

软岩高边坡预应力锚索抗滑桩的设计计算

曹兴松, 周德培

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 目前已提出了多种预应力锚索抗滑桩的设计计算方法, 例如按 Winkler 弹性地基梁的方法、锚索与桩的协调变形的等等。由于软弱岩体的变形特征, 结构与岩体的相互作用机理较为复杂, 这些方法难以直接应用于软岩高边坡工程, 需要加以分析改进。应该分析预应力锚索抗滑桩的施工顺序、实际受力条件、锚索预应力的主要控制因素等, 分阶段进行计算, 这样得出的计算结果才有可能与实际情况一致。在充分吸取现有计算方法优点的基础上, 提出了改进的方法。通过实际工程的计算, 得出了较为符合实际情况的结果。

关键词: 预应力锚索; 抗滑桩; 设计; 软岩

中图分类号: X141

文献标识码: A

预应力锚索抗滑桩的设计计算现今没有相关的规范, 各设计单位一般按照各自的计算方法并根据工程经验进行设计。鉴于预应力锚索抗滑桩在工程中的大量应用, 对其计算方法适用性的研究应具有重要意义。软岩有较大的变形特征, 当采用预应力锚索抗滑桩加固软岩高边坡时, 在锚索张拉阶段, 桩受锚索张力作用而向坡体内侧位移, 张拉完毕在工作阶段, 坡体发生较大位移而产生滑坡推力作用在桩上。因此这两个阶段锚索抗滑桩的内力是不相同的。目前的预应力锚索抗滑桩的设计计算方法没有考虑施工工序和锚索桩的实际受力条件, 要将这些方法用于软岩高边坡预应力锚索抗滑桩的设计计算, 应该做必要的改进。文献^[1]在这方面做了一些研究, 本文在此基础上做进一步研究。在分析各计算方法的基础上, 提出了用于软岩边坡工程的改进的计算方法, 供工程界参考。

1 现有设计计算方法的分析

1.1 预应力锚索桩的计算

现有设计计算包括锚索和抗滑桩的设计计算。对于锚索主要指锚索预应力和张拉力的计算; 对于抗滑桩则主要是在预应力锚索和滑坡推力作用下的内力和变形。锚索和抗滑桩作为一个整体, 在计算

中有一个锚与桩协调变形的问题。因此目前预应力锚索抗滑桩桩身内力常用的计算方法^[2-11] 根据是否考虑锚索与桩的协调变形可分为两种。

第一种计算方法的力学模型如图 1 所示, 该法中直接将预应力与滑坡推力作为荷载施加在桩上, 滑面以上按结构静力问题计算, 滑面以下按 Winkler 弹性地基梁计算。这种方法计算较简单, 不考虑锚索与抗滑桩的变形协调, 认为锚索的拉力就是所施加的预应力, 在工作过程中其值保持不变。

第二种计算方法的力学模型也可参见图 1, 该法也将预应力与滑坡推力作为荷载, 但在计算滑坡

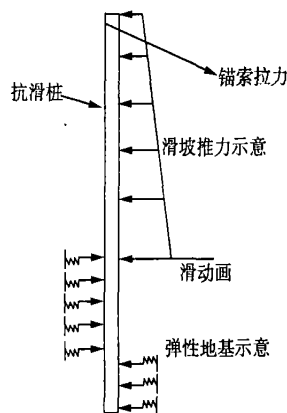


图 1 第一种方法计算模型示意图
Fig. 1 Calculating model for the first method

收稿日期 (Received date): 2005- 01- 20; 改回日期 (Accepted): 2005- 04- 15。

作者简介 (Biography): 曹兴松 (1972-), 男, 西南交通大学土木工程学院岩土工程专业博士研究生, 主要从事岩土体大变形及其稳定性的研究 [Cao Xingsong, male, born in 1972. Doctorate candidate of School of Civil Engineering of Southwest Jiaotong university. Mainly engaged in research work of rockmass deformation and its stability.]

