

真空预压加固软土地基作用机理分析

李时亮

(铁道第四勘察设计院, 武汉 430063)

摘 要:真空预压技术已在港口、道路工程领域得到应用, 但长期以来在作用机理的认识上还存在争论或不明确。结合工程试验资料, 对真空预压加固区应力场、孔隙水压力变化以及有效加固范围进行了分析, 结果表明, 真空预压使加固区土体与膜上及周围土体间产生一个大气压差 ΔP , 在 ΔP 作用下地基土产生正的超静孔隙水压力 Δu , 随着 Δu 的逐渐消散而转化为有效应力, 力学关系符合有效应力原理; 真空预压作用下孔隙水压力测试应考虑 ΔP 的影响; 真空预压与堆载预压在应力特点、附加应力传递、有效加固深度等方面有明显区别, 工程应用中应充分考虑。

关 键 词:真空预压; 软土地基; 真空度; 作用机理

中图分类号: TB 47

文献标识码: A

Analysis of action mechanism of treating soft foundation with vacuum preloading

LI Shi-liang

(The 4th Survey and Design Institute of Railway, Wuhan 430063, China)

Abstract: Based on the engineering tests, the stress, pore water pressure and effective depth range of treating soft foundation with vacuum preloading are analyzed. The analytical results show that: the vacuum preloading brings atmosphere about pressure difference between treating groundsill and its entourage; and brings plus pore water pressure; the mechanical relation is accordant with effective stress principle. The test results of pore water pressure are influenced by atmosphere pressure. Vacuum preloading and surcharge have distinct difference in stress action characteristics, stress treating transfer and effective treating range etc.

Key words: vacuum preloading; soft foundation; vacuum degree; action mechanism

1 引 言

真空预压是利用抽真空来加固软土地基的一种方法, 目前已在港口、道路工程的软基处理工程中得到应用, 但长期以来在作用机理的认识上还存在争论或不明确^[1-6], 影响到该项技术的推广。本文结合工程试验资料, 对真空预压加固区应力场、孔隙水压力变化、有效加固范围进行了分析, 并对真空预压与堆载预压的作用特点进行了比较。

2 对于真空预压机理的认识

对于真空预压使软基产生固结的作用机理, 目前有两种解释, 即负压固结理论^[1-5]和真空渗流场理论^[6]。

(1) 负压固结理论认为, 抽真空使地基土中产

生负的超静孔隙水压, 真空预压加固过程中总应力没有增加, 加固过程中降低的孔隙水压力就等于有效应力的增加, 即

$$\Delta\sigma = -\Delta u \text{ 或 } \sigma = \Delta\sigma + \Delta u = 0 \quad (1)$$

式中: σ 、 $\Delta\sigma$ 和 Δu 分别为附加应力、有效应力和孔隙水压力。

(2) 真空渗流场理论

真空渗流理论空作用将在地基土中形成真空渗流场, 其间产生流动介质为真空流体, 真空渗流场将产生两个方面的作用: ①对于地下水位以上地基, 真空流体使土粒中较小孔道处孔隙水排出而产生固结; ②对于地下水位以下地基, 真空渗流场不能向下传递, 真空预压本身对地下水位以下的地基固结无效。

3 现场观测分析

3.1 试验工程基本情况

武汉市梅子路软基试验段长 300 m, 地基处理采用真空-堆载联合预压, 竖向排水体采用塑料排水板, 打设深度为 14~16.5 m, 间距为 1.2~1.5 m, 为等边三角形布设。水平排水体采用砂垫层, 厚度为 50 cm。

试验段地层自上而下为: ①素填土, 层厚 1.0~2.0 m; ②淤泥, 流塑, 层厚 2.0~4.1 m; ③黏土, 可~软塑, 层厚 0.50~4.0 m; ④淤泥质黏土, 流塑, 层厚 6.2~10.2 m; ⑤黏土, 软塑~可塑, 层厚 2.0~6.4 m, 其下为硬塑黏土及碎石土, 地下水位处于地表下 0.5~1.0 m。

试验工程于 2004 年 5 月 23 日开工, 7 月 7 日开始抽真空, 8 月 20 日开始填土, 12 月 16 日停止抽真空。

3.2 观测结果及分析

3.2.1 真空度的传递

用真空预压法加固软基时地表总荷载并没有改变, 而是通过砂垫层、真空管、塑料排水板等形成通道抽水抽气, 使加固区地基土与膜上及周围土体间形成一个大气压差 ΔP , 这个压差即为“真空度”, 在其作用下地基产生固结沉降。因此, 了解真空度在膜下砂垫层、竖向排水体、地基土中传递变化规律是分析真空预压加固作用机理的关键。图 1 为膜下砂垫层、塑料排水板及地基土中真空度随时间变化曲线。

