

文章编号: 1000-7598 (2014) 01-0055-07

支挡结构上的水土压力特性试验研究

赵明华, 霍 然, 罗 宏, 张 锐

(湖南大学 岩土工程研究所, 长沙 410082)

摘 要: 针对当前水土压力计算中很少考虑土自身性质对其影响的研究现状, 以自制试验槽为研究工具, 通过使用 3 种不同渗透性土样进行的支挡结构上水土压力测试研究, 对比了水土压力实测值和由水土压力分算、水土压力合算得到的理论计算值, 分析了孔隙水压力和土压力的变化规律。由试验结果可以得到, 由水土压力合算得到结果偏小, 但在一定条件下尚可以接受, 在发生主动位移情况下墙后土体会产生负超孔压, 渗透系数影响着负超孔压的消散和孔隙水压力的传递程度, 并进一步影响支挡结构上水土压力的分布情况。由试验结果推知, 当土体渗透系数小到一定程度时, 水土压力合算的方法是合理的。

关 键 词: 支挡结构; 水土压力合算; 水土压力分算; 渗透系数; 孔隙水压力

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Experimental study of water and earth pressures on retaining structure

ZHAO Ming-hua, HUO Ran, LUO Hong, ZHANG Rui

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: For the current status of research that it rarely considers the impact of the nature of soil when calculating water and earth pressures, using self-made testing tank as research tool through measurement study by using three types of soil samples with various permeability coefficients, the measured water and earth pressures are compared with the theoretical values obtained by water and earth pressures calculated separately and together method; and the variation laws of pore water pressure and earth pressure are analyzed. The experimental results show that the values obtained by water and earth pressures calculating together method is lower than measured values; but still acceptable under certain conditions. Accompanied by active displacements, it generates negative exceed pore pressure in soil behind wall. Dissipation of negative exceed pore water and transfer of pore water pressure are both affected by permeability of soils which further affect the distribution of water and earth pressures on retaining structures. From the experiment results we can speculate on that the water and earth pressures by calculating together method is reasonable when the permeability of soil reduces to certain level.

Key words: retaining structure; water and earth pressures calculating together; water and earth pressures calculating separately; permeability coefficient; pore water pressure

1 引 言

随着我国城市化的发展, 大量高层、超高层建筑拔地而起, 城市地铁建设方兴未艾, 其建设过程中不可避免地涉及大深度、大面积基坑工程的设计计算。准确计算作用在支护结构上的侧向土压力对合理设计支护结构意义重大, 我国现行规范^[1]规定, 对于地下水位以下的砂质粉土和砂土采用水土压力分算原则, 水压力不需要乘以折减系数, 对于地下水位以下的黏土和粉质黏土采用水土压力合算原则, 将水压力和土压力一并乘以相应的主动或者被动土压力系数。然而水土压力合算的做法并不符合

有效应力基本原理, 因此, 广大工程人员及学者对是采用水土压力合算准则还是水土压力分算准则更为合理这一问题上进行了相应研究, 并产生了较大的争议。

杨晓军等^[2]认为, 在软黏土地区临时性开挖基坑支护中采用水土压力合算方法更为接近实测结果。陈愈炯等^[3]总结了国内各种常用计算方法, 认为黏性土在施工期采用分算方法并不成熟。李广信^[4]总结了影响支护结构上水土压力的若干因素, 指出一定条件下的水土压力合算具有一定的微观基础。姚秦^[5]、胡其志^[6]针对黏性土水土压力计算分别提出了考虑其塑性指数和液性指数影响的计算方法,

收稿日期: 2013-03-18

第一作者简介: 赵明华, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事桩基础及软土地基处理方面的研究工作。E-mail: mhzhaohd@21cn.com

但都缺乏可靠的理论依据。李兴高等^[7]利用自制试验箱进行了 3 种墙体主动位移模式下的水土压力测试研究,得出土压力及水压力大小及作用点所在位置与挡墙位移模式相关,但未对黏土情况进行研究。刘国彬等^[8-9]通过对上海软土基坑工程的大量实测工作,认为应当对土中的水压力进行折减,水土压力分算时水压力应当乘以水压力折减系数。张彬^[10]通过试验证明,无论砂土还是黏土,都能够传递孔隙水压力,但孔隙水压力的传递程度和速度存在差异。崔岩等^[11]则通过试验得出了相反的结论,认为黏性土中的孔隙水压力也是可以完全传递的,水土压力分算在黏性土中完全适用。

