



锚索框架梁结合锚索抗滑桩 在港区陆域山体边坡加固中的应用

张歆瑜

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对锚索框架梁, 结合锚索抗滑桩对港口工程复杂高边坡的联合加固, 分析锚索框架梁和锚索抗滑桩的受力机理和先整体后局部的计算方法。通过工程实例总结了该类结构的设计、计算、施工要点, 对于今后港口工程高边坡的设计研究具有一定的借鉴作用和参考价值。

关键词: 锚索框架梁; 锚索抗滑桩; 边坡支护; 受力机理

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)10-0040-07

Application of anchor cable anti-slide pile and anchor cable frame girder associated support and protection in slope reinforcement of port project

ZHANG Xin-yu

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: This paper focuses on the anchoring cable-beam and anchor cable anti-slide pile and used in complicated high slope stabilization of harbor engineering, also analyzes stress mechanism of anchoring cable-beam and anti-slide pile with computational procedure from part to overall. Key points of design, computation and construction on such structure are summarized with engineering cases, serving as reference for high-slope design in the harbor engineering.

Key words: anchoring cable-beam; anchoring anti-slide pile; slope stabilization; stress mechanism

目前, 许多大规模的港口工程由于用地限制, 需要通过开山来形成陆域。由于开山山体往往海拔较高, 经常深挖形成高陡边坡, 在某些复杂的山体地质条件下, 为防止滑坡和山体边坡失稳, 需要进行坡体的支护, 锚索框架梁和锚索抗滑桩均是进行坡体防护的有效手段, 锚索框架梁通过预应力锚索锚固深层岩土体, 以钢筋混凝土框架梁作为传力结构, 不但保证浅层坡面的稳定, 也使预应力锚索提供的主动压应力能较为均匀地作用在坡面上, 锚索框架梁作为一种主动加固的组合结构, 可使松散风化的坡面成为一个稳定的整体。而预应力锚索抗滑桩是治理不稳边坡

的一种抗滑结构, 它是在一般抗滑桩顶部施加强劲的预应力, 使桩和预应力锚索形成一个联合受力体系。以被动受力的抗滑桩为主体, 在其上部设置具有一定下倾角的锚索, 锚索可以锚固在岩土之中。由于设置了锚索, 与普通抗滑桩相比较, 桩身最大水平位移及最大弯矩值均较小^[1], 其内力分布更为合理, 从而大大降低了配筋率。锚索框架梁联合锚索抗滑桩可以对地质条件极其复杂、风化层深厚、易于形成大规模滑动体的深挖高边坡进行有效加固, 利用锚索抗滑桩固“脚”, 锚索框架梁强“腰”, 使坡面的浅、中、深层均能达到安全稳定的状态, 确保港区后

收稿日期: 2013-08-10

作者简介: 张歆瑜(1974—), 男, 高级工程师, 从事港口道路堆场、地基处理和道路桥梁设计工作。

方陆域纵深的形成和使用安全。

1 锚索框架梁和锚索抗滑桩的构造及受力机理

1.1 锚索框架梁、锚索抗滑桩构造

锚索框架梁主要由框架梁（紧贴或部分嵌入坡面）、锚索结构组成，框架梁为钢筋混凝土结构，一般分联沿坡面布置，每联间设伸缩缝分开，锚索结构由伸入岩土体并锚固的灌浆预应力结构组成，从组成上分为锚固段、自由段和锚固在框架梁节点上的张拉锚墩。锚索框架梁通过对预应力锚索施加预应力，将潜在滑动岩土体与稳定岩体紧密连接为一体，增加岩土体各层面的抗滑力，同时又通过坡面上框架梁将各个锚索有效地连成一个整体，形成一个由表及里的加固体系。而锚索抗滑桩主要由抗滑桩和锚固在桩顶锚索组成桩锚支挡体系。预应力锚索框架梁和锚索抗滑桩联合结构见图1。

