

# 围桩-土耦合结构平面布置的合理性分析\*

常春荣<sup>1</sup>, 刘伟宏<sup>2\*\*</sup>

(1.张家港市南城房地产有限公司, 江苏 张家港 215600; 2.南通纺织学院 建筑工程系, 江苏 南通 226007)

**【摘要】**针对一种新型围桩-土耦合式抗滑结构, 基于桩土耦合的假定, 给出了耦合刚度的计算式, 并分析耦合刚度与桩数、围桩间距、桩径等变化关系, 分析得出刚度随桩间距、桩径、桩数增大而增大, 为进一步讨论布置合理性, 引入耦合结构的等效半径、耦合效能利用程度来进行分析, 结果表明: 采用选用桩数为6, 围桩间距为3~5倍桩径组成的平面型式较为合理。其研究成果为建立这种新型抗滑结构的设计理论提供依据。

**【关键词】**桩土耦合; 刚度; 等效; 面积比

**【中图分类号】**TU473.1 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1673-1891(2013)01-0055-04

## 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, 其设计理论和计算方法取得了很大进展<sup>[1]</sup>, 伴随着抗滑加固机理研究的不断深入, 近年来出现了微型抗滑桩组合结构<sup>[2-6]</sup>、捆绑式抗滑桩<sup>[7]</sup>等新型抗滑结构, 在中小型滑坡治理中得到有效的补充; 郑明新、李培植等<sup>[8]</sup>运用土拱理论, 首次提出围桩-土耦合式抗滑结构, 即采用数根中小直径的圆形桩, 按一定方式成多边形布置排列, 顶部设置连梁围桩-土耦合结构来说, 根据滑坡体推力及滑坡岩土体参数, 确定结构的布置形式, 按合理的锚固比, 埋置于坡体的最下一级坡中, 成为埋入式抗滑结构。依靠结构强大的抗弯刚度和桩土复合体效应, 通过调动结构周围一部分岩土体共同抵抗滑坡推力, 从而达到充分发挥岩土体自身强度的目的。郑明新、徐典<sup>[9]</sup>等通过土拱室内试验研究黏性土中围桩间距的合理范围, 并建立围桩加圆形承台的微桩土耦合式抗滑桩模型试验, 通过改变滑坡体参数来讨论各围桩后侧的土压力分布规律, 得出一些有益的结论。基于上述研究成果, 本文从围桩结构的整体抗弯刚度出发, 讨论其耦合结构的平面型式合理组合, 进一步研究这种抗滑结构加固滑坡的工作机制, 从而建立围桩-土耦合式抗滑结构的设计理论奠定基础。

## 2 抗弯刚度的确定

下面通过分析围桩不同的平面布置, 讨论围桩所构成结构的抗弯刚度, 得到一组较为合理的围桩组合。先假定在一定围桩外接圆直径D情况下, 各围桩分别成内接正n边形(n=4、5、6、7、8)布置, 各

围桩桩顶采用刚性联系梁连接, 如图1所示:

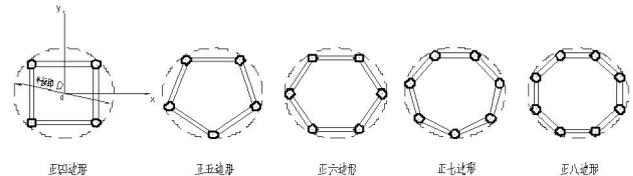


图1 不同围桩平面布置

### 2.1 围桩结构抗弯惯性矩计算

下面分别计算在不同围桩数情况下, 所形成的围桩结构的抗弯惯性矩。

#### (1) 正四边形布置

当结构中围桩数量为4, 呈正四边形布置, 桩顶联接连接, 形成围桩组合结构。只考虑结构中各围桩对x轴、y轴的惯性矩, 忽略桩顶联接的惯性矩, 由结构的对称性可知, 结构对x轴、y轴的惯性矩是相等

$$I_{x4} = I_{y4} = \frac{\pi d^4}{64} \times 4 + A y^2 \times 4 = \frac{4\pi d^4}{64} + A \times (R \cos \frac{\pi}{4})^2 \times 4 = \frac{4\pi d^4}{64} + 2AR^2 \quad (2-1)$$

