

## 10. 東京下町における地盤の振動性状

地震研究所 嶋 悦 三

(昭和43年11月26日発表—昭和43年11月27日受理)

### 1. はじめに

地震時における災害を僅小にくいとめるためには、その場所における地盤そのものの振動性状、さらに、その上にたつ構築物の耐震性をくわしく吟味する必要がある。構築物に関していえば、いわゆる上部構造の耐震性に関する研究が戦後急速な進歩をとげ、電子計算機の発達と相まって、non-linear の振動領域にまで議論がすすめられている。それにもかかわらず、現実に地震時に問題となる、構造物と地盤との interaction に関連した研究は意外に少ない。このことは、一つには地盤を構成する物質の動的性質があまりにも複雑であり、定性的な議論はともかくとして、実際の場合への定量的な研究がむずかしかったためでもある。したがって現時点においては、まず地盤の性質をくわしくしらべた上で、構築物との関連を論ずるのが近道と考える。

さて地盤の振動のありさまを調べるためには、それを構成する物質の弾性常数を知ればよいことはいうまでもない。これ等の常数は、物質内を伝わる P 波、S 波の速度および密度がきまれば、簡単な関係式により導くことが出来る。特に S 波速度は、物質の強度に関連した剛性率をあたえる。しかも地震の際 S 波の振幅は P 波のそれと較べてはるかに大きいから、震害をあたえる主要素は S 波であると考えてもそれほど間違いではないであろう。しかるに、この方面からの地盤の研究がなされていなかったのは、現場において S 波を安定に発生させ観測することが至難とされていたからである。最近にいたり、S 波の発生法およびその伝播に関する研究がすすみ、小規模ながら、S 波による地震探査が出来るようになり、弾性波からみた地盤の性質究明への糸口が開かれた。

地震波が弾性や密度のちがう媒質に入射する場合、その境界面で反射屈折して、振幅に変化を生ずることはよく知られている。そしてその変化のありさまは、媒質間のインピーダンス比が大きければ大きいほどいちぢるしい。したがって震源から放出された地震波は、伝播の途中で数多くの不連続面を通過するため、次第にその波形を変えながら伝わっていく。ところで、震災を及ぼすような地震の震源は、それほど深いとは思えない。おそらくそのような地震は地殻内におこるといってもそれほどまちがいはないであろう。地震観測からえられた地殻内での S 波の速度は、granitic layer とよばれる最上層で 3 km/s とされている。またモホでのそれは 4.5 km/s 位とされている。破壊的地震波の震源から地表への経路は地殻内またはせいぜいマントルの上部に限られると思われるから、厚さにくらべてこの程度の速度の変化しかないから、伝播する途中でうける波形の変化はそれほどいちぢるしいものではないと思われる。一方、特に地震による災害をうけやすい、いわゆる軟弱地盤地帯にあっては、せいぜい 200 m/s たらずの S 波速度をもつ地層が厚く存在することが次第に明らかになってきた。このようなことから、地表ごく近くにおいて、速度のへり方が非常に急になることが予想される。このことは、S 波に関する限り、地表

付近では地震波が真下からきていること、そしてまたこれ等軟弱層内にけおる重複反射の結果、特別な周期の波については地表に大振幅をもたらし、遂には亀裂を生じさせる原因にもなり得ることをおしえてくれる。このような観点に立てば、S波速度の垂直分布をしらべてやれば、その地域における地震時における地盤の振動の有様を予測することが出来るにちがいない。ところで我々は、実際の地震観測から、ほんのわずかはなれた場所でも震害が異なることを尽々経験している。これ等が地盤の地下構造のちがいによるものであるとすれば、S波の地下探査は非常にきめ細かに行なわなければならないことになる。たとえば、東京の下町というようにある程度の広さの区域における震災予防のための基礎資料を得たい場合、費用また時間から考えてこれはあまり現実的ではない。この欠点をおぎなうために考えられるのは、関東地震以来集積されたボーリングのデーターの活用である。特に最近では、地下鉄工事その他の都市再開発のために、その路線にそって非常に密な調査が行なわれ、その地質断面が精度よく推定出来るまでになってきた。したがって東京の地盤を構成する代表的地層内を伝わるS波の速度をしらべておけば、地質断面図はまた、S波の地下構造と見ることが出来るであろう。そしてこれから地盤の振動の有様が計算により推定出来るであろう。我々は、この目的のために、都内各地においてS波による地震探査を実施し、地質とS波速度との対比をもとめてきた。<sup>1), 2), 3)</sup> その結果かなりデーターも集まり、基盤に関する大よその情報もえられた。そこで以上の考え方を東京の下町の場合に応用してみよう。

## 2. 解 析

まず計算の基礎となる地質断面は、首都高速道路公団が、高速道路建設に伴うボーリング調査の結果得たものを拝借した。断面のある場所は、東京駅を中心として、Fig. 1に太線で示してある。なお、7号線に関しては更に東にのび、江東の軟弱地盤地帯を東西に横断している (Fig. 5 参照)。この断面は下町の代表的な地下構造をしめすものであり、下町一帯の地盤の振動性状を論ずるためには好都合なデーターであると考えられる。Figs. 2-5には、各々の路線について地層の厚さのよみとりを行なった場所を黒丸で示してある。Tables 1-4は断面図から読みとった各層の厚さ (m) である。記号は、それぞれ

TS	表 層	Top Soil
AC	冲積粘土層	Alluvial Clay
AS	冲 積 砂 層	Alluvial Sand
DC	洪積粘土層	Diluvial Clay
DS	洪 積 砂 層	Diluvial Sand
DSG	洪積砂礫層	Diluvial Sand and Gravel

である。ただし、TSは場所場所により構成物質が異なり速度のばらつきも多いと考えられる。しかしながら図でも最高 3m をこえるものは殆んど見当たらない。したがってこれ

- 1) 河角 広・嶋 悦三・太田 裕・柳沢馬住・Ahmed ALLAM・宮川和志 地震研究所集報 44 (1966), 731-747.
- 2) 嶋悦三・太田裕・柳沢馬住・Ahmed ALLAM・河角広 地震研究所集報 46 (1968), 759-772.
- 3) 嶋悦三・太田裕・柳沢馬住・工藤一嘉・河角広 地震研究所集報 46 (1968), 1301-1312.

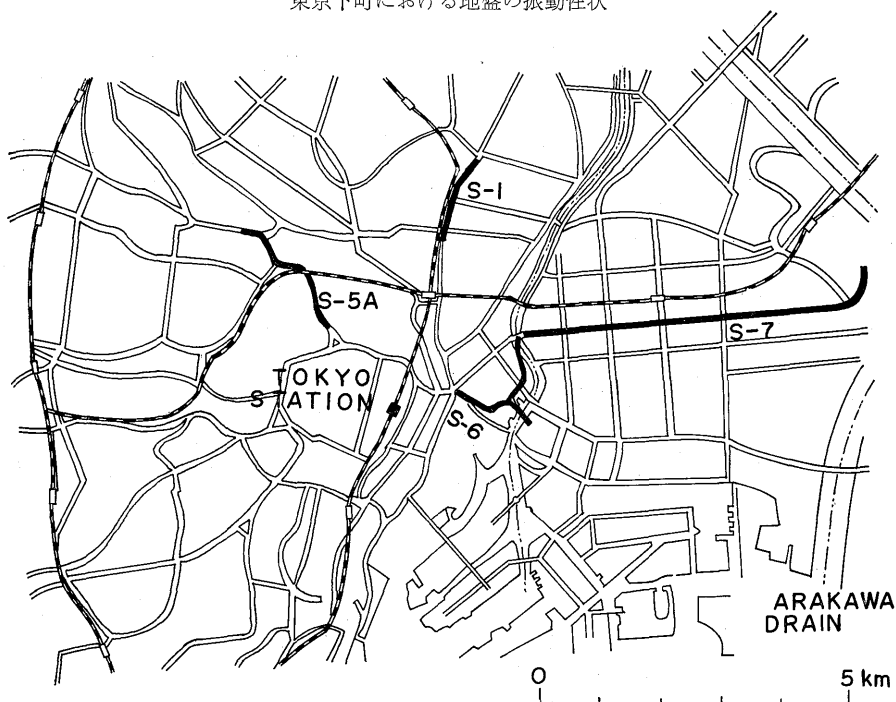


Fig. 1. A map of downtown Tokyo showing the configuration of express ways. Geological sections are available along these routes.

