

DOI: 10.11779/CJGE201504016

# 接触面模型对面板与垫层间接触变形及面板应力的影响

刘京茂<sup>1, 2</sup>, 孔宪京<sup>1, 2\*</sup>, 邹德高<sup>1, 2</sup>

(1. 大连理工大学海岸和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:** 对某在建面板堆石坝进行了三维有限元静、动弹塑性计算, 分析了接触面模型对面板与垫层间接触面变形及面板应力的影响。面板与垫层接触面分别采用: 双曲线(仅静力计算)、理想弹塑性及广义塑性接触面模型。结果表明: 竣工期, 3 种模型计算的面板应力是基本一致的。满蓄期, 3 种模型计算的面板顺坡向应力分布规律基本一致, 但面板坝轴向应力的分布规律和量值有较明显的差别。蓄水时广义塑性接触面模型计算的接触面的应力路径和剪切位移与双曲线和理想弹塑性存在较大的差异。在地震荷载下, 理想弹塑性和广义塑性接触面模型计算的地震后坝体残余变形引起的面板顺坡应力基本一致, 但面板坝轴向应力差别较大。理想弹塑性模型只有当应力达到峰值时才产生塑性变形, 这样会低估接触面的残余变形, 不能与坝体残余变形相协调, 高估了坝体残余变形对面板应力的影响。广义塑性接触面模型能更好的反映三维条件下接触面的剪胀、剪缩、硬化、软化、循环残余变形及颗粒破碎特性, 更符合实际情况。

**关键词:** 接触面; 弹塑性; 面板堆石坝; 面板应力

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)04-0700-11

**作者简介:** 刘京茂(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事堆石料试验及本构模型研究。E-mail: goliu@mail.dlut.edu.cn。

## Effects of interface models on deformation of interface between slab and cushion layer and slab stress of concrete faced rock fill dam

LIU Jing-mao<sup>1, 2</sup>, KONG Xian-jing<sup>1, 2</sup>, ZOU De-gao<sup>1, 2</sup>

(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:** Three-dimensional static and dynamic elasto-plastic finite element analyses are conducted on a concrete faced rock fill dam. Three different soil-structure interface models are used to simulate the interface between slab and cushion layer, including hyperbolic model (only for static analysis), ideal elasto-plastic model and a generalized plastic model. The slab stresses are nearly the same among three interface models after construction. The slope-direction slab stresses are also slightly different among three interface models during impoundment, while the axial-direction slab stresses have clear differences. The stress path and shear deformation between slab and cushion layer calculated by the generalized plastic model are different from those by the hyperbolic and ideal elasto-plastic models during impoundment. The slope-direction stress induced by the residual deformation is slightly different between the generalized plastic and ideal elasto-plastic interface models, but the axial-direction stress is much larger for the ideal elasto-plastic model. The ideal elasto-plastic model can only produce plastic deformation when the stress reaches the peak strength, and the shear deformation of interface during earthquakes will be underestimated. The generalized plastic interface model can reflect the dilative and contractive responses, strain hardening, softening, particle breakage and cyclic residual deformation, which is more close to reality.

**Key words:** interface; elasto-plasticity; concrete faced rock fill dam; slab stress

## 0 引 言

面板堆石坝中面板和垫层的刚度相差较大, 两者之间在填筑、蓄水和地震时可能发生较大的非连续变形。合理模拟面板堆石坝中面板与垫层间的接触特性对分析面板的应力是十分重要的。目前常采用 Goodman 单元<sup>[1]</sup>和 Desai 薄层单元<sup>[2]</sup>对面板和垫层的

非连续变形进行模拟。在此基础上, 国内学者<sup>[3-12]</sup>针

**基金项目:** 地震行业科研专项经费项目(201208013); 国家自然科学基金项目(91215301, 51279025, 51379028); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0083)

**收稿日期:** 2014-06-12

\*通讯作者

对不同的问题提出了不同的接触面本构关系。但目前很少有可以反映接触面在地震荷载下残余变形和循环硬化等变形特性的三维接触面本构模型。随着面板堆石坝弹塑性有限元分析的发展, 传统的 Clough-Duncan 双曲线<sup>[13]</sup>和理想弹塑性接触面模型已不能满足地震荷载条件下面板堆石坝弹塑性反应分析的需求。

本文对某在建面板堆石坝进行了三维有限元静力、动力弹塑性分析, 筑坝材料采用堆石料广义塑性模型。面板与垫层接触面分别采用了双曲线接触面模型、理想弹塑性接触面模型和广义塑性接触面模型。分析了施工期、蓄水期及地震条件下面板与垫层接触面变形及面板应力的差异。数值分析结果可为进一步认识面板与垫层间的接触面变形、合理分析面板应力分布规律以及改善面板应力提供参考。

## 1 三维广义塑性接触面模型

笔者在 Zienkiewicz 等<sup>[14]</sup>提出的广义塑性模型的框架下, 采用边界面模型的思路<sup>[15]</sup>和状态相关理论<sup>[16]</sup>, 发展了一个三维弹塑性接触面模型<sup>[17]</sup>。该模型是在 Liu 等<sup>[18]</sup>提出的二维接触面模型修改而来的, 修改后的模型可以用一组参数较好的反映三维条件下不同围压和不同密实度的接触面的单调和循环荷载变形特性, 包括剪胀、剪缩、硬化、软化、残余变形及颗粒破碎。

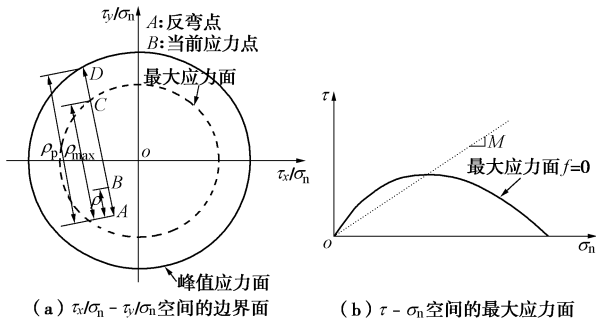


图1 边界面定义

Fig. 1 Definition of boundary surface

### 1.1 边界面

如图1, 在剪切面  $\tau_x/\sigma_n - \tau_y/\sigma_n$  上定义了两个边界面: 峰值应力边界面和最大应力历史边界面。在  $\tau - \sigma_n$  空间也定义了最大应力历史边界面

$$f = \tau - M\sigma_n \left( \frac{\alpha}{\alpha-1} \right) \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^{\alpha-1} \right] = 0 \quad (1)$$

式(1)与 Pastor 等<sup>[19]</sup>中的屈服面的表达式是一致的。两个空间的最大应力历史边界面组成了三维空间中的最大应力历史边界面。式(1)中,  $\tau$  为剪应力 ( $\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}$ ),  $\sigma_n$  为法向应力。 $\alpha$ ,  $M$  均为试验常数。 $\sigma_c$  表征屈服面的大小。

与 Wang 等<sup>[20]</sup>的砂土模型类似, 根据当前应力状

态  $B$  和反弯点  $A$  的状态, 确定峰值边界面  $\eta_p$  ( $\eta_p = (\tau/\sigma_n)_p$ ) 和最大历史应力边界面  $\eta_{max}$  的状态, 图1中  $AB = \rho$ ,  $AC = \rho_{max}$ ,  $AD = \rho_p$ 。当前应力状态在历史最大应力边界面上 ( $\rho = \rho_{max}$ ), 表示单调加载, 当前应力状态在历史最大应力边界面内 ( $\rho < \rho_{max}$ ), 表示循环加载。

