

文章编号: 1007-2993(2022)05-0365-06

# 土岩二元结构地层地区吊脚墙基坑支护研究

熊璐<sup>1,2</sup>

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西西安 710043;  
2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 陕西西安 710043)

**【摘要】** 以广州地铁 21 号线员村站基坑工程为例, 针对土岩二元结构地层地区, 基坑可分为上下两段进行计算, 上段采用“吊脚地下连续墙+内撑(锚索)”的墙撑(锚)体系, 下段采用岩质边坡锚喷体系, 计算结果对比现场监测结果表明: (1)推荐算法适用于土岩二元结构地层吊脚墙的计算; (2)吊脚墙锁脚锚索对墙脚水平位移起明显控制作用, 位移受锚索预应力大小的影响较大; (3)虽然吊脚墙的支持体系较常规支持体系水平位移大 15% 左右, 但位移控制水平能够满足规范要求, 并且该支持体系能够有效节省工期和投资。

**【关键词】** 吊脚墙; 土岩二元结构; 基坑支护

**【中图分类号】** TU 473; U 231<sup>+.4</sup>

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.05.004

## Research on Design of Foundation Pit Support for Suspended Wall in Soil and Rock Dual Structure Stratum Area

Xiong Lu<sup>1,2</sup>

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory (FSDI), Xi'an 710043, Shaanxi, China)

**【Abstract】** With the deepening of the excavation depth of foundation pits, the geological conditions tend to become more complicated, and the forms of supporting structures tend to be diversified. Taking Guangzhou Metro Line 21 Yuancun Station as an example, for the soil-rock dual structure strata area, the foundation pit can be divided into two upper and lower sections for calculation. The upper section adopts the wall of "suspended base underground continuous wall + inner support (anchor cable)" supporting (anchor) system, and the lower section adopts the rock slope anchoring shotcrete system. The calculation results are compared with the on-site monitoring results. The results show that: (1)The recommended algorithm is suitable for the calculation of the suspended wall of the soil and rock dual structure; (2)The foot lock anchor cable of suspended wall has an obvious control effect on the horizontal displacement of the wall foot, which is greatly affected by the prestress of the anchor cable; (3)The supporting system of the suspended wall can effectively save construction period and investment, and the deformation of the foundation pit is about 15% compared with that of the conventional foundation pit.

**【Key words】** suspended wall; soil-rock dual structure; foundation pit support

### 0 引言

城市土地资源日趋紧张, 城市地下空间开发需求不断加大, 基坑开挖深度不断加深, 基坑开挖较深可能进入中等风化—微风化岩层, 形成“上软下硬”的土岩二元结构地层, 基坑上部为土层, 下部为基岩, 两种介质差异性较大, 很难用一种计算模型解决该问题<sup>[1]</sup>。对于上述土岩二元结构地层, 基坑上部土层范围常采用墙(桩)撑(锚)支护结构, 考虑到基岩单轴抗压强度较大, 墙(桩)底嵌入基岩深度有限, 而基坑底

面在基岩以下数米, 墙(桩)底好像吊在空中, 形成“吊脚墙(桩)”<sup>[2]</sup>。目前关于吊脚墙(桩)的研究较少, 刘红军等<sup>[3]</sup>建立吊脚桩有限元数值模型, 分析了桩体嵌岩深度、桩脚处锚杆轴力和预留岩肩宽度等因素对基坑的影响。田海光<sup>[4]</sup>认为吊脚桩的嵌固深度取 2 m, 岩肩宽度取 1.5 m 较合理。赵文强<sup>[5]</sup>、朱丹晖<sup>[6]</sup>认为微型钢管桩超前支护在直立岩石边坡预裂及减振作用明显。吴晓刚<sup>[7]</sup>结合有限元仿真计算结果和现场监测数据, 对吊脚桩深基坑围护结构及土体的变

形规律展开了研究。黄薛等<sup>[8]</sup>认为吊脚桩采用桩锚支护及两桩一锚的布设方式经济效益和时间效益明显。毕经东等<sup>[9]</sup>认为微型钢管桩对吊脚桩岩肩保护作用明显。许满吉<sup>[10]</sup>以深圳地铁5号线为例,详细介绍了吊脚墙施工技术和锚索施工技术。本文以广州地铁21号线员村站为例,对土岩二元结构地层采用吊脚墙的支护体系计算方法进行研究,计算结果符合现场实测数据,可以作为吊脚墙支护体系设计的参考。

