

# 拔除高架桥桩施工对地层的扰动影响分析

高敏

(上海同济检测技术有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 拔桩施工需破除桩周的摩阻力,减少拔桩力,其力学机理十分复杂。依托上海市中山北路高架桥 B32 桥墩拔除工程,采用三维有限元数值模拟技术,建立了套管法拔桩施工过程的弹塑性有限元模型,分析了桩拔除引起的土体竖向位移随时间变化关系、拔桩地表沉降分布以及土体应力消散规律。研究表明当存在套管支护时,水平向应力分布较为平稳;当无套管支护时,在既有桩基一侧处将发生剧烈波动;拔桩施工结束后,附加应力均趋于稳定;由于桩基周围土体应力释放,当存在套管支护时,竖向向地表沉降分布平稳。

**关键词:** 高架桥; 桥墩桩基; 拔桩施工; 地层扰动分析; 三维有限元法

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0224-05

## Analysis of disturbance on strata from viaduct pile pulling construction

GAO Min

(Shanghai Tongji Testing Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The pile pulling construction needs to reduce the friction force around the pile and reduce the pulling force, the mechanical mechanism is very complicated. Relying on the pile pulling construction of the B32 bridge pier of Zhongshan North Road viaduct in Shanghai City, the elasto-plastic finite element model was established in the three-dimensional finite element numerical simulation technology, the relationship between the vertical displacement of soil and the distribution of soil surface settlement and the law of soil stress dissipation were analyzed. The results showed that the horizontal stress distribution was more stable when the casing support was existed. When the casing support was not existed, there was violent fluctuation on the side of the existing pile foundation. After the pile pulling construction, the additional stress tends to be stable and the vertical settlement of the ground surface was distributed when the soil stress was released around the pile foundation steady.

**Key words:** viaduct; pier pile foundation; pile pulling construction; analysis of formation disturbance; three-dimensional finite element method

## 1 研究背景

地下工程(盾构隧道、深大基坑等)施工过程中,需要遵循的一个重要原则就是其走向或者选址位置尽量沿城市主干道,以避免高层建筑或者城市高架桥梁的桩基础。但由于城内建筑物林立、河道纵横、主干道上桥梁众多,在地下工程施工推进过程中,难免遇到中高层建筑、防汛墙和高架桥梁桩基侵入地下开挖限界的情况<sup>[1-3]</sup>。为使地下工程建设顺利推进,就需要将这些侵入限界的高架桥梁桩基进行拔除。随着近几年我国各大城市轨道交通的飞速

发展,高架桥拔桩施工及其对周围环境的影响问题研究越来越受到国内外学者的关注。

众所周知,拔桩施工最重要的是破除桩周的摩阻力,主要为切断桩基与外界土体的联系,释放其应力,减少拔桩力,拔桩施工多采用套管法<sup>[4-5]</sup>。在桩体拔出过程中,难免对于周边的土体产生扰动,甚至会威胁到周围环境的安全<sup>[6-8]</sup>。拔桩施工存在着相当大的不确定性,必须加强施工中对周围环境的监测,并根据监测结果及时动态调整拔桩施工参数,保证周边结构物的安全。

目前,在旧桩基拔除施工方面,国内外学者已进

收稿日期:2018-04-24; 修回日期:2018-07-07

作者简介:高敏(1984-),男,江苏淮阴人,硕士,高级工程师,主要从事桥梁结构健康监测与诊断工作。

行了一些研究<sup>[9-12]</sup>。不难发现,大多数研究仅局限于对现场工程的实际监测,虽然获得了一些规律性的成果,但往往不具推广性;也有一些学者采用有限元数值模拟的方法,对拔桩过程进行了分析<sup>[13-15]</sup>,但也仅分析了拔桩引起的地层位移变化,对于拔桩过程的受力情况并未有所涉及,更没有关于外加套管拔桩施工影响的研究。因此,本文依托上海市中山北路高架桥 B32 桥墩拔除工程,采用有限元数值模拟方法,建立套管法拔桩施工过程的弹塑性有限元模型,重点分析桩拔除引起的土体竖向位移随时间变化关系、拔桩地表沉降分布以及土体应力消散规律,研究成果可为今后相关工程的设计与施工提供借鉴。

