

泄水减压法抗浮效果影响因素的正交分析

杨博进^{1a, 1b}, 李银平^{1a, 1b, 2}, 干泉³, 刘伟², 孔庆聪^{1a, 1b}, 黄珏皓^{1a, 1b}

(1. 中国科学院 a. 武汉岩土力学研究所; b. 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430010; 2. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030; 3. 湖北天利建筑技术有限责任公司, 武汉 430010)

摘要: 针对地下室传统抗浮工法的不足之处, 探讨了地下室泄水减压抗浮法的基本原理及相应的构造措施, 结合数值模拟对影响地下室抗浮泄水减压效果的回填土宽度、泄水孔间距, 以及施工过程中填土夯实度、地下室底部底层扰动程度等因素进行正交试验探讨分析, 最后结合残差分析法及层次分析法对各因素的影响顺序、影响权重进行了计算。研究表明: 相对传统方式, 泄水减压法变被动抗浮为主动抗浮, 抗浮效果显著, 且施工简便、成本低廉; 各因素影响顺序: 填土夯实度 > 填土宽度 > 孔间距 > 地下室底部扰动程度, 对应权重值分别为 0.55, 0.27, 0.15, 0.03。前3个因素的总和达到 0.97, 故在应用该技术的工程实践中应尽量减小回填土宽度, 降低填土透水性, 缩减泄水孔间距均能达到良好抗浮效果, 同时也应根据具体的工程条件对这3个因素的参数进行合理限制, 以达到最佳降水效果, 为泄水减压抗浮法的设计和施工等提供重要参考。

关键词: 泄水减压抗浮法; 泄水孔; 正交试验分析法; 宽度; 夯实度; 扰动程度

中图分类号: TU46

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2016)09-0121-07

1 研究背景

随着我国城市化进程的加快, 国内各大中城市纷纷发展地下空间, 而且地下空间正在快速扩展^[1]。开发地下空间的同时伴随着地下结构抗浮问题的产生, 并且建筑抗浮问题已成为影响结构设计和工程经济的难题。地下室抗浮设计尚未完善, 主要是设计过程中没有明确的抗浮设计标准和设计依据^[2]。地下室抗浮问题的抗浮设计方法主要表现为“被动”和“主动”2种方式。目前地下室抗浮设计中主要是“被动”抗浮设计方法, 如自重抗浮、抗浮桩、抗浮锚杆等传统的抗浮技术, 其地下水浮力无法调节, 结构只能被动地承受。因此采用“被动”抗浮设计方法, 地下室的抗浮设防水位的确定和水浮力的计算成为了主要难题, 其直接影响工程的可靠性和经济性。但是地下室抗浮设防水位没有一定合理的理论依据设定, 导致地下室“被动”抗浮设计时带有一定盲目性^[3]。

“主动”抗浮设计方法以泄水、降压作为主要手段, 通过降低地下室周围土层水位, 降低地下室水浮力, 从而达到地下室抗浮的目的。本文探讨了“主

动”抗浮中泄水减压理论, 通过在地下室四周设置排水沟和地下室外墙和底板上布设一定间距的泄水孔, 让地下水有组织地汇入室内排水系统来降低地下水水位, 从而主动降低地下水对地下室的浮力, 达到抗浮目的。工程实践证明, 与传统的抗浮设计相比, 用泄水孔泄水减压及水泵抽水费用相对节约, 具有良好的经济效益。

2 泄水减压法的抗浮原理

2007年袁奕^[4]提出的泄水减压抗浮方法结构是由泄水系统和集水系统组成, 如图1所示, 在地下室底板或者是地下室侧墙上布置泄水孔, 并在泄水孔外墙端设置反滤层, 以防堵塞泄水孔, 将渗入反滤层的水引流到地下室内部排水沟中, 达到降水目的。当排水沟中的水积聚一定量时, 开启排水系统, 将积水抽出到集水井内用于其他用途, 以此方法降低地下水水位, 能够有效释放地下水对基底的压力。

根据图1所示的泄水减压结构可知, 影响泄水减压法抗浮的主要因素有: 侧墙泄水孔的间距、填土的宽度及填土的夯实度、底板受到扰动土厚度。本文通过数值模拟对泄水减压抗浮影响因素进行分

收稿日期: 2015-08-05; 修回日期: 2015-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472285)

