

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.011

深埋暗道 CFG 桩及碎石垫层复合地基变形特性

田建勃¹, 韩晓雷¹, 史庆轩¹, 陈凯², 张辉¹, 魏磊¹, 王朋¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055;
2. 中国有色金属工业西安勘察设计研究院, 西安 710054)

摘要:将 CFG 桩复合地基技术应用于深埋暗道这类特种结构的地基处理问题,通过对具体试验工程进行现场测试以及不同厚度碎石垫层的室内模型试验研究,对深埋暗道 CFG 桩复合地基沉降变形进行了分析,指出褥垫层的压缩量是应该被考虑到的,沉降变形计算不能仅仅考虑针对复合地基的修正,并应同时考虑褥垫层变形的修正。利用 ABAQUS 有限单元法分析了不同厚度褥垫层对 CFG 桩复合地基桩土应力比、总沉降量、垫层压缩量和桩身轴向应力的影响规律。介绍了一种输煤暗道沉降变形监测方法,通过现场测试、室内模型试验以及有限元分析,确定了深埋暗道 CFG 桩复合地基褥垫层的选用原则。

关键词:CFG 桩;复合地基;变形;褥垫层;有限单元法

中图分类号:TU473.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)01-0074-07

Analysis on Deformation Characteristics of CFG Piles-Gravel Cushion Composite Foundation of the Deep Embedded Secret Passage

Tian Jianbo¹, Han Xiaolei¹, Shi Qingxuan¹, Chen Kai², Zhang Hui¹, Wei Lei¹, Wang Peng¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China;
2. Xi'an Engineering Investigation and Design Research Institute of China National Non-ferrous Metals Industry, Xi'an 710054, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the issue in the field of the application of CFG pile application of CFG pile composite foundation technology in deep embedded secret passage of such special structure ground treatment, the settlement deformation of CFG pile composite foundation according to deep are studied and detailed analysis are given in the field test and indoor model test of the gravel cushion with different thickness. Moreover it points out that the cushion compressive deformation must be taken into account, and that the settlement deformation calculation cannot simply consider the amendments of composite foundation. The amendments of cushion deformation must be considered. The effect of the different thickness of cushion on pile-soil stress ratio, total settlement of composite foundation, cushion compression and axial stress of pile body were analysed by using ABAQUS finite element method. Through the analysis of the field test, indoor model test and the numerical simulation of CFG piles-gravel cushion composite foundation of the deep embedded secret passage, a settlement deformation monitoring method has been described and the selection principle of the cushion has determined so as to provide the cushion design basis in the process of composite foundation design.

Key words: cement fly-ash gravel (CFG) pile; composite foundation; deformation; cushion; finite element method

收稿日期:2013-06-15

基金项目:国家自然科学基金(51178380,51078309)

作者简介:田建勃(1986-),男,博士生,主要从事地基处理研究,(E-mail)tianjianbo2006@sina.com。

随着中国对煤炭资源地不断开发和利用,输煤暗道已经成为重要煤炭运输途径,由于输煤暗道的工程性质和特点,在通常情况下,多数输煤暗道处理地基的强度与稳定性时并不太难,不成为控制因素;目前工程面临的主要难题是沉降变形及其各种地基处理情况下的固结问题,所以沉降变形问题成为输煤暗道地基处理的主要问题。严格控制工后沉降,对于保障输煤暗道的顺利运输有着极其重要的意义。

CFG 桩复合地基技术以其地基处理效果好、施工速度快、质量容易控制、工程造价低等特点,目前已经成为了多层、高层建筑、高速公路地基处理的主要技术之一,取得了不少研究成果^[1-5]。文献[6]采用半无限弹性体中圆柱孔横向变形理论的方法,给出了在竖向荷载作用下计算复合地基最终沉降量的方法。文献[7]基于等应变假定分析,土体与桩顶位移相等,并给出了土分担荷载和土体沉降的关系。文献[8-13]根据不同的假定,给出了 CFG 桩复合地基承载力和沉降变形不同的计算方法。然而,将 CFG 桩复合地基技术应用于深埋暗道这类特种结构的地基处理还很少见,实际工程中对于深埋暗道地基处理往往采用很厚的褥垫层,对深埋暗道复合地基的承载性能、褥垫层的设置、沉降机理及变形计算等问题目前研究很少。碎石垫层因其具有抗剪强度高、压实性能好、透水性强、填筑密度大、承载力高等工程特性,在土木工程建设中得到了越来越广泛的应用^[14-15],而对于复合地基中碎石垫层(尤其是比较厚的碎石垫层)在高应力下的承载能力、变形特性尚缺乏研究。

