

黎俊杰,肖世国. 穿坡油气管道的框架桩防护结构分析方法. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(5): 1615–1628. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220327.

Li Junjie, Xiao Shiguo. Analysis Method of Frame-Type Stabilizing Piles for Protecting Petroleum Pipelines Through Hillslopes. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1615–1628. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220327.

穿坡油气管道的框架桩防护结构分析方法

黎俊杰¹, 肖世国²

1. 西南交通大学地质工程系, 成都 610031

2. 高速铁路线路工程教育部重点实验室(西南交通大学), 成都 610031

摘要:针对沿山坡走向铺设的埋地油气管道存在的抗震防护问题,提出了一种新型的框架型抗滑桩式管道防护结构。在采用拟静力法确定作用于结构地震滑坡推力的基础上,将位于滑面以上的结构受荷段作为底端固定的平面框架结构,采用超静定平面刚架结构模型分析;而位于滑面以下的嵌固段则为埋置于稳定地层的两单桩结构,采用侧向受荷的弹性地基梁模型分析,由此建立了框架型抗滑桩的内力及位移计算方法。实例分析表明:框架桩前、后桩及上、下横梁弯矩与剪力的理论计算值与数值模拟结果误差均在±20%以内,理论结果偏于保守;水平地震影响系数对结构内力影响显著,结构内力最大值随水平地震影响系数增加近似呈线性增大,而竖向地震影响系数影响较弱;结构最大内力与土体重度呈线性正相关性,与黏聚力和内摩擦角呈非线性负相关性,且随着土体抗剪强度参数的增大,前、后桩以及上、下横梁的内力分别趋于接近;前、后排桩与上、下横梁的最大内力分别与桩体抗弯刚度呈非线性正相关性与负相关性,而分别与桩体嵌固深度近似呈线性正相关性与负相关性;框架桩间距对结构内力影响显著,而前后桩排间距则对结构内力影响较小。

关键词:油气管道;边坡;框架桩;平面刚架;弹性地基梁

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220327

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

Analysis Method of Frame-Type Stabilizing Piles for Protecting Petroleum Pipelines Through Hillslopes

Li Junjie¹, Xiao Shiguo²

1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

2. Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering (Southwest Jiaotong University), Ministry of Education, Chengdu 610031, China

Abstract: In order to availably protect embedded petroleum pipelines through a slope particularly

收稿日期:2022-12-02

作者简介:黎俊杰(1997-),男,硕士研究生,主要从事边坡工程方面的研究,E-mail: 970084985@qq.com

通信作者:肖世国(1973-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程、地质灾害防治工程及地震岩土工程方面的研究,E-mail: xiaoshiguo@swjtu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(51578466);国家石油天然气管网集团有限公司科研项目(GWHT20210014429)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51578466) and the Science and Research Project of PipeChina (GWHT20210014429)

under seismic actions, a new frame-type stabilizing pile with the pipelines covered is proposed. On the basis of determining the seismic landslide thrust force on the structure by the pseudo-static method, the load section of the structure located above the sliding surface is taken as the plane frame structure which is taken as the plane rigid frame structure with fixed bottom. A super-static plane rigid frame structure model is used to analyze the loading section. The part of the structure below the slip surface called the embedded section is actually two independent piles buried in the stable layer, which can be analyzed using the elastic beam on foundation model under lateral loads on their tops. Thus, a calculation method of internal forces and displacements of the frame-type stabilizing pile is established by combing the two parts. The results of an example show that the deviation between the proposed and the numerical bending moments and shear forces of the front and rear piles as well as the upper and lower beams of the frame-type stabilizing pile is within 20%, and the proposed results are relatively conservative. The influence of horizontal seismic coefficient on the internal forces is obvious. The maximum value of the internal forces increases approximately linearly with the seismic coefficient, while the influence of vertical seismic coefficient is slight. The maximum internal force of the structure is linear positive correlation with soil unit weight and nonlinear negative correlation with cohesion and internal friction angle of soil, respectively. As soil shear strength parameters increase, the internal forces of the front and rear piles together with the upper and lower beams tend to be close, respectively. The maximum internal forces of the two piles and the two beams are nonlinear positive and negative correlation with flexible rigidity of the piles, respectively; But are approximately linear positive and negative correlation with embedded depth of the piles, respectively. The separation between adjacent structures has obvious influence on the structural internal forces, but the row spacing between the two piles in the same structure has slight effect on them.

Key words: petroleum pipelines; slope; frame-type stabilizing pile; plane rigid frame; elastic beam on foundation

0 引言

山区油气管道工程沿坡体走向铺设的情况较为常见。由于管道埋深一般较浅(通常不超过 3 m),因此在地震高烈度山区存在地震诱发浅表层滑坡致管道破坏的可能^[1-3]。目前在一般情况下可采用水土保护墙或普通抗滑桩等传统支挡结构防护此类管道,但针对强震作用下管道防护工程结构的研究较少。实际工程中,基于浅表层滑坡作用下管道抗震防护工程需求的基本特征,可采用一种由前、后排桩及上、下横梁所组成的框架型抗滑桩式管道抗震防护结构(简称框架桩),将相对柔性的管道结构约束在前后排桩与上下横梁所构成的框架内部,以有效减小管道在浅表层滑坡作用下产生的变位及内力。

对于与抗滑桩相关的工程结构,普通抗滑桩在实践中已有较多应用与研究^[4-7]。国外一般是将地基土视为弹性介质,应用弹性地基梁的计算原理,以文克尔(E. Winkler)提出的“弹性地基”假说作为计

算的理论基础,Jewell 等^[8]将相关计算方法归纳为压力法、位移法和有限单元法。国内对抗滑桩结构的计算通常会考虑滑坡的形态要素,即以滑面为界,将抗滑桩分为受荷段和嵌固段两部分进行,并根据滑动面以上桩前滑体所产生作用的不同,归纳总结为地基系数法(又称地基反力法)和悬臂桩法^[9],如:何磊等^[10]基于不同的地基系数条件,得出了不同边界条件下抗滑桩的变位与内力表达式;孙来宾等^[11]基于弹性地基梁法与塑性极限分析上限法,总结出了一种抗滑桩受荷段前侧有限土体条件下地基抗力系数的取值方法;李焕焕等^[12]基于“m”法,提出了一种适用于悬臂桩与埋入桩的滑坡推力与桩身内力反演方法;邓时容等^[13]提出了一种嵌固段顶端拓宽型单桩结构,并基于水平受荷的弹性地基梁模型,推导出了滑床为多层岩土体的嵌固段顶部拓宽型桩的内力、位移、地层反力计算公式;陶波等^[14]基于岩土工程有限单元法研究了抗滑桩与周围岩土体间相互作用力的分布规律,结果表明,抗滑桩与围岩间相互

作用力呈非线性分布。

近年来,随着组合式抗滑支挡结构的应用日益广泛,其使用条件也越来越复杂,组合抗滑桩结构也得到不断发展。目前组合式抗滑桩的结构形式主要有双排桩、锚索桩、门架式抗滑桩和h型桩等,见图1。

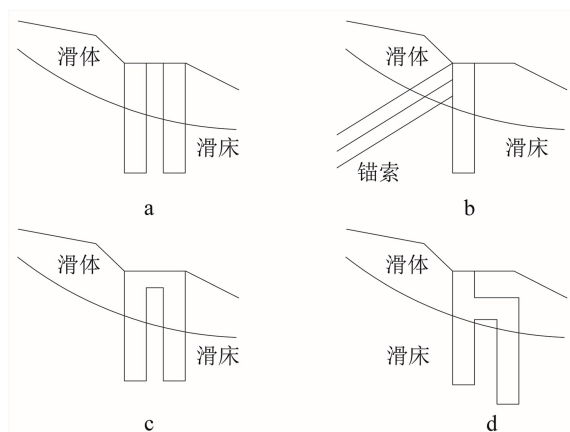
双排桩(图1a)由两根相互平行的单桩共同组成,是早期组合抗滑桩的研究热点之一,针对其开展的研究如下:薛德敏等^[15]基于竖向土拱理论和水平土拱理论,得出了一种非极限状态下双排桩桩后滑坡推力的计算方法;闫玉平等^[16]通过物理模型试验,探讨了大型基岩-覆盖层滑坡下前、后桩上坡体压力的分布特征及沉埋深度、滑带软化效应的影响;Lei等^[17]根据桩位及间距变化,将双排桩稳定的破坏模式分为浅滑和深滑5类,并认为双排桩的最佳桩位为边坡下部和中下部;Li等^[18]提出了一种考虑前排桩以上坡体存在局部破坏的双排桩加固边坡的简化分析模型;Zhou等^[19]针对双排桩间的有限土体,提出了一种考虑土间切向摩擦力的土压力公式;Shen等^[20]提出了区别于传统双排桩的长短复合双排桩,并讨论了后排桩受荷段长度与排距对整体受力的影响。

