

地盤震動特性に関する二、三の考察

CONSIDERATIONS ON THE CHARACTERISTICS OF
SEISMIC MOTION IN THE GROUNDS浅田 秋江*・河上 房義**
By Akie ASADA and Fusayoshi KAWAKAMI

1. ま え が き

最近、構造物の耐震設計を行う際、耐震設計用地震動としての入力地震波に地盤の震動特性を考慮しようという動きが活発になり、各方面で盛んに地盤の弾性波探査、常時微動測定、地震動観測あるいはS波の重複反射理論に基づく地盤の地震時応答解析が行われている。

一般に、構造物への入力地震波の特性は概念的に次のように表わされる。すなわち、地震の発生機構に基づく震動特性（地震の規模、震源距離などによるもの）を $E(t)$ 、地震波の伝ば径路で生じる震動特性（径路における地震波の反射、屈折、散乱、吸収などによるもの）を $C(t)$ 、さらに地盤構造に基づく震動特性（実体波の重複反射、分散性 Rayleigh や Love 波の伝ば性などによるもの）を $G(t)$ とすると、構造物への入力地震波の震動特性はこれらの積、 $E(t) \cdot C(t) \cdot G(t)$ で表わされる。

しかるに、現在工学の分野で盛んに行われている地盤の地震時応答解析では浅い地盤におけるS波の重複反射のみを対称とした、いいかえれば、地盤上に現われる地震動特性 $E(t) \cdot C(t) \cdot G(t)$ のうち $G(t)$ の一部の特性にしか注目しないかたよった取扱いが多いように思われる。たとえば、1968年十勝沖地震の際に八戸港に設置されているSMAC強震計の記録に2.5secの加速度振幅が著しく卓越した事実はたかだか深さ20m程度の地盤の弾性波探査や重複反射理論に基づく地震時応答解析によってはなんら説明することができず¹⁾、深さ380mの深い地盤構造を対称とすることによって、はじめて2.5secの卓越性を説明できるし、また、周期2.5secで大きい加速度振幅を生じた事実を説明するとなれば、どうしても震源および伝ば径路での特性について検討しなければならぬといわれている²⁾。さらに、嶋³⁾が強調し

ているように、1968年十勝沖地震の八戸港におけるSMAC記録のEW成分がRayleigh波であり、NS成分がLove波であるとすれば、S波の重複反射理論そのものの適用すら場合によっては再考しなければならない。このように、地震時の地盤の挙動は最近工学の分野でしきりに行われている浅い地盤に対するS波の重複反射に基づく応答解析で解決されるにはあまりにも複雑であって、さらに震源あるいは伝ば径路のスペクトル特性、深い地盤構造を反映した長周期の実体波あるいは表面波の伝ば性を考慮していくものでなければ真に把握されるものではない。

しかしながら、震源あるいは伝ば径路に基づく特性すなわち $E(t)$ あるいは $C(t)$ については地震学の分野においてもいまだ未知の問題が多く、とうてい、著者の知識の及ぶところではないが、最近の報告によれば⁴⁾ 地盤の強震動特性は $E(t) \cdot C(t)$ よりも $G(t)$ にきわめて強く支配されるといわれている。したがって本研究では特に地盤構造に基づく震動特性 $G(t)$ のうち、現在見過ごされがちな深い地盤構造を反映した長周期の実体波あるいは表面波の工学的重要性を過去の震害事実と観測事実を通して再確認し、さらに耐震設計用地震動に地盤の震動特性を考慮する際、長周期の実体波あるいは表面波が切っても切り離せない要因であることを実地盤で行った測定および理論計算結果によって再認識したことを述べ、最後にこれらの要因を実際の耐震設計に適用する際の取扱いについて検討してみた。

2. 深い地盤構造を反映した実体波（とくにS波）の工学的重要性について

過去に、マグニチュード6以上の地震が発生すると、各地方気象台で観測される地震記録には必ずといっていいくらいに長周期の最大変位振幅が現われる（一例として表-1に秋田地方気象台における地震観測結果を示し

* 正会員 東北工業大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

表一 秋田地方気象台における地震観測値と
その付近で観測した著者らの観測結果

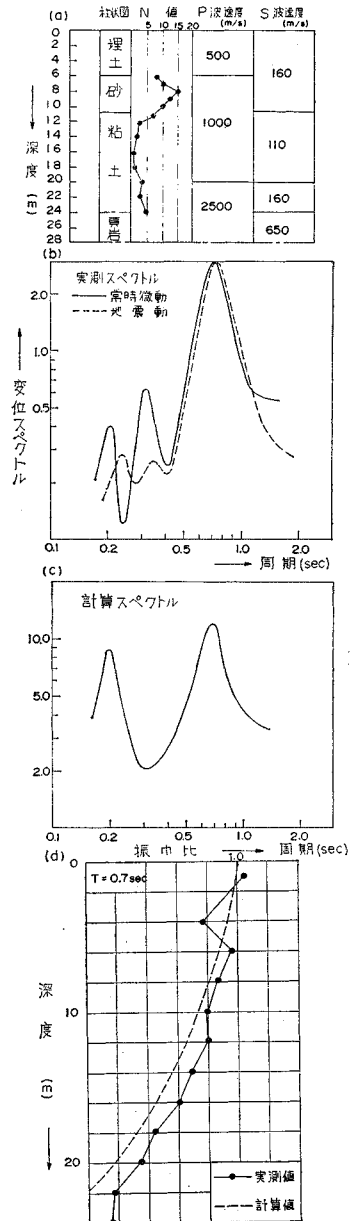
	震源位置 (緯度, 経度)	震源深さ (km)	発震時刻 (M)	N-S		E-W		U-D		
				最大変位(mm)	周期(sec)	最大変位(mm)	周期(sec)	最大変位(mm)	周期(sec)	
高森県西方沖地震	40°30'N 139°36'E	40	5:39:57	7.2	16.8	3.1	18.8	4.9	8.4	4.3
秋田県地震	38°24'N 139°12'E	40	5:39:16	7.5	20.5	4.8	20.2	2.1	10.5	3.6
1968年沖津地震	46°44'N 143°35'E	0	5:43:51.6	7.9	41.8	2.5	41.3	3.3	32.0	4.3
秋田県沖津地震	39°12'N 140°45'E	0	5:45:10.6	6.2			45.0	5.4		
著者の観測例	秋田地方気象台より北方30km離れた八郎海堤防地区で秋田県沖津地震発震時に 0.7mm, 1.3 sec 同地区上の常時微動の卓越周期1# 2.0 sec 秋田地方気象台より南方60km離れたあいののダム地区上で1階沖津地震時に0.45 sec									

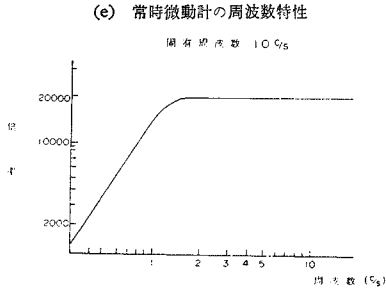
てみた)。これらの長周期成分は工学的分野でしばしば地表あるいは地中で観測される地震動あるいは雑微動記録に現われる卓越周期と比べて、その大きさにかなりの差があって、なんとなく不思議に思っていたものである。しかし考えてみれば当然なことで、地方気象台の1倍強震計は固有周期6秒であるのに対し、工学方面で使用している電磁型地震計のそれは約1秒程度であるために、1秒以上の長周期帯域の地震波形を変位量として記録することが困難であるということである。特に地中地震動を観測する際には換振器を地中に埋設するために、地盤の軟弱な場合には換振器の水準をかなり厳しく規制しなければならないので、いきおい、ばね定数の大きい、すなわち硬いばねを換振器の振子に使用することになる。したがって、地震動の測定範囲が短周期帯域に限定され、このために、加速度量の測定は安易になるが、変位量の測定が困難となる。このことが、工学的分野で、短周期帯域(1.0秒以下)での加速度量が重要視されてきた理由の一つにもなっているように思われる。

さらに、最近では固有周期1秒程度の速度型換振器を用いて、地表と地中の同時地震動観測を行い、その観測結果がS波の重複反射理論によりきわめてよく説明するといわれている。しかし、地中地震動観測では意識的に水平動成分(SH波)のみをとらえようとするあまり、ともするとS波の重複反射理論が適用されやすいような観測条件の設定(水平1成分による観測)をしやすい。つまりSH波と同時に表面波をもとらえようとする公平な立場に立った観測体制(たとえば三成分一点観測や三成分三点観測)が少ないように思われる。また、S波の重複反射理論計算に適用する地盤のS波速度をwell shooting methodで求める際にもその測定深度に限界があるため深い地盤のS波速度が求められず、したがって、深い地盤構造を反映する長周期成分がとらえにくいことになり、幸か不幸か結果的には、実測値と計算値とがたまたま短周期帯域では一致するが長周期帯域での両者の比較ができなくなる。またかりに、地動の加速度量を記録するとなれば長周期帯域の観測は技術的には容易であ

るが、八戸市における観測例²⁾のように、同じ震源の地震に対しても $M=5.8$ の地震では 0.3 sec の短周期しか卓越しないのに $M=7.0$ 以上になると 2.5 sec の長周期が卓越するという具合に、地震の規模の大きさによっても、励起される地盤の深さが異なってくるので、軽震のみを観測しても、地盤構造によっては強震時の地盤の挙動を把握できない場合もでてくる。

以上に述べた問題点の提起は、単的にいえば現在の地盤震動問題において1秒以上の長周期帯域の変位なり加速度なりの取扱いが工学的な分野できわめて軽視されていることに対して行ったものである。これらの問題提起





