

堆积体滑坡抗滑桩所受推力计算及分布特征研究

张健¹, 胡瑞林², 李志清²

(1. 南阳师范学院土木建筑工程学院, 河南 南阳 473061; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

摘要: 沿下伏基岩面失稳是堆积体滑坡破坏主要模式之一, 在土石混合体介质-接触面大型直剪试验成果基础上, 发现土石混合体介质与接触面在剪切试验过程中表现出应变硬化和应变软化两种接触面力学性质, 建立了能够描述上述两种接触面性质的表达式。基于一个简化的力学模型通过求系统极值的尖点突变理论推导了堆积体滑坡抗滑桩所受滑坡推力的计算公式, 公式中考虑了上述描述应变硬化和应变软化两种接触面力学的表达式, 利用该公式分析了其中的主要参数对抗滑桩所受推力大小及分布特征的影响。最后将推导公式应用到一个堆积层古滑坡实例中, 对比分析表明该理论结果与现场实测结果具有较好的一致性。

关键词: 堆积体滑坡; 抗滑桩; 滑坡推力; 分布特征; 尖点突变模型

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)11-2005-06

作者简介: 张健(1980-), 男, 河南新乡人, 博士, 讲师, 主要从事土压力、土石混合体和滑坡方面的研究与教学工作。E-mail: zhangjian9945016@126.com。

Distribution laws of thrust of talus slide on anti-sliding piles

ZHANG Jian¹, HU Rui-lin², LI Zhi-qing²

(1. Department of Civil Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China; 2. Key Laboratory of Engineering

Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: Talus always slides along the bedrock surface. On the basis of straight shear tests on earth-rock aggregate and bedrock, the sliding surface of talus slide is a combination of two media: strain-hardening and strain-softening. A shear stress-strain constitutive model for the strain-softening medium is described by the Weibull's distribution law. A shear stress-strain constitutive model for the strain-hardening medium is described by the linear equation. Based on a simplified model for anti-sliding piles in talus slide, the formulas for calculating thrust on anti-sliding piles are derived by considering the above two shear stress-strain constitutive models. How the main parameters of the proposed formulas affect the distribution laws of talus slide thrust on anti-sliding pile is discussed. Finally, the rationality of the proposed formulas is demonstrated based on comparative analysis of the theoretical and the experimental results.

Key words: talus slide; anti-sliding pile; landslide thrust; distribution law; cusp catastrophe model

0 引言

堆积体滑坡是三峡库区中分布最为广泛的一类地质灾害, 该类滑坡常常是由土石混合体介质构成。目前为止, 抗滑桩仍然是该类滑坡灾害防治普遍采用的有效防治措施^[1]。在工程实践中, 对于特定的滑坡, 以刚体极限平衡法为基础的各种方法得到的滑坡推力(剩余下滑力)差别不大。传统设计方法中作用在桩上的岩土推力分布是假定的, 一般假设为矩形分布, 有时假设为三角形、梯形分布, 不同的分布形式会使支挡结构内力计算结果有很大差异^[2]。因此, 分布形式选择得是否合理直接影响抗滑桩结构设计的合理性和经济性^[3-4]。

有鉴于此, 国内外众多的研究者对此展开了研究,

取得了一定的成果。文献[5]中建议, 如果滑体变形是均匀往下蠕动而且是一种黏聚力较大的地层(如黏土、土夹石等), 其推力分布可近似按矩形考虑。如果滑体是一种以内摩擦角为主要抗剪特性的堆积体, 其推力分布可按三角形考虑, 甚至按二次曲线考虑, 介于以上两者情况可假定为梯形。文献[6]利用模型试验对岩土体为松散砂土或者黄土情况下抗滑桩所受推力的分布形式进行了研究。当滑体为松散砂土时, 推力的分布形式为三角形; 而滑体为黄土时, 推力形式为矩形分布; 文献[7]利用土压力计在抗滑桩有限点上的实测

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072226); 河南省科技攻关计划项目(122102310397); 南阳师范学院高层次人才项目

收稿日期: 2012-01-05

数值拟合滑坡推力的分布形式，结果发现大多数呈抛物线以及梯形分布；文献[8]采用数值分析方法获得抗滑桩桩身若干点的水平应力，进而绘制滑坡推力的分布图式，结果发现大多数呈弓形和抛物线分布。文献[9]在不平衡推力法的基础上基于定点剪出法确定了抗滑桩所受的滑坡推力主要集中在滑动面附近较小范围内，而大部分桩身受力相对较小。

