

DOI: 10.11779/CJGE202208022

转弯凸型边坡静动力稳定性分析及空间效应研究

张 飞^{1, 2}, 林立曜^{1, 2}, 舒 爽^{1, 2}, 杨尚川³, 高玉峰^{*1, 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210024;

3. 西南交通大学高速铁路路线工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 山区受地形影响建有大量转弯路基边坡, 其失稳呈显著的空间特性, 传统的边坡稳定分析方法大都基于二维平面应变条件, 难以真实反映滑坡三维空间特征。基于变分理论的极限平衡法开展了转弯凸型边坡三维稳定性分析, 结合拟静力法分析地震作用下边坡动力稳定性, 并确定转弯边坡的最危险滑裂面位置。通过与其他方法计算结果对比, 表明这一理论获得了转弯边坡更为临界的稳定性。通过考虑不同边坡转弯外凸参数(如转弯角、转弯半径、坡度)和水平地震加速度系数, 揭示了三维效应对转弯凸型边坡稳定性的影响规律。结果表明: 较小的转弯角就可以充分发挥三维效应, 增大了边坡静动力稳定性; 减小转弯半径会显著增强三维效应, 并增加最危险滑裂面深度, 但对较大的坡度和水平地震加速度情况并不明显, 此时可以忽略三维效应采用传统的平面应变分析方法。

关键词: 边坡; 三维分析; 极限平衡; 空间效应; 拟静力法

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)08-1558-09

作者简介: 张 飞(1985—), 江苏南京人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事边坡工程及加固技术方面的研究工作。E-mail: feizhang@hhu.edu.cn。

3D effects on static and dynamic stability of convex curved slopes

ZHANG Fei^{1, 2}, LIN Li-yao^{1, 2}, SHU Shuang^{1, 2}, YANG Shang-chuan³, GAO Yu-feng^{*1, 2}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024,

China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Key Laboratory

of High-Speed Railway Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: There are numerous curved slopes adjacent to mountainous terrain. Their failures have significant three-dimensional (3D) characteristics. The traditional analyses of slope stability are based on two-dimensional plane-strain conditions and cannot involve the 3D effects. In this study, 3D stability analysis of curved slopes is carried out based on the limit equilibrium method of variational theory. The pseudo-static method is used to assess the 3D stability of the curved slopes subjected to the earthquakes. The critical slip surfaces are also determined by the optimization procedure. The results are compared with those calculated by other methods, indicating that the proposed method can obtain more critical solutions on the 3D stability of curved slopes. The geometrical parameters of the slopes (e.g., curving angle, curving radius, slope angle) and the horizontal seismic acceleration coefficients are considered to investigate the influences of the 3D effects on the slope stability. The results demonstrate that the 3D effects can be completely provided for a slope with a small curving angle to increase the safety of the slope, and reducing the curving radius can significantly enhance the 3D effects and enlarge the depth of the critical slip surface, whereas it is not pronounced for the slopes with large angles and horizontal seismic acceleration. In this situation, the traditional plane strain analysis can be adopted neglecting the 3D effects.

Key words: slope; three-dimensional analysis; limit equilibrium; spatial effect; pseudo-static method

0 引 言

随着中国“交通强国”战略推进, 复杂艰险的山区拟建和在建有大量公路、铁路、机场等基础设施。在地形变化复杂的路段, 直线路线难以与地形相协调并显著增加工程费用。因此在路线遇到障碍或因地形需要而改变方向时, 通常会将其设置为弯曲形态与地

形相适应。这样, 山区复杂地形下路线设计会产生转弯外形的边坡, 如公路路堤边坡、铁路路堤边坡以及

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078185, 51878248); 中央高校基本科研业务费项目(B220202013)

收稿日期: 2021-09-03

***通信作者** (E-mail: yfgao66@163.com)

机场跑道路堤边坡。西南山区地震频发, 边坡极易发生滑坡事故, 中断交通。因此, 有必要开展静动力条件下转弯边坡稳定性分析, 为实际工程的安全设计与评价提供指导。

转弯边坡具有显著的空间特征, 需要在三维条件下开展稳定性分析。目前, 三维边坡稳定性分析方法主要有极限平衡法^[1-4]、极限分析法^[5-6]、数值分析法^[7-10]等。传统的极限平衡法分析三维边坡稳定性需要假定三维滑动面为特定形状(如球面和椭球面)再进行条柱划分、建立土柱静力平衡方程, 通过土柱间受力情况引入一假设条件使得平衡方程静定可解, 从而形成三维边坡稳定性分析方法。王家臣等^[1]、Cheng 等^[2]、李列列^[3]、卢坤林等^[4]应用这些方法对转弯边坡稳定性开展了研究。极限分析上限法分析三维边坡稳定性, 需要构建运动许可的速度场(即三维滑动面形状), 通过功率平衡确定三维边坡稳定性的最小上限解。Giger 等^[11]基于极限分析上限理论假设了对数螺旋滑动面形状分析了转弯直立边坡稳定性, 但其转弯模型仅限一固定的转折角度。同样, Farzaneh 等^[5]假设一平动破坏机制分析了转弯边坡稳定性, 并给出了转弯有外凸圆弧面形式的稳定性结果。赵衡等^[6]构建了圆形凸坡在轴对称条件下的破坏机制, 建立了纯黏性土圆形凸坡稳定性极限分析方法。Leshchinsky 等^[12]提出了基于变分理论的边坡稳定性极限平衡分析法, 通过严格数学方法导出的三维边坡破坏面为广义对数螺旋面, 并证明该方法等同于极限分析上限理论^[12-13], 更重要的是该方法可以用于分析复杂外形的三维边坡稳定性, 如外凸转角型^[14-15]、圆锥型^[16]。

