

SLS路堤的稳定性和沉降分析

马时冬

(华侨大学 土木工程系, 福建 泉州 362011)

摘要: 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SLS)路堤是继发泡塑料(EPS)路堤之后发展起来的“不进行地基处理的路堤软基处理方法”。在文献[1]基础上,笔者对SLS路堤进行了稳定分析和沉降计算,并与常规填土路堤的相应成果进行了比较。在此基础上讨论了该类路堤的设计计算方法,作为今后将这种材料进一步应用于工程的技术准备。

关键词: 轻质填土;路堤;软弱地基;稳定性;沉降

中图分类号: TU 472.6 **文献标识码:** A

Stability and settlement of embankment filled with stabilized light soil

MA Shi-dong

(Department of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362011, China)

Abstract: The stabilized light soil (SLS) is developed after another kind of expanded polystyrene (EPS) used in embankment. Due to the feature of lightweight the load of SLS filled embankment can be sustained by soft foundation without any treatment. This paper deals with the stability analysis and settlement calculation for the SLS filled embankment, which is based on the reference[1]. The analysis and calculation results are compared to that of the embankment filled with common material. Based on it, the design method for such kind of embankments is also discussed; it will promote the further application of this lightweight material to engineering.

Key words: stabilized light soil; embankment; soft foundation; stability; settlement

1 前言

通过减轻上部填土重量来降低地基中的应力水平,提高路堤的稳定性和减少沉降,以解决“桥头跳车”和局部软基问题,即所谓的“不进行地基处理的软基处理方法”,是当前的新动向。

聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(Stabilized Light Soil 简称 SLS)是由土、砂和 EPS 球粒(或碎粒、片等)及水泥等胶结材料制成,是继模压法发泡塑料(Expanded Polystyrene 简称 EPS)之后开发出来的新工法,尽管 SLS 的密度比纯粹的 EPS 大,但其具有强度高、压缩模量大、价格低,并可利用废泡沫塑料和建筑弃土的优点,在国外被纳入环境岩土工程范畴,近年来得到迅速发展,如在日本已形成产业化。

文献[1]介绍了 SLS 的试验室配方、试验内容和成果,得到了 SLS 的轻质(密度)-高强(强度)-变形(压缩模量)间的相互关系,提出了有工程应用前景的配方,制备了样品且测定了各类工程性能

指标,并与常规填土指标相比较,表明 SLS 能够满足路堤填土的要求。

本文在前文研究^[1]的基础上,对 SLS 路堤的稳定性和沉降进行了计算分析,并以闽东南地区的代表性地质剖面为例,对 SLS 路堤和普通填土路堤的稳定安全系数和沉降量进行了比较,并在此基础上,讨论了适用于该类路堤的设计计算方法。

鉴于 SLS 在我国尚未进入实用阶段,这些计算分析结果的合理程度还有待用实测资料来进一步验证。本文的工作是将 SLS 这一新材料应用于实际工程的技术准备。

2 计算断面的基本情况

在福(州)-厦(门)和漳(州)-诏(安)两条高速公路的软基试验路段中,代表性的地基土层自上而下为:①硬壳层:由粘土或亚粘土组成,厚 1~2 m;②淤泥和淤泥质土层,厚度为 4~17 m;③亚粘土和砂质粘性土;④强风化花岗岩。

收稿日期: 2002-04-11

资助项目: 福建省交通厅科研处资助项目(项目名称: 高等级公路软基轻质填土的研究)。

作者简介: 马时冬,女,1940年生,教授,主要从事岩土力学与工程方面的研究与教学。

淤泥和淤泥质土层的土性指标为：含水量 ω 为 50 %~80 %；密度 ρ 为 1.53~1.73 g/cm³；液限 ω_L 为 44 %~53 %；塑限 ω_p 为 25 %~29 %；压缩系数 a_{1-2} 为 0.85~2.2 MPa⁻¹；三轴不排水剪强度参数 C_u 为 10~19 kPa； ϕ_u 为 0°~5°；渗透系数 k 为 10⁻⁷ cm/s；有机质含量为 0.5 %~5.3 %；地基承载力标准值 f_k 为 50~80 kPa。属于流塑状态的高压缩性、低强度、低透水性饱和软粘土。地下水位在地表下约 1.5 m。

本文选择的计算断面如图 1 所示。硬壳层厚 1.4 m，淤泥厚 14.6 m，填土设计高度为 5.4 m，路堤顶面宽 26 m，边坡为 1:1.5。该断面位于一般路段，采用塑料排水带处理，有 2 年以上的侧向位移、沉降和孔隙水压力等现场观测资料。

