

文章编号: 1000-4750(2008)10-0194-06

# 软土地区弱透水层承压水基坑突涌计算模型研究

丁春林

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘 要:** 针对软土地区弱透水层承压水基坑, 根据坑底出渗面土体稳定条件, 推导了坑底弱透水层土体突涌临界破坏方程, 建立了基坑突涌渗透破坏有限元计算模型, 并用验证算例将模型计算结果与离心试验结果、现场观察结果、压力平衡理论结果、以及突涌塑性破坏模型结果进行了比较。结果表明: 模型计算结果与离心模型试验结果和现场观察结果比较吻合, 而采用压力平衡法和突涌塑性破坏模型得到的判断结果与现场实际和试验结果出入较大。对于弱透水层的承压水基坑, 建议采用突涌渗透破坏模型分析基坑抗突涌稳定性。

**关键词:** 基础工程; 承压水基坑; 弱透水层; 突涌; 渗透破坏; 计算模型

**中图分类号:** U456.3<sup>+</sup>2; TU46 **文献标识码:** A

## A STUDY ON CALCULATION MODEL OF INRUSHING FOR FOUNDATION PIT OF SEMIPERVIOUS AQUICLUDE WITH CONFINED WATER IN SOFT SOIL AREA

DING Chun-lin

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Aiming at foundation pit of semi-pervious aquiclude with confined water in soft soil area, the critical equation of inrushing seepage failure was inferred from stability condition of soil on the bottom surface of the pit, and a Finite Element model for pit inrushing based on seepage failure was established. Calculation results of case studies were compared with the results of centrifuge test, field observation, pressure balance method and inrushing model of plastic failure. The comparison shows that the results of the model are similar to the results of centrifuge test and field observation, while the results of the pressure balance method and the inrushing model of plastic failure are not consistent with the results of the test and field observation. It is suggested that the model based on seepage failure should be used to analyze anti-inrushing stability for the pit of semipervious aquiclude with confined water.

**Key words:** foundation engineering; foundation pit with confined water; semi-pervious aquiclude; inrushing of soil and water; seepage failure; calculation model

随着我国城市地下铁道、高层建筑等基础设施的迅速发展, 深基坑工程日益增多, 深基坑工程开挖施工的地质条件和环境也日益复杂。在深基坑工程中, 一项事关全局的工作就是地下水防治, 特别是在沿海软土地区, 地下水是深基坑工程的天敌, 是导致基坑工程事故最直接的原因之一。含承压水

基坑在施工中更易产生突涌、管涌、流砂或流土<sup>[1]</sup>。但是, 如何判断承压水基坑抗突涌稳定? 关于软土地层承压水基坑突涌稳定性判断分析, 国内外学者研究得较少, 而在相关领域岩石地层的采矿突水分析则研究得较多<sup>[2-3]</sup>; 且我国现行基坑工程规范和教科书里均采用了压力平衡方法<sup>[4]</sup>, 该方法只考虑

收稿日期: 2007-03-25; 修改日期: 2007-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772178)

作者简介: 丁春林(1968—), 男, 安徽人, 副教授, 工学博士, 从事隧道与地下工程、工程数值计算方面研究(E-mail: chunlinding308@sina.com)

了承压含水层顶隔水层土体自重力引起的抗力，忽略了隔水层土体的抗剪强度和承压水在弱透水层土体中产生的渗透力。尽管有些学者在探索采用其它方法<sup>[5]</sup>进行研究，但这些研究存在的不足或缺陷在于把坑底土简化成具有抗弯性能的均质连续梁或板单元模型分析与实际情况出入较大。实际工程中，承压水基坑坑底隔水层常为非均质、成层分布的弹塑性体，没有抗弯性能，且当坑底土与基坑跨度之比较大时，简化成均质梁或板单元分析与梁板定义也不符。此外，对于弱透水层的承压水基坑，其突涌破坏常表现为坑底发生流砂、流土或类似于“沸腾”喷水冒砂这样的渗透破坏，这用强度理论和压力平衡理论是难以解释的。因此，有必要从坑底土透水性着手，对含不透水和弱透水层的承压水基坑抗突涌稳定分别进行研究。对于含不透水隔水层的承压水基坑抗突涌稳定分析模型已在有关论文中进行了阐述<sup>[6]</sup>；本文针对弱透水层的承压水基坑，从坑底土突涌渗透破坏的力学机理出发，建立基坑抗突涌稳定分析模型，并用工程实例对计算模型进行考证。

