

# 桩承式加筋路堤作用机理理论分析与数值模拟

骆瑞萍<sup>1</sup> 陈保国<sup>2</sup>

(1. 湖北省建筑科学研究设计院,湖北武汉 430071; 2. 华中科技大学土木工程与力学学院,湖北武汉 430074)

**【摘要】** 软土地基上填筑高路堤常常面临地基承载力不足、沉降和不均匀沉降过大等问题。桩承式加筋路堤能够有效地解决这些难题。通过理论分析和有限元数值模拟,研究了路堤填土-加筋材料-桩体-桩间土之间的相互作用机理,讨论了路堤填土中的土拱效率、桩体效率、路堤底面差异沉降和筋材拉力的变化规律。研究结果表明,填土中的土拱效应和筋材张力膜效应能够有效地提高桩体效率,防止软土屈服,筋材内部拉力呈非线性分布,桩顶边缘处筋材拉力最大。

**【关键词】** 桩承式路堤;作用机理;理论分析;数值模拟;土拱效率;桩体效率

**【中图分类号】** TU 472

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.03.011

## Theoretical Analysis and Numerical Simulation of Embankment Reinforced With Geosynthetics and Pile-wall

Luo Ruiping<sup>1</sup> Chen Baoguo<sup>2</sup>

(1. Hubei Institute of Building Research and Design, Wuhan 430071, Hubei ;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong Univ. of Sci. and Tech., Wuhan 430074, Hubei, China)

**【Abstract】** The construction of high embankments on soft ground faces several challenges, such as potential bearing capacity failure, intolerable total or differential settlements. Horizontal geosynthetic reinforcement combined with vertical reinforcement using piles or pile walls can provide an economical and effective solution to ground improvement to support high embankments. Theoretical and numerical analyses were conducted to investigate the interaction among the embankment fill, geosynthetics, pile-walls and soft soil. The variation laws of the soil arch efficiency, the pile-wall efficiency, the differential settlement at the embankment bottom and the tension in geosynthetics are also discussed. Research results show that the soil arch effect in fill combined with the tension membrane effect of geosynthetics can considerably enhance the pile-wall efficiency, and minimize the yielding of the soft soil; the distribution of tension in geosynthetics is not uniform and the maximum value of tension generates at the edge of pile-wall.

**【Key Words】** piled embankment; interaction; theoretical analysis; numerical simulation; soil arch efficiency; pile-wall efficiency

### 0 引言

水平向加筋与竖向桩体联合应用处理路堤下软土地基能够很好地控制沉降,增强路堤稳定性,提高地基的承载力<sup>[1-3]</sup>。桩土之间的刚度差异会在桩顶平面引起差异沉降,从而导致路堤填土内部产生土拱效应。Terzaghi(1936)对差异变形在砂土中引起的土拱效应进行了描述<sup>[4]</sup>,Hewlett(1988)用室内模型试验验证了土拱的存在,并基于弹塑性理论和极限状态分析了三维土拱效应<sup>[5]</sup>,陈云敏等(2004)改进了Hewlett的极限分析方法<sup>[6]</sup>,但都没有考虑筋材的影响。Low(1994)通过模型试验和理论研究,

基于平面应变假设分析了路堤中的土拱效应<sup>[7]</sup>。Han(2002)基于平面应变假设,利用有限差分法分析了填土高度,筋材模量和桩体模量对桩-土-筋材体系受力的影响<sup>[8]</sup>。饶为国等(2002)通过假设桩间筋材变形为抛物线形,获得了轴对称情况下桩土应力比计算式<sup>[9]</sup>,Chen(2007)通过室内模型试验分析了平面土拱效应和路堤沉降变化规律<sup>[10]</sup>。但是以上分析都没有反映出土拱的效率和桩体的效率,桩承式加筋路堤的理论研究落后于工程实践。本文通过理论方法和平面有限元方法,分析了桩承式加筋路堤的作用机理(本文中的桩体采用桩墙,即

pile wall), 讨论了土拱效率、桩体效率、路堤底面差异沉降和筋材拉力的变化规律。

### 1 理论分析

#### 1.1 定义与假设

由于桩土刚度差异, 桩顶上部的土柱体(内土柱体)和桩间土上部的土柱体(外土柱体)之间产生差异沉降, 由此引起内外土柱体之间的摩擦作用。该摩擦作用称为填土内部的土拱效应。土拱效应和筋材的张力膜效应共同作用将上部的填土荷载传递到桩顶。内外土柱体之间的差异沉降和摩擦力随着距桩顶距离的增大而减小, 最终趋于零, 差异沉降为零的平面称为等沉面。土拱效率( $E_{SA}$ )是指路堤填土中的土拱传递荷载的能力, 桩体效率( $E_{PW}$ )指桩墙顶面承担荷载占单个桩墙处理范围内填土总荷载的比率。土拱效率和桩体效率可用下式表示

