

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0865-05

真空联合堆载预压法负面效应分析

刘吉福^{1,2}

(1. 华南理工大学, 广州 510640; 2. 广东省航盛建设集团有限公司, 广州 511442)

摘 要: 虽然真空联合堆载预压法具有许多优点, 但是它也有一些负面效应。首先, 由于真空卸除后地基土的不排水抗剪强度降低可能导致路基失稳, 这种情况尤其可能出现在填土在很多时间内快速填筑完毕且真空马上卸除的时候。其次, 由于真空卸除后地基土压缩模量降低可能导致工后沉降增大, 特别是当真空卸除后马上施工路面的情况下容易出现上述情况。真空联合堆载预压法的其他负面效应如周围地面沉降和开裂在其他文献中已有报道。。

关 键 词: 真空联合堆载预压法; 负面效应; 失稳; 工后沉降

中图分类号: TU434 **文献标识码:** A

Study of negative effects of method of preloading with vacuum and surcharge

LIU Ji-fu^{1,2}

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Province Hangsheng Engineering Co. Ltd. Guangzhou 511442, China)

Abstract: Although the preloading method with vacuum and surcharge has many advantages, but it also has some negative effects. Firstly, it may lead to instability of embankment especially when fill is constructed in a short period and vacuum is unloaded immediately after finishing of surcharge because the undrained shear strength will decline with the unloading of vacuum. Secondly, it may lead to more settlement after construction especially when pavement is constructed immediately after unloading of vacuum for the value of compression modulus will decline with the unloading of vacuum. Other negative effects such as cracking and settlement of ground near the improvement zone have been reported in other papers already.

Key words: preloading method with vacuum and surcharge; negative effect; instability; settlement after construction

1 引 言

真空联合堆载预压法是在真空预压法的基础上发展起来的, 具有加大水力梯度、加快排水固结、地基稳定性增加等优点, 已经在水利水电、公路、铁路等工程中得到广泛应用。目前关于真空预压法、真空联合堆载预压法的研究主要集中在其正面作用, 对其负面效应的研究则较少, 而且主要集中在真空预压对周围环境影响方面, 而不是对加固区本身负面影响的研究。董志良等在深圳河治理二期工程中研究了真空预压对周围环境的影响, 测试表明距离加固区边缘 8 m 处的最大侧向位移量达到 33.5 cm, 向深度达到 14 m; 距离加固区边缘 14 m 处的最大位移达到 23.2 cm, 影响深度达 12 m, 影

响范围达到 40 m^[1]。王劲等则根据南沙港真空预压工程测试得到距离真空预压区 30 m 范围内水平位移和垂直沉降都较为明显^[2]。

真空联合堆载预压法引起周边地表的沉降更大。广珠北高速公路软基试验段采用真空联合堆在预压的路段路堤坡脚沉降达到 1.1~1.5 m, 见图 1 和表 1, 路基外沉降曲线呈漏斗状, 漏斗半径约 20 m。距离路堤坡脚 10 m 范围内的稻田由于地面沉降而长期积水, 水稻枯萎, 被迫将约 7 亩的稻田租用施工场地; 而与之相邻, 地质条件、路堤高度基本相同, 采用堆载预压法的路段坡脚沉降仅 0.5~0.6 m, 周边积水程度较轻。

笔者在工程实践中发现, 真空联合堆载预压法除了会造成周围地面下沉、开裂外, 真空联合堆载预压法的主要负面效应主要表现为: 误导失稳、导

致工后沉降偏大。针对上述问题笔者对其进行了较深入地研究。

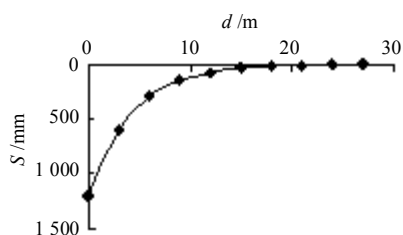


图1 k25+724 路基附近沉降与坡脚距离的关系曲线

Fig.1 The relationship between settlement near embankment of k25+724 and distance from toe of slope

