

黄土地基湿陷引发桩基负摩阻力的估算方法研究

梅源¹, 胡长明¹, 李修波², 袁一力¹, 赵楠¹, 刘大江^{1,3}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 华夏幸福基业股份有限公司, 北京 100027;

3. 唐山学院土木工程系, 河北 唐山 063000)

摘要:通过分析黄土湿陷引发的桩基负摩阻力的传递规律, 基于荷载传递法建立桩侧摩阻力及桩端阻力的计算分析模型, 对湿陷性黄土湿陷导致的桩基负摩阻力微分方程进行求解, 据此得到了黄土地基不同湿陷阶段的桩基负摩阻力、桩身轴力及桩顶沉降的估算公式。研究成果可为黄土地基湿陷引发单桩负摩阻力的计算分析提供参考。

关键词: 湿陷性黄土; 负摩阻力; 荷载传递法; 单桩承载力

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2015)06-0854-04

Research on the estimating method of the negative skin friction caused by the collapse deformation of loess foundation

MEI Yuan¹, HU Changming¹, LI Xiubo², YUAN Yili¹, ZHAO Nan¹, LIU Dajiang^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. China Fortune Land Development Co., LTD. Beijing 100027, China;

3. Department of Civil Engineering, Tangshan College, Tangshan 063000, China)

Abstract: According to the transfer rules of the negative skin friction caused by the collapse deformation of the collapsed loess, analytical models of the negative skin friction and the pile tip resistance were established based on the load transfer method. Also, differential equation of the negative skin friction caused by the collapse deformation of the collapsed loess was worked out. As a result, estimation formula of the negative skin friction, axial stress and settlement of the pile in different collapse period was presented. Research results can serve as reference for the calculation and analysis of the negative skin friction of single pile caused by the collapse deformation of the collapsed loess.

Key words: collapsed loess; negative skin friction; load transfer method; bearing capacity of single pile

黄土湿陷引发的桩基负摩阻力大且往往具有突发性, 由此带来的工程问题在我国西部黄土地区建设中尤为突出, 因此, 黄土湿陷引发的桩基负摩阻力的计算是黄土地区桩基设计过程中需要解决的重要问题^[1]。

目前, 针对黄土湿陷引起的桩基负摩阻力的研究已经积累了一些重要成果。刘明振^[2]提出了含有自重湿陷性黄土夹层的场地上群桩负摩阻力的计算方法; 黄雪峰^[3]针对大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力开展了大型试验研究; 曹卫平^[4]研究了湿陷性黄土地基中人工挖孔扩底灌注桩在预浸水过程及其之后的加载过程中桩身摩阻力、桩端反力及桩身中性点深度的发展变化规律; 齐静静^[5]对自重湿陷性黄土浸水过程中桩侧负摩阻力的变化规律及湿陷变形对基桩竖向承载力性能的影响进行了分析; 李大展^[6]提出了浸水湿陷全过程中大直径桩荷载传递机理的三阶段分析法; 王长丹^[7]研究和分析黄土的湿陷变形性质与桩基的负摩阻力; 张献辉^[8]对自重湿陷性黄土中大直径桩的破

坏模式、荷载传递机理、浸水过程中桩侧负摩阻力的变化规律及浸水对桩竖向承载力的影响进行了深入的研究。本文基于荷载传递法的原理和有关概念, 推导了一种简单适用的黄土湿陷引发桩基负摩阻力的估算方法。

1 分析方法和计算模型

1.1 基本方法

为了解决桩土相对位移、桩侧摩擦力和桩端土阻力之间的关系, 传递函数法是常用的理论分析方法之一, 其基本分析模型如图1所示^[9-11]。

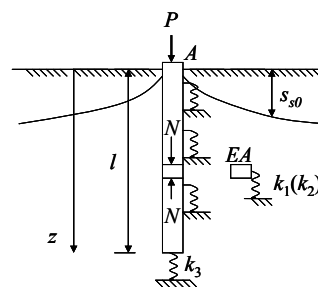


图1 分析模型

Fig.1 Analysis model

收稿日期: 2014-12-28

修改稿日期: 2015-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408463); 陕西省教育厅专项科研项目(15JK1413); 西安建筑科技大学科技计划项目(RC1375); 西安建筑科技大学科技项目(QN1409)