### 1 突涌渗透破坏计算理论

对于存在弱透水层的承压水基坑，基坑突涌破坏形式常常表现为坑底发生流砂、流土或类似于“沸腾”喷水冒砂现象，如：南京地铁一号线某明挖区间隧道深基坑封底前坑底出现的涌水、涌砂<sup>[1]</sup>等。基坑产生这种形式的突涌破坏原因在于弱透水层土单元不仅要承受承压水的水头压力作用，而且要承受动水压力，即渗透力的作用，在动水压力作用下，松散细颗粒土产生悬浮或受到冲刷，土结构受到破坏，最后导致坑底发生流砂、流土或喷水冒砂现象。下面从弱透水层基坑出渗面稳定条件出发，建立基坑突涌渗透破坏条件方程式。

#### 1.1 坑底土突涌渗透破坏条件<sup>[7]</sup>

图 1 为弱透水层承压水基坑坑底出渗面处单位体积的土单元体，单元体的稳定条件是由四个力决定的：① 垂直向上渗流的渗透力  $\gamma_w J$ ；② 土体的浮容重  $\gamma' = (1-n)\gamma_s - \gamma_w \approx \gamma_d - (1n)\gamma_s$ ；③ 土粒间的摩擦力，单元体单位体积的摩擦力平均为  $\frac{1}{2}\xi\gamma'\tan\varphi$ ，这里  $\varphi$  为土的内摩擦角， $\xi$  为侧压力系数， $\frac{1}{2}\gamma'$  为坑底弱透水层的单位土体由顶面到底

面垂直压力的平均值；④ 单元体土体所受的粘聚力，单元体单位体积的粘聚力为  $C$ 。

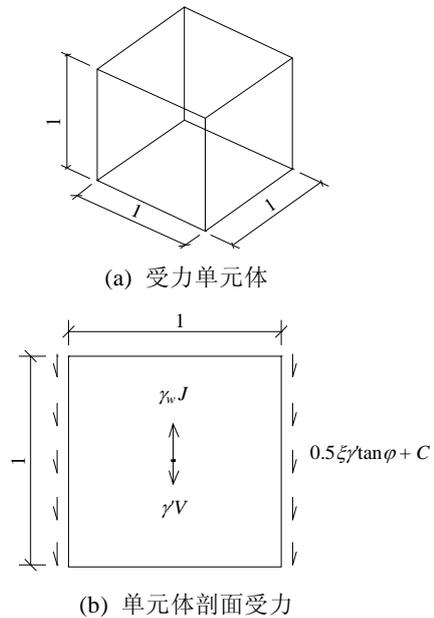


图 1 坑底出渗面单元体受力分析图

Fig.1 Mechanical analysis of element on the bottom surface of the pit

在上述四个力作用下，坑底弱透水层土产生突涌渗透破坏的条件为：

$$\gamma_w J \geq \gamma' V + 0.5\xi\gamma'\tan\varphi + C \quad (1)$$

即：

$$J \geq \frac{1}{\gamma_w}(\gamma' + 0.5\xi\gamma'\tan\varphi + C) \quad (2)$$

令：

$$J_c = \frac{1}{\gamma_w}(\gamma' + 0.5\xi\gamma'\tan\varphi + C) \quad (3)$$

则坑底弱透水层土体产生突涌渗透破坏的条件为：

$$J \geq J_c \quad (4)$$

式中  $J_c$  为坑底弱透水层土体突涌破坏临界渗透坡降。

#### 1.2 坑底土渗流基本微分方程

由方程(4)可知，要判断承压水基坑坑底弱透水层土体是否产生突涌渗透破坏，首先要对承压水在坑底弱透水层中产生的渗流运动进行分析计算。

假定承压水在坑底弱透水层中的渗流符合 Darcy 定律。根据水均衡原理和 Darcy 定律<sup>[7]</sup>，可推导得到二维非稳定渗流场的基本微分方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \mu^* \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

式中:  $H$  为渗流场压力水头;  $T_x$ 、 $T_y$  为导水系数,  $T_x = K_x T$ ,  $T_y = K_y T$ ,  $T$  为含水层厚度;  $\mu^*$  为贮水系数,  $\mu^* = \mu_s T$ ;  $Q$  为源汇项。

