

# 饱和黏土中注浆引起的土体水平变形研究

贺翀, 唐剑华, 尚祖光, 刘澄赤  
上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011  
DOI:10.61369/ERA.2025060031

**摘要 :** 轨交隧道施工或基坑施工容易引起邻近建筑物发生沉降变形, 有关注浆应用于控制基坑开挖引起的隧道水平变形的研究较少, 目前有关注浆抬升既有建筑物或者隧道的研究较多, 而有关注浆控制隧道水平变形的研究较少, 且已有研究多是工程案例分析, 尚缺乏控制隧道水平变形的系统注浆理论及策略。此外, 基坑施工不仅引起隧道产生竖向变形, 还会同时引起水平变形, 应采用注浆同时控制隧道变形和竖向变形。而目前尚缺乏同时控制隧道水平变形和竖向变形的系统注浆理论及策略, 有必要对其进行深入研究。本文采用圆孔扩张理论对饱和黏土中注浆引起的土体水平变形受力机制进行解析研究, 并形成一套适用于跟踪注浆引起土体位移的计算方法。

**关键词 :** 轨交隧道; 注浆变形; 基坑施工

## Research on Horizontal Deformation of Soil Caused By Grouting in Saturated Clay

He Chong, Tang Jianhua, Shang Zuguang, Liu Chengchi  
Shanghai Shen Yuan Geotechnical Engineering Co., Ltd. Shanghai 200011

**Abstract :** Subway shield tunneling or foundation pit construction can easily cause settlement and deformation of adjacent buildings. There is relatively little research on the application of grouting to control the horizontal deformation of tunnels caused by foundation pit excavation. Currently, there is more research on grouting to lift existing buildings or tunnels, while there is less research on grouting to control the horizontal deformation of tunnels. Moreover, most of the existing research is based on engineering case analysis, and there is still a lack of systematic grouting theory and strategies to control the horizontal deformation of tunnels. In addition, foundation pit construction not only causes vertical deformation of the tunnel, but also horizontal deformation. Grouting should be used to control both tunnel deformation and vertical deformation simultaneously. At present, there is a lack of systematic grouting theory and strategies to simultaneously control the horizontal and vertical deformation of tunnels, and it is necessary to conduct in-depth research on it. This article uses the theory of circular hole expansion to analyze and study the horizontal deformation mechanism of soil caused by grouting in saturated clay, and forms a set of calculation methods suitable for tracking soil displacement caused by grouting.

**Keywords :** tunneling; grouting deformation; excavation

## 引言

上海是典型的软土地区, 深大基坑施工对周边环境的变形影响一向不容忽视, 如何将地下空间开发过程中深大基坑施工对地铁车站和隧道区间的影响控制在毫米级的“微变形”范畴是上海地区岩土工程领域的重点和难点<sup>[1-2]</sup>。为开发地下空间而进行的基坑施工不可避免地引起周边土体产生变形, 从而引发邻近轨交隧道产生变形。这给轨交线路的结构安全和运营安全带来威胁。

基坑施工会对邻近轨交隧道产生较大的变形, 通常可采用跟踪注浆恢复隧道水平位移或水平收敛, 由于柱孔扩张理论形式简单, 力学原理明确, 被广泛地应用于旁压试验、静力触探、静压沉桩以及注浆等岩土工程领域<sup>[3]</sup>, 本文采用柱孔扩张相关理论模拟注浆周围土体的物理力学变形机制。

### 一、柱孔扩张理论解析研究

在图1中,  $P_u$  为柱孔扩孔压力,  $R_u$  为扩孔柱孔内径,  $R_p$  为弹塑性区边界半径,  $\sigma_p$  为弹塑性边界区径向应力, 根据 Vesic<sup>[4]</sup> 的相关研究弹塑性区边界半径与柱孔扩孔内径之间的关系可根据下式得到:

$$\frac{R_p}{R_u} = \sqrt{I_{rr} \sec \phi} \tag{1}$$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta \sec \phi} \tag{2}$$

$$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)(c+q \tan \phi)} = \frac{G}{S_u} \tag{3}$$

