

# 真空-堆载联合预压地基加固技术

## Foundation Reinforcement with Vacuum-heaped Load Combining

### Pre-compression

周文明,于建军,邵国强,任世杰

ZHOU Wen-ming, YU Jian-jun, SHAO Guo-qiang, REN Shi-jie

中铁九局集团有限公司, 辽宁 沈阳 110013

China Railway No.9 Group Co. Ltd., Shenyang 110013, Liaoning, China

**【摘要】**以杭州—上海(浦东)高速公路为工程实例,研究了真空-堆载联合预压加固地基的效果和影响。应用有效应力法和有效固结压力法,对剪切蠕变所导致的抗剪切强度衰减进行分析。结果表明:加固地基的抗剪强度、地基强度、孔隙水压力的消散程度较加固前有显著提高,预压效果明显。

**【Abstract】**The effect and influence of foundation reinforcement with vacuum-heaped load combining are studied by taking Hangzhou-Shanghai(Pudong) Expressway as an example. Effective stress method and effective consolidated stress method are used to analyze the weakening of shear strength caused by the shear creep. The result indicates that after the reinforcement, the shear strength, strength of foundation and degree of evanescence of pore water pressure are improved, the effect of pre-compression is notable.

**【关键词】**加固;联合预压;软土路基;抗剪强度

**【Key words】**reinforcement; combing pre-compression; weak subgrade; shear strength

中图分类号:U416

文献标识码:B

文章编号:1000-033X(2008)06-0038-03

## 0 引言

软粘土层广泛分布在中国地区,具有含水量高、强度低、压缩性好、渗透性差、流变性明显等特点。若在这种软土地基上修建高速公路,采用有效的加固措施是必要的,否则会产生路堤填筑过程中的地基失稳和工后沉降过大等问题。地基加固的主要方式有真空排水预压、堆载预压、自载预压等,也可以联合采用几种方法<sup>[1-2]</sup>。近年来,一些高速公路软基处理实例中采用真空-堆载联合预压加固方法并取得了良好的效果,为类似的工程提供了有价值的结论和参数。软土工程性质的地域性差异较大<sup>[3]</sup>,本文以杭州—上海(浦东)高速公路为工程实例开展大量室内和现场试验,通过试验数据分析总结真空-堆载联合预压的加固效果。

## 1 真空-堆载联合预压的机理

真空-堆载联合预压是在真空预压的基础上利用填土施加外荷载,增加总应力和软土中的孔隙水压力,加大软土

与排水通道中的孔隙水压力差,从而进一步加速软土排水固结。根据达西定律,土体中孔隙水的渗透速度与水力坡度成正比,因此增加水头差和缩短排水距离均可加速土体排水固结的进程。真空预压的加固机理是通过降低土体中孔隙水压力,也就是使加固区内形成负超静孔隙水压力的方式,使加固区内外存在水头差,从而形成渗流需要的水力梯度。而堆载预压则是由堆载产生正超静孔隙水压力,通过孔压的消散使强度得到提高。2种预压方法联合使用可以使正、负孔隙水压力的压差增大,也就增加了水头差,使孔压消散更快,加固效果更好<sup>[4]</sup>。

另外,由于真空产生负压,使土体产生向内的收缩变形,四周土体向着预压区移动,产生等向固结,不会产生剪应力,这样就可以抵消由堆载引起的向外挤出的变形,地基也就不会因填土速率快而出现不稳定性问题。

## 2 预压效果分析

试验区段的详细工程地质情况见表1。

表1 试验区段土质地质条件

层号	土层名称	厚度/m	天然含水量/%	孔隙比	液限/%	塑限指数
1	杂填土	0.5~1.0				
2	黄色粉质粘土	1.0~1.7	35.8	0.98	37.6	16.5
3-1	灰色淤泥质粉质粘土	0.6~3.2	35.8	1.00	36.6	15.7
3-2	灰色粉质粘土	1.0~1.2	32.9	0.93		
3-3	灰色淤泥质粉质粘土	3.7~5.0	44.4	1.28	38.7	16.7
4	灰色淤泥质粘土	6.4~8.8	45.5	1.35	46.1	22.9

表2 加固前后土层物理性质对比

工况	土层	含水量/%	湿密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	液限/%	塑性指数	液性指数	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩系数/MPa <sup>-1</sup>	压缩模量/MPa
加固前	2	35.8	1.88	1.38	0.98	37.6	16.5	0.89	21.0	17.9	0.41	4.84
	3-1	35.8	1.87	1.37	1.00	36.6	15.7	0.95	13.5	17.4	0.66	2.91
	3-3	44.4	1.73	1.20	1.28	38.7	16.7	1.34	9.5	15.2	1.08	2.00
	4	45.5	1.70	1.17	1.35	46.1	22.9	0.98	12.0	11.5	1.05	2.08
加固后	2	26.3	1.96	1.55	0.76	33.7	13.8	0.46	17.5	18.6	0.25	6.87
	3-1	30.4	1.92	1.47	0.86	35.4	14.6	0.67	15.0	17.9	0.28	6.48
	3-3	39.1	1.85	1.33	1.06	37.7	16.5	1.09	13.5	16.5	0.40	5.01
	4	43.5	1.82	1.27	1.21	38.9	18.5	1.25	11.6	12.0	0.90	2.41

