

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.129



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



湿陷性黄土地基中桩基负摩阻力计算新方法

赵敏¹, 曹卫平²

(1. 西安工业大学建筑工程学院, 西安 710021; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院; 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 西安 710055)

摘要: 负摩阻力对湿陷性黄土地基中桩基的承载变形性状具有重要影响, 现行桩基规范及黄土规范推荐的负摩阻力计算方法不能反映黄土桩基负摩阻力的实际性状。对近30年来在黄土地区开展的钢筋混凝土灌注桩现场浸水试验实测数据进行统计, 分析黄土浸水完成后桩身中性点深度、桩身最大负摩阻力深度及负摩阻力系数与桩长径比的关系, 通过线性拟合得到了中性点深度比、最大负摩阻力深度比及负摩阻力系数与桩长径比的经验表达式, 提出湿陷性黄土地基中桩基负摩阻力计算的新方法。新方法用三角形表示负摩阻力沿深度的分布, 能反映负摩阻力从桩顶向下先逐渐增大、达到最大值后随深度增加逐渐减小、最终在中性点处减小为零的分布特征。将提出的方法、桩基规范及黄土规范方法的计算结果与实测结果进行对比, 结果表明, 桩基规范预测的中性点深度比优于黄土规范, 黄土规范预测的最大下拉荷载优于桩基规范, 而用新方法计算的负摩阻力最接近实测结果。

关键词: 湿陷性黄土; 钢筋混凝土桩; 负摩阻力; 计算方法

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)02-0001-10

A new approach for calculating negative skin friction of piles in collapsible loess soils

ZHAO Min¹, CAO Weiping²

(1. School of Civil & Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, P. R. China;
2. School of Civil Engineering; Key Lab. of Geotechnical & Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: The negative skin friction (NSF) has important influence on the bearing and deformation behavior of piles in collapsible loess soils. The current calculating method of NSF recommended by the Standard for Building Construction in Collapsible Loess Regions (Standard I) and the Technical Code for Building Pile Foundations (Standard II) cannot reflect the actual behavior of the NSF. This paper conducted a statistical analysis on the field flooding test datum of reinforced concrete piles in the loess area of China during the past 30 years. The relationship between the depth of the neutral plane, the depth of the maximum NSF as well as the coefficient of NSF with the pile length diameter ratio was analyzed, and the empirical expressions of the three

收稿日期: 2022-04-20

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JM-006)

作者简介: 赵敏(1970-), 女, 教授, 主要从事岩土工程研究, E-mail: zhaominxait@163.com。

曹卫平(通信作者), 男, 教授, E-mail: caowp@xauat.edu.cn。

Received: 2022-04-20

Foundation item: Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No. 2019JM-006)

Author brief: ZHAO Min (1970-), professor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: zhaominxait@163.com.

CAO Weiping (corresponding author), professor, E-mail: caowp@xauat.edu.cn.

parameters above with the pile length diameter ratio were obtained linear fitting, then a new approach for calculating NSF of piles in loess soils was established. According to the proposed method, the distribution of the NSF along pile shaft is represented by a triangle, i. e., the NSF increases with the depth and reaches a maximum value at a certain depth, then decreases to zero at the neutral plane depth, which perfectly reflects the actual distribution characteristics of the NSF along pile shaft. The calculated NSF by using the new method presented herein, Standard I and Standard II were compared with the field test datum. The results show that the neutral plane depth ratio predicted by Standard II is better than that by Standard I, and the maximum drag load predicted by Standard I is better, while the NSF calculated by the new approach are in good agreement with the measured.

Keywords: collapsible loess soil; reinforced concrete piles; negative skin friction; calculating approach

钢筋混凝土桩基础承载力高、适用范围广^[1],能通过侧摩阻力及端阻力将荷载传递到深层承载力高的土层,容易满足地基承载力和沉降的要求^[2],因而在黄土地区得到了广泛的应用。湿陷性黄土浸水会产生湿陷变形,桩周土相对于桩产生向下的位移,桩身承受方向向下的摩阻力,即负摩阻力^[3]。负摩阻力的存在使桩承受了附加下拉荷载,下拉荷载一方面会使桩基产生附加沉降,还会使桩身轴力增大。Fellenius曾报道过由负摩阻力导致桩身材料发生强度破坏的案例^[4],因此,工程设计时应充分考虑负摩阻力对桩基承载变形性状造成的不利影响。

黄土桩基负摩阻力大小及分布与桩端土的类型、桩长径比等诸多因素有关,性状十分复杂。黄土湿陷是黄土在水的作用下天然结构破坏的过程,黄土湿陷变形随时间的发展变化还没有相应的理论计算方法。因此,还无法采用理论方法或数值方法对黄土桩基负摩阻力进行合理地分析。黄土具有特殊的结构,难以在室内小比例尺模型试验中重现黄土真实的天然结构,实践中很少采用室内模型试验研究黄土桩基负摩阻力。正是由于上述两方面的原因,现场浸水试验成为研究黄土桩基负摩阻力的主要方法,中国在西北地区通过现场浸水试验对黄土桩基负摩阻力开展了较多的研究^[5-25]。这些现场试验重点研究了中性点的深度位置、负摩阻力的分布特征及浸水对桩基承载性状的影响。黄土浸水诱发的负摩阻力使桩产生向下的位移,桩身轴力明显增大,大大降低了桩基的承载力。负摩阻力的大小与地质环境、桩长、地基土的黏聚力及黄土湿陷量有关,桩长径比等是影响中性点深度及负摩阻力大小的重要因素。这些现场试验一方面提供了一些宝贵的实测数据,另一方面使人们对黄土桩基负摩阻力的性状有了一定的认识,重要的是所有这些现场浸水试验也说明实测桩基负摩阻力沿深度分布形式与规范^[26-27]的规定有较大差异。目前还未见文献对这些实测数据进行统计分析,笔者对这

些实测数据进行了整理,分析了负摩阻力沿桩长的分布特征,并与桩基规范^[26]及黄土规范^[27]中桩基负摩阻力的计算方法进行比较,在此基础上建立黄土桩基负摩阻力计算的新方法。

