

DOI: 10.11779/CJGE202210004

地面堆载对盾构隧道围压影响的模型试验与理论分析

魏 纲^{1, 2, 3}, 张书鸣⁴, 余剑英¹, 丁 智¹, 崔允亮¹

(1. 浙大城市学院土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 浙江省城市盾构隧道安全建造与智能养护重点实验室, 浙江 杭州 310015;
3. 城市基础设施智能化浙江省工程研究中心, 浙江 杭州 310015; 4. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 盾构隧道周边发生突发性地面堆载时会对管片产生附加荷载, 当附加荷载过大时会导致隧道纵缝接头张开、螺栓外露、拱顶部管片结构棱角破损等。针对地面突发性堆载对隧道的危害, 采用几何相似比 $C_L=15.5$ 的室内缩尺寸模型试验, 综合考虑堆载大小、隧道埋深、堆载位置等影响因素, 研究在地面突发堆载下隧道的围压变化情况; 采用理论分析的方法研究地面堆载作用下隧道围压以及总围压的变化, 最后将相同工况下的理论分析与试验结果进行对比。研究表明: 当堆载等值逐级累加时, 隧道围压的变化量基本呈现等值增大的现象; 隧道围压的变化量在一定范围内随偏心距离的增大整体呈现下降趋势, 当堆载位置在 $0.5D_0$ (D_0 为管片外直径)、 $1D_0$ 时偏心侧的隧道围压下降值明显比非偏心侧小, 当堆载位置为 $1.5D_0$ 时, 隧道两侧围压的变化量基本相同; 随着隧道埋深增加, 由于隧道顶部土体厚度增加, 地面堆载对隧道围压的影响相对减小; 理论计算结果与室内模型试验结果的变化趋势非常吻合, 从而说明了试验与理论分析的准确性。

关键词: 盾构隧道; 地面堆载; 模型试验; 围压

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)10-1789-10

作者简介: 魏 纲(1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事城市地下隧道与周边环境相互影响及风险控制等方面的研究。E-mail: weig@zucc.edu.cn。

Model tests and theoretical analyses of influences of surface surcharge on confining pressure of shield tunnels

WEI Gang^{1, 2, 3}, ZHANG Shu-ming⁴, YU Jian-ying¹, DING Zhi¹, CUI Yong-liang¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China; 2. Key Laboratory of Safe Construction and Intelligent Maintenance for Urban Shield Tunnels of Zhejiang Province, Hangzhou 310015, China; 3. Zhejiang Engineering Research Center of Intelligent Urban Infrastructure, Hangzhou 310015, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: When sudden surface surcharge occurs around the tunnel, the surface additional stress on the tunnel segments will be generated. When the surface surcharge is too large, it will cause the opening bolts of the longitudinal joints of the tunnel to be exposed, and the structural edges and corners of the segments at the top of the arch will be damaged. In response to the hazards of sudden surface surcharge on the tunnel, the indoor reduced size model tests with geometric similarity ratio $C_L=15.5$ are carried out to study the change of confining pressure of the tunnel comprehensively considering the depth of the tunnel, the size and location of the surcharge. The method of theoretical analysis is used to study the change of confining pressure and total confining pressure of the tunnel under the action of surface surcharge, and finally the theoretical analysis and experimental results are compared under the same working conditions. The results show that when the surcharge is accumulated step by step, the change of the confining pressure of the tunnel basically shows an equivalent increase, and it exhibits an overall downward trend with the increase of the eccentric distance within a certain range. When the surcharge position is $0.5D_0$ and $1D_0$, the decrease of the confining pressure of the tunnel at the eccentric side is obviously much smaller than that at the non-eccentric side. However, when the surcharge position is $1.5D_0$, the changes of the confining pressure at both sides of the tunnel are basically the same (D_0 is the outer diameter of the tunnel segment). As the buried depth increases, due to the increase in the thickness of the soil at tunnel crown, the influences of the surface surcharge on the confining pressure of the tunnel

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目 (LGF22E080012); 杭州市农业与社会发展科研一般项目 (20201203B127)

收稿日期: 2021-09-22

*通信作者 (E-mail: yujy@zucc.edu.cn)

are relatively reduced. The theoretical results are in good agreement with those of the indoor model tests, and thus the accuracy of the experimental and theoretical analyses is demonstrated.

Key words: shield tunnel; surface surcharge; model test; confining pressure

0 引言

近年来中国已发生了很多起由于突发性地面堆载引起的盾构隧道结构破坏事故,表明邻近突发性地面堆载是威胁既有盾构隧道结构安全的一个重要因素。地面堆载会在隧道管片上产生附加荷载,从而改变隧道的围压。过大的围压改变会导致隧道管片发生破坏、管片之间的接口处缝隙增大、连接管片之间的螺栓发生失效等。因此,研究突发性地面堆载作用下隧道的围压变化具有重要意义。

采用室内模型试验^[1-10]的方法可以直接获得隧道在堆载作用下的受力变化数据,但室内模型试验尚有一定的局限性,一般采用理论研究^[11-17]对其进行补充与验证。黄大维等^[1]采用缩尺寸模型试验方法,研究了在地表超载作用下隧道结构的变形情况以及隧道周边土压力的变化。梁发云等^[18]采用缩尺寸试验,研究在局部地面堆载下堆载位置和堆载大小不同对隧道椭圆度、管片接头张开量、隧道管片表面土压力的影响。以上试验研究并未对隧道在堆载作用下围压的变化进行系统性分析,唯有梁发云等^[18]在试验中涉及了隧道表面土压力,但未对其变化规律进行系统性分析,且未研究埋深不同的影响。因此,有必要对堆载作用下隧道围压的变化规律进行系统性研究。

本文研究地面堆载对盾构隧道附加围压的影响,通过改变堆载大小、隧道埋深、堆载位置以及试验土体的物理性质,进行室内缩尺寸模型试验研究,分析不同工况下隧道围压的变化规律。同时,采用理论计算方法,得出室内模型试验对应工况下的围压数据,与模型试验结果作对比。

