

自動車走行振動による地盤の良否の判定について

名大 島田 静雄

1 まえがき

筆者は、構造物の振動測定を、機会がある度に行なつて来ている。この目的は、構造物の安全性と直接的に知ろう、という意味である。というのも、現に存在している構造物を破壊実験などで直接に耐荷力を求めることが不可能であるからである。振動を測定するのは、医者が聴診器で音を聞いて判断を下すのと同様に、豊富な経験の蓄積との相対的な比較によって、正常、要状を判断するものである。この場合、少数の診断の経験よりは、多くのデータが保存されている方が判断を誤る率が少なくなる道理である。

振動測定の科会は、自分の専門の關係で、橋梁などの構造物に片寄ることが多いが、その場合にも、意識的に基礎構造、地盤振動のデータと記録・保存するように努力してきた。最近になつて、コンピュータの利用による大量のデータ処理が軌道に乗るようになったが、それと同時に、過去の測定データを見直すことができるようになった。

図-1は、振動の測定から、データの解析に至るまでのシステムの流れを模式的に示したものである。

このシステムを完成させるまでには、測定方法の標準化を始め、データ処理のソフトウェアの充実に時日を要したが、大量のデータ処理に威力を発揮し始めた。最大の利点は、データ処理に作業を加える余地が少なくなり、統計的な性質を良く表わすことである。特に地盤の振動においては、ある限られた長さの振動記録を、どのように精密に分析したところで、それが正しい地盤の性質であるか、否かは難かしい。

そこで、地盤の振動を、何でもよいから記録して、統計的な処理を経た上で相互に比較して調べる方法を考えることにした。地盤の加振方法として、常次微動だけでなく、枕打ち振動、および、最も手軽な加振として、重量車を走行させたりした。もちろん、通常の交通下でも測定は行なった。

これらの実測例の中から、幾つかの事例をこの報告の中に示し、合わせて、その応用としての地盤良否の判定方法について述べたいと思う。

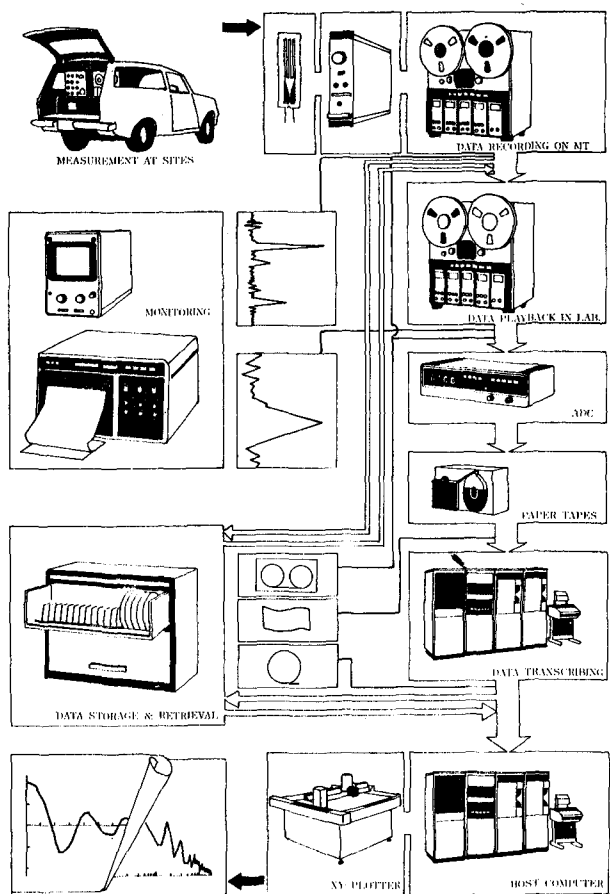
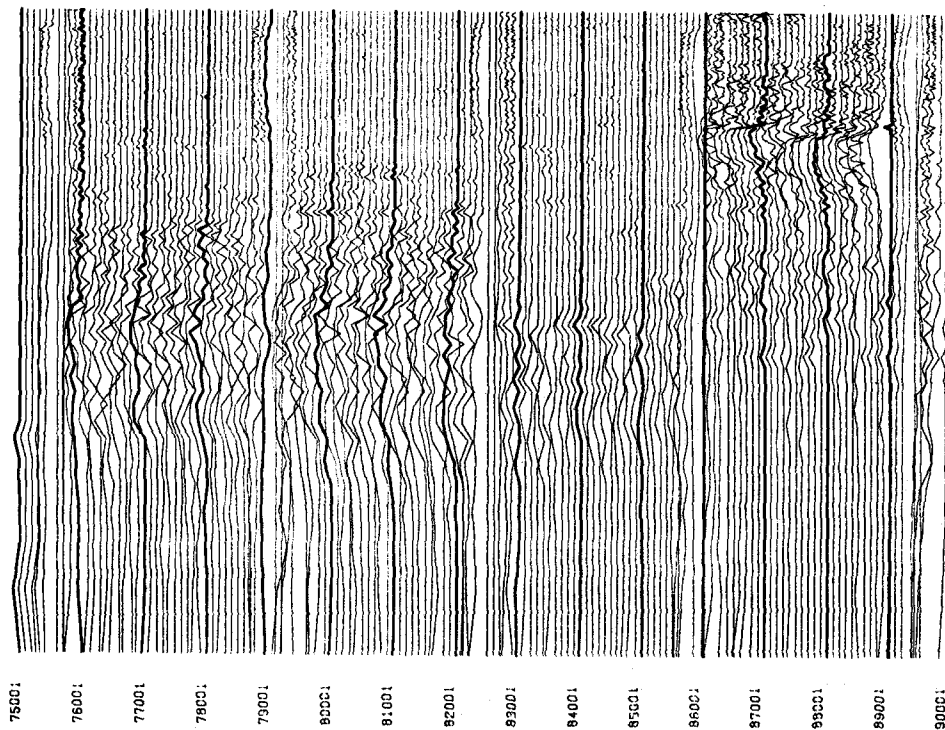