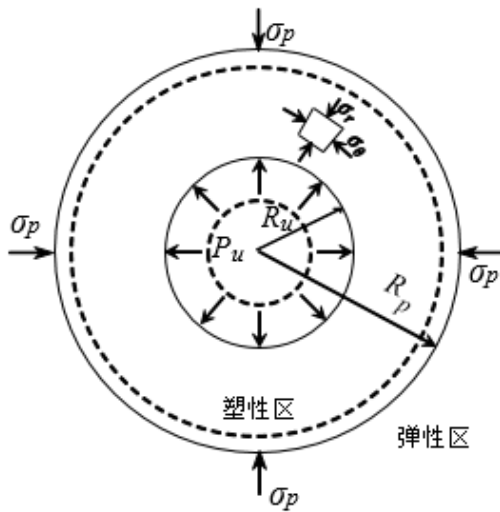


图1 柱孔扩张示意图

在上式中,  $\phi$  为土体内摩擦角,  $c$  为土体粘聚力,  $I_r$  为刚性指数,  $I_{rr}$  为修正刚性指数,  $\Delta$  为平均体应变,  $E$  为杨氏模量,  $\nu$  为泊松比,  $G$  为剪切模量,  $S_u$  为不排水剪切强度, 其为土体内摩擦角  $\phi$  与土体粘聚力  $c$  的函数,  $q$  为初始平均正应力, 其表达式可用下式表示:

$$q = \frac{(1+2K_0)\sigma_{v0}}{3} \tag{4}$$

式(4)中  $K_0$  为静止土压力系数,  $\sigma_{v0}$  为初始竖向应力, 结合以上各式, 若已知柱孔内径  $R_u$ , 则可通过式(1)计算得到弹塑性区边界半径  $R_p$ 。

根据 Vesic<sup>[4]</sup> 的研究, 柱孔的扩孔压力可根据下式获得:

$$P_u = S_u F_c + P_0 F_q \tag{5}$$

$$F_c = \ln(I) + 1 \tag{6}$$

$$F_q = (\sin \phi + 1) \left( \sec \phi \frac{\sin \phi}{\sin \phi + 1} \right) \tag{7}$$

根据式(5)~式(7)得到的球孔扩孔压力  $P_u$  以及塑性区边界半径与球孔扩孔内径比值  $R_p/R_u$ , 可求得弹塑性边界区域的径向应力  $\sigma_p$ , 如式(8)所示

$$\sigma_p = (P_u + c \cot \phi) \left( \frac{R_u}{R_p} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{\sin \phi + 1}} - c \cot \phi \tag{8}$$

通过以上各式得到了弹塑性边界处的径向应力  $\sigma_p$  与弹塑性边界处对应的球孔半径  $R_p$ , 通过本构关系可得到弹塑性边界处的径向位移:

$$\delta_p = \frac{1+\nu}{2E} R_p (\sigma_p - q) \tag{9}$$

本文假设扩孔过程中周围土体为不排水过程, 因此塑性区体应变为0, 考虑有限变形, 根据扩孔前后土体体积不变的原则, 可得到塑性区径向位移为

$$\delta = \frac{2R_p + \delta_p}{2r + \delta} \delta_p (R_u \leq r \leq R_p) \tag{10}$$

上式中  $r$  为径向距离, 径向位移  $\delta$  为径向距离  $r$  的隐式函数, 上式不能直接求解, 为了简化数字迭代过程, 假设小变形的条件下径向位移  $\delta$  可用下式表示

$$\delta \approx \frac{R_p}{r} \delta_p (R_u \leq r \leq R_p) \tag{11}$$

将上式代入式(10), 可得到径向位移的近似值

$$\delta \approx \frac{2R_p + \delta_p}{2r + \delta_p R_p / r} \delta_p (R_u \leq r \leq R_p) \tag{12}$$

