第25卷 第4期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 25 No. 4
2012年12月 JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE) Dec. 2012

水泥搅拌桩加固软黏土地基模型试验和有限元分析

孙发平

(长沙市轨道交通集团有限公司,湖南 长沙 410000)

摘要:在软黏土(黄土质粉质黏土、粉土和粉质黏土)地基上做了路基施工的离心模型试验研究,重点探讨了在水泥搅拌桩法加固处理后地基的沉降随时间的变化关系、基底应力分布规律、地基加固效果等。得到如下结论:①提出了水泥搅拌桩法加固处理地基离心模型试验的设计及模型制作方法。②由水泥搅拌桩加固处理的试验结果可知,水泥搅拌桩处理后的地基在施工期间可以完成大部分沉降,能够有效减少工后沉降,对工后沉降要求比较严格的工程而言,水泥搅拌桩法加固处理地基是一种有效的加固工法。③通过有限元计算,得出其结果可以作为在工程设计、施工时推导总沉降量的参考。

关键词:水泥搅拌桩;地基沉降;基底应力;模型试验;有限元分析

中图分类号:U213 文献标识码:A 文章编号:2095-0373(2012)04-0086-05

0 引言

路基沉降变形主要是由软弱地基变形引起的。水泥搅拌桩利用固化剂与地基土搅拌形成的水泥土硬化机理,使加固体和桩间土共同分担路基上部荷载,提高地基承载力,减小地基沉降变形,同时减小路基沉降变形。在修建胶济客运专线时,王村施工段地质情况复杂,主要分布着黄土质粉质黏土,粉土、粉质黏土,且分布不均,差异较大,对控制沉降非常不利。所在区域内地下水位埋深旱季17~33 m,雨季8~15 m,地基土主要处于非饱和状态。用离心机模型试验[1]和有限元计算分析研究了软黏土(黄土质粉质黏土、粉土和粉质黏土)地基用水泥搅拌桩加固的沉降变形特性和基底应力。希望较好地反映水泥搅拌桩加固地基[2]原型的沉降特性,预测地基沉降,更好地指导路基施工。

1 模型试验

1.1 试验材料及物理参数

试验材料按《原状土取样技术标准》(JGJ89—92),在施工现场用钻孔法取4~20 m原状软黏土(黄土质粉质黏土、粉土和粉质黏土)。按《铁路工程土工试验规程》(TB10101—2004)和《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)测定了原状土的天然密度、含水率、饱和度等物理指标。原状软黏土带回试验室后再晒干,碾碎,过筛,按原土层密度和含水率配置地基重塑土,具体物理参数见表1。

表1 试验地基土物理参数

土的种类	土层厚度/cm	天然密度/(g·cm^{-3})	含水率/%	饱和度/%	填筑质量/kg
黄土质粉质黏土	5.8	1.92	9.4	56	53.5
粉土	15	1.91	12	81	137.5
粉质黏土	18	1.94	21	100	167.6

1.2 模型尺寸及制作

本次模型试验为水泥搅拌桩加固软黏土(黄土质粉质黏土、粉土和粉质黏土)地基试验,在西南交通大学土工试验室进行。试验分2组完成:(1)模拟路基在施工期及静置期沉降特性;(2)模拟路基在使用期沉降特性。根据下述模型制作选择采用大型模型箱800 mm×600 mm×600 mm(长×宽×高)进行离

收稿日期:2012-09-19
作者简介:孙发平 女 1975年出生 工程师

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

心模型试验。模型相似比采用 $N = 80$ 。模型路堤一次填筑完成,采用加速度逐级增加的方式模拟现场路堤填筑过程,离心模型最终的几何形状与现场原型相同。试验如下。

