

文章编号: 1008—2786(2000)02—0171—06

一种垂向卸荷型浅生时效构造的地质力学模拟

李天斌, 王兰生, 徐 进

(地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059)

提 要: 采用地质力学模拟方法, 再现了铜街子水电站浅生时效构造的形成演化过程。研究表明, 它是区域性剥蚀卸荷过程中因岩体中残余应变能释放, 时效变形而在浅部岩体中形成的一种垂向卸荷型变形破裂迹象。

关键词: 浅生时效构造; 物理模拟; 铜街子水电站

中图分类号: P546; P554 文献标识码: A

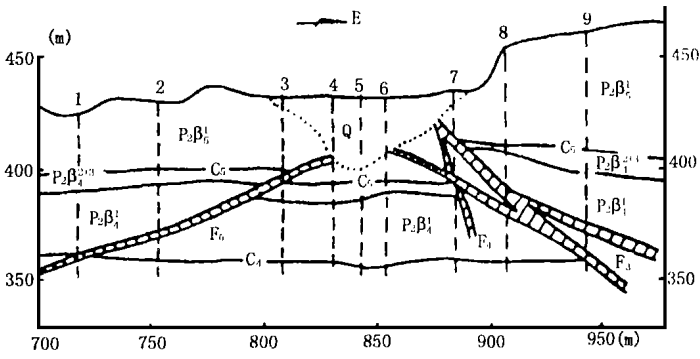
浅生时效构造是 80 年代以来, 新发现的一种既不同于一般地质构造形迹, 又区别于受现代地形控制的表生构造的地壳浅层变形破裂形迹。研究表明, 它是挽近期以来, 区域性剥蚀(垂向卸荷)或侧向扩张(侧向卸荷)引起岩体中的残余应变能释放, 在地壳浅表层中形成的时效变形破裂迹象。由于这类变形破裂形迹发育在近地表范围内, 它对地面岩体运动、岩体稳定性及工程活动起着重要控制作用。

1 地质原型与概念模型

在四川大渡河铜街子电站坝地质勘测和施工开挖过程中, 揭示了一类十分特殊的地质结构——一套层间、层内错动带和、缓倾角断裂组成的破裂体系。该电站坝址区顺河发育一轴向近南北的宽缓背斜(岩层倾角 $< 8^{\circ}$), 主要由二叠系的玄武岩($P_2\beta$)、砂页岩(P_2s)和三叠系的砂岩、泥岩(T_1f)组成。勘探资料和施工开挖揭示, 在近水平的似层状玄武岩岩体中发育了一套由层间、层内错动(C 、 L)和小规模中、缓倾断裂(F_3 、 F_6)组成的破裂体系(图 1)。它们的主要特征如下:

1.1 发育分布特征与构造形迹和表生结构有所区别

中缓倾断裂呈剖面 X 型发育在平缓背斜核部一带, 为具张剪性特征的逆断层。总体走向与背斜轴向大体一致, 倾角 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 且由地表向地下逐渐变缓。断裂面波状起伏、粗糙不平; 断裂带上宽下窄, 一般宽数十厘米, 部分可达 $1\text{ m} \sim 2\text{ m}$, 以角砾岩和碎裂岩为主。与一般构造形迹相比, 这套断裂垂直断距较小, 通常仅几米, 最大约 16 m , 而且从地表向地下深处, 断距逐渐变小(图 1)。这



F_3 —断层及编号; C_5 —层间错动及编号; $P_2\beta_{4+3}$ —二叠系凝灰岩和凝灰玄武岩; $P_2\beta_{41}$ —二叠系玄武岩; Q —第四系工程沉积物

图 1 铜街子水电站坝轴线地质剖面图

Fig. 1 Geologic profile of Tongjiesi dam axis

些特征表明,中缓倾断裂区别于构造形迹,而与卸荷回弹有关的表生结构的发育特征有某些相似之处。但其波及范围和发育深度又远远超出通常仅限于河谷地带的表生结构区。

在玄武岩和河谷两岸沙湾组砂页岩中,也可见到与断裂方向大体平行的两组裂隙,但它们呈稀疏分布,显示断裂体系是在上覆盖层不厚的低围压条件下形成的。

除断裂外,玄武岩体中具张剪性特征的层间、层内错动也较发育。它们的错动使岩体多处架空,错动方向指向背斜轴部或河谷方向。层间错动分布于各大层玄武岩之间,尤以C₅最为典型(图1)。错动带一般厚0.3 m~0.4 m。层内错动主要发育在玄武岩的顶底部,总体产状与玄武岩似层面大体一致。