作者简介: 杨博进(1990-), 男, 河南商丘人, 助理工程师, 硕士, 主要从事岩土工程基坑降水及加固技术方面的研究。(电话) 15102735900(电子邮箱) 1057531292@qq.com。

析,研究各个因素的变化对泄水减压效果的影响状况,便于对地下室泄水减压抗浮设计时作出合理的参数选取。

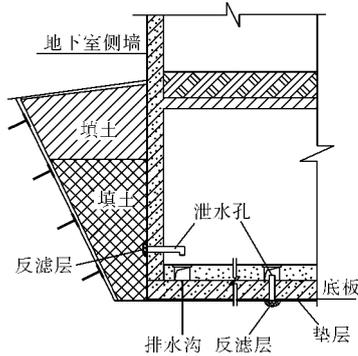


图1 泄水减压抗浮结构

Fig. 1 Details of anti-floating structure by draining decompression

3 建立数值模拟计算模型

本文运用数值模拟的方法研究上述因素与泄水减压效果之间的关系,由地下室底部压力水头作为判断泄水减压效果的主要依据。

运用二维渗流有限元程序 SEEP/W 对某地下工程项目进行了数值模拟分析,该项目共有 3 层地下室。所开挖的地下土层信息见表 1。

表 1 土层基本参数

Table 1 Basic parameters of soil strata

各土层名称	土层厚度/m	天然重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙比 e	弹性模量 E_s/MPa	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
杂填土	2.4	19.2	0.728	5.20	4.0×10^{-4}
黏土	8.4	19.2	0.756	10.30	4.0×10^{-7}
残积黏土	5.0	19.2	0.795	12.86	4.0×10^{-6}

纯地下室采用框架结构,周边为剪力墙围护,柱下为独立基础,持力层为③层残积黏土层。地下第 3 层为设备用房和停车场,建筑面积约 1.2 万 m^2 。本项目建筑 ± 0.000 标高为高程 40.650 m,独立基础顶部标高为 -13.150 m,高 1 000 mm,侧面宽度 130 m,而泄水孔后的反滤层的尺寸约为 400 mm \times 400 mm,故仅取其中一个剖面单元进行数值模拟分析。本文模拟地下室处于最不利的极限情况,例如暴雨、连续强降雨等,拟采用上层滞水为 0.3 m 的极限积水、填土层均完全饱和情形^[5]。

评判泄水减压效果分析主要是通过地下室底板的总水头的大小进行,底板总水头的大小直接代表地下室底板水浮力的大小,地下室未泄水减压时,底板处的总水头为 12.3 m。其中数值模拟研究泄水孔间距 L 对泄水减压的抗浮效果的影响过程中,泄

水孔间距的大小为 2 泄水孔中心的距离,由于 SEEP/W 只能研究二维有限元问题,取模型的剖面分析,为此取仅有 1 个泄水孔的单元进行等效模型分析。将泄水孔的有效泄水面积 A_1 等效为 1 个泄水横槽 A_2 ,其中 $A_1 = A_2 = Ld$, d 为横槽宽,因此 $d = A_1/L$ 。计算中取剖面的范围用于计算,基坑背后填土范围取为 9 m,其中上部回填土(纵向厚度取为 1.0 m)夯实层渗透系数取 $K = 8.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$;其他土层的渗透系数取值根据实测资料取表 1 中数值。

为了对模型进行有限元计算分析,需对计算模型进行网格划分,模型的 1 个单元大小设为 20 mm \times 20 mm;假定初始水位在地表以上 0.3 m,且模型底部高程为 0;在模型左侧设置无渗流边界,得到初始情况下地下室模型左侧总水头为 16.5 m;在模型中地下室侧墙上距底板 0.6 m 的泄水孔处,设置压力水头为 0。存限元计算模型如图 2 所示。

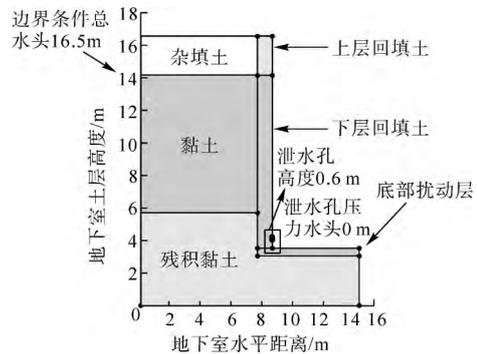


图2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite-element simulation model

