

真空联合堆载预压加荷速率的控制

娄 炎¹, 尹敬泽²

(1. 南京水利科学研究院 南京市 210029; 2. 广东省公路建设有限公司 广州市 510600)

摘 要: 通过工程实例和应力路线分析,说明采用真空联合堆载预压法加固软基时,也需要考虑加荷速率的控制,否则会发生地基失稳的事故。其与堆载预压不同,由于真空联合堆载预压时有真空的作用,起初的堆载量和速率都可以大一些,一般第一级总荷载控制在 50~60 kPa 以内比较合适。现场孔隙水压力监测是判断地基是否稳定的必要和有效手段,当总的超静孔隙水压力处于正的状态时,只要小于 0.67 倍堆载荷载,地基就处于稳定状态。

关键词: 真空预压; 堆载预压; 联合; 加荷速率; 控制; 孔隙水压力

真空联合堆载预压的加固方法在高速公路^[1]的建设中得到空前广泛的应用,在江浙、广东一带尤为盛行。此外,也被广泛用于沿海地带的围海造陆工程中,以及污水处理厂、变电站、工业厂房、港口后方堆场等软基加固中。该方法主要能解决两方面问题:一是工后沉降量过大的问题;二是在路堤施工中须时刻关注的稳定及工期过长问题。一般而言,只要方法运用得当、设计正确、施工现场管理到位,加固总能取得较好的效果。然而有些人没有真正掌握该方法的本质,盲目加快堆载的速度,不控制加荷速率,工程中也出现了一些问题,发生了路堤滑坡、坍方等事故。这些问题的产生,根本原因是对加固机理缺乏深刻的认识,有的是管理上混乱引起的,有的是缺乏良好的职业道德所造成。事故给工程带来了损失,延误了工期,也使一部分人对真空联合堆载预压加固软基的方法产生了怀疑,影响了该方法的推广使用。本文针对真空联合堆载预压要不要控制加荷速率的问题谈谈看法,与同行们进行讨论,以便更好地推广和使用该方法。

1 真空联合堆载预压加固的实例

1.1 未控制加荷速率造成桥头路堤失事的一个实例

在某高速公路施工工地,采用真空联合堆载预压方法对桥头软基进行加固。该桥头有 12 m 左右厚的淤泥,袋装砂井并将其打穿,膜下真空度稳定 10 天

后,开始路堤填筑。在路堤填筑达到 5.4 m 高(含砂垫层)之后的第 10 天,又连续在 3 天内快速填高 2.3 m。恰逢最后一天早上开始停电,事发时抽真空已停 11 h 之久,膜下真空度有所下降,加上现场没有安排孔隙水压力监测,于是造成这次事故发生(见图 1、图 2)。在填到最后一层不到 2 h,路堤左半幅开始滑塌,路边稻田被抬高 2 m 多(见图 3)。又过了 2 h,路堤右半幅也发生滑坡,致使路边鱼塘底部露出水面(见图 4),整个路堤全部报废。滑坡范围沿路长有 140 m,宽度达 110 m。产生这次深层滑坡的主要原因是加荷速率太快,填筑层厚超标准(最后 4 层平均厚为 57 cm,最后一层厚达 70 cm)。这次事故造成直接经济损失 800 万元。

