

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.11.005

基于有限元的地基-路堤-路面协同变形机理分析

涂慕溪¹, 陈礼彪¹, 曾俊铨¹, 黄晓明², 肖光书³

(1. 福建省高速公路建设总指挥部, 福建 福州 350001; 2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096;
3. 福建路桥建设有限公司, 福建 福州 350002)

摘要:我国软土地基分布广泛,在软土地基上修建工程建筑物时,不同位置上产生的变形量大小不同,修建在软土地基上的高等级公路常因软基不均匀沉降导致路面服务性能降低甚至发生结构性破坏。为了避免这些破坏的产生,需研究软土地基病害和其不均匀变形在道路面层结构中的传递机理,本研究运用数值模拟方法建立了地基-路堤-路面协同作用的力学模型,在建立的ABAQUS数值模型中,由上至下各层分别为面层、路堤、砂垫层、淤泥质黏土4层。分析了不同路堤填料路堤在不同车辆荷载、填筑高度及填料模量下的变形规律:土石混合料路堤的沉降最大沉降量和车辆轴载及路堤填筑高度均成正比,沉降量随着填筑材料模量的增加不断减小,且减慢速率不断减小,并提出了地基-路堤-路面三者组合的变形协同机理。发现沉降量在道路结构中向上传递会叠加路堤压缩变形以及道路结构层的厚度变化,且随高度逐渐减小的协同变形。地基-路堤-路面模型的整体变形规律为:软土地基施工结束后,在路堤和路面填筑过程中发生固结,水分排出引起沉降,沉降曲线为沿道路中线对称的抛物线形状。分层填筑路堤时,填料进行固结作用产生竖向变形,但与软土地基产生的竖向变形量相比可忽略不计。路堤与面层为适应地基沉降发生协调变形:路面结构在荷载和自重作用下,产生层间协调变形以填充路堤固结沉降产生的空间,但是由于结构层变厚软基沉降量向上传递时表现为不断减小。

关键词:道路工程;变形协同机理;数值模拟;变形规律;轻质填料

中图分类号:U416.1⁺6

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2019)11-0033-07

Analysis on Mechanism of Foundation-embankment-pavement Cooperative Deformation Based on FEM

TU Mu-xi¹, CHEN Li-biao¹, ZENG Jun-cheng¹, HUANG Xiao-ming², XIAO Guang-shu³

(1. Expressway Construction Headquarters of Fujian Province, Fuzhou Fujian 350001, China; 2. School of Transportation, Southeast University of Jiangsu Province, Nanjing Jiangsu 211189, China; 3. Fujian Road and Bridge Construction Co., Ltd., Fuzhou Fujian 350002, China)

Abstract: Chinese soft soil foundations are widely distributed. When constructing engineering buildings on soft soil foundations, the deformations generated at different locations are various. High-grade roads on soft soil foundations often result in reduced pavement service performance or even structural damages due to uneven settlement of soft foundations. In order to avoid the occurrence of these damages, it is necessary to study the transfer mechanism of soft soil-based diseases and their uneven deformation in road surface layer structure. The mechanical model of foundation-embankment-pavement synergy is established by numerical simulation method, and there are 4 layers (surface course, embankment, sand cushion and silty clay) from top to bottom layers in the established ABAQUS numerical model. The deformation rules of the embankments filled with different fillers under different vehicle loads, filling heights and moduli are analyzed: the maximum settlement of earth-rock mixed embankment is proportional to the axle load of the vehicle and the embankment

收稿日期:2019-07-03

作者简介:涂慕溪(1966-),男,福建龙岩人,教授级高级工程师。(cyuef1@126.com)

filling height, the settlement decreases with the increase of the modulus of the filler, and the slowing rate also decreases. The deformation synergetic mechanism of foundation-embankment-pavement combination is proposed. It is found that the upward transfer of the settlement amount in the road structure will superpose the compression deformation of the embankment and the thickness variation of the road structure layers, and the synergistic deformation gradually decreased with the height change. The overall deformation rule of the foundation-embank-pavement model is; after the construction of the soft soil foundation, consolidation occurs during the embankment and pavement filling process, the water discharge causes settlement, and the settlement curve is a parabolic symmetric shape along the middle line of the road. When the embankment is filled in layers, the consolidation of the filler produces vertical deformation, but it is negligible compared to the amount of vertical deformation produced by the soft soil foundation. The coordinated deformation of embankment and the surface layer occurs to adapt to the settlement of the foundation; under the action of load and self-weight, the pavement structure produces coordinated deformation between the layers to fill the space created by the consolidation settlement of the embankment. However, as the structural layer becomes thicker, the settlement of the soft foundation appears to decrease continuously.

