

DOI: 10.11779/CJGE20221401

考虑土体非均质性和孔隙水压力耦合作用的 地下连续墙槽壁稳定性研究

黄 阜¹, 纪恒博¹, 王子钦¹, 潘秋景², 凌同华¹

(1. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 针对非均质和富水地层中地下连续墙成槽施工诱发槽壁坍塌失稳的发生机理和破坏模式研究尚不透彻这一现状, 利用空间离散技术构建了地下连续墙槽壁极限状态下的三维离散型破坏机制。基于该破坏机制和极限分析上限定理, 通过将土体非均质特性和孔隙水压力引入内外能耗功率计算获得了极限状态下槽壁的安全系数目标函数。利用非线性规划算法对该目标函数进行优化计算, 得到了地下连续墙槽壁安全系数的最优上限解。为了验证该方法的有效性, 将计算得到的槽壁安全系数分别与已有计算结果以及数值模拟结果进行了对比分析, 对比结果表明: 该方法计算的安全系数与已有计算结果和数值模拟结果基本一致。在此基础上, 考虑土体非均质特性和孔隙水压力的耦合作用对地下连续墙槽壁的安全系数进行了参数分析, 分析结果表明: 孔隙水压力和土体非均质性对地下连续墙槽壁安全系数有较大影响, 地下连续墙槽壁安全系数随地下水位高度 H_w 的升高和黏聚力非均质系数 k_c 的增大而减小, 随重度非均质系数 k_g 的增大而增大。

关键词: 地下连续墙; 非均质特性; 孔隙水压力; 上限分析; 安全系数

中图分类号: TU476.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)03-0539-10

作者简介: 黄 阜(1983—), 男, 博士, 特聘教授, 主要从事隧道和城市地下工程领域的教学和科研工作, E-mail: hfcust@csust.edu.cn。

Stability of slurry trench walls considering coupling effects of soil heterogeneity and pore water pressure

HUANG Fu¹, JI Hengbo¹, WANG Ziqin¹, PAN Qiuqing², LING Tonghua¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Because the studies on the occurrence mechanism and collapse mode of slurry trench during the construction of underground diaphragm wall in heterogeneous and water-rich stratum are rare, a discretization three-dimensional failure mechanism of slurry trench is established by using the spatial discretization technique. Based on the proposed mechanism and the upper bound theorem of limit analysis, an objective function for the safety factor of the slurry trench is obtained by introducing the heterogeneous characteristics of soil and pore water pressure into the energy dissipation calculation. The optimal upper bound solution for the safety factor of the slurry trench is calculated by the nonlinear programming approach. To verify the validity of the proposed method, the safety factors of the slurry trench are compared with the results of the existing documents and the solutions provided by the numerical simulation technique. Moreover, the comparative results show that the calculated safety factors are in accordance with those of the existing documents and numerical simulations. The parametric analysis shows that the heterogeneous characteristics of soil and pore water pressure affect the safety factor of the slurry trench. The safety factors of the slurry trench decrease with the increase of the cohesive inhomogeneity coefficient k_c and underground water level H_w , and increase with the increase of the unit weight inhomogeneity coefficient k_g .

Key words: slurry trench wall; heterogeneous characteristic; pore water pressure; upper bound analysis; safety factor

0 引 言

随着中国新型城镇化战略的实施, 统筹利用地上和地下空间成为了各级政府和规划部门的共识。近年

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878074, 52278395); 湖南省自然科学基金面上项目(2021JJ30714); 国家自然科学基金青年项目(52108388)

收稿日期: 2022-11-11

以来,地下空间的开发和利用迈入了快车道,各种类型的地下工程在城市中屡见不鲜。大型地下工程施工往往涉及基坑开挖,为了在基坑开挖过程中抵抗土压力的作用,各种类型的围护结构也随之出现。其中,地下连续墙凭借其刚度大、整体性强、适用范围广等优点,成为了基坑工程中应用最为广泛的一种围护结构。然而,地下连续墙在成槽施工过程中易发生槽壁坍塌失稳,尤其是在地质条件较差或者地下水位高的情况下槽壁发生坍塌的概率更高。一旦地下连续墙槽壁两侧土体发生坍塌,坍塌土体可能会混入灌注的混凝土中,影响地下连续墙的浇筑质量。此外,槽壁坍塌还可能诱发槽段两侧土体发生沉降,造成邻近既有建筑变形甚至破坏。由于地下连续墙槽壁的坍塌具有突发性和隐蔽性的特点,因此,学术界对地下连续墙槽壁破坏机理和坍塌模式的研究还不够透彻^[1-3]。鉴于这一情况,国内外很多学者已经采用各种理论方法对地下连续墙槽壁的坍塌失稳问题开展了研究,并取得了一些研究成果。丁勇春等^[4]针对地下连续墙成槽施工过程中槽壁的坍塌失稳问题,通过分析成槽施工过程中槽壁土体的应力路径,揭示了影响地下连续墙槽壁稳定性的关键因素。Han 等^[5]针对地下连续墙槽壁的整体和局部坍塌破坏特征,构建了极限状态下槽壁的二维和三维破坏机制并利用极限分析理论计算得到了整体和局部坍塌模式下地下连续墙槽壁的安全系数。Zhang 等^[6]利用极限平衡法结合变分理论计算得到了不同类型地层中地下连续墙槽壁的稳定性系数,并通过理论推导获得了槽壁的潜在塌落面形状。夏元友等^[7]基于极限平衡理论和二维楔形体破坏模式,优化了用于分析地下连续墙槽壁稳定性的水平条分法并将该方法应用于武汉市某超深基坑的稳定性评估。Wang 等^[8]利用二维曲线型破坏机制和极限分析理论对水平分层地层中地下连续墙槽壁在极限状态下的稳定性进行了研究。随后,Wang 等^[9]利用空间离散技术构建基坑阳角处土体的坍塌破坏机制并结合极限分析理论和土体非均质特性计算得到了该情况下基坑槽壁的安全系数。最近,Zhang 等^[10]在考虑加固桩对地下连续墙槽壁加固的基础上,利用极限分析理论和二维旋转型破坏机制推导了该加固桩加固力的计算公式并分析了加固桩对地下连续墙槽壁稳定性的提升效果。

上述基于极限分析或者极限平衡理论对地下连续墙槽壁稳定性开展的研究,大多是利用预先假设的刚性块体构建极限状态下地下连续墙槽壁坍塌的破坏模型,再在此基础上通过对刚性块体进行力学计算来评估槽壁的稳定性。然而在实际工程中,由于各种复杂因素和地质条件的影响,利用预先假设的刚性块体构建的破坏模型与实际工程中槽壁的坍塌破坏特征存在较大差异。另一方面,土体是一种典型的非均质三相