对于弹性区径向位移, 通过胡克定律以及边界条件可得到, 其解析表达式为

$$\sigma_r = (\sigma_p - q) \frac{R_p^2}{r^2} + q \quad r > R_p \tag{13}$$

弹性区的径向位移可用下式表示

$$\delta = \frac{R_p^3}{r^3} \delta_p \tag{14}$$

### 二、单排多孔注浆解析

上述表达式只适用于单孔注浆对周围土体产生的位移, 而实际施工过程中, 大多存在单排多孔同时注浆, 图2为多孔注浆平面布置示意图。

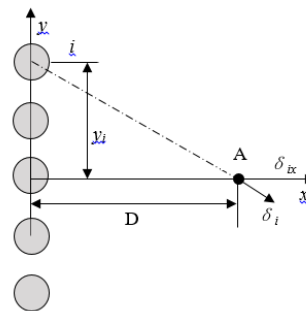


图2 多孔注浆平面布置示意图

在图2中, 对于  $x$  轴给定的  $A$  点, 由第  $i$  孔注浆引起  $A$  点  $x$

轴方向位移为  $\delta_{ix}$ ，根据几何关系可用式 (15) 表示

$$\delta_{ix} = \delta_i \frac{D}{\sqrt{D^2 + y_i^2}} \quad (15)$$

式 (15) 中  $D$  为计算点  $A$  与  $y$  轴的距离， $y_i$  为第  $i$  个注浆孔与  $x$  轴的距离， $\delta_i$  为第  $i$  个注浆孔注浆在  $A$  点产生径向方向的位移，其方向如图 2 所示。

假定第  $L$  个注浆孔对  $A$  点产生的位移可以忽略不计，此时注浆孔与  $x$  轴的垂直距离为  $y_L$ ，为了考虑多个注浆孔注浆施工对目标点  $A$  产生的位移，拟采用线性叠加法，因此只需对所有的注浆孔对  $A$  点产生的位移进行求和，可得到式 (16)：

$$\delta_{ix} = \frac{2D}{S} \int_0^L \frac{\delta}{\sqrt{D^2 + y_i^2}} dy \quad (16)$$

式 (16) 中  $S$  为相邻注浆孔的中心距离， $L = \min(y_L, Y_{ac}), Y_{ac}$  为目标点与第  $i$  个注浆孔的实际距离，当径向距离  $\delta_a = \sqrt{D^2 + y^2} > R_p$ ，可通过弹性区位移计算公式 (14) 结合式 (16) 计算得到，反之可通过塑性区位移计算公式 (12) 结合式 (16) 计算得到。因此需分三类情况进行计算：

① 第一类情况为目标测点既位于部分注浆孔的弹性区，又位于另一部分注浆孔的塑性区，即  $D < R_p$  且  $\sqrt{D^2 + L^2} > R_p$ ，计算结果如下：

$$\delta_{xA} = \frac{2D(2R_p + \delta_p)\delta_p}{S\sqrt{4D^2 + 2R_p\delta_p}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{2(R_p^2 - D^2)}{2D^2 + R_p\delta_p}} + \frac{R_p^3\delta_p}{SD^2} \cdot \frac{DL}{D^2 + L^2} \quad (17)$$

② 第二类情况为目标测点位于所有注浆孔的弹性区，即  $D < R_p$  且  $\sqrt{D^2 + L^2} \leq R_p$ ，计算结果如：

$$\delta_{xA} = \frac{2D(2R_p + \delta_p)\delta_p}{S\sqrt{4D^2 + 2R_p\delta_p}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{2L^2}{2D^2 + R_p\delta_p}} \quad (18)$$

③ 第三类情况为目标测点位于所有注浆孔的弹性区，即  $D \geq R_p$ ，计算结果如下：

$$\delta_{xA} = \frac{R_p^3\delta_p}{SD^2} \cdot \left( \frac{DL}{D^2 + L^2} + \tan^{-1} \frac{L}{D} \right) \quad (19)$$

式 (17)~式 (19) 可计算多孔注浆对目标点  $A$  产生的位移，图 2 假设注浆孔关于  $A$  点对称，若多孔注浆孔关于  $A$  点不对称，则需对  $y$  轴正负半轴分别积分。

### 三、多排多孔注浆理论解析

上节讲述了单排多孔注浆施工，实际施工过程中大多为多排多孔注浆施工，本节主要针对多排多孔注浆施工对目标测点  $A$  产生的位移进一步解析。

若注浆施工后，注浆体与土层性质保持不变，则多排孔注浆施工顺序对于目标测点  $A$  产生的位移基本保持一致注浆施工后注浆体的物理力学参数显然强于周围土层，已施工注浆体对后施工注浆体会产生遮挡效应，产生增强或者减弱后施工注浆体对于目标测点  $A$  的位移变形。因此，对于多排注浆孔，不同排之间施工顺序不同对目标测点亦会不同。