堆积体滑坡主要的破坏模式之一是在降雨、洪水等各种外界作用下沿下伏基岩面失稳。其稳定性评价可采用土质边坡分析方法，不同在于堆积体与下部基岩存在显著的分界线，计算时应考虑基岩接触面的影响^[10]。此外，在堆积体滑坡失稳过程中，不同滑动面位置附近的土石混合体介质可能表现出不同的接触面力学特性，如弹塑性、应变软化、应变硬化、不可能同时达到峰值剪切强度。要想获知其接触面情况下的力学特性需进行土石混合体介质-接触面（基岩面）大型直剪试验。所以本文在土石混合体介质-接触面大型直剪试验成果的基础上，通过一个公路滑坡抗滑桩简化模型（如图1所示），考虑堆积体滑坡沿基岩面失稳破坏过程中不同位置处土石混合体介质与基岩面具有不同的接触面力学特性（应变软化和应变硬化），基于求系统极值的尖点突变理论建立了一种确定堆积体滑坡中抗滑桩所受推力大小与分布特征的方法，从而拓展对这一问题的研究思路。

1 公式推导过程

1.1 力学计算模型的建立

三峡库区某堆积体滑坡由于道路路基开挖引起滑坡复活。根据勘察结果，堆积层滑坡体后缘覆盖层较薄，下伏基岩均为中风化泥岩，基岩坡面较陡，滑带位于堆积体与基岩接触面附近。采用抗滑桩对该滑坡进行治理（如图1所示）。

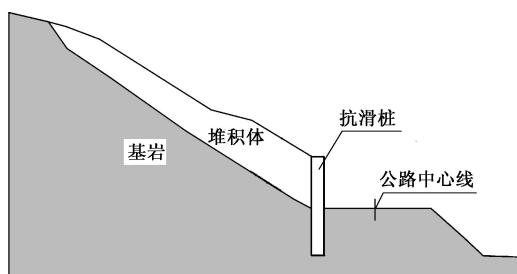


图1 堆积体滑坡剖面图

Fig. 1 Vertical section of talus slide

笔者^[11]研究堆积体滑坡时，在室内进行了多组不同应力水平、排水条件、接触面粗糙度、含水率和含石率组合的土石混合体介质-接触面大型直剪试验，以此考虑基岩接触面对其抗剪强度的影响，通过试验

结果得到以下结论：

(1)接触面粗糙度和法向应力是影响其剪应力-应变关系的最主要因素。当粗糙度较小，法向应力较大时，剪应力-应变关系成软化型；反之，成硬化型如图2所示。

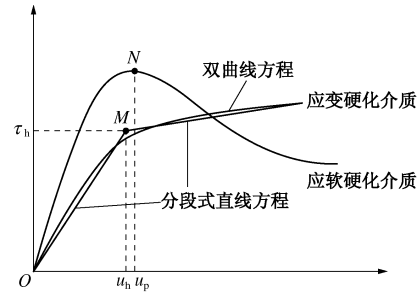


图2 两种典型的接触面应力-应变关系曲线

Fig. 2 Constitutive curves of two different media along shear-slip surface

(2)对于应变软化型试验曲线，采用一种基于Weibull分布函数的方程（推导详见文献[11]）来描述其应力-应变关系，即

$$\begin{cases} \tau = \frac{G_s u}{\Delta h} \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right], \\ u_0 = m^{\frac{1}{m}} u_p. \end{cases} \quad (1)$$

式中 G_s 为初始剪切模量； $G_s u / \Delta h$ 为剪切带初始抗剪刚度， u_p 为峰值应力对应的应变； m 为曲线同族指数，也称为均匀性指标， m 越大，材料的均匀性愈好硬脆性愈大，应变软化现象越明显，如图3所示^[12]。

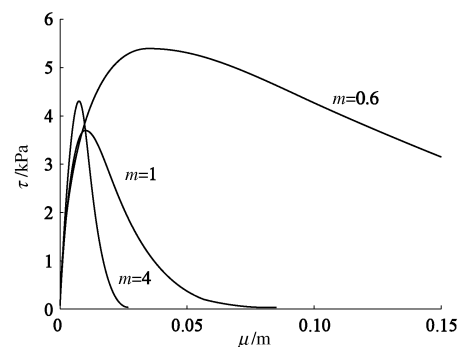


图3 不同 m 值的应变软化曲线 ($G_s = 5 \text{ MPa}$, $u_0 = 0.1 \text{ m}$, $\Delta h = 0.1 \text{ m}$)

