地下工程开挖问题计算方法的再认识

周顺华^{1,2}

1. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804

E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn

2018-12-15 收稿, 2019-02-15 修回, 2019-02-18 接受, 2019-08-22 网络版发表

国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(5171101316)资助

摘要 开挖方法的选择既取决于施工技术, 也受制于地层特性. 如何计算开挖过程中的变形和稳定性一直以来都是国内外学界与工程界研究的热点. 随着城市地下工程建设逐步向高精度、微变形的方向发展, 针对开挖问题的一些计算方法也需要重新认识. 本文对传统开挖问题计算方法的基本假定进行了阐述和讨论, 提出了考虑开挖应力释放效应来对开挖计算方法进行修正, 探讨了开挖过程中与工法相关的应力释放问题, 为今后对开挖问题的理论研究与地下工程的设计施工计算提供一种思路.

关键词 开挖, 边界面, 散粒体, 应力释放

地下工程建设的首要问题就是解决开挖及其引发的变形或稳定性控制. 历史上多种施工方法的演变和尝试, 均针对开挖而展开, 同时各种施工方法的演变既与施工技术有关, 也与地层特性密不可分. 如何计算开挖过程中的变形, 或如何评价开挖引起的稳定性, 在学术界颇具争议^[1,2]. 就传统的地下工程而言, 由于连续介质力学的成就, 即便开挖对象是散体或块体, 也常常采用连续介质力学方法进行计算^[3-5], 其结果只需满足设计要求即可.

然而, 随着城市地下工程受周边重要建筑物控制情况的限制, 施工控制正朝向高精度和微变形方向发展. 现有连续介质理论模型和方法也正面临新的挑战^[1]. 从细观角度看, 岩土体属于典型散粒体, 受散体材料离散性和内摩擦特性的影响, 土体颗粒结构在经历开挖之后, 局部应力的释放将受到其他部分土体的约束, 进而发生变形和应力释放受阻现象, 在细观上表现为颗粒间存在残余应力^[6-10]. 残余应力的分布与颗粒尺度^[10]、形状^[11,12]、表面粗糙度^[12]、排列方

式^[10]等因素密切相关, 也与开挖面的应力水平和应力状态有关^[13,14], 其存在使得岩土体的真实应力状态与现有方法计算结果并不一致^[15], 从而影响了设计施工人员对于内力、变形、稳定性的预判, 难以实现微变形控制.

目前, 直接采用散体力学对开挖进行计算还是不现实的, 但通过对岩土材料细观特性的了解可进一步优化现有计算方法, 从而将细观特性(如内摩阻力)与宏观力学行为联系起来^[16-20]. 研究表明, 颗粒体系的应力残留特性在宏观的表现就是开挖应力释放效应^[6,21-24]. 开挖应力释放效应与传统的开挖荷载或开挖应力释放系数有着显著的差别, 前者是工程影响范围内颗粒间相互作用的力学体现, 而后者则是对开挖边界的一种近似处理. 本文根据散体材料加卸载特性和开挖应力释放研究的最新成果, 对传统开挖问题计算方法的基本假定进行了阐述和讨论, 提出了以开挖应力释放效应对开挖问题进行修正的计算方法, 探讨开挖过程中与工法相关的应力释放问题, 为今后对开挖问题的理

引用格式: 周顺华. 地下工程开挖问题计算方法的再认识. 科学通报, 2019, 64: 2608-2616

Zhou S H. Rethinking of the calculation method of excavation issues in underground engineering (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2608-2616, doi: 10.1360/N972018-01248

论研究与地下工程的设计施工计算提供一种思路。

1 开挖计算的若干假定

开挖其实是物理过程, 在计算中将物理过程简化为计算域中的动态边界问题, 即以某步开挖面为新边界. 计算结果取决于: (1) 初始应力场的真实性; (2) 本构关系的可靠性; (3) 开挖面力的合理性.

