

# 软土基坑突水判断方法模型试验研究

周 健, 张 刚, 胡展飞

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 结合深基坑的突水问题进行室内模型试验研究, 通过对比试验前、后的参数, 发现突水前后基底土体物理力学性质的变化规律。基坑突水破坏使得基底软土层的黏聚力和压缩模量显著下降, 而对内摩擦角的影响较小。根据试验结果, 当承压含水层水头压力值与上覆软土层单位面积质量相等时, 土体并不破坏。因此认为传统判断基坑突水的“压力平衡法”具有一定缺陷。在对试验结果进行理论分析的基础上, 根据试验的结果考虑基底土层抗剪强度的黏聚力分量, 量化地提出软土地基基坑突水的判断方法。研究表明, 与工程实践进行对比, 对于软土地基的基坑突水问题, 传统的判断方法过于保守。

**关键词:** 土力学; 基坑突水; 模拟试验; 临界水头; 突水判断方法

**中图分类号:** TU 41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)10 - 2115 - 06

## MODEL TEST RESEARCH ON JUDGMENT METHOD OF WATER GUSHING IN PIT

ZHOU Jian, ZHANG Gang, HU Zhanfei

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Combined with water gushing in pit, the laboratory model test research is carried out. By comparison between the parameters before and after the test, the development regulation of physico-mechanical parameters of the substratum of pit is found. The cohesion and modulus of compression of the substratum are deeply reduced after water gushing in pit, but the internal friction angle of the substratum doesn't change. According to the results of the test, when the head pressure of confined aquifer is equal to the earth pressure of the super stratum, the gushing in pit doesn't occur. So this paper points out the disadvantages of pressure balance method, traditional judgment method of water gushing in pit. Based on the theoretical analysis of the test results, considering the cohesion force component of the shear strength, the judgment method of gushing in pit is quantified for the first time and is compared with engineering practice. The results show that the traditional judgment method of water gushing in pit is overestimated when it is used to design the pit in soft soil.

**Key words:** soil mechanics; water gushing in pit; model test; critical head; judgment method of water gushing

## 1 引 言

随着对基坑工程变形和稳定性的要求越来越

高, 国内外学者<sup>[1~6]</sup>对基坑工程的研究越来越深入。刘国彬等<sup>[1]</sup>分析了基坑不同开挖阶段的现场试验测试结果, 对土体力学特性在不同开挖阶段的变化进行了研究, 得出了开挖卸载下土体的强度变化规律

**收稿日期:** 2005 - 09 - 20; **修回日期:** 2005 - 11 - 11

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50379037); 上海市重点学科建设资助项目

**作者简介:** 周 健(1957 -), 男, 博士, 1982年毕业于华东水利学院农田水利工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事环境岩土工程、地基液化与振陷和土体细观力学模拟等方面的教学与研究工作。E-mail: tjuzj@163.com

以及对主、被动区土压力的影响；李景林等<sup>[2]</sup>通过离心模型试验模拟基坑开挖的应力路径变化过程；姚秦<sup>[3]</sup>针对弱透水性的土及中等透水性的土的土压力计算提出了混合算法；徐少曼等<sup>[4]</sup>对多土层土工模型的深基坑开挖试验进行了研究，认为基坑开挖模拟试验可作为对基坑开挖问题进行研究的一种经济合理的有效方法；胡展飞<sup>[7]</sup>研究了突水前后基底土体物理力学性质的变化规律。

综上所述，已开展的模型试验研究针对基坑开挖的过程进行了模拟，并进行理论和数值分析，研究的重点在于探讨基坑开挖过程中应力路径的变化或渗流的存在影响土体强度参数，进而对基坑变形和稳定性的影响。然而对于基坑突水问题的研究较为少见，目前基坑设计中也只是简单地考虑当承压含水层水头压力值与上覆软土层单位面积质量相等时，作为基坑突水的判断标准。因此，在实际的施工过程中，当地下水位接近这一标准的水位时，施工单位大多将水位降到该设计标准的要求以确保安全。但是对于软土地基的基坑，在这一标准下并不一定会发生基坑的突水。此外，地下水位降低后还会引发一定的环境问题。

