

# 阿墨江三江口水电站混凝土面板堆石坝坝体计算\*

杨玲<sup>1</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 文俊<sup>1</sup>, 赵亚明<sup>3</sup>

(1. 云南农业大学 水利水电与建筑学院, 云南 昆明 650201; 2. 云南省水利水电勘察设计研究院, 云南 昆明 650021; 3. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650011)

**摘要:** 采用简化 Bishop 法, 分析了三江口水电站混凝土面板坝坝坡在施工期和正常运行期下的抗滑稳定性, 针对河床冲积层特性进行了下游坝坡稳定敏感性分析, 并采用 E-B 模型完成了竣工期、正常运行期的坝体的应力应变计算。结果表明, 三江口水电站混凝土面板坝的设计是合理的。

**关键词:** 简化 Bishop 法; 抗滑稳定性; 稳定敏感性; E-B 模型; 应力应变

**中图分类号:** TV 641.4   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1004-390X (2009) 01-0123-05

## Calculation of the Concrete Facing Rockfill Dam of Sanjiangkou Hydropower Station of Amojiang River

YANG Ling<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, WEN Jun<sup>1</sup>, ZHAO Ya-ming<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources, Hydroelectric and Architecture, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Provincial Water Conservancy and Hydroelectric Survey Design and Research Institute, Kunming 650021, China; 3. Kunming Survey and Design Research Institute of Chinese Water and Electricity Consultant Group, Kunming 650011, China)

**Abstract:** In this paper, using simplified Bishop method, the stability against sliding of concrete facing rock-fill dam of Sanjiangkou hydropower station of Amojiang River was analyzed and the stable sensitivity of the downstream slope under the river bed alluvium influence in construction and running periods was studied. Finally, the stress and the strain of the dam in completion and running periods by Duncan E-B mode were calculated. The results of the calculation illustrated that the design of the concrete facing rock-fill dam of Sanjiangkou Hydropower Station was rational.

**Key words:** simplified Bishop method; stability against sliding; stable sensitivity; Duncan E-B mode; stress and strain

### 1 工程概况

三江口水电站为三等中型工程, 是阿墨江规划河段梯级水电站中的第三个梯级电站, 开发方式为堤坝式。枢纽建筑物主要有拦河坝、泄洪建筑物、引水系统、厂房、导流洞等。泄洪建筑物、引水系统、导流洞均布置在阿墨江左岸; 厂房布置于泗南江右岸。电站总库容  $8.452 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 水

库正常蓄水位为 614.000 m, 相应总库容  $7.576 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 调节库容  $1.486 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 库容系数 0.4%, 水库具有日调节性能。装机容量 99 MW, 保证出力 33 MW, 多年平均发电量  $4.24 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 年利用小时数达 4 283 h。

### 2 坝址区地形、地质条件

枢纽区山脉、主要河流的发育受地质构造控制

收稿日期: 2008-03-30    修回日期: 2008-05-06

\* 基金项目: 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院勘察项目

作者简介: 杨玲 (1977-), 女, 在读硕士研究生, 讲师, 主要从事水利工程制图、水利信息化、水工的教学与科研工作。

明显,以南北向和北西走向者为主。区内山势陡峻,山顶高程 710 ~ 1 550 m,谷底高程 552 ~ 560 m,相对高差 150 ~ 1 000 m,属中等切割中山峡谷地貌类型。坝段阿墨江总体流向 S48°E;他郎河及泗南江总体自北向南流。坝址区两岸地形呈不对称“V”字型,属斜向谷,左岸地形相对较完整,地形坡度 40° ~ 45°;右岸地形较零乱,小冲沟较发育,地形较缓,地形坡度多在 20° ~ 30°间,在右岸坝轴线附近 570 ~ 590 m 高程为一缓坡台地。厂房位于泗南江右岸漫滩上,后山坡地形坡度约 40°。

工程枢纽区主要出露三迭系上统路马组(T3l)地层,在坝址上游右岸有侏罗系中统雅期组(J2y)地层分布,路马组地层与雅期组地层呈角度不整合接触,路马组地层中局部有侵入岩脉分布。路马组地层岩性较为复杂,为灰、深灰、黑灰、青灰色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、长石石英砂岩夹灰黑色炭质、含炭质泥岩,局部夹灰岩透镜体,相变较大。

