

常時微動と自然地震動の相関性

(松代地震その他の計測より)

角田 智彦

概 要

構築物を設計するに当って、地盤調査はその基礎の設計に欠く事のできない重要な要素である。従来からの STATIC な構造設計に必要なボーリング試験、標準貫入試験、物理試験などとともに、DYNAMIC な構造設計に必要な資料として地盤の地震時の卓越振動周期、振動 SPECTRUM、動的地盤係数などが要求されるようになって来た。

我々は数年前から地盤の常時微動を計測、解析する事により上記の各テーマの研究の手がかりを得ようと考え、今回松代群発地震により数多くの記録が得られの統計的に資料をまとめる事とした。

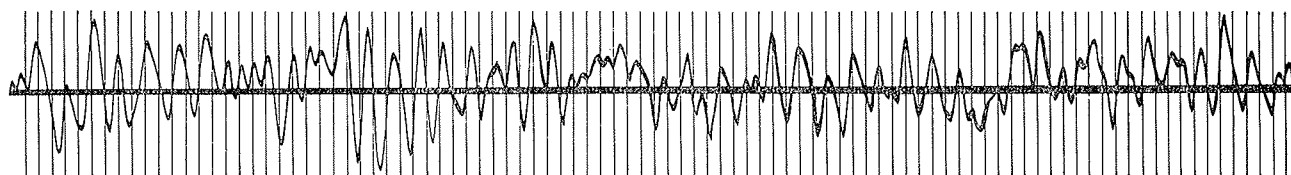
なお、将来は地盤と構築物を一体として地震時の各種応答を解明する様に研究を発展して行きたいと考える。

1. 常時微動

近年の計測、解析器械の精度や技術の向上によって振動測定についても従来は計測できなかった 0.1μ 単位 ($\mu=0.001\text{mm}$)の記録が可能になり、また RANDOM 波形のため解析に手間がかかっていた問題も磁気録音その他電子技術を駆使する事により短時間に結果を得る事が可能になり統計的処理が考えられるようになって来た。

ところで地盤は常時数 μ 以下の振巾で動いている。その周期は数10秒のものから数10分の1秒のものまでの範囲に変化する。数秒以上の波長のものをその地盤の脈動と呼び、それ以下の周期の波を常時微動として区別している。

地盤に常時微動が起る理由としては附近を通る交通機関や工場の機械などが振源となる人工的なものと、風、気圧、川や海の波動が原因となる自然的なものとと考えられる。したがってその現象は場所により時間により不規則な PATTERN を示すので次章以下の解析方法を用いてその地盤特有の性質を知る必要がある。常時微動の原波形を図一1に示す。



図一1 地下10mにおける常時微動の原波形

2. 常時微動測定の意義

地盤は構築物と同様に地震動によってある特有の周期が卓越して震動すると考えられている。たとえば東京山手の本郷台地では0.3秒位、下町江東地区では0.5~0.7秒位が卓越すると言う研究がある。同様に地盤微動もそれぞれ地盤固有の周期と SPECTRUM を示すものだと両者の周期分布の相関性についての研

究がある¹⁾。

次に常時微動から地盤種別の判定を行なう研究がある。たとえば金井は常時微動の卓越周期と振巾を PARAMETER として図表化し従来から用いられている「建設省告示第1074条地盤種別と設計震度」との対比を行なっている²⁾。

また、鳥海³⁾、山原⁴⁾は住宅公団アパートの屋上階での水平振動固有周期を集団計測する事により地盤との関係を求めている。すなわち公団アパートは構造様式が一樣で剛性であるため、その頂部の常時微動は周辺地盤の影響が直接現われるとして動的地盤図的な表現を行なっている。

