

文章编号: 1000-4750(2014)02-0177-07

块石空间分布对土石混合体边坡稳定性的影响

邵 帅, 季顺迎

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

摘 要: 土石混合体是自然界中分布广泛的一种地质材料, 受组分多样性, 块石粒径大小不一和块石空间分布位置随机等因素的影响, 其物理力学性质十分复杂。在土石混合体边坡的稳定性分析中, 以往大多将其简化为均匀地质体结构而不考虑块石的影响。该文采用有限元强度折减法, 对土体和四种不同类型块石分布的土石混合体边坡分别在自重状态(准静态)和打桩作用(动态)下的稳定性进行了分析, 探讨了块石空间分布对剪切带和边坡稳定性的影响。计算结果表明, 土石混合体边坡内的剪切带具有明显的绕石效应, 位于土石混合体边坡内部不同位置处的块石对边坡稳定性产生的影响不同。

关键词: 土石混合体; 有限元分析; 稳定性; 边坡; 剪切带; 绕石效应

中图分类号: TD824.7 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.0248

EFFECTS OF ROCK SPATIAL DISTRIBUTIONS ON STABILITY OF ROCK-SOIL-MIXTURE SLOPE

SHAO Shuai, JI Shun-ying

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Soil-rock-mixture is widely distributed in nature. Due to its variety in component, difference in rock's size and random distribution of rocks, the physical and mechanical properties of soil-rock-mixture are very complex. In previous studies of stability analysis of soil-rock-mixture slope, the slope was usually simplified as homogeneous soil materials without considering the influence of rocks. In the present work, the shear band of soil and four different kinds of soil-rock-mixture slopes under gravity (quasi-static case) and pile driving load (dynamic case) are analyzed, respectively. Using the strength reduction method in the finite element simulation, the influences of rocks and their spatial distributions on the slope stability are discussed. The results show that the shear band of soil-rock-mixture slope has obvious rounding rock effect, and different locations of rocks have different effects on the stability of rock-soil-mixture slope.

Key words: soil-rock-mixture; FEM analysis; stability; slope; shear band; rounding rock effect

土石混合体是由强度较高的大型块石和松软的土体混合而成的多相体系^[1-3]。土石混合体在成因上十分复杂, 主要包括冲洪积成因、残坡积成因、崩积成因、冰积成因及人工堆积成因等类型, 具有物质成分复杂、结构分布不规则、地域性强等特征。由于构成土石混合体的各组分物理力学性质有很大差别, 同时各组分之间又存在着极其复杂的相互作用, 因此, 土石混合体的力学行为相对于传统的

岩石力学和土力学更加复杂^[4]。

近几年来, 土石混合体材料作为一种特殊的岩土介质越来越受到岩土工程界的重视^[5-7]。试验研究结果表明, 土石混合体中块石空间分布、含量以及粒度在很大程度上影响着土石混合体抗剪强度特征^[8-11]。当碎石尺寸较小、含量较少时, 其对剪切性能影响并不大。但当其达到一定尺寸和含量时, 碎石就成为影响土石混合体力学性能的重要因

收稿日期: 2012-04-09; 修改日期: 2013-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808027); 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB731502); 新世纪优秀人才资助计划项目(NCET-08-0072)

通讯作者: 季顺迎(1972—), 男, 河北武邑人, 教授, 博士, 博导, 从事颗粒介质力学及工程地质灾害研究(E-mail: jisy@dlut.edu.cn).

作者简介: 邵 帅(1987—), 男, 辽宁普兰店人, 博士生, 从事工程地质灾害的数值模拟研究(E-mail: shaoshuai@mail.dlut.edu.cn).

