

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2012.02.010

抗滑桩内力的 BOTDR 监测分析

刘永莉^{1,2}, 孙红月³, 于 洋¹, 詹 伟¹, 尚岳全¹

(1. 浙江大学 土木工程系, 浙江 杭州 310027; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 浙江大学 海洋科学与工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 为了获取抗滑桩的内力分布数据及客观评价抗滑桩工作状态, 通过在抗滑桩上布置光纤传感器, 对抗滑桩进行桩身应变监测. 研究表明: 该种测量方法实现从抗滑桩浇注完成至滑坡推力作用整个过程的应变变化过程的监测, 成功采集到抗滑桩受力过程中桩身任意深度处的应变; 抗滑桩浇注完成后, 由于混凝土凝固, 首先有一个桩身收缩的过程, 达到稳定的时间约 4 个月; 选取桩身收缩应变完成点作为计算初值, 再依据钢筋混凝土构件计算理论, 对抗滑桩的轴向应力进行计算分析, 得出抗滑桩目前的安全状态评价结论.

关键词: 抗滑桩; 布里渊光时域反射测量计 (BOTDR); 钢筋混凝土; 工作状态;

中图分类号: TU 411

文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2012)02-243-07

BOTDR monitoring analysis of anti-sliding pile internal force

LIU Yong-li^{1,2}, SUN Hong-yue³, YU Yang¹, ZHAN Wei¹, SHANG Yue-quan¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China; 3. Department of Ocean Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to get the internal force distribution data of anti-sliding piles and evaluate their working state, distributed optic fiber sensing technique was used in landslide engineering monitoring strains of anti-sliding piles. Research results show that the process of strain variation from pile casting to push acting on pile is monitored; The strain in arbitrary depth of anti-sliding pile body is successful collected. Strain variation of anti-sliding pile because of the shrinkage of concrete achieves stable time about 4 months. Selecting the strain of the stable time as an initial value, according to the calculation theory of reinforced concrete, anti-sliding pile axial stress is computed and the current state of the safety evaluation of anti-sliding pile is obtained.

Key words: anti-sliding pile; BOTDR; reinforced concrete; working state

在大量工程滑坡发生的背景下, 抗滑桩作为滑坡治理中最有效的手段之一, 得到了广泛的应用^[1-2]. 因此, 抗滑桩的设计理论和工程作用研究的重要性也日益提高, 作为获取抗滑桩实际工作状态的监测技术, 更是随着经济与安全评价的需要而取得的很大的发展.

常用的抗滑桩监测手段有: 在抗滑桩的受力主筋上安装钢筋计, 监测受力主筋的应力变化; 在抗滑桩内设置测斜孔或者在桩顶设置位移观测点监测抗滑桩的侧向位移^[3-6]. 抗滑桩的内力计算也是以这些用常规监测手段获得的物理量作为基础数据^[7-11], 如用地基系数法理论设计计算抗滑桩, 需要知道抗

收稿日期: 2010-07-28.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972187).

作者简介: 刘永莉(1984—), 女, 博士生, 从事分布式光纤传感技术在土木工程中的应用研究. E-mail: maryroseli@126.com

通信联系人: 孙红月, 女, 副教授. E-mail: shy@zju.edu.cn

滑桩在工作过程中的侧向位移;通过测斜获取抗滑桩深部位移的监测手段应用比较成熟,所以应用抗滑桩的侧向位移计算内力的研究较多.但是这些计算公式都是以理想的地基模型理论为依据建立的,在诸多假设基础上,需要对监测数据进行繁琐的处理,计算过程中会将误差放大.钢筋计虽然能够直接获得受力主筋的应力变化,但是在有限的空间内安装大量的钢筋计是很难实现的.在常规监测手段不能获得更多更直接的物理量的情况下,这些算法在抗滑桩设计和内力计算中占据有主导地位,随着监测技术的提高,更多的先进监测技术被应用到抗滑桩监测中,也为抗滑桩的设计计算提供更多更直接的物理量.光纤监测技术能够在短时间内获得大量有效、更直接的物理量,且后续不需要对监测数据进行繁琐处理.