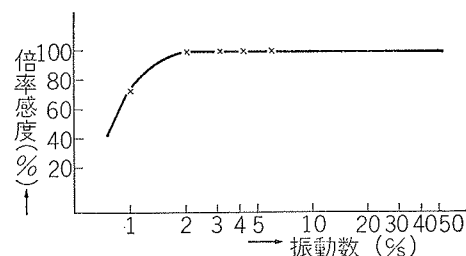
3. 常時微動計測

振動研究室で使用している計測、解析器械を簡単に説明する。

3.1. 測定計器

動コイル型振動計……倒立振子コイルと不動点側の永久磁石とからなり固有周期、1.0秒、出力は速度比例型

増巾器……振動計から与えられる速度信号を変位に



図一2 計測に関する総合特性

比例した電圧に変換する積分増巾器および記録器の最適入力電圧, 1VP-P とする直流増巾器を組み合わせる。

磁気記録器……19cm/sec, 38cm/sec 走行の磁気テープに増巾器からの信号をパルス巾変調して記録する。

以上のごとき計測システムによる周波数総合特性は図-2の様になる。

3.2. 解析装置

現在の所, 確立的な解析方法や装置があるわけではなく発表されたデータの表現も統一されていない。

したがって以下の章において周期 (sec) と言う表現と振動数 (c/s) とする表現が混在するが解析器械の表示方式をそのまま使用した事によるので文章の不統一はお許し願いたい (表, 図の表示方法もしたがって同じ事が言える)

前掲のごとく原波形は複雑な波形をしているが, 時間的に定常確率過程と解釈し記録の自己相関を求めて卓越周期だとする。この分析に使用するのが磁気相関計であって一種のアナログコンピューターで原理は, 振動記録は上述のごとく統計的に定常であるとしその

函数 $f(t)$ を時間 (t) だけずらしてかけ合わせて時間的平均値を作る。

$$\phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) \cdot f(t+\tau) dt$$

図-3 に示すのが図-1 の原波形を計算したもので, 分析時間は約40秒, 分析周波数はDC~20c/sである。

次にこの $\phi(\tau)$ をフーリエ変換したものが SPECTRUM POWER 密度と呼ばれるもので

$$S(\omega) = 4 \int_0^{\phi} \phi(\tau) \cdot \cos \omega \tau d\tau$$

で表わし電子計算機で計算したものを図-4 に示す。

また, 自己相関を用いなくて直接常時微動記録から $S(\omega)$ を求める方法がある。たとえば再生記録のある中心周波数 f_0 の BAND WIDE FILTER で FILTER した出力の POWER を測定する事によって得られる。分析周波数が DC~100c/s と低いために解析器械の精度上に多少の問題点はある。図-5 に原波形から直接解析した変位 SPECTRUM の一例を示す。

