

基于土拱效应的耦合结构围桩间距分析*

常春荣¹, 刘伟宏²

(1.张家港市南城房地产有限公司,江苏 张家港 215600;
2.南通纺织职业技术学院 建筑工程学院,江苏 南通 226007)

【摘要】针对一种新型围桩-土耦合结构,从土拱效应出发,结合普氏及桩的绕流阻力理论进行结构内各相邻围桩桩间距分析,得出围桩间距的计算控制式,同时各围桩之间小土拱的存在,推导出结构的桩土耦合直径计算式,通过耦合直径与桩间距、土体参数、桩数的变化规律。研究表明,在黏性土介质为主的,中小型边坡工程,结构采用五或六边形布置,桩间距采用3~4倍围桩桩径是较为经济合理的,并能够实现最佳耦合效果,为耦合结构的工程应用奠定基础。

【关键词】土拱; 桩土; 围桩间距; 耦合直径

【中图分类号】TV223.2 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1673-1891(2014)01-0039-05

1 引言

抗滑桩作为一种常用抗滑支挡结构物,具有抗滑能力强、相对圬工量小、桩位灵活、施工方便和治理效果显著等优点,在滑坡防治工程中被广泛采用^[1],而伴随着抗滑加固机理研究的不断深入,近年来微型抗滑桩组合结构^[2-5]、捆绑式抗滑桩^[6]等新型抗滑结构在中小型滑坡治理中不断的应用,文献^[7]从土拱理论出发,提出围桩-土耦合式抗滑结构,并进行初步讨论,文献^[8]通过土拱室内试验研究黏性土中抗滑桩桩间距的合理范围,并建立围桩加圆形承台的微桩土耦合式抗滑桩模型试验,文献^[9]通过模型试验分析了单个耦合结构加固边坡的工作机理,文献^[10]基于刚度理论分析耦合结构的桩数及平面布置的合理性。基于上述研究成果,本文从正多边形平面布置形式出发,运用土拱理论分析围桩-土耦合抗滑结构内各围桩桩间距合理范围,进一步讨论结构内部参数的合理性,为后期耦合结构工程应用提供依据。

2 力学模型的建立

在传统的抗滑桩结构中,在滑坡推力的作用下,由于桩土两种介质的变形差,桩间能够形成土拱效应,滑坡推力通过土拱传递给桩,再由桩传给地基,桩间土不发生滑动,从而起到稳定和加固滑坡的作用。然而土拱效应理论就成为桩土耦合一个最重要的工作机理,为了最大限度的实现土拱效应,必须确定合理的桩间距。

针对围桩-土耦合结构,在滑坡推力作用下,也将产生一定的土拱效应,使得围桩结构内土体不流出,结构外土体不挤入,实现桩土共同作用。而土拱一般情况下为三维的,在倾斜的滑动面上,桩间

存在水平土拱和竖向土拱,赵明华从倾斜土拱受力出发,分别以水平土拱和竖向土拱建立力学平衡方程,得出二个方向的土拱控制的桩间距计算式,经过对比发现,桩间距主要以水平土拱得出的计算式来控制。因此本文主要通过建立桩间水平土拱的力学平衡,土拱的拱脚、拱顶上下边缘作为控制截面,根据土体的摩尔-库仑强度破坏准则和桩的绕流阻力来建立桩间距计算公式。

下面不妨以正六边形布置的围桩-土耦合结构为研究对象,圆形截面桩按等间距排列,桩顶采用砼连梁连接。如图1所示,设各围桩之间的间距为 S (即相邻围桩中心至中心之间的距离)。