布里渊光时域反射测量计(brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR)是一项可用于土木工程健康监测的新技术,能够在短时间内获得监测对象的大量的应变信息,通过材料的本构关系可直接将监测物理量转化为工程评价所需要的目标物理量,不需要设置大量的假设和经验性参数,具有实时、动态、分布式等诸多优点,受到国内外学者的重视.目前 BOTDR 技术已经被应用到土木工程的各个领域,如隧道、边坡表面及构筑物、基坑工程、岩溶地区及海堤沉降观测等^[12-20].

本文将 BOTDR 技术应用到抗滑桩的桩身应变监测中,成功采集到抗滑桩不同深度的应变信息.以抗滑桩桩体材料的变形破坏特征为依据,无需应用到大量的模型假设和经验性参数,可直接通过应变计算抗滑桩的受力分布.在此基础上,考虑滑坡推力作用,通过桩体材料的变形破坏特征分析,探讨了抗滑桩的工作状态.

1 抗滑桩的分布式光纤监测

1.1 光纤铺设方式的选择

工程中常用的抗滑桩型是钢筋混凝土现场灌注桩,混凝土材质均匀,对光纤的切割作用小,钢筋笼的刚度较大,在混凝土振捣过程中不会发生大的变形和移位,所以可以利用混凝土的黏结作用,将光纤黏结在钢筋上,待混凝土凝结时,光纤、混凝土、钢筋三者之间保持同步变形.抗滑桩受滑坡推力作用,体现在桩身材料上是主筋承担拉力,混凝土承担压力,产生轴向拉、压应变.综合分布式光纤监测技术的优

点及抗滑桩材质的特点,将光纤沿竖向植入到抗滑桩体内,可达到监测抗滑桩受力主筋及混凝土变形的目的.

1.2 分布式光纤监测布置

分布式光纤监测技术应用普通的单模光纤作为传感器,通过在一端测试,即可在短时间内得到整条光纤上的应变分布.在抗滑桩钢筋笼施工期,将光纤与抗滑桩受力主筋捆绑在一起,灌浆完成待混凝土完全固结时,光纤与抗滑桩成为一体,保持同步变形.光纤捆绑在受力主筋上,所以当混凝土产生裂缝时,光纤仍能够和钢筋保证同步变形,监测过程中能够测试到钢筋在受力过程中的应变变化.即使在混凝土产生裂缝的情况下,光纤也不会与混凝土完全脱离开来,这时光纤测试的是混凝土的平均应变.

在某高速公路滑坡治理工程中,抗滑桩的设计长度是 35 m,利用分布式光纤监测开展了抗滑桩桩身变形监测.如图 1 所示是光纤在抗滑桩中布置的示意图, $a-a'-b-b'$ 和 $c-c'-d-d'$ 分别构成光纤监测的回路,其中 $a-a'$ 、 $b-b'$ 、 $c-c'$ 、 $d-d'$ 分别为监测目标光纤段.光纤所在的位置近似以抗滑桩的中心轴线呈对称分布,桩前是靠近路基一侧、桩后是靠近滑坡体的一侧.将光纤应变分析仪与 a 或 b 相接,即可获得 $a-a'-b-b'$ 整条光纤沿线上的应变分布,同样地将光纤分析仪与 c 或者 d 相接,可监测 $c-c'-d-d'$ 光纤沿线上的应变分布.