以上学者均对水土压力分算与合算问题进行了深入的研究,但忽视了规范中所强调的土的性质对水土压力分布特性的影响。判定水土压力分算还是水土压力合算更为合理的核心在于判定土中孔隙水压力的传递情况。如果孔隙水压力可以无损失的传递,不必乘以主动或者被动土压力系数,那么采用水土压力分算准则计算也就毋庸置疑。渗透性是土的一项重要物理性质,对研究土中孔隙水压力传递有着重要意义。因此,本文考虑通过采用 3 种不同渗透性的土样在试验槽中进行水土压力实测试验,观测其水土压力分布特征和变化规律,并根据试验结果探讨在不同渗透性土层中水土压力分算和合算的合理性,以期得到一些有益的结论,为工程实践提供参考。

2 试验模型及材料

2.1 试验槽及试验挡墙

试验利用湖南大学工程试验楼地下室自砌砌体试验槽进行,试验槽内尺寸为 $160\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 200\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),并预留一个 30 cm 开口,如图 1 所示。内墙和底面抹平,为防止土中水渗出槽外,在槽内铺设 3 层塑料膜,并在每层塑料膜间涂抹润滑油,这对于消除试验槽内墙、挡墙与土样间的摩擦力十分有效。在试验槽后部设 15 cm 的砂砾层作为缓冲层,试验时由此处加水,可以避免直接加水对表层土样的冲刷。

挡墙采用尺寸为 $200\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)的刚性板加工而成,在与土样接触一面预定位置处加工出圆形凹槽,将土压力盒粘贴在凹槽内,并用石膏将挡墙与土压力盒间的缝隙抹平,挡墙尺寸和土压力盒分布情况如图 2 所示。

由于挡墙上水土压力分布情况随挡墙位移模式变化而变化^[7],必须控制挡墙发生的位移属于同一

模式。本试验选择绕墙底转动的位移模式进行试验,实现方法为,在墙底设一根直径为 2 cm 的 PVC 管,内部填充水泥砂浆,保证其在水泥砂浆硬化后能够达到刚度要求,上部设一块厚度为 2 cm 的垫板,待试验开始后将上部的垫板抽走,即可保证挡墙发生绕墙底转动的主动位移。在挡墙顶端用两只由磁性支座固定 10 mm 百分表来观测挡墙的位移变化情况,参考图 1。

