

# 金包银围堰三维非线性应力应变分析

周晓信

(湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南 长沙 410007)

**摘要:**“金包银”围堰是一种新型的围堰型式, 其具有工程量小、施工快速、稳定性、防渗性好等特点。本文结合土谷塘航电枢纽工程二期“金包银”纵向围堰的工程实际情况, 建立了“金包银”围堰的三维数值模型, 对其进行了三维非线性应力应变分析, 分析其在施工工况和正常运行工况下围堰堰体的应力应变规律, 并指出薄弱部位, 并对混凝土面板配筋的必要性进行了探讨。

**关键词:** 施工导流; 围堰; 有限差分法; FLAC3D; 应力应变分析

**中图分类号:** TV 551.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1004-390X (2011) 04-0717-06

## Three-dimensional Nonlinear Stress-strain Analysis on Gold Rimming Silver Cofferdam

ZHOU Xiao-xin

(Hunan Hydro and Power Design Institute, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Gold rimming silver cofferdam was a new type of cofferdam, Its Characteristics included small quantities, rapid construction, good stability and well impermeable. Based on physical circumstances of gold rimming silver second-stage cofferdam of Tugutang navigation-hydropower junction, the three-dimensional model was established, and three-dimensional nonlinear anlysis was proceeded. And then the stress-strain regularities of distribution and weak regions of cofferdam were reveald when the cofferdam were in construction and normal working. At last the necessity of allocating concrete reinforced bar was invesgated.

**Key words:** construction diversion; cofferdam; finite difference calculus; FLAC3D software; stress-strain analysis.

### 1 概述

近年来, 随着众多大中型水利水电项目的建设, 施工导流的安全性与经济性的显得越来越重要, 因为施工导流费用一般占工程总投资的 5% ~ 15% 左右, 且施工导流顺利与否会直接影响到主体工程<sup>[1]</sup>。常用围堰结构形式有土石围堰和砼围堰<sup>[2-3]</sup>, 近年来随着水电工程施工技术的提高, 以及施工设备的改进, 大中型水利水电工程的工

期大大缩短, 往往只经历一个汛期和两个枯水期即可以蓄水发电, 金包银结构围堰是在这种施工过程中总结出来的一种特殊的围堰结构形式。“金包银”围堰主体结构是在堰体中间填筑开挖料或河床附近的砂砾石料, 其迎水面与背水面浇筑砼面板、上下游围堰利用原有的外围堰加高后浇筑砼面板, 形成拦洪防渗的整体, 俗称为金包银围堰。“金包银”围堰具有工程量小、施工快速、稳定性、防渗性好等特点<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2010-11-30

修回日期: 2010-12-28

网络出版时间:

作者简介: 周晓信 (1969-), 男, 湖南临湘人, 高级工程师, 主要从事施工组织设计及造价咨询方面的设计、研究工作。E-mail: zhouxiaoxin-2003@163.com

网络出版地址:

土谷塘航电枢纽工程位于湘江干流中游的衡南县云集镇附近，是湘江干流九个开发梯级建设中的第六级，枢纽工程由船闸、厂房、泄水闸、土坝等建筑物组成。船闸布置于右岸；河床式电站厂房布置于左岸，总装机容量 80 MW。土谷塘航电枢纽工程采用分期导流方式（图 1），一期上、下游横向围堰及纵向围

堰均采用土石不过水围堰。二期上、下游横向围堰采用过水围堰，二期纵向围堰采用“金包银”型式（混凝土面板 + 内部填石碴或砂砾石）围堰，其中纵向围堰在一期不过水围堰保护下干地施工，纵向围堰上、下游“金包银”型式段总长度约 300 m，纵向围堰横剖面图如图 2 所示。

