

## 鉄道車両の高速走行を考慮した地震応答解析

Seismic Response Analysis on Running Trains with High Speed

山崎 幹男\* 石井 拓一\* 中野 聡\*\*

By Mikio Yamazaki, Koichi Ishii and Satoshi Nakano

## Abstract

The object of this study is to develop the method of response analysis on high speed trains running on structures during an earthquake. In the study, a train model consisting of a row of cars connected in longitudinal direction is used and the lateral response of cars is analyzed differently from that a plane model representing the cross section of a car has been used generally in the seismic analysis of a railway car. The analytical equations of interaction between structures and a train, considering the running of a row of cars are to be formulated with those which express their dynamic behavior properly. In order to simplify the equation however, we tried to analyze the seismic response of railway structures and that of running trains separately with use of, existing programs for dynamic analysis.

Key Words: seismic response analysis, response of running trains, snake motion response of cars

## 1. まえがき

構造物上を走行する鉄道車両が地震力を受けた場合の応答解析は、高速鉄道の地震時の走行安全性を考える上で、重要な課題である。鉄道車両の地震時の解析は、一般的には車両の断面を取り出した平面モデルあるいは1車両を取り出したモデルで行われているが<sup>1) 2) 3)</sup>、本研究では車両の線路方向における長さや連結を考慮した車両のモデル化を行い、列車の左右方向の蛇行的な挙動を解析することを主たる目的の一つとしている。

このような車両の移動を考慮した構造物-車両連成系の挙動の解析は、本来はその挙動をそのまま運動方程式として取扱う必要があるが、本研究では近似解析として既存の動的解析プログラムを用い、構造物の地震応答と走行車両の応答とを分離して扱う方法を試みた。車両の応答解析は、構造物の地震応答解析で得られる応答変位を用い、車両が高速で移動することによって生じる車両の車軸位置における時間遅れを考慮した走行時の入力波形を算出し、それを車両の車軸位置に多点入力することによった。本論文は、これらの鉄道車両の移動を考慮した地震時応答解析手法とその適用例について、報告するものである。

\* 東海旅客鉄道株式会社 (〒103 東京都中央区 八重州 1-6-6)

\*\* (株)福山コンサルタント (〒133 東京都江戸川区 北小岩 3-17-2)

## 2. 解析概要

構造物上を走行する車両の地震応答解析を行う場合、本来は構造物-車両を一連の系としてとらえ、構造物と車両の地震時における動的相互作用を考慮した地震応答解析が必要である。しかし、この解析では、これに進むひとつの段階として、構造物と車両を別々に取扱い、接合面である構造物天端における変位を介して両者を接合する擬似的な動的サブストラクチャー法を用いて地震応答解析を行った。これが厳密な意味での動的サブストラクチャー法との異なる点は本解析では構造物から車両へ伝達される動的な効果は考慮できないのに対し、逆に車両から構造物へ揺れ戻す二次的な応答が考慮できないことにある。しかしながら、車両と構造物の固有振動数が異なり、車両の質量に比して構造物の質量が大きい場合には有効な手法と考える。

本解析では、構造物、車両ともバネ-マス系の振動モデルによっている。車両と構造物の離散化された運動方程式は絶対座標系上において次式で表わされる。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{P\} \quad (1)$$

ここに、 $[M]$  : 質量,  $[C]$  : 減衰,  $[K]$  : 剛性,  $\{u\}$  : 変位,  $\{P\}$  : 外力

さらに、構造物と地盤の分離を構造物天端のレール位置における境界節点変位  $\{u_b\}$  と車両の自由節点変位  $\{u_f\}$  に分離する。(サフィックス  $f$  : 車両系, サフィックス  $b$  : 境界節点)

$$\begin{pmatrix} M_{ff} & M_{fb} \\ M_{bf} & M_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_f \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} C_{ff} & C_{fb} \\ C_{bf} & C_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_f \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_{ff} & K_{fb} \\ K_{bf} & K_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_f \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f \\ P_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで(2)式を車両系だけの運動方程式に書き改めると

