

带悬臂桩—锚桩抗滑体系的 试验研究及计算机仿真分析

21
109-115

张四平 赖明 廖贺平
(重庆建筑大学建筑工程学院 400045)

P641.22
TP391.9

摘要 通过多种情况下的室内模型试验和大量的计算机仿真分析,对带悬臂桩—锚桩抗滑体系的性能、受力状况以及各种影响因素进行了研究分析。该抗滑体系应用于重庆市施家梁滑坡治理工程,产生了显著的社会、经济效益。

关键词 悬臂桩, 锚桩, 抗滑体系, 滑坡 计算机仿真
中图分类号 TU317

在目前治理滑坡的常规工程措施中,重力式抗滑挡墙、锚杆式挡墙或抗滑桩都存在一定的缺陷。尤其是被广泛采用的悬臂式抗滑桩,在悬臂长度较大时属于不合理的刚性受力结构,桩身内力、桩的横截面和桩的埋置深度均相当大,耗费材料多,造价较高。针对抗滑结构应用广泛而研究水平较低,现场试验难度大的状况,为加强对桩—锚桩抗滑体系的应用研究,我们提出了适用性广、受力性能好、安全可靠、经济性优越的带悬臂桩—锚桩抗滑体系。通过多种情况下的室内模型试验以及大量的计算机仿真分析,结合具体的滑坡治理工程对这种抗滑体系的受力状况和优化设计进行了研究分析,并提出了相应的应用条件。其结果将对山区的滑坡整治产生明显的经济效益,并促进了抗滑结构的发展和运用。

1 试验研究

本次试验以重庆市渝南公路施家梁滑坡治理工程中采用的带悬臂桩—锚桩抗滑体系为实际结构(见图1)。利用小比例的模型试验作为抗滑结构性能分析的手段,取几何相似比 $c = 1/6$ 来设计试件及模型结构。为了避免材料性能变异以及尺寸效应的影响,设计了五个相同截面的试件和两个悬臂长度相同的试件,并根据试验的量测内容(包括竖桩桩身位移、钢筋和砼应力应变、锚桩应力应变)布置了相应的测点。

1.1 试件设计

取几何相似比 $c = 1/6$, 设计矩形截面试件。原结构的竖桩为圆形, 桩径 $D = 0.8 \text{ m}$, 则:

$$\text{截面积 } A = \pi D^2 / 4 = 0.5026 \text{ m}^2 \quad \text{而矩形 } A = bh$$

收稿日期:1998 - 04 - 08

张四平,男,1955年生,副教授

该项目获得1994年重庆市科技进步二等奖

截面惯性矩 $I = \pi D^4 / 64 = 0.02011 \text{ m}^4$ 而矩形 $I = bh^3 / 12$

有: $h = \sqrt{3} / 2 D$ $b = \pi / 2 \sqrt{3} D$, 将 $D = 0.8 \text{ m}$ 代入得:

$h = 0.12 \text{ m}$ $b = 0.12 \text{ m}$ 取试件截面 $b \times h = 120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$

对应于原结构 $D = 1.0 \text{ m}$ 的试件模型截面为 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, 试件配筋和斜锚桩及悬臂长度设计见施件施工图(图 2)和表 1。

