

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1728

# 承压水地层基坑抗突涌稳定性的计算方法

黄茂松<sup>1,2</sup>, 刘奕晖<sup>1,2</sup>, 俞 剑<sup>1,2</sup>, 李弈杉<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 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:** 现行规范计算基坑抗突涌稳定性采用压力平衡法, 该方法未考虑上方土体强度和基坑尺寸的影响, 对接近临界承压水压力情况的评价偏于保守。针对上述问题, 首先根据强度折减原理定义安全系数, 采用有效应力分析并考虑基坑被动区的存在, 改进了已有的考虑土体四周抗剪强度抗突涌计算方法, 并基于弹性板理论提出了新的基坑抗突涌计算方法; 随后在平面应变条件下利用强度折减有限元计算结果进行了讨论, 并进一步分析了基坑长宽比的影响; 最后对工程实例进行了计算分析。分析表明, 改进后和新提出的方法相较于现有方法能更好地说明基坑抗突涌稳定性随承压水压力的变化情况, 在保证工程安全的前提下提高经济性。

**关 键 词:** 抗突涌稳定性; 承压水; 强度折减; 有效应力; 压力平衡法

中图分类号: TV551

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2023)11-3071-11

## Calculation method of stability against inrush of excavation overlying a confined aquifer

HUANG Mao-song<sup>1,2</sup>, LIU Yi-hui<sup>1,2</sup>, YU Jian<sup>1,2</sup>, LI Yi-shan<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The pressure balance method is adopted in calculating the stability against the inrush of excavation in the current criterion. The effects of soil strength and excavation size are not considered in this method. Therefore, the method gives a conservative evaluation of the situation approaching the critical artesian pressure. Aiming at these problems, firstly, the safety factor is defined according to the principle of shear strength reduction in this paper. The existing method considering soil shear strength along slip surfaces is improved by adopting effective stress analysis and considering the passive zone of excavation. Then, a new calculation method for inrush resistance is proposed based on the elastic plate theory. Subsequently, the results of the finite-element method with reduced shear strength are compared with those of above calculation methods under the plane strain condition. And the effects of the excavation length-width ratio for the improved and proposed methods are further analyzed. Finally, the analysis of an engineering practice is carried out. The analysis shows that compared with the existing methods, the improved and proposed methods in this paper can better reveal the trends of excavation stability against inrush with the change of the artesian pressure and improve the economy on the premise of ensuring the safety of engineering practice.

**Key words:** stability against inrush; artesian water; shear strength reduction; effective stress; pressure balance method

## 1 引 言

随着超高层建筑的建设以及地下多层轨道交通的开发, 基坑工程的深度不断增加, 在部分沿海和内地城市, 承压水引起的基坑工程突涌安全风险日益加剧<sup>[1-4]</sup>。为了防止由于承压水影响而导致的基坑开挖失稳, 通常采用的方法是通过降水降低含水层

中的承压水压力。然而, 这种方法使用不当可能会导致基坑周围的地层大范围沉降过度<sup>[5-7]</sup>, 进而引发更大的危害。

在承压水地层基坑抗突涌稳定性分析中,《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-2012)<sup>[8]</sup>、《基坑工程技术标准(上海)》(DG/TJ08-61-2018)<sup>[9]</sup>主要采用压力平衡法进行分析, 该方法概念清晰, 应用

收稿日期: 2022-11-03

录用日期: 2023-02-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 51738010); 国家重点研发计划课题(No. 2016YFC0800202)。

This work was supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (51738010) and the National Key Research and Development Program (2016YFC0800202).

第一作者简介: 黄茂松, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: mshuang@tongji.edu.cn

简便, 计算效率高, 在工程实践中获得了广泛的应用, 但其也有明显缺陷, 压力平衡法假设坑底的隔水层为简单均质板, 而不考虑基坑尺寸及坑底土层抗剪强度的影响, 特别是土层抗剪强度对承压水地层基坑抗突涌稳定性是有利的, 规范方法对接近临界承压水压力情况的评价往往偏于保守, 有部分基坑依据该方法计算安全系数明显小于规范要求, 最终却安全竣工<sup>[10]</sup>。为了获得更为合理的承压水地层基坑抗突涌稳定性评价方法, 部分研究将抗突涌土体视作均质连续体, 通过考虑土体抗剪强度储备对原有规范方法进行改进<sup>[11-13]</sup>; 部分研究将抗突涌土体假设为均匀连续构件, 用抗剪强度或抗拉强度控制坑底土体抗突涌临界厚度<sup>[10, 14-15]</sup>。近年来, 也有不少研究通过基于工程实践或室内模型试验结合数值模拟的方式分析基坑抗突涌稳定性<sup>[16-23]</sup>, 这些研究往往基于模拟真实基坑开挖对突涌问题进行探究, 获得了包括基坑的尺寸、支护结构及形式甚至开挖的方案影响在内的承压水地层基坑的整体失稳模式, 但均未给出在工程界适用的合适简化计算方法。同时, 绝大部分研究都集中于突涌条件的判别, 对承压水地层基坑抗突涌安全系数定义和随承压水压力的变化少有提及。

针对上述问题, 本文对承压含水层上方黏土隔水层采用有效应力分析并考虑基坑被动区的存在, 依据强度折减原理定义安全系数, 对文献<sup>[12]</sup>提出的考虑土体四周抗剪强度的抗突涌稳定性计算方法进行了改进, 并进一步基于弹性板理论提出了一种新的抗突涌稳定性分析方法, 通过与强度折减有限单元法 (shear strength reduction finite element method, 简称 SSRFEM) 算例以及典型工程实例的对比分析, 验证了所提出分析方法的合理性和适用性。

## 2 抗突涌稳定性计算方法

### 2.1 已有的坑底整体顶升抗突涌稳定分析方法

对于涉及坑底承压含水层的深基坑, 抗突涌稳定验算结果直接决定了承压含水层减压井内水位值, 从而间接影响了坑外地面沉降发展。所以, 基坑抗突涌稳定验算既关系到坑底安全, 又影响地面沉降发展。偏于保守的抗突涌稳定验算容易造成较大的地面沉降值, 甚至导致地面建筑倾斜、开裂, 为周边环境要求所不允许, 偏于冒险的抗突涌稳定验算容易造成安全隐患, 同样不可采用。本小节将对常见的两种坑底抗突涌稳定分析方法和其安全系数定义进行介绍。

