

DOI: 10.11779/CJGE20211420

软土深部地层盾构开挖扰动时效演化离心机试验研究

刘树佳^{1,2}, 廖少明^{2,3}, 马险峰^{2,3}

(1. 上海建设管理职业技术学院, 上海 201702; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 软土深部地层进行盾构隧道开挖, 所引起的土拱时效与隧道埋深及软土蠕变特性有着直接的联系。本文通过离心机试验, 模拟软土深埋盾构隧道在开挖以及后期长时间蠕变阶段的全过程, 获得了开挖面的土压力值时效变化规律。本试验设置多组独立的模型试验, 模拟 4D 埋深与 6D 埋深两种覆土厚度的工况。根据离心机性能指标以及模型尺寸限制条件, 重力加速度选为 50g、70g、90g, 以对应实际工况中的中埋、深埋、超深埋三种情况, 每组试验中均采取主动卸荷、被动加荷两种开挖模式, 通过不同埋深、不同开挖方式对土拱效应影响的对比, 共进行 12 组对比试验, 分析盾构开挖的掌子面压力变化、土拱产生以及衰减规律。由试验得到, 在软土深部地层 ($\geq 4D$) 开挖, 采取卸荷开挖模式, 则盾构机以及管片在开挖 2 年后所承受的长期土压力比静止土压力减小约 20%; 采取加荷土压力开挖模式, 在后期长期蠕变过程中, 管片所承受的被动土压力逐步减小, 盾构管片长期承受的土压力维持值比静止土压力增加约 20%, 为软土深部地层盾构开挖提供了重要的时效性参考数据。

关键词: 软土深部地层; 盾构开挖; 扰动时效; 离心机试验

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)01-

作者简介: 刘树佳(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事城市地下空间和交通岩土工程方面的研究工作。E-mail: liusj86@163.com。

Experimental study on the time-dependent evolution of shield tunneling disturbance in soft soil deep strata using centrifuge

LIU Shujia^{1,2}, LIAO Shaoming^{2,3}, MA Xianfeng^{2,3}

(1. Shanghai Construction Management Vocational and Technical College, Shanghai 201702; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground

Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Underground Architecture and Engineering,

Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The soil arching caused by shield tunnel excavation in deep soft soil layers is directly related to the tunnel depth and creep characteristics of soft soil. This article simulates the entire process of excavation and long-term creep of a deep buried shield tunnel in soft soil through centrifuge experiments, and obtains the temporal variation law of soil pressure values on the excavation surface. This experiment sets up multiple independent model tests to simulate two types of soil cover thickness conditions: 4D burial depth and 6D burial depth. Based on the performance indicators of the centrifuge and the size limitations of the model, the gravity acceleration was selected as 50g, 70g, and 90g to correspond to the three situations of medium burial, deep burial, and ultra deep burial in actual working conditions. In each experiment, two excavation modes, active unloading and passive loading, were adopted. By comparing the effects of different burial depths and excavation methods on soil arch effect, a total of 12 comparative experiments were conducted to analyze the changes in face pressure, soil arch generation, and attenuation laws of shield tunneling. According to the experiment, when excavating in deep soft soil layers ($\geq 4D$) using unloading excavation mode, the long-term soil pressure borne by the shield machine and pipe segments after 2 years of excavation is reduced by about 20% compared to the static soil pressure; Adopting the excavation mode of adding soil pressure, during the long-term creep process in the later stage, the passive soil pressure borne by the tunnel segments gradually decreases, and the long-term soil pressure maintained by the shield tunnel segments increases by about 20% compared to the static soil pressure, which provides important time sensitive reference data for shield tunneling excavation in deep soft soil formations.

基金项目: 上海市教育发展基金晨光计划 (24CGB26)

收稿日期: 2024-9-30

*通信作者: 刘树佳 (E-mail: liusj86@163.com)

Key words: soft soil deep strata; shield tunneling excavation; disturbance timeliness; centrifuge testing

0 引言

盾构法在特大型城市的地铁和综合管廊中广泛应用,以往盾构施工多集中在浅部地层,然而随着特大型城市发展与土地资源短缺的之间矛盾日益突出,地下空间开发逐渐向深部地层拓展^[1-3]。而在软土地区进行盾构开挖时,由浅部地层到深部地层的地质条件特性差异大,地质水文环境发生了从软土到硬土、从潜水到承压水的巨大改变。在软土深部地层开挖卸载和加载作用下,深部地层所产生的土拱效应指标及时效演变规律,会直接影响盾构施工效果和后期管片变形指标。

在软土深部地层进行盾构隧道开挖,所引起的土拱时效与隧道埋深及软土蠕变特性有着直接的联系,揭示开挖所产生长期蠕变过程中的土体运动和压力变化规律,认清软土深部地层盾构隧道施工开挖所产生的扰动时空效应,对盾构隧道全生命周期的安全具有重要意义。而在以往的工程和试验研究中,缺乏相关的长效监测试验数据,这使得盾构在软土地区深部地层中设计和施工时,所采用的参数指标难以精准确定,会导致施工扰动不可控、管片变形等严重后果。

针对上海地区软土深埋地层开挖扰动主要研究手段包括:模型试验^[4]、数值模拟^[7]、理论分析^[8]。Ibrahim 等^[1]研究砂土地层盾构开挖面失稳离心模型试验,得到开挖面极限支护力的影响因素和土体扰动破坏的阶段。Idinger 等^[4]通过离心模型试验研究提出砂土地层土拱效应产生的临界深度埋深比 $C/D=1.0$ 。Soranzo 等^[5]通过离心模型试验开展不同地层条件下浅埋隧道的开挖面稳定性。黎春林^[6]通过盾构隧道施工松动土压力计算方法研究现场砂土地层中盾构隧道开挖影响规律。崔蓬勃等^[8]在非饱和砂土盾构隧道极限支护力计算方法中考虑了土拱发挥在开挖过程中的作用。吴昌胜等^[9]通过理论推导,研究软土地层大直径泥水盾构掘进引起的地面变形分析。针对盾构开挖面失稳破坏过程,Atkinson 等^[10]通过离心模型试验模拟砂土地层条件下无衬砌隧道的失稳坍塌,分析隧道稳定的支护压力的上限解。汤旅军等^[12]针对密实砂土地层离心机试验提出土拱效应与支护力的变化与密切相关,极限支护力在土拱发展至拱顶荷载时达到最小。付亚雄等^[13]、马险峰等^[14]在同济大学 TLJ-150 复合型土工离心机开展了大量关于软黏土地层开挖面失稳破坏的离心模型试验,分析了软黏土地层开挖面主加荷试验、被动渐进破坏、开挖面卸荷等方式所引起地层的变化规律。