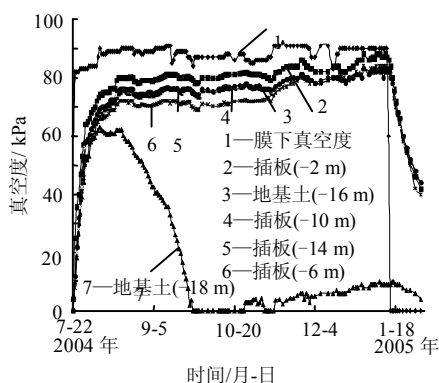


图 1 膜下砂垫层、塑料排水板及地基土中真空度曲线
Fig.1 Curves of vacuum degree in sand padding, prefabricated drain and groundsill

测试资料表明, 膜下真空度在抽真空后 1~2 d 内达到 80 kPa 以上, 而塑料排水板及地基土中真空度是逐渐上升的, 全部测点达到基本稳定值在正式抽真空后一个月以后。在膜下真空度保持在 85~90 kPa 的条件下塑料排水板及地基土中真空度后期能达 80 kPa 左右 (16 m 地基土中测试值因真空管漏

气而出现异常)。

塑料排水板中不同时间真空度沿深度变化曲线见图 2, 其中膜下与 2 m 深处真空度相差约 6~8 kPa, 表明真空度在从砂垫层向塑料排水板的传递过程中有一定的损耗; 在膜下真空度保持 90 kPa 左右的条件下后期塑料排水板中真空度值在 78~84 kPa 之间, 真空度在塑料排水板中沿深度基本无衰减, 这与文献[2]中测试资料是吻合的。

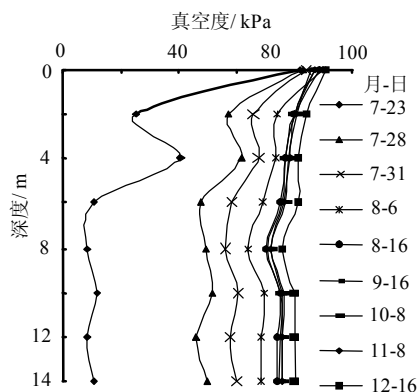


图 2 塑料排水板中真空度曲线

Fig.2 Curves of vacuum degree in prefabricated drain

从真空度测试资料可得出以下结论: (1) 在膜下真空度保持在 85~90 kPa 的条件下抽真空一段时间后, 塑料排水板及地基土中真空度能达到 80 kPa 左右, 且沿深度基本无衰减。(2) 真空预压有效加固范围可达塑料排水板底部, 不受地下水位的限制。

3.2.2 真空预压加固区应力场

对于真空预压机理的解释其核心是如何理解抽真空时加固区地基土应力状态。天然土体是由固体相 (土体颗粒)、液体相 (水)、气体相 (气体) 组成, 其中水和气体附存于土体颗粒孔隙间, 土中气体与大气是相连通的, 存在一个标准的大气压力。抽真空过程中加固区土体中水、气渗流示意图及加固区土中质点受力见图 3。

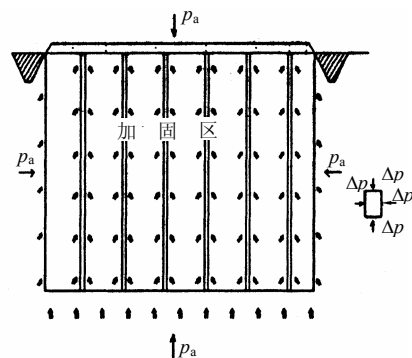


图 3 土体渗流及应力示意图

Fig.3 Seepage and stress sketch map of soil

对于膜上地表来讲总应力无变化,但对于加固区土体,测试资料表明,在抽真空作用下大气压下降达 80 kPa 左右,显然加固区内外产生了一个 ΔP (真空度) 的大气压力差,地基土受气体压力作用而产生固结,则有如下应力关系:

$$\Delta\sigma + \Delta u = \Delta P \quad (2)$$

对于真空-堆载联合预压有

$$\Delta\sigma + \Delta u_1 + \Delta u_2 = \Delta P + \sigma \quad (3)$$

式中: Δu_1 为抽真空作用引起的超静孔隙水压力值; Δu_2 为堆载作用引起的超静孔隙水压力值; σ 为堆载荷载产生的附加应力。

可见,负压理论认为抽真空产生负的超静孔隙水压、且有 $\sigma = \Delta\sigma + \Delta u = 0$,与加固区土体实际应力状态不符合,不能满足力学平衡。抽真空作用下产生的超静孔隙水压力与堆载等荷载条件相类似,其值是正值,理论上也无法对土体在负孔隙水压力状态时孔隙水仍将向外排出进行解释。另外,负压固结理论中对于真空-堆载联合预压作用下孔隙水压变化的解释存在矛盾之处,因为按负压固结理论,如果抽真空和堆载(将)对孔隙水压力变化方向影响相反,则二者共同作用下对孔隙水压力变化作用是相互抵消的,这显然与大量工程实际经验所表明二者作用是叠加的结论不符。