(f) A地盤における地震計の特性

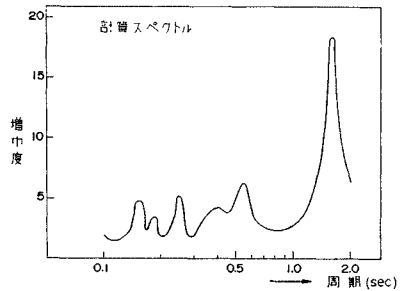
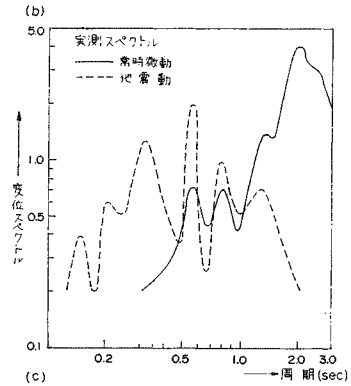
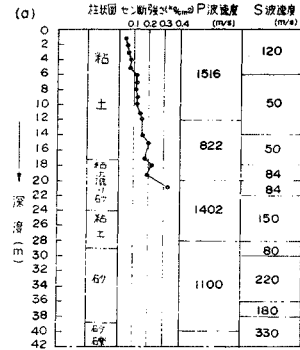
換振器	固有共振数	10 c/s
感度	感度	15 μ A/gol
増幅器	減衰比	$\times 1, \times 2, \times 3, \times 5$
二重積分器付増幅器	型式	CR積分回路2段式
	電圧増幅率	約 200倍
	入力減衰比	0, -10, -30 db
電磁オシログラフ	検流計固有周波数	50 c/s

図一 A地盤における実測および計算スペクトル

に対しては当然反論があると思う。その一つは、実地震時に1秒以上の深い地盤構造を反映する長周期帯域の変位や加速度が各種地盤で実際に卓越する可能性があるのかということであり、第二の反論は、もし地盤内で卓越するとしてもこれら1秒以上の長周期帯域の変位なり加速度が果して構造物の耐震性に大きな影響を与えるものだろうかということである。第一の反論に答えるために、著者らは各種地盤において地表および地中の常時微動の測定あるいは地震動観測を行い、かつ地盤の弾性波速度測定結果を用いて理論的考察をも加え、以下に述べるような検討を行った。

(1) 比較的浅い深さに振動インピーダンスの高い基盤が存在する地盤で、地震時応答に対して重複反射計算値と実測値が一致する例

A地点の地盤は柱状図および弾性波速度測定結果(図一(a))によると、3層の表面層から成り、深さ24mで振動インピーダンスの高い(S波速度比にして約4)頁岩に達している。この地盤上で測定した地震動と常時微動の実測スペクトル(図一(b))とS波の重複反射理論から求めた増幅度スペクトル(図一(c))とを比較すると、三つのスペクトルとも0.70secに卓越周期を有し、スペクトルの形もきわめて類似している。さらに、地中の常時微動を連続して測定した結果から求めた地中振幅分布と重複反射計算から得た地中振幅分布とが0.7secでかなり一致している(図一(d))。これらの事実から、比較的浅い深さに振動インピーダンスの高い基盤が存在するような、換言すれば振動インピーダンス比が比較的大きい地盤では現在行われているS波の重複反射理論によって実地震時の地盤の挙動をかなりの程度まで正確に求めることができる。



(d) B地盤における地震計の特性

換振器	検出方式 固有周波数 感度 測定周波数範囲	電磁速度方式 3 c/s \pm 1 c/s 0.2 μ cm / sec 1 ~ 30 c/s
増幅器	周波数特性 積分開始周波数	3c/s ~ 30c/s (フラット) 0.2 c/s より
電磁オシログラフ	検流計固有周波数	100 c/s

図二 B地盤における実測および計算スペクトル

(2) 静的には支持層であるとみなされる深さに振動基盤を仮定して、地表層の重複反射理論計算をしたものの地中常時微動の測定によるとさらに深い地盤構造を反映する長周期成分が現われる例

B地点の地盤柱状図(図二(a))をみると、39mの深さに静的には支持層であるとみなされる砂礫層が存在

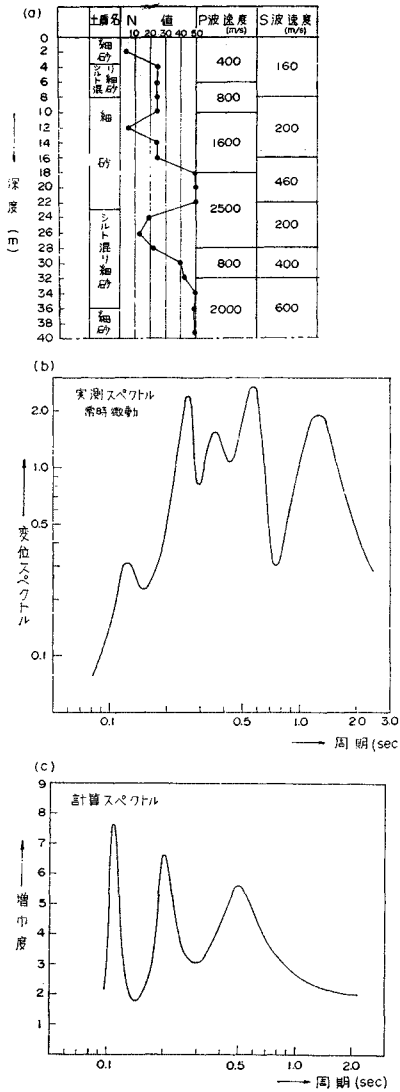


図-3 C地盤における実測および計算スペクトル

している。この層を振動基盤として地表層のS波速度(図-2(a))から、重複反射計算を行い、地盤の増幅度スペクトルを求めると、図-2(c)に示すように、1.60, 0.80, 0.55, 0.25 および 0.16 sec に卓越周期が求まる。一方、地震動観測によるとその実測スペクトルは、図-2(b)に示すごとく、1.33, 0.80, 0.55, 0.25 および 0.15 sec にピークを示している。両スペクトルを比較すると、最も長い周期を除いて他の卓越周期はすべて一致するので実測スペクトルに現われた 1.33 sec の成分は地震計の周波数特性(固有周波数 3 c/s)上の制約から 1.60 sec の成分が現われるべきところが 1.33 sec でカットされたのではないかと判断したがる。通常、その他の測定手段によって実測値を再確認することは少ないからこの地盤の一次の卓越周期は 1.60 sec であると解

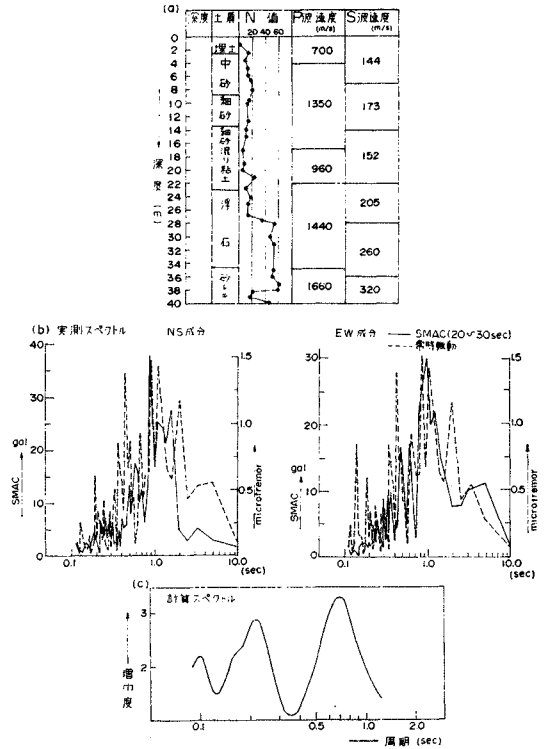


図-4 D地盤における実測および計算スペクトル

析することになるであろう。しかし、さらに地中常時微動を測定してみると、図-2(b)に示すように新たに周期 2.0 sec でスペクトルが顕著に卓越することがわかる。すなわち、振動基盤として仮定した 39 m の深さよりさらに深い地盤構造を反映した長周期成分が常時微動の測定からキャッチされることがわかる。

次に C 地盤(図-3(a))のように、地表からほぼ一様に砂層が堆積している地盤に対して、N値の分布から深さ 40 m のところを仮に基盤と考え、弾性波探査によりS波速度を求め、重複反射理論により増幅度スペクトル(図-3(c))を求めた。これによると地盤の卓越周期は 0.11, 0.2 および 0.5 sec となる。一方、地表および地下の常時微動を測定すると図-3(b)に示すように、計算スペクトルと同様に 0.11, 0.2 および 0.5 sec が卓越するが、さらに長周期の 1.0~1.5 sec のスペクトルがより顕著に卓越することが認められる。このことは、実際には 40 m 以深の地盤構造を反映した 1.0~1.5 sec のスペクトル成分が地盤内に潜在していることを示している。

さらに、もう一つの例としてD地盤について検討してみたい。図-4(a)のS波速度の分布から $V_S=320$ m/s(深さ 35 m)を示すところを振動基盤とすると、計算スペクトルには 0.1, 0.2 および 0.7 sec に卓越周期が現われる。しかし、常時微動のスペクトル(図-4(b))

