

文章编号: 1000-7598-(2008) 01-0207-05

近水平岩层滑坡启动的临界水柱高度分析

吕美君^{1,2}, 晏鄂川², 程江涛²

(1. 南昌理工学院 建筑工程系, 南昌 330013; 2. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 从岩性特点和外部诱发因素等方面分析了近水平岩层滑坡的形成机制, 提出此类滑坡启动的主要诱发因素是暴雨或持续降雨。从力学角度讨论了滑坡启动的判别依据, 推导了滑坡启动时的临界水柱高度。研究表明, 裂隙水对近水平岩层滑坡启动的影响是有条件的, 在滑体厚度 d 一定的情况下, 当滑面长度 L 小于安全长度 L_s 时, 滑坡就会启动, 否则裂隙水不足以引起滑坡的启动。同时对应于一定的滑面长度, 分析了浅层、中层、厚层滑坡的临界水柱高度值。

关 键 词: 近水平岩层滑坡; 启动; 力学分析; 临界水柱高度

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Study on critical depth of fracture water for nearly horizontal strata landslide

LÜ Mei-jun^{1,2}, YAN E-chuan², CHENG Jiang-tao²

(1. Department of Architecture, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The mechanism of deformation and failure of the nearly horizontal strata landslide is studied from lithologic characters and inducing factors, and the start-up of these landslides is mainly due to sustained rainfall or intense rainfall. From the point of view of mechanics, the start-up criterion of the landslide is discussed; also critical depth of fracture water is deduced. Studies indicate that the effect of the fracture water is conditional; if the thickness of sliding mass is a constant, when the length of sliding surface exceeds a fixed value (safe length), the depth of fracture water has little effect on the stability of the slope. For different length of sliding surface, the critical depth of fracture water is calculated for shallow, medium-bedded and thick-bedded landslides respectively.

Key words: nearly horizontal strata landslide; start-up; mechanical analysis; critical depth of fracture water

1 引 言

近水平岩层斜坡是指倾角小于 10° 的岩层组成的斜坡^[1]。在四川盆地中部低丘陵地区, 天然斜坡多由近水平的较坚硬的砂岩和较软弱的泥岩互层组成, 因为岩层倾角小于其内摩擦角, 在如此小的倾角下, 如果没有外力的驱动, 靠自重是不可能下滑的, 所以这类斜坡本应是稳定的。但在四川盆地却已发现多处斜坡变形以致失稳破坏的实例, 并造成了人民生命和财产的严重危害与损失^[2,3]。因此, 对这类斜坡的变形失稳机制的研究, 具有十分重要的意义。

近水平岩层滑坡是较常见的一种滑坡型式, 其形成和变形破坏特点与岩性特点、岩体结构特征及其他外部因素有密切的关系。滑坡后缘常为坡体中

的陡倾结构面, 滑面为坡体中的软硬岩层界面或软弱夹层, 滑坡后缘下座明显, 常形成较宽的拉裂缝, 为地表水入渗提供了空间。

图 1 是一典型近水平岩层(砂泥岩互层)滑坡地质模型图, 此类斜坡破坏的主要诱发因素是降雨, 但也不排除历史上的地震作用因素。在暴雨或持续降雨条件下地表水来不及排出, 沿后缘裂隙大量下渗, 砂岩裂隙中充水形成裂隙水压力, 对滑体产生推动力, 同时下渗的地表水沿透水性差的软弱岩(泥岩)层面汇集、运动, 从而软化软硬岩层交界面, 大大降低层面的强度, 并产生渗透水压力。岩体在上述各种因素的作用下, 很容易沿泥岩层面向前滑动, 从而形成滑坡。因此, 降雨或者准确地说是裂隙充水, 是导致此类滑坡的主要因素之一, 还有相对隔水层问题, 所以降雨量或者裂隙水柱高度对研

