

文章编号:1672-9331(2017)02-0007-07

泡沫轻质土填筑软土地基沉降分析及控制

曾 勇¹, 刘 勇², 石苏意³, 关宏信¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004; 2.内蒙古包头市公路工程质量监督站, 内蒙古 包头 014040; 3.南昌市城市规划设计研究总院, 江西 南昌 330038)

摘 要: 为了解决软土地基变形导致路面不均匀沉降问题, 并使泡沫轻质土更广泛地应用于路堤填筑, 利用ANSYS有限元软件, 对泡沫轻质土填筑不同高度、密度和弹性模量的路堤进行了理论分析。研究表明, 软土层弹性模量对路基沉降影响最大, 而其粘聚力的变化对路基沉降几乎无影响; 与普通路基相比, 泡沫轻质土路基能够很大程度上降低路基沉降; 泡沫轻质土路堤高度的增大、弹性模量的减小和密度的增大均会使路基沉降增大。同时, 发现泡沫轻质土密度大于 11 kg/m^3 、路堤高度大于或等于 12 m 时, 路基易发生失稳。

关键词: 泡沫轻质土路堤; 路堤填筑; 路基沉降; 路堤高度; 密度; 弹性模量

中图分类号: U416

文献标识码: A

Sedimentation analysis and control of soft soil foundation filled with foamed light soil

ZENG Yong¹, LIU Yong², SHI Su-yi³, GUAN Hong-xin¹

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 2.Inner Mongolia Baotou Highway Engineering Quality Supervision Station, Baotou 014040, China; 3.Nanchang Urban Planning and Design Institute, Nanchang 330038, China)

Abstract: In order to solve the problem of uneven settlement of the soft soil foundation, and to make the foam lightweight soil more widely used in embankment filling, the model in ANSYS finite element software is established, which can help the theoretical analysis of the embankment with different heights, density and elastic modulus of foamed light soil. Results show that the elastic modulus of soft soil layer have the most effect on the settlement of subgrade, and the change of cohesion has little influence on the settlement of subgrade. Compared with the common subgrade, the foam lightweight soil roadbed can largely reduce the subgrade settlement. The increase settlement of the embankment influence by the increase of the height of the embankment, the decrease of the elastic modulus and the increase of the density. Meanwhile, it is found that the roadbed is prone to be unstable when the density of the foamed light soil is over 11 kg/m^3 , and the height of the embankment is over or equal to 12 m .

Key words: foamed light soil embankment; embankment filling; subgrade settlement; embankment height; density; elastic modulus

收稿日期: 2017-01-13

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ3070); 内蒙古自治区交通运输厅建设科技项目(NJ-2015-35)

作者简介: 曾 勇(1992-), 男, 湖南郴州人, 长沙理工大学硕士研究生, 主要从事路基路面工程的研究。

软土路基一直是公路工程中难以完善处理的问题,经研究表明,泡沫轻质土可作为一种新型材料用以处理软土路基。1988年,英国伦敦地区同样采用泡沫轻质土代替普通土作为路基填料,使地基承受自重荷载大大减小,从而将路面沉降控制在合理范围内^[1]。紧接着,日本同年在东名和京叶两条公路的改扩建中使用泡沫轻质土,解决了新老路基易产生差异沉降的问题^[2]。

目前,国内越来越多的学者从事泡沫轻质土应用于软土路基的研究。高英力等^[3]分别从路基填筑加宽、软基处理、地铁隧道减荷、特殊地段路基填筑、回填灌浆及冻土地区隔热保温6个方面,对泡沫轻质土在公路工程中的关键应用技术进行了阐述。刘杰等^[4]通过对路基横向引孔,并对路基进行换填泡沫轻质土处理,使路基沉降降低。吴跃东等^[5]用泡沫轻质土对申嘉湖杭高速公路(练杭段)堆载预压处理段的路基进行换填,换填后的路段沉降得到了很好的控制。赵全胜^[6]、陈文平等^[7]分析了桥头跳车原因,采用泡沫轻质土作为软土地基台背回填土,降低了填土荷载,从而减轻了桥台受到的土压力,有效地控制了桥头处差异性沉降。陈永辉等^[8]采用室内试验和工程应用相结合的方式,对沉降控制标准进行了修正,并根据用实测沉降来估算填土置换量的方法,对理论计算方法所得结果与工程实测数据进行了对比分析,从而论证了该方法的可行性。

