

DOI: 10.11779/CJGE2021S1040

浸水条件下湿陷性黄土地基群桩基础承载特性 模型试验研究

张延杰^{1,2}, 王旭¹, 梁庆国¹, 蒋代军¹, 李建东¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 采用人工制备湿陷性黄土作为模型试验相似材料, 进行 2×2 群桩基础浸水模型试验, 对桩周土体湿陷变形规律和桩基础荷载传递特征进行分析。结果表明: 土层浸水后, 随浸水时间的持续, 湿陷变形量-浸水时间关系曲线可划分为: 初期平缓段、浸水陡降段、中期平缓段和停水后平缓段。随湿陷深度的增大, 桩侧负摩阻力自上而下发展, 中性点深度逐渐下移。停水稳定后, 中性点深度比为0.7。在大厚度湿陷性黄土地基中, 当湿陷性黄土层下限深度采用室内试验确定时, 同时考虑桩顶承受工作荷载, 浸水后负摩阻力的中性点深度比可参考建筑桩基技术规范取值。当土层湿陷变形处于浸水陡降期时, 桩侧负摩阻力迅速发展, 下拉荷载和桩端荷载增大, 导致群桩基础沉降也逐渐增大, 土层的湿陷与桩侧负摩阻力、群桩基础沉降的发展呈现出同步趋势。

关键词: 桩基工程; 湿陷性黄土; 群桩; 负摩阻力; 模型试验

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S1-0219-05

作者简介: 张延杰(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土工理论及桩基础方面的教学和科研。E-mail: shuizhongdelantian@163.com。

Model tests on bearing behavior of pile groups in collapsible loess ground under water immersion

ZHANG Yan-jie^{1,2}, WANG Xu¹, LIANG Qing-guo¹, JIANG Dai-jun¹, LI Jian-dong¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The artificially prepared collapsible loess is used as the similar material to carry out 2×2 pile group model tests under water immersion. The change law of collapsibility deformation and the load transfer mechanism are analyzed. The results show that with the increase of soaking time, the relationship between the cumulative collapse settlement and the time mainly includes the initial gentle section, immersion steep drop section, medium gentle section and gentle section after water cut. With the increase of collapse depth, the negative frictional resistance develops from top to bottom, and the depth of neutral point moves down gradually. When the settlement achieves stability, the neutral point depth ratio is 0.7. In large-thickness collapsible loess, when the depth of collapsible loess is determined by the laboratory experiments, and considering the working load on pile top, the neutral depth ratio of negative friction resistance can be determined by the recommended value of technical specification for building pile foundation. In the steep drop period of water immersion for collapsible deformation of soil layer, the negative friction resistance acting on the pile increases rapidly, which leads to the increase of downward load and pile end load and gradual increase of the settlement of pile foundation. Collapse of soil layer presents a synchronous trend with the negative friction of pile side and the occurrence and development of pile foundation settlement.

Key words: pile foundation engineering; collapsible loess; pile group; negative skin friction; model test

0 引言

在西部大开发和“一带一路”倡议的深入推进下, 中国中西部地区各类工程正在迎来新一轮的发展高潮。黄土地区超高层建筑、大型桥梁基础等建设过程中, 群桩基础是广泛采用的一种基础型式。大厚度湿陷性黄土地层中没有良好的桩端持力层时, 加大桩长

和桩径作摩擦桩设计, 是最常用的方法, 所以大直径长桩、超长桩在大厚度湿陷性黄土地区的应用急剧增多^[1-2]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868038, 41662017); 兰州交通大学“天佑青年托举人才计划”基金项目

