

(資料)

金属工場周辺の地盤と家屋の振動について

On the Vibration of Ground and Building Induced by a Metal-Working Factory

松岡達郎 小林良夫

要 旨

ある大規模な金属工場周辺の広い地域で、地盤上では全く無感でありながら、家屋内では明確に有感となる振動公害が発生した。調査により、振動源は工場のコンプレッサ、鍛造プレス、エアハンマに特定されたが、被害家屋はこれら振動源から300 m以上離れた地点にまで及ぶことが確認された。また、家屋はいずれの振動源によっても4.5 Hz前後の単一周期振動状態となり、地盤に対する家屋の振動倍率は8倍前後に達していることも判明した。通常の振動公害には見られないこのような挙動について、原因を究明するための調査を行った結果、

(1)振動源で発生した波のうち4.5 Hz前後の成分のみが、沖積地盤を非減衰状態で伝わっていること。

(2)家屋が鋭い共振系(固有振動数4.5 Hz, 減衰比0.053)を示し、共振時の増幅度が8.8になること。

が明らかになり、両者の競合が振動公害の広域化をもたらしたものと推定された。

1. はじめに

振動公害の大半は、ふつう、振動源付近数10 m以内で発生する。したがって、苦情の対象となる現象には、振動源の特性が強く反映され、媒質である地盤や受振点としての家屋の特性が明確に現われることは少ない。一方、振動源から遠く離れた場所にまで障害を及ぼす振動公害では、地盤や家屋の特性に依存する現象が見られる場合がある。

筆者らは、ある大規模な金属工場周辺で発生した広域振動公害について調査する機会を得たが、そこで、家屋振動が有感でありながら、対応する地盤振動はどこでも暗振動に埋もれるほど微弱であるという、まれな現象を経験した。これは、地盤や家屋の特性が強く現われた、極端な事例であるといえよう。

本稿は、実施された調査の中から、振動源特定の経緯、家屋の振動応答や地盤の伝搬特性に関する測定等についてとりまとめ、障害が広域化した原因を推定したものである。

2. 家屋と振動源の調査

2・1 家屋振動の実態

被害家屋のうちの一軒を選び、家屋振動の実態を調査した。計器による測定に先立ち、居室内の振動現象を観察したところ、

A. 体感は認められないが、建具やタンスの取手の振動によって感知する状態。

B. 船酔いに似た不快な長周期の振動をはっきり体感する状態。

が、不時、現われることが確認された。これらは、水平加振によって惹起されやすい現象であるため、振動レベル計で確認したところ、加速度レベルで上下方向45dB, 水平方向60dBであった。このため、サーボ加速度計(VIC 106)、データレコーダ(TEAC 210B)、スペクトラムアナライザ(NICOLET 446A)からなるシステムで、水平動を中心とした家屋まわりの精査を実施した。

図1は、Aの状態における居室水平動の加速度スペクトルである。図から、家屋が4.35 Hz, 0.75 gal (rms アベレージ値)の単一周期振動状態にあることがわかる。図2(上)は、このときの加速度波形であり、同図(下)に示すように、およそ40秒ほどの周期的な変動を繰り返すが、これは後述する理由によるうなりであった。

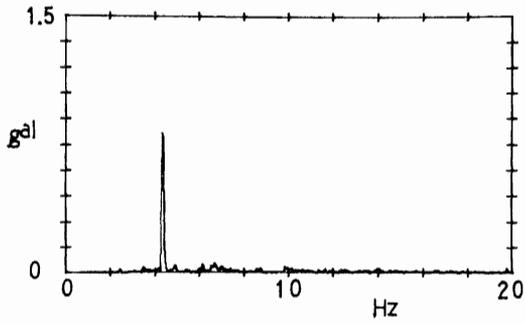


図1 家屋の水平動加速度スペクトル (Aの状態)

Meister の振動感覚曲線によれば、Aの場合の振幅0.75 galは無感、Bの場合の1.2 galは有感となり、測定値はともに現象に適う値といえよう。

2・2 振動源の特定

家屋振動の状態のうち、Aのほうは、スペクトルの形状および加速度波形から、振動源が回転系機器であることは明らかである。そこで、工場内の施設の中から家屋振動に対応する回転数のものを探したところ、3台の単気筒横型コンプレッサ(250 rpm, 75 kW)が該当した。これらのコンプレッサは、振動調査を実施した家屋からおよそ150 mほど離れた場所に設置されていた(図5)。各

