

# 钻孔弹模计检测断层固结灌浆效果

李光煜 刘继光

谢远静

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071) (宜昌地区水利局 宜昌 443000)

**提要** 为了评价天福庙水库坝肩断层  $F_3$  的固结灌浆效果,进行了断层带内的钻孔弹模试验,测得变形模量约为 1GPa,弹性模量不小于 2GPa,满足了稳定分析计算对该参数的要求。

**关键词** 断层,固结灌浆,变形模量,钻孔弹模计

## 1 引言

天福庙水库位于湖北省远安县境内,黄柏河东支中上游,为黄柏河第二梯级,下游 26km 处为西北口水库;汇雨面积 554km<sup>2</sup>,年径流量  $2.7 \times 10^8 \text{m}^3$ ,总库容  $63.8 \times 10^6 \text{m}^3$ ;坝体为浆砌双曲拱坝,左岸为溢流重力坝,最大坝高 63.3m,坝顶高程 410.3m;水库以灌溉为主,兼顾发电,年供水量  $1.86 \times 10^8 \text{m}^3$ ,二级电站总装机容量为 5.64MW;1974 年动工,1978 年基本建成蓄水。

由于当时条件所限,对坝基坝肩的地质调查和处理不够充分,蓄水后发现一些隐患,对左右坝肩稳定性存在疑问,十多年来一直不敢蓄至正常高水位,每年降低效益约 500 万元,大大地限制了水库效益的发挥。

经多次调查及专家论证,认为主要问题之一是左右两岸坝肩抗滑稳定度低,坝区地层为黄陵背斜东翼,震旦至中三迭系沉积岩区。两岸坝肩为天河组板岩层,总厚 86m,由 9 小层组成,小层亦为层状体,层间含泥质条带,泥化夹层,岩性为泥质条带灰岩,白云质灰岩,豆状鲕状及藻类灰岩,地层平缓,抗滑力低,且有多条陡倾角断层(倾角约 80°)切割,特别是右坝肩的  $F_3$  及左坝肩的  $F_{28}$ ,用狭缝法测定,其变形模量和弹性模量分别为 0.15GPa 和 0.30GPa。有关部门在坝肩稳定分析计算中将此两条断层当作临空面处理,认为它们不能传递坝座推力。按纯拱法计算,右坝肩及左坝肩稳定系数分别为 0.74 和 1.07,而按拱冠梁法计算时二者分别为 0.88 及 0.63。

基于上述原因,专家论证认为  $F_3$  及  $F_{28}$  断层必须固结灌浆,以提高变形模量,满足稳定要求。1994 年 5 月宜昌地区水利局对  $F_3$  进行了固结灌浆处理。沿断层走向设置二排共 52 个钻孔,沿断层倾向钻进,倾角为 75°;孔距 3m,终孔高程均为 338m,距坝顶高约 72m。根据地表高程不同,孔深介于 14—62m。断层地表出露处采用 150 号混凝土压浆板,灌浆压力应不低于 3MPa,灌浆后单位吸水量应满足  $W \leq 0.03 \text{L/m} \cdot \text{in}$ 。

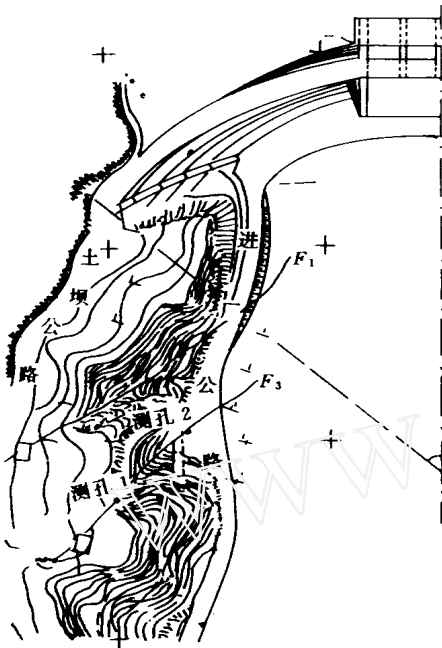


图 1 F<sub>3</sub> 测孔布置图

Fig 1 Arrangement of boreholes for F<sub>3</sub>

## 2 试验方法及布置

常用检测方法分动静两类。由于灌浆前未进行声波检测，无法对比，且只能提供声波波速及动弹性模量，而稳定分析计算要求  $F_3$  及  $F_{28}$  的静变形模量不低于 1MPa，静弹性模量不低于 2MPa，声波试验不能满足此项要求，故决定采用静力法。静力法测定岩体变形模量的方法可归纳为三大类：压力试洞法、承压板法（包括狭缝法）及钻孔法。由于原有的勘探洞已经衬砌并封闭，地表又有浆砌护坡及压浆板，因而最理想的选择是钻孔法。