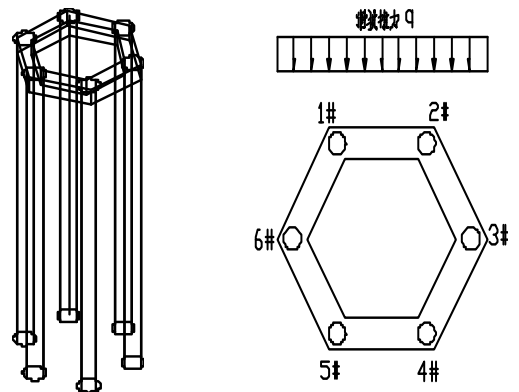


图1 围桩-土耦合结构

3 围桩间距分析

3.1 1#与2#围桩间距分析

3.1.1 基本假定

1#与2#桩间岩土体共同承受滑坡推力,能够形成土拱,只分析成层土中水平土拱问题,将土体视为各向同性材料,土质均匀,滑坡推力简化为沿拱跨方向均匀分布。

收稿日期 2013-11-14

*基金项目 国家自然科学基金资助项目,新型围桩-土耦合式抗滑桩作用机理与计算方法研究(项目编号 51068006)。

作者简介:常春荣(1981-),男,江苏张家港人,工程师,主要从事建筑施工及工程管理工作。

3.1.2 土拱的几何参数

1#、2#桩为圆形截面桩，土拱范围内的桩宽采用内接四边形宽度来处理^[11]，见图2所示，令土拱跨度为 l ，拱高为 f ，滑坡推力均布荷载为 q ，桩体本身作为拱支座，由结构力学可知，均布荷载作用下，能够形成拱形结构，且拱结构处于稳定而不发生破坏，一般情况下结构简化为三铰拱来进行处理。

3.1.3 受力分析

均布荷载作用下，三铰拱合理的拱轴线为二次抛物线，并且土拱圈上任意截面弯矩和剪力均为零，只受轴向力作用。建立如下平衡方程：

$$1\#, 2\# \text{ 支座反力 } V_1 = \frac{1}{2}ql \quad (1)$$

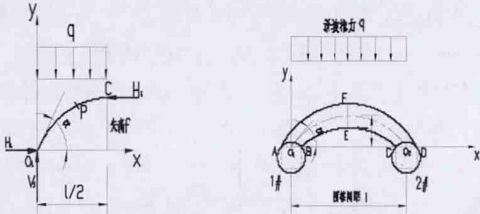


图2 土拱受力图

取三铰拱的半跨建立力矩平衡方程：

$$\Sigma M_c = 0, \quad V_1 \times \frac{1}{2}l - q \times \frac{1}{2}l \times \frac{1}{4}l - H_1 \times f = 0, \quad H_1 = \frac{ql^2}{8f} \quad (2)$$

$$\Sigma X = 0, \quad H_1 - H_c = 0, \quad H_1 = H_c = \frac{ql^2}{8f} \quad (3)$$

为求得合理拱轴线，则在任意点处的弯矩和剪力均为零，对任意点 $P(x,y)$ 求力矩，有

$$\Sigma M_p = 0, \quad V_1x - q \times \frac{1}{2}x^2 - H_1y = 0 \quad (4)$$

将式(2)、(3)代入式(4)，得抛物线方程：

$$\frac{1}{2}qlx - q \times \frac{1}{2}x^2 - \frac{ql^2}{8f}y = 0 \Rightarrow y = \frac{4(lx - x^2)}{l^2}f \quad (5)$$

3.1.4 静力平衡控制

在拱脚处：为了保证土拱在水平方向上的稳定性，由普氏理论^[12]，作用拱脚处的水平推力 H 应小于垂直反力 V 所产生的最大摩擦力。

$$H \leq \mu \cdot V \quad (6)$$

其中： μ -岩土体与桩体的摩擦系数($\mu = \tan \delta$)

δ -岩土体与桩侧之间的内摩擦角，通常取岩土体的等值内摩擦角 ϕ_m ，忽略土黏聚力 c 影响，

$$\phi_m = \arctan \frac{\sigma \tan \phi + c}{\sigma} = \arctan \frac{\sigma \tan \phi}{\sigma} = \phi$$

即 $\delta = \phi$ 代入式(6)得

$$\frac{ql^2}{8f} \leq \frac{1}{2}ql \tan \phi \quad \text{则} \quad f \geq \frac{l}{4 \tan \phi} \quad (7)$$

