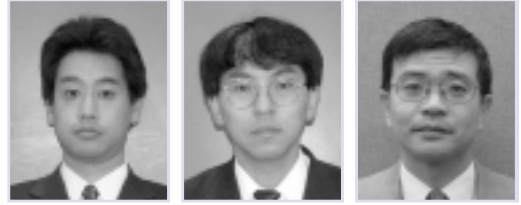


# 新幹線高速走行における コンクリート桁の動的挙動



金田 淳\* 小林 薫\* 野澤 伸一郎\*

列車走行速度の向上により桁の動的応答の変化が予測されるため、高速走行時の桁の変形、振動状況の把握が必要となっている。これまで、実測による動的挙動の把握を行ってきたが、桁構造物はスパン、断面形状、構造形式等が様々に異なる多種により構成されているため、全て実測により挙動を把握することは難しい。そこで、構造物の動的挙動を解析的に把握する手法の構築を試みた。簡易なモデルによる動的挙動解析を実施した結果、曲げ剛性の値により結果が大きく変化するが、適切な剛性で解析を行った場合は、桁の挙動を精度よく再現できることがわかった。また、この解析手法を用いて高速走行時の桁構造物の動的挙動を検討した結果、列車から桁へ過大な荷重が作用する可能性が少ないことが明らかとなった。

●キーワード：動的挙動、衝撃荷重、共振、固有周期、曲げ剛性

## 1 研究の背景

### 1.1 動的挙動の影響

コンクリート桁の動的挙動の影響は衝撃荷重という形で設計上考慮されてきた。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、桁の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。

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

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。東海道新幹線の開業により、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、東海道新幹線の設計列車荷重は、機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たため、構造物は比較的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、詳細に検討されるようになっていく。

### 1.2 東北新幹線(大宮—盛岡間)の桁構造物の概要

東北新幹線の桁構造物は東海道新幹線の事象を受け、動的挙動の影響を意識した設計方針となっている。

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。

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

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(1)で決まる値

$l \leq 15m \dots\dots L=25m$

$5 < l < 15m \dots\dots L=75m$

$l \geq 15m \dots\dots L=250m$

以上のように、新幹線の高速走行に伴う桁の共振現象の発生を予測する上で、桁構造物の固有振動数を把握することが重要となる。そこで、大宮-盛岡間の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。表1に大宮-盛岡間の桁構造物の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は桁の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の桁が突出して数が多いことがわかる。

表1 構造別の桁数

桁種別	記号	桁数
T桁(RC)	Ct	13323
T桁(PC)	Ctp	1340
箱桁(RC)	Cb	426
箱桁(PC)	Cbp	404
スラブ桁	Csd	146
合成桁	Gc	142
合成箱桁	Gb	33
その他の構造		60
合計		15781

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はスパンと固有振動数の関係を構造毎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。

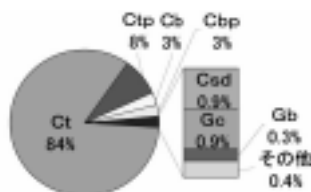


図1 構造毎の割合

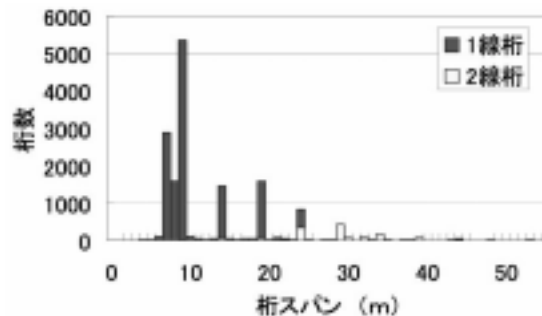


図2 桁スパンと桁数

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

ここに、 $n$ :基本固有振動数(Hz)