1 室内模型试验

1.1 模型试验的模型及土体介绍

本次试验选取某隧道 23 环管片共计 27.6 m 作为研究对象,隧道的外直径 $D_0=6.2$ m,隧道管片环宽为 1.2 m,管片厚度为 0.348 m。室内模型试验的几何相似比 $C_L=15.5$,表 1 为根据相似第二定理推导出的各物理量相似比。室内模型箱尺寸为 $1.8\text{ m}\times 1.8\text{ m}\times 1.5$

m,模型箱的宽度为 1.8 m (为 $4.5D_0$),高度为 1.5 m (为 $3.75D_0$)。图 1 为室内模型试验装置。

隧道模型的管片材料采用弹性模量 $E=2.06\text{ GPa}$ 的有机玻璃进行加工,根据几何相似比确定管片厚度为 22 mm、隧道外径为 0.4 m。表 2 为隧道模型的几何参量和材料特性。隧道模型管片以及管片环之间采用螺栓进行连接,表 3 为连接螺栓的几何参量和材料特性。试验土体材料使用晒干后的细砂,细砂的材料特性见表 4。模型试验的堆载方式为采用千斤顶在承压板上加压来模拟均布堆载。采用 BWM 型应变式土压力计,测量隧道表面在堆载作用下产生的土压力变化。使用 AB 胶将土压力计粘贴到测点位置。共计布置 40 个土压力计,沿隧道管片呈八边形布置。测点布置见图 2。



图 1 模型试验装置
Fig. 1 Model test devices

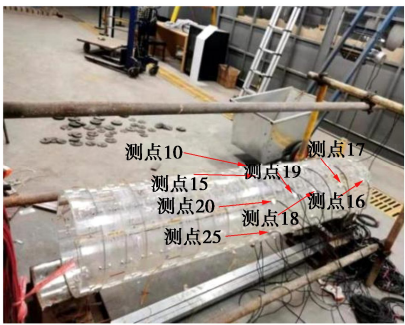


图 2 隧道模型整体示意图
Fig. 2 Schematic diagram of overall tunnel model

表 1 室内模型试验相似常数
Table 1 Similarity constants in indoor model tests

物理量	相似关系	相似常数	物理量	相似关系	相似常数
几何尺寸	基本量	15.50	弹性模量	基本量	16.75
压力	C_q	16.75	重度	C_e	1.08

表 2 隧道模型的几何参量和材料特性

Table 2 Geometric parameters and material properties of tunnel model

类型	管片外径/m	管片内径/m	管片厚度/m	环宽/m	管片弹性模量/MPa	管片泊松比
原型	6.200	5.504	0.348	1.200	34500	0.2
模型	0.400	0.356	0.022	0.077	2060	0.3

表 3 隧道连接螺栓的几何参量和材料特性

Table 3 Geometric parameters and material properties of tunnel-connecting bolts

类型	螺栓长/m	螺栓直径/m	螺栓数	螺栓弹性模量/MPa	螺栓泊松比
原型	0.400	0.030	17	200000	0.30
模型	0.027	0.002	6	33800	0.32

表 4 干砂物理力学指标

Table 4 Physical and mechanical properties of dry sand

密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	压缩模量/MPa
1.495	0.23	29	0	2.89

1.2 模型试验工况及荷载

一共进行了 8 组试验,通过改变隧道拱顶埋深(指隧道顶部的覆土厚度,简称埋深)、堆载位置以及试验土体的物理性质,来研究在突发性地面堆载下盾构隧道的围压变化。试验工况见表 5。选取试验 1 作为标准工况。

每组试验均改变堆载大小。千斤顶施加的力对应的荷载质量分别为 0.344, 0.688, 1.032, 1.376 kN, 承压板尺寸为 0.4 m×0.4 m、厚度 4 mm。试验对应的实际堆载大小分别为 36, 72, 108, 144 kPa, 土的重度取 18 kN/m³, 堆土高度分别取 2, 4, 6, 8 m, 对应的实际堆载尺寸为 6.2 m×6.2 m。

表 5 试验工况

Table5 Test conditions

试验编号	堆载位置/m	隧道埋深/m	试验用砂
1	偏心 0	0.6	干砂
2	偏心 0.2	0.6	干砂
3	偏心 0.4	0.6	干砂
4	偏心 0.6	0.6	干砂
5	偏心 0	0.5	干砂
6	偏心 0	0.7	干砂
7	偏心 0	0.8	干砂
8	偏心 0	0.6	湿砂

1.3 试验步骤

进行模型试验时,先将隧道吊在指定位置,之后分级加砂。先加砂 20 cm 使砂层到达隧道模型底部,静置 24 h 后,将剩下的砂分两次加入,每次加入后都静置 24 h,可以保证砂子的密实度基本相同。为了保证试验的准确性,研究埋深不同时地面堆载对隧道围压影响时,每做完一个埋深试验后都将模型箱中的砂子排出,之后再下一组的模型试验。由于受模型箱与隧道模型的限制,本次模型试验只是单纯模拟地

面堆载对运营中盾构隧道的影响,为了试验方便盾构隧道是采用直接埋入式操作,未模拟隧道开挖过程。

加载前把土压力计清零,即仅研究堆载引起的围压变化。使用液压千斤顶逐级快速的施加压力,到达预定压力值后将该压力固定,加载半小时后再进行下一级压力施加;试验中使用电阻式应变仪对数据进行实时采集,采集间隔为 1 s,这样可以详细掌握隧道在堆载作用下的围压变化情况。

2 室内模型试验结果分析

令隧道上某点沿着纵向(隧道掘进方向)到隧道模型中心点的距离为 x ,沿着横向到隧道模型中心点的距离为 y ,从地面垂直向下为 z 方向,地面堆载中心点到隧道轴线的水平偏心距离为 s 。

本节试验结果分析中的数值,均为实际测得的隧道附加围压值。文中试验结果图,除了研究 x 变化的数据图,其他图的数据均来源于 $x=0$ m 处的测试截面,不再一一说明。

2.1 堆载大小对隧道围压的影响

图 3 是第 1 组试验工况下 $x=0$ m 时,堆载 p 大小不同导致的隧道围压变化对比图,图中 0° 位置为隧道顶部。如图 3 所示,测点处围压都随着堆载 p 的不断增大而变大,该变化规律与黄大维等^[1]得出的隧道变形规律基本相同,从侧面验证了本次试验的正确性;由于对称堆载,测点处围压变化的分布大致呈现左右对称的情况,分布规律基本相同。

