

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0422

竖向掏土纠倾孔周塑性区计算研究

肖俊华^{1,2}, 孙剑平^{1,2}

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东建大工程鉴定加固研究院, 山东 济南 250014)

摘 要: 采用桩筏基础的高层建筑倾斜后, 常采用竖向孔掏土进行地应力解除实现纠倾, 工程设计与施工依据经验进行, 缺乏理论指导。将一定深度处的竖向孔周应力重分布问题简化为平面应变问题, 采用摩尔-库仑强度条件推导了塑性区半径的解析解。该解析解表明, 塑性半径随土体抗剪参数的降低而增大, 随掏土孔半径的增大而增大, 随地应力的增大而增大。结合解析解的表达式, 探讨了存在地下水、注水、抽水、循环掏土扰动等因素对塑性区半径的影响。最后用数值分析方法对该解析解进行模拟验证, 表明公式的正确性与适用性。该研究成果对纠倾工程的设计与施工具有积极的指导作用。

关 键 词: 竖孔掏土; 纠倾; 塑性半径; 数值模拟

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 12-4073-06

Study of the calculation of plastic zone around the vertical digging hole for building rectification

XIAO Jun-hua^{1,2}, SUN Jian-ping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China;

2. Institute of Project Appraisal and Reinforcement of Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: For inclined high-rise building with pile raft foundation, vertical hole digging is often used to relieve the ground stress to achieve the inclination correction. Due to the lack of theoretical guidance, the engineering design and construction have to rely to a large extent on experience. In this paper, the problem of stress redistribution around a vertical hole at a certain depth is simplified as a plane strain problem, and the analytical solution of the radius of plastic zone is derived by using the Mohr Coulomb strength theory. The analytical solution shows that the plastic radius increases with the decrease of shear parameters, the increase of digging hole radius and the increase of depth. By combining the site rectification phenomenon with the analytical solution formula, the influences of the groundwater, water injection, pumping, cyclic soil digging disturbance on the plastic radius are discussed. Finally, the numerical simulation is used to verify the analytical solution, which shows the validity and applicability of the formula. The research results will provide scientific insight for the design and smart construction of the rectification practice.

Keywords: vertical hole digging; incline-rectifying; plastic radius; numerical simulation

1 引 言

对于桩筏基础的高层建筑来说, 纠倾难度大、风险高。对于摩擦型桩基工程来说, 采用的纠倾方法为在沉降小的一侧竖向成孔至桩端持力层, 通过减小或解除桩侧与桩端的应力, 使孔周及孔端产生塑性屈服、流动, 相应桩侧摩擦力及桩端应力减小, 基桩进一步产生下沉达到纠倾目的。实践中通过严密的监测进行动态施工, 在掏土孔设计与施工过程中急需理论方面的指导。对于天然地基中的掏土孔

问题, 陈云娟等^[1]基于鲁宾涅特解的建筑物掏土纠倾孔周土塑性区计算, 给出了塑性区半径的解析解, 并推导了水平掏土孔间的最大间距。曾英俊等^[2]基于传统的临界状态土力学理论, 利用圆柱孔收缩弹塑性解研究隧道开挖问题, 给出了圆柱孔收缩问题孔压与孔径变化之间的关系, 并结合隧道开挖引起的土体瞬时沉降的理论, 给出了隧道支护压力和地表最大沉降量之间的关系。张治国等^[3]采用球形孔和圆柱孔扩张(收缩)理论研究桩基与隧道的相互作用, 基于 Mohr-Coulomb 屈服准则, 采用圆柱形

收稿日期: 2020-04-13

修回日期: 2020-06-20

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51678350)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51678350).

