

# 土岩组合地层地铁深基坑土压力实测研究

寿凌超,王立峰,王珂,韦康

(浙江科技学院 土木与建筑工程学院,杭州 310023)

**摘要:** 为了研究土岩组合地层基坑开挖性状和受力性能与其他地质条件的差异,采用现场实测和 Rankine 理论分析的方法对金华地区土岩组合地质条件下万达广场地铁深基坑的土压力、深层土体位移等进行分析。研究表明:当开挖在见岩面以上土层时,主动土压力分布模式为三角形,基坑开挖面以下的影响深度约为 0.93~1.1 倍的开挖深度 ( $H$ );当开挖到见岩面以下岩石层时,主动土压力由三角形分布演变为 R 形分布,基坑开挖面以下的影响深度约为 0.58~0.67 $H$ ;在见岩面以上,围护结构上主动土压力的实测值与理论值的比值约为 0.81;在见岩面以下,实测值与理论值相差较大,两者比值约为 0.48。研究结果可为土岩组合地质条件下类似工程的设计、施工和监测等提供参考。

**关键词:** 土岩组合地层;土压力;基坑;土体位移

**中图分类号:** TU473      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-8798(2021)03-0248-06

## Field measurement study on earth pressure of deep foundation pit of subway in soil-rock combination stratum

SHOU Lingchao, WANG Lifeng, WANG Ke, WEI Kang

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to explore the differences of foundation pit excavation properties and mechanical performance between the soil-rock combination stratum and other geological conditions, the methods of field measurement and Rankine theoretical analysis were used to analyze the soil pressure and deep soil displacement of deep foundation pit of subway under the geological conditions of soil-rock combination in Wanda Plaza, Jinhua area. The research results show that when excavating in the soil layer above the rock surface, the active earth pressure distribution pattern is triangular, and the influence depth below the excavation surface of the foundation pit is about 0.93~1.1 times  $H$  ( $H$  is the excavation depth); when excavating in the rock layer below the rock surface, active earth pressure evolves from triangular distribution to R-shaped distribution, and the influence depth below the excavation surface of the foundation pit is about 0.58~0.67 times  $H$ ; above the rock face, the ratio of the measured value to the theoretical value is about 0.81; below the rock face, the ratio is about 0.48,

**收稿日期:** 2020-08-05

**基金项目:** 浙江省金华市科技局计划项目(0401104117)

**通信作者:** 王立峰(1968—),男,安徽省宿州人,教授,博士,主要从事土力学、基坑工程研究。E-mail:wanglfzust@163.com。

indicating the great difference between the measured value and the theoretical value. The research results can provide a reference for the design, construction and monitoring of similar projects under the geological conditions of soil-rock combination.

**Keywords:** soil-rock combination stratum; earth pressure; foundation pit; soil displacement

近年来地铁建设在全国各地蓬勃发展,在地铁建设过程中会遇到各种土质情况,针对不同的土质应采取相应的围护结构以保证基坑和周边环境的安全。基坑围护的主要荷载为主动土压力,因此研究主动土压力的大小和分布对了解围护结构受力情况具有重要的意义。

