

不同预压作用下软基侧向变形规律对比研究

扈胜霞^{1,2}, 崔保龙¹, 刘丽君¹

(1. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000;

2. 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)

摘 要: 软土地基侧向变形会引起上部土体的水平位移, 产生裂缝, 引发道路开裂、路基失稳等工程问题。为了研究不同预压荷载作用下软土路基的侧向变形规律, 分析了真空预压、堆载预压以及真空-堆载联合预压法加固软基时土体的应力、应变和侧向受力的不同。结合软基预压加固的实测资料, 讨论了不同预压方式下土体的水平位移。得到了如下结论: 在不同预压荷载作用下, 土体的应力不同, 应变路径不同, 侧向所受应力也不同; 预压加固断面实测的水平位移曲线表现出了与应力计算分析相同的现象; 由于路基处理的隐蔽性, 预压方法加固软土路基时, 需建立科学的监测方法, 进行信息化施工; 不同的预压方法加固软基时, 真空预压处理深厚软基的效果优于堆载预压。

关键词: 预压荷载; 侧向变形; 水平位移; 实测资料

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)03-0080-05

Comparative Study on Lateral Deformation Law of Soft Subgrade by Different Preloading Method

HU Sheng-xia^{1,2}, CUI Bao-long¹, LIU Li-jun¹

(1. Architectural Engineering College, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The lateral deformation of soft soil will cause the horizontal displacement of the upper part of the soil, then cracks, which will cause road cracking, subgrade instability and other engineering problems. In order to study the lateral deformation law of the soft soil subgrade under different preloading load, the stress, strain and lateral force of the soft soil foundation under the vacuum preloading, surcharge preloading and combined vacuum-surcharge preloading were analyzed. Based on the observed data of the soft soil subgrade by preloading, the horizontal displacement of the soft soil under different preloading was discussed. The conclusions are as follows: The stress and the strain as well as the lateral stress of the soft soil is different under the different preloading load; The horizontal displacement curves observed from preloading section show the same characteristics with the stress calculation analysis; Due to the roadbed of concealment, when using the preloading method for the consolidation of soft soil subgrade, the scientific monitoring techniques and information construction are required; When using different preloading method for the consolidation of soft foundation, the treatment effect for deep soft foundation by vacuum preloading is better than that by surcharge preloading.

Keywords: preloading load; lateral deformation; horizontal displacement; measured data

1 引言

随着我国基础建设的快速发展, 有大量的公路、高速公路、铁路等在软土地区上修建。淤泥质软土

具有高含水率、大孔隙、低密度、低强度、高压缩性等特点。在这种地基上进行建设, 需要对软基进行处理。真空-堆载联合预压法是一软基加固的排水固结方法, 因为具有施工快捷、工期短、安全稳定、经济

有效等优点被广泛应用于港口、机场、高速公路和高速铁路等工程建设中^[1-8]。

真空一堆载联合预压法是在堆载预压法和真空预压法基础上发展起来的一种软土地基加固方法,综合了堆载预压可依据加固需要施加超载和真空预压可瞬时加载的特点,具有双重处理效果^[9-10]。由于真空预压和堆载预压的加载方式和加固机理不同,软土体的变形机理和水平位移的大小也不同。对软土路基加固而言,水平位移是评价和控制软土路基稳定性的重要依据之一。侧向位移观测是路基稳定控制观测中的主要测量内容之一。准确测量高速公路施工的侧向变形,对于保证高速公路安全施工具有非常重要的意义^[11]。本文将在分析不同预压方法加固机理、侧向受力的基础上,结合南京市青石埂东段工程的实测资料,对不同预压作用下软基侧向变形的规律进行研究。

2 预压方法加固机理及变形分析

2.1 加固机理

堆载预压加固软基时,是通过增加土体中的总应力来提高土中的孔隙水压力,等增加的孔隙水压力消散后增加土体的有效应力,效果取决于堆载的大小和超静孔压的消散程度。堆载预压加固后土体的剪应力和抗剪强度都有增加,土体容易发生失稳剪切破坏,所以须分级加载以控制堆载的速率。真空预压法是在保持总应力不变的同时降低孔隙水压力,一开始就增加了有效应力,加固的效果依赖于真空度的稳定维持和有效传递。真空预压加固后剪应力大小没有改变,所以真空吸力可瞬时一次性施加。真空-堆载联合预压法是真空预压和堆载预压两种方法的有效组合,充分发挥了真空预压可瞬时加载和堆载预压,可依据需要施加超载的特点。

