

文章编号: 1000-7598-(2005)增刊-103-04

真空预压法及真空-堆载联合预压法的室内试验研究

彭 劼, 刘汉龙, 丰土根, Ali Hasson

(河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 通过室内试验, 研究了试样在模拟的堆载预压、真空预压、真空-堆载联合预压以及各向等压 4 种情况下土体的固结变形特性。结果表明, 在真空预压模拟试验情况下, 试样的变形、加固情况等指标与各向等压模拟试验下的情况很接近, 即: 试样的竖向变形小于堆载预压模拟试验情况下试样的竖向变形, 土性改善程度要优于堆载预压的情况。而真空-堆载联合预压模拟情况下, 试样的竖向变形大于真空预压的情况, 加固效果好于堆载预压的情况, 总体上具有更好的加固效果。

关 键 词: 室内试验; 真空预压; 真空-堆载联合预压; 固结

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Laboratory test of vacuum preloading and vacuum combined surcharge preloading

PENG Jie, LIU Han-long, FENG Tu-gen, Ali Hasson

(Geotechnical Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Four kinds of laboratory experiments, those are vacuum preloading, surcharge preloading, vacuum combined surcharge preloading and each direction equal loading, were made to study the consolidation character of soil. The result shows that the deformation and improvement of soil of vacuum preloading is more close to that of each direction equal loading. The vertical deformation of vacuum preloading sample is smaller than that of surcharge preloading; and the improvement degree of soil under vacuum preloading is better than that under surcharge preloading. The vertical deformation of vacuum combined surcharge preloading sample is larger than that of vacuum preloading; and the improvement degree of soil of vacuum combined surcharge preloading is better than that of surcharge preloading. As a whole, the vacuum combined surcharge preloading is most effective to improve the soft soil.

Key words: laboratory test; vacuum preloading; vacuum combined surcharge preloading; consolidation

1 引 言

随着真空-堆载联合预压法在高速公路、港口、机场中的应用, 迫切需要对其加固机理进行深入研究。一些学者通过室内外试验取得了一些研究成果^[1~5]。由于现场试验不易重复, 室内试验虽然不能完全反映现场的所有情况, 但因其具有可重复、易操作等优点, 在岩土工程中得到了广泛应用^[6~8]。相对于真空预压工程应用, 真空预压理论和试验研究还比较少。本文用自制的负压三轴仪分别进行真空预压、堆载预压、真空-堆载联合预压以及各向等压的模拟试验, 并分析了四者之间的异同。

2 室内试验原理及试验过程

(1) 试验目的及原理

试验的目的是为了进一步研究真空预压及真空-堆载联合预压的加固机理以及和堆载之间的区别、联系。研究了打设排水板的试样分别在堆载、真空、真空联合堆载、等向压缩 4 种荷载条件下的变形、体积以及强度变化情况。在试样中布置排水体是为了用以模拟单井地基, 以此来研究单井地基在 4 种荷载状态下的力学性状。

试验均在自制的负压三轴仪上进行, 试样在加载前施加 40 kPa 的围压令试样固结, 之后分别施加荷载。在试验中, 堆载预压是在 40 kPa 围压固结的

收稿日期: 2005-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50379010)。

作者简介: 彭劼, 男, 1971 年生, 博士, 从事桩基础及软基处理研究工作。E-mail: peng-jie@hhu.edu.cn

基础上,同时向试样施加各向相等、大小为 $K \times 40 \text{ kPa}$ 的围压和大小为 $(40 - K \times 40) \text{ kPa}$ 的竖向荷载,以此模拟现场情况下施加 40 kPa 堆载荷载时地基中某点的荷载变化情况,如图1(a)所示。

其中 K 为水平应力系数,本研究中取 $K=0.5$ 。模拟真空预压是在 40 kPa 围压固结的基础上,从试样顶部进行抽真空,抽真空压力为 40 kPa ,如图1(b)所示。

