

陈志敏,孙勇,郝彦玉,等.公路地质纵剖面黄土湿陷系数预测及分布规律研究[J].地震工程学报,2024,46(6):1269-1278.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230813001

CHEN Zhimin, SUN Yong, HAO Yanyu, et al. Prediction and distribution law of the collapsibility coefficient of loess in a geological longitudinal section of highway[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1269-1278. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230813001

公路地质纵剖面黄土湿陷系数 预测及分布规律研究

陈志敏¹, 孙勇¹, 郝彦玉², 杨易朴¹, 杨雯宇¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃恒通路桥工程有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 通过充分挖掘现有黄土湿陷试验资料的价值, 建立基于克里金插值法的湿陷系数预测模型。以G244线打庆公路(K1+640~K10+640段)工程为背景, 利用少量的湿陷系数实测数据, 对湿陷系数进行插值预测并沿其纵剖面绘制等值线图。将湿陷系数预测值与实测值进行对比, 并对其二维空间分布规律进行分析。结果表明:(1)基于地质统计克里金法的黄土湿陷系数插值计算方法可行且插值结果合理, 能满足工程对于黄土湿陷性的精度和实际应用需求;(2)利用湿陷系数等值线图, 采用“0.015”判定法得到黄土湿陷临界深度, 湿陷临界深度的变化相对于地表的坡度变化较缓, 且沟谷区的湿陷深度(3~8 m)明显小于山岭区的湿陷深度(15~25 m);(3)自地表向下, 黄土湿陷系数随着深度的增加先增大后减小, 直至小于0.015, 即湿陷性消失;(4)在钻孔取样深度相同时, 河沟谷区的含水量大于黄土丘陵区, 在较低的自重压力时, 河沟谷区的湿陷系数大于黄土丘陵区, 随着自重应力逐渐增大, 黄土丘陵区的湿陷系数逐渐大于河沟谷区。

关键词: 黄土湿陷系数; 克里金法; 半变异函数模型; 纵剖面分布规律

中图分类号: U419.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1269-11

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230813001

Prediction and distribution law of the collapsibility coefficient of loess in a geological longitudinal section of highway

CHEN Zhimin¹, SUN Yong¹, HAO Yanyu², YANG Yipu¹, YANG Wenyu¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Gansu Hengtong Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: By thoroughly analyzing existing data from collapsible loess experiments, a predictive model for the collapsibility coefficient based on the Kriging interpolation method was established. Using the Daqing Highway section of the G244 line (from K1+640 to K10+640) as a case

收稿日期: 2023-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(12262018); 中央引导地方科技发展资金项目(22ZY1QA005)

第一作者简介: 陈志敏(1979-), 男, 河北邢台人, 博士, 教授, 主要从事岩土与隧道工程等领域的教学与科研工作。

E-mail: czm@mail.lzjtu.cn.

通信作者: 孙勇(1999-), 男, 重庆巫溪人, 硕士研究生, 主要从事岩土与隧道工程等领域的科研工作。E-mail: 1515294031@qq.com.

study, the collapsibility coefficient of loess was predicted through interpolation, utilizing a limited amount of measured data of the collapsibility coefficient, and then, a contour map was drawn along the longitudinal section. The predicted values of the collapsibility coefficient were compared with the measured values, and the two-dimensional spatial distribution pattern of the collapsibility coefficient was analyzed. The results demonstrate the following: (1) The interpolation method for the collapsibility coefficient of loess based on the Kriging method is feasible, producing reasonable interpolation results that meet the engineering requirements of the accuracy and practical application of loess collapsibility. (2) By utilizing the contour map of the collapsibility coefficient of loess and the "0.015" judgment method, the critical depth of loess collapsibility was determined. The variation in the critical depth of loess collapsibility is relatively gradual compared to changes in the surface slope, with the depth of collapsibility in valley areas (3—8 m) notably less than that in the mountainous region (15—25 m). (3) Moving downward from the surface, the collapsibility coefficient of loess initially increases with the increase in the depth, then decreases until it falls below 0.015, indicating the disappearance of collapsibility. (4) At the same sampling depth, the moisture content in river valleys exceeds that in the loess hilly region. Under low self-weight pressure, the collapsibility coefficient in river valleys is greater than that in the loess hilly region. However, as self-weight stress gradually increases, the collapsibility coefficient in the loess hilly region surpasses that in river valleys.

Keywords: collapsibility coefficient of loess; Kriging method; semivariogram model; distribution law of longitudinal section

0 引言

湿陷性黄土^[1-2]是在干旱、半干旱气候条件下形成的一种特殊性质的土,其土质较均匀、结构疏松。当在一定压力下受水浸湿,结构会迅速破坏,产生较大附加沉降,强度迅速降低,对工程安全造成很大危害。湿陷系数^[3]是湿陷性黄土的重要指标。目前,测定湿陷性的方法主要有:室内压缩试验、现场静载荷试验和现场试坑浸水试验^[4]。然而,采用试验测得的湿陷系数,即使在误差允许范围内也很难达到所需精度,且需要的仪器设备多,测定效率低。因此,对公路地质纵剖面湿陷系数的预测及其分布规律的研究有重要的理论和现实意义。

对黄土湿陷系数的分析和预测有多种方法,如邵生俊等^[5]利用多因素分析法建立了湿陷系数与物性指标间的非线性回归模型;马闫等^[6]利用含水量与湿陷系数的模糊关系提出了模糊信息优化处理方法,对湿陷系数进行预测;井彦林等^[7]采用最小二乘法支持向量机挖掘模型进行了黄土湿陷性的预测挖掘。然而,以上研究仍存在一些不足之处:回归分析中大多采用线性回归方法,但各土性指标与黄土湿陷系数并非简单的线性关系,利用简单的线性模型进行分析误差较大;模糊数学方法计算过程中受人

