

(44) 高速列車走行による沿線地盤への振動の伝播性状

GROUND VIBRATIONS INDUCED BY HIGH-SPEED TRAIN RUNNING

竹宮宏和*、安木清史***

Hirokazu TAKEMIYA and Kiyoshi YASUGI

* 岡山大学環境理工学部 教授 (〒700 岡山市津島中 2-1-1)

*** 岡山大学大学院工学研究科 大学院生 (〒700 岡山市津島中 2-1-1)

キーワード：高速列車走行による振動、地盤内の波動伝播/遮断の現象、現場計測、コンピュータ・シミュレーション

(High-speed train induced vibrations, wave propagation/impediment, field measurement, computer simulation)

1 はじめに

都市間を結ぶ鉄道に一層の高速化の期待がもたれ、我が国の新幹線列車も最近では 300km/h が実現しており、さらに将来の高速化への開発がなされている。ところで高速列車の走行などの質量の移動は衝撃的な载荷となって周辺環境へ振動を伝える。この振動源は沿線の住民の快適生活や精密機械の稼動などにマイナスの影響を与える可能性があり、環境振動として重要な課題をわれわれに与えている。この振動影響を予測・評価することは社会的に重要である。当該問題を力学的に捉えるには、地盤内の弾性波動伝播を解明する必要がある。

そこで本研究では、高架軌道を走行する新幹線列車を対象に沿線の地盤振動の評価法の開発を目的とした。振動予測を行うに際して問題となるのは、列車振動に関連する要素が多岐にわたっていることである。そこで、まず、最初に新幹線列車の走行時に振動計測した結果の分析をし、列車の走行による荷重列からくる振動の特性を把握した。つぎに、その結果を踏まえて周期的な移動加振源による高架橋-基礎-周辺地盤系としての応答を FEM-BEM 手法による数値解析によってコンピュータ・シミュレーションした。

なお本論文の内容は、衝撃载荷時の成層および多層地盤内の波動伝播を理論的に展開した別論文 [1,2,3] に基づいている。

2 高架軌道における現場計測

図1は、現場振動計測した高架軌道とその周辺地盤の概略状況を描いたものである。同図に示す振動計(サーボ型速度/加速度計)の計測配置から得た結果をまとめて、図2には各計測点の加速度波形を描いた。なお、これらの時刻歴波形には同期をとっていない。高架軌道の場合は、高架構造の固有の振動が発生し、それが基礎をとおして周辺地盤へ伝播する。そのため、平坦軌道、盛土軌道とは異なり [4, 5]、非常に紡錘形の時刻歴波形を示すのが特徴である。最大加速度で、高架部は 100 gal を超す大きい値であるが、地盤振動では、軌道近傍で 20 gal から 30 gal 程度で、距離と共に減衰している。

