文章编号:2096-5052(2026)03-0157-06　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.15

工作井基坑开挖及吊装全过程土体应力路径试验

王冬[1],张中堃[2*],刘燕[3],张树明[3],胡威东[4],徐静[1],李君瑶[5],吕昌怀[6],杨帆[7]
(1. 济南城市建设集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 济南建工集团有限公司, 山东 济南 250014;
3. 济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022; 4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;
5. 山东省地质矿产勘查开发局第四地质大队, 山东 潍坊 261021;
6. 中国电建集团江西省电力设计院有限公司,江西 南昌 330096;
7. 济南鼎汇土木工程技术有限公司,山东 济南 250002)

摘要:为揭示盾构始发工作井基坑开挖与吊装施工中土体应力演化规律,明确主应力轴旋转对土体力学特性的影响,以济南市黄河隧道盾构始发工作井为工程背景开展研究。采用理论分析与应力路径三轴试验相结合的方法,确定不同区域土体应力路径边界条件,分析坑内外土体主应力演化与轴旋转特征。结果表明,引入大主应力偏转角 α 的 p-q-α 三维应力路径,相比传统仅考虑平均压应力 p 与广义剪应力 q 的二维描述,可更全面反映复杂施工工况下土体真实应力状态;基坑开挖阶段坑内土体以竖向卸荷为主,平均压应力降低、广义剪应力增大,大主应力轴阶跃式顺时针旋转近 90°,旋转幅度随距基坑中心距离增大而衰减,空间效应显著;坑外土体以侧向卸荷为主,广义剪应力基本稳定,主应力轴旋转幅度较小;坑内主应力轴旋转引发的强度与刚度劣化效应需在基坑变形与稳定性分析中重点考虑,坑外可近似忽略。研究成果可为深基坑工程设计与安全管控提供理论支撑。

关键词:基坑开挖;应力路径;数值模拟;主应力旋转;吊装荷载
中图分类号:TU43;TU44　　**文献标志码**:A

引用格式:王冬,张中堃,刘燕,等. 工作井基坑开挖及吊装全过程土体应力路径试验[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):157-162. Wang Dong, Zhang Zhongkun, Liu Yan, et al. Soil stress path in the whole process of excavation and hoisting of working shaft in silty clay[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):157-162.

Soil stress path in the whole process of excavation and hoisting of working shaft in silty clay

Wang Dong[1], Zhang Zhongkun[2*], Liu Yan[3], Zhang Shuming[3], Hu Weidong[4],
Xu Jing[1], Li Junyao[5], Lü Changhuai[6], Yang Fan[7]
(1. Jinan City Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China;
2. Jinan Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, Shandong, China;
4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China;
5. Fourth Geological Group of Shandong Provincial Bureau of Geological Mineral Exploration and Development, Weifang 261021, Shandong, China; 6. China Electric Power Engineering Consulting Group Jiangxi Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, Jiangxi, China;
7. Jinan Dinghui Civil Engineering Technology Co., Ltd., Jinan 250002, Shandong, China)

Abstract: A study was conducted to reveal the stress evolution law of soil during foundation pit excavation and hoisting construction of a shield launching shaft and clarify the influence of principal stress axis rotation on soil mechanical

收稿日期:2026-04-20;**修回日期**:2026-08-21;**接受日期**:2026-08-31;**出版日期**:2026-09-20
基金项目:济南城市建设集团有限公司科技开发计划资助项目(2020W003);中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究资助项目(TSYSDY-JLLCHSD[2020]-05)
第一作者简介:王冬(1982—),男,山东济南人,助理工程师,主要研究方向为土木工程与管理。E-mail:93147531@qq.com
*通信作者简介:张中堃(1978—),男,山东肥城人,工程师,主要研究方向为隧道与地下工程。E-mail:m19707015772@163.com

properties, with the shield launching shaft of Jinan Yellow River Tunnel taken as the engineering background. By adopting the method combining theoretical analysis and stress path triaxial tests, the stress path boundary conditions of soil in different regions were determined, and the principal stress evolution and axis rotation characteristics of soil inside and outside the foundation pit were analyzed. The results showed that, compared with the traditional two-dimensional description only considering the mean compressive stress p and generalized shear stress q, the real stress state of soil under complex construction conditions could be more comprehensively reflected by the three-dimensional p-q-α stress path incorporating the major principal stress deflection angle α. During foundation pit excavation, the soil inside the foundation pit was dominated by vertical unloading, with decreased mean compressive stress and increased generalized shear stress. The major principal stress axis was rotated clockwise by nearly 90° in a stepwise pattern, and the rotation amplitude was attenuated with increasing distance from the foundation pit center; a significant spatial effect was observed. The soil outside the foundation pit was dominated by lateral unloading, with relatively stable generalized shear stress and a small rotation amplitude of the principal stress axis. The strength and stiffness deterioration effects induced by principal stress axis rotation inside the foundation pit should be emphatically considered in the analysis of foundation pit deformation and stability, while those outside the foundation pit could be largely ignored. Theoretical support for the design and safety management of deep foundation pit engineering was provided by the research results.

