

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1907

考虑圆孔不均匀收敛和空间效应的基坑坑外土体水平位移场分析

应宏伟^{1,2}, 熊一帆¹, 沈华伟³, 魏 锋⁴, 李冰河⁵, 吕 唯¹

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000; 4. 中铁十一局集团城市轨道交通工程有限公司, 湖北 武汉 430074; 5. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘 要: 基坑开挖将使土体产生水平位移, 过大的水平位移会使邻近地下结构受到破坏。基于圆孔均匀收敛假定的传统影像源法低估了浅层土体的水平位移, 应用于工程实践偏不安全, 且该方面的研究大多基于平面应变分析, 不能考虑基坑的空间效应。借助虚拟镜像技术和微元法推导了考虑不均匀收敛特性的土体水平位移的二维和三维半解析解, 将半解析解同实测数据、既有理论解以及有限元结果进行对比, 提出符合实际情况的不均匀收敛模式; 进一步地, 基于杭州深厚软黏土地区工程实例对土体水平位移的空间效应进行了详细的分析。结果表明: 向下收敛的极限为更接近实际情况的收敛模式; 被广泛认为偏于安全的平面应变解无法考虑平行于挡墙的土体水平位移, 低估了基坑角部附近浅层土体的总水平位移; 工程实践中容易忽视的平行于挡墙的土体位移可能对邻近浅基础和地下管线等浅埋结构造成意料之外的危害。

关 键 词: 基坑开挖; 水平位移; 虚拟镜像技术; 不均匀收敛; 三维应变; 空间效应

中国分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 12-3565-12

Analysis of horizontal displacement field of soil outside foundation pit considering nonuniform convergence of circular hole and spatial effect

YING Hong-wei^{1,2}, XIONG Yi-fan¹, SHEN Hua-wei³, WEI Feng⁴, LI Bing-he⁵, LÜ Wei¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China; 3. Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China; 4. China Railway 11th Bureau Group City Rail Engineering Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China; 5. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou, Zhejiang 310006, China)

Abstract: Excavation of foundation pit induces the horizontal displacement of soil, and the excessive horizontal displacement will cause damage to adjacent underground structures. The traditional virtual mirror technology based on the assumption of uniform convergence of circular hole underestimates the horizontal displacement of shallow soil, which is unsafe in engineering practice. Most of the research in this field is based on plane strain analysis, and the spatial effect of foundation pit cannot be considered. The two-dimensional and three-dimensional semi-analytical solutions of soil horizontal displacement considering nonuniform convergence characteristic were derived using virtual mirror technology and infinitesimal method. The nonuniform convergence mode in line with the actual situation was proposed by comparing the semi-analytical solution with the measured data, the existing theoretical solution, and the finite element results. Furthermore, the spatial effect of soil horizontal displacement was analyzed in detail based on an engineering case in Hangzhou deep soft clay. The results indicate that the limit of downward convergence is the convergence mode closer to the actual situation. The plane strain solution, which is generally considered to be safe, cannot consider the horizontal displacement of soil parallel to the retaining wall and will underestimate the total horizontal displacement of shallow soil near the corner of foundation pit. The soil displacement parallel to the retaining wall that is easily ignored in engineering practice may cause unexpected harm to shallowly buried structures such as shallow foundations and underground pipelines.

收稿日期: 2022-12-06

录用日期: 2023-04-07

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51678523); 中央高校基本科研业务费 (No.B200201012); 浙江省建设科研项目 (No.2018K119)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51678523), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (B200201012) and the Zhejiang Province Construction Research Project (2018K119).

第一作者简介: 应宏伟, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事地下工程、软黏土力学与地基处理方面的教学与科研工作。E-mail: ice898@zju.edu.cn

通讯作者: 熊一帆, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事地下工程方面的科研工作。E-mail: cxxyf0831@163.com

Keywords: excavation of foundation pit; horizontal displacement; virtual mirror technology; nonuniform convergence; three-dimensional strain; spatial effect

1 引言

在建、构筑物密集的地区开挖基坑将不可避免地对邻近既有结构产生扰动,如房屋的沉降和不均匀沉降^[1-3]、隧道和地下管线的位移^[4-6],严重时甚至会造成结构的破坏^[7-9]。因此,准确预测基坑开挖诱发的土体水平位移具有重要的现实意义。

当前,研究基坑开挖诱发土体水平位移的方法大多为:①现场实测法。应宏伟等^[10]基于杭州某深厚软黏土基坑的实测数据,发现时空效应是影响土体水平位移的重要因素,且隔断墙的设置、邻近既有地下室的存在对减小位移有积极作用;Tan^[11]和Cheng^[12]等发现,及时浇筑混凝土底板能够有效抑制软土地区深基坑围护结构的侧向变形和周围土体位移的发展。②数值模拟法。Schuster等^[13]建立了基坑开挖诱发坑外土体位移的三维数值模型,发现随着距围护墙距离的增加,土体水平位移逐渐从内凹状分布转变为悬臂状分布;木林隆等^[14]利用实测数据对某基坑进行反分析建模,总结数值模型中土体位移的衰减规律,提出了考虑土体小应变特性的土体三维位移场经验公式。③理论解析法。钱建固等^[15]利用镜像映射法求得了挡墙平移与绕墙趾转动两种基本刚性挡墙位移模式下周围土体水平位移的理论解;在此基础上,程康等^[16]利用微元法将各挡墙微段诱发的土体水平位移进行叠加,提出了挡墙在任意变位模式下的坑外土体水平位移解答。Sagaseta^[17]利用虚拟镜像技术和弹性力学理论推导了圆孔收缩诱发的土体位移解析公式;Xu等^[18]利用Sagaseta^[17]所提公式和面积等效原理,进一步推导了围护墙变形诱发土体位移的公式。

然而,Sagaseta解^[17]的推导基于圆孔的均匀收敛,未能考虑土体自重等因素对圆孔收敛模式的影响。基于此,Park^[19]和林存刚等^[20]推导了圆孔不均匀收敛条件下盾构开挖诱发的土体位移公式,而基坑开挖条件下对圆孔不均匀收敛的探讨则相对较少。另一方面,有关利用虚拟镜像技术推导土体位移的研究大多局限于平面应变^[21-23],对于空间效应明显、长宽比较小的基坑并不适用。

综上所述,本文基于已有理论成果,推导了考虑圆孔不均匀收敛特性和空间效应的基坑开挖诱发土体水平位移的二维、三维半解析解;将计算获得的土体水平位移曲线与实测数据、既有理论解和有

限元结果进行比较,确定了更符合实际情况的不均匀系数;最后,通过某工程实例对坑外土体水平位移的空间效应进行了深入的分析讨论。

2 控制方程建立及求解

Sagaseta^[17]首先引入虚拟镜像技术求解由地层损失引起的土体位移场,其基本分析步骤如图1所示,基本假定为:①土体为各向同性、均质且不可压缩弹性体;②圆孔外部土体的收敛始终保持径向。

