

真空和堆载两种预压法的室内试验研究

吴桂芬^{1,2}, 高玉峰¹, 魏代现³, 刘汉龙¹

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098; 2. 广西电力工业勘察设计研究院, 南宁 530023;
3. 山东临沂岸堤水库管理处, 山东 临沂 276001)

摘 要: 通过室内试验模拟真空预压法和堆载预压法加固不同深度的土体, 对两种预压法下土体前后的物理力学性质指标、土体的沉降量、排水量等进行了分析, 认为两种方法均能使土体的物理力学性质改善, 就渗透性而言, 真空预压优于堆载预压, 但就压缩性而言, 堆载预压优于真空预压; 堆载预压下试样的轴向位移远大于真空预压下的轴向位移, 且比真空预压下的沉降收敛慢; 真空预压下的排水量大约是堆载预压下排水量的 1.8 倍; 在真空预压和堆载预压下, 浅层土体的排水量均大于深层土体的排水量。

关 键 词: 室内试验; 真空预压; 堆载预压; 加固效果; 沉降量; 排水量; 侧向变形

中图分类号: TU 454 **文献标识码:** A

Study on laboratory test of vacuum and surcharge preloading

WU Gui-fen^{1,2}, GAO Yu-feng¹, WEI Dai-xian³, LIU Han-long¹

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Guangxi Electric Power Investigation, Design and Research Institute, Nanning 530023, China; 3. Shandong Provincial Linyi Administration Bureau of Bank and Reservoir, Linyi 276001, China)

Abstract: By modeling vacuum preloading and surcharge preloading in different depths of the soil using the laboratory test; then soil properties before and after test, axial settlements, volume changes of two methods are analyzed. And some useful conclusions are drawn; soil properties are improved and penetrability after vacuum preloading is better than the one after surcharge preloading, while compressibility after surcharge preloading is better than the one after vacuum preloading. Settlement after surcharge preloading is much bigger than the one after vacuum preloading, and it is constricted more slowly than the one of vacuum preloading. Volume change after vacuum preloading is 1.8 times more than the one after surcharge preloading, and volume change of shallow soil is more than the one of deep soil after vacuum and surcharge preloading.

Key words: laboratory test; vacuum preloading; surcharge preloading; strengthening result; settlement; volume change; lateral deformation

1 引 言

真空预压法加固地基的模型最早由瑞典皇家地质学院杰尔曼(W.Kjellman)教授于 1952 年提出^[1], 该方法提出后引起了学术界和工程界的关注。由于当真空度达 80 kPa 以上时, 相当于一次性施加 4~5 m 的填土荷载产生的总应力, 同时抽真空产生负压使土体产生向内的收缩变形, 从而保证加固区的稳定性, 所以该法逐渐应用于实际工程中, 取得了较好的加固效果^[2~4]。

相对于真空预压的工程应用, 真空预压的理论及试验研究则比较滞后。我国开展了室内模拟试验、正负压对比试验、轴对称和三维真空固结试验以及离心模型试验^[5~8], 国外也进行了不少试验^[9, 10], 其中文献[9]中以室内三轴试验模拟了真空预压、堆载预压和真空-堆载联合预压, 得出了堆载预压和真空预压的沉降量差别不大, 在改善土体的物理力学性质上堆载预压的效果优于真空预压等结论。但是该作者仅考虑了土样在预压荷载下的作用, 即仅模拟了地基表面的土体。实际上, 工程中土体处于不

同深度故所处的应力状态是不同的,所以本文在此基础上,先给试样施加大小不同围压,以此模拟地基不同深度土体的应力状态,再对试样进行真空预压和堆载预压。

2 试验简介

2.1 试验原理

试验均在三轴仪上进行,为使结果具有可比性,竖向荷载均取 80 kPa。试样分 2 组,1 组做真空预压,另 1 组做堆载预压。试验时,试样在预压前分别在不同的围压下固结后,再分别施加预压荷载。模拟真空预压时,将试样分别在不同的围压下固结稳定后,再从试样的顶部抽 80 kPa 的真空压力,受力如图 1(a)所示。模拟堆载预压时,将试样分别在不同的围压下固结稳定,再加产生 80 kPa 的竖向应力,如图 1(b)所示,试验过程中均量测试样的轴向变形、排水量、试样底部孔压变化,直至变形基本稳定停止试验,并分析试验前后土样的物理力学性质指标进行对比分析。这里的围压是针对不同深度的土体而言的,而竖向荷载则是针对预压荷载。需指出和说明的是,堆载预压时,由于一次性施加 80 kPa 的竖向应力,试样易发生破坏,所以预压时应分级施加荷载,一次施加 20 kPa 的竖向应力,间隔时间为 1 d。