国内外众多研究者对基坑开挖时土压力的大小和分布等做了探索。Terzaghi 等<sup>[1]</sup>提出实测土压力与经典土压力理论不相符,实测的土压力呈非线性分布,而经典土压力理论计算的结果却是直线分布;赵涛<sup>[2]</sup>的研究发现基坑开挖引起的地下连续墙土压力分布呈非线性的波动特征;宋征<sup>[3]</sup>在经典土压力理论的基础上,分析了墙后土体的应力状态,推导了考虑墙背摩擦情况的土压力系数和土压力计算方法;侯大伟<sup>[4]</sup>研究了土体位移对围护结构土压力分布的影响,建立了土压力与墙体位移的关系曲线,得到了考虑位移的土压力计算方法;丁克胜等<sup>[5]</sup>分析了天津软土地区采用逆作法施工的某深基坑工程,得到了土压力和墙体侧向变形的关系;屈志英<sup>[6]</sup>研究了黄土地区围护桩桩后的土压力,认为桩后土压力值小于静止土压力,接近主动土压力;李涛等<sup>[7]</sup>分析了北京地铁车站的土压力实测数据,得到了实测土压力上部为三角形、下部为矩形的分布规律;姚爱军等<sup>[8]</sup>研究了长春某基坑工程双排桩支护结构的土压力分布规律,发现排桩桩前土压力大致呈“右凸”形分布;蒋忠信等<sup>[9]</sup>研究了南昆铁路支护结构的主动土压力,得到主动土压力大致呈抛物线分布。应宏伟等<sup>[10]</sup>提出了任意位移柔性挡墙主动土压力合力的计算公式、土压力分布及合力作用点高度的计算方法;张家国等<sup>[11]</sup>分析了排桩框架结构的变形和内力及桩径、桩端地层等因素对桩后土压力的影响,得出围护桩桩后土压力接近三角形分布;刘方克等<sup>[12]</sup>分析了土岩组合地区围护结构变形的实测数据,得到嵌岩桩基坑的围护结构侧移最大值与基坑深度的比值为 0.3‰~2.4‰。

上述研究主要针对软土地区、砂质土地区的土压力分布模式及围护结构变形情况,尚少涉及上软下硬土岩组合地区基坑开挖的土压力分布和围护结构变形,对此,本研究依托浙江金华地区土岩组合地层条件下的某地铁深基坑工程,通过现场实测和理论计算分析基坑在不同工况下的受力特征和围护结构性状。

## 1 工程概况及科研监测

金华万达广场地铁车站主体结构为地下三层单柱双跨混凝土框架结构,车站采用明挖法(局部盖挖)施工,标准段宽度为 20.2 m,基坑开挖深度为 24.0~25.0 m。车站总长约为 182.0 m。围护结构采用钻孔灌注桩+内支撑,桩径为 1 m,桩间距为 1.2 m,桩体嵌固深度为 5 m,地下 8.5 m 以下均为中风化泥质粉砂岩,强度较高,共设 3 道内支撑,围护结构典型剖面图如图 1 所示。第一道为混凝土支撑,第二、三道为钢支撑。钻孔灌注桩间采用高压旋喷桩止水,桩间土采用挂网喷射混凝土支护。

本工程地层由上至下依次为:素填土,层厚为 1.4~6.8 m;粉砂,层厚为 0.6~1.3 m;圆砾,层厚为 1.9~4.9 m;强风化泥质粉砂岩,层厚为 0.4~2.0 m;中风化泥质粉砂岩,层厚为 6.0~34.0 m。中风化泥质粉砂岩层顶面在地表以下约 8.5 m 处,见岩面位于地表以下 8.5 m,各土层基本物理力学参数见表 1,各参数指标由勘察单位的地勘报告提供。

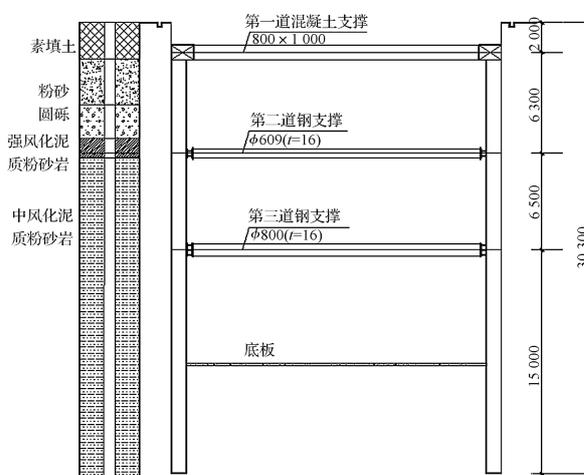


图 1 围护结构典型剖面图(单位:mm)

Fig. 1 Cross-section of enclosure structure(unit: mm)

表 1 土层基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of soil layer

土层代号	土层名称	重度( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	层厚/m	内摩擦角/ $(^\circ)$	黏聚力/kPa
①	素填土	16.0	2.0	20.6	10
②	粉砂	19.0	3.0	25.0	0
③	圆砾	20.5	2.0	32.0	0
④	强风化泥质粉砂岩	19.4	1.5	25.0	30
⑤	中风化泥质粉砂岩	24.4	40.0	35.0	50