坡面形态对边坡稳定性有较大影响, 平直边坡可以采用传统的二维平面应变分析方法, 凹凸型边坡就需要开展三维稳定性分析。已有研究结果^[7-10, 17]表明内凹型边坡三维安全系数总是大于二维安全系数, 但外凸边坡三维与二维稳定安全系数关系尚有不同结论。这是由于凸型边坡分析模型和假设存在差异, 大部分研究对象为圆形凸坡, 考虑其轴对称特征假定破坏沿径向滑动。对于土体内摩擦角为 0 时, 赵衡等^[6]得出坡度较缓凸坡三维安全系数大于二维安全系数, 陡坡则相反; 对于土体内摩擦角大于 0 时, 卢坤林等^[4]发现凸坡三维安全系数总是小于二维安全系数。若假定圆形凸坡破坏沿同一方向滑动时^[5, 16], 则凸坡三维安全系数大于二维安全系数。此外, 一些三维数值分析结果^[8, 10]表明, 边界条件也会影响外凸边坡三维与二维稳定安全系数关系。

实际转弯凸型边坡大多由圆弧曲面和平直面组合而成, 这样不是空间轴对称问题, 已有研究的分析

方法^[1, 4, 6]难以采用。本文将运用基于变分理论的极限平衡法针对这类转弯外凸型边坡开展三维稳定性分析, 结合拟静力法研究其地震条件下动力稳定性, 进一步探究转弯引起的空间效应对三维边坡稳定性的影响规律。

1 三维分析模型与破坏机制

图 1 给出一个转弯边坡三维分析模型, 边坡坡顶水平, 斜坡倾斜角度为 i 、坡高为 H 。整个转弯边坡由两部分构成: 第一部分为以 O 点为圆心, 圆心角为 θ 的圆弧形弯曲边坡, 由坡脚位置半径 R 的圆弧和坡肩半径 R' 的同心圆弧组成, 如图 1 (b) 中区域 I 所示; 第二部分为与圆弧形弯曲边坡相接的长直边坡, 轮廓由与坡肩、坡脚圆弧相切的直线延伸而成, 如图 1 (b) 中区域 II 所示。当转弯角 $\theta = 0^\circ$ 时, 边坡没有弯曲部分, 即为长直边坡, 此时就是二维边坡情况; 当转弯角 $\theta = 180^\circ$ 时, 边坡为 U 形转弯边坡。

为了分析静动力条件下转弯边坡的三维稳定性, 有以下 5 点假设: ①整个边坡土体为均质、各向同性; ②转弯边坡外形对称, 则滑动方向统一沿对称中心面; ③潜在的三维滑动面通过坡脚, 不发生深层滑动; ④土体强度采用莫尔库仑破坏准则; ⑤仅考虑水平方向地震作用, 且作用方向与对称中心面平行, 忽略了竖向和侧向地震作用。

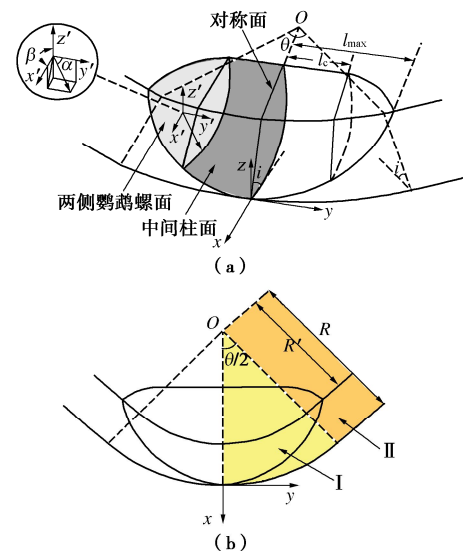


图 1 转弯边坡三维分析模型及其俯视图

Fig. 1 Three-dimensional analysis model for a convex curved slope and its top view

Leshchinsky 等^[12, 18]针对三维均质边坡稳定问题采用变分理论确定了最小安全系数及其最危险滑动面, 该破坏机制形状类似“鹦鹉螺”面(图 1 (a)), 在笛卡尔坐标系下的滑面上任意位置 (x_1, y_1, z_1) 的

表达式为

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_c + A \exp(-\psi_m \beta) \sin^2 \alpha \sin \beta, \\ y_1 &= y_c + A \exp(-\psi_m \beta) \sin \alpha \cos \alpha, \\ z_1 &= z_c + A \exp(-\psi_m \beta) \sin^2 \alpha \cos \beta. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 A 为对数螺旋面的初始半径; $\psi_m = \tan \varphi_m = \tan(\varphi)/F_s$ (其中, φ 为土体内摩擦角, F_s 为安全系数); (x_c, y_c, z_c) 为三维滑动面的转动中心; α 为球面坐标系中滑面与 y' 轴正向的夹角, β 为球面坐标系中滑面对 $x'-y'$ 平面投影后与 z' 轴正向的夹角。

为了保证三维边坡宽度很大时, 边坡稳定性趋于平面应变情况, 参照文献[18], 在滑动面中间设置一定宽度的柱面体, 该柱面体的横截面即为对数螺旋线, 这样在笛卡尔坐标系下的该柱面体滑面上任意位置 (x_2, y_2, z_2) 为

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_c + A \exp(-\psi_m \beta) \sin \beta, \\ y_2 &= y_c + A \exp(-\psi_m \beta) \cos \alpha / \sin \alpha, \\ z_2 &= z_c + A \exp(-\psi_m \beta) \cos \beta. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

