都内の S 波速度と地震基盤について

小川 好*・星野 務*

S. Wave Velocities and Densities of Subsoil Layers and Seismic-baseroack in Tokyo

Yoshimi OGAWA & Tsutomu HOSHINO

Abstract

To get vibration characteristics over 23 wards in Tokyo, measurements of "S" and "P" wave velocities were taken at 8 places. From these measurements, more considerable scattering in "S" wave velocities are observed in sandy layers, and gravel and sand layers comparing with clay Formation. And also, as for the "S" wave velocities of upper Yurakucho Layers, we found that N-Value is separated into 2 groups by the values of "N=0" and "N $\geq$ 1". The density of subsoil measured in the field using scattering γ -ray is coincided with the density obtained in our laboratory test.

It is possible that the "Kazusa-Group" is one of the strongest seismic baserocks in Tokyo. It was found that the "Kazusa-Group" is thick, for instance, in the Edogawa area, it is over 2,000 m and in the Tama area, over 500 m. It means that the layer is physically fixed by referring the resistivity test by electrical logging and the densities of subsoil measured with γ -ray.

"S" wave velocities in the Kazusa-Group measured in Denenchofu area, one of the 8 places, are 580 m/s in the field test, and by ultrasonic 650 m/s.

1. はじめに

地震の被害は、地震の規模や震央距離、震源の深さなどの条件だけによって決定されるものではなく、その地点の地盤の性状に大きく支配されていることは、かなり古くから知られていた。こういった「地盤が良い」とか「地盤が悪い」とかいった、定性的な表現であらわされていた地震時の地盤の挙動を定量的にとらえる方法は、関東地震を契機として大きく進歩した。

定量化の方法としては、現在のところ、

- ① 常時微動を測定する。
- ② 自然地震を測定する。
- ③ 地層の層厚やS波速度、密度などを測定し、モデル計算をおこなう。

の三つの方法が主として用いられている。

これらの調査は、いずれもその測定点近傍の地盤振動特性を明らかにすることが目的のものである。広い地域をカバーするためには多数の測定点を設けなければなら

ないことが、費用などの点でネックになっている。しかし、都市防災の観点からは、このような地震に対する地盤の挙動を都市全域にわたって予測し、地盤による地震動の増幅率にしたがって地域を区分する作業—いわゆる Seismic microzoning—は、きわめて重要なものとなる。

このため、いくつかの仮説をおいたうえでの、地震に対する地盤の挙動を計算することがおこなわれている。東京の区部については、すでに嶋ら¹⁾によって、東京都防災会議の資料として発表されている。これは、東京都土木技術研究所で発行した「東京都地盤地質図」²⁾で区分された地層の層厚と、東京都内でおこなわれたS波速度の実測値をもとに各地層のS波速度と密度を仮定して、多重反射理論によってレスポンスを求めたものである。このような方法では、S波速度を決定することが特に重要であることから、東京都土木技術研究所でも都内の7カ所でボーリング調査をおこない、S-P 検層と密度検層をおこなった。また、東京都第5建設事務所でも、蔵前橋の調査と同様の測定をおこなったので、あわせて報告する。

なお、東京都土木技術研究所でおこなわれたこれらの

* 東京都土木技術研究所

図-1 調査地点位置図

調査は、「東京都総合地盤図」³⁾のための調査の一環としておこなわれたものである。

2. 調査地点

調査地点の選択にあたっては、選ばれた地点の地質条件が各々異なっており、またその地点の地質が東京の代表的なものであることが望ましい。このため、調査地点は「東京都地盤種別図」⁴⁾の分類にしたがって、低地部に5カ所、台地部に3カ所を選んだ(図-1、表-1)。東京都地盤種別の区分を、図-2、表-2に示す。

調査地点のうち、中川5丁目(飯塚橋)は、この地点が先にあげた東京都防災会議の資料で、最も高い増幅率を示した地点である。

表-1 調査地点とその地盤種別

番号	調査深度 (m)	調査地点	地盤種別
1	70	足立区中川5丁目	A-3
2	40	台東区蔵前1丁目	A-2
3	50	足立区梅田8丁目	A-2
4	50	江東区清澄2丁目	A-2
5	55	江戸川区堀江町 2871	A-3
6	30	大田区田園調布3丁目	B-1
7	40	港区白金台2丁目	B-1
8	30	練馬区大泉学園 2540	B-2