素, 土石混合体的剪切强度随碎石尺寸的增大和含量的增多而增大。

土石混合体的宏观力学行为在很大程度上依赖于其内部的细观特征(如块石的空间分布及排列方式、块石的形状、块石的粒度、土石之间的相互作用等)^[12-13]。然而, 以往在岩土边坡稳定性的研究中, 为简化地质体模型, 将土石混合体视为一种宏观连续的岩土材料, 采用均质土体近似地模拟土石混合体边坡^[14-16]。由于忽略了其内部的一些细观特征, 这使计算结果产生一定的误差。

在施工过程中, 通过打桩使建筑物有一个稳定且牢固的基础。当采用振动法打桩时, 由于重锤产生的巨大冲击力, 会使周围土体产生强烈的振动, 对附近岩土边坡的稳定性产生不利影响, 是诱发岩土边坡失稳的重要因素之一。目前, 在打桩过程的动力响应研究中, 主要集中于分析桩与桩周土体的相互作用^[17-18]。在打桩作用对边坡稳定性影响方面的研究中, 大多采用均质土体来近似地构造地质体边坡模型, 并未考虑岩土体中块石对计算结果产生的影响^[19-20]。

采用有限元强度折减法进行边坡稳定性分析, 具有无需预先指定滑动面, 可以考虑地质体内部应力场状态, 且在复杂边坡的稳定性分析时具有其他传统分析方法无可比拟的优点。为此, 本文利用有限元强度折减法对土石混合体边坡进行准静态和动态分析。通过土石混合体边坡稳定性的数值模拟, 探讨块石以及块石空间排布对边坡稳定性及剪切带的影响。

1 土石混合体边坡的有限元模型

针对土石混合体边坡在自重状态下和打桩作用下的稳定性, 采用有限元方法进行计算。本文在准静态计算时采用增量有限元方法, 动态计算时采用隐式逐步积分法。将土体单元和块石单元分别赋予对应的岩土力学参数以区分模型中的土体和块石区域。

1.1 增量有限元格式

由于岩土材料具有很强的非线性性质, 其力学行为与加载以及变形历史有关, 因此需要采用增量形式表示岩土材料的本构关系^[21]。

在时间步 $[t_k, t_{k+1}]$ 内, 载荷增量的等效节点力为:

$$\Delta \mathbf{F}^k = \mathbf{F}^{k+1} - \mathbf{F}^k \quad (1)$$

式中, \mathbf{F}^k 和 \mathbf{F}^{k+1} 分别为时刻 t_k 和 t_{k+1} 的外力等效节点力。在时刻 t_{k+1} 时, 结构的位移、应变、塑性应变和应力分别为:

$$\mathbf{u}^{k+1} = \mathbf{u}^k + \Delta \mathbf{u}^k \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{k+1} = \boldsymbol{\varepsilon}^k + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^k \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pk}+1} = \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pk}} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pk}} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^{k+1} = \boldsymbol{\sigma}^k + \Delta \boldsymbol{\sigma}^k \quad (5)$$

在小变形条件下, 应变增量和位移增量满足:

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^k = \mathbf{B} \Delta \mathbf{u}^k \quad (6)$$

式中: \mathbf{B} 为应变矩阵; $\Delta \mathbf{u}^k$ 为 t_k 时刻结构的节点位移增量。

增量本构方程为:

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_{\text{ep}} d\boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{D}_{\text{e}} - \mathbf{D}_{\text{p}}) d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (7)$$

式中: \mathbf{D}_{e} 为弹性矩阵; \mathbf{D}_{p} 为塑性矩阵, 即:

$$\mathbf{D}_{\text{p}} = \frac{\mathbf{D}_{\text{e}} \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)^{\text{T}} \mathbf{D}_{\text{e}}}{\left(\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)^{\text{T}} \mathbf{D}_{\text{e}} \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)} \quad (8)$$

在 t_{k+1} 时刻土体结构的平衡方程为:

$$\int_V \mathbf{B}^{\text{T}} \Delta \boldsymbol{\sigma}^k dV = \mathbf{F}^{k+1} - \int_V \mathbf{B}^{\text{T}} \boldsymbol{\sigma}^k dV \quad (9)$$

通过联合式(6)和式(7), 将应力增量用节点位移增量表示, 然后代入式(9), 平衡方程中的未知量只剩下 $\Delta \mathbf{u}^k$ 。解这个非线性方程组便可得到当前时间步内的位移增量。

1.2 隐式逐步积分过程

目前, 已有多种求解结构动力响应的离散化差分格式, 如中心差分法、Wilson- θ 方法和 Newmark 方法^[22]等。相对于显示积分, 隐式积分可取较大的时间步长。为提高计算效率, 本文采用 Newmark 方法进行土石混合体边坡稳定性的动力分析。