### 1.3 渗流场有限元方程<sup>[8]</sup>

求基本微分方程(5)在下列初始条件和边界条件下的解, 通常采用有限单元法。初始和边界条件为:

$$\begin{cases} H(x, y, t)|_{t=0} = H_0(x, y), & (x, y) \in \Omega \\ H(x, y, t)|_{\Gamma_1} = \varphi(x, y, t), & (x, y) \in \Gamma_1, t > 0 \\ -T \frac{\partial H}{\partial n}|_{\Gamma_2} = q(x, y, t), & (x, y) \in \Gamma_2, t > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $H_0(x, y)$  为初始水头已知函数;  $\varphi(x, y, t)$  为水头边界已知函数;  $q(x, y, t)$  为流量边界已知函数, 对于稳定渗流场, 上述边界函数则不考虑时间  $t$  的作用。

假设渗流区域  $\Omega$  剖分为  $M$  个有限单元,  $N$  个节点, 设每个单元的结点为  $i, j, k, \dots$ , 节点水头为  $H_i, H_j, H_k, \dots$ , 单元的基函数(或插值函数)为  $N_i, N_j, N_k, \dots$ , 则单元内任一点的水头  $h$  用基函数表示为:

$$h^e(x, y, t) = N_i H_i + N_j H_j + N_k H_k + \dots = \mathbf{N}^T \mathbf{H}^e \quad (7)$$

式中,  $\{\mathbf{H}\}^e = [H_i \ H_j \ H_k \ \dots]^T$  为单元节点水头列阵。

单元体任一点处的渗流水力坡降为:

$$\{\mathbf{J}\}^e = [J_x^e \ J_y^e]^T = \left[ \frac{\partial h^e}{\partial x} \ \frac{\partial h^e}{\partial y} \right]^T = [\mathbf{B}]\{\mathbf{H}\}^e \quad (8a)$$

式中:

$$[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial x} & \frac{\partial N_l}{\partial x} & \dots \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial y} & \frac{\partial N_l}{\partial y} & \dots \end{bmatrix} \quad (8b)$$

应用剩余试函数法可推导得到单元任意节点的二维不稳定流伽辽金有限元方程为:

$$\sum_{e=1}^M \left( [\mathbf{G}]^e \{\mathbf{H}(t)\}^e + [\mathbf{S}]^e \left\{ \frac{d\mathbf{H}(t)}{dt} \right\}^e \right) = \sum_{e=1}^M (\{\mathbf{E}\}^e + \{\mathbf{F}\}^e) \quad (9a)$$

即:

$$[\mathbf{G}]\{\mathbf{H}(t)\} + [\mathbf{S}] \left\{ \frac{d\mathbf{H}(t)}{dt} \right\} = \{\mathbf{E}\} + \{\mathbf{F}\} \quad (9b)$$

式中:  $[\mathbf{G}] = \sum_{e=1}^M [\mathbf{G}]^e$  为求解域总导水矩阵, 矩阵为

$N \times N$  阶;  $[\mathbf{S}] = \sum_{e=1}^M [\mathbf{S}]^e$  为求解域总贮水矩阵, 矩阵

为  $N \times N$  阶;  $\{\mathbf{H}\}$  为未知水头列向量;  $\left\{ \frac{d\mathbf{H}(t)}{dt} \right\}$  为

结点水头对时间一级导数的列向量;  $\{\mathbf{E}\} = \sum_{e=1}^M \{\mathbf{E}\}^e$

为汇源项列阵或垂直补给列阵;  $\{\mathbf{F}\} = \sum_{e=1}^M \{\mathbf{F}\}^e$  为边

界列阵。

同样, 将式(9b)改写成差分的形式, 可表示为:

$$\left( [\mathbf{G}] + \frac{1}{\Delta t} [\mathbf{S}] \right) \{\mathbf{H}^{t+\Delta t}\} = \frac{1}{\Delta t} [\mathbf{S}] \{\mathbf{H}^t\} + \{\mathbf{E}\} + \{\mathbf{F}\} \quad (10)$$

在给定初始条件和边界条件下, 通过式(10)可计算得到各时刻渗流场离散区域各结点水头值; 通过式(8a)可计算得到单元体任意结点处沿坐标  $x$  方向、 $y$  方向的水力坡降, 再按下列公式(11)可得到渗流区域任意结点  $i$  处沿坐标  $x$  方向、 $y$  方向的水力坡降。

$$\left. \begin{aligned} J_x &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m J_{xi}^e \\ J_y &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m J_{yi}^e \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中:  $J_{xi}^e, J_{yi}^e$  为单元体任意结点  $i$  处沿坐标  $x$  方向、 $y$  方向的水力坡降;  $m$  为围绕结点  $i$  的单元数。