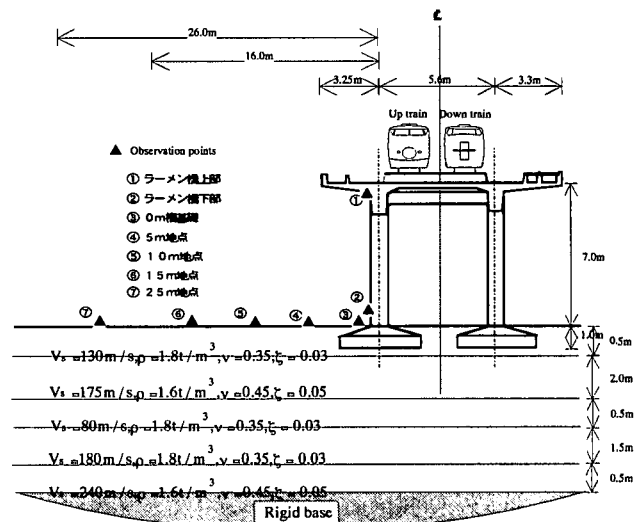


図1 新幹線高架軌道における計測

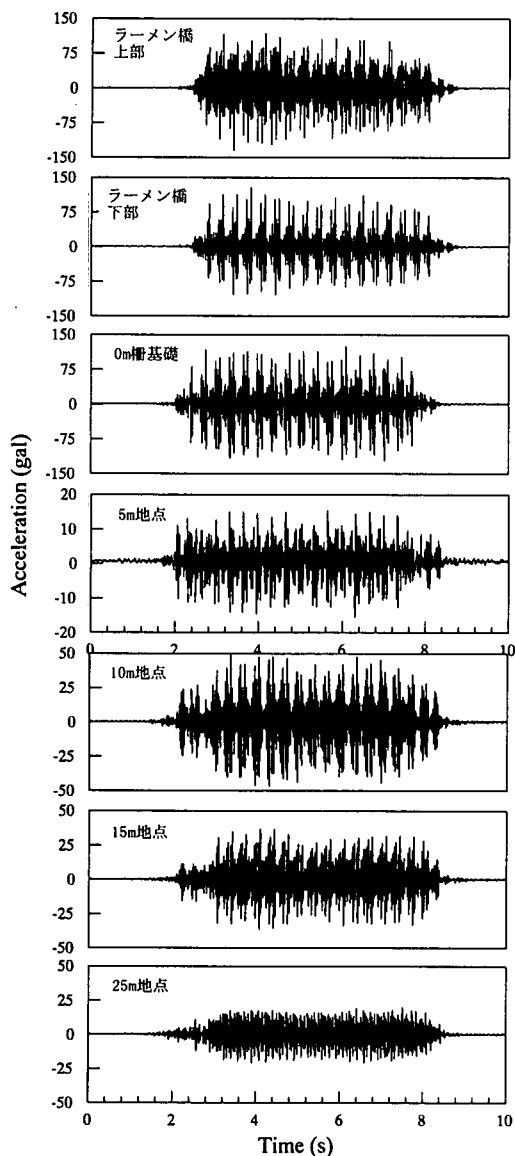


図2 新幹線（300系）走行時の軌道及び沿線地盤の加速度記録波形、鉛直成分、推定走行速度 266.8km/h

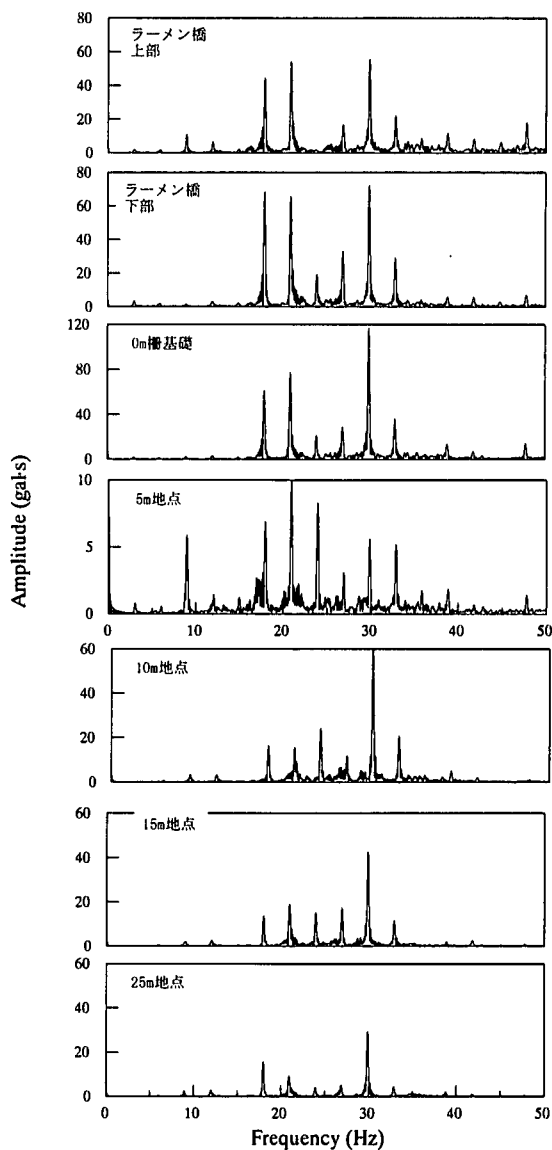


図3 計測加速度波形（図2）のフーリエ振幅（鉛直成分）

加速度波形における振動数成分を調べるためにそのフーリエ変換をとった。それを図3に示す。鉛直振動は、高架の桁部と橋脚下端部ではほぼ同位相で現われているが、卓越している振動数帯域は20前から30 Hzである。10 Hz以下の低振動数成分はほとんど含まれていない。この原因として、後述するように、浅い軟弱表層地盤による波動遮断現象によると思われる。

振動の伝播状況を把握するために、各測点の加速度応答の伝達関数を高架桁位置に対するもので評価した。このときの各方向成分を図4に示す。ここでは、評価値を振動レベルで表示している。同図より、水平成分の伝達率においては、約10Hz付近以下の低振動成分の伝播が非常に抑制されていることが分

かる。これは竹宮・合田が文献[6]で指摘している成層地盤の波動遮断現象である。そこで、文献[3]に従って対象地盤の層状構成を考慮しての伝達関数を計算した。その際、载荷として一様な正方形の移動分布荷重を仮定した。その結果を図4に折れ線で併せて描いてある。水平成分では、計測結果と概ねよい対応を示している。しかし鉛直成分は、計測結果において、ゼロ/ゼロの状態であるので上記の遮断振動数の効果は明瞭には現われていない。