推力作用时考虑了锚索与桩的协调变形, 因此锚索拉力在工作过程中是变化的, 即考虑了预应力施加后由于滑坡推力作用引起的锚索内力的改变, 这种方法理论上较第一种方法合理。

以上两种计算方法中, 一般不考虑桩前滑面以上岩土体的作用, 或者将桩前岩土体的剩余抗滑力按一定的分布形式作用在抗滑桩上, 作为外力以考虑桩前岩土体的作用。对于桩前岩土体的考虑方法, 同样存在着不确定的问题, 即桩前岩土体的抗力未必就是其剩余抗滑力。由于第二种计算方法的合理性, 预应力锚索抗滑桩的计算也多趋向于采用该方法^[2,7,11]。但第一种方法和第二种方法在计算过程中均隐含了这样一个事实, 即计算预应力荷载作用下抗滑桩的内力时采用了如图 2 所示的力学计算模型, 从该模型中可见滑面以上桩段按一般静力结构计算, 在滑面以下可按 Winkler 弹性地基梁计算。但根据抗滑桩的实际工作条件可知在抗滑桩施工完毕后桩即与其周围岩土体紧密结合, 抗滑桩后面是它所支撑的滑坡岩土体, 所以当桩受到预应力作用时, 滑面以上的桩段由于其后部岩土体的支撑其受力模式也应视为弹性地基梁来计算, 如果忽略了桩后岩土体的存在而将其视为悬臂结构进行计算(如图 2), 这与抗滑桩的实际工作条件是不符合的。

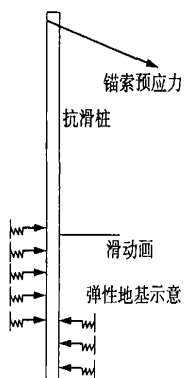


图 2 第二种方法中预应力作用下的计算模型

Fig. 2 Calculating model for the second method

1.2 锚索预应力的计算方法

在锚索抗滑桩的设计计算中, 锚索预应力的取值对抗滑桩的内力计算影响较大, 目前关于锚索预应力值的确定方法, 大致可分为以下几种。

第一种方法, 用控制桩顶位移法来计算锚索的拉力^[12]。设在锚索拉力 T 和滑坡推力共同作用下, 允许桩顶最终产生水平位移为 y_2 , 并设为在滑坡推力作用下桩顶产生的水平位移, 为在锚索拉

力 T 作用下桩顶产生的水平位移, 则, 将和的表达式代入该式就可求出 T 。

第二种方法, 用作用在每根桩上的滑坡推力、桩前滑面以上岩土抗力, 计算出抗滑桩埋入滑床顶面处的剪力 Q_0 来确定锚索设计拉力 T ^[13]。预应力锚索抗滑桩一般设计为柔性桩。由于桩顶水平位移控制在 3 cm 左右, 锚索相当于一个铰性支点。预应力锚索抗滑桩类似于简支梁式结构, 滑坡推力在梁上分布近似矩形, 滑坡推力和桩前岩土抗力之合力作用点大致在桩高的中间, 故认为锚索拉力设计为 $(1/2 \sim 4/7) Q_0$ 比较合理。

第三种方法, 以桩在滑面处弯矩为零的条件来设计锚索张拉力(预应力)^[4]。即根据计算出的滑坡推力, 取适当的分布形式(一般取为矩形分布), 根据桩在滑面以上所受的滑坡推力和锚索张拉力进行静力计算, 使桩在滑面处的弯矩为零, 由此可得出锚索预应力。

第四种方法^[8], 根据作用于桩上的滑坡推力荷载先求出使桩的正负弯矩大致相等时锚索所承担的总拉力 T_t , 然后再根据锚索与桩的变形协调条件求出滑坡推力作用下锚索中增加的拉力 T_z , 则锚索所需施加的预应力 T 可写为 $T = T_t - T_z$ 。