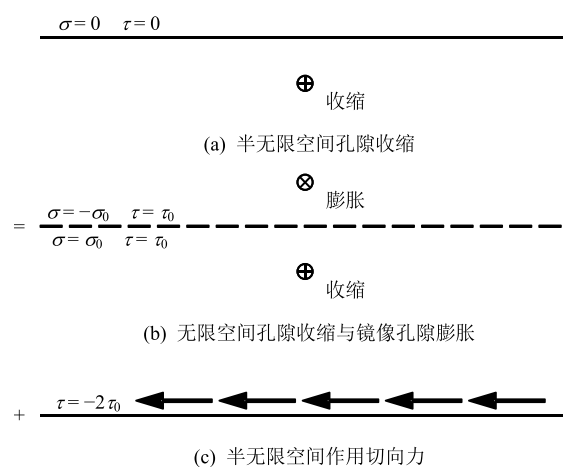


图1 虚拟镜像技术的分析步骤

Fig.1 Analysis steps of virtual mirror technology

2.1 平面应变

如图2所示为在平面应变条件下,半径为 δ 、圆心为 o_1 的圆孔发生不均匀收敛,此时收敛中心变为 o_2 ,圆 o_1 顶部、底部的径向收敛位移分别为 u_1 和 u_2 ,定义 u_1/u_2 为不均匀系数 n 。

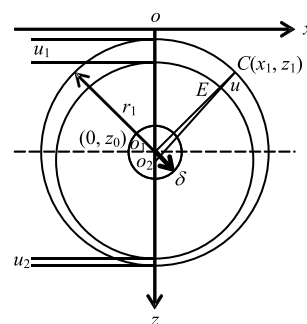


图2 平面应变下土体不均匀收敛计算模型

Fig.2 Nonuniform convergence calculation model of soil under plane strain

以三角形 o_1o_2E 为研究对象,解 $\angle o_2o_1E$ 的余弦

定理方程可得在不均匀收敛模式下, 任意一点 $C(x_1, z_1)$ 的径向收敛值为

$$u = \frac{(z_0 - z_1)\delta^2}{2r_1^2} \frac{n-1}{n+1} + r_1 - \sqrt{\frac{\delta^4}{4r_1^2} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \frac{x_1^2}{r_1^2} \right] - \delta^2 + r_1^2} \quad (1)$$

$$r_1^2 = x_1^2 + (z_0 - z_1)^2 \quad (2)$$

令不均匀系数 $n = 1$, 即由不均匀收敛退化为均匀收敛, 此时式 (1) 退化为 Sagaseta 解^[17]。

由式 (1) 可获得土体两个方向的位移分量 u_{1x} 、 u_{1z} :

$$u_{1x} = -\frac{x_1(z_0 - z_1)\delta^2}{2r_1^3} \frac{n-1}{n+1} - x_1 \left[1 - \sqrt{\frac{\delta^4}{4r_1^4} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \frac{x_1^2}{r_1^2} \right] - \frac{\delta^2}{r_1^2} + 1} \right] \quad (3)$$

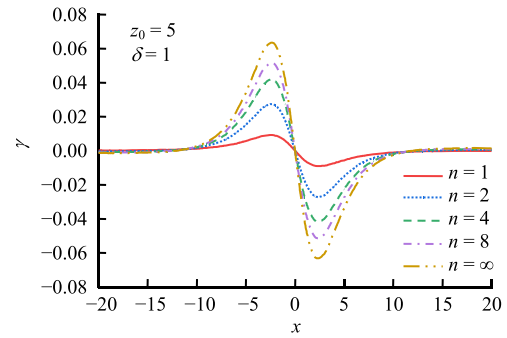
$$u_{1z} = \frac{(z_0 - z_1)^2 \delta^2}{2r_1^3} \frac{n-1}{n+1} + (z_0 - z_1) \left[1 - \sqrt{\frac{\delta^4}{4r_1^4} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \frac{x_1^2}{r_1^2} \right] - \frac{\delta^2}{r_1^2} + 1} \right] \quad (4)$$

类似地, 可以得到无限空间内镜像圆孔膨胀在点 $C(x_1, z_1)$ 处产生的两个方向的位移分量 u_{2x} 、 u_{2z} 。叠加圆孔及其镜像圆孔分别诱发的位移分量即可完成图 1(b)。进一步利用位移分量之和可求解图 1(b) 诱发的地表剪应变:

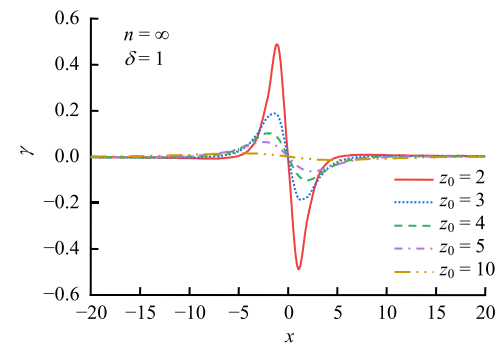
$$\gamma_x = \left[\frac{\partial(u_{1x} + u_{2x})}{\partial z} + \frac{\partial(u_{1z} + u_{2z})}{\partial x} \right]_{z=0} \approx x\delta^2 \left[\frac{n-1}{n+1} \frac{x^2 - 5z_0^2}{(x^2 + z_0^2)^{2.5}} - \frac{4z_0}{(x^2 + z_0^2)^2} \right] \quad (5)$$

令不均匀系数 $n = 1$, 即由不均匀收敛退化为均匀收敛, 此时式 (5) 退化为 Sagaseta 解^[17]。

图 3 给出了不同不均匀系数 n 和收敛圆孔深度 z_0 对地表剪应变分布的影响。可以看出, 剪应变呈中心对称分布; 剪应变的最大值出现在圆孔附近且向两边衰减的速度较快; 剪应变随着 n 的增大而增大, 剪应变增幅却随 n 的增大而减小; 随着收敛圆孔深度的减小, 剪应变最大值急剧增加。



(a) 不均匀系数 n 对地表剪应变的影响



(b) 收敛圆孔深度对地表剪应变的影响

图 3 不同因素对地表剪应变的影响

Fig.3 Influence of different factors on surface shear strain

对 Cerruti 平面应变解^[22]在地表范围进行数值积分即可得到图 1(c)的解答:

$$u_{3x} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\gamma_x}{2\pi} \left\{ \frac{z_1^2}{(x_1 - x)^2 + z_1^2} + \frac{1}{2} \ln[(x_1 - x)^2 + z_1^2] \right\} dx \quad (6)$$

考虑到远离基坑的地表剪应力对坑外土体的位移几乎没有任何贡献, 计算时可根据剪应力的衰减曲线缩小数值积分的范围 (下同)。

最后对 u_{1x} 、 u_{2x} 和 u_{3x} 进行叠加即可得到土体的总水平位移。

2.2 三维应变

如图 4 所示为在三维应变条件下, 半径为 δ 、圆心为 o_1 的圆孔发生不均匀收敛。以三角形 o_1o_2E 为研究对象, 解 $\angle o_2o_1E$ 的余弦定理方程可得在不均匀收敛模式下任意一点 $C(x_1, y_1, z_1)$ 的径向收敛值为

$$u = \frac{(z_0 - z_1)\delta^3}{3r_1^3} \frac{n-1}{n+1} + r_1 - \sqrt{\frac{\delta^6}{9r_1^4} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \frac{x_1^2 + (y_0 - y_1)^2}{r_1^2} \right] - \frac{2\delta^3}{3r_1} + r_1^2} \quad (7)$$

$$r_1^2 = x_1^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2 \quad (8)$$

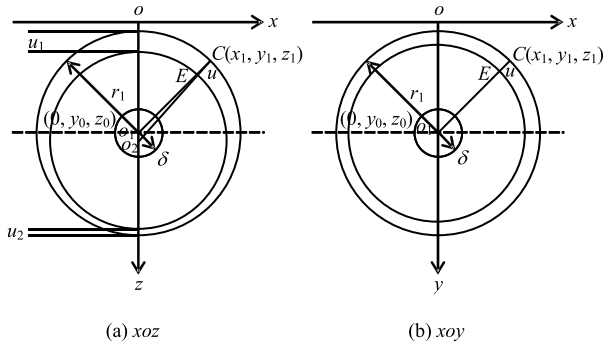


图4 三维应变下土体不均匀收敛计算模型

Fig.4 Nonuniform convergence calculation model of soil under three-dimensional strain