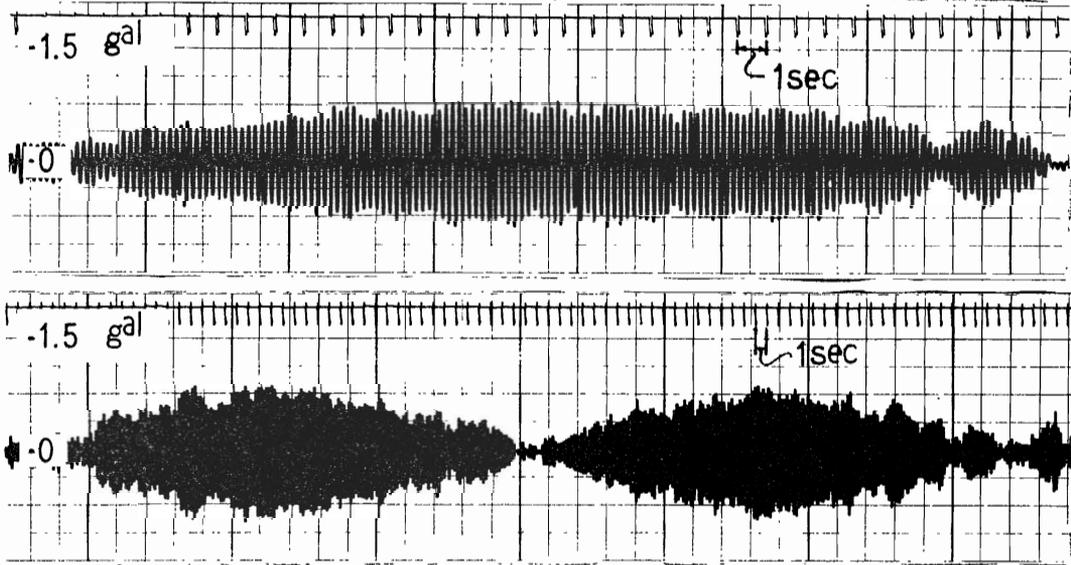


図2 家屋振動の加速度波形 (Aの状態)

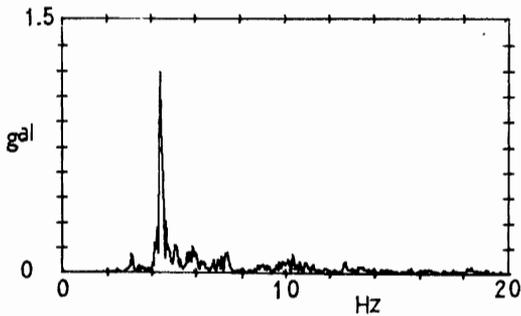


図3 家屋の水平動加速度スペクトル (Bの状態)

図3は、Bの状態の加速度スペクトルである。Aと同様に単一の周期振動であり、卓越振動数も4.40 Hzと極めて近接した値となるが、振幅は1.2 gal (rms アベレージ値) とかなり大きい。加速度波形を図4に示したが、Aとは異なり変動に周期性がないように見える。

コンプレッサの基礎上で振動数を実測したところ、2台が4.35 Hz、1台が4.40 Hzであった。また、付近の地盤上では図6のような加速度波形が得られたが、家屋振動のAの状態に等しい40秒周期の変動を示していた。これは、4.35 Hzと4.40 Hzのコンプレッサによって発生し得るうなりの周期(2/4.40-4.35)に等しい。

この結果、家屋振動の原因のひとつは、これらコンプレッサによるうなりであることが明らかになった。

家屋内で有感となるBの状態は変動が一見不規則であるが、スペクトルからも明らかのように、基本成分は強い周期性を持っている。そこで、再度、回転系機器類について調べなおしたが、相応するものはなく、卓越周波数から振動源を特定することが不可能となった。

図7は、家屋に対する地盤の加振状態を精査する目的で、両者の水平振動の同時記録に5Hzのローパスフィルタ(-36 dB/oct.)をかけて再生された波形である。地盤

