

文章编号: 1001-7372(2003)03-0035-05

袋装砂井处理河滩相软土固结沉降研究

贾其军¹, 王晓谋², 袁怀宇³

(1. 北方交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

3. 陕西省公路勘察设计院, 陕西 西安 710068)

摘要: 以河滩相软土为研究对象, 利用沉降板、测斜管、孔隙水压计等测试仪器, 选取有代表性的观测断面, 进行了一年多的沉降与稳定观测。通过对观测数据进行整理与分析, 推算出符合工程实际的最终沉降量、固结沉降量及地基平均固结度, 进而从三个方面对袋装砂井加速河滩相软土固结效果进行了评价。同时提出了固结度参数 β 的参考值, 对在河南省河滩相软土地基上修筑高等级公路具有重要的参考价值。

关键词: 道路工程; 河滩相软土; 沉降观测; 袋装砂井; 固结

中图分类号: U 416.1 **文献标识码:** A

Consolidation settlement study of alluvial flat soft clay with disposal of packed sand

JIA Qi-jun¹, WANG Xiao-mou², YUAN Huai-yu³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

3. Highway Design Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China)

Abstract: Taking alluvial flat soft clay as research object and using settlement plates, deflection inclinometer and piezometer as testing apparatus, the stability and settlement of representative sections had been observed for more than one year. Based on the observation data, the total settlement, consolidation settlement, the average degree of consolidation and its coefficient- β were calculated, so the effect of packed sand quickening up the consolidation of alluvial flat soft clay was evaluated in three aspect. It will be of great value to us in constructing the high grade highway on alluvial flat soft clay foundation in the future.

Key words: road engineering; alluvial flat soft clay; settlement observation; packed sand; consolidation

0 引言

软土的特点是含水量大、压缩性高、强度低、透水性差、很多情况埋藏较深。在软土地基上直接修筑建筑物或进行填土时, 地基将由于固结和剪切变形会产生很大的沉降和差异沉降, 而且沉降的延迟时间很长, 有可能影响建筑物的正常使用。在软基上修筑公路时, 软基受荷后沉降量大, 极易导致地基失稳。故在软基上修筑高等级公路时沉降与稳定是两

大突出的问题^[1]。通常情况下, 计算地基土沉降所用的模型参数是由室内试验确定的, 由于土样在挖取、贮藏、运输过程中不可避免地扰动, 现场和室内试验两者边界条件的差异, 使得这种方法得出的结果与实际相差较大。目前较为实用的方法是: 以大量的实测资料进行反馈分析, 建立起半理论、半经验的计算公式是一条可行的途径。沪宁高速公路的科研人员曾以大量的沉降资料尝试进行反馈分析, 建立了半理论、半经验的计算公式。岳宏宇^[2]运用反分析中的

收稿日期: 2002-07-21

作者简介: 贾其军(1976-), 男, 山东泰安人, 工学博士研究生



© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

直接分析法, 根据现场观测的结果不断修正地基土的位置参数, 以此来反演地基固结参数。笔者结合焦作至巩义黄河公路大桥连接线工程, 以河滩相软土为研究对象, 通过大量沉降观测数据的分析对袋装砂井加速河滩相软基固结效果进行研究。

1 工程概况

焦作至巩义黄河公路大桥是根据区域经济的需要, 由地方安排的重点交通基础设施建设项目。连接线的起点位于新建的新孟公路上, 沿温县城市规划的西环线南下, 跨老新孟公路, 过伊洛河与已建的开封至洛阳高速公路相接并跨越, 终点接到巩义至站街的已改建公路上。全线长 18.502 km, 共分 6 个标段。