锚索桩(图1b)利用桩身及受荷段锚索深入稳定地层形成简支受力系统,关于锚索桩开展的研究有:董建华等^[21]基于达朗贝尔原理与符号函数,提出了一种将锚索桩受荷段和嵌固段均视作均匀弹性地基梁的动力计算模型;陈昌富等^[22]考虑张拉阶段预应力损失及桩身位移对桩锚协调变形的影响,并基于加权残值法分别对张拉阶段与推力作用阶段建立了锚索桩的内力与变形计算方法;石洋海等^[23]将锚索视为多余约束,采用力法将锚索拉力视为基本未知量,综合考虑平衡条件、变形条件、物理条件求解锚索轴力,从而进一步确定了锚索与抗滑桩各自分担的滑坡推力比例。

门架式抗滑桩(图1c)具有刚度大、桩顶位移小和抵抗力大的特点。相关研究有:Chang等^[24]20世纪70年代首次提出了门架式抗滑桩的概念,并根据Winker假定和经典土压力的理论建立了相应的计算模型;Xiong等^[25]通过试验与数值模拟,探讨了基岩、节理及埋深对门架式抗滑桩加固机理的影响;Qiao等^[26]通过监测数据与数值模拟相互验证分析了桩间距、排距及横梁尺寸对桩变形及稳定性的影响;Dai等^[27]通过试验证明了排间土对传递滑坡推力的作用,并建议合理排间距取为1.0~1.5倍

桩径以保证桩满足承载力要求;王鹏斌等^[28]利用荷载分担比量化分级堆载下桩体的变形协调,由此建立了桩体最佳设计参数下桩顶位移与堆载之间的关系方程;申永江等^[29]将门架式抗滑桩的桩排间岩土体视作由线弹性单元与塑性单元组成,并基于桩顶位移反算出桩排间土压力;赵波等^[30]通过试验探讨了门架式抗滑桩的桩身内力分布以及桩身位移的变化特征。

h型桩(图1d)在门架式抗滑桩基础上创新发展而成,其结构形式新颖,已有不少学者对其展开了相关研究。如:张永杰等^[31]将h型桩分为阻滑段与嵌固段两部分,并考虑桩前土体的抗力以及桩排间土对前后排桩的影响,基于结构力学与弹性地基梁理论给出了简化的桩体变位与内力计算方法;Zhao等^[32]采用相似思路提出了一种h型锚索桩的计算方法;罗勇等^[33]利用全分布式光纤传感测试技术与传统深部位移测试,对h型桩在滑坡治理过程中的变形特征与内力进行了研究;李洋等^[34]利用有限元软件分析了h型桩在矩形、三角形和梯形三种桩排间土体抗力分布形式下的受力情况;Liu等^[35]通过物理模型试验研究了嵌固段深度对滑动推力与抗力分布的影响,认为桩的变形响应和作用机制不仅与滑动面角度有关,还与横梁长度和锚固深度有关;Zhang等^[36]通过监测得到桩身弯矩和位移的变化规律,并进行了参数优化设计,为h型桩设计提供了参考。



a. 双排桩; b. 锚索桩; c. 门架式抗滑桩; d. h型桩。

图1 抗滑桩结构类型图

Fig.1 Stabilizing pile structure type map

综上,组合式抗滑桩结构受力机理复杂,前、后排桩及排间土的作用难以确定,因而其设计计算方

法也成为研究的核心问题。以往相关研究多致力于大型滑坡或工程边坡治理中的双排桩、锚索桩、门架式抗滑桩和 h 型桩等组合结构的受力特征、加固机理及桩土相互作用方面。山区油气管道抗震防护工程,滑坡厚度较小(一般不超过 5 m),属于浅表层滑坡,可采用针对性的具有小桩径、小跨度(适当大于管径)构造特征的小型框架桩结构进行管道防护及坡体加固,而相关研究却鲜见报道。鉴于此,本文首先基于拟静力法,针对山坡浅表层埋地管道的抗震防护工程提出新型框架桩结构,然后分析在地震诱发浅表层滑坡下框架桩结构的受力特征,最后采用平面框架与弹性地基梁模型,建立结构内力与位移分析方法,并讨论地震影响系数、坡体浅表层土性、框架桩结构属性等因素的影响特征,以期更好地解决沿山坡走向铺设埋地油气管道所存在的抗震防护问题。

1 分析模型与公式推导

1.1 分析模型

本文提出的新型框架型抗滑桩式管道抗震防护结构(简称框架桩)如图 2 所示。该结构的基本单元由前、后排桩与上、下横梁构成,这些基本单元将管道约束在前、后排桩与上、下横梁构成的框架内,有效限制管道的变形,以充分保护沿山坡走向铺设的长输油气管道,减少其在滑坡作用下的破坏风险。同时,前、后排桩深入较为稳定的地层中,可提供足够抗力来加固管道赋存的坡体,也可提高坡体稳定性。此外,为合理约束管道侧向变形且方便施工,前、后排桩之间的净距比管道外径适当大一些,一般可取 0.1~0.2 m,即管道两侧各 5~10 cm。

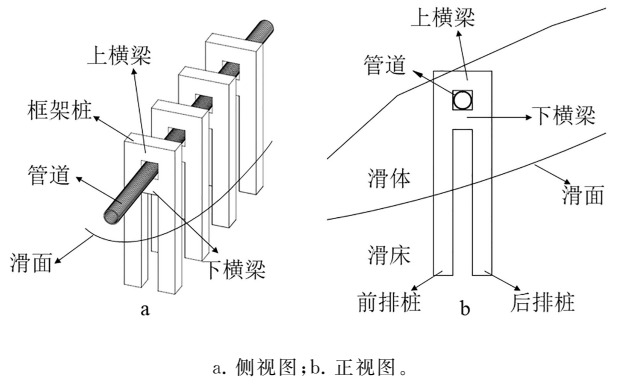


图 2 框架型抗滑桩式管道防护结构示意图
Fig.2 Frame-type stabilizing pile for protecting petroleum pipeline map

作用于框架桩的外力一般可分为 4 部分(图 3):后排桩后侧的滑坡推力 p ;前排桩前侧的坡体抗力;前、后排桩排间的岩土压力;油气管道自身重力 G 。为便于简化分析且偏于保守处理,将前、后排桩排间的岩土压力予以忽略。这是由于,一方面考虑到框架桩小跨度结构的前后桩排间距较小,相应跨度内的岩土体范围较小,其对后排桩的岩土压力作用较弱;另一方面鉴于排间岩土体对后排桩的岩土压力属于对结构抗滑作用有利的荷载,出于对结构受力偏保守分析,可将该岩土压力视为框架桩抵抗滑坡推力的安全储备而忽略。

框架桩通过上、下横梁与前、后排桩连成一体而形成整体框架。在坡体滑移变形过程中,原本作用于管道的滑坡推力被框架桩阻拦直接作用于后排桩,再通过横梁传递至前排桩,使三者形成受力共同体。框架桩在滑面以上部分(受荷段)因滑坡推力而产生内力与变形,向下传递至滑面以下(嵌固段)的稳定地层。其间,框架桩可视为对管道起到遮蔽作用,避免了横向抗弯刚度较小的可视为柔性结构的管道直接承受较大滑坡推力而产生大幅挠曲变形。实际上,由于管道从框架内部穿过,与框架间预留有适当的距离(净距一般为 5~10 cm),使得不同框架桩之间的管道可以适度侧向自由变形,但其自由变形范围被限制于框架内部;同时,框架桩的整体侧向变形又有限(工程设计中一般限制桩顶侧向位移不

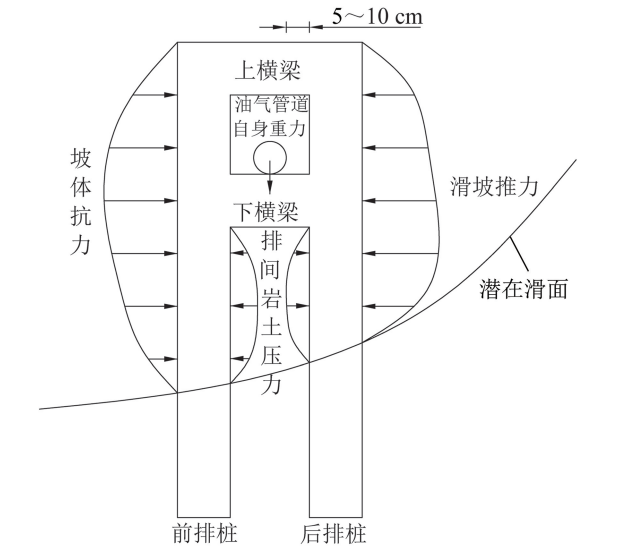


图 3 框架型抗滑桩一般受力模式
Fig.3 General mechanical mode of frame-type stabilizing pile

超过受荷段高度的 1%^[8],即一般不超过 3 cm)。因此,管道侧向变形得到有效限制,避免框架桩防护段管道发生变形不协调,有利于保障管道的稳定性。

以潜在滑面为界,根据框架桩的受力特征,可将其分为滑面以上的受荷段和滑面以下的嵌固段分别计算。其中,受荷段可视作底端固定的平面框架结构,嵌固段则为埋置于稳定地层的两单桩结构。计算时,首先采用平面刚架结构模型分析受荷段,求得其底部的固定端支反力后作为嵌固段的顶端边界条件;然后采用侧向受荷的弹性地基梁模型分析嵌固段的两单桩结构;最后可得到整个框架桩结构的弯矩、剪力、位移及嵌固段地层侧向反力。

