

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.020

# 陡坡段双桩-柱基础简化计算方法及影响因素分析

张永杰<sup>1,2</sup>, 夏旂琪<sup>2</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 王桂尧<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 陡坡段双桩-柱基础与普通桩基存在较大的差异性, 其承载变形特性更为复杂。首先, 在探讨陡坡段双桩-柱基础承载机制的基础上, 针对纵、横双向双桩-柱基础分别提出了对应的简化分析模型; 其次, 基于桩侧受均布力的基桩内力变形分析方法建立出陡坡段纵、横双向双桩-柱基础简化计算方法, 并通过实例对比分析验证了该方法的可行性; 然后, 采用典型工程案例系统分析了桩径、滑坡体厚度、剩余下滑力集度及地基水平抗力系数的比例系数等因素对基桩桩顶水平位移与桩身最大弯矩的影响规律, 结果表明, 各因素对两者的影响规律相似, 基桩受荷段的陡坡效应显著, 而承载变形段的深度效应则不明显; 最后, 建议工程设计时应优先考虑增大桩径, 但不宜大于 2.5 m, 另可调整基础位置以减小剩余下滑力的影响, 进而减少工程失稳风险, 而不同工况的分析结果曲线则可用于工程优化设计。

**关键词:** 基础工程; 双桩-柱基础; 承载机制; 简化计算方法; 敏感性分析

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 06 - 1705 - 11

## A simplified method and affecting factors for double pile-column foundation in abrupt slope

ZHANG Yong-jie<sup>1,2</sup>, XIA Yi-qi<sup>2</sup>, FENG Xia-ting<sup>1</sup>, WANG Gui-yao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** There are significant differences between the double pile-column foundation and the common pile foundation in abrupt slope. And the bearing capacity and deformation behaviors of double pile-column foundations in abrupt slope are more complex. Simplified models were developed to analyze the bearing mechanism of lengthways and lateral double pile-column foundations in abrupt slope, and were derived using the internal force of common pile subjected to the horizontal uniform force applied on the shaft. The proposed model was verified and its influencing factors were analyzed by a typical engineering project, including pile diameter, sliding body thickness, residual sliding force, proportional coefficient of ground level resistance modulus, on the pile-top horizontal displacement and pile maximum bending moment. The results indicated similar impact by these factors, and salient potential sliding body on the load acting section, and subtle influence of the depth on the load bearing section. Larger pile diameters within 2.5 m are preferred to control the pile deformation and bending moment. Foundation locations can also be changed to reduce the influence of residual sliding force, and lower the instability risk of the pile-column foundation in abrupt slope. The results under different conditions imply optimization design in engineering practices.

**Keywords:** foundation engineering; double pile-column foundation; bearing mechanism; simplified calculation method; sensitivity analysis

## 1 引 言

西部山区高速公路跨越沟谷地区时存在大量的

高陡斜坡(陡坡)段桥梁桩基, 在高度允许的情况下一般采用双桩-柱基础, 由于受陡坡作用影响, 其与平原地区普通桩柱基础相比承载变形特性更为复

收稿日期: 2015-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(No.51208063); 中国博士后科学基金项目(No.2012M511709); 湖南省教育厅优秀青年项目, 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室资助课题(No.Z013006)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51208063), China Postdoctoral Science Foundation (2012M511709), Outstanding youth project of Hunan Provincial Department of Education, Open Research Fund of State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences (Z013006).

第一作者简介: 张永杰, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事边坡与隧道工程稳定可靠性分析与风险评估方面的教学与研究。E-mail: yjzhang309@sohu.com

杂<sup>[1]</sup>,此时如何进行陡坡段基桩位移与内力计算成为工程设计的关键。为此,有必要深入研究陡坡段双桩-柱基础计算分析方法,探讨各种因素对承载变形特性的影响规律,为工程优化设计提供借鉴,进而降低失稳风险。

针对陡坡段桩基承载变形机制与计算分析方法,国内外学者已开展了相关研究,并取得了一定成果。Jeong等<sup>[2]</sup>和Martin等<sup>[3]</sup>分别采用数值方法分析了受边坡滑动影响的单排桩承载变形规律;赵明华等<sup>[4]</sup>建立了陡坡段单桩位移与内力计算的有限差分法;对于陡坡段双桩-柱基础,杨明辉等<sup>[5]</sup>、贺健军<sup>[6]</sup>和赵明华等<sup>[7]</sup>分别探讨了其承载变形机制,并建立了相应的位移与内力有限差分与幂级数计算方法。此外,张洪波<sup>[8]</sup>、龚先兵等<sup>[9]</sup>和尹平保等<sup>[10]</sup>通过现场测试或室内试验对陡坡段双桩-柱基础的承载变形特性进行了分析。上述研究促进了陡坡段双桩-柱基础的理论分析与试验研究,但仍存在不足:现有理论分析方法均采用数值解,需进行编程计算,对工程人员而言计算过程较复杂,不便于理解与设计计算;缺乏对陡坡段双桩-柱基础承载变形特性影响因素的系统分析,尚需进行基桩陡坡效应与深度效应<sup>[7]</sup>的量化影响规律探讨;现有理论方法计算结果工程指导作用不强,缺少既能指导工程设计又能反应各种因素影响的陡坡段双桩-柱基础基桩变形与内力分析结果曲线。因此,有必要在已有研究基础上,借鉴陡坡群桩基础简化计算方法<sup>[11]</sup>分别建立陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础简化计算方法,并系统探讨各种因素对基桩承载变形特性的影响规律。

为此,本文将首先分析陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础承载机制,并针对其承载变形特性分别提出纵、横坡向双桩-柱基础简化分析模型;其次,在探讨相关参数确定方法基础上建立陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础简化分析方法,并进行工程实例验证;然后,采用典型案例系统分析了桩径、滑坡体厚度、剩余下滑力集度及地基水平抗力系数的比例系数等因素对基桩承载变形特性的影响规律,探讨陡坡效应与深度效应的量化影响规律;最后,提出工程优化设计建议,以期减少工程失稳风险。

## 2 陡坡段双桩-柱基础承载机制

高陡边坡上的桥梁桩-柱基础,与地面上的普通桩基相比,主要差别在于受荷段的陡坡效应与承载段的深度效应,进而使其承载机制、变形特性、分析模型均与普通桩基存在较大的差异性;地面上的

普通桩-柱基础若受边坡推力则可能发生破坏,因此,陡坡段双桩-柱基础设计计算时必须考虑陡坡效应与深度效应,使其具有足够的安全储备。为此,应分析陡坡段双桩-柱基础承载机制,并提出简化计算分析模型。

陡坡段双桩-柱基础的基桩通常为嵌岩桩,基桩埋深范围内上部全风化或强风化岩土体采用极限平衡法所得安全系数虽满足规范要求,但在桩基施工或降雨入渗影响下仍会产生一定的变形,进而对设置于其上的基桩产生一定的滑坡推力,使基桩在承受上部荷载的同时还要承受坡体剩余下滑力的作用。相对于地面上的普通双桩-柱基础,其受到的横向荷载更大,使按普通桩基分析理论设计的桩基础存在失稳风险。