4. 計測資料

従来からの計測資料を次の様な観点から整理した。

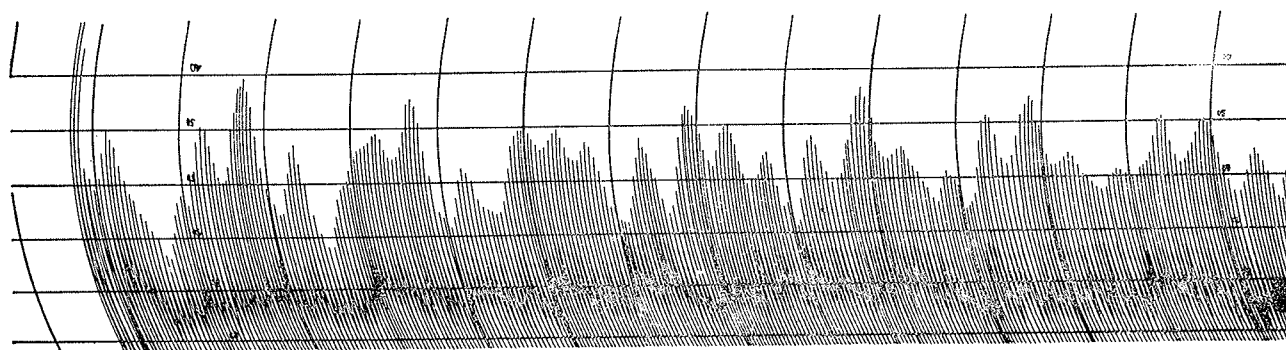


図-3 自己相関資料。図-1 の資料を磁気相関計により解析したものと。

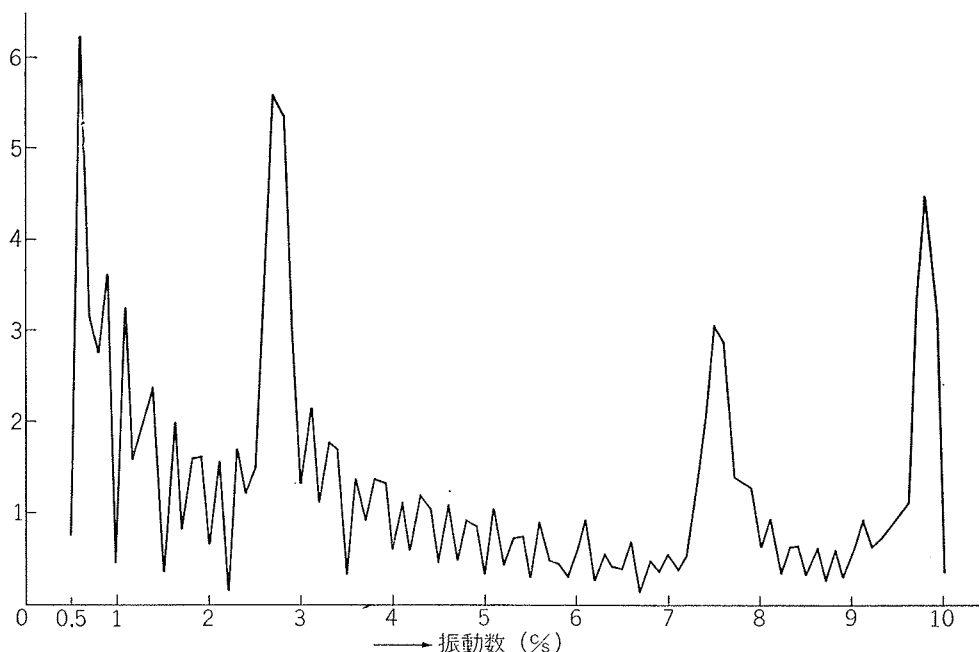


図-4 POWER SPECTRUM。図-3 の資料をアナログコンピューターで計算したものと。

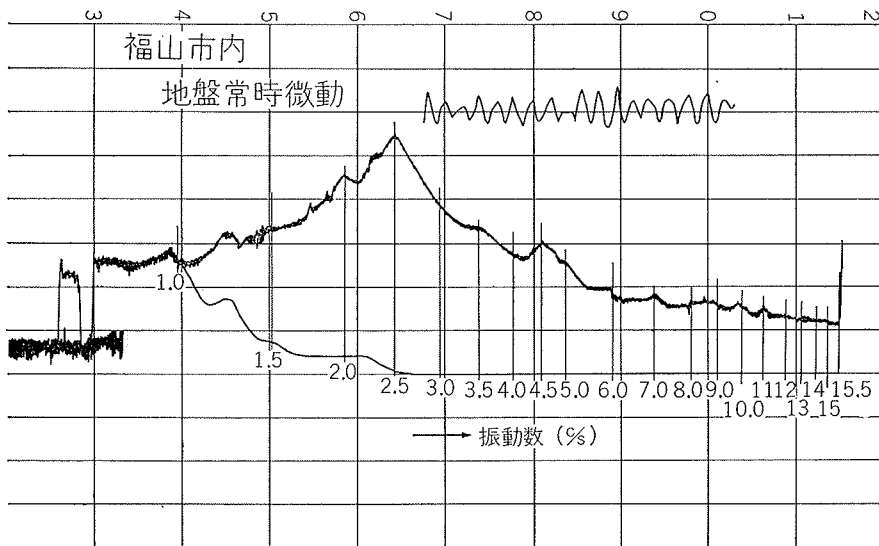
4.1. 常時微動の経日変化

常時微動時の SPECTRUM, 振巾 LEVEL などが日によって振源とは無関係に変化すると言う説と常に一定だとする説がある。しかし地盤に関する問題は同一条件での比較が不可能で我々の研究も一義的な結論は得られなかった。

