

桩承式加筋路堤格栅应变计算及试验

陈永辉^{1,2}, 陈 庚^{1,2}, 齐昌广^{1,2}, 徐 锴³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘 要:为了完善桩承式加筋路堤中土工格栅应变的计算方法,在德国规范 EBGEO 的基础上,考虑桩帽及土工格栅刚度对格栅应变计算的影响,提出考虑等效桩径系数的修正计算方法,同时依托桩承式路堤现场试验,监测记录了路堤沉降、桩土压力和格栅应变的变化规律,并将实测结果与计算结果进行了对比。研究表明:格栅类型对路堤填筑期沉降影响不显著;桩土间的荷载传递随着格栅模量的增大而得到进一步加强;路堤荷载传递形式因采用不同类型的格栅而存在差异;填筑期内钢塑格栅应变随路堤填筑高度的增大而增加,且观测到了徐变性;钢丝格栅在填筑期内的应变变化不明显,但在填筑期结束后观测到了应变突变现象。通过现场试验与理论计算结果的对比,验证了采用等效桩径系数法计算格栅应变的合理性,并建议当采用钢丝格栅等高强刚度格栅时,可采用考虑等效桩径系数的修正 EBGEO 法进行格栅应变与应力计算。

关键词:岩土工程;桩承式加筋路堤;修正 EBGEO 规范;现场试验;格栅应变;等效桩径系数

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A

Calculation and test of geogrid strain in pile-supported reinforced embankment

CHEN Yong-hui^{1,2}, CHEN Geng^{1,2}, QI Chang-guang^{1,2}, XU Kai³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 21098, Jiangsu, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China)

Abstract: In order to improve the calculation method of geogrid strain in pile-supported reinforced embankment, this paper based on the German standard EBGEO, considered the effect of cap and the stiffness of geogrid on the calculation of geogrid strain and proposed the modified calculation method with consideration of equivalent pile diameter. Based on field experiment of pile-supported embankment, the embankment settlement, pile-soil stress and rules of the geogrid-strain variation were monitored and recorded, and the measured results were compared with the calculated results. The results show that types of geogrid have no significant effect on embankment settlement. Pile-soil load transformation is further strengthened with the increase of modulus of geogrid. There are differences in the transformation mode of the embankmen load. Strain of steel-plastic geogrid increases with the increase of the height of embankment in the

收稿日期:2015-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51178160);水利部公益性行业科研专项经费项目(201201015);浙江省交通运输厅科技计划项目(2012H01)

作者简介:陈永辉(1972-),男,浙江东阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:yonghuich@163.com。

filling period, what's more, creep is observed. The strain changes of wire geogrid during the filling period are not obvious, but strain mutation appears after that. By comparing the field experiment results with the theoretical results, the rationalization of the equivalent pile diameter coefficient method used to calculate the geogrid strain is verified. It is suggested that the modified EBGeo method with consideration of the equivalent pile diameter coefficient can be adopted for geogrid strain and stress analysis when the high-strength stiff geogrids such as steel geogrids are used. 2 tabs, 9 figs, 20 refs.

Key words: geotechnical engineering; pile-supported reinforced embankment; modified EBGeo standard; field test; geogrid strain; equivalent pile diameter coefficient

0 引言

桩承式加筋路堤因其施工速度快,路堤沉降收敛迅速等特点而被广泛应用。桩承式加筋路堤作为一个复杂系统,包括路堤桩、加筋垫层及上部填土^[1-2]。目前对桩承式加筋路堤研究相对较多的是路堤桩的承载特性及上部填土在土拱作用下的应力调整等问题^[3-4]。而土工格栅在桩承式路堤系统中可以提高土体的地基承载力、抗变形能力和抗裂能力,在桩承式加筋路堤中具有重要作用^[5]。

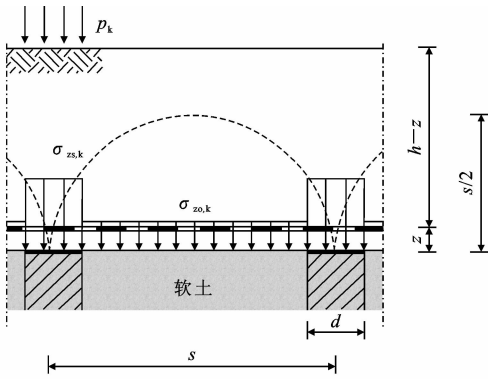
尽管已有众多采用桩承式加筋路堤的工程实践,但由于其受力复杂,国内外学者对此展开了诸多研究。饶为国等基于薄板变形理论和 Winkler 弹性地基模型将加筋材料和垫层作为整体进行求解,建立了桩承式加筋路堤工后沉降的薄板理论解^[6];吕伟华等通过室内试验对土工格栅应变计算的 Giroud 法(考虑土工格栅拉膜效应)和 Espinoza 法(考虑土工格栅为圆形或抛物线变形形式)进行试验验证分析,得出 Espinoza 法与实测结果比较接近^[7]。但土工格栅类型众多,不同刚度的土工格栅在工程应用中的应力变化也有诸多不同,胡启军等通过现场试验发现加筋垫层中格栅最大拉力值在路堤中心线处^[8];程培峰等通过有限元分析得到土工格栅拉力在路堤横断面上出现先增大后减小的现象,土工格栅的拉力随着路堤填土的增加也逐渐增大^[9];蔡德钧等考虑加筋体初始挠度,采用悬索理论对桩承式加筋路堤的加筋材料受力情况进行计算,并建议土工格栅加筋体的最低强度可取使用年限内发生失效应变时的强度^[10-11]。工程设计应用方面,英国 BS 8006 规范采用平面应变模型下的拉膜模型假定,建立了土工格栅在二维条件下变形量与格栅拉力的关系式^[12];挪威 Nordic 法和日本规范也采用该模型进行计算^[1];中国在相关规范中也参照了该设计计算方法^[13]。对于该计算方法,Abusharar 等