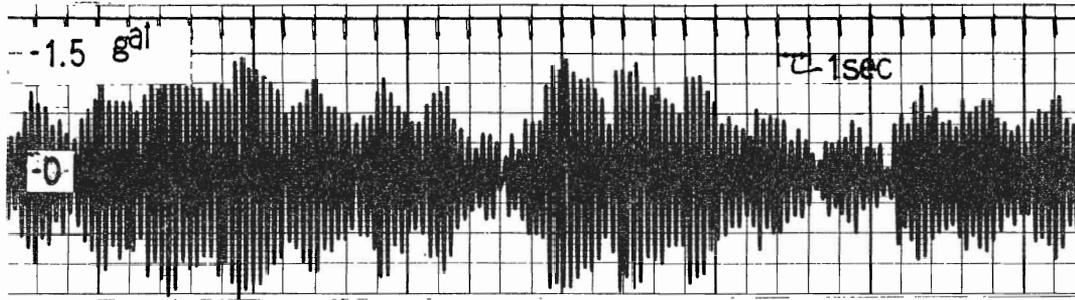


図4 家屋振動の加速度波形（Bの状態）

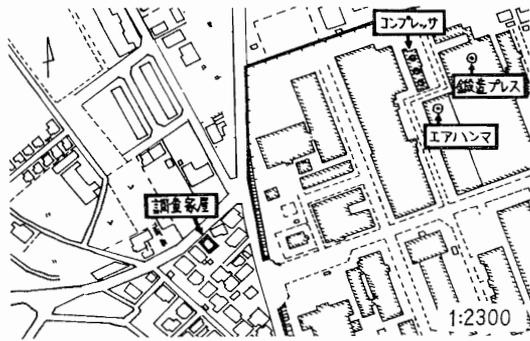


図5 工場周辺図

一方、エアハンマ稼動時においても、図8に示すように、家屋への入射波の間隔が異なるだけで、周波数および振幅とも鍛造プレスの場合とほとんど変わらない振動状態を起していることが判明した。したがって、エアハンマの稼動によっても家屋内で有感となることは明らかで、前述した家屋振動調査時には、エアハンマが停止していたものと推定された。なお、図7、図8において、地盤振動に現われるパルス状の波の間隔は、鍛造プレスおよびエアハンマの直近で計数されたストロークインタバル（各々2.3 sec, 0.7 sec）に一致した。

以上より、振動源をコンプレッサ、鍛造プレス、エアハンマに特定することができた。

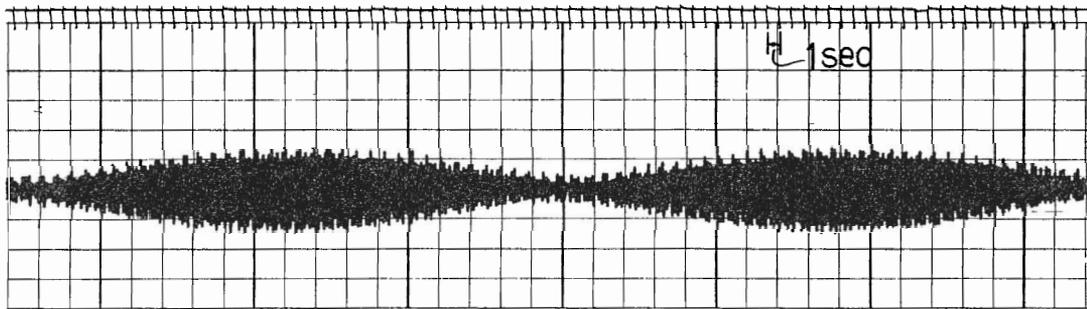


図6 コンプレッサの加速度波形

振動の原波形は微弱でノイズ性の強い信号であったが、フィルタリングをうけた波形には、不明確ながらも、およそ2秒間隔で発生するパルス状の波が現われている（図7上）。そして、家屋は、ちょうどこの波の入射に応じて、強い周期性の自由減衰振動状態になっているように見える（同図下）。

この事実をもとに、Bの振動源を衝撃性加工機械であると推定し、工場内の大型施設の中から鍛造プレス(2000 t)、エアハンマ(2 t)を選んで、稼動状況別の家屋振動を測定した。その結果、鍛造プレス稼動時に図7の波形が再現され、Bの振動源であることが明らかになった。