Fig. 3 Weibull distribution constitutive curves of strain-softening medium for different values of m ($G_s = 5 \text{ MPa}$, $u_0 = 0.1 \text{ m}$, $\Delta h = 0.1 \text{ m}$)

(3)对于应变硬化型试验曲线可采用双曲线方程或分段直线方程进行描述。本文中采用分段直线方程进行描述，即

$$\tau = \begin{cases} \frac{G_1 u}{\Delta h} & (u < u_h) \\ \tau_h + \frac{G_2 (u - u_h)}{\Delta h} & (u > u_h) \end{cases} \quad (2)$$

式中 Δh 为剪切带的厚度; u 为滑动楔体沿滑动面剪切带的蠕滑位移; u_h 为应变硬化开始点的位移; τ_h 为 u_h 对应的抗剪应力; G_1 , G_2 分别为应变硬化介质对应于 $0 \leq u \leq u_h$ 和 $u > u_h$ 的剪切模量。

在进行力学分析时, 将图 1 所示的堆积体滑坡治理工程进行简化如图 4 所示。

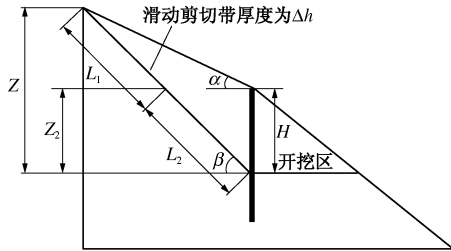


图 4 简化力学模型

Fig. 4 Simplified mechanical model

滑动面以上抗滑桩的高度 H , 作用在抗滑桩推力的合力为 E , 滑楔体总高度为 Z , 其总重力为 W , 平均重度为 γ ; 坡面与水平面的夹角为 α ; 滑动面与水平面夹角为 β ; 滑动剪切带厚度为 Δh , 由应变硬化介质和应变软化两种介质构成, 沿滑动面的长度分别为 L_1 和 L_2 。其中应变软化介质高度为 Z_2 。

1.2 基于尖点突变模型理论推导

突变理论作为一门数学理论的分支, 在对于许多土工的失稳破坏给出深入的解释和分析过程中表现出了优越特性^[13-16]。其中, 应用最多的主要是尖点突变模型, 它由两维控制变量和一维状态变量组成, 临界面也容易构造, 且几何直观性很强。当岩土介质从弹塑性变形状态进入临界破坏状态时是一种状态突变为, 可用突变理论进行研究, 用它可以计算具有不同应力-应变属性的岩土材料进入临界破坏状态时所需的力学条件。

因下滑楔体位移变化很小, 在滑动过程中不考虑下滑楔体内部的应力和变形。由图 4 可知, 只有当 $u > u_h$ 时, 堆积体滑坡整体上才有可能进入临界破坏状态。在 $u > u_h$ 时, 取其单位厚度, 滑动楔体系统的总势能可表达为

$$V = \int_0^u \frac{G_s u}{\Delta h} L_2 \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right] du + \int_0^{u_h} \frac{G_1 u}{\Delta h} L_1 du + \int_{u_h}^u \left[\tau_h + \frac{G_2(u - u_h)}{\Delta h}\right] L_1 du + Eu \cos \beta - Wu \sin \beta \quad (3)$$

根据几何关系有

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\sin(\beta - \alpha)} \quad (4)$$

$$L = L_1 + L_2 = H \frac{\cos \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \quad (5)$$

$$L_2 = Z_2 \frac{1}{\sin \beta} \quad (6)$$

式 (4)、(5) 中, $\beta > \alpha$ 。令 $\frac{dV}{du} = 0$, 可得

$$\frac{dV}{du} = \frac{G_s u}{\Delta h} L_2 \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right] du + \frac{G_2 u}{\Delta h} L_1 + \left[\tau_h - \frac{G_2 u_h}{\Delta h}\right] L_1 + E \cos \beta - W \sin \beta \quad (7)$$

式 (7) 是力的平衡条件, 在突变理论分析中称为平衡曲面。根据平衡曲面的光滑性质, 由 $V'' = 0$ 可求得尖点值, 即

$$u_1 = u = \left(\frac{m+1}{m}\right)^{\frac{1}{m}} u_0 = \left(\frac{m+1}{m}\right)^{\frac{1}{m}} (u_p m^{\frac{1}{m}}) = u_p (m+1)^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

