

文章编号:0451-0712(2006)11-0001-04

中图分类号:U416.1

文献标识码:B

# 昔格达地层滑坡抗滑桩加固 离心模型试验研究

杨 明, 姚令侃, 王广军

(西南交通大学土木工程学院 成都市 610031)

**摘 要:** 由于昔格达地层具有特殊的工程地质性质,西攀高速公路通过昔格达地层时形成较多的昔格达地层滑坡。对滑坡的处治主要采用抗滑桩进行支挡。抗滑桩的设计理念是采用非连续结构,利用土体自身强度形成的拱效应来达到支挡的目的,设计时应进行桩截面尺寸及桩间距的优化,最大限度地利用桩间土体的成拱能力。通过离心模型试验,对抗滑桩加固昔格达地层滑坡形成土拱效应的现象进行研究,再现了桩间土拱形成的现象。试验表明,试验条件下的合理桩间净距约为 4 m。采用对比试验方法,研究桩宽度对形成土拱及破坏荷载下拱脚稳定性的影响,发现桩宽度大小对桩间土拱的形状没有太大影响,但在破坏荷载下对拱脚的稳定性有较大影响。因此,在满足同样稳定性要求的前提下,采用较大的桩宽度可以适当增加桩间净距的大小。

**关键词:** 昔格达地层; 滑坡; 抗滑桩; 离心模型试验; 土拱效应; 合理桩间距

西昌~攀枝花(西攀)高速公路是交通部规划的 8 条西部大通道之一——甘肃兰州~云南磨憨口岸的重要组成部分,是四川省通往云南省昆明市的主要通道。西攀高速公路地处川滇南北构造带中部,挤压褶皱和活动断裂众多,地震频繁,地震烈度大,晚第三系昔格达地层发育。路线全长约 90 多 km。公路受地形条件限制,许多地方以路堑形式通过昔格达地层。昔格达地层有着特殊的工程地质特性,受微构造及水的影响,边坡开挖后若不及时进行支挡,很容易形成滑坡灾害。对昔格达地层滑坡进行处治的工程措施主要是采取抗滑桩进行支挡,辅以清方减载及防排水措施。

本文对西攀高速公路几处昔格达地层滑坡的成因及相应的工程措施进行分析和总结,并采用离心模型试验对抗滑桩加固昔格达滑坡时的合理桩间距问题进行探讨。

## 1 昔格达地层滑坡的特性分析

### 1.1 昔格达地层特性

昔格达地层是我国西南地区著名的晚新生代地层,在大渡河、雅砻江、金沙江及其支流安宁河等河

谷地带均有分布,主要由灰绿色、灰黑色、灰黄色的粘土岩、粉砂质粘土岩和粉砂岩组成。昔格达地层属半成岩,按岩性可分为粘土岩、砂岩。其粘土岩较致密,砂岩较疏松。粘土岩具微细层理,侵水后容易崩解成鳞片状;砂岩呈半胶结状,胶结物为泥质或钙质。

就岩性、岩体的物理力学性质、承载力而言,昔格达地层为较良好的地基持力层。但值得特别指出的是,昔格达地层具有不可忽视的不良地质因素,主要可归纳为以下几个方面。

(1)昔格达地层尽管经受了一定的成岩作用,但比起前三系的成岩程度有天壤之别,因此强度较低。特别是在水的作用下,承载性能和抗剪强度都会大幅度降低。

(2)昔格达地层中页岩、泥岩具有微细的层理,在风干后,特别是反复侵水后,极易崩解。

(3)由于昔格达地层为砂(粉砂)岩、泥(页)岩互层,岩体中常有软弱的沉积结构面,特别是所谓的“红层”(很薄的红土层)等。这些软弱结构面及昔格达地层与上覆松散堆积层的接触界面、与下伏地层的界面,是产生滑坡、坍方的主要不良结构面<sup>[1]</sup>。

