

文章编号:1671-1637(2012)06-0007-06

拼接工况下路基的参数反演与沉降特性

韩 丁¹, 谭 华², 黄晓明³, 扈惠敏⁴

(1. 合肥工业大学 交通运输工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 广西交通科学研究院 广西道路结构与材料重点实验室培育基地, 广西 南宁 530007; 3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 4. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:应用路基和土基的 Duncan-Chang 模型, 选用拼接路基顶面的最大沉降量作为目标函数, 研究了路基拼接工况下模型的灵敏度函数和最敏感参数, 使用实体工程中沉降板的检测数据进行了参数反演, 并根据反算参数计算了铺筑路面结构层引起的路基顶面差异沉降。研究结果表明: 拼接工况下, 路基 $E-B$ 模型对模量指数 n 最敏感, 模量系数 k_E 也有较大影响; 土基 $E-B$ 模型对破坏比 R_f 最敏感, k_E 和 n 也有较大影响; 埋设在土基顶面和路堤中层的沉降板检测数据可用来反算土基和路基 Duncan-Chang 模型的最敏感参数; 拼接路基表面的工后沉降计算曲线与类似工程实测沉降曲线具有较高的相似性, 采用反算参数的数值仿真可以描述拼接工况下路基的沉降特征。

关键词:道路工程; 拼接路基; Duncan-Chang 模型; 参数敏感性; 差异沉降

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Parametric inversion and settlement characteristic of subgrade in joint condition

HAN Ding¹, TAN Hua², HUANG Xiao-ming³, HU Hui-min⁴

(1. School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Guangxi Key Laboratory Cultivation Base of Road Structure and Materials, Guangxi Transportation Research Institute, Nanning 530007, Guangxi, China; 3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 4. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: The Duncan-Chang models for subgrade and soil were used, the maximum settlement of joint subgrade surface was chosen as an objective function, and the sensitivity functions and most sensitive parameters of the models were studied in the joint condition of subgrade. The detection data of settlement plates in actual engineering were used to inverse relevant parameters. Differential settlements of subgrade surface after laying pavement structure were calculated by using relevant parameters. Analysis result indicates that modulus index n is the most sensitive parameter for $E-B$ model of subgrade, and the model is also obviously affected by modulus coefficient k_E . Damage ratio R_f is the most sensitive parameter for $E-B$ model of soil, and the model is also obviously affected by k_E and n . Detection data of settlement plates buried on soil surface and embankment middle layer can be used to inverse the most sensitive parameters of the Duncan-Chang models. Calculated settlement curves of joint subgrade surface after construction

收稿日期: 2012-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008109); 安徽省高速公路总公司交通科技项目(AHJT200901); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010HGBZ0540)

作者简介: 韩 丁(1982-), 男, 安徽肥东人, 合肥工业大学讲师, 工学博士, 博士后, 从事道路基础与面层结构研究。

have good comparability with actual measurement curves of similar engineering. The numerical simulation with inversion parameters can describe the settlement characteristics of subgrade in joint condition. 3 tabs, 10 figs, 14 refs.

Key words: road engineering; joint subgrade; Duncan-Chang model; parameter sensibility; differential settlement

Author resume: HAN Ding(1982-), male, lecturer, PhD, +86-551-2929161, handing@hfut.edu.cn.

