

基于沉降实测数据的软土地基土工参数优化计算*

刘展瑞¹, 张潭¹, 罗克文¹, 吕琰², 易真²

(1. 广西壮族自治区玉林公路发展中心, 广西 玉林 537000; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为获取工后沉降, 采用最小二乘法, 结合广西玉林市公路工程现场实测沉降数据, 建立由实测沉降数据获取多层软土地基土工参数计算模型, 将时间-固结度值、起始荷载、最终荷载、加载历时及初始参数输入模型中, 得到各成层土层的土工参数。

关键词: 公路; 软土地基; 土工参数; 沉降实测数据

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)06-0088-04

软土地基具有高压缩性与低承载力的工程特性, 在上面修筑公路路堤会出现失稳和不均匀沉降, 需对其进行加固处理。针对地基的固结排水过程, 陈伟通过数值仿真计算, 分析了堤基固结沉降过程及规律, 并与现场水库堤基的沉降监测数据对比, 预测了堤基沉降达到稳定时所需的固结时间及最终固结沉降值。李强等介绍了双曲线法、星野法、指数曲线法等沉降分析方法, 并利用实测沉降数据推算了任意时间的沉降量, 预测了软土路基的沉降变形趋势。周舟等结合嘉绍(嘉兴—绍兴)高速公路, 分析了软基沉降预测原理, 提出了任意地基一维固结问题的解, 并利用实际沉降数据对计算模型和参数进行反演, 对公路最终沉降及工后沉降进行了预测。彭占洪从软基的孔隙变化规律出发, 以大应变固结理论为基础建立适合软土的三维固结模型, 运用有限差分法构造显示差分格式, 并利用 MATLAB 软件编程进行求解。谢康和对双层地基一维固结特性进行分析, 对荷载在时间任意变化及起始孔压沿深度任意分布的情况下双层地基一维固结进行了解答。但对基于现场沉降数据反算土工参数的研究没有涉及。该文以广西玉林市博白县省道 S209 线路面大修工程软基为原型施加荷载, 使大部分沉降在预压过程中完成, 通过现场实测沉降数据计算得到各土层的土工参数。

1 多层软土地基固结排水过程的理论推导

令 c_{vi} 为成层土层的竖向固结系数, u_i 为时空状态(成层土层 i 中任意一点任意时刻)下超静孔压力, H 为 n 层地基总厚度, h_i 为第 i 层成层土厚度,

m_{vi} 为土层 i 的体积压缩系数, k_{vi} 为土层 i 的渗透系数, E_{si} 为土层 i 的压缩模量。其他参数定义如下:

$$a_i = \frac{k_{vi}}{k_{v1}}, b_i = \frac{m_{vi}}{m_{v1}} = \frac{E_{s1}}{E_{si}}, \rho_i = \frac{h_i}{H}$$

$$u_i = \sqrt{\frac{c_{v1}}{c_{vi}}} = \sqrt{\frac{b_i}{a_i}} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

根据太沙基经典一维固结理论中超静孔压解的形式, u_i 可由下式表示:

$$u_i = \sum_{m=1}^{\infty} C_m g_{mi}(z) e^{-\beta_m t} \left(q_0 + \int_0^t \frac{dq}{dt} e^{\beta_m t} dt \right) \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

式中: $\beta_m = \lambda_m^2 c_{v1} / H^2$; $g_{mi}(z) = A_{mi} \sin(\mu_i \lambda_m z / H) + B_{mi} \cos(\mu_i \lambda_m z / H)$ 。

土层 i 的平均固结度为:

$$U_i = \frac{1}{q_u h_i} \int_{z_{i-1}}^{z_i} [q(t) - u_i] dz = \frac{1}{q_u h_i} [q(t)(z_i - z_{i-1}) - \int_{z_{i-1}}^{z_i} u_i dt] = \frac{1}{q_u} \left\{ q(t) - \sum_{m=1}^{\infty} C_m e^{-\beta_m t} \frac{H}{\mu_i \lambda_m h_i} [A_{mi} (\cos(\mu_i \lambda_m \frac{z_{i-1}}{H}) - \cos(\mu_i \lambda_m \frac{z_i}{H})) + B_{mi} (\sin(\mu_i \lambda_m \frac{z_i}{H}) - \sin(\mu_i \lambda_m \frac{z_{i-1}}{H}))] \right\} \left(q_0 + \int_0^t \frac{dq}{dt} e^{\beta_m t} dt \right) = \frac{1}{q_u} [q(t) - \sum_{m=1}^{\infty} C_m e^{-\beta_m t} \cdot \frac{A_{mi}(C_i - D_{i+1}) + B_{mi}(B_{i+1} - A_i)}{\mu_i \lambda_m \rho_i} (q_0 + \int_0^t \frac{dq}{dt} e^{\beta_m t} dt)]$$

