

文章编号:1671-8879(2009)02-0013-06

拓宽路基差异沉降计算参数的确定

张永清,王选仓,王朝辉

(长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:为简便精确地确定高速公路拓宽路基差异沉降计算参数,依照正交设计要求选取地基及路基土体的物理力学参数及取值域,用有限元分析软件 ANSYS 计算出相应的神经网络分析样本,构建人工神经网络模型,再依托工程现场实测的观测数据,对拓宽路基差异沉降计算参数进行神经网络模拟计算,确定地基及路基土物理力学参数的取值。模拟计算结果表明:路基土各物理力学参数的计算值与实测值吻合很好;用灰色关联分析,模型模拟计算精度很高,表明该方法确定的地基及路基土的物理力学参数值满足工程计算精度要求。

关键词:道路工程;拓宽路基;差异沉降;计算参数;有限元法;正交设计;神经网络
中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A

Calculation parameter determination of widened subgrade difference settlement

ZHANG Yong-qing, WANG Xuan-cang, WANG Chao-hui

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to simplify the precise determination of the calculation parameter of the subgrade difference settlement in freeway widening, this paper chooses the physical mechanics parameter and the value range of the roadbed soil body according to the demand of orthogonal design, obtains the corresponding artificial neural network analysis sample by using the ANSYS software, builds up the model of artificial neural network, and carries out the neural network simulation about the calculation parameter of the difference settlement. The results show that the calculated result matches the actual measured value well. The values of physical mechanics parameter of groundsill and the subgrade obtained in this way satisfy the accuracy request of the engineering calculation. Thus, a new and practical method to determine the calculation parameter can be given. 6 tabs, 2 figs, 13 refs.

Key words: road engineering; widened subgrade; difference settlement; calculation parameter; finite element method; orthogonal design; neural network

0 引言

随着中国国民经济的快速发展、路网的不断完

善及交通量的迅速增大,现有高速公路的通行能力已逐渐不能满足使用要求,对高速公路的改扩建势在必行。目前,中国高速公路改扩建工程,多数采用

收稿日期:2008-04-11

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2005 318 812 13)

作者简介:张永清(1963-),男,陕西富平人,高级工程师,工学博士研究生,E-mail:xian856@163.com。

沿老路两侧加宽的方式建设,旧路基拓宽后,新老路基之间不均匀沉降直接影响路面结构使用性能和使用寿命^[1-11],因此,对拓宽路基提出合理的工后沉降计算公式和预估方法,显得尤为重要。为此,本文将有限元法、正交设计和神经网络方法相结合,构建了高速公路拓宽路基差异沉降计算参数的理论分析模型,为进一步分析和计算拓宽路基差异沉降探索一种实用的新方法。

1 观测点位置布设

1.1 纵断面位置布设

沿路线选取路基填料相同、地基变化不大和填土高度不同的路段作为观测路段,每隔 200 m 布设 1 个观测断面,连续可设 5 个观测断面。在观测路段桩号范围内,有大、中桥时在桥头两端分别增加 1 个观测断面,观测断面设在距离结构物边缘 1 m 处。当桥头填土高度大于 5 m 时,为保证观测数据的可靠性,在桥梁两端分别布设 2 个观测断面。2 个观测断面间距 1~2 m,靠近桥台背处的观测断面设在距离结构物边缘 1 m 处。

1.2 横断面位置布设

路基和地基的沉降,可通过观测埋设在路基中沉降板的竖向位移量而得知。在路基横断面上,每个观测断面上埋设 5 个沉降板,分别埋设在旧路基中央分隔带正中、新路基土路肩处和新路基坡脚附近。地基的稳定性可通过观测路基边坡坡脚处地表面位移桩的水平位移量和隆起而得知。当地基不存在软弱土层时,考虑到施工和观测的方便,建议在观测断面每侧埋设 2 个位移桩,分别埋设在路堤两侧新路基坡脚趾部、边沟外缘处。位移桩的布置断面和沉降观测断面一致,同一观测断面的位移桩、沉降板应在同一轴线上,具体埋设见图 1。