为主观因素影响较大,缺少严密的理论基础和标准化的方法;对湿陷系数之间的空间相关性考虑较少。由于湿陷系数受到相同区域化条件的影响,取样数据点之间存在自相关和互相关特征。因此,可以通过克里金插值方法内插或外推未知点的数值,并得出总体纵剖面分布趋势。目前对黄土路基湿陷系数的分布已有一些研究^[8-9],但在测点数据不足的情况下,对黄土湿陷临界深度及公路地质纵剖面湿陷系数分布规律的研究仍然较为有限。常用的单变量克里金法有简单克里金法、普通克里金法以及泛克里金法^[10]。其中,简单克里金法假设随机函数的期望值为已知常数,但在实际应用中一般难以满足;泛克里金法将插值过程分为趋势项和残差项的两部分之和,但残差变异函数的预测十分繁琐;普通克里金法要求随机函数的期望值在搜寻领域内稳定但未知,该方法目前被广泛应用,具有线性无偏、最优估计的特点。目前克里金插值法多用于煤矿可采储量预测^[11]、降雨量^[12-13]以及微量元素^[14-15]等研究,关于黄土湿陷系数的预测方法及其分布规律的研究相对较少。

本文以 G244 线打庆公路(K1+640~K10+640 段)工程为背景,利用少量的湿陷系数实测数据,基于普通克里金插值法^[16]建立预测模型对公路

地质纵剖面湿陷系数进行插值预测,并对湿陷系数的分布规律进行分析。

1 预测模型算法的实现

1.1 研究区概况

工程地处陇东黄土高原丘陵沟壑区,区内整体地势西北高、东南低,大致从西北向东南倾斜;具有切割密度大、地形支离破碎、沟壑纵横、高低起伏的特点^[17]。线路发育的主要地貌类型为黄土丘陵地貌和河沟谷地貌,且根据现场调研与室内试验可知该工程地区的河沟谷地貌的含水率大多数高于黄土丘陵地貌。

线路特殊性岩土主要为黄土,且黄土厚度达 20~200 m,其中包括马兰黄土层、离石黄土层以及粉质黏土层,因此其不良地质的发育都以黄土为物质基础,依据《湿陷性黄土地区建筑标准(GB 50025—2018)》^[17],本工程区为中国湿陷性黄土工程地质分区的Ⅱ区,属陇东—陕北—晋西地区。该区黄土性质特征为:自重湿陷性黄土分布广泛,湿陷性黄土层厚度通常大于 10 m,地基湿陷等级一般为Ⅲ~Ⅳ级,湿陷性较敏感。

1.2 研究方法

克里金法是依据半变异函数对随机场进行空间建模和预测插值的回归算法^[18]。基本公式为:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(X_i) \quad (1)$$

式中: $Z(X_0)$ 为估算值; $Z(X_i)$ 为已知点的实测值; λ_i 为第*i*个权重系数,表示各空间样本点实测值对估算值的贡献程度,其应当满足克里金方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

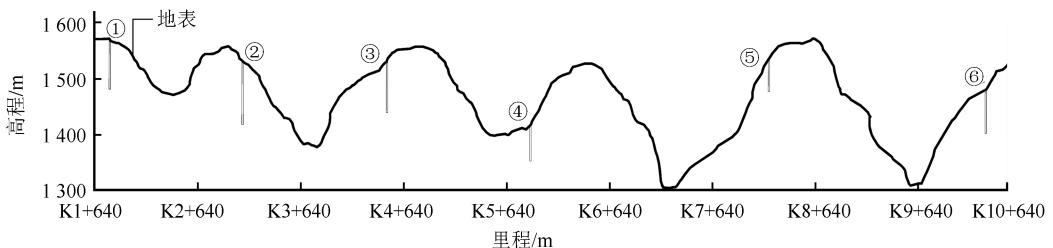


图 2 湿陷系数测点分布图

Fig.2 Distribution map of measuring points for collapsibility coefficient

1.4 半变异函数模型拟合

1.4.1 选择半变异函数模型

实验半变异函数模型是克里金插值方法中不

式中: $\gamma(x_i, x_j)$ 为第*i*个与第*j*个已知测点的半方差值; $\gamma(x_i, x)$ 为估算点与已知测点*i*的半方差值; λ_i 为第*i*个权重系数,即贡献程度; μ 为拉格朗日常数。

解克里金方程组可求得权重系数,进而通过式(1)求出湿陷系数估算值。理论计算步骤如图 1 所示。

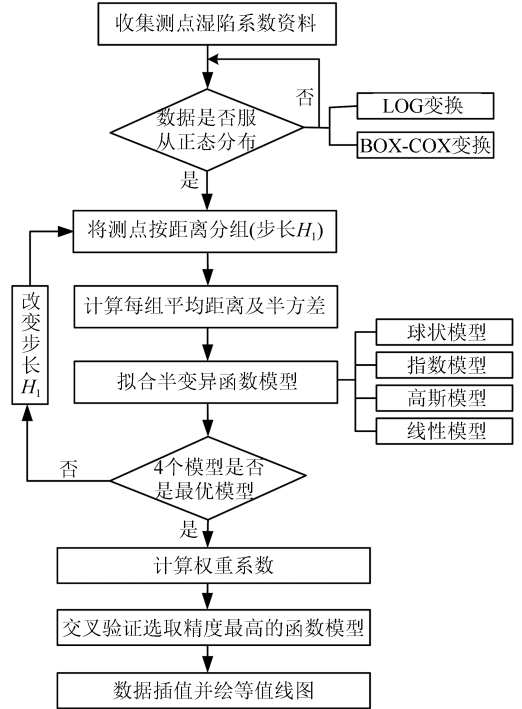


图 1 理论流程图

Fig.1 Theoretical flow chart

1.3 数据的选取与处理

使用普通克里金法进行插值预测,为满足空间统计推理要求的平稳假设,首先要确保数据呈正态分布^[19]。故收集现有的黄土湿陷性实测资料,其测点分布如图 2 所示。经过统计分析和 LOG 或 BOX-COX 变换^[20],对实测湿陷系数的数据进行处理,最终得到的湿陷系数,如表 1 所列。