第一作者简介: 肖俊华, 女, 1969 年生, 博士, 副教授, 主要从事地基基础加固与桩基工程方面的研究工作。E-mail: 13606412056@163.com

孔收缩模型模拟隧道开挖过程,得到 Pasternak 地基上隧道开挖引起的邻近单桩弹塑性水平位移,并提出隧道开挖对邻近桩基承载能力弹塑性影响的计算方法。杨敏等^[4]用有限元方法研究隧道施工对桩内力变形的影响。黎春林等^[5]基于小孔扩张理论研究了注浆压力、注浆量对土体扰动塑性区的影响,推导了塑性区与注浆压力和注浆量之间的函数关系。竖向掏土纠倾与以上研究均属于半无限体中的小孔收缩问题,与水平掏土纠倾机制不同:水平掏土孔周围为非均匀应力场,小孔收缩或塑变直接产生纠倾效果,而竖向掏土孔周围为均匀应力场,通过小孔收缩或塑变减小桩侧阻与端阻,降低桩承载力从而促使桩进一步下沉达到纠倾效果。同隧道开挖的小孔收缩相比,二者在空间的展布与尺度上迥异,隧道开挖研究小孔收缩问题引起的桩基内力及沉降,目的是如何减沉;本项目小孔收缩问题则是通过小孔开挖令孔周塑性区发展至桩侧或迫使桩端塑性区扩大,从而减小桩侧摩擦力与桩端阻力,促使桩基沉降达到建筑物纠倾目的。

先将问题简化为平面应变问题,推导孔周塑性半径的表达式,然后讨论几种情况下塑性半径变化的原理解释,以及平面应变假定对塑性半径的影响。

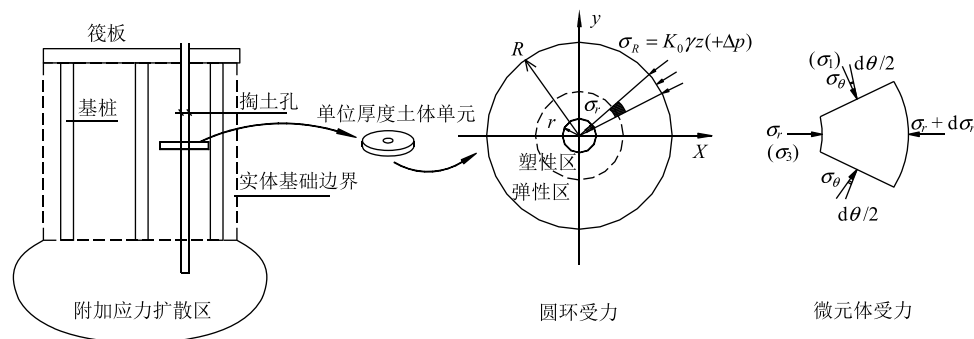


图1 竖向孔周围微元体受力分析简图

Fig.1 Schematic diagram of stress analysis for micro element around vertical hole

成孔之后,土体中的应力重分布。根据力学平衡原理,在任意一点处,土体的应力有如下关系:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

用弹性理论和边界条件可求得其解析解^[6-7]。对于内部压力为0的圆孔,径向应力因缩孔而减小,切向应力因沿圆周挤压而增大,保持弹性情况下其应力解为^[8]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right) p_0 \\ \sigma_\theta &= \left(1 + \frac{r_0^2}{R^2}\right) p_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

最后通过有限元模拟验证解析解的正确性。

2 竖向掏土孔周围塑性半径的推导

2.1 问题描述与平面应变简化

高层建筑桩筏基础竖向掏土纠倾时,在地下室底板成孔直至桩端,掏土孔直径一般为100~150 mm,有时也会利用微型桩孔加强纠倾效果。开孔后根据工程地质条件与建筑物回倾情况,往往采用注水、抽水、扰动、循环掏土等措施促沉。

竖向孔掏土纠倾过程中,土体的变形以径向变形为主,竖向变形可以忽略,因此,可取沿深度方向上一薄圆环,将其简化为平面应变问题进行分析,如图1所示。

2.2 孔周应力分析

桩筏基础中竖向成孔后,孔周径向应力减为0,向远处逐渐恢复至原应力场。把桩筏基础当作理想的实体深基础,若桩筏基础中不考虑筏底土的分担作用,则相当于桩长的孔深范围内原始径向应力场为 $K_0 \gamma z$;在桩端以下则应计入附加应力作用,即 $K_0(\gamma z + \Delta p)$ 。若取 $K_0 = 1.0$,则对于掏土孔周围的土体单元来说, $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$,可以利用简化的摩尔-库仑强度准则进行弹塑性分析。

