

# 地盤の周波数特性と建物の地震被害

山原 浩  
渡辺 弘之  
藤井 邦雄  
市之瀬 紘一

## § 1. はじめに

地震時の建物の挙動は、地盤の振動特性と密接な関係を持つといわれている。そして地動の卓越周期と建物の固有周期との一種の共振現象が被害に結びつく大きな要因であると考えられてきた。1968年の十勝沖地震における震害状況をみても、構造的強度の点ではほぼ同等と見られる建物間にも、あるものは破壊し、あるものは亀裂すら入らなかったという現象を生じている。このような現象は、あるいは被害を受けた建物の固有周期が地動の卓越周期に近かったのではないかという臆測を生みだす。

しかし幾多の建物について行なった現地調査の結果、そのような理由だけでは説明がつかない場合の方がむしろ多かった。実際に鉄筋コンクリート造3～8階建の建物の固有期間は、0.2～0.5sec.の範囲に分布する。一方地盤の卓越周期も、その範囲に分布する場合が極めて多い。

したがって、一般に地盤の卓越周期と建物の固有周期がほぼ一致する確率は案外高いのである。にもかかわらず、実際の被害率が低いということを考え合わせても、建物と地動の周期性のほかに、もっと何か重要な要素を見落しているのではないかと思われる。その1つは地動の持つエネルギーレベルであり、もう1つは周波数成分の密集度すなわち周波数選択度と呼ぼうとするものである。本論文においては、これら2つの要素を中心に十勝沖地震の地盤と建物被害の関連を論ずることにした。

## § 2. 地盤の卓越周期と建物の固有周期との関係

八戸市内およびその郊外にある幾多の建物について、常時微動による建物の固有周期と、その周囲地盤上の卓越周期との関係を示すと表-1のようになる。また両者の相関関係を図-3に示した。

建物名称	*1被害	階数 地上—地下	建物の固有周期 sec.		地盤の卓越周期 sec.	
			短辺	長辺	短辺	長辺
八戸信用金庫本店	○	3-0	0.32	0.24	—	—
東北電力八戸営業所	○	3-0	0.27	0.26	0.35	0.34
八戸市民病院	○	5-1	0.31	0.33	0.21	0.28
八戸グランドホテル	○	5-1	0.29	0.26	0.38	0.36
光星学院	○	3-0	0.27	0.30	0.21	2.20
青和銀行八戸支店	○	3-0	0.35	0.34	—	—
八戸日赤病院	○	6-1	0.23	0.32	0.24	0.21
三万デパート	○	4-0	0.34	0.35	—	—
丸光デパート	○	6-1	0.36	0.44	—	—
岩徳ビル	○	4-0	0.36	0.35	—	—
八戸工業高校	○	3-0	0.39	0.40	0.47	0.47
根城小学校	○	3-0	0.37	0.43	0.28	0.32
八戸北高校	○	3-0	0.34	0.35	0.25	0.23
八戸東高校 (1)	●	3-0	0.30	0.34	0.21	0.25
〃 (2)	△	3-0	0.39	0.40	0.33	0.35
八戸図書館	●	1-0	0.41	0.41	0.35	0.27
八戸高専 (1)	●	0-3	0.26	0.30	0.42	0.42
〃 (2)	●	0-3	0.28	0.33		
〃 (3)	●	0-3	0.29	0.31		
〃 (4)	●	3-3	0.24	0.26		
〃 (5)	●	0-3	0.32	—		
〃 (6)	●	0-3	0.30	0.29		
三沢商業高校	●	3-3	0.35	0.40	0.28	0.27