受岩土材料的散体特性和开挖范围内自重应力的影响, 开挖荷载的大小难以精确计算. 因此, 目前应用于工程设计领域的主流计算方法均对开挖荷载进行了一定假设. 根据不同的假设, 可将开挖问题求解分为以下三类:

(i) 等值反向面力法. 面力法是将开挖边界面上的初应力反向施加于开挖面来模拟和计算开挖问题的一种方法. 如图1所示, 开挖地下洞室可视为图1(b)和(c)两种状态的叠加, 计算时首先求解域内各点的初始应力 $\{\sigma_0\}$, 再将开挖边界面上的初始应力反向施加于开挖面以得到开挖引起的位移 $\Delta\delta$ 和应力增量 $\Delta\sigma$, 此时计算域内的实际应力 $\{\sigma\}$ 为

$$\{\sigma\} = \{\sigma_0\} + \{\Delta\sigma\}, \quad (1)$$

而域内的位移, 仅为由开挖所引起的位移 $\Delta\delta$.

采用有限单元法计算时, 开挖面上的应力则转化成反向等效节点荷载. 这类模拟方法主要有Mana法、单元应力内插法和由位移直接求结点力法, 目前应用最为广泛的是Mana法^[24], 其等效节点荷载的计算格式为

$$F = \sum_{i=1}^N \int_{\Omega} B^T \sigma d\Omega, \quad (2)$$

式中 N 表示被挖去土体中与开挖边界相连接的单元数, B 表示单元应变-位移矩阵, σ 表示单元的应力张量, 积分范围 Ω 为被挖去土体中与开挖边界相连接的单元体

积或面积.

(ii) 反向修正法. 面力法在计算浅埋土质隧道时, 理论上应该采用三维模型, 但在实施上尚有难度, 所以绝大部分计算都采用二维模型进行模拟, 此时式(2)的计算结果会出现较大误差, 尤其是我国一些城市中的软土隧道, 在隧道的底部出现较大的隆起现象^[7]. 这是由于式(2)在计算中只考虑了开挖范围内单元内力对等效结点荷载的贡献, 没有考虑开挖部分以外土体对变形的影响, 在自重应力场下, 平面模型的等效结点荷载的计算格式应修正为^[24]

$$F = \sum_{i=1}^N \int_{\Omega} B^T \sigma d\Omega - \sum_{i=1}^N \int_{\Omega} N^T \gamma d\Omega, \quad (3)$$

式中 N 表示单元形函数矩阵, γ 为土的重度.

(iii) 折减系数法. 由于实际问题的空间效应, 采用开挖面节点应力计算出来的变形偏大, 计算中将开挖前的初始应力乘上一个折减系数, 这一系数称为应力释放系数或荷载释放系数. 根据施工的不同情况, 应力释放系数可以从0~1之间变化. 孙钧和汪炳鉴^[25]以隧道开挖为例, 提出了开挖与支护各阶段应力释放系数的概念, 如图2所示. 图2(a)为围岩初始应力状态, 初始应力即为岩土体的自重应力. 若单元的初始应力为 $\{\sigma_0^e\}$, 由式(2)

$$F_0^e = \int_{\Omega} B^T \sigma_0^e d\Omega. \quad (4)$$

因此, 在开挖边界的结点 i 上, 等效节点荷载为

$$f_i = -\sum_e F_0^e. \quad (5)$$

在施工阶段(b), 开挖边界上释放的结点荷载 $f_{li} = \alpha_1 f_i$, 式中 α_1 为该阶段的开挖应力释放系数.

同理, 在施工阶段(c), 原开挖边界上释放的结点荷载为 $f_{2i} = \alpha_2 f_i$; 而作用在新的开挖边界上的释放结点

图1 面力法开挖问题计算图示. (a) 地下洞室开挖计算边界; (b) 反向施加地应力; (c) 初始状态

Figure 1 Calculation diagram of the excavation problem of the surface force method. (a) Calculation boundary of underground cavern excavation; (b) reverse applied the ground stress; (c) initial state

 图2 荷载(应力)释放示意图^[25]

 Figure 2 Schematic diagram of load (stress) release^[25]

