

地震作用下面板堆石坝面板错台模型试验研究

孔宪京^{1, 2}, 刘福海¹, 刘君^{1, 2*}

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用弹性-重力相似关系设计了一组混凝土面板堆石坝(面板坝)振动台模型试验, 研制开发了仿真面板材料, 设计了一套图像采集、存储与分析系统。根据图像识别技术分析结果以及模型的数值计算分析结果, 详细分析了面板坝面板错台机理, 并与汶川地震中紫坪铺面板坝面板错台震害进行了对比分析。研究结果表明, 地震造成的堆石体永久变形对面板产生的向下摩擦力和向外推力是造成面板错台的主要原因。模型试验结果与数值计算结果和实际震害基本吻合, 表明振动台模型试验可以再现原型的主要破坏特征。

关键词: 面板堆石坝; 振动台模型试验; 图像识别; PIV; 紫坪铺; 面板错台

中图分类号: TV641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)02-0258-10

作者简介: 孔宪京(1952-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土地震工程和高土石坝抗震的研究。E-mail: kongxj@dlut.edu.cn。

Shaking table model tests on face-slab dislocation of concrete faced rock-fill dams under earthquakes

KONG Xian-jing^{1, 2}, LIU Fu-hai¹, LIU Jun^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Coastal & Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Shaking table model tests on concrete faced rock-fill dams are designed according to the elasticity-gravity similarity rules. Face-slab model materials are developed, and a system for the image collection, storage and pattern recognition is presented. On the basis of the results of the PIV analysis and the numerical simulation, the dislocation mechanism of the face-slab under earthquakes is analyzed, and the results are compared with the real dislocation damage of Zipingpu Dam during Wenchuan Earthquake. The results of the model tests agree with those of numerical simulation. Both of them reveal the slab dislocation phenomenon of Zipingpu Dam. The results show that the main reasons of the face-slab dislocation are the thrust force towards the upstream and the friction force towards the downstream along the slab due to the permanent deformation of the rock-fill. Shaking table model tests can reflect the main damage characteristics of the prototype dams.

Key words: concrete faced rock-fill dam; shaking table model test; pattern recognition; PIV; Zipingpu Dam; face-slab dislocation

0 引言

2008年5月12日发生在汶川的里氏M8.0级地震具有强度大、波及范围广、主震持续时间长等特点, 震中最大烈度高达XI度, 对大中型水工建筑物安全造成严重威胁。紫坪铺水利枢纽工程距震中仅17 km, 强烈地震导致大坝坝顶下游侧路缘石开裂破坏, 上游L型防浪墙在两岸岸坡处发生张拉、中部挤压破坏; 大坝周边缝受震陷影响错位破坏; 坝中部距坝顶1/5坝高处坡面堆石震松翻起; 面板脱空、施工缝错位和面板间垂直缝挤压破坏等^[1]。其中大坝安全的最大威胁之一是845 m高程二、三期混凝土面板间施工缝出现了大范围的错台现象, 最大错台17 cm, 涉及26块

面板, 总错台长度达340 m, 如图1所示。

虽然经过几十年的努力, 已经在土石坝坝料动力特性、土石坝地震反应分析等方面积累了较为丰富的资料, 取得了一系列成果^[2-8]。然而, 由于缺乏系统性的震害资料, 尤其是遭受强震的高土石坝震害资料, 对土石坝暨高土石坝的震害机理的认识尚不充分, 目前还不能够很好地对强震作用下土石坝的抗震安全性进行准确评价。紫坪铺大坝是目前唯一经历过超设计

基金项目: 国家自然科学基金项目(90815024, 50978045); 辽宁省创新团队项目(2009T017)

收稿日期: 2011-01-21

*通讯作者

标准地震考验的坝高超过 150 m 的混凝土面板堆石坝(面板坝), 探究其破坏机理对深入认识强震区高面板坝抗震性能具有非常重要的意义^[9-10]。

文献[11]根据坝体震陷的监测数据认为, 二、三期面板施工缝发生错台的主要原因是由于大坝堆石体的地震永久变形使得面板受到一向下的摩擦力作用, 导致面板在施工缝这一结构相对薄弱部位发生错台。文献[12]通过计算分析认为, 面板发生错台主要是由于堆石体震缩产生的永久变形导致面板顶部出现脱空现象, 使其成为悬臂结构而产生较大的弯剪作用, 在二、三期面板间发生了剪切破坏。文献[9]根据地震反应分析以及以往模型试验的结果认为, 地震作用引起坝体永久变形产生的面板附加应力和地震惯性力引起的面板动应力联合作用导致了面板分期施工缝错台以及三期面板脱空的现象, 但对于坝体永久变形产生的面板附加应力尚未进行详细分析。

由于缺少实际观测结果的验证, 对面板错台的机理还没有确定的解释。振动台模型试验为定性解释这一现象提供了一种可行的手段。振动台模型试验由于其灵活性、便利性, 能直观地观测到坝体破坏过程, 很多学者对该试验方法进行了广泛而深入的研究^[13-14], 振动台模型试验也成为研究高土石坝破坏机理、预测高土石坝地震变形和破坏以及检验数值计算方法的重要手段。

本文结合紫坪铺大坝在汶川地震中实际震害, 采用振动台模型试验和数值分析相结合的方法, 对地震作用下面板堆石坝面板错台机理进行了详细分析, 并对数值分析方法的合理性进行了验证。



图 1 面板错台示意图^[9]

Fig. 1 Sketch of dislocation of face-slab

1 振动台模型试验设计

本试验考虑一般堆石坝的几何形状和筑坝材料的力学性质及振动台的实际工作能力采用如下的设计原则: ①为能较好地反映面板惯性力对堆石体的作用, 模型坝的面板与堆石料密度的比值尽可能接近原型; ②模型和原型几何相似应该满足, 即几何形状、尺寸

比相似; ③满足重力相似; ④根据弹性力相似的原则确定面板材料的强度和弹性模量。

1.1 模型尺寸及布置

考虑模型箱的尺寸和试验场地限制, 模型坝坝高取为 1.4 m, 上下游边坡均为 1:1.4, 坝顶宽 0.08 m。面板厚度 6~8 mm, 底部设置趾板, 模型如图 2 所示。