收稿日期: 2007-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40672189)。

作者简介: 吕美君, 女, 1981 年生, 硕士, 主要从事岩土体稳定性评价与利用方面的研究。E-mail: didalmj@163.com

究斜坡的稳定性具有重要意义。

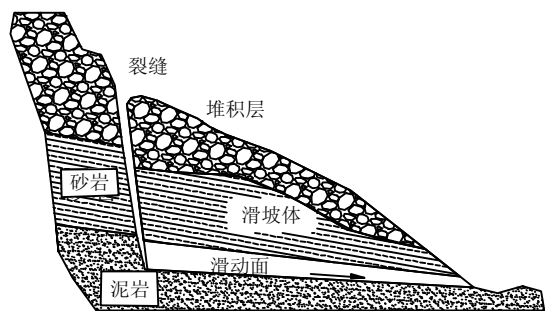


图 1 近水平岩层滑坡概化地质模型

Fig.1 Geology model scheme of horizontal strata landslide

2 形成机制分析

2.1 岩性特征

在地质历史时期,受构造作用的影响和地下水的长期作用,斜坡中的泥岩被软化或泥化而成为坡体中的软弱夹层。在上覆坡体的较大的自重压力长期作用下,软硬岩层产生差异蠕变,向临空方向发生塑性挤压,并逐步导致上覆岩层中拉应力集中,产生拉裂、解体和沉降。

对这种软硬岩互层斜坡(砂泥岩互层),其变形破坏与岩性特点有密切的关系。因泥岩属于软岩,强度低,在压剪应力作用下变形较大,呈现出明显的塑性变形特征,且基本不透水,遇水后强度大幅度降低,泥岩层为相对隔水层;而砂岩则相反,强度高,属于硬岩,在坡体应力作用下变形小,呈明显的脆性变形特征,砂岩层为相对富水层和透水层。砂岩和泥岩的这种变形性质的差别,对砂泥岩互层斜坡的变形破坏有决定作用。此类互层斜坡,在构造应力、自重应力和水的作用下,泥岩变形大,但为塑性变形,无明显的节理发育,而砂岩变形小,但为脆性破坏,故砂岩中往往陡倾节理发育。因此,变形破坏首先是发生在坡体的中部下伏有厚层泥岩的硬层砂岩层中,由于拉应力集中造成拉破坏,形成节理裂隙后,逐渐向坡体上部扩展;砂泥岩层产生的差异变形,又促使上部砂岩陡倾节理的进一步扩大,直至贯通出露地表,为地表水入渗奠定了基础^[4]。

2.2 外部因素

遇暴雨或持续降雨时,雨水沿坡体后缘拉裂缝下渗,拉裂缝充水。裂隙中水头逐渐升高,产生较大的垂直于裂隙面的静水压力,从而对滑坡产生推动作用;与此同时,高水头裂隙水沿砂岩与下伏泥岩界面向坡外渗流,渗流水又产生强大的扬压力(渗透压力),一方面下渗的地表水沿透水性差的泥岩层

面汇集、运动,软化砂泥岩层面,大大降低层面的抗剪强度;另一方面产生浮托力,加上后缘拉裂缝中的静水压力,三者的联合作用使软弱夹层的上覆岩体沿软弱夹层被水平推动,产生平推式滑坡,其破坏界面为后缘的陡倾裂隙和砂泥岩层面。滑坡启动后,后缘的拉裂缝又变宽形成拉裂,同时水头迅速降低,滑体也很快制动。

斜坡后缘早期拉裂缝(带)的存在是前提条件,连续降雨是主要诱发因素,产生的静水压力和浮托力是滑坡启动的决定性因素。

3 力学分析

3.1 力学模型

虽然降雨过程中裂隙水压力的变化是暂态的,但却是斜坡稳定的最不利荷载。我国各设计单位针对不同工程的具体情况对降雨产生的暂态水压力分布分别做出了不同的规定。图 2 所示为各种建议的水压力分布形式,如漫湾水电站左岸边坡加固设计时取 $0.4\gamma h$ 为边坡水荷载,即将全静水头压力乘以折减系数 0.4。通常坡面顶部的裂隙较下部发育,隙宽也较大,雨水容易由地表上部渗入,但从坡脚排出则比较困难,所以会形成更为不利的水压力分布形式^[5]。

