

清江水布垭坝址软弱夹层 变形机制分析

简文星

(中国地质大学, 武汉)

吴树仁

(中国地质科学院地质力学研究所)

徐瑞春

(长江三峡勘测研究院)

摘要 清江水布垭坝址软弱夹层的变形机制为: (1) 差异沉积作用造成了软弱夹层物质成分和结构构造上的差别, 从本质上决定了软弱夹层的变形强度; (2) 软沉积变形加强了软弱夹层物质的分异和软化; (3) 构造活动导致软弱夹层发生多期次剪切滑动, 使软弱夹层中的软弱物质泥化、叶理化并发生揉皱; 使相对坚硬的结核和团块压扁、旋转和圆化。

关键词 水布垭坝址 软沉积变形 沉积差异

1 水布垭坝址概况

水布垭水利枢纽是清江干流三级大型梯级工程之一, 拟建坝高 230—250m, 库容 $47 \times 10^8 - 60 \times 10^8 \text{ m}^3$, 装机容量 $150 \times 10^5 - 200 \times 10^5 \text{ kW}$, 属国家级大型水利枢纽工程。经过多年详细的规划、勘测及论证, 坝址最终定在水布垭近 1km 的 NNE 向河段的中部 (图 1)。

坝址位于半峡背斜的西翼, 次级褶皱三友坪向斜核部东侧。三友坪向斜为一自南向北倾伏的宽缓褶皱, 轴线总体呈近 SN 向, 枢纽倾伏角 $3 - 5^\circ$ 。西翼地层倾向 $95 - 105^\circ$, 倾角 $5 - 15^\circ$; 东翼地层倾向 $230 - 285^\circ$, 倾角 $6 - 15^\circ$ 。向斜核部为二叠系龙潭组、茅口组和栖霞组中薄层灰岩、泥灰岩夹中薄层泥岩, 两翼分别为石炭—泥盆系中厚层灰岩、砂岩和志留系页岩。其中位于坝轴线附近的栖霞组发育多层软弱夹层, 且软弱夹层的剪切滑动、泥化、软化作用较强。坝址区断裂以近 S—N 向张性地堑、地垒式组合为主, 规模不大, 一般延伸 $\pm 2\text{km}$ 便顺层消失。

2 软弱夹层基本特征

软弱夹层发育在栖霞组和马鞍山组内。栖霞组厚 192.16—241.7m, 按岩性组合可分为 15 段, 岩性以灰岩为主, 夹有 14 层软弱层 (表 1)。马鞍山组顶部发育 1 层软弱夹层, 中、下部为巨厚石英砂岩。灰岩和石英砂岩厚度大, 成分单一, 层理完整、平直, 岩性坚硬。软弱夹层主要由泥页岩、泥灰岩及微层状泥质灰岩组成, 表面多呈鳞片状、页片状, 且剪切滑动揉皱变形强烈, 风化表面物质疏松, 泥化软化明显。根据沉积组合特征, 坝址区软弱夹层可分为 3 类: (1) 软弱夹层由软硬相间的互层组成, 软层、硬层的累计厚度大致相等, 如 131、081、031 等; (2) 软弱夹层

由岩性较软的炭质泥岩、页岩、灰质泥岩等组成,如 001等;(3)软弱夹层由硬质团块、透镜体及软基质构成,其特点是软基质呈微细条带绕硬质团块或透镜体(图 2),如 101 102 103等。这种软弱夹层的厚度较大,且延伸稳定。上述特征表明,软弱夹层的变形,既与原始成分差异、成岩压实分异作用相关,也与软沉积变形、构造变形作用相关。