国内外对泡沫轻质土的材料分析及应用研究较多,而对其应用于道路建设的数值模拟还较少。沈炜等^[9]对泡沫轻质土应用于加宽路段的沉降进行了数值模拟,发现新老路基拼接后,在荷载作用下路基最大沉降发生在拓宽路基部分,随着开挖宽度和泡沫轻质土换填深度的增大,新老路基差异沉降减小。陈永辉等^[10]通过建立不同置换形式的泡沫轻质土路堤模型,分析发现不同形式的泡沫轻质土路基均可有效控制路堤沉降,并防止发生不均匀沉降。李苏醒^[11]则开展了泡沫轻质土作为机场垫层的模型分析,发现泡沫轻质土密度和弹性模量是影响机场路面形变量的两个主要因素。为此,作者对不同泡沫轻质土路堤高度、密度和弹性模量下的路基沉降进行分析,并与普通土路堤进行对比分析,以使泡沫轻质土作为一种新材料应用于路堤填筑。

1 建立模型

1.1 模型的建立

道路是一个受多因素制约的系统,这些因素可分为主要因素和次要因素。在处理这些影响因素时,需要区别对待。计算中需进行如下的假设。

- 1) 假设路堤足够长,将该三维空间问题转化为二维平面问题,按平面应变问题进行处理。
- 2) 假设地基自身的固结变形已经完成。
- 3) 模型中的单元采用平面应变 Plane 82 单元,本构模型选用 Drucker-Prager 模型。
- 4) 模型的左侧受到对称荷载的约束作用,右侧受到水平荷载的约束,底部受到水平和竖向的约束作用。

本研究选取双向四车道公路作为计算模型,路基顶面宽度为 24.0 m,边坡直立,基准模型路堤高度为 8 m。为了在数值计算中提高运行效率,取结构的一半为研究对象,宽度为 12 m,地基宽度为 36 m,其网格划分如图 1 所示。

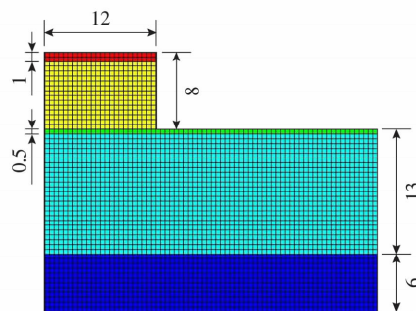


图 1 基准泡沫轻质土路堤模型与网格划分(单位:m)

Fig. 1 The model of lightweight soil embankment and grid division(Unit:m)

1.2 模型材料的计算参数

由于路面材料弹性模量较大,其自重是产生路基沉降的主要因素,因此可简化为一层结构。而对于地基,则需根据不同土层分为粘土层、软土层和持力层。各种材料的计算参数如表 1 所示。

1.3 地基初始地应力场的模拟和计算

众所周知,初始地应力也称天然应力、残余应力,指的是在地壳内的岩土本身天然条件就具有的一个应力,或者是由于某些地壳运动所残留在岩体、土体中的一个应力。由于数值计算方法是

增量分析法,而在增量分析中,岩土体的应力可分为初始应力和应力增量两个部分,因此,通过建立模型分析表明,在自重作用下原状土竖向位移及其竖向应力都在正常范围之内。这进一步证实了原状土自重应力模型的正确性。

表 1 基准泡沫轻质土路堤计算参数

Table 1 Calculation parameters of light soil embankment

道路结构	厚度/ m	E/ MPa	泊松 比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
路面结构层	1.0	1 200	0.25	2 300	—	—
泡沫轻质土层	7.0	150	0.28	600	120	6
粘土层	0.5	10	0.35	1 850	25	20
软土层	12.5	3	0.32	1 780	12	8
持力层	6.0	30	0.38	1 900	15	25

去掉重力荷载,导入自重应力模型生成的初应力文件进行求解,模拟土体在初始地应力作用下的状态,用以验证 ANSYS 的初始地应力导入功能,以保证土体应力自平衡。计算结果显示,土体在初始地应力作用下,不产生竖向应力,也不产生水平应力;当模型同时在自重荷载和初始地应力作用下,不会产生竖向位移,但会产生真实的土体应力。当加上上部路堤时,建立的模型将模拟土体在上部荷载和初始应力的共同作用下产生的沉降与变形。