本文将采用该三维转动破坏机制对转弯边坡进行三维稳定性分析, 确定其最危险破坏面。

2 稳定性计算方法与验证

基于极限平衡-变分理论^[12]获得的均质边坡三维转动破坏机制, 建立该机制下的力矩平衡就可以计算三维边坡稳定性。对于上述分析模型, 滑动力矩仅需考虑滑动土体自身重力、水平地震惯性力产生的力矩, 抗滑力矩由滑动面上土体法向支撑力、土体抗剪强度产生剪切力的力矩。由于对数螺旋滑动面上土体单元的法向力和剪切力的摩擦分量共同产生的合力通过转动中心, 故抗滑力矩只需考虑土体抗剪强度黏聚力分量对应的力矩。考虑本文分析模型的对称性, 这里以对称中心面的一半模型进行计算。

为了计算三维滑动土体自重产生的力矩, 运用微分思路将整个滑动体分为若干土柱单元, 以土柱单元在 $x-y$ 平面的投影面积 $dx dy$ 为横截面积、土柱底部的滑动面与顶部坡面的竖向距离为高, 考虑三维滑动体由两个部分组成, 可以分别计算重力产生的力矩: 侧端“鹦鹉螺”部分滑动土体自重力矩为 $\gamma \iint_{D_1} M_{12} dx dy$

其中,

$$M_{12} = \left[A \exp(-\psi_m \beta) \sin^2 \alpha \cos \beta - (\bar{Z} - z_c) \right] \cdot \exp(-\psi_m \beta) \sin^2 \alpha \sin \beta, \quad (3)$$

式中, $Z = \bar{Z}(x, y)$ 为转弯边坡坡面空间表达式, 详见附录I。中间柱面体部分滑动土体自重力矩为 $\gamma \iint_{D_2} M_{22} dx dy$, 其中,

$$M_{22} = \left[A \exp(-\psi_m \beta) \cos \beta - (\bar{Z} - z_c) \right] \cdot \exp(-\psi_m \beta) \sin \beta. \quad (4)$$

采用传统的拟静力法对三维转弯边坡进行地震稳定性分析, 只考虑水平方向地震力、且作用方向与滑动面对称中心面平行, 同样划分土柱单元并将地震作用简化的水平惯性力作用在柱体中心处 (即土柱高度 1/2 处), 就可以计算水平地震加速度系数 k_h 下地震力矩。

侧端“鹦鹉螺”部分滑动土体受到的地震力矩为 $k_h \gamma \iint_{D_1} M_{1s} dx dy$, 其中,

$$M_{1s} = -(\bar{Z} - z_1) \cdot \frac{\bar{Z} - z_c + A \exp(-\psi_m \beta) \sin^2 \alpha \cos \beta}{2}. \quad (5)$$

中间柱面体部分滑动土体受到的地震力矩为 $k_h \gamma \iint_{D_2} M_{2s} dx dy$, 其中,

$$M_{2s} = -(\bar{Z} - z_2) \cdot \frac{\bar{Z} - z_c + A \exp(-\psi_m \beta) \cos \beta}{2}. \quad (6)$$

土体抗剪强度黏聚力分量产生的力矩同样运用微分思想进行计算, 将三维滑动面划分为若干个微小滑面单元, 黏聚力 c_m 作用的微元滑面面积乘以该滑面到转动中心距离即可计算黏聚力产生的抗滑力矩。

侧端“鹦鹉螺”部分滑动土体黏聚力产生的抗滑力矩为 $c_m \iint_{D_1} M_{11} dx dy$, 其中,

$$M_{11} = \frac{\exp(-\psi_m \beta) \sin^2 \alpha}{(\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \cos \beta + \psi_m \sin \beta}. \quad (7)$$

中间柱面体部分滑动土体黏聚力产生的抗滑力矩为 $c_m \iint_{D_2} M_{21} dx dy$, 其中,

$$M_{21} = \frac{\exp(-\psi_m \beta)}{\psi_m \sin \beta - \cos \beta}. \quad (8)$$

将由式 (3) ~ (8) 得到的滑动力矩和抗滑力矩进行力矩平衡, 表达式如下:

$$\begin{aligned} M &= \left(\gamma \iint_{D_1} M_{12} dx dy + \gamma \iint_{D_2} M_{22} dx dy \right) + \\ & k_h \left(\gamma \iint_{D_1} M_{1s} dx dy + \gamma \iint_{D_2} M_{2s} dx dy \right) - \\ & c_m \left(\iint_{D_1} M_{11} dx dy + \iint_{D_2} M_{21} dx dy \right) = 0. \quad (9) \end{aligned}$$

参照 Taylor^[19]提出的稳定数 N_s 进行边坡稳定性评价, 即 $N_s = \gamma H / c_m$ 。根据力矩平衡方程可获得其计算表达式:

$$N_s = \frac{\gamma H}{c_m} =$$

$$\frac{H \left(\iint_{D_1} M_{11} dx dy + \iint_{D_2} M_{21} dx dy \right)}{\left(\iint_{D_1} M_{12} dx dy + \iint_{D_2} M_{22} dx dy \right) + k_h \left(\iint_{D_1} M_{1s} dx dy + \iint_{D_2} M_{2s} dx dy \right)} \quad (10)$$

对一组给定的转弯边坡参数: 坡度 i 、转弯角 θ 、转弯半径 R 、土体设计内摩擦角 φ_m 、水平地震加速度系数 k_h , 对未知的滑动面位置参数 (对数螺旋面的初始半径 A , 转动中心坐标 x_c, y_c, z_c) 进行搜索, 获得稳定数的最小值, 即

$$N_s = \min_{z(x,y) \leq Z(x,y)} f(A, x_c, y_c, z_c | i, \theta, R, \varphi_m, k_h). \quad (11)$$