1.2 形成时期晚于构造断裂

中缓倾断裂与坝区扭性陡倾角构造断裂的相交关系及中缓倾裂隙与陡倾角构造裂隙的交切关系均表明,中缓倾结构面晚于构造结构面形成。采用石英颗粒形貌电镜扫描法(SEM)确定出,坝区特殊破裂体系形成于上新世到早更新世之间^[1]。

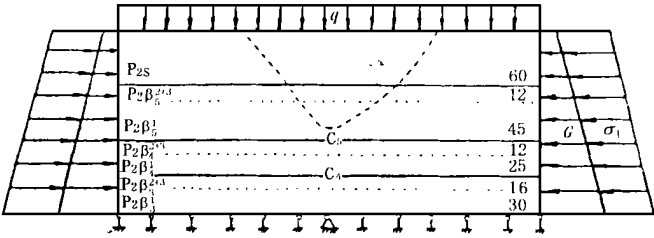
1.3 有近期活动迹象

坝基基坑开挖揭露的河谷深槽中直接观察到断层(F₆)破碎带附近有被“咬紧”的砾石。有的砾石被压裂,有的表面刻出平行等距的齿痕。这些现象证明断层在深槽形成后仍有活动。SEM分析和热释光(TL)测年结果也表明,特殊破裂体系最近一次较强烈的活动发生在中更新世晚期到晚更新世早期之间,距今22~33万年^[2]。由此可见,这一套特殊破裂体系既不属于构造断裂,又区别于受现代地貌控制的表生结构面,其形成与晚近期地质作用密切相关。分析认为,它是在晚近期地壳大面积抬升剥蚀阶段,储有较高残余应变能的岩体在近地表一带卸荷释能、时效变形而形成的一种浅表层变形破裂形迹,称之为垂向卸荷型浅生时效构造。为了检验这一概念模型的正确性和合理性,深化对这种浅生时效构造形

成过程中岩体变形破坏机制的认识,以下采用地质力学模拟方法开展深入研究。

2 力学模型

将地质原型转化成为力学模型是模拟研究的关键。由于坝区的浅生断裂体系发育于一宽缓背斜的核部。因此,垂直于背斜轴向取一单位厚度剖面,将研究对象抽象成平面应变问



P_{2s}—地层代号; 60—地层厚度(m)
图2 研究对象的力学模型
Fig. 2 Mechanical model of the study area

题来模拟,其力学模型如图2所示。图中X方向的G为岩体自重侧压力;σ_t为残余构造应力,通过地应力的Kaiser效应测试和FEM反演确定为30MPa^[3]。Y方向的均布荷载q是模拟范围以上盖层产生的自重应力(ρgh)。力学模型中各介质的物理力学参数如表1所示。

表1 各介质的物理力学参数
Table1 The physical and mechanical parameters for each mediums

岩层代号	密度 (KN/m)	变模 (MPa)	泊松比	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	抗剪断强度	
						f	C(MPa)
P _{2s}	25	11000	0.27	45	2.5	1.15	1.8
P _{2β3} ²⁺³ , P _{2β4} ²⁺³ , P _{2β5} ²⁺³	26	16000	0.27	60	4.5	1.25	2.0
P _{2β3} ¹ , P _{2β4} ¹ , P _{2β5} ¹	28	22000	0.25	160	7.2	1.60	3.0
C ₄ , C ₅			0.35		0	0.45	0

3 模型设计

3.1 相似条件

为再现浅生时效构造发生、发展、演变全过程,须采用破坏试验,并要求原型与模型满足相似律;

$$C_{\sigma} = C_E = C_c = C_R = C_T = C_{\rho} \circ C_b \ C_{\mu} = 1, C_f = 1$$