Fig. 4. Systems flow on Data processing of Vibration Data.

2 地盤振動の一般的性質

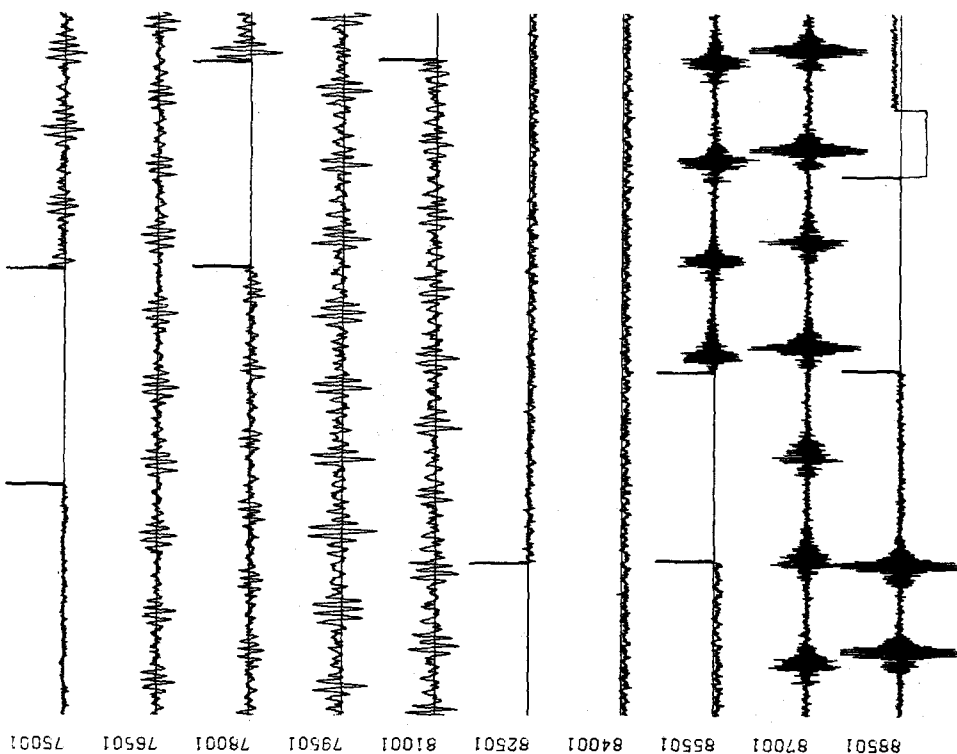
- (1) 地盤の振動は、一般に上下動、水平動は性質を要にする。水平動の成分においても、その場所の地下構造や、地形、構造物の存在などにより、方向成分について性質を要にすることが多い。したがって、振動の測定においては、並直、並びに水平二方向の三つ互いに直交する振動方向の記録を取ることが望ましい。アースダム、堤防、これに類した土盛りの道路などは、長手方向の水平動よりも、これと直交する水平動の強さが大きい。土留壁、アパート、ヨー壁などにおいては、動的な土圧による水平動が測定される。
- (2) 軟弱な地盤の場合に於ては、上下動の振動レベルは通常、三成分中最小になる。常次微動においては周期成分の高い雑音の性質を持つ。地山、岩盤などは、水平動も同様の性質を持つ。この場合の振動は、地盤中の縦波、つまり音を検出する。音は、相当離れた場所でも振源がある場合にも検知されるし、また、加速度記録が大きく出るので、良好な地盤と考えられる場所においても、振動の苦情を持ち込まれる例がある。この種の振動(縦波)は、振動伝播を防ぐ空堀、砂層、などのバンプゾーンや、基礎を深く、かつ独立させることで抑えることができる。
- (3) 振動公害の振源としては、重量車の進行による振動、杭打ちによる振動が最も影響が大きい。いずれも、物理的には、ある重量(マス)が落下することによる強制振動を誘発する。自動車進行による振動の場合、路面の凹凸は振動発生に支配的な影響を持つ。逆に、この性質を利用することで、測定には加振源を人為的に製造することができる。つまり、適当な重量車を使い、道路面に厚さ3cm程度の路板を取置き、これに乗越えするときの衝撃によって振動データを記録することができる。このような方法が不可能であっても、一般道路においては重量車の通過によって測定することが可能である。
