

環境振動における地盤内の波動伝播と振動対策

Wave Propagation in Soils and Reduction Measures in Environmental Disturbances

竹宮 宏 和 (たけみや ひろかず)

岡山大学教授 環境理工学部

1. ま え が き

振動あるいは衝撃を発する源には、大別して、自然現象である地震と、人為的現象である車や列車の交通振動、建設現場の建設機械の作動、工場の機械稼働等による環境振動とがある。地震による地盤、構造物の振動応答を求めるに際しては、一般に入射波を仮定している。一方、本総説でのテーマである人為的環境により生じる振動においては、振動／衝撃の源を含み、それから発生した波動の地盤内の伝播における定常／遷移応答性状が注目される。

これらの環境振動は日常生活の中で常時発生し、我々はそれを感知しているのであるが、振動が許容限度を越えると不快感を持つことになり、快適生活を妨げられることになる。また、先端技術の世の中で、製作過程で高精度を要求されるため外部振動を受けることを避けなければならない超精密機械が多く存在する。その意味で環境振動問題は重要性を増してきている。

環境振動は、振動源／衝撃源のそれ自体が持つ特性、それに地盤条件に大きく影響される。堅固な地盤上にあるとき、軟弱な地盤上にあるときでは感知する側の振動の強度が異なる。そのため振動源／衝撃源の動的特性の把握、衝撃の波動伝播媒体としてのタドミタイス効果を評価しなければならない。従来、環境振動は実測に基づいた回帰式によって予測されているが、地盤振動の評価に弾性波動論の知識を用いれば振動の伝播予測が精度よくでき、より効果的な防振、制振の対策をとることができる。つまり、環境振動の予測を高度化することができる。今回の総説のタイトルを「波動伝播と振動対策」としたゆえんである。

2. 加振／衝撃による振動伝播

弾性体を伝播する波の種類には、圧縮波（P波）とせん断波（S波）がある。S波はさらに水平成分のみを持つSH波と、鉛直と水平成分を持つSV波に分けられる。これらは併せて実体波と呼ばれる。さて、地表面（自由境界）の条件が与えられると、地表面付近に波のエネルギーが集中して伝わる表面波が生じる。それらには半無限体の下でのP波とSV波から成るレイリー波の場と、層状地盤の下でのSH波から成るラブ波の場がある。

加振／衝撃に対する地盤振動を評価する際には、加振源の特徴と共に地盤の諸条件に基づくモデル化に応じて波動場が限定されてしまうので、この過程で十分な注意

を払う必要がある。

一様な半無限体地盤を仮定して、Woods（ウッズ）は円盤表面基礎へ加振したときの地盤内の波動の伝播の様子を波頭に関して示した¹⁾。これによると、表面波であるレイリー波が円筒波として周辺へ伝わるが、その振幅は深さ方向に指数的に減衰し、深さが波長の1.5倍でほぼゼロに収束する。つまり、表面波のエネルギーは地表面の近傍に限られている。一方、実体波は半球面波として無限深部へ伝わっていく。よって地中内部では実体波が卓越している。地表面に着目すると、実体波は距離減衰が大きく（距離 r に関して r^{-2} に比例）、振源から遠ざかると表面波による貢献が支配的に残る。表面波の場合は $r^{-1/2}$ の距離減衰である。この波動伝播性状を衝撃的作用力に対する遷移応答として走時曲線で表せば図-1となる。P波、S波、レイリー波がそれぞれ V_P 、 V_S 、 V_R の位相速度となり、不変（非分散性）である。したがって距離と共に各波動が時間軸上で分離してくる。伝播波の波長は $\lambda = V$ （位相速度）/ f （振動数）で定義されるので、与えられた振動数の下では各波の波長は一定である。しかし、レイリー波長はポアソン比 ν に依存して $\lambda_R = \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \cdot \lambda_S$ で、通常地盤においては、 $\lambda_R = 0.9\lambda_S$ (λ_S は S 波の波長) である。