(1)

式中: C 为相似系数, 为原型参数与模型参数之比, 例如 $C_E = E_p / E_m$ 。 σ 、 E 、 C 、 R 、 T 、 ρ 、 l 、 μ 和 f 分别表示工作应力、材料的弹模、内聚力、抗压强度、抗拉强度、密度、几何尺寸、泊松比和摩擦系数。

根据模拟的范围和模型装置尺寸, 选择几何相似系数 C_l 为 350 模型材料密度与岩体密度一致($C_{\rho} = 1$), 由此可按(1)式确定其它相似系数: $C_1 = 350$ $C_{\rho} = 1$, $C_{\mu} = 1$, $C_f = 1$, $C_{\sigma} = C_{\rho} \circ C_1 = 350$ 。

根据上述相似条件求得模型的物理力学参数如表 2 所示。

表 2 模型物理力学参数

Table. 2 The physical and mechanical parameters for model

岩层代号	密度 (KN/m)	变模 (MPa)	泊松比	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	抗剪断强度	
						f	C (MPa)
P_{2s}	25	31.4	0.27	0.13	0.007	1.15	0.005
$P_{2\beta_3^{2+3}}, P_{2\beta_4^{2+3}}, P_{2\beta_5^{2+3}}$	26	45.7	0.27	0.17	0.013	1.25	0.006
$P_{2\beta_3^1}, P_{2\beta_4^1}, P_{2\beta_5^1}$	28	62.8	0.25	0.46	0.021	1.60	0.009
C_4, C_5			0.35		0	0.45	0

3.2 模型结构

受模型装置的限制, 模拟范围重点考虑第三、四、五层玄武岩($P_{2\beta_3}$ 、 $P_{2\beta_4}$ 、 $P_{2\beta_5}$)和它们之间的 C_4 、 C_5 层间错动带以及部分沙湾组岩层(P_{2s})。上覆岩层用加均布荷载(q)的办法模拟至二级夷平面高程(900 m 左右)。根据地质勘探剖面 and 坝区地层柱状图, 确定主要模拟的原型厚度为 200 m。其中, C_4 、 C_5 由于原型厚度很小, 模型中不考虑其厚度。理论计算表明^[1], 研究区最易产生褶曲的岩层长度与岩层厚度之比为 2.1:1.0。由此确定原型的模拟长度为 420 m, 经几何相似系数换算, 模型长 1.2 m, 高 0.57 m。地质分析认为, 浅生时效构造形成前研究区多次的 EW 向挤压应力场作用, 可能已使宽缓褶皱的雏形形成。因此, 我们将模型的初始状态设计成轻微隆起状, 两翼“岩层”倾角为 2°。

3.3 模型材料

选用重晶石、氧化锌粉和液体石蜡油三种原料的混合物作为模拟岩体的制模材料。根据 ISMES(意大利结构模型试验研究所)的资料和我们已有的研究, 适当调整三种原料的配方和制模压力, 可以得到一系列不同物理、力学性能 的模型材料。用 0.01 mm 厚的铝箔夹滑石粉模拟层间错动带 C_4 和 C_5 , 将少许滑石粉均匀地置于两层铝箔间, 可使其摩擦系数控制在 0.45 左右。

3.4 加载技术及测试方法

为了模拟图 2 所示的边界条件, 在模型两侧安装上、下两排千斤顶, 分别提供岩体自重侧压力(G)和残余构造应力(σ_t)的相似荷载, 并通过 5 cm 厚的钢性承压板将荷载传给模型。模型顶部的上覆盖层自重压力 q 用 5 cm×5 cm×20 cm 的长方体铁块模拟。在模型与试验装置的所有接触面上均采取了相应的降低摩擦的措施。为了观察变形破坏的全过程, 采用了以下测试方法:

1. 在模型两侧面用静电法印制网格系统。其网线密度分别为 2 条/mm 和 3 条/cm。通过这些网格可详细鉴别模型变形特征、裂纹性质、错距、生长方向, 甚至可观察到一些非常细微的变化。
2. 在模型前后侧面上设置关键测点, 并在有机玻璃板上点出相应位置。由于有机玻璃板为固定“坐标”, 因此可通过这种方法, 求得关键点的位移矢量。
3. 在模型顶面左、中、右部位, 布置三个位移传感器测量垂直方向的变形。分别为 1、2、3 号测点。
4. 摄影测量对大变形和破坏试验具特有的优点, 因此采用定位照相方法记录变形破坏的全过程。

