

# 苏南核电站地基各向异性的评价

黄承贤

(中国科学院武汉岩体土力学研究所)

自五十年代世界上第一座核电站至今已有 300 多座,从现有经验和资料来看,核电站要求在自重或可能遭受到最大地震荷载情况下,地基的差异沉降不大于万分之一,地基的强度不低于 490 KPa,以确保反应堆和冷却水供水管道的安全。对于岩石地基,其强度大多是可以满足的,但差异沉降指标就不一定符合要求。产生差异沉降的原因主要有:深部断层的蠕变和浅部断层的位错,岩溶塌陷等以及岩基的物理力学特性的各向异性(如地基的刚度或承载力分布的不均衡性)。本文仅讨论该核电站岩基物理力学特性的各向异性及其评价。

现场岩体原位力学试验所需人力、物力是很多的,试验周期也比较长,而岩体弹性波法具有轻便灵活,可较大范围测试的特点。我们采用弹性波法结合工程地质调查资料,综合分析,来评价该处岩基的各向异性。

## 一、试验技术

### (一) 测试方法及其主要量测设备

本次试验采用地震法、声波法确定地基的物理力学特性及各向异性<sup>\*</sup>。地震法用于测试较大范围地基的平均物性,声波法用于测试局部部位或小范围的平均物性。

2. 声波法 是采用压电式换能器激发岩体中的弹性波,又用压电式换能器拾震,用水耦合,其拾震讯号输入SYC-2型数字式声波岩石参数测量仪读数记录。(1)一发二收式单孔测井 一发二收式单孔测井是三个园管式换能器(一个发射,二个接收),间隔一定距离组装在一起。本次试验采用 35—45KHZ 的 FSS 型单孔换能器。(2)双孔测井 是在一孔中放入  $\phi 35 \times 25\text{mm}$ , 35—40KHZ 发射换能器,另外孔中放入同类型的接收换能器,用水耦合,从孔口至孔底或从孔底至孔口,间隔一定距离,采用同步对测法和辐射法及跨孔法,测定不同孔深,不同方向上声波在孔间的传播速度(图1)。

### (二) 测点布置

基岩为泥盆系中下统茅山群(D<sub>3</sub><sup>m+z</sup>)的地层,以灰紫色—灰白色中细粒石英砂岩为主,并夹有中厚层粉砂岩和少量粘土岩。岩层产状为走向东西,倾向北,倾角10°—30°。场区节理,断层较为发育,依照发育程度依次为北西向,东北向,东西向和南北向<sup>\*\*</sup>。我们将地震法震源和声波法中心孔设置在反应堆中心(0点)的基岩露头上,以0点为圆心,1米为半径的园周范围内,布置声波法测试孔8个,0点一个,共计9孔,孔深3米,孔径0.05米(图2);再以0点为圆心,21.5米为半径的园周上,与声波法测试孔相应的

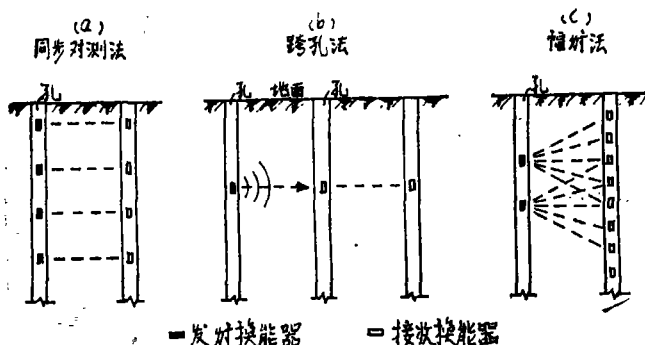


图 1 声波法对测井示意图

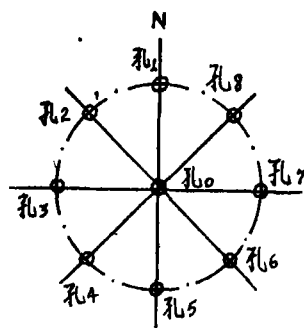


图 2 声波法测孔布置

1. 地震法 本次试验是用人工爆破,在岩体中激发一定频率的弹性波,在震源周围不同方向、不同距离的基岩露头上设置测点,采用国产DZJP-71型地震检波器,CZ-2型测振仪和SC18型光线示波器组成的量测系统。

- \* 黄承贤, 1983, 华东苏南核电站可行性研究报告, 岩石地基物理力学特性试验, 中国科学院武汉岩体土力学研究所。
- \*\* 华东电力设计院, 1978, 728工程扩大初步设计工程地质勘测报告之二。

