

## 高切坡超前支护桩与坡体共同作用分析

何思明

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 针对高切坡施工常常导致边坡失稳破坏, 诱发滑坡发生的现象, 提出采用超前支护桩整治不稳定高切坡的设计理论。采用解耦方法研究了超前支护桩与开挖坡体之间的相互作用机制, 其中高切坡开挖面采用弹性理论分析; 超前支护桩采用可以考虑桩侧向土体屈服的弹塑性理论进行桩的内力理论解, 根据两者之间荷载变形关系建立联系求解, 为高切坡超前支护桩的设计提供依据。结果表明: 桩土相互作用力大于常规主动土压力, 与边坡开挖量、开挖高度、支护桩的刚度以及土体性质等因素密切相关。

**关键词:** 超前支护桩; 高切坡; 相互作用机制

**中图分类号:** TU37

**文献标识码:** A

在山区修筑公路、铁路、水利工程以及进行城镇建设的过程中, 不可避免地出现大量的高切坡。如果边坡开挖不当, 或开挖后不及时进行支护、长期暴露, 在开挖卸荷、雨水入渗的综合作用下极易导致高切坡发生变形破坏, 甚至演变成滑坡, 造成重大的财产损失甚至人员伤亡, 严重地影响工程建设的顺利进行, 并破坏了西部山区脆弱的生态环境, 给工程建设造成不可弥补的损失。这样的实例在我国西部地区基础设施建设中, 特别是公路建设过程中屡见不鲜, 不胜枚举, 并已成为继滑坡、崩塌、泥石流之后的又一大地质病害, 严重地制约了我国西部山区经济建设的发展。比如, 川藏公路 G317 线妥(坝) - 昌(都)改扩建路段, 全长仅 100 多 km, 就形成了高切坡近 200 余个, 平均 2 个/km。由于未及时支护, 在开挖过程中以及高切坡形成后不久就产生了 10 余个大型滑坡, 不仅增加了近 2 亿元的投资, 而且由于要重新对新增滑坡进行勘察、设计、施工, 严重地影响了公路建设的顺利进行。又比如, 据不完全统计, 仅三峡库区重庆段, 在移民建房、县城搬迁以及公路建设过程中, 就产生了 3 000 余个高切坡, 这些高切坡只有很少一部分进行了工程治理, 未经整治的部

分高切坡已经发生了严重变形破坏, 有的甚至已经演变成滑坡, 严重地威胁库区人民的生命财产安全。

针对上述问题, 我们提出了高切坡超前支护研究课题, 所谓超前支护是指在高切坡形成之前, 首先对其进行危险性评价, 若判定该高切坡属于危险性边坡(不稳定边坡), 特别是在施工过程中或形成后不久就可能发生变形破坏的高切坡, 则在高切坡形成之前先进行支护结构设计和施工, 待支护工程完成后, 再进行边坡开挖, 这样一种提前支护的方法, 称为超前支护。采用这种设计思想后, 可避免人工开挖边坡诱发滑坡的情况出现, 从根本上解决因施工开挖切坡诱发滑坡这一困扰基础设施建设多年的难题。若这种新的设计思想能在我国西部山区乃至全国推广, 将会从根本上改变山区基础设施建设投资偏高, 建设周期过长的不利局面, 极大地推进西部山区基础设施建设的发展。因此, 开展高切坡超前支护研究, 对于加快我国西部山区的基础设施建设, 推进我国经济可持续发展具有重要的科学意义和实用价值。

2004 ~ 2005 年, 我们在西藏中尼公路曲(水) - 大(竹卡)段改扩建工程中, 首次采用了超前支护进

收稿日期(Received date): 2006 - 06 - 20。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(40572158) [Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 40572158)]

作者简介(Biography): 何思明(1968 - )男, 四川蓬溪人, 博士, 副研究员, 主要从事山地灾害形成机制及防治技术研究。haml12003@yahoo.com.cn [He Siming(1968 - ), male, born in Penxi, Sichuan, P. H. D., associate professor, majoring on landslide controlling engineering]