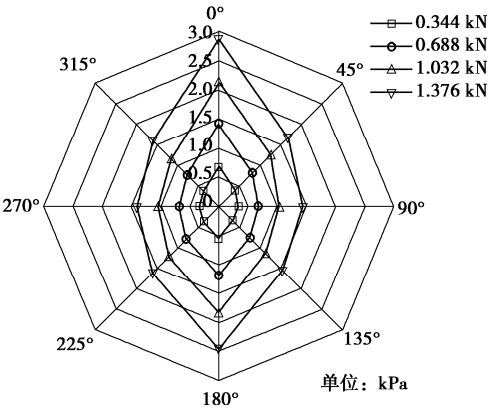


图 3 隧道在不同堆载下围压变化图

Fig. 3 Change of confining pressure of tunnel under different surcharges

图 4 为 $x=0$ 处隧道顶部测点的围压在堆载发生前

后的变化图。从图4可以看出,当发生突发堆载时,隧道管片的围压瞬间发生变化(变大),之后有一小段平滑的增大过程,最后趋于稳定。

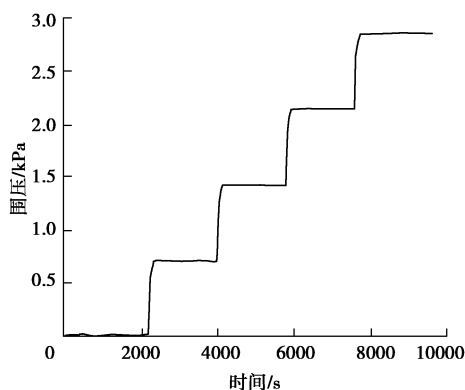


图4 隧道顶部围压在堆载前后变化图

Fig. 4 Change of confining pressure at tunnel crown before and after surcharge

图5为1.376 kN堆载大小下不同 x 处的围压分布图。如图5所示,随着 x 值的增大隧道围压在不断变小,但围压形状相似,这是由于随着 x 值的增大,离堆载中心距离越远,堆载影响也变小;随着 x 值增大,试验得到的隧道顶部附加围压分别为2.875, 2.585, 1.679, 0.793, 0.336 kPa,变化基本符合半正态分布,与梁发云等^[13]提出的隧道沉降变化规律基本相同。原因是根据土力学知识,地面局部堆载在隧道顶部产生的土体竖向附加应力 σ_z ,沿 x 轴方向的变化规律符合正态分布。

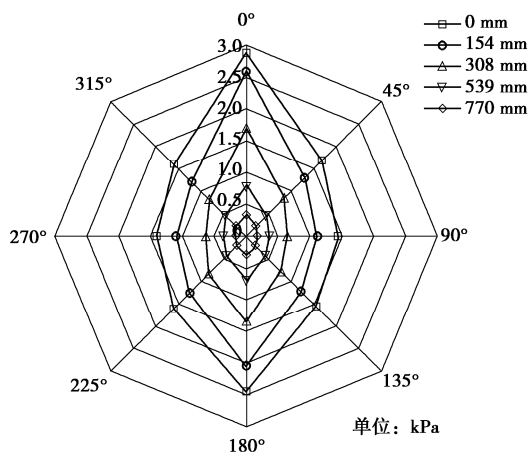


图5 x 值不同时隧道围压的变化情况

Fig. 5 Change of confining pressure of tunnel under different values of x

2.2 隧道埋深对隧道围压的影响

图6为1.376 kN堆载大小下试验隧道埋深为0.5, 0.6, 0.7, 0.8 m时围压的变化雷达图。如图6所示,当隧道埋深增加时,在突发堆载下隧道围压明显减小,

但围压形状相似;隧道拱顶的围压变化基本符合三阶衰减指数函数,以隧道顶部测点围压变化为例,隧道埋深从0.5 m变到0.8 m时,围压数值从3.879 kPa下降到1.279 kPa,下降幅度非常大,表明突发堆载对隧道围压的影响随着埋深的增大有明显的递减效应。原因是地面局部堆载产生的土体竖向附加应力 σ_z ,会随深度 z 增大而急剧减小。

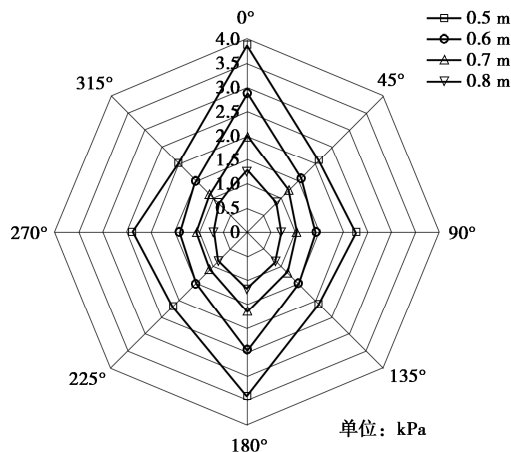


图6 不同埋深下隧道围压变化

Fig. 6 Change of confining pressure of tunnel under different buried depths

2.3 堆载位置对隧道围压的影响

以堆载位置为控制变量,试验堆载的偏心距离分别采用 $s=0$ m, $s=0.2$ m, $s=0.4$ m, $s=0.6$ m,堆载大小和隧道埋深分别为1.376 kN, 0.6 m,对应实际工况的堆载大小和隧道埋深分别为144 kPa, 9.3 m。

图7为在不同偏心位置堆载时隧道围压的变化情况。如图7所示:①隧道拱顶、非加载侧拱腰、拱底的围压随偏心距离的增大整体呈现下降趋势,与魏纲等^[14]所得规律基本相同。②隧道围压在偏心加载侧的下降趋势明显比非偏心侧要小。在 $s=0.2$ m时,隧道偏心侧的围压与堆载 $s=0$ m时相比反而有小幅度的增大,隧道上1/4和下1/4拱腰以及加载侧拱腰的增大值分别为0.193, 0.108, 0.23 kPa,之后随着 s 进一步增大围压开始减小。③原因是 s 从0偏移到0.2 m ($0.5D_0$)的过程中,有一部分土体竖向附加应力 σ_z 会发生小幅度增大的现象,之后随着 s 进一步增大 σ_z 整体呈现下降趋势。