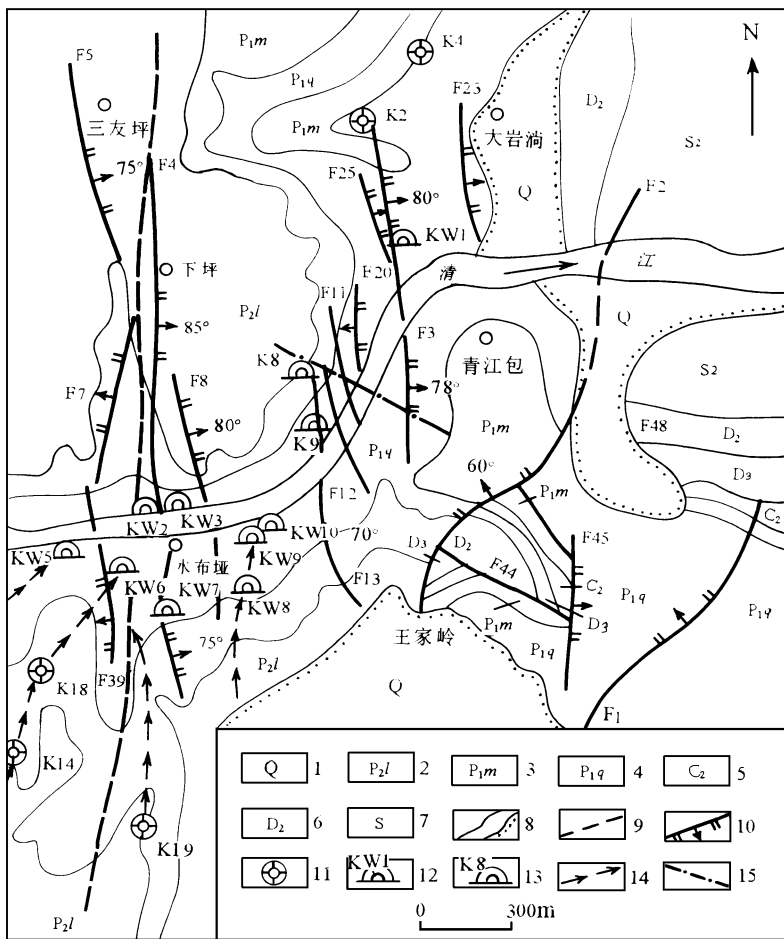


图 1 水布垭坝址地质简图(据长江水利委员会清江地质大队改编^①)

Fig. 1 Geologic sketch of the Shuibuya dam site

1. 第四系; 2-4. 分别为二叠系龙潭组、茅口组、栖霞组; 5. 中石炭统; 6. 泥盆系; 7. 志留系; 8. 地质界线; 9. 向斜轴线;
10. 断层; 11. 落水洞; 12. 有水水平溶洞; 13. 无水水平溶洞; 14. 地下水通道; 15. 坝轴线

3 软弱夹层的沉积差异

软弱夹层与坚硬岩层相比,其物理性质、抗风化能力、岩石力学性质和强度等方面具有很大差异。这种差异的根本原因是物质成分和结构构造上的差别。坚硬岩层的岩性为结晶灰岩、生物碎屑灰岩、白云岩及石英砂岩等。这些岩石为厚层、巨厚层层状构造,岩体的强度大,抗风

^① 长江水利委员会清江地质大队,清江水布垭水利枢纽可行性研究阶段地质勘察报告,1993

化能力强,构造变形弱;软弱层则以泥岩、页岩、泥灰岩为主,薄层状、鳞片状或页片状构造。岩体强度相对较低,抗风化能力弱,构造变形强。这些软弱层呈多层夹层分布,反映了沉积环境上的多期动荡变化。

