

标贯试验在石家庄湿陷性黄土承载力评价中的应用

吕素芬¹, 李洋洋²

[1. 石家庄市城市建设投资控股集团有限公司, 河北 石家庄 050000; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 由于湿陷性黄土在施工过程中极易引发地面塌陷、不均匀沉降、裂缝等现象, 因此, 关于湿陷性黄土地基承载力的测定, 具有切实可行的工程实际指导意义。以石家庄市某快速连通工程勘察数据为基础, 系统阐述了标准贯入试验的技术原理, 重点分析了其在湿陷性黄土地层承载力评价中的应用效果, 并通过158组试验数据推导出了适合于石家庄地区湿陷性黄土标贯击数 N 与地基承载力特征值 f_{ak} 的经验关系。研究成果可为石家庄地区湿陷性黄土区地基承载力的评定提供技术参考。

关键词: 石家庄; 湿陷性黄土; 标准贯入试验; 地基承载力评价

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0336-04

Application of Standard Penetration Test in Bearing Capacity Assessment of Collapsible Loess in Shijiazhuang

LYU Sufen¹, LI Yangyang²

[1. Shijiazhuang City Construction Investment Holding Group Co., Ltd., 050000 Shijiazhuang, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Due to the fact that collapsible loess is highly prone to ground collapse, uneven settlement, cracks and other phenomena during the construction process, the determination of the bearing capacity of collapsible loess foundation has practical and feasible guiding significance for engineering. Based on the survey data of a rapid connection project in Shijiazhuang City, the technical principles of the standard penetration test (SPT) are systematically expounded, and the focus is on analyzing its application effectiveness in evaluating the bearing capacity of collapsible loess strata. Through 158 sets of experimental data, an empirical relationship between the SPT blow count (N) and the characteristic value (f_{ak}) of foundation bearing capacity suitable for collapsible loess in the Shijiazhuang area is derived. The research achievement can provide a technical reference for assessing the foundation bearing capacity in collapsible loess area in the Shijiazhuang region.

Keywords: Shijiazhuang; collapsible loess; standard penetration test (SPT); assessment of foundation bearing capacity

0 引言

标准贯入试验(SPT)作为岩土工程勘察中应用最广泛的原位测试方法之一, 自20世纪40年代问世以来, 已成为评价土层力学性质的关键技术手段。标准贯入试验按照《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)进行, 该试验是用质量为63.5 kg的穿心锤, 从76 cm高度自由下落, 将标准贯入器在钻孔底部预先打入15 cm后, 继续贯入30 cm并记录锤击次数(N), 以此判定土的力学特性^[1], 并可用于地基承载力的评定。与其他原位测试方法相比, 标准贯入试验在

仪器配置简便性、测试流程规范性以及结果可靠性等方面展现出显著优势。

湿陷性黄土不同于一般土层, 具有明显的大孔隙特征, 且垂直节理发育良好, 这些自身的特点决定了湿陷性黄土具有特殊的物理力学性质^[2]。因此, 利用标准贯入试验对湿陷性黄土层地基承载力的评价有待进一步研究。

石家庄地区地质地貌单元属于太行山隆起与华北平原接壤地带, 黄土的堆积过程主要受太行山东麓地质环境的影响, 主要分布于市区西北部。该区域黄土的基本单元体为颗粒状, 以碎屑颗粒为主要组成, 且具有肉眼可见的较大孔隙, 孔隙比为0.7左右。

湿陷性黄土在施工过程中极易引发地面塌陷、

收稿日期: 2025-07-01

作者简介: 吕素芬(1991—), 女, 硕士, 工程师, 从事市政工程设计工作。

不均匀沉降、裂缝等现象,对于市政工程施工、地下管线的开挖和支护、挡土墙施工等均有影响。因此,研究湿陷性黄土地基承载力的测定方法,对工程实际具有切实可行的指导意义。