以“山西平朔东露天煤矿暗道测试与研究”为依托,对深埋暗道 CFG 桩复合地基沉降变形进行分析,介绍了本课题组自己研制的输煤暗道地基变形监测方法,通过对具体试验工程进行现场测试、不同厚度碎石垫层的室内模型试验研究以及不同荷载下带有碎石垫层的 CFG 桩复合地基的有限元分析,并和实测沉降值进行对比。最后利用 ABAQUS 有限元法分析了不同厚度褥垫层对 CFG 桩复合地基桩土应力比、总沉降量、垫层压缩量和桩身轴向应力的影响规律。

1 试验工程概况

平朔矿区东露天矿选煤场为年产 2 500 万 t 特大型选煤厂,产品煤槽仓与装车站距离 3 348.7 m,其中东露天煤矿至电厂的输煤暗道长近 240 m,钢筋混凝土结构,顶部为拱形,底部倒拱形,两侧直墙。

地貌为典型的黄土高原沟壑地带,冲沟发育。

地质条件复杂,地层及岩土特性自上而下依次为:

1)冲填土(Q_4^{ml}):黄褐色,稍密—中密,稍湿—饱和,高压缩性,人工淤地坝冲填形成,主要成分为粉土,具水平层理,厚度 4.2~8.20 m,层底标高 1 322.08~1 333.03 m;

2)黄土(Q_3^{col}):浅黄色,粉土,土质均匀,具大孔及针孔,含零星钙核。稍密—中密,稍湿,中偏高压缩性,湿陷性中等,土层厚度 7.00~33.50 m,层底标高 1 325.20~1 333.03 m,地基承载力特征值 $f_{ak} = 140$ kPa;

3)粉质粘土(Q_{1-2}^{col}):棕红色—褐黄色,斑块状结构,节理发育,节理面光滑上部含少量钙质结核,下部含大量泥岩、砂岩碎屑。硬塑—坚硬状态,中压缩性,层厚 1.90~19.10 m,层底标高 1 298.88~1 322.08 m,地基承载力特征值 $f_{ak} = 220$ kPa;

4)强风化泥岩(P_{1r}):岩性由灰色—黄色及杂色的泥岩,夹多层砂岩薄层构成,局部夹有风化煤层,砂岩主要由石英、长石组成,泥质胶结,薄层状,地基承载力特征值 $f_{ak} = 450$ kPa;

5)中风化泥岩(P_{1r}):此层在强风化层以下,呈灰色—黄灰及杂色,由泥岩夹砂岩薄层构成,泥岩矿物成分主要为蒙脱石、高岭土,砂岩主要由石英、长石组成,含少量云母片。泥质胶结,薄层理,结构部分破坏,沿节理层面有次生矿物,岩体呈块状,最大揭露厚度 60.70 m。

暗道建成后需进行回填,回填深度约 40 m,下层地基土软弱,地下水埋深小于 2 m。地基土不能达到强度和沉降控制要求,所以对输煤暗道地基采用 CFG 桩复合地基进行地基处理。CFG 桩复合地基采用钻孔压灌桩长螺旋钻机成孔,泵送混凝土灌注,压灌桩直径 $\varphi = 500$ mm,桩长 15 m,采用正三角形布桩,桩心距为 1.2 m,其中褥垫层为 2 m 厚碎石垫层,压实系数不小于 0.96,碎石垫层宽出边桩外径 500 mm。为了保证暗道在建成后能安全地投入使用,设计中采用了尽可能高的安全系数。但从理论上和工程地质勘察资料中,对埋深达 40 m 的地基承载能力,很难作出科学评价,这样一来,设计的安全储备大小、保守程度如何以及设计的合理性如何等仍有待进一步研究探讨。