Key words: road engineering; deformation synergetic mechanism; numerical simulation; deformation rule; light filler

0 引言

我国软土地基分布广泛,在软土地基上修建工程建筑物时,不同位置上产生的变形量大小不同,建筑物内的应力会因这些沉降而增大。结构物中的应力会随着软土地基的变形量增大不断增大,当变形量大于规定的阈值时,道路建筑物会因总应力过大产生结构性破坏。国内外学者常忽略路堤作为地基和路面的中间构造物,研究软土地基病害和其向上传递到道路面层结构的规律^[1-2]。在不良地质(如软土地质)地区的道路工程中,路堤的填料类型、高度等要素对软土地基的沉降反应是有差异的^[3]。因此,在研究软基的不均匀沉降对路面的影响之前,应首先分析不均匀变形在路堤中的传递机理。基于上述原因,有必要将地基、路堤、路面三者进行有机结合,系统地分析三者之间的协同作用关系^[4-5]。

路基路面协同作用的研究工作主要集中在路面结构内的应力与路堤变形之间的关系,以及路堤作用在软土地基上时地基和路堤的协同作用^[6-8]。目前科研人员的常用研究手段包含数值解析、数值模拟及工程现场监测等。由于考虑塑性和黏性的解析求解非常复杂,因此,解析法主要通过弹性求解对路面结构之间的协同作用进行分析。主流弹性解析法包括3个模型:具有弹性夹层的双层板力学模型、两边简支 Winkler 地基上的板条在荷载作用下的弯曲模型,以及多层弹性理论模型^[9-11]。基于上述模型的分析结果均表明,软土的不均匀变形会使道路面层结构内出现除外部荷载作用引起应力之外的其他

应力,且该应力对道路结构的影响不可忽略^[12-14]。目前数值模拟多基于塑性力学理论,考虑静态或动态车辆荷载对软土路基上的路面工作状态进行分析,如利用数值仿真可以充分考虑车辆荷载引起的非线性应力-应变特性、分析冻土地基融沉与路面协同作用、道路加宽时新旧道路的沉降量之间不协调导致中间脱空等问题^[15-18]。

1 路堤变形性质研究

1.1 路堤填料类型

本研究使用的路堤填料类型包括土石混合料与轻质材料两类,其中土石混合料包括填土路堤、土石路堤和填石路堤,轻质填料路堤选取 EPS 轻质材料作为代表。根据《公路路基施工技术规范》(JTG 10—2006),土石混合料可以根据石料质量比和石料粒径尺寸分为填土路堤、土石路堤和填石路堤。其中,粒径大于 4 cm 且含石量小于 30% 的为填土路堤;含石量在 30% ~ 70% 的路堤为土石路堤;含石量占总质量 70% 以上的为填石路堤。

轻质填料的密度远小于现有的路堤填料、重量较轻,而其力学性质能够满足路堤材料的要求,因此,使用轻质填料是控制路堤沉降的有效方法。本研究选择聚苯乙烯泡沫(EPS 轻质填料)研究路堤的协同变形性质,其密度 $\rho < 0.02 \text{ g/cm}^3$,压缩强度 $\geq 0.15 \text{ MPa}$,弯曲强度 $\geq 0.18 \text{ MPa}$ 。

1.2 路堤-路面数值模型

建立两个有限元模型,第 1 个模型通过改变填料参数和分层填筑厚度等因素实现对填土、土石和

填石 3 种路堤形式的模拟; 第 2 个模型模拟 EPS 轻质路堤的路面结构。两个模型的主要区别在于填料的本构模型及路堤结构形式, 其他参数如路面结构层个数、路面厚度、材料属性等均保持一致。模拟的时间包括施工期间以及工后 15 a 的沉降值。分析的变量及其类型、参数和范围列在表 1 中。

表 1 变量类型及取值范围

Tab. 1 Variable types and ranges of values

参数名称	参数取值范围
路堤类型	填土, 土石, 填石, 轻质
路堤填筑高度/m	4, 8, 12
车辆轴载/kPa	70, 280, 490, 700, 910
路堤模量/MPa	25 ~ 80

路表面宽度取 28 m, 路面与路堤按 1:1.5 放坡, 路基底部宽度通过计算获得。沥青层和基层的厚度、材料参数见表 2。仅在模型中施加路面和路堤重力, 路堤竖向变形量较小 (5 mm 或更小), 无法准确观测到变形变化的趋势, 因此在模型中添加车辆荷载, 分析在两个荷载耦合作用下的路堤沉降规律。模型的边界条件为底部全约束, 即无横向或纵向的位移, 也无旋转。模型的顶面和侧面可以有竖向变形, 但无旋转。

