

立命館大学理工学部 正員 ○早川 清
同 上 正員 高山直隆

1. まえがき

列車の走行により誘起される振動は、市道地盤に伝達される経路において発生源では車両の種類、列車編成、列車速度、軌道構造などの影響因子により様々に異なり、伝搬経路では線路構造物や基礎構造の違いによっても多様な特性を示す。これらに加えて市道への振動の伝搬媒体である地盤の諸性質が複雑であるために、市線における地盤振動の正確な予測は極めて困難なものとなっている。しかし今日、わが国の国土保全における環境保全の必要性から環境アセスメント法案もまた法制化される機運にあり、鉄道建設にあっても新路線計画や在来線の増設計画段階における振動予測の問題は不可避の命題となってきた。本報告は鉄軌道による地盤振動の予測手法を確立するための段階的の一試案として、鉄軌道振動の発生機構をモデル化して取扱い、その振動波形のシミュレーション方法に関して検討した結果について述べたものである。

2. 測定方法

測定場所は京都一大阪間を運行するある私鉄市線の平面構造区間(〇地区、K地区とする)の2ヶ所を選択し、測定点側に最も近い線路からの適当な位置に動線輪型加速度計(固有振動数2Hz)7台を設置し、電磁オシログラフ(FR-102, 三栄計器製)、ガルバー(固有振動数15Hz)を使用して感光紙上に上下方向の変位波形について同時記録を行なった。加速度波形については圧電型加速度計、サーボ型加速度計を使用し、それぞれ専用の増幅器を通してデータ・レコーダ(R-260, TFA社製)に磁気録音を行なった。振動の測定と同時にある基準点を列車の先頭部と後頭部が通過するのに要する時間をストップウォッチで計測し、列車長から走行速度を算出した。

3. 測定結果および考察

3.1 変位波形, 加速度波形

Fig-1は変位波形記録の代表例を示したものである。変位波形の形状の特徴によって類別すると、レール近傍では制線に列車が近接する時に低次の周波数の大きい変位を生じており、これに車輪とレールの動的相互作用により発生すると思われる高次の周波数成分が重複している。しかしながら、線路より6.5m~10.5m程度離れると高次の周波数成分は急速に減衰し、レールの継目部を各車輛が通過する時の影響によると思われる周波数成分の振幅が極めて大きくなっている。さらに線路よりの距離が12.5m~14.5mになると高次の

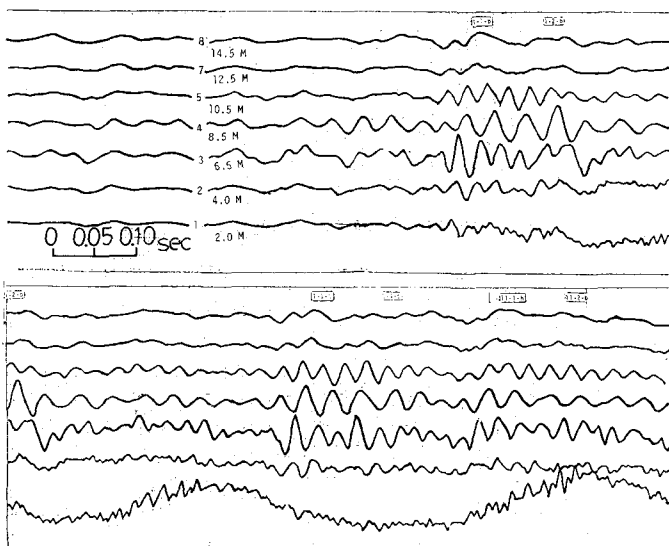


Fig-1 変位波形の更測結果

周波数成分はほとんど見られなくなり、継目部を通過する車輪の間に対応してむしろ大きな変位成分が現れかへくる傾向にある。したがって線路の近傍では移動する車輪衝撃の配置により誘起される振動成分が大きな変位を示し、線路よりの距離が大きくなるとレールの継目部による影響が支配的となり、この現象が列車の通過時間だ