通过优化计算获得稳定数, 同时就可以确定相应的最危险滑动面位置。此外, 对安全系数进行迭代计算就可以确定 F_s 的最小值。

为了验证本文所提出转弯边坡三维稳定性分析方法的有效性, 将分析模型参数退化到平面应变下的二维模型, 与对应的二维计算结果^[14]对比。当转弯半径与坡高的比值 R/H 趋于无穷大或转弯角 $\theta = 0^\circ$ 时, 三维转弯边坡就退化为简单的二维情况, 这里在三维分析中分别选取 $R/H = 1 \times 10^{14}$, $\theta = 0^\circ$ 进行计算。图 2 对比了本文计算的三维结果与文献^[14]中给出的二维结果, 两者结果十分接近, 仅在坡度较小且土体设计内摩擦角较小时产生了一定误差, 这是由于此时地震边坡最危险滑动面为穿过坡脚以下的深层滑动, 而本文分析模型假设滑动面仅穿过坡脚。

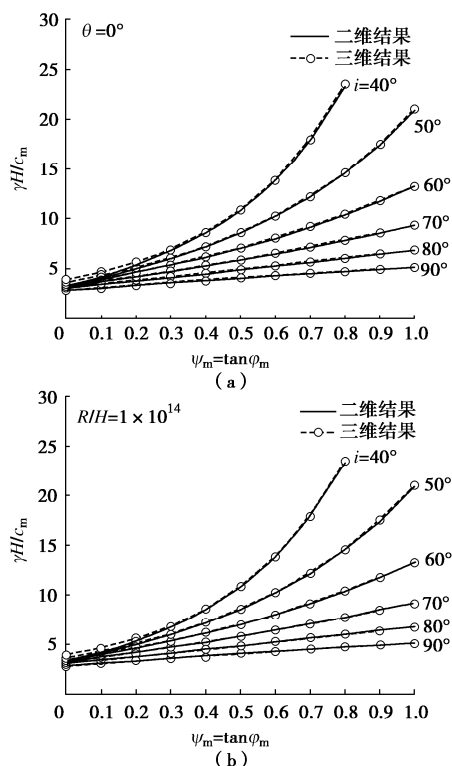


图 2 转弯边坡分析方法有效性验证 ($k_h = 0.3$)

Fig. 2 Validity of analysis method for convex curved slopes ($k_h = 0.3$)

针对本文分析的转弯边坡模型, 下面将本文方法与文献^[5, 8]其他方法计算的结果进行对比分析。Farzaneh 等^[5]采用基于平动机制的极限分析上限法获得了平顶圆锥边坡模型的三维分析与二维分析的安全系数比值 (图 3), 运用本文分析方法采用转弯角 $\theta = 360^\circ$ 就可以对同一模型进行计算, 这里的二维分析结果与 Farzaneh 等^[5]同样采用对数螺旋线滑动面确定。由于本文所采用的变分-极限平衡法与极限分析上限法等价^[12-13], 所以本文所采用的三维转动破坏机制较平动机制更危险。表 1 对比了本文方法与 Zhang 等^[8]采用 FLAC 数值分析计算获得的安全系数, 发现本文求得的安全系数与数值结果基本一致。

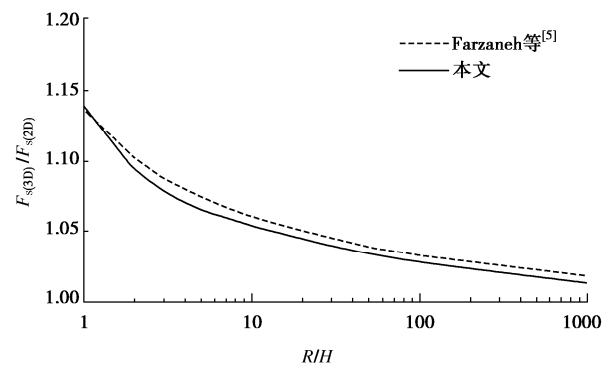


图 3 本文与极限分析法^[5]计算结果对比

Fig. 3 Comparison between proposed method and limit analysis method^[5]

3 结果分析

根据转弯边坡分析模型, 重点研究其几何参数 (坡度 i 、转弯角 θ 和转弯半径 R) 对地震边坡稳定性的影响, 其中地震条件考虑了水平地震加速度系数 $k_h = 0.1, 0.2, 0.3$, 以及静力条件 ($k_h = 0.0$)。

图 4, 5 分别给出坡度 $i = 45^\circ, 90^\circ$ 的转弯边坡在不同转弯半径与坡高的比值 $R/H = 1, 5, 50, 1000$ 下, 转弯角 θ 对地震稳定性的影响, 稳定数 N_s 随地震加速度系数增大, 土体设计内摩擦角减小而显著减小。当 $\theta = 0^\circ$ 时转弯边坡退化为二维情况, 此时没有空间效应作用稳定性最低导致稳定数 N_s 最小; 由于空间效应影响, 稳定数随转弯角增加而增大, 但 θ 增加到临界值 θ_{cr} (大致 $5^\circ \sim 20^\circ$) 时, 稳定数就保持为常数, 表明此时边坡稳定性与转弯角无关, 三维效应对地震边坡稳定性充分发挥了作用。临界转弯角 θ_{cr} 随转弯半径与坡高的比值 R/H 增大而减小, 与土体设计内摩擦角、水平地震加速度系数几乎无关。对于坡度 $i = 45^\circ$ 转弯边坡的 $R/H = 1$ 时, 临界转弯角 θ_{cr} 相比其他情况出现显著增大, 可达 $90^\circ \sim 120^\circ$ 。

表 1 本文与 Zhang 等^[8]计算安全系数的对比
Table 1 Comparison of F_s calculated by proposed method and Zhang et al.^[8]

算例	参数					本文	Zhang 等 ^[8]
	$c/\gamma H$	$\varphi /(^{\circ})$	$i /(^{\circ})$	$\theta /(^{\circ})$	R/H		
1	0.278	20	90	180	2.00	1.56	1.63
2	0.167	20	45	180	2.33	1.89	1.89
3	0.167	20	45	90	2.00	1.92	1.90