综上,在以往软土条件下盾构隧道开挖所产生的扰动效应研究中,有针对软土盾构进行现场监控量测、

模型试验和计算推导的方法来确定时空效应。关于模拟盾构隧道施工开挖扰动的影 响,以往学者利用土工离心模型试验,取得了较好的试验结果。要针对性开展深部地层高应力条件下开挖扰动时空效应以及软土地应力长期蠕变效应,需要通过离心模型试验,才能充分还原长效变化的真实效果,以验证盾构开挖所引起的土拱时效规律。但是由于试验所模拟的地层条件及开挖方式不同,关于软土深部地层的土拱时效试验研究,难于得出统一结论,因此有必要针对性地进一步深入研究。

本文通过离心机试验,模拟了软土深埋盾构隧道在开挖以及后期长时间蠕变阶段的全过程,获得了开挖面的土压力值变化规律,并设置多组独立的模型试验,通过不同埋深、不同开挖方式对土拱效应影响的对比分析,从试验角度揭示埋深、盾构施工参数与软土深部地层土拱效应时效性之间的影响规律,为土拱时效理论提供充分的试验依据。

1 离心模型试验方案

1.1 试验方案

本试验通过离心机模型,对上海软土地区不同埋深盾构开挖所引起的土拱效应,进行时效性研究,在确定管径、土质等参数条件下,调整埋深、开挖方式,得到掌子面顶进压力与覆土厚、开挖方式等之间的关系模型,研究土压平衡条件下掌子面压力的变化规律以及范围。以掌子面顶进压力与掌子面法向位移关系曲线为基础,研究开挖过程中掌子面压力的变化规律以及取值区间,从而得到加、卸荷开挖所产生的土拱效应影响范围、影响幅值以及时效规律。

综合模型箱尺寸、实际工程指标等影响因素,本试验模拟 4D 埋深与 6D 埋深两种覆土厚度的工况。根据离心机性能指标以及模型尺寸限制条件,重力加速度选为 50g、70g、90g,以对应实际工况中的中埋、深埋、超深埋三种情况,每组试验中均采取主动卸荷、被动加荷两种开挖模式。综上,离心机共进行 12 组对比试验,具体试验方案布置如表 1 所示。

表 1 试验方案参数设置表

Table 1 Table of experimental scheme parameter setting		
埋深	荷载方式	重力加速度
4D 埋深	加荷试验	50g, 70g, 90g
	卸荷试验	50g, 70g, 90g
6D 埋深	加荷试验	50g, 70g, 90g
	卸荷试验	50g, 70g, 90g

1.2 试验模型

本试验采取 1/2 盾构掌子面模型在饱和软黏土中开挖所产生的土拱效应, 研究在相同开挖面位移条件下, 土拱的发生发展规律。

不同埋深条件下的土拱效应不仅取决于周围土压力大小, 同时必须考虑盾构施工参数对土拱效应发生以及发展的影响。考虑到周围土体扰动与开挖速度、土仓压力有关, 因此试验通过统一的开挖速度, 连续观察掌子面土压力变化规律, 明确盾构埋深、开挖方式与土拱效应的关系。本次离心机试验结合上海地铁工程, 充分考虑上海软土深部地层土体特性。为研究不同埋深和开挖方式对土拱作用的影响, 在模型中设盾构顶推装置, 通过远程控制开关调节确保盾构顶进的速度和长度完全一致, 以模拟相同的盾构推进速度和径向距离, 实现了在离心机不停机状态下模拟隧道加卸载开挖、地层损失和蠕变全过程, 得到土体应力变化时程曲线等。

依据现场隧道实际尺寸、模量相似关系、模型箱的净空尺寸, 并结合离心机的工作条件, 本试验所采用离心机运行最大加速度为 90g, 重力加速度相似常数 n 取为 90, 则对应的长度相似比取 $N=1/n=1/90$, 按照量纲分析法抗弯刚度相似比应为 N^4 。由于铝合金和 C50 混凝土的杨氏模量分别为 72 GPa、36 GPa, 进而可计算出模拟盾构管片的内径约为 7cm, 恰好相当于实际工程中 6.3m 直径的盾构。由于实际工程中盾构直径一般为 6.2m, 考虑到模型箱的大小以及试验模型和埋深的尺寸相似比, 本次试验采用其管片内径为 7cm, 如图1所示。

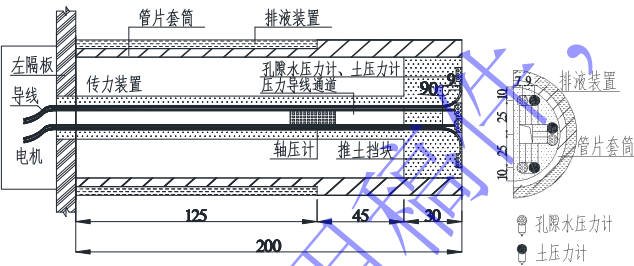


图 1 盾构模型及掌子面压力计布置立面示意图(mm)

Fig. 1 Vertical schematic diagram of shield tunneling model and palm face pressure gauge layout (mm)



图 2 盾构模型立面及掌子面压力计布置

Fig. 2 Shield tunneling model facade and palm face pressure gauge model

试验在掌子面上所设置的微型土压力传感器为 JZ-TY-00 系列, 属于高精度的接触应力传感器, 该传感器量程: 0.02~20MPa、直径 8mm、厚度 3.2mm、准确度误差: $\leq 0.3F \cdot S$ 、接桥方式采用全桥。由于试验装备的加工空间受限, 本试验模拟的活塞和盾构之间存在差异, 本试验主要是为了模拟土体被动和主动扰动时的受力情况, 从而研究掌子面前方土压力所受的扰动随时间的变化规律, 确定软土深部地层土拱效应的时效性规律。综合试验模型因素, 本试验选用铝合金材料制作隧道模型, 根据相似比关系计算出模型的各项参数, 具体见表 2。

