

高速公路软基处理中袋装砂井参数优化设计

胡立堂 严加兵 余启洋 韩宏伟 李文豪

(中国地质大学工程学院)

(湖北省高等级公路管理局)

摘 要 本文在简单论述袋装砂井排水固结机理的基础上, 计算并对比分析了高速公路软基处理中不同参数的砂井经不同时间预压后的固结度, 探讨了砂井直径、间距、长度等参数的优化设计问题。

关键词 软土地基 袋装砂井 排水固结 固结度

在高速公路软基处理中, 排水固结法应用最多, 其中尤以袋装砂井排水固结法应用最为普遍, 效果较好。它是通过人为设置袋装砂井这样的竖向排水通道, 在路堤加载后使软土中的孔隙水能较迅速地排出, 加速地基的固结, 提高地基的强度, 使地基能够满足工程对强度、沉降、工期等的需求, 从而达到安全、快速施工。

1 袋装砂井排水固结机理

软土的结构一般为蜂窝状或絮状, 土颗粒周围充满水, 被吸附在颗粒周围的结合水在重力作用下不能自由流动, 但受外力作用时弱结合水可以变形或转化为重力水, 从而缓慢排出, 产生固结。由于软土的透水性很差, 渗透系数一般在 $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{ cm/s}$, 土体中的孔隙水的渗透十分缓慢。当软土层很厚时, 如果不改变软土的排水边界条件, 仅采用预压法, 软土固结非常慢, 使得地基土的强度增长缓慢而不能快速堆载, 导致预压时间延长, 或者在一定时间内的超载过大而出现失稳, 影响施工。此时可以在软土地基内人为设置砂井等竖向排水体, 以增加排水途径, 缩短排水距离, 使地下水快速排出, 从而加速土层固结。

软土层打入砂井前, 其排水过程可看作是一维排水固结。打入砂井后, 其水动力场已经变为三维, 砂井周围一定范围柱体为其有效排水范围, 可以近似地认为该范围内的地下水是通过位于其中间的砂井排出的。高速公路软土地基处理中, 一般采用砂井等边三角形布置, 砂井影响范围为一正六边形柱体, 为便于分析和计算, 也可近似看作直径为1.05倍井间距圆柱体。圆柱体内的孔隙水受到附加应力作用后, 主要以径向流流向砂井, 再经砂井上部的砂垫层及下部的透水层流出, 仅有少部分孔隙水直接竖向流出。

竖向排水平均固结度可由下式计算

$$\bar{U}_v = 1 - \frac{8}{\pi} \sum_{M=1}^{\infty} \frac{1}{4M-1} \frac{1}{m^2} e^{-\frac{\pi^2 m^2}{4} T_v}$$

式中: T_v , 竖向固结时间因数; H , 土层的竖向排水距离, 双面排水时为软土层厚度的一半。

径向排水固结度可由下式计算

$$U_r = 1 - e^{-\frac{8T_h}{F_n}}$$

式中: $T_h = \frac{C_h}{d_e^2} t$; C_h , 径向固结系数; d_e , 砂井等效间距; F_n , 反映排水距离的影响因子, $F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} m(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$, n 为井径比, $n = \frac{d_e}{d_w}$ 。

总固结度按下式计算

$$U_{rz} = 1 - (1 - U_z)(1 - U_r)$$

在实际工程计算中, 由于软土层的厚度比砂井的间距大得多, 使得径向固结度比竖向固结度大许多, 因而经常忽略竖向固结度。此外, 由上式得出的理论固结度比实际监测的小, 这是因为实际情况远比理论求解模型复杂, 理论求解条件经过概化后, 忽略了一些影响因素, 如土的扰动、砂井砂料阻力、逐渐加载条件、水动力条件等。