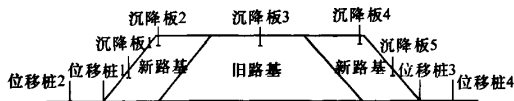


图 1 沉降板和位移桩埋设

同一观测断面,当原地地面横坡小于 2% 时,拓宽路基可看作轴对称问题,取半幅路基研究。

沉降板 3 埋放在旧路基中央分隔带正中,考虑到中央分隔带处可能预埋有管线和排水系统,因此,沉降板 3 左移 150 cm,距路基顶面 50 cm;沉降板 4 埋放在新路基距土路肩 50 cm,距路基顶面 20 cm 处;沉降板 5 埋放在新路基距坡角 100 cm,距原地面 45 cm 处;位移桩 3 埋设在右侧新路基坡脚趾部;位移

桩 4 埋设在右侧边沟外缘处。详细布置见图 2。

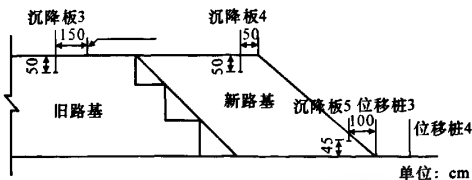


图 2 沉降板和位移桩埋设位置

1.3 沉降与位移观测

从埋板开始起第 1 个月每 10 d 观测一次,第 2、3 个月每半个月一次,以后每个月观测一次。若相邻 2 个月观测结果相同时,可认为路基达到稳定状态,且路面尚未施工,应每 2 个月观测一次。超等载预压填土地段,在确认达到稳定标准后,在卸载前后再观测一次。观测后,挖出沉降板的管杆,按卸载厚度拆除相应的管杆(也可分次拆卸),卸载完成后,对保留在路槽面下的管杆顶再观测一次,其他要求及资料整理同一般路段填筑期观测要求。经沉降分析确定沉降稳定后方可进行路面施工。

2 构建神经网络样本

土是一种变异性很大的工程材料,在其漫长的形成过程中,经历了自然和人为因素的作用,其性质十分复杂。对拓宽路基差异沉降计算,由于土体的固结条件和差异性很大,用传统的工程类比或定性的分析方法,均没有考虑土体本构关系的非线性特征和不确定性,分析结果往往与工程实际有差距。本文利用有限元分析软件 ANSYS 建立路基沉降计算模型,对拓宽路基的应力、边界条件以及施工荷载情况进行模拟分析。计算路基横断面不同点的最终沉降值,以构建神经网络学习样本。

2.1 计算模型

2.1.1 假定条件

基于路基沉降影响因素的复杂性,综合考虑计算简化和计算精度的要求,对计算模型进行如下简化和假定。

- (1)按空间问题考虑,进行三维有限元分析。
- (2)土体为弹塑性材料,采用 Drucker-Prager 模型进行模拟。
- (3)新旧路基接触面完全连续,且不发生滑移。
- (4)边界条件,地基底面为 3 个方向完全约束,地基宽度两侧水平约束(X,Y 方向),地基和路基沿公路延伸方向(Z 方向)水平约束。
- (5)本模型计算得到的路基沉降为拓宽路基的

最终沉降,即包括 3 部分:旧路的第 2 次沉降和新路基的第 1、第 2 次沉降,但不包括旧路基在加铺前的沉降(即旧路基第 1 次沉降)。

2.1.2 数值计算区域及网格划分

拓宽路基仅对地基顶面以下 2~5 倍路基高度和宽度范围土体产生影响,故模拟计算区域分为以下几个部分。

(1) 地基计算深度(压缩层厚度)确定。地基压缩层厚度 z_n 指路基下地基土体中,在荷载作用下发生压缩变形的土层的总厚度,它的大小从路基底面算起,下限的深度按式(1)确定

$$\sigma_m = (0.1 \sim 0.2)\sigma_{cm} \tag{1}$$

式中: σ_m 、 σ_{cm} 分别为压缩层下限处土的附加应力和自重应力。

若在 z_n 范围内存在不可压缩层(如坚硬岩层),则应把该层顶面视为压缩下限;若按式(1)计算确定的压缩层厚度以下仍存在十分软弱的土层,其压缩变形仍不可忽视,则宜适当加大 z_n 的深度计算其压缩沉降量。