地基平均固结度为:

* 基金项目: 广西玉林市科学技术局科学研究与技术开发计划项目(玉市科 201925002)

$$\bar{U}_t = \frac{S_t}{S_\infty} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \rho_i U_i}{\sum_{i=1}^n b_i \rho_i}$$

由于上述求解过程已求得任意成层土层 i 的平均固结度 U_i , 通过按沉降定义的地基平均固结度的计算公式即可计算出软土地基的地基平均固结度。

2 多层软土地基的软化模型问题

基于现场实测数据, 先通过最小二乘法推导成层地基在变荷载下任意层任意时刻的固结系数, 即时空状态下固结系数。太沙基经典一维固结理论虽被广泛应用于工程建设项目中, 但其假设与工程实际有很大差别, 它将任何地基都视为一层, 其计算结果可能与实际有所偏差。故在讨论多层软土地基固结排水过程时, 考虑与固结系数关系非常大的时间及空间因素, 推导出多层软土地基的固结排水过程, 计算任意时间点及成层地基的固结系数, 该时空状态下的固结系数能更好地为工程建设提供帮助。

玉林市公路片石处理为 2 层地基。针对双层软土地基, 根据文献[7]可得到 $a_1, a_2, b_1, b_2, c_{v1}, c_{v2}$ 6 个主要土工参数满足下式:

$$C_m = \frac{2 \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i b_i} [A_{mi} (C_i - D_{i+1}) + B_{mi} (B_{i+1} - A_i)]}{\sum_{i=1}^n \sqrt{a_i b_i} [\mu_i \rho_i \lambda_m (A_{mi}^2 + B_{mi}^2) + (B_{mi}^2 - A_{mi}^2) (D_{i+1} B_{i+1} - C_i A_i) + 2 A_{mi} B_{mi} (C_i^2 - D_{i+1}^2)]} \quad (3)$$

令:

$$E(D) = (U_{s1} - U_{s1}^0)^2 + (U_{s2} - U_{s2}^0)^2 + \dots + (U_{s\epsilon} - U_{s\epsilon}^0)^2 = (U_s - U_s^*)^T (U_s - U_s^*) \quad (4)$$

式中: $U_s = [U_{s1}(a_1, a_2, b_1, b_2, c_{v1}, c_{v2}), \dots, U_{s\epsilon}(a_1, a_2, b_1, b_2, c_{v1}, c_{v2})]^T$; $U_s^* = (U_{s1}^0, \dots, U_{s\epsilon}^0)^T$ 。

令 $x = (x_1, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{2n}, x_{2n+1}, \dots, x_{3n}) = (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n, c_{v1}, \dots, c_{vn})$, 得:

$$f_j(x) = U_{sj} - U_{sj}^0 = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \rho_i U_{sj}}{\sum_{i=1}^n b_i \rho_i} - U_{sj}^0 \quad (j = 1, 2, \dots, \epsilon) \quad (5)$$

式(4)可转化为:

$$F(x) = \sum_{j=1}^{\epsilon} f_j^2(x) \quad (6)$$

式(6)中 $f_j^2(x)$ 为非线性函数, 利用解的第 k

$$\min \left[\sum_{j=1}^{\epsilon} (U_{sj}(a_1, a_2, b_1, b_2, c_{v1}, c_{v2}) - U_{sj}^0)^2 \right] \quad (j = 1, 2, \dots, \epsilon)$$

即:

$$\min [(U_{s1} - U_{s1}^0)^2 + (U_{s2} - U_{s2}^0)^2 + \dots + (U_{s\epsilon} - U_{s\epsilon}^0)^2]$$