行高切坡整治,这是国内外第一次将高切坡超前支护设计应用于工程实践的实例,也正是由于曲(水)~大(竹卡)段改扩建工程采用了超前支护的设计理论对高切坡进行整治,完全避免了因为路堑开挖诱导滑坡发生的情况发生,大大降低了本段工程的建设投资,节约了工期,保证了该项目的顺利实施,成为西藏公路建设史上的一个奇迹,也初步显示了高切坡超前支护理论的巨大潜力<sup>[1]</sup>。

虽然高切坡超前支护设计已经在工程实践中得到了应用,但超前支护结构与变形坡体之间相互作用机制问题仍然存在许多模糊认识,比如超前支护桩与变形坡体相互作用机制,特别是变形坡体施加在超前支护桩上的荷载大小及分布特点,直接关系到超前支护桩的结构设计,关系到超前支护结构的经济和安全,本文内容正是这方面研究的一次尝试。

## 1 高切坡无支护开挖及超前支护开挖坡体变形特征

大量的事实表明:自然边坡在无支护开挖后,会在坡体一定深度范围内形成卸荷带,卸荷带也常常是高切坡发生变形破坏的位置,并在坡体开挖面上产生最大的自由变形,这种变形沿着坡体深度快速衰减并最终在卸荷带内边界处趋于零。通过弹性岩体开挖的简单力学分析表明<sup>[2]</sup>:边坡开挖后,其应力场、位移场均会发生变化,而发生变化的区域就是开挖卸荷带的影响区,但这种开挖卸荷作用的影响是有限的,不会波及到很大的范围。在影响范围内,边坡内的应力场和变形场会发生显著变化,而超过这个区域后,高切坡则不受影响。

如果在高切坡开挖前预先设置超前支护桩,超前支护桩的存在就可以约束坡面自由变形的发展,在高切坡变形岩土体与超前支护桩之间产生相互作用,相当于超前支护桩给高切坡坡面施加了一个约束力,限制了坡面变形的进一步发展,相应地,坡面也会有相应大小的荷载作用在超前支护桩上,这个荷载的大小及分布特征是超前支护桩进行结构设计的基础和依据,也是超前支护桩与高切坡变形坡体之间相互作用机制研究的重要内容。

假设高切坡无支护开挖后,其坡面任意位置处的水平变形量为 $u_0(z)$ ,当采用超前支护桩整治后,由于超前支护桩的存在,抑制了坡面自由变形的发展,假设坡面在支护桩作用下,坡面任意位置处的实际变形量为 $u_1(z)$ ,而支护桩在变形坡体作用下的

实际变形量为 $u_2(z)$ ,则这三种变形之间应满足如下变形协调关系<sup>[3,4]</sup>(见图1)

$$u_0(z) = u_1(z) + u_2(z) \quad (1)$$

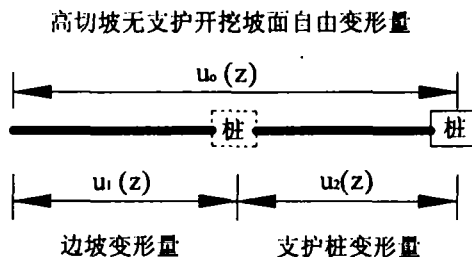


图1 高切坡超前支护桩变形协调关系

Fig. 1 Deformation relation of pile/soil of high cutting slope

## 2 高切坡超前支护桩体系解藕计算

为研究方便,采用解藕计算方法对高切坡超前支护体系进行研究(图2),即将体系分解成高切坡和支护桩两个部分分别进行研究,再根据两者之间荷载、变形协调关系进行组合求解。其中高切坡体部分采用弹性理论进行计算;支护桩部分则采用可以考虑桩侧向土体屈服的弹塑性理论进行桩的内力理论解。计算内容分别见第4、第5节。

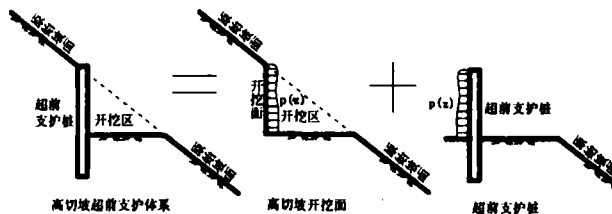


图2 高切坡超前支护解藕计算模型

Fig. 2 Uncouple model of pre-reinforced of high cutting slope

## 3 侧向荷载作用下高切坡坡体变形分析

高切坡在支护桩施加的荷载作用下的变形计算可以采用半无限平面的弹性力学解确定,在此假定边坡岩土体为均匀的弹性各向同性体。相应的计算模型见图3。作用在高切坡开挖面上的荷载为 $p(z)$ ,开挖高度为 $h$ ,在图示坐标系下,根据弹性力学半无限平面问题基本解,可以给出开挖面上任意位置处的变形计算<sup>[5]</sup>