## 2 工程概况与与施工方案

### 2.1 工程概况

本工程是上海轨道交通 7 号线 5 标区间隧道,包括新村路—铜川路—中山北路站两个区间,是 7 号线的重要组成部分,铜川路—中山北路站区间盾构主要沿岚皋路、镇坪路一线推进。隧道施工过程中,下行线在此区域盾构掘进断面内遇到中山北路高架桥 B32 桥墩下准备废弃的 1 根钻孔灌注桩。

该钻孔灌注桩直径为  $\Phi 1000$ ,为需废弃的高架 B32 号桥墩的承重桩,盾构穿越前拟采用全回转工法进行拔除。钻孔灌注桩桩长 37 m,混凝土标号 C30,桩顶标高 0.548 m,钻孔灌注桩主筋配置  $8\Phi 20 + 8\Phi 19$ ,桩下部 12 m 范围主筋为  $8\Phi 20$ 。钻孔桩断面图如图 1 所示。

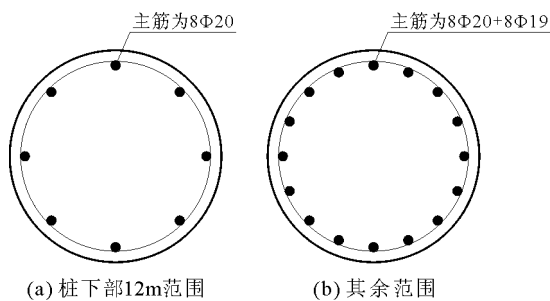


图 1  $\Phi 1000$  钻孔桩断面图

### 2.2 施工方案

钢套管为直径  $\Phi 2000$  mm,壁厚 48 mm 钢质桶式结构,根据需要钻进的深度情况分长度不同的若干节,在管口布置刀头。钢套总长 26 m,每沉完一节钢管,吊装上一节钢管,位置对准后,用高强螺栓连接。利用全回转设备产生的下压力和扭矩,驱动钢套管转动,利用管口的高强刀头对土体及钢筋混

凝土等障碍物的切削作用,将套管钻入地下,去除套管内桩体,最后向套管内回填土体并逐节顶拔套管。在整个过程中套管钻进与套管顶拔是整个施工的关键。该工法最大的特点是对周边环境影响小,利用套管的护壁作用,在套管内进行清障。施工流程如图 2 所示。

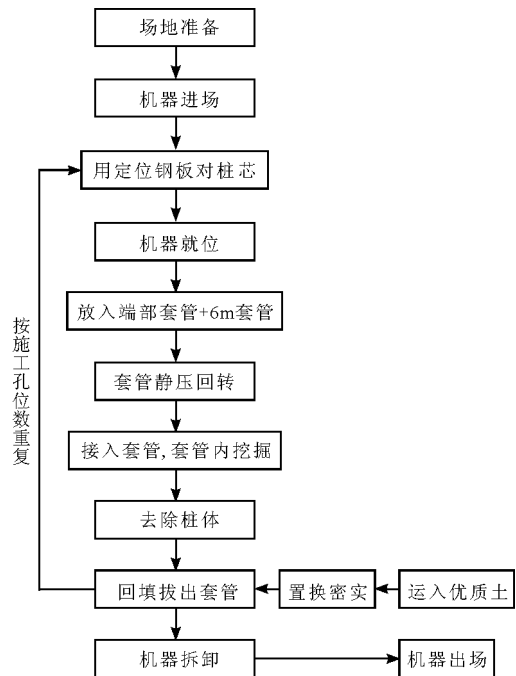


图 2 拔桩施工流程图

## 3 有限元模型构建

桩土相互作用过程中,一般模拟桩与土间的接触行为多是引入接触面单元,它是有限元计算中用以模拟接触面变形的一种特殊单元。在桩土相互作用计算中,将桩表面定为主接触面,土表面定为从属接触面,能够有效地解决该问题。

在几何模型上,用大尺寸来模拟半无限空间体,计算时土体计算域的半径远大于桩横截面的半径(土体半径取为桩横截面半径的 40~60 倍),计算深度为桩长的 1.5 倍以上。由于在施工时,桩在 22 m 处拔断,所以计算中拔出桩的半径为 0.5 m,长度 22 m,计算域的半径取为  $R = 20$  m,深度取为  $H = 30$  m,宽度方向取 40 m。对于单个的大直径超长桩的轴向受荷有限元分析,可简化为轴对称平面问题进行计算。土体、桩和套管都采用 4 结点双线性轴对称单元(C3D81),桩-土之间的接触采用一定厚度的薄层单元来模拟拔桩施工中存在的摩擦效应。为了减小计算误差,同时也为了缩短计算时间,在桩-土接触面附近单元网格划分的较细,而在远离接