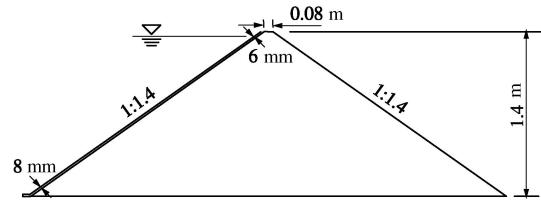


图 2 模型示意图

Fig. 2 Sketch of a typical element

1.2 相似关系选择

堆石料等散粒材料在动载作用下, 其动剪切模量和阻尼比随剪应变幅呈非线性变化, 建立完全满足相似条件的模型十分困难。因此, 只能放弃或部分放弃某些相似条件, 用与原型相同的填筑材料, 在几何相似的前提下, 尽可能使被观测的主要物理量满足相似条件^[4]。结构动力模型试验有 3 种基本相似换算关系, 各适用于不同的情况^[15]。

(1) 弹性相似率: 研究结构的自振频率与振动模态等振动特性时, 可以保持惯性力与弹性恢复力的相似, 即 $\lambda_p \lambda_l^3 \lambda_a = \lambda_F$ 。又有 $\lambda_a = \lambda_u / \lambda_t^2$, $\lambda_u = \lambda_e \cdot \lambda_l$ (几何相似条件); $\lambda_g = \lambda_e \cdot \lambda_E$ (物理相似条件); $\lambda_F = \lambda_g \cdot \lambda_l^2$ (边界相似条件)。其中, λ_p 为密度比尺, λ_l 为长度比尺, λ_a 为加速度比尺, λ_F 为外力比尺, λ_u 为变形比尺, λ_t 为时间比尺, λ_E 为弹性模量比尺, λ_g 为应力比尺, λ_e 为应变比尺。由以上几式联合可推出:

$$\lambda_t = \lambda_l \sqrt{\lambda_p / \lambda_E} \quad (1)$$

(2) 重力相似率: 若要在模型设计中主要保持振动惯性力与重力的比例相同, 则结构加速度比尺 λ_a 与重力加速度比尺 λ_g 相同, 即 $\lambda_u / \lambda_t^2 = \lambda_g$, 由 $\lambda_g = 1$ 和 $\lambda_e = 1$ 可得

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda_l} \quad (2)$$

对于土工建筑物, 其振动破坏特性主要取决于材料的强度, 模量的影响可以忽略。当采用小比尺模型时, 要求的模型材料黏结力将比原型中的黏结力小很多, 有时甚至可以考虑取 $c_m \approx 0$ ^[15]。

(3) 弹性 - 重力相似率: 许多情况下重力对结构的振动变形产生重要影响, 同时还要考虑弹性恢复力的作用, 这时模型相似条件要同时满足式 (1)、(2)。联合两式可得

$$\lambda_E = \lambda_p \lambda_l \quad (3)$$

1.3 试验材料选择

(1) 堆石料选择

本次模型坝堆筑料依据某300 m级典型面板坝的堆石坝料级配进行选配, 经相关力学性质试验, 使选配的模型堆筑料的主要力学指标在合理范围内。

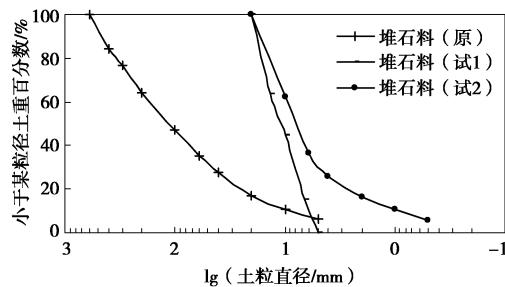


图3 原型以及选取试样级配曲线

Fig. 3 Gradation curves of prototype and selected materials

笔者曾进行过大量面板坝模型试验, 结果表明: 虽然选取不同粒径堆石料堆筑的模型坝所测得的加速度反应有所不同, 但其破坏形态没有本质的区别^[16]。根据以往模型试验粒径的选取经验以及进行模型堆石材料三轴试验设备的尺寸, 选取最大粒径为20 mm。针对两种级配堆石料(图3)进行了基本物理量的测试, 结果表明级配曲线2所代表的堆石料可以达到较高的填筑密度, 并且具有低黏聚力的特点, 这也尽量满足了重力相似的要求。因此选择第二种级配作为模型试验的堆石材料。

根据选定的几何比尺和密度比尺再确定模型的其它相似比尺, 各相似比尺: 几何比尺 $\lambda_l=214$, 密度比尺 $\lambda_p=1.14$, 应变比尺 $\lambda_e=1$, 时间比尺 $\lambda_t=\sqrt{\lambda_l}=14.6$, 变形比尺 $\lambda_u=\lambda_l \lambda_e=214$, 加速度比尺 $\lambda_a=\lambda_u/\lambda_t^2=\lambda_l \lambda_e/\lambda_t=1$, 弹性模量比尺 $\lambda_E=\lambda_p \lambda_l=244$, 应力比尺 $\lambda_\sigma=\lambda_e \lambda_E=244$, 频率比尺 $\lambda_f=1/\lambda_t=0.07$ 。

(2) 面板材料选择

混凝土面板密度一般为 2.4 g/cm^3 , 堆石密度一般为 $1.9\sim2.2 \text{ g/cm}^3$, 其比值为1.2左右。本次试验中, 堆石密度为 1.85 g/cm^3 , 根据上述设计原则1, 面板的密度应取为 2.2 g/cm^3 。同时, 面板材料还需要根据弹性-重力相似率满足弹性模量和抗拉强度的要求。

笔者曾分别采用石膏面板、砂浆面板和有机玻璃面板研究过面板坝的动力特性。文献[17]利用矾土、水泥、水、珍珠岩、重晶砂和淀粉的混合砂浆材料模拟面板。这些面板材料均存在养护时间长、强度和弹性模量不易控制以及施工安装困难等缺点。