表 2 隧道模型参数表

Table 2 Table of tunnel model parameter	
参数	数值
轴向刚度 $E_a/(kN/m)$	6.3×10^7
弯曲刚度 $E_I/(kN \cdot m^2/m)$	4.8×10^5
管壁内径 d/cm	7
管壁厚度 t/cm	0.3
管壁长度 l/cm	20

1.3 试验条件模拟

上海深部土体的物理力学性质较浅层土体有较大区别, 隧道盾构主被动开挖是瞬时加卸载不排水的过程, 在土体盾构开挖的瞬时, 孔隙水来不及排出, 开挖释放的地应力由孔隙水承担, 开挖面附近土体出现超孔隙水压力或负孔隙水压力, 开挖完成后随着盾构周围土体蠕变时间的增长, 其超孔压或负孔压不断消散, 开挖面周围土体的有效应力变化。而常规的直剪试验无法体现这一应力路径的变化, 无法满足研究的需求。为还原软土扰动特性, 本文模型试验必须在排水的条件下进行, 而饱和软土中有大量的水, 所以在试验中最难以实现的是土体空间的密封性, 以确保满足不排水条件。同时, 还要确保土体与盾构模型的有效接触, 而由于盾构模型需要进行顶推以及收缩, 有着较大的空隙, 所以必须实现土体空间与盾构模型的完全止水隔离。

由于离心试验模型设备需要在有限的空间内实现盾构开挖, 并需提供黏土所要求的绝对密闭性以及饱和等条件, 这些条件的复杂性使得离心机模拟软土盾构实时开挖非常难实现。所以部分学者进行了基于平面应变假定, 通过排液法模拟隧道一次开挖扰动的失稳破坏, 但无法实现盾构在软土地层中开挖面主、被动连续开挖以及位移的准确控制。所以, 克服止水问题成为本试验成功的关键之一。

针对上述问题, 本模型试验特设置了橡胶薄膜止水装置。通过乳胶膜止水作用, 成功地克服了前人遇到的饱和软黏土隔水问题以及软黏土试验所要求的

绝对密闭性，具体操作工艺如下图 3 所示。

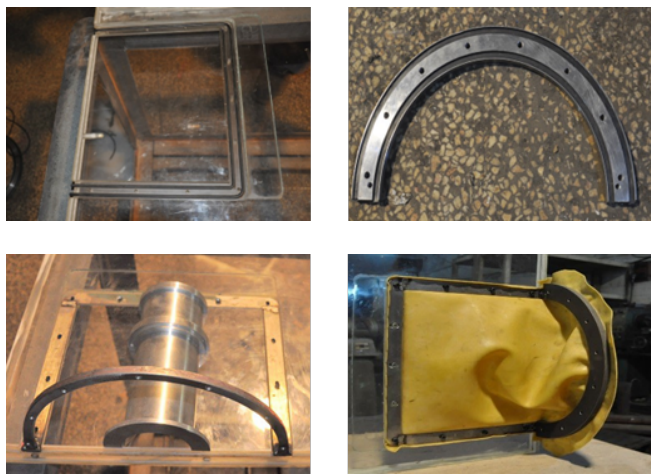


图 3 盾构模型制作及防水装置安装过程

Fig. 3 Shield tunneling model production and waterproofing device installation process

其中四个图分别是有机玻璃开槽密封止水、固定凹槽内橡胶止水条、止水隔间整体安装组合、形成橡胶模止水空间四个步骤。为充分满足止水效果以及隧道顶推自由变形条件，橡胶模在横断面尺寸上留有 $15 \times 7 \text{ cm}^2$ 的自由变形面积，以确保盾构装置顶推过程中橡胶模的自由变形以及盾构刀盘的自由移动。

在设计模型尺寸时，还应注意模型距离模型箱内边距，以防止边界效应影响。为消除盾构开挖的边界效应，隧道距模型箱左右边界以及上边界的尺寸不小于 4 倍盾构直径。对于盾构隧道，综合考虑模型箱的尺寸及离心加速度，确定具体尺寸如图 4 所示。

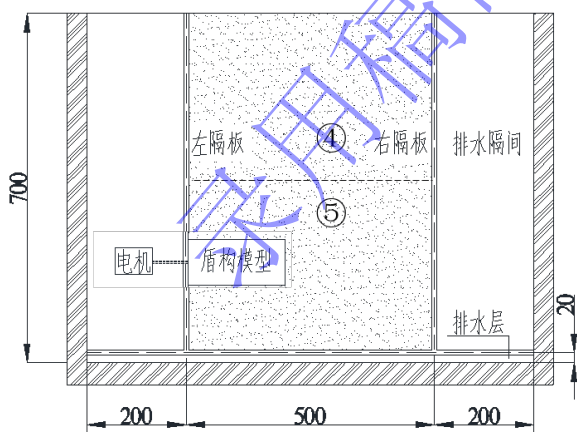


图 4 盾构模型箱尺寸图

Fig. 4 Dimension diagram of shield tunnel model box

本模型隔板箱由厚为 10 mm 的钢板焊接而成，接缝处用防水胶密封防水，钢板外壁设置了横向的钢支撑，以保证其有足够的刚度。隔板箱正面为厚 40 mm 的透明有机玻璃，便于观察模型箱内部，箱子的

内腔尺寸为 $50 \text{ cm} \times 31 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。其中，盾构模型埋设在⑤号土体中，上方是④号土覆盖。

试验采用半圆柱形铝合金模型来模拟盾构刀盘顶推装置，半圆筒模型模拟盾构壳体，在半圆筒内放置径向长度为 3 cm 的半圆金属块，并使其与透明有机玻璃面紧贴，如图 5 所示。通过金属杆与伺服电机相连，操作远程开关可控制金属块前进和后退，从而模拟实际隧道的连续被动加荷和主动卸荷开挖，并能根据开挖面前方土体发生破坏情况，随时停止模型开挖。