作者简介: 梅源(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩土力学及工程技术方面的研究。E-mail: my0326@126.com

1.2 计算模型

试验表明^[11]:湿陷性黄土地基随着浸水量的增加,其湿陷变形将持续增加,当湿陷性黄土层饱和后,地基湿陷沉降量将达到一稳定值,随后会产生一定量的固结沉降,最终趋于稳定.在浸水过程中,桩侧负摩阻力的发展呈现出先增加后减小最后趋于稳定的发展规律.因此,黄土地基湿陷引发桩侧负摩阻力的传递函数,可采用三折线模型描述^[12].

为克服负摩阻力带来的不利影响,《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025-2004)规定:在湿陷性黄土地带采用桩基础,桩端必须穿透湿陷性黄土层,且桩端一般支承在非湿陷的黄土(或砂)持力层中,此时桩端土阻力将存在“深度效应”(即桩进入砂持力层或硬黏土持力层的深度存在一个临界值,当桩进入持力层的深度小于该临界值时,桩端极限承载力基本上随深度而线性增长;当桩进入持力层的深度大于该临界值时,则桩端极限承载力保持不变,且称为端阻力稳值)^[13],因此,桩端土阻力传递函数可采用双折线模型描述^[14-15].

本文推导黄土湿陷引发单桩负摩阻力的计算

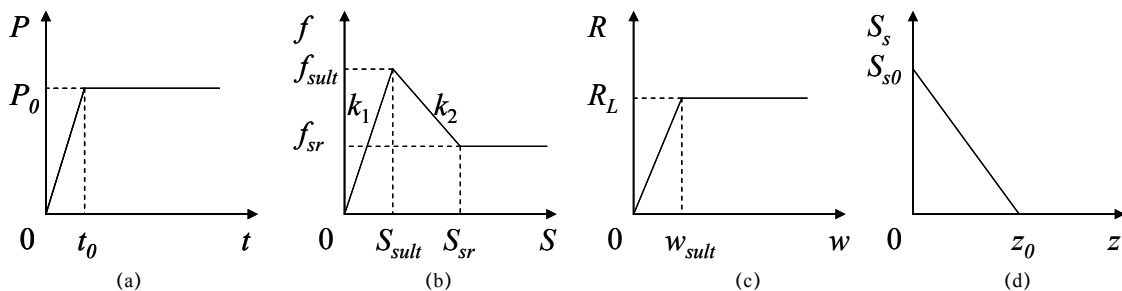


图2 计算模型^[14-17]
Fig.2 Calculation model

2 基本方程及求解

2.1 基本方程

根据上述理论依据、基本假定及计算模型,得到的各阶段桩侧负摩阻力传递函数^[14-17],如式(1):

$$f = \begin{cases} k_1 S, 0 \leq S < S_{sult} \\ k_1 S_{sult} - k_2 (S - S_{sult}), S_{sult} \leq S < S_{sr} \\ f_{sr}, S_{sr} \leq S \end{cases} \quad (1)$$

由浸水引起的黄土湿陷沉降为一维线性,以下式(2)表达:

$$S_s = S_{s0} - mz \quad (2)$$

则桩土相对位移可表示为

$$S = S_p - S_s = S_p - S_{s0} + mz \quad (3)$$

2.2 方程求解

(1) 初始浸水阶段

地基浸水初始阶段,上部土层虽然含水量较高,但浸水导致的附加应力小.湿陷性黄土层整体

公式过程中,基本假设如下^[14-16]:

(1) 桩体截面均匀,且在加载过程中处于弹性范围.初始状态下,桩、土沿竖向的位移为零;(2) 桩顶荷载由零逐渐加载到设计值并维持稳定,如图2(a);(3) 桩侧摩阻力传递函数采用三折线模型描述,如图2(b);(4) 桩端土阻力传递函数采用双折线模型描述,如图2(c);(5) 由浸水引起的黄土湿陷沉降是一维的,且沿深度 z 方向线性分布,如图2(d).

