

文章编号: 1000-7598 (2014) 09-2616-07

连续桩键结构的抗滑机制及加固效果研究

郑 轩^{1,2}, 孔令伟²

(1. 长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010; 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, 武汉 430071)

摘 要: 连续桩键是一种新型抗滑结构, 结合了阻滑键和抗滑桩结构型式的综合功能。采用二维 FLAC 程序对连续桩键结构与滑坡的作用效应进行了数值模拟。分析表明, 结构的内在抗滑机制主要体现于有效减小滑带区域的剪切变形量、降低塑性区的发展程度、阻滞滑坡体的整体位移、调动滑体区域的岩土体抗力等方面, 而其外在抗滑机制则对应于结构能有效加固设置区域岩土体和充分发挥整体抗滑支挡这两种作用。总体上结构处于剪切、弯曲和拉压的复杂受力状态, 内力变形连续分布且均衡, 相当于整体协调受力的连续刚架体系, 其抗滑效果更加明显, 并表现出良好的工作状态。连续桩键结构克服了单体结构的应用局限问题, 而更充分发挥了对滑坡体的加固阻滑效果, 显著提高了滑坡体的整体稳定安全裕度, 对滑坡治理工程有更广泛的适用性, 已被成功应用于三峡库区最复杂的地质灾害治理项目——猴子石滑坡治理工程, 取得了良好的治理效果。

关 键 词: 连续桩键结构; 抗滑机制; 加固效果; 滑坡治理; 三峡库区

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Research on anti-slide mechanism and reinforcement effects of continuous pile-plug structure

ZHENG Xuan^{1,2}, KONG Ling-wei²

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Continuous pile-plug structure is a new-type anti-sliding structure, with the combination of function of shear plug and slide-resistant pile. The FLAC^{2D} numerical modeling program is used to model the relationship between continuous pile-plug structure and landslides. The result shows that, the internal anti-sliding mechanism of the structure can decrease shear deformation, reduce plastic zones, block slide displacement, mobilize rock-soil resistance; and the external mechanism is the reinforcement effect and retain function. In general, continuous pile-plug structure works under complex stress state with bending moment, shear force and axial force, and the internal force deformation distributes continuously and balanced corresponding to continuous rigid-frame under balanced force. Continuous pile-plug structure solves the limitation of monomer structure and behaves better in slide resistance and reinforcement of landslides. It improves the safety margin of mass movement stability significantly and has wider applicability in landslides management project. The continuous pile-plug structure is applied in Houzishi landslide control engineering, which is the most complex geological hazard control project in Three George reservoir, and obtains good governance effect.

Key words: continuous pile-plug structure; anti-slide mechanism; reinforcement effect; landslide control; Three Gorges reservoir

1 引 言

在滑坡治理的各种支挡措施中, 由于具有效果明显、设置灵活、施工方便的特点, 抗滑桩和阻滑键两种结构型式在工程中得到了广泛应用。阻滑键是通过将抗剪强度低的滑带材料置换为抗剪强度高的混凝土或钢筋混凝土, 从而提高沿滑带滑动的整体稳定性, 以截面抗剪强度控制; 而抗滑桩则是通

过桩-土共同作用, 将滑坡推力传递到稳定的滑床基岩中, 通常简化为悬臂梁或弹性地基梁结构, 主要以截面抗弯强度控制^[1]。

抗滑桩和阻滑键的应用同样也存在局限性, 如当滑体物质较为软弱或松散时, 分离设置的阻滑键往往无法发挥有效的“销榫”作用; 而当下滑推力巨大或滑体深厚时, 受结构尺寸及应力、变形限制, 单体抗滑桩的治理效果也并不理想^[2]。基于此, 可

收稿日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10872210)。

第一作者简介: 郑轩, 男, 1973 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事水利水电工程规划设计方面的工作。E-mail: zhengxuan@cjwsjy.com.cn

考虑在常规抗滑桩和阻滑键措施的基础上,将独立设置的结构相互连接形成整体结构,以提高其抗滑能力。具体做法是顺滑坡的滑动方向,沿滑带连续开挖多级地下平洞和竖井并置换为钢筋混凝土,从而形成由多级平肢和竖肢首尾相连的“台阶”型阻滑结构型式。由于这种结构结合了阻滑键和抗滑桩的应用特点,但并非完整意义上的阻滑键或抗滑桩,因此,称其为“连续桩键结构”,典型布置如图1所示。