けくり返されるものと考えられる。Fig-2は同一地区の加速度の波形記録を示したものである。加速度波形では線路よりの距離にそれ程関係なく継目部で発生すると思われる高次の周波数成分の影響が強調されるために、車輪が継目部を通過する時の振幅が極端に大きくなり、変位波形において見えたような近接部を列車が通過する時の大きな振幅を示す波形は分離して判別しにくい傾向となっている。

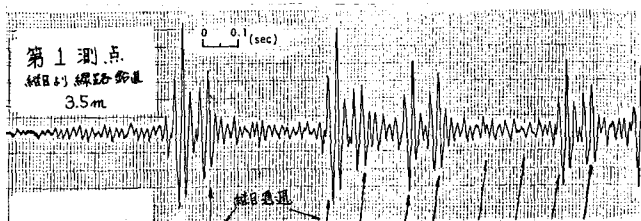


Fig-2 加速度波形の測定結果

3.2 周波数スペクトル

記録紙上の変位波形を1/200秒間隔でサンプリングしてA-D変換を行ない、これらの数値を用いて0地区の変位波形のパワースペクトルを求めたものがFig-3である。これより線路の近傍では車輪間隔による荷重配置と列車の走行速度との関係から発生すると考えられる2Hz付近の周波数成分のみが卓越するが、4m~6.5mではこの周波数成分に加えて10Hz付近、40Hz付近の周波数成分も卓越してくることが知られる。8.5m~10.5mの距離では40Hz、10Hz付近の周波数成分が卓越し、さらに線路よりの距離が大きくなると高次の周波数成分は減衰し、10Hz付近の周波数成分が大きく卓越するようになる。このように列車走行時に発生する地盤振動の周波数スペクトルは振動の伝達経路、地盤の硬軟や成層条件などの特性によって列車の走行位置からの各距離で複雑に変化する。これらの卓越周波数成分のうち10Hz付近のものは車体の曲げ固有振動数に近いが、走行する列車の近接する2つの車輪間隔による移動荷重が軌道の近傍でレールの継目部を通過する時に列車速度との関連性から誘起される割合の割合が大きいと考えられる。40Hz付近の周波数成分についてはバネ下質量、レールおよびまくら木が一体となって振動するようなモデルを設定して計算を行うと、この振動系の固有振動数に近接している。また50Hz付近の周波数成分はまくら木間隔と列車速度の関係から誘起されるものと思われる。一方、磁気録音した加速度記録についてパワースペクトルを求めたものの代表例をFig-4に示した。加速度記録の場合は上述したように変位記録に比較して高次の周波数成分が強調されて現れやすくなる。パワースペクトルの大小に多少の差はあるが、線路から10m~30mの位置における卓越周波数成分は30Hz、40Hzおよび50Hz付近にそれぞれ共通して見えている。

