

文章编号: 1008-2786-(2015)1-72-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000010

抗滑桩与桩顶弧形连系梁协同作用机理及计算分析

张志伟 邓荣贵 钟志彬

(西南交通大学 土木工程学院 四川 成都 610031.)

摘 要: 桩顶弧形连系梁通过约束桩顶位移,能够优化桩身的受力状态,且能提高抗滑桩的整体稳定性。与直线型连系梁相比,弧形连系梁的受力性能与拱形结构相似,以受压为主,能够充分发挥混凝土较高的抗压能力。通过抗滑桩及连系梁可将部分滑坡推力传递至滑体两侧稳定岩土体,降低了对滑床岩土体强度及抗滑桩桩身强度的要求。根据抗滑桩与连系梁之间的协同作用及变形协调,利用力法原理,建立柔度方程,求解桩顶与连系梁之间的约束内力,进而计算连系梁及抗滑桩的内力和位移。通过算例表明,弧形连系梁较直线型连系梁内力分布均匀,与单桩及桩顶受直线型连系梁约束的排桩相比,弧形连系梁对抗滑桩的约束效果明显,而且约束效果随弧形连系梁矢跨比的增加而增强。

关键词: 弧形排桩; 弧形连系梁; 协同作用; 内力分布; 位移约束

中图分类号: U417.1 ;TU 753.3

文献标志码: A

滑坡灾害可造成巨大的生命财产和经济损失^[1],抗滑桩可通过平衡滑坡推力,使边坡处于稳定状态,而被广泛应用^[2]。在抗滑桩加固机理及计算理论研究方面,Harry G. Poulos^[3]根据满足安全系数所需抗滑力,及单桩的承载能力,选择桩型、桩数,并在合适位置布桩。S. Hassiotis 等^[4]根据圆弧滑动模式,分析了抗滑桩对滑坡的加固效果。Michael Long^[5]分析了支护体系刚度对支护结构及地表位移的影响。Mohamed Ashour 和 Hamed Ardalan^[6]基于桩土相互作用,对桩间距对桩身抗滑能力的影响进行了研究。R. Kourkoulis 等^[7]根据桩身受荷段长度、及其与锚固段的长度比及桩间距等影响因素,分析了桩身内力及位移。

为优化单桩的受力性能,提高整体性,曾庆义等^[8]提出了桩顶圈梁可约束和协调各桩的受力和变形,使之成为一个整体。在理论计算方面,高印立等^[9]采用弹性地基梁模型,提出了直线型圈梁-排桩协同作用的简化分析方法,假定圈梁与桩顶之间

的约束内力为水平集中力,分析计算了圈梁及桩身的内力和位移。Giovanni B. Fenelli 和 Luca Paganò^[10]进一步假定圈梁与下部抗滑结构之间的约束内力为集中力及弯矩,分析了圈梁对下部结构位移的约束作用。

以上分析表明,桩顶圈梁具有协调作用,可约束桩身位移,使桩的受力状态更加合理。但直线型连系梁会产生较大的弯矩,为降低直线型连系梁的弯矩,基于拱的受力特点,可将抗滑桩呈弧形布置,桩顶设置弧形连系梁,连系梁两端设置高强度抗力桩或利用滑体两侧稳定岩土体作为拱脚。在理论计算方面,张志伟等^[11]将桩顶弧形连系梁简化为两铰拱,假定桩顶与连系梁之间的约束内力为水平集中力,分析计算了弧形连系梁的内力及抗滑桩的内力及位移,与直线型连系梁相比,弧形连系梁弯矩减小,受压为主,且能够有效约束桩身位移。

为与工程实际相符,本文将桩顶弧形连系梁的计算模型简化为无铰拱,假定桩顶与连系梁之间的

收稿日期(Received date): 2014-04-15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(No. 41272321); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120184110023)。[This research is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 41272321) and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20120184110023).]

作者简介(Biography): 张志伟(1979-),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事滑坡治理。[Zhang Zhiwei, male, born in 1979, Changchun of Jilin province, PhD Candidate, mainly engaged in landslide protection.] E-mail: zwzhangswjtu@163.com

约束条件为固结。利用抗滑桩与连系梁之间的变形协调,分析抗滑桩与弧形连系梁之间的协同作用,计算弧形连系梁内力随拱高的变化趋势,并与直线型连系梁进行对比;同时分析控制点处桩身内力及位移,并与单桩及桩顶设置直线型连系梁的排桩进行对比。

1 抗滑结构理论分析

1.1 抗滑结构构造

桩顶设置弧形连系梁的抗滑结构具体构造示意图如图1。图1中抗滑桩呈弧形布置,桩顶设置弧形连系梁,二者形成拱形桩梁抗滑结构。

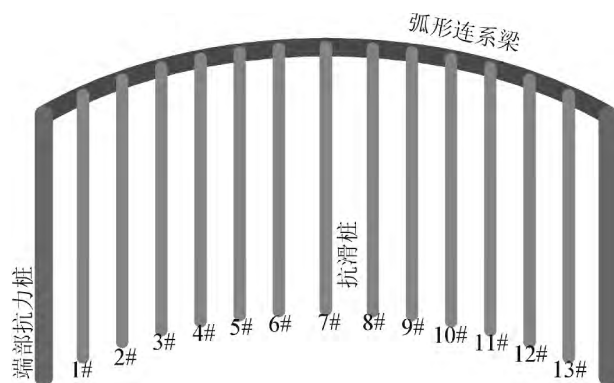


图1 弧形排桩-弧形连系梁抗滑结构构造图

Fig.1 Diagram of spatial anti-slide structure of arc row piles with arc coupling beam on pile top

为约束连系梁两端位移,可提高作为拱脚的两端抗力桩的强度,以提供水平抗力,使连系梁发挥拱的作用;如应用于两侧地质条件较好的“深槽型”滑坡治理,可直接利用两侧岩体作为拱脚,抗滑结构的优越性可进一步充分体现。假定桩顶与连系梁固结条件下,分析连系梁与桩顶之间的约束内力,各自的内力分布形式分别见图2及图3。