如图1(a)所示是堆载预压堆载瞬间土单元的二维应力图。 σ_z 方向有效应力大小没有发生任何改变,而 σ_x 方向大小则有所减小。真空预压加固软基时,由于真空荷载是各向相等的吸力,所以当土体受到 Δq 的真空荷载时,在竖向和水平向的增量都为与 Δq 数值相等的 Δu ,如图1(b)所示。

2.2 变形分析

堆载预压加固软土地基时,在加荷边缘和靠近地表的地方, $\Delta\sigma'_3 > k_0 \times \Delta\sigma'_1$,应力路径指向 k_0 线的下方,侧向变形指向加固区。但随着地基深度的增加,有效应力增量 σ'_3 沿深度很快衰减,因而 $\Delta\sigma'_3 < k_0 \times \Delta\sigma'_1$,应力路径指向 k_0 线的上方,这些点的

侧向变形指向加固区外,如图2所示。所以堆载预压处理路基时,土体容易发生侧向挤出变形。真空一堆载联合预压法是真空预压和堆载预压的有效组合,虽然堆载过程中,地基土也会发生侧向挤出变形。但由于有真空荷载作用,真空产生的侧向收缩变形与堆载产生的侧向挤出变形可以相互抵消一部分^[12],真空预压荷载能有效约束堆载引起的土层侧向外挤现象^[13](见图2)。

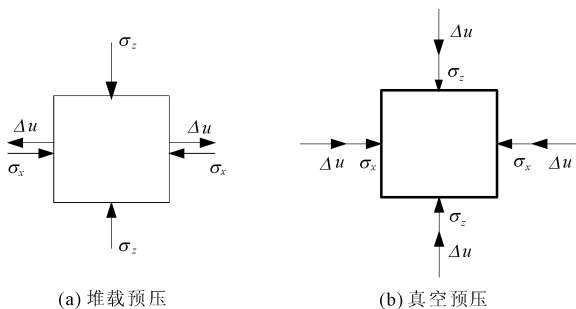


图1 堆载预压与真空预压时二维应力图

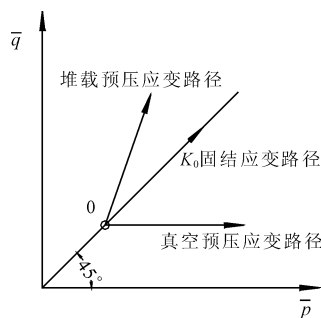


图2 堆载预压与真空预压时土体的变形路径

假设用相同大小的堆载预压、真空预压和真空一堆载联合预压加固软基,比如三种工况分别是用80 kPa的真空吸力、80 kPa的竖向堆载和40 kPa真空+40 kPa堆载的联合预压荷载来加固软基,受力示意图如图3所示,则其应变分析如下。

对三种加载方式来说,在竖向所加的荷载增量是相同的,即 $\Delta\sigma$ 均为80 kPa,则加固后土体在竖向所受的力为 $\sigma_z + \Delta\sigma_z = \sigma_z + 80$ kPa,而在水平向即 σ_x 方向大小各有差别。

堆载预压加固软基后,在水平向土体受到的力是:

$$k_0\sigma_z + k_0\Delta\sigma_z = k_0(\sigma_z + \Delta\sigma_z) \quad (1)$$

真空预压加固软基后,在水平向土体受到的力是 $k_0\sigma_z + \Delta p$,因为真空荷载是各向相等的增量,为了易于与堆载荷载区别,表达为 Δp 。又因为其作用方向与堆载荷载相反,所以在式子中其符号取为负。为了便于理解土体的受力应变情况,人为地把 Δp 分解为两项,则有:

$$k_0\sigma_z - \Delta p = k_0(\sigma_z + \Delta p) - \Delta p(1 + k_0) \quad (2)$$