式中: $U_{s1}^0, \dots, U_{s\epsilon}^0$ 为根据现场实测沉降数据计算的固结度; $U_{s1}, \dots, U_{s\epsilon}$ 按式(1)计算。

$$U_{sj} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \rho_i U_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_i \rho_i} \quad (j = 1, 2, \dots, \epsilon) \quad (1)$$

式中: U_{ij} 按式(2)计算。

$$U_{ij} = \frac{1}{q_u} \left\{ q(t) - \sum_{i=1}^n C_m e^{-\beta_m t} \frac{H}{\mu_i \lambda_m h_i} \cdot [A_{mi} (\cos(\mu_i \lambda_m \frac{z_i}{H}) - \cos(\mu_i \lambda_m \frac{z_{i-1}}{H})) + B_{mi} (\sin(\mu_i \lambda_m \frac{z_i}{H}) - \sin(\mu_i \lambda_m \frac{z_{i-1}}{H}))] \cdot (q_0 + \int_0^t \frac{dq}{dt} e^{\beta_m t} dt) \right\} \quad (2)$$

式中: C_m 按式(3)计算。

次近似值 x^k 将上述函数线性化, 即可将非线性最小二乘法问题转化为线性最小二乘法问题, 解出这个问题的极小点 x^{k+1} , 将其作为非线性最小二乘法问题的第 $k+1$ 次近似值, 再从 x^{k+1} 开始, 迭代上述过程。令:

$$\varphi_j(x) = f_j(x^k) + \nabla f_j(x^k)(x - x^k) = \nabla f_j(x^k)^T 8x - [\nabla f_j(x^k)^T x^k - f_j(x^k)] \quad (j = 1, 2, \dots, \epsilon) \quad (7)$$

式(7)中右端为上述函数 x^{k+1} 在 x^k 点展开的一阶泰勒多项式。令:

$$\varphi(x) = \sum_{j=1}^{\epsilon} \varphi_j^2(x) \quad (8)$$

以式(8)中 $\varphi(x)$ 近似替代 $F(x)$, 将 $\varphi(x)$ 的极小值作为目标函数 $F(x)$ 极小值的估计值, 得:

$$\varphi(x) = (Ax - B)^T (Ax - B) = x^T A^T Ax - 2B^T Ax + B^T B \quad (9)$$

式中: A, B 分别见式(10)、式(11)。

$$A = \begin{bmatrix} \nabla f_1(x^k)^T \\ \dots \\ \nabla f_\epsilon(x^k)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x^k)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1(x^k)}{\partial x_n} & \frac{\partial f_1(x^k)}{\partial x_{n+1}} & \dots & \frac{\partial f_1(x^k)}{\partial x_{2n}} & \frac{\partial f_1(x^k)}{\partial x_{2n+1}} & \dots & \frac{\partial f_1(x^k)}{\partial x_{3n}} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial f_\epsilon(x^k)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_\epsilon(x^k)}{\partial x_n} & \frac{\partial f_\epsilon(x^k)}{\partial x_{n+1}} & \dots & \frac{\partial f_\epsilon(x^k)}{\partial x_{2n}} & \frac{\partial f_\epsilon(x^k)}{\partial x_{2n+1}} & \dots & \frac{\partial f_\epsilon(x^k)}{\partial x_{3n}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B = \begin{bmatrix} \nabla f_1(x^k)^T x^k - f_1(x^k) \\ \dots \\ \nabla f_\epsilon(x^k)^T x^k - f_\epsilon(x^k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$x^{k+1} = x^k - (A^T A)^{-1} A^T f_{(k)} \quad (15)$$

3 实际工程应用

对玉林市某公路双层软土地基固结排水过程进行分析,利用基于工程现场实测沉降数据获取的双层软土地基土工参数及模型对软基沉降进行计算,为该公路软基沉降量分析提供理论依据。

取玉林市某公路 K28+280、K46+800 断面进行计算。两断面均为双层地基,断面 K28+280 的层高分别为 5.4、8.4 m,断面 K46+800 的层高分别为 4.6、12.7 m。通过实际测量,得到各断面的时间-沉降-固结度(见表 1),各断面不同时间点各土层的固结度见图 1,各土层的相关土工参数 a_i 、 b_i 、 c_{vi} 计算结果见图 2。