注) \*1 ○ほとんど被害を受けなかったもの

△かなり被害を受けたもの

●著しく被害を受けたもの

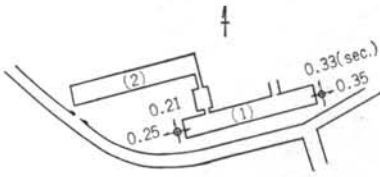
\*2 測定校舎を 図-1 に示す

\*3 被害校舎を解体撤去後の測定値で、それぞれの測定位置を 図-1 に示す

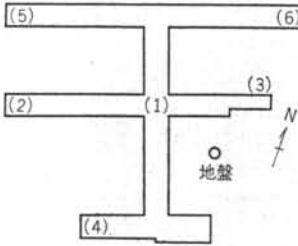
\*4 測定位置を 図-2 に示す

地盤の周期中の空白欄は、主として市街地の場合で近所の建物の影響によって地盤本来の特性が得られないもの

表-1 建物の固有周期と地盤の卓越周期



図一 八戸東高校の常時微動測定位置



図二 八戸高専の常時微動測定位置

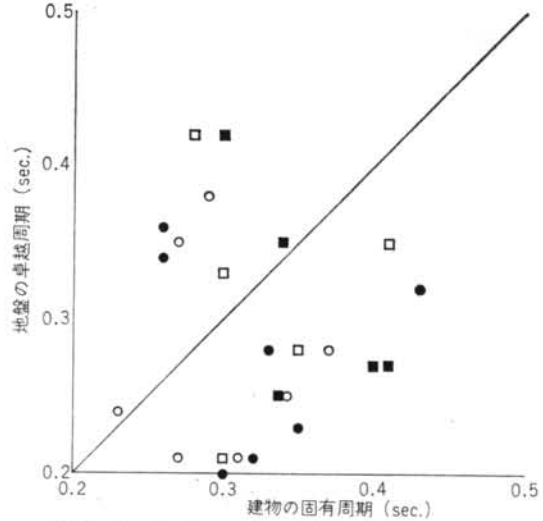
図一から、地盤の卓越周期は 0.21~0.47sec. の間に分布し、建物の固有周期は 0.23~0.44sec. の間で、両者はほぼ同じ範囲に分布していることがわかる。また被害を受けた建物(□■印)が、地盤と建物の周期が必ずしも近かったとはいえない。

しかしこのような結果は、数ミクロンという微小変形における値であり、本震時の周期がそのまま保存されていたとは、さまざまな理由から考え難い。とくに被害を受けた建物の固有周期は、すべて被害を受けた後に計測されたものであり、健全であった状態から比べればかなり周期は延びているものと想像される。また余震による建物の応答記録からわかったことであるが、地震時の建物の周期は構造的破壊がなくても、変形が大きくなるにつれてかなり延びる。その大きな理由は、地盤のばね特性の非線形性によるもので、建物の剛性が相対的に高くなるほど著しい。したがって、もし常時微動において地盤と建物の周期が一致していたとしても、大地震時には自動的に共振を回避する作用が生ずるのかもしれない。このような現象を考えると、むしろ建物の周期が地盤の周期よりやや短い場合の方が危険なようであるが、図一からそのような傾向も読みとれない。

このような調査結果から、今回の十勝沖地震の場合、建物と地盤の周期性だけでは、建物の被害との関連を説明することは、どうやら無理であるといわざるを得ない。

### § 3. 地動の周波数分析と選択度の定義

常時微動や地震動の周波数特性の表示法として、周期



注) ○短辺方向 } ほとんど被害を受けなかったもの  
●長辺方向 }  
□短辺方向 } 著しい被害を受けたもの  
■長辺方向 }

図三 建物の固有周期と地盤の卓越周期との関係

一頻度特性、応答スペクトル、フーリエまたはパワースペクトルといった方法が用いられている。地盤条件と地動との関連を調べるには、もとの現象のもつ大きさ(平均パワー)と、その大きさに占める各周波数成分の割合を知る必要があるだろう。そのような目的には、いわゆるパワースペクトルが最も有効であろう。

いま地動  $f(t)$  があるとき、その自己相関関数  $R(\tau)$  は

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

から計算される。一方  $R(\tau)$  とパワースペクトル  $P(\omega)$  とはフーリエ変換の対をなすという性格があるから

$$P(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad \dots(2)$$

$$R(\tau) = \int_0^{\infty} P(\omega) \cos \omega \tau d\omega \quad \dots(3)$$

となる。ここで  $R(0)$  は平均パワーに他ならなく、

$$R(0) = \int_0^{\infty} P(\omega) d\omega \quad \dots(4)$$

となる。したがって  $R(\tau)$  を  $R(0)$  で Normalize してパワースペクトルを計算すれば

$$\frac{P(\omega)}{R(0)} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R(\tau)}{R(0)} \cos \omega \tau d\tau$$

$$\therefore \int_0^{\infty} \frac{P(\omega)}{R(0)} d\omega = 1 \quad \dots(5)$$

となる。このような方法で周波数特性を表示すれば、 $R(0)$  はもとの現象の大きさ(平均パワー)に相当し、

$$P(\omega)/R(0) \times d\omega$$

は振動数  $\omega$  の成分がその大きさに寄与する割合を意味する。

さて、実際の地動をスペクトル解析するとき、ある特定の周期成分がどの程度の勢力で卓越するか、その割合を示す何かが必要になる。例えば図-4に示すように、(a)(b)のいずれも  $T_n$  に共通した卓越性を持っているが、両者の工学的な意味には大きな違いがある。