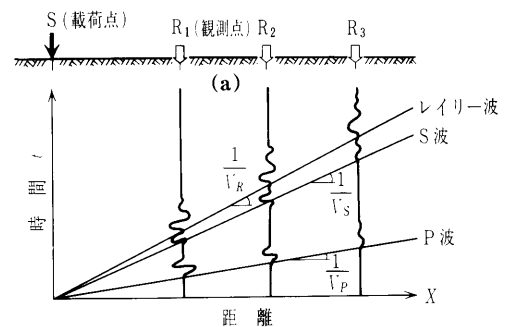
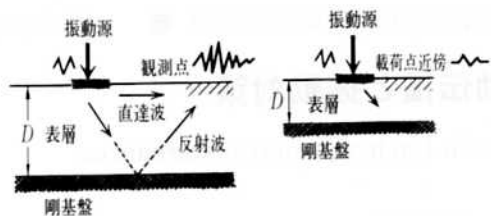


図-1 走時曲線

原位置ボーリング調査結果から分かるように、地盤物性の深さ方向の分布は、一般に層状を示す。特に剛な基盤面を有する層状地盤では、振動源から発した波が基盤面と地表面で反射、回折を繰り返し、軟弱な表層内部に閉じ込められた格好で、図-2(a)に見られるように側方向に伝播していく。実体波の表層内の伝播周期はS波に対して $2D/V_S$ 、P波に対して $2D/V_P$ である²⁾。そして、表層の共振周期は1/4波長則に従ってS波に対して $4D/V_S$ 、P波に対して $4D/V_P$ で与えられる。多層地盤に対しては、概略的にそれぞれ



(a) 水平方向に振動が伝わる (b) 水平方向に振動が伝わらない
 図-2 成層地盤内の波動の伝播/遮断現象

$$T_s \approx \sum \frac{4D_i}{V_{si}} \quad T_p \approx \sum \frac{4D_i}{V_{pi}} \quad (\text{添え字 } i \text{ は各層を指す})$$

で評価される。しかし、各層間での反射・屈折が加わって波動の伝播は複雑になる。実体波のほかに振動数に応じて伝播速度が変わる分散性のある表面波が水平方向に伝播するが、この場合のレイリー波は一般化レイリー波と呼ばれる。これは距離と共に波形のひずむ現象を生む。

ところで成層地盤の特徴として、層厚と振動数の関係で図-2 (b)のように振動源の直下では载荷に応じて地盤変形は生じるが、地盤内には波が伝わらなくなる状況が存在する。例えば、波長が層厚 D に比較して $D < \lambda$ の場合である。同図のような局所的な载荷下では $D = \alpha V/f_{cr}$ (α は係数で1/2程度) となる層状地盤の限界振動数 f_{cr} 、つまり遮断振動数が存在する。この現象は、後述する防振、振動軽減対策に利用される。

最近のコンピューター・シミュレーションによって地盤-構造物系の複雑な境界条件下の波動場の解析が可能となり、さらに、その結果のビジュアル化によって波動の伝播の様相が容易に理解できるようになってきている。

3. 定位置载荷による振動問題

建設作業や、工場の機械振動は、加振源あるいは载荷源が空間的に一定位置に固定されることが多い。波動場として、特定の振動数を持つ調和波動場と、衝撃による遷移波動場がある。

杭の打設過程での载荷/加振は地表面から始まり、杭の打込みの進行に従って深くなる。杭の貫入量が浅い段階では、表面波が支配的な波動であり、一方、深い段階では図-3 (a)に示すように、直接に伝播してくる実体波と表面波、さらに支持層にまで行き、そこで反射されて戻ってくる反射波が混在してくる。油圧ハンマーによる打撃の場合は、衝撃的な直達波 (図-3 (b)の最初の大きな振幅の2波、3波)の後に表層地盤の振動 (図-3 (b)の振幅の小さなしかし長く継続する波) が現れてくる³⁾。したがって、観測される振動の強さは、载荷源/振動源の特徴、地盤の物性、観測点までの距離に応じて変化してくる。パイロ・ハンマーによる定常調和的な加振源の場合は、表面波と反射実体波の干渉が位相速度の差から生じるため、2節で述べた実体波、表面波のそれぞれの距離減衰の傾向と異なって、振源からの特定の距離で大きな振動になったりする。

