

文章编号:1000-582X(2011)02-113-07

# 用于垃圾土地基加固的碎石桩承载力

高海,施建勇,王蕊

(河海大学教育部岩土力学与堤坝工程重点实验室,江苏南京 210098)

**摘要:**根据现有垃圾土地基碎石桩处理的试验,发现其破坏形式为桩体的侧向鼓胀;假设桩周垃圾土因桩的侧向鼓胀达到朗肯被动破坏状态,且不计地基垃圾土和桩身自重,由桩、桩周垃圾土的极限平衡,可以得到桩的极限承载力理论计算公式;依据已经进行的相关试验和参考资料确定公式中的计算参数,计算出桩的极限承载力;同时进行了桩身重型动力触探试验,可以由贯入击数推求承载力的特征值;经过理论计算与原位试验结果对比分析,两者比较接近。

**关键词:**垃圾土地基;城市固体废弃物;碎石桩;鼓胀破坏;承载力;动力触探;原位试验

**中图分类号:**TU443

**文献标志码:**A

## Bearing capacity of solid waste ground reinforced by stone column

GAO Hai, SHI Jian-yong, WANG Rui

(Key Laboratory of MOE of Geomechanics and Dam Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** Based on presented tests of improvement of solid waste ground by stone column, the failure mode of lateral expansion of column body can be found. It is assumed that solid waste surrounding column is in Rankin's positive limit situation caused by lateral expansion of column body, self weight solid waste and column is neglected, the calculation theory of limit bearing capacity of stone column can be extended on equilibrium of solid waste and column. The limit bear capacity of stone column can be calculated on parameters by complete tests and reference data. The heavy dynamic penetration tests were finished in stone column and the characteristic value of bearing capacity can be recommended on blow count. It is shown that bearing capacities of calculation and field test are close.

**Key words:** ground of solid waste; MSW; stone column; expansion failure; bearing capacity; dynamic penetration tests; in-situ test

垃圾土具有与普通土显著不同的物理力学和生化特性<sup>[1-4]</sup>,国内外关于垃圾填埋场地的研究主要集中于填埋场地本身的稳定和安全方面,已经有不少学者对垃圾土的抗剪强度、强度参数特性、应力-应变变化规律等开展了深入的研究,加筋土的复合材料模型得到较广泛认同<sup>[5-16]</sup>,但针对垃圾土地基加固的相关研究并不多。随着我国城市开发范围的扩展和城市化进程的推进,垃圾土作为建筑物地基的

工程实例越来越多<sup>[17-20]</sup>,系统进行垃圾土地基勘探、设计、施工、检测的试验性工作尤为必要。

### 1 侧向鼓胀破坏模式下的极限承载力理论推导

在试验过程中,通过现场观察和桩侧垃圾土的开挖,发现桩体破坏时产生了鼓胀变形。桩体的鼓胀变形使桩周垃圾土进入被动极限平衡状态,桩周

收稿日期:2010-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878075)

作者简介:高海(1967-),男,高级工程师,河海大学博士研究生,主要从事环境岩土工程研究,(E-mail)gaohaitz2007@163.com。

垃圾土极限平衡破坏如图 1 所示。

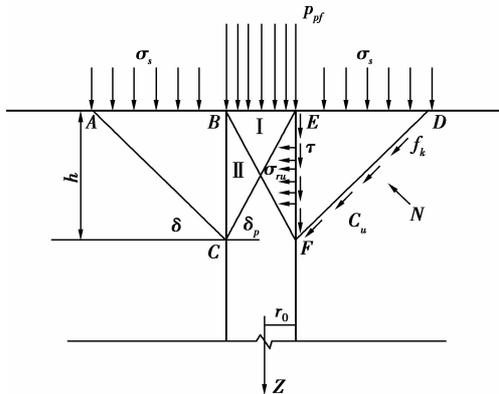


图 1 碎石桩极限平衡破坏受力分析图

极限承载力推导时假设:桩周垃圾土的极限平衡区位于桩顶附近,滑动面成漏斗形,土楔 ABC 和 DEF 成为朗肯的被动状态区,∠BAC 即  $\delta$  为  $(45^\circ - \frac{\varphi_p}{2})$ , 其中  $\varphi_p$  为桩间垃圾土的内摩擦角;桩体鼓胀破坏长度为  $h$ ,桩体滑动面与水平面夹角为  $\delta_p$ ,破坏长度  $h$  等于  $2r_0 \text{tg}\delta_p$ ,其中  $r_0$  为桩体半径;考虑荷载作用下桩周垃圾土与桩体间摩擦力为  $\tau$ ;在极限平衡中,环向应力  $\sigma_\theta = 0$ ;计算中不计垃圾土和桩体的自重<sup>[21]</sup>。