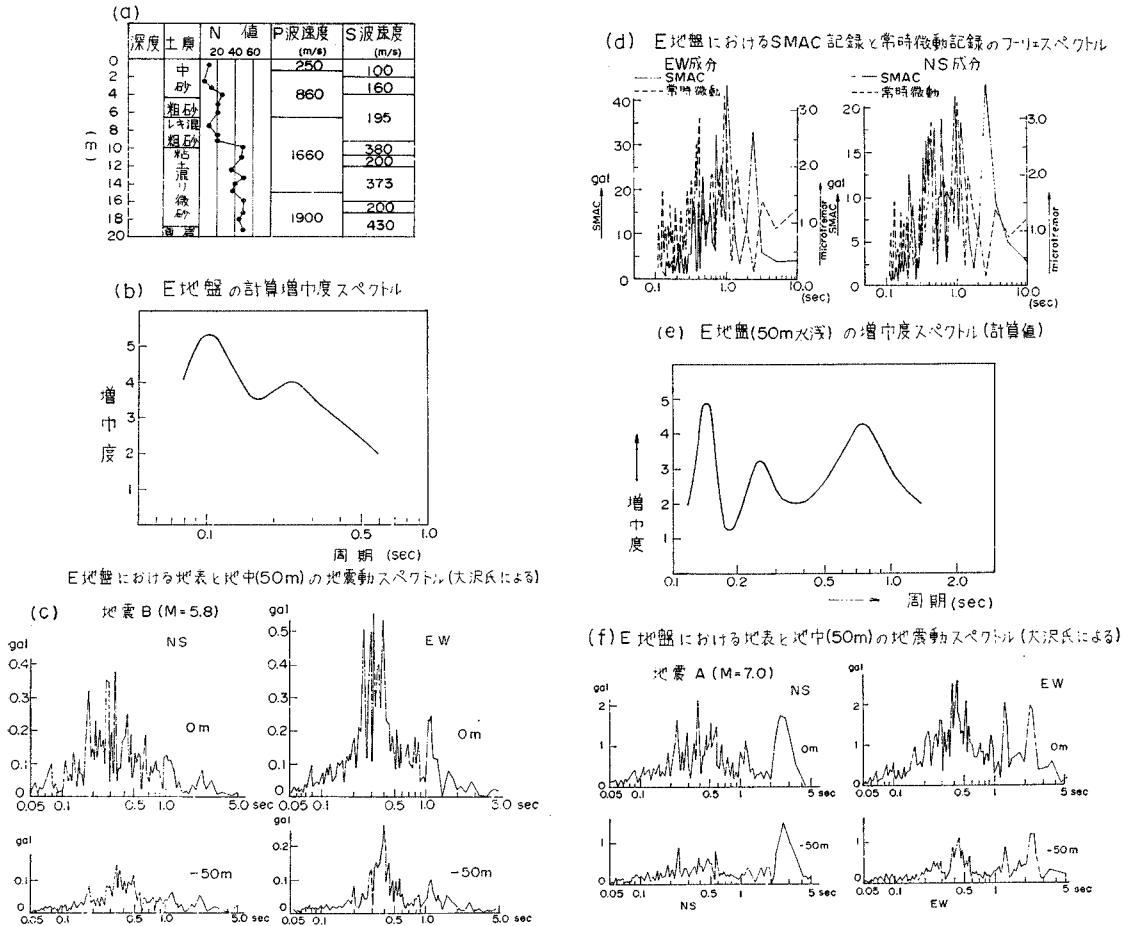


図-5 E地盤における実測および計算スペクトル

にはこれらの周期の他に 1.0 sec の卓越周期が現われてくるし、また SMAC 強震記録のスペクトル (図-4 (b)) も常時微動とまったく同じスペクトルを示し、1.0 sec の存在を裏付けている。すなわち、この地盤でも、S波速度を求めた深さよりも深いところに振動基盤が存在することがわかる。

- (3) 軽震観測あるいは常時微動測定によって振動基盤を再確認したつもりでも、強震動の際に、さらに深い地盤構造を反映する応答スペクトルが現われる例

E 地盤について 20 m までの S 波速度を測定し (図-5 (a)), 重複反射理論により 20 m 以浅の地盤の増幅度スペクトル (図-5 (b)) を求めると、0.1 sec と 0.25 sec に卓越したスペクトルが認められる。一方、同じ地点において観測された $M=5.8$ の地震記録 (地震 B) のフーリエスペクトル (図-5 (c)) をみても 0.25~0.3 sec にピークを示している。この両スペクトルを見た限りにおいては、地盤の固有周期は 0.25~0.30 sec であるよ

うに思われる。しかし同じ地盤で常時微動を測定すると図-5 (d) に示すごとく、前述した周期よりもさらに長い 0.8, 1.0 および 1.6 sec の卓越成分が現われてくる。そこでさらに 50 m までの S 波速度を求め、重複反射による増幅度スペクトルを算出すると、図-5 (e) に示すように、0.8 sec の卓越周期はでてくるが、どうしても 1.0 sec と 1.6 sec の卓越が認められず、これらは 50 m より深い地盤構造を反映した成分であると認めざるを得ない。しかるに、その後、 $M=7.0$ と 7.9 の地震が発生し、それらの記録のフーリエスペクトルをみると (図-5 (d), (f)), 2.5 sec にきわめて卓越したスペクトルが現われている。この長周期成分は、大沢ら²⁾によると、深さ 380 m までの地盤構造を反映したものであり、その振幅レベルはさらに、震源機構に基因するものとしなければ解釈できないといわれている。このように、常時微動測定やマグニチュードの小さい軽震観測によって振動基盤を求め地盤の増幅度スペクトルを算出し、実測値と計算値との一致を確認したうえで構造物への入力地震波を求めたつもりでも、マグ

ニチュードの大きい地震動が発生した場合、事前に確認した振動基盤よりもさらに深い地盤構造を反映したスペクトルが卓越してくる場合がある。

結局、上述した5地点の実測例から得られた結果を要約すると次のようになる。A地盤のように、比較的浅い深さに振動インピーダンスの高い基盤が存在する地盤で重複反射計算と地震動観測あるいは常時微動測定などの実測結果とが一致する場合、つまり地盤の実地震時の応答特性が現行の計算によって比較的容易に再現されるような場合もある。しかし、多くはB地盤のように、静的には支持層である地層を振動基盤と仮定しても、常時微動測定などの検証によると、さらに深いところに基盤が存在する場合がみられる。ましてや、CおよびD地盤にみられるように静的にすら支持層とみられない地層を基盤と仮定しても、とうてい、正確な地震時の挙動を求めることは期待できない。このように、現行の地盤に対する地震時応答解析法は地震動観測や常時微動測定などの動的測定手段を併用せずに、静的な調査結果のみを参考にして便宜的に振動基盤を設定し、その深さまでの弾性波探査を行い、S波の重複反射理論により地盤の増幅度スペクトルを求めているが、このような方法では実地震時の真の地盤の挙動を把握できないのみか、長周期構造物の設計に対してはかえって危険な情報を提供することになりかねない。さらに、E地盤のように動的測定手段によって基盤の存在が検証されたとしても、地震の規模によっては、これらの測定手段ですら測定しえないほどの深い地盤構造を反映した長周期スペクトルや震源からの特性が卓越したスペクトルが現われる。しかし、このように長周期の問題を力説しても工学的にはどの辺の帯域が最も大事なものか、つまり構造物側からみて最も影響を受ける帯域としてはどの辺までをとればよいかという議論に焦点を持ってこなければいけない。これは当然のことながら、構造物への入力地震波としては構造物の固有振動を励起させるような周期帯域をもつものが重要視されるべきであって、長大構造物や超高層ビルを除いた多くの構造物の固有周期がほぼ1.5 sec以下(表-3)であることからみれば、それほどまでに深い地盤構造を反映した長周期の成分が多く多くの構造物に対して大きな影響は与えないであろうということである。たとえば先程の例でいえば、E地盤上に建設される構造物の固有周期が0.25 sec前後のものならば、深さ20 mまでの地盤構造を反映する周期特性を考慮すれば十分であろうし、また、構造物の固有周期が1.0 sec程度であれば、50 mの深さまでの地盤特性を考えればよいということである。しかし、表-2に示すような予定される構造物が長スパンの橋梁とか超高層ビルであるとするれば、その固有周期が2.0 sec以上になるであろうから、このような場

合には、かなり深い地盤構造に対する動的調査かぜひ必要となるということであろう。

結局、この節の結びとして提言したいことは、地震の規模によってはいくらかでも深い地盤構造を励起する長周期の成分は現われることは事実であるが、“地震基盤”という考え方に代表されているような構造物に影響を及ぼさない長周期成分までは、われわれ工学の分野では取り上げる必要はないと思う。だからといって、現在行われているような安易に浅い地盤の特性のみを考え、構造物に最も影響を与えるべきより深い地盤構造を反映する周期成分を、ともすると見過ごしてしまう重大な過失をおかすことはなおさら危険であるといわねばならない。

3. 表面波の工学的な重要性についての検討

長周期の地震波が卓越するような地盤では、前節で述べたような実体波はもちろんのこと、高次モードの表面波が卓越するので、耐震設計用地震動として、さらに表面波を考慮する必要がある。かりに、表面波が構造物の震害に大きな影響を及ぼすであろうという立場にたつて、過去の震害を振り返ってみると、男鹿西方沖地震(1964)による八郎潟西部承水路堤防、新潟地震(1964)による越後線および新潟空港滑走路の縦断方向に発生した波状の陥没など分散性 Rayleigh 波によると思われるこん跡が残されているし、また一級国道7号線海老ヶ瀬地区の道路に発生した蛇行は Love 波によるこん跡と思われる。さらに地震観測結果から、たとえば1968年十勝沖地震時の八戸港湾で観測された SMAC 記録の NS 成分が Rayleigh 波であり、EW 成分が Love 波であるといわれているし、また震源から、650 km も離れている東京都内の超高層ビルが表面波により大きく揺れた事実などを見聞すると、表面波を考慮しなければならない工学的必要性が痛感させられる。特に昨今、耐震設計用地震動はS波の重複反射応答解析法により算定する傾向がきわめて強いが、震害に及ぼす表面波の影響が大きいとするならば、現行のせん断波形を対称とした構造物の耐震設計や土の動力学実験への入力地震波を根底から考え直す必要がある。このような観点から、本節では、表面波の工学的な重要性について、震害調査、実測および理論計算の三面から検討した結果を述べたものである。