当极限状态时，

$$\text{矢跨比} \frac{f}{l} = \frac{1}{4 \tan \phi} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)得

$$\text{拱轴线方程} \quad y = \frac{(lx - x^2)}{l \tan \phi} \quad (9)$$

在跨中截面处：若桩间土拱不发生剪切破坏，则土体应满足摩尔-库仑强度破坏准则，分别对土拱的跨中截面上下点进行强度校核。其表达式如下：

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (10)$$

对于土拱跨中截面最上面点 F

$$\sigma_{3F} = q$$

$$\sigma_{1F} = \frac{H_c}{r} = \frac{ql^2/8f}{\sqrt{2}d/2} = \frac{\sqrt{2}ql^2}{8fd} \quad (11)$$

式(11)代入式(10)得

$$\frac{\sqrt{2}ql^2}{8fd} = q \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (12)$$

式(7)代入(12)得

$$\frac{\sqrt{2}ql^2}{8(\frac{l}{4 \tan \phi})d} = q \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (13)$$

化简得

$$l_1 = \frac{\sqrt{2}d \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2})}{\tan \phi} + \frac{2\sqrt{2}dc \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})}{q \tan \phi} \quad (14)$$

对于土拱顶最下面点 E

$$\sigma_{3E} = 0$$

$$\sigma_{1E} = \frac{H_c}{r} = \frac{ql^2/8f}{\sqrt{2}d/2} = \frac{\sqrt{2}ql^2}{8fd} \quad (15)$$

将式(15)代入式(10)得

$$\frac{\sqrt{2}ql^2}{8fd} = 0 + 2c \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})$$

$$\frac{\sqrt{2}ql^2}{8(\frac{l}{4 \tan \phi})d} = 0 + 2c \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (16)$$

$$\text{得} \quad l_2 = \frac{2\sqrt{2}dc \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})}{q \tan \phi}$$

对于拱脚处 o_1 点

$$\sigma_{1o_1} = \frac{H_1}{\sqrt{2}d/2} = \frac{ql^2/8f}{\sqrt{2}d/2} = \frac{ql^2}{4\sqrt{2}fd}$$

$$\sigma_{3o_1} = \frac{V_1}{\sqrt{2}d/2} = \frac{ql/2}{\sqrt{2}d/2} = \frac{ql}{\sqrt{2}d} \quad (17)$$

将式(17)代入式(10)得

$$\frac{ql^2}{4\sqrt{2}fd} = \frac{ql}{\sqrt{2}d} \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad \text{化}$$

$$l_3 = \frac{\sqrt{2}dc \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2})}{q[\tan \varphi - \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})]} \quad (18)$$

3.1.5 基于绕流阻力的桩间距分析

根据文献^[13-14]桩的绕流阻力计算公式,桩成排布置时,桩间距应小于下述公式中的临界桩间距。否则桩间土将会发生绕桩滑动,桩土也就不能保证形成一个耦合体。

$$l_4 = A * [1 + \frac{1}{2} \tan u \exp(\frac{\pi}{2} \tan \varphi)] + 2B \exp(u \tan \varphi) \sin u \quad (19)$$

其中:

A、B——分别为桩垂直于滑动方向的宽度和平行于滑动方向的高度

φ ——土体的内摩擦角

$$u = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$$

将上述式(14)、(16)、(18)、(19)联立,分别确定四个桩间距,并取其中最小值作为水平土拱形成的控制值。

3.2 2#与3#围桩间距

假定2#、3#围桩之间在滑坡推力作用下,能够形成如图3所示的土拱效应, α_2 与水平方向的夹角为 θ 值为 $\frac{2\varphi}{n}$,n为桩数,根据1#与2#围桩间距的推理,同样也可以得出两桩倾斜布置时桩间距的计算公式同(14)、(16)、(18)、(19)。

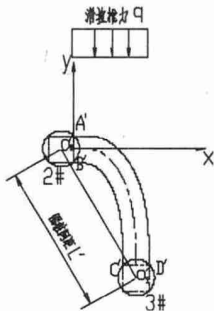


图3 围桩2#与3#土拱

利用对称性,各相邻围桩之间外荷载作用下,都能形成土拱效应,其桩间距均采用上述的1#与2#桩之间的桩间距计算公式来控制。耦合结构的土拱如图4所示:

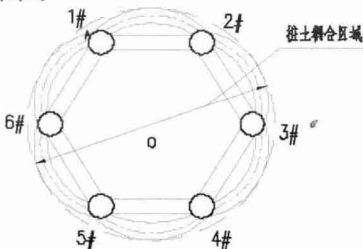


图4 桩土耦合结构土拱

综合上述分析,可知合理的围桩间距与岩土体参数、滑坡推力、桩径等有关在实际工程治理中,有效确定滑坡推力就显得尤为重要。

4 结构耦合影响直径确定

假设n根围桩按一定间距正多边形排列,在滑坡推力作用下,能够形成土拱效应,将所有围桩间形成的小土拱所包络的范围视作耦合结构的影响范围。为方便计算,取各小土拱的外切圆代替影响区域,并记小土拱外切圆的直径为 $D_{影响}$,如图5所示:

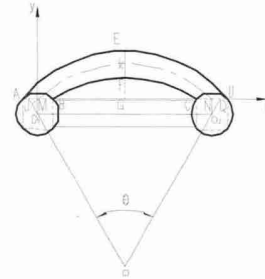


图5 两围桩间的土拱

由几何关系得

$$D_{影响} = \sqrt{\frac{4 \times n \times (S_{O_1O_2} + S_{O_1MNO_2} + S_{MKN})}{\pi}} + \frac{\sqrt{2}}{4} d \quad (20)$$

$$S_{O_1O_2} = \frac{l \times (\frac{l}{2} \tan(\frac{\theta}{2}))}{2} = \frac{l^2}{4 \tan \frac{\theta}{2}} \quad (21)$$

$$S_{O_1MNO_2} = \frac{\sqrt{2}}{4} d \times l - \frac{\sqrt{2}}{4} dl \quad (22)$$

$$S_{MKN} = \int_0^l \frac{l x - x^2}{l \tan \varphi} dx = \frac{l^2}{6 \tan \varphi} \quad (23)$$

将式(2-35)(2-36)(2-37)代入(2-34)得

$$D_{影响} = \sqrt{\frac{4 \times n \times (\frac{l^2}{4 \tan \frac{\theta}{2}} + \frac{\sqrt{2}}{4} dl + \frac{l^2}{6 \tan \varphi})}{\pi}} + \frac{\sqrt{2}}{4} d \quad (24)$$

4.1 $D_{影响}$ 与桩间距关系

假定围桩的桩径为d,土体的内摩擦角为 20° ,围桩数为4、5、6、7、8变化,围桩间距采用为2d、3d、4d、5d、6d、7d不断变化,影响直径与围桩间距关系曲线,如图6所示。取桩数为6根为例,耦合直径从6.71d增加到19.1d,可见结构的耦合影响直径随着桩间距的增加而不断增加,为了更好体现桩土耦合的发挥程度,现分析耦合区域与结构本身的外接圆D所围面积之比与桩间距的关系,如图7所示。同等围桩间距的情况下,面积比随着桩数的增加而不断减少,当围桩间距为3倍桩径,桩数为5、6根时所

获得的面积比最大,其值分别对应为1.56,1.55,均高于桩数为4、7、8对应的面积比值,当围桩间距为4倍桩径时,桩数为5时,所获得的面积比最大,其值为1.61。可见当围桩间距小于4倍桩径时,5边形布置所获得的面积比最大,即耦合效果发挥程度最高。当围桩间距大于5倍,围桩数为4根所组成的结构获得面积比最大,因此根据面积比的大小并结合桩间距的变化来确定围桩数的合理性是十分有必要的,在密间距布置桩的情况下,选用桩数为5、6,围桩间距为3d~4d,组成围桩结构是比较经济的。