考虑轴对称性,桩体和土垃圾体的几何形状、约束情况、以及所受的荷载都是对称于  $z$  轴的(通过  $z$  轴的任一平面都是对称面),则所有的应力、形变和位移也就对称于这一轴,它们都将只是  $r$  和  $z$  的函数,不随  $\theta$  而变。

根据桩体的受力平衡,得 I 区、II 区受力图 2 和图 3 所示。

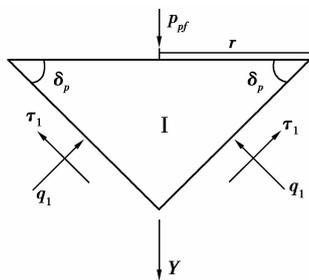


图 2 脱离体 I 的受力分析图

对脱离体 I,按竖向平衡条件,取  $\Sigma y = 0$ ,可得:

$$q_1 \cos\delta_p \cdot \frac{\pi r^2}{\cos\delta_p} + \tau_1 \sin\delta_p \cdot \frac{\pi r^2}{\cos\delta_p} = p_{pf} \cdot \pi r^2, \quad (1)$$

$$q_1 = \frac{p_{pf} - c_p \cdot \text{tg}\delta_p}{1 + \text{tg}\varphi_p \cdot \text{tg}\delta_p}.$$

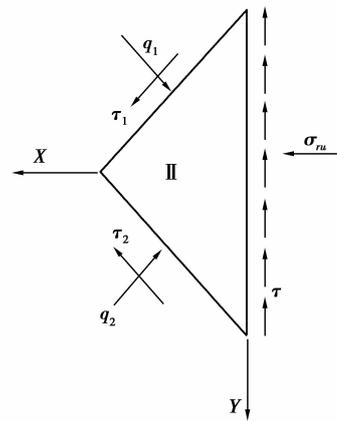


图 3 脱离体 II 的受力分析图

对脱离体 II,按水平向平衡条件,取  $\Sigma x = 0$ ,可得

$$(q_1 + q_2) \sin\delta_p \cdot \frac{2\pi r^2}{\cos\delta_p} = \sigma_{ru} \cdot 2r \text{tg}\delta_p \cdot 2\pi r + (\tau_1 + \tau_2) \cdot \cos\delta_p \cdot \frac{2\pi r^2}{\cos\delta_p},$$

$$q_1 + q_2 = \frac{2\text{tg}\delta_p \cdot \sigma_{ru} + 2c_p}{\text{tg}\delta_p - \text{tg}\varphi_p}. \quad (2)$$

对脱离体 II,按竖向平衡条件,取  $\Sigma y = 0$ ,可得

$$(q_1 - q_2) \cos\delta_p \cdot \frac{2\pi r^2}{\cos\delta_p} + (\tau_1 - \tau_2) \sin\delta_p \cdot \frac{2\pi r^2}{\cos\delta_p} = \tau \cdot 2r \text{tg}\delta_p \cdot 2\pi r,$$

$$q_2 = q_1 - \frac{2\tau \cdot \text{tg}\delta_p}{1 + \text{tg}\delta_p \cdot \text{tg}\varphi_p}. \quad (3)$$

式中:  $\tau_1, \tau_2$  为桩体滑动面上产生剪应力, kPa;  $\tau_1 = q_1 \text{tg}\varphi_p + c_p$ ;  $\tau_2 = q_2 \text{tg}\varphi_p + c_p$ ;  $\tau$  为桩与垃圾土之间摩擦力, kPa;  $\varphi_p$  为桩体内摩擦角, ( $^\circ$ );  $c_p$  为桩体粘聚力, kPa;  $\delta_p$  为桩体破坏角, ( $^\circ$ ).

将式(1)、式(3)代入式(2),可得:

$$2 \left( \frac{p_{pf} - c_p \cdot \text{tg}\delta_p}{1 + \text{tg}\varphi_p \cdot \text{tg}\delta_p} \right) - \frac{2\tau \cdot \text{tg}\delta_p}{1 + \text{tg}\delta_p \cdot \text{tg}\varphi_p} = \frac{2\text{tg}\delta_p \cdot \sigma_{ru} + 2c_p}{\text{tg}\delta_p - \text{tg}\varphi_p}. \quad (4)$$