模型制作时,取配好的地基重塑土,在模型箱内分层压实填筑: 首先填筑厚 18 cm 的粉质黏土,再填筑厚 15 cm 的粉土,最后填筑厚 5.8 cm 的黄土质粉质黏土。地基铺好后,在地基中打孔,灌入水泥,待其变硬后成为水泥搅拌桩。水泥搅拌桩采用 C25 水泥、水、细砂及速凝剂制成,加固地基桩长 6.5 cm,桩径 0.68 cm,桩间距 1.25 cm,加固宽度为 40 cm。待水泥搅拌桩强度达到设定标准的 80% 开始进行路堤填筑。路堤采用现场所取黄土质粉质黏土制作,高 9 cm,边坡比 1∶ m = 1∶ 1.5。路堤上部荷载在模型中用折算的钢板等效替代。钢板宽 3.25 cm,厚 1.1 cm。模型尺寸和仪器埋设图如图 1 所示。

1.3　路基放置期间模拟

设定路基施工期为 80 d,按照 $a = 80g$ 的加速度换算,模型在离心机中的运行时间为 20.25 min。

1.4　路堤的长期运营模拟

按 3 a 使用期测试路堤的工后沉降及附加应力。模型在离心机中的运行时间为 250 min。

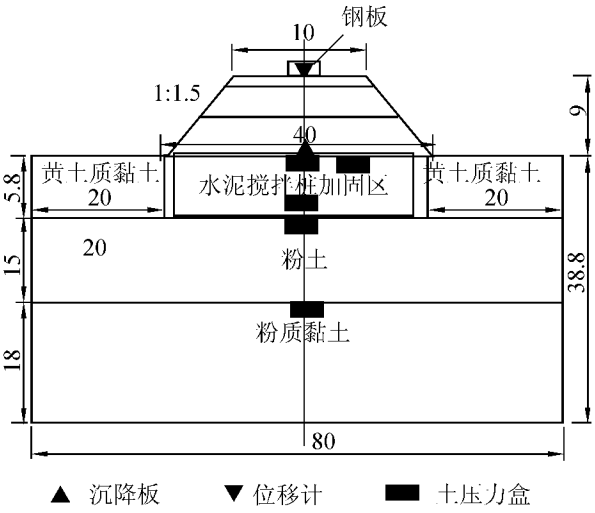

图 1　水泥搅拌桩加固与仪器埋设断面(单位: cm)

2　试验结果及分析

(1) 路基施工过程(80 d) 、静置期间(3 个月) 和使用期(3 a) 沉降与时间关系如图 2 和图 3 所示。

从图 2 和图 3 可得出,非饱和粉土、粉质黏土路基模型试验结果(如表 2 所示) 。又可得出路基基底最终沉降量 = 施工期沉降量 + 静置期沉降量 + 使用期沉降量,即模型最终沉降量 = 49.7 + 26.4 + 35.5 = 111.6 mm。非饱和粉土、粉质黏土水泥搅拌桩加固地基施工期内(施工期 + 静置期) 沉降占总沉降的比例为 68.2% 。

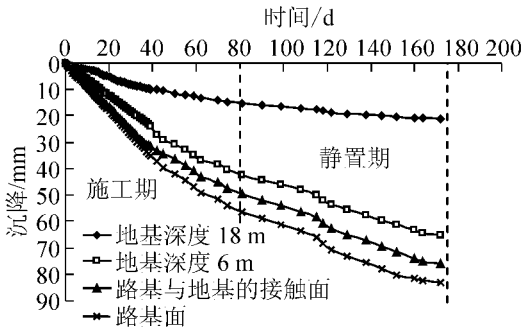

图 2　施工期及静置期沉降与时间关系

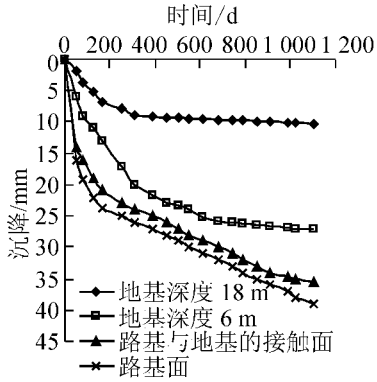

图 3　使用期(3 a) 沉降与时间关系

表 2　模型试验结果汇总

处理方式	填筑方式	基底中心沉降/mm				基底中心应力/kPa
		施工期	静置期(3 个月)	使用期(3 a)	总沉降	(路基施工完成后)
水泥搅拌桩	一次填筑	49.7	26.4	35.5	111.6	141.6