对于坑底赋存高承压水的基坑工程来说, 现行

规范中规定需按压力平衡法进行抗突涌稳定性验算, 如图 1 所示。《建筑基坑支护技术规程》<sup>[8]</sup>中对抗突涌安全系数  $F_{sl}$  定义为上覆土重 (抗力) 和承压含水层水压力 (荷载) 的比值:

$$F_{sl} = \frac{\gamma_{sat}(D+t)}{p_w} \quad (1)$$

式中:  $\gamma_{sat}$  为承压水层以上土的饱和重度;  $D$  为承压水层顶面以上围护结构的入土深度;  $t$  为承压水层顶面距围护结构底部的距离, 若围护结构进入承压水层, 取  $t=0$ ;  $p_w$  为承压含水层水压力。那么临界水压力  $p_{cr1}$  可表示为

$$p_{cr1} = \gamma_{sat}(D+t) \quad (2)$$

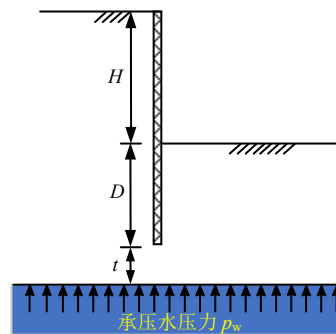


图 1 抗突涌稳定性分析示意图

Fig.1 Diagram of stability analysis against inrush

由式 (1)、(2) 可知, 《建筑基坑支护技术规程》<sup>[8]</sup>方法的计算原理清晰, 便于工程中使用, 但方法仅考虑坑底隔水层厚度影响, 由未考虑基坑尺寸效应以及隔水层抗剪强度发挥对抗突涌稳定性的贡献, 导致规范方法所得结果偏保守, 这一点在文献中也被广泛提及<sup>[12, 24-25]</sup>。

杨建民等<sup>[12]</sup>针对规范方法缺陷, 基于规范公式提出了考虑抗突涌土体侧面抗剪强度发挥的计算方法。本文基于该方法, 采用有效应力分析, 获得了承压水基坑坑底整体顶升稳定性分析方法。

该方法将抗突涌土体视作一个整体进行受力分析, 假设当力达到平衡条件时基坑处于临界状态:

$$F_r + G - P = 0 \quad (3)$$

式中:  $F_r$  为抗突涌土体四周土体抗剪强度的贡献;  $G$  为坑内承压水层顶面上覆土总重;  $P$  为承压水压力, 这 3 项计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} F_r &= 2(B_1 + B_2) \left[ \int_0^{D+t} (K_0(\gamma_{sat}z - u) \tan \phi' + c') dz \right] \\ G &= \gamma_{sat}(D+t) \cdot B_1 B_2 \\ P &= p_w \cdot B_1 B_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中：\$B\_1\$ 为基坑长度；\$B\_2\$ 为基坑宽度；\$K\_0\$ 为静止土压力系数；\$u\$ 为孔隙水压力；\$z\$ 为坑底至计算点距离；\$c'\$ 和 \$\varphi'\$ 分别为土体有效黏聚力和内摩擦角。

计算孔隙水压力时，假设坑内潜水位位于坑底表面处，为简化计算且便于应用，假设承压含水层与隔水层之间无竖向渗流的发生，承压水压力不影响隔水层中孔压分布，隔水层内孔隙水压力按静水压力计算，不考虑因基坑内外潜水位差引起的渗流对孔压的影响。以坑底与基坑围护结构交点 \$O\$ 为原点建立坐标系，指定 \$z\$ 轴正方向为重力加速度方向，如图 2 所示，\$p\_0\$ 为隔水层底面处水压力，\$\gamma\_w\$ 为水重度，可得到隔水层内孔压 \$u\$ 的分布计算式为

$$u = \frac{p_0}{D+t} z = \gamma_w z \quad (5)$$

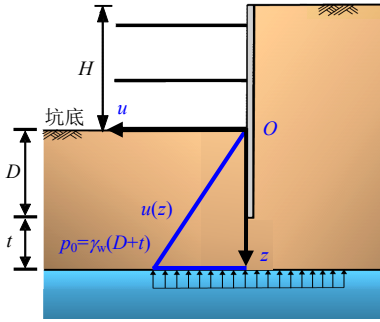


图 2 隔水层孔压分布示意图

Fig.2 Pore water pressure distribution in an aquiclude

通过式 (3) ~ (5) 可得此时临界水压力 \$p\_{cr2}\$ 为

$$p_{cr2} = \frac{2(B_1 + B_2)}{B_1 B_2} \cdot \int_0^{D+t} [K_0(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz + \gamma_{sat}(D+t) \quad (6)$$

杨建民等<sup>[12]</sup>采用由极限平衡原理定义的安全系数计算方法，得到的安全系数依据抗力和荷载之比确定，安全系数 \$F\_{s2,LEM}\$ 表示为上覆土重与抗突涌土体四周抗剪强度之和同承压含水层水压力的比值：

$$F_{s2,LEM} = \frac{2(B_1 + B_2)}{B_1 B_2} \cdot \frac{\int_0^{D+t} [K_0(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{P_w} + \frac{\gamma_{sat}(D+t)}{P_w} \quad (7)$$

## 2.2 考虑土体四周抗剪强度方法的改进

在基坑工程中，基坑被动区的存在是被广泛承认的。随着围护结构向内变形，坑内墙前土压力逐渐由静止土压力向被动土压力发展。因此，在墙前采用被动土压力取代静止土压力是更符合工程实际

的方法。

使用朗肯被动土压力进行计算时，抗突涌土体四周土体抗剪强度的贡献 \$F\_r\$ 可修改为

$$F_r = 2(B_1 + B_2) \cdot \left\{ \int_0^D [K_p(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz + \int_D^{D+t} [K_0(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz \right\} \quad (8)$$

式中：\$K\_p\$ 为朗肯被动土压力系数，取 \$\tan^2(4/\pi + \varphi'/2)\$；\$K\_0\$ 为静止土压力系数。需要注意的是此处被动土压力计算忽略了 \$2c'\sqrt{K\_p}\$，这一方面是因为被动土压力是一种极限状态，土压力实际处于被动土压力和静止土压力之间的状态，去掉该项是为了更贴近实际情况；另一方面是因为有效强度指标下 \$c'\$ 较小，在深度较大时该项数值远小于计算项。

在引入墙前被动土压力计算后，考虑土体四周抗剪强度方法得到的临界承压水压力 \$p\_{cr3}\$ 为

$$p_{cr3} = \frac{2(B_1 + B_2)}{B_1 B_2} \left\{ \int_0^D [K_p(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz + \int_D^{D+t} [K_0(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz \right\} + \gamma_{sat}(D+t) \quad (9)$$

另一方面，对于安全系数来说，有两种定义方法，一种是以极限平衡原理为基础；另一种则是以强度折减原理为基础。极限平衡原理易于理解，在工程中应用广泛，但根据极限平衡状态的依据不同，安全系数表达形式可能大相径庭。例如在坑底有软弱夹层时土坡稳定性的简化分析方法中，依据滑动力与抗滑力之间的相对关系和黏土层的抗剪强度，安全系数存在两种不同的表达方式，会在工程实际使用中带来一定困扰。而强度折减原理概念清晰，安全系数在推导过程中自然产生，有着统一的表达形式，该安全系数定义方法在极限分析方法中得到了较为广泛的应用<sup>[26-28]</sup>。

下面介绍引入墙前被动土压力计算后，进一步提出以强度折减原理为基础的安全系数计算方法，考虑土体四周抗剪强度的方法涉及到土体侧压力的计算，由于土体侧压力系数计算中包含了有效内摩擦角 \$\varphi'\$，因此根据侧压力系数是否需要折减，依据强度折减原理可得到两种不同的安全系数表达式。

在基坑未达到临界状态时，基于式 (3) ~ (5) 和式 (8)，可以得到：

$$\gamma_{sat}(D+t)B_1 B_2 + 2(B_1 + B_2) \cdot \left\{ \int_0^D \left[ K_p(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \frac{\tan \varphi'}{F_r} + \frac{c'}{F_r} \right] dz + \int_D^{D+t} \left[ K_0(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \frac{\tan \varphi'}{F_r} + \frac{c'}{F_r} \right] dz \right\} - p_w B_1 B_2 \geq 0 \quad (10)$$