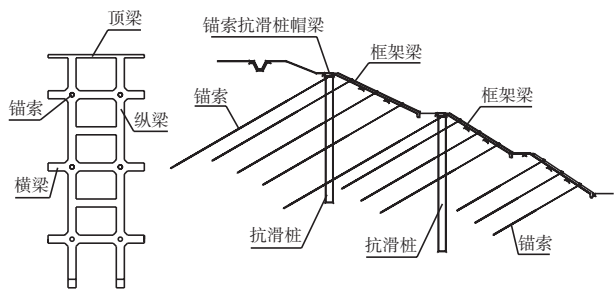


图1 预应力锚索框架梁和锚索抗滑桩联合结构

1.2 锚索受力机理及构造

目前，锚索框架梁和锚索抗滑桩主要使用单孔复合锚索，按类型分为拉力分散型锚索、压力分散型锚索（图2）、拉压混合型锚索等，主要由锚固段、自由段和锚头端及相应的防腐、水泥灌浆等附属部分组成，用于稳定坡面的预应力锚索是将锚索的锚固段设置在滑动面（或潜在滑动面）以下的稳定地层中，在地面通过反力装置（桩、框架、地梁或锚墩）将滑坡推力传入锚固段以稳定边坡。

2 锚索框架梁和锚索抗滑桩的受力分析及计算方法

2.1 联合结构的整体设计计算

锚索框架梁和锚索抗滑桩在整个坡体受力模

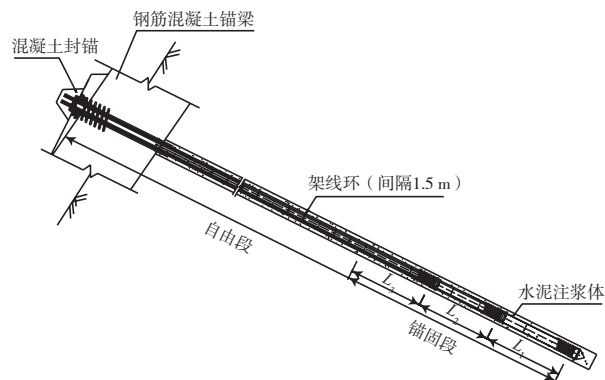


图2 预应力锚索结构（压力型）

型中由锚索结构提供主动抗滑力，而抗滑桩提供被动抗滑力，整体边坡稳定分析可以采用有限元的强度折减法或经典极限平衡的方法，虽然有限元方法精确直观，尤其在锚索抗滑桩等力学模拟上更能反映实际情况，但由于加固结构和岩土单元的本构接触关系参数选取困难^[1]，并且和现行规范要求的安全系数不匹配，使用受到了限制，目前边坡的稳定分析主要仍以极限平衡法为主^[2-3]，以最易产生失稳的高深风化土质或碎粒状边坡为例，滑动面假设为圆弧。条分法（以简单条分法）受力模型见图3。

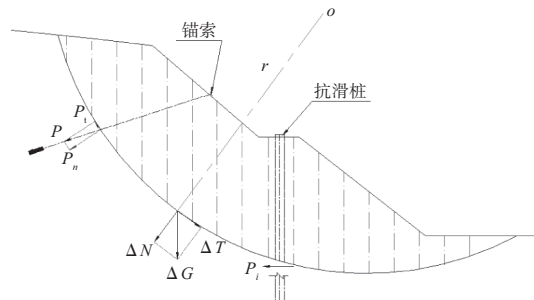


图3 条分法受力模型

联合加固边坡的安全系数公式^[4]：

$$m = \frac{f(\sum \Delta N + P_n) + \sum C \Delta L + P_i}{\sum \Delta T - P_i} \quad (1)$$

式中： ΔN 为条垂直的底层分条重力 ΔG 对剪切面的法向分力； f 为土层的摩擦系数； C 为土层的粘结力； ΔT 为作用于土条剪切面上切向力； P_n 、 P_i 为垂直于坡面单位锚索的法向分力和切向分力； P_i 为抗滑桩的容许水平抗力（切向分量）。