そこで、このような周波数成分の密集度を言葉の便宜上、周波数選択度、または単に選択度と呼ぶことにしよう。



図-4 卓越周期は同じでも、工学的意味には大きな違いがある

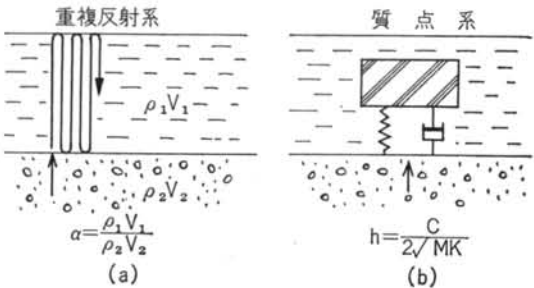


図-5 地表層の簡単なモデル置換

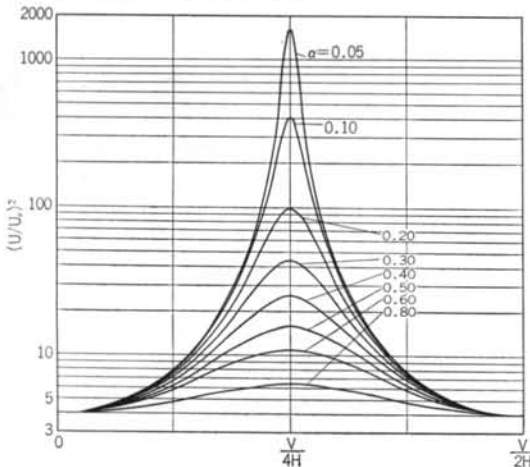


図-6 2層重複反射系にホワイトノイズが入射したとき地表層におけるパワースペクトル

図-4(a)は選択度が低い、図-4(b)は選択度が高いと表現することになる。

つぎに周波数選択度を定量的に、どのように定義したらよいかという問題になる。もし地動のスペクトルに卓越成分を生ずる物理的機構がはっきりしていれば問題は簡単である。今日、基盤に到達する地震波のスペクトル密度はほぼ一定と考えられ、地表に現われるスペクトルは大部分地表層によって誘発されるということが定説になっている。また常時微動のスペクトルは地表層における特性を表わしていると考えられている。そこでもし地表層を 図-5(a)に示すような重複反射系に置換するとすれば、選択度は振動インピーダンス比  $\alpha$  によって一義的に決定される<sup>1)</sup>。図-6は基盤にホワイトノイズが入射したとき、地表層における重複反射によって地表に現われる波のパワースペクトル特性を示したものである。

また地表におけるスペクトルが、1つの顕著なピークを持つような場合、地表層を 図-5(b)に示すような1質点系に近似することも可能であろう。このような場合選択度は減衰常数  $h$  で表現される。

しかし、実際の地盤の構成は甚だ複雑で、一体どの層をもって基盤と見なしてよいのか、中間層はいかに考えるべきかといった問題に当惑する。また実際の地動のスペクトルには、いくつかの周波数成分が卓越する場合が多く、図-5に示すような簡単な系に置きかえては、うまく適合しない場合が多い。

そこでスペクトルに生ずるピークの生成機構は知らなくても、結果として生ずるピークの形状を客観的に定義した方が後々のために便利ではないかと思われる。結局式(5)で与えられているように、Normalizeされたスペクトルにおいては、ピークの相対的な形よりも、その絶対値の方が問題になるのである。そこで本論文では、スペクトルに現われる最大値すなわち  $P(\omega)/R(0)$  の最大値をもって、周波数選択度と定義しておく。これは最も卓越する成分がもとの波形の平均パワーに占める割合を意味することになり、工学的にも理解しやすい。

#### § 4. 地盤の選択度と建物の地震被害との関係

今回の十勝沖地震において、被害を受けた建物は当初地盤との一種の共振現象があったのではないかと推測された。しかし調査の結果、そのような期待はどうやら当たっていないということがわかった。

しかし常時微動の観測中、記録計の針の動きからある

程度感ずることであるが、震害のひどかった地盤上での記録波形は比較的単調である。これをパワースペクトルの形で表現すると、ある特定の周期に著しく卓越するピークを生ずる。すなわち前章の定義によって周波数選択度が高いといえる。