本文通过室内的模型试验模拟了软土地区基坑突水破坏的问题。在对试验结果进行理论分析的基础上，考虑基底土层抗剪强度的黏聚力分量对抵抗基坑突水的贡献，量化地提出了基坑突水的判断方法，与工程实践进行了对比。目的是指出传统方法判断软土地基基坑突水的缺陷，以寻求一种更合理的基坑突水判别方法。

## 2 基坑突水问题的研究现状

当基坑底部下伏承压含水层时，必须分析承压水头是否会冲毁坑底软土层，传统的方法通常是采用压力平衡原理建立基坑突水的判断公式<sup>[8]</sup>，即

$$\gamma M = \gamma_w H_w \quad (1)$$

式中： $\gamma$ ， $\gamma_w$ 分别为基坑底部黏性土层和地下水的重度； $H_w$ 为相对于承压含水层顶板以上的承压水头高度； $M$ 为基坑底部以下黏性土层的厚度。

因此，基坑底部软土层的厚度必须满足：

$$M > \frac{\gamma_w}{\gamma} H_w K \quad (2)$$

式中： $K$ 为安全系数，一般为1.1~1.5，主要视基坑底部软土层的物理力学性质及坑底面积大小而

定。如果当 $M \leq KH_w \gamma_w / \gamma$ 时，有可能发生基坑突水，其主要现象为：

(1) 基底顶裂，出现网状或树杈状裂缝，地下水从裂缝中涌出，并带出下部的土颗粒；

(2) 基坑底发生流砂现象，从而造成边坡失稳和整个地基悬浮流动；

(3) 基底发生类似于“沸腾”的喷水现象，基坑积水，地基土扰动。

## 3 基坑突水模拟试验

### 3.1 试验模型和试验过程

本试验采用自制的模型箱，在室内模拟深基坑底部软土地层在承压含水层水头压力作用下变形及突水破坏。

模拟箱体由10 mm厚的钢板焊接而成，尺寸为1 200 mm×1 200 mm×1 500 mm(长×宽×高)。底部放置粗砂，厚度为35 cm，用于模拟承压含水层；粗砂层上覆厚度为100 cm的灰色淤泥质黏土，模拟深基坑底部的软土地层。

软土层顶部设置位移量测仪器测量试验全过程的位移变化。粗砂含水层顶、底部分别安装压力传感器，用于量测粗砂含水层的水头压力，即作用于上覆软土层底面上的承压水头压力。

在试验过程中，通过调节阀门和压力转换室中的水位保持每级承压水头压力为一恒定值。稳定后在增加下一级荷载。各级承压水头压力值为13, 16, 18, 19, 20, 22, 24, 27 kPa(破坏)。

模拟基坑突水试验前、后，在模拟箱内取土样做土工试验，取样深度为土层表面以下20 cm。同时进行静力触探试验。土工试验和静力触探成果见表1。

试验模型、量测装置的布置和试验详细过程请参考胡展飞等<sup>[9]</sup>的相关研究。

### 3.2 土层破坏特征

土层破坏时的主要特征为：先出现密集小气泡，约10 min后逐渐变大并伴随浑浊泥水冒出土面，到15 min时，就喷出浓浓泥浆水，最大喷出高度达5 cm，见图1。

## 4 试验结果分析

### 4.1 基坑突水前、后土体性质的变化

表 1 土层物理力学性质指标  
Table 1 Physico-mechanical properties of soil layers

土层名称	条件	含水量 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 $e$	液限 $w_L$	塑限 $w_P$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	渗透系数		直剪参数		压缩系数 $a_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{1-2}/\text{MPa}$
									$K_v$ $/ (10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$K_h$ $/ (10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )		
淤泥质黏土	试验前	52.0	1.71	1.59	45.7	24.0	21.6	1.51	1.18	2.7	13	12	1.33	2.01
	试验后	52.5	1.71	1.62	45.5	24.2	21.8	1.5	1.19	2.6	7	11	1.18	1.09