3.3 変位波形の距離減衰

Fig-5は変位の距離減衰を示したものであるが、各距離における波形の振幅は主として測線に各車輪が最も近接した時に対

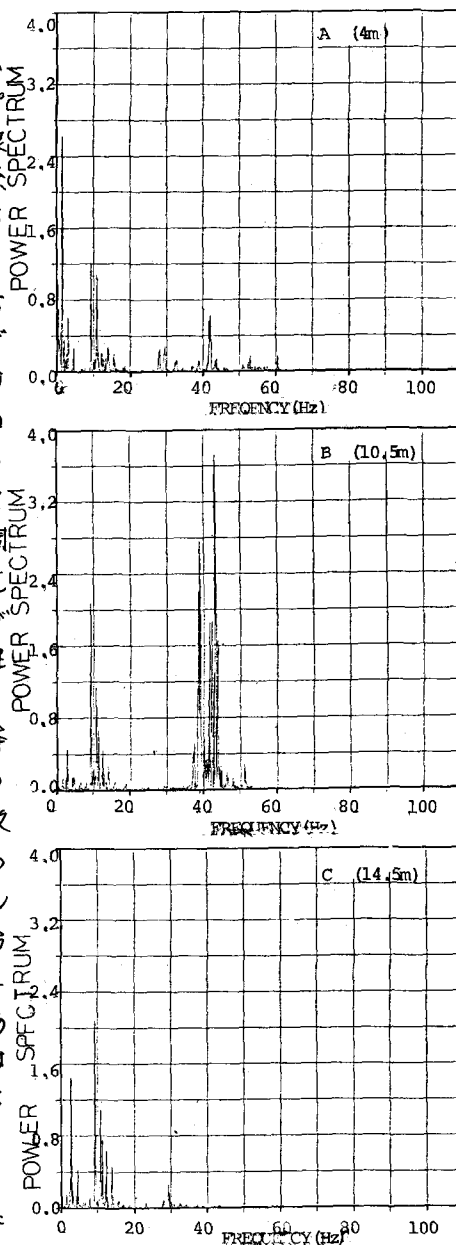


Fig-3 パワースペクトル(変位波形)

応する記録および各車両の中央部が通過した時に対応する記録に2.0mについて整理した。この図の関係より尖の経験式を適用して減衰定数を算定し、変位波形のシミュレーション計算に用いるものとした。これらにより求めた減衰定数は0.1~0.2程度であり、既往の地盤の減衰定数と比較すると大きくなっているが、これは主要には振動の測定範囲が線路から比較的近く、この影響にも起因していると思われる。

$$y_n = y_1 \sqrt{\frac{x_1}{x_n}} e^{-\beta(x_n - x_1)}$$

$$\therefore \beta = - \frac{\log(y_n/y_1) - \log(x_1/x_n)^{1/2}}{x_n - x_1} \quad (1)$$

ここに、 β :減衰定数 (m^{-1}), x_1 :振動源から基準点までの距離(m), x_n :振動源からある地点までの距離(m), y_n, y_1 : x_n, x_1 の位置における変位振幅(mm)

4. シミュレーション方法

列車走行時に地盤に発生する振動波形をシミュレーションする方法として、ここでは実測資料を参考にして変位波形、加速度波形を半理論的に再現化することを試みた。変位波形に関してはLambの半無限弾性体の表面に周期的加振力が働く場合の上下方向成分についての理論解を適用し、加速度波形については同様に衝撃力が作用する場合の近似解を適用して波形の演算を行なった。

4.1 変位波形

Lambによれば半無限弾性体の表面上の1点を原点として、そこに $Re^{i\omega t}$ なる鉛直方向の周期力が働く場合の振動を3次元的に求めた上下方向変位は次式で与えられる。

$$w_0 = \frac{KR}{2\mu} K \sqrt{\frac{2}{\pi Kr}} \cdot e^{i(\omega t - Kr - 1/4\pi)} \quad (2)$$

ここに、 $\omega/k = V_p$ (縦波速度), $\omega/k = V_s$ (横波速度), $\omega/k = V_R$ (Rayleigh波速度), r :距離, μ :ラーメの定数, ρ :単位体積質量, $d_1 = \sqrt{K^2 - k^2}$, $\beta_1 = \sqrt{K^2 - k^2}$,

$$f(K) = 8d_1\beta_1 K^2, F(K) = (2K^2 - k^2)^2 - 4k^2 d_1\beta_1, K = -2d_1 k^2 (2K^2 - k^2)^2 / F'(K) f(K)$$

いま地盤のポアソン比を1/3とすれば、 $V_p = 2V_s$, $V_R = 0.928V_s$ となる。 $1/\rho = 0.00613 m^4/kg \cdot sec^2$ として整理し、内部減衰項を加味して(2)式を変換すると(3)式が求められる。

$$w_0 = 340.2 R \cdot V_R^{-5/2} \omega^{1/2} r^{-1/2} e^{i(\omega t - \omega/k r - 1/4\pi)} \cdot e^{-\beta r} \quad (mm) \quad (3)$$

