

九州電力株式会社 総合研究所 正員 赤司六哉 永津忠治  
九州産業大学 工学部 正員 石堂純 学生員 ○中石光伸  
電力中央研究所土木技術研究所 正員 緒方信英

1. まえがき

地盤の地震時における応答解析を実施するには、地盤の構成材料の力学特性が十分に把握されているなければならない。土や岩は、発生するひずみの大きさによって、その力学特性が変化する。従って、地盤の地震応答解析を実施する際には、ひずみの大きさを考慮した力学諸定数を数式で表示するのが必要である。しかしながら、岩石や岩盤についてのひずみ依存性を考慮した数式表示は、あまり報告されていない。

そこで、ここではHardin-Drnevich式を用いて、軟岩の振動三軸試験結果を表示することとした。

2. 試料および試験方法

試験に用いた試料は、ブロックサンプリング法により採取した安山岩と凝灰岩の乱さない試料である。試験に用いた供試体の土質諸定数を表-1に示し、その平均粒度曲線を図-1に示した。

今回の試験は、直径10cm、高さ約24cmの供試体を所定の拘束圧のもとで等方圧密を行い、その後、側圧を一定に保ち、軸方向のみに振動数0.5Hzの正弦波状の軸荷重を小ひずみから大ひずみまで段階的に載荷した。その各ひずみ段階における繰返し回数は、13~14回とした。

3. 結果と動的変形特性の表示法および考察

計測された動的軸応力、動的軸ひずみおよび横方向ひずみの繰返し回数10波

表-1 土質諸定数の一覧

| 試料名 |    | 物理試験      |                        |               |           |             |            |           |           |           |           | 供試体の初期性状                            |           |           |           |           |       |
|-----|----|-----------|------------------------|---------------|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
|     |    | 比重<br>Gs  | 含水率<br>%<br>含水率<br>(%) | 粒度分布          |           |             |            |           | コンパクション   |           |           | 平均<br>粒径<br>D <sub>50</sub><br>(mm) | e         | Sr<br>(%) |           |           |       |
|     |    |           |                        | ふるい分け率<br>(%) | 砂分<br>(%) | シルト分<br>(%) | 粘土分<br>(%) | Uc        | Uc        | WL<br>(%) | WP<br>(%) |                                     |           |           | IP<br>(%) |           |       |
| 岩種  | 岩級 | 試料<br>No. | 試料<br>No.              | 試料<br>No.     | 試料<br>No. | 試料<br>No.   | 試料<br>No.  | 試料<br>No. | 試料<br>No. | 試料<br>No. | 試料<br>No. | 試料<br>No.                           | 試料<br>No. | 試料<br>No. | 試料<br>No. | 試料<br>No. |       |
| 安山岩 | D  | 273.427   | 2.00                   | 0             | 26.5      | 50.3        | 23.2       | —         | 62.1      | 38.0      | 24.1      | 1.0                                 | 1.774     | 1.242     | 1.198     | 9.73      |       |
|     |    | 274.44.0  | 2.00                   | 0             | 15.1      | 59.9        | 25.0       | 25.0      | 128       | 67.0      | 41.2      | 25.8                                | 3.0       | 1.771     | 1.222     | 1.242     | 9.88  |
|     | CL | 274.38.3  | 2.00                   | 0             | 70.1      | 21.9        | 8.0        | 56.0      | 20.8      | 71.6      | 34.0      | 36.8                                | 0.5       | 1.849     | 1.337     | 1.049     | 100.0 |
|     |    | 273.36.5  | 2.00                   | 0             | 71.3      | 20.2        | 9.5        | 59.1      | 28.0      | 180       | 35.3      | 32.7                                | 1.0       | 1.852     | 1.357     | 1.012     | 98.3  |
| 凝灰岩 | D  | 272.40.4  | 2.00                   | 0             | 69.2      | 22.8        | 8.0        | 54.1      | 125       | 70.0      | 34.8      | 36.0                                | 2.0       | 1.817     | 1.294     | 1.042     | 99.7  |
|     |    | 274.38.5  | 2.00                   | 0             | 69.2      | 22.6        | 8.2        | 53.2      | 104       | 71.4      | 34.0      | 36.0                                | 3.0       | 1.852     | 1.337     | 1.049     | 100.0 |
|     | CL | 250.49.2  | 9.52                   | 1.5           | 72.6      | 19.9        | 6.0        | 26.0      | 24        | NP        | —         | —                                   | 0.5       | 1.631     | 1.107     | 1.250     | 97.8  |
|     |    | 253.53.0  | 19.1                   | 2.1           | 70.6      | 20.8        | 6.5        | 31.0      | 3.0       | NP        | —         | —                                   | 1.0       | 1.660     | 1.094     | 1.213     | 99.8  |
| 凝灰岩 | D  | 250.52.2  | 9.52                   | 2.6           | 71.4      | 19.0        | 7.0        | 49.0      | 3.4       | NP        | —         | —                                   | 3.0       | 1.658     | 1.089     | 1.369     | 98.4  |
|     |    | 249.42.2  | 25.4                   | 8.1           | 72.3      | 16.6        | 3.0        | 12.0      | 1.2       | NP        | —         | —                                   | 0.5       | 1.765     | 1.241     | 1.168     | 97.2  |
|     | CL | 273.42.8  | 25.4                   | 8.2           | 70.3      | 19.3        | 2.0        | 10.0      | 0.9       | NP        | —         | —                                   | 1.0       | 1.765     | 1.236     | 1.209     | 96.6  |
|     |    | 272.44.2  | 19.1                   | 6.6           | 69.3      | 19.7        | 4.4        | 10.0      | 0.76      | NP        | —         | —                                   | 2.0       | 1.774     | 1.230     | 1.211     | 99.3  |
| 凝灰岩 | D  | 273.44.3  | 10.1                   | 7.3           | 71.2      | 17.1        | 4.4        | 9.8       | 0.79      | NP        | —         | —                                   | 3.0       | 1.761     | 1.220     | 1.238     | 97.7  |
|     |    | 257.42.5  | 9.52                   | 4.1           | 59.2      | 27.9        | 8.8        | 43.1      | 1.7       | 71.3      | 31.3      | 40.0                                | 1.0       | 1.758     | 1.234     | 1.083     | 100.0 |
|     | CL | 254.41.8  | 19.1                   | 4.6           | 57.4      | 28.8        | 8.8        | 38.5      | 1.09      | 74        | 134.9     | 99.2                                | 2.0       | 1.727     | 1.219     | 1.085     | 97.9  |
|     |    | 256.47.0  | 9.52                   | 3.7           | 62.1      | 24.1        | 11.1       | 70.8      | 1.53      | 71.8      | 34.4      | 37.4                                | 3.0       | 1.682     | 1.144     | 1.238     | 97.2  |
| 凝灰岩 | D  | 262.39.3  | 19.1                   | 6.5           | 67.5      | 19.0        | 7.0        | 47.0      | 1.92      | 76.8      | 37.9      | 38.9                                | 4.0       | 1.748     | 1.255     | 1.088     | 94.6  |