令不均匀系数 $n = 1$, 即由不均匀收敛退化为均匀收敛, 此时式 (7) 退化为 Sagaseta 解^[17]。

由式 (7) 可获得土体 3 个方向的位移分量 u_{1x} 、

u_{1y} 、 u_{1z} :

$$u_{1x} = -\frac{x_1(z_0 - z_1)\delta^3}{3r_1^4} \frac{n-1}{n+1} - x_1 \left[1 - \sqrt{\frac{\delta^6}{9r_1^6} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \frac{x_1^2 + (y_0 - y_1)^2}{r_1^2} \right] - \frac{2\delta^3}{3r_1^3} + 1} \right] \quad (9)$$

$$u_{1y} = \frac{(y_0 - y_1)(z_0 - z_1)\delta^3}{3r_1^4} \frac{n-1}{n+1} + (y_0 - y_1) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\delta^6}{9r_1^6} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \frac{x_1^2 + (y_0 - y_1)^2}{r_1^2} \right] - \frac{2\delta^3}{3r_1^3} + 1} \right] \quad (10)$$

$$u_{1z} = \frac{(z_0 - z_1)^2 \delta^3}{3r_1^4} \frac{n-1}{n+1} + (z_0 - z_1) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\delta^6}{9r_1^6} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \frac{x_1^2 + (y_0 - y_1)^2}{r_1^2} \right] - \frac{2\delta^3}{3r_1^3} + 1} \right] \quad (11)$$

类似地, 可以得到无限空间内镜像圆孔膨胀在点 $C(x_1, y_1, z_1)$ 处产生的 3 个方向的位移分量 u_{2x} 、 u_{2y} 、 u_{2z} 。叠加圆孔及其镜像圆孔分别诱发的位移分量即可完成图 1(b)。进一步利用位移分量之和可求解图 1(b)诱发的地表剪应变:

$$\gamma_{yz} = \left[\frac{\partial(u_{1x} + u_{2x})}{\partial z} + \frac{\partial(u_{1z} + u_{2z})}{\partial x} \right]_{z=0} \approx x\delta^3 \left(\frac{2}{3} \frac{n-1}{n+1} \frac{k - 8z_0^2}{k^3} - \frac{4z_0}{k^{2.5}} \right) \quad (12)$$

$$\gamma_{yz} = \left[\frac{\partial(u_{1y} + u_{2y})}{\partial z} + \frac{\partial(u_{1z} + u_{2z})}{\partial y} \right]_{z=0} \approx -(y_0 - y)\delta^3 \left(\frac{2}{3} \frac{n-1}{n+1} \frac{k - 8z_0^2}{k^3} - \frac{4z_0}{k^{2.5}} \right) \quad (13)$$

$$k = x^2 + (y_0 - y)^2 + z_0^2 \quad (14)$$

令不均匀系数 $n = 1$, 即由不均匀收敛退化为均匀收敛, 此时式 (12)、(13) 退化为 Sagaseta 解^[17]。

图 5 给出了 $n = \infty$ 、 $z_0 = 5$ 、 $\delta = 1$ 条件下的地表剪应变分布。与平面应变的结论相同, 剪应变呈中心对称分布; 剪应变的最大值出现在圆孔附近且向两边衰减的速度较快。有关不均匀系数 n 和收敛圆孔深度 z_0 对地表剪应变影响的结论亦与平面应变的结论相同, 本文受限于篇幅不予展示。

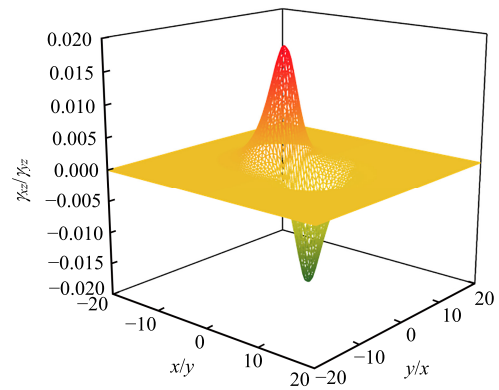


图5 三维条件下的地表剪应变分布($n = \infty$ 、 $z_0 = 5$ 、 $\delta = 1$)
Fig.5 Surface shear strain distribution under three-dimensional condition($n = \infty$ 、 $z_0 = 5$ 、 $\delta = 1$)

为符合实际边界条件, 将 τ_{xz} 、 τ_{yz} 反方向作用于地表, 通过对 Cerruti 解答^[24]进行数值积分, 即可得到图 1(c)的解答:

$$u_{3x} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\gamma_{xz}}{4\pi} \frac{r^2 + (x_1 - x)^2}{r^3} dx dy + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\gamma_{yz}}{4\pi} \frac{(x_1 - x)(y_1 - y)}{r^3} dx dy \quad (15)$$

$$u_{3y} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\gamma_{xz}}{4\pi} \frac{(x_1 - x)(y_1 - y)}{r^3} dx dy + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\gamma_{yz}}{4\pi} \frac{r^2 + (y_1 - y)^2}{r^3} dx dy \quad (16)$$

$$r^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + z_1^2 \quad (17)$$

最后对各项解答进行叠加即可分别得到土体

在 x 和 y 方向的总位移。

2.3 基坑开挖下坑外土体水平位移场推导

考虑到岩土复杂性, 围护墙侧移的确定一直是基坑工程的难点。当前, 常见的有 3 种方法预测围护墙侧移: ①基于实测数据的经验关系, 如 Chen 等^[25]将 $f_{\max}/H = 0.5\%$ 作为围护墙侧移的上限值, 徐中华等^[26]给出的上海地区围护墙侧移拟合公式; ②数值模拟及其参数分析给出的拟合公式^[14]; ③弹性地基梁方法。然而, 本文的重点为在既定墙体位移的条件下推导土体位移, 因此在接下来的分析中采用实测墙体侧移最大值及其所在深度结合拟合公式作为边界条件。

图 6 所示为采用板式支护的基坑围护墙变形三维示意图。针对该类型的基坑, 张陈蓉等^[27]给出了基坑中心截面围护墙侧移的拟合公式:

$$f(0, z) = f_{\max} e^{-\left[\frac{3(z-H_m)}{H+D}\right]^2} \quad (18)$$

进一步地, 木林隆等^[14]利用已有实测数据进行有限元反分析, 结合张陈蓉等^[27]的研究成果, 给出了围护墙侧移的三维拟合公式:

$$f(0, y, z) = f_{\max} e^{-\left[\frac{3(z-H_m)}{H+D}\right]^2 - \pi\left(\frac{y}{R}\right)^2} \quad (19)$$

$$R = \frac{L}{2} \left[0.069 \ln\left(\frac{H}{L}\right) + 1.03 \right] \quad (20)$$