1 传统桩基负摩阻力计算方法

1.1 α 法和 β 法

中性点深度、负摩阻力大小及分布形式是研究负摩阻力的3个关键问题。桩基负摩阻力计算方法总体上可分为两大类,即 α 法^[28]和 β 法^[29]。 α 法把负摩阻力 q_s^n 与桩侧土体的不排水抗剪强度 S_u 联系起来,即 $q_s^n = \alpha \cdot S_u$, α 为经验参数,因为 S_u 为土的总应力强度指标,因此 α 法也被称为总应力法,常用于计算饱和软土中桩基的负摩阻力。 β 法把负摩阻力与桩侧土体的竖向有效应力 σ'_v 联系起来,即 $q_s^n = \beta \cdot \sigma'_v$, β 为经验参数,因为用的是土的竖向有效应力,因此 β 法也被称为有效应力法。

无论 α 法还是 β 法都没有给出中性点深度的确定方法,而且这两种方法计算的负摩阻力沿深度总体上逐渐增大,这与负摩阻力沿深度先增大、然后逐渐减小、在中性点处减小为零的实际分布特征不符。

1.2 中国规范计算方法

黄土规范^[27]建议中性点深度可取自重湿陷性黄土层底面深度,但没有给出负摩阻力沿桩身自上而下如何分布,只是指出在无实测资料时,黄土桩基平均负摩阻力可采用表1中的数值。

中国桩基规范^[26]建议中性点深度应按桩周土层沉降与桩沉降相等的条件确定,也可根据桩端土的

表1 桩侧平均负摩阻力特征值
Table 1 Mean characteristic values of NSF of piles

自重湿陷量的计算值/mm	桩侧平均负摩阻力特征值/kPa	
	钻、挖孔灌注桩	打(压)入式预制桩
70~200	10	15
>200	15	20

类型按表 2 中的数值确定中性点深度,对于湿陷性黄土桩基,中性点深度可按表 2 中的数值放大 10% 取用。桩基规范^[26]推荐采用式(1)计算负摩阻力。

$$q_{si}^n = \zeta_{ni} \cdot \sum_{i=1}^n \gamma'_i \Delta z_i \quad (1)$$

式中: q_{si}^n 为第 i 层土负摩阻力; ζ_{ni} 为第 i 层土负摩阻力系数,可取 0.20~0.35; γ'_i 、 Δz_i 分别为桩周第 i 层土体的有效重度及厚度; n 为计算深度以上桩周土层数。

表 2 中性点深度比

Table 2 The neutral plane depth ratio

持力层性质	中性点深度比
黏性土、粉土	0.5~0.6
中密以上砂	0.7~0.8
砾石、卵石	0.9
基岩	1.0

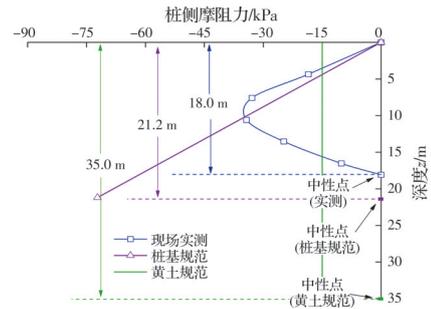
显然,中国桩基规范^[26]推荐的负摩阻力计算方法就是 β 法,因此,该方法继承了 β 法的优缺点,即按式(1)计算的负摩阻力反映了桩土界面摩擦的物理本质。随着深度增大,土层竖向有效应力逐渐增大,按式(1)计算得到的负摩阻力沿深度整体上分段逐渐线性增大,在中性点深度处负摩阻力达到最大值,这与负摩阻力沿深度先增大、然后逐渐减小、在中性点处减小为零的实际分布规律不符。

1.3 负摩阻力实测结果与中国规范计算结果的比较

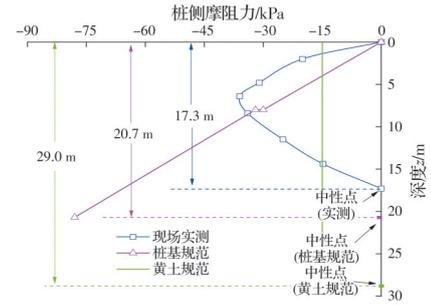
图 1 以宁夏固原^[31]、河南三门峡^[9]两个工程为例对比了现场实测负摩阻力与根据黄土规范^[27]、桩基规范^[26]计算的负摩阻力。可以看出,宁夏固原工程和河南三门峡工程桩基实测中性点深度分别为 18.0、17.3 m,按黄土规范^[27]的规定则中性点深度分别为 35.0、29.0 m,是实测值的 1.94、1.68 倍。按桩基规范^[26]的规定中性点深度分别为 21.2、20.7 m,是实测值的 1.18、1.20 倍。显然,根据这两个规范计算得到的中性点深度均大于实测值。

中性点以上桩身负摩阻力的合力即为下拉荷载。从图 1 可以发现,宁夏固原工程及河南三门峡工程桩基实际最大下拉荷载分别为 896、1 072 kN,根据桩基规范^[26]计算的最大下拉荷载分别为 1 924、2 028 kN,是实际值的 2.15、1.89 倍。根据黄土规范^[27]计算的最大下拉荷载分别为 1 319、1 093 kN,是实际值的 1.47、1.02 倍。显然黄土规范^[27]、桩基规范^[26]都高估了负摩阻力。

上述对比表明,根据桩基规范^[26]、黄土规范^[27]计算得到的负摩阻力与实测结果存在较大的差异,具体表现在负摩阻力沿深度的分布形式、中性点深度及负摩阻力大小与实际情况均有较大的差异。



