

黄河大柳树坝址岩体破坏机制动力模拟试验分析

王勇智, 戚 炜, 门玉明, 彭建兵

(长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 黄河黑山峡大柳树坝址区存在大范围的岩体松动破坏现象, 其主要特征是岩体应力释放, 结构面张开, 密度显著下降。为进一步研究岩体松动的成因机制, 在详细调查区域地质背景条件及区域地震动力作用基础之上, 提出了地震动力作用与岩体松动现象的内在联系, 通过动力模拟试验进一步证明大柳树坝址区存在的大深度、大范围岩体松动与历史上该地区发生的强烈地震具有密切关系。因此在目前的工程地质条件下, 一旦发生较大强度的地震活动, 坝址区所遭受的破坏程度会更大, 对拟建的水利工程设施将产生严重威胁。

[关键词] 大柳树; 岩体松动; 地震动力作用; 动力模拟试验

[中图分类号] TU435 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2004)02-0054-05

[作者简介] 王勇智(1969—), 男, 江苏姜堰人, 讲师, 博士研究生, 现从事地质工程与岩土工程研究工作。

黄河黑山峡河段从甘肃省靖远县大庙村入峡, 至宁夏回族自治区中卫县小湾村上游出峡, 全长 71 km。大柳树坝址位于峡谷出口以上 2 km。前期的勘查表明大柳树坝址区存在大面积、大范围的岩体松动现象。作为坝址区水利工程建设的基础, 大范围的岩体松动必将引发各种种样的工程问题, 因此对大柳树坝址区松动岩体成因机制的研究有着十分重要的意义。大量的勘探工程揭露和多种方法测试实际资料表明, 大柳树松动岩体特征无法用风化、静力卸荷及褶皱构造给以科学合理的阐释^[1]。为此, 提出了大柳树松动岩体的地震成因机制。为探讨大柳树松动岩体地震动力成因机制, 开展了强震区岩体动力破坏调研。在做了大量实地勘测工作基础之上, 还做了坝址区坝基岩体地震动力模拟试验, 取得了丰富的资料。

1 地质背景

1.1 区域构造背景

研究区地处青藏高原东北缘, 大地构造上属祁连褶皱带的走廊过渡带东段, 位于三大构造单元的

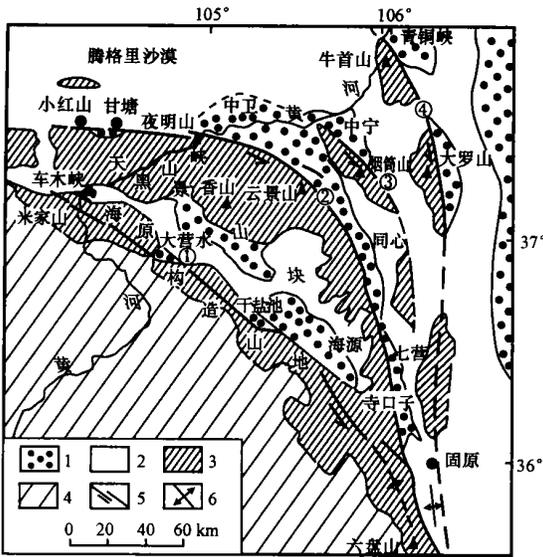
交界处。东面是鄂尔多斯块体, 西北部为阿拉善块体, 西南部由祁连地槽褶皱系的主体构成, 是一个相对较为软弱和活动的构造带^[2]。受这三个构造块体的夹持和制约, 走廊过渡带显示出最活动、最复杂、最软弱的构造属性。大柳树地区恰位于该构造块体内部次级构造单元的分界带, 即分割香山断褶和甘塘-中卫断陷的中卫-同心断裂带内。

1.2 新构造运动

由于第三纪以来, 青藏高原块体受到印度板块向北持续挤压作用, 导致高原块体南北向大幅度收缩与垂直方向上的快速隆升, 并成为全球大陆地壳晚第三纪以来活动性最强、上升幅度最大的地区, 因此, 该区亦成为全球陆内地震活动最为集中而强烈的分布区带之一。在此过程中, 由于祁连山褶皱系位于青藏高原的东北缘峰端地带, 同时受到东面的鄂尔多斯地块、北面的阿拉善地块的限制, 在高原块体的推挤下产生强烈的新构造变动, 最显著的构造效应是发育一系列与其周围连接走向平行的弧顶指向东北的弧形活动构造带, 由南而北依次为海原活动断裂带、中卫-同心活动断裂带、烟筒山活动断裂带和牛首山-罗山活动断裂带(图 1)。这些活动断裂带规模大, 延伸长度达 200~500 km。控制着本区现今活动格局, 其中中卫-同心断裂带为 709 年中卫 7.5 级地震发震断裂带^[3]。