## 1 工程概况

员村站初期是21号线的第一个车站,远期是11号线的中间站,与5号线员村站进行换乘,车站南端设折返线。车站位于规划的花城大道与员村二横路交汇十字路口以南,沿员村二横路南北向布置,车站总平面布置图见图1,车站有效站台中心里程为DK5+112.000,车站明挖设计起点里程为DK4+769.590,车站设计终点里程为DK5+214.800。车站主体为地下四层14.5 m岛式站台车站,车站全长445.21 m,标准段宽为23.8 m,车站基坑开挖深度约28.12~30.86 m。基坑底位于中等风化及微风化岩层。

员村站主体基坑主要位于绢麻厂地块内,周边建筑物主要包括站北的南新大街民房,西侧的员村派出所,东侧的程界西村居民房,南侧的程届西子

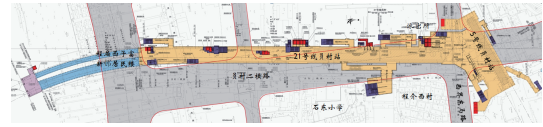


图1 员村站总平面布置图

富新村居民楼,基坑明挖施工占用车站南侧员村二横路以及北侧西界东马路,给交通带来不便,可以通过交通导改解决。

影响车站的主要管线有:员村二横路上的 $\phi 1000$ 雨水管线、 $\phi 400$ 给水管道两路,200 $\times$ 300电信管线;二号风亭上的 $\phi 800 \times 700$ 雨水管线,二号风亭处排水管线采用临时迁改,施工完成后恢复。车站主体明挖段上方市政管线均考虑置换悬吊后恢复。

## 2 地质概况

员村站及站后折返线场地地貌属于珠江三角洲冲积平原,地面标高约6.37~12.72 m,地势稍有起伏。上覆地层主要为第四系河湖相沉积地层和陆相冲、洪积相地层,下伏基岩为白垩系泥质粉砂岩和砾岩。主要地层从上至下依次为人工填土<1>、粉质黏土<4N-2>、淤泥质土<4-2B>、残积粉质黏土<5N-1>、残积粉质黏土<5N-2>、全风化碎屑岩<6>、强风化砾岩、泥质粉砂岩(<7-1>、<7-3>)、中等风化砾岩、泥质粉砂岩(<8-1>、<8-3>)、微风化砾岩、泥质粉砂岩(<9-1>、<9-3>),局部为粉细砂<3-1>、中粗砂<3-2>、淤泥<4-2A>。车站岩土参数建议值表如表1所示。

表1 岩土参数建议值表

| 岩土分层   | 岩土名称      | 天然密度<br>$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ (直剪) | 内摩擦角<br>$\varphi/(\text{°})$ (直剪) | 渗透系数<br>$k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$ | 桩侧摩阻力<br>特征值 $q_{sk}/\text{kPa}$ | 土的承载力<br>特征值 $f_{sk}/\text{kPa}$ | 基床系数(水平)<br>$K_H/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$ | 基床系数(垂直)<br>$K_V/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$ |
|--------|-----------|--|----------------------------|-----------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|--|--|
| <1>    | 人工填土      | 1.86   | *10.0                      | *15.0                             | *2.000                                   | 10                               | 80                               | 10   | 12   |
| <3-1>  | 粉细砂       | *1.90  |                            | *30.0                             | 2.500                                    | 15                               | 110                              | 10   | 15   |
| <3-2>  | 中粗砂       | *1.95  |                            | *32.0                             | 9.000                                    | 30                               | 180                              | 15   | 20   |
| <4N-2> | 粉质黏土      | 1.90   | 20.9                       | *15.0                             | *0.100                                   | 25                               | 160                              | 25   | 30   |
| <4-2A> | 淤泥        | 1.61   | *5.0                       | *4.0                              | *0.001                                   | 6                                | 50                               | 4  | 4  |
| <4-2B> | 淤泥质土      | 1.77   | *8.0                       | 4.5                               | *0.001                                   | 10                               | 70                               | 6  | 8  |
| <5N-1> | 粉质黏土      | 1.93   | 20.0                       | *19.0                             | *0.300                                   | 30                               | 180                              | 30   | 35   |
| <5N-2> | 粉质黏土      | 1.98   | *24.0                      | 21.0                              | *0.300                                   | 35                               | 220                              | 35   | 40   |
| <6>    | 全风化碎屑岩    | 1.99   | *28.0                      | *22.0                             | *0.500                                   | 45                               | 300                              | 40   | 45   |
| <7-1>  | 强风化砾岩     | 1.95   | *33.0                      | *25.0                             | 1.200                                    | 90                               |                                  | 120  | 150  |
| <7-3>  | 强风化泥质粉砂岩  | 1.96   | *36.0                      | *24.5                             | 0.800                                    | 80                               |                                  | 120  | 150  |
| <8-1>  | 中等风化砾岩    | 2.50   | *200                       | *30.0                             | *1.500                                   |                                  |                                  | 300  | 350  |
| <8-3>  | 中等风化泥质粉砂岩 | 2.55   | *150                       | *28.0                             | 1.200                                    |                                  |                                  | 250  | 300  |
| <9-1>  | 微风化砾岩     | 2.63   | *500                       | *35.0                             | 0.800                                    |                                  |                                  | 750  | 850  |
| <9-3>  | 微风化泥质粉砂岩  | 2.66   | *400                       | *33.0                             | *0.500                                   |                                  |                                  | 700  | 800  |