为分析桩顶与连系梁之间的约束内力,建立局部坐标系 $px'y'z'$, 原点 p 为弧形连系梁的任一点 p , 在 i 桩桩顶处以 i 代表 p , x' 轴沿弧形连系梁法线方向,以指向弧线内侧为正, y' 轴沿切线方向, z' 轴以竖直向上为正。忽略桩身轴力,连系梁与桩顶之间的5个约束力可统一表示为 X_i^k , 其中 i 及 k 具体说明如下:

i —桩顶与连系梁之间的内力位置或编号,其中 i 包括 B 端; k —桩顶与连系梁之间的内力类型编

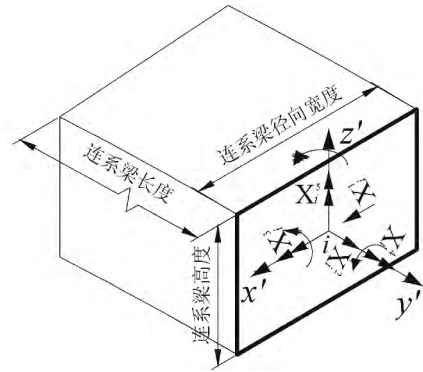


图2 i 桩桩顶处连系梁受力模型图

Fig.2 Graph of force model of coupling beam at the top of pile i

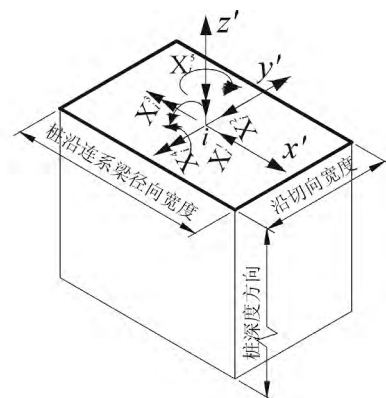


图3 i 桩桩顶受力模型图

Fig.3 Graph of force model at the top of pile i

号,分为5种类型($k=1,2,3,4,5$),具体对应关系如下:1—沿 x' 轴正方向的集中力;2—沿 y' 轴正方向的集中力;3—指向 x' 轴正方向的矩;4—指向 y' 轴正方向的矩;5—指向 z' 轴正方向的矩。

1.2 分析思路

以连系梁与桩顶之间的约束内力为分析对象,在单一单位内力作用下,推导弧形连系梁的内力计算公式,计算柔度系数,建立柔度矩阵;同时,在桩顶未知内力作用下,对抗滑桩建立含桩顶未知内力的位移表达式;然后根据桩顶与连系梁之间的位移协调条件,建立典型方程并求解内力;最后根据内力计算连系梁和抗滑桩的内力及位移,具体计算流程见图4。

1.3 连系梁内力分析

将弧形连系梁的计算模型简化为拱轴在水平面内,拱轴作用多余约束的无铰拱,连系梁与抗滑桩桩顶之间的约束作用为集中力、弯矩和扭矩。计算模型如图5所示。

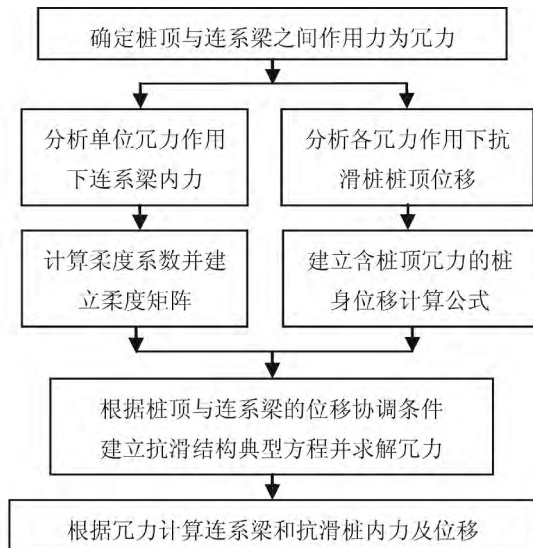


图4 弧形排桩-弧形连系梁结构分析思路图

Fig.4 Analysis flow chart of arc row piles with arc coupling beam on pile top

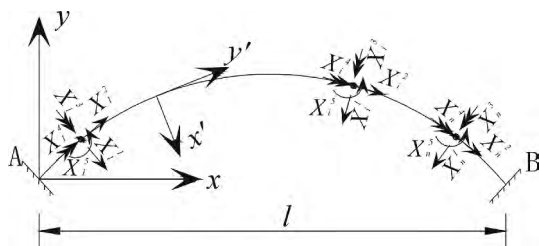


图5 连系梁计算模型平面图

Fig.5 Graph of calculation model of coupling beam

为便于分析连系梁内力,建立整体坐标系 $Axyz$, 原点为弧形连系梁左端 A , x 轴为弧形连系梁左右端连线,以指向右端为正,整体坐标系中的 z 轴与局部坐标系中的 z' 轴相互平行,以竖直向上为正,取如图6所示的以 B 端的集中力、弯矩及扭矩为多余约束的基本体系。

为计算柔度系数,首先分析 $\bar{X}_i^k = 1$ 所产生的连系梁任一点 p 的内力 \bar{X}_{pi}^{jk} , \bar{X}_{pi}^{jk} 空间分布如图7所示。

k 及 i 在前文已做说明,此处不再赘述 j 及 p

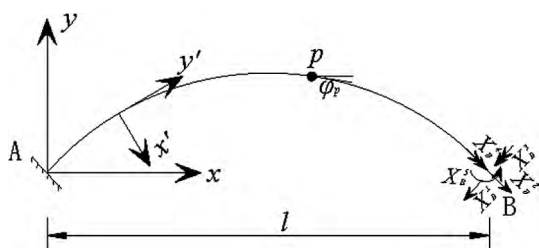
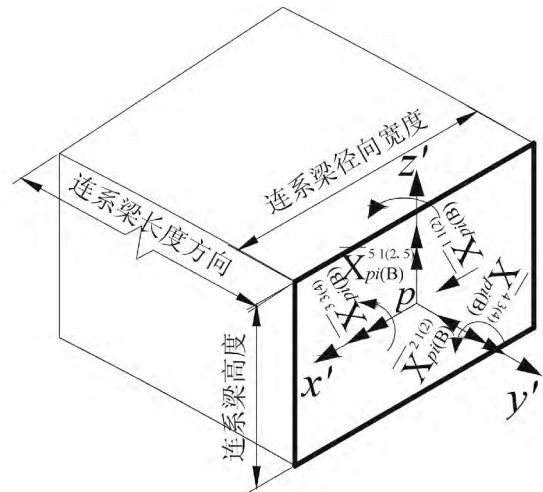