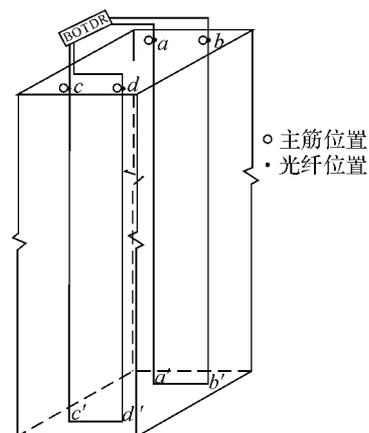


图 1 光纤铺设示意图

Fig. 1 Sketch of optical fiber laying

2 应变曲线特征分析

抗滑桩浇筑完成的一段时间内,混凝土有一个收缩的过程^[21-22],所以在进行抗滑桩内力的计算时,首先要将由收缩引起的应变和与滑坡推力作用

引起的应变分离开来,选取合适的光纤监测初值,计算在滑坡推力作用下抗滑桩的应变应力的变化.为了方便计算,假定混凝土的收缩过程是独立的,且在一定时间内,混凝土收缩完成,抗滑桩开始受滑坡推力作用.在混凝土收缩过程中,光纤所测试的应变随时间呈负向增长,直至收缩稳定,桩后因滑坡推力作用呈受拉状态,应变开始增大,所以以桩后应变与时间的变化曲线出现拐点为界确定滑坡推力开始作用在抗滑桩上的时间.

如图 2 所示为桩后不同埋深位置处应变随时间的变化过程曲线,抗滑桩浇注完成开始进行数据采集.监测结果显示,抗滑桩浇注完成后有一个长期的收缩过程,应变成负向增长.从图 2 可以看到,2009 年 11 月 11 日完成抗滑桩浇注,直至 2010 年 3 月 12 日,对各变形曲线进行统计分析,不同埋深位置处的应变曲线开始呈现上升趋势,桩身变形开始增大.因此,将变形曲线出现拐点的应变作为监测初值,抗滑桩因混凝土的收缩引起的应变大小在 0.098%~0.172%之间,收缩量的大小受抗滑桩埋深影响,收缩稳定时间约 4 个月.

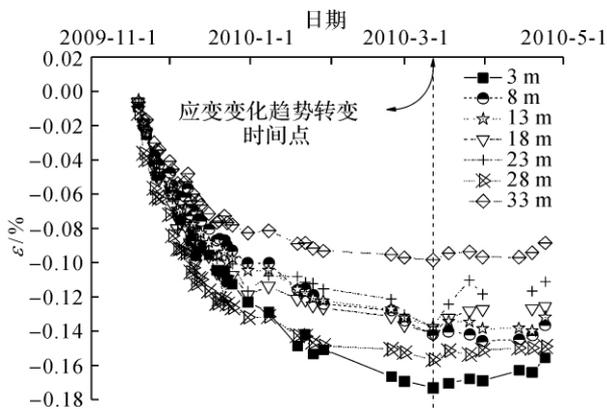


图 2 抗滑桩桩身应变变化过程

Fig. 2 Strain variation process of anti-pile body

如图 3 所示为监测抗滑桩纵剖面图,桩长 35 m,滑面以下约 11 m,桩前因下排抗滑桩施工,开挖施工平台,抗滑桩桩前一段临空,从桩顶至 10 m 处.由于桩前及侧面临空,此段光纤传感器受温度影响较大,桩顶位置受测量扰动误差较大.应变分析时,由于此段抗滑桩受滑坡推力作用较小,桩前取埋入岩土体中桩身应变、桩后对桩埋深 4 m 以下应变变化进行分析,以去除温度效应及测量扰动误差.