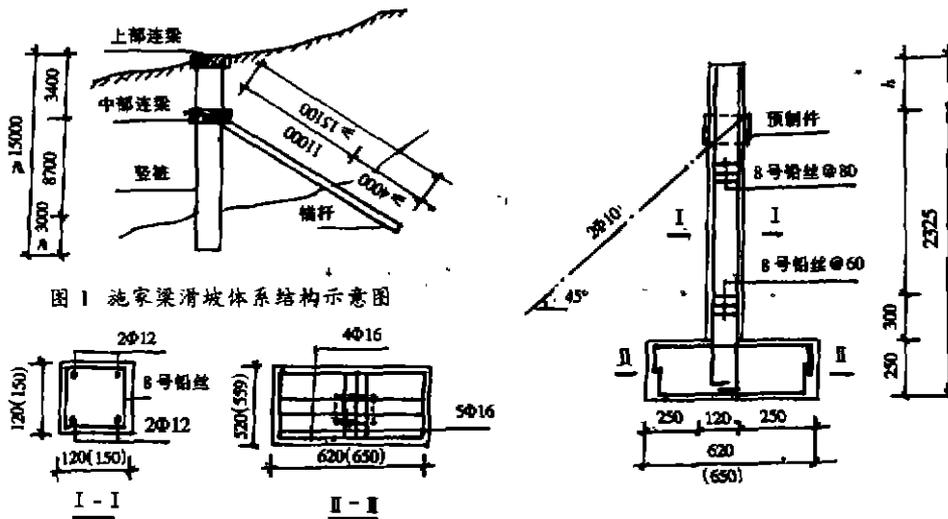


图 1 施家梁滑坡体系结构示意图

图 2 施件施工图

表 1 试件简表

试件编号	悬臂长度(mm)	截面尺寸(mm)	锚桩长度(下料长度)mm
S1	0(0)	120×120(D=800)	2 828(3 400)
S2	375(2 000)	120×120(D=800)	2 357(3 000)
S3	450(2 500)	120×120(D=800)	2 240(2 700)
S4	500(3 000)	120×120(D=800)	2 121(2 600)
S5	580(3 500)	120×120(D=800)	2 000(2 400)
S6	0(0)	150×150(D=1 000)	2 828(3 400)

注:悬臂长度和截面尺寸栏中,括号数值为原结构的对应值。

1.2 加载方案

在实际工程中,抗滑体系所受到的滑坡推力是随机的。一般在雨季由于水的润滑作用加速滑坡的活动,作用于竖桩的滑坡推力逐渐增大。在南方地区每年有两个雨季,因此竖桩要受到两次突增的滑坡推力作用。若抗滑体系的使用年限为 30 年,则抗滑体系在使用基准期内共受到 60 次较大滑坡推力的作用。再考虑到工程和自然条件的复杂性以及其它因素的影响,抗滑体系的受力机理就更为复杂。

根据上述讨论,通过电算分析,设计加载方案如下:

1.2.1 预加载阶段

其目的是检验各试验装置及测量仪表的工作是否正常,同时使试件中的节点等部位接触密实进入工作状态。预加载数值大约为 $0.1P_y$ (P_y 为屈服荷载)。

1.2.2 标准荷载阶段

结构承受标准荷载是结构的工作状态。根据抗滑体系周期性地受到滑坡推力的作用, 采用分级循环加载的方法。首先分级加载至 $(0.5 \sim 0.6) P_y$ (每级 $0.1 P_y$), 再加载至 $(0.9 \sim 1.0) P_y$ (每级 $0.1 P_y$), 分别循环十次。这样分级循环加载的方法, 较为真实地反映了抗滑体系的受力机理, 弥补了试验中的短期荷载代替实际长期荷载的不足, 使结构在标准荷载的作用下变形得到充分发展, 有利于考察抗滑体系的工作性能。

1.2.3 破坏荷载阶段

从试验截面的屈服荷载开始, 逐渐往上加载, 直至试件破坏。

试验采用电液伺服加载系统, 8个千斤顶用同一油泵以保证同步加载。

1.3 试验结果及其分析

将试验中所测得的数据进行整理分析, 得出试件 S1 至 S6 的荷载—位移曲线 ($P - \Delta$)、钢筋应变曲线 ($P - \epsilon_s$)、受拉砼应变曲线 ($P - \epsilon_c$)、锚桩应变曲线 ($P - \epsilon$) 等。这里列出有代表性的试件 S4 的 $P - \Delta$ 曲线、 $P - \epsilon_s$ 曲线图(见图3、图4)。