注: \*号为岩土勘察单位提供的经验值。

勘察期间测得地下水初见水位埋深为 1.00 ~ 4.60 m(标高 3.67 ~ 9.19 m), 稳定水位埋深为 1.20 ~ 4.80 m(标高 3.87 ~ 9.69 m)。场地地下水类型主要包括①第四系孔隙水, 主要赋存于冲、洪积砂层中, 在松散填土之中亦有少量第四系孔隙水; ②基岩风化裂隙水, 主要赋存于强风化、中等风化岩体的风化裂隙之中、含水层无明确界限, 埋深和厚度很不稳定, 其透水性主要取决于裂隙发育程度、岩石风化程度和含泥量。风化程度越高、裂隙充填程度越大, 渗透系数则越低。

### 3 基坑支护方案

员村站为地下四层车站, 主体基坑深度约为 28.12 ~ 30.86 m。站位所在位置临近珠江, 结构周边居民房屋密集, 建筑物距离车站主体最近约 15.2 m 左右, 地质钻孔显示车站南端有较厚的砂层和淤泥层。为减少基坑开挖对周边建筑物和重要管线的影响, 车站围护结构采用刚度大、变形小、工艺成熟、抗渗止水效果好的地下连续墙方案。

由详勘地质钻孔揭示, 基坑 26—53 轴范围岩面较高, 中等风化及微风化岩自稳性较好, 为降低工程造价, 该范围内连续墙采用吊脚墙, 减少连续墙入岩深度, 便于施工。综合建筑场地空间限制和相关文献研究<sup>[4]</sup>, 岩肩宽度取值 1.5 m。考虑到车站抗浮要求, 在车站地下三层中板位置施作“抗浮墙趾+压顶梁”, 车站主体结构回筑阶段, 岩肩范围回填 C15 素混凝土作为抗浮压重, 考虑耐久性要求, 地下连续墙采用 C35、P6 水下混凝土, 吊脚地下连续墙嵌入岩肩范围以下 1.5 m, 上部基坑深度约 22.5 m, 基坑采用“800 mm 厚连续墙+内支撑体系”, 第一道支撑采用钢筋混凝土支撑, 支撑于冠梁上, 第二—第四道支撑采用  $\phi 600 \times 14$  钢管支撑, 支撑于 2I45a 钢围檩上, 第五道支撑采用锚索, 锚固于 800 mm  $\times$  800 mm 的钢筋混凝土围檩(压顶梁)上, 锚索采用 1  $\times$  7  $\phi_s 15.2$  标准钢绞线, 锚固体直径为 150 mm, 锚索的锚固体强度不小于 25 MPa。