$L_b$ :桁のスパン

$EI$ :桁の曲げ剛性

$g$ :重力加速度

$D_1$ :単位長さ当たりの固定死荷重

$D_2$ :単位長さあたりの付加死荷重

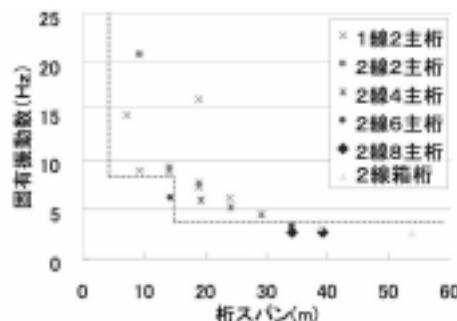


図3 桁スパンと固有振動数の関係

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いることがわかる。

### 1.3 動的挙動の把握の現状

高速走行時における動的挙動検討の基礎データとするため、2003年に上越新幹線、東北新幹線の一部区間でE2系、E3系を使用して実施された高速走行試験において、コンクリート構造物の動的挙動測定を実施し、その把握につとめてきた。しかし、新幹線の構造物は、スパン、断面形状、構造形式等が様々に異なる多種により構成されている。また、河川上の構造物や、高所にある構造物等、計測機器の設置が難しい構造物もあるため、すべての種類の桁の挙動を実測によって

把握することは非常に困難な状況となっている。

また、現行の構造物の設計基準における衝撃係数の算定式は、構造物、車両を精密にモデル化した動的解析結果に基づいたものとなっている。したがって、列車速度や車両の軸配置が、衝撃係数の算定式構築の基礎となっている解析条件と著しく異なる場合は、別途検討が必要となっている。

このような状況のもとで高速化に向けた取り組みを進めるにあたり、構造物の動的挙動を解析的に把握する簡易な手法を構築することを試みている。

今回、簡易な2次元モデルを利用した解析により、コンクリート桁構造物の動的挙動検討を実施したので報告する。

## 2 簡易モデルによる動的挙動解析

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。

- (1) 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。
- (2) 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4にサブストラクチャー法の概念図を示す。

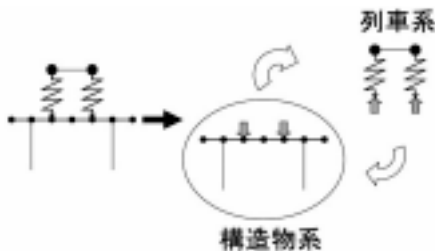


図4 サブストラクチャー法の概念図

### 2.1 解析モデル概要

#### 2.1.1 列車モデル

本解析で使用した列車モデルの概念を図5に示す。各車両は、車体、台車、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

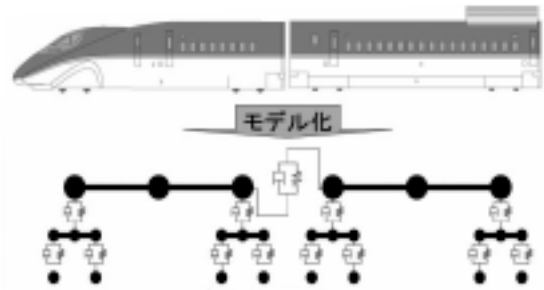


図5 列車モデル

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、梁要素には曲げ剛性を設定した。

#### 2.1.2 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6に示す。コンクリート桁は一律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。また、構造物の減衰特性として、剛性比例減衰を設定した。