4 多因素耦合作用下对泄水减压效果的研究

泄水减压过程中地下水水位不仅受泄水孔间距大小控制,而且受地下室周围填土宽度及夯实程度的控制。夯实程度主要通过周围填土的渗透性体现,另外地下室底部扰动层的厚度是施工时对地下室底部土的扰动程度,其主要通过水能在地下室底板流动,使周围地下水连通,从而对地下水水位也有明显的影响,因此泄水减压法下的地下水水位受到多因素耦合相互作用。运用 Geostudio-Seep 软件数值模拟对泄水减压法降水进行孔间距、填土宽度、填土夯实度、地下室底部扰动程度因素影响下的正交数值模拟实验,分析每个因素对泄水减压地下水水位影响的主次关系;运用层次分析法计算各影响因素对地下水水位影响权重,得到孔间距、填土宽度、填土夯实度、地下室底部扰动程度作用下地下水水位

的方程,进而为地下室泄水减压降水工程各部分工程设计提供科学依据。

4.1 数值模拟试验方案

泄水减压法主要是通过泄水孔将地下室外的地下水从泄水孔中汇入地下室,再从地下室内部用水泵抽出。此泄水减压过程中受到地下室工程多方面因素影响,为了准确分析各因素对地下室泄水减压的影响规律,便于为地下室泄水减压工程提供参数选取的科学依据,选取孔间距、填土宽度、填土夯实度、地下室底部扰动程度进行正交试验研究。正交试验^[6]设计采用4因素4水平的试验L16(4²)方案,共需进行16次试验。其中在布置高出地下室底面0.6m泄水孔时,泄水孔间距分别为1,2,3,4m,填土宽度分别为0.5,1.0,2.0,4.0m,填土夯实度(本研究通过渗透率来表征)为1×10⁻⁵,2×10⁻⁶,4×10⁻⁷,8×10⁻⁸m/s,底板扰动厚度分别为0.2,0.3,0.4,0.5m。正交试验方案如表2所示。

表2 多因素耦合作用下地下室底板水位正交试验设计
Table 2 Orthogonal experiment design of basement floor level under the coupling action of multiple factors

水平	影响因素			
	A	B	C	D
1	1	0.5	1×10 ⁻⁵	0.2
2	2	1.0	2×10 ⁻⁶	0.3
3	3	2.0	4×10 ⁻⁷	0.4
4	4	4.0	8×10 ⁻⁸	0.5

注:A表示泄水孔间距(m);B表示填土宽度(m);C表示夯实度(m/s);D表示底板扰动程度(m)。

运用设计的有限元模型,开展孔间距、填土宽度、填土夯实度及地下室底部扰动程度多场相耦合数值模拟试验。通过有规律地改变各个影响因素的大小,数值模拟计算得出地下室工程底板的水头。

4.2 数值模拟试验结果

在孔间距、填土宽度、填土夯实度及地下室底部扰动程度4个因素耦合作用下,共建立了16个有限元模型进行数值模拟试验,正交试验数值模拟求解地下室地板水头的试验结果如表3所示。

4.3 试验结果分析

4.3.1 水浮力及建筑物恒载计算

4.3.1.1 地下室水浮力

依据地勘要求,地下室抗浮水位可按设计室外地面整平标高确定,地下水水位取-0.15m(±0.000绝对标高40.650m),地下3层底板板面标高-13.150m,底板厚500mm,水头高度(13.15+0.5-0.15)=13.5m,取最大的柱网8.4m×8.1m进行验算。

表3 地下室底板水头正交试验结果
Table 3 Orthogonal experiment results of basement floor level

模型编号	泄水孔间距/m	填土宽度/m	夯实度/(m·s ⁻¹)	底板扰动程度/m	地下室底板水头/m
1	1	0.5	1×10 ⁻⁵	0.2	3.0
2	1	1.0	2×10 ⁻⁶	0.3	1.7
3	1	2.0	4×10 ⁻⁷	0.4	1.5
4	1	4.0	8×10 ⁻⁸	0.5	1.2
5	2	0.5	2×10 ⁻⁶	0.4	1.0
6	2	1.0	1×10 ⁻⁵	0.5	3.5
7	2	2.0	8×10 ⁻⁸	0.2	1.1
8	2	4.0	4×10 ⁻⁷	0.3	2.2
9	3	0.5	4×10 ⁻⁷	0.5	1.0
10	3	1.0	8×10 ⁻⁸	0.4	1.1
11	3	2.0	1×10 ⁻⁵	0.3	4.5
12	3	4.0	2×10 ⁻⁶	0.2	3.5
13	4	0.5	8×10 ⁻⁸	0.3	0.8
14	4	1.0	4×10 ⁻⁷	0.2	1.6
15	4	2.0	2×10 ⁻⁶	0.5	3.1
16	4	4.0	1×10 ⁻⁵	0.4	4.6