環境振動の評価には、地盤内の波動伝播のメカニズムを把握することの重要性が認識される。Lamb (ラム)⁴⁾

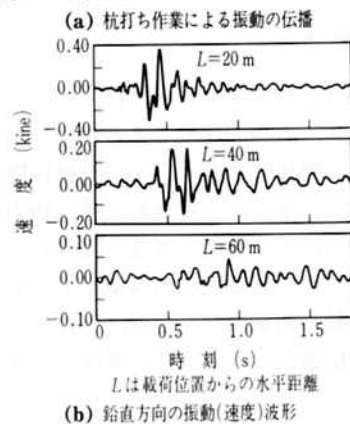
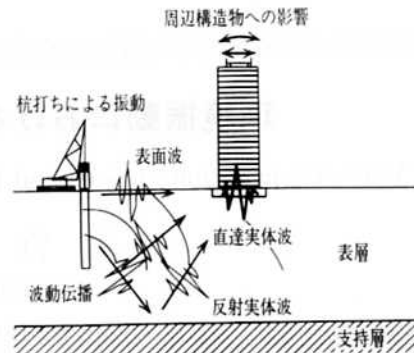


図-3 定位置载荷/加振と地盤振動

以来、多くの研究者が半無限地盤の载荷/加振問題の振動数領域、時間領域の解析に従事してきた。本小特集の内容に関係する波動論解の特に後者について幾つかを挙げると、Forrestal (フォレストル) ら⁵⁾は衝撃線载荷に対する半無限体の遷移応答性状を地表に限って計算した。二次元波動場では応答はポアソン比に依存するが、レイリー波の到達時に特異性 (無限大の応答値) を示す。Takemiya ら⁶⁾、竹宮・祐保²⁾は分布衝撃载荷に対して半無限地盤と成層地盤の応答性状を明確にし、隣接基礎への影響を調べている。三次元波動場では半無限体表面への点源载荷の遷移応答を地表面に限って Pekeris (ペケリス)⁷⁾は示している。Gakenheimer (ガッケンハイマー)⁸⁾は内部応答を評価し、地表と内部で卓越する波を特定している。

一様な半無限体の理想化された载荷状態の下での解が現実の複雑な地盤構成、载荷状態に対してどのように役立つのかを説明しておく。まず、地盤の構成は土柱図から明らかなように一般に層状である。したがって、これを一様半無限体に置き換えた場合に、どのような载荷状態でこの近似が成り立つのか? その近似度は? これに答えるには例えばレイリー波が伝播する波動場であれば、その波長との関係で、対象とする振動数帯域によって支配的な影響を与える地盤深さの範囲を限定することが可能である。これは一様な半無限地盤解の利用を促す方向にある。一方、堅い支持層が比較的浅いとき、同面で波の反射が起こり、軟弱な表層ではその固有振動が惹起されて現れる。したがって、このような場合には、成層地盤仮定は有用な地盤モデル化となる。多成層地盤としてのモデル化が必要な場合は、薄層要素法の適用が考えられる。

つぎに載荷状態であるが、複雑な現実の時間変動に対して、単純化された基本載荷状態の解がグリーン関数として使用され、そして載荷関数が分かれば、これとの合積分計算で応答の評価ができる。その際の基本載荷状態と応答成分の対応をつかんでいけば、一般には変位で誘導される理論解と、速度、加速度で計測される実測値との比較検討が容易にできる。