- (4) 地盤の性質を知るには、杭打ち工事の行なわれたいる時に振動測定をする機会が与えられることが最も望ましい。この場合には柱状図も得られることが多く、総合的な地盤判定を行なうことが可能である。
- (5) 衝撃的な加振力は、スペクトル構造で云へば、あらゆる周期成分を持った波である。しかし、これが地盤中を伝わっていくと、一部は減衰し、一部は増幅され、観測場所に到達した場合には、ある固有のスペクトル分布に変化する性質が見られる。現在までの測定例においては、下のような値が得られている。(北九州田川市における例)
- (I) 杭打ち箇所から10m程度、50Hz程度の高い周波数の成分の波形。主として上下動に認められる。
- (II) " " 40m程度、上述の周波数帯が20Hz~50Hz、もしくは10~20Hzのように全体として低い周波数の方に移動する。加振源に対して直交する水平成分、および長手方向の水平成分によって性質が異なる。
- (III) " " 60m程度、全体として5~20Hzの幅のスペクトル分布に移る。また、加振源に向って直交する水平成分の成分が強く観察される。
- (IV) " " 100m " " その地盤の持つ卓越周期に相当する波の成分が観察される。
- (6) 地盤には、その土地固有の卓越周期が存在する。これは常次微動の解析でも得られるが、その周期は、ずっと大きなスケールで考え、その場所の地質学的な構造と関連するものと考えられる。広い沖積平野においては、約3秒の長周期成分が測定されている。名古屋市郊外、瀬戸市周辺では同化した第三紀層が主であるが、この場合6Hzの卓越周期が測定された。通常の常微動的な値は3~5Hz程度である。この卓越周期は、建物の存在する極地的な基礎地盤の最も振動しやすい周期とは必ずしも一致しない。通常の公害振動は、したがって現地での局地的な地盤構造が重要な要素になる。