如图1、图3所示,根据双桩-柱基础布置形式与边坡剖面的相互关系将其分为横坡向与纵坡向两类,其中, $q_1$ 、 $q_2$ 为单位厚度岩体对基础后侧产生的剩余下滑力的水平分量, $l_0$ 为桩顶 $O$ 点至桩基中心轴线与最可能滑面交点 $O_1$ 的垂直距离(或称桩位处滑坡体厚度), $l_1$ 为滑动面以下两基桩的平均埋深,即 $O_1$ 点至基桩桩底的垂直距离。纵坡向双桩-柱通过系梁与盖梁联结形成一个整体,且 $A$ 、 $B$ 桩以相同的承载变形特性共同承载,并在上部荷载 $P$ 、 $H_{纵}$ 、 $M_{纵}$ 与剩余下滑力作用下同时发生水平变形而挤压桩前土体,使其对基桩产生一定的水平抗力。横坡向双桩-柱也通过系梁与盖梁联结形成一个整体,如图3所示,但在上部水平荷载与剩余下滑力作用下后桩会首先发生水平变形而挤压桩间岩土体,使其对后桩产生水平抗力,并对前桩产生水平推力;前桩在桩间岩土体、系梁与盖梁共同作用下发生水平变形而挤压前桩前侧土体,使其对前桩可能产生一定的水平抗力,前桩与后桩共同承载并满足变形协调,与双排桩支挡结构承载变形机制相似<sup>[12]</sup>。

两类陡坡段双桩-柱基础,滑动面以上基础前侧 $l_0$ 深度范围内的岩土体均对桩基存在一定的水平抗力作用,抗力的有效性与 $l_0$ 、坡角 $\beta$ 及桩径 $d$ 有关。若 $l_0 \cot \beta$ 大于 $n$ 倍桩径 $d$ ,则可考虑桩基前侧 $l_0 \sim nd \tan \beta$ 深度范围内岩土体的水平抗力作用,综合现有研究成果<sup>[1, 10, 13-14]</sup>, $n$ 通常可取3~6倍桩径,具体应根据桩周岩土体性质确定;否则,不考虑 $l_0$ 深度范围内岩土体的水平抗力作用。

## 3 陡坡段双桩-柱基础简化分析模型

基于上述陡坡段双桩-柱基础承载机制及外荷

载作用特点 将陡坡段双桩-柱基础分为纵坡向与横坡向两种工况进行分析，并建立其对应的简化分析模型。

### 3.1 纵坡向双桩-柱基础简化分析模型

陡坡段纵坡向双桩-柱基础的两根基桩以相同的承载变形特性共同承担上部结构的竖向荷载  $P$ 、顺桥向水平荷载  $H_{纵}$  与弯矩  $M_{纵}$  及剩余下滑力，不考虑横桥向荷载  $H_{横}$ 、 $M_{横}$  的影响，其计算分析简化平面模型如图 1 所示。为便于计算，该模型满足如下假定：

(1) 纵坡向双桩-柱基础可简化为单桩-柱  $A$  或  $B$  进行计算，且上部荷载  $P$ 、 $H_{纵}$  与  $M_{纵}$  平均分配到  $A$ 、 $B$  桩的桩顶，分别为  $P_1$ 、 $H_1$  与  $M_1$ 。

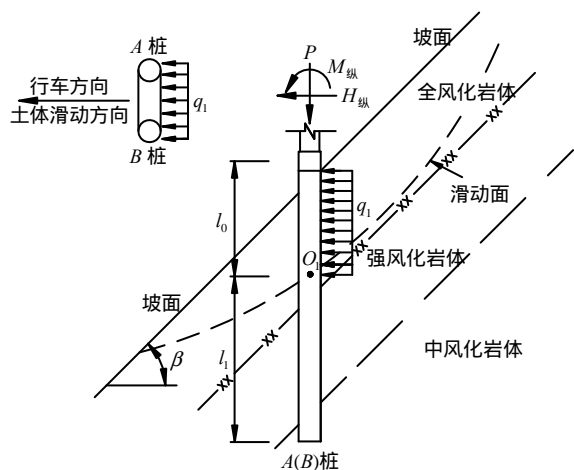


图 1 纵坡向双桩-柱基础计算分析平面图  
Fig.1 Lengthways pile foundation analysis plane graph

(2) 不考虑滑动面以上桩间土体与基桩的相互作用；偏安全考虑，不计基桩前侧陡坡段  $l_0$  范围内岩土体对基桩的抗力作用。

(3) 基桩后侧剩余下滑力作用深度为  $l_0$ ，并根据抗滑桩计算分析方法<sup>[15]</sup>假定基桩宽度范围内的剩余下滑力以矩形分布形式  $q_1$  作用于基桩后侧；桩位处边坡安全系数大于 1.1 坡体变形较小难以在桩基后形成土拱，因此，剩余下滑力的作用范围仅为基桩计算宽度。

(4) 将过  $O_1$  的滑面简化为平面，并将此平面以下承载段  $l_1$  作为桩基埋深进行计算，同时，嵌岩倾斜面也简化为平面，嵌岩深度为  $l_1-h$ ， $h$  为基桩承载变形段深度。

基于上述假定可将陡坡段纵坡向双桩-柱基础受荷变形模型转化为自由段受水平推力的平地普通嵌岩基桩简化分析模型，如图 2 所示，在保证工程安全的前提下，使陡坡段纵坡向双桩-柱基础计算过程简单，并可采用已有的桩基内力变形计算方法，

而相关假定对工程设计均偏保守。

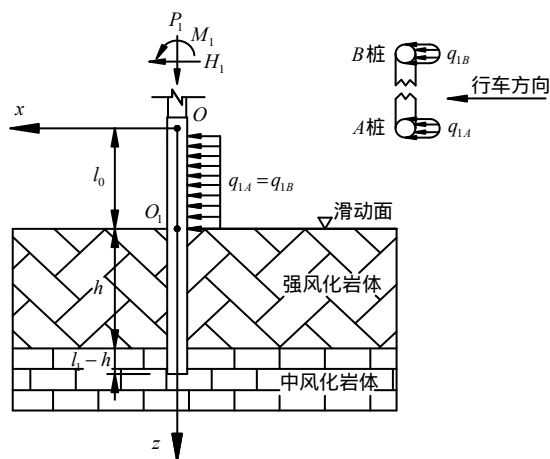


图 2 纵坡向双桩-柱基础简化分析模型  
Fig.2 Simplified model of lengthways pile foundation

### 3.2 横坡向双桩-柱基础简化分析模型

陡坡段横坡向双桩-柱基础通过前、后桩与桩间土共同承担上部结构的竖向荷载  $P$ 、横桥向水平荷载  $H_{横}$  与弯矩  $M_{横}$  及剩余下滑力，不考虑纵桥向荷载  $H_{纵}$ 、 $M_{纵}$  的影响，其计算分析简化平面模型如图 3 所示。为便于计算，该模型满足如下假定：

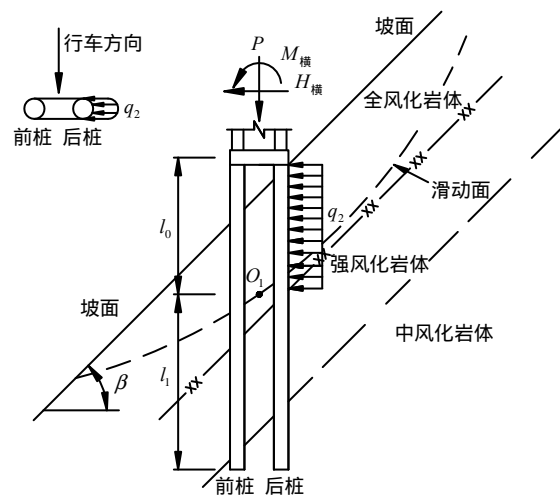


图 3 横坡向双桩-柱基础计算分析平面图  
Fig.3 Lateral pile foundation analysis plane graph

(1) 横坡向双桩-柱基础可简化为前、后单桩-柱基础进行计算，且上部荷载  $P$ 、 $H_{横}$  与  $M_{横}$  平均分配到前、后桩的桩顶，分别为  $P_1$ 、 $H_2$  与  $M_2$ 。