[收稿日期] 2003-05-30

[基金项目] 甘肃省科委项目(G01-0016)



1—第四纪盆地; 2—丘陵或沙漠; 3—基岩山地区; 4—陇西高地; 5—活动断层; 6—背斜; ①海原断裂带; ②中卫—同心断裂带; ③烟筒山断裂带; ④牛首山断裂带

图 1 青藏高原东北缘弧形挤压-走滑活动构造区
Fig. 1 Active tectonic region at the northeastern part of Qinghai-Tibet plateau

1.3 坝址区构造

大柳树坝址区位于中卫-同心活动断裂带中, 由数十条压扭性逆冲断裂组成, 各断层规模不一。断裂带总体宽约 4.5 km, 在坝址区近东西向排列, 南边以 F_1 为界, 北边以 F_{202} 为界。中间有 $F_2, F_3, F_{7(8)}, F_{203}, F_{201}$ 等。这些断层平面上近东西向平行展布, 向西撒开, 向东收敛。除 F_3 和 F_{203} 外, 其余均南倾^[1], 自第四纪以来几乎都发生过不同程度和性质的再活动, 如距坝址仅 1.5 km 的 F_{201} 断层至今仍处于活动状态。据跨越 F_{201} 断层水准测量(国家地震局资料), 断层活动参数(腰虱子沟 1971~1982 年)走滑分量 1.44 mm/a, 垂直分量 7.16 mm/a。又据有关黄河干流摆动位移、地质体位移及区内最大冲沟扭曲位移资料推算, 全新世以来 F_{201} 断层的平均左旋滑动速率为 2.08~3.25 mm/a。由此表明, F_{201} 断裂是中卫-同心断裂带各主干断裂中自全新世以来直至现代仍具较强活动的一条重要断裂^[4]。

1.4 坝址区岩性

大柳树坝址区地层主要为寒武系中统香山群第四亚群的软硬相间的层状岩体及第四系的松散堆积物(图 1)。变质长石石英砂岩属硬岩、干枚岩及干枚状板岩, 性质为中软岩, 多次强烈构造的作

用使本区岩体中断裂构造极发育, 形成了大量的层间挤压带及顺层断裂, 加剧了岩体软硬相间的层状特征, 早期强烈逆冲推覆, 后期走滑、剪张, 更进一步破坏了岩体完整性。可以说, 破碎的软硬相间的层状介质是大柳树坝址岩体松动形成的基础。

2 坝址区的地震动力作用

本区地震活动十分强烈, 自公元前 193 年至公元 1987 年, 先后发生过 87 次中强地震(图 2)^[5]。自公元 1125 年以来, 本区大体上经历了三个震活跃期和两个平静期, 其中 1920 年至今的第三活跃期, 以 1920 年海原 8.5 级大震为标志^[5]。大量的测年资料已经充分表明大柳树地区频繁发生过古地震和历史强震构造; 而中小地震的震中也大体沿此断裂带分布。据长流水沟孟家湾一带探槽揭露, F_{201} 断层在晚更新世末期(约 3~1.2 万年之间)有过四次古地震事件, 全新世以来有过两次古地震事件, 其震级均为 7~7.5 级^[5]。据国家地震局的校核和鉴定, 大柳树坝址的地震烈度定为 VIII 度。

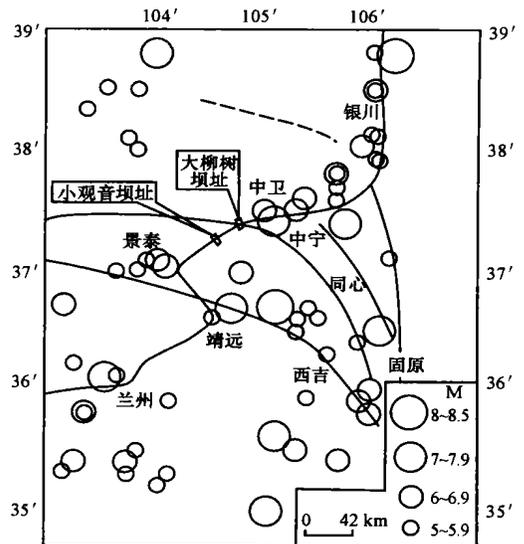


图 2 区域强震震中分布

Fig. 2 Distribution of epicenters for regional seismic

3 松动岩体地震动力作用机制模拟试验分析

为了进一步研究坝址区松动岩体的地震动力成因机制, 在室内进行了坝基岩体地震动力模拟

试验:

3.1 模型及参数

模型比例尺为 1:2 000, 模型实际尺寸为: 20 cm×25 cm×60 cm。模型堆砌基块所用材料为重晶石、石膏、沙子。根据相似比的原则, 按一定配合比做成尺度为 20 cm×10 cm×50 cm 的基块, 共堆砌制作成三个模型, 分别编号为 1, 2, 3 号模型。其中 1, 3 号模型模拟硬质岩石的材料参数为: 重度 2.4 g/cm³, 变形模量 37.2 MPa; 模拟软岩的材料参数为: 重度 1.94 g/cm³, 变形模量 14.5 MPa。2 号模型模拟硬质岩石的材料参数为: 重度 2.4 g/cm³, 变形模量 137.2 MPa; 模拟软岩的材料用橡胶, 参数为: 重度 1.9 g/cm³, 变形模量 70 MPa; 模型中软岩所占比例 20%, 硬岩 80%。振动试验设备采用美国 UD 公司 2XSA60-T100-32WL 型电磁振动台, 该设备可进行频率为 2~2 000 Hz 的 x , y , z 三向振动。

试验选用的模拟地震动力参数: 水平加速度 a_h 分别取 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8 g 时, 在各级水平加速度 a_h 作用下, 振动频率 F 分别取 4, 6, 8, 10, 14, 16 Hz; a_h 为 1.0 g 时, F 取 6 Hz。各次振动持续时间为 20 s。振动方向取 x (对应东西向, 与岩层走向一致)、 y (对应南北方向, 与岩层走向垂直) 两个方向。



图 3 2 号模型在 0.4 g-14 Hz 时右岸裂缝延伸
Fig. 3 Extended cracks of right dam shoulder in model 2 at 0.4 g-14 Hz



图 5 1 号模型在 0.8 g-16 Hz 时松动破坏情形
Fig. 5 Dynam-relaxed destruction in model 1 at 0.8 g-16 Hz

3.2 试验结果

3.2.1 x 方向(东西向)施加振动力

(1) a_h 为 0.2 g 时, 振动频率从 4 Hz 开始, 依次进行。当 $F < 12$ Hz 时, 模型无破坏现象。 F 为 12 Hz 时, 2 号模型产生共振现象, 表层块体间开始出现微弱开裂松动; 当 a_h 为 0.3 g 时, 2 号模型出现明显开裂, 表层岩体有倾倒现象; 而 1, 3 号模型均无明显反应。

(2) a_h 为 0.4 g 时, F 为 16 Hz 时, 1 号模型的左岸岩体局部出现共振、松动现象; 2 号模型左岸坡体表面出现整体松动、滑塌, 右岸裂缝延伸(图 3)。3 号模型在 12 Hz 时上部块体开始松动, 16 Hz 时块体松动加剧。

(3) a_h 为 0.6 g 时, 1 号模型出现大的松动开裂, 当 F 为 16 Hz 时岩体出现剧裂振动, 并发生明显错位, 右岸断层上部破坏拉裂深度约 2 cm; 2 号模型左岸坡脚发生膨胀松动, 影响深度达 8 cm。12 Hz 时右岸整体松动, 并有向河谷倾倒、崩塌、拉裂(图 4); 3 号模型在 8 Hz 时出现松动破坏, 10 Hz 以上时产生共振, 破坏程度增大, 拉裂深度垂直地表 5 cm, 左岸达 13 cm 之深。

(4) a_h 为 0.8 g 时, 1 号模型岩层出现断裂、严重滑塌(图 5), 14 Hz 时发生崩塌; 2 号模型整体崩塌; 3 号模型最后的松动影响深度距坡表水平距离为 14 cm(图 6), 在河床以下影响深度约 3~4 cm。



图 4 2 号模型在 0.6 g-16 Hz 时倾倒、崩塌情形
Fig. 4 Situation of topple and fall in model 2 at 0.6 g-16 Hz