式中: $f_{\max}$ 为围护墙最大侧移; H_m 为围护墙最大变形所在深度; H 为基坑开挖深度; D 为围护墙嵌固深度; R 为变形影响半径; L 为基坑纵向长度。

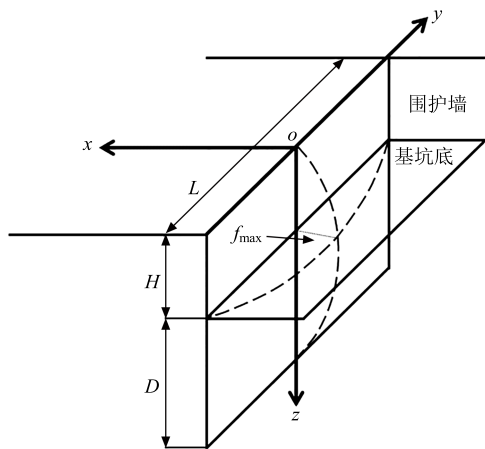


图 6 基坑围护墙变形示意图
Fig.6 Diagram for deformation of foundation pit retaining wall

针对平面应变问题, 先将式 (18) 的拟合曲线

划分为足够多的微段, 此时每个微段的面积近似为 $f dz$, 经镜像后的微段总面积为 $2f dz$; 依据面积等效原理可知^[18], 每个微段等效为圆后的半径为 $\delta = (2f dz/\pi)^{1/2}$; 进一步地, 利用上文所提公式可得该微段诱发的坑外任意点的土体水平位移; 最后, 将微段诱发任意点的水平位移沿整个围护墙深度积分, 则可得坑外土体因开挖产生的水平位移。

同样地, 针对三维应变问题, 先将式 (19) 的拟合曲面划分为足够多的微单元, 此时每个微单元的体积近似为 $f dy dz$, 经镜像后的微单元总体积为 $2f dy dz$; 依据体积等效原理可知, 每个微单元等效为球后的半径为 $\delta = (3f dy dz/2\pi)^{1/3}$; 进一步地, 利用上文所提公式可得该微单元诱发的坑外任意点的土体水平位移; 最后, 将微单元诱发任意点的水平位移沿整个围护墙平面积分, 则可得坑外土体因开挖产生的水平位移。

3 与不同算例的对比分析

不均匀系数 n 的取值会对坑外土体位移计算的准确性造成影响, 因此有必要对 n 的取值进行讨论。本节提出 3 种 n 的不同取值进行分析, 分别为 1、2、 ∞ , 即圆孔均匀收敛、顶部收敛为底部的两倍和向下收敛的极限。值得说明的是, 虽然未对其余不均匀系数进行讨论, 但所提 3 种取值足够典型, 对 n 进一步细分讨论的意义不大。

3.1 与实测数据、既有理论解的对比分析

丁智等^[28]对杭州某地铁站深基坑开挖过程中的地连墙侧移、坑外土体水平位移等监测数据进行分析。地连墙深度范围内, 自上而下的土层分别为填土、粉土、粉砂、黏土; 基坑围护结构采用厚 0.8 m、深 32 m 的地连墙+一道混凝土支撑+四道钢支撑; 由于篇幅限制, 其余信息不再阐述。

如图 7 所示为基坑标准段的墙体测斜 CX22 在不同开挖深度下的变形曲线及利用式 (18) 拟合的曲线, 图中 s 为墙体水平位移。可以看出 $H = 7$ m 的拟合效果较好, $H = 10$ 、15.5 m 则高估了围护墙下部的侧移。

土体测斜 TX9 位于 CX22 后方 2 m 的位置, 图 8 给出了不同开挖深度条件下 TX9 的实测数据、本文理论的平面应变解和既有理论解^[16]对比, 图中 u_x 为土体垂直于挡墙方向的水平位移, $z_{\max}$ 为挡墙深度。可以发现, $n = \infty$ 时计算值的上部土体位移相较于 $n = 1$ 、2 时偏大, 下部土体位移则偏小, 侧移最大值所在深度偏小, 而侧移最大值三者趋于一致; 不论是上、下部土体位移还是最大侧移所在深度, $n =$

∞ 时的计算值都与实测数据更为相符。 $H = 7、10、15.5$ m 时本文方法和既有理论解的计算最大值相较于实测值分别偏小 1.6%、7.7%、3.9%和偏大 7.9%、10.3%、9.2%；比较而言，本文方法的计算值差异相对小且侧移曲线的趋势与实测值更为吻合。综上所述，可以初步得出， $n = \infty$ 是更符合实际情况的不均匀系数，且相较于其他理论解有一定的优势。

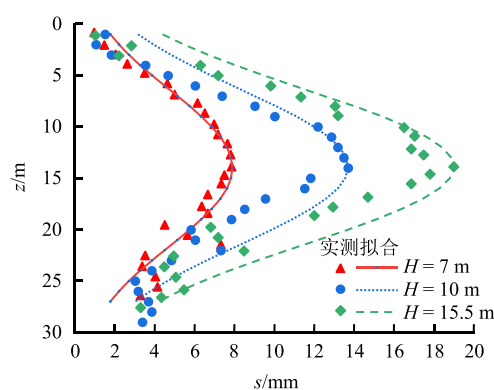


图7 地连墙实测变形及拟合曲线

Fig.7 Measured deformation and fitting curves of diaphragm wall

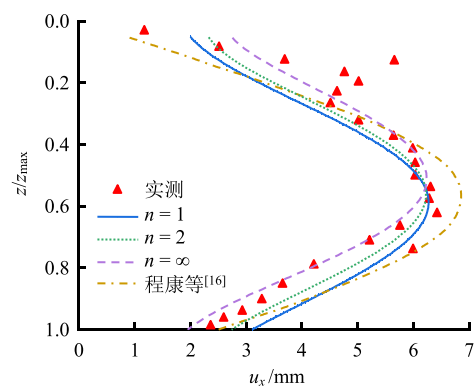
3.2 与有限元结果的对比分析

如图 9、10 所示，杭州某深基坑平面尺寸为 100 m×28 m，开挖深度为 24 m，平面上呈长条形；围护结构采用厚 1 m、深 40 m 的地连墙+五道混凝土支撑，支撑的横截面尺寸自上而下分别为 0.9 m×0.8 m、2×1.1 m×0.9 m、2×1.2 m×1.1 m。

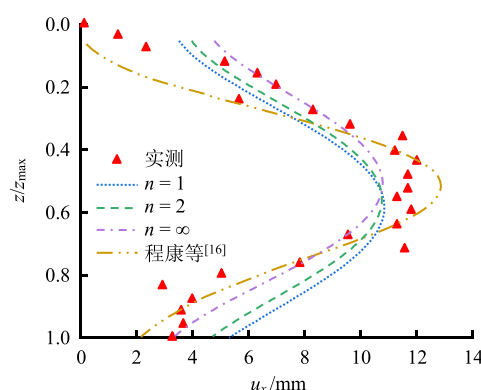
为降低边界效应的影响，地连墙中心线至模型水平边界的距离取 4 倍开挖深度，竖向边界取至地连墙墙底以下 30 m，模型尺寸为 292 m×220 m×70 m。至于计算模型的边界条件则为：水平边界水平方向位移约束，竖直方向位移自由，下边界两个方向均位移约束，上边界位移自由。