(2) 地基计算宽度确定。取大于 3 倍拓宽后路堤底部宽度。

(3) 路基和地基计算长度确定。针对高速公路拓宽工程的实际路基宽度和拓宽方式,利用 ANSYS 软件试算确定计算板体的影响宽度较小,一般在 0.5 m 以内,故取公路延伸方向 1 m 作为计算长度。

考虑到拓宽路基宽度较大,单元横向划分单位为 2 m,竖向划分单位为 2 m,公路延伸方向划分单位为 1 m;网格划分方式对于路基采用 Mapped 方式,地基采用 Sweep 划分方式。

2.2 数值计算参数和试验方案选取

老路基因为固结硬化作用,模量较新路基有所提高,地基压缩模量比路基更低,故模量因数应取为老路基模量 E_1 、新路基模量 E_x 和地基模量 E_s ,路基比地基的内摩擦角大一些,内摩擦角因数取为路基内摩擦角 φ_1 、地基内摩擦角 φ_s ,路基与地基的重度 γ 、泊松比 μ 、粘聚力 c 相同。各物理力学参数取值域见表 1。

表 1 数值计算物理力学参数的取值域

| E_1/MPa | E_x/MPa | E_s/MPa | μ | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | $\varphi_1/(^{\circ})$ | $\varphi_s/(^{\circ})$ | c/kPa |
|------------------|------------------|------------------|-----------|--|------------------------|------------------------|----------------|
| 20~90 | 15~80 | 1~9 | 0.10~0.45 | 15~21 | 10~45 | 5~40 | 2~60 |

将因素(E_1 , E_x , E_s , μ , γ , φ_1 , φ_s , c)的水平数取为 8,按正交试验法进行不同因素水平的数值计算。

正交实验是用于多因素试验的一种方法,它是从全面试验中挑选出部分有代表的点进行试验,这些点具有“整齐”和“分散”的特点,试验方案能反映全面试验的要求。用正交拉丁方构造表 $L_{64}(8^9)$ 布置试验方案,可选模型试验次数为 8^2 。由于高速公路旧路基的固结硬化作用,其压缩模量比新路基压缩模量将有所提高。因此,试验方案中新路基压缩模量大于老路基压缩模量 20% 的试验可舍去,所以计算时可选模型试验次数为 45 次(试验方案见下页表 2)。将表 2 所列数值代入设计程序,计算出相应观测点处的沉降值 y_3 、 y_4 、 y_5 ,以及相应位移观测点处的水平位移值 v_3 、 v_4 ,以此作为神经网络分析的输入样本。

神经网络分析样本计算依托河南安新(安阳—新乡)高速公路拓宽工程,其中有一段路堤,旧路基宽 26 m,填高 8 m,采用双侧拓宽方式,每侧拓宽 8 m,边坡坡度 1:1.5,则拓宽路堤底部宽度为 66 m,地面横坡小于 2%,地基计算深度取 20 m,计算宽度取 200 m(大于 3 倍拓宽路堤底部宽度),计算长度(沿公路延伸方向)取 1 m。施工结束后,由实测固结