3. 家屋の振動増幅と地盤の長距離振動伝搬

3・1 家屋の振動特性

本事例では、いずれの被害家屋も、直近の地盤上では振動を感じない。これは、地盤振動が家屋で著しく増幅されていることを意味する。実際、図7（鍛造プレス）、図8（エアハンマ）から、入射波の振幅と家屋の応答振幅を読み取って比較すると、両方の記録ともおよそ8倍前後に達している。この値は、通常見込まれる増幅度に比べて極端に大きく、家屋の振動特性に不利な条件が作用していることを思わせる。そこで、調査家屋の特性を

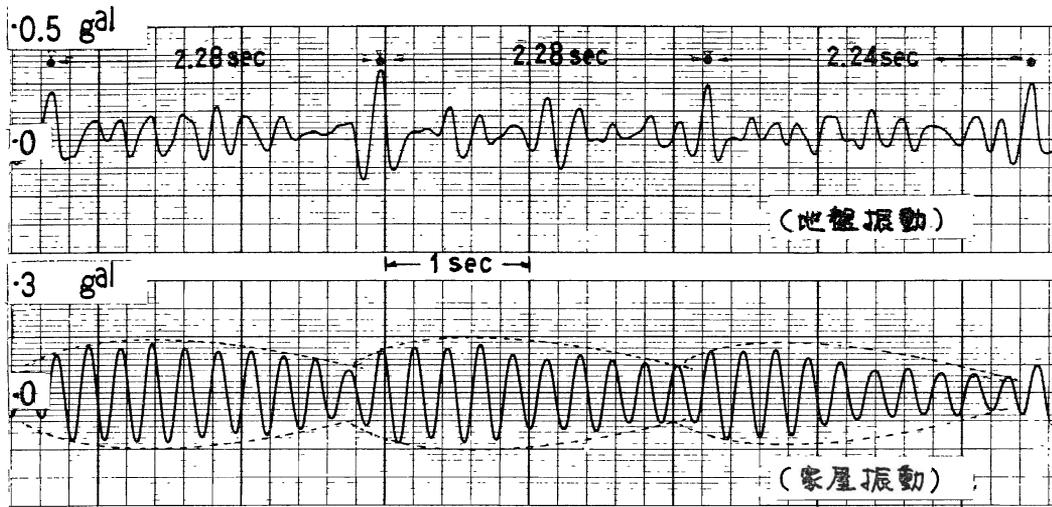


図7 地盤振動と家屋振動の対応 (Bの状態)

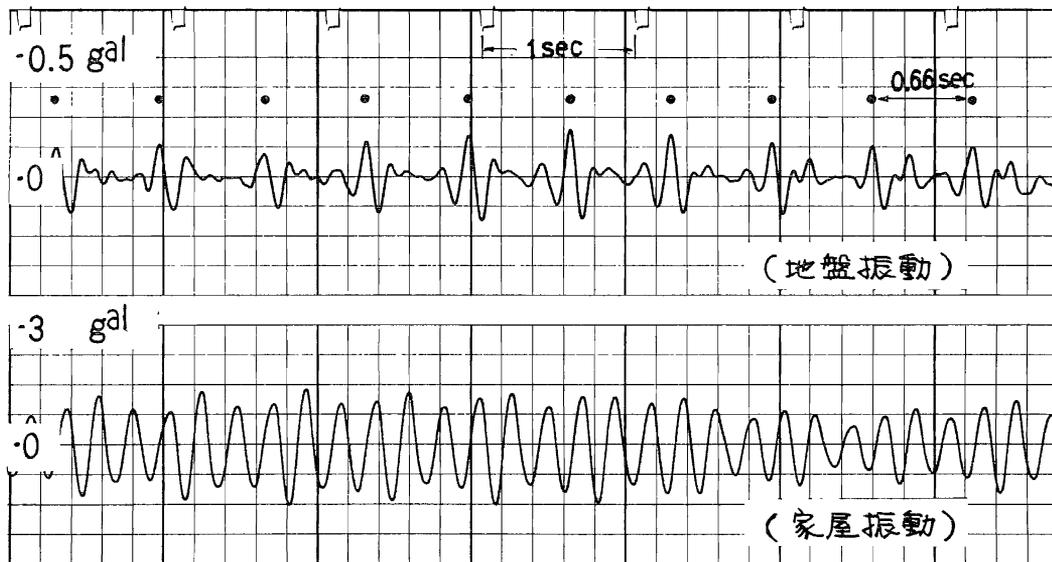


図8 地盤振動と家屋振動の対応 (エアハンマ稼動時)