今回の地震被害の特徴の1つとして、学校建築の被害が多かったことが挙げられる。構造的強度においてはほぼ同等と思われる学校建築物の間にあるものは破壊しあるものは亀裂すら入らないという珍現象を生じた。

われわれが調査した学校関係で、被害の著しかったものは八戸高専、八戸東高校、三沢商業高校で、それぞれの地盤のスペクトルを図-7に示した。また被害をほとんど受けなかったものは、根城小学校、八戸北高校、光星学院、八戸工業高校で、それぞれの地盤のスペクトルを図-8に示した。

図-7と図-8を比較すると八戸工業高校の場合だけが唯一の例外で、被害を受けた建物は選択度の高い地盤に、被害を受けなかった建物は選択度の低い地盤にあったことができる。

さらに図-9は被害の著しかった八戸図書館および八

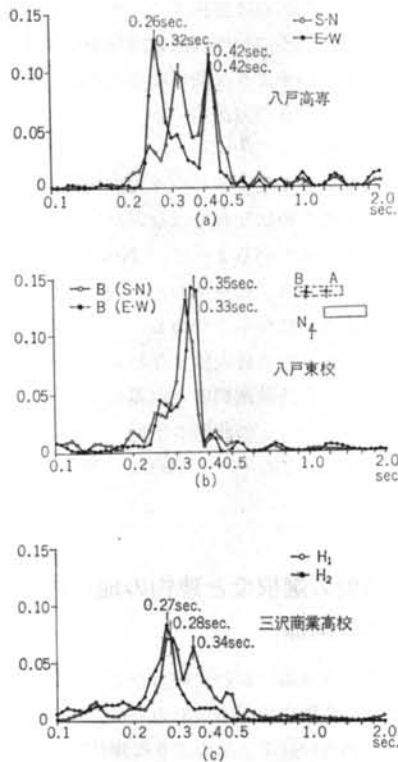


図-7 地震被害が著しかった学校建築の周囲地盤上の常時微動スペクトル

戸タワーの地盤のスペクトルであり、いずれも高い選択度を有している。もちろん選択度の高い地盤にあった建物がすべて被害を受けたということではない。図-10に示すように、東北電力八戸営業所や八戸日赤病院などは、かなり高い選択度を持つ地盤上に建っていた。しかしいずれも無被害であったということは、やはり建物の構造的な違いから説明されるものと思われる。すなわち東北電力八戸営業所は、建物の固有周期が示すように剛性がかかなり高い構造物であり、八戸日赤病院は地下室を有し、しかも周囲がドライエリアになっていた。