荷载为

$$f'_{2i} = f_{2i} - \sum \int_{\Omega} B^T \sigma_1^e d\Omega, \quad (6)$$

式中右边第二项是由施工阶段(b)完成后位于新开挖边界上的各个单元的应力 σ_1^e 所产生的等效节点荷载。依次计算可得围岩和衬砌最后的应力和位移值为各个施工阶段相应值叠加的结果。折减系数法是对等值反向面力法的一种修正,不是从内应力释放的角度进行计算。

实际开挖问题与诸多因素有关,主要包括土性、辅助施工措施、开挖尺寸、开挖方法、支护施作时间、初始应力等^[7,26,27]。因为问题的复杂性,如仅为满足工程设计需要,可采用一种简化但较为方便的处理方法,即将诸多因素归纳到一个系数中去,这个综合系数的确定可以根据实际经验而定^[7,18],也可以通过分析隧道、基坑开挖的过程属性,根据位移释放率来计算开挖应力释放率,进而提出开挖动态荷载释放系数的概念和计算公式^[18]。

2 开挖与卸荷的差异

通常将开挖问题视为卸荷或卸载。卸荷是对结构而言的,具有明确的加载与被加载对象。但开挖与结构

的卸荷存在明显的差异,如图3所示,第I步开挖形成的开挖面为边界1和边界2,对边界2而言,开挖部分的重量被解除了,可以理解为卸荷。但对边界1而言,开挖移走的重量对边界1没有直接影响,对边界1来说卸荷并不成立。此外,如果是浅埋隧道的开挖问题,边界1对地表的影响远大于边界2。如果采用前述边界力法,边界2对应的 σ_2 大于边界1对应的 σ_1 ,这将导致地表变形计算的异常。这就引出了一个问题:卸荷与自重应力作用方向之间的关系将影响实际结果。

一般暗挖法隧道的卸荷方向与自重应力作用方向不共线,这就导致了开挖面的几何形状不同,开挖影响

图3 开挖面上不同的卸载方向

Figure 3 Different unloading directions on the excavation face

效果也不相同,如图4(a)。对于由垂直和水平面组成的基坑开挖问题,如图4(b)所示,坑底水平面上的卸荷作用非常明显。侧面由于围护结构的存在,开挖的宏观效应更多的是受基坑外侧土压力的作用,围护结构的侧面不存在应力释放,但存在水平土压力的卸除。

从以上例子可以发现,地下工程的开挖作业,在某些情况与卸载问题接近,但其他情况与卸载或卸荷相差甚远。总体来说,开挖是在既有应力均平衡的条件下,因临空面的出现而导致内应力的释放。

3 岩土体应力释放的特征

开挖问题准确计算的关键在于明确开挖或卸荷阶段土体的应力释放特性。传统的卸载本构曲线是以单元体通过加卸载得到的,经典砂箱试验曲线如图5所示,即实测的过程是外荷载加卸载的过程,与开挖形成临空面而由内应力产生应力释放有所区别。

以弹簧-滑块系统解释应力释放,如图6(a)所示,弹簧内存在初始内应力 σ_0 ,当系统处于平衡状态时有

$$F - \mu P \leq \sigma_0 \leq F + \mu P, \quad (7)$$

式(7)中,存在的不变值 μP 与介质之间的相互运动趋势有关。实际情况在右侧不是 F ,以弹簧单元替代 F ,则如图6(b)所示, σ_1 与 σ_2 可以存在某一摩擦力,否则滑块将滑动到新的平衡点。

事实上,图6所示弹簧-质量系统的加载和卸载过程可拆解为图7所示的多个特征阶段。由图7可知,弹簧在外力卸除后只有部分应力得到了释放,即出现了残余应力。残余应力的概念最先被用于解释金属制造领域

图4 基坑与隧道工程开挖工况。(a)隧道开挖;(b)基坑开挖
Figure 4 Excavation conditions of foundation pit and tunnel engineering. (a) Tunnel excavation; (b) foundation pit excavation

中的内力不均匀现象,金属产生残余应力的原因主要有不均匀塑性变形、相变及化学变化。而对于诸如岩土体等颗粒材料,可不考虑相变及化学变化,那么宏观上的不均匀塑性变形成为颗粒材料出现应力残留的主要原因,反映到细观上即为颗粒间相对位移。

