

# 软弱土层地下通道不均匀沉降分析及基础设计

李惠霞<sup>1</sup>, 何鑫龙<sup>2</sup>

(1.福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2.中铁二局第三工程有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要:**以某地下通道工程为例,根据埋深不同和沉降缝位置,将整条地下通道分为 5 个节段,并在 FLC3D 平台上对其进行数值模拟。研究不同条件/工况组合下,整条地下通道纵向各节段间不均匀沉降规律,提出了基础设计优化建议,控制通道不均匀沉降,减小运营期通道渗漏水,并在此基础上提出了软土地基上设计建造下穿式地下通道的若干合理化建议。

**关键词:**软土地基,不均匀沉降,沉降特性,处治技术

中图分类号: TU475

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)04-0319-05

## Uneven settlement analysis and foundation design of underground passages in soft soil

LI Huixia<sup>1</sup>, HE Xinlong<sup>2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2.No.3 Engineering Company, Second Engineering Bureau, China Railway Co. Ltd., Chengdu 610000, China)

**Abstract:** An underground passage project was taken as an example. The entire underground passage was divided into five sections based on different burial depths and the location of the settlement joints, and then numerically simulated on the FLC3D platform. The uneven settlement between longitudinal sections of the entire underground passage under different conditions/working condition combinations was studied. A basic design optimization proposal was proposed to control the uneven settlement of the passages and reduce the possibility of leakage during operation. On this basis, several reasonable suggestions are put forward for designing and constructing a down-through underground passage on soft foundation.

**Keywords:** soft soil foundation; uneven settlement; settlement characteristics; treatment technology

将软土地区地下通道的地道视为支承在地基上的整体式片筏基础,或是支承在桩基础上的框架结构<sup>[1-4]</sup>。地下通道是混凝土节段组成,各节段埋设深度不同,节段间不均匀沉降使沉降缝处的防水结构遭到剪断破坏<sup>[5-6]</sup>,造成地下通道渗漏水。地下通道修建在高地下水位地区软土地基上时,因为抗浮能力不足问题,控制不均匀沉降更加困难。目前,国内外对不同节段在不同条件(工况)组合下的沉降研究相对较少。

本研究通过数值分析方法对道路软土地基差异沉降进行研究。研究对象为  $5 \times 3 \times 3 = 45$  种不同

条件(工况)组合下整条地下通道,目的是发现纵向节段间不均匀沉降规律,从而针对地下通道软土地基处理的经济合理的基础设计提出优化建议,进行通道不均匀沉降控制,减小运营期通道渗漏水。

## 1 软土地基沉降计算方法

### 1.1 计算方法

采用 FLAC3D 为数值分析平台,求解场的控制微分方程,应用单元离散模型,模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形,进行材料弹塑性分析、大变形分析,尤其模拟施工过程有独到的优

点<sup>[7-9]</sup>。FLAC3D 克服了离散元法的缺陷,避免了有限元法优点,用于材料模型及边界条件的非规则区域连续问题求解。FLAC3D 采用的动态松弛法不需要形成整体刚度矩阵,便于在微机求大规模工程问题,占用内存少。FLAC3D 应用节点位移连续的条件,对连续介质进行大变形分析<sup>[10-11]</sup>。

## 1.2 工程方案选择

某工程底板最大埋深 7.5 m,所穿越地层为淤泥质软土。地下通道为对称结构,从中间至两端各有 12 个节段,分别为:1~2 节段为箱型下穿隧道,3~12 节段为 U 型坡道,1~8 节段结构底板为预应力混凝土管桩,9~12 节段下为水泥土搅拌桩置换软土。

结合福州地质情况,对深度 60 m 范围内土层进行调查总结,由上至下土层分布情况分别为杂填土、淤泥质土、砂土、黏性土/砾砂土/强风化花岗岩。研究的深部持力层为黏性土、砾砂或强风化花岗岩 3 种情况,中部过渡层为中细砂,浅部持力层为淤泥质土。

表 1 地下通道划分节段参数

Tab.1 Segment parameters of the underground passage

| 分段名  | 坡道形状  | 宽度<br>/m | 长度<br>/m | 埋深<br>/m | 坡度<br>/% | 桩长<br>/m |
|------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 节段 1 | 箱型    | 30.8     | 40       | 7.50     | /        | 43       |
| 节段 2 | U 型坡道 | 30.8     | 45       | 6.95     | 0.7      | 42       |
| 节段 3 | U 型坡道 | 30.8     | 45       | 5.60     | 2.2      | 35       |
| 节段 4 | U 型坡道 | 30.8     | 45       | 3.50     | 2.2      | 28       |
| 节段 5 | U 型坡道 | 30.8     | 45       | 1.65     | 2.3      | 8        |

