

条形基坑的突涌分析

梁勇然

(常州市规划设计院, 213003)

1 问题的提出

承压水作用下的基坑突涌分析, 按照传统的压力平衡方法, 通常根据坑底隔水层的突涌临界厚度 h_{cr} 来验算。其表达式为

$$h_{cr} = \gamma_w H_w / \gamma \quad (1)$$

式中 γ_w 为水的容重; H_w 为承压水水头差; γ 为坑底隔水层土的容重。

如图 1 (a) 所示, 当坑底隔水层的实际厚度 $h < h_{cr}$ 时, 即隔水层土重小于承压水的浮力, 基坑可能发生突涌^[1]。因此, 基坑开挖通常要求满足 $h \geq h_{cr}$ 的平衡条件。

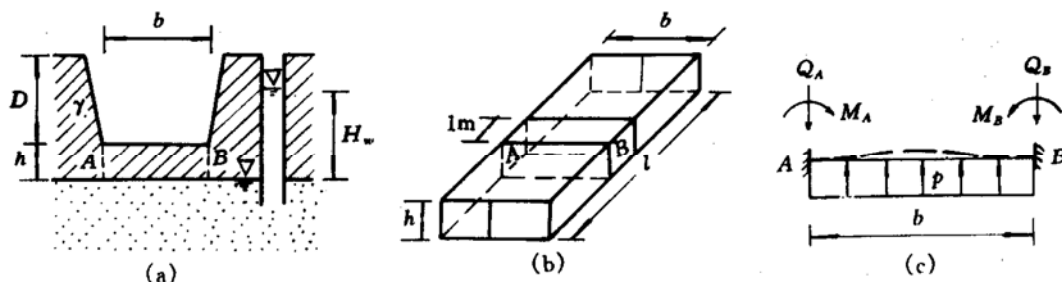


图 1 基坑剖面、底板单位板宽梁及其受力图

表 1 所列为基坑的实际资料。在 $h/h_{cr} = 0.54 \sim 0.74$ 的非平衡条件下, 却未出现坑底开裂、冒砂等突涌迹象。仅④号基坑由于挖深过大 ($h/h_{cr} = 0.38$), 加上施工者用钢钎插探, 沿坑边局部出现了粉土冒喷。这些工程都已于 1990 年前竣工, 使用正常。

表 1 实挖基坑突涌的传统分析与现场实际对比表

编号	工程名称	D (m)	b (m)	l (m)	底板土类	γ (KN/m ³)	h (m)	H_w (m)	h_{cr} (m)	突涌 判别	现场 实际
①	RLH 大楼	6.0	14.0	72.8	粉质粘土	19.0	1.7	4.5	2.37	突涌	无突涌
②	新堂水泵房	5.0	10.0	15.0	粉质粘土	19.5	1.1	4.0	2.05	突涌	无突涌
③	北环补住宅	3.0	3.2	12.0	粉质粘土	18.8	1.1	3.5	1.76	突涌	无突涌
④	(同③)	3.4	3.6	12.0	粉质粘土	19.0	0.7	3.5	1.74	突涌	突涌
⑤	蜜饯厂车间	6.1	4.6	13.0	粘土	19.4	3.3	8.7	4.48	突涌	无突涌

可见,按式(1)的判断结果,与现场情况相差较大,明显偏于保守,也难以反映基坑抗突涌的安全系数。究其原因,主要是忽略了坑底隔水土强度的抗突涌作用,更没有考虑基坑平面尺寸对突涌的影响。因此,本文针对常见的条形基坑,从材料力学和工程实用的角度,探讨基坑突涌的机理,建立更接近实际的突涌判别式。

2 基坑突涌的机理与突涌分析的简化假设

基坑突涌就是承压地下水顶裂或冲破坑底隔水层而形成冒喷地下水及砂性土的现象。无疑,在 $h \geq h_{cr}$ 的平衡条件下,承压水的浮力不会使坑底隔水层产生拱起或剪切破坏。当开挖至 $h < h_{cr}$ 后,在向上的净压力 $p = \gamma_w H_w - \gamma h$ 的作用下,坑底隔水层便产生了剪力、弯矩及挠曲拱起^[2]。笔者认为,土体可视作具有抗剪强度和抗弯刚度的构件,在一定的容许范围内,土体处于弹性阶段,变形微小,即当基坑回填加荷后,随着净压力 p 的减小,坑底隔水层将得到弹性恢复,直至平衡,地基土仍保持着原有的工程特性。

但是,当挖深超过一定限度后,由于内力剧增,截面剪力大于土体抗剪力(受剪截面面积 $\times$ 抗剪强度),承压水沿着剪切面冲破坑底隔水层,出现突涌现象。如果坑底隔水层厚度较小且为粘土,可能先呈现拱起过大的塑性拉裂(暂称为视突涌迹象),从而减小了坑底隔水层有效的厚度、刚度和抗剪力,最后导致剪力大于抗剪力而突涌。