从细观结构上分析,土体颗粒间的摩擦、咬合便是滑块受到的摩阻作用^[28,29],宏观效果会导致卸载阶段产生变形自锁现象,随着摩阻作用的减弱,滑块发生滑动时,弹簧中的内应力将得到释放。以颗粒材料的光弹试验为例,卸载阶段颗粒体系中存在直观可视的残留接触力,如图8所示,进一步分析颗粒的位移响应,随着外荷载的逐级卸除,体系的卸载响应逐步增强,最终可将土体开挖变形划分为惰性(微变形)、加速(快速变形)和剧变(大变形)3个阶段,如图9所示,该划分主要是为开挖阶段的应力释放与变形控制提供指导,即通过将应力释放量控制在惰性卸载阶段以达到微变形控制的目的。

传统观点认为卸载过程产生残留应力的主要原因

图5 (网络版彩色)经典的室内砂箱加卸载试验。(a)模型示意图;(b)砂的加卸载曲线

Figure 5 (Color online) Classic loading and unloading test in sand box. (a) Model schematic; (b) sand loading and unloading curve

图6 应力释放简化模型。(a) 单个单元情况下的系统内应力；(b) 复杂情况下的系统内应力

Figure 6 The simplified model of stress release. (a) The stress in a single unit; (b) the stress in complex conditions

在于边界提供的摩擦作用，即边界效应。然而，通过力链的研究可以发现^[10]，颗粒体系在加载作用下的“强力链带”会形成“内边界”(图8)，力链的位置及形态与散体材料内部应力残留特性有关，卸载时颗粒体系内力残留就是由强力链内边界导致的约束差异造成的。“内边界”提供的内摩擦力与残留内力在体系内部形成自平衡，卸载后体系内力增量为零，这是经典弹塑性力学方法所无法描述的。

根据散体材料的应力释放特点，开挖的本质是土体内应力的释放。因此，经典计算方法中所一直沿用的开挖面上的开挖荷载只是一种表象，其目的是为了计算变形而“假想”的某种作用力。然而，该过程的实质应是开挖导致地层在一定范围内发生内应力的释放，由此产生的变形。

在现有计算方法中加入开挖应力释放理念可有效提高计算精度。开挖应力释放的关键在于描述颗粒间的内摩擦作用，借助能量原理，可推导颗粒内摩擦与单元体应力状态的数理关系，在考虑摩擦作用后，经典计

算方法中的单元刚度矩阵修改为如下形式^[20]：

$$[k]_{ii} = \int_Q [B]^T (1 + [L])[D]_L [B] dV, \quad (8)$$

式中 $[D]_L$ 为弹塑性本构关系矩阵，弹性阶段 $[D]_L=[D]$ ，弹塑性阶段 $[D]_L=[D_{ep}]$ ， $[L]$ 为考虑摩擦效应后的修正矩阵。以此对卸荷刚度进行调整，即可考虑材料的摩擦作用对计算区域的影响。

4 与工法相关的开挖应力释放问题讨论

工程中的开挖是机械与土体相互作用的结果，不同的开挖工法对应的施工步骤不同，所采用的施工装备也不相同。开挖问题的计算，在明确岩土体应力释放机理的基础上，还需要针对不同的工法进行开挖应力释放效应的讨论。

一般地下工程的开挖可以分为钻爆型、切削敞开型(如果忽略爆破过程的影响，钻爆型可以近似归入切削敞开型)、护壁泥浆稳定型和挤压型等四类。

4.1 切削敞开型

切削作用以盾构机刀盘切削前方土体的开挖过程最为典型。根据盾构机刀盘选型和开口率设定，开挖面前方土体在刀盘不同位置的应力释放效应不同；同理，盾构掘进和停机拼装时的开挖面应力释放量也不相同。当盾构机穿越具有一定强度土体时，刀盘开口之间土体还有可能形成微拱^[26,30,31]，这些都是影响应力释放和地表变形的关键因素。

图7 弹簧-质量系统加卸载过程中力的转化和平衡

Figure 7 Force conversion and balance during loading and unloading in the spring-mass system