本地铁站周边未见地表水分布。场地西侧距离武义江约 150~300 m, 武义江水与本场地地下水联系较弱。勘探深度范围内地下水类型主要可分为潜水和基岩裂隙水, 水位埋深 2.70~6.50 m。地下水位埋深和变化幅度受季节和大气降水的影响, 动态变化大, 水位变化幅度一般在 1.0~3.0 m。

科研监测内容包括: 土体深层水平位移、土压力。监测方案如下: 取基坑长边标准段 3 个断面桩体内埋设仪器, 桩代号分别为 B137、C14、C60; 土压力盒安装采用挂布法, 主动区和被动区各安装 7 个土压力盒, 监测点剖面图如图 2 所示。由于施工问题和土压力盒的存活率, 在主动侧只存活了桩下 1.5、8.5、21、28 m 处的 4 个土压力盒, 在被动侧存活了 8.5、14.8、24.4、28 m 处的 4 个土压力盒。

## 2 理论计算与实测结果分析

图 3 为金华万达广场地铁基坑平面监测布置图, 选取 1-1 剖面进行分析, 其中 C14 桩位于标准段, 在 C14 桩内挂有土压力盒、测斜管等科研仪器, 现对基坑外主动土压力进行分析。

### 2.1 坑外土压力分布模式

在基坑开挖过程中, 土压力是不断变化的, 其分布受到施工工况、围护结构变形、支撑架设及各种施工机械布置等因素的影响, 实际上是由时间(挖深)、围护结构变形及荷载等因素综合作用的结果。

图 4 为实测主动土压力随工况的变化, 其中图 4(a)、(b)分别为开挖深度在见岩面(大约在地面以下 8.5 m)以上及见岩面以下的主动土压力随着深度的变化情况。

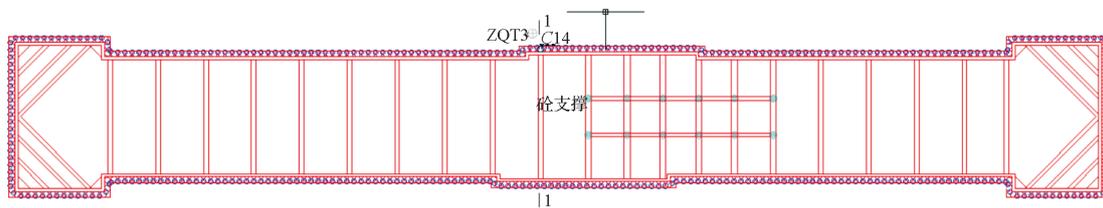


图 3 基坑平面监测布置图

Fig. 3 Monitoring layout of foundation pit plan

由图 4 可知, 当开挖深度在见岩面以上时, 沿深度方向主动土压力随深度的增加而增加; 但在同一埋深处的主动土压力却随开挖深度的增加而减小, 因为此时随开挖深度的增加, 土体位移变大, 主动土压力减小; 总体上主动土压力分布近似为三角形分布, 与 Rankine 主动土压力分布模式相同。当开挖深度在见岩面以下, 土层为中风化泥质粉砂岩时, 土压力分布大致为 3 段: 第 1 段为地表至地表以下 8.5 m, 分布模式近似呈三角形分布, 其中地表至地表以下 2 m 范围的主动土压力与理论值出入较大, 其主要原因是现场施工使得地表附近的土体扰动较大; 2~8.5 m 之间的土压力分布为线性分布, 与 Rankine 土压力理论较符合, 主动土压力随深度的增加而增加; 第 2 段为地表以下 8.5~21 m, 主动土压力随深度的增加而减小, 主要原因是随着深度的增加, 中风化泥质粉砂岩从上方的碎岩石变为完整性较好的岩石, 对围护结构的作用力较小; 第