符号规定:地基湿陷时,某一深度处桩身沿轴向的位移为 S_p ,mm;与之对应的同一深度处桩周土体的位移为 S_s ,mm,则该深度桩土相对位移为 $S = S_p - S_s$; f 、 f_{sult} 、 f_{sr} 分别为单位深度内土体所产生的桩侧摩阻力、桩侧极限摩阻力和桩侧残余摩阻力,kN/mm; S 、 S_{sult} 、 S_{sr} 分别为 f 、 f_{sult} 、 f_{sr} 所对应的桩土相对位移,mm; k_1 、 k_2 分别为不同阶段桩周湿陷性黄土层的剪切刚度系数和剪切刚度损失系数, k_3 为桩端土反力系数,kN/mm; R 、 R_L 为桩端阻力和端阻力稳值,kN; w 、 w_{sult} 分别为桩端贯入位移和极限贯入位移,mm.

含水量低、胶结力损失小,此时浸水导致的变形主要为压缩变形,随着浸水的持续进行,由黄土颗粒间胶结力逐渐丧失和其它外部因素共同造成了附加应力不断增加,湿陷性黄土层开始初步发生湿陷,但绝大部分桩周土没有发生剪切滑移,桩周土的剪切刚度 k_1 为一常数,此过程中,桩土相对位移逐渐增大,平均单位深度土体所产生的负摩阻力将持续增加.此时,建立的微分方程如式(4):

$$\begin{cases} EA \frac{d^2 S_p}{dz^2} = f = k_1 S \\ S = S_p - S_{s0} + mz \\ P|_{z=0} = P_0 \\ S_p|_{z=0} = S_{p0} \end{cases} \quad (4)$$

为便于表达,以下公式中令 $\alpha_1 = \sqrt{EAk_1}$; $\alpha_2 = \sqrt{EAk_2}$; $\beta_1 = \sqrt{k_1/EA}$; $\beta_2 = \sqrt{k_2/EA}$; $p = P_0/EA$; $\gamma = S_{sult}(k_1 + k_2)/k_2$.求解方程(4)可得此阶段桩土

相对位移、桩身位移及轴力的计算结果,如式(5):

$$\begin{cases} S = (S_{p0} - S_{s0})\text{ch}\beta_1 z + \left(\frac{P_0}{\sqrt{EA}m} + m\right)\text{sh}\beta_1 z \\ S_p = (S_{p0} + S_{s0})\text{ch}\beta_1 z + \left(\frac{P_0}{\alpha_1} - m\right)\text{sh}\beta_1 z + mz - S_{s0} \\ N = EA\zeta = EA \frac{dS_p}{dz} = (S_{p0} + S_{s0})\alpha_1 \text{sh}\beta_1 z + \\ (P_0 - m\alpha_1)\text{ch}\beta_1 z + mEA \end{cases} \quad (5)$$

(2) 桩周土整体强度下降阶段

随着浸水量增加,湿陷性黄土层的大部分土体颗粒间的胶结力逐渐减小,导致土体抗剪强度降低,湿陷变形加速发展,桩周部分土体发生剪切滑移,且滑移范围逐渐增大,使得桩体附着重量逐渐减轻,这一过程由上到下逐渐发展,单位深度土所产生的负摩阻力在达到峰值后随之降低.随滑移范围的发展,桩周土体的剪切刚度系数 k_1 虽然处于不稳定的调整状态,但为方便表达和简化推导过程,假设此时剪切刚度系数 k_1 保持不变^[14-17].此时,建立的微分方程如式(6):

$$\begin{cases} EA \frac{d^2 S_p}{dz^2} = f = k_1 S_{\text{sult}} - k_2 (S - S_{\text{sult}}) \\ S_p = S_{s0} - mz + S \\ P|_{z=0} = P_0 \\ S_p|_{z=0} = S_{p0} \end{cases} \quad (6)$$