常用的 Newmark 方法的形式为:

$$m\ddot{\mathbf{x}}^{k+1} + c\dot{\mathbf{x}}^{k+1} + k\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{F}^{k+1} \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{x}}^{k+1} = \dot{\mathbf{x}}^k + (1-\delta)\Delta t\ddot{\mathbf{x}}^k + \delta\Delta t\ddot{\mathbf{x}}^{k+1} \quad (11)$$

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \dot{\mathbf{x}}^k \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \alpha \right) (\Delta t)^2 \ddot{\mathbf{x}}^k + \alpha (\Delta t)^2 \ddot{\mathbf{x}}^{k+1} \quad (12)$$

式中, δ 、 α 均为 Newmark 方法的计算参数, 当满足 $\delta \geq 0.5$ 和 $\alpha \geq 0.25(0.5 + \delta)^2$ 时, 计算是无条件稳定的, 通常取 $\delta = 0.5$ 和 $\alpha = 0.25$ 。

将式(11)和式(12)代入式(10), 得到关于 \mathbf{x}^{k+1} 的方程:

$$\bar{\mathbf{K}} \mathbf{x}^{k+1} = \bar{\mathbf{F}} \quad (13)$$

式中, \bar{K} 和 \bar{F} 分别为等效刚度和等效载荷, 即:

$$\bar{K} = \frac{m}{\alpha(\Delta t)^2} + \frac{c\delta}{\alpha\Delta t} + k \quad (14)$$

$$\bar{F} = m \left(\frac{\mathbf{x}^k}{\alpha(\Delta t)^2} + \frac{\dot{\mathbf{x}}^k}{\alpha\Delta t} + \frac{0.5-\alpha}{\alpha} \ddot{\mathbf{x}}^k \right) + c \left(\frac{\delta\mathbf{x}^k}{\alpha\Delta t} + \frac{\delta-\alpha}{\alpha} \dot{\mathbf{x}}^k + \frac{(0.5\delta-\alpha)\Delta t}{\alpha} \ddot{\mathbf{x}}^k \right) + \mathbf{F}^{k+1} \quad (15)$$

将求得的 \mathbf{x}^{k+1} 代入到式(12)和式(11), 可分别得到 $\dot{\mathbf{x}}^{k+1}$ 和 $\ddot{\mathbf{x}}^{k+1}$ 。

在以上土石混合体稳定性的非线性动力分析中, 在一个时间步内采用 Newton-Raphson 方法进行迭代计算^[23]。

1.3 有限元强度折减法

所谓强度折减法就是在有限元计算中将边坡岩土体的抗剪切强度参数逐渐降低直到其达到破坏状态为止。破坏状态一般采用非线性程序是否收敛、塑性区贯通、位移突变性等边坡失稳准则来判断。达到破坏状态的塑性区即为破坏滑动面, 具体计算式为:

$$c' = \frac{c}{F_s} \quad (16)$$

$$\varphi' = \arctan \left(\frac{\tan \varphi}{F_s} \right) \quad (17)$$

式中: F_s 为折减系数; c' 、 φ' 分别为折减后的材料内聚力和内摩擦角。

有限元强度折减法无需事先假定滑裂面的位置及其几何形状, 可直接求出边坡稳定安全系数, 能考虑土体变形对稳定影响^[24]。

2 土石混合体边坡稳定性分析

在土石混合体边坡的准静态和动态计算中, 采用自行开发的有限元程序计算块石空间分布对岩土边坡稳定性的影响。

2.1 土石混合体边坡的计算模型

采用数字图像技术可建立精确的土石混合体边坡模型^[25-26]。为方便建立土石混合体边坡模型, 采用四边形块石分析其对岩土边坡的影响。虽然模型对于土石间相互作用的计算精度相对不高, 但其仍可反映块石对边坡稳定性产生的影响。图 1 为均质土体边坡的有限元计算模型。边坡长 30m, 高 15m, 坡脚 60°。图 1(a)~图 1(e)分别为均质土体和不同块石空间分布的边坡有限元计算模型。三种不