收稿日期: 2020-12-15

近年来,在湿陷性黄土场地桩基工程研究中,诸多学者通过理论分析、现场浸水试验、数值分析等手段,针对桩基负摩阻力、中性点深度、下拉荷载等问题,开展了大量的研究,有效地指导了湿陷性黄土地区桩基工程的开展^[3-5]。由于群桩基础桩数多、承载力大,现场静载试验开展困难,费用高,所以主要采用模型试验、数值计算、理论分析等方法开展群桩负摩阻力研究。Mashhour等^[6]通过改进 Hanna等^[7]理论,提出了湿陷性黄土场地上群桩负摩阻力计算方法,并通过模型试验结果进行了验证。高永贵^[8]考虑承台-桩-土相互作用,进行了群桩承载力模型试验,提出了黄土中低承台群桩基础极限承载力经验公式。刘明振^[9]基于群桩外包线以内土和外包线以外土之间的沉降差,考虑群内土和群外土之间的剪应力值,通过试算法确定中性点位置,给出了群桩负摩擦力的计算方法。

群桩现场浸水试验至今还未见相关报导,湿陷性黄土具有很强的结构性,室内试验也较难模拟,所以模型试验研究也较少。因此,本文采用人工制备的湿陷性黄土模型试验相似材料模拟原状湿陷性黄土,室内填筑 2×2 群桩模型,进行浸水条件下群桩基础承载特性模型试验,探讨群桩基础负摩阻力的发展规律。

1 群桩模型试验概况

1.1 模型桩及承台制作

采用亚克力棒制作模型桩,直径3 cm,长度180 cm,长径比60,弹性模量2.18 GPa,采用环氧树脂黏细砂做粗糙处理。采用有机玻璃板加工承台,厚度4 cm, 2×2 群桩承台尺寸为18 cm \times 18 cm,桩间距为3 d,平面布置图见图1。

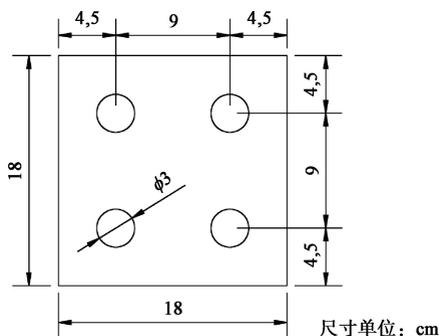


图1 承台平面尺寸

Fig.1 Plane sizes for pile cap

1.2 模型填筑与控制

模型箱尺寸:长 \times 宽 \times 高=1.0 m \times 1.0 m \times 2.1 m,模型箱底部分层填筑50 cm厚的压实重塑黄土作为持力层,压实黄土的密度 1.95 g/cm^3 ,含水率17%,压实度0.95,桩端进入非湿陷性黄土层30 cm。桩周土体采用人工制备湿陷性黄土填筑^[10],选用石英

粉和砂作为无黏结性材料,富含蒙脱石的膨润土、石膏和工业盐作为胶结材料,各成分的质量比为:砂:石英粉膨润土:石膏:工业盐=0.25:0.3:0.3:0.1:0.05。控制密度 1.40 g/cm^3 ,含水率6.5%,自重湿陷系数为0.125,渗透系数为 $1.26 \times 10^{-4} \text{ mm/s}$ 。分层填筑,填筑总高度为150 cm,模型填筑示意图见图2。