PT751015 TAOHNA EARTH-VIBRATION



FREQUENCY (HZ)

SAMPLING TIME: 50 SEC SAMPLE LENGTH: 1.0 SEC



N.U.C.E. VIBRIOGRAM DATA. MADE IN 76-10-23. TIME CODE 101541

3 振動の伝播の性質

- (1) 種々の原因を持つ加振源から、地盤振動は伝播して来る。地表での観測において、これを大別して、縦波と横波とにわけざるを得ない。杭打ち工事においては、空中で伝わる音と同時に記録するとは有意義である。いずれの波も速度がそれぞれ異なるので、観測地点での波の到達時間を測定することにより、地盤の性質とある程度推定することが可能である。
- (2) コンクリートダムにおいて測定された例(青連寺ダム)において、ダム頂における振動は、ダム首とダム頂部との間を伝播する縦波(音)が、コンクリート中で約 3000 m/sec で伝わることが測定された。共鳴による振動周期は、昭和45年5月の測定において $10.1 \sim 10.2 \text{ Hz}$ 、同年11月の測定において $11.2 \sim 11.4 \text{ Hz}$ と得られた。これは、1秒間にコンクリートのヤング率が10%上昇したことを直接的に確認することになった。
- (3) 通常の地盤においては、上記(2)のような縦波は減衰が早く、ダイヤモンドの爆発のような強い衝撃力の加振以外には問題にならない。ただし、岩盤地帯、たとえば、トンネル中を自動車が行き来する場合、音の観測値が得られることがある。名古屋市の地下鉄が覚王山付近でトンネルで抜けているが、その直上において測定された例があるが、公害振動としては殆んど問題にならない。
- (4) 公害振動として問題になるのは、主として表面波(Love波)と、横波である。前者は、加振源に向う方向の水平動成分と、上下動とを伴う。後者は、加振源に向って直前方向の水平動である。伝播の速度は地盤の軟弱さの程度によるが、約 $200 \sim 400 \text{ m/sec}$ である。速度の値もそれほど軟弱な地盤であると云へる。
- (5) 振動の伝播は、その場所の地盤の構造と密接な関係がある。最も普通のモデルは、表層と基層の二層構造である。表層が軟かく、基層は構造物の基礎として耐え得る地耐力を持つものである。杭打ち工事において、杭が表層上を貫入通過する時期に振動が最も速くまで影響を及ぼす。また重車輦が表層上を通行する場合も影響が大きい。
- (6) 振動の伝播は、上記の軟弱な表層の厚さ(深さ)と密接な関係がある。多くの観測例による経験的な法則は、加振源から厚さの5倍までの半径の範囲が影響範囲である。厚さの10倍離れた地点からは、実用上振動の許容範囲に入る。減衰は、5倍の距離について $1/10$ (20db) 程度である。ただし、加振源方向に対して直前方向の水平振動(せん断波)の減衰は相対的に小さく、速くまで伝わる性質がある。
- (7) 地盤の構成が、サンドイッチ状に硬い層と軟い層とが積み重なっている場合は、公害振動の被害の程度が比較的多い。これについては、二つの例を示す。

例A1 三幸里、四日市・桑名周辺の木曾川下流域。この付近は、木曾川を合流する三河川の河口堆積物で構成された地域である。1回の低い軟弱層が $20 \sim 30 \text{ m}$ あり、その下には約 10 m 程度の硬い層があり、その下には再び軟弱層が 10 m 程度あり、再び硬い、実用上の地耐力を持つ層で構成されている。地表は軽圧された $3 \sim 5 \text{ m}$ の層があり、典型的なサンドイッチ構造を示す。杭打ちによる振動は、これらの各層で杭の先端が貫通するに従って、複雑な振相を示す。

まず、地表付近を貫入する際、杭の中心から半径 50 m の範囲は、表面波の影響によって大きな振動を感じる。杭が地表の硬い層を通過し、最初の軟弱層を通過する際は振動レベルが低下する。つまり、最初の硬い層に達すると再び振動が大きくなるが、この場合には半径 200 m 程度の遠方まで影響が出る。この層を通過すると再び振動レベルは低下する。杭の打ち止まりの段階では、周波数の高いピリツキ振動が支配的となる。この地帯の地盤振動は、地下約 20 m 付近に層状に浮いた硬い地層で、丁度、タイコのように打つことが、振動を遠方にまで伝える作用をすることも考えられた。

例の2 名古屋市郊外名四国道周辺。道路の構成は名四国道に限らず、全国どこでも考えられる典型的な例であると考えられる。まず、この道路は、地盤の安定低湿地に、国道のバイパスとして作られた。軟弱な土地に土盛りによって路床が構成され、埋立によって道路の周辺が造成された。したがって、表層は一応堅固な土層で構成するが、下に軟弱層がある。したがって、地表は軟弱層を覆及して固くなったように思われるが、自動車の走行は常にこの及の部分に振動する。道路の周辺において、造成された地面が存在するときは、周設敷成分の高い振動が早く減衰するが、周辺を南寄が通むにつれて振動の伝播が速くは達するようになる。振動の影響する範囲は、前述のように軟弱層の厚さ(深さ)に依存する。

例の3 宅建地における不平等下の原因。名古屋市郊外にある、ある宅地造成地において、ある局所的な場面で不平等下が認められ、住宅の一部に被害が生じた。この付近は、風化した第三紀層の表土が主体であって地盤の性質は良好な場所である。しかし、不平等下の生じた場所は、宅建時には用水池であって、これを捨て土によって埋め立てられた。用水池の堤防の影響もあり、排水が不備であって、地表から数m下に滞水層が形成され、あたかも軟弱な層をサンドイッチ状に含むような地層と局所的に構成していた。調査の際、小型のダンパーでこの付近を走り振動を測定したところ、地表下には軟弱な部分が存在している場所の振動が大きく、同時に調査された土質調査の結果と良好一致を示した。振動の伝播の性質も比較的局所的であった。住宅地であるため、大型車の通行は殆どないため、いわゆる公害振動の対象にはならなかった。