1 标准贯入试验在国内外的的发展

1.1 国外标准贯入试验发展现状

标准贯入试验在国外的发展历程丰富,具体情况见表1^[3-6]。

表 1 标准贯入试验在国外发展情况		
时间	国家	研究发展经历
1921 年	瑞典	标准贯入试验正式提出并开始应用
1930 年	荷兰	开始采用修正的贯入试验,考虑土壤类型和扰动影响
1950 年	美国	美国石油学会(API)提出标准贯入试验的规范,用于土层分类和工程评价
1970 年	日本	日本工业标准(JIS)引入标准贯入试验,用于土层评价和地基处理设计
2000 年	国际	日本工业标准(JIS)引入标准贯入试验,用于土层评价和地基处理设计

1.2 国内标准贯入试验发展现状

标准贯入试验在国内的发展情况见表2^[7-11]。

表 2 标准贯入试验在国内发展情况	
时间	研究发展经历
1953 年	南京水利实验所首次引进 SPT,应用于淮河治理工程
1978 年	SPT 被列为法定测试方法
1990 年	明确 SPT 在桩基设计与液化判别中的细则
2010 年至今	开发 SPT-BIM 实时计算模块(如 PKPM 平台),优化桩基设计与施工验证

2 地基承载力的确定

地基承载力可通过其他原位测试、载荷试验或理论计算公式推导,结合工程实践数据等多种技术手段进行综合分析和确定^[12-15]。

按《河北省建筑地基承载力技术规程(试行)》(DB 13(J)/T48—2005)^[16],地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)可按式计算:

$$f_{ak}=a+b \cdot N_{修} \tag{1}$$

$$N_{修}=\alpha \cdot N \tag{2}$$

式中: $N_{修}$ 为修正标准贯入试验锤击数(标贯击数),次; a 、 b 均为地区经验系数; N 为实测标贯击数,次; α 为杆长修正系数(见表3)。

标准贯入试验是在钻探过程中进行的,相较于平板载荷试验和静力触探试验,其适用范围更为广泛^[17]。天然地基中标贯击数与地基承载力之间的量

表 3 杆长修正系数 α	
杆长/m	α
≤ 3	1.00
6	0.92
9	0.86
12	0.81
15	0.77

化关系,在工程实践中常通过规范经验表格及勘察单位建立的土类专属经验公式来实现。考虑到湿陷性黄土有着区别于其他土体的物理力学性质,按照传统经验公式来确定其地基承载力,结果常常偏差较大。近年来,对于湿陷性黄土地基承载力的试验分析研究不断深入,各地总结出的经验公式较多,适用的条件也各不相同。因此通过系统研究石家庄地区湿陷性黄土的工程特性,结合标准贯入试验数据与地基承载力的相关性分析,建立适用于石家庄区域的标贯击数与地基承载力量化关系式,对实际工程具有较大参考价值。表4列出了部分经验公式。

表 4 各地区地基承载力经验公式			
单位	f_{ak} 经验公式	土类	注释
冶金部武汉勘察公司	$4.9+35.8N$	第四纪冲、洪积黏土、粉质黏土、粉土	$3 \leq N \leq 23$
江苏省水利勘察总院	$23.3N$	黏性土、粉土	N 不作杆长修正
湖北勘察院	$80+20.2N$	黏性土、粉土	
铁道部第三勘察设计院	$72+9.4N^{1.2}$	粉土	

利用室内土工试验得到土的物理力学指标,并以此确定地基土的承载力是一个传统、简便的经验方法^[16]。因此,基于土工试验结果来确定地基承载力,再与相同位置的标贯击数对应,利用回归分析统计手段,将标贯击数与地基承载力进行关联。这种关系的建立不仅可实现从标贯击数到地基承载力确定的快速转换,还可为工程实践中优化勘察方案、降低测试成本提供科学依据。实际应用表明,该经验关系能够有效反映湿陷性黄土在天然状态下的力学特性,对提升区域地基基础设计的可靠性具有显著意义。

