

# 地下超长结构温度效应分析与设计

罗人宾<sup>1</sup> 赵小芹<sup>2</sup> 刘继辉<sup>3</sup> 田 闯<sup>1</sup> 宋佳豪<sup>3</sup>

1.深圳地铁建设集团有限公司 广东深圳 518029; 2.广州城市理工学院 广东广州 510850;  
3.中铁南方建设投资有限公司 广东深圳 518040.

**摘 要:** 为提高施工效率和减少伸缩缝病害, 实际工程中可以不设伸缩缝或延长伸缩缝间距, 但在设计时须考虑结构各温度区段的温度效应。本文以深圳某地下超长隧道结构为研究对象, 使用有限元分析软件 ABAQUS 进行温度效应分析和温度应力配筋, 为超长隧道结构工程的应力分析和设计提供参考。

**关键词:** 超长结构; 温度效应; 温度应力配筋

Temperature effect analysis and design of ultra-long underground structure

Renbin Luo<sup>1</sup>, Xiaoqin Zhao<sup>2</sup>, Jihui Liu<sup>3</sup>, Chuang Tian<sup>1</sup>, Jiahao Song<sup>3</sup>

1. Shenzhen Metro Construction Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518029

2. Guangzhou City University of Technology, Guangzhou, Guangdong, 510850

3. China Railway Construction Southern Construction Investment Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518040

**Abstract:** In order to improve construction efficiency and reduce diseases of expansion joint, expansion joints may not be set or the expansion joint spacing may be extended in actual projects. However, the temperature effect of each temperature segment must be considered in the design. In this paper, an ultra-long underground tunnel structure in Shenzhen is taken as the research object, and ABAQUS is used for temperature effect analysis and temperature stress reinforcement, providing a reference for stress analysis and design of ultra-long tunnel structure engineering.

**Key words:** Ultra-long structure; Temperature effect; Temperature stress reinforcement

## 引言

在隧道结构建设时, 为了方便施工、加快施工进度、减少伸缩缝的病害, 宜尽量避免设置伸缩缝。当钢筋混凝土结构长度大于现行国家标准《混凝土结构设计规范》的钢筋混凝土结构最大伸缩缝间距时为超长结构<sup>[1]</sup>。不设置伸缩缝的地铁隧道结构, 其长度超过规范要求的设置伸缩缝最大间距限值时属于该类情况。

在实际工程中, 可以运用有限元软件对该类超长结构进行等效温度应力分析。郭海浩<sup>[2]</sup>等用 SAP2000 对某地下超长顶板进行温度应力分析, 结果表明侧墙约束会加剧温度应力。余周<sup>[3]</sup>等详细计算了某轨道项目地下超长结构的温度作用大小, 考虑了温差、收缩、

徐变和刚度折减, 用 MIDAS Gen 软件进行了温度作用分析。现有温度应力分析研究的对象多为超长框架结构, 少对超长隧道结构进行温度应力分析的案例。本文将基于深圳市某地下超长隧道结构工程, 计算该结构在运营阶段的温差, 建立有限元模型进行温度应力分析和温度应力配筋设计, 为隧道结构工程的温度应力分析提供参考。

## 1 模型概况

该隧道结构位于深圳市, 外围尺寸为 24960mm × 24920mm, 壁厚为 800mm, 结构全长采用混凝土现浇, 不设置伸缩缝, 各混凝土墙板内配置双层非温度应力钢筋 C14@150, 混凝土和钢筋相关参数取值见表 1。

表 1 混凝土和钢筋相关参数取值表

| 材料名称    | 密度 (kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量 (MPa) | 泊松比  | 线膨胀系数 (10 <sup>-5</sup> ) |
|---------|-------------------------|------------|------|---------------------------|
| C40 混凝土 | 2500                    | 32500      | 0.2  | 1.2                       |
| HRB400  | 7850                    | 200000     | 0.25 | 1.25                      |