2 深埋暗道 CFG 桩及碎石垫层复合地基沉降变形计算分析

2.1 暗道沉降变化规律

地基变形测试采用课题组研制的双套管标杆法。测试点设置在输煤暗道底板不妨碍正常作业的

位置,在监测点设永久性沉降观测点,在其附近的暗道底板上留洞,洞口位于事先设置的变形标杆位置上方。地基变形测试点共设置2个。图1为沉降观测点剖面布置示意图,图2为双套管标杆法沉降监测原理示意图,沉降观测点现场沉降测试如图3所示。通过观测暗道结构随着填土高度及作用时间的增长,得到暗道沉降变化关系曲线(图4)。

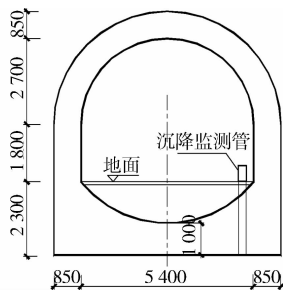


图1 沉降观测点剖面图布置示意图

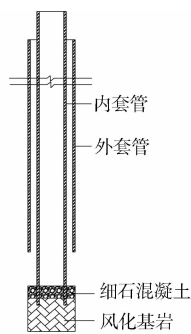


图2 双套管标杆法沉降监测原理示意图

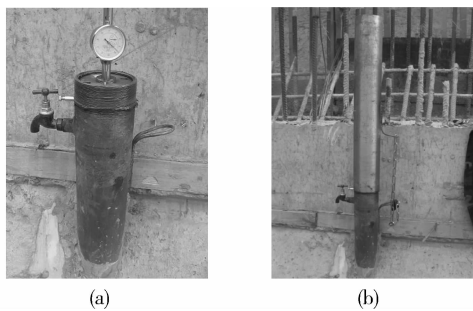


图3 沉降观测点现场布设

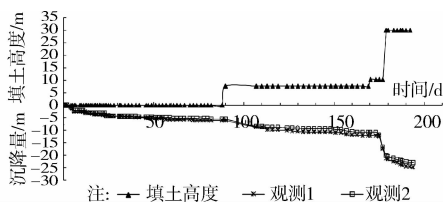


图4 暗道沉降随填土高度变化曲线

由图4可知,暗道结构完成时沉降约2 mm,仅暗道侧部填土的近3个月时间内,结构沉降变化较

小,稳定在5~6 mm,当填土高度变化时,结构沉降变化显著,可以看出当填土高度在顶部以上22.5 m时沉降量大约为25 mm。另外还可以看出,在填土施工过程中,沉降位移变化剧烈;填土稳定后变化十分缓慢,这时可以认为结构进入工后沉降,这个变化过程将随时间变化十分缓慢。

2.2 采用复合模量法的沉降变形计算

测试点设置在输煤暗道底板不妨碍正常作业的位置,在监测点设永久性沉降观测点,在输煤暗道施工之前,在设置变形标杆的位置(CFG桩中间位置的桩间土中)用百米钻打孔取样,钻孔2个,钻孔外径100 mm,钻深22 m,取原状土样20件/孔,每深1 m取一个样。根据在研究现场采取的原状土样,在实验室进行了原状土的高压固结试验和三轴固结不排水剪试验(CU),确定地基地层在高应力水平下的变性特性和抗剪强度指标。

为了准确计算复合地基的沉降变形,沉降计算并未采用勘察报告提供的整数压力区间的压缩模量 E_{s1-2} 、 E_{s2-3} 、 E_{s3-4} 、 E_{s4-5} ……,而是通过试验获得的 $e-p$ 曲线和不同固结压力下的孔隙比,来计算相应压力区间的压缩模量,以此进行复合地基的变形计算。因为不管是采用上述形式的压缩模量,还是采用 $E_{sp_0 \sim p_0+100}$ 、 $E_{sp_0 \sim p_0+200}$ 、 $E_{sp_0 \sim p_0+300}$ 、 $E_{sp_0 \sim p_0+400}$ ……形式的压缩模量计算沉降变形时均存在一定的误差^[16]。