锚索力作用在和其轴线相交的划分土条中心的底部，其切向分力作为主动力在公式分母上消

减下滑力, 而抗滑桩水平抗滑力作为被动力作用在其轴线与划分土条底部中心相交处, 在公式分子上增加抗滑力。

以上是滑动面假定为圆弧的情况, 适用于风化较强的类土质开山边坡, 对于岩质等开山边坡可采用沿直线或复合滑移面整体稳定分析方法, 锚索和抗滑桩的加固力输入也基本类似, 对于提供被动力的抗滑桩水平抗力的输入, 极限平衡法公式仅仅是力的平衡, 并没有考虑位移协调条件, 和实际情况有些不符合, 如果按有限元方法应更能精确地反映, 但由于该方法简便, 安全系数直观和规范规定边坡分析公式结合较好, 在山体边坡整体稳定计算分析中得到了广泛的采用。

2.2 框架梁的内力计算原则

1) 计算时将预应力锚索框架梁拆成单片梁的形式分别计算, 分锚索张拉阶段和工作阶段计算地梁内力, 合理结构设计。不考虑纵梁和横梁的扭转效应, 在纵、横梁交点处简化为铰支连接。简化框架梁格构与岩体地基的相对刚度对地基压

力的影响, 认为格构具有一定的刚柔度。

2) 在张拉阶段, 将框架地梁视为在上部集中力(锚索预张拉力)作用下置于坡面上的连续梁, 此时锚索预张拉力已知, 而地基反力未知, 可按Winkler地基模型计算地梁内力^[5], 即

$$p=ky \quad (2)$$

式中: p 为坡体反压应力; k 为相应的地基弹性系数; y 为坡面在框架梁压力作用下产生的垂直于格构地面方向的位移。

作用于纵横梁上的外力(图4)主要有: 锚索张拉力、梁下岩土体的反压力、梁的重力、梁底摩擦力。由于后两者相对于前两者非常小, 故可仅考虑两个主要外力——锚索张拉力 T 、梁下岩土体的反力 $q(x)$ 。框架梁-地基系统满足两个力学相容关系: 静力平衡和变形协调, 在纵横梁交点处(如图4 A点, 下同)纵梁挠度 ω_1 应与横梁挠度 ω_2 相等, 在张拉阶段, 锚索预张拉力 T_1 是已知的, 在纵、横梁交点处分别作用于纵、横梁的压力 T_4 , T_6 由张拉力 T_1 分别分配而来, 由力的平衡和变形协调可得方程:

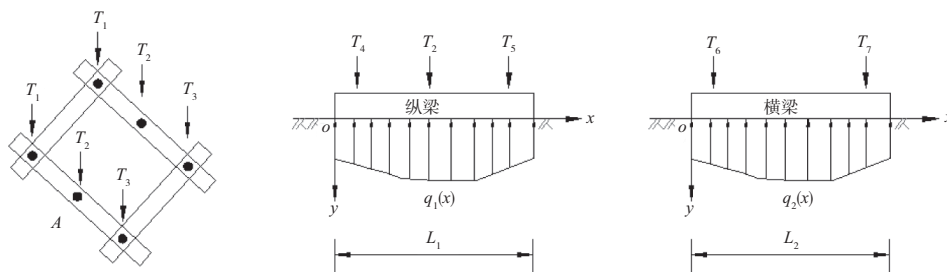


图4 框架梁受力模式

$$\begin{cases} T_4 + T_6 = T_1 \\ \omega_1 = \omega_2 \end{cases} \quad (3)$$

根据Winkler假定, 又可进一步写成:

$$T_4 \alpha_1 Z_{x1} / (2kb_1) = T_6 \alpha_2 Z_{x2} / (2kb_2) \quad (4)$$

式中: k 为弹性系数; b_1 , b_2 分别为纵、横梁的宽度; α_1 , α_2 分别为纵、横的地基柔度系数,

$$\alpha_1 = \sqrt[4]{kb_1 / (4EI_1)} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \sqrt[4]{kb_2 / (4EI_2)} \quad (6)$$