本次试验根据仿真混凝土材料^[18]的特性, 研制了由石膏粉、重晶粉、标准砂、矿石粉和水按一定比例混合而成的仿真面板材料。该材料基本满足面板材料所需强度和刚度的相似要求, 且具有施工简单和早强

的特性, 有利于缩短试验时间, 提高效率。按照相似关系换算和实际材料的基本性质列入表1。虽然根据相似关系换算的结果与实际模型材料结果有所差别, 但差别不大。

表1 面板材料参数

Table 1 Parameters of face-slab materials

参数	密度 (g/cm^3)	抗拉 强度 (kPa)	弹性 模量 (MPa)	极限拉 应变 ($\mu\epsilon$)
相似关系换算	2.20	12.3	123.0	—
实际模型材料	2.22	14.5	130.8	134.7

1.4 坝体填筑

为保证坝体填筑密度, 在模型箱内分层填筑, 每层层高约10 cm, 并经过振捣达到指定密度。坝体填筑完成后, 在堆石体上游侧用垫层模拟料进行垫平、压实处理, 最后涂抹面板。鉴于面板材料具有早凝特性, 需快速施工完成。制作完成的模型如图4所示。

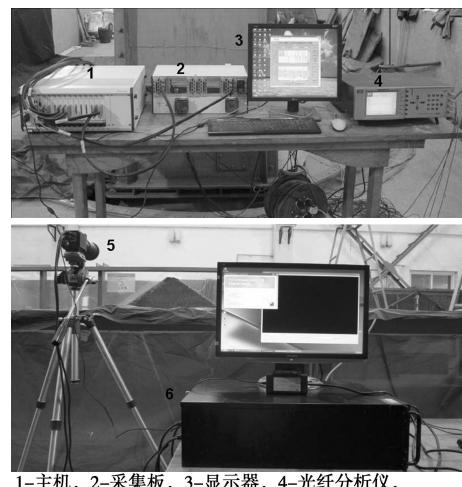


图4 模型整体图片

Fig. 4 Photo of model

1.5 量测系统

试验中采用了多种先进测试技术来监测坝体的动力响应、坝体的变形以及面板的开裂。包括: 高速摄影、颗粒图像速度识别技术、分布式光纤光栅应变传感器以及压电式加速度传感器等。采集系统如图5所示。



1-主机, 2-采集板, 3-显示器, 4-光纤分析仪,
5-高清摄像头, 6-照片采集及存储工作站

图5 数据采集设备

Fig. 5 Data acquisition equipments

(1) 加速度传感器

加速度传感器的布置原则为尽量能够测得坝体关

键部位的加速度反应, 共布置 16 个高精度加速度传感器, 基本布置如图 6 所示。

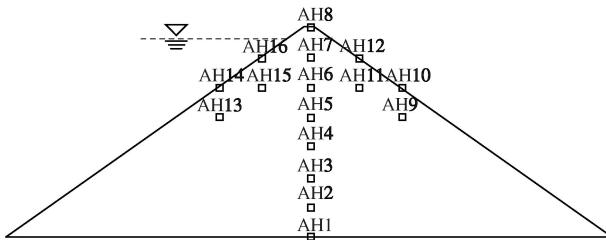


图 6 加速度传感器布置示意图

Fig. 6 Profile of arrangement of acceleration sensors

(2) 光纤光栅传感器

传统应变测量一般采用电阻应变片, 由于其尺寸小、重量轻、测试技术简单、价格低廉而得到了广泛应用。但是电阻应变片易受环境电磁场干扰, 在地震模拟系统的强电磁干扰情况下, 电阻应变片的噪声响应很大, 很难测量到较弱的应变信号。

光纤光栅 (Fiber Bragg Grating-FBG) 是近年来出现的一种新型智能传感元件, 具有稳定性好、灵敏度高、抗电磁干扰、体积小、结构简单和可埋入结构内部等优点, 能够更好地反映大坝模型试验的结果。本次试验中面板应变测量采用大连理工大学工程抗震研究所自行研发的夹持式封装分布式光纤光栅应变传感器^[19]。

(3) 图像采集系统

对于土石等散粒体材料, 准确地量测位移是非常困难的, 常规的位移传感器或者光学位移计都无法监测数目如此之多的颗粒运动过程。设置彩色砂柱也只能是有限的几条, 而且砂柱的运动和变形不能准确代表坝体的变形。目前只有图像识别技术可以解决如此大量颗粒运动过程的跟踪。文献[20]成功地将 PIV(Particle Image Velocimetry) 测试技术引入到大型振动台模型试验中。在本次模型试验中, 模型的正前方和模型上、下游侧均设置了高速高清摄像机, 采集模型坝的变形全过程和坝面颗粒运动过程。高速高清摄像机的采样频率为 25 Hz, 图像分辨率为 4096×3072 (1200 万像素)。图形采集系统采用专门的服务器, 并配置大容量内存以及大容量高速硬盘作为临时和永久写入设备。为降低振动台的振动对相机的影响, 提高图像质量, 设计了叠层橡胶减震体系。

本图像系统开发了 PIV 程序, 其后处理界面如图 7 所示。该程序能处理多种图片格式以及对分析结果进行多种方式处理, 并且可以同时处理一次试验的所有图像。针对土工问题, 开发了位移场、速度场、应变场的图形显示以及矢量图形、位移和速度的输出。

1.6 试验仪器及地震波输入

本文研究采用的仪器为大连理工大学工程抗震实验室的水平与垂直两向激励的水下振动台。振动台的主要性能参数: 振动为双向, 控制为数字, 最大载重为 10 t, 水平最大位移为 ±75 mm, 水平最大速度 ±50 cm/s, 水平最大加速度为 1.0g, 垂直最大速度 ±50 mm, 垂直最大速度 ±35 cm/s, 垂直最大加速度 0.7g, 工作频率 0.1~50 Hz。