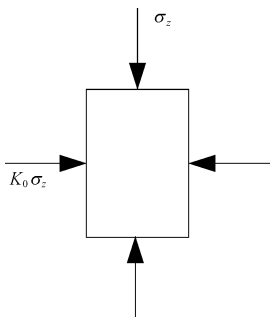


图 3 地基中深度 z 处土体受力示意图

在分析了堆载预压和真空预压加固软基后土体水平向受力的情况后,真空 - 堆载联合预压加固后土体在水平向所受到的力可表示为:

$$k_0\sigma_z + k_0\Delta\sigma_z - \Delta p = k_0\Delta\sigma_z + k_0(\sigma_z + \Delta p) - \Delta p(1 + k_0) = k_0(\Delta\sigma_z + \sigma_z + \Delta p) - \Delta p(1 + k_0) \quad (3)$$

假设 k_0 取 0.5, 分别把 80 kPa 的真空吸力、80 kPa 的竖向堆载和 40 kPa 真空 + 40 kPa 堆载的联合预压荷载代入上述式子后则有:

堆载预压加固软基后,在水平向土体受到的力是:

$$k_0\sigma_z + k_0\Delta\sigma_z = k_0 \times (\sigma_z + \Delta\sigma_z) = 0.5 \times (\sigma_z + 80) = 0.5\sigma_z + 40 \quad (4)$$

真空预压加固软基后,在水平向土体受到的力是:

$$k_0\sigma_z - \Delta p = k_0(\sigma_z + \Delta p) - \Delta p(1 + k_0) = 0.5 \times (\sigma_z + 80) - 80 \times 1.5 = 0.5\sigma_z - 80 \quad (5)$$

真空 - 堆载联合预压加固后,土体在水平向所受到的力为:

$$k_0\sigma_z + k_0\Delta\sigma_z - \Delta p = 0.5\sigma_z + 0.5 \times 40 - 40 = 0.5\sigma_z - 20 \quad (6)$$

由上述分析可见,假如消去三个式子中的共同项 $0.5\sigma_z$,天然地基中某一深度 z 处土体在堆载预压加固后侧向受到向外的压力 40 kPa,真空预压加固后侧向受到向内的吸力 80 kPa,联合预压后受到向内的吸力 20 kPa。因此,在三种预压方法加固后,堆载预压的路基向两侧挤出;真空预压的路基则向加固区有较大位移,在工程现场常能看到较大的裂缝;联合预压后,地基的稳定性相比堆载预压显著提高,是因为地基中的土体受到了 20 kPa 向内的吸力。

3 工程现场实测资料分析

软土地基处理一直是市政道路、高速公路修建等工程建设中的一个技术难题。如果处理不好往往

会造成路基沉降变形和路面开裂,严重影响道路的使用质量和交通安全。对道路施工过程实施稳定动态控制和侧向位移观测,可以保证施工期填筑路堤的稳定安全,验证设计并优化路基预压处理方案^[14]。因此,路基填筑过程中水平位移的监测显得尤为重要。

3.1 工程概况

南京市青石埂东段工程东起经四路、西至凤台南路。工程场地地层分布复杂,其内均为全新世长江冲淤积成因的松软土层。松软土层具有高压缩性,为加固软基,对于软土层较厚的部分路段采用真空预压法处理,其余大部分路段采用堆载预压法。本路段真空预压施工的监测断面有 K0 + 360、K1 + 320、K1 + 380,其他监测断面均为堆载预压处理断面。

3.2 监测概况

软基现场监测是控制施工质量,及时分析软基加固效果,判断路堤填筑速率是否得当和软基稳定性的重要而有效的措施。通过对现场资料进行分析,全面分析评价软基加固效果及其主要影响,为软基的筑路施工提供科学的依据和建议。

现场监测内容主要包括:表面沉降观测、分层沉降观测、水平位移观测、孔隙水压力观测、土压力观测和真空度测试等。本文主要讨论侧向变形,所以只将水平位移监测的结果进行分析。