Z_x 为计算函数,

$$Z_x = 1 + e^{-2\alpha x} [2\cos^2(\alpha x) + 1 - \sin(2\alpha x)] \quad (7)$$

式中: x_1 , x_2 分别为交点处 T_4 , T_6 至相应梁端的距

离; 用式(3)和式(4)联立解出 T_4 和 T_6 :

$$T_4 = (\alpha_2 z_{x2} / b_2) / (\alpha_1 z_{x1} / b_1 + \alpha_2 z_{x2} / b_2) T_1 \quad (8)$$

$$T_6 = (\alpha_1 z_{x1} / b_1) / (\alpha_1 z_{x1} / b_1 + \alpha_2 z_{x2} / b_2) T_1 \quad (9)$$

最终纵、横梁的挠度 $\omega(x)$, 弯矩 $M(x)$, 剪力 $Q(x)$ 及相应的地基反力 $q(x)$ 可根据相应的计算类型得到解答。

3) 在工作阶段, 同样将框架梁拆分成纵梁和横梁分别计算, 常规认为作用于框架梁上的地基压力为已知, 而锚索张拉力需要计算, 计算框架梁即求解倒置于坡面上的连续梁的内力与支座反力(锚索力)的问题, 纵梁可采用力矩分配法,

首先求出弯矩,进而求出剪力、支座反力,横梁直接按简支梁求解得出梁的内力与支座反力。由于框架梁上的地基压力需要由整体稳定分析来确定,对于较为复杂的多级边坡,确定较为困难,实际上可以根据锚索张拉锚固的地质情况,偏安全的先假定锚索力为设计锚索抗拔力,按张拉阶段的计算方法计算框架梁内力,该法能和上述整体稳定计算很好地结合,能满足工程设计的需要。

2.3 锚索抗滑桩的内力计算

锚索抗滑桩按横向变形地基系数法进行计算,考虑了锚索和桩的协调变形作用,理论上更合理一些,计算有以下的假定^[1,6]:

1) 假定每根锚索抗滑桩承受桩两侧各一半的土压力,计算时只考虑作用于桩上的土压力、锚索拉力及锚固段桩周岩土作用力,不计桩体自重、桩底反力、桩与岩土间摩擦力及锚索与桩背后岩土的相互作用力。

2) 考虑锚索系统的伸长与桩的位移,假定坡体潜在破裂面为库仑破裂面^[7],土压力按库仑主动土压力计算,土压力分布简化为矩形(图5)。

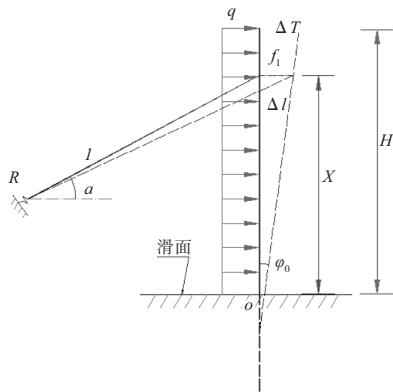


图5 结构计算简图

3) 将桩、锚固段桩周岩土以及锚索系统作为一整体,视为超静定结构。在锚索与桩连接处,桩的位移与锚索的伸长变形一致。

将抗滑桩与锚索视为一个整体结构,桩简化为受横向变形约束的弹性地基梁,设置锚索处可视为弹性支座。根据锚索与桩的变形协调条件,按地基系数法^[8](m法)确定锚索拉力及桩身内力。图6为锚索抗滑桩结构计算简图,锚固段可认为是滑面。