(2) 不考虑前桩前侧陡坡段  $l_0$  范围内岩土体对前桩的抗力作用，桩间岩土体仅起到传递剩余下滑力的作用，不考虑其对后桩的抗力作用。

(3) 前、后桩后侧剩余下滑力作用深度均为  $l_0$ ，且系梁与盖梁对横坡向双桩-柱基础承受剩余下滑

力的影响可通过前、后桩的分担来体现,即基桩宽度范围内的剩余下滑力集度  $q_2$  以矩形分布形式  $q_{2前}$  与  $q_{2后}$  分担于前、后桩的后侧,不再考虑系梁与盖梁的传力作用,  $q_{2前}$  与  $q_{2后}$  可根据桩间土体重量的比例关系<sup>[16]</sup>进行确定。

(4)将过  $O_1$  的滑面简化为平面,并将此平面以下承载段  $l_1$  作为前、后基桩埋深进行计算,同时,嵌岩倾斜面也简化为平面,前、后基桩嵌岩深度均为  $l_1-h$ 。

基于上述假定可将陡坡段横坡向双桩-柱基础受荷变形模型转化为前、后两根自由段受水平推力的平地普通嵌岩基桩简化分析模型,如图4所示,在保证工程安全的前提下,使陡坡段横坡向双桩-柱基础计算过程简单,并可采用已有的桩基内力变形计算方法。

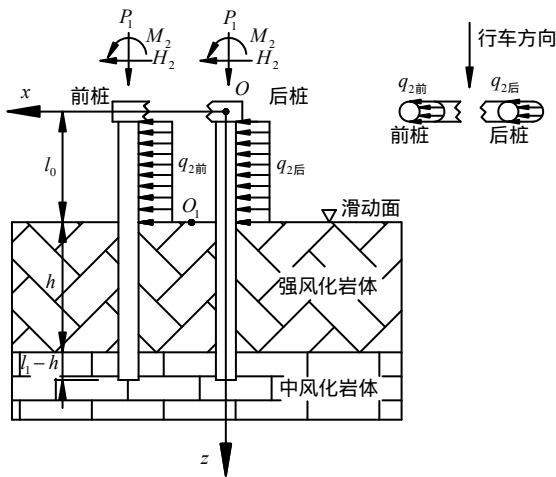


图4 横坡向双桩-柱基础简化分析模型

Fig.4 The simplified model of lateral pile foundation

针对建立的陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础计算分析平面模型及其等效分析模型,如何进行工程设计计算,需进一步探讨剩余下滑力确定方法及陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础简化基桩计算分析方法。

## 4 陡坡段双桩-柱基础设计计算方法

### 4.1 陡坡段剩余下滑力确定方法

陡坡段双桩-柱基础是在陡坡稳定(边坡安全系数大于规范要求值)的前提下考虑陡坡、基础与外荷载的共同作用进行设计计算,若陡坡本身安全系数不满足相关规范要求,则应在桩基础施工前先对陡坡进行支护设计。

稳定陡坡对双桩-柱基础产生的剩余下滑力可采用极限平衡法确定,常用的方法有瑞典法、简化 Bishop 法、M-P 法、Sarma 法、Janbu 法和不平衡推

力法等,具体可根据地质条件进行选择,但需注意不平衡推力法得到的剩余下滑力平行于滑面,计算时应采用将其分解后的水平向分力。陡坡段双桩-柱基础承受的剩余下滑力为通过桩基础最危险滑动面计算所得的基础后侧剩余下滑力与基桩宽度的乘积,并将其转化为桩基位置处滑坡体厚度  $l_0$  范围内的矩形分布荷载  $q_1$  或  $q_2$ 。

根据桩基础在陡坡上的不同布置位置,剩余下滑力可能为正值,也可能为负值。若其为正值,则直接采用前述陡坡段双桩-柱基础简化分析模型进行计算,若其为负值,则先令  $q_1$  或  $q_2$  等于 0,再采用前述简化分析模型进行计算,此时计算结果将偏安全。陡坡段双桩-柱基础后侧剩余下滑力可采用 Matlab 编制的程序进行自动搜索计算。

### 4.2 陡坡段双桩-柱基础简化基桩计算分析方法

在获得陡坡段双桩-柱基础后侧剩余下滑力基础上,根据纵、横向双桩-柱基础简化分析模型,可采用《公路桥涵地基与基础设计规范》(以下简称《桥基规范》)<sup>[17]</sup>中侧面受土压力的单排嵌岩桩柱计算方法进行基桩设计计算,桩侧承受矩形分布荷载的嵌岩桩-柱基础计算模型如图5所示,其中,  $P_i$ 、 $M_i$ 、 $H_i$  与  $q_i$  分别为纵、横向双桩-柱基础简化分析模型对应的上部荷载与剩余下滑力集度,  $EI$  为基桩抗弯刚度。此时,如何根据双桩-柱基础简化分析模型求解桩顶变位与基桩内力成为基础优化设计的另一关键问题。

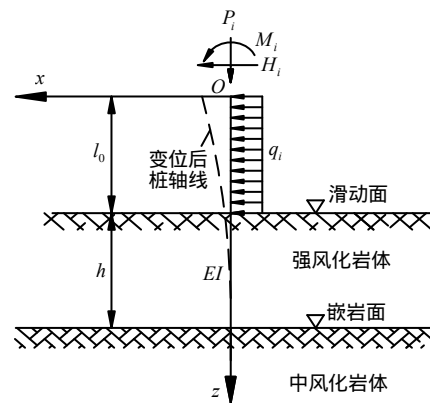


图5 推力作用下嵌岩桩-柱基础计算模型

Fig.5 The proposed model of rock-socketed pile foundation subjected to thrust

根据《桥基规范》中的基桩位移与内力计算方法,当基桩在滑动面  $O_1$  处作用水平力  $H_0$  与弯矩  $M_0$  时,该处产生的水平位移  $x_0$  与转角  $\phi_0$  分别为