P_0 反映残留区初始接触力水平， k 反映体系初始刚度

F 为外荷载， P_L 反映加载后残留区接触力水平， x_L 反映承载变形， P_U 为卸载后接触力水平， $k=k(x)$ 为残留区刚度

$k \cdot x_L$ 为残留区因弹性变形而产生的力

$F = k \cdot x_L + f_L$ ，外荷载与内力的平衡

$f_L = P_L \cdot \mu$ ，外力诱发的摩擦阻力

$\mu = f(\phi)$ ，摩擦系数

$k \cdot x_U = f_U$ ，卸载后的残留接触力

$f_U = P_U \cdot \mu$ ，摩擦自锁力

$\mu = f(\phi)$ ，摩擦系数

图 8 (网络版彩色)散体材料加卸载光弹试验. (a) 卸载UL1级; (b) 卸载UL0级

Figure 8 (Color online) Bulk material loading and unloading photoelastic test. (a) Unloading level UL1; (b) Unloading level UL0

图 9 散体材料卸载过程中的变形特性

Figure 9 Deformation characteristics of bulk material during unloading

盾构法隧道理论上不存在敞开型工况, 但以下两种情况例外:

(1) 同步注浆压力不足, 或者注浆量不足时, 如图10所示, 此时会发生径向的应力释放: 压力不足时全断面均有不同程度的释放, 注浆量不足时则在壁后空隙部位发生释放.

(2) 曲线段掘进或出现超挖时. 盾构曲线段施工所导致的超挖主要由于仿行刀开启造成, 此时盾体本身对内侧地层也有一定的挤压作用, 实际掘进面为椭圆形, 实际挖掘超出理论挖掘量, 如图11所示.

显然, 当超挖间隙填充不及时或填充参数设置不恰当时, 地层内应力会发生影响的释放, 进而导致地层损失和周边建(构)筑物的变形.

4.2 护壁泥浆稳定型

地下墙和钻孔灌注桩施工时, 槽壁和孔壁会采用灌入泥浆的方式进行临时平衡, 泥水盾构在停机时也依靠泥水的渗透和成膜平衡开挖面, 泥水平衡示意图如图12所示. 泥浆与土体的相互作用在工程界是非常常见的现象, 泥浆通过在土体中的渗透和沉积作用形

图 10 (网络版彩色)同步注浆参数设置不当引起的应力释放. (a) 注浆压力不足; (b) 注浆量不足

Figure 10 (Color online) Stress release caused by improper setting of synchronous grouting parameters. (a) Insufficient grouting pressure; (b) insufficient grouting amount

图 11 (网络版彩色)盾构曲线段超挖间隙及填充. (a) 盾构未发生偏转; (b) 盾构向左偏转; (c) 土体向超挖间隙运动, 填充间隙; (d) 同步注浆填充超挖间隙

Figure 11 (Color online) Filling the over-excitation gap in shield curve section. (a) The shield is not deflected; (b) shield deflected to the left; (c) the soil moves to the overcut gap and fills the gap; (d) synchronous grouting filling over-excitation gap

成致密的填充层或泥皮(渗透型泥膜或泥皮型泥膜), 进而将泥浆压力转化为有效支护压力来起到开挖面的临时支撑作用^[32].

大多数情况下土体由固、液、气三相组成(饱和地层由固、液二相组成), 考虑泥水平衡时, 还需进一步计算泥浆颗粒沉积对系统力学性态的影响^[33,34], 此时研究对象为固、液、气及颗粒四相(饱和地层中为固、液、颗粒三相).

研究表明^[33,34], 泥浆临时护壁涉及颗粒迁移、土体变形以及孔压转化等多个物理过程并相互耦合. 这种情况下开挖引起的地层应力释放和开挖面支护压力转化都较一般水土耦合体系不同. 根据泥浆渗透的多

场耦合计算结果,可以得到不同地层中泥浆颗粒填充和有效应力转化随时间的变化关系^[33,34],从而可知开挖面上的有效支护压力.结合开挖动态边界,可制定成槽施工的精细化方案,这对于科学管理现场施工具有积极的意义.

