

超大深基坑开挖坑底回弹变形规律 及其变异机制

向 鹏¹, 金大春², 郭洪军², 沈恒祥¹, 冯国俊², 王 浩³

(1. 北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100023; 3. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101)

摘 要:以北京某基坑工程为例, 分析了厚砂土层中超大深基坑开挖坑底回弹变形特征及规律, 发现立柱变形存在明显的 3 阶段特征: 早期明挖阶段快速隆起, 中期逆作板施作阶段缓慢变形沉降, 后期盖挖阶段持续隆起, 但早期立柱隆起量远超一般基坑的范畴。基于理论和试验分析了基坑开挖尺度、开挖次数、开挖速率等时空因素对坑底土体卸荷应力、卸荷模量和回弹变形的影响及机制。分析结果表明, 随着基坑宽高比和宽长比增大, 坑底土体卸荷应力增加, 卸荷模量减小, 回弹变形增加; 开挖卸荷量和卸荷速率越大, 所引起的卸荷应力越大, 卸荷模量越小, 回弹变形也越大。根据上述结论推断, 开挖尺度大和速度快所导致的上述土体回弹变形时空效应是副中心站基坑早期立柱异常隆起的主要原因, 这与现场土方开挖记录相吻合。在此基础上, 提出了考虑卸荷模量受时空效应影响而变化的回弹变形计算方法, 通过多种计算方法对比分析, 指出超大深基坑回弹变形在计算时要充分考虑时空效应影响, 否则会导致对回弹变形的严重低估, 影响后续施工安全。

关键词:开挖尺度; 开挖速度; 回弹变形; 卸荷模量; 时空效应

中图分类号: TU448 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)04-1070-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241000

Law and variation mechanism of rebound deformation at the bottom of a super large deep excavation pit

XIANG Peng¹, JIN Da-chun², GUO Hong-jun², SHEN Heng-xiang¹, FENG Guo-jun², WANG Hao³

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100023, China; 3. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: Taking a foundation pit project in Beijing as an example, the characteristics and laws of rebound deformation at the bottom of the super-deep foundation pit with a thick sandy soil layer were analyzed. It was found that the column deformation exhibits obvious three stages: rapid uplift in the early open excavation stage, slow deformation and settlement in the middle reverse slab construction stage, and continuous uplift in the late cover excavation stage, but the amount of early column uplift far exceeded the

收稿日期: 2024-09-12.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC2907403).

作者简介: 向鹏(1987-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 地下工程灾害防控. E-mail: xiangpeng811@126.com

general scope of foundation pits. Based on theory and experiment, the influence and mechanism of spatiotemporal factors were studied. It was found that with the increase of width to height ratio and width to length ratio of the pit, the unloading stress increases, the unloading modulus decreases, and the rebound deformation increases. The greater the excavation unloading quantity and unloading rate, the greater the unloading stress, the smaller the unloading modulus and the greater the rebound deformation. Based on the above analysis, it was concluded that the spatiotemporal effect of soil rebound deformation caused by large excavation scale and fast excavation speed is the main reason for the abnormal uplift of the column in the early excavation stage, and this conclusion was consistent with the site excavation records of the earthwork. A calculation method of rebound deformation considering dynamic change of unloading modulus of thick sand soil was established. Through the comparative analysis of various calculation methods, it was pointed out that the influence of space-time effect should be fully considered in the calculation of rebound deformation of super-large deep foundation pit, otherwise it will lead to a serious underestimation of rebound deformation and affect the safety of subsequent construction.

Key words: excavation scale; excavation speed; rebound deformation; unloading modulus; space-time effect

0 引言

近年来超大超深基坑工程不断涌现,大尺度基坑一次开挖带来的卸荷量显著增大(几十万甚至上百万立方米的卸荷量),使得坑底土体隆起变形显著增加,对上部结构和基坑整体稳定性构成威胁,因此揭示基坑隆起变形机理,并预测并控制坑底土体及桩柱的隆起变形成为亟待解决的工程问题之一^[1]。

在基坑隆起变形机理方面,学者们通过研究,总结出以下几个方面原因^[2]:一是由上部土体开挖导致开挖面以下土体卸荷回弹引起;二是由于围护结构侧向卸载,在内外土压力差作用下围护结构侧移挤压坑内土体引起;三是由坑外土体向坑内移动产生的塑性隆起;四是地下水的浮力及渗流作用变化引起。

在坑底卸荷回弹变形预测方面,目前常用方法有规范法、经验公式法、残余应力法和数值分析法等^[3,4],还有学者提出了一些新的隆起变形计算方法^[5,6]。然而不同计算方法的适用性并不一致,以分层总和法为基础的规范法应用较为广泛,但由于影响基坑隆起变形的影响因素复杂多变,现有方法在指导工程实践方面仍有不足。

实际上基坑开挖回弹变形是一个复杂的时空效应问题,空间效应与荷载变化、应力重分布有关,学者们通过附加应力系数随基坑几何尺度特征变化分析了长宽比、宽深比等空间因素对卸荷应力的影响^[7-11],但较少进一步考虑空间因素对

土体卸荷模量的影响及其作用机制^[12];在时间效应方面,现有研究大多聚焦于黏土的压缩蠕变特性^[13-15],部分学者则关注到土体卸载速率对变形的影响,如李玉岐等^[16]分析了基坑开挖卸载引起的负超静孔隙水压力消散对坑底回弹的影响,林城福^[17]、师旭超^[18]等分析了卸荷速率对土体负超静孔隙水压力变化的影响,闫澍旺^[19]研究了变形速率对卸荷状态下饱和软黏土的影响,但较少见用于实际工程分析。尤其是对于超大深基坑,由于规模巨大,开挖卸荷带来的强烈时空扰动效应,不仅影响土体应力场分布,也影响土体自身变形力学特性,最终导致回弹变形呈现出变异特征,因此本文以北京某基坑工程为例,基于通过厚砂土层超大深基坑开挖坑底回弹变形特征、规律及其影响因素的分析,揭示超大深基坑卸荷回弹变形的时空效应及其影响机制,提出考虑时空效应的超大深基坑回弹变形计算方法,为超大型深基坑坑底土体及桩柱的回弹变形预测和控制提供依据。