可或缺的研究工具。两个实测湿陷系数数值之差平方的一半被称为这两点间的半方差,其计算公式为:

表1 变换后的湿陷系数

Table 1 Collapsibility coefficient after transformation

①号钻孔 取样深度 /m	湿陷 系数	②号钻孔 取样深度 /m	湿陷 系数	③号钻孔 取样深度 /m	湿陷 系数	④号钻孔 取样深度 /m	湿陷 系数	⑤号钻孔 取样深度 /m	湿陷 系数	⑥号钻孔 取样深度 /m	湿陷 系数
1.5	0.022	2.0	0.023	2.0	0.026	1.0	0.020	1.0	0.024	1.0	0.021
3.0	0.026	4.0	0.030	4.0	0.034	2.0	0.023	2.0	0.028	2.0	0.024
4.5	0.032	6.0	0.037	6.0	0.043	3.0	0.026	3.0	0.033	3.0	0.027
6.0	0.037	8.0	0.042	8.0	0.050	4.0	0.029	4.0	0.038	4.0	0.030
7.5	0.041	10.0	0.044	10.0	0.052	5.0	0.033	5.0	0.044	5.0	0.034
9.0	0.044	12.0	0.041	12.0	0.048	6.0	0.036	6.0	0.049	6.0	0.037
10.5	0.043	14.0	0.035	14.0	0.040	7.0	0.039	7.0	0.054	7.0	0.040
12.0	0.041	16.0	0.027	16.0	0.031	8.0	0.042	8.0	0.057	8.0	0.043
13.5	0.036	18.0	0.021	18.0	0.023	9.0	0.043	9.0	0.059	9.0	0.044
15.0	0.031	20.0	0.017	20.0	0.018	10.0	0.043	10.0	0.059	10.0	0.044
16.5	0.026	22.0	0.015	22.0	0.015	11.5	0.041	11.0	0.058	11.0	0.043
18.0	0.021	24.0	0.014	24.0	0.014	13.0	0.037	12.0	0.055	12.0	0.041
19.5	0.018	26.0	0.014	26.0	0.014	14.5	0.032	13.0	0.051	13.0	0.038
21.0	0.016	28.0	0.013	28.0	0.013	16.0	0.027	14.0	0.045	14.0	0.034
22.5	0.015	30.0	0.013			17.5	0.022	15.0	0.040	15.0	0.031
24.0	0.014	32.0	0.013			19.0	0.019	16.0	0.035	16.0	0.027
25.5	0.014	34.0	0.013			20.5	0.016	17.0	0.030	17.0	0.024
27.0	0.013	36.0	0.013								
28.5	0.013	38.0	0.013								
30.0	0.013	40.0	0.013								
31.5	0.013										
33.0	0.013										

$$\gamma_{ij} = \frac{(Z_i - Z_j)^2}{2} \quad (3)$$

式中： γ_{ij} 为半方差； Z_i 为 i 点变换后的湿陷系数实测值； Z_j 为 j 点变换后的湿陷系数实测值。

在 n 个湿陷系数测点中，选择不重复的两个测点计算半方差，任意两点的半方差值与距离相关。通过求得所有测点之间的半方差和距离，可以得到 $C(n, 2)$ 个与距离相关的半方差数据。将这些数据按照 H_{\max}/H_1 分组，并计算每组的平均半方差以及平均距离。最后用最小二乘法拟合实验半变异函数来描述 H_{\max}/H_1 组平均半方差和平均距离之间的关系。其中 $C(n, 2)$ 为组合的线性写法，即在 n 个湿陷系数测点中选两个测点， H_{\max} 为湿陷系数测点的最远距离， H_1 为滞后距（步长）。

常用的半变异函数模型有：球面函数模型、指数函数模型、高斯函数模型和线性函数模型等^[21]，具体表达如式(4)所示：

$$\gamma(x) = \begin{cases} c_0 + c_1 \left(\frac{3x}{2c_2} - \frac{x^3}{2c_2^3} \right), & 0 \leq x \leq c_2 \\ c_0 + c_1, & x > c_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\gamma(x) = c_0 + c_1 \left(1 - e^{-\frac{x}{c_2}} \right)$$

$$\gamma(x) = c_0 + c_1 \left(1 - e^{-\frac{x^2}{c_2^2}} \right)$$

$$\gamma(x) = c_0 + c_1 \left(\frac{x}{c_2} \right)$$

式中： c_0 为块金值； c_1 为偏基台值（拱高）； $c_0 + c_1$ 为基台值； c_2 为变差距离（变程）； x 为样本点间的距离。

通过半方差分析确定湿陷系数彼此之间的依赖性，表明计算指标采用不同半变异函数建模，具有块金效应^[22]。平方和误差 SSErr 与回归系数 R^2 提供了拟合的精确度量，SSErr 较低， R^2 较高表示更好的拟合。用球状模型、指数模型、高斯模型和线性模型分别计算湿陷系数，通过不断改变滞后距 H_1 ，计算出湿陷系数的最优球状模型、指数模型、高斯模型和线性模型。不同的函数模型在最优步长下的拟合曲线如图3所示。

四种模型的最优拟合函数及其相关性系数如表2所列。

1.4.2 计算权重系数

在获得最优步长的半变异函数模型之后，分别计算插值点与样本点之间的半变异函数值以及样本点之间的半变异函数值，将两者代入克里金方程组即式(2)便可求得权重系数 λ_i 以及拉格朗日系数 μ 。进而通过式(1)计算得到插值点的湿陷系数。

将克里金方程组写成矩阵形式：

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{L}^{-1} \cdot \mathbf{M} \quad (5)$$