因设计输煤暗道结构宽 $b = 7.1$ m,CFG桩复合地基处理段长 $l = 232.7$ m, $l/b = 232.7/7.1 = 32.77 > 10$,故基础底面下附加应力系数可按条形面积竖向均布荷载 p 来计算,根据竖向线均布荷载弗拉曼解,地基内任意一点的附加应力 σ_z 可按式(1)来进行计算。

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} \left[\arctan \frac{m}{n} - \arctan \frac{m-1}{n} + \frac{mn}{m^2+n^2} - \frac{n(m-1)}{n^2+(m-1)^2} \right] \quad (1)$$

其中: $m = x/b$, $n = z/b$ 。

根据设计资料,复合地基承载力特征值 $f_{spk} = 320$ kPa,输煤暗道底面下土的承载力 $f_{ak} = 140$ kPa,取作用于暗道基础底面处的附加应力 $p_0 = 427.5$ kPa(根据测试现场土压力盒测定,测试现场填土高度22.5 m),CFG桩桩长15 m,桩径500 mm。

复合地基的置换率见式(2)。

$$m' = \frac{\pi/4 d^2}{sh} = \frac{\pi/4 \times 0.5^2}{1.2 \times 1.039} = 0.1574 \quad (2)$$

CFG桩复合地基沉降变形按式(3)^[16]计算。

$$s = \psi_s \left[\sum_{i=1}^n \frac{p_0}{\zeta E_{si}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) + \sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) \right] \quad (3)$$

桩长范围复合土层压缩模量应将原来土层压缩模量乘以 ζ 系数,加固区土的模量提高系数见式(4)。

$$\zeta = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} = \frac{320}{140} = 2.29 \quad (4)$$

因输煤暗道基础中点对沉降最为敏感,计算时取暗道中点下各点来进行计算,所以 $m = x/b = 0.5$ 。变形计算深度范围内压缩模量的当量值 \bar{E}_s 为:

$$\bar{E}_s = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{E_{si}}} = \frac{4\,326.28}{131.48} = 32.90 \quad (5)$$

查变形计算经验系数 ψ_s 表,取 $\psi_s = 0.2$,则输煤暗道基础中点沉降为:

$$s = \psi_s s' = 0.2 \times 47.43 = 9.49 \text{ mm} \quad (6)$$

2.3 考虑褥垫层变形修正的复合地基沉降计算方法

根据在现场采集的碎石垫层,进行了不同厚度碎石垫层在高应力下的强度特性和变形指标室内模型试验研究,本试验是模拟大尺寸 CFG 桩复合地基碎石垫层的环境条件,采用褥垫层四边均约束、防止褥垫层从载荷板下挤出的侧限模型箱试验条件,主要是对不同厚度碎石垫层在侧限高应力下的强度特性和变形指标进行室内模型试验研究,分别对 10、20、30、40、50 cm 厚碎石垫层进行静载荷试验,得出了碎石垫层的强度特性和变形指标。限于篇幅,不再详细介绍室内模型试验方案。试验加载装置及原理见图 5、6。



图 5 试验加载装置图

室内试验得到的工程现场碎石垫层变形模量介于 40~49 MPa,按式(7)计算碎石垫层的沉降 S_s 。

$$S_s = \frac{P_0}{E_0} h = \frac{427.5}{E_0} \times 2\,000 \quad (7)$$

计算结果:碎石垫层的沉降 S_s 介于 17.45~21.38 mm,均值 19.21 mm。

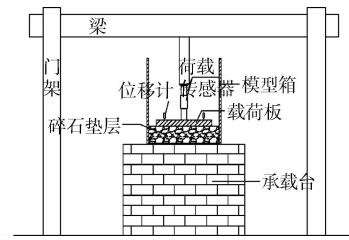


图 6 试验原理示意图

当填土高度在暗道顶部以上 22.5 m 时,实测沉降量约为 25 mm,式(6)计算的加固区的沉降量为 9.49 mm,因此,褥垫层的压缩量是应该被考虑到的,沉降修正计算不能仅仅针对复合地基,并应同时考虑褥垫层变形的修正。复合地基基础总沉降量 S 应由三部分组成,其一为桩长范围内土层加固区的压缩量 S_1 ,其二为下卧层的压缩量 S_2 ,其三为褥垫层压缩量 S_3 ,即 $S = S_1 + S_2 + S_3$ 。给出了考虑褥垫层变形修正的复合地基沉降计算公式:

$$s = \psi_s \left[\sum_{i=1}^n \frac{p_0}{\zeta E_{si}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) + \sum_{i=1}^{n_1} \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) \right] + \psi_c \frac{P_0}{E_0} h \quad (8)$$