0 引 言

沉降预测按其原理可以分为模型试验^[1]、系统分析^[2-3]、有限元分析^[4-5]、范例推理^[6]、曲线拟合^[7]等。随着数值计算技术的进步,有限元仿真对新老路基拼接前后的变形机理和沉降特征进行的模拟趋于真实,结合现场检测数据的校准可以避免经验性和尺寸效应的影响,因此,该方法逐渐得到广泛的使用。傅珍等应用有限元程序研究了结构类型、材料参数和拓宽方式对路基差异沉降以及沉降曲线形态的影响,结果表明以路面结构的力学响应考虑差异沉降控制指标较好,并以 4 cm 作为差异沉降控制标准的低限,以 9 cm 作为差异沉降控制标准的高限,双侧拼接在差异沉降控制上优于单侧拼接,且最大差异沉降的增加和土基压缩模量的减小不成反比例,存在减速性^[8];翁效林等研究了拓宽路基时管桩复合地基和湿陷性黄土地基的变形特性,并使用离心试验和数值方法进行了分析,结果表明拓宽路基坡脚处高含水量对拓宽黄土路基稳定性有显著影响,强夯法能很好地改善黄土地基的湿陷性,管桩处理能有效缓解拓宽新老路基的差异沉降,管桩复合地基最大沉降值位于拓宽荷载的形心垂线处^[9-10]。路基沉降计算中常使用 Biot 固结模型和 Duncan-Chang 模型。殷宗泽剖析了 Duncan-Chang 中 $E-\mu$ 和 $E-B$ 模型的影响因素、差异原因和适用条件,其中 E 为弹性模量, μ 为泊松比, B 为体积模量^[11]。截止目前还未见有研究使用 Duncan-Chang 模型对拼接路基进行计算。本文分析了该工况下 $E-B$ 模型的灵敏度函数和最敏感参数,使用实体工程中分层沉降板的检测数据反演了相关参数,并对铺筑路面结构层引起的拼接路基顶面差异沉降进行了计算。

1 拼接试验段工况

本文依托的实体工程是合宁高速公路扩建工程,原有道路是四车道的水泥路面,1989 年建成通车,地质为弱膨胀土。2006 年开始对合宁高速公路合肥段进行改扩建,从双向四车道改造为双向八车

道。原有的水泥路面采用多头破碎机进行碎石化处理,拼接路面结构中的水泥稳定碎石基层顶面标高与水泥路面碎石化后的材料顶面齐平,再共同铺筑沥青面层。为了对拼接路基的沉降性质进行研究,选取路堤填筑高度为 6 m 的路基试验段进行沉降板埋设,埋设位置垂直对应于拼接后道路的路肩边缘,见图 1。

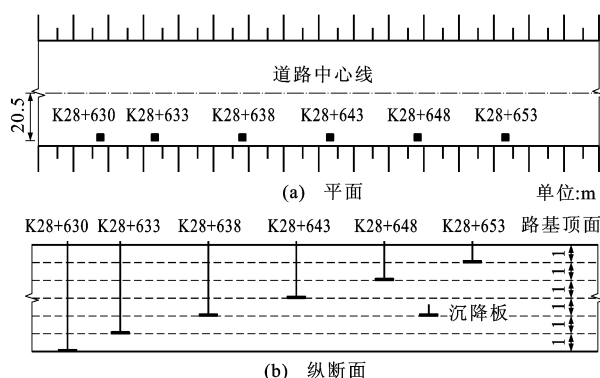


图 1 沉降板埋设布置

Fig. 1 Inbuilt arrangement of settlement plates

依据《公路土工试验规程》(JTJ E40—2007),通过室内含水量、密度和重型击实试验分别得到土基和路基填筑土的材料参数,结果见表 1。

表 1 土体材料参数

Tab. 1 Material parameters of soil

土体	含水量 w / %	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	湿密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙比 e
土基	24.6	1.746	2.177	0.757
3%石灰土	16.8	1.709	1.996	0.403
5%石灰土	17.7	1.672	1.968	0.420

由于施工现场的诸多不可控因素,整个填筑过程中未发生断杆情况的沉降板位置是 K28+630(埋深为 6 m)和 K28+643(埋深为 3 m),沉降检测数据(沉降板的沉降量)见表 2。

2 参数敏感性分析

为了分析拼接工况下 $E-B$ 模型各参数对拼接路基沉降的影响,简化道路拼接结构形式的灵敏度

表 2 沉降检测结果

Tab. 2 Detection results of settlements

cm

桩号	日期										
	2007 年			2008 年							
	09-15	10-26	11-30	02-11	03-22	04-30	06-03	06-28	07-14	07-29	08-15
K28+630	埋板	3.4	5.7	7.6	9.1	10.5	11.3	11.5	11.9	12.5	12.8
K28+643				埋板	2.6	4.3	5.8	6.0	6.6	7.6	7.9

分析计算模型见图 2,其中,拼接路基和原有路基采用同一组参数的 $E-B$ 模型,土基采用另一组参数的 $E-B$ 模型,两侧施加水平方向位移约束,底侧施加竖直方向位移约束。