如图 4 所示为抗滑桩桩前 (b-b')、桩后 (d-d') 光纤所在位置处在滑坡推力作用下的应变分布, h 是以抗滑桩顶面为起点,抗滑桩的桩身长度.监测结果

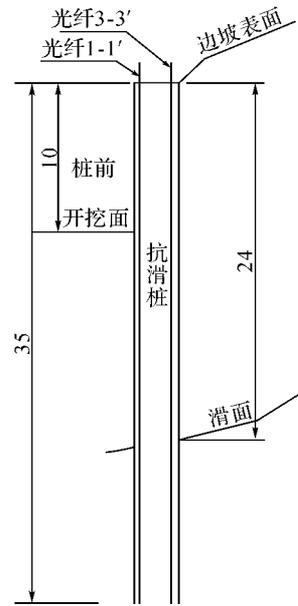


图 3 监测抗滑桩纵剖面图

Fig. 3 Longitudinal impedance profile of monitoring anti-pile

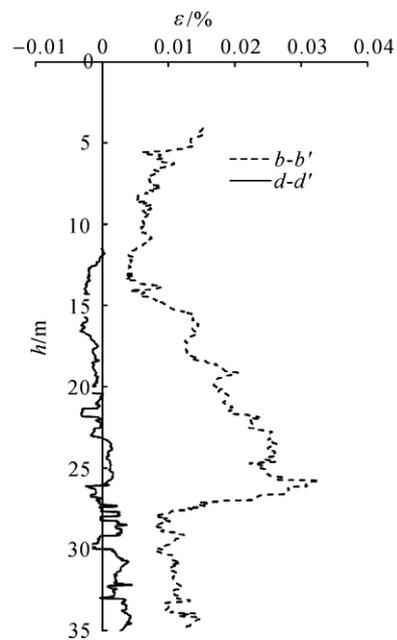


图 4 抗滑桩桩身应变分布

Fig. 4 Strain distribution of anti-pile body

显示,桩后抗滑桩体整体上出现受拉状态,最大拉应变达到 0.033%;应变在抗滑桩桩体中分布不均匀,滑面位置附近应变较突出,且应变最大;抗滑桩桩前基本呈受压状态,整体应变较小,这与滑坡推力作用下,桩前抗滑桩受压,桩后钢筋承担拉力是相吻合的.

如图 5 所示是桩前 c-c'、d-d' 光纤所在位置的应变分布对比,从图中看出,对称位置上桩体的应变变化基本一致,这说明抗滑桩桩身浇注比较均匀、连贯.

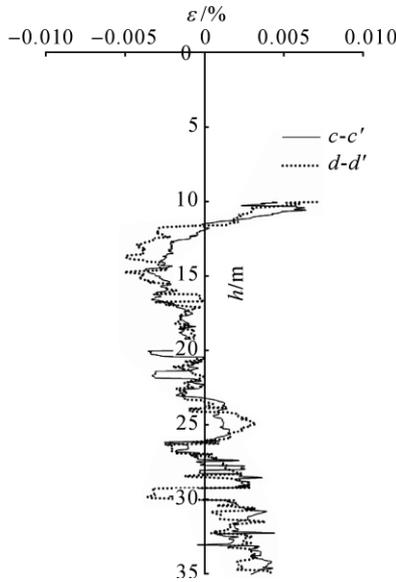


图 5 桩前对称位置处应变对比

Fig. 5 Strain comparison of pre-anti-pile symmetrical position

3 抗滑桩的桩身应力计算

3.1 计算原理

3.1.1 材料的应力应变关系 常用的抗滑桩型是钢筋混凝土现场灌注桩,在抗滑桩变形后截面应变满足平截面假定的条件下,钢筋和混凝土的应力应变关系如下^[23]:

混凝土的应力应变关系如下:

当 $\epsilon_c \leq \epsilon_0$ 时,

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^n \right] \quad (1)$$

当 $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$ 时,

$$\sigma_c = f_c \quad (2)$$

$$\epsilon_0 = 0.002 + 0.5 (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (3)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (4)$$

$$n = 2 - \frac{1}{60} (f_{cu,k} - 50) \quad (5)$$

式中: ϵ_c 为混凝土的压应变; σ_c 对应于混凝土压应变为 ϵ_c 时的混凝土压应力; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; ϵ_0 对应于混凝土压应力刚达到 f_c 时的混凝土压应变,当计算的 ϵ_0 值小于 0.002 时, ϵ_0 取为 0.002; ϵ_{cu} 正截面处于非均匀受压时的混凝土极限压应变,当计算的 ϵ_{cu} 值大于 0.0033 时, ϵ_{cu} 取为 0.0033; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值; n 为计算系数,当计算值大于 2.0 时,取为 2.0.

