

# 典型内陆平原冲积地区公路软基土体工程特性研究

刘晓立, 张友恒, 付旭, 周慧文

(北华航天工业学院建筑工程系, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**近年来,我国基础设施建设的快速发展,高等级道路建设需要不断扩大。然而,由于道路地质构造的特殊性,道路路基往往有深厚的软土层,由于地基沉降或过度沉降,道路地基处理不当可能影响道路的正常使用寿命。依据河北省东部内陆平原区的数千个钻孔资料,结合工程地质情况,以廊坊地区软土为研究对象,按照一元线性回归方法及多元线性回归方法进行统计分析,对软土物理力学性质指标进行了变异性及相关性分析,得到了所有土性指标的变化范围,建立了个指标相互之间的经验回归方程及相关系数。研究结果填补了廊坊地区的空白,对今后廊坊地区的公路建设方案比选、沉降控制及造价分析具有实际的指导意义。

**关键词:**廊坊软土;物理力学指标;变异性分析;一元线性回归方法;多元线性回归方法

**中图分类号:** TB115

**文献标志码:** A

## 引言

我国土地资源丰富,在地形、自然环境、气候变化都有很大的区别,建筑工程中对软土地区基础稳定、强度等各个方面提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。软土地基是一项难以规避的问题,其直接影响着地基的承受强度和公路的使用安全,处理不当易引发路面的沉降、变形和扭曲等问题<sup>[2]</sup>。河北省地域地质条件较为复杂,类型成因较多,以行政区域、沉积环境和地层条件为主要依据,河北省地域可划分为四个工程地质分区,其中廊坊可划归为东部内陆平原区。本区以廊坊、沧州、任丘、衡水为主要范围,由永定河、大清河、子牙河、南运河、宜惠河等内陆河流为主形成的冲积、湖积平原,称为“黑龙港流域”。这些地区的地下水位一般较浅,地基强度较低,给公路建设带来很多困难<sup>[2]</sup>。以往,有关廊坊地区软土工程性质的系统研究一直是空白,因此,研究其土体的工程特性对未来公路设计方案比选、施工及运维期沉降控制及

造价分析具有较大的现实意义<sup>[3]</sup>。

## 1 河北省廊坊地区软基土工参数试验数据分析

### 1.1 软土物理力学指标的相关性分析方法

本文统计所用的大量数据来源于河北省各地区公路路基数千个钻孔资料。

物理、力学指标的物理意义各不相同,但它们之间都具有内在的密切相关关系,其中一部分还可能近似地用数学表达式表示<sup>[4]</sup>。在函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$ 方程式中, $x_i$ 被称之为随机变量(自变量), $y$ 称之为随机未知变量(因变量),进行土体物理力学性质指标的相关性分析<sup>[5]</sup>,最重要的是合理选用随机变量和回归方程的类型。可采用一元线性回归方法及多元线性回归方法<sup>[6]</sup>。

### 1.2 软土物理力学指标的概率分布分析方法

#### (1) 初步确定参数的概率分布模型

子样分布刻画子样中数据的分布情况,通常有3种形

式:频数分布和频率分布、经验分布函数和直方图。直方图能直观地反映子样的分布规律<sup>[7-8]</sup>,设所收集到某参数的个数为  $N$ ,其最大、最小值分别为  $a$ 、 $b$ ,则可划分区间:

$$M = 1 + 3.31 \lg N \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{a + b}{M} \quad (2)$$

式中: $M$  为划分区间的个数; $\Delta$  为区间长度。

确定区间长度后,子样值进行分组,如果子样值  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$  分成  $l$  组,可作分点  $a_0, a_1, \dots, a_l$  (各组组距可以不相等),把各组取为左开右闭区间,因而各组为  $(a_0, a_1], (a_1, a_2], \dots, (a_{l-1}, a_l]$ ,子样值落在各组中的频数为  $m_1, m_2, \dots, m_i$ ,于是频率为:

$$f_i = \frac{m_i}{N} \quad (3)$$

直方图由一些矩形构成,各矩形以组为底边,高取为相应组的频率除以组距。直方图中每一矩形面积等于相应组的频率。观察直方图的形状,就可以初步确定参数的概率分布模型。

(2) 土工参数概率分布模型

以廊坊软土含水率为例说明土性指标概率模型的建立。已知收集到的廊坊软土含水率的样本  $N = 4391$ ,  $a = 47.4, b = 2.0$  代入式(1)和式(2)计算可得: $M = 7.943, \Delta = 6.2$ ,将分布区间划分为7个。由  $(a - b) / 7 = 6.48$ ,可将含水率区间长度间隔设为6.48,由式(3)计算每个区间内的频数和频率(表1),廊坊软土含水率直方图如图1所示。

