

承压水基坑突涌机制离心模型试验与数值模拟

李镜培^{1,2}, 张 飞^{1,2}, 梁发云^{1,2}, 宋 著^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 软土地区的深基坑工程, 在承压水作用下容易发生管涌、流土和隔水层整体顶升等形式的突涌破坏。结合紧邻地铁枢纽深大基坑工程, 设计了基坑突涌离心模型试验, 模拟不同承压水位作用下黏性土体隔水层突涌状态, 并建立有限元数值模型, 分析试验水位压力下坑底土体的应力应变机制。离心模型试验和数值模拟结果表明, 在承压水压力作用下, 坑底隔水层产生向上的隆起变形, 并且基坑中间位置变形量大, 随着水位的升高, 土体变形曲率增大; 基坑围护墙附近的隔水层土体剪切应变大于体积应变, 而隔水层与承压含水层的界面处体积应变较大, 产生水压楔裂作用并形成有效应力为零的区域; 黏性土体隔水层在剪切效应与界面楔裂效应的共同作用下, 发生整体顶升破坏。

关键词: 基坑; 承压水; 突涌机制; 应力应变状态; 离心模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Centrifugal Model Tests and Numerical Simulation on Hydraulic Heave Mechanism in Excavation with Confined Water

LI Jingpei^{1,2}, ZHANG Fei^{1,2}, LIANG Fayun^{1,2},
SONG Zhu^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In soft ground with lower confined aquifer, the bottom of an excavation may appear hydraulic heave like erosion, piping, bottom heave and hydraulic uplift at high hydraulic gradient. Combined with deep and large excavation engineering immediately adjacent to a subway hub, centrifugal model test was designed to simulate hydraulic heave in high cohesive aquiclude, at different hydraulic loads. In addition, numerical model was established to analyze soil stress-strain mechanism at the hydraulic loads of centrifugal model test.

Centrifugal model test and numerical simulations results show that under the effect of confined water, aquiclude uplift large in the central of foundation pit while small around the retaining wall, and aquiclude deformation curvature increase when confined water level become higher; the soil shear strain is greater than volume strain in aquiclude adjacent to retaining wall, but volume strain is greater at interface between aquiclude and confined aquifer, which produces discrete crack and wedge failure, and also make the effective stress in the region becomes zero; the low permeability cohesive aquiclude appears hydraulic uplift under the combination of shear failure mechanism and interface wedge failure mechanism.

Key words: excavation; confined water; hydraulic heave mechanism; stress-strain state; centrifugal model test; numerical simulation

在承压水压力的作用下, 深基坑容易发生突涌、管涌或流土破坏, 造成破坏性事故。目前, 深基坑抗突涌稳定性的判断与计算, 常采用压力平衡法^[1], 通过降低承压水位或坑底加固等措施提高基坑抗突涌稳定性。另外, 也有将坑底的相对不透水层视为受均布荷载的弹性梁、板^[2-3]以及带预应力连续梁、板^[4]分析, 考虑了土体强度和土体与结构相互作用的影响, 但是未考虑坑内土体性质和不同突涌模式的影响。一些学者采取模型试验的手段分析基坑突涌模式与破坏机制。Terzaghi^[5]通过模型试验指出坑底渗透破坏的危险区域集中在围护墙附近, 并建立了土层矩形棱柱体的力学平衡关系。McNamee^[6]认为基坑突涌破坏模式分两种, 即围护桩附近坑底土表面管涌砂沸和隔水层土体整体顶升破坏。孙永等^[7]采用 L-30 型土工离心机模拟基坑的突涌破坏模式, 揭示了基坑 3 种突涌破坏模式, 即隔水层土体

收稿日期: 2011-04-19

基金项目: 上海市科委科技攻关计划(09231200900, 10231200500)

第一作者: 李镜培(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土力学及桩基础工程。E-mail: lij2773@tongji.edu.cn

通讯作者: 张 飞(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为深基坑、桩基础工程和地基处理等。E-mail: engineerfeizhang@yahoo.com.cn