表 1 水布垭坝址软弱夹层一览表

Table 1 The incompetent interlayers in Shuibuya dam site

编号	出露层位	厚度 (m)	与底板间距 (m)	岩性特征
151	P ₁ ⁵ q	1.55	1.55	灰、灰黑色有机质泥质生物碎屑灰岩,内夹灰色细晶灰岩团块、透镜体或长扁豆体,带内物质较破碎,呈页片状、鳞片状,并有不同程度的软化
131	P ₁ ³ q	7.15- 8.30	7.15- 8.30	由软硬相间 9层组成。软弱层共 5层,累计厚约 6.45m,岩性为灰黑色含炭、泥质生物碎屑灰岩,内夹生物碎屑灰岩、钙质不连续条带或扁豆体。硬岩层厚 1.35m,岩性为中厚层微晶灰岩
121	P ₁ ² q	0.40	4.85	炭质泥灰岩。中上部有 3- 5cm的泥化带,两侧为鳞片状、碎屑状的劈理带夹灰岩透镜体
111	P ₁ ¹ q	0.15	5.75	泥灰岩。整个夹层软化明显,结构疏松,呈土状。在顶底面附近断续分布方解石脉
103	P ₁ ⁰ q	1.90	4.96	瘤状泥灰岩。中部有厚 25cm强软化带,带内物质多呈鳞片、页片状,并有方解石脉断续分布,两侧为劈理揉皱带
102	P ₁ ⁰ q	0.16	1.56	灰色泥灰岩夹灰岩团块或透镜体。泥灰岩风化后呈页片状
101	P ₁ ⁰ q	0.80	0.80	泥质微晶白云岩,风化后呈页片状,很象页岩,含少量炭质灰岩扁豆体
091	P ₁ ⁰ q	0.30	7.50	灰色泥灰岩与灰黑色生物碎屑灰岩构成的复合层。软层大部分已风化成灰黄色泥,性状差
081	P ₁ ⁸ q	10.31	10.31	由 13层软硬岩层组成。软岩层共 7层,最厚为 1.2m,累计厚为 6.34m,岩性为泥灰岩、灰质泥岩。硬岩层共 6层,累计厚 3.97m,由中厚层微晶灰岩、生物碎屑灰岩组成,岩性坚硬
061	P ₁ ⁵ q	3.10	3.10	灰、深灰色瘤状泥灰岩。瘤体为深灰色细晶灰岩,岩性坚硬。基质为灰质泥岩,易风化,风化后出现不均匀球状体
041	P ₁ ⁴ q	1.30	38.10	灰色瘤状泥灰岩。顶部有一层厚为 0.45m的灰质泥岩、炭质页岩,性状更差
031	P ₁ ³ q	8.07	8.07	自上而下可分为软硬相间的 29小层。软岩层累计厚为 4.81m,由泥岩、泥灰岩、泥质生物碎屑灰岩、微层状含白云质生物碎屑组成。硬岩层为生物碎屑灰岩,累计厚 3.26m。此层构造变形强,且延伸至坝底,对坝基的稳定性影响大
012	P ₁ ¹ q	3.42	9.03	自上而下分为软硬相间的 17小层。软岩层为灰色泥灰岩,累计厚 1.70m,风化后呈页片土状。硬岩层由不规则条带状微晶灰岩组成,累计厚 1.72m,岩性坚硬
011	P ₁ ¹ q	3.21	3.21	自上而下共分软硬相间的 20小层。软层累计厚 1.28m,岩性为钙质页岩、钙质泥岩。硬岩层为深灰色微-细晶岩,累计厚 1.93m
001	P ₁ ma	1.20- 8.58	5.70- 17.25	由炭质页岩、钙质页岩、页岩及不连续煤层组成,岩性、厚度变化较大

据长江水利委员会清江地质大队,清江水布垭水利枢纽可行性研究阶段地质勘察报告整理。

在软弱夹层内,多包含有藕节状、透镜状和条带状坚硬的生物碎屑灰岩和硅质团块。微观分析表明,这种团块状硬质岩中含有大量的生物骨屑、碎片及钙质、硅质吸附交代团块(图 3)。