ここで対象とする列車の車輪配置をFig-6のようにモデル化し、各車輪に(3)式を適用して計算を行なうものとする。ある時刻 t における i 番目の車輪と観測点 O との距離は次式で示される。

$$D_i = \sqrt{H^2 + \{L + 2.1(i-1) - Vt\}^2} \quad (4)$$

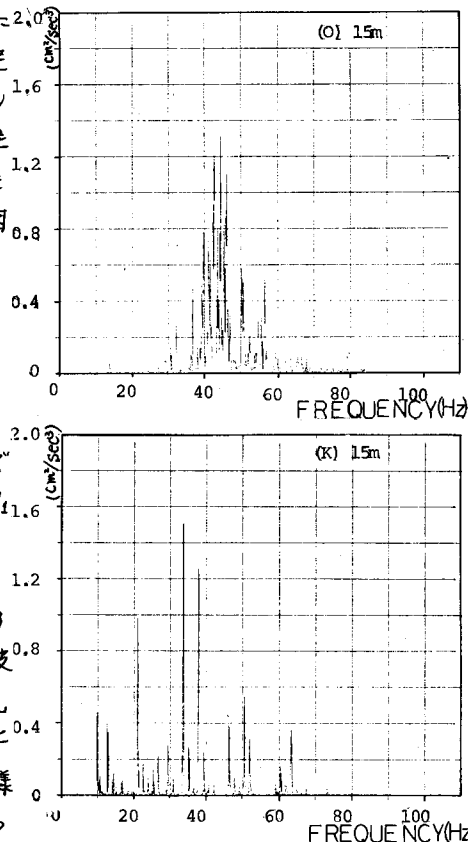


Fig-4 パワースペクトル (加速度波形)

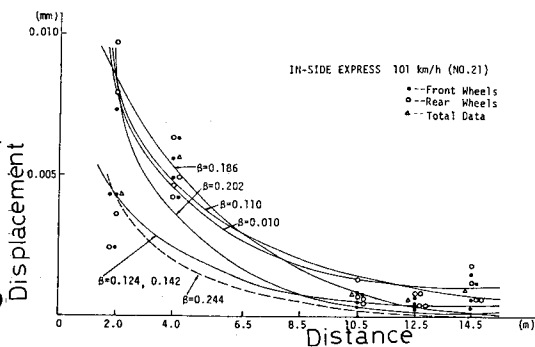


Fig-5 変位波形の距離減衰例

これよりN個の車輪によるある時刻における測点Oでの合成変位は各車輪による加振力の位相差を考慮せずに計算を進めることとした。減衰定数を上述の実験結果より 0.18 m^{-1} とし、変位波形の位相走時曲線を描いてこの地盤の表面波の伝播速度 $V_R = 286 \text{ m/sec}$ を求めた。列車速度を 30 m/sec (108 km/h)、 $\omega = 2\pi f$ ($f = 40 \text{ Hz}$) としレールより測線までの直角距離 $H = 2 \text{ m}$ についてシミュレーションを行なった結果が Fig. 7 である。計算時には図中の車輪番号3, 4, 5, 6, 9等の輪荷重は0としてある。