钻孔法主要分钻孔膨胀计及钻孔千斤顶二类，本次试验采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 BJ 系列钻孔弹模计，这是近十年来在 Goodman Jack 的基础上研制改进的。Goodman Jack 已作为国际岩石力学协会的建议方法<sup>[1]</sup>，但由于该设备的固有缺陷，测定值不等于真实值，

当真实值为 70GPa 时，测定值约为 24GPa，只及 0.34，因而必须修正<sup>[2]</sup>。经改进后的 BJ 系列钻孔弹模计，则可直接测定介质的真实模量，不必修正，标定试验及现场测试表明其误差仅为 5-10%<sup>[3]</sup>。

本次试验共钻 5 个孔，做了 8 个点试验。其中  $F_3$  断层面上钻 2 个孔，做了 4 个点，试验选在灌浆压力最小（1.2MPa）的上段进行。钻孔方向垂直地表，孔口（浆砌台阶面）高程分别为  $\nabla 386.75m$ ， $\nabla 363.00m$ ，孔深分别为 4.2m，12.0m（图 2）。

$F_{28}$  断层面的破碎和充泥情况比原来地表调查结果好得多，整个  $3.3m \times 3.3m$  洞壁上只在下游壁上约 2.4m 长度内有断层角砾岩及黄泥充填，宽度 1-5cm，影响带宽 10-30cm。其余段胶结良好，无可见裂隙。破碎带内共钻 2 孔，孔深约 1.5m，一孔水平，一孔向下呈 45 角，均因掉块，不能成孔，无法试验。只在胶结较好的上游断层面的钻孔（测孔 1）内进行了 2 次试验，一次垂直于断层面，一次平行于断层（图 3，图 4）。

为了再一次验证试验结果的可靠性，在完整的白云质灰岩处钻测孔 2，用 BJ-110 钻孔弹模计进行二次试验，并取岩芯在压力机上测定弹模值，以资对比。

## 3 试验结果

钻孔法的基本原理为：向钻孔壁施加一对径向力，并同时测定相应压力及钻孔直径变化，即可根据下述公式计算变形模量或弹性模量。

$$E = A H d T^* (\gamma, \beta) \frac{\Delta Q}{\Delta D}$$

式中  $A$  为用二维公式计算三维问题时的影响系数,  $A = 0.915$ ;  $H$  为压力修正系数, 因直接用压力传感器测量压力  $Q$ , 无需进行修正, 故取  $H = 1$ ;  $T^*$  是与岩石接触角及岩石泊松比有关的系数, 本次采用的  $T^* (0.25, 22.5^\circ) = 2.141$ 。  $d = 11\text{mm}$ , 代入各种系数并简化后得出下式:

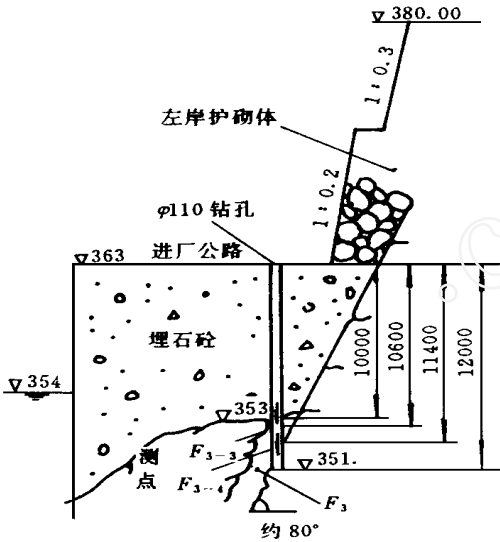


图 2  $F_3$  第二测孔示意图

Fig 2 The second borehole for  $F_3$

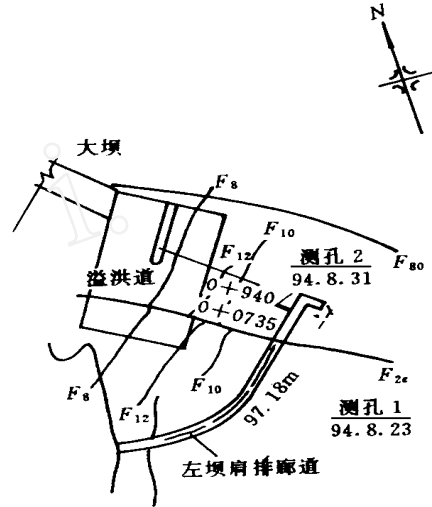


图 3  $F_{28}$  测孔布置图

Fig 3 Arrangement of borehole for  $F_{28}$

表 1  $F_3$  各测点地质描述

Table 1 Geological description of measuring points for  $F_3$

测点	地质描述
$F_{3-1}$	断层带, 主要成份为灰黄色粘土碎石, 见明显水泥痕迹
$F_{3-2}$	
$F_{3-3}$	灰色、浅灰色薄层灰岩及断层糜棱岩, 方解石薄膜充填
$F_{3-4}$	断层糜棱岩

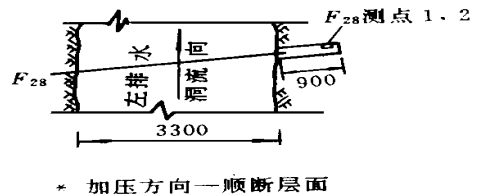
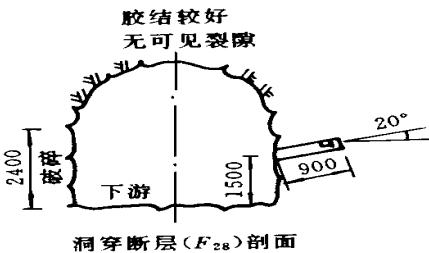


图 4  $F_{28}$  各测点部位图

Fig 4 Position of measuring points for  $F_{28}$

$$E = 217.5 \frac{\Delta Q}{\Delta d}$$

式中  $\Delta Q$ 、 $\Delta d$  为承压面上的压力增量 (MPa) 及相应的钻孔变形增量 (mm)。

$\Delta Q$ 、 $\Delta d$  由相应的压力和位移传感器测定。试验采用多级单循环加载方式，按最后一次加载线取弹性模量  $E$ ，按峰值外包线取变形模量  $D$  (图 5)。

表 2 各测点在不同压力级别下的  $D$ 、 $E$  值

Table 2 Values of  $D$  and  $E$  for each measuring points under various pressure levels

测点	F <sub>3</sub> - 1	F <sub>3</sub> - 2	F <sub>3</sub> - 3	F <sub>3</sub> - 4	F <sub>28</sub> - 1	F <sub>28</sub> - 2
压力 (MPa)	0- 8	0- 8	0- 8	0- 7	0- 10	0- 23
$D$ (GPa)	0.85	2.20	4.00	1.58		
$E$ (GPa)	2.75	3.92	7.85	3.91	12.86	25.45

F<sub>28</sub>及完整岩体所测曲线有别于 F<sub>3</sub> 的  $Q - d$  曲线，这是因为它们的  $E$  值高，岩体坚硬，在低压力下承压板和孔壁之间尚未全接触，实际单位压力高于平均压力，因而变形较大。计算  $E$ 、 $D$  值时应以 3—5MPa 以上陡直线段计算  $E$  值，此外由于这几个测点残余变形很小，因此， $D$ 、 $E$  值比较接近 (图 6)。