由此可见, 软弱夹层内坚硬物质的富集与生物沉积分异作用和化学沉积分异作用密切相关^[1]。生物沉积分异作用主要表现为两种方式: 其一, 是生物吸附大量的钙质、硅质, 死后连同骨骼一起堆积, 形成硬质堆积的团块, 类似于珊瑚礁的形成; 其二, 是在松散泥质沉积物中, 由于穴居生物活动, 产生次生空洞, 被钙质、硅质物所充填交代而形成坚硬的团块, 这也可称为生物化学沉积作用。化学沉积分异作用与生物吸附、沉淀作用密切相关, 主要表现为生物碎屑的硅质交代和硅化堆积, 进而形成坚硬的硅质条带或硅质团块。正是这种生物吸附、聚积和化学交代作用相叠置的生物化学沉积分异作用, 造成了软弱夹层内部物质成分的分异, 形成了以软弱物质为主且含坚硬的团块体、透镜体的软弱层

4 软沉积变形

软沉积变形是指沉积物尚未固结成岩时发生的变形。软沉积变形的必要条件是软、硬沉积物相间分布, 如砂岩层和页岩层, 灰岩层和泥岩层的相间分布等。当灰岩(或砂岩)沉积物位于塑性状态的页岩(泥岩)层之间时, 由于差异压实作用使沉积物发生垂向流动, 形成瘤状、团块状、椭球状和枕状不规则的断续分布。水布垭坝区栖霞组软弱夹层中的灰岩球和灰岩枕就是这种软沉积变形的结果。

在软弱夹层中, 软沉积变形比较普遍, 规模从几厘米到十几米。除差异压实作用外, 水体扰动、震动、重力滑塌和孔隙水压力作用也有较大影响, 其形成机制与 Kuenen(1965)所论述的砂岩球、砂岩枕的形成机制相似^[2]。软沉积变形进一步强化了软弱夹层内的物质分异作用和软化作用。因此, 软沉积变形越强烈的地段, 软弱夹层的强度越差。

5 软弱夹层的构造变形

软弱夹层在沉积分异和软沉积变形之后, 又叠加了复杂的、多期次的构造变形。构造变形

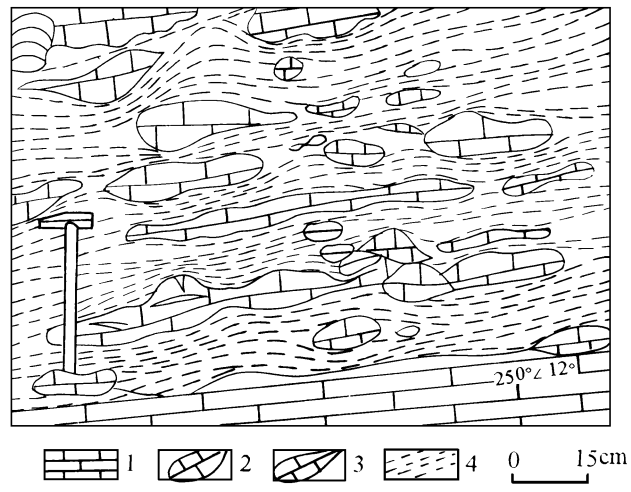


图 2 P₁²q 段中 121 软弱夹层
Fig. 2 Sketching map of 121 incompetent interlayer
1. 灰岩; 2. 灰岩透镜体; 3. 燧石结核透镜体; 4. 泥灰岩、钙质泥岩

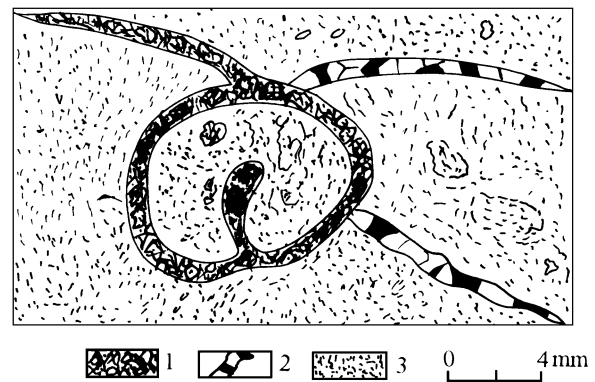


图 3 围绕生物壳体生成的硅质岩
(水布垭左岸 250m 台阶 091 软弱夹层)
Fig. 3 Sketching map of biogenic silicalite
1. 玉髓; 2. 方解石脉; 3. 微晶石英