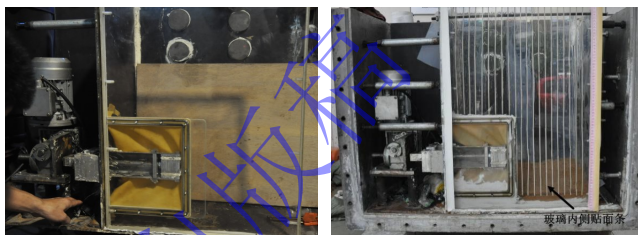


图 5 盾构模型安装过程

Fig. 5 Installation process of shield tunneling model

试验采用专门加工的盾构隧道试验系统，包括盾构模型、模型土箱、动力系统、监控系统及测试系统，具体布置及原理见图 6。在盾构掌子面上，安装有两个土压力计。压力计沿盾构掌子面纵向垂直布置。两个压力计，可以降低压力计损坏对于读取数据影响的风险。为确定深部地层盾构开挖所产生的土拱扰动范围以及土压力变化值，特在本试验盾构周围土体中的不同位置埋设土压力传感器。通过传感器可读取掌子面开挖面周围 1D 空间范围内的土压力变化值，以进一步确定土拱扰动范围，传感器布置如图 6 所示。

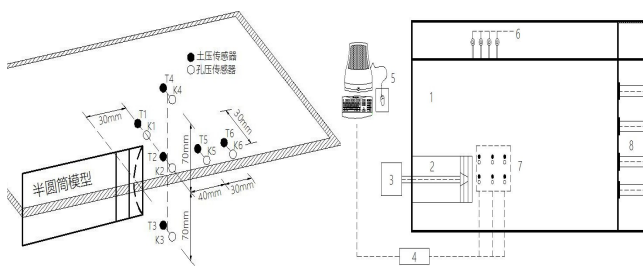


图 6 盾构模型试验土体中压力计布置及控制系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of pressure gauge layout and control system in shield tunneling model test soil

图中，试验装置各组成部分分别为：1-模型土箱；2-盾构模型机；3-动力系统；4-数据采集系统与试验监测系统；5-计算机；6-激光位移传感器；7-土压力和孔隙水压力传感器；8-钢支撑系统。

1.3 土样制备

为了确保模型试验结果与现场试验具有可比性，试验土体取自上海软土地层⑤₃层粉质粘土进行加

工, 形成重塑土。在重塑过程中, 根据原位土体饱和度和, 将其含水量控制在 80%~120%, 同时将土体进行抽真空, 排除土中气体, 确保土体饱和。试验土料取自现场, 以地基强度指标作为主要控制量, 其他诸如含水率、容重等参量都作为次要参量近似满足相似律。

先将取自现场的扰动土晒干、粉碎、过筛、浸泡、加水搅拌, 直至土体成为流塑状态, 然后将土体在自重和 20 kPa 压力下固结 10 d, 使之具有足够刚度, 以免在离心机高速运转过程中发生上浮的现象。在模型箱内 1 g 条件下铺设固结完成的土体至指定高度 (隧道埋深 $C=24\text{ cm}$), 并根据试验分层击实土体。试验过程中, 土体在离心机中继续固结, 定期测定土层的厚度、强度, 使其符合覆土厚度以及固结要求。

表 3 试验⑤号土体参数

Table 3 Experimental parameters of ⑤ soil	
指标	数值
天然重度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	17
饱和重度 $\gamma_{sat}/(\text{kN/m}^3)$	18
压缩模量 E/MPa	3
泊松比 ν	0.3
黏聚力 c/kPa	20
内摩擦角 $\varphi/^\circ$	18

2 开挖掘进试验

2.1 试验方案

本试验分两种开挖方式进行。一类研究软土在加荷作用下产生的被动土拱效应, 另一类研究软土在卸荷作用下的主动土拱效应, 卸荷开挖时的模拟, 是在模型土箱未装土前, 把半圆筒型隧道模型内的盾构刀盘模型推出盾构管片模型外 3cm, 然后将 1g 条件下固结好的土体放入模型箱中, 分层夯实并在预先设计的位置放置土压力传感器和孔隙水压力传感器, 填筑至指定高度后在土表面架设位移传感器, 并将各传输线固定于离心机臂上。启动离心机, 逐级增大加速度直至标定加速度, 至固结度达到 95%以上, 远程控制电机, 使金属杆保持稳定速度连续后移, 直至开挖面

前方土体产生主动土拱效应, 停止后移。按照离心机的速度比例, 要乘以 n (重力加速度相似常数) 是参考离心机试验最大转速, 当 n 取 90, 实际盾构开挖的速度 36mm/min 即对应模型的 0.4mm/min, 因此被动开挖时推动金属杆使盾构刀盘模型保持 0.4mm/min 的速度连续向前方推进, 直至开挖面前方被动土拱效应产生, 土体发生被动土压力扰动作用, 停止推进并观察后期蠕变阶段的土拱效应发展。

2.2 试验数据

软土深埋盾构隧道实际施工中, 主要控制指标是确保在开挖时地表位移在控制允许范围内, 且开挖面土体不发生失稳。控制该指标的关键在于, 能够根据地层条件准确的判断支护压力以及采取合理的推进速度, 使盾构所引起的土压力和水压力变化以及长期地表隆沉值稳定在可控范围内。所以开挖面的顶推力和掘进速度对地层扰动的作用, 是问题的核心所在。因此, 在离心模型试验中, 可通过盾构开挖面的顶推力、掘进速度的影响分析, 得到土拱效应的变化规律。

模型中的上覆土厚度取 28cm ($H/D=4$), 同时为研究超深埋隧道受力, 加设第二组覆土厚为 42cm ($H/D=6$) 的深埋试验, 相当于现场试验的 38m 埋深。研究上覆土层埋深比为 $H/D=4$ 与 $H/D=6$ 两组试验, 以确定埋深对软土地层中土拱效应的影响。由开挖面支护应力比的关系, 可得不同埋深的土拱效应比例。对不同埋深、不同推进方式条件下的盾构掌子面中心处的土体应力值进行汇总。