钢筋的应力应变关系如下:

当 $0 < \epsilon_s \leq \epsilon_y$ 时:

$$\sigma_s = \epsilon_s E_s \quad (6)$$

当 $\epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$ 时,

$$\sigma_s = f_y \quad (7)$$

式中: ϵ_s 为钢筋受拉时的拉应变; σ_s 为对应于钢筋拉应变为 ϵ_s 时的拉应力; ϵ_y 为钢筋屈服时的屈服应变; f_y 对应于屈服应变 ϵ_y 时的屈服强度; E_s 为受拉钢筋的弹性模量; ϵ_{su} 为受拉钢筋的极限拉应变,取值为 0.01.

3.1.2 截面应变分布计算 如图 6 所示为截面设计参数已知,知道 ϵ_s, ϵ_c ,则可求得截面应变分布,按平截面假定计算可得

$$y = \frac{(h_0 - a') \epsilon_c}{\epsilon_s + \epsilon_c} \quad (8)$$

受压区高度为

$$x_c = y + a' \quad (9)$$

受压区边缘混凝土的压应变为

$$\epsilon'_c = \frac{x_c}{y} \epsilon_c \quad (10)$$

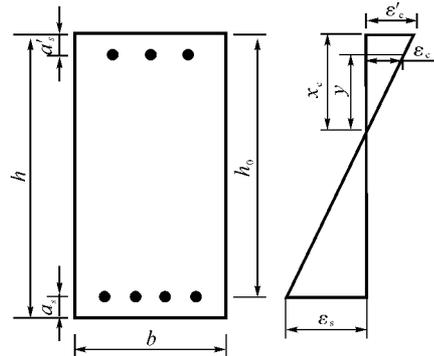


图 6 截面应变分布计算示意图

Fig. 6 Sketch of section strain distribution calculation

3.2 计算结果分析

抗滑桩在滑坡推力作用下,桩后钢筋承担拉应力,桩前混凝土承担压应力,作用方向都是轴向的.分布式光纤传感器应变监测得到的是轴向应变的分布,所以根据应力应变公式可直接将应变转换成应力,中间误差较小.

根据图 4 桩前、桩后应变曲线分布特征,分段计算抗滑桩截面应力.

工程中使用 C30 混凝土,查表 $f_c = 14.3 \text{ MPa}$, $f_{cu,k} = 20.1 \text{ MPa}$,根据式(3)、(4)、(5)分别计算得 $\epsilon_0 = 0.00185$,小于 0.002,则取 $\epsilon_0 = 0.002$; $\epsilon_{cu} = 0.0036$,大于 0.0033,取计算值; $n = 2.0$.目前测试结果显示混凝土最大压应变为 0.00373%,小于 ϵ_0 .按式(1)进行计算.

实际监测最大拉应变为 0.033%,按式(6)对钢筋的拉应力进行计算.抗滑桩处于受拉状态,当混凝土未出现拉裂缝时钢筋与混凝土保持同步变形,则式(6)中的弹性模量应按钢筋与混凝土的等效弹性模量计算,计算式如下:

$$E_e = \eta_A E_s + E_c \quad (11)$$

式中: E_e 为等效弹性模量, η_A 为抗滑桩截面配筋率, E_s 为钢筋弹性模量, E_c 为混凝土弹性模量.抗滑桩各段弹性模量值计算见表 1.

表 1 抗滑桩等效弹性模量(桩长 35 m)

h/m	$E_e/(10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2})$
0~7	3.45
7~10	3.52
10~20	3.63
20~35	3.90

如果按等效模量计算拉应力大于混凝土的设计拉应力,则混凝土退出工作,不承受拉应力,按钢筋弹性模量计算.C30 混凝土的拉应力设计值是 1.43 MPa,抗滑桩中光纤所在位置处截面应力计算结果见图 7.

图 7 是抗滑桩轴向应力分布图,钢筋所受最大拉应力是 65 MPa,在滑面位置附近;从抗滑桩埋深 14 m 至滑面位置处,轴向应力近似呈线性增长,滑面以下应变基本呈矩形分布,桩前压应力很小.监测结果表明,目前滑坡体仍在变形阶段,滑坡推力逐渐施加到抗滑桩上,而且在滑面处变形较明显,应力最大;锚固段的应力随深度变化较小,说明锚固段岩体完整性较好.