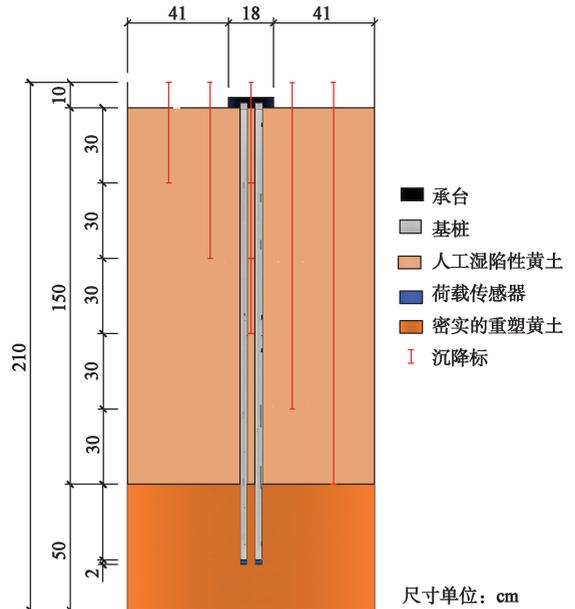


图2 模型填筑及测试元件布置剖面图

Fig.2 Model filling and layout profile of test elements

1.3 测试元件布置

(1) 应变片

在2根基桩表面每隔15 cm粘贴应变片,共粘贴22个应变片,进行桩身轴力测试。

(2) 荷载传感器

在桩端采用石膏黏合微型荷载传感器,用于量测桩端荷载。

(3) 微型沉降标

在桩周湿陷性土层内,每隔30 cm布置微型沉降标,用于桩周土体湿陷变形量测试。

(4) 百分表

在承台表面和沉降标顶部布设百分表,用于桩顶位移与土体位移测试。

1.4 模型加载与控制

参考《建筑基桩检测技术规范》^[11],采用慢速维持荷载法,分级加载至工作荷载时进行开始浸水,浸水采用滴定方法,湿陷性土层全部饱和后,停止浸水;桩顶沉降及桩周土体变形量小于 $1 \text{ mm}/24 \text{ h}$ 时,认定变形相对稳定。

2 土体湿陷变形分析

根据未浸水状态下同一组竖向极限承载力模型试验结果可得,群桩的极限承载力为 16 kN ^[12]。控制相

同条件,重新填筑模型,加载至承载力特征值 8 kN 稳定后,开始浸水,采用滴定方式,保持稳定水头高度 5 cm,土层全部饱和后,停止浸水,浸水 17 d,累计浸水 537 L,计算平均饱和度为 0.87。停水 7 d 后,土体变形达到相对稳定。

土层累积湿陷变形量随浸水时间关系曲线见图 3,随浸水时间的持续,土体的湿陷变形可划分为:①初期平缓,上部土层开始遇水产生微小湿陷变形,而中下部土层保持天然状态。②浸水陡降段,随水分渗入深度的增加,造成大部分大孔隙和中等孔隙的迅速破坏,土层由浅部到深部,产生快速的湿陷变形,浸水 14 d 时,各深度处的累积湿陷量约占总湿陷量的 80%,完成主要湿陷。③中期平缓段,浸水 14 d 至停水前,小部分中等孔隙和大量小孔隙产生破坏,土颗粒位置进行微调整,缓慢湿陷。④停水后平缓段,停止浸水后,由于模型箱侧壁封闭,底部为渗透系数较小的压实黄土,土层未发生明显的自重排水固结,曲线保持平缓,最终趋于稳定。

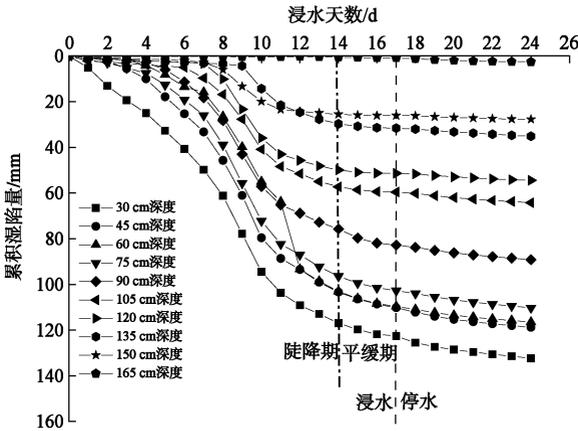


图 3 土层累计湿陷量随时间关系曲线

Fig. 3 Relationship between cumulative collapse settlement and time

与现场浸水试验相比,当自重湿陷性黄土层厚度较小(约 10 m)时,土层累计湿陷量随时间关系曲线分为初期平缓段、浸水陡降段和中期平缓段^[13],与模型试验结果一致。当自重湿陷性黄土层厚度较大时,土层累计湿陷量随时间关系曲线分为初期平缓段、浸水陡降段、中期平缓段、停水后的陡降段和后期平缓段^[3],停水后,饱和土层产生较大的自重固结变形。