## 2 运营阶段温差分析

### 2.1 季节温差

根据《建筑结构荷载规范》<sup>[4]</sup>, 查得深圳市的基本气温, 其中最低温度为 8℃, 最高温度为 35℃。

### 2.2 混凝土收缩当量温差

混凝土收缩效应采用等效温差模拟, 可按王铁梦<sup>[5]</sup>建议公式(1)和(2)进行计算。

$$\varepsilon_y(t) = 3.24 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.01t}) M_1 M_2 M_3 \cdots M_n \quad (1)$$

$$\varepsilon = 3.24 \times 10^{-4} - \varepsilon_y(t) \quad (2)$$

其中  $t$  为混凝土龄期,  $\varepsilon_y(t)$  为  $t$  天时混凝土的收缩量,  $M_n$  为第  $n$  个收缩影响因素最大收缩修正取值,  $\varepsilon$  为  $t$  天后混凝土收缩剩余量。曾韶奎<sup>[6]</sup>建议应在 60 天后合拢后浇筑带较为合理, 故取  $t = 60$ 。根据工程实际, 考虑了收缩的 12 个影响因素进行修正。不考虑合拢前混凝土收缩的影响, 剩余的收缩将发生在运营阶段, 根据式(1)

和式(2)可算得剩余的收缩量为  $\varepsilon = 7.8 \cdot 10^{-5}$ 。

运营阶段收缩当量温差可按式(3)计算, 可得收缩当量温差为  $T = -6.5^\circ\text{C}$ 。

$$T = \varepsilon / \alpha \quad (3)$$

其中  $T$  为收缩当量温差,  $\alpha$  为线膨胀系数。

### 2.3 徐变折减

在运营阶段, 混凝土在外荷载和温度应力的作用下会发生徐变, 有降低温度应力作用的效果。采用 Tros-tBazant<sup>[7]</sup>提出的龄期调整的有效模量法进行计算, 见式(4)。龄期调整的有效模量法是计算徐变的有效方法, 在工程中得到广泛的应用。

$$R_s(t, t_0) = 1 - \frac{\varphi(t, t_0)}{1 + \chi(t, t_0)\varphi(t, t_0)} \quad (4)$$

其中  $R_s(t, t_0)$  为混凝土徐变松弛系数, 即本文所表述的徐变折减系数,  $\varphi(t, t_0)$  为  $t$  时刻的混凝土徐变系数,  $t_0$  为加载龄期,

$\chi(t, t_0)$  为  $t$  时刻的老化系数。徐变系数  $\varphi(t, t_0)$  可按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》<sup>[8]</sup> 计算。计划夏季开始浇筑混凝土, 到冬季间隔半年, 取  $t = 180$ 。60 天后合拢后浇带, 即  $t_0 = 60$ 。代入相关参数后, 可得龄期为 180 天时的混凝土徐变系数为  $\varphi(180, 60) = 0.691$ 。老化系数  $\chi(t, t_0)$  一般情况可取 0.8。本文根据工程实际情况按照王勋文<sup>[9]</sup>等建议的回归公式, 即式 (5) 进行计算。最终计算得降温时徐变的应力折减系数为 0.574。

$$\chi(t, t_0) = \frac{1}{1 - e^{[-0.665\varphi(t, t_0) - 0.107(1 - e^{-3.131\varphi(t, t_0)})]}} - \frac{1}{\varphi(t, t_0)} \quad (5)$$

#### 2.4 刚度折减

在温度应力分析时, 混凝土的弹性模量设置为常量。为了考虑混凝土带裂缝工作的实际状态, 在工程设计中常用刚度折减系数对总温差进行折减。刚度折减系数多为经验取值。马昭宇<sup>[10]</sup>等在某地下空间超长结构温度应力分析中取刚度折减系数为 0.7。柯玉伟<sup>[11]</sup>等在某一超长楼板温度应力分析中取刚度折减系数为 0.8。本文按傅学怡<sup>[12]</sup>的建议, 将混凝土构件刚度乘以 0.85 的折减系数, 即刚度折减系数取 0.85。

#### 2.5 计算温差

合拢时混凝土的温度取深圳市年平均温度 21.5℃, 有最大温降:

$$\Delta T^- = (8 - 21.5 - 6.5) \times 0.574 \times 0.85 = -9.8^\circ\text{C}$$

待升温时徐变已经较为缓慢, 对温度效应影响较小, 故可不考虑徐变折减, 有最大温升:

$$\Delta T^+ = (35 - 21.5 - 6.5) \times 0.85 = 6.0^\circ\text{C}$$

### 3 有限元模型分析

#### 3.1 建立模型

采用 ABAQUS 有限元软件进行温度应力分析。由于该结构模型最大厚度远小于结构截面尺寸, 故在分析时, 可忽略应力在截面厚度的分布, 用壳单元进行建模。经试算, 100m 的隧道结构已经可以体现出结构受力特点, 且应力发展趋势和峰值大小随着结构长度增加已经无明显变化, 故该次分析取隧道结构为 100m。隧道结构模型如图 1 所示。