地下室水浮力的计算基本原理是根据阿基米德原理,浮力等于它所排开水体体积之重量,即

$$F_{浮} = \gamma_w HA \quad (1)$$

式中: γ_w 为水的重度; H 为建筑物在水中的高度; A 为地下室底面积。

该项目工程中地下室的水浮力大小依式(1)可得 $F_{浮} = 13.5 \times 10 \times 8.4 \times 8.1 = 9\ 185.40(\text{kN})$ 。

4.3.1.2 地下室结构恒载

恒载包括地下室顶板覆土、结构自重。依据工程实例对地下室结构恒载各个部分进行计算,得到如下数据。

(1) 顶板覆土自重(400mm厚): $0.4 \times 17.6 \times 8.4 \times 8.1 = 479.00(\text{kN})$ 。

(2) 楼板自重: $0.5 + 0.13 + 0.13 + 0.2 \times 25 \times 8.4 \times 8.1 = 1\ 632.96(\text{kN})$ 。

(3) 柱自重: $0.6 \times 0.6 \times 12.9 \times 25 = 116.10(\text{kN})$ 。

(4) 垫层自重: $0.1 \times 20 \times 8.4 \times 8.1 = 136.08(\text{kN})$ 。

(5) 独立基础自重: $4.0 \times 4.0 \times 1.0 \times 25 = 400.00(\text{kN})$ 。

地下室结构恒载总重为以上各部分自重之和: $G = 479.00 + 1\ 632.96 + 116.10 + 136.08 + 400.00 = 2\ 764.14(\text{kN}) < F_{浮} = 9\ 185.40(\text{kN})$ 。

根据以上数据,结合《给排水构筑物设计规范》(GB50068—2002)中地下室抗浮稳定性相关规

范^[7]: 水浮力 $F_{浮}$ 与结构自重 G 的关系满足 $G/F_{浮} \geq 1.05$ 故该项目地下室抗浮临界水位 H_L 大小为

$$H_L = 1.05G / (\gamma_w A) = \frac{1.05 \times 2\,764.14}{10 \times 8.4 \times 8.1} = 4.27 \text{ m}。$$

由以上计算可知,地下室结构自重值远小于地下室水浮力值,地下水位远高于“临界抗浮水位”,因此地下室结构抗浮稳定性严重不足。在表3的多因素耦合作用下模拟地下室底板水头正交试验结果可知,大部分地下室模型经过泄水减压,地下水位下降到地下室“抗浮临界水位”以下,故泄水减压法能够较好地降低地下水位。

4.3.2 影响因素主次性分析

影响因素主次性分析主要利用极差分析法。极差分析法是通过每一因素的平均极差来分析试验结果^[8],能有效反映各因素对总体效果的影响程度,在多层次多指标影响总体目标的分析中具有广泛的应用。以试验因素 A (泄水孔间距) 为例,其水平分别为 (1 2 3 4)。 A 因素的 1 水平所对应的试验指标之和为

$$\begin{cases} K_{A1} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 3.0 + 1.7 + 1.5 + 1.2 = 7.4, \\ K_{A2} = x_5 + x_6 + x_7 + x_8 = 1.0 + 3.5 + 1.1 + 2.2 = 7.8, \\ K_{A3} = x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} = 1.0 + 1.1 + 4.5 + 3.5 = 10.1, \\ K_{A4} = x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} = 0.8 + 1.6 + 3.2 + 4.6 = 10.2. \end{cases} \quad (2)$$

其每个水平试验指标平均值 M 为

$$\begin{cases} M_1 = K_{A1} / 4 = 1.85, \\ M_2 = K_{A2} / 4 = 1.95, \\ M_3 = K_{A3} / 4 = 2.53, \\ M_4 = K_{A4} / 4 = 2.55. \end{cases} \quad (3)$$

式中 M_1, M_2, M_3 和 M_4 为试验因素“泄水孔间距”在不同水平时地下室底板水头平均值。从试验结果可以看出,随着泄水孔间距的增加地下室底板水头明显减小,其影响比较明显。