试验过程中各类土的含水量减小,容重增大,强度有所提高。从以上数据可以看出,虽然由于土层分布、土质、含水量等因素影响导致的沉降在施工期和静置期内可以完成总沉降的约 70% 。

(2) 路基施工完成后实测基底中心应力为 141.6 kPa。据有关资料[7] 介绍: 在路基坡度比一定的情况下,基底应力数值计算结果介于均布荷载和比例荷载之间,并且受路基宽高比 b/H(b 为路基表面宽度,H 为路基高度) 影响明显。随着 b/H 的增加,基底中心应力逐渐趋近于 γH,即逐渐接近于比例荷载。取此次

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

试验实测基底中心应力的数据,以 $\sigma/\gamma H$ 为纵坐标,b/H 为横坐标绘制曲线,所得结果如图4所示。充分验证了上述结论。

3 软黏土地基沉降有限元分析

采用相同的路基断面形式及地层条件,对软黏土(黄土质粉质黏土、粉土和粉质黏土)地基的沉降变形和基底应力进行计算分析,并将模型仿真计算结果与现场试验数据进行对比,以此验证计算模型的可靠性和正确性。

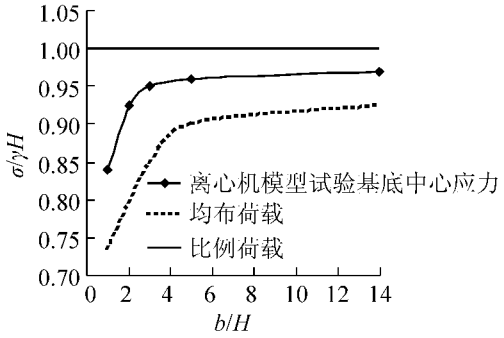

图4 b/H 值对基底中心应力影响

3.1 有限元模型

粉质黏土等岩土类材料依据其在受到外力作用时所表现出来的物理力学性质,通常可看作属于弹塑性变形的混合体,按照弹塑性理论来研究[3],其应力应变是非线性的。因此路基土和地基土采用的是较为符合岩土类材料的屈服和破坏特征的 Mohr-Coulomb 模型,材料参数见表3。采用 Van Genuchten 模型模拟基质吸力随饱和度的变化关系。地基各土层采用修正后的渗透系数计算,路基按照不透水材料考虑。水泥搅拌桩桩体只能受压,不能受拉,且抗弯刚度很小,设定其属性为只能受压。大量计算表明,水泥搅拌桩桩体在岩土类材料中受到的压力较其抗压强度要小得多,所以将水泥搅拌桩桩体采用线弹性本构关系[4]。材料性能参数:压缩模量 $E_s = 1.3 \times 10^8$ Pa,泊松比 $\mu = 0.22$,密度 $\rho = 2\ 480$ kg/m^3。

3.2 计算结构及材料参数

水泥搅拌桩加固地基,有限元网格划分见图5。其概化几何参数为:路基计算高度7.2 m,基顶计算宽度约8 m,边坡坡度1∶1.5;地基土计算深度31 m,计算宽度约64 m。水泥搅拌桩地基土由上至下依次为黄土质粉质黏土、粉土和粉质黏土,厚度分别为4.6 m,12 m,14.4 m,地下水位线设置距地基面16.6 m。水泥搅拌桩加固区厚度5.2 m,桩径0.55 m,路肩宽度内桩间距为1 m,两边坡下桩间距为1.2 m。

表3 材料计算参数取值

类别	厚度/m	容重/(kN·m^{-3})	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	泊松比
级配碎石	0.8	22	120	5	40	0.3
基床底层	2.5	20	60	54	36	0.3
路堤本体	3.9	20	60	54	36	0.3
黄土质粉质黏土	4.6	193	9.4	35	27.1	0.34
粉土	12	182	12.3	8.5	19.7	0.3
粉质黏土	14.4	195	12.5	53	135.2	0.36