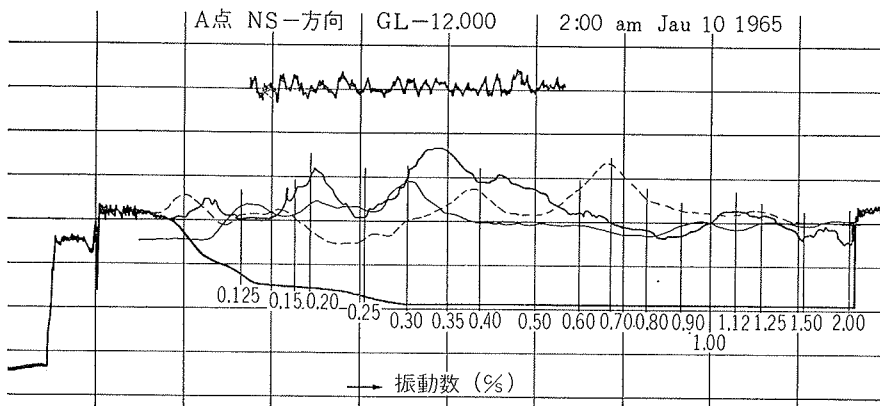
測定に関して同一条件とするのは以下の事項である。測定期間は普通連続6日間とし測定時刻は午前2時前後、測定場所周辺に自動車、通行人の少ない時を選び、一回の記録時間を約2分間連続して行なう。測定する地盤方向は水平方向とし振動計は直接地盤に設置する事としている。代表的な測定結果を図一6, 7に示す。

卓越振動数	1.6%	2.2	2.7	3.2	3.8	FLAT
頻度	23.6%	7.3	38.2	12.7	3.6	14.6
図一7			a		b	c

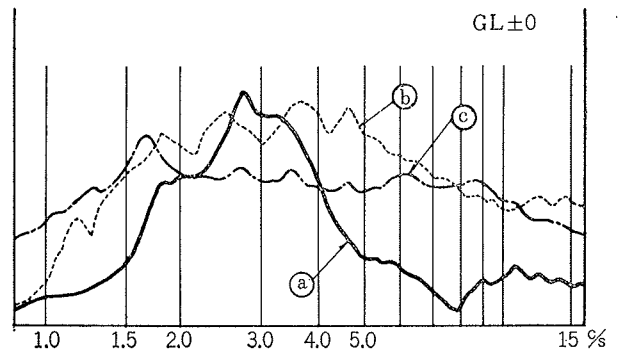
表一1



図一5 変位 SPECTRUM。SHORT RANGE SPECTRUM ANALYZER で解析したもの。原波形を図中上部に示す。



図一6 変位 SPECTRUM。6日間の経日変位を調べたもの3本の線は2日毎の同時刻の記録を示す。



図一7 常時微動 変位スペクトル

4.1.1. 図一6は東京都中央区における資料で特殊な条件として附近を高速道路が通っている事と、測点の地下12mは高速道路の路面と同一 LEVEL である事があげられる。その結果、周期 $T=3.0\sim 4.0$ 秒と言う脈動に近い波が卓越し6日間の変動は見られなかった。

4.1.2. 図一7は長野市松代町で行なった測定結果である。特殊な条件として長期にわたって起っている地

震動の合い間にとった資料である事があげられる。測定位置は地表面のみとし、解析した資料数は100ケでその中80ケの資料については約10秒間の記録を分析し、20ケの資料については約120秒間の記録を整理した。その変位 SPECTRUM は大別して三種類に分けられ、①は単一の PEAK を、②は2~3ケの PEAK を、そして③は全体にわたって FLAT な形を示す。そしてこの地盤は同一測定日でも時間によって①の PATTERN が現われたり③が現われたりして不規則である。しかし6日間の資料を統計的に見ると表一1に示すように③が現われる頻度が最も多い。

卓越一次振動数は LEVEL の変動により日によって多少変動する。たとえば図一7の①は単一 PEAK をもつ PATTERN であるが、②の PATTERN においてもその PEAK は完全に消滅するのではなく低い LEVEL の2, 3次卓越振動数として存在する。(振動数=1/周期)