图 5 给出了 u_1 和 u_p 的数学关系。从图 5 可以看出: 尖点处位移值 u_1 随着 m 值的增大不断减少, 无限接近于应变软化曲线的峰值应变 u_p , 也就是说材料的 m 值愈大, 它的均匀性硬脆性愈好, 达到尖点处位移值所需的位移更小。 u_1 的取值范围如下:

$$\mu_1 = (1 \sim 2.3) \mu_p \quad (9)$$

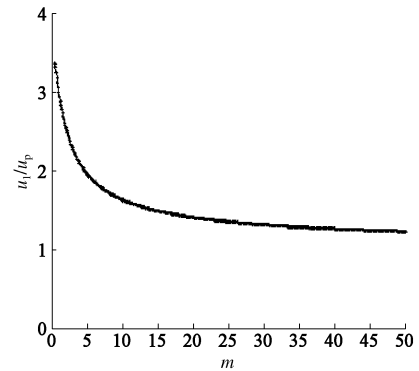


图 5 u_1 与 u_p 的数学关系

Fig. 5 Relation between u_1 and u_p

将平衡曲面式 (7) 在尖点处状态变量值 u_1 作 Taylor 展开, 作变量替换截取三次项得到尖点突变模型的标准形式:

$$\left(\frac{u - u_1}{u_1}\right)^3 + a \left(\frac{u - u_1}{u_1}\right) + b = 0 \quad (10)$$

其中

$$a = \frac{6(k-1)}{(m+1)^2} \quad (11)$$

$$b = \frac{6(mk+1-\xi)}{m(m+1)^2} (1-\xi) \quad (12)$$

$$k = \frac{G_2 L_1}{m G_s L_2} \exp\left(\frac{m+1}{m}\right) \quad (13)$$

$$\xi = \frac{\left[W \sin \theta - E \cos \theta - \left(\tau_h - \frac{G_2 u_h}{\Delta h}\right)\right]}{G_s L_2 u_1} \cdot \Delta h \exp\left(\frac{m+1}{m}\right)$$

$$(14)$$

为求得 E 的极小值, 可对式 (10) 求导可得

$$3\left(\frac{u-u_1}{u_1}\right)^2 + a = 0 \quad (15)$$

联立式 (10)、(11)、(12) 和 (15) 可得

$$D = 4a^2 + 27b^3 = \frac{864(k-1)^3}{(m+1)^6} + \frac{972}{(m+1)^4 m^2} (1-\xi + mk)^2 = 0 \quad (16)$$

上式在突变理论中称为分叉集方程。当满足式 (16) 时表示滑体沿滑动面整体上进入临界破坏状态。

根据 $\frac{972}{(m+1)^4 m^2} (1-\xi + mk)^2 \geq 0$ 可知, 只有当 $k \leq 1$ 时分叉集方程 $D = 0$ 才有可能成立。结合式 (13) 可得

$$0 \leq k = \frac{G_2 L_1}{m G_s L_2} \exp\left(\frac{m+1}{m}\right) \leq 1 \quad (17)$$

因此, $0 \leq k \leq 1$ 是滑动面剪切带整体上进入临界破坏状态的必要条件。通过分析上式可知, k 愈小愈易进入临界破坏状态。

由式 (15) 可解得堆积体滑坡体达到临界破坏状态时所需要的临界位移值:

$$u_b = u_1 \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{m+1} (1-k)^{1/2} \right] = u_p (m+1)^{1/m} \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{m+1} (1-k)^{1/2} \right] \quad (18)$$

由于 u_b 是临界位移, 不可能为负值, 即

$$u_b \geq 0 \quad (19)$$

根据 $0 \leq k \leq 1$ 可得

$$0 \leq (1-k)^{1/2} \leq 1 \quad (20)$$

联立式 (18)、(19)、(20)、(9) 可得

$$0 \leq \mu_p \leq \mu_1 \quad (21)$$

其中 $m \geq \sqrt{2} - 1$, 式 (21) 说明当滑动位移至少超过峰值应变 u_p 后滑动面剪切带才有可能进入临界破坏状态。

当 $k=1$ 时, $u_b = u_1$; 当 $k=0$ 时, $u_b = u_1 [1 - \sqrt{2}/(m+1)]$ 。由此可知, k 愈小所需的临界位移 u_b 愈小。