S求解方程(6)可得此阶段桩土相对位移、桩身位移及轴力如式(7):

$$\begin{cases} S = [S_{p0} - S_{s0} - \gamma] \cos \beta_2 z + \frac{p+m}{\beta_2} \sin \beta_2 z + \gamma \\ S_p = (S_{p0} - \gamma + S_{s0}) \cos \beta_2 z + \frac{p+m}{\beta_2} \sin \beta_2 z - \\ mz + \gamma + S_{s0} \\ N = \gamma \alpha_2 \sin \beta_2 z + (P_0 + mEA) \cos \beta_2 z - mEA \end{cases} \quad (7)$$

(3) 湿陷稳定阶段

当湿陷性黄土层绝大部分土体发生湿陷时,地基表面沉降趋于稳定,桩周土体产生剪切滑移的范围及桩土相对位移亦趋于稳定,单位深度土所提供的摩阻力达到残余强度值并维持稳定,桩基负摩阻力随之达到相对稳定的状态,此时,建立的微分方程如式(8):

$$\begin{cases} EA \frac{d^2 S_p}{dz^2} = f = f_{\text{sr}} \\ P|_{z=0} = P_0 \\ S_p|_{z=0} = S_{p0} \end{cases} \quad (8)$$

求解方程可得此阶段桩土相对位移、桩身位移及轴力如式(9):

$$\begin{cases} S = \frac{f_{\text{sr}} z^2}{2EA} + (P_0 + m)z + S_{p0} - S_{s0} \\ S_p = \frac{f_{\text{sr}} z^2}{2EA} + \frac{P_0}{EA} z + S_{p0} \\ N = f_{\text{sr}} z + P_0 \end{cases} \quad (9)$$

则各阶段的桩基负摩阻力可表示为

$$F = \begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^n (S_{p0} + S_{s0}) \alpha_1 (\text{sh} \beta_1 z_{i+1} - \text{sh} \beta_1 z_i) + \\ (P_0 - m\alpha_1) (\text{ch} \beta_1 z_{i+1} - \text{ch} \beta_1 z_i) \\ F_2 = \sum_{i=1}^n \gamma \alpha_2 (\sin \beta_2 z_{i+1} - \sin \beta_2 z_i) + \\ (P_0 + mEA) (\cos \beta_2 z_{i+1} - \cos \beta_2 z_i) \\ F_3 = \sum_{i=1}^n f_{\text{sr}} (z_{i+1} - z_i) \end{cases} \quad (10)$$

上述结果为一种黄土湿陷引起的桩基负摩阻力的解析解.湿陷变形停止后,土体发生固结,土颗粒间的胶结力逐渐恢复,桩土相对位移增加,桩侧负摩阻力可能出现“二次峰值”现象,此时仍可采用上述方法进行分析.模型中的基本参数: k_1 、 k_2 可由不同状态下湿陷性黄土与混凝土接触面的剪切试验获得,桩端土反力系数 k_3 需根据实际工程试桩结果分析确定.

3 结论

通过分析黄土湿陷引发的桩基负摩阻力的传递规律,分别采用采用双折线模型及三折线模型描述黄土地基单桩端阻力和湿陷引发桩侧负摩阻力的传递函数,继而建立微分方程并求解,据此给出了黄土湿陷引发桩基负摩阻力、桩土相对位移、桩身位移及轴力的系列计算公式,该公式需确定的参数较少,可方便用于湿陷性黄土地基桩基负摩阻力的估算.

由于黄土的结构性强,湿陷性黄土受水后土体结构遭到破坏,土体干密度、粘聚力、内摩擦角、变形模量等物理力学指标在湿陷及土体固结过程中波动较大,且反映桩土界面剪切力学特性的有关指标与湿陷性黄土增湿阶段的物理力学指标关系密切,因此,确定黄土湿陷引发的桩基负摩阻力需要大量现场试验数据支持.本文提供的计算方法尚处于理论推导阶段,因此,其计算结果的精度有待进行试验研究.