考虑了独立桩帽及桩体摩擦力的作用,并进行了修正^[14];Eekelen 等通过对英国 BS 8006、德国 EBGeo 规范及数值分析的对比计算发现,BS 8006 规范的格栅拉力计算结果偏大,并提出了三维条件下的格栅上部拉力的修正计算方法^[15]。需要说明的是,德国 EBGeo 规范在考虑桩间土反力的基础上,将垫层上的压力转换为桩与桩间土上的三角形分布荷载,采用三维条件下的薄膜理论进行计算,并得出相应的计算加筋诺谟图,而上述诸多规范计算中,除德国 EBGeo 规范外,均未考虑桩间土的支撑作用^[16]。由此可见,德国规范计算方法更贴近于桩承式加筋路堤系统的受力特征^[17-18],但该方法未涉及桩体上部的桩帽作用,而桩帽具有均化桩顶应力、提高桩荷载分担比、减小复合地基沉降等作用^[19-20],故中国的桩承式加筋路堤多采用刚性桩+桩帽的形式进行地基加固。若直接将该规范引用,采用桩体截面计算,会因忽略桩帽作用而使格栅设计偏于保守;若将桩帽截面直径用作桩体直径计算,也会因夸大桩帽作用而使格栅设计偏于不安全。

基于此,本文对考虑桩帽作用下的德国 EBGeo 规范中格栅拉力计算方法进行修正,并对采用不同刚度的土工格栅进行桩承式加筋路堤现场试验,监测记录路堤沉降、桩土压力和格栅应变的变化规律,最后对修正 EBGeo 法的计算结果与原规范结果、现场实测数据进行对比分析,以说明该方法的适用性。

1 修正 EBGeo 法的土工格栅拉力计算

下页图 1 为未考虑桩帽作用下的复合地基联合加筋垫层桩土界面受力示意图。假定作用在桩间土上的荷载大小相同,根据 Zaeske 计算公式可求得桩土界面的竖向应力 $\sigma_{z0,k}$ 为



注: z -格栅铺设高度(m); $\sigma_{zs,k}$ -桩体的竖向应力(kPa)。

图1 EBGeo有关桩土界面土压力示意

Fig. 1 EBGeo: vertical stress on soil

$$\sigma_{zo,k} = \lambda_1^{\chi} (\gamma_k + \frac{p_k}{h}) \{ h(\lambda_1 + h_g^2 \lambda_2)^{-\chi} + h_g [(\lambda_1 + \frac{h_g^2 \lambda_2}{4})^{-\chi} - (\lambda_1 + h_g^2 \lambda_2)^{-\chi}] \} \quad (1)$$

式中: $\lambda_1 = \frac{1}{8}(s-d)^2$; $\lambda_2 = \frac{s^2 + 2ds - d^2}{2s^2}$; φ_k 为路堤填料的内摩擦角($^{\circ}$); γ_k 为路堤填料的单位容重(kN/m^3); p_k 为上部荷载(kPa); h_g 为土拱高度(m), 当填土高度 h 大于桩间距时, 取 $s/2$; $\chi = \frac{d(K_1 - 1)}{\lambda_2 s}$, $K_1 = \tan^2(45^{\circ} + \frac{\varphi_k}{2})$, d 为桩径(m); s 为最大桩距(m)。

考虑桩帽作用下桩土界面土压力计算时, 假定桩帽上的土压力均匀分布, 以方形桩帽为例, 桩帽边长为 a , 正方形布置, 桩径为 d , 计算极限土拱荷载时考虑桩帽作用, 定义 ξ 为等效桩径系数, 取值范围 $d/a \sim 1$, 此时等效桩径 $d' = d/\xi$, 此时桩土界面压力值 $\sigma'_{zo,k}$ 为

$$\sigma'_{zo,k} = \lambda_1'^{\chi'} (\gamma_k + \frac{p_k}{n}) \{ h(\lambda_1' + h_g^2 \lambda_2')^{-\chi'} + h_g [(\lambda_1' + \frac{h_g^2 \lambda_2'}{4})^{-\chi'} - (\lambda_1' + h_g^2 \lambda_2')^{-\chi'}] \} \quad (2)$$

$$\text{式中: } \chi' = \frac{d(K_1 - 1)}{\xi \lambda_2' s}, \lambda_1' = \frac{1}{8}(s - \frac{1}{\xi}d)^2, \lambda_2' = \frac{s^2 + 2ds/\xi - d^2/\xi^2}{s^2}.$$