対象地盤内の波動の伝播の様相を把握するために対象地盤内の波動の分散特性を求めて描いたのが図5である。列車の推定（図2からラーメン高架で読み取れる最初の輪重による衝撃応答から最後のそれまでの経過時間で列車の総長を除いた値）に対する特

3 高架軌道の解析

ここでは新幹線高架橋の代表的な2層ラーメン高架橋を解析対象とする。

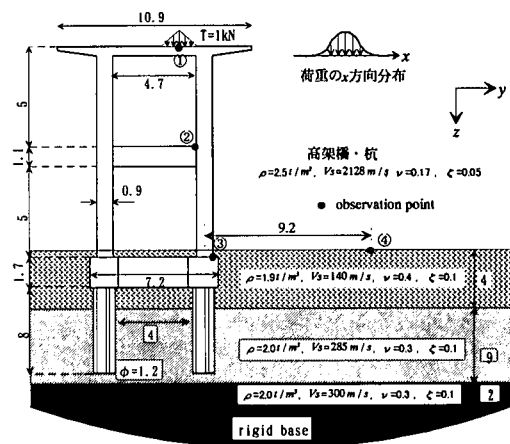


図6 新幹線高架(2層ラーメン橋)と沿線地盤

図6のモデルの3次元振動伝播解析には竹宮・合田の文献[3]におけるFEMとBEMのハイブリッド法を拡張して適用した。列車の走行を同図の挿入図と表1に示す移動分布加振源で擬似的に取り扱った。これについての説明を付録に示しておいた。したがって加振振動数を与えた移動荷重下での高架構造物—地盤系を離散化モデルとする。

表1 荷重モデル

空間領域	波数領域
$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2L}} \exp\left(-\frac{ x }{L}\right) \sin\left(\frac{ x }{L} + \frac{\pi}{4}\right)$ $a = \frac{3\pi L}{4}, \quad L = \sqrt{\frac{4EI}{k}}$	$\tilde{\Phi}(\xi) = \frac{4}{4 + (\xi L)^4}$

(1) 加振振動数と応答性状

荷重の周期特性が振動応答に及ぼす影響を検討するため、 $C=100\text{m/s}$ の一定移動速度の下で加振振動数を10Hz、20Hz、30Hzに変えた時の時刻歴応答およびフーリエ振幅を求めた。図7にフーリエ振幅を示す。以下の考察をする上で必要な対象地盤の波動分散特性を図9に示した。構造物では30Hz加振の振幅が、