3.5 试验步骤

根据前述概念模型, 铜街子坝区的浅生变形破坏形迹是在区域性剥蚀卸荷过程中形成的。因此, 采用在模型作用有残余构造应力的同时, 逐渐卸除上覆盖层这一卸荷地质力学模型试验方法来模拟铜街

子浅生构造的形成过程。卸荷时,按相似条件逐级卸掉模型顶部一定数量的铁块。

为了尽可能地模拟研究对象经历的地质过程,将试验分为 6 个阶段进行。依次为加压阶段、第一级卸荷阶段、第二级卸荷阶段、第三级卸荷阶段、第四级卸荷阶段和河谷深槽卸荷阶段。由于地质历史时期的大规模卸荷是一个相当漫长的过程,目前地质力学模拟中还不能很好地考虑模型与原型的时间相似性,且试验又不可能长期进行。因此,在相似荷载作用下,短时间内要观察到研究对象完整的变形破坏过程实际上是不可能的。为了解决这一问题,将试验分两次进行。第一次在相似荷载条件下观察浅生构造形成时的变形特征;第二次用改变模型受力条件的方法(超载荷法),加速变形破坏发展,从而达到模拟浅生构造形成全过程的目的。

4 试验成果及分析

4.1 变形特征

第一级卸荷阶段,将垂直荷载卸至 0.0207 MPa(相当于原型 787 m 高程)。此时模型无任何宏观变形破坏迹象。位移传感器测量模型顶部的隆起变形也非常微小。

第二级卸荷阶段,垂直荷载卸至 0.0135 MPa(相当于原型 690 m 高程)。获得各测点(1[#]、2[#]、3[#])相对垂直位移与时间的关系曲线如图 3 所示。由图可见,此时,“岩体”的垂向变形随时间而逐渐增大,且模型中部测点(2[#])的位移比两侧测点(1[#]、3[#])的位移大。但是,由于上覆荷载对模型变形的限制仍较大,“岩体”的时效变形表现出一定的滞后性,曲线前段呈上凹型。

第三级卸荷阶段,垂直荷载卸至 0.0068 MPa(相当于原型 600 m 高程)。由图 4 可见,模型中部测点的垂直位移已明显大于两侧测点的垂直位移,模型表现出逐渐隆起的趋势。而且,随着时间的增长,各测点位移也明显增大,“岩体”的时效变形特征非常明显。从上面三个卸荷阶段模型的变形特征可以看出,铜街子浅生构造形成过程中,在卸荷方向上,岩体发生明显变形,随上覆盖层的不断削薄,储能体变形范围逐渐扩大,其时效变形特征也渐趋明显。

4.2 变形破坏的全过程

变形试验完成后,改变模型受力条件,在超载荷载条件下进行上述 6 个阶段的试验。其结果如下:

1. 第一级卸荷后,模型未发生任何宏观变形破坏迹象。

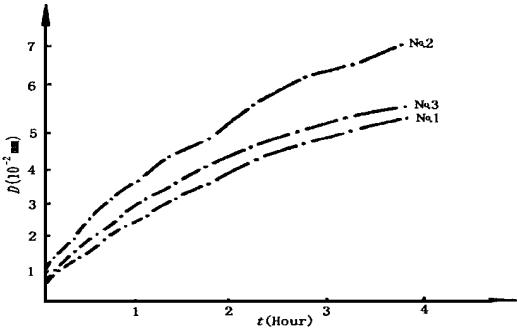


图 3 第二级卸荷后各测点相对垂直位移(D)时间(t)曲线
Fig. 3 Relative vertical displacement—time curves of each measurement point after the second unloading stage