1.2 公式推导

1.2.1 受荷段

受荷段主要受力包括后排桩后侧的滑坡推力 p 、前排桩前侧的坡体抗力、前后排桩排间的岩土压力和油气管道自身重力 G 。其中,静力条件下可首先采用传递系数法^[9]计算出滑坡的剩余下滑力,再将剩余下滑力沿后排桩竖向上近似按矩形分布模式^[9,31],即可得到作用于后排桩后侧的滑坡推力 p 。滑坡在地震作用下的剩余下滑力可基于静力条件下传递系数法公式采用拟静力法分析,其计算表达式为

$$P_q = (1 + k_v)W_q \sin \alpha_q + k_h W_q \cos \alpha_q - [(1 + k_v)W_q \cos \alpha_q - k_h W_q \sin \alpha_q] \frac{\tan \varphi_q}{F_s} - \frac{c_q l_q}{F_s} + \psi_{q-1} P_{q-1} \quad (1)$$

式中: P_q 为第 q 个土条($q=1,2,\cdots,n$, n 为管道后潜在滑体由后向前所分割的条块总数)在地震作用下的剩余下滑力(kN); k_h 、 k_v 分别为水平(指向坡体前缘为正)、竖向(向下为正)地震影响系数; W_q 为第 q 个土条的自重(kN); α_q 、 φ_q 、 c_q 、 l_q 分别为第 q 个土条滑面倾角($^\circ$)、内摩擦角($^\circ$)、黏聚力(kPa)、长度(m); F_s 为边坡稳定性设计安全系数; ψ_{q-1} 为第 $q-1$ 个土条的条间力传递系数,计算公式为

$$\psi_{q-1} = \frac{\cos(\alpha_{q-1} - \alpha_q) - \sin(\alpha_{q-1} - \alpha_q) \frac{\tan \varphi_q}{F_s}}{\cos \alpha_{q-1}} \quad (2)$$

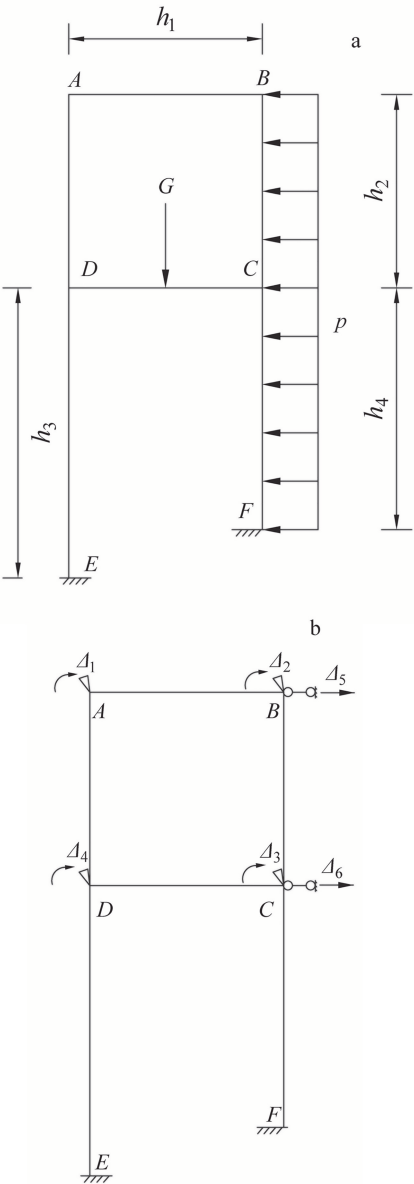
框架桩受力和基本结构示意图见图 4。考虑到山区油气管道的埋深一般不超过 3 m,相应浅表层滑坡体的厚度较小,而且又是小桩径、小跨度的小型框架桩结构;因此,前排桩的前后侧坡体压力的差值

一般较小,可近似认为排间岩土压力与前排桩前侧的坡体抗力平衡,以简化且偏保守分析问题。由此,框架桩的受荷段可视为承受滑坡推力 p 与管道自重 G 的底端固定的平面刚架,如图 4a 所示。

$$p = P_q L / (h_2 + h_4); \quad (3)$$

$$G = WL. \quad (4)$$

式中: W 为单位长度管体(包括管道与其内部油气)自重(kN/m); L 为平面外相邻两框架桩的间距(m)。



a. 框架结构受力示意图;b. 基本结构示意图。 h_1 为上下横梁长度, m ; h_2 为框架部分桩长, m ; h_3 、 h_4 分别为前后排桩从底梁至滑面处的长度, m 。

图 4 框架桩受荷段分析模型

Fig.4 Loaded section of frame-type stabilizing pile model

采用结构力学方法对图 4a 所示的超静定平面刚架结构进行分析,此结构在结点 A、B、C、D 上有 4 个角位移($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$),在 AB、DC 方向上有 2 个水平线位移(Δ_5, Δ_6),故为 6 次超静定结构,相应的基本结构如图 4b 所示。采用位移法对基本结构进行求解,其基本方程为:

$$r_{jk}\Delta_j = R_{jP} \quad (5)$$

式中: r_{jk} 为 k 处产生单位位移时在 j 处引起的反力($j, k=1, 2, \dots, 6$)(kN); Δ_j 为 j 处的独立位移(m); R_{jP} 为实际荷载在 j 处引起的反力(kN)。

根据形常数与载常数求得 r_{jk} ,令 $i_1+i_2=X_1$, $i_1+i_2+i_3=X_2$, $i_1+i_2+i_4=X_3$, $\frac{i_2}{h_2}-\frac{i_4}{h_4}=X_4$, $\frac{i_3}{h_3}-\frac{i_2}{h_2}=X_5$, $\frac{2i_2}{h_2^2}+\frac{i_3}{h_3^2}+\frac{i_4}{h_4^2}=X_6$,由此式(5)的系数矩阵 r_{jk} 与常数矩阵 R_{jP} 可分别表示为:

$$r_{jk} =$$

$$\begin{pmatrix} 4X_1 & 2i_1 & 0 & 2i_2 & -\frac{6i_2}{h_2} & \frac{6i_2}{h_2} \\ 2i_1 & 4X_1 & 2i_2 & 0 & -\frac{6i_2}{h_2} & \frac{6i_2}{h_2} \\ 0 & 2i_2 & 4X_3 & 2i_1 & -\frac{6i_2}{h_2} & 6X_4 \\ 2i_2 & 0 & 2i_1 & 4X_2 & -\frac{6i_2}{h_2} & -6X_5 \\ -\frac{6i_2}{h_2} & -\frac{6i_2}{h_2} & -\frac{6i_2}{h_2} & -\frac{6i_2}{h_2} & \frac{24i_2}{h_2^2} & -\frac{24i_2}{h_2^2} \\ \frac{6i_2}{h_2} & \frac{6i_2}{h_2} & 6X_4 & -6X_5 & -\frac{24i_2}{h_2^2} & 12X_6 \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$$R_{jP} = - \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{ph_2^2}{12} \\ \frac{ph_2^2}{12} + \frac{Gh_1}{8} - \frac{ph_4^2}{12} \\ -\frac{Gh_1}{8} \\ \frac{ph_2}{2} \\ \frac{p}{2}(h_2+h_4) \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, i_e ($e=1, 2, 3, 4$) 为构件的线刚度,即 $i_e = E_e I_e / h_e$,其中 E_e 为构件弹性模量, I_e 为构件截面惯

