

文章编号:1673-2049(2007)04-0045-05

山区变电站高填方地基工后沉降分析

贺广零¹, 李倩妹², 洪芳³, 彭双艳⁴

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 中南林业科技大学 土木建筑与力学学院, 湖南 长沙 410004;
3. 福建工程学院 土木工程系, 福建 福州 350007; 4. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:首先从试验和理论2个方面确定了山区变电站高填方地基工后沉降的主要影响因素,即填方高度和变形模量,并给出计算地基工后沉降的初步公式;然后结合2个典型工程对公式中的系数进行修正,拟合出一个实用的经验公式;最后以2个山区变电站工程为例进行分析,发现理论计算值与实测值吻合良好,有力地论证了该公式的有效性。所得的结论为山区变电站高填方地基工后沉降的进一步研究和相关规范的制定提供了参考。

关键词:山区变电站;高填方地基;工后沉降;变形模量;压实度

中图分类号:TU433 **文献标志码:**A

Analysis of Post-construction Settlement of Transformation Substation High Fill Foundation in Mountainous Areas

HE Guang-ling¹, LI Qian-mei², HONG Fang³, PENG Shuang-yan⁴

(1. Department of Architectural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Architectural Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 3. Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350007, Fujian, China; 4. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Firstly, authors presented the main influencing factors of post-construction settlement of transformation substation high fill foundation in two ways of experiment and theory, which is fill height and deformation modulus, and a primary formula of post-construction settlement of foundation was given. Then, the key coefficients of post-construction settlement were modified and a useful formula was deduced based on two typical transformation substation projects. At last, taking two transformation substation projects as an example, the theoretical computing values agreed well with the measured values, which showed the validity of the formula. This paper is useful for the further research of post-construction settlement of transformation substation high fill foundation in mountainous areas and designing of relevant codes.

Key words: transformation substation in mountainous area; high fill foundation; post-construction settlement; deformation modulus; compaction density

0 引言

在现代社会,电力是国民经济的根本,而变电站

又是电力的中枢,因此,变电站建设是关乎国民经济命脉的生命线工程。中国人口众多,土地资源相对紧缺,为了充分利用土地资源,有必要将变电站建在

收稿日期:2007-10-16

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(50321803)

作者简介:贺广零(1982-),男,湖南衡阳人,工学博士研究生,E-mail:hglcool@126.com。

山区。由于山区特殊的地质条件,变电站依山而建势必导致许多特殊的问题,其中,山区变电站高填方地基沉降分析是众多问题中的核心问题。在高填方地基沉降的研究过程中,谢春庆^[1-2]、刘宏等^[3]对机场高填方地基沉降进行了研究,黎丽^[4]、郑治^[5]对高填方路基沉降进行了分析,本文中笔者则在前人研究的基础上对山区变电站高填方地基工后沉降进行了探索。

1 主要影响因素试验分析

1.1 填方高度

从经验中可知,填方高度是影响高填方地基沉降的主要因素。通过分析不同工程的工后沉降与填方高度的关系(图 1),不难发现以下 2 个规律:

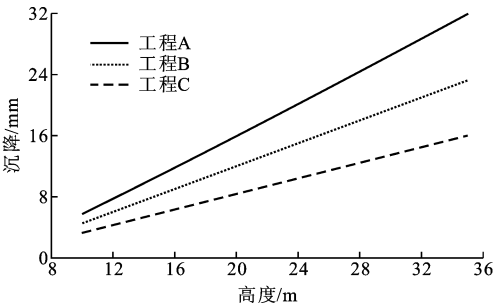


图 1 工后沉降与填方高度之间的关系
Fig. 1 Relation Between Post-construction Settlement and Fill Height

(1)从不同高度高填方地基的工后沉降数值可以看出,填方高度越高,填筑体自身沉降越大。

(2)工程 A、B、C 分别为中国山区变电站高填方地基 3 种粗粒填料(砂岩 A、泥岩 B、钙质页岩 C)对 10~35 m 范围内高填方地基沉降的实测结果。显然,工程 A、B、C 的干密度和压实度是不一样的,三者在工后沉降上的差异说明,干密度和压实度也是影响高填方地基工后沉降的重要因素。

1.2 填料类型

由表 1 可以看出,高填方地基工后沉降随填料类型的不同而变化。对其进行分析,不难得出以下 2 个结论:

(1)石类填料或土石混合填料的压缩性小于土类填料,对于石类填料,弹性模量越大的石料,其后期压缩性越小,故而工后沉降也就越小。

(2)透水性良好的填料工后沉降明显小于透水性较差的填料(填石比填土透水性好)。

表 1 填料类型对工后沉降的影响

Tab. 1 Influences of Filling Style on Post-construction Settlement

填料类型	干密度/(kg·m ⁻³)	压实度	工后沉降/mm
砂岩	20.10	0.92	7.29
钙质页岩	19.90	0.92	14.34
泥岩	19.80	0.91	15.30
页岩土	18.76	0.93	23.61
砂类土	17.72	0.91	26.60
粉质黏土	17.39	0.91	37.14

1.3 填料压实度

对高填方地基而言,压实度也是影响其工后沉降的一个重要因素。对工后沉降与压实度之间的关系(图 2)进行分析,得出以下 2 个结论:

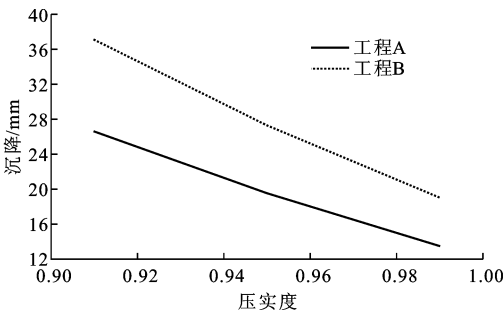


图 2 工后沉降与压实度之间的关系

Fig. 2 Relation Between Post-construction Settlement and Compaction Density

(1)压实度与工后沉降之间存在较好的负相关性。在同一工程中,压实度越大,其后期的工后沉降越小,对于高填方地基,提高地基压实度可以有效减小后期的工后沉降。如对于碎石土填料,压实度为 0.91 填料工后沉降比压实度 0.95 的填料大了约 90%。从多个样本的计算结果来看,在一般情况下,填筑体的自身压缩量一般占填方高度的 1% 以下。

(2)工后沉降对压实度有较强的敏感性。压实度的轻微扰动,会导致工后沉降较大的变化,也就是说,工后沉降对压实度有较强的灵敏度。因此,要减小高填方地基的工后沉降,提高填料的压实度是一个有效的方法。

由上述可知,通过工程实测确定影响高填方地基沉降的主要因素有填方高度、填料类型、填料压实度等。而与这些主要影响因素等价的力学指标主要有填方高度和碎石土的弹性模量,这个结论是获得工后沉降经验拟合公式的基础。

2 主要影响因素理论分析

在山区变电站高填方地基工程中,高填方土体

在自重荷载作用下的沉降量计算方法,在一些土力学和地基基础教材中尚未见到。笔者依据弹性力学^[6-8]推导出大面积高填方土体在自重荷载作用下沉降量的简易计算公式。图 3 为在地基上大面积高填方土体中取出的一个微元柱体,其中, H 为填方高度, ν 为泊松比, ρ 为密度。

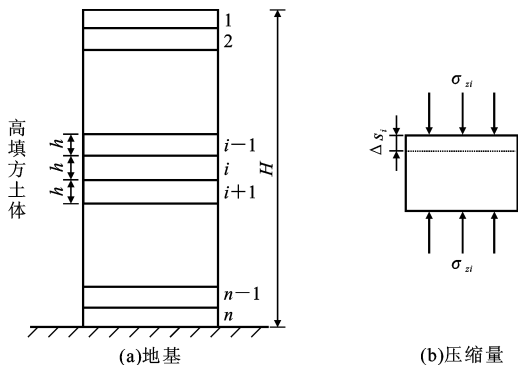


图 3 高填方土体中取出的微元柱体

Fig. 3 Micro-cell Column from High Fill Soil

由弹性力学可知,上述问题是一个三维空间轴对称问题。高填方土体中任意一个微元体的应力-应变关系式为

$$\epsilon_x = \frac{1}{E_0} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (1)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E_0} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (2)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E_0} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (3)$$

式中: E_0 为变形模量。

由于空间轴对称问题的微元体没有侧向位移,只有垂向位移,故

$$\epsilon_x = \epsilon_y = 0 \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)、(2)中,然后与式(3)合并,可得

$$\epsilon_z = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \frac{\sigma_z}{E_0} \quad (5)$$