对于隧道结构模型两端的边界条件, 降温模型和升温模型都为约束两端的纵向位移。对于隧道结构模型四壁的边界条件, 降温模型为无约束, 而升温模型则约束各个“壁”法线方向的位移。这是由于整体降温时, 隧道结构会向内部收缩, 不需考虑土体的约束, 故降温模型仅约束模型两端的纵向位移。模型整体升温时会向外膨胀, 需要考虑土体的约束, 故升温模型除了约束模型的纵向位移外, 还需约束各个壳单元法线方向的位移, 以考虑周围土体的约束。

综合考虑了季节温度变化、混凝土收缩当量温差、徐变折减和刚度折减, 最终取温降效应的温差为 -9.8℃, 取温升效应的温差为 +6℃。

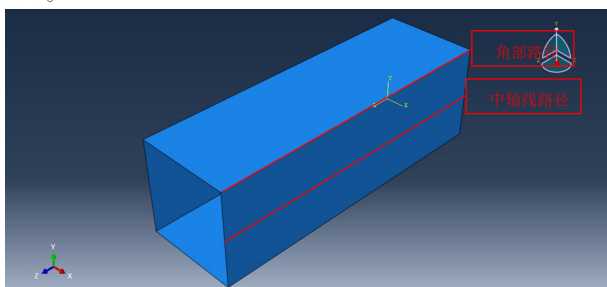
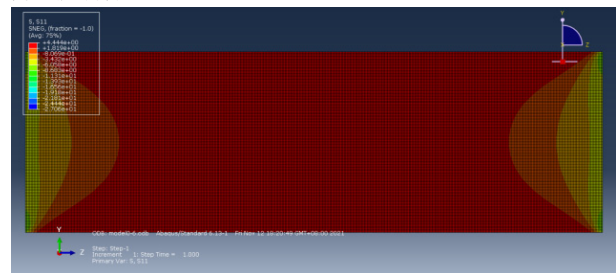


图 1 隧道结构模型示意图

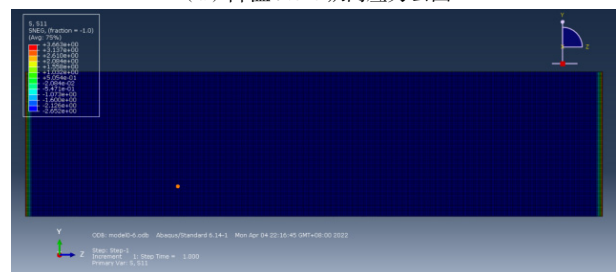
#### 3.1 有限元结果分析

图 2 是隧道结构模型中轴线纵向应力沿隧道分布图。如图 2(a) 和图 2(c) 所示, 无加强带隧道结构整体降温 -9.8℃ 时, 最大拉应

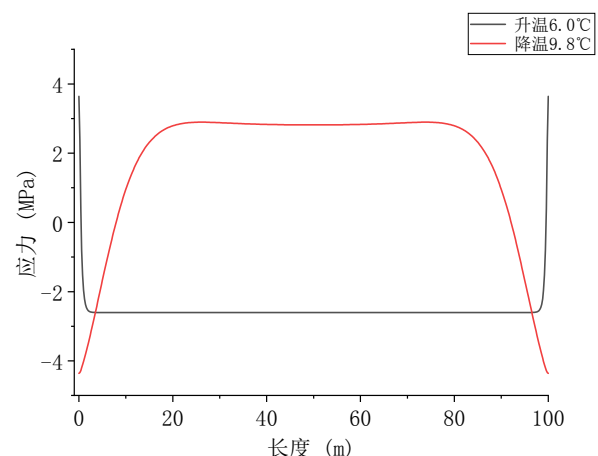
力 (正值) 出现在中间段, 而两端受压 (负值)。这是由于在隧道靠近两端的隧道结构受到固定约束的影响, 发生了平面外的变形, 使得靠近两端的隧道结构受到挤压, 影响范围约为 20m。如图 2(b) 和图 2(c) 所示, 整体升温 6℃ 时, 最大拉应力 (正值) 出现在两端, 而中间段受压。这是由于升温模型约束了壳单元的法线方向位移, 限制了隧道结构的平面外变形, 靠近两端的隧道结构受到固定约束的影响较小, 影响范围约为 2m。如图 2(c) 所示, 在隧道结构中间段, 温度应力会趋于常数。这是由于中间段距离两端固定约束较远, 受到两端固定约束的影响基本可以忽略, 呈现出轴向拉伸或压缩的特征。