(a) 宁夏固原工程



(b) 河南三门峡工程

图 1 负摩阻力实测值与规范计算值的比较

Fig. 1 Comparison between the measured NSF and the calculated NSF

2 计算黄土桩基负摩阻力的新方法

2.1 建立计算黄土桩基负摩阻力新方法的思路

针对桩基规范^[26]、黄土规范^[27]关于黄土桩基负摩阻力计算存在的问题,提出计算负摩阻力的新方法,其思路如图 2 所示。

黄土桩基现场浸水试验结果表明,对于不同工程,实际负摩阻力沿深度的分布模式是相同的,即从桩顶开始,随着深度增加,负摩阻力逐渐增大,达到最大值后,随深度增加负摩阻力逐渐减小为零,如图 2 中的曲线 ABC 所示, B 点为最大负摩阻力所在深度位置, C 点为中性点。用折线 ADC 代替曲线 ABC 来表示负摩阻力沿深度的分布, D 点与 B 点深度相同,这样能保证中性点深度及最大负摩阻力深度与实际相同,这样能保证中性点深度及最大负摩阻力深度与实际相同。为使折线 ADC 表示的负摩阻力尽量接近实际情况,即折线 ADC 与曲线 ABC 尽可能重合,通过调整 D 点的横坐标使三角形 ADC 的面积与曲线多边形 ABCA 的面积相等来实现。这样就可以实现用折线 ADC 表示的负摩阻力分布形式与实际情况比较接近,中性点及最大负摩阻力的深度与实际相同,尽管最大负摩阻力的大小与实际有差异,但保证了下拉荷载与实际相同。

用该方法计算负摩阻力时,需要确定 3 个参数,分别为中性点深度 l_n (即图 2 中 C 点的纵坐标)、最大负摩阻力深度 l_m (即 D 点的纵坐标)及最大负摩阻力 (即 D 点的横坐标)。

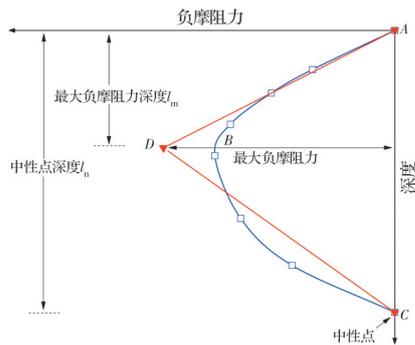


图 2 黄土桩基负摩阻力计算新方法示意图

Fig. 2 Diagram of the new approach of NSF for piles in loess soils

2.2 参数的确定

桩基负摩阻力本质上是桩土界面的摩擦力,是桩土相对位移及桩土界面相互剪切的结果^[30]。影响桩基负摩阻力性状的因素很多,如桩端土的类型、桩长径比、桩土界面性状、桩土模量比等,但在建立负摩阻力计算方法时不可能把这些因素全部考虑进去。如,桩基规范^[26]仅考虑了桩端土类型的影响,而黄土规范^[27]仅考虑了自重湿陷量对平均负摩阻力的影响。中国西北地区黄土的竖向分布自上至下一般为 Q_4 、 Q_3 、 Q_2 黄土^[31-32]。 Q_4 黄土属新近堆积黄土,湿陷强烈。 Q_3 黄土孔隙结构发育,湿陷较强烈。 Q_2 黄土结构密实,一般不具湿陷性。设计黄土中的桩基时,一般都会把桩端放在 Q_2 黄土或承载力较高的土层中,因此,在对现场试验结果统计分析时,采用了桩端持力层为 Q_2 黄土的工程。相关理论研究表明^[33-34],长径比对桩沉降影响较大,而负摩阻力是桩与桩侧土相对位移的结果,因此,在对工程实测数据分析时主要考虑了桩长径比、中性点深度、最大负摩阻力深度及最大负摩阻力大小的影响。笔者收集的黄土桩基负摩阻力现场浸水试验结果见表 3,表 3 中实测负摩阻力系数是根据实测最大负摩阻力及土层参数按照式(1)反算得到的。

2.2.1 中性点深度比

确定中性点深度的根本目的在于确定桩身有多长的区段分布有负摩阻力,通常用中性点深度比表示中性点深度。黄土规范^[27]定义中性点深度比为中性点深度与黄土湿陷下限深度之比,是将中性点深度与湿陷性黄土层下限深度联系起来,不如将中性点深度与桩长联系起来更直接。工程实践中是通过现场取样、运输、制样,再进行室内环刀样浸水压缩试验获得湿陷系数来判断湿陷下限的。经过现场取样、运输、制样等过程,土样的湿陷性有时难以完全反映现场土层的湿陷性,因此,湿陷下限的判断存在一定的误差。另外,软土桩基中性点深度

比定义为中性点深度与桩长之比。因此,将中性点深度比定义为中性点深度 l_n 与桩长 l 之比。

对表 3 中现场实测数据进行统计,给出了中性点深度比随桩长径比的变化情况,如图 3 所示。

从图 3 可以看出,中性点深度比随长径比的变化虽有一定的离散,但整体上仍表现出了随桩长径比增大中性点深度比逐渐减小的特征。长径比越大表示桩越细长,在负摩阻力作用下桩身的压缩变形量越大,桩向下的位移就越大,黄土湿陷引起的桩周土相对于桩向下的位移量就较小,则桩身分布有负摩阻力的长度越短,即中性点越浅,相应的中性点深度比就越小。用线性拟合得到中性点深度比与桩长径比的关系,即

$$\frac{l_n}{l} = 0.6463 - 0.0044 \times \frac{l}{d} \quad (2)$$

式中, l_n/l 为中性点深度比, l/d 为桩长径比, d 为桩身直径。工程中常见的桩长径比介于 30~60 之间,按式(2)计算的中性点深度比为 0.51~0.38,可见桩长径比越大,中性点深度越小。

2.2.2 最大负摩阻力深度比

最大负摩阻力深度是本文方法反映负摩阻力沿深度分布特征的关键因素之一。如图 2 所示,最大负摩阻力深度 D 点向上或向下移动,并不改变三角形 ADC 面积,即由负摩阻力引起的桩身下拉荷载大小保持不变,但最大负摩阻力深度 D 点改变会影响负摩阻力沿深度的分布,还会使由负摩阻力引起的桩身附加轴力沿深度的分布发生变化。