整理可得关于单桩极限承载力  $p_{pf}$  与桩侧土侧向极限应力  $\sigma_{ru}$  的方程式(5):

$$\sigma_{ru} \cdot \text{tg}\delta_p = \frac{(p_{pf} - c_p \cdot \text{tg}\delta_p - \tau \cdot \text{tg}\delta_p)(\text{tg}\delta_p - \text{tg}\varphi_p)}{1 + \text{tg}\varphi_p \cdot \text{tg}\delta_p} - c_p, \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{ru}$  为垃圾土能提供的侧向极限应力, kPa;  $p_{pf}$  为单桩极限承载力, kPa。

在上述假设的基础上,再考虑桩周垃圾土极限平衡区土体受力的平衡。破坏形状平面图如图 4 所示,垃圾土上力的多边形如图 4 所示。

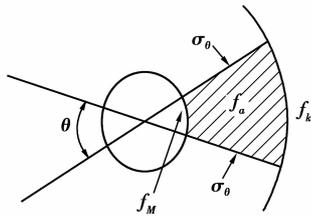


图4 破坏面示意图

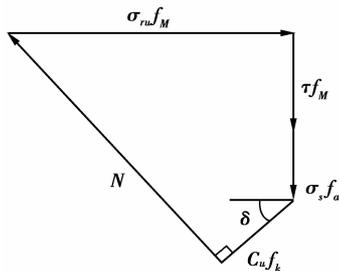


图5 力矢多边形

图4中  $f_M$ 、 $f_k$  和  $f_a$  分别表示阴影部分所示的平衡土体桩周界面、桩周土滑动面和垃圾土的面积。取任意弧度  $\theta$ , 可得

$$f_M = 2\theta r^2 \text{tg}\delta_p, \quad (6)$$

$$f_k = 2\theta r^2 \frac{\text{tg}\delta_p}{\sin\delta} \left(1 + \frac{\text{tg}\delta_p}{\text{tg}\delta}\right), \quad (7)$$

$$f_a = 2\theta r^2 \frac{\text{tg}\delta_p}{\text{tg}\delta} \left(1 + \frac{\text{tg}\delta_p}{\text{tg}\delta}\right). \quad (8)$$

由图5, 根据垃圾土滑动面上力的平衡, 可得到  $C_u f_k + (\sigma_s f_a + \tau \cdot f_M) \sin\delta = \sigma_{ru} f_M \cos\delta$ 。 (9) 则桩周垃圾土的极限应力  $\sigma_{ru}$  为

$$\sigma_{ru} = \left(\sigma_s + \frac{2C_u}{\sin 2\delta}\right) \left(\frac{\text{tg}\delta_p}{\text{tg}\delta} + 1\right) + \tau \cdot \text{tg}\delta, \quad (10)$$

当桩周垃圾土表面荷载  $\sigma_s = 0$  时, 上式可为

$$\sigma_{ru} = \frac{2C_u}{\sin 2\delta} \left(\frac{\text{tg}\delta_p}{\text{tg}\delta} + 1\right) + \tau \cdot \text{tg}\delta. \quad (11)$$

将式(11)式代入(5)式, 可得关于单桩极限承载力的关系式, 如式(12)所示:

$$\left[ \frac{2C_u}{\sin 2\delta} \left(\frac{\text{tg}\delta_p}{\text{tg}\delta} + 1\right) + \tau \cdot \text{tg}\delta \right] \cdot \text{tg}\delta_p = \frac{(p_{pf} - c_p \cdot \text{tg}\delta_p - \tau \cdot \text{tg}\delta_p)(\text{tg}\delta_p - \text{tg}\delta_p)}{1 + \text{tg}\delta_p \cdot \text{tg}\delta_p} - c_p, \quad (12)$$

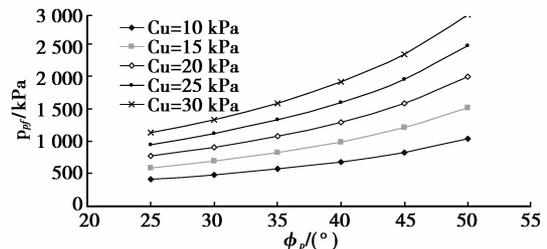
将上式整理可得单桩极限承载力为

$$p_{pf} = \left\{ \left[ \frac{2C_u}{\sin 2\delta} \left(\frac{\text{tg}\delta_p}{\text{tg}\delta} + 1\right) + \tau \cdot \text{tg}\delta \right] \cdot \text{tg}\delta_p + c_p \right\} \cdot (1 + \text{tg}\delta_p \cdot \text{tg}\delta_p) / (\text{tg}\delta_p - \text{tg}\delta_p) + (c_p + \tau) \cdot \text{tg}\delta_p. \quad (13)$$