与地下结构接触面水力劈裂、接触面或附近土体剪切破坏以及隔水层土体复合拉剪和剪切破坏。

基坑突涌模式与坑底土层性质相关, Marsland^[8]通过大量模型试验揭示了砂土地基中的渗透破坏现象, 并将破坏机制分为桩底附近的楔形体顶升破坏和坑底土体表面的砂沸破坏。牛富俊^[9]、胡展飞等^[10]利用自行设计的试验装置分析了淤泥质粘土基坑的突涌机制, 突涌现象为坑底中心先出现“砂眼”, 随之在大范围产生“砂沸”, 并认为突涌机制是隔水层表面在下部承压水作用下先达到拉伸破坏^[9]。Wudtke^[11]等总结试验现象提出, 低黏性的土体发生类似液化的浅蚀破坏, 而高黏性的土体中将发生带有剪切面的楔体破坏或隔水层整体顶升破坏。

模型试验可以直观地观察坑底突涌形式, 但不能反映土体的应力应变状态, 不能从力学与土体变形的角度分析承压水的突涌破坏机制。基于此, 本文结合紧邻地铁枢纽深大基坑工程, 设计基坑突涌离心模型试验, 建立真实的基坑坑底承压水应力作用状态, 分析不同承压水位条件下坑底土体变形与突涌机制, 在离心模型试验基础上, 采用岩土有限元程序 PLAXIS 建立基坑突涌数值模型, 分析各级水位作用下坑底土体的应力应变状态, 研究坑底土体的突涌机制, 验证离心模型试验与有限元数值模型的适用性。

1 试验工程概况

“世纪大都会”2-3 地块项目位于上海浦东陆家嘴金融贸易区, 紧靠世纪大道、张杨路和福山路, 呈三角形分布, 工程占地面积约 38 000 m², 拟建建筑地下 2~4 层, 基坑大部区域开挖深度为 22.80 m。紧邻基坑南侧为地铁 2 号、4 号、6 号和 9 号线交汇的世纪大道站, 运营中的轨道交通 6 号线矩形区间隧道横穿场地中部, 将工程分割成两个面积约 1.33 万 m² 和 1.72 万 m² 的三角形基坑。基坑开挖与地铁交通枢纽的位置关系如图 1 所示。

基坑场地浅部第①层为杂填土, 第②层为褐黄~灰黄色粉质粘土, 第③、④、⑤层分别为粉土、淤泥质粘土和粉质粘土, 土质软弱并具有流变性, 基坑开挖容易产生较大围护墙位移变形和基底土隆起回弹, 第⑦层属上海地区典型的承压含水层, 顶面埋深约为地面下 27.40 m, 并且与下部的含水层连通形成厚度大于 90.00 m 的复合承压含水层组。勘察期

间测得承压水位为 -8.90~-10.75 m。承压含水层上覆的第⑥层粉质粘土厚度 4.00~6.00 m, 土层黏性大、渗透性小, 为本基坑的承压水隔水层。

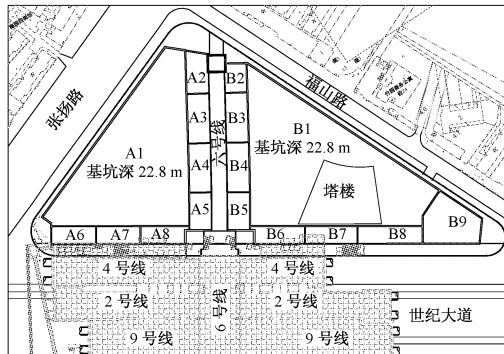


图1 超深基坑与紧邻地铁的位置关系

Fig.1 Relationship between the location of deep excavation and adjacent metro lines

经压力平衡法初步计算, 基坑底土层重力不足以抵抗承压含水层的水压力, 开挖到坑底 -22.80 m 时, 需将承压水位降低到 -19.50 m, 以保证基坑抗突涌稳定性。然而, 大面积、大幅度的降水将引起软弱土层较大的固结沉降, 对紧邻基坑的地铁交通枢纽产生不利影响。

2 承压水基坑突涌离心模型试验

试验在同济大学 TLJ-150 复合型岩土离心机上完成, 该离心机容量为 150 g·t, 最大加速度可达 200g; 有效旋转半径为 3.0 m, 模型箱有效尺寸为 0.9 m×0.7 m×0.7 m (长×宽×高), 模拟基坑开挖到坑底标高 -22.8 m 时, 施加不同承压水位, 分析坑底土层形态与突涌破坏机制。