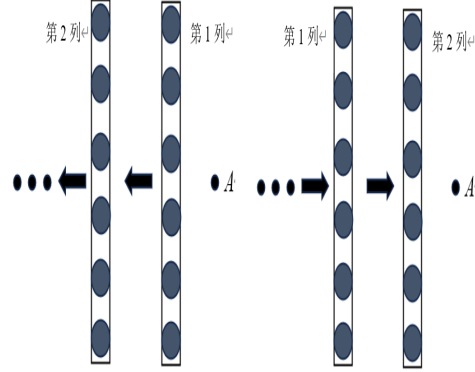


图 3(a) 由近而远施工

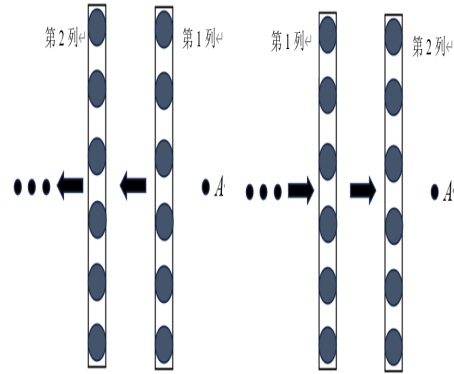


图 3(b) 由远而近施工

图 3 注浆孔施工顺序以及平面布置图

实际施工过程中可能会存在多种施工顺序，本文考虑两种典型的施工顺序，如图 3 (a) 所示，该种施工顺序为自  $A$  点由近及远施工，若先施工第一列，由于已施工注浆体物理力学参数强于原状土体，当施工第二列注浆体的时候，由于已施工第一列注浆体的存在，会减弱第二列注浆体施工在目标点  $A$  的横向位移。如图 3 (b) 所示，该种施工顺序为自  $A$  点由远及近施工，若先施工远离  $A$  点第一列，由于已施工注浆体物理力学参数强于原状土体，当施工第二列注浆体的时候，由于已施工第一列注浆体的存在，会增强第二列注浆体施工在目标点  $A$  的横向位移。

结合以上分析本文假定两种极端的模式：1) 假定已施工的注浆体与原状土体物理力学参数性质相同，此种情况下，可考虑多排多孔注浆施工对目标点  $A$  的引起的位移采用线性叠加的方法求得。2) 若采用由近及远的方式施工，考虑第一列已施工注浆体对后续即将施工的注浆体的遮挡效应，极端情况下，仅需考虑第 1 列注浆体施工对土体引起的位移。以上两种情况均为理想中的计算模型，而实际施工过程中，目标点的位移介于二者之间。

### 四、工程案例研究

本文采用 Shen<sup>[9]</sup> 论文中的案例, 图4为土体参数示意图, 注浆管深度为20m, 注浆量为0.146m<sup>3</sup>/m, 不排水强度  $S_u$  为土体剪切强度  $q_u$  的一半, 扩孔半径  $R_{u0}$  为0.58m, 与其相对应的弹塑性边界半径  $R_{p0}$  为  $E/S_u=150$ , 泊松比  $\nu=0.5$ 。

图5为单排多孔注浆, 分别在不同深度处测试随遇注浆距离而变化的土体横向位移, 案例中分别测试深度分别为5m, 10m, 15m 深度处的土体横向位移随径向距离变化的规律。