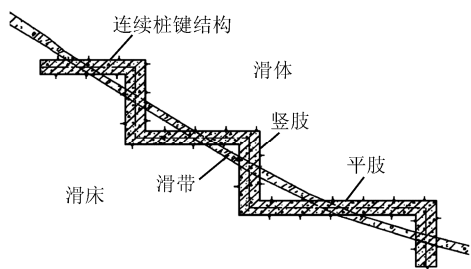


图1 典型连续桩键结构

Fig.1 Typical continuous pile-plug structure

目前,对抗滑桩的应用已开展了大量的分析研究工作^[3-7],也取得了许多阻滑键的工程实践经验^[8-10],但对于连续桩键结构,既缺乏有效的应用经验与实测数据,也没有成熟的分析理论和计算方法。因此,为分析连续桩键结构作为滑坡治理措施的适用性,本文拟采用数值方法通过对结构与滑坡岩土体的作用效应分析,来研究结构的抗滑机制和加固效果,从而为工程应用实践提供相应的理论支撑和计算参考。

2 数值模拟

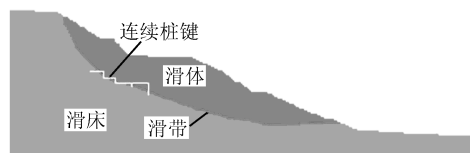
2.1 数值模型

实际研究对象为滑坡岩土体与结构的复杂三维作用问题。鉴于连续桩键结构的布置符合常规单体抗滑结构的设置原则,结构与岩土体的作用以纵向(顺滑动方向)为主,横向间的联系与影响相对次之。因此,为避免多重因素和条件的交叉影响,抓住问题的主要矛盾,并便于与工程界广泛采用的二维极限平衡分析方法对比分析,本文拟采用基于FLAC程序的二维平面应变数值模型,滑坡岩土体采用理想弹塑性本构模型和摩尔-库仑屈服准则,连续桩键结构采用桩单元模拟,基于强度折减法求解滑坡体稳定安全系数和极限状态力学状态指标^[11]。

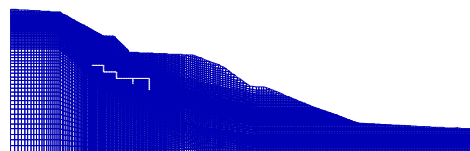
根据一典型滑坡地质剖面建立计算模型,模型剖面自地表向下分别为滑体、滑带和滑床区域,滑带前缓后陡,分别对应滑坡阻滑段和滑动段。连续

桩键结构骑滑带区域布置,由四段平肢和四段竖肢组成3级台阶形结构,间距按常规抗滑结构设置。

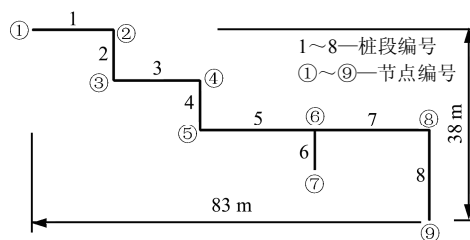
整个模型共剖分了18 697个单元、21 171个节点,连续桩键结构按各肢位置共划分为8段独立桩单元,在节点处相互刚接形成整体。为较准确模拟结构与滑带岩土体的相互作用,对滑带区域及其上下一定范围的网格剖分适当加密。相应的计算模型如图2所示。



(a) 滑坡示意图



(b) 滑坡网格剖分图



(c) 结构模型示意图

图2 滑坡和结构数值模型

Fig.2 Numerical model of landslide and structure

基于滑坡各部位岩土体特性差异并结合工程实例,确定计算采用的滑坡岩土体物理力学指标和结构桩单元模型参数分别如表1、2所示。

表1 滑坡岩土体物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical properties of landslide

区域	重度 /(kN/m ³)	抗剪强度		变形特性	
		内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa
滑体	23.0	32	35	2 100	350.0
滑带	20.0	21	20	67	6.9
滑床	24.0	40	500	4 600	1 900.0
滑带(降低)	20.0	19	15	67	6.9