式中:  $F_r$  为强度折减系数, 不断增大强度折减系数, 当式 (10) 右侧等于 0 时, 定义此时的强度折减系数为安全系数  $F_{s3,SSR}$ 。不折减侧压力系数  $K_p$ 、 $K_0$  情况下, 安全系数可按式 (11) 计算:

$$F_{s3,SSR} = \frac{2(B_1 + B_2)}{B_1 B_2} \left\{ \frac{\int_0^D [K_p(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{p_w - \gamma_{sat}(D+t)} + \frac{\int_D^{D+t} [K_0(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{p_w - \gamma_{sat}(D+t)} \right\} \quad (11)$$

而在折减侧压力系数  $K_p$ 、 $K_0$  情况下, 安全系数计算式则变化为

$$F_{s3,SSR} = \frac{2(B_1 + B_2)}{B_1 B_2} \left\{ \frac{\int_0^D [K_{p,SSR}(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{p_w - \gamma_{sat}(D+t)} + \frac{\int_D^{D+t} [K_{0,SSR}(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{p_w - \gamma_{sat}(D+t)} \right\} \quad (12)$$

其中:

$$K_{p,SSR} = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\arctan(\tan(\varphi')/F_{s3,SSR})}{2} \right) \quad (13)$$

$$K_{0,SSR} = 1 - \sin \left( \arctan \left( \frac{\tan \varphi'}{F_{s3,SSR}} \right) \right) \quad (14)$$

式 (12) 直接求解较为困难, 可采用迭代方法计算。

### 2.3 基于弹性板理论的稳定性分析方法

当承压含水层上方为隔水黏土层时, 将坑底承压含水层上方土层假设为受承压含水层水压力产生的均布荷载且四边完全固支的矩形弹性板, 如图 3 所示。

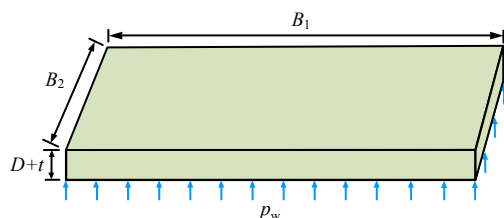


图3 基坑坑底承压含水层上方土层示意图  
Fig.3 Soil layer overlying a confined aquifer inside the excavation

假设在扣除土体自重后承压含水层水压力产生的均布荷载作用下, 坑底土层发生剪切破坏。根据受均布荷载的四边固支弹性板的解可知, 板长边剪

力大于短边剪力, 因此认为剪切破坏首先发生在基坑长边。当荷载引起的板长边剪力达到一定数值时破坏发生, 该数值可取板长边上与荷载反向的剪力的平均值。定义剪力系数  $\delta_1 = Q/qB_2$ , 其中  $Q$  为剪力,  $q$  为作用在板上的均布荷载, 不同长宽比条件下的剪力系数如表 1 所示。

表1 不同长宽比下长边平均剪力系数  
Table 1 Average shear coefficient of the long side under different length-width ratios

| $B_1/B_2$ | $\delta_1 = Q/qB_2$ | $B_1/B_2$ | $\delta_1 = Q/qB_2$ |
|-----------|---------------------|-----------|---------------------|
| 1.0       | 0.285               | 10.0      | 0.475               |
| 2.0       | 0.406               | 20.0      | 0.488               |
| 3.0       | 0.439               | $\infty$  | 0.500               |
| 5.0       | 0.459               |           |                     |

假设坑底以下至围护结构插入深度部分采用被动土压力, 承压含水层顶面至围护结构底部采用静止土压力。对于发生破坏的基坑长边方向, 取单位宽度, 根据竖向静力平衡条件并考虑破坏面上抗剪强度的发挥可得

$$\int_0^D [K_p(\gamma_{sat} z - u) \tan \varphi' + c'] dz + \int_D^{D+t} [K_0(\gamma_{sat} z - u) \tan \varphi' + c'] dz = \delta_1 [p_w - \gamma_{sat}(D+t)] B_2 \quad (15)$$

其中,  $K_p$ 、 $K_0$ 、 $u$  的计算方法均同 2.2 节一致。

通过式 (15) 可得临界承压水压力  $p_{cr4}$  表达式:

$$p_{cr4} = \gamma_{sat}(D+t) + \frac{\int_0^D [K_p(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{\delta_1 B_2} + \frac{\int_D^{D+t} [K_0(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{\delta_1 B_2} \quad (16)$$

式中:  $\delta_1$  为剪力系数。

以强度折减原理为基础定义安全系数, 在基坑未达到临界状态时, 基于式 (15) 可得

$$\int_0^D [K_p(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \frac{\tan \varphi'}{F_r} + \frac{c'}{F_r}] dz + \int_D^{D+t} [K_0(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \frac{\tan \varphi'}{F_r} + \frac{c'}{F_r}] dz - \delta_1 [p_w - \gamma_{sat}(D+t)] B_2 \geq 0 \quad (17)$$

不折减侧压力系数  $K_p$ 、 $K_0$  情况下, 基于弹性板理论的稳定性分析方法安全系数  $F_{s4,SSR}$  可按式 (18) 计算:

$$F_{s4,SSR} = \frac{\int_0^D [K_p(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{\delta_1 B_2 [p_w - \gamma_{sat}(D+t)]} + \frac{\int_D^{D+t} [K_0(\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{\delta_1 B_2 [p_w - \gamma_{sat}(D+t)]} \quad (18)$$

而在折减侧压力系数  $K_p$ 、 $K_0$  的情况下，安全系数可按式计算：

$$F_{s4,SSR} = \frac{\int_0^D [K_{p,SSR} (\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{\delta_1 B_2 [p_w - \gamma_{sat} (D+t)]} + \frac{\int_D^{D+t} [K_{0,SSR} (\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{\delta_1 B_2 [p_w - \gamma_{sat} (D+t)]} \quad (19)$$

其中， $K_{p,SSR}$  和  $K_{0,SSR}$  由式 (13) 和式 (14) 计算。式 (19) 同样可以采用迭代的方式进行求解。

## 2.4 平面应变假设下的简化计算方法

压力平衡方法与基坑平面尺寸（长度和宽度）无关，在平面应变假设下没有区别。考虑土体四周抗剪强度方法和基于弹性板理论方法均与基坑平面尺寸有关，因此在平面应变假设下需要进行相应的调整。

针对改进前的考虑土体四周抗剪强度方法（杨建民等<sup>[12]</sup>），基坑长边  $B_1$  长度为无限大，因此式 (6) ~ (7) 中  $2(B_1 + B_2) / B_1 B_2$  项可根据数学中极限的定义化简为  $2 / B_2$ ，可以改写为

$$p_{cr2} = \frac{2}{B_2} \int_0^{D+t} [K_0 (\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz + \gamma_{sat} (D+t) \quad (20)$$

$$F_{s2,LEM} = \frac{2}{B_2} \frac{\int_0^{D+t} [K_0 (\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{p_w} + \frac{\gamma_{sat} (D+t)}{p_w} \quad (21)$$