图6 无铰拱结构基本体系

Fig.6 Basic system of hinge less arch

图7 连系梁任一点 p 内力图Fig.7 Graph of internal force of any point p of coupling beam

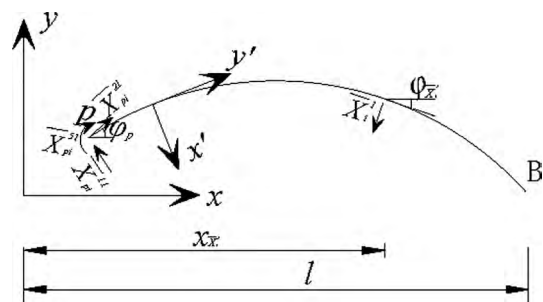
的具体说明如下:

p —单一冗力作用下,需要计算内力的任一点,其中 p 点包括左端部 A 。 j —在 i 处冗力 k 作用时,在 p 点引起的内力 j ,分为5种类型($j=1, 2, 3, 4, 5$)。具体对应关系如下:1—点 p 处沿 x' 轴方向的剪力,以绕隔离体顺时针转动为正;2—点 p 处沿 y' 轴方向的轴力,以压力为正;3—点 p 处绕 x' 轴的弯矩,以弧形连系梁下侧受拉为正;4—点 p 处绕 y' 轴的扭矩,以指向离开截面的扭矩为正;5—点 p 处绕 z' 轴的弯矩,以使弧形连系梁内侧受拉为正。

以下分别分析 \bar{X}_i^k 单独作用时,弧形连系梁的内力 \bar{X}_{pi}^{jk} ,并推导具体内力计算公式。

1. 当 $\bar{X}_i^1 = 1$ 作用于弧形连系梁时,任一点 p 的内力 \bar{X}_{pi}^{j1} 计算简图见图8,产生三种内力,即 \bar{X}_{pi}^{11} 、 \bar{X}_{pi}^{21} 及 \bar{X}_{pi}^{51} 。

如图8所示 $0 < x < x_{\bar{X}_i^1}$ 区段, \bar{X}_{pi}^{11} 和 \bar{X}_{pi}^{21} 计算值与 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^1}$ 有关,根据 p 点所在位置不同,分为 $\varphi_p -$

图8 连系梁任一点 p \bar{X}_{pi}^{j1} 计算简图Fig.8 \bar{X}_{pi}^{j1} calculation diagram of any point of coupling beam

$\varphi_{\bar{X}_i^1} \leq 90^\circ$ 和 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^1} > 90^\circ$ 两种情况,但计算表达式可统一用式(1)表示。

$$\bar{X}_{pi}^{11} = \cos(\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^1}); \bar{X}_{pi}^{21} = \sin(\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^1}) \quad (1)$$

计算 \bar{X}_{pi}^{51} 时,分别计算 \bar{X}_i^1 沿 x 轴的分力 \bar{X}_{ix}^1 与沿 y 轴的分力 \bar{X}_{iy}^1 对 $0 < x < x_{\bar{X}_i^1}$ 区段任一点 p 的弯矩。根据点 p 的 y 坐标 y_p 与 \bar{X}_i^1 作用点的 y 坐标 $y_{\bar{X}_i^1}$,可分为 $y_p \leq y_{\bar{X}_i^1}$ 和 $y_p > y_{\bar{X}_i^1}$ 两种情况。根据前文对 \bar{X}_{pi}^{51} 正负号的规定原则, \bar{X}_{pi}^{51} 计算表达式可统一用式(2)表示。

$$\bar{X}_{pi}^{51} = \bar{X}_{ix}^1 (y_p - y_{\bar{X}_i^1}) + \bar{X}_{iy}^1 (x_p - x_{\bar{X}_i^1}) \quad (2)$$

式中 $\bar{X}_{ix}^1 = -\bar{X}_i^1 g \sin \varphi_{\bar{X}_i^1}$, $\bar{X}_{iy}^1 = \bar{X}_i^1 g \cos \varphi_{\bar{X}_i^1}$, 其中 $\varphi_{\bar{X}_i^1}$, \bar{X}_i^1 为作用点处的切线方位角。在 $x_{\bar{X}_i^1} < x < l$ 区段, \bar{X}_{pi}^{51} 均为 0。

2. 当 $\bar{X}_i^2 = 1$ 作用于弧形连系梁时,任一点 p 的内力 \bar{X}_{pi}^{12} 计算简图见图 9,产生三种内力,即 \bar{X}_{pi}^{12} 、 \bar{X}_{pi}^{22} 及 \bar{X}_{pi}^{52} 。

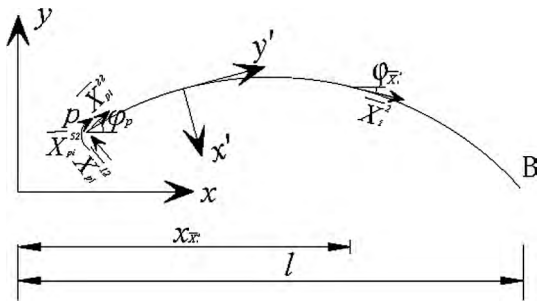


图 9 连系梁任一点 p \bar{X}_{pi}^{12} 计算简图

Fig. 9 \bar{X}_{pi}^{12} calculation diagram of any point of coupling beam

如图 9 所示 $0 < x < x_{\bar{X}_i^2}$ 区段任一点 p 的内力 \bar{X}_{pi}^{12} 和 \bar{X}_{pi}^{22} 与 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^2}$ 有关。根据 p 点所在位置不同,可分为 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^2} \leq 90^\circ$ 和 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^2} > 90^\circ$ 两种情况,计算表达式可统一用式(3)表示。

$$\bar{X}_{pi}^{12} = \sin(\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^2}); \bar{X}_{pi}^{22} = -\cos(\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^2}) \quad (3)$$

计算 \bar{X}_{pi}^{52} 时,分别计算 \bar{X}_i^2 沿 x 轴的分力 \bar{X}_{ix}^2 与沿 y 轴的分力 \bar{X}_{iy}^2 对 $0 < x < x_{\bar{X}_i^2}$ 区段任一点 p 的弯矩。根据点 p 的 y 坐标 y_p 与 \bar{X}_i^2 作用点的 y 坐标 $y_{\bar{X}_i^2}$,可分为 $y_p \leq y_{\bar{X}_i^2}$ 和 $y_p > y_{\bar{X}_i^2}$ 两种情况。根据前文对 \bar{X}_{pi}^{52} 正负号的规定原则, \bar{X}_{pi}^{52} 计算表达式可统一由式(4)表示。

$$\bar{X}_{pi}^{52} = \bar{X}_{ix}^2 (y_p - y_{\bar{X}_i^2}) + \bar{X}_{iy}^2 (x_p - x_{\bar{X}_i^2}) \quad (4)$$