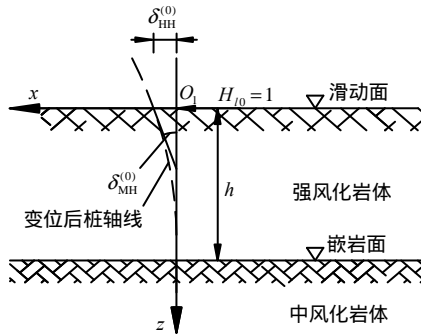
$$x_0 = H_0 \delta_{HH}^{(0)} + M_0 \delta_{HM}^{(0)} \quad (1)$$

$$\phi_0 = H_0 \delta_{MH}^{(0)} + M_0 \delta_{MM}^{(0)} \quad (2)$$

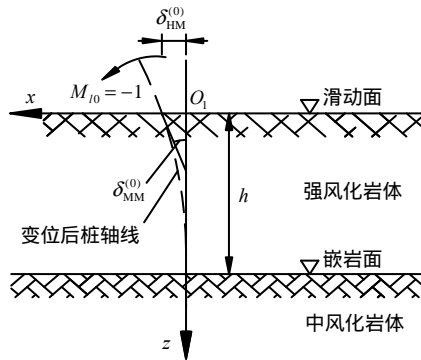
式中： $\delta_{HH}^{(0)}$ 、 $\delta_{MH}^{(0)}$ 、 $\delta_{HM}^{(0)}$  与  $\delta_{MM}^{(0)}$  分别为基桩在滑动面  $O_1$  处作用单位水平力  $H_{i0}=1$  与单位弯矩  $M_{i0}=-1$  时（如图 6 所示）该处截面产生的水平位移与转角，可通过查《桥基规范》相关表格计算得到；此外，

$$H_{i0} = H_i + q_i l_0 \quad (3)$$

$$M_{i0} = M_i + H_i l_0 + q_i l_0^2 / 2 \quad (4)$$



(a) 滑动面处基桩受单位水平力变位计算模型



(b) 滑动面处基桩受单位弯矩变位计算模型

图 6 基桩受单位荷载变位计算模型

Fig.6 Model for calculating deformation of pile applied by unit load

根据结构力学理论，基桩桩顶  $O$  处的水平位移  $\Delta$  包括基桩  $O_1$  处的水平位移  $x_0$  与转角  $\varphi_0$  引起的桩顶位移  $x_0$  与  $\varphi_0 l_0$ 、基桩陡坡段作为悬臂梁受  $M_i$ 、 $H_i$  与  $q_i$  作用在桩顶产生的水平位移为  $x_M$ 、 $x_H$  与  $x_q$ ，即

$$\Delta = x_0 - \varphi_0 l_0 + x_M + x_H + x_q \quad (5)$$

则滑动面以下深度  $z$  处的基桩截面弯矩  $M_z$  与剪力  $Q_z$  分别为

$$M_z = \alpha^2 EI(x_0 A_3 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_{i0}}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{H_{i0}}{\alpha^3 EI} D_3) \quad (6)$$

$$Q_z = \alpha^3 EI(x_0 A_4 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_{i0}}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{H_{i0}}{\alpha^3 EI} D_4) \quad (7)$$

式中： $\alpha$  为基桩变形系数； $E$  为基桩弹性模量； $I$  为基桩截面惯性矩； $A_3$ 、 $B_3$ 、 $C_3$ 、 $D_3$ 、 $A_4$ 、 $B_4$ 、 $C_4$  与  $D_4$  分别为基桩内力计算系数，可查《桥基规范》相关表格确定。

至此，根据陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础承载机制及其简化分析模型建立出简化基桩设计计算方法，进而可得陡坡段基桩桩顶位移与任意深度处的基桩内力，以此可对陡坡段双桩-柱基础设计参数进行复核，并进行基桩配筋设计。

### 4.3 算例验证

为验证陡坡段双桩-柱基础简化设计计算方法的合理性，本文采用文献[7]中的算例进行分析。该陡坡段纵坡向双桩-柱基础附近的边坡岩土体主要由 4~9 m 厚的强风化白云质灰岩和 12~18 m 厚的中风化白云质灰岩组成，边坡坡角为  $35^\circ \sim 50^\circ$ ，强风化白云质灰岩的黏聚力为 46 kPa，内摩擦角为  $26^\circ$ 。强风化灰岩地基水平抗力系数的比例系数  $m_1$  为  $8 \text{ MN/m}^4$ ，中风化灰岩的  $m_2$  为  $72 \text{ MN/m}^4$ 。基桩桩顶竖向荷载  $P_1=5731 \text{ kN}$ ，水平荷载  $H_1=78 \text{ kN}$ ，弯矩  $M_1=112 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。基桩采用 C25 混凝土和  $\Phi 25 \text{ mm}$  的 HRB335 钢筋，混凝土弹性模量为 28 GPa。

针对陡坡段双桩-柱基础的不同设计方案，分别考虑边坡安全系数  $F_s$ 、剩余下滑力  $q_1$ 、桩径  $d$  与基桩承载变形段深度  $h$  4 个影响因素，采用本文方法与文献[7]方法计算得到的桩顶位移计算结果如表 1 所示，其中，剩余下滑力不考虑地下水与地震作用力的影响。

表 1 桩顶位移计算结果对比

Table 1 Pile-top horizontal displacements with different cases

方案	安全系数 $F_s$	剩余下滑力 $q_1 / (\text{kN/m})$	桩径 $d / \text{m}$	基桩承载变形段深度 $h / \text{m}$	后桩水平位移 $x_0 / \text{mm}$		计算误差 / %	后桩最大弯矩 $M_{\max} / (\text{kN}\cdot\text{m})$		计算误差 / %
					文献[7]计算值	本文计算值		文献[7]计算值	本文计算值	
1	1.15	81.5	1.5	8.0	5.9	6.07	2.88	1373.5	1398.9	1.9
2	1.15	81.5	2.0	12.0	3.2	3.26	1.88	1369.1	1420.8	3.8
3	1.15	81.5	2.5	10.0	2.0	2.06	3.00	1375.6	1490.7	8.4
4	1.25	263.4	2.5	8.0	3.8	4.13	8.68	2093.1	4093.6	95.6
5	1.35	585.4	2.5	12.0	7.2	7.61	5.69	3397.2	9241.3	172.0

由表 1 可知, 本文方法所得桩顶位移均大于文献[7]的计算值, 主要因为其计算方法考虑了桩基前侧土体的抗力作用, 并假定桩基后侧剩余下滑力服从抛物线分布, 而本文简化分析模型不考虑桩基前侧土体抗力作用, 且剩余下滑力服从矩形分布, 上述差异导致本文方法计算结果偏大; 此外, 各方案计算误差均小于 9%, 满足工程要求, 且本文方法计算偏安全, 因此, 本文提出陡坡段双桩-柱基础简化设计计算方法可用于实际工程分析, 且计算过程简单, 可直接利用《桥基规范》相关公式与表格进行计算。本文方法所得桩身弯矩均大于文献[7]的计算值, 当剩余下滑力增加 2~6 倍时, 本文计算结果与文献[7]相比将增加 2~3 倍, 上述结果主要由于未考虑桩基前侧土体的抗力作用, 但对于实际情况 (剩余下滑力约为 40~80 kN/m, 安全系数为 1.15), 本文计算结果与文献[7]的误差均在 10% 以内, 满足工程要求; 剩余下滑力较大时边坡稳定性不满足要求或要求太高 (安全系数为 1.25 或 1.35), 此时应首先采用抗滑桩或锚索等支护措施进行边坡工程处治, 再进行陡坡桩基设计。方案 4 与 5 不符合实际工程要求, 此处仅用于对比分析。

## 5 陡坡段双桩-柱基础变形影响因素分析

针对前述建立的陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础简化计算方法, 为探讨桩径  $d$ 、滑坡体厚度  $l_0$ 、剩余下滑力集度  $q_i$ 、承载变形段长度  $h$  与地基水平抗力系数的比例系数  $m$  等因素对陡坡段双桩-柱基础承载变形特性的影响规律, 对某高速公路 3 车道  $5 \times 30$  m 跨筒支梁桥进行分析, 其中, 3# 桥墩为陡坡段双桩柱基础, 柱高 6 m, 基础上侧方边坡高 30 m, 坡度为  $50^\circ$ ; 桩位区域表层为 3~5 m 厚全风化岩层, 黏聚力为 25 kPa, 内摩擦角为  $15^\circ$ ; 中部为 10 m 厚强风化岩层, 黏聚力为 60 kPa, 内摩擦角为  $28^\circ$ , 地基水平抗力系数的比例系数为  $40 \text{ MN/m}^4$ ; 下部为中风化岩层。