这说明土体密实效果良好。

### 2.2 地基强度的计算值与实测值

根据有效应力法和有效固结压力法原理所计算的抗剪强度值分别见表3和表4。计算时有效应力 $\Delta\sigma'_v$ 取各深度处实测的负孔隙水压力增量值,附加应力 $\Delta\sigma'_v$ 取相应的砂井中各深度实测的真空压力值,固结度 $U_v$ 根据现场实测分层沉降与所推算的最终沉降的比值求得,并且通过综合性强度折减系数 $\eta$ 来判断所得结果是否出现强度衰减。

表3 用有效应力法计算的强度

深度/m	天然强度 $\tau_v$ /kPa	实测强度 $\tau_g$ /kPa	$\Delta\sigma'_v$ /kPa	$\Delta\tau_v$ /kPa	$\tau_{gv}$ /kPa	$\eta$
3	17.95	27.35	27.7	7.51	25.46	1.074
6	19.34	29.61	33.7	9.14	28.48	1.040
9	19.68	30.48	30.6	8.30	27.98	1.089
12	20.12	31.34	32.3	8.76	28.88	1.085

表4 用有效固结压力法计算的强度

深度/m	天然强度 $\tau_v$ /kPa	实测强度 $\tau_g$ /kPa	$\Delta\sigma'_v$ /kPa	$U_v$ /%	$\Delta\tau_v$ /kPa	$\tau_{gv}$ /kPa	$\eta$
3	17.95	27.35	76.8	48.0	12.41	30.36	0.901
6	19.34	29.61	74.3	53.0	12.72	32.06	0.924
9	19.68	30.48	70.8	57.9	12.14	31.82	0.958
12	20.12	31.34	67.2	66.5	9.50	29.62	1.058

2种计算方法所得到的结果主要取决于 $\Delta\sigma'_v$ 和 $\Delta\sigma'_s$ ,而 $\Delta\sigma'_s$ 的简化计算值明显大于 $\Delta\sigma'_v$ ,即有效固结压力法所得到的结果偏大,从而强度折减系数 $\eta$ 偏小,这说明在用有效固结压力法计算时出现了抗剪强度的衰减。随着深度的增加,由于负超静孔隙水压力的增加以及真空度在向深层地基传递过程中的损失,这2种方法所得到的理论值逐渐接近。2种计算方法所得到的 $\eta$ 平均值分别为1.072和0.960,即实测强度与理论计算强度的比值接近1.0。这说明在本工程中真空堆载联合预压法加固软土路基没有引起明显的抗剪强度衰减,地基剪应力的增加与固结强度的增长相适应,从而保证了加固过程中路基的稳定性。在本工程中,建议 $\eta$ 取值为0.960~1.070。

### 2.1 加固前后土层的物理力学性质

加固前后土层的物理性质对比见表2。

由表2可知:软土地基在经过排水固结后孔隙水被排出,含水量和孔隙比减小,软土由软塑发展为可塑状态,土体得到固结密实,压缩模量增大,从而在堆载施加的后期沉降量减小,有利于地基的稳定;加固之后压缩系数变小,压缩曲线逐渐趋于平缓,同时加固后湿密度和干密度都增大,

### 2.3 加固前后十字板剪切强度变化

十字板试验对土体产生的扰动较小,因此被认为是较能反映土体原位强度的测试方法。通常十字板试验测出的强度较小,且主要测试竖直面的抗剪强度,但是仍然可以通过比较加固前后的十字板试验强度值来判断加固效果。各深度处抗剪强度对比结果见图1。

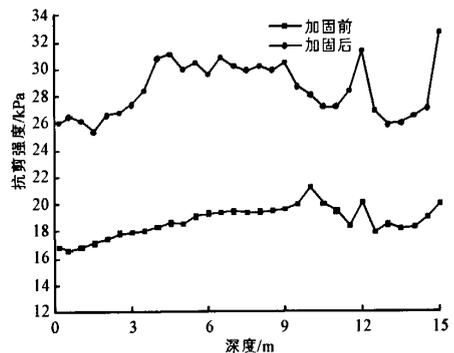


图1 加固前后抗剪强度对比

通过分析加固前后强度变化发现:加固后的强度比加固前增长6.80~12.54 kPa,增长率为32%~59%;强度增长最大值(12.54 kPa)出现在地表以下4 m处,且地表以下3~9 m范围内的强度平均增长量和增长率分别为10.96 kPa、57.78%,而地表以下0~3 m和9~15 m处分别为9.15 kPa、53.54%和8.75 kPa、45.49%,这说明在地下3~9 m深处预压效果更为明显。