下部岩石基坑深度约 7.5 m, 主要为微风化砾岩, 砾状结构, 层状构造, 裂隙稍发育, 岩体完整性指数  $K_v$  为 0.640, 为较完整—完整岩体; 微风化泥质粉砂岩, 砂状结构, 层状构造, 裂隙稍发育, 岩体完整性指数  $K_v$  为 0.936, 为完整岩体。场地无放坡条件采用直壁开挖, 岩石基坑的稳定性与岩体结构面发育情况及产状有关, 为保障岩体的稳定性, 采用“锚杆+混凝土面层”锚喷体系。锚杆采用 HRB400 钢筋, 主要起箍束骨架、承担主要荷载、应力传递和扩散、对土体加

固的作用。面层可增强整个锚喷体系的整体性及防水作用。面层采用 100 mm 厚 C20 素砼, 锚杆 MG1 采用 3E28, 锚杆 MG2 和 MG3 采用 2E28, 采用梅花形布置 @2000 mm  $\times$  2000 mm, 锚杆长度 5 ~ 8 m, 锚杆入射角 15°, 结构面倾角 60°。

车站施工将可能对周边环境将产生一定的不利影响。本站基坑侧壁安全等级为一级, 变形控制保护等级为一级, 变形控制标准: 地面最大沉降量  $\leq 0.15\% H$ ; 围护结构最大水平位移  $\leq 0.25\% H$ , 且  $\leq 30$  mm。连续墙接头均采用 I 型钢接头。基坑支护剖面见图 2。

车站主体结构采用明挖顺作法施工, 主要施工步骤如下: 施工围挡, 场地平整——施工地下连续墙、中立柱——开挖至第一道砼支撑中心以下 0.8 m, 架设第一道砼支撑——待第一道砼支撑达到设计强度后, 继续开挖至第二道钢支撑中心以下 0.8 m, 架设第二道支撑——依次向下开挖, 随挖随撑, 架设第三、四道支撑、第五道锚索——继续向下开挖, 挂网喷射 100 mm 厚 C20 素砼支护, 锚杆加固, 直至开挖至基坑底——施工垫层、防水层、底板和部分地下四层内衬墙——继续向上施工, 浇筑侧墙、负三层中板、墙趾和压顶梁, 待中板达到设计强度后, 拆除第四道支撑——依次向上施工, 浇筑侧墙、各层中板及顶板——待顶板达到设计强度后, 拆除第一道砼支撑和冠梁, 施工顶板防水层、保护层, 回填土, 恢复路面。

### 4 基坑支护计算

基坑上部为土层, 下部为基岩, 两种介质差异性较大, 很难用一种计算模型解决。本次计算, 上部基坑采用理正深基坑 7.0 软件, 满足《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)的要求, 按“增量法”计算, 计算荷载包括地面超载和水土压力等。采用弹性法土压力模型, 基坑外侧土压力按主动土压力计算, 砂性土按照水土分算, 黏性土按照水土合算。以标准段 4—4 段面为例, 计算模型如图 3 所示, 计算结果如图 4 和图 5 所示。

经计算, 围护桩最大水平位移 10.39 mm, 地表最大沉降值为 16 mm, 整体稳定安全系数  $K_s = 3.669 > 1.35$ , 均能够满足规范要求。

下部岩质基坑采用理正岩土计算软件, 采用极限平衡法进行简单平面滑动稳定分析, 计算荷载取上部基坑覆土自重  $q = 450$  kPa, 地面超载取  $q = 20$  kPa, 合计 470 kPa。计算模型见图 6。