2.2 模拟方法及分析内容

根据滑坡由初始稳定发展至剪切破坏的过程,确定相应的模拟方法为:天然情况下滑坡处于重力荷载初始平衡后的稳定状态,由于某种外界因素影响(如降雨入渗或地下水上升)或人为计算需要(抗

表2 连续桩键结构模型参数

Table 2 Parameters of continuous pile-plug structure

不同桩段分段长度/m								不同桩段单元数量/个								桩排 间距 /m	截面尺寸		弹性 模量 /GPa	耦合弹簧					
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8		高 /m	宽 /m		刚度/(GN/m)/m		黏聚力/(kN/m)		摩擦角/(°)	
17	10	18	10	24	8	24	18	30	15	30	15	40	12	40	30	7.5	3	2.5	30	130	1.3	100	400	30	80

剪强度折减),造成滑带岩土体的强度指标降低,从而使滑坡产生滑动变形效应。在此基础上,分别模拟不设结构和设置结构条件下的滑坡岩土体及结构的力学状态。

对于岩土体,分析内容主要包括剪应变增量、位移矢量、塑性区分布及稳定安全系数等指标;对于连续桩键结构,主要研究其轴力、剪力和弯矩等内力分布和位移矢量指标。

最大剪应变增量可反映岩土体的剪切变形程度,塑性区分布直接反映各单元发生剪切屈服或张拉破坏的应力状态。最大剪应变增量及塑性区的分布范围和贯通情况可直观反映滑坡潜在破坏滑动面的分布位置、稳定状态和发展趋势,最大剪应变增量范围越大,塑性区单元数量越大,滑坡越接近滑动破坏临界状态,贯通塑性区即可看作是临界滑动破坏面。基于强度折减法的稳定安全系数计算可直接判定滑坡体的安全储备裕度及临界滑动面位置^[15]。

根据结构内力计算值可直接分析结构的综合受力状态及工作特性,位移矢量则直观反映了滑坡体和结构运动变形的方向及量值特性。

3 计算结果分析

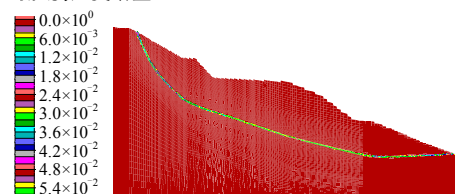
3.1 剪应变增量

图3为不设结构和设置结构条件下滑坡体最大剪应变增量等值线云图对比,表3为两种条件下滑带区域各部位剪应变增量值数值对比。

对于不设结构情况,最大剪应变增量分布于性状相对软弱的滑带区域,形成了从后部至前部完整贯穿的剪切变形集中区,为潜在的滑动破坏面;而在滑床和滑体区域则基本无剪切变形。根据各部位剪应变增量值大小,总体上可将滑带区域分为后部、中部和前部3个剪切变形区,相应的剪应变增量平均值分别为0.024、0.010和0.012,表明前部剪出口和后部拉张部位的剪切变形较大,而中部区域的剪切变形相对较小。

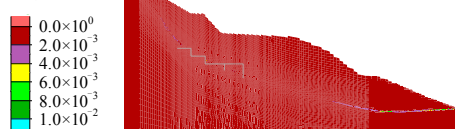
设置结构后,整个滑带区域的剪切变形明显变小,没有形成连续的同程度变形集中区,剪应变增量值也大为降低,相应位置的剪应变增量分别降至

最大剪应变增量



(a) 不设结构

最大剪应变增量



(b) 设置结构

图3 滑坡体剪应变增量等值线云图

Fig.3 Nephograms of shear strain increments of landslide

表3 滑带区域各部位的剪应变增量数值(平均值)

Table 3 Shear strain increments in different locations of sliding zone(average value)

滑带 部位	剪应变			
	不设结构 数值/ 10^{-2}	设置结构 数值/ 10^{-3}	减少量 / 10^{-3}	平均比值 / 10^{-2}
后部	2.42	2.29	21.90	9.46
中部	1.02	1.09	9.11	10.70
前部	1.23	4.87	7.43	39.60
结构位置	1.39	0.88	13.00	6.33