参考文献 References

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 陕西: 科学技术出版社, 1997.
- LIU Zudian. Mechanics and engineering of loess[M]. Shaanxi Science and Technology Press, 1997.
- [2] 刘明振. 含有自重湿陷性黄土夹层的场地上群桩负摩阻力的计算[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 749-752.
- LIU Mingzhen. A calculation method of negative skin friction on the pile group in the self-weight collapsible loess stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 749-752.
- [3] 黄雪峰, 陈正汉, 哈双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 338-346.
- HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, HA Suang, et al. Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 338-346.
- [4] 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(S1): 3167-3173.
- CAO Weiping, ZHAO Min. 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(S1): 3167-3173.
- [5] 齐静静, 徐日庆, 龚维明. 湿陷性黄土地区桩侧负摩阻力问题的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(S): 881-884.
- QI Jingjing, XU Riqing, GONG Weiming. Experimental study on negative skin friction resistance on piles in collapsible loess area[J]. Rock and soil Mechanics, 2006, 27(S): 881-884.
- [6] 李大展, 滕延京, 何颐华. 湿陷性黄土中大直径扩底桩垂直承载性状的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 11-21.
- LI Dazhan, TENG Yanjing, HE Yihua. Vertical bearing behaviour of large diameter belled pile in collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 11-21.
- [7] 王长丹, 王旭, 周顺华, 等. 自重湿陷性黄土与单桩负摩阻力离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3101-3106.
- WANG Changdan, WANG Xu, ZHOU Shunhua, et al. Centrifugal model tests on self-weight collapsible loess and negative skin friction of pile foundations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3101-3106.
- [8] 张献辉, 高永贵. 自重湿陷性黄土中大直径桩荷载传递机理试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 1999, 28(4): 467-471.
- ZHANG Xianhui, GAO Yonggui. Experimental study on the load transfer mechanism of large diameter pile in loess[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 1999, 28(4): 467-471.
- [9] LEE C Y. Pile groups under negative skin friction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 119(10): 1587-1600.
- [10] WONG K S, TEH C I. Negative skin friction on piles in layered soil deposits[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, 121(6): 457-465.
- [11] 刘争宏, 郑建国, 于永堂. 湿陷性黄土场地PHC桩竖向承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 111-114.
- LIU Zhenghong, ZHENG Jianguo, YU Yongtang. Vertical bearing behaviors of PHC piles in collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 111-114.
- [12] 李作勤. 摩擦桩的荷载传递及承载力的一些问题[J]. 岩土力学, 1990, 11(4): 1-12.
- LI Zuoqin. Some problems concerning load transfer and bearing capacity of friction piles[J]. Rock and soil Mechanics, 1990, 11(4): 1-12.
- [13] 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- Zai Jinmin, Zai Jinzhang. Analysis and design of the foundation of high rise buildings[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992.
- [14] 赵明华, 贺炜, 曹文贵. 基桩负摩阻力计算方法初探[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1442-1446.
- ZHAO Minghua, HE Wei, CAO Wengui. Study on calculation of negative skin friction resistance on piles[J]. Rock and soil Mechanics, 2004, 25(9): 1442-1446.
- [15] 陈明中, 龚晓南, 严平. 单桩沉降的一种解析解法[J]. 水利学报, 2000(8): 70-74.
- CHEN Mingzhong, GONG Xiaonan, YAN Ping. An analytical solution for settlement of single pile[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(8): 70-74.
- [16] 周国林. 单桩负摩阻力传递机理分析[J]. 岩土力学, 1991, 12(3): 35-42.
- ZHOU Guolin. The analysis on negative friction of piles[J]. Rock and soil Mechanics, 1991, 12(3): 35-42.
- [17] 魏成国. 湿陷性黄土地基桩基湿陷负摩阻力计算与研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- WEI Chengguo. Count and study on the collapsible and negative friction of pile in collapsible loess region[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.

(编辑 桂智刚)