2 泡沫轻质土路堤参数对沉降的影响

2.1 路堤高度的影响

基于对地基施加初始应力条件下的基准模型,并保持泡沫轻质土材料参数不变,计算不同路堤高度下的路基沉降。根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015),泡沫轻质土路基填筑高度不宜超过 15 m,加上路面结构层厚度 1 m,本研究拟定路堤高度分别为 2,4,6,8,10,12,14,16 m。通过 ANSYS 模拟计算,可以得到各个高度的泡沫轻质土路堤路基沉降及塑性变形情况。图 2 和图 3 分别为 8 m 高泡沫轻质土路堤沉降量和塑性变形云图。

图 2 显示,当泡沫轻质土填筑时,地基变形量主要集中在软土层。图 3 显示,在此填筑高度及

泡沫轻质土设计密度下,路堤塑性变形区域不大,结构偏于安全。

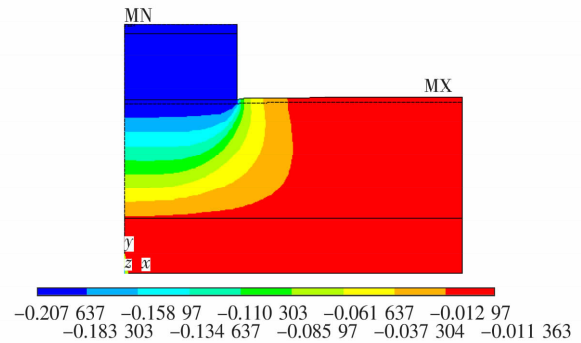


图 2 路基沉降云图

Fig. 2 Settlement of Subgrade

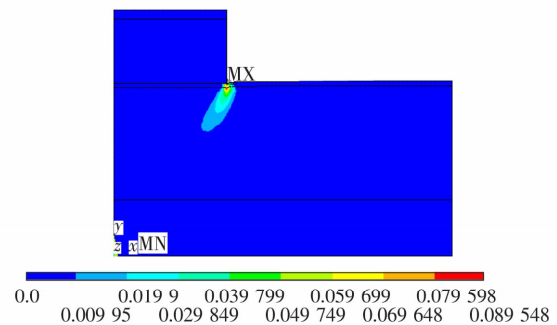


图 3 路堤塑性变形图

Fig. 3 Plastic deformation of embankment

根据模型分析结果,不同路堤高度时的沉降量与路堤高度的关系曲线如图 4 所示。

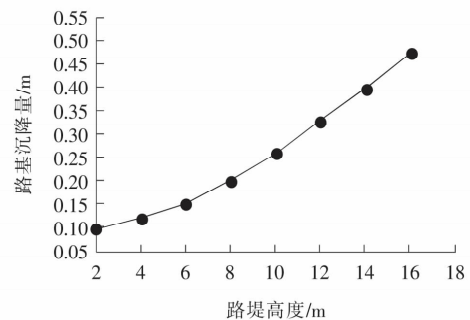


图 4 路堤高度与沉降关系图

Fig. 4 Relationship between embankment height and settlement

由图 4 可知,路堤高度的增加使得路堤自重增大,路基沉降呈增加趋势。同时,路基沉降增加速度随着路堤高度的增大而变大。这是因为路基上部荷载的增大导致了地基塑性变形进一步增大,从而使路基沉降量增大。但从整体上来说,其