由式 (14) 和 (16) 可解得作用在抗滑桩推力合力 E 为

$$E = W \tan \beta - \left(\tau_h - \frac{G_2 u_h}{\Delta h} \right) \frac{L_2}{\cos \beta} - \frac{G_s L_1 u_1}{\Delta h \cos \beta \exp\left(\frac{m+1}{m}\right)} \cdot \left[1 + mk + \frac{2\sqrt{2}}{3} (1-k)^{\frac{3}{2}} \frac{m}{m+1} \right] \quad (22)$$

将式 (4) ~ (6) 代入式 (22) 得

$$E = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\sin \beta \cos \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} - \left(\tau_h - \frac{G_2 u_h}{\Delta h} \right) \cdot \left[\frac{H \cos \alpha}{\sin(\beta - \alpha) \cos \alpha} - \frac{2Z_2}{\sin 2\beta} \right] - \frac{2G_s Z_2 u_1}{\Delta h \sin 2\beta \exp\left(\frac{m+1}{m}\right)} \cdot \left[1 + mk + \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{m}{m+1} (1-k)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (23)$$

$$\exp\left(\frac{m+1}{m}\right) G_2 \left[\frac{H \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\beta - \alpha)} - Z_2 \right]$$

其中, $k = \frac{\exp\left(\frac{m+1}{m}\right) G_2 \left[\frac{H \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\beta - \alpha)} - Z_2 \right]}{m G_s H_s}$ 。

对式 (23) 求一阶导数可得作用在抗滑桩上的推力强度分布 P :

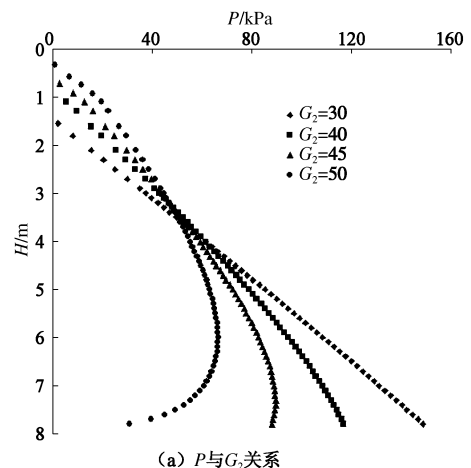
$$P = \frac{dE}{dH} = \gamma H \frac{\sin \beta \cos \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} - \frac{\left(\tau_h - \frac{G_2 u_h}{\Delta h} \right) \cos \alpha}{\sin(\beta - \alpha) \cos \beta} - \frac{G_2 \cos \alpha u_1}{\Delta h \sin(\beta - \alpha) \cos \beta} \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{m+1} (1-k)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (24)$$

2 抗滑桩推力分布特征及实例验证

2.1 抗滑桩推力分布特征

为了研究抗滑桩推力分布的特征, 采用一个具体算例进行分析说明。假设滑动面以上抗滑桩的高度 $H=8$ m。其它参数取值如下: $\gamma=20$ kN/m³, $\beta=60^\circ$, $G_s=4$ MPa, $Z_2=1$ m, $u_h=0.1$ m。利用本文公式进行计算讨论公式中部分参数 G_2 , α , u_0 , Δh 和 m 对抗滑桩推力强度分布影响, 计算结果如图 6 所示。

利用式 (24) 计算得到的抗滑桩滑坡推力强度分布根据参数取值的不同具有不同的分布图形。例如, 图 6 (a) 中 $G_2=30$ kPa 的情况滑坡推力分布为三角形; 图 6 (e) 中 $u_0=0.03$ m 的情况滑坡推力分布为梯形; 图 6 (a) 中 $G_2=50$ kPa、图 6 (b) 中 $m=1$ m 和 $m=2$ m、图 6 (c) 中 $\Delta h=0.11$ m 滑坡推力分布类似于抛物线形、双曲线形及弓形“非线性”图形。