2.4 试验用土物理性质不同时对隧道围压的影响

图8为试验用土物理性质不同时隧道围压的对比图,图中软黏土的数据来源于文献[19]。从图8可以看出:①当试验采用湿砂时,隧道围压明显减小,以隧道顶部围压为例,干砂时为2.875 kPa,湿砂时为1.082 kPa;②当试验采用软黏土时,隧道围压有明

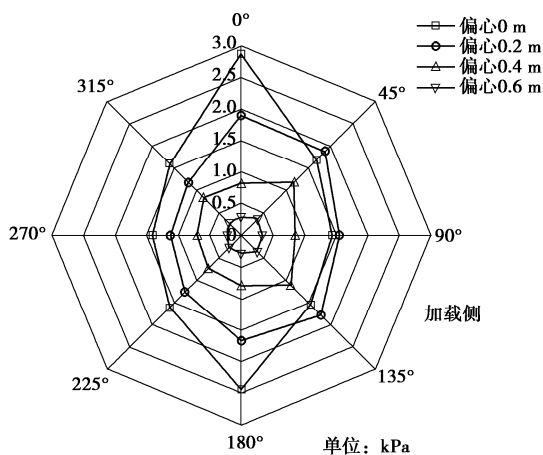


图 7 不同堆载位置下隧道围压的变化

Fig. 7 Change of confining pressure of tunnel under different surcharge positions

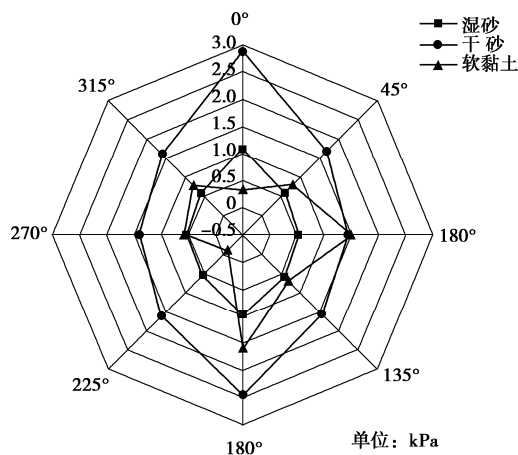


图 8 土质条件不同时隧道围压变化

Fig. 8 Change of confining pressure of tunnel under different soil conditions

显减小, 围压基本呈现左右对称, 但未完全对称, 主要是因为加载过程中砝码放置稍有偏心从而导致轻微偏载, 且软黏土表面承压板放置找平较为困难, 软黏土反应又十分灵敏^[19]; ③试验用土为干砂时隧道围压整体明显大于用湿砂和软黏土。原因是土体竖向附加应力 σ_z 在不同土质条件下向下传递的扩散角 θ_z 不同, 在湿砂与软黏土条件下 θ_z 比干砂时更大, 这就导致传递到隧道附近的 σ_z 比干砂时小, 故隧道的围压变小。

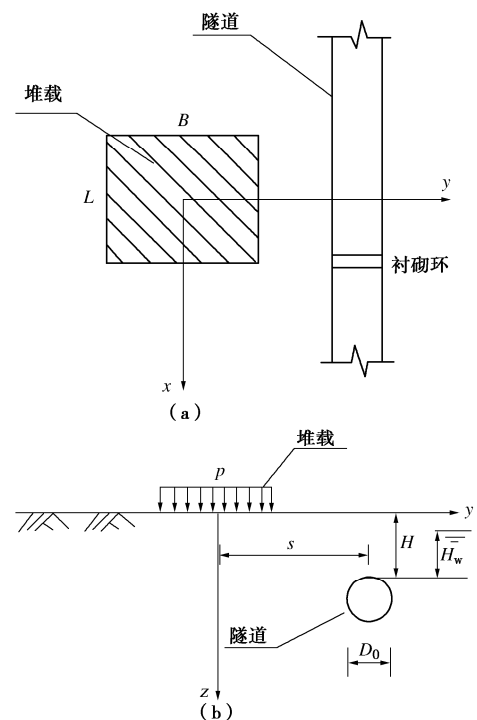
3 模型试验与理论研究对比分析

在魏纲等^[14]的研究基础上完善对隧道围压的计算方法。文献[14]仅研究了隧道在黏土中的受力特性, 且未考虑隧道拱背处的水土压力。本文在其基础上加

上拱背土压力, 以及由砂土特性引起的松弛土压力, 推导了适用于砂土的计算方法。

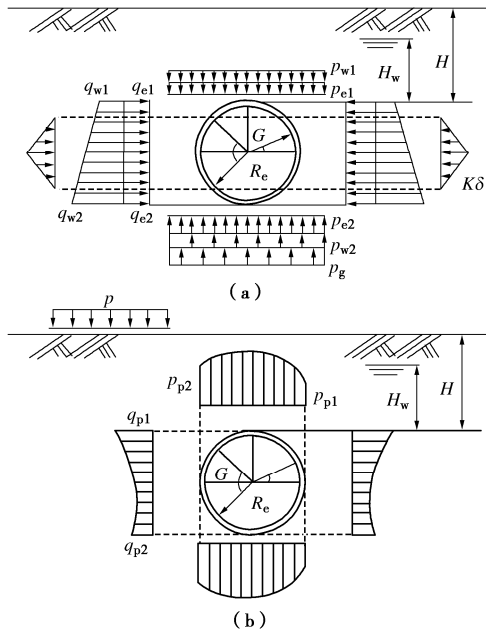
3.1 隧道理论计算模型

图 9 (a), (b) 为理论计算模型简图^[14]。图中 L 为堆载受力面的边长, B 为堆载受力面的宽度, 坐标原点则选为堆载受力面的中心点, s 为堆载受力面到隧道中心点的水平距离, H 为隧道的埋置深度, H_w 为地下水位线高度, D_0 为隧道外径, p 为地面堆载。为了简化计算, 选取一个衬砌环进行研究, 设该环的中心点坐标为 $(x, s, H + D_0/2)$ 。该衬砌环主要受到水土压力、堆载对隧道产生的附加荷载以及隧道衬砌自身重力的作用。

图 9 理论计算模型简图^[14]Fig. 9 Schematic diagram of theoretical model for tunnels^[14]