このように地盤の選択度と地震被害との間には、少なくとも有意なる関連を有するということだけは結論されようである。

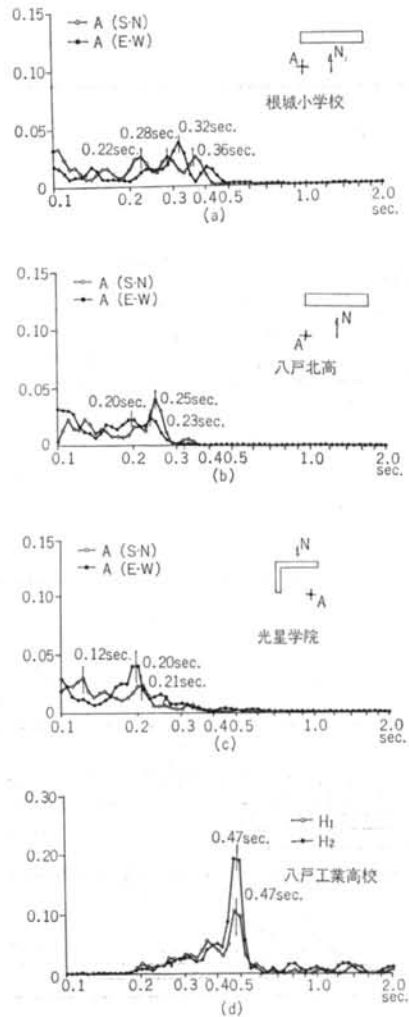


図-8 地震被害がほとんどなかった学校建築の周囲地盤の常時微動スペクトル

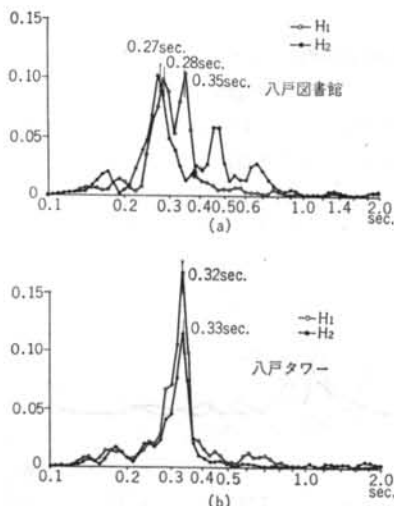


図-9 被害の著しかった八戸図書館や八戸タワーでは、やはり地盤の選択度は高い

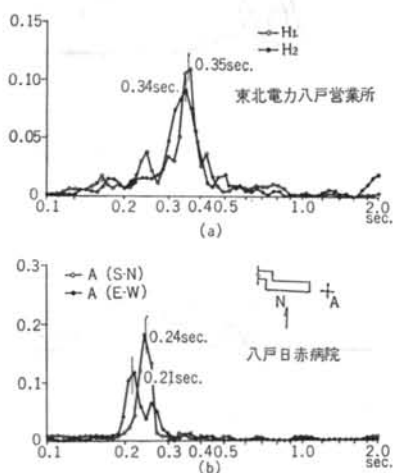


図-10 東北電力八戸営業所や八戸日赤病院では地盤の選択度が高いが建物の被害はなかった

## § 5. 地盤の選択度と地震スペクトルとの関係

震害後、八戸港湾のSMAC設置場所と、八戸高専のいずれも同一地盤上において、常時微動と幾つかの余震を観測した。八戸港湾では結局、同一地点において本震、余震および常時微動の3種の記録が得られたことになる。

これからの観測結果から非常に興味ある傾向を知ることができた。

建物名称	地盤の選択度*1		*2 地震被害
	S-N	E-W	
八戸日赤病院	0.181	0.121	○
八戸工業高校	0.194	0.105	○
八戸タワー	0.169	0.115	●
八戸東高校	0.134	0.146	●
八戸高専	0.118	0.108	●
八戸図書館	0.105	0.105	●
東北電力八戸営業所	0.108	0.092	○
八戸グランドホテル	0.099	0.092	○
三沢商業高校	0.073	0.086	●
八戸市民病院	0.061	0.083	○
根城小学校	0.024	0.041	○
八戸北高校	0.041	0.025	○
光星学院	0.032	0.038	○

注) \*1 地盤の選択度はすべて常時微動のスペクトルから読取った

\*2 ○ほとんど被害を受けなかったもの  
●構造物に著しい被害を受けたもの

表-2 地盤の選択度と建物の地震被害一覧表

まず、図-11は八戸港湾における本震、余震それに常時微動のスペクトルを示したものである。一見して相互の類似性は極めて低いことがわかるであろう。卓越する周期に至っては、全くばらばらであるといわざるを得ない。