注:平均比值指设置结构剪应变与不设结构剪应变之比。

0.002 3、0.001 1和0.004 9,平均减小程度接近一个数量级,特别是位于结构设置区域的滑带剪应变增量最小,降低幅度也最大,仅为不设结构条件的0.06倍,充分反映了连续桩键结构的阻滑作用。

根据上述分析可知,设置连续桩键结构可有效降低滑坡体的整体剪切变形程度,特别是对结构设置处的滑带区域及其附近滑体区域产生了整体加固作用,从而起到了显著的阻滑效果。

3.2 滑坡体位移

图4为不设结构和设置结构条件下滑坡体的水平向位移等值线云图对比。

对于不设结构情况,在滑带和滑体区域产生了较明显位移,而滑床基本无位移,反映了滑坡体在

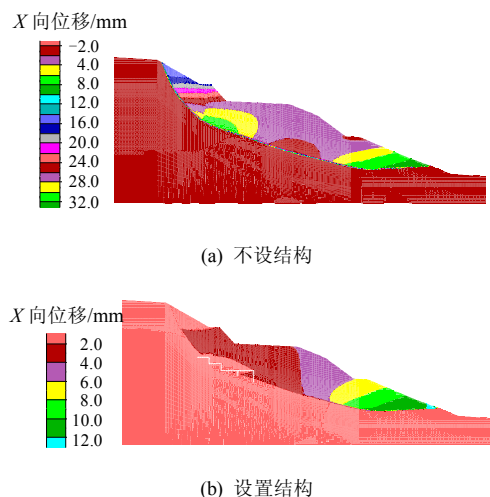


图4 滑坡体X向位移云图
Fig.4 Nephograms of displacement of landslide in X-direction

重力作用下由于滑带剪切变形而带动上部滑体向前整体运动的趋势。同样, 可根据各区域水平位移值大小, 将滑体分为后部、中部和前部3个变形位移区, 相应的水平向位移平均值分别为22、28和29 mm, 由后部至前部逐步增加, 表明滑坡变形量的累积效应。滑带的水平位移值在竖向呈线性分布, 从底板处的零值增加至顶板处与滑体位移值相同, 反映了其变形受下部滑床稳定基岩的阻滞和上部运动滑体牵动的特点。

设置结构后, 整个滑体区域的位移量明显减小, 相应部位的水平位移值分别降低至2.1、3.3和8.5 mm, 平均降低幅度达90%; 在结构设置区域的滑体位移最小, 相应的水平位移值为2.4 mm, 较之不设结构情况下的2.7 mm位移值降低了一个多数量级, 表明此区域的滑坡体运动变形受到明显抑制。根据等值线图可以更加直观看到, 结构设置后形成的阻滑区域和效果, 是以结构设置范围为核心向外围扩散其牵滞效应。

根据上述分析可知, 设置连续桩键结构可有效减小滑坡体的整体位移, 特别是对结构设置区域的滑体变形产生了明显的阻滞效应, 从而产生了显著的整体阻滑效果。

3.3 滑坡体塑性区分布

图5为不设结构和设置结构条件下滑坡体的塑性区分布图对比。

对于不设结构情况, 剪切塑性区基本上分布于滑带区域, 滑体区域后缘和前缘坡面处初始出现的塑性区域经应力调整后恢复弹性状态, 滑床基岩完全呈弹性状态。滑带内塑性单元沿整个区域均匀分布, 占总单元数的69%左右, 表明沿滑带产生了明