枢纽区总体处于歹字形构造带内,地质构造复杂,褶皱、断裂构造发育,构造形迹以北西向为主,北东向次之,近东西向也有分布。工程区褶皱发育,与工程有直接影响的褶皱主要是坝址河床一带的复式褶皱。坝址复式褶皱主要由一背斜(2)和一向斜(3)组成,背、向斜核均位于河床,两岸次级褶曲发育,左岸总体表现为单斜构造,右岸被次级褶曲所复杂化。工程枢纽区断裂构造发育,以压扭性断层为主,小断层和节理裂隙发育。对工程影响较大的断层有 F6, F7, F12, F14, F15, F16, F19, F20。枢纽区节理裂隙较发育,多闭合 ~ 微张,局部张开 1 ~ 5 cm,延伸较短,规模较小,局部面上见擦痕。

### 3 面板堆石坝剖面拟定及坝料分区

坝顶长 330 m,坝顶宽 8 m,坝顶高程 618.00 m,上游设防浪墙。趾板开挖最低高程为 541.00 m,最大坝高为 77.0 m。上、下游坝坡均采用 1:1.4,在下游坝坡 598.00 m 高程设一台 2.0 m 宽马道。坝体材料分区主要由垫层区(2A)、过渡料(3A)、硬岩堆石料(3B)、软岩堆石料(3C)、并在面板上游设坝前覆盖料(1A, 1B)、下游块石护坡(3D),三江口坝体断面<sup>[1~2]</sup>见图 1。①垫层料(2A):垫层区直接位于面板下部,为面板提供均匀可靠的支承并作为防渗设置第二道防线。垫层料

须具有半透水性,较好的渗透稳定性、低压缩性和高抗剪强度,以及良好的施工性能,水平宽度取 3 米,上下等宽布置。料源为酸角树石料场弱风化及以下的砂岩。②过渡料(3A):在垫层料与堆石料间设过渡料区,料源为料场开挖的弱风化以下岩石,物理力学指标要求与垫层料相近,即具有低压缩性、高抗剪强度,对垫层料能起到反滤保护作用,并具有自由排水性。③硬岩堆石料(3B):介于过渡区与软岩料填筑的 3C 区之间以及下游设计洪水位以下部分,要求级配良好,具有低压缩性,高抗剪强度、透水性和耐久性。料源采用溢洪道开挖料中弱风化以下的砂岩料,不足部分由石料场开采。④软岩堆石料(3C)料源主要为弱风化以下的粉砂质泥岩、泥质粉砂岩及强风化砂岩。针对粉砂质泥岩、泥质粉砂岩变模低、渗透系数小及抗剪强度稍低、易风化、易浸水软化、失水崩解等性质,将其置于下游设计洪水位以上的干燥区,控制高程为 567.50 m 以上部分。⑤坝前覆盖料区(1A, 1B):面板上游的坝前覆盖料区由堵缝材料和保护料组成,当面板较低部位出现裂缝、周边缝止水破坏等原因产生大的渗漏水时,堵缝材料随水流进入渗漏通道堵缝自愈。堵缝材料采用粉煤灰、粘土,顶部高程按 1/3 水头控制,宽度在满足施工要求的前提下根据工程经验确定为 6 m,保护料采用工程弃渣料,坡度由边坡稳定控制,确定为 1:2.5。⑥下游块石护坡(3D):下游坝坡设置护坡,其厚度不小于 1.0 m,由堆石体中选取砂岩中超径大块石干砌而成。

## 4 坝坡稳定分析

### 4.1 坝坡稳定计算

坝坡稳定分析选取面板堆石坝典型断面,采用简化毕肖普法<sup>[3~5]</sup>进行计算,滑裂面为圆弧,在计算过程中考虑到堆石体的渗透系数  $> 1.0 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ ,可以达到自由透水,所以计算时可假设堆石体完全透水,同时面板对坝坡的稳定性影响很小,可不考虑面板作用。坝料计算参数依据堆石坝石料试验成果<sup>[6]</sup>,考虑到试验成果并不具有广泛的代表性需类比其它工程整理试验成果数据,结果见表 1,计算工况和计算结果见表 2。