(1) 真空预压法

根据真空预压法加固公路软基的特点和施工过程,依据现场情况,制定了详细的监测计划。在采用真空预压法进行地基处理区域内各布置一个监测断面,监测断面桩号为 K0 + 360、K1 + 320、K1 + 380。其中 K1 + 320、K1 + 380 为同一真空预压处理段的两个监测断面。

从前述加固机理和侧向变形分析知,真空预压处理软基具有一个明显的特点,即处理段的水平位移是向内的。如图 4 所示是 K0 + 360 监测断面的水平位移曲线图。K0 + 360 段从 2003 年 6 月 13 日开始抽真空,于 6 月 15 日真空度达到 82 kPa,然后一直维持在 80 kPa 左右,直至 7 月 04 日真空度才有所降低,抽真空在 7 月 29 日结束。从图 4 所示实测的水平位移来看,从一开始抽真空,土体就发生向内的水平位移,然后随着抽真空时间的增长,土体发生的水平位移逐渐增大,到抽真空停止时其水平位移达到 85 mm。

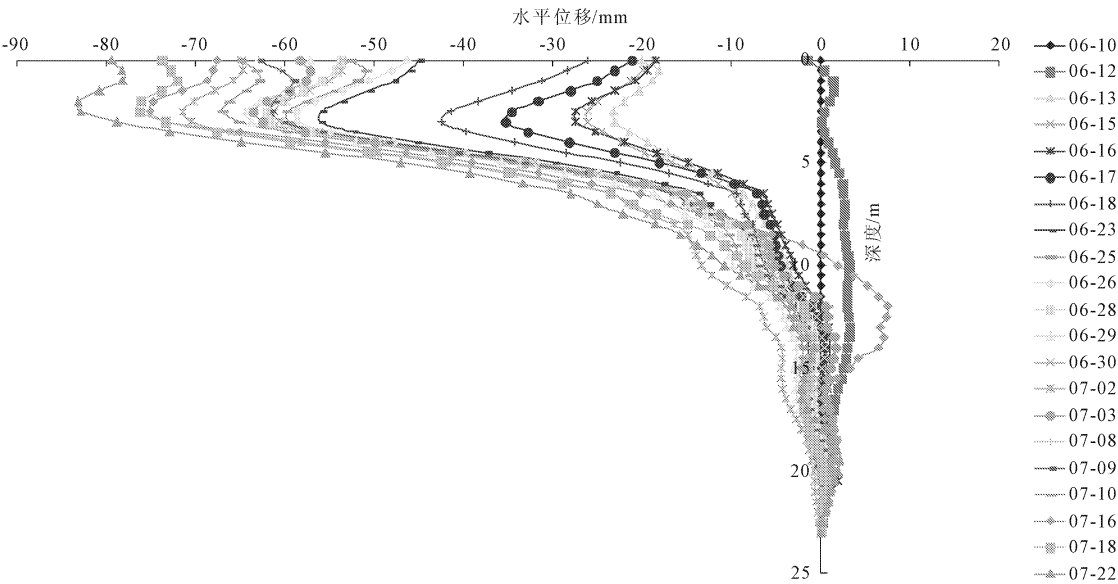


图 4 K0+360 真空预压处理段水平位移曲线

图 5 所示为 K1+380 真空预压处理段实测的水平位移曲线。K1+380 真空预压处理段于 2003 年 9 月 12 日开始抽真空,9 月 13 日真空度就达到 82 kPa,然后一直维持在 80 kPa 左右。抽真空在 10 月 27 日结束。与 K0+360 段实测的水平位移曲线相

似,图 5 所示的水平位移曲线也是从一开始抽真空土体就发生向内的水平位移,随着抽真空的时间增长,土体发生的水平位移逐渐增大,到抽真空停止时其水平位移达到最大,为 110 mm。