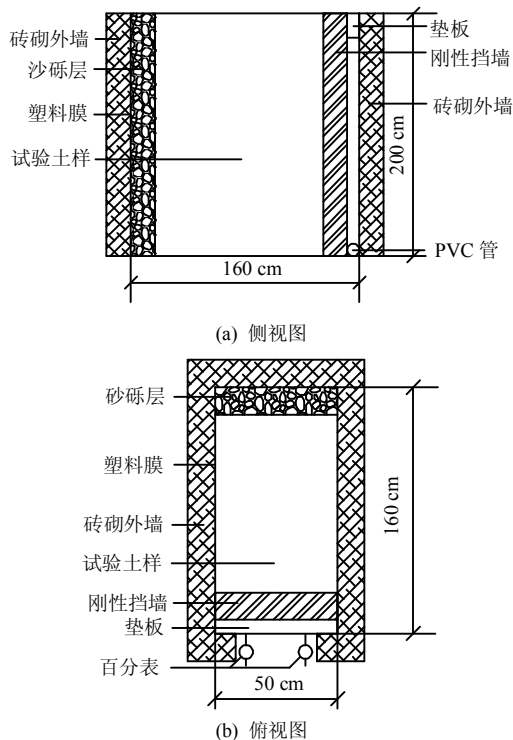


图 1 试验槽示意图

Fig.1 Schematic diagram of testing tank

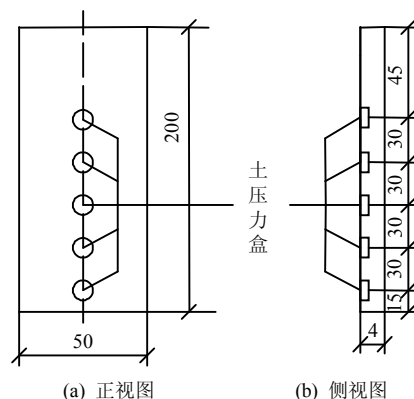


图 2 挡墙尺寸及土压力盒布置 (单位: cm)

Fig.2 Dimensions of retaining wall and layout of earth pressure cells (unit: cm)

2.2 试验土样

本试验使用了 3 种不同渗透性的土样,经颗粒分析试验和界限含水率试验认定为砂土、黏土和粉

质黏土，各土样级配情况如图 3 所示。

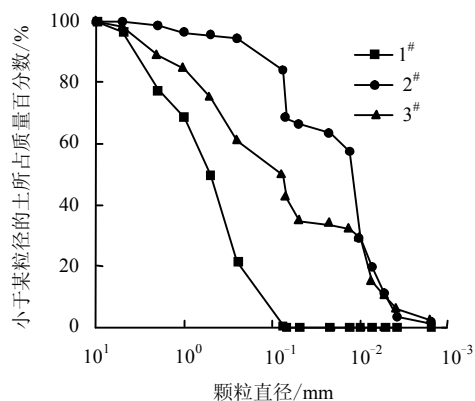


图 3 土样颗粒级配曲线

Fig.3 Particle size distribution curves of soil sample

试验所用 3 种土样的物理和力学参数如表 1、2 所示。

表 1 土样物理参数

Table 1 Physical parameters of soil samples

土样 编号	土样	饱和重度 γ_{sat} /(kN/m ³)	干重度 γ_d /(kN/m ³)	渗透系数 k /(cm/s)	塑性指数 I_p
1	砂土	18.5	14.2	1.2×10^{-2}	
2	黏土	20.6	15.2	1.5×10^{-7}	29.3
3	粉质黏土	19.8	14.9	5.2×10^{-5}	15.1

表 2 土样力学参数

Table 2 Mechanical parameters of soil samples

土样 编号	土样	固结不排水抗剪强度指标		有效应力抗剪强度指标	
		c_{cu} /kPa	$\varphi_{cu}/(^{\circ})$	$c'/$ kPa	$\varphi'/(^{\circ})$
1	砂土	0.0	18.2	0.0	23.9
2	黏土	5.2	12.7	6.0	23.6
3	粉质黏土	3.4	12.8	4.7	20.7

3 试验步骤

由于试验条件和时间有限，作者只进行了绕墙底转动发生主动位移条件下的土压力试验，其具体试验步骤如下：

(1) 将塑料膜间涂抹润滑油后铺设在试验槽内部，将挡墙、PVC 管、垫板和百分表装入预定位置，土压力盒和孔隙水压力传感器调零。

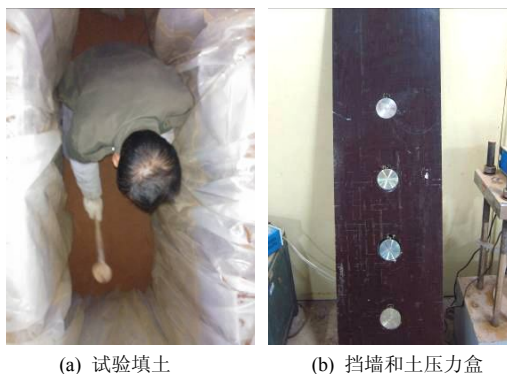
(2) 将风干土样按计算得出的质量均匀填入土槽内部，并压实至 15 cm，共计 12 层，土样高度为 1.8 m。填土过程中在土压力盒圆心同一深度处埋入孔隙水压力传感器，土压力传感器的布置情况参考图 2。