同样地，针对改进后的考虑土体四周抗剪强度方法 (2.2 节)，式 (9) 改为

$$p_{cr3} = \frac{2}{B_2} \left\{ \int_0^D [K_p (\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz + \int_D^{D+t} [K_0 (\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz \right\} + \gamma_{sat} (D+t) \quad (22)$$

不折减侧压力系数  $K_p$ 、 $K_0$  情况下，式 (11) 改为

$$F_{s3,SSR} = \frac{2}{B_2} \left\{ \frac{\int_0^D [K_p (\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{p_w - \gamma_{sat} (D+t)} + \frac{\int_D^{D+t} [K_0 (\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{p_w - \gamma_{sat} (D+t)} \right\} \quad (23)$$

在折减侧压力系数  $K_p$ 、 $K_0$  情况下，式 (12) 改为

$$F_{s3,SSR} = \frac{2}{B_2} \left\{ \frac{\int_0^D [K_{p,SSR} (\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{p_w - \gamma_{sat} (D+t)} + \frac{\int_D^{D+t} [K_{0,SSR} (\gamma_{sat} z - \gamma_w z) \tan \varphi' + c'] dz}{p_w - \gamma_{sat} (D+t)} \right\} \quad (24)$$

针对基于弹性板理论方法 (2.3 节)，由表 1 可得剪力系数  $\delta_1 = 0.5$ ，这样式 (16)、(18) 和 (19) 变得与式 (22)、(23) 和 (24) 完全一致，即  $p_{cr4} = p_{cr3}$ ， $F_{s3,SSR} = F_{s4,SSR}$ 。关于这一现象的解释将在下一节中详细阐述。也就是说在平面应变假设下，改进后的考虑土体四周抗剪强度方法 (2.2 节) 和基于弹性板理论方法 (2.3 节) 是一致的，将在下述的算例对比验证中统称为“本文改进后的方法”。

## 3 抗突涌稳定性计算方法

### 3.1 与平面应变强度折减有限元法比较

使用大型商用有限元软件 ABAQUS 对考虑承压水作用的基坑算例进行建模和计算。基于对称原理简化，沿基坑中心线按实际 1/2 尺寸建立二维有限元模型，考虑到模型的尺寸边界效应，模型尺寸取 120 m × 40 m，土体采用 CPE8P 单元，墙体用实体单元模拟，采用 CPE8 单元。基坑开挖深度  $H$  为 10 m，挡墙插入深度  $D$  为 10 m，隔水层厚度  $D+t$  为 15 m，基坑宽度  $B/H$  变化范围为 1~8。算例模拟高承压水头情况， $h_{cw}/h$  变化范围为 1.0~1.7， $h_{cw}$  为承压水头高度， $h$  为坑外潜水位到承压水层顶面高度，承压水压力  $p_w = \gamma_w h_{cw}$ 。有限元模型以及网格划分如图 4 所示。

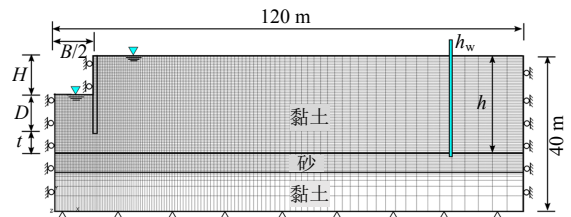


图 4 有限元模型示意图

Fig.4 FEM mesh for the base stability analysis

土体服从理想弹塑性 Mohr-Coulomb 准则，土体参数如表 2 所示；挡墙采用理想弹塑性模型，挡墙达到屈服应力后，挡墙进入理想塑性，将挡墙的抗弯刚度与土体的强度按照相同的折减系数进行折减分析。模型左右边界约束水平位移，底部约束水平和竖直两个方向位移，对基坑开挖深度部分的挡墙施加水平位移约束，假设挡墙粗糙，土体与支护

结构无滑移。在地表和坑底施加零孔压边界条件模拟地下水位在地表和坑底的情况；在除去承压含水层外的模型右边界处设置静水孔压边界，模拟地下水的远场补给；在承压水层顶面设置承压水压力。

表 2 土体物理力学参数取值

Table 2 Physico-mechanical parameters of soil layers

| 土体 | 饱和重度<br>/ (kN · m <sup>-3</sup> ) | 有效黏聚力<br>/ kPa | 有效内摩擦角<br>/ (°) | 泊松比  | 弹性模量<br>/ MPa |
|----|-----------------------------------|----------------|-----------------|------|---------------|
| 黏土 | 20.0                              | 5              | 25              | 0.35 | 10            |
| 砂土 | 18.7                              | 1              | 31              | 0.25 | 30            |

根据平面应变强度折减有限元法 (SSRFEM) 可知, 在地层条件固定情况下, 基坑宽度是影响基坑抗突涌稳定性的关键因素。将 SSRFEM 得到临界承压水压力与压力平衡法结果和改进前的考虑四周土体抗剪强度方法 (杨建民等<sup>[12]</sup>, (式 (20)) 以及本文改进后的方法 (式 (22)) 结果进行对比, 从而得到 4 种方法下归一化临界承压水压力和相对基坑宽度的关系, 如图 5 所示。

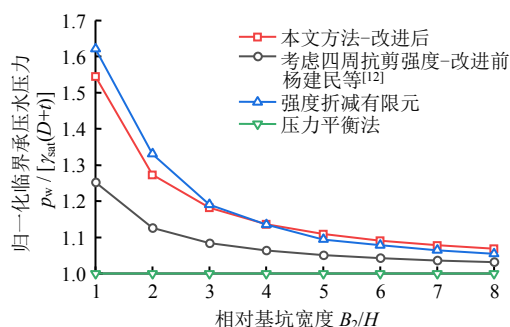


图 5 不同相对宽度下的归一化基坑临界承压水压力  
Fig.5 Normalized critical artesian pressure with different relative excavation widths

从图 5 中可以看到, 随着基坑宽度的增加, SSRFEM 计算得到的临界承压水压力不断减小并趋近于压力平衡法给出的临界承压水压力, 压力平衡法给出结果则为一定值即上覆土重, 且该值过于保守, 不能反映基坑宽度对突涌临界状态的影响。在  $B_2 / H \geq 3$  时, 本文改进后的方法的结果与 SSRFEM 结果十分接近, 而在基坑较窄的情况下 ( $B_2 / H < 3$ ), 该方法给出结果略小于 SSRFEM 结果。总体上, 本文推导的改进后的方法的临界承压水压力可以较好地反映 SSRFEM 分析得出的临界承压水压力与基坑宽度的关系, 该关系也与 Hong 等<sup>[21]</sup>得出的结论接近。改进前的考虑土体四周抗剪强度方法 (杨建民等<sup>[12]</sup>) 得到的基坑宽度与临界承压水压力关系趋