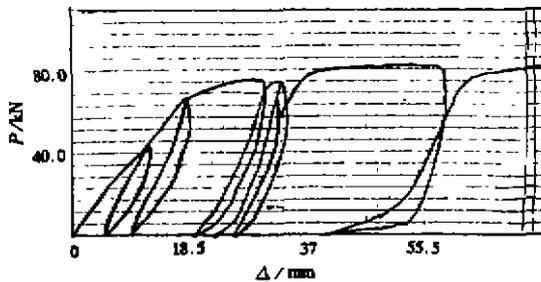


图3 试件 S4 荷载—位移曲线

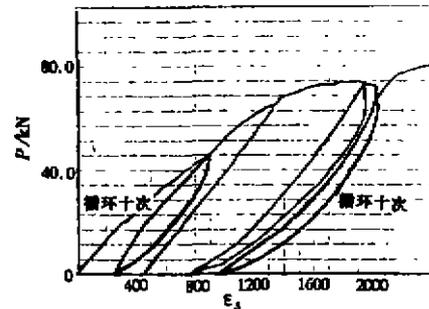


图4 试件 S4 荷载—受拉钢筋应变曲线

1.3.1 试件强度变化及其影响因素

在模型试验中, 将锚桩与竖桩的联接视为弹性支承, 试验中 8 个千斤顶的同步作用视为均布荷载作用, 则抗滑竖桩实际上是一个梁式受弯构件(见图5)。由内力图可知, 竖桩的内力分布特点是: 在底端截面处弯矩最大, 有剪力作用, 中部弯矩较大, 但剪力为零。锚桩与竖桩连接处也有弯矩和剪力的共同作用。因此, 这种内力分布规律决定了抗滑体系的破坏形式是弯矩和剪力共同作用下的破坏类型。试验中记录的各试件开裂荷载 P_c 、屈服荷载 P_y 以及极限荷载 P_u 如表 2 所示。可以看出, 随悬臂长度的增加, P_y 和 P_u 变化明显, 试件 S2 与 S1 比较, P_y 提高 35.9%, 试件 S3、S4、S5 的 P_y 分别比 S1 提高 52.7%、75.3%、93.1%; 试件 S6 与 S1 相比, P_c 提高 50%, P_y 提高 30%, P_u 提高 35%, 可见悬臂长度和桩径的变化对抗滑体系的抗滑能力有较大的影响。

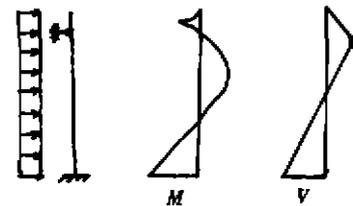


图5 竖桩内力图

1.3.2 试件刚度变化及其影响因素

根据试验中竖桩顶部的荷载—位移曲线可以看出试件刚度变化。由于抗滑竖桩是钢筋

表 2

试件号	悬臂长度(mm)	P_u (kN)	P_r (kN)	P_s (kN)	P_s / P_r
S1	0	15.5	46.5	51.7	1.11
S2	375	20.1	63.2	66.3	1.05
S3	450	24.4	71.0	75.6	1.07
S4	500	27.2	81.5	84.5	1.04
S5	580	29.6	89.5	93.4	1.04
S6	0	23.2	66.4	79.2	1.19

砼受弯构件，刚度已不再是常量，必须根据钢筋砼特有的非线性受力性能确定。从前面所列的试件 S4 的荷载—位移曲线可以看出，在砼未开裂时，由于砼在受拉区已表现出一定的塑性，因此抗弯刚度比 $E_c I_0$ 低。桩身受拉区砼开裂后，由于裂缝截面受拉区砼逐步退出工作，截面的抗弯刚度明显下降。当荷载循环作用于其上时，试件的变形随时间也不断有所增长，刚度也不断缓慢下降，这主要是由于受压区砼在荷载作用下产生徐变，还由于裂缝之间仍处于受拉状态的砼的应力松弛和受拉钢筋与砼之间的滑移徐变，使得抗弯刚度缓慢降低。从荷载—位移曲线还可看出，在弹性范围内，竖桩顶端位移一般在 1.5 mm ~ 10 mm 之间变化，在抗滑体系破坏时，顶端位移一般在 55 mm 左右。

1.3.3 锚桩的作用

试件中还可以清楚地看到，在竖桩上部的某一位置加上锚桩之后，使得竖桩在外力作用下的受力状态与一般抗滑桩完全不同。竖桩相当于一梁式受弯构件，且出现两个反弯点，沿整个竖桩桩身弯矩分布较一般抗滑桩均匀得多（见图 6）。因此，在竖桩的上部某一适当位置加上锚桩可以很大程度地改善竖桩的受力性能，使竖桩的抗滑能力和材料性能得到更充分的发挥，还大大减小了竖桩的桩径和埋置深度。

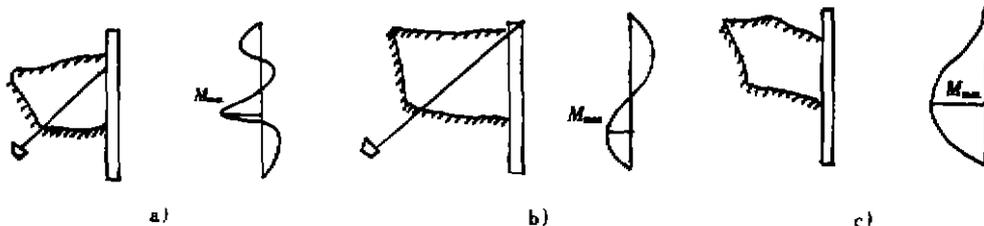


图 6 桩—锚桩抗滑结构与一般抗滑结构弯矩比较图

2 计算机仿真分析

本次计算机仿真分析采用美国麻省理工学院编制的大型结构分析软件 ADINA - 84 版。计算分析时作如下假定：

- 1) 因斜锚桩主要为受拉构件，与岩体的联接视为铰接，且不考虑锚桩承受弯矩。
- 2) 斜锚桩与竖桩联接视为铰接，不考虑接头传递弯矩。
- 3) 斜锚桩仅考虑钢筋承受拉力，不考虑开裂后砼粘结力产生的有利影响。
- 4) 土压力荷载直接作用于竖桩桩身。