表1 真空联合堆载预压和堆载坡脚沉降对比

Table 1 Comparison of settlement near toe of embankment between preloading with vacuum and preloading with surcharge

监测断面	左坡脚/m	路中线/m	右坡脚/m	加固方法
k25+724	1.3	2.254	1.316	真空联合堆载预压
k25+755	1.423	2.326	1.266	真空联合堆载预压
k25+790	1.327	2.222	1.17	真空联合堆载预压
k25+825	1.143	1.997	1.109	真空联合堆载预压
k25+875	0.612	1.714	0.618	堆载预压
k25+960	0.571	1.627	0.575	堆载预压
k26+001	0.592	1.55	0.668	堆载预压

2 误导失稳分析

在真空荷载下加固区周围地基中产生如图2所示的渗流力，与此同时，地基土受到球状有效附加应力（如图3左侧土体单元所示），抗剪强度增大，地基承载力增大，有利于路堤、堆场等的稳定性。但是，真空荷载不是永久性荷载，真空卸载后图2中的渗流力将消失，与此同时地基土应力状态发生变化，如图3(a)所示，其中 σ'_v 为真空荷载产生有效附加应力， σ' 为卸除真空荷载后作用的有效竖向附加应力， $\sigma'_v \geq \sigma'$ ， $k < 1$ 。

如果堆载产生的附加应力已经完全转变成有效应力，则真空卸载后真空荷载产生的有效应力将完全消失， $\sigma' = 0$ ，如图3(b)所示。因此，在这种情况下卸除真空荷载将地基土由正常固结土变为超固结土，地基土的抗剪强度降低，如图4所示。研究表明，黏性土不排水抗剪强度与超固结比的经验关系式为^[3]

$$\frac{(C_u/\sigma'_{vc})_{oc}}{(C_u/\sigma'_{vc})_{nc}} = \text{OCR}^m \quad (1)$$

式中： $(C_u/\sigma'_{vc})_{nc}$ 和 $(C_u/\sigma'_{vc})_{oc}$ 分别为正常固结土及超固结土的不排水强度 S_u 与其相应的有效固结压力 σ'_{vc} 的比值；OCR表示土的超压密比，参数 m 为常数。

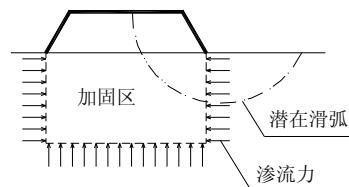


图2 真空荷载作用下的渗流力

Fig.2 Seepage force caused by vacuum loading

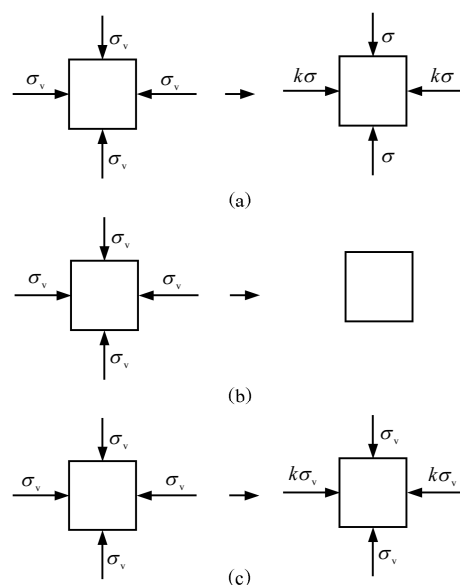


图3 卸除真空荷载前后土体应力状态变化

Fig.3 Stress states of soil unit before and after unloading of vacuum

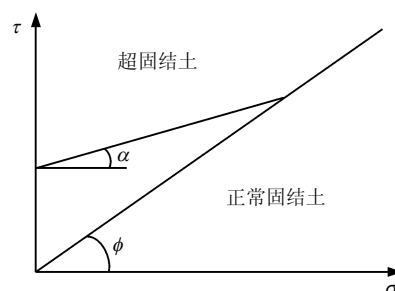


图4 卸除真空对抗剪强度的影响

Fig.4 Influence on shearing strength of unloading of vacuum

由式(1)可知，对于图3(b)对应的情况，卸除真空荷载后地基土不排水抗剪强度将降低。卸除真空荷载前地基土不排水抗剪强度、地基极限填土高度分别为^[4]