试验结果极差 R 值主要用于判断各个因素对试验指标影响的主次关系。根据极差大小,可判断因素的主次影响顺序。 R 越大,表示该因素的水平变化对试验指标的影响越大,因素也就越重要。极差 R 的计算方法为

$$R = \max \{M_1, M_2, M_3, M_4\} - \min \{M_1, M_2, M_3, M_4\}。 \quad (4)$$

因此影响因素“泄水孔间距”的极差即为

$$R = \max \{1.85, 1.95, 2.52, 2.55\} - \min \{1.85, 1.95, 2.52, 2.55\} = 0.7。 \quad (5)$$

根据上述方法依次计算其他试验因素泄水孔间距、填土宽度、填土夯实度、地下室底部扰动程度的极差,计算结果如表4所示。从表4可知各试验因

素极差大小依次为 0.7, 1.43, 2.85, 0.32, 试验因素极差关系为填土夯实度 > 填土宽度 > 孔间距 > 地下室底部扰动程度。因此根据极差分析可知,各试验因素对地下室底板水头大小影响主次关系为填土夯实度 > 填土宽度 > 孔间距 > 地下室底部扰动程度。

表4 各因素对地下室底板水头影响的极差分析数据

Table 4 Data of range analysis of factors that affect the basement floor level

均值和极差	泄水孔间距/m	填土宽度/m	夯实度/(m·s ⁻¹)	底板扰动程度/m
M_1	1.85	1.45	3.90	2.30
M_2	1.95	1.98	2.33	1.98
M_3	2.52	2.55	1.58	2.05
M_4	2.55	2.88	1.05	2.20
R	0.70	1.43	2.85	0.32

4.3.3 影响因素显著性分析

极差分析法通俗易懂,计算方法较为容易,但方法的缺陷为不能区分试验中由于试验条件改变引起的数据波动和试验误差引起的数据波动,换言之,不能区分因素各水平间对应的试验结果的差异究竟是由于因素水平不同,还是由于试验误差引起的,且无法估计试验误差的大小。另外,极差分析法中各因素对试验结果的影响大小无法给以精确的数量估计,不能提出一个标准来判断所考察因素作用是否显著。为了弥补极差分析的缺陷,可采用方差分析。方差分析基本思想是将数据的总变异分解成因素引起的变异和误差引起的变异 2 部分,构造 F 统计量,作 F 检验,即可判断因素作用是否显著。

(1) 总偏差平方和 SS_T 计算为

$$\begin{cases} SS_T = \sum_{i=1}^{16} (x_i - \bar{x})^2, \\ \bar{x} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} x_i. \end{cases} \quad (6)$$

(2) 因素偏差平方和为

$$SS_{因素} = 4 [(M_1^A - \bar{x})^2 + (M_2^A - \bar{x})^2 + (M_3^A - \bar{x})^2 + (M_4^A - \bar{x})^2]。 \quad (7)$$

(3) 自由度计算如式(8),其中: df 为自由度; n 为因素水平个数。

$$df = n - 1。 \quad (8)$$

(4) 误差平方和为

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D。 \quad (9)$$

(6) 方差计算为

$$MS_{因素} = \frac{SS_{因素}}{df_{因素}}, MS_{误差} = \frac{SS_{误差}}{df_{误差}}。 \quad (10)$$

(7) F 统计量为

$$F_{\text{因素}} = \frac{MS_{\text{因素}}}{MS_{\text{误差}}} \quad (11)$$

以试验因素 A 泄水孔间距为例,计算 F 统计量 具体如下:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{16} x_i = 2.21 \quad ; \quad (12)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^{16} (x_i - \bar{x})^2 = 25.24 \quad ; \quad (13)$$

$$SS_A = 4 [(M_1^A - \bar{x})^2 + (M_2^A - \bar{x})^2 + (M_3^A - \bar{x})^2 + (M_4^A - \bar{x})^2] = 1.64 \quad . \quad (14)$$

同理计算可得 $SS_B = 4.78$, $SS_C = 18.45$, $SS_D = 0.35$,误差平方和 SS_E 可以通过平方和分解公式获得 即

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D = 0.02 \quad . \quad (15)$$

则因素 A 的 F 统计量为

$$F_A = \frac{SS_A}{SS_E} = 82 \quad . \quad (16)$$

类似可以计算出其它因素 F 统计量 ,具体方差分析数据如表 5 所示。

表 5 各因素对地下室底板水头影响的方差分析

Table 5 Variance analysis of multiple factors that affect the basement floor level