式中: E_0 为褥垫层的变形模量; h 为褥垫层的厚度; ψ_c 为褥垫层变形修正系数;其余参数按规范法计算公式参数来取值。将计算值代入式(8),得

$$s = 9.49 + \psi_c \times 19.21 = 25 \quad (9)$$

得到褥垫层变形修正系数 $\psi_c = 0.81$,通过对其长期监测得到的沉降变形值,利用上述方法计算得到的褥垫层变形修正系数 ψ_c 在 0.8~0.9 之间。

目前在各类实用计算 CFG 桩复合地基沉降变形方法中,往往把复合地基沉降变形分成两部分:加固区的变形量 S_1 和下卧层的变形量 S_2 ,而忽略褥垫层产生的压缩量 S_3 。然而,褥垫层的沉降量是个应该被关注和重视的问题,是需要经过对实际的分析来确定,当褥垫层厚度较大,且褥垫层材料的级配不良,变形模量低,密实度小,则褥垫层的变形量是不能被忽略的,应根据具体工程情况进行计算;沉降变形计算不能仅仅考虑针对复合地基的修正,并应同时考虑褥垫层变形的修正。

沉降变形计算经验系数 ψ_s 与褥垫层变形修正系数 ψ_c 的取值对于复合地基最终沉降变形量的计算有很大的影响, ψ_s 和 ψ_c 取值的准确性在很大程度上决定了复合地基最终沉降计算的准确性。而 ψ_s 和 ψ_c 的取值又具有很强的地区性和经验性,沉降变形计算作为复合地基设计的关键问题,设计人员需掌握一定数量的同类型工程在同一地质条件下复合

地基的沉降观测资料,并经过统计对比、分析,采用这种半经验的方法,得到符合当地实际的经验修正系数,为今后更加准确有效的计算复合地基沉降变形积累宝贵资料。

3 不同褥垫层厚度对 CFG 桩复合地基影响的有限元分析

3.1 计算模型的建立

采用 ABAQUS 有限元软件^[17]来分析不同褥垫层厚度对 CFG 桩复合地基的影响。数值模拟时假定桩、土、褥垫层均为均质各向同性;桩体采用弹性模型,土体与褥垫层采用弹塑性 Mohr-Coulomb 模型;桩及桩周土体采用二维轴对称模型进行计算。计算模型土体的水平方向取一倍桩长,竖向方向取 2 倍桩长 30 m。单桩模型根据对称性取四分之一分析,桩、土、垫层分别采用 4 结点平面实体单元,在桩土、桩垫层间设立面面接触单元,在对称面上施加对称约束,土体四周和底部施加固定约束。模型几何尺寸示意图见图 7。地基土的物理力学性质根据室内三轴试验和高压固结试验确定,各种材料的模型参数选值见表 1。

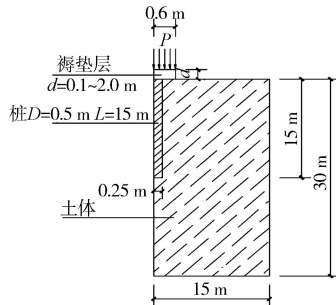


图 7 数值分析模型几何尺寸示意图

表 1 计算模型的材料参数

材料	模量 E/MPa	泊松比 ν	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
褥垫层	45	0.22	0	40	18
桩	2.55×10^4	0.22			22
土	32	0.25	35	25	20