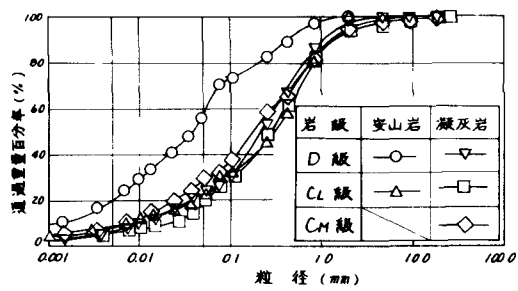


図-1 平均粒度曲線

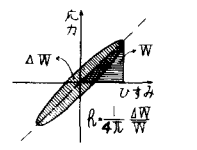


図-2 減衰定数の算出法

目の値から、せん断力Gとせん断ひずみγを求め、動的せん断弾性係数Gを算出し、図-3に示した。減衰定数γrは、図-2に示す方法で求め

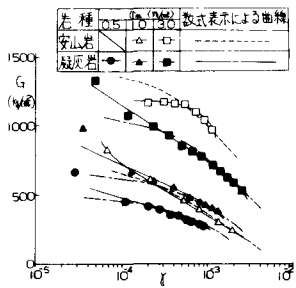


図-3 G~γ

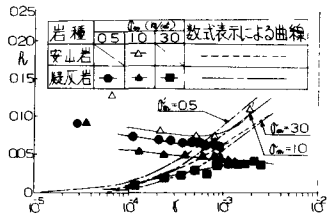


図-4 γr~γ

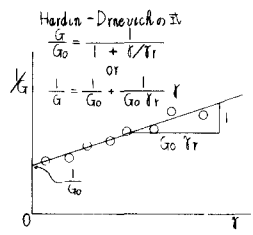


図-5 G0, γrの推定法

図-4に示した。Gは、有効平均主応力 $\bar{\sigma}_m$ が高くなる程大きくなり、 $\gamma$ が増大する程小さくなっている。一方、 $\bar{\sigma}_m$ は計測された値そのものが小さいため測定誤差が大きいと考えられ、データにバラツキが認められるが、 $\gamma$ の増大とともに大きくなる傾向がみられる。従って、G、 $\bar{\sigma}_m$ は $\bar{\sigma}_m$ とひずみ振幅に依存性が認められる。

以上の結果を地震応答解析に利用するには、Gと $\bar{\sigma}_m$ が数式にて表示される必要がある。今回の試験に用いた振動三軸試験装置は微小ひずみ振幅におけるせん断弾性係数 $G_0$ を直接測定して求める事ができないので、Hardin-Drnevich式を用いて図-5に示す方法で推定した。このようにして求めた $G_0$ および規準ひずみ $\bar{\gamma}$ を用いて、 $\bar{\sigma}_m$ との関係に表わしたのが図-6~9である。この図から、 $\log G_0 \sim \log \bar{\sigma}_m$ 、 $\log \bar{\gamma} \sim \log \bar{\sigma}_m$ は、ほぼ直線関係にあり、 $G_0 = A \bar{\sigma}_m^b$ 、 $\bar{\gamma} = C \bar{\sigma}_m^d$ の形で表示できる。よって、 $\bar{\sigma}_m$ を決めればGと $\bar{\gamma}$ が求まる。それをHardin-Drnevich式に代入すると、任意のひずみ振幅におけるGを求めることができる。図-10、11は、Hardin-Drnevich式において、それぞれ、 $\bar{\gamma} = 9.43 \times 10^{-4} \times (\bar{\sigma}_m)^{0.916}$ 、 $\bar{\gamma} = 158 \times 10^{-3} (\bar{\sigma}_m)^{0.599}$ を採用したときの $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線を $\bar{\sigma}_m$ について表わしたものである。