$$[M_{ff}] \{\ddot{u}_f\} + [C_{ff}] \{\dot{u}_f\} + [K_{ff}] \{u_f\} = \{P_f\} - [M_{ff}] [B] \{\ddot{x}_b\} - [C_{ff}] [B] \{\dot{x}_b\} \quad (3)$$

$$\text{ただし、} [B] = [K_{fb}]^{-1} [K_{fb}] \quad (4)$$

(3)式の外力項において絶対座標系では自由節点に入力は作用しないことから右辺第1項  $\{P_f\}$  はゼロとなり、また外力項では慣性力が支配的であると考えると減衰力による項は省くことができる。なおここで  $\{x_b\}$  は、構造物上に列車が存在しない時の境界節点における絶対変位である<sup>4)</sup>。

次に、車両系の境界節点に与える外力は、一般に強制変位を与えたときの動的解析で用いられる Large-Stiffness-Method と呼ばれる方法を用い、節点の強制変位で与えた。この Large-Stiffness-Method を図-1(a)に示す簡単な2自由度系を例にして説明する。減衰項を無視した2自由度系の強制振動の運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_e \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_e \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 + K_e \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{ここで(5)式の第1式は、} m_1 \ddot{x}_1 + K_1 (x_1 - x_e) = 0 \quad (6)$$

$$\ddot{x}_1 = \ddot{x} + \ddot{x}_e, \quad x_1 = x + x_e \text{より}$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + K_1 x = -m_1 \ddot{x}_e \quad (7)$$

となり図-1(b)に示すような1自由度系に地震加速度  $\ddot{x}_e$  を作用させたときの運動方程式にほかならない。

$$\text{また、(5)式の第2式は、} m_e \ddot{x}_e - K_1 (x_1 - x_e) + K_e x_e = F(t) \quad (8)$$

$$(8) \text{式より} \quad F(t) = K_e \left\{ x_e - \frac{K_1}{K_e} (x_1 - x_e) + \frac{m_e}{K_e} \ddot{x}_e \right\} \quad (9)$$

ここで、 $m_e \rightarrow 0$  となるように  $m_e$  を小さくすると、かつ  $K_1/K_e \rightarrow 0$  となるように  $K_e$  を大きくすると、

$$F(t) = K_e x_e \quad (10)$$

となり、下側の節点以下に着目した静的釣合方程式に他ならない。すなわち下側の節点重量を小さな値とし、それを支持するバネと大きな値とした2自由度系の下側の節点に強制変位を与えた場合の運動方程式は、その強制変位による加速度を上側の振動系に慣性力として作用させたものと等価となる。