式(5)即为高填方土体中竖向应变与竖向应力之间的关系式。

在高填方土体中取一个微元柱体,并分成 n 层,层高度为 h 。其中,第 i 层上的土柱在自重荷载作用下的竖向压缩量[图 3(b)]的计算公式为

$$\Delta s_i = h \epsilon_{zi} = h \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \frac{\rho g (i-1) H}{n E_0} \quad (6)$$

则高填方地基沉降为

$$s = \sum_{i=1}^n \Delta s_i = \sum_{i=1}^n \frac{i-1}{n} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \frac{\rho g H^2}{E_0} = \frac{\rho g h H}{E_0} = \frac{n-1}{2n} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \frac{\rho g H^2}{E_0} \quad (7)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时,式(7)可简化为高填方地基沉降的简易计算公式

$$s = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \frac{\rho g H^2}{E_0} \quad (8)$$

由式(7)可知,影响高填方土体沉降的主要因素有填方高度 H 、变形模量 E_0 、密度 ρ 、泊松比 ν 。对于高填方碎石土而言,密度保持在 $2.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右,泊松比也基本维持不变,故重度和泊松比都可看作常量。因此,对高填方地基沉降起决定作用的因素为填方高度 H 和变形模量 E_0 ,这与实测结果得出的结论是一致的。

3 经验拟合公式

由试验和理论分析可知,影响高填方地基沉降的主要因素为填方高度 H 和变形模量 E_0 ,同时,由理论分析还可得出高填方地基沉降与 H^2/E_0 成正比。然而,在分析过程中假设土体是连续且完全弹性的,显然有些理想化,因此,要获得符合实际工程的计算公式,必须借助实测数据对理论公式的常数项进行修正^[9-14]。在确定了高填方地基沉降主要影响因素的基础上,本文对中国众多山区变电站高填方地基工后沉降实测记录进行了分析(表 2、3,其中山区变电站 A 和 B 是 2 个较为典型的工程),期望通过实测数据拟合出一个具有一定精度且简单实用的公式。

表 2 山区变电站 A 高填方地基工后沉降

Tab. 2 High Fill Foundation Post-construction Settlement of Transformation Substation A in Mountainous Areas

填方高度 H/m	10.9	45.1	17.3	19.1
工后沉降实测值 s/mm	3.4	8.8	10.7	14.6
$H^2 \cdot E_0^{-1}/(\text{m}^2 \cdot \text{MPa}^{-1})$	4.750	9.120	11.972	14.592

对表 2、3 的数据进行了工后沉降 s 与 H^2/E_0 的曲线拟合,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,高填方地基的工后沉降计算公式可以表示为

$$s = 4.493 + 0.672 H^2 / E_0 \quad (9)$$

4 算 例

4.1 工程实例 1

500 kV 龙中变电站位于广东省深圳市龙岗区,站址覆盖层由第四纪冲积物、坡积物、残积物组成,除站址的东部和南部低洼山坑揭露有薄层软弱土外,其余承载性能较好,下伏基岩为燕山三期的花岗岩。东部和南部山坑内存在可塑~软塑的冲积黏

表 3 山区变电站 B 高填方地基工后沉降

填方高度 H/m	34.3	17.5	9.5	25.5	40.5	46.5	51.6	54.0	25.0	34.2	35.5	37.0	29.0	35.6	40.0	34.0	27.2
工后沉降实测值 s/mm	5.3	1.3	1.3	3.8	10.7	12.1	11.3	8.6	5.4	5.6	6.9	9.3	4.5	7.7	7.9	1.2	6.6
$H^2 \cdot E_0^{-1}/(\text{m}^2 \cdot \text{MPa}^{-1})$	2.10	0.54	0.16	1.14	2.87	3.78	4.65	5.10	1.09	2.04	2.20	2.39	1.47	2.22	2.80	2.02	1.29