由试验数据规律可得, 土拱效应变化速率与深度成正比关系。随着离心机转速提高, 模拟的土体埋深增加, 刀盘主动开挖时前方土压力变化速率越快, 在较高地应力条件下主动开挖, 易形成主被动土拱效应。深度对主被动开挖土拱效应的发挥有着直接的影响作用。与以往研究中的砂土土拱效应相比, 在软土深部地层主动开挖作用下, 软土土拱压力恢复阶段时间较长, 而软土土拱效应长期维持比例与砂土层相比较低。

表 4 盾构掌子面中心处的土体应力值

Table 4 Soil stress at the center of shield tunnel face

盾构埋深		4D 埋深开挖						6D 埋深开挖					
开挖方式		加荷开挖			卸荷开挖			加荷开挖			卸荷开挖		
重力加速度		50g	70g	90g	50g	70g	90g	50g	70g	90g	50g	70g	90g
初始值/kPa		241	272	429	285	376	590	186	306	562	273	409	582
极限应力/kPa		335	595	575	215	268	485	375	505	730	230	220	215
极限应力比/%		139	218.8	134	75.4	71.3	82.2	201.6	165	129.9	84.2	53.8	36.9
残余应力/kPa		306	350	460	276	345	610	222	410	590	241	312	488
残余应力比/%		127	128.7	107.2	96.5	91.8	103.4	119.4	134	105	88.3	76.3	83.8

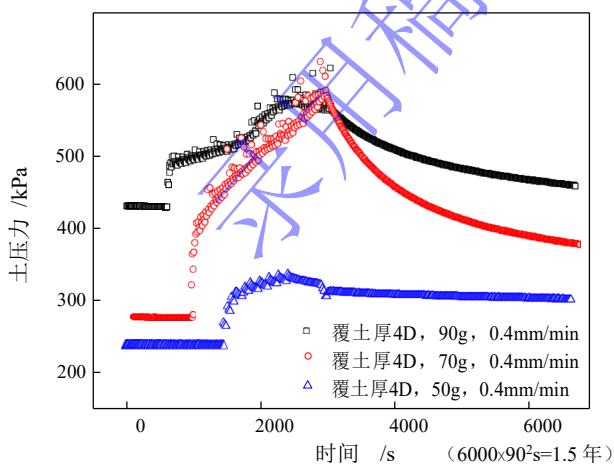
通过试验数据分析, 70g 情况所对应的不同覆土厚比, 所产生的主动土拱效应比例差异较大, 覆土厚比 $H/D=6$ 时所对应的主动土拱效应主衰期时长为 2400s (折算为 1g 重力场下的 136.1 天), 而 $H/D=4$ 所对应的主衰期时长为 1800s (折算为 1g 重力场下的 102.1 天), 与大比例覆土厚的 136.1 天时间差异比例为 30%, 在覆土厚比 $H/D=6$ 的工况下, 超深埋 90g 对应的卸荷试验松动区土拱主衰期经历了 2200s (折算加速度相似比, 为 1g 重力场下的 216.8 天), 而在覆土厚比 $H/D=4$ 的工况下, 深埋覆土厚卸荷开挖破坏松动区土拱主衰期时长为 1800s (折算为 1g 重力场下的 161.3 天)。所以在当盾构在深埋情况下, 覆土厚对土拱效应维持比例及维持时间有着较大的影响。

3 试验分析

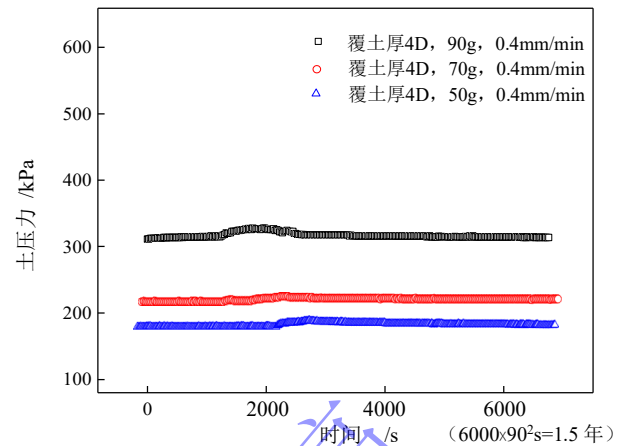
3.1 加荷试验分析

在第一组离心机模型试验中, 采取加荷的方式进行加荷开挖, 测试全过程开挖面土压力。在离心机不停机条件下, 将盾构刀盘模型向前顶推, 在前方形成被动土拱区。通过掌子面土压力计得到前方土体压力数据, 对掌子面所受的土压力进行实时监测并连续读取记录, 从而得到土拱效应的时效性规律。

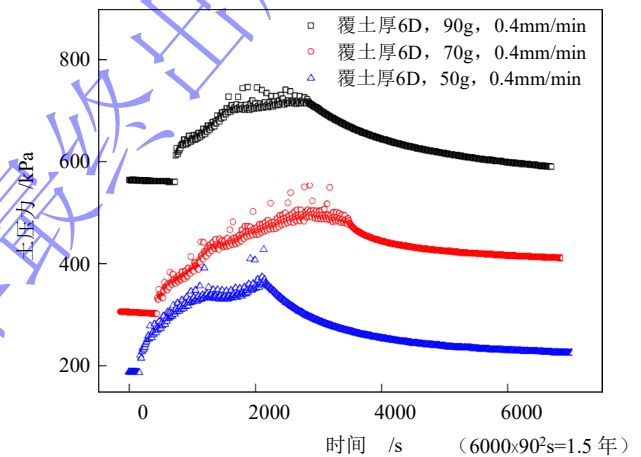
离心机模型中的时间比例关系为 n^2 , 在模型试验中开挖时间 t , 对应于现场的 $n^2 \times t$ s。因此, 通过乘以 n^2 可与理论计算相对比, 可得到土拱长期发展的时效性规律。在覆土 6D 和 4D 条件下, 采取不同重力加速度, 得到不同覆土厚比以及不同埋深条件下的土拱效应, 如图 7 所示。