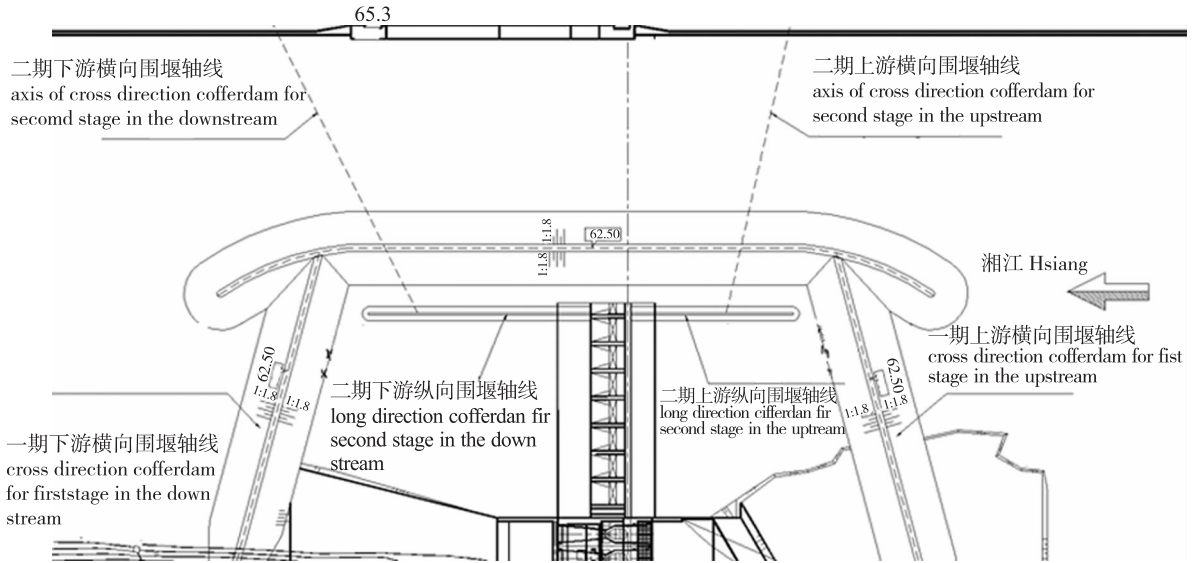


图 1 土谷塘航电枢纽工程分期导流示意图

Fig. 1 Pictorial drawing of Tugutang navigation-power junction for stage diversion

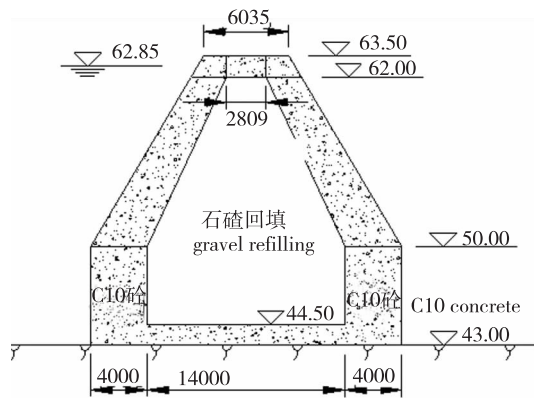


图 2 “金包银”二期纵向围堰剖面图 (mm)

Fig. 2 Sectional view of gold rimming silver cofferdam

由于“金包银”纵向围堰剖面型式特殊，不同于一般的围堰型式，现有的工程经验不能满足工程的设计要求，因此需要采用三维数值方法进行二期纵向围堰的应力应变分析，分析在典型工况下围堰堰体、基岩的应力和变形规律，并指出薄弱部位，并对混凝土面板的厚度取值范围、面

板配筋的必要性等进行研究，为设计、施工提供可靠准确的相关数据。

本文结合土谷塘水电枢纽工程二期“金包银”纵向围堰的实际情况，采用大型商用有限差分软件 FLAC3D 对纵向围堰施工、运行期进行三维非线性模拟<sup>[5-6]</sup>，研究其应力、变形情况及稳定性。

## 2 纵向围堰三维模型的建立

“金包银”纵向围堰横剖面形状如图 2 所示。为了能够真实地模拟“金包银”纵向围堰在施工期及运行期的应力应变情况，三维计算要求取较大的模型范围。三维模型计算所取范围如下：沿围堰左右方向，分别向左、右岸取 1.5 倍围堰高度的范围；垂直河流方向，取 20 m 长的范围；基础深度计算范围为以建基面（▽ 43.0 m）为基准向下取 1.5 倍围堰高度的范围。坐标系确定：围堰竖直中心轴线与▽ 43.0 m 高程平面交点为计算坐标系的原点，垂直围堰水平坝轴线方向且指向右岸为 X

