

石门拱坝右肩岩体力学性态变化

Mechanical characteristics of the right abutment of Shimen arch dam

龙云霄

(汉中市石门水库管理局, 汉中, 723003)

李 瓚

(国家电力公司西北水电勘测设计研究院, 西安, 710001)

郑 宁

(汉中市石门水库管理局, 汉中, 723003)

中图法分类号 TV 543

作者简介 龙云霄,男,汉族。1941 年生,陕西省汉中市人。1966 年西安理工大学(原陕西工业大学)水利系毕业,高级工程师。1983 年至今任汉中市石门水库管理局局长,主要从事石门水库的建设与管理。

1 概 况

石门大坝是单园心前倾双曲拱坝,设计坝高 90 m,顶底厚分别 5 m 和 28 m,坝顶弧长 254 m,大坝中心角在 $129^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 间。施工中坝基欠挖,实际最大坝高 88.6 m,坝底宽 27.3 m。工程分别于 1972 年、1974 年临时和永久投运,至今分别为 26 年和 24 年。

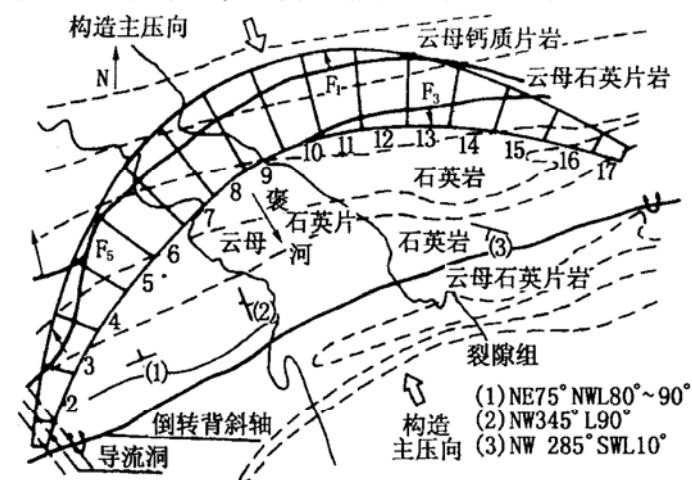


图 1 石门拱坝地质要况示意图

Fig. 1 Engineering geological diagram of Shimen arch dam

坝区河道方向北偏西,河水大体由北向南流。从地质构造看,本坝位于秦岭东西复杂构造中部段南缘,坝区主要受 NS 向推挤,形成了一系列的背向斜褶皱和断层,由于梯级规划需要石门坝址附近河段是背向斜最为密集部位,水工布置条件受到限制,大坝坝头即位于石门倒转背斜之轴部(图 1),特别右坝肩直接顶压其上。在上述构造背景下,形成了 NEE 向陡倾压性 NNW 向陡倾张性和 NWW 向缓倾扭性结构面,即“两陡一缓”。第 1 组为横河向,倾 NW 即上游,倾角多在 80° 或 80° 以上;第 2 组为顺河向,倾 NE 较多,倾角也在 80° 以上;第 3 组大体横河,优势走向 NW 285° ,倾 SW $\angle 10^{\circ}$,最大可达 30° ,基本倾下游偏右岸。第 1 3 组多

(第一组最多)特别右坝肩处,第 2 组较少,背斜轴面即属于第 1 组。第 1 组结构面一般宽 1~3 cm,最大可达 10~30 cm,充填岩石碎块碎屑。第 2 组呈闭合状,面不平,多无充填。第 3 组宽 0.2~3 cm,面平整光滑,新鲜岩体中无充填,弱风化带中有钙膜,强风化带中有粘土充填。上述各组近地表均有铁染。

右坝肩主要为石英岩,石英片岩和云母石英片岩,性硬脆,在上述构造地质背景中,反映为裂隙发育,后期受卸荷风化影响,岩石条件差,同时形成了一个孤立山头(图 2)。

2 右坝肩深孔固结灌浆处理及岩体力学性态改善

对于顶压于背斜轴部并单薄破碎的右坝肩岩体,设计上的对策是采取综合处理,诸如帷幕灌浆、排水、坝体初期切缝、填沟、坝头局部扩大、深孔固结灌浆、包墙并加强观测等综合措施。其中深孔固结灌浆是十分重要的项目。