介质,非均质特性和孔隙水压力对地下连续墙槽壁稳定性的影响很大,而目前已开展的研究工作很少考虑土体非均质特性和孔隙水压力耦合作用对地下连续墙槽壁稳定性的影响。

针对目前研究中存在的问题,本文利用空间离散技术,构建了地下连续墙成槽施工过程中槽壁在极限状态下的三维离散型破坏机制。通过将土体的非均质特性和孔隙水压力引入该破坏机制的虚功率计算,得到了考虑土体非均质性和孔隙水压力耦合作用下地下连续墙槽壁安全系数目标函数,最后利用非线性优化方法计算得到了极限状态下地下连续墙槽壁的安全系数。通过将已有理论解及数值模拟解与本文计算的安全系数进行对比分析,验证了本文方法的有效性。在此基础上,通过计算不同参数作用下地下连续墙槽壁的安全系数,获得了土体非均质特征和孔隙水压力对槽壁安全系数的影响规律,研究成果可以为地下连续墙成槽施工过程中槽壁的稳定性评估提供参考。

1 地下连续墙槽壁三维离散型破坏机制

地下连续墙成槽施工过程中,由于施工扰动,地下连续墙槽壁的部分土体有可能沿某滑动面从地下连续墙槽底坍塌到地表,从而导致槽段两侧土体发生整体垮塌,造成基坑附近既有建筑变形甚至破坏。针对地下连续墙槽壁这一破坏模式,本文利用三维离散型破坏机制构建了极限状态下地下连续墙槽壁的整体坍塌破坏机制。

该三维离散型破坏机制最先由法国学者 Guilhem Mollon^[11-13]提出并被广泛应用于盾构隧道开挖面的稳定性研究^[14-16]。这一破坏机制根据土体的正交法则,由“点到点”的方式生成,与实际工程中观测得到的盾构隧道开挖面前方土体坍塌破坏模式十分接近。鉴于地下连续墙槽壁的坍塌破坏模式与盾构隧道开挖面前方土体的坍塌破坏模式相似,本文将 Mollon 等^[11]用于分析盾构隧道开挖面前方土体坍塌破坏的三维“牛角型”空间离散技术引入地下连续墙槽壁的稳定性分析中,结合地下连续墙槽壁的破坏特征构建了极限状态下地下连续墙槽壁的三维离散型破坏机制,如图 1 所示。

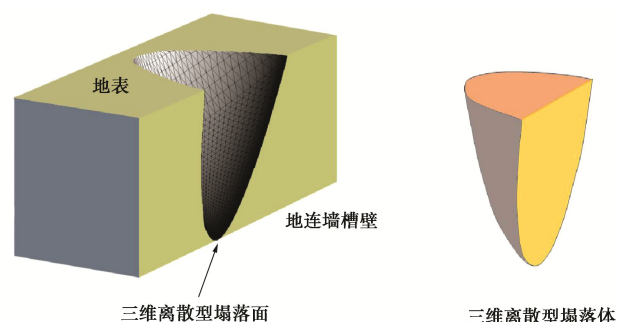


图 1 地下连续墙槽壁的三维离散型破坏机制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional discrete failure mechanism for slurry trenches

图2为本文利用Mollon等^[11]提出的空间离散技术生成极限状态下地下连续墙槽壁三维塌落面的示意图, MBN为塌落体与槽壁的交界面, b 为塌落体的最大宽度。通过设定该三维离散型破坏机制的生成程序在地表处中止运行, 可以得到用于描述极限状态下地下连续墙槽壁坍塌失稳的三维离散型塌落面。图3为该三维破坏机制的二维剖面图。图中, H 为地下连续墙成槽深度, 塌落面由地下连续墙槽底 B 点延伸到地表 D 点。 BD 为塌落体剖面与地下连续墙槽壁相交形成的曲线。

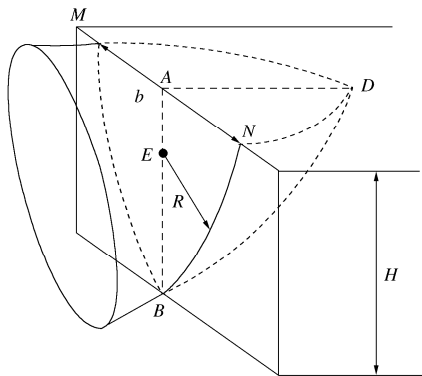


图2 地下连续墙槽壁三维破坏机制生成过程示意图

Fig. 2 Generative process of three-dimensional failure mechanism of trench wall

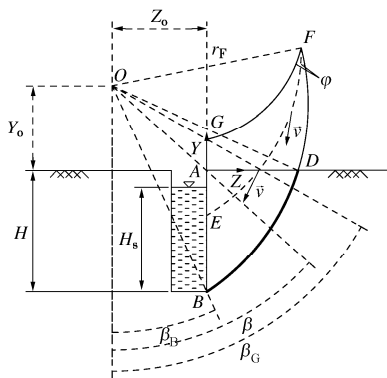


图3 极限状态下地下连续墙槽壁塌落体剖面图

Fig. 3 Cross-section of collapse block for a trench wall in limit state

地下连续墙三维塌落体在二维剖面上的投影以为 BF 和 GF 两条对数螺旋线为边界, BF 和 GF 均以 O 点为旋转中心, 相交于 F 点。 BF 和 GF 的解析方程为

$$r = r_G \exp((\beta_G - \beta) \tan \varphi) \quad (1)$$

$$r = r_B \exp((\beta - \beta_B) \tan \varphi) \quad (2)$$

式中: 参数 r_A , r_B , r_G 和参数 β_A , β_B , β_G 分别为线段 OA , OB , OG 的长度和这几条线段与竖直方向的夹角; φ 为土体摩擦角。假设土体遵循相关流动法则, 根据空间离散技术生成的塌落面上每个点的速度矢量方向都会与塌落面切线方向形成角度为 φ 的夹角。

图4为基于空间离散技术的地下连续墙槽壁破坏机制生成过程。假设该牛角型塌落体被 Π_1 到 Π_j 的数个径向平面截断, 且这些平面都相交于 O 点。 δ_β 为这些 Π 平面的夹角, δ_β 值越小, 说明 Π 平面之间的夹角越小, 生成的离散单元越多, 破坏机制越精确。塌落体与槽壁的交界面 MBN 为如图4所示的圆弧面, A_1-A_j 为该圆弧面上的圆弧 MBN 离散后形成的离散点。圆弧面 MBN 的半径 EA_j 与竖直方向的夹角 β_j 为三维离散型破坏机制被 Π 平面所截得平面上的离散单元精度控制参数。与参数 δ_β 类似, β_j 值越小则所截平面上的离散单元就越多, 破坏机制就越精确。