系数推算固结度 $U_1 = 60\%$,按轴对称问题,取右侧半幅路基进行数值计算。

2.3 模型计算流程

(1) 利用 ANSYS 的单元生死技术,先将新路基单元杀死,对旧路基和地基施加重力作用,得到旧路基、地基应力和应变平衡。

(2) 在旧路基、地基的应力场和应变条件下,将新路基单元激活,利用增量迭代原理模拟路基分层施工。

(3) 其他参数不变,重新计算,得到拓宽路基各点最终沉降值和地基位移值。

(4) 整理数据(数值计算结果见下页表 3)。

3 确定拓宽路基差异沉降计算参数

人工神经网络具有自组织、自学习和非线性动态处理特征,具有联想推理和自适应识别能力。多层前馈神经网络(即 BP 网络)模型,可通过对给定样本进行网络训练、网络结构及学习参数优化,就能达到理想效果,科学、精确地完成既定任务。本文采用一个隐层的 3 层 BP 网络模型,计算拓宽路基差异沉降计算参数。

表 2 正交试验方案

| 试验 编号 | 因 素 | | | | | | | |
|----------|---------------|---------------|---------------|-------|--|------------------------------|------------------------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | $E_1/$ MPa | $E_2/$ MPa | $E_3/$ MPa | μ | $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | $\varphi_1/$ ($^\circ$) | $\varphi_2/$ ($^\circ$) | $c/$ kPa |
| 1 | 20 | 15 | 2 | 0.01 | 15 | 10 | 5 | 2 |
| 2 | 20 | 25 | 3 | 0.15 | 16 | 15 | 10 | 10 |
| 3 | 30 | 15 | 3 | 0.20 | 18 | 30 | 30 | 45 |
| 4 | 30 | 25 | 2 | 0.25 | 17 | 35 | 25 | 60 |
| 5 | 30 | 35 | 5 | 0.10 | 16 | 40 | 40 | 30 |
| 6 | 40 | 15 | 4 | 0.35 | 22 | 15 | 20 | 30 |
| 7 | 40 | 25 | 5 | 0.30 | 21 | 10 | 15 | 35 |
| 8 | 40 | 35 | 2 | 0.45 | 20 | 25 | 10 | 45 |
| 9 | 40 | 40 | 3 | 0.40 | 19 | 20 | 5 | 60 |
| 10 | 50 | 15 | 5 | 0.45 | 19 | 35 | 35 | 20 |
| 11 | 50 | 25 | 4 | 0.40 | 20 | 30 | 40 | 25 |
| 12 | 50 | 35 | 3 | 0.35 | 21 | 45 | 25 | 2 |
| 13 | 50 | 40 | 1 | 0.30 | 22 | 40 | 30 | 10 |
| 14 | 50 | 50 | 9 | 0.25 | 15 | 15 | 15 | 45 |
| 15 | 60 | 15 | 6 | 0.15 | 20 | 40 | 15 | 60 |
| 16 | 60 | 25 | 7 | 0.10 | 19 | 45 | 20 | 45 |
| 17 | 60 | 35 | 8 | 0.25 | 22 | 30 | 5 | 35 |
| 18 | 60 | 40 | 9 | 0.20 | 21 | 35 | 10 | 30 |
| 19 | 60 | 50 | 2 | 0.35 | 16 | 20 | 35 | 25 |
| 20 | 60 | 60 | 3 | 0.30 | 15 | 25 | 40 | 20 |
| 21 | 60 | 70 | 4 | 0.45 | 18 | 10 | 25 | 10 |
| 22 | 70 | 15 | 7 | 0.25 | 21 | 20 | 40 | 10 |
| 23 | 70 | 25 | 6 | 0.20 | 22 | 25 | 35 | 2 |
| 24 | 70 | 35 | 9 | 0.15 | 19 | 10 | 30 | 25 |
| 25 | 70 | 40 | 8 | 0.10 | 20 | 15 | 25 | 20 |
| 26 | 70 | 50 | 3 | 0.45 | 17 | 40 | 20 | 35 |
| 27 | 70 | 60 | 2 | 0.40 | 18 | 45 | 15 | 30 |
| 28 | 70 | 70 | 5 | 0.35 | 15 | 30 | 10 | 60 |
| 29 | 70 | 80 | 4 | 0.30 | 16 | 35 | 5 | 45 |
| 30 | 80 | 15 | 8 | 0.30 | 17 | 45 | 10 | 25 |
| 31 | 80 | 25 | 9 | 0.35 | 18 | 40 | 5 | 20 |
| 32 | 80 | 35 | 6 | 0.40 | 15 | 35 | 20 | 10 |
| 33 | 80 | 40 | 7 | 0.45 | 16 | 30 | 15 | 2 |
| 34 | 80 | 50 | 4 | 0.10 | 21 | 25 | 30 | 60 |
| 35 | 80 | 60 | 5 | 0.15 | 22 | 20 | 25 | 45 |
| 36 | 80 | 70 | 2 | 0.20 | 19 | 15 | 40 | 35 |
| 37 | 80 | 80 | 3 | 0.25 | 20 | 10 | 35 | 30 |
| 38 | 90 | 15 | 9 | 0.40 | 16 | 25 | 25 | 35 |
| 39 | 90 | 25 | 8 | 0.45 | 15 | 20 | 30 | 30 |
| 40 | 90 | 35 | 7 | 0.30 | 18 | 15 | 35 | 60 |
| 41 | 90 | 40 | 6 | 0.35 | 17 | 10 | 40 | 45 |
| 42 | 90 | 50 | 5 | 0.20 | 20 | 45 | 5 | 10 |
| 43 | 90 | 60 | 4 | 0.25 | 19 | 40 | 10 | 2 |
| 44 | 90 | 70 | 3 | 0.10 | 22 | 35 | 15 | 25 |
| 45 | 90 | 80 | 2 | 0.15 | 21 | 30 | 20 | 20 |

