



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2506890

引用格式:李兵,李文博,李松霖.砂黏复合地层隧道在地表堆载下的响应机制:模型试验与数值模拟[J].科学技术与工程,2026,26(20):8750-8761.

Li Bing, Li Wenbo, Li Songlin. Response mechanism of tunnels in sand-clay composite strata under surface surcharge: model testing and numerical simulation[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(20): 8750-8761.

砂黏复合地层隧道在地表堆载下的响应机制: 模型试验与数值模拟

李兵,李文博,李松霖

(沈阳建筑大学土木工程学院,沈阳 110068)

摘 要 为解决地表堆载引起的复合地层隧道变形预测难题,揭示砂黏互层条件下隧道的应变响应机制,通过室内缩尺模型试验与 ABAQUS 数值模拟相结合的方法研究了不同荷载等级下隧道的变形规律及荷载-应变关系。结果表明:随着上部荷载增加,隧道加载点处应变变化最为显著,且随距离增大呈衰减趋势;受土体应力重分布影响,跨中区域出现应变拐点及起拱现象;黏土中隧道变形显著大于砂土,且隧道几何参数对应力分布形态具有显著调控作用。研究成果突破了传统均质地层假设,揭示了土体各向异性下荷载传递与隧道变形机制,所建立的荷载-应变方程能有效预测危险点应变演化趋势,可为复杂土体情况下深埋隧道安全维护提供理论依据。

关键词 复合地层;荷载等级;模型试验;数值模拟;应变响应;土体各向异性

中图分类号 TU473; **文献标志码** A

Response Mechanism of Tunnels in Sand-clay Composite Strata under Surface Surcharge: Model Testing and Numerical Simulation

LI Bing, LI Wen-bo, LI Song-lin

(School of Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110068, China)

[Abstract] In order to solve the difficulty in predicting tunnel deformation induced by surface surcharge in composite strata and reveal the strain response mechanism under sand-clay interbedded conditions, a combination of laboratory reduced-scale model tests and ABAQUS numerical simulations was used to investigate the tunnel deformation patterns and load-strain relationships under different load levels. The results show that the strain variation at the loading point is most significant with the increase of the upper load. An attenuation trend is observed with increasing distance. Strain inflection points and arching phenomena appear in the mid-span region due to soil stress redistribution. The tunnel deformation in clay is significantly greater than that in sand. The stress distribution is significantly regulated by tunnel geometric parameters. It is concluded that the traditional homogeneous strata assumption is overcome. The mechanisms of load transfer and tunnel deformation under soil anisotropy are revealed. The strain evolution trend at critical points is effectively predicted by the established load-strain equation. A theoretical basis is provided for the safety maintenance of deep-buried tunnels in complex soil conditions.

[Keywords] composite strata; load level; physical mode test; numerical simulation; strain response; soil anisotropy

城市化进程中,既有隧道常受上部工程活动影响,地铁隧道周边突发堆载工况日益频繁。由此引发的地铁隧道安全事故屡见报道。突发堆载^[1]作用导致隧道周围土体应力重分布,引发土体位移和内力变化,会破坏隧道结构原有的应力平衡状态,引起隧道应力重分布与纵横向变形^[2-3],对地铁安全造成严重影响,尤其在复合土体情况下,隧道的变形更加难以预测,因此研究复合土体情况下地表堆载对既有隧道的影响具有重要意义。

现有研究多集中在地表堆载下既有隧道变形的均质底层条件,文献[4]探讨了局部堆载位置对软、硬地层中隧道横向变形的作用机理,考察了堆载偏心距及隧道穿越土层性质的影响。文献[5]系统分析了地铁隧道与基坑相对位置变化对隧道变形响应特性的影响。文献[6]揭示了不同堆载工况下隧道累计收敛变形的演化规律。文献[7]通过开展室内模型试验,研究了地表堆载作用下盾构隧道纵向受力与变形特性。文献[8]重点关注地表堆载

收稿日期:2025-09-25; 修订日期:2025-12-16

基金项目:国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(52027811)

第一作者:李兵(1974—),男,汉族,辽宁沈阳人,博士,教授。研究方向:地下工程、组合结构。E-mail:Cebli@sjzu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

作用下隧道系统变形过程中的能量演化特性。文献[9]基于两阶段法提出了一种可以预测邻近堆载对下卧既有隧道变形响应的解析计算方法。综上所述可知,上述研究均建立在单一土层假设基础上。对于砂黏复合地层,土体各向异性导致的荷载传递复杂,现有理论难以解析土层特性与隧道变形的定量关联。研究表明,当土体性质差别较大时,不能简单地将分层地基等效为均质地基^[10-13]。鉴于此,现针对砂黏复合地层中荷载等级对既有隧道的应变响应机制,开展系统试验研究。通过模型试验与数值模拟^[14]相结合的方法,系统研究砂黏复合地层中既有隧道的应变结构响应机制。通过室内缩尺试验^[15]监测采集不同等级荷载作用下隧道模型表面应变,采用非线性拟合得到荷载-应变关系方程,利用ABAQUS构建有限元模型将数值模拟所得结果与模型试验监测数据进行交叉验证。一方面,验证模型试验的准确性、数值模拟的可靠性及关系方程的适应性;另一方面,解决砂黏土复合地层各向异性导致荷载传递路径复杂化的理论瓶颈,为该领域提供理论支持与数据参考。所建立的荷载-应变关系方程,为实际工程提供理论依据。

1 工程概况

以沈阳地区某地铁车站四号线为依托工程,基于现场监测数据与地质参数,选取典型区段开展模型试验,如图1所示。地铁隧道的直径为6 m,管片厚度为0.35 m,土体表面以下至隧道顶点即埋深16~25 m。

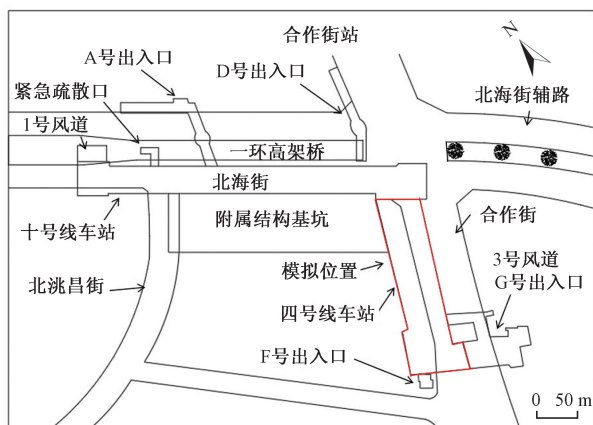


图1 地铁车站平面图

Fig. 1 Subway station layout map

2 试验方法

2.1 试验相似准则

本试验以沈阳地铁某车站为原型,采用定性模型试验方法,基于相似三定理建立缩尺模型系统。设原型工程与模型满足以下相似比关系。

2.1.1 基本相似比定义

(1)几何相似比可定义为

$$S_\phi = \frac{S_{pi}}{P_{mi}} \quad (1)$$

式(1)中: S_ϕ 为几何相似比; S_{pi} 为原型工程隧道几何尺寸; P_{mi} 为模型隧道几何尺寸。

(2)质量相似比可定义为

$$S_m = \frac{m_{ip}}{m_{im}} \quad (2)$$

式(2)中: S_m 为质量相似比; m_{ip} 为原型工程隧道质量; m_{im} 为模型隧道质量。

(3)荷载相似比定义如下

$$S_p = S_\phi^2 S_\sigma \quad (3)$$

式(3)中: S_p 为集中荷载相似比; S_σ 为应力相似比。

$$S_\omega = S_\phi S_\sigma \quad (4)$$

式(4)中: S_ω 为线荷载相似比。

$$S_q = S_\sigma \quad (5)$$

式(5)中: S_q 为面荷载相似比。

$$S_M = S_\phi^3 S_\sigma \quad (6)$$

式(6)中: S_M 为弯矩或扭矩相似比。

(4)应力、相似比应变相似比定义为

$$\begin{cases} S_\sigma = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} \\ S_\epsilon = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_m} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: σ_p 为原型工程应力; σ_m 为模型应力; ϵ_p 为原型工程应变; ϵ_m 为模型应变。