1 北京某超大深坑底变形特征分析

北京某基坑规模为亚洲最大,其中02标段基坑长600 m,宽120~190 m,基坑面积10.86万平方米,基坑深度32.617~36.847 m,根据施工方案,该标段被划分为2个区域,用1 m厚素混凝土墙隔开,本文研究主要针对西咽喉区(见图1),其东西向长度约360 m,宽度120~190 m,最深约

40 m,按照施工工法不同,基坑划分为A、B、C三个大区域,其中主基坑A区又划分A1、A2、A3三个小区域;A区B3层全部逆作施工,B2层东侧三跨(A2区)逆作施工,B区B2层边跨逆作施工,C区B2层和B3层逆作施工,其余区域均顺作施工。基坑典型剖面见图2,开挖流程大致如下:先从地

表21 m标高放坡开挖至13 m标高,在该平台进行地下连续墙及工程桩、逆作柱的施工,然后进行降水分层开挖和相应支撑结构施作,主体部分B3层逆作顶板在标高1.3 m位置(开挖至-2 m标高时支模浇筑),基坑底板平均标高为-14.5 m,底板浇筑后,在基坑两侧预留反压土进行开挖。

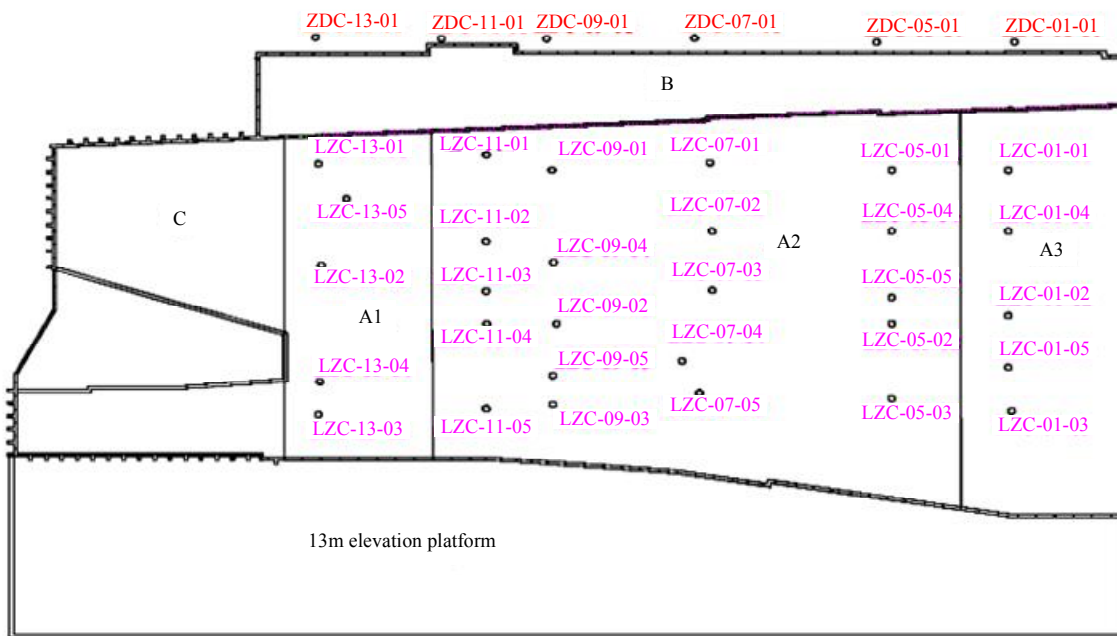


图1 基坑平面分区图

Fig. 1 Division of construction area

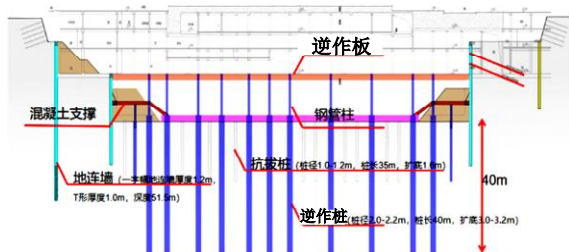


图2 基坑典型剖面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of typical section of foundation pit

根据现场记录,2021年6月中旬现场测量发现东三跨土方(A3区)开挖过程中逆作桩桩顶标高上升了20~30 mm,2021年7月下旬测量发现中部土方开挖至3 m标高时逆作桩桩顶标高上升了50~60 mm,经多方复核后确认中部区域土方开挖时逆作桩桩顶标高平均上升了50~60 mm,局部立柱隆起量超过90 mm,现场情况见图3,部分立柱变形空间分布图见图4(彩图参见电子版,下同),蓝色表示7月30日前变形,白色表示7月30日后新增变形,可见立柱整体变形量较大,在基坑中东部区域变形最突出,且变形集中在7月

底前。

7月30日后,现场开始对立柱变形进行连续监测,监测点分布如图1所示,图5为7月30日后立柱累计竖向变形情况,结合坡顶位移监测结果(见图6)可知,变形明显存在3个阶段。第一阶段为2021年8月至9月,该阶段A2区土层平均由3 m标高开挖至0 m标高,该处立柱隆起约13 mm,坡顶隆起约11 mm;A3区土层由8 m标高开挖至0 m标高,立柱快速隆起约20 mm,坡顶隆起约15 mm;二者变形差异主要由于A2区土体前期超挖较多,而A3区集中在8~9月开挖。第二阶段为2021年10月至12月下旬,期间主要完成A2区的B3层逆作顶板浇筑和A1区B2层局部土方开挖,A3区立柱整体变形较平缓,而A2区立柱和坡顶则发生明显沉降变形,其中A2区立柱最大沉降差达到15 mm,坡顶沉降差约10 mm。第三阶段为2022年1月至9月,该期间土层开挖至坑底设计标高,由于逆作板下土层集中开挖卸荷,立柱由沉降又改为隆起,变化量达到15 mm。总体来看,后期立柱新增隆起不大,坑底立柱变形主要发生

在前期的6~9月,尤其以6~7月最为显著。



图 3 基坑施工现状

Fig. 3 Current situation of foundation pit excavation

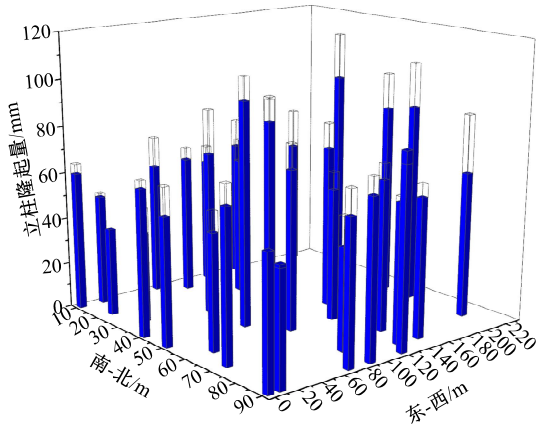


图 4 坑底立柱隆起空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of column uplift at pit bottom