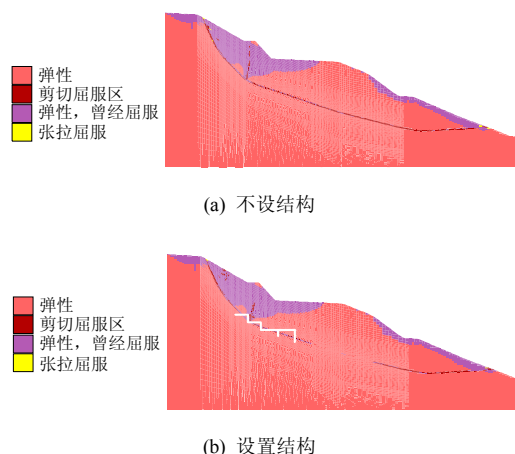


图5 滑坡体塑性区分布图
Fig.5 Distribution of plastic zone of landslide

显的剪切破坏并有发生整体滑动破坏的趋势, 与最大剪应变增量的分布特性相一致。

设置结构后, 滑带区域的塑性单元数明显减少, 占总单元数比例降低至38%, 除前部和后部的塑性单元分布相对较为集中外, 在结构布置区域的滑带塑性单元数已大为降低, 占此范围总单元数的比例由62%下降至26%, 而中部区域较大范围内单元则完全处于弹性状态, 塑性区分布不再连续。滑带区域的塑性区单元较少且未连续贯通的情况表明, 滑坡稳定安全状态较好。

根据上述分析可知, 设置连续桩键结构可有效改善滑坡岩土体的应力状态, 减小剪切破坏范围, 从而降低了滑坡体塑性区发展程度, 特别是在结构设置区域的滑带土体大部分处于弹性应力变形状态, 从而有效提高了抗滑能力。

3.4 滑坡稳定安全系数

图6为不设结构和设置结构条件下, 采用强度折减法计算的滑坡稳定安全系数及极限状态最大剪应变增量和位移矢量分布对比。对极限状态滑带区域最大剪应变增量值和滑体前缘区域最大水平位移值进行了统计, 如表4所示, 并选取正常状态的水平位移值进行参照说明。

不设结构和设置结构条件对应的滑坡稳定安全系数分别为1.03和1.27, 表明设置结构可起到明显的阻滑作用, 使滑坡的整体稳定有了显著提高。

极限状态下, 对应不设结构条件, 滑带区域产生了从上至下完全贯穿的剪切变形集中区, 最大剪应变增量值明显加大。如表4所示, 滑带后部和前部区域的剪切变形较大, 而中部区域剪切变形相对较小, 表明滑带后部和前部区域单元先于中部区域单元达到屈服状态后应变持续增加的特性。对应设

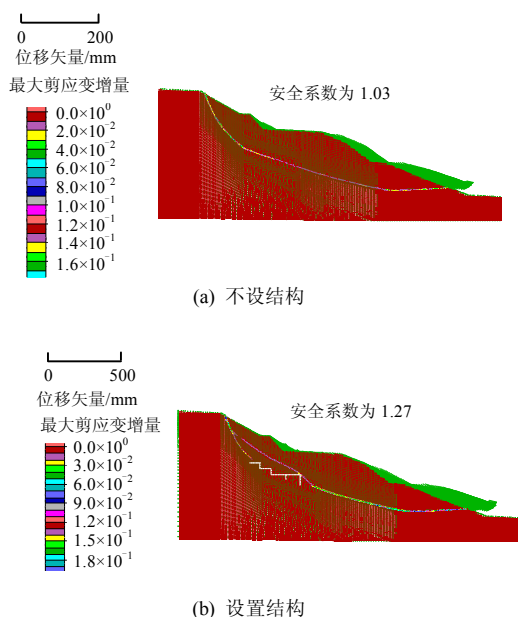


图6 滑坡体安全系数
Fig.6 Safety factors of landslide

置结构条件, 临界滑面位置发生显著变化, 在结构设置区域, 原发生于滑带内的最大剪切变形区上移至结构顶部的滑体内, 并从此位置向上延伸至后缘顶部, 向下延伸过结构最下级竖肢后与原滑带剪切区相连, 从而构成了新的临界剪切滑动面。同时, 滑带前部区域的剪切变形量明显增加, 最大值约为 0.98 左右, 主要是由于滑体物质的强度较高, 因此, 其剪切屈服的应变较大, 由此导致中部和前部区域滑带单元屈服应变的进一步增加。

表4 极限状态剪应变增量和最大水平位移值
Table 4 Shear strain increments and maximum horizontal displacements in limit state

模拟条件	稳定系数	滑带剪应变增量平均值			滑体前缘最大水平位移平均值/mm	
		后部	中部	前部	正常状态	极限状态
不设结构	1.03	0.46	0.18	0.25	28.9	60.8
设置结构	1.27	0.18	0.35	0.98	9.2	202.0