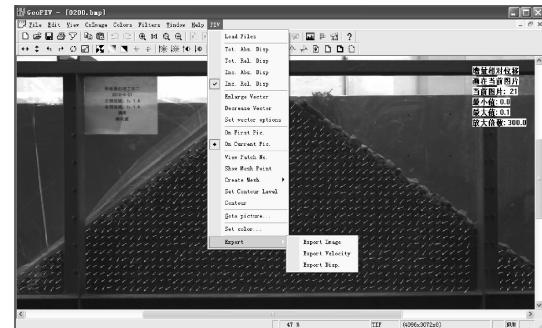


图 7 PIV 分析系统

Fig. 7 PIV analysis system

输入地震波采用频率为 10 Hz 的正弦增幅波, 60 s 时达到峰值加速度 1.0g。振动台台面监测到的输出过程如图 8 所示。

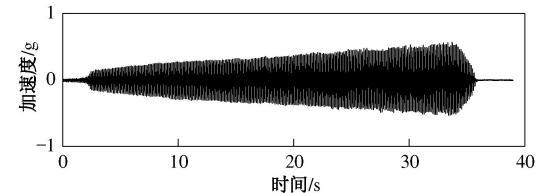


图 8 振动台台面输出加速度时程

Fig. 8 Output of earthquake waves of shaking table

1.7 工况设置

本文主要介绍空库和满库两个工况, 以对比分析研究面板错台的机理及其影响因素。其余工况的结果将另文介绍。

2 结果分析

2.1 空库时面板错台现象

笔者曾进行过大量二维以及三维面板坝模型动力试验, 试验结果均表明, 强烈地震时堆石体震陷并伴有向下游滑移、滚落和向上游侧鼓胀 (上游有面板约束), 尤其在空库或水位较低时, 面板的变形呈“外凸”形^[16]。这主要是由于堆石料在低围压下剪胀变形造成的^[21]。空库时, 面板和坝体的最终变形如图 9 所示, 与以往模型试验结果一致。采用 PIV 技术进行图像处理得到的面板变形过程如图 10 所示, 从图中可以明显观测到面板“外凸”现象, 并最终在 0.3 倍坝高处面板出现错台, 如图 11 所示。



图 9 空库时面板和坝体最终变形

Fig. 9 Deformation of model in empty-reservoir case

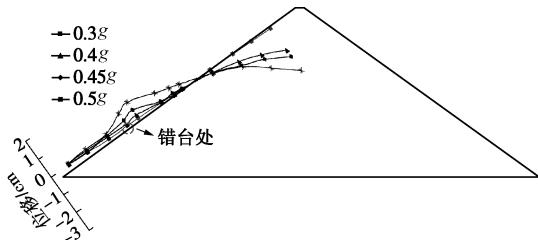


图 10 面板变形过程(变形放大 15 倍)

Fig. 10 Process of deformation of slab

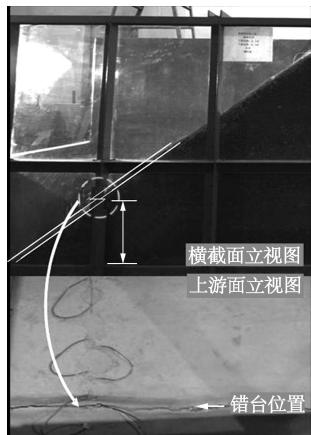


图 11 面板错台 (输入:0.50g)

Fig. 11 Dislocation of face-slab

2.2 面板错台过程

面板错台过程是与上游侧坝坡变形发展过程相关的, 如图 12 所示。图中矢量线为 PIV 分析结果, 矢量线长度和方向分别代表各点当前时刻位置与振动前位置的差, 即总位移的大小和方向。

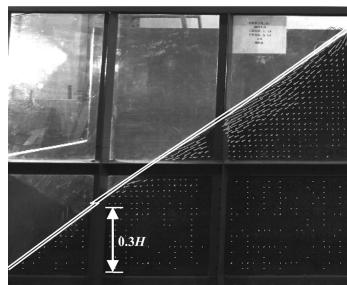
台面输入为 $0.45g$ 时, 上游堆石体已开始沉降并伴有向上游外侧鼓胀, 面板呈现“外凸”的现象, 如图 10 和图 12 (a) 所示。随着振动的增强, 上游侧堆石体继续沉降并向外鼓胀, “外凸”现象加剧。加速度输入为 $0.50g$ 时, 面板已经出现错台, 见图 12 (b)。之后, 面板错台量进一步增大, 当输入加速度达到 $0.55g$ 时, 面板完全分离 (图 12 (c)), 随后错台处上方面板底部出现脱空 (图 12 (d)), 上方面板沿下方面板向下滑落。

从图 12 (a) ~12 (c) 可以清楚的看到面板错台过程与上游侧堆石体位移以及滑裂面形成过程的相关

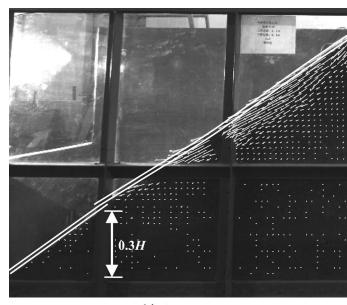
性。图 12 (a) 中面板附近的堆石颗粒位移明显大于稍远处颗粒位移, 但滑裂面还没有形成; 从图 12 (b) 可以清晰看到面板下面的堆石体已经出现了潜在滑裂面。



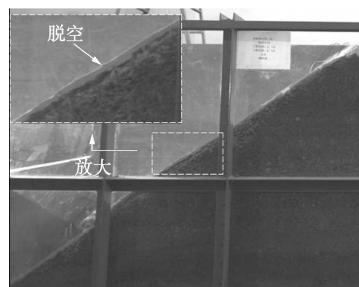
(a) 输入:0.45g



(b) 输入:0.50g



(c) 输入:0.55g



(d) 输入:0.55g

图 12 面板错台过程

Fig. 12 Process of dislocation

2.3 面板错台机理

面板发生错台时, 坝体中轴线处加速度响应沿坝高分布如图 13 所示。由于坝顶区颗粒松动、滑移较大, 传感器 AH8 (见图 6) 已失真, 因此图 13 中未画出其加速度响应。由图 13 可见, 坝体加速度响应在 1/2 坝