令:

$$\nabla F(x) = \nabla \varphi(x) = 2A^T Ax - 2A^T B = 0 \quad (12)$$

求出 $\varphi(x)$ 的平稳点,将 A 、 B 代入式(12),得到 $A^T Ax = A^T (Ax^k - f_{(k)})$,进而得:

$$A^T A(x - x^k) = -A^T f_{(k)} \quad (13)$$

式中: $f_{(k)}$ 按式(14)计算。

$$f_{(k)} = \begin{bmatrix} f_1(x^k) \\ \dots \\ f_\epsilon(x^k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$A^T A$ 为对称正定矩阵,即 A 为满秩时,存在逆矩阵 $(A^T A)^{-1}$,可通过式(8)得到 $\varphi(x)$ 的稳定点:

表 1 两断面的时间-沉降-固结度

断面	时间 t/d	沉降量 S/mm	固结度 U	断面	时间 t/d	沉降量 S/mm	固结度 U
K28+800	27	25	0.062	K46+800	18	16	0.082
	52	111	0.312		27	45	0.222
	65	125	0.353		46	71	0.331
	77	138	0.384		54	82	0.390
	101	156	0.433		68	87	0.421
	110	164	0.451		80	92	0.441
	117	169	0.470		97	98	0.462
	151	179	0.506		110	105	0.502
	216	227	0.633		115	109	0.511
	233	238	0.664		152	135	0.631
	267	247	0.682		223	137	0.640
	295	248	0.691		267	139	0.663
	334	273	0.765		298	141	0.672
	375	284	0.794		333	158	0.751
	393	290	0.801		370	165	0.781
427	291	0.812	391	167	0.790		
456	294	0.825	427	168	0.803		

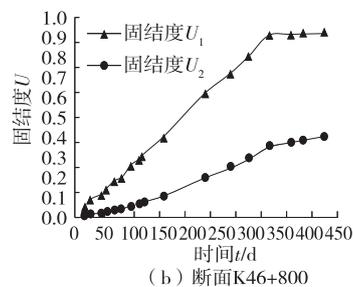
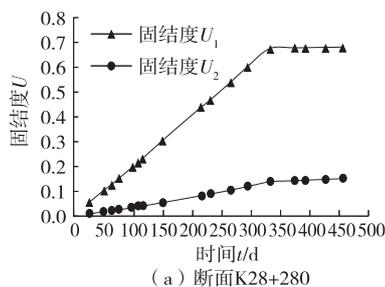