突涌机理表明,剪力大于土体抗剪力,或者挠度超过土体刚度条件,这是底板突涌的直接原因。为了便于分析,根据基坑底板的土性和受力特征,作以下简化假设:

(1) 基坑底板是匀质、连续的可变形隔水土层。

(2) 如图1所示,条形基坑底板在 $p = \gamma_w H_w - \gamma h > 0$ 的均布净压力作用下产生拱起。按单向板的简化分析方法^[3],沿底板长度 l 方向截取 $b_0 = 1\text{m}$ 的单位板宽,并假定底板水平且厚度 h 相等。由此构成的梁 AB 即为矩形等截面梁,抗弯刚度 $EI = Eb_0 h^3/12$,其中 E 为土(梁)的弹性模量,可由三轴剪切试验或普通压缩试验测得^[1]。

(3) 对于一般的基坑,坑周土的位移甚为微小,底板延伸于坑周部分被坑周土所嵌固,其转动和移动均受限制,故可将底板近似地简化为两端固定的受力梁 AB 。

3 突涌判别式及刚度校核式的建立

根据简化假设和材料力学理论^[2],导出梁 AB (图2)的剪力 Q_x ,弯矩 M_x ,挠度 f_x 及相应的最大剪力 $Q_{\max}$,最大挠度 $f_{\max}$ 分别为

$$Q_x = \frac{pb}{2} - px \quad (2)$$

$$M_x = -\frac{pb^2}{12} + \frac{px(b-x)}{2} \quad (3)$$

$$f_x = \frac{px^2(x-b)^2}{24EI} \quad (4)$$

$$Q_{\max} = Q_0 = |Q_b| = \frac{pb}{2} \quad (5)$$

$$f_{\max} = f_{b/2} = \frac{pb^4}{384EI} \quad (6)$$

很明显, 最大剪力发生于基坑底板边缘截面 A, B 处, 而土体竖向截面抗剪面积最小, 所以坑底边缘是最易发生突涌的部位。由此可建立剪力与抗剪力之间的极限平衡方程

$$Q_{\max} = h_{us} b_0 c_{uu} \quad (7)$$

式中 h_{us} 为考虑土体抗剪强度时的突涌临界厚度, c_{uu} 为底板土的不固结不排水剪粘聚力。将 $Q_{\max} = pb/2$ 和 $p = b_0 (\gamma_w H_w - \gamma h_{us})$ 代入式 (7), 得

$$h_{us} = \frac{H_w}{\frac{\gamma}{\gamma_w} + \frac{2c_{uu}}{\gamma_w b}} \quad (8)$$

式 (8) 就是基坑突涌验算式。当 $h < h_{us}$ 时, 基坑底板由于强度不足而发生竖向剪切破坏, 形成突涌; 当 $h \geq h_{us}$ 时, 无突涌。 h 与 b 、 c_{uu} 的关系如图 3 (a), 3 (b) 所示。

工程应用中的抗涌安全系数 K_s 可设定为 $K_s = h_{us} b_0 c_{uu} / Q_{\max}$, 故有

$$h_{ks} = \frac{H_w}{\frac{\gamma}{\gamma_w} + \frac{1}{K_s} \frac{2c_{uu}}{\gamma_w b}} \quad (9)$$