图 1 基坑突水破坏(喷出高度达 5 mm 的浓浓泥浆水)  
Fig.1 Failure of water gushing in pit(dense mud fluid with a gushing height of 5 mm)

从破坏前、后软土层的实测物理力学指标分析,破坏前、后软土层的物理性质基本保持不变,但是,其力学性质变化较大,主要表现为:(1) 深度 0.5 m 以上范围内软土层的静力触探比贯入阻力  $P_s$  值平均下降了 42 kPa,亦即下降了 44.21%。(2) 抗剪强度参数——黏聚力( $c$ )减小了 6 kPa,亦即减小了 46.15%;内摩擦角( $\varphi$ )减小了  $1^\circ$ ,亦即减小了 7.69%。(3) 压缩系数( $a_{1-2}$ )下降了  $0.15 \text{ MPa}^{-1}$ ,亦即下降了 11.28%,压缩模量( $E_{1-2}$ )下降了 0.92 MPa,亦即下降了 45.77%。由上述信息可知,基坑突水破坏使得软土层的黏聚力和压缩模量显著下降,其下降幅度分别达 46.15%, 45.77%。

由静力触探成果的前、后对比(见表 2)可知,基坑突水前、后受影响土体的范围主要为基坑表面一定深度范围内的土体。本试验中为土表面以下 0.5 m(占淤泥层总厚度的 50%)以内的土体。

#### 4.2 基坑突水的破坏压力

本试验中土体在 27 kPa 时发生破坏。室内模型试验不可避免的受到边界条件的影响,本试验的装

表 2 静力触探试验成果  
Table 2 Results of cone penetration test

深度/m	试验前 $P_{s1}/\text{kPa}$	试验后 $P_{s2}/\text{kPa}$	$\Delta P_s/\text{kPa}$
0.1	85	40	45
0.2	90	45	45
0.3	95	55	40
0.4	100	60	40
0.5	105	65	40
0.6	110	85	25
0.7	115	105	10
0.8	190	180	10
0.9	290	285	5
1.0	1 910	1 905	5
1.1	3 035	3 030	5

注:  $\Delta P_s = P_{s2} - P_{s1}$ 。

置也不例外。根据试验过程中土体表面变形的曲线分析<sup>[9]</sup>,在破坏的时候,边界处的变形要大于中间的变形,也就是从边界处比较薄弱,所以认为在 27 kPa 时发生破坏是偏于安全的。按照传统的基坑突水计算的平衡方法判断基坑突水问题,即当承压水水头压力大于或等于上覆软土地层的单位面积质量时(式(1))认为基坑突水破坏。本试验似应发生这样的情况:  $H_w = \gamma M / \gamma_w = 17.1 \times 1 / 10 = 1.71(\text{m})$  水头值,即当承压含水层水头压力值(如本试验的大小为 18 kPa)与上覆软土层单位面积质量相等时,土体发生破坏。而实际上土体并没有破坏的迹象。本试验的突水压力与计算的突水压力相差近 7~10 kPa,比计算值大 41%~58%。显然简单地采用“压力平衡法”判断软土地基基坑突水问题很不合理。将承压含水层的水头压力  $p$  与上覆软土层单位面积自重压力  $\sigma_z$  之比列于表 3 中,就看得更清楚了。

表 3 承压含水层水头压力  $p$  与上覆软土层单位面积自重压力  $\sigma_z$  的比值  $\lambda$

Table 3 Ratio( $\lambda$ ) between head pressure of confined aquifer( $p$ ) and self-weight stress of upper soft soil layer( $\sigma_z$ )