以上四种方法中, 前三种方法虽然确定锚索预应力的条件互不相同, 但它们都没有考虑滑坡推力作用下由于锚索与桩的协调变形而引起的锚索拉力增加部分, 这是它们的共同缺点。第四种方法考虑了锚索与桩的协调变形条件下锚索中增加的拉力部分, 并在确定预应力值时考虑了这一增加拉力的影响, 但该法在确定锚索总拉力时由于其计算模型上的不足(如前所述, 未考虑预应力施加时桩后岩土体的作用)而使得预应力值的计算显得不够准确, 前 3 种方法也存在此问题。另外, 4 种方法中, 都是根据某个单一的条件确定预应力的施加值, 而在实际中, 应根据具体情况综合考虑预应力施加的主要目的, 从而根据最主要的控制条件来确定锚索预应力, 而不是在任何时候都采取相同的条件, 如桩的受力、位移、桩前滑体抗力等因素。

2 预应力锚索抗滑桩的改进计算方法

2.1 计算基本假定

要合理地进行预应力锚索抗滑桩的设计计算, 应考虑桩后土体的变形、锚索张拉等问题。针对这些问题提出改进计算方法。建议根据预应力锚索抗滑桩的施工顺序及实际受力条件, 分阶段进行计算。主要采用了以下几个基本假定:

1. 桩与锚索按弹性结构进行计算, 地基考虑为线性 Winkler 模型。
2. 桩与周围岩土体紧密结合, 预应力锚索基本不松弛。
3. 锚索桩所承受的滑坡推力按桩“中 中”的滑体推力进行计算, 可依据具体情况将其简化为三角形、矩形或梯形分布荷载, 不考虑桩与周围岩土的摩擦力以及桩底反力等的作用, 滑动面在整个工作过程中不会改变。

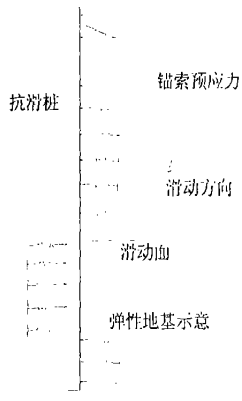


图 3 改进方法中第一阶段计算模型

Fig. 3 The first step calculating model for the improved method

2.2 基本计算原理及过程

根据预应力锚索抗滑桩的实际受力过程和条件, 分为两个主要的计算阶段。

第一阶段为抗滑桩施工完毕至锚索张拉到设计值的阶段。此时锚索由于张拉端最终锚固于桩上而使桩承受锚索预应力的作用, 锚索相当于施加一个集中荷载于抗滑桩上。由于抗滑桩与桩后的岩土体紧密接触, 所以滑面以上桩段在承受锚索预应力作用发生变形时也会受到其后岩土体的变形反力作用, 也应将其视为弹性地基梁模型, 由此可得该阶段中抗滑桩在锚索预应力作用下的力学计算模型如图 3 所示。抗滑桩无论是滑面以上还是滑面以下均按弹性地基梁模型进行计算。软岩边坡在锚索张拉前会发生部分变形, 可能产生部分滑坡推力作用到抗滑桩上, 此时应先按普通抗滑桩计算桩在该滑坡推力作用下的内力, 之后再按上述模型计算抗滑桩仅在预应力作用下的内力, 再将二者的计算结果相叠加, 共同作为该阶段抗滑桩的内力计算结果。注意在此阶段中, 虽然锚索相当于施力结构, 但此时锚索已经有了初始拉力值, 即为所施加的预应力。