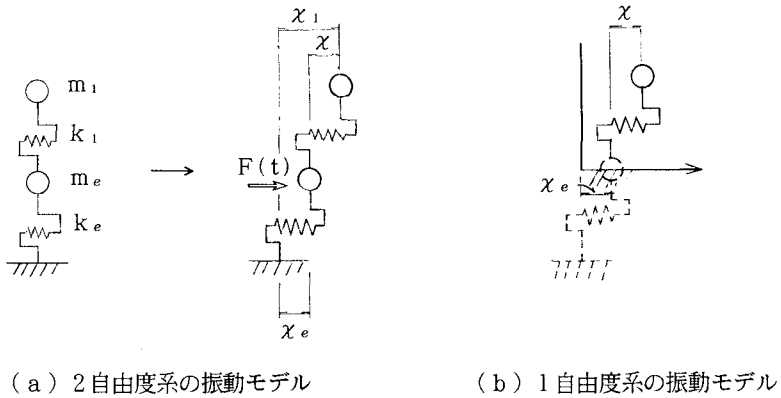


図 - 1 2自由度系の振動モデルに対する Large-Stiffness-Methodの適用

以上の方法を用いると車両モデルの車輪位置にそれぞれ時々刻々と変化する異なった入力が入力した場合の挙動を解析できることになる。

### 3. 解析モデル

解析モデルの自由度は、線路直角方向の応答に対する解析を行うことから、線路直角方向の並進、線路軸回りの回転および鉛直軸回りの回転である。構造物のモデル<sup>5)</sup>としては図-2に示す様に橋脚中心の間隔30mのPCボックス単純桁を有する10径間(全長300m)の桁式高架橋を想定した。なお、この桁式高架橋の全体系の1次の固有振動数は、固有値解析を行った結果では、1.64Hzである。また車両のモデルは、図-3に示す様に、車体を梁要素、車体-台車間および台車-車輪間を3方向(並進、ローリング、ヨーイング)のバネとダンパーで評価している。なお、ダンパーは車体-台車間は並進方向とヨーイング方向に、台車-車輪間はローリング方向のみに、それぞれ考慮している。また、車両と車両を結ぶ連結器は、二重節点によるカップリング要素を用い、並進方向の変位のみを一致させるようにした。なお解析は、既存の動的解析プログラム(NASTRAN)を用いて行った。

さらに、構造物天端の変位を車両に引き渡す入力位置は台車-車輪間バネの下の節点で行い、Large-Stiffness-Methodに用いる仮想質量と仮想部材の剛性はそれぞれ台車質量の1/10000倍と台車-車輪間のバネの10000倍を設定した。なお、この仮想質量と仮想部材の剛性はあらかじめ車両の応答解析を用い、構造物天端の変位と境界節点位置(仮想質量の位置)の変位が一致することを確認して決定した。