通过极限平衡法计算可知, 最危险滑动面位于全风化岩层中, 不同滑坡体厚度对应的桩位处剩余下滑力集度为 40~80 kN/m, 边坡安全系数均大于 1.15。根据文献[18]的计算方法可得作用于单桩桩顶的荷载为: 竖向荷载  $P_1=2800 \text{ kN}$ , 纵桥向水平荷载  $H_1=40 \text{ kN}$ , 纵桥向弯矩  $M_1=390 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 横桥向水平荷载  $H_2=5 \text{ kN}$ , 横桥向弯矩  $M_2=495 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。桩身重度  $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$ , 桩身弹性模量  $E=28 \text{ kPa}$ 。桩端置

于中风化岩层中, 嵌岩深度为 1 倍桩径  $d$ , 承载变形段深度为 10 m。考虑滑坡体厚度及其对应的剩余下滑力的变化范围, 采用本文计算方法系统分析各因素对桩顶位移的影响规律, 以便为工程设计提供参考。

### 5.1 桩径、滑坡体厚度与剩余下滑力的影响规律

为探讨不同桩径  $d$ 、滑坡体厚度  $l_0$  及其对应的剩余下滑力集度  $q_i$  对桩基变形的影响规律, 分别计算不同工况下的基桩变形, 具体结果如下。

#### 5.1.1 工况 1: 纵坡向双桩-柱基础

上部荷载与剩余下滑力共同作用下不同计算参数对应的纵坡向基桩桩顶水平位移计算结果如图 7 所示, 由图可知: 桩径、滑坡体厚度与剩余下滑力

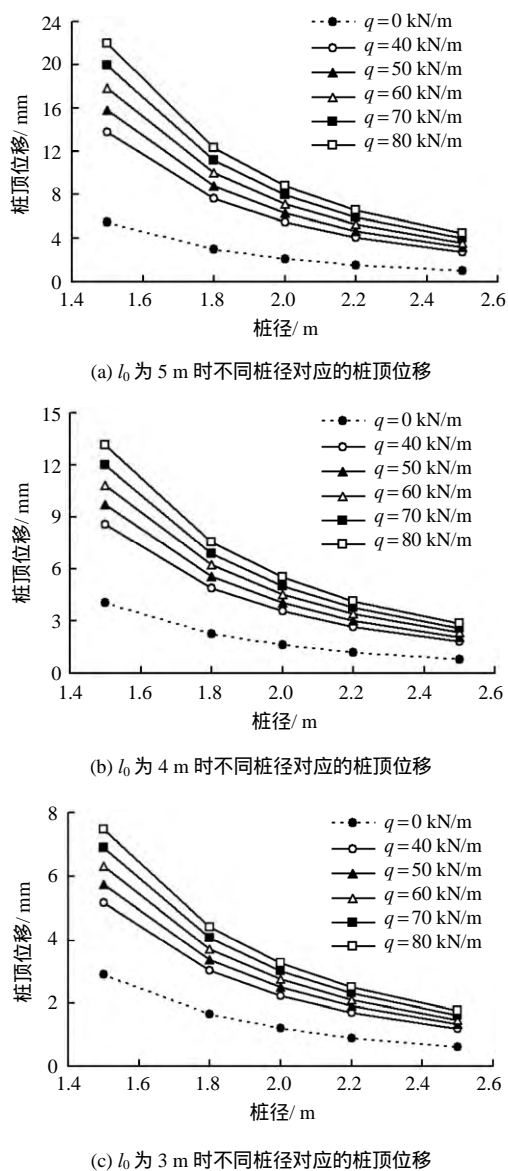


图 7 纵坡向双桩-柱基础不同计算参数对应的桩顶水平位移计算结果

Fig.7 Pile-top horizontal displacements of lengthways double pile-column foundations with different parameters

对桩顶位移均有显著影响，考虑剩余下滑力影响的桩顶位移比平地情况下增加 1.5 ~ 3.0 倍；当剩余下滑力集度从 40 kN/m 增加到 80 kN/m 时，不同滑坡体厚度与桩径对应的桩顶位移增加 44% ~ 61%；当桩径从 1.5 m 增大到 2.5 m 时，不同滑坡体厚度与剩余下滑力集度对应的桩顶位移均减少 80% 左右；当滑坡体厚度从 5 m 减小到 3 m 时，不同桩径与剩余下滑力集度对应的桩顶位移均减少 60% 左右。

陡坡段若不考虑剩余下滑力对双桩-柱基础变形的影响，采用上部荷载按平地普通桩基计算理论设计的桩-柱基础使用过程中可能产生较大的水平位移，存在重大安全隐患，说明其陡坡效应明显。此外，陡坡段纵坡向双桩-柱基础的桩顶水平位移对桩径最敏感，其次为滑坡体厚度和剩余下滑力集度，因此，增大桩径能最有效减小桩顶水平变形，与工程实践一致。

5.1.2 工况 2：横坡向双桩-柱基础

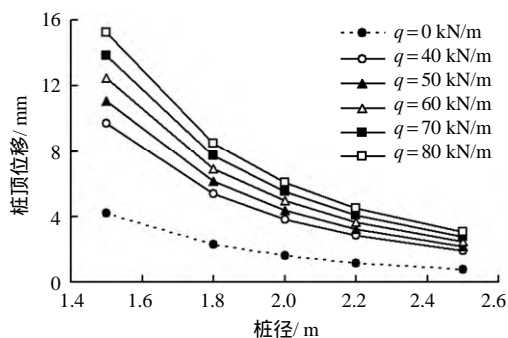
上部荷载与剩余下滑力共同作用下不同计算参数对应的横坡向后桩桩顶水平位移计算结果如图 8 所示，由图可知，桩径、滑坡体厚度与剩余下滑力集度对桩顶位移均有显著影响，考虑剩余下滑力影响的桩顶位移比平地情况下增加 1.2 ~ 2.6 倍；当剩余下滑力集度从 40 kN/m 增加到 80 kN/m 时，不同滑坡体厚度与桩径对应的桩顶位移增加 38% ~ 58%；当桩径从 1.5 m 增大到 2.5 m 时，不同滑坡体厚度与剩余下滑力集度对应的桩顶位移减少 77% ~ 80%；当滑坡体厚度从 5 m 减小到 3 m 时，不同桩径与剩余下滑力集度对应的桩顶位移减少 54% ~ 64% 左右。

陡坡段横坡向双桩-柱基础的基桩水平变形对不同参数的敏感性规律与纵坡向双桩-柱基础类似，且不同参数的影响程度基本相同；相同条件下，横坡向双桩-柱基础的后桩虽然比纵坡向基桩承受更大的剩余下滑力，但由于计算模型平面简化问题，未考虑上部纵桥向荷载的影响，导致横坡向双桩-柱基础的基桩水平位移较纵坡向的减少 22.5% ~ 31.5%。