触面的土体,网格划分相对稀疏,ABAQUS中无套管支护和套管支护模型如图3所示。

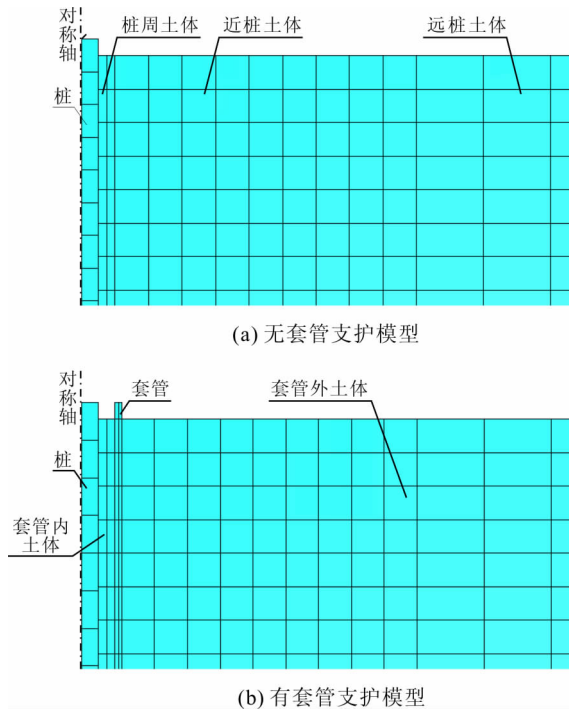


图3 有限元计算模型示意图

对于计算域的边界,取下部为固定边界,侧面边界为仅竖向可以移动的滑动边界。在桩顶部施加位移荷载,分为两个分析步:第一步(Step1)仅拔出0.01 m,小位移试算,保证计算收敛;第二步(Step2)拔出22 m。不失一般性,假设桩基处于单一地层中,不考虑拔桩过程中土体的蠕变和排水固结作用。选取典型地层的物理力学参数如表1所示。而在高架桥桩基的物理力学参数取值中,泊松比 $\mu = 0.2$ ,弹性模量 $E = 32\ 500\ \text{MPa}$ 。

表1 地层的物理力学性质

名称	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	内摩擦 角/( $^\circ$ )	黏聚 力/kPa	泊松比
粉质黏土	1850	20	27	23	0.4

## 4 有限元结果分析

### 4.1 竖向应力分析

图4所示为拔桩周围土体竖向应力分布图。由图4(a)中可见,随着桩的拔出,土体由于受到拉应力的作用,竖向应力减小,尤其是桩周围的土体减小更加明显,应力等值线在桩孔处成漏斗形。而图4(b)中可知,由于套管的支护作用,套管外土体的竖向应力基本没有变化,但是套管内的土体在拔桩力的作用下,竖向应力逐渐减小。

图5所示为拔桩周围土体竖向附加应力。由图5可知,随着桩的拔出,既有桩基周围土体由于受到拉应力的作用,无论有无套管支护,竖向应力均发生波动,处于中心位置处的竖向应力波动较大,存在套管支护的竖向附加应力波动更加剧烈,附加应力的最大值减小100 kPa左右。可见套管支护对于拔桩施工周围土压力的稳定具有十分明显效果。

### 4.2 水平应力分析

图6所示为拔桩周围土体水平向应力分布图。由图6(a)中可见,土体由于受到拉应力的作用,水平应力也会减小,尤其是桩周围的土体减小更加明显,同样,应力等值线在桩孔处成漏斗形。而从图6(b)中可见,套管外土体的水平应力基本没有变化,但是套管内的土体在拔桩力的作用下,水平应力逐渐减小。