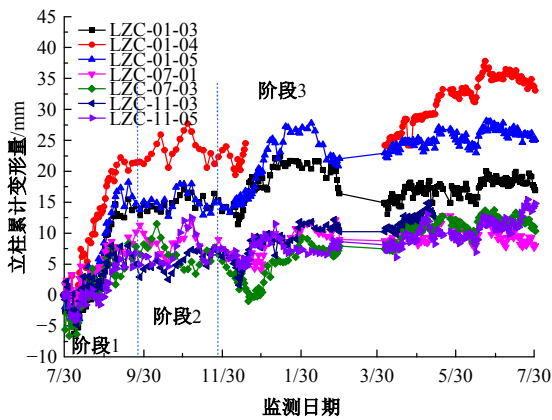


图 5 立柱累计变形

Fig. 5 Cumulative vertical displacement of column

研究表明,立柱隆起的最直接原因是坑底土体回弹,根据施工流程,该基坑6~7月开挖土方标高约为13 m至3 m,即开挖土层厚度约10 m,开挖土层埋深约18 m,且开挖主要在21 m厚的砂土中进行,可见土层开挖深度和厚度相比一般基坑并不大,为何会产生如此大的回弹呢?因此有

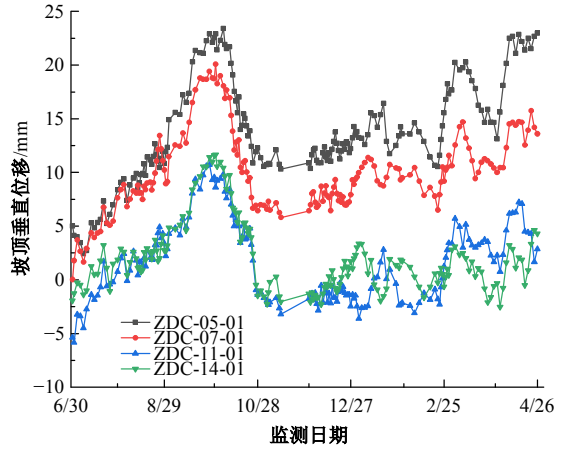


图 6 基坑坡顶累计竖向位移

Fig. 6 Vertical displacement of slope crest

必要对该基坑回弹变形的影响因素进行分析。

2 坑底回弹变形影响因素分析

2.1 空间尺度效应影响分析

(1) 对坑底卸荷应力的影响

坑底卸荷附加应力常用计算方法有两种,一是基于 Boussinesq 解推导出无限弹性地基表面作用矩形均布荷载在坑中产生的竖向开挖卸载应力沿深度分布,计算公式如下:

$$\Delta\sigma_{zB} = \alpha_B P = \frac{2P}{\pi} \times \left(\arctan \frac{BL}{(z-H)\sqrt{B^2+L^2+(z-H)^2}} + \frac{BL(z-H)(B^2+L^2+2(z-H)^2)}{(B^2+(z-H)^2)(L^2+(z-H)^2)\sqrt{B^2+L^2+(z-H)^2}} \right) \quad (1)$$

式中: B 为一半基坑宽度; L 为一半基坑长度,且 $L \geq B$; H 为基坑开挖高度; x 、 y 、 z 为以基坑平面中心点为原点建立的笛卡尔坐标系,其中 x 、 y 表示基坑所在平面, z 表示沿土层向下的深度。

另一种方法是基于 Mindlin 解推导出半无限弹性地基内部作用矩形均布荷载作用下角点处的竖向附加应力公式,计算公式如下:

$$\sigma_{zM} = \alpha_M P = \frac{P}{8\pi(1-\mu)} \times \left\{ 2(1-\mu) \arctan \left[\frac{BL}{(z-H)\sqrt{B^2+L^2+(z-H)^2}} \right] + 2(1-\mu) \arctan \left[\frac{BL}{(z+H)\sqrt{B^2+L^2+(z+H)^2}} \right] + \right.$$

$$\frac{BL(z-H)[B^2+L^2+2(z-H)^2]}{[B^2+(z-H)^2][L^2+(z-H)^2]\sqrt{B^2+L^2+(z-H)^2}} + \frac{BL[H+(3-4\mu)z][B^2+L^2+2(z+H)^2]}{[B^2+(z+H)^2][L^2+(z+H)^2]\sqrt{B^2+L^2+(z+H)^2}} + \frac{2Bzh(z+H)[3B^2L+2L^2+3L(z+H)^2]}{[B^2+(z+H)^2]^2[B^2+L^2+(z+H)^2]^{1.5}} + \frac{2LzH(z+H)[3L^2B+2B^2+3B(z+H)^2]}{[L^2+(z+H)^2]^2[B^2+L^2+(z+H)^2]^{1.5}} \quad (2)$$

式中: B 为基坑宽度; L 为基坑长度, 且 $L \geq B$; 矩形基坑中心点处竖向附加应力可通过角点法叠加求得。

对两种方法计算得到的矩形基坑中心点处竖向附加应力系数进行了对比。图 7 显示, 当基坑宽深比较小时, 坑底以下 2 倍开挖深度范围内 Boussinesq 解 (B 解) 附加应力系数比 Mindlin 解 (M 解) 大很多, 随着宽深比增加, B 解和 M 解差异减小, 并逐渐趋于一致。当基坑宽深比超过一定界限时, 在靠近坑底区域, 斜率显著增加, 即附加应力系数衰减缓慢, 坑底以下强卸荷范围显著增加。图 8 显示, 随着长宽比增加, 两种方法所得附加应力系数均减小, 附加应力系数差值沿着深度方向呈现两头小, 中间大的分布模式。综合对比来看, 当基坑尺寸较大时, 两种方法计算所得基坑中心土体最大卸荷应力基本一致。