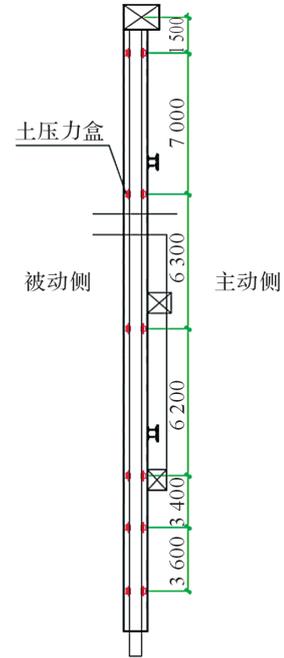


图 2 监测点剖面图(单位: mm)

Fig. 2 Cross-section of monitoring point(unit: mm)

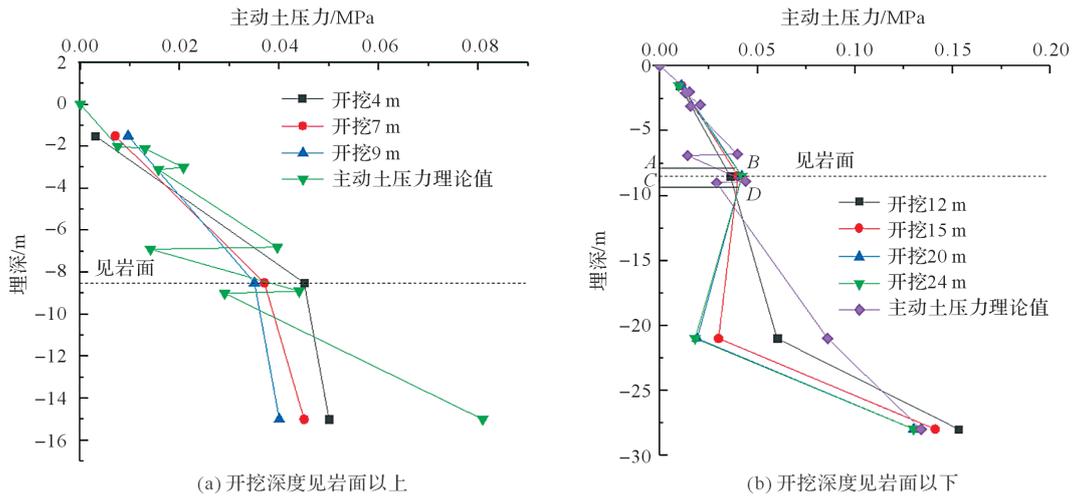


图 4 实测主动土压力随工况的变化

Fig. 4 Variation of measured active earth pressure with working conditions

3 段为地表以下 21~28 m,主动土压力随深度的增加而增大,其主要原因是坑底 24 m 处中风化岩石强度较高,限制了土体的位移,主动土压力增大。从实测结果来看,围护结构上的土压力分布近似为 R 形。

不同地质条件下的桩撑式围护结构的主动土压力分布模式有较大的不同。例如:软土地区,深基坑实测主动土压力均大于按照 Rankine 主动土压力公式的计算值,但实测值与计算值的趋势总体一致,大致呈三角形分布,Rankine 理论<sup>[13]</sup>较适用;卵石地区实测主动土压力分布模式近似为上部 R 形下部为矩形<sup>[14]</sup>;对于本研究涉及的中风化泥质粉砂岩地区,其主动土压力分布模式表现为 R 形分布,这与 Rankine 理论有较大的差异。

### 2.2 主动土压力实测值与理论值的对比分析

表 2 列出了不同工况下土压力的实测值和 Rankine 理论值。由表 2 可知,基坑开挖到底时最大实测主动土压力约为 0.13 MPa,同样开挖深度的上海软土地区的最大主动土压力实测值为 0.25 MPa<sup>[15]112</sup>,可见,土岩地区的最大主动土压力约为软土地区的 0.52 倍。表 3 为基坑开挖到底时见岩面上下各土层实测主动土压力合力值与 Rankine 主动土压力合力值的比值统计表。实测值是基坑开挖到底时的土压力值,无实测点的土层主动土压力采用插值法取得,比值采用面积比(图 4(b)中,每层土主动土压力合力值为 ABCD 所包围的面积)。加权平均值为各土层土压力实测值与理论值的比值与相应土层厚度的乘积,除以总土层厚度。加权平均值能够反映基坑开挖过程中主动土压力实测值与 Rankine 主动土压力计算值之间的差异。由表 3 可知:在见岩面以上,实测土压力与 Rankine 理论值比较接近,实测值与理论值的比值约为 0.81;在见岩面以下,实测值与理论值相差较大,两者比值约为 0.48。