路堤材料的 D-P 弹塑性模型参数如表 3 所示, 分别用于填土路堤、土石路堤和填石路堤的分析。

表 2 面层和基层材料属性

Tab. 2 Material properties of surface course and base course

结构层	材料名称	厚度/ cm	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
表面层	沥青玛蹄脂 SMA	4	10 000	0.35
中面层	沥青混凝土 AC20	6	8 500	0.3
下面层	沥青稳定碎石 ATB	24	7 500	0.3
上基层	级配碎石 GM	15	7 000	0.35
下基层	水泥稳定碎石 CTB	20	6 000	0.25

表 3 Drucker-Prager 模型参数

Tab. 3 Parameters of Drucker-Prager model

路堤填筑材料	r_d ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	c / kPa	φ / ($^\circ$)	E/kPa	μ	β / ($^\circ$)	κ	ψ / ($^\circ$)
填土	19.2	29.3	36.5	25 000	0.4	28.7	1.0	28.7
土石	20.8	41.3	38.5	50 000	0.3	30.7	1.0	30.7
填石	22.3	43.3	40.5	80 000	0.2	32.7	1.0	32.7

为研究轻质填料的变形特性, 路堤只设置了 EPS 填料, 并未设置刚性夹层。轻质填料路堤的材料参数, 参考课题组之前研究成果, 其弹性模量设为 216 kPa, 密度设为 0.031 kg/m^3 。

1.3 路堤-路面模型结果

1.3.1 不同填筑高度与车辆轴载竖向变形规律

图 1 总结在不同车辆轴载与填筑高度下, 4 种路

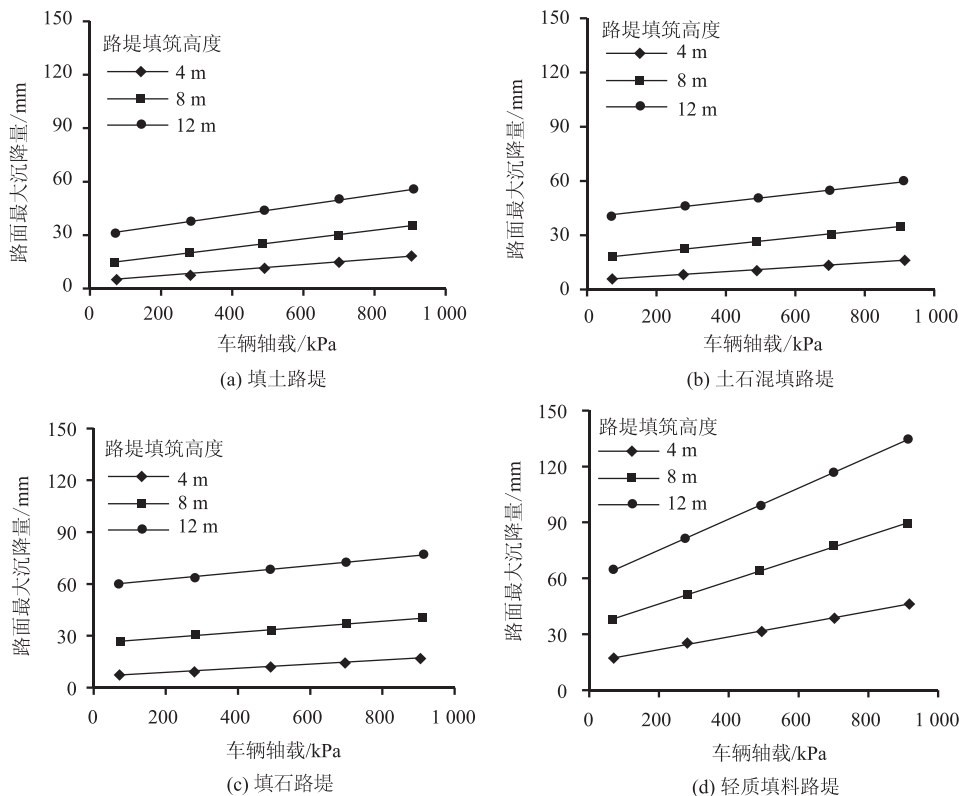


图 1 不同路堤填筑高度与车辆轴载作用下的沉降量

Fig. 1 Embankment settlements under action of different filling heights and axle loads of vehicle

堤的最大竖向变形。由图可见,最大沉降量和车辆轴载及路堤填筑高度均成正比:车辆轴载越大,竖向变形量越大;路堤填筑越高,竖向变形量越大。填石路堤的沉降较土石和填土路堤更大,主要归因于石料含量高导致自重较大,如12 m填筑高度、车辆荷载为0.7 MPa时,填石路堤的最大竖向变形量比土石和填土路堤分别大44%和11%。