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	临界值 F_{α}	显著性
泄水孔间距	3	1.64	0.55	82.0	$F_{\alpha(0.05)} = 9.28$ $F_{\alpha(0.01)} = 29.46$	**
填土宽度	3	4.78	1.59	239.0	$F_{\alpha(0.05)} = 9.28$ $F_{\alpha(0.01)} = 29.46$	**
夯实度	3	18.45	6.15	922.0	$F_{\alpha(0.05)} = 9.28$ $F_{\alpha(0.01)} = 29.46$	**
底板扰动程度	3	0.35	0.12	17.5	$F_{\alpha(0.05)} = 9.28$ $F_{\alpha(0.01)} = 29.46$	
误差	3	0.02	0.14			

注: F_{α} 为 0.05 ,0.01 两种自由度下的临界值 ,** 代表显著性大小。

多因素耦合作用下建立有限元模型模拟求解地下室底板水头大小正交试验 ,其各个影响因素方差分析结果如表 5。根据分析结果可知 ,填土宽度和填土夯实度影响因素方差分析统计 F 值分别为 239 和 922 ,大于泄水孔间距和底板底层扰动程度 2 个影响因素方差分析统计量 F 值 ,分别为 82.0 和 17.5。F 分布临界值 $F_{\alpha(0.05)} = 9.28$, $F_{\alpha(0.01)} = 29.46$,影响因素泄水孔间距和填土宽度及夯实度 F 值都远远大于 $F_{\alpha(0.05)}$ 和 $F_{\alpha(0.01)}$ 。因此 ,泄水孔间距和填土宽度及夯实度 3 个因素对泄水减压法地下室底板水头影响具有明显显著性 ,地下室底板底层土扰动程度对地下室底板水头影响不特别显著。通过上述分析可知 ,影响泄水减压法地下室底板水头因

素主次关系依次为: 填土夯实度、地下室底板宽度、填土宽度和底层土扰动程度 ,其结果与极差分析结果一致。

4.3.4 试验因素对泄水减压法地下室底板水头大小的影响

图 3 为试验影响因素泄水孔间距、填土宽度、夯实度和底层扰动层厚度对泄水减压法地下室底板水头影响的趋势图。

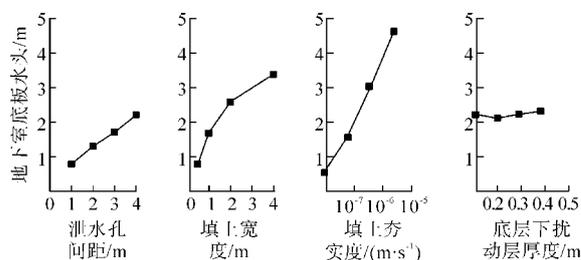


图 3 试验因素对地下室底板水头的影响趋势

Fig. 3 Trends of factors affecting the basement floor level

从图 3 中可以看出 ,地下室底板水头大小随着泄水孔间距减小而降低;地下室底板水头大小随着填土宽度增加而增大;地下室底板水头大小随着填土夯实度增大迅速减小;随底板扰动程度增加而缓慢减小。试验影响因素对地下室底板水头大小影响变化规律跟前文试验结论是一致的。

根据数值模拟试验结果可知 ,随着泄水孔间距和填土宽度及夯实度增大 ,地下室底板水头变化幅度很大 ,而随着底部扰动层厚度增大 ,底板水头变化幅度不大 ,从而说明在多因素耦合条件下 ,泄水孔间距和填土宽度及夯实度 3 个因素对地下室底板水头影响明显 ,底部扰动层厚度对地下室底板水头影响不明显。上文分析试验影响因素对底板水头影响的主次关系和显著性可知 ,泄水孔间距和填土宽度及夯实度 3 个因素对地下室底板水头影响显著 ,底部扰动程度大小对地下室底板水头影响不显著 ,因此试验结果跟分析结果是一致的 ,进而说明该正交试验方案设计以及结论分析是正确的。

5 地下室底板水头影响因素权重分析

地下室底板水头大小影响因素孔间距、填土宽度、填土夯实度、底部扰动程度耦合条件下正交试验 ,分析了 4 个因素对地下室底板水头大小影响主次关系以及其显著性 ,本文运用层次分析法模拟计算 4 个影响因素对地下室底板水头大小影响权重 ,从而为地下室底板水头大小回归方程提供拟合回归依据。