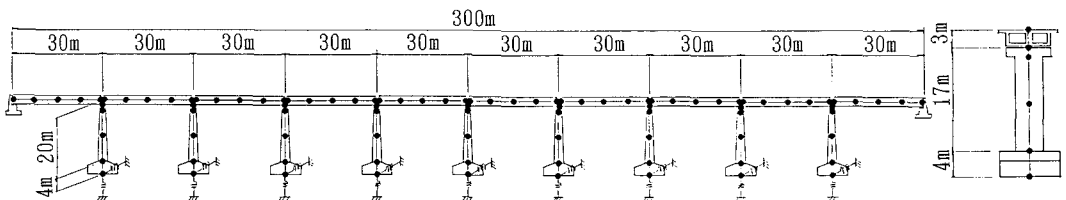


図 - 2 解析対象構造図

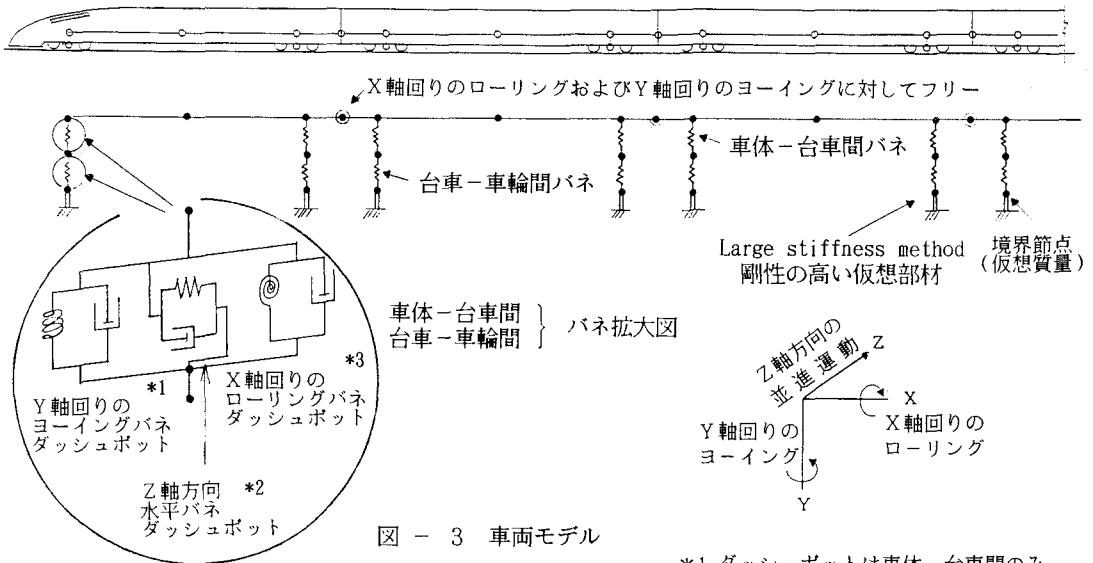


図 - 3 車両モデル

- \*1 ダッシュポットは車体-台車間のみ
- \*2 ダッシュポットは車体-台車間のみ
- \*3 ダッシュポットは台車-車体間のみ

#### 4. 車両への入力波形

車両への入力波形は、構造物の地震応答解析によって得られる天端レール面での線路直角方向の水平変位と線路軸回りの回転角により作成した。

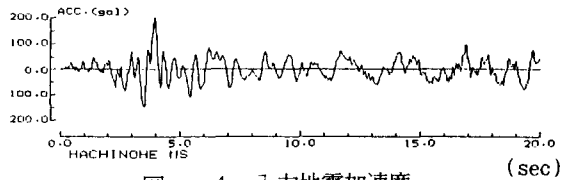


図 - 4 入力地震加速度

解析に用いた入力地震波は、十勝沖地震（1968年5月16日）の八戸で観測されたN S成分波である。この入力地震波（加速度）を図-4に示す。この地震波は観測波形を重複反射理論によって基盤波形に変換後、露出基盤最大加速度200galに増幅したものである。次に、この入力地震波を用いて構造物の地震応答解析を行った結果を図-5に示す。

構造物の地震応答解析はすべて線形計算で行っている。図中実線の波形は橋脚の天端での応答変位波形を示し、点線は、桁上を4分割した位置での応答変位波形をそれぞれ示している。

また斜線で示したのが、車両が速度300km/hで構造物上を移動する時に受ける、線路直角方向の水平変位である。車両への入力波形はこの斜線で示した応答変位波形を考えれば良いが、構造物の応答波形は前出図-2に示した様に離散的な節点位置で取り出しているため、この節点間の部分は、線形補間した。この様にして作