高以上明显放大。光纤传感器监测到面板共出现4条主要裂缝, 按出现次序依次标记为^{#1}, ^{#2}, ^{#3}和^{#4}裂缝, 如图14所示。图15为^{#1}裂缝处的光纤传感器监测结果, 图中显示当输入加速度达到0.41g时, 面板应变达到了材料的极限应变(134.7 με), 面板裂缝出现。本次试验再次证明, 地震时坝体上部加速度反应较大, 且下游坝坡没有面板的约束, 因此, 坝顶部下游侧堆石体容易发生松动并伴有向下游滑移、坍塌, 导致面板失去支撑, 加之面板地震惯性力联合作用, 造成面板上部最先出现裂缝。值得注意的是: 仔细观察这4条裂缝, 发现只有^{#4}裂缝发生了面板错台现象, 从第1条到第4条裂缝出现仅在4.2 s瞬间。

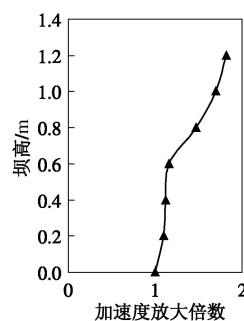


图13 坝体地震响应(输入:0.48g)

Fig. 13 Earthquake reaction of dam

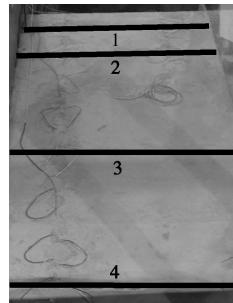


图14 面板裂缝分布

Fig. 14 Distribution of cracks

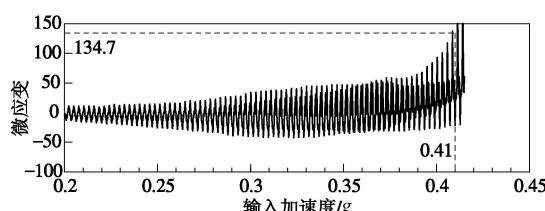


图15 ^{#1}裂缝光纤监测结果

Fig. 15 FBG results of crack No. 1

由此可见, 地震时面板裂缝是面板破坏的主要特征之一, 通常情况下面板水平裂缝从上部到下部依次发生。其主要原因: ①地震惯性力的直接作用; ②堆石体变形。本次试验还揭示了一个现象, 即面板裂缝

并不一定伴有面板错台。也就是说, 导致面板错台的一个重要原因是上游堆石滑移体变形对面板产生的摩擦和外推(鼓胀)作用, 面板遭受的地震惯性力不应是面板错台的控制性因素。

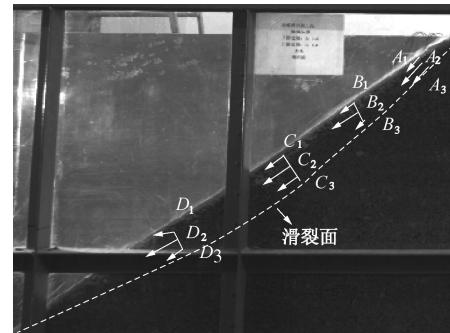


图16 不同截面处总位移分布

Fig. 16 Distribution of total displacements in different sections

在图12(a)所代表时刻的滑移体中选取有代表性的4个截面(截面垂直于面板), 分析此时所选取截面上测点的总位移大小和方向分布, 如图16所示, 其中各截面^{#1}点位于面板上, 其它测点位于堆石体内。以C截面为例, 3个位移测点的总位移时程曲线如图17所示。由图17可见, 面板错台之前, 滑移体的位移始终大于面板位移, 其它3个截面结果基本相同, 表明堆石体与面板之间出现相对运动, 堆石体滑移对面板产生向下的摩擦力。

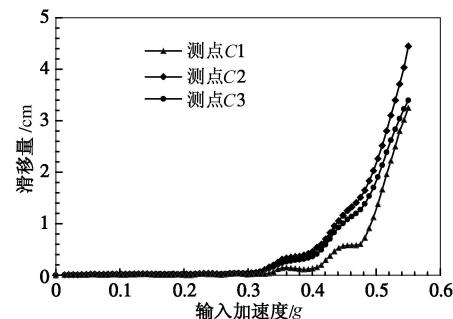


图17 C截面位移观测点总位移时程曲线

Fig. 17 Time history curves of total displacements at observed points in section C

由图12可见, 上游侧堆石体滑移至面板错台处附近趋于停止, 这将对面板产生向外的推力。堆石体的变形对面板的作用机理(摩擦力和向外推力)如图18所示。因此, 面板错台的主要原因应是堆石体永久变形造成的作用在面板上的向下摩擦力与向外推力的联合作用。

C2测点(图16)在振动过程中的增量位移时程曲线如图19所示。从图中可以看出, 当输入加速度达到0.48g时, 测点的增量位移出现突然加剧, 表明错台上方面板已经脱离下方面板并沿着下方面板加速向

坡底滑动。因此可以认为,面板错台发生在台面输入为 $0.48g$ 的时刻。

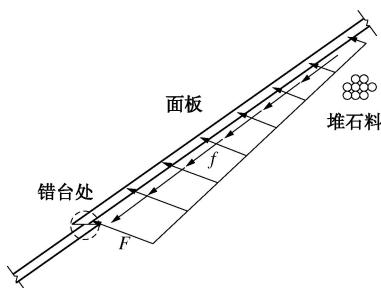


图 18 堆石体永久变形对面板作用机理示意图

Fig. 18 Sketch map of effects of permanent deformation of rock-fill slab

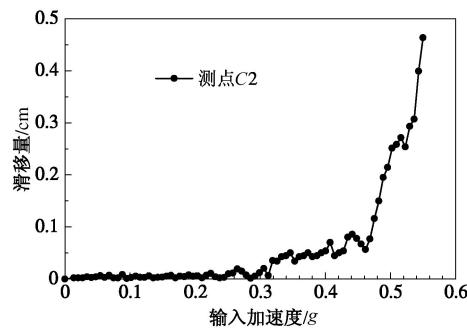


图 19 位移观测点 C2 增量位移时程曲线

Fig. 19 Time history curves of incremental displacement at point C2

2.4 空库与满库情况对比

图 20, 21 分别给出了满库工况的增量位移和总位移。虽然增量位移显示面板下方的堆石颗粒有向上游运动的趋势, 但总位移均呈现向下游侧的运动, 面板未发生错台现象, 表明库水压力对上游堆石体变形有明显的抑制作用。