(3) 在试验槽后部预留的砂砾层中注水，直至试验槽内土样饱和。

(4) 试验中挡墙上的水土压力、孔隙水压力和墙顶位移分别由土压力盒、孔隙水压力传感器和墙顶的百分表测得。读取各土压力盒及孔隙水压力传感器读数，待水土压力值稳定后将上部垫板拔出，模拟挡墙在墙后水土压力作用下绕墙底转动，记录一定时间后土压力盒、孔隙水压力传感器和百分表的读数，直至各项数据稳定。

(5) 取出所填试验土样，采用其他试验土样重复步骤 (1)~(4) 的工作。

试验现场如图 4、5 所示。



(a) 试验填土 (b) 挡墙和土压力盒

图 4 填土和挡墙

Fig.4 Filling soil and retaining wall



(a) 试验槽实景



(b) 参数量测设备

图 5 水土压力量测现场

Fig.5 Measurement site of water and earth pressures

4 试验结果及分析

4.1 水土压力理论值和实测值对比分析

当前,国内水土压力计算方法中应用较为广泛的有以下几种^[2](以静水条件下饱和土的主动土压力为例)。

(1) 总应力水土压力合算法

$$\sigma_a = \gamma_{\text{sat}} h K_a - 2c_{\text{cu}} \sqrt{K_a} \quad (1)$$

式中: γ_{sat} 为土体的饱和重度; h 为计算点深度; $K_a = \tan^2(\pi/4 - \varphi_{\text{cu}}/2)$; c_{cu} 、 φ_{cu} 为三轴固结不排水强度。

(2) 有效应力水土压力分算法

$$\sigma_a = \gamma' h K'_a - 2c' \sqrt{K'_a} + \gamma_w h \quad (2)$$

式中: γ' 为土体的有效重度; $K'_a = \tan^2(\pi/4 - \varphi'/2)$; γ_w 为水重度; c' 、 φ' 为有效应力抗剪强度。

(3) 总应力水土压力分算法

$$\sigma_a = \gamma' h K'_a - 2c' \sqrt{K'_a} + \gamma_w h \quad (3)$$

式(1)为典型的水土压力合算方法,抗剪强度参数易于获得,在工程中有着广泛应用;式(2)是根据有效应力原理得到的水土压力分算公式,物理意义明确,有坚实的理论基础;由于土中的超孔隙水压力难以通过测定和计算准确获得,有研究人员提出,将超孔隙水压力作为土压力的一部分,采用式(3)将总应力强度指标代入水土压力分算公式的方法进行估算。

1[#]~3[#]土样根据式(1)~(3)计算得出的水土压力理论值和移开垫板后1、12、34 d后水土压力实测值如图6~8所示。

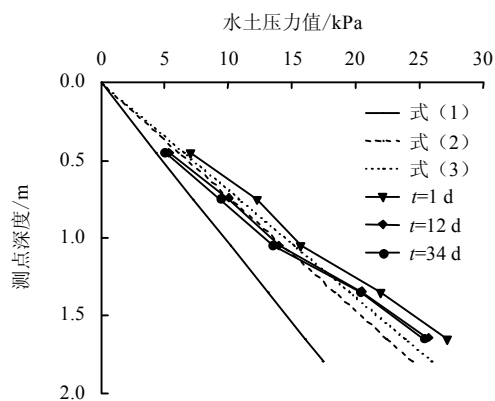


图6 1[#]土样土压力理论值及实测值对比

Fig.6 Comparison between calculated and measured earth pressures of soil sample #1

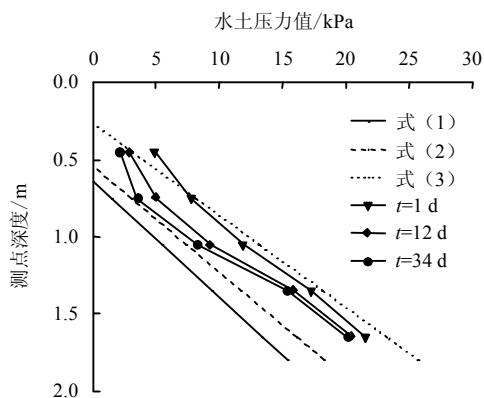


图7 2[#]土样土压力理论值及实测值对比

Fig.7 Comparison between calculated and measured earth pressures of soil sample #2