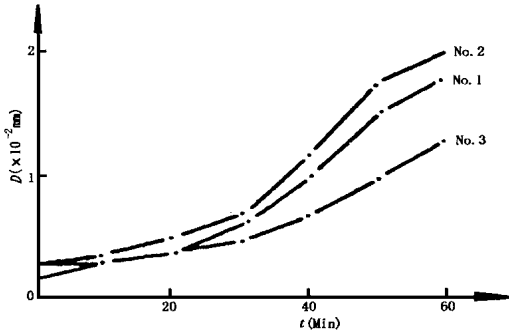


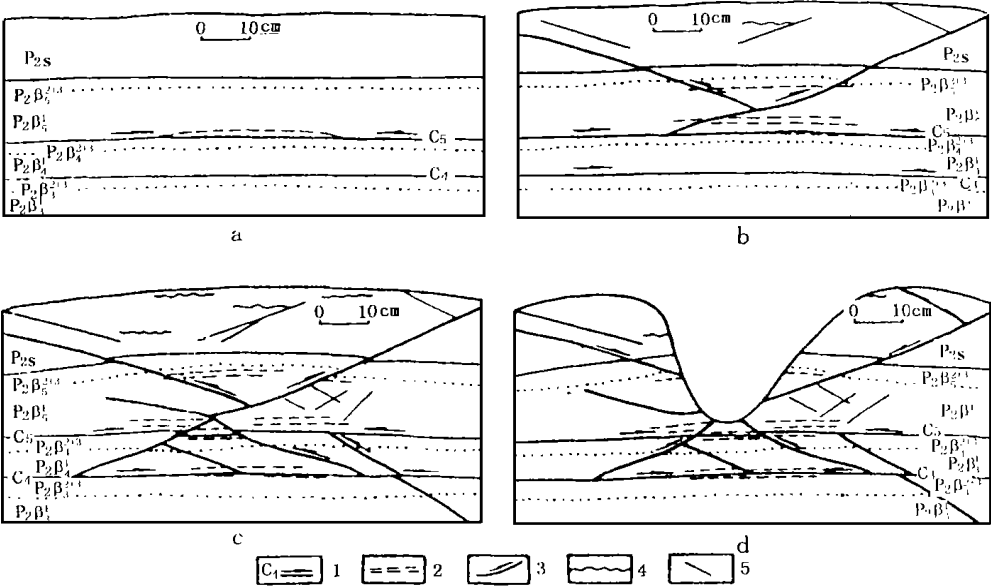
图 4 第三级卸荷后各测点相对垂直位移(D)时间(t)曲线
Fig. 4 Relative vertical displacementtime curves of every measurement point after the third unloading stage

2. 第二级卸荷时,C₅开始产生微小错动,并在中部轻微张开,紧邻其上的P₃¹底面附近发育平行于C₅的微裂隙,如图 5a 所示。

3. 第三级卸荷过程中,模型轻微隆起,率先在P_{2s}上部出现缓倾角张剪性裂隙和近水平的张裂隙。

随后 C₅ 发生进一步错动,并在其附近的 P₂β₄ 顶部、P₂β₅¹ 底部产生近水平的裂隙——层内错动面。同时 C₄ 开始有微小错动,P₂β₅ 中部出现分别倾向模型左右两侧的中缓倾破裂面,即原型的中缓倾浅生断裂。它们在模型中部相交,其中倾向左侧的破裂面先发育且呈明显的张剪性(尤其是上部最突出)。该裂面向上延伸至 P₂s 中,与先出现的缓倾破裂面贯通;向下发育至 C₅ 层,其倾角有变缓的趋势。倾向右侧的破裂面在模型中部受限于倾向左侧的破裂面,向上则与 P₂s 中的缓倾破裂面贯通。上述特征见图 5b。

4. 第四级卸荷相当于卸至原型高程 509 m 附近(图 5c),模型进一步隆起,C₄ 明显错动,中部张开,在其附近出现近水平发育的层内错动面;C₅ 以下相继出现几条中缓倾破裂面,其发育多受 C₄ 控制,向下消失于 C₄ 层内,向上错断 C₅ 与已有破裂面贯通或平行展布。同时,C₅ 及上部已有破裂面进一步错动、张开,呈现明显张剪性特征,裂面附近出现稀疏的次级破裂,P₂s 和 P₂β₅¹ 顶部发育近水平的张裂隙。



a. 2 级卸荷后 b. 3 级卸荷后 c. 4 级卸荷后 d. “河谷”深切后
1. 层间错动; 2. 层内错动; 3. “断层”及错动方向; 4. 张性破裂; 5. 剪切破裂;
图 5 相似材料地质力学模型变形破坏过程图