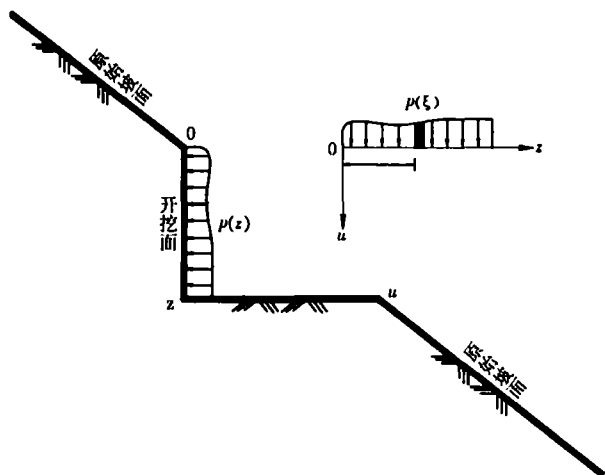


图3 受侧向荷载作用的高切坡计算模型  
Fig. 3 Calculation model of high cutting slope under lateral loading

$$u_1(z) = \int_0^h \frac{(1-2\nu)p(\xi)}{\pi E(z-\xi)} d\xi \quad (2)$$

式中  $p(\xi)$  为超前支护桩施加在高切坡开挖面上的荷载;  $u_1(z)$  边坡在侧向荷载作用下开挖面上任意位置处的水平变形;  $E$ 、 $\nu$  分别为高切坡岩土体的弹性模量和泊松比;  $h$  为高切坡垂直开挖高度。

## 4 超前支护桩变形分析<sup>[6-9]</sup>

### 4.1 桩内力计算的基本方程

弹性桩的内力计算最常用的方法是弹性地基梁法。如图4所示,把土体作用简化为很多离散的弹簧,桩上任意一点的反力和位移仅和该点上的弹簧相关。滑面以上部分桩的挠曲微分方程为

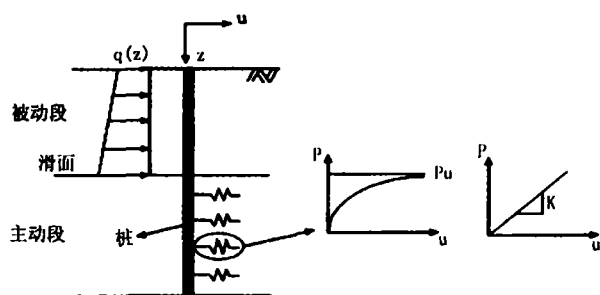


图4 水平荷载桩  
Fig. 4 A pile subjected to lateral soil displacement

$$E_z I \frac{d^4 u_2}{dz^4} = q(z) \quad (3)$$

式中  $E_z I$  为桩的刚度;  $u_2$  为潜在滑面以上部分桩的变形;  $q(z)$  为作用在桩上的土压力。滑面以下部分桩的变形微分方程为

$$E_z I \frac{d^4 u_3}{dz^4} = -p = -Ku_3 \quad (4)$$

式中  $u_3$  为滑面以下部分桩的变形;  $K = K_b b$ ,  $K_b$  为地基反力系数,  $b$  为桩的宽度或直径。上式是视滑面以下土体为弹性时的计算公式,这在土体小变形的情况下适用。

### 4.2 考虑土体屈服的桩内力理论解

开挖面以下的部分支护桩受力如图4所示,由于桩顶位移较大,部分土体可能已经发生屈服,因此把地基按完全弹性计算是不合理的。本文把土体视为理想弹塑性材料(图5(a)),当应力达到屈服应力  $p_u$  时,土体屈服,桩上的反力不变而位移持续增大。对应于屈服应力的位移为屈服位移,用  $w^*$  表示,因此有  $p_u = kw^*$ 。对粘性土,Matlock(1970)把屈服位移描述为应变  $\varepsilon_c$  和桩的直径的函数。对砂性土的屈服位移,Reese, et al. (1974)认为仅和桩的直径相关,这种情况下的土体屈服位移见表1。