方位上设置地震法测点 8 个,震源设置在孔 0 上。

## 二、实测结果

综合分析声波法单孔和双孔测井及地震法结果(表1),可见不同部位,不同孔深,不同方向上的弹性波速是不同的,岩体呈现各向异性。二者结果在平面上波速分布规律是相似的,呈椭圆形,椭圆方向一致,椭圆长轴在NE45°方向,纵波波速最大,椭圆

表 1 地震声波法地基弹性波速结果表

| 测试区段    | 测试方法   | 测试方向  | 平均值 (m/s) |        |
|---------|--------|-------|-----------|--------|
|         |        |       | 纵波波速      | 横波波速   |
| 孔0-孔1   | 双孔声波测井 | 南北向   | 2779.2    | 1415.9 |
| 孔0-孔2   | 双孔声波测井 | 北西45° | 2154.9    | 1132.7 |
| 孔0-孔3   | 双孔声波测井 | 东西向   | 3239.4    | 1627.7 |
| 孔0-孔4   | 双孔声波测井 | 北东45° | 4917.1    | 2747.2 |
| 孔0-孔5   | 双孔声波测井 | 南北向   | 2750.6    | 1301.7 |
| 孔0-孔6   | 双孔声波测井 | 北西45° | 2152.9    | 1029.6 |
| 孔0-孔7   | 双孔声波测井 | 东西向   | 2252.2    | 1119.2 |
| 孔0-孔8   | 双孔声波测井 | 北东45° | 4162.0    | 2037.2 |
| 孔0      | 单孔声波测井 | 铅垂向   | 4036.8    | 2052.5 |
| 孔1      | 单孔声波测井 | 铅垂向   | 4347.6    | 2290.0 |
| 孔0-测点13 | 地震法    | 北西45° | 2687.5    | 1343.8 |
| 孔0-测点14 | 地震法    | 南北向   | 3566.5    | 1713.8 |
| 孔0-测点15 | 地震法    | 北东45° | 3795.6    |        |
| 孔0-测点7  | 地震法    | 东西向   | 3710.3    | 2152.0 |
| 孔0-测点11 | 地震法    | 北西45° | 2446.6    | 1304.9 |
| 孔0-测点1  | 地震法    | 南北向   | 3675.0    | 1706.3 |
| 孔0-测点9  | 地震法    | 东西向   | 3983.2    | 1968.3 |
| 孔0-测点12 | 地震法    | 北东45° | 3406.0    | 2203.0 |

注:岩石容重为2.58g/cm<sup>3</sup>

短轴在NW45°方向,纵波波速最小(图3)。在三维空间上波速最大值构成一椭球体(图4)。国际岩石力学委员会关于用弹性波法测量各向异性的方法是测量三个互相正交方向的纵波波速,将各方向速度与三个

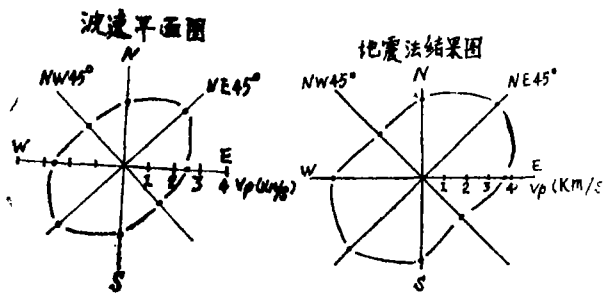


图 3 在地基平面上不同方向纵波波速分布图

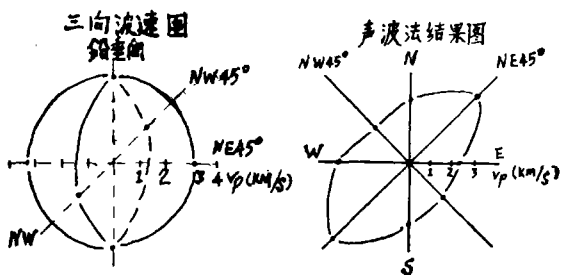


图 4 岩体不同方向的纵波波速

方向波速平均值之比定义为各向异性系数,并规定其值在1%以内者为准各向同性。从表2可见,垂直岩层面方向纵波波速最大,其次是NE45°、NW45°方向纵波波速最小,因此,可视岩体为横向各向同性体。