$$E_{SA} = \frac{P_{em}b}{\gamma Hs} \times 100\% \quad (1)$$

$$E_{PW} = \frac{P_{pw}b}{\gamma Hs} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $P_{em}$  为桩墙顶部筋材上表面的平均压力, kPa;  $P_{pw}$  为桩墙顶面的平均压力, kPa;  $\gamma$  为路堤填土重度, kN/m<sup>3</sup>;  $H$  为路堤填土高度, m;  $b$  为桩墙宽度, m;  $s$  为桩墙中心间距, m。

理论分析主要基于以下几条假设: 1) 计算模型符合平面应变假设; 2) 桩墙顶面的路堤土柱体与桩间土顶面的土柱体之间的作用面为垂直面; 3) 桩墙顶部土柱体与桩间土顶部土柱体之间的垂直压力满足朗金土压力理论; 4) 桩端落在坚硬持力层上, 桩端位移为零; 5) 筋材的重量忽略不计。理论分析和数值模拟的计算模型见图 1。

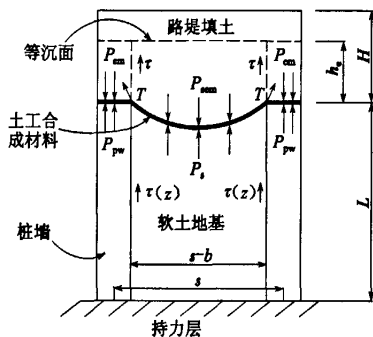


图 1 计算单元受力示意图

#### 1.2 土拱效应分析

考虑桩顶上部内外土柱体之间的摩擦作用, 由桩顶上部土柱体微单元受力平衡可得

$$(p+dP)b = pb + \gamma b dz + 2[(\gamma z k_a - 2c\sqrt{k_a}) \tan\varphi + c] dz \quad (3)$$

式中:  $p$  为桩顶上部土柱体内部的平均压力, kPa;  $k_a$  为朗金主动土压力系数;  $c$  为填土黏聚力, kPa;  $\varphi$  为填土内摩擦角, (°)。

当  $H < h_c$  时, 取  $z = H$ , 由式(3)可得

$$p_{em} = \gamma H + \gamma k_a \tan\varphi \cdot H^2/b + 2c(1 - 2\tan\varphi\sqrt{k_a})H/b \quad (4)$$

当  $H \geq h_c$  时, 取  $z = H$ , 由式(3)可得

$$p_{em} = \gamma H + \gamma k_a \tan\varphi (2H - h_c)h_c/b + 2c(1 - 2\tan\varphi\sqrt{k_a})h_c/b \quad (5)$$

由路堤填土内部竖向受力平衡可得

$$p_0(z) = (\gamma z - mp(z))/(1-m) \quad (6)$$

假设  $z = H$ , 则式(6)变为

$$p_{sem} = (\gamma H - mp_{em})/(1-m) \quad (7)$$

式中:  $p_0(z)$  为桩间土上部土柱体内的平均压力, kPa;  $p_{sem}$  为桩间土上部筋材上表面的平均压力, kPa;  $m$  为桩墙面积置换率,  $m = b/s$ 。

等沉面处, 内外土柱体之间的差异沉降为零, 由此可得

$$W_{pw}(0) + S_{em} = W_s(0) + S_{sem} \quad (8)$$

式中:  $S_{em}$  和  $S_{sem}$  分别为桩顶上部内外土柱体的压缩量;  $W_s(0)$  和  $W_{pw}(0)$  分别为桩顶和桩顶平面处桩间土的平均沉降。

桩顶平面处最大差异沉降为

$$\Delta S = S_{em} - S_{sem} = W_s(0) - W_{pw}(0) = \int_{H-h_c}^H (p(z) - p_0(z))/E_{em} dz \quad (9)$$

式中:  $E_{em}$  为路堤填土的压缩模量, kPa, 此处假设桩顶土柱体和桩间土上部土柱体压缩模量相等。

实际工程中, 一般要求路堤填土高度大于等沉面高度, 假设路堤填料为无粘性土, 由式(5)、式(7)、式(9)可得

$$\Delta S = \frac{\gamma k_0 \tan\varphi [H^3/3 - H(H-h_c)^2 + 2(H-h_c)^3/3]}{(1-m)bE_{em}} \quad (10)$$