### 1.2 广义塑性接触面模型框架

三维条件下, 接触面应力增量与应变增量的关系为

$$d\sigma = D^{ep} d\epsilon \quad (2)$$

式中 应力增量  $d\sigma = (d\tau_x, d\tau_y, d\sigma_n)^T$ ; 应变增量  $d\epsilon = (du_x, du_y, dv)^T / t$ ;  $t$  为接触面厚度, 一般等于 5~10 倍的颗粒平均粒径。

弹塑性矩阵表示为

$$D^{ep} = D^e - \frac{D^e : n_g \otimes n : D^e}{H + n : D^e : n_g} \quad (3)$$

$$\text{式中, 弹性矩阵 } D^e = \begin{bmatrix} D_s & & \\ & D_s & \\ & & D_n \end{bmatrix}.$$

塑性模量表示为

$$H = H_0 \frac{1}{1+\psi} \left( \frac{\sigma_n}{p_a} \right) \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) (1+\rho)^{-2} f_h \quad (4)$$

塑性流动方向  $n_g = (n_{gx}, n_{gy}, n_{gn})^T$ , 代表塑性应变增量的方向; 加载方向  $n = (n_x, n_y, n_n)^T$ , 为屈服面法线方向。

$$\text{其中, } D_s = D_{s0} \frac{1+e}{e} \left[ \left( \frac{\sigma_n}{p_a} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{p_a} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (5a)$$

$$D_n = \frac{D_{n0}}{D_{s0}} D_s \quad (5b)$$

$$\left. \begin{aligned} n_{gx} &= \frac{\tau_x}{\tau \sqrt{d_g^2 + 1}} \\ n_{gy} &= \frac{\tau_y}{\tau \sqrt{d_g^2 + 1}} \\ n_g &= \frac{d_g}{\sqrt{d_g^2 + 1}} \end{aligned} \right\} \quad (6a)$$

$$d_g = r_d \alpha \left( (M_c + k_m \psi) \sqrt{\frac{\rho_{max}}{\rho}} - \eta \right) \exp \left( \frac{c_0}{\eta} \right) \quad (6b)$$

$$\left. \begin{aligned} n_x &= \frac{\tau_x}{\tau \sqrt{d_f^2 + 1}} \\ n_y &= \frac{\tau_y}{\tau \sqrt{d_f^2 + 1}} \\ n_n &= \frac{d_f}{\sqrt{d_f^2 + 1}} \end{aligned} \right\} \quad (7a)$$

$$d_f = r_d \alpha \left( (M_f + k_m \psi) \sqrt{\frac{\rho_{\max}}{\rho}} - \eta \right) \exp\left(\frac{c_0}{\eta}\right), \quad (7b)$$

$$\psi = e - e_c, \quad (8a)$$

$$e = e_0 - \frac{\nu}{t}(1 + e_0), \quad (8b)$$

$$e_c = e_{c0} - \Delta e_c - \lambda \ln\left(\frac{\sigma_n}{p_a}\right), \quad (8c)$$

$$\Delta e_c = c_3 (B_r)_{\text{virgn}} + c_4 (B_r)_{\text{cyclic}}, \quad (8d)$$

$$B_r = \frac{W_p}{c_1 + c_2 W_p}, \quad (8e)$$

$$\Delta e_c = \int_{\rho_{\max}=\rho} \frac{-dW_p}{(a+bW_p)^2} + \int_{\rho_{\max}>\rho} \frac{-c \cdot dW_p}{(a+bW_p)^2}. \quad (8f)$$

式 (5) ~ (8) 中,  $p_a$  是标准大气压,  $e$  为当前孔隙比,  $e_0$  为初始孔隙比,  $\nu$  为法向位移,  $e_c$  为临界孔隙比.  $B_r$  为颗粒破碎量参量<sup>[21]</sup>,  $W_p$  为塑性功,  $B_r$  和  $W_p$  的双曲线关系适用于单调和循环荷载<sup>[22]</sup>,  $c_1$  和  $c_2$  为试验常数,  $(B_r)_{\text{virgn}}$  表示单调荷载下的颗粒破碎量 ( $\rho = \rho_{\max}$ ),  $(B_r)_{\text{cyclic}}$  表示发生在循环荷载下的颗粒破碎 ( $\rho < \rho_{\max}$ ).  $c_3$  和  $c_4$  用来反映单调和循环荷载下颗粒破碎对临界孔隙比的影响. 其中  $a = c_1 / \sqrt{c_1 c_3}$ ,  $b = c_2 / \sqrt{c_1 c_3}$ ,  $c = c_4 / c_3$ .

修改模型参数包括弹性参数  $D_{n0}$ ,  $D_{s0}$ ; 临界状态参数  $e_r$ ,  $\lambda$ ,  $M_c$ ; 塑性流动方向  $\alpha$ ,  $r_d$ ,  $k_m$ ; 加载方向参数  $M_f$ ; 塑性模量参数  $H_0$ ,  $k$ ,  $f_h$ ; 颗粒破碎参数  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .  $c_0$  为很小的常数, 取为 0.0001. 大部分参数均可根据试验结果直接确定<sup>[17-18]</sup>, 本文不再赘述.

1.3 加卸载判断

修改模型加卸载判断方法与广义塑性模型<sup>[19]</sup>一致.

- $n: d\sigma^e > 0$ , 表示加载;
- $n: d\sigma^e < 0$ , 表示卸载;
- $n: d\sigma^e = 0$ , 表示中性变载. 其中  $d\sigma^e = D^e d\epsilon$ .

但与传统广义塑性模型不同, 当出现反弯点时确定加载方向  $n$  的应力状态要由最大应力边界面上的映射点的应力状态  $\bar{\sigma}$  (图 1 (b) 中  $c$  点应力状态) 代替绝对应力状态  $\sigma$ .

2 面板坝实例分析

对面板堆石坝的面板与垫层间接触面进行了模拟. 比较了施工期、蓄水期及地震荷载下双曲线 (仅静力分析)、理想弹塑性和广义塑性接触面模型计算的面板挠度和面板应力的异同, 分析了采用不同接触面模型对面板与垫层接触面变形及应力的差异.

2.1 大坝有限元模型

采用某在建面板堆石坝为计算模型 (见图 2). 大

坝的三维有限元网格共有单元 74521 个. 面板堆石坝最大坝高为 171 m, 坝顶长 355 m, 坝坡 1 : 1.4. 面板与坝体交界面、趾板与坝体交界面采用 Goodman 单元, 面板垂直缝、周边缝采用缝单元. 面板分三期填筑, 一期面板顶部高程 2737 m, 二期面板顶部高程 2805 m, 三期面板顶部高程 2852 m. 面板厚度为 0.3 m+0.0035H ( $H$  为坝高, 单位 m). 填筑过程有限元加载步为 86 步. 填筑到高程 2780 m 时 (有限元 54 步), 浇筑一期面板, 大坝填筑完成后浇筑 II 期、III 期, 然后大坝由空库蓄水至高程 2840 m.

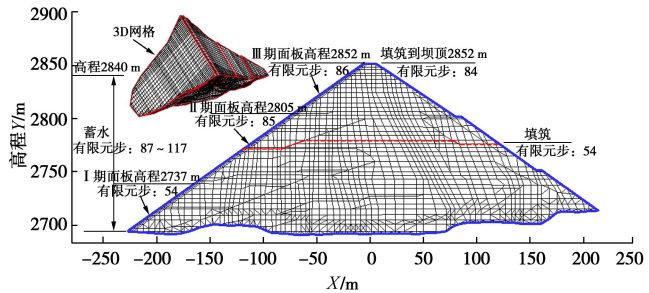


图 2 大坝最大断面网格

Fig. 2 Finite element mesh of dam

2.2 计算参数

(1) 堆石料参数

筑坝堆石料采用广义塑性模型, 模型的简介见文献[23]. 根据大坝主堆石料静力与循环荷载三轴试验确定了模型参数. 过渡料与垫层料均取为主堆石料参数. 堆石料广义塑性模型参数见表 1.