以上の波動理論の知識の適用によって、環境振動の評価・予測法が進歩することが期待される。

4. 移動載荷による振動問題

列車走行に伴って発生する振動には、二つの要因が複合されている。まず、車両が走行することによって、その自重が軌道を通して衝撃的に地盤に載荷されること。そして、それは車軸間隔、複数車両の列結によって決まる周期的載荷となることである。さらに、これに駆動モーターなどの調和振動が加わる。列車走行は周期変動を併せ持った移動載荷問題として特徴付けられる。それは、無限遠からやって来て観測点を通過して無限遠へ去っていく状態で、一般に初期条件を伴わない。図-4は新幹線沿線での計測結果⁹⁾を示したものである。

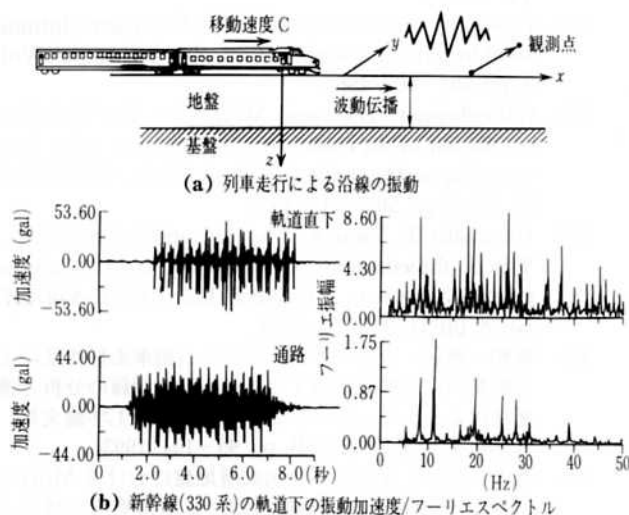


図-4 移動荷重と地盤振動

列車の安全で快適な走行上からは軌道上の応答が、そして環境振動からは軌道沿線の地盤振動の評価が重要となる。前節の杭打ち時の衝撃応答がそうであるが、鉛直方向の載荷下でも、振源からのある距離では水平方向の応答が鉛直方向のそれと同じ程度の大きさに出る。このことから、走行荷重に対する地盤振動応答計算には三次元解析が要求される。

移動荷重に対する研究は1950年代に始まり、理想化された条件の下で弾性波動理論解が導かれた。そこでは対象のモデル化、定式化の上で、二次元平面問題、三次元問題として扱われている。なかでも Eason (イーンソン)¹⁰⁾ は一定力が等速度で移動する状況(擬似静的載荷)を定式化した。そして移動速度が地盤のレイリー波速度に近づくと載荷線上の応答は急激に大きくなることを示した。Gakenheimer ら¹¹⁾ は急激載荷の初期条件下の遷移応答を定式化した。

移動載荷による地盤応答の特徴は、移動速度 C によってサブ・ソニック状態 ($C < V_s$: V_s は地盤の S 波速度)、トラン・ソニック状態 ($V_s < C < V_p$: V_p は地盤の P 波速度)、スーパー・ソニック状態 ($V_p < C$) に分けて記述される。現在の新幹線は最高速度で 300 km/h (83 m/s) で未だサブ・ソニック領域内にあるが、現在 JR で開発中のリニア・モーターカーは速度が 500 km/h (=139 m/s) にも達するので、軟弱地盤のレイリー波速度を越え、トラン・ソニックからスーパー・ソニックの領域に入ることもなる。

移動周期荷重による地盤内の応答は定常状態であり、したがって移動方向には、与えられた周期に対応した一つの特長波長の波が伝わる。そのため定常応答解析は、遷移応答解を求めるよりはるかに易しい。このことから Hanazato ら¹²⁾ は、有限要素法に伝達境界を組み込んで軌道地盤系を解析した。福和ら¹³⁾、源榮ら¹⁴⁾ は、フーリエ変換法を使って時刻歴を求め、移動載荷の下での弾性波の伝播におけるドップラー効果を確認した。竹宮・合田¹⁵⁾ は成層地盤上の移動加振問題の遷移応答解を求めて、表層地盤の固有振動が惹起されることを指摘した。