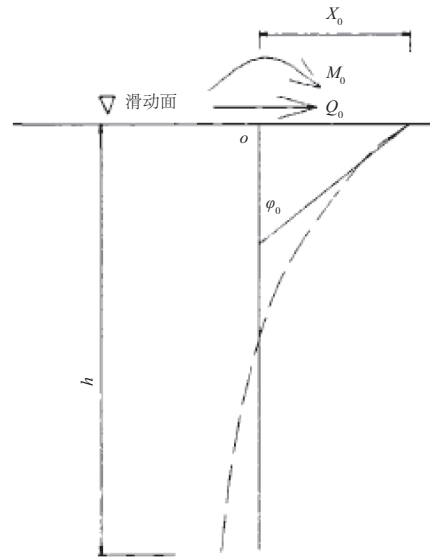


图6 弹性桩锚固段的内力和变形

由位移变形协调关系及上述假定可知,锚索水平伸长量 $\Delta_1 \cos \alpha$ 与锚索所在点处桩的水平位移 f_1 相等,即有:

$$f_1 = \Delta_1 \cos \alpha \quad (10)$$

锚索作用处桩的水平位移包括桩在锚固段由于地基抗力产生的水平位移 y_0 , 转角 f_0 , 以及非锚固段由地基抗力和锚索拉力产生的位移,即:

$$f_1 = y_0 + f_0 x + \Delta_{1q} - \delta_{11} R \cos \alpha \quad (11)$$

土压力对1点处的位移:

$$\Delta_{1q} = \frac{qx^2}{24EI} (x^2 - 4H + 6H^2) \quad (12)$$

单位荷载作用时1点处的位移

$$\delta_{11} = \frac{x^3}{3EI} \quad (13)$$

式中: R 为锚索的拉力; l 为锚索自由段的长度; x 为锚索离锚固端 o 的距离; H 为锚固段以上桩的长度; q 为作用在桩上的均布荷载; y_0 和 f_0 分别为 o 点处的位移和转角,根据地基系数之“m”法可得:

$$y_0 = \frac{Q_0}{a^3 EI} a_{xA} + \frac{M_0}{a^2 EI} b_{xA} \quad (14)$$

$$f_0 = \frac{Q_0}{a^2 EI} a_{fA} + \frac{M_0}{a EI} b_{fA} \quad (15)$$

式中: a_{xA} , b_{xA} , a_{fA} , b_{fA} 为桩的无量纲系数,可根据桩的变形系数换算长度 a_h 查表计算,而

$$M_0 = M - R_x \quad (16)$$

$$Q_0 = Q - R \quad (17)$$

式中: Q , M 分别为边坡滑动推力或岩土压力作用于 o 点的弯矩和剪力。

$$\Delta l = \frac{Rl}{E_s A_s} \quad (18)$$

式中: E_s 为锚索的弹性模量; A_s 为锚索的换算半径。

将式(11)~(18)代入式(10)即可解出锚索拉力 R ,利用该值可进行锚索设计拉力的验算。另外,以该值及作用在桩上的均布荷载为外力进行桩身内力计算,按自由段桩身(o 点以上)内力和锚固段(即滑动面以下)桩身内力分别进行计算,其中自由段桩身可按照一般的力学平衡公式计算,而锚固段桩周岩土受力后产生变形,按变形与桩周岩土受力成正比,采用 m 法的弹性地基梁挠曲微分方程用幂级数解出,实际已转换成了按 m 法计算桩顶受力的埋入桩基的内力计算,一般的桩基内力程序均可常规简单计算得出桩身弯矩、剪力等内力值,具体计算图式见图6,其中桩顶 M_0 和 Q_0 可根据自由段桩身内力边界条件取得。

以上抗滑桩的内力计算应结合开山边坡整体稳定分析,由于按本文边坡整体稳定计算方法需首先输入锚索抗滑桩的水平抗滑力并作用在滑面条块底端,因此可先假设抗滑桩的抗滑力进行边坡整体稳定分析以取得作用在桩上的均布下滑力 q ,再按本节锚索抗滑桩内力计算方法得出抗滑桩的抗滑力进行验证。通过几次试算后可得到满足边坡整体稳定要求和合理截面配筋的锚索抗滑桩设计。