4.3 挤压型

旋喷桩施工(高压旋喷或全方位喷射注浆)或压桩施工时,地层内土体会受到显著的挤压作用,加之喷射水泥的胶结和固化,此时土体内摩擦效应会大大增强,导致开挖时相应区域的应力释放效应减弱.

旋喷桩施工对地层的挤压作用可以看做在开挖面施加了远大于地层内应力的外力,这一方面导致颗粒自身被压密,内摩擦效应增强,另一方面,这种挤压作用也会导致周边环境发生变化.计算时应同时关注旋喷挤压对外界的不利影响.

5 结语

随着城市地下工程的发展,施工受既有建筑物限制的情况越来越普遍,对设计方案和施工控制的要求

图12 (网络版彩色)地下工程泥水平衡示意图. (a) 泥水盾构泥水压力与地层平衡; (b) 地下墙成槽时的泥浆护壁平衡

Figure 12 (Color online) Schematic diagram of slurry balance in underground engineering. (a) Slurry pressure and balance in slurry shield; (b) slurry balance in the underground wall construction

也越来越高,体现在对计算结果的要求越来越精细,否则难以实现微变形控制,于是需要对经典的近似进行本质的修正.本文仅从传统开挖问题计算的基本假定进行了阐述和讨论,提出了以开挖应力释放效应作为开挖计算的方法,回避了岩土体本构对计算的影响.这一方法的完善需要更深入的散体力学成就,尤其是作为散粒体土体的细观力学机理及其描述方法.

参考文献

- 1 Zhou S H. New challenges in construction mechanics of urban rail transit (in Chinese). Sci Sin Technol, 2016, 46: 560–569 [周顺华. 城市轨道交通施工力学的新挑战. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 560–569]
- 2 Lü A Z, Jiao C M. Discussion of two elementary problems in rock mechanics (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2004, 23: 4095–4098 [吕爱钟, 焦春茂. 岩石力学中两个基本问题的探讨. 岩石力学与工程学报, 2004, 23: 4095–4098]
- 3 Wei R L. Excavation unloading and calculation of passive earth pressure (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 1997, 19: 88–92 [魏汝龙. 开挖卸载与被动土压力计算. 岩土工程学报, 1997, 19: 88–92]
- 4 Meng F L, Fan L B, Yao J. Test investigation of shear strength of soft clay in unloading state (in Chinese). J Zhejiang Univ Tech, 2003, 31: 432–435, 459 [孟凡丽, 樊良本, 姚君. 卸荷状态下软黏土抗剪强度的试验研究. 浙江工业大学学报, 2003, 31: 432–435, 459]
- 5 Gao J H, Zhao W B, Li X W. Simulation of unloading due to excavation in F.E. analysis — Modified Mana method based on comparison of three methods (in Chinese). J Hohai Univ, 1999, 27: 47–52 [高俊合, 赵维炳, 李兴文. 深开挖有限元分析中释放荷载模拟——三种常用方法比较及改进的Mana法. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27: 47–52]
- 6 Mi G M, Zhu J P, Shao H M, trans. Generation and Countermeasures of Residual Stress (in Chinese). Beijing: Mechanical Industry Press, 1983 [米谷茂, 朱荆璞, 邵会孟, 译. 残余应力的产生和对策. 北京: 机械工业出版社, 1983]
- 7 Zhou S H, Xu Z L, Liu E J. Study on stress release rate of tunnel in soft soil (in Chinese). In: Papers of the 8th Annual Conference of Tunnel and Underground Engineering Society of China Society of Civil Engineering, 1994. 5 [周顺华, 徐正良, 刘恩军. 软土隧道应力释放率研究. 见: 中国土木工程学会隧道及地下工程学会第八届年会论文集, 1994. 5]
- 8 Zhuang L. Loading-unloading and stress release characteristics of granular materials (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanghai: Tongji University, 2009 [庄丽. 散粒体的加卸载与应力释放特性. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2009]
- 9 Jia J, Zhou S H, Gong Q M. Stress release characteristics of sandy soil arching by laboratory tests and numerical simulation (in Chinese). Rock Soil Mech, 2013, (2): 395–403 [贾剑, 周顺华, 宫全美. 砂性土成拱应力释放特性的模型试验及数值模拟研究. 岩土力学, 2013, (2): 395–403]
- 10 Fu L L. Meso-mechanism of residual stress characteristics of loading and unloading in granular system (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanghai: Tongji University, 2016 [付龙. 颗粒体系加卸载应力残留特性的细观机理. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2016]
- 11 Tan T K. Important consequences of stress release in the stability of excavations. In: Proceedings of 7th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Aachen, 16–20 September 1991, V2. 1217–1221