表 1 堆石料广义塑性模型参数

Table 1 Parameters of rockfill materials								
$G_0$	$K_0$	$m_s$	$m_v$	$M_g$	$M_f$	$\alpha_f$	$\alpha_r$	$H_0$
1475	1567	0.43	0.43	1.75	0.90	0.21	0.43	570
$m_l$	$\beta_0$	$\beta_1$	$H_{u0}$	$m_u$	$r_d$	$\gamma_{DM}$	$\gamma_u$	
0.18	42	0.039	1500	0.18	120	65	7.5	

(2) 面板、竖缝、周边缝材料参数

混凝土面板采用线弹性模型, 密度  $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量  $E = 2.55 \times 10^{10} \text{ Pa}$ , 泊松比  $\nu = 0.167$ . 面板板间竖缝参数采用文献[24]建议值, 其法向压缩刚度为 25 GPa/m, 法向拉伸刚度为 5 MPa/m, 切向刚度取为 1 MPa/m.

(3) 面板、趾板与垫层间的接触面材料参数

面板、趾板与垫层间的接触面均分别采用双曲线、理想弹塑性及广义塑性接触面模型. 采用 Zhang 等<sup>[25]</sup>的接触面试验成果对模型参数进行了标定. 广义塑性接触面模型参数见表 2, 图 3 为模拟和试验结果. 广义塑性接触面模型可以较好的反映剪胀、剪缩、硬化和软化. 循环荷载下较大的法向位移与颗粒破碎有密切的关系, 颗粒破碎的影响也可由广义接触面模型反

映。双曲线和理想弹塑性接触面模型与文献[23]一致。双曲线模型参数见表 3, 试验和模拟结果见图 4; 理想弹塑性模型参数见表 4, 试验和模拟结果见图 5。双曲线模型和理想弹塑性模型可以模拟剪应力和剪切位移的关系, 但广义塑性接触面模型不仅可以模拟剪应力和剪切位移的关系, 还可以模拟法向应力和法向位移的关系。

表 2 广义塑性接触面模型参数

Table 2 Parameters of generalized plastic interface model							
$D_{s0}/\text{kPa}$	$D_{n0}/\text{kPa}$	$M_c$	$e_r$	$\lambda$	$a/\text{kPa}^{0.5}$	$b$	$c$
1000	1500	0.88	0.4	0.091	224	0.06	3.0
$\alpha$	$r_d$	$k_m$	$M_f$	$k$	$H_0/\text{kPa}$	$f_h$	$t/\text{m}$
0.65	0.2	0.6	0.65	0.5	8500	2	0.1

表 3 双曲线接触面模型参数

Table 3 Parameters of hyperbolic interface model					
$k_1$	$k_2/(\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$n$	$\varphi/(^{\circ})$	$R_f$	$c/\text{kPa}$
600	$1\times 10^7$	0.85	41.5	0.9	0

表 4 理想弹塑性接触面模型参数

Table 4 Parameters of ideal elasto-plastic interface model				
$k_1$	$k_2/(\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$n$	$\varphi/(^{\circ})$	$c/\text{kPa}$
300	$1\times 10^7$	0.8	41.5	0

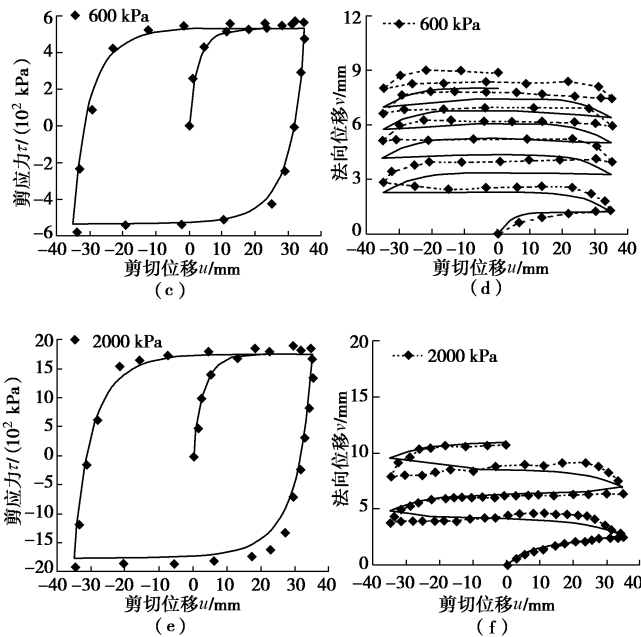
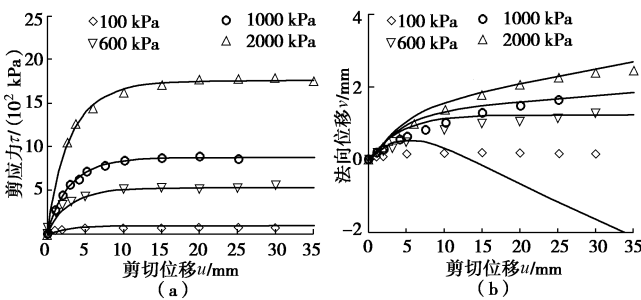


图 3 广义塑性接触面模型

Fig. 3 Generalized plastic interface model

(4) 地震动输入

动力计算地震输入采用《水工建筑物抗震设计规范》中的规范谱生成的人工地震波, 见图 6。顺河向与坝轴向输入地震波峰值为  $3\text{ m/s}^2$ , 竖向峰值为  $2\text{ m/s}^2$ 。

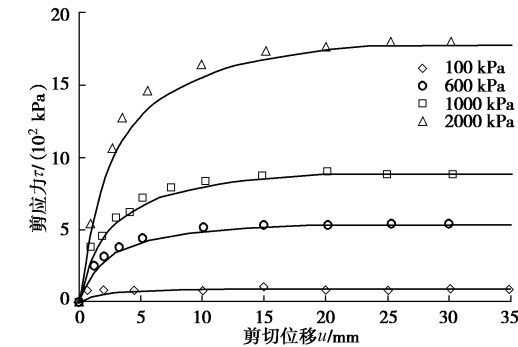


图 4 双曲线模型

Fig. 4 Hyperbolic interface model

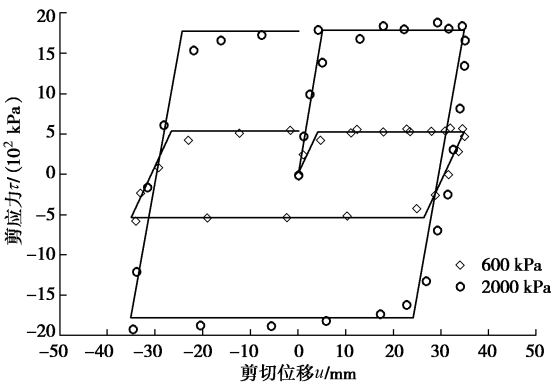


图 5 理想弹塑性模型

Fig. 5 Ideal elasto-plastic interface model

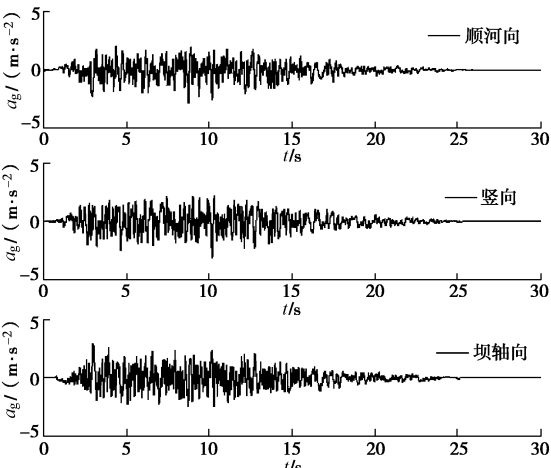


图 6 地震波时程

Fig. 6 Input earthquake motions

2.3 施工蓄水分析

(1) 大坝变形

堆石料广义塑性模型可以较好地反映不同应力路径下堆石的变形特性[26]。采用 3 种不同的接触面模型

计算得到的大坝填筑和蓄水后的大坝变形是一致的。填筑时,坝体变形以竖向沉降为主,上游坝面土体表现为向上游的水平变形(见图 7(a))。蓄水引起的变形也以坝体竖向沉降为主,在坝底部到中部水平变形指向下游,在坝顶附近坝体的水平位移指向上游(见图 7(b))。