轴正方向；以围堰水平坝轴线为 Z 轴，逆水流方向为 Z 轴正方向；沿高程向上方向为 Y 轴正方向。

本次计算中三维计算模型先采用 ANSYS 10.0 建立，然后采用自编的接口程序导入 FLAC3D 进行数值求解计算<sup>[7]</sup>，FLAC3D 数值求解完毕后再用接口程序把结果数据导入 ANSYS 10.0 进行后处理。整个模拟区域均采用八结点六面体单元离散。“金包银”二期纵向围堰的 FLAC3D 三维单

元模型形态及材料分区如图 3 所示。整个模型离散为 12 636 个结点和 10 488 个单元。计算边界条件：模型底部施加 X, Y, Z 3 个方向的位移约束，模型侧面均施加法向位移约束。

“金包银”二期纵向围堰为全断面施工，为了考虑应力路径对堰体变形的影响，每 2.0 m 分一层填筑，每一层分一个子步加载。在计算过程中设置了 13 个施工填筑荷载步，施工顺序见图 4。

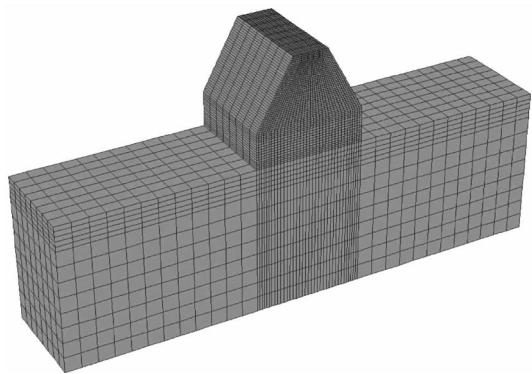


图 3 围堰三维网格及材料分区  
Fig. 3 Three dimensional grid of cofferdam

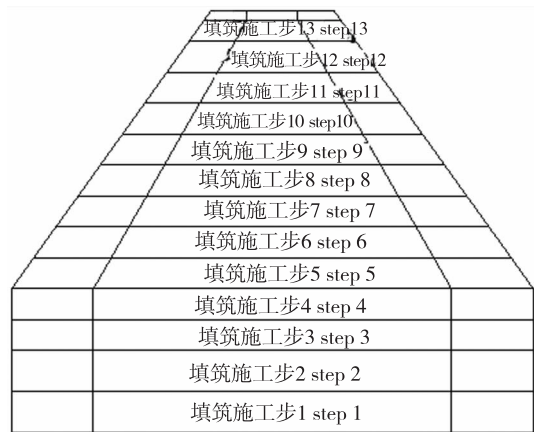


图 4 堰体施工顺序图  
Fig. 4 Sequence of construction for cofferdam

结合工程的实际需要，本研究对 2 种剖面式的 2 种工况进行了计算分析，2 种工况分别为：堰体填筑竣工期（考虑 13 个施工填筑荷载步）；堰体挡水运行期（水位 62.85 m）应力应变分析。本次计算考虑的计算荷载类型如下：基岩中的初始自重应力、坝体自重、运行期最高水位水压力（水位 62.85 m）、稳定渗流期孔隙水压力。

计算中本构关系的选用：自重应力场计算时选用采用线弹性模型，开挖过程中采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型<sup>[8]</sup>。

### 3 纵向围堰三维应力应变计算分析

#### 3.1 材料参数

计算模型中材料的物理力学参数根据设计单位提供的现场实测参数选取，详见表 1 所示。

表 1 岩体物理力学参数表  
Tab. 1 Parameters of rock

类别 type of soil	容重 unit weight / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比 Poisson's ratio	弹性模量/ GPa elastic modulu	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ ) internal friction angle	凝聚力/MPa cohesion	渗透系数/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) permeability coefficient	抗拉强度 /MPa intensity of tension
砂卵砾石 gravel	19.8	0.3	0.03	28	0.0	$3 \times 10^{-2}$	0.0
C10 混凝土 concrete	24.0	0.167	17.5	50	3.0	$3 \times 10^{-8}$	0.65
基岩 bedrock	24.0	0.3	1.0	32	0.1	$3 \times 10^{-4}$	0.1