もしこのような地盤を二三回経験すれば、地震時の地動と常時微動のスペクトル特性の間には、全く相関性がないと早合点してしまうかもしれない。

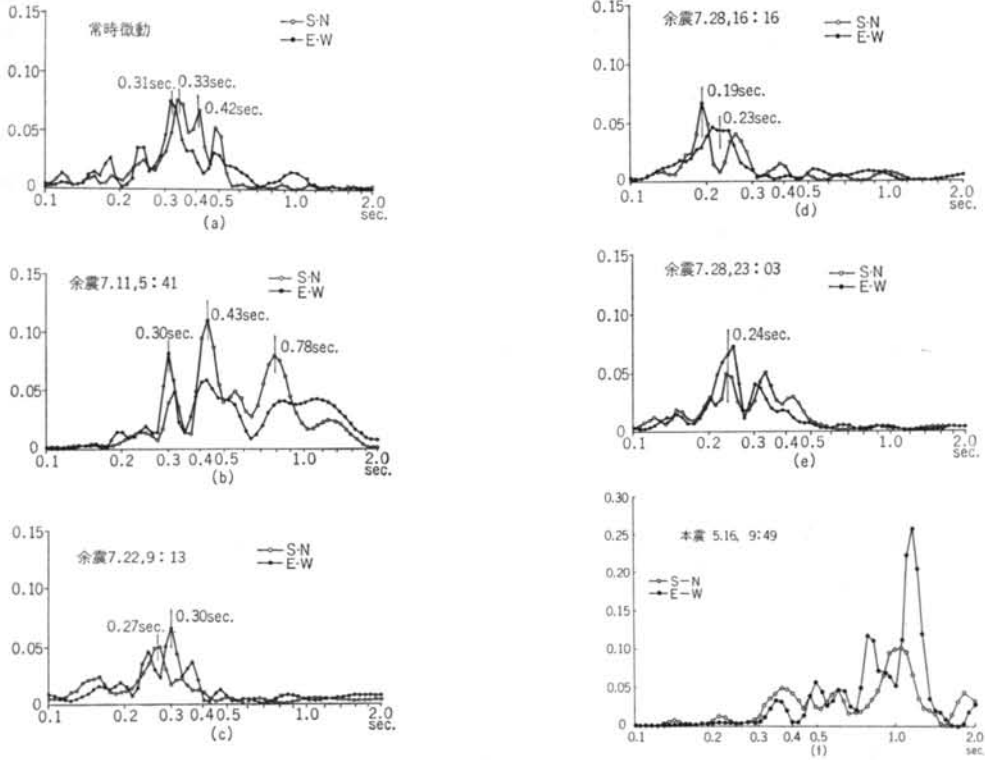
しかしそれと全く反対の傾向が八戸高専の地盤上において観測された。図-12は八戸高専の地盤上で観測された常時微動と幾つかの余震のスペクトルを示したものである。ここではきまってほぼ同一周期に著しく卓越するピークを発見することができる。実は多くの余震の中には、ごく少数ではあるが、その周期に卓越するピークを持たないものもあった。その問題に関しては次章で検討することにして、とにかく八戸高専の地盤は、常時微動および余震において同一周期に卓越する確率が極めて高いということだけはいえる。

しかも、八戸港湾のスペクトルの形と比較すると、八戸高専の場合は選択度が著しく高いことがわかるであろう。すなわち選択度の高い地盤は、地震時に同一周期に卓越する確率が高く、しかもその卓越周期は常時微動の周期と一致すると考えられる。一方選択度の低い地盤では、地震時にある特定の周期に共通して卓越する確率は

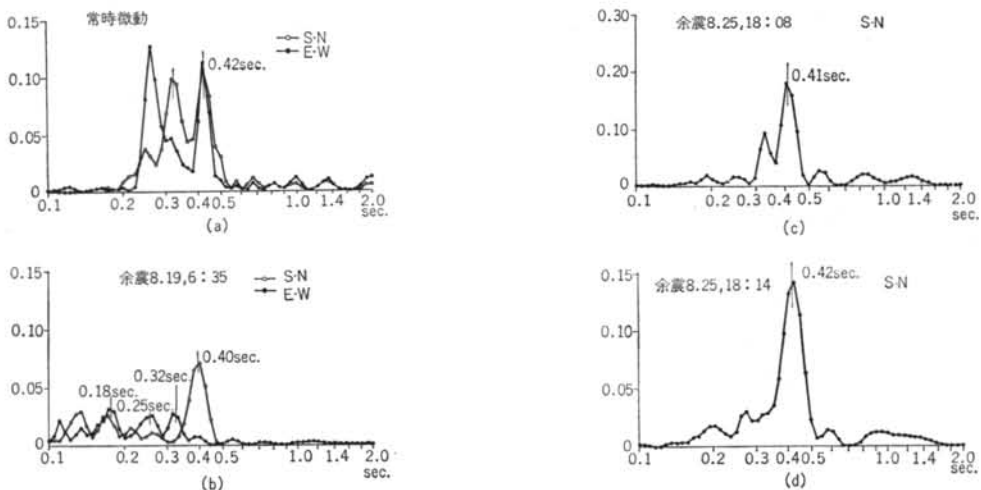
低く、常時微動の周期との相関性も低いといえそうである。

このような傾向はつぎのように説明しても無理ではない。すなわちスペクトルに現われる選択度の高いピークは、地表層において誘発されたものであり、もし地表にそのような周波数の選択性能がなければ、入射波のスペク

トルがそのまま地表に現われて比較的低い選択度特性を示す。もし地表付近において、前者は明確な成層を形成し、後者はほぼ一様な地盤構成になっているならば、金井博士の重複反射理論<sup>2)</sup>によって、そのような特性を容易に説明することもできる。