同尺寸的块石随机分布于岩土边坡内部。块石边长分别为 0.83m、1.25m 和 1.67m。A 型至 D 型土石混合体边坡的含石量分别为 11.7%、12.2%、13.5% 和 13.9%。A 型与 B 型土石混合体的差别仅是坡脚处的一个块石位置不同, 如图 1(b)~图 1(c)所示; C 型相对于 A 型土石混合体在坡面附近增加 3 块块石, D 型相对于 A 型土石混合体在边坡内部增加 3 块块石, 以研究块石的不同空间分布对剪切带的影响。

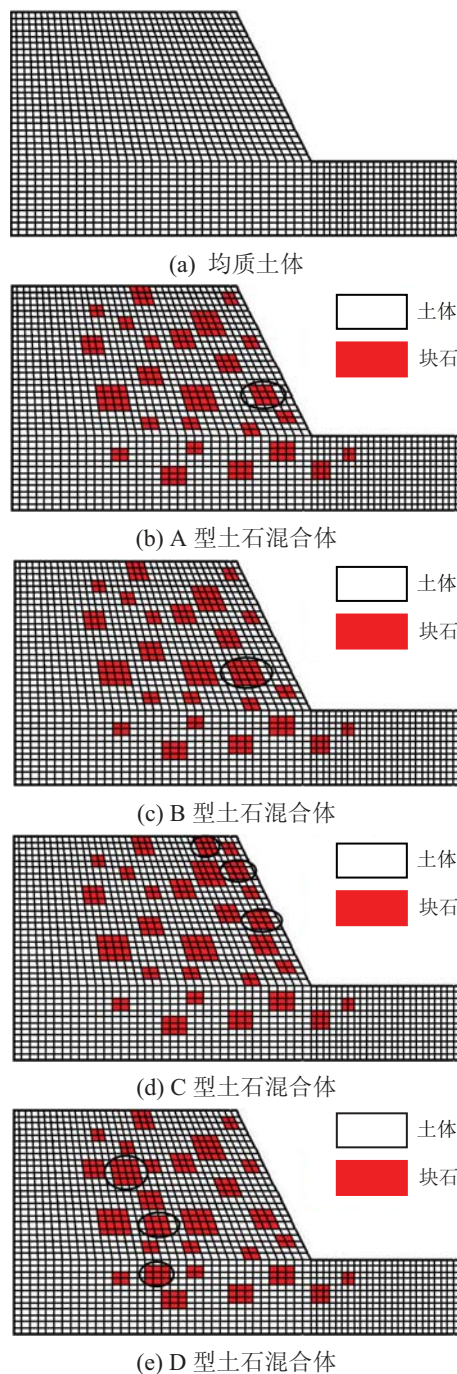


图 1 岩土边坡有限元计算模型

Fig. 1 FEM models of soil and soil-rock-mixture slopes

采用 8 节点四边形单元对土石混合体边坡进行网格划分,单元总数为 1584 个,节点总数为 4945 个。在模型的左右边界采用水平约束,下边界采用水平和垂直约束。岩土边坡中块石和土体的物理力学参数列于表 1 中^[25]。

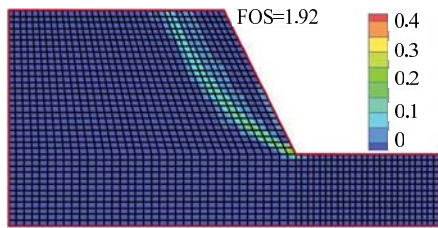
表 1 土石混合体边坡的计算参数

Table 1 Computational parameters of soil-rock-mixture slope

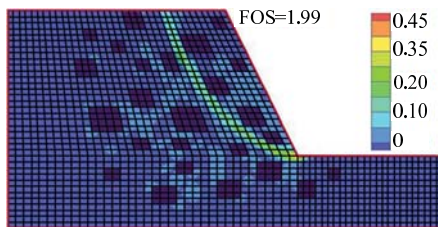
成分	密度/(g/cm ³)	弹性模量/MPa	泊松比	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
土体	1.80	50.0	0.35	30	24
块石	2.41	2e4	0.2	900	42