势与 SSRFEM 以及本文改进后的方法一致, 但结果明显偏小, 而本文改进后的方法明显优于改进前的方法和压力平衡法。

下面讨论改进前的考虑土体四周抗剪强度方法 (杨建民等<sup>[12]</sup>) 和本文改进后的方法的计算结果, 取挡墙插入深度  $D / H = 1$ , 相对宽度  $B_2 / H$  分别为 2、3、4、5 的有限元算例结果对比, 得到不同相对宽度下归一化承压水压力和安全系数关系, 如图 6 所示。强度折减有限元结果反映出随承压水压力提高, 基坑破坏模式由隆起破坏逐渐过渡到整体顶升破坏, 破坏模式转变时归一化承压水压力由图 6 中分界线所示, 分界线左侧为隆起破坏, 分界线右侧为承压水压力过高引起的整体顶升突涌破坏。

本文改进后的方法均假设破坏模式为整体顶升突涌破坏, 因此当计算得到的安全系数  $F_{s3,SSR}$  或  $F_{s4,SSR}$  超过按圆弧滑动法确定的抗隆起安全系数  $F_{s,BASE}$  时, 按整体顶升突涌破坏模式转变成隆起破坏模式处理, 即  $F_{s3,SSR} = F_{s,BASE}$  或  $F_{s4,SSR} = F_{s,BASE}$ 。圆弧滑动法按照上海市工程建设规范《基坑工程技术标准(上海)》(DG/TJ08-61—2018)<sup>[9]</sup>给出的有关公式, 为了与 SSRFEM 比较, 本文考虑了最下道支撑以上土体强度的发挥。

从图 6 中可以看出, 本文改进后的方法与 SSRFEM 结果有较好的吻合性, 特别是在靠近与超过临界承压水压力的阶段, 这说明了基于强度折减原理定义安全系数的合理性。当承压水压力小于上覆土重时, SSRFEM 结果变化不大, 说明此时承压水压力对基坑稳定性几乎无影响, 验证了本文改进后的方法在该阶段按隆起破坏模式处理的合理性。同时有限元得到的隆起破坏与整体顶升破坏分界线位置和理论计算分界点较为接近, 进一步说明了本文方法的可靠性。而改进前的考虑土体四周抗剪强度方法 (杨建民等<sup>[12]</sup>) 得到安全系数变化趋势与压力平衡法一致, 与 SSRFEM 结果有明显差距。总体来看, 本文改进后的方法相较于改进前的考虑土体四周抗剪强度方法 (杨建民等<sup>[12]</sup>) 以及压力平衡法能更好地反映随承压水压力升高基坑抗突涌稳定性的变化趋势。折减土体侧压力系数会小幅降低安全系数随承压水压力升高而下降的速率, 但从与 SSRFEM 结果的吻合程度来看, 是否折减侧压力系数影响不大。由于折减侧压力系数需要进行迭代求解, 计算较为繁琐, 因此从工程中使用的便利程度来看, 不折减侧压力系数的计算方法更具有优势。从本算例的计算结果看, 圆弧滑动法与 SSRFEM 的结果还存在明显的差异, 因此圆弧滑动法的改进也是有必要的。

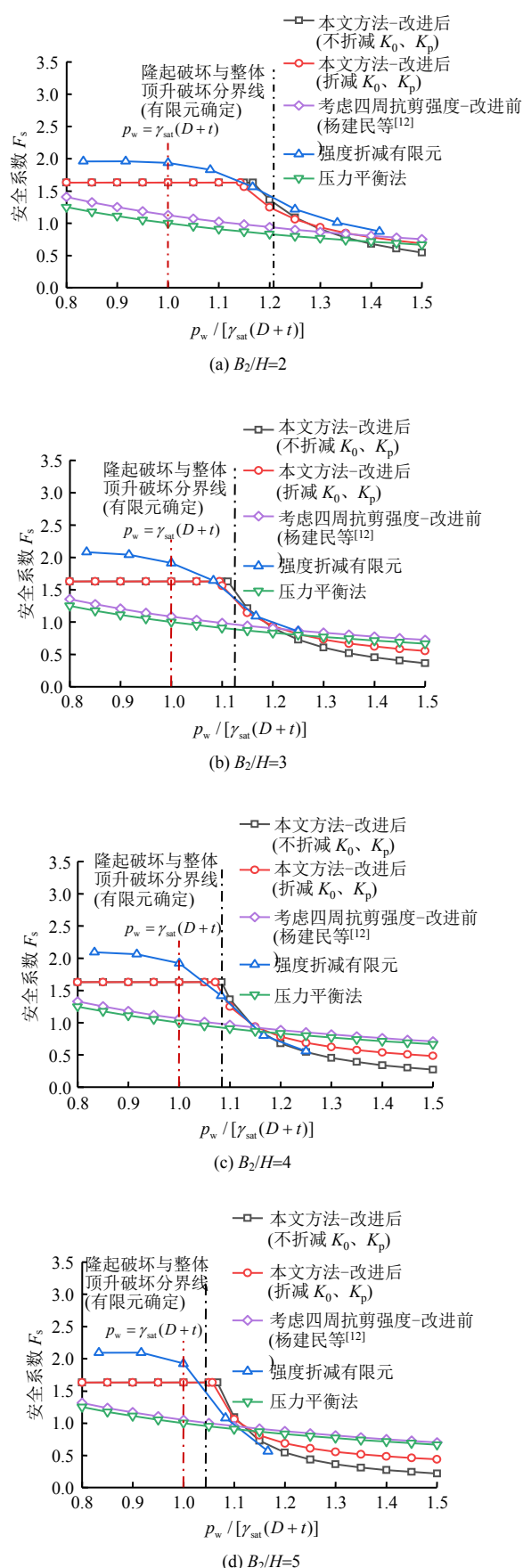


图 6 不同基坑宽度下归一化承压水压力和安全系数的关系

Fig.6 Relationship between the normalized artesian pressure and safety factor with different excavation widths

需要注意的是, 本文有限元模拟中, 挡墙完全粗糙的假设会导致临界承压水压力偏大。同时由图 6 可知,  $B_2/H=5$  情况下本文改进后的方法结果均高于 SSEFEM, 偏于不安全, 结合图 5 得到的基坑临界承压水压力随基坑宽度增加逐渐接近压力平衡法结果的结论, 认为在基坑宽度较大 ( $B_2/H>5$ ) 情况下, 使用压力平衡法评价承压水地层基坑抗突涌稳定性还是可以接受的。

### 3.2 不同长宽比的对比分析

比较改进后的考虑土体四周抗剪强度方法 (式 (11)、(12)) 与基于弹性板理论方法 (式 (18)、(19)) 可以发现, 两种方法中土体抗剪强度的计算是完全一致的, 二者结果的差异源于基坑尺寸影响系数  $\alpha$  不同。考虑四周抗剪强度方法中  $\alpha=2(B_1+B_2)/B_1$ , 而在基于弹性板理论方法中系数  $\alpha=1/\delta_1$ , 而基坑长宽比  $B_1/B_2$  是控制该系数的关键因素。

选取以下算例分析基坑长宽比对两种计算方法结果的影响: 基坑开挖深度  $H=10\text{ m}$ , 宽度  $B_2=30\text{ m}$  ( $B_2/H=3$ ), 挡墙入土深度  $D=10\text{ m}$ , 隔土层厚度为  $15\text{ m}$ ; 土体饱和重度  $\gamma=20\text{ kN/m}^3$ , 有效内摩擦角  $\varphi'=25^\circ$ , 有效黏聚力  $c'=5\text{ kPa}$ , 基坑长宽比  $B_1/B_2=1、3、5$ 。改进后考虑土体四周抗剪强度方法和基于弹性板理论方法得到安全系数随承压水压力变化如图 7 所示。改变上述算例基坑宽度  $B_2$ , 取  $B_2/H=2、3、4$  和  $5$ , 考虑基坑长宽比为  $1$  和  $2$  的情况, 杨建民等<sup>[12]</sup>方法和基于弹性板理论方法以及压力平衡法得到的承压水压力与基坑稳定性安全系数的关系如图 8 所示。