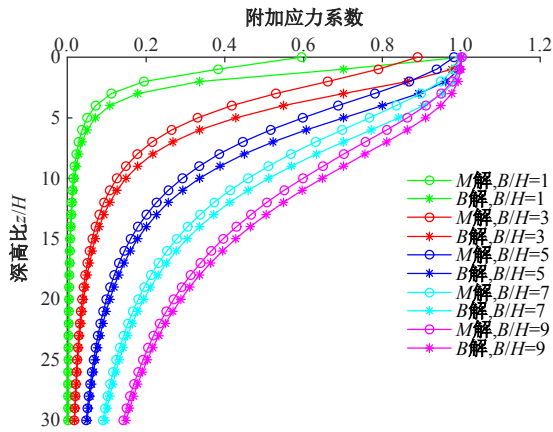


图 7 不同宽高比下竖向附加应力分布 ($H=20\text{ m}$)

Fig. 7 Distribution of vertical additional stress under different aspect ratios ($H=20\text{ m}$)

通常用卸荷比 R 衡量土体卸荷程度, 可取卸荷应力 p_z 与最大预压荷载 p_{\max} (或初始上覆荷载) 的比值, 据此可得到开挖高度为 H 时坑底以下任意深度 z 处垂直卸荷比:

$$R = \frac{p_z}{p_{\max}} = \frac{\alpha_z H}{z} \quad (3)$$

结合式 (2) (3) 可计算得不同深度卸荷比分

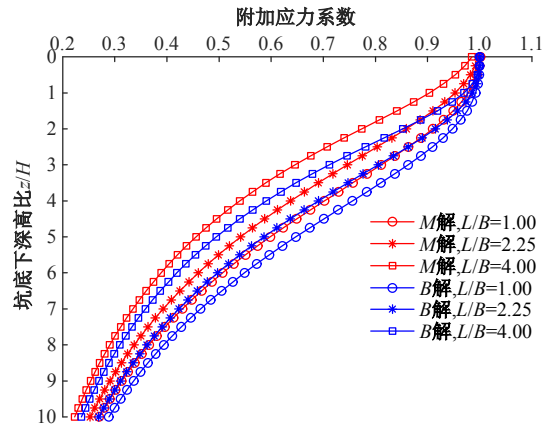


图 8 不同长宽比下竖向附加应力分布

Fig. 8 Vertical additional stress distribution under different aspect ratios ($H=20\text{ m}, S=180 \times 180\text{ m}^2$)

布。由图 9 可见, 随着坑底下深高比增加, 卸荷比快速降低, 宽高比越大, 同样深度处卸荷比越大, 但卸荷比差随着宽高比的差值增大逐渐减小, 当宽高比超过某一临界值后 ($B/H > 7$), 可认为卸荷比基本不再随宽高比变化。图 10 为分别以卸荷比 0.2、0.3 作为开挖卸荷影响深度临界点计算得到回弹影响深度系数随宽高比变化情况, 可见回弹影响深度随着宽高比呈非线性增加, 并最终趋于稳定, 卸荷比临界值越大, 回弹影响深度相对越小, 且随着宽高比增加卸荷比临界值选取对回弹深度影响更大, 当基坑宽度为 180 m 时, 影响深度可达到 3 倍开挖高度。

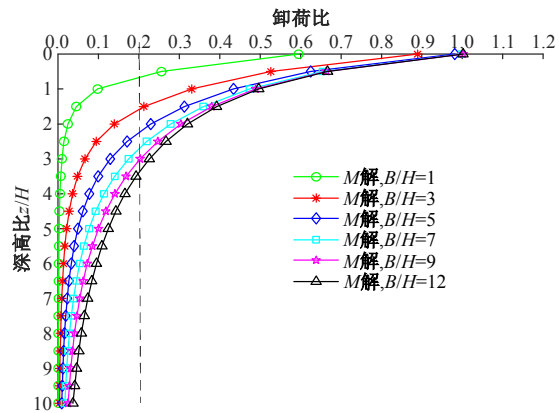


图 9 不同宽高比下卸荷比分布

Fig. 9 Distribution of unloading ratio under different aspect ratios

(2) 对卸荷模量的影响

上文探讨了基坑空间尺度对卸荷应力场的影响, 实际上基坑回弹变形不仅与卸荷应力有关, 还与土体的变形模量相关, 研究表明土体的卸荷模量不仅取决于土体的材料性质, 还与其所经历的

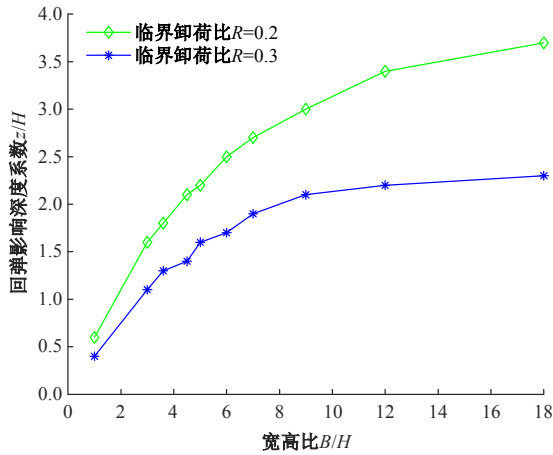


图 10 回弹影响深度随宽高比变化

Fig. 10 Depth of rebound effect varies with the aspect ratio

应力路径有关,由于土体应力场的空间效应,从而使得土体变形模量本身也具有显著的空间效应。

文献[1]通过对不同地区、不同土性的土样的进行回弹试验,并分析结果发现,土在完全卸荷时的卸荷模量 E_0 与初始卸荷应力 p 近似呈线性关系:

$$E_0 = \alpha p + b \quad (4)$$

实际上坑底土体在某一开挖状态下的卸荷模量 E_c 不仅与初始卸荷应力水平有关,也与卸荷比 R 的大小有关,初始卸荷应力及卸荷比不同,其卸荷模量也不同,根据试验数据可拟合三者之间的关系如下:

$$E_c = E_0(c \ln(R) + d) \quad (5)$$

将式(3)(4)代入式(5)计算即可得到地表下不同深度 z 处土体卸荷模量分布:

$$E_z = (\alpha \gamma z + b) \left(c \ln \left(\frac{\alpha_z H}{z} \right) + d \right) \quad (6)$$