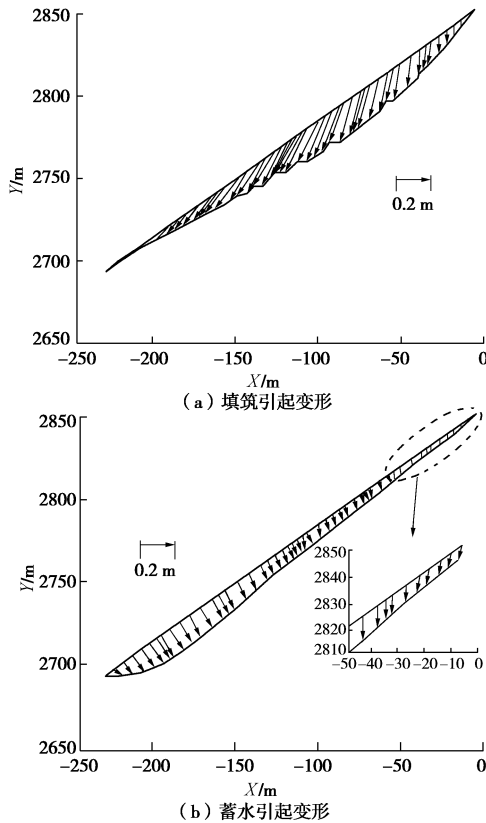


图 7 填筑和蓄水引起的坝体变形

Fig. 7 Deformations after construction and impoundment

## (2) 面板应力和挠度

图 8 为竣工和蓄水后面板顺坡向和坝轴向应力随坝高的变化规律。竣工后,3 种接触面模型计算的面板应力的分布规律是一致的。蓄水后,不同接触面模型计算的面板顺坡向应力的分布规律是基本一致的,但面板坝轴向应力的分布规律和量值存在差异。如图 8(b),蓄水后,在高度 2760 m 以下,广义塑性接触面模型的面板坝轴向应力小于双曲线和理想弹塑性模型;高度 2760 m 以上,广义塑性接触面模型的面板坝轴向应力大于双曲线和理想弹塑性。如图 9 所示,3 种不同接触面模型计算的面板挠度的规律是基本一致的。但广义塑性接触面模型计算得到的面板挠度整体上要略大。

## (3) 接触面位移

面板与垫层间的相对变形即为接触面的位移,接触面在面板与垫层的间起到“缓冲”作用。接触面的剪切位移越小,垫层的变形对面板的影响越大。取 1 个特征接触面单元 I-A (高程 2711 m) 比较了广义塑

性接触面模型与双曲线和理想弹塑性接触面模型在填筑和蓄水过程中的差异。

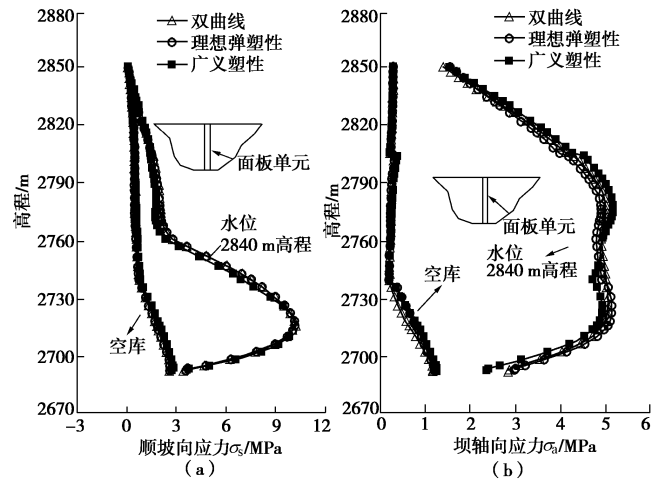


图 8 竣工和蓄水后坝中部面板应力

Fig. 8 Slab stresses after construction and impoundment

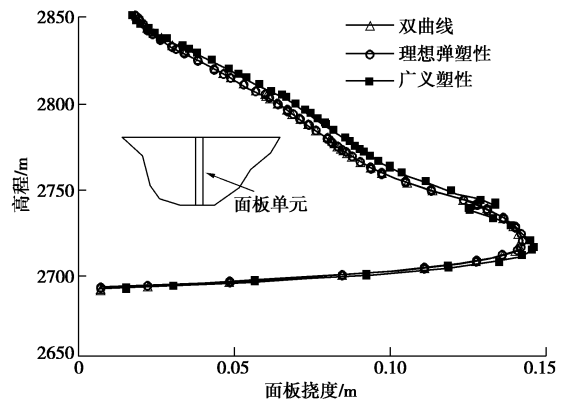
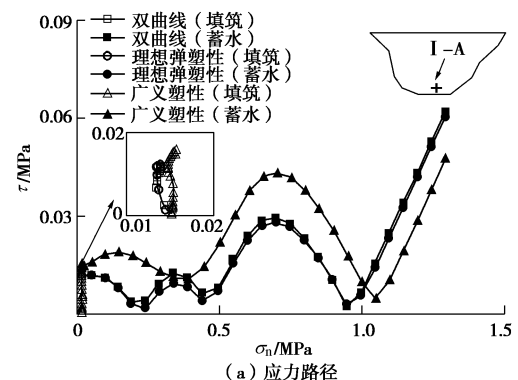


图 9 蓄水后不同接触面模型面板挠度

Fig. 9 Slab stresses and deflections after impoundment

图 10(a) 和 10(b) 分别为一期面板下侧的接触面单元 I-A (高程 2711 m) 在填筑和蓄水过程中法向应力  $\sigma_n$  与剪应力  $\tau$  ( $\tau = \sqrt{\tau_a^2 + \tau_s^2}$ , 下标 a 表示坝轴向, s 表示顺坡向)、剪切位移  $u$  ( $u = \sqrt{u_a^2 + u_s^2}$ ) 与应力比  $\tau/\sigma_n$  的关系。竣工后(填筑过程中  $\sigma_n$  较小且变化不大)不同接触面模型的剪切位移  $u$  和剪应力  $\tau$  的大小是基本一致的。但蓄水过程中,广义塑性接触面模型的剪切位移和剪应力的大小与双曲线和理想弹塑性存在较明显的差异。



(a) 应力路径

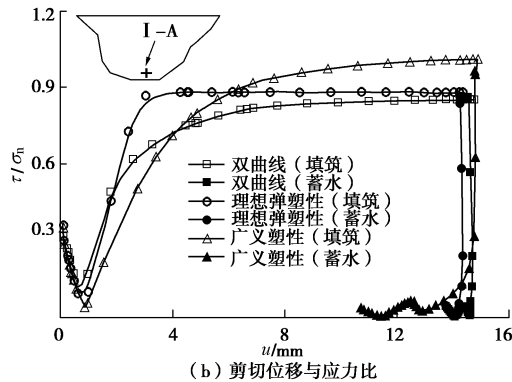


图10 填筑和蓄水过程中接触面单元 I-A 的应力和位移

Fig. 10 Stresses and strain paths of interface element I-A during construction and impoundment