- 12 Raihan T M, Shaverdi H. Evolution of fabric under the rotation of the principal stress axes in the simple shear test. *Mech Mater*, 2014, 69: 173–184
- 13 Sazzad M M, Kiichi S. Micromechanical behavior of granular materials with inherent anisotropy under cyclic loading using 2D DEM. *Granul Matter*, 2010, 12: 597–605
- 14 Sazzad M M. Micro-scale behavior of granular materials during cyclic loading. *Particuology*, 2014, 16: 132–141
- 15 Dave T N, Dasaka S M. A review on pressure measurement using earth pressure cell. *Int J Earth Sci*, 2011, 4: 1031–1034
- 16 Liu G B, Hou X Y. Residual stress analysis method for upheaval deformation of soft soil foundation (in Chinese). *Undergr Eng Tunn*, 1996, 6: 2–7 [刘国彬, 侯学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力分析法. *地下工程与隧道*, 1996, 6: 2–7]
- 17 Zhou S H, Guo P J, Stolle D F E. Interaction model for “shelled-particles” and small-strain modulus of granular materials. *J Mech*, 2018, 85: 1–11
- 18 Zhou S H, Gao Q Q, Cui Z J. Calculation model of stress release rate in excavation (in Chinese). *Shanghai Mech*, 1997, (1): 91–98 [周顺华, 高渠清, 崔之鉴. 开挖应力释放率计算模型. *上海力学*, 1997, (1): 91–98]
- 19 Zhou S H, Cui Z J, Gao Q Q. Finite element formula for excavation problems (in Chinese). *J Shanghai Railway Univ*, 1996, (4): 17–22 [周顺华, 崔之鉴, 高渠清. 开挖问题的有限元计算格式. *上海铁道大学学报*, 1996, (4): 17–22]
- 20 Wu D, Zhou S H, Jia J. A finite element method to excavation problem considering frictional effect of material (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2015, 34: 5 [吴迪, 周顺华, 贾剑. 开挖问题摩擦效应的有限元计算方法. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34: 5]
- 21 Sun Y Y, Zhou S H, Zhuang L. Calculation of passive earth pressure and shear strength in foundationpits considering residual stress (in Chinese). *Chin Civ Eng J*, 2011, 4409: 94–99 [孙玉永, 周顺华, 庄丽. 考虑残余应力的基坑被动区土压力及强度计算. *土木工程学报*, 2011, 4409: 94–99]
- 22 Zhuang L, Zhou S H. Triaxial extension test study on the unloading behavior of granular (in Chinese). *Chin J Solid Mech*, 2009, 3004: 354–360 [庄丽, 周顺华. 散粒体卸载特性的三轴伸长试验研究. *固体力学学报*, 2009, 3004: 354–360]
- 23 Zhuang L, Zhou S H. Static loading-unloading test of sand and stress release model (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2009, (9): 2667–2673, 2685 [庄丽, 周顺华. 砂的静力加卸载试验和应力释放模型研究. *岩土力学*, 2009, (9): 2667–2673, 2685]
- 24 Mana A I, Clough G W. Prediction of movements for braced cuts in clay. *J Geotech Eng*, 1981, 107: 759–777
- 25 Sun J, Wang B J. Finite Element Analysis of Underground Structures (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 1988 [孙钧, 汪炳鉴. 地下结构有限元法解析. 上海: 同济大学出版社, 1988]
- 26 Yuan Y, Jiang X M, Liu X. Predictive maintenance of shield tunnels. *Tunn Undergr Sp Tech*, 2013, 38: 69–86
- 27 Bernat S, Cambou B. Soil-structure interaction in shield tunnelling in soft soil. *Comput Geotechn*, 1998, 22: 221–242
- 28 Chaney R, Demars K, Wong R. Shear deformation of locked sand in triaxial compression. *Geotech Test J*, 2000, 23: 158–170
- 29 Guo P, Su X. Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials. *Can Geotech J*, 2007, 44: 579–591
- 30 Guo P, Zhou S. Arch in granular materials as a free surface problem. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 2013, 37: 1048–1065
- 31 Han G X, Gong Q M, Zhou S H. Analysis of microcosmic mechanism of soil arching in frictional geotechnical material by particle flow simulating (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2013, (6): 1791–1798 [韩高孝, 宫全美, 周顺华. 摩擦型岩土材料土拱效应微观机制颗粒流模拟分析. *岩土力学*, 2013, (6): 1791–1798]
- 32 Wu D, Zhou S H, Wen X. Laboratory test and filter cake formation in sand during slurry shield construction (in Chinese). *Chin J of Rock Mech Eng*, 2015, S1: 3460–3467 [吴迪, 周顺华, 温馨. 砂性土层泥水盾构泥浆成膜性能试验. *岩石力学与工程学报*, 2015, S1: 3460–3467]
- 33 Zhou S H, Zhang X H, Wu D, et al. Mathematical modeling of slurry infiltration and particle dispersion in saturated sand. *Transport Porous Med*, 2018, 124: 91–116
- 34 Wu D, Zhou S H, Li Y C. A deformation-infiltration-dispersion coupling model for the slurry infiltration computation in saturated sand (in Chinese). *Chin J Theor App Mech*, 2015, 47: 1026–1036 [吴迪, 周顺华, 李尧臣. 饱和砂土中泥浆渗透的变形-渗流-扩散耦合计算模型. *力学学报*, 2015, 47: 1026–1036]