上面介绍的伽辽金有限元方程主要针对非稳定渗流问题, 对于稳定渗流, 含水层中贮存量不消耗, 这时  $\mu_s = 0$  或  $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$ , 上述方程中去掉包含  $\mu_s$  项, 即去掉  $[\mathbf{S}]$  矩阵即可。

## 2 渗流计算模型

对承压水基坑坑底弱透水层进行渗流有限元计算, 首先就是要建立坑底弱透水层渗流运动的数学模型, 确定渗流区域、渗流的初始状态和边界条件, 然后对渗流区域进行离散化和数值计算。本文基于弱透水层承压水基坑支护结构形式、基坑渗流的特点, 建立数学模型和有限元计算模型时, 假设: ① 坑周土非均质、各向异性、成层等厚分布; ② 渗流为二维平面流, 且渗流符合 Darcy 定律; ③ 不考虑含水层土体的弹性释水或贮水; ④ 坑底取至不透水层, 为不透水边界; 基坑断面靠坑中心侧边界为不透水的第二类边界, 另一侧边界为第一类给

定水头边界；围护结构(隔水帷幕)视为完全隔水边界。

在上述假定条件下，建立的弱透水层承压水基坑二维渗流计算模型如图 2 所示，其数学模型描述为：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0, \quad x, y \in \Omega \quad (12)$$

方程(12)求解的边界条件如图 2 所示。



图 2 弱透水层承压水基坑二维渗流计算模型

Fig.2 Calculation model of 2-D seepage for the pit of Semi-pervious aquiclude with confined water

### 3 计算模型验证

为了便于将模型计算结果与离心试验结果和现场观测结果进行对比，验证算例取自上海地铁 M8 线某车站深基坑第⑥硬土隔水层有缺失的某一断面。采用通用有限元程序 Geo-slope 建模计算坑

底土渗流坡降。根据基坑结构对称性，计算模型宽度取为  $B = 100\text{m}$ ，模型高度取为  $H = 45.0\text{m}$ (即承压含水层底板至地面高度)。计算范围内各土层厚度分布如图 3 所示，各土层计算参数见表 1<sup>[9]</sup>。计算模型的有限元网格划分如图 4 所示，模型中土体采用四节点等参数单元。

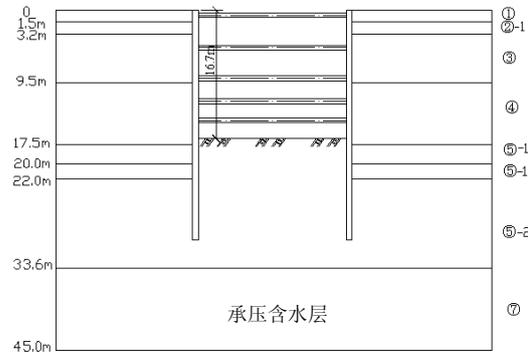


图 3 计算模型断面

Fig.3 Cross section of calculation model

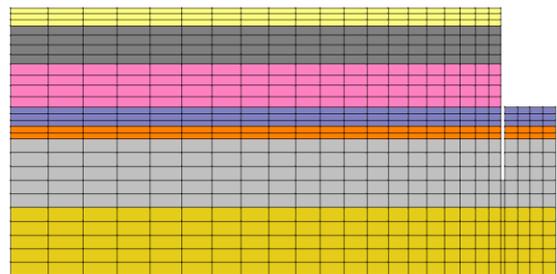


图 4 计算模型有限元网格划分

Fig.4 Mesh of finite element model

表 1 土层力学计算参数

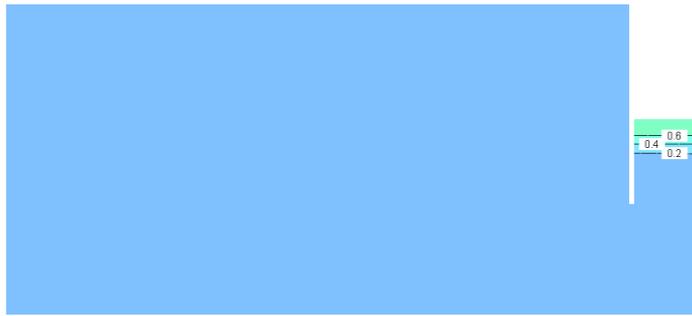
Table 1 Mechanical calculation parameters of soils