式中 $\bar{X}_{ix}^2 = \bar{X}_i^2 g \cos \varphi_{\bar{X}_i^2}$, $\bar{X}_{iy}^2 = -\bar{X}_i^2 g \sin \varphi_{\bar{X}_i^2}$, 其中 $\varphi_{\bar{X}_i^2}$ 为 \bar{X}_i^2 作用点处的切线方位角。在 $x_{\bar{X}_i^2} < x < l$ 区段, \bar{X}_{pi}^{52} 均为 0。

3. 当 $\bar{X}_i^3 = 1$ 作用于弧形连系梁时,任一点 p 的内力 \bar{X}_{pi}^{33} 计算简图见图 10,产生两种内力,即 \bar{X}_{pi}^{33} 和 \bar{X}_{pi}^{43} 。

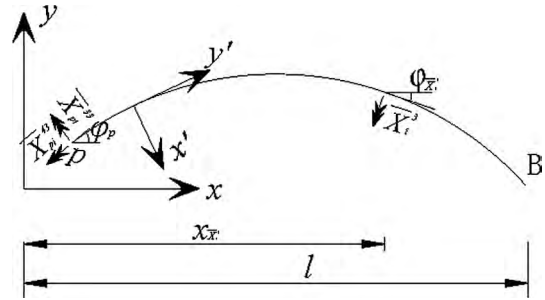


图 10 连系梁任一点 p \bar{X}_{pi}^{33} 计算简图

Fig. 10 \bar{X}_{pi}^{33} calculation diagram of any point of coupling beam

如图 10 所示 $0 < x < x_{\bar{X}_i^3}$ 区段任一点 p 的内力 \bar{X}_{pi}^{33} 和 \bar{X}_{pi}^{43} 与 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^3}$ 有关。根据 p 点所在位置不同,可分为 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^3} \leq 90^\circ$ 和 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^3} > 90^\circ$ 两种情况,计算表达式可统一用式(5)表示。在 $x_{\bar{X}_i^3} < x < l$ 区段, \bar{X}_{pi}^{33} 均为 0。

$$\bar{X}_{pi}^{33} = \cos(\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^3}); \bar{X}_{pi}^{43} = -\sin(\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^3}) \quad (5)$$

4. 当 \bar{X}_i^4 作用于弧形连系梁时,任一点 p 的内力 \bar{X}_{pi}^{44} 计算简图见图 11,产生两种内力,即 \bar{X}_{pi}^{34} 和 \bar{X}_{pi}^{44} 。

如图 11 所示 $0 < x < x_{\bar{X}_i^4}$ 区段任一点 p 的内力 \bar{X}_{pi}^{34} 和 \bar{X}_{pi}^{44} 与 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^4}$ 有关。根据 p 点所在位置不同,可分为 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^4} \leq 90^\circ$ 和 $\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^4} > 90^\circ$ 两种情况,计算表达式可统一用式(6)表示。在 $x_{\bar{X}_i^4} < x < l$ 区段, \bar{X}_{pi}^{44} 均为 0。

$$\bar{X}_{pi}^{34} = \sin(\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^4}); \bar{X}_{pi}^{44} = \cos(\varphi_p - \varphi_{\bar{X}_i^4}) \quad (6)$$

5. 当 $\bar{X}_i^5 = 1$ 作用于弧形连系梁时,任一点 p 的内力 \bar{X}_{pi}^{55} 计算简图见图 12,只产生一种内力 \bar{X}_{pi}^{55} 。

如图 12 所示 $0 < x < x_{\bar{X}_i^5}$ 区段任一点 p 的内力

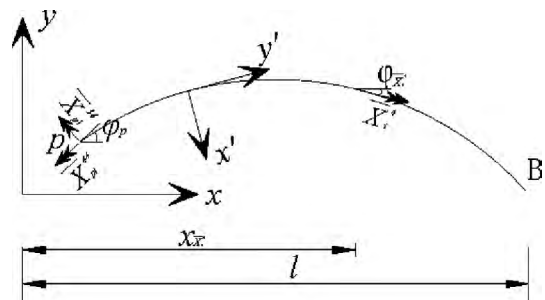
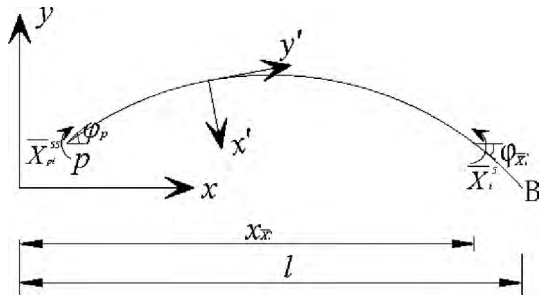


图 11 连系梁任一点 p \bar{X}_{pi}^{44} 计算简图

Fig. 11 \bar{X}_{pi}^{44} calculation diagram of any point of coupling beam

图 12 连系梁任一点 p \bar{X}_{pi}^{55} 计算简图Fig. 12 \bar{X}_{pi}^{55} calculation diagram of any point of coupling beam

\bar{X}_{pi}^{55} 计算表达式如式 (7) 所示, $x_{\bar{X}_i^k} < x < l$ 区段, \bar{X}_{pi}^{55} 为 0

$$\bar{X}_{pi}^{55} = 1 \quad (7)$$

计算弧形连系梁内力时, 根据 p 点所在位置与作用 \bar{X}_i^k 位置的几何关系, 分别应用以上公式可计算连系梁任一点 p 的内力 \bar{X}_{pi}^{jk} 。

1.4 抗滑桩变形位移分析

抗滑桩计算模型为图 13 所示的弹性地基梁, 图中 x 轴为桩顶沿连系梁法向位移方向, y 轴为桩顶沿连系梁切向位移方向。抗滑桩在滑动面上、下均按弹性地基梁计算, 计算模型为“ $m-K$ ”法。

根据桩底的约束条件, 利用弹性桩的计算方法, 可得桩顶位移及转角的计算表达式。以桩底为自由端为例, 桩顶位移及转角的计算公式如式 (8) 所示。

$$\left. \begin{aligned} v_i^{1(2)} &= AX_i^{1(2)} + BX_i^{4(3)} + C\Delta q_{x'} \\ \phi_i^{3(4)} &= DX_i^{1(2)} + EX_i^{4(3)} + F\Delta q_{y'} \\ \phi_i^5 &= \frac{X_i^5 g h_1}{GI_t} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