式中: γ 为土层平均重度。

根据上述公式进一步推导可得回弹变形计算公式如下:

$$S_c = \int_0^{z_0} \frac{\gamma H \alpha_z}{E_z} dz \quad (7)$$

式中: z_0 为回弹影响深度。

假设坑底分布均匀粉质黏土,参考已有试验资料^[1],取 $a=0.01, b=2, c=-9.5, d=1$,采用 Matlab 编程计算不同空间尺度特征下回弹模量分布和回弹变形情况。

如图 11 所示,随着深度增加,卸载模量增大;宽高比越大,卸载模量相对越小,当宽高比 $B/H > 5$ 时,坑底 2 倍开挖深度范围内回弹模量基本不

再随之变化。图 12 表明,回弹位移随着宽高比增加而增大,当宽高比 $B/H > 5$ 后,其对回弹变形影响不再明显。

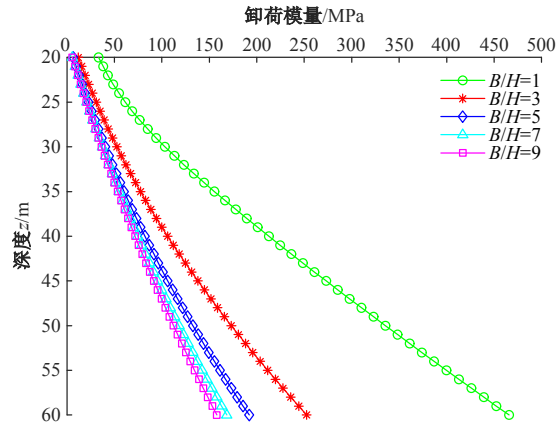


图 11 不同宽高比 B/H 下卸荷模量变化 ($H=20$ m)

Fig. 11 Change of unloading modulus under different aspect ratios ($H=20$ m)

2.2 开挖卸荷时间效应影响分析

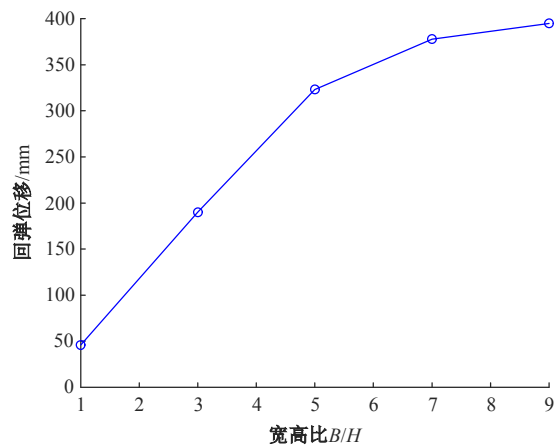


图 12 宽高比与回弹变形量关系 ($H=20$ m)

Fig. 12 Relationship between rebound deformation and width height ratio ($H=20$ m)

以平面尺寸 $180 \text{ m} \times 180 \text{ m}$ 、开挖深度 20 m 基坑为例,对比不同分层开挖次数对坑底土体卸荷比的影响,图 13 和图 14 显示,随着分层开挖次数增加,同一深度附加应力系数减小,卸荷比逐渐减小,卸荷模量增大,导致回弹应变和变形减小。分析其变化原因如下:假设上面第 i 层土开挖时在坑底下厚度 m 的土层中产生的平均卸荷应力为 σ_i , n 次开挖引起的总附加应力 $\sigma_{\text{分层}} = \sum_{i=1}^n \sigma_i$,当一次性开挖时,可认为卸荷回弹应力 $\sigma_{1\text{次}} = n\sigma_n, \sigma_n$ 为最后一个分层开挖卸荷应力,根据附加应力系数随深度变化规律可知,从上往下分层开挖时 $\sigma_i < \sigma_{i+1}$,使得 $\sigma_{\text{分层}} < \sigma_{1\text{次}}$ 。

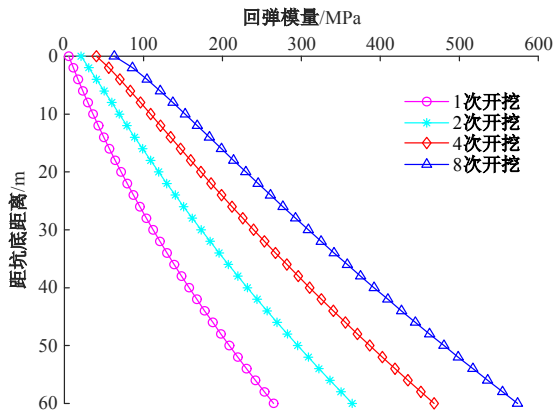


图 13 分层开挖次数与卸荷模量关系

Fig. 13 Relation between layered excavation times and unloading modulus

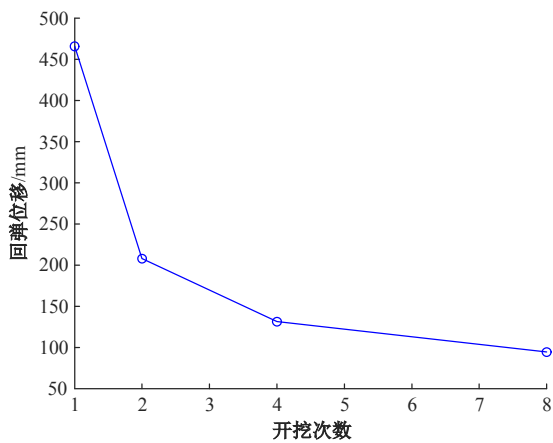


图 14 分层开挖次数与回弹变形关系

Fig. 14 Relation between layered excavation times and rebound strain

实际上,一次开挖对坑底土体来说意味着快速卸荷,分层开挖意味着缓慢卸荷,某种程度上分层开挖和一次开挖代表着工程开挖卸荷速率的不同,包含着土体卸荷的时间特性,但上述弹性理论计算无法体现时间效应影响,因此需要考虑卸荷速率对坑底土体回弹应力和变形的影响。

已有研究表明^[16-18],基坑土体开挖卸载将产生负的超静孔压,负孔压消散会导致坑底土体中的有效应力降低,从而引起坑底土体膨胀回弹。

图 15 为基于线性卸荷下地基土一维固结方程求解得到的不同速率和不同卸荷量下负超孔隙压变化,可见卸荷量和卸载速率越大,所引起的负超孔隙水压力越大,消散速度越快,对应着土体有效应力降低越多,降低速度越快,所导致的土体膨胀回弹就越大。当卸荷速率较小时,不同卸荷量下所引起的最大负孔隙水压值基本恒定,只有卸荷速率超过一定界限后,最大负孔隙水压随卸荷