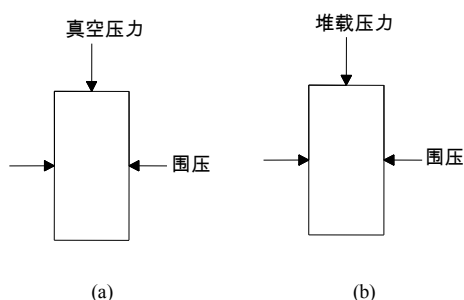


图 1 试样受力示意图

Fig.1 Sketch of the samples under loading

2.2 试验仪器简介

试验仪器为应力控制式三轴仪。试样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,需对试验设备进行一些改进,即三轴仪中原来的排水管路与抽真空系统相连接,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^[11]。具体连接参见图 2。

2.3 试验用土样及制备

试验用土样均为广州原状土样,含水率较大,

压缩性大,强度低,为使试验结果具有较好的可比性,采用大直径薄壁取样器,尽量减少对土体的扰动,取样筒长 50 cm,直径略大于 10 cm。取样深度基本保持一致,以降低土样离散性过大引起的缺点。试样直径约为 10 cm,高 20 cm。排水板的位置设置在试样的中心处,试样取好后,用直径约为 1 cm 的薄壁铜管轻轻插入试样中心,以免扰动土样,当插入深度 15 cm 时再轻轻拔出铜管,铜管带出部分土体,再用实心铜棍插入土样中心,这样形成一个直径为 1 cm,深度约为 15 cm 的排水孔。然后,把事先已筛过并晾干的细砂填入排水孔,适当捣实。排水孔打到 15 cm 深,一方面尽量减少对试样的扰动,另一方面要让试样留出 5 cm 以便取渗透样,保证渗透系数的准确性。

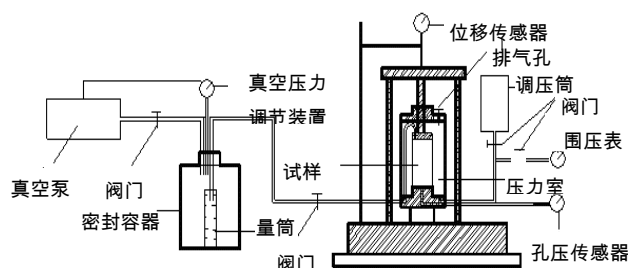


图 2 试验仪器示意图

Fig.2 Sketch of test apparatus

3.4 试验过程

为了实现试验目的,相应地进行了 2 组试验,每组 2 个试样。

(1) 模拟真空预压情况。试验过程基本相同于常规三轴试验,试样 A、试样 B 分别在 20, 60 kPa 围压下固结至排水基本稳定,再在橡皮模包围下,从试样顶部抽气,保持真空压力在 -80 ± 2 kPa。试验过程中土体的水和气被抽出,土体发生固结,记录试样轴向变形、排水量和试样底部孔压变化,待变形基本稳定结束试验。试验结束后称量试样的质量、测量试样直径并进行含水量、密度、孔隙比、压缩、渗透、直剪试验,以了解固结前后土样的物理力学性质变化及加固效果。

(2) 模拟堆载预压情况。试样 C 和试样 D 分别在 20, 60 kPa 围压下固结至排水基本稳定,然后都在 80 kPa 竖向应力下固结(分 4 次施加,每次施加 20 kPa),量测试样轴向变形、排水量、试样底部孔压变化,变形基本稳定后结束试验,并称量试样的质量、量测试样直径并测定加固后土体的物理力学指标变化。这里采用围压 20 kPa 模拟土体在 1 m 深的

应力状态 ,用 60 kPa 围压模拟土体在 3 m 深的应力状态。

3 试验结果与分析

3.1 物理力学性质变化

通过对比试验前后物理力学性质指标，可以很好地对两种方法在不同围压下的加固效果进行分析。由表 1 可知，4 种情况下试验前后的土样含水率降低，孔隙比减小，密度增大，抗剪强度提高，渗透系数减小，压缩系数减小，压缩模量增大，土的工程性质得到改善。其中土的渗透系数和压缩系

数变化最为明显，这是因为土在产生了一定的沉降并排出了大量的水之后，土颗粒间孔隙减小了，土变得更加密实的原因。但比较试样 A 和试样 D、B 和试样 C 试验前后的物理力学性质可知，真空预压法对土渗透系数的影响大于堆载预压法对土渗透率影响，而真空预压法对土的压缩系数和压缩模量的影响则小于堆载预压法对土压缩系数和压缩模量的影响。由此可得出结论：当需要处理的软土地基对土体的渗透性要求较高时，可优先选择真空预压法；而当对土体沉降要求较高时，可优先选择堆载预压法。