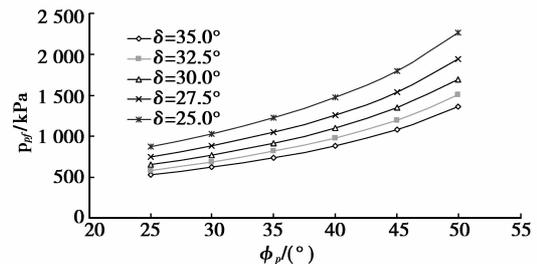
式中:  $C_u$  为垃圾土不排水抗剪强度, kPa;  $\delta$  为土体滑动面与水平面夹角, ( $^\circ$ );  $\delta = 45^\circ - \frac{\phi_s}{2}$  ( $\phi_s$  为桩间土的内摩擦角)。

## 2 侧向鼓胀破坏模式下的极限承载力理论分析

由公式(13)可知, 垃圾土不排水抗剪强度、土体滑动面与水平面夹角 ( $\delta = 45^\circ - \frac{\phi_s}{2}$ )、桩体滑动面与水平面夹角、桩土间摩擦力以及桩体的粘聚力和内摩擦角是影响桩极限承载力的因素。由图6(a)可见, 垃圾土不排水抗剪强度对桩极限承载力的影响显著, 在其它条件相同时垃圾土不排水抗剪强度增加5 kPa, 桩极限承载力增加20%~40%, 平均增加约30%; 垃圾土内摩擦角对桩极限承载力的影响也很显著, 由图6(b)可见在其它条件相同时内摩擦角增加 $5^\circ$ , 桩极限承载力增加10%~16%, 平均增加约13%。



(a) 垃圾土不排水剪切强度对桩极限承载力影响



(b) 垃圾土内摩擦角对桩极限承载力影响

图6 垃圾土强度特性对桩极限承载力的影响分析

桩和桩周垃圾土的相互作用特性会影响到桩的鼓胀深度即桩体滑动面与水平面夹角, 也会影响桩和桩周垃圾土的相互摩擦力。由图7(a)可见, 桩的鼓胀深度越大, 桩极限承载力越大; 在其它条件相同时桩的鼓胀深度增加0.5倍的桩径, 桩极限承载力增加16%~25%, 平均增加约20%; 同时发现, 在桩的鼓胀深度较浅时, 桩极限承载力对影响因素比较敏感, 如桩身材料摩擦角增加会引起桩极限承载力的陡然增加; 从公式(13)分析可知, 在桩体滑动面与

水平面夹角接近桩身材料摩擦角时,桩极限承载力会出现奇异;从实际工程分析得到,在桩的鼓胀深度较浅且接近地表时,桩体的破坏不能形成完整的鼓胀体,不再是鼓胀破坏,而是剪切破坏,已经推导的公式(13)不适合这种破坏模式下桩极限承载力分析;公式(13)只适用于鼓胀破坏条件下复合地基桩极限承载力分析;从图 7(b)可见,桩和桩周垃圾土的相互摩擦力对桩极限承载力有影响,但不明显;这与桩的破坏形式有关,鼓胀破坏主要是桩和桩周垃圾土的侧向相互挤压作用,沿桩身轴线方向上桩和桩周垃圾土的相互摩擦力对桩极限承载力影响不明显是合理的。

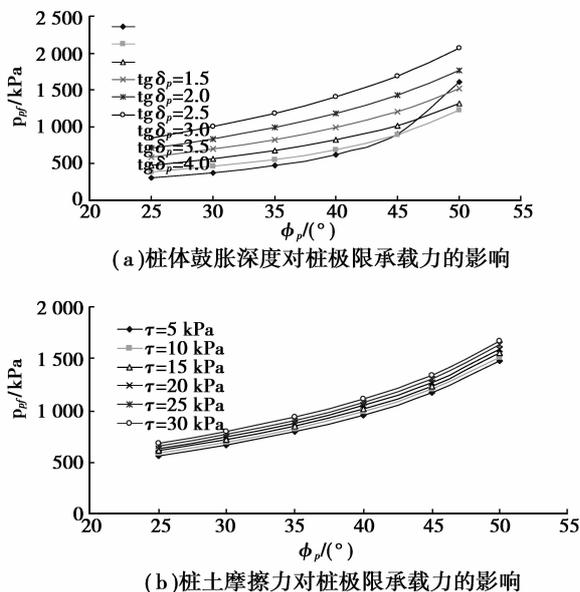


图 7 桩土相互作用特性对桩极限承载力的影响分析

桩身材料性质是影响桩极限承载力的另一重要因素,但图 8 中桩身材料的粘聚力对桩极限承载力的影响有限,因为复合地基中桩发生鼓胀破坏时通常是散粒体材料桩,其粘聚力一般较低,难以有图 8 所示的粘聚力的变化幅度,总体上粘聚力不会有大的变化,对桩极限承载力的影响有限;此外影响桩发生鼓胀破坏的角度、范围的决定因素是桩身材料性的内摩擦角,图 8 中横坐标是桩身材料性的内摩擦角,其变化对桩极限承载力的影响是显著的,桩身材料性的内摩擦角一般取值范围为  $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ,内摩擦角增加  $5^{\circ}$ ,桩极限承载力增加约 17%;桩身材料性的内摩擦角达到  $45^{\circ}$  以上,内摩擦角增加  $5^{\circ}$ ,桩极限承载力增加约 24%。