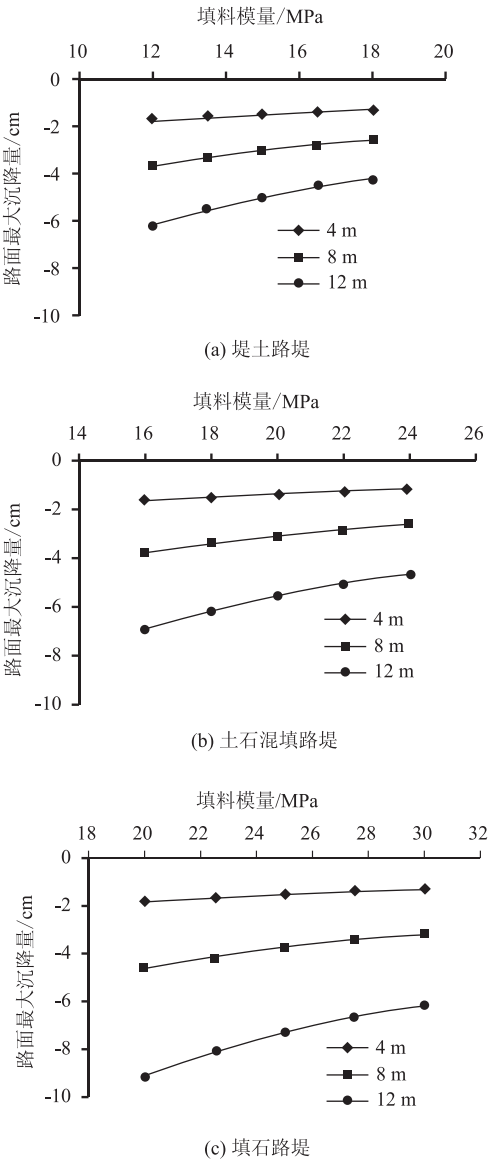


图2 不同路堤填料模量与路面最大沉降量

Fig.2 Moduli of different embankment fillers and maximum settlements of pavement

1.3.2 不同填料模量竖向变形规律

由于EPS填料的弹性模量变化范围较小,因此仅对土石混合料路堤填料模量与沉降的关系进行分析,结果如图2所示。由图可知,沉降量随着填筑材料模量的增加不断减小,且减慢速率不断减小,表

明模量增加对抵抗变形能力具有较好的效果。此外,路堤高度的增加显著增加了最大沉降量,且从8 m增至12 m时,最大沉降量显著高于4~8 m的工况。

2 地基-路堤-路面协同变形机理

2.1 协同变形数值模型

在上述数值模拟基础上,在路堤之下增加0.5 m砂垫层,弹性模量 E 为50 MPa,泊松比 μ 为0.3。在砂垫层之下增加两层软基层,分别为11.5 m厚的淤泥质黏土和8 m厚的粉质黏土。淤泥质黏土采用D-P弹塑性模型进行力学行为描述,材料参数列在表4中;粉质黏土采用Clay plasticity模型进行力学行为描述,材料参数如表5所示。地下水位线位于砂垫层以下1 m,模型底面宽度取100 m。地基-路堤-路面协调变形模型中只有自重荷载,无车辆荷载。

表4 Drucker-Prager模型参数

Tab.4 Parameters of Drucker-Prager model

材料类型	$r_d/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$c/$ kPa	$\varphi/$ ($^\circ$)	$E/$ kPa	μ	$\beta/$ ($^\circ$)	κ	$\psi/$ ($^\circ$)
淤泥质黏土	17.6	8.0	24.0	2 500	0.35	35.5	1.0	35.3

表5 Clay Plasticity模型参数

Tab.5 Parameters of Clay Plasticity model

材料类型	$r_d/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$c/$ kPa	$\varphi/$ ($^\circ$)	κ	v	λ	M	$\alpha_0/$ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	β	K	e_1
粉质黏土	17.8	22.4	31.6	0.02	0.31	0.07	1.27	0.00	1.0	1.0	1.02

2.2 协同变形数值模型结果

2.2.1 路堤不同深度沉降规律

通过数值模拟分析,得到了施工15 a后路堤不同深度的竖向位移变化趋势,如图3所示。观测点分别为路堤表面(0 m)、路堤结构内1, 2, 3 m和4 m的深度。由图可知:

(1) 变形沿路堤宽度方向其沉降曲线呈“凹”型抛物线分布,以路堤中心线为对称轴路堤两侧沉降值等量分布;

(2) 土石路堤中心点沉降随路堤深度增加而增大,而路肩处的沉降不断减小。

4 m沉降曲线处的中心沉降量比0 m沉降曲线处的中心路肩沉降量增加71%;4 m沉降曲线处的路肩沉降量比0 m沉降曲线处的路肩沉降量减小54%;路堤观测层中心点的沉降和路肩处的沉降均随路堤

深度增加不断减小;

(3) 理论上, 道路中心与路肩的竖向变形量之差为道路不均匀沉降, 因此, 土石道路不均匀的竖向变形会沿着道路向上的方向不断的减小, 轻质路堤不均匀竖向变形会沿着道路向上的方向先变大后衰减。