为考虑土体的屈服,把桩分成两段,并假设土体的  $K$  和  $w^*$  在深度方向上为定值。如图5(b)所示, C点处桩的位移刚好为  $w^*$ ,则在C点以上的部分桩的位移大于  $w^*$ ,土体已经发生屈服,土体对桩的反力为极限压力  $p_u$ 。对C点以下的部分桩,土体仍处于弹性状态,因此可以用弹性地基梁法的公式计算。塑性段桩的内力控制方程为

$$S = P_0 - p_u(z_0 - z_1) \quad (5)$$

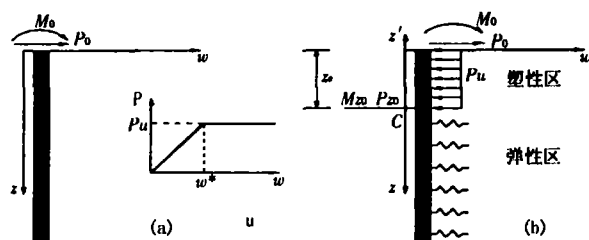


图5 水平荷载桩的主动段

Fig. 5 The active portion of a laterally loaded pile

表1 土的屈服位移  
Table1 Yielding displacement of soil

| 土的类型 | 屈服位移                             | 参考文献                           |
|------|----------------------------------|--------------------------------|
|      | $w^* = 20\varepsilon_c d$        |                                |
|      | 脆弱敏感性粘土: $\varepsilon_c = 0.005$ |                                |
| 粘性土  | 扰动或重塑粘土: $\varepsilon_c = 0.002$ | Matlock(1970)                  |
|      | 正常固结粘土: $\varepsilon_c = 0.001$  |                                |
| 砂性土  | $w^* = 3d/80$                    | Reese, Cox, and Koop<br>(1974) |

$$M = M_0 + P_0(z_0 - z_1) - \frac{P_u(z_0 - z_1)^2}{2} \tag{6}$$

$$\theta = \frac{P_0 z_0 z_1}{E_z I} - \frac{P_0 z_1^2}{2E_z I} + \frac{M_0 z_1}{E_z I} - \frac{P_u}{2E_z I}(z_0^2 - z_1^2 - z_0 z_1^2 + \frac{z_1^3}{3}) + \theta_{s0} \tag{7}$$

$$u = \frac{P_0 z_0 z_1^2}{2E_z I} - \frac{P_0 z_1^3}{6E_z I} + \frac{M_0 z_1^2}{2E_z I} - \frac{P_u}{24E_z I}(6z_0^2 z_1^2 - 4z_0 z_1^3 + z_1^4) + \theta_{s0} z_1 + u_{s0} \tag{8}$$

式中  $S$ 、 $M$ 、 $\theta$ 、 $u$  分别为桩的剪力、弯矩、转角和位移。 $M_0$ 、 $P_0$  分别为作用在滑面处的水平推力和弯矩; $\theta_{s0}$ 、 $u_{s0}$  分别为  $C$  点桩的转角和位移。由于  $C$  点土体刚好屈服,所以由式(8)可得, $u_{s0} = w^*$ 。因此式(8)可写成

$$u = \frac{P_0 z_0 z_1^2}{2EI} - \frac{P_0 z_1^3}{6EI} + \frac{M_0 z_1^2}{2EI} - \frac{P_u}{24EI}(6z_0^2 z_1^2 - 4z_0 z_1^3 + z_1^4) + \theta_{s0} z_1 + w^* \tag{9}$$