2.2 自重状态下剪切带的绕石效应及稳定性分析

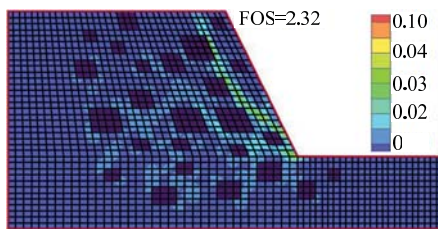
为研究块石以及块石的空间分布对土石混合体边坡的影响,采用有限元强度折减法分别对自重状态下的均质土坡和四种(A型~D型)土石混合体边坡进行稳定性分析,得到边坡塑性应变云图,如图 2 所示。土质边坡内部剪切带较为平滑,由坡脚贯穿至坡顶。A 型、C 型和 D 型土石混合体边坡内



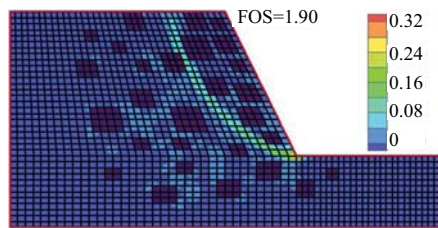
(a) 土质边坡



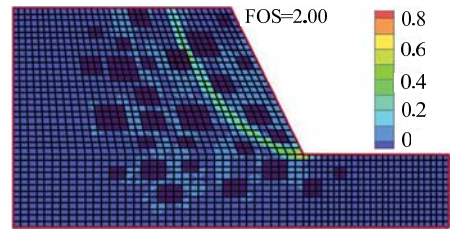
(b) A 型土石混合体边坡



(c) B 型土石混合体边坡



(d) C 型土石混合体边坡



(e) D 型土石混合体边坡

图 2 自重状态下土质边坡(a)与土石混合体边坡(b,c,d,e)的塑性应变云图

Fig.2 Plastic strain contours of soil slope (a) and soil-rock-mixture slopes (b,c,d,e) under gravity

部剪切带沿着块石间的缝隙贯穿地质体,表现出明显的绕石效应。B 型土石混合体边坡内部的剪切带受坡脚处一个尺寸较大块石的影响分裂为两条,此时绕石效应更加显著。

可以看出,块石是影响岩土边坡稳定性的重要因素。不同空间位置的块石对土石混合体边坡的稳定性产生的影响不同。A 型土石混合体边坡相对于土质边坡稳定性有所增加(安全系数由 1.92 升至 1.99)。由于块石材料的强度要远远高于土质材料,在外力载荷作用下,松软的土体首先发生屈服,进入塑性状态,而块石仍然处于弹性阶段。此时,边坡稳定性有所提升。B 型相对于 A 型土石混合体边坡的稳定性再次提高(安全系数由 1.99 升至 2.32)。这是由于 B 型土石混合体边坡在坡脚剪出口处有一块粒径较大的块石阻挡,块石阻碍剪切带贯穿地质体,使得边坡稳定性再次提升。C 型相对于 A 型土石混合体边坡稳定性降低(安全系数由 1.99 降至 1.90)。这是由于 C 型土石混合体在剪切带上方增加了 3 块块石,使剪切面承受更大的下滑力,从而降低了边坡的稳定性。D 型相对于 A 型土石混合体边坡的稳定性大致相同(安全系数由 1.99 变为 2.00)。可以看出,土石混合体边坡的滑体部分受位于剪切带下方的块石影响不大。

综合上述结果,剪切带将土石混合体边坡分为剪切带上部、剪切带处和剪切带下部 3 个区域。位于剪切带上部的块石对边坡稳定性产生不利影响。位于剪切带上的块石可以提高边坡的稳定性。位于剪切带下方的块石对边坡稳定性影响并不显著。

2.3 打桩作用下剪切带的绕石效应及稳定性分析

在动力计算过程中,在边坡顶部施加打桩动荷载。当 $t=0.02s$ 时,有最大荷载峰值 5000kN,冲击过程历时 0.04s^[27]。均质土体边坡塑性应变云图如图 3 所示。动力计算过程中,边坡安全系数随外力

载荷的变化而变化, 这里安全系数取最小值, 即打桩载荷取峰值时对应的安全系数。图 3(a)~图 3(c) 为安全系数为 1.73 时, 均质土体边坡在不同时刻剪切带的贯穿过程。在 $t=0.00s$ 时刻, 由于尚未施加打桩载荷, 边坡受重力作用, 坡脚处首先进入塑性状态, 但此时剪切带还未贯穿边坡, 边坡是稳定的。在 $t=0.01s$ 时刻, 打桩载荷为 2500kN, 坡顶打桩附近区域发生塑性变形, 但并未与坡脚的剪切带连通。在 $t=0.02s$ 时刻, 此时打桩载荷已经达到峰值 5000kN, 剪切带发生连通并贯穿岩土边坡。