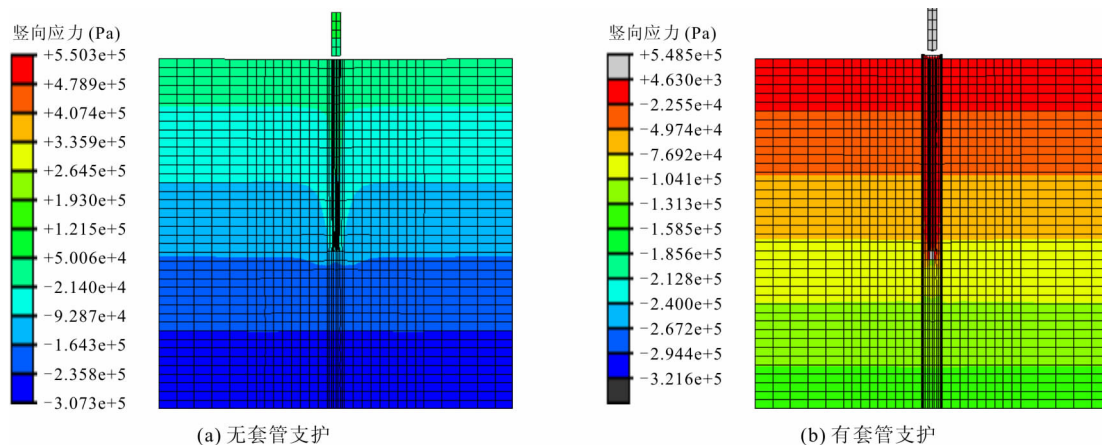


图4 拔桩周围土体竖向应力分布图(单位:Pa)

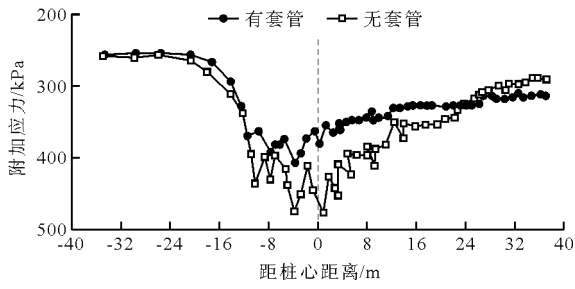
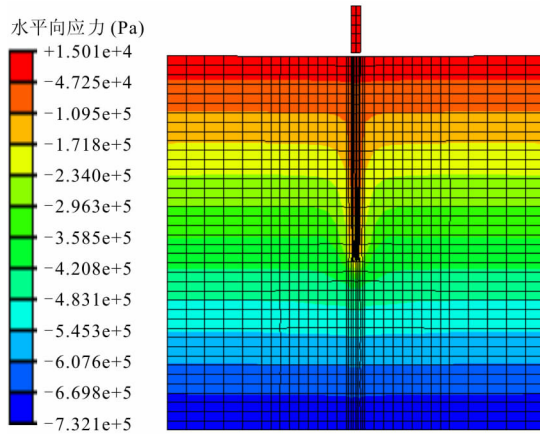
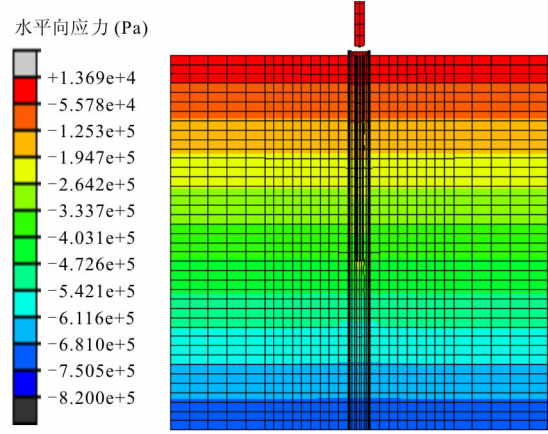


图 5 拔桩周围土体竖向附加应力

图 7 所示为拔桩周围土体水平向应力分布曲线。由图 7 可知,随着桩的拔出,既有桩基周围土体由于受到拉应力的作用,当存在套管支护时,水平向应力分布较为平稳,波动性并不明显;当没有套管支护时,在既有桩基一侧处将发生较剧烈波动,这是由于拔桩过程中的应力释放对桩周土体影响十分明显,在拔桩施工结束后,附加应力均趋于稳定,但此时无套管时附加应力较有套管支护时大 100 kPa 左右。



(a) 无套管支护



(b) 有套管支护

图 6 拔桩周围土体水平向应力分布 (单位:Pa)

