

9-1 地震波の増幅メカニズム

これまで、構造物の揺れ方の物理について勉強してきた。同様に地盤の揺れ方にも物理が存在する。ここでは、この物理に関してその要点について勉強する。

9-2 地盤の物性値

地盤の揺れ方は、以下の物性値に強く依存する。

(1) S波速度： V_s

せん断波速度ともいう。一般に、地震波形の中でもっとも卓越するのはS波である。そのS波の伝わる速さがS波速度である。したがって、地盤震動の中でも、もっとも重要な物性値である。なお、変数名として、 V_s と表記されることもある。

(注意：応答スペクトルなどで加速度、速度や変位などを勉強してきたが、S波速度は、その速度とはまったく別であるので注意すること。)

(2) P波速度： V_p

P波が伝わる速度である。なお、変数名として、 V_s と表記されることもある。地下水位より深い地盤では、一般に1500m/s以上である。この1500m/sは、水の音速度である。

(3) ポアソン比： ν

構造力学などで学んだポアソン比と同じ定義である。コンクリートやスチールと同じように、粒粒の地盤や岩石にもポアソン比が存在する。なお、流体にもポアソン比があり、水のそれは、0.5である。なお、軟弱地盤のポアソン比は、0.5に近いことが多く(0.45~0.49)、ポアソン比の値的には、流体に近いことが分かる。このことから、軟弱地盤は揺れやすいことが理解できる。なお、コンクリートは $\nu=1/6\sim 1/12$ 程度、スチールは $\nu=1/3\sim 1/4$ 程度、岩石は0.25程度である。

(4) 密度：

単位当たりの質量である。建設現場で扱う地盤のS波速度は数十～数百m/s程度とばらつきが大きいのに対し、地盤の密度は、1.5～2.5ton/m³とばらつきの範囲は比較的小さいのが特徴である。

(5) 物性値間の関係

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$
$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}$$

ここで、 E はヤング率、 G はせん断剛性であり、 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ の関係にある。

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$

なお、 $0 \leq \nu \leq 0.5$ なので、 $V_p \geq \sqrt{2}V_s \approx 1.4V_s$ となる。なお、 $\nu = 0.5$ のときに、 $\frac{V_p}{V_s} = \infty$ となるが、これは、 $V_s = 0$ となるからである。流体の ν は 0.5 であり、せん断力が伝わらないので $V_s = 0$ となる。

参考：スチール： $E = 200 \text{ kN/mm}^2$ 、コンクリート： $E = 25 \sim 35 \text{ kN/mm}^2$ 程度である。

(6) 便利な指標：N 値

N 値は、標準貫入試験から得られる値である。【標準貫入試験方法を簡単に説明すると 63.5kg のハンマー（おもり）を 75cm の高さから自由落下させて、サンプラーを土中に 30cm 貫入させるのに要する打撃回数を測定する試験で、この時の打撃回数が N 値です。（ジオテック（株）、

<http://www.jiban.co.jp/navi/001.htm> から引用）】

したがって、上記(1),(2),(4)には SI 単位系で測定できる物性値であるのに、N 値は叩いた回数という非常にあいまいな物性値である。しかし、建設現場で簡単に測定できることや、上記(1)～(4)を推定する経験式があるため、非常に多用されている。しかし、これらの経験式はあくまでも統計的に得られたものであり、当然、誤差も大きいのでその適用には十分注意する必要がある。

参考：N 値から S 波速度への経験式*

砂質土 $V_s = 80N^{1/2}$ ($N \leq 50$)

粘性土 $V_s = 100N^{1/2}$ ($2 \leq N \leq 50$)

N	砂質土	粘性土
2	101	126
5	137	171
10	172	215
15	197	247
20	217	271
25	234	292
30	249	311
35	262	327
40	274	342
45	285	356
50	295	368

* 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計

例題

- (1) V_s , V_p からポアソン比 を求めよ .
- (2) 物性値が $V_s = 220\text{m/s}$, $V_p = 570\text{m/s}$, $\rho = 1.7\text{g/cm}^3$ の地盤のポアソン比 , ヤング率 E を求めよ . 単位も明記すること .