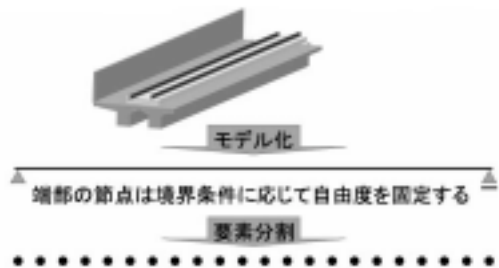


図6 構造物モデル

### 2.2 解析精度の検証

本手法による解析の精度を確認するために、これまでに実施したコンクリート桁の動的挙動測定と同一の条件で解析を実施し、解析値と実測値の比較を行った。

#### 2.2.1 対象構造物

対象とする構造物の諸元を表2に示す。

表2 対象構造物

	スパン (m)	構造形式	走行車両
桁1	24.2	複線8主PCI桁	E2+E3系
桁2	29.2	複線4主PCI桁	E2系
桁3	50.0	複線箱桁	E2系



#### 2.2.2 解析モデルの設定

構造物モデルの分割数は50とした。桁の質量は、梁、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のスパンを乗じた値の他、軌道質量、高欄質量を考慮している。

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。構造物の減衰特性として剛性比例減衰を減衰定数が2%となる値に設定した。また、解析刻みは0.005秒とし、ニューマーク法の $\beta$ 値を0.25として解析を実施している。

一部の桁については、曲げ剛性または列車速度を様々に変化させた解析を実施している。曲げ剛性の算定方法は表3に示す3通りとした。

表3 曲げ剛性の設定

	条件A	条件B	条件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			実測データより剛性を逆算
備考	梁・スラブのみ考慮して算定。	梁スラブに加えて地覆・路盤コンクリートを考慮して算定	実測データの自由振動部分より固有周期を推定。固有周期より曲げ剛性を逆算

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、30km/h～500km/hの範囲で解析を実施した。

桁毎の解析条件表4に示す。

表4 解析パラメーター

	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(30km/h毎) 240～500km/h(5km/h毎)
桁3	C	30～240km(30km/h毎) 240～500km/h(5km/h毎)

### 2.2.3 動的挙動測定方法

ここで、動的挙動測定方法について説明する。図7に、測定方法の概要を示す。



図7 測定項目概要図

測定は図7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は2000Hzで連続的に記録した。

### 2.2.4 実測値と解析結果の比較

図8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とした場合の解析値は、実測値とくらべ最大変位、振幅が大きくなっており、解析結果と実測値は異なっているといえる。また、曲げ剛性を条件Bとした場合、条件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

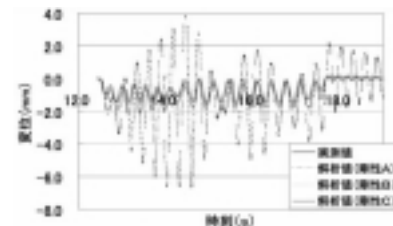
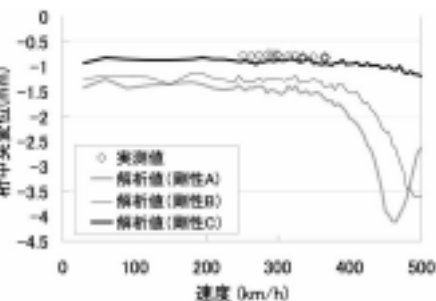


図8 桁中央鉛直変位と時刻の関係(桁1)

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9は桁2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。

図中にひし形で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。変位の実測値は、速度の変化にかかわらずほぼ一定の値を示している。一方、解析結果も、測定を実施した



速度域において

図9 桁中央最大鉛直変位と速度の関係(桁2)では、急激な変化は見られない結果となっている。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結果となっている。

図10は桁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。

変位の実測値は測定を実施した速度域において、比較的大きな変化を伴うことがわかる。また、解析結果も、速度の変化に伴う

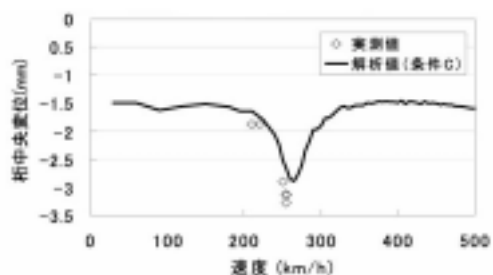


図10 桁中央最大鉛直変位と速度の関係(桁3)