#### (2) 正五边形布置

$$I_{x5} = I_{y5} = \frac{5\pi d^4}{64} + 2.5AR^2 \quad (2-2)$$

#### (3) 正六边形布置

$$I_{x6} = I_{y6} = \frac{5\pi d^4}{64} + 3AR^2 \quad (2-3)$$

#### (4) 正n边形布置

$$I_{xn} = I_{yn} = \frac{n\pi d^4}{64} + \frac{n}{2} A \left( \frac{D-d}{2} \right)^2 \quad (2-4)$$

式中:

D—围桩结构外接圆直径

d—各围桩的直径

收稿日期: 2013-02-15

\*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, 工程师, 研究方向: 土木与建筑工程的建造与工程管理。\*\*为通讯作者刘伟宏。

R—耦合结构单元中心至各围桩中心的距离, 其值为(D-d)/2

A—单个围桩的面积, 其值为  $\frac{\pi d^2}{4}$

n—围桩的数量

$I_x, I_y$ —正 n 边形布置的耦合结构分别对 x 轴、y 轴的惯性矩

y—各围桩的中心至各耦合结构的形心 x 轴的距离

从上述的分析, 得出围桩成正多边形布置时, 所形成的围桩结构的抗弯惯性矩与桩数成正比关系。

### 2.2 围桩-耦合结构抗弯刚度计算

将上述不同的围桩所形成的结构埋设于岩土体中, 并使围桩与围桩内的土体形成一个耦合体共同承受外荷载, 那么就存在桩土共同作用下的耦合结构抗弯刚度, 现采取以下两种方法进行计算。

#### 2.2.1 桩土分离算法

将围桩-土耦合结构抗弯刚度视为桩的抗弯刚度与土的抗弯刚度叠加, 耦合结构的范围视为各围桩的外接圆直径为 D 所在区域, 表达式如下:

$$K_{耦合1} = E_p I_p + E_s I_s = E_p I_p + E_s \times \left( \frac{\pi D^4}{64} - I_p \right) \quad (2-5)$$

式中:

$E_p$ —桩的弹性模量

$E_s$ —土的弹性模量

$I_p$ —耦合结构中的所有围桩结构对 x 轴(y 轴)的惯性矩

$I_s$ —耦合结构中土体对 x 轴(y 轴)的惯性矩

$K_{耦合1}$ —桩土分离算法时的耦合结构整体抗弯刚度

令土桩模量比

$$\alpha_{sp} = \frac{E_s}{E_p} \quad (2-6)$$

将(2-6)式代入(2-5)式

$$(1 - \alpha_{sp})E_p \times \left( \frac{n\pi d^4}{64} + \frac{nA(D-d)^2}{2} \right) + \alpha_{sp}E_p \times \frac{\pi D^4}{64} \quad (2-7)$$

#### 2.2.2 桩土模量面积加权平均算法

假设围桩-土耦合结构在一定围桩间距的条件下, 桩土能够形成耦合体, 桩土耦合体的模量采用围桩和土体两者所占的面积加权平均得出, 其表达式:

$$E_{耦合} = \frac{E_p A_p + E_s A_s}{A_p + A_s} = \frac{E_p \frac{n\pi d^2}{4} + \alpha_{sp} E_p \left( \frac{\pi D_{耦合}^2}{4} - \frac{n\pi d^2}{4} \right)}{\frac{\pi D_{耦合}^2}{4}} \quad (2-8)$$

$$K_{耦合2} = E_{耦合} \times \frac{\pi D_{耦合}^4}{64} \quad (2-9)$$

式中:

$\alpha_{sp}$ —土体与桩的弹性模量比

$A_p$ —桩土耦合体中所有桩的总面积

$A_s$ —桩土耦合体中土体的面积

$E_{耦合}$ —桩土耦合体弹性模量

$D_{耦合}$ —桩土耦合体耦合直径

$K_{耦合2}$ —桩土模量面积加权算法时的耦合结构整体抗弯刚度

#### 2.2.3 两种算法的比较

现以正六边形围桩布置为例, 围桩桩径 d 为 0.4m, 钢筋砼桩的弹性模量为 20000MPa, 土体的弹性模量为 20MPa, 下面计算不同耦合直径的情况下, 进行两种算法所得的抗弯刚度的大小与各级围桩桩间距 2d、3d、4d、5d、6d、7d 的变化关系。如图 2 所示:

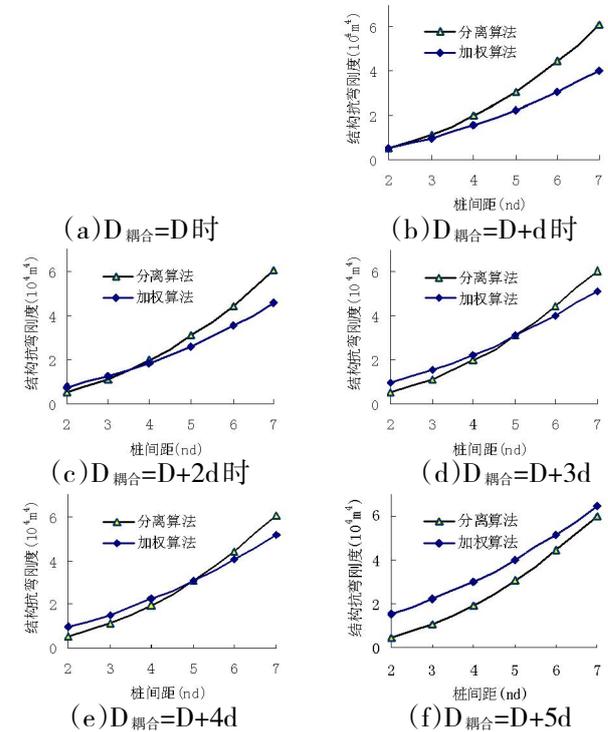


图 2 两种算法的抗弯刚度

从图 2-a 中, 当耦合直径等于围桩结构外接圆直径时, 可以看出当围桩间距为 2~7 倍围桩桩径变化时, 加权平均算法求得的抗弯刚度值从  $3.78 \times 10^3 m^4$  增大至  $3.51 \times 10^4 m^4$ , 桩土分离算法求得的抗弯刚度  $4.99 \times 10^3 m^4$  增大至  $6.05 \times 10^4 m^4$ , 随着围桩间距的增大, 模量加权算法求得的抗弯刚度均小于桩土分离算法的值。

从 2-b 图中, 当耦合直径等于围桩结构外接圆直径加上 1 倍围桩直径时, 可以看出当围桩间距为 2~7 倍围桩桩径变化时, 加权平均算法求得的抗弯刚度值从  $5.46 \times 10^3 m^4$  增大至  $4.02 \times 10^4 m^4$ , 桩土分离

算法求得的抗弯刚度  $4.99 \times 10^3 \text{m}^4$  增大至  $6.05 \times 10^4 \text{m}^4$ , 在围桩间距为  $2.293d$  时, 两种算法达到相同的抗弯刚度值为  $6.645 \times 10^3 \text{m}^4$ , 并以该桩间距作为分界, 当围桩间距小于  $2.293d$  时, 桩土耦合算法求得的抗弯刚度大于桩土分离算法求得的值, 当围桩间距大于  $2.293d$  时, 桩土分离算法求得的抗弯刚度均大于模量加权算法求得的值。同理从图 2-c、图 2-d、图 2-e、耦合直径分别等于围桩结构外接圆直径加上 2 倍、3 倍、4 倍围桩直径时, 均出现桩间距的分界点, 分别求得两种算法下相同抗弯刚度值相等时对应的围桩间距为  $3.635d$ 、 $4.952d$ 、 $6.351d$ , 其抗弯刚度值为  $1.615 \times 10^4 \text{m}^4$ ,  $3.007 \times 10^4 \text{m}^4$ ,  $4.973 \times 10^4 \text{m}^4$ , 可见随着围桩间距的增加, 耦合直径的增大, 耦合体的抗弯刚度不断增大。

从 2-f 图中, 当耦合直径增大为外接圆直径加上 5 倍围桩直径时, 加权平均算法求得的抗弯刚度值从  $1.53 \times 10^4 \text{m}^4$  增大至  $6.4 \times 10^4 \text{m}^4$ , 桩土分离算法求得的抗弯刚度  $4.99 \times 10^3 \text{m}^4$  增大至  $6.05 \times 10^4 \text{m}^4$ , 从数值上看, 加权平均算法求得的抗弯刚度均大于桩土分离算法求得的刚度。