図-2 東京都地盤種別図

3. 測定方法

図-3 に示すように、ボーリング孔の途中に固定できるようにした地中受振器によって、地表で発生させた地震波を観測した。測定は深度について 2m 間隔とし、できるだけ地層の境界でも測定した。

震源は、S 波については板たたき法、P 波については“かけや”で地表面を強打する方法を用いた。(ただし、蔵前 1 丁目(蔵前橋)の測定では、実験地がアスファルト舗装されていたために、S 波についても“かけや”で地表面を強打する方法を用い、P 波のあとにおくれて現われる S 波を読みとった。)

板たたき法は発生機構が簡単で、良好な SH 波を発生させる方法である。また、板をたたく方向を変えることで、位相を逆転させることができる。

測定結果の一例を 図-4 に示す。この図は堀江町のものであるが、図中の実線は感振器のはいつているボーリング孔に向かって板の右側をたたいた時のもの、破線は左側をたたいた時のものである。

4. 測定例

(1) 中川 5 丁目(飯塚橋)

この地点は、層厚 9m の有楽町層上部 (Yu) の下位に、層厚 21m の有楽町層下部 (Yl)、層厚 25m の七

表-2 東京都地盤種別の区分

地域	地盤種別	地 質 的 特 長
沖積低地域	(A-1)	有楽町層上部 (Yu) の下位に有楽町層下部 (Yl) を欠いて直接東京層 (To) が分布している地域。 または有楽町層上部 (Yu) の下位に有楽町層下部 (Yl), 東京層 (To) が分布している地域で、軟弱土層の厚さが 10m 以下の地域。
	(A-2)	有楽町層上部 (Yu) の下位に有楽町層下部 (Yl), 七号地層 (Na) が分布している地域で、軟弱土層の厚さが 10~30m の地域。
	(A-3)	有楽町層上部 (Yu) の下位に有楽町層下部 (Yl), 七号地層が分布している地域で、軟弱土層の厚さが 30m 以上の地域。
洪積台地域	(B-1)	関東ローム層 (Tml), ローム質粘土層 (lc) の下位に、直接東京層 (To) が分布している地域。
	(B-2)	関東ローム層 (Tml), ローム質粘土層 (lc) の下位に、武蔵野礫層 (Mg), 立川礫層 (Tag) または本郷層 (Ho) が分布している地域。
河地谷域底	C	洪積台地を刻む谷部の地域で、腐植土, 腐植質粘土が分布している地域。

図-3 S・P波の測定方法

号地層 (Na), 層厚 2m の東京層 (To), 東京礫層 (Tog) の順に分布しており、地盤種別では A-3 に区分されている。

S 波速度は、地表から 18m までは 110 m/s, 18~30 m までは 150 m/s, 30~53 m までは 240 m/s, 53~70 m までは 400 m/s となっている (図-5)。図中のポアソン比 (σ) は、S 波速度と P 波速度から求めたものである。

(2) 蔵前1丁目 (蔵前橋)

この地点は、層厚 1m の有楽町層上部 (Yu) の下位に、層厚 4m の有楽町層下部 (Yl), 層厚 27m の東京層 (To), 東京礫層 (Tog) の順に分布しており、地盤種別では A-2 に区分されている。

S 波速度は、地表から 8m までは 100 m/s, 8~23 m までは 180 m/s, 23~40 m までは 230 m/s である (図-6)。

図-4 S波測定結果の一例

(3) 梅田8丁目

この地点の地質は、層厚 5m の有楽町層上部 (Yu) の下位に、層厚 18m の有楽町層下部 (Yl), 層厚 11m の七号地層 (Na), 層厚 4m の埋没段丘礫層-2 (btg-2),

図-5 中川5丁目の地質柱状図とS波速度

東京層 (To) の順に分布しており、地盤種別では A-2 に区分されている。

S 波速度は、地表から 14 m までが 120 m/s, 12~26

m までが 210 m/s, 26~33 m までが 320 m/s, 33~40 m までが 430 m/s, 40~50 m までが 380 m/s となっており, 40 m のところで速度がおそくなっているのが見ら

図-6 蔵前1丁目の地質柱状図とS波速度

れる。この点は、埋没段丘礫層 (btg-2) と東京層 (To) の境界面に、ほぼ一致している (図-7)。

(4) 清澄2丁目

この地点の地質は、層厚 5 m の有楽町層上部 (Tu) の下位に、層厚 22 m の有楽町層下部 (Yl)，層厚 3 m の埋没ローム層 (bl)，層厚 10 m の埋没段丘礫層 (btg-2)，東京層 (To) の順に分布しており、地盤種別では A-2 に区分されている。