#### 1.3 筋材受力和变形分析

假设筋材变形为以半径为  $R$ , 圆心角为  $2\theta$  的圆弧(见图 2), 由几何条件可得

$$\sin\theta = \frac{4\Delta S/(s-b)}{1 + 4[\Delta S/(s-b)]^2} \quad (11)$$

由筋材的竖向受力平衡可得:

$$\begin{cases} p_{pw} = p_{em} + 2T_0 \sin\theta/b \\ p_s = p_{sem} - 2T_0 \sin\theta/(s-b) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $T_0$  为桩体边缘处筋材的拉力, kN/m;  $p_s$  为桩

间土顶面的平均压力, kPa。

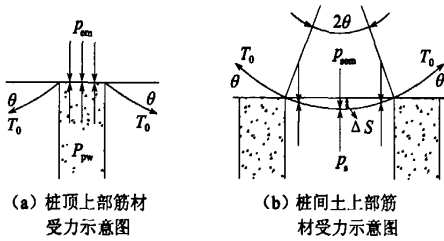


图2 筋材受力和变形示意图

1.4 桩土相互作用分析

桩端落在坚硬持力层上,假设桩侧摩阻力呈倒三角形分布,则有

$$\tau(z) = \tau_u \cdot (L - z) / L \quad (13)$$

假设桩顶为座标原点,垂直向下的方向为Z轴正方向,由桩体和桩间土微单元受力平衡可得:

$$\begin{cases} d^2 W_{pw}(z) / dz^2 = 2\tau / E_{pw} b \\ d^2 W_s(z) / dz^2 = -2\tau / E_s (s - b) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $E_{pw}$  和  $E_s$  为桩体和桩间土的压缩模量, kPa。

桩顶平面处的差异沉降为  $\Delta S$ , 桩端平面处沉降为零, 由位移边界条件可得

$$\begin{cases} W_s(0) - W_{pw}(0) = \Delta S \\ W_{pw}(L) = W_s(L) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

由桩顶平面力的边界条件可得

$$\begin{cases} E_{pw} W'_{pw}(0) = p_{pw} \\ E_s W'_s(0) = p_s \end{cases} \quad (16)$$

联立式(13)~式(16)得

$$\begin{cases} W_{pw}(z) = 2\tau_u \cdot (z^2/2 - z^3/6L) / E_{pw} + \\ p_{pw} z / E_{pw} - 2\tau_u L^2 / 3E_{pw} b - p_{pw} L / E_{pw} \\ W_s(z) = 2\tau_u \cdot (z^3/6L - z^2/2) / E_s (s - b) + \\ p_s z / E_s + 2\tau_u L^2 / 3E_s (s - b) - p_s L / E_s \end{cases} \quad (17)$$

由式(9)和式(17)得

$$\Delta S = \frac{2}{3} \tau_u L^2 \cdot \left( \frac{1}{E_s (s - b)} + \frac{1}{E_{pw} b} \right) + \left( \frac{p_{pw}}{E_{pw}} - \frac{p_s}{E_s} \right) \cdot L \quad (18)$$

由桩体和桩间土之间的竖向受力平衡可得

$$p_s = (\gamma H - m p_{pw}) / (1 - m) \quad (19)$$

联立式(7)、式(8)、式(9)、式(10)、式(11)、式(12)、式(18)和式(19), 运用 MATLAB 数学软件求解  $p_m$  和  $p_{pw}$ , 再将  $p_m$  和  $p_{pw}$  代入式(1)和式(2)求得土拱效率和桩体效率。

1.5 理论计算结果分析

理论计算结果见图3和图4, 计算参数见表1。图3表明,  $E_{SA}$  和  $E_{PW}$  随桩土刚度差异的增加而增

大, 当桩土刚度比增大到一定程度时,  $E_{SA}$  和  $E_{PW}$  趋于稳定。桩土模量比由 30 增大到  $10^4$  时,  $E_{PW}$  由 44.04% 增加到 62.04%,  $E_{SA}$  由 37.62% 增加到 54.55%。由图4可知,  $E_{PW}$  和  $E_{SA}$  随着  $H/(s-b)$  的增大而增大, 但是增加的速率逐渐减小。  $E_{PW}$  与  $E_{SA}$  之间的差值随着  $H/(s-b)$  的增大而减小。