(5)其他相似比定义如下。

$$S_\mu = \frac{\mu_p}{\mu_m} \quad (8)$$

式(8)中: S_μ 为泊松比相似比; μ_p 为原型工程泊松比; μ_m 为模型泊松比。

$$S_E = \frac{E_p}{E_m} \quad (9)$$

式(9)中: S_E 为弹性模量相似比; E_p 为原型工程弹性模量; E_m 模型弹性模量。

$$S_x = \frac{x_p}{x_m} = \frac{y_p}{y_m} \quad (10)$$

式(10)中: S_x 为体积力相似比; x_p 、 y_p 分别为原型工程水平、竖直方向体积力; x_m 、 y_m 分别为模型水平、竖直方向水平力。

$$S_\delta = \frac{\delta_p}{\delta_m} \quad (11)$$

式(11)中: S_δ 为位移相似比; δ_p 为原型工程位移; δ_m 为模型位移。

$$S_{\bar{x}} = \bar{X}_p \bar{X}_m \quad (12)$$

式(12)中: $S_{\bar{x}}$ 为边界力相似比; $\bar{X}_p$ 为原型工程边界力; $\bar{X}_m$ 为模型边界力。

将式(1)~式(12)代入 π 数相等方程可得

$$\begin{cases} S_{\sigma} = S_{\phi} S_{\bar{x}}, S_{\sigma} = S_E S_{\varepsilon} \\ S_{\bar{x}} = S_{\sigma}, S_{\mu} = 1, S_{\varepsilon} = 1, S_x = S_{\gamma} \end{cases} \quad (13)$$

式(12)中: S_{γ} 为容重相似比。

2.1.2 量纲分析与 π 定理应用

由量纲分析法可知,隧道各相关参数可表示为

$$f(\sigma, E, \varepsilon, \mu, \sigma, \bar{X}, X, \Phi) = 0 \quad (14)$$

式(14)中: σ 为应力; E 为弹性模量; ε 为应变; μ 为泊松比; $\bar{X}$ 为边界力; X 为体积力; Φ 为几何尺寸。

因为 $S_{\mu} = 1, S_{\varepsilon} = 1$,则式(14)可简化为

$$f(\sigma, E, \sigma, \bar{X}, X, \Phi) = 0 \quad (15)$$

根据 π 定理,可将式(15)改写为 π 函数方程,即

$$g(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \quad (16)$$

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{\sigma}{X\Phi} \\ \pi_2 = \frac{E}{X\Phi} \\ \pi_3 = \frac{\delta}{X\Phi} \\ \pi_4 = \frac{\bar{X}}{X\Phi} \end{cases} \quad (17)$$

最后,由相似第三定理,确定相似条件为

$$\frac{S_{\sigma}}{S_X S_{\Phi}} = 1; \frac{S_E}{S_X S_{\Phi}} = 1; \frac{S_{\sigma}}{S_{\Phi}} = 1; \frac{S_{\bar{X}}}{S_X S_{\Phi}} = 1 \quad (18)$$

2.1.3 弹性模量冲突的补偿设计

基于相似定理的关系式,建立几何相似比为1:120的缩尺模型。鉴于大比例缩尺条件下混凝土成型工艺的限制,选用弹性模量等效的有机玻璃材料模拟隧道。有机玻璃模量 $E_m = 3.1 \text{ GPa}$,远超理

论值 $E_m = \frac{E_p}{S_{\Phi}} = 49.2 \text{ MPa}$ 。通过数值模型刚度折减补偿:等效弹性模量 $E_{eq} = \eta E_m$ (其中 $\eta = 0.15$),补偿后等效弹性模量像相似比 $S_E^{eq} = \frac{E_p}{E_{eq}} \approx 127$,与目标值(120)偏差 $<6\%$,满足工程精度。

2.1.4 相似比参数确定

试验土体采自原型工程对应地层,以保证地质特性的相似性。在满足弹性模量、荷载强度及土体重度相似准则的条件下,保证模型表现出与原型几何相似的应力-应变响应特性。

依据相似准则与几何相似比,假定模型与原型材料重度基本等效、材料特性差异可忽略,最终确定试验模型的详细相似比参数,如表1所示。

表1 试验模型与原型相似比

Table 1 Model-prototype similarity ratio

参数	相似比
几何尺寸 Φ	1:120
体积力 X	1:120
容重 γ	1
边界力 $\bar{X}$	1:120
位移 δ	1:120
应力 σ	1:120
应变 ε	1
黏聚力 c	1:120
内摩擦角 φ	1
泊松比 μ	1
弹性模量 E	1:120

2.2 试验土体材料及参数

基于原型系统参数建立缩尺模型体系,按几何相似比1:120换算得,上下层土体分别为250 mm、350 mm,并均匀化处理分层处。采用工程原位土,通过环刀法、击实试验、直剪试验(图2),测定并获取土体的各项参数,并结合团队过往的地勘报告得到土体参数如表2所示。

隧道模型试验中,为实现预设形变,在计算沉降深度及隧道埋置深度时,采用土体沉降的基本理



图2 直剪试验

Fig. 2 Direct shear test

表2 土体参数

Table 2 Soil parameters

参数	黏土	砂土
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.89	2.2
干密度 $\rho_d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.5	2.1
承载力特征值 f_{ak}/kPa	130.0	240.0
含水率 $\omega/\%$	26.0	5.0
重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{cm}^{-3})$	18.9	19.0
压缩模量 E_s/MPa	5.9	19.0
变形模量 E_0/MPa	5.9	19.0
黏聚力 c/kPa	24.8	—
内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	10.3	34.0
粒径 r/mm	—	0.4
泊松比 μ	0.3	0.3

论,参考《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中关于地基变形计算深度的计算方法,如式(19)所示。

$$\Delta S_n \leq 0.025 \sum_{i=1}^n S_i \quad (19)$$

式(18)中: S_i 为第*i*层土的变形计算值; ΔS_n 为位于计算深度以上、具有一定厚度的土层的变形计算值。

基底宽度*B*与计算厚度 δ_Δ 的对应关系: $B \leq 2$ m时 $\delta_\Delta = 0.3$ m; $2 < B \leq 4$ m时 $\delta_\Delta = 0.6$ m; $4 < B \leq 8$ m时 $\delta_\Delta = 0.8$ m; $B > 8$ m时 $\delta_\Delta = 1$ m。基于150 mm隧道模型埋深设计,计算得出的沉降深度符合要求。

2.3 模型的设计与制备

2.3.1 隧道模型箱

基于试验对刚度的要求高以及较浅的埋深条件,选用文献[16]推荐的刚性模型箱。尺寸为2 000 mm(长)×500 mm(宽)×600 mm(高),采用厚度为12 mm的Q235钢板作为箱体材料。如图3所示。在纵向短边中线位置开设直径为54 mm的孔洞,圆心顶距上边界的距离为150 mm,板材双侧设焊接槽;为降低边界效应,箱内壁铺设柔性介质隔离刚性接触,隧道端部采用橡胶包裹缓冲,接缝处以发泡胶填充,以保证土体剪切变形的真实性。

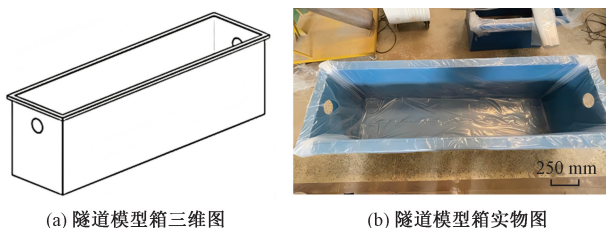


图3 隧道模型箱

Fig. 3 Tunnel model box

2.3.2 隧道模型

试验采用定制有机玻璃制备隧道模型,基于几何相似比确定模型直径50 mm(原型6 m)、壁厚3 mm(原型0.35 m)。模型总长2 100 mm(模型箱内长度2 000 mm)土体表面以下至隧道顶点即埋深150 mm(原型埋深16 m~25 m),如图4所示。