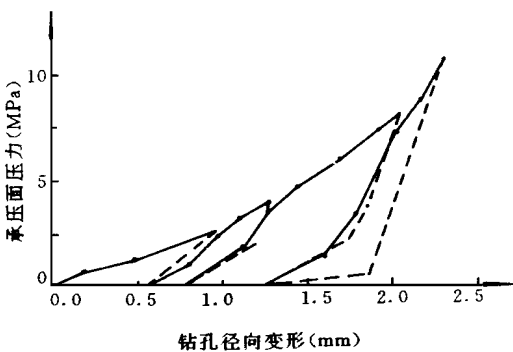


图 5 实测 F<sub>3</sub>- 1 压力和钻孔变形图

Fig. 5 Pressure Vs borehole deformation for measuring point of F<sub>3</sub>- 1

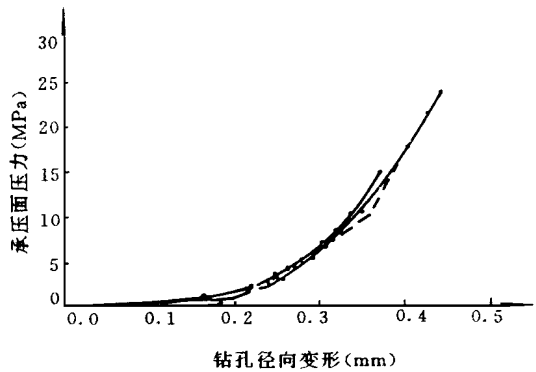


图 6 实测 F<sub>28</sub>- 2 压力和钻孔变形图

Fig. 6 Pressure Vs borehole deformation for measuring point of F<sub>28</sub>- 2

对完整白云质灰岩的测试表明，垂直于层面的测点 ID<sub>1</sub> 及平行于层面的测点 ID<sub>2</sub> 的  $E$  值分别为 48.60GPa 和 47.39GPa，较为接近。岩芯试验的  $D$ 、 $E$  为 46.88GPa，51.14GPa，表明用 BJ—110 弹模计测定岩体  $D$ 、 $E$  值是较为可靠的。

### 4 结论

- (1) 二个测孔试验资料表明，除靠近地表的 F<sub>3</sub>- 1 测点变形模量略小于 1GPa 外，其余

均大于 1GPa, 弹性模量高于 2GPa。四个测点的位置均处于  $F_3$  断层上部, 灌浆压力较低 (1.2MPa), 而下部灌浆压力较高 (12—32MPa), 因而, 可以认为  $F_3$  的平均变形模量和弹性模量将不会低于 1GPa 和 2GPa。

(2) 排水洞中,  $F_{28}$  的破碎情况较原地质报告所描述的好些, 测试的  $D$ 、 $E$  值均较高, 但值得说明的是最破碎处无法试验, 测点处断层闭合且不夹泥,  $F_{28}$  的整体  $D$ 、 $E$  值将低于实测值。根据破碎段所占比例判断,  $F_{28}$  的整体变形模量及弹性模量均不会低于  $F_3$ 。两断层实测  $D$ 、 $E$  值均满足稳定分析计算要求。

(3) 完整白云质灰岩的钻孔测试和室内试验表明其误差仅为 5%, 白云质灰岩本身也基本上属于各向同性体, 垂直和平行于层面的  $E$  值之差仅为 2.5%。

**致谢** 本次试验的目的和要求都是以杨绍全副局长为首的天福庙水库基础加固领导小组提出的, 小组成员周铭烈、蒋元柱、田一龙等同志, 自始至终参加并指导测试工作, 以白咸义、喻志平为首的水利工程团负责钻孔工作, 他们以高超技术保证了钻孔质量, 使试验得以顺利完成, 特此致谢。

### 参 考 文 献

- 1 Goodman, R. E., Van, T. K. and Heuze, F. E.: Measurement of rock deformability in boreholes. *Proc. 10th Symp. Rock Mech.*, Univ. Texas, Austin, Texas: 1968; 523-555
- 2 Francois E. Heuze: Suggested method for estimating the in-situ modulus of deformation of rock using the NX-borehole Jack. *ASTM. Geotechnical Journal GTJODJ*, 1984; 7(4): 205—210
- 3 李光煜, 周百海: 测定岩体变形特性的 BJ—110 钻孔弹模计. *岩土工程学报*, 1991; 13(4): 12-23

## DETECTION OF CONSOLIDATION GROUTING EFFECTS IN FAULTS BY MEANS OF BOREHOLE JACK

Li Guangyu Liu Jiguang

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia Sinica, Wuhan 430071)

Xie Yuanjing

(Yichang Water Conservancy Bureau, Yichang 443000)

**Abstract** The treatment of consolidation grouting was performed for fault  $F_3$  in the site of Tianfumiao reservoir. To evaluate the effects, the borehole tests have been conducted in the fault zones. The deformation modulus of about 1 GPa and the elastic modulus of 2 GPa are obtained through measurements which meet the demand of abutment stability of the dam.

**Key words** fault, consolidation grouting, deformation modulus, borehole jack