模拟真空-堆载联合预压是在 40 kPa 围压固结的基础上,向试样施加各向相等、大小为 $K \times 20 \text{ kPa}$ 的围压和大小为 $(20 - K \times 20) \text{ kPa}$ 的竖向荷载,与此同时,从试样顶部进行抽真空,抽真空压力为 20 kPa ,如图1(c)所示。

此外,还进行了等向加压试验,即施加围压 40 kPa ,如图1(d)所示。试验过程中量测试样轴向变形、排水量变化,至变形基本稳定时停止试验,同时测定试验前后土样的物理力学性质变化进行对比分析。

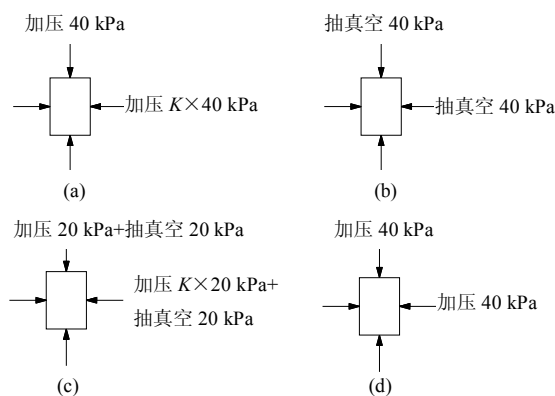


图1 试样受力示意图
Fig. 1 Load on soil sample

(2) 试验用土样及试样制备

试验所用土样为温州原状软土样,含水率比较大,压缩性较大,强度低,孔隙比大。为使试验结果具有较好的对比性,采用大直径薄壁取土器,尽量降低对土体的扰动程度,取样筒取长 50 cm ,直径稍大于 10 cm ,便于制取试样;取样深度基本保持一致($8 \sim 12 \text{ m}$),以尽量降低所用土样离散性过大所带来的缺点。通过对各层土体进行室内物理力学性质试验,土样基本性质差别不是很大,以此来保证室内试验结果具有较好的对比性和可靠性。

试样直径为 10 cm ,高 20 cm 。排水板的打设是在试样切好之后,在试样中心处打设排水体:首先用直径约 8 mm 的薄壁铜管插入试样 14 cm ,然后拔出铜管带出部分土,之后用实心铜棍插入土体,形成一个直径 $8 \sim 10 \text{ mm}$,深度约 14 cm 的排水洞,再往洞内填细砂,并适当捣实。

(3) 试验仪器简介

试验采用应力控制式三轴流变仪,试样直径为 10 cm ,高度为 20 cm ,大于常规三轴仪的试样,以期可以更为方便地观测试样在试验过程中的变化。对于抽真空的试验(模拟真空预压和真空-堆载联合预压情况),需对试验设备进行一些改造和重新连接,三轴仪中原来的排水管路与抽真空系统相连接,试验中需实现抽真空时水气分离,以实现排水量的量测,同时采用电接点真空表使真空压力保持基本恒定在某个压力范围内。具体连接示意图参见图2。