从图 10 (a) 接触面单元 I-A 应力路径可以看出, 蓄水过程中 I-A 的法向应力是逐渐增大的, 但剪应力呈往复的变化, 并且广义塑性接触面模型与双曲线和理想弹塑性的应力路径存在着明显的差异。双曲线和理想弹塑性模型应力增量与应变增量方向是相同的, 不能反映法向应力变化对加卸载判断的影响, 加卸载判断的差异是引起应力路径的差异的一个原因。此外, 双曲线和理想弹塑性模型的 3 个变形方向: 两个剪切方向和一个法向压缩方向, 是相互独立的, 而广义塑性接触面模型<sup>[17]</sup>可以反映它们间的耦合。双曲线和理想弹塑性模型不能较好地反映往复荷载下的接触面的变形特性, 进一步导致了蓄水过程中的接触面位移的差异 (见图 10 (b))。这些差别都是广义塑性接触面模型计算的接触面应力路径、位移及面板应力不同于双曲线和理想弹塑性模型的原因。

图 11 为不同接触面模型蓄水后接触面法向位移。双曲线和理想弹塑性模型由于假定法向刚度较大, 接触面的法向位移较小。广义塑性接触面模型计算的结果表明: 填筑过程中一期面板下侧接触面法向位移存在明显的剪胀现象 (面板与垫层没有张开)。蓄水过程中接触面法向位移主要表现为剪缩, 在坝顶区域也有轻微的剪胀 (面板与垫层没有张开)。接触面法向位移的差异是引起图 9 中不同接触面模型面板挠度的差别的原因。

## 2.4 地震反应分析

采用广义塑性接触面模型和理想弹塑性接触面模型进行了有限元弹塑性动力计算, 分析了地震荷载下两种接触面模型的面板应力的异同, 并同时分析了地震过程中接触面应力及变形的变化规律。

### (1) 坝体残余变形

图 12 为地震荷载下大坝的震前和震后的轮廓图。坝体主要表现为竖向沉降和向下游的水平位移。坝体

残余变形主要集中在坝体的中上部。采用理想弹塑性和广义塑性接触面模型的坝体残余变形的结果是一致的。

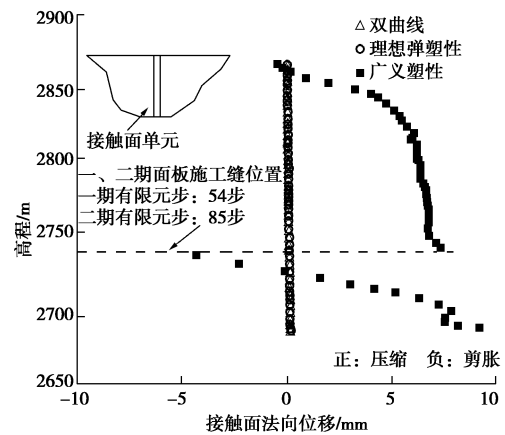


图11 蓄水后河谷中部接触面法向位移

Fig. 11 Normal deformations of interface after impoundment

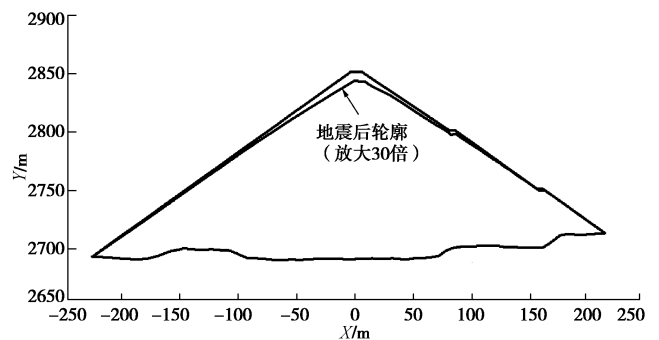


图12 地震引起的坝体残余变形

Fig. 12 Residual deformations after earthquake

### (2) 面板应力和挠度

图 13 (a)、13 (b) 为地震后坝体残余变形引起的面板顺坡向和坝轴向应力的分布。如图 13 (a), 坝体残余变形引起的面板沿顺坡向应力在坝底部区域呈受压状态, 在坝顶区域呈受拉状态。两种接触面模型的面板顺坡向应力差别并不明显。如图 13 (b), 坝体残余变形引起的面板沿坝轴向应力主要呈受压状态, 最大压应力位置发生在坝中位置。两种接触面模型的面板坝轴向应力差别较大, 广义塑性接触面模型的最大坝轴向压应力约为 9 MPa, 理想弹塑性接触面模型约为 13 MPa, 广义塑性的坝轴向应力明显小于理想弹塑性。图 14 为面板单元 F-A (高程 2813 m) 的应力时程, 两种接触面模型计算的面板单元 F-A 的应力时程在地震初期差别不大, 但随着地震过程的发展, 差别逐渐变大, 当地震停止时, 面板应力差别趋于稳定。但两种接触面模型的面板的动应力幅值是大致相同的。

如图 13 (c), 坝体残余变形引起的面板挠度最大

值在坝顶区域，在靠近坝底区域很小。在坝顶区域两种接触面模型的面板挠度有较大的差异，广义塑性接触面模型计算的面板挠度较小。

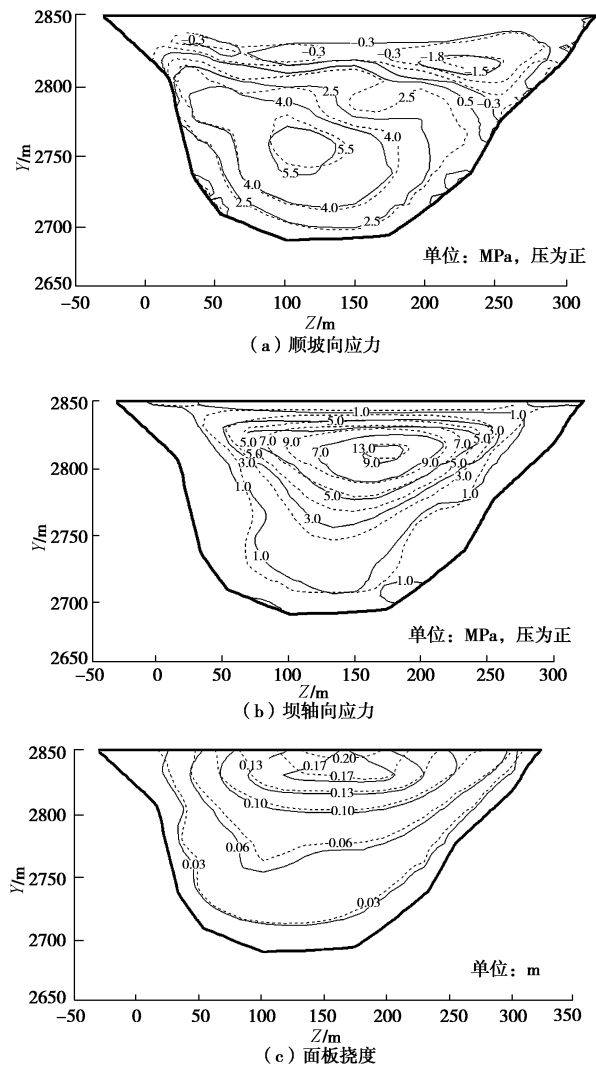


图 13 地震后坝体残余变形引起的面板应力和挠度(广义塑性: 实线; 理想弹塑性: 虚线)