注:表中模量:桩为弹性模量,褥垫层、土为变形模量。

3.2 计算结果分析

3.2.1 不同褥垫层厚度下荷载与桩土应力比的关系 图 8 分析了不同褥垫层厚度下荷载 P 与桩土应力比 n 的关系。由图 8 可知,随着荷载的增加,桩土应力比呈现如下的变化规律:在加荷初期,桩顶的褥垫层由于更容易被压缩,因此,CFG 桩桩体发挥了更大的作用,桩土应力比此时较大;随着荷载的不断

增加,CFG 桩桩体发生了反向刺入,此时桩间土逐渐开始发挥作用,桩间土应力增大,桩土应力比开始减小;随着荷载的增加,桩端向持力层刺入,此时桩承担的荷载又进一步增大,桩土应力比增大。这种趋势在褥垫层越薄越明显,当褥垫层较厚时桩土应力比随荷载的增加几乎不变。

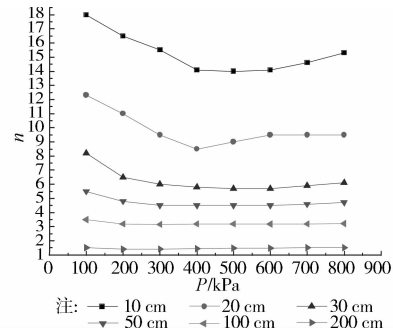


图 8 不同褥垫层厚度 H 下荷载 P 与桩土应力比 n 关系曲线

3.2.2 褥垫层厚度对桩土应力比的影响 图 9 分析了不同荷载 P 下褥垫层厚度 H 与桩土应力比 n 关系曲线。由图 9 可知,随着褥垫层厚度 H 的增加,桩土应力比 n 逐渐减小,这与垫层的调节作用有关,垫层厚度较大时,允许桩顶有较大的上刺入,桩的荷载分担比小,桩顶应力减小,这就造成了桩土应力比的减小。褥垫层厚度在 10~50 cm 之间对桩土应力比有很大的调节作用。当褥垫层厚度再增大时,其调节桩土荷载分配的能力已明显减弱。

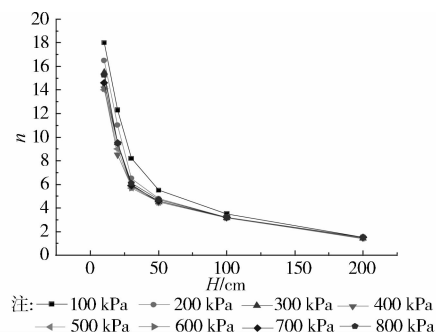


图 9 不同荷载 P 下褥垫层厚度 H 与桩土应力比 n 关系曲线

3.2.3 褥垫层厚度对复合地基总沉降量、垫层压缩量的影响 由图 10、11 可知:1)总沉降均随着垫层厚度的增加而增加。当垫层厚度在 10~50 cm 内时,总沉降随着垫层厚度的增加较为缓慢,而当垫层厚度超过 50 cm 后,总沉降量随垫层厚度的增加,变化明显加快。2)褥垫层厚度越大,褥垫层的压缩量在复合地基的总沉降中占的比重越大,褥垫层的压缩量在复合地基沉降计算中是不能被忽略的,相对

较厚的褥垫层会增加垫层压缩量从而增大复合地基的沉降,但是褥垫层本身的压缩无助于桩和桩间土总承载力的发挥。再次证明了在复合地基沉降计算中,总沉降量应由加固区变形量、下卧层变形量和褥垫层压缩量构成。

3.2.4 不同褥垫层厚度对桩身轴向应力的影响
有限元计算采用分级加载方式,每级 100 kPa,直到 800 kPa,垫层厚度变化如前计算方案所述。选取总荷载分别为 400、800 kPa 下不同褥垫层厚度桩身轴向应力沿桩长分布如图 12、13 所示。