第二阶段为锚索张拉完毕后滑坡推力逐渐作用到抗滑桩上的阶段, 此时锚索与桩作为一个整体共

同承受滑坡推力的作用, 锚索与桩的变形相协调。在该阶段由于桩后岩土体的不断变形而将滑坡推力传递到锚索抗滑桩上, 此时滑面以上的桩段在不考虑桩前岩土体的作用时可视为在桩顶弹性嵌固的静力承载结构, 不再按弹性地基梁模型进行计算, 而滑面以下的桩段仍应按弹性地基梁计算。在第二阶段计算中应注意桩后的滑坡推力是否需要修正。因为经过第一阶段计算之后, 在预应力的作用下滑面以上桩后的岩土体受到了指向坡体内侧的作用力, 即桩在承受地基反力作用的同时也对岩土体产生了大小相等、方向相反的力, 在此将其称为桩对坡体的预加固力。在此预加固力作用下, 抗滑桩原有的滑坡推力是否受到影响而需要修正是值得进一步探讨的问题, 在此按下述原则对原计算的滑坡推力进行修正。通过图 4 可以对滑坡推力修正的原则做出示意性的说明。在第一阶段计算后, 可以得到预加固力在桩后岩土体上的分布, 设如图 4 (a) 所示, 方向与 y 坐标正向相同, 取为正值; 设滑坡推力分布如图 4 (b) 所示, 方向与 y 坐标相反, 取为负值。将图 4 (a) 与图 4 (b) 进行叠加后所得的滑坡推力即为修正后的滑坡推力, 如图 4 (c) 所示。在修正后的滑坡推力分布中, 如果滑坡推力的方向指向了坡体内侧, 即滑坡推力变为了正值, 应该将其取为零, 因为在预加固力的作用下, 抗滑桩承受的滑坡推力只有可能减小, 而不可能改变方向变成对桩的拉力。

经过上述的滑坡推力修正后, 预应力锚索抗滑桩在第二阶段的力学计算模型如图 5 所示。第二阶段的计算是在第一阶段的基础上进行的, 通过第一阶段的计算, 可将得到的预加固力对桩后的滑坡推力进行修正, 同时锚索与桩开始作为一个有机整体来共同承受滑坡推力的作用。根据基本假定 (1), 第二阶段与第一阶段的计算结果相叠加, 即可得最终的结构 (包括锚索与桩) 内力与变形和锚固段地基反力。

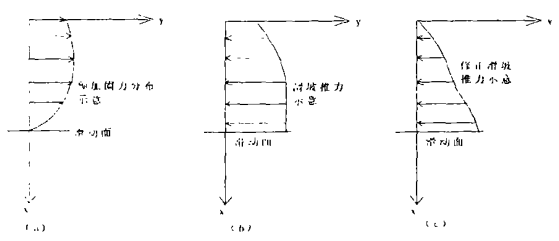


图 4 滑坡推力修正示意图

Fig. 4 The correcting schematic diagram of landslide thrust

3 算例

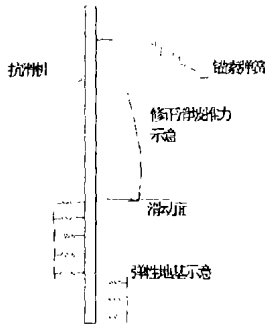


图 5 改进方法第二阶段计算模型

Fig. 5 The second step calculating model for the improved method

图 6 是某软岩边坡工程的锚索抗滑桩，桩长 45.5 m，用土压盒和钢筋计测桩上坡体压力和桩内力。桩的靠山侧设 15 个土压盒，靠河侧为 14 个，成对分布，共计 29 个土压盒。靠山侧和靠河侧分别设 $\Phi 32$ 钢筋计 11 个，成对分布共 22 个。还在桩头四束锚索的锚头上安装了 4 个 1 200 kN 荷载传感器。该抗滑桩是在 2001- 11- 02 安装测试元件和完成桩体混凝土施工的。在 2001- 12- 16 进行锚索的张拉锁定，在此日期前抗滑桩属于普通抗滑桩。该锚索桩每束锚索都由 12 根 $\Phi 15.2$ 钢绞线组成，设计张拉力为 1 200 kN，四束共计 4 800 kN，在 2001- 12- 16 张拉锁定后四束均为 1 200 kN，与水平面的平均夹角为 30° 。

根据桩后实测土压力做出几个日期内测量的土压力沿桩身的分布如图 7 所示，从中可以看出除了 2001- 11- 2 的值较小外，其余时间的土压力数值相差不多。从图中土压力的分布图形和趋势，可认为滑动面位于距抗滑桩桩顶 21.0 m 的位置，此下部为抗滑桩的锚固段。抗滑桩为半坡桩，考虑桩前 3.0 m 深度以下岩土体的抗力，坡体在滑面以上地基比例系数取为，滑面以下地基抗力系数为。