### 4.2 下游坝坡稳定敏感性分析

为保证下游坝坡稳定性,针对河床冲积层特性进行下游坝坡稳定敏感性分析,由于河床冲积

层非线性指标中的是影响坝坡稳定的重要参数, 数值越低坝坡越不稳定, 所以对降低  $\varphi$  值 20%, 40%<sup>[7]</sup>, 分别计算其对下游坝坡正常运行的稳定影响, 计算结果见表 3。

### 5 应力应变计算

计算软件为清华大学编制的土石坝计算程序

“EFESD”, 计算模型采用 E - B 模型<sup>[8]</sup>, 计算网格图见图 2, 坝料计算参数依据《阿墨江三江口水电站可行性研究阶段堆石坝石料试验报告》<sup>[6]</sup> 成果并类比其它相近工程整理而成见表 4。考虑到本工程坝体填筑工期及蓄水历时较短, 故仅计算坝体填筑完成时的竣工工况及正常运行工况, 最终结果汇总于表 5。

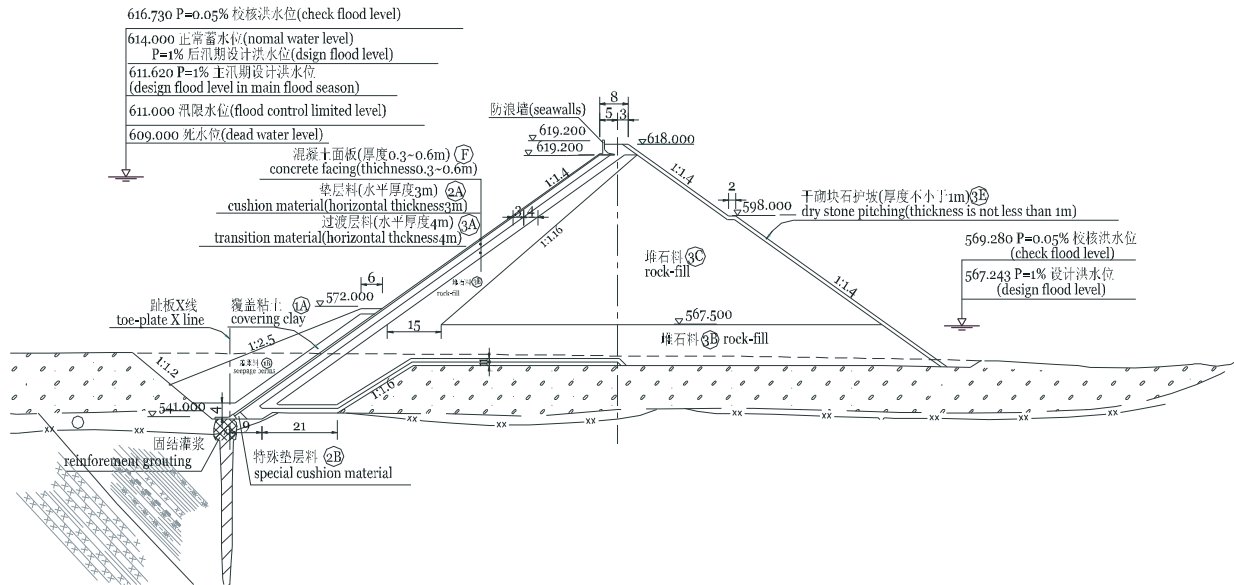


图 1 面板堆石坝最大横截面图

Fig. 1 The biggest cross section of the concrete facing rock-fill dam

表 1 坝体稳定计算参数

Tab. 1 Parameters of dam stable calculation

坝料名称 name of dam material	填筑容重 $\gamma$ fill density / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	饱和容重 $\gamma_s$ saturation density / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	非线性强度指标 nonlinear intensity target	
			起始内摩擦角 $\varphi$ origin angle of internal friction/ ( $^\circ$ )	内摩擦角增量 $\Delta\varphi$ increment of internal friction angle/ ( $^\circ$ )
垫层料 cushion material	21.98	23.78	51.56	10.34
过渡料 transition material	21.44	23.44	55.66	14.71
堆石料 rock-fill material	20.90	23.10	53.98	11.95
盖重料 seepage berm material	20.75	23.15	45.00	8
堆石料 (软岩) weak rock-fill material	21.84	23.84	50.54	11.90
冲积层 alluvium	20.79	23.09	51.3	10.4
基岩 pedestal rock	24.02	25.22	70	0