式中： $\boldsymbol{\lambda}$ 、 \mathbf{L} 、 \mathbf{M} 的表达式为：

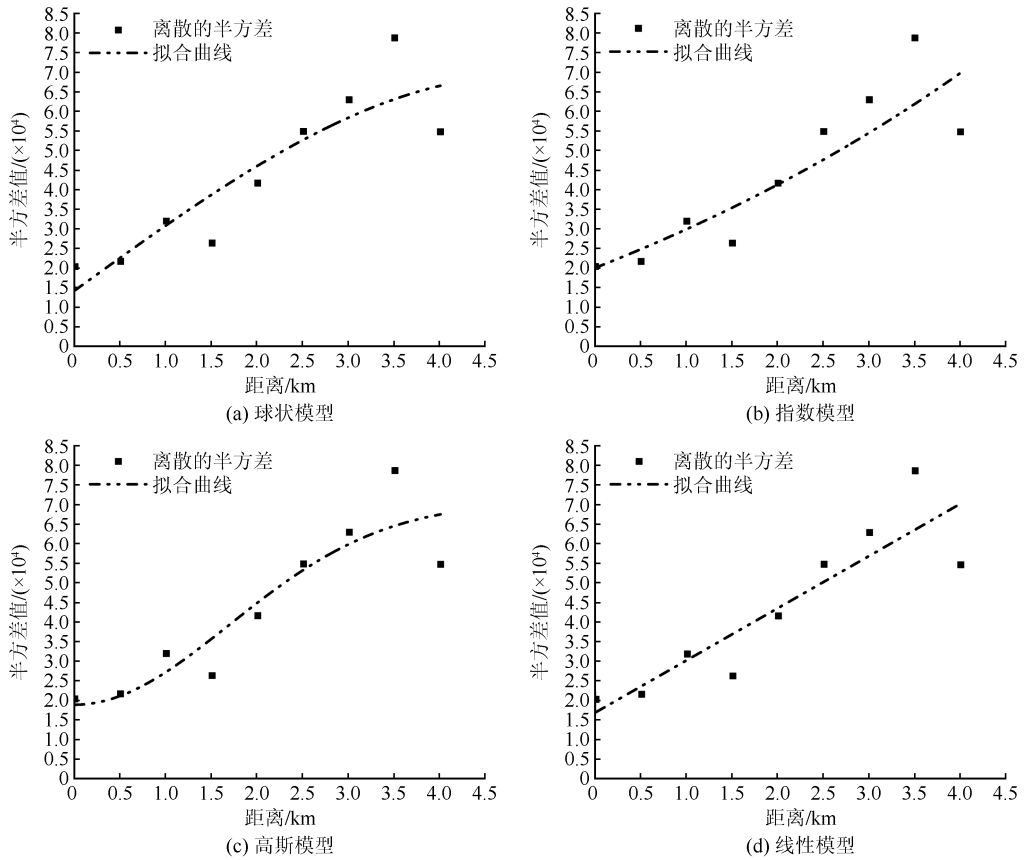


图 3 半变异函数模型拟合结果

Fig.3 Fitting results of semivariogram model

表 2 模型最优拟合函数表达式

Table 2 Expression of optimal fitting function of the model

模型	最优拟合函数表达式	相关性系数 R^2
球状模型	$\gamma(x) = \begin{cases} 0.000\ 141 + 0.000\ 161 \times \left(\frac{3x}{2 \times 69.86} - \frac{x^3}{2 \times 69.86^3} \right), & 0 \leq x \leq 69.86 \\ 0.000\ 141 + 0.000\ 161, & x > 69.86 \end{cases}$	0.812 8
指数模型	$\gamma(x) = -0.000\ 42 + 0.001\ 05 \times (1 - e^{-\frac{x}{6\ 854.04}})$	0.780 1
高斯模型	$\gamma(x) = 0.000\ 188 + 0.000\ 519 \times (1 - e^{-\frac{x^2}{2\ 401.59^3}})$	0.929 5
线性模型	$\gamma(x) = 0.000\ 169 + 0.000\ 007\ 26 \times \left(\frac{x}{54.51} \right)$	0.800 7

$$\lambda = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \cdots \quad \lambda_n \quad \mu]^T$$

$$L = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & 1 \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nm} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M = [\gamma(x_1, x) \quad \gamma(x_2, x) \quad \cdots \quad \gamma(x_n, x) \quad 1]^T$$

1.4.3 交叉验证选取最优半变异函数模型

采用交叉验证来检验各模型质量,交叉验证会移除样本中一个测点,因此可利用剩下的测点计算出移除点的估算值,重复该操作直至获得所有测点

的估算值。这样可以用估算值和测量值计算出评估半变异函数模型质量的相关指标,以确定最优半变异函数模型。

评估模型质量的指标包括:平均误差 ME、均方根误差 RMSE、标准化均方根误差 NRMSE 和平均标准误差 ASE。计算公式分别如式(6)~(9)所示。以上四种指标误差越小、平均标准误差与均方根误差越接近,说明半变异函数模型的质量越好^[23]。

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n [Z(S_1) - Z(S_2)]}{n} \tag{6}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z(S_1) - Z(S_2)]^2}{n}} \quad (7)$$

$$NRME = \frac{RMSE}{Z(S_{\max}) - Z(S_{\min})} \quad (8)$$

$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta^2}{n}} \quad (9)$$

式中： $Z(S_1)$ 为变换后的湿陷系数实测值； $Z(S_2)$ 为

插值估算值； $Z(S_{\max})$ 为变换后的湿陷系数实测值的最大值； $Z(S_{\min})$ 为变换后的湿陷系数实测值的最小值； n 为测量样本数； δ 为样本标准差。

在球状模型、指数模型、高斯模型和线性模型中分别计算出湿陷系数的误差，结果如表3所列。

根据表3中各误差指标可得：球面函数模型、指数函数模型和线性函数模型的均方根误差和平均标准误差相对较大，而高斯函数模型则表现出最佳的拟合效果。具体来说，高斯函数模型的平均标准误

表3 各种模型误差指标 ($\times 10^{-3}$)

Table 3 Error index of each model ($\times 10^{-3}$)