Keywords: foundation pit excavation; stress path; numerical simulation; principal stress rotation; lifting load
Received: 2026-04-20; **Revised**: 2026-08-21; **Accepted**: 2026-08-31; **Published**: 2026-09-20

0 引言

在基坑工程的施工过程中,基坑开挖卸荷、内支撑架设、坑顶吊装作业等一系列施工扰动,导致基坑周边土体的应力状态呈现出显著的复杂性与多变性。土体的应力-应变本构关系并非仅由当前应力状态决定,还受应力历史与应力路径等因素影响。因此,若直接采用常规三轴加载试验获取的土体参数开展基坑工程设计与数值模拟分析,将会产生较大计算偏差。现有研究[1-4]已证实,在基坑开挖对应的典型卸荷工况下,土体内部剪应力持续发展,会诱发主应力轴发生偏转,进而造成土体抗剪强度衰减、塑性变形不断累积,宏观上即表现为土体力学响应的整体“软化”特征;若工程设计中忽视该卸荷力学特性,直接沿用传统塑性理论开展设计,将显著增加基坑工程的安全风险。在实际基坑工程中,常因低估基坑开挖后周边土体的变形量,进而引发周边环境损伤问题。

现阶段,针对深基坑开挖过程中土体应力路径演化规律的研究,已成为基坑工程领域的重点研究方向[5-9]。曾国熙等[5]通过分析总结,明确了基坑不同区域土体的应力路径特征:被动区土体单元呈现侧向荷载恒定、竖向卸荷的受力特征,主动区土体单元则表现为竖向荷载恒定、侧向卸荷的应力演化规律。刘国彬等[6]针对软土基坑被动区土体的应力特征开展深化研究,认为被动区土体以竖向卸荷为核心特征,侧向荷载的演化规律更为复杂,存在恒定、增大、减小 3 种可能,而坑外主动区土体的应力路径与文献[5]的研究结论一致。吴宏伟等[7]对基坑卸荷应力路径开展定性分析,发现被动区土体的有效应力路径与室内不排水伸长试验的应力路径完全吻合,而主动区土体的应力路径与室内不排水压缩试验的应力路径存在显著差异。但袁静等[8]则提出不同观点,认为基坑开挖全过程中,主动区与被动区土体均处于卸荷应力状态。何世秀等[9]借助真三轴试验,对基坑开挖坑周土体的应力路径进行模拟试验,结果表明,在中主应力的影响下,土体的应力-应变曲线更陡,极限应变有所减小,土体可承受的破坏应力阈值更高。应宏伟等[10]建立了可考虑主应力轴旋转效应的三维应力路径分析方法,并指出亟需建立考虑主应力轴旋转的基坑开挖典型应力路径,为工程实践提供理论指导。

本研究针对复杂应力路径下土体的应力-应变关系,对基坑分层开挖与吊装施工全过程开展数值模拟,获取不同工况下基坑不同位置土体单元的应力路径,分析土体单元的应力演化规律,最终得出吊车吊装荷载的空间影响范围。

1 工程背景

本次研究依托的盾构始发工作井基坑,宽度介于 36.6~52.4 m 之间,总长度 150 m,基坑顶部覆土厚度约 3 m,底板埋深为 26.2~31 m,基坑最大开挖深度达 31.2 m;工程采用顺作法施工,属于典型的深基坑工程。本次研究场地内,基坑影响深度范围

内的地层自上而下依次为：填土、黏质粉土、粉质黏土、砂质粉土、粉质黏土、黏土、粉质黏土、细砂、粉质黏土。盾构始发工作井场区的地下水类型为第四系松散覆盖层中的孔隙潜水，地下水位埋深 1.10～2.80 m，含水层主要分布于人工填土、黏质粉土、粉质黏土、粉细砂等地层中；地下水主要接受水库、沉砂池、黄河水体补给及大气降雨补给，通过地下径流、自然蒸发及人工开采的方式排泄。