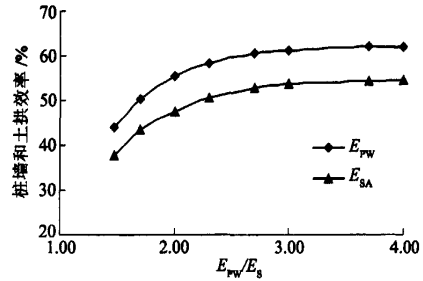


图3 土拱和桩体效率随桩土相对刚度的变化规律

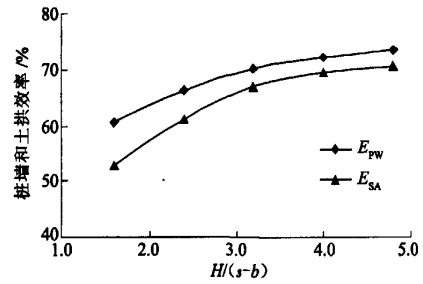


图4 土拱和桩体效率随 H/(s-b) 的变化规律

表1 理论计算材料参数

材 料	参 数
路堤填土	$c=0, \varphi=30^\circ, \gamma=18 \text{ kN/m}^3, E_{em}=14 \text{ MPa}, H=4\sim 12 \text{ m}$
桩体	$b=0.5 \text{ m}, s=3 \text{ m}, L=12 \text{ m}, \gamma=24 \text{ kN/m}^3, E_{pw}=66 \text{ MPa}\sim 22 \text{ GPa}$
地基土	$c=9 \text{ kPa}, \varphi=6^\circ, \gamma=16 \text{ kN/m}^3, E_s=2.2 \text{ MPa}$

2 数值模拟

2.1 计算模型

采用 PLAXIS 软件来模拟桩承式加筋路堤的作用机理。网格划分采用 15 节点三角形单元, 加筋材料采用 5 节点的格栅单元。桩墙宽度取 0.5 m, 中心间距为 3.0 m, 筋材为线弹性, 拉伸模量取 1000 kN/m, 路堤填土高度取 4 m, 软土厚度为 12 m, 桩端落在坚硬持力层上, 计算模型两侧为水平向约束, 底部为水平向和竖向约束, 其他计算参数见表 2。

表2 数值模拟计算参数

参数	路堤填土	软土地基	桩墙
材料模型	M-C	M-C	线弹性
重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	18.0	16.0	24.0
压缩模量/MPa	14.0	2.2	1100
泊松比	0.3	0.35	0.2
黏聚力 c/kPa	1.0	9.0	
内摩擦角 φ/(°)	30	6	
膨胀角 Ψ/(°)	0	0	
界面强度折减系数	0.8	0.4	

2.2 数值模拟结果分析

筋材内部的拉力分布规律见图5,其拉力沿筋材呈非均匀分布,桩顶上部筋材拉力较小,边缘处拉力突然增大,桩间土上部,筋材拉力随着距桩体边缘距离的增大而减小。筋材的竖向位移即为桩顶平面处沉降分布规律。桩顶平面沉降呈非均匀分布(见图6),桩顶边缘处沉降发生突变,最大沉降发生在桩墙之间的中心位置。

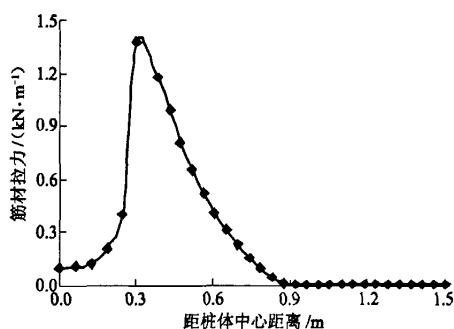


图5 筋材内部拉力分布规律

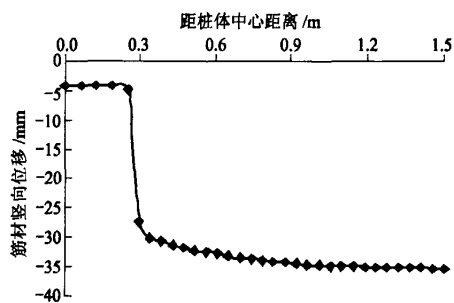


图6 筋材的竖向位移分布规律

理论方法计算结果与数值模拟结果的对比分析见表3和表4。由表3可知,理论方法与数值模拟得到的  $E_{PW}$  和  $E_{SA}$  的变化规律一致,当桩土模量比为30时,理论解和数值解得到的桩体效率之间的差异为16.50%,土拱效率之间的差异为16.42%;当桩土模量比增大到  $10^4$  时,该差异分别减小到