结合地勘报告和相关文献，忽略较薄土层，对相似土层进行合并后，确定计算分析时采用的土层分布及模型参数如图 10 和表 1 所示。为了考虑土体的小应变特性，采用 HS-Small 土体模型 (HSS) 考虑淤泥和粉质黏土以确保基坑和坑外土体变形接近实际，土体参数的选取参照《基坑工程技术标准》(DG/TJ 508—61—2018) [29]；圆砾和中风化砂岩则采用传统的摩尔-库仑本构模型 (MC)，参数选取参照文献[30]。

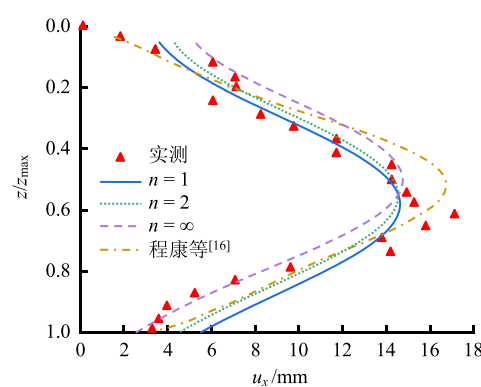
依照工程实际情况定义地连墙等结构参数，具体如表 2 所示。为了考虑坑内外桩基对地连墙变形的保护作用，将已打设的 200 根坑底工程桩以及西



(a) 开挖深度为 7 m



(b) 开挖深度为 10 m



(c) 开挖深度为 15.5 m

图8 不同开挖深度下土体水平位移比较

Fig.8 Comparison of horizontal displacement of soil under different excavation depths

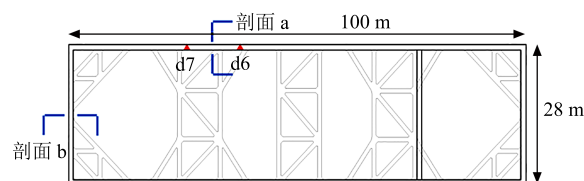


图9 基坑平面示意图

Fig.9 Schematic plan of foundation pit

侧 605 根工程桩进行建模。地连墙与内支撑之间为刚性连接；土体与地连墙之间设置界面，强度折减

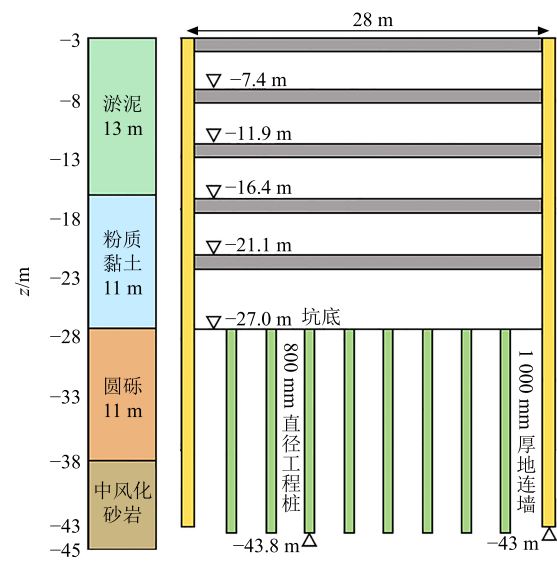


图 10 基坑剖面示意图
Fig.10 Generalized section of foundation pit

表 1 土体参数
Table 1 Soils parameters

模型	土层	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c'/kPa	$\phi'/(^{\circ})$	$\psi/(^{\circ})$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	R_f	E/MPa	ν
HSS	淤泥	16.5	1	20	0	2.1	1.8	14.2	46.8	2	0.6	—	—
	粉质黏土	19.5	15	25	0	8.5	7.1	42.3	148.1	2	0.9	—	—
MC	圆砾	20.0	1	36	6	—	—	—	—	—	—	97.5	0.30
	中风化砂岩	22.0	30	38	8	—	—	—	—	—	—	150.0	0.25

注： γ 为重度； c' 为有效黏聚力； ϕ' 为有效内摩擦角； ψ 为剪胀角； E_{50}^{ref} 为标准三轴排水试验所得割线模量； $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 为侧限加载试验的切线模量； $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为工程应变卸载模量； G_0^{ref} 为小应变阶段的参考剪切模量； $\gamma_{0.7}$ 为割线模量减小到初始值的 70%时的剪应变； R_f 为破坏比； E 为弹性模量； ν 为泊松比。

表 2 结构参数
Table 2 Structural parameters

结构	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E/MPa	ν	尺寸
地下连续墙	25.0	3.15×10^4	0.15	厚 1 m
混凝土支撑	25.0	3.00×10^4	—	以实际情况定义
工程桩	25.0	3.15×10^4	—	直径 0.6、0.8、1.0 m

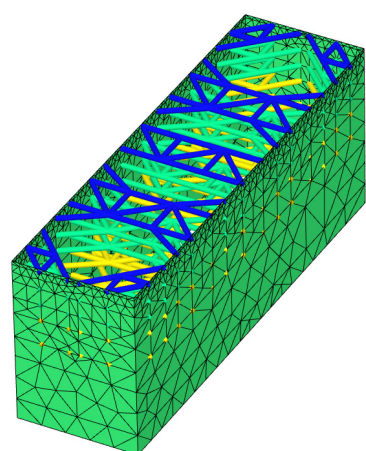


图 11 核心区网格划分
Fig.11 Mesh subdivision of core area

样是位移控制的本文计算值进行对比。

系数 $R_{\text{inter}} = 0.67$ ；土体与桩基界面的行为采用弹塑性模型描述，可将摩阻力与桩基所在土层的强度参数以及强度折减系数 $R_{\text{inter}} = 0.67$ 联系起来。

模型网格划分精度为中等，生成 34 838 个单元、66 485 个节点，核心区网格划分如图 11 所示。根据实际工况定义施工步，即开挖一层土方后施工支撑，如此往复，直至开挖至坑底。

如图 9 所示，d6、d7 为基坑标准段的两个围护墙测斜，将开挖到底时二者地连墙侧移的实测数据、有限元结果及拟合曲线进行对比，具体如图 12 所示。可以看出，数值结果的侧移最大值介于 d6 和 d7 之间，侧移最大值所在深度也较为吻合，可以认为数值计算反映了基坑的实际状态；有限元结果与拟合曲线较为一致，因此可以将数值模型中土体的变形视为由位移控制，这样便可将有限元结果与同

图 13 给出了剖面 a 围护墙后 4 m 土体位移的有限元结果与本文平面应变解的比较。与 3.1 节的规律类似， $n = \infty$ 时的土体水平位移与有限元结果更为吻合。图 12 给出了剖面 b 地连墙侧移的有限元结果和拟合曲线，图 14 给出了剖面 b 围护墙后 2 m 土体位移的有限元结果与本文二、三维应变解的比较。可以发现，三维应变解中仍然是 $n = \infty$ 时的土体水平位移与有限元结果更为吻合；当将平面应变解应

