

真空预压土体的变形研究

徐 锴¹, 梅国雄¹, 宰金珉¹, 殷宗泽²

(1.南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009; 2.河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 对真空预压的研究现状进行了总结, 分析了该法的加固机理, 并指出了在实际使用过程中所遇到的问题。研究表明, 真空预压的加卸载实际上是以小主应力方向加卸载为主的过程; 在卸去真空的过程中, 小主应力方向的卸载会削弱土体的竖向回弹, 土体不会出现明显的回弹现象, 甚至可能继续沉降; 模拟真空预压应力路径的试验需要更加合理的设计。

关 键 词: 真空预压; 变形; 小主应力; 球形压

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Deformation of soil under vacuum preloading

XU Kai¹, MEI Guo-xiong¹, ZAI Jin-min¹, YIN Zong-ze²

(1.College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2.Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The researches on vacuum preloading are summarized. The mechanism of vacuum preloading is analyzed; and some problems in practice are pointed out. Loading and unloading of vacuum preloading is derived and considered as loading and unloading from minor principal stress. Unloading from minor principal stress could weaken the resilience of the soil when unloading of vacuum preloading; the soil would not appear resilient obviously, even go sinking. We have needed to design the test of modeling vacuum preloading stress path more reasonably.

Key words: vacuum preloading; deformation; minor principal stress; spherical stress

1 前 言

我国的软土主要分布在东南沿海及各大江大河的入海三角洲冲积平原地区, 从北至南有天津塘沽、连云港、上海、宁波、温州、福州、珠海、深圳等地。内陆主要是湖沼或者山谷冲积而成, 分布范围较小, 不成片分布。软土的特点是含水率很高, 孔隙比大, 压缩性高, 强度低, 透水性差。由于压缩性高、透水性差, 在建筑物荷载的作用下会产生很大的沉降和沉降差, 而且沉降的过程会延续很长的时间, 有可能影响建筑物的正常使用, 需对其进行处理。其目的—是提高天然地基的承载能力, 使其达到设计要求; 二是预先消除在使用荷载下所产生的变形, 使建筑物在使用期间不致产生不利的沉降或者沉降差^[1]。

真空堆载预压法是一种新型的地基处理方法,

最早由瑞典皇家地质学院 Kjellmen 于 1952 年提出。天津大学 1958 年就开始进行真空排水固结的室内试验研究。由于工艺上存在问题, 因而真空预压未能在工程中应用, 直到 20 世纪 80 年代, 交通部—航局、天津大学和南京水利科学院等单位对这项技术进行室内和现场的试验研究, 取得了成功的经验, 膜下真空度可以达到 85~92 kPa, 并成功地将这项技术应用于天津新港软基加固工程中, 此后真空预压法在工程中得到了推广应用^[1, 2]。

如图 1 所示, 真空预压是在需要加固的软黏土地基中插入竖向的排水通道如砂井、袋装砂井或排水板等, 然后在地面上铺设砂垫层, 再在其上覆盖一层不透水的薄膜。在膜下抽真空成负压, 负压沿竖向排水通道向下传递, 在负压作用下, 孔隙水逐渐渗流到竖向排水通道中, 从而达到土体排水固结的效果。

收稿日期: 2005-05-30

修改稿收到日期: 2006-01-23

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50608038); 霍英东青年教师基金项目 (No. 91076); 江苏省建设系统科技计划项目 (No. JS200416)。

作者简介: 徐锴, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事真空预压方面的研究。E-mail: hhxkai@163.com

论文联系人: 梅国雄, 男, 1975 年生, 教授、博导, 主要从事土体本构及固结理论等方面的研究。E-mail: meiguox@163.com

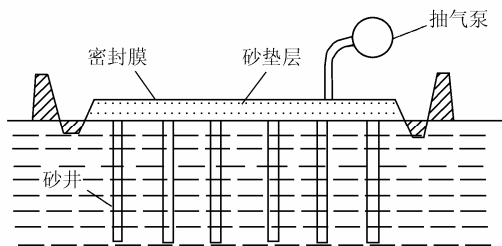


图1 真空预压示意图

Fig.1 Illustration of vacuum preloading

加固以前,土体中任意一点的有效应力强度可以用图2中的A圆表示,与其相应的强度可以近似用其平均应力 p'_0 对应的强度 τ_0 来表示。对于真空预压加固软基的抽真空阶段,随着膜内空气的排出,在膜内外形成了一个负的气压差 Δp ,土体内任意一点的有效应力增量为 $-\Delta p$ 。随着土体有效应力的提高,土体发生排水固结。在抽真空的末期,土的孔隙水应力降到最低,土体主固结完成。此时该点的有效应力圆可以用图2中的B圆表示。由图可知,在真空预压的过程中,有效应力圆的直径保持不变,位置沿轴向右移动,逐渐远离破坏线,在加固的过程中不会出现地基失稳的现象。