图 6 3 号模型在 0.8 g-12 Hz 时松动影响范围
Fig. 6 Dynam-relaxed range in model 3 at 0.8 g-12 Hz

3.2.2 y 方向(南北向)施加振动力

(1) $a_h \leq 0.3 g$ 时, 1, 2 号模型均处于比较稳定状态, 未发现明显的松动开裂。

(2) a_h 为 $0.4 g$ 时, F 为 $14 Hz$ 时, 2 号模型左岸坡表松动、鼓起, 较小的破碎岩块滑落, $12 Hz$ 时, 右岸出现倾倒拉裂现象, $16 Hz$ 时, 右岸整体拉裂, 浅部整体倾滑; 1 号模型在 $14 Hz$ 时表层有松动现象, $16 Hz$ 时, 右岸出现共振现象, 坡缘出现倾滑迹象。

(3) a_h 为 $0.8 g$ 时, 振动开始时 1 号模型右岸出现断裂, 影响深度距坡表 $4 cm$, 垂直顶面 $13 cm$, 随着频率的增加, 岩体断裂、松动程度加剧, $16 Hz$ 时, 断层带严重破碎, 影响深度达 $10 cm$ 以上; 2 号模型出现大面积崩塌。

(4) a_h 为 $1.0 g$ 时, 1 号模型左岸彻底破坏, 最大影响深度距顶面 $13 \sim 15 cm$, 距坡表水平距离为 $10 cm$, 右岸塌落, 山体下降 $0.6 cm$, 河谷松动影响深度 $2 \sim 4 cm$ (图 7); 2 号模型整体崩塌 (图 8), 山体模型整体下沉约 $5 mm$ 。

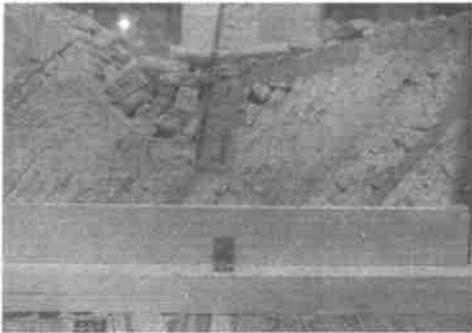


图 7 1 号模型在 $1.0 g-6 Hz$ 时河谷松动影响范围

Fig. 7 Dynam-relaxed range of river valley in model 1 at $1.0 g-6 Hz$



图 8 2 号模型在 $1.0 g-6 Hz$ 时整体崩塌

Fig. 8 Large-scale collapses in model 2 at $1.0 g-6 Hz$

4 结论

(1) 无论是层面间结合力紧密的岩体, 还是层面间结合力薄弱的岩体, 在 $a_h \leq 0.2 g$ 时, 岩体都是相对稳定的, 当 a_h 为 $0.4 g$, 岩体弱结合部位发生错动开裂; 当 a_h 为 $0.8 g$, 发生大面积的岩体松动、开裂、断碎、滑塌等现象。据此推断大柳树坝址区历史上至少发生过裂度达 9 度的强烈地震, 否则岩体松动影响范围就不会达到如此深度。这与野外对断层 F_{201} 揭露情况所判断的地震强度相当。

(2) 当软、硬岩的变形模量相差比较大 (2 号模型), 当 $a_h \leq 0.42 g$ 时, 岩体相对稳定, 无明显开裂松动现象; 当 a_h 为 $0.3 g$ 时, 岩体开裂, 表层岩体倾倒。当软硬岩的变形模量相差不大 (1, 3 号模型) 时, $a_h \leq 0.3 g$ 时, 岩体总体上处于相对稳定状态; a_h 为 $0.4 g$ 时, 坡表出现明显的松动、开裂、滑塌; $a_h \geq 0.6 g$ 时, 两类模型中出现岩体松动、错位、拉裂、崩塌等现象加剧, 岩体出现大面积松动开裂崩塌、下陷。

(3) 大柳树坝址区岩体中软、硬岩层之间的物性差异很大, 介质弹性模量比达 $1.5 \sim 2$ 。尤其是硬岩与断层带、挤压带介质弹性模量之比达数倍, 这是导致软、硬岩层或断层之间出现明显错动 (顺层剪切滑错) 的主要原因。

(4) 同等条件下, 由顺河道方向 (东西) 的加速度产生的破坏力要大于垂直河道方向 (南北) 的加速度造成的破坏力。显然这与坝址区地层及断裂产状有密切关系。由于 F_{201} 断层与穿过坝轴线的次级断层 F_{12} , F_{39} 断层处于同一构造活动链中, 因此 F_{201} 断层的地震活动, 必然牵动次级断层的活动, 由此影响坝址区岩体深部的稳定而发生大深度、大范围破坏。