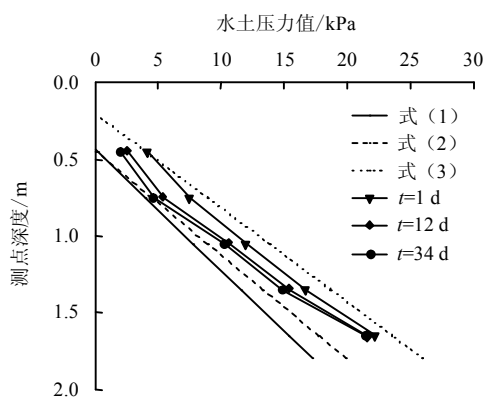


图8 3[#]土样土压力理论值及实测值对比

Fig.8 Comparison between calculated and measured earth pressures of soil sample #3

通过对图6~8的比较,可以发现试验所用的3种土样在试验条件下各个深度处实测得到的结果均不同程度大于由水土压力合算式(1)得到的理论值,但对于2[#]和3[#]土样,浅层土压力与水土压力合算结果差距不大,说明水土压力合算在计算试验模拟条件下的主动土压力是有一定价值的。对于渗透系数最大的1[#]砂土,无论采用式(2)还是式(3)计算都是合理的,结果差异不大。对于渗透系数较小的2[#]和3[#]土,其前期(1 d)土压力值更为接近式(3)结果,中后期(12、34 d)随着土压力的减小,浅层的土压力值逐渐趋向式(2)结果,而深层土压力变化相对较小,仍然采用式(3)计算更为合理,在计算试验模拟条件下主动土压力时可以考虑施工期按式(3)计算,营运期按式(2)计算。

4.2 孔隙水压力和水土压力随时间变化规律

1[#]~3[#]土样中孔隙水压力随时间的变化情况经分析整理,并与水土压力合算的静水压力值 $\gamma_w h$ 和

水土压力分算的静水压力值 $K_a \gamma_w h$ 比较, 结果分别如图 9~11 所示。

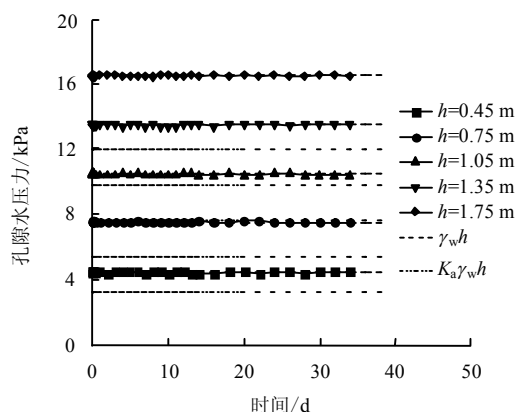


图 9 1#土样孔隙水压力随时间变化
Fig.9 Changes of pore water pressure with time of soil sample #1

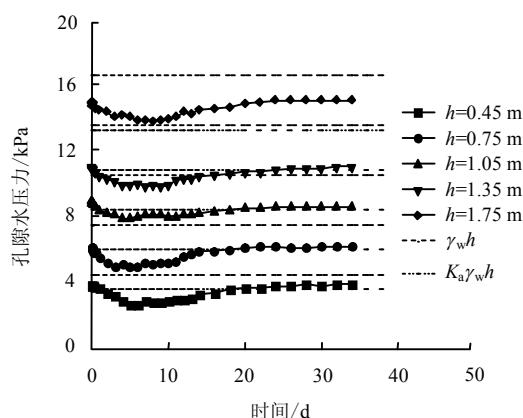


图 10 2#土样孔隙水压力随时间变化
Fig.10 Changes of pore water pressure with time of soil sample #2