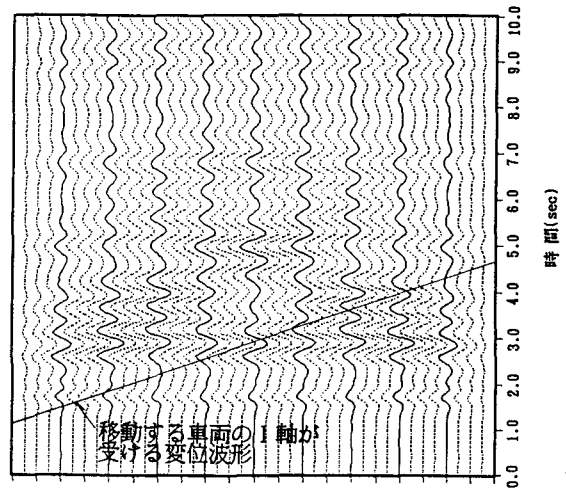


図 - 5 構造物の地震応答 - 天端変位

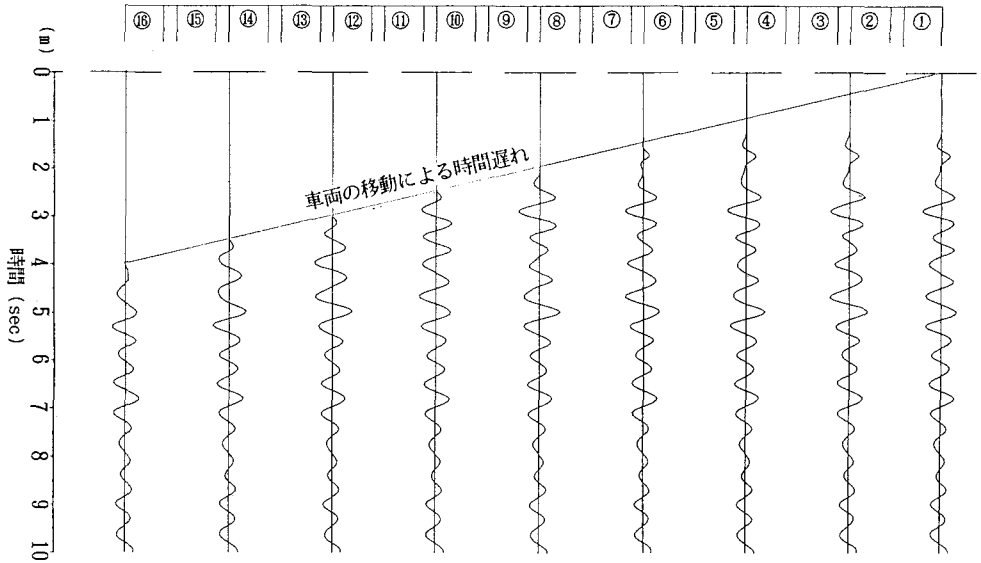


図 - 6 車両の入力波形




成した車両の入力波形を図-6に示す。ここでは車両への入力波形の内の数波を車両モデルとともに入力位置に沿って示している。

また、車両の入力位置の離れによって生じる移動時間の遅れを斜線によって示しているが、先頭車両と最後尾車両の入力位置では約 4.0秒の時間遅れが生じている。この移動時間の遅れ以降では、各入力位置における入力波形はほぼ同位相となっているが、これは解析に用いた構造物の個々の橋脚の条件（構造形式および地盤条件等）をすべて同一としたことにより、構造物の挙動として同一方向かつ同位相で揺れる並進運動が支配的となったためである。なお入力波形は前出図-2の構造物が30径間の場合を想定したものである。さらに、線路軸回りの回転角についても同様の入力波形を作成した。

### 5. 車両の応答解析

応答解析の結果を示す前に、解析に用いた車両の振動性状を示す。車両の固有値解析を行った結果から、車両の振動形態を3帯域に区分して、その挙動を表-1に示す。これらの振動モードの内、応答解析でその卓越が予想されるのは、0.85~0.98Hzに現れている車体のローリングおよびヨーイングである。車両の応答解析は、前項で説明した線路直角方向の水平変位と線路軸

表 - 1 振動モードの区分

振動数 (Hz)	振動特性	
① 0.85-0.98	下心ローリングが先行し、ヨーイングに移行。	
② 3.63-7.07	車体の曲げ振動	
③ 8.48-8.52	台車のローリング	

回りの回転角の波形を車両のすべての入力位置に多点入力することにより行っている。なお応答解析は計算時間間隔  $\Delta t = 0.05$  秒、計算時間15秒間で、直接法の過渡応答解析を用いて行った。 応答計算を行った結果として、車両の瞬時モードを図化（車両の応答を平面的に上から眺めている）したのが図-7である。

瞬時モードは 0.1秒刻みで車両が構造物へ進入した直後から約 3秒間描画しているが、先頭車両から順に車両が揺れだし、次々に全車両へと広がっていくことが認められる。さらに 4.0秒経過し動揺が車両全体に及んだ以降は並進的な同一方向の動揺が支配的であるが、一部に蛇行的な挙動が認められる。なお、ここで示した車両の瞬時モードはいずれも構造物の動きを含めた絶対変位量で示しており、図中では構造物天端の動きを点線で示している。

次に、車両への入力波形（構造物の動き）と車両の台車の位置における応答（絶対変位）を用いて、台車位置における相対変位（台車位置の応答変位から入力変位を時間ごとで差し引いた値）の算出を行った。その結果として先頭車両（先頭車両の台車位置）と中間車両（8両目と9両目の台車位置）の応答を図-8に示すが、図中破線が入力、点線が絶対変位、実線が相対変位である。この様に車両と構造物の相対的な挙動は、入力波形の周期を決定する構造物の橋軸直角方向の固有振動数が、先に述べたように1.60Hzと、車両のローリングおよびヨーイング振動の固有振動数0.85~0.98Hzより高い帯域にあり、両者に共振の可能性はなく、構造物の変位は車両の絶対変位量に比べるとかなり小さい。