图4 隧道模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the tunnel model

2.4 试验方法及步骤

在模型箱内壁铺设塑料薄膜,排除气隙并平整固定于箱边缘,于预设隧道洞口位置精确切割薄膜开孔,并按150 mm分层夯填土体至隧道埋深设计标高处,精确定位隧道模型后继续填土至箱顶,安

装加载板,静止24 h使土体应力平衡。荷载传递采用Q235钢板构建加载板平台。如图5所示。



图5 加载示意图

Fig. 5 Loading diagram

并采用分级加载制度,设定7级荷载谱,总荷载1 520 kg(单块砝码质量20 kg),荷载谱函数 $N = 16 + 12 \times 4 + 6 \times 2$ 。在末三级荷载施加时,采用梯度递减方式,以捕捉临界荷载点。

2.5 试验数据采集设计

2.5.1 应变监测网络

沿隧道纵向布设18个应变片(两端各预留200 mm,间距200 mm),分别粘贴于截面顶部和底部,测点1~9位于顶部,10~18位于底部,测点布置如图6、图7所示。

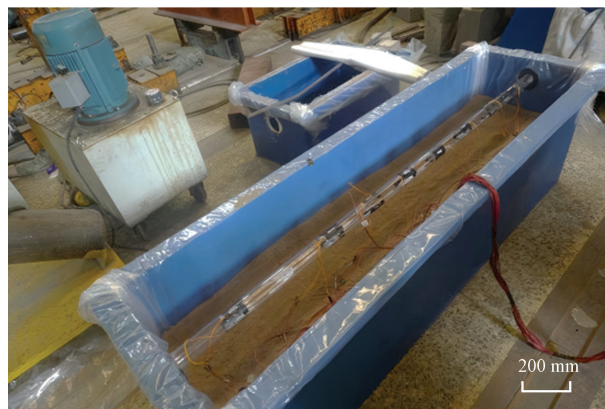


图6 隧道模型组装及应变片布置

Fig. 6 Layout of strain gauge of tunnel model

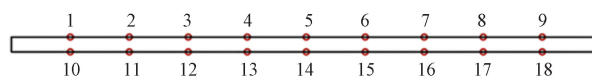


图7 应变监测点位

Fig. 7 Tunnel model assembly and strain gauge layout

2.5.2 数据采集系统及数据处理办法

本试验采用XL2101B3静态应变仪进行数据采集,将应变与荷载数据进行曲线绘制,并将各组试验中的荷载-应变进行非线性拟合,构建出试验模型的关系方程。

3 试验结果与分析

3.1 砂-黏土层隧道试验

首组试验模拟砂黏土地层条件。数据处理结果如图8、图9所示,分别为隧道上表面(测点1~9)及下表面(测点10~18)的应变分布。试验结果表明,隧道模型的纵向应变随上方荷载增加而显著增大。

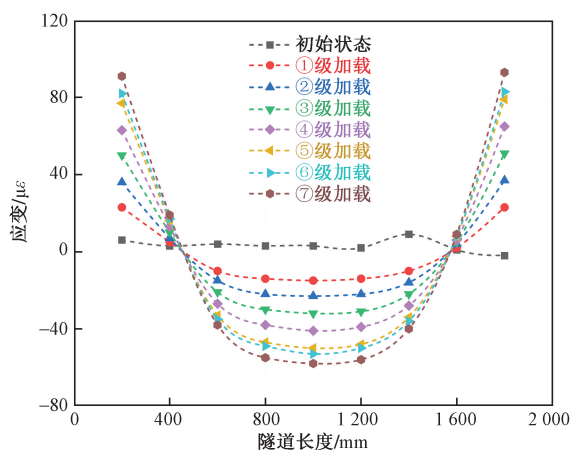


图8 砂-黏土隧道上表面应变

Fig. 8 Strain on the upper surface of sand-clay tunnels

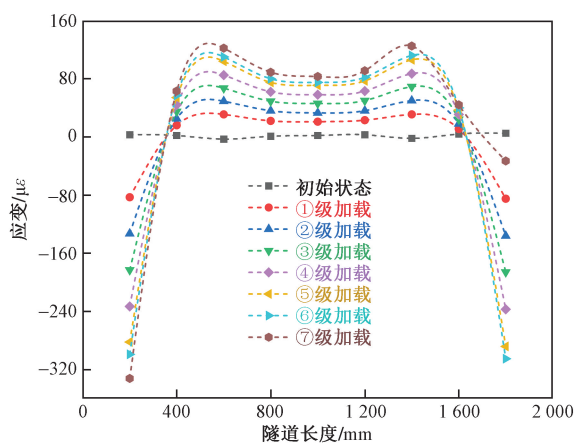


图9 砂-黏土隧道下表面应变

Fig. 9 Strain on the lower surface of the sand-clay tunnel

3.1.1 砂-黏土隧道上部表面应变

如图8所示,跨中测点5的应变增速及极值是最大的。应变的增长幅值和极值随着与跨中位置的距离逐渐增加而持续减小。端点测点1、9因为边界约束未参与对比。各测点的应变曲线均呈现开口向上抛物线。由于边界约束区与荷载作用下测点2、8应变为正值,表现出受拉倾向。

跨中测点5的荷载-应变分析表明,2~5级荷载作用下应变幅值分别为1级的59.94%、59.89%、59.85%、59.63%,6级骤降至19.92%,

7级回升至39.84%。

对比分析各级加载表明,在1、2级荷载阶段,测点3、7的应变增幅分别为测点5的65.88%、67.23%,测点4、6为93.72%、95.64%。对称测点组(测点3与测点7、测点4与测点6)的响应偏差率小于5%,验证了对称荷载作用下结构响应的空间一致性特征。测点2、8与测点5呈现反向应变特征,其数据未参与对比。3~5级荷载阶段,测点3、7的增长幅值为测点5的62.18%、62.46%,测点4、6为测点5的90.32%、91.14%。6、7级荷载阶段,测点3、7的增长幅值为测点5的64.18%、64.46%,测点4、6为测点5的92.32%、93.14%。

3.1.2 砂-黏土隧道下部表面应变

由图9可知,邻近加载区域的监测点12、16具有最显著的形变累计速率及峰值。应变增幅随着距加载点的增大呈梯度递减,并在接近跨中位置出现应变拐点,模型上部跨中区域有拱起现象。受边界约束影响,测点10、18的数据未纳入分析范围。测点11~17在不同荷载作用下的应变变化与结构上部受压区幅值类似,前期平稳,后期逐渐减小。应变曲线分析表明,测点数据呈现双波峰(加载点处)与单波谷(跨中起拱区域)的分布特征。

以1级加载幅值为基准,测点12的应变在2~5级加载中增幅稳定(约66.4%),但第6级时骤降至22.10%,随后在第7级回升至44.19%。总体而言,该测点的应变增幅显著高于上表面压应变。

基于结构对称性,选取测点11~14进行分析。以测点12的应变为基准,各测点的相对应变增幅如下:在1、2级荷载下,测点11、13、14的增幅分别为59.56%、79.71%和76.94%;在3~5级荷载下,增幅变为51.65%、72.77%和68.13%;在6、7级荷载下,增幅则分别为51.56%、71.72%和66.22%。

3.2 黏-砂土层隧道试验

第二组试验模拟黏土-砂土复合地层(上层黏土250 mm、下层砂土350 mm)。试验数据如图10、图11所示。其中,隧道上表面测点1~9的应变分布如图10所示,隧道下表面测点10~18的应变分布如图11所示。

3.2.1 黏-砂土隧道上部表面应变

跨中测点5在2~5级加载阶段,其形变参数增量呈渐进式衰减趋势,相对于1级加载的响应值依次为59.92%、59.86%、59.81%、59.75%,其衰减规律与砂土地层增幅具有高度相似性。进入6、7级加载阶段,增幅骤降至29.85%、29.84%,增幅较小,但黏性土体中的峰值应变仍较砂土中大。