5.1 层次结构模型

利用层次分析法^[9]计算孔间距、填土宽度、填土夯实度、底部扰动程度 4 个因素对地下室底板水头大小影响权值时,首先构建层次结构模型,层次结构模型分为 3 层:目标层、指标层和对象层。图 4 即为层次结构模型图,目标层为各影响因素的权值,指标层为地下室底板水头大小,对象层为影响因素孔间距、填土宽度、填土夯实度、底部扰动程度。

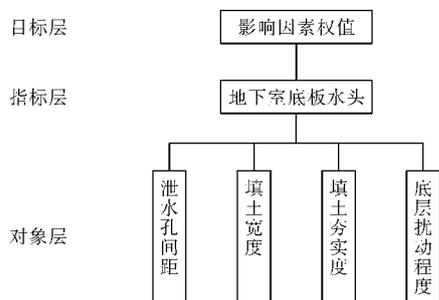


图 4 层次结构模型

Fig. 4 Hierarchy model

5.2 判断矩阵

运用回归分析方法,对任意 2 个影响因素和地下室底板水头大小进行二元线性回归分析,通过计算得到标准回归系数如表 6。对任意 2 个影响因素标准回归系数经比较后,可以计算出 2 个影响因素对地下室底板水头大小相对重要性比值,利用相对重要性比值来构建判断矩阵。如影响因素“孔间距”的标准回归系数为 0.82,影响因素对应标准回归系数为 0.55,则 2 个因素对地下室底板水头大小影响相对重要性比值 $a = |(-0.82) / 0.55| = 1.48$ 。根据此方法可以依次计算出任意 2 个影响因素对地下室底板水头大小相对重要性比值,从而构建判断矩阵 A。在进行回归分析之前要对原始数据进行预处理,使各影响因素与地下室底板水头大小呈较好的线性关系,为回归分析做好相应准备。

表 6 标准回归系数

Table 6 Standard regression coefficients

因素	孔间距	填土宽度	填土夯实度	底部扰动程度
孔间距	—	0.23	0.23	0.23
填土宽度	0.40	—	0.40	0.40
填土夯实度	0.83	0.83	—	0.83
底部扰动程度	-0.05	-0.05	-0.05	—

其判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.575 & 0.280 & 4.714 \\ 1.739 & 1 & 0.487 & 8.204 \\ 3.571 & 2.055 & 1 & 16.857 \\ 0.212 & 0.123 & 0.059 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

经过计算得到矩阵 A 的最大特征值为 4.178,其影响因素权向量 $\omega = [0.15 \ 0.27 \ 0.55 \ 0.03]$ 。

5.3 一致性检验

在对计算模型分析计算过程中,不可能对所有因素的数值进行精确的判断,计算依据会存在误差,从而导致判断矩阵的特征值会产生偏差。在构造判断矩阵时,并没有要求判断具有完全一致性,但判断一定要有大体的一致性,否则无法进行分析计算。总之,在计算得出判断矩阵最大特征值后,还要进行一致性检验。

通过式(18)计算判断矩阵 A 的随即一致性比率 CR,当 $CR < 0.1$ 时,判定矩阵 A 具有满意的一致性。为了度量不同阶判断矩阵的一致性,引入了判断矩阵的平均随机性指标 RI 值,当矩阵阶数 n 为 3~10 时,随机一致性比率 RI 取值分别为 0.78, 0.90, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45, 1.49。

$$CR = \frac{\lambda_{\max}(A) - n}{n - 1} / RI \quad (18)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵 A 的最大特征值。通过判断矩阵计算 $\lambda_{\max} = 4.178$,矩阵阶数 $n = 4$,计算得到 $CR(A) = 0.04$ 。判断矩阵 A 的一致性比率 $CR < 0.1$,因此判断矩阵 A 具有满意的一致性。