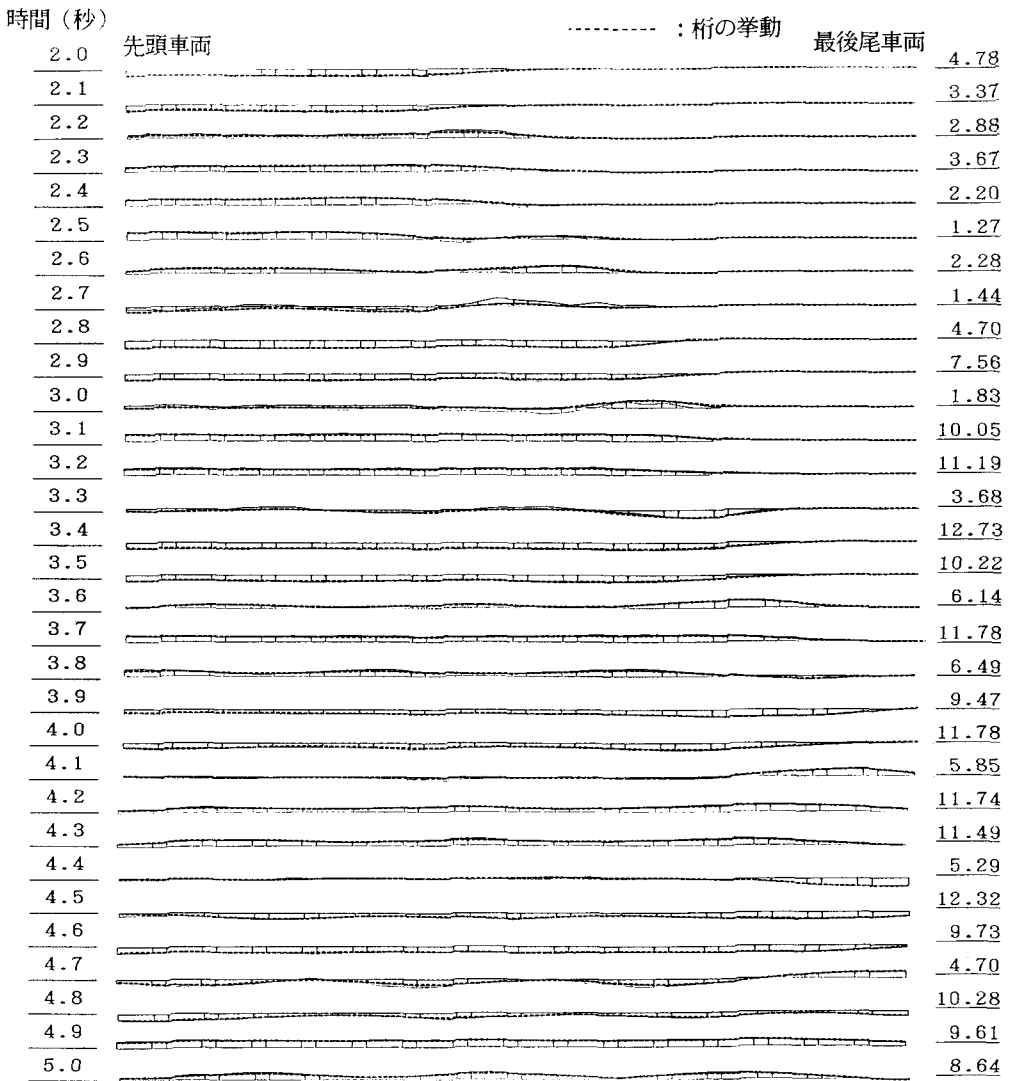


図 - 7 車両の瞬時モード

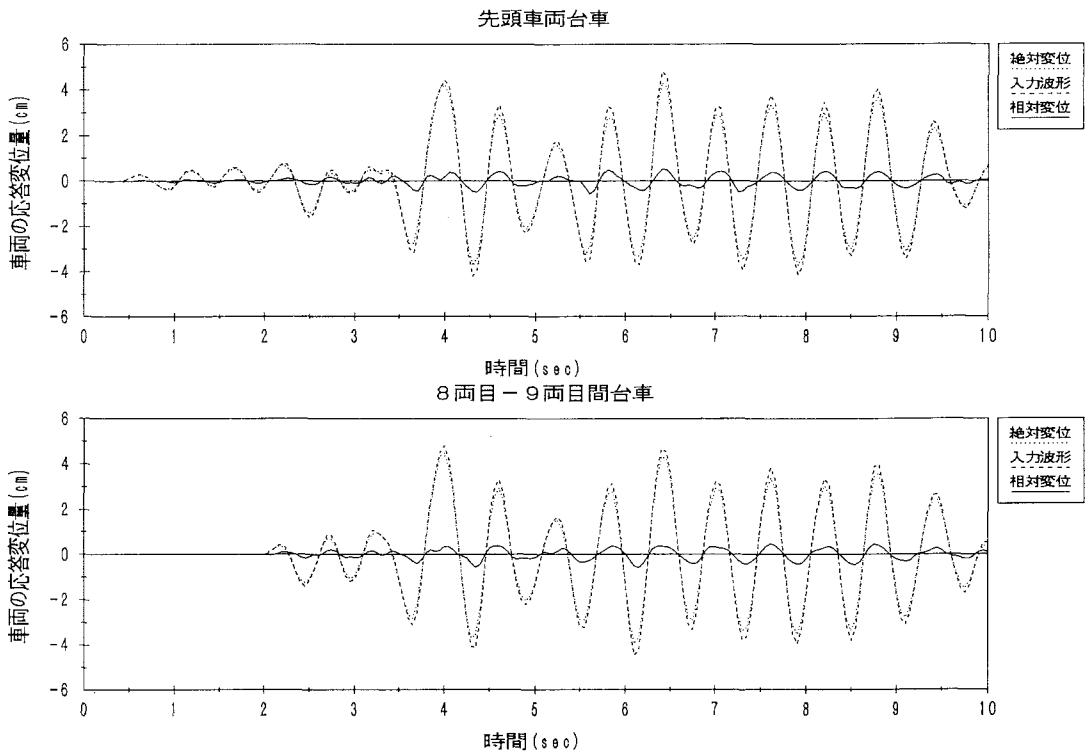