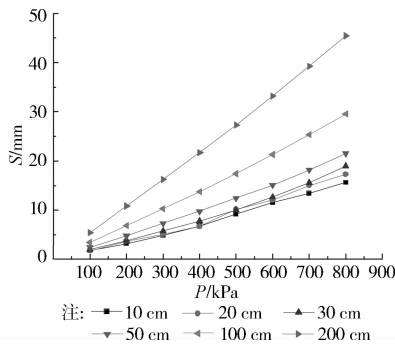


图 10 不同褥垫层厚度 H 下荷载 P 与总沉降量 S 关系曲线

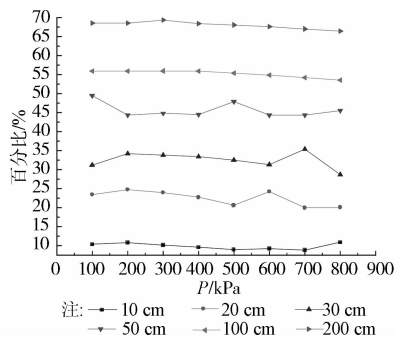


图 11 不同褥垫层厚度 H 下褥垫层压缩量占总沉降量的百分比

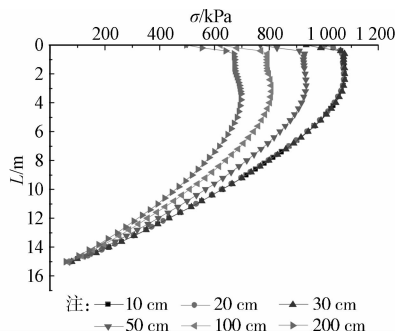


图 12 总荷载为 400 kPa 下不同褥垫层厚度桩身轴向应力 σ 沿桩长 L 分布

由图 12 和图 13 可知:1)对各种不同厚度褥垫层情况下,从桩顶部位向下,轴力逐渐增大,在桩顶下约 2.4 m 深处(均在 $0.16 L$ 左右处, L 为桩长

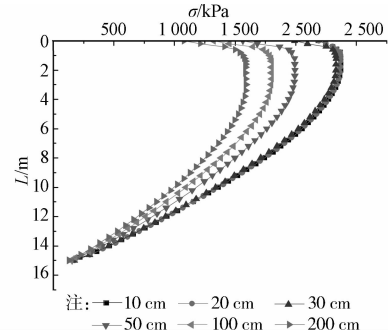


图 13 总荷载为 800 kPa 下不同褥垫层厚度桩身轴向应力 σ 沿桩长 L 分布

15 m),桩轴力达到最大值,随后逐渐减小,至桩端达到最小值,桩顶应力大于桩端应力。2)在垫层厚 10 cm 时,桩顶应力最大,随着垫层厚度增大,桩身轴力沿深度都在逐渐减小,垫层越厚减小越大;对不同厚度的垫层,桩顶应力变化较大,桩端应力变化较小。桩顶轴力随垫层厚度增加而减小,在垫层厚度小于 50 cm 时,桩顶轴力随厚度增加其减小趋势较微弱,当垫层厚度大于 50 cm 时,桩顶轴力随厚度增加其减小趋势较明显。

4 沉降计算、有限元分析和现场实测结果对比分析

对实际具体工程情况,将考虑垫层变形修正的复合地基沉降计算结果、有限元分析结果与现场沉降观测结果进行对比,见图 14。可以看出,三者结果基本接近,考虑垫层变形修正的复合地基沉降计算值、有限元计算值和实测值具有相似的变化规律。对于深埋暗道 CFG 桩及碎石垫层复合地基变形计算时,不能仅仅考虑针对复合地基的修正,并应同时考虑褥垫层变形的修正。深埋暗道褥垫层设计时,要减小沉降变形,应选择级配良好,变形模量高,密实度大的碎石垫层作为复合地基的褥垫层材料。

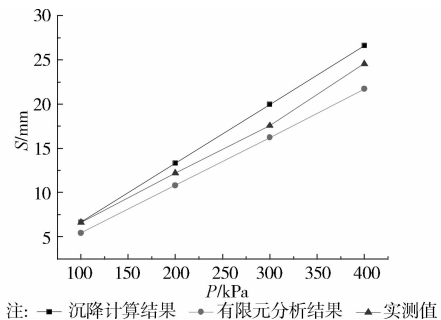


图 14 沉降计算、有限元分析和现场实测结果的对比

5 结语

1)采用双套管标杆法进行输煤暗道地基沉降变

形监测,施工方便,方法可行,值得在类似工程中进一步推广应用。

2)褥垫层的沉降量是个应该被关注和重视的问题,需要经过对实际的分析来确定。沉降变形计算不能仅仅考虑针对复合地基的修正,并应同时考虑褥垫层变形的修正。沉降变形计算经验系数 ϕ_s 与褥垫层变形修正系数 ϕ_c 的取值对于复合地基最终沉降变形量的计算有很大的影响。