#### 3.2 堰体填筑竣工期计算结果

围堰施工填筑按 2 个步骤进行：（1）计算河床初始地应力，在本次计算中采用自重应力场作

为河床的初始的地应力场，忽略构造应力场的作用；（2）围堰堰体按 13 个施工步填筑，平均每步填筑高度 2 m。

“金包银”纵向围堰填筑完毕时最大、最小主应力等值线如图 5, 6 所示, 填筑完毕时围堰体塑性区如图 7 所示; 结果表明: 围堰体内部填土应力水平较低; 混凝土面板的主要受力特征为: 在▽ 50.00 ~ ▽ 55.00 m 高程之间混凝土面板应力水平较高。混凝土面板外侧区域受拉, 最大主拉应力达到 0.76 MPa, 拉应力区深度为 0.5 ~ 1.0 m, 在▽ 50.00 ~ ▽ 55.00 m 高程之间的混凝土面板内侧主要受压, 最大主压应力达到 -1.22 MPa。

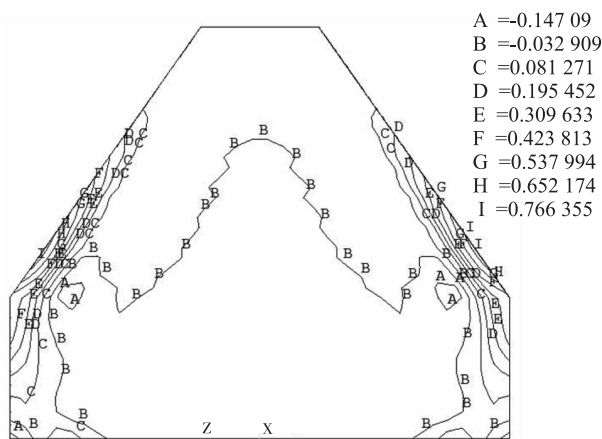


图 5 填筑完毕时围堰体第一主应力 (MPa)

Fig. 5 Major principal stress for cofferdam when filling completely

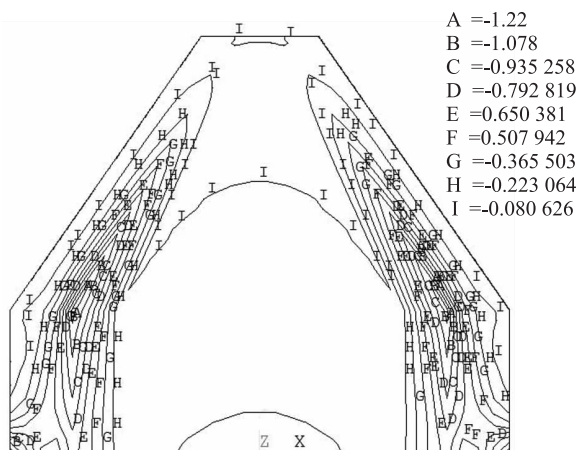


图 6 填筑完毕时围堰体第三主应力 (MPa)