图 1 各断面不同时间点各土层的固结度变化

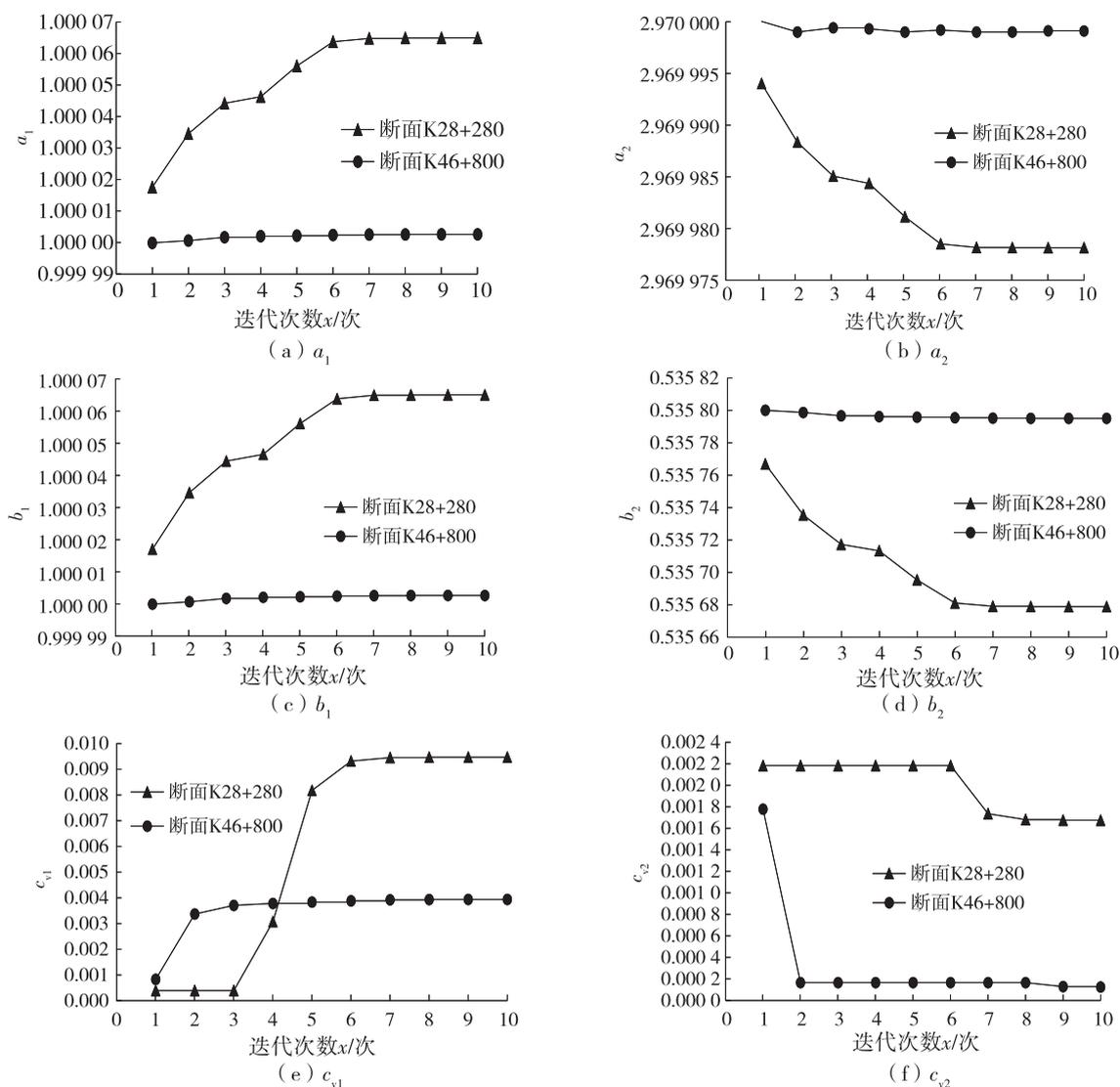


图2 两断面各土层土工参数计算结果

从表1可看出:K28+280、K46+800断面的沉降量和固结度随着时间的增加而增大。

从图1可看出:2个断面不同时间点各土层的固结度都逐渐增大,第一层地基的固结度大于第二层地基的固结度,但其固结度变化幅度逐渐变小,曲线逐渐平缓,并趋于某一范围值。

从图2可看出:2个断面软土地基的第一层土工参数逐渐增大,成层土层的竖向固结系数逐渐增大;第二层土工参数逐渐减小,土层的竖向固结系数逐渐减小;两者的变化幅度都逐渐减小并趋于一个稳定范围值。

基于软土地基实测沉降数据计算地基土工参数,其精度较高,且收敛速度较快,可减少因误差带来的影响,将沉降量控制在工后沉降范围内,能应用于公路建设项目中。

4 结语

将理论与玉林软基公路相结合,建立基于现场实测沉降数据获取软土地基土工参数的优化模型,将工程现场实测数据与加载值输入模型即可得到固结系数及土工参数。计算结果显示,不同断面各土层不同时间点的固结度逐渐增长,并慢慢趋近于某一范围值。该方法可避免室内实验的难点,且通过现场实测数据计算出的土工参数比实验室内得到的土工参数更准确,避免了土样在运输、制作及实验过程中发生变化造成结果不准确的困扰。

参考文献:

- [1] 张明,郭凯旋.铁路路基软基处理效果分析与方案优选 (下转第94页)

粒之间的界面不断产生裂缝的现象,随着裂缝的不断延伸扩大,难免会遇到混合料中的大颗粒,经过挤压和剪切后,会沿裂缝界面发生破坏。BF 可提升 WRMA 的柔韧性和界面强度,因而掺纤维再生混合料的破坏应变比未掺纤维混合料大得多。

2.3 水稳定性

浸水马歇尔稳定度可反映 WRMA 在发生水损害时抗剥落的能力,但存在一定不足。为进一步分析 WRMA 抵抗水损害的能力,通过冻融劈裂试验模拟路面破坏的真实状态,试验结果见图 4、图 5。