承压含水层水头压力 $p/\text{kPa}$	上覆软土层单位面积上的自重压力 $\sigma_z/\text{kPa}$	$\lambda = p/\sigma_z$	备注
13		0.76	
16		0.94	
18		1.05	
19		1.11	
20	17.1	1.17	
22		1.29	
24		1.40	未破坏, 但变形随时间显著增大
27		1.58	破坏

## 5 基坑突水判断方法探索

### 5.1 临界水头 $H_{wcr}$

“压力平衡法”的明显缺陷是忽略了软土层所具有的强度。要弄清基坑突水时如何考虑软土的强度因素, 首先必须回答这样一个问题, 即软土强度在抵抗承压含水层的水头底鼓破坏时, 能起多大的作用。笔者认为, 软土具有“土骨架-水”体系中双电层结合水膜。沈珠江<sup>[10]</sup>也论述过: “黏土颗粒周围包含有黏滞性较明显的水膜”。F. H. Hermann<sup>[11]</sup>指出, 任何颗粒排列发生的变化都和双电层有关。由此可知, 在研究基底突水问题时, 如果要考虑软土的强度因素, 那么应该充分注意双电层结合水膜。双电层结合水膜对软土黏聚力的影响作用比对内摩擦角的明显<sup>[12]</sup>。从本试验前、后的土体力学性质变化也可以看出, 内摩擦角在破坏前后的变化较小, 而黏聚力的变化较大。另一方面, 黏聚力作为土体的抗剪强度是“直接”贡献的, 而内摩擦角对强度的贡献是通过法向压力体现出来的, 而且, 深基坑开挖是个垂直御荷过程, 开挖后, 基底软土层作为承压含水层的隔水顶板, 其自重压力在竖直方向从顶板面(基坑底面)到顶板底是从零开始逐渐变大到  $\gamma M$ , 所以在基坑突水问题上, 可以仅仅考虑黏聚力的贡献作用。为此, 笔者考虑将软土层抗剪强度的一部分黏聚力分量作为抵抗基坑突水的有效约束

力, 即

$$\gamma M + \xi c \geq \gamma_w H_w \tag{3}$$

式中:  $\xi$  为待定系数。

从上面的模拟试验研究成果可以清楚地看出: 在突水破坏前的一级承压水水头压力  $p = 24 \text{ kPa}$  作用下上覆软土层的变形量随时间显著增大。所以, 把承压水水头压力  $p = 22 \text{ kPa}$  确定为上覆软土层将要开始发生突水破坏的临界水头压力, 这是合理的。

令  $\gamma M = 17.1 \text{ kPa}$ ,  $\gamma_w H_w = 22 \text{ kPa}$ ,  $c = 13 \text{ kPa}$ , 代入到式(3), 有  $\xi = 0.377$ 。

如果取  $\xi = 0.4$ , 那么, 式(3)就可以写为

$$H_w \leq \frac{5\gamma M + 2c}{5\gamma_w} \tag{4}$$

通过上述分析很容易得出基坑突水时的临界水头  $H_{wcr}$  为

$$H_{wcr} = (\gamma M + 0.4c) / \gamma_w \tag{5}$$

### 5.2 工程实例分析

下面结合几例长条形基坑的实际资料<sup>[13]</sup>, 分析式(3)~(5)的可行性和合理性(这些工程均位于江苏省常州市, 并且都已经竣工)。具体情况见表 4。

由表 4 可知, 采用考虑基底土层黏聚力分量的基坑突水判断方法得出的结论与现场实际情况完全符合, 而采用传统的压力平衡法得出的判断结论除④基坑外均与现场实际情况相反, 其判断正确率只有 16.7%。

另一方面, 目前工程界常常采用传统的压力平衡法分析深基坑突水问题, 当判断结论为“突水”时, 就采用注浆或减压降水的方法加固坑底土层, 然后用式(1)验算。这样做也存在着很大的不合理性。现在, 对一基坑工程实例进行分析。