考虑桩间土荷载呈三角形分布, 两桩中心点处最大土压力按 EBGeo 规范进行计算。

得出考虑桩帽的均化桩顶受力作用后, 以 $\frac{F_k/b_{\text{Ers}}}{J_k}$ 量纲一为横轴, 其中 F_k 为桩间土最大压力值(kN); $b_{\text{Ers}} = \frac{1}{2}\xi a\sqrt{\pi}$, 为桩支撑宽度(m); J_k 为土工格

栅刚度(kN/m)。计算曲线值 $k_{s,k}L_w^2/J_k$, $L_w = \sqrt{2}(s-a)$, 为最大净桩距(m), $k_{s,k}$ 为桩间土弹性模量与计算深度的比值(kN/m^3)。土工格栅最大应变的计算曲线如图2所示^[9], 土工格栅的最大应力可通过 $E = \epsilon_k J_k$ 得到, ϵ_k 为土工格栅的最大应变。

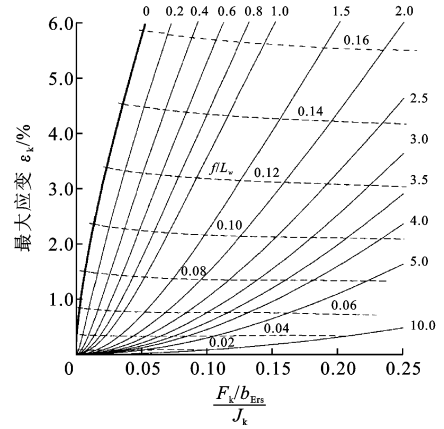


图2 格栅最大应变值的诺漠计算

Fig. 2 Maximum strain in geosynthetic reinforcement

2 桩承式加筋路堤现场试验

工程试验段选在浙江省某一在建高速公路, 该地所处杭嘉湖平原, 属典型软土地基分布区, 因此在进行工程建设时需进行必要的地基处理。

以该区内某高速公路 K26+565 和 K23+020 这 2 个试验断面为依托, 分别对 2 个不同地基处理形式及加筋形式的断面(塑料套管桩联合钢丝格栅、预应力管桩联合钢塑格栅)进行现场试验。所涉试验段土层的物理力学指标见表 1; 试验段设计参数见下页表 2。

本次现场试验采用振弦式土压力计(型号 TXR-2020)监测桩顶和桩间土的受力情况, 量程分为 0.2 MPa (精度为 2 kPa) 和 1.0 MPa (精度为 10 kPa) 2 种; 桩帽上采用量程为 1.0 MPa 的土压力计, 其余位置采用量程为 0.2 MPa 的土压力计。采用振弦式表面应变计(YXR-4058 型)测量钢丝格栅和钢塑格栅的应变, 测试精度为 0.01, 测试仪器的电缆长度根据具体埋设位置确定。埋深土压力计, 其下铺设一层 5 cm 厚的细砂, 且在其上掩埋细砂以确保其受力均匀, 同时在相邻桩帽上铺设相同厚度的细砂以保证相邻桩的受力环境与设置土压力计的桩相同。在安置表面应变计时, 用自带夹具夹紧的同时, 用胶水进行再次加固, 以防表面应变计与格栅之间发生滑移。试验段横断面及土压力计和表面位移计布置如下页图 3、图 4 所示。

表 1 试验段物理力学性质指标

Tab. 1 Physico-mechanical properties of test sections

土层编号	土层名称	土层厚度/m	天然含水率/%	天然重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	空隙比 e	塑限 w_p	液限 w_{pl}	压缩模量 E_s/MPa	直剪快剪	
									粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
②-1	粉质粘土	3.2	29.4	18.9	0.855	25.7	38.4	5.01	42.0	9.2
②'-2	粉质粘土	2.0	36.8	18.7	0.990	26.1	40.2	3.03	13.0	3.4
②-2	淤泥质粉质粘土	3.5	40.2	18.3	1.093	25.6	40.7	2.76		
③-1	粉质粘土	9.8	30.6	19.5	0.762	26.6	41.6	7.96	67.0	7.6
③-4	粉质粘土	4.4	34.5	18.6	0.951	23.7	37.5	4.79	50.0	16.7
④-2	粉质粘土	3.8	26.2	19.8	0.727	22.1	32.4	5.57	8.0	15.2
④-5	粉土	12.1	21.4	20.3	0.616	22.0	28.5	15.27	19.0	32.7