式中: p_0 为小孔周围的天然应力场,此处为 $K_0(\gamma z + \Delta p)$,当 $K_0 = 1.0$ 时, $p_0 = \gamma z + \Delta p$; r_0 为掏土孔半径; R 为距掏土孔中心的距离。

根据以上解,在孔壁处 $R = r_0$,则 $\sigma_r = 0$, $\sigma_\theta = 2p_0$ 。

在 $R = 6r_0$ 处,径向应力与切向应力变化的幅度只不超过原应力场的3‰,可以认为掏土之后应力重分布的影响范围为 $6r_0$ 。对于理想的弹塑性材料,则在孔周形成影响区和非影响区,在影响区的内部又分为塑性区与应力重分布弹性区,参见图1。

2.3 塑性边界方程

在小孔周围的弹塑性界面处,应力满足土体单

元的极限平衡条件，即

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3)$$

将 $\sigma_1 = \sigma_\theta$ ， $\sigma_3 = \sigma_r$ 代入上式，得

$$\left(1 + \frac{r_0^2}{R^2} \right) p_0 = \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) p_0 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (4)$$

$$\text{令: } A = \frac{r_0^2}{R^2}, \quad \theta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$$

则：

$$(1 + A)p_0 = (1 - A)p_0 \tan^2 \theta + 2c \tan \theta \quad (5)$$

$$Ap_0(1 + \tan^2 \theta) = p_0 \tan^2 \theta - p_0 + 2c \tan \theta \quad (6)$$

两边同乘以 $\cos^2 \theta$ ，得到：

$$Ap_0(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = p_0 \sin^2 \theta - p_0 \cos^2 \theta + 2c \sin \theta \cos \theta \quad (7)$$

$$Ap_0 = c \sin 2\theta - p_0 \cos 2\theta \quad (8)$$

$$A = \frac{c}{p_0} \sin 2\theta - \cos 2\theta \quad (9)$$

$$A = \frac{c}{p_0} \sin(90^\circ + \varphi) - \cos(90^\circ + \varphi) \quad (10)$$

$$A = \frac{c}{p_0} \cos \varphi + \sin \varphi \quad (11)$$

即：

$$\frac{r_0^2}{R^2} = \frac{c}{p_0} \cos \varphi + \sin \varphi \quad (12)$$

根据式 (12)，绘出最大塑性半径比 R/r_0 与各影响因素之间的关系曲线，如图 2 所示。

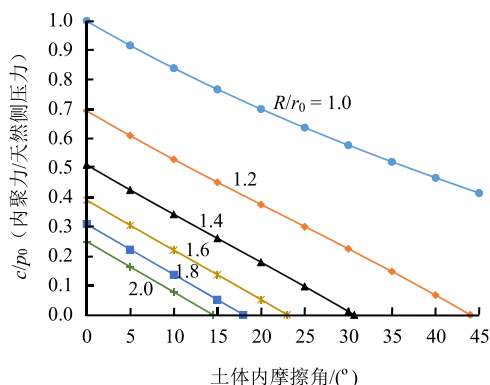


图 2 塑性区半径与影响因子之间的关系曲线

Fig.2 Curves between plastic zone radius and influencing factors

由图可见，随着黏聚力的减小、内摩擦角的减小，塑性区的半径增大，但增大的幅度渐小。在土体抗剪参数一定条件下，塑性半径随超载 p_0 增大而增大，表明塑性半径随深度或附加应力的增大而增大。若成孔半径 r_0 增大，则塑性半径 R 必然增大。

3 几种情况下的孔周塑性半径

3.1 不同土类的孔周塑性半径

由以上推导及图形可见，土体抗剪参数对竖向掏土孔塑性半径的影响。对于不同类型的土当围压分别为 $p_0 = 360$ 、 560 kPa 时，利用其抗剪参数^[9]计算孔周塑性半径，计算结果如表 1 所示。

表 1 几种土的塑性区的计算值 (R/r_0)

Table 1 Calculation value of plastic zone for several soils (R/r_0)