Fig. 5 Deformation and failure evolution diagram of geomechanical model

5. 由于“断裂”形成使岩体应力部分释放,稳压 48 h 后,在 50 % 的水平荷载作用下,模拟河流的深切卸荷。观察表明,主要结构面向临空方向进一步错动。由模型最终变形破坏迹象(图 5d)可见,主要破裂面发育在一定的深度范围内,呈稀疏分布,错动距离从上至下逐渐减少,最后与其他软弱面搭接。

5 结 论

- 1. 模型试验再现了铜街子坝区浅生时效构造形成的全过程,模型最终的变形破坏现象和现场观测到的地质特征非常吻合。由此证明了这类浅生时效构造形成机制概念模型的正确性。
- 2. 铜街子浅生构造的形成过程是一个具有张剪性特征的累进性变形破坏过程。随着上覆盖层的不断卸荷,在卸荷方向上储能体扩容、膨胀,变形破坏总体上由上向下发展,破裂面呈稀疏分布,发育在一定深度范围内,且部分破坏面未发育至地表。
- 3. 模型试验证明,浅生构造形成过程中具有明显的时效变形特征。变形破裂随卸荷而逐渐发生、发展,并且这种时效变形和储能体上覆盖层产生的围压大小密切相关。围压愈小,时效变形特征愈明显。

4. 铜街子浅生构造在形成过程中软弱结构面(例如 C_4 、 C_5)起重要的控制作用。由于卸荷导致储能体上覆压力降低,在残余应力作用下,已有软弱面发生剪切错动,并使岩体应力更加集中。当上覆盖层卸至某临界厚度时,岩体中产生张剪性破裂,最后形成中缓倾断裂。

5. 浅生构造虽然形成于河谷深切以前,但河谷深切时的进一步卸荷对已有的浅生构造有一定的改造作用。模型试验中已有破裂面向临空方向的进一步错动以及铜街子坝区现场发现的被破裂面“咬碎”或“咬紧”的卵砾石等现象证实了这一点。

6. 浅生时效构造的形成、演化是岩体中的应变能逐渐释放并不断减少的过程。铜街子水电站建成后,坝区附近出现的轻微水库诱发地震就是坝区岩体应变能进一步释放的表现。可以预计,这种水库诱发地震将随着岩体应变能的耗尽而消失。

参考文献:

- [1] 王兰生,李天斌,赵其华. 浅生时效构造与人类工程[M]. 北京:地质出版社, 1994.
- [2] L. S. Wang, T. B. Li. A type of epigenetic time—dependent structure and its engineering geologic significance[Z]. In: Proc. 7th Intern. Congress IAEG. Rotterdam; A. A. Balkema Publishers. 1994.
- [3] T. B. Li, L. S. Wang. An approach to the determination of geostress using the Kaiser effect[Z]. In: Proc. 6th Intern. Congress IAEG. Rotterdam; A. A. Balkema Publishers. 1990.

THE GEOMECHANICAL MODELING OF A TYPE OF VERTICAL UNLOADING EPIGENETIC TIME—DEPENDENT STRUCTURE

LI Tian-bin, WANG Lan-sheng, XU Jin

(National Laboratory of Geohazard Prevention, Chengdu, 610059)

Abstract: During geologic investigation for Tongjiezi damsite on Dadu River in China, a typical kind of epigenetic time-dependent structure was discovered, which was different from both general geologic structures and superficial structures. The study indicates that it originated from time-dependent deformation and releasing of residual strain energy in rockmasses at shallow depth in the course of overburden unloading caused by regional erosion. A geomechanical model test was conducted to study and verify the formation mechanism and evolution process of this structure. The model test and its results are described in detail in this paper.

Key words: Epigenetic time dependent structures; physical modeling; tongjiezi hydroelectric station