3 浸水状态下桩基荷载传递特征

3.1 浸水状态下桩顶有附加荷载时群桩试验

在浸水前,分级加载至承载力特征值 8 kN 时,承台顶沉降为 2.01 mm。此时,维持稳定荷载 8 kN 开始浸水。桩顶沉降与浸水时间曲线见图 4,与土体累计湿陷量随时间变化规律一致,在浸水陡降段,桩顶沉降量近

似线性增加,14 d 累积沉降量占最终沉降量 70%。桩周土体变形稳定时,承台顶的附加沉降量为 74.82 mm。

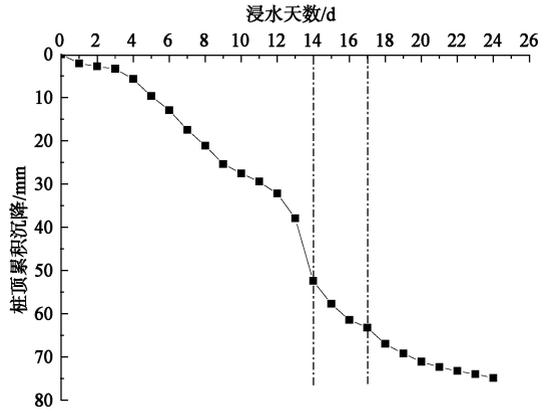


图 4 桩顶沉降与浸水时间曲线

Fig. 4 Relationship between settlement of pile top and time of water immersion

3.2 桩身轴力传递特征

浸水后基桩桩身轴力和桩侧摩阻力分布曲线见图 5,6,浸水 1 d,上部土层浸湿约 33 cm,桩顶正摩阻力开始向负摩阻力转化,在中性点处桩身轴力最大,中性

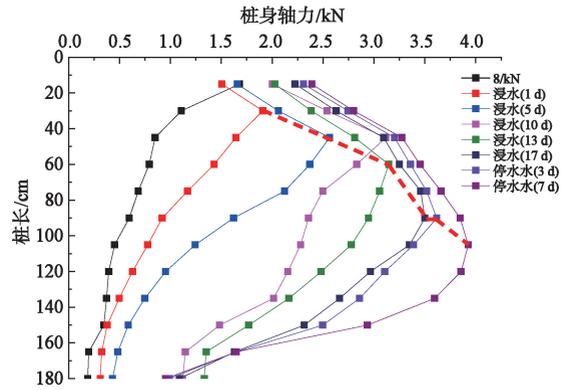


图 5 浸水后基桩桩身轴力传递曲线

Fig. 5 Transfer curves of axial force of pile foundation under water saturation

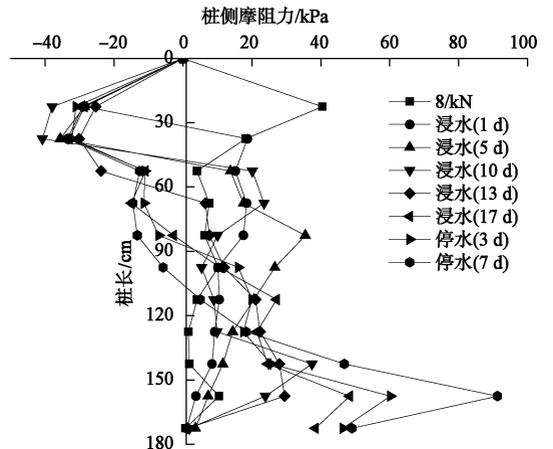


图 6 浸水后基桩桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 6 Distribution curve of lateral skin friction of piles under water saturation