解答

$$(1) \quad \nu = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{Vp}{Vs} \right)^2 - 1 \right] / \left[\left(\frac{Vp}{Vs} \right)^2 - 1 \right]$$

(2)

$$\nu = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{Vp}{Vs} \right)^2 - 1 \right] / \left[\left(\frac{Vp}{Vs} \right)^2 - 1 \right] = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{570}{220} \right)^2 - 1 \right] / \left[\left(\frac{570}{220} \right)^2 - 1 \right] = 0.412$$

$$Vs^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}$$

より

$$E = 2\rho(1+\nu)Vs^2$$

したがって、

$$E = 2 * 1700 * (1 + 0.412) * 220^2 = 2.32 * 10^8 \text{ N/m}^2$$

9-3 地下構造はどうなっているのか？

(1) 比較的浅いところ

図 9-1 にある埋立地の PS 検層結果を示す。深さ 40m までの結果であるが、土質、N 値、 V_s 、 V_p ともに大きく変化していることがわかる。同図は、鉛直方向の変化を示したものであるが、実際の地盤は、水平方向にも、複雑に変化している場合が多い。なお、水平方向にも地下構造が変化している地盤を、不整形地盤と呼ぶ(図 9-2 参照)。不整形地盤では地震波が特定の方向にゆれ易くなることがあり、注意が必要である。

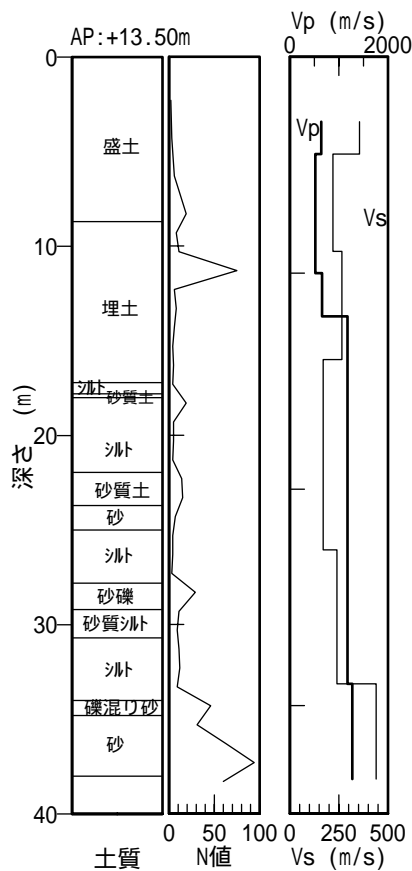


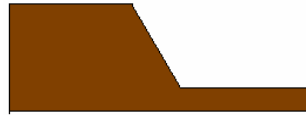
図 9-1 PS 検層の例 (東京都大田区埋立地)

PS 検層

講義で簡単に説明する．



(a) 基盤の傾斜



(c) 崖地形



(b) 水平方向の不均質性



(d) 地表面の凹凸

図 9-2 不整形地盤の例（不整形地盤は，数メートル規模もあれば，数キロ規模もある．例えば，図 9-3 のように首都圏自体も不整形地盤として捉えることができる．）

(2) 深いところ

図 9-3 に、首都圏の基盤までの深さを示す。ただし、S 波速度は、灰色の V 字ラインより北側が $V_s=5.7\text{km/s}$ で、南側が $V_s=5.4\text{km/s}$ と異なっていることに注意すること。基盤までの地層を堆積層と呼ぶと、堆積層は場所によって変化していることがわかる。また、西側（丹沢山地・関東山地）と北東側（筑波山）では、地表面に基盤が現れていることがわかる。このような、堆積層の厚さの変化は、周期数秒の地震波の伝播に大きな影響を与えている。