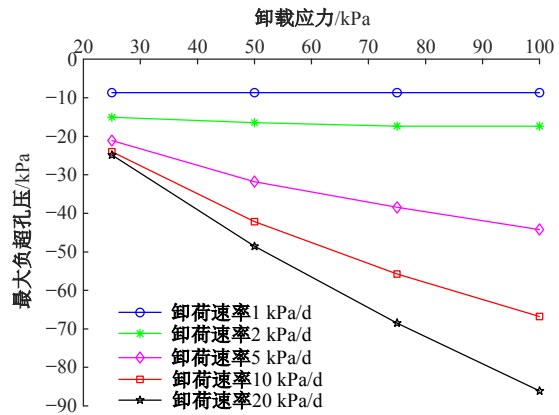


图 15 卸荷速率、卸荷量与最大负孔压关系^[17]

Fig. 15 Relation between unloading rate, unloading capacity and maximum negative pore pressure^[18]

量增大而增大。图 16 为卸荷速率对天津饱和软黏土孔压规律影响试验结果,亦表明变形速率越大,负孔压峰值越大,进而带来土体有效应力降低越大,从而影响土体回弹变形,上述理论和实验结果证实,开挖的卸荷量和速率对土体回弹变形有重要影响。

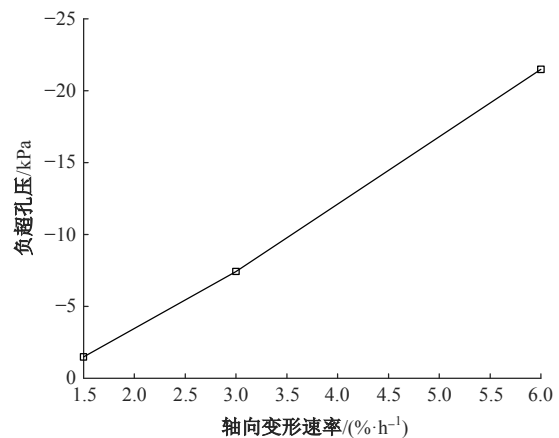


图 16 卸荷速率与负超孔隙关系^[18]

Fig. 16 Relation between unloading rate and negative excess pore^[18]

图 17、图 18 为基坑内重粉质黏土和砂质粉土和在不同卸载稳定时间 h 下的卸荷回弹曲线,可见只有卸荷比达到一定程度时(临界卸荷比 R_{cr})才会产生明显的回弹,卸载稳定时间 h 越小(即开挖卸荷速率越快),对应的 R_{cr} 越小,土体回弹模量也越小,使得卸荷影响深度越大,最终卸荷回弹变形越大;试验中获取的变形模量是表征土体变形的宏观参数,是卸荷速率引起的土体中应力变化和材料特性变化的综合反映。

现场土方开挖统计显示,2021年7月份土方

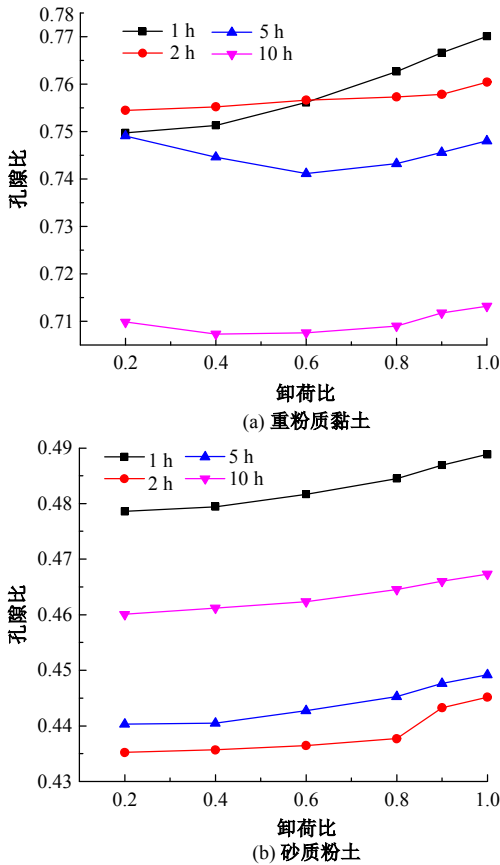


图 17 不同卸荷时间土体孔隙比与卸荷比(e-R)关系曲线

Fig. 17 Relationship between soil porosity ratio and unloading ratio (e-R) under different unloading times

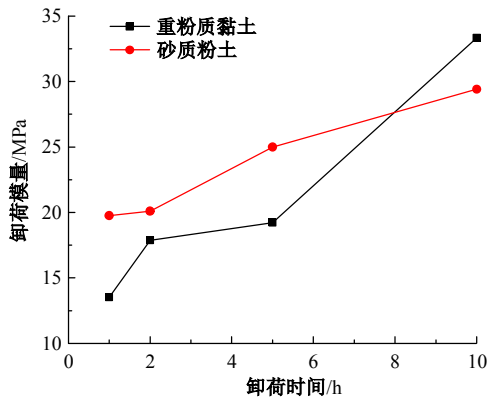


图 18 卸载模量-时间关系(卸荷比 R=1)

Fig. 18 Relationship between unloading modulus and time (unloading ratio R=1)

开挖总量为 276 080 m³,推算出 1 个月内土方标高平均降低约 9.23 m,日均开挖量约 8 900 m³,日均降低约 0.3 m,而 8 月土方日均开挖量约 5 200 m³,立柱最大隆起不超过 30 mm,远小于 7 月的平均隆起量 60 mm,这也证实了土方开挖量和速度对坑底变形有重要影响。

综上所述可知,西咽喉区基坑空间规模大,宽高比远大于普通基坑,同时早期明挖阶段土方开挖量巨大,且开挖速率较快,由此引发的时空效应是其坑底回弹变形异常的主要原因之一。据此向施工方提出了减缓开挖速度,分区分段均匀开挖和及时增加上覆结构荷载等控制措施,从而在中后期开挖过程有效控制了立柱隆起。