点深度约为 30 cm。随水分入渗深度增加,土层由上向下产生快速湿陷变形,负摩阻力自上而下发展,中性点深度下移。当桩周土体全部浸水饱和时,中性点深度为 90 cm,中性点深度比为 $90/150 = 0.6$,负摩阻力最大值为 33 kPa。在停水期间,负摩阻力继续缓慢向下发展,中性点深度最终为 105 cm,中性点深度比为 $105/150 = 0.7$,负摩阻力最大值为 33.5 kPa。

3.3 桩端阻力发挥特征

浸水后基桩端阻力与浸水时间曲线见图 7,从浸水开始至 13 d 时,基桩桩端阻力近似线性增大,最大为 1.37 kN,此时桩身最大轴力为 3.05 kN,占竖向荷载的 45%。随桩端荷载的增大,桩顶位移显著增大,与图 4 所揭示的规律一致。停水稳定后,最终基桩桩端阻力为 1.0 kN,桩顶位移缓慢增加,在下拉荷载作用下,群桩基础呈现刺入式破坏。

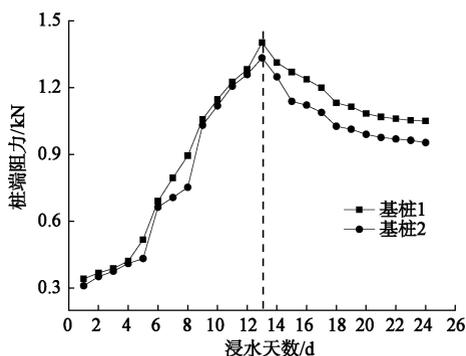


图 7 浸水后基桩端阻力与浸水时间曲线

Fig. 7 Relationship between pile end resistance and time of water immersion under water saturation

3.4 中性点位置分析

进行中性点深度分析,土体全部浸水饱和后,基桩的中性点深度比为 0.6,停水稳定后,中性点深度比最终为 0.7。《建筑桩基技术规范》^[14]给出的推荐值为 $(0.5 \sim 0.6) \times 1.1 = 0.55 \sim 0.66$,本次模型试验结果与桩基规范推荐值较为接近。由于中性点深度受地表沉降、桩顶荷载、桩径、土体湿陷性、浸水路径、桩侧摩阻力以及桩端持力层性质等因素的影响,所以各地试验现场浸水试验所得中性点位置离散性较大,从 0.34 到 0.85^[15]。

选取近年来国内具有代表性的湿陷性黄土地基桩基浸水试验结果进行分析:①由室内试验结果确定的湿陷性土层厚度与现场浸水试验实测值差异较大,而采用室内试验值确定湿陷性黄土层下限深度时,有 80% 以上的中性点深度比在 0.5 ~ 0.65 之间,即符合桩基规范推荐值。②浸水前桩顶是否承受工作荷载对中性点深度比影响较大,当桩顶承受一定竖向荷载时,有 80% 以上的中性点深度比在 0.5 ~ 0.65 之间,即符合桩基规范推荐值。实际工程中的桩基,都是在承受

一定竖向荷载条件下的浸水。

因此,在大厚度湿陷性黄土地层中,当湿陷性黄土层下限深度采用室内试验确定值,同时考虑桩顶承受工作荷载,浸水后负摩阻力的中性点深度比可参考桩基规范取值。

4 结 论

(1) 开始浸水后,桩周湿陷性土层的累积湿陷变形量随浸水时间的持续,可划分为初期平缓段、浸水陡降段、中期平缓段和停水后平缓段。由于模型箱侧壁封闭,底部压实黄土渗透系数较小,土层未发生较大的自重固结变形,与自重湿陷性黄土层厚度较小的现场浸水试验规律相一致。

(2) 在桩顶保持恒载条件下浸水,随土层浸水深度的增大,湿陷变形快速发生,负摩阻力自上而下发展,中性点深度下移,浸水 17 d 结束时,负摩阻力最大值为 33 kPa,中性点深度比为 0.6。停止稳定后,负摩阻力最大值为 33.5 kPa,中性点深度比为 0.7,试验结果与桩基规范推荐值较为接近。