(3) 概率分布模型的假设检验

利用拟合优度检验的有限比较法,可以实现土工参数概率模型的优化拟合。有限比较法的选用原则为<sup>[9]</sup>:

表1 含水率统计分析

含水率 W/%	频数 ml	频率 fl
2 ~ 8.48	121	0.03
8.48 ~ 14.96	89	0.02
14.96 ~ 21.44	609	0.14
21.44 ~ 27.92	2356	0.54
27.92 ~ 34.4	1012	0.23
34.4 ~ 40.88	103	0.02
40.88 ~ 47.36	101	0.02

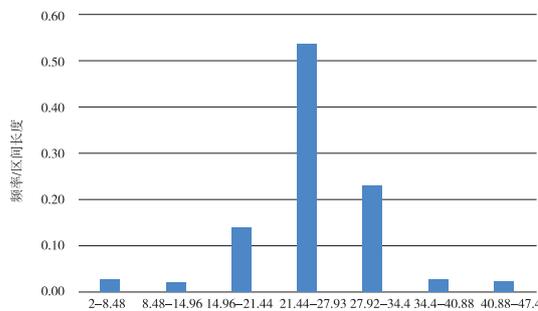


图1 廊坊软土含水率直方图

①当样本数  $n > 150$  时,可由传统的检验方法唯一地确定最优概型,而不必考虑比较问题。

②当样本数  $n > 850$  时,可用 K-S 比较法、C-M 比较法、A-D 比较法确定最优概型<sup>[10]</sup>。

③当样本数  $50 < n < 150$  时,可用  $\chi^2$  比较法确定最优概型。本文中软土土性指标样本数为  $50 \sim 150$ ,采用  $\chi^2$  比较法确定最优概型<sup>[11]</sup>。

2 河北省廊坊地区软基土体物理力学指标变异性分析

基于所收集的土体的物理力学指标,按一元线性回归方法及多元线性回归方法进行统计分析,分析结果见表2。

表2 廊坊软土土工参数统计分析成果表

序号	指标	样本容量 N	最大值	最小值	分布区间	平均值 $\mu$	标准差 $\sigma$	变异系数 $\delta$
1	含水率 W/%	4391	47.4	2.00	47.4 ~ 2.0	26.158	7.27	0.277 926 447
2	比重 G	4419	2.99	1.70	2.99 ~ 1.70	2.706	0.0866	0.032 002 956
3	湿密度 $r/g/cm^3$	4222	2.4	1.26	2.4 ~ 1.26	1.935	0.109	0.056 330 749
4	干密度 $rd/g/cm^3$	4230	1.88	1.05	1.88 ~ 1.05	1.536	0.1468	0.095 572 917
5	饱和度 $Sr/\%$	4147	102.1	24.30	102.1 ~ 24.3	90.679	9.105	0.100 409 136
6	孔隙比/e	4228	1.665	0.06	1.665 ~ 0.06	0.7648	0.1991	0.260 329 498
7	液限/WL(76 g)	4421	99	14.00	99 ~ 14	33.8636	9.2283	0.272 513 85
8	塑限/WP(76 g)	4425	47.1	0.10	47.1 ~ 0.1	20.1829	5.1009	0.252 733 75
9	塑性指数/IP(76 g)	4301	79.5	0.10	79.5 ~ 0.1	14.1932	8.1356	0.573 204 07
10	液性指数/IL(76 g)	4290	11.33	-20.33	11.33 ~ -20.33	0.4014	0.9998	2.490 782 262
15	压缩系数 $a_{1-2}/MPa^{-1}$	3013	17.7	0.02	17.7 ~ 0.02	0.96	1.968	2.05
16	压缩模量 $E_{s1-2}/MPa$	3001	88	0.09	88 ~ 0.09	6.673	7.057	1.057 545 332

由表2可知:

(1)由分析结果可得变异系数由小到大的指标排列次序为:比重、饱和度、湿密度、干密度、塑限(76 g)、塑限(100 g)、液限(76 g)、液限(100 g)、孔隙比、含水率、塑性指数(76 g)、塑性指数(100 g)、压缩模量、压缩系数、液性指数(76 g)、液性指数(100 g)。其中,比重的变异系数最小,液性指数的变异系数最大。