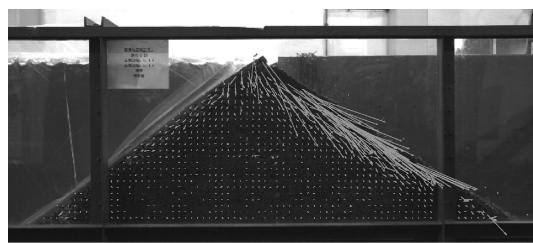


图 20 满库情况时增量位移 (输入:0.48g)

Fig. 20 Incremental displacements in full-reservoir case

2.5 模型坝数值分析

模型坝的数值计算分析模型如图 22 所示。计算分析采用快速拉格朗日差分程序(Fast Lagrangian Analysis of Continua-FLAC)^[22]。计算模型采用摩尔库伦弹塑性模型。计算参数一般需通过相关材料试验确定。由于模型坝只有 1.4 m 高, 围压很低, 需极低围压下的材料试验确定计算参数。笔者曾采用扭剪仪在极低围压

条件下 ($5.2\sim 84\text{ kPa}$) 对小名浜砂 (ONAHAMA Sand) 的动力特性进行了研究^[23-25]。结果表明砂料在极低围压下的剪切模量和阻尼比特性与中等围压下 ($>50\text{ kPa}$) 的基本相同。限于试验条件的限制, 本文对模型材料进行了 $50, 75, 100\text{ kPa}$ 围压下的大型三轴试验, 根据试验结果选取的计算参数: $\rho=1.85\text{ g/cm}^3, E=94\text{ MPa}, \nu=0.3, c=0\text{ kPa}, \varphi=46^\circ$ 。



图 21 满库状态时总位移 (输入:0.48g)

Fig. 21 Total displacements in full-reservoir case

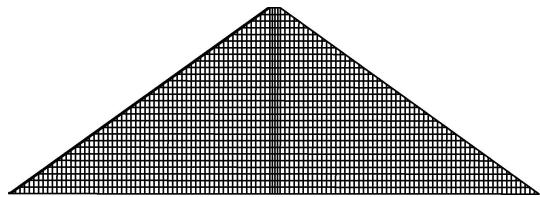


图 22 数值计算模型

Fig. 22 Numerical model

数值计算的空库条件下坝体水平向位移分布如图 23 所示 ($0.5g$, 虚线所示为振动前模型轮廓)。由振动前后坝体轮廓变化可见, 振动结束后坝顶出现向下游侧的坍塌滑移、坝体下游坝坡堆石体出现大面积滑动、上游坝坡由于面板的限制位移较小、面板中部变形呈“外凸”形, 这些都与模型试验中观测到的现象一致。由图 23 还可以看出, 位移最大区域的底部也位于 0.3 倍坝高处, 这与模型试验中面板错台位置基本吻合。

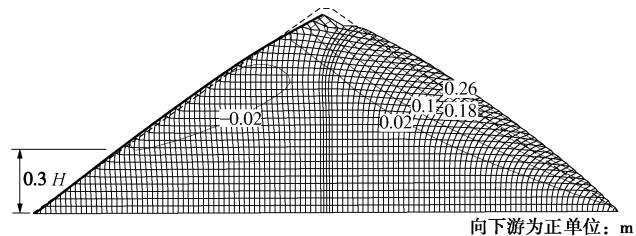


图 23 空库时坝体变形和水平向位移分布(输入:0.5g)

Fig. 23 Distribution of deformation and displacement in horizontal direction in full-reservoir case

由图 16 可知, 模型试验中上游坝坡位移最大值位于滑移体中间位置。选取有代表性的 C2 测点 (见图 16) 与数值分析结果进行对比分析。C2 测点水平向总位移与数值分析中上游坝坡最大水平向位移时程曲线如图 24 所示。在面板错台前, 数值分析与模型试验结果趋势一致。错台发生后 C2 测点水平向位移迅速增

大, 而数值分析结果呈现平缓均匀发展趋势。

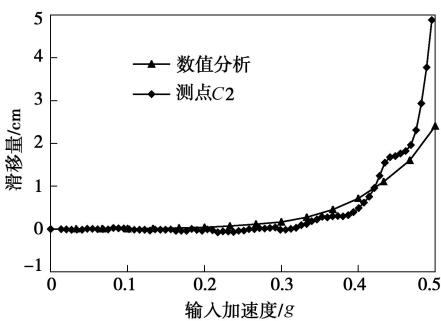


图 24 数值分析中上游坝坡最大水平向位移和模型试验 C2 测点水平向总位移时程曲线对比

Fig. 24 Comparison of maximum horizontal displacements of upstream slope between numerical analysis and observed point C2

满库情况下坝体水平向位移分布如图 25 所示, 依然呈现与振动台模型试验相同的现象: 坝顶土体向下游侧坍塌滑移; 下游坝坡大面积滑动; 整个坝体均向下游侧运动; 由于水压力的作用, 面板没有明显的“外凸”现象。从坝体变形可以看出, 满库时上游坝坡没有明显失稳, 面板也未出现错台, 这与模型试验观察到现象大体一致。

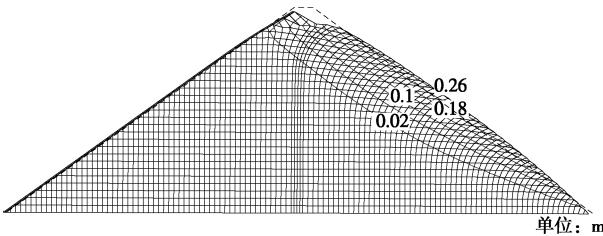


图 25 满库时坝体变形和水平向位移分布(输入:0.5g)
Fig. 25 Distribution of deformation and displacement in horizontal direction in the full-reservoir case