(1) 震害および地震観測に現われた表面波の挙動

過去に発生した震害を調査する際、われわれは、往々狭い範囲に限った調査を行う嫌いがあった。震害に影響を及ぼす地震波が実体波であるならば、局所的な調査(いわゆる点の調査)でも震害機構を知り得るが、震害に関与する地震波の主成分が表面波であるならば、広範

困の面的調査を行わなければ震害機構を解明することはむずかしい。

ここで、仮に構造物の震害に大きな影響を及ぼした地震波が表面波であったという仮定に立って、改めて過去の震害を振り返ってみたい。男鹿西方沖地震(1964)による八郎潟中央干拓堤防の沈下状況を図-6に示したが、沈下は堤防の延長方向に対して100~200m間隔の周期性をもって発生している。実測によれば、地盤のRayleigh波速度は60~120m/s、固有周期は約2secであるから、波長は120~240mとなり、沈下の間隔がほぼRayleigh波の波長と同程度となっている。さらに、新潟地震(1964)による新潟空港滑走路および誘導路の縦断方向に発生した波状の変形(図-7)、あるいは国鉄越後線(関谷~白山間)築堤の縦断方向に生じた波状の陥没(図-8)をみると、いずれも100~200mの周期的間隔をもって波状の変形を示し、Rayleigh波による被害の様相を呈している。さらにまた、一級国道7号線海老ヶ瀬地区の道路の蛇行状況(図-9)は、あたかもLove波のこん跡を残しているかの状況を示している。

一方、実地震観測によって表面波が記録された例もある。松代地方に群発した強震を東京で観測した例によると5sec程度の周期をもった表面波が卓越することが知られている。さらに1968年十勝沖地震のときには、震源から650kmも離れていた東京で、超高層ビルが非常に大きく揺れた事実も表面波の影響によると考えられているし、また嶋³⁾によれば、十勝沖地震の際、八戸港湾で得られたSMAC記録を解析した結果、EW成分の主要動はRayleigh波であり、NS成分はLove波であるともいわれている。さらに、図-10に著者らが観測した十勝沖地震時の仙台火力発電所構内地盤の記録を示したが、同図で↓印以後の位相は初動以後の時間の長さを考えると、S波をはじめとする実体波によるとは考えられず、実体波入射後に新たに入射してきた表面波のものと思われる。

以上述べた過去の震害例あるいは実地震観測例から見ても、過去に表面波がなんらかの形で構造物に被害をもたらしたことが推測できるし、また種々の地震動観測によ

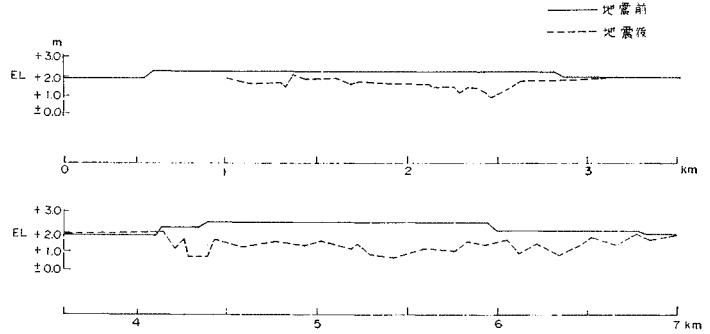


図-6 1964年5月7日の男鹿沖地震による八郎潟干拓堤防の沈下

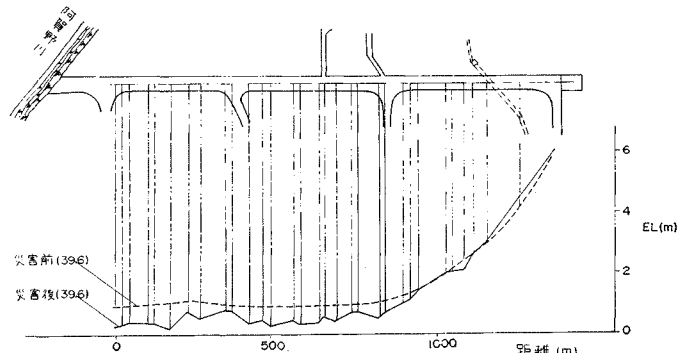


図-7 (a) 新潟地震により新潟空港A滑走路に生じた波状の変形

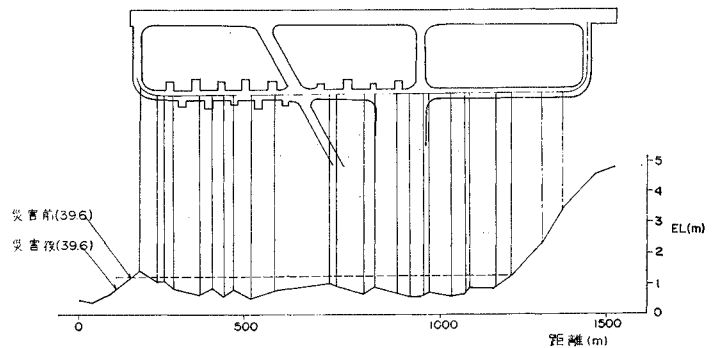


図-7 (b) 新潟地震により新潟空港誘導路に生じた波状の変形

り、表面波が構造物に大きな振動作用を与える事実も説明された。したがって、構造物の耐震設計用地震動としては、S波のみでなく、表面波をも考慮に入れられるような方向に、今後研究を進めていく必要があろうと思われる。その第一段階として、次節では、地盤内での表面波の伝ば特性をS波のそれと定量的に比較検討するために、地表と地中の常時微動同時測定および地表の常時微動三点測定を行い、さらに実測値に対する理論的検証をも行った。なお、波動伝ばの理論については、地盤の固有振動が実体波の重複反射によって生じるという説の他に、表面波が地盤内を伝ばする場合でも地盤の固有振動

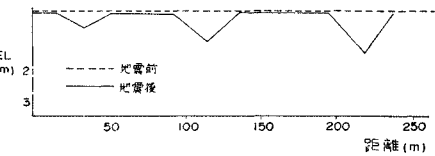
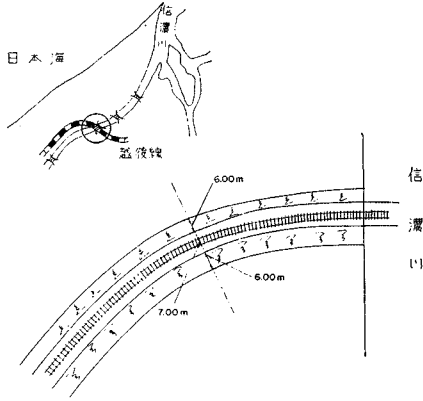


図-8 越後線(関谷~白山間)に生じた波状の変形

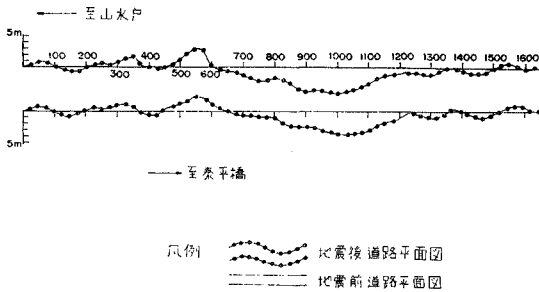


図-9 一級国道7号線海老ヶ瀬地区の道路の蛇行状況

が現われることが、Stonley⁵⁾によって指摘されてきた。そこで、著者らは常時微動は表面波から成るという立場に仮定にたつて、分散性 Rayleigh 波の理論分散、水平動と鉛直動との振幅比、および地中振幅比分布を、

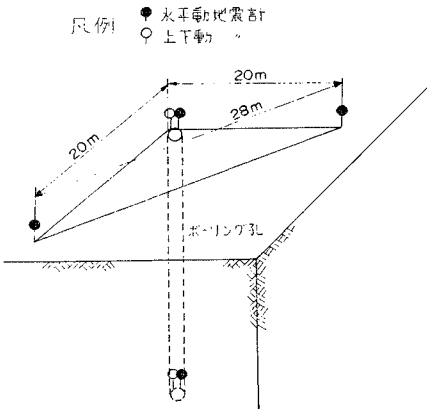


図-11 常時微動の測定

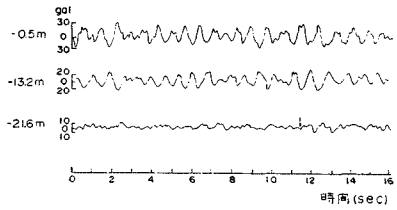


図-10 仙台火力発電所構内地盤で記録された1968年十勝沖地震波形

Haskel⁶⁾の方法により理論計算を行った。さらに Love 波の分散および地中振幅比分布も同じ手法を用い、振幅関数は佐藤の方法⁷⁾を用いて計算を行った。

(2) 比較的浅い深さに振動インピーダンスの高い基盤が存在し、基盤上の地表層がほぼ均質な地盤でS波の重複反射と同程度に分散性 Rayleigh 波が卓越する例

図-11 に示すように、A 地盤上に4個の換振器(固有周期 1.0 sec, 水平動成分3個, 鉛直動成分1個)を設置して、三点観測を行い、地中ボーリング孔を穿ち、孔中用換振器(固有周期 1.0 sec, 水平・鉛直それぞれ1成分)をそう入して、2 m 間隔で地中常時微動を測定した。