3 标准贯入试验在石家庄地区的应用

3.1 石家庄地区工程地质情况

石家庄地区地质地貌单元属于太行山隆起与华北平原接壤地带,西部为太行山地,东部为华北平原,地势西高东低,地形一般平缓,区域地质构造为新华夏构造体系。石家庄市上部覆盖着第四纪全

新世地层,系由滹沱河冲洪积而成,上部地层主要为黄土状粉质黏土、粉土;下部由粉质黏土、粉土及砂类土粉砂、细砂、中砂及粗砂组成^[18]。

3.2 工程实例

该工程位于河北省石家庄市,属于快速联通工程,需新建连续高架桥,且桥下铺设地面辅路。主要地层均为第四系冲洪积地层,依据其埋藏、分布、工程地质特征进行分层,其中部分地基土层的工程地质特征分述如下:

- (1)素填土:以建筑垃圾为主,含混凝土、水泥路面、石子等,偶见砂,局部为素填土,以粉土为主,含少量砖块,平均厚度3.2 m。
- (2)黄土状粉土:黄褐色,土质不均,含有铁锰氧化物、姜石,具有砂感,可见孔隙;层厚0.4~5.1 m。
- (3)粉细砂:本层砂质不纯,夹粉土薄层,厚0.6~10 m不等。

该工程在此次勘察中对各地基土层均进行了标准贯入试验,置于第2层黄土状粉土地层的测点数为477次。按照试验要求,需通过冲击钻钻进至指定深度,完成清孔操作后,获取原状土试样,随后开展标准贯入试验。这种操作方式能够较好地维持地基土层的原始结构,保障试验质量,让测试数据具备较高的可信度^[19]。

基于现场获取的标准贯入试验数据,将其中的异常值予以剔除后,该土层修正后的标贯击数 $\bar{N}$ 为7.7(见表5)。现场土工试验显示,土层含水量 $\bar{w}$ 为15.8%,天然孔隙比 $\bar{e}$ 为0.651;根据探井中采集的土试样所进行的室内湿陷性试验成果,拟建场地湿陷系数介于0.033~0.081,湿陷程度为中等—强烈,湿陷起始压力为34~119 kPa。湿陷系数呈现出自现地面向下,随深度加深而减小的趋势;湿陷起始压力则与之相反,自现地面向下,随深度的增加而不断增大。

表5 黄土状粉土物理力学指标统计表			
值别	天然含水量 $W/\%$	天然孔隙比 e	修正标贯击数/次
最大值	27.20	0.978	9.50
最小值	8.50	0.402	5.70
平均值	15.80	0.651	7.70
标准差	5.07	0.100	0.86
异系数	0.32	0.160	0.11
统计个数	158	158	477

根据现场158个标贯击数以及相应土工试验换算而来的承载力汇总,可得出标贯击数与地基承载力之间的关系曲线^[2],如图1所示。

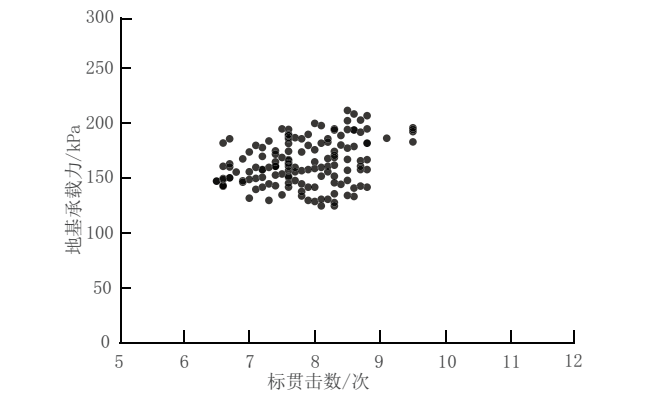


图1 标贯击数与地基承载力关系图

假设标贯击数与地基承载力之间存在线性回归关系,其公式为 $y=a+bx$;采用最小二乘法来确定系数 a 、 b ,其计算式为^[3]:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \tag{3}$$
$$a = \bar{y} - b\bar{x} \tag{4}$$