计算结果显示: 总下滑力为 723.2 kN, 总抗滑力为 3893.4 kN, 安全系数为 5.384, 岩质基坑稳定性满足要求。

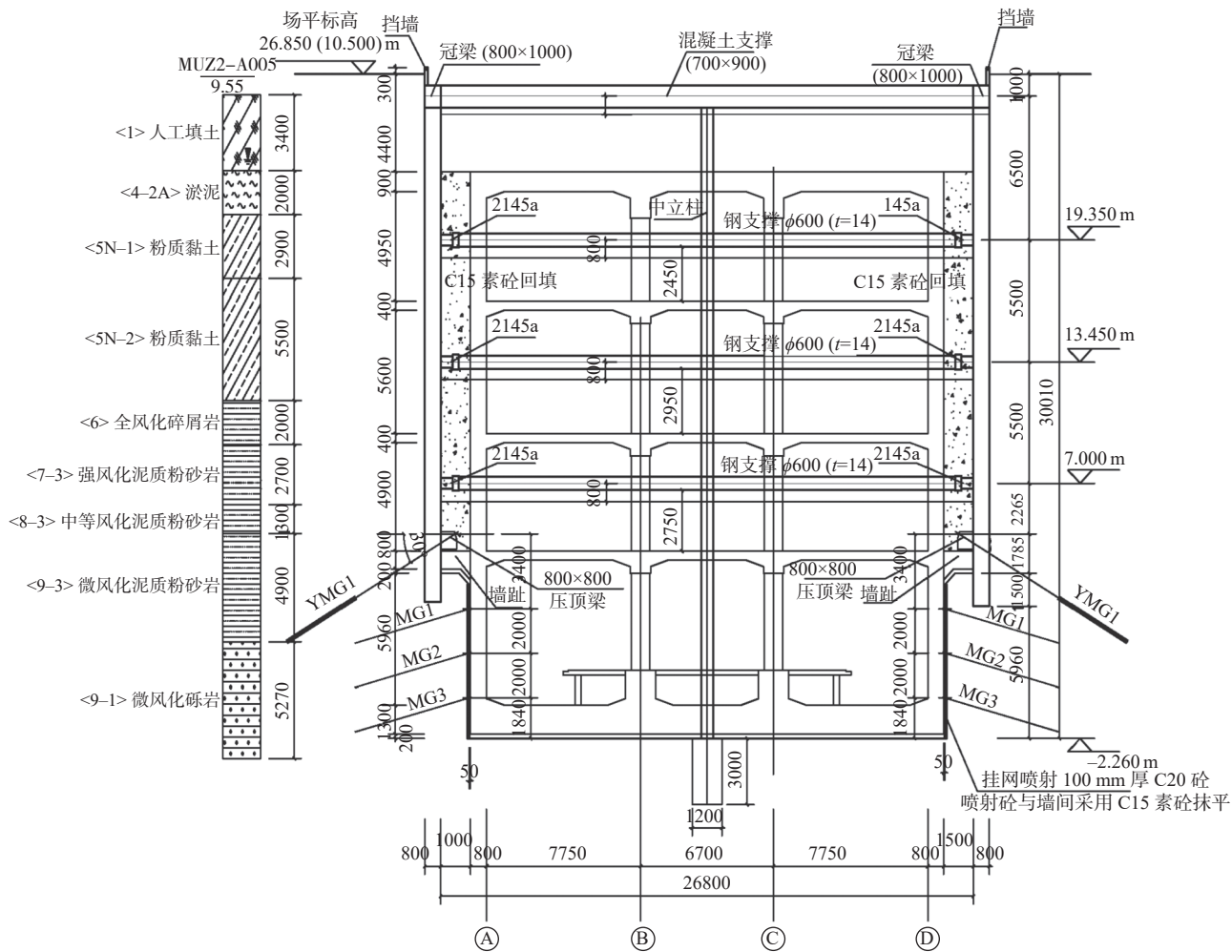


图2 基坑支护剖面图(单位:mm)

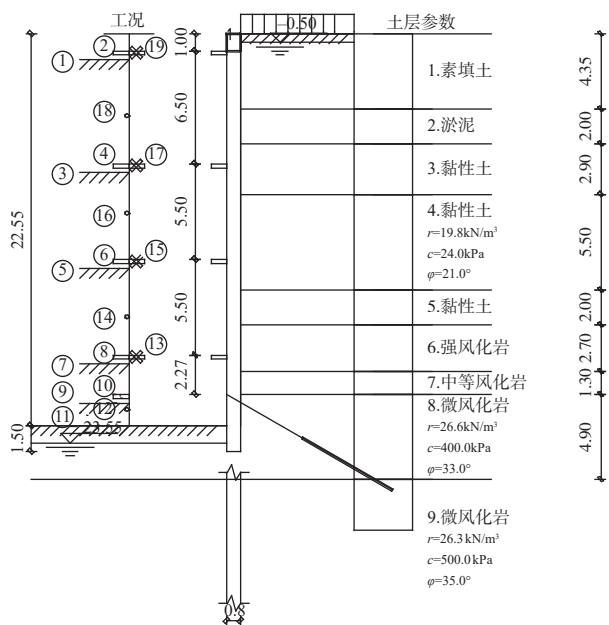


图3 支护结构计算模型(单位:m)