### S-1

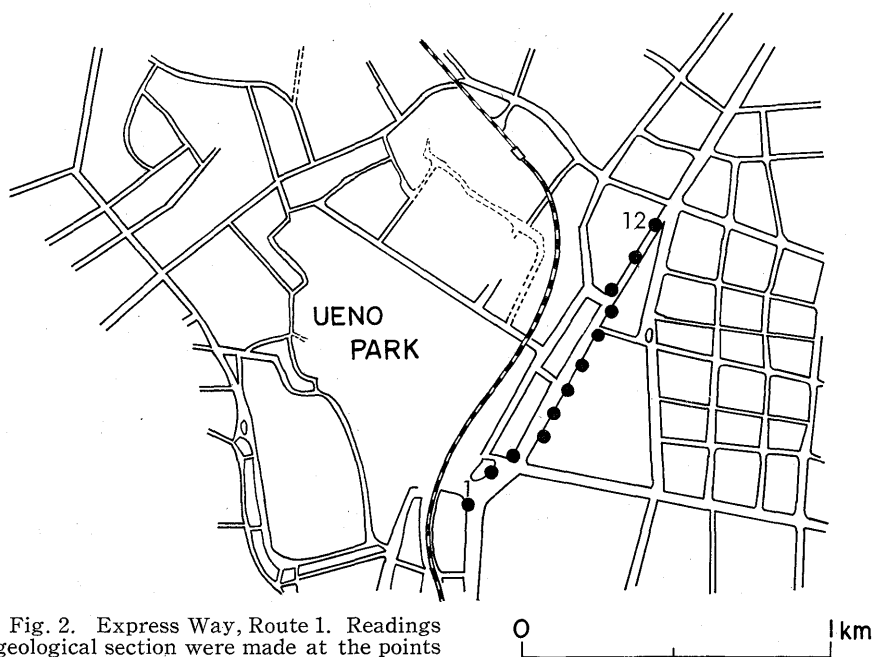


Fig. 2. Express Way, Route 1. Readings of geological section were made at the points shown in black circles.

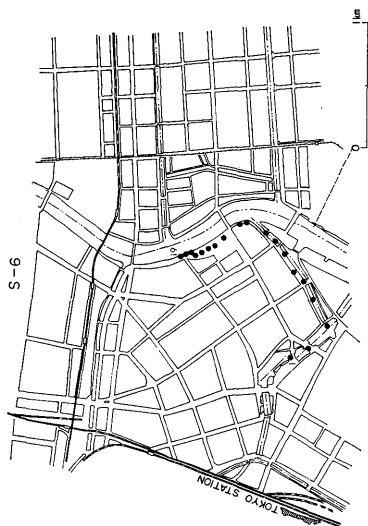


Fig. 4. Express Way, Route 6. Readings of geological section were made at the points shown in black circles.

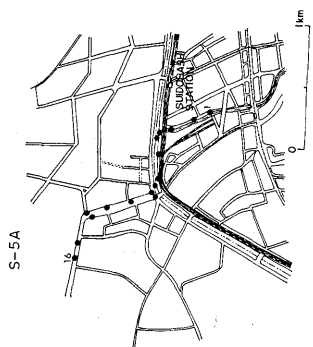


Fig. 3. Express Way, Route 5. Readings of geological section were made at the points shown in black circles.

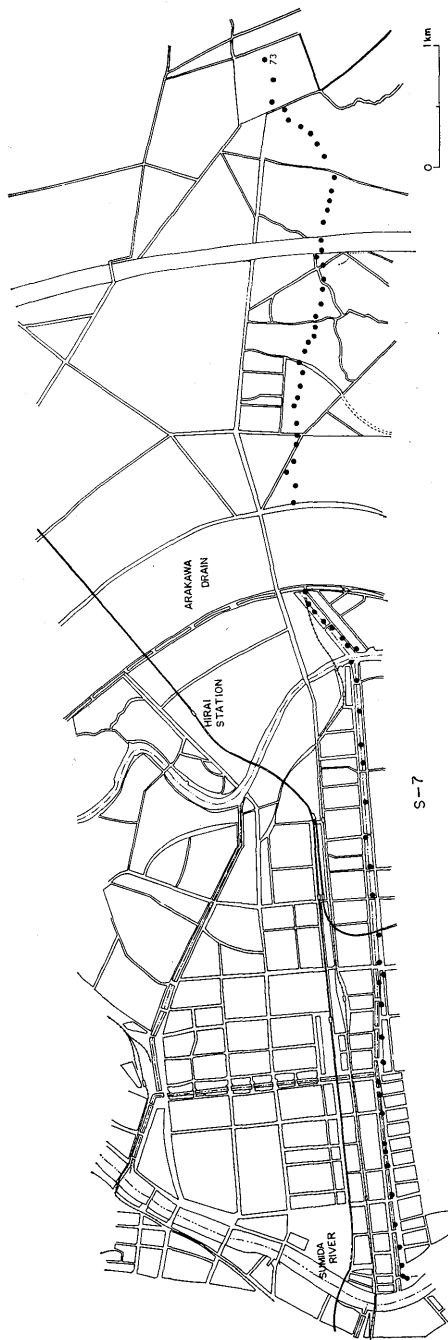


Fig. 5. Express Way, Route 7. Readings of geological section were made at the points shown in black circles.

Table 1. Geology and thickness of each layer (in m), Route 1.

Location														
S1-1	TS	4.5	DC	1.8	DS	5.8	DC	1.0	DS	4.0	DC	12.3	DSG	
S1-2	TS	3.3	DS	0.9	DC	0.8	DS	11.9	DC	7.9	DS	3.4	DSG	
S1-3	TS	1.1	DS	1.5	DC	1.3	DS	5.9	DC	1.8	DS	4.3	DC	10.9 DS 1.4 DSG
S1-4	TS	2.3	DS	14.7	DC	11.8	DSG							
S1-5	TS	2.5	AS	1.6	DS	12.2	DC	12.0	DSG					
S1-6	TS	3.9	DC	2.5	DS	13.3	DC	10.0	DSG					
S1-7	TS	1.4	AS	1.0	DS	22.3	DC	5.0	DSG					
S1-8	TS	1.5	AS	1.1	DS	5.0	DC	1.3	DS	9.1	DC	2.9	DS	4.1 DC 3.8 DSG
S1-9	TS	1.1	AS	2.1	DC	1.0	DS	16.4	DC	9.7	DSG			
S1-10	TS	2.7	DS	15.2	DC	1.6	DS	13.2	DSG					
S1-11	TS	1.5	AS	3.9	AC	9.7	DS	6.8	DC	3.8	DS	4.8	DC	2.6 DSG
S1-12	TS	1.1	AS	2.2	AC	10.4	DS	6.2	DC	13.8	DSG			

Table 2. Geology and thickness of each layer (in m), Route 5.

Location													
S5A-1	TS	5.7	DSG	1.7	DS	2.4	DC	1.8	DS	1.2	DSG	0.7	DS
S5A-2	TS	7.6	AS	0.9	DSG	0.4	DC	6.5	DSG	1.0	DS	3.6	DC 0.8 DS
S5A-3	TS	11.7	DC	2.9	DSG	3.7	DS						
S5A-4	TS	3.8	DSG	2.1	DC	4.5	DSG	2.3	DS				
S5A-5	TS	4.1	DSG	1.7	DC	4.2	DSG	2.7	DS				
S5A-6	TS	9.7	DSG	1.0	DC	5.1	DS	3.4	DSG	0.8	DS	7.9	DC 0.6 DS
S5A-7	TS	8.3	DSG	2.1	DC	3.5	DSG	1.8	DC	0.8	DS	10.1	DC 0.2 DS
S5A-8	TS	6.7	DSG	3.4	DC	2.6	DSG	2.2	DC	1.6	DS	4.4	DC 0.2 DS
S5A-9	TS	6.8	DSG	2.2	DC	4.7	DSG	2.7	DS				
S5A-11	TS	7.1	DC	1.9	DS								
S5A-12	TS	8.0	DSG	2.0	DS								
S5A-13	TS	7.8	DSG	2.0	DS								
S5A-14	TS	8.6	DSG	1.4	DS								
S5A-15	TS	1.1	DSG	3.5	DS								
S5A-16	TS	1.2	DSG	2.4	DS	16.2	DC						

Table 3. Geology and thickness of each layer (in m), Route 6.