(5) 根据实测模型上的破坏深度及松动范围, 换算到实际工程中, 当 a_h 为 $0.4 g$ 时, 在坝址附近坡体中岩体松动实际影响深度最大可达 $200 m$ 左右, 河谷影响深度达 $80 m$; 而当 $a_h \geq 0.4 g$ 时, 实际岩体中破坏深度达到 $200 \sim 300 m$, 河谷地段纵向影响深度达 $120 \sim 160 m$, 结果与目前实测情况相吻合。

根据岩体地震动力模拟试验结果来看, 大柳树坝址区存在的大深度、大范围岩体松动与该地区独特的地质构造背景有关, 还与破碎的软、硬相间的层状岩层有关, 更与历史上发生的强烈地震密度相

关。显然在目前的工程地质条件下,一旦发同规模的地震活动,坝址区所遭受的破坏程度会更大,对拟建的水利工程设施将产生严重威胁。

[参 考 文 献]

[1] 韩文峰. 黄河黑三峡大柳树松动岩体工程地质研究[M]. 兰

州: 甘肃科学技术出版社, 1993.

[2] 田勤俭, 丁国瑜. 青藏高原东北隅的三联点构造特征[J]. 中国地震, 1998, 14(4): 27~35.

[3] 田勤俭, 丁国瑜, 申旭. 青藏高原东北隅强震构造模型[J]. 地震, 2002, 22(1): 9~16.

[4] 黎克武, 刘汉超, 冯永国, 等. 大柳树坝址松动岩体的基本特征及成因机制[J]. 地质灾害与环境, 1994, 5(4): 1~17.

[5] 彭建兵. 区域稳定动力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

Dynamic simulation test analysis on destructive mechanism of rock mass at Daliushu dam site of Huanghe River

WANG Yong-zhi, QI Wei, MEN Yu-ming, PENG Jian-bing

(School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: There is a large scale of dynam-relaxed rock mass lies in DaLiushu dam site of Huanghe River. Geostatic stress released, structural planes opened and density reduced are the main characteristics of dynam-relaxed rock mass. In order to study the destructive mechanism of the rock mass, geological background conditions and earthquake dynamic effects of the region round Daliushu dam site are investigated. The internal relations between earthquake dynamic effects and dynam-relaxed rock mass are confirmed. A further research to the conclusion is given by the dynamic simulation test. Consequently once a more serious earthquake happened at present engineering geological conditions the rock mass of dam site will be further destroyed. That would be threaten to the new water conservancy at Daliushu dam site of Huanghe River.

Key words: Daliushu; dynam-relaxed rock mass; earthquake dynamic effect; dynamic simulation test

(英文审定: 苏生瑞)

(上接第 53 页)

Study on the dynamic change feature of reservoir property with injection exploitation in Guantao formation of Gudao oil field

ZHANG Wei-feng^{1,2}, LIU Shou-jun², LI Yong-an², GAO Xiao-Peng², XIE Yu-qing²

(1. School of Petroleum Engineering, Xi'an University of Petroleum, Xi'an 710061, China;

2. Gudao Production Group of Shengli Oil Field Limited Company, Dongying Shandong 257231, China)

Abstract: Based on coring information, laboratory test data and dynamic logging information of the formation, the paper elaborated on the changing feature of the lithology, physical property, oil bearing property and electrolysis property for sandstone reservoir in Gudao oil field during low water bearing period, medium water bearing period and high water bearing period respectively. Because of long-term injection exploitation, within the reservoir the clay volume, carbonate content, oil saturation and bound water saturation was reduced, and average pore diameter and rock grain size was increased, which led to an increase of the permeability and porosity. However, with overall growth of physical property, the discrepancy of the parameter for porosity and permeability was raised. At the same time, the physical property became worse due to the water sensitivity and rate sensitivity. Additionally, interval travel, spontaneous potential and induction resistivity changed obviously. There was a difference in change level for reservoir parameter of different lithology. For example, the change level for reservoir parameter of silt is less than that of fine sand.

Key words: injection exploitation; lithological property; physical property; oil bearing property; electrolysis property; Guantao Formation; Gudao oil field; Shandong

(英文审定: 苏生瑞)