3.2.3 真空预压加固区孔隙水压力

图4为试验段超静孔隙水压力测试值随时间荷载 (P - T - U) 变化曲线,其中超静孔隙水压力值在7月25日出现大幅上升是由于在填筑砂垫层时断面附近短期有 2~3 m 厚的堆砂影响。

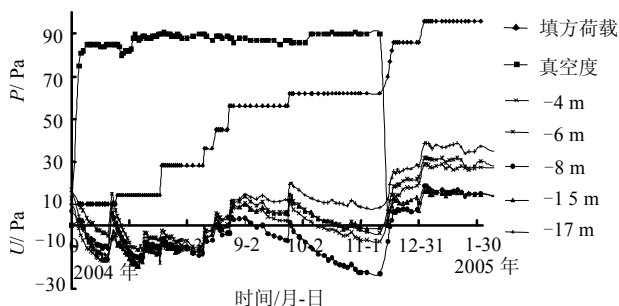


图4 孔隙水压力曲线

Fig.4 Curves of pore water pressure

抽真空初期,超静孔隙水压都出现明显的下降,约1个月后其值渐趋稳定,下降值在 10~40 kPa 之间,其后超静孔隙水压力测试值受路基填筑荷载影响明显,填筑期间,超静孔隙水压力上升,荷载稳定后超静孔隙水压力消散明显。真空卸载后,

各测点超静孔压测试值呈明显上升趋势。

从测试资料看,真空预压作用下孔隙水压力值呈减小趋势,似乎孔隙水压力测试结果与应力关系出现矛盾,这是因为真空预压作用下孔隙水压力的测试值为土中孔隙水压变化与大气压力变化共同作用的结果。常规堆载预压中大气压力在孔隙水压力计受力膜内外是相等的,因此气体压力的影响可不予以考虑,膜上压力测试值仅反映孔隙水压力的变化。而在抽真空作用下,孔隙水压力计内腔存在一个标准大气压力值 P_a ,地基土由于抽真空作用气体压力下降至 P_n ,二者差值为 ΔP (即土中真空度值),对于加固区正常固结土有

$$u_{\text{测}} = u_{\text{静}} + \Delta u_1 - \Delta u_{\text{静}} - \Delta P \quad (4)$$

对于真空-堆载联合预压有

$$u_{\text{测}} = u_{\text{静}} + \Delta u_1 + \Delta u_2 - \Delta u_{\text{静}} - \Delta P \quad (5)$$

式中: $u_{\text{测}}$ 为孔隙水压力实测值; $u_{\text{静}}$ 为抽真空前初始静水压力; $\Delta u_{\text{静}}$ 为地下水位下降引起的静止水压力下降值。

试验段测试资料表明,抽真空作用下地基土中真空度逐渐升高,抽真空一个月左右,地基土中真空度能达到 68~72 kPa,而在真空度 ΔP 上升的同时,由于地基固结作用超静孔隙水压力 Δu_1 将逐渐消散转化为有效应力,二者综合影响的结果使孔隙水压力计的测试值不断下降,到后期,真空度的影响将持续增大,如不考虑堆载作用,固结完成时 Δu_1 逐渐趋于 0,孔隙水压力计测试值较初始值下降幅度可能达 70~80 kPa 的范围,这与工程测试结果是吻合的。