模型	平均误差 ME	均方根误差 RMSE	标准化均方根 误差 NRME	平均标准误差 ASE
球状模型	2.10	1.06	35.60	1.72
指数模型	3.00	1.57	52.40	1.92
高斯模型	0.72	0.30	11.25	1.57
线性模型	4.00	1.88	62.80	1.75

差与均方根误差差值最小，并且其均方根误差相对于其他函数模型而言最小。因此，选择高斯函数模型作为最优半变异函数模型。

最优半变异函数模型：

$$\gamma(x) = 0.000188 + 0.000519 \times (1 - e^{-\frac{x^2}{2 \cdot 401.59^3}}) \quad (10)$$

1.5 预测模型数据插值

利用最优半变异函数模型进行湿陷系数的插值计算，并将其与收集的黄土湿陷系数实测值进行对比验证。由于篇幅所限，本文以①号钻孔为例，计算其湿陷系数，并通过拟合度验证该方法的正确性。具体结果列于表4。其中拟合度 F 为插值结果与实测值的比值：

$$F = \frac{Z(X_0)}{Z(X_i)} \times 100\% \quad (11)$$

将①号钻孔共22个测点湿陷系数的插值数据与实测数据进行对比，结果如图4所示。大部分测点的湿陷系数值拟合度在85%~115%之间，误差控制在±15%以内，拟合精度约85%，仅钻孔的个别测点拟合度为70%，初步分析为测试结果本身误差的影响；目前常用的黄土湿陷系数预测方法的误差在15%左右^[24-25]，故以相对误差15%以内作为湿陷系数插值计算的精度，由此可说明该方法应用于湿陷系数的插值具有一定的适用性及准确性。

然后，对全域通过MATLAB计算得到权重系数矩阵 λ ，代入式(1)，得到并绘出间隔一定距离的湿陷系数等值线图，如图5所示。

表4 ①号钻孔湿陷系数估算值及拟合度

Table 4 Estimated value and fitting degree of collapsibility coefficient of No. 1 borehole

①号钻孔取样 深度/m	实测湿陷 系数数值	插值湿陷 系数结果	拟合度 F /%
1.5	0.033	0.031 0	94
3	0.029	0.030 5	105
4.5	0.028	0.031 5	113
6	0.037	0.035 0	95
7.5	0.045	0.040 0	89
9	0.041	0.040 5	99
10.5	0.05	0.045 0	90
12	0.044	0.047 0	107
13.5	0.037	0.040 0	108
15	0.03	0.034 0	113
16.5	0.028	0.030 0	107
18	0.023	0.025 0	109
19.5	0.02	0.021 5	108
21	0.018	0.020 0	111
22.5	0.017	0.019 0	112
24	0.014	0.013 0	93
25.5	0.013	0.011 0	85
27	0.009	0.008 0	89
28.5	0.006 5	0.007 0	108
30	0.007	0.006 5	93
31.5	0.008	0.005 7	71
33	0.005 6	0.005 0	89

同理可得黄土的自重湿陷系数等值线图，如图6所示。

2 结果与分析

2.1 湿陷系数的工程应用

2.1.1 湿陷等级的判定

湿陷性黄土的湿陷等级，应根据自重湿陷量 Δ_{zs}

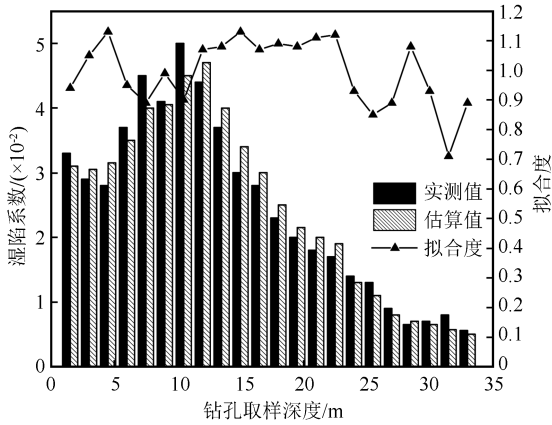


图 4 数据对比及拟合度

Fig.4 Data comparison and fitting degree

和湿陷量 Δ_s ,按表 5 判定。自重湿陷量是土样在上覆土层饱和自重压力作用下进行浸水饱和试验后计算得到的,不仅与该层土自重湿陷系数有关,还与地区土质修正系数有关;湿陷量是在规定压力下进行浸水饱和试验、计算得到的,不仅与土层湿陷系数有关,还与基底地基土的受力状态以及地区等因素的修正系数有关。因此,两者的试验上覆压力、修正系数计算公式不同,之间不存在直接的大小关系。自重湿陷量 Δ_{zs} 和湿陷量 Δ_s 的计算如式(12)、(13)所示。