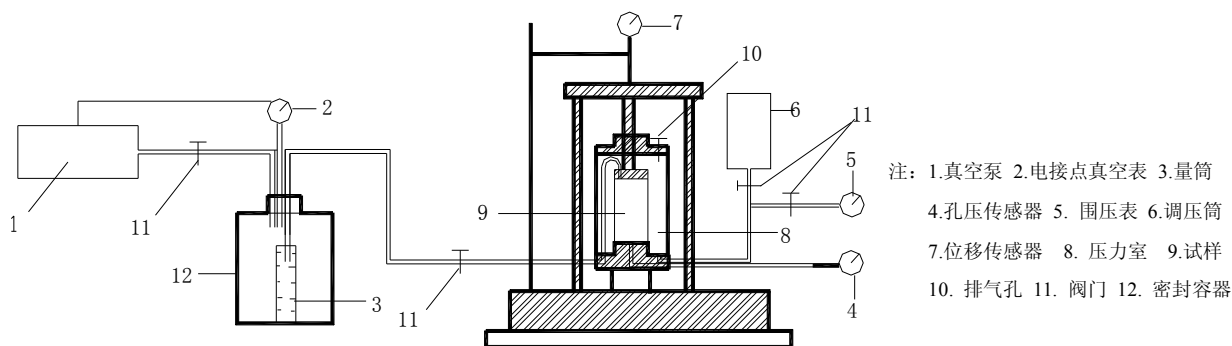


图2 试验仪器示意图
Fig. 2 Sketch map of apparatus

(4) 试验过程

① 模拟堆载预压情况

试验过程基本相同于常规三轴试验,先施加 40 kPa 的围压,令试样固结,然后向试样施加各向相等、

大小为 $K \times 40 \text{ kPa}$ 的围压和大小为 $(40 - K \times 40) \text{ kPa}$ 的竖向荷载,以此模拟施加 40 kPa 堆载荷载时地基中某点的荷载变化情况。固结至变形基本稳定为止,结束试验后进行含水量、干密度、孔隙比、

直剪试验、无侧限抗压强度，以了解加固前后土样的物理力学性质变化及加固效果。试验过程中量测试样轴向变形、排水量变化。

② 模拟真空预压情况

在 40 kPa 围压固结的基础上，从试样顶部抽气，保持真空压力在 $-40 (\pm 3)$ kPa。试验过程中土体的水和气被抽出，土体发生固结至变形基本稳定，测定加固后土体的物理力学指标变化。

③ 模拟真空-堆载联合预压情况

在 40 kPa 围压固结的基础上，向试样施加各向相等、大小为 $K \times 20$ kPa 的围压和大小为 $(20 - K \times 20)$ kPa 的竖向荷载，与此同时，从试样顶部进行抽真空，抽真空压力为 $20 (\pm 3)$ kPa。至土体变形基本稳定，测定加固后土体的物理力学指标变化。

④ 各向等压试验

为了研究抽真空引起的各向等压与外力加压引起的各向等压之间的关系，还做了各向等压试验。在 40 kPa 围压固结的基础上，向试样施加各向相等、大小为 80 kPa 的围压。至土体变形基本稳定，测定加固后土体的物理力学指标变化。

如前所述，上述试验中，均取水平系数 $K=0.5$ 。

上述 4 个试验为一组试验。对打设了排水板的试样进行了上述试验，共计 4 次试验。

3 试验结果分析

3.1 轴向变形

4 种情况下轴向位移随时间变化曲线如图 3、图 4 所示。在经历基本相同的固结时间 (6 d) 后，轴向变形均基本稳定。抽真空和各向等压试验的轴向变形相差不大，分别为 6.7 mm 和 7.2 mm，而且其轴向变形曲线也比较接近。堆载试验的轴向变形最大，达 15.9 mm，真空联合堆载介于两者之间，为 12 mm。堆载预压和真空-堆载联合预压在加载初期均有较大的瞬时沉降，而真空预压和等向预压的瞬时沉降则很小，此外堆载预压的前期沉降很快。从本次试验的结果来看，堆载预压试验产生的沉降大约是真空预压的 2.4 倍，真空-堆载联合预压试验的沉降是真空预压的 1.7 倍。这是由于堆载时有较大的剪应力存在，因此会有较大的轴向变形。