5 施工监测与结果分析

基坑监测是基坑工程施工中的重要环节,实际

施工过程中与设计模拟的工作状态存在一定的差异,需要在基坑开挖过程中,通过监测掌握围岩、支护结构、地表及周边建筑物的动态,及时预测和反馈,根据监测成果调整设计,指导施工。

吊脚墙的墙体未嵌入基坑底,墙脚位移过大会造成整个基坑失稳,因此墙脚的预应力锚索显得尤为重要。刘红军<sup>[3]</sup>认为墙脚锚杆锚固力能够弥补岩层桩体嵌固深度太小造成的嵌固力不足的问题,本文通过改变锚索预应力值大小研究墙脚位移与预应力的关系如图7所示,发现墙锁脚锚索对墙脚水平位移的约束起明显控制作用,锚索预应力越大,墙脚位移越小,锚索预应力值不应过小也不宜太大,应以满足工程实际需要为确定原则,本次设计锚索预应力取值300 kN,墙脚位移控制在2 mm。

吊脚墙墙顶水平位移如图8所示,S1和S2两处观测点连续墙顶水平位移最大值分别为8 mm和7 mm,均小于30 mm,满足规范要求。随着基坑开挖,坑内土体卸荷作用下,连续墙顶向内平移,随着基坑开挖深度增加,水平位移增大,由于基坑内随着基坑

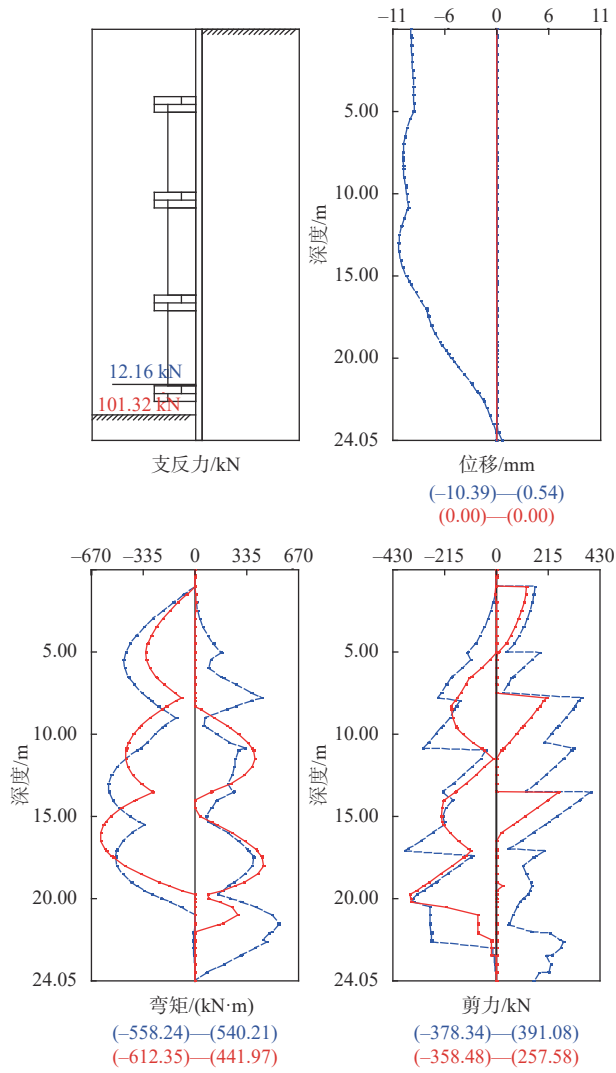


图 4 计算结果

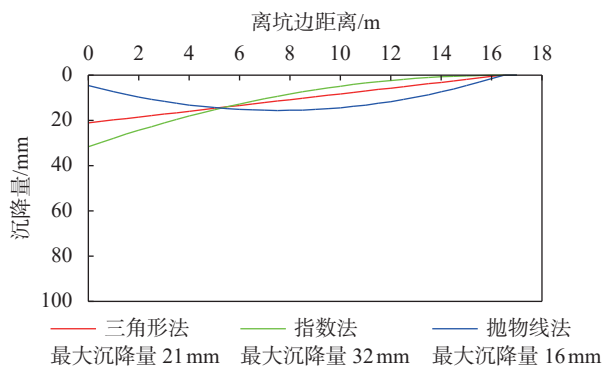


图 5 地表沉降图

开挖过程中架设支撑和锚索,能有效抵抗基坑外水土压力,连续墙顶水平位移趋于稳定。

观测点 C1 吊脚墙墙体变形图如图 9 所示,连续墙最大变形在墙体中部 12 m 位置处,墙体变形 18 mm,小于控制值 30 mm。随着基坑开挖,墙体两侧土压平衡破坏,墙体向坑内变形,墙体最大变形点随着基坑开挖由墙体上半部分向墙体中部移动,最终变形呈