3.2 水土压力

采用水土分算法对隧道所受到的水土压力进行计算, 无堆载情况下隧道衬砌结构的受力见图 10 (a)^[14], 在地面堆载情况下隧道所受的附加荷载见图 10 (b)^[14]所示。图 10 中 p_{e1} 与 p_{e2} 表示隧道顶部以及底部所受到的竖向土压力; p_{w1} 与 p_{w2} 表示隧道顶部以及底部所受到的竖向水压力; q_{e1} 与 q_{e2} 表示隧道顶部以及底部所受到的水平土压力; q_{w1} 与 q_{w2} 表示隧道顶部以及底部所受到的水平水压力; $K\delta$ 表示隧道管片受到的地层抗力; q_{p1} 与 q_{p2} 为地面堆载对隧道顶部与底部水平力的影响; p_{p1} 与 p_{p2} 为地面堆载对隧道两侧拱腰处竖向力的影响; G 是隧道自重荷载; R_c 为衬砌形心半径, p 为地面堆载量。

图 10 隧道衬砌受力简图^[14]Fig.10 Schematic diagram of forces acting on tunnel lining^[14]

对于隧道所受的水土压力、拱背土压力以及由砂土特性引起的松弛土压力的计算过程具体见文献[14~16]。针对实际工程中隧道围压的计算方法如下:

(1) 竖向土压力

根据文献[16],对砂性土或硬质黏土而言,当 $H > D_0$,因地层存在拱效应,竖直土压应选用松弛土压力。关于松弛土压力的计算方法一般采用太沙基公式^[16],但该公式未考虑拱背土压力,所以在原有公式基础上应加上拱背土压力^[16]。

计算公式如下:

$$h_0 = \frac{B_1 \left(1 - \frac{c}{B_1 \gamma} \right)}{K_0 \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \tan \varphi \frac{H}{B_1}} \right) + \frac{p}{\gamma} e^{-K_0 \tan \varphi \frac{H}{B_1}}, \quad (1)$$

$$q_3 = \frac{B_1 \left(\gamma - \frac{c}{B_1} \right)}{K_0 \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \tan \varphi \frac{H}{B_1}} \right) + p e^{-K_0 \tan \varphi \frac{H}{B_1}}, \quad (2)$$

$$B_1 = R_e \cdot \cot \left(\frac{\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}}{2} \right). \quad (3)$$

拱背处土压力简易计算公式如下:

$$q_4 = \sum \gamma R (1 - \cos \theta), \quad (4)$$

$$G_1 = 2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \gamma R_e^2 \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (5)$$

为简化计算,将公式中的 q_4 假设为均布荷载, $q_4 = G_1 / 2R_e$;但当 p/γ 小于 h_0 时,采用以下公式:

$$q_3 = \frac{B_1 \left(\gamma - \frac{c}{B_1} \right)}{K_0 \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \tan \varphi \frac{H}{B_1}} \right). \quad (6)$$

式中 h_0 表示土的松动高度; q_3 表示竖向松弛土压力; q_4 表示拱背土压力; K_0 表示水平与竖向土压力之比; φ 表示土的内摩擦角; γ 表示土体的重度; c 表示土的黏聚力。

$$p_{e1} = q_3 + q_4. \quad (7)$$

(2) 水平土压力

作用在盾构隧道管片上侧面水平土压力,可以按照竖向土压力乘侧向土压力系数得出,即

$$q_{e1} = \lambda \cdot p_{e1}, \quad (8)$$

$$q_{e2} = \lambda \cdot (p_{e1} + \gamma \cdot D_0), \quad (9)$$

式中, λ 表示侧向土压系数。

(3) 水压力

水压力计算公式为

$$p_{w1} = H_w \cdot \gamma_w, \quad (10)$$

$$p_{w2} = (H_w + D_0) \gamma_w. \quad (11)$$

(4) 地面堆荷载

设地面堆载上点 (α, β) 的力为 $p d\alpha d\beta$,根据文献[14]中提出的地面堆载引起隧道围压变化的计算公式如下:

$$p_p = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{3p \cdot (H + 0.5 \cdot D_0 - 0.5 \cdot D_0 \cos \theta)^3}{2\pi \cdot R^5} d\alpha d\beta, \quad (12)$$

$$q_p = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{3p}{2\pi} \left\{ \frac{(s - 0.5D_0 \sin \theta - \beta)}{R^5} \times \frac{(H + 0.5D_0 - 0.5D_0 \cos \theta)}{R^5} + \frac{1 - 2\mu}{3} \left[\frac{R^2}{R^3(R + H + 0.5D_0 - 0.5D_0 \cos \theta)} - \frac{(H + 0.5D_0 - 0.5D_0 \cos \theta)}{R^3(R + H + 0.5D_0 - 0.5D_0 \cos \theta)} \times \frac{(R + H + 0.5D_0 - 0.5D_0 \cos \theta)}{R^3(R + H + 0.5D_0 - 0.5D_0 \cos \theta)} - \frac{(s - 0.5D_0 \sin \theta - \beta)^2}{R^3(R + H + 0.5D_0 - 0.5D_0 \cos \theta)^2} \times \frac{(2R + H + 0.5D_0 - 0.5D_0 \cos \theta)}{R^3(R + H + 0.5D_0 - 0.5D_0 \cos \theta)^2} \right] \right\} d\alpha d\beta, \quad (13)$$

$$R = \sqrt{(s - 0.5D_0 \sin \theta - \beta)^2 + (H + 0.5D_0 - 0.5D_0 \cos \theta)^2 + (x - \alpha)^2}. \quad (14)$$

式中 p_p 表示堆载对隧道竖向受力的影响; q_p 表示堆载对隧道水平受力的影响; θ 表示测点和隧道中心点的连线与隧道顶点和中心点连线的夹角(逆时针为

正)。

(5) 地层抗力、自重荷载

采用文献[14]计算方法进行计算，地层抗力为

$$q = K \delta \quad , \quad (15)$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad , \quad (16)$$

$$\delta_1 = \frac{[2(p_{e1} + p_{w1}) - (q_{e1} + q_{w1}) - (q_{e2} + q_{w2})\pi G]R_c^4}{24(\eta EI + 0.0454KR_c^4)} \quad , \quad (17)$$

$$\delta_2 = \frac{[(p_{p1} + p_{p2}) - q_{p1} - q_{p2}\pi G]R_c^4}{24(\eta EI + 0.0454KR_c^4)} \quad . \quad (18)$$