表 2 地基弹性波法结果综合表

| 岩体类型 | 测试方向   |          | 纵波波速 (m/s) | 横波波速 (m/s) | 各向异性系数 |
|------|--------|----------|------------|------------|--------|
|      | 方位     | 与产状关系    |            |            |        |
| 石英砂  | NW 45° | 与倾向夹角45° | 2360.5     | 1202.8     | 0.68   |
| 岩夹薄  | NE 45° | 与倾向夹角45° | 4070.2     | 2297.6     | 1.18   |
| 层粉砂  | 南北     | 沿倾向      | 3192.9     | 1543.5     | 0.92   |
| 岩和粘  | 东西     | 沿走向      | 3285.1     | 1716.9     | 0.95   |
| 土岩   | 铅垂     | 垂直层面     | 4192.2     | 2171.3     | 1.21   |

注:岩石容重为2.58g/cm<sup>3</sup>

## 三、岩体的工程弹性常数

### (一) 计算方法

弹性力学的理论告诉我们,在弹性极限以内的固体介质,在微小形变的情况下(即弱声扰动),通常用工程弹性常数来表征它的物理力学特性。

各向异性体的广义虎克定律为:

$$\begin{cases}
 \sigma_x = C_{11}\epsilon_x + C_{12}\epsilon_y + C_{13}\epsilon_z + C_{14}\gamma_{yz} + C_{15}\gamma_{zx} + C_{16}\gamma_{xy} \\
 \sigma_y = C_{21}\epsilon_x + C_{22}\epsilon_y + C_{23}\epsilon_z + C_{24}\gamma_{yz} + C_{25}\gamma_{zx} + C_{26}\gamma_{xy} \\
 \sigma_z = C_{31}\epsilon_x + C_{32}\epsilon_y + C_{33}\epsilon_z + C_{34}\gamma_{yz} + C_{35}\gamma_{zx} + C_{36}\gamma_{xy} \\
 \tau_{yz} = C_{41}\epsilon_x + C_{42}\epsilon_y + C_{43}\epsilon_z + C_{44}\gamma_{yz} + C_{45}\gamma_{zx} + C_{46}\gamma_{xy} \\
 \tau_{zx} = C_{51}\epsilon_x + C_{52}\epsilon_y + C_{53}\epsilon_z + C_{54}\gamma_{yz} + C_{55}\gamma_{zx} + C_{56}\gamma_{xy} \\
 \tau_{xy} = C_{61}\epsilon_x + C_{62}\epsilon_y + C_{63}\epsilon_z + C_{64}\gamma_{yz} + C_{65}\gamma_{zx} + C_{66}\gamma_{xy}
 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C_{mn}$  ( $m, n = 1, 2, \dots, 6$ ) 是弹性系数,共36个,由于  $C_{mn} = C_{nm}$  因此在各向异性的一般情况下,上述独立的弹性系数减为21个,若介质有着轴的或者面的对称,那么,可以在这些系数中找到一些关系式,因而独立的弹性系数将相应减少<sup>[1,2]</sup>。

1. 横向各向同性体工程弹性常数与其弹性波速的关系 横向各向同性体是各向异性体的一种简单情况, 弹性系数将相应减少, 取YOZ面为各向同性面, X轴垂直各向同性面, 则式(1)变为:

$$\begin{cases} \sigma_x = C_{11}\epsilon_x + C_{12}\epsilon_y + C_{12}\epsilon_z \\ \sigma_y = C_{12}\epsilon_x + C_{22}\epsilon_y + C_{23}\epsilon_z \\ \sigma_z = C_{12}\epsilon_x + C_{23}\epsilon_y + C_{22}\epsilon_z \\ \tau_{yz} = C_{44}\gamma_{yz} \\ \tau_{zx} = C_{55}\gamma_{zx} \\ \tau_{xy} = C_{55}\gamma_{xy} \end{cases} \quad (2)$$

式中含有6个弹性系数, 但独立的弹性系数仅5个。

因为岩体的弹性系数与其弹性波速存在下列关系:

$$\begin{cases} C_{11} = \rho V_{1\cdot p}^2 \\ C_{55} = \rho V_{1\cdot s}^2 \\ C_{22} = \rho V_{2\cdot p}^2 \\ C_{44} = \rho V_{2\cdot s}^2 \\ C_{23} = \rho V_{2\cdot p}^2 - 2\rho V_{2\cdot s}^2 \\ C_{12} = \rho \left[ \sqrt{\left( \frac{4V_{45\cdot p}^2 - 2V_{1\cdot s}^2 - V_{2\cdot p}^2 - V_{1\cdot p}^2}{2} \right)^2 - \left( \frac{V_{1\cdot p}^2 - V_{2\cdot s}^2}{2} \right)^2} - V_{1\cdot s}^2 \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $V_{1\cdot p}$ ——垂直各向同性面方向纵波波速;  
 $V_{1\cdot s}$ ——垂直各向同性面方向横波波速;  
 $V_{2\cdot p}$ ——在各向同性面内纵波波速;  
 $V_{2\cdot s}$ ——在各向同性面内横波波速;  
 $V_{45\cdot p}$ ——与各向同性面相交成45°方向传播的纵波波速;  
 $\rho$ ——岩石容重。