図 - 8 車両の応答波形

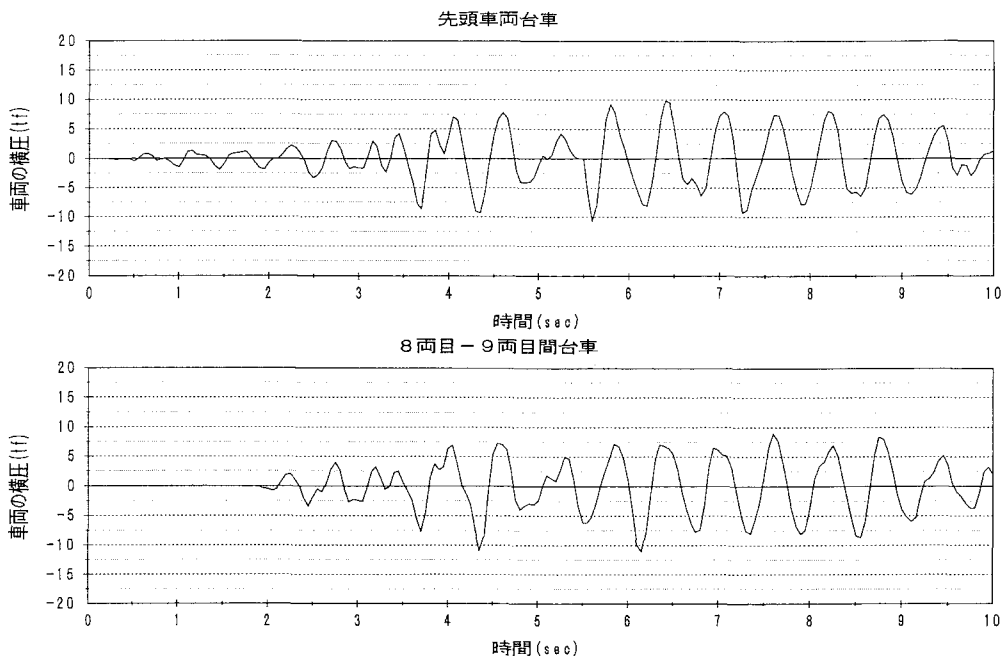


図 - 9 台車-車両間のせん断力波形 (横圧は1台車当たりの2車軸分を示す)