地表の3点測定から求めた波の軌跡は 図-12 に示すごとく、Rayleigh 波的な軌跡を描くものが大部分を占め、Love 波的なものも若干見られる。いずれにしても常時微動が表面波から成っている傾向が強く現われている。さて常時微動三点測定から得られた種々の周期をもつ波の伝ば速度は常時微動が表面波であるという立場にたてば実測された分散と解釈される。これらの実測値とすでに求めた理論分散とを比較したものが 図-13 である。この図によると実測分散は卓越周期付近で分散性 Rayleigh 波(M_{11} 波)および Love 波(L_0 波)の群速度および位相速度曲線上にのっている。このことは、常

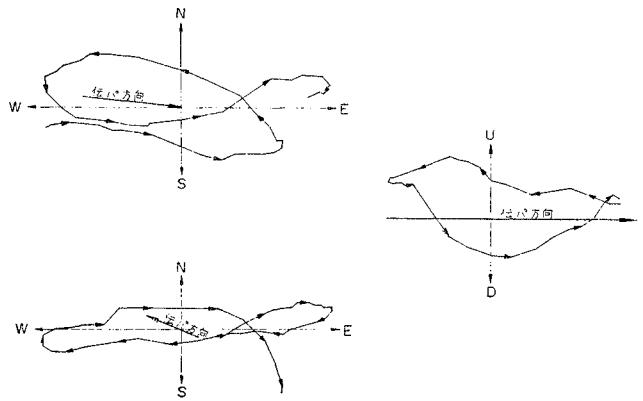


図-12 波の軌跡

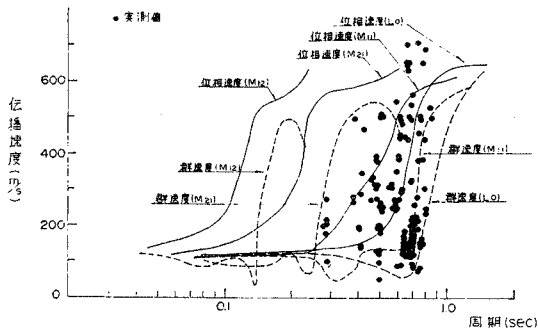


図-13 実測分散速度と理論分散曲線

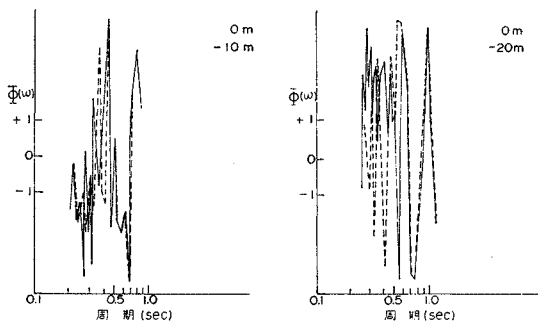


図-15 地表と地下の位相スペクトル

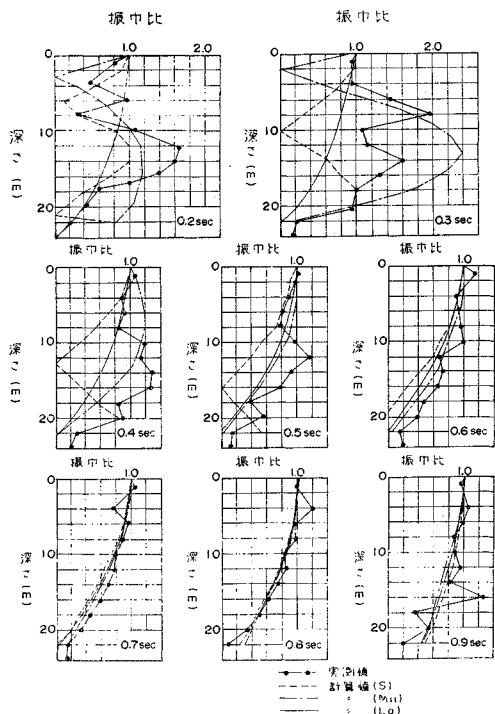


図-14 地中振幅分布

時微動の水平動で卓越振動が生じるのはS波の重複反射と同程度に表面波によるものも結構大きいことを示している。次に、地中で測定した常時微動の振幅スペクトルをそれぞれの周期について地表のスペクトルに対する比を深さ方向にとると 図-14 に示す地中振幅比分布が得られる。さらに、同図に理論的に求めたS波の重複反射、分散性 Rayleigh 波および Love 波による地中振幅分布をも示した。図から、0.2 および 0.3 sec においてはそれぞれの理論値と実測値は一致しないが、分散性 Rayleigh 波と S 波の重複反射による振幅を重合したものは実測値と一致するように思われる。卓越周期 0.7 sec より長い周期では、いずれの理論値もほぼ同じ振幅分布を示し、実測値ともほとんど一致している。以上のように、分散曲線および地中振幅分布における理論値と

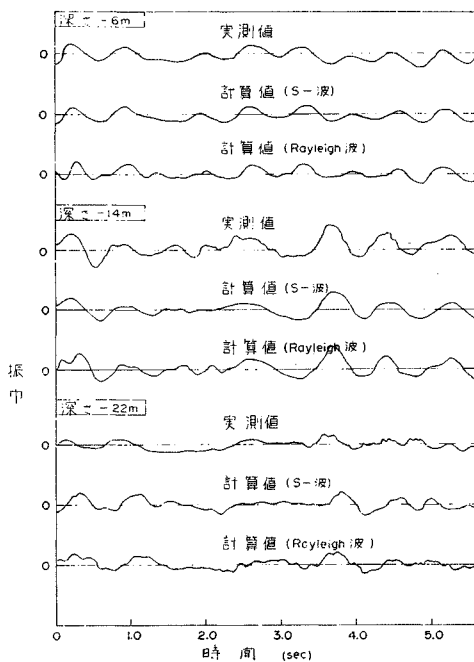


図-16 実測波形と計算波形の比較

実測値の対比から、この地盤ではS波の重複反射と同様に分散性 Rayleigh 波と Love 波の卓越が認められる。しかし、地表と地中における位相スペクトル (図-15) によると、0.4 sec 以下で地表と地中で位相が逆転しているため、これは理論的にあり得ないため、地震波動が Love 波から成るとい説がうすくなる。したがって、残った分散性 Rayleigh 波と S 波の重複反射のいずれが、この地盤で卓越するのかを知るために、さらに両者の波形の比較を行った。図-16 に地表と地中 6m、14m および 22m における実測波形と S 波の重複反射および Rayleigh 波による理論波形を描いてみた。深さ 6、14 および 22m において実測波形は S 波の重複反射と Rayleigh 波の理論波形のいずれにも類似していることからみて、工学的には、波動を S 波の重複反射として取り扱ってもよいし、また Rayleigh 波として取り扱って

もよい。

以上述べた考察から、比較的浅い深さに振動インピーダンスの高い基盤が存在し、基盤上の地表層が軟弱で等質な地盤では本質的には分散性 Rayleigh 波が最も卓越するが、工学的には分散性 Rayleigh 波も S 波の重複反射も同じ程度に卓越していることがわかる。なお、Love 波については地表と地中での位相が逆転していることから、Love 波が存在しにくいといったが、見方によっては Love 波ではなく S 波であるとすれば当然位相が逆転するわけであるから、この矛盾さえ訂正されれば、この地盤では Love 波の卓越性も結構高いことになる。またその方が理論的にも妥当性があるように思われる。

4. 耐震設計用地震動としての長周期実体波および表面波の取り扱い

2. および 3. では、それぞれ深い地盤構造を反映した実体波、および表面波が構造物の耐震設計用地震動としていかに重要な要因であるかについて、過去の震害例あるいは観測例、さらには常時微動測定および理論計算によって明らかにしてきた。しかしながら、長周期の実体波、および表面波が構造物にかなり大きな影響を与えるという事実がわかったとしても、工学的な立場からいえば、問題が解決されたわけではない。すなわち、構造物の耐震設計という観点からいって、これらの長周期実体波あるいは表面波をどのように耐震設計に適用していくかが問題である。つまり、実体波についていえば、どの深さまでの地盤構造を反映する周期成分をどのような方法で求めたらよいのかということであり（実体波の耐震設計用地震動への適用は重複反射理論に基づく）、表面波についていえば、どのような方法で表面波を求めさらにそれをいかに耐震設計用地震動として取り扱っていくのが残された問題である。

(1) 実体波を対称とした地盤の動的調査法

すでに、2. で述べたように、過去に SMAC 強震計で観測された地震記録のうち、最も長周期のスペクトルが得られたのが新潟地震時に白山で記録された 6 sec のものと 1968 年十勝沖地震時に八戸港湾で得られた 2.5 sec のものであろう。また、あまり知られてはいないが、過去に観測された SMAC 記録のフーリエスペクトルから 1.0 sec 以上の長周期のスペクトルが顕著に卓越した例を表-2 に示したが、思っていたよりも数多くの長周期 (1.0~1.7 sec) の加速度が卓越していることには驚かされた。地震時に長周期の変位が卓越することは気象台の 1 倍強震計の観測結果から衆知のことであるが、上記のように、加速度が長周期帯域で卓越するという問題は今