5.4 权重分析

判断矩阵具有满意的一致性,说明判断矩阵构建合理,因此判断矩阵的权向量即为影响因素权值。孔间距、填土宽度、填土夯实度、底部扰动程度 4 个影响因素对地下室底板水头影响因素权值大小依次为 0.15, 0.27, 0.55, 0.03,其中孔间距、填土宽度、填土夯实度 3 个因素对地下室底板水头大小影响权值很大,底部扰动程度权值较小。孔间距、填土宽度、填土夯实度 3 个因素权重占到 95% 以上,另外可以看出填土夯实度对地下室底板水头大小影响最大,填土宽度影响次之,剩下依次为孔间距和底部扰动程度。该结论与前文分析上述 4 个因素对地下室底板水头大小影响的主次关系以及显著性的结论是一致的,因此运用层次分析法判断孔间距、填土宽度、填土夯实度、底部扰动程度 4 个影响因素对地下室底板水头大小影响权重是合理正确的。

6 结论及建议

(1) 泄水减压法是一种通过降低地下水位达到降低地下室底板水压力的方法,其能主动将地下水汇入室内排水系统排出,使地下水位达到目标抗浮

水位以下,达到抗浮目的,泄水减压抗浮工程具有良好的可靠性和经济性。

(2) 泄水孔应尽量设在地下室侧墙上,其既能有效降低地下水水位,又不影响地下室侧墙的施工和作用。在地下室侧面布置泄水孔时,一定间距范围内,泄水孔间距越小,越有利于地下水位的降低,工程中根据地下水水位的高低及地下室大小,适当增减侧面泄水孔的间距。

(3) 在一定范围内,填土的宽度增加和夯实度的降低均能够使地下室底板水头增加较大,地下室底板水头大小对填土宽度和夯实度变化较为敏感。工程中应当严格控制填土的宽度和夯实度,填土宽度根据工程设计一定时,夯实下部填土达到一定程度,充分降低填土的渗透性。

(4) 地下室底板下土层扰动厚度对地下室底板水头有一定影响,对地下室底板水头影响权重较小,地下室底板水头大小随着地下室底板下土层扰动程度增加而增加。在地下室底部垫层施工过程中应尽量避免对地下室底板下土层的扰动。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 10-11.
- [2] 赵新, 王骏永, 王呈龙. 泄水减压法在地下室抗浮设计中的应用[J]. 浙江建筑, 2014, 32(2): 4-8.
- [3] 刘波, 刘钟, 张慧东. 建筑排水减压抗浮新技术在新加坡环球影城中的设计应用[J]. 工业建筑, 2011, 41(8): 138-139.
- [4] 袁奕. 一种地下建筑抗浮的方法: 中国, ZL200710052439.9[P]. 2010-11-10.
- [5] 定培中, 肖利, 李威. 深厚透水性地层中大型深基坑降水方案设计探讨[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 46-50.
- [6] 《正交试验法》编写组. 正交试验法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1976.
- [7] GB50068-2002 给排水构筑物设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] 王岩, 隋思涟, 王爱青. 数理统计与 MATLAB 工程数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [9] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1989.

(编辑: 刘运飞)

Orthogonal Analysis of Factors Affecting the Anti-floating Effect of Draining Decompression

YANG Bo-jin^{1,2}, LI Yin-ping^{1,2,3}, GAN Quan⁴, LIU Wei³,
KONG Qing-cong^{1,2}, HUANG Jue-hao^{1,2}

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430010, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430010, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 4. Hubei Tianli Construction Technology Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: In view of the shortcomings of traditional basement anti-floating methods, we discussed the basic principle and the corresponding construction measures of draining decompression. We also analyzed the factors affecting the anti-floating effect with orthogonal experiments compared with numerical simulation. The factors include the width of backfill, the spacing of drainage holes, the compaction degree of backfill, and the disturbance degree of the underlying at the bottom of the basement. Finally, we calculated the influence order and weights of various factors using residual analysis method and analytic hierarchy process. Results show that compared with conventional methods, draining decompression has obvious anti-floating effect by changing passive anti-floating to active anti-floating. Moreover, it is convenient to construct and the cost is low. The order of factors according to the influence is as follows: compaction degree of backfill > width of backfill > spacing of drainage holes > disturbance degree at the bottom of basement, and the corresponding weights are 0.55, 0.27, 0.15, 0.03, respectively. The sum of the first three factors is up to 0.97. As a result, we should try to reduce the spacing of holes, the width and the water permeability of the backfill to achieve good anti-floating effect in engineering practice. Besides, we should also limit the parameters of these three factors reasonably in order to achieve the best effect of lowering water level according to specific engineering conditions. The research method provides an important reference for the design and construction of the anti-floating method by draining decompression.

Key words: anti-floating method by draining decompression; drainage holes; orthogonal experiment analysis; width; compaction degree; disturbance degree