土类	内聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)	R/r_0	
			$p_0 = 360$ kPa	$p_0 = 560$ kPa
粗砂	0	40	1.247	1.247
中砂	0	38	1.274	1.274
细砂	0	36	1.304	1.304
粉砂	3	34	1.329	1.332
粉土	5	28	1.441	1.447
粉质黏土	10	20	1.648	1.669
黏土	30	17	1.639	1.706
老黏土	60	22	1.375	1.453
新近沉积黏土	15	10	2.158	2.236
软黏土	10	7	2.587	2.677

由表 1 可见，理论公式计算塑性半径的规律与实际情况相符。对于无黏性土，随内摩擦角的减小，塑性半径增大，由粗砂至粉土，粉土的塑性半径最大。粉质黏土和黏土的塑性半径相近。老黏土因其较强的黏聚力和较高的内摩擦角其塑性半径偏小。新近沉积土和软黏土塑性半径偏大。

对同一种土而言，其塑性半径随土体的密实程度增加而减小，随含水率的减小而减小。理论计算超载对无黏性土的塑性半径无影响，这一点与实际情况不符；随超载增大，黏性土的塑性半径增大，但增大程度有限。

上述计算采用的应力场相当于约 20 m 和 30 m 处的天然应力场中小孔掏土时的情况，塑性半径相当于桩周小孔塑性半径。对于实际工程而言，桩端掏土纠倾，其应力场除了土体自重以外，还要加上高层建筑产生的附加应力，其塑性半径必然增大；伴随高应力下土体的侧向流动、蠕变，竖向孔在桩端的塑性半径必然远大于理论计算值。

3.2 有地下水时孔周塑性半径的变化

地下水的存在, 使的土体中有效自重应力减小。对于无黏性土来说, 只要土体抗剪参数即内摩擦角不变, 则塑性区半径保持不变。实际掏土中, 无黏性土层为含水层, 只要掏土孔向下贯穿了含水层, 流砂现象不可避免, 尤其是孔径大、无黏性土层厚度大时, 有利于塑性半径的增大。

对于黏性土来说, 土层中难以形成静水压力, 应采用水土合算方法计算其自重应力, 即 p_0 保持不变; 同时孔内有静水压力作用, 相当于孔壁内侧沿径向增加了一个外力作用, 即摩尔圆中的 σ_3 增大, 因此塑性半径会相应减小。孔中静水压力的存在有助于孔壁的稳定, 这也是地基工程各种条件下竖向成孔时进行泥浆护壁维持稳定的机制。

3.3 扰动、注水、抽水对塑性半径的影响

竖向孔成孔后, 为了促使桩基沉降, 常采用不同的方法扩大塑性区范围促沉。掏土孔至桩端持力层后, 需多次孔壁扰动与孔底掏土, 每次扰动掏土相当于扩大了成孔半径, 从而使塑性区半径增大。而对于地下水位比较深的地区, 通过注水方式可降低土体的抗剪参数, 尤其是黏性土的抗剪指标值, 从而达到扩大塑性半径的目的。对于地下水位高的地区, 掏土孔内抽水除了使桩基内的附加应力 Δp 增加外, 对于掏土孔周围区域相当于增加了向孔内的动水力或者使内壁处于负压状态, 从而达到土体塑性区不断增大的目的。注水与抽水的原理如图 3 所示。

3.4 简化条件对塑性半径的影响

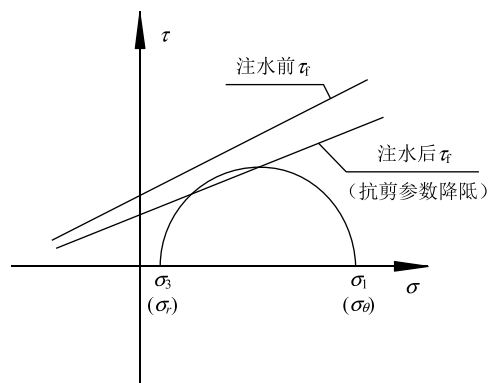
对塑性半径进行推导时, 假定为平面问题。对于孔周土体单元来说, 只有当 $K_0 = 1.0$ 时, 利用水平面内的大、小主应力建立极限平衡条件才成立。当土体的内摩擦角不为 0 时, 则竖向应力为实际的大主应力, 土体单元更容易在竖向平面内产生破坏。