(4)由于攀西地区新构造运动强烈,岩体中常存

有断裂和构造裂隙为主的破裂结构面,这将给昔格达地层边坡的稳定性带来严重影响。

## 1.2 昔格达地层滑坡成因分析

自然斜坡是坡体应力与外界自然营力长期作用的结果,处于稳定状态。由于工程活动的影响,当边坡形成临空面,急剧地改变了坡表形态,致使坡体应力重新调整、集中分布,并于局部地下水含量高地带超过了岩石的抗剪强度,于是造成边坡的局部失稳。边坡岩体的滑动不但使滑体周边的岩体受到张拉、剪切破坏,同时也形成了新的临空面,坡体应力又重新调整分布,在自然营力的影响下,临空处岩体又产生新的滑动。同时,大气降水不但增加了斜坡岩体的容重,也增加了裂隙水压力,降低了昔格达组地层的抗剪强度,为边坡的失稳提供了有利的条件。以下为西攀高速公路沿线几处典型的昔格达地层滑坡的成因分析及主要处治工程措施。

### 1.2.1 牛坪子滑坡

牛坪子滑坡位于K137+820~K138+020线路左侧,原设计为路堑边坡,开挖后出现多次坍塌。边坡岩土体中夹有呈浅黄、深灰色的昔格达组软弱层,这是滑坡滑动的内因。丰富的地表水下渗为滑坡的发育提供了基本条件,路堑边坡开挖形成临空面,破坏了斜坡平衡,诱发了滑坡。同时,雨季大量地表水渗入坡体,增加滑体容重,降低土体物理力学强度,软化滑面,加剧了滑坡的发展<sup>[2]</sup>。

该滑坡K137+820~K137+921段高边坡,昔格达软弱层位于边坡中下部,倾向坡外,边坡处于欠稳定状态,故适当清方减载后,在第三级平台设置抗滑桩,以防止上部边坡岩土体沿昔格达组软弱层滑动。抗滑桩共设17根,截面尺寸为1.6 m×2.4 m,桩长20 m,桩中心间距为5 m。

### 1.2.2 K151+280~K151+360 右侧边坡滑坡

该滑坡位于盐边县新九乡蚂蟥沟水库北侧,原设计为深挖路堑,坡脚设路堑墙,墙顶上按1:1坡比放坡,8 m一级,每级设宽为2 m的平台,坡面植草防护。2005年1月上旬,当开挖至距设计标高还有约4 m时,K151+280~K151+360段右侧已开挖成型的、高达33 m的3级边坡突然产生下滑推移,滑体前缘瞬间移至中线左侧约4 m处,险些酿成机毁人亡的重大安全事故。

该滑坡为牵引式中型滑坡,全长约80 m。其主滑方向与路线近似垂直,沿主滑方向长95.5 m,平面形态呈圈椅状。滑体的平均厚度约为10 m,体积

约4.3万m<sup>3</sup>。滑坡纵、横向张拉裂缝发育,个别裂缝宽达20~30 cm,长达10余m。滑坡后壁连续、完整、陡立,高约2.0~10.0 m。

滑坡位于向斜核部,产状近水平,张裂隙较发育,有利于地下水的汇集、运移。昔格达组地层为相对含水的粉砂岩夹相对隔水的泥岩,且均为半成岩,遇水易软化并导致内摩擦角、凝聚力急剧降低。泥岩具相对隔水作用,地下水易在其上部富集并形成泥化层。边坡开挖后,形成高达33 m的临空面,并加速了地下水的运移、排泄,改变了岩体原始平衡条件及水文地质条件,从而形成滑坡。

对该滑坡的处治措施主要是采取适当清方减载后,设置一排抗滑桩,桩间设挡土板。抗滑桩共设21根,截面尺寸为2.0 m×2.5 m,桩中心间距为5.0 m,桩长有17 m和15 m两种。

### 1.2.3 K159+380~K159+580 滑坡

该段线路原设计为二级路堑边坡,边坡开挖成型一段时间后,于2004年7月31日19:30开始开裂,到2004年8月1日5:30,边坡产生整体滑动,前推了约11 m。滑体后缘最大下错高度达9 m,前缘剪出口附近隆起明显。