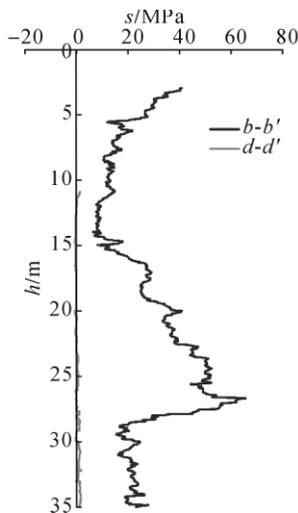


图 7 抗滑桩轴向应力分布图

Fig. 7 Axial stress distribution of anti-pile

4 抗滑桩的工作状态分析

通过应力计算,得到光纤所在位置处任意埋深的轴向应力大小,进而可通过应力及应变大小与钢筋混凝土的设计值对比,对抗滑桩的工作状态进行分析.

钢筋混凝土抗滑桩可看成是受弯构件,在滑坡推力的作用下,抗滑桩截面都将以中和轴分为受压区和受拉区;混凝土的抗拉强度很低,故需要在受拉区配置钢筋来承受拉力,由于抗滑桩的实际受力情况比较复杂,设计中在桩前、桩后都设置受力主筋.抗滑桩的破坏体现在材料上是桩后主筋达到屈服强度、桩前边缘混凝土的应变达到极限压应变 ϵ_{cu} 时,混凝土会出现大的裂缝而被压碎,梁的弯矩达到极限弯矩.

抗滑桩在 14.5 m 处的压应变最大,取 14.5 m 处截面按照平面假定进行分析.

抗滑桩设计参数: $a_s = a'_s = 105 \text{ mm}$, $h = 3\ 000 \text{ mm}$,监测值: $\epsilon_s = 0.005\ 61\%$, $\epsilon_c = 0.003\ 73\%$,则根据式(8)~(10)计算得受压区边缘混凝土的压应变, $\epsilon'_c = 0.004\ 1\%$,远远小于混凝土的极限压应变 ϵ_{cu} .

从监测结果分析,钢筋所受最大拉应力是 65 MPa,而钢筋的设计强度是 360 MPa,钢筋的强度发挥了 18%;受压区边缘混凝土的压应变是 0.004 1%,远小于混凝土的极限压应变,目前抗滑桩变形完全处于安全状态,对滑坡的变形发展还有较高的承受能力.

5 结 论

根据分布式光纤监测技术的特点,结合抗滑桩的几何受力特征,采用 BOTDR 监测技术对抗滑桩的变形进行监测,并结合钢筋混凝土构件的计算理论,对抗滑桩的内力进行了计算分析,得到以下结论:

(1) 将分布式光纤监测技术应用到滑坡抗滑桩工程监测中,可实现对抗滑桩从浇注完成、桩身混凝土凝结收缩及开始发挥抗滑作用整个过程的变形监测.监测结果显示,抗滑桩在施工完成后,桩体混凝土材料有个较长时期的收缩过程.掌握抗滑桩收缩的时间变化过程,可为准确分析和判断抗滑桩受滑坡推力作用的大小情况提供可靠依据.

(2) 选择合理的光纤铺设方式,将光纤植入到抗滑桩体内,能够全面监测到抗滑桩不同深度位置处的应变信息,在此基础上可以对抗滑桩的应力分

布进行计算分析,由此可以掌握抗滑桩的受力状态,以为抗滑桩的内力计算提供新的研究思路。

(3) 通过应用分布式光纤监测技术对某滑坡治理期间的抗滑桩变形情况进行连续监测,并通过内力计算分析,对抗滑桩的工作状态进行评价,目前抗滑桩处于安全状态,监测结果对于分析工程安全具有重要的指导意义。