本基坑采用地下连续墙结合内支撑的支护体系，其中地下连续墙设计厚度 1.2 m，墙体深度 50 m；基坑标准段深度范围内共设置 5 道支撑，第 1、4 道采用钢筋混凝土支撑，第 2、3、5 道采用钢支撑。济南黄河隧道盾构始发工作井基坑的支护结构平面布置及设计尺寸如图 1 所示。

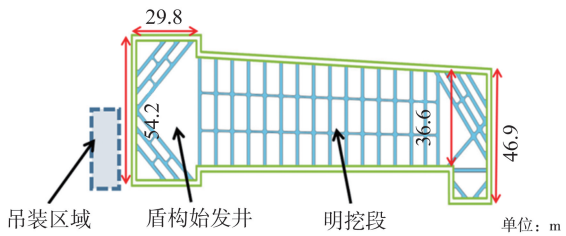


图 1　盾构始发工作井基坑的支护结构平面及尺寸

Fig.1　Plan layout and dimensions of the supporting structure for the shield launching shaft foundation pit

2　考虑主应力轴旋转的应力路径描述

针对基坑开挖阶段周边土体的应力路径演化特性，刘熙媛等[11]按应力响应特征将基坑周边土体划分为 3 个区域，不同区域土体的典型应力路径存在本质性差异，各区域的应力路径特征如图 2 所示。

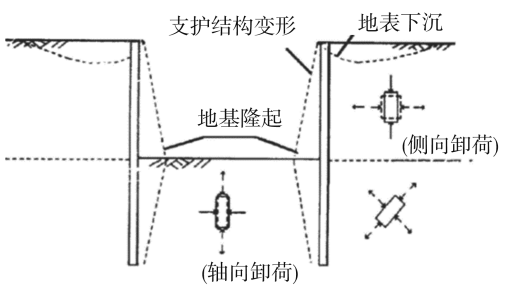
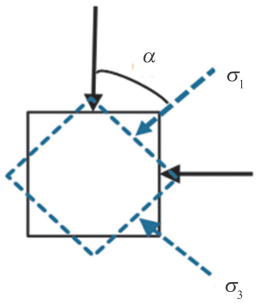


图 2　基坑开挖影响区域划分[11]

Fig.2　Zoning of influenced zones for foundation pit excavation[11]

选取 p、q、α 3 个参数表征二维平面中土体单元的应力状态变化，各参数物理意义明确如下：p 为平均压应力；q 为广义剪应力；α 为大主应力旋转角，定义为大主应力与竖直方向夹角，并规定顺时针偏转的 α 值为正[9-10]，如图 3 所示。



注：σ_1 为大主应力，σ_3 为小主应力，α 为大主应力旋转角。

图 3　二维平面中土体单元的大主应力偏转角示意图

Fig.3　Schematic diagram of major principal stress deflection angle for soil element in two-dimensional plane

针对二维平面问题的分析计算，通常可做出中主应力与小主应力数值相等的基本假定，若假设土体单元中某点应力状态为 $\sigma=\{\sigma_x,\sigma_y,\tau_{xy}\}$，则

$$p=\frac{1}{3}(\sigma_1+2\sigma_3)=\frac{1}{3}(\sigma_x+2\sigma_y), \tag{1}$$

$$q=\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_3)=\sqrt{\left(\frac{\sigma_y-\sigma_x}{2}\right)^2+\tau_{xy}^2}, \tag{2}$$

$$\alpha=\arctan\frac{\tau_{xy}}{\sigma_y-\sigma_x}, \tag{3}$$

式中，σ_x 为 x 方向的主应力，σ_y 为 y 方向的主应力，τ_{xy} 为 x-y 平面的切应力。

3　土体强度及变形的应力路径三轴试验

试验采用立方通达（天津）实验仪器有限公司生产的 LFTD1805 高级应力路径三轴仪，对采集自济南黄河南岸的原状粉质黏土试样，开展了不排水应力路径三轴试验。试验土体由现场勘探钻孔并采用薄壁取土器取得。所有试样均取自同一钻孔同一层位，全程密封防震运输以保留土体天然结构。试样制备阶段通过密度、含水率测试筛选初始物理指标偏差小于±5%的试样，剔除含明显裂隙、夹层的不合格样品；固结阶段以孔隙水压力完全消散、轴向变形速率连续 24 h 小于 0.01 mm/h 为稳定标准，最大限度降低土体非均质性与试样扰动对试验结果的影响。试样直径 39.1 mm，高度 80 mm，试样的制备、饱和及安装均满足试验要求。本次试验所用原状粉质黏土试样，均取自济南黄河隧道盾构始发工作井场地内的第④层粉质黏土，取样深度范围为 14.0～17.0 m，天然含水率（w）为 26.8%，天然密度（ρ）为 1.95 g/cm^3，初始孔隙比（e_0）为 0.765，液限（w_l）为 36.4%，塑限（w_p）为 19.7，饱和度（S_r）为 95.2，压缩