导致软弱夹层发生多期次的剪切滑动,使软弱夹层中的软弱物质泥化、叶理化,并发生揉皱;而较坚硬的结核和团块则发生旋转、圆化和压扁作用,形成透镜状、香肠状构造组合。根据软弱夹层组合变形特征分析,它们主要有3次重要的变形作用。

(1) 半峡背斜形成过程中所派生的层间剪切滑动。这种区域性的上层面上滑剪切作用,破坏了软弱夹层各纹层之间的粘结强度。软弱物质发生塑性剪切变形而叶理化;坚硬的团块由于滞后的剪切旋转作用,与软弱层不协调,故团块扁平面与叶理有一定交角,指示上层面向上剪切滑动(图4b)。同时由于软弱层与坚硬团块之间的粘塑性剪切滑动,使坚硬团块或条带细颈化,并在其细颈部位形成张裂或剪破裂,从而形成叶理化软弱物质所包裹的透镜状、藕节状夹层构造。这种剪切变形降低了软弱夹层的抗剪强度和岩体质量。

(2) 龙王冲断层的伸展拆离,诱导顺层下滑作用,使软弱夹层中的软弱物质强烈叶理化并发生揉皱,指示上层面向下滑(图4b)。在下滑剪切过程中,沿着主要下滑剪切面充填多层顺层张性方解石脉,最多可达10-15层(图4a),其中方解石晶体垂直脉壁生长,表明软弱夹层存在多次脉动性伸展滑脱作用。

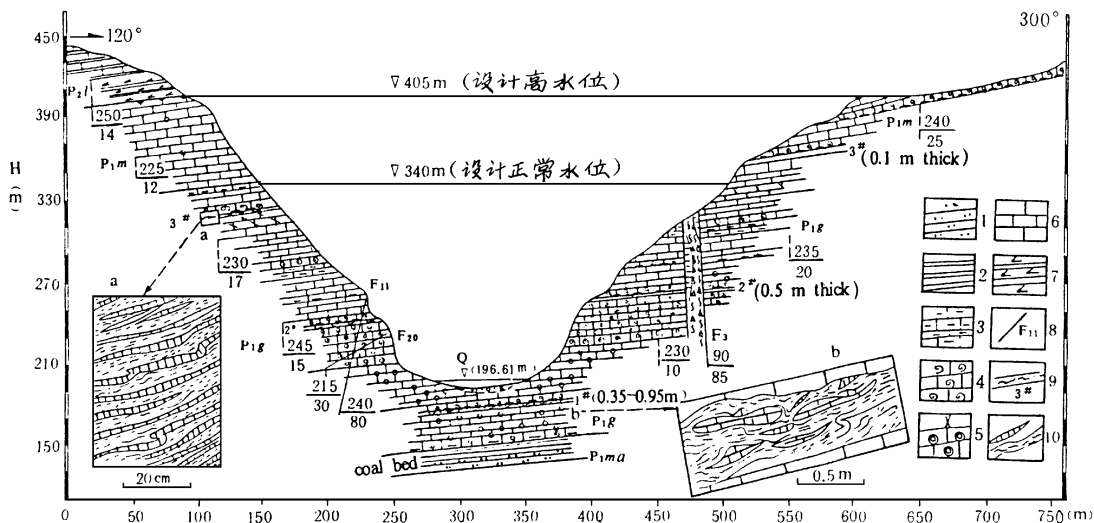


图4 水布垭坝轴线实测剖面图(据长江水利委员会清江地质大队资料改绘^①)