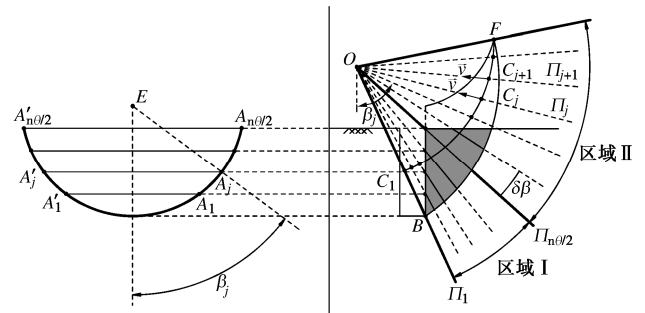


图4 基于空间离散技术生成的地下连续墙槽壁塌落破坏机制

Fig. 4 Failure mechanism of trench wall on the basis of the space discretization technology

图5为利用 Π_j 平面上的点生成 Π_{j+1} 平面上的点的示意图。假设前述的两个 Π 平面截取塌落体后, 形成了 Π_j 和 Π_{j+1} 两个截面。 $P_{i,j}$ 和 $P_{i+1,j}$ 为截面 Π_j 边缘上的两个离散点, 在此基础上利用矢量运算和相关流动法则, 生成了 Π_{j+1} 截面上的新离散点 $P_{i,j+1}$ 。 $P_{i,j}$, $P_{i+1,j}$ 和 $P_{i,j+1}$ 构成了一个塌落面中的三角形离散单元。按照上述生成方法, 生成 n 个离散单元后, 形成了槽壁上的三维离散型塌落面。由于该离散型塌落面的生成方法在Mollon等^[11-13]的论文中已进行详细阐述, 本文不再赘述。为了有效生成地下连续墙槽壁的坍塌破坏机制, 图4中将槽壁塌落体分为了区域I和区域II两个部分分别生成, 其中区域I的生成过程如图6所示。

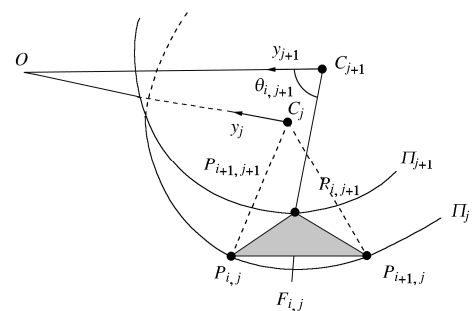


图5 由点 $P_{i,j}$ 和 $P_{i+1,j}$ 生成点 $P_{i,j+1}$ 的详细过程^[11]

Fig. 5 Generating process of point $P_{i,j+1}$ from points $P_{i,j}$ and $P_{i+1,j}$ ^[11]

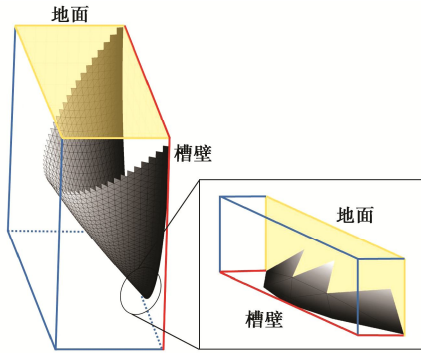


图6 三维离散型破坏机制中区域 I 的生成示意图

Fig. 6 Diagram of generation process of three-dimensional discretization failure mechanism for region I

最终生成的极限状态下地下连续墙槽壁三维破坏机制如图 7 所示。由于该离散型破坏机制中的各个离散单元是基于岩土塑性力学的正交法则按照“点到点”的方式生成的，因此与实际工程中地下连续墙槽壁坍塌特征比较吻合。本文利用该破坏机制和极限分析上限定理计算得到了极限状态下地下连续墙槽壁安全系数上限解，在此基础上研究了土体非均质性和孔隙水压力耦合作用对地下连续墙槽壁稳定性的影响。

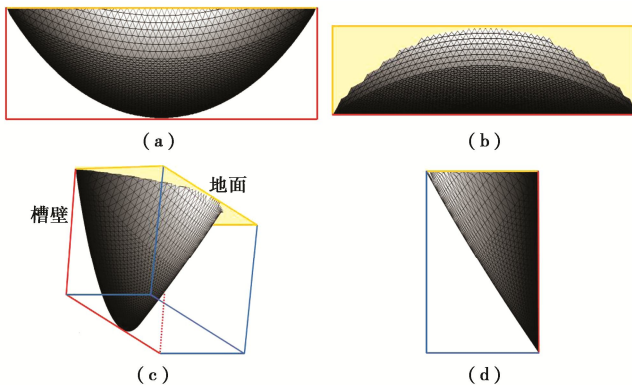


图7 地下连续墙槽壁三维离散型破坏机制整体生成效果图

Fig. 7 Three-dimensional discretization failure mechanism of a trench wall

2 基于三维离散型破坏机制的地下连续墙槽壁安全系数计算

采用极限分析上限定理和三维离散型破坏机制对地下连续墙槽壁的安全系数进行计算，首先需要计算该破坏机制中的外力功率和内能耗散功率。其中外力功率包括地下连续墙槽壁塌落体重力做功功率和护壁泥浆压力做功功率，而内能耗散是指塌落体与槽壁发生相对滑移过程中由于摩擦产生的能量耗散。

2.1 塌落体重力做功功率计算

由于本文构建的离散型破坏机制中塌落体是由一个个离散单元体组成的，该塌落体的重力功率可以先

计算每一个离散单元体的功率，再通过积分得到整个塌落体的重力功率。单个单元体的重力功率可以由土体重度、单元体体积和单元体速度矢量的乘积求得。将单个单元体的重力功率在整个塌落范围内进行积分可以求出整个塌落体的重力做功功率 W_γ ：

$$W_\gamma = \iiint_V \gamma v dV = \omega \gamma \sum_{i,j} (R_{i,j} V_{i,j} \sin \beta_j + R'_{i,j} V'_{i,j} \sin \beta'_j) \quad (3)$$

式中： $R_{i,j}$ 和 β_j （以及相对应的 $R'_{i,j}$ 和 β'_j ）为面 $S_{i,j}$ （以及面 $S'_{i,j}$ ）重心的极坐标； γ 为土体重度； $V_{i,j}$ 和 $V'_{i,j}$ 为离散单元与其在 (Y, Z) 横断面上的投影所围成的体积； v 为单元体的速度矢量。

2.2 护壁泥浆功率计算

在地下连续墙的成槽施工过程中，为了维持槽壁稳定性，通常会往槽段内灌注护壁泥浆，利用泥浆压力来维持槽壁稳定性。本文将泥浆压力假设为线性递增的均布力水平作用在槽壁两侧。泥浆做功功率可以通过计算塌落体与泥浆接触面上的单个离散单元的功率，然后再对该功率在泥浆作用范围内进行积分得到。因此，破坏机制中护壁泥浆做功功率为

$$W_s = \omega \gamma_s \sum_j (R s_j \cos \beta_j S s_j ((R s_j \cos \beta_j + R s_{j+1} \cos \beta_{j+1}) / 2 - Y_0 - H + H_s)) \quad (4)$$

式中： γ_s 为护壁泥浆的重度； Y_0 为旋转中 O 点到地表的距离； $S s_j$ 为槽壁上的离散面 $A_j A'_{j+1} A'_{j+1}$ 的面积； $R s_j$ 为槽壁离散面中心到 O 点的距离。