4 斜面の安定と地盤振動

地盤の振動の伝播は、土の粒子が連続的に接して、応力がある面から他の面へと伝えられる状態になっていることが必要條件になる。したがって、土中もしくは、主応力の進む方向で自由表面、もしくは応力の伝達を断絶させる層が存在すると、振動の伝播は著しく小になる。乾いた砂や排水の良好な土地は、この条件と良く満たす。しかし、地下水位の高い場所、傾斜面では振動と良く伝わる性質がある。この性質は、以下の例に示すような観察・測定例によって説明することができる。

- (1) 土留雁壁は、一般に裏側の土が土圧として作用する。橋梁においては、アバットメントがこの種の土圧の影響を受ける。雁壁の背面の排水が良好に施工してあるものは、土盛り部分と重畳車が通行しても振動の影響が小さい。しかし、一般的傾向として、アバットメントでは、取付道路と直行中にアバットメントを橋側に押し出すような振動を示す。
- (2) 群馬県高崎市郊外にある小さな橋のアバットメントは特異な振動の性質を示した。この地点は丁度地中に地帯の先端に位置していて、道路に対してほぼ直角に地中の向きが当たっている。アバットメントの振動は、道路の直行車輛の振動によって、アバットメントに対して横方向、橋軸に直角、地中の向きに平行な成分の水平動と顕著に記録した。なお興味あることは、ダンパーが、アバットメントよりも100m離れた地点で直行している時点でも振動が観察された。これは、地盤が、いわばフレストレス状態にあるため、振動の伝播が容易にしているものと考えられる。
- (3) 東名高速道路、御殿場から約10kmの付近において、支間約30mのデッキラング橋の振動測定を行なった。この橋は山腹の傾斜地の小さな谷を越える場所である。アバットメントは、基礎工事に非常に不利な地形となっていた。このアバットメントは橋軸に直角方向の振動成分を、かなり大きく記録した。驚いたことに、この地点で測定中、斜面のほぼ下と御殿場線が通っているが、列車の通行時に振動と検出した。

- (4) 橋梁の橋脚、アバットメントは一般に強固な基礎の上に作られていると思われ勝であるが、実際には地盤上、コンクリート上の積木のように、ある程度の変形能を持っている。高架橋の下においては、道路方向の振動が(水平動)大きく、これと直角方向の水平動は相対的に小さい。しかし、一本足の丁字形とした高架橋の橋脚においては、基礎の面積が小さく、道路に直角な方向の振動と地盤に伝わり易く、これが道路から離れた場所に伝播する。定量的な測定記録を持っているが、定性的に観測した経験がある。
- (5) これは筆者の予測であるが、タイロッド、PC鋼棒などによる土留め壁は、土に常次プレストレスを作用させた状態であるので、振動に対して敏感であり、耐震構造として好ましくないと考えられる。例は新潟地震における新潟港の岩壁に見られる。廠壁の安全性を確かめるために試験する一つの方法として、振動の測定も何かの役に立つものと予想される。

5 地盤調査における振動測定の応用

- (1) 通常の土質調査と平行して、地盤の振動測定を行うことは、対象としている場所の地盤についてマクロ的な判断を下す上で有益である。つまり、ボーリング等は点の調査であるが、振動はその場所の地盤としての性質をとらえることになる。
- (2) 加振方法として、常微動の測定、通常走行車両の通行による加振、重車両による衝撃、杭打ち工事の際の測定、などがあり、それぞれに意義がある。
- (3) 振動測定の結果は、定量的な値として得られるのではなく、種々の測定を相対的な比較によって統計的な性質として得られる。したがって、あらゆる場合に、種々の地盤における測定記録を蓄積しておくことが重要である。
- (4) 振動測定の統計的な処理には、電子計算機の利用による大量データ処理を行うことが望ましい。この処理を行うには、測定から解析に至るまでの一貫して、標準化されたシステムを計画することが最善である。
- (5) 振動測定の結果を、いかに素人わかりの形で表現することは困難な課題である。この目的のためには自動化を応用し、犯罪調査に使用され始めた声紋のようなグラフィカルな図示法を研究中である。
- (6) 地盤の性質から総合的に判断して、対象とする場所について適正な構造物の規模を提案することは、計画の段階において有益であると考えられる。

参考文献

1. 島田 静雄, 相同解析手法による構造物の振動解析, 土木学会論文報告集 174号 昭和45-2
2. 島田 静雄, 測定の話題-1 自動化, 土木学会誌 昭51-5
3. S. Shimada Aseismic Surveys of Existing Tall Concrete Chimneys, Memoir of the Faculty of Engineering, Nagoya University Vol 28-1 May 1976.