2 袋装砂井优化设计

为使袋装砂井达到良好的排水效果, 必

须对袋装砂井的直径、间距、深度等进行科学合理的优化设计。这里以某高速公路试验段的试验资料, 探讨设计中的有关问题。该试验段断面地层分布从上向下为: 0~ 1.2m, 耕植土层; 1.2~ 14m, 淤泥层; 14.0~ 19.0m, 淤泥质土夹中细砂层; 19~ 28m, 淤泥质粘土层; 28m 以下, 弱风化粘土岩层。各土体层物理力学性质指标见表1。

2.1 砂井直径与间距

由径向固结度计算公式可以看出, 砂井间距越小, 直径越大, 排水固结就越快, 但投

表1 各土层物理力学性质指标统计表

层 号				
土 类		淤泥和淤泥质土	淤泥质土夹中细砂	淤泥质粘土
厚度(m)		8.4- 16.0	3.4- 6.4	11.0- 20.0
含水量w (%)		68.3	30.8	53.2
重度 ρ(g/cm ³)		2.71	2.68	2.71
孔隙比 e		1.799	0.764	1.367
塑限w _p (%)		25.40	14.08	22.04
液限w _L (%)		45.83	22.75	38.72
塑性指数 I _p (%)		20.4	8.67	16.58
压缩系数 a _v (MPa ⁻¹)		1.86	0.44	1.072
固结系数 C _v (10 ⁻³ cm ² /s)		0.87	4.23	4.65
渗透系数 k (10 ⁻⁶ cm/s)		1.134	3.86	4.96
快剪	C (kPa)	7	13.6	13.2
	ψ (%)	4	27.1	11.7
	有机质含量 (%)	2.15		
原位测试	十字板抗剪强度 C _u (kPa)	8.62	27.52	15.78
	静探比贯入阻力 P _s (kPa)	239.42	3528.34	663.61

资也越大。多大的直径、间距较为经济合理呢?按砂井排水的总平均固结度计算公式, 对不同直径、间距的砂井固结度进行计算, 结果见表2。可见: 为加速软土层的固结, 缩

小井距要比增加砂井直径效果好得多, 特别是当砂井间距小于1.5m 时, 增加砂井井径, 固结效果的增加并不明显。例如7 cm 与50cm 相比, 预压三个月时固结度相差18.43%,

预压一年时固结度相差不到7%，往后相差甚微。此外，即使是4 cm 的理想砂井，对加速固结也是十分有效的。因此，袋装砂井的布置应采用“细而密”原则。

表2 不同砂井直径和间距固结度计算结果

间距 (m)	井径 (cm)	91天(三个月)	365天(一年)	730天(二年)	3285天(九年)	备 注
1 0	4	42 65	60 90	65 95	84 10	算例边界条件: 1 荷载 $H = 4\ 935\text{m}$ (80 21kPa), 加载时间277天; 2 计算压缩层厚度为 31. 46m; 3 砂井长度为15m; 4 $C_v = 1\ 134 \sim 4\ 96$ $\times 10^{-3}\text{cm}^2/\text{s}$, $C_h = C_v$ (C_v 由等效厚度法求得); 5 相关参数见表1。
	7	46 07	61 62	65 98	84 10	
	10	48 70	61 89	65 98	84 10	
	20	54 57	62 07	65 98	84 10	
	30	57 54	62 07	65 98	84 10	
	42	58 17	62 07	65 98	84 10	
	50	58 83	62 07	65 98	84 10	
	4	31 56	52 60	63 67	84 10	
1 5	7	33 56	55 09	64 72	84 10	
	10	35 26	56 79	65 26	84 10	
	20	40 14	59 99	65 87	84 10	
	30	44 52	61 36	65 97	84 10	
	42	49 29	61 93	65 98	84 10	
	50	50 09	62 04	65 98	84 10	
	4	26 89	44 21	57 75	84 06	
	7	27 98	46 54	59 76	84 09	
2 0	10	28 92	48 35	61 12	84 10	
	20	31 67	52 75	63 74	84 10	
	30	34 29	55 87	64 99	84 10	
	42	37 50	58 53	65 66	84 10	
	50	39 71	59 79	65 85	84 10	
	4	23 51	35 34	47 55	82 73	
	7	23 93	36 59	49 23	83 21	
	10	24 28	37 61	50 55	83 48	
3 0	20	25 29	40 26	53 55	83 89	
	30	26 23	42 70	56 31	84 02	
	42	27 38	45 29	58 71	84 08	
	50	28 19	46 93	60 06	84 09	