土体单元的 $\sigma_1 = p_z = \frac{p_0}{K} = \frac{p_0}{1 - \sin \varphi}$, 将式 (12) 中的

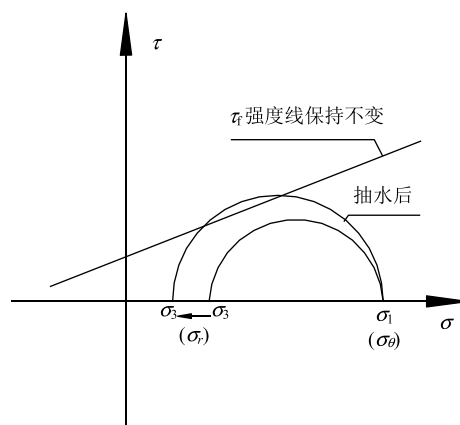
的 p_0 以 $\frac{p_0}{1 - \sin \varphi}$ 代替, 于是塑性半径的公式变为

$$\frac{r_0^2}{R^2} = \frac{c}{p_0} (1 - \sin \varphi) \cos \varphi + \sin \varphi \quad (13)$$

利用式 (13) 计算得到的塑性半径与某深度处假定平面应变问题理论计算结果的对比如图 4 所示。由图可见, 在参数一致情况下, 考虑竖向应力为土体单元的大主应力时, 塑性区曲线始终位于本



(a) 注水引起土体屈服 (破坏) 原理



(b) 抽水引起土体屈服 (破坏) 原理

图 3 注水与抽水引起的土体塑性屈服 (破坏) 原理
Fig.3 Principle of plastic yield (failure) of soil caused by water injection and pumping

文解析解的上方, 即塑性半径大于水平面应变问题的塑性解, 这种差异随摩擦角的增大而增大, 但差值不超过 $0.2r_0$ 。因此, 本文的推导得出的解析解可以反映小孔掏土的塑性半径规律, 且误差在可接受范围之内。

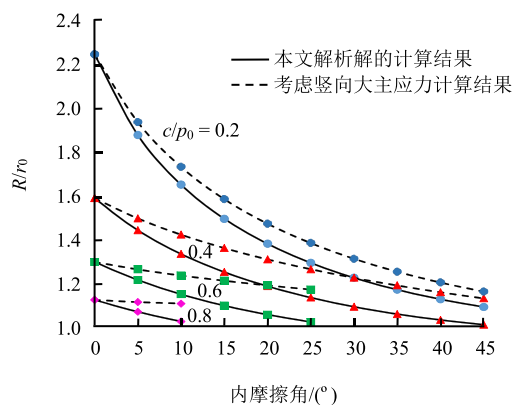


图 4 平面假定误差分析图
Fig.4 Error analysis of plane assumption

4 数值方法的验证

为了验证解析解的正确性, 采用数值模拟方法进行塑性区验证。取直径为 2.0 m 的土柱, 内部成孔直径为 0.2 m, 土体为粉质黏土, $c = 10 \text{ kPa}$, $\varphi = 20^\circ$, 土体材料采用摩尔-库仑强度材料, 上覆压力 p_0 为 360 kPa。图 5(a)为孔周的最大剪应力等值线图, $\tau_{\max} = (\sigma_\theta - \sigma_r) / 2$, 由图可见孔周水平面上因

掏土地应力解除而引起的应力重分布情况, 在孔周约 2 倍小孔直径以外, 土体中的应力几乎不受影响, 保持各向等压状态, 最大剪应力接近于 0。图 5(b)为小孔周围竖向剖面上的地应力重分布情况, 最大剪应力随孔深增大而增大, 反映出 p_0 对应力重分布的影响。正是因为这种应力解除产生的重分布现象, 使土体单元达到摩尔-库仑极限平衡条件, 从而使土体单元产生塑性破坏。图 5(c)为塑性区沿孔周的