2.1 试验对象与模型制备

基坑围护结构为内撑式地下连续墙, 墙深 50.0 m, 基坑开挖深度为 22.8 m 时, 沿深度方向设 5 道钢筋混凝土支撑。三角形基坑边长为 140.0~180.0 m, 因离心机工作条件和模型箱尺寸的限制, 试验模型率取 100, 并将基坑尺寸作适当简化, 截取长 55.0 m 宽 20.0 m 的矩形基坑分析坑底土体的抗突涌稳定性。模型基坑围护连续墙采用铝板制作, 按抗弯刚度相等的原则^[12]计算的铝板厚度为 7.0 mm, 钢筋混凝土支撑按抗压刚度相似的原则^[12]采用直径 5 mm、壁厚 1 mm 的铝棒模拟。试验土层根据性质和厚度对其进行了适当的简化, 选取代表性的土层以使其与现场地质水力条件相似, 模型中各土层分布

与基坑开挖的关系如图2所示。

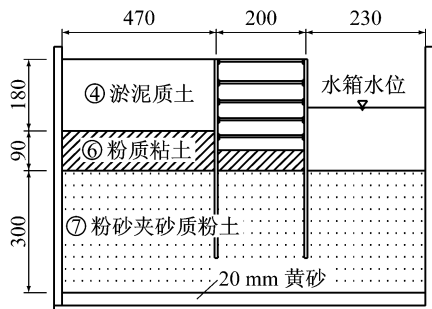


图2 离心试验模型尺寸图(单位:mm)

Fig.2 Geometrical model of centrifugal test (unit: mm)

图2中,试验土层分别为取自现场的第④层淤泥质粘土、第⑥层粉质粘土和第⑦层粉砂夹砂质粉土,经粉碎过筛重塑并在离心模型中分层固结,土层厚度分别为180,90和300 mm,为方便填土阶段土层固结,在模型箱底面铺设20 mm的黄砂作为固结排水通道。在模型箱填土过程中,配制土体含水率与现场土层一致,试验过程中控制含水率、重度等指标,并取土样做直剪试验控制土体强度,使其与现场土层的性质接近。固结后的土体强度参数分别为:淤泥质粘土粘聚力 $c=14.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,内摩擦角 $\varphi=13.4^\circ$,粉质粘土 $c=20.89 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, $\varphi=23.08^\circ$,粉砂夹砂质粉土 $c=0.96 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, $\varphi=38.57^\circ$,与现场土体试验参数基本相近。

试验中,在围护墙的一侧设置水位箱施加水位,地下水通过连续墙底端第⑦层含水层连通到模型箱的其他部位,并且,在水箱有机玻璃面的内侧固定直尺读取水位值的大小。

2.2 试验过程

基坑土体开挖采用目前最为常见的停机开挖方式进行模拟,试验先按照基坑开挖的工况依次开挖支护,开挖到坑底标高-22.8 m后,在水箱内施加水位模拟基坑在不同承压水位下的突涌稳定性。由压力平衡法计算的抗突涌稳定水位为-19.5 m,试验设计水位控制在这个标高附近,并逐渐升高承压水位观察坑底土层的反应。

试验水位施加步骤为:先将水位施加到-22.5 m并静置到水位稳定,然后加速离心机到100g并稳定3 min,停机测量基坑坑底变形,并补充机器旋转过程中消失的水位,依次类推,将承压水位分别控制在-21.0,-19.5,-18.5和-17.5 m。当施加水位为-17.5 m,加速度到达80g时,坑底发生突涌破坏。

2.3 试验结果

试验过程中,在基坑底面标高处的模型箱玻璃

面画出3条竖向间距为20 mm的水平直线,各开挖步运行停机后观测土体位移,根据直线与土体的相对位置变化,用直尺测量读取土体变形值。各级水位下观测的坑底突涌形态为:①在水位为-22.5 m和-21.0 m时,隔水层土体表现为较均匀的隆起,且基坑中间部位的隆起量大,靠围护墙的两侧隆起量小;②当水位达到-19.5 m和-18.5 m时,隔水层内部靠玻璃面附近出现倾斜状的裂纹,基坑并未发生突涌破坏,说明承压水压力与上覆黏性土重力相等时,土层仍有抗突涌稳定性;③承压水水位继续增加到-17.5 m时,持续加速离心机,水位压力的上升促使基坑发生突涌破坏,承压含水层内的地下水涌入基坑,水箱内的水位显著下降。