2 地质概况

跨区大部处于黄河冲积平原、伊洛河河谷冲积平原及河漫滩地。在勘探范围内其岩性主要为亚粘土、低液限粘土夹低液限粉土、粉细砂薄层及透镜体。其成因主要为黄河水倒灌及各河流漫流等形成的静水环境下的湖沼相沉积, 在伊洛河两岸形成了大面积的软弱地基土。试验场地大致可分为 6 个工程地质层: I ~ III 层及其亚层为第四系全新统 (Q_4^1) 新近沉积物, 其土性为: I 层为低液限粉土 (亚砂土); II 层为淤泥质低液限粘土~低液限粉土 (亚粘土~亚砂土), 第 II 层工程性能极差, 厚度为 2.4~10.5 m, 自伊洛河向两岸逐渐加厚; III 层为细砂, 仅在伊洛河河谷及右岸 400 m 范围内呈透镜状分布, 最大厚度为 12.0 m, III-1 层为低液限粘土 (亚粘土) ~ 低液限粉土 (亚砂土), 呈楔状穿插于伊洛河左岸的 III 层之中, 最大厚度为 10.5 m。IV~VI 层为第四系全新统下段 (Q_4^2) 冲洪积物, 土性分别为低液限粉土 (亚砂土)、含卵石细砂及含漂卵石层。本试验段采用直径 7 cm、按正方形井间距 1.5 m 布孔的袋装砂井, 井深按路堤填土荷载与地基土状况采用不同的处理深度。袋装砂井上置厚 0.5 m 的砂垫层及厚 0.2 m 的碎石层, 其靠路基边坡处设有干砌片石以利排水。为减小不均匀沉降, 增大地基承载力和稳定路基边坡, 对路基填土较高和软土层厚度较大的 K17+300~K17+635、K17+740~K18+170 路段, 还在砂垫层及碎石层顶面铺设土工网格各一层。

3 观测数据及计算

由于本试验工程有丰富翔实的观测数据, 所以

通过实测的荷载—沉降—时间曲线不仅可以客观地推算出预压期的最终沉降量, 同时也可以反算地基的平均固结系数, 并推算其预压期内不同时间的固结度。常用的通过实测沉降资料推算沉降的方法有双曲线法、沉降速率法、三点法、星野法和浅岗松尾法。笔者主要利用双曲线法以及三点法, 关于固结度的计算, 采用改进的太沙基法。

选择试验段 K17+100 处作为实例, 图 1 及表 1 为测点 K17+100 的沉降板观测资料与荷载—沉降—时间关系曲线。

3.1 用三点法进行推算

用三点法^[3]进行推算见图 2、表 2。

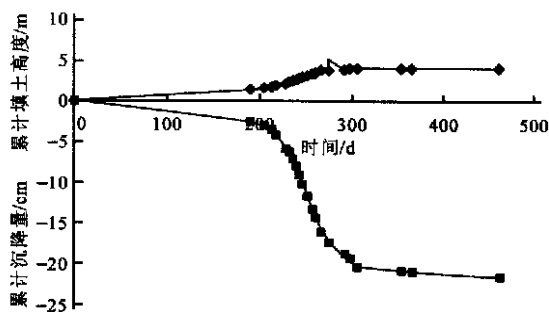


图1 荷载—沉降—时间过程曲线

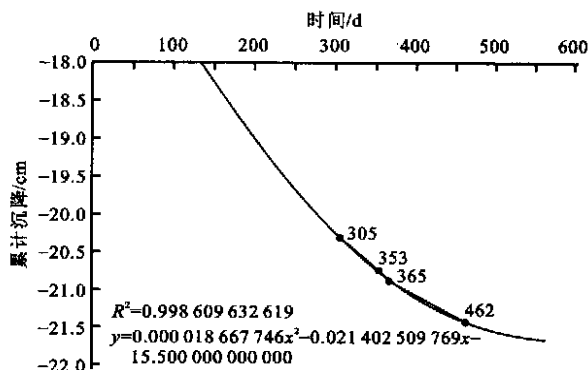


图2 最大恒载时间段内沉降拟合曲线(二次型)

3.2 用双曲线法进行推算

用双曲线法^[4]进行推算见图 3、表 3。

3.3 用改进的太沙基法进行计算

在利用改进太沙基法^[5]进行固结度的计算时, 通过多级等速加载模拟实际的路基填土情况, 在本试验段中基本上是每周为一个加载周期, 所以这里假定:

(1) 7 d 为一个加

载周期。在一个加载周期内, 填土时间为 2 d,

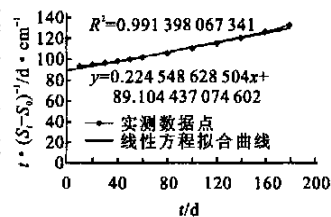


图3 双曲线法推算最终沉降量(K17+100)

表 1 沉降板野外观测数据

观测时间 t /d	间隔时间 t /d	累计填土时间 t /d	填土厚度 h /m	累计填土厚度 $\sum h$ /m	相当荷载 p /kPa	沉降量 ΔH /mm	累计沉降量 S_t /mm	沉降速率 /mm · d ⁻¹
1999-08-11	0	0		0	0	0	0	0
2000-02-29	189	189	1.52	1.52	40.55	- 2.35	- 2.35	- 0.01
2000-03-15	15	204	0.198	1.71	44.51	- 0.43	- 2.78	- 0.03
2000-03-23	8	212	0.149	1.86	47.49	- 0.49	- 3.27	- 0.06
2000-03-28	5	217	0.191	2.05	51.31	- 0.61	- 3.88	- 0.12
2000-04-07	10	227	0.184	2.24	54.99	- 1.74	- 5.62	- 0.17
2000-04-11	4	231	0.208	2.45	59.15	- 0.45	- 6.07	- 0.11
2000-04-15	4	235	0.175	2.62	62.65	- 0.83	- 6.90	- 0.21
2000-04-19	4	239	0.129	2.75	65.23	- 0.95	- 7.85	- 0.24
2000-04-22	3	242	0.199	2.95	69.21	- 0.96	- 8.81	- 0.32
2000-04-25	3	245	0.189	3.14	72.99	- 1.16	- 9.97	- 0.39
2000-04-30	5	250	0.168	3.31	76.35	- 1.49	- 11.46	- 0.30
2000-05-06	6	256	0.211	3.52	80.57	- 1.71	- 13.17	- 0.29
2000-05-09	3	259	0.171	3.69	83.99	- 0.93	- 14.10	- 0.31
2000-05-15	6	265	0.300	3.99	89.99	- 1.87	- 15.97	- 0.31
2000-05-24	9	274	0.000	3.99	89.99	- 1.26	- 17.23	- 0.14
2000-06-16	6	297	0.170	4.22	94.72	- 0.64	- 19.29	- 0.11
2000-06-24	8	305	0.000	4.22	94.72	- 1.00	- 20.29	- 0.13
2000-08-12	48	353	0.000	4.22	94.72	- 0.43	- 20.71	- 0.01
2000-08-24	12	365	0.000	4.22	94.72	- 0.14	- 20.85	- 0.01
2000-12-01	97	462	0.000	4.22	94.72	- 0.55	- 21.40	- 0.01

表 2 “三点法”推算沉降参数结果

参数	测点					
	K17+ 100	K17+ 200	K17+ 400	K17+ 575	K17+ 950	K18+ 050
t_1 /d	300	288	307	300	250	290
t_2 /d	380	375	327	370	355	375
t_3 /d	460	462	347	440	460	460
$\beta/10^{-3}d^{-1}$	5.25	7.39	7.68	7.32	8.01	9.00
填土高度/m	4.22	3.94	5.39	5.45	4.25	2.94
$U_{t=460\text{ d}}/\%$	83.70	91.10	91.69	90.94	92.47	94.27

表 3 双曲线法推算沉降参数结果

测点	沉降参数						
	a	b	$\frac{1}{b}$	填土高度 h/m	S_{∞} /mm	$S_{t=460\text{ d}}$ /mm	剩余沉降 $\Delta S/\text{mm}$
K17+ 100	89.10	0.22	4.45	4.20	24.48	21.40	3.08
K17+ 200	73.00	0.36	2.76	3.94	21.67	20.20	1.47
K17+ 400	31.06	0.20	5.09	5.39	40.80	38.26	2.53
K17+ 575	21.50	0.15	6.65	5.45	40.22	37.15	2.98
K17+ 750	18.00	0.14	7.01	1.33	14.22	12.18	2.05
K17+ 950	21.00	0.16	6.14	4.25	36.69	34.52	2.17
K18+ 050	37.00	0.30	3.36	2.94	32.04	30.70	1.34