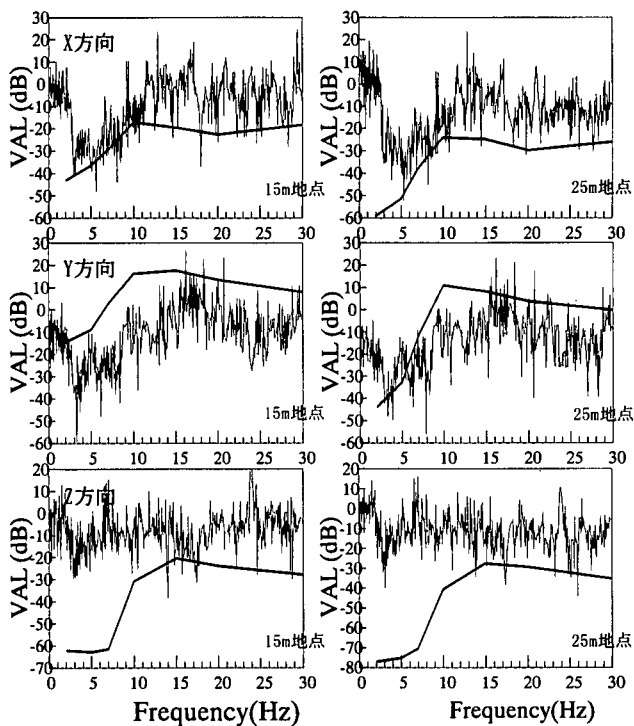


図4 計測加速度記録から求めた伝達関数

列車の推定速度 = 266.8 km/h

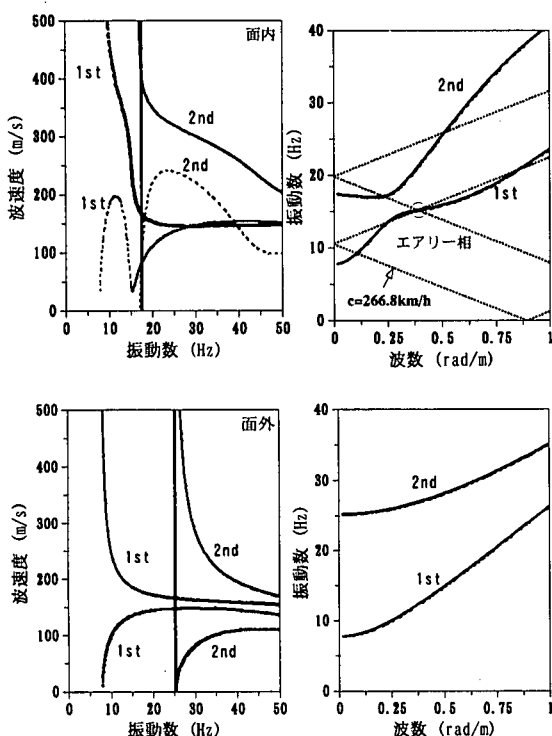


図5 図1の層状地盤内の波動分散特性

性線も記入してある。同図より、10数Hzの箇所ではエアーリー相が認められ、これが列車速度の特性線と交わり、したがって図4のピーク値の振動数と対応していることが分かる。