h_{ks} 可称为基坑底板容许最小厚度。如果工程对地基的要求较高, 而且基坑底板的宽度较大或者刚度较小时, 为了确保底

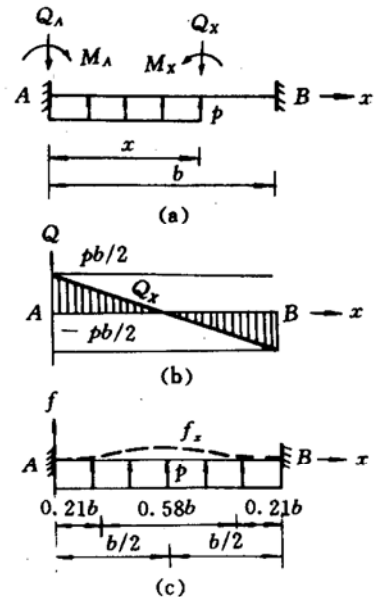


图 2 Q_x , M_x 和 f_x 特征

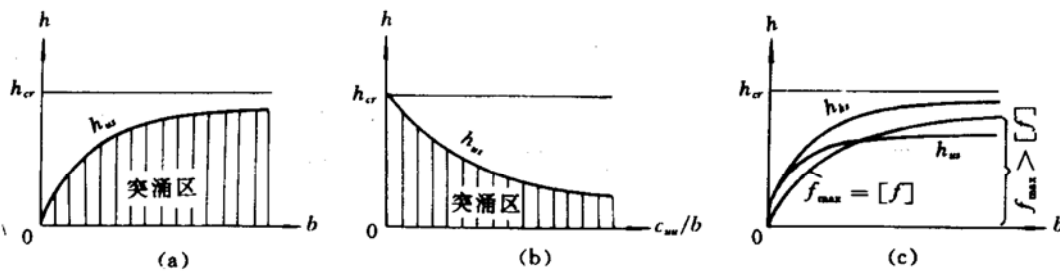


图 3 判别突涌的 h - b 及 h - c_{uu} 关系

板在回填加荷后得到弹性恢复, 不致于产生塑性拉裂, 往往还需进行底板的刚度校核, 即控制最大挠曲 (拱起) 在容许挠度 $[f]$ 之内, $f_{\max} \leq [f]$ 。通常取 $[f] = b/m_s$, 数值 m_s 可由有关规范给定或者根据经验选用。若将 $EI = Eb_0 h^3/12$ 和 $p = b_0 (\gamma_w H_w - \gamma h)$ 代入式 (6), 即得刚度校核式

$$h \geq \frac{H_w}{\frac{\gamma}{\gamma_w} + \frac{32}{m_s} \left(\frac{h}{b}\right)^2 \frac{E}{\gamma_w b}} \quad (10)$$

式 (10) 是隐函数不等式, 可用试算法求解 h 。对比式 (8), 若设 $\alpha = (4/\sqrt{m_s}) \sqrt{E/c_{uu}}$, 不难发现, 当 $b/h \leq \alpha$ 时, 突涌由强度控制, 否则由刚度控制。

另外, 鉴于长宽比 $l/b \geq 2$ 的矩形板, 宽度 b 方向分担了 94% 以上的荷载^[3], 可按条形板考虑, 所以, 底板 $l/b \geq 2$ 的矩形基坑也可视为条形基坑。

4 实例分析与应用探讨

【例 1】对于表 1 所列基坑, 用式 (6), 式 (8), 式 (9) 并按条形基坑近似验算, 结果与实际基本相符 (表 2)。其中②号基坑 $l/b=1.5$, 可能是当做条形基坑来验算而偏安全的缘故, 未突涌情况下反算 K_s 只有 0.77, 但估计 $f_{\max}$ 已偏大 (设 $[f]=b/320$)。

表 2 考虑基坑底板宽度、土体强度及刚度的突涌实例分析

基坑编号	b (m)	h (m)	c_{uu} (kPa)	E (MPa)	h_{us} (m)	K_s	$f_{\max}$ (m)	$[f]$ (m)	剪破突涌 判 别	刚度 校核
①	14.0	1.7	76	76	1.51	1.45	0.040	0.044	无突涌	满足
②	10.0	1.1	65	79	1.23	0.77	0.055	0.031	突涌	不满足
③	3.2	1.1	42	48	0.78	2.02	0.001	0.010	无突涌	满足
④	3.6	0.7	48	60	0.77	0.86	0.005	0.011	突涌	满足
⑤	4.6	3.3	70	80	1.75	4.37	0	0.014	无突涌	满足

注: 参考文献 [5] 及本地区土压缩模量 E_s , 取 $E \approx 8E_s$ 。

【例 2】如图 4 所示, 常州中山苑运河挡土墙基坑, $l=52\text{m}$, $b=2.0\text{m}$, $D=6.2\text{m}$, $h=0.8\sim 1.4\text{m}$, 是典型的条形基坑。据勘测资料, $H_w=5.0\text{m}$, 基坑底板土为 $I_p=13.2$ 的可塑粉质粘土, $\gamma=19.9\text{kN/m}^3$, $c_{uu}=67\text{kPa}$ 。若按式 (1) 验算, $h_{cr}=2.5\text{m}$ 或者 $\gamma h/\gamma_w=1.6\sim 2.8\text{m}$, 即要降低 $2.2\sim 3.4\text{m}$ 的水头才能挖到坑底。实际上, 我们试用了式 (9) 来验算, 取 $K_s=1.3$, 得 $h_{ks}=0.7\text{m}<h$, 判定无突涌, 可在不降低水头的情况下挖至基底 (该工程已顺利竣工)。另外, 类似的椿桂坊运河挡墙基坑, 也已按式 (9) 评价顺利挖至基底。