式中 K 表示地层反力系数； δ_1 表示水土压力导致隧道发生的水平位移； δ_2 表示地面堆载导致隧道发生的水平位移； η 表示弯曲刚度有效率； EI 表示抗弯刚度。

隧道衬砌的自重荷载计算公式如下：

$$G = \frac{W_1}{2\pi R_c} = g_1 g T \quad . \quad (19)$$

式中 W_1 为单位长度衬砌的重力 (kN/m)； g_1 为衬砌的体密度 (t/m³)； g 为重力加速度； T 为衬砌厚度。

3.3 算例分析

(1) 模型试验算例工况

因为试验中没有地下水的影响，则理论计算中忽视地下水位线。实际工况计算参数见表 6。

表 6 实际工况参数

Table 6 Parameters of actual working conditions

参数	取值	参数	取值
隧道外径 D_0	6.2 m	砂的弹性模量	39.6 MPa
管片宽度 t	1.2 m	地层反力系数	5000 kN/m ³
堆载尺寸	6.2 m×6.2 m	混凝土密度 ρ	2.6 t/m
土的内摩擦角	29°	侧向土压力系数 λ	0.4
土的黏聚力	0 kPa	隧道衬砌弹性模量	34500 MPa
土体天然重度 γ	16.2 kN/m ³		

文中理论计算结果图,除了研究 x 变化的数据图,其他图的数据均来源于 $x=0$ m 处的计算截面,不再一一说明。

图 11 为不同埋深下隧道的总围压变化图。从图 11 可以看出,随着埋深增大隧道的总体围压呈现一种增大的趋势。该结果表明埋深在一点范围内时,当堆载大小一定,埋深增大在一定程度上可以减小堆载对隧道围压的影响。

(2) 附加围压理论计算结果与试验结果对比

附加围压的理论计算结果见图 12~15。

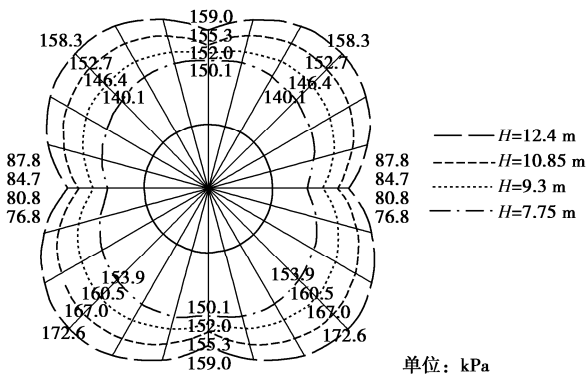


图 11 不同埋深下隧道的总围压变化

Fig. 11 Change of total confining pressure of tunnels under different buried depths

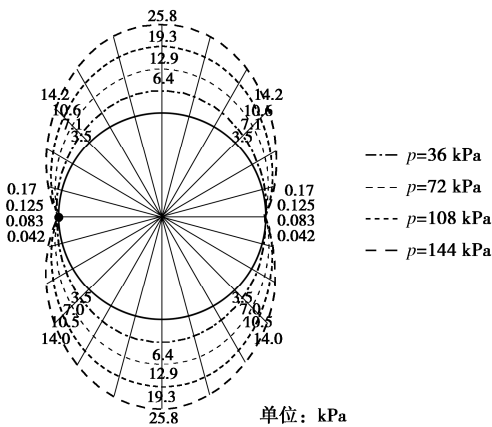


图 12 不同堆载大小时隧道的围压变化

Fig. 12 Change of confining pressure of tunnel with different surcharges

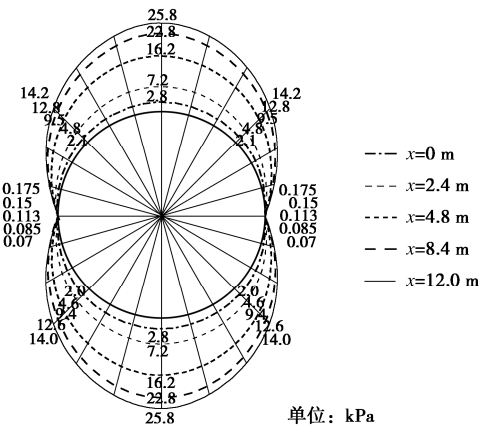


图 13 不同 x 值下隧道的围压变化

Fig. 13 Change of confining pressure of tunnels under different values of x

从图 12 可以明显地看出,随着堆载变大隧道围压基本呈现等值增大的趋势。由图 13 可知,随着 x 值增加隧道围压一直在减小,而减小速率则为先减小、后增大、之后再次减小,变化规律基本符合半正态分布,与室内模型试验的规律基本一致。

如图 14 所示,在非偏心堆载影响下隧道的顶部围压最大,在隧道拱腰处达到最小值并无限接近于 0;随着埋深的增加,地面堆载对隧道围压的影响逐渐变小,减小速率也在下降。

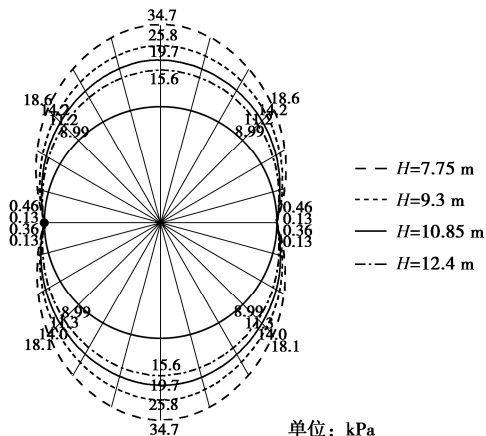


图 14 不同埋深下隧道的围压变化

Fig. 14 Change of confining pressure of tunnels under different buried depths

图 15 同图 7 一样右侧为偏心加载侧。如图 15 所示,堆载位置偏移过程中隧道围压整体呈现减小趋势,偏移侧围压的下降趋势明显比非偏移侧要小得多;当偏移量在一定范围内时偏移侧的围压明显大于非偏移侧的围压,在偏移 3.1 m 时隧道偏移侧一部分围压大于堆载未发生偏移时隧道的围压变化,该规律与室内模型试验基本一致。