表-2 SMAC 記録のフーリエスペクトルに現われた長周期の例

発震時 年月日	震 源 地 (N-S, E-W)	震源深さ (km)	観測地	観測 方向	最大スプレッドの周波数 (sec)	マグニ チュード
1967. 1. 7	金葉山沖 (38.3°, 142.2°)	40	塩釜	EW	1.6	
1968. 4. 1	日向灘 (32.3°, 132.6°)	40	高知	EW	1.3	7.5
1968. 4. 1	日向灘 (32.3°, 132.6°)	40	細島	EW	1.3	7.5
1968 5.16	十勝沖 (40.7°, 143.7°)	20	室蘭	NS	1.3	7.8
1968 5.16	十勝沖 (40.7°, 143.7°)	20	青森	NS	1.3	7.8
1968 5.18	(39.6°, 143.6°)	20	大船渡	NS EW	1.0	
1968 8. 6	愛媛県西方沖 (33.3°, 132.4°)	20	広島	EW	1.7	6.6
1968 9.21	瀬河沖 (41.9°, 142.8°)	40	青森	EW	1.7	6.9
1972 5.11	釧路沖 (42.6°, 144.9°)	60	釧路	EW	1.3	5.8

後新たに工学的にとり上げていかねばならぬ課題であろう。さしあたりの問題は工学的にはどの程度の長周期帯域を考えればよいのか、つまり構造物側からみて、どのあるいはいかほどの周期帯域が構造物に大きく寄与するかを検討することである。きわめて単純に考えれば構造物の固有周期に等しい周期の地震波が入射すれば構造物が共振現象を起こし、危険になるであろうから地盤上に建設される構造物の各次の固有周期に等しい周期が地盤の中で励起される可能性をあらかじめ検討することが重要なことになる。さて、それならば建築あるいは土木構造物の固有周期は一体どの程度のものなのだろうか改めて確認する意味で表-3 に代表的な構造物の固有周期を

表-3 (a) 橋梁の固有振動周期

種 別	(m)	形式・構造	(sec)
連続橋	21.75+27.0+21.75	プレートガーダー	0.30
〃	46.0+46.0	合成(2径間)	0.29
〃	63.4+63.4+63.4	遠征道路プレートス	0.29
〃	+172+	斜張橋	1.61
ゲルバー橋	S=24.35, C=3.28	2径間	0.29
〃	S=22.7, C=5.9	3径間	0.28
〃	16+32+16	鉄筋コンクリート	0.36
アーチ橋	91.4	2ヒンジアーチ	0.50
〃	52	鉄筋コンクリートアーチ	0.22
〃	84	上落パイプアーチ	0.38
〃	140	スタブゲージン	0.71~0.59
フリ橋	37.2+98.2+98.2+37.2	トラス	0.99
〃	114.0	プレートガーダー	1.52
〃	137.6	トラス	1.25
〃	72	プレートガーダー	1.20
〃	100	〃	1.54
〃	150	トラス	1.09
〃	156.5+367+156.7	〃	2.78
〃	343.3+1280+343	〃	8.33
〃	158	〃	1.22, 0.66
〃	107	〃	1.08
〃	50	床版	1.25
〃	83	トラス	2.17

表-3 (b) 高架ラーメン橋の固有振動周期

形 状	地 盤	基 礎 形	明 高 (m)	方 向	固有周期 (sec)
円形ラーメン	〃	コニング	17.07	橋 軸	0.13
〃	〃	〃	24.08	〃	0.24
〃	〃	〃	21.79	〃	0.24
長方形断面	砂、砂利	〃	15.24	〃	0.15
〃	〃	〃	11.74	〃	0.14
〃	砂、砂土	〃	18.29	〃	0.17
〃	〃	〃	23.17	〃	0.17
〃	砂、砂利	〃	10.36	〃	0.20
〃	〃	〃	〃	橋 軸	0.14
〃	〃	〃	8.23	橋 軸	0.14
〃	〃	〃	〃	橋 軸	0.15
〃	〃	〃	9.47	橋 軸	0.19
円形断面	砂、砂土	井 筒	5.18	〃	0.15
〃	〃	コニング	6.60	〃	0.16
〃	〃	〃	6.60	〃	0.17
円形断面	砂、砂利	井 筒	3.51	〃	0.19
〃	〃	〃	3.51	〃	0.19

表一3 (c) 鋼製煙突のたわみ振動周期

地上高	径 (m)		固有周期(sec)
	頂	底	
61	3.3	3.3	0.71
69	5.2	7.2	0.81
76	4.5	7.0	1.01
76	5.0	7.5	0.86
76	5.0	7.5	0.94
76	4.6	6.2	1.02
90	4.4	6.9	1.47

表一3 (d) 送電塔の自由振動周期

高さ(m)	根間さ	方向	曲げ振動周期(sec)		ねじり振動周期(sec)	
			架線前	架線後	架線前	架線後
39.0	6.9	線路方向	0.41	0.33	0.33	
		直角	0.42		0.16	
39.6	6.0	線路平行直角	0.40	0.20	0.16	
46.5	6.6	線路方向	0.30	0.26	0.31	
67.8	11.45	平行	0.56	0.49	0.30	
		直角	0.57	0.54		
69.9	12.4	方向			0.56	
87.1	27.0				0.60	
93.0	17.0	平行			0.65	
		直角			0.68	
226.0	32.0	線路	1.69	1.64	0.54	0.53

表一3 (e) フィルタイプダムの固有振動周期

ダム名	種別	堤高(m)	固有振動周期(sec)		
			埋軸直交	埋軸方向	上下方向
御母衣	ダム	135	0.37, 0.42, 0.59	0.26, 0.57	
真摺山		95	0.50, 0.37, 0.35, 0.40	0.35, 0.40	0.35, 0.26
長野		128	0.44	0.45	
魚沼橋		115	0.42, 0.23	0.42	
牧尾		85	0.38		
かいのの	アースフル	41	0.40		0.26~0.35
山王海		31	0.40		
牛野		21	0.26		
樺田		10	0.18		
東郷		31	0.40		

表一3 (f) アーチダムの固有振動周期

ダム名	堤高(m)	堤頂長(m)	基礎岩盤	固有周期sec	振動形
佐々木ダム	67.4	127.3	石英凝岩	0.23	逆対称二次 (満水時)
				0.18	対称一次 (低水時)
				0.16	対称一次 (満水時)
				0.15	対称一次 (低水時)
				0.27	対称二次 (満水時)
上津垂ダム	110.0	310.0	礫砂岩	0.50	逆対称二次 (満水時)
				0.26	対称一次 (満水時)
				0.19	対称三次 (満水時)
				0.16	対称一次 (低水時)
				0.23	逆対称二次 (低水時)
雪川ダム	39.0	95.0	礫内録岩	0.11	逆対称一次 (満水時)
				0.08	対称二次 (満水時)
				0.18	対称一次 (満水時)
				0.16	対称一次 (低水時)
				0.10	対称二次 (満水時)
扇山ダム	62.0	128.7	石英粗面岩	0.09	対称一次 (満水時)
				0.19	逆対称一次 (満水時)
				0.17	対称一次 (低水時)
				0.09	対称一次 (満水時)
				0.06	対称一次 (満水時)
Monticelloダム	91.6	351.2	石英粗面岩	0.32	対称一次
				0.28	逆対称一次
				0.21	対称一次
				0.17	逆対称一次
				0.13	対称三次

示した。最も固有周期の長いものはスパン(343+1280+343) m の吊橋が 8.33 sec, 33階建の鉄骨構造建築物の 3.73 sec, その他 1 sec 以上のものは、吊橋で 1.08~2.78 sec, 鋼製煙突 1.47 sec, 送電塔 1.64 sec, 建築物が 1.10~1.40 sec の範囲となっている。

さて、構造物の固有周期は構造物の構造形式に応じて固有に決るものであるから、構造物の建設地点が定まれば、あとは構造物と地盤の周期性の関係が問題となる。

表一3 (g) 建築物の固有振動周期

構造形式	階数地上/地下	方向	固有振動周期(sec)		
			地震観測	常時微動	振動試験
鉄骨鉄筋コンクリート造	8/2	NS	0.75	0.63	0.59
		EW	0.54	0.46	0.41
		NS	0.80	0.61	
	9/1	EW	0.85	0.63	
		NS	0.77	0.32	0.56
		EW	0.35	0.40	0.30
9/1	NS	0.44	0.40		
	EW	0.43	0.39		
鉄筋コンクリート造	7/3	NS	0.73	0.54	
		EW	0.75	0.54	

構造形式	階数地上/地下	方向	固有振動周期(sec)		
			地震観測	常時微動	振動試験
鉄骨鉄筋コンクリート造	8/3	NS	0.53	0.42	
		EW	0.71	0.58	
		NS	0.51	0.44	
9/1	EW	NS	0.52	0.46	
		NS	0.70	0.59	
9/2	EW	NS	0.79	0.65	
		NS	0.39	0.36	
鉄筋コンクリート造	7/1	EW	0.40	0.37	
		NS	0.39	0.36	
鉄骨鉄筋コンクリート造	9/3	NS	0.80	0.37	0.57
		EW	0.86	0.65	
		NS	0.46	0.42	
8/2	EW	NS	0.40	0.36	
		NS	0.52	0.46	
9/4	EW	NS	0.57	0.49	
		NS	0.73	0.60	
10/3	NS	EW	0.64	0.54	
		NS	1.30	1.06	0.89
3/3	EW	NS	1.31	1.05	0.89
		NS	0.54	0.45	
12/2	EW	NS	0.72	0.62	
		NS	1.27	0.96	
14/4	EW	NS	1.26	0.98	
		NS	1.39	1.27	
21/2	EW	NS	1.40	1.24	1.07
		EW	1.40	1.24	
鉄骨構造	33	1次	2.7次	3次	
		3.73	1.38	0.83	
		1.7次	2.7次	3次	
鉄骨鉄筋コンクリート造	25/4	NS	1.39	0.64	0.42
		EW	1.25	0.49	
10/4	EW	NS	1.10	0.33	0.13
		EW	0.89	0.29	0.17