Fig. 4 Geologic profile of Shuibuya dam site

a和 b. 软弱夹层素描: 1. 粉砂岩; 2. 页岩; 3. 泥质灰岩; 4. 生物碎屑灰岩; 5. 团块状灰岩;
6. 灰岩; 7. 硅质灰岩; 8. 断层; 9. 软弱夹层; 10. 方解石脉及软弱夹层

(3) 后期逆冲剪切作用。软弱夹层在多次剪切滑动变形过程中,应变硬化。由于喜马拉雅主期的缩短作用,使局部软弱夹层形成脆性逆冲剪切面。这种剪切面最明显的特征是大致顺层面平直地切割软弱夹层中的软弱物质和硬质团块,而不受物质界面的限制。这种局部变形现象表明,软弱夹层的晚期变形处于应变硬化状态。根据软弱夹层变形方解石脉的e双晶和位错构造的统计分析显示,在软弱夹层的多次变形过程中,变形最高的差异应力为65-85 MPa(表2);包裹体测温结果为平均变形温度217°C。这些结果表明,软弱夹层的构造变形属于低温、低

① 长江水利委员会清江地质大队,清江水布垭水利枢纽可行性研究阶段地质勘察报告,1993

应力环境下发生的粘滑性剪切过程,由方解石脉体所估算的累计应变可达 30% 左右。

表 2 软弱夹层变形应力估算表

Table 2 The estimation of deformational stress of the incompetent interlayers

样号	位 置	方法	差异应力 (MPa)
S ⁰	水布垭左岸 270m线, 103夹层	方解石 e双晶率	77
S ⁴	水布垭左岸 270m线, 031夹层	方解石 e双晶率	65
M ₁	水布垭左岸 320m线, 121夹层	方解石位错密度	85

6 总结

综上所述,清江水布垭坝址软弱夹层变形机制表现为: (1)差异沉积作用造成了软弱夹层物质成分和结构构造上的差别,从本质上决定了软弱夹层的变形强度; (2)软沉积变形强化了软弱夹层物质的分异和软化; (3)多期次的剪切滑动使软弱夹层中的软弱物质泥化、叶理化,使相对坚硬的结核和团块发生旋转、圆化和压扁作用。正是由于这些变形作用,导致了软弱夹层抗剪强度大大降低,岩体质量变差,可能会影响坝基沉陷和蠕滑变形。边坡和坝肩的稳定性及施工的顺利进行,在进一步的设计、勘测和施工过程中,应引起足够的重视。

参 考 文 献

- 1 F J Pettijohn, *Sedimentary Rocks*, 1974, 李汉瑜等译,北京:石油工业出版社,1981
- 2 朱志澄等,构造地质学,武汉:中国地质大学出版社,1990

A STUDY ON THE DEFORMATION MECHANISM OF THE INCOMPETENT BEDS IN THE SHUIBUYA DAM SITE IN QINGJIANG RIVER

Jian Wenxing

Wu Shuren

(China University of Geosciences, Wuhan)

(Institute of Geomechanics, CAGS)

Xu Ruichun

(Sanxia Institute of Exploration)

Abstract The deformation mechanism of incompetent beds in the Shuibuya dam site may be summarized as follows: (1) The difference in composition and structure of the incompetent beds resulting from differential sedimentation determines essentially their strength. (2) The deformation of soft sediments may facilitate their repeated shearsliding giving rise to the argillation, foliation and crenulation of the soft materials, and the flattening, rounding and rotation of the hard ones.

Key words Shuibuya dam site, deformation of incompetent beds, differential sedimentation

第 一 作 者 简 介

简文星,男,29岁,讲师。1992年获中国地质大学构造地质硕士学位,现攻读水文工程地质博士学位。通讯地址:湖北武昌喻家山中国地质大学。邮政编码:430074