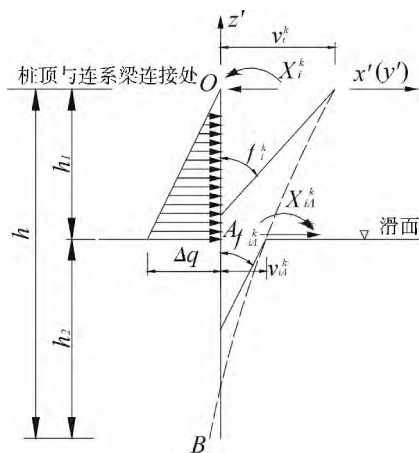


图 13 抗滑桩计算模型

Fig. 13 Calculation model of anti-slide pile

式 (8) 中系数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 及 F 具体表示如下

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{\alpha^3 EI^g} \frac{B_8 D_7 - D_8 B_7}{A_8 B_7 - A_7 B_8}; \\ B &= \frac{1}{\alpha^2 EI^g} \frac{B_8 C_7 - C_8 B_7}{A_8 B_7 - A_7 B_8}; \\ C &= \frac{b_{y(x)}}{\alpha^5 EI h_1^g} \frac{B_8 F_7 - F_8 B_7}{A_8 B_7 - A_7 B_8}; \\ D &= \frac{1}{\alpha^2 EI^g} \frac{A_7 D_8 - A_8 D_7}{A_8 B_7 - A_7 B_8}; \\ E &= \frac{1}{\alpha EI^g} \frac{A_7 C_8 - A_8 C_7}{A_8 B_7 - A_7 B_8}; \\ F &= \frac{b_{y(x)}}{\alpha^4 EI h_1^g} \frac{A_7 F_8 - F_7 A_8}{A_8 B_7 - A_7 B_8}; \end{aligned}$$

式中 $v_i^{1(2)}$ 、 $\phi_i^{3(4)}$ 及 ϕ_i^5 分别表示与桩顶冗力 X_i^k 所对应的桩顶水平位移、转角及扭转角 Δq 为在滑面处按三角形分布的滑坡推力强度 h_1 为抗滑桩受荷段长度, GI_t 为桩的抗扭刚度, A_i 、 B_i 、 D_i 、 F_i 为“ m ”法影响函数值和“ K ”法影响函数值的组合系数。

1.5 抗滑结构柔度方程

利用连系梁与桩顶连接处的位移协调条件, 可建立式 (9) 所示的抗滑结构柔度方程

$$\delta X = v \quad (9)$$

其中 δ 为式 (10) 所示的柔度系数矩阵, X 为弧形连系梁与桩顶之间的冗力 p 为与 X 所对应的位移

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_{BB} & L & \delta_{Bi} & L & \delta_{Bn} \\ M & & M & & M \\ \delta_{iB} & L & \delta_{ii} & L & \delta_{in} \\ M & & M & & M \\ \delta_{nB} & L & \delta_{ni} & L & \delta_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 δ 为分块矩阵, 各子块均为 5 阶方阵, 以 m 、 n 表示约束 i 的任意两个, 则子块可分为 δ_{mm} 和 δ_{nn} 两种类型, 且 $\delta_{mn} = \delta_{nm}$ 。 δ_{mm} 和 δ_{nn} 子块中的元素可分为 δ_{mm}^{11} 、 δ_{mm}^{22} 、 δ_{mm}^{33} 、 δ_{mm}^{44} 、 δ_{mm}^{55} 、 δ_{mm}^{12} 、 δ_{mm}^{15} 、 δ_{mm}^{25} 、 δ_{mm}^{34} 、 δ_{mm}^{11} 、 δ_{mm}^{22} 、 δ_{mm}^{33} 、 δ_{mm}^{44} 、 δ_{mm}^{55} 、 δ_{mm}^{12} 、 δ_{mm}^{15} 、 δ_{mm}^{25} 、 δ_{mm}^{34} 几种类型, 各元素计算公式详见附录, 各子块中其余元素均为 0。

冗力 X 为式 (11) 所示的分块矩阵

$$X = [X_B^k \quad X_i^k \quad X_n^k]^T \quad (11)$$

冗力矩阵 X 各子块元素可用式 (12) 表示

$$X_i^k = [X_i^1 \quad X_i^2 \quad X_i^3 \quad X_i^4 \quad X_i^5]^T \quad (12)$$

位移矩阵 v 为式 (13) 所示的分块矩阵

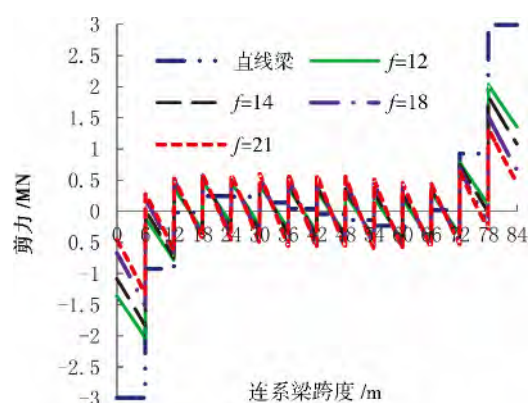
$$v = [v_B^k \quad v_i^k \quad v_n^k]^T \quad (13)$$

位移矩阵 v 各子块元素可用式 (14) 表示

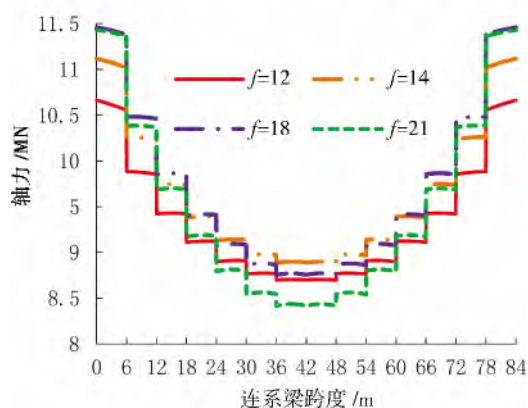
$$v_i^k = [v_i^1 \quad v_i^2 \quad \phi_i^3 \quad \phi_i^4 \quad \phi_i^5]^T \quad (14)$$

2 算例分析与讨论

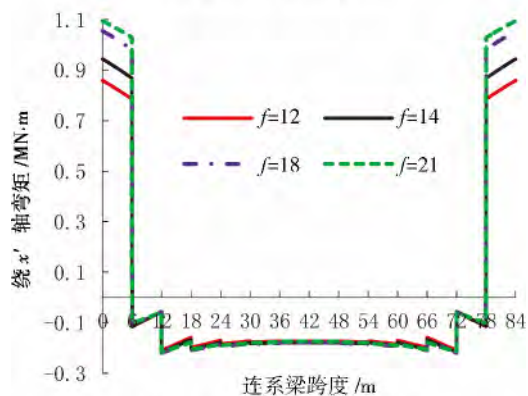
某滑坡滑动面以上为硬塑性砂粘土,地基系数的比例系数 $m = 4 \text{ MN/m}^4$,滑动面以下为炭质页岩,地基系数 $K = 300 \text{ MN/m}^3$ 。抗滑桩按图1所示呈弧形布置,具体按抛物线 $y = \frac{fx(84-x)}{1764}$ 排列,桩长24 m,其中受荷段 $h_1 = 16 \text{ m}$,锚固段 $h_2 = 8 \text{ m}$,桩间距沿