表 3 加宽路基观测位置沉降与位移数值计算结果

| 试验 编号 | 位置沉降 /cm | | | 水平位移 /cm | |
|----------|----------|---------|--------|----------|-------|
| | y_3 | y_4 | y_5 | u_3 | u_4 |
| 1 | -22.75 | -46.88 | -37.24 | 1.60 | 8.14 |
| 2 | -14.59 | -31.18 | -26.13 | 0.20 | 4.75 |
| 3 | -15.35 | -34.51 | -27.40 | 0.39 | 4.11 |
| 4 | -20.89 | -37.62 | -44.25 | -2.45 | 3.73 |
| 5 | -9.13 | -16.02 | -19.22 | 3.46 | 0.68 |
| 6 | -6.77 | -19.05 | -26.79 | -2.86 | -0.86 |
| 7 | -7.35 | -22.12 | -16.71 | -1.42 | 0.63 |
| 8 | -0.26 | -23.37 | -35.39 | -10.16 | -7.92 |
| 9 | -5.29 | -24.81 | -19.39 | -4.94 | -2.74 |
| 10 | -2.36 | -16.30 | -10.74 | -7.81 | -3.17 |
| 11 | -3.61 | -20.50 | -14.82 | -3.93 | -2.32 |
| 12 | -10.18 | -31.71 | -25.29 | -4.60 | -1.13 |
| 13 | -45.62 | -103.67 | -91.85 | -14.05 | 2.20 |
| 14 | -3.52 | -9.38 | -7.31 | -0.26 | 0.73 |
| 15 | -8.98 | -20.45 | -15.46 | 1.79 | 3.21 |
| 16 | -7.84 | -16.66 | -13.14 | 1.44 | 3.06 |
| 17 | -5.80 | -15.53 | -11.85 | -0.29 | 1.17 |
| 18 | -5.62 | -13.75 | -10.69 | 0.20 | 1.59 |
| 19 | -14.35 | -33.57 | -29.39 | -4.44 | -0.55 |
| 20 | -11.21 | -23.50 | -20.63 | -1.99 | 1.13 |
| 21 | -0.31 | -13.84 | -10.50 | -4.16 | -3.32 |
| 22 | -6.31 | -17.33 | -12.46 | 0.45 | 1.43 |
| 23 | -9.13 | -21.32 | -16.64 | 0.34 | 2.46 |
| 24 | -5.69 | -12.76 | -9.99 | 0.69 | 1.95 |
| 25 | -7.26 | -15.10 | -12.23 | 0.90 | 2.72 |
| 26 | -0.89 | -16.99 | -13.21 | -5.14 | -4.11 |
| 27 | -9.49 | -32.87 | -27.96 | -6.79 | -3.66 |
| 28 | -4.85 | -13.16 | -10.98 | -1.56 | -0.18 |
| 29 | -8.70 | -18.98 | -16.53 | -1.69 | 0.84 |
| 30 | -3.77 | -11.51 | -7.97 | -0.13 | 0.43 |
| 31 | -2.51 | -9.83 | -6.77 | -0.86 | -0.26 |
| 32 | -2.14 | -10.03 | -7.30 | -1.70 | -1.01 |
| 33 | 0.10 | -7.51 | -5.02 | -2.12 | -1.71 |
| 34 | -16.14 | -29.95 | -26.10 | 0.00 | 5.27 |
| 35 | -12.58 | -24.95 | -21.34 | -0.45 | 3.62 |
| 36 | -27.48 | -49.37 | -45.19 | -3.34 | 5.98 |
| 37 | -16.72 | -33.79 | -29.85 | -2.91 | 2.61 |
| 38 | -1.13 | -7.72 | -4.81 | -1.23 | -0.86 |
| 39 | -1.39 | -7.90 | -5.17 | -1.46 | -0.94 |
| 40 | -4.91 | -13.22 | -10.13 | -0.78 | 0.43 |
| 41 | -4.23 | -1.66 | -0.95 | -1.49 | -0.33 |
| 42 | -12.23 | -25.88 | -22.11 | -1.89 | 1.94 |
| 43 | -11.79 | -24.48 | -21.01 | -1.71 | 1.91 |
| 44 | -10.75 | -22.04 | -18.56 | -0.69 | 2.52 |
| 45 | -31.91 | -56.39 | -52.01 | 8.43 | -3.33 |