## 1.3 计算组设计

通过对地下通道竣工运营后的状态进行数值模拟以分析不均匀沉降。第一步用下穿式立交通道的设计资料(几何尺寸、地基处理方式),结合地质情况运用数值分析软件 FLAC3D 进行模拟。由于地下通道各节段断面形式不同,地基处理方法也有不同,方案设计从中间向两端取出 5 个典型节段作为研究区段。

各节段横断面根据深部持力层不同,分为 3 种地层条件,由上至下分别为:

(1)杂填土(2 m)、淤泥质土(8 m)、中细砂(20 m)、粘性土持力层。

(2)杂填土(2 m)、淤泥质土(8 m)、中细砂(20 m)、砂砾土持力层。

(3)为杂填土(2 m)、淤泥质土(8 m)、中细砂(20 m)、强风化花岗岩持力层。

上述每个节段断面分别研究 3 种工况,刚施工完毕定为工况 0,运营期地下水位升至最高且夜间无车辆荷载定为工况 1;运营期地下水位升至最高且日间车辆满载定为工况 2。

针对整条地下通道纵向各节段间不均匀沉降规律,拟通过数值分析方法研究前述  $5 \times 3 \times 3 = 45$  种不同条件(工况)组合进行研究。

## 1.4 计算参数

可以通过标准现场或实验室测试取得桩和岩土共同作用参数,桩和岩土的剪切力从岩土参数中估算。

朱百里<sup>[12]</sup>对结构物—土的相互作用进行研究结果表明,S 曲线呈现非线性关系,且与法向压力  $p$  大小有关。许宏发<sup>[13]</sup>对桩土接触面单元参数进行分析得到土与结构之间的剪切力学参数。参考以往研究成果,结合福州地区的实际情况,总结不同土层深度范围( $\Delta z$  处)桩土接触参数如表 2 所示,其中  $c_s$  为剪切耦合弹簧单位长度上内聚力, $\psi_s$  为剪切耦合弹簧摩擦角, $K_s$  为剪切耦合弹簧刚度, $c_n$  为法向耦合弹簧单位长度上内聚力, $\psi_n$  为法向耦合弹簧摩擦角, $K_n$  为法向耦合弹簧刚度。

表 2 桩土接触面参数

Tab.2 Parameters of pile-soil interface

| 桩伸入<br>土层  | $\Delta z /$<br>m | $c_s /$<br>( $N \cdot m^{-1}$ ) | $\psi_s /$<br>( $^\circ$ ) | $K_s /$<br>MPa( $N \cdot m^{-1}$ ) | $c_n /$<br>( $^\circ$ ) | $\psi_n /$<br>( $^\circ$ ) | $K_n /$<br>MPa |
|------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------|
| 淤泥         | 2~10              | 30                              | 3                          | 100                                | 0                       | 0                          | 100            |
| 中细砂        | 10~30             | 10                              | 35                         | 300                                | 0                       | 0                          | 300            |
| 黏土         |                   | 100                             | 25                         | 300                                | 0                       | 0                          | 300            |
| 砂砾土        | 30~80             | 10                              | 35                         | 700                                | 0                       | 0                          | 700            |
| 强风化<br>花岗岩 |                   | 2 000                           | 45                         | 100                                | 0                       | 0                          | 100            |

用衬砌单元来模拟通道底板、顶板衬砌与土接触面参数的选取。通过剪切弹簧和法向弹簧来实现衬砌单元与岩土体间的相互作用,其取值见表 3,其中  $\Delta z$  为土层深度范围, $C_s$  为剪切耦合弹

簧单位长度上内聚力,  $\psi_s$  为剪切耦合弹簧摩擦角,  $K_s$  为剪切耦合弹簧刚度,  $K_n$  为法向耦合弹簧刚度。

表 3 衬砌结构单元参数

Tab.3 Parameters of the lining structural unit

| 衬砌埋置土层 | $\Delta z /$<br>m | $c_s /$<br>( $^\circ$ ) | $\psi_s /$<br>( $^\circ$ ) | $K_s /$<br>MPa | $K_n /$<br>MPa |
|--------|-------------------|-------------------------|----------------------------|----------------|----------------|
| 填土     | 0~2               | 30                      | 30                         | 200            | 1000           |
| 淤泥     | 2~10              | 30                      | 3                          | 200            | 1000           |