把握するために、地盤の常時微動を入力、これによる家屋の応答振動を出力とみなして、伝達関数を求めた。

図9 および図10は、信号解析システム (Gen/Rad 2510) によって計算された家屋の水平方向の伝達関数、コヒーレンス関数およびインパルス応答関数である。伝達関数の増幅度特性から、6Hz近くまでの周波数領域で、家屋の応答振幅が地盤の入射振幅をおおむね上まわり (1~2倍)、特に4.5 Hz近傍では急激な増幅 (約8.8倍) を示すことがわかる。また、位相は、4.5 Hz付近を境に、安定した遅れの状態から急変して進みに移る。こ

のような増幅度・位相の対応は、線型系の共振点近くで見られる挙動である。この間のコヒーレンスはおおむね良好で特に4.5 Hzで0.95となる。さらに、インパルス応答は、基本周期0.22秒 (約4.5 Hz) 前後でおよそ2.5秒間継続する自由減衰波形を示している。図から減衰比を計算したところ、0.053の値が得られた。以上の結果は、この家屋 (通常の木造二階建家屋) を固有振動数4.5 Hz、減衰定数0.053の1質点系振動モデルに置き換えることを可能とする。

図11 のようなモデルに地盤振動 $X_0 = \exp(i2\pi ft)$

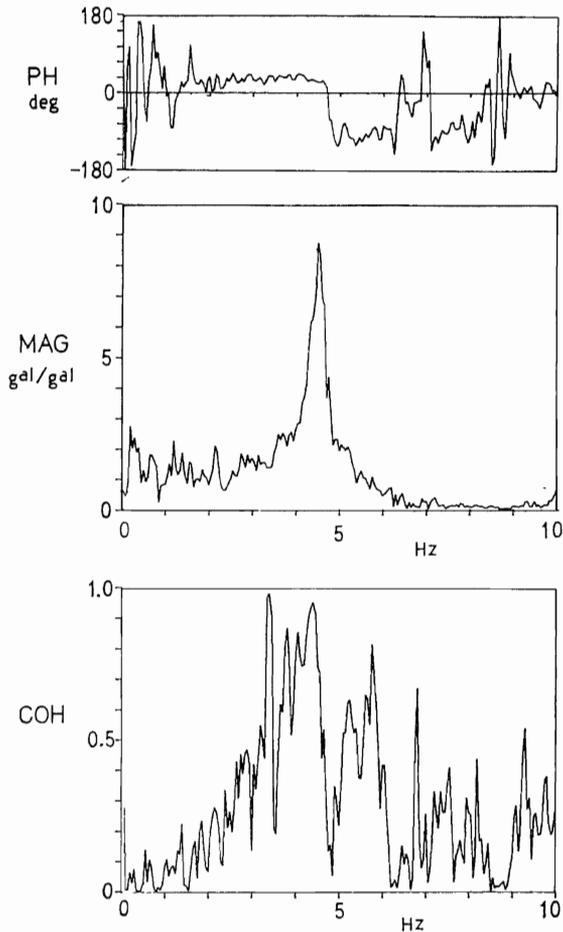


図9 伝達関数の位相特性 (PH)、増幅度特性 (MAG) およびコヒーレンス関数 (COH)

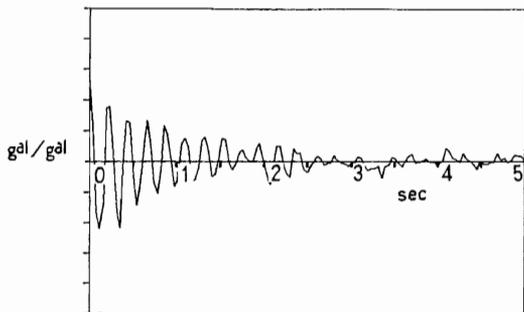


図10 インパルス応答関数

が入射したとき、家屋の応答振幅 u は、

$$u = X_0 \frac{(f/f_0)^2}{\sqrt{\{1 - (f/f_0)^2\}^2 + 4h^2(f/f_0)^2}} \exp(i(2\pi ft - \epsilon))$$