(3) 在浸水期间,桩端阻力随浸水时间先近似线性增大,后缓慢减小。桩端阻力最大时,占竖向总荷载 45%。最终在下拉荷载作用下,群桩基础产生较大的沉降。土层的湿陷与桩侧负摩阻力、群桩基础沉降的发生与发展呈现出同步趋势。

参考文献:

- [1] 冯世进,柯瀚,陈云敏,等. 黄土地基中超长钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 110 - 114. (FENG Shi-jin, KE Han, CHEN Yun-min, et al. Experimental study on super-long bored pile in loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 110 - 114. (in Chinese))
- [2] 朱彦鹏,杨校辉,马天忠,等. 黄土塬地区大直径长桩承载性状与优化设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 1012 - 1023. (ZHU Yan-peng, YANG Xiao-hui, MA Tian-zhong, et al. Bearing behavior and optimization design of large-diameter long pile foundation in loess subsoil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 1012 - 1023. (in Chinese))
- [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试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 338 - 346. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, 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. (in Chinese))
- [4] 任鹏. 黄土地基超长基桩竖向承载特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (REN Peng. Vertical Load Bearing

- Behaviors of Super-long Pile in Loess Subgrade [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [5] 杨校辉, 黄雪峰, 朱彦鹏, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和湿陷性评价试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 1063 - 1074. (YANG Xiao-hui, HUANG Xue-feng, ZHU Yan-peng, et al. Experimental study on collapsibility evaluation and treatment depths of collapsible loess upon self-weight with thick depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(5): 1063 - 1074. (in Chinese))
- [6] MASHHOUR I, HANNA A. Drag load on end-bearing piles in collapsible soil due to inundation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(12): 2030 - 2038.
- [7] HANNA A M, SHARIF A. Drag force on a single pile in clay subjected to surcharge loading [J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2006, **6**(2): 89 - 96.
- [8] 高永贵. 黄土中低承台群桩承载性能的试验研究[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1994, **26**(4): 355 - 360. (GAO Yong-gui. Experimental study on the load-capacity behavior of pile groups with low cap in loess[J]. Journal of Xi'an Inst. of Metall. & Cons. Eng, 1994, **26**(4): 355 - 360. (in Chinese))
- [9] 刘明振. 含有自重湿陷性黄土夹层的场地上群桩负摩擦力的计算[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 749 - 752. (LIU Min-zhen. 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. (in Chinese))
- [10] 张延杰, 王旭, 梁庆国, 等. 湿陷性黄土模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 4019 - 4024. (ZHANG Yan-jie, WANG Xu, LIANG Qing-guo, et al. Development of model test similar material of collapsible loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **32**(S2): 4019 - 4024. (in Chinese))
- [11] 建筑基桩检测技术规范: JGJ106—2014 [S]. (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ106—2014 [S]. 2014. (in Chinese))
- [12] 李建东, 王旭, 张延杰, 等. 大厚度黄土地基超长群桩承载特性模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(6): 1708 - 1714. (LI Jian-dong, WANG Xu, ZHANG Yan-jie, et al. Model tests for bearing behavior of large diameter and super long pile group in large thickness loess site[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(6): 1708 - 1714. (in Chinese))
- [13] 钱鸿缙, 王继堂, 罗玉生, 等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985. (QIAN Hong-jin, WANG Ji-tang, LUO Yu-sheng, et al. Collapsed Loess Foundation [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1985. (in Chinese))
- [14] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 2008. (Technical Code for Building Pile Foundation: JGJ 94—2008 [S]. 2008. (in Chinese))
- [15] 黄雪峰, 杨校辉, 殷鹤, 等. 湿陷性黄土场地湿陷下限深度与桩基中性点位置关系研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 2): 296 - 302. (HUANG Xue-feng, YANG Xiao-hui, YIN He, et al. Study of relationship between maximum collapsing depth and neutral point position of pile foundation in collapsible loess ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S2): 296 - 302. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)