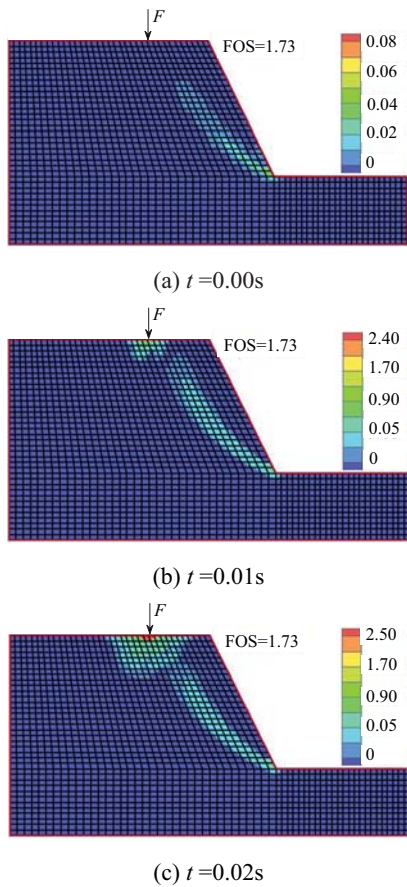


图 3 均质土体边坡塑性应变云图
Fig.3 Plastic strain contours of soil slope

土石混合体边坡剪切带的贯穿过程与均质土体边坡类似, 这里只给出土石混合体边坡在打桩峰值载荷作用时的塑性应变云图, 分析块石对边坡稳定性的影响。

A 型土石混合体边坡在打桩峰值时刻的塑性应变云图如图 4(a)所示。由于块石的影响, 使得剪切带不再光滑, 并且塑性区域沿着块石间的缝隙延伸, 剪切带绕石现象明显。B 型土石混合体边坡在打桩峰值时刻的塑性应变云图如图 4(b)所示。由于受一个较大块石阻挡, 从坡角开始剪切带逐渐分裂

成两条, 此时剪切带的绕石现象更加显著。C 型土石混合体边坡在打桩峰值的塑性应变云图如图 4(c)所示。由于块石的密度高于土体, 使剪切面承受更大的下滑力, 此时相对于 A 型土石混合体边坡 C 型土石混合体边坡的稳定性降低。D 型土石混合体边坡在打桩峰值时刻的塑性应变云图如图 4(d)所示。相对于 A 型土石混合体边坡, D 型土石混合体边坡内部增加的块石对边坡稳定性影响不明显。