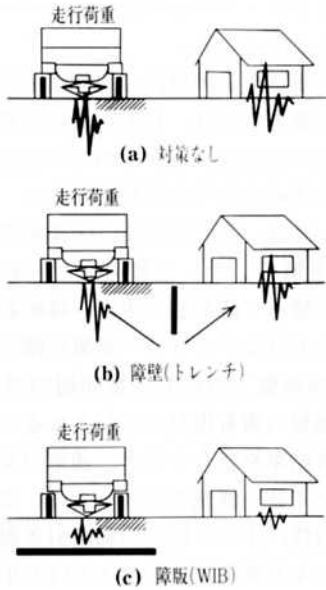
以上の解析結果を総合すると、通常交通機関の走行速度程度(レイリー波速度より小さい)では、交通荷重の持つ周期特性によって地盤振動は引き起こされる。静荷重の走行による効果は無視できるほど小さい。しかし、走行速度がレイリー波を越える超高速の下では、自重の移動による衝撃効果が地盤振動に支配的となる。

5. 振動対策

以上、機械振動や交通振動による地盤振動問題について述べたが、現実に環境振動において障害が既に多発しており、それへの対策が強く望まれている。このような振動障害を軽減・防止する方法論として、(i)振動源において出力を抑える工夫をする、(ii)振動の伝播をその経路上において遮断する、(iii)振動を受ける側において対策を講じる、の三つの考え方があろう。ここでは、地盤が最も関与する(ii)の波動遮断工法について述べる。

波動遮断工法の代表として、古くからトレンチ(溝)工法がある。トレンチは空溝とする場合と、保水したり中詰りする場合とがある。そして非常に剛性の高い障壁とすることもある。これらの工法では、伝播波の遮断効果はトレンチ深さと対象波の波長の関係に依存する。図-5に示すように、トレンチの施工後には地盤の振動の様相は変わってくる。振動源側のトレンチの前面では波の反射によって振動は逆に大きく、その反対側では波動源からの波はトレンチを回折して構造物側へ伝播していく。波長に比してトレンチが十分深いと回折波が少なくなり遮断効果が上がる。トレンチの深さは経験的に決められる場合が多いが、対象波の波長との関係で合理的に決定されなければ効果が無い¹⁶⁾。そのため数値解析手法でトレンチの波動遮断を調べた過去の研究は参考になる。例えば、レイリー波の伝播する場合を対象として、トレンチ深さ (L) がレイリー波の 1 波長半あれば、同

波のほとんどは遮断できる。しかし、その深さは、例えばS波速度を $V_s=100\text{ m/s}$ 、振動数を $f=10\text{ Hz}$ として波長は $\lambda_s=10\text{ m}$ で $L=15\text{ m}$ になり、空溝では大規模な掘削施工となる。したがって、地中壁とする方が安全であるが、連続した地中壁ではやはり大規模な構造体となる。そこで考えられるのが柱列式の施工であろう。柱の設置間隔によって透過する波も現れるが、対象波動場との関係でそれは合理的に決定されよう。



図一五 振動防止軽減のための対策法

一方、剛基盤上の成層地盤に対する波動遮断現象（図一2(b)）を利用して、振動源を含む構造体自体の制振効果と共に周辺への波動伝播の抑制効果を発揮させる合理的設計、工法が提案されている。それは剛な版あるいはそれに相当する剛性分布を人工的に構造物の下に設ける工法である。竹宮らはこの工法を波動遮断ブロック工法（Wave Impeding Block: WIB）と呼んでおり、それによる波動遮断のメカニズムを詳細に調べると共に^{17),18)}、実際への工法として、軟弱地盤への施工法の開発とフィールド実験を実施している¹⁹⁾。