根据地勘资料,滑坡区出露昔格达组粉砂岩破碎物,其为第四系全新统滑坡堆积物,底部见0.30~0.40 m厚的滑带土,由软化泥岩组成。滑坡床基底岩层为新生界昔格达组泥岩,滑坡体以外地段分布有昔格达粉砂岩,其中上部常与泥岩呈互层状。

由于昔格达组粉砂岩呈散体状结构,抗剪强度低,其内局部分布紫红色泥岩,加之地下水长期浸泡昔格达组粉砂岩与泥岩界面,使其抗剪强度大大降低。前缘边坡开挖破坏了原有自然斜坡的稳定平衡状态,最终形成前剪后推式整体滑坡。

该滑坡治理措施主要采用桩板墙进行支护,边坡进行适当清方减载后,于滑坡前缘设置一排抗滑桩,桩间设挡土板。抗滑桩共设26根,分A、B两种桩型。其中1~13号为A型桩,截面尺寸为2.2 m×3.2 m,桩长15 m,桩间距为5.0 m;14~26号为B型桩,截面尺寸为2.0 m×2.5 m,桩长15 m,桩间距为6.0 m。

### 1.2.4 金江互通立交C匝道滑坡

该滑坡原设计为路堑边坡,在开挖期间发生多次坍塌,滑坡滑体长约100 m,宽30~55 m,推测厚度约7~10 m,体积约6万m<sup>3</sup>。滑体前缘受阻力作用,形成刀棱状的小鼓丘,鼓丘高0.3~0.5 m;中部形

成数条张拉裂缝,局部形成剪裂缝,裂缝宽窄不等;滑体后缘可见光滑镜面和擦痕,后缘形成高低不等的滑壁,高2~3 m。滑体从平面上看呈条带状展布。滑坡区出露地层主要为第四系全新统滑坡堆积物、残坡积层、昔格达组。昔格达组中节理发育,利于地表水的渗入。

昔格达组粉砂岩、泥岩呈互层状产出,泥岩、粉砂岩亲水性强,遇水易软化或崩解,抗剪强度受含水量多少而变化,具动态特征。粉砂岩与泥岩间夹软弱泥化夹层,其物理力学性能极差,是坡体中的最不利结构面。

该滑坡坡体内存在的软弱泥化夹层与倾向坡外的陡倾节理组合,共同构成坡体滑动的内因,边坡开挖揭露软弱泥化夹层是滑坡产生的外因。通过对多次滑动剪出口位置的分析,基本上每次滑动剪出口位置都在开挖坡脚附近,其剪出口位置随着开挖坡脚标高的降低而降低,具追踪性。

滑坡处治措施为适当清方后坡脚设抗滑桩进行支挡。共设抗滑桩23根,截面尺寸为2.5 m×3.0 m,桩长21~22 m。4~19号桩桩中心间距为5 m,其余桩中心间距为6 m。桩顶每3根一组,采用系梁联结,最后2根作为一组进行联结。

## 2 抗滑桩加固滑坡的离心模型试验

### 2.1 离心模型试验设计

抗滑桩的设计理念是采用非连续结构,利用土体自身强度形成的拱效应<sup>[3]</sup>,将桩间土体的下滑推力传递到桩身来达到支挡的目的。在设计时,首先考虑桩结构的强度和土体下滑推力平衡,在此基础上对桩截面尺寸及桩间距进行优化,达到技术可行、经济合理的目的。目前,对于桩自身强度的设计方法已经比较成熟,而对于合理桩间距的设计还停留于依靠经验的阶段,没有成熟的理论方法可供指导。在工程实践中,若抗滑桩的桩间距设得较小,能保证安全性的要求,但在经济上不合理;若桩间距设得过大,则可能不能形成土拱效应,桩间土体发生滑动,导致整个坡体的破坏。所以,在抗滑桩设计时,合理桩间距是抗滑桩设计时的一个重要指标。合理的桩间距是在满足桩结构强度和土体下滑推力平衡的条件下,桩间土体能产生土拱效应而又不被破坏的最大桩间距<sup>[4]</sup>。