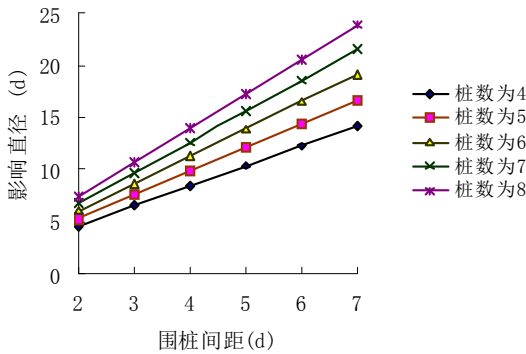


图6 影响直径与围桩间距的关系

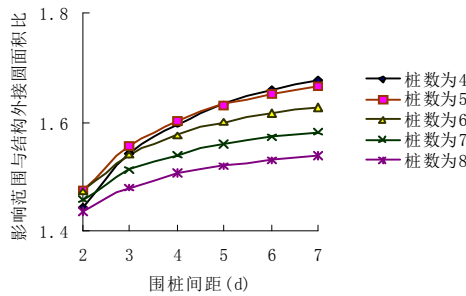


图7 耦合范围与结构外接圆面积比

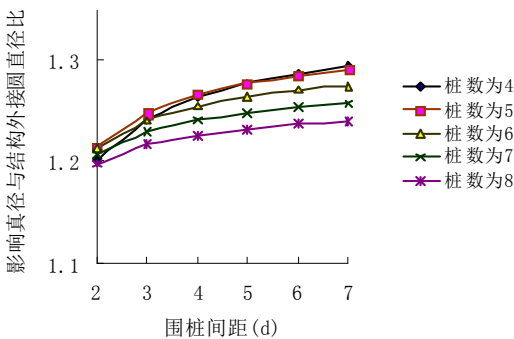


图8 耦合直径与结构外接圆直径比

从图8可知,结构的耦合直径和外接圆直径比,当桩数为5,随桩间距在3d~4d时,对应的耦合影响直径为1.247D~1.265D,当桩数为6,随桩间距在3d~4d时,对应的耦合影响直径为1.243D~1.254D,桩数一定的情况下,耦合影响直径随围桩间距的增大而不断增大,其直径比基本在1.2~1.3之间变化。即

$$D_{影响} = (1.2 \sim 1.3)D \tag{25}$$

4.2 $D_{影响}$ 与土体内摩擦角的关系

假定围桩的桩径为d,桩间距采用3d,围桩数不断变化,土体的内摩擦角为10、15、20、25、30、35、40,不断变化时, $D_{影响}$ 的变化关系如图9所示,围桩间距一定的情况下,结构的影响直径随土体内摩擦角的增大而不断减小,可见桩间土体强度越小、桩土相对位移越明显,若土拱能够保持稳定,所获得的土拱矢跨比就越大,当耦合结构中桩数多,获得的影响直径也就越大。

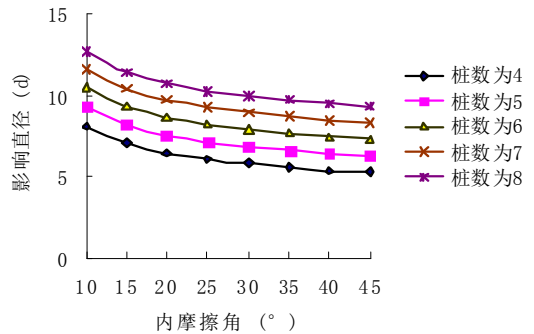


图9 影响直径与围桩间距的关系

4.3 $D_{影响}$ 与桩数的关系

取桩径为d,土体内摩擦角为20,外接圆直径取7d、8d、9d、10d、11d、12d、13d、14d,关系曲线如图10所示,结构耦合直径不断增大,同等外接圆直径的情况下,桩数少,获得耦合结构的影响直径大。