Summary for “地下工程开挖问题计算方法的再认识”

Rethinking of the calculation method of excavation issues in underground engineering

Shunhua Zhou^{1,2}

¹ Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Shanghai 201804, China;

² Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China

E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn

The key to the construction of the underground engineering is to solve the deformation and stability problems caused by the excavation. Evolutions and attempts of various construction methods in history have been carried out for excavation. The evolution of various construction methods is not only related to construction technologies, but also closely related to the characteristics of the soil stratum. How to calculate the deformation during excavation, or how to evaluate the stability caused by excavation in a precise way, is still controversial in academia. In engineering practice, the excavation calculation is still limited to traditional continuum mechanics, even if the surrounding soil is cohesionless. As a result, the calculation precision cannot be guaranteed.

Furthermore, limited to the strict deformation control of existing adjacent buildings, the excavation of the urban underground engineering should meet the requirement of high precision and micro-deformation, which brings more challenges for traditional continuum theoretical methodologies. From a microscopic point of view, soil is a type of typical granular material. After the excavation, the local stress release in the soil particle structure will be constrained by the other parts of the soil. As a result, the deformation and stress release are hindered, and the residual stress is observed.

Studies have shown that the macroscopic performance of the stress residual characteristics of the particle system caused by the excavation is result from the stress release effect. The stress release effect of the excavation problem is significantly different from the traditional excavation load or excavation stress release coefficient. The former is the mechanical expression of the interaction between particles in the engineering influence range, while the latter is an approximate treatment of the excavation boundary.

Based on the latest research results of the loading and unloading characteristics of the bulk material and the excavation stress release, the basic assumptions of the traditional excavation calculation method are expounded and discussed in this paper. A calculation method for correcting the traditional excavation problem by considering the excavation stress release effect is proposed. This paper also discussed the stress release problems related to the construction method during the excavation process, which can provide a way of rethinking for the theoretical research on the excavation issues and the design and construction calculation of the underground engineering.

excavation, boundary face, granule, stress release

doi: [10.1360/N972018-01248](https://doi.org/10.1360/N972018-01248)