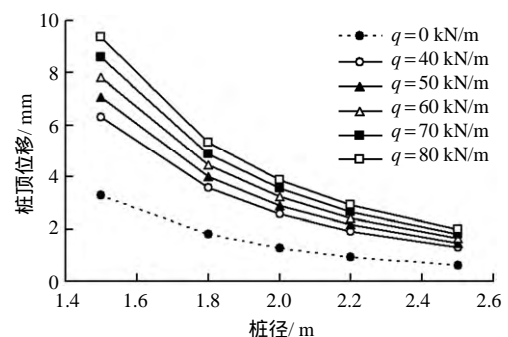
5.2 地基水平抗力系数的比例系数的影响规律

桩周岩土体的地基抗力受岩土体性质、边坡稳定性及地下水等因素影响，根据土体类型与密实程度确定的地基水平抗力系数的比例系数并非定值，有必要探讨其对基桩变形的影响规律。根据前述影响因素敏感性分析结论，取滑坡体厚度为 5 m、桩

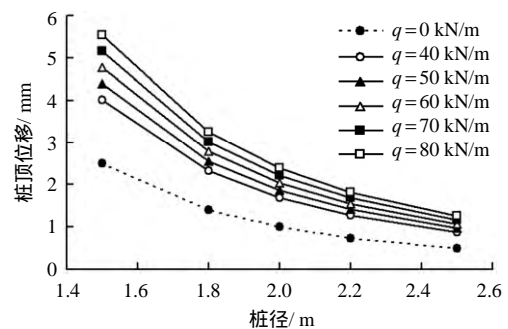
径为 2 m，承载变形段深度为 10 m，不同工况对应的基桩桩顶水平位移计算结果如图 9 所示。



(a)  $l_0$  为 5 m 时不同桩径对应的桩顶位移



(b)  $l_0$  为 4 m 时不同桩径对应的桩顶位移

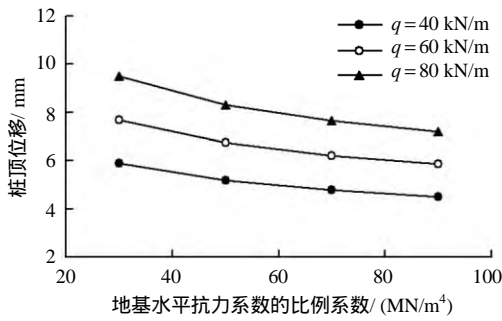


(c)  $l_0$  为 3 m 时不同桩径对应的桩顶位移

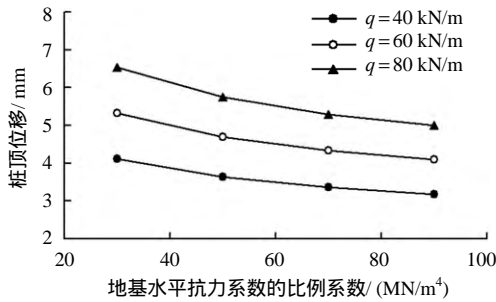
图 8 横坡向双桩-柱基础不同计算参数对应的桩顶水平位移计算结果

Fig.8 Pile-top horizontal displacements of lateral double pile-column foundations with different parameters

由图可知，对于纵、横坡向双桩-柱基础及不同的剩余下滑力集度，当地基水平抗力系数的比例系数从 30 kN/m<sup>4</sup> 增大到 90 kN/m<sup>4</sup> 时，基桩桩顶水平位移均减小 23% 左右，说明地基水平抗力系数的比例系数对桩顶水平位移的影响相对较小，实际工程中其取值偏差（通常为 ±20%）对基础设计参数的影响可忽略不计。



(a) 不同比例系数对应的纵坡向桩顶位移



(b) 不同比例系数对应的横坡向桩顶位移

图9 不同工况基桩桩顶水平位移计算结果  
Fig.9 Pile-top horizontal displacements under different conditions

5.3 承载变形段深度的影响规律

上部荷载与剩余下滑力共同作用下,双桩-柱基础水平变形还受滑面以下承载变形段深度的影响,为此,综合前述分析结论,取  $l_0=5$  m 和  $q=80$  kN/m,对不同桩径的纵坡向双桩-柱基础进行计算,结果如表 2 所示。

表 2 不同承载变形段深度对应的桩顶水平位移(单位: mm)  
Table 2 Pile-top Horizontal displacements with different  $l_0$  (unit: mm)

桩径 /m	承载变形段深度 $h$ /m				
	8	9	10	11	12
1.5	21.84	21.97	21.97	21.97	21.97
1.8	12.18	12.22	12.28	12.29	12.29
2.0	8.76	8.77	8.80	8.84	8.84
2.2	6.52	6.53	6.54	6.57	6.57
2.5	4.41	4.43	4.43	4.44	4.44

由表可知,承载变形段深度  $h$  从 8 m 增大到 12 m 时,不同桩径对应的桩顶水平位移增加 0.5% ~ 1.0%,且存在临界承载变形段深度,即某一桩径对应的桩顶水平位移随承载变形段深度达到一定值后 ( $ah=4$ ) 不再增加而保持不变,说明陡坡段纵坡向双桩-柱基础承载变形段深度对桩顶水平位移的影响程度较小,嵌岩深度满足稳定要求(不小于 0.5 m)的前提下其深度效应不明显。

实际工程在保证桩基承载变形段与嵌岩段达到一定深度的基础上,应首先考虑增大桩径来控制桩顶水平位移,但应注意增加幅度,无论何种工况桩径增大到一定程度 ( $d=2.5$  m) 后桩顶水平位移随桩径增大而减小的幅度将降低,如图 7、8 所示;其次,通过调整桩基位置以减小滑坡体厚度与剩余下滑力集度,进而减小桩顶水平位移,但其控制效果随桩径的增大而降低。

6 陡坡段双桩-柱基础弯矩影响因素分析

在系统分析不同计算参数对陡坡段双桩-柱基础变形影响规律基础上,为便于基桩配筋优化设计,有必要对其弯矩影响因素进行系统分析,采用前述案例计算所得结果进行分析。

6.1 桩径、滑坡体厚度与剩余下滑力的影响规律

根据陡坡段双桩-柱基础变形影响因素分析结果,考虑不利工况,取承载变形段深度  $h=10$  m,地基本水平抗力系数的比例系数  $m=40$  MN/m<sup>4</sup>,分别计算不同桩径  $d$ 、滑坡体厚度  $l_0$  与剩余下滑力集度  $q_i$  对应的纵、横坡向双桩-柱基础桩身最大弯矩,结果如图 10 所示。由图可知,纵、横坡向双桩-柱基础桩身弯矩均随剩余下滑力集度的增大而增大(如图 10(a)与 10(b),其中,  $d=2$  m,  $l_0=5$  m),且最大弯矩截面位置基本保持不变;当剩余下滑力集度从 40 kN/m 增大到 80 kN/m 时,纵坡向基桩桩身最大弯矩增加 57%,横坡向基桩桩身最大弯矩增加 53%,不同剩余下滑力集度对应的纵坡向基桩桩身最大弯矩比横坡向大 40%。

桩身最大弯矩随桩径的增大而增大(如图 10(c)与(d),其中,  $l_0=5$  m),桩径从 1.5 m 增大到 2.5 m 时,不同剩余下滑力集度对应的桩身最大弯矩增大 9% ~ 11.5%,使桩径增大后的桩身尚存在较大的承载能力,剩余下滑力集度从 40 kN/m 增大到 80 kN/m 时,不同桩径对应的桩身最大弯矩增大 56% ~ 59%;考虑剩余下滑力影响的桩身最大弯矩比平地情况下增加 1.2 ~ 2.7 倍。