滑坡体的最大位移量发生于滑体前部, 对于不设结构条件, 正常状态和极限状态的滑坡体最大位移值分别为 29 mm 和 61 mm; 在设置结构条件下, 相应的位移值分别为 9 mm 和 20 mm。可见, 对应正常状态和极限状态, 不设结构和设置结构的数据对比关系是相反的, 其变化规律与最大剪应变及塑性区分布规律内在机制一致。

综上所述, 设置连续桩键结构可起到有效的加固作用, 迫使结构设置区域的剪切路径发生改变, 从而显著提高了滑坡稳定安全性。

3.5 结构内力

结构内力包括剪力、弯矩和轴力, 其沿结构各部位的分布如图 7 所示。

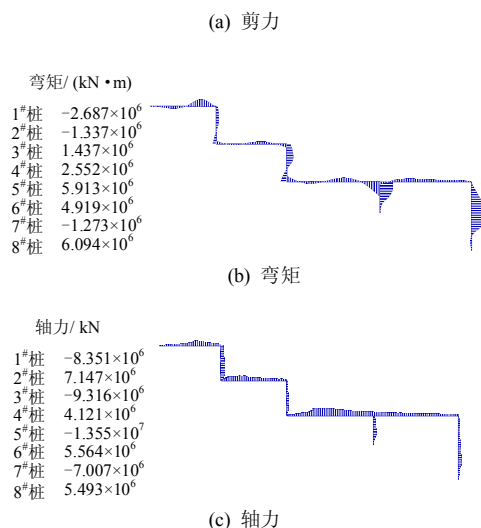


图7 连续桩键结构内力

Fig.7 Internal forces of continuous pile-plug structure

由图示可知, 结构承受了较大的各种形式内力作用, 处于剪切、弯曲和拉压的复杂受力状态, 各项内力均沿结构各桩段连续分布, 总体上分布较为均衡, 量级基本相同, 充分表明结构在滑坡推力作用下发挥了明显的支挡阻滑作用, 处于整体协调受力状态。

剪力沿结构各肢桩身的分布规律通常是由从桩顶位置 (位于滑体内) 沿桩身向下逐渐增加至桩身某一位置出现峰值和拐点, 再反向变化逐渐减小至桩底位置 (位于基岩内), 且所有桩顶剪力均为非 0 负值, 反映出各桩段承受了滑体运动产生的推力作用, 同时对于结构任一单肢而言, 在桩顶位置由于有相邻桩段相连而由相邻桩段对其产生了一个反向牵制力作用, 可部分抵消推力作用, 从而使滑体区域的桩身剪力值相应降低, 优化了结构的受剪状态。

弯矩的分布规律通常是绝对量值从桩顶位置沿桩身向下逐渐增加至滑体内桩身某位置出现峰值和拐点, 再反向变化至滑床内桩身某位置再次出现峰值和拐点, 又反向减小至桩底位置; 各桩段弯矩最大值均出现于滑体内, 且所有桩段在相互连接处的桩端弯矩值一般均不为 0。由此可知, 由于结构相

互连接的影响, 弯矩作用可有效在全部桩体范围内相互传递, 使内力分配更加优化均衡, 呈现出明显的连续结构的受力特点, 更有利于发挥结构整体抗弯支挡的作用。

结构的平肢均承受轴向拉力作用, 而竖肢则均承受轴向压力作用, 表明除滑坡推力使各桩段承受轴向力外, 另由于结构各桩段在桩顶位置对相邻桩段提供了与下滑方向相反的牵制力作用, 其中对于水平桩段, 其所提供的反向牵制力呈拉力形式, 对于竖直桩段, 其所提供的反向牵制力呈压力形式, 从而进一步加大了桩身轴力值。

根据结构内力分析可知, 连续桩键结构在滑坡推力作用下承受了复杂内力状态, 与普通抗滑桩相比, 既有相似的地方, 又有明显的区别。连续桩键结构的各项内力均沿桩段连续分布, 整体受力特点十分突出, 各部分相互连接牵制作用优化协调了结构的抗剪和抗弯效果, 并使轴向支撑作用更加显著, 总体上有利于发挥结构的整体抗滑支挡作用。