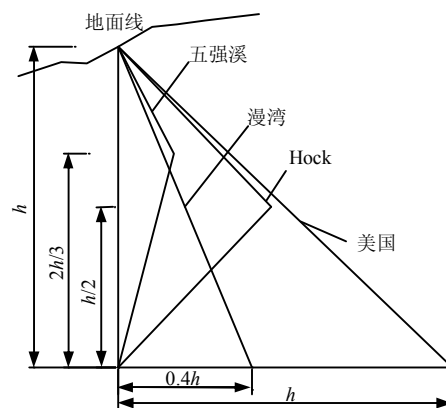


图 2 各工程所用的水压力分布图

Fig.2 Water pressure-distribution pattern for practical engineering

事实上,裂隙不但存在于斜坡的后缘,而且在斜坡体的中前部也存在裂隙发育。由于裂隙水对裂隙前后的斜坡体作用有大小相等、方向相反的静水压力(因裂隙两面的角度近似平行),在以整个斜坡体为分析对象时,两静水压力可相互抵消。因此,可将斜坡体视为一整体,仅考虑斜坡体后缘裂隙中水的水压力作用。近水平岩层斜坡力学模型可简化如图 3 所示。计算时假定斜坡体渗透系数很小,裂

隙水不渗入斜坡体, 只沿滑动面渗透, 滑动面以下是隔水层。

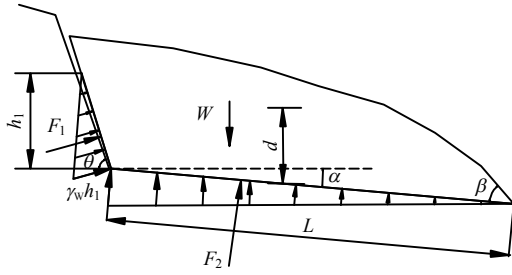


图3 力学模型图

Fig.3 Mechanical model scheme for horizontal strata slope

如前所述, 近水平岩层斜坡体在图3所示的力共同作用下, 发生沿软弱岩层面的整体滑移, 造成斜坡破坏。将裂隙水压力视为静水压力, 设滑坡后缘裂隙水柱高度为 h_1 , 斜坡坡角为 β , 滑面倾角为 α , 斜坡后缘裂隙倾角(与水平面的夹角)为 θ 。对斜坡体进行力学分析, 其沿滑面方向的合力为

$$f(h_1) = F_{\text{滑}} - F_{\text{阻}} = [W \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma_w h_1^2 \sin(\theta - \alpha)] - \left[cL + \left(W \cos \alpha - \frac{\gamma_w h_1 L}{2} - \frac{\gamma_w h_1^2 \cos(\theta - \alpha)}{2} \right) \tan \varphi \right] \quad (1)$$

由上式可知, 当 $f > 0$ 时, 斜坡体发生整体滑动; 当 $f = 0$ 时, 斜坡体处于极限平衡状态; 当 $f < 0$ 时, 斜坡体处于稳定状态。由极限平衡原理可得此时近水平岩层斜坡的稳定性系数:

$$K = \frac{\left(W \cos \alpha - \frac{\gamma_w h_1 L}{2} - \frac{\gamma_w h_1^2 \cos(\theta - \alpha)}{2} \right) \tan \varphi + cL}{W \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma_w h_1^2 \sin(\theta - \alpha)} \quad (2)$$

3.2 临界水柱高度的确定

由于此类滑坡发生的主要诱发因素是降雨, 故重点探讨雨水下渗后产生的裂隙水柱高度。当裂隙水柱高度继续增加, 水压力进一步增大, 斜坡开始发生变形破坏时的水柱高度, 就是滑坡启动时的临界水柱高度 h_{cr} , 即 $k=1$ 时, 由式(2)得

$$h_{cr} = \frac{-L \tan \varphi + \sqrt{L^2 \tan^2 \varphi - \frac{8}{\gamma_w} X_1 X_2}}{2 X_1} \quad (3)$$

式中: L 为滑面长度 (m); d 为滑体平均厚度 (m); W 为滑体自重 (kN/m); φ 为滑面内摩擦角 ($^\circ$);

c 为凝聚力 (kPa); 水的重度为 γ_w (kN/m³)。 $X_1 = \sin(\theta - \alpha) + \cos(\theta - \alpha) \tan \varphi$, $X_2 = W(\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \tan \varphi) - cL$ 。