表 2 试验段设计参数

Tab. 2 Design parameters of test sections

试验段里程号	路基填土参数		地基处理参数				加筋垫层			
	填土高度/m	坡度	处理形式	桩距/m	桩径/m	桩帽形状及尺寸	加筋形式	加筋位置	横向抗拉强度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	格栅刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
K26+565	3.3	1 : 1.5	预应力管桩	2.4	0.4	方形边长 1.0 m	钢丝格栅	碎石垫层中部	≥ 80	90 000
K23+020	3.5	1 : 1.5	塑料套管桩	1.5	0.2	圆形直径 0.5 m	钢塑格栅	碎石垫层中部	≥ 80	6 000

注:路堤填土的重度以 19 kN/m³ 计。

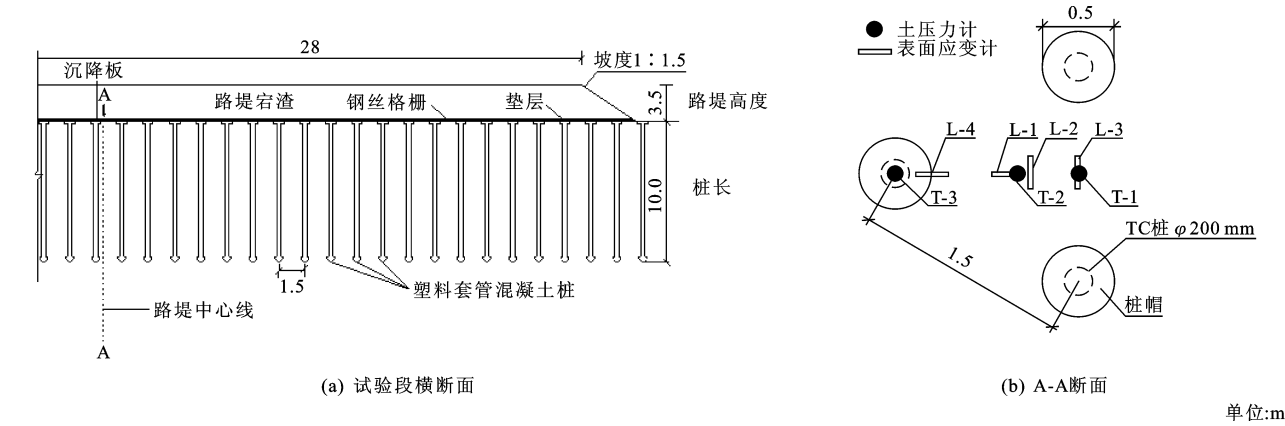


图 3 TC 桩(塑料套管桩)联合钢丝格栅处理断面及仪器布置

Fig. 3 Layout of instrumentation arrangement on TC pile-supported embankment field test

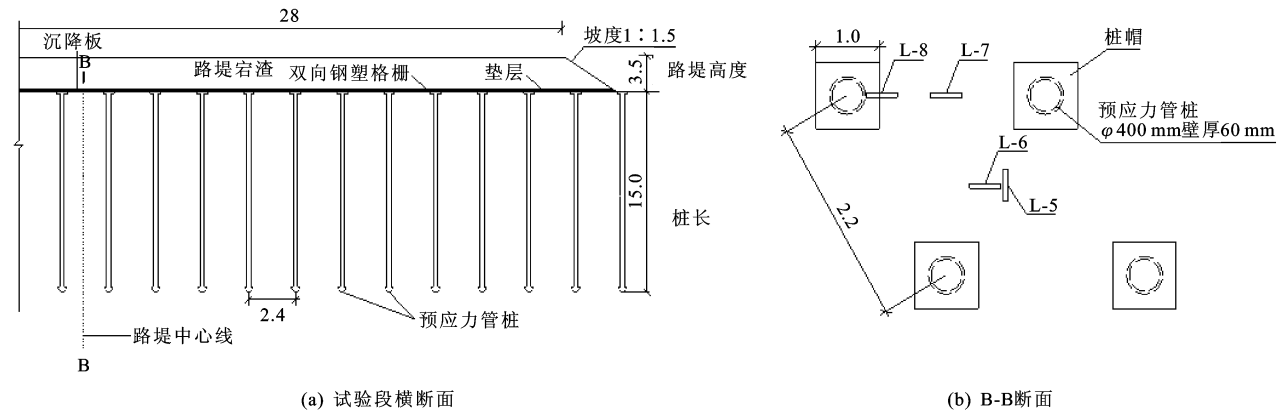


图 4 预应力管桩联合钢塑格栅处理断面及仪器布置

Fig. 4 Layout of instrumentation arrangement on pipe pile-supported embankment field test

土压力计仅在塑料套管桩联合钢丝格栅试验段埋设,表面位移计在 2 个试验断面均有埋设:土压力计埋深于桩距中点(T-1)、桩间土中心点(T-2)及桩帽中心点(T-3),因考虑到随着路堤的填筑,若在土工格栅上部的桩间土对应点放置土压力计,土压力计会发生偏转,使读数难以反映其真实受力情况,故只在格栅下部放置土压力计;表面位移计分别布置在桩帽边缘(L-4、L-8)、两桩中心连接线中点处(L-3、L-7)和桩体布置对角线交点处(L-1、L-2 及 L-5、L-6),以监测桩土界面上土压力及土工格栅应变的变化规律。