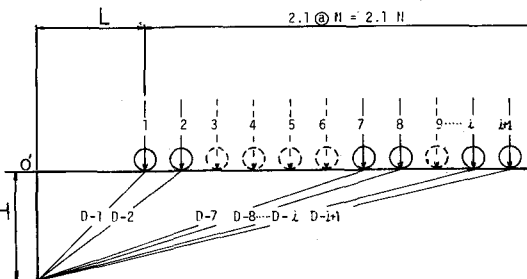


Fig-6 列車の車輪配置モデル

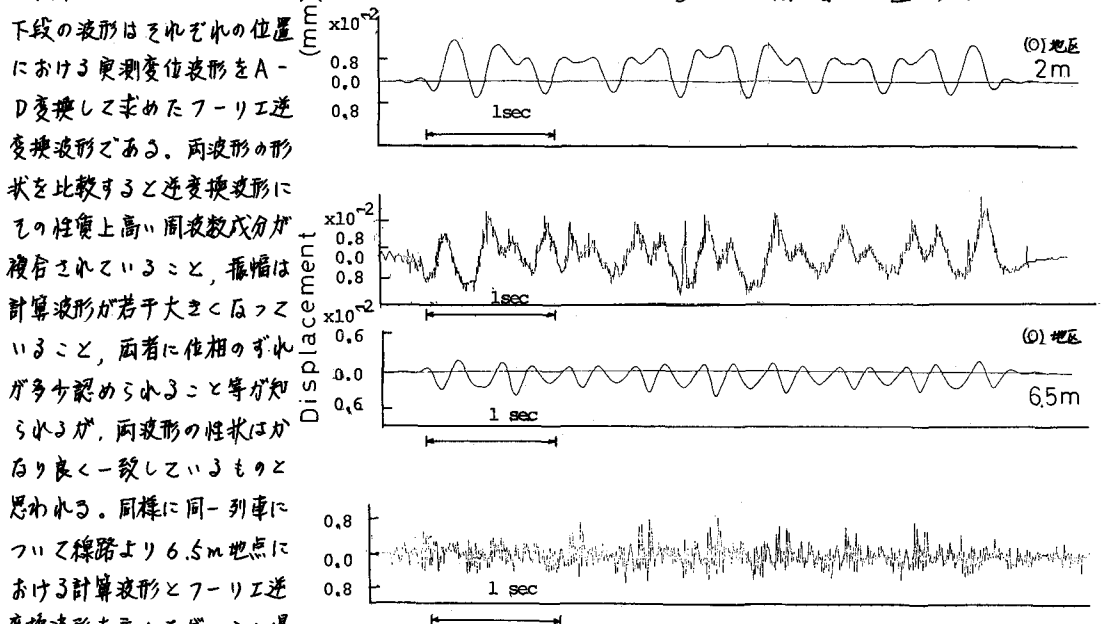


Fig-7 変位波形のシミュレーション結果

には波形の全体的な形状は近似し

ているが、上述したようにフーリエ逆変換波形で確かめられる継目部の影響が現われており、計算波形との適合性が著しく落ちてきているように思われる。

4.2 加速度波形

加速度波形では車輪が継目部を通過する時に 40 Hz 付近の周波数成分をもつ大きな加速度振幅が励起され、この影響が加速度波形に強調されていることが知られた。そこで加速度波形のシミュレーションは、特に継目部の効果を考慮し示す $Lamb$ による衝撃力が働らく場合の上下方向変位を求める理論式を適用した。継目部による効果を最も単純化して考え、移動する列車の車輪が継目部を通過する瞬時にのみ衝撃的に振動力が作用するものとした。

$$\omega_0 = \frac{KL}{2\mu(2rV_R)^{1/2}\omega^{3/2}} \cos V \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{3}{2}V\right) \quad (5)$$

ここに K は上述と同様であり、 $\cos V = P/(P^2 + t_*^2)$ 、 $t_* = t - r/V_R$ 、 P 、 L は任意の正実数である。

(5)式を加速度表示の式に変換し、各継目にこの式を適用して計算を行なうこととしたが、衝撃力による時間関数 $S(t)$ について $Lamb$ は $S(t) = PL/(P^2 + t_*^2)$ とし示しており、ここでは振源ごの変位が決定できないので振幅の定量的評価が不可能である。Lとして各車輪の荷重比を考え、加速度波形の全体的な形状変化につい

このシミュレーションを行なった。

$$\frac{d^2 w_0}{dt^2} = -0.0045235 L \cdot r^{-1/2} \cdot V_R \cdot \omega^{-7/2} \cdot \cos^{-5/2} \psi \cos(\pi/4 - 7/2 \psi) \quad (6)$$

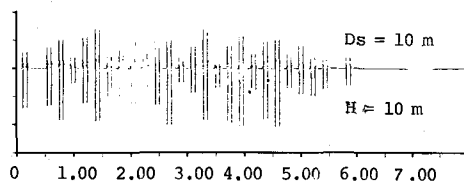
レール上で測点との直交点と継目との距離を D_s とし、 $D_s = 10 \text{ m}$, $H = 10 \text{ m}$, 列車速度 (8両編成) 30 m/sec , $V_R = 286 \text{ m/sec}$ なる条件で継目2つの場合の加速度波形の計算結果をO地区について示したものがFig-8である。図中の下段は磁気録音した加速度記録のフーリエ逆変換波形を示している。