3)过厚的褥垫层不仅不经济,而且会起反作用,桩体不能更好的发挥其承载能力,其总沉降量也会加大。

参考文献:

- [1] 赵明华,何腊平,张玲. 基于荷载传递法的CFG桩复合地基沉降计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(3):839-844.
Zhao M H, He L P, Zhang L. Settlement calculation of CFG pile composite foundation based on load transfer method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 839-844.
- [2] 李华明,蒋关鲁,刘先峰. CFG桩加固饱和粉土地基的动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1550-1554.
Li H M, Jiang G L, Liu X F. Study of dynamic characteristics of saturated silty soil ground treated by CFG columns [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5):1550-1554.
- [3] 徐林荣,王宏贵,左坤,等. 高速铁路沉降控制复合桩基的性状试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9):2605-2612.
Xu L R, Wang H G, Zuo S, et al. Test study of performance of composite pile foundation of high-speed railway controlling settlement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9):2605-2612.
- [4] 张建伟,原华,孔德志. CFG桩复合地基褥垫层效用的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(Suppl2): 460-463.
Zhang J W, Yuan H, Kong D Z. Finite element analysis of cushion in CFG pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Suppl2): 460-463.
- [5] 周爱军,栗冰. CFG桩复合地基褥垫层的试验研究和有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1803-1808.
Zhou A J, Li B. Experimental study and finite element analysis of cushion in CFG pile composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1803-1808.
- [6] Cannon R W. Proportioning fly ash concrete mixes for strength and economy[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1968, 65(11):23-28.
- [7] Priebe H. Estimating settlement in a gravel column consolidated soil[J]. Die Bautechnik, 1976, 53:160-162.
- [8] Lei X Y, Sun X H, Zhao F L, et al. Design of CFG-pile composite foundation under isolated foundation bearing eccentric compression [C]//2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering, April 22-24, 2011, Lushan, China. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011: 4907-4912.
- [9] Canetta G, Nova R. A numerical method for the analysis of ground improved by columnar inclusions [J]. Computers and Geotechnics, 1989, 7(1):99-114.
- [10] Park Y J. Equivalent linearization for seismic response I: Formulation and error analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2207-2226.
- [11] Ekstrom J C, Berntsson J A, Sallfors G B. Test fills of clays stabilized with cement columns [C]//Proceedings 13th ICSMFE. [s. l.]:[s. n.], 1994: 1183-1186.
- [12] Alamgir M, Miura N, Poorooshasb H B, et al. Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions [J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(4):267-290.
- [13] Ellison R D, Dappolonia E. Load-deformation mechanism for bored piles [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(4), 661-678.
- [14] 刘志伟,杨生彬. 碎石垫层在百万千瓦级机组主厂房地基处理中的应用[J]. 电力勘测设计, 2010(2):12-15.
Liu Z W, Yang S B. Application of sand-gravel cushion replacement method in main building of 1000 MW unit power plant [J]. Electric Power Survey & Design, 2010(2):12-15.
- [15] 李丽民,何兆益,银力. 重载作用下大碎石柔性基层的抗车辙性能[J]. 土木工程与环境工程, 2009, 31(1): 83-88.
Li L M, He Z Y, Yin L. Rut-resistance properties of a large-stone flexible base under heavy loads[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(1):83-88.
- [16] 阎明礼,张东刚. CFG桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [17] 冯嵩,郑颖人,孔亮,等. 广义塑性力学多重屈服面模型隐式积分算法及其ABAQUS二次开发[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10):2019-2025.
Feng S, Zheng Y R, Kong L, et al. Implicit algorithm of multi-yield-surface model based on generalized plasticity and its redevelopment in ABAQUS [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10):2019-2025.