在西攀高速公路沿线的昔格达滑坡处治中,抗滑桩中心间距一般设计为5 m,而桩间净距仅

2.5 m。这一方面是从安全角度考虑;另一方面确实对土拱效应的机理,尤其是昔格达土在形成土拱方面的特性没有进行深入的研究。

抗滑桩桩间土拱效应的产生一般认为跟桩间距、桩的尺寸、桩的性质(刚性桩或柔性桩)、土体抗剪强度参数、桩侧与土体摩擦系数、土体下滑推力的大小、桩的形式(埋入式或悬臂式)等有关系。本文主要针对桩间距进行对比试验,为了更好地观察桩间土体成拱的现象,采用悬臂式抗滑桩,桩间不设板,形成临空面。滑坡采用如图1所示的概化模型,用石膏砂浆混凝土模拟持力层,再分层填筑昔格达重塑土作为滑体,两者交界面形成滑动面。采用铝合金矩形管模拟抗滑桩,截面尺寸为12 mm×16 mm。在模型桩的内部填充砂浆,表面涂环氧树脂,并粘上一层薄砂浆,进一步使模型桩的外形、刚度及其与土的摩擦阻力与原型相似。

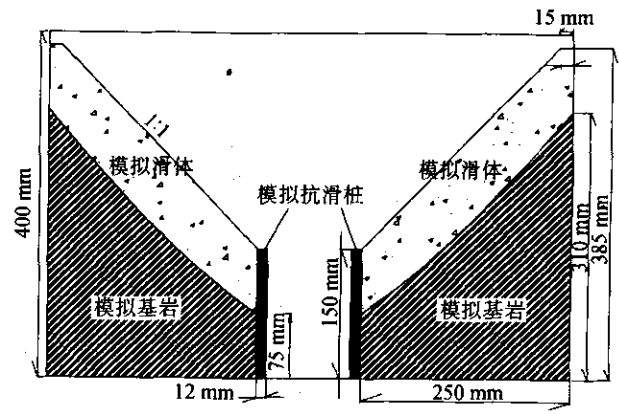


图1 离心模型正面示意

虽然制模使土体强度参数存在微小误差,但对试验结果影响很小,试验仍具有可比性。各组试验土体的含水率、密度及土体强度参数见表1(其中编号为1、2的模型和编号为5、6的模型分别是在同一个模型箱中完成的,因此,其土体参数是相同的)。

表1 试验参数及试验方案

模型编号	桩间净距 cm	粘聚力 <i>c</i> kPa	内摩擦角 <i>φ</i> (°)	含水率 <i>w</i> %	密度 <i>ρ</i> g·cm <sup>-3</sup>
1	3	37.3	29.5	24	1.96
2	5	37.3	29.5	24	1.96
3	8	39.1	25.8	23.5	1.99
4	10	39	27	23.9	1.99
5	12	40.6	25.8	24.4	2.00
6	17	40.6	25.8	24.4	2.00

2.2 离心模型试验结果

试验加载时离心加速度从 0 g 逐渐加到 40 g, 然后再运行 30 min。桩间土体坍塌形成的拱现象及拱脚破坏情况见表 2 及图 2(限于篇幅, 仅列出桩间净距为 8 cm、10 cm 及 12 cm 的模型)。根据试验现象可以得到以下的初步结论。在土体强度参数、桩的尺寸以及下滑力(受离心加速度大小及模型高度控制)大致相同的情况下, 抗滑桩桩间净距的上限在 10~12 cm 之间, 为桩径的 6.25~7.5 倍, 按模型比尺  $n=40$  进行计算, 约为 4~4.8 m。由于 10 cm 桩间净距的模型坡体表面出现拉裂缝, 所以在上述条件下的合理桩间距应该在 8~10 cm 之间, 即为桩径的 5~

6.25 倍, 按模型比尺  $n=40$  进行计算, 约为 3.2~4 m。

表 2 桩间土体坍塌成拱的试验现象

模型编号	桩间净距 cm	土拱拱矢 cm	拱脚破坏情况
1	3	1.2	未破坏
2	5	1.8	未破坏
3	8	2.2	未破坏
4	10	4.2	出现裂缝
5	12	形成土拱但拱已破坏	出现裂缝及多处斜拉裂纹
6	17	未形成土拱	出现裂缝