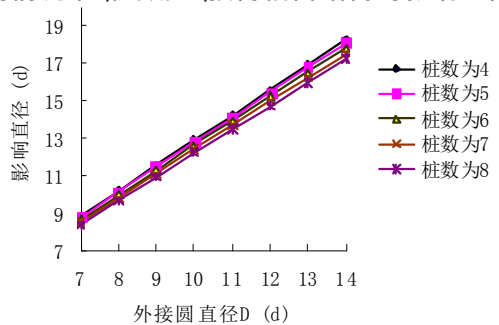


图10 影响直径与外接圆直径的关系

综合上述结构抗弯刚度与耦合影响直径的分析,选用5根或6根小桩,按正多边形排列,桩间距取3d(4d)与桩间距控制式中的最小值作为围桩间距,桩顶采用连梁,形成的平面布置较为合理。

5 结论

在黏性土介质中,桩间距控制在 $L1/L2/LE/L4$ 之间的最小值,是能够发挥其桩-土效应。

围桩结构,采用五、六边形布置,桩间距为3~4倍的围桩桩径是经济合理的。

基于土拱效应,耦合结构是能够充分发挥桩间岩土体的强度的,真正实现桩土共同作用。

注释及参考文献：

- [1]李海光.新型支挡结构设计与工程实例[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2]周德培.微型桩组合抗滑结构及其设计理论[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1353-1361.
- [3]肖维民.微型桩结构体系抗滑机理研究[D].西南交通大学土木工程学院,2008.
- [4]鲜飞.微型桩组合结构模型试验研究[D].西南交通大学土木工程学院,2010.
- [5]孙宏伟.刚性帽梁微型桩组合结构内力分析[D].西南交通大学土木工程学院,2010.
- [6]王凯,郑颖人,王其洪,等.捆绑式抗滑桩优越性初步研究[J].地下空间与工程报,2008,4(3):533-539.
- [7]李培植.微桩-土耦合式抗滑桩计算方法研究[D].华东交通大学土木建筑学院,2007.
- [8]徐典.耦合式抗滑桩模型试验及设计方法研究[D].华东交通大学土木建筑学院,2009.
- [9]刘伟宏,郑明新.单个围桩-土耦合抗滑结构受力试验分析[J].中外公路,2012,32(4):17-20.
- [10]常春荣,刘伟宏.围桩-土耦合结构平面布置的合理性分析[J].西昌学院学报(自然科学版),2013,4(1):20-23.
- [11]贾海莉,王成华,李江洪.基于土拱效应的抗滑桩与护壁桩的桩间距分析[J].工程地质学报,2004,12(1):98-103.
- [12]冯君,吕和林,王成华.普氏理论在确定抗滑桩间距中的应用[J].中国铁道科学,2003,24(6):79-81.
- [13]沈珠江.散粒体对柱体的绕流压力及其在计算桩对岸坡稳定的遮帘作用中的应用[R].南京水利科学研究所研究报告,1961.
- [14]沈珠江.桩的抗滑阻力和抗滑桩的极限设计[J].岩土工程学报,1992,14(1):51-56.

Analysis on the Coupling Structure around the Pile Spacing Based on the Soil Arch Effect

CHANG Chun-rong¹, LIU Wei-hong²

(1.Nan Cheng Real Estate Corporation of Zhang Jiagang, Zhangjiagang, Jiangsu 215600; 2.Institute of Architecture Engineering Nantong Textile Vocational Technology College, Nantong, Jiangsu 226007)

Abstract: By according to a new type of pile-soil around coupling structure and starting from the soil arching effect, and analyzing the around the pile spacing of pile structure integrating the theory of M.M. promojiyfakonov and flow around resistance within the adjacent, this paper concluded the calculation control type of the pile spacing, and provided a small soil arching between all around the piles were existing, and deduced the coupling calculation formula of structure for the diameter of piles and soil by coupling pile diameter and pile spacing, soil parameters, the change rule of the pile number. Research showed that there is more economic and reasonable in small and medium-sized slope engineering of clayey soil medium-based, using five or six hexagonal structure arrangement, the pile diameter of the pile spacing is 3-4 times, that it can achieve the best coupling effect, and ILay the foundation for the coupling structure of the engineering application.

Key words: soil arch; pile-soil; around the pile spacing; coupling diameter