式中: a 为截距; b 为回归系数; x_i 为第 i 个修正标贯击数,次; y_i 为第 i 个地基承载力特征值,kPa; $\bar{x}$ 为修正标贯击数平均值,次; $\bar{y}$ 为地基承载力特征值平均值,kPa。

基于上述相关性分析结果,可建立标贯击数与地基承载力 f_{ak} 的回归公式为:

$$f_{ak}=9.2N_{修}+92.5 \tag{5}$$

3.3 回归公式分析

采用表4所列经验公式,代入本次标贯击数修正值,可算出该层土的地基承载力 f_{ak} ,如表6所示。

表6 各经验公式计算结果		
单位	f_{ak} 经验公式	f_{ak}/kPa
冶金部武汉勘察公司	$4.9+35.8N$	280.56
江苏省水利勘察总院	$23.3 N$	179.41
湖北勘察院	$80+20.2N$	235.54
铁道路第三勘察设计院	$72+9.4N^{1.2}$	180.87

根据前面推导出来的回归公式(5)计算的该层土地基承载力为:

$$f_{ak}=9.2\times7.7+92.5=163.34 \text{ kPa} \tag{6}$$

根据工程场区所做的8组旁压试验,并按临塑法计算的地基承载力为153 kPa,而由平板载荷试验获得的地基承载力为145 kPa,与式(6)所得的163.34 kPa相差不大。由此说明回归公式(5)是适用的,而根据表4所列各地区经验公式得出的地基承载力值偏差均较大,不适合石家庄地区。

为验证回归公式(5)的适用性,鉴于文中工程实例位于石家庄市西部,特选取该市东、南、北3个

区域的市政工程项目进行验证。具体试验数据如下:东部项目湿陷系数为0.001~0.022,标贯击数 $\bar{N}$ 为7.7,实测地基承载力为159 kPa,按回归公式(5)计算为163.3 kPa,误差为2.7%;南部项目湿陷系数为0.019,标贯击数 $\bar{N}$ 为6.5,实测地基承载力为147.5 kPa,按回归公式(5)计算为152.3 kPa,误差为3.4%;北部项目黄土湿陷系数为0.001~0.006,标贯击数 $\bar{N}$ 为8.6,实测地基承载力为179 kPa,按回归公式(5)计算为171.6 kPa,误差为4.1%。因3个区域的误差均较小,故回归公式(5)在石家庄全域适用,可为工程设计与施工提供理论依据。

4 结 语

(1)湿陷性黄土具有自身特性,其物理力学性质不同于其他土体。因此国内外标贯击数与地基承载力的经验关系并不适用,需建立专属经验公式。

(2)通过大量工程试验数据推导出适用于石家庄地区湿陷性黄土地区标贯击数与地基承载力的回归公式为: $f_{ak}=9.2N+92.5$ 。该研究成果可为石家庄地区湿陷性黄土区地基承载力的评定提供技术参考。

(3)不同地区湿陷性黄土在沉积条件、年代等方面具有差异,因此不同地区的湿陷性黄土具有独特性,在应用标贯击数与地基承载力的经验关系时应综合各种勘察手段,来提高标准贯入试验的精确性。

参考文献:

[1] 姜彬. 沈阳地区砂土层两种原位测试方法研究[J]. 煤炭工程, 2012(10): 156-157.

[2] 李俊青. 风积黄土地区标贯试验确定承载力回归公式初探[J]. 岩土工程, 2014(3): 114-117.

[3] 秦国华. 钻孔工艺对标准贯入试验影响的研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2005.

[4] 徐光大, 徐光黎, 李俊杰. 日本标准贯入试验方法及其N值在岩土工程中的应用[J]. 安全与环境工程, 2011(7): 33-38.

[5] 卢坤玉, 李兆焱, 袁晓铭, 等. 国内外标准贯入测试影响因素研究[J]. 地震研究, 2020(7): 582-591.

[6] 王学武, 赵琼, 汪洋. 基于标准贯入及土工试验的伊拉克哈法亚油田地基承载力回归分析[J]. 勘察科学技术, 2016(6): 40-42.