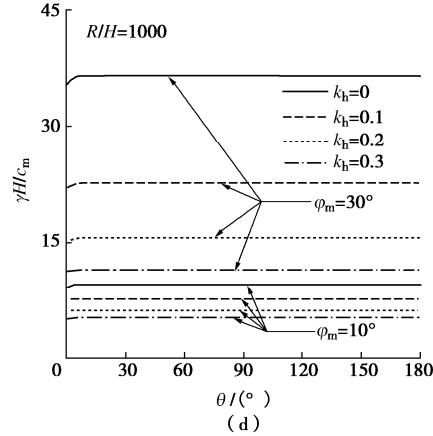
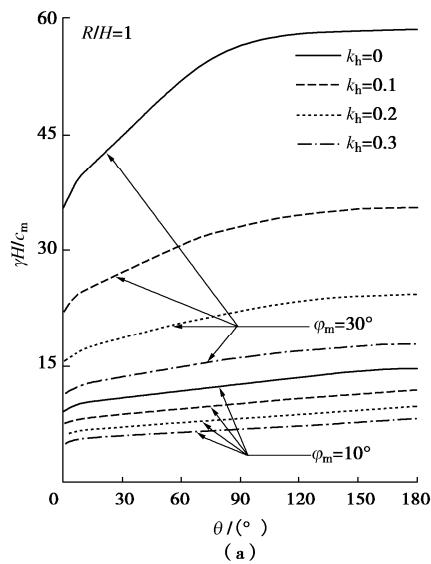
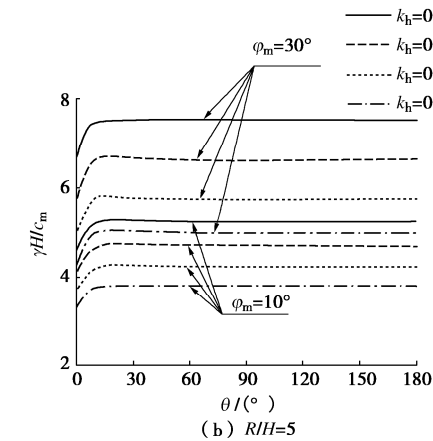
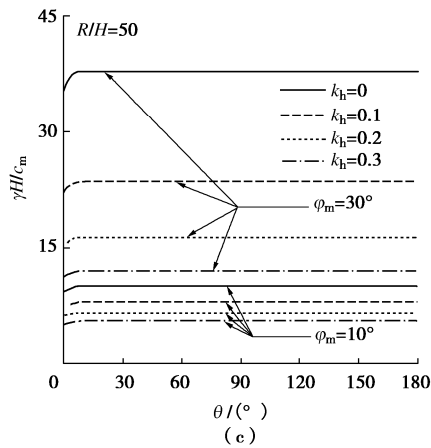
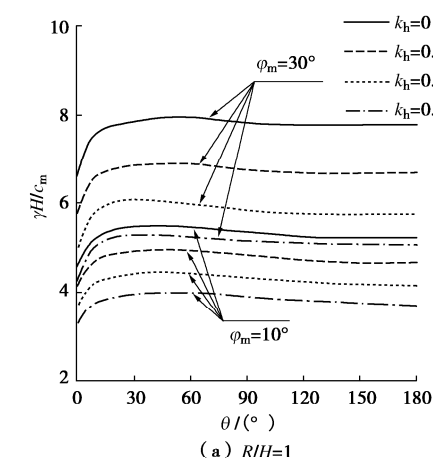
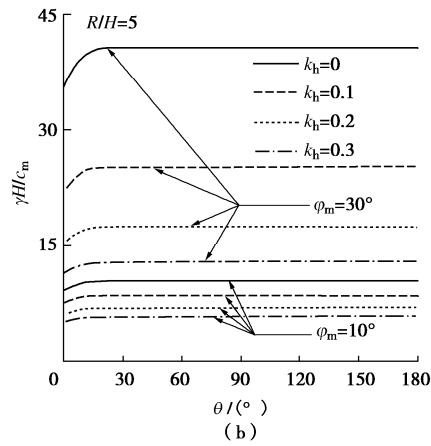


图 4 静动力条件下转弯角 θ 对稳定数 N_s 的影响 ($i = 45^{\circ}$)
Fig. 4 Effects of θ on N_s under static and dynamic conditions ($i = 45^{\circ}$)



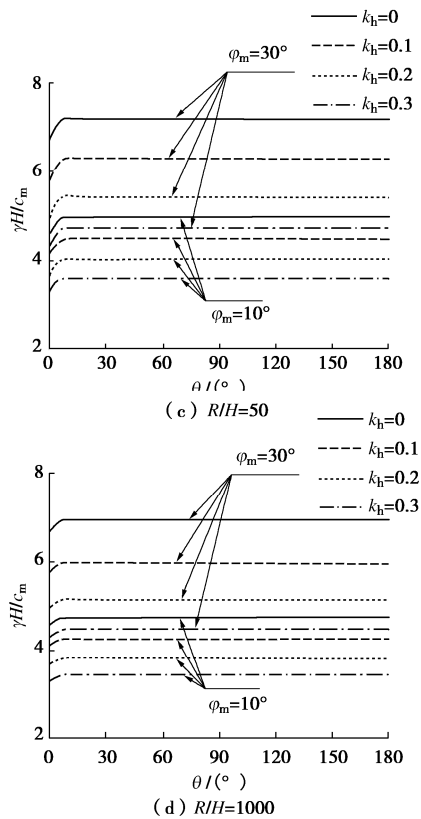


图5 静动力条件下转弯角 θ 对稳定数 N_s 的影响 ($i = 90^\circ$)