将坑内的积水抽干后,采集的坑底突涌堆积破坏体如图3所示。可以发现其呈现典型的突涌状“丘”形体。



图3 坑底突涌破坏体

Fig.3 Failure body at the excavation bottom

3 承压水基坑突涌的数值模拟

3.1 建模与材料参数

利用岩土有限元 PLAXIS 程序建立平面应变模型,分析本试验基坑突涌稳定性,研究试验承压水位条件下坑底土体的应力应变状态。模型在左右边界约束水平位移,底部同时约束水平和垂直位移,土体采用高精度的15节点三角形单元来模拟,本构模型为土体硬化模型,使用塑性理论,考虑土体剪胀性,并引入一个屈服帽盖来反映塑性体积应变。该模型的特点为采用特定参考压力下的土体模量来反映刚度对应力状态的依赖性,可以较好地模拟坑底土体在开挖受力下的应力应变状态。数值计算参数如表1所示。

地下连续墙采用梁单元,抗拉刚度 $E_A=3.0 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,抗弯刚度 $E_I=2.6 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$,支撑采用杆单元,刚度 $E=3.24 \times 10^6 \text{ kN}$,围护墙与土体

表 1 数值模拟土体计算参数

Tab.1 Soil parameters of numerical simulation

土层	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$k_h/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	$k_v/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	$E_{50}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$E_{\text{oed}}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$E_{\text{ur}}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	ν	$c/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\phi/$ ($^\circ$)	R_{inter}
④	16.8	2.82×10^{-4}	1.55×10^{-4}	5580	2790	16740	0.2	14.5	13.4	0.7
⑥	19.7	2.68×10^{-6}	1.84×10^{-6}	14280	7140	42840	0.2	20.89	23.08	0.7
⑦	18.8	5.19×10^{-1}	3.40×10^{-1}	23920	12460	48000	0.2	0.96	38.57	0.7

注: γ 为土体重度; k_h 为土体水平向渗透系数; k_v 为土体竖向渗透系数; E_{oed} 为主固结仪加载中的切线刚度, 计算取土体压缩模量; E_{50} 为参考围压 p^{ref} 下 50% 强度的割线模量, 根据经验取 $E_{50} = (1.5 \sim 2.0) E_{\text{oed}}$; E_{ur} 为参考围压 p^{ref} 下的卸载/再加载模量, 取值为 $E_{\text{ur}} = 3E_{50}$; ν 为土体卸载/再加载泊松比, 取 $\nu = 0.2$; R_{inter} 为墙土界面强度折减因子。

界面的强度折减因子为 $R_{\text{inter}} = 0.7$ 。生成的模型网格如图 4 所示, 模型的左上角坐标为 (0, 0)。

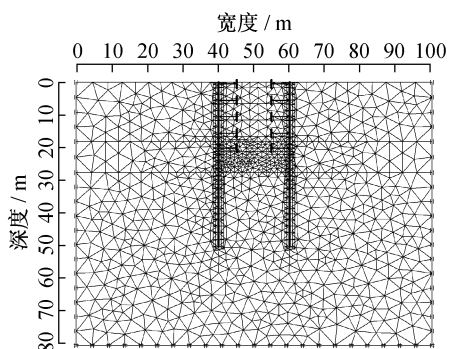


图 4 基坑模型有限元网格

Fig.4 Finite element mesh of excavation model

3.2 承压水突涌模拟方案

数值计算基坑开挖、支护步骤按实际工程和离心模型试验的开挖支撑工序进行模拟。基坑土层的潜水位在地面下 1.0 m 处, 计算中, 将水位改变到相应的开挖面标高, 模拟潜水位土体的疏干。第⑦层承压水的初始水位在 -10.0 m 处, 开挖到地面以下 17.0 m 时改变水压分布, 模拟承压水位降低。根据离心模型试验的工况, 开挖到坑底 -22.8 m 时, 施加承压水位分为 -22.5, -21.0, -19.5, -18.5 和 -17.5 m, 以此分析坑底土体的隆起变形反应。