[7] 张智敏. 黄土地区标准贯入试验研究[J]. 工程前沿, 2024(2): 71-72.

[8] 李金云, 吴全雷, 王邵臻, 等. 强夯法处治湿陷性黄土路基的数值分析与应用[J]. 兰州理工大学学报, 2017(2): 111-115.

[9] 肖泽忠, 刘之葵, 贺行良, 等. 标准贯入试验在桂林市红粘土地基承载力确定中的应用[J]. 矿产与地质, 2018(1): 164-170.

[10] 孙志军. 标贯试验在膨胀土承载力分析中的应用研究[J]. 邢台职业技术学院学报, 2013(6): 61-63.

[11] 卢玉南. 广西红粘土地基承载力与标准贯入试验锤击数的经验关系[J]. 工程勘察, 2010(1): 95-100.

[12] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].

[13] 尹科, 李广平, 李浩年, 等. 标准贯入试验在强夯地基承载力评价中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2008(6): 18-19.

[14] 庞旭卿, 郭亚宇, 杨继军. 黄土地基承载力检测方法研究[J]. 山西建筑, 2008(2): 146-146.

[15] 刘怡林, 付胜利, 魏方震. 湿陷性黄土地区公路地基承载力的评价[J]. 武汉大学学报, 2008(6): 87-90.

[16] DB 13(J)/T48—2005 河北省建筑地基承载力技术规程(试行)[S].

[17] 刘利星. 湿陷性黄土渗透特性及地基承载力测试分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.

[18] 安进英, 郝翠祥. 石家庄市湿陷性黄土状土土质分析[J]. 河北地质学院学报, 1994(4): 395-399.

[19] 王建权. 南水北调中线工程石家庄段黄土状土湿陷性研究[J]. 水科学与工程技术, 2011(7): 71-72.

[20] 程力学模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11): 33-39.

[21] 唐阳明, 李咏安. 大跨度钢屋盖整体提升施工数值分析及控制研究[J]. 钢结构, 2018, 33(9): 105-110.

[22] 苏杭, 王静峰, 丁仕洪, 等. 基于云监测的大跨度空间异形曲面钢桁架结构多点不对称整体提升技术研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(8): 105-115.

[23] 常海东, 张小东, 苏铠, 等. 大跨度钢梁提升结合滑移安装技术[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊4): 1661-1664.

[24] 崔晓强, 郭彦林, 叶可明. 大跨度钢结构施工过程的结构分析方法研究[J]. 工程力学, 2006(5): 83-88.

[25] 郑江, 郝际平, 王宏, 等. 大跨屋盖多点整体提升过程的力学形体研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(1): 83-87.

[26] 王涛, 贾兴利, 潘永江, 等. 大跨度钢箱梁吊装施工过程数值模拟分析[J]. 建筑机械, 2024(12): 143-148.

[27] 贾兴利, 王涛, 范玉峰, 等. 大跨度钢结构箱梁吊装施工过程应力

[28] 监测分析[J]. 建筑机械, 2024(10): 98-105.

[29] 荣向波, 张胤. 大跨度变截面连续钢箱梁设计、施工及受力特性分析[J]. 建筑机械, 2025(4): 202-206.

[30] 北京城建集团. 钢结构工程施工工艺标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 2007.

[31] 黄雪松. 大跨度梁拱组合钢结构桥梁在市政道桥施工技术分析[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(15): 124-126.

[32] 许雪荣. 跨街大跨度钢箱梁吊装施工难点分析及解决方案[J]. 建筑技术开发, 2025, 52(6): 95-98.

[33] 吕晓鸿, 于海洋. 大跨径变截面钢箱梁施工技术[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(30): 181-184.

[34] 陈正新. 大跨度连续结构钢箱梁整跨架设施工技术研究[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(16): 28-30.

[35] 雷永社. 钢箱梁运输及安装施工工艺分析[J]. 新城建科技, 2024, 33(2): 122-124.

(上接第310页)