S 波速度は、地表から 17 m までが 130 m/s，17~29 m までが 200 m/s，29~32 m までが 300 m/s，32~50 m までが 450 m/s である (図-8)。

(5) 堀江町

この地点の地質は、層厚 8 m の有楽町層上部 (Yu) の下位に、層厚 23 m の有楽町層下部 (Yl)，層厚 11 m の七号地層 (Na)，東京層 (To) の順に分布しており、地盤種別では A-3 に区分されている。

S 波速度は、地表から 8 m までは 180 m/s，8~20 m までは 110 m/s，20~31 m までは 220 m/s，31~47 m ま

図-7 梅田8丁目の地質柱状図とS波速度

では 310 m/s，47~55 m までは 480 m/s となっている。有楽町層上部 (Yu) から有楽町層下部 (Yl) に交わる深度で、S 波速度が 180 m/s から 110 m/s に低下しており、この変化は N 値の低下とも一致している (図-9)。

(6) 田園調布3丁目

この地点の地質は、層厚 11 m の関東ローム層 (Tml) の下位に、層厚 4 m の東京層 (To)，層厚 2 m の東京礫層 (Tog)，上総層 (Ka) の順に分布しており、地盤種別では B-1 に区分されている。

S 波速度は、地表から 10 m までが 170 m/s，10~14 m までが 270 m/s，14~30 m までが 580 m/s となっている。東京層 (To) から東京礫層 (Tog) に交わる点で S 波速度も大きく変化しており、ここでも N 値の変化と S

図-8 清澄2丁目の地質柱状図とS波速度

波速度の変化は、よい一致を示している (図-10)。

(7) 白金台2丁目

この地点の地質は、層厚 10m の関東ローム層 (Tml) の下位に、層厚 14m の東京層 (To), 層厚 8m の東京礫層 (Tog), 層厚 4m の江戸川層 (Ed), 上総層群 (Ka) の順に分布しており、地盤種別では B-1 に区分されている。

S 波速度は、地表から 10m までは 160 m/s, 10~14m までは 330 m/s, 14~24m までは 240 m/s, 24~40m までは 550 m/s となっている (図-11)。

(8) 大泉学園

この地点の地質は、層厚 11m の関東ローム (Tlm) の下位に、武蔵野礫層 (Mg) が分布しており、地盤種別で

図-9 堀江町の地質柱状図とS波速度

は B-2 に区分されている。

S 波速度は、地表から 4m までは 110 m/s, 4~10m までは 220 m/s, 10~24m までは 400 m/s, 24~30m までは 280 m/s となっている (図-12)。

5. 地層別の S 波速度

今回測定した S 波速度を地層別に区分したものを、図-13 に示す。

S 波速度は物理量の一つであり、地下水の影響を比較的うけないことから、地層の二次的性質の一つと考える

図-10 田園調布の地質柱状図と S 波速度

図-12 大泉学園の地質柱状図と S 波速度

図-11 白金台2丁目の地質柱状図と S 波速度

図-13 地層別の S 波速度

Yu 有楽町層上部 Mg 武蔵野礫層
 Yl 有楽町層下部 To 東京層
 Na 七号地層 Tog 東京礫層
 bl 埋没ローム層 Ed 江戸川層
 Tml ローム層 Ko 上総層 (上部)
 btg-2 埋没段丘礫層-2

図-14 嶋による地層別の S 波速度⁵⁾

ことができるであろう。

粘性土層の S 波速度に比べて、砂質土層、砂礫層の S 波速度はばらつきが大きい。また、有楽町層下部 (YI) の S 波速度は、N 値が 0 と 1 以上とではちがいが見られる。なお、今回測定した有楽町層下部 (YI) は、すべて粘性土層である。

地層区分と S 波速度の対比については、すでに嶋⁵⁾、工藤⁶⁾ によってまとめられており (図-14)、今回の測定からもほぼ同様の結果が得られた。

6. 密 度

多重反射理論によって地盤の振動に対するレスポンスを求めるためには、地層の層厚と S 波速度、密度を知ればよい。地層の密度は、一般的にはボーリングコアで測定されるが、砂礫層や固結した地層の密度はボーリング孔の原位置試験によって求めることができる。今回の測定のうち 4 地点については、室内試験のほかに γ 線の散乱を利用した密度検層をおこなった。この結果は、室内試験から求めた土の単位体積重量とよい一致を示している。