(a) P 与 G_2 关系

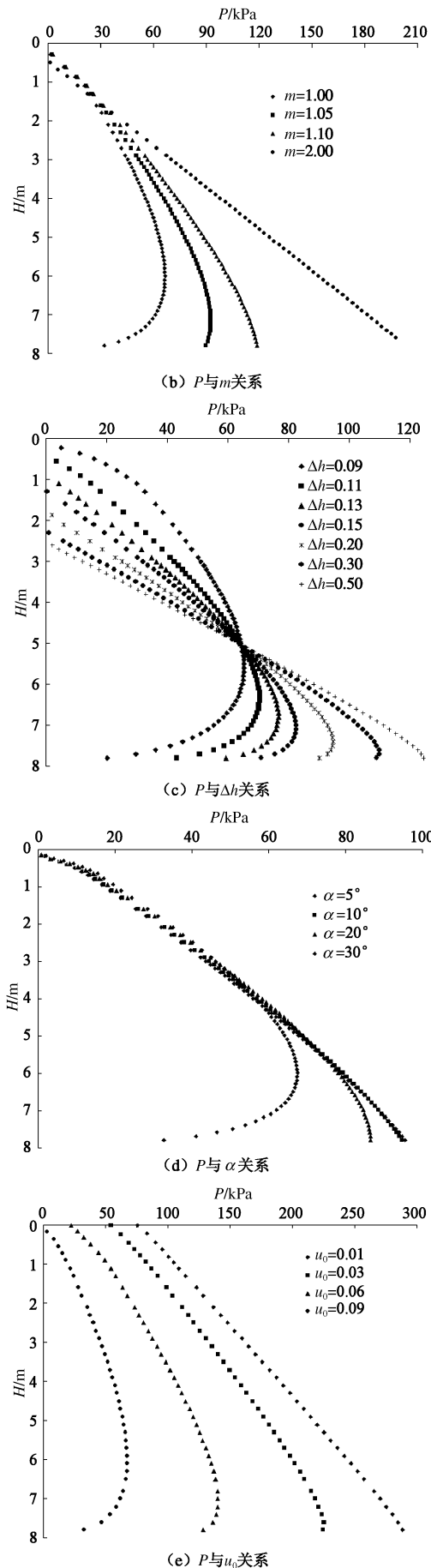


图 6 不同参数情况下的理论分布曲线

Fig. 6 Computed curves under different parameters

2.2 实例应用

为验证本文公式的合理性, 采用一个工程实例进行验证。利用公式 (24) (参数取值如下: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $\beta = 60^\circ$, $G_s = 4 \text{ MPa}$, $H_s = 1 \text{ m}$, $u_h = 0.17 \text{ m}$, $G_2 = 50 \text{ kPa}$, $\alpha = 30^\circ$, $\tau_h = 10 \text{ kPa}$, $u_0 = 0.09 \text{ m}$, $\Delta h = 0.1 \text{ m}$, $m = 1$) 计算出滑坡推力强度分布曲线。并与文献^[17]的实测曲线进行对比如图 7 所示。由此可见, 本文提出的理论曲线与实测曲线吻合良好。

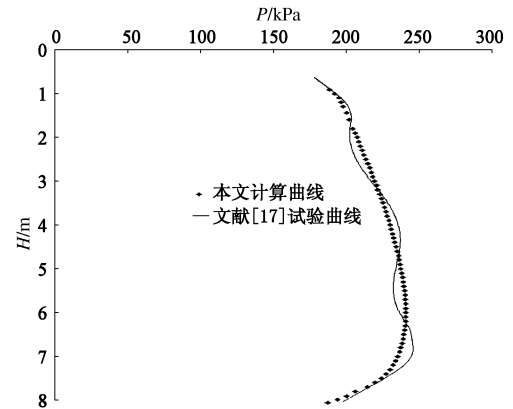


图 7 理论曲线与实测曲线的对比

Fig. 7 Comparison between theoretical and measured curves

3 结 语

考虑堆积体滑坡剪切带具有不同的滑动接触面力学特性, 基于尖点突变理论推导了堆积体滑坡中抗滑桩所受推力大小与强度分布的计算公式。鉴于目前关于堆积体滑坡抗滑桩现场监测资料较少, 进一步开展大型物理模型试验对该公式的适用性进行验证。堆积体滑坡抗滑桩推力强度分布的公式根据参数取值的不同得到了多种形式的分布模式, 如文献[5~8]中提到的三角形、梯形、抛物线形、弓形等“非线性”分布。抗滑桩推力分布特征随参数 G_2 , m , u_0 , α 的增大“非线性”现象愈来愈明显; 随着 Δh 增大“非线性”现象愈来愈不明显。

参考文献:

[1] 张倬元. 滑坡防治工程的现状与发展展望[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 89 - 97. (ZHANG Zhuo-yuan. The present status technical advance and development trend of land slide remedial measures[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(2): 89 - 97. (in Chinese))