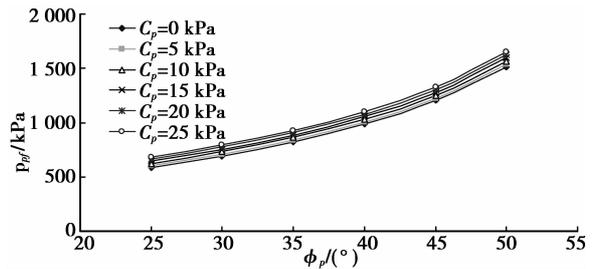


图 8 桩身材料性质对桩极限承载力的影响分析

### 3 工程实例分析

#### 3.1 试验工程方案

文中通过现场 1:1 尺寸实际模拟施加载圾土地基改良工程,分析研究垃圾土地基的加固机理、理论计算及方案比对。试验工程在深圳市罗湖区的玉龙坑填埋场进行,分别采取碎石桩、沉管灌注桩和渗透注浆方案加固。该填埋场是深圳最早的垃圾填埋场之一;自 1983 年启用,相继进行了 6 次扩建,1998 年 2 月停止垃圾进场。经过 11 年的生化反应,垃圾填埋场已经达到稳定。场区占地面积约  $1 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,共填埋垃圾总量约 300 多万 t,垃圾总容量约  $3.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,加上填埋覆土总容量达  $4.7 \times 10^6 \text{ m}^3$  左右,以生活垃圾为主要成份;填埋场的最大垃圾填埋深度超过 30 m,在我国工程建设中具有比较典型的特征。具体情况如图 9 所示:

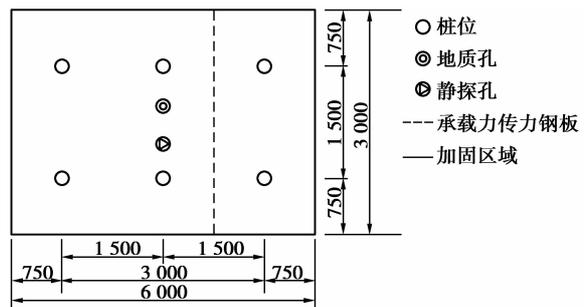


图 9 碎石桩方案(单位:mm)

碎石桩方案:桩长 10 m、桩径 377 mm,共 6 根,均匀布置,桩中心距 1.5 m,见图 9。采用锤击沉管成孔,拔管速度控制在 0.8 m/min 内,拔管过程中小落距锤击不少于 50 次/min,碎石粒径 1~3 cm,事先冲洗、晾干,每米喂料量  $0.13 \sim 0.15 \text{ m}^3$ 。

#### 3.2 重型动力触探和平板载荷试验

碎石桩打设完成后,对桩身进行了重型动力触探试验、取芯以及复合地基的平板载荷试验。0.0~

10.3 m 深度范围内碎石大小 1~3 cm 为主,含少量石米、石粉,3.0 m 以下含有机质,桩芯呈深灰色,碎石分布较均匀;表层的垃圾比较松软,对碎石桩的约束比较差,桩身的重型动力触探试验采用 63.5 kg 穿心锤,每贯入 10 cm 记录一次击数,击数按规范规定进行杆长修正,得到  $N_{63.5}$  的平均值为 11.35,桩身承载能力的极限值可取 640 kPa<sup>[22-24]</sup>(相当于单桩  $640 \times 3.14 \times 0.377^2 / 4 = 71.4$  kN)。