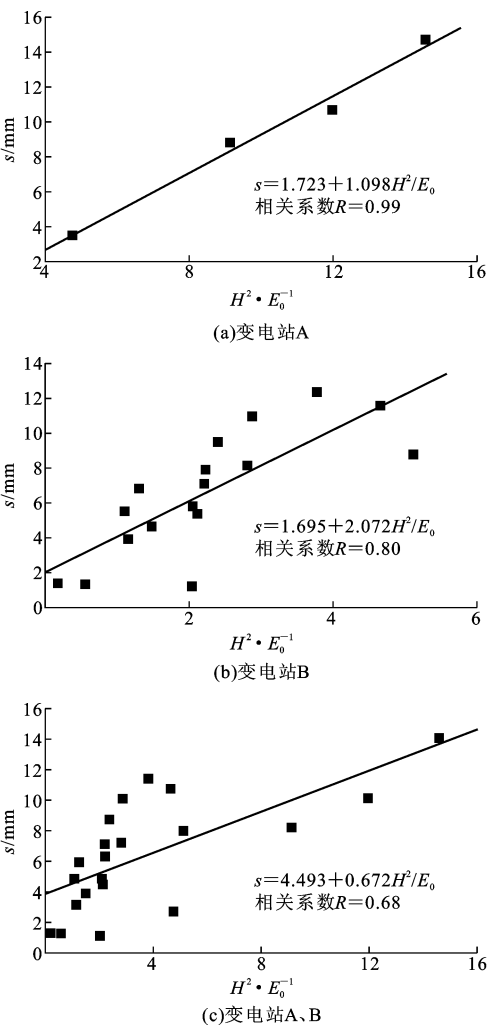


图 4 山区变电站高填方地基 s 与 H^2/E_0 拟合曲线
Fig. 4 Fitting Curves of s and H^2/E_0 of High Fill Foundation of Transformation Substation in Mountainous Areas

土,属中软、软弱土,可视为不利地段,其余地段均为中硬土,属有利地段。综合该区的地质条件,依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)^[15]的有关规定,场地类别为 II 类。场地平整采取土方挖填平衡,回填区回填土主要为硬塑粉质黏土及硬塑残积砾质黏性土,场地回填土最大高度为 19 m,采用分层碾压方式加固地基,压实系数即压实度不小于 0.94。500 kV 龙中变电站分层碾压回填土地基压板试验共完成 3 点,分别为试验点 $Y_1 \sim Y_3$ 。对于试验点 Y_3 而言,填方高度为 19 m,变形模量为 74.16 MPa,依据式(9)有

$$s=4.493+0.672H^2/E_0=7.764\text{ mm}\tag{10}$$

试验点 Y_3 的实测工后沉降为 7.19 mm,相对误差为 7.39%。

4.2 工程实例 2

220 kV 铁涌变电站位于广东省惠州市惠东县铁涌镇境内,站址范围内上覆第四系地层相对较薄。在丘陵地段,上覆第四系地层为薄层坡积和残积黏性土;在凹地或洼地(水田或荒地),上部存在一薄层冲洪积层(包括黏性土和砂土),下部依然为坡积和残积黏性土。场地下伏基岩为泥盆系桂头群砂岩。在钻孔揭露范围内,按岩石风化等级和工程地质分类,依次划分为全风化、强风化、中等风化带,但是,场地风化岩以强风化砂岩为主。场地风化岩埋藏浅,部分地段已直接露出于地表。另外,站内基岩风化程度不均一,岩块软硬程度差异大,中等风化岩层面起伏和埋藏深度变化大。场地平整采取土方挖填平衡,站区南面丘间凹地或洼地先清除表层软弱土厚为 2~3 m,回填土主要为北面丘陵风化砂岩碎石土,场地回填碎石土最大高度为 12 m,采用强夯方式加固地基。220 kV 铁涌变电站强夯碎石土地基压板试验共完成 6 点,分别为试验点 $Y_1 \sim Y_6$,对于试验点 Y_2 而言,填方高度为 12 m,变形模量为 66.56 MPa,依据式(9)有

$$s=4.493+0.672H^2/E_0=5.947\text{ mm}\tag{11}$$

试验点 Y_2 的实测工后沉降为 5.48 mm,相对误差为 7.85%。

5 结 语

(1)山区变电站高填方地基沉降的主要影响因素是填方高度 H 和变形模量 E_0 ,并且与 H^2/E_0 成正比。

(2)式(9)可用于山区变电站高填方地基的工后沉降估算,该公式具有一定的精度,同时简洁明了,便于工程应用。

(3)以 500 kV 龙中、220 kV 铁涌 2 个山区变电站工程为例,发现高填方地基工后沉降理论计算值与实测值吻合良好,有力地论证了本文公式的有效性。该文所得的结论为山区变电站高填方地基工后