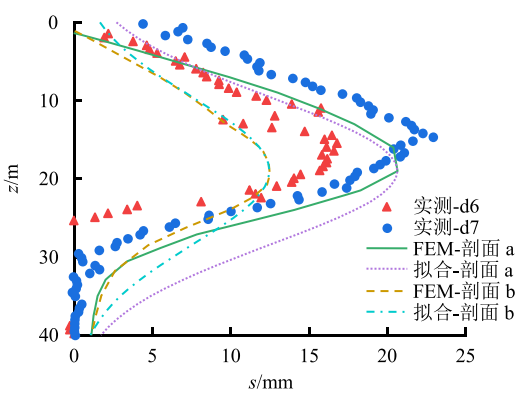


图 12 地连墙侧移对比
Fig.12 Comparison of lateral displacement of diaphragm wall

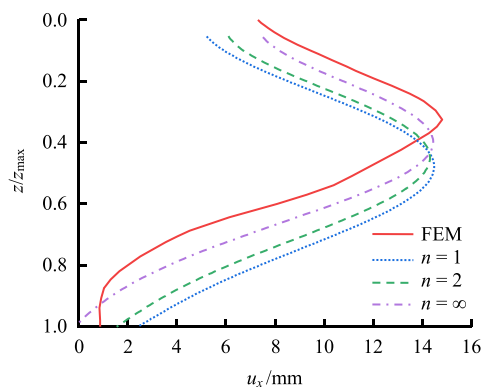


图 13 剖面 a 挡墙后方土体水平位移对比

Fig.13 Comparison of horizontal displacement of soil behind retaining wall of section a

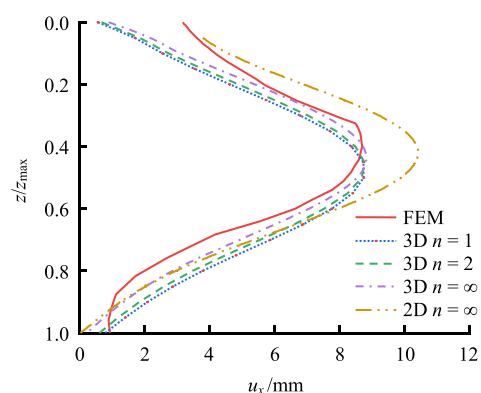


图 14 剖面 b 挡墙后方土体水平位移对比

Fig.14 Comparison of horizontal displacement of soil behind retaining wall of section b

用于空间效应显著的短边挡墙后方土体时,平面应变解相较于有限元结果和三维应变解偏大,这符合普遍认知。至此,可以得出 $n = \infty$ 是更符合实际情况的不均匀系数的结论。

4 参数分析

上文所述案例皆为长条形基坑,长边不同剖面的应力-应变状态非常近似,因此可用平面应变解求解;而长宽比小的基坑空间效应强,围护墙中部和角部土体的应力-应变状态有较大差异,无法简单地利用平面应变解给出计算值。本节将上文所验证的 $n = \infty$ 的三维解答应用于某空间效应显著的类正方形基坑以探讨该类基坑墙后土体水平位移的空间效应。

4.1 实例验证

Cheng 等^[12]分析了杭州深厚软黏土地区某深大基坑开挖的变形性状。地连墙深度范围内,自上而下的土层分别为填土、软土、粉质黏土、圆砾、风化岩;基坑开挖深度为 30.2 m,开挖面积约 8 000 m²;

围护结构采用厚 1.2 m、深 50 m 的地连墙+六道混凝土支撑+被动区裙边加抽条加固;如图 15 所示为地连墙测斜以及墙后土体测斜,土体测斜位于挡墙后方 1 m 的位置;由于篇幅限制,其余信息不再阐述。

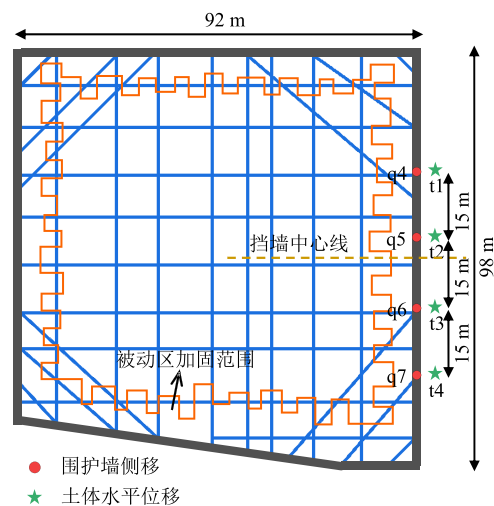


图 15 基坑平面示意图

Fig.15 Schematic plan of foundation pit

利用式 (19) 和 q5 测斜最大侧移可以反算出挡墙中心线位置的地连墙最大侧移 $f_{\max}$,接着将 $f_{\max}$ 代回式 (19) 即可得到不同位置的墙体测斜拟合曲线,将其与实测数据进行比较,具体如图 16 所示。可以看出, q4 和 q5 的侧移拟合效果较好,而 q6 和 q7 的拟合效果则相对并不理想。利用 $f_{\max}$ 和式 (19) 作为输入条件可求得土体测斜的三维应变计算值,将计算值与实测值进行比较,具体如图 17 所示。可以看出,除去 t1 的拟合值略小于实测值,其余测斜的土体水平位移的吻合度较高,这再次证明了所提半解析解的正确性;土体下部的水平位移拟合值略高于实测值,这是因为张陈蓉等^[27]未考虑墙端进入