如果把  $C$  点以下的部分桩按半无限长桩考虑,则其挠度曲线方程为

$$u = \frac{2\lambda P_{s0}}{K} e^{-\lambda z} \cos \lambda z + \frac{2\lambda^2 M_{s0}}{K} e^{-\lambda z} [\cos(\lambda z) - \sin(\lambda z)] \tag{10}$$

$$\theta = \frac{2\lambda^2 P_{s0}}{K} e^{-\lambda z} \sin(\lambda z) - M_{s0} e^{-\lambda z} [\cos(\lambda z) + \sin(\lambda z)] \tag{11}$$

$$M = \frac{P_{s0}}{\lambda} e^{-\lambda z} \sin(\lambda z) - M_{s0} e^{-\lambda z} [\cos(\lambda z) + \sin(\lambda z)] \tag{12}$$

$$S = -P_{s0} e^{-\lambda z} [\cos(\lambda z) - \sin(\lambda z)] + 22M_{s0} e^{-\lambda z} [\sin(\lambda z)] \tag{13}$$

式中  $z$  的原点为  $c$ ,  $\lambda = \sqrt{\frac{K}{4E_z I}}$ , 是桩的特征长度。上式是基于长桩的解,对于超过临界长度的桩,可以按半无限长桩考虑,这个长度称为桩的临界长度,用  $l_c$  表示。Fleming, et al. (1992) 给出了桩的临界长度的计算公式

$$l_c = 4^4 \sqrt{\frac{E_z I}{K}} \tag{14}$$

根据前述, $c$  点处桩的位移应等于  $w^*$ ,由式(8)可得

$$w^* = \frac{2\lambda P_{s0}}{K} + \frac{2\lambda^2 M_{s0}}{K} \tag{15}$$

根据公式(12)和(13),  $C$  点处的桩的剪力和弯矩分别为

$$P_{s0} = -p_u z_0 + p P_0 \tag{16}$$

$$M_{s0} = -\frac{p_u z_0^2}{2} + P_0 z_0 + M_0 \tag{17}$$

把公式(16)、(17)和  $p_u = kw^*$  代入式(15)可得

$$p_u (\lambda z_0 + 1)^2 - 2\lambda P_0 (\lambda z_0 + 1) - 2\lambda^2 M_0 \tag{18}$$

解(16)式可以得到的值。根据在  $C$  点桩的转角连续,令式(7)中  $z_1 = 0$ ,式(11)中  $z = 0$ ,然后令两式相等,可得  $\theta_{s0}$  的值。

进而可以计算高切坡开挖面以上超前支护桩上任意位置处的变形量。

5 超前支护桩与变形坡体整体分析

通过4、5节的分析,分别给出了支护桩和坡体的变形,最后根据两者之间的变形和相互作用力之间的协调关系建立联系,进而得到问题的解。其中桩土相互之间的作用是求解的关键。在本文中,将桩土之间的未知作用力  $p(z)$  采用无穷级数表示,在实际计算中可以仅取前11项即可<sup>[10]</sup>

$$p(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + \cdots + a_{10} z^{10} \tag{19}$$

将(19)带入(2)式即可求出高切坡坡面变形量  $u_1(z)$ 。

同样在已知  $p(z)$  的情况下,根据第5节的内容,可以计算出超前支护桩锚固段以上部分任意位置处的变形量  $u_2(z)$ 。

如果能确定高切坡无支护开挖情况下开挖面的水平变形量  $u_0(z)$  (可根据现场实测资料或数值分析确定),则可根据(1)式建立方程,并根据幂次相同项的系数相等的条件,得到含  $z$  的11个方程组,进而得到桩土之间的相互作用力。

6 算例

采用FLAC<sup>3D</sup>对多个高切坡多种形式的无支护

开挖进行了数值模拟,计算结果表明:开挖面自由水平变形具有上大下小的特点,拐点出现在  $0.8h$  处,最后在坡脚处自由变形量趋近于零(图 6),大致可以用如下形式来模拟

$$u_0 = \begin{cases} u & z \in [0, 0.8h] \\ u \left(1 - \frac{h}{z}\right) & z \in [0.8h, h] \end{cases} \quad (20)$$

式中  $h$  为高切坡开挖高度。

考虑如图 7 所示的高切坡,边坡地层为坡崩积碎石土,为修建公路,需要开挖路堑边坡,拟开挖高度  $6\text{ m}$ ,如果无支护开挖,经过计算会导致边坡破坏,为此,采用超前支护桩进行整治,即先施工支护桩,再开挖边坡的方法。已知,超前支护桩为 C25 钢筋混凝土结构,桩长  $12\text{ m}$ ,其中锚固段长  $5\text{ m}$ ,桩