模量为 4.64 MPa，超固结比为 1.32。试验分为 A、B、C 3 组（见表 1）。A 组为等向固结-轴向加荷常规三轴试验，主要用于获得土的有效强度指标；B 组为 K_0 固结减围压三轴试验，用于模拟基坑开挖时土体侧向卸荷的应力路径 AD；C 组为 K_0 固结减围压后轴向加荷三轴试验，用于模拟基坑开挖后周边作用重型施工荷载的应力路径 AB_1C。土样的剪切速率为 0.1%/min。A 组试验得到的有效强度指标 c' 为 29.3 kPa，φ' 为 29.3°，理论上 $K_0 = 1 - \sin\varphi' = 0.51$。需要说明的是，该理论公式仅适用于理想正常固结、无结构性效应的重塑土体；本次试验采用的黄河冲洪积原状粉质黏土具有天然结构性与弱超固结特征，其原位静止土压力系数显著高于理论值。结合本工程勘察阶段原位旁压试验、扁铲侧胀试验的实测成果，该层粉质黏土的静止土压力系数实测分布区间为 0.64～0.72；同时参考济南地区同类土层的试验研究成果，原状粉质黏土的 K_0 实测值普遍处于 0.65～0.75 区间。结合不同试验分组对应的工程场景：B 组模拟坑外主动区侧向卸荷过程，土体超固结程度相对较弱，取 $K_0 = 0.67$；C 组模拟坑底土体先卸荷回弹、再受吊装荷载的受力过程，土体应力历史更复杂，取 $K_0 = 0.70$。两组取值均与场地原位应力状态相匹配，可更真实地还原施工全过程的土体应力演化路径[9]。

表 1 应力路径三轴试验方案

Table 1 Scheme for stress path triaxial tests

组号	试验类型	固结过程/kPa	卸荷过程	加荷过程
A 组	固结不排水剪（DE）	等压固结，σ_3 = 100、200、300		由初始 σ_3 起常规不排水剪
B 组	K_0 固结侧向卸荷（AB）	K_0 固结，K_0 = 0.67 σ_1 = 200、300、400 σ_3 = 134、201、268	试样由初始 σ_3 卸荷直到破坏	
C 组	K_0 固结不排水侧向卸荷-轴向加荷（AB_1C）	K_0 固结，K_0 = 0.70 σ_1 = 200；σ_3 = 140	目标 σ_3：126、105 对应卸荷比 10%，30%	由目标 σ_3 起常规不排水剪

B、C 组试验的应力-应变曲线如图 4 所示，图中 ε_1 为轴向应变，数据点间隔为 1 000 s。B 组 K_0 固结侧向卸荷试验由于仪器问题，在降低围压至偏应力达到初始围压之后，轴压和围压将同时降低，偏应力保持不变。试验结果显示在侧向卸荷应力路径下，土体在很小的轴向应变范围内偏应力呈线性增加，卸荷模量大致相同，呈弹性至弹塑性变形；在偏应力接近初始围压时，应力-应变曲线曲率迅速增大，土体逐渐进入塑性变形。在偏应力恒定阶段，莫尔-库仑平均应力减小，土体轴向变形速率逐渐增加，直到试样破坏。试验将变形速率开始大幅增加作为试样破坏的依据。破坏时的轴向应变远小于常规三轴试验的破坏轴向应变，在 2.4%～3.0%之间，且偏应力达到初始围压前的应力-应变曲线呈双曲线状。与此同时，由于卸荷时围压减小导致试样体积膨胀，卸荷的有效应力路径与总应力路径相同（见图 5），孔隙水压力为负值。从变形的角度分析，侧向卸荷应力路径下，围压的作用使试件在横向呈主动的膨胀变形，而轴向变形是试件在变形规律作用下的被动变形，其量值远小于轴向加载三轴试验的主动轴向变形。当偏应力接近其极值时，试件转入塑性变形，其轴向变形在比围压大得多的轴压作用下急剧增大，进入脆性破坏。这说明侧向卸荷试验更能够体现基坑工程中土体变形不明显且破坏迅速的现象。可将土体进入明显弹塑性阶段的偏应力作为土体卸荷破坏的依据。