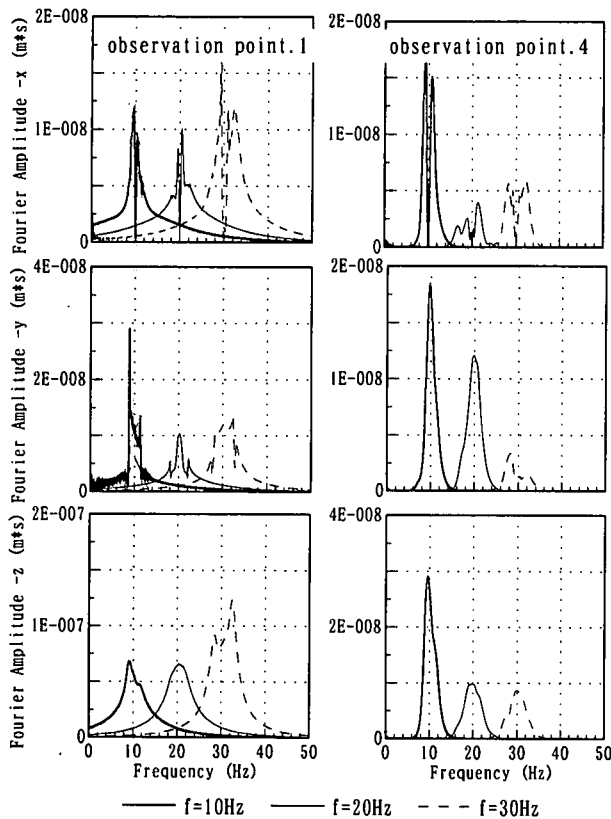


図7 移動加振源によるフーリエ応答

地盤では 10Hz 加振の振幅が他の加振振動数の振幅に比べて大きい。地盤において 10Hz の振幅が最も大きいのは、1 次モードのエアリー相近傍での 1 次モードを惹起するためと考えられる。y 方向のフーリエ振幅において、20Hz の振幅が大きいのは、面内のエアリー相の影響であると思われる。また、波形(省略)より、30Hz 加振では観測点 3 (フーチング) も y 方向に振動しているが、10Hz ではフーチングの振幅が小さいのに対し、軌道での衝撃波が見られる。これは、10Hz 加振において構造物の固有振動による揺れが生じているのに対し、30Hz では高架橋全体が振動していることが考えられる。荷重による影響が、直接下部構造に伝達しているものと思われる。

(2) 伝達関数

伝達関数より、スペクトルでは見られない伝播特性を見ることができる。高架橋の基礎から沿線地盤へ伝播する振動を把握するため、図 6 の基礎(点 3) に対する周辺地盤(点 4) への伝達関数を評価した。これを図 7 に示す。これらの結果は振動数帯域 5 Hz から 15Hz では、加振振動数を 10Hz に、帯域 15 Hz から 25Hz では 20 Hz に、そして帯域 25 Hz から 50 Hz