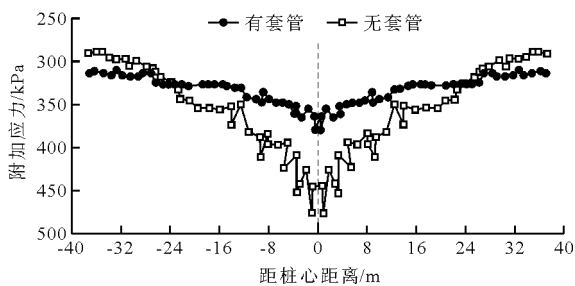
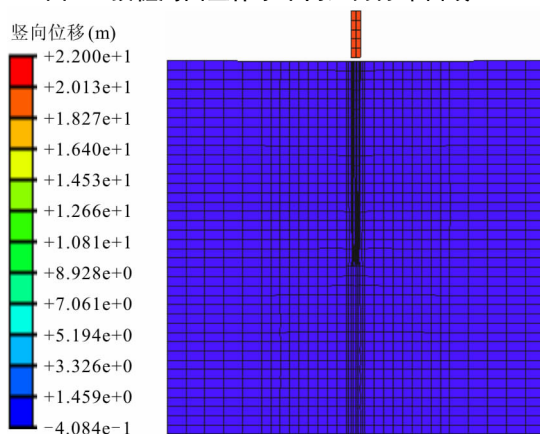


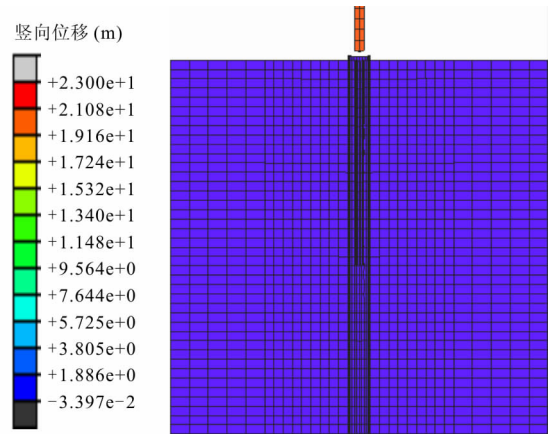
图 7 拔桩周围土体水平向应力分布曲线

### 4.3 竖向位移分析

图 8 所示为拔桩周围土体竖向位移分布曲线图。由图 8(a)中可见,桩开始拔出一个微小位移时,桩下部土体产生明显的向上的竖向位移,然后,由于桩周围土体的自重作用,土体滑脱于桩面,竖向位移减小直至消失。而图 8(b)中可知,由于存在套管的支护作用,加之套管内土体受扰动,该部分土体强度进行了折减,套管内外土体竖向位移很微小。因此,存在套管对与降低施工引起的竖向地表沉降具有十分显著作用。



(a) 无套管支护



(b) 有套管支护

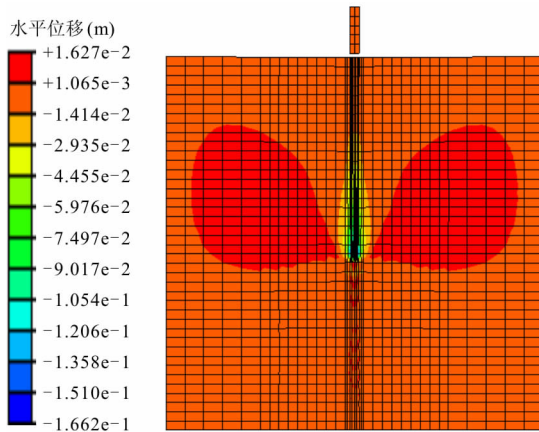
图 8 拔桩周围土体竖向位移分布



图9所示为拔桩周围土体竖向位移分布曲线。由图9可知,随着桩的拔出,既有桩基周围土体由于受到竖向的拉拔力作用,桩基周围土体应力释放发生松动,产生明显的沉降槽,这与图8中的位移云图结果相吻合。此外,当存在套管支护时,竖向向地表沉降分布平稳,中心位置处的沉降大约为4 mm;而当无套管存在时,既有桩基位置处的土体产生明显的沉降,最大沉降值为10 mm,且沉降槽呈现明显的漏斗状,在距离既有桩基大约20 m半径范围内的影响显著,远离该区域则沉降几乎趋于稳定状态。这就要求在拔桩施工过程中,应重点注意拔桩在桩周产生的应力释放,采取积极有效方法减少施工过程中产生的大面积地面沉降。