沉降量没有发生突变,说明在上述模型中,泡沫轻质土密度为 6 kg/m^3 、路堤高度到 16 m 时,地基承载力基本能满足要求。

2.2 弹性模量的影响

由于道路的跨度范围非常大,且在我国大多数道路修建的地方是软土地区,因此先分析各参数影响下的软土路基沉降量。

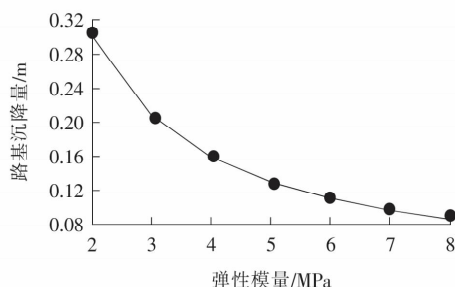


图5 软土地基土弹性模量的影响

Fig. 5 Effect of elastic modulus of soft soil foundation

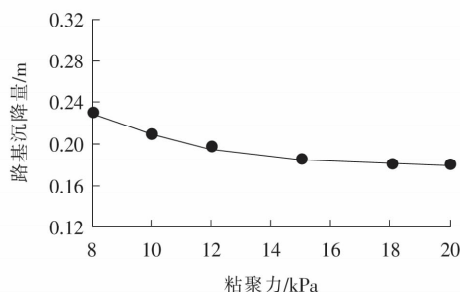


图7 软土地基土粘聚力的影响

Fig. 7 Effect of cohesive strength of soft soil foundation

同样,采用控制变量法研究泡沫轻质土对路基沉降的影响。由于胶凝材料的存在,泡沫轻质土弹性模量要大于一般土体,因此将泡沫轻质土弹性模量变化范围控制在 $25 \sim 300 \text{ MPa}$,分析其路基沉降变化。

图9显示,当其他参数不变时,泡沫轻质土弹性模量的增大使得路基沉降量减小;且其弹性模量较小时,随着泡沫轻质土弹性模量的增大,路基沉降减小较快,而后面减小速度趋于平缓。这是因为泡沫轻质土弹性模量的增加可以减小路基上部荷载对泡沫轻质土路基的压缩作用和自重引起的路堤沉降,当弹性模量达到一定值,路堤自身沉降值已很小,弹性模量增加所引起的变化就微乎其微,这时路基沉降主要是由下部软土地基的压缩引起的。

在 8 m 高路堤模型下,通过控制变量的方法,分别改变软土层参数,绘制出路基沉降变化图如图5~8所示。图5~8显示,随着软土层弹性模量、泊松比、粘聚力和内摩擦角的增大,软土地基沉降均减小,但弹性模量的变化对软土地基沉降的影响最大。因此,作者通过类比方法,认为泡沫轻质土弹性模量对路基沉降也会造成影响。

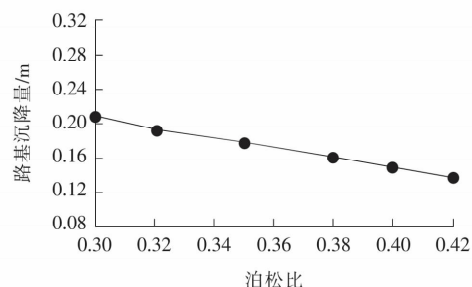


图6 软土地基土泊松比的影响

Fig. 6 Effect of Poisson's ratio on soft soil foundation

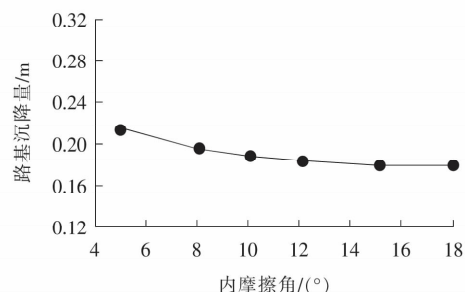


图8 软土地基土内摩擦角的影响

Fig. 8 Effect of friction angle in soft soil foundation

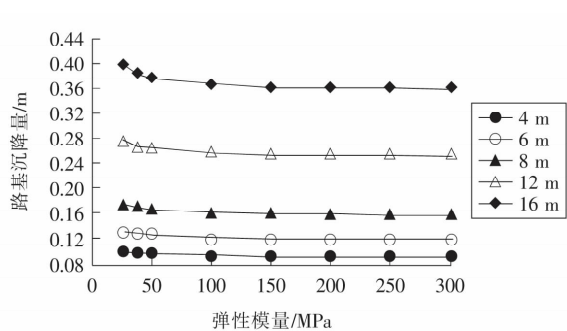


图9 泡沫轻质土弹性模量与沉降关系图

Fig. 9 Relationship between elastic modulus and settlement of foamed lightweight soil