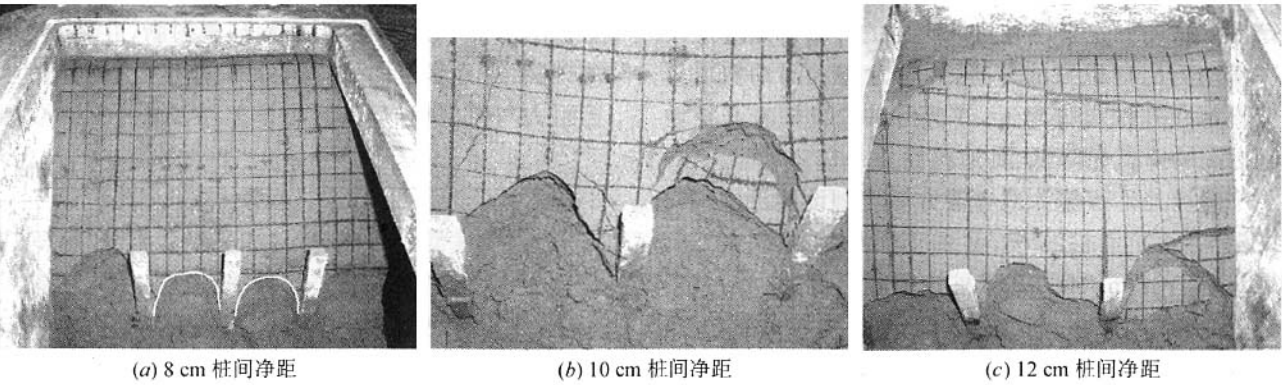


图 2 桩间土拱及破坏情况

2.3 桩宽度不同对形成土拱的影响分析

离心加速度为 40 g 时, 模型桩宽相当于真实桩宽, 为 0.84 m。桩宽度对形成土拱及其稳定性有很大影响, 这对于桩截面及桩间距的优化设计具有重要意义。

一般的观点认为, 桩间土体形成土拱的厚度跟桩的宽度有关系。如果是方桩, 则其抗弯一侧的宽度即为拱厚; 如果是圆桩, 则认为圆形内接正方形的边长即为拱厚<sup>[5]</sup>。显然, 若只考虑桩间土体, 假定土体强度参数及桩间净距相同, 则桩宽度对土拱的影响主要体现为对拱脚的影响。本文对此做了一组对比试验, 试验在同一个模型箱中一次完成, 一侧采用 32 mm 桩宽, 一侧仍然采用 16 mm 桩宽。桩间净距均为 10 cm, 离心加速度先加到 40 g, 然后再加到 80 g。试验现象如图 3 所示。

观察试验现象可以发现, 当桩间净距相同时, 桩的宽度对土拱的形状及拱矢高度几乎没有太大的影响, 但对拱脚的稳定性影响较大。当离心加速度加到 80 g 时, 16 mm 桩的桩后土体已基本破坏, 而 32 mm

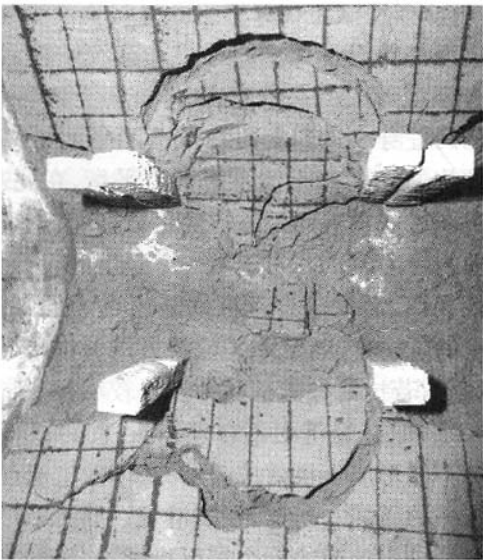


图 3 桩宽对土拱的影响

桩的桩后则仅出现一条细小斜裂纹。由此可以看出, 桩的宽度越大, 对土拱拱脚的稳定性越有利。换言之, 在满足同样的稳定性要求的前提下, 采用较大的桩径即可适当地增大桩间距。