3 工程实例

3.1 工程概况

中化泉州重油深加工项目配套码头仓储工程陆域开山边坡为化工码头港区后方开山形成,开山部分涉及山体最高高程为120 m以上,而港区陆域设计高程约为35 m,为石油储罐区。开山边坡为三面环形布置,最高边坡达90 m,边坡等级定为1级(图7)。工程区域地质构造属于浙闽活化陆台,经过多次造山运动,地质的基底由变质岩系组成,盖层广泛分布着中生代火山岩系,山体自上而下分布主要为:素填土、坡洪积含漂石(块石)砂质黏土、残积砂质黏性土、全风化闪长岩、砂砾状强风化闪长岩、中风化岩。其中,

西侧K0+340~500边坡高度最大,强度较低,易饱和和软化的残积砂质黏性土、全风化闪长岩、砂砾状强风化闪长岩等厚达40~50 m,地质情况极为复杂,初期开挖施工曾发生坡面的局部滑塌,通过分析计算,仅仅采用锚索框架梁或抗滑桩并不能有效进行坡体加固,因此设计最终采用了锚索框架梁联合锚索抗滑桩联合支护的边坡加固方法^[9],该边坡已施工完成。

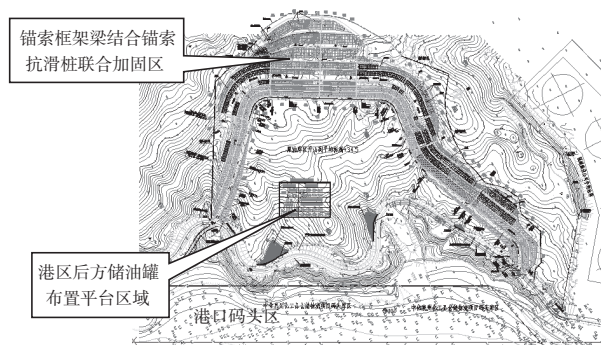


图7 工程边坡总体平面布置

3.2 地质参数

山体岩土层的主要物理力学指标见表1。

边坡场地类别划分为II类,抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度为0.1g,设计地震分组为第2组,设计特征周期0.4 s。

3.3 设计计算原则

采用先整体稳定再具体结构计算的原则,由于整个坡面风化土层深厚,岩土层均为砂土状或碎块状,根据规范整体稳定计算可采用极限平衡圆弧滑动方法,锚索和抗滑桩先按估算拉力和抗力输入,得到满足的安全系数后再按上述计算方法局部结构验算。

边坡按照逆作法原则施工,计算施工期、使用期及地震偶然荷载,抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度值为0.10g,设计地震分组属第3组。II类建筑场地,特征周期为0.45 s。

施工期的安全系数应基本 $\geq 1.1 \sim 1.2$,使用期一般组合 ≥ 1.3 ,考虑抗震组合 ≥ 1.05 ,见图8和9。

3.4 设计计算结果

根据代表性断面的设计计算结果,上两级边坡,坡面上采用锚索框架梁加固,框架梁为钢筋混凝土结构,矩形断面,间距3~4 m,横梁和纵

表1 岩土层设计计算指标

层号	岩土名称	天然密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	饱和密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	抗剪强度				岩土体与锚固 体黏结强度 F_{rp}/kPa	水平抗力比例 系数 $m/(MN \cdot m^{-4})$
				天然快剪		饱和快剪			
				C/kPa	$\varphi/(\circ)$	C/kPa	$\varphi/(\circ)$		
②	坡积砂质黏性土	1.73	1.760	10.5	14.5	8.5	12.1	25	20
③	残积砂质黏性土	1.75	1.836	11.5	21.0	7.0	13.8	35	25
④ ₁	全风化闪长岩	1.78	1.880	15.0	25.0	12.0	20.0	70	30
④ ₂	全风化花岗岩	1.85	1.950	18.0	26.0	15.0	22.0	70	30
⑤ ₁	强风化化岗岩 (砂土状)	1.95	1.997	20.0	28.0	17.0	25.0	120	40
⑥ ₁	强风化闪长岩 (砂土状)	1.95	2.000	20.0	28.0	17.0	25.0	110	
⑥ ₂	强风化闪长岩 (碎块状)	2.10	2.150	25.0	35.0	20.0	32.0	140	50
⑦	中微风化闪长岩	2.50	2.550	150.0	48.0	120.0	42.0	550	