同样地, 当计算得到的安全系数  $F_{s3,SSR}$  或  $F_{s4,SSR}$  超过按圆弧滑动法确定的抗隆起安全系数  $F_{s,BASE}$  时, 取  $F_{s3,SSR}=F_{s,BASE}$  或  $F_{s4,SSR}=F_{s,BASE}$ , 需要注意的是按圆弧滑动法计算得到的抗隆起安全系数  $F_{s,BASE}$  并不受基坑长宽比的影响。

进一步分析基坑尺寸影响系数  $\alpha$  随长宽比的变化趋势, 在基坑长宽比  $B_1/B_2$  从  $1$  变化到  $20$  的情况下, 基坑尺寸影响系数  $\alpha$  的变化如图 9 所示。

综合图 7~9 可知, 基坑长宽比  $B_1/B_2$  对本文改进和提出的两种方法结果有明显影响, 对杨建民等<sup>[12]</sup>方法结果影响较小。随长宽比增大, 基坑尺寸影响系数不断降低, 但其降低速率不断减小。基于弹性板理论方法结果略小于改进的考虑四周抗剪强度方法, 更偏于安全。同时两种方法结果随基坑长宽比增加趋于一致。最终在平面应变 ( $B_1/B_2=\infty$ ) 条件下, 两种方法的基坑尺寸影响系数  $\alpha$  均为  $2.0$ , 得到的稳定性分析结果完全一致。

可以从两种方法破坏模式假设入手解释出现上述现象的原因。基于弹性板理论方法认为破坏首先发生在剪力较大处的基坑长边；而改进后的考虑土体四周抗剪强度方法则假设破坏同时发生在矩形基坑 4 个壁面上。土体抗剪强度在 4 个壁面同时达到极限值所需的承压水压力显然要大于仅在长边方向上达到极限值的情况。因此，对于大部分基坑长宽比，改进后的考虑土体四周抗剪强度方法结果要略大于基于弹性板理论方法。而在平面应变条件下，基于弹性板理论方法在平面应变条件下可把板简化为梁，破坏发生在梁端部。而改进后的考虑土体四周抗剪强度方法的破坏面从原来三维空间的 4 个侧面简化到二维平面上的两条边，恰好对应于梁端部。两种方法具有一致破坏条件，因此得到了相同的稳定性分析结果。

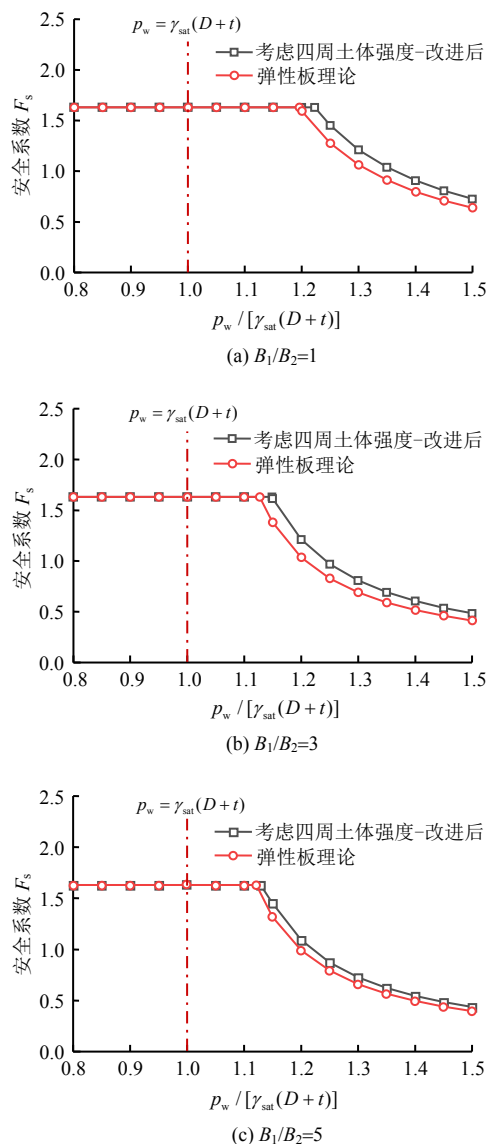


图7 不同基坑长宽比下承压水压力和安全系数的关系  
Fig.7 Relationship between the artesian pressure and safety factor with different excavation length-width ratios

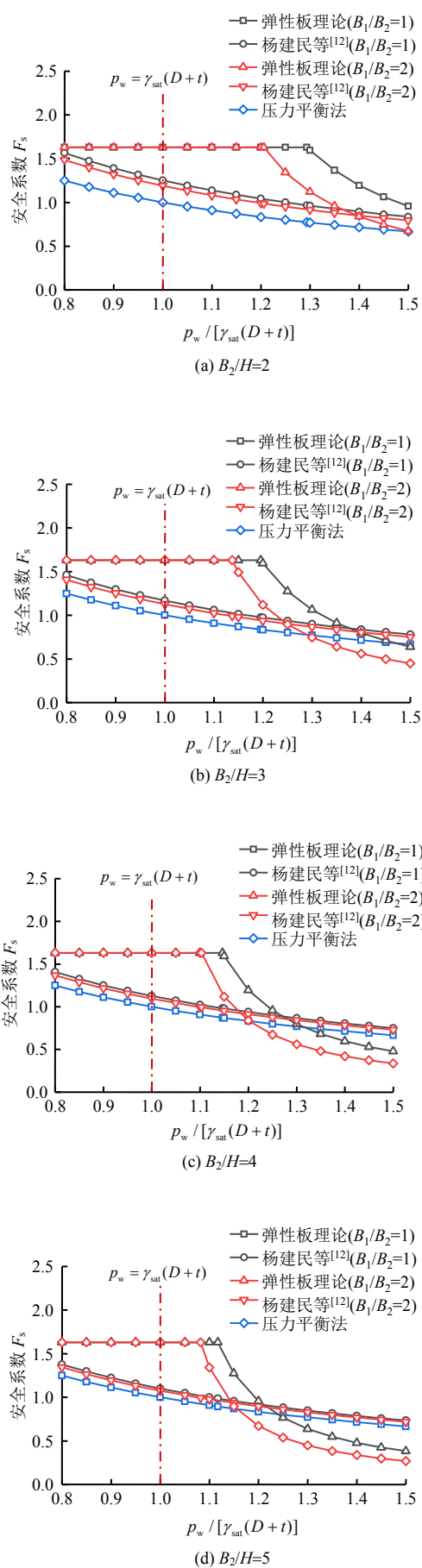


图8 不同宽度下承压水压力与安全系数的关系  
Fig.8 Effect of the artesian pressure on the safety factor with different excavation widths