表 2 主动土压力实测值与 Rankine 理论值

Table 2 Measured value and theoretical value of active earth pressure

开挖深度/m	实测值/MPa				Rankine 理论值/MPa			
	埋深 1.5 m	埋深 8.5 m	埋深 21 m	埋深 28 m	埋深 1.5 m	埋深 8.5 m	埋深 21 m	埋深 28 m
未开挖	0.002	0.051	0.067	0.185	0.020	0.053	0.135	0.182
3	0.003	0.045	0.064	0.180	0.013	0.044	0.090	0.134
6	0.007	0.035	0.061	0.172	0.013	0.044	0.090	0.134
9	0.009	0.037	0.060	0.165	0.013	0.044	0.090	0.134
12	0.010	0.036	0.060	0.153	0.013	0.044	0.090	0.134
15	0.011	0.040	0.030	0.141	0.013	0.044	0.090	0.134
20	0.011	0.042	0.019	0.130	0.013	0.044	0.090	0.134
24	0.011	0.042	0.018	0.130	0.013	0.044	0.090	0.134

### 2.3 不同埋深处主动土压力随开挖深度的变化规律

图 5 为实测主动土压力随开挖深度的变化图,由图可知,在整个施工过程中埋深 1.5 m 处的土压力变化稳定,其原因可能是圈梁对桩顶有限制作用,使上部土压力基本上处于稳定状态。埋深 8.5m 处土

表 3 不同深度处实测主动土压力合力值与 Rankine 主动土压力合力值的比值

Table 3 Ratio of measured active earth pressure resultant value to the Rankine active earth pressure resultant value at different depths

深度	土层名称	实测值/理论值	加权平均值
见岩面以上	素填土	—	—
	粉砂	0.59	0.81
	圆砾	0.85	
见岩面以下	强风化泥质粉砂岩	1.20	0.48
	中风化泥质粉砂岩	0.46	
	质粉砂岩	0.46	

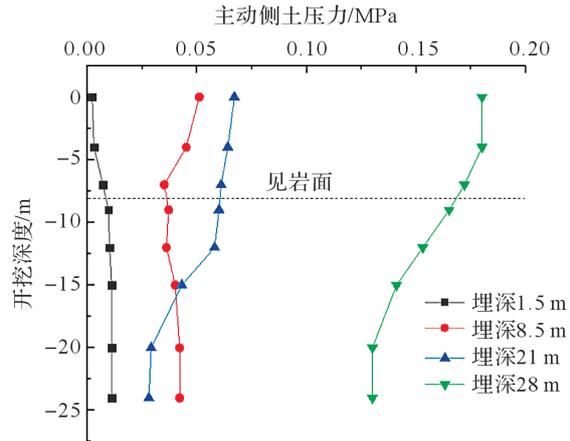


图 5 实测主动土压力随开挖深度的变化

Fig. 5 Time history curve of measured active earth pressure with excavation depth

压力并非一直在减小,而是一个动态变化过程,开挖初期土压力随开挖深度的增加而减小,当第二道钢支撑架设后,钢支撑限制了围护结构与土体位移,使作用在围护结构上的土压力增大,当开挖到 15 m 以下时对埋深 8.5 m 处土压力的影响较小,土压力较稳定,变化不大。埋深在 21、28 m 处见岩面以下的主动土压力随开挖深度的增加呈现出先不变后减小的趋势,其原因主要是初期该两处处于静止土压力状态,随着开挖深度的增加转变为主动土压力,且主动土压力随开挖深度的增加而减小,这与基坑开挖的工程性状相符合。