たとえば、地盤に構造物の各次の固有周期と等しい周期成分が含まれていれば地震時に構造物の固有振動が励起されることになる。したがって残された問題は地盤に含まれる卓越周期成分とこれらが反映される地盤の深さを事前にどのようにして求めればよいかという方法論の問題である。その方法についての私案を述べてみたい。

① 構造物の固有振動周期 T_n (n は各次数を表わす) はあらかじめ構造計算によって求められているとする。

② 構造物の T_n と同じ周期が構造物建設予定地点の地盤内で卓越するかどうかを知るために、地表面で一点三成分(上下成分は後述するように表面波の存在を確認するために必要である)地震計を用いて常時微動を測定する。特に T_n が長周期ならばそれに応じて長周期帯域を測定できる 3 ないし 5 秒の高倍率地震計を用いる。測定は短周期の雑微動の多い昼間をさけ、夜間に行う。えられた記録のフーリエスペクトルから T_n の卓越性を確かめる。

③ T_n のうちいずれかの次数の周期に対応した卓越周期が地盤内に存在するかが確認されたならば、その周期がどの深さまでの地盤構造を反映するものであるかを知るために、地中にボーリング孔を穿ち、地中換振器(3成分内そう)をそう入し、各深度にて地表地震計と

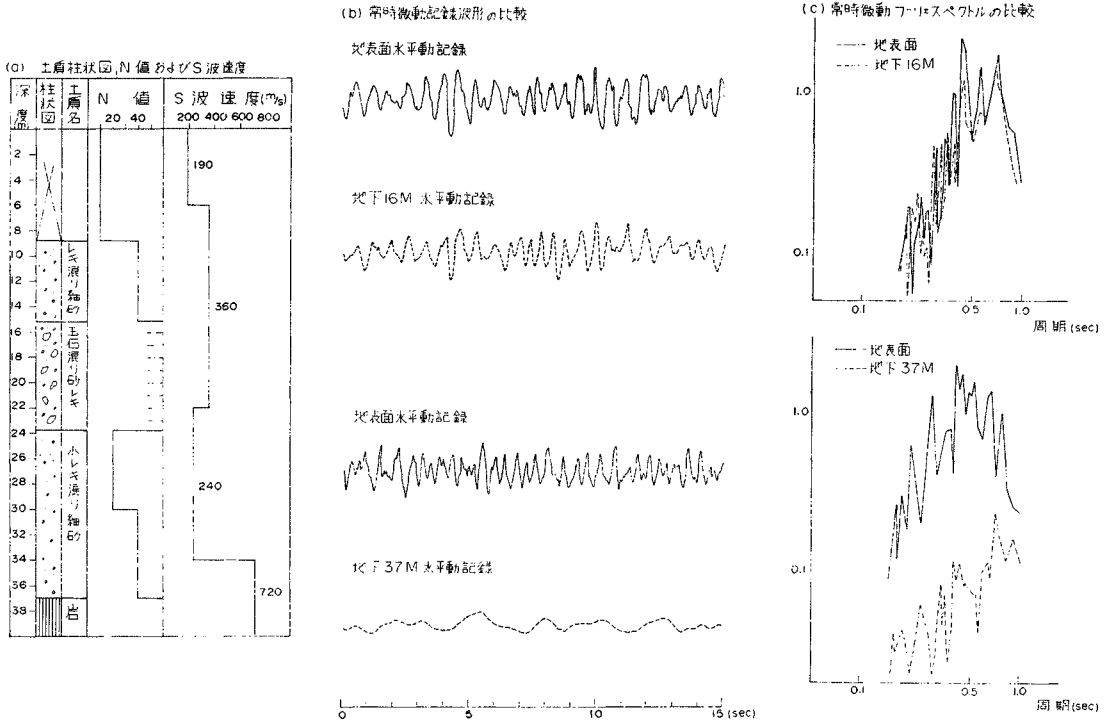


図-17 F地盤における地表面および地下の常時微動記録とスペクトルの比較

同時測定を行う。ある深さで同時常時微動測定を行った際、地表の地震計でえられた記録の中には卓越している T_n が地中地震計の記録には認められなくなったところの深さが T_n を卓越させている地盤の下限であり、特に T_1 が認められなくなったところの深さが工学的な意味での振動基盤であると考えられる。

具体的には著者らが行った実測例について説明しよう。F地盤における地表面と地下 16 m および地下 37 m の同時測定記録とそのフーリスpekトルをそれぞれ図-17 (b) および (c) に示した。地表面と地下 16 m における波形とスペクトルをみると、地表面に比べて地下 16 m の振幅がやや小さくなっていることを除けば両者ともほとんど一致している。しかるに、地下 37 m に達すると、地表面に比べて短周期の成分が消滅してくる。すなわち、地表面では 0.4 sec が最も卓越していたのに、地下 37 m に至ると 0.7 sec が最も卓越しだし、それより短周期の成分は急減してくることがわかる。つまり地下 37 m までの地盤構造が 0.4 sec を反映させているものである。したがって、F地盤上に建設される構造物の固有周期が 0.4 sec であれば地下 37 m を振動基盤と仮定し、それ以浅の弾性波速度を測定し、S波の重複反射理論に基づいた伝達関数を求めることで十分である。しかし、構造物の固有周期が 0.7 sec あるいはそれ以上であれば、さらに地下 37 m 以深の地盤特性を考えなければならない。もう一つの例として 図-18 にG地

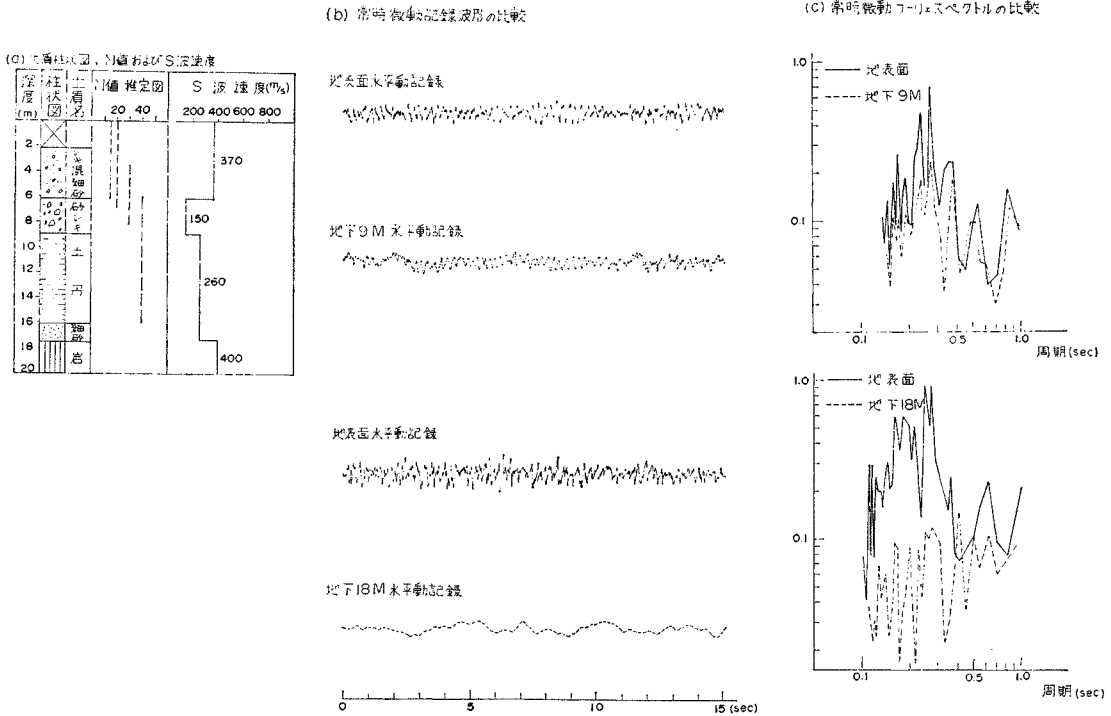
盤の測定例を示した。地表面でえられた記録には 0.25 sec が最も卓越しているが、この成分は地下 9 m でも消滅することなく、地下 18 m に達してはじめて急減し、新たに 0.4 sec が卓越してくる。すなわちG地盤では 0.25 sec の卓越成分は地下 18 m 以浅の地盤構造を反映するものであり、0.4 sec のものは、さらに深い地盤構造を反映するものであろう。

以上述べた動的な地盤調査法は地盤の卓越周期が約 2 sec より短周期の帯域では有効であるが、それよりも長い周期帯域に対しては地震計の特性上の制限や常時微動の伝ばし得る深さに限界があるなどのことから、現状では困難であるように思われる。しかし、最近、固有周期 3 ないし 5 sec の地震計が開発されているし、これらを用いて人工的振動源に基づく雑微動ではなく、脈動を測定の対象とすればさらに長い周期帯域を測定できるであろう。

(2) 表面波の測定

すでに 3. で述べたように、過去の震害あるいは地震動観測などの経験から、耐震設計用地震動として実体波と同様に新たに表面波をも考慮していかなければならない必要性が痛感させられた。したがって、本節では、工学の分野ではあまり行われていない表面波の測定について述べてみたい。

表面波のうち、分散性 Rayleigh 波は、基本的には半



図一18 F地盤における地表面および地下の常時微動記録とスペクトルの比較

無限体での Rayleigh 波に下層と上層との境界面での境界条件を付加して導いた特性方程式を解いたものであり、これは波長によって伝ば速度の異なるいわゆる分散を生じ、粒子が波動の伝ば方向に平行な鉛直面内で長円を描いて逆行あるいは進行運動を行い、その振幅は地下で急激に減少するものである。また、Love 波は表面層があるときに、波の伝ば方向に直角な振動方向をもつ水平運動の表面波で、その速度は波長によって異なる分散性のものであり、Rayleigh 波と同様に地下における振幅の減衰性がきわめて高いものである。