6. む す び

本誌での1979年の小特集「地盤振動」²⁰⁾から10数年を経た。その間、環境振動問題の重要さは認識されつつも、その評価法、予測法において波動論が積極的に導入されて来たとは言いがたい。波動論の有用性は十二分に痛感されていたのであるが、理論自体の難解な面もあり、それが主な原因でなかろうかと思う。最近の離散化手法の応用が図られる中で、ステート・オブ・アートが高度化して、同時に波動論の考え方が活かされていくものと筆者は確信している。併せて、これに基づいて環境振動対策が実際工法として積極的に開発されることを強く望む。

参 考 文 献

1) Richart, E.E. Jr., Hall, J.R. and Woods, R.D.: Vibra-

tions of Soils and Foundation, 土と基礎の振動, 岩崎・島津訳, p. 95, 鹿児島出版会, 1975.

2) 竹宮・祐保: 帯状载荷に対する全弾性体の遷移グリーン関数評価と半無限/層状地盤の表面载荷による波動伝播性状, 土木学会論文集, No. 483/I-26, pp. 147~155, 1994.

3) 竹宮・合田・江種・村上・本荘: 鋼管杭ハンマー打設における地盤振動評価について, 第31回地盤工学研究会発表会発表講演集, 1996.

4) Lamb, H.: On the propagation of tremors over the surface of an elastic solids, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A., Vol. 203, pp. 1~42, 1904.

5) Achenbach, J.D.: Wave propagation in elastic solids, North-Holland, p. 309, 1984.

6) Takemiya, H., Guan, F. and Sukeyasu, Y.: 2-D transient soil-surface foundation interaction and wave Propagation by time domain BEM, Earthquake Engineering and structural Dynamics Vol. 23, pp. 931~945, 1994.

7) Pekeris, C.: Procs. National Academy of Sciences, Vol. 41, pp. 469~480, 1955.

8) Gakenheimer, D.C.: Numerical results for Lamb's point load problems, J. Appl. Mech., Trans. of ASME, Vol. 37, pp. 522~524, 1970.

9) 神田・竹宮・合田・長戸・宮本: 列車走行による周辺地盤の振動計測と評価, 土木学会年次学術講演会概要, VI, 1996.

10) Eason, G.: The stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force, Int. J. Eng. Sci., Vol. 2, pp. 581~609, 1965.

11) Gakenheimer, D.C. and Miklowitz, J.: Transient excitation of an elastic half space by a point load traveling on the surface, J. Appl. Mech., ASME, Vol. 36, No. 3 pp. 505~515, 1969.

12) Hanazato, T., Ugai, K., Mori, M. and Sakaguchi, R.: Three dimensional analysis of traffic-induced ground vibrations, J. Geotech. Eng., ASCE, Vol. 117, No. 8, pp. 1133~1155, 1991.

13) 福和・西阪・浅野・多賀・寺村: 自動車走行外乱による地盤の振動性状に関する研究一実測記録の分析と薄層法によるシミュレーション解析一構造工学論文集, 日本建築学会, Vol. 39B, pp. 95~104, 1993.

14) 源栄・菅原・永野: 3次元成層地盤における Moving Green Functionの基本的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第462号, pp. 51~60, 1994.

15) 竹宮・合田: 移動分布加振源による成層地盤の遷移応答特性, 土木学会論文集, 投稿中.

16) 木村・小出: 地盤振動の遮断工法, 土と基礎, Vol. 27, Vol. 8, pp. 9~16, 1979.

17) Takemiya, H. and Fujiwara, A.: Wave propagation/impediment in a stratum and wave impeding block (WIB) measured for SSI response reduction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 13, pp. 49~61, 1994.

18) 竹宮・合田・佐藤: 波動遮断ブロック (WIB) の受動的制振効果, 土木学会論文集, No. 537/I-37, 1996. (掲載予定)

19) 竹宮・西村・成瀬・細谷・橋本: 埋設波動遮断ブロック制振工法 (WIB工法) の開発, 基礎工, Vol. 23, No. 2, pp. 111~115, 1995.

20) 地盤振動小特集, 土と基礎, Vol. 27, No. 8, pp. 1~52, 1979.

(原稿受理 1996.4.17)