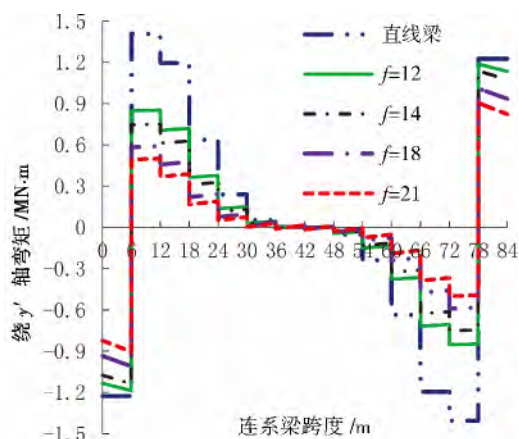
(a) 连系梁 X_1^1 (剪力) 图



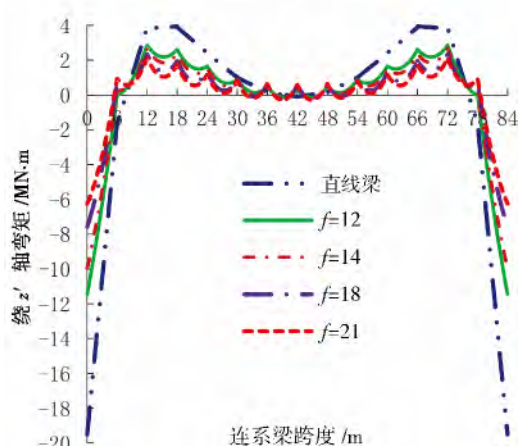
(b) 连系梁 X_2^2 (轴力) 图



(c) 连系梁 X_3^3 (绕 x' 轴弯矩) 图



(d) 连系梁 X_4^4 (绕 y' 轴弯矩) 图



(e) 连系梁 X_5^5 (绕 z' 轴弯矩) 图

图14 连系梁内力图

Fig. 14 Internal force diagram of coupling beam

跨度方向为6 m,桩顶连系梁跨度 $l = 14 \times 6 \text{ m}$,滑坡推力按三角形分布,在滑面处的强度 $\Delta q = 800 \text{ kPa}$ 。桩截面尺寸 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,长边与 x' 轴平行,桩身各面所受滑坡推力为沿弧形系梁法向及切向的分量。桩顶连系梁宽3 m高1.5 m,桩与桩顶连系梁的弹性模量均为 $E = 26 \text{ GPa}$,桩底边界条件按自由端考虑。

2.1 连系梁内力分布特征

编制计算程序,利用本文计算方法,分别计算矢高 f 为12、14、18及21 m桩顶连系梁的内力 X_p^j ($j = 1, 2, 3, 4, 5$),即分别表示任一点 p 沿 x' 轴方向的剪力、沿 y' 轴方向的轴力、绕 x' 轴的弯矩、绕 y' 轴的扭矩、绕 z' 轴的弯矩。并与直线型连系梁进行对比,矢高对连系梁内力分布趋势影响如图14所示。

由图14(a)可知,在端部附近,直线连系梁剪力较弧形连系梁大,在中部区间则相反,随矢高增加,剪力分布趋于均匀;由图14(b)可知,矢高较小时,

随矢高增加轴力增加,但矢高 $f > 14$ m后,随矢高增加,轴力减小,且跨中部分减小幅度较大;从图 14(c)可知,随矢高增加,连系梁绕 x' 轴弯矩增加,且在端部附近增加幅度较大;从图 14(d)可知,直线连系梁绕 y' 轴扭矩数值较弧形连系梁大,随矢高增加,扭矩数值整体呈减小趋势;由图 14(e)可知,直线连系梁绕 z' 轴弯矩较弧形连系梁大,在两端附近愈加明显,随矢高的增加,弯矩数值减小,在端部附近减小明显,整体趋于均匀分布。

为精确分析图 14 中连系梁内力随矢高的变化趋势,取连系梁各内力的最大值与最小值作为分析对象,进行详细分析,各内力的最大值及最小值见表 1。

表 1 连系梁特征点内力

Table 1 Internal forces of characteristic point of coupling beam

内力类型		直线型	$f=12\text{ m}$	$f=14\text{ m}$	$f=18\text{ m}$	$f=21\text{ m}$
Type of internal forces		Straight				
X_p^1	A 端	-2.992	-1.357	-1.082	-0.669	-0.458
/MN	$x=36\text{ m}$	0.044	0.371	0.434	0.538	0.597
X_p^2	A 端	0	10.662	11.118	11.459	11.428
/MN	$x=42\text{ m}$	0	8.699	8.890	8.756	8.416
X_p^3	A 端	0	0.859	0.944	1.054	1.094
/MN · m	$x=12\text{ m}$	0	-0.209	-0.216	-0.218	-0.215
X_p^4	A 端	-1.226	-1.135	-1.076	-0.935	-0.824
/MN · m	$x=6\text{ m}$	1.407	0.847	0.745	0.583	0.493
X_p^5	A 端	-19.486	-11.442	-9.957	-7.568	-6.233
/MN · m	$x=12\text{ m}$	3.825	2.829	2.636	2.311	2.115

如表 1 所示,沿 x' 轴方向的剪力 X_p^1 在 A 端最小,在 $x=36$ m 处最大,随矢高增加,最大值与最小值均增加,但差值减小明显,利于 X_p^1 均匀分布;沿 y' 轴方向的轴力 X_p^2 在 A 端最大,在 $x=42$ m 处最小,随矢高增加,二者均呈先增大后减小趋势,且二者差值增加,导致 X_p^2 不均匀分布;绕 x' 轴的弯矩 X_p^3 在 A 端最大,在 $x=12$ m 处最小,随矢高增加,最大值持续增大,最小值先减小后增大,二者差值增加,导致 X_p^3 不均匀分布;绕 y' 轴的扭矩 X_p^4 在 A 端最小,在 $x=12$ m 处最大,直线型连系梁最大值与最小值差值最大,随矢高增加,最大值减小,最小值增加,二者差值减小,利于 X_p^4 均匀分布;绕 z' 轴的弯矩 X_p^5 在 A 端最小,在 $x=12$ m 处最大,直线型连系梁最大值与最小值差值最大,随矢高增加,最大值减小,最小值增