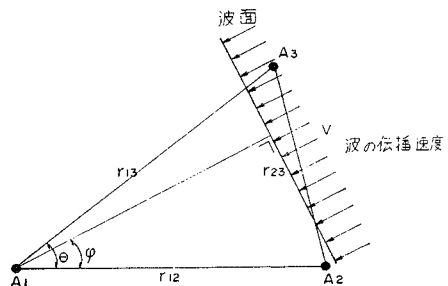
周期の長い波はかなり深く地中に入っても振幅はそれほど小さくならないので、観測は地表だけで十分である。ただし、必ず三成分観測が望ましい。これは記録の上で波の性質を見分ける手段を提供するからである。Love 波の到着は Rayleigh 波のそれよりわずかに早い。そして Love 波は震源と観測点を結ぶ線に直角方向 (T方向) の水平動だけである。また Rayleigh 波は震源の方向 (R方向) の水平動と上下動 (V方向) のみである。しかし、水平動の一つが偶然震源を向くことはまれであり、両水平動には二つの表面波が共存することになる。この場合、三成分の観測を行うと、地震波の区別ができる。すなわち地震記録から R と V との積をつくると、P波は伝ば方向に振動しているから必ず正となる。また、S波の場合には伝ば方向に直角な面で振動しているから、その積は負となる。また、Rayleigh 波は位相

差のためにゼロ線のまわりを振動することになる。

しかし、上述した一点三成分観測によって地震波の性質を知る方法は地震波の到来する方向があらかじめ既知である場合には有効であるが、観測点付近の地形あるいは地盤構造が複雑であって、地震波の伝ば方向が把握できない場合には、次に述べるような三点三成分観測によらないと地震波の性質を知ることがむずかしい。図一19に示すように、地表面に平行に平面波が入射してきた場合、地表で三点三成分観測を行うと、図一20に示すごとく、各点で波の対応とその位相差が現われ、次の関係式が成立つ。

$$\frac{1}{v} = \left(\frac{t_{12}}{r_{12}} \right) \sec \varphi, \quad \frac{1}{v} = \left(\frac{t_{13}}{r_{13}} \right) \sec(\theta - \varphi)$$

上式で r_{12} , r_{13} , θ は既知であり、 t_{12} , t_{13} は測定値から求まる。したがって、上式から v と φ が求められる。



図一19 三点三成分観測

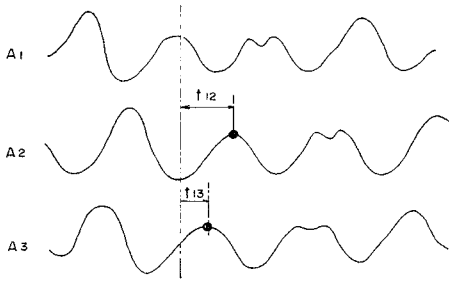


図-20 波形の位相差

すなわち、波の伝ば速度 v と伝ば方向 φ が知られる。したがって、波の伝ば速度と波長とから波の分散性が把握されるし、また波の伝ば方向と三成分観測よりえられる波の軌跡から Rayleigh 波と Love 波の判別ができる。著者らが測定して得た分散曲線（伝ば速度と波長との関係）と波の軌跡の実例はすでに図-13 と図-12 に示した。

さて、最後に耐震設計の立場からいって最も重要なことは、表面波の特性をどのように耐震設計に適用させるかということにある。その一つの試みとして桜井⁹⁾は表面波の波形がかなり正弦的であるので、現地における工学的な波形としては次式を採ることが第一近似であろうと提言している。

$$y(X, t) = a_0 \sin p \left(t - \frac{X}{V} \right)$$

ただし、 y : 変位、 $a_0 = A/p^2$: 振幅、 A : 加速度、 $p = 2\pi/T$ 、 T : 周期、 X : いま考えている測線の座標、 V : 地震波の見掛けの速度。

しかし、これまでに本論文で述べてきたように、表面波の伝ば性は分散性を示すことが特徴である、つまり波長（周期）によって伝ば速度が異なるため、上式では分散性を考慮しなければならないこと、また表面波の特性である地下での振幅の減衰も考えなければいけないなどの諸問題を残している。地盤の密度、横波および縦波の速度がえられれば、地盤内を伝ばする表面波の分散曲線と振幅関数が理論的に求まり、地盤内の周期および振幅特性が導びかれるが、耐震設計に必要な入力としての、つまり任意の点での入力振幅がわかれば、それから離れた任意の点での出力振幅を理論的に求めることは原理的には可能ではあるが、計算作業上はきわめて困難であり、現段階では実用的に無理であろう。したがって、現地では、実在の長大構造物の延長方向に測線を設けて地震計（3成分）を配列し、実在の地震を測定することにより、地盤の分散性を求め、これに応じた2点間の振幅、位相などの変化を求める他はなく、耐震設計に有用な表面波応答解析法が早急に実現することを望む次第である。

5. む す び

本論文で考察してきた問題を整理してみると次の二つに要約される。

(1) 地震時の地盤の応答解析を行う際、地盤の弾性波速度を測定し、S波の重複反射理論に基づいて、地盤の周波数伝達関数を求め、構造物への入力地震波を導き出すという方法が、最近、工学の分野で盛んに行われている。しかし、実際に行われている方法は重複反射計算そのものは問題ないとしても、S波速度を求める弾性波探査がせいぜい40~50mの浅い地盤までしか行われないうために、算定される周波数伝達関数には短周期帯域のスペクトルのみが現われ、長周期の固有周期をもつ構造物への入力地震波として重要な長周期帯域のスペクトルが無視されることになり、深い地盤構造を反映した長周期成分を把握し得ず、長周期構造物の耐震設計に対しては危険側の情報を提供することになりかねない。著者らが行った数か所の地盤での測定例によると、地表層と基盤の剛性が明確に区分されている地盤で地表層厚が比較的薄い場合には、基盤までの弾性波探査もしやすく、応答解析結果も実際の挙動を再現するが、地表層が深い場合あるいは地表から地中に連続的に地層が堆積しているような砂質地盤では、通常行われている弾性波探査の深さ(40~50m)より深い地盤構造を反映する長周期が必ずといっていいくらいに地震動記録あるいは常時微動記録に現われてくる。

したがって、耐震設計上有用な地盤の周波数伝達関数を求めるためには構造物の固有周期と同域の周期成分が地盤中に潜在するかどうかを確かめることである。その場合、地表における地震動観測だけではそれらの存在の有無は知れるが、それらがどの深さまでの地盤構造を反映するかがわからないので、地表から地中に向かって鉛直方向に連続的に常時微動を測定し、各次の周期を励起させている地盤構造の深さを確かめた上で、できれば一次の周期が卓越する地盤の下底まで弾性波探査を行い、その測定値を用いて重複反射応答解析を行うべきである。

(2) 前述したごとく、最近、工学の分野で行われている地盤の地震時応答解析には実体波であるS波の重複反射に基づいた解析が適用されているが、これまでの震害に現われた事実あるいは地震観測によってえられたデータを見聞するにつけ、表面波の存在とそれらを工学的に取扱わねばならない必要性がきわめて痛切に感じられる。著者らの測定例によれば、S波の重複反射とまったく同程度に Rayleigh 波と Love 波との卓越がみられる場合があるので、長大構造物、たとえば橋梁、地中埋設

管あるいは道路・河川・干拓堤防などの土質構造物の耐震設計用入力地震波に対しては是非とも表面波を考慮していく必要があると思われる。现阶段では表面波による応答解析法の確立は困難ではあるが、せめて、種々の長大構造物に対する実地震時の表面波観測を行って、長大構造物に及ぼす表面波の影響について観測データを集積していきたいものである。その際、SMAC 強震観測を含めて、短周期帯域の加速度量のみを記録させる現在の観測システムでは表面波をとらえることはなかなか困難であるから、せめて 1~2 sec の長周期帯域の記録を確実にとらえるような観測技術の開発と一点三成分観測から三点三成分観測システムへの移行を期待したい。

最後に、本研究の測定および計算に終始ご助力をいただいた東北工業大学 神山 真氏および栗原益男氏に心から感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 河上房義・浅田秋江・神山 真：軟弱地盤における強震地動と常時微動特性との相関について，東北地域災害科学学研究報告，第9巻，pp. 1~8，1973年3月。
- 2) 大沢 胖他：八戸市における地中地震動の観測，1968年十勝沖地震における八戸港湾の強震記録と地盤特性，文部省科学研究費「構造物災害に対する地震動特性の研究」，pp. 38~67，1972年6月。
- 3) 嶋 悦三：強震地動に見られる表面波成分第，3回日本地震工学シンポジウム（1970）講演集，pp. 277~284，1970年11月。
- 4) 土田 肇・上部達生：地表における強震記録より推定した基盤の地震動の特性，港湾技術研究所報告，第11巻，第4号，pp. 191~270，1972年12月。
- 5) Stonley, R. : Surface Waves Associated with 20° Discontinuity, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. Geophys. Suppl., Vol. 4, pp. 39~43, 1937.
- 6) Haskel, N.A. : The Dispersion of Surface Waves on Multi-layered Medium, Bull. Seis. Soc. Amer., Vol. 43, pp. 17~34, 1953.
- 7) Sato, Y. : Study on Surface Waves VI Generation of Love and Other Type of S-H Waves, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 30, pp. 101~120, 1952.
- 8) 桜井・高橋・栗原・矢島：長大構造物の地震応答解析についての一考察，Proc. 3rd. Japan Earthq. Eng. Symposium 1970, pp. 429~436, 1970. 11.

(1974.7.1・受付)