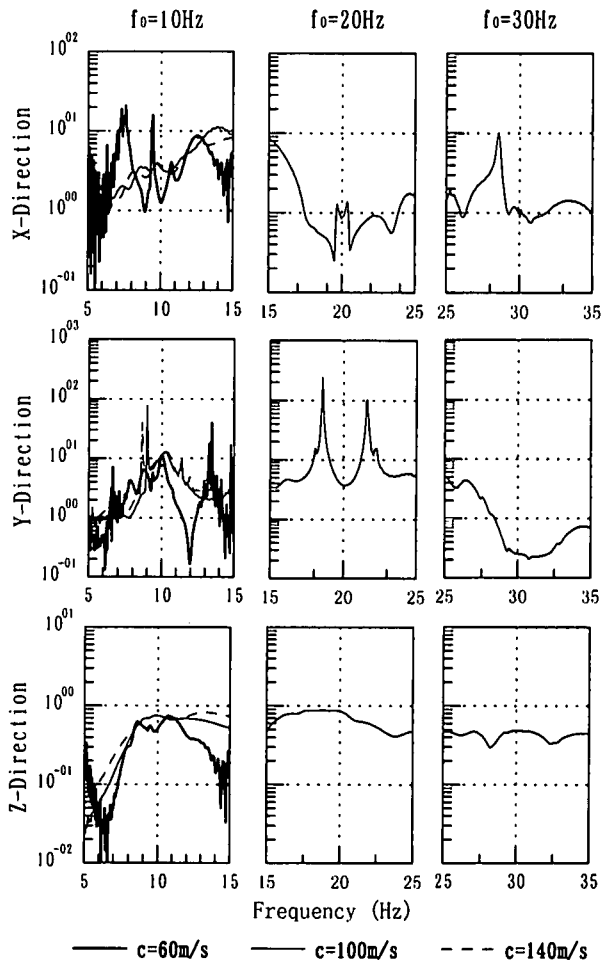


図8 基礎(点 3) に対する周辺地盤(点 4) への伝達関数

では 30Hz に固定した移動加振源を仮定して求めた。これより、対象地盤内でよく伝わる振動数の波とそうでない振動数の波があることが言える。鉛直方向の z 成分に関しては、距離と共に振幅は減衰するが、遮断振動数が 10Hz 付近に存在する。それより高い振動数の波は一様に伝わる事が分かる。軌道直角方向の y 成分では、加振振動数(10 Hz) 付近の大きな 2 つの大きな卓越振動成分はドップラー効果によるものと考えられる。しかし、高架橋から地盤(観測点 1 から 4) への伝達関数を見ると、ドップラー効果の影響と思われる振動数成分は減衰しており、その周辺の成分が増幅している。また、16Hz 付近の卓越振動数は、移動加振によって励起される 2 次モードの地盤の固有振動である。x 成分に関しては、加振振動数より離れた振動数成分が地盤に伝播されず、10Hz 付近の波も少し減衰して地盤に伝わる。また、フーチングから周辺地盤(観測点 3 と 4) の伝達関数で 14Hz 付近が増幅しているのは、分散曲線より面外の 2 次モードの影響と考えられる。20Hz の y 方向

5 むすび

本研究では、新幹線高架橋を対象として列車の走行時の現場計測とそのコンピュータ・シミュレーションから以下の結果を得た。

1. 新幹線列車の走行は高架軌道から沿線への振動の伝播の様相を距離減衰として、さらにその振動数成分において伝播と非伝播として評価できた。
2. 剛な支持層上の軟らかい表層地盤上の軌道では表層部の波動遮断振動数が明確に突き止められた。これは地盤情報に基づいて予測が可能である。
3. 列車の走行は輪重の繰り返し衝撃载荷状であることから、周期的载荷の状態である。これを車両の諸元と編成から特定の振動数の移動加振源として規定することができる。
4. FEM-BEM 手法に基づいて、高架軌道、その他の軌道タイプも含めて、列車走行による沿線の振動予測ができるコンピュータ解析システムを開発した。それを使用したパラメータ解析から現場計測から得られた知見の検証を行った。

参考文献

- 1) 竹宮, 合田: 移動分布加振源による成層地盤の3次元遷移応答特性, 土木学会論文集, No. 563/I-39, 137-148, 1997.
- 2) Takemiya, H. and Goda, K.: Prediction of ground vibration induced by high-speed train operation, Proc. 5th Int. Symp. Sound and Vibration, Adelaide, Australia, 1997.
- 3) 竹宮, 合田: 移動加振源による多層地盤上の盛土軌道およびその周辺地盤の振動応答, 土木学会論文集, 投稿中
- 4) 竹宮・羽矢他: 新幹線高架橋と沿線の振動計測 土木学会年次講演会, 1998, 発表予定
- 5) 川端, 合田, 竹宮, 神田: 列車走行による周辺地盤の振動評価法, 土木学会年次講演会, 1996
- 6) 小森, 合田, 竹宮, 神田: 新幹線走行による盛土軌道周辺の振動評価, 土木学会年次講演会, 1997
- 7) 竹宮, 合田: 衝撃/移動荷重による成層地盤の波動の伝播非伝播現象, 土木学会論文集, 投稿中