Location													
S6-1	TS	4.5	AS	4.3	DSG	2.7	DS	2.9	DC	6.3	DS	2.0	DSG 0.9 DS
S6-2	TS	1.6	AS	2.9	AC	1.3	DC	12.5	DS	2.4	DC	1.6	DSG
S6-3	TS	1.2	AS	4.8	DS	14.4	DC	7.5	DS	3.9	DSG		
S6-4	AC	12.8	DS	4.5	DC	13.1	DS	8.4	DSG				
S6-5	TS	3.2	AS	3.1	AC	21.3	DC	3.8	DS	4.0	DSG		
S6-6	TS	1.3	AS	4.8	AC	22.4	DC	2.7	DS	3.4	DSG		
S6-7	TS	23.5	DC	2.2	DS	2.9	DSG	5.7	DS	2.1	DSG	5.0	DS
S6-8	TS	3.1	AS	0.4	AC	23.0	DC	1.7	DS	1.7	DSG	10.0	DS
S6-9	TS	1.6	AS	2.2	AC	21.0	DC	2.3	DS	2.1	DSG		
S6-10	TS	20.5	AS	1.2	AC	2.9	DC	2.5	DS	3.2	DSG	9.6	DS
S6-11	TS	24.0	DC	3.8	DS	2.1	DSG						
S6-12	TS	2.4	AS	3.8	AC	21.3	DC	3.4	DS	5.0	DSG	7.4	DS
S6-13	TS	0.7	AS	2.9	AC	1.4	AS	3.2	AC	17.2	DC	4.2	DS 3.4 DSG 5.0
S6-14	TS	3.1	AS	3.9	AC	20.0	DC	2.6	DS	3.9	DSG	6.2	DS
S6-15	TS	0.4	AS	0.8	AC	1.2	AS	2.0	AC	18.1	DC	6.5	DS 0.2 DC 0.4
S6-16	TS	2.9	AS	3.8	AC	16.6	DC	9.0	DS	1.7	DSG	5.3	DS
S6-17	TS	2.8	AS	3.9	AC	16.3	DC	9.0	DS	2.1	DSG		
S6-18	AC	16.1	DC	7.1	DS	4.1	DSG	1.3	DS	2.6	DSG	2.7	DS 10.8 DC 2.2
S6-19	TS	16.5	DC	6.3	DS	4.8	DSG	1.2	DS	2.5	DSG	2.6	DS 11.8 DC 2.8

が大勢を決するとは思えないので、TS と AC については、計算の際同じ S 波速度をもつものとしたため、TS と AC が続いている場合には、TS に含めてかいてある。表中で TS が大きい値を示しているものがあるのはそのためである。

つぎに、現在までに、我々が実施した地震探査の結果得られた S 波速度と地質との関係をまとめた Fig. 6<sup>4)</sup> を参照して、各地層内の S 波速度\* を、また東京地盤図<sup>5)</sup> を参照してそれぞれの密度を仮定した (Table 5)。DSG に関しては実測値がすくないため、たとえば速度については、これが鮮新世の土丹程度に匹敵するものと考えた。また密度は仮定に用いたものより実際は幾分大きいであろう。これらは将来更に研究を進め、改めていくべきものであるが、これ等の値がすこし変わっても、計算結果はそれほど変わらない筈である。

4) *loc. cit.*, 3).

5) 東京地盤調査研究会 東京地盤図 昭和 34 年 技報堂。

\* AC の速度として 100 m/s をとったのは江東地区のみの平均値が 100 m/s に近いこと、しかも 30 m 程度の厚さがあっても深さに対して速度がほとんど一様であることがわかったからである。これについては機会をあらためて報告する予定である。

Table 4. Geology and thickness of each layer (in m), Route 7.

Location									
S7-1	TS	1.7 AS	2.8 AC	21.6 AS	0.6 DSG	8.9 DC			
S7-2	TS	1.7 AS	2.8 AC	21.6 AS	0.6 DSG	8.9 DC			
S7-3	TS	1.4 AS	2.0 AC	5.5 AS	5.6 AC	0.4 AS	0.9 AC	6.4	
	AS	0.6 AC	4.9 DC	3.1 DS	1.4 DSG				
S7-4	TS	1.0 AS	1.9 AC	22.4 DC	1.6 DS	4.7 DSG			
S7-5	TS	1.0 AS	2.3 AC	27.5 DGS					
S7-6	TS	1.2 AS	2.1 AC	20.6 DC	3.8 DS	3.0 DSG			
S7-7	TS	0.8 AS	2.2 AC	18.0 AS	0.4 AC	5.2 DC	3.3 DS	0.2	
	DSG								
S7-8	TS	0.8 AS	2.4 AC	17.2 AS	4.1 DS	0.7 DC	4.2 DSG		
S7-9	TS	1.4 AS	1.4 AC	17.6 DC	2.7 DS	2.6 DC	3.1 DSG		
S7-10	TS	1.2 AS	0.6 AC	24.8 DC	1.3 DSG	9.0 DS	1.5 DSG		
S7-11	TS	23.0 AS	4.6 DC	2.0 DSG					
S7-12	TS	2.0 AS	2.2 AC	22.0 AS	0.2 AC	0.7 AS	0.7 DC	0.4	
	DSG	8.1 DS	4.3 DSG						
S7-13	TS	2.9 AS	6.4 AC	19.2 DC	2.3 DSG	15.6 DS			
S7-14	TS	2.0 AS	3.0 AC	25.0 DC	1.2 DSG	4.2 DC	4.4 DS	1.5	
	DC	2.9 DSG							
S7-15	TS	2.0 AS	1.8 AC	24.3 DC	3.0 DS	1.0 DSG	4.3 DC	7.3	
	DS	0.9 DSG							
S7-16	TS	2.4 AS	2.6 AC	24.3 DC	2.4 DSG	6.5 DC	5.6 DSG		
S7-17	TS	26.2 DC	3.2 DSG	10.3 DC	4.8 DSG				
S7-18	TS	28.0 DC	1.4 DSG	9.4 DC	5.8 DSG				
S7-19	TS	2.0 AS	1.7 AC	25.6 DSG	8.8 DC	4.6 DSG			
S7-20	TS	30.5 DS	1.9 DSG	4.8 DC	8.8 DSG	2.4 DS			
S7-21	TS	29.0 DC	1.2 DSG	5.0 DC	5.8 DS	2.6 DSG	3.3 DS		
S7-22	TS	31.8 DC	12.1 DS						
S7-23	TS	3.4 AS	3.4 AC	26.6 DC	6.8 DS	2.2 DC	8.8 DS		
S7-24	TS	2.8 AS	2.6 AC	28.4 AS	1.1 DC	2.1 DS	10.8 DC	2.5	
	DS								
S7-25	TS	2.2 AS	0.8 AC	26.9 DS	1.8 DC	5.7 DS	0.8 DC	14.4	
	DS								
S7-26	TS	2.9 AS	2.0 AC	24.6 AS	2.6 DS	4.8 DC	16.7 DS		
S7-27	TS	3.2 AS	2.6 AC	26.6 DS	3.9 DC	3.0 DS	0.4 DC	6.8	
	DS								
S7-28	TS	2.6 AS	1.5 AC	32.4 DS	2.2 DC	1.8 DS	1.0 DC	0.8	
	DS	0.7 DC	0.8 DS	3.0 DC	2.5 DS	2.3 DC	4.9 DS		
S7-29	TS	2.1 AS	0.3 AC	28.4 AS	2.8 AC	3.1 DS	1.9 DC	6.1	
	DS	0.4 DC	0.6 DS	1.6 DC	8.8 DS				
S7-30	TS	29.4 AS	3.5 AC	3.6 DS	1.8 DC	0.2 DS	0.1 DC	4.8	
	DS	0.3 DC	1.6 DS	2.1 DC	5.3 DS				
S7-31	TS	1.7 AS	1.6 AC	25.6 AS	2.0 AC	4.4 DC	3.3 DS	1.1	
	DC	6.7 DS	2.0 DC	1.9 DS	2.4 DC	0.4 DS	2.9 DSG		
S7-32	TS	1.6 AS	5.8 AC	21.4 AS	0.8 DS	5.2 DC	4.3 DS	0.8	
	DC	0.8 DS	0.8 DC	1.1 DS	0.9 DC	1.2 DS	9.7 DSG		
S7-33	TS	1.7 AS	5.6 AC	21.8 DS	5.5 DC	2.9 DS	3.9 DC	3.5	
	DS	9.9 DSG							
S7-34	TS	0.9 AS	5.4 AC	21.2 AS	1.0 AC	1.3 DS	5.3 DC	2.8	
	DS	3.7 DC	2.4 DS	11.6 DSG	9.4 DS				
S7-35	TS	1.0 AS	4.6 AC	21.9 AS	2.2 AC	0.2 DC	2.2 DS	4.2	
	DC	3.5 DS	3.4 DC	1.6 DS	11.2 DSG	10.0 DS			
S7-36	TS	1.7 AS	5.6 AC	21.6 AS	1.9 DC	3.3 DS	2.4 DC	4.8	
	DS	2.3 DC	1.8 DS	11.8 DSG					
S7-37	TS	0.8 AS	3.9 AC	23.9 DS	2.9 DC	0.3 DS	0.4 DC	3.6	
	DS	7.1 DC	3.0 DS	11.2 DSG					
S7-38	TS	2.6 AS	5.0 AC	24.5 DC	6.7 DS	8.0 DC	3.2 DS		
S7-39	TS	2.2 AS	4.8 AC	24.2 DS	1.0 DC	6.0 DS	7.7 DC	4.4	
	DS								
S7-40	TS	2.3 AS	2.6 AC	27.0 DS	10.1 DC	9.7 DS	2.0 DSG	4.2	
	DS	1.1 DC							