性矩(m^4), h_e 为构件长度(m)。

求解式(5)可得各独立位移 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6$,由此各构件任意截面处弯矩 M 为

$$M = M_j \Delta_j + M_p \quad (8)$$

式中: M_j 为 Δ_j 在相应梁任意截面处的弯矩(kN·m); M_p 为荷载引起的弯矩(kN·m)。

从而构件 AB、AD、DC、CB、CF、DE 在各自局部坐标系下的弯矩 M 与剪力 Q 表达式为:

$$M_{AB} = \left(\frac{6i_1}{h_1}x - 4i_1 \right) \Delta_1 + \left(\frac{6i_1}{h_1}x - 2i_1 \right) \Delta_2; \quad Q_{AB} = \frac{6i_1}{h_1}(\Delta_1 + \Delta_2) \quad (9)$$

$$M_{AD} = \left(\frac{6i_2}{h_2}x - 4i_2 \right) \Delta_1 + \left(\frac{6i_2}{h_2}x - 2i_2 \right) \Delta_4 - \left(\frac{12i_2}{h_2^2}x - \frac{6i_2}{h_2} \right) \Delta_5 + \left(\frac{12i_2}{h_2^2}x - \frac{6i_2}{h_2} \right) \Delta_6; \quad Q_{AD} = \frac{6i_2}{h_2}\Delta_1 + \frac{6i_2}{h_2}\Delta_4 - \frac{12i_2}{h_2^2}\Delta_5 + \frac{12i_2}{h_2^2}\Delta_6 \quad (10)$$

$$M_{DC} = \left(\frac{6i_1}{h_1}x - 2i_1 \right) \Delta_3 + \left(\frac{6i_1}{h_1}x - 4i_1 \right) \Delta_4 - \frac{G}{2}x + \frac{Gh_1}{8}, 0 \leq x < \frac{h_1}{2}; \quad M_{DC} = \left(\frac{6i_1}{h_1}x - 2i_1 \right) \Delta_3 + \left(\frac{6i_1}{h_1}x - 4i_1 \right) \Delta_4 + \frac{G}{2}(x-h_1) + \frac{Gh_1}{8}, \frac{h_1}{2} \leq x \leq h_1; \quad Q_{DC} = \frac{6i_1}{h_1}\Delta_3 + \frac{6i_1}{h_1}\Delta_4 - \frac{G}{2}, 0 \leq x < \frac{h_1}{2}; \quad Q_{DC} = \frac{6i_1}{h_1}\Delta_3 + \frac{6i_1}{h_1}\Delta_4 + \frac{G}{2}, \frac{h_1}{2} \leq x \leq h_1 \quad (11)$$

$$M_{CB} = \left(-\frac{6i_2}{h_2}x + 2i_2 \right) \Delta_2 - \left(\frac{6i_2}{h_2}x - 4i_2 \right) \Delta_3 + \left(\frac{12i_2}{h_2^2}x - \frac{6i_2}{h_2} \right) \Delta_5 - \left(\frac{12i_2}{h_2^2}x - \frac{6i_2}{h_2} \right) \Delta_6 + \frac{p}{2}(x-\frac{h_2}{2})^2 - \frac{ph_2^2}{24}; \quad Q_{CB} = -\frac{6i_2}{h_2}(\Delta_2 + \Delta_3) + \frac{12i_2}{h_2^2}(\Delta_5 - \Delta_6) + p\left(x - \frac{h_2}{2}\right) \quad (12)$$

$$M_{CF} = \left(\frac{6i_4}{h_4}x - 4i_4 \right) \Delta_3 - \left(\frac{12i_4}{h_4^2}x - \frac{6i_4}{h_4} \right) \Delta_6 +$$

$$\frac{p}{2}(x-\frac{h_4}{2})^2-\frac{Ph_4^2}{24};$$
$$Q_{CF}=\frac{6i_4}{h_4}\Delta_3-\frac{12i_4}{h_4^2}\Delta_6+p\left(x-\frac{h_4}{2}\right)。(13)$$

$$M_{DE}=\left(\frac{6i_3}{h_3}x-4i_3\right)\Delta_4-\left(\frac{12i_3}{h_3^2}x-\frac{6i_3}{h_3}\right)\Delta_6;$$
$$Q_{DE}=\frac{6i_3}{h_3}\Delta_4-\frac{12i_3}{h_3^2}\Delta_6。(14)$$

式中:对于构件 AB,以 A 为原点,向右为 x 轴正向,向上为 y 轴正向;对于构件 AD,以 A 为原点,向下为 x 轴正向,向右为 y 轴正向;对于构件 DC,以 D 为原点,向右为 x 轴正向,向上为 y 轴正向;对于构件 CB,以 C 为原点,向上为 x 轴正向,向右为 y 轴正向;对于构件 CF,以 C 为原点,向下为 x 轴正向,向右为 y 轴正向;对于构件 DE,以 D 为原点,向下为 x 轴正向,向右为 y 轴正向。

1.2.2 嵌固段

对受荷段按平面刚架模型求得固定端支座反力后,将其反向作用于两单桩结构相应的桩顶,如图 5 所示,并采用侧向受荷的弹性地基梁模型分析。考虑到防护管道的框架桩通常多位于土层中,因而采用“m”法^[9]计算,且应按滑面处地基系数不为 0 处理,由此得到嵌固段桩体任意截面的侧向线位移 x_y 、转角 φ_y 、弯矩 M_y 、剪力 Q_y 及地层侧向抗力 σ_y ^[9] 分别为:

$$x_y=x_0A_1+\frac{\varphi_0}{\partial}B_1+\frac{M_0}{\partial^2EI}C_1+\frac{Q_0}{\partial^3EI}D_1;$$
$$\varphi_y=\partial\left(x_0A_2+\frac{\varphi_0}{\partial}B_2+\frac{M_0}{\partial^2EI}C_2+\frac{Q_0}{\partial^3EI}D_2\right);$$

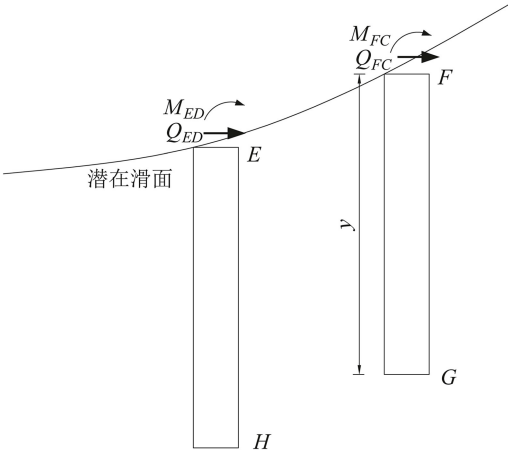


图 5 框架桩嵌固段分析模型

Fig.5 Inserted section of frame-type stabilizing pile model

$$M_y=\partial^2EI\left(x_0A_3+\frac{\varphi_0}{\partial}B_3+\frac{M_0}{\partial^2EI}C_3+\frac{Q_0}{\partial^3EI}D_3\right);$$
$$Q_y=\partial^3EI\left(x_0A_4+\frac{\varphi_0}{\partial}B_4+\frac{M_0}{\partial^2EI}C_4+\frac{Q_0}{\partial^3EI}D_4\right);$$
$$\sigma_y=\Phi_hx_y。(15)$$

式中: A_m 、 B_m 、 C_m 、 D_m 为与嵌固段桩体的换算深度 (φy) 有关的系数 ($m=1,2,3,4$; y 为竖向轴); ∂ 为桩的变形系数 (m^{-5}); Φ_h 为地基系数随深度增加的比例系数 (kPa/m^2); x_0 、 φ_0 、 M_0 、 Q_0 分别为嵌固段桩体顶端的侧向线位移 (m)、转角 (rad)、弯矩 ($kN \cdot m$) 和剪力 (kN); σ_y 为地层侧向抗力 (kPa); E 、 I 分别为桩的弹性模量 (kPa) 和截面惯性矩 (m^4)。

2 实例分析与验证

某山区成品油管道沿坡体走向穿越边坡,其典型横断面如图 6 所示。通过地质勘察,确定坡体浅层主要由两类土体组成,上层为黄褐色粉质黏土,下层为深褐色粉质黏土,其中潜在最危险滑面位于上层的黄褐色粉质黏土之中(该滑面为考虑 7 级地震烈度工况下,由强度折减法搜索得到),管道在坡脚附近于黄褐色粉质黏土层中穿过。采用前述的框架型抗滑桩结构加固,前、后排桩身截面长×宽为 $1.25\text{ m} \times 1.25\text{ m}$,排间净距 1.0 m ,桩长 10.0 m ,上、下横梁截面长×宽为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$,框架桩采用钢筋混凝土 (C30) 材料现浇施作,相邻框架桩的中心间距为 3.0 m 。

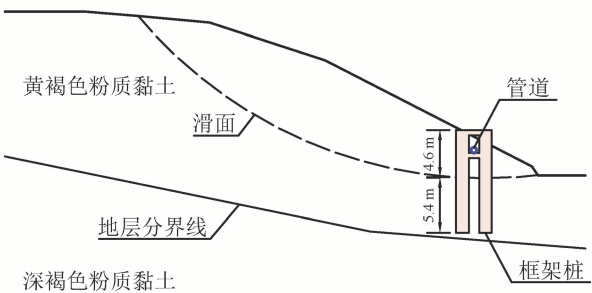


图 6 实例横断面示意图

Fig.6 Diagram of cross section of the practical example

通过现场取样及室内试验,确定地层主要参数 (表 1)。表 1 中未涉及嵌固段的比例系数 Φ_h , 为保证 Φ_h 与表 1 中相关参数的协调性,本文通过数值模拟平板载荷试验获得该边坡在此物理参数下的 Φ_h 为 $5\,271\text{ kPa}/m^2$,以减弱主观选取参数

导致的较大误差^[37]。框架桩所设位置的后排桩受荷段长度为 4.6 m,嵌固段长度为 5.4 m。场地抗震设防烈度为 7 度,管道赋存坡体的稳定性设计安全系数为 1.15。