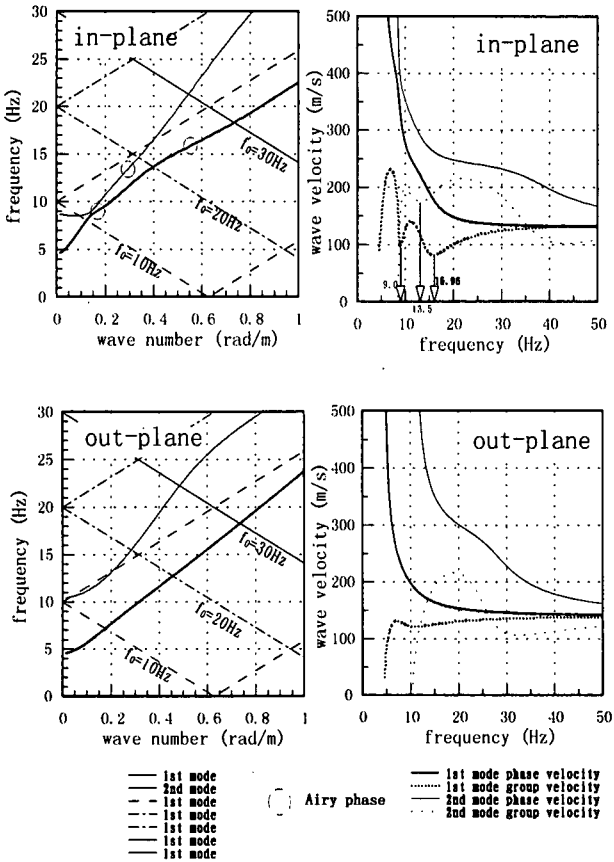


図9 対象地盤の分散特性, 移動速度 $c=100\text{ km/h}$

については、地盤の2次モードの影響も現れている。 z 方向については、構造物から地盤への伝播過程で、ほぼ一様に減衰している。また、どの加振振動数においても、加振振動数の前後10Hzの波が最も地盤に伝播していない様子が伺える。この振動数の波は、構造物の固有振動において、振幅の大きいものがほぼ10Hz以内なので、構造物の振動に現れるが、10Hz以上の波は構造物の振動に現れにくいいため、伝播されないと考えられる。フォーミングから周辺地盤(観測点3から4)の伝播においては、加振振動数10Hzの伝達関数では、分散などの影響により、 x 方向成分で増幅が見られたが、20Hz、30Hz加振では、限られた成分の波しか増幅していない。30Hz加振では、どの方向成分もフーリエ振幅の大きい、振動数域の成分が減衰している。

付録 移動する荷重列からの振動発生

実際の列車走行により生じる振動の主要な振動数成分は、特に車軸配置や車両の編成状況、車輪、車軸そのものの振動等に依存する。車両編成の列車荷重を定式化するにあたり、まず、図9のように一輛分の輪荷重を考える。時間・空間領域における荷重分布は加振振動数を p として

$$F(x, y, t) = \Psi(y) \{ \Phi(x - ct) + \Phi(x - ct - a) + \Phi(x - ct - a - b) + \Phi(x - ct - 2a - b) \} e^{ip t} T \quad (1)$$

ただし $\Phi(x)$ は1つの輪荷重に対する x 方向分布関数、 $\Psi(y)$ は y 方向分布関数、 p は加振振動数、 T は荷重強度を表す。式(1)を x, y 方向に関して、また時間に対してフーリエ変換を行うと

$$\begin{aligned} \tilde{F}(\xi_x, \xi_y, \omega) &= \frac{2\pi}{c} \tilde{\Phi}(\xi_x) \tilde{\Psi}(\xi_y) \\ &\left\{ 1 + e^{ia\xi_x} + e^{i(a+b)\xi_x} + e^{i(2a+b)\xi_x} \right\} \delta\left(\xi_x - \frac{\omega - p}{c}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