3.3 数值模拟的结果分析

当开挖到基坑底面且承压水位较低时, 坑底土体在压力水头作用下隆起回弹, 但不发生突涌破坏; 当承压水位高于 -17.5 m 时, 数值计算缓慢, 坑底产生无限增长的塑性变形, 计算工序未达到最大加载步数而土体先达到破坏荷载, 计算自动停止, 隔水层与承压含水层界面处土体脱离, 基坑底土体类似顶升突涌破坏。

3.3.1 坑底土体的非破坏状态

当承压水位较低, 开挖到基坑底面时坑底土体的剪切应变分布如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 在基坑围护墙的内侧附近, 土体剪切应变较大, 最大值达到 0.62%, 此处土体呈

现剪切破坏机制。在坑底土体标高 -22.8 ~ -27.0 m 的竖向分布上, 离坑底表层越近, 剪切应变越大, 表明坑底表层土体的剪切变形最大, 此处是突涌剪切破坏的最危险位置。

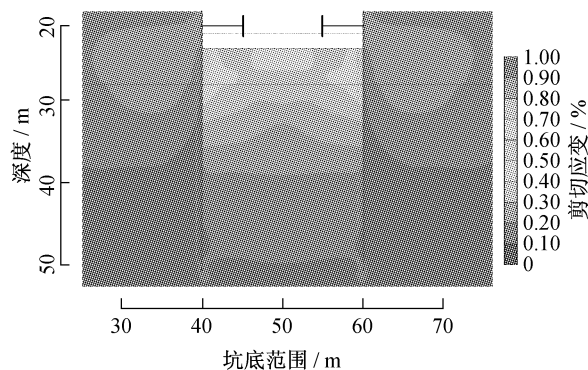


图 5 坑底土体剪切应变机制

Fig.5 Mechanism of soil shear strain in aquiclude

开挖到坑底隔水层标高为 -23.0 m 的平面上时, 各级承压水位工况的土体剪切应变如图 6 所示。

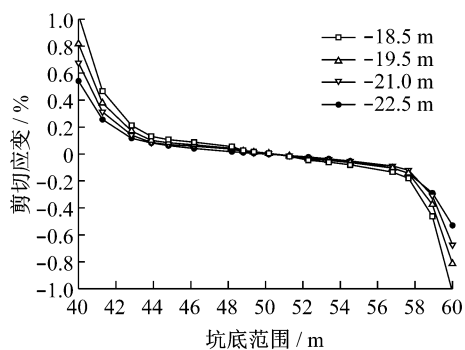


图 6 不同水位下坑底土体剪切应变

Fig.6 Soil shear strain at different confined water levels

从图 6 中可以看出, 当坑底承压水位提高时, 土体剪切应变从 0.54% 变化到 1.02%, 水头压力对坑底隔水层的剪切作用非常明显。在同一级水压力下, 基坑围护墙附近的土体剪切应变较大, 而基坑中间部位土体剪切应变较小。由于剪切应变在基坑中央坐标处符号改变, 图 6 中表示的应变大小在基

坑的两侧基本相等。

在承压水压力作用下,开挖到坑底时土体的体积应变分布状态如图7所示。

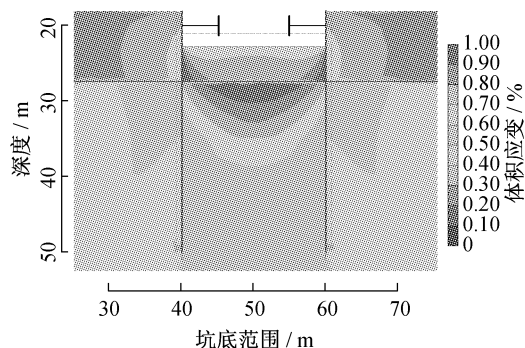


图7 坑底土体体积应变机制

Fig.7 Mechanism of soil volumetric strain in aquiclude

从图7中可以看出,坑底隔水层内部在水头压力作用下产生较均匀的体积应变,隔水层与含水层界面处体积应变较大,土体产生一定的变形。同一级水头压力下,隔水层内的土体体积应变为剪切应变的20%左右,小于图6所示的剪切应变,即在隔水层内,控制突涌破坏的应变机制为土体剪切变形。隔水层与承压含水层的界面处,土体体积应变较大,体积应变达到0.7%,表明坑底隔水层受到承压水的顶托力作用,发生较大的向上隆起变形。