所以横向同性体的工程弹性常数计算式是:

$$\begin{aligned} G_{\perp} &= \rho V_{1\cdot s}^2 \\ G_{\parallel} &= C_{44} \\ \nu_{\perp} &= \frac{C_{12}}{C_{22} + C_{23}} \\ E_{\perp} &= C_{11} - 2C_{12}\nu_{\perp} \\ \nu_{\parallel} &= \frac{C_{12}^2 - C_{11}C_{23}}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}} \\ E_{\parallel} &= 2C_{44}(1 + \nu_{\parallel}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $E_{\parallel}$ ——平行各向同性面方向的动弹性模量;

$E_{\perp}$ ——垂直各向同性面方向的动弹性模量;

$\nu_{\parallel}$ ——平行各向同性面方向的动应变在垂直各向同性面方向的动应变效应;

$\nu_{\perp}$ ——垂直各向同性面方向的动应变在平行各向同性面方向的动应变效应;

$G_{\parallel}$ ——是各向同性面内任意方向间夹角变化的动剪切模量;

$G_{\perp}$ ——是各向同性面的任意方向与垂直此平面方向之间夹角的变化的动剪切模量。

2. 各向同性体的工程弹性常数与其弹性波速的关系: 各向同性体是横向各向同性体的一种特殊和简单情况, 独立的弹性系数仅二个。

工程弹性常数与其弹性波速的关系是:

$$\begin{cases} \text{动泊桑比 } \nu = (V_p^2 - 2V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2) \\ \text{动弹性模量 } E = \frac{\rho V_p^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \\ \quad = \rho V_p^2 (1 + \nu) (1 - 2\nu) / (1 - \nu) \\ \text{动剪切模量 } G = \rho V_s^2 \\ \text{动体积模量 } K = \rho (V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \\ \text{拉梅常数 } \lambda = \rho (V_p^2 - 2V_s^2) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $V_p$ ——岩体中纵波波速;

$V_s$ ——岩体中横波波速。

(二) 岩体的工程弹性常数

根据式(4)和式(5)分别计算场区石英砂岩岩体( $D_{1+2}^H$ )的工程弹性常数, 取NE45°方向和铅垂向所决定的面为各向同性面, 其计算结果列于表3, 垂直于同性面方向的动弹性模量小于同性面方向的动弹性模量。式(4)和式(5)计算结果差别很大, 可增大112%, 可减小56%, 这说明视现场岩体为各向同性体处理地基的弹性常数是够精确的, 必须考虑基岩的各向异性性质。

#### 四、地基物理力学特性各向异性的评价

本次试验结果表明, 厂区的地基各向异性系数最大值为1.21, 最小值为0.68, 动弹性模量和剪切模量最大值与最小值相差约3.5—3.8倍, 在NE45°方向波速最高, NW45°方向最小, 各向同性面是与倾向斜交45°方向(即NE45°方向)和垂直层面方向所组成的面。厂区的中细粒石英砂岩的矿物成份比较均匀, 相变不大, 孔隙和风化比较均匀, 地应力或残余应力的大小和方向是一定的, 因此决定这种属性的主要因素是构造和裂隙的空间排列和组合关系及发育程度。

试验结果表明, 苏南核电站厂房地基受地质构造的影响, 物理力学性质具有明显的各向异性, 但是是全区各向异性系数最小的区域, 只要在核电站设计和地基处理时予以重视与适当考虑, 是适宜建设核电站。这项研究表明, 仅根据工程地质和地震因素评价核电站地面地下工程在自重荷载和地震力作用下地壳的稳定性是不全面的, 必须综合评价工程地质和地震

# 判别水平土层液化势的剪切波速法

石兆吉 (国家地震局工程力学研究所)