卸除真空后,被加固的土体由正常固结状态变为超固结状态,土体的强度沿超固结强度线 EO' 返回到F点,F点比G点有更高的强度。因此,经过真空预压,被加固土体的强度 τ 得到了提高^[3]。

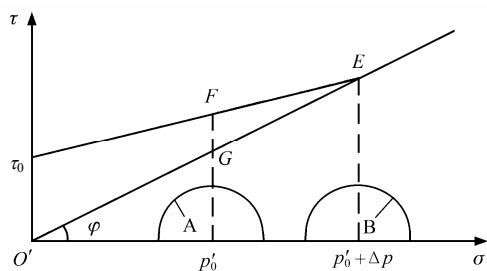


图2 真空预压使土体强度得到增长

Fig.2 Vacuum preloading causes the strength of soil increasing

多年真空预压机理的研究已进行了多年,现在已经得到了以下的一些规律:在真空预压的过程中,土体的总应力不发生改变,随着超静孔隙水压力的消散而使土体受到的有效应力增加;在抽真空的过程中,土体受到的剪应力不增加,因而不会引起土体的剪切破坏(真空预压法对地基的天然抗剪强度没有要求),并且不需要控制抽真空的速率;在预压土体产生指向预压区中心的侧向变形;土体固结,有效应力提高,土体强度增长;抽真空的过

程中,地下水位下降使相关土层产生排水固结(实施真空预压加固范围内不能有强含水层存在)。抽真空时土体的固结速度与土体的渗透系数、竖向排水体以及边界排水条件有关。抽真空的影响深度与抽真空的强度、竖向排水体、土体的孔隙分布情况以及相关的边界有关。

2 真空排水预压下土体的变形研究中存在的问题

真空预压法自提出至今已得到了广泛应用与发展。然而,对于地基设计计算目前还没有一个较为成熟的方法,往往借助于堆载预压(正压)的计算方法来计算土体的最终沉降量、固结系数等。从很多现场观测资料来看,真空预压加固后的残余沉降远大于理论计算值,这个差值也远远大于卸除真空压力后地基的回弹量,故又有人提出了一种修正方法,即将计算结果乘上一个修正系数。该系数只是根据经验给定,并没有进行详细的论证,据此计算出的结果虽然有所改进,但是仍带有一定的人为因素,不能够准确地反映实际工程情况,是由于对真空预压的机理认识不清所造成的。

实际上,地基经真空预压处理后投入使用,其应力路径发生了变化(堆载使大主应力方向的力加大),该变化还会产生一定量的后期变形。加固过程中,土体内的压应力为球应力,这一点在前面已经详细阐述了。而加固后投入使用土体所承受的压应力为正应力,该正应力产生剪应力,会产生剪切变形,而该部分剪切变形将引起一部分沉降量。由于抽真空加固过程中,土体产生向加固区中心收缩的侧向变形,该部分侧向变形使土体进一步压密。而一旦投入使用,承受的为正压力,土体产生向外挤出变形,该变形对于最终沉降量有着显著贡献^[4]。殷宗泽的“用限制侧向变形的方法来加固地基”一文^[5]中对此也进行了详细论证。地基在真空预压后如果再承受相应的正压,还将产生一定量的后期沉降,该沉降量会对工程产生一定的影响。现已引起了人们的重视,但有关的研究还较少。

李丽慧等^[6]已经进行了模拟真空预压以后即投入使用的地基受荷应力状态的室内试验研究:该试验第1步是模拟真空预压的加荷路径,故对土体施加等向固结压力100 kPa,一次性施加,同时测读该级荷载下的轴向变形量。变形稳定后卸荷至50 kPa,保持该围压不变至变形稳定,测读其回弹值。在100 kPa等向压力下试样轴向变形量达1.502 mm,卸荷后回弹,其回弹值仅为0.042 mm。

第 2 步待土样在 50 kPa 的等向固结压力下变形稳定后, 测读其轴向变形量, 然后施加轴向压力 50 kPa。轴向压力加至 100 kPa 时, 直至变形稳定, 测读其变形量。其轴向变形总量达 2.042 mm, 即又产生了 0.582 mm 的后期变形。