X_0 : 地盤の最大振幅 f : 地盤振動の周波数
 f_0 : 家屋の固有振動数 h : 家屋の減衰定数
 であるから、増幅度は、

$$\frac{u}{X_0} = \frac{(f/f_0)^2}{\sqrt{\{1 - (f/f_0)^2\}^2 + 4h^2(f/f_0)^2}}$$

となる。ここで $f_0 = 4.5$ Hz, f はコンプレッサの場合 4.35 Hz, 鍛造プレスやエアハンマの場合, 図7, 8の入射波から 4.5~4.6 Hzと読み取れるため, いずれの振動源についても $(f/f_0)^2 \approx 1$ とみなせる。したがって, $h = 0.053$ を代入すれば、

$$\frac{u}{X_0} = 9.4$$

となる。この値は、鍛造プレスやエアハンマが稼動したときの実測値 (8倍前後) に近い。また、この値は、伝達関数の測定から得られる最大増幅度とも近似しており、1質点系モデルへのあてはめが不合理でないことも明らかである。

以上の検討によって、家屋の顕著な振動増幅は、共振によって惹起されていることが実証された。

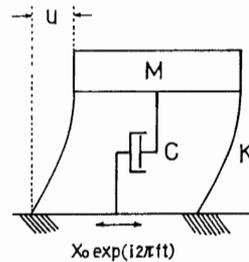


図11 振動モデル

3・2 地盤の振動伝搬特性

各振動源と調査家屋との距離はおよそ 150 m~170 m であるが、最も遠い有感家屋までは 300 m以上も離れている。一般に、振動が長距離伝搬する場合、その原因のほとんどが地盤にあるといつてよい。ここでは、当該地盤で長距離伝搬が起こった原因を推定するために、距離減衰測定を実施した。

エアハンマを対象振動源として、これと調査家屋とを結ぶ直線上に測線をとリ、エアハンマから 3 m, 20 m, 40 m, 60 m, 70 m, 100 m, 120 m, 160 mの各地点において、稼動時の上下、水平方向の地盤振動をデータレコーダに収録した。各点のデータについて瞬時スペクトルを求め、どの地点にも共通するピークの中から、家屋への入射波の成分である 4.5 Hzと比較のための 6.5 Hz成分について、距離減衰曲線を作成した。図12は水平動の

距離減衰であるが、6.5 Hz成分は振動源付近からおおむね一様な減衰を示すのに対して、4.5 Hz成分は100 m地点から先で一切減衰しなくなることがわかる。これは、地盤がこの付近から明確な周波数選択性を持つことを意味する。一般に、地盤が周波数選択性を持つ条件は、インピーダンスの異なる層構造が存在することによって、その現象は、低インピーダンス側の層内での重複反射であるとみなされている。そこで、以下に、工場周辺の地形的な考察をもとに、地盤がこのような条件下にあるか否かを推定した。

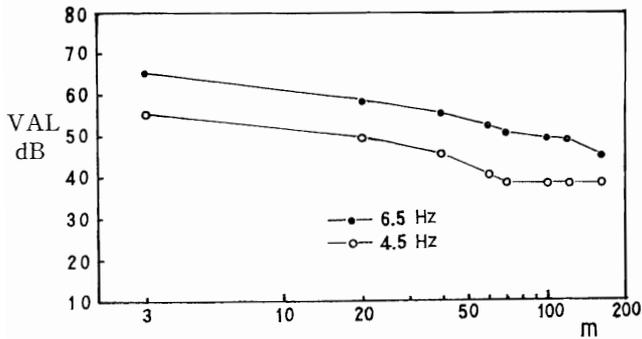


図12 距離減衰曲線



図13 地形図

図13に示すように、この地域は北足立台地の西辺部にあつて、沖積低地が樹枝状に入り込んでいるが、これは台地を浸食した谷が埋積されたものである。苦情発生地域は、荒川より北東方向に続く本谷の上流に形成された支谷付近にあたり、工場はその直上の台地に立地している。実際、工場敷地境界（エアハンマから80~100 m地点）付近から苦情発生地域にかけて、ゆるやかなスリバチ状の地形が認められる。したがって、4.5 Hz成分の減衰傾向の変化（一様減衰、非減衰）が地形変化（台地、