$$C_{u1} = (\sigma_f U_f + \sigma_v U_v) \tan \varphi_{cu} \quad (2)$$

$$h_{\max 1} = 5.52 C_{u1} / \gamma_f \quad (3)$$

式中: σ_f 、 U_f 、 σ_v 、 U_v 、 φ_{cu} 、 γ_f 分别为填土荷载及其对应的固结度、真空荷载及其对应的固结度、固结不排水剪内摩擦角、填土重度。

停抽真空后不排水抗剪强度、极限填土高度分别为

$$C_{u2} = (\sigma_f U_f + \sigma_v U_v) \tan \varphi_{cu} - \sigma_v U_v \tan \alpha \quad (4)$$

$$h_{\max 2} = 5.52 C_{u2} / \gamma_f \quad (5)$$

式中 α 为超固结土固结不排水剪内摩擦角。

没有真空预压时的不排水抗剪强度、极限填土高度分别为

$$C_{u3} = \sigma_f U_f \tan \varphi_{cu} \quad (6)$$

$$h_{\max 3} = 5.52 C_{u3} / \gamma_f \quad (7)$$

可见, $C_{u1} > C_{u2}$, $h_{\max 1} > h_{\max 2} > h_{\max 3}$ 。如果停抽真空前填土高度 h_f 与 $h_{\max 1}$ 、 $h_{\max 2}$ 的关系为 $h_{\max 1} > h_{\max 2} > h_{\max 3}$, 停抽真空则可能导致路基失稳。

图 3(c) 对应堆载产生附加应力仍然有一部分由孔隙水承担, 且这部分附加应力大于真空荷载产生的有效应力, 则真空卸载后, 地基土承受的竖向有效附加应力不变, 即 $\sigma' = \sigma'_v$, 水平有效应力减小。麦远俭指出真空荷载产生的不排水抗剪强度大于数值相同的竖向固结荷载产生的不排水抗剪强度, 其比值为 $1 + \sin \varphi_{cu}$ [5]。对于图 3(c) 对应的情况, 卸除真空荷载后, 地基土体抗剪强度也会降低。

如果堆载产生附加应力仍然有一部分由孔隙水承担且这部分附加应力小于真空荷载产生的有效应力, 则真空卸载后, 地基土承受的竖向有效附加应力由 σ'_v 减小至 σ' , 水平有效应力由 σ'_v 减小至 $k\sigma'$, 其抗剪强度降低, 介于图 3(b) 和图 3(c) 对应的两种情况之间。

无论哪种情况地基土强度和地基承载力都会降低, 在堆载作用下的稳定性都会下降。真空联合堆载预压的稳定计算公式为

$$k = \frac{M_k + M_v}{M_h} \quad (8)$$

$$M_v = U \sigma_v \tan \varphi_{cu} \quad (9)$$

如果卸除真空荷载前, 路堤安全系数 k 稍大于

1, 则卸除真空后, 由于地基土体强度下降, $M_v = \delta U P_v \tan \varphi_{cu}$, $\delta < 1$, 可能造成在堆载作用下失稳。

珠江三角洲某高速公路路基高度普遍较大, 软土深厚土性差, 不少路段采用真空联合堆载预压。其中一路段设计填土高度为 6 m, 由于气候和填料资源等原因路基填筑时间较集中, 填土完毕后很快停抽真空, 大约半月后路基发生开裂现象; 另一路段路基设计高度为 7 m, 路基填筑也是在较短时间内完成, 填土完毕后很快卸除真空荷载, 不久约 150 m 范围内发生大规模的路基滑塌。