2.6 与紫坪铺大坝震害的对比分析

上述模型试验和数值计算的结果都表明, 空库或库水位较低时, 由于坝体上部堆石体永久变形造成的作用在面板上的向下摩擦力与向外推力的联合作用, 容易导致面板的外凸和错台。紫坪铺大坝典型断面如图 26 所示。地震发生时, 水位位于二期面板 828.65 m 高程, 面板错台处为二、三期面板接缝位置 845 m 高程。由于库水压力作用, 水位以下堆石体变形均指向

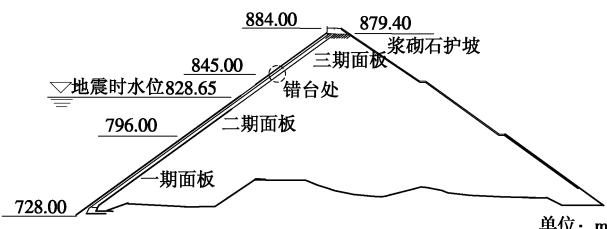


图 26 紫坪铺大坝典型断面及错台位置

Fig. 26 Typical section and dislocation position of Zipingpu Dam

下游侧, 没有发生错台。而水位以上堆石体则可能出现向上游侧的永久变形(相对于面板), 对面板产生摩擦和外推(鼓胀)作用。因此, 水位以上发生了错台。本文的模型试验以及数值计算结果与实际震害现象基本吻合, 也再次表明模型试验和数值计算的合理性。

3 结 论

结合紫坪铺大坝在汶川地震中实际震害, 采用振动台模型试验和数值分析相结合的方法, 对面板坝面板错台机理进行了详细分析, 得到以下 3 点结论。

(1) 地震产生的坝体永久变形对面板所产生的向下的摩擦力和向外侧的推力是造成面板(接缝)错台的主要原因。满库试验结果表明, 库水压力能有效抑制坝体上游堆石体的变形, 从而也抑制了面板错台的发生。

(2) 模型试验结果与采用 M-C 弹塑性模型的计算分析结果以及汶川地震中紫坪铺大坝的面板错台现象也基本吻合, 由此相互印证, 表明振动台模型试验可以基本反映原型坝的主要破坏特征, 联合运用振动台模型试验和数值分析方法可以揭示地震时土石填筑坝破坏机理, 深化对土石坝抗震性能和减灾对策的认识。

(3) 本文所设计的量测系统, 包括加速度量测系统、图像采集系统、PIV 分析程序以及光纤光栅应变量测系统在散粒体结构模型试验中是有效的, 能准确捕捉到土石坝坝体的动力响应, 精确跟踪地震作用下土石坝的动力破坏发生和发展过程。尤其是图像识别技术能有效解决散粒体材料变形量测的困难。

致谢: 本文的模型试验得到了朱彤高级工程师和任亮博士的大力协助, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 关志诚. 紫坪铺水利枢纽工程 5·12 震害调查与安全状态评估[J]. 中国科学(E 辑: 技术科学), 2009, 39(7): 1291–1303.
(GUAN Zhi-cheng. The earthquake damage survey and the safety statement review of Zipingpu dam during 5·12 earthquake[J]. Science in China(Series E: Technological Sciences), 2009, 39(7): 1291–1303. (in Chinese))
- [2] 孔宪京, 娄树莲, 邹德高, 等. 筑坝堆石料的等效动剪切模量与等效阻尼比[J]. 水力学报, 2001(8): 20–25. (KONG Xian-jing, LOU Shu-lian, ZOU De-gao, et al. The equivalent dynamic shear modulus and equivalent damping ratio of rock-fill material for dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(8): 20–25. (in Chinese))

- [3] 姜朴, 汤书明. 土石坝模型动力试验与计算[J]. 水利学报, 1992(2): 53 - 57. (JIANG Pu, TANG Shu-ming. Dynamic model tests and calculations of embankment dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992(2): 53 - 57. (in Chinese))
- [4] 韩国城, 孔宪京. 混凝土面板堆石坝抗震研究进展[J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(6): 708 - 720. (HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing. Aseismatic studies of concrete faced rockfill dams: state of the art[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1996, 36(6): 708 - 720. (in Chinese))
- [5] 陈生水, 沈珠江. 钢筋混凝土面板坝的地震永久变形分析[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(3): 66 - 72. (CHEN Sheng-shui, SHEN Zhu-jiang. The earthquake permanent deformation analysis of the concrete faced dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(3): 66 - 72. (in Chinese))
- [6] 孔宪京, 邹德高, 邓学晶, 等. 高土石坝综合抗震措施及其效果的验算[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1489 - 1495. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao, Deng Xue-jing, et al. Comprehensive earthquake resistant measure of high earth-rockfill dams and effectiveness verification[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1489 - 1495. (in Chinese))
- [7] 孔宪京, 刘君, 韩国城. 面板堆石坝动力破坏模型试验与数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 26 - 30. (KONG Xian-jing, LIU Jun, HAN Guo-cheng. Dynamic failure test and numerical simulation of model concrete-faced rock-fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 26 - 30. (in Chinese))
- [8] 郦能惠, 孙大伟, 李登华, 等. 300 m 级超高面板堆石坝变形规律的研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 155 - 160. (LI Neng-hui, SUN Da-wei, LI Deng-hua, et al. Deformation behavior of 300 m high-concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 155 - 160. (in Chinese))
- [9] 孔宪京, 邹德高, 周扬, 等. 汶川地震中紫坪铺混凝土面板堆石坝震害分析[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 667 - 674. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao, ZHOU Yang, et al. Earthquake damage analysis of Zipingpu concrete face rock-fill dam during Wenchuan earthquake[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 667 - 674. (in Chinese))
- [10] 赵剑明, 刘小生, 温彦峰, 等. 紫坪铺大坝汶川地震震害分析及高土石坝抗震减灾研究设想[J]. 水力发电, 2009, 35(5): 11 - 14. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, WEN Yan-feng, et al. Analysis of earthquake damage of the Zipingpu Dam in Wenchuan earthquake and the study proposal on the anti-earthquake and disaster reduction of high earth-rock dam[J]. Water Power, 2009, 35(5): 11 - 14. (in Chinese))
- [11] 陈生水, 霍家平, 章为民. “5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 795 - 801. (CHEN Sheng-shui, HOU Jia-ping, ZHANG Wei-min. Analysis of effects of 5.12 Wenchuan Earthquake on Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 795 - 801. (in Chinese))
- [12] 朱晟, 杨鸽, 周建平, 等. “5.12”汶川地震紫坪铺面板堆石坝静动力初步反演研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 113 - 119. (ZHU Sheng, YANG Ge, ZHOU Jian-ping, et al. Back analysis on static and dynamic characteristics of Zipingpu CFRD under 5.12 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Sichuan University, 2010, 42(5): 113 - 119. (in Chinese))
- [13] 刘小生, 王钟宁, 赵剑明, 等. 面板堆石坝振动模型试验及动力分析研究[J]. 水利学报, 2002(2): 29 - 35. (LIU Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, ZHAO Jian-ming, et al. Advancement of technology on shaking table model test and dynamic analysis of CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(2): 29 - 35. (in Chinese))
- [14] 孔宪京, 李永胜, 邹德高, 等. 加筋边坡振动台模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 152 - 157. (KONG Xian-jing, LI Yong-sheng, ZOU De-gao, et al. Shaking table model tests on soil slope reinforced with geo-grid[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 152 - 157. (in Chinese))
- [15] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 1 - 8. (LIN Gao, ZHU Tong, LIN Bei. Similarity technique for dynamic structural model test[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(1): 1 - 8. (in Chinese))
- [16] 孔宪京. 混凝土面板堆石坝抗震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1990. (KONG Xian-jing. Study on the performance of concrete-faced rockfill dams during earthquakes[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1990. (in Chinese))
- [17] 刘小生, 王钟宁, 汪小刚, 等. 面板坝大型振动台模型试验与动力分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 知识产权出版社, 2005. (LIU Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, WANG Xiao-gang, et al. Large-scale shaking table model test and dynamic analysis of concrete-faced rockfill dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))