これとは別に、東京都土木技術研究所で収集した都内の土質データから、地層別の土の単位体積重量の平均値を求めたものを、表-3 に示す。これは、東京都総合地盤図³⁾、の基礎資料として集めたもので、5431 箇のデータから計算したものである。

7. 地震基盤

多重反射理論による計算では、予想される地震波を入力させる地層を、地震基盤として設定しなければなら

い。地震基盤となるような地層の条件としては

- ① 対象とする地域全体に広がっている。
- ② S 波速度などの物理定数がほぼ一定である。
- ③ 基盤となる地層以下では S 波速度が大きく変化しない。

などがあげられる。

しかし、実際に地震基盤を設定するととなると多くの問題があり、研究者の間でも一致をみえていないようである。従来は、いわゆる岩盤であるとされていたが、東京都内では先第三系の岩盤と推定される地層の深度は、地表面下 2~3 km と深く、これまでにその深度まで到達したボーリングはない。しかし、江東区、江戸川区でおこなわれた、天然ガス井の記録によると⁸⁾、上総層群の層厚は 2000 m を越えており、その岩相も大きな変化がないと考えられる。

上総層群の分布は、世田谷区や大田区の台地斜面にも露頭として見られ、北東に向かって深度を増していることが知られている⁹⁾ (図-15)。このため、東京都 23 区の南部では、地表面下の浅いところに分布しており、今回

図-15 固結シトル層 (泥岩層) 最上部付近の分布形態 (T.P. 基準 単位: m, 文献 9) による

測定した田園調布のように、直接その振動特性を測定することができる。東京都の地盤沈下調査でおこなった 22 カ所の層序試錐によって、上総層群の泥岩層の分布は、多摩地区でも 500 m 以上の層厚があることが知られている⁹⁾。図-16 は、調布市調布ヶ丘でおこなった層序試錐の柱状図であるが、ここでは上総層群の泥岩層が 320 m の層厚まで確認されている。また、地層の物理特性を示す、電気検層による比抵抗値、および γ 線による地層の密度もほぼ一定の値を示している。

このようなことから、東京を対象とする場合には、前述の 3 つの条件を満足する地層として上総層群を地震基盤と考えることが可能であろう。このため、田園調布のボーリング・サンプルについて、室内での超音波速度の

表-3 地層別、N 値別の土の単位体積重量の平均値

地層名, N 値, 土質名	平均値	分 散	データ数	地層名, N 値, 土質名	平均値	分 散	データ数
表土 (Sl)	1.604	0.195	39	七号地層 (Na) N>30 (粘性土)	1.758	0.135	4
沖積層 (Al) N=0~5 (粘性土)	1.473	0.138	143	(砂質土)	1.902	0.160	31
(砂質土)	1.919	0.030	2	本郷層 (Ho) N=0~10 (粘性土)	1.400	—	1
N=6~10 (粘性土)	1.658	0.190	4	(砂質土)	1.607	0.364	3
(砂質土)	—	—	—	N=10~30 (粘性土)	1.703	0.342	3
N=11~30 (粘性土)	—	—	—	(砂質土)	1.918	0.237	21
(砂質土)	1.859	—	1	N>30 (粘性土)	1.650	0.099	2
N>30 (粘性土)	—	—	—	(砂質土)	1.900	0.167	11
(粘質土)	—	—	—	東京層 (To) N=0~10 (粘性土)	1.630	0.158	135
有楽町層上部 (Yu) N=0~5 (粘性土)	1.610	0.139	165	(砂質土)	1.774	0.215	15
(砂質土)	1.810	0.134	95	N=11~30 (粘性土)	1.712	0.161	100
N=6~10 (粘性土)	1.691	0.166	18	(砂質土)	1.822	0.118	101
(砂質土)	1.846	0.107	115	N>30 (粘性土)	1.661	0.129	26
N=11~30 (粘性土)	1.640	0.123	7	(砂質土)	1.890	0.139	191
(砂質土)	1.829	0.118	103	関東ローム (TMI) N=0~10	1.409	0.144	560
N>30 (粘性土)	—	—	—	N=11~30	1.574	0.136	12
(砂質土)	1.822	0.212	6	N>40	—	—	—
有楽町層下部 (Yl) N=0~5 (粘性土)	1.588	0.096	2509	ローム質粘土 (lc) N=0~10	1.549	0.158	324
(粘質土)	1.630	0.066	10	N=11~30	1.722	0.184	21
N=6~10 (粘性土)	1.622	0.143	87	N>30	1.855	—	1
(砂質土)	1.740	0.129	10	埋没ローム (bl) N=0~10	1.556	0.162	39
N=11~30 (粘性土)	1.673	0.147	17	N=11~30	1.688	0.144	12
(砂質土)	1.775	0.090	4	N>30	1.377	0.086	2
N>30 (粘性土)	—	—	—	埋没段丘礫層-1 (btg-1)	—	—	—
(砂質土)	—	—	—	立州礫層 (Tag)	—	—	—
七号地層 (Na) N=0~5 (粘性土)	1.644	0.096	15	埋没段丘礫層-2 (btg-2)	1.938	0.415	8
(砂質土)	1.872	0.160	5	武蔵野礫層 (Mg)	1.946	0.266	74
N=6~10 (粘性土)	1.681	0.128	36	東京礫層 (Tog)	1.980	0.198	88
(砂質土)	1.861	0.135	15	江戸川層 (Ed)	1.810	0.168	119
N=11~30 (粘性土)	1.715	0.115	23	上総層 (Ka)	1.861	0.077	18
(砂質土)	1.868	0.107	44				