また、100ケ全部の平均した SPECTRUM と個々の SPECTRUM を比較して見ると平均値の PATTERN の PEAK,

1.6c/s, 2.7c/s, 3.2c/s, は表-1 に示される卓越振動数と一致する。

以上の事から、SPECTRUM の一次的特徴の著しい地盤では日よっての卓越振動数の変動は少い。しかし松代のように卓越振動数の LEVEL が低い場所では変動する可能性がある。

4.2. 常時微動と地盤深度

常時微動の周期成分や振巾は地盤の性質に影響される。したがって場所によって異なるのは当然ながら同時に同一地点でも地層の変化によっても SPECTRUM は異なる可能性がある。そこで構築物の基本設計の資料として必要なのは構築物が設置される地盤の値であるが、現在の研究の段階ではたとえば地下10mに基礎下面が来るとするとその前後の深さのボーリング孔による測定値をもって代表している。

しかし実際に構築物に影響するのはボーリング孔で

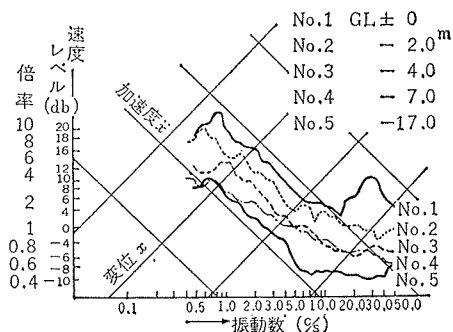


図-8 地盤常時微動 スペクトル分析

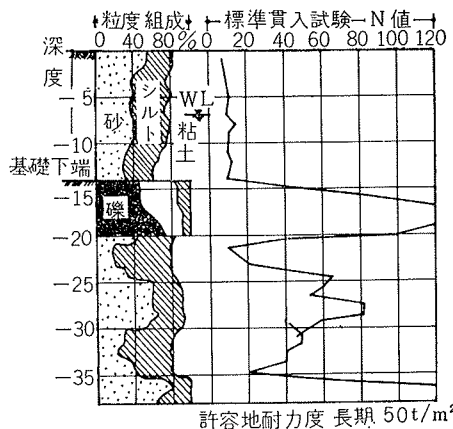


図-9 土質柱状図

の資料、OPEN CUT された原地盤、コンクリート基礎版、または地下部分の側壁地盤の及ぼす影響のいづれが優勢するかは解明されていない。この問題には鳥海の研究がある⁵⁾。

したがって我々は現在の所、ボーリング孔での測定値を何らの修正もせずに構造設計資料として使用するのが現状である。

測定場所は大阪市内、横浜市および東京都内で行なった。

4.2.1. 大阪市内 地下10m附近にある天満層では

ANALY. TIME	MANUAL					CORRELATER	
	30 SEC		60 SEC		40 SEC		
POINT	PERIOD in SEC.	FREQ %	PERIOD in SEC.	FREQ %	DISP. μ	PERIOD in SEC.	FREQ. %
M G L \pm 0	0.60	1.67	0.60 0.40	1.67 2.50	8.30	0.60 0.38 0.30	1.67 2.63 3.30
G L - 8	0.64 0.34	1.56 2.94	0.60	1.67	2.13	0.70	1.43
G L - 15	NO	PEAK	NO PEAK		1.87	0.36 0.24	2.78 4.16
G L - 23	0.60	1.67	0.64	1.56	0.60	1.28	0.78
G L - 30	0.40	2.50	0.40	2.50	0.20	0.24	4.17
G L - 40	1.00	1.00	1.06	0.95	0.40	1.08	0.93
G L - 50	1.20	0.84	NO PEAK		0.30	(1.10)	(0.90)
G L - 60	0.50	7.00	0.40	2.50	0.30	(0.48)	(2.80)