Fig. 5 Effects of θ on N_s under static and dynamic conditions ($i = 90^\circ$)

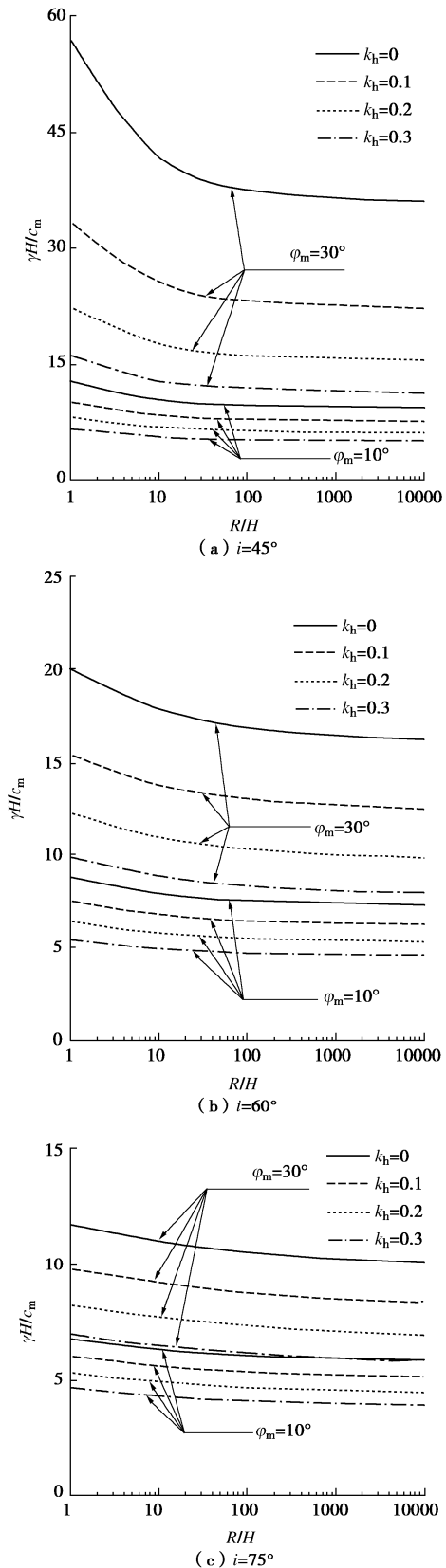
图6给出了4种坡度 $i = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 的转弯边坡地震稳定数随转弯半径与坡高的比值 R/H 的变化, 结合前文分析的转弯角影响规律, 考虑充分发挥三维效应选取 $\theta = 90^\circ$ 。转弯边坡地震稳定数 N_s 随 R/H 增加而逐渐减小, 边坡稳定性降低, 当 $R/H = 10000$ 时边坡处于近似平面应变下的二维情况, 此时稳定数最小、稳定分析可以不考虑空间效应。对于较缓边坡 ($i = 45^\circ, 60^\circ$) 在 $R/H < 20$ 时, 稳定数随 R/H 增加而迅速减小, 表明此时转弯半径对边坡稳定性影响较大, 其影响程度随地震加速度增大而减弱; 对于较陡边坡 ($i = 75^\circ, 90^\circ$), 转弯半径对边坡稳定数影响较弱, 此时可以忽略空间效应采用平面应变的二维方法分析转弯边坡稳定性。

4 边坡稳定性的三维效应

本文分析模型假设三维滑动方向统一沿对称中心面, 计算得到的转弯外凸边坡的三维稳定性结果总是大于二维结果。为了进一步探明三维空间效应对转弯外凸型边坡稳定性的影响规律, 将三维分析的稳定数与二维分析结果进行对比定义三维效应影响系数 η , 表达式为

$$\eta = \frac{N_s^{3D} - N_s^{2D}}{N_s^{2D}} \times 100\% \quad , \quad (12)$$

式中, N_s^{3D} 为三维分析的稳定数, 这里取转弯角 $\theta = 90^\circ$, N_s^{2D} 为二维分析的稳定数。



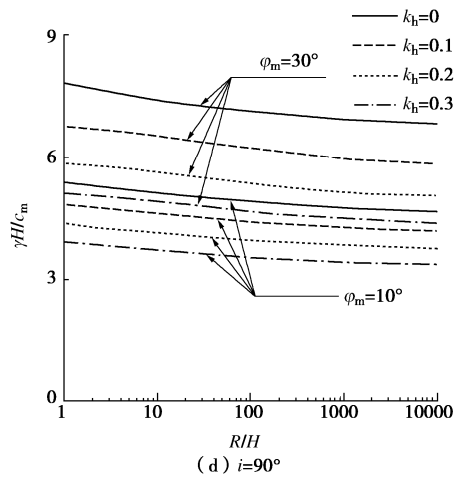


图 6 静动力条件下转弯半径与坡高的比值 R/H 对稳定数 N_s 的影响 ($\theta = 90^\circ$)

Fig. 6 Effects of R/H on N_s under static and dynamic conditions ($\theta = 90^\circ$)

表 2, 3 分别给出了坡度 $i = 45^\circ$, 90° 转弯边坡的三维效应影响系数 η 结果, 可见转弯半径对三维边坡稳定性影响最大, 坡度、土体设计内摩擦角、地震加速度系数的影响较小。当转弯半径与坡高的比值 $R/H > 50$ 时系数 η 大致为 5%, 此时可以忽略三维效应影响采用二维分析方法评估转弯边坡稳定性; 当转弯半径与坡高的比值 $R/H < 50$ 时, 三维效应对转弯边坡稳定性影响愈发显著, 尤其对于较缓的 $i = 45^\circ$ 转弯边坡, 在 $R/H = 1$ 时系数 η 甚至超过 50%, 此时十分有必要考虑三维效应采用三维稳定性分析方法评估转弯边坡稳定性。