试验与实际工程中观察到的现象还是比较吻合的, 下面从真空预压加卸载这一特定应力路径下土体变形进行理论分析。

3 从小主应力加卸载角度分析真空预压

3.1 抽真空阶段土体应力路径分析

取天然地基中某一深度 z 处土体为研究对象, 假设在竖向土体受到大小为 σ_z 的力, 在水平方向土体受到的力为 $K_0\sigma_z$ (K_0 为静止土压力系数)。用这样的模型来模拟土体的天然初始状态, 如果进行试验可以取 σ_z 为 p_c (p_c 为土体历史上受到的最大应力)。

抽真空后, 随着密封膜内空气的排出, 在膜内外形成了一个负的气压差 $-\Delta p$, 土体内任意一点的有效应力增量为 Δp , 如图 3 所示。

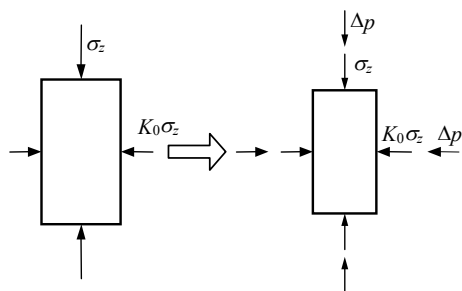


图 3 抽真空时土体的应力变化

Fig.3 Change of stress when pumping the air out of soil

将 Δp 分解为 2 项:

$$\Delta p = K_0 \Delta p + \Delta p(1 - K_0) \quad (1)$$

则有

$$K_0 \sigma_z + \Delta p = K_0 (\sigma_z + \Delta p) + \Delta p(1 - K_0) \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 把抽真空加荷过程分成两部分, 如图 4 所示, 认为土体从深度 z 向下移到深度 z' ($z' > z$), 同时土体在受到了一个水平向的附加力 $\Delta p(1 - K_0)$, 为压应力, 是一个小主应力方向加荷过程。

对于抽真空加荷阶段, 针对不同的 K_0 讨论如下: 如果 $K_0 = 1$, 那么水平向的附加力 $\Delta p(1 - K_0)$ 退化为 0, 抽真空加荷的过程可以看成土体仅仅从深

度 z 向下移到深度 z' ($z' > z$)。

一般情况下, $0 < K_0 < 1$ 时水平向的附加力 $\Delta p(1 - K_0) > 0$, 抽真空加荷的过程可以看成土体不仅从深度 z 向下移到深度 z' ($z' > z$), 同时土体在水平向受到 $\Delta p(1 - K_0)$ 的压力。这时水平向受到压缩, 同时减小了竖向的沉降, 是因为小主应力方向加荷 $\Delta p(1 - K_0)$ 限制了竖向的压缩。从这一点可以看到, 真空预压加固地基所产生的沉降要比较同竖向应力的堆载预压产生的沉降要小, 这与实际情况相吻合。

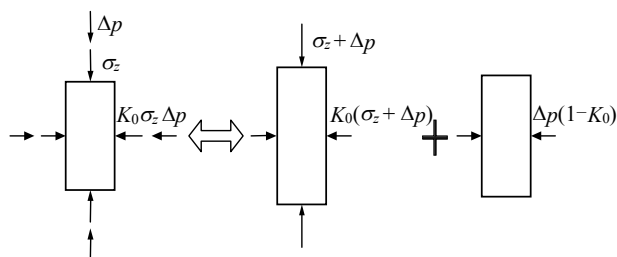


图 4 应力分解

Fig.4 Resolution of stress

3.2 卸去真空后土体应力路径分析

抽完真空后, 再卸去真空, 土体的应力状态变化如图 5 所示。令 $\sigma'_z = \sigma_z + \Delta p$, 卸去真空后土体应力变化, 土体处于一个新的 K_0 状态 (土体处于深度为 z' 处)。而卸除真空以后, 土体相当于从深度 z' 向上提到深度 z ($z' > z$), 同时也存在一个水平方向的附加力 $-\Delta p(1 - K_0)$, 为拉应力, 这是一个小主应力方向卸荷过程。

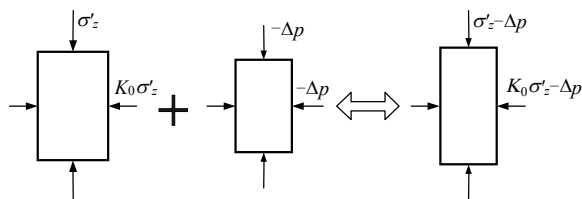


图 5 卸去真空时土体应力的变化

Fig.5 Change of stress when stop pumping the air

对于卸去真空加荷阶段, 可同样针对不同的 K_0 展开讨论如下: 当 $K_0 = 1$, 那么水平向的附加力 $\Delta p(1 - K_0)$ 退化为 0, 其卸荷的过程仅仅相当于把土体从深度 z' 向上移到较浅的深度 z 处。