3.1 BP 网络模型输入、输出参数向量

规定 BP 网络模型的输入向量 X 由观测点沉降值和水平位移值(y_3, y_4, y_5, v_3, v_4) 组成,输出向量 Y 由地基及路基土体物理力学参数($E_1, E_x, E_s, \mu, \gamma, \varphi_1, \varphi_s, c$) 组成,将输入、输出参数数值归一化处理后代入程序进行迭代计算。

3.2 BP 网络结构和学习参数优化

对含有一个隐层的 3 层 BP 网络模型,当输入节点数 $n=5$ 、输出节点数 $m=8$ 、样本数 $k=45$ 时,根据文献[12],确定的隐层节点数 n_1 取值在 6~14 之间是适宜的。取 6~14 之间不同隐层节点数进行网络训练,使得系统的总误差最小。通过网络训练,当 $n_1=9$ 时系统的总误差最小,系统结构优化成功。

系统学习参数优化,绘出系统对应于不同动量项 α 和学习效率 η 的系统总误差变化曲线,得到 $\alpha=0.85$ 、 $\eta=0.70$ 时系统训练效果最理想。

3.3 用 BP 网络模型进行参数确定

用 BP 神经网络分析确定拓宽路基土的物理力学参数。以河南安新高速公路拓宽工程为例,其中一段路基填土高度大部分在 2.5~6.0 m 之间,在该段布设 6 个沉降观测断面。各观测断面路基填土高度及各观测点的沉降量与位移值见表 4。该段路基填土工后沉降计算的固结度取 60%。

表 4 拓宽路基沉降与位移实测值

| 观测断面 编号 | 路基高 度 /m | y_3 / cm | y_4 / cm | y_5 / cm | v_3 / cm | v_4 / cm |
|------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1# | 3.12 | -1.52 | -4.65 | -7.18 | -1.4 | -0.6 |
| 2# | 3.47 | -2.71 | -6.13 | -8.97 | -3.9 | -1.1 |
| 3# | 4.14 | -3.79 | -7.31 | -10.48 | -4.3 | -1.7 |
| 4# | 4.56 | -5.06 | -8.49 | -11.65 | -5.1 | -2.1 |
| 5# | 5.21 | -6.37 | -9.68 | -12.78 | -5.7 | -2.3 |
| 6# | 5.72 | -6.84 | -9.86 | -13.15 | -6.8 | -2.6 |