## 2 计算结果及分析

### 2.1 不同节段的有限元模拟计算

利用有限元模拟计算划分的 5 个节段, 1-4 节段计算范围水平方向取 200 m, 垂直方向取 80 m, 第 5 节段计算范围水平方向取 80 m, 垂直方向取 60 m。以节段 1 为例, 模型共划分 23 672 个网格单元、26 381 个网格节点和 4 789 个结构单元。以节段 1 为例, 三维数值模型如图 1 所示。

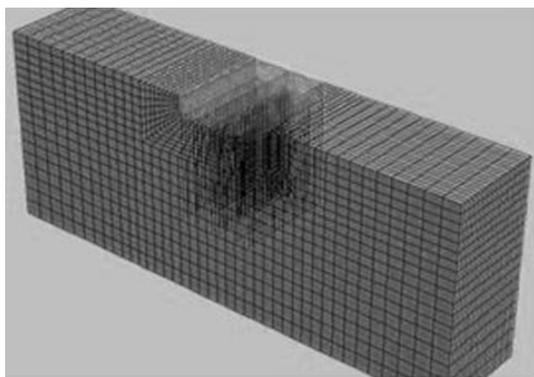


图 1 节段 1 数值模拟

Fig.1 Numerical simulation of segment 1

### 2.2 计算结果

3 种地层条件下地下通道各节段的沉降量如图 2-5。

由图 2-4 可知:

- (1) 工况 0, 整个节段沉降明显; 工况 1, 恢复地下水水位, 沉降变化不大; 工况 2, 运营期间节段 2 受到车辆荷载作用, 沉降变化明显;
- (2) 地层条件不同, 对沉降影响较大, 地层 1 沉降量较大, 地层 3 沉降量较小;
- (3) 地下通道的 5 个节段中, 节段 1、5 沉降较明显, 节段 2-4 沉降量较小且比较均匀。

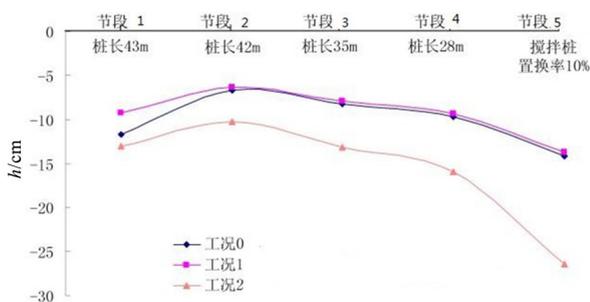


图 2 通道整体纵断面上沉降曲线(地层条件 1)

Fig.2 Settlement curve of the entire longitudinal section of the passage (stratification condition one)

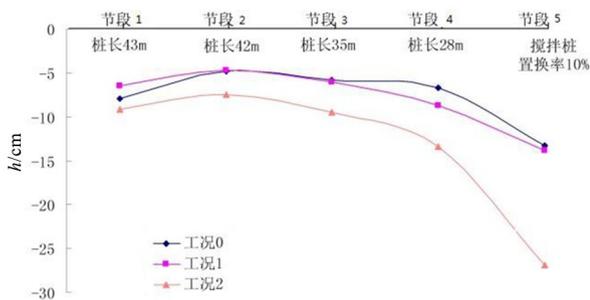


图 3 通道整体纵断面上沉降曲线(地层条件 2)

Fig.3 Settlement curve of the entire longitudinal section of the passage (stratification condition 2)

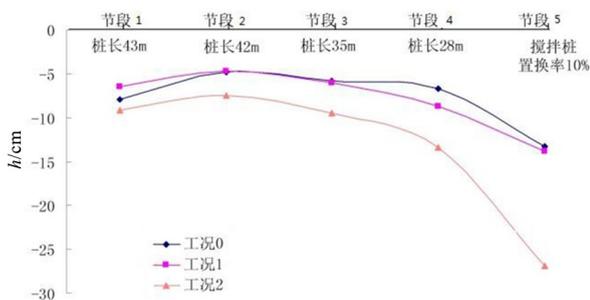


图 4 通道整体纵断面上沉降曲线(地层条件 3)

Fig.4 Settlement curve of the entire longitudinal section of the passage (stratification condition 3)

## 3 控制不均匀沉降方案优化

### 3.1 纵向不均匀沉降优化建议

(1) 通道整体沉降不强调减小各节段的沉降而造成工程成本的提高, 协调各节段间的沉降, 允许沉降发生但不至出现节段间错动严重。

(2) 对于地层条件 1, 减小节段 2 的桩长, 增加节段 4 的桩长, 节段 5 采用刚性桩或提高水泥土搅拌桩置换率减小沉降, 最终将整体总沉降控制在 150 mm 左右;