其余 5 d 为本级荷载的预压期。这种假定基本上与

实际填土的情况相吻合。

(2) α 与 β 的选取采用考虑径向固结与竖向固结的砂井地基平均固结度的参数值。 $\alpha=8/\pi^2$, β 则取通过沉降资料推算的数值, 这样更加符合实际的加载情况。

(3) 从 1999 年 9 月开始填土算起一共进行了 280 d 的加载时间, 即 9 个月的填土过程中一共填筑了 $280/7=40$ (层)。每层的填筑厚度为 $(\sum \Delta h_i)/40$, 填土的重度 $\gamma_{填}=21\text{ kN/m}^3$ 。

由多级等速加载的公式

$$\dot{U}_t = \sum_{n=1}^n \dot{U}_{t_{(t-\frac{t_{n-1}+t_n}{2})}} \frac{\Delta p_n}{\sum \Delta p}$$

式中: $\dot{U}_t=1-\alpha e^{-\beta t}$, $\alpha=8/\pi^2$, $\beta=6.073\ 190\times 10^{-8}\text{ s}^{-1}$ 。分级加载示意图见图 4, 计算结果见表 4。

4 袋装砂井处理软土地基效果的评价

4.1 容许工后沉降的评价

工后沉降法是以公路在整个运营期可能发生的沉降量大小进行控制, 一般认为高速公路运行 15~20 年后需进行大修。根据《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017-96) 中关于容许工后沉

表 4 加载分级及修正后的固结度(K17+ 100)

项目	荷载等级						备注
	1	2	3~ 37	38	39	40	
各级荷载增量 $\Delta h/\text{cm}$	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	
各级荷载起始时间 $t_{n-1}, t_n/\text{d}$	0~ 2	7~ 9	—	259~ 261	266~ 268	273~ 275	
$t - \frac{t_n + t_{n-1}}{2} / \text{d}$	459	452	—	200	193	186	$t = 460 \text{ d}$
各级荷载下 $u_t/\%$	92.7	92.4	—	71.6	70.6	69.5	
p_i/p_0	1/40	1/40	1/40	1/40	1/40	1/40	
修正后的 $\bar{U}_t/\%$	2.317	2.310	2.303	1.79	1.76	1.73	$\sum 82.69$

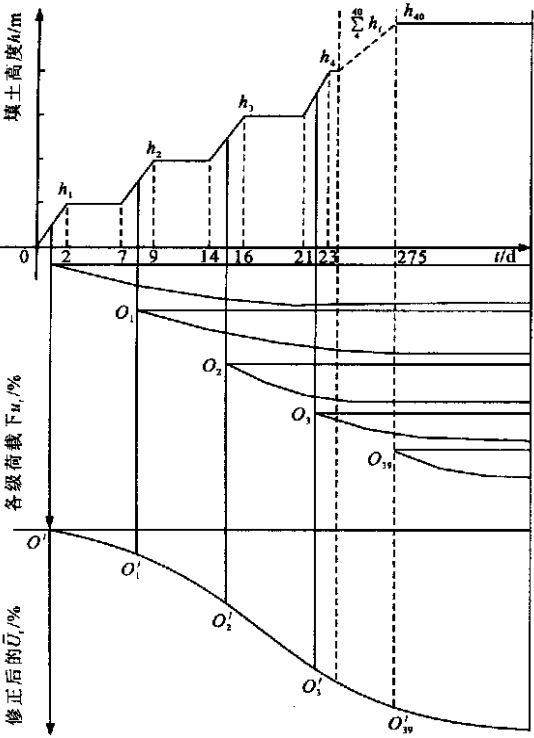


图 4 修正太沙基法

降的规定见表 5。

表 5 容许工后沉降/m

公路等级	工程位置		
	桥台与路堤相邻处	涵洞或箱型信道处	一般路段
高速公路、一般公路	≤ 0.10	≤ 0.20	≤ 0.30
二级公路(采用高级路面)	≤ 0.20	≤ 0.30	≤ 0.50