进一步对比分析各级荷载下不同测点的应变

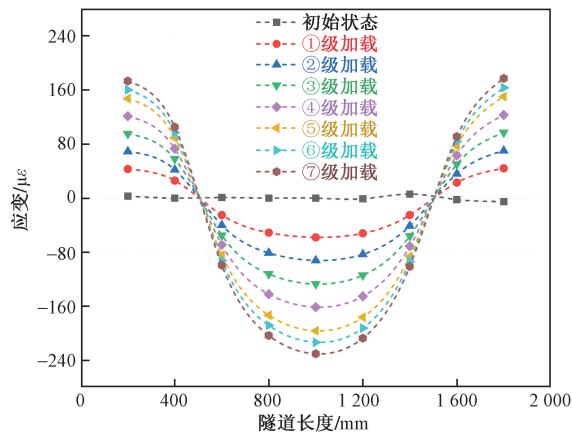


图 10 黏-砂土隧道上表面应变

Fig. 10 Strain on the surface of the silt-sandy soil tunnel

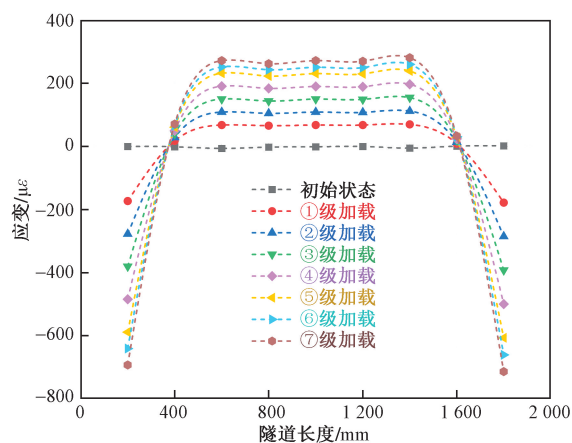


图 11 黏-砂土隧道下表面应变

Fig. 11 Strain on the lower surface of the cohesive-sand tunnel

响应可见,在1、2级荷载阶段,测点3、7的应变增幅分别为参考点(测点5)的44.16%、50.45%,而测点4、6达到88.13%、88.84%。由于测点2和8与测点5的应变变化趋势不同,故未进行对比,但其应变增幅远高于砂土中的对应测点。在3~5级荷载阶段,测点3、7的增幅为参考点(测点5)的42.88%、43.75%,测点4、6为88.09%、89.88%。进入6、7级荷载阶段,测点3、7的增幅为参考点(测点5)的42.77%、43.64%,测点4、6为88.07%、89.87%。整体表现出随荷载阶段变化的稳定响应特征。

3.2.2 黏-砂土隧道下部表面应变

由图11可知,邻近加载区域的测点12与16表现出最显著的变形累积速率及峰值应变。以1级加载为基准,测点12在2~5级加载中的应变增幅稳定在55.0%,至第6级骤降至约27.4%,并于第7级保持在该水平(27.32%),整体变化幅度明显大于上表面压应变。

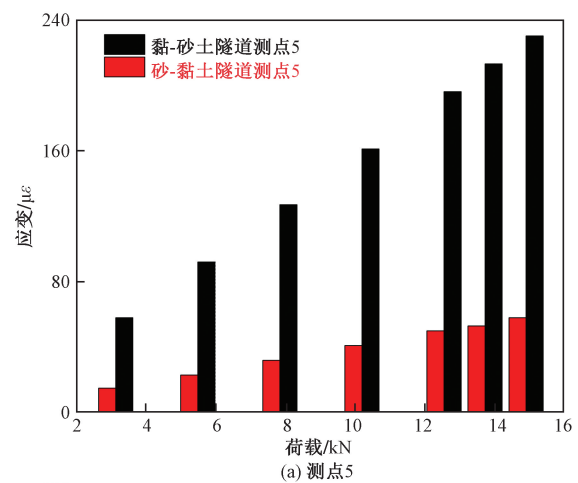
基于结构对称性原则,进一步对比分析测点11~14的相对应变响应。各荷载阶段下,测点11

的应变增幅始终约为测点12的26%,而测点13和测点14的增幅分别保持在93%~96%和95%~99%,表明测点13、14的应变响应与测点12较为接近,且在整个加载过程中这一相对关系基本稳定。

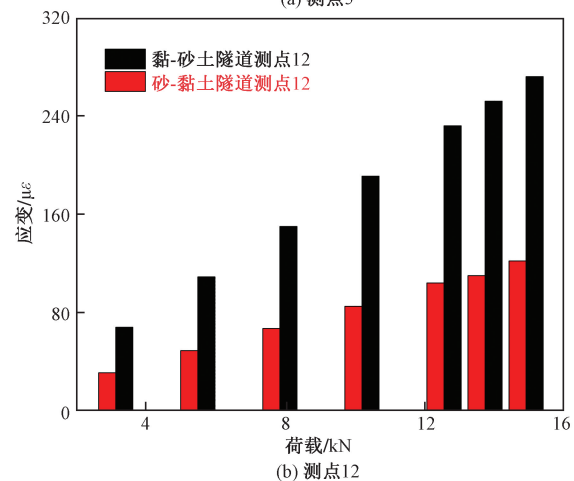
3.3 试验数据分析

3.3.1 峰值代表点

为对比隧道在不同土体中的峰值应变,选取测点5和12的正应变值进行分析(图12)。结果显示,砂土中测点5、12的应变值仅为黏土中相同测点的25.36%、44.35%。因此从整体变形趋势来看,隧道在黏土中的跨中起拱程度更大,在相同荷载条件下,隧道在黏土中的形变程度大于砂土,表明不同土体对结构变形的影响存在明显差异。