用最大负摩阻力深度比表示最大负摩阻力深度,最大负摩阻力深度比定义为最大负摩阻力深度 l_m 与中性点深度 l_n 的比值。根据表 3 列出的工程实测最大负摩阻力深度及中性点深度计算得到的 l_m/l_n 随桩长径比变化的统计结果如图 4 所示。数据虽然有一定的离散性,但最大负摩阻力深度比随桩长径比的变化特征很明显,即随桩长径比增大,最大负摩阻力深度比逐渐减小。

对图 4 中的数据采用线性拟合,则最大负摩阻力深度比与长径比可表示为式(3)。

$$\frac{l_m}{l_n} = 0.7573 - 0.0050 \times \frac{l}{d} \quad (3)$$

式中: l_m/l_n 为最大负摩阻力深度比; l/d 为桩长径比; d 为桩直径。工程中常见的桩长径比介于 30~60 之间,按照式(3)计算的最大负摩阻力深度比为 0.61~0.46,可见桩长径比越大,最大负摩阻力越靠近桩顶。

2.2.3 负摩阻力系数

如图 2 所示,该方法用两段直线 AD 、 DC 表示

表3 湿陷性黄土地区主要桩基负摩阻力现场浸水试验汇总表
Table 3 Summary of field test datum of NSF of piles in collapse loess

场地名称	湿陷类型	湿陷等级	湿陷下限深度/m	浸水试验时间/d	测线数	测点数	桩号	桩长/m	桩径/m	实测中性点深度/m	实测最大负摩阻力深度/m	实测最大负摩阻力/kPa	实测负摩阻力系数
宁夏固原 ^[3]	自重湿陷	IV	35	68		53	ZH3	40	0.8	19			
蒲城电厂 ^[10]	自重湿陷	II	32	40			A2	40	1.2	25			
							B1	32	1	12	9	-45	0.23
							B2	32	1	21	14.5	-85	
芝川河 ^[11]	非自重湿陷			48	8	24	1#	35	1.2	20	13.5	-69.4	
							2#	35	1.2	16	4	-38.8	
渭南市 ^[12]	自重湿陷	IV	33	53	9	127	S3	60	0.8	17.0	8	-30	0.31
							S5	60	0.8	22.9	6	-58	
河运高速 ^[13]	自重湿陷	IV	20	23	4	11	S2	20	0.6	11.8	4.5	-26.9	0.48
							S3	20	0.6	13.2	5.8	-76.5	
郑西高铁 ^[14]	自重湿陷	IV	33	53	10	88	S4	50	0.8	16	7	-44	0.40
							S5	60	0.8	23	9	-39	0.53
天水市 ^[15]	自重湿陷	IV	30	20			S1	52	1	18	11	-29	0.20
							S2	52	1	15.5	8	-43	0.26
陇西高原 ^[16]	自重湿陷	IV	20	33	6	24	S2	20.5	0.8	7.8	7	-17	0.14
							S3	60	0.8	16	7	-36	
							S4	50	0.8	15	6	-39	
河南灵宝 ^[17]	自重湿陷	II	12	49			S5	60	0.8	23	7	-52	
							ZSH-1	40	0.8		3.5	-27.6	
							SZH-2	40	0.8		5.6	-29.1	
黄土高原 ^[19]	非自重湿陷	II	32	40			A1	32	1	21	13.5	-90	0.41
							A2	32	1	12	9	-45	0.23
关中东部 ^[20]	自重湿陷	II-III	33	53	12	93	S1	60	0.8	17	7	-30	0.30
							S2	60	0.8	22	8	-63	0.55
郑西客运专线 ^[21]	自重湿陷	IV	32	53	11	127	S4	50	0.8	16	7	-49	0.49
							S5	60	0.8	22	6	-64	0.76
渭南某地 ^[22]	自重湿陷	IV	32	53	10	120	S3	60	0.8	17	8	-27	0.23
							S5	60	0.8	22	6	-58	0.67
蒲城电厂 ^[23]	非自重湿陷	II	32	40			D1	40	1.2	17	11.8	-46	0.24
							E2	32	1	20.8	14.8	-85	0.36
辛家庙转盘 ^[24]	自重湿陷	II-III		14	8	160	S1	18.7	0.8	7.8	3.5	-10.2	
东、北二环路 ^[25]	自重湿陷	II-III		14	8	160	S1	18.7	0.8	11.4	4.9	-8.5	

注:表中未给出的实测负摩阻力系数,是未查到该工程地层参数。

负摩阻力沿深度的分布,因此,在确定了D点及C点的深度位置后,只要确定了D点的横坐标,即最大负摩阻力的大小后,就可以完全确定负摩阻力沿深度的分布。最大负摩阻力(D点负摩阻力)可用式(4)表示。

$$q_{s\max}^n = 2 \times \frac{S_{ABC}}{AC} \quad (4)$$

式中: $q_{s\max}^n$ 为最大负摩阻力; S_{ABC} 为实际的负摩阻力

沿桩身分布曲线ABC与AC形成的曲边多边形的面积;AC为桩顶到中性点的距离。

采用有效应力法计算最大负摩阻力,则最大负摩阻力也可以表示成式(5)。

$$q_{s\max}^n = \zeta_n \cdot \sum_{i=1}^m \gamma'_i \Delta z_i \quad (5)$$

式中: ζ_n 为负摩阻力系数; $\gamma'_i \Delta z_i$ 分别为最大负摩阻力深度以上桩周第*i*层土体的有效重度及厚度; m 为

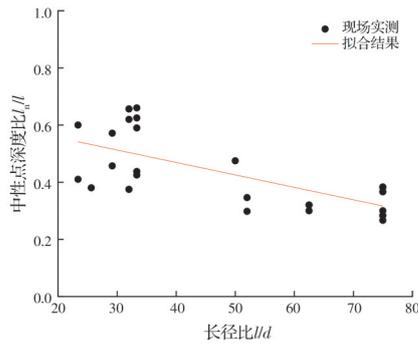


图3 中性点深度比与长径比的关系

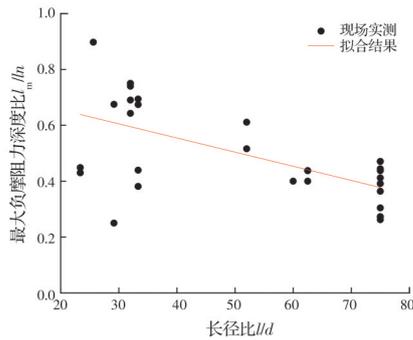
Fig. 3 Relationship between L_n/l and l/d 