7.73%和8.56%。表4计算结果表明,理论解和数值解得到的桩体效率和土拱效率均随着  $H(s-b)$  的增大而增大,并趋于稳定。理论解与数值解的差异随着  $H(s-b)$  的增大而减小。当填土高度为1.6倍的桩体净距时,理论解和数值解得到桩体效率之间差异为5.44%,土拱效率之间的差异为5.97%;当填土高度为4.8倍的桩体净距时,该差异分别减小到2.33%和3.03%。由此说明,理论计算结果与数值模拟计算结果吻合较好。

表3  $E_{PW}$  和  $E_{SA}$  的理论解及数值解随  $E_{PW}/E_s$  的变化规律

$E_{PW}/E_s$	$E_{PW}/\%$		$E_{SA}/\%$	
	理论解	数值解	理论解	数值解
30	44.04	60.54	37.62	54.04
50	50.15	63.92	43.51	57.24
100	55.31	66.81	47.36	60.05
200	58.40	68.33	50.44	61.61
500	60.51	69.19	52.75	62.51
1000	61.28	69.51	53.62	62.83
5000	61.90	69.73	54.29	63.08
10000	62.04	69.77	54.55	63.11

表4  $E_{PW}$  和  $E_{SA}$  的理论解及数值解随  $H/(s-b)$  的变化规律

$H/(s-b)$	$E_{PW}/\%$		$E_{SA}/\%$	
	理论解	数值解	理论解	数值解
1.6	60.51	65.95	52.75	58.72
2.4	66.35	70.41	60.94	62.79
3.2	70.09	72.86	66.89	65.06
4.0	72.28	74.65	69.42	66.70
4.8	73.49	75.82	70.73	67.70

3 结论

- 1) 填土中的土拱效应和筋材张力膜效应能够有效地提高桩体效率,防止软土屈服。
- 2) 土拱效率和桩体效率随着桩土相对刚度、路堤填土高度与桩墙净距比值的增大而增大,并最终趋于稳定。
- 3) 筋材内部的拉力呈非线性分布,最大拉力发生在桩墙边缘处。由于土拱效应和筋材张力膜效应,桩间土的沉降也呈非均匀分布,中心处最大,向两侧逐渐减小。

参考文献

[1] 罗强,刘俊彦,张良. 土工合成材料加筋砂垫层减小软土地基沉降试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003,25(6):710-714.

[2] 陈仁朋,贾宁,陈云敏. 桩承式加筋路堤受力机理及沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(23):

- 4358-4367.
- [3] 郑俊杰,陈保国,Abusharar S W,等.双向增强体复合地基桩土应力比分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2007,35(7):110-113.
- [4] Terzaghi K. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door [C]. Proc. 1st Int. Conf. Soil Mechanics. Harvard University, Cambridge, 1936:307-311.
- [5] Hewlett W J, Randolph M F. Analysis of piled embankment[J]. Ground Engineering, 1988, 21(3):12-18.
- [6] 陈云敏,贾宁,陈仁朋.桩承式路堤土拱效应分析[J].中国公路学报,2004,17(4):1-6.
- [7] Low B K, Tang S K, Choa V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(11):1917-1938.
- [8] Han J, Gabr M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1):44-53.
- [9] 饶为国,赵成刚.桩-网复合地基应力比分析与计算[J].土木工程学报,2002,35(2):74-80.
- [10] Chen Y M, Cao W P, Chen R P. An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2):164-174.

收稿日期:2008-12-08

(上接第142页)

- [5] 崔广心.特殊地层条件竖井破坏及防治技术[J].建井技术,1998,19(1):28-32.
- [6] 陈湘生.华东地区立井井壁破坏原因浅析[J].建井技术,1997,18(6):1-3.
- [7] 毕思文.徐淮地区煤矿竖井变形破坏特征与机理探讨[J].建井技术,1997,18(3):37-39.
- [8] 周治安.厚松散覆盖层底部机械潜蚀与黄淮地区井筒破裂[J].煤炭科学技术,1993(9):45-50.
- [9] 张建怡,卞政修.黄淮地区新构造活动与井壁损坏[J].煤炭科学技术,1992(3):31-34.
- [10] 崔广心,程锡禄.徐淮地区井壁原因的初步研究[J].煤炭科学技术,1991(8):46-50.
- [11] 杨维好.深厚表土层中井壁垂直附加力变化规律的研究[D].徐州:中国矿业大学,1993.
- [12] 杨俊杰,刘全林.由混凝土强度理论分析井壁的破坏特征和机理[J].淮南矿业学院学报,1995,15(4):18-23.
- [13] 郭佳奇.高应力下土与结构界面单剪试验及本构关系研究[D].焦作:河南理工大学,2007.
- [14] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999.

收稿日期:2009-03-23