Fig. 6 Minor principal stress for cofferdam when filling completely

### 3.3 堰体挡水运行期计算结果

纵向围堰体正常运行挡水稳定渗流期压力水头等值线如图 8 所示。渗流计算表明: 由于在建基面浇筑了 2.0 m 厚的一层混凝土, 因此围堰内

部流速相对比较低, 水流渗透主要发生在基岩内部。

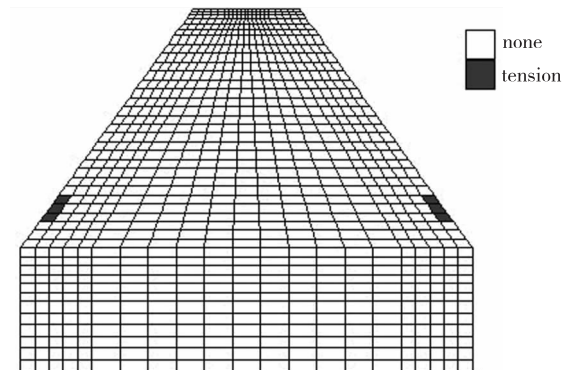


图 7 填筑完毕时围堰体塑性区示意图

Fig. 7 Plastic zone of cofferdam when filling completely

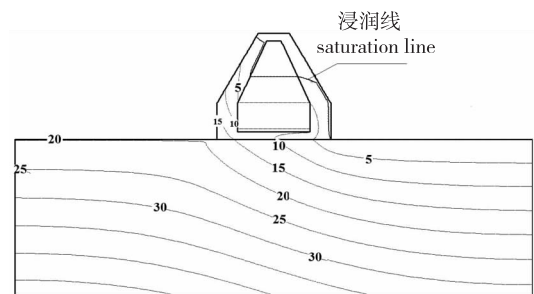


图 8 纵向围堰稳定渗流期压力水头等值线 (m)

Fig. 8 Pressure head of steady seepage for cofferdam

“金包银”纵向围堰在运行期挡水时最大、最小主应力等值线如图 9, 10 所示; 围堰体内部填土应力水平较低。上游面混凝土面板由于受水压力的作用, 混凝土面板迎水面表现为受压, 最大主压应力为 -2.10 MPa, 发生在上游面板与混凝土垫层交接区域; 上游面混凝土面板内侧表现为受拉, 最大主拉应力为 0.40 ~ 0.52 MPa, 发生在▽ 60.00 ~ ▽ 65.00 m 高程区域。

图 11 为围堰体蓄水时的塑性区分布示意图。剪切破坏发生在在建基面基岩与下游面混凝土交接部位 (坝址处), 拉裂破坏主要发生在混凝土面板▽ 50.00 ~ ▽ 55.00 m 高程区域迎水面、围堰顶部混凝土连接区域。基岩的剪切破坏塑性区分布面积较小, 混凝土面板被拉裂的深度均在 0.50 m 左右, 混凝土面板并未形成贯穿性的裂缝。

金包银围堰体需要重点关注的部位: (1) 上、下游面混凝土面板▽ 51.00 ~ ▽ 54.00 m 高程之间的区域, 此区域在施工填筑完成时会出现拉裂破坏, 拉裂深度为 0.30 ~ 0.50 m; (2) 围堰顶

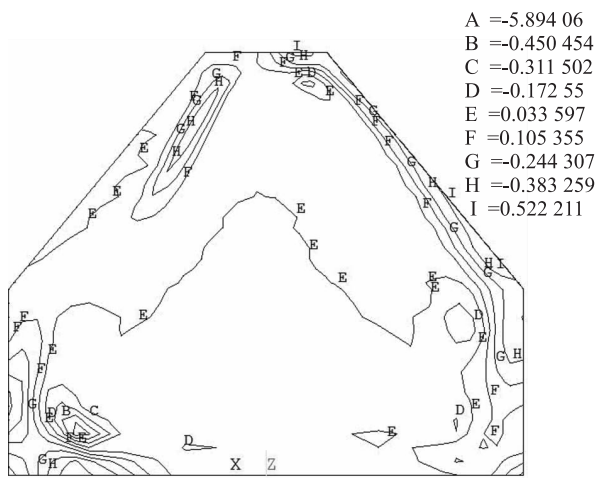


图9 正常运行时围堰体第一主应力(MPa)  
Fig. 9 Major principal stress for cofferdam on normal working