2.3 内能耗散功率计算

构建的地下连续墙槽壁三维离散型塌落体，在极限状态下沿塌落面发生滑移。由于塌落体和槽壁的接触面是粗糙的，因此在滑移过程中，塌落体与未发生塌落的土体之间由于摩擦发生了能量耗散。塌落面上的总内能耗散功率可以通过对每个离散单元在塌落面上的能量耗散进行积分求得。

Chen^[17]指出，单元体在速度间断面上的内能耗散功率可以由土体黏聚力乘以该单元体在沿速度间断面上的速度切向矢量得到。因此，本文构建的三维破坏机制中总内能耗散功率可以利用下式计算：

$$W_D = \iint_S c v \cos \phi dS = \omega c \cos \phi \sum_{i,j} (R_{i,j} S_{i,j} + R'_{i,j} S'_{i,j}) \quad (5)$$

式中： c 为土体黏聚力。

2.4 安全系数上限解计算

为了分析地下连续墙成槽施工过程中槽壁的稳定性，需要有一个定量指标对槽壁的稳定性进行评估。安全系数就是一种被广泛用于边坡、基坑和隧道等土工构筑物稳定性评估的可靠指标，因此本文也采用安

全系数来评估成槽施工过程中地下连续墙槽壁的稳定性。Han 等^[18]指出, 地下连续墙槽壁安全系数等于破坏机制中总内能耗散功率与总外力功率的比值。本文利用该定义和总内能耗散功率与总外力功率, 得到了极限状态下地下连续墙槽壁安全系数上限解的目标函数:

$$F_s = \frac{W_D}{W_\gamma + W_s} \quad (6)$$

上限定理表明, 由内外功率计算得到的安全系数只是上限解的通用表达式, 要得到极限状态下安全系数的最优上限解需要求得该目标函数的最小值。由于式 (6) 包含大量非线性函数, 难以采用解析方法求出其最小值, 本文利用 Lagarias 等^[19]提出的 Nelder-Mead 单纯形算法编制程序对式 (6) 进行优化计算, 最终求出地下连续墙槽壁在极限状态下安全系数的最优上限解。此外, 根据优化计算得到的破坏机制中的几何参数, 可以绘制得到极限状态下槽壁塌落面的三维形状, 为槽壁的破坏机理和坍塌模式研究提供理论依据。

3 对比计算

3.1 与现有理论解对比

为了验证本文计算结果的正确性, 将基于三维离散型破坏机制计算的地下连续墙槽壁安全系数与 Han 等^[18]采用三维刚性块体破坏机制和极限分析上限理论计算得到的地下连续墙槽壁安全系数进行了对比分析。假设地下连续墙参数如下: 槽段深度 $H=20\text{ m}$, 地下连续墙宽高比 $b/H=5$, 土体重度 $\gamma=18\text{ kN/m}^3$, 土体黏聚力 $c=5\sim30\text{ kPa}$, 土体摩擦角 $\varphi=10^\circ$, 泥浆重度 $\gamma_s=10.8\text{ kN/m}^3$, 泥浆高度与地下连续墙开槽深度比值 $H_s/H=0.95$ 。根据上述参数计算得到了槽壁安全系数并与 Han 等^[18]计算得到的安全系数进行对比, 如图 8 所示。

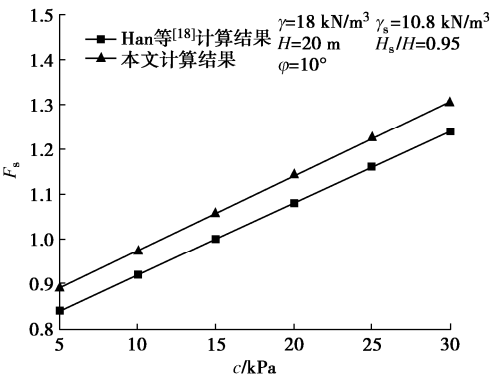


图 8 本文计算结果与 Han 等^[18]计算结果的对比

Fig. 8 Comparison between proposed results and those by Han et al^[18]

从图 8 中可以看出, 本文所计算的安全系数与 Han 等^[18]计算得到的安全系数比较接近, 最大差值不超过 6.3%, 且两种方法计算得到安全系数随土体黏聚

力的变化规律一致, 这说明本文基于三维离散型破坏机制计算得到的地下连续墙槽壁安全系数是有效的。

3.2 数值模拟结果对比

为了进一步验证本文计算结果的可靠性, 利用有限差分软件 FLAC^{3D} 构建了地下连续墙三维数值模型, 结合强度折减法计算得到了地下连续墙槽壁安全系数的数值解。该三维数值模型的尺寸为: 60 m (X 方向) × 40 m (Y 方向) × 40 m (Z 方向), 地下连续墙开槽深度 $H=20\text{ m}$, 地下连续墙宽度 $b=2\text{ m}$, 护壁泥浆深度 $H_s=19\text{ m}$, 模型下边界取至地下连续墙底部以下 20 m。槽壁土体重度为 19 kN/m^3 , 黏聚力为 10 kPa , 摩擦角为 10° , 弹性模量为 20 MPa , 泊松比为 0.4。

地下连续墙在成槽施工过程中, 需要灌注护壁泥浆以维持槽壁两侧土体的稳定性。通过在槽壁内侧施加线性递增的水平均布力, 模拟护壁泥浆对槽壁的支护作用, 地下连续墙成槽施工三维数值模型如图 9 所示, 施工过程中泥浆压力分布示意图如图 10 所示。

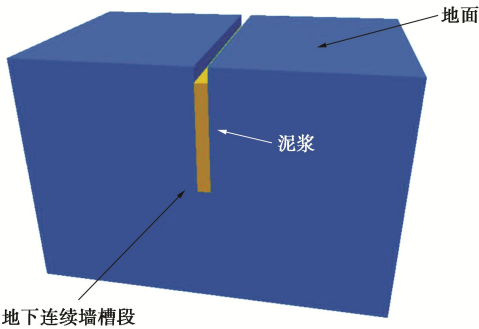


图 9 地下连续墙成槽施工三维数值模型图

Fig. 9 3D numerical model for construction of an underground diaphragm wall

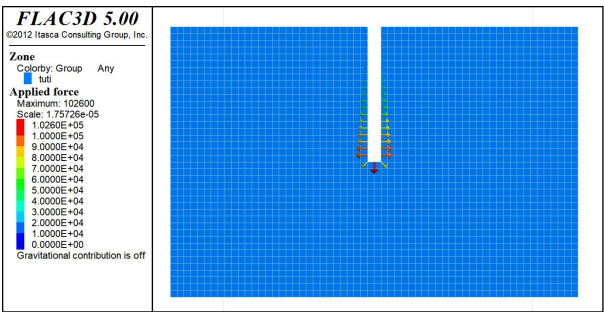


图 10 地下连续墙成槽施工泥浆压力分布图

Fig. 10 Distribution of slurry pressure of construction of an underground diaphragm wall