从式(3)可以看出, 近水平岩层滑坡启动与否的关键因素之一是临界水柱高度 h_{cr} , 它的大小主要与滑体的平均厚度 d 和滑面的长度 L 有关。

4 工程实例

4.1 工程概况

马鞍沱滑坡位于重庆市渝北区龙兴镇马鞍沱自然村长江一级支流——御临河北岸, 距龙兴镇约 2 km。该滑坡前缘高程为 160~164 m, 后缘高程为 225 m, 沿纵向长约 190 m, 滑坡面积为 $9.46 \times 10^4 \text{ m}^2$, 滑体厚度平均约为 8.4 m, 滑坡体积约为 $79.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。岩层呈单斜产出, 产状 $96^\circ \sim 130^\circ \angle 8^\circ \sim 10^\circ$, 为顺向坡。可见两组裂隙发育: ① $210^\circ \angle 73^\circ$, 长 3~4 m, 宽 0.005~0.04 m, 间距为 0.5~1 m; ② $110^\circ \angle 79^\circ$, 长 1~3 m, 间距为 0.4~0.8 m, 隙面平直, 闭合或呈微张。滑坡体北侧即滑坡后壁为较陡的陡崖 ($65^\circ \sim 85^\circ$ 左右), 滑坡地形呈后陡、中部缓、前部陡的形态, 后缘坡角为 $9^\circ \sim 11^\circ$, 中部为 $2^\circ \sim 3^\circ$, 前缘为 $5^\circ \sim 8^\circ$ 。滑坡体主要由粉质黏土夹碎石、块石夹粉质黏土组成, 局部表层为人工填土, 滑体厚度为 2.41~15.43 m, 变化较大。地层岩性上以粉质黏土为主, 含砂岩块石, 滑面为土层与基岩接触面, 为一土质滑坡, 局部出现土层之间的蠕滑, 但主要是土层与基岩接触面滑动。

4.2 临界水柱高度计算

计算模型取 1-1' 剖面: 滑体土重度计算取值为: 上部砂岩崩塌体天然重度取 22.80 kN/m^3 , 饱和状态重度取 23.00 kN/m^3 , 饱水状态下滑面 $c_s = 11.97 \text{ kPa}$, $\varphi_s = 13.50^\circ$, 倾角 $\alpha = 10^\circ$, 滑面长度 $L = 60 \text{ m}$, 斜坡后缘裂隙倾角 (与水平面的夹角) $\theta = 85^\circ$, 斜坡后缘滑体厚度为 12.9 m, 取滑体平均厚度 $d = 10.3 \text{ m}$ 。

由式(3)得, 临界水柱高度 $h_{cr} = 11.98 \text{ m}$ 。即后缘裂隙水柱高度达 11.98 m 时, 该滑坡即可启动。显然, 欲使该类斜坡稳定, 首要的治理措施是排除后缘裂隙水, 以降低水头高度, 同时防止地表水入渗。当滑面长度 $L = 50, 100, 150 \text{ m}$ 时, 分别计算了滑体平均厚度 d 在 $0 < d < 60 \text{ m}$ 间变化时对应的临界水柱高度 h_{cr} , 所得曲线图如图 4 所示。

5 临界水柱高度的讨论

滑坡按深度可分为 4 类: (1) 浅层滑坡 (厚度

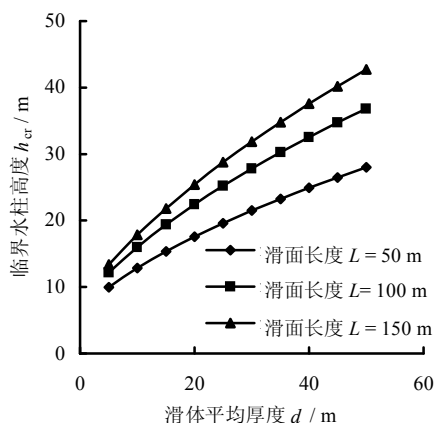
图4 临界水柱高度 h_{cr}

Fig.4 Critical depth of fracture water

小于 6 m); (2) 中层滑坡 (厚 6~20 m); (3) 厚层滑坡 (厚 20~50 m); (4) 巨厚层滑坡 (厚度大于 50 m) [6]。在此只讨论前 3 类滑坡, 且取滑体平均厚度 $d=5, 10, 15, 20, 30, 40, 50$ m 时求有关参数之间的统计关系。