(3)减小节段 2 桩长,增加节段 4 的桩长,节段 5 也可以采用刚性桩或者提高水泥土搅拌桩置换率来减小沉降,这两种措施优化最终将地下通道整体总沉降控制在 10 cm 左右;

(4)深部持力层为强风化花岗岩的地层条件(地层条件 3),采用与前两种地层条件相同的优化方案,节段 5 采用刚性桩打入花岗岩持力层,将整个通道总沉降控制在 3 cm 范围内;

(5)良好地层条件下建议减小桩长,节段 5 需采用较密集的水泥土搅拌桩。通过优化将地下通道整体总沉降控制在 10~15 cm 范围内。

### 3.2 软土地基处理方式的的经济性与沉降控制效果

由以上结果可知,节段 5 和节段 1 分别为埋深最小与埋深最大的两个节段,以这两个节段为例,对比在同一地层条件下,采用两种软土地基处理方式的的经济性与沉降控制效果。

对于深部持力层为黏性土的地层条件,若在节段 5 下打不同长度的预应力管桩(分别为 15、25、35 m)或打不同置换率水泥土搅拌桩(10%、15%、25%)。

在节段 1 打不同长度的预应力管桩(15、25、35、43m)或打不同置换率水泥土搅拌桩(10%、15%、25%、35%)。

#### 3.2.1 地层条件 1 软土地基处理效果分析

节段 5 控制效果如图 5 所示随着管桩入土深度的增加,上部结构沉降量线性减小,工况 0 时其沉降分别为 11.8、9.2、8.1 cm,工况 2 时其沉降分别为 25.7、20.1、16.4 cm。随着置换率的提高,上部结构沉降量同样也呈现线性减小,工况 0 时其沉降分别为 14.1、13.0、11.7 cm,工况 2 其沉降分别为 26.5、26.6、17.7 cm。

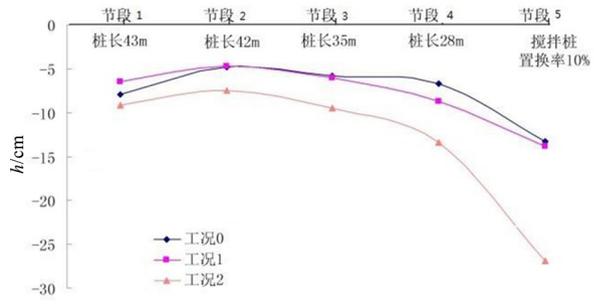


图 5 刚性桩和柔性桩的沉降控制效果 (节段 5 地层条件 1)

Fig.5 Settlement control effect of rigid piles and flexible piles (segment 5, stratification condition 1)

节段 1 控制效果如图 6 所示,管桩方案工况 0 沉降量分别是 21.8、17.3、14.7、11.7 cm,工况 2 沉降量分别是 25.5、19.5、16.0、13.0 cm。搅拌桩方案工况 0 沉降量分别是 29.4、25.6、20.3、16.2 cm,工况 2 沉降量分别是 43.3、38.0、30.1、23.9 cm。随着上部结构受力较大的情况下,搅拌桩方案的最终沉降量是管桩方案的 2 倍左右,因此采用打设刚性桩较柔性桩能控制结构沉降。

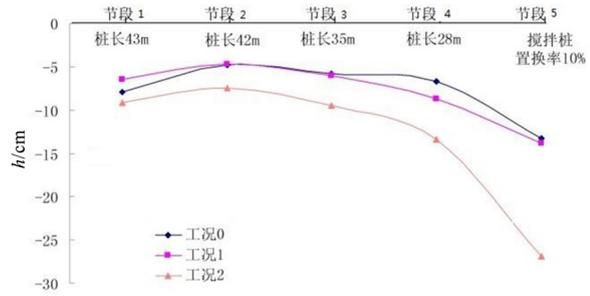


图 6 刚性桩和柔性桩的沉降控制效果 (节段 1 地层条件 1)

Fig.6 Settlement control effect of rigid piles and flexible piles (segment 1, stratification condition 1)

#### 3.2.2 地层条件 3 软土地基处理效果分析

地层条件 3 节段 5 沉降控制如图 7 所示管桩方案工况 0 沉降分别为 5.1、2.2、1.2 cm,工况 2 沉降分别为 12.4、6.4、1.9 cm。搅拌桩方案工况 0 沉降分别为 10.3、10.0、9.1 cm,工况 2 沉降分别为 19.3、17.9、15.0 cm。相比地层条件 1,在深部持力层条件较好的情况下,管桩方案对沉降的控制效果明显较搅拌桩方案好,即刚性桩入土深度平均每增加 1m 能减小上部结构沉降 0.53 cm,而柔性桩置换率平均每增加 1%能减小上部结构沉降 0.29 cm。