表 1 实例主要物理力学参数

Table 1 Main physical and mechanical parameters of the example

材料	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	弹性模 量/MPa	泊松 比
黄褐色 粉质黏土	18	8	22	25	0.34
深褐色 粉质黏土	19	9	23	27	0.33
框架桩	25			30 000	0.22

根据图 6 建立数值模型(图 7),边坡土体采用理想弹塑性本构模型与 Mohr-Coulomb 强度准则及非关联流动法则,框架桩中的前后桩与上下横梁分别采用桩单元、梁单元模拟,数值模型单元总数 153 077 个,节点总数 29 014 个。数值模型的合理性可由图 8 所示的典型竖向剖面 AA' 的自重应力场模拟值与经典理论计算值的一致性得到进一步确定。

根据式(1)计算可得设计地震滑坡推力为 $P_n = 228 \text{ kN/m}$,换算得到 $p = 149 \text{ kN/m}$, $G = 4.2 \text{ kN}$;从而由式(9)–(15)可得框架桩的内力以及嵌固段地层侧向反力计算结果,如图 9、10 所示。为进一步分析理论计算的合理性,图 9、10 中也给出了 7 级地震烈度下 FLAC^{3D} 数值模拟结果。

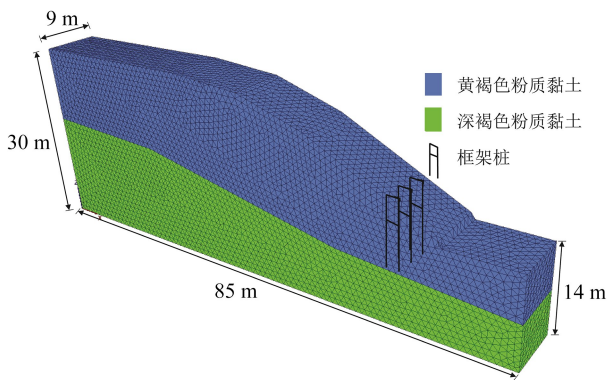
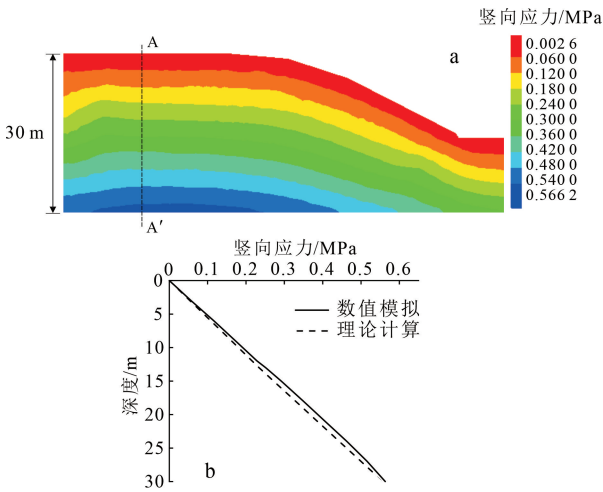


图 7 实例坡体数值模型

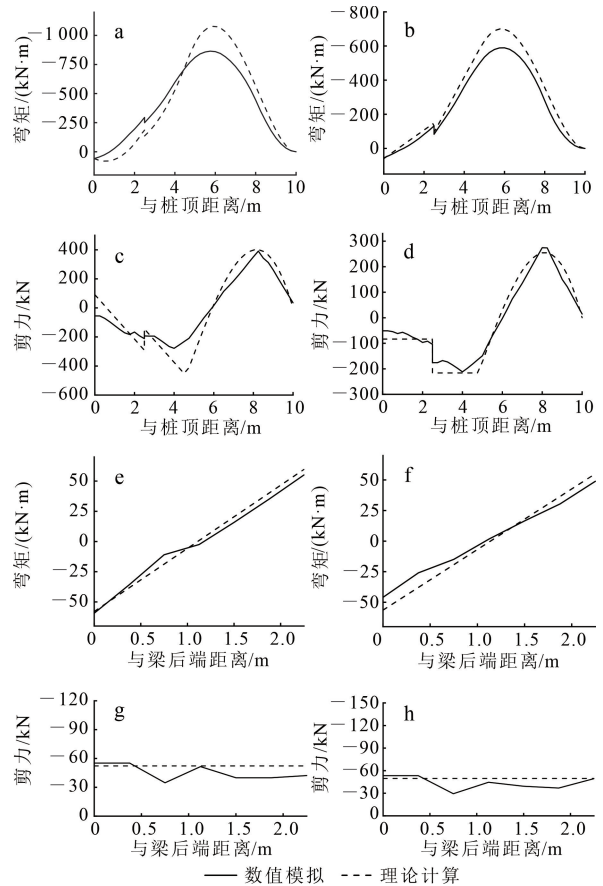
Fig.7 Numerical model of the practical slope



a. 数值模拟坡体竖向应力云图;b. 坡顶向下竖向剖面的竖向应力。

图 8 实例坡体竖向应力结果

Fig.8 Vertical stress of the practical slope



a. 后排桩弯矩;b. 前排桩弯矩;c. 后排桩剪力;d. 前排桩剪力;e. 上横梁弯矩;f. 下横梁弯矩;g. 上横梁剪力;h. 下横梁剪力。负号对于桩体和梁体分别表示后侧、下侧受拉,下同。

图 9 实例框架型抗滑桩内力计算结果

Fig.9 Calculation results of internal forces of frame-type stabilizing pile of the example

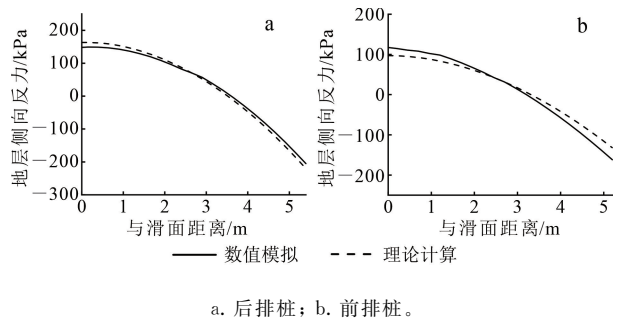


图 10 实例框架型抗滑桩嵌固段的地层侧向反力

Fig.10 Lateral resistance of stratum surrounding insterted section of frame-type stabilizing pile of the example

由图 9 可见,框架桩弯矩和剪力的理论计算结果与数值模拟结果呈现相同的分布特征,两者较为接近,且理论计算值总体上略大于数值模拟结果,实际工程中偏于安全。具体表现为:前、后桩最大弯矩的理论值与数值模拟误差分别约为 16%和 20%,剪力的理论值与模拟结果误差分别约为-7%和 13%;上、下横梁的最大弯矩理论值与模拟结果误差分别约为 2%和 11%,剪力的理论值与模拟结果误差分别约为 5%和 6%。

由图 10 可见,前、后排桩嵌固段地层侧向反力的理论值与数值模拟结果吻合良好,后排桩最大地层侧向反力的理论值比数值模拟结果高出约 6%,前排桩的理论值则比数值模拟结果小约 12%。

3 影响因素

由前述本文分析方法可见,坡体管道抗震防护的框架桩结构内力主要受地震影响系数、管道所赋存土体的特性、框架桩结构的力学属性与几何参数等因素的影响,下面基于本文理论分析方法,以上述实例参数作为基本参数,采用控制变量法,讨论这些主要因素对框架桩内力的影响特征。

3.1 地震影响系数

取水平地震影响系数变化范围为 0~0.20($k_v=0.5k_h$),框架桩的各构件最大弯矩与最大剪力随 k_h 变化曲线如图 11 所示。由图 11 可见:在 $k_h<0.05$ 时坡体处于稳定状态,框架桩结构基本不受力;随着 k_h 增大,前后排桩和上下横梁的弯矩与剪力最大值随 k_h 近似呈线性增大,其中,后排桩弯矩和剪力最大值变化较为显著(图 11a、b),上下横梁内力变化幅度相近(图 11c、d)。

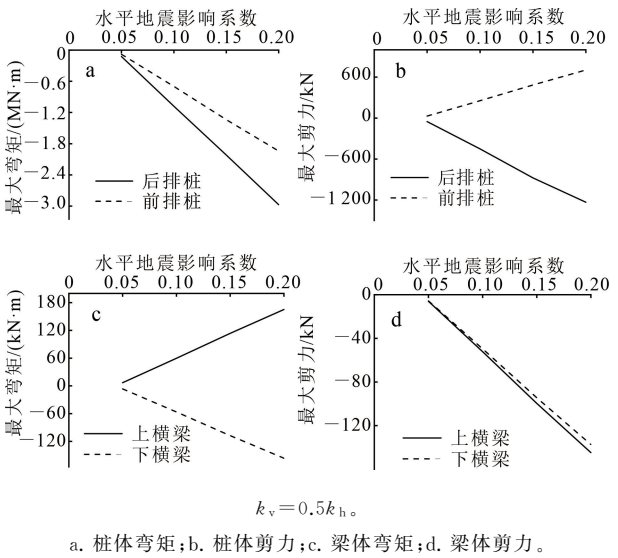


图 11 实例框架桩结构最大内力随水平地震影响系数变化

Fig.11 Variation of maximum internal forces with horizontal seismic coefficients of frame-type pile of the example