3 回弹变形理论计算分析

采用工程上常用地基回弹计算方法计算该基坑阶段回弹变形结果见表 1,可见开挖至 3 m 标高(2021 年 6~7 月)时坑底土体最大回弹位移约 52 mm,而实际工程中仅坑底立柱的平均变形量就超过这一值(局部超过 100 mm),土体回弹变形则更大,显然上述计算结果严重偏小,若以此作为设计依据,可能对后续施工造成不利影响。

表 1 传统方法计算坑底土体回弹变形结果

Table 1 Results of rebound deformation based on traditional calculation method

坑底地层名称	土层厚度 h/m	土层标高 z/m	回弹模量/MPa	回弹变形/mm	
				分层总和法	残余应力法
细砂	11.8	-6.8	106	9.87	25.98
重粉质黏土	4.4	-11.2	45	8.66	17.14
细砂	2.9	-14.1	106	2.43	3.80
有机质黏土	3.5	-17.6	76.1	4.07	3.83
黏质粉土一	4	-21.6	85.6	4.13	1.30
细砂	6.4	-28	106	4.28	
粉质黏土一	3.2	-31.2	57.1	4.63	
黏质粉土一	3.5	-34.7	85.6	3.36	
细砂	2	-36.7	106	1.55	
重粉质黏土	2.1	-38.8	57.1	3.00	
细砂	2.1	-40.9	106	1.61	
累计回弹变形量/mm				47.58	52.05

由于逆作柱是在前期放坡开挖(H₁=8 m)半年之后开始施工,其变形可认为主要是由后期开挖土体卸荷引起,即卸荷土层厚度实际为 H₂=10 m,但前期放坡开挖会影响坑底土体的卸荷比状态,计算中需要加以考虑,后期土层开挖引起的卸荷比:

$$R_2 = \frac{H_2 \alpha_2}{z - H_1 \alpha_1} \quad (8)$$

式中:α₁为前期开挖附加应力系数;α₂为后期开挖附加应力系数。

可见,受前期开挖影响,后期开挖时虽然卸荷

应力不变,但卸荷比却增大了,使得该处卸荷模量相应减少,进而影响最终变形。

根据表 1 可知,坑底主要为厚砂土,为计算简单,假设坑底为均匀分布砂土层。图 19 为每级卸荷压力稳定 24 h 后测定获得的砂土卸荷模量,图 20 为砂土在初始荷载 600 kPa,卸载稳定时间 $h=1$ h 条件下的卸荷模量,与卸荷稳定时间 $h=24$ h 的结果相比,其卸荷模量明显减小。对两种卸荷速率下试验数据拟合,得到卸荷模量沿着深度方向分布 E_z , 代入式 (7) 计算回弹变形,结果如表 2。

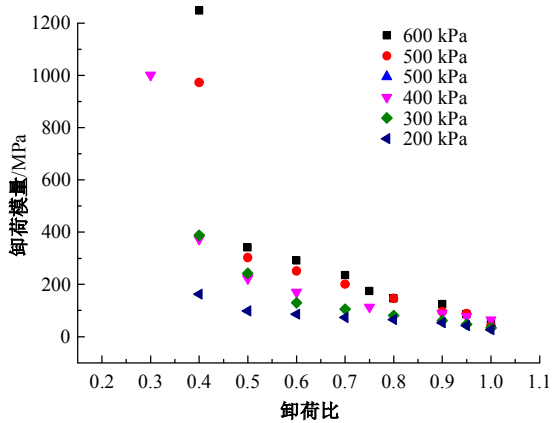


图 19 砂土标准试验条件下 ($h=24$ h) 卸荷模量分布

Fig. 19 Distribution of unloading modulus of sand under standard test conditions ($h=24$ h)

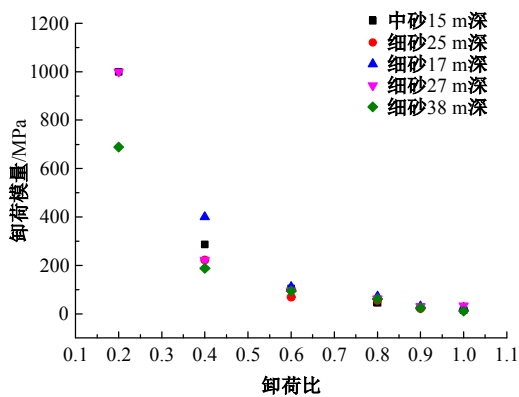


图 20 砂土快速卸载时 ($h=1$ h) 卸荷模量分布

Fig. 20 Distribution of unloading modulus of sand at fast unloading ($h=1$ h)

对比可见考虑卸荷速度对卸载模量影响的计算结果更贴近实际情况,该结果是以初始卸荷应力水平 600 kPa 试验得到的卸荷模量计算,实际坑底强卸荷区初始应力水平要低于 600 kPa,卸荷模量会更小,变形会更大。当然,卸荷稳定时间取 1 h 所得到的卸荷模量是否与现场开挖速率影响完全对应尚有待讨论,另外立柱的隆起量也不能

完全代表土体回弹(关于立柱隆起影响因素分析将另行撰文分析),但土体回弹量应比立柱大,所以卸载速率对坑底回弹变形有重要影响是肯定的,若不考虑这一超大规模带来的时空效应影响,可能导致坑底回弹变形的严重低估。

表 2 考虑回弹模量变化的坑底土体回弹变形计算结果

Table 2 Calculation results of rebound deformation considering changes in rebound modulus

卸荷时间/h	卸荷模量 E_z /MPa	卸荷临界比 R_{cr}	回弹影响深度 z_0 /m	回弹变形量 S /mm
24	$47.66R_z^{-2.31} - 6.22$	0.2	36	55
1	$79.58R_z^{-1.61} - 68.08$	0.2	36	103

忽略初始卸荷应力水平影响

4 结 论

(1) 现场监测表明坑底立柱变形明显存在明显 3 阶段特征:早期明挖阶段快速隆起,中期逆做板施做阶段缓慢沉降,后期盖挖阶段持续隆起,与施工工序基本吻合,但早期立柱隆起量为平均 50~60 mm,局部超过 90 mm,远超普通基坑范畴。