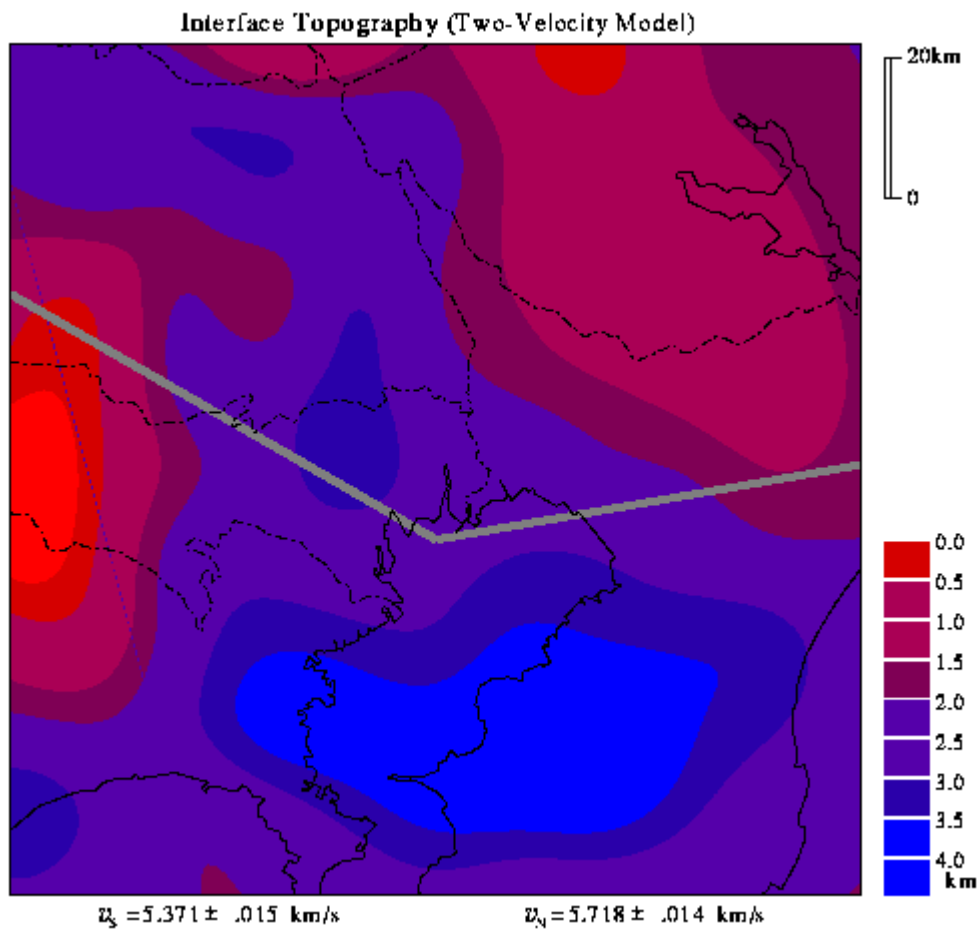


図 9-3 首都圏の基盤までの深さ（東京大地震研究所の瀧瀬研究室のホームページより）

9-4 耐震設計ではどの深さから考えれば良いのか？

これは、造る構造物の大きさで決まる。構造物の規模が大きくなると、構造物の固有周期も長くなる。地震波はいろいろな周期の波が重ね合ったものであるが、短周期の地震波は、主に地表付近の浅い地下構造の影響を強く受け、一方、長周期の地震波は、地下深いところまでの地下構造の影響を受ける。なお、参考に東京区部および横浜の大局的な地下構造を以下に示す。

表 9-1 東京区部モデル

層	S 波速度 (m/s)	P 波速度 (m/s)	密度 (t/m ³)	層厚 (m)
1	700	1800	1.9	1500
2	1500	2800	2.2	800
3	3000	5600	2.5	-

表 9-2 横浜モデル

層	S 波速度 (m/s)	P 波速度 (m/s)	密度 (t/m ³)	層厚 (m)
1	700	1800	1.9	800
2	1500	2900	2.2	2200
3	2500	4800	2.3	3000
4	3000	5500	2.5	-

なお、表の第 1 層 (S 波速度 700m/s) の上には、軟弱地盤が載っていることが多い(図 9-1 参照)。固有周期が比較的短い構造物 (1, 2 秒以下) を考える場合には、S 波速度が 400m/s の層を基盤と考えることが多い。N 値にして 50 以上の層である。この基盤は、**工学的基盤**と呼ばれることがある。ただし、 $V_s=400\text{m/s}$ あるいは N 値 50 以上を基盤と考える根拠は、あまり明確ではなく、議論も多い。工学基盤は、地震波動論から得られたというよりも、構造物の支持基盤として定義された感がある。したがって、この基盤は支持基盤と呼ばれることもある。

S 波速度 3000m/s の層は、一般に**地震基盤**と呼ばれており、固有周期が長い構造物 (2, 3 秒以上) を考える場合には、この地震基盤を基盤と考えて入力地震動を設定することが多い。

補足：基盤について

基盤とは、耐震設計や波動伝播シミュレーションのときにの最下層の地盤ということができる。地球は半径 6000km の球であるが、数十メートルや橋を作るのに、深さ 6000km までの地盤物性を考慮して設計する人はいない。通常、工学的基盤以下は、その基盤が無限に続いていると仮定して、耐震設計が行われる。つまり、基盤と

は、基盤より深いところが、無限に続いていると仮定できる地盤である。