根据玉龙坑填埋垃圾埋场其它相关试验结果及相关研究机构的试验结果<sup>[25]</sup>,极限承载力计算公式(13)中参数选取为: $C_u = 16$  kPa,  $\varphi_p = 40^\circ$ ,  $c_p = 0$  kPa,  $\varphi_s = 25^\circ$ ,  $\text{tg}\delta_p = 3.0$ ,  $\tau = 10$  kPa。其中,垃圾土的固结不排水剪参数是在钻孔取原状样的基础上,按各层垃圾组分和原状垃圾土物理指标的平均值经人工配制而成,并开展三轴剪切试验所获取。这样做的原因在于垃圾土是一种高度不均质材料,结构松散,原状垃圾土样难以成型,不便于直接试验;另一方面,垃圾埋场在填埋历史中往往采取分层填埋作业,压实粘土分隔等措施,并且相同年代的垃圾成分也具有一定相似性,因此该埋场垃圾土呈现成层性分布的特点。经计算,单桩极限承载力  $p_{pf} = 620.7$  kPa,与 640 kPa 相比,理论计算值与重型动力触探原位试验推算值基本相当。

平板载荷试验结果如下:

表 1 碎石桩平板载荷试验成果表

序号	荷载 /kN	历时/min		沉降/mm	
		本级	累计	本级	累计
0	0	0	0	0.00	0.00
1	75	90	90	0.92	0.92
2	150	90	180	1.33	2.25
3	225	90	270	1.58	3.83
4	300	90	360	1.64	5.47
5	375	90	450	1.82	7.29
6	450	90	540	2.11	9.40
7	525	90	630	2.65	12.05
8	600	90	720	3.68	15.73
9	450	30	750	-0.55	15.18
10	225	30	780	-0.62	14.56
11	0	180	960	-2.25	12.31

最大沉降量:15.73 mm,最大回弹量:2.16 mm,回弹率:21.7%,压板面积:3.8 m<sup>2</sup>,根据规范确定地基承载力特征值为 147 kPa。

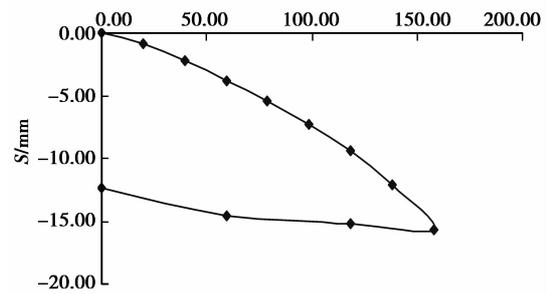


图 10 碎石桩复合地基 P-S 曲线

进一步推算复合地基承载力特征值:

$$\bar{f} = f_1 \times (A - A_p) + f_2 \times A_p, \quad (14)$$

式中: $\bar{f}$ 为复合地基承载力特征值, $f_1$ 为垃圾土地基承载力特征值(垃圾土承载力的特征值可由静力触探试验结果取 135 kPa), $A$ 荷载板面积, $A_p$ 碎石桩面积, $f_2$ 碎石桩承载力特征值。

$$\bar{f} = 135 \times (3.8 - 3.14 \times 0.377^2 / 4) + 320 \times 3.14 \times 0.377^2 / 4 = 136.4 \text{ kPa}。$$

计算结果与平板静载荷试验结果基本相当。

## 4 结 论

根据试验的鼓胀滑动面形状,通过简化得到假定的滑动面,然后借助该滑动面上桩体和桩周垃圾土的极限平衡条件,可以求出极限荷载公式,主要结论有:

1)垃圾土地基碎石桩的破坏模式为侧向鼓胀破坏,垃圾土的强度性质对桩极限承载力的影响显著;在条件相同时垃圾土不排水抗剪强度增加 5 kPa,桩极限承载力增加 20%~40%,平均增加约 30%;垃圾土内摩擦角对桩极限承载力的影响也很显著,在其它条件相同时内摩擦角增加 5°,桩极限承载力增加 10%~16%,平均增加约 13%;

2)桩身材料强度是桩极限承载力另一决定因素,桩身材料的粘聚力对桩极限承载力的影响有限,因为桩发生鼓胀破坏,桩身材料性的内摩擦角是破坏的角度、范围的主要因素,桩身材料性的内摩擦角一般取值范围内,内摩擦角增加 5°,桩极限承载力约 17%;

3)桩和桩周垃圾土的相互作用特性将对桩极限承载力产生影响;桩的鼓胀深度越大,桩极限承载力越大;桩的鼓胀深度增加 0.5 倍的桩径,桩极限承载力增加 16%~25%,平均增加约 20%;在桩的鼓胀深度较浅时,桩体的破坏不能形成完整的鼓胀体,不再是鼓胀破坏,而是剪切破坏;鼓胀破坏主要是桩和

桩周垃圾土的侧向相互挤压作用,沿桩身轴线方向上桩和桩周垃圾土的相互摩擦力对桩极限承载力影响不明显。

4)按文中推导的碎石桩承载力公式得到的计算结果(其中的基本参量:桩垃圾土不排水抗剪强度 $C_u$ 、桩体粘聚力 $c_p$ 、桩体内摩擦角 $\varphi_p$ 、桩间垃圾土内摩擦角 $\varphi_s$ 等参数均取自试验)与原位重型动力触探测试推算的结果比较接近。同时,由此推算出的复合地基承载力与平板载荷试验结果也基本相当。

