/h (5km/h 毎)	

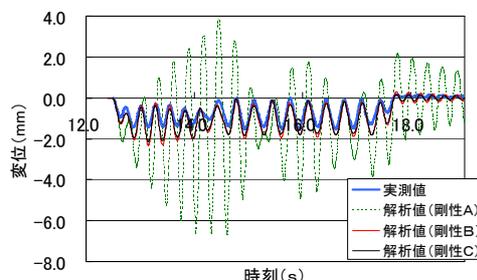


図-9 桁中央鉛直変位と時刻の関係 (桁1)

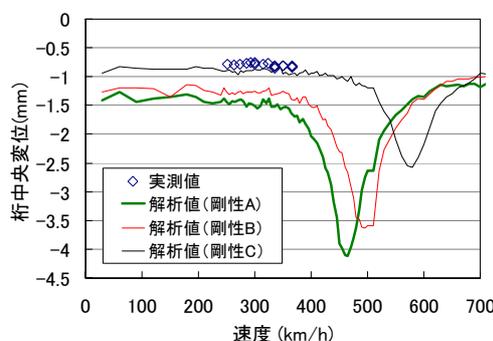


図-10 桁中央最大変位と速度の関係 (桁2)

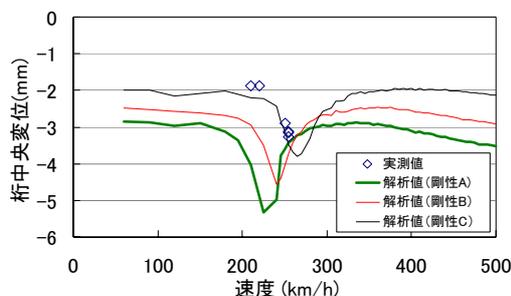


図-11 桁中央最大変位と速度の関係 (桁3)

表-6 固有振動数 (Hz)

	剛性A	剛性B	剛性C
桁1	3.6	4.4	4.5
桁2	5.1	5.4	6.3
桁3	2.4	2.6	2.9

桁中央変位が最大となる極値が存在することがわかる。また、極値を持つ速度は曲げ剛性が大きいほど高速側となることがわかる。表-6は剛性条件毎に式(3)により求めた固有振動数を示したものである。ここで、剛性条件毎に桁

の固有振動数と解析値が極値を持つ速度における加振振動数を比較すると、それぞれの値はほぼ等しいことがわかる。

解析結果と実測値を比較すると、桁の曲げ剛性の違いによる影響は、桁1の場合と同様、剛性Aの場合の実測値と解析値の乖離が一番大きく、剛性Cの場合の乖離が一番小さいことがわかる。特に図-10においては加振振動数と固有振動数が近づいた場合に、変位が急激に増大する現象が実測値においても確認でき、剛性Cでの解析結果は実測値を精度よく再現しているといえる。

図-12は桁3の実測値と剛性Cとした解析値のうち、列車速度が210km/hと255km/hであるものについて桁中央変位と時刻の関係を表したものである。いずれの速度においても、時刻の変化に伴う変位量の変化は、同様の傾向を示しており、解析値は比較的精度よく、実測値を再現しているといえる。

表-7は剛性の違いが解析結果に与える影響を比較するために、桁中央最大変位について、解析値の実測値に対する比としてまとめたものである。桁2、桁3の解析値の実測値に対する比の算定に当たっては、曲げ剛性を剛性Bとした場合の解析値と実測値の比が最も大きくなる速度において算定している。剛性Aで解析を行った場合、実測値と解析値の比は1.89~4.37倍となっている。剛性Bで解析を行った場合は1.53倍~1.61倍となっている。このように剛性の設定によって解析精度が変わることから、桁構造物の動的挙動を解析的に検討する場合、検討対象桁の剛性評価方法が重要であるといえる。今後より合理的な剛性評価方法の研究を進めたいと考えている。

#### 4. まとめ

以上の検討の中で得られた知見を以下に示す。

- (1) 列車走行時、実際に桁に生じるたわみは、設計断面より求めた桁の曲げ剛性での解析により求めたたわみに比べて小さなものとなっている。

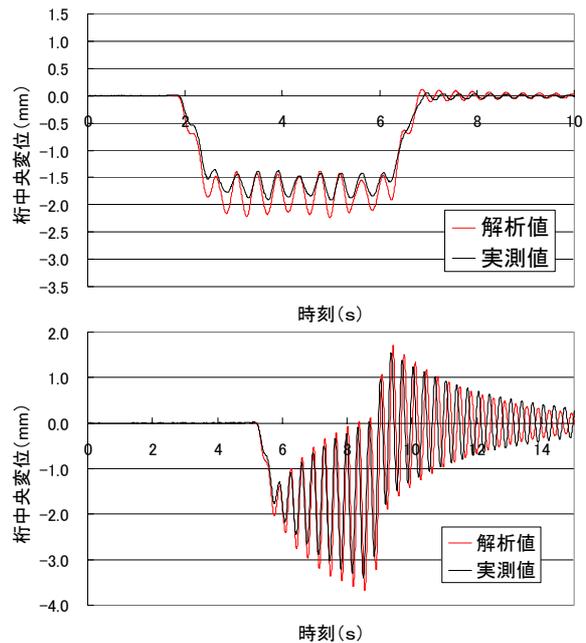


図-12 桁中央変位と時刻の関係（桁3）

表-7 桁中央最大変位の比較

	解析値/実測値		
	剛性 A	剛性 B	剛性 C
桁 1	4.37	1.53	1.42
桁 2	1.89	1.61	1.13
桁 3	2.15	1.57	1.17

- (2) 構造物モデル、列車モデル共に二次元としたモデルで解析を実施した場合、桁の曲げ剛性の値によって解析結果が異なり、今回検討した範囲においては、設計断面（梁とスラブ）から求めた曲げ剛性の解析結果は実測値の1.89~4.37倍となっており、曲げ剛性算定の際、設計断面の他に路盤コンクリートとを考慮した場合の解析結果は、実測値の1.53~1.61倍となっている。

#### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所；鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物,2004.4
- 2) 岡田勝也,石橋忠良,佐藤荘一郎；列車の動的応答による RC 桁断面の検討(1),構造物設計資料,No34 ,pp.13~22 ,1973.6
- 3) 宮崎修輔,井上寛美；東北新幹線コンクリート構造物の設計方針(2),構造物設計資料,No37 ,pp.18~24 ,1974.3