从表 5 中二级公路容许工后沉降的规定值与本试验段各测点的剩余沉降量相对比(表 3)可以发现:通过袋装砂井处理过的本试验段软土地基剩余沉降量一般在 2~ 3 cm 之间。在测点 K17+ 575 处,填土最高,填土厚度为 5.45 m。相应的剩余沉降量

也最大,接近 3 cm。在测点 K18+ 050 处的剩余沉降量最小,仅有 1.34 cm。通过双曲线法推算的沉降结果可以看出,本试验段软土地基通过袋装砂井处理后,在完成路堤填土后 6 个月的预压期内所有测点的剩余沉降量均小于规范所规定的容许值。

4.2 砂井地基平均固结度的评价

软土地基平均固结度的评价是衡量软土地基处理效果优劣的一个很重要的指标。因为固结度的大小直接与孔隙水压力的消散相联系,而孔隙水压力的消散又直接影响到软土因固结而产生的抗剪强度的增长。确定了各级荷载作用下不同时间的固结度,则可以推算地基强度的增长,从而可以进行各级荷载下地基的稳定分析,并确定相应的加荷计划。同时软土地基平均固结度的大小又与剩余沉降量有着密切的关系^[6]。已知固结度就可以推算加荷期间地基的沉降量,以便确定预压荷载的期限。一般软土地基平均固结度达到 80% 以上,其剩余的沉降量就比较小,基本上可以满足工程上对工后沉降量的要求。不过这还要同软土地基的固结沉降量共同分析。因为如果软土地基的固结沉降量很大,虽然软土地基在经过地基处理后其固结度可以达到 80% 以上,可是由于其较大的总固结沉降量,其剩余的沉降量仍然是很大的。由此可见,软土地基的平均固结度在软土地基处理的分析中占有相当重要的地位。

从表 6 可以看出:在所有的 6 个测点中,从预压期开始时间算起($t = 280 \text{ d}$),当软基预压期为 2 个月($t = 340 \text{ d}$)时,所有测点的平均固结度小于或接近 80%。根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-91)中对预压法的规定可知:对主要以沉降控制的工程,当地基经预压消除的变形量满足设计要求且受压土层的平均固结度达到 80% 以上时,方可认为完成预压。在完成路基填土后 90 天时($t = 370 \text{ d}$),经袋装砂井处理过的软土地基的平均固结度,除了个别测点如 K17+ 100 外,其它测点的平均固结度都在 80% 以上。通过 6 个月的预压,不仅所有测点的平均固结度都超过 80%,而且基本上超过了 90%。《沪宁高速公路江苏段工程地质、地基沉降及地基处理评估总报告——徐泽中、殷宗泽、蔡家范、许道化》中有关固结度标准的资料:在路基修筑后,地基的固结度达到 80% ~ 90% 后再修筑路面,从概念上讲,此时绝大部分的沉降已发生,剩余沉降不大。这也可以从孔隙水压力、荷载随时间变化中得到印证(图 5、6),与填土期间孔隙水压力升高缓慢相对比,在预压期内,孔隙水压力的消散较快,这说明袋装沙井加速软基固结效果明

显。可见, 通过 6 个月的预压, 经袋装砂井处理过的本试验段完全满足平均固结度的规定要求。

表 6 预压期间的固结度/%

测点	时间/d				
	$t=300$	$t=340$	$t=370$	$t=400$	$t=460$
K17+100	62.26	69.4	73.86	77.67	82.69
K17+200	71.00	78.41	82.70	86.14	91.10
K17+400	71.82	79.23	83.48	86.86	91.69
K17+575	70.78	78.19	82.49	85.94	90.94
K17+950	72.96	80.36	84.54	87.84	92.47
K18+050	75.83	83.13	87.12	90.16	94.27