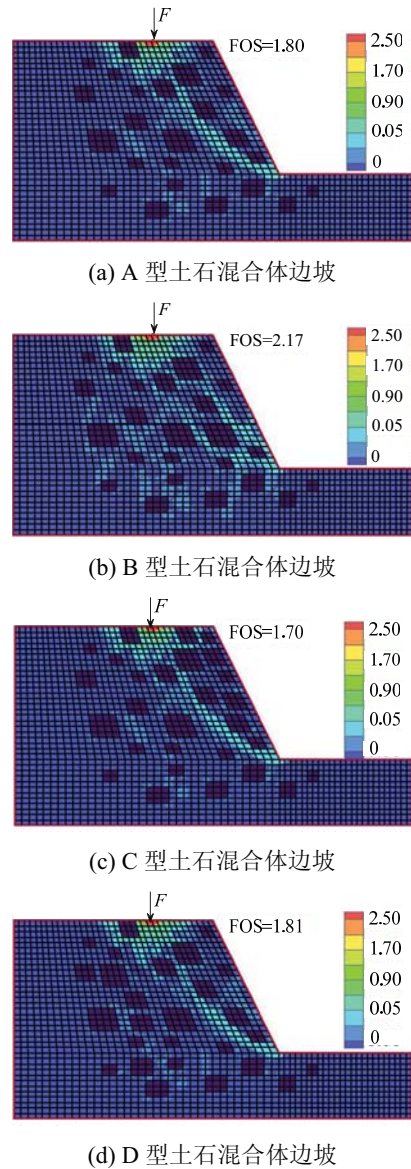


图 4 打桩峰值时土石混合体边坡塑性应变云图
Fig.4 Plastic strain contours of soil-rock-mixture slopes

通过对土石混合体边坡的动态分析, 得到了与准静态计算时的类似结果。安全系数由土质边坡的 1.73 增加到 A 型土石混合体边坡的 1.80 和 B 型的 2.17。C 型土石混合体边坡的安全系数相对于 A 型由 1.80 降至 1.70。D 型土石混合体边坡的安全系数

相对于 A 型变化不大。

综合土石混合体边坡的准静态和动态数值分析结果可发现,块石及其空间排布对地质体边坡稳定性有显著的影响。这主要是由于块石的强度和密度都明显高于土体。位于剪切带上方的块石其高密度对边坡稳定性的影响起主导作用,使剪切面承受更大的下滑力,从而降低边坡的稳定性。位于剪切带上的块石其高强度对边坡稳定性的影响起主导作用,地质边坡内部原本应发生塑性变形的区域由于块石的影响仍处于弹性阶段,使剪切带表现出绕石效应,从而提高地质体边坡的稳定性。剪切带下方的块石对边坡的稳定性影响并不明显。

土石混合体的室内大型直剪试验研究表明,土石混合体内部的滑面随着裂纹扩展逐渐贯穿试样。在贯穿过程中由于土石混合体成分的多样性及非均匀性,破坏面极其不规则,并且土石混合体的破坏形态多数以滑面绕过碎石出现,有时伴随着多条次生裂纹贯穿现象^[28]。这与本文土石混合体边坡的数值分析结果相吻合。

3 结语

采用有限元强度折减法对土石混合体边坡准静态和动态下的稳定性进行了计算。结果表明,块石及其空间排布对土石混合体边坡的剪切带和稳定性都有较大影响。块石的存在使得边坡内部剪切带不再平滑,剪切带表现出绕石效应。土石混合体边坡内部不同位置的块石对边坡的稳定性影响不同。剪切带上方的块石对土石混合体边坡产生不利影响,剪切带上的块石对土石混合体边坡产生有利影响,剪切带下方的块石对土石混合体边坡的稳定性影响不显著。

在以后研究中,将开展块石空间分布对边坡稳定性影响的模型试验研究,并注重开展现场试验的验证。

参考文献:

- [1] 欧阳振华,李世海,戴志胜. 块石对土石混合体力学性能的影响研究[J]. 实验力学, 2010, 25(1): 61—67.
Ouyang Zhenhua, Li Shihai, Dai Zhisheng. On the influence factors of mechanical properties for soil-rock mixture [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1): 61—67. (in Chinese)
- [2] 李晓,廖秋林,赫建明,陈剑. 土石混合体力学特性的原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2377—2384.
- [3] 贾学明,柴贺军,郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2695—2703.
Jia Xueming, Chai Hejun, Zheng Yingren. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2695—2703. (in Chinese)
- [4] 徐文杰,胡瑞林,曾如意. 水下土石混合体的原位大型水平推剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 814—818.
Xu Wenjie, Hu Ruilin, Zeng Ruyi. Research on horizontal push-shear in-situ test of subwater soil-rock mixture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 814—818. (in Chinese)
- [5] Edmund M. Orderly characterization of chaotic franciscan mélanges [J]. Engineering Geology, 2001, 19(4): 20—33.
- [6] 油新华,汤劲松. 土石混合体野外水平推剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1537—1540.
You Xinhua, Tang Jinsong. Research on horizontal push-shear in-situ test of soil and rock-mixture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1537—1540. (in Chinese)
- [7] 陈红旗,黄润秋,林峰. 大型堆积体边坡的空间工程效应研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 323—328.
Chen Hongqi, Huang Runqiu, Lin Feng. Study on the spatial engineering effect of large accumulation slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 323—328. (in Chinese)
- [8] Vallejo L E, Mawby R. Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures [J]. Engineering Geology, 2000, 58(2): 125—136.
- [9] Lindquist E S. The strength and deformation properties of mélange [D]. Berkeley, CA: University of California at Berkeley, 1994.
- [10] Springman S M, Jomm C, Teyssseire P. Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: A case history [J]. Geotechnique, 2003, 53(1): 3—10.
- [11] Xu Wenjie, Xu Qiang, Hu RuiLin. Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(8): 1235—1247. (in Chinese)
- [12] 廖秋林,李晓,郝钊,王思敬,吴硕,赫建明. 土石混合体的研究现状及研究展望[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 800—807.
Liao Qiulin, Li Xiao, Hao Zhao, Wang Sijing, Wu Shuo, Hao Jianming. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates (RSA) [J]. Journal of