取竖向地震影响系数变化范围为-0.10~0.10($k_h=0.1$),框架桩的各构件最大弯矩与剪力随 k_v 变化曲线如图 12 所示。由图 12 可见,随竖向地震影响系数增大,框架桩结构的内力最大值略微呈线性增大;说明竖向地震影响系数对结构内力影响不大。

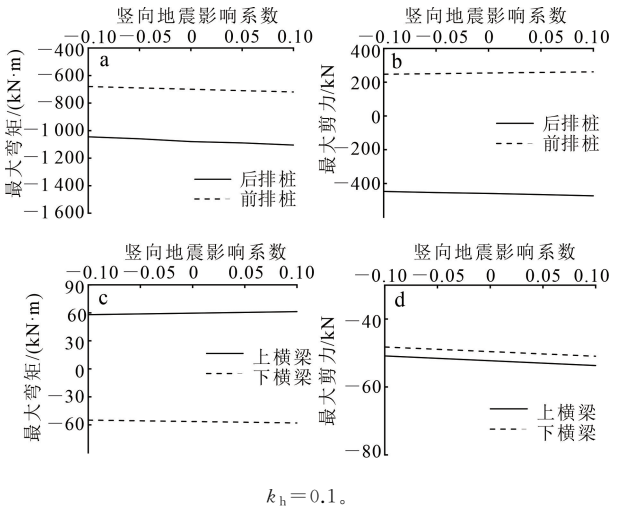


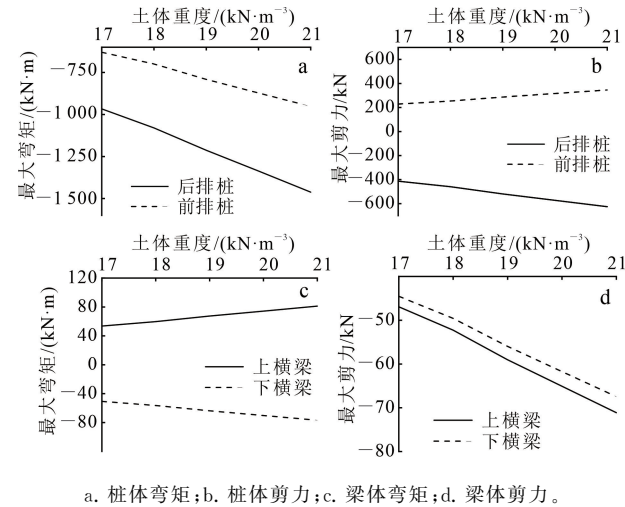
图 12 实例框架桩结构最大内力随竖向地震影响系数变化曲线

Fig.12 Variation of maximum internal forces with vertical seismic coefficients of frame-type pile of the example

3.2 土体重度

图 13 为框架桩的最大内力随管道赋存土体的

重度变化曲线。由图 13 可见:前、后排桩和上、下横梁的弯矩与剪力最大值均随土体重度增加而线性增大,且前、后排桩及上、下横梁的最大内力的变化幅度相近;当土体重度每增加 1 kN/m^3 时,框架桩结构最大内力增加幅度约 11% 。



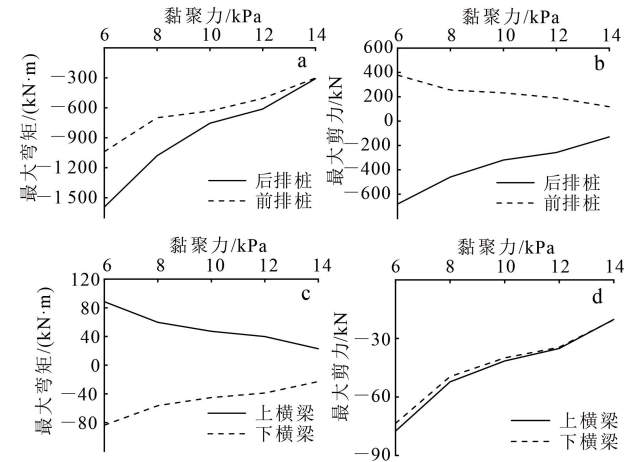
a. 桩体弯矩;b. 桩体剪力;c. 梁体弯矩;d. 梁体剪力。

图 13 实例不同土体重度时框架桩结构内力最大值

Fig.13 Maximum internal forces under different soil weights of frame-type pile of the example

3.3 土体黏聚力

框架桩结构的最大内力随管道赋存土体的黏聚力变化曲线如图 14 所示。由图 14 可见:前、后排桩和上、下横梁的弯矩与剪力最大值均与土体黏聚力之间呈现非线性负相关;随着土体黏聚力增大,前、



a. 桩体弯矩;b. 桩体剪力;c. 梁体弯矩;d. 梁体剪力。

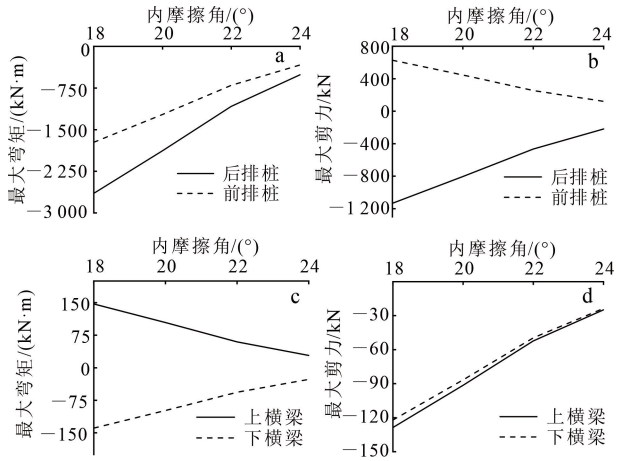
图 14 实例不同土体黏聚力时框架桩结构内力最大值

Fig.14 Maximum internal forces of frame-type pile under different cohesions of soil of the example

后排桩及上、下横梁的内力最大值的差值也逐渐变小,其原因在于随着土体黏聚力的增加,滑坡推力逐渐变小。

3.4 土体内摩擦角

框架桩结构的最大内力随管道赋存土体的内摩擦角变化曲线如图 15 所示。由图 15 可见:框架桩的弯矩和剪力最大值与土体内摩擦角之间也呈非线性负相关;随土体内摩擦角增大,前、后排桩及上、下横梁的内力最大值的差值亦逐渐变小。



a. 桩体弯矩;b. 桩体剪力;c. 梁体弯矩;d. 梁体剪力。

图 15 实例不同土体内摩擦角时框架桩结构内力最大值

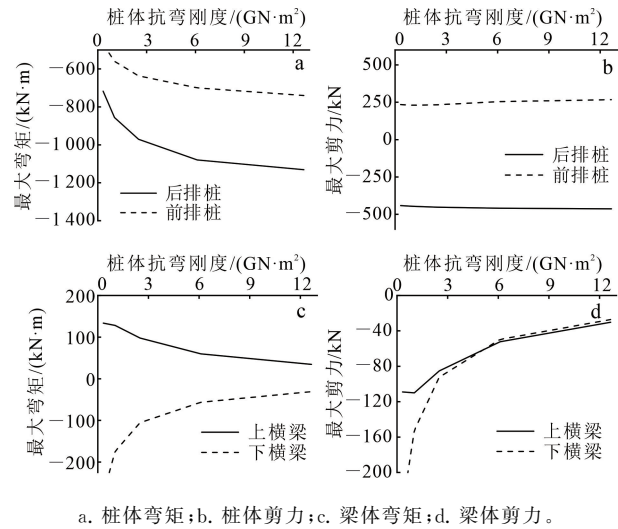
Fig.15 Maximum internal forces of frame-type pile under different internal friction angles of soil of the example

3.5 桩体抗弯刚度

取前后桩边长分别为 $0.60、0.80、1.00、1.25$ 和 1.50 m ,得到框架桩结构的最大内力随桩身抗弯刚度变化曲线如图 16 所示。由图 16 可见:前、后排桩的弯矩最大值随桩体抗弯刚度增加而呈较为明显的非线性增大,但剪力最大值则呈微小的近似线性增加;上、下横梁的弯矩和剪力最大值均与桩体抗弯刚度呈非线性负相关,这说明上、下横梁在桩身抗弯刚度较小时,其内力发挥相对更为充分。