同様にK地区について $D_s = 10 \text{ m}$, $H = 15 \text{ m}$ の条件で継目を6つ考慮して計算した結果を示したものがFig-9である。O地区における継目2つの場合において、継目部で誘起される極大振幅の波形については計算波形とフーリエ逆変換波形の一致が見られるが、極大振幅の前後での大振幅の波形との一致度は多少程良くないように思われる。継目を6つ考慮したK地区の場合では、当然、極大振幅の発生間隔が短縮されてくるので、前者の結果と比較してフーリエ逆変換波形とシミュレーション波形はより良く近似したものとなっている。

Fig-10は継目を4つとして D_s と H を変化した場合の計算波形を示したものであるが、図では示していないが加速度波形については線路よりの距離が変化しても振幅の大きさが変わるだけで極大振幅の発生状態は良く似たものとなっている。シミュレーション波形においても H の変化より D_s を変化させることで、波形全体の形状が相違してくることが確かめられる。

Fig-11はフーリエ逆変換波形と計算波形の時間軸を5倍に拡大して両波形の比較を見たものである。図中の波形(a)はフーリエ逆変換波形を(b)は継目6つ場合の計算波形を、さらに(c)は継目4つ場合の結果である。このような結果より加速度波形のシミュレーションについては継目部を6ヶ所程度まで考慮すれば、実測波形にほとんど近似した波形が求められると考えている。しかしながら、理論計算による加速度波形のこのようなシミュレーション方法では振幅の大きさを定量的に評価できないことや、密接継目部で誘起される極大振幅については充分近似しうるが、極大振幅の前後の小さな振幅変動が再現化できないこと等の問題がある。

5. まとめ

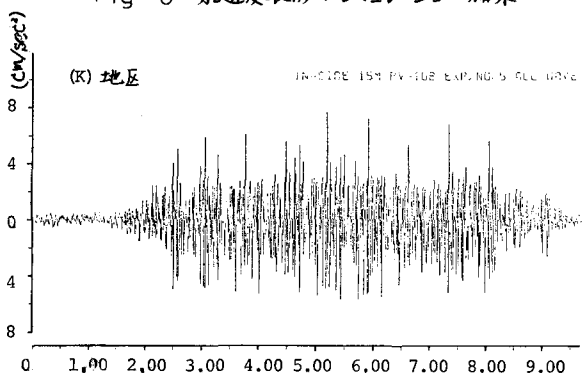


(O) 地区

IN-SIDE PV-35 10M NO.5 1.17 EXP

0 1.00 2.00 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 8.00 9.00

Fig-8 加速度波形のシミュレーション結果



(K) 地区

IN-SIDE 15M PV-32B EXP. NO.5 ALL WAVE

0 1.00 2.00 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 8.00 9.00

Fig-9 加速度波形のシミュレーション結果

鉄軌道による地盤振動の予測手法についての一試案として Lamb による理論式を適用し、実測した変位波形、加速度波形の半理論的な再現方法について検討を行なった。変位波形では線路近傍で、計算波形と実測波形にはほとんど近似する結果が得られたが、距離が大きくなると近似割合は少しく低下した。加速度波形については車輪が踏切継目部を通過する時の大きな加速度波形を主要に考えて、波形の再現化を試みた。この結果、再現波形では踏切継目部を6つ程度考えれば、継目部で発生する極大振幅の形状を求めることが知られたが、振幅の定量化については今後の課題である。また継目部の差異による衝撃力の増加量についても今回は検討しているが、ここで得られた結果が他の地区に適用しうるかどうかについても検討の余地があると思われる。

参考文献

1) Lamb, H. ; On the Propagation of Tremors over the Surface of an Elastic Solid. Phil. Trans. Roy. Soc. (London)

A. Vol. 203, p. 1-42, 1904

2) 松藤幸輔, 早川 清, 島山直隆; 効外電車による地盤振動の解析について, 昭和54年度土木学会関西支部支部年次学術講演会概要, Ⅲ-25-1, 2