在此利用改进计算方法求解预应力锚索抗滑桩的内力，以锚索张拉后 2002- 12- 18 的各实测数值为依据进行计算和结果分析比较。2002- 12- 18 的锚索拉力衰减至原设计拉力的 90% 左右，在此近似取为每束锚索的预应力为 1 000 kN。建立第一阶段的计算桩模型，不考虑锚索张拉前作用在桩上的滑坡推力，只计算抗滑桩在锚索水平向预应力作用下的内力和变形，最后得出由于锚索预应力的施加，使得抗滑桩能对桩后距桩顶 13.0 m 范围内的岩土体产生 4 676 kN 的预压力，设此预压力均匀分布于岩体深度上。

示，将其分为两个矩形分布的土压力，如图中虚线

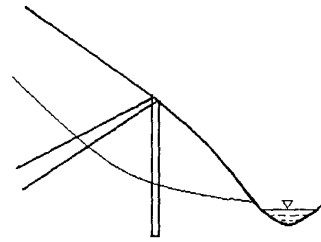


图 6 某工程的预应力锚索抗滑桩

Fig. 6 Anti-slide pile with prestressed anchor rope and its arrangement of test points

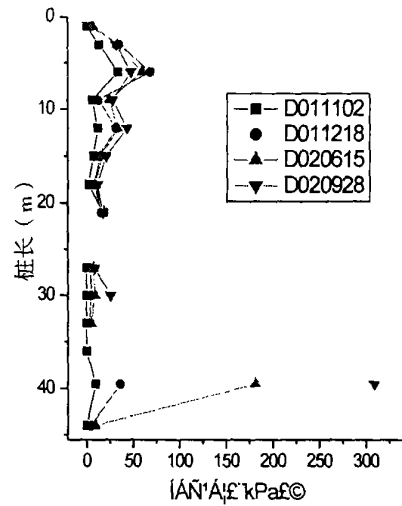


图 7 锚索抗滑桩桩后土压力分布

Fig. 7 The soil pressure acting on the pile

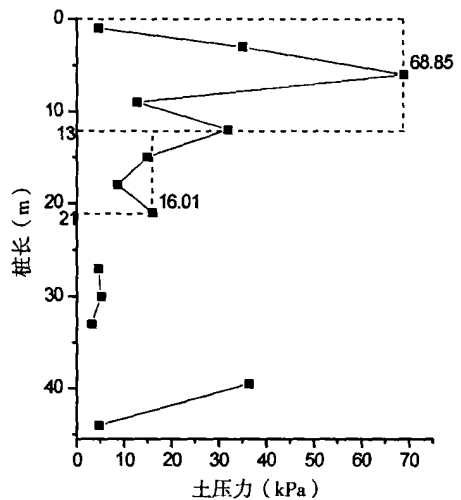


图 8 2002- 12- 18 桩后土压力

The soil pressure acting on the pile from the test results of December 18 / 2002

2002- 12- 18 桩后实测土压力分布如图 8 所

所示, 通过分析可认为在 13.0 m 以上的土压力分布是由于锚索预应力的施加产生的预压力, 13.0 m 以下为滑坡推力产生的土压力分布。通过理论计算可知在锚索预应力施加前, 在 13.0 m 以上作用于桩上的滑坡推力为 2 796.4 kN, 将其视为均布在抗滑桩距桩顶 13.0 m 范围内的滑坡推力, 在加上抗滑桩深度范围内 13.0~21.0 m 的滑坡推力, 可得第二阶段的计算模型。注意此时由于预应力锚索尚未施工完毕, 所以抗滑桩应作为普通桩进行计算。由于是弹性设计, 将第一和第二阶段的计算结果叠加, 即可得到预应力锚索施工完毕后 2002-12-18 抗滑桩的内力计算结果。其剪力如图 9 所示, 根据抗滑桩两侧的实测钢筋应力和配筋图, 可得锚索抗滑桩此时的弯矩分布, 与计算结果的对比一并示于图 10 中。