Fig. 13 Slab stresses and deflections induced by residual deformation (generalized plastic model: solid; ideal elasto-plastic model: dashed)

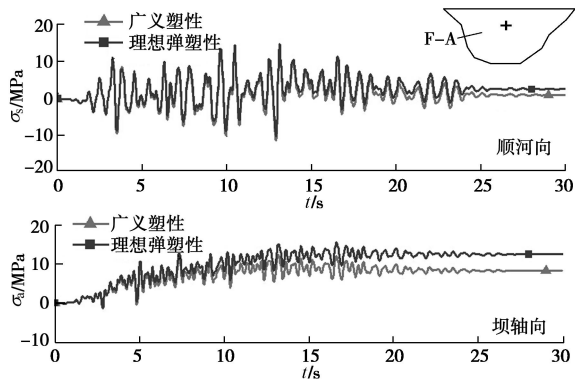


图 14 地震引起的面板单元 F-A 应力时程

Fig. 14 Slab stresses during earthquake

(3) 接触面位移

图 15 为地震后坝体残余变形引起的垫层相对于面板的位移(接触面剪切位移)矢量分布图。接触面沿顺坡向剪切位移为“负”(垫层相对于面板位移顺坡向分量沿  $Y$  轴正方向为正); 接触面沿坝轴向剪切位移指向坝中(垫层相对于面板位移坝轴向分量沿  $Z$  轴正方向为正)。在高程 2820 m 下, 广义塑性的接触面位移要明显的大于理想弹塑性。

图 16 (a) 和 16 (b) 为广义塑性接触模型计算的坝体残余变形引起的面板与垫层间接触面法向位移(不包含接触面的张开量)和面板与垫层间张开量的分布。如图 16 (a), 在坝顶区, 接触面表现出了明显的剪胀, 而在坝的中下部区域, 接触面法向表现为压缩, 在坝底部区域接触面法向压缩较小, 最大压缩值

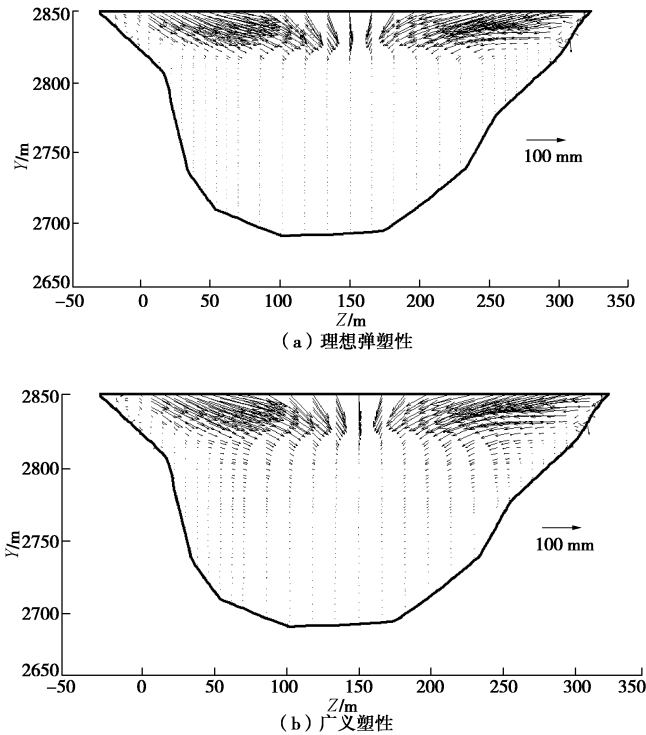
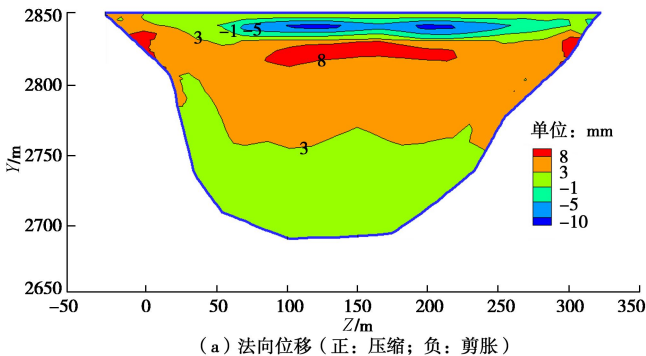


图 15 地震后坝体残余变形引起的接触面剪切位移

Fig. 15 Shear deformations of interface induced by residual deformation





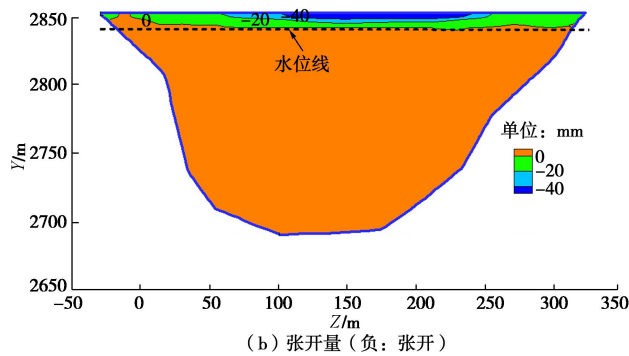


图 16 地震后坝体残余变形引起的面板与垫层间法向位移和张开 (广义塑性接触面模型)

Fig. 16 Normal deformations of interface induced by residual deformation for generalized plastic model

发生在约高程 2820 m 位置。如图 16 (b), 在水位线至坝顶区域, 面板与垫层间有着明显的张开。如图 17, 在坝顶区域, 理想弹塑性接触模型计算的面板与垫层间也有张开, 但张开量和张开区大小均小于广义塑性接触模型。

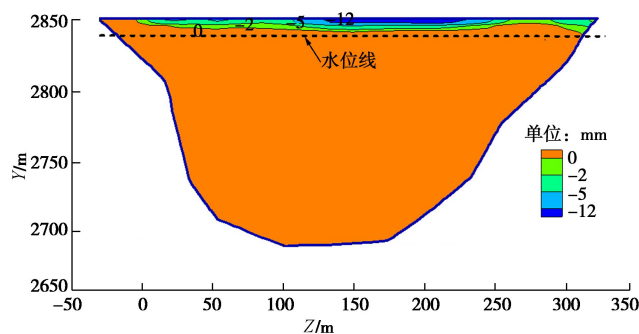


图 17 地震后坝体残余变形引起的面板与垫层间张开量 (理想弹塑性模型)

Fig. 17 Separate deformations of interface induced by residual deformation for ideal elastoplastic model

取 3 个特征接触面单元进一步比较了广义塑性和理想弹塑性接触面的差异。图 18 和图 19 分别为坝体左岸 I-B (高程 2809 m) 和坝中顶部区域接触面单元 I-C (高程 2838 m) 的应力和位移时程。图 20 为坝顶接触面单元 I-D (高程 2852 m) 面板与垫层间张开量随地震时程的变化过程。

如图 18 (a), 两种接触面模型计算的单元 I-B 的顺坡向剪应力是基本一致的。但两种模型计算的 I-B 坝轴向剪应力时程差别较大: 在地震初期两者基本一致, 但随着地震的进程, 广义塑性接触面模型计算的坝体残余变形引起 I-B 的坝轴向剪应力值要明显小于理想弹塑性的。地震过程中单元 I-B 的法向应力变化不大, 且接触面一直处于受压状态 (单元 I-B 初始法向应力为 0.31 MPa)。广义塑性接触面模型计算的 I-B 的残余剪切和法向位移都有明显的塑性累积过程, 且