(2)天然含水率的变化范围在112.4%~12.0%之间,均值为30.428%;液限(76 g)的变化范围为86.7%~18.9%,均值为33.9%,塑限(76 g)的变化范围为67.7%~9.20%,均值为21.4%。塑性指数(76 g)变化范围为43%~7.10%,均值为12.6%;液性指数(76 g)变化范围为2.71%~-0.53%,均值为0.71%。液限(100 g)的变化范围为127.0%~22.30%,均值为39.7%,塑限(100 g)的变化范围为67.7%~9.20%,均值为21.4%。塑性指数(100 g)变化范围为63.0%~10.0%,均值为18.3%;液性指数(100 g)变化范围为1.87%~-0.37%,均值为0.49%。

(3)压缩系数的变化范围在2.08~0.07 MPa<sup>-1</sup>之间,均值为0.42 MPa<sup>-1</sup>;压缩模量的变化范围为22.36~1.19 MPa,均值为5.09 MPa。湿密度的变化范围2.30~1.39 g/cm<sup>3</sup>,均值为1.92 g/cm<sup>3</sup>,干密度的变化范围2.01~0.68 g/cm<sup>3</sup>,均值为1.48 g/cm<sup>3</sup>。孔隙比的变化范围为2.34~0.34,均值为0.85。饱和度的变化范围为108.1%~63.9%,均值为96.2%。比重的变化范围为2.75~2.35,均值为2.708。

### 3 河北省廊坊地区软基土的物理力学指标相关性分析

在岩土工程中,土体的各项物理、力学参数并不是独立存在的,物理性质指标反映了土体的自然状态,力学性质指标反映土体的力学性质,它们相互之间具有一定的关联性<sup>[12]</sup>。研究各项物理、力学指标之间的相关性,建立相互之间的经验回归方程,具有重要的工程实用价值<sup>[13-14]</sup>。

廊坊地区压缩系数和含水量相关性的散点图及回归拟合曲线如图2所示,两者之间存在正相关关系,拟和曲线方程为:

$$a_{1-2} = \frac{W - 21.65321}{20.46748}$$

相关系数R<sup>2</sup>为0.12205。

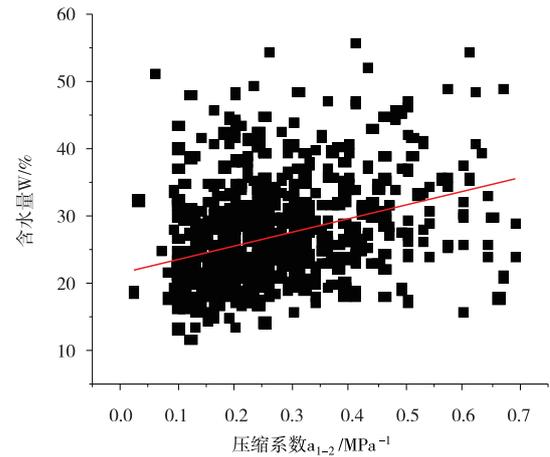


图2 压缩系数与含水量相关性关系图

廊坊地区压缩系数和比重相关性的散点图及回归拟合曲线如图3所示,两者之间具有较差负相关性,拟和曲线方程为:

$$a_{1-2} = \frac{2.70395 - G}{0.1182}$$

相关系数R<sup>2</sup>为0.01076。

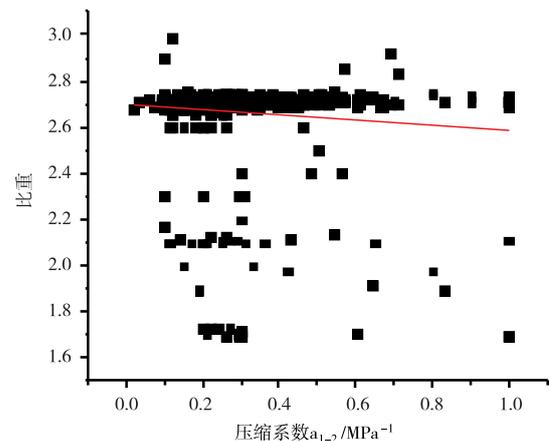


图3 压缩系数与比重相关性关系图

廊坊地区压缩系数和湿密度相关性的散点图及回归拟合曲线如图4所示,两者之间具有较差的负相关性,拟和曲线方程为:

$$a_{1-2} = \frac{2.0236 - r}{0.29982}$$

相关系数R<sup>2</sup>为0.16538。

廊坊地区压缩系数和干密度相关性的散点图及回归拟合曲线如图5所示,两者之间具有较好的负相关性,拟和曲线方程为:

$$a_{1-2} = \frac{1.64362 - r_d}{0.3909}$$

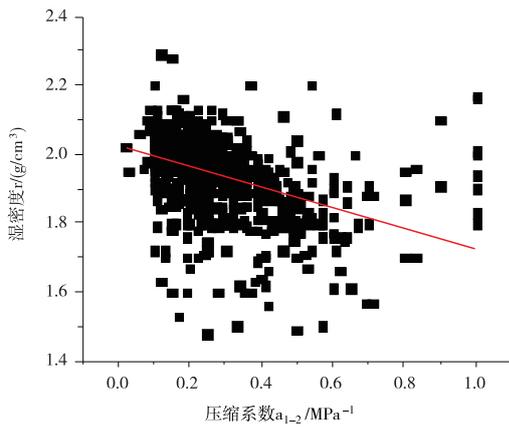


图4 压缩系数与湿密度相关性关系图

相关系数  $R^2$  为 0.19154。

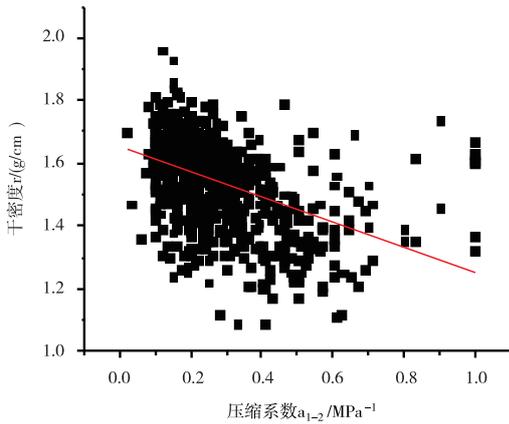


图5 压缩系数与干密度相关性关系图

廊坊地区压缩系数和孔隙比相关性的散点图及回归拟合曲线如图6所示,两者之间具有较差的正相关性,拟和曲线方程为:

$$a_{1-2} = \frac{e - 0.58911}{0.37774}$$

相关系数  $R^2$  为 0.07371。

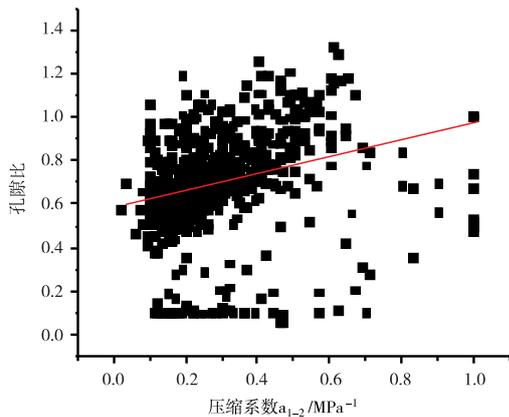


图6 压缩系数与孔隙比相关性关系图

廊坊地区压缩系数和饱和度相关性的散点图及回归拟合曲线如图7所示,两者之间具有较差的正相关性,拟和曲线方程为:

$$a_{1-2} = \frac{S_r - 81.83726}{0.08755}$$

相关系数  $R^2$  为 -0.00113。

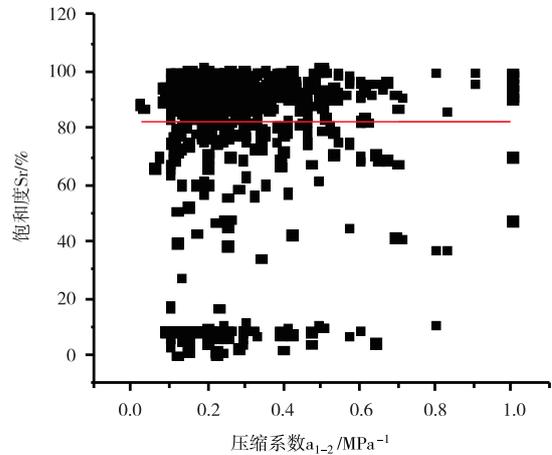


图7 压缩系数与饱和度相关性关系图

廊坊地区压缩系数和液限(76 g)相关性的散点图及回归拟合曲线如图8所示,两者之间具有较差的正相关性,拟和曲线方程为:

$$a_{1-2} = \frac{W_L - 33.04859}{15.32318}$$

相关系数  $R^2$  为 0.0344。

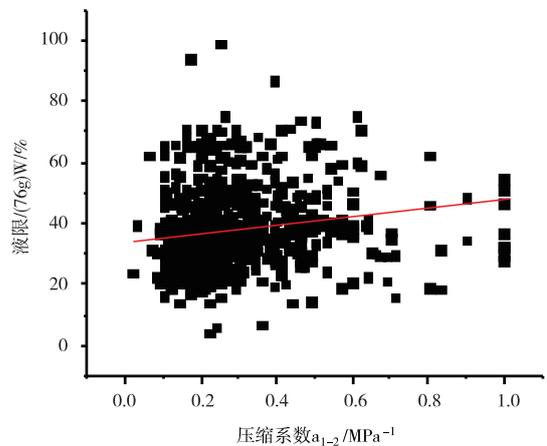


图8 压缩系数与液限(76 g)相关性关系图

廊坊地区压缩系数和塑限(76 g)相关性的散点图及回归拟合曲线如图9所示,两者之间具有较差的正相关性,拟和曲线方程为:

$$a_{1-2} = \frac{W_p - 18025048}{7.95638}$$

相关系数  $R^2$  为 0.02387。

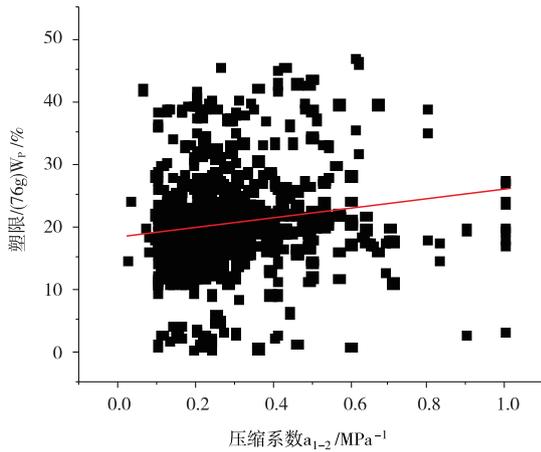


图 9 压缩系数与塑限 (76 g) 相关性关系图

廊坊地区压缩系数和塑性指数 (76 g) 相关性的散点图及回归拟合曲线如图 10 所示,两者之间具有较差的正相关性,拟和曲线方程为:

$$a_{1-2} = \frac{I_p - 14.79811}{7.3668}$$

相关系数  $R^2$  为 0.01304。

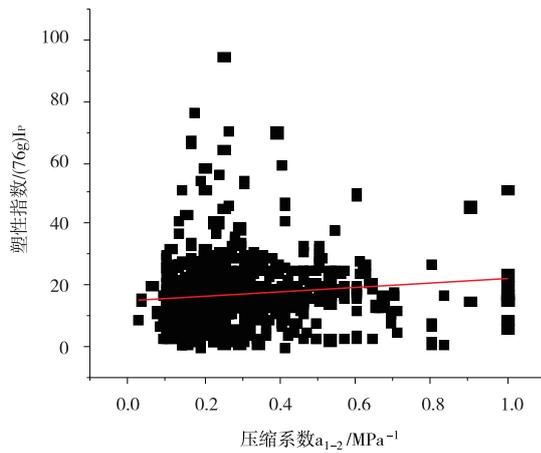


图 10 压缩系数与塑性指数 (76 g) 相关性关系图

廊坊地区压缩系数和液性指数 (76 g) 相关性的散点图及回归拟合曲线如图 11 所示<sup>[15]</sup>,两者之间具有较差的正相关性,拟和曲线方程为:

$$a_{1-2} = \frac{I_L - 0.47891}{0.42834}$$

相关系数  $R^2$  为 0.00206。

#### 4 结 论

(1) 根据廊坊地区软土的物理力学指标统计,可以得出:廊坊地区软土的比重、湿密度、干密度的变异系数

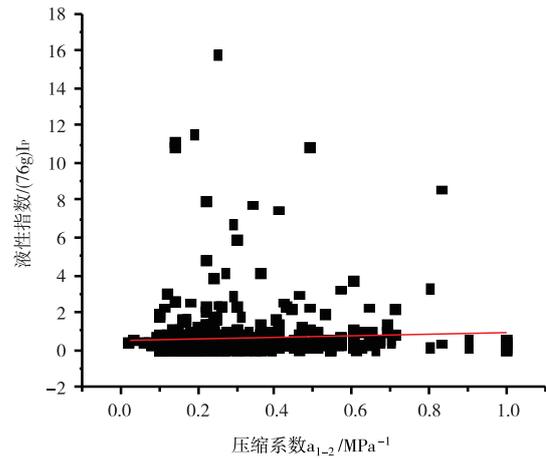


图 11 压缩系数与液性指数 (76 g) 相关性关系图

小于 0.1,可以视为常量,一般能够满足工程设计精度的要求。

(2) 廊坊地区软土的压缩系数与其他各物理力学性质指标的相关性见表 3。

表 3 物理力学指标及相关性

物理力学指标	相关性
含水量	正相关性
比重	较差负相关性
湿密度	负相关性
干密度	较好的负相关性
孔隙比	差的正相关性
饱和度	较差的正相关性
塑性指数 (76 g)	较差的正相关性
液限 (76 g)	较差的正相关性
塑限 (76 g)	较差的正相关性
液性指数 (76 g)	较差的正相关性

廊坊地区土性的相关性结论,对廊坊地区公路路基施工及运维期间的沉降观测具有重要的借鉴作用。

#### 参 考 文 献:

- [1] 赵孝斌.建筑工程中软土地基处理技术的应用分析探究[J].工程建设与设计,2015,5(2):65-67.
- [2] 张廷军.关于公路施工中软土地基处理技术的探讨[J].低碳世界,2014(7):193-194.
- [3] 戢英.软土地基处理技术及在公路施工中的应用[D].天津:天津大学,2006.
- [4] 刘用海,朱向荣,李金柱.宁波地区典型软粘土土性指标概率特性研究[J].科技通报,2008,24(5):672-677.
- [5] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [6] 陈延猛,夏银飞.软土物理力学指标的统计关系研究

- [J].国外建材科技,2007,28(2):106-108.
- [7] 阙金声,陈剑平,石丙飞.广州大学城软土的工程地质性质统计分析[J].煤田地质与勘探,2007,35(1):49-52.
- [8] 夏银飞,吴代华,文建华.珠江三角洲软土物理力学指标统计分析[J].公路交通科技,2008,25(1):47-50.
- [9] 马海鹏.上海地区土体抗剪强度与静力触探比贯入阻力相关关系研究[J].岩土力学,2014,35(2):536-542.
- [10] 苏卫卫.上海软黏土抗剪强度指标概率分布类型研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(2):1695-1699.
- [11] 陈立宏.土体抗剪强度指标的概率分布类型研究[J].岩土力学,2005,26(1):37-40.
- [12] ALMEIDA M,LIMA B,RICCIO M,et al.Stone Columns Field Test: Monitoring Data and Numerical Analyses[J].Geotechnical Engineering,2014,45(1):103-112.
- [13] ALI F H.Engineering properties of improved fibrous peat[J].Scientific Research & Essays,2010,5(2):154-169.
- [14] 田小甫.北京地区粘性土物理力学指标统计分析[J].资源与产业,2007,9(4):80-84.
- [15] CHING J Y.Modeling piezocone cone penetration (CPTU) parameters of clays as a mu[J].Canadian Geotechnical Journal,2014,51(1):77-91.

## Embankment on Soft Soil Engineering Properties Typical Inland Alluvial Plains Region

LIU Xiaoli, ZHANG Youheng, FU Xu, ZHOU Huiwen

(Department of Civil Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

**Abstract:** In recent years, with the rapid development of infrastructure construction, high-grade road construction needs is expanded continuously in China. However, due to the particularity of the road geological structure, a deep soft soil layer is often existed in the roadbed; and due to foundation settlement or excessive settlement, the normal use of the road function may be affected by improper handling of road foundation. Based on the thousands of borehole data in the inland plain area of eastern Hebei Province and the engineering geological conditions, the soft soil of Langfang area is used as the research object. According to the unitary linear regression method and the multiple linear regression method, the variability and correlation analysis of the soft soil physical mechanics were carried out, then the variation range of all the earth indexes was obtained, and the empirical regression equation and correlation coefficient between the indexes were established. The results of the study fill the gaps in the Langfang area, and have practical significance for the future comparison of road construction schemes, settlement control and cost analysis in Langfang area.

**Key words:** Langfang soft soil; physical mechanical parameters; variability analysis; unitary linear regression method; multiple linear regression method