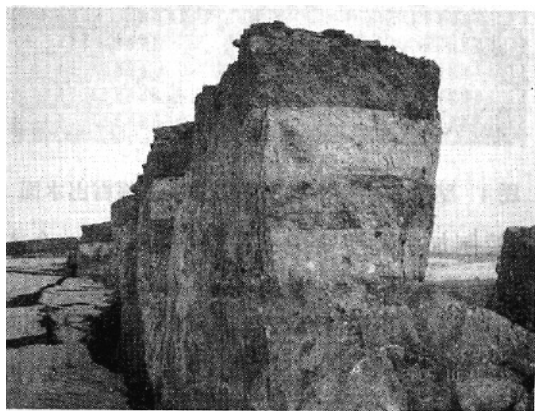


图 1 某高速公路路堤两侧滑坡情景



图 2 路堤右半幅滑坡场景



图 3 路堤左半幅滑塌使稻田抬高 2 m 多



图 4 路堤右半幅滑坡使路边鱼塘底部露出水面

1.2 控制加荷速率避免桥头路堤失事的一个实例

该桥头软基厚达 30 m, 采用真空联合堆载预压法加固软基。打设的排水板长 30 m, 间距为 1.2 m。设计路堤高度为 3.1 m, 实际填筑高有 5 m 之多。现场设置有沉降、水平位移、孔隙水压力等观测仪器, 在施工过程中进行动态监测。图 5 就是该高速公路桥头断面的超静孔隙水压力实际观测资料, 图中每一条曲线代表某一深度软土随加荷(真空荷载和路堤填筑荷载)过程、软土中超静孔隙水压力的变化情

形。由图 5 可见, 没填土以前(仅有砂垫层)由于真空的作用, 在被加固土体中 0~30 m 深度范围均形成了负的超静孔隙水压力; 而在真空联合堆载预压加固的整个过程中, 由于控制了填土速率, 所以在不同深度软土中所产生的总的超静孔隙水压力基本上都是负值, 不同深度的软土中都处于负超静孔隙水压力控制状态, 填土加荷并没有使软基中有效应力发生过损失, 土体具有较高的抗剪强度, 因此不会产生剪切破坏, 地基始终处于安全稳定状态。但是也看到, 当加荷速率过大时, 总的超静孔隙水压力会由负变到正, 如在填土初期(2004-07-01 前后), 11 d 内填土荷载由 16 kPa 猛增到 46 kPa 时(平均约 3 kPa/d), 也就是说 11 d 填了 1.5 m 高的土, 地基中所有测点的正超静孔隙水压力都一致地迅猛上升, 特别是在 12 m 深的软土中, 超静孔隙水压力由 -21 kPa 变为 +10 kPa。该正的超静孔隙水压力已相当于 1/3 的填土荷载, 若不控制加荷速率, 继续高强度填土, 那就会使 12 m 深处的正超静孔隙水压力继续上升, 而且范围会不断扩大, 就有可能引起地基失稳破坏。由于当时控制了加荷速率, 使超静孔隙水压力迅速下降, 从而保证了路堤的安全。

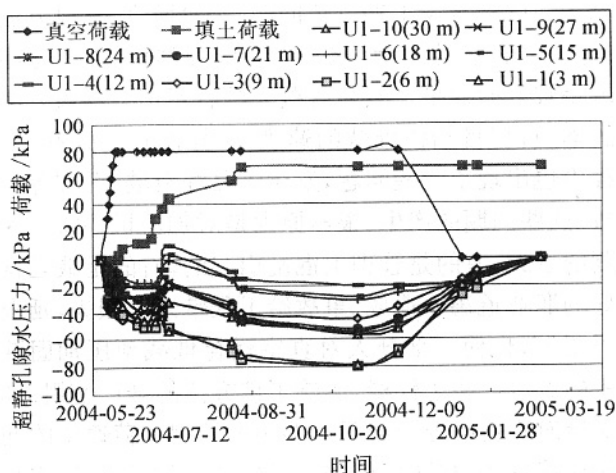


图 5 真空联合堆载形成的超静孔隙水压力过程线

2 从应力路线角度看控制加荷速率的必要性

从两个案例可以看出, 真空联合堆载预压加固软土地基时, 也需要控制加荷速率。对真空排水预压法^[2]来说, 加固时土中有效应力的增加在大小主应力方向都为 $\Delta\sigma'$, 应力圆仅发生移动, 而圆的大小, 即半径并不发生变化, 土体中剪应力并没有增大。在 $p' \sim q$ 平面上(见图 6)的有效应力路线^[2]是从 k_0 线上 H 点出发而平行于 p' 轴的直线。无论 $\Delta\sigma'$ 增大