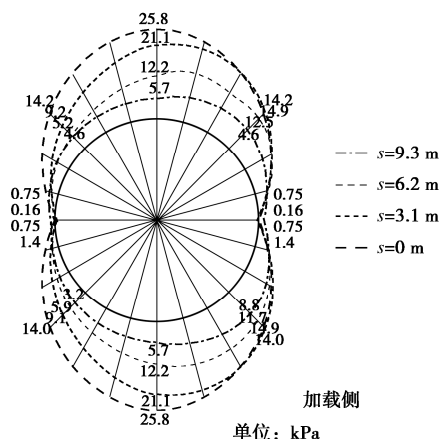


图 15 不同堆载位置下隧道的围压变化

Fig. 15 Change of confining pressure of tunnels under different surcharge positions

图 16~19 分别是不同堆载大小、 x 值、埋深值以及偏心距离下试验与理论计算中隧道顶部围压的无量纲对比图。结合上述试验与理论计算对比分析可以看出:①试验结果与理论计算结果的变化规律比较吻合,整体上的变化趋势无过大差距,但试验与理论计算还

是存在不同之处。②在理论计算中,隧道在非偏心堆载影响下隧道的顶部围压最大,从隧道顶部到底部的过程中隧道围压先变小、后变大,并在隧道拱腰处达到最小值并无限接近于 0;而试验中隧道围压虽然也是在拱腰处达到最小值,但拱腰处围压并不为 0。③随着埋深增加,地面堆载对隧道围压的影响逐渐变小,减小的速率也在下降,但室内模型试验中的围压下降速率明显大于理论计算下降速率。④当偏心位置发生改变时,随着偏心距离增大,试验中隧道围压变化明显比理论计算中围压变化更为迅速。

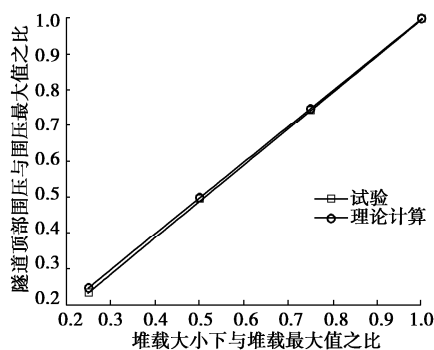


图 16 不同堆载大小下隧道顶部围压无量纲对比图

Fig. 16 Dimensionless comparison diagram of confining pressure at tunnel crown under different surcharge loads

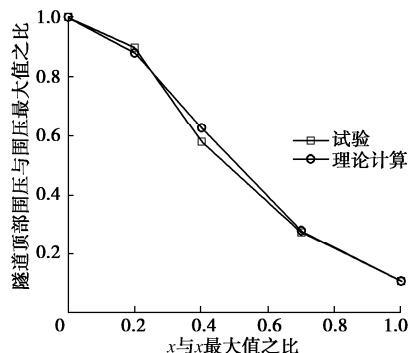


图 17 不同 x 值下隧道顶部围压的对比图

Fig. 17 Comparison of confining pressure at tunnel crown under different values of x

导致试验结果与理论计算结果发生差异的原因可能是:①试验中所用土体为干砂,干砂的性质接近与砂性土,砂土在均匀荷载作用下其基底压力呈抛物线分布,这使得压力可以较集中地作用在隧道管片上,从而导致了试验测得结果远大于理论计算所得;②试验中由于场地、相似比以及经济方面的原因,模型箱的尺寸不宜过大,这会导致试验会受到模型箱边界效应的影响;③试验时在堆载作用下隧道环会发生横向变形,在与边界效应的共同作用下会使得隧道拱腰的压力增大,而在理论计算中则没有考虑该因素。

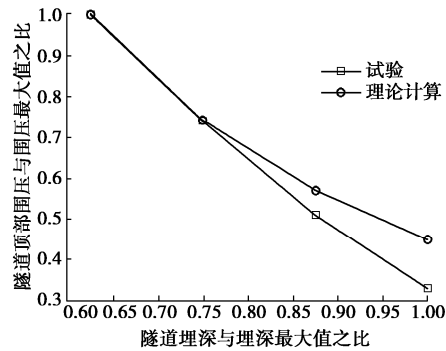


图 18 不同埋深下隧道顶部围压的对比图

Fig. 18 Comparison of confining pressure at tunnel crown at different buried depths

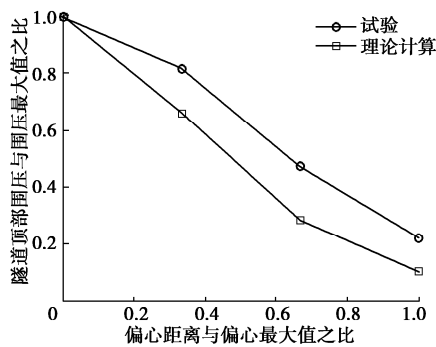


图 19 不同偏心距离下隧道顶部围压的对比图

Fig. 19 Comparison of confining pressure at tunnel crown under different eccentric distances

4 结 论

(1) 隧道衬砌的围压随着堆载的不断增加而不断变大, 非偏心堆载时测点处围压分布大致呈现左右对称的情况; 在隧道正上方发生突发堆载时, 隧道的围压最大值发生在地面堆载中心下方处, 且随着 x 值的增大围压在逐渐减小, 变化规律基本符合半正态分布。

(2) 当隧道埋深增加时, 在突发堆载下隧道围压明显减小, 但围压形状相似; 隧道围压随偏心距离 s 的增大整体呈现下降趋势, 在偏心侧的隧道围压下降趋势明显比非偏心侧小, 且在偏心距离 s 从 0 到 $0.5D_0$ 时隧道加载侧的围压有一小部分区域呈现变大趋势, 随后变小。

(3) 当试验采用湿砂与软黏土时, 隧道围压的降低幅度非常大。原因可能是附加应力在不同土质条件下扩散角不同, 在湿砂与软黏土条件下扩散角更大, 导致堆载产生的附加应力有所减小。