加,二者差值减小,利于 X_p^5 均匀分布。

2.2 抗滑桩内力及位移分布特征

根据图 14 所示的连系梁内力变化趋势,内力在 A 端部最大,在 1#桩桩顶处突变最大,因此,将端部 A 抗力桩及 1#桩取为控制桩,分析桩顶沉力随矢高的变化趋势,各沉力值随矢高的变化见表 2。

表 2 控制桩桩顶沉力

Table 2 Redundant forces on pile top of controlled pile

内力类型		直线型	$f=12\text{ m}$	$f=14\text{ m}$	$f=18\text{ m}$	$f=21\text{ m}$
Type of internal forces		Straight				
X_i^1	A 端	2.992	1.357	1.082	0.669	0.458
/MN	$x=6\text{ m}$	-2.069	-1.919	-1.861	-1.726	-1.617
X_i^2	A 端	0	-10.662	-11.118	-11.459	-11.428
/MN	$x=6\text{ m}$	0	-0.670	-0.754	-0.895	-0.978
X_i^3	A 端	0	0.859	0.944	1.054	1.094
/MN · m	$x=6\text{ m}$	0	0.899	0.981	1.088	1.130
X_i^4	A 端	1.226	1.135	1.076	0.935	0.824
/MN · m	$x=6\text{ m}$	-2.634	-2.034	-1.884	-1.595	-1.398
X_i^5	A 端	-19.486	-11.442	-9.957	-7.568	-6.233
/MN · m	$x=6\text{ m}$	0.095	0.062	0.056	0.046	0.040

如表 2 所示,随连系梁矢高增加, X_A^1 及 X_A^1 数值均减小,且二者差值减小; X_A^2 数值先增大后减小, X_A^2 数值增加,但幅度较小; X_A^3 及 X_A^3 略有增加; X_A^4 及 X_A^4 数值减小,且二者差值减小; X_A^5 数值呈大幅度减小, X_A^5 略有减小,二者差值减小明显。

综合分析连系梁内力、端部 A 抗力桩及 1#桩桩顶沉力,可知最优矢高利于连系梁内力分布,且可减小桩顶控制型沉力,有利于抗滑结构整体内力分布。

因算例中 1#桩桩顶处沉力较大,故此,以 1#桩为例,计算分析桩身在控制方向的内力及位移,即沿 x' 轴方向的剪力、绕 y' 轴的弯矩及沿 x' 轴方向的位移,并与单桩及受直线型连系梁约束的排桩进行对比,结果见图 15。

由图 15(a)可知,在桩顶连系梁约束下,桩身沿 x' 轴方向剪力随矢高增加而减小,但矢高增加对剪力变化影响并不明显;由图 15(b)在连系梁约束下,桩顶在绕 y' 轴方向产生反向弯矩,桩身弯矩最大值随矢高增加而减小,在受荷段,均大于单桩桩身弯矩,在锚固段则相反;由图 15(c)可知,连系梁能够有效约束桩顶在 x' 轴方向的位移,且随矢高增加,约束效果明显增强。

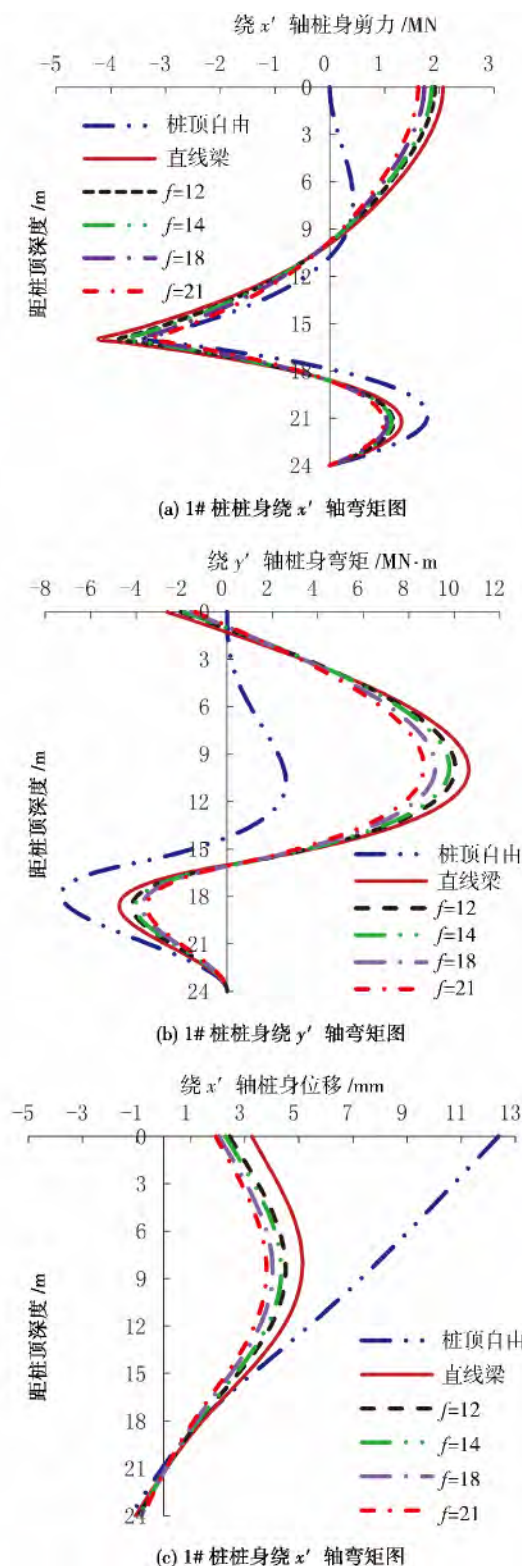


图 15 1#桩桩身内力位移图

Fig. 15 Internal force and displacement diagram of 1# pile body

3 结论

1. 考虑抗滑桩与桩顶弧形连系梁的协同作用,

推导了连系梁的内力计算公式,通过算例,分析弧形连系梁的内力分布规律,并与直线型连系梁进行比较,验证了其内力分布的合理性。

2. 矢高对弧形连系梁内力分布形式影响效果明显,尤其对绕 z 轴弯矩及轴力的影响,通过分析轴力随矢高的变化趋势,当 $f/l = 1/6$ 时,内力整体分布较为合理,即 $f = 14$ m 为最优矢高。