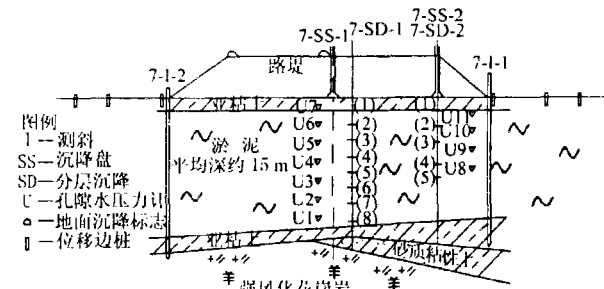


图 1 计算断面
Fig.1 Calculation geological profile

为了便于比较，普通填土路堤和 SLS 路堤采用相同的断面尺寸，但实际应用时，由于 SLS 材料的强度高，所以 SLS 路堤的坡度可提高，底宽可减小。

3 SLS 路堤的稳定性分析

3.1 临界填土高度

在天然地基上填筑路堤，存在着一个临界填土高度。当填土高度大于临界填土高度时，应控制填土速率，不然，地基将面临失稳破坏的危险。临界填土高度的大小取决于地基土的力学性质、成层性、硬壳层厚度及填土的性质。表 1 列出了软基试验路段内几个代表性断面的普通填土的临界填土高度。表中数据表明，普通填土路堤的临界填土高度只有 2~3 m。

3.2 SLS 路堤和普通填土路堤的稳定性比较

SLS 路堤的稳定性分析方法与普通填土路堤是相同的。本文采用简化的 Bishop 法计算程序，按所选计算断面进行分析，对 SLS 路堤和普通填土路堤的稳定性进行比较。

- (1) 计算条件：假定不进行软基处理，而且是连续填土，地基土的强度因来不及固结而不能增长。
- (2) 计算参数：列于表 2。

(3) 计算结果：SLS 路堤和普通填土路堤在不同填土高度时的稳定安全系数如表 3 所示。

从表 3 的计算结果可以看出：①对于本文选用的计算断面，在不进行地基处理的情况下，普通填土路堤的填土高度达到 3 m 时，稳定安全系数为 1.08，若要继续填高，必须进行地基处理，这一结

表 1 普通填土路堤的临界填土高度
Table 1 Critical height of the embankment filled with common material

断面号	1 [#]	4 [#]	5 [#]	7 [#]
硬壳层厚度/m	1.5	1.2	1.0	1.4
淤泥层厚度/m	8.0	13.4	10.3	14.6
H_{cr1} /m	3.0	2.6	2.7	2.5
H_{cr2} /m	2.8	3.2	2.6	2.3
H_{cr3} /m	2.9	2.3	2.2	2.2

注：*为本文选择的计算断面； H_{cr1} 、 H_{cr2} 、 H_{cr3} 均指临界填土高度， H_{cr1} 是根据 $H_{cr}=KC_u/\rho$ 计算取得（ K 是与地基条件有关的系数）； H_{cr2} 根据实测的孔隙水压力-填土高度关系曲线确定； H_{cr3} 根据实测的侧向位移-堤中心沉降关系曲线确定。

表 2 稳定分析计算参数
Table 2 Calculation parameters for stability analysis

土性	三轴试验的抗剪强度参数		密度 ρ /g·cm ⁻³
	c /kPa	ϕ /(°)	
普通填土	28.0	18.0	2.00
SLS 填土	120.0	22.0	1.00
硬壳层	26.0	19.8	1.90
淤泥层	12.0	0	1.67

表 3 不同填土高度时的稳定安全系数
Table 3 Safety factors of stability analysis for different placement height

填土类别	填土高度/m							
	1	2	3	4	5	6	7	8
普通	2.60	1.56	1.08	0.84	0.65	0.56	/	/
SLS	2.85	2.73	2.19	1.70	1.47	1.34	1.26	1.03

果和临界填土高度是接近的。②SLS 路堤的稳定性明显提高，SLS 填土高达 8 m 时，稳定安全系数为 1.03。③SLS 路堤稳定性的提高，不仅由于密度小，而且与强度高有关。换言之，SLS 路堤的稳定性不仅可以通过减轻密度来控制，还可以通过加大强度来加以控制。

4 SLS 路堤的沉降计算

4.1 不排水沉降

现行公路设计规范中的路基沉降计算包括三部

分: 瞬时沉降、主固结沉降、次固结沉降。但是, 大量实测资料表明, 深厚软基路堤的实际沉降量往往大于按规范设计计算的沉降量, 且软基越深厚, 填土越高, 误差越大。由此造成过大的工后沉降从而影响工程质量。

笔者认为造成设计计算沉降量偏小的原因是:

①规范中的沉降计算方法是建立在 Terzaghi 单向固结理论基础上, 比较适合大面积堆载的情况。但是路堤下的地基属于平面应变状态, 是二维固结问题。
②高填方路堤下软基的应力水平高, 在剪切应力作用下, 软基塑流引起的侧向位移 (同时地表隆起) 会持续相当长时间, 使地基产生附加沉降。现行规范没有考虑剪切变形引起的附加沉降, 有文章提出将这部分沉降归入瞬时沉降计算, 显然没有考虑侧向位移的长期性。图 2 是典型断面路堤坡脚处的实测侧向位移-时间关系曲线, 将图中典型的最大侧向位移及其深度列于表 4。充分说明了侧向位移的长期性。

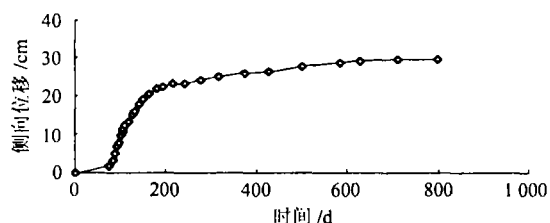


图 2 最大侧向位移-时间关系曲线

Fig2. Curve of maximal lateral displacement vs time

表 4 最大侧向位移和深度实测结果

Table 4 Measurement of maximal lateral displacements and its depths

时间/d	83	117	*139	195	428	804
最大侧向位移/mm	31.3	133.4	176.3	223.2	265.0	295.8
最大侧向位移深度/m	2.5	2.0	2.0	2.5	2.5	2.5

注: 时间从开始填土算起, *指填土达到设计高度 5.4 m

假如近似地把实际沉降量大于计算沉降量的部分定义为塑流引起的附加沉降, 将软基试验段几个代表性断面的各类沉降归纳在表 5 中, 可以看出, 软基塑流引起的附加沉降在实际沉降中占的比例 ($(S_f - S) / S_f$) 相当大 (26%~42%)。

瞬时沉降和侧向位移引起的附加沉降都是在剪应力作用下产生的剪切变形, 是在不排水条件下产生的变形, 前者为弹性变形, 后者为塑性变形, 在深厚软土中很难分开, 为此通称为不排水变形。目前国内有多种计算不排水沉降的方法, 但有些局限于弹性变形, 有些方法虽然较精确, 但需要做大

表 5 软基的沉降

Table 5 Settlements of soft foundation

断面号	1 [#]	5 [#]	*7 [#]
填土高度/m	6.6	5.4	5.4
淤泥层厚度/m	8.0	10.3	14.6
*瞬时沉降 S_d /cm	2.9	5.1	7.7
*主固结沉降 S_c /cm	51.7	89.0	131.4
*次固结沉降 S_s /cm	3.2	5.8	7.9
*总沉降 S /cm	57.8	99.9	147.0
按 24 个月实测沉降推算的最终沉降 S_f /cm	83.5	135.3	252.4
塑流引起的附加沉降 $(S_f - S)$ /cm	25.7	35.4	105.4
不排水沉降 $(S_f - S + S_d)$ /cm	28.6	40.5	113.1
$\frac{S_f - S}{S_f} / \%$	31.0	26.0	42.0

注: *指按规范计算的结果。

量的实验和测定大量的参数, 实施较为困难。

徐少曼教授认为, 不排水沉降是主应力差作用下产生的畸变变形, 提出了一种基于三轴固结不排水剪试验所得的双曲线应力-应变关系, 并结合分层总和不排水沉降计算方法, 该方法应用了归一化理论, 使计算参数和计算工作量大大减少^[2-3]。

笔者通过三轴固结不排水剪试验, 取得了 SLS 材料、普通填土及地基土层的双曲线应力-应变关系。在徐少曼法的基础上, 进一步考虑下卧的亚粘土 (或砂质粘性土) 层的应力集中影响, 编制了有限元程序。针对典型断面, 分别计算了普通填土路堤和 SLS 路堤的不排水沉降和最大侧向位移量, 计算结果列于表 6。表中数据表明, 在相同的填土高度 (5.4 m) 下, SLS 路堤的最大侧向位移量为 5.9 cm, 不排水沉降为 6.8 cm, 明显小于普通填土路堤的 34.1 cm 和 112.7 cm。由此可以说明, 由于 SLS 路堤地基的应力水平低, 由剪应力产生的软基侧向位移小, 不排水沉降就小, 并可以认为, 在 SLS 路堤填筑完成后, 不排水沉降基本完成, 路基的工后