表-2

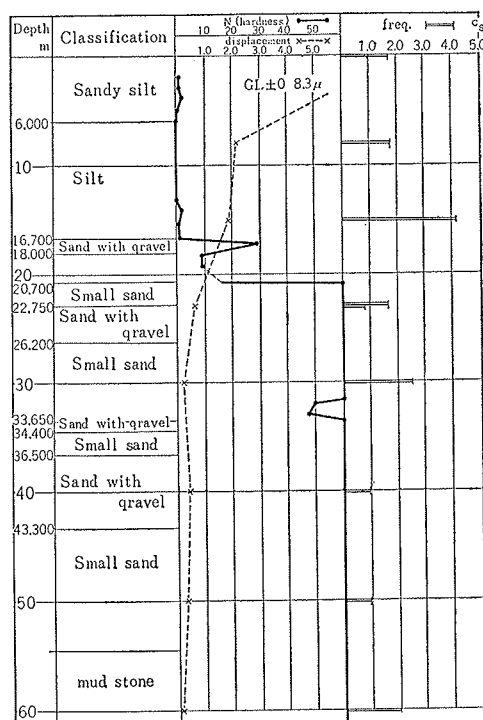


図-10

周期 $T=0.38$ 秒が卓越し振巾は数分の $2 \sim 4 \mu$ 程度である。一方地表面では周期 $T=0.15$ 秒が卓越し振巾は地下10m測点の約2倍の値を示す。

4.2.2. 横浜市 測定結果を図-8に示す。この測定の場合、No. 1~No. 4 は同じ日の資料だが No. 5 はそれから約3ヶ月後に OPEN CUTされた基盤層での値である。地表面の PATTAN を除いて他はよく近似している。地表面では振動数 $n=0.9c/s$ と $30.0c/s$ 附近で卓越している。振巾の絶対値を計測してないので振巾倍率は不明だが、例えば速度 LEVEL を検討してみると深度方向に倍率が小さく地表面は地下17m測点より平均して4倍の倍率をもっている。