- Engineering Geology, 2006, 14(6): 800—807. (in Chinese)
- [13] 董云, 柴贺军. 土石混合料的工程综合分类法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 179—184.
- Dong Yun, Chai Hejun. Study on engineering synthetical classification of rock-soil aggregate mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 179—184. (in Chinese)
- [14] 年廷凯, 栾茂田, 杨庆, 蒋景彩. 基于强度折减弹塑性有限元法德抗滑桩加固边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 558—562.
- Nian Tingkai, Luan Maotian, Yang Qing, Jiang Jingcai. Stability analysis of slope reinforced with piles by using strength reduction FEM [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Suppl): 558—562. (in Chinese)
- [15] Li H J, Dai F C, Li W C, Xu L, Min H. Stability assessment of a slope under a transformer substation using numerical modeling [J]. Bull Eng Geol Environ, 2011, 70(3): 385—394.
- [16] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387—403.
- [17] 王育兴, 孙钧. 打桩施工对周围土性及孔隙水压力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 153—158.
- Wang Yuxing, Sun Jun. Influence of pile driving on properties of soils around pile and pore water pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 153—158. (in Chinese)
- [18] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 431—436.
- Hu Zhongxiong. Soil mechanics and environmental geotechnics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997: 431—436. (in Chinese)
- [19] 陈永辉, 王新泉, 周星德, 桂炎德. 应用无限地基方法研究打桩振动对海堤的影响[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 226—231.
- Chen Yonghui, Wang Xinquan, Zhou Xingde, Gui Yande. Determination of impact of pile driving vibration on seawall by infinite foundation method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 226—231. (in Chinese)
- [20] Ausilio E, Conte E, Dente G. Stability analysis of slopes reinforced with piles [J]. Computers and Geotechnics, 2001, 8(28): 591—611.
- [21] 凌道盛, 徐兴. 非线性有限元及程序[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004: 195—196.
- Ling Daosheng, Xu Xing. Nonlinear finite element and procedures [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2004: 195—196. (in Chinese)
- [22] Newmark N M. A method of computation for structural dynamics [J]. Journal American Society of Civil Engineers, 1959, 85(EM3): 69—94.
- [23] Benjamin W. Viscous nonlinearity in central difference and Newmark integration schemes [J]. Acta Mech, 2010, 209(3/4): 179—186.
- [24] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 58—61.
- Zheng Yingren, Zhao Shangyi, Zhang Luyu. Slope stability analysis by strength reduction FEM [J]. Engineering Science, 2002, 4(10): 58—61. (in Chinese)
- [25] 徐文杰, 王玉杰, 陈祖煜, 胡瑞林. 基于数字图像技术的土石混合体边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 28(增刊): 341—346.
- Xu Wenjie, Wang Yujie, Chen Zuyu, Hu Ruilin. Stability analysis of soil-rock mixed slope based on digital image technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 28(Suppl): 341—346. (in Chinese)
- [26] Xu W J, Yue Z Q, Hu R L. Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45(5): 749—762.
- [27] 陈云敏, 凌道盛, 周承涛. 打桩振动近场波动的数值分析和实测比较[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 178—184.
- Chen Yunmin, Ling Daosheng, Zhou Chengtao. Numerical analysis and test of pile driving vibration [J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(2): 178—184. (in Chinese)
- [28] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 曾如意, 于火青. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1270—1277.
- Xu Wenjie, Hu Ruilin, Tan Rujiao, Zeng Ruyi, Yu Huoqing. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of longpan in tiger-leaping gorge area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1270—1277. (in Chinese)