石门右坝肩一般系指 590 m 高程以上到坝顶 620 m 高程、垂直大约 30 m 范围内的持力岩体。#1 和 #2 坝段的一半置基其上,主要深孔固结灌浆布置区域示意图 2。右坝肩钻孔深度 25.5~38.5 m,共灌浆 1431 m/48 孔,平均灌浆深度 $29.8 \approx 30$ m,平均注灰量 29.41 kg/m, #1, #2 坝段坝基分别灌 201 m/8 孔和 379 m/17 孔,平均孔深分别为 25.2 m 和 22.3 m,平均注灰量分别为 26.8 kg/m 和 3.25 kg/m(本坝其他部位平均注灰量 11.3 kg/m),三者总计灌浆长 2011 m。灌浆用机钻作业,孔径多为 110 mm,主要是垂直孔,孔距 3 m。施工方法为一次钻至孔底,孔口卡塞,射浆管下至距孔底 0.5~1.0 m 处,用泵进行全孔脉动冲洗,然后自下

而上分段灌注, 灌压 0.5 MPa, 浆液水灰比 10: 1~ 0. 6: 1。灌浆使用的为[#] 500 普通硅酸盐水泥。

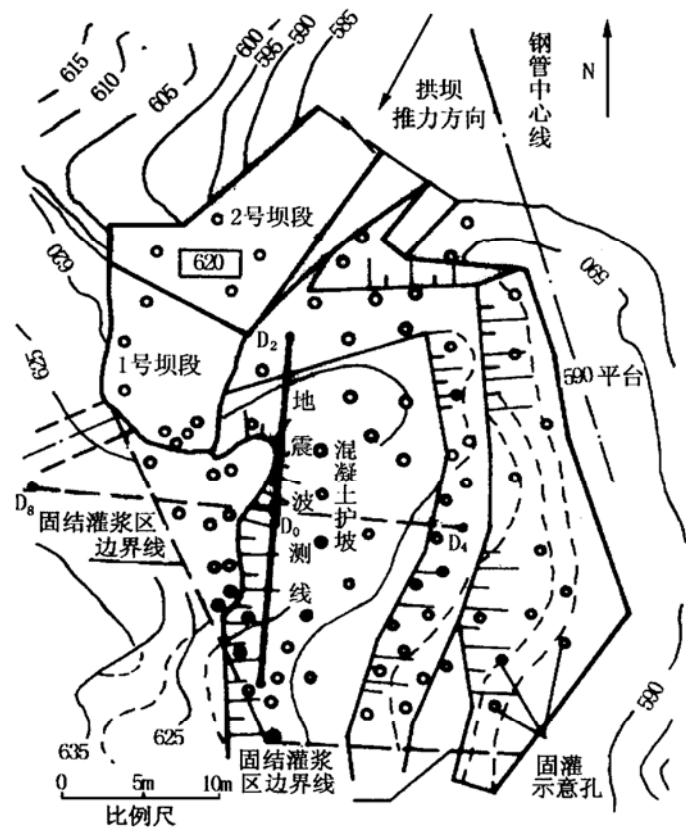


图2 右坝肩固结灌浆区示意和 V_p 测线布置

Fig. 2 Layout of consolidation grouting holes and V_p measuring points of right abutment

对于大面积岩体力学性态的测控, 熟悉拱坝设计的同志很清楚, 目前国内外通用的办法是对所拟研究的岩体, 进行波动传播速度的测量, 主要是纵波速度 V_p 的测量, 对岩体力学状况做出评价。