堆载超载预压卸载时也会造成地基土体强度下降, 但是卸载的同时堆载荷载也同时减少, 且荷载减少量大于强度降低量, 路堤卸载前的安全系数小于卸载后的安全系数。因此, 只要卸载前不失稳, 卸载后通常不会失稳。

3 导致工后沉降偏大原因分析

如第 2 节所述, 真空荷载不是永久荷载, 卸除真空荷载后地基土应力状态发生变化。图 3(a) 和图 3(c) 相当于地基土承受的剪应力增加, 地基土发生剪切变形, 地基将向加固区外侧的侧向位移增大, 导致加固区沉降增大, 这种沉降主要分布在路基两侧一定范围内。图 3 中几种情况都有一个共同点, 即地基土受到的侧向约束减小, 即 σ_3 减小。由式 (10) 可知 [6], 公路地基土变形模量变小、地基沉降量增大而产生工后沉降, 这种工后沉降分布在路基大部分范围内。

$$E_0 = K P_a (\sigma_3 / P_a)^n \quad (10)$$

$$K = K_0 + C \ln OCR \quad (11)$$

式中: E_0 、 K 、 n 、 P_a 、 σ_3 、 OCR 、 K_0 、 C 分别为土体初始模量、模量数、试验常数、单位应力、围压, 固结度、 OCR 等于 1 时的模量数、试验常数。由式 (10) 可知, 卸除真空荷载后地基土的压缩模量将由 $E_0 = k P_a (\sigma_3 / P_a)^n$ 减小为 $k P_a [(\sigma_3 - U_v P_v) / P_a]^n$ 。施建勇等研究表明, 常规压缩试验的压缩系数约为等向压缩试验的压缩系数的 1.2 倍, 最大比例为 1.9 倍 [7]。由于卸除真空荷载后地基土压缩模量将减小、压缩系数将增大, 在堆载作用下地基土将产生压缩, 加固区地基将产生沉降。可以证明, 不论在真空、堆载作用下的是否完全固结, 停止抽真空后均会产生一定数量的沉降。其沉降大小为

$$S_{iv} = \sum_{i=1}^n h_i \left(\frac{\sigma_f}{E_{2i}} - \frac{\sigma_f}{E_{1i}} \right) \quad (12)$$

式中 E_{2i} 、 E_{1i} 分别为第 i 层土卸除真空荷载后、卸除真空荷载前的压缩模量。

虽然, 土体回弹与压缩模量减少可能在较短时间内完成, 但是, 饱和黏土在堆载作用下的压缩增量发生的快慢则取决于饱和黏土排水固结的快慢, 这一点可以由图 5 说明。图 5 中太沙基一维固结模型中的弹簧数量减少表示土体压缩模量的减小, 原本由弹簧承担的一部分荷载转移到孔隙水上, 随着孔压的消散, 逐渐产生沉降。这种沉降随时间的发展规律符合固结理论, 是随时间缓慢发生的。如果卸除真空荷载后不久就投入使用, 由于卸除真空荷载产生的沉降可能在工后发生, 造成工后沉降增大。因此, 为避免真空联合堆载预压加大工后沉降, 建议停抽真空一定时间后再施工路面。

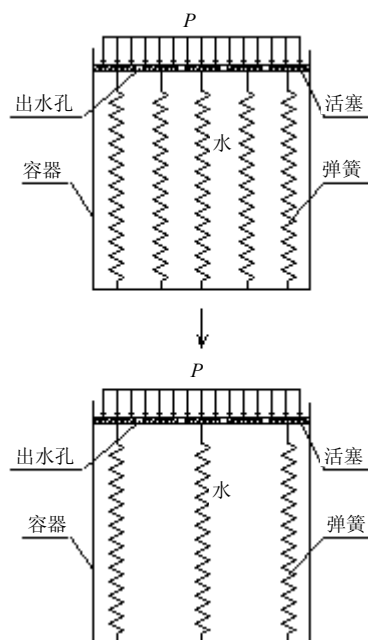


图 5 压缩模量减小对应的固结模型

Fig.5 Consolidation model with decreased compression modulus

广-珠-北高速公路软基试验段真空联合堆载预压路段满载联合预压 85 d 后卸除真空荷载, 卸除真空荷载 7 d 内地基发生反弹, 如图 6 表示其中 2 个施工监测断面处在真空荷载卸除前后沉降发展情况, 反弹量约为 23~29 mm, 其后又继续沉降, 而且持续时间较长。反弹后继续沉降除了与次固结变形有关外, 另外一个原因是卸除真空荷载后地基土压缩模量减小。