层序	土层名称	重度 $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	粘聚力 $C / \text{kPa}$	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	侧压系数 $\zeta$	渗透系数/ $(10^{-7} \text{cm}/\text{s})$	
						$K_v$	$K_h$
①	填土	18.2	16.8	17.0	—	0.26	1.2
②-1	褐黄色粉质粘土	18.3	22.0	21.0	0.48	1.60	2.43
③	灰色淤泥质粉质粘土	17.5	12.0	22.5	0.50	2.14	2.95
④	灰色淤泥质粘土	16.7	11.0	11.0	0.59	1.08	3.08
⑤-1a	灰色粘土	17.2	16.0	10.0	0.52	1.13	2.44
⑤-1b	灰色粉质粘土	17.8	5.0	28.0	0.41	2.71	2.73
⑤-2	灰色粘质粉土	18.1	11.0	23.5	0.34	11.5	1260
⑥	暗绿色粉质粘土	19.6	42.0	20.0	0.38	1.72	3.41
⑦-1a	草黄色砂质粉土	19.0	0	40.0	0.33	2090	7320
⑦-1b	黄色粉砂	18.5	3.0	34.5	0.31	3720	10300

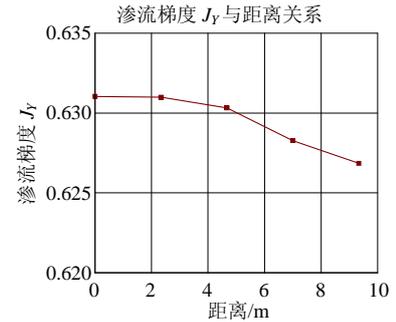
图 5—图 7 是根据渗流模型计算得到的坑底土和坑底面 Y 方向渗流坡降分布；根据式(3)计算得到的坑底面 Y 方向临界渗流坡降如表 2。基坑突涌渗透破坏模型计算判断结果与离心试验、现场观测<sup>[10]</sup>及其它方法结果比较如表 2 所示。

由图 5—图 7 和表 2 可以看出：① 对于坑底存在弱透水层基坑，坑底面最大渗透坡降点发生在围

护结构附近，该点也是基坑产生突涌的危险点，这主要与渗流在坑底围护结构附近易产生渗流应力集中有关；② 采用突涌渗透破坏模型分析，得到的判断结果与现场实际和离心试验结果比较吻合，而采用压力平衡法和突涌塑性破坏模型得到的判断结果与现场实际和离心试验结果出入较大。



(a) 坑底弱透水层 Y 方向渗流梯度分布



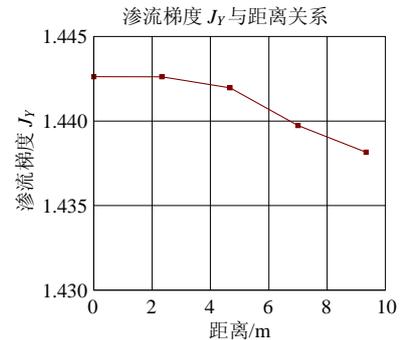
(b) 坑底面 Y 方向渗流梯度分布

图 5 水头高 20m 坑底弱透水层和坑底面 Y 方向渗流梯度分布

Fig.5 Distribution of seepage gradient  $J_y$  for semi-pervious aquiclude & the bottom surface of the pit at confined water head 20m



(a) 坑底弱透水层 Y 方向渗流梯度分布



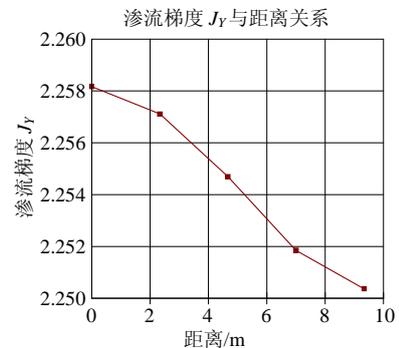
(b) 坑底面 Y 方向渗流梯度分布

图 6 水头高 24m 坑底弱透水层和坑底面 Y 方向渗流梯度分布

Fig.6 Distribution of seepage gradient  $J_y$  for semi-pervious aquiclude & the bottom surface of the pit at confined water head 24m