根据《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》(CJJT 177-2012)^[12]中弹性模量与抗压强度的关系,换算公式为:

$$E_c = 250q_u. \quad (1)$$

式中: E_c 为气泡混合轻质土的弹性模量,MPa; q_u 为气泡混合轻质土的抗压强度,MPa。

图 9 显示,当泡沫轻质土弹性模量达到 100 MPa,换算成抗压强度为 0.4 MPa,其弹性模量增大对路基沉降的影响很小。因此,在考虑经济性的情况下,以满足沉降为要求时,推荐将 0.4 MPa 作为泡沫轻质土设计抗压强度。

2.3 密度的影响

前文结果表明,在泡沫轻质土密度为 6 kg/m^3 时,路基沉降量随着路堤高度的增大而增大,而泡沫轻质土的密度可以通过控制发泡剂量来加以改变。泡沫轻质土密度的改变是否影响路基沉降,这是值得商榷的问题。

为此,改变泡沫轻质土密度,计算不同密度下的路基沉降,以便分析泡沫轻质土对路基沉降的影响。在其他参数不变的情况下,将泡沫轻质土密度分别取 5,6,7,8,9,10,11 kg/m^3 ,研究不同高度路基沉降随密度变化的情况,结果如图 10 所示。

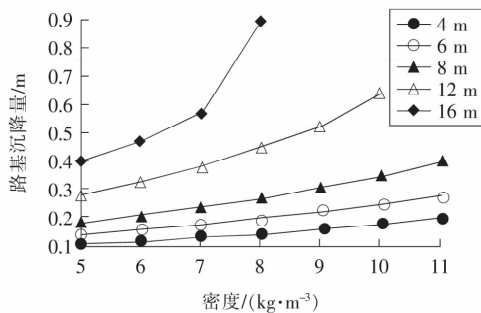


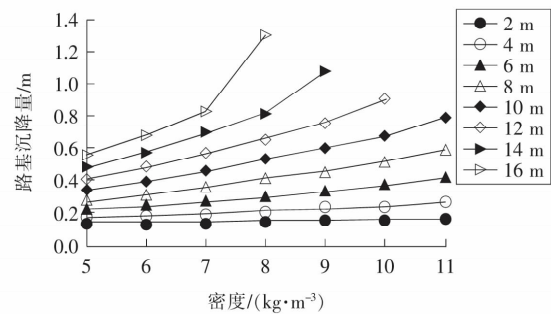
图 10 泡沫轻质土密度与沉降关系图

Fig. 10 Relationship between density and settlement of foamed light soil

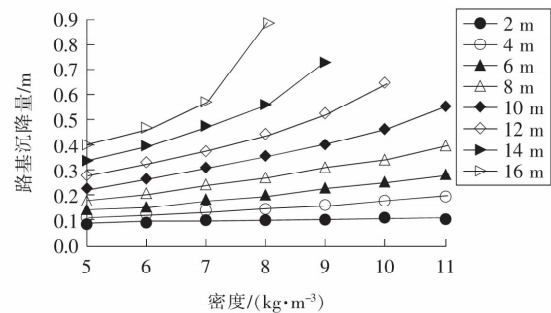
图 10 表明,在路堤高度不变的条件下,路基沉降随着泡沫轻质土密度的增大而增大;同样的密度梯度,路堤高度越大,路基沉降随密度的增大其增长速率越快,说明泡沫轻质土路堤高度越大,其密度对沉降的影响也越大。从图 10 还可以看出,当泡沫轻质土密度为 11 kg/m^3 、路堤高度大于或等于 12 m 时,计算不收敛,说明地基此时已被压坏。因此,需要根据实际泡沫轻质土路堤高度来选择泡沫轻质土的配合密度,以减小沉降,实现地基相对稳定。

对泡沫轻质土材料而言,密度是影响路基沉降的主要因素。但对软土地基而言,弹性模量是

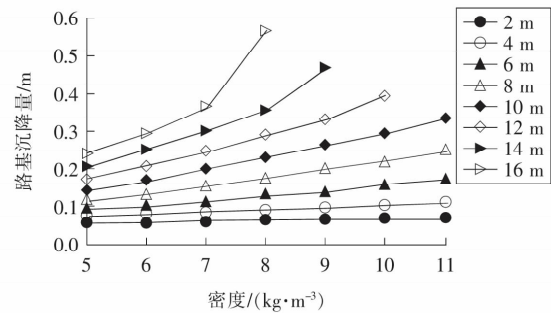
其主要影响参数。分别取弹性模量为 2,3,5 MPa 的软土地基层,研究不同路堤高度下泡沫轻质土材料密度对路基沉降的影响,结果如图 11 所示。