我国从1979年就开始了用剪切波速预测轻亚粘土液化势的研究,利用现场勘测获得的剪切波速资料,按经验作图法给出了八度地区的液化判别界线和判别式。自Dobry 按应变法原理提出用剪切波速预测砂土液化势以来<sup>[1,2]</sup>,我国也开展了类似的研究工作,提出若干判别方法和判别式。Dobry 方法的一个重要缺陷是过于保守,因为是以刚要产生超孔隙水压力作为判别基准的。为克服这一缺陷,笔者等曾以孔压比等于1,即从超孔隙水压力等于周压力作为判别基准,利用现场和室内试验结果也提出了一个更实用的剪切波速预测轻亚粘土液化势的公式(3)。

剪切波速法虽然是新近出现的预测液化势的方法,但它具有一些明显的优点而逐渐被重视和推广。其最大优点是具有一定的理论基础和室内试验依据。Dobry 曾推导出土层的剪切波速、地震烈度、剪应变、埋深和刚度之间的基本表达式:

$$V_s = \left( \frac{(a_{\max}/g) g d_o \gamma_d}{\gamma (G/G_{\max}) \nu} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中  $V_s$ ——剪切波速(米/秒),  $a_{\max}$ ——地表最大加速度(米/秒<sup>2</sup>),  $g$ ——重力加速度(米/秒<sup>2</sup>),  $d_o$ ——埋深(米),  $\nu$ ——剪应变,  $\gamma_d$ ——考虑土柔性

的系数,  $(G/G_{\max})$ ——剪应变为 $\nu$ 时的横量衰减系数。

同时,室内试验结果证明,动荷载下土的孔隙水压力发展主要取决于应变幅值,刚要产生超孔隙水压力时的剪应变称为边缘剪应变,其变化范围约在 $1 \times 10^{-2}\%$ 和 $2 \times 10^{-2}\%$ 之间。试验结果还证明,影响液化的主要因素对剪切模量(或剪切波速)也有明显影响,例如土密度的增加和周压力的提高等都将提高土的剪切波速值,很明显,它们也同样增强了土的抗液化能力。这就是利用剪切波速预测液化势的物理基础。粘土颗粒对剪切波速值是有明显的影响,对抗液化强度的影响也很大,但影响的方式不一样。粘土颗粒的存在使剪切波速值减小,但却使抗液化能力增加这一特点将使轻亚粘土的液化临界判别值低于砂土的。在用标准贯入击数或静触探作为判别指标时,也存在同样情况。

剪切波速法的另一个优点是判别式中不包含地下水位这一项,显得更加简单。地下水位是影响液化的重要因素之一,它的作用相当于周压力的作用,必须加以考虑。在基本表达式(1)中,地下水位只对表示抗液化能力的剪切模量 $G$ 和最大剪切模量 $G_{\max}$ 值有

表 3 地基的物理力学参数

| 参 数<br>岩体类型                                        | 横向各向同性体                          |                              | 各向同性体                                 |                  | 偏差 $\epsilon$<br>(%) |
|----------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------|----------------------|
|                                                    | 弹性波速<br>(m/s)                    | 按式(4)计算                      | 弹性波速<br>(m/s)                         | 按式(5)计算          |                      |
| 石英砂岩夹薄层粉砂岩和粘土岩<br>( $\rho = 2.58 \text{ g/cm}^3$ ) | $V_{\perp, \rho} = 2360.5$       | $E_{\perp} = 10.52 GP_0$     | $V_{\rho} = 3336.9$<br>$V_s = 1714.5$ | $E = 17.42 GP_0$ | 66                   |
|                                                    | $V_{\perp, \sigma} = 1202.8$     | $\nu_{\perp} = 0.17$         |                                       | $\nu = 0.36$     | 112                  |
|                                                    | $V_{\parallel, \rho} = 4110.9$   | $G_{\perp} = 3.81 GP_0$      |                                       | $G = 7.73 GP_0$  | 103                  |
|                                                    | $V_{\parallel, \sigma} = 2255.5$ | $E_{\parallel} = 39.87 GP_0$ |                                       |                  | -56                  |
|                                                    | $V_{45^\circ, \rho} = 3239$      | $\nu_{\parallel} = 0.49$     |                                       |                  | -27                  |
|                                                    |                                  | $G_{\parallel} = 13.38 GP_0$ |                                       |                  | -42                  |

因素及地基各向异性才是正确的方向。在这一点上人们往往容易忽略地基物理力学属性的研究,必须引起足够的重视。

参加现场试验的有宋大卫、黄理兴、于衍翌等同志,仅此致谢!

## 参 考 文 献

- [1] 王龙甫, 1978年, "弹性理论", 科学出版社。
- [2] Ernest A. Kraarsberg, 1968, Elasticity Studies of isotropic and anisotropic rock Samples, Transactions of the Society of mining engineers of AIME Vol 24 No 4