$$\Delta_{zs} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \quad (12)$$

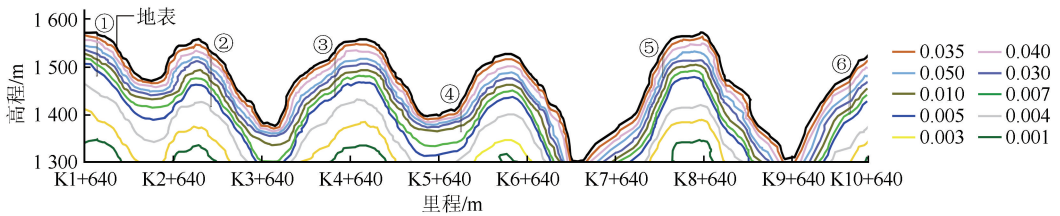


图 5 湿陷系数等值线图

Fig.5 Collapsibility coefficient contour map

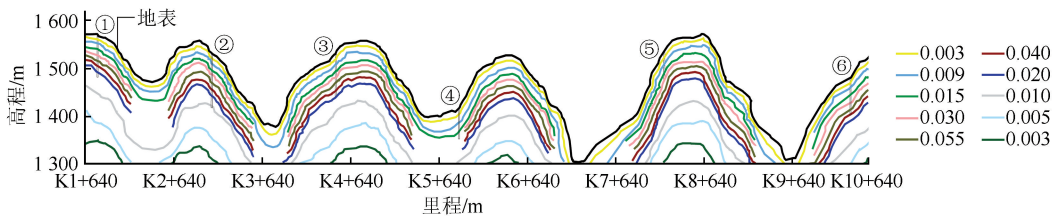


图 6 自重湿陷系数等值线图

Fig.6 Contour map of self-weight collapsibility coefficient

表 5 湿陷等级判断表

Table 5 Judgment table of collapsibility grade

场地湿陷类型	非自重湿陷性场地		自重湿陷性场地	
	$\Delta_{zs} \leq 70$	$70 < \Delta_{zs} \leq 350$	$\Delta_{zs} > 350$	
$50 < \Delta_s \leq 100$	I (轻微)	I (轻微)	II (中等)	
$100 < \Delta_s \leq 300$		II (中等)		
$300 < \Delta_s \leq 700$	II (中等)	II (中等)或 III (严重)	III (严重)	
$\Delta_s > 700$	II (中等)	III (严重)	IV (很严重)	

式中: Δ_{zs} 为自重湿陷量的计算值(mm); δ_{zsi} 为第 i 层土的自重湿陷系数; h_i 为第 i 层土的厚度(mm); β_0 为因地区土质而异的修正系数,本文取 1.2。

$$\Delta_s = \sum_{i=1}^n \alpha \beta \delta_{si} h_i \quad (13)$$

式中: Δ_s 为湿陷量的计算值(mm); δ_{si} 为第 i 层土的湿陷系数; β 为考虑基底下地基土的受力状态及地区等因素的修正系数; α 为不同深度地基土浸水机率系数,按地区经验取值。

2.1.2 湿陷临界深度的确定

当 $\delta_s > 0.015$ 时,应定为湿陷性黄土;当 $\delta_s < 0.015$ 时,应定为非湿陷性黄土。因此可以依据湿陷系数等于 0.015 所对应的深度来判定黄土的湿陷临界深度,本文称为“0.015”判定法,进而为准确掌握具有较大厚度的湿陷性黄土地基的处理深度以及剩余湿陷量控制提供资料。以①、②号钻孔为例,将其 $\delta_s = 0.015$ 及以下的深度作为湿陷临界深度,如图 7 所示。

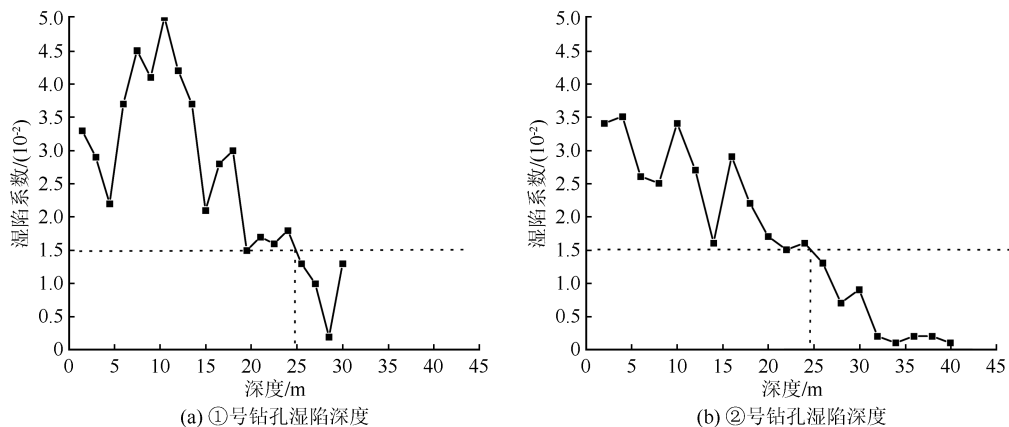


图7 湿陷深度示意图

Fig.7 Collapsibility depth diagram

消除黄土湿陷性的地基处理方法包括垫层法^[26]、强夯法^[27]、挤密法^[28]和预浸水法^[29]。这些方法可分别用于处理1~3 m、3~12 m、5~15 m和6 m以上的湿陷性黄土地基厚度。由于每种方法所能处理的湿陷地基深度不同,因此使用湿陷系数得到湿陷深度并为地基处理方法的确定提供了重要依

据,有利于节约时间以及经济成本。利用克里金插值法求得的湿陷系数和湿陷系数等值线图对全域的湿陷临界深度进行求解,结果如图8所示。

由图8可知,湿陷临界深度的变化相对于地表的坡度变化较缓,且河沟谷区的湿陷深度(3~8 m)明显小于丘陵区的湿陷深度(15~25 m)。

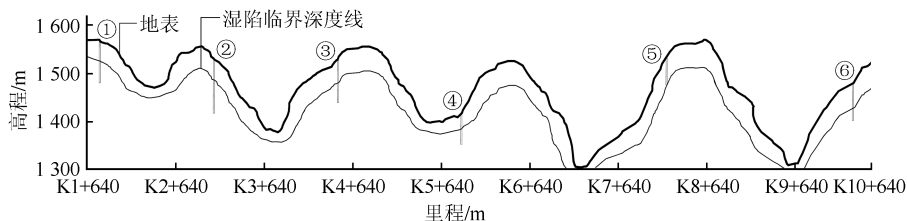


图8 全域湿陷临界深度示意图

Fig.8 Schematic diagram of critical collapsibility depth in the study area

2.2 湿陷系数的分布规律

2.2.1 湿陷系数分布与土体自重应力的关系

由黄土湿陷系数插值预测结果及等值线图可得:随着深度的增加,黄土的湿陷系数先增大后减小;而土的自重应力与深度关系为正相关,故随着土的自重应力的增加,黄土湿陷系数先增大后减小。当土的自重应力增加到一定数值时,湿陷系数达到最大值,然后随土的自重应力的增加开始逐渐减小,直至小于0.015。