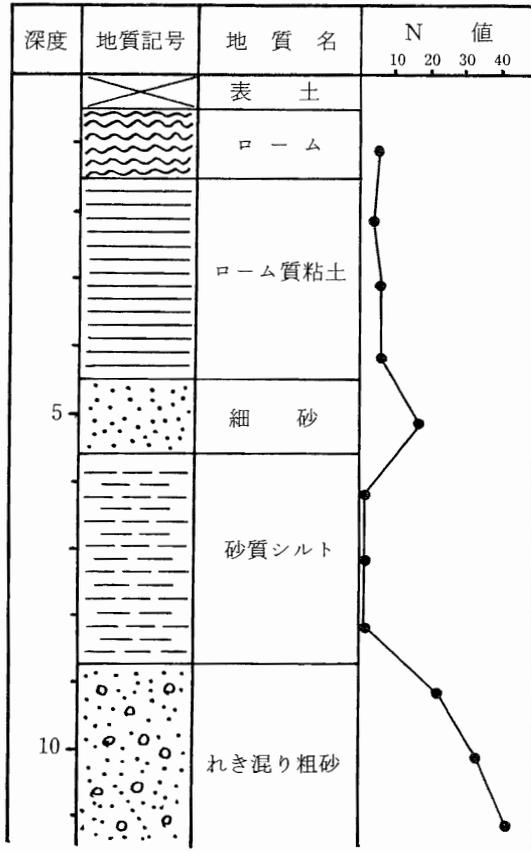


図14 ボーリング柱状図

埋積谷) に対応していることがわかる。苦情発生地域のボーリング資料が得られなかったため層構造が不明であるが、このような谷では通常、表層は腐植土、シルト等の極めて軟弱な堆積物である。そして、台地の土質柱状図(図14)に現われる砂れき層が、浸食を受けずに二層目として存在すれば、表層内に重複反射を起こす条件が整うことになる。

以上の推論は、当該地盤のS波速度分布を調べることにより、周波数の特定も含めて実証すべきものだが、現場付近の弾性波探査が不可能であったため、蓋然性を残す結果となった。しかしながら、特定周波数成分の減衰傾向と地形変化の対応等の傍証から、表層内重複反射は十分起こり得るものと思われる。

4. おわりに

ここに紹介した事例は、

- (1) おそらくは沖積層の表層内重複反射により、特定

の水平動成分の波が遠方に伝わったこと。

(2) その波が、木造家屋の水平方向の固有振動数にほぼ一致する周波数成分を持っていたこと。

の悪条件が重なった結果、極めて広域に振動障害が発生したものと考えられる。しかしながら、これを、まれにしか起こり得ない不幸な一致とみなすのは危険であろう。表層の重複反射で定まる固有振動数が4.5 Hz程度になる場合はさほどめずらしいことではなく、たとえば、S波速度100 m/sec程度の軟弱層が砂れき層上に5 mほど堆積すればよく、同様な結果を得る組合せは沖積低地の浅部の層構造としてふつうに存在する。また、木造家屋の固有振動数についても、統計的には2.5 Hz程度のもが多いようであるが、近年都市域に建てられた家屋は固有振動数が高くなっており、5 Hz近くのものが増えてきているという報告¹⁾もある(本事例における調査家屋も新築したばかりである)。このような地盤、家屋に関する物理的条件、さらには、住宅適地の減少による

軟弱地盤の宅地化の増加という社会的条件から、両者の特性が一致して広域振動公害が発生する危険性は増えているように思える。

振動公害は、通常、振動源まわりの狭い地域での現象であるため、振動規制法も「敷地境界線上の上下方向振動量」による規制という、振動源付近だけに適用できる考え方をとっている。ところが、広域的な振動公害が一度発生すると、本事例のように「敷地境界線上で規準値以下、家屋では水平動による振動障害」ということも起こり得るのであって、その場合、現行法規では対処することが困難になる。したがって、このような事態を起こさないためにも、適切な土地利用計画を推進するのはもとより、振動規制法についても再考の余地があるか否か検討すべきではないだろうか。

文 献

- 1) 金井 清：地震工学，共立出版，1972