广义塑性模型计算值要远大于理想弹塑性模型的, 这种现象也可以从图 15 (高程 2820 m 以下) 的矢量图中可以看出。两种模型计算的接触面位移的差异是由于理想弹塑性模型不能较好地反映塑性滑移导致的。理想弹塑性模型只有在应力达到破坏强度时才会产生塑性滑移, 而这显然是不合理的。理想弹塑性模型易低估接触面的残余剪切位移, 不能与坝体残余变形相协调, 导致面板与垫层间剪切力偏大, 进而会高估面板的应力, 是面板轴向应力计算值偏大 (图 13 (b)) 的原因。

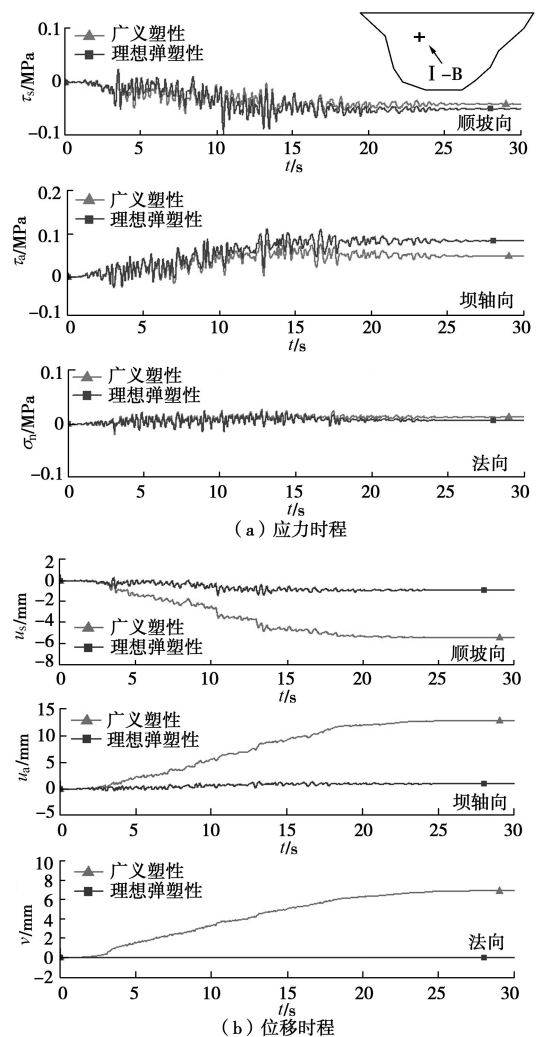


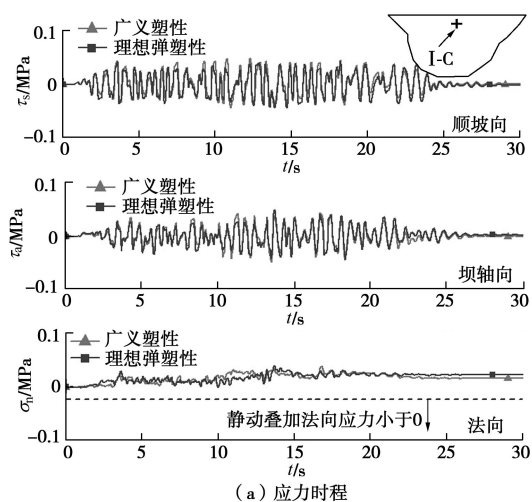
图 18 坝左岸接触面单元 I-B 应力和位移时程

Fig. 18 Stresses and deformations during earthquake for interface element I-B

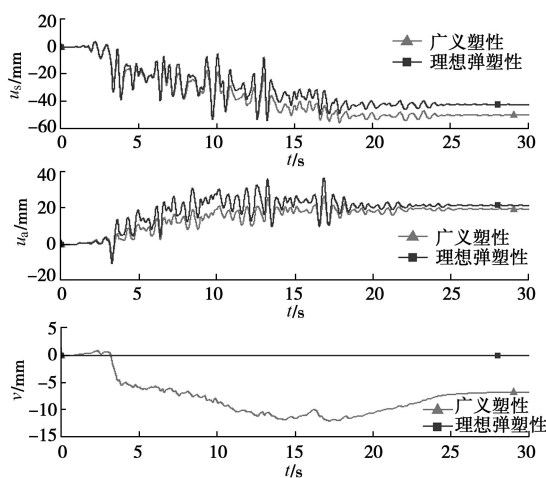
如图 19 (a), 与单元 I-B 不同, 两种接触面模型计算的坝中顶部区域的单元 I-C 的应力时程差别并不大, 且震后坝体残余变形引起的剪应力接近于 0。如图 19 (b), 两种接触面模型计算的 I-C 的剪切位移时程的差别也较单元 I-B 小, 这是由于单元 I-C 法向应力较小 (初始法向应力为 0.023 MPa) 而剪应力较大, 在地震过程中容易达到了破坏强度从而导致理想弹塑



性模型也能产生较大的塑性滑移。如图 19 (a), 单元 I-C 在地震过程中静动叠加法向应力是大于 0 的。如图 19 (b) 中单元 I-C 的法向位移时程, 广义塑性接触面模型的法向位移在地震初期表现为剪缩, 随着地震的增强, 接触面表现出明显的剪胀, 地震峰值之后地震强度逐渐减小, 接触面的法向位移增量又表现为压缩, 这是理想弹塑性模型不能反映的现象。接触面的剪胀抵消了部分坝体沿面板法向的变形, 进而会减小面板的挠度。



(a) 应力时程



(b) 位移时程

图 19 坝顶区接触面单元 I-C 应力和位移时程

Fig. 19 Stresses and deformations during earthquake for interface element I-C

图 20 为坝顶接触面单元 I-D 在地震过程中面板与垫层间张开量随地震时程的变化过程 (广义塑性接触面模型可以记忆张开量和剪胀 (或剪缩) 量), 其中广义塑性接触面模型在 2 s 之前是处于闭合状态, 2 s 后面板与垫层之间开始张开。两种接触面模型计算的 I-D 单元的张开量大小差别较大, 广义塑性接触面模型计算的张开量大于理想弹塑性模型的。理想弹塑性不能反映接触面的剪胀和剪缩, 而广义塑性接触面的法向位移分布 (图 16 (a)) 反映出面板挠曲的变化所

导致的坝顶区面板与垫层间张开的加剧, 是两者张开量差别较大的原因。广义塑性和理想弹塑性接触面在法向位移及面板与垫层间张开量的差异是导致图 13 (c) 中面板挠度产生差异的原因。

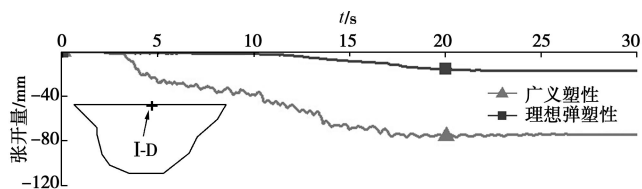


图 20 坝顶接触面单元 I-D 张开量

Fig. 20 Separate deformations during earthquake for interface element I-D

### 3 结 论

本文对某在建面板堆石坝进行了三维有限元静力、动力有限元弹塑性分析。筑坝堆石料材料采用广义塑性模型, 面板与垫层间接触面单元分别采用双曲线 (仅静力分析)、理想弹塑性和广义塑性接触面模型。比较了在施工、蓄水及地震全过程不同接触面模型计算的面板应力和挠度的差异, 并分析了接触面的应力和位移的异同。结果表明:

(1) 在施工期, 3 种接触面模型计算的面板应力、接触面剪应力和剪切位移的分布规律和量值都是基本一致。蓄水期, 3 种接触面模型计算得到的面板顺坡应力差别不大, 但面板坝轴向应力的大小和分布有较明显差别。蓄水过程中, 广义塑性接触面模型计算的接触面的应力路径和剪切位移与双曲线和理想弹塑性存在较大的差异。与双曲线和理想弹塑性模型不同, 广义塑性接触面模型可以反映接触面 3 个方向 (两个剪切方向和法向) 的耦合, 并且加卸载判断可以反映法向应力变化的影响。此外, 双曲线模型和理想弹塑性模型不能较好地反映往复荷载下的接触位移。这些均是引起接触面应力路径和剪切位移差异的原因。

(2) 在地震荷载条件下, 采用理想弹塑性模型和广义塑性模型计算的地震后的面板顺坡应力差别不大, 但面板沿坝轴向应力差别较大。采用理想弹塑性接触面模型只有当应力达到峰值强度时才产生塑性滑移, 会低估较大法向应力条件下的接触面的接触位移特性, 不能与坝体残余变形相协调, 导致板与垫层间接触面的坝轴向剪应力计算值偏大, 进而会高估坝体残余变形对面板应力的影响。广义塑性接触面模型可以更好地反映地震荷载下接触面的塑性剪切位移特性, 能较好地反映接触面的剪胀、剪缩特性, 并且还可以记忆面板与垫层间的张开量和剪胀 (或剪缩) 量, 更符合实际情况。

本文发展的三维广义塑性接触面模型可以较好地反映面板与垫层间接触面的复杂加载变形特性。此外, 该模型也可以反映颗粒破碎的影响, 可为进一步分析 300 m 级面板堆石坝面板与垫层、坝体与岩体的接触效应提供良好的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] GOODMAN R F, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1968, **94**(3): 637 - 660.
- [2] DESAI C S, ZAMAN M M. Thin layer element for interfaces and joints[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, **8**(1): 19 - 43.
- [3] 卢廷浩, 鲍伏波. 接触面薄层单元耦合本构模型[J]. 水利学报, 2000, **52**(2): 71 - 75. (LU Ting-hao, BAO Fu-bo. A coupled constitutive model for interface thin-layer element[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, **52**(2): 71 - 75. (in Chinese))
- [4] 吴军帅, 姜 朴. 土与混凝土接触面的动力剪切特性[J]. 岩土工程学报, 1992, **14**(2): 61 - 66. (WU Jun-shuai, JIANG Pu. Dynamic shearing characteristics of soil-concrete interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **14**(2): 61 - 66. (in Chinese)).
- [5] 殷宗泽, 朱 泓, 许国华. 土与结构材料的接触面的变形及数学模型[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3): 14 - 22. (YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(3): 14 - 22. (in Chinese))
- [6] 张冬雯, 卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及应用[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(6): 62 - 66. (ZHANG Dong-wen, LU Ting-hao. Establishment and application of a interface model between soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(6): 62 - 66. (in Chinese))
- [7] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2002, **23**(1): 6 - 11. (HU Li-ming, PU Jia-liu. Damage model of soil-structure interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(1): 6 - 11. (in Chinese))
- [8] 栾茂田, 武亚军. 土与结构间接接触面的非线性弹性-理想塑性模型及其应用[J]. 岩土力学, 2004, **25**(4): 507 - 513. (LUAN Mao-tian, WU Ya-jun. A nonlinear elasto-perfectly plastic model of interface element for soil-structure interaction and its applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(4): 507 - 513. (in Chinese))
- [9] 孙吉主, 施戈亮. 循环荷载作用下接触面的边界面模型研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(2): 311 - 314. (SUN Ji-zhu, SHI Ge-liang. Bounding surface model for soil-structure interface under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(2): 311 - 314. (in Chinese))
- [10] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1175 - 1179. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1175 - 1179. (in Chinese))
- [11] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面三维本构关系及数值模型[J]. 岩土力学, 2007, **28**(2): 288 - 292. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Three-dimensional model of interface between structure and coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(2): 288 - 292. (in Chinese))
- [12] 周爱兆, 卢廷浩. 基于广义位势理论的接触面弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(10): 1532 - 1536. (ZHOU Ai-zhao, LU Ting-hao. Elasto-plastic constitutive model of interface based on generalized potential theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1532 - 1536. (in Chinese))
- [13] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1971, **97**(12): 1657 - 1673.
- [14] ZIENKIEWICZ O C, MORZ Z. Generalized plasticity formulation and applications to geomechanics[M]. Desai C S, Gallagher R H, ed. Wiley: Mechanics of Engineer Materials, 1984: 665 - 679.
- [15] DAFALIAS Y F, POPOV E P. A model of nonlinearly hardening materials for complex loading[J]. Acta Mechanica, 1975(**21**): 173 - 192.
- [16] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, WORTH C P. On the yield of soils[J]. Géotechnique, 1958, **8**(1): 22 - 53.
- [17] LIU J M, ZOU D G, KONG X J. A three-dimensional state-dependent model of soil-structure interface for monotonic and cyclic loadings[J]. Computers and Geotechnics, (in press).
- [18] LIU H B, LING H I. Constitutive description of interface behavior including cyclic loading and particle breakage within the framework of critical state soil mechanics[J].

- International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008, **32**: 1495 - 1514.
- [19] PASTOR M, ZIENKIEWICZ O C, CHAN A H C. Generalized plasticity and the modeling of soil behavior[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1990, **14**: 151 - 190.
- [20] WANG Z L, DAFALIAS Y F, SHEN C K. Bounding surface hypoplasticity model for sand[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1990, **116**(5): 983 - 1001.
- [21] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(4): 309 - 316.
- [22] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高, 等. 紫坪铺面板坝堆石料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **25**(1): 35 - 40. (KONG Xian-Jing, LIU Jing-mao, ZOU De-gao, et al. Experimental study of particle breakage of Zipingpu rock fill material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **25**(1): 35 - 40. (in Chinese))
- [23] 孔宪京, 邹德高, 徐 斌, 等. 紫坪铺面板堆石坝三维有限元弹塑性分析[J]. 水力发电学报, 2013, **32**(2): 213 - 222. (KONG Xian-Jing, ZOU De-gao, XU Bin, et al. Three-dimensional finite element elasto-plastic analysis of Zipingpu concrete faced rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, **32**(2): 213 - 222. (in Chinese))
- [24] 邹德高, 尤华芳, 孔宪京, 等. 接缝简化模型及参数对面板堆石坝面板应力及接缝位移的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 3257 - 3263. (ZOU De-gao, YOU Hua-Fang, KONG Xian-Jing, et al. Research on joint simplified model and effects of joint parameters on panel stress and joint displacements of faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 3257 - 3263. (in Chinese))
- [25] ZHANG G, ZHANG J M. Unified modeling of monotonic and cyclic behavior of interface between structure and gravelly soil[J]. Soils and Foundations, 2008, **48**(2): 237 - 251.
- [26] 邹德高, 付 猛, 刘京茂, 等. 粗粒料广义塑性模型对不同应力路径适应性研究[J]. 大连理工大学学报, 2013, **53**(5): 702 - 709. (ZOU De-gao, FU Meng, LIU Jing-mao, et al. Study of adaptability of generalized plastic model of coarse grained soil under various stress paths[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, **53**(5): 702 - 709. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司  
封 3 北京理正软件股份有限公司  
封 4 上海分元土木工程科技有限公司  
后插 1 庆祝南京水利科学研究院成立 80 周年  
后插 2 台州建元勘察仪器有限公司  
后插 3 本期田洪水等作者文章的图 2, 4 彩色插图  
后插 4 西安力创材料检测技术有限公司