砂井直径设计还要从经济角度去考虑。假设砂井间距为1. 5m，计算出不同直径的砂井处理后软土层达到固结度80% 时所需时间，以及各种类型砂井的单价见表3。由表中数据可看出7cm 与42cm 两种砂井在固结度80% 时，所需时间仅相差70天，这在一般地基处理工期内完全可以调剂出来的，而两者的造价比约为1: 5，因而从经上考虑不

宜采用大井径砂井。当然,砂井的井径选取还与砂井的类型和施工方法有关。但在软土地基砂井排水固结法处理中,选取7cm或10cm井径,间距在1.5m左右的砂井较为合理。

表3 砂井直径与固结时间关系

砂井直径(m)	固结度(%)	固结时间(d)	单价(元/m)	单价对比	备注
7	80	100	3.6~4.0	1.0	
30	80	45	9.0~10.0	2.5	砂井间距为1.5m
42	80	30	18.0~20.0	5.0	
50	80	30	20.0~22.0	5.5	

2.2 砂井设计深度

砂井深度的确定与软土层的分布、地基中附加应力的分布和分布、施工工期等因素有关,一般考虑如下原则。

- (1) 当软土层较薄时,砂井应该贯穿软土层。
- (2) 当软土层较厚,但间夹薄砂层或砂层透镜体时,砂井应尽可能打至薄砂层或砂层透镜体。
- (3) 当软土层很厚又不夹含透水层时,在满足地基稳定性和沉降要求的前提下,确定砂井深度。对于以沉降为主要控制点的高速公路工程,如果压缩层厚度不很大时,则打穿受压层,以减少预压荷载和预压时间;当受压层很厚时,由于砂井较大深度处的附加应力与土体自重应力相比已很小,砂井排水固结作用已经不大,因而砂井不必打穿整个压缩层。

一般选定某一砂井间距、井径、深度,通过沉降和固结度计算,得出经过一定时间预压之后可能的剩余沉降量,如果该沉降量不

能满足建筑物的沉降和工期要求,则需另行选择砂井参数重新设计,直至满足为止。对于高速公路,既要考虑沉降要求,还需以路基的稳定性为控制条件,一般以滑弧稳定性分析成果来作为确定砂井深度的参考依据,砂井深度必须超过最危险滑弧深度。当软土层较厚时,砂井设计深度可由下式确定。

$$h = 0.5H + C$$

式中: h —砂井设计深度(m)
 H —计算压缩层厚度(m)
 C —调节系数, $C = 0.5 \sim 1.5$, 若软基强度较大或间夹透水层时取小值,否则取大值。

3 小结

- (1) 目前袋装砂井排水固结的理论研究尚不深入,固结度的理论计算值与实测值有一定程度的差异。理论计算上应考虑土的扰动、砂井砂料渗透性、逐渐加载条件及水动力条件对固结速率与固结度的影响。
- (2) 在高速公路软基处理的袋装砂井设计中,对于砂井的间距和直径应该遵循“细而密”的原则,直径以7cm、间距以1.5m左右为宜。
- (3) 软土层较薄时,砂井应该贯穿软土层。软土层较厚,但间夹薄砂层或砂层透镜体时,砂井应尽可能打至薄砂层或砂层透镜体。软土层很厚又不夹含透水层时,砂井设计深度可由下式确定 $h = 0.5H + C$ 。
- (4) 在高速公路软土地基处理中,为了使袋装砂井排水固结的效果更好和指导工程施工,设置典型软基试验路段是十分必要的。