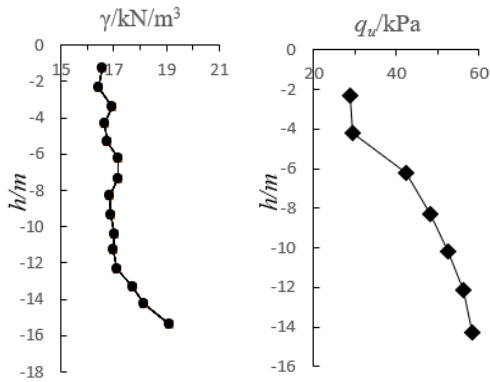


图4 土体参数示意图

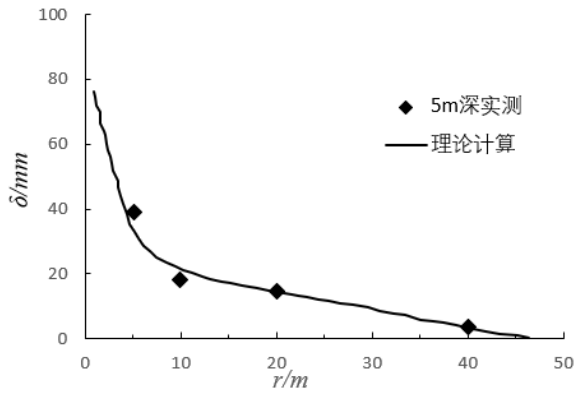


图5 (a) 5m 深度处土体位移随径向距离变化

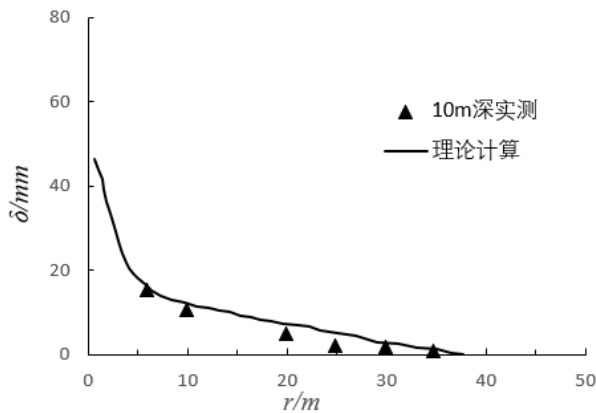


图5 (b) 10m 深度处土体位移随径向距离变化

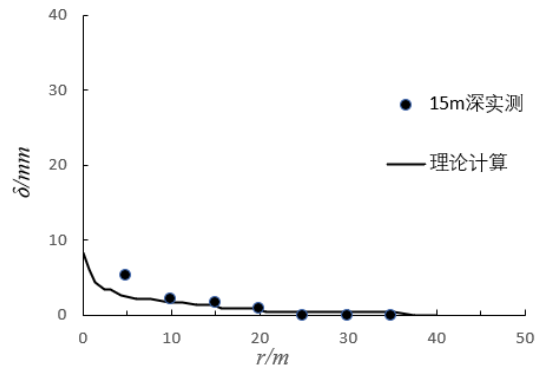


图5 (c) 10m 深度处土体位移随径向距离变化

图5 不同深度处土体位移随径向距离变化

如图5所示, 本文所示理论计算值与实测数据吻合的较好, 在一定程度上验证了理论解析方法的有效性。总体上土体位移随径向距离减小而减小, 在注浆管周边10m 距离以内土体位移急剧减小, 在10m 范围以外土体位移衰减速度相对较慢。在深度方向上5m 深度处土体位移变化较大, 这主要是随着深度增加土体强度增大, 相对应刚度系数亦随深度增大, 因此在深度变化方向上, 随深度增大, 土体横向逐渐减小。在5m 处, 位移为0区域半径约为46m, 在深度10m 处, 位移为0的区域半径约为39m, 在深度15m 处, 位移为0的区域半径约为36m, 因此可得出结论, 随着深度增加, 注浆对土体位移影响逐渐减小。