表 1 为采用三维离散型破坏机制计算的安全系数上限解与 FLAC^{3D} 软件计算的数值解的对比, 从表中可以看出在参数相同的情况下两种方法之间的最大差值不超过 4.92%。由此可见, 本文采用三维离散型破坏机制和极限分析理论计算得到的地下连续墙槽壁安全系数是有效的。此外, 本文利用优化计算得到的地下连续墙槽壁破坏机制中的几何参数, 生成了极限状

态下槽壁的三维塌落面。因此，可以将数值模拟计算得到的地下连续墙槽壁塌落面和理论计算得到的塌落面进行对比分析。图 11 为相同参数下，数值模拟计算得到的地下连续墙槽壁剪切应变增量云图和本文理论计算得到的槽壁土体塌落面对比图。其中，左半部分为理论计算得到的槽壁土体塌落面，右半部分为数值模拟计算得到的槽壁土体塌落面。从图 11 中可以看出，上限理论计算得到的槽壁土体塌落面与数值模拟计算得到的塌落面范围和形状基本一致，从另外一个角度验证了本文构建的地下连续墙槽壁三维离散型破坏机制的有效性。

表 1 槽壁安全系数上限解与数值解对比

Table 1 Comparison between upper bound and numerical solutions of safety factor for slurry trench wall

黏聚力/ kPa	安全系数 数值解	安全系数 上限解	差值/ %
10	0.99	0.9732	1.73
15	1.07	1.0561	1.32
20	1.18	1.1403	3.48
25	1.25	1.2236	2.16
30	1.37	1.3057	4.92

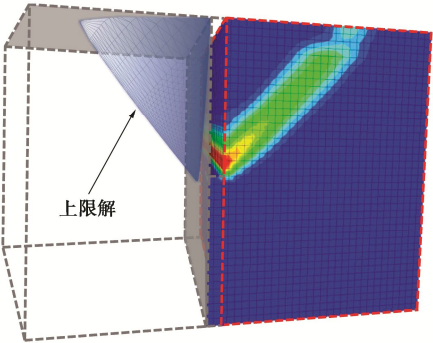


图 11 地下连续墙槽壁极限状态下塌落面的理论解和数值解对比

Fig. 11 Comparison between theoretical and numerical solutions of collapse surface for trench wall in limit state

4 考虑土体非均质性和孔隙水压力耦合作用的地下连续墙槽壁安全系数计算

4.1 土体的非均质特性

实际工程中的土体都体现出各向异性和非均质的特征，各向同性土体只是一种理想情况。如果在地下连续墙槽壁稳定性分析中将土体视为各项同性体，计算得到的结果将与实际工程产生较大的偏差。在实际工程中，土体黏聚力和土体重度随深度的增加而发生变化是土体非均质性的典型表现，许多学者也在他们的研究中考虑了这一非均质特性对土工构筑物安全性的影响^[20-22]。为了将土体的非均质特性引入本文的理论计算，本文采用了如图 12 所示的土体黏聚力和重度

随深度变化的非均质模型。

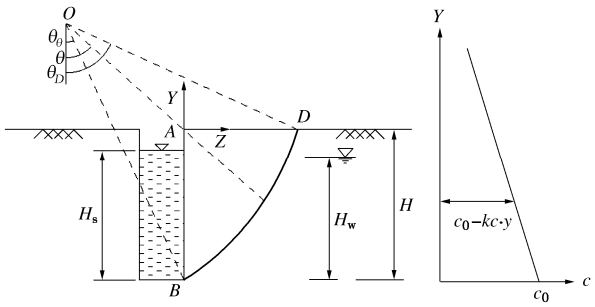


图 12 土体非均质模型

Fig. 12 Heterogeneous model for soils

由于三维离散型破坏机制从地下连续墙槽壁底部开始生成，因此本文设定槽壁底部的土体黏聚力和重度分别为初始黏聚力 c_0 和初始重度 γ_0 。根据上图所示的土体非均质模型，推导得到了土体黏聚力和重度随深度变化的计算公式：

$$c_i = c_0 - k_c (y_i + H) \quad (7)$$

$$\gamma_i = \gamma_0 - k_g (y_i + H) \quad (8)$$

式中：无量纲参数 k_c 和 k_g 分别为土体黏聚力和重度非均质系数； y_i 为土体中任一点的纵坐标； c_i 和 γ_i 分别为土体任意深度处的黏聚力和重度。当非均质系数等于 0 时，该土体为均质土体。利用该非均质系数可以将土体的非均质特性引入地下连续墙槽壁的安全系数计算并定量分析土体非均质特性对槽壁稳定性的影响。

4.2 孔隙水压力作用下的功率计算

中国南方部分地区地下水位较高，地层中含水量较大。在富水地层中进行地下连续墙施工时，地下连续墙槽壁位于地下水位线以下部分的稳定性会受到孔隙水压力的不利影响。Viratjandr 等^[23]指出，由于孔隙水压力可以视为作用在土体颗粒上的外力。孔隙水压力做功可以定义为孔隙水压力使土体颗粒膨胀做的功和水压力在速度场边界上做的功之和。因此，孔隙水压力做功的功率计算公式如下：

$$W_u = - \int_V u \cdot \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_S u \cdot n_i \cdot v_i dS \quad (9)$$

式中： u 为孔隙水压力； v_i 为机动速度场中的速度矢量； $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为体积应变率； V 为破坏机制的体积； n_i 为破坏面上外法线矢量； S 为破坏机制的边界。由于上限定理假设破坏机制忽略体积应变，式（9）中体积应变率为零，孔隙水压力做功全部由式（9）中等式右边的第二项产生。将式（9）计算得到的孔隙水压力功率代入式（6）并综合 4.1 节所述的方法进行优化计算，可以得到考虑土体非均质特性和孔隙水压力耦合作用下槽壁的安全系数。

为了获得地下连续墙成槽施工过程中孔隙水压力做功功率，首先需要计算槽壁坍塌范围内各离散单元

的孔隙水压力。由于孔隙水压力很难采用理论方法计算获得, 本文采用有限差分软件 FLAC^{3D} 对地下连续墙成槽施工过程中槽壁的孔隙水压力的分布情况进行模拟, 从而得到各个离散点对应的孔隙水压力值。为了获得地下连续墙成槽施工过程中, 槽壁坍塌范围内土体的孔隙水压力, 本文构建了与本文三维离散型破坏机制一致的地下连续墙三维数值模型。在该数值模型中, 假设地下水渗流场为恒定渗流场, 模型中各处的渗透系数相等。同时, 假设有稳定的水源对渗流场进行补给, 地下水位在渗流过程中不会发生变化。当开槽深度 $H=20$ m, 地下水位 $H_w=20$ m, 计算得到了地下连续墙周边区域的孔隙水压力等值线分布图, 如图 13 所示。