表 2 坝体稳定计算结果

Tab. 2 Results of dam stable calculation

计算工况 operations of calculation	计算安全系数 calculated safety coefficient	允许安全系数 allowed safety coefficient
施工期上游坝坡 upstream slope in construction periods	1.72	1.20
施工期下游坝坡 downstream slope construction periods	1.69	1.20
正常运行期下游坝坡 downstream slope in running periods	1.69	1.30
正常运行期下游坝坡 7 度地震 downstream slope in running periods with earthquake at seven level	1.55	1.15

注：不计面板影响。 Note: Ignoring the influence of facing.

表 3 敏感性分析计算结果

Tab. 3 Results of stability against sliding

坝料名称 name of dam material	填筑容重 $\gamma$ fill density /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	饱和容重 $\gamma_s$ saturation density /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	起始内摩擦角 $\varphi$ origin angle of internal friction/( $^\circ$ )	内摩擦角增量 $\Delta\varphi$ increment of internal friction/( $^\circ$ )	计算安全系数 calculated safety coefficient
冲积层试验参数 test parameters of alluvium	20.79	23.09	51.3	10.4	1.69
参数降低 20% parameter reduce 20%	20.79	23.09	41.0	10.4	1.69
参数降低 40% parameter reduce 40%	20.79	23.09	30.8	10.4	1.51

表 4 阿墨江三江口水电站平面静力计算参数表比值

Tab. 4 Parameters of the dam static calculation

材料名称 name of dam material	填筑容重 fill density/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角 $\varphi$ of internal friction/( $^\circ$ )	切线模 量参数 K tangent modulus	卸荷模 量参数 Kur unloading modulus	卸荷模 量参数 n unloading modulus	破坏比 Rf damage ratio	体变 模量 kb bulk modulu	体变 模 M Bulk modulu	孔隙率 void ratio	饱和 容重 saturation density ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	内摩擦角 增量 $\Delta\varphi$ of internal friction/( $^\circ$ )
盖重区 seepage berm	21.60	48	500	750	0.25	0.727	250	0	0.26	2420	10
混凝土面板 concrete facing	24.00	42	200000	300000	0	0	100000	0	0.0001	2400.1	0
垫层区 cushion material	21.98	51.56	1523	2285	0.19	0.75	1062	0.106	0.18	2378	10.34
过渡区 transition material	21.44	55.66	1400	2100	0.154	0.756	937	0.1	0.2	2344	14.71
主堆石区 rock - fill material	20.90	53.98	1406	2109	0.56	0.81	1074	0.155	0.2	2290	11.95
软岩堆石区 weak rock -fill material	21.84	55.78	955	1432.5	0.004	0.8	791	-0.51	0.2	2384	11.9
冲积层 alluvium	20.79	51.3	1242	1863	0.185	0.639	904	0.083	0.3	2379	10.7