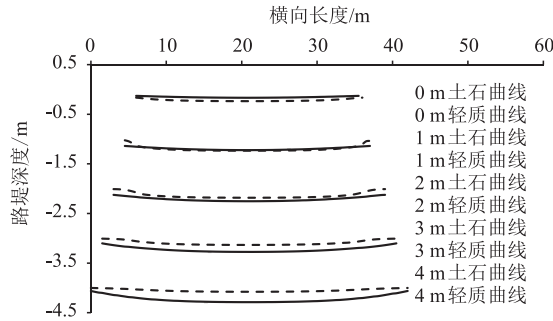


图 3 土石和轻质路堤内不同深度的沉降量与不均匀沉降值

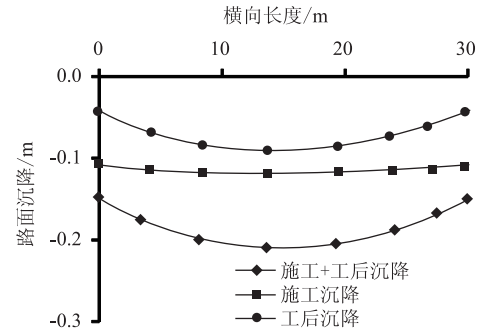
Fig. 3 Settlements and uneven settlement values of earth-rock mixed embankment and light-material embankment in different depths

2.2.3 路堤不同时期沉降量

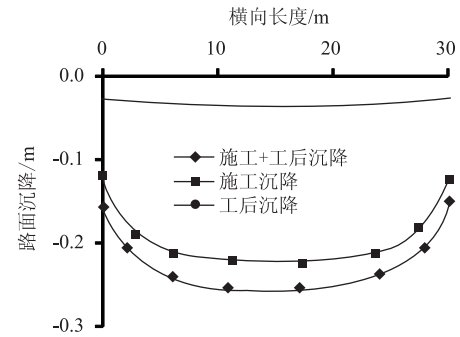
图 4 (a) 和 4 (b) 对比了在横向长度方向, 施工沉降、工后沉降以及两个沉降的叠加值, 观测点均为路堤底部沉降值。横向长度为以左侧路堤坡脚为起点, 坐标方向指向道路右侧的长度。施工沉降为施工完成时 (第 471 d) 的沉降量; 工后沉降为路面设计年限末 (15 a) 的地基沉降量与路面交工时的地基沉降量之差; 总沉降量为施工期间与运行期间产生的竖向变形量之和。不均匀沉降会使路面内部产生很大的应力, 应力值可能超过路面的极限强度产生道路病害。土石路堤的工后沉降约为 0.3 m 左右的路堤整体沉降, 轻质路堤的工后沉降约为 0.05 m 左右的路堤整体沉降, 沿横向长度方向起伏均较小。路堤高度为 4 m 土石和轻质填料路堤的竖向均匀沉变形量产生在施工期间的分别占总竖向不均匀变形量的 92.7% 和 80.7%。因此, 不均匀沉降主要在施工期间产生, 由软土地基的固结作用引起, 而工后沉降在横断面方向则较为均匀。轻质路堤的面层工后沉降较土石路堤底部的工后沉降为小, 这是因为主要变型为弹性的 EPS 路堤与路面结构在软土地基内产生的总荷载较小, 因此施工结束后路堤的固结沉降较小。

2.2.4 路堤填筑高度对沉降的影响分析

图 5 对比了 4, 8, 12 和 20 m 填筑高度条件下,



(a) 土石路堤



(b) 轻质路堤

图 4 路堤不同时期的沉降量

Fig. 4 Settlements of embankment in different periods

路面沉降量和与路面不均匀沉降量的变化规律。分析图 (a)、(c) 可知, 路面的竖向变形量与填筑高度呈正相关。填筑材料为土石混合料时, 软基中心点的竖向变形量与填筑高度层正相关; 填筑材料为轻质填料时, 在填筑初期软基中心点的竖向变形量与填筑高度层正相关, 后期呈指数关系。软基内的附加应力不断增大, 软土固结作用不断增强, 软基沉降的增加会相应地导致路面沉降的增加。轻质填料的整体性随填筑高度的增高变差, 道路竖向变形量的增大速度不断变快。分析图 (b)、(d) 可知, 软土地基的竖向不均匀变形与路堤的填筑高度呈负相关。轻质路堤因其材料特性能够在很大程度上减小路堤不均匀沉降。土石路堤因为随着填筑路堤不断增高, 路面竖向变形量随在不断增加, 但路堤厚度增厚的速度快于竖向变形量的增加速率, 因此不均匀沉降量不断减小。轻质填料路堤道路, 由于路面与路堤之间的有较大的弹性模量差, 在很大程度上限制了软土地基不均匀变形向路面的传递。