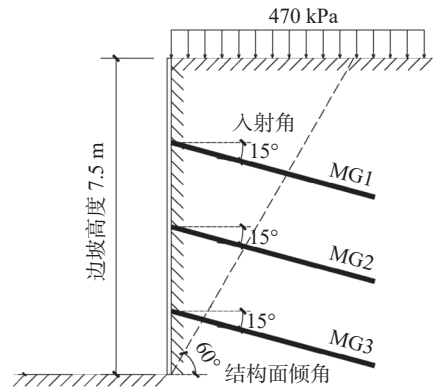


图 6 边坡计算模型

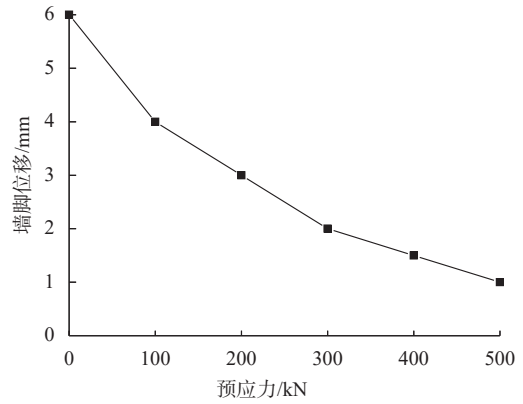


图 7 墙脚位移与锚索预应力关系图

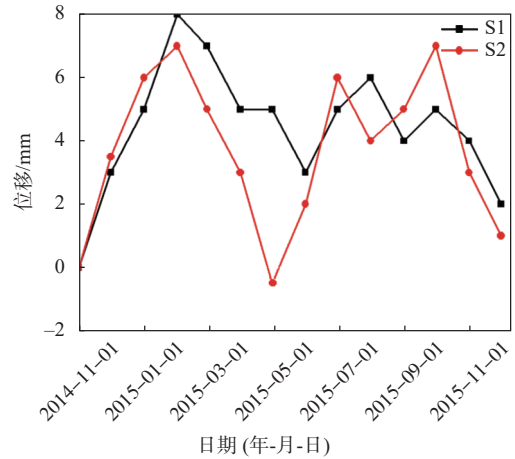


图 8 墙顶水平位移变化图

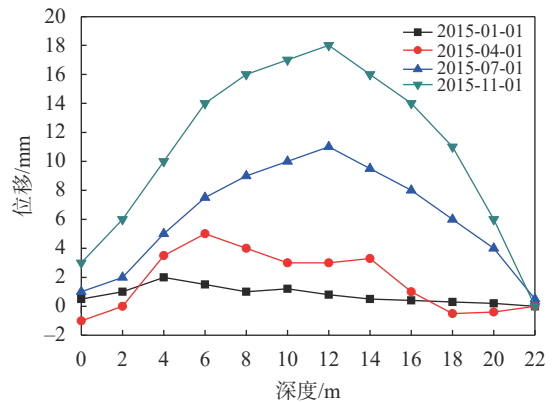


图 9 墙体变形变化图

现为“两头小、中间大”状态。

采用有限元模拟将吊脚墙嵌入基坑底以下 1.5 m, 吊脚墙方案与一般连续墙方案的最终基坑变形和坑外地表沉降如图 10 和图 11 所示, 吊脚墙和一般连续墙最大墙体变形分别为 10.39 mm 和 8.84 mm, 吊脚墙的支持体系基坑变形比常规基坑大 15% 左右。随着基坑开挖, 坑外土体最大沉降加大, 基坑开挖完成后达到最大沉降, 吊脚墙和一般连续墙坑外最大地表沉降分别为 16 mm 和 15 mm, 均能满足规范要求。沉降大部分发生在距离基坑 0~20 m 范围, 超过一定距离, 沉降基本忽略不计。