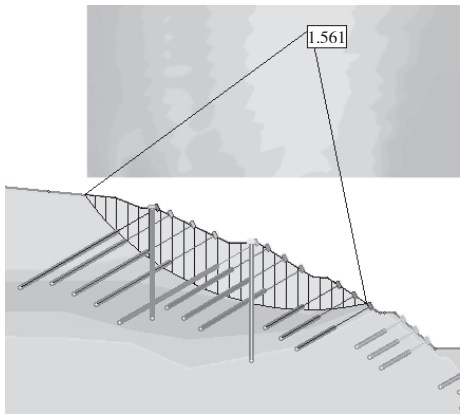


图8 使用期一般组合最小安全系数

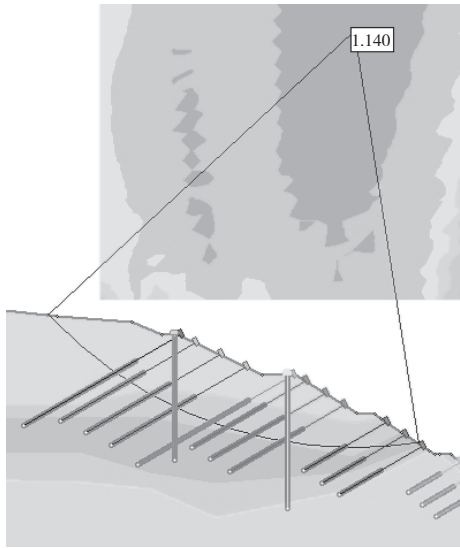


图9 地震组合最小安全系数

拉力450~550 kN，锚索下倾角为30°。坡面高度为不大于10 m，锚索抗滑桩设在平台处，抗滑桩直径1.8 m，间距3 m，桩长20~30 m不等，桩顶设钢筋混凝土帽梁及预应力锚索，由于锚索锚固地层地质较差，采用适应性较好的四单元压力型预应力锚索，设计张拉力450 kN。

3.5 施工要点

由于该坡面地质情况复杂，风化覆盖层大，施工采用了开挖1级支护1级，并同时加强监测，进行信息化施工。锚索框架梁主要施工顺序为：开挖并平整坡面→钻孔→清孔下锚索安装，并注意锚索保护→在坡面上定出框架梁位置并铺设模板，留出预应力锚索孔的位置→浇筑框架梁→给锚索注浆→待框架梁强度和注浆体强度达到要求后按设计张拉工序张拉锚索到设计值→在框架梁中采用锚喷混凝土防护，锚索注浆采用二次注浆工艺。对于压力分散型锚索，因各单元锚索长度不同，张拉应注意严格按设计次序分单元采用差异分步张拉，根据设计荷载和锚筋长度计算确定差异荷载，并根据计算的差异荷载进行分单元张拉^[2]。抗滑桩施工采用在开山平台上冲击成孔灌注成桩工艺。