已知基坑深度 15 m, 基底土层为 5 m,  $\gamma H_w = 160 \text{ kPa}$ , 假设基坑底部软土层的重度为 18~19  $\text{kN/m}^3$ , 采用化学注浆对 5 m 厚的基底土层进行封闭式全部加固, 加固后的重度设为:  $\gamma_{cp} = 21\sim 22 \text{ kN/m}^3$ , 则  $\gamma_{cp} M = (105\sim 110) \text{ kPa}$ , 它仍然不能平衡 160 kPa 的承压水水头压力。如果要达到平衡, 则  $\gamma_{cp}$  要达到 32  $\text{kN/m}^3$ , 事实上是不可能的。但是, 加固后, 基坑未发生突水现象。因而可知, 传统的压力平衡判断方法出了问题——没有考虑加固后土层强度提高的因素。

### 5.3 判断方法

表 4 考虑基底土层黏聚力分量的基坑突水判断方法应用实例分析

Table 4 Case analysis of the judgement method of water blow-up of pit considering cohesion of the shear strength of substratum

序号	工程名称	基坑深度/m	基底土层	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_{uu}$	基底土层厚度 $M/\text{m}$	承压水头 $H_w/\text{m}$	传统方法判断	本文方法判断临界水头 $H_{wcr}/\text{m}$	是否突水	现场实际
①	RLH 大楼	6.0		19.0	76	1.7	4.5		6.27	否	否
②	新堂水泵房	5.0		19.5	65	1.1	4.0		4.75	否	否
③	北环补住宅	3.0	粉质黏土	18.8	42	1.1	3.5	突水	3.75	否	否
④	北环补住宅	3.4		19.0	48	0.7	3.5		3.25	是	是
⑤	中山苑运河挡土墙	6.2		19.9	67	1.4	5.0		5.5	否	否
⑥	密钱厂车间	6.1	黏土	19.4	70	3.3	8.7		9.2	否	否

根据上面的深入分析，并考虑到模拟试验的局限性以及上述基坑工程都是长条形基坑等因素，对式(5)等号左边乘以一个折减系数  $\beta$ ，即

$$H_{wcr} = \beta(\gamma M + 0.4c) / \gamma_w \quad (6)$$

式中： $\beta$  值可以根据基坑工程的大小、基底土层情况以及周围环境条件等因素确定，笔者建议取  $\beta = 0.7 \sim 0.9$ ，相当于通常的安全系数  $K = 1.1 \sim 1.4$ 。

考虑到基坑底部土层的成层性和加固等因素，将式(6)改为一般形式：

$$H_{wcr} = \beta \left( \sum_{i=1}^n d_i \gamma_i + 0.4 \frac{\sum_{i=1}^n d_i c_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \right) / \gamma_w \quad (7)$$

式中： $d_i$  为基坑底部第  $i$  层土层的厚度； $\gamma_i$  为基坑底部第  $i$  层土层的重度，当采用加固措施时，取加固土层的重度； $c_i$  为基坑底部第  $i$  层土层的黏聚力，当采用加固措施时，取加固土层的黏聚力。

因此，考虑基底软土层抗剪强度黏聚力分量的基坑突水判断方法为：当  $H_w < H_{wcr}$  时，不会发生基坑突水；当  $H_w > H_{wcr}$  时，将要发生基坑突水。

这一成果具有较大的工程意义和显著的经济效益。因为，目前在深基坑工程设计时，采用压力平衡方法判断基坑突水问题，偏于保守。这样做一方面很可能浪费了一部分财力和物力，而另一方面又会对周围环境产生危害性影响。