3.2 物理力学性质变化

通过试样试验前后物理力学性质指标对比可以很好的对 4 种情况的加固效果进行分析和评价。表 1~4 分别为 4 种情况试验前后物理力学性质指标。

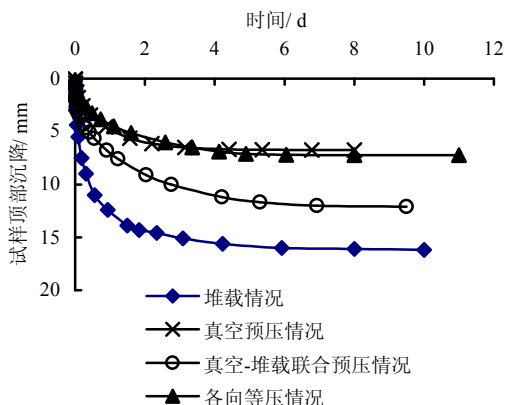


图 3 轴向变形随时间变化曲线
Fig. 3 Curves of axial deformation vs time

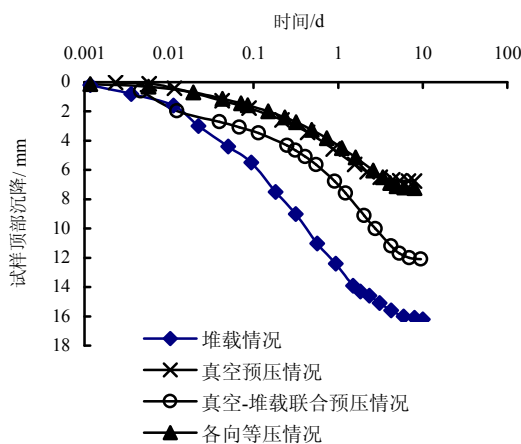


图 4 轴向变形随时间变化曲线 (对数坐标)
Fig. 4 Curves of axial deformation vs time (logarithmic coordinate)

表 1 各向等压情况下土样试验前后物理力学性质指标
Table 1 Soil properties under each direction equal loading before and after test

指标	含水量 w/%	孔隙比 e	湿密度 / g · cm ⁻³	无侧限抗压 强度/kPa	直剪试验	
					粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
试验前	74.2	1.93	1.58	19.9	10.4	24.2
试验后	60.3	1.61	1.63	28.5	25.6	27.7
变化率/%	18.7	16.7	3.2	43.2	—	—

表 2 模拟真空预压情况下土样
试验前后物理力学性质指标
Table 2 Soil properties under vacuum loading before and after test

指标	含水量 w/%	孔隙比 e	湿密度 / g · cm ⁻³	无侧限抗压 强度/kPa	直剪试验	
					粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
试验前	77.2	1.96	1.59	21.1	11.6	19.2
试验后	59.1	1.62	1.65	30.4	27.1	23.5
变化率/%	23.4	17.3	3.8	44.1	—	—

表 3 模拟真空-堆载联合预压情况下土样
试验前后物理力学性质指标

Table 3 Soil properties under vacuum combined
surcharge loading before and after test

指标	含水量 w/%	孔隙比 e	湿密度 /g·cm ⁻³	无侧限抗压 强度 q_u /kPa	直剪试验	
					粘聚力 c/kPa	内摩擦角 ϕ /°
试验前	75.5	2.02	1.58	19.7	11.8	20.5
试验后	57.7	1.67	1.73	25.2	21.5	27.3
变化率/%	23.6	16.9	9.5	27.9	—	—

表 4 模拟堆载预压情况下土样
试验前后物理力学性质指标

Table 4 Soil properties under surcharge loading before
and after test

指标	含水量 w/%	孔隙比 e	湿密度 /g·cm ⁻³	无侧限抗压 强度/kPa	直剪试验	
					粘聚力 c/kPa	内摩擦角 ϕ /°
试验前	77.1	1.99	1.60	20.1	12.7	21.3
试验后	56.9	1.69	1.70	26.5	23.6	29.1
变化率/%	19.3	15.6	8.6	31.8	—	—

从表 1~4 可以明显看出, 4 种试验前后土体的含水量减少, 孔隙比降低, 重度增加, 抗剪强度提高, 使得土样工程性质得以改善。其中真空预压及真空-堆载联合预压的含水量降低幅度较大, 这是因为除了抽真空导致橡皮膜压紧试样令其排水外, 抽气本身也会带出一部分水分。4 种试验对土体的加固程度仍然存在一定的差别, 总体说来, 真空预压和等向压缩的效果基本相同, 各向等压加固效果相对较好, 真空-堆载联合预压的处理效果次之, 堆载预压情况处理效果相对差一些。这是因为堆载预压情况下的围压最小, 而偏应力的存在, 使试样产生更大的轴向位移的同时也有横向膨胀, 土体的密实程度不及其他 3 种试样, 因此, 其无侧限抗压强度较其他试样增加幅度略小。