(to be continued)

Table 4. Geology and thickness of each layer (in m), Route 7.  
(continued)

Location									
S7-41	TS	1.9 AS	3.6 AC	28.2 DS	7.8 DC	3.6 DS	0.7 DC	5.6	
	DS	2.2 DS G	3.5 DS						
S7-42	TS	0.8 AS	6.0 AC	29.9 DC	3.4 DS	7.6 DC	2.6 DS	5.2	
	DS G	4.2 DS							
S7-43	TS	0.5 AS	5.6 AC	31.8 DC	2.6 DS	6.6 DC	3.6 DS	3.9	
	DS G	5.1 DS							
S7-44	TS	0.6 AS	5.3 AC	32.6 DS	1.3 DC	3.4 DS	3.3 DC	3.8	
	DS G								
S7-45	TS	1.1 AS	4.5 AC	33.2 DS	1.4 DC	3.8 DS	2.5 DC	3.8	
	DS G								
S7-46	TS	1.6 AS	3.3 AC	35.1 DS	0.3 DC	8.8 DS	3.3 DS G		
S7-47	TS	1.5 AS	4.1 AC	33.0 DC	5.6 DS G	0.4 DC	4.6 DS		
S7-48	TS	1.2 AS	6.0 AC	15.8 AS	3.2 AC	3.8 AS	1.7 AC	3.0	
	AS	0.6 DC	5.6 DS G	5.4 DC	3.6 DS				
S7-49	TS	1.3 AS	3.3 AC	2.2 AS	5.6 AC	9.5 DS	8.7 DC	2.0	
	DS	2.0 DC	6.0 DS	4.4 DS G					
S7-50	TS	1.1 AS	3.1 AC	2.9 AS	5.0 AC	8.6 DS	5.4 DC	2.2	
	DS	6.6 DC	4.8 DS	6.7 DS G	0.1 DC	2.4 DS			
S7-51	TS	1.1 AS	3.2 AC	15.3 DS	7.0 DC	0.4 DS			
S7-52	TS	0.4 AS	4.3 AC	15.0 DS	13.1 DC	5.0 DS			
S7-53	TS	1.0 AS	3.0 AC	14.8 DS	11.0 DC	1.9 DS			
S7-54	TS	0.8 AS	3.4 AC	14.7 DS	10.4 DC	2.8 DS			
S7-55	TS	0.4 AS	3.4 AC	18.7 DS	7.4 DC	1.9 DS			
S7-56	TS	1.7 AS	3.0 AC	13.4 DS	13.3 DC	2.2 DS			
S7-57	TS	2.0 AS	2.9 AC	13.9 DS	13.5 DC	1.1 DS			
S7-58	TS	1.6 AS	2.8 AC	14.3 DS	13.3 DC	0.9 DS			
S7-60	TS	1.9 AS	2.6 AC	14.6 DS	13.7 DC	1.4 DS			
S7-61	TS	1.8 AS	2.2 AC	14.8 AS	0.7 DS	14.0 DC	1.2 DS		
S7-62	TS	1.7 AS	4.0 AC	13.6 AS	4.0 DS	9.8 DC	1.1 DS		
S7-63	TS	1.6 AS	4.5 AC	12.5 AS	7.1 DS	7.9 DC	1.2 DS		
S7-64	TS	1.7 AS	4.5 AC	9.0 AS	12.0 DS	7.2 DC	1.4 DS		
S7-65	TS	2.1 AS	4.1 AC	8.9 AS	11.2 DS	6.1 DC	1.3 DS		
S7-66	TS	1.1 AS	4.1 AC	9.2 AS	7.1 DS	10.8 DC	1.1 DS		
S7-67	TS	0.9 AS	4.8 AC	6.6 AS	3.0 DS	16.7 DC	0.6 DS		
S7-68	TS	1.2 AS	4.5 AC	7.4 DS	21.4 DC	1.3 DS			
S7-69	TS	0.6 AS	2.3 AC	5.8 DS	23.8 DC	1.4 DS			
S7-70	TS	0.5 AS	3.3 AC	5.0 DS	24.5 DC	1.2 DS			
S7-71	TS	0.6 AS	3.4 AC	4.1 DS	25.4 DC	1.7 DS			
S7-72	TS	0.9 AS	3.3 AC	4.6 DS	25.0 DC	1.6 DS			
S7-73	TS	0.8 AS	4.1 AC	4.3 DS	25.0 DC	2.0 DS			

Table 5.

Geology	S Wave Velocity (m/sec)	Density (gr/cm <sup>3</sup> )
TS	100	1.5
AC	100	1.5
AS	170	1.8
DC	200	1.5
DS	250	1.8
DS G	400	1.8



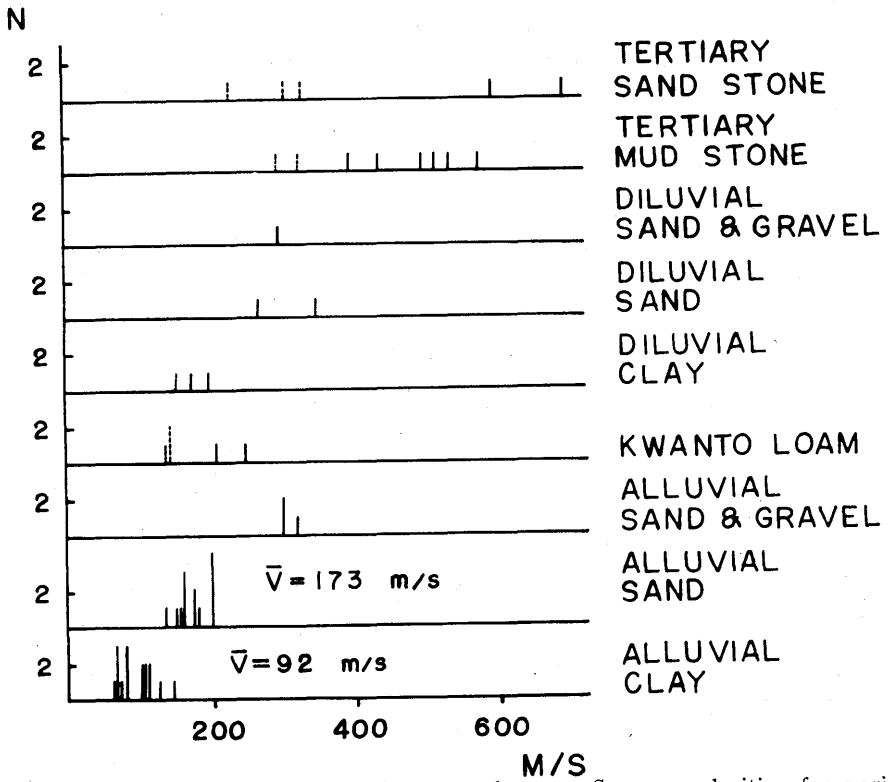


Fig. 6. The number of observations vs. observed  $S$  wave velocities for various formations.