多少,都不会与破坏包线 k_f 相遇,因此不会出现地基失稳的情形,也就没有必要分级加荷。这就是工程实践中一次可将“真空度”提高到很高的缘故。

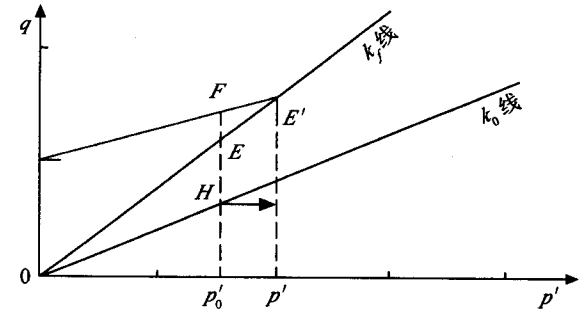
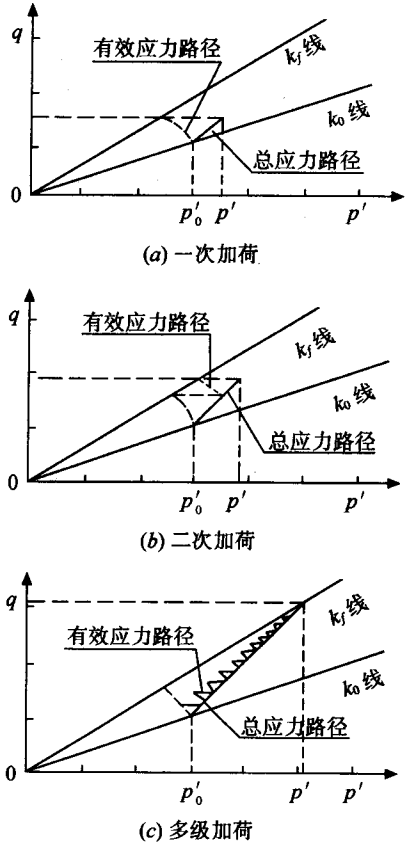


图 6 真空预压加固软基的应力路线

而在堆载排水预压^[2]中,加荷时不仅平均应力增大了,而且应力圆的半径亦增大,这意味着地基土的强度和剪应力都在增大。土体原处于 k_0 应力状态,位于 $p' \sim q$ 图中的 k_0 线上,当加荷后,其有效应力路线如图 7 所示。若一次施加的总应力太大,当有效应力增长较慢时,则有效应力路线很容易达到破坏包线 k_f ,从而发生失稳剪切破坏。因此,一定得控制加荷速率,让土体强度的增长大于剪应力的增加。这就是堆载排水预压法中荷载要分级施加的原因。图 7(b)、(c)说明,分级次数多少将造成加荷的有效应力路线不同,土体所具有强度也迥然不同。

在真空联合堆载预压中,一般先进行真空预压,等膜下真空度稳定后再进行堆载预压,此时的应力路线如图 8 所示。开始时有效应力路线是自 k_0 线上的 H 点出发而平行于 p' 轴的一段直线 HD ,处于 k_0 线的下方。在堆载开始后应力路线则从水平直线 D 点转向右上方,成斜线(一般其与 p' 轴的夹角小于 45°)到达 G 点,有效应力路线自图 8(a)中 D 点沿虚线向 S 点靠近。若一次施加的总应力(堆载)太大、太快,软土中将产生较大的正超静孔隙水压力,土体强度的增长有可能跟不上剪应力的增加,地基就有可能发生失稳剪切破坏。此刻有效应力路线就有可能上扬而到达 k_f 线上的 S 点。若堆载分二级施加、加荷速率得到控制,那总应力路线和有效应力路线的发展就如图 8(b)所示。第一级荷载自 D 点到 E 点,而在堆载加荷和处于休止期的同时,由真空荷载形成的有效应力在不断增加,则有效应力路线也不断向右呈水平移动,为 E 点到 F 点。当再施加第二级堆载时,则总应力路线自新的起点 F 转向右上方成斜线发展到达 G' ,而有效应力路线为 F 点到 S' 点。虽然又