図—11 八戸港湾SMAC位置における、常時微動、余震、本震のスペクトル比較



図—12 八戸高専における常時微動および余震のスペクトル比較

## § 6. 地表動と地震スペクトルとの関係

もし、地表付近における地震波の伝達機構を、基盤に入射する地震波のスペクトル密度が一様で、地表層における実体波の重複反射だけで処理しようとする、時にはさまざまな矛盾を生ずる。例えば、八戸港湾の場合、重複反射する地表層がなかったとしても基盤に入射する地震波そのものが、すでにかなり顕著なスペクトル特性を有していると考えざるを得ない。また図-13に示すように、八戸高専においても5~6回に一度の割合で、共通のピークが現われない地震が観測された。実体波の重複反射からでは、このような現象は説明されない。実際の地盤構成と波動の伝播機構の複雑性を考えると、これらの問題を解析的に解くことは不可能に近いのではないだろうか。

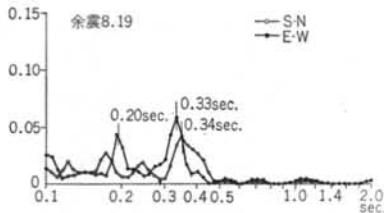


図-13 八戸高専においても 0.4sec. 付近にピークのない地震が来ることがある

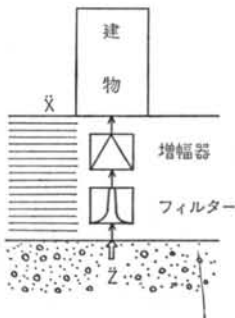


図-14 地表層の物理的構成

しかしわれわれはそれらの解析的構造は知らなくても、今までの観測によって、地表層は一種のフィルターとしての特性と、増幅器としての特性を持っていることだけは分かった(図-14)。

しかもそれらの特性は常時微動なり地震動の観測によって、個々の地盤についてとらえることができる。フィルターとしての特性は、基盤からホワイトノイズが入射したときの地表に現われるスペクトル特性であり、その時の基盤と地表との平均パワーの比を増幅率と考えればよい。この場合、基盤におけるスペクトル特性を考慮すれば、基盤をどの地層で考えてもよいことになる。

いま基盤から入射する波のスペクトルを  $G(\omega)$ 、 $G(\omega) = 1$  なるホワイトノイズが入射したときの地表に現われるスペクトル特性(以後これを地表層のスペクトル特性と呼ぶことにする)を  $S(\omega)$  とすれば、地表に現われる波の平均パワー  $R(0)$  は

$$R(0) = \int_0^{\infty} G(\omega)S(\omega)d\omega \quad \dots(6)$$

から計算され、そのパワースペクトル  $P(\omega)$  は

$$P(\omega) = G(\omega)S(\omega) \quad \dots(7)$$

で与えられる。

これは単に2つのスペクトルについて、同一周波数成分のスペクトル密度の積として計算されるから甚だ便利である。図-15は選択度の高い地盤にその周波数に卓越した入力波と、その周波数成分をほとんど持たない入力波が入射した場合の地表のスペクトル特性を模式的に示したものである。

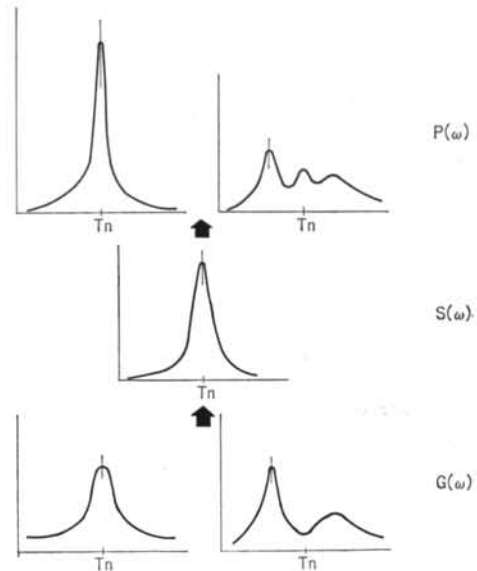
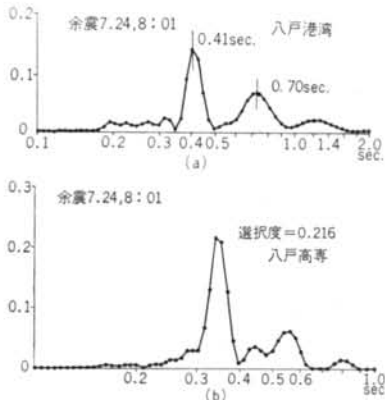
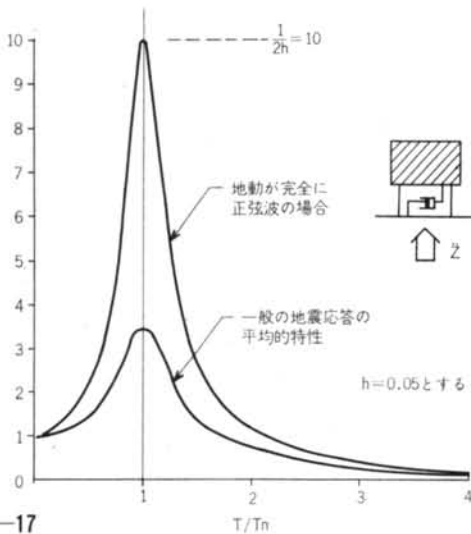