利用上述公式可计算得出: 对应于以上厚度的斜坡体的安全滑面长度 L_s , 如图 5 所示。 L_s 与 d 成函数关系为

$$L_s = -7 \times 10^{-4} d^3 + 0.081 d^2 + 2.576 d - 7.357 \quad (4)$$

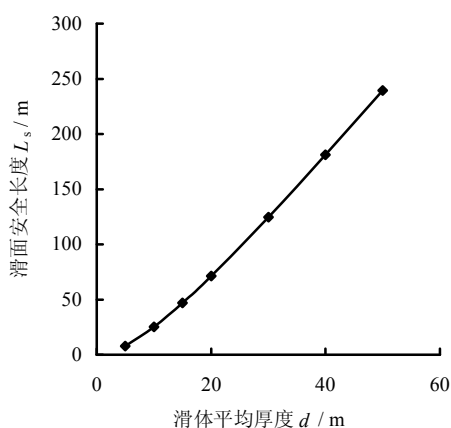


图5 滑面安全长度与滑体厚度的关系

Fig.5 Safe length of sliding surface vs. thickness of sliding mass

对于浅层滑坡, 当 $d=6$ m 时, $L_s=10.8$ m, 只要滑面长度小于 10.8 m, 滑坡就会启动, 否则后缘裂隙水不足以引起滑坡的启动。亦即滑体厚度 d 一定的近水平岩层斜坡体, 当滑面长度超过一定值 (大于 L_s) 时, 后缘裂隙水不足以引起滑坡的启动。

利用上述工程实例——马鞍沱滑坡的有关参数, 采用本文提出的临界水柱高度计算公式探讨了不同规模的滑坡启动时的临界水柱高度值。对于浅层滑坡, 如图 6(a) 所示, 若滑面长度为 7 m, 裂隙水柱高度在区间 4.76~5 m 内变化, 此时只要后缘裂隙水柱高度超过 5 m 滑坡就会启动。

对于中层滑坡, 如图 6(b) 所示, 若滑面长度为 20 m, 裂隙水柱高度在区间 8.8~12.21 m 内变化, 若后缘裂隙水柱高度超过 12.21 m 滑坡就会启动。

对于厚层滑坡, 如图 6(c) 所示, 若滑面长度为 50 m, 裂隙水柱高度在区间 17.56~27.98 m 内变化, 若后缘裂隙水柱高度超过 27.98 m 滑坡就会启动。

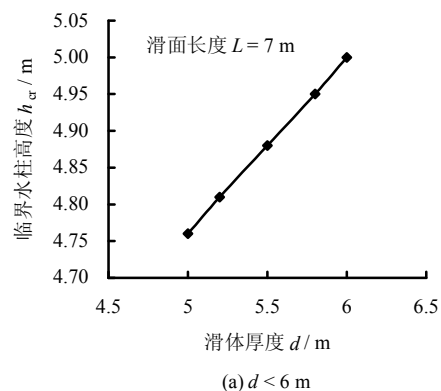
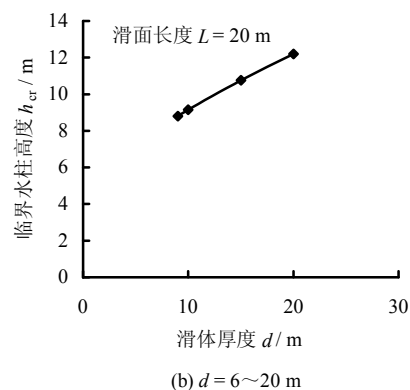
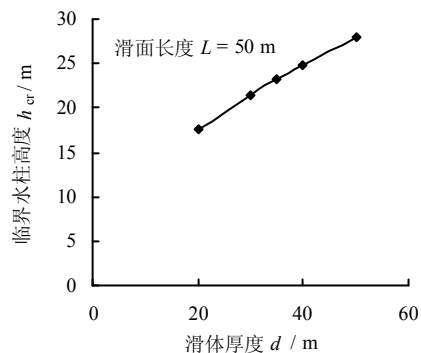
(a) $d < 6$ m(b) $d = 6 \sim 20$ m(c) $d = 20 \sim 50$ m图6 临界水柱高度 h_{cr}