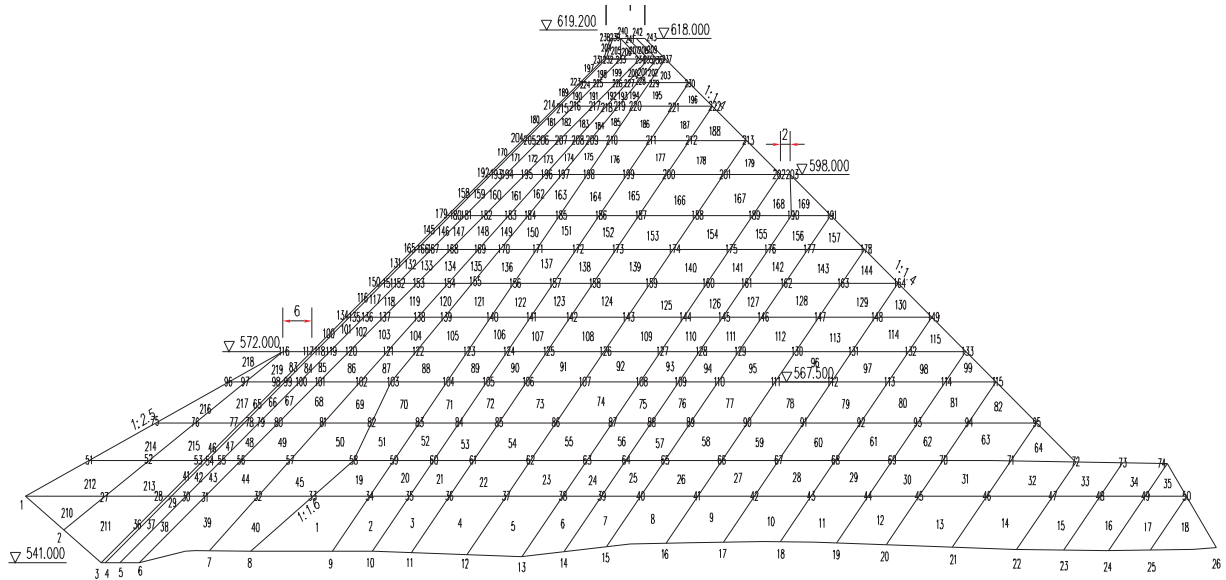


图 2 计算网格图

Fig. 2 Calculation of the dam network

表 5 计算成果汇总表

Tab. 5 the results of the dam stress and strain calculation

工况 operations	坝体位移最大值/m maximum shift of the dam		堆石体应力最大值/MPa maximum strain of dam	
	水平位移 horizontal shift	竖直沉降 vertical shift	大主应力 major principal strain	小主应力 minor principal strain
竣工期 completion periods	-0.05 (向上游 towards upstream)	0.08 (向下游 towards downstream)	0.18	1.1 0.50
运行期 running periods	-0.035 (向上游 towards upstream)	0.08 (向下游 towards downstream)	0.18	1.0 0.45

6 结论

6.1 坝坡稳定计算成果分析

通过计算分析, 施工期上、下游坝坡及运行期下游坝坡稳定均能满足规范最小安全系数要求。

冲积层特性研究表明, 河床冲积层厚度一般 13 ~ 17 m, 由砂、卵、砾石混漂石组成, 砾石直径 600 ~ 100 mm 的含量平均为 46.5%, 砂砾石粒径 < 100 mm 的含量约占 41.1% ~ 66.5%, 砂砾石粒径 < 0.075 mm 的含量约占 1.5% ~ 3%, 砂砾石粒径 < 5 mm 的含量约占 13% ~ 22%, 天然干密度在 2.21 ~ 2.28 g/cm<sup>3</sup> 间, 湿密度在 2.29 ~ 2.39 g/cm<sup>3</sup> 间, 孔隙比 0.21 ~ 0.41。根据室内试验成果, 抗剪强度指标较高, 非线性强度指标 φ 为 51.3°, Δφ 为 10.4°, 计算中除正常计算工况外,

针对河床冲积层特性进行游坝坡稳定敏感性分析, 把河床冲积层非线性指标中的 φ 值降低 20%, 40%, 下游坝坡均满足稳定要求。

6.2 应力应变计算结果分析

计算结果表明, 坝体的变形符合一般规律。由于坝体填筑量不大, 施工按平行上升考虑。竣工期坝轴线两侧基本呈对称分布, 水平位移向下游侧变形稍大, 运行期受蓄水影响, 水平位移向上游侧略有减少, 向下游侧略有增加, 最大值位于下游侧坝壳 1/3 坝高处。坝体竖直计算中已计入冲积层影响, 冲积层无明显突变现象, 竣工期垂直位移与运行期相当, 说明竣工期已达较高的压实水平, 后期变形能力较低, 按坝轴线处计算, 最大沉降量仅占设计坝高的 0.3%。

(下转第 153 页)