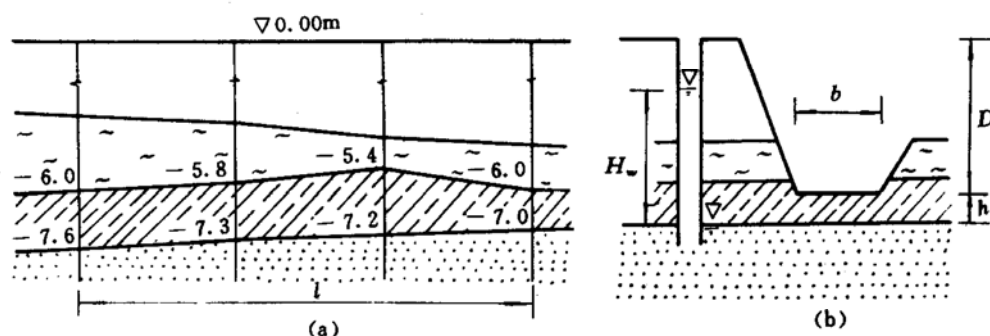


图 4 例 2 纵向地质剖面与横向基坑剖面

试算发现, 在 $b \leq 25\text{m}$ 的通常情况下, 若取 $K_s=1.25+0.03b$, 并且按式 (9) 求得 h_{ks} 。当满足 $h \geq h_{ks}$ 时, 一般都符合式 (10) 的条件, 基本上可忽略刚度校核, 如图 3 (c) 所示。基坑底板的力学分析还表明, 坑底边缘的截面剪力及负弯矩最大, 跨中则挠度最大, 均是预防突涌的重要地带。而且, 坑底宽度 b 对拱起与剪破的影响显著, b 愈小愈利于坑底稳定。这些认识对于选择施工措施具有一定实用意义。例如, 跨中和坑边宜采用草袋堆压, 而开挖排水边沟则是削弱坑边截面的有效抗剪力及刚度。如能将基坑分片开挖回填, 尽量减小每个分基坑的底板宽度, 对于抵抗突涌和减小拱起, 都是十分有益的。

由于基坑底板的应力状态比较复杂,难以吻合纯弯曲的假定或者 $h > b$ 的精度条件,目前也缺少相应的岩土容许应力测度。因此,我们避开了复杂的应力强度条件,从简易实用的角度,建立了截面剪力与抗剪力之间的强度平衡方程。实例验算结果证明,底板截面剪力-抗剪力的平衡厚度,与实际剪破突涌的临界厚度比较接近。同时,根据挠度计算与实际坑底拱起的大概比较,也表明固定梁的简化假设有一定的近似程度。

5 结 语

(1) 基于岩土工程的实践与应用,本文从突涌分析的现状与突涌机理出发,借助材料力学理论,建立了条形基坑(包括 $l/b \geq 2$ 的矩形基坑)的突涌判别式。实例验算结果初步表明,考虑基坑底板宽度、土体强度及刚度的突涌分析与实际情况基本相符。

(2) 基坑突涌不仅与压力平衡有关,而且与底板宽度、土体抗剪强度及弹性模量密切相关。工程应用中可参考式(9)进行突涌分析,该式简易实用,物理机制也较为明确。

(3) 基坑底板的实际受力及变形通常比较复杂,本文将土体视为承受剪力和弯矩的梁板,是侧重于工程实用的近似简化和初步尝试,所引证的实例也局限于常州市区。因此,突涌判别式及其经验参数(如 K_s 和 m_s),尚有待进一步的理论完善与实践检验。

承蒙我院孙洪寿高级工程师指导和帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 《工程地质手册》编委会,工程地质手册(第三版).北京:中国建筑工业出版社,1992. 948, 208.
 - 2 罗 亚.材料力学(第一版).北京:高等教育出版社,1985.
 - 3 丁大钧.钢筋混凝土结构学(第一版).上海科学技术出版社,1985. 97~120.
 - 4 巴尔坎.关于土的弹性指标与强度指标之间关系.孙洪寿译.冶金勘察技术情报,1975(4): 28~30.
- *****

《水运工程》1996 年征订启事

《水运工程》月刊是经国家新闻出版署批准,由交通部领导的面向全国水运工程行业公开发行的技术刊物。报道港口、航道、修造船厂建设等勘察、规划、设计、科研、施工、水运经济及管理方面的新技术、新方法和技术改造方面的成果以及主要经验教训;贯彻“双百”和“科学技术为经济建设服务”的方针,开展学术和信息交流;介绍国内外先进技术及水平动向。

本刊读者对象系从事水运工程的广大科技人员、技术工人、领导干部及有关的院校师生。

本刊每期 60 页,定价 4 元,全年 48 元。欢迎单位及个人踊跃订阅。望订阅者务必认真填写订阅单及邮政标签。汇款时请写明编辑部地址并注明《水运工程》订阅款。订款请由银行汇至中交水运规划设计院;邮汇可直接寄:北京安定门内国子监 28 号《水运工程》编辑部,邮政编码 100007。

本编辑部有 1995 年合订本及少量的 1994 年、1993 年合订本(每本 65 元)可供订阅。