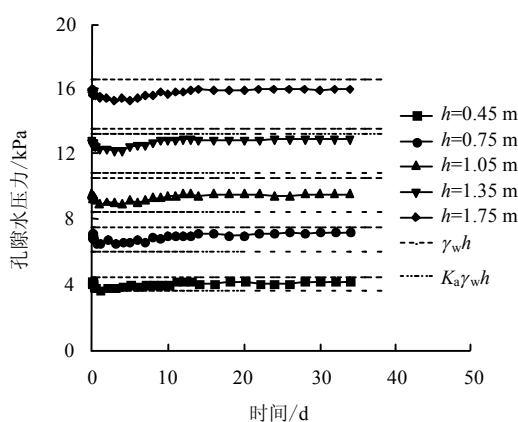


图 11 3#土样孔隙水压力随时间变化
Fig.11 Changes of pore water pressure with time of soil sample #3

1#~3#土样中的水土压力随时间的变化情况如图 12~14 所示。

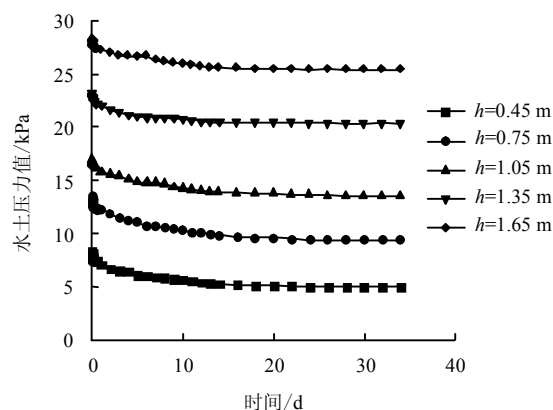


图 12 1#土样水土压力随时间变化
Fig.12 Changes of water and earth pressure with time of soil sample #1

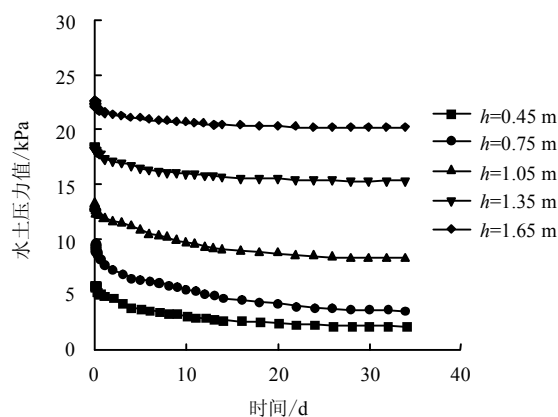


图 13 2#土样水土压力随时间变化
Fig.13 Changes of water and earth pressure with time of soil sample #2

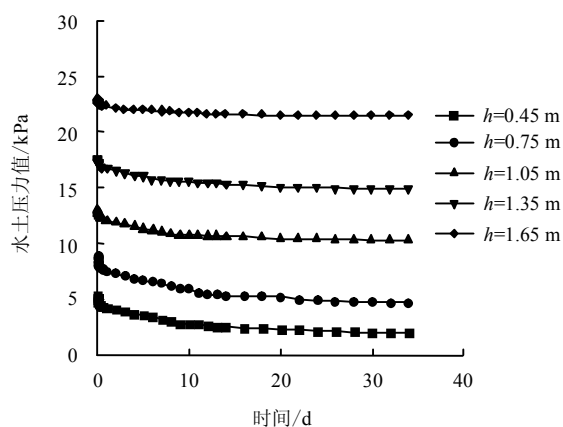


图 14 3#土样水土压力随时间变化
Fig.14 Changes of water and earth pressure with time of soil sample #3

由图 9~11 可以看出, 对于渗透性最大的 1#土样, 其孔隙水压力几乎是完全传递的, 而且在试验过程中基本保持不变。再参照图 6 的对比结果, 可见在较高渗透性的砂土情况下采用水土压力分算方法是合理的。而对于 2#和 3#土样, 孔隙水压力均有一定程度的折减, 低于理论值, 且渗透系数大的 3#

土样中的孔隙水压力要高于2[#]土样同一深度处的孔隙水压力,随着渗透性增大,孔隙水压力传递能力增强。2[#]土样和3[#]土样孔隙水压力实测值与理论静水压力值 $\gamma_w h$ 的比较如表3所示。