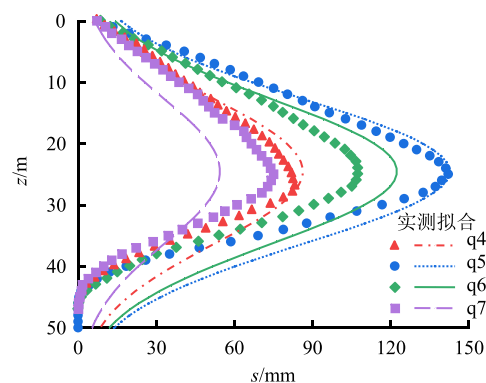


图 16 地连墙侧移对比

Fig.16 Comparison of lateral displacement of diaphragm wall

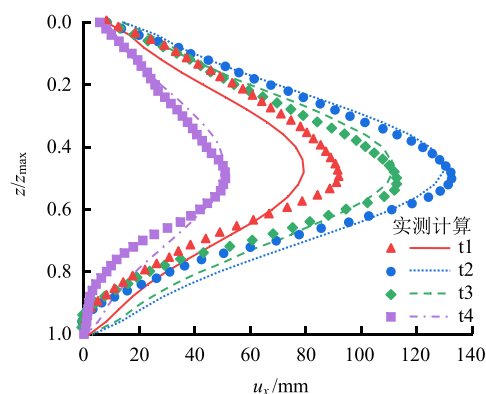


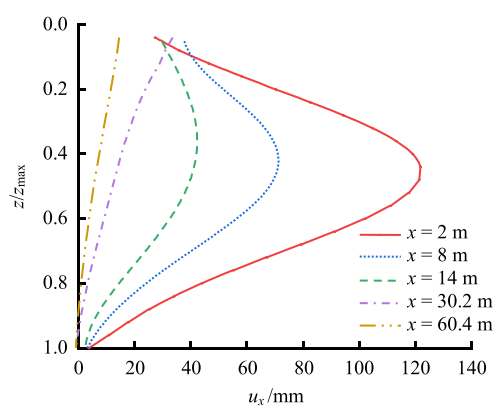
图 17 土体水平位移对比

Fig.17 Comparison of horizontal displacement of soil

基岩对于挡墙的嵌固作用, 导致拟合曲线的下半部分相对于实测值偏大, 这也说明土体水平位移的准确性非常依赖挡墙侧移的准确性。

4.2 距挡墙距离

图 18 给出了挡墙中心线上距围护墙水平距离 $x = 2、8、14、30.2、60.4$ m 时, 土体水平位移 u_x 的计算曲线。可以看出, 当土体距挡墙距离较近时, 土体最大水平位移所在深度保持在 $z/z_{\max} = 0.45$ 附近; 随着距离的增大, $z/z_{\max} = 0.45$ 附近的土体水平位移及其衰减速率减小, 同时浅层土体的水平位移增大; 当土体距挡墙 H 时, 土体侧移曲线的性状已发生变化, 即浅层土体的水平位移高于深层土体; 当土体距挡墙 $2H$ 时, 浅层土体仍然有 15 mm 左右的水平位移, 证明基坑对土体水平位移的影响在 $2H$ 以外的范围。

图 18 距挡墙距离对 u_x 的影响Fig.18 Influence of distance from retaining wall on u_x

4.3 距挡墙中心线距离

图 19 给出了距挡墙距离 $x = 2$ m, 距挡墙中心线距离 $y = 0、10、20、30、40、49$ m 时, 土体水平位移 u_x 的计算曲线。可以看出, 土体最大水平位移所在深度并不随距挡墙中心线距离的改变而改

变, 一直保持在 $z/z_{\max} = 0.45$ 附近; 随着距挡墙中心线距离的增大, 土体最大水平位移逐渐减小, 且在 $y/L = 0.1 \sim 0.3$ 范围内的衰减速度最快, 这与挡墙侧移曲线衰减的规律相关; 基坑开挖几乎不会诱发角部土体产生垂直于挡墙的水平位移。

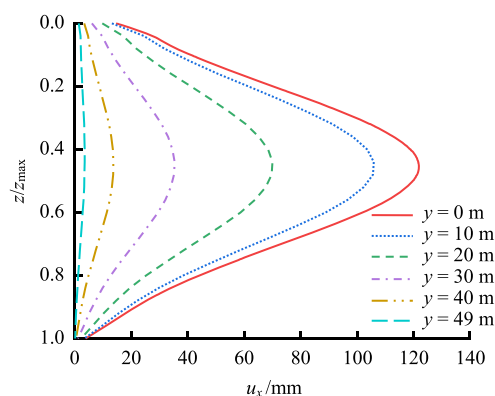
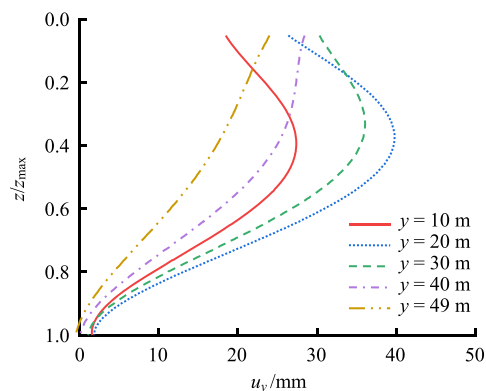
图 19 距挡墙中心线距离对 u_x 的影响Fig.19 Influence of distance from center line of retaining wall on u_x

图 20 给出了距挡墙距离 $x = 2$ m, 距挡墙中心线距离 $y = 10、20、30、40、49$ m 时, 土体水平位移 u_y 的计算曲线, 位移为正代表向挡墙中心线方向变形。可以看出, 当 u_y 呈现出内凹性状时, 其最大侧移所在深度保持在 $z/z_{\max} = 0.40$ 附近, 高于图 18、19 中的 $z/z_{\max} = 0.45$; 不论是土体最大水平位移还是浅层位移, 都随土体距挡墙中心线距离的增加呈现出先增加后减小的性状; 当土体距挡墙中心线距离为 30 m 时, u_y 的最大值已然与 u_x 相当; 当土体距挡墙中心线距离为 40 m 时, 浅层土体水平位移已大于深层土体; 即使在基坑的角部位置, 土体依然有不可忽视的平行于挡墙的水平位移; 被广泛认为偏于安全的平面应变解答显然无法考虑平行于挡墙

图 20 距挡墙中心线距离对 u_y 的影响Fig.20 Influence of distance from center line of retaining wall on u_y

的土体位移,因此可能无法给出坑外土体水平位移的保守估计,尤其是 u_y 较大的基坑角部附近的坑外土体。

图 21 给出了距挡墙距离 $x = 2$ m, 距挡墙中心线距离 $y = 0$ 、10、20、30、40、49 m 时,土体水平总位移 u 的计算曲线。可知, u_y 显著提高了土体浅层的水平位移,忽略 u_y 对总水平位移的影响会使浅基础、地下管线等浅埋结构明显偏不安全;随着距挡墙中心线距离的增大,总位移的方向从垂直于挡墙变为几乎与挡墙平行。

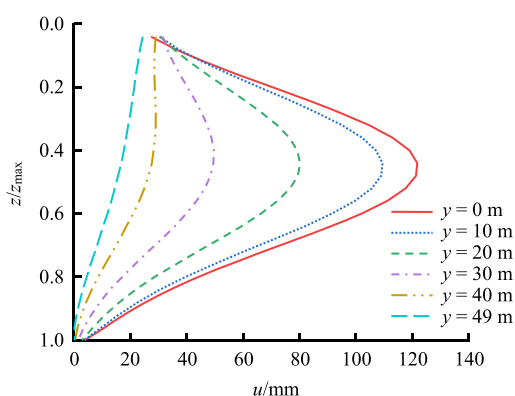


图 21 距挡墙中心线距离对 u 的影响

Fig.21 Influence of distance from center line of retaining wall on u

5 结 论

(1) 借助虚拟镜像技术推导了圆孔不均匀收敛诱发土体水平位移的二维和三维半解析解;利用微元法,将围护墙的挠曲变位视作围护墙各微单元均发生圆孔不均匀收敛后的叠加。本文半解析解考虑了当前研究中大多忽略的土体收敛的非等量性和三维效应,更符合实际。

(2) 将本文半解析解应用于两个基坑案例中,通过将计算值同实测数据、既有理论解以及有限元结果进行对比,提出向下不均匀收敛的极限为更符合工程实际的收敛模式;对比半解析解的计算值与有限元结果发现,二维半解析解并不适用于空间效应显著的基坑。

(3) 将所验证的不均匀系数应用于杭州深厚软黏土地区某空间效应显著的深大基坑工程案例中,与实测数据的对比再次验证了本文半解析解的合理性;对坑外土体水平位移的空间效应进行了详细的分析,发现被广泛认为偏于安全的平面应变解无法考虑平行于挡墙的土体位移,低估了基坑角部附近浅层土体的总水平位移;忽略平行与基坑边线的水平位移 u_y 对邻近浅基础和地下管线等浅埋结构不

利。

(4) 基坑开挖前,可利用围护墙变形的既有经验公式获得坑外土体的位移场,然而所得土体位移的精确程度依赖于所输入围护墙变形的准确性;基坑开挖结束后,可利用围护墙实测变形数据获得坑外土体位移,然而此时计算值仅可用于坑外土体位移场的校核,如何跳过围护墙变形问题获得准确的坑外土体位移场是进一步研究的方向。