#### 4.4 水平位移分析

图10所示为拔桩周围土体水平位移分布图。



(a) 无套管支护

由图10(a)中可见,桩开始拔出一个微小位移时,桩底土体受到向上拉力,产生向内的水平位移,然后随着桩的逐渐拔出,在桩孔两侧产生一对对称的、囊状的、向外的水平位移区域。而从图10(b)中可见,由于套管的保护作用,套管外土体几乎没有水平位移,只是在桩底两侧产生一对对称的、囊状的、向外的水平位移区域。

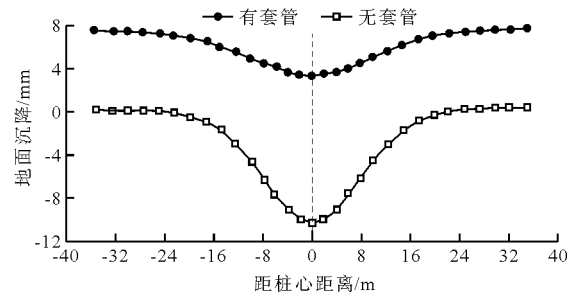
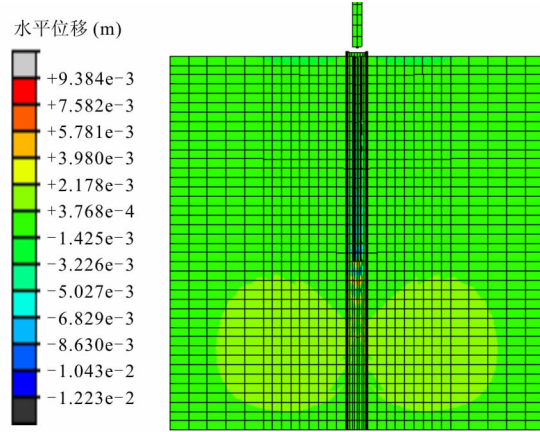


图9 拔桩周围土体竖向位移分布曲线



(b) 有套管支护

图10 拔桩周围土体水平位移分布图

图11所示为拔桩周围土体竖向位移分布曲线。

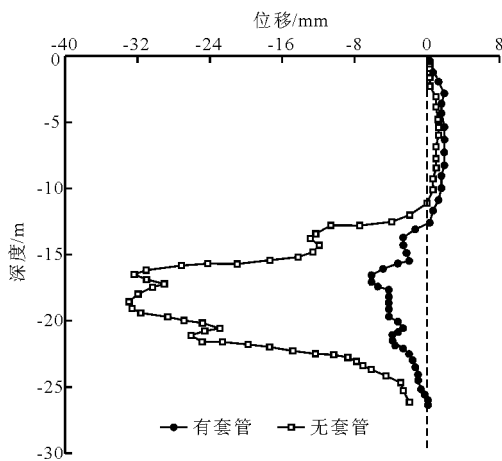


图11 拔桩周围土体水平位移分布曲线

由图11可知,由于对称性,随着桩的拔出,桩周土体分别向两边松弛,产生向外扩张的水平位移,可

以发现无套管支护时,产生的侧向位移较存在套管支护时明显增大,最大水平位移大25 mm左右,并且可见最大位移产生位置位于既有桩基桩端位置处,这是由于在拔桩过程中,随着桩端上升,桩与土体之间逐渐形成较大的空隙,该位置处受到拔桩扰动累积的结果。

## 5 结论

依托上海市中山北路高架桥B32桥墩拔除工程,采用三维有限元数值模拟方法,通过构建套管法拔桩施工过程的弹塑性有限元模型,分析了桩拔引起的环境扰动影响规律。主要结论有:

(1) 无论有无套管支护,竖向应力发生波动,处于中心位置处的竖向应力波动较大,存在套管支护的竖向附加应力波动更加剧烈。

(下转第235页)