(a) 测点5



(b) 测点12

图 12 测点5、12应变对比

Fig. 12 Strain comparison at monitoring point 5, 12

3.3.2 关系方程的建立

选择测点5、12作为峰值应变的代表点,统一取其正应变值构建演化曲线(图13),基于砂-黏土与黏-砂土中的应变数据,利用非线性拟合方法所得的拟合曲线如图14所示。

根据所得数据,建立应变与荷载关系方程

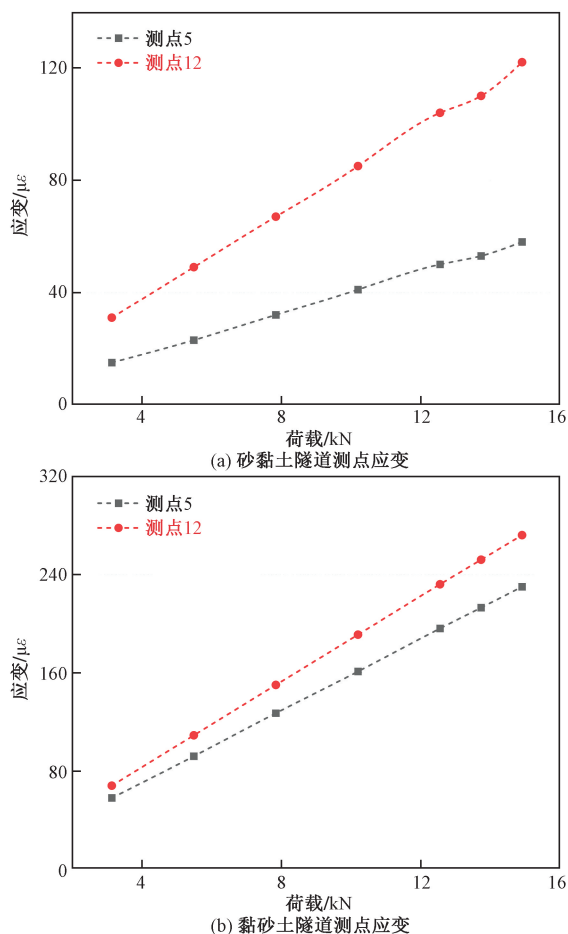


图 13 峰值测点应变-荷载

Fig. 13 Strain-load response at the peak monitoring point

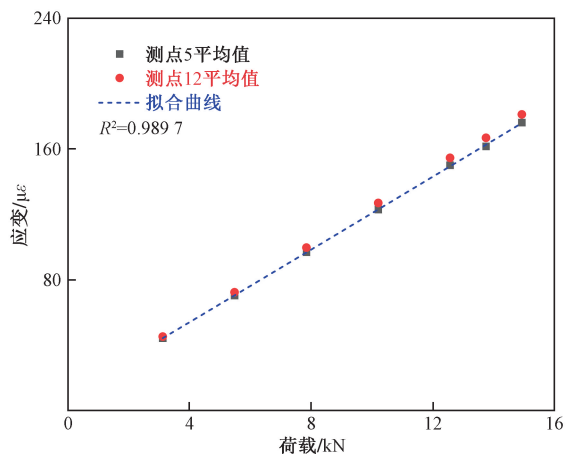


图 14 隧道应变-荷载拟合曲线

Fig. 14 Fitted curve of strain as a function of load

[式(20)],为数值模拟提供数学基础。

$$y = y_0 + \frac{A}{W\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(x-x_c)^2}{w^2}} \quad (20)$$

式(20)中: x 为自变量(应力); y 为因变量(应变); y_0 为初始应变值; W 为斜率修正系数; x_c 为应变值修正系数; A 为修正系数。

4 数值分析

4.1 土体本构模型

在数值模拟中,合理选择土体的本构模型是准确再现其力学行为的关键。所研究的土体材料为砂土和黏土,均为典型的颗粒状材料,其力学行为具有显著的压力敏感性和摩擦特性,因此选用Mohr-Columnb 弹塑性模型^[17],因其具有概念清晰、参数物理意义明确,并且能有效表征土体的摩擦与黏聚强度,被广泛应用于岩土工程的数值模拟分析中。

4.2 岩土材料的有限变形

重点探讨岩土介质与地下结构的相互作用机制。当变形量超出小应变范围时,传统小变形理论的基本假设不再适用,需重新建立多参考系下的运动学描述方法,因此采用文献[18]的方法,由于该模型未对塑性关联性施加限制,因此同样适用于非关联塑性模型。

4.3 数值模拟的简化

构建砂-黏土复合地层数值模型,重点关注浅埋隧道与地表建筑群的相互作用机制^[19]。为此,采用以下简化措施:黏土和砂土选择实际工程中粒径和性能较为均匀的土体;建立筏基建筑-隧道体系,采用均布荷载模拟建筑自重;限定浅埋工况,排除地下水 and 地下结构的影响。

4.4 数值模型几何尺寸及边界条件

数值模型精准还原试验体系:几何尺度 1:1 (2 000 mm × 500 mm × 600 mm,隧道埋深 150 mm);隧道结构尺寸为 $\Phi 50$ mm × 2 000 mm (壁厚 $t=3$ mm)。

模型边界条件如下: X 轴方向设置双向平移约束; Y 轴方向限制单向平移约束,允许发生竖向沉降; Z 轴方向同样施加双向平移约束;模型底面采用三向约束固定处理^[20]。

4.5 土体模型参数

使用 ABAQUS 对隧道系统中的土体进行模拟时,为使模拟结果与试验数据高度一致,将误差控制在合理区间,研究中直接沿用了室内试验所确定的围岩土体材料参数,确保了模拟条件与实际试验的一致性,建立的隧道土体模型如图 15 所示,土体的高度与试验一致,并进行绑定处理。

4.6 隧道数值模型的建立

隧道建模过程中,采用试验材料参数如下:密度 $\rho=1\,200\text{ kg/m}^3$ 、弹性模量 $E=3.1\text{ GPa}$ 、极限抗拉强度 $f_t=67\text{ MPa}$ 、刚度折减系数 $\eta=0.15$ 、极限抗压强度 $f_c=115\text{ MPa}$ 、泊松比 $\mu=0.32$ 。基于这些参数,构建非线性黏弹性本构模型^[21]并赋予计算截

面。隧道模型尺寸为:直径 50 mm、长度 2 000 mm,如图 16 所示。为了使模拟更加贴切于现实,实际工程中管片接缝导致的刚度退化,通过 15% 折减系数予以体现。

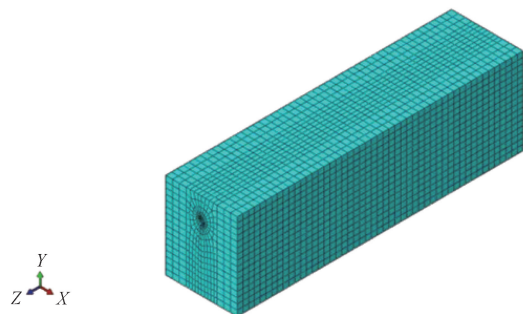


图 15 隧道周围土体模型
Fig. 15 Soil model around tunnel

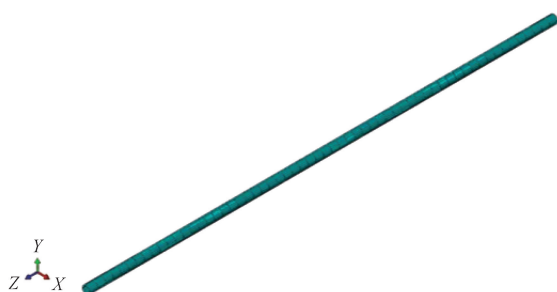


图 16 隧道模型
Fig. 16 Tunnel model

4.7 模型荷载

在有限元模拟中,为模拟建筑群竖向荷载作用,对称布置两处均布荷载区域,尺寸为 280 mm × 220 mm,中心间距与室内试验一致。采用分级加载制度^[22],荷载值按照试验荷载等级逐步增加,以模拟建筑物自重的传递路径,如图 17 所示。

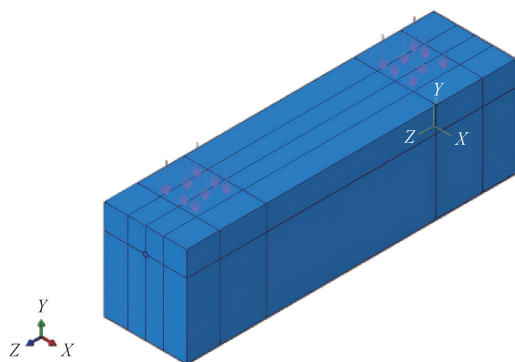
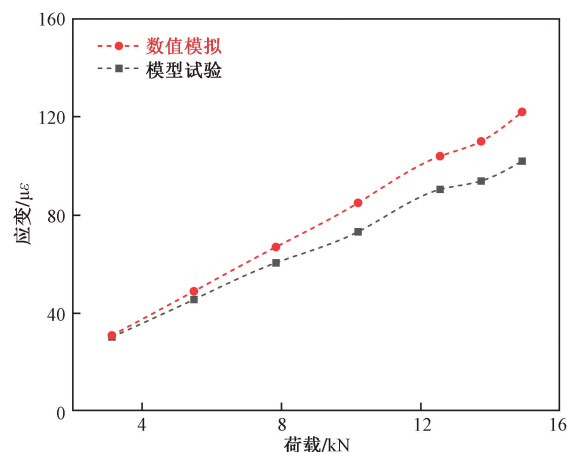