4.2.3. 東京都内 測定結果は地層との関係を図表化したものを図-10に、各測点の周期および振巾を表-2に示す。

地表面の周期成分は連日の測定を通じて $T=0.6$ 秒

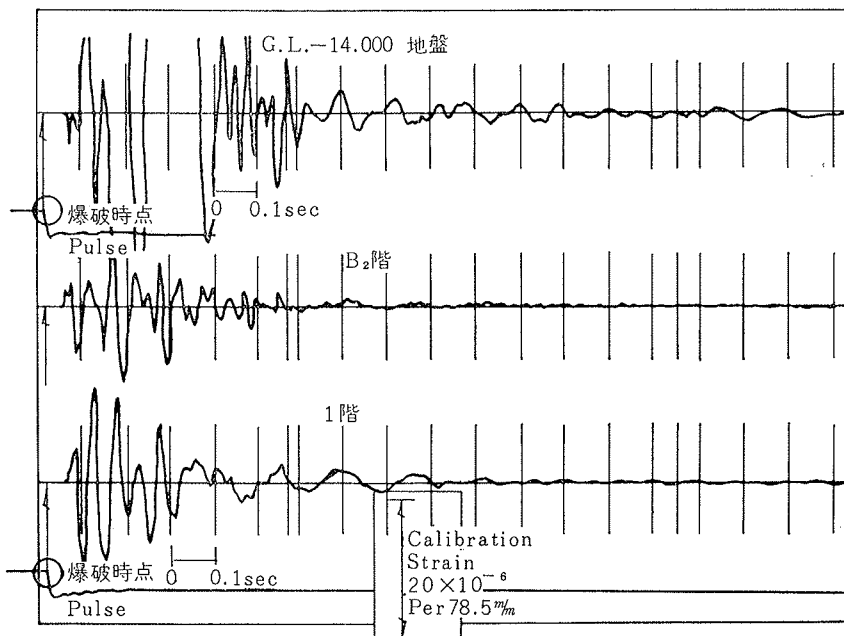


図-11 人工地震加速度記録

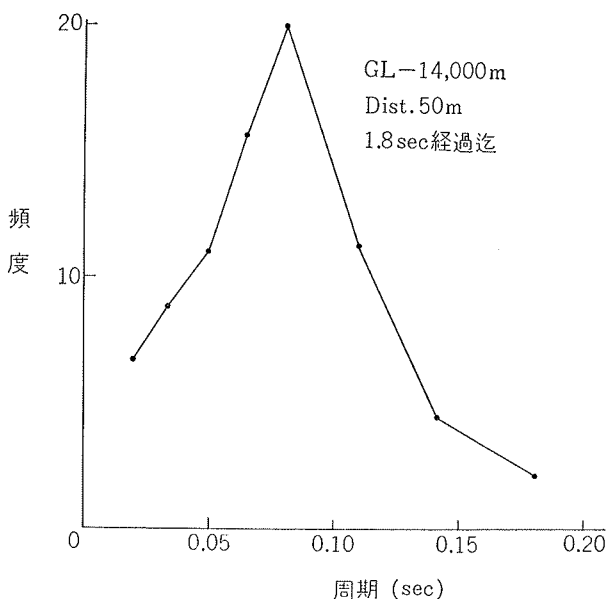


図-12 地下14M加速度周期の頻度

で卓越する。GL-15M~23M における SPECTRUM は地層の複雑性を反映して卓越成分が明瞭でない。特に GL-23M 附近では下部層の成分 $T=1.00$ 秒と表層の $T=0.6$ 秒が混在してかなり雑音的である。GL-40M~60M では $T=1.00$ 秒が卓越して現われる。

以上の事より判断できる事は、地層の単純な場所では深さ方向に関しても SPECTRUM に変化はない。しかし地盤柱状図が複雑な場所では2~3ケの卓越周期が現われる。振巾については深さ方向に減少しているが現在のところ資料数が少ないので規則性は未だ見いだせない。

4.3. 常時微動と人工地震

松代地震の様な場合は例外として、普通では構築物の振動実験に際して地盤をも含めた試験は容易でない。地盤は構築物に対して地震波入力の際にはFILTERとして作用し、構築物が振動を初めると ENERGY 散逸の場として働くことされているからその要素は無視できない。そこで自然地震の代用として人工地震を用いる事が考えられる。有限地盤で加振時間が短いと言う欠点はあるが、波形としてRANDOMでかなりの震度に相当するENERGYを作る事ができる。これらの理由で構築物に関して人工地震実験を行なう事は有意義なので、地盤における常時微動と人工地震時の卓越周期について調べて見た。

4.3.1. 横浜市 人工地震の振源としてダイナマイトを使用し、薬量1.0kgとし地下17M地点で爆発し

	SPECTRUM ANALYZER	手計算	卓越振動数	頻度	備考
常時微動	80ヶ(10秒)	20(120)	2.7%	38.7%	()内は解折時間を示す。
微弱震	10 (#)	16	3.8	33.4	
強震	—	18	3.0	40.0	

表-3

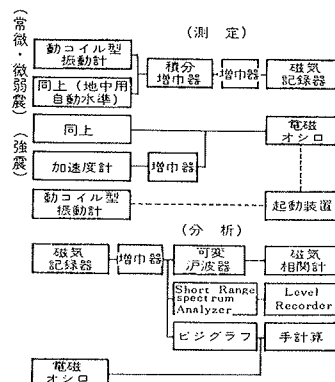


図-13

た。振源より50M地点地下14Mの測定記録を図-11に加速度の周期頻度を図-12に示す。地震継続時間は約2.0秒で卓越振動数は12.5c/sで常時微動時の0.9c/s, 30.0c/sとは一致しない。

4.3.2. 福山市 上記とほぼ同一条件だが爆発深さは地下 3.0M とし記録は地表面のみとした。爆発後 0.03秒から 0.207 秒までの 0.177 秒間に初期微動が起る。その後約2.5秒間は卓越振動数 $n=3.0\sim 3.3c/s$ が現われる。最大振幅 50μ 、加速度 25gal とする結果が得られた。常時微動を解析した結果は図-5 に変位 SPECTRUM を示すが卓越振動数は 2.5c/s となり 4.3.1. と同様にやはり常時微動時のそれと一致しない。