2.3 地基-路堤-路面协同作用分析

为研究地基-路堤-路面之间的变形协调, 在建立的 ABAQUS 地基-路堤-路面数值模型中, 由上至下各层分别为面层、路堤、砂垫层、淤泥质黏

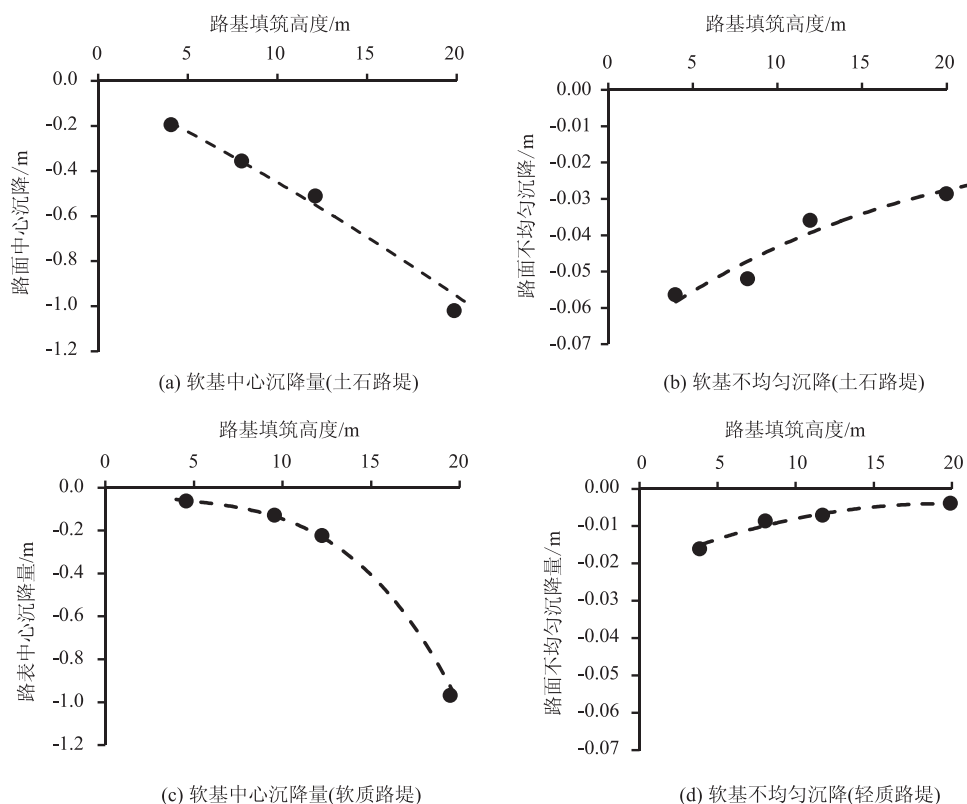


图5 软基沉降与路堤填筑高度关系

Fig. 5 Relationship between soft foundation settlement and embankment filling height

土。在其中选取监控观测点,观测点的布设位置分别分布于路表(c2)、层间(面层和路堤顶面间-b2、路堤底面和砂垫层顶面之间-a5、砂垫层底面和淤泥质黏土顶面之间-a4),和结构层内部(面层中间-c1、路堤中间-b1、从点a-4开始依次向下在地基压缩深度范围之内取三点a-3、a-2和a-1),共9个观测点。分析了各点随时间的竖向变形量增大规律,并对不同填筑层、不同位置的竖向变形量进行对比。选定的9个观测点变形随时间变化规律汇总见图6:

(1) 各点变形量随时间推移不断增大但速率逐渐减缓并趋于稳定,该趋势表明软土地基的固结和次固结已基本完成,达到稳定状态。在9个观测点中,砂垫层或路堤最低层(a-5)的竖向变形量最大,达到28.9 cm,路面上面层(c-2)的竖向变形量最小,为12.5 cm。

(2) 通过对比分析分布在地基中5个观测点a-1至a-5的变形曲线,软土地基的竖向变形量沿路面向下的方向从28.9 cm不断减小到14.9 cm,该趋势与单项压缩分层总和法的结论相同;

(3) 铺设在未处理软土地基上的路堤和路面,路堤底面的变形量和对应砂垫层对应点的沉降量相

同。路堤本身的沉降量相对软土的地基的沉降量较小,因此,路堤和路面均以自重的作用下适应软基的协同变形量为主导,路堤竖向变形量影响较小,其竖向变形量排序为: $a-5 > b-1 > b-2 > c-1 > c-2$ 。