(a) 坑底弱透水层 Y 方向渗流梯度分布



(b) 坑底面 Y 方向渗流梯度分布

图 7 水头高 28m 坑底弱透水层和坑底面 Y 方向渗流梯度分布

Fig.7 Distribution of seepage gradient  $J_y$  for semi-pervious aquiclude & the bottom surface of the pit at confined water head 28m

表 2 渗透破坏模型计算结果与离心试验、现场实际及其它方法结果比较

Table 2 Comparison of results from seepage failure model, centrifuge test, field observation and others methods

承压水水头	临界渗透坡降	坑底面计算最大坡降	渗透破坏模型	离心模型试验	现场实际	塑性破坏模型 <sup>[6]</sup>	压力平衡法 <sup>[4]</sup>
20m	1.805	0.631	无突涌	坑底稳定、无突涌	未观测	突涌	突涌
24m	1.805	1.443	无突涌	坑底稳定、无突涌	无突涌	突涌	突涌
28m	1.805	2.258	突涌	坑底稳定、无突涌	未观测	突涌	突涌

## 4 结论

本文针对软土地区坑底存在弱透水层的承压水基坑，基于坑底出渗面土单元稳定条件，推导了坑底弱透水层土体突涌临界破坏方程式，建立了基

坑突涌渗透破坏计算模型，并用工程实例考证了计算模型。计算结果表明：渗透破坏模型计算结果与离心模型试验结果和现场观察结果基本吻合，而采用压力平衡法和突涌塑性破坏模型得到的判断结果与现场实际和离心试验结果出入较大。可见，对

于软土地区坑底存在弱透水层的承压水基坑,用渗透破坏计算模型分析基坑抗突涌稳定是合理可行的。

此外,考证算例的计算结果还显示:对于坑底存在弱透水层基坑,坑底面最大渗透坡降点发生在围护结构附近,该点也是基坑产生突涌的危险点,原因是渗流在坑底围护结构附近易产生应力集中,导致土体破坏。因此,对于弱透水层的承压水基坑,建议对基坑围护结构附近土体进行加固处理。

#### 参考文献:

- [1] 郑剑升, 张克平, 章立峰. 承压水地层基坑底部突涌及解决措施[J]. 隧道建设, 2003, 25(5): 25—27.  
Zheng Jiansheng, Zhang Keping, Zhang Lifeng. Inrushing of the bottom for confined water pit foundation and its treatment method [J]. Tunnel Construction, 2003, 25(5): 25—27. (in Chinese)
- [2] Zhang Jincai. Investigations of water inrushes from aquifers under coal seams [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(3): 350—360.
- [3] Liu Weitao, Wu Qiang, Gu Jingmei. Evaluation methods on safety of mine floor water inrush [C]. Progress in Safety Science and Technology Volume 4: Proceedings of the 2004 International Symposium on Safety Science and Technology. Shanghai, China, 2004: 973—978.
- [4] DBJ08-61-97, 上海市标准. 基坑工程设计规程[S]. 上海: 上海市建设委员会, 1997.  
DBJ08-61-97, Shanghai Standard. Code for the design of excavation engineering [S]. Shanghai: Shanghai Construction Council, 1997. (in Chinese)
- [5] 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 Guicheng. Further discussion of judgment in gushing of strip pit of foundations [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 1998, 17(5): 507—510. (in Chinese)
- [6] 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 Chunlin, Wang Dongfang. 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. (in Chinese)
- [7] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.  
Qian Jiahuan, Yin Zongze. Soil engineering principle and calculation [M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1996. (in Chinese)
- [8] 苑连菊, 李振栓, 武胜忠. 工程渗流力学及其应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001.  
Yuan Lianju, Li Zhenshuan, Wu Shengzhong. Engineering seepage mechanics and its application [M]. Beijing: China Building Material Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [9] 上海现代建筑设计集团申元岩土工程有限公司. 上海地铁某车站工程地质勘察试验报告[R]. 上海: 上海现代建筑设计集团, 2004.  
Shenyuan Geotechnical Engineering Co. Ltd, Shanghai Modern Design Group. Test report of engineering site investigation for some station in Shanghai metro [R]. Shanghai: Shanghai Modern Design Group, 2004. (in Chinese)
- [10] 丁春林, 宫全美, 孟晓红. 地铁车站深开挖施工中下层承压水的处理技术研究(阶段报告)[R]. 上海: 同济大学, 2004.  
Ding Chunlin, Gong Quanmei, Meng Xiaohong. A study on treatment technology of confined water for deep foundation pit of metro station during excavation [R]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)