表3 孔隙水压力理论值与实测值
Table 3 Calculated and measured pore water pressures

土样 h/m	2 [#]		3 [#]	
	实测值 /kPa	实测值/ 理论值	实测值 /kPa	实测值/ 理论值
4.5	2.7~3.9	0.600~0.867	3.8~4.1	0.844~0.911
7.5	5.0~6.2	0.667~0.827	6.5~7.1	0.867~0.946
16.5	13.7~15	0.830~0.909	15.2~15.9	0.921~0.964

另一方面,可以明显地观察到挡墙发生主动位移的前期,2[#]和3[#]土样中的孔隙水压力均有一定程度的降低,这是因为由于挡墙移动导致围压减小,进而产生负值的超孔隙水压力,随着负超孔压的消散,孔隙水压力又逐渐恢复到原来的水平。这种负超孔压在渗透性较大的1[#]土样中很容易消散,几乎不能测得,而在渗透性较小的2[#]和3[#]土样中,这种负超孔压会持续一段时间。

将2[#]和3[#]土样的孔隙水压力实测值和乘以主动土压力系数后的水压力 $K_a \gamma_w h$ 比较,可以发现,稳定后的孔隙水压力实测值只是略高于 $K_a \gamma_w h$,而在负超孔压影响下更是有低于 $K_a \gamma_w h$ 的情况。可以得到以下推论,如果土体的渗透性进一步降低(由本试验结果来看渗透系数至少要低于 10^{-7} cm/s),在考虑负超孔压影响的情况下,可能在较长一段时间内土中孔隙水压力等于或者小于 $K_a \gamma_w h$,这时采用水土压力合算方法计算是合理的,但这尚需要进一步的研究证明。

结合图12~14,可以看到土压力主要的降低时间段也是墙体发生主动位移的前期,这段时间也是土体围压变化较大,产生负超孔压的阶段,可见这种负超孔压在一定程度上改变支挡结构上水土压力的分布情况,在一定程度上减小了主动土压力大小,对于支挡结构的设计是有利的,在设计中适当考虑这种影响可使设计更为经济合理。

5 结 论

(1) 在试验条件下,水土压力合算结果普遍偏小,但在黏性土和粉质黏土的浅层得到的结果尚可接受,仍有一定参考价值,水土压力分算方法可以考虑根据工况选择。

(2) 渗透性对孔隙水压力的影响体现在两个方面:一是,在静水压力的传递上,在渗透系数足够大的土样中,静水压力能够完全传递,在渗透系数

较小的土样中,静水压力会有一定的折减;二是,体现在土体中产生的负超孔隙水压力的消散时间上,与渗透性较大的土体相比,负孔压对渗透性较小的土体影响更大。

(3) 根据试验结果可以得到推论,当土的渗透性低于一定水平时,水土压力合算方法是可行的。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
- [2] 杨晓军, 龚晓南. 基坑开挖中考虑水压力的土压力计算[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4): 58—62.
YANG Xiao-jun, GONG Xiao-nan. Calculation of earth pressure on excavation considering pore water pressure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1997, 30(4): 58—62.
- [3] 陈愈炯, 温彦锋. 基坑支护结构上的水土压力[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 139—143.
CHEN Yu-jiong, WEN Yan-feng. Water and earth pressures on the supporting structure around a foundation pit[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(2): 139—143.
- [4] 李广信. 基坑支护结构上水土压力的分算与合算[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 348—352.
LI Guang-xin. Estimating the water and earth pressures on the supporting structure around a foundation pit separately and together[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 348—352.
- [5] 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 on excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(1): 134—135.
- [6] 胡其志. 基坑支护结构水土压力的分算[J]. 岩土工程界, 2003, 6(12): 54—55.
HU Qi-zhi. Calculations of the water pressure and the soil pressure in foundation pit support structures[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2003, 6(12): 54—55.
- [7] 李兴高, 刘维宁. 挡墙上作用土压力和水土压力的测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 24(12): 2149—2154.
LI Xing-gao, LIU Wei-ning. Study on measurements of earth pressure and water-soil pressure acting on retaining wall[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 24(12): 2149—2154.