7 堆载预压分级加荷的有效应力路线

上一个台阶,但有效应力路线距 k_f 线还很远,路基就处于安全稳定状态,就不会出现路堤坍塌与滑坡,这就是分级加荷的好处与必要。

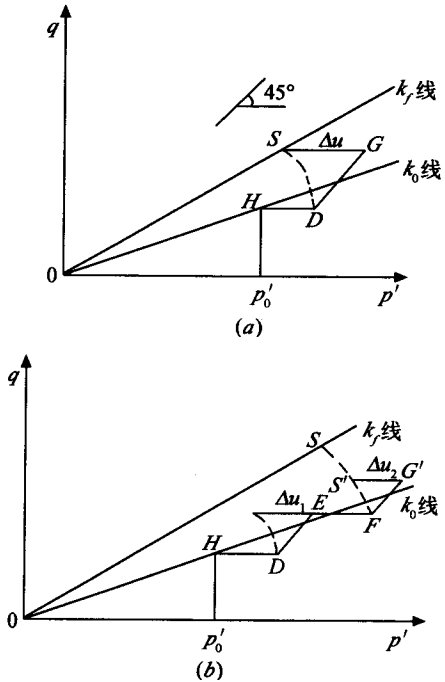


图 8 真空联合堆载预压加荷的有效应力路线

然而也要看到,由于有真空的作用,起始的有效应力路线都在 k_0 线下方,与单独堆载预压情况相比,在同样堆载情况下,有真空作用的有效应力路线比纯堆载预压时距 k_f 线要远,所以起初堆载量和速率都可以大一些。在第二个案例中,连续 11 d 的加荷使地基中所有测点的正超静孔隙水压力都一致地迅猛上升,于 12 m 深处超静孔隙水压力增量达到 31 kPa,也就是说该增量与外加的荷载(1.5 m 高填土)是基本相等的,若是纯堆载预压情况那就有可能发生剪切破坏。但因有真空形成的负超静孔隙水压力存在,它抵消了 $2/3$ 的正超静孔隙水压力,使叠加后的超静孔隙水压力只有 +10 kPa,远小于地基破坏时的临界超静孔隙水压力,使地基处于稳定状态。一般第一级堆载荷载控制在 50~60 kPa 以内比较合适,具体还需看堆荷速率与软土天然强度的大小。现场一定要有孔隙水压力的监测手段相配合才会万无一失,当土体中总的超静孔隙水压力处于正的状态时,只要小于 0.67 倍堆载荷载,地基就处于稳定状态。

3 结语

(1) 工程实践证明,真空联合堆载预压加固软基时也得考虑分级加载和控制加荷速率的问题,现场孔隙水压力监测是判断地基是否稳定的必要和有效手段。

(2) 应力路线分析也说明真空联合堆载预压加固软基有分级加荷的必要性。

(3) 与单独堆载预压情况相比,由于真空联合堆载预压时有真空的作用,起初堆载量和速率都可以大一些,一般第一级总荷载控制在 50~60 kPa 以内比较合适,当总的超静孔隙水压力处于正的状态时,只要小于 0.67 倍堆载荷载,地基就处于稳定状态。

参考文献:

- [1] 姜炎,等. 真空与自载预压联合加固高速公路软土地基[J]. 公路,2003,(3).
- [2] 姜炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京:人民交通出版社,2002.

Control of Loading Velocities for Vacuum Preloading Combined Surcharge Loading

LOU Yan¹, YIN Jing-ze²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Guangdong Highway Construction Co., Ltd, Guangzhou 510600, China)

Abstract: The control of loading velocities should also be considered in strengthening soft foundation with the method of vacuum preloading combined surcharge loading through analysis of engineering cases study and stress path, otherwise instability accidents will occur. Different from surcharge preloading, because of the function of vacuum, the inceptive load and loading velocities can be more great, which the first degree suitable loading should be controlled in 50~60 kPa generally. The field pore pressure monitor is one indispensable and valid means to judge foundation steady or not. When the total excess static pore water pressure is positive value, and it is smaller than 0.67 times of surcharge loading, then foundation should be stable.

Key words: vacuum preloading; surcharge preloading; combining; loading velocity; control; pore water pressure