本文成功的将分布式光纤技术用于抗滑桩内力监测及工作状态评价中,为抗滑桩的内力监测及滑坡治理工程效果评价提供了一种新的手段。本试验目前仍在进行之中,后续将对监测数据进行更深层次的挖掘,将对目前监测过程中出现的问题进行分析修正,组成一个完整的抗滑桩工作状态监测评价系统,将对滑坡安全状态评价及抗滑桩设计、施工具有重要的意义。

参考文献(References):

- [1] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983: 2-13.
- [2] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 394-397.
- [3] 沈强, 陈从新, 汪稔, 等. 边坡抗滑桩加固效果监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 934-938.
SHEN Qiang, CHEN Cong-xin, WANG Ren, et al. Monitoring and analysis of reinforcement effect on slope anti-slide piles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6): 934-938.
- [4] 任伟中, 陈浩, 唐新建, 等. 运用钻孔测斜仪监测滑坡抗滑桩变形受力状态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3667-3672.
REN Wei-zhong, CHEN Hao, TANG Xin-jian, et al. Study on monitoring of deformation and stree state of landslide anti-slide piles using borehole inclinometer [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Supp. 2): 3667-3672.
- [5] 韩艳芬, 赵蔚东, 杨昌键, 等. 八尺门滑坡锚索抗滑桩施工与监测 [C]// 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 西安: 中国科学技术出版社, 2002: 807-809.
HAN Yan-fen, ZHAO Wei-dong, YANG Chang-jian, et al. Constructing and monitoring of anti-slide piles with anchor cables on Bachimen landslide [C]// *In: Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, Academic Conference Proceedings Seventh*. Xi'an: China Science and Technology Press, 2002: 807-809.
- [6] 阮波, 李亮, 刘宝琛, 等. 许家洞滑坡治理工程监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1445-1449.
RUAN Bo, LI Liang, LIU Bao-chen, et al. Analysis on deformation monitoring and tendency of Xujiadong landslide [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(8): 1445-1449.
- [7] 申永江, 孙红月, 尚岳全, 等. 基于测斜数据的抗滑桩工作状态的评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(A02): 3591-3596.
SHEN Yong-jiang, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan, et al. Evaluation of state of anti-slide piles based on inclinometer data [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(A02): 3591-3596.
- [8] 申永江, 孙红月, 尚岳全, 等. 抗滑桩内力的监测与计算[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 18-22.
SHEN Yong-jiang, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan, et al. Monitoring and calculation of anti-slide piles internal force [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2009, 36(5): 18-22.
- [9] 戴自航, 沈蒲生, 彭振斌. 弹性抗滑桩内力计算新模式及其有限差分法[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 99-104.
DAI Zi-hang, SHEN Pu-sheng, PENG Zhen-bin. A new mode for calculating internal forces of stabilizing pile [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(4): 99-104.
- [10] 聂文波, 张利洁, 胡江运. 滑坡治理中抗滑桩设计推力计算探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 2): 5050-5052.
NIE Wen-bo, ZHANG Li-jie, HU Jiang-yun. Study on designed thrust of anti-slide pile [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(Supp. 2): 5050-5052.
- [11] 宋从军, 周德培, 肖世国. 岩石高边坡埋入式抗滑桩的内力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 105-109.
SONG Cong-jun, ZHOU De-pei, XIAO Shi-guo. Calculation of internal force of embedded anti-slide pile in high rock slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(1): 105-109.
- [12] 张丹, 施斌, 徐洪钟, 等. BOTDR 用于钢筋混凝土 T 型梁变形监测的试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2004, 34(4): 480-484.
ZHANG Dan, SHI Bin, XU Hong-zhong, et al. Experimental study on the deformation monitoring of reinforced concrete T-beam using BOTDR [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science*, 2004, 34(4): 480-484.
- [13] 施斌, 张巍, 王宝军. 预制桩损伤分布式光纤检测方法 and 系统: 中国, 200610086082. 1[P]. 2007-01-24.
SHI Bin, ZHANG Wei, WANG Bao-jun. Prefabricated pile test method and systems with distributing optical fiber