表 2 坡度 $i = 45^\circ$ 转弯边坡的三维效应影响系数 η

Table 2 Influence coefficient of three-dimensional effect η of slope with angle $i = 45^\circ$ (%)

$\varphi_m / (^\circ)$	k_h	R/H			
		1	5	50	1000
10	0.0	58.85	11.80	5.06	2.09
	0.1	58.77	11.54	5.14	1.90
	0.2	60.01	12.69	5.52	2.09
	0.3	61.89	15.11	6.21	2.42
30	0.0	64.62	14.58	6.40	2.47
	0.1	61.01	13.93	6.36	2.48
	0.2	59.35	14.48	6.55	2.54
	0.3	59.00	14.18	6.54	2.65

表 3 坡度 $i = 90^\circ$ 转弯边坡的三维效应影响系数 η

Table 3 Influence coefficient of three-dimensional effect η of the slope with angle $i = 90^\circ$ (%)

$\varphi_m / (^\circ)$	k_h	R/H			
		1	5	50	1000
10	0.0	13.87	13.85	8.16	3.33
	0.1	13.43	14.20	8.47	3.49
	0.2	12.81	14.38	8.69	3.61
	0.3	12.14	14.32	8.78	3.66
30	0.0	16.25	12.02	7.49	3.61
	0.1	16.58	15.67	9.32	3.87
	0.2	16.62	15.98	9.80	4.12
	0.3	18.53	16.42	10.18	4.34

图 7 体现了转弯半径对边坡最危险滑裂面的影响, 仅给出了三维分析获得的对称中心面上滑裂面位置, 可见三维滑裂面随转弯半径减小而逐渐加深, 尤其对于土体内摩擦角较小情况。因此, 对于转弯半径较小的边坡进行加固设计时, 建议采用三维分析方法保证边坡安全。图 8 给出了水平地震加速度系数对转弯边坡三维最危险滑裂面的影响, 从俯视角度的三维滑裂面位置可以看出: 转弯边坡三维滑裂面随水平地震加速度增大, 土体内摩擦角减小而逐渐加深, 且宽度增大。

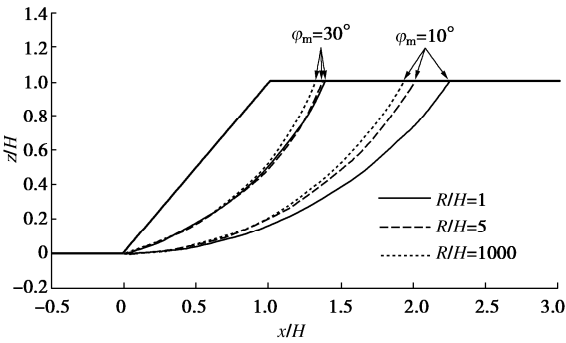


图 7 不同转弯半径下地震边坡的最危险滑裂面位置 ($k_h = 0.2$, $i = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$)

Fig. 7 Locations of critical slip surface of seismic slope under different curving radii ($k_h = 0.2$, $i = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$)

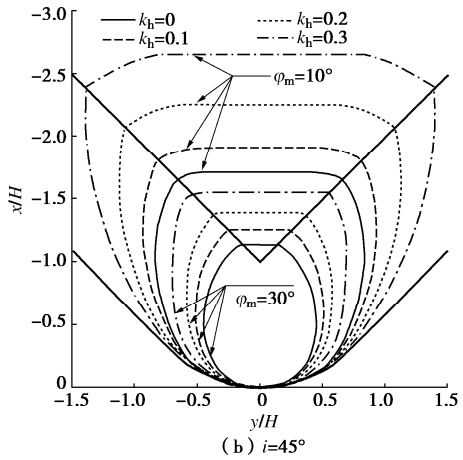
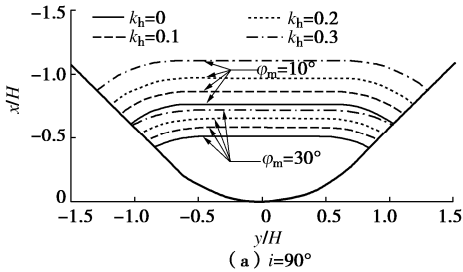


图 8 不同水平地震加速度下转弯边坡 ($\theta = 90^\circ$, $R/H = 1$) 的最危险滑裂面位置

Fig. 8 Locations of critical slip surface ($\theta = 90^\circ$, $R/H = 1$) under different horizontal seismic accelerations

5 结 论

本文基于极限平衡-变分理论建立了转弯外凸型边坡三维稳定性分析方法, 结合拟静力法开展了地震稳定性分析研究, 通过参数分析揭示了三维效应对转弯边坡稳定性的影响规律, 获得了以下3点结论。

(1) 转弯角 θ 的增大使得三维效应更为显著, 提高了转弯边坡静动力稳定性, 但较小的转弯角 (约 $5^\circ \sim 20^\circ$) 就可以充分发挥三维效应, 再增大转弯角对边坡稳定性几乎没有影响。

(2) 转弯半径 R 越大, 三维效应对边坡稳定性影响越小, 逐渐趋于平面应变条件。同时转弯半径对边坡稳定性的影响程度随着坡度增大、水平地震加速度系数增大而减小, 对于陡坡可以忽略转弯产生的三维效应。

(3) 转弯边坡的最危险三维滑裂面随转弯半径 R 减小而逐渐加深, 尤其对于土体内摩擦角较小、水平地震加速度系数较大的情况, 这样采用传统的二维分析方法对转弯半径较小的边坡进行加固设计可能会产生危险。