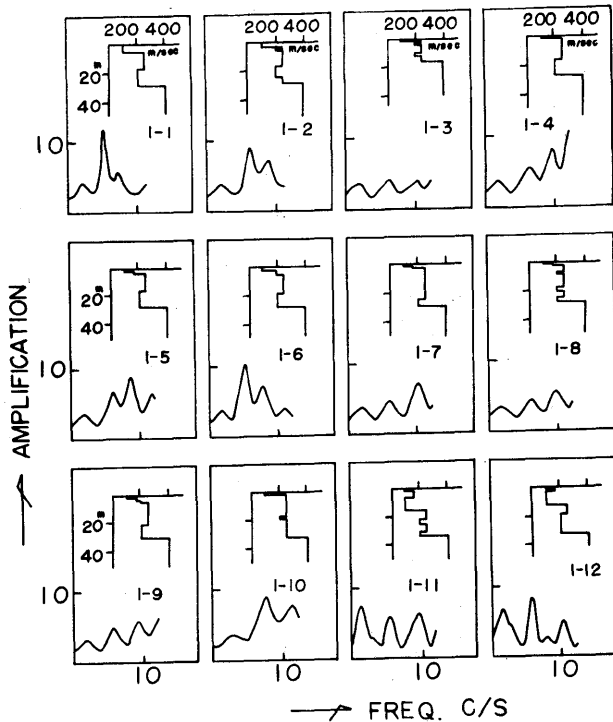


Fig. 7-1.

Fig. 7-1~9. Expected vibration characteristics of the ground during the earthquakes.

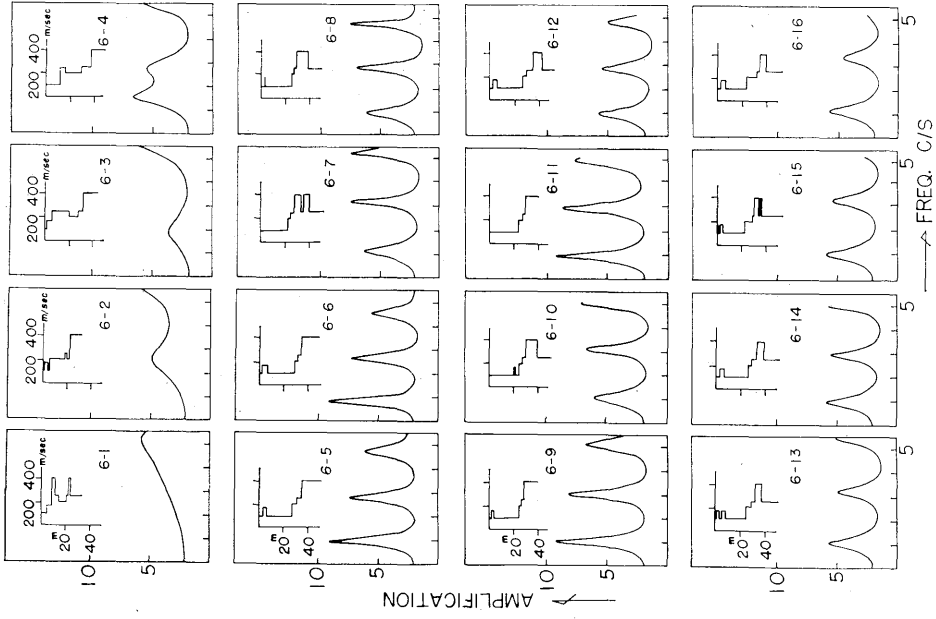


Fig. 7-3.

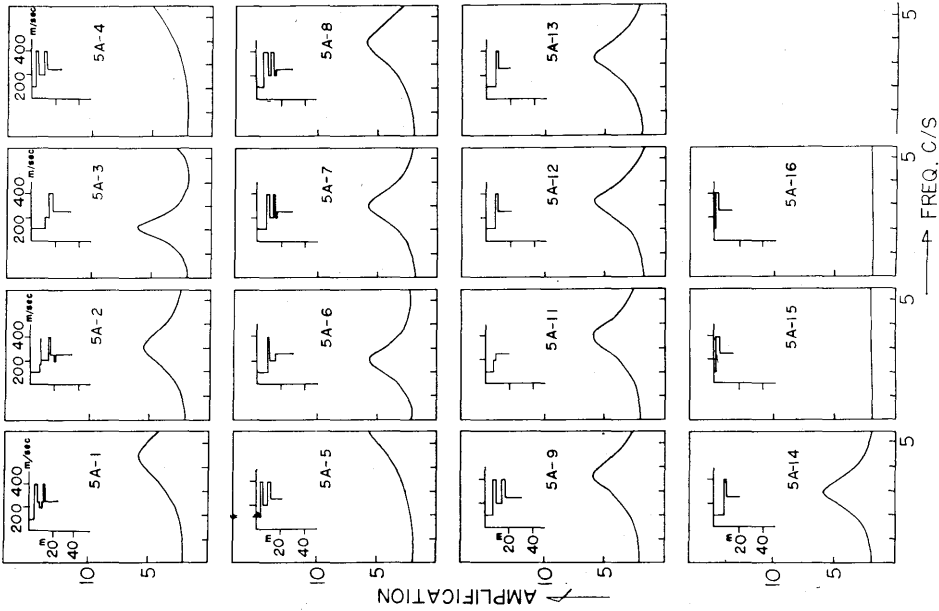


Fig. 7-2.

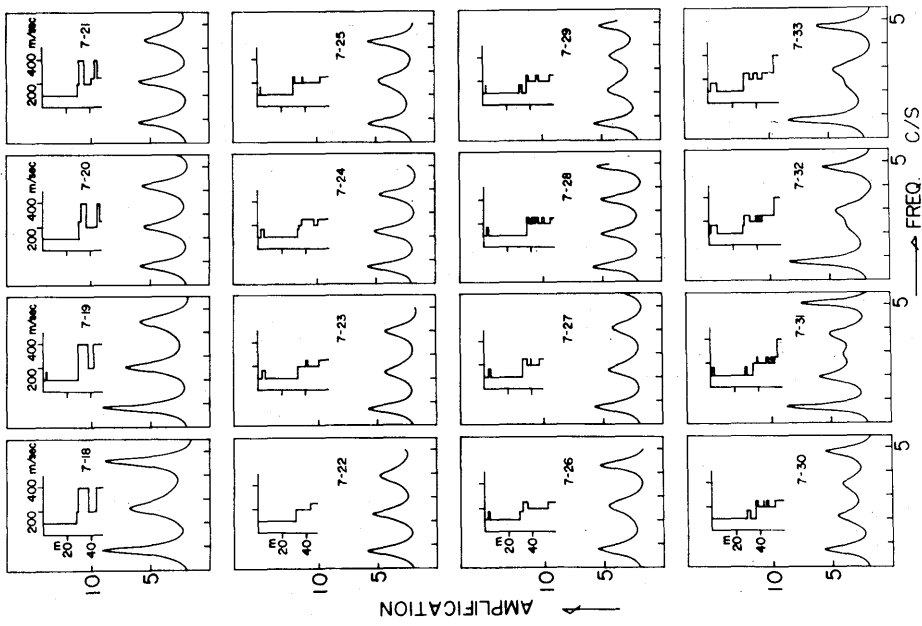


Fig. 7-4.

(Fig. 7-4. is shown in page 157.)

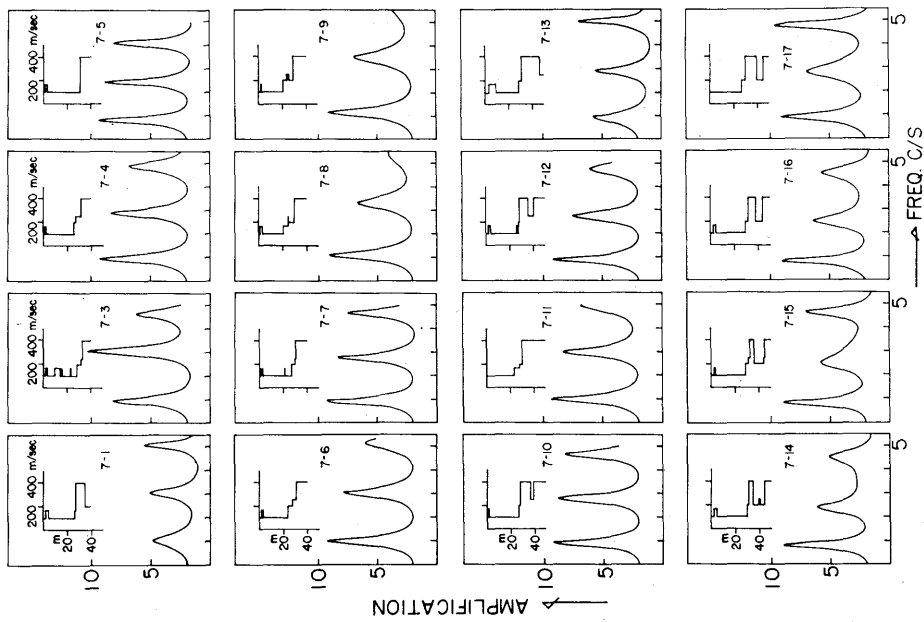


Fig. 7-5.