的截面尺寸为  $0.8 \times 1.0$ ,间距  $4\text{ m}$ 。采用  $\text{FLAC}^{3\text{D}}$  模拟,无支护开挖条件下,坡面最大水平位移量为  $55\text{ mm}$ 。其他相关的模型计算参数见表 2。

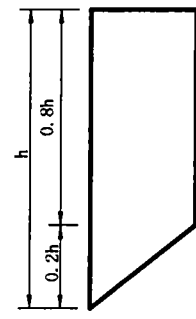


图 6 高切坡无支护开挖坡面自由变形量

Fig. 6 Free deformation of high cutting slope without reinforced

表 2 地基土 Duncen-Chang 本构模型参数

Table 2 Calculation parameters on soil of Duncen-Chang model

| 项目        | $\gamma$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | $c$<br>( $\text{kPa}$ ) | $\varphi$<br>( $^\circ$ ) | $E$<br>( $\text{kPa}$ ) | $\nu$ | $E_z$<br>( $\text{Gpa}$ ) | $h$<br>( $\text{m}$ ) | $L$<br>( $\text{m}$ ) | $b$<br>( $\text{m}$ ) | $u$<br>( $\text{mm}$ ) | $P_u$<br>( $\text{kPa}$ ) | $w^*$<br>( $\text{mm}$ ) | $k$<br>( $\text{MN/m}$ ) |
|-----------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 坡崩积(开挖坡体) | 20                              | 20                      | 18                        | 120                     | 0.30  |                           |                       |                       |                       | 55                     | 300                       | 20                       | 15                       |
| 超前支护桩     |                                 |                         |                           |                         |       | 25                        | 6                     | 12                    | 0.8                   |                        |                           |                          |                          |

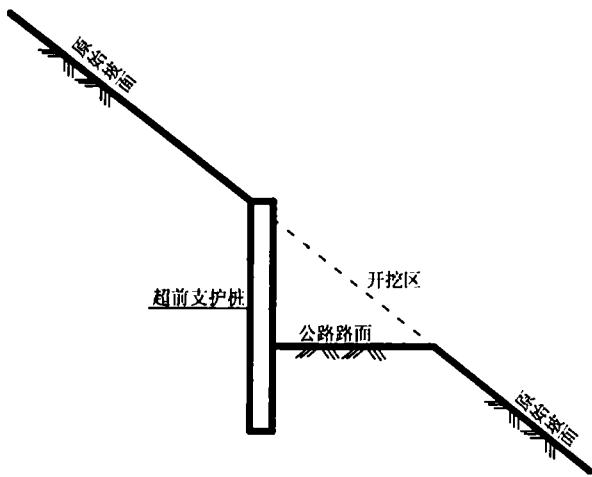


图 7 高切坡超前支护桩整治工程算例

Fig. 7 Pre-reinforced pile of high cutting slope

按照本文计算方法给出了作用在超前支护桩上的土压力分布(图 8),图中同时给出了按照  $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 、主动土压力方法计算出的相应土压力分布曲线,结果表明:本文模型计算获得的桩土相互作用力与按照有限元分析得到的结果比较接近,两者的分布与主动土压力分布有显著差别。

按照本文模型的计算结果与按照  $\text{FLAC}^{3\text{D}}$  计算

的结果比较一致,具有上大下小、最大值出现在中部位置的特点,与主动土压力或静止土压力计算结果刚好明显不同。实际作用在超前支护桩上的荷载要远大于按主动土压力计算的荷载,且荷载合力作用点的位置也要相对高一些,大致在超前支护桩悬臂段一半的高度位置处,因此作用在锚固段上的水平推力、弯矩均要比按主动土压力计算的结果高。此外,超前支护桩与坡体之间的相互作用力还与桩的刚度、土性参数、桩间距以及开挖量等因素密切相关。