#### 参考文献:

- [1] 涂帆,钱学德.中美垃圾填埋场垃圾土的重度、含水量和相对密度[J].岩土力学与工程学报,2008,27(6):3075-3081.  
TU FAN, QIAN XUE-DE. Unit weight, water content and specific gravity of municipal solid waste in china and united states [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(6):3075-3081.
- [2] 张丙印,介玉新.垃圾土的强度与变形特性[J].工程力学,2006,23(z2):14-22.  
ZHANG BING-YIN, JIE YU-XIN. Strength and deformation characteristics of municipal solid wastes[J]. Engineering Mechanics, 2006,23(z2):14-22.
- [3] 陈云敏,林伟岸,詹良通,等.城市生活垃圾抗剪强度与填埋龄期关系的试验研究[J].土木工程学报,2009,429(3):111-117.  
CHEN YUN-MIN, LIN WEI-AN, ZHAN LIANG-TONG, et al. A study on the relationship between the shear strength of municipal solid waste and the fill age [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 429 (3):111-117.
- [4] MERRY S M, KAVAZANJIAN E, JR, FRITZ W U. Reconnaissance of the July 10, 2000, payatas landfill failure [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005,19(2):100-107.
- [5] KAVAZANJIAN E, Jr. Evaluation of MSW properties using field measurements [C]//Proceedings of the 17<sup>th</sup> Conference: Hot topics in Geosynthetics-IV, December 15, Las Vegas, USA:[s. n.], 2003:74-113
- [6] LUPO J F, MORRISON K F. Geosynthetic design and construction approaches in the mining industry [J]. Geotextiles and Geomembranes,2007,25(2):96-108.
- [7] QIAN X D, KOERNER R M. A new method to analyze for, and design against, wtranslational failures of geosynthetic lined landfills [C] // Geosynthetics and Geosynthetic-engineered Structures, The ASME/ASCE/SES McMat 2005 Conference, June 1-3, Baton Rouge, USA:[s. n.],2005:61-98.
- [8] ZHAN T L T, CHEN Y M, LIN W A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China [J]. Engineering Geology, 2008, 97 (4): 97-111.
- [9] 刘荣,施建勇,彭功勋.垃圾土力学性质的室内试验研究[J].岩土力学,2005,26(1):108-112.  
LIU RONG, SHI JIAN-YONG, PENG GONG-XUN. Experimental studies on mechanical behavior of refuse samples [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (1): 108-112.
- [10] 冯世进,陈云敏,高丽亚,等.城市固体废物的剪切强度机理及本构关系 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (12): 2524-2528.  
FENG SHI-JIN, CHEN YUN-MIN, GAO LI-YA, et al. Shear strength mechanism and constitutive model of municipal solid waste [J]. Rock and Solid Mechanics, 2007, 28(12):2524-2528.
- [11] 高丽亚,冯世进,陈云敏,等.城市固体废弃物大直径三轴压缩试验研究[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(12):1603-1609.  
GAO LI-YA, FENG SHI-JIN, CHEN YUN-MIN. Large-scale triaxial compression test for municipal solid waste [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(12):1602-1606.
- [12] 陈云敏,高登,朱斌.城市固体废弃物的复合指数应力-应变模型及应用 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31 (7): 1020-1029.  
CHEN YUN-MIN, GAO DENG, ZHU BIN. Composite exponential stress-strain model of municipal solid waste and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7):1020-1029.
- [13] SHI J L, QIAN X D, ZHU J G, et al. Application of shear strength of solid waste and multilayer liner in landfill [C] // The International Symposium on Geoenvironmental Engineering, September 8-10, 2009, Hangzhou, China. [S. l.]:[s. n.], 2009: 286-294.
- [14] NABESHIMA Y, TOMOHISA S. Reuse of pond sediment by mixing with stabilizers and shredded paper [C]// The International Symposium on Geoenvironmental Engineering, September 8-10, 2009, Hangzhou, China. [S. l.]:[s. n.], 2009:657-661.
- [15] ZHANG Z, WU C, CHEN Y. Study on duncan-zhang model parameters of stress compression for municipal solid waste [C] // The International Symposium on Geoenvironmental Engineering, September 8-10, 2009, Hangzhou, China. [S. l.]:[s. n.], 2009:602-606.
- [16] TU F, CHANG F, XIAO Z, et al. Study on sensitivity of the combination failure of landfill with dam [C]// The International Symposium on Geoenvironmental