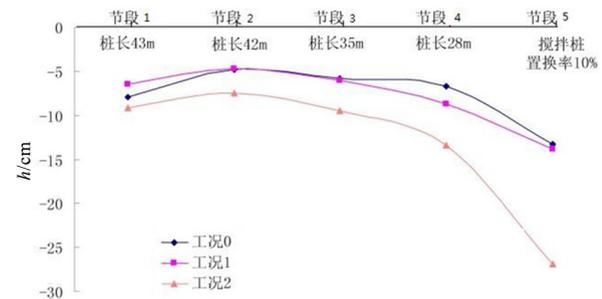


图 7 刚性桩和柔性桩的沉降控制效果 (节段 5 地层条件 3)

Fig.7 Settlement control effect of rigid piles and flexible piles (segment 5, stratification condition 3)

对地层条件3节段1沉降控制如图8所示,采用管桩或搅拌桩的两种软土地基处理方案,在工况0沉降分别为8.0、2.7、2.0、1.8 cm,在工况2沉降分别为11.4、3.0、2.3、1.9 cm。搅拌桩方案在工况0沉降分别为20.6、18.2、15.3、12.0 cm,工况2沉降分别为33.7、29.7、20.4、15.0 cm。在结构受力较大的情况下,须采用管桩方案才能更好的控制结构沉降。

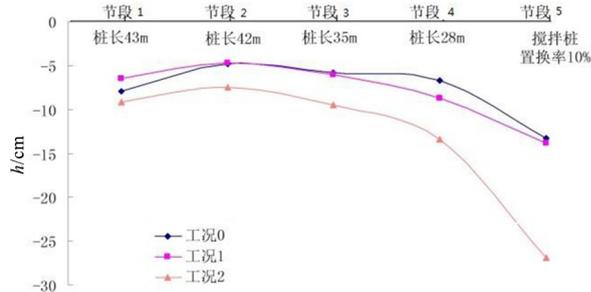


图8 刚性桩和柔性桩的沉降控制效果  
(节段1地层条件3)

Fig.8 Settlement control effect of rigid piles and flexible piles (segment 1, stratification condition 3)

#### 参考文献:

- [1] 吕双全. 新旧路基不均匀沉降分析与控制技术[J]. 山东交通科技, 2019(2): 63-65.
- [2] 张立明, 浦春林, 颜亮, 等. 综合管廊复杂节点结构不均匀沉降剖析[J]. 城市道桥与防洪, 2019(9): 214-218, 23.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基施工技术规范: JTG/T 3610-2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [4] 蔡鹏程. 软土地区城市地下通道桩基设计的优化研究[J]. 福建建筑, 2013(3): 84-87, 80.
- [5] 张星星. 公路软土地基处理及沉降分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
- [6] 魏英华. 复杂地质条件下连拱隧道变形规律及施工方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [7] LIU C, HAN X, LIU Y. Finite element analysis of historical construction with differential settlement[J]. Advanced Materials Research, 2013, 671-674: 684-687.
- [8] 陈志宝. 高速公路新旧路基差异沉降分析与处理技术研究[J]. 交通世界, 2019(17): 29-32.
- [9] 常远. 不同桩距桩基础在竖向荷载作用下沉降性能研究[D]. 开封: 河南大学, 2019.
- [10] 李围. 隧道及地下工程FLAC解析方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [11] 白旭峰, 张晶, 苏晓果. 软土地区长期不均匀沉降对预制综合管廊的影响研究[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(10): 86-87.
- [12] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- [13] 许宏发, 吴华杰, 郭少平. 桩土接触面单元参数分析[J]. 探矿工程, 2002(5): 10-12.

(责任编辑: 方素华)

## 4 结论

1) 采用管桩方案与采用搅拌桩方案对于埋深较小的节段, 进行软土地基处理; 在深部持力层条件较差时, 总沉降的控制效果相当, 大约在15~27 cm之间; 在深部持力层条件较好时, 采用管桩方案比采用搅拌桩方案的沉降小的多, 前者大约仅为后者的一半。

2) 根据地质勘查报告对于控制各个节段沉降协调, 对整个地下通道进行分段设计。采取打设刚性桩支承的节段, 可以通过增减桩长来控制节段沉降; 对于采取使用柔性桩加固地基土的节段, 可以通过提增减桩体置换率来控制节段沉降; 对局部预计沉降过大的节段, 在该节段施工前采取预垫高的措施, 抵消发生过大沉降, 把不均匀沉降控制在允许范围内。