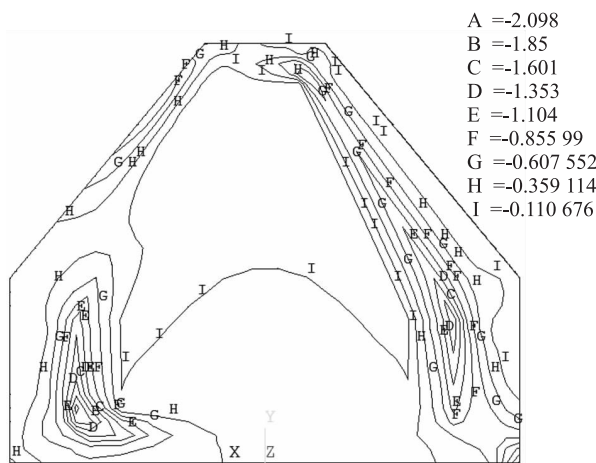


图10 正常运行时围堰体第三主应力(MPa)  
Fig. 10 Minor principal stress for cofferdam on normal working

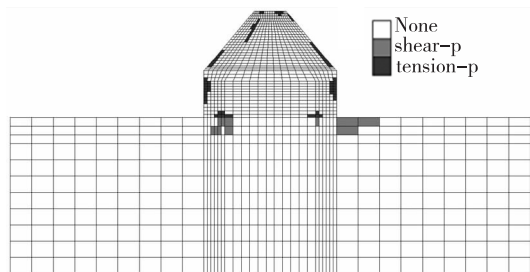


图11 正常运行时围堰体塑性区示意图  
Fig.11 Plastic zone of entire model on normal working

部混凝土连接区域，此区域在挡水阶段会出现拉裂破坏，拉裂深度在0.50 m左右；(3) ∇ 58.00 ~ ∇ 61.00 m 高程区域上游面混凝土面板内侧，此区域在挡水阶段会出现深度为0.30 m 的拉裂区。本次计算 C10 混凝土的抗拉强度设计值取

0.65 MPa，因此在围堰上、下游面需要进行结构配筋，以防止出现拉裂破坏。

### 3.4 围堰安全性超载计算

图12, 13为超载水荷载条件下的围堰的塑性区分布示意图，超载采用水容重超载法<sup>[9]</sup>，及分别将水的容重增加到1.5, 2.0倍。图12为超载1.5倍水容重的塑性区示意图，由图可知围堰体塑性区均有所扩大，但均未出现贯穿、联通的塑性区，围堰体处于正常工作状态。图13为超载2.0倍水容重的塑性区示意图，由图可知围堰体上游混凝土面板出现贯穿性拉裂塑性区，面板发生断裂。围堰体建基面未形成贯穿性的剪切塑性区，围堰不会整体沿着建基面发生滑移。

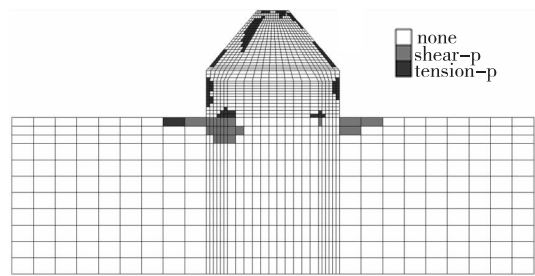


图12 超载(1.5倍水荷载)整体塑性区(剪切、拉伸破坏)  
Fig.12 Plastic zone of entire model on over loading (1.5 times normal hydraulic head)

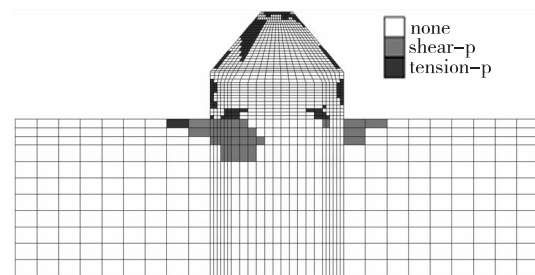


图13 超载(2.0倍水荷载)整体塑性区(剪切、拉伸破坏)  
Fig.13 Plastic zone of entire model on over loading (double normal hydraulic head)