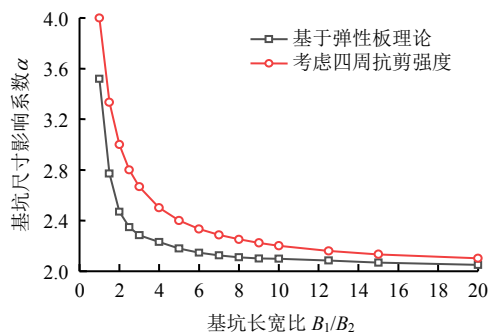


图 9 基坑长宽比与基坑尺寸影响系数的关系

Fig.9 Effect of length-width ratio of excavation on the influence factor of excavation size

## 4 承压水地层基坑案例分析

案例 1 为文献[19]的承压水基坑突涌离心模型试验,该试验基于上海“世纪大都会”2~3 地块基坑项目。根据离心模型试验相似比可知,该基坑宽度为 20 m,长度为 55 m,开挖深度为 23 m,隔水层厚度为 4 m,地下连续墙插入深度为 27 m,基坑断面示意图如图 10 所示,基坑计算参数如表 3 所示。所给参数为直剪固结快剪强度指标,有效强度指标根据《基坑工程技术标准(上海)》<sup>[9]</sup>给出的经验公式  $\varphi' = 0.7(\varphi_{cq} + c_{cq})$  取值,其中,  $c_{cq}$  和  $\varphi_{cq}$  为固结快剪指标。

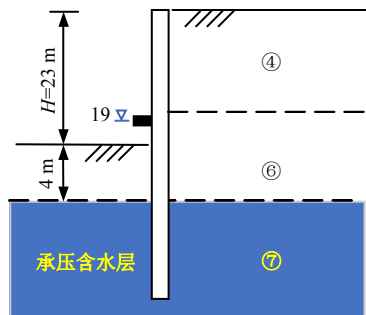


图 10 案例 1 基坑剖面图及土层分布

Fig.10 Soil layers and a typical cross-section of case 1

表 3 案例 1 土层物理力学参数

Table 3 Parameters of soil layers for case 1

| 土层 | 层厚<br>/ m | 重度<br>/ (kN · m <sup>-3</sup> ) | $\varphi_{cq}$<br>/ (°) | $c_{cq}$<br>/ kPa | $\varphi'$<br>/ (°) | $c'$<br>/ kPa |
|----|-----------|---------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|---------------|
| ④  | 18        | 16.8                            | 13.4                    | 14.5              | 19.5                | 0             |
| ⑥  | 9         | 19.7                            | 23.1                    | 20.9              | 30.8                | 0             |

使用本文提出的方法进行计算时,根据 3.1 节分析可知,在同本案例相似的狭长基坑计算中,折减  $K_0$ 、 $K_p$  对结果影响不大,因此为了工程使用的便利,默认采用不折减  $K_0$ 、 $K_p$  方法。为反映实

际工程中墙-土界面强度的折减,对墙前土强度参数进行折减,折减系数按文献[19]取 0.7。根据试验工况,计算时取承压水压力 75、85、95 kPa 3 种情况分别计算,计算所得安全系数见表 4。

表 4 案例 1 抗突涌稳定安全系数

Table 4 Safety factor against inrush for case 1

| 承压水压力<br>/ kPa | 压力<br>平衡法 | 考虑土体四周<br>抗剪强度 (改进后) | 弹性板理论      | 试验结果     |
|----------------|-----------|----------------------|------------|----------|
| 75             | 1.05      | 2.15 (抗隆起)           | 2.15 (抗隆起) | >1 (未突涌) |
| 85             | 0.93      | 1.55                 | 1.32       | >1 (未突涌) |
| 95             | 0.83      | 0.59                 | 0.50       | <1 (突涌)  |

案例 2 为文献[29]的承压水基坑突涌现场原位试验,该基坑直径为 4.2 m,围护结构长度为 6 m,承压水水压力为 40 kPa,基坑断面示意图如图 11 所示,基坑计算参数如表 5 所示。根据试验工况,取开挖深度  $H = 3.2$  m 和 3.6 m 两种情况进行计算,计算时考虑墙前土强度参数的折减,折减系数按文献[29]取 0.7。计算所得安全系数见表 6。

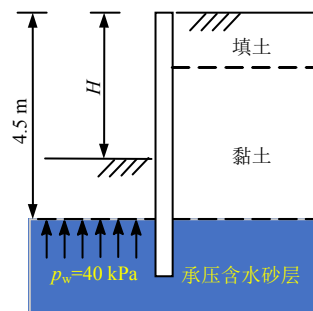


图 11 案例 2 基坑剖面图及土层分布

Fig.11 Soil layers and a typical cross-section of case 2

表 5 案例 2 土层物理力学参数

Table 5 Parameters of soil layers for case 2

| 土层 | 层厚<br>/ m | 重度<br>/ (kN · m <sup>-3</sup> ) | $\varphi'$<br>/ (°) | $c'$<br>/ kPa |
|----|-----------|---------------------------------|---------------------|---------------|
| 黏土 | 3.5       | 18.3                            | 12                  | 25            |
| 砂土 | —         | 18.0                            | 26                  | 0             |

表 6 案例 2 抗突涌稳定安全系数

Table 6 Safety factor against inrush for case 2

| 挖深<br>/ m | 压力<br>平衡法 | 考虑土体四周<br>抗剪强度 (改进后) | 弹性板理论 | 试验结果     |
|-----------|-----------|----------------------|-------|----------|
| 3.2       | 0.59      | 1.59                 | 1.59  | >1 (未突涌) |
| 3.6       | 0.41      | 0.72                 | 0.72  | <1 (突涌)  |

由表 4 和表 6 的结果可知,传统压力平衡法结果明显偏于保守,而本文提出方法对基坑抗突涌稳定的判断与离心试验以及现场试验结果一致,进一步说明了本文提出方法的正确性和适用性。本文提

出方法既可以保证施工安全,又可以节省工时费用,减少长时间大范围降水带来的事故隐患。

## 5 结 论

本文针对承压水地层基坑抗突涌稳定性计算方法开展研究,改进了现有的考虑抗突涌土体四周抗剪强度计算方法,提出了基于弹性板理论的抗突涌计算方法,通过与平面应变条件下的强度折减有限元法对比以及不同长宽比基坑的计算分析,结合工程实例说明了方法的合理性。主要得到以下结论:

(1) 介绍了基于有效应力分析,考虑基坑被动区存在,使用强度折减原理定义安全系数的改进后考虑土体四周抗剪强度抗突涌计算方法以及基于弹性板理论的抗突涌计算方法。

(2) 在平面应变条件下,压力平衡法和考虑土体四周抗剪强度方法(杨建民等<sup>[12]</sup>)结果与 SSRFEM 结果差距较大,而本文提出的方法和 SSRFEM 结果吻合较好,可以更好说明随承压水压力升高基坑抗突涌稳定性安全系数的变化趋势,并得到临界承压水压力随基坑宽度增大不断减小并趋近于压力平衡法给出结果的规律。

(3) 基坑长宽比对改进后的考虑土体四周抗剪强度方法与基于弹性板理论方法结果有较大影响。随长宽比增加,两种方法结果迅速减小,最终在平面应变情况下趋于一致。除平面应变条件外,基于弹性板理论方法结果更偏于安全。