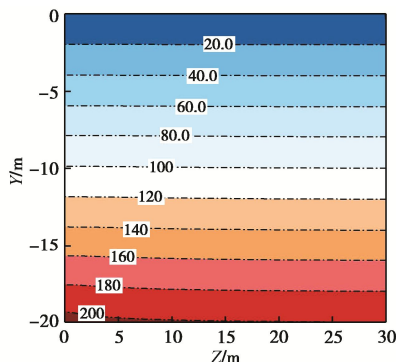


图 13 地下连续墙周边区域的孔隙水压力等值线分布图

Fig. 13 Contours of pore pressure adjacent to slurry trench wall

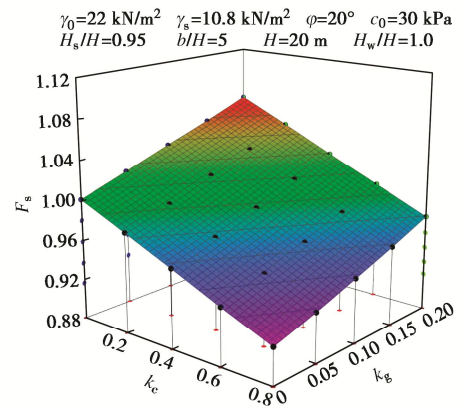
通过上述数值模型和渗流边界条件计算得到地下连续墙槽壁周边区域的孔隙水压力后, 利用 FISH 程序将各个节点的孔隙水压力数值提取出来, 然后导入到上限破坏机制所对应的离散点中, 再采用插值法结合式 (9) 可以计算得到孔隙水压力做功功率, 详细计算过程见文献[24]。将计算得到的孔隙水压力功率引入上限定理的虚功率方程, 最后通过优化计算获得了考虑非均质特性和孔隙水压力耦合作用的地下连续墙槽壁安全系数上限解。

4.3 考虑土体非均质特性和孔隙水压力耦合作用的地下连续墙槽壁稳定性分析

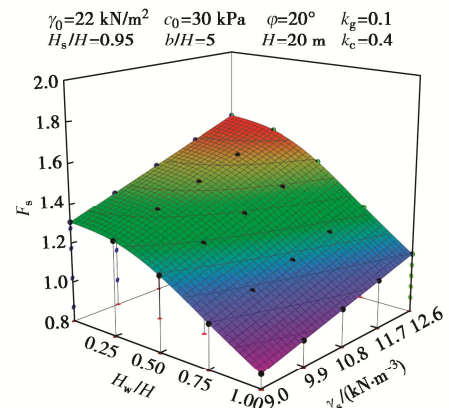
利用上述方法, 将土体的非均质特性和孔隙水压力引入地下连续墙槽壁安全系数计算, 得到了不同影响参数对应的地下连续墙槽壁安全系数。图 14 绘制了土体初始黏聚力 $c_0=30$ kPa, 初始重度 $\gamma_0=22$ kN/m³, 摩擦角 $\varphi=20^\circ$, 成槽深度 $H=10\sim30$ m, 护壁泥浆重度 $\gamma_s=9\sim12.6$ kN/m³, 泥浆液面深度与开槽深度比值 $H_s/H=0.8\sim1.0$, 地下连续墙宽高比 $b/H=5$, 黏聚力非均质系数 $k_c=0\sim0.8$, 重度非均质系数 $k_g=0\sim0.2$, 地下水位 $H_w=0\sim20$ m 时, 安全系数随各个参数变化的规律图。

从图 14 中可以看出, 在考虑土体非均质特性和孔隙水压力耦合作用的情况下, 地下连续墙槽壁安全系

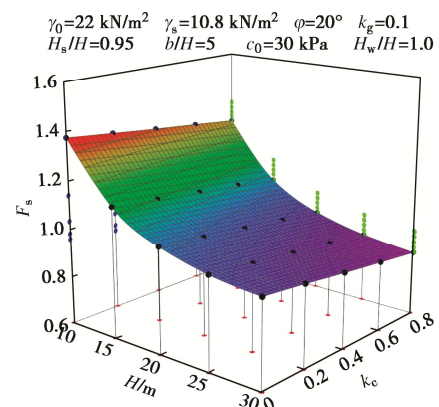
数随 k_c , H 和 H_w 的增大而减小, 随 k_g , H_s/H 和 γ_s 的增大而增大。



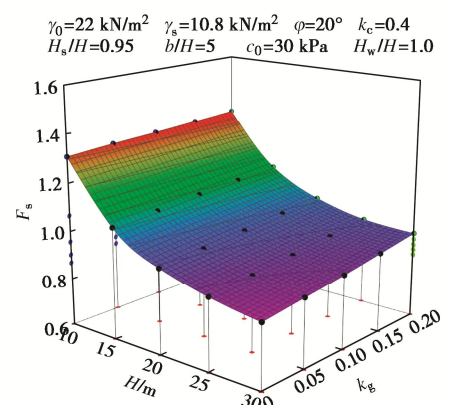
(a) 不同 k_c 和 k_g 对应的槽壁安全系数



(b) 不同 H_w/H 和 γ_s 对应的槽壁安全系数



(c) 不同 k_c 和 H 对应的槽壁安全系数



(d) 不同 k_g 和 H 对应的槽壁安全系数

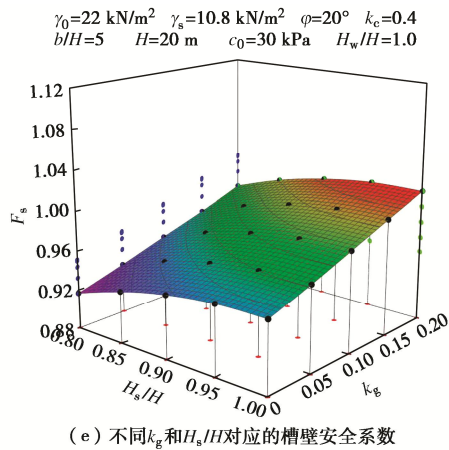


图 14 不同参数对地下连续墙槽壁安全系数的影响

Fig. 14 Influences of different parameters on safety factors of trench walls

图 15 为参数 $H_w/H=1.0$, $H=20\text{ m}$, $\gamma_0=18\text{ kN/m}^3$, $\gamma_s=10.5\text{ kN/m}^3$, $b/H=5$, $H_s/H=0.95$, $c_0=30\text{ kPa}$, $\varphi=20^\circ$, $k_c=0.1, 0.5$, 和 $k_g=0.1, 0.2$ 时, 计算得到的地下连续墙槽壁极限状态下塌落面的三维图形。从图 15 可以看出, 在考虑孔隙水压力的情况下, 随着黏聚力非均匀系数 k_c 的增大, 槽壁的坍塌范围增大; 随着重度非均匀系数 k_g 的增大, 槽壁的坍塌范围减小。