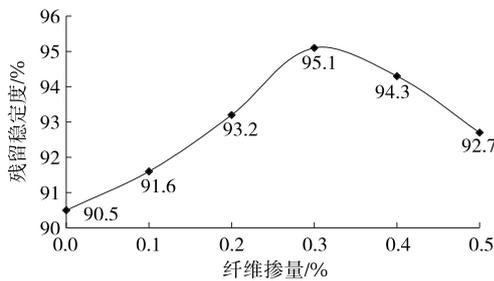


图 4 不同 BF 掺量 WRMA 的浸水马歇尔试验结果

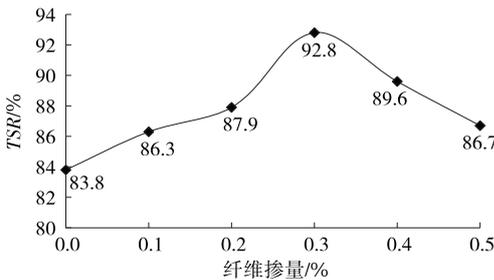


图 5 不同 BF 掺量 WRMA 的冻融劈裂试验结果

由图 4、图 5 可知:参加 BF 的再生混合料的水稳定性均满足规范要求。纤维掺量为 0.3% 时,残留稳定度最大,比未掺纤维时提升 5.1%;BF 掺量为 0.3% 时,WRMA 的冻融劈裂强度和冻融劈裂强度比 TSR 最大,比未掺纤维时提升 10.7%。

再生混合料在拌和和施工过程中无法避免出现空隙,水的流动性和渗透性会使再生混合料空隙中一直存在微量的水,由外部荷载引起的内部水压

力导致混合料内部松动、开裂。根据已有研究,沥青与集料形成的界面无法抵御水的浸入,玄武岩纤维可与沥青和集料形成更稳定、更全面的界面且强度更大,抵御水浸入的能力和在外部荷载作用下的整体性都得到极大提升。同时,WRMA 的油石比随着 BF 的掺入得到提高,油石比的提高使 WRMA 的沥青膜密度增大,能更好地抵御水压力的荷载,增强 WRMA 的水稳定性。

3 结论

(1) 与不参加 BF 相比,BF 使 WRMA 的动稳定度提高 41.7%,破坏应变提高 15.3%,残留稳定度提高 5.1%,TSR 提高 10.7%,即 BF 可综合改善 WRMA 的路用性能。

(2) BF 掺量对 WRMA 路用性能的提升效果有极大影响,综合分析,BF 的最佳掺量为 0.3%。但各地的地理气候、荷载等级、降水量等路面环境不同,实际工程中对 WRMA 路用性能的偏重也不同,为更好地迎合实际情况需求,BF 掺量可在 0.3%~0.4% 进行调整。

(3) 文中只研究了 BF 掺量对 WRMA 路用性能的影响,没有研究不同 RAP 掺配率对 WRMA 路用性能的影响,无法确定最佳 RAP 掺配率,需作进一步试验研究。

参考文献:

[1] 张勤玲,杨保存,王荣,等.玄武岩纤维改善再生沥青混合料路用性能研究[J].公路工程,2016,41(3):17-20+27.
 [2] 王恩,张启志.纤维对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J].新型建筑材料,2020,47(6):74-78.
 [3] 马煜纓.纤维加强再生沥青混合料的压实特性研究[J].科学技术与工程,2014,14(8):256-259.

收稿日期:2021-03-01

(上接第 91 页)

[J].低温建筑技术,2019,41(10):109-111+116.
 [2] 陈伟.软土堤基固结沉降预测的数值仿真分析[J].东北水利水电,2018,36(4):40-41+72.
 [3] 李强,李刚.公路软基路堤实测沉降资料的分析方法[J].公路工程,2010,35(4):142-146.
 [4] 周舟,罗如平.嘉绍高速公路软基工后沉降分析与研究[J].珠江水运,2014(10):66-67.

[5] 彭占淇.基于孔隙变化的软土三维固结分析[D].广州:华南理工大学,2017.
 [6] 谢康和.双层地基一维固结理论与应用[J].岩土工程学报,1994,16(5):24-35.
 [7] 谷亚双,李友云,易真.最小二乘法在地基土工参数获取中的应用[J].数学理论与应用,2013,33(4):40-46.

收稿日期:2020-12-31