考虑山区转弯边坡多为填方工程, 本文研究仅限于均质土体, 没有考虑成层土体情况。后续可以参照 Leshchinsky 等^[20]将本文研究拓展到成层情况, 应用于实际工程。

参考文献:

- [1] 王家臣, 杜竞中. 水平凸型边坡破坏分析[J]. 中国矿业大学学报, 1992, **21**(2): 102 - 108. (WANG Jia-chen, DU Jing-zhong. The failure analysis of horizontal convex earth slopes[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1992, **21**(2): 102 - 108. (in Chinese))
- [2] CHENG Y M, LIU H T, WEI W B, et al. Location of critical three-dimensional non-spherical failure surface by NURBS functions and ellipsoid with applications to highway slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2005, **32**(6): 387 - 399.
- [3] 李列列. 三维外凸边坡稳定性分析方法研究及数值模拟[D]. 长沙: 中南大学, 2011. (LI Lie-lie. 3D Stability Analysis and Numerical Simulation of Convex Curve Slopes[D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese))
- [4] 卢坤林, 朱大勇. 坡面形态对边坡稳定性影响的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 35 - 42. (LU Kun-lin, ZHU Da-yong. Theoretical and experimental study of effect of slope topography on its stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 35 - 42. (in Chinese))
- [5] FARZANEH O, ASKARI F, GANJIAN N. Three-dimensional stability analysis of convex slopes in plan view[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(8): 1192 - 1200.
- [6] 赵 衡, 宋二祥. 圆形凸坡的稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 730 - 737. (ZHAO Heng, SONG Er-xiang. Stability analysis of circular convex slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 730 - 737. (in Chinese))
- [7] 黄治文. 地震作用下凹凸坡的稳定性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2016. (HUANG Zhi-wen. The Stability of Concave and Convex Slope under Seismic Excitations[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese))
- [8] ZHANG Y B, CHEN G Q, ZHENG L, et al. Effects of geometries on three-dimensional slope stability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(3): 233 - 249.
- [9] SUN C W, CHAI J R, XU Z G, et al. 3D stability charts for convex and concave slopes in plan view with homogeneous soil based on the strength-reduction method[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, **17**(5): 06016034.
- [10] NIAN T K, HUANG R Q, WAN S S, et al. Three-dimensional strength-reduction finite element analysis of slopes: geometric effects[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(5): 574 - 588.
- [11] GIGER M W, KRIZEK R J. Stability analysis of vertical cut with variable corner angle[J]. Soils and Foundations, 1975, **15**(2): 63 - 71.
- [12] LESHCHINSKY D, BAKER R, SILVER M L. Three dimensional analysis of slope stability[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1985, **9**(3): 199 - 223.
- [13] ZHANG F, LESHCHINSKY D, BAKER R, et al. Implications of variationally derived 3D failure mechanism[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016, **40**(18): 2514 - 2531.
- [14] ZHANG F, LESHCHINSKY D, GAO Y F, et al. Three-dimensional slope stability analysis of convex turning corners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, **144**(6): 06018003.
- [15] LESHCHINSKY D, MULLETT T. Stability of vertical corner cuts[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1988, **114**(3): 337 - 344.
- [16] BAKER R, LESHCHINSKY D. Stability analysis of conical

heaps[J]. Soils and Foundations, 1987, 27(4): 99 - 110.

[17] ZHANG X. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(6): 658 - 671.

[18] LESHCHINSKY D, BAKER R. Three-dimensional slope stability: end effects[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4):

98 - 110.

[19] TAYLOR D W. Stability of earth slopes[J]. Journal of Boston Society of Civil Engineering, 1937, 24(3): 197 - 246.

[20] LESHCHINSKY D, HUANG C C. Generalized three-dimensional slope-stability analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(11): 1748 - 1764.

附录 I

转弯边坡坡面可以分为弯曲边坡坡面和长直边坡坡面两部分, 对于弯曲边坡坡面空间表达式为

$$\bar{Z} = \frac{H}{R-R'} \left(R - \sqrt{(R+x)^2 + y^2} \right) \\ x \in [\sqrt{R'^2 - y^2} - R, \sqrt{[R - \bar{Z}(R-R')]^2 - y^2} - R], \quad (1a)$$

$$\bar{Z} = H \quad (x \in [-\infty, \sqrt{R'^2 - y^2} - R]) \quad (1b)$$

对于长直边坡坡面空间表达式为

$$\begin{vmatrix} x-x_1 & y-y_1 & \bar{Z}-z_1 \\ x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ x_3-x_2 & y_3-y_1 & z_3-z_1 \end{vmatrix} = 0 \\ x \in \left[\frac{[(y-y_1)b_2 - (H-z_1)b_3]}{b_1} + x_1, \right. \\ \left. \frac{[(y-y_1)b_2 - (Z-z_1)b_3]}{b_1} + x_1 \right], \quad (2a)$$

$$\bar{Z} = H \quad x \in \left[-\infty, \frac{[(y-y_1)b_2 - (H-z_1)b_3]}{b_1} \right], \quad (2b)$$

式中, (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 、 (x_3, y_3, z_3) 为长直边坡斜面上 3 个不共线的空间点, 具体可表示为: $x_1 = R[\cos(\theta/2)-1]$, $y_1 = R\sin(\theta/2)$, $z_1 = 0$, $x_2 = R'\cos(\theta/2)-R$, $y_2 = R'\sin(\theta/2)$, $z_2 = H$, $x_3 = -R$, $y_3 = R/\sin(\theta/2)$, $z_3 = 0$; b_1, b_2, b_3 为此坡面三阶行列式对应的 3 种二阶子式, 表达式为

$$b_1 = \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix}, \quad (3a)$$

$$b_2 = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix}, \quad (3b)$$

$$b_3 = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix}. \quad (3c)$$

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)