(4) 辣椒田的主要天敌异色瓢虫、七星瓢虫在田间各有1个发生高峰期,分别在8月中上旬和8月下旬,七星瓢虫的发生高峰期比异色瓢虫的发生高峰期早10d左右。8月中旬后,由于蚜虫的种群数量降低,两种瓢虫的种群数量随着下降。在我国异色瓢虫1年可以发生2~8代,代数随纬度的降低而增加<sup>[10]</sup>。BROWN<sup>[11]</sup>等在对苹果园捕食性瓢虫物种多样性的调查工作中发现:异色瓢虫对其它瓢虫(如*Cycloneda sanguine* L.)的替代作用十分明显。七星瓢虫(*Coccinella septempunctata* L.)、多异瓢虫(*Hippodamia variegata* Goeze)、龟纹瓢虫(*Propylaea japonica* Thunber)以及两星瓢虫(*Adalia bipunctata* L.)会在异色瓢虫的侵入过程中大量减少,因此,在丘北辣椒田,是否由于异色瓢虫对其它瓢虫产生了替代作用,才使七星瓢虫、龟纹瓢虫和黄缘巧瓢虫的种群数量相对较少,需进一步观察和研究。

#### [参考文献]

- [1] 蒋慕东,王思明. 辣椒在中国的传播及其影响 [J]. 中国农史, 2005, (2): 17-27.  
[2] 刘发万,罗绍康,蔡荣靖. 丘北辣椒生产现状及发

- 展策略 [J]. 辣椒杂志, 2006, (2): 9-11.  
[3] 严婧. 文山丘北产业发展现状与对策 [J]. 西南农业学报, 2006, 19 (Z1): 377-379.  
[4] 王俊,曹月琴. 辣椒田烟青虫的发生规律和防治技术 [J]. 中国植保导刊, 2006, 26 (4): 23-25.  
[5] 罗素兰,张圣经,长孙东亭. 辣椒蚜虫种类的调查 [J]. 生物学杂志, 2003, 20 (1): 22-24.  
[6] 韩学俭. 棉铃虫烟青虫对辣椒的危害及其防治 [J]. 辣椒杂志, 2005, 3 (3): 34-36.  
[7] 高岩,王人民. 烟青虫生物学特征和生态学特性 [J]. 河南农业科学, 2005, (5): 46-48.  
[8] 李照会. 园艺植物昆虫学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.  
[9] 李秀军,陈斌. 0.5%甲氨基阿维菌素苯甲酸盐微乳剂对烟青虫的防治效果研究 [J]. 云南农业大学学报, 2007, 22 (3): 358-360.  
[10] WANG X Y, SHEN Z R. Progress of applied research on multicolored Asian ladybird beetle [J]. Entomological Knowledge, 2002, 39 (4): 255-256.  
[11] BROWN M W, MILLER S S. Coccinellidae (Coleoptera) in apple orchards of eastern West Virginia and the impact of invasion by *Harmonia axyridis* [J]. Entomological News, 1998, 109 (2): 136-142.

#### (上接第127页)

主应力的大值区都集中在面板的下部区域,堆石区应力较小,大主应力未超过1.1MPa,小主应力未超过0.50MPa,应力分布符合一般规律。正常运行期与竣工期比较,水平位移、应力变化均不大。主要原因为:由于软岩料的大范围的应用,设计压实干密度取值较高,孔隙率设计值相对较低,坝体后期变形空间较小。上述结果表明,三江口水电站混凝土面板坝的设计是合理的。

#### [参考文献]

- [1] 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院. 阿墨江三江口水电站坝型比选设计专题报告 [R]. 昆明: 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 2006.  
[2] SL228-98, 混凝土面板堆石坝设计规范 [S].

- [3] 傅志安,凤家骥. 混凝土面板堆石坝 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.  
[4] 朱百里,沈珠江. 计算土力学 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1990.  
[5] 陈胜宏. 高坝复杂岩石地基及岩石高边坡稳定分析 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2001.  
[6] 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院. 阿墨江三江口水电站可行性研究阶段堆石坝石料试验报告 [R]. 昆明: 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 2006.  
[7] 南京水利科学研究所. 泗南江水电站混凝土面板堆石坝三维有限元静力计算及坝坡稳定性分析专 [R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2004.  
[8] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.