图 17 加载区域示意图
Fig. 17 Schematic of the loading area

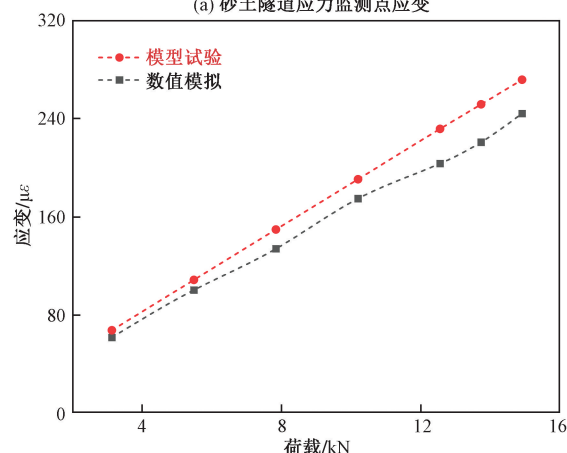
4.8 数值模拟与模型试验的结果对比验证

在施加荷载后,提取监测点数据,并将其与模型试验中的加载处应变数据(测点 12)进行对比分

析,以验证数值模型的准确性、关系方程的适用性以及本章构建数值模型的可行性(图 18)。数值模拟与模型试验的峰值应变演化规律高度一致,但数值模拟结果整体略低于试验数据,该偏差主要源于:实验室条件下土体填埋与夯实工艺导致密实度低于数值模型中的理想化连续介质;缩尺模型尺寸效应强化了边界条件差异对试验结果的影响^[23]。



(a) 砂土隧道应力监测点应变



(b) 黏土隧道应力监测点应变

图 18 应力监测点应变对比图

Fig. 18 Strain Comparison at stress monitoring points

数值模拟与模型试验的结果进行对比分析,验证了研究方法的可靠性与前文关系曲线的适用性,这为将相关结论应用于实际工程提供了重要依据,增强了研究的实践价值。

5 参数化分析

5.1 直径对既有隧道的影响

为了研究不同隧道直径受土体应力分布的影响,采用原工程的实际尺寸,构建直径分别为 4、6、8 m 的隧道模型,在砂土和黏土环境下进行模拟分析,结果如下。

5.1.1 砂土层隧道

隧道应力云图如图 19 所示,模拟结果表明,隧

道应力分布呈双峰倒“U”形,建筑荷载作用区域形成明显应力峰,对应荷载位置,跨中区域表现出起拱趋势。应力曲线(图 20)分析结果显示,隧道下截面主要受拉,在集中荷载作用点,应力值为正,而跨中区域表现为压应力状态。以 4 m 直径隧道为基准,6、8 m 隧道应力峰值分别为基准值的 111% 和 116%。起拱峰值在 120 m 处,6、8 m 隧道起拱峰值分别为 4 m 隧道的 121%、157%。

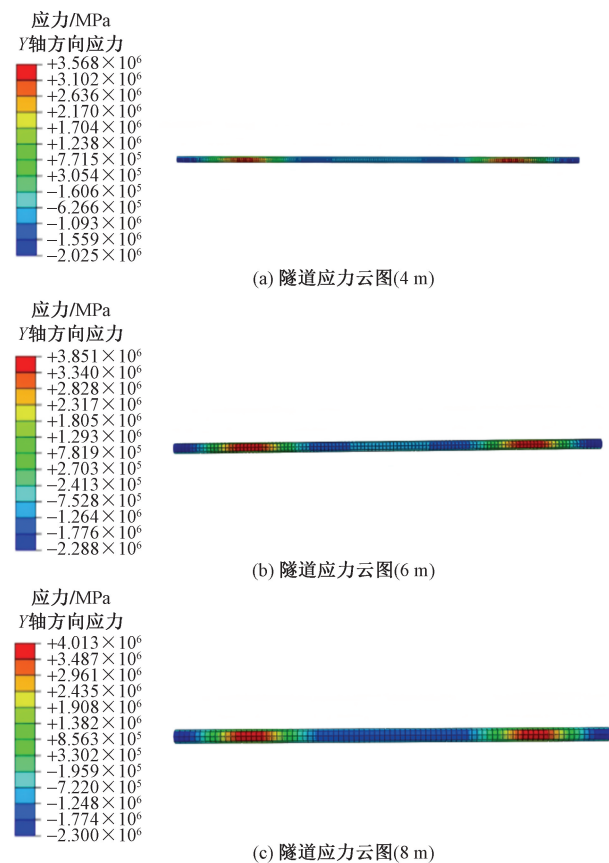


图 19 直径变化下隧道应力云图

Fig. 19 Tunnel stress distribution as a function of diameter

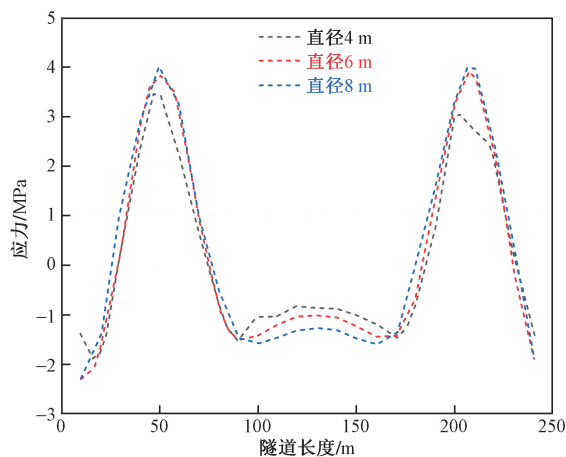


图 20 直径变化下砂土隧道应力曲线

Fig. 20 Stress curve of sand tunnel under diameter change

5.1.2 黏土层隧道

隧道应力云图如图 21 所示,曲线(图 22)分析表明,黏土层和砂土层中隧道结构的荷载-变形曲线形态一致,但黏土中隧道下截面应力因土体弹性模量较高而更为显著。数值模拟进一步揭示了隧道直径的影响:6 m 与 8 m 隧道应力峰值达到 4 m 隧道的 106% 与 114%。而在距隧道入口约 120 m 的起拱峰值处,该比例进一步升至 115% 与 133%。对比相同直径下的土体效应发现,黏土中的应力值显著高于砂土,且其优势随隧道跨度增大而减小,4、6、8 m 隧道在黏土中的应力值分别为砂土的 167%、153% 和 143%。

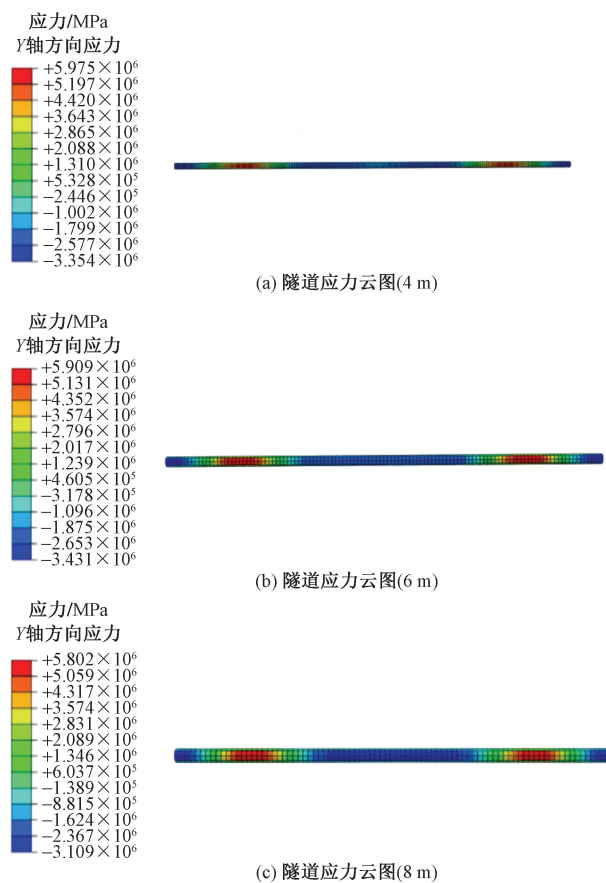


图 21 直径变化下隧道应力云图

Fig. 21 Tunnel stress distribution as a function of diameter

5.2 埋深对既有隧道的影响

为研究不同体量荷载对不同埋深隧道的影响规律,建立直径为 4 m 的隧道模型,并将其埋深分别设定为 16、22、28 m(从隧道轴心至地表垂直距离),并采用单一化土体即砂土和黏土,以对比分析不同埋深条件下隧道模型的应力情况。