3 试验结果分析

3.1 路堤沉降

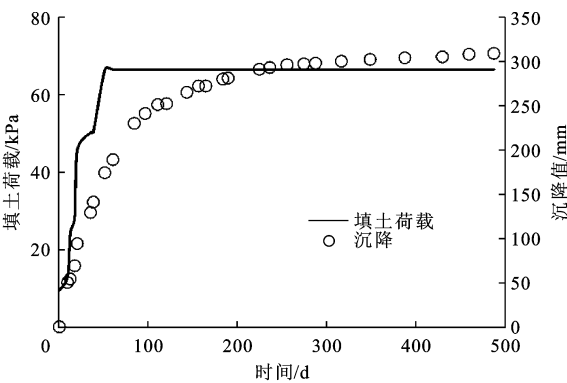
图 5 为试验段路堤沉降曲线,其中图 5(a)为塑料套管桩联合钢丝格栅试验段(K23+020)路堤沉降曲线,该断面于 2011 年 7 月 12 日开始填筑,至 2012 年 8 月 25 日结束,共计 42 d,填高 3.5 m。自填筑起始至第 490 d,路堤中心沉降点总沉降为 309 mm,其填筑期的沉降值为 174 mm,填筑期的沉降量为总沉降的 56.3%。

图 5(b)为预应力管桩联合钢塑格栅试验段(K26+565)沉降曲线。该断面于 2011 年 5 月 25 日开始填筑,至 2011 年 9 月 29 日结束,填筑时间共计 127 d,填高 2.9 m。自填筑至第 500 d,路堤中心点沉降为 171 mm,其填筑期沉降值为 112 mm,填筑期的沉降量为总沉降的 65.5%。

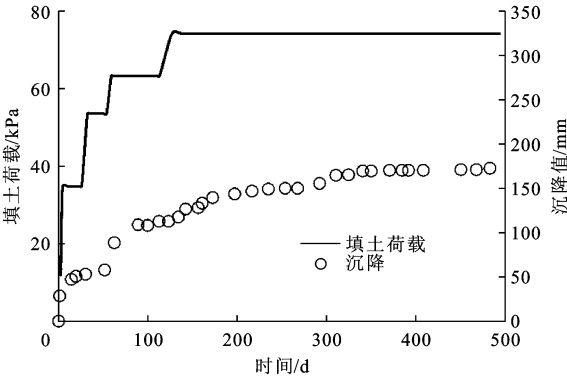
尽管采用不同的地基处理方式及加筋形式,但塑料套管桩联合钢丝格栅试验段、预应力管桩联合钢塑格栅试验段在填筑期内沉降量占总沉降量比例相近,表明格栅类型对路堤填筑期沉降的影响不显著。

3.2 桩土界面土压力

图 6 为塑料套管桩联合钢丝格栅试验段的桩土界面土压力及桩土应力的变化。在填土初期,桩帽及桩间土压力随高度呈线性变化,这是因为填土中尚未形成土拱,桩土界面各测点压力值未有过大差异。在路堤填至 1.2 m 时,桩间土中心点(T-2)并未随填土高度继续线性增大,其压力值增至 35 kPa 左右后稳定,直至试验观测结束。表明土拱效应对桩间土压力具有减弱作用;桩距中点(T-1)和桩帽中心点(T-3)随填土高度亦呈非线性增大,但桩距中点在路堤填筑结束后开始变小,直至稳定在 55 kPa;而桩帽中心则在路堤填筑结束后继续变大,



(a) TC桩+钢丝格栅试验段面



(b) 预应力管桩+钢塑格栅试验段面

图 5 试验段路堤沉降曲线

Fig. 5 Settlement curves of testing road embankment

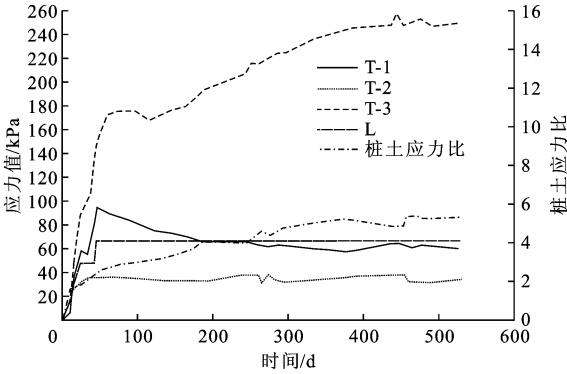


图 6 桩土界面土压力及桩土应力比变化

Fig. 6 Curves of soil vertical pressure at pile-soil interface and pile-soil stress ratio