表 6 沉降计算结果

Table 6 Computing results of settlements

计算参数	SLS 路堤 计算结果	普通填土路堤沉降结果	
		计算	实测
最大侧向位移/cm	5.9	34.1	38.5
不排水沉降/cm	6.8	112.7	113.1
主固结沉降/cm	37.6	137.5	131.4
总沉降/cm	44.4	250.2	252.4
路中和路肩沉降差/cm	17.8	112.6	121.2

注: 填土高度为 5.4 m

沉降由固结沉降引起。

4.2 主固结沉降

主固结沉降是排水引起的沉降。尽管计算方法很多,但 Terzaghi 单向固结理论至今被广泛应用于工程中。由于路基沉降属于平面应变问题,因此,本文采用了河海大学的地基二维固结变形程序 BCF 进行计算。

计算中,对于 SLS 路堤,由于其有强度高和快硬性的特点,可考虑连续填筑。对于普通填土路堤,按 50 cm 一层填筑,每层填筑时间为 7 d,两层填筑之间相隔 10 d。

计算所用的邓肯-张模型参数通过三轴试验测定,列于表 7。据此,算得的主固结沉降见表 6。

表 7 沉降计算参数
Table 7 Parameters for settlement calculation

计算参数	路堤填土		地基土层		
	普通	SLS	硬壳层	淤泥	亚粘土
$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.0	1.0	1.9	1.67	1.94
c/kPa	28.0	120.0	26.0	12.0	25.0
$\phi/(\circ)$	18.0	22.0	19.8	0	23.5
R_f	0.88	0.92	0.84	0.85	0.85
K	363	1413	200	70	224
N	0.25	1.32	0.30	0.60	0.28
K_b	40	0	40	30	40
M	0.2	0	0.2	0.2	0.2
K_{ur}	250	1413	200	100	220

可以看出,在相同的填土高度(5.4 m)下,SLS 路堤的主固结沉降为 37.6 cm,总沉降(包括不排水沉降和主固结沉降)为 44.4 cm,明显小于普通填土路堤的 137.5 cm 和 250.2 cm。表中同时列出了实测结果,通过将普通填土路堤的计算结果和实测结果比较,可以说明计算程序的误差较小。

4.3 次固结沉降

次固结是土体中孔隙水压力消散后,在有效应力作用下的骨架蠕变。我们曾根据恒温条件下(20 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 进行的次固结试验确定了地基土层的次固结系数,并据此计算了普通填土路堤的次固结沉降,计算结果见表 5。

从表 5 可以看出:次固结沉降在总沉降所占比例较小。同时,由于在深厚软土层中,次固结不是在固结完成后发生的,而是和主固结同时发生的,很

难分开。如果将其归入不排水沉降,又将使路堤软基变形机理的概念混淆,因此,在 SLS 路堤的沉降计算中忽略了次固结沉降。

5 结 论

(1) SLS 路堤的稳定性明显提高,其稳定性的提高可以通过减轻材料密度、加大材料强度来加以控制。SLS 路堤的稳定性分析方法与普通路堤是相同的。本文采用简化 Bishop 法的计算程序进行分析。

(2) 由于 SLS 路堤在软基中产生的应力水平低,除沉降量明显减小外,由软基塑流引起的侧向位移也明显减小,因此,由侧向位移引起的附加沉降也明显减小。此外,在有硬壳层的情况下,因不进行软基处理,硬壳层不会遭到破坏,可充分发挥硬壳层的有利作用。

(3) 现行公路设计规范中的路基沉降计算没有考虑软基塑流引起的附加沉降,造成设计沉降量偏小,工后沉降过大而影响工程质量。

(4) 本文的沉降计算包括两部分:不排水沉降和主固结沉降。其中的不排水沉降包括瞬时沉降和侧向位移引起的附加沉降。忽略了次固结沉降。

本文通过三轴固结不排水剪试验,在徐少曼法的基础上,进一步考虑下卧的亚粘土(或砂质粘性土)层的应力集中影响,编制了有限元程序,计算不排水沉降。采用了河海大学的地基二维固结变形程序 BCF 计算主固结沉降。并认为,在 SLS 路堤填筑完成后,不排水沉降基本完成,路基的工后沉降由固结沉降引起。

(5) SLS 路堤若和土工合成材料配合使用,将取得更好的效果。

参 考 文 献

- [1] 马时冬. 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SLS)的特性[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 245-248.
- [2] 徐少曼. 对称荷载下饱和粘性土地基不排水沉降量的计算[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 122-133.
- [3] 徐少曼. 饱和粘性土地基不排水沉降的变化规律[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(5): 49-58.
- [4] 张诚厚, 戴济群, 袁文明. 剪切变形引起附加沉降量的计算方法. 高速公路软基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.