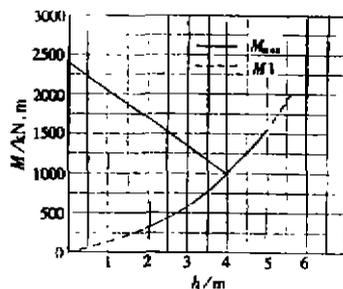
2.1 桩径 D 和锚桩配筋量的影响

由于抗滑体系是由竖桩和锚桩共同抵抗外荷载的, 任何一方增加刚度都会多分配一部分荷载。如其它条件不变, 增大竖桩桩径 D 就会增加竖桩刚度, 弯矩也随之增大, 锚桩拉力则随之减小。反之, 提高锚桩配筋量, 锚桩应承担更大的荷载, 竖桩的变形和弯矩相应减小。分析结果表明, 增大竖桩桩径时, 截面抵抗弯矩增幅很大, 而提高锚桩配筋量则对结构体系的影响不大。但是锚桩配筋量不能太小以致于锚桩钢筋屈服, 从而使得竖桩 M_{max} 迅速增大, 结构体系破坏。因此, 锚桩的配筋量应以保证其不屈服为较经济的控制条件。

2.2 悬臂长度 h 的影响

悬臂长度 h 对抗滑体系的内力和变形都有很大影响。我们计算了不同悬臂长度的竖桩弯矩, 得出弯矩 M 与悬臂长度 h 之间的关系(见图7)。从图中看到, 当 h 在 $(0 \sim 1/3)H$ (H 为竖桩桩长) 内变化时, 随 h 的不断增大, 竖桩底部 M_{max} 逐渐减小, 锚桩与竖桩联接点处弯矩 M_1 逐渐增大。当 $h = H/3$ 时, $M_{max} = M_1$, 且 M_{max} 仍在竖桩底截面, 此时的悬臂长度是最佳长度。当 $h > H/3$ 时, M_{max} 将呈非线性增长, 这时 h 的增大对桩身内力起反作用。因为此时竖桩上部有一大段是悬臂结构, 其承载力显然是很低的。

同时, 通过仿真分析得出的不同悬臂长度下竖桩变形曲线图可以作出竖桩最大位移 Δ_{max} 与 h 的关系曲线(见图8)。当 h 在 $(0 \sim 1/6)H$ 范围内时, Δ_{max} 基本上与 h 成线性关系, 随 h 增大而减小。当 h 超过 $H/6$ 后, Δ_{max} 在竖桩顶部, 此时 Δ_{max} 很大程度上取决于一个长为 h 的悬臂结构的顶点位移, 因此随着 h 的增大 Δ_{max} 将非线性地迅速增大。



M_{max} —竖桩底端最大弯矩

M_1 —竖桩与锚桩连接处弯矩

图7 $M_{max} - h$, $M_1 - h$ 曲线

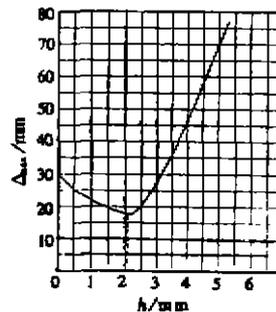


图8 $\Delta_{max} - h$ 曲线图

另外, 我们还进行了锚桩倾角、土压力分布、嵌岩情况、空间协同等因素对抗滑体系的影响, 由于篇幅关系不一一赘述。总之, 在诸多因素中, 对工程影响最大的是悬臂长度 h , 在一定范围内增大 h , 能使竖桩内力减小很大幅度, 且对工程难度无太大提高。增大竖桩桩径 D 虽能提高抗滑体系的承载力, 但大大提高了工程造价。