## 6 结 论

本文针对基坑突水问题的模拟试验进行分析，

获得以下几点成果：

(1) 基坑突水破坏主要导致基坑底面一定范围内的软土地层的黏聚力和压缩模量大幅度下降，而内摩擦角的变化幅度较小。

(2) 当承压含水层水头压力值(如本试验的大小为 18 kPa)与上覆软土层单位面积质量相等时，土体并不破坏。这与传统的基坑突水判断方法得出的结论是不同的，主要原因在于传统的方法没有考虑软土的强度影响，用传统的“压力平衡法”计算分析软土地基深基坑突水问题过分偏于保守。

(3) 根据试验的结果考虑基底土层抗剪强度的黏聚力分量对于软土抵抗承压水头的贡献，量化提出基坑突水的判断方法，与工程实践进行了对比。结果表明，本文提出的深基坑突水判断是较接近软土基坑的实际情况。

## 参考文献(References):

[1] 刘国彬, 刘金元, 徐全庆. 基坑开挖引起的土体力学特性变化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 112 - 116. (Liu Guobin, Liu Jinyuan, Xu Quanqing. Testing study on variation of mechanical characteristics of soil due to excavation. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 112 - 116. (in Chinese))

[2] 李景林, 王剑平, 徐光明. 离心模型试验模拟基坑开挖的一种新方法[J]. 水利水运科学研究, 2000, (4): 69 - 72. (Li Jinglin, Wang Jianping, Xu Guangming. A new method for simulation of excavation in centrifugal model test [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000, (4): 69 - 72. (in Chinese))

[3] 姚 秦. 基坑工程的水土压力混合算法[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2001, 20(1): 134 - 135.(Yao Qin. Earth pressure calculation considering soil-water jointly of excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 134 - 135.(in Chinese))
- [4] 徐少曼, 李树华, 陈孝贤. 软土深基坑开挖的模型试验研究[J]. 福建建筑, 2000, (增 2): 63 - 65.(Xu Shaoman, Li Shuhua, Chen Xiaoxian. Study of model tests for multilayer deep excavation[J]. Fujian Architecture and Construction, 2000, (Supp.2): 63 - 65.(in Chinese))
- [5] 应宏伟, 谢新宇. 软土深基坑开挖的有限元分析[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(4): 59 - 63.(Ying Hongwei, Xie Xinyu. Finite element analysis of deep excavation in soft soil[J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(4): 59 - 63.(in Chinese))
- [6] 刘广胜, 赵维炳. 深基坑施工中渗流对土的抗剪强度的影响[J]. 水利水运科学研究, 2000, (1): 54 - 57.(Liu Guangsheng, Zhao Weibing. Effect of seepage on shear strength of silt soil in foundation excavation[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000, (1): 54 - 57.(in Chinese))
- [7] 胡展飞. 地下水对软土深基坑影响效应试验研究与工程应用[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2002.(Hu Zhanfei. Test research on the mechanic character of soft soil during deep excavations considering the effect of underground water and engineering practice[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2002.(in Chinese))
- [8] 夏明耀, 曾进伦. 地下工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 179 - 230.(Xia Mingyao, Zeng Jinlun. Manual of Design and Construction for Underground Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. 179 - 230.(in Chinese))
- [9] 胡展飞, 张刚, 周健. 软土基坑突水模拟试验基底变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 638 - 641.(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 - 641.(in Chinese))
- [10] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. 1 - 74.(Shen Zhujiang. Theoretical Soil Mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2000. 1 - 74.(in Chinese))
- [11] Hermann F H. Thixotropy[M]. Paris: [s. n.], 1935.
- [12] 胡展飞, 傅艳蓉. 基于不同初始含水量的软黏土抗剪强度的试验研究[J]. 上海地质, 2001, (1): 38 - 42.(Hu Zhanfei, Fu Yanrong. Experimental study of the shear strength of soft soil with different initial water contents[J]. Shanghai Geology, 2001, (1): 38 - 42.(in Chinese))
- [13] 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 Yongran. Analysis of gush of strip foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 75 - 79.(in Chinese))