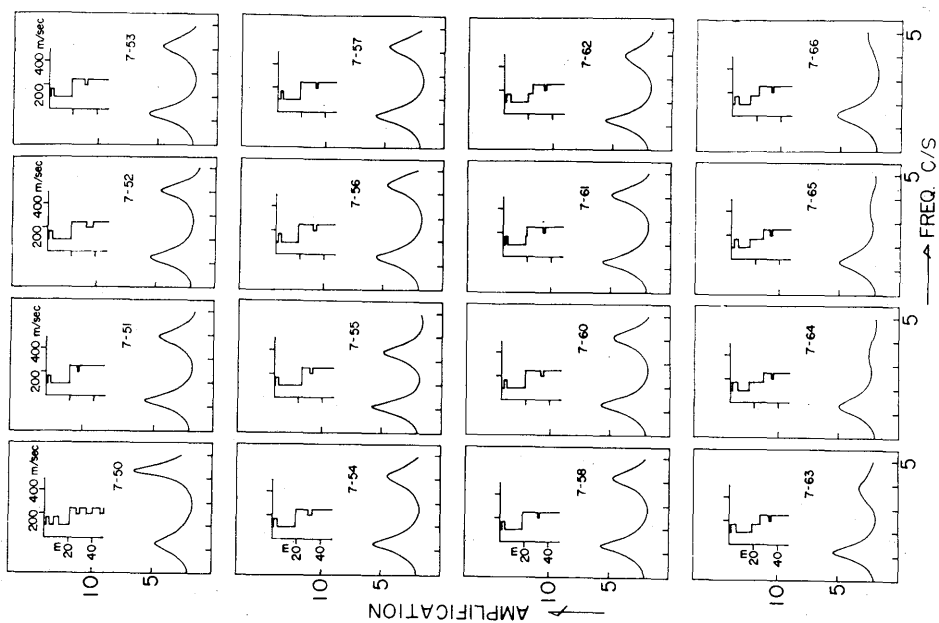


Fig. 7-8.

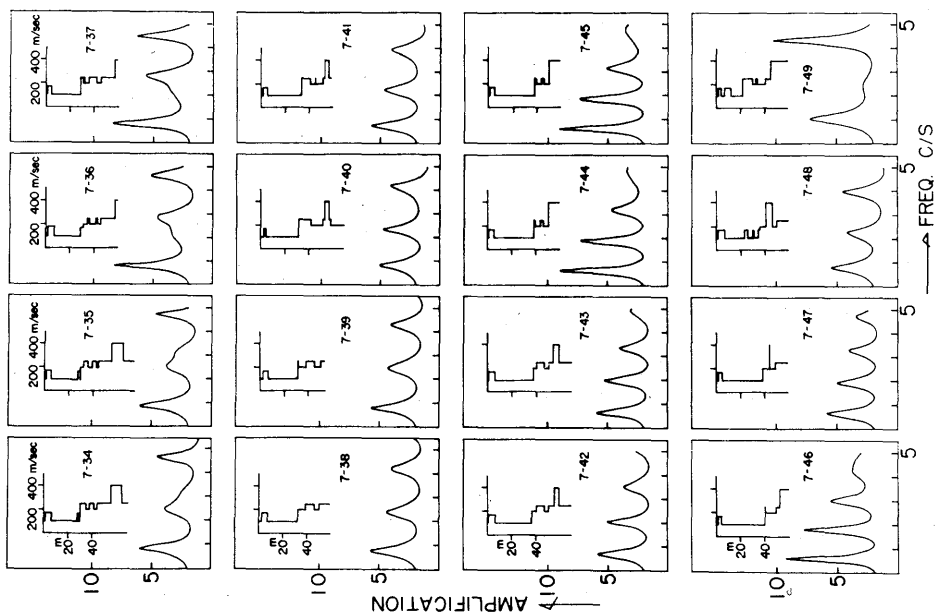


Fig. 7-7.

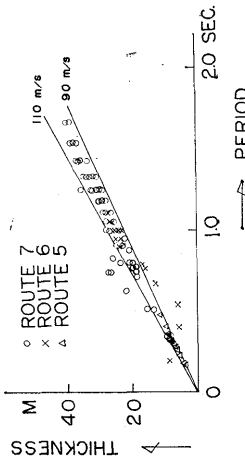


Fig. 8. Relation between the thicknesses of alluvial layers vs. predominant periods (1st peaks).

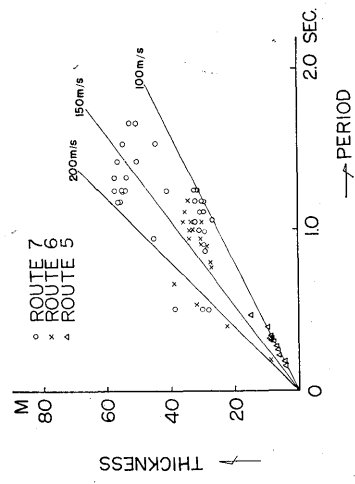


Fig. 9. Relation between the thicknesses of soil layers down to Tokyo gravel bed vs. predominant periods (1st peaks).

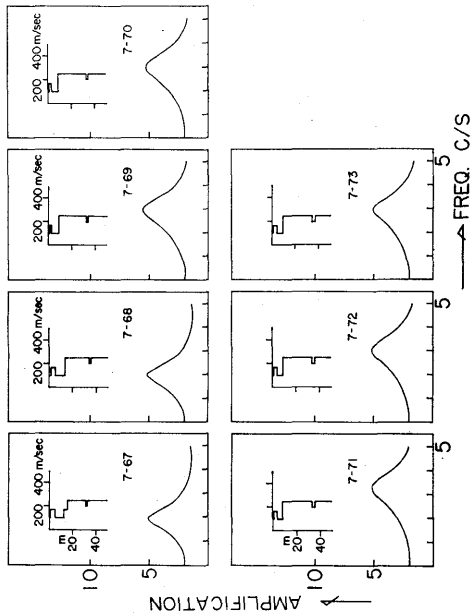


Fig. 7-9.

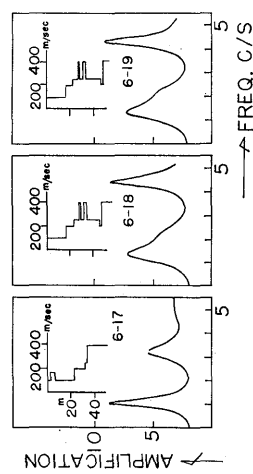


Fig. 7-4.

そこで最初のころみとして、これ等の仮定のもとに、よみとった地質断面の最下層に、あらゆる周波数に対して一様なスペクトル密度をもつような地震波（S 波）が垂直に入射した場合に地表で予想される地震動のスペクトルをもとめた（Fig. 7-1—Fig. 7-9）。なお計算では、入力波の振幅を 1 とし減衰は無視してある。図には、仮定した地下の速度分布もしめしてある。

Fig. 8 はこのようにして得られた一次の卓越周期と冲積層の厚さとの関係をしらべた

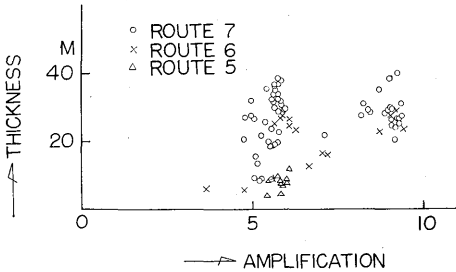


Fig. 10. Relation between the thicknesses of alluvial layers vs. amplifications (1st peaks).