(a) 软土地基弹性模量为 2 MPa



(b) 软土地基弹性模量为 3 MPa



(c) 软土地基弹性模量为 5 MPa

图 11 软土基弹性模量为 2,3,5 MPa 时不同高度路堤沉降随密度变化的情况

Fig. 11 When the elastic modulus of the soft soil foundation is 2,3,5 MPa, the settlement of the embankment with different heights varies with the density

由图 11 可知,对于同一路堤高度,密度越大则沉降量越大。由于本研究数值模拟时选用弹性模量作为计算参数,而地质勘探时一般测试软土的压缩模量,因此对弹性模量和压缩模量之间进行换算:

$$E = E_s \left(1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \right). \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量; E_s 为压缩模量; μ 为泊松比。

为此,对 3 种不同压缩模量软土地基采用不

同设计密度的泡沫轻质土填筑,从而控制其直接填筑软土地基所产生的沉降,同时使地基不致因上部荷载过大而产生较大的塑性变形损坏,达到

良好的工程性目的。具体控制参数见表 2。对于表中所不涉及的情况,可根据其随参数的不同变化规律适当选取差值。

表 2 压缩模量为 2.35,3.53,5.89 MPa 时软土地基上泡沫轻质土路堤材料密度控制标准

Table 2 The compressive modulus of the soft soil foundation of 2.35,3.53,5.89 MPa soft soil embankment material density control standards

压缩模量/ MPa	沉降量/ cm	泡沫轻质土设计密度/(kg·m ⁻³)							
		路堤高度/m							
		2~4	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14	14~15	16
2.35	<30	11.0	8.0	5.0	—	—	—	—	—
	<40	11.0	11.0	7.5	6.0	5.0	—	—	—
	<50	11.0	11.0	9.5	7.0	6.0	5.0	—	—
3.53	<30	11.0	11.0	8.0	6.0	5.0	—	—	—
	<40	11.0	11.0	11.0	8.0	7.0	6.0	5.0	5.0
	<50	11.0	11.0	11.0	10.0	8.0	7.0	6.0	5.0
5.89	<30	11.0	11.0	11.0	9.5	8.0	7.0	5.5	5.0
	<40	11.0	11.0	11.0	11.0	9.5	8.0	7.0	6.5
	<50	11.0	11.0	11.0	11.0	10.0	8.0	7.0	7.0

3 泡沫轻质土路堤与普通土路堤沉降对比

泡沫轻质土由于其质量轻、弹性模量较普通土大的特点,在减小软土地基沉降中有着良好的作用。通过上文研究发现,采用不同参数的泡沫轻质土能够满足规范对于沉降的要求。而对普通

路堤而言,其沉降量又是如何,泡沫轻质土的改善效果如何,需要做进一步的分析。因此,在其他条件不变的情况下,采用普通填土进行路基填筑,等效坡度保持 1:1.5,计算分析不同高度下其路基沉降,并与泡沫轻质土进行比较。材料参数见表 3。模型与网格划分如图 12 所示。

表 3 普通土路堤基准模型沉降计算参数

Table 3 Parameters of settlement calculation of common soil embankment model

	厚度/m	$E/(\times 10^7 \text{ Pa})$	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
路面结构层	1.00	120.0	0.25	2 300	—	—
普通填土层	7.00	2.5	0.35	1 860	20	22
粘土层	0.50	1.0	0.35	1 850	25	20
软土层	12.50	0.3	0.32	1 780	12	8
持力层	6.00	3.0	0.38	1 900	15	25

根据图 13 可以看出,普通土路堤随着高度的增加,路基沉降迅速增大,其增长速度远大于泡沫轻质土路堤;其在 6~8 m 高度时,产生的沉降急剧增大,地基承载力已不能承受上部路堤产生的荷载;计算过程中发现,到 10 m 时计算已不收敛,说明地基已完全破坏;而泡沫轻质土却能填筑到