图4 最大负摩阻力深度比与长径比的关系

Fig. 4 Relationship between L_m/l_m and l/d

最大负摩阻力深度以上的土层数。

令式(4)、式(5)等号右边相等可以得到负摩阻力系数,对于表3中所给出的资料比较完整的工程,可以得到实际的负摩阻力系数见表4。

表4 负摩阻力系数

Table 4 The coefficient of the NSF

场地名称	桩号	负摩阻力系数	场地名称	桩号	负摩阻力系数
蒲城电厂 ^[10]	B1	0.29	黄土高原 ^[19]	A2	0.30
渭南市 ^[12]	S3	0.26	关中东部 ^[20]	S1	0.38
河运高速 ^[13]	S2	0.42	客运专线 ^[21]	S3	0.34
陇西高原 ^[14]	S2	0.17			
郑西高铁 ^[14]	S4	0.43		S3	0.30
	S5	0.30	渭南某地 ^[22]	S4	0.59
				S5	0.88
天水市 ^[15]	S1	0.18			
	S2	0.37	蒲城电厂 ^[23]	D1	0.26

表4中负摩阻力系数与桩长径比的关系如图5所示。可以看出,尽管负摩阻力系数随着长径比变化有一定的离散性,但整体上负摩阻力系数随长径比的增大而增大。采用线性拟合则负摩阻力系数与桩长径比关系可表示为式(6)。

$$\zeta_n = 0.1521 + 0.0041 \times \frac{l}{d} \quad (6)$$

式中: ζ_n 为负摩阻力系数; l/d 为桩长径比; d 为桩身直径。

对于工程中常见的长径比介于30~60之间的桩,按照式(6)计算得到的负摩阻力系数为0.28~0.40,这与桩基规范^[26]建议的负摩阻力系数0.2~0.35有较大的重合区间,但桩基规范^[26]并未规定如何从0.2~0.35区间选用具体的负摩阻力系数,而式(6)则根据长径比计算负摩阻力系数,便于工程应用。

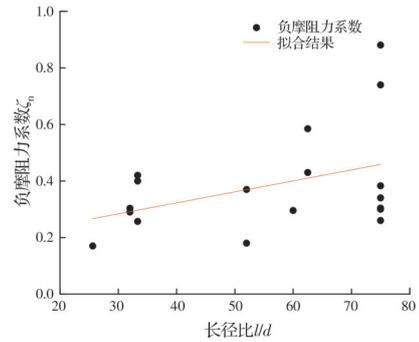


图5 负摩阻力系数与长径比的关系

Fig. 5 Relationship between ζ_n and l/d

3 负摩阻力计算新方法的验证

为验证本文负摩阻力计算方法的合理性,将表3中现场实测数据比较完整的11个工程、共16根桩实测的中性点深度比、最大负摩阻力及深度、最大下拉荷载分别与桩基规范^[26]、黄土规范^[27]以及按照该方法的计算结果进行比较,对比结果见表5。表5中最大负摩阻力及深度对应列括号中的数据为最大负摩阻力出现的深度,表5最后一行还给出了规范、该方法与现场实测结果的平均相对误差。

从表5可以看出,与实际的中性点深度比相比,桩基规范^[26]计算结果的平均相对误差为22%,黄土规范^[27]计算结果的平均相对误差为95%,而根据本文方法计算的平均相对误差为20%。说明桩基规范^[26]及本文方法对中性点深度比的预测明显比黄土规范^[27]接近实际情况。

桩基规范^[26]规定自重湿陷性黄土的负摩阻力系数取值范围为0.20~0.35,计算时取其平均值0.28。从表5可以看出,根据桩基规范^[26]计算的最大负摩阻力及其深度与现场实测值的平均相对误差分别为108%、137%,而本文方法计算的最大负摩阻力及其深度与现场实测值的平均相对误差分别为33%、12%。显然,根据本文方法计算的最大负摩阻力及其深度远优于桩基规范^[26]的计算结果。

下拉荷载是由负摩阻力引起的桩身附加最大轴力,即中性点深度以上负摩阻力的合力,该数值

对于桩基设计具有重要的意义。从表5可以看出,本文方法、黄土规范^[27]、桩基规范^[26]计算的下拉荷载与实际结果的平均相对误差分别为42%、62%、118%,即黄土规范^[27]的预测结果显然远优于桩基规范^[26],本文方法计算结果则最接近实际值。

根据上述比较可知,本文方法计算得到的中性点深度比、最大负摩阻力及深度、下拉荷载与实测结果吻合程度优于桩基规范^[26]和黄土规范^[27]。

表5的比较仅仅是基于中性点深度比、最大负摩阻力及其深度、下拉荷载这3个反应负摩阻力性状的关键指标,但还不能反映负摩阻力沿深度的分布情况,因此,从已有文献报道的黄土地基中桩基负摩阻力现场试验随机选取4个场地的4根试桩,对负摩阻力沿深度的分布进行计算,对比本文方法及规范方法的优劣,应该说明的是这4个试验的数据未用来进行式(2)、式(3)及式(6)的拟合。