将表 4 所列数值归一化处理后,代入训练好的神经网络模型,即可计算得到路基土的物理力学参数值。神经网络模型确定的路基土的物理力学参数计算值与位移实测值的对照见表 5。

3.4 BP 网络模型精度检验

文献[13]给出了灰色关联度检验预测模型精度的评价等级(表 6)。

对 BP 网络模型进行检验,用灰色关联分析法,其优点是适用少样本和无规律样本,计算量小,且方便,不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况。通过对表 5 所列数据分析得出,路基土各物理力学参数计算值与位移实测值的灰色综合关联度分别为 0.896、0.862、0.897、0.953、0.809、0.867、0.763、0.909。

表 5 路基土物理力学参数计算值与位移实测值的对照

| 路基土物理 力学参数 | | 观测断面编号 | | | | | |
|---|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1# | 2# | 3# | 4# | 5# | 6# |
| E_1 / MPa | 计算值 | 51.89 | 52.63 | 55.31 | 54.72 | 54.08 | 52.86 |
| | 实测值 | 53.24 | 55.41 | 57.07 | 57.61 | 56.33 | 54.64 |
| E_x / MPa | 计算值 | 42.50 | 40.79 | 43.15 | 43.23 | 41.84 | 42.76 |
| | 实测值 | 45.67 | 43.12 | 46.53 | 45.62 | 44.75 | 45.38 |
| E_s / MPa | 计算值 | 4.53 | 4.27 | 7.68 | 6.21 | 4.84 | 4.72 |
| | 实测值 | 5.60 | 6.30 | 9.50 | 8.20 | 6.60 | 6.20 |
| μ | 计算值 | 0.308 | 0.316 | 0.301 | 0.319 | 0.314 | 0.306 |
| | 实测值 | 0.285 | 0.288 | 0.293 | 0.303 | 0.297 | 0.288 |
| γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 计算值 | 17.52 | 17.15 | 17.96 | 19.03 | 18.48 | 18.76 |
| | 实测值 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 18.37 | 18.37 | 18.37 |
| φ_1 / ($^\circ$) | 计算值 | 24.43 | 20.15 | 23.97 | 20.86 | 20.34 | 21.65 |
| | 实测值 | 26.14 | 22.37 | 26.55 | 23.57 | 22.93 | 24.87 |
| φ_s / ($^\circ$) | 计算值 | 13.96 | 16.43 | 15.87 | 14.38 | 15.82 | 16.24 |
| | 实测值 | 15.36 | 18.54 | 17.58 | 16.57 | 17.62 | 15.95 |
| c / kPa | 计算值 | 25.87 | 23.15 | 23.60 | 24.71 | 23.83 | 23.97 |
| | 实测值 | 29.73 | 24.37 | 26.52 | 28.07 | 27.56 | 25.77 |

表 6 灰色关联度检验预测模型精度等级

| 精度等级 | 一级 | 二级 | 三级 | 四级 |
|-------|------|------|------|------|
| 灰色关联度 | 0.90 | 0.80 | 0.70 | 0.60 |

对照表 6 可以看出,神经网络模型确定的路基土各物理力学参数值与实测值有很好的相关性,模型精度达到二级以上,表明该方法确定的路基土的物理力学参数值能满足工程计算精度要求。

4 结 语

(1)拓宽路基由于新老路基修建的历史、填料和压实度的差异,新老路基顶面将产生横向不均匀沉降变形,影响拓宽路基差异沉降变形的主要因素有路基拓宽方式、填土高度和土基压缩模量等。