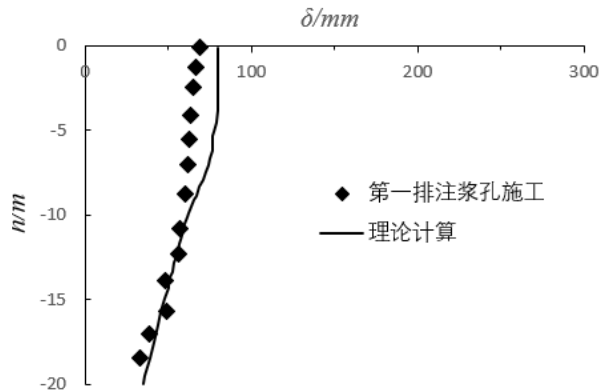


图6 (a) 由远及近施工第一排注浆孔

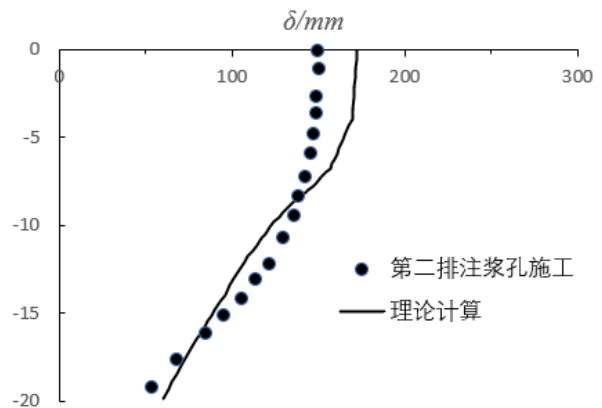


图6 (b) 由远及近施工第二排注浆孔

图6 由远及近的施工方式土体位移变化规律

如图6所示为由远及近的方式施工,分别施工两排注浆,图6(a)为施工第一排注浆引起与注浆管距离为6m处测点的水平位移,图6(b)为施工第二排注浆引起目标测点的水平位移,两种工况下理论计算值与实测值吻合的均相对较好,且施工第二排注浆时,测点水平位移显著增大。同时根据图6发现随着深度增加,土体的水平位移逐渐减小。

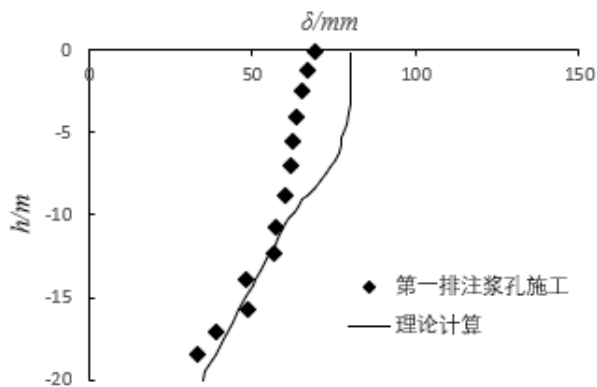


图7(a) 由近及远施工第一排注浆孔

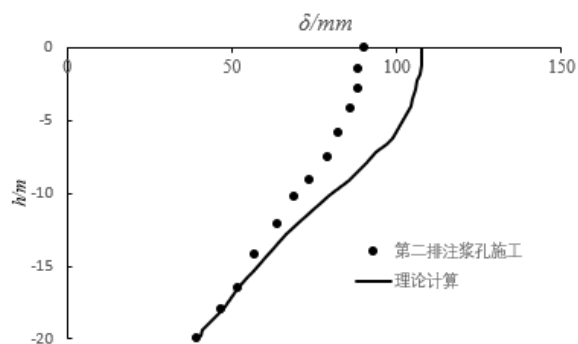


图7(b) 由近及远施工第二排注浆孔

图7由近及远的施工方式土体位移变化规律

如图7所示为由近及远的方式施工,分别施工两排注浆,图7(a)为施工第一排注浆引起与注浆管距离为6m处测点的水平位移,图7(b)为施工第二排注浆引起目标测点的水平位移,两种工况下理论计算值与实测值吻合的均相对较好,且施工第二排注浆时,测点水平位移略微增大。与图2.7相比,施工完第二排注浆后,目标测点土体位移小于由近及远的施工方式的土体位移,表明由近及远的方式施工,存在遮帘效应。

## 五、结论

通过圆孔扩张理论模拟了土层中的注浆过程,通过解析公式的方法得到了注浆引起的土体中的位移,主要结论如下:

(1) 通过理论推导法获得了单排孔注浆施工引起的土体的水平位移,水平方向上,在一定范围以内,土体位移急剧减小,随之衰减速度减弱,在竖向方向上,随着深度的增加,土体的水平位移逐渐减小。

(2) 通过叠加法获得了多排注浆孔引起土体的位移的计算方法,并通过案例计算说明了当存在多排注浆孔时,说明了由远及近的施工方式与由近及远的施工方式产生位移差异的力学机理,验证了多排注浆孔先后施工会存在遮帘效应。

## 参考文献

- [1] 徐长节,孙凤明,陈金友,等.基坑相邻地铁隧道变形与应力控制措施[J].土木建筑与环境工程,2013,35(S1):75-80.
- [2] 王卫东,沈健,翁其平,等.基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J].岩土工程学报,2006,(S1):1340-1345.
- [3] 蒋明镜,沈珠江.考虑剪胀的弹脆塑性软化柱形孔扩张问题[J].河海大学学报,1996,24(4):65-72.
- [4] Vesic, A. S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. Soil Mech. Found. Div, 1972, 98(3), 265 - 290.
- [5] Shen, S. L., Wu, H. N., Cui, Y. J. & Yin, Z. Y. Long-term settlement behavior of the metro tunnel in Shanghai. Tunneling Underground Space Technol, 2014, 40 (2), 309 - 323.