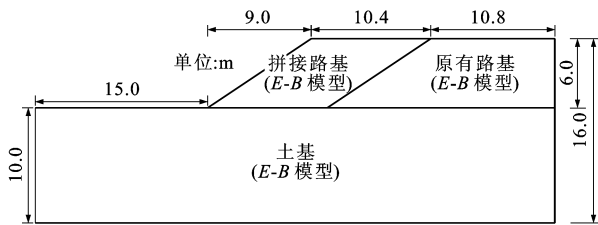


图 2 灵敏度分析的计算模型

Fig. 2 Computation model of sensitivity analysis

Duncan-Chang 的 $E-B$ 模型包含切线变形模量 E_t 、卸荷变形模量 E_{ur} 和切线体积模量 B_t ,分别为

$$E_t = k_E P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left\{ 1 - \frac{R_f [1 - \sin(\varphi)] (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos(\varphi) + 2\sigma_3 \sin(\varphi)} \right\}^2 \quad (1)$$

$$E_{ur} = k_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{n_{ur}} \quad (2)$$

$$B_t = k_B P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (3)$$

式中: k_E 为与初始弹性模量有关的模量系数; P_a 为大气压; n 为模量指数; R_f 为破坏比; c 为粘聚力; φ 为内摩擦角; σ_1 、 σ_3 分别为第一主应力和第三主应力; k_{ur} 、 n_{ur} 分别为卸载和再加载时的模量系数和模量指数,一般取 $n_{ur} = n$; k_B 、 m 分别为切线体积模量系数和模量指数。

2.1 灵敏度函数的定义和基准参数值

选用拼接路基顶面的最大沉降量 u 作为目标函数,定义为

$$u = u(x_i) = u(k_E, P_a, n, R_f, c, \varphi, k_{ur}, k_B, m) \quad (4)$$

式中: $u(x_i)$ 为随着变量 x_i 的不同取值而发生改变的 u 值。

选取某一组基准参数值状态为

$$u^* = u(x_i^*) = u(k_E^*, P_a^*, n^*, R_f^*, c^*, \varphi^*, k_{ur}^*, k_B^*, m^*)$$

式中: x_i^* 为各材料参数的基准取值。分别令各参数变量在可能的范围内变动,分析由于这些参数的变动,目标函数值 u 偏离基准状态值 u^* 的趋势和程

度,判断该参数对目标函数值的灵敏度。

为了能相互比较各参数变化对目标函数影响的幅度,定义灵敏度函数为

$$S(x_i) = \begin{cases} \left| 1 - \frac{u}{u^*} \right| / \left| 1 - \frac{x_i}{x_i^*} \right| & x_i \neq x_i^* \\ 0 & x_i = x_i^* \end{cases} \quad (5)$$

某一参数 x_i 对应的灵敏度函数值 $S(x_i)$ 越大,说明该参数对目标函数值的影响越大。

根据合宁扩建工程的地质勘测报告和类似土体的试验数据^[12],选定的路基和土基的基准参量值见表 3,土基的渗透系数为 $7.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

表 3 材料参数的基准值

Tab. 3 Reference values of material parameters

参数	k_E	P_a/kPa	n	R_f	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	k_{ur}/k_E	k_B	m
路基	300	101.3	0.4	0.60	84.3	27.3	2.3	200	0.5
土基	400	101.3	0.3	0.75	35.4	17.2	1.0	100	0.5

粘聚力 c 、内摩擦角 φ 可视为材料的固有参数,可由常规试验获得, P_a 为标准大气压,这 3 个参数都不需要进行灵敏度计算。需要进行敏感性分析的参数有 k_E 、 n 、 R_f 、 k_{ur} 、 k_B 、 m 。

2.2 路基 $E-B$ 模型的参数敏感性分析

分别将路基 $E-B$ 模型的 6 个参数按其基准值的 10% 间隔向两侧各延伸 2 次,作为参数变化幅度 $1 - x_i/x_i^*$ 。当某 1 个参数变化时,其他参数保持基准值不变,土基的 $E-B$ 模型参数保持为基准值不变。先对未拼接前的路基和土基进行地应力平衡,再计算拼接路基填筑后的灵敏度函数值,结果见图 3。路基 $E-B$ 模型的参数 k_E 、 n 对路基顶面最大竖向位移的影响都较大,其中参数 n 的影响最大,因此,选用路基 $E-B$ 模型的参数 n 为反算参数。