## 4 结语

本研究根据土谷塘航点枢纽工程二期纵向围堰的实际情况，运用渗流、应力应变分析理论对“金包银”围堰的渗透特性、应力应变特性以及超载时的安全性做了深入研究。从应力和塑性区分布来看，纵向围堰断面型式设计合理，只要外部混凝土具有足够的刚度和强度，即可保证

围堰整体安全性；混凝土结构最薄弱的部位为上游面混凝土面板▽ 58.00 ~ ▽ 61.00 m 高程区域。对于“金包银”纵向围堰混凝土区域，建议采用 C15 混凝土进行浇筑；如果采用 C15 混凝土，其抗拉强度设计值为 0.9 MPa，以上部位均不需进行计算配筋，如需增加安全裕度可只在重点部位进行构造配筋。

#### [参考文献]

- [1] 肖焕雄. 施工导截流与围堰工程研究 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 张云生, 陈世全, 平有洪, 等. 土石围堰设计中的若干问题探讨 [J]. 云南水电技术, 2009 (1): 40 - 44, 48.
- [3] 李家锐, 何阳海, 袁雪岷. 构皮滩水电站上游碾压混凝土围堰施工工艺 [J]. 水电站设计, 2010, 26 (2): 91 - 94.
- [4] 苏启凤. “金包银”结构围堰在导流工程中的应用 [J]. 中国西部科技, 2006 (23): 19 - 20.
- [5] ITASCA Consulting Group Inc. Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, version 3. 0, user's manual [K]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [6] 龚纪文, 席先斌, 王岳军, 等. 应力与变形的数值模型方法——数值模拟软件 FLAC 介绍 [J]. 华东地质学院学报, 2002, 25 (3): 220 - 227.
- [7] 寇晓东, 周维垣, 杨若琼. FLAC-3D 进行三峡船闸高边坡稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (1): 6 - 10.
- [8] 廖秋林, 曾钱帮, 刘彤, 等. 基于 ANSYS 平台复杂地质体 FLAC3D 模型的自动生成 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (6): 1010 - 1013.
- [9] 陈育民, 徐顶平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

(上接第 672 页)

- [5] NUMANN P M. Plant growth and leaf-applied chemicals [M]. Boca Raton: CRC Press, 1988.
- [6] 谭金芳. 作物施肥原理与技术 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 141.
- [7] 曹春英. 植物组织培养 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 21 - 22.
- [8] WILSON P J, THOMPSON K, HODGSON J G. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies [J]. New Phytologist, 1999, 143 (1): 155 - 162.
- [9] RICHAUD R, LACHAS H, HEALEY A E, et al. Trace element analysis of gasification plant samples by i. c. p. - m. s. : validation by comparison of results from two laboratories [J]. Fuel, 2000, 79 (9): 1077 - 1087.
- [10] SPOMER L A, SMITH M A L, SAWWAN J S. Rapid, nondestructive measurement of chlorophyll content in leaves with nonuniform chlorophyll distribution [J]. Photosynthesis Research, 1988, 16 (3): 277 - 284.
- [11] GATLIN C L, ENG J K, CROSS S T, et al. Automated identification of amino acid sequence variations in proteins by HPLC/microspray tandem mass spectrometry [J]. Analytical Chemistry, 2000, 72 (4): 757 - 763.
- [12] TESSIER F, BIRLOUEZ-ARAGON I, TJANI C, et al. Validation of a micromethod for determining oxidized and reduced vitamin C in plasma by HPLC-fluorescence [J]. International Journal for Vitamin and Nutrition Research, 1996, 66 (2): 166 - 170.
- [13] MENSOR L L, MENEZES F, LEITÃO G G, et al. Screening of Brazilian plant extracts for antioxidant activity by the use of DPPH free radical method [J]. Phytotherapy Research, 2001, 15 (2): 127 - 130.
- [14] MEZIANE D, SHIPLEY B. Direct and indirect relationships between specific leaf area, leaf nitrogen and leaf gas exchange. Effects of irradiance and nutrient supply [J]. Annals of Botany, 2001, 88 (5): 915 - 927.
- [15] 李燕婷, 李秀英, 肖艳, 等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展 [J]. 中国农业科学, 2009, 42 (1): 162 - 172.