当 $0 < K_0 < 1$ 时, 卸去真空, 相当于把土体从深度 z' 向上移到较浅的深度 z 处, 并且土体受到一个小主应力方向的卸荷过程, 如图 6 所示, 使得土体侧向膨胀、竖向下沉, 该下沉从某种程度减缓甚至

抵消土体相当于从深度 z' 向上提到深度 z ($z' > z$) 的回弹。

把上面的理论分析和试验结合起来可以看出, 该试验中土体的静止土压力系数 $0 < K_0 < 1$, 卸去真空以后土体将出现较小的回弹, 这与试验结果是比较吻合的, 验证了上述理论分析是合理的。

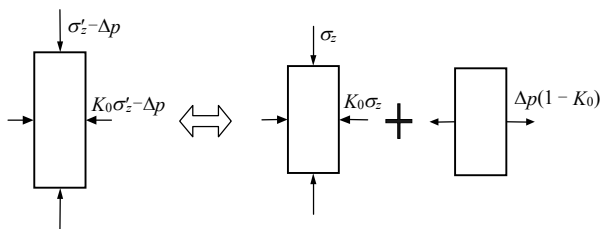


图 6 应力分解
Fig.6 Resolution of stress

轴向压力加至 100 kPa 时, 直至变形稳定, 测读其变形量, 当其轴向变形总量达 2.042 mm, 即又产生了 0.582 mm 的后期变形, 这一过程是用来模拟真空预压后土体投入使用的加荷路径。分析这两个过程, 模拟真空预压, 土体受到的是 100 kPa 的围压, 而模拟真空-堆载联合预压, 土体受到的是 50 kPa 的围压以及 50 kPa 的轴向力。在大主应力方向, 土体受到了同样大小的有效应力 100 kPa, 不同的是在模拟真空-堆载联合预压时, 土体在水平向卸荷 50 kPa, 这时土体在水平方向的约束放松, 必然导致土体在竖向的沉降进一步加大, 这就合理说明了试验观察到的现象。实际工程中常常出现较大的工后沉降, 也可以归因于此。

由于试验没有对试样进行 K_0 固结, 所以其土样的性质和在现场的土体还是有区别的, 所以在以后的试验研究中如何更好地模拟土体在真空压力下的受力特性, 首先要进行 K_0 固结试验, 同时卸去真空, 土体实际上经历的是一个吸水固结过程, 这是一个很长的过程。三轴试验模拟时, 土样只有通过上下的透水石面进行吸水, 这与实际情况相差较大 (实际情况下, 土体各个面都可以吸水), 所以在试验条件下, 判断沉降稳定是一个相当长的过程。因此, 在进行室内试验时对卸去真空后土体变形要给予更充分的时间。

4 结 论

(1) 真空预压的加卸载实际上是以小主应力方向加卸载为主的过程。

(2) 卸去真空的过程中, 小主应力方向的卸载会削弱土体的竖向的回弹, 笔者大胆推测真空预压的卸荷阶段, 土体不会出现明显的回弹现象, 甚至可能继续沉降。

(3) 模拟真空预压应力路径的试验需要更加合理的设计, 从而来验证理论分析, 更好的为实际工程服务。

参 考 文 献

- [1] 徐至钧. 软土地基和预压法地基处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 叶柏荣. 综述真空预压法在我国的发展[J]. 地基处理, 2000, (3): 49—57.
YE Bo-rong. Development of vacuum preloading in China[J]. *Ground Treatment*, 2000, (3): 49—57.
- [3] 张志允, 翟国民, 张明晶. 堆载预压法和真空预压法加固机理的比较研究[J]. 岩土工程界, 2002, (5): 24—26.
ZHANG Zhi-yun, ZHAI Guo-min, ZHANG Ming-jing. Strengthening mechanism research of surcharge preloading and vacuum preloading[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2002, (5): 24—26.
- [4] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [5] 殷宗泽. 限制侧向变形的办法在地基加固中的应用[J]. 河海大学学报, 1999, 27: 9—12.
YIN Zong-ze. Application of confined lateral deformation method in ground treatment[J]. *Journal of Hohai University*, 1999, 27: 9—12.
- [6] 李丽慧, 王清, 王剑平, 等. 真空排水预压土体变形的应力路径分析[J]. 地质工程学报, 2001, 9(2): 170—173.
LI Li-hui, WANG Qing, Wang Jianping, et. al. Analysis of stress path soil's deformation under the vacuum preloading[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(2): 170—173.