2.3 土基 $E-B$ 模型的参数敏感性分析

分别将土基 $E-B$ 模型的 6 个参数按其基准值的 10% 间隔向两侧各延伸 2 次,作为参数变化幅度 $1 - x_i/x_i^*$ 。当某 1 个参数变化时,其他参数保持基准值不变,路基的 $E-B$ 模型参数保持为基准值不变。先对未拼接前的路基和土基进行地应力平衡,再计算拼接路基填筑后的灵敏度函数值,结果见

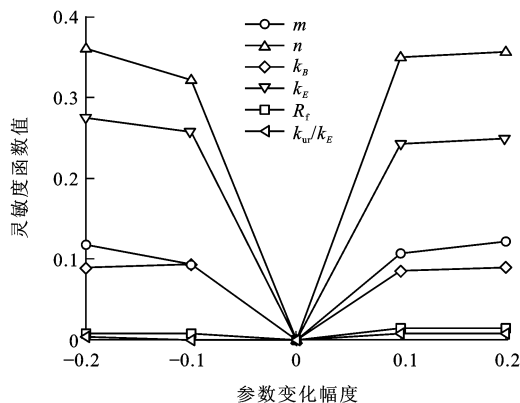


图3 路基 E-B 模型的参数灵敏度分析

Fig. 3 Parameter sensitivity analysis of subgrade E-B model

图4。土基 E-B 模型的参数 k_E 、 n 、 R_f 对路基顶面最大竖向位移的影响都较大,其中参数 R_f 的影响最大,因此,选用土基 E-B 模型的参数 R_f 为反算参数。

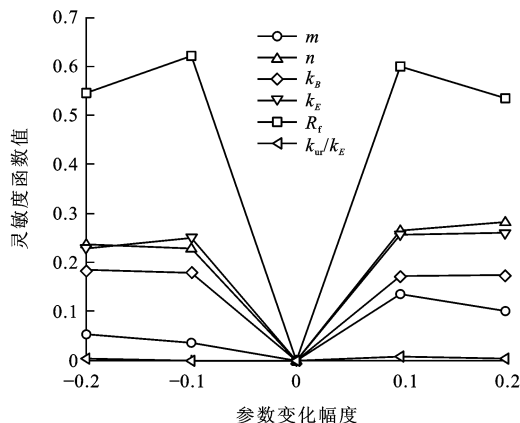


图4 土基 E-B 模型的参数灵敏度分析

Fig. 4 Parameter sensitivity analysis of soil E-B model

根据相关研究,多数情况下地基沉降对参数 R_f 、 k_E 、 n 较为敏感^[12],这与文中的分析结果相一致。

3 参数反演与工后沉降计算

如果按照施工顺序进行分层填筑模拟,难以实现施工过程中的找平,此时每层的表面沉降将成为下一层底部的位移边界条件,会带来很大的误差甚至错误。在路基施工过程中,每层路基的施工时间没有规律,若出现降雨还要将路基翻晒重新压实,数值方法很难模拟实际工况。因为只有路面结构层填筑后路基和土基的沉降才会对路面结构产生影响,因此,可以对路基施工全部完成后的工况进行研究。