一方、 $\bar{\sigma}_m$ は、Hardin-Drnevich式より次式で表わされる。

$$\frac{\bar{\sigma}_m}{\bar{\sigma}_{max}} = 1 - \frac{G}{G_0}$$

従って算出された $\bar{\sigma}_m$ と $G/G_0$ の関係をグラフにプロットする事により、最大減衰定数 $\bar{\sigma}_{max}$ を求める事が出来る。この関係を示したのが、図-12、13である。

以上のようにして求められた $G_0$ 、 $\bar{\gamma}$ 、 $\bar{\sigma}_{max}$ を表-2にまとめて示した。

#### 4. おわりに

今回試験を行った結果、Gについての相関は、比較的良好一致が得られたが、 $\bar{\sigma}_m$ についての相関は、良い結果が得られなかった。この原因のうち大きな比重を占めているものは、今回用いた振動三軸試験装置が、 $10^{-4}$ 程度のせん断ひずみを測定するのが限度であったということであろう。すなわち、 $10^{-4}$ 以下におけるせん断ひずみを測定する装置の工夫が今後の課題である。

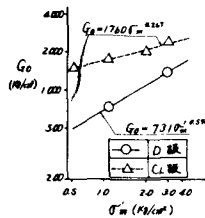


図-6  $G_0 \sim \bar{\sigma}_m$  (安山岩)

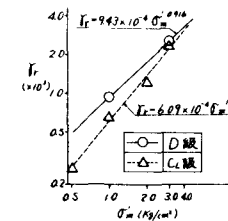


図-8  $\bar{\gamma} \sim \bar{\sigma}_m$  (安山岩)

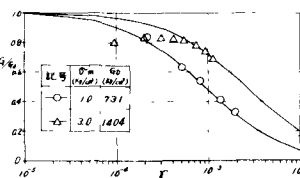


図-10  $G/G_0 \sim \gamma$  (安山岩)

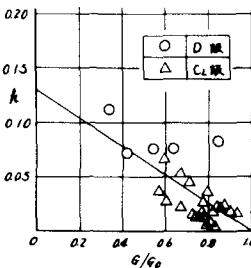


図-12  $\bar{h} \sim G/G_0$  (安山岩)

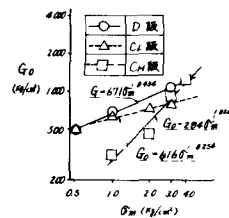


図-7  $G_0 \sim \bar{\sigma}_m$  (凝灰岩)

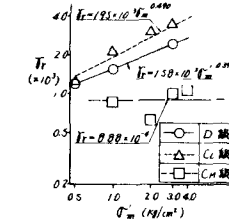


図-9  $\bar{\gamma} \sim \bar{\sigma}_m$  (凝灰岩)

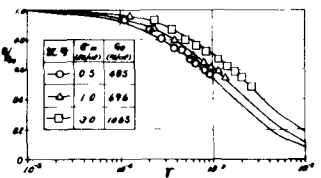


図-11  $G/G_0 \sim \gamma$  (凝灰岩)

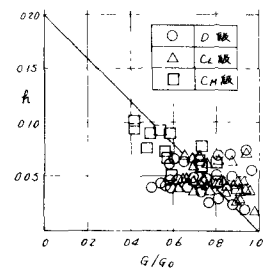


図-13  $\bar{h} \sim G/G_0$  (凝灰岩)

表-2 提案式の係数一覧

| 岩種                   | 安山岩                                    |                                        | 凝灰岩                                    |                                        |                                        |
|----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
|                      | D                                      | CL                                     | D                                      | CL                                     | CM                                     |
| $G_0$                | 731 $\sigma_m^{0.534}$                 | 1760 $\sigma_m^{0.557}$                | 671 $\sigma_m^{0.554}$                 | 616 $\sigma_m^{0.554}$                 | 284 $\sigma_m^{0.554}$                 |
| $\bar{\gamma}$       | 9.43 $\times 10^{-4} \sigma_m^{0.916}$ | 6.09 $\times 10^{-4} \sigma_m^{1.196}$ | 1.58 $\times 10^{-3} \sigma_m^{0.599}$ | 1.58 $\times 10^{-3} \sigma_m^{0.599}$ | 1.58 $\times 10^{-3} \sigma_m^{0.599}$ |
| $\bar{\sigma}_{max}$ | 0.130                                  |                                        | 0.198                                  |                                        |                                        |