当取样深度较小,即自重应力较小时,黄土的微观结构没有发生明显的变化,仍然存在大量大孔隙,但孔隙所占面积有所减少,湿陷系数在此阶段增大。当取样深度逐渐增大,即自重应力逐渐增大时,试样微观结构明显变得密实,大、中孔隙明显减少,骨架颗粒的排列以镶嵌排列为,湿陷系数也开始逐渐减小。这是由于在低自重应力下,黄土内部颗粒间的连接力还可以维持自身结构的稳定性,但在此阶

段由于含水率的小幅增加,使土颗粒表面水膜发生变化,在土的自重应力作用时阻碍颗粒间相对滑动的阻力稍微变小,使湿陷系数增大。随着自重应力的不断变大,颗粒间的连接力已不能抑制土体的变形,颗粒间的连接结构被破坏,结构也由稳定转化为亚稳结构。在水和土的自重应力共同作用下,骨架颗粒发生滑动或旋转,不断向孔隙处挤密。原有的骨架颗粒排列被打乱,重新排列,颗粒趋于定向性排列,骨架颗粒间的接触关系由点接触为主变成点面接触和面面接触共存,土体也趋于密实,湿陷系数也逐渐减小。

在工程建设中,应计算出合适的地基土的自重应力,减少湿陷对工程的影响。

2.2.2 湿陷系数分布与地貌特征的关系

黄土的湿陷系数在不同地形地貌中存在差异,因此需要针对项目所处的不同地貌类型进行湿陷系数分析。山岭区:上部主要分布马兰黄土,该层黄土

具有孔隙发育、结构疏松的特点,湿陷系数大部分在0.02~0.056之间,湿陷性中等~强烈,湿陷深度15~25 m;部分土样具有自重湿陷性,自重湿陷系数大部分在0.015~0.055之间。综合判断湿陷性等级应以Ⅱ(中等)~Ⅲ(严重)自重湿陷场地为主,局部Ⅳ级(很严重)。沟谷区:为新近堆积黄土状土,主要分布在河流一级阶地及冲沟底部;湿陷系数大部分在0.015~0.045之间,湿陷性轻微~中等,湿陷深度3~8 m,不具自重湿陷,属于非自重湿陷性场地,湿陷等级为Ⅰ级(轻微)。在钻孔取样深度相同时,河沟谷区的含水量大于黄土丘陵区的含水量,由湿陷系数分布与土体自重应力的关系可知:在较低的自重压力时,河沟谷区的湿陷系数大于黄土丘陵区的湿陷系数,随着自重应力逐渐增大,黄土丘陵区的湿陷系数逐渐大于河沟谷区的湿陷系数。

3 结论

(1) 基于克里金插值法建立黄土湿陷系数插值预测模型。利用少量的湿陷系数实测数据,对湿陷系数进行插值,湿陷系数插值与实测值的拟合度较高,拟合误差在±15%以内,拟合度约85%。表明此插值计算方法可行、插值结果合理,能满足工程对于黄土湿陷性的精度和实际应用需求。

(2) 利用湿陷系数等值线图,取湿陷系数为0.015对应的深度为黄土湿陷临界深度(“0.015”判定法),湿陷临界深度的变化相对于地表的坡度变化较缓,且河沟谷区的湿陷深度(3~8 m)明显小于丘陵区的湿陷深度(15~25 m)。可以为提前选择合适的湿陷性黄土地基处理方法提供重要依据,节约成本。

(3) 自地表向下,随着深度的增加,黄土的湿陷系数呈现先增大后减小的趋势。与此同时,土的自重应力与深度之间存在正相关关系。因此,在土的自重应力不断增加的情况下,黄土湿陷系数也会逐渐增大,并在达到一定数值时达到最大值。随着土的自重应力继续增加,湿陷系数开始逐渐减小,直至黄土湿陷性消失。

(4) 黄土丘陵区的湿陷系数相比于河沟谷区,在较低的自重压力时,后者大于前者;随着自重应力逐渐增大,前者逐渐大于后者,且黄土丘陵区的自重湿陷系数大部分在0.015~0.055之间,而河沟谷区的自重湿陷系数小于0.015(不具有自重湿陷性)。

(5) 基于克里金法建立湿陷系数预测模型,对地质纵剖面的湿陷系数进行插值预测,实现了二维

空间上的精准预测。下一步需要进一步将其推广到三维空间中进行研究,使更多的已知测点加权得到预测点的湿陷系数,以提高预测结果的准确度。

参考文献(References)

- [1] LI P, DONG Y X, LIU L P. Discussion of some new trends in mechanics and engineering research of collapsible loess[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 525(1): 012084.
- [2] 史宝东, 梁庆国, 赵涛, 等. 场地黄土扰动前后的湿陷性与其物性指标的关系[J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 977-982, 988. SHI Baodong, LIANG Qingguo, ZHAO Tao, et al. Relationship between collapsibility and physical properties of loess before and after disturbance[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 977-982, 988.
- [3] 任文博, 胡少磊, 刘云龙, 等. 黄土湿陷系数与其物性指标的定量关系分析[J]. 地震工程学报, 2023, 45(2): 311-318. REN Wenbo, HU Shaolei, LIU Yunlong, et al. Quantitative relationship between the collapsibility coefficients and physical indexes of loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 311-318.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 土工实验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Geotechnical test method standard: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [5] 邵生俊, 杨春鸣, 马秀婷, 等. 黄土的独立物性指标及其与湿陷性参数的相关性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 27-34. SHAO Shengjun, YANG Chunming, MA Xiuting, et al. Independent physical properties of loess and their correlation with collapsible parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Suppl02): 27-34.
- [6] 马闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 黄土湿陷性与土性指标的关系及其预测模型[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 120-128. MA Yan, WANG Jiading, PENG Shujun, et al. Relationships between physical-mechanical parameters and collapsibility of loess soil and its prediction model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 120-128.
- [7] 井彦林, 仵彦卿, 林杜军, 等. 基于最小二乘支持向量机的黄土湿陷性预测挖掘[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1865-1870. JING Yanlin, WU Yanqing, LIN Dujun, et al. Prediction of loess collapsibility by using data mining based on least squares support vector machines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1865-1870.
- [8] 张国伟, 谢潇. 黄土的工程性质空间变异规律研究[J]. 土工基础, 2022, 36(6): 917-920. ZHANG Guowei, XIE Xiao. Spatial variation relations of engineering properties of loess[J]. Soil Engineering and Foundation, 2022, 36(6): 917-920.