基于上述的分析, 各级耦合影响直径情况下, 存在一个临界的围桩间距, 使得两种算法较为一致的结果, 那么在围桩-土耦合结构其与桩内土体既有耦合性又存在着一定分离性, 为了充分考虑结构的安全储备, 必须进行确定合理的抗弯刚度计算模式。

下面讨论上述图式中的一种, 如图 2-c, 耦合结构影响范围为外接圆直径加 2 倍围桩桩径的情况。即:

$$D_{\text{耦合}} = D + 2d \quad (2-10)$$

则耦合结构抗弯刚度如下:

$$K_{\text{耦合}} = \begin{cases} E_P I_P + E_S \times \left( \frac{\pi D^4}{64} - I_P \right) & S \leq 3.67d \\ E_{\text{耦合}} \times \frac{\pi D_{\text{耦合}}^4}{64} & S \geq 3.67d \end{cases} \quad (2-11)$$

### 3 抗弯刚度因素分析

#### 3.1 抗弯刚度与桩数关系

当围桩桩间土为黏性土时  $E_P=16000\text{MPa}$ ,  $E_S=16\text{MPa}$ , 则  $\alpha_{sp}=1/1000$ , 围桩桩径为  $0.4\text{m}$ , 分别取围桩桩间距为  $2d$  和  $4d$  考虑围桩数  $n=4, 5, 6, 7, 8$  变化, 耦合结构的抗弯刚度, 如图 2-3a 所示: 抗弯刚度值从  $0.17 \times 10^3 \text{m}^4$  增大至  $1.12 \times 10^4 \text{m}^4$ , 如图 3b 所示:

可见耦合结构的抗弯刚度随桩数的增加而增加。

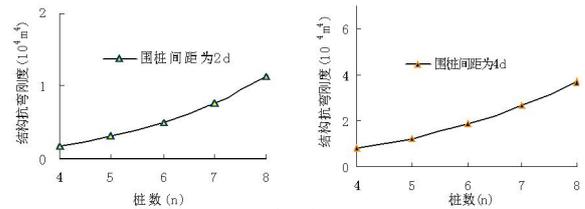


图 3 耦合结构刚度与桩数关系

#### 3.2 抗弯刚度与桩径关系

为了研究方便, 先假定认为围桩成六边形排列, 桩径为  $0.4\text{m}$ , 成  $3d$  的桩间距布置, 根据式 (2-11) 可算得外接圆直径为  $2.8\text{m}$ , 若不同围桩数量的耦合结构都在外接圆直径  $D=2.8\text{m}$  的情况下, 同理通过式 (2-11) 反算出不同桩数时对应的围桩间距  $S$ , 将围桩桩径为  $0.2\text{m}$ 、 $0.25\text{m}$ 、 $0.3\text{m}$ 、 $0.35\text{m}$ 、 $0.4\text{m}$ 、 $0.45\text{m}$ 、 $0.5\text{m}$ 、 $0.55\text{m}$ 、 $0.6\text{m}$ 、 $0.65\text{m}$ 、 $0.7\text{m}$  时变化, 算得耦合结构的抗弯刚度, 如图 4 所示: 同等外接圆直径  $D$  的情况下, 各耦合结构的抗弯刚度随桩径的增加而不断增加。

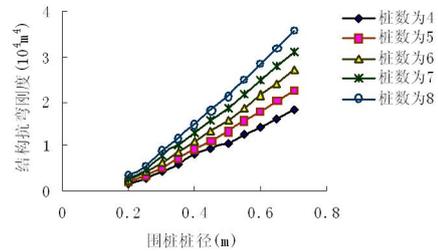


图 4 耦合结构刚度与桩径的关系

#### 3.3 抗弯刚度和围桩桩距

由上述分析可知, 耦合结构抗弯刚度随桩数和桩间距的增大而呈增大趋势, 桩数增加, 围桩间距不变, 必然会引起结构的耦合体面积增大, 从而引起结构刚度增大。当桩数一定, 外接圆直径一定, 桩数增加, 也会导致刚度增大, 现引入耦合结构等效直径, 认为结构的平均抗弯刚度相当于一定直径  $D_1$  的钢筋混凝土桩所产生的刚度。如图 5 所示:

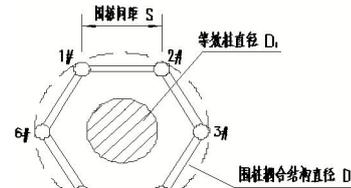


图 5 围桩耦合结构等效桩

当围桩桩径  $d$  为  $0.4\text{m}$ , 在相同的桩数时, 如图 6、7 所示, 当桩数为 6 时, 围桩间距从  $2d$  变化至  $7d$  时, 等效直径  $D_1$  值从  $5.63d$  变化至  $17.04d$ , 即随着围桩间距的增大而增大, 对应的等效直径所组成的等效圆与各围桩外接圆面积比从  $0.56$  变化至  $0.19$ , 随桩间距的增大而不断减小, 而面积比在一定程度反映了结构刚度的综合利用效率, 围桩数的增加, 桩

间距增大,虽然能获得较大的等效直径,但刚度的利用程度不断下降。在相同的桩间距的情况下,桩数少,虽等效直径小,但所得到的面积比大,综合两个方面的因素,选用桩数为6,桩间距为3~5倍桩径组成的结构刚度较为合理。

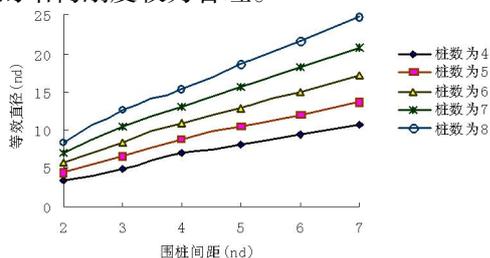


图6 等效直径与围桩间距关系

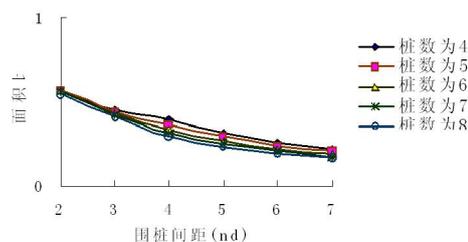


图7 面积比与围桩间距关系

#### 4 结论

通过桩土耦合结构,基于结构刚度的比较,结合施工经济合理等因素,采用桩数为6,桩间距为3~5倍桩径组成的耦合结构平面布置较为合理,即能够极大的发挥桩土的耦合效能。

#### 注释及参考文献:

- [1]李海光,新型支挡结构设计工程实例[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2]丁光文,王新.微型桩复合结构在滑坡整治中的应用[J].岩土工程技术 2004,18(1):47-50.
- [3]肖维民.微型桩结构体系抗滑机理研究[D].成都:西南交通大学,2008.
- [4]鲜飞.微型桩组合结构模型试验研究[D].成都:西南交通大学,2010.
- [5]孙宏伟.刚性帽梁微型桩组合结构内力分析[D].成都:西南交通大学,2010.
- [6]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.
- [7]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):33-539.
- [8]李培植.微桩-土耦合式抗滑桩计算方法研究[D].南昌:华东交通大学,2007.
- [9]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.

### Analysis on Rational Arrangement of Surround-Pile-Soil Coupling Structure

CHANG Chun-rong<sup>1</sup>, LIU Wei-hong<sup>2</sup>

(1.Nancheng Real Estate Corporation of Zhang Jiagang, Zhangjiagang, Jiangsu 215600;

2.Construction Engineering Department, Nantong Textile Vocational Technology College, Nantong, Jiangsu 226007)

**Abstract:** According to a new type of surround-pile-soil coupling anti-slide structure, based on the assumption of coupling of piles and soil, the coupling stiffness calculation formula is given, and the coupling stiffness change rule among pile number, pile spacing, pile diameter is analyzed. The result shows that stiffness increases with the increasing of pile spacing, pile diameter, pile number. To have a further discussion on the rationality of the arrangement, it is analyzed by using the equivalent radius and utilization degree of the coupling structure. The results show that using six piles, enclosing for 3 to 5 times the pile diameter, the pile spacing of plane model is more reasonable. The results of their research will provide a basis for the theory of the establishment of this new type of anti-slide structures.

**Key words:** Soil-pile coupled; Stiffness; Equivalent; Area ratio