[2] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定性安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 344 - 346. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis of safety factor of slope by strength reduction

- FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 344 - 346. (in Chinese))
- [3] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 21(4): 517 - 521. (DAI Zi-hang. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antislides piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 21(4): 517 - 521. (in Chinese))
- [4] 陶波. 抗滑桩上侧向膨胀力与等效锚固力分布规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2003. (TAO Bo. Research on distribution feature of the lateral swelling force and equivalently anchoring force imposed on the ant-sliding pile [D]. Changchun: Jinlin University, 2003. (in Chinese))
- [5] 铁道部第二勘察设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983. (MOR Second Survey and Design Institute. Anti-slide pile design and calculation[M]. Beijing: China Railway Press, 1983. (in Chinese))
- [6] 熊治文. 深埋式抗滑桩的受力分布规律[J]. 中国铁道科学, 2000, 21(1): 48 - 51. (XIONG Zhi-wen. Force distribution rule of deeply buried anti-slide pile[J]. China Railway Science, 2000, 21(1): 48 - 51. (in Chinese))
- [7] 广东省高速公路有限公司. 京珠高速公路粤境北段路堑高边坡病害预防及防治措施研究[R]. 广州: 广东省高速公路有限公司, 2003. (Guangdong Province Expressway Co., Ltd. Study on disaster prevention and treatment measures for high side slope of cutting[R]. Guangzhou: Guangdong Province Expressway Co., Ltd., 2003. (in Chinese))
- [8] 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): 57 - 61. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, ZHANG Lu-yu. Slope stability analysis by strength reduction FEM[J]. Engineering Science, 2002, 4(10): 57 - 61. (in Chinese))
- [9] 王培勇, 彭玉麒, 刘元雪, 等. 基于定点剪出法抗滑桩滑坡推力分布形式的确定[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(2): 1 - 4. (WANG Pei-yong, PENG Yu-qi, LIU Yuan-xue, et al. Distribution of landslide thrust on anti-slide pile ascertained by specified shear opening method[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2010, 26(2): 1 - 4. (in Chinese))
- [10] 王小锋. 两家人堆积体三维地质特征及稳定性评价[D]. 南京: 河海大学, 2007. (WANG Xiao-feng. Study on 3D geologic feature and stability of Liangjia-ren deposits[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [11] 张健. 土石混合体关键力学性质试验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011. (ZHANG Jian. Experimental research on soil-rock mixture in the key mechanical properties[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese))
- [12] QIN S Q, JIAO J J, WANG S J. A nonlinear catastrophe model of instability of planar-slip slope and chaotic dynamical mechanisms of its evolutionary process[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(4): 8093 - 8109.
- [13] ZHANG Ye-min, LUAN Mao-tian, LI Shun-quan. Estimation of liquefaction based on catastrophe theory[J]. 计算力学学报, 2008(4): 237 - 240. (ZHANG Ye-min, LUAN Mao-tian, LI Shun-quan. Estimation of liquefaction based on catastrophe theory[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008(4): 237 - 240. (in Chinese))
- [14] 刘军. 缓倾角层状岩体失稳的尖点突变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 42 - 44. (LIU Jun. Study of catastrophic model with cusp point for failure of stratified rock mass with gentle inclination[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 42 - 44. (in Chinese))
- [15] 张业民, 宋长清. 软黏土流动性的尖点突变模型分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(4): 67 - 70. (ZHANG Ye-min, SONG Chang-qing. Analysis of flowing rule for soft clay with cusp catastrophe model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(4): 67 - 70. (in Chinese))
- [16] 许强, 黄润秋. 地震作用下结构非线性响应的突变分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 25 - 29. (XU Qiang, HUANG Run-qiu. Catastrophic analysis of nonlinear response of structure under earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 25 - 29. (in Chinese))
- [17] 姚晓阳, 周育峰, 刘伯莹. 堆积层古滑坡抗滑桩受力监测及分析[C]// 中国交通建设集团有限公司第一届科技大会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2009: 245 - 251. (YAO Xiao-yang, ZHOU Yu-feng, LIU Bo-ying. Force monitoring and analysis of anti-slide pile in talus slide[C]// The First Session of the Conference on Science and Technology Proceedings of China Communications Construction Group. Beijing: China Communications Press, 2009: 245 - 251. (in Chinese))