表5 负摩阻力计算结果与实际结果的比较

Table 5 Comparison between the calculated NSF and the measured ones

试验场地	桩号	中性点深度比				最大负摩阻力/kPa及(深度/m)			下拉荷载/kN			
		现场实测	黄土规范	桩基规范	本文方法	现场实测	桩基规范	本文方法	现场实测	黄土规范	桩基规范	本文方法
蒲城电厂 ^[10]	B1	0.38	1.00	0.61	0.51	-45.00(9.00)	-88.18(19.36)	-42.85(9.79)	865	1508	2680	1053
渭南市 ^[12]	S3	0.28	0.55	0.33	0.32	-30.00(8.00)	-81.71(19.97)	-48.07(7.30)	813	1244	2049	1159
河运高速 ^[13]	S2	0.59	1.00	0.61	0.50	-26.90(4.50)	-49.20(12.10)	-24.30(5.90)	388	565	561	229
郑西高铁 ^[14]	S4	0.32	0.66	0.40	0.37	-44.00(7.00)	-81.71(19.97)	-47.83(8.14)	1128	1244	2049	1111
	S5	0.38	0.55	0.33	0.32	-39.00(9.00)	-81.71(19.97)	-48.07(7.30)	1398	1244	2049	1159
天水市 ^[15]	S1	0.35	0.58	0.35	0.42	-29.00(11.00)	-73.45(18.15)	-58.39(10.92)	1061	1414	2112	1988
	S2	0.30	0.58	0.35	0.42	-43.00(8.00)	-73.45(18.15)	-58.39(10.92)	1390	1414	2112	1988
陇西高原 ^[16]	S2	0.38	0.98	0.59	0.53	-17.00(7.00)	-49.48(12.10)	-26.01(6.84)	141	754	751	355
黄土高原 ^[8]	A2	0.38	1.00	0.61	0.51	-45.00(9.00)	-88.18(19.36)	-41.93(9.60)	838	1507	2680	1098
关中东部 ^[20]	S1	0.28	0.55	0.33	0.32	-30.00(7.00)	-81.61(19.97)	-47.99(7.30)	887	1244	2047	1157
	S2	0.37	0.55	0.33	0.32	-63.00(8.00)	-81.61(19.97)	-47.99(7.30)	2381	1244	2047	1157
郑西客运专线 ^[21]	S5	0.30	0.53	0.32	0.32	-30.00(8.00)	-81.71(19.36)	-48.07(7.30)	925	1206	1987	1159
	S4	0.32	0.64	0.39	0.37	-49.00(7.00)	-81.71(19.36)	-47.83(8.14)	1507	1206	1987	1111
渭南某地 ^[22]	S3	0.28	0.55	0.33	0.32	-27.00(8.00)	-81.71(19.97)	-48.07(7.30)	833	1244	2049	1159
	S5	0.37	0.55	0.33	0.32	-58.00(6.00)	-81.71(19.97)	-48.07(7.30)	2260	1244	2049	1159
蒲城电厂 ^[23]	D1	0.43	0.80	0.48	0.50	-46.00(11.80)	-88.18(19.36)	-54.52(11.80)	1620	1810	3216	2054
平均相对误差			95%	22%	20%		108%(137%)	33%(12%)		62%	118%	42%

工程实例1试验场地位于宁夏固原市七营镇张堡村,场地黄土层厚度大于60m,湿陷性土层厚度约35m。地层自上而下分别为:黄土层,层厚35m,浅黄色,属自重湿陷性土层;壤土层,层厚大于25m,为第四系上更新统冲积粉土层,呈棕黄~浅红色,属非湿陷性土层。场地为自重湿陷性场地,湿陷等级IV级。ZH4试桩长40m,桩径0.8m,桩身混凝土强度等级为C30,桩端持力层为Q₂黄土。

工程实例2试验场地位于陕西省渭南市,地貌单元为渭河II级阶地。场地类型为自重湿陷性黄土场地,湿陷等级为IV级。自重湿陷系数大于0.015的土层主要为地表下33m深度以上的晚更新世Q₃黄土。试桩S4桩长50m,桩径0.8m,桩身混凝土强度等级为C35,桩端持力层为Q₂黄土。

工程实例3试验场地位于陕西省潼关县高桥

乡,地层自上而下分别为:黄土层,层厚33m,褐黄色,属自重湿陷性土层;Q₃粉质黏土,层厚3m,红褐色;Q₂黄土层,层厚24m,属非湿陷性土层。该场地为自重湿陷性场地,自重湿陷下限深度33m,场地湿陷等级为IV级。S3试桩长60m,桩径0.8m,桩身混凝土强度等级为C35,桩端持力层为Q₂黄土。

工程实例4试验场地位于陕西渭北黄土塬上,地形开阔平坦。地基土为黄土与古土壤成层交互分布,上部6m为马兰黄土Q₃,下部为离石黄土Q₂,总厚度60m,属大厚度黄土地基。本场地为II级自重湿陷性黄土,自重湿陷主要发生在地表下14~32m深度处。试桩A1桩长40m,桩径1.2m,桩身混凝土强度等级为C30,桩端持力层为Q₂黄土。