沉降的进一步研究和相关规范的制定提供了参考。

参考文献:

References:

- [1] 谢春庆,邱延峻.粗巨粒土填筑地基[M].成都:西南交通大学出版社,2003.
XIE Chun-qing, QIU Yan-jun. Coarse Grained Soil Filling Foundation[M]. Chengdu: Southwest Transportation University Press, 2003.
- [2] 谢春庆,刘汉超,甘厚义.高填方块碎石夯实地基变形的研究[J].岩土工程学报,2002,24(1):38-41.
XIE Chun-qing, LIU Han-chao, GAN Hou-yi. Study on Deformation of Ground Under High Fill of Block and Detritus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 38-41.
- [3] 刘宏,李攀峰,张倬元.九寨黄龙机场高填方地基工后沉降预测[J].岩土工程学报,2005,27(1):90-93.
LIU Hong, LI Pan-feng, ZHANG Zhuo-yuan. Prediction of the Post-construction Settlement of the High Embankment of Jiuzhai-Huanglong Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 90-93.
- [4] 黎莉.高填石路堤施工沉降观测及质量控制方法研究[D].长沙:湖南大学,2001.
LI Li. Study on Settlement Observation and Quality Control Method of High Embankment with Rock [D]. Changsha: Hunan University, 2001.
- [5] 郑治.高填路堤沉降变形规律研究及压实技术课题成果简介[J].公路交通技术,2005,21(5):12-15.
ZHENG Zhi. Introduction of Project of Settlement Deformation Law Research and Compaction Technology of High Embankment[J]. Technology of Highway and Transport, 2005, 21(5): 12-15.
- [6] 徐芝纶.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,1990.
XU Zhi-lun. Elastic Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [7] 徐秉业,刘信生.应用弹塑性力学[M].北京:清华大学出版社,1995.
XU Bing-ye, LIU Xin-sheng. Applied Elastic and Plastic Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [8] 钱加欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1996.
QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Theory and Calculation of Soil[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Conservancy and Electric Power Press, 1996.
- [9] 夏建中,江雯,谢康和.成层非均质地基一维固结方程半解析求解[J].中国公路学报,2006,19(3):8-11.
XIA Jian-zhong, JIANG Wen, XIE Kang-he. Semi-analytical Solution to One-dimensional Consolidation Equation of Layered Non-homogeneous Subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 8-11.
- [10] 汪益敏,王秉纲.公路土质路基边坡坡面冲刷稳定性的模糊综合评价[J].中国公路学报,2005,18(1):24-29.
WANG Yi-min, WANG Bing-gang. Fuzzy Evaluation Method of Scouring Stability on Soil Subgrade Slope [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 24-29.
- [11] 刘保健,支喜兰,谢永利,等.公路工程中黄土湿陷性问题分析[J].中国公路学报,2005,18(4):27-31.
LIU Bao-jian, ZHI Xi-lan, XIE Yong-li, et al. Analysis of Problems on Loess Hydrocompaction in Highway Engineering [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 27-31.
- [12] 杨果林,丁加明.膨胀土路基的胀缩变形模型试验[J].中国公路学报,2006,19(4):23-29.
YANG Guo-lin, DING Jia-ming. Model Test on Expansion and Shrinkage Deformation in Expansive Soil Roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 23-29.
- [13] 李进军,黄茂松,王育德.交通荷载作用下软土地基累积塑性变形分析[J].中国公路学报,2006,19(1):1-5.
LI Jin-jun, HUANG Mao-song, WANG Yu-de. Analysis of Cumulative Plastic Deformation of Soft Clay Foundation Under Traffic Loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 1-5.
- [14] 李宁,徐彬,陈飞熊.冻土路基温度场、变形场和应力场的耦合分析[J].中国公路学报,2006,19(3):1-7.
LI Ning, XU Bin, CHEN Fei-xiong. Coupling Analysis of Temperature, Deformation and Stress Field for Frozen Soil Roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 1-7.
- [15] GB 50011—2001,建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001, Code for Seismic Design of Buildings[S].