3.3 计算结果分析

3.3.1 沉降-时间关系曲线

图6为水泥搅拌桩加固地基的沉降—时间关系曲线[5]。从图6中可看出水泥搅拌桩加固软黏土地基的施工期间沉降为77.1 mm,最终沉降量为85.8 mm,施工期间沉降分别占总沉降的89.9%,路基施工完成后放置120 d沉降完全稳定下来。由此可见,水泥搅拌桩软黏土地基的沉降稳定时间短,沉降量小,加固效果明显。理论上讲,路基施工完成后放置较短的时间即可满足工后沉降要求。但在工期紧张的情况下,软黏土地基不利于工后沉降控制。笔者按照最不利情况考虑(即路基施工完成后立即使用),计算软黏土的工后沉降量,有限元计算结果如表4所示。不利情况计算总沉降94.7 mm比有静置期最终沉降85.8 mm,多沉降了8.9 mm,即多沉降了10.4%。因此在施工期和使用期之间,应适当地设置一定的静置期,减少工后沉降,从而达到减少总沉降的目的。

表4 路基基底沉降计算汇总

地基处理方式	施工期沉降/mm	工后沉降/mm	总沉降/mm
水泥搅拌桩	77.1	17.6	94.7

3.3.2 基底应力分布

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

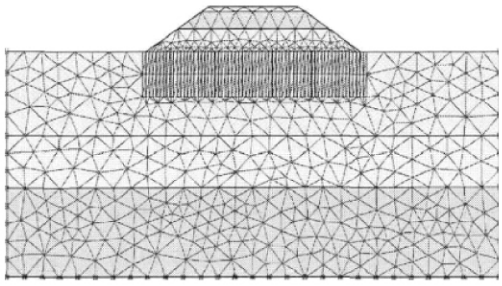

图 5　有限元网格划分图

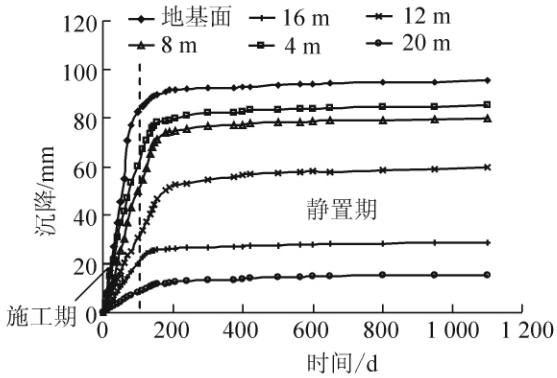

图 6　地基沉降-时间曲线

表 5 为路基基底中心应力有限元计算结果[6]。从表 5 中可以看出，有限元计算结果介于均布荷载和比例荷载之间。在路基坡度比一定的情况下，基底应力分布受路基宽高比 b/H（b 为路基表面宽度，H 为路基高度）影响明显。随着路基宽高比的增加，基底中心应力逐渐趋近于 γH[7]，即逐渐接近于比例荷载。

表 5　路基基底中心应力

路基高度/m	宽高比	比例荷载/kPa	均布荷载/kPa	有限元计算/kPa	$\sigma/\gamma H$
2.7	2.96	54	46.2	53.8	0.996
5	1.6	100	74.4	98.6	0.986
7.2	1.1	144	102.3	134.5	0.934

3.4　模型试验方法与有限元计算结果对比

模型试验与有限元计算结果对比见表 6。

表 6　模型试验方法与有限元计算结果对比

类别	路基基底总沉降/mm	路基基底中心应力/kPa
模型试验	111.6	141.6
有限元计算	85.8	134.5

由表 6 分析可知，采用模型试验与有限元法计算所产生的结果既有相似之处，也存在较大的差异。其主要差异表现沉降值上的差异，即模型试验产生的路基基底总沉降比有限元计算的大，其相对误差大于 10%，不能满足工程需要。这是因为模型缩尺制做肯定与原型土料在物理力学性质上存在差异，且缩尺使土体颗粒的不均匀性和不连续性暴露出来，导致模型和原型在力学性质上的差异。然而，模型试验和有限元法计算产生的路基基底中心应力具有相同的特性，其相对误差不大于 10%，可以满足工程需要。