図-15 スペクトルの重ね合例

同図から、選択度の高い地盤にその周期にピークを持つ入力波が入ると、地表動の選択度はますます大きくなり、その平均パワーそのものもかなり大きく増幅されることが理解されよう。このような現象を実測資料から確認する目的で図-16を見ていただきたい。図-16(a)は八戸港湾で記録された余震のスペクトルである。このスペクトルは先に述べたように入力波のスペクトルに近い特性を有している。そのスペクトルには八戸高専の地盤の卓越周期約 0.4sec. にピークを有している。しからばそのような地震が八戸高専の地盤に入射したならば、ますます選択度の高いスペクトル特性を持った地動が誘発されると想像される。図-16(b)はその地震と同時に観測をした八戸高専でのスペクトルを示したものである。想像通り一般に八戸高専における地震スペクトルの選択度は0.10~0.15であるのに、この場合は実に0.216になっている。



図一16



図一17

不幸にしてSMACの記録から、本震時の入力波が0.4sec. 付近にピークを持つものであったため、八戸高専の地盤は本震時に特に著しく大きく揺れたものと推定される。

つぎに地動が高い選択度を示す場合、耐震上なぜ不利かということについて簡単に触れておこう。第一に先に述べたように、地表における平均パワーすなわち地動そのものが大きくなることである。特に、入力波と地表層のスペクトルのピークが一致した場合に著しい。第二に選択度が高いということは、ある特定の周波数成分が大部分を占めるということである。すなわち波形はかなり正弦波状になる。図一17に示すように、建物の地震応答

を考えたとき、一般の地震では地動に対する加速度比 $\bar{S}_a$ は、 $h=0.05$ のとき最大値はせいぜい3~4であるが、入力波が正弦波になると共振時の最大加速度比は10になる。すなわち、地動加速度が同じであったとしても、建物の地震応答に対しては選択度が高い場合著しく不利になる。

## § 7. おわりに

以上述べたような原理によって、地盤と地震時の地動との関連が案外うまく説明される。特につぎのような疑問に対しては一応の説明がつけられる。

- (1) 八戸港湾において本震、余波、常時微動の卓越周期が共通しない。
- (2) 八戸高専において多くの場合、ある特定の周期にきまってピークを生ずるが、時にはそのピークが全くないこともある。
- (3) 地盤の卓越周期と建物の固有周期に近いのに、建物が本震時に大きく揺れた形跡が全くない。
- (4) 地盤の卓越周期と建物の固有周期が離れ、しかも地動もそれほど大きくないと想像されるのに、建物の被害が案外著しい。

本紙では、十勝沖地震に関して行なった調査資料をもとにして、地盤の周波数特性と地動との関連について、考え方の原理を定性的に進めてきた。今後このような考え方を骨子にして、定量的な解析を進めていく予定にしている。十勝沖地震による建物被害の原因解明に、いささかでも寄与するものがあれば幸いである。

## ■ 謝 辞

本紙の説明に使用した十勝沖地震調査資料の現地観測および分析には、清水建設研究所の広瀬道孝君、伊藤哲次君の協力があつた。また八戸港湾のSMAC記録は、東工大小林研究室で読取られたものを使用させていただいた。さらに本研究において、清水建設の大築志夫研究所長から多くの貴重な助言を賜わつた。末筆ながら上記諸氏に深い感謝の意を表する次第である。

## <参考文献>

- 1) 妹沢克惟：“地震波によって土地の固有振動が誘起される可能性について” 地震研究所彙報 No. 8, 1930
- 2) 金井 清：“卓越震動が現われるための地盤の条件” 地震研究所彙報 No. 35, 1957
- 3) 金井 清：“地震動の卓越周期について” 地震研究所彙報 No. 37, 1962