さらにこの相対変位に台車-車輪間のバネ定数を乗じて台車-車輪間のせん断力（レールに作用する横圧に相当、図中は1台車当たり2輪軸分を示している）の算出を行った結果が図-9である。1輪軸当たりのせん断力の最大値は6.07tfであった。新幹線の軌道構造においてレールに作用する地震時の横圧の限界値は7.8tfとされており<sup>10)</sup>、本解析の結果ではこの限界値は越えていない。また鉄道構造物において地震時の列車走行安全性の検討は角折れによるが<sup>6) 7) 8) 9) 10)</sup>、本解析結果では構造物の最大角折れ $\theta$ は0.74‰であり制限値（スパン30m、最大速度260km/h）である4‰<sup>11)</sup>を下回っている。

## 6. 結び

車両が走行中に構造物上で受ける地震力に対する応答を擬似的な動的サブストラクチャー法を用いて解析する手法について述べた。この解析手法はあくまで車両から構造物への二次的な応答については考慮していないため近似解法の域は脱していないが、通常の構造物と列車ではこれを十分満足しているので目的を達成し得る解析手法であると考ええる。

なお、本論では、解析手法の検討を行うことを目的とし、対象とした構造物は仮想的に作成したモデルを用いている。今後は実橋りょうに適用し、想定地震の震源の設定等を行って入力地震波の入力位相差をも考慮した解析を行うことを予定している。

## 謝辞

本論文作成に当っては、東海旅客鉄道株式会社 技術本部 技術顧問 佐藤吉彦氏に貴重なる御指導御助言を賜った。記して深く感謝いたします。

## 〔参考文献〕

- 1)西岡:「軌道振動を考慮した車両運動に関する理論的研究」土木学会論文報告集 第172号 1969-12
- 2)西岡,橋本:「水平地震に対する橋梁上の2軸貨車の走行安定性」土木学会論文報告集 第296号 1980-4
- 3)川上, 秋山:「水平振動を受ける二軸車両の挙動とそのモデル化についての一考察」土木学会論文報告集第347号 1984-7
- 4)土木学会:「土木技術者のための振動便覧」1985-10
- 5)土木学会:「国鉄建造物設計標準解説 基礎構造物」1986-3
- 6)涌井:「新幹線車両の走行性から見た長大橋の折れ角限度」鉄道技術研究報告 1978-7
- 7)松浦:「水平・鉛直角折れ軌道に対する2軸貨車の走行シミュレーション」鉄道技術研究所速報 1975-3
- 8)伊藤,岡田,志村,川村:「橋りょうの軌道変形が車両に与える影響(第1報)」鉄道技術研究報告 1971-11
- 9)伊藤,岡田,志村,川村:「橋りょうの軌道変形が車両に与える影響(第2報)」鉄道技術研究報告 1971-12
- 10)佐藤, 三浦:「走行安全ならびに乗心地を考慮した線路構造物の折れ角限度」鉄道技術報告 1972-8
- 11)(財)鉄道総合技術研究所:「鉄道構造物設計標準(コンクリート構造物編)」1991-1
- 12)宮本, 渡辺:「線路 - 軌道の設計・管理 - 」山海堂 1971-7
- 13)平野:「質点モデルによる新幹線車両の輪重変動に関する理論的検討」鉄道技術研究所速報 1974-7
- 14)松浦, 志村:「高速鉄道における橋桁と車両の鉛直方向動的相互作用に関するシミュレーションプログラム」鉄道技術研究所速報 1974-5

(1993年9月16日受付)