表 1 试验前后土样物理力学性质指标
Table 1 Soil properties before and after test

方法	组号	围压 /kPa	状态	含水率 w/%	孔隙比 e	湿密度 /gcm ³	ρ	渗透系数 $\kappa/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	压缩系数 a_v/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
真空预压	A	20	预压前	40.0	1.08	1.80		541×10^{-7}	0.55	3.82	11.2	20
			预压后	36.2	0.99	1.83		2.05×10^{-7}	0.35	5.68	19.3	23
			变化率/%	9.5	8.3	1.7		62.1	36.4	48.7		
	B	60	预压前	37.7	1.02	1.82		2.29×10^{-6}	0.46	4.39	25.9	24
			预压后	30.9	0.88	1.86		8.24×10^{-7}	0.27	6.96	32.4	27
			变化率/%	18.0	13.7	2.2		64.0	41.3	58.5		
堆载预压	C	20	预压前	37.7	1.00	1.82		2.29×10^{-6}	0.46	4.39	25.9	24
			预压后	33.3	0.91	1.86		1.32×10^{-6}	0.21	9.10	30.7	29
			变化率/%	11.7	9.0	2.2		42.4	54.3	107.3		
	D	60	预压前	40.0	1.08	1.80		5.41×10^{-7}	0.55	3.76	11.2	20
			预压后	35.6	0.96	1.84		2.74×10^{-7}	0.33	5.94	27.5	25
			变化率/%	11.0	11.1	2.2		49.4	40.0	56.0		

3.2 轴向位移分析

图 3 为轴向位移随时间变化的曲线。由图可知，在堆载预压下试样的轴向位移远大于真空预压下试样的轴向位移，堆载预压下产生的沉降大约是真空预压下的 2.3~2.9 倍，但是堆载预压下试样的沉降比真空预压下的沉降收敛慢。堆载预压由于是分级加荷，每次加荷试样都会发生较大的瞬时沉降，在沉降曲线上表现为小段小段的折线。加荷完成后，试样的轴向变形则趋于稳定。从图中亦可以看出，土样 C (1 m 深) 最终的沉降量为 8.787 cm，大于试样 D (3 m 深) 土样最终的沉降量 7.366 cm，再次验证了堆载预压下的加固效果随深度衰减的结论。

3.3 排水量分析

4 种情况下的排水量随时间的变化如图 4 所示。总的变化量如下，真空预压情况下试样 A 和试样 B 的排水量分别为 102.3 mL 和 114.5 mL，而堆载预压

下试样 C 和试样 D 的排水量分别为 56 mL 和 82 mL。减去试样在围压下的排水量，则真空预压引起试样 A 和试样 B 的排水量为 102.3 mL 和 88 mL，而堆载预压引起试样 C 和试样 D 的排水量仅为 55.5 mL 和 47 mL。很明显，无论是浅层土，还是深层土，真空预压下的排水量大约是堆载预压下的排水量的 1.8 倍，同时数据亦表明无论是真空预压，还是堆载预压，浅层土体的排水量大于深层土体的排水量。

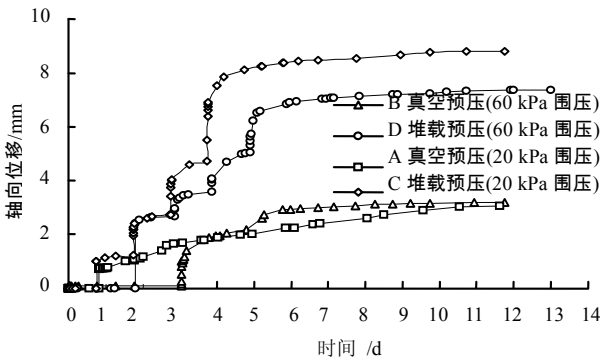


图 3 轴向位移随时间的变化曲线

Fig. 3 Curves of axial displacements with time

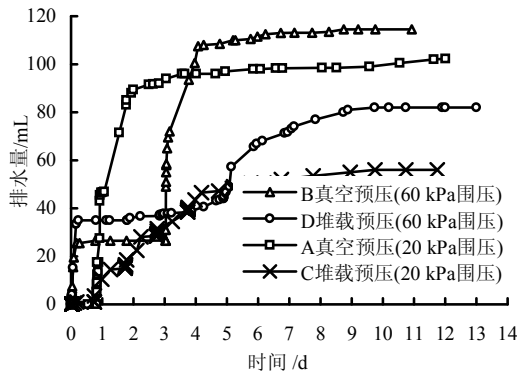


图 4 排水量随时间的变化曲线

Fig. 4 Curves of drainage volumes with time

表 2 试验前后试样直径变化

Table 2 Soil diameters before test and after test

加压方式	围压/kPa	预压前/cm	预压后/cm	变化量/cm
真空	20	10.060	9.950	-0.110
预压	60	10.067	9.880	-0.187
堆载	20	10.036	10.123	0.087
预压	60	10.060	10.010	-0.050