ものである。また Fig. 9 は同様にして、縦軸に層々構造物の基礎にえられる東京礫層までの厚さをとってある。厚さと卓越周期の関係は Fig. 8 の方がはるかによい。このことは、計算に用いた冲積層及び洪積層のインピーダンス比から考えて、当然のことかもしれないが、卓越周期に関する限り、主として冲積層の厚さが関与していることがわかる。

Fig. 10 は、増幅率と冲積層の厚さとの関係をしらべたものである。重要なことは、

これ等が冲積層の厚さと全く無関係に、6 および 9 付近の 2 つのグループにわかれてしまうことである。そこでこれら 2 つのグループの代表的な地下構造ををしらべてみよう。前者は、S7-22～S7-30（Fig. 7-6 参照）等によって代表される砂礫層が計算を行なった範囲で地下に見当たらないもの、および、S7-20～S7-21, S7-40～S7-43（Fig. 7-6, Fig. 7-7 参照）等によって代表される砂礫層があってもそれほど厚くなく下の層が出ている場合である。後者は、最下層が砂礫層であり、その下のデーターがないため計算ではこれが厚く存在するとしてある。しかしながら、実際には下町の地下においてこれ等の砂礫層（東京礫層とよばれる）はそれほど厚いものではないから、むしろ前者の方が下町の地盤構成の代表的なものといえるであろう。この考え方にたてば、砂礫層の存在は、増幅率に関する限りほとんど影響をおよぼさないようである。さらに S 波速度が 400 m/s をこえる第三紀層は、下町では 200 m 近い地下にあることを考えれば、洪積世の堆積物中での垂直速度分布の gradient は非常にゆるやかであることが予想され、近似的には深さに対して一様な S 波速度を持つ基盤とも考えられるから 2 秒程度より短い周期を問題にする場合には、冲積層の厚さのみを問題にすればよいということになる。したがって冲積層の厚さの分布図はとりもなおさず卓越周期の分布図に書きなおすことが出来る。Fig. 11 は、以上のような見地からえられた東京下町における卓越周期の分布図である。なお前にものべたように、この卓越周期における地盤の増幅率は、冲積層の厚さ、および周期に無関係に 6 倍弱である。ただし、これには地表における反射の影響もはいつているから、実際には、洪積層が地表に露出して、かつ非常に厚いところに較べて 3 倍弱ということになる。

ところで、関東大地震による下町の家屋被害と冲積層の厚さとの関係が、河角<sup>6)</sup>により

6) 河角広 資源データーブック第 6 号災害編 その 2 災害危険度の分布 昭和 27 年 経済安定本部資源調査会事務局。

まとめられている。それによれば同じ地震について横浜の地盤について表<sup>7)</sup>のおこなった調査結果とやや異なり、沖積層の厚さが厚くなれば、被害も増大するとされている。金井等<sup>8)</sup>によれば、木造家屋については、0.4 s の卓越周期付近に震害の極大があるとしている。よってこのような卓越周期を与える沖積層の厚さは Fig. 8 より 10 m 前後であることがわかる。そしてそれよりも厚いところでは、共振の周期からはずれるから、むしろ被害は小さくなくてもよい筈である。しかし現実には江東地区では、沖積層の厚さが 30~40 m 近いのにもかかわらず大きな被害を受けている。今まで我々は第一の peak を与える卓越周期のみを問題としていた。これは媒質内における粘性の影響で（たとえば Voigt 型の場合粘性の影響は周波数に比列して増大する）第2の peak はそれほど卓越しないであろうと考えていたためでもある。現在はまだ粘性による減衰の機構は必ずしも明確にされておらず、かつ実測も非常に数が少なく、この方面からの検討は出来ない。Fig. 12 は第2の卓越周期と沖積層の厚さとの関係、Fig. 13 はその時の増巾率と厚さとの関係をしめしている。Fig. 13 においては前述の第2のグループ、すなわち第1の卓越周期におけ

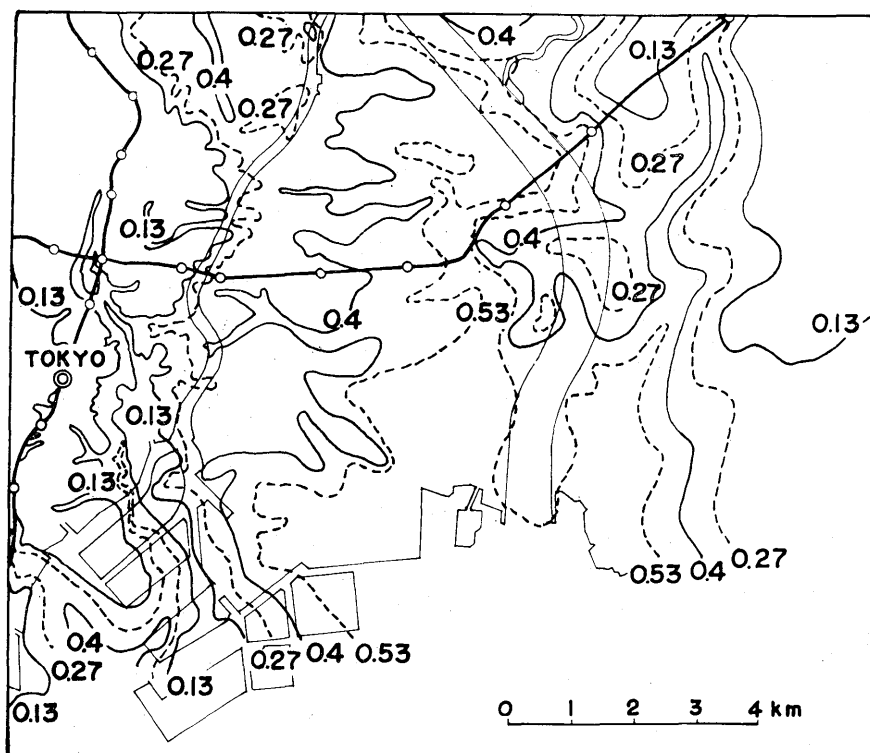


Fig. 11. A map of downtown Tokyo showing the distribution of predominant periods during the earthquakes (1st peaks).

7) S. OMOTE, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **27** (1949), 57-62.

8) K. KANAI et al., *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **44** (1966), 1297-1333.

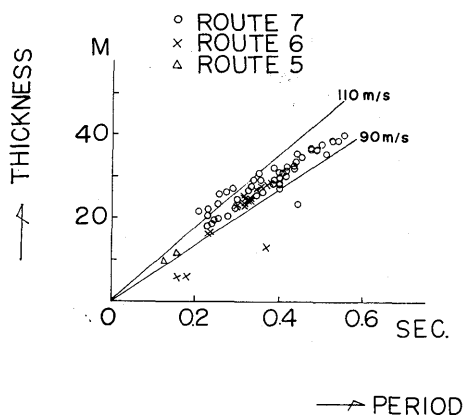


Fig. 12. Relation between the thicknesses of alluvial layers vs. predominant periods (2nd peaks).

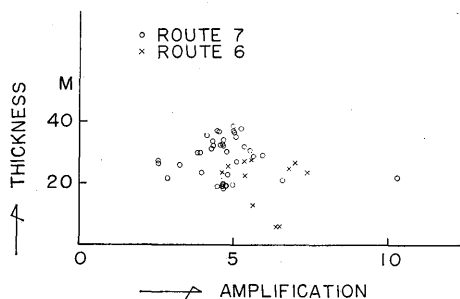


Fig. 13. Relation between the thicknesses of alluvial layers vs. amplifications (2nd peaks).

る増幅率が9倍位になるものはのぞいてある。同図で増幅率のばらつきが Fig. 10 に較べて大きいのは、沖積の地盤構成が近似的には単一層とみなせるが実際にはかなり複雑であることをしめしているのである。しかし平均的には約5倍の増幅率をしめしている。震害が振動のみによると考えるのは早計であり、不等沈下その他色々な他の要素もあわせ考えねばならないであろう。しかし、実際に減衰が小さく、第2、第3の卓越同期まで問題にしなればいけないと考えると、さきへのべた沖積層が厚くても被害があることの一応の説明がつくことになり面白いことであると思われる。この考え方が正しいとすれば、東京の下町では、沖積層の厚さが、10 m, 30 m 付近 (第1の卓越周期でそれぞれ 0.4 s, 1.2 s 付近) の場所が危険であるといえる。それを示したのが Fig. 14 の第2の卓越周期の分布図である。実際に、河角のまとめた図<sup>9)</sup>にも明らかにその厚さのところに被害が集中している傾向がうかがわれる。\*

Fig. 11 をたしかめる他の手段として、もっとも直接的なものは、自然地震観測により、その地盤の卓越周期を調べることである。Table 6 は、自然地震の観測からえ

Table 6.