- Engineering, September 8-10, 2009, Hangzhou, China. [S. l.]:[s. n.], 2009:607-609.
- [17] 衡涛,米海珍,杨文侠. 兰州地区某工程垃圾地基土处理方法研究[J]. 甘肃科学学报, 2007, 19(1):140-144.  
HENG TAO, MI HAI-ZHEN, YANG WEN-XIA. The treatment of garbage foundation soil in an engineering project in Lan Zhou[J]. Journal of Gansu Sciences, 2007, 19(1):140-144.
- [18] 马志斌,张宏,王欣. 振冲碎石桩在垃圾填埋场地中的应用[J]. 工业建筑, 2008, 38(9):7-50.  
MA ZHI BIN, ZHANG HONG, WANG XIN. The application of vibroflotation gravel pile in garbage site[J]. Industrial Construction, 2008, 38(9):7-11.
- [19] 焦瑞玲,吴连海,崔维孝,等. 北京高速铁路动车段垃圾填埋场地基处理现场试验研究[J]. 铁道设计标准, 2009(2):76-80.  
JIAO RUI-LING, WU LIAN-HAI, CUI WEI-XIAO, et al. Studies of site experiment on improvement of landfill for Beijing express-railway station[J]. Railway Standard Design, 2009(2):76-80.
- [20] 许立武,王书芳. 强夯法在处理生活垃圾地基中的应用[J]. 勘察科学技术 2004(5):44-45  
XU LI-WU, WANG SHU-FANG. Application of dynamic compaction in MSW foundation[J]. Reconnaissance Science and Technology, 2004(5):44-45.
- [21] 王蕊. 考虑破坏特征的复合地基承载力计算方法研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [22] MATASOYIC E, KAVAZANJIAN E J DE A, DUNN J. CPT-based seismic stability assessment of hazardous waste site [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(1):201-208.
- [23] ROBERTSON P K. Soil classification using cone penetration test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(1):151-158.
- [24] 廖红建,赵树德. 岩土工程测试[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [25] 张振营,吴世明,陈云敏. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1):35-39.  
ZHANG ZHEN-YING, WU SHI-MING, CHEN YUN-MIN. Experimental research on the parameter of life rubbish in city [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1):35-39.
- [26] 施建勇,冒俊. 水泥垃圾土强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7):1951-1996.  
SHI JIAN-YONG, MAO JUN. Experimental research of strength characteristic of solid waste mixed with cement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7):1951-1966.

(编辑 陈移峰)

## (上接第 112 页)

- [14] 陈杰,李志敏,钟先信,等. 高速物流图像采集与实时异物剔除的原理及实现[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5):454-458.  
CHEN JIE, LI ZHI-MIN, ZHONG XIAN-XIN, et al. Principle and realization of data acquisition of high speed logistics images and of real time foreign material elimination[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(5):454-458.
- [15] 陈文涛,钟先信,李志敏,等. 烟草在线异物剔除系统设计与实验研究[J]. 光学精密工程, 2003, 11(4):384-389.  
CEHN WEN-TAO, ZHONG XIAN-XIN, LI ZHI-MIN, et al. Design of a tobacco online foreign body Eliminating system and its experiment [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(4):384-389.
- [16] PAUET U, ENGELBRECHT A P. Training support vector machines with particle swarms[C/OL]// Proc. of International Joint Conference on Neural Networks, July 20-24, 2003 [2003-08-26]. [http://ieeexplore.ieee.org/search/srchabstract.jsp?tp=&arnumber=1223937&queryText=%3DTraining+support+vector+machines+with+particle+swarms%26openedRefinements%3D\\*%26searchField%3DSearch+All](http://ieeexplore.ieee.org/search/srchabstract.jsp?tp=&arnumber=1223937&queryText=%3DTraining+support+vector+machines+with+particle+swarms%26openedRefinements%3D*%26searchField%3DSearch+All).
- [17] PAUET U, ENGELBRECHT A P. A new particle swarm optimizer for linearly constrained swarms [C/OL] // Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation, December 8-12, 2003 [2004-05-24]. [http://ieeexplore.ieee.org/search/srchabstract.jsp?tp=&arnumber=1299579&queryText=%3DA+new+particle+swarm+optimizer+for+linearly+constrained+swarms%26openedRefinements%3D\\*%26searchField%3DSearch+All](http://ieeexplore.ieee.org/search/srchabstract.jsp?tp=&arnumber=1299579&queryText=%3DA+new+particle+swarm+optimizer+for+linearly+constrained+swarms%26openedRefinements%3D*%26searchField%3DSearch+All).

(编辑 陈移峰)