桩身最大弯矩随滑坡体厚度的增加或剩余下滑力集度的增加而增加(如图 10(e)与(f),其中,  $d=2$  m),且与抗滑桩桩身最大弯矩变化规律一致<sup>[19]</sup>;当剩余下滑力集度从 40 kN/m 增大到 80 kN/m 时,纵坡向双桩-柱基础不同滑坡体厚度对应的桩身最大弯矩增大 42% ~ 58%,横坡向的桩身最大弯矩增大 34% ~ 53%;当滑坡体厚度从 3 m 增大到 5 m 时,纵坡向双桩-柱基础不同剩余下滑力集度对应的桩



身最大弯矩增大 54% ~ 72%，横坡向的桩身最大弯矩增大 41% ~ 61%。

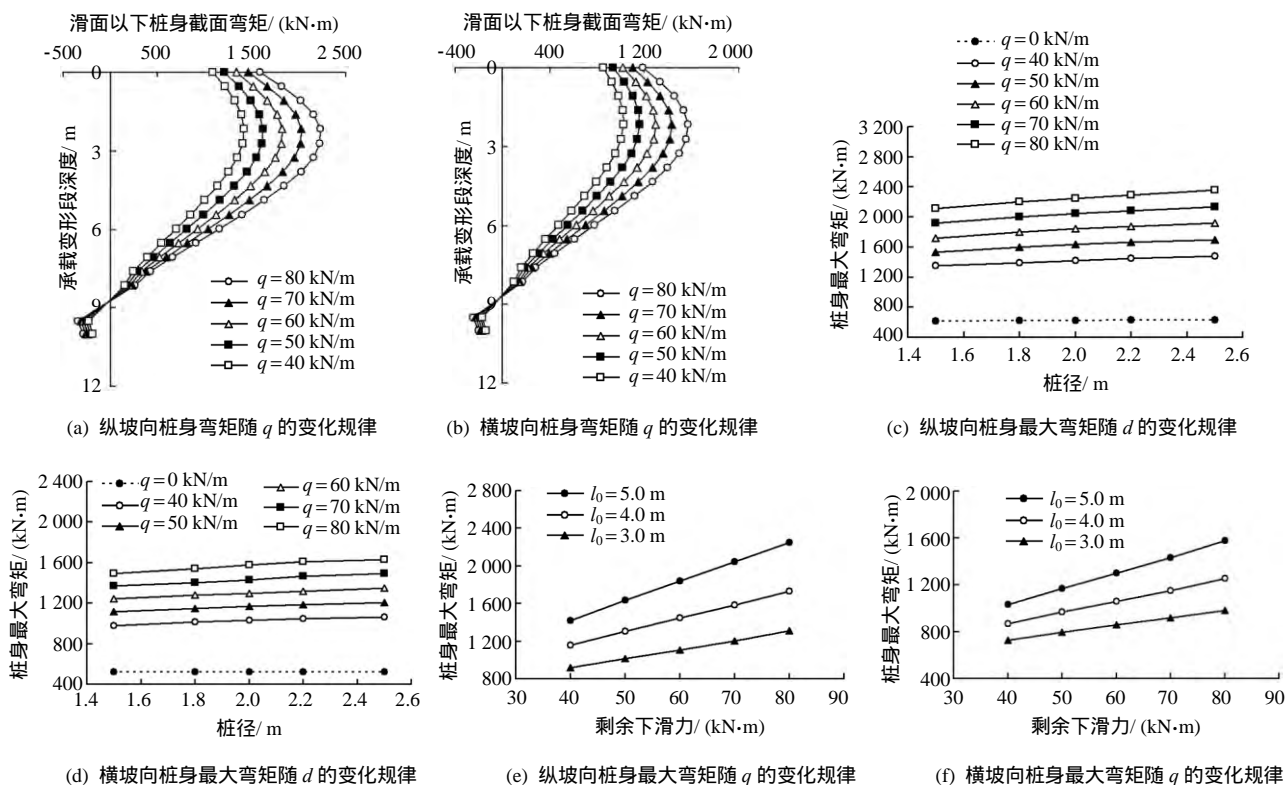


图 10 纵、横坡向双桩-柱基础不同计算参数对应的桩身最大弯矩计算结果

Fig.10 Maximum bending moments of pile of lengthways and lateral double pile-column foundations with different parameters

综合上述分析可知，陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础基桩桩身最大弯矩存在明显的陡坡效应；桩身最大弯矩对滑坡体厚度最敏感，其次为剩余下滑力，桩径对其影响相对较小，分析结论与工程实际一致，因为桩身弯矩主要由上部荷载和剩余下滑力引起，而剩余下滑力取决于滑坡体厚度和剩余下滑力集度；此外，纵、横坡向桩身最大弯矩的变化规律与桩顶水平位移的类似。

### 6.2 地基水平抗力系数的比例系数的影响规律

根据前述影响因素敏感性分析结论，取滑坡体厚度  $l_0=5\text{ m}$ ，承载变形段深度为 10 m，桩径  $d=2\text{ m}$ ，不同工况对应的桩身最大弯矩计算结果如图 11 所示。由图可知，对于纵、横坡向双桩-柱基础及不同的剩余下滑力集度，当地基水平抗力系数的比例系数从  $30\text{ kN/m}^4$  增大到  $90\text{ kN/m}^4$  时，桩身最大弯矩均减小 6% 左右，说明地基水平抗力系数的比例系数对桩身最大弯矩的影响很小，实际工程中其取值偏差对基础设计参数的影响可忽略不计。

### 6.3 承载变形段深度的影响规律

上部荷载与剩余下滑力共同作用下，双桩-柱基础水平变形还受滑面以下承载变形段深度的影响，

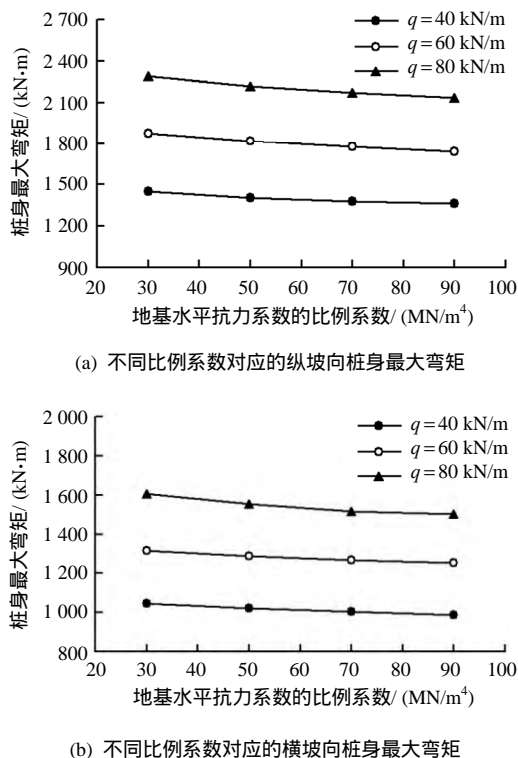


图 11 不同工况基桩桩身最大弯矩计算结果

Fig.11 Maximum bending moments of piles under different conditions

为此,综合前述分析结论,取 $l_0=5$  m和 $q=80$  kN/m,对不同桩径的纵坡向双桩-柱基础进行计算,结果如表3所示。由此可知,承载变形段深度 $h$ 从8 m增大到12 m时,不同桩径对应的桩身最大弯矩增加0.6%~3.2%,且当基桩计算深度 $\alpha h > 4$ 时桩身最大弯矩不随承载变形段深度 $h$ 的增大而增大,说明陡坡段双桩-柱基础承载变形段深度对桩身最大弯矩的深度效应不明显。