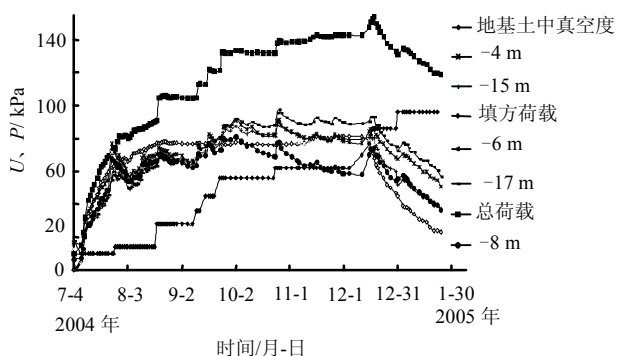


图5 孔隙水压力曲线

Fig.5 Curves of pore water pressure

图5为试验段排除真空度影响后的超静孔隙水压力随荷载、时间的变化曲线,总荷载为堆载及地基土中真空度之和。该曲线可分为4段:①7月7

日~8月20日:地基土中真空度持续上升,堆载应力基本无变化,超静孔隙水压力变化主要受地基土中真空度快速上升影响而增长。② 2004年8月21日~10月25日:地基土中真空度变化不大,堆载应力持续增加,超静孔隙水压力变化主要受堆载影响而变化,在堆载间隙总荷载稳定期间,超静孔隙水压力消散明显。③ 2004年10月26日~12月15日:地基土中真空度及堆载应力基本稳定,超静孔隙水压力逐渐消散。④ 2004年12月16日~2005年1月24日:抽真空停止,地基土中真空度持续下降,除2004年12月16日~12月18日及2005年1月2日~1月3日快速堆载影响而出现超静孔隙水压力突增外,总体上随着总荷载的降低及固结消散作用,超静孔隙水压力持续降低。

图5表明,超静孔隙水压力变化曲线如按加固区地基土实际应力状态考虑,并消除地基土中真空度的影响,地基土中超静孔隙水压力增加、消散规律与单纯堆载作用基本一致。从超静孔隙水压力变化看,抽真空与堆载作用基本相同,但这并不意味着二者作用下地基土固结渗流场也完全相同,抽真空时“真空渗流场”中存在一个主动的吸水、吸气作用,表现在工程实践中真空预加固地基时地基固结速度相对堆载预压快,达西定律是否完全适合存在争议,需进一步研究。

3.2.4 真空预压与堆载预压比较

真空预压与堆载预压都使加固区土体应力状态发生改变,产生超孔隙水压力并逐渐消散,从而达到地基加固目的,但二者在作用特点又有所区别,二者比较见表1。

表1 真空预压与堆载预压的比较

Table 1 Comparison of vacuum preloading and surcharge

比较	类别	
	堆载预压	真空预压
类型	排水固结	排水固结
土中应力	地表及土中应力均增加,随着超静孔隙水压力逐渐消散而使有效应力增加。	地表总应力不变,加固区土体应力状态发生改变,随着超静孔隙水压力逐渐消散而使有效应力增加。
变形特点	产生偏应力及剪切变形,可使土体产生剪切破坏	产生类似球应力,土体向内变形,不会产生剪切破坏。
附加应力传递	沿深度衰减,衰减幅度与质点位置及堆载荷载大小有关。	加固区内沿竖向排水体基本无衰减
有效深度	受附加应力影响深度控制,与堆载面积及荷载大小有关。	一般考虑至竖向排水体底部
固结速度	一般较慢	相对较快

表1表明,真空预压与堆载预压在力的性质、应力传递规律、有效作用深度等都有明显区别,工程应用中应充分考虑。显然不加区别地将真空预压等效为一定高度堆载来考虑加固效果或计算地基沉降,可能会造成较大误差。

4 结 论

通过分析得出如下结论:

(1) 真空预压改变了加固区土体应力状态,在加固区与膜上及周围土体间产生一个大气压差 ΔP ,在 ΔP 作用下,地基土产生正的超静孔隙水压力 Δu ,随着 Δu 的逐渐消散而转化为有效应力,地基土产生固结。

(2) 真空预压作用主要是依靠真空度的有效传递,因此真空度能有效传递的深度也就是其有效加固深度,从试验段测试资料看,有效加固深度能达到塑料排水板底部,不受地下水位限制。

(3) 真空预压作用下有效应力及超静孔隙水压力变化与堆载预压类似,符合有效应力原理,但二者在变形特点、附加应力传递衰减规律、有效加固深度等方面有明显区别,工程应用中应充分考虑。

参 考 文 献

- [1] 天津港湾工程研究所. JTJ 250—98 港口工程地基规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [2] 叶柏荣. 真空预压加固法的发展及工程实录[J]. 地基处理, 1995, 6(3): 1—10.
- [3] 李就好. 真空-堆载联合预压法在软基加固中的应用[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 58—62.
- LI Jiu-hao. The application of vacuum-heaped load combining precompression in the consolidation of soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(4):58—62.
- [4] 陈环. 真空预压法机理研究十年[J]. 港口工程, 1991, (4):17—26.
- [5] 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.
- [6] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(2):7—10.
- GONG Xiao-nan, CEN Yang-run. Mechanism of vacuum preloading[J]. **Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture**, 2002, 35(2):7—10.