- sensing; China, 200610086082.1[P]. 2007-01-24.
- [14] 张俊义,晏鄂川,薛星桥,等. BOTDR 技术在三峡库区崩滑灾害监测中的应用分析[J]. 地球与环境, 2005, 33(增刊): 355-358.
ZHANG Jun-Yi, YAN E-Chuan, XUE Xing-Qiao, et al. The application of BOTDR on geological hazards monitoring in three Gorges [J]. *Earth and Environment*, 2005, 33(supplement): 355-358.
- [15] 李世海,魏作安,张俊红,等. 光纤光栅传感技术在抗滑桩模型实验中的应用[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(3): 84-88.
LI Shi-hai, WEI Zhuo-an, ZHANG Jun-hong, et al. Application of fiber grating sensing technology in model [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, 25(3): 84-88.
- [16] 魏广庆,施斌,余小奎,等. BOTDR 分布式检测技术在复杂地层钻孔灌注桩测试中的应用研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 826-832.
WEI Guang-qing, SHI Bin, YU Xiao-kui, et al. Botdr based distributed strain test on bored pile buried in complicated geological ground [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(6): 826-832.
- [17] 高俊启,施斌,张巍,等. BOTDR 检测钢筋混凝土梁分布式应变的试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 74-79.
GAO Jun-qi, Shi Bin, Zhang Wei, et al. An experimental study for measuring the distributed strain of reinforced concrete beam using botdr [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(9): 74-79.
- [18] 施斌,徐洪钟,张丹,等. BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(3): 493-499.
SHI Bin, Xu Hong-zhong, Zhang Dan, et al. Feasibility Study on Application of BOTDR to Health Monitoring for large Infrastructure Engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 493-499.
- [19] 隋海波,施斌,张丹,等. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 22(增刊 2): 3725-3731.
SUI Haibo, SHI bin, ZHANG Dan, et al. Study on distributed optical fiber sensor—based monitoring for slope engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 22(supp. 2): 3725-3731.
- [20] 葛捷. 分布式布里渊光纤传感技术在海堤沉降监测中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1856-1860.
GE Jie. Application of BOTDR to monitoring sea dyke subsidence [J]. *Rock and soil Mechanics*, 2009, 30(6): 1856-1860.
- [21] 时旭东,过镇海. 钢筋混凝土结构的温度场[J]. 工程力学, 1996, 13(1): 35-43.
HI Xu-dong, GUO Zhen-hai. Analysis of the temperature field of reinforced concrete structure [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1996, 13(1): 35-43.
- [22] 李悦,谈慕华,张雄,等. 混凝土的自收缩及其研究进展[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(3): 252-257.
LI Yue, TAN Mu-hua, ZHANG Xiong, et al. Autogenous shrinkage of concrete and its research progress [J]. *Journal of building Materials*, 2000, 3(3): 252-257.
- [23] 舒士霖. 钢筋混凝土结构[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996: 82-84.

下期论文摘要预登

产品方案设计约束模型及其演化博弈算法求解

林晓华, 冯毅雄, 谭建荣

(浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对产品方案设计这一有约束的系统求解问题, 通过分析产品方案设计在概念与特性上与约束满足问题(CSP)的相似性, 将方案求解问题映射到 CSP 中来表示方案设计, 对应 CSP 中的变量、变量的域和约束集建立产品方案设计 CSP 模型. 采用演化博弈算法求解 CSP 模型, 将方案设计求解问题的搜索空间映射为博弈的策略组合空间, 将评价函数映射为博弈的效用函数. 通过主体的顺序最优反应达到均衡状态, 并不断对均衡状态施加扰动而重新恢复均衡从而搜寻到更优的均衡状态, 最终达到对应于全局最优解的 Pareto 最优均衡状态. 以透平膨胀机的方案设计为例验证了所提理论和方法的可行性和有效性.

关键词: 方案设计; 功构映射; 约束满足问题(CSP); 演化博弈算法