参 考 文 献

- [1] 閻超, 刘秀珍. 某深基坑安全开挖引起临近建筑物较大沉降的实例分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 479-482.
XIA Chao, LIU Xiu-zhen. Case study of settlement of adjacent buildings caused by excavation of a deep foundation pit[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(Suppl.2): 479-482.
- [2] SHI J, LIU G, HUANG P, et al. Interaction between a large-scale triangular excavation and adjacent structures in Shanghai soft clay[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 50: 282-295.
- [3] NI X, LU J, WANG Y, et al. Field investigation of the influence of basement excavation and dewatering on ground and structure responses[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 117: 104121.
- [4] ZHANG J, XIE R, ZHANG H. Mechanical response analysis of the buried pipeline due to adjacent foundation pit excavation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78: 135-145.
- [5] 徐日庆, 程康, 应宏伟, 等. 考虑埋深与剪切效应的基坑卸荷下卧隧道的形变响应[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 1): 195-207.
XU Ri-qing, CHENG Kang, YING Hong-wei, et al. Deformation response of a tunnel under foundation pit unloading considering buried depth and shearing effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(Suppl.1): 195-207.
- [6] 应宏伟, 程康, 俞建霖, 等. 考虑地基变形连续的基坑开挖诱发邻近盾构隧道位移预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(2): 318-329.
YING Hong-wei, CHENG Kang, YU Jian-lin, et al. Prediction of shield tunnel displacement due to adjacent

- basement excavation considering continuous deformation of ground[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2021, 55(2): 318-329.
- [7] YUAN Y, LI S, ZHANG Q, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels based on a modified grey evaluation model: sample as Shangjiawan Tunnel[J]. **Geomechanics and Engineering**, 2016, 11(4): 493-513.
- [8] FENG R, ZHANG Q, LIU S. Experimental study of the effect of excavation on existing loaded piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2020, 146(9): 04020091.
- [9] ZHANG D M, XIE X C, LI Z L, et al. Simplified analysis method for predicting the influence of deep excavation on existing tunnels[J]. **Computers and Geotechnics**, 2020, 121: 103477.
- [10] 应宏伟, 杨永文. 杭州深厚软黏土中某深大基坑的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1838-1846.
- YING Hong-wei, YANG Yong-wen. Characteristics of a large and deep soft clay excavation in Hangzhou[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(12): 1838-1846.
- [11] TAN Y, WEI B, ZHOU X, et al. Lessons learned from construction of Shanghai metro stations: importance of quick excavation, prompt propping, timely casting, and segmented construction[J]. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 2015, 29(4): 04014096.
- [12] CHENG K, XU R, YING H, et al. Observed performance of a 30.2 m deep-large basement excavation in Hangzhou soft clay[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2021, 111: 103872.
- [13] SCHUSTER M, KUNG G T C, JUANG C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009, 135(12): 1823-1835.
- [14] 木林隆, 黄茂松. 基坑开挖引起的周边土体三维位移场的简化分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 820-827.
- MU Lin-long, HUANG Mao-song. Simplified method for analysis of soil movement induced by excavations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(5): 820-827.
- [15] 钱建固, 周聪睿, 顾剑波. 基坑开挖诱发周围土体水平移动的解析解[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3380-3387.
- QIAN Jian-gu, ZHOU Cong-rui, GU Jian-bo. Analytical solution for excavation-induced soil horizontal movement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(12): 3380-3387.
- [16] 程康, 徐日庆, 林存刚, 等. 挡墙任意变位模式诱发周围土体水平位移的简化算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(5): 899-908.
- CHENG Kang, XU Ri-qing, LIN Cun-gang, et al. Simplified method for predicting surrounding soil's horizontal displacement caused by arbitrary deflection of retaining wall[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2020, 54(5): 899-908.
- [17] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. **Geotechnique**, 1987, 37(3): 301-320.
- [18] XU K J, POULOS H G. Theoretical study of pile behaviour induced by a soil cut[C]//ISRM International Symposium. [S. l.]: OnePetro, 2000.
- [19] PARK K H. Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(3): 249-261.
- [20] 林存刚, 夏唐代, 梁荣柱, 等. 盾构掘进地面沉降虚拟镜像算法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1438-1446.
- LIN Cun-gang, XIA Tang-dai, LIANG Rong-zhu, et al. Estimation of shield tunnelling-induced ground surface settlements by virtual image technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(8): 1438-1446.
- [21] 张治国, 赵其华, 徐晨, 等. 基于影像源法的基坑开挖对邻近单桩影响简化分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2011-2020.
- ZHANG Zhi-guo, ZHAO Qi-hua, XU Chen, et al. Simplified analysis of adjacent single-pile response subjected to foundation pit excavation based on virtual image technique[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 2011-2020.
- [22] 徐日庆, 程康, 应宏伟, 等. 基于影像源法的基坑开挖引起的土体水平位移预测[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 17-20.
- XU Ri-qing, CHENG Kang, YING Hong-wei, et al. Prediction of horizontal displacement of soils caused by

- excavation of foundation pits based on virtual mirror technology[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl.1): 17-20.
- [23] 程康, 徐日庆, 林存刚, 等. 既有单桩在邻近基坑开挖下的水平向响应简化分析[J]. 浙江大学学报 (工学版), 2020, 54(1): 91-101.
- CHENG Kang, XU Ri-qing, LIN Cun-gang, et al. Simplified analysis method for evaluating horizontal deformation of single pile due to adjacent foundation pit excavation[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2020, 54(1): 91-101.
- [24] KACHANOV M L, SHAFIRO B, TSUKROV I. Handbook of elasticity solutions[M]. [S. l.]: Springer, 2003.
- [25] CHEN H, LI J, LI L. Performance of a zoned excavation by bottom-up technique in Shanghai soft soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2018, 144(11): 05018003.
- [26] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81-86.
- XU Zhong-hua, WANG Jian-hua, WANG Wei-dong. Deformation behavior of diaphragm walls in deep excavations in Shanghai[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2008, 41(8): 81-86.
- [27] 张陈蓉, 俞剑, 黄茂松. 基坑开挖对邻近地下管线影响的变形控制标准[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2027-2034.
- ZHANG Chen-rong, YU Jian, HUANG Mao-song. Deformation controlling criterion of effect on underground pipelines due to foundation pit excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(7): 2027-2034.
- [28] 丁智, 王达, 虞兴福, 等. 杭州地铁新塘路、景芳路交叉口工程深基坑监测分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 445-451.
- DING Zhi, WANG Da, YU Xing-fu, et al. Monitoring and analysis of deep foundation pit at Xintang Road-Jingfang Road cross of Hangzhou metro[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Suppl.2): 445-451.
- [29] 上海市住房和城乡建设管理委员会. DG/TJ 508—61—2018 基坑工程技术标准[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- Shanghai Housing and Urban-Rural Construction Management Committee. DG/TJ 508—61—2018 Foundation pit engineering technical standards[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [30] 北京金土木软件技术有限公司. PLAXIS 岩土工程软件使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- Beijing Jintumu Software Technology Co., Ltd. PLAXIS geotechnical engineering software usage guide[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.