综合以上的分析可知，一方面，模型试验产生的路基基底总沉降与有限元计算存在较大差异，很难精确预测非饱和粉质粘土、粉土地基那样的软黏土地基沉降，所以对于具有高沉降控制标准路基，使用模型试验的沉降结果来预测实际地基的沉降是不可行的；另一方面，这 2 种方法本身产生的路基基底中心应力是相似的，其作为一种定性分析方法有一定的应用价值。

4　结语

通过对水泥搅拌桩加固的软黏土（黄土质粉质黏土、粉土和粉质黏土）地基进行模型试验和有限元分析，得出其沉降特性和应力传递的定性分析规律，总结如下：

（1）模型试验在施工期和静置期内地基完成沉降量占总沉降的 70% 左右。有限元分析施工期间水泥搅拌桩加固地基施工期内沉降占总沉降的 89.9%。两种分析结果表明，水泥搅拌桩加固地基的沉降速度快，工后沉降小，有利于控制软黏土地基沉降变形，适合软黏土地基加固。

（2）有限元分析路基施工完成后直接使用，水泥搅拌桩加固地基的施工期沉降占总沉降的 81.7%，比设置静置期少沉降 8.2%，但总沉降多沉降了 10.4%。说明软黏土地基在使用前需设置足够的静置期。路基施工完成后放置 1～12 个月，计算路基的工后沉降量。计算结果表明，在合理优化施工期的基础上，

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

最长需设置3个月的静置期,其工后沉降为8.7 mm,满足使用要求。

(3)模型试验和有限元分析都得出基底应力介于比例荷载和均布荷载之间。基底应力分布与路基宽高比有关。随着路堤宽高比 b/H 的增加,路基基底中心应力分布越接近于 γH。

(4)通过模型试验与有限元计算结果对比分析,可得使用模型试验的沉降结果来预测实际地基的沉降是不可行的,但其作为一种定性分析方法有一定的应用价值。

(5)据有关文献[7]介绍,水泥搅拌桩主要适用于处理正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、饱和黄土、素填土、黏性土以及无地下水流动的饱和松散砂土等地基。不但能最大限度地利用原土,缩短工期,降低成本,提高地基承载力,减小地基沉降变形,而且不会使地基侧向挤出,影响周围建筑物。这点在模型试验中得到有效验证,根据试验数据可验证上述观点,并且在试验结束后地基没有侧向挤出痕迹。

参 考 文 献

[1] 南京水力科学研究院土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京:人民交通大学出版社,2003.
[2] 马义俊. 强夯及深层水泥搅拌桩地基加固技术在工程中的研究与应用[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2003.
[3] 交通部公路科学研究院. JTJ/T060—98 公路土工合成材料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,1999.
[4] 住房和城乡建设部. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
[5] 梅国雄. 沉降一时间曲线"S"型的证明及其应用——从土体本构关系[J]. 岩土力学,2005,26(增刊):21-24.
[6] 蒋关鲁,王海龙,李安洪. 高速铁路路基基底应力计算方法研究[J]. 铁道建筑,2009(4):6569.
[7] 吴丽君,蒋关鲁,李安洪. 基于 Plaxis 的高速铁路非饱和土地基沉降计算分析[J]. 铁道建筑,2011(6):86-89.

Model Test and Finite Element Analysis of Soft Clay Foundation Reinforced by Cement Mixing Pile

Sun Faping

(Changsha Rail Transit Group Co. Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: Centrifugal model test of roadbed construction on soft clay (loess silty clay, silty soil and silty clay) is studied in this paper. Foundation settlement variation together with time, basal stress distribution and foundation reinforcement effect are discussed. Centrifugal model test design and method of foundation reinforced by cement mixing pile are put forward. According to the result of reinforcing treatment by cement stirring pile, most of foundation settlement can be finished during construction period after the foundation is reinforced by cement mixing pile. The foundation settlement after construction can be effectively reduced. The method of foundation reinforcement with cement mixing pile is very effective especially for the engineering with more stringent requirements for the foundation. The finite element calculation result can be used in derivation of the total settlement in engineering design or construction.

Key words: cement mixing pile; foundation settlement; base stress; model test; finite element analysis

(责任编辑 刘宪福)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net