综上所述:随着开挖深度的增加,岩面以上各埋深处的土压力波动较小,基本上不变;而岩面以下各埋深处的土压力随开挖深度的增加而减小。

#### 2.4 桩侧土压力与桩体位移、土体水平位移的规律分析

土压力的产生与土体位移有着紧密的关系,不同深度处的围护结构的土体水平位移不同,因此围护结构外的土压力也不同<sup>[15]93</sup>。而实际工程中,基坑处于安全状态,围护结构后土体未形成连续的滑动面,未达到极限平衡状态,处于静止土压力与主动土压力之间。

图 6 为不同工况下桩体水平位移与埋深的关系,由图可知,随着开挖深度的增加,桩体水平位移逐渐增大,位移随深度分布曲线呈两头小中间大的“鼓胀”形,且最大桩体位移出现在见岩面处。其原因是开挖初期混凝土支撑的架设易控制支撑附近桩体的变形,见岩面处为土和岩层的交界处,岩土体性质发生突变;深处的土质为中风化泥质粉砂岩,强度较高,这对桩体位移的影响较小。

图 7 为土岩地区实测土压力与位移的关系曲线,由图可知,实测主动土压力随土体水平位移的增加而减小。见岩面以上,埋深 8.5 m 处当基坑开挖到 9 m 时土体水平位移达到 4.2 mm 时,土压力基本上不再变化;见岩面以下土层全为中风化泥质粉砂岩,在埋深 21 m 处当土体位移达到 3.8 mm 时,土压力不再变化;而埋深 28 m 处的土压力随土体位移的增加而减小,处于主动土压力与静止土压力之间。

#### 2.5 土压力与深层土体位移的关系

支护桩桩身及坑外土体位移与土压力大小密切相关,选取其中一个剖面在不同工况时的水平位移变化情况进行分析,土岩组合地层深层土体水平位移随工况的变化如图 8 所示,由图可知:开挖面在见岩面以上时,最大土体位移位于地表,主要是因为地表土质为素填土,压缩性大,位移受施工影响较大;当基坑

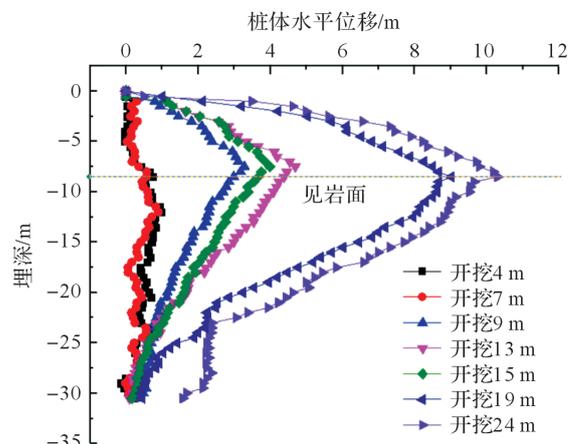


图 6 不同工况下桩体水平位移与埋深的关系

Fig. 6 Relationship between horizontal displacement

开挖4 m(粉砂层)时,8.5 m处土体位移由1.2 mm明显减小到0.2 mm,且8.5 m以下的土体位移与未开挖时相同,上部开挖到4 m时对8.5 m以下无影响,可知开挖到4 m时对基坑的影响深度约为1.1倍开挖深度( $H$ );当基坑开挖7 m(圆砾层),13.5 m处土体位移由1.9 mm明显减小到0.4 mm,且13.5 m以下的土体位移与未开挖时相同,可知开挖7 m时对基坑的影响深度约为0.93 $H$ ;当基坑开挖9 m时,15 m处土体位移明显减小,15 m以下的土体位移与未开挖时相同,可知开挖9 m时对基坑的影响深度约为0.67 $H$ ;当开挖在见岩面以下(中风化泥质粉砂岩土层)时,开挖到12 m时,19 m处土体位移明显减小,且深处的位移与未开挖时相同,可知开挖12 m时对基坑的影响深度大约为0.58 $H$ ;开挖到15 m及以下时土体都产生了位移是因为受到了开挖工况的影响。