1 車輛長を L として列車編成の N 両の和をとると

$$F_i(x, y, t) = \sum_{n=0}^N F(x - nL, y, t) \quad (3)$$

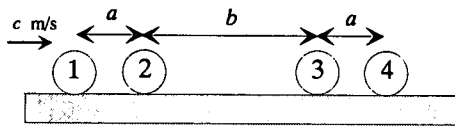


図10 一車輛分の輪荷重

したがって波数・振動数領域では

$$\begin{aligned} \tilde{F}_i(\xi_x, \xi_y, \omega) &= \frac{2\pi}{c} \chi(\xi_x) \tilde{\Psi}(\xi_y) \delta\left(\xi_x - \frac{\omega - p}{c}\right) \\ \chi(\xi_x) &= \tilde{\Phi}(\xi_x) \left\{ 1 + e^{ia\xi_x} + e^{i(a+b)\xi_x} + e^{i(2a+b)\xi_x} \right\} \frac{1 - e^{iNL\xi_x}}{1 - e^{iL\xi_x}} \end{aligned} \quad (6)$$

上記の荷重列による地盤の振動を層状地盤のグリーン関数を文献[3]に従って計算する。図10は新幹線を対象として、16両編成での移動荷重として与えたときの時刻歴応答のシミュレーションしたものである。こ

れは軌道路盤で計測される周期的なスパイク状の振動に酷似している[5,6]。振動数成分を調べるために、そのフーリエ変換をとったものを図11に描いた。これからは規則的な振動数間隔で卓越する振動が分かる。それらは式(6)から計算される振動数に対応している。

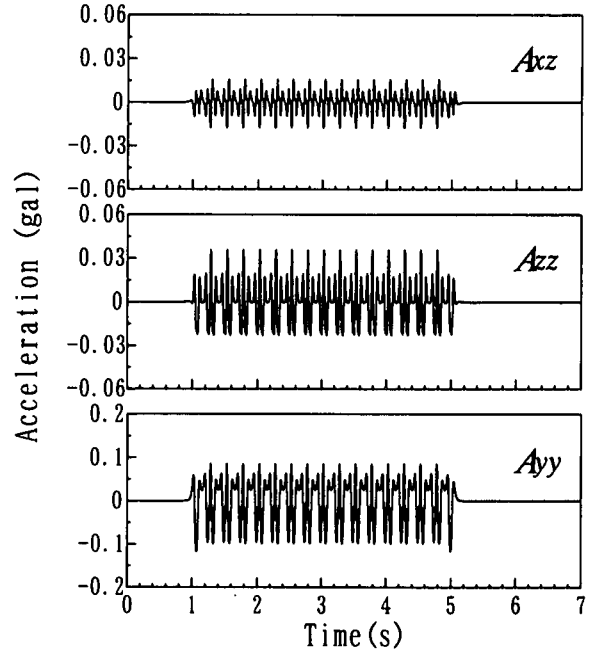


図10 移動荷重列による地盤振動

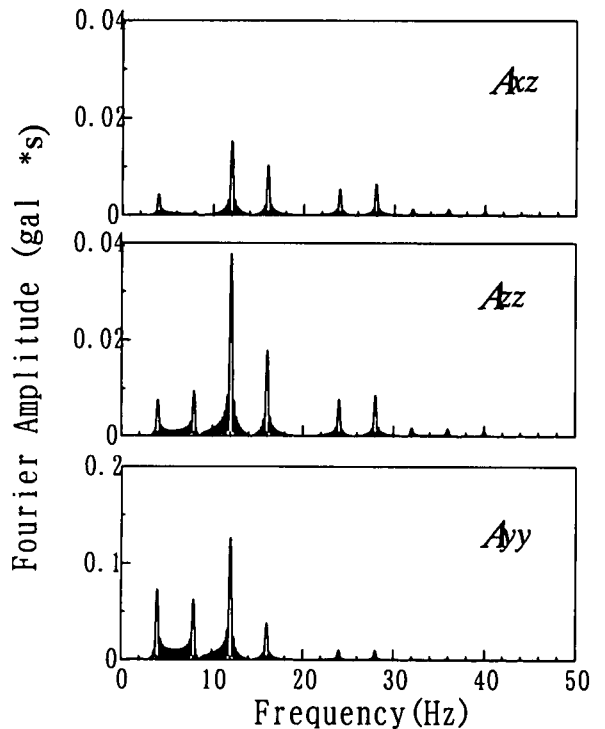


図11 フーリエ振幅