# 水泥混凝土路面板底脱空的弯沉判据研究

邱丽章, 王端宜

(华南理工大学交通学院 广州市 510640)

**摘 要:** 根据试验路几种脱空检测方法的结果, 研究了水泥混凝土路面板脱空的弯沉判据, 提出了以一定保证率下板角弯沉值与板角弯沉差作为路面板板角脱空的弯沉判据, 为施工单位提供了一种简单实用的方法识别脱空板。

**关键词:** 水泥混凝土路面; 板底脱空; 弯沉判据

在水泥混凝土路面的使用过程中, 路面板底脱空是一种常见现象。板底脱空又是造成水泥混凝土路面板断裂和错台的直接原因。因此, 以一定的方法检测和判别路面板下基础脱空与否及程度大小, 对于采取适宜的预防性或矫正性的修复措施, 预防和阻止路面板发生结构性破坏是极为重要的。

工程上对于如何检测水泥混凝土路面板的脱空一直没有很好的办法, 目前常用的脱空判断方法主

要有落锤式弯沉仪(FWD)脱空判断、声振法人工神经网络脱空判断、反算地基模量脱空判断、探地雷达脱空判断、超声波脱空判断等。尽管各种方法都能不同程度地识别出路面板脱空, 但是鉴于目前我国施工单位的实际条件, 上述各种方法要么设备昂贵, 要么过程复杂, 在工程实际操作方面比较困难, 难以推广。

鉴于在道路工程设计和常规的质量评定中多以

收稿日期: 2006-04-20

## 3 结论

(1) 昔格达地层具有特殊的工程地质特性, 在水的作用下, 承载性能和抗剪强度都会大幅度降低。软弱结构面及新构造运动产生的断裂和构造裂隙, 对昔格达地层边坡的稳定性有严重的影响。

(2) 人工边坡开挖形成临空面, 急剧地改变了坡体形态, 致使坡体应力重新调整、集中分布, 在地下水及大气降水的影响下, 昔格达地层抗剪强度降低。这是西攀高速公路沿线昔格达地层滑坡形成的主要原因。

(3) 抗滑桩设计时应根据滑体性质, 在满足结构强度与滑体下滑推力平衡的条件下, 进行桩截面尺寸和桩间距的优化设计, 研究桩间土体形成土拱的能力及土拱破坏荷载, 采用能产生土拱效应而又不被破坏的合理桩间距。

(4) 离心模型试验所采用昔格达重塑土粘聚力约为 40 kPa, 内摩擦角约为  $30^\circ$ 。在离心加速度为 40 g 的条件下, 其合理桩间距为桩径的 5~6.25 倍,

按模型比尺  $n=40$  进行计算, 约为 3.2~4 m。西攀高速公路沿线昔格达地层滑坡的抗滑桩净间距一般采用的是 2.5 m, 偏于保守。

(5) 桩宽度对形成土拱的形状和拱矢高度没有太大的影响, 但在破坏荷载作用下对拱脚的稳定性影响较大。在满足同样的稳定性要求的前提下, 采用较大的桩径可以适当地增大桩间距。

## 参考文献:

- [1] 许述礼. 昔格达层变形特征及其原因[J]. 四川地震, 1990, (3).
- [2] 尹紫红, 周志林, 梁明学. 昔格达组地层研究现状与牛坪子滑坡稳定性分析[J]. 路基工程, 2005, (2).
- [3] 吴子树, 张利民, 等. 土拱的形成机理及存在条件的探讨[J]. 成都科技大学学报, 1995, (2).
- [4] 周德培, 肖世国, 等. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1).
- [5] 贾海莉, 王成华, 等. 关于土拱效应的几个问题[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(4).