从计算弯矩与实测弯矩的对比图可以看出, 二

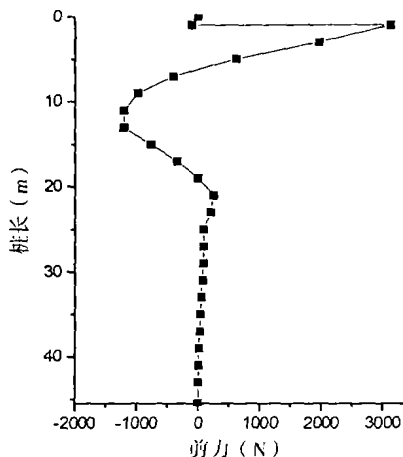


图 9 预应力锚索桩的剪力图

Fig. 9 shear force acting on the pile

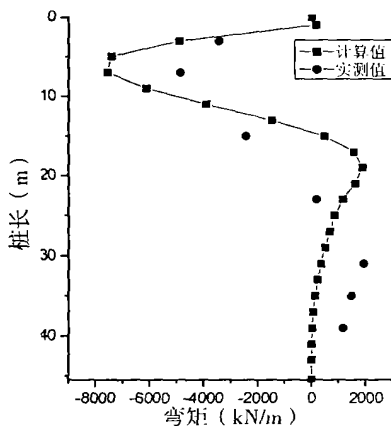


图 10 桩的计算弯矩与实测弯矩的对比图

Fig. 10 The contrast between calculated moment and tested one

者所反映的规律基本一致, 说明改进的锚索抗滑桩的计算方案是合理的。二者在数值上有些差别, 由于实测过程中一些无法避免的因素影响以及理论计算中一些没有考虑的因素 (如地基性质的不均匀性、滑体的蠕变以及锚索的松弛等因素), 二者之间存在差异是必然的。

4 结束语

由于软弱岩土体的变形特征, 在预应力锚索桩的各施工阶段及投入运营后的阶段, 桩的实际受力是不相同的。因此预应力锚索桩的设计计算应考虑其施工工序和实际受力条件, 分阶段加以计算。在充分吸取现有预应力锚索桩设计计算优点的基础上, 建议抗滑桩施工完毕至锚索张拉到设计值的阶段, 按弹性地基梁模型进行计算。锚索张拉完毕后滑坡推力逐渐作用到抗滑桩上的阶段, 将滑面以上的桩段视为在桩顶弹性嵌固的静力承载结构, 不再按弹性地基梁模型进行计算, 而滑面以下的桩段仍应按弹性地基梁计算, 此时还应考虑修正作用于桩上的滑坡推力。由此方法得出的结果与实测结果较为一致。

参考文献 (References):

- [1] Liu Xiaoli. Design theory of new pattern structures of pile-anchor system [D]. Southwest Jiaotong University Doctor Degree Dissertation, Chengdu: 2003. [刘小丽. 新型桩锚结构的设计计算理论研究 [D]. 成都: 西南交通大学博士学位论文, 2003.]
- [2] Zhou Depei, Wang Jiansong. Design method of retaining pile with prestressed cable [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2002, 21 (2): 247~250 [周德培, 王建松. 预应力锚索抗滑桩内力的一种计算方法 [J]. 岩石力学与工程学报. 2002, 21 (2): 247~250]
- [3] Zeng Derong, Ling Tianqing, Fan Caoyuan. Design and construction of prestressed anchor-cable pile applied to landslide controlling [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*. 2000, (5): 51~54 [曾德荣, 凌天清, 范草原. 预应力锚索在滑坡治理中的设计与施工 [J]. 水文地质工程地质. 2000, (5): 51~54]
- [4] Tian Jinggui, Fan Caoyuan. The principle and design of retaining piles with prestressing cable [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*. 1998, 17 (4): 59~64 [田景贵, 范草原. 预应力锚索抗滑桩的机理初步分析及设计 [J]. 重庆交通学院学报. 1998, 17 (4): 59~64]
- [5] Zeng Derong, Fan Caoyuan. The test study of retaining piles with prestressing Cable [J]. *Engineering Mechanics*. 1999 (Suppl.): 521~525 [曾德荣, 范草原. 预应力锚索抗滑桩结构的