5.2.1 不同埋深条件下砂土层隧道

隧道应力云图如图 23 所示,数值模拟结果显示,隧道结构应力曲线如图 24 所示,依旧呈现双峰

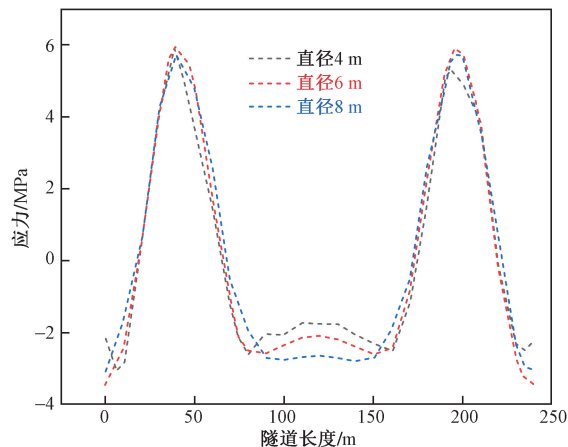


图 22 直径变化下黏土隧道应力曲线

Fig. 22 Stress curves of clay tunnel under diameter variation

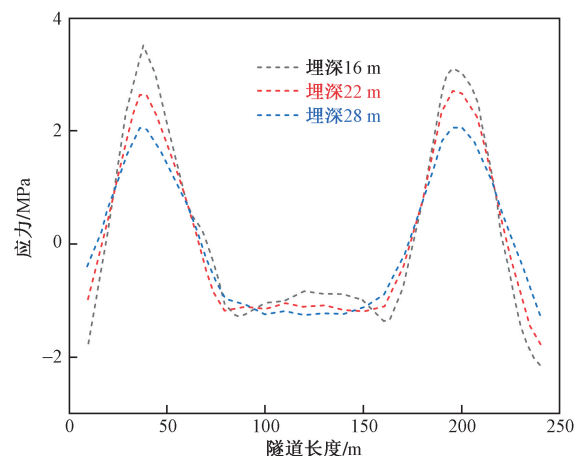


图 24 埋深变化下砂土隧道应力曲线

Fig. 24 Stress curve of sand tunnel under the change of buried depth

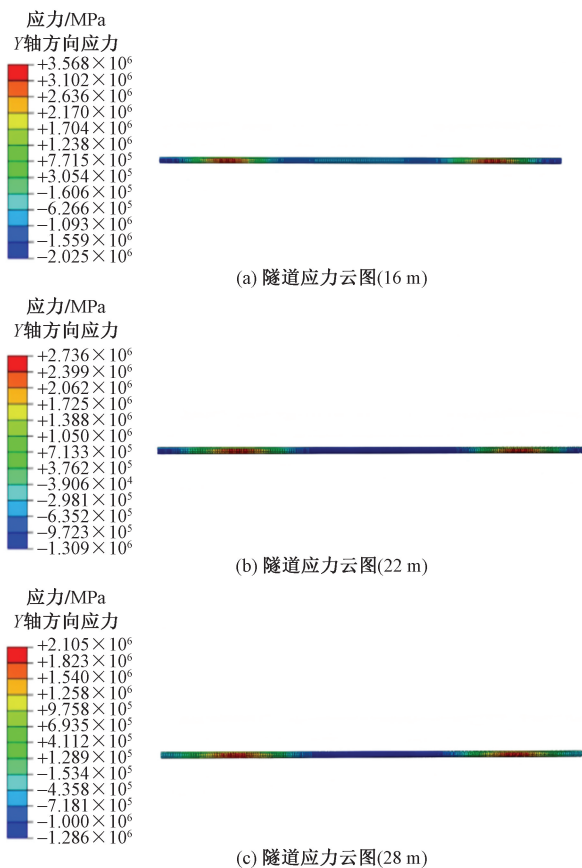


图 23 埋深变化下砂土隧道应力云图

Fig. 23 Stress contour of sand tunnel under the change of buried depth

倒“U”形。对比不同参数的影响发现,调整埋置深度对底截面应力的作用明显超过直径变化。当埋深 16 m 时,隧道的受拉应力和起拱程度最大。尽管覆土自重随埋深增大而增加,但土压力分布来看,隧道越接近荷载作用区,所受土体压力越高,从而使得隧道变形加剧,自身应力相应增加。进一步对比不同埋深情况下的应力分布可见,埋深分别为

22 m 和 28 m 时,隧道的应力极值及跨中起拱处应力值相较 16 m 埋深时分别下降至 77% 和 60%,而起拱应力值则增至 131% 和 148%。

5.2.2 不同埋深条件下黏土层隧道

隧道应力云图如图 25 所示,黏土因其特殊的物理力学性质,导致不同埋深隧道在该介质中的应力

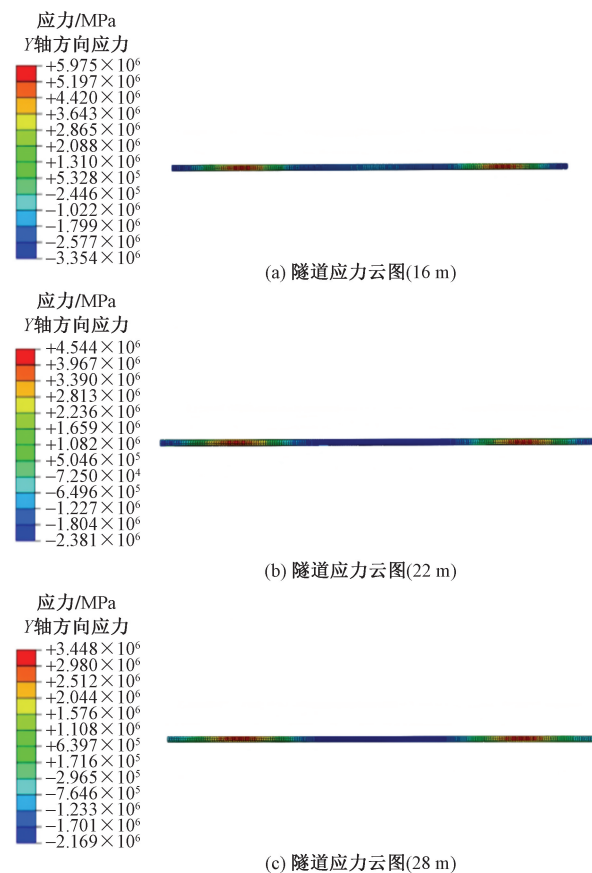


图 25 埋深变化下黏土隧道应力云图

Fig. 25 Stress contour of clay tunnel under the change of buried depth

分布变化显著强于砂土地层,如图 26 所示。数值分析表明:埋深为 22 m 和 28 m 时,其应力极值分别为 16 m 埋深隧道的 79% 和 73%,在跨中起拱处的应力值则增至 121% 和 128%。这一结果充分说明,在黏土介质中,隧道的应力极值相对较高,但在跨中起拱的高度变化幅度较小。

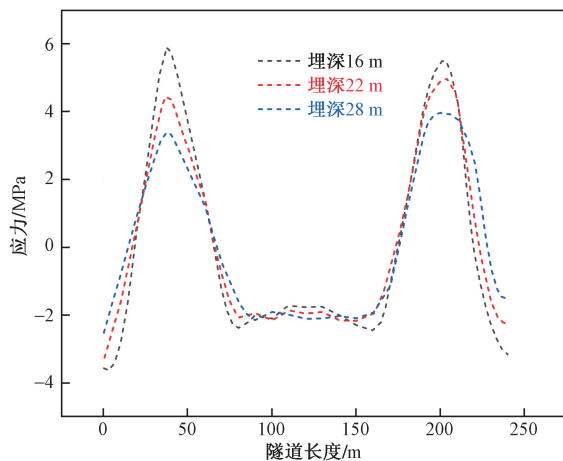


图 26 埋深变化黏土隧道应力曲线

Fig. 26 Stress curves of clay tunnel under the change of buried depth

6 结论

基于室内模型试验与数值模拟研究,通过系统分析砂-黏复合地层隧道在堆载下的应变响应规律,得到以下结论。

(1)地表堆载作用下,隧道结构应变响应呈现显著空间分异特征:荷载作用区应变集中效应显著,应变随距离加载点距离增加而衰减;跨中区域因土体应力重分布产生应变拐点及起拱效应。黏性土体中的起拱程度与整体变形量均显著高于砂性土体,证实土体性质对隧道变形机制具有决定性调控作用。