(3) 排水量变化

4 种情况下排水量随时间变化曲线如图 5 所示。真空-堆载联合预压和真空预压情况下的排水量分别为 172 mL 和 184 mL, 各向等压情况下排水量为 160 mL, 堆载情况下为 155 mL。与沉降曲线比较, 排水量曲线的特点是, 4 种情况的排水过程差异不是很大, 不过仍能看出, 真空预压的排水量最大。

4 结 论

通过大直径三轴仪模拟了真空预压、堆载预压、真空-堆载联合预压以及各向等压下土样的变形和加固特性。试验结果表明, 4 种方法均能使土体的抗剪强度提高。具体而言, 真空预压和各向等压在提高土体强度方面优于真空-堆载联合预压和堆

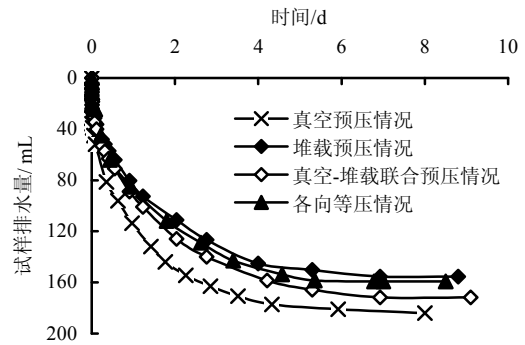


图 5 排水量随时间变化曲线

Fig. 5 Volume change curves with time

载预压。而土样的轴向变形量则是堆载预压最大, 是真空预压的 2.4 倍左右, 真空-堆载联合预压的沉降量是真空预压的 1.7 倍。真空预压和各向等压的沉降量差别不大。

对土样而言, 无论堆载预压还是真空预压及真空-堆载联合预压, 都是土体结构不断调整重组的过程。在真空预压情况下, 真空压力直接作用在土体中的水气流体上, 而不是直接作用在土体骨架或颗粒上, 而由于各个方向作用相同, 因此真空预压更接近于各向等压情况。相对而言, 各向等压的沉降要略大于真空预压, 这是因为真空预压的加固机理是通过作用于孔隙流体然后间接作用于土颗粒上。而各向等压是力直接作用于土骨架上而引起孔压变化并发生固结, 两者的作用步骤是相反的, 虽然最终结果两者接近, 但是直接作用各向等压略优于真空预压。真空-堆载联合预压兼具真空预压和堆载预压的优点, 轴向变形大于真空预压, 加固效果好于堆载预压, 总体具有更好的加固效果。

参 考 文 献

- [1] 刘汉龙, 李豪, 彭劫. 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.
- [2] 高志义, 张美燕, 刘玉钰, 等. 真空预压加固的离心模型试验研究[J]. 港口工程, 1988, (3): 45—50.
- [3] 彭劫. 真空-堆载联合预压法加固机理与计算理论研究[博士论文 D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [4] 陈环, 鲍秀清. 负压条件下土的固结有效应力[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(5): 39—47.
- [5] 彭劫, 刘汉龙, 陈永辉. 真空-堆载联合预压法加固机理讨论[M]. 河海大学学报, 2003, 31(5): 560—563.
- [6] Leong E C. Soil Improvement by surcharge and vacuum preloading[J]. Geotechnique, 2000, 5: 601—605.
- [7] 吴跃东, 余湘娟, 殷宗泽. 负压条件下考虑土体损伤和流变的有限元分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 137—141.
- [8] 曹永琅, 丛建, 吴晓峰. 高速公路超软土地基的真空预压加固研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 771—775.