- 室内试验研究 [J]. 工程力学. 1999 (增刊): 521~ 525]
- [6] Zeng Derong, Li Lin. Study of the Property of Structure combined prestressed cables with drilling piles [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*. 2001, **20** (2): 79~ 82 [曾德荣, 李霖. 抗滑桩锚索联合体系特性研究 [J]. 重庆交通学院学报. 2001, **20** (2): 79~ 82]
- [7] Zou xingpu. Design of Retaining Piles with Prestressing Cable [J]. *Roadbed Engineering*. 2000, (2): 9~ 10 [邹兴普. 锚索抗滑桩的设计计算 [J]. 路基工程. 2000, (2): 9~ 10]
- [8] Yu Zhengxi. The Application of Prestressed Anchor-cable Pile to Landslide Controlling [J]. *Metal Mine*. 1998, (4): 10~ 12, 27 [余振锡. 预应力锚索抗滑桩在滑坡治理中的应用 [J]. 金属矿山. 1998, (4): 10~ 12, 27]
- [9] Shen Yimin. The Desingn of Prestressed Anchor-cable Pile [J] *Roadbed Engineering*. 1999, (5): 16~ 17 [申益民. 预应力锚索桩设计探讨 [J]. 路基工程, 1999, (5): 16~ 17]
- [10] Hong Wencong, Chen Jianxin. The Design and Construction of anchored Pileplate wall with deformer Restriction Mothod [J]. *The Communication Sciency and Technology in Yunnan*. 1999, **15** (1): 33~ 35 [洪文聪, 陈建欣. 北厢工程锚索桩板墙的设计与施工 [J]. 云南交通科技. 1999, **15** (1): 33~ 35]
- [11] Chen Xin. The Calculation for Multi-anchored Pile-plate wall with deformer Restriction Mothod [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*. 1997, **1** (5): 68~ 74 [陈新. 多点锚拉桩板墙的变形约束计算法 [J]. 四川联合大学学报 (工程科学版). 1997, **1** (5): 68~ 74]
- [12] Liu Xiaoli, Zhou Depei, Yang Tao. A Method for Computing the Prestressing Force of the Anti-slide pile with Prestressed Cable. *Journal [J]. Engineering Geolog.* 2002, **10** (3): 317~ 320 [刘小丽, 周德培, 杨涛. 预应力锚索抗滑桩设计中确定锚索预应力值的一种方法 [J]. 工程地质学报. 2002, **10** (3): 317~ 320]
- [13] Wang Huaqing, Liao Zhenghuan, Zhou Xi. A New Anti-slide Structure-Prestressed Anchor-cable Pile [M]. The Editorial Committee of Landslide Study and Prevention, Landslide Study and Prevention I. Chengdu: Sichuan and Technology Publisher. 1996. 48~ 68 [王化卿, 廖正环, 周熹. 预应力锚索抗滑桩—新一代抗滑结构 [M]. 滑坡研究与防治编委会. 滑坡研究与防治 iv. 成都: 四川科学技术出版社. 1996. 48~ 68]

Design of Anti-slide pile with Prestressed Anchor Rope for High Slope of Weak Rockmass

CAO Xingsong, ZHOU Depei

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: several design methods of anti-slide-pile with prestressed anchor rope are put forward now, for example, the method on the basis of winkler elastic beam, the method according to compatible deformation between the pile and anchor rope. As the deformation is the notable characteristic of weak rockmass, and the reacting mechanism of the structure and rockmass is complex, these methods need to be improved when they are applied to high slope of weak rockmass. According to the construction working procedure, practice acting forces and the main factors of controlling the rope force, it is reasonable to calculate the internal forces of the pile by steps. The improved design method is given in this paper. The calculate results from a landslide project on the basis of the method are nearly the same as results of the practice project.

Key words: prestressed anchor rope, anti-slide-pile, design, weak rockmass