3.6 结构位移

图 8、9 分别为正常状况和极限状态的结构位移矢量图, 并与结构设置区域的滑坡位移矢量对比显示。

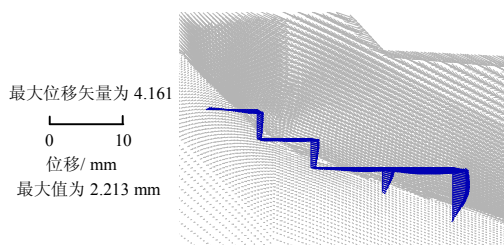


图 8 正常状态连续桩键结构位移
Fig.8 Displacements of continuous pile-plug structure in normal state

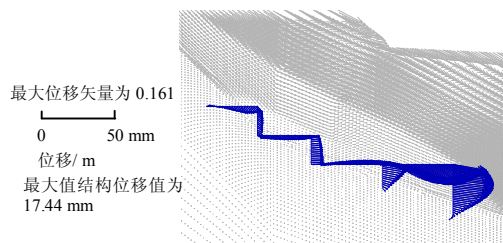


图 9 极限状态下连续桩键结构位移
Fig.9 Displacements of continuous pile-plug structure in limit state

结构各桩段均产生了与滑体滑动方向相同的位移变形, 且以水平向位移为主, 各桩段的位移分布连续且均衡, 反映出结构处于整体协调受力变形状态。总体上, 各桩段位移由桩顶向桩底逐步降低,

符合常规底端嵌固于滑床基岩的抗滑桩变形特点, 由于结构整体连接, 所以桩底也产生一定的变形量。

正常状态下, 结构最大位移量为 2.21 mm, 相应的滑坡体最大位移为 12.42 mm; 极限状态下, 结构最大位移量为 17.44 mm, 相应的滑坡体最大位移为 228.00 mm。结构位移与滑坡位移相差接近一个数量级, 即使在极限状态, 连续桩键结构的位移变形也较小, 反映了其良好的工作状态。

对比结构与滑坡体的位移矢量可知, 在结构设置区域, 滑体位移较之其他区域明显偏小, 反映了结构的支挡抗滑效果, 特别是极限状态下的结构支挡效果在滑体位移分布图上更加明显和直观, 与最大剪应变增量分布规律完全相同。

由上述分析可知, 基于连续桩键结构的整体布置体型, 其在滑坡推力作用下变形均匀, 协调能力较强, 处于良好的工作状态, 更有利于结构整体抗滑作用的有效发挥。

4 实践验证

作为一种体型复杂的新型阻滑结构, 连续桩键结构已被成功应用于笔者参加设计的三峡库区最复杂的地质灾害治理项目——奉节县猴子石滑坡治理工程^[12-15], 而在此前还未有过类似工程实践的文献记载。该治理工程于 2005 年开展设计, 2006 年正式开工建设, 2008 年 8 月前完成主体工程施工, 从而有效地保证了于汛后进行的三峡水库 175 m 试验性蓄水工作的正常开展。

为了评价治理措施的实施效果及对比分析模型计算结果, 在开展治理工程设计时针对性布置了全面和完善的效应监测项目, 以通过对治理后滑坡体和结构措施的变形、受力及地下水运动等指标的动态监测数据, 来反映和分析其工作运行状态, 主要包括滑坡体变形监测、结构受力状态监测和地下渗流监测三部分措施, 分别设置于坡体表面、滑体内部及主体结构上。

通过对所收集的治理工程竣工运行多年监测数据的分析研究, 治理工程的整体变形量较小, 滑坡体总体处于稳定安全状态, 从而直观地反映了连续桩键结构的有效抗滑效果。

5 结 论

(1) 作为一种新型抗滑结构, 连续桩键结构结合了阻滑键和抗滑桩结构型式的综合功能, 克服了单体结构的应用局限问题, 而更充分地发挥了对滑坡体的加固阻滑效果, 显著提高了滑坡体的整体稳