1973 年以前, 在右坝肩 590 m 高程平台 (即右坝[#] 1# 2 坝段岸边一侧的灌溉管平台, 图 2), 原水电三局做了灌浆前后同一地段专门动弹模改变的测试, 有以下记述: “... 灌浆前冲洗过程可发现裂隙密集带和层面裂隙大量渗水, 裂隙充填物被冲出, 灌浆时可见水泥浆沿层面裂隙 (即第 1 组结构面) 穿入[#] 2 坝块, 边坡上可见水泥浆渗出, 灌浆后岩体动弹模值由 $(6 \sim 7) \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 提高到 $(8 \sim 12) \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, 分别比原岩体弹性模量增长了 47%~ 49%, ...”。具体地说, 大体垂直层面方向 (图 2), 高程 590~ 595 m 范围右坝肩 4 段动弹模试验的提高率分别是 47. 4%, 47. 4%, 63. 5% 和 69% (灌前动弹模 $(6 \sim 7. 1) \times 10^3 \text{ MPa}$, 灌后 $(8. 9 \sim 12) \times 10^3 \text{ MPa}$), 试验是在灌浆结束后 10 天进行的。

1974 年原水电三局又进行了右坝肩孔内穿透动弹试验, 波速按 4 个方位 (图 2) 在孔内施测。(1 孔爆破, 其他两孔接收)。对各高程综合整理后可有图 3 所

示结果。图中线 1 是深孔固结灌浆前岩体的动弹模 E_d 值, 线 2 是深孔固结灌浆施工完毕, 岩体 E_d 改变后的情况, 从中可见通过深孔固结灌浆岩体刚度得到了明显的加强, 岩体力学性态明显变好。图中曲线 3 是经过固结灌浆后, 岩体 E_d 增加的定量描述, 总体上说, 一般 E_d 增值在 50%~ 100%, 最大可达 2 倍或 2 倍以上。同时也可看出 590 m 以上随着高程的升高, 动弹下降较快, 这完全符合右肩三面孤立山包和背斜轴部在坝头通过的地形地质情况 (请参见图 1 并图 2)。

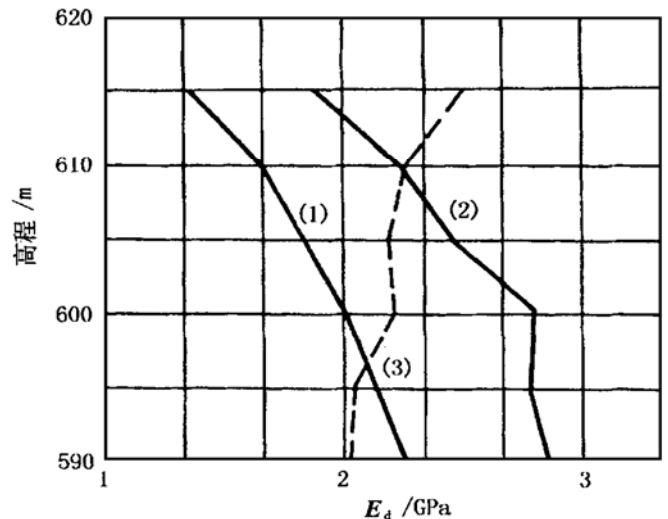


图3 右坝肩动弹变化情况

Fig. 3 Variation of E_d in rock body of right abutment

右坝肩岩体力学性态的各向异性明显, 灌前平行层面动弹是垂直层面的 1. 57 倍, 灌浆后各向异性情况得到改善, 匀质性加强, 该比值降至 1. 19 倍。

石门右坝肩深孔固结灌浆效果是明显的, 对改善岩体的力学性状有很大的好处。

3 右坝肩综合老化

前文谈到过 V_p 测试是衡量坝肩大范围岩体力学性态的主要手段, 这是设计拱坝的习用办法。大坝运行 20 余年后, 我们更不可能用破坏性质的试验去论证岩体力学性状的变化, 只能继续使用纵波速度的测试办法鉴别这个问题。

为了能尽可能准确并有对比性地说明问题, 我们刻意找到了 1974 年原来也是我院进行过动弹测试的钻孔, 即图 2 所示的 D0~ D8 孔, 在 22 年后的 1996 年, 在同样的高程段, 用相同的方法, 重新进行岩体动弹模测试^[2]。试验同样用人工地震法, 在孔内爆破, 他孔接收的办法实现。使用的主机为 DLF-2 双通道电荷电压滤波积分放大器 (最大输入电荷量 10 000PC; 频率范围 0. 16~ 20 kHz; 误差 < 2%; 失真度 < 1. 5%; 噪声 < 20 mv RMS (增益 1000 倍时)); 测头为 YD-82 压力式