16 m 高,但沉降依然没有急剧变大。同时,从图 13 还可以发现,路堤越高,两种路堤导致的沉降的差异就越大,当路堤高度为 6 m 时,泡沫轻质土路基沉降仅为普通土路堤的 36.9%;到 8 m 时,更只为其沉降的 28.3%。由此可见,泡沫轻质土用于软土地基时,可以很大程度地降低路基沉降,

保证道路系统整体结构的稳定。

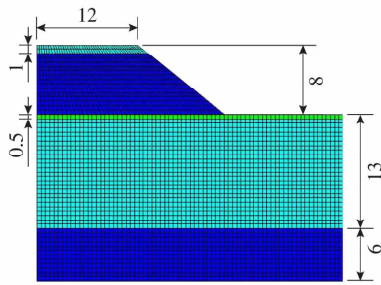


图12 普通土路堤沉降分析基准模型
与网格划分(单位:m)

Fig. 12 Standard model for settlement analysis of
common soil embankment and grid division(Unit:m)

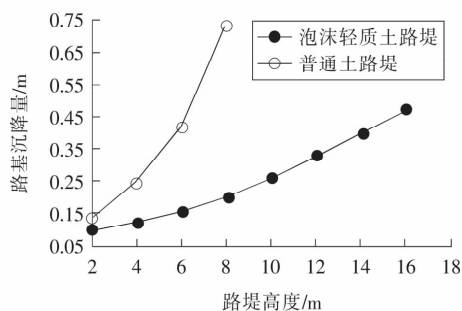


图13 泡沫轻质土路堤与普通土路堤
在不同高度下的沉降对比

Fig. 13 Comparison of the settlement between the
light weight soil embankment and the common
soil embankment at different heights

4 结论

通过对路建立有限元模型,计算了不同参数泡沫轻质土路堤的沉降变化情况,得出以下结论。

1) 当泡沫轻质土路堤高度增大时,其路堤自重随之增大,路基沉降也随之增大。同时,当泡沫轻质土路堤高度较低时,路基沉降随路堤高度的增大而增大的速率较小;当泡沫轻质土路堤高度较大时,其地基塑性变形区的扩大,路基沉降随路堤高度的增大而增大的速率较大。

2) 随着软土层弹性模量、粘聚力、内摩擦角和泊松比的增大,软土地基沉降逐渐减小,其中,弹性模量对沉降的影响最大,而粘聚力的变化对沉降几乎没有影响,可以忽略不计。

3) 由于弹性模量反应的是材料抵抗变形的能力,随着泡沫轻质土弹性模量的增大,其路基沉降

减小,且路基沉降减小速率也随之减小。当弹性模量达到 100 MPa(换算成抗压强度为 0.4 MPa)时,其弹性模量的变化对沉降的影响可忽略不计。

4) 在路堤高度相同时,路基沉降随着泡沫轻质土密度的增大而增大;在路堤高度不同时,路堤高度越大,路基沉降随着泡沫轻质土密度的增大而增大的速度越大。在路堤高度一定时,可以通过调节泡沫轻质土的密度来减小沉降,以确保路基稳定。且在不同软土层模量下,其路基沉降变化规律是一致的。

5) 路堤越高,普通土路堤和泡沫轻质土路堤所导致的沉降的差异越大,当路堤高度为 6 m 时,泡沫轻质土路基沉降仅为普通土路堤的 36.9%;到 8 m 时,只为其沉降的 28.3%。由此可见,泡沫轻质土用于软土地基时,可以很大程度地降低路基沉降,保证道路系统整体结构的稳定。