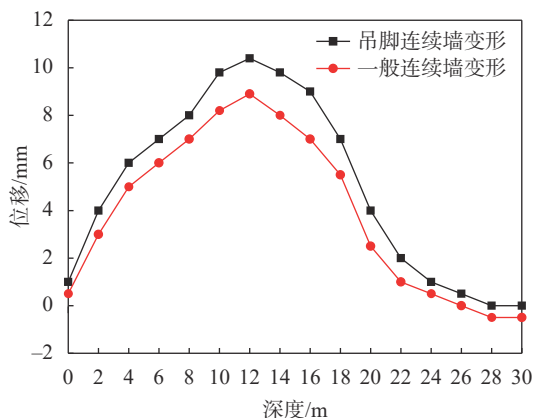


图 10 两种方案的基坑变形图

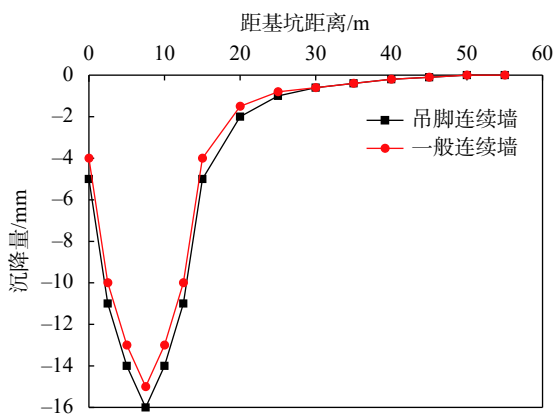


图 11 两种方案的坑外地表沉降图

## 6 结论

以广州地铁 21 号线员村站基坑工程为例, 介绍了适用于土岩二元结构地层的基坑支护体系——上段采用“吊脚地下连续墙+内撑(锚索)”、下段采用岩质边坡锚喷体系, 通过设计计算、数值模拟并综合

基坑监测数据分析, 得出以下结论:

(1) 基坑监测数据显示, 基坑支护结构水平变形随深度呈现镰刀型分布, 最大变形点位于基坑中部, 最大水平位移值满足规范要求, 表明下部岩层对基坑变形有明显的约束作用, 同时也表明对于此类土岩二元结构地层, 上段采用“吊脚地下连续墙+内撑(锚索)”的墙撑(锚)体系, 下段采用岩质边坡锚喷体系是适用的。

(2) 吊脚墙锁脚预应力锚索对墙脚约束作用明显, 能有效地弥补岩肩宽度不足的问题, 可以有效控制墙脚水平位移。

(3) 通过有限元数值模拟, 将吊脚墙支护体系与常规全嵌固支护体系进行对比, 发现二者地表沉降也相差不大, 吊脚墙的支持体系基坑水平变形比常规支护大 15% 左右, 但其位移控制水平满足规范要求, 且能有效节省工期和投资, 经济效益明显。

## 参 考 文 献

- [1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [2] 刘建伟. “吊脚桩”支护体系计算方法探讨[J]. 西部探矿工程, 2014, (2): 18-22.
- [3] 刘红军, 李东, 孙涛, 等. 二元结构岩土基坑“吊脚桩”支护设计数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(5): 43-48.
- [4] 田海光. 土岩组合地层盖挖法车站“吊脚桩”基坑设计优化研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(7): 635-641.
- [5] 赵文强. 上软下硬复合地层条件下深基坑支护设计探析[J]. 隧道建设, 2014, 34(2): 153-157.
- [6] 朱丹晖. 吊脚桩+超前微型钢管桩体系在地铁基坑工程中的应用[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(5): 90-94.
- [7] 吴晓刚. 地铁吊脚桩深基坑围护结构及土体变形规律[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(14): 280-287.
- [8] 黄薛, 曾纯品, 雷炳霄. “吊脚桩”桩锚支护在土岩组合地层深基坑工程中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(4): 75-79.
- [9] 毕经东, 张自光. “吊脚桩”支护型式应用及计算方法分析[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2013, 12(1): 28-32.
- [10] 许满吉. 吊脚连续墙在深圳地铁5号线深基坑施工中的应用[J]. 铁道标准设计, 2011, (8): 89-93.

收稿日期: 2021-07-14