3.1 道路拼接沉降分析的计算模型

道路拼接工后沉降计算模型见图5,将加宽路面结构转化为重力荷载施加在路基表面上。模型两侧施加水平方向位移约束,底侧施加竖向位移约束。

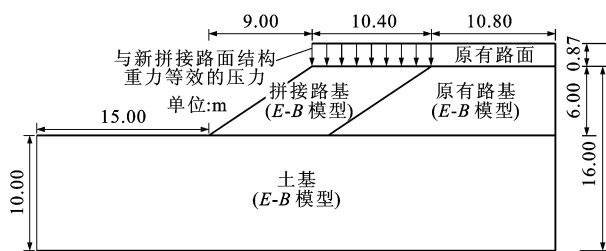


图5 沉降分析模型

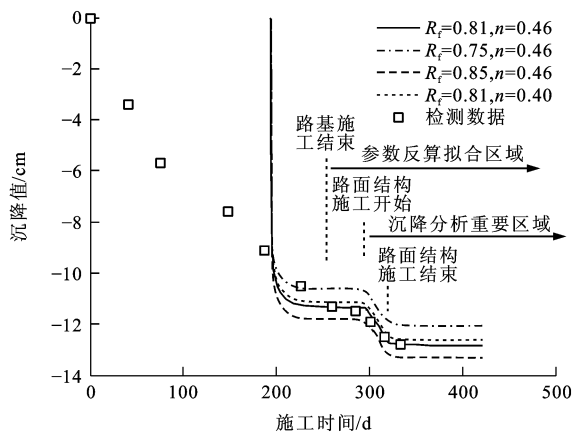
Fig. 5 Settlement analysis model

分别不断调整土基材料参数 R_f 和路基材料参数 n ,路基和土基的其他参数采用表1、3的值,当沉降板检测得到的沉降曲线与有限元模型中相应位置处计算得到的沉降曲线一致时,该试算参数可作为材料的反算参数。

3.2 土基 E-B 参数 R_f 的反算

路基填筑完成后,土基的沉降受到填筑路基自重的影响,但与路基的 E-B 模型参数无关。埋深 6 m 的沉降板(K28+630)能检测出土基顶面的沉降值,该数据可用来反算土基的 E-B 模型参数 R_f 。

路基拼接前先对原有道路和土基进行地应力平衡,再分别填筑拼接路基(一次施加)和路面结构(一次施加)。当 R_f 采用不同值时,有限元计算曲线和实际沉降板数据的比较见图6。

图6 土基 E-B 模型参数 R_f 的反算Fig. 6 Back calculation of R_f in soil E-B model

沉降曲线的吻合判断从路基施工结束时开始,因为路面结构填筑后路基表面产生的差异沉降会对路面结构产生直接的影响,因此,重点是路面结构施工开始后路基表面的变形过程。当 R_f 为 0.81 时,沉降计算曲线与实测曲线较为吻合,可将该值作为反算值。

3.3 路基 E-B 参数 n 的反算

有限元建模中路基填筑是一次完成的,需要对沉降板的检测数据进行处理后才能使用。设 3 m

埋深沉降板(K28+643)的埋设日期为 t_0 ,此时杆端标高是 a_0 ,在 t_0 时刻,6 m埋深沉降板(K28+630)的杆端标高是 b_0 。在 t 时刻($t > t_0$),3 m埋深沉降板的杆端标高是 a ,6 m埋深沉降板的杆端标高是 b ,则从 t_0 时刻到 t 时刻,路基表面以下3~6 m间的竖向变形量为 $a - a_0 \sim b - b_0$ 。

路基拼接前先对原有道路和土基进行地应力平衡,再分别填筑拼接路基(一次施加)和路面结构(一次施加),土基参数 R_f 取为0.81。 n 采用不同值时有限元计算曲线和实际沉降板数据的比较见图7。数值计算中求解控制方程是抛物线形式时,加载突然变化后的瞬时求解会表现出skin effect的现象。