わみ量の変化は実測値と概ね同様の傾向を示している。

図11は桁3の実測値と解析値のうち、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の傾向は同様となっており、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。

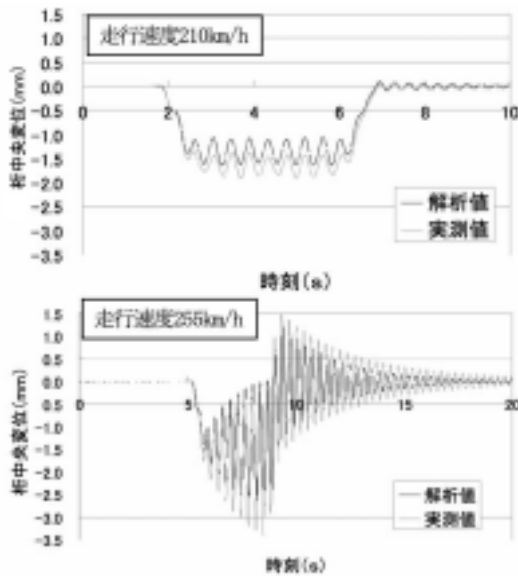


図11 桁中央鉛直変位と時刻の関係 (桁3)

以上の比較により車体モデル、車両モデル共に二次元とした簡易なモデルでの動的解析でも、桁の曲げ剛性を適切に設定することで、特定の速度域で振幅が増大する現象も含め、動的挙動を比較的精度よく再現することができることが明らかとなった。また、列車走行時に桁に生じる実際のたわみは、剛性Aでの解析結果からもとまるたわみに比べて小さいことが明らかになった。

### 3 360km/h走行時の構造物の動的挙動の検討

#### 3.1 目的

2004年6月から実施されている、FASTECH360Sによる高速走行試験では、試験列車の走行速度は360km/hの速度域となっている。そこで、高速走行試験が実施される区間の構造物の動的挙動を把握する目的として、動的挙動解析を実施したので、その内容について述べる。

#### 3.2 検討対象桁の選定

高速走行区間内のコンクリート桁構造物の総数は約1200

連にのぼる。そこで、これらのコンクリート桁について、スパン、桁断面、桁高により整理を行い、代表的な桁について解析を実施することとした。

検討対象桁の選定にあたっては、以下の点について考慮した。

- ・様々な断面形状の桁を選定する
- ・概ねスパン5m毎に1種の桁を選定する

また、一般的に、他の条件が同一であれば、スパンが長いほど、桁高が低いほど、列車の高速走行時における振動の影響が大きくなりやすいことより、同一断面・同一スパンの桁の中では桁高の低い桁を、同一断面・桁高の桁では、スパンの長い桁を検討対象に選定することとした。

図12は高速走行試験区間内のコンクリート桁について、桁高、スパン、断面形状別に整理したものである。検討対象の桁として図中において○印で囲んだ17種類の桁を選定した。

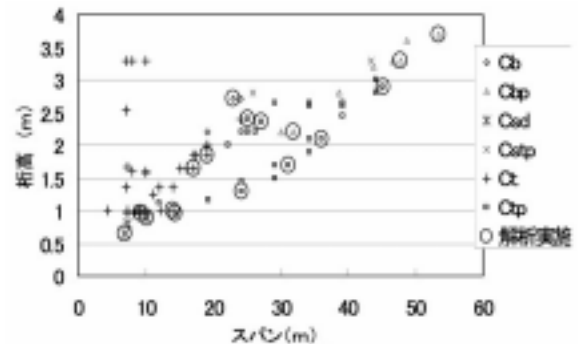


図12 スパンと桁高の関係

#### 3.3 検討方法

検討は、車軸からコンクリート桁に作用する力に着目して実施した。車軸からコンクリート桁に作用する力は、列車荷重、衝撃荷重により構成されているものとし、車軸から桁への作用力について、設計値と高速走行時の解析値を比較することによって、高速走行の影響を把握することとした。