表3 不同承载变形段深度对应的桩身最大弯矩(单位: kN·m)  
Table 3 Maximum bending moments of piles with different  $l_0$  (unit: kN·m)

桩径 / m	承载变形段深度 $h$ / m				
	8	9	10	11	12
1.5	2 098	2 111	2 111	2 111	2 111
1.8	2 164	2 197	2 201	2 201	2 201
2.0	2 185	2 254	2 249	2 247	2 247
2.2	2 238	2 292	2 299	2 290	2 286
2.5	2 306	2 322	2 376	2 349	2 380

实际工程中在保证桩基承载变形段与嵌岩段达到一定深度的基础上,同样应首先通过增大桩径来控制桩身最大弯矩,因桩径增大后桩身弯矩增加很小,但其承载能力却大大提高;其次,通过调整桩基位置以减小滑坡体厚度与剩余下滑力集度,进而减小桩身最大弯矩,其对不同直径基桩的控制效果均较明显。

## 7 结 论

(1)在分析陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础承载机制基础上,通过简化与假定分别提出了陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础简化分析模型,并基于剩余下滑力计算方法与桩侧受均布力的基桩内力变形计算方法建立出陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础内力变形计算方法,工程实例对比分析表明,本文计算方法合理、可行。

(2)采用典型工程案例系统分析了桩径、滑坡体厚度与剩余下滑力集度等因素对陡坡段纵、横坡向双桩-柱基础的基桩桩顶水平位移与桩身最大弯矩的影响规律,结果表明,各因素对两者的影响规律相似,基桩受荷段的陡坡效应显著,而承载变形段的深度效应则不明显;工程优化设计时应优先考虑增大桩径,其次,通过调整基础位置以减小剩余下滑力的影响,而地基水平抗力系数的比例系数取

值偏差对计算结果的影响可忽略。

(3)采用典型工程案例所得各种工况下基桩桩顶水平位移与桩身最大弯矩的计算结果曲线可用于类似工程优化设计,而相关规律可为其他陡坡桩基工程提供借鉴,此外,不同工况对应的量化分析结论的广泛适用性尚需相关工程案例的对比分析与总结。

## 参 考 文 献

- [1] 冯忠居. 特殊地区基础工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
FENG Zhong-ju. Foundation engineering in special areas[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [2] JEONG S, KIM B, WON J, et al. Uncoupled analysis of stabilizing piles in weathered slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, 30(8): 671 - 682.
- [3] MARTIN G R, CHEN C Y. Response of piles due to lateral slope movement[J]. *Computers & Structures*, 2005, 83(8-9): 588 - 598.
- [4] 赵明华, 刘建华, 杨明辉. 倾斜荷载下高陡边坡桥梁基桩内力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2352 - 2357.  
ZHAO Ming-hua, LIU Jian-hua, YANG Ming-hui. Inner-force calculation of bridge pile foundation in high-steep rock slope under inclined loads[J]. *Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(11): 2352 - 2357.
- [5] 杨明辉, 刘广轩, 赵明华. 高陡横坡段桥梁双桩结构计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(8): 55 - 59.  
YANG Ming-hui, LIU Guang-xuan, ZHAO Ming-hua. Study on calculation method of the bridge double piles structure in high-steep transverse slope[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(8): 55 - 59.
- [6] 贺健军. 秦巴山区陡坡地段桥梁桩基横轴向荷载作用下的工作性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
HE Jian-jun. Analysis on the performance of pile foundation under the lateral loading steep-slope area of Qinba mountain region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [7] 赵明华, 尹平保, 张永杰, 等. 高陡斜坡段桩柱式桥墩基础设计计算方法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3): 106 - 111.

- ZHAO Ming-hua, YIN Ping-bao, ZHANG Yong-jie, et al. The design and calculation method of pile-column bridge pile foundation in high and steep slope[J]. **Engineering Mechanics**, 2013, 30(3): 106 - 111.
- [8] 张洪波. 秦巴山区陡坡桥梁桩基竖向承载特性现场试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- ZHANG Hong-bo. Field test research on the vertical load-bearing characteristics of bridge pile foundation in steep-slope area of Qinba mountain region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [9] 龚先兵, 杨明辉, 赵明华, 等. 山区高陡横坡段桥梁桩基承载机制模型试验[J]. **中国公路学报**, 2013, 26(2): 56 - 62.
- GONG Xian-bing, YANG Ming-hui, ZHAO Ming-hua, et al. Load-bearing mechanism model test for bridge pile foundation in high-steep transverse slope[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2013, 26(2): 56 - 62.
- [10] 尹平保, 赵明华, 杨超炜, 等. 复杂荷载下横坡段桥梁桩基承载特性试验研究[J]. **土木工程学报**, 2014, 47(5): 110 - 117.
- YIN Ping-bao, ZHAO Ming-hua, YANG Chao-wei, et al. Experimental study on bearing capacity of bridge piles in cross slopes under complex loads[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, 47(5): 110 - 117.
- [11] 张永杰, 李侑军, 赵明华, 等. 高陡斜坡作用下群桩基础设计计算方法[J]. **中国公路学报**, 2014, 27(10): 84 - 92.
- ZHANG Yong-jie, LI You-jun, ZHAO Ming-hua, et al. Design and calculation method of pile groups foundation in high-steep slope[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2014, 27(10): 84 - 92.
- [12] 郑刚, 李欣, 刘畅, 等. 考虑桩土相互作用的双排桩分析[J]. **建筑结构学报**, 2004, 25(1): 99 - 106.
- ZHENG Gang, LI Xin, LIU Chang, et al. Analysis of double-row piles in consideration of the pile-soil interaction[J]. **Journal of Building Structures**, 2004, 25(1): 99 - 106.
- [13] GEORGIADIS K, GEORGIADIS M. Development of  $p$ - $y$  curves for undrained response of piles near slopes[J]. **Computers and Geotechnics**, 2012, 40(3): 53 - 61.
- [14] GEORGIADIS K, GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C. Lateral bearing capacity of rigid piles near clay slopes[J]. **Soils and Foundations**, 2013, 53(1): 144 - 154.
- [15] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(4): 517 - 521.
- DAI Zi-hang. Study of distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on anti-slide piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 517 - 521.
- [16] 何颐华, 杨斌, 金宝森, 等. 双排护坡桩试验与计算的研究[J]. **建筑结构学报**, 1996, 17(2): 58 - 66.
- HE Yi-hua, YANG Bin, JIN Bao-sen, et al. A study on the test and calculation of double-row fender piles[J]. **Journal of Building Structures**, 1996, 17(2): 58 - 56.
- [17] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D63-2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- CCC Highway Consultants Co., Ltd. JTG D63-2007, Code for design of ground base and foundation of highway bridge and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [18] 袁伦一. 连续桥面简支梁桥墩台计算实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- YUAN Lun-yi. Calculation example of simple beam bridge piers and abutments with continuous deck[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [19] 戴自航, 徐祥. 边坡抗滑桩设计计算的三维有限元法[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(12): 2572 - 2578.
- DAI Zi-hang, XU Xiang. 3D finite element method for design computations of anti-slide piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(12): 2572 - 2578.