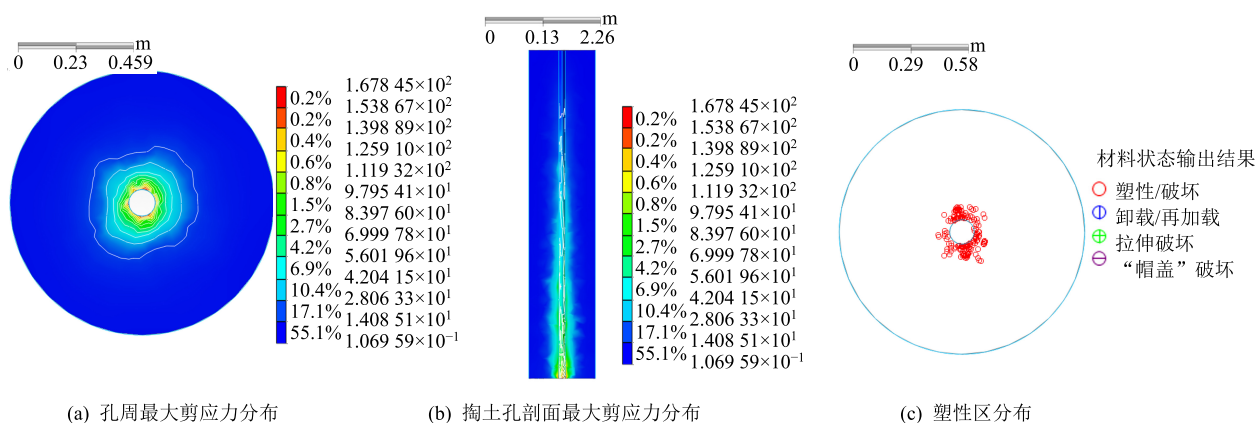


图 5 掏土孔周围最大剪应力与塑性区分布图 (单位: kN/m)

Fig.5 Maximum shear stress around digging hole and distribution of plastic zone(unit: kN/m)

分布图, 与理论公式计算基本吻合, $R/r_0 = 1.648$ 。

5 结 论

通过理论推导、施工措施的理论分析、算例验证与数值模拟, 对基于桩筏基础纠倾问题的竖向孔应力解除问题得到如下结论:

(1) 土体中的竖向成孔问题可以简化为平面应变问题, 利用摩尔-库仑强度破坏 (屈服) 条件推导出孔周塑性半径的解析解, 研究表明, 塑性半径随土体抗剪参数的减小而增大, 随深度的增大而增大, 随孔径的增大而增大。

(2) 孔周塑性半径规律与工程实践中竖向成孔时塑性变形现象相吻合; 桩筏纠倾竖向掏土过程中的各种促沉措施实际上是通过改变塑性半径的影响因素而达到扩大塑性半径的目的。

(3) 数值模拟结果与理论分析相一致, 验证了孔周塑性区解析解的正确性。

(4) 本文推导了竖向小孔孔周塑性区的理论解, 在桩基纠倾工程研究中尚属于首次, 为工程实践提供最基本的理论支持, 对纠倾设计与施工具有重要指导意义。

参 考 文 献

[1] 陈云娟, 张鑫, 郭道通, 等. 基于鲁宾涅特解的建筑物

掏土纠倾孔周土塑性区计算[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(2): 168-172.

CHEN Yun-juan, ZHANG Xin, GUO Dao-tong, et al. Calculation on surrounding soil's plastic zone in building's soil-digging incline-rectifying process based on Rubin's answer[J]. **Journal of Building Structures**, 2018, 39(2): 168-172.

[2] 曾英俊, 杨敏, 孙庆. 圆柱孔收缩的弹塑性解及其在隧道工程中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 40(10): 1480-1485.

ZENG Ying-jun, YANG Min, SUN Qing. Elastic-plastic solution for cylinder cavity contraction and its application to tunnel engineering[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2011, 40(10): 1480-1485.

[3] 张治国, 徐晨, 宫剑飞. 隧道开挖对邻近桩基变形及承载力影响的弹塑性解答[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 208-222.

ZHANG Zhi-guo, XU Chen, GONG Jian-fei. An elastoplastic solution of pile deflection and pile load capacity due to adjacent tunneling[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(1): 208-222.