稳定在 250 kPa 左右,该试验段断面的桩土应力比随填筑高度而变大,观测期末其值稳定在 5~6 之间。

需要说明的是,桩间中心点的压力值小于邻桩中心点,这是由于试验段的土压力观测点埋设于土工格栅之下,由于格栅的网兜作用使得土工格栅下部的土压力分布与原假定的桩间土荷载呈三角形分布不同,表明采用钢丝格栅试验段的格栅下桩间土压力值并未随距桩体的距离增大而增大,与钢塑格栅作用下的柔性基础分布规律有差异。

3.3 格栅应变

图 7 为塑料套管桩联合钢丝格栅处理方式的格栅应变曲线。填筑期钢丝格栅应变变量较小,直至第 130 d 各点应变变量小于 5%,且此时路堤沉降量已达 253 mm,说明钢丝格栅的网兜作用比路堤沉降有所迟延。随着路堤中竖向应力的不断调整,位于桩体布置中心位置的表面应变计 L-2 发生损坏;在观测的第 150 d 时,钢丝格栅 L-1 和 L-3 同时发生应变突变的情况,分别由 5.3% 和 3.8% 增至 1.53% 和 1.24%,这可能是由于填土内部竖向应力的变化,使得填土荷载转向桩间土,而钢丝格栅的 L-1 和 L-3 位于桩间土之上,故其应变突然增大;而位于桩帽边缘处的 L-4 的应变先变小再变大,这是因为在桩间土上的钢丝格栅应变变大后,减小了桩帽边缘钢丝格栅的网兜作用,使其变小,而随沉降及土拱效应的进一步调整,格栅拉力再次变大,至观测的第 500 d, L-1、L-3 和 L-4 的应变测值分别为 1.58%、1.89% 和 2.53%。

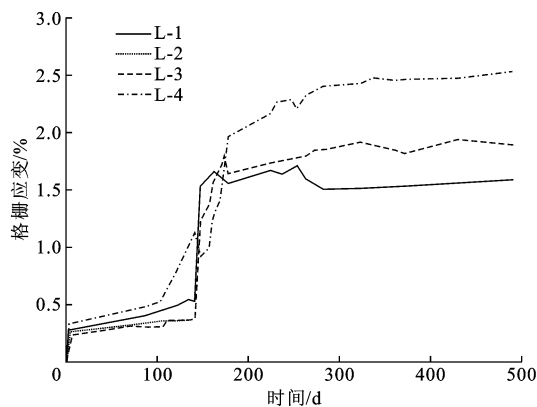


图 7 TC 桩联合钢丝格栅处理格栅应变曲线

Fig. 7 Variation curves of wire grid strain with time in TC pile pile-supported embankment field test

图 8 为预应力管桩联合钢塑格栅处理方式的格栅应变曲线,由于施工及碾压机械的原因,L-6 受到破坏而无读数。本试验段初次填土较快,第 5 d 其填筑高度即达 1.3 m,且采用钢塑格栅进行处理,故该段的表面应变计的初期变化较为明显,且随时间呈线性变化,直至路堤填筑完成后的 1 个月左右。不同于塑料套管桩联合钢丝格栅处理段,此试验段桩帽边缘的 L-8 在填筑初期时格栅应变增长较快,第 10 d 时 L-8 的应变为 1.51%,而后,L-5、L-7 和 L-8 应变的变化趋势在填筑期后一致,至观测的第 500 d, L-5、L-7 和 L-8 的应变测值分别稳定在 1.87%、1.74% 和 3.43%。

尽管采用不同的地基处理方式及加筋形式,但

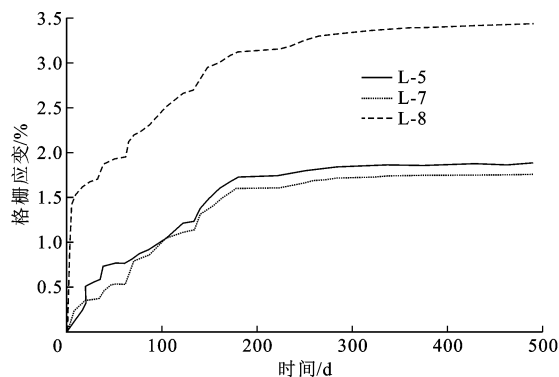


图 8 预应力管桩联合钢塑格栅处理格栅应变曲线

Fig. 8 Variations curves of geogrid strain with time in pipe pile-supported embankment field test

塑料套管桩联合钢丝格栅试验段、预应力管桩联合钢塑格栅试验段在填筑期的沉降量分别为已观测总沉降量的 56.3%、65.5%,而平均应变为土工格栅稳定应变的 16.5%、68.4%。2 个不同试验断面沉降在填筑期所占比例相近,但是由于塑料套管桩联合钢丝格栅试验段的填筑期短于预应力管桩联合钢塑格栅试验段,且钢丝格栅的变形模量远大于钢塑格栅,所以其应变发展规律有所不同,即钢丝格栅存在应变突然增大的现象。

3.4 修正方法的验证与讨论

依据不同试验段的填筑及复合地基的设计施工情况,采用修正 EBGeo 法并选取不同等效桩径系数(分别取 0.4、0.6、0.8、1.0)进行计算,并与实测值、中国现行规范值对比^[6],其计算结果如下页图 9 所示。