3 工程实例—施家梁滑坡治理

3.1 滑坡概况

施家梁滑坡位于嘉陵江观音峡南江西岸牛屎沱岸坡, 原是一老滑坡, 形成年代久远。

滑坡体呈北东向展布,东西最大长度约 320 m,南北宽约 50 ~ 120 m,滑坡总体积约 $2.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。滑坡区岩体具不良地质结构且处于不利地貌部位,加之气象水文因素的异常变化及车辆震动和库塘、边沟渗水等外界触发因素的作用,几十年来滑体内不同部位发生不同程度的变形,部分地段滑动加剧,分别形成了土溜、蠕滑、拉裂、滑移。该滑坡一直严重影响重庆市北部交通要道—渝南公路的运输安全,虽经多年的不断治理并耗资巨大,但仍然年年滑坡不断,必须尽快从根本上治理。

3.2 治理方案

通过几种治理方案的优化比较,我们确定了带悬臂桩—锚桩方案(图 1)。整个抗滑体系由竖桩、锚桩和联系梁三部分组成,呈拱形布桩。竖桩桩径为 0.8 m,其间距为 2.0 m、2.5 m 与 3 m,中间密、两边疏。锚桩桩径为 0.35 m,与水平面夹角成 45° 。竖桩与锚桩均为 16 根。矩形截面的联系梁分上部和中部两道,锚桩在中部联系梁距上部联系梁顶以下 3.15 m 处与竖桩相连。竖桩与锚桩均嵌入滑动面以下中风化岩层内,各桩组成了一个空间协同作用的整体。

该方案比采用抗滑桩—锚桩体系治理同样的工程节约钢筋用量 20% ~ 25%,节约水泥 25% ~ 30%,同时施工难度减小,工期加快。其工程造价仅为原估算跨线桥治理方案的十分之一,为原估算抗滑挡墙的三分之一。该滑坡治理工程由本课题组设计并实施,于 1993 年完工,仅花工程费 21 万元人民币。工程建成后从根本上结束了过去年年滑坡、年年治理的状况,保证了渝南公路的安全畅通,具有良好的经济效益和社会效益。

4 结 论

1) 抗滑结构体系的可靠性、经济性受多种因素影响,关键在于确定合理的抗滑结构体系,它直接关系到阻滑结构的成败以及工程造价。带悬臂桩—锚桩抗滑体系与其它的阻滑结构相比,能更好地在保证结构可靠性的前提下,尽可能降低工程造价。

2) 带悬臂桩—锚桩抗滑体系,即在抗滑竖桩上部某一位置加上锚桩。在滑坡推力作用下,由于锚桩的拉力作用,使竖桩的受力状态与一般的抗滑桩完全不同。桩身相当于梁式受弯构件,且出现两个反弯点,桩身弯矩沿整个桩身高度分布较一般抗滑桩均匀得多,这样便大大提高了抗滑体系的整体承载能力。

3) 影响桩—锚桩抗滑体系的因素很多,包括竖桩与锚桩桩径、悬臂长度、配筋率、嵌岩深度、锚桩倾角等。在工程造价相对不变的前提下,一个相当敏感的因素便是悬臂长度的确定,它直接关系到这一新型阻滑体系优势的体现。其确定原则是使竖桩桩身正负弯矩分布尽可能均匀,使得抗滑体系的主要受力部件(包括竖桩和锚桩)达到均衡受力的优化状态。

4) 通过对比模型试验可知,1 m 桩径的不带悬臂的抗滑桩—锚桩体系与桩径为 0.8 m 的带悬臂桩—锚桩体系比较,其抗滑能力相差无几,而后者比前者的工程造价大幅度降低,与其它结构比较,其经济效益更加明显。

5) 重庆市渝南公路的施家梁滑坡治理工程的实施及运营状况充分体现了带悬臂桩—锚桩抗滑体系的可靠性与经济性,也反映了这种结构体系的工程应用价值。

参 考 文 献

- 1 张四平. 嵌岩桩传荷性能及破坏机理的试验研究. 重庆建筑工程学院学报, 1990, 12(2)
- 2 H.F. 温特科恩等. 基础工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983
- 3 C.S 德赛等. 岩土工程数值方法. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981
- 4 滑坡文集. 北京: 中国铁道出版社, 1988
- 5 滑坡分析与防治. 北京: 中国铁道出版社, 1987

Model Test and Computer Simulated
Analysis of Slide-Resistant System on
Cantilever Pile-Anchorage Pile

Zhang Siping Lai Ming Liao Heping
(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045)

Abstract This paper deals with the investigation of the structural behaviour, mechanical conditions and the impacts of the related factors of slide-resistant system on cantilever pile-anchorage pile. This investigation is based on analysis of indoor model test and a great number of computer-simulated analyses. The slide-resistant system was used for landslide-resistant project in Shijialiang of Chongqing, and provided good social and economic benefits.

Key Words cantilever pile, anchorage pile, slide-resistant system, landslide