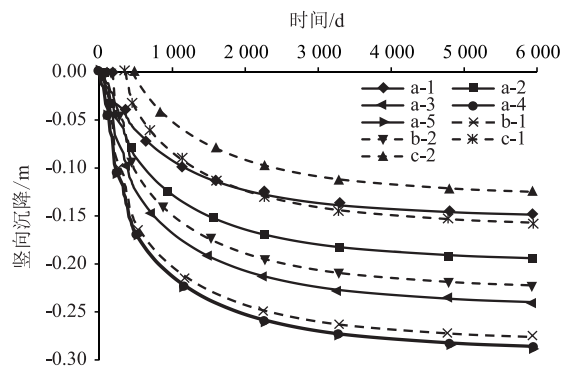


图6 路面结构各测点沉降随时间变化

Fig. 6 Settlement of pavement structure at different measuring points varying with time

综上所述,该地基-路堤-路面模型的整体变形规律为:首先淤泥质黏土和粉质黏土在路堤和路面分层填筑过程中发生固结,水分排出从而引起沉降,其最终沉降曲线为沿道路中线对称接近抛物线的形状。道路路堤和面层结构摊铺在软基上时,各

结构层厚度表现为变厚。分层填筑路堤时, 填料进行固结作用产生竖向变形, 但与软土地基产生的竖向变形量相比可忽略不计。最终, 路堤与面层为适应地基沉降发生协调变形, 即路面结构在自重作用下和路堤沉降空间内产生层间协调的沉降填充因土基固结产生的空间, 但是由于结构层变厚软基沉降量向上传递时表现为不断减小。

4 结论

(1) 3 种不同类型的土石混合料路堤的在增大相同高度的情况下, 填石路堤较填土路堤的重力增大了 8 倍, 但其弹性模量仍为 2 倍。3 种土石混合料路堤的沉降量变化规律为填石路堤大于土石路堤大于填土路堤。最大沉降量和车辆轴载及路堤填筑高度均成正比: 车辆轴载越大, 竖向变形量越大; 路堤填筑越高, 竖向变形量越大; 沉降量随着填筑材料模量的增加不断减小, 且减慢速率不断减小。

(2) 地基-路堤-路面模型的整体变形规律为: 软土地基施工结束后, 在路堤和路面填筑过程中发生固结, 水分排出引起沉降, 沉降曲线为沿道路中线对称的抛物线形状。分层填筑路堤时, 填料进行固结作用产生竖向变形, 但与软土地基产生的竖向变形量相比可忽略不计。路堤与面层为适应地基沉降发生协调变形: 路面结构在在荷载和自重作用下, 产生层间协调变形以填充路堤固结沉降产生的空间, 但是由于结构层变厚软基沉降量向上传递时表现为不断减小。

参考文献:

References:

- [1] 廖公云, 黄晓明, 杨庆刚. 不同路面结构对软基不均匀沉降的适应性研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (4): 34-38.
LIAO Gong-yun, HUANG Xiao-ming, YANG Qing-gang. Adaptability of Different Asphalt Pavement Structures on Soft Ground with Differential Settlements [J]. Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (4): 34-38.
- [2] 朱学雷. 成都绕城高速公路软土地基不均匀沉降对路面结构性能影响的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
ZHU Xue-lei. Study on Influence of Uneven Settlement of Soft Soil Foundation of Chengdu Ring Expressway on Pavement Structure Performance [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [3] ELLIOTT R P, DENNIS N D, QIU Y. Permanent Deformation of Subgrade Soils (Phase I: A Test Protocol) [R]. Springfield: National technical Information Service, 1998.
- [4] 曹东伟, 胡长顺. 多年冻土区路基融沉变形的附加应力分析 [J]. 重庆交通学院学报. 2001, 20 (3): 57-61.
CAO Dong-wei, HU Chang-shun. Analysis for Additional Stress in Pavement due to Thawing Settlement of Permafrost Subgrade [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, 20 (3): 57-61.
- [5] 姬杨蓓蓓, 马磊, 王秉刚. 冻土地区路基融沉变形对沥青路面结构的影响 [J]. 中国公路学报, 2006, 19 (5): 1-5.
JIYANG Bei-bei, MA Biao, WANG Bing-gang. Influence of Subgrade Settlement Deformation in Frozen Soil Zone on Asphalt Pavement Structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (5): 1-5.
- [6] 观祖保. 新老道路拼接中土工格栅加筋土的协同作用研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
GUAN Zu-bao. Research on Synergistic Effect of Geogrid Reinforced Soil in New and Old Road Splicing [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2016.
- [7] LENG W, XIAO Y, NIE R, et al. Investigating Strength and Deformation Characteristics of Heavy-haul Railway Embankment Materials Using Large-scale Undrained Cyclic Triaxial Tests [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17 (9): 04017074.
- [8] 郑柯, 魏中华, 翁剑成. 路基膨胀土特性及其对路面破坏的影响分析 [J]. 北京工业大学学报, 2002, 28 (4): 444-447.
ZHENG Ke, WEI Zhong-hua, WENG Jian-cheng. Characteristics of Roadbed Swelled Ground and Their Influence on Pavement Destruction [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2002, 28 (4): 444-447.
- [9] CHAI J C, IGAYA Y, HINO T, et al. Finite Element Simulation of an Embankment on Soft Clay: Case study [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 48 (3): 117-126.
- [10] MESRI G, CHOI Y K. Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111 (4): 441-464.
- [11] SHI Y J, LI M G, CHEN J J, et al. Long-term Settlement Behavior of a Highway in Land Subsidence Area [J]. Journal of Performance of Construction Facilities, 2018, 32 (5): 1-12.
- [12] 谈至明, 姚祖康. 软土地基不均匀沉降对铺面结构影响的分析 [J]. 岩土工程学报, 1989, 11 (2): 54-63.