表-4 田園園調布の泥岩コア—試料室内超音波伝達速度測定結果

深 さ (m)	状 態	S 波 速 度 (m/s)	P 波 速 度 (m/s)	ポアソン 比
-21.45	自 然	632	1,750	0.425
	湿 潤	591	1,790	0.439
	乾 燥	750	1,240	0.212
-22.40	自 然	655	1,720	0.415
	湿 潤	641	1,770	0.425
	乾 燥	783	1,300	0.215
-23.35	自 然	662	1,420	0.361
	湿 潤	629	1,500	0.393
	乾 燥	792	1,260	0.174

測定をおこなった (表-4)。このサンプルは、第四紀である上総層上部のものであるが、第三紀の上総層群についても S 波速度は大きな変化をしめさないであろうと考えられる。

野外測定の結果は、S 波速度は 580 m/s、P 波速度は 2000 m/s であり、室内実験の方が S 波速度はやや早く、P 波速度はややおそくなっている。

8. ま と め

1. 東京都 23 区内の地盤振動特性を調べる目的で、都内 8 カ所で S-P 検層をおこなった。地層別の S 波速度を、図-13 に示す。この結果から、粘性土層に比べて、砂質土層、砂礫層の方が、S 波速度にばらつきが見られ

図-16 調布ヶ丘の柱状図 (文献 9) に加筆
To-group; 東京層群
Ka-group; 上総層群

ることがわかった。また、有楽町層下部 (YI) は、N 値が 0 と 1 以上で S 波速度に変化がみられることがわかった。

2. γ 線を利用した密度検層の結果と、室内試験による単位体積重量は、よい一致を示している。また、都内の 5431 個のデータから求めた土の単位体積重量の平均値を、表-3 に示す。

3. 東京の地震基盤として、上総層群を考慮することが可能であろう。田園調布で測定した S 波速度は、野外実験では、580 m/s、室内の超音波速度の測定では 650 m/s であった。

参考文献

1. 嶋 悦三, 他 (1970): 東京都 (23 区) 地盤の振動に対するレスポンス 東京都防災会議
2. 東京都土木技術研究所 (1969): 東京都地盤地質図 (23 区)
3. 東京都土木技術研究所 (MS): 東京都総合地盤図
4. 青木 滋, 他 3 (1970): 東京都 23 区内の地下地質と地盤の区分について, 東京都土木技研年報
5. 嶋 悦三, 他 (1968): 東京都内各所における S 波の測定結果 (第 3 報) 地震研究所彙報
6. 工藤一嘉 (1972): 地盤と物質量の対比について, 物理探鉱
7. 首都圏基盤構造研究グループ (1976): 東京の基盤構造について, その 2, 地震学会春季大会講演予稿集
8. 東京都土木技術研究所 (1963): 東京都地質図集 1
9. 遠藤 毅, 他 2 (1974): 東京の第四系, 東京都土木技研年報