- Xiao-gang, et al. Advancement of technology on shaking table model test and dynamic analysis of CFRD[M]. Beijing: China WaterPower Press, Intellectual Oroperty Press, 2005. (in Chinese))
- [18] 朱彤, 林皋, 马恒春. 混凝土仿真材料特性及其应用的试验研究[J]. 水力发电学报, 2004, 23(4): 31–37. (ZHU Tong, LIN Gao, MA Heng-chun. The test research on properties and applications of emulation concrete material[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(4): 31–37. (in Chinese))
- [19] REN L, CHEN J Y, LI H N, et al. Design and application of a fiber Bragg grating strain sensor with enhanced sensitivity in the small-scale dam model[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(3): 7.
- [20] 刘君, 刘福海, 孔宪京, 等. PIV 技术在大型振动台模型试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 368–374. (LIU Jun, LIU Fu-hai, KONG Xian-jing, et al. Application of PIV in large-scale shaking table model tests[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 368–374. (in Chinese))
- [21] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社,
1999. (SHEN Zhu-jiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1999. (in Chinese))
- [22] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC-3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) Version 3.0, User manual[S]. 2004.
- [23] PRADHAN TEJ B S, KONG Xian-jing, TATSUOKA Fumio, et al. Dynamic deformation properties of sand at extremely low pressures-testing method[R]. Seisan-Kenkyu/Report of the institute of industrial science, the University of Tokyo, 1986, 38(2): 24–27.
- [24] KONG Xian-jing, PRADHAN TEJ B S, TATSUOKA Fumio, et al. Dynamic deformation properties of sand at extremely low pressures-test results[R]. Seisan- Kenkyu/Report of the institute of industrial science, the University of Tokyo, 1986, 38(2): 28–31.
- [25] KONG Xian-jing, PRADHAN TEJ B S, TATSUOKA Fumio, et al. Dynamic deformation properties of sand at extremely low pressures-empirical relations[R]. Seisan-Kenkyu/Report of the institute of industrial science, the University of Tokyo, 1986, 38(3): 11–14.

中国建筑学会地基基础分会 2012 年学术年会 (1 号通知)

本次会议旨在展示和交流近年来全国在岩土工程勘察、土的基本性质、天然地基、桩基础、地基处理、基坑(边坡)支护、特殊土地基等地基基础领域理论与实践方面的最新研究成果、发展趋势及热点难点问题, 确定会议征文内容如下: ①地基基础设计理论研究; ②模型试验研究; ③数值模拟与分析方法; ④设计方法与工程实践; ⑤施工技术; ⑥检验与监测技术; ⑦地下空间开发设计与施工新技术; ⑧地基基础规范编制修订研究。

论文格式要求: ①应征论文要求内容具体、明确、严谨、未公开发表过、文责自负且不涉及保密内容; ②论文格式请按《岩土力学》论文体例, 论文模板请登录《岩土力学》网站下载中心下载, 网站地址: <http://yt1x.whrsm.ac.cn/>; ③请务必注明作者详细通讯地址、邮编、联系电话及 E-mail 地址; ④论文以邮件(word 电子文档)向会务组电子邮箱投稿, 文章篇幅一般不超过 8 000 字(含图、表), 原则上篇幅不超过 6 页, 最大

篇幅不超过 8 页, 大小不超过 10M。要求图表清晰、数据翔实。

会议论文采取集中推荐期刊发表的方式。会议部分优秀论文将由《岩土力学》(EI 收录)增刊发表; 其它优秀论文将由《建筑科学》(核心期刊)增刊发表。所有论文由学会组织专家统一审阅, 决定是否录用、推荐具体发表刊物和形式。

每篇论文版面费以各刊出期刊收费标准而定。论文经审定确定刊出期刊后, 版面费直接交各刊出期刊编辑部。

重要日期: ①2012 年 4 月 30 日提交全文截止日期; ②2012 年 5 月 30 日全文录用截止日期; ③2012 年 7 月 20 日修改稿提交截止日期; ④2012 年 9 月中旬举行会议。

联系方式: 陶玲, 010-64517471/13601266323; 宫剑飞, 010-64517232/13501172090; 北京市北三环东路 30 号中国建筑科学研究院地基所; 投稿邮箱 taoling—cabr@163.com, gjfcabr@sina.com。