定安全裕度,对滑坡治理工程有更广泛的适用性。

(2) 连续桩键结构的内在抗滑机制主要体现于有效减小滑带区域的剪切变形量、降低塑性区的发展程度、阻滞滑坡体的整体位移、调动滑体区域的岩土体抗力等方面,而其外在抗滑机制则对应于结构能有效加固设置区域岩土体和充分发挥整体抗滑支挡这两种作用。

(3) 通过设置连续桩键结构,形成了以结构设置范围为核心并向外扩散的加固阻滞区,滑带剪应变增量值大为降低,剪切变形集中区和塑性分布区分散且间断,同时结构承受了较大的抗滑作用内力,并迫使极限状态的剪切路径发生改变,从而显著增加了滑坡稳定安全性,直观表现为安全系数的提高。

(4) 连续桩键结构处于剪切、弯曲和拉压的复杂受力状态,各项内力在结构内连续分布,相当于整体协调受力的连续刚架体系。连续桩键结构的受力特点与常规抗滑桩有所差别,其内力和变形量均相对较小,且分布更加均衡合理,整体协调性更强,抗滑效果也更加明显,表现出良好的工作状态。

(5) 连续桩键结构的体型和受力状态均相对复杂,宜通过结构与滑坡岩土体共同作用的数值模拟,来探求和分析其作用机制、治理效果和受力特性,从而为结构设计提供相应的参考依据。

(6) 连续桩键结构已被成功应用于工程实践,取得了良好的治理效果。

参考文献

- [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] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [3] 马骥. 单根抗滑桩受力条件的实验研究[C]//滑坡文集(第5集). 北京: 中国铁道出版社, 1986: 88—96.
- [4] 徐良德, 尹道成, 刘惠明. 滑体为松散介质时桩前滑体抗力的分布[C]//滑坡文集(第6集). 北京: 中国铁道出版社, 1988: 84—91.
- [5] 郑颖人, 赵尚毅. 用有限元强度折减法求滑坡支挡结构的内力[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3552—3558.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Calculation of innerforce of support structure for landslide slope by using strength reduction FEM[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(20): 3552—3558.
- [6] 戴自航, 彭振斌. 抗滑桩全桩内力计算“ $m-k$ ”法的有限差分法[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 321—324.
DAI Zi-hang, PENG Zhen-bin. Finite difference method based on “ $m-k$ ” method for calculation of internal force of a whole stabilizing pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(3): 321—324.
- [7] 钱同辉, 唐辉明. 双排门式抗滑桩的空间计算模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1137—1141.
QIAN Tong-hui, TANG Hui-ming. Spatial calculation model for portal double row anti-slide piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(4): 1137—1141.
- [8] 中华人民共和国电力行业标准. DL/T 5353—2006 水电水利工程边坡设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [9] 彭正华, 郑俊杰. 长江三峡链子崖危岩体煤层采空区的治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 710—714.
PENG Zheng-hua, ZHENG Jun-jie. Treatment of dangerous rock body of coal mined-out area in Lianziya of the Three gorges of Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(5): 710—714.
- [10] 高大水, 徐年丰, 高银水, 等. 用混凝土阻滑键技术治理灰岩顺层滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5433—5437.
GAO Da-shui, XU Nian-feng, GAO Yin-shui, et al. Application of concrete sliding resistant key to treating limestone bedding landslip[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Supp.2): 5433—5437.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 5.0, User's Manual[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [12] 长江勘测规划设计研究院. 重庆市三峡库区奉节县猴子石滑坡处理续建工程初步设计补充报告[R]. 武汉: 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2006.
- [13] 邹从烈, 郑轩, 熊传义, 等. 三峡库区猴子石滑坡防治工程设计[J]. 人民长江, 2008, 39(6): 57—61.
- [14] 邹从烈, 高润德, 郑轩, 等. 置换阻滑键在猴子石滑坡治理工程中的应用[C]//第17届全国结构工程学术会议论文集. 武汉: [出版社不详], 2008.
- [15] 付敬, 丁秀丽, 邹从烈, 等. 有限差分强度折减法在猴子石滑坡治理工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(2): 58—60.
FU Jing, DING Xiu-li, ZOU Cong-lie, et al. Application of lagrangian difference method based on shear strength reduction[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, 25(2): 58—60.