传感器(电荷灵敏度 $100\text{PC}/\text{ms}^{-2}$; 误差: $\pm 2\%$); 记录分析系统(硬件为 COMAXC-386S 便携式微机和 16 路数据采集接口板; 软件为 NV306DASP 大规律数据采集系统)。

由于石门拱坝的中心角比较大, 例如坝顶为 129° , 坝体较薄, 拱坝坝端 590 m 高程以上的拱推力基本为切线向, 也即是与坝肩最发育的第一组结构面(背斜轴走向即与之相同, 见第 1 部分并图 1) 基本正交, 沿上下游方向岩体力学性态的变化最能说明右坝肩安危现况。为此我们主要进行了 $D_2-D_0-D_6$ 这个剖面的岩体 V_p 测试, 经整理实测数据示于图 4 中。其中园点表示 1974 年深孔固结灌浆后, 同剖面的实测值; $\times$ 点表示 1996 年同剖面实测值。由之可以看到, 运行 20 余年来, 右坝肩岩体 V_p 值确实有所下降。根据点群情况, 我们进行了线性回归分析, 1974 年右肩岩体的 V_p-E 的关系可以是 $V_p = 39077 - 59.6E$ (见图 4 中曲线 1), 式中 E 为高程(以 m 计), V_p 的单位为 m/s , 相关系数 r 为 0.69; 1996 年有 $V_p = 35560 - 54.3E$ (见图 4 中曲线 2), 相关系数 r 为 0.73。由之也可以从统计意义上, 定量看清 20 余年后 V_p 值的降低情况。根据熟知的弹性波传播理论, 对于 V_p 与 E_d 的关系, 有公式

$$E_d = \rho V_p^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)},$$

式中 ρ 为岩体密度 (2.69 t/m^3), μ 为岩体泊松比 (0.22)。根据计算可有表 1 所示结果:

表 1 22 年后右坝肩 V_p , E_d 降低情况

Table 1 Reduction of V_p and E_d after 22 years

高程 /m	$V_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			E_d / GPa		
	1974 年	1996 年	(2)/(1)	1974 年	1996 年	(5)/(4)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
613	2542	2294	90.2%	1.5510	1.2635	81.4%
610	2721	2457	90.3%	1.7777	1.4494	81.5%
605	3019	2728	90.4%	2.1884	1.7868	81.6%
600	3317	2999	90.4%	2.6417	2.1595	81.7%
593	3734	3379	90.5%	3.3477	2.7414	81.9%
平均	3138	2836	90.37%	2.3973	1.9589	81.71%

简言之, 22 年后右坝肩岩体发生了“综合老化”现象, 力学性态有所下降, 岩体 V_p 降低了约 10%, E_d 降低了近 20%。部份抵销了第二部份所谈到的, 固结灌浆对右坝肩岩体的改善作用。

4 右坝肩稳定性评价

石门拱坝右肩稳定一直是该坝一个重要问题, 引起管理部门和诸多专家的关注是很自然的。文献[1]早在 80 年代初对之就进行过评述, 认为右坝肩上部弹模(笔者按文意理解可能是变模, 本节内同)可能小于

混凝土弹模的 1/5, 也即在 3200MPa 以下。90 年代初, 能源部南京大坝观测资料分析中心的一些专家^[3], 研究了渗流和位移, 进行了一些正演试算, 提出由于地下水等因素作用, 右坝肩岩体性态有变化(恶化)。当右坝肩弹模减为设计值的 20% 时, 梁拱法计算得出的位移值与实测值接近。具体一些说, 在将 590 m~600 m 高程处的弹模由 1.067 GPa 减为 0.217 GPa, 610~620 m 高程弹模由 0.533 GPa 降为 0.107 GPa 时, 算出的水平位移与实测值所得者仅差 3.2%。也即是说右坝肩弹模较之过去设计值降低了 1/5, 最小值仅为 0.107 GPa。这些分析和看法都是很有意义的。