(a) 降温 9.8℃ 纵向应力云图



(b) 升温 6.0℃ 纵向应力云图



(c) 中轴线沿隧道分布纵向应力

图 2 隧道结构模型中轴线 (见图 1) 纵向应力沿隧道分布图

图 3 是隧道结构模型角部和中轴线路径纵向应力沿隧道分布对比图。如图 3(a) 所示, 在降温模型中, 横截面四角的最大拉应力比横截面中部的最大拉应力高 57%; 如图 3(b) 所示, 在升温模型中, 横截面四角的应力和横截面中部的应力基本相等。降温模型和升温模型的不同点在于是否约束壳单元的法线方向位移。在降温模型中, 隧道四壁自由内缩, 横截面中部所受到的约束较横截面四角小, 可变形空间大, 可以通过变形消散更多的温度应力, 故出现横截面四角的应力会比横截面中部的应力大的情况。而在升温模型中, 本文用约束隧道四壁的法线方向位移, 来模拟升温膨胀时受到的土体约束, 即横截面中部所受到的约束和横截面四角一致, 故横截面四角的应力和横截面中部的应力基本相等。

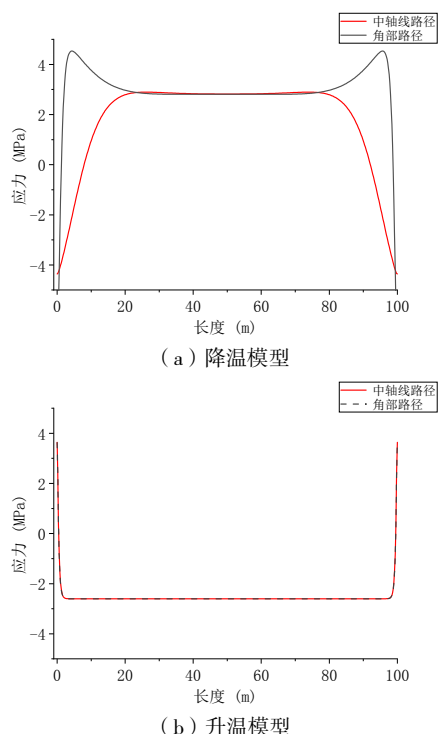


图3 隧道结构模型角部和中轴线路径(见图1)纵向应力沿隧道分布对比图

表2 温度应力配筋表

| 序号 | 公式   | 钢筋最大应力控制取值 (MPa) | 是否考虑混凝土抗拉能力 | 计算配筋面积 (m <sup>2</sup> ) | 截面配筋率增量 (%) |
|----|------|------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| 1  | 式(6) | 360              | 否           | 0.160                    | 0.80        |
| 2  | 式(7) | 200              | 是           | 0.050                    | 0.25        |
| 3  | 式(8) | 160              | 否           | 0.361                    | 1.81        |

式(6)直接使用钢筋强度设计值,忽略了混凝土是否开裂的问题,不适用于有裂缝控制要求的结构;式(7)的钢筋最大应力控制值 200MPa,是通过假定混凝土受拉峰值应变为  $1 \times 10^{-4}$  求得,认为届时混凝土为开裂且能够发挥抗拉能力,配筋率增量最少。式(8)能够更好控制混凝土的裂缝宽度,但配筋率增量太大,经济性差。式(7)在控制混凝土最大拉应变为  $1 \times 10^{-4}$  和钢筋最大应力控制值为 200MPa 的前提下,考虑了混凝土的抗拉能力,在温度应力作用下的配筋率增量比式(6)少 2.2 倍,比式(8)少 6.24 倍。可见,对于混凝土截面较大的隧道结构,其混凝土抗拉能力不可忽视,应合理考虑混凝土的抗拉能力,使温度应力配筋更经济。