3.6 桩排净距和框架桩间距

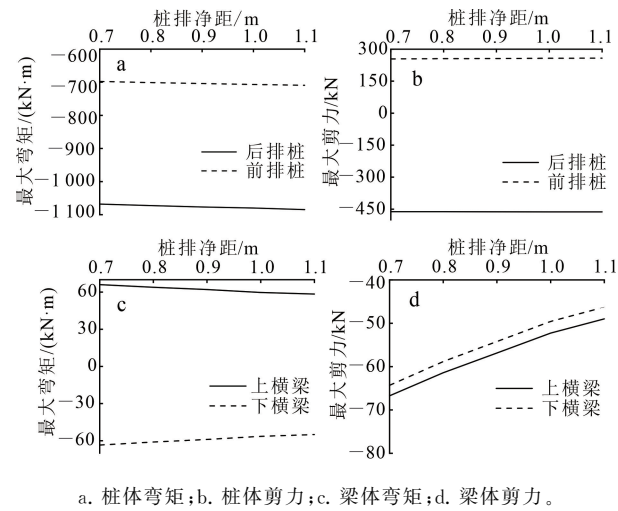
框架桩结构最大内力随桩排净距和框架桩间距的变化曲线如图 17、18 所示。由图 17、18 可见:前、后排桩的最大内力受桩排净距影响较小,上下横梁的最大剪力与桩排净距近似呈较显著的线性负相关关系,而最大弯矩则随桩排净距增大略微减小(图 17);框架桩间距对结构内力影响较大,前、后排桩和



a. 桩体弯矩;b. 桩体剪力;c. 梁体弯矩;d. 梁体剪力。

图 16 实例不同桩体抗弯刚度时框架桩结构内力最大值

Fig.16 Maximum internal forces of frame-type pile under different flexible rigidities of piles of the example



a. 桩体弯矩;b. 桩体剪力;c. 梁体弯矩;d. 梁体剪力。

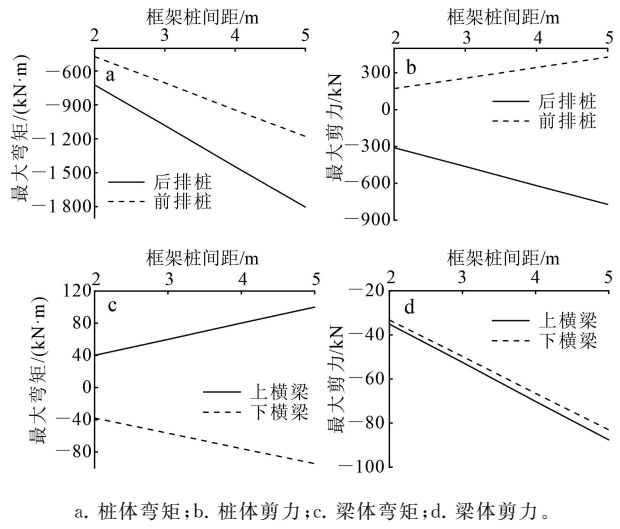
图 17 实例不同桩排净距时框架桩结构内力最大值

Fig.17 Maximum internal forces of frame-type pile under different net row spacing between two piles of the example

上下横梁的最大内力均与桩间距近似呈线性正相关关系(图 18)。

3.7 桩体嵌固深度

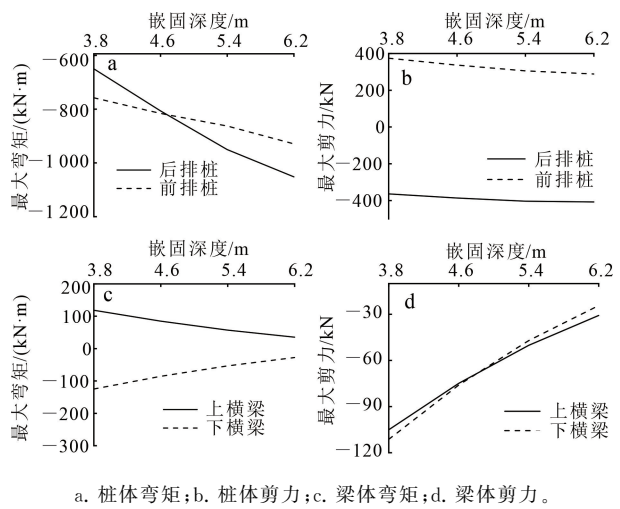
框架桩结构最大内力随桩体嵌固深度(为便于讨论,取前后桩嵌固深度相同)变化曲线如图 19 所示。由图 19 可见:桩体内力最大值与嵌固深度近似呈线性正相关性;横梁内力与嵌固深度则近似呈线性负相关性;随着嵌固深度增大,后排桩的最大弯矩变化幅度逐渐大于前排桩(图 19a),其余桩和梁则变化不明显。



a. 桩体弯矩;b. 桩体剪力;c. 梁体弯矩;d. 梁体剪力。

图 18 实例不同框架桩间距时框架桩结构内力最大值

Fig.18 Maximum internal forces under different spacing between adjacent structures of frame-type pile of the example



a. 桩体弯矩;b. 桩体剪力;c. 梁体弯矩;d. 梁体剪力。

图 19 实例不同嵌固深度时框架桩结构内力最大值

Fig.19 Maximum internal forces under different embedded depth of piles of frame-type pile of the example

4 结论

1)对浅表层滑坡作用下的框架型抗滑桩结构,可以潜在滑面为界,将其分为滑面上下的受荷段、嵌固段分别计算。其中,受荷段视为底端固定的平面框架结构,采用超静定平面刚架结构模型分析;嵌固段为埋置于稳定地层的两单桩结构,采用侧向受荷的弹性地基梁模型分析,其顶端内力边界条件即为反向后的受荷段底端支座反力。

2)实例分析表明,前后排桩及上下横梁弯矩和

剪力的理论计算值与数值模拟结果误差均在 $\pm 20\%$ 以内,且整体上理论值偏大。对于防护管道的框架型抗滑桩结构,本文的简化分析模型计算结果相对偏于保守。

3)地震影响系数、管道所赋存土体的特性、框架桩结构属性等因素均对框架桩内力产生影响。其中:水平地震影响系数对结构内力影响显著,随着水平地震影响系数增加,结构内力最大值近似呈线性增大,而竖向地震影响系数影响较弱;结构最大内力与土体重度呈线性正相关性,与黏聚力和内摩擦角呈非线性负相关性;前、后排桩的内力最大值与桩体抗弯刚度之间呈非线性正相关,上、下横梁与其则呈非线性负相关;结构最大内力与框架桩间距呈明显线性正相关,而受前后桩排间距影响较小;前后排桩和上下横梁的最大内力与桩体嵌固深度分别近似呈线性正相关性和负相关性。

4)随着土体黏聚力和内摩擦角的增大,框架桩结构中的前、后排桩及上、下横梁的内力最大值的差值也逐渐变小,即前、后桩和上、下横梁的受力分别趋于接近。

参考文献(References):

[1] 张家铭,尚玉杰,王荣有,等.基于Pasternak双参数模型的滑坡段埋地管道受力分析方法[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(5):1328-1336.
Zhang Jiaming, Shang Yujie, Wang Rongyou, et al. Force Analysis Method of Buried Pipeline in Landslide Section Based on Pasternak Double-Parameter Model [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(5): 1328-1336.

[2] 蒋宏业,兰旭彬,王金荣,等.滑坡下成品油管道力学响应研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(6):71-83.
Jiang Hongye, Lan Xubin, Wang Jinrong, et al. A Study on Mechanical Response of Product Oil Pipeline Under Landslide [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(6): 71-83.

[3] 赵志超,敖波,罗志强,等.浅层滑坡对天然气管道的应力影响研究[J].油气田地面工程,2020,39(12):35-40.
Zhao Zhichao, Ao Bo, Luo Zhiqiang, et al. Study on Stress of Shallow Landslide on Natural Gas Pipeline [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2020, 39(12): 35-40.

[4] 陶波,仵磊,伍法权,等.抗滑桩与周围岩土体间相互作用力的分布规律[J].吉林大学学报(地球科学版),2005,35(2):201-206.
Tao Bo, Nai Lei, Wu Faquan, et al. Distribution Law of Forces Between the Anti-Sliding Pile and the Surrounding Soil Mass [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, 35(2): 201-206.

[5] 王聪聪,李江腾,廖峻,等.抗滑桩加固边坡稳定性分析及优化[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(1):231-237.
Wang Congcong, Li Jiangteng, Liao Jun, et al. Stability Analysis of Slope Reinforced with Piles and Optimization [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(1): 231-237.

[6] 任青阳,赵梦园,谢忠伟,等.抗滑桩应变特征与内力非线性研究[J].水文地质工程地质,2021,48(2):114-124.
Ren Qingyang, Zhao Mengyuan, Xie Zhongwei, et al. A Study of the Strain Characteristics and Internal Force Nonlinearity of Anti-Slide Pile [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 114-124.

[7] 安玉科,吴玮江,张文,等.抗滑桩裂纹控制荷载结构设计法及工程应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2017,47(1):171-178.
An Yuke, Wu Weijiang, Zhang Wen, et al. Crack Control Design Method of Anti-Slide Pile and Engineering Application [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(1): 171-178.