注: 预压期起始时间 $t=280$ d。

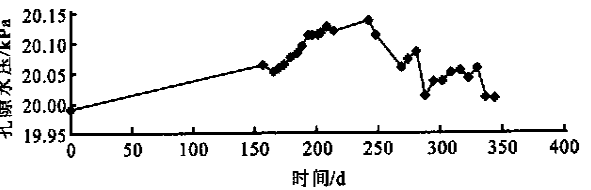


图 5 孔隙水压—时间关系曲线

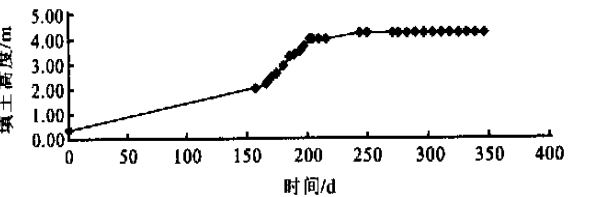


图 6 填土高度—时间关系曲线

4.3 沉降速率的评价

沉降速率法^[7]是在路堤修筑以后观测沉降变化的过程。当沉降速率小于某一数值(如 10 mm/月)后再铺设路面, 根据观测到的沉降变化过程还能推测出今后尚能发生的沉降量, 此法较为合理。表 7 为

表 7 预压期间的沉降速率/ $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$

桩号	时间/d				
	$t=300$	$t=305$	$t=350$	$t=365$	$t=460$
K17+100	0.127	0.105	0.009	0.011	0.006
K17+200	0.121	0.029	0.008	0.009	0.001
K17+400	0.141	0.092	0.011	0.008	0.002
K17+575	0.135	0.106	0.021	0.008	0.003
K17+800	0.213	0.178	0.056	0.032	0.002
K17+950	0.125	0.082	0.024	0.013	0.002
K18+050	0.136	0.024	0.014	0.011	0.008

本试验段预压期内的沉降速率汇总。

通过现场的沉降观测资料, 可以准确地得出不同测点的沉降速率。从表 7 统计的数据可清晰地看出: 各个测点预压期的沉降速率均逐渐减小, 至预压期 3 个月时其沉降速率基本上在 0.010 cm/d 左右, 已经小于沉降速率的规定值 10 mm/月 。也就是说在预压期为 3 个月时可以进行面层基层的填筑。而到最后的观测日期 $t=460 \text{ d}$ 时, 其沉降速率基本上在 0.002 cm/d 左右, 可以认为此时不再产生沉降。由此可见, 通过沉降速率控制得出的结论与通过软土地基平均固结度控制得出的结论是一致的。这也进一步验证了沉降速率观测数据以及通过沉降资料推算的软基平均固结度的正确性。

5 结 语

(1) 从本试验段沉降与稳定观测资料入手, 利用三点法以及双曲线法对实测荷载—沉降—时间曲线进行整理与分析, 推算出符合工程实际的最终沉降量、固结沉降量、剩余沉降量及地基平均固结度。从三个方面(容许工后沉降、地基平均固结度、沉降速率)的分析可以清楚地看出袋装砂井加速软基固结的效果符合各项指标规定, 这证明了本试验段软基处理方案的合理性、适用性。

(2) 同时提出了固结度参数 β 的参考值, $\beta=7 \times 10^{-3} \sim 9 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$, 对在河南省黄河流域河滩相软土地基上修筑高等级公路具有重要参考价值。

参考文献:

[1] 张诚厚, 袁文明, 戴济群, 等. 高速公路软基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[2] 岳宏宇. 由实测沉降数据反演地基固结参数的适用计算方法[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 29—33.

[3] 洪毓康. 土质学与土力学(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990. 110—118.

[4] JTJ 017-96, 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].

[5] 叶书麟. 地基处理与托换技术(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[6] 赵九斋. 连云港软土路基沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 643—649.

[7] 龚晓南. 高速公路软弱地基处理理论与实践[M]. 上海: 上海大学出版社, 1998.