(2)为了对拓宽路基提出合理的工后沉降计算公式和预估方法,整体考虑地基和路基变形以及新老路基的共同作用,将其作为空间问题,用三维有限元分析软件,建立路基变形模型,数值模拟拓宽路基的差异沉降;拓宽路基数值模拟计算的主要参数为路基土体的物理力学参数,其取值可采用工程类比、现场测试和实验室试验等方法;工程类比法与工程实际的差别有时较大,现场测试和实验室试验费时又费事。

(3)本文依照正交设计要求选取可用于路基填料土体的物理力学参数及取值域,用有限元分析软件 ANSYS 计算得出相应的神经网络分析样本,构建人工神经网络模型,并进行网络训练、网络结构及

学习参数优化,再依托工程现场实测的观测数据,对拓宽路基差异沉降计算参数进行神经网络模拟计算,确定地基及路基土物理力学参数的取值。

(4)结合工程实例计算,结果证实了本文介绍的方法的可行性、科学性和准确性,可以指导公路路基拓宽设计与施工,为拓宽路基差异沉降计算参数的确定探索一种较为实用的新方法。

参考文献:

References:

- [1] 高翔,刘松玉,石名磊.软土地基上高速公路路基扩建加宽中的关键问题[J].公路交通科技,2004,21(2):29-33.
GAO Xiang, LIU Song-yu, SHI Ming-lei. Key problems in embankment widening of expressway on soft ground[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(2): 29-33.
- [2] 王瑞甫,陈华兴,刘宏力.高填方路基沉降计算方法研究[J].中外公路,2007,27(6):14-16.
WANG Rui-fu, CHEN Hua-xing, LIU Hong-li. Study of method of settlement calculation and prediction of high subgrade[J]. Road of China and Abroad, 2007, 27(6): 14-16.
- [3] 张永清,王选仓,王朝辉,等.土工格栅处治填挖交界路基数值模拟与现场试验[J].交通运输工程学报,2008,8(3):63-67.
ZHANG Yong-qing, WANG Xuan-cang, WANG Chao-hui, et al. Numerical simulation and field test at the cut to fill location of subgrade treated geogrids[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(3): 63-67.
- [4] 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.
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.
- [5] 邓卫东,张兴强,陈波,等.路基不均匀沉降对沥青路面受力变形影响的有限元分析[J].中国公路学报,2004,17(1):12-15.
DENG Wei-dong, ZHANG Xing-qiang, CHEN Bo, et al. Nonlinear FEM analysis of influence of asphalt pavement under non-homogenous settlement of roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 12-15.
- [6] 傅珍,王选仓,陈星光,等.拓宽路基差异沉降特性和影响因素[J].交通运输工程学报,2007,7(1):54-57.
FU Zhen, WANG Xuan-cang, CHEN Xing-guang, et al. Differential settlement characteristics and influencing factors of widening subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 54-57.
- [7] 李进军,黄茂松,王育德.交通荷载作用下软土地基累积塑性变形分析[J].中国公路学报,2006,19(1):1-5.
LI Jin-jun, HUANG Mao-song, WANG Yu-de. Analysis of cumulative plastic deformation of soft clay foundation under traffic loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 1-5.
- [8] 郑传超,夏永旭,王秉纲,等.道路结构力学计算[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [9] 张起森.道路工程有限元分析法[M].北京:人民交通出版社,1983.
- [10] 唐朝生,刘义怀,施斌,等.新老路基拼接中差异沉降的数值模拟[J].中国公路学报,2007,20(2):13-17.
TANG Chao-sheng, LIU Yi-huai, SHI Bin, et al. Numerical simulation on differential settlement of jointing of new and old roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 13-17.
- [11] 梁燕,赵桂娟,谢永利,等.黄土增湿变形的数值模型[J].建筑科学与工程学报,2007,24(3):43-46.
LIANG Yan, ZHAO Gui-juan, XIE Yong-li, et al. Numerical model of loess moistening deformation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 43-46.
- [12] Li D Q, Selig E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006-1013.
- [13] 刘思峰,郭天榜,党耀国,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2000.