車軸から構造物への作用力の設計値は、設計当時の設計基準に規定されている列車荷重ならびに衝撃係数により把握することができる。一方、高速走行を想定した車軸からの作用力は、FASTECH360S車両の軸重と衝撃係数を決定することにより把握することができる。衝撃係数は式(1)に定義されていることより、静的載荷時のたわみと動的載荷時のたわみから求めることができる。動的載荷時のたわみはFASTECH360S車両モデルを用いた列車走行解析によって



得ることができる。260km/h～365km/hの範囲で5km/h毎に走行速度を変化させて解析を行った結果のうち、最も大きなたわみを動的挙動時のたわみとした。静的載荷時のたわみの算定は、構造物へ作用する荷重の変化が緩やかな場合、動的挙動と静的挙動はほぼ一致することから、列車走行速度を30km/hとした場合の列車走行解析結果を行うことで求めることとした。また、桁の曲げ剛性の設定は条件Bとして解析を行った。

### 3.4 検討結果

図13に検討結果を示す。桁毎に、設計時の衝撃係数、高速走行試験時の衝撃係数、作用力比を示している。ここで、作用力比とは車軸から桁への作用力について、高速走行時の値を設計時の値で除したものである。ほとんどの桁において、衝撃係数は増加しているが、車両の軽量化により軸重が小さくなっており、車軸から桁への作用力は設計上考慮されている作用力を下回っている。このことより、高速走行において、桁が過大な列車の軸重を受ける可能性が小さいことが明らかとなった。

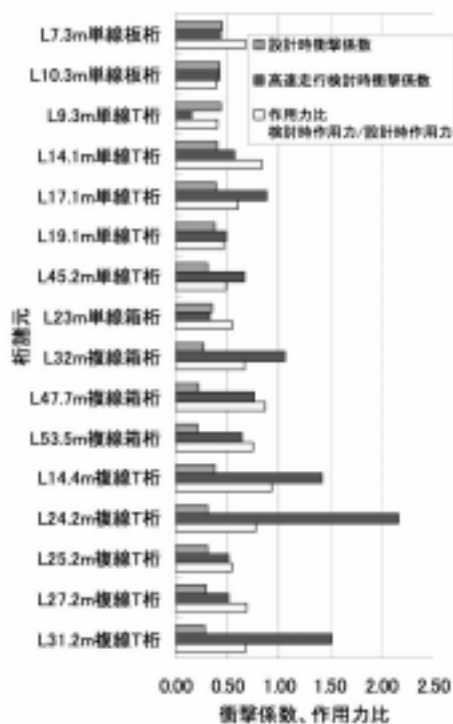


図13 検討結果

の構築に取り組んできた。取り組み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。
- (2) 構造物モデル、車両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、実測データより求めた桁の固有周期より逆算した曲げ剛性による結果が、実測値との乖離が一番小さくなっている。
- (3) 高速走行時に車軸から桁への作用力について検討を行った結果、多くのけたで速度の向上により衝撃係数の増大が見られるが、設計軸重に比べ軸重が軽くなっているため、桁が過大な列車の軸重を受ける可能性が小さいことが明らかとなった。

## 4 今後の課題

今後の課題として、動的挙動解析の精度向上が挙げられる。解析精度は桁の曲げ剛性の設定により大きく変わることから、安全かつ合理的な値の算定手法を構築していきたいと考えている。これについては、FASTTECH360Sによる高速走行実験時に構造物の動的挙動測定を実施し、実測値と解析値を比較検討しながらすすめていきたい。また、高速走行列車のすれ違い時の検討や、疲労強度の検討を今回紹介した解析手法を利用しながら進めていく予定である。

### 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20044
- 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) 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(2),構造物設計資料,No35,pp.14～18,1973.9
- 4) 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,p18,1974.3
- 5) 土木学会；動的解析の方法,19897

## 4 まとめ

列車高速走行時の構造物の動的挙動の簡易な算定手法