3.6 联合结构加固后边坡建成情况

该部分边坡采用锚索框架梁结合锚索抗滑桩加固施工已完成近2 a（图10），根据现场监测资

梁相接处设置三单元压力型预应力锚索，设计张

料,坡顶表层水平位移30 d内仅为0.1~0.3 mm,锚索应力变化均在10%以内,证明边坡稳定、安全,边坡加固确保了港区后方陆域的安全。

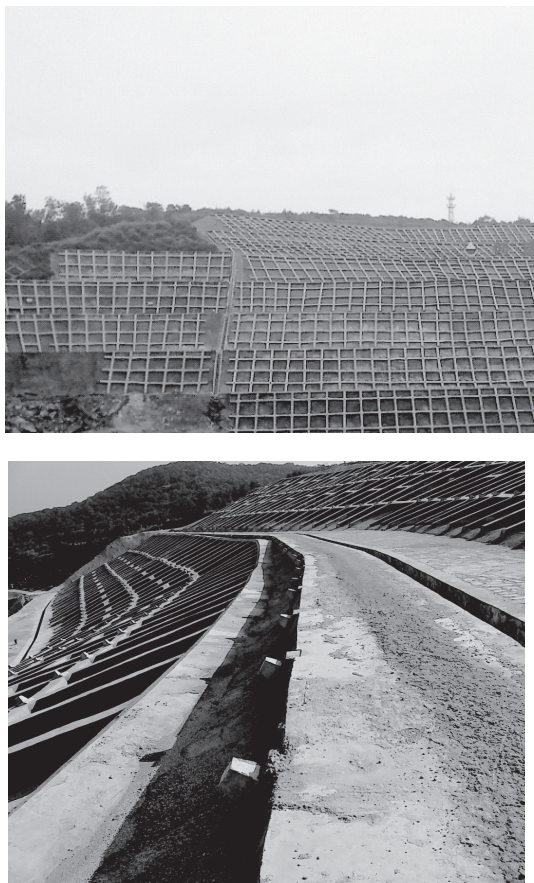


图10 锚索抗滑桩联合锚索框架梁支护建成后概况

4 结语

1) 预应力锚索框架梁和锚索抗滑桩的联合应用,可以对港口工程中复杂地质高边坡,尤其是山体覆盖风化层深厚的开挖后不稳人工边坡进行有效的加固,有利于形成安全稳定的港区后方陆域,值得在港口工程陆域形成高边坡加固中借鉴推广运用。

2) 锚索框架梁和锚索抗滑桩的设计计算可采用先整体后局部的步骤,边坡的整体稳定计算采用二维平面的极限平衡法,锚索设计力按主动集中力作用在锚索轴线和滑面的相交处,抗滑桩抗

滑力按桩轴线与滑面相交处作用的水平被动抗力考虑,在取得满足边坡整体稳定安全系数的情况下,具体对锚索框架梁和锚索抗滑桩按局部结构受力构件进行验算。采用本计算方法较为简单实用,和规范规定的边坡极限平衡设计安全系数方法结合较好。

3) 采用预应力锚索框架梁和锚索抗滑桩联合支护,采用合理的施工顺序和相应的监测较为重要,不仅能确保施工阶段的安全,并且可以对整个边坡进行动态监控,建立起有效的信息化施工系统。

4) 锚索框架梁和锚索抗滑桩的边坡支护作为港口工程复杂危险高边坡的支护手段,准确的分析计算较为复杂,采用考虑变形位移协调条件有限元及其他数值方法等,更能精确地模拟整个边坡及支护结构的变形受力情况,可以开创出考虑岩土介质与结构共同作用求支护结构内力的新方法,今后结合实际结构的监测试验结果,值得进一步的研究应用。

参考文献:

- [1] 郑颖人,陈祖煜. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [2] CECS 22—2005 岩土锚杆(索)技术规程[S].
- [3] DL/T 5353—2006 水电水利工程边坡设计规范[S].
- [4] 程良奎,范景伦. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [5] 梁瑶,周德培,赵刚. 预应力锚索框架梁支护结构的设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(2): 318-322.
- [6] 石玉玲,李貅,李凯玲. 锚索抗滑桩工程的优化设计研究[J]. 工程地质学报, 2007(3): 412-415.
- [7] GB 50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S].
- [8] JTG D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [9] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 中化泉州重油深加工项目配套码头仓储工程(相关设计部分)[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2010.

(本文编辑 武亚庆)