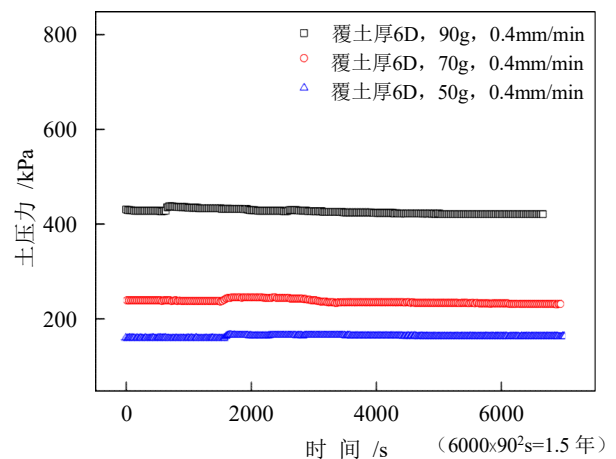
(a) 4D 埋深盾构模型刀盘被动开挖前方掌子面土压力变化值
(a) The variation value of soil pressure on the front face of the passive excavation of the 4D buried shield model cutterhead



(b) 4D 埋深盾构模型上方 7cm (1D) 位置被动土压力变化值
(b) Passive soil pressure variation at 7cm (1D) above the 4D buried shield tunnel model



(c) 6D 埋深盾构模型刀盘被动开挖前方掌子面土压力变化值
(c) The variation value of soil pressure on the front face of the passive excavation of the 6D buried shield model cutterhead



(d) 6D 埋深盾构模型上方 7cm (1D) 位置被动土压力变化值
(d) Passive soil pressure variation at 7cm (1D) above the 6D buried shield tunnel model

图 7 深埋条件刀盘慢速掘进时被动土压力随时间变化值

Fig. 7 The variation of passive earth pressure over time during slow excavation of the cutterhead under deep burial conditions

根据图 7 数据表明, 盾构加荷开挖所引起开挖面土压力变化, 经历以下几个阶段:

第一阶段: 弹性变形阶段。在该阶段的土体处于弹性阶段, 土体应力随着土体受到的挤压变形而显著增大。土体应力增值与刀盘推进的距离正相关。第二阶段: 土拱形成阶段。随着推进过程, 土体所受到压力逐渐达到极限压力值, 被动挤压土拱逐渐形成, 土压力值趋于平稳。第三阶段: 土拱发展阶段。该阶段的刀盘位于土拱扰动区域范围, 土拱范围内土体进入塑性状态, 掌子面前方土体应力并不随着推进位移而变化。第四阶段: 蠕变稳定阶段。当盾构推进结束, 土拱效应逐步衰减, 进入蠕变阶段。该阶段的时长与土体在开挖过程所产生的土拱效应比例有关。

由图 7 可知, 深埋与超深埋情况相比, 土拱效应在第一、二阶段过程中的时长有所不同。土体在不同应力场中, 形成土拱所需的土体位移量有所不同。在软土超埋深的地层中, 土拱效应形成所需位移量较大, 开挖面支护压力的变化幅值增大。开挖面极限支护压力与埋深并非线性关系。与深埋 $H/D=4$ 情况相比, 在大深度 $H/D=6$ 条件下, 埋深与极限支护压力的增幅比例逐渐减小。

随着转速增加, 两种覆土厚条件下的极限土压力差值逐渐减小。按照该规律, 超深埋土拱极限压力值会逐渐趋于稳定。通过掌子面极限土压力值与初始土压力对比分析, 土拱效应比例与埋深呈非线性关系, 所以在超深埋条件下, 掌子面压力大小不仅需要考虑埋深, 同时也需要考虑不同深度条件下的土拱效应。

对于相同 g 值、不同覆土厚度比 H/D 条件下, 加荷开挖所产生土拱效应比例以及被动土压力峰值等规律较为接近。而对于相同覆土厚比、不同 g 值条件下所对应的土拱发展规律, 在被动土压力峰值、蠕变效应等方面有着较大区别。因此, 对于深埋盾构隧道开挖所产生的土拱效应, 不仅需考虑覆土厚比, 同时上覆土厚度绝对值对土拱效应发挥起到了重要的影响作用。

由试验数据可得, 深部地层土拱效应在蠕变阶段长期维持的比例值随着深度增加而增加。在 $50g$ 、 $4D$ 覆土厚度条件下, 土拱效应长期维持比例为 18% , 而在 $90g$ 、 $6D$ 覆土厚条件下, 该比例为 32% 。试验结果表明, 在深埋条件下, 软土所发挥的土拱效应比例随深度增加而增大, 且蠕变阶段土拱效应维持比例也随深度增加而增大。

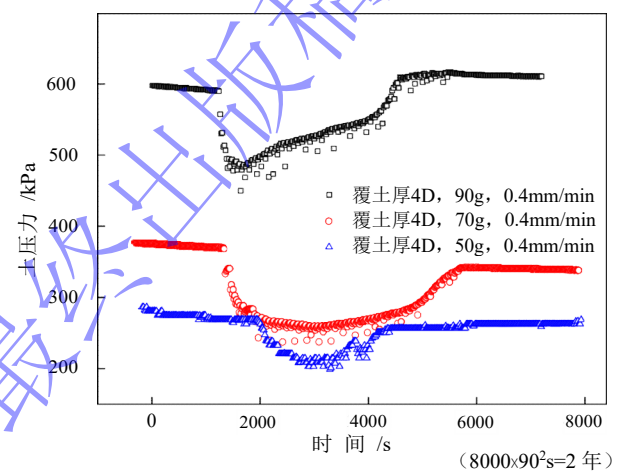
在覆土厚 $H/D \geq 4$ 初始地应力较大的情况下, 蠕变对土拱衰减效应作用较大, 但深部地层土拱效应所