3.3.2 坑底土体的破坏状态

数值模拟施加承压水位高于-17.5 m,且计算开挖到第4层土体(深度17.0 m)时,坑底向上的位移达到50 mm,隔水层与承压含水层界面产生有效应力为零的区域,此时,坑底土体内的剪切应变与体积应变如图8所示。

从图8中可以看出,坑底土体的剪切应变在围护墙角附近最大,并逐渐向下部的土层扩展,延伸到较大的区域。同时,隔水层与承压含水层界面处也有剪切应变的扩展,大于承压水位较低时的土体体积应变,表明在较高的水头压力作用下,坑底土体的剪切应变和体积应变均有增大的趋势。

当开挖第5层土体(深度20.0 m)时,PLAXIS分步施工控制参数和前述承压水位较低时的设置相同,但是此时数值计算缓慢,坑底产生无限增长的塑性变形,计算工序未达到最大加载步数而土体先达到破坏荷载,计算自动停止,记录信息框显示“未达到指定的终极状态,土体破坏”,此时隔水层与承压含水层界面处土体脱离,有效应力为零的区域贯通整个基坑坑底,认为坑底发生突涌破坏。坑底土体剪切应变与体积应变分布形状相似,如图9a所示,

有效应力分布如图9b所示。

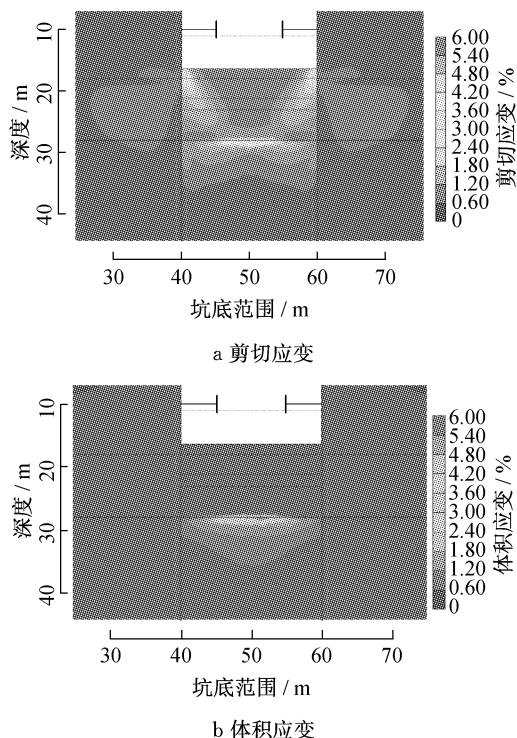


图8 开挖第4层土体基坑的应变机制

Fig.8 Mechanism of soil strain in aquiclude upon the excavation of the 4th layer

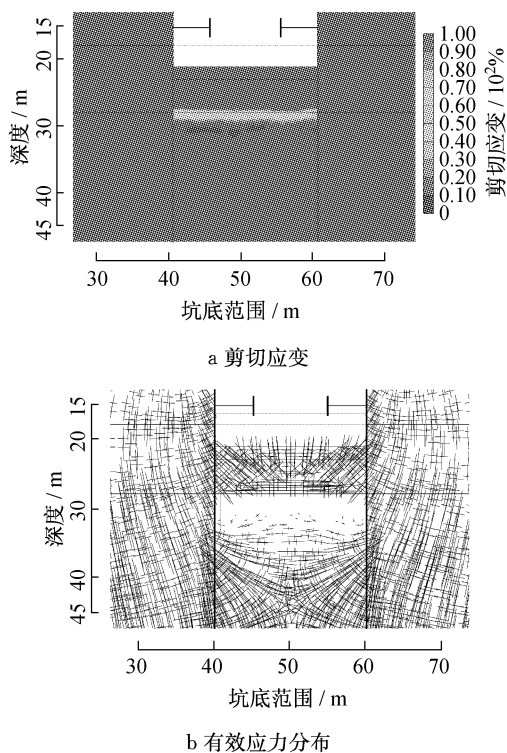


图9 坑底发生整体顶升破坏

Fig.9 Hydraulic uplift of cohesive aquiclude

从图9a可以看出,第5层土体的开挖过程中,隔水层与承压含水层界面处裂缝持续发展,并贯通

整个基坑底面,隔水层土体与其下部的承压含水层脱离,即发生整体顶升破坏.图9b为土体有效应力分布,符号“+”的长轴表示有效应力主方向,短轴表示有效应力大小.从图中可以看,隔水层第⑥层粉质粘土的下方,形成厚度约5.0 m的有效应力为零的区域并贯穿整个基坑宽度方向,表明承压水压力使土颗粒呈现悬浮状态,基坑发生突涌破坏.

4 结论

(1) 当承压含水层水头压力与上覆隔水层土体自重平衡时,坑底并未立即产生突涌破坏,表明基坑土体的抗突涌条件应计入黏性土体强度与土体结构相互作用的影响.

(2) 承压水作用下坑底土体变形模式为基坑中间位置处隆起变形大而围护墙周围变形小,随着承压水位的升高或基坑开挖深度的增加,土体变形的曲率变大,数值计算较好地模拟了离心模型试验的结果.

(3) 基于离心模型的数值计算表明,基坑底隔水层内部的土体剪切应变大于体积应变,呈剪切破坏机制,而隔水层与承压含水层的界面处体积应变较大,产生水压楔裂作用并逐渐形成有效应力为零的区域,黏性土体隔水层在剪切机制与楔裂机制的共同作用下,发生整体顶升破坏.

(4) 离心模型试验可以直观地反应基坑突涌破坏状态,数值模拟可以较好地分析坑底土体的受力状态与应变机制,两者所得的土体受力状态和隆起变形吻合较好.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999.
The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. JGJ 120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.
- [2] 梁勇然. 条形基坑的突涌分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 75.
- LIANG Yongran. Analysis of strip pit piping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 75.
- [3] 李建交, 屠厚泽. 关于矩形基坑中突涌问题的分析与探讨[J]. 地质科技情报, 1998, 17(3): 91.
- LI Jianjiao, TU Houze. Analysis and discussion on the piping problem of rectangular foundation pits[J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(3): 91.