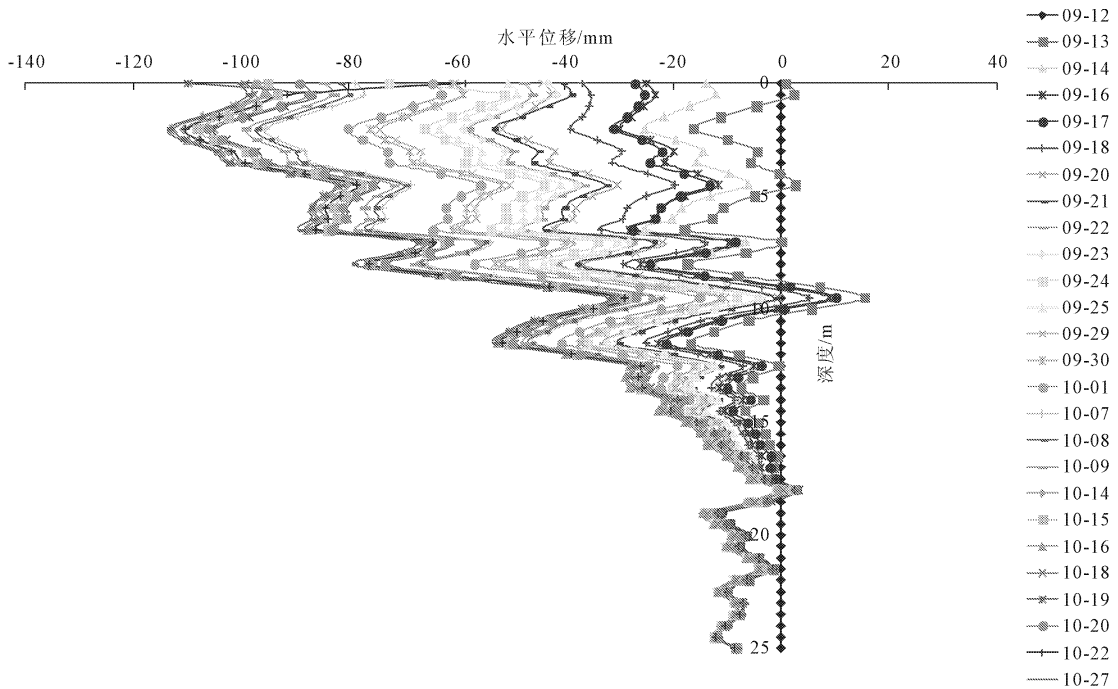


图 5 K1+380 真空预压处理段水平位移曲线

从上述可见,2.2 节经过假设计算,在预压荷载总量都为 80 kPa 的情况下,真空预压受到 80 kPa 向内的侧向力。实测资料也显示出真空预压处理段的水平位移是向内的,K1+380 真空预压处理段向内的水平位移最大达 110 mm,十分有利于保证土体的

稳定,不会因为土体的加载速率过快、过高而引起土体失稳,因此真空预压处理软基加载可以一次性加载到设计要求。但另一方面,在加固区周围有已建各种设施时,土体向真空预压区的侧向变形过大,将对周围房屋、道路等建筑物产生不利影响,危及周围

建筑物安全^[15],须采取格栅状水泥搅拌桩和单排水泥旋喷桩等防护措施。

(2) 堆载预压法

由于堆载预压过程中路堤的稳定性一直是施工中的一个重点控制项目,因此在超载预压处理段 K1 + 250 断面埋设水平位移监测管一个。如图 6 所示是这个断面的水平位移时程曲线。堆载预压处理软基具有一个明显的缺点,其处理段的水平位移是向外的,影响了路堤的稳定性,在许多软基处理过程中,由于土体填筑过高过快,造成土体水平位移发生过快过大,以至于土体发生失稳。在青石埂东段工程中,由于堆载的土体高度较低,超载荷载较小,从实测的水平位移来看,K1 + 250 断面的最大水平位移量小于 25 mm。因此土体的水平位移量满足土体的稳定性要求。