注：变化量数值前加“-”号表示减少，未加则表示增大。

3.4 试样直径变化分析

试验前后试样直径变化见表 2。可以看出，真空预压后的试样直径变小，堆载预压后试样的直径则有大有小，且真空预压后的试样直径变化要大于堆载预压后的试样直径变化。真空预压下试样直径变小，验证了工程上真空预压下土体有向内侧向位移的现象。所不同的是，在本文试验中引起试样直径变小的因素除了抽真空的影响外，还有对试样施加的围压的作用，围压的方向由试样外指向试样横截面圆心，使试样有向圆心收缩的趋势，围压越大这种趋势越大，产生的收缩越大，则试样直径变形也越大。所以，真空预压时（围压为 60 kPa）时的侧向变形大于围压为 20 kPa 时的侧向变形。

工程上土体在堆载作用下的侧向位移一般是向外扩张的，从本文试验的结果看，似有矛盾，但实际是一致的。这是因为堆载预压的土体一般是正常固结土，而本文试验中的土是欠固结土，所以试样直径变化则取决于堆载产生的附加应力（ $\sigma_3 = \kappa_0 \sigma_z$ ，水平系数 κ_0 取 0.5）与所施加围压大小的关系，当附加应力大于围压，试样所受到的侧向应力由试样中心指向试样外的，这样试样就有向外扩张的趋势，试样直径是变大的；而当附加应力小于围压，试样的侧向应力方向是指向试样中心的，试样有向内收缩的趋势，则试样直径是变小的，故

在本试验中堆载预压围压为 20 kPa 时直径变大，而围压为 60 kPa 时试样直径变小。这是因为工程上土体只受到竖向堆载的作用，导致土体有水平向外的位移，而试验中试样不仅受到竖向荷载，还有围压的作用，这样试样直径可能不变甚至变小。所以，为了消除堆载预压时土体侧向变形过大引起的失稳情况，可以在堆载预压时向土体中打入被动桩抵消侧向应力，以减小土体的侧向膨胀。

4 结 论

通过以上分析，可以得出以下结论：

两种方法均能使土体的力学性质得以改善，就渗透性而言，真空预压要优于堆载预压；就压缩性而言，堆载预压要优于真空预压。

堆载预压下试样的轴向位移要远大于真空预压下试样的轴向位移，堆载预压下产生的沉降大约是真空预压下的 2.3~2.9 倍，同时堆载预压下试样的沉降比真空预压下的沉降收敛慢。

无论是浅层土还是深层土，真空预压下的排水量大约是堆载预压下的排水量的 1.8 倍；真空和堆载预压下，浅层土体的排水量大于深层土体的排水量。

由试验前后土样直径变化，再次验证了真空预压下土体侧向位移是指向预压土体的，而堆载预压下土体侧向变形是由预压土体指向外的结论。

参 考 文 献

- [1] Kjellman, K. Consolidation of clay by means of atmosphere pressure[A]. Proceedings of a Conference on Soil Stabilization [M]. Boston: MIT, 1952. 258 - 263.
- [2] 《地基处理手册（第二版）》编写委员会. 地基处理手册（第二版）[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000.
- [3] 程欣，曹亮彦，洪宝宁. 真空预压加固高速公路软基的现场试验研究[J]. 广州公路建设，2001，(3): 15 - 17.
- [4] 程琪，王卫东. 真空预压法加固连云港庙岭三期软基可行性试验[J]. 中国港湾建设，2002，(6): 48 - 51.
- [5] 陈环. 真空预压加固软土地基的机理研[A]. 真空预压加固软土地基论文集[C]. 南京：河海大学，1986，(1): 45 - 73.
- [6] 闫澍旺，陈环. 用真空加固软土地基的机制与计算方法[J]. 岩土工程学报，1986，8(2): 35 - 43.
- [7] 沈珠江. 软土地基真空排水应用的固结变形分析[J]. 岩土工程学报，1986，8(3): 7 - 15.
- [8] 李豪. 真空-堆载联合预压加固软基及简化计算方法研究[硕士论文 D]. 南京：河海大学，2003.
- [9] Harvey, Judith A F. Vacuum drainage to accelerate submarine consolidation at Chek Lap Kok, Hong Kong[J]. Ground Engineering, 1997, (1): 34 - 36.
- [10] Leong, E C, Soemetro R M, Richardjo H. Soil Improvement by surcharge and vacuum preloading[J]. Geotechnique, 2000, (5): 601 - 605.

- [11] 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, (1): 145 - 149.