以上わずか 2ケの実験例だけしかないが人工地震時の卓越振動数と常時微動のそれは少くとも地盤に関しては問題がありそうである。

4.4. 常時微動と自然地震

この問題については松代群発地震を対象として研究する事を考えた。従来からこの点に関しての研究は行なわれて来たが、実際に両者の測定資料が同一条件で求められた例はきわめて少ない。したがって松代ではできるだけ条件をそろえる事に注意し図-13の器械の組み合わせにより資料を求めた。常時微動については 4.1.2. に説明してある。地震時の資料解析数は表-3 に示す数でこの場合、微弱震の加速度は 1.5gal 以下、強震は約 20~40gal の範囲にある。

地震の強弱による SPECTRUM の変化はさほど見られない。強震時の方が高次の振動数が現われる割合が大きい程度で、卓越する振動数は両者共に 3.0~3.8 c/s 附近にある。次に常時微動との比較になるとまず SPECTRUM については常時微動時の ㊶ 一曲線によく相似している (図-7 参照)。この事は他に比べて LEVEL の高い SPECTRUM がやはり相似性をもち卓越振動数についても一致する。

このように松代に関しては常時微動と地震動の卓越振動数は良く一致したがこれは実際には常時微動が種

種の PATTERN を示すため解析数を100ケと言う数多くの資料を統計的に整理してその上での相似性を論じたためで、したがって単一の SPECTRUM が現われてしかも地震動と一致すると言う規則性のはっきりしたものではない。また上記松代での結果については条件として普通一般の場所の常時微動と異なり自然地震の発生している間に採った記録である事を考慮しておくべきである。

5. むすび

以上、前半に地盤微動計測の意義について、後半に当研究所で行なってきた一連の測定結果について述べた。その目的とする所は、設計の段階で与えようとする設計震度、最適地盤入力 PATTERN、地盤卓越周期、地下構造体に及ぼす地震応力分布などを見いだす事にある。しかし常時微動、人工地震、自然地震の三者が同一基準で評価される場が少なく前述のごとく松代群発地震によって地盤の卓越周期に関してはある程度の結論が得られたと考える。なを今後、地下部分に及ぼす影響に関して地盤の深さ方向の常時微動と自然地震を計測する事を計画している。

このように目的とする所が大きいのに比べて常時微動と言う測定対象が割合簡単に与えられるため、ともすれば結論も安易に出す恐れがある。したがってその目的によっては長期的により精密な計測技術をもって行なう必要があると考える。

なお文中、氏名の敬称は省略させていただきます。

参考文献

- 1) 常時微動について……震研報 No. 39
金井清 田中貞二
- 2) ”
- 3) 建築学会論文集 40.9
- 4) ” 41.10
- 5) PROCEEDINGS OF JAPAN EARTH-
QUAKE ENGINEERING SYMPOSIUM
1966

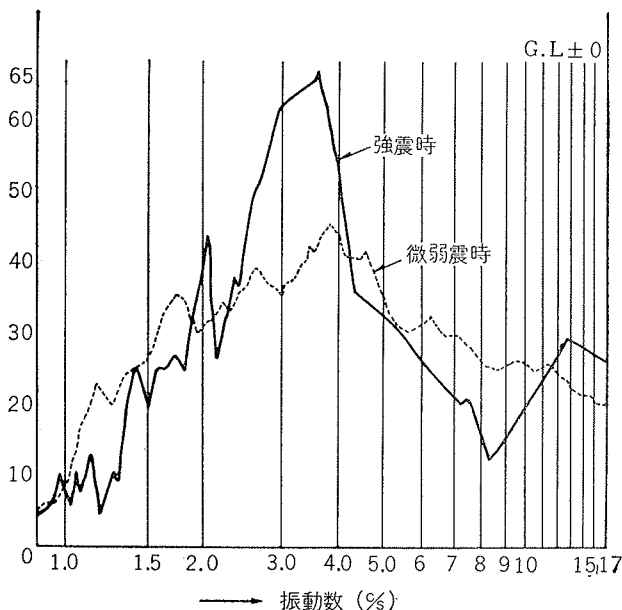


図-14 地震時変位スペクトル GL±0