〔参考文献〕

- [1] Simon Van Deijk. A review of the netherlands approach to the use of foam concrete in Holland and at Canary Wharf[J]. Concrete, 1991, 25(5): 49-54.
- [2] 三岛信雄,长尾和之. 气泡セメント盛土工法(FCB工法)の研究[J]. 土木学会誌, 1994, 79(1): 18-21.
- [3] 高英力,肖敏强,关宏信. 气泡混合轻质土及其在公路工程中的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8): 2432-2438.
- GAO Ying-li, XIAO Min-qiang, GUAN Hong-xin. Research progress in the application of air bubble mixed light soil in highway engineering[J]. Silicate Bulletin, 2016, 35(8): 2432-2438.
- [4] 刘杰,毛爱民,宋亮. 气泡混合轻质土在调整高速公路不均匀沉降中的应用[J]. 工业建筑, 2014, 44(9): 122-152.
- LIU Jie, MAO Ai-min, SONG Liang. Application of bubble mixed light soil in the adjustment of uneven settlement of expressway[J]. Industrial Buildings, 2014, 44(9): 122-152.
- [5] 吴跃东,李晓峰. 气泡混合轻质土置换高速公路路堤工后沉降研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013(6): 16-19.
- WU Yue-dong, LI Xiao-feng. Study on the post construction settlement of highway embankment after the replacement of light soil with air bubble[J]. Journal of Hydraulic Engineering and Construction Engineering, 2013(6): 16-19.

(下转至第 74 页)

- [8] Aliriza Maheri, Multi-objective design optimization of standalone hybrid wind-PV-diesel system under uncertainties[J]. Renewable Energy, 2014(66): 650-661.
- [9] Kamjoo A, Maheri A. Multi-objective design under uncertainties of hybrid renewable energy system using NSGA-II and chance constrained programming[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015(S4): 123-124.
- [10] Binayak Bhndari, Kyung-Tae Lee, Gil-Yong Lee, et al. Optimization of hybrid renewable energy power systems: a review[J]. Renewable Energy, 2015(5): 15-21, 5-1283.
- [11] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电子自动化设备, 2011, 31(4): 120-123.
WANG Shao-yong. Design and operation of micro-network based on distributed power supply[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 120-123.
- [12] 钱一晨, 金晶. 可再生能源混合系统电源优化配置综述[J]. 太阳能学报, 2012(S1): 98-102.
QIAN Yi-chen, JIN Jing. Summary of optimal allocation of renewable energy hybrid system power[J]. Acta Energyciae Solaris Sinica, 2012(S1): 98-102.
- [13] 冬雷, 廖晓钟, 刘广忱, 等. 分布式风光互补发电系统及其多目标优化控制策略研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(S2): 750-753.
DONG Lei, LIAO Xiao-zhong, LIU Guang-chen, et al. Multi-index optimization control strategy based on distributed PV and wind energy complemental generation system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(S2): 750-753.

(上接第 13 页)

- [6] 赵全胜, 苏国柱, 张春会. 气泡混合轻质土控制软土路堤桥头沉降试验[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2010, 29(2): 260-262.
ZHAO Quan-sheng, SU Guo-zhu, ZHANG Chun-hui. Experiment on the settlement of soft soil embankment with air bubble mixed light soil[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2010, 29(2): 260-262.
- [7] 陈文平, 谭存茂, 杨和平. 气泡混合轻质土在台背回填施工中的应用[J]. 公路, 2012(11): 162-165.
CHEN Wen-pin, TAN Cun-mao, YANG He-ping. Application of air bubble mixed light soil in abutment backfill construction[J]. Highway, 2012(11): 162-165.
- [8] 陈永辉, 石刚传, 曹德洪, 等. 气泡混合轻质土置换路基控制工后沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1854-1862.
CHEN Yong-hui, SHI Gang-chuan, CAO De-hong, et al. Study on the settlement of the control work of the air bubble mixed light soil replacement subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1854-1862.
- [9] 沈炜, 吕锡岭. 气泡混凝土拓宽路基的沉降特性数值分析[J]. 公路工程, 2014, 39(3): 241-245.
SHEN Wei, LV Xi-ling. Numerical analysis of the settlement characteristics of the expanded roadbed with air bubbles[J]. Highway Engineering, 2014, 39(3): 241-245.
- [10] 陈永辉, 章亦锋. 泡沫混凝土路堤置换形式数值分析[J]. 公路, 2014(7): 78-83.
CHEN Yong-hui, ZHANG Yi-feng. Numerical analysis of replacement form of foam concrete embankment[J]. Highway, 2014(7): 78-83.
- [11] 李苏醒. 气泡混合轻质土抗冲击试验与应用在机场中的有限元分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
LI Su-xing. Finite element analysis of impact test and application of air bubble mixed light soil in Airport[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [12] CJJ/T 177-2012, 气泡混合轻质土填筑工程技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
CJJ/T 177-2012, Technical specification for foamed mixture lightweight soil filling engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.