[8] Jewell R J, Stewart D P, Randolph M F. Design of Piled Bridge Abutments on Soft Clay for Loading from Lateral Soil Movements [J]. Geotechnique, 1994, 46(2):277-296.

[9] 铁路路基支挡结构设计规范:TB 10025—2019[S].北京:中国铁道出版社,2019.
Code for Design on Retaining Structures of Railway Subgrade: TB 10025—2019 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.

[10] 仵磊,马丽英,冷曦晨,等.滑坡治理中的抗滑桩设计[J].吉林大学学报(地球科学版),2002,32(2):162-165.
Nai Lei, Ma Liying, Leng Xichen, et al. Anti-Slide Pile Design in Landslide Treatment [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002, 32(2): 162-165.

[11] 孙来宾,肖世国.抗滑桩受荷段前侧有限范围地层的地基抗力系数取值方法[J].岩土力学,2020,41(1):

- 278-284,294.
- Sun Laibin, Xiao Shiguo. Evaluation Method for Elastic Foundation Coefficient of Finite Downslope Soil Against Loading Segment of Stabilizing Piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 278-284, 294.
- [12] 李焕焕,倪万魁,张延磊.基于抗滑桩内力计算方法:“m”法的桩顶最大位移判据研究[J].安全与环境学报,2016,16(4):177-180.
- Li Huanhuan, Ni Wankui, Zhang Yanlei. On the Maximum Displacement Criteria for the Pile Tip-Top Based on “m” Method for the Internal Force Calculation of the Anti-Slide Piles [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(4): 177-180.
- [13] 邓时容,肖世国.嵌固段顶部拓宽型抗滑桩计算方法[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):84-91.
- Deng Shirong, Xiao Shiguo. Calculation Method of Stabilizing Piles with Broadened Top at the Built-in Section[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 84-91.
- [14] 陶波,仵磊,伍法权,等.抗滑桩与周围岩土体间相互作用力的分布规律[J].吉林大学学报(地球科学版),2005,35(2):201-206.
- Tao Bo, Nai Lei, Wu Faquan, et al. Distribution Law of Forces Between the Anti-Sliding Pile and the Surrounding Soil Mass[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, 35(2): 201-206.
- [15] 薛德敏,李天斌,张帅.基于位移控制的双排桩桩后滑坡推力计算方法[J/OL].岩土工程学报,2022;1-8 [2022-11-01]. Doi:10.11779/CJGE20220687.
- Xue Demin, Li Tianbin, Zhang Shuai. Calculation Method of Landslide Thrust Behind Double-Row Piles Based on Displacement Control [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022; 1-8 [2022-11-01]. Doi:10.11779/CJGE20220687.
- [16] 闫玉平,肖世国.双排抗滑桩后侧推力分布物理模型试验[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(2):79-87.
- Yan Yuping, Xiao Shiguo. Physical Model Test on Landslide Thrust Distribution on Double-Row Stabilizing Piles [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 79-87.
- [17] Lei H Y, Liu X, Song Y J, et al. Stability Analysis of Slope Reinforced by Double-Row Stabilizing Piles with Different Locations[J]. Nat Hazards, 2021, 106(1): 19-42.
- [18] Li C D, Chen W Q, Song Y J, et al. Optimal Location of Piles in Stabilizing Slopes Based on a Simplified Double-Row Piles Model[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2020, 24(2): 377-389.
- [19] Zhou Y J, Yao B J. Consideration of the Pile-Soil Friction for Earth Pressure of Limited Soil for Double-Row Piles [C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Asia Urban GeoEngineering. Singapore: Springer, 2018: 174-183.
- [20] Shen Y J, Wu Z J, Xiang Z L, et al. Physical Test Study on Double-Row Long-Short Composite Anti-Sliding Piles [J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13(4): 621-640.
- [21] 董建华,吴晓磊,连博,等.预应力锚索抗滑桩滑坡防治结构的动力计算方法研究[J/OL].土木工程学报,2022;1-13 [2022-11-03]. Doi:10.15951/j.tmgxcb.21101064.
- Dong Jianhua, Wu Xiaolei, Lian Bo, et al. Study on Dynamic Calculation Method for Landslide Prevention Structure of Anti-Slide Pile with Pre-Stressed Anchor Cable[J/OL]. China Civil Engineering Journal, 2022; 1-13 [2022-11-03]. Doi:10.15951/j.tmgxcb.21101064.
- [22] 陈昌富,曾松林,刘一俊.考虑预应力损失桩-锚结构内力计算的加权残值法[J].岩土力学,2018,39(12):4569-4576.
- Chen Changfu, Zeng Songlin, Liu Yijun. Calculation of the Internal Forces of Pile-Anchor Cable Structure Considering the Prestressed Loss Based on Weighted Residual Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4569-4576.
- [23] 石洋海,王贤能.力法计算锚索抗滑桩内力分担比及其应用[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):92-97.
- Shi Yanghai, Wang Xianneng. Application of the Structural Mechanics Method to Calculate the Internal Force Sharing Ratio of Anchor Cable and Anti-Slide Pile for Retaining Structure[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 92-97.
- [24] Chang C Y, Duncan J M. Analysis of Soil Movement Around a Deep Excavation[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1655-1681.
- [25] Xiong S, Li C D, Yao W M, et al. Physical Model

- Tests and Numerical Modeling of Stabilizing Mechanism of Portal Double-Row Piles in Landslides with Interbedded Weak and Hard Dedrock [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(3): 1-18.
- [26] Qiao S, Xu P, Teng J, et al. Numerical Study of Optimal Parameters on the High Filling Embankment Landslide Reinforced by the Portal Anti-Slide Pile[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2020, 24(5): 1460-1475.
- [27] Dai Z H, Qiu Z H, Li H Y, et al. Laboratory Model Test of Fully Buried Portal Frame-Shaped Slope-Stabilizing Piles[J]. Geotechnical Testing Journal, 2022, 45(2): 390-410.
- [28] 王鹏斌, 阎长虹, 万佳佳, 等. 门架式抗滑桩设计参数优化与桩体变形分析[J]. 地质论评, 2022, 68(1): 195-204.
- Wang Pengbin, Yan Changhong, Wan Jiajia, et al. Design Parameter Optimization and Deformation Analysis of Portal Anti-Slide Pile [J]. Geological Review, 2022, 68(1): 195-204.
- [29] 申永江, 邓飏, 杨明, 等. 门架式双排抗滑桩的弹塑性模型与计算分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 149-155.
- Shen Yongjiang, Deng Biao, Yang Ming, et al. Elastoplastic Models and Calculation Analysis of Portal Double-Row Anti-Slide Piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup.1): 149-155.
- [30] 赵波, 王运生, 王羽, 等. 门架式抗滑桩结构模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2017, 39(1): 101-105.
- Zhao Bo, Wang Yunsheng, Wang Yu, et al. Model Test of the Structure of Portal Anti-Sliding Piles[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2017, 39(1): 101-105.
- [31] 张永杰, 周欢, 冯夏庭, 等. h 型抗滑桩简化计算方法及其影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 2935-2943.
- Zhang Yongjie, Zhou Huan, Feng Xiating, et al. Simplified Calculation Method and Affecting Factors Analysis of h-Type Anti-Slide Pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup.1): 2935-2943.
- [32] Zhao L H, Liao W F, Li L, et al. Improved Calculation Method for the Internal Force of h-Type Prestressed Anchor Cable Anti-Slide Piles [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(11): 040221.
- [33] 罗勇, 姜波, 李春峰, 等. h 型抗滑桩滑坡治理中的变形特性及内力研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1702-1710.
- Luo Yong, Jiang Bo, Li Chunfeng, et al. Research on the Deformation and Internal Force Characteristics of h-Type Anti-Slide Piles in Landslide Treatment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(6): 1702-1710.
- [34] 李洋, 李元松, 王亚军. h 型抗滑桩的受力特性及优化设计[J]. 武汉工程大学学报, 2016, 38(2): 173-177.
- Li Yang, Li Yuansong, Wang Yajun. Mechanical Characteristics and Optimization Design of h-Type Antisliding Pile[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2016, 38(2): 173-177.
- [35] Liu X R, Kou M M, Feng H, et al. Experimental and Numerical Studies on the Deformation Response and Retaining Mechanism of h-Type Anti-Sliding Piles in Clay Landslide [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(5): 163-163.
- [36] Zhang H, Xing H F, Liu L L, et al. Field Test and Numerical Analysis on Deformation Response of H-Type Anti-Slide Pile: Case Study of Longjiayan Landslide, China[J]. Natural Hazards Review, 2021, 22(4): 05021015.
- [37] 肖世国, 杨豪, 陈廷君. 嵌固于多种地层的抗滑桩设计计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 116-125.
- Xiao Shiguo, Yang Hao, Chen Tingjun. A Calculation Method for Design of the Stabilizing Piles Embedded in Various Strata[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 116-125.