维持的长期比例也较大。这为软土不同深度被动土拱效应长期维持比例的确定提供了重要的参考依据。

3.2 卸荷试验分析

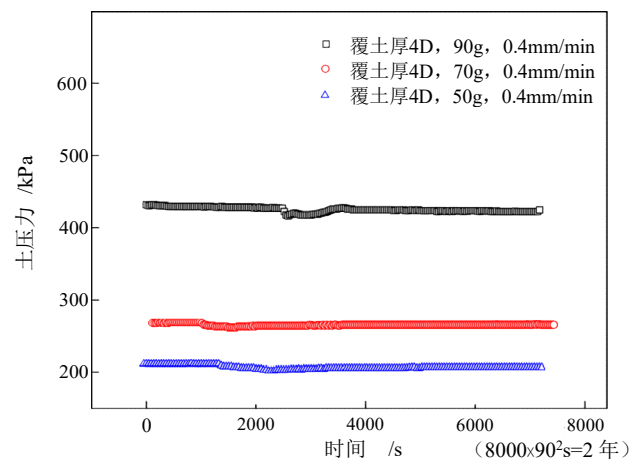
第二组离心机模型试验采取卸荷的方式进行主动开挖, 测试全过程开挖面的土压力。在离心机不停机条件下, 盾构模型刀盘卸荷开挖, 模拟土体卸荷过程, 在刀盘前方形成主动土拱区域。通过掌子面前方土压力数据进行实时监测并连续读取记录, 从而判断土拱效应的变化。

在覆土 $6D$ 和 $4D$ 条件下, 采取不同重力加速度, 模拟不同覆土厚比以得到不同埋深条件下的主动土拱效应, 土压力的变化如图 8 所示。



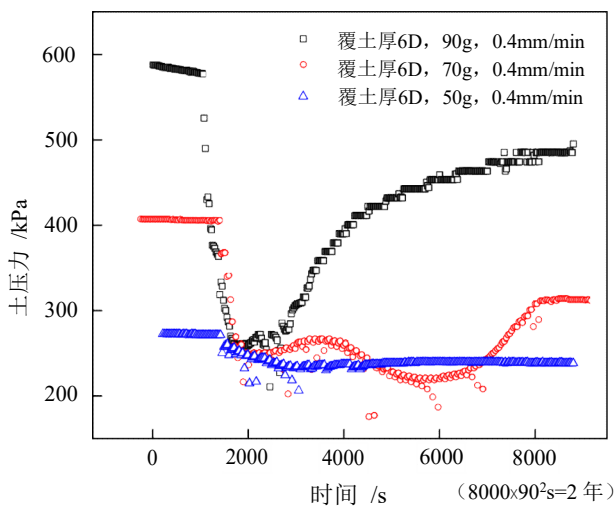
(a) 4D 埋深盾构模型刀盘主动开挖前方掌子面土压力变化值

(a) The variation value of soil pressure on the front face of the active excavation of the 4D buried shield model cutterhead



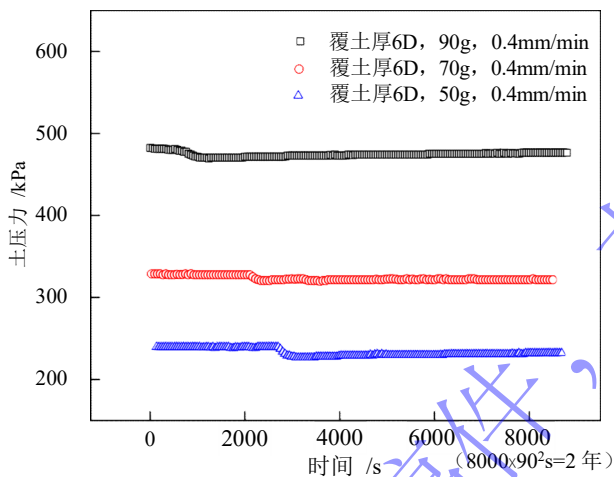
(b) 4D 埋深盾构模型上方 7cm (1D) 位置主动土压力变化值

(b) Active soil pressure variation at 7cm (1D) above the 4D buried shield tunnel model



(c) 6D 埋深盾构模型刀盘前方掌子面土压力变化值

(c) The variation value of soil pressure on the front face of the active excavation of the 6D buried shield model cutterhead



(d) 6D 埋深盾构模型上方 7cm (1D) 位置主动土压力变化值

(d) Active soil pressure variation at 7cm (1D) above the 6D buried shield tunnel model

图 8 深埋条件刀盘慢速卸荷掌子面主动土压力随时间变化值

Fic.8 The variation of active soil pressure on the palm surface over time during slow unloading of the cutterhead under deep burial conditions

在卸荷试验的模式下,土拱的发生发展经历了以下四个阶段:第一阶段:土拱形成阶段。在固结稳定状态下,刀盘卸荷开挖,使得前方土体发生微小主动变形,开挖面所受到的土压力急剧降低。随着盾构开挖面卸荷引起应力释放,刀盘支护压力减小,前方形成主动土拱效应。在盾构刀盘卸荷所产生的主动土拱区域,土体抗剪强度逐渐发挥作用。

第二阶段:土拱发展阶段。当刀盘卸荷开挖量持续增大时,卸荷开挖所产生的土拱效应发展,主动土

压力值降低的速率逐渐减小,开挖面支护土压力逐渐减小至松动土压力最小值。在卸荷开挖区间逐步达到主动土压力极限值时,开挖面压力达到最小值且变化速率减缓。

第三阶段:土拱稳定阶段。在土拱作用形成之后,刀盘持续的主动位移仅引起土拱范围内主动土压力微小的变化。该阶段的刀盘开挖面压力,为土拱范围内主动土压力极限值。刀盘前方土拱范围内,土体局部达到极限平衡状态。此时开挖面前方形成土拱,软土抗剪作用得到充分发挥。

第四阶段:盾构开挖面周围土体进入稳定土拱状态后,主动土拱效应会随着蠕变作用而逐渐衰减。由于软土的蠕变特性,随着时间的推移,主动土压力逐步向稳定土压力值靠近,负孔隙水压力消散,土体松动区逐渐密实,软土深部主动土拱作用逐步衰减,开挖面压力缓慢增加。卸荷开挖产生的土拱作用进入蠕变衰减阶段之后,长期保持较小比例的拱效应。经历长时间蠕变,向稳定土压力发展。