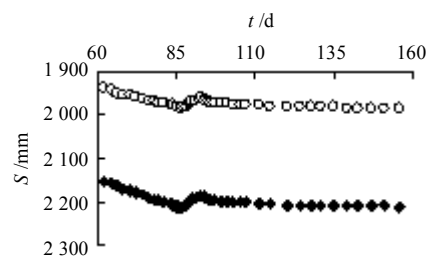


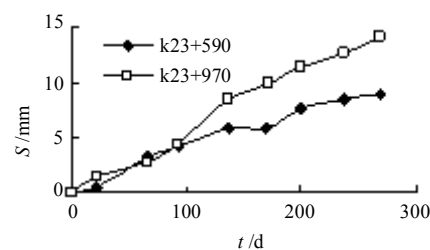
图 6 卸除真空后地基沉降-时间关系曲线

Fig.6 Relationship between settlement and time after unloading of vacuum

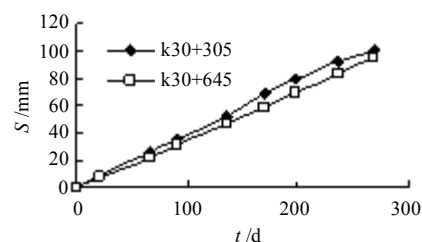
表 2 江中-高速公路部分工后监测断面

Table 2 Some monitoring sections after construction of Jiangmen-Zhongshan Expressway

断面	加固方法	软土厚/m	路基高/m
k23+590	堆载	17.6	6.94
k23+970	真空联合堆载	22.6	7.47
k30+305	真空联合堆载	34.5	6.86
k30+645	堆载	31.8	6.84



(a)



(b)

图 7 两种加固方法工后沉降对比

Fig.7 Settlement after construction of two methods of ground improvement

江-中高速公路软基广泛分布。表 2 为江-中高速公路部分工后监测断面对应的地质与加固等情况。表 2 中断面均距离桥台 10 m。采用真空联合堆的断面路基填筑完成时间早与相邻采用堆载预压的断面。图 7 是表 1 中断面江-中高速公路工后监测的部分成果。可见, 地质条件、填土高度、施工条件等基本一致的情况下, 采用真空联合堆载预压的路段的工后沉降大于采用堆载预压的路段的工后沉降。

4 结 论

(1) 卸除真空后, 地基强度下降, 真空联合堆载法可能误导路基失稳。

(2) 卸除真空后地基压缩模量下降, 采用真空联合堆载预压法可能导致通车后一定时间内的工后沉降大于采用堆载预压法。

参 考 文 献

- [1] 董志良, 胡利文, 赵维军, 等. 真空预压对周围环境的影响及其防护措施[J]. 岩土工程界, 2005, 8(10): 36—39.
- [2] 王劲, 陈晓平, 胡辉. 真空预压法对周围环境影响的监测成果分析[J]. 施工技术, 2006, 35(1): 12—14.
WANG Jin, CHEN Xiao-ping, HU Hui. Monitoring result

analysis of influence of vacuum preloading method on surrounding environment[J]. **Construction Technology**, 2006, 35(1): 12—14.

- [3] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [4] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [5] 麦远俭. 真空预压加固中软黏土不排水剪切强度的增长[J]. 水运工程, 1998, (12): 53—57.
- [6] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [7] 施建勇, 雷国辉, 艾英钵, 等. 关于真空预压沉降计算的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 65—368.
- [8] SHI Jian-yong, LEI Guo-hui, AI Ying-bo, et al. Research of settlement calculation for vacuum preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(3): 365—368.