(2) 采用 Boussinesq 解和 Mindlin 解计算矩形基坑开挖引起的坑底附加应力,基坑尺度较小时 B 解计算值明显大于 M 解,而对于大尺度基坑,二者结果趋于一致;基坑宽高比和宽长比越大,卸荷附加应力越大,同一深度土层卸载模量相对越小,回弹影响深度越大,回弹变形越大,当宽高比超过一定限值后,最大回弹变形趋于稳定。分层开挖次数越大,对应的附加应力系数越小,卸荷模量越小,回弹变形也越小。

(3) 开挖卸荷速度对回弹变形有重要影响,其机制在于基坑开挖产生的负孔压消散导致坑底土体中的有效应力降低,引发坑底土体的膨胀隆起,开挖卸荷速率越大,卸荷量越大,引起的负孔压越高,消散速度越快,土体卸荷模量越小,土体回弹变形越大。

(4) 综合分析得出西咽喉区基坑空间规模大,宽高比远大于普通基坑,同时早期明挖阶段土方开挖量巨大,且开挖速率较快,由此引发的回弹变形时空效应是其坑底立柱异常隆起的主要原因。若按照传统方法不考虑超大深基坑这一时空效应影响来计算,必然导致对坑底回弹变形的低估,从而对后续盖挖逆作施工带来不便。

(5)针对实际工程问题,通过采取减缓开挖速度,分区分段均匀开挖和及时增加上覆结构荷载等方式,可有效控制立柱隆起。

参考文献:

- [1] 王曙光,李钦锐,李建民. 地基回弹变形计算若干问题探讨[J]. 土木工程学报, 2020, 53(8): 108-115
Wang Shu-guang, Li Qin-rui, Li Jian-min. Discussion on some issues of resilient deformation calculation [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(8): 108-115.
- [2] 潘林有,胡中雄. 深基坑卸荷回弹问题的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 101-104
Pan Lin-you, Hu Zhong-xiong. Experimental study on the resilience of pit under unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 101-104.
- [3] 刘国彬,侯学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力分析法[J]. 地下工程与隧道, 1996(2): 2-7.
Liu Guo-bin, Hou Xue-yuan. Residual stress analysis method for heave deformation of soft foundation pit [J]. Journal of Underground Engineering and Tunnel, 1996(2): 2-7.
- [4] 李德宁,楼晓明,杨敏. 基坑回弹变形计算方法研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1921-1927.
Li De-ning, Lou Xiao-ming, Yang Min. Research and application of calculation method for rebound deformation of foundation pits[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1921-1927.
- [5] 杨建民,李嘉. 基坑底分层回弹量的实用计算方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1413-1420.
Yang Jian-min, Li Jia. A practical method for calculating layerwise rebound at the bottom of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1413-1420.
- [6] 伍浩,王毅军,王海,等. 大面积基坑开挖回弹简化计算方法[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊1): 361-366.
Wu Hao, Wang Yi-jun, Wang Hai, et al. Simplified calculation method for rebound of large area foundation pit excavation[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup. 1): 361-366.
- [7] Finno R J, Blackburn J T, Roboski J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 30-36.
- [8] 何春保,王林彬,李高扬. 基于Mindlin解的矩形均布荷载作用下的附加应力[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 533-539.
He Chun-bao, Wang Lin-bin, Li Gao-yang. Stresses induced by vertical rectangular uniform loads within ground based on Mindlin solution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 533-539.
- [9] 王洪新. 半无限弹性体内作用竖向矩形和条形均布荷载时的应力计算公式[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 113-118.
Wang Hong-xin. Equations for calculating stresses in a semi-infinite elastic solid subjected to a vertical rectangular and strip uniform load beneath ground surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 113-118.
- [10] 童星,袁静,姜叶翔,等. 基于Mindlin解的基坑分层卸荷附加应力计算及回弹变形的多因素影响分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2432-2440.
Tong Xing, Yuan Jing, Jiang Ye-xiang, et al. Calculation of layered unloading additional stress of foundation pit based on Mindlin solution and the analysis of multiple factors influencing the rebound deformation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2432-2440.
- [11] 曹力桥. 软土地区深基坑开挖坑底隆起的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Z2): 819-824.
Cao Li-qiao. Finite element method analysis of bottom upheaval of deep foundation pits in soft-clay ground due to excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Z2): 819-824.
- [12] 陈晓,董建华,董和平,等. 考虑卸荷变形模量的坑底回弹变形计算方法[J]. 地震工程学报, 2021, 43(05): 1134-1141.
Chen Xiao, Dong Jian-hua, Tan He-ping, et al. Calculation methods for rebound deformation of foundation pit bottom considering unloading deformation modulus[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(5): 1134-1141.
- [13] 刘国彬,贾付波. 基坑回弹时间效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1): 3041-3044.
Liu Guo-bin, Jia Fu-bo. Test research on time effect of foundation pit rebound[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup. 1): 3041-3044.
- [14] 章为明,顾行文,王芳. 土的卸荷回弹试验及其时间过程的计算方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6):

- 979-987.
Zhang Wei-ming, Gu Hang-wen, Wang Fang. Calculation method of unloading rebound test and time process of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 979-987.
- [15] 周坤鹏,王颖轶,朱继文,等. 强蠕变软土条件下地铁基坑的施工变形特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(9): 1413-1418.
Zhou Kun-peng, Wang Ying-yi, Zhu Ji-wen, et al. Analysis of deformation properties of subway station foundation pit in soft soil with high creep property[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(9): 1413-1418.
- [16] 李玉岐,魏婕,谢康和. 负孔压消散对坑底的回弹影响研究[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(4): 52-55.
Li Yu-qi, Wei Jie, Xie Kang-he. Study on the effect of negative pore pressure dissipation on the spring back of the bottom[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(4): 52-55.
- [17] 林城福,雷国辉. 一维回弹试验中卸载条件下的负超孔隙水压力响应[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3613-3618,3626.
Lin Cheng-fu, Lei Guo-hui. Negative super Pore water response under unloading condions in one-dimensional rebound test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3613-3618,3626.
- [18] 师旭超,孙运德. 线性卸荷作用下软土超孔隙水压力变化规律分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1333-1338.
Shi Xu-chao, Sun Yun-de. Analysis of the evolution of excess pore water pressure in soft soil under linear unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1333-1338.
- [19] 闫澍旺,张京京,陶琳,等. 等向固结饱和黏土卸荷特性影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增2): 42-47.
Yan Shu-wang, Zhang Jing-jing, Tao Lin, et al. Influencing factors for unloading characteristics in saturated clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup. 2): 42-47.