随不同深度的变化,土拱范围内主动土压力极限值有所不同。在 $H/D=6$ 的情况下,土拱效应得到了更大程度的发挥,在 70、90g 条件下,主动土压力极限值比初始土压力减小了 50%,土拱效应得到了充分的发挥。而在相同 g 值、 $H/D=4$ 的工况下,土拱效应只发挥了 20%。在卸荷开挖条件下,埋深比对于土拱效应的发挥起到了关键作用。

4 结 论

本文通过离心机试验,对于不同覆土厚比、不同推进速度条件下,盾构主被动开挖所产生的主动土拱效应的比例差异,进行了多组试验研究对比,研究土拱效应的主衰期时长、覆土厚等因素对土拱效应维持比例及维持时间的影响,主要结论有以下三点:

(1) 由试验可得,深度对软土深部地层土体主动开挖土拱效应的发挥有着直接的影响作用。软土深部地层开挖所产生的土拱效应变化速率与深度成正比关系。在软土深部地层 ($\geq 4D$) 高地应力条件下卸/加荷开挖,埋深越大,且刀盘卸/加荷开挖时前方土压力变化速率越快,形成主/被动土拱效应的比例越大,比例幅值可达 30%~50%。

(2) 随着盾构开挖面卸/加荷引起应力释放,土拱效应逐渐形成,从而对周围土体的应力状态产生影响。在盾构开挖面卸荷所产生的主/被动土拱区域,随着刀盘移动纵向距离增加,对主/被动区的影响逐渐减

小。软土深部地层效应形成的范围为1倍盾构直径内,且随着开挖进行的土拱范围边界较为稳定。

(3) 通过试验可得,软土深部地层($\geq 4D$)的重力场中开挖,采取卸荷开挖模式,主动土拱效应主衰期时长约为100~150天;采用加荷开挖模式,被动土拱效应主衰期时长约为重力场中的150~200天。随着埋深增大,软土深部地层主/被动土拱的主衰期有所延长。

(4) 在软土深部地层($\geq 4D$)开挖,采取卸荷开挖模式,则盾构机以及管片在开挖2年后所承受的长期土压力比静止土压力减小约20%。采取加荷土压力开挖模式,在后期长期蠕变过程中,管片所承受的被动土压力逐步减小,盾构管片长期承受的土压力维持值比静止土压力增加约20%。

参考文献:

- [1] Ibrahim E, Soubra A H, Mollon G, et al. Three-dimensional face stability analysis of pressurized tunnels driven in a multilayered purely frictional medium[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49:18-34.
- [2] Chambon P, Corté J F. Shallow tunnels cohesionless soil: stability of tunnel face[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(7): 1148-1165.
- [3] Huang M S, Tang Z, Zhou W X, et al. Upper bound solutions for face stability of circular tunnels in non-homogeneous and anisotropic clays[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 98: 189-196.
- [4] Idinger G, Aklik P, Wu W. Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel[J]. Acta Geotechnical, 2011, 6(2): 105-117.
- [5] Soranzo E, Tamagnini R, Wu W. Face stability of shallow tunnels in partially saturated soil: centrifuge testing and numerical analysis[J]. Geotechnique, 2015, 65(6): 454-467.
- [6] 黎春林. 盾构隧道施工松动土压力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1714-1720. (LI Chun-lin. Method for calculating loosening earth pressure during construction of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1714-1720. (in Chinese))
- [7] 宋彦杰, 周胜, 邓文武. 软土黏土地层盾构隧道开挖面稳定性离心模型试验研究[J]. 市政技术, 2021, 39(10): 103-106. (SONG Yan-jie, ZHOU Sheng, DENG Wen-wu. Research on deformation influence law of railway frame bridge by ultra-deep buried large diameter subway shield tunnel undercrossing in soft soil layer [J]. Municipal Technology, 2021, 39(10): 103-106. (in Chinese))
- [8] 崔蓬勃, 朱永全, 刘勇, 等. 考虑土拱发挥过程的非饱和砂土盾构隧道极限支护力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 873-881. (CUI Peng-bo, ZHU Yong-quan, LIU Yong. Calculation of ultimate supporting forces of shield tunnels in unsaturated sandy soils considering soil arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 873-881. (in Chinese))
- [9] 吴昌胜, 朱志铎, 宋世攻, 等. 软土地层大直径泥水盾构掘进引起的地面变形分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1)增: 169-172. (WU Chang-sheng, ZHU Zhi-duo, SONG Shi-gong, et al. Ground settlement caused by large-diameter slurry shield during tunnel construction in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 169-172. (in Chinese))
- [10] Atkinson J H, Potts D M. Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soils[J]. Geotechnique, 1997, 27(2): 203-215.
- [11] 沈翔, 袁大军. 盾构隧道掘进面稳定性砂土模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2015(s1): 261-265. (Shen Xiang, Yuan Da-jun. Model test of shield tunnel excavation face stability in sand[J]. China Civil Engineering Journal, 2015(S1): 261-265. (in Chinese))
- [12] 汤旅军, 陈仁朋, 尹鑫晟, 等. 密实砂土地层盾构隧道开挖面失稳离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1830-1838. (TANG Lv-jun, CHEN Ren-peng, YIN Xin-sheng. Centrifugal model tests on face stability of shield tunnels in dense sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1830-1838. (in Chinese))
- [13] 付亚雄, 贺雷, 马险峰, 等. 软黏土地层盾构隧道开挖面稳定性离心模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 387-393. (Fu Ya-xiong, He Lei, Ma Xian-feng, Zheng Hong. Centrifuge model tests on face stability of shield tunneling in soft clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 387-393. (in Chinese))
- [14] 黄德中, 马险峰, 王俊淞, 等. 软土地区盾构上穿越既有隧道的离心模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 520-527. (HUANG De-zhong, MA Xian-feng, WANG Jun-song, LI Xiao-yun, YU Long. Centrifuge modelling of effects of shield tunnels on existing tunnels in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 520-527. (in Chinese))