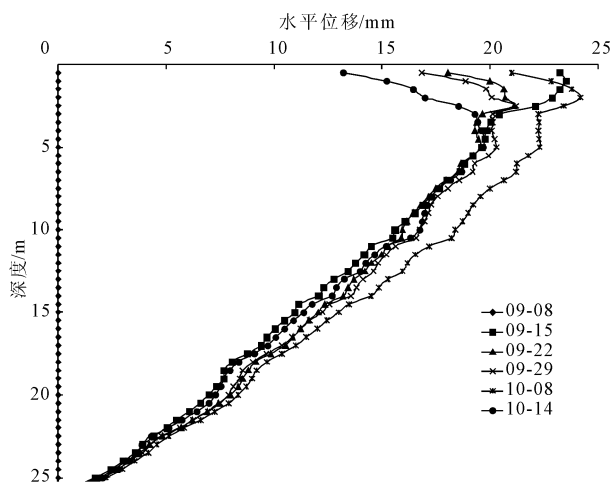


图 6 K1 + 250 堆载预压处理段水平位移曲线

4 结 论

本文对真空预压、堆载预压和真空 - 堆载联合预压三种常用的预压方法加固软基的机理、应力变化和应变路径进行了分析,在分析的基础上,通过计算分析对比了三种不同预压方法加固软基时,软基中一点处土体受到了不同的侧向受力。结合南京市青石埂路东段工程的现场实测资料,分析了不同预压方法下软土路基产生的不同的水平位移。得到如下结论:

(1) 堆载预压、真空预压和真空 - 堆载联合预压三种不同的预压方法加固软基的机理、应力路径、应变路径均不相同。经过计算分析,各自的侧向受力也不相同;

(2) 南京市青石埂东段工程真空预压和堆载预压加固断面实测的水平位移曲线表现出了与应力计算分析相同的性质和现象。真空预压处理段实测水

平位移向内最大达 110 mm;

(3) 由于真空预压、堆载预压和真空 - 堆载联合预压的某些机理还不够完善以及路基处理的隐蔽性,需建立科学的监测的方法,进行信息化施工,使路基处理更科学、安全、经济;

(4) 对于不同的预压方法加固软基的效果来讲,真空 - 堆载联合预压可瞬时施加真空荷载并依据需要施加堆载超载,效果最好;真空预压处理深厚软基的效果优于堆载预压。

参考文献:

- [1] 刘国祥,安庆军,袁 伟,等.真空-堆载加固胶州湾软基现场试验研究[J].水运工程,2011,(10):145-148.
- [2] 张海霞,王保田.真空堆载联合预压效果检验[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12):1873-1876.
- [3] 白立华,刘 烽,诸葛爱军.真空预压加固法在天津港东疆港区的应用与展望[J].中国港湾建设,2013,(6):13-16.
- [4] 张利慧.浦东国际机场第三跑道地基处理技术[J].中国市政工程,2007,(3):75-77.
- [5] 许忠发,何 钜.真空-堆载联合预压法在高速公路路基加固中的应用研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(2):163-168.
- [6] 宋上明.真空-堆载联合预压软基处理技术在铁路路基试验段的应用[J].铁道工程学报,2010,(1):24-28.
- [7] 张照华.真空联合堆载预压排水固结法在沿海吹填造地中的应用[J].水利与建筑工程学报,2009,7(3):123-126.
- [8] 王宗文,尤苏南,王文宇.真空堆载联合预压在连云港某工程中的运用研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(2):127-133.
- [9] 龚永康,蔡 建.真空-堆载联合预压法处理吹填淤泥试验研究[J].水运工程,2012,(12):238-241.
- [10] 刘汉龙,李 豪,彭 劼,等.真空-堆载联合预压加固软基室内试验研究[J].岩土工程学报,2004,26(1):145-149.
- [11] 李 飞,程鹏环,周 乾.软土路基侧向变形影响因素分析与监测研究[J].工程勘察,2004,(3):16-19.
- [12] 林长森,周志华.堆载预压与真空堆载联合预压技术在软基处理中的对比分析[J].路基工程,2013,(5):107-112.
- [13] 曾巧玲,于海成,翟文华,等.真空堆载联合预压法加固软基的现场试验[J].北京交通大学学报:自然科学版,2009,33(4):74-77.
- [14] 王晓东.软土路基沉降和侧向位移监控方法[J].交通标准化,2011,(10):50-52.
- [15] 艾英钵,蔡南树,柯朝辉.减小真空预压区外土体侧向变形的措施[J].河海大学学报:自然科学版,2008,35(6):686-689.