(下转第 74 页)

- Southwest Jiaotong University, 2009.
- [15] 郑双杰, 刘玉擎. 开孔板连接件初期抗剪刚度试验 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (11): 69-75.
- ZHENG Shuang-jie, LIU Yu-qing. Experiment of Initial Shear Stiffness of Perforated Connector [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27 (11): 69-75.
- [16] 刘明虎, 徐国平, 刘峰. 鄂东大桥混合梁钢-混凝土结合部研究与设计 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (12): 78-85.
- LIU Ming-hu, XU Guo-ping, LIU Feng. Study and Design of Steel-concrete Joint Part of Hybrid Girder of Edong Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (12): 78-85.
- [17] 李军, 陈学兵. 厦漳跨海大桥北汊主桥索塔及其钢锚梁研究 [J]. 公路交通技术, 2012, 28 (4): 54-60.
- LI Jun, CHEN Xue-bing. Research on Cable Towers and Steel Anchor Beams of Main Bridge in Northern Bay of Xia-Zhang Bridge across Sea [J]. Technology of Highway and Transport, 2012, 28 (4): 54-60.
- [18] 刘明虎, 刘玉擎. 钢锚梁式组合索塔锚固结合部技术研究 [R]. 上海: 同济大学, 2018: 1-6.
- LIU Ming-hu, LIU Yu-qing. Research on Steel-concrete Interface of Steel Anchor Beam in Cable-pylon Composite Anchorage [R]. Shanghai: Tongji University: 1-6.
- [19] 刘明虎, 孙鹏, 胡广瑞, 等. 港珠澳大桥青州航道桥“中国结”形钢剪刀撑设计与施工 [J]. 桥梁建设, 2016, 46 (1): 81-87.
- LIU Ming-hu, SUN Peng, HU Guang-rui, et al. Design and Construction of “Chinese Knot” Style Steel Cross Bracing for Pylon of Qingzhou Ship Channel Bridge of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46 (1): 81-87.

(上接第39页)

- TAN Zhi-ming, YAO Zukang. Structural Analysis of Concrete Pavements on Soft Subsoils with Differential Settlements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11 (2): 54-63.
- [13] 郑传超, 王秉刚. 非均匀地基上的板弯问题 [C] // 中国力学学会计算力学委员会. 第三届全国计算力学论文集: 计算力学理论与应用. 北京: 科学出版社, 1992: 566.
- ZHENG Chuan-chao, WANG Bing-gang. Plate Bending Problem on Non-uniform Foundations [C] // Computational Mechanics Committee of Chinese Society of Mechanics. Proceedings of the Third National Computational Mechanics: Computational Mechanics Theory and Applications. Beijing: Science Press, 1992: 566.
- [14] 张嘉凡, 张慧梅. 软土地基路基不均匀沉降引起路面结构附加应力 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23 (3): 21-25.
- ZHANG Jia-fan, ZHANG Hui-mei. Additional Stress in Pavement Structure due to Asymmetrical Settlement of Soft Subgrade [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23 (3): 21-25.
- [15] 王新岐, 刘玉民. 软基沉降对沥青混凝土路面的影响 [J]. 中国市政工程, 2001 (1): 27-29.
- WANG Xin-qi, LIU Yu-min. Influence of Soft Ground Settlement on Asphalt Concrete Pavements [J]. China Municipal Engineering, 2001 (1): 27-29.
- [16] QIU Y, DENNIS N, ELLIOTT R. Design Criteria for Permanent Deformation of Subgrade Soils in Flexible Pavements for Low-volume Roads [J]. Society Soils & Foundation, 2000, 40 (1): 1-10.
- [17] 王金昌, 朱向荣. 软土地基上沥青混凝土路面动力分析 [J]. 公路, 2004 (3): 6-11.
- WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong. Dynamic Analysis of Asphalt Concrete Pavement on Soft Clay Ground [J]. Highway, 2004 (3): 6-11.
- [18] PORAN C J, RODRIGUEZ J A. Impact Behavior of Sand [J]. Soils & Foundations, 1992, 32 (4): 81-92.