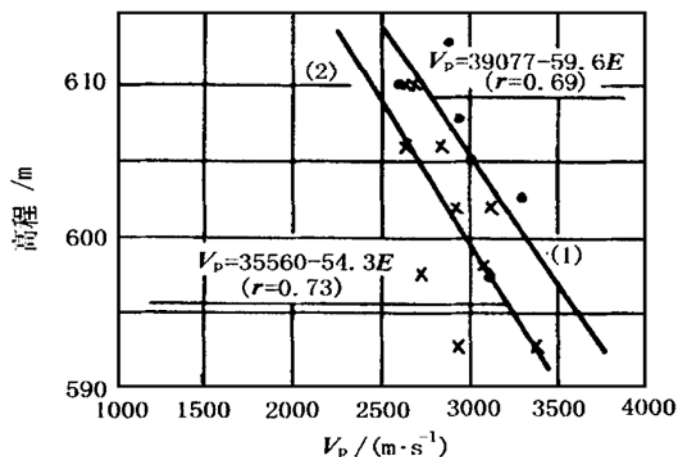


图 4 灌前灌后 V_p-E 曲线

Fig. 4 V_p-E curves before and after consolidation grouting

本次 22 年后的重新测试, 在一定程度上证实了有关专家的耽心, 右坝肩岩体确实有所下降, 如“3”中所述, 岩体纵波速度 V_p 值, 在坝肩主要受力方向降低了约 10%, 相应动弹降低了近 20%。由于破碎岩体静动模量对比困难, 不能从实测值较准确地表明现在变模究竟是多少, 但由这次重新试验结果看, 有关专家认为现在实有变模小于设计采用值 5330 MPa 的论断是正确的。

一般梁拱法计算, 基础位移考虑的是 Vogt 基础, 坝基应是半无限体, 或者在坝基主要持力范围内与半无限体相差不大。但石门右肩多少是一个“孤立山头”, 三面临空(图 2), 与假定相去甚远, 在具体分析坝肩变模、位移时应该考虑这个因素。直接假定弹模用梁拱法试算位移与实测值比较认可弹模值, 未计及 Vogt 基础与实际基础的不同, 可能是过多地“降低”了所论弹模的具体数值, 也即是右坝肩高部岩体实际的弹模值比 1.067 GPa 要高一些, 该值可以认为是低限, 不会比此更低了。当然必然应该注意到坝肩地下水的渗流因素, 梁拱法分析中也是进不去的。从这些观点出发, 拱坝分析从梁拱法进入有限元的时间, 积极创造条件, 早比晚好。

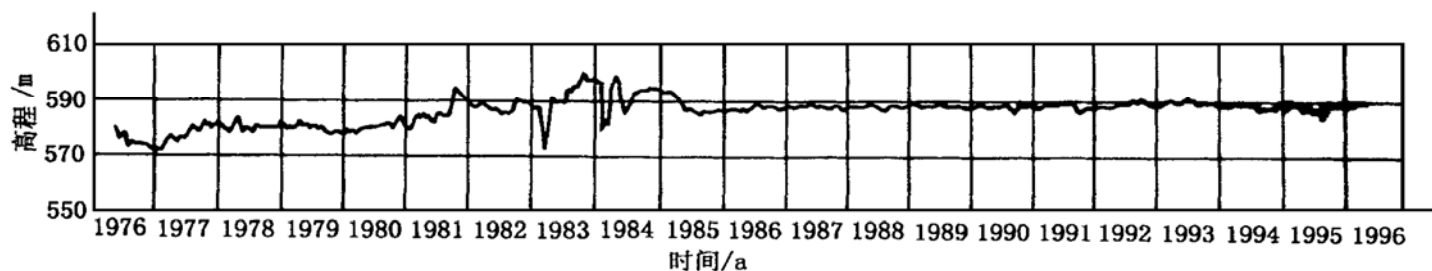


图5 观2孔地下水位过程线

Fig. 5 Variation of underground water level in monitoring hole No. 2

从这次右肩岩体力学性能测试中,可以直接使用的只有纵波速度,在主要受力方向 V_p 平均为 2836 m/s,最低值均在 2000 m/s 左右。对于高拱坝该值显然偏低,但对比于经历了 20 余年的运行过程以及原右肩背斜轴部岩体的实际情况看,勉强尚可。