3. 弧形连系梁能够有效约束桩身位移,同时可改变抗滑桩的受力状态,使其内力分布更加均匀合理。

4. 尽管文中通过具体算例对理论计算公式进行了验证,但是其在实际工程中的实用性还有待进一步的研究和检验。

附录:

$$\begin{aligned}\delta_{mm(n)}^{11} &= \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{51} \bar{X}_{pm(n)}^{51} ds}{EI_z} + \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{21} \bar{X}_{pm(n)}^{21} ds}{EA} \\ &\quad + \sum \int \frac{k \bar{X}_{pm}^{11} \bar{X}_{pm(n)}^{11} ds}{GA} \\ \delta_{mm(n)}^{22} &= \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{52} \bar{X}_{pm(n)}^{52} ds}{EI_z} + \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{22} \bar{X}_{pm(n)}^{22} ds}{EA} \\ &\quad + \sum \int \frac{k \bar{X}_{pm}^{12} \bar{X}_{pm(n)}^{12} ds}{GA} \\ \delta_{mm(n)}^{33} &= \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{33} \bar{X}_{pm(n)}^{33} ds}{EI_{x'}} + \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{43} \bar{X}_{pm(n)}^{43} ds}{GI_{y'}} \\ \delta_{mm(n)}^{44} &= \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{34} \bar{X}_{pm(n)}^{34} ds}{EI_{x'}} + \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{44} \bar{X}_{pm(n)}^{44} ds}{GI_{y'}} \\ \delta_{mm(n)}^{55} &= \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{55} \bar{X}_{pm(n)}^{55} ds}{EI_z} \\ \delta_{mm(n)}^{12} &= \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{51} \bar{X}_{pm(n)}^{52} ds}{EI_z} + \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{21} \bar{X}_{pm(n)}^{22} ds}{EA} \\ &\quad + \sum \int \frac{k \bar{X}_{pm}^{11} \bar{X}_{pm(n)}^{12} ds}{GA} \\ \delta_{mm(n)}^{15} &= \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{51} \bar{X}_{pm(n)}^{55} ds}{EI_z}; \\ \delta_{mm(n)}^{25} &= \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{52} \bar{X}_{pm(n)}^{55} ds}{EI_z} \\ \delta_{mm(n)}^{34} &= \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{33} \bar{X}_{pm(n)}^{34} ds}{EI_{x'}} + \sum \int \frac{\bar{X}_{pm}^{43} \bar{X}_{pm(n)}^{44} ds}{GI_{y'}}\end{aligned}$$

参考文献(References)

- [1] Wang Gongxian. Key technique in landslide control and its handling measures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005 24 (21): 20 - 29 [王恭先. 滑坡防治中的关键技术及其处理方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005 24 (21): 20 - 29]
- [2] He Jianqing, Zhang Jiansheng, Mei Songhua. Inquiring into some questions in anti-slide pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

- and Engineering ,1999 ,18(5) : 600 – 602 [贺建清 ,张家生 ,梅松华. 弹性抗滑桩设计中几个问题的探讨 [J]. 岩石力学与工程学报 ,1999 ,18(5) : 600 – 602]
- [3] Poulos H. G. ,Design of reinforcing piles to increase slope stability [J]. Canadian Geotechnical Journal ,1995 ,32(5) : 808 – 818
- [4] Hassiotis S J Chameau M. Gunaratne. Design method for stabilization of slopes with piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ,1997 ,123(4) : 314 – 323
- [5] Long M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ,2001 ,127(3) : 203 – 224
- [6] Ashour M ,H Ardalan. Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction[J]. Computers and Geotechnics ,2012 ,39: 85 – 97
- [7] Kourkoulis R. ,et al. Slope stabilizing piles and pile-groups: parametric study and design insights [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ,2011 ,137(7) : 663 – 677
- [8] Zeng Qingyi ,Liu Mingcheng. Mechanism and calculating analysis for ring beam of soldier piles [J]. Rock and Soil Mechanics ,1995 ,16(2) : 74 – 82 [曾庆义 ,刘明成. 支护桩圈梁的作用机理与计算分析 [J]. 岩土力学 ,1995 ,16(2) : 74 – 82]
- [9] Gao Yinli ,Xu Jianxin ,Chen Huan. A flexing equation method considering the cooperative action between row of piles and ring beam during excavating procedure [J]. China Civil Engineering Journal , 2001 ,34(1) : 67 – 72 [高印立 ,徐建新 ,陈环. 排桩与圈梁协同作用下考虑开挖过程的挠曲方程法 [J]. 土木工程学报 ,2001 , 34(1) : 67 – 72]
- [10] Fenelli G ,L Pagano. Computing top-beam effects in retaining walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 1999 ,125(8) : 665 – 672
- [11] Zhang Zhiwei ,Deng Ronggui. Theoretical study on spatial anti-slide structure of arc interval row piles with coupling beam on the pile top [J]. Rock and Soil Mechanics ,2013 ,34(12) : 3403 – 3409 [张志伟 ,邓荣贵. 弧形间隔排桩 – 桩顶拱梁空间抗滑结构理论研究 [J]. 岩土力学 ,2013 ,34(12) : 3403 – 3409 , 3430]

The Mechanism and Calculation Analysis of Arc Row Piles with Arc Coupling Beam on Pile Top

ZHANG Zhiwei ,DENG Ronggui ,ZHONG Zhibin

(School of Civil Engineering ,Southwest Jiaotong University ,Chengdu 610031 ,Sichuan ,China)

Abstract: The arc coupling beam can provide constraint to pile top ,so moment and forces of pile body distribution is uniform and the integrity stability of piles is improved. Compared with linear coupling beam ,the arc coupling beam ,which mainly sustains compression forces ,can give full play of the high compressive capacity of concrete. Through the cooperation of arc coupling beam and the anti-slide piles ,part of the landslide thrust can be transferred to both sides stabilized stratum ,which decrease the resistance requirements of slide bed and the required strength of piles. By using the deformation compatibility between arc row piles and arc coupling beam ,the flexibility equation is set up and the redundant forces can be solved based on the flexibility equation ,then the internal force and displacement of beam and piles is calculated. The results of an example show that the internal force distribution and the deformation of arc coupling beam is more reasonable than linear coupling beam. Compared with the cantilever row piles and the linear interval row piles with beam on the top of piles ,the constraint effect provided to the piles by arc coupling beam is obvious and the constraint effect is stronger with the increase of the span ratio of arc coupling beam.

Key words: arc row piles; arc coupling beam; deformation compatibility; internal force distribution; displacement constraints