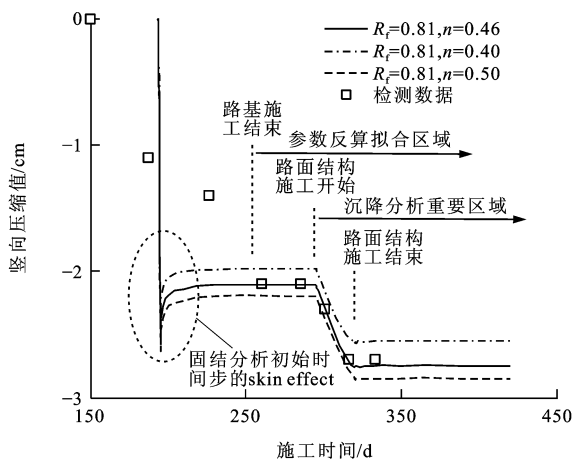


图7 路基E-B模型参数 n 的反算

Fig. 7 Back calculation of n in subgrade E-B model

沉降曲线的吻合判断从路基施工结束时开始,当 n 为0.46时,沉降计算曲线与实测曲线较为吻合,可将该值作为反算值。

3.4 路面结构层引起的路基顶面沉降

采用图5的分析模型和反算得到的材料参数,分别计算得到路面结构施工前、路面结构施工结束和路面结构施工结束一段时期后拼接路基表面的沉降曲线,见图8。

为判定有限元计算的合理性,选用类似工程的检测数据予以比较。沪宁高速公路拓宽工程对桩号K0+380处的沉降变形进行了检测,试验段的路堤高度为3.25 m,检测结果见图9^[13]。杭甬高速公路拓宽工程中试验段的路堤高度是4 m,当路堤填筑后,地表横断面随时间的沉降变化规律见图10^[14]。本文的计算曲线(图8)与沪宁高速公路拓宽和杭甬高速公路拓宽实测的沉降曲线在趋势上较为接近,表明采用反算参数的有限元计算能描述路基拼接后的沉降特征。

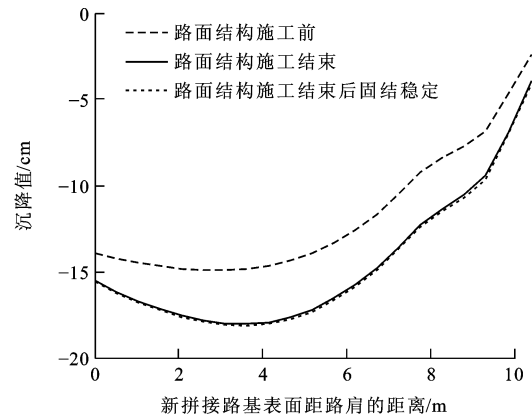


图8 不同阶段拼接路基表面的沉降曲线

Fig. 8 Surface settling curves of joint subgrade at different stages

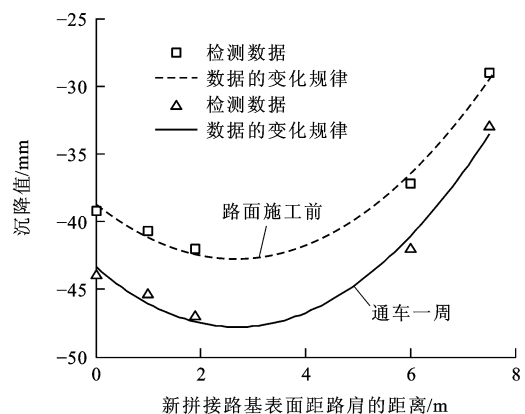


图9 沪宁高速公路拓宽路基沉降检测

Fig. 9 Settlement detection of joint subgrade in Hu-Ning Freeway

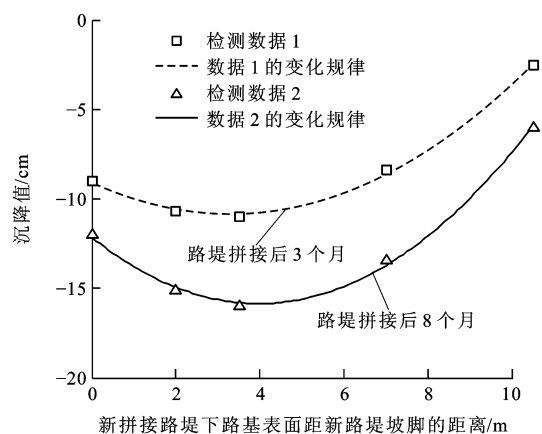


图10 杭甬高速公路拓宽路基沉降检测

Fig. 10 Settlement detection of joint subgrade in Hang-Yong Freeway

4 结 语

(1) 选用拼接路基顶面的最大沉降量作为材料参数敏感分析的目标函数值,路基E-B模型较为敏

感的参数是 k_E 和 n , 其中 n 最敏感, 土基 $E-B$ 模型较为敏感的参数是 R_f 、 k_E 和 n , 其中 R_f 最敏感。

(2) 计算曲线和实际检测沉降曲线的吻合判断从路基施工结束时开始, 重点是路面结构施工开始后路基表面的变形过程。土基 $E-B$ 模型参数可以使用埋设在土基顶面的沉降板的检测数据来反算, 路基 $E-B$ 模型参数可以使用埋设在土基顶面和路堤中层的 2 个沉降板的检测数据差值来反算。