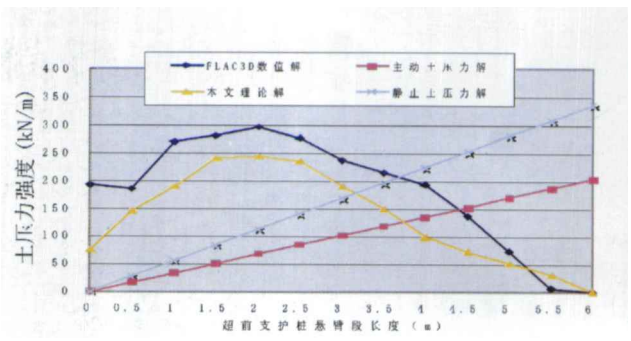


图 8 超前支护桩桩土相互作用力的分布

Fig. 8 Respond on pile/soil of pre-reinforced pile

## 7 结论

本文采用解藕方法研究了高切坡超前支护桩与开挖坡体之间的相互作用机制,并得出了以下结论:

1. 采用超前支护桩整治高切坡能完全避免因为开挖诱发滑坡的发生,能有效抑制开挖面的变形和开挖卸荷带的发展。

2. 桩土响应与桩的刚度、坡体土性参数、桩间距以及开挖量等因素有相关。

3. 作用在超前支护桩上的土压力具有上大下小、最大值出现在中部位置的特点。

4. 合力作用点大致位于超前支护桩悬臂段一半高度位置。

5. 按照主动土压力进行超前支护桩的设计不安全。

## 参考文献(References)

- [1] He Si-Ming, Zhou Jian-ting. Reports of study on high cutting slope in Tibet[R]. Chongqing Tiaotong College, Project Center of Key Road of Tibet. [何思明,周建庭. 西藏人工高切坡超前支护研究研究报告[R]. 重庆交通学院,西藏自治区交通厅重点公路建设项目管理中心. 2005.]
- [2] Xiao Shi-guo, Zhou De-pei. Approximate analytical solution for stress field of cutting slopes[J]. *SHUILIUEBAO*, 2005, 36(1): 16 ~ 21
- [肖世国 周德培. 边坡开挖应力场的近似解析解[J]. 水利学报, 2005, 36(1): 16 ~ 21]
- [3] Chen L T, Poulos H G. Piles subjected to lateral soil movements [J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*. ASCE 1997, 123(9): 802 ~ 11
- [4] M. Fraser Bransby. Sarah Springman, selection of load transfer functions for passive lateral loading of pile groups [J]. *Computers and Geotechnics*, 1999, (24): 155 ~ 184
- [5] Wu Jia-long. Elastic Mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1987. 201 ~ 207 [吴家龙. 弹性力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1987. 201 ~ 207]
- [6] Chen L T, Poulos H G. Analysis of pile/soil interaction under lateral loading using infinite and finite Elements [J]. *Computers and Geotechnics*, 1993, 15: 189 ~ 220
- [7] Chen L T, Poulos H G. A method of pile/soil interaction analysis for piles subjected to lateral soil Movement [A]. In: Siriwardane, Zaman, editors. Rotterdam: Balkema [C]. 1997. 11 ~ 16
- [8] Goh ATC, Teh C I, Wong K S. Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil Movements [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1997, 123(9): 792 ~ 801
- [9] G. R. Martin, C - Y. Chen. Response of piles dueto lateral slope movement [J]. *Computers & Structures*, 2005, (83): 588 ~ 598
- [10] Xiao Si-guo. Analysis on relaxation zone and some stabilizing structures in high slope projects [D]. Ph. D. thesis. Chengdu: South West Jiaotong University, 2003 [肖世国. 岩石高边坡开挖松弛区及加固支护结构研究 [D]. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2003]

## Interaction of Pre-reinforced Pile-soil of High Cutting Slope

HE Siming

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Slope failures or even landslides are often triggered by improper excavation in high slopes construct. The pre-reinforced pile is presented to use to reinforced high cutting slope. In this paper, the interaction mechanism of pile/soil is study according to uncouple method, the deformation of the high cutting is calculated using elastic theory, and the deformation of the pre-reinforced pile is computed used elastic-plastic theory take account on, then to build the equation groups according the load and deformation relation. The analysis demonstrates that the respond of pile/slope is controlled by cutting amount, high of slope, stiffness of pile as well as soil property, and the distributed load along pile is more high than general active pressure.

**Key words:** pre-reinforced pile; high cutting slope; interaction mechanism