Location	Predominant Period (Obd.) <sup>10)</sup> s	Thickness of Alluvium m	Predominant Period (Calc.) s
Kanamachi	0.5	30	1.2, 0.4
Azumacho	0.38, 0.77	26	1.0, 0.3
Higashi-Shinozakicho	0.4	16~17	0.6~0.7
Oshima	0.4~0.5	30~35	1.2~1.4 0.4~0.5
Sumida Park	0.5~0.6	17	0.7

9) *loc. cit.*, 6).

\* 但し河角の図にある沖積層の等深線は、その後のデータにより幾分か変わっているようである。

10) 地震研究所地盤研究会 地震研究所彙報 33 (1955), 471-545.



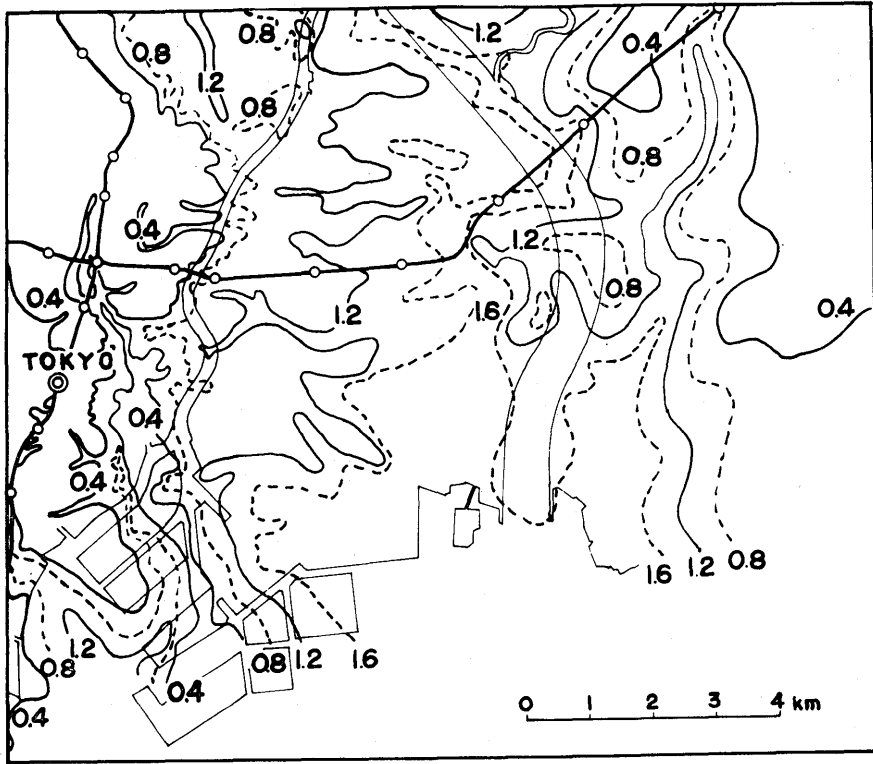


Fig. 14. The distribution of predominant periods during the earthquakes (2nd peaks).

られた卓越周期と、今回の結果との比較である。なお表で冲積層の厚さは、東京地盤図により推定した。結果はこの種のものとしては、かなりよくあっているといえるであろう。このような意味で、下町における系統的な同時自然地震観測（特に長周期の地震計による）の必要性を痛感した次第である。

### 3. ま と め

地震時における地盤の振動性状をしらべ、災害防止のための基礎資料を得るひとつのころみとして、東京下町を横断する地質断面図をもととして、いままでに得られた S 波の速度を用い、地震時に期待される卓越周期の図をつくった。計算において地盤図の粘性による減衰は無視した。この結果 2 秒程度以下の卓越周期に関しては洪積層と冲積層が重要な役割を演じていること、いいかえれば、冲積層の厚さのみでそれがきまってしまうこと、また増幅率は、冲積層の厚さとは無関係に、洪積地盤が地表に出ているところと比較すれば、ほぼ 3 倍程度になることが明らかになった。

また、関東大地震の際の家屋の被害状況をみると、冲積層の厚さが、10 m, 30 m 付近のところが多いように思われる。家屋の被害は、地盤の卓越周期が 0.4 s のときに最大であるといわれている。前記の場合、第 1 次の卓越周期は、それぞれ、0.4 s, 1.2 s となる。

しかし、第2次の卓越周期まで考えれば、30 m の場合も 0.4 s をあたえることになり、震害からのデーターにあうことになる。このことは、地盤内における粘性による減衰が意外に小さいことをおしえてくれているのかもしれない。また第2次まで考えると、いままでにおこなわれた自然地震観測の結果ともかなりよくあっていることがわかった。

卓越周期の分布図は、東京下町における沖積層の等深度線をもとにしてえがいたものであるが、必ずしも正確なわけではなく、変更を要する地点も多々あることと思われる。目下東京都土木技術研究所において、細かに資料を製作中であるときいている。一日も早い完成を心から望むものである。

また卓越周期の分布図をよりよくしていくためにも、S波の速度分布、粘性による減衰等の基礎的な調査、さらに長周期地震計による、系統的な、自然地震の同時観測の必要性を痛感する。

#### 4. お わ り に

おわりに、本研究の基礎となった地質断面図を見せて下さった、首都高速道路公団の関係者に厚く御礼申し上げる。また図面の製作に協力された、渡辺さゆり、永田滋子の両嬢にも御礼申し上げる。

本研究の計算には、東京大学大型計算機、HITAC 5020 (課題番号、3001B00450, 3001CX0128) を使用した。

---

### 10. *Vibration Characteristics of Subsoil Layers in Downtown Tokyo during the Earthquakes*

By Etsuzo SHIMA,  
Earthquake Research Institute.

The elucidation of vibration characteristics of the subsoil layers during violent earthquakes is essential before we consider any problems related to engineering seismology. It is well recognized that the S wave information plays an important role for this purpose. Therefore, a series of seismic surveys by means of S waves have been conducted to clarify the S wave velocities in the typical subsoil layers often found in the Tokyo Metropolitan area. The results of these surveys are summarized and shown in Fig. 6.

In downtown Tokyo, precise geological sections are available along the routes of the Metropolitan Express Way System. Consulting these geological sections as well as S information given in Fig. 6, S wave underground structures at about 100 points along the routes have been derived. The expected spectral responses at the ground surface were thus calculated, assuming that the spectrum of the earthquake is constant with respect to the frequency and the seismic waves are normally incident on the surface layer from the substratum (Fig. 7-1~Fig. 7-9). In these calculations, the attenuation of seismic waves in the surface layer was neglected.

Through the analysis, the following conclusions can be drawn.

- 1) As far as the predominant periods shorter than approximately 2 seconds are concerned, the depth of the boundary between the alluvial and the diluvial strata plays an important role in forecasting the predominant period at the site.
- 2) The amplification factor of the surface layer in downtown Tokyo is independent of the thickness of the surface layer itself. The factor is approximately three times compared with the places where the thick diluvial stratum is found at the surface.

From the above-mentioned conclusions, the distribution map of the expected predominant periods during the earthquakes in downtown Tokyo has been thus constructed (Fig. 11).

According to Kanai et al., the degree of damage done to the wooden houses due to the earthquakes is maximum at the places where the predominant periods of the grounds are 0.4 sec. In the case of the Great Kanto Earthquake of 1923, the damage seems to be severe at the places where the thicknesses of alluvial layers are around 10 m and 30 m, which correspond to the predominant periods of 0.4 sec and 1.2 sec respectively. However, if we take the higher order predominant frequency (2nd) from the response curve into consideration, the latter case will give 0.4 sec, and this explains why the damage is found at such places. If this is the case, the attenuation of the seismic waves in the surface layers is so small that it does not affect the amplification factors of the higher order resonant frequencies.

The forecasted predominant periods were compared with the ones obtained from the routine observations of natural earthquakes. A fairly good agreement was found between them.