(2)隧道几何参数对变形机制具有显著调控作用:结果表明,隧道直径与埋深对变形机制的调控作用显著且模式各异,适当增大直径可增强结构抗变形能力;增加埋深则能充分利用土拱效应,有效降低荷载敏感区应力峰值。在黏性地层中几何参数的调控效应尤为显著。

(3)通过模型试验与数值模拟协同验证,表明缩尺试验相似比与有限元参数设置合理。结果高度一致,所建荷载-应变方程可有效预测危险点应变演变,为复合地层隧道安全预警提供依据。

(4)揭示了砂黏互层复合地层中各向异性是导致荷载传递路径复杂化和隧道非对称变形的内在原因,阐明了土体各向异性对隧道变形行为的影响。

(5)对实际工程提出针对性建议:在黏土层或软硬交互地层中进行隧道上方作业时,可根据荷载-应变方程进行严格的堆载控制;对于隧道邻近区域新建工程项目,可参照所建立的荷载-应变关系曲线及参数分析结果,进行安全评估,以保证隧道安全;确定的隧道应变敏感区域(加载点、跨中)及演化规律,可为指导监测系统的测点优化布置。

参 考 文 献

- [1] 张芳,王露露,朱云桂,等. 地面堆载作用下盾构隧道结构变形分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3474-3481.
Zhang Fang, Wang Lulu, Zhu Yungui, et al. Structural deformation analysis of shield tunnels under surface surcharge loading[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(8): 3474-3481.
- [2] 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 Fayun, Yuan Qiang, Li Jiaping, et al. Influence of soil-layer stratification on the longitudinal deformation of metro tunnels induced by surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 63-71.
- [3] 王露露,丁爽,黄磊,等. 地面堆载作用下既有隧道的工作状态[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5764-5769.
Wang Lulu, Ding Shuang, Huang Lei, et al. Working state of existing tunnels under ground surface surcharge[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(13): 5764-5769.
- [4] 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 Fayun, Fang Yanqi, Yuan Qiang, et al. Experimental study on the transverse deformation of tunnels under localized surcharge in soft and stiff strata[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(3): 322-331, 430.
- [5] 宋博文,秦会来,王蓉,等. 南京地区基于地铁隧道保护要求的基坑变形控制指标[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 548-556.
Song Bowen, Qin Huilai, Wang Rong, et al. Deformation control indices for excavations based on metro-tunnel protection requirements in Nanjing area[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2025, 53(4): 548-556.
- [6] 张金秋叶. 地面堆载对既有地铁隧道结构变形影响研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(S1): 6-9, 14.
Zhang Jinquye. Influence of surface surcharge on the structural deformation of existing metro tunnels[J]. Urban Mass Transit Research, 2025, 28(S1): 6-9, 14.
- [7] 梁荣柱,曹世安,向黎明,等. 地表堆载作用下盾构隧道纵向受力机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 736-747.
Liang Rongzhu, Cao Shian, Xiang Liming, et al. Experimental investigation on longitudinal mechanical mechanism of shield tunnels subjected to ground surface surcharge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 736-747.
- [8] 田栋梁,徐兴,王伊丽,等. 邻近堆载引起既有隧道变形响应分析[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(5): 49-54.

- Tian Dongliang, Xu Xing, Wang Yili, et al. Deformation response analysis of existing tunnels induced by adjacent surcharge loading [J]. Urban Mass Transit Research, 2025, 28(5): 49-54.
- [9] 张涛, 欧伟山, 齐晓强. 邻近堆载诱发既有隧道受力变形研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 802-809.
- Zhang Tao, Ou Weishan, Qi Xiaoqiang, et al. Study on mechanical behavior and deformation of existing tunnels induced by adjacent surcharge[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2): 802-809.
- [10] 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 Dawei, Zhou Shunhua, Lai Guoquan, et al. Degradation mechanism and characteristics of shield tunnels under ground surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1173-1181.
- [11] 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 Minggao, Zhou Shunhua, Huang Dawei, et al. Analysis of the influence of ground surface surcharge on metro shield tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2271-2278.
- [12] Zhang Z, Huang M, Zhang M. Deformation analysis of tunnel excavation below existing pipelines in multi-layered soils based on displacement controlled coupling numerical method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012, 36(11): 1440-1460.
- [13] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 层状地基中隧道开挖对临近既有隧道的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 600-608.
- Zhang Zhiguo, Huang Maosong, Wang Weidong. Influence of tunneling in layered soils on adjacent existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 600-608.
- [14] 黄信, 黄兆伟, 胡雪瀛. 地铁上盖建筑施工对既有地铁隧道变位的影响[C]//第五届全国建筑结构技术交流会论文集. 天津: 天津市建筑设计院, 2015: 821-825.
- Huang Xin, Huang Zhaowei, Hu Xueying. Influence of over-track building construction on deformation of existing metro tunnels [C]//Proceedings of the 5th National Technical Exchange Conference on Architectural Structures. Tianjin: Tianjin Architectural Design Institute, 2015: 821-825.
- [15] 卢钦武, 陈智威, 关振长, 等. 基于静力推覆试验的4车道公路隧道围岩压力计算模型研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3315-3323.
- Lu Qinwu, Chen Zhiwei, Guan Zhenchang, et al. A calculation model for surrounding rock pressure of four-lane highway tunnels based on static pushover tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(11): 3315-3323.
- [16] 张立明, 裴付军, 邓旭. 基坑施工影响下的隧道变形分析及评价[J]. 施工技术, 2017, 46(S2): 1094-1099.
- Zhang Liming, Pei Fujun, Deng Xu. Analysis and evaluation of tunnel deformation induced by foundation-pit construction [J]. Construction Technology, 2017, 46(S2): 1094-1099.
- [17] 陈书宇. 岩土工程中的有限单元法研究[C]//第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(下册). 北京: 中国土木工程学会, 2003: 766-769.
- Chen Shuyu. Research on the finite element method in geotechnical engineering[C]//Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Volume II). Beijing: China Civil Engineering Society, 2003: 766-769.
- [18] 朱登峰, 赵寿刚, 黄宏伟. 土的有限变形理论研究现状及进展[J]. 建筑科学, 2009, 25(7): 106-110.
- Zhu Dengfeng, Zhao Shougang, Huang Hongwei. Research status and advances in finite deformation theory of soils [J]. Building Science, 2009, 25(7): 106-110.
- [19] Mohamad K, Ou C Y. Evaluation of deformation parameter for deep excavation in sand through case histories[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 47(1): 57-67.
- [20] 秦素贞. 既有建筑复合地基对基坑土压力的影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- Qin Suzhen. Influence of existing composite foundations on earth pressure in foundation pits[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [21] 叶帅华, 李德鹏. 复杂环境下深大基坑开挖监测与数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(S2): 117-126.
- Ye Shuaihua, Li Depeng. Monitoring and numerical simulation of deep and large foundation-pit excavation under complex environments[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S2): 117-126.
- [22] 张晓荣, 陈志敏, 朱烜, 等. 临近城市高层建筑的隧道基坑围护结构变形控制[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 326-331.
- Zhang Xiaorong, Chen Zhimin, Zhu Xuan, et al. Deformation control of retaining structures for tunnel foundation pits adjacent to urban high-rise buildings[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(32): 326-331.
- [23] 周泽栖, 刘春, 唐超. 基坑工程对既有隧道结构稳定性影响研究现状分析[J]. 四川建筑, 2021, 41(4): 158-159, 162.
- Zhou Zeqi, Liu Chun, Tang Chao. Review of the influence of foundation-pit engineering on the structural stability of existing tunnels[J]. Sichuan Architecture, 2021, 41(4): 158-159, 162.