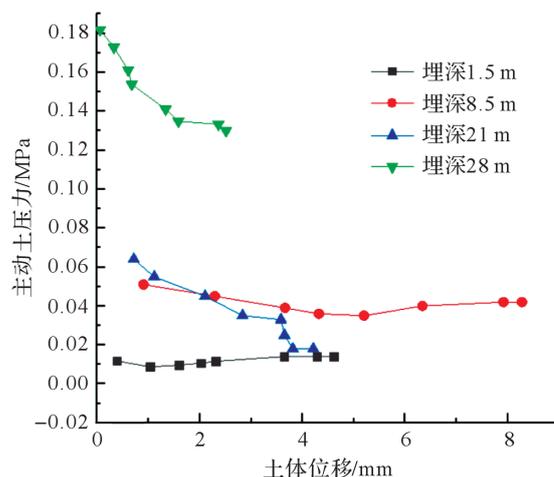


图7 实测土压力-位移关系

Fig. 7 Active earth pressure-displacement curve of pile and buried depth under different working conditions

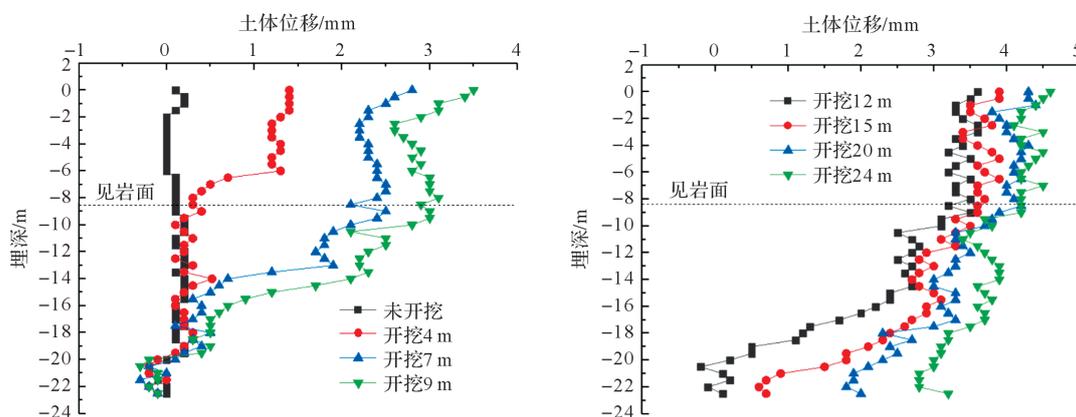


图8 深层土体位移随工况的变化

Fig. 8 Variation of deep soil displacement under different working conditions

开挖到底时最大土体位移在地表处,主要是混凝土支撑位于地表以下2 m处,见岩面以上土体性质较差,压缩性大,产生的位移也大;见岩面处为土和岩层的交界处,岩土体性质发生突变,土体水平位移也较大。

### 3 结论

通过对金华地区万达广场地铁站土岩组合实测数据的分析,可以得到以下几点结论:

1) 基坑开挖过程中,土岩组合地区主动土压力分布模式表现为三角形分布;开挖在见岩面以下时,围护结构上的主动土压力分布由三角形分布演变为R形分布。

2) 开挖深度相同条件下的基坑,土岩组合地区的最大主动土压力约为软土地区的0.52倍。在见岩面以上,实测值与理论值的比值约为0.81;在见岩面以下,实测值与理论值相差较大,两者比值约为0.48。随着开挖深度的增加,见岩面以上各埋深处的土压力基本上不变;而见岩面以下各埋深处的土压力随开挖深度的增加而减小。

3) 土岩组合地区最大水平位移位于地表。当开挖在见岩面以上土层时,对基坑的影响深度约为0.93~1.1 $H$ ;当开挖在岩面以下岩石层时,对基坑的影响深度约为0.58~0.67 $H$ 。

### 参考文献:

[1] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: Wiley John, 1948.

(下转第260页)