(4) 隧道拱腰处围压在模型试验中影响较为明显, 而在理论计算中基本无影响; 模型试验中测得的数据在通过相似比计算后要远大于理论计算值, 原因

可能是: 室内模型试验中存在边界效应; 在均匀荷载作用下砂土的基底压力呈抛物线分布, 使得压力较集中地作用在隧道管片上; 理论计算中未考虑隧道管片横向变形对周围土体的挤压作用。

参考文献:

- [1] 黄大维, 周顺华, 赖国泉, 等. 地表超载作用下盾构隧道劣化机理与特性[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(7): 1173 - 1181. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, LAI Guo-quan, et al. Mechanisms and characteristics for deterioration of shield tunnels under surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(7): 1173 - 1181. (in Chinese))
- [2] 吴 庆, 杜守继. 地面堆载对既有盾构隧道结构影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, **10**(1): 57 - 66. (WU Qing, DU Shou-ji. Model test on influence of ground heaped load on existing shield tunnel structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, **10**(1): 57 - 66. (in Chinese))
- [3] 柳 献, 张浩立, 鲁 亮, 等. 超载工况下盾构隧道结构承载能力的试验研究[J]. 地下工程与隧道, 2013(4): 10 - 15, 59. (LIU Xian, ZHANG Hao-li, LU Liang, et al. Experimental study on load bearing capacity of shield tunnel structure under overload condition[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2013(4): 10 - 15, 59. (in Chinese))
- [4] 张明告, 周顺华, 黄大维, 等. 地表超载对地铁盾构隧道的影响分析[J]. 岩土力学, 2016, **37**(8): 2271 - 2278. (ZHANG Ming-gao, ZHOU Shun-hua, HUANG Da-wei, et al. Analysis of influence of surface surcharge on subway shield tunnel under[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(8): 2271 - 2278. (in Chinese))
- [5] ATKINSON J H, POTTS D M. Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil[J]. Géotechnique, 1977, **27**(2): 203 - 215.
- [6] 封 坤, 何 川, 苏宗贤. 南京长江隧道原型管片结构破坏试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2011, **46**(4): 564 - 571. (FENG Kun, HE Chuan, SU Zong-xian. Prototype test on failure characteristics of segmental lining structure for Nanjing Yangtze River tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, **46**(4): 564 - 571. (in Chinese))
- [7] 何 川, 张建刚, 杨 征. 武汉长江隧道管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(12): 85 - 90. (HE Chuan, ZHANG Jian-gang, YANG Zheng. Model test study on the mechanical characteristics of segment lining for the Wuhan Yangtze River tunnel[J]. China Civil

- Engineering Journal, 2008, **41**(12): 85 – 90. (in Chinese))
- [8] 鞠 杨, 徐广泉, 毛灵涛, 等. 盾构隧道衬砌结构应力与变形的三维数值模拟与模型试验研究[J]. 工程力学, 2005, **22**(3): 157 – 165. (JU Yang, XU Guang-quan, MAO Ling-tao, et al. 3d numerical simulation of stress and strain properties of concrete shield tunnel lining and modeling experiments[J]. Engineering Mechanics, 2005, **22**(3): 157 – 165. (in Chinese))
- [9] 唐志成, 何 川, 林 刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(1): 85 – 89. (TANG Zhi-cheng, HE Chuan, LIN Gang. Study on mechanical behavior of segment of shield tunnel of metro with model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(1): 85 – 89. (in Chinese))
- [10] 郭智杰, 鲁 亮, 刘祖华. 双圆盾构法隧道衬砌 1:1 结构试验加载方法研究[J]. 结构工程师, 2004, **20**(3): 64 – 71. (GUO Zhi-jie, LU Liang, LIU Zu-hua. Loading method of test for double-circular face shield-tunnel lining[J]. Structural Engineers, 2004, **20**(3): 64 – 71. (in Chinese))
- [11] 康 成, 梅国雄, 梁荣柱, 等. 地表临时堆载诱发下既有盾构隧道纵向变形分析[J]. 岩土力学, 2018, **39**(12): 4605 – 4616. (KANG Cheng, MEI Guo-xiong, LIANG Rong-zhu, et al. Analysis of the longitudinal deformation of existing shield tunnel induced by temporary surface surcharge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(12): 4605 – 4616. (in Chinese))
- [12] 魏新江, 洪文强, 魏 纲, 等. 堆载引起临近地铁隧道的转动与错台变形计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(5): 1281 – 1289. (WEI Xin-jiang, HONG Wen-qiang, WEI Gang, et al. Rotation and shearing dislocation deformation of subway tunnels due to adjacent ground stack load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(5): 1281 – 1289. (in Chinese))
- [13] 梁发云, 袁 强, 李家平, 等. 堆载作用下土体分层特性对地铁隧道纵向变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(1): 63 – 71. (LIANG Fa-yun, YUAN Qiang, LI Jia-ping, et al. Influences of soil characteristics on longitudinal deformation of shield tunnels induced by surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(1): 63 – 71. (in Chinese))
- [14] 魏 纲, 洪文强, 魏新江, 等. 偏心堆载引起的盾构隧道横向受力理论计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, **50**(7): 1645 – 1654. (WEI Gang, HONG Wen-qiang, WEI Xin-jiang, et al. Theoretical calculations of transverse force on shield tunnel caused by eccentric load[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, **50**(7): 1645 – 1654. (in Chinese))
- [15] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, **7**(5): 195 – 202.
- [16] 张凤祥, 傅德明, 杨国祥, 等. 盾构隧道施工手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 190 – 201. (ZHANG Feng-xiang, FU De-ming, YANG Guo-xiang, et al. Shield Tunnel Construction Manual[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 190 – 201. (in Chinese))
- [17] HUANG H W, ZHANG D M. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **51**: 301 – 312.
- [18] 梁发云, 方衍其, 袁 强, 等. 软、硬地层中局部堆载对隧道横向变形影响的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, **49**(3): 322 – 331, 430. (LIANG Fa-yun, FANG Yan-qi, YUAN Qiang, et al. Experimental study of the influence of surface surcharge on tunnel lateral deformation in soft and hard soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, **49**(3): 322 – 331, 430. (in Chinese))
- [19] XIANG P F, WEI G, ZHANG S M, et al. Model test on the influence of surcharge, unloading and excavation of soft clay soils on shield tunnels[J]. Symmetry, 2021, **13**(11): 1 – 18.