塑料套管桩联合钢丝格栅试验段的平均桩间土压力实测值(45 kPa)与中国现行规范值(47 kPa)相近;采用修正 EBGeo 法时,当等效桩径系数 ξ 取 0.6~0.8 时,其计算值分别为 45.7、50.0 kPa,与实测值相近。而钢丝格栅实测应变平均值为 2.00%,中国现行规范计算得出其格栅应变计算值为 0.65%;未修正的德国 EBGeo 规范计算值($\xi=1$)为 1.50%;当采用修正 EBGeo 法,且等效桩径系数 $\xi=0.4$ 时,计算值为 4.7%;等效桩径系数 $\xi=0.8$ 时,计算值为 1.8%,与实测值相近。

预应力管桩联合钢塑格栅试验段格栅的实测应变平均值为 2.35%,采用中国现行规范计算得出其格栅应变计算值为 1.72%,德国 EBGeo 规范的计算值为 0.4%,采用等效桩径系数 $\xi=0.4$ 的计算值为 2.3%。由此可见,采用钢塑格栅时,中国现行规范可较为准确地进行格栅应变的计算,但对钢丝格栅采用中国现行规范计算时,其计算值仅为实测值

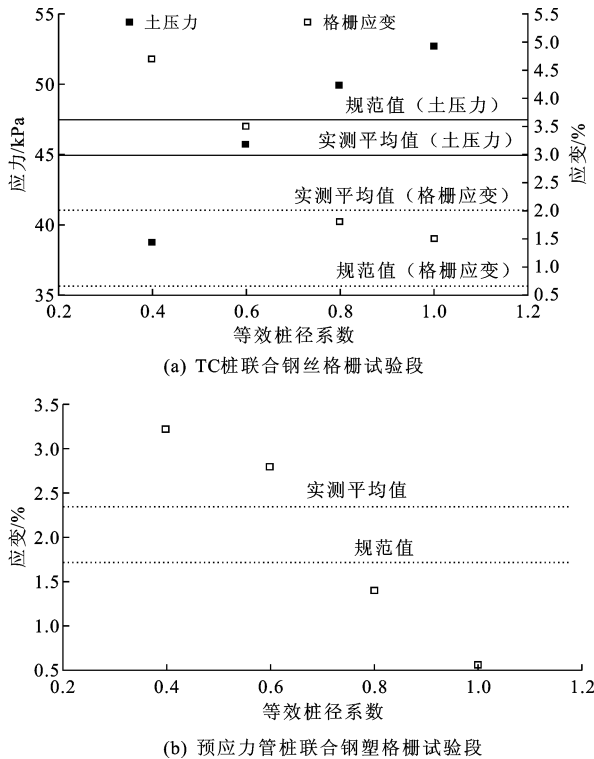


图9 试验段计算值与实测值对比

Fig. 9 Comparison of calculated and measured values of test section

的 32.5%。因此,对于采用高强刚度的钢丝格栅而言,采用德国 EBGeo 规范计算更为准确,就本试验而言,德国 EBGeo 规范计算值为实测值的 75%。若考虑桩帽作用进行相应修正,且等效桩径系数取 0.8 时,计算值(其值为 1.8%)更为准确。

4 结 语

(1)考虑桩帽的均化桩顶受力的作用,定义等效桩径系数,并以桩体等效直径进行桩间土受力和格栅拉力的计算,其计算条件更为贴近实际。

(2)通过对塑料套管桩联合钢丝格栅试验段的桩土界面土压力监测,发现不同位置处的土压力随填筑高度呈现不同变化趋势:桩间土中心点和桩帽中心点土压力随路堤填筑高度增长;而桩距中点土压力随填筑高度先增长后减少,直至稳定,其值小于桩帽中心点土压力实测值;钢丝格栅试验段的格栅下桩间土压力值并未随距桩体距离的增大而增大,与钢塑格栅作用下的柔性基础分布规律有差异。

(3)对塑料套管桩联合钢丝格栅试验段及预应力管桩联合钢塑格栅试验段的格栅应变监测发现,钢丝格栅与钢塑格栅的应变变化不同:随着填土荷载的增加,钢塑格栅应变持续增大,在路堤填筑结束

后具有徐变性;钢丝格栅在填筑期应变较小,但在填筑期后会发生应变的突变现象。

(4)通过对修正 EBGeo 法与中国现行规范及试验实测值进行对比发现,采用中国现行规范得出的钢塑格栅应变值贴近试验实测值;对于高强刚度的钢丝格栅,采用修正 EBGeo 法的计算值(ξ 取 0.8)与试验实测值相近。

(5)不同刚度的土工格栅在路堤荷载下具有明显不同的应变特点,建议进一步研究其对路堤沉降稳定的影响。

参考文献:

References:

- [1] 周 镜,叶阳升,蔡德钧. 国外加筋垫层桩支承路基计算方法分析[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2): 1-6.
ZHOU Jing, YE Yang-sheng, CAI De-gou. Analysis of calculation method for foreign geosynthetic reinforced pile supported embankments[J]. China Railway Science, 2007, 28(2): 1-6. (in Chinese)
- [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, 2006, 24(23): 4358-4367.
CHEN Ren-peng, JIA Ning, CHEN Yun-min. Mechanism and settlement analysis of pile-supported and geogrid-reinforced embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 24(23): 4358-4367. (in Chinese)
- [3] CHEN R P, CHEN Y M, HAN J, et al. A theoretical solution for pile-supported embankments on soft soils under one-dimensional compression [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(5): 611-623.
- [4] 费 康,刘汉龙. 桩承式加筋路堤的现场试验及数值分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1004-1012.
FEI Kang, LIU Han-long. Field test study and numerical analysis of a geogrid-reinforced and pile-supported embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1004-1012. (in Chinese)
- [5] 刘 春,赵洪波,白世伟. 土工格栅在治理软土路基沉降问题中的研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1070-1073.
LIU Chun, ZHAO Hong-bo, BAI Shi-wei. Research on using geogrids to control settlements of subgrades [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 1070-1073. (in Chinese)
- [6] 饶为国,江辉煌,侯庆华. 桩-网复合地基工后沉降的薄板理论解[J]. 水利学报, 2002(4): 23-27.
RAO Wei-gou, JIANG Hui-huang, HOU Qing-hua.

- Deformation of sheet plate due to residual settlement of pile-net composite foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(4): 23-27. (in Chinese)
- [7] 吕伟华, 缪林昌, 王 非. 基于不完全土拱效应的土工格栅加固机制与设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 632-639.
- LU Wei-hua, MIAO Lin-chang, WANG Fei. Mechanism of geogrid reinforcement based on partially developed soil arch effect and design method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 632-639. (in Chinese)
- [8] 胡启军, 谢 强, 卿三惠. 加筋碎石垫层中双层土工格栅拉力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 799-802.
- HU Qi-jun, XIE Qiang, QING San-hui. Field study of tensile force character of double-layered geogrid in reinforced gravel cushion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 799-802. (in Chinese)
- [9] 程培峰, 慕万奎, 姜海洋, 等. 土工格栅加固浅层软土地基的有限元分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(2): 6-11.
- CHENG Pei-feng, MU Wan-kui, JIANG Hai-yang, et al. Finite element analysis of shallow soft soil foundation reinforced by geogrids[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(2): 6-11. (in Chinese)
- [10] 蔡德钩, 杨国涛, 叶阳升, 等. 高速铁路桩网结构加筋网垫受力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(5): 1-5.
- CAI De-gou, YANG Gou-tao, YE yang-sheng, et al. Calculation method for the mechanical force of reinforced bedding in the geosynthetics reinforced and pile supported embankments of high speed railway[J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 1-5. (in Chinese)
- [11] 李冬雪, 邓卫东, 葛 娟. 考虑土工格栅蠕变的加筋路堤变形分析法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 11(5): 23-27.
- LI Dong-xue, DENG Wei-dong, GE Juan. Deformation analysis on reinforced embankment taking into account of creep of geogrid[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 11(5): 23-27. (in Chinese)
- [12] BS 8006: 2010, Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills[S].
- [13] JTG/T D31-02—2013, 公路软土地基路堤设计与施工技术细则[S].
- JTG/T D31-02—2013, Technical guidelines for design and construction of highway embankment on soft ground[S]. (in Chinese)
- [14] ABUSHARAR S W, ZENG J J, CHEN B G, et al. A simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(1): 39-52.
- [15] EEKELEN S J M, BEZUIJEN A, TOL A F. Analysis and modification of the British standard BS 8006 for the design of piled emankments[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(3): 345-359.
- [16] RAITHEL M, KIRCHNER A, KEMPFERT H G. German recommendation for reinforces embankment on pile-similar elements [C]//LI X, CHEN Y M, TANG X W. Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009: 279-284.
- [17] CHEN R P, XU Z Z, CHEN Y M, et al. Field tests on pile-supported embankments over soft ground [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(6): 777-785.
- [18] 刘汉龙, 王新泉, 陈永辉, 等. Y型沉管灌注桩加筋路堤力学性状试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 297-304.
- LIU Han-long, WANG Xin-quan, CHEN Yong-hui, et al. Field experimental study of mechanical performance of Y-shaped vibro-pile reinforced embankments [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 297-304. (in Chinese)
- [19] 何良德, 陈志芳, 徐泽中. 带帽 PTC 单桩和复合地基承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 435-440.
- HE Liang-de, CHEN Zhi-fang, XU Ze-zhong. Experimental study on load-bearing characteristics for single PTC pile with cap and composite foundation with PTC (prestressed thin-wall concrete) piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 435-440. (in Chinese)
- [20] 雷金波, 陈从新. 带帽刚性桩复合地基现场足尺试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1713-1720.
- LEI Jin-bo, CHEN Cong-xin. In-situ prototype test study of composite foundation of rigid pile with cap [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1713-1720. (in Chinese)