- [9] 付伟.宝兰客运专线湿陷性黄土分布规律及地基处理技术分析[J].铁道标准设计,2014,58(11):15-19.
FU Wei.Distribution rules of collapsible loess and analysis on foundation treatment technology on Baoji—Lanzhou passenger dedicated line[J].Railway Standard Design,2014,58(11):15-19.
- [10] 吴响.煤矿瓦斯场分布演化规律及其时空建模研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
WU Xiang.Research on the distribution and evolution law of coal mine gas field and its space-time modeling[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology,2014.
- [11] 李沫.基于 GIS 的乌鲁木齐土壤氡变化规律浅析[J].环境科学与管理,2011,36(4):104-106,131.
LI Mo.Analysis of soil radon variation of Urumqi based on GIS[J].Environmental Science and Management,2011,36(4):104-106,131.
- [12] 邱云翔,张潇潇,刘国东.粒子群算法优化 BP 在降雨空间插值中的应用[J].长江科学院院报,2017,34(12):28-32.
QIU Yunxiang,ZHANG Xiaoxiao,LIU Guodong.Application of BP neural network optimized by particle swarm optimization to rainfall spatial interpolation[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2017,34(12):28-32.
- [13] 程家昌,黄鹏,熊昌盛,等.基于 BP 神经网络的土壤养分空间插值[J].广东农业科学,2013,40(7):64-67,71.
CHENG Jiachang,HUANG Peng,XIONG Changsheng,et al.Spatial prediction of soil nutrition based on BP neural network[J].Guangdong Agricultural Sciences,2013,40(7):64-67,71.
- [14] KEBAILI BARGAOUI Z,CHEBBI A.Comparison of two Kriging interpolation methods applied to spatiotemporal rainfall[J].Journal of Hydrology,2009,365(1-2):56-73.
- [15] AGYEMAN P C,KINGSLEY J,KEBONYE N M,et al.Prediction of the concentration of antimony in agricultural soil using data fusion,terrain attributes combined with regression Kriging[J].Environmental Pollution,2023,316:120697.
- [16] 杨雪峰,胡长青.普通克里金法在海水温度剖面插值中的应用[J].声学技术,2015,34(5):385-388.
YANG Xuefeng,HU Changqing.Application of ordinary Kriging method in the interpolation for seawater temperature profile[J].Technical Acoustics,2015,34(5):385-388.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.湿陷性黄土地区建筑标准:GB 50025—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China,State Administration for Market Regulation.Standard for building construction in collapsible loess regions:GB 50025—2018[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2019.
- [18] 李晓军,张振远.基于指示和普通克里金的不连续地层厚度估计方法[J].岩土力学,2014,35(10):2881-2887.
LI Xiaojun,ZHANG Zhenyuan.A combined indicator-ordinary Kriging method for estimating thicknesses of discontinuous geological strata[J].Rock and Soil Mechanics,2014,35(10):2881-2887.
- [19] 刘轩,王俊峰,周斌,等.基于普通克里金法的同位素测氡探火数据优化处理[J].太原理工大学学报,2022,53(4):690-696.
LIU Xuan,WANG Junfeng,ZHOU Bin,et al.Data optimization based on ordinary Kriging for radon detection to identify spontaneous combustion areas[J].Journal of Taiyuan University of Technology,2022,53(4):690-696.
- [20] BODRO D K,SARTONO B,SADIK K.A simulation study with log, Box-Cox, and dual-power transformation on handling curvilinear relationship in small area estimation[J].IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2019,299(1):012029.
- [21] 张涛.变异函数模型的对比优选研究[D].南京:南京大学,2017.
ZHANG Tao.Comparative optimization of variogram model[D].Nanjing:Nanjing University,2017.
- [22] 高帮飞,李红兵,张书琛,等.块金效应地质意义及其对品位估值影响[J].黄金,2021,42(11):6-13.
GAO Bangfei,LI Hongbing,ZHANG Shuchen,et al.Geological interpretation of nugget effect and its constraint on grade estimation[J].Gold,2021,42(11):6-13.
- [23] 李俊晓,李朝奎,殷智慧.基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J].测绘通报,2013(9):87-90,97.
LI Junxiao,LI Chaokui,YIN Zhihui.ArcGIS based Kriging interpolation method and its application[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2013(9):87-90,97.
- [24] 任文博,刘云龙,李佳佳,等.基于离散型二项式系数组合模型的黄土湿陷性评估[J].科学技术与工程,2022,22(12):4945-4953.
REN Wenbo,LIU Yunlong,LI Jiajia,et al.Evaluation of loess collapsibility based on discrete binomial coefficient combination model[J].Science Technology and Engineering,2022,22(12):4945-4953.
- [25] 朱凤基,南静静,魏颖琪,等.黄土湿陷系数影响因素的相关性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(2):128-133.
ZHU Fengji,NAN Jingjing,WEI Yingqi,et al.Mathematical statistical analysis on factors affecting collapsible coefficient of loess[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2019,30(2):128-133.
- [26] 田予东,赵伟,宋义平,等.安哥拉 Quelo 砂湿陷性地区垫层法地基处理及基础设计研究[J].建筑结构,2016,46(24):66-69.
TIAN Yudong,ZHAO Wei,SONG Yiping,et al.Research on replacement cushion foundation treatment and foundation design of collapsible Quelo sand area in Angola[J].Building Structure,2016,46(24):66-69.
- [27] 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 Xiaolin,WANG Wei,LIU Baojian.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.