### 2.4 孔隙水压力变化

根据现场施工安排,所选区段于2005年4月16日开始抽真空,18天后膜下真空度达到80 kPa,预压至2005年7月20日开始填筑路堤,于2005年11月1日结束。荷载和孔隙水压力(简称孔压)变化情况见图2。根据有效应力原理,在加固软土地基时,减小的孔压逐渐转化为有效应力,土体强度也

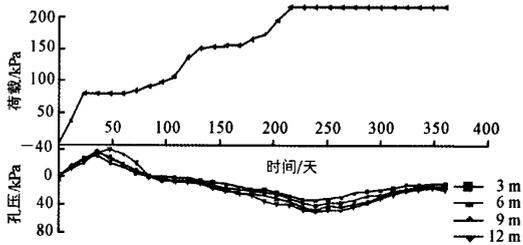


图2 荷载-孔压-时间关系

表5 各深度处孔隙水压力消散程度

级别	孔压/kPa			孔压/kPa			孔压/kPa			孔压/kPa		
	最大	加载前	消散度/%									
	3 m深处			6 m深处			9 m深处			12 m深处		
1级堆载	18.1	14.6	19.4	21.9	17.2	21.5	25.9	20.6	20.5	35	28.6	18.3
2级堆载	33.7	21.6	35.9	36.9	25.6	30.6	42.9	31.7	26.1	48.4	29.8	38.4

加载时孔压的消散程度大于前期,有效应力进一步增大,地基土体也达到更高的抗剪强度。

### 3 结语

通过进行真空-堆载联合预压加固试验及分析,得到以下结论。

- (1) 地基的固结度越高,固结应力就越大,等向固结方式对强度增长的影响也越大,从而强度综合折减系数 $\eta$ 也越大,本工程推荐 $\eta$ 取值为0.96~1.07。
- (2) 加固前后的十字板剪切试验结果表明:真空-堆载联合预压后强度增长6.80~11.42 kPa,强度增长率为32%~59%,在地表以下3~9 m深处加固效果更明显。
- (3) 每级荷载施加时,孔压先缓慢增加到最大值然后逐

得到增强。因此,孔压的消散反映了土体强度的增长程度的同时也可以反映土体的固结程度。

从图2中可以看出:在抽真空阶段,形成负超静孔压;开始分级填筑路堤之后,正、负孔压相互抵消后慢慢增大到一个极大值然后逐渐消散,随后施加下一级荷载时孔压又先增大然后逐渐消散,从而使地基强度得到增强。各深度处孔隙水压力消散程度见表5。从表5中可以看出:各深度处2级荷载比1级荷载的平均孔压消散度大6%~30%,这说明后期

渐消散,此过程随着荷载的增加而不断循环,使得地基强度最终得到增强。在一定范围内,后期加载时孔压消散程度大于前期。

### 参考文献:

- [1] 《地基处理手册》编写委员会.地基处理手册[M].第二版.北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [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,2001.
- [3] 沈珠江.软土工程特性和软土地基设计[J].岩土工程学报,1998,20(1):100~111.
- [4] 周金鹏,王良国.真空-堆载联合预压加固高速公路软基探讨[J].公路交通科技,2003,20(3):32~36.

收稿日期:2007-11-03

[责任编辑:谭忠华]

(上接第37页)

度不均匀、混合料的材料离析和温度离析。

(3) 松铺层的厚度不均匀。这是由于松铺层和下层路面不平整造成的。

在碾压过程中另一类因素的影响机理与第1类完全不同, 这些因素的影响不是通过压缩比或压缩量的变化传递给成型路面的, 而是在碾压过程中由碾轮直接引起铺层材料隆起或凹陷。此种情况通常是由材料的推移和压路机操作不当造成的<sup>[4]</sup>。

#### 4.6 沥青面层摊铺层数控制

研究表明: 沥青路面的平整度与沥青路面的厚度没有关系, 而与其摊铺层数有关。摊铺层数越多, 其表面获得的平整度越高。

### 5 结语

路面平整度要达到行车舒适的要求, 要从路基施工准

备阶段抓起, 所有参加公路建设工程的施工单位都有义不容辞的责任, 必须强化各结构层施工管理, 完善各结构层施工工艺和施工方法, 提高各结构层施工质量, 这样才能从源头上、根本上解决问题。

### 参考文献:

- [1] 李奎岭, 陈龙智. 沥青路面层间平整度的传递分析[J]. 中外公路, 2003, 23(6): 51-54.
- [2] 盛安连, 戴经梁. 高等级公路路面平整度传递理论及其应用[J]. 中国公路学报, 1992, 5(4): 8-16.
- [3] 王昕政. 沥青路面平整度的影响因素及处理措施[J]. 机械管理开发, 2007, 22(2): 56-57.
- [4] 阎 利. 沥青混凝土路面施工平整度控制要点[J]. 公路交通技术, 2007, 23(2): 61-62.

收稿日期:2007-12-12

[责任编辑:张宗涛]