图6给出了4个工程实例实测负摩阻力、根据黄土规范^[27]、桩基规范^[26]及本文方法计算得到的负

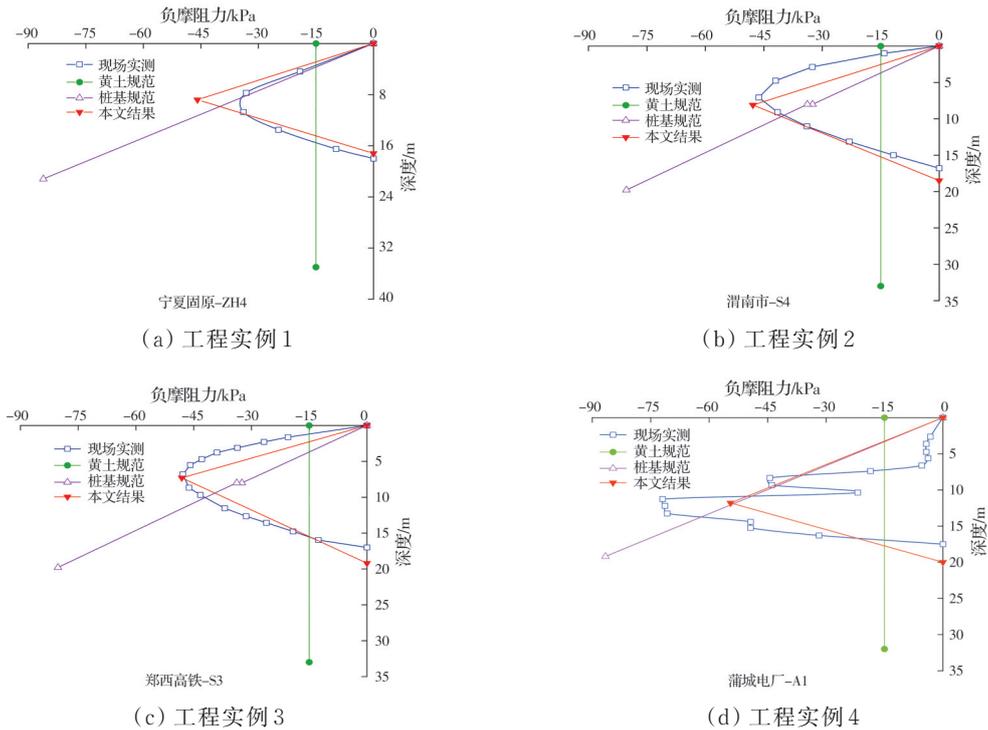


图 6 负摩阻力计算结果与实测值的比较

Fig. 6 Comparison between the calculated NSF and the measured NSF

摩阻力沿深度的分布,表6对比了本文方法、黄土规范、桩基规范计算的中性点深度比及下拉荷载与实测结果的相对误差。可以看出,本文方法计算结果反映了负摩阻力沿深度先逐渐增大、达到最大值后逐渐减小为零的实际分布特征,而黄土规范^[27]与桩基规范^[26]的计算结果不能反映负摩阻力沿深度的这种实际变化规律,本文方法计算的中性点深度比、最大负摩阻力及其深度与实际结果最为接近。

表 6 工程实例实测结果与计算结果的比较

Table 6 Comparison between the calculated NSF and the measured ones

实例	中性点深度比误差/%			下拉荷载误差/%		
	本文方法	黄土规范	桩基规范	本文方法	黄土规范	桩基规范
实例1	4.4	95.5	17.8	8.7	44.6	151
实例2	8.8	94.1	17.6	13.2	2.8	60.1
实例3	14.2	96.4	17.9	11.8	5.4	55.8
实例4	13.6	81.8	9.1	6.4	6.2	66.6

4 结论

对黄土场地钢筋混凝土灌注桩浸水试验实测结果进行了整理与分析,建立了计算黄土桩基负摩阻力的新方法,并与中国现行的黄土规范及桩基规范的计算方法进行了对比,得到以下结论:

1)本文方法用折线模拟桩身负摩阻力沿深度的分布,给出了计算负摩阻力3个参数的线性拟合

公式,拟合公式主要考虑了桩长径比、中性点深度比、负摩阻力系数及最大负摩阻力深度比的影响。线性拟合虽稍感粗糙,但从比较结果来看还是比较合理,且采用线性公式也便于工程应用。

2)本文方法能反映黄土桩基负摩阻力从桩顶向下逐渐增大、达到最大值后逐渐减小、在中性点深度处减小为零的实际分布特征。

3)根据本文方法计算得到的中性点深度比、最大负摩阻力及其深度、负摩阻力系数3个方面均优于黄土规范及桩基规范。

需要说明的是,统计结果是针对湿陷性黄土地区桩端土为 Q_2 黄土的情况,桩端土为其他类型的土层如卵石层等更为坚硬的土层时,需开展进一步的研究工作。

参考文献

- [1] 康银庚,高磊,罗易,等. 硅藻土地区桥梁灌注桩成孔测试研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(2): 335-342. KANG Y G, GAO L, LUO Y, et al. Study on borehole test of bridge cast-in-place piles in diatomite area [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(2): 335-342. (in Chinese)
- [2] 李玲玲,王立忠,邢月龙. 大直径钻孔灌注桩负摩阻力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 583-590. LI L L, WANG L Z, XING Y L. Experimental