(3) 采用反算参数的有限元计算可以描述路基拼接后路基顶面的沉降特征, 其计算结果可为拼接路面结构分析提供量化的支承条件。

(4) 由于土体材料参数具有依赖于荷载的非线性特征, 在今后研究中可以通过埋设多层沉降板对路堤各层的土体材料参数进行分层反算, 最终得到的路基顶面沉降曲线将会更加符合实际。

参 考 文 献 :

References :

- [1] VISWANADHAM B V S, KONIG D. Centrifuge modeling of geotextile-reinforced slopes subjected to differential settlements[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(2): 77-88.
- [2] 张永清, 王选仓, 王朝辉. 拓宽路基差异沉降计算参数的确定[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(2): 13-18.
ZHANG Yong-qing, WANG Xuan-cang, WANG Chao-hui. Calculation parameter determination of widened subgrade difference settlement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 13-18. (in Chinese)
- [3] 张慧梅, 李云鹏, 毛 成. 人工神经网络在软土地基路基沉降预测中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(4): 20-22.
ZHANG Hui-mei, LI Yun-peng, MAO Cheng. Settlement prediction of roadbed in soft ground by using artificial neural networks[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4): 20-22. (in Chinese)
- [4] 章定文, 刘松玉. 软土地基高速公路扩建中新老路堤相互作用的数值分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 7-12.
ZHANG Ding-wen, LIU Song-yu. Numerical analysis of interaction between old and new embankment in widening of freeway on soft ground[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 7-12. (in Chinese)
- [5] KARIM M R, GNANENDRAN C T, LO S C R, et al. Predicting the long-term performance of a wide embankment on soft soil using an elastic-viscoplastic model[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(2): 244-257.
- [6] 王东耀, 折学森, 叶万军, 等. 高速公路软基最终沉降预测的范例推理方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 20-23, 42.
WANG Dong-yao, SHE Xue-sen, YE Wan-jun, et al. Case-based reasoning approach to settlement of expressway on soft foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 20-23, 42. (in Chinese)
- [7] 朱志铎, 周礼红. 软土路基全过程沉降预测的 Logistic 模型应用研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 965-969.
ZHU Zhi-duo, ZHOU Li-hong. Application of Logistic model in settlement prediction during complete process of embankment construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 965-969. (in Chinese)
- [8] 傅 珍, 王选仓, 陈星光, 等. 拓宽道路工后差异沉降控制标准[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(5): 10-13.
FU Zhen, WANG Xuan-cang, CHEN Xing-guang, et al. Controlling criterion of differential settlements after widening expressway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(5): 10-13. (in Chinese)
- [9] 翁效林, 王 玮, 刘保健. 湿陷性黄土拓宽路基变形特性及强夯法处治效应模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 17-22.
WENG Xiao-lin, WANG Wei, LIU Bao-jian. Model test on deformation characteristics of widening collapsible loess roadbed and dynamic compaction method treatment effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 17-22. (in Chinese)
- [10] 翁效林, 王 玮, 张留俊. 拓宽路基荷载下管桩复合地基沉降变形模式[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(1): 31-35.
WENG Xiao-lin, WANG Wei, ZHANG Liu-jun. Deformation characteristics of widen subgrade settlement with pipe pile treatment[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(1): 31-35. (in Chinese)
- [11] 殷宗泽. 高土石坝的应力与变形[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 1-14.
YIN Zong-ze. Stress and deformation of high earth and rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 1-14. (in Chinese)
- [12] 付宏渊. 基于灵敏度分析的地基沉降反演参数优化[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2006, 3(2): 24-28.
FU Hong-yuan. Optimizing back-analysis parameters for settlement prediction based on sensitivity analysis[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 3(2): 24-28. (in Chinese)
- [13] 张军辉. 不同软基处理方式下高速公路加宽工程变形特性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1216-1222.
ZHANG Jun-hui. Analysis of deformation behavior of expressway widening engineering under different foundation treatments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1216-1222. (in Chinese)
- [14] 贾 宁, 陈仁鹏, 陈云敏, 等. 杭甬高速公路拓宽工程理论分析及监测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 755-760.
JIA Ning, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Theoretical analysis and measurement for widening project of Hang-Yong Expressway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 755-760. (in Chinese)