石门右坝肩的位移观测投入甚晚,1980 年第 4 季度才有观测数据,但 1980 年~1983 年恰巧基本为雨量丰沛的大水年,无法直接对比该年段与 70 年代后期位移变化的趋势。据彭虹等分因素统计分析^[3],对比于 1981~1982 年,1983~1984 年水位分量引起的位移,较前者增加了 2 倍以上,而且该两年 457 天的时间内,切向有 2.28 mm 的时效位移量增加,并认为是由于右肩地下水位升高和对岩体的潜蚀作用引起。

图 5 为坝肩观 2 孔(位置参见图 2)地下水位过程线,由此可见从 1979 年开始到 1985 年,观 2 孔地下水位有约 4~5 m 的一个永久抬升,同时在 1983~1984 年抬升值比较大,由于石门拱坝虽坝高较高,但库容不大(总库容 1 亿 m^3 左右),每年水库均可蓄满,在 7 年的水库平均水位在 607.16~614.03 m 间(坝顶高程 620 m),变化不大,因而这种地下水位的抬升并不再下降的事实,只能从右肩岩体介质性能的改变中探求,简言之,我们认为这是由于前文所谈 80 年代初期流域雨量丰沛,及其他因素造成右坝肩地下水循环加剧带走了部份结构面中的充填物所致(另文讨论)。

笔者认为从位移和渗流分析得到的右坝肩岩体性态的恶化,与这次(1996 年) V_p 测试所得到的结果降低这两个现象,是完全呼应的。正由于这种性态的改变与一般岩体灌浆中水泥结石的老化不同,因素内涵更丰富,所以本文称之为“综合老化”。

90 年代以来,坝肩切向位移和地下水位变化基本平稳,从监测资料的统计分析中知,这些年来时效因素很小。

5 结 论

(1) 根据 V_p 测试资料,施工过程中通过深孔固结灌浆,提高了右坝肩岩体的 E_d ,使右坝肩岩体的力学

性态得到提高。该部位岩体(破碎)动弹模提高约 50%~100%,最大可以提高 150% 以上。

(2) 测试表明,22 年右坝肩主要受力方向(垂直岩层走向),由于“综合老化”原因,岩体纵波速度平均下降了约 10%,岩体动弹模下降了近 20%。22 年的运行过程中右肩岩体力学性态有所降低。

(3) “综合”老化的主要因素是 80 年代右肩地下水活动加剧,带走结构面间灌浆水泥结石以外界面上的充填物所致。

(4) 虽然由于运行期综合老化原因,抵消了右坝肩一定数量施工期固结灌浆效果,但固结灌浆的作用还是显著的。如果没有固结灌浆的存在,综合老化作用还要加剧。

(5) 不论从 22 年后的 V_p 试测,还是位移、观 2 孔地下水变化分析,均证明石门右坝肩岩体力学性态确有下降。同时表明 V_p 测试成果可信。

(6) 1996 年同高程段、同部位、同钻孔、同方法、同单位岩体动弹测试,最大可能并“真实”地反映了石门拱坝 1974 年到该年 22 年间右坝肩岩体力学性态变化。这种“5 同 1 不同”的测试研究我们在国内外拱坝中尚未见到,在国内是首次。这种方法可供其他拱坝工程参考使用。

(7) 由于特殊的地质背景和运行情况目前右坝肩岩体 V_p 平均 2836 m/s,最低值约在 2000 m/s 左右,对高拱坝该值明显偏低,但从 90 年代以来右坝肩观 2 孔地下水位和右坝肩切向位移变化情况看,比较稳定未现异常,可以认为坝肩工作情况尚可。但由于右肩的重要性,确有“综合老化”现象发生和目前纵波速度偏低等情况的存在,继续严密监测十分重要。

参 考 文 献

- 1 刘眉县,李宝华.石门拱坝变形性态分析.水利学报,1982,(12)
- 2 西北勘测设计院科研所.石门拱坝右坝肩岩体动弹模测试结果报告.1996
- 3 彭虹等.石门拱坝资料分析报告.南京自动化研究所.1990