- research on negative skin friction of large-diameter bored piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 583-590. (in Chinese)
- [3] 夏力农, 王星华, 蒋春平. 桩顶荷载对桩基负摩阻力特性的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(4): 359-362. XIA L N, WANG X H, JIANG C P. Influences of working load on negative skin friction characters of pile [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(4): 359-362. (in Chinese)
- [4] FELLENIUS B H. Results from long-term measurement in piles of drag load and downdrag [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(4): 409-430.
- [5] ZHAO Z F, YE S H, ZHU Y P, et al. Scale model test study on negative skin friction of piles considering the collapsibility of loess [J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(2): 601-611.
- [6] 辛海龙. 自重湿陷性黄土地场桩侧负摩阻力特性试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. XIN H L. Field test on characteristics of piles negative friction in loess collapsible under overburden pressure [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (in Chinese)
- [7] 宗雪梅, 周新平, 狄谨. 湿陷性黄土层桩基侧摩阻力的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(6): 710-716. ZONG X M, ZHOU X P, DI J. Tests in side friction around the pile collapsible loess layers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(6): 710-716. (in Chinese)
- [8] 曹卫平, 赵敏. 黄土地基中人工挖孔扩底灌注桩负摩阻力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(Sup 1): 3167-3173. CAO W P, ZHAO M. Experimental study of negative skin friction for man-made cast-in-situ belled piles in loess soil foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 3167-3173. (in Chinese)
- [9] 黄世斌. 湿陷性黄土区铁路桩基试验研究[J]. 铁道建筑, 2010, 50(7): 87-89. HUANG S B. Experimental studies on rail pile foundations in collapsible loess area [J]. Railway Engineering, 2010, 50(7): 87-89. (in Chinese)
- [10] 中国建筑科学研究院地基基础研究所. 蒲城电厂扩底灌注桩试验报告[R]. 1991. Foundation engineering research institute of CABR. Test report of expanded bottom pile in Pucheng Power Plants [R]. 1991. (in Chinese)
- [11] 冯忠居, 谢永利, 张宏光, 等. 地面水对黄土地区桥梁桩基承载力影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1758-1765. FENG Z J, XIE Y L, ZHANG H G, et al. Experimental study on effect of surface water on bearing capacity of pile foundation in loess area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1758-1765. (in Chinese)
- [12] 唐国艺. 关中地区某自重湿陷性黄土地场桩基负摩阻力试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2007. TANG G Y. Experiment study on the negative skin friction on piles in the field of loess collapsible under overburden pressure of Guanzhong area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [13] 董晓明. 基于黄土非均匀湿陷变形的桥梁群桩基础承载特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. DONG X M. Research on the load bearing characteristics of bridge group piles foundation on loess non-uniform deformation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [14] 王小军. 黄土地区高速铁路建设中的重大工程地质问题研究(以郑西客运专线为例)[D]. 兰州: 兰州大学, 2008. WANG X J. Study on the great and important engineering geological problems for high-speed railway construction in loess area (Illustrated with Zhengzhou-Xi'an passenger dedicated line) [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. (in Chinese)
- [15] 李心平. 深厚层强湿陷性黄土区桩基负摩阻力现场试验[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(3): 1161-1168. LI X P. Field test on negative skin friction of piles in deep collapsible loess area [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(3): 1161-1168. (in Chinese)
- [16] 艾小平. 湿陷性黄土地区桩基负摩阻力的产生及发展试验分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018. AI X P. Study on the generation and development of negative friction resistance of pile foundation in collapsible loess area [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2018. (in Chinese)
- [17] 白琦成. 郑西线三门峡至灵宝段桥梁基桩试验研究[J]. 铁道标准设计, 2009, 53(4): 38-43. BAI Q C. Experimental study on bridge foundation piles between Sanmenxia and Lingbao City on Zhengxi Railway [J]. Railway Standard Design, 2009, 53(4): 38-43. (in Chinese)
- [18] 朱彦鹏, 董芸秀, 包泽学, 等. 超大厚度 Q_2 黄土场地单桩承载力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(Sup2): 4375-4383. ZHU Y P, DONG Y X, BAO Z X, et al. Experimental study of bearing capacity of single pile in large thickness Q_2 loess ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup2): 4375-4383. (in Chinese)
- [19] 张炜, 隋国秀. 黄土中钻孔灌注桩荷载传递性状的试验研究[C]//中国土木工程学会. 全国岩土工程青年专家

- 学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 173-181.
- ZHANG W, SUI G X. Experimental study on load transfer behavior of bored pile in loess [C]//Chinese Society of Civil Engineering. Proceedings of the National Conference of Young Experts in Geotechnical Engineering, Beijing: China Architecture & Building Press, 1998: 173-181. (in Chinese)
- [20] 马侃彦, 张继文, 王东红. 自重湿陷性黄土地桩的负摩阻力[J]. 岩土工程技术, 2009, 23(4): 163-166, 177.
- MA K Y, ZHANG J W, WANG D H. Negative skin friction of pile in self-weight collapse loess site [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2009, 23(4): 163-166, 177. (in Chinese)
- [21] 刘争宏. 浸水条件下湿陷性黄土地桩基特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- LIU Z H. Study on characteristics of piles in collapsible loess sites under water immersion condition [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [22] 李祖仁. 自重湿陷性黄土地桩基浸水荷载试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- LI Z R. Experiment study on the piles in the soggy field of loess collapsible under overburden pressure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [23] 衡朝阳, 何满潮, 景海河, 等. 王曲与蒲城电厂湿陷性黄土地基浸水试桩比较[J]. 工程勘察, 2002, 30(3): 19-22.
- HENG C Y, HE M C, JING H H, et al. Comparison between water immersed piles in collapsible loess ground of two power plants [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2002, 30(3): 19-22. (in Chinese)
- [24] 孔令琨, 林高原. 湿陷性黄土桥梁桩基自然浸水荷载试验[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(4): 262-265.
- KONG L K, LIN G Y. Natural immersion load test for pile foundation of collapsible loess bridge [J]. Highway Traffic Technology (Application Technology Version), 2016, 12(4): 262-265. (in Chinese)
- [25] 魏进, 李哲, 郝忙利, 等. 自重湿陷性黄土地基的桩基浸水荷载试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(5): 63-67.
- WEI J, LI Z, HAO M L, et al. Submerged static load test of pile foundation in collapsible loess area [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31(5): 63-67. (in Chinese)
- [26] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [27] 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.
- Standard for building construction in collapsible loess regions: GB 50025—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [28] BRENNER R P, BALASUBRAMANIAM A S. Skin friction tests on driven piles in soft Bangkok clay [C]//Proceedings, 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1984:327-334.
- [29] BURLAND J. Shaft friction of piles in clay: a simple fundamental approach [J]. Ground Engineering, 1973, 6(3): 30-42.
- [30] 叶好文, 麦健, 张学峰. 公路桥梁桩基础受竖向荷载桩侧土接触面损伤机理模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(6): 104-111.
- YE Y W, MAI J, ZHANG X F. Experimental study on damage mechanism model of pile-soil contact surface of highway bridge pile foundation subjected to vertical load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(6): 104-111. (in Chinese)
- [31] 钱鸿缙, 罗宇生, 涂光祉等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- QIAN H J, LUO Y S, TU G Z, et al. Collapsible loess foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985. (in Chinese)
- [32] 刘祖典. 黄土力学与工程 [M]. 西安: 陕西科技出版社, 1996.
- LIU Z D. Mechanics and engineering of loess [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [33] RANDOLPH M F, WROTH C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups [J]. Géotechnique, 1979, 29(4): 423-439.
- [34] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering, 1978, 104(12): 1465-1488.

(编辑 胡玲)