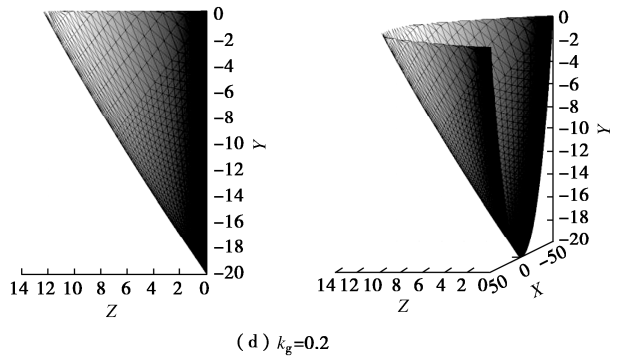
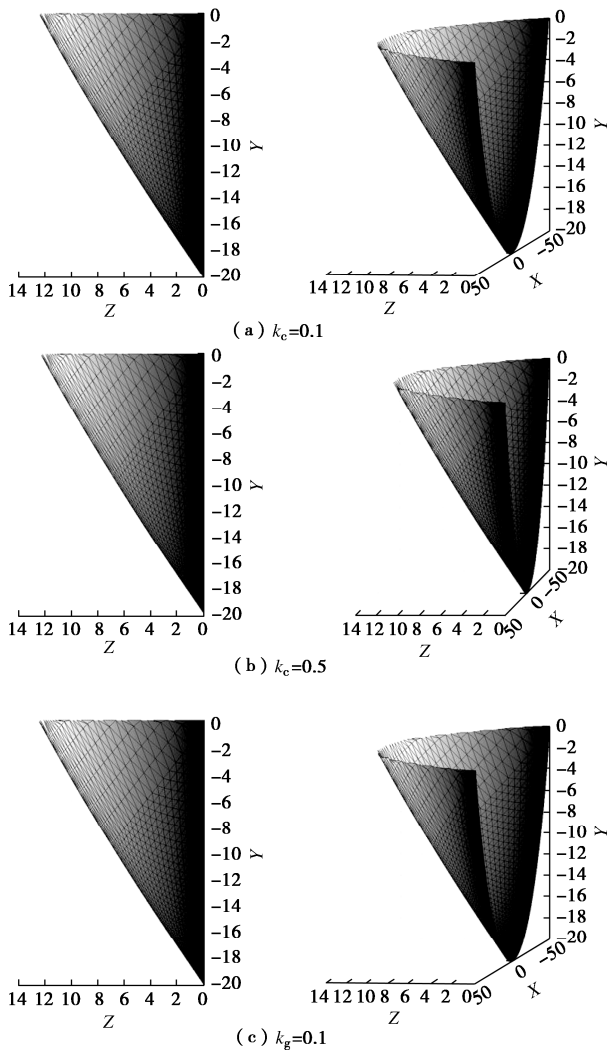


图 15 不同参数对地下连续墙槽壁塌落面形状的影响

Fig. 15 Influences of different parameters on shape of collapse surface for trench walls

5 工程实例分析

为了验证本文研究方法可以用于分析实际工程中地下连续墙槽壁的稳定性, 本文参照黄茂松等^[22]论文中的工程案例计算了地下连续墙槽壁的安全系数。

算例 1 为广州轨道交通三号线北延段的地下连续墙槽段, 地下连续墙宽 6 m, 开槽深度 19 m, 泥浆相对质量密度为 1.2, 平均地下水位为 3.17 m。算例 2 为广州君豪国际商业城中的地下连续墙槽段, 地下连续墙宽 6 m, 开槽深度 21.8 m, 泥浆相对质量密度为 1.30, 平均地下水位为 1.8 m。两个算例中土体参数的具体值见文献^[22]。

根据这两个工程实例的参数, 利用本文的理论计算方法计算得到了极限状态下地下连续墙槽壁的安全系数并与黄茂松等^[22]基于极限平衡理论计算的结果进行了对比, 如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 本文采用三维离散型破坏机制计算的地下连续墙安全系数与黄茂松等^[22]采用极限平衡理论计算的安全系数比较接近, 两者的最大差值为 14.18%。由于本文安全系数是采用极限分析理论计算的而文献^[22]中的安全系数是采用极限平衡理论计算的, 两种方法构建的理论计算模型差异较大, 因此这一差值在可以接受的范围内。工程实例分析结果说明本文提出的方法可以用于实际工程中地下连续墙槽壁的安全系数计算。

表 2 基于工程实例的地下连续墙槽壁安全系数计算

Table 2 Calculation of safety factors of trench walls based on

actual projects			
分类	本文理论解	黄茂松等 ^[22] 的理论解	差值/%
算例 1	2.36	2.75	14.18
算例 2	2.08	2.27	8.37

6 结 论

本文基于极限分析上限定理, 在考虑土体非均质特性和孔隙水压力耦合作用下计算得到了地下

连续墙槽壁安全系数的最优上限解。通过将采用三维离散型破坏机制计算得到的安全系数分别与现有理论计算结果和数值模拟结果对比, 验证了本文计算方法的有效性。主要得到以下3点结论。

(1) 土体非均质性和孔隙水压力对地下连续墙槽壁稳定性有较大影响。在考虑土体非均质特性和孔隙水压力耦合作用的情况下, 地下连续墙槽壁安全系数随黏聚力非均质系数 k_c 和地下水位高度 H_w 的增大而减小, 随重度非均质系数 k_g 的增大而增大。在实际工程中如果忽略土体非均质性和孔隙水压力将对地下连续墙槽壁的稳定性评估产生不利影响。

(2) 在其它参数不变的情况下, 地下连续墙槽壁安全系数随着泥浆重度 γ_s 和泥浆液面深度与地下连续墙开槽深度比值 H_s/H 的增大而增大, 随着开槽深度 H 的增大而减小。在实际工程中可以通过合理设置泥浆稠度和泥浆液面高度等方式以保障地下连续墙在成槽施工过程中槽壁的稳定性, 防止槽壁发生坍塌。

(3) 非均匀系数对地下连续墙槽壁破坏范围具有一定影响。在考虑孔隙水压力的情况下, 槽壁土体的坍塌范围随着黏聚力非均匀系数 k_c 的增大而增大, 随着重度非均匀系数 k_g 的增大而减小。在地质条件较差的环境进行地下连续墙成槽施工时, 有必要对地下连续墙槽壁潜在坍塌范围内的土体进行加固, 降低成槽施工过程中槽壁发生坍塌的风险。

参考文献:

- [1] FOX P J. Analytical solutions for stability of slurry trench[J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 2004, **130**(7): 749-758.
- [2] OBLOZINSKY P, UGAI K, KATAGIRI M, et al. A design method for slurry trench wall stability in sandy ground based on the elastoplastic FEM[J]. *Computers and Geotechnics*, 2001, **28**(2): 145-159.
- [3] POWRIE W, KANTARTZI C. Ground response during diaphragm wall installation in clay: centrifuge model test[J]. *Géotechnique*, 1996, **46**(4): 725-739.
- [4] 丁勇春, 李光辉, 程泽坤, 等. 地下连续墙成槽施工槽壁稳定机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, **32**(增刊1): 2704-2709. (DING Yongchun, LI Guanghui, CHENG Zekun, et al. Analysis of stability mechanism of slot wall in underground diaphragm wall trenching construction[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(S1): 2704-2709. (in Chinese))
- [5] HAN C Y, WANG J H, XIA X H, et al. Limit analysis for local and overall stability of a slurry trench in cohesive soil[J]. *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 2015, **15**(5): 06014026.
- [6] ZHANG F, GAO Y F, DOV L, et al. Closed-form solution for stability of slurry trenches[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, **17**(1): 04016029.
- [7] 夏元友, 裴尧尧, 王智德, 等. 地下连续墙泥浆槽壁稳定性评价的水平条分法[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(6): 1128-1133. (XIA Yuanyou, PEI Yaoyao, WANG Zhide, et al. Horizontal slice method for stability of slurry trench[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(6): 1128-1133. (in Chinese))
- [8] WANG H Y, HUANG M S. Upper bound stability analysis of slurry-supported trenches in layered soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, **122**: 103554.
- [9] WANG H Y, HUANG M S, CHIAN S C. Three-dimensional trench stability in non-uniform undrained clay with discretization-based kinematic analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, **135**: 104166.
- [10] ZHANG J W, LI M D, YI J X, et al. Determination of stabilizing forces acting on piles to reinforce slurry trench against globe collapse[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, **22**(6): 06022009.
- [11] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Rotational failure mechanisms for the face stability analysis of tunnels driven by a pressurized shield[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, **35**(12): 1363-1388.
- [12] MOLLON G, PHOON K K, DIAS D, et al. Validation of a new 2D failure mechanism for the stability analysis of a pressurized tunnel face in a spatially varying sand[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2011, **137**(1): 8-21.
- [13] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Continuous velocity fields for collapse and blowout of a pressurized tunnel face in purely cohesive soil[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, **37**(13): 2061-83.
- [14] PAN Q, DIAS D. Three dimensional face stability of a tunnel in weak rock masses subjected to seepage forces[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2018, **71**: 555-66.
- [15] 黄 阜, 潘秋景, 凌同华. 地下水渗流作用下的盾构隧道开挖面安全系数上限分析[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(8): 1461-1469. (HUANG Fu, PAN Qiujing, LING Tonghua. Upper bound analysis of factor of safety for shield tunnel face

- subjected to underground water seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(8): 1461-1469. (in Chinese))
- [16] ZHANG C P, Li W, ZHU W J, et al. Face stability analysis of a shallow horseshoe-shaped shield tunnel in clay with a linearly increasing shear strength with depth[J]. Tunnelling and Underground Space Technology 2020, **97**: 103291.
- [17] CHEN W F. Limit Analysis and Soil Plasticity[M]. Amsterdam, New York: Elsevier Scientific Pub Co, 1975.
- [18] HAN C, CHEN J, WANG J, et al. 2D and 3D stability analysis of slurry trench in frictional cohesive soil[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2013, **14**(2): 94-100.
- [19] LAGARIAS J C, REEDS J A, WRIGHT M H, et al. Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions[J]. Siam Journal of Optimization, 1998, **9**(1): 112-147.
- [20] 孙志彬, 潘秋景, 杨小礼, 等. 非均质边坡上限分析的离散机构及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(7): 1680-1688. (SUN Zhibin, PAN Qiuqing, YANG Xiaoli, et al. Discrete mechanism and application of upper limit analysis of heterogeneous slope[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(7): 1680-1688. (in Chinese))
- [21] 黄茂松. 土体稳定与承载特性的分析方法[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(1): 1-34. (HUANG Maosong. Analysis methods for stability and bearing capacity of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(1): 1-34. (in Chinese))
- [22] 黄茂松, 王鸿宇, 谭廷震, 等. 地下连续墙成槽整体稳定性的工程评价方法[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(5): 795-803. (HUANG Maosong, WANG Hongyu, TAN Tingzhen, et al. Engineering evaluation method for overall stability of slurry trenches[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(5): 795-803. (in Chinese))
- [23] VIRATJANDR C, MICHALOWSKI R L. Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, **43**(8): 802-814.
- [24] PAN Q, DIAS D. The effect of pore water pressure on tunnel face stability[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016, **40**(15): 2123-2136.

第十届全国岩土工程物理模拟学术研讨会征文通知（一号通知）

为促进中国岩土工程物理模拟学术交流,由中国水利学会岩土力学专业委员会和中国土木工程学会土力学及岩土工程分会主办,交通运输部天津水运工程科学研究所、南京水利科学研究所、中交天津港湾工程研究院有限公司、天津大学承办的第十届岩土工程物理模拟学术研讨会将于2024年8月16日—18日在天津举行。本届会议是继武汉(2011年)、杭州(2013年)、北京(2017年)、喀什(2023年)会议后全国岩土工程物理模拟领域的又一次学术盛会。届时将邀请国内外岩土力学与物理模拟领域的著名专家和学者进行交流,展现最新模拟技术和研究成果,探讨物理模拟在“交通强国与海洋强国”基础设施建设与防灾减灾研究中的应用,以促进物理模拟研究对中国重大战略和重大工程的技术支撑作用。本次会议热诚欢迎本领域及相关领域的专家、学者及工程技术人员参加,特别欢迎相关的博士和硕士研究生参加。

一、会议议题

岩土工程物理模拟理论、技术和装备的发展前沿及“交通强国与海洋强国”基础设施建设工程难点问题(例如高烈度土工抗震、港口码头的基础设施建设与高性能服役等),具体会议议题包括(但不限于)如下:①物理模拟新设备与新技术(Ng超重力模拟与1g常重力模拟);②岩土工程物理模拟理论与相

似律;③岩土工程物理模拟与数值分析;④交通基础设施与地下工程;⑤边坡与堤坝工程防灾减灾;⑥近海及海洋岩土工程;⑦土动力学与岩土地震工程;⑧水利水电与能源岩土工程;⑨冻土与特殊土力学及工程;⑩岩土工程物理模拟研究生论坛。

二、论文征稿

论文全文请于2024年1月1日前电邮至会议秘书处邮箱:125828612@qq.com,审查结果将于2024年1月30日通知。根据审查意见,作者修改后的论文终稿请于2024年3月15日前电邮至会议秘书处邮箱。

论文格式:论文限6页以内,论文排版格式参考《岩土工程学报》。

本次会议优秀论文将推荐在《岩土工程学报》或《水道港口》等正刊或专刊上发表。热忱从事相关领域的研究、勘察、设计与施工的科技工作者及青年研究生踊跃投稿。论文请控制在6页以内。

三、联系方式

地址:交通运输部天津水运工程科学研究所;邮编:300456;E-mail:125828612@qq.com, 726327972@qq.com;电话:张宇亭 18622332119, 安晓宇 18622236750, 王雪奎 13502069907, 陈广思 1532018817。

(会议组委会)