Fig.6 Critical depth of fracture water

6 结 论

(1) 受构造作用影响和地下水的长期作用, 近水平岩层斜坡的软硬岩层地质结构在介质长期蠕滑作用下发生明显差异变形, 导致了后缘拉裂缝的产生, 为地表水入渗奠定了基础。裂隙水产生的静水压力和浮托力是近水平岩层滑坡启动的主要诱发因素。

(2) 近水平岩层滑坡能否启动的关键判别指标是临界水柱高度 h_{cr} , 它的大小主要与滑体的平均厚度 d 和滑面的长度 L 有关。而在滑体厚度 d 一定的情况下, 当滑面长度 L 小于安全长度 L_s 时, 滑坡就会启动; 否则, 裂隙水不足以引起此类滑坡的启动。

(3) 利用三峡库区马鞍沱滑坡勘察所获得的有关参数, 采用本文提出的临界水柱高度计算公式探讨了不同规模的滑坡启动时的临界水柱高度值。对于浅层滑坡, 当滑面长度为 7 m 时, 裂隙水柱高度在区间 4.76~5 m 内变化, 此时只要后缘裂隙水柱高度超过 5 m 滑坡就会启动。对于中层滑坡, 若滑面长度为 20 m, 裂隙水柱高度在区间 8.8~12.21 m 内变化, 此时只要后缘裂隙水柱高度超过 12.21 m 滑坡就会启动; 对于厚层滑坡, 若滑面长度为 50 m, 裂隙水柱高度在区间 17.56~27.98 m 内变化, 此时后缘裂隙水柱高度超过 27.98 m 滑坡就会启动。

参 考 文 献

- [1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
 - [2] 吉随旺, 张倬元, 王凌云, 等. 近水平软硬互层斜坡变形破坏机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(9): 49—52.
JI Sui-wang, ZHANG Zhuo-yuan, WANG Ling-yun, et al. The mechanism of deformation and failure for the slope composed of nearly horizontal competent and incompetent intercalated rock mass strata[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11(9): 49—52.
 - [3] 张倬元, 等. 工程地质探索与开拓[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1997.
 - [4] 程 强, 周永江, 黄绍彬. 近水平红层开挖边坡变形破坏特征[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1 311—1 314.
CHENG Qiang, ZHOU Yong-jiang, HUANG Shao-bin. Distortion and failure character of excavation slope in approximate level red beds[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(8): 1 311—1 314.
 - [5] 张有天. 岩石水利学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
 - [6] 李智毅, 王智济, 杨裕云. 工程地质学基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990.
-
- 上接第 206 页
- [4] 丁洲祥, 谢永利, 龚晓南, 等. 时间差分格式对路基 Biot 固结有限元分析的影响[J]. 长安大学学报, 2005, 25(2): 34—37.
DING Zhou-xiang, XIE Yong-li, GONG Xiao-nan, et al. Influence of time difference schemes on Biot's consolidation FEA of roadbed foundation[J]. *Journal of Chang'an University*, 2005, 25(2): 34—37.
 - [5] 范家让. 强厚度叠层板壳的精确理论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
 - [6] 胡泳芬, 熊立瑶. 用状态方程求解瞬态电磁场[J]. 南昌大学学报, 1999, 21(4): 7—11.
HU Yong-fen, XIONG Li-yao. Solution of the transient electromagnetic field using state equations[J]. *Journal of Nanchang University*, 1999, 21(4): 7—11.
 - [7] 梅甫良, 曾德顺. 压电梁机电耦合作用的状态方程法[J]. 山东科技大学学报, 2002, 21(3): 9—12.
MEI Fu-liang, ZENG De-shun. State equation method of mechanical-electric coupling for a piezoelectric beam[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology*, 2002, 21(3): 9—12.
 - [8] 龚晓南. 土工计算机分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
 - [9] 封建湖, 车刚明, 等. 数值分析原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.