- [4] 马石城, 印长俊, 邹银生. 抗承压水基坑底板的厚度分析与计算[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 204.
- MA Shicheng, YIN Changjun, ZOU Yinsheng. Analysis and calculation of the pit base plate thickness of bearing resistance water foundation[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(2): 204.
- [5] Terzaghi K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [6] Mcnamee J. Seepage into a sheeted excavation[J]. Geotechnique, 1949, 4(1): 229.
- [7] 孙永玉, 周顺华. 基于离心模型试验的基坑突涌模式及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2551.
- SUN Yuyong, ZHOU Shunhua. Mode and mechanism of bursting in foundation pit based on centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2551.
- [8] Marsland A. Model experiments to study the influence of seepage on the stability of a sheeted excavation sand[J]. Geotechnique, 1953, 6(3): 223.
- [9] 牛富俊, 刘玉海, 倪万魁. 软土基坑变形失稳形态模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(1): 93.
- NIU Fujun, LIU Yuhai, NI Wankui. Simulation study of deformation and instability shape of foundation—pit in soft soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(1): 93.
- [10] 胡展飞, 张刚, 周健. 软土基坑突水基底变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 638.
- HU Zhanfei, ZHANG Gang, ZHOU Jian. Research on deformation behavior of substratum at water blow-up of the pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 638.
- [11] Wudtke R-B. Failure mechanisms of hydraulic heave at excavations[C]//19th European Young Geotechnical Engineer's Conference. Győr: [s.n.], 2008: 331—338.
- [12] 马险峰, 张海华, 朱卫杰, 等. 软土地区超深基坑变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1371.
- MA Xianfeng, ZHANG Haihua, ZHU Weijie, et al. Centrifuge model tests on deformation of ultra-deep foundation pits in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1371.