- on construction waste control practices: Legislative and waste management perspective [J]. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2016, 224: 276 - 283.
- [13] WOJCIECH S, GLUCHOWSKI A. Effects of stabilization with cement on mechanical properties of cohesive soil - sandy - silty clay [J]. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation*, 2013, 45 (2): 193 - 205.
- [14] HASAN U, CHEGENIZADEH A, BUDIHardjo M A, et al. Experimental evaluation of construction waste and ground granulated blast furnace slag as alternative soil stabilisers [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2016, 34(6): 1707 - 1722.
- [15] 孙中明, 璩继立. 纤维素纤维和石灰粉对上海黏土抗压强度的影响 [J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27 (2): 211 - 215.
- [16] CHEN Aijun, ZHANG Jiasheng, PENG Liying, et al. Indoor experimental research on the unconfined compressive strength of lime improving expansive clay [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 250 - 253: 2296 - 2301.
- [17] JHA A K, SIVAPULLAIAH P V. Susceptibility of strength development by lime in gypsiferous soil - A micro mechanistic study [J]. *Applied Clay Science*, 2015, 115: 39 - 50.
- [18] MUBEEN M M. Stabilization of soft clay in irrigation projects [J]. *Irrigation & Drainage*, 2010, 54(2): 175 - 187.
- [19] YU H S, SLOAN S. Finite element limit analysis of reinforced soils [J]. *Computers and Structures*, 1997, 63 (3): 567 - 577.
- [20] CONSOLI N C, ROCHA C G D, SILVANI C. Effect of curing temperature on the strength of sand, coal fly ash, and lime blends [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(8): 6014015 - 6014011.
- [21] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTGE40 - 2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [22] 徐宝龙. 建筑垃圾土性能及其作为路基填料的施工 [J]. *中国市政工程*, 2011, 152(2): 67 - 69 + 93 - 94.
- [23] 花丽君, 吴相豪, 袁潘. 掺粉煤灰和石灰粉影响再生混凝土自收缩变形的试验研究 [J]. *粉煤灰*, 2013, 25 (1): 37 - 39.

(上接第 228 页)

(2) 当存在套管支护时, 水平向应力分布较为平稳, 波动性并不明显; 当没有套管支护时, 在既有桩基一侧处将发生较剧烈波动, 在拔桩施工结束后, 附加应力均趋于稳定。

(3) 随着桩的拔出, 桩基周围土体应力释放发生松动, 当存在套管支护时, 竖直向地表沉降分布平稳; 拔桩时桩周土体分别向两边松弛, 产生向外扩张的水平位移, 且最大位移产生位置位于既有桩基桩端位置处。

#### 参考文献:

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [2] 孙钧, 汪炳建. 地下结构有限元法解析 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
- [3] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [4] 冯嵩, 郑颖人, 孔亮, 等. 广义塑性力学多重屈服面模型隐式积分算法及其 ABAQUS 二次开发 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(10): 2019 - 2025.
- [5] 贺嘉, 陈国兴. 基于 ABAQUS 软件的大直径桩承载力-变形分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(2): 306 - 310.
- [6] 司海宝, 蔡正银. 基于 ABAQUS 建立土体本构模型库的研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(2): 599 - 603.
- [7] HIBBIT K. ABAQUS/Standard User's Manual [M]. USA: HKS Co., Ltd, 2002.
- [8] 曹玉忠, 刘建国, 徐东. 套管法拔桩施工对邻近箱涵的影响分析 [J]. *城市轨道交通研究*, 2007(8): 70 - 71.
- [9] 钱建固, 贾鹏, 程明进, 等. 注浆桩土接触面试验研究及后注浆抗拔桩承载特性数值分析 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(S1): 662 - 668.
- [10] 丁红岩, 刘建辉. 钻井船拔桩对筒基平台稳定性影响的敏感分析 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1205 - 1211.
- [11] 周长东, 张蝶. 预应力 FRP 片材约束混凝土方柱应力-应变模型 [J]. *结构工程师*, 2010, 26(2): 18 - 23.
- [12] HARAJLI M H. Axial stress-strain relationship for FRP confined circular and rectangular concrete columns [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(10): 938 - 948.
- [13] 刘其园, 张利荣. 钢板桩静压施工技术及其在螺河特大桥的应用 [J]. *水利水电技术*, 2013, 44(3): 37 - 38.
- [14] 徐壮涛, 张静. 旋挖扩底抗拔桩受力机理及扩底段作用机制研究 [J]. *建筑结构*, 2016, 46(8): 65 - 69.
- [15] 王建营. 全回转钻机拔桩施工技术 [J]. *建筑施工*, 2010, 32(2): 143 - 144.