## 5 结论

根据有限元模型的分析结果,可以得出以下结论:

- (1) 对于两端约束的无加强带隧道结构,整体升温时,最大拉应力出现在两端,中间段为接近常数的压应力;整体降温时,最大拉应力出现在中部,中间段为接近常数的拉应力。
- (2) 在降温模型中,隧道横截面四角的最大拉应力较中部增大 57%;在升温模型中,隧道横截面四角的应力和中部的应力基本一致。
- (3) 对于横截面面积较大的隧道结构,应合理考虑混凝土的抗拉能力,使温度应力配筋更经济。

## 参考文献:

- [1] 预应力混凝土结构设计规范: JGJ369—2016[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 郭海浩, 王鸿泰, 吴腾飞, 鲁璐.考虑边缘侧墙约束的超长结构温度及预应力效应分析[J].安徽建筑, 2018, 24 (03): 70-71+83.
- [3] 余周, 薛尚铃, 朱红.某轨道项目地下超长结构温度作用分析

## 4 温度应力配筋

余周<sup>[3]</sup>和张明月<sup>[13]</sup>等不考虑混凝土的抗拉能力,将温度应力与钢筋抗拉强度设计值的比值作为构件截面配筋率增量,见式(6)。林永安<sup>[14]</sup>等考虑了混凝土的抗拉能力,钢筋最大应力控制在 200MPa,见式(7)。朱丹<sup>[15]</sup>等根据工程经验将钢筋最大拉应力应控制在 160MPa 以下,保证混凝土裂缝宽度不大于 0.2mm,见式(8)。

$$\Delta \rho_{\tau} = \sigma_{\tau} / f_y \quad (6)$$

$$\Delta \rho_{\tau} = (\sigma_{\tau} - f_{tk}) / 200 \quad (7)$$

$$A_s = \sigma_{\tau} b h / 160 \quad (8)$$

其中,  $\Delta \rho_{\tau}$  为温度应力作用下的截面配筋率增量,  $\sigma_{\tau}$  为温度应力大小,  $f_y$  为钢筋抗拉强度设计值,  $A_s$  为温度应力作用下的截面配筋面积,  $f_{tk}$  为混凝土抗拉强度标准值,  $b$  为构件截面宽度,  $h$  为构件截面高度。

本文取降温模型中间段最大拉应力 2.896MPa 进行温度应力配筋计算,结果见表 2。

[J].建筑结构, 2019, 49 (S2): 582-587.

[4] 建筑结构荷载规范: GB50009-2012[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[5] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[6] 曾韶崑.某新工研发大楼超长结构温度应力分析[J].福建建材, 2020 (04): 59-60+66.

[7] 孙宝俊.混凝土徐变理论的有效模量法[J].土木工程学报, 1993 (03): 66-68.

[8] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362-2018[S].北京: 人民交通出版社, 2018.

[9] 王勋文, 潘家英.按龄期调整有效模量法中老化系数  $\alpha$  的取值问题[J].中国铁道科学, 1996 (03): 12-23.

[10] 马昭宇.某金融岛外环纵向街坊路地下空间超长结构设计分析[J].安徽建筑, 2021, 28 (05): 60-61.

[11] 柯玉伟, 李斌, 马镇炎.恒丰贵阳中心超长嵌固端楼板温度应力分析与设计[J].建筑结构, 2019, 49 (03): 52-56.

[12] 傅学怡. [M].北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[13] 张明月.超长混凝土结构温度应力分析[J].工程设计与设计, 2015 (01): 61-63+68.

[14] 林永安, 李强汶.某车辆段超长盖板结构温度应力分析与设计[J].广东土木与建筑, 2020, 27 (10): 5-9+26.

[15] 朱丹, 许庆, 李劲龙, 刘家名.天津某大型医院门诊医技综合楼及 1 号住院楼结构设计[J].建筑结构, 2020, 50 (S1): 180-187.