(4) 案例分析表明本文方法可以更合理评价基坑抗突涌稳定性,在保证工程安全前提下提高经济性。

## 参 考 文 献

- [1] 张兴辽, 尚玉忠, 郭文秀. 一起令人深思的基坑突涌事件[J]. 岩土工程技术, 1999, 13(3): 63-65.  
ZHANG Xing-liao, SHANG Yu-zhong, GUO Wen-xiu. A deep thought accident inrush from pit[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 1999, 13(3): 63-65.
- [2] 刘国彬, 王洪新. 上海浅层粉砂地层承压水对基坑的危害及治理[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 790-792.  
LIU Guo-bin, WANG Hong-xin. Influence of the pressure water in shallow silty sand in Shanghai on excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(6): 790-792.
- [3] MILLIGAN V, LO K Y. Observations on some basal failures in sheeted excavations[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1970, 7(2): 136-144.
- [4] MOORE J F A, LONGWORTH T I. Hydraulic uplift of the base of a deep excavation in Oxford clay[J]. **Géotechnique**, 1979, 29(1): 35-46.
- [5] 陈永才, 李镜培, 邸国恩, 等. 某深基坑降水对周边环境影响的分析及处理措施[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊 1): 319-322.  
CHEN Yong-cai, LI Jing-pei, DI Guo-en, et al. Analysis of a deep foundation pit dewatering impacts on the surrounding environment and treatment measures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(Suppl.1): 319-322.
- [6] ROY D, ROBINSON K E. Surface settlements at a soft soil site due to bedrock dewatering[J]. **Engineering Geology**, 2009, 107(3-4): 109-117.
- [7] 兰韡, 王卫东, 常林越. 超大规模深基坑工程现场抽水试验及土层变形规律研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2898-2910.  
LAN Wei, WANG Wei-dong, CHANG Lin-yue. Field pumping test and soil layer deformation analysis of super large scale deep foundation pit engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(10): 2898-2910.
- [8] 中国建筑科学研究院. JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
China Academy of Building Research. JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [9] 上海市城乡建设和交通委员会. DG/TJ08-61—2018 基坑工程技术标准(上海)[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.  
Shanghai Municipal Housing and Urban-Rural Construction Management Committee. DG/TJ08-61—2018 Technical code for excavation engineering[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [10] 梁勇然. 条形基坑的突涌分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 75-79.  
LIANG Yong-ran. Bursting analysis of strip excavations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(1): 75-79.
- [11] 谭松林. 考虑土体强度的建筑基坑突涌问题分析[J]. 地球科学, 2002, 27(2): 209-211, 216.  
TAN Song-lin. Analyses of abrupt gush problem of soil and water based on strength of soil body in building foundation pit[J]. **Earth Science**, 2002, 27(2): 209-211, 216.
- [12] 杨建民, 郑刚. 基坑降水中渗流破坏归类及抗突涌验算公式评价[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 261-264.  
YANG Jian-min, ZHENG Gang. Classification of seepage failures and opinion to formula for check bursting instability in dewatering[J]. **Rock and Soil Mechanics**,

- 2009, 30(1): 261-264.
- [13] 孙永玉, 周顺华, 肖红菊. 承压水基坑抗突涌稳定判定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 399-405.  
SUN Yu-yong, ZHOU Shun-hua, XIAO Hong-ju. Study of stability judgement method of confined water intruding in foundation pit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 399-405.
- [14] 杜贵成. 改进的条形基坑突涌判别式[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1998, 17(5): 507-510.  
DU Gui-cheng. Further discussion of judgment in gushing of strip pit of foundations[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)**, 1998, 17(5): 507-510.
- [15] 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): 204-208.  
MA Shi-cheng, YIN Chang-jun, ZOU Yin-sheng. Analysis and calculation of the pit base plate thickness of bearing resistance water foundation[J]. **Engineering Mechanics**, 2004, 21(2): 204-208.
- [16] 丁春林, 周顺华, 张师德. 基于离心试验的承压水基坑变形稳定影响因素[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(12): 1586-1591.  
DING Chun-lin, ZHOU Shun-hua, ZHANG Shi-de. Centrifuge model experimental study on influence factors of deformation stability for confined water foundation pit[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2005, 33(12): 1586-1591.
- [17] 丁春林, 王东方. 基于塑性破坏的承压水基坑突涌计算模型研究[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 126-131.  
DING Chun-lin, WANG Dong-fang. A study on calculation model for piping in foundation pit with confined underground water based on plastic failure[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24(11): 126-131.
- [18] 丁春林, 孟晓红. 承压水基坑离心模型试验与现场实测分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 22-26.  
DING Chun-lin, MENG Xiao-hong. Centrifuge model test and field measurement analysis for foundation pit with confined water[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2008, 36(1): 22-26.
- [19] 李镜培, 张飞, 梁发云, 等. 承压水基坑突涌机制离心模型试验与数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 837-842.  
LI Jing-pei, ZHANG Fei, LIANG Fa-yun, et al. Centrifugal model tests and numerical simulation on hydraulic heave mechanism in excavation with confined water[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2012, 40(6): 837-842.
- [20] HONG Y, NG C W W. Base stability of multi-propped excavations in soft clay subjected to hydraulic uplift[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2013, 50(2): 153-164.
- [21] HONG Y, NG C W W, WANG L. Initiation and failure mechanism of base instability of excavations in clay triggered by hydraulic uplift[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(5): 599-608.
- [22] 胡勇, 李云安, 李波, 等. 承压水位变动下深大基坑空间效应离心试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 1999-2007.  
HU Yong, LI Yun-an, LI Bo, et al. Centrifugal model tests and numerical simulation of three-dimensional space effect of deep and large foundation pit under the confined water level fluctuation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(6): 1999-2007.
- [23] CHEN F, MIAO G, LAI F. Base instability triggered by hydraulic uplift of pit-in-pit braced excavations in soft clay overlying a confined aquifer[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2020, 24(6): 1717-1730.
- [24] 周健, 张刚, 胡展飞. 软土基坑突水判断方法模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2115-2120.  
ZHOU Jian, ZHANG Gang, HU Zhan-fei. Model test research on judgment method of water gushing in soft soil foundation pit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(10): 2115-2120.
- [25] 郑刚, 杨建民. 抗突涌稳定验算公式分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 123-127.  
ZHENG Gang, YANG Jian-min. Analysis of the formula for checking the heaving stability of excavations[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(2): 123-127.
- [26] MICHALOWSKI R L. Slope stability analysis: a kinematical approach[J]. **Geotechnique**, 1995, 45(2): 283-293.
- [27] 黄茂松, 余生兵. 基坑抗隆起稳定的块体集上限分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1440-1447.  
HUANG Mao-song, YU Sheng-bing. Upper bound analysis of basal stability in undrained clay based on block set mechanism[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(8): 1440-1447.
- [28] WANG H, HUANG M. Upper bound stability analysis of slurry-supported trenches in layered soils[J]. **Computers and Geotechnics**, 2020, 122: 103554.
- [29] ZHAO G, YANG Y, MENG S. Failure of circular shaft subjected to hydraulic uplift: field and numerical investigation[J]. **Journal of Central South University**, 2020, 27(1): 256-266.