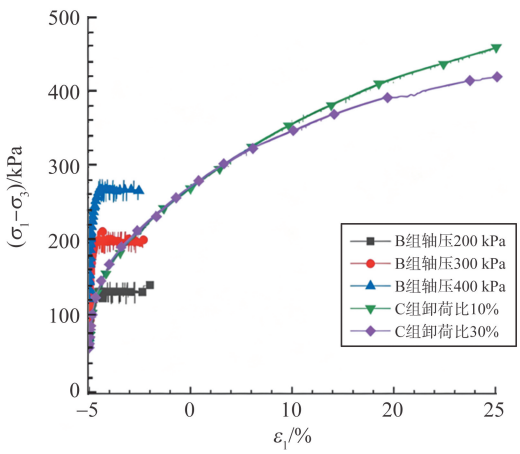


图 4 B、C 组试验应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves after test groups B and C

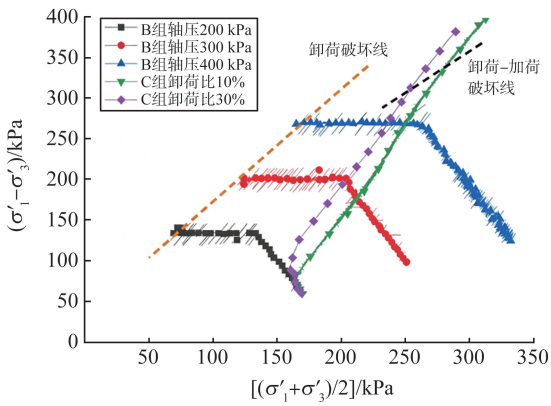


图 5 B、C 组试验有效应力路径

Fig.5 Effective stress paths after test groups B and C

在 C 组 K_0 固结侧向卸荷-轴向加荷应力路径三轴试验中，土样卸荷时呈现典型的侧向卸荷力学性质，偏应力在很小的应变范围内快速增长，应力-应变曲线及有效应力路径与 B 组基本相同，孔隙中出现负孔隙水压力。轴向加载后土体的强度随卸荷比增加而降低，符合理论分析规律。杨雪强等[12]指出可将偏应力引发的孔隙水压力最大值对应的特征点，作为土体破坏的判别依据；基于该判别标准，得到对应孔压最大值的侧向卸荷-轴向加荷应力路径试验强度，与常规三轴试验的强度对比如表 2 所示。

表 2　不同轴向加荷路径三轴试验强度对比

Table 2　Comparison of soil strengths after tests for different axial loading paths

试验类型	初始围压/kPa	最大偏应力/kPa
常规三轴	100	210
常规三轴	200	375
常规三轴	300	470
卸荷 10%后	140	340
卸荷 30%后	140	310

轴向加载时，被动轴向应变（ε_1）转为主动，孔压（u）在先期克服负孔隙水压力后出现明显的峰值点，且随先期卸荷比的增加，孔压峰值更小，且峰值点前移（见图 6）。

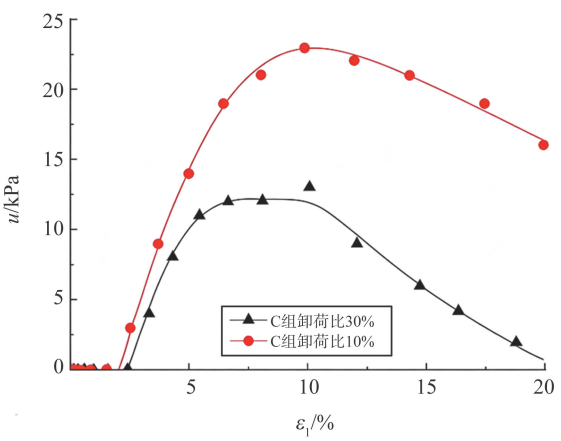


图 6　C 组试验孔隙水压力变化

Fig.6　Evolution of pore water pressure after test group C

由于卸荷期平均应力减小导致的土体膨胀（“体积卸荷”）占主导作用，轴向加荷前土体孔隙比随卸荷结束时平均应力降低而增加，产生的负孔压更大，加荷强度的降低使得土体孔隙的破坏偏应力随之降低，因此加荷时孔压峰值更小。Lambe 把土体强度分为黏聚力、摩擦和剪胀 3 部分，认为土体黏聚力只在极小应变下发挥作用，剪胀在加载中期达到峰值后减小，加载后期摩擦起主导作用。加荷前期卸荷比越大，土体偏向加载水平越趋于后期，摩擦起主导作用越提前，土体孔隙在摩擦作用下破坏引起孔隙水压力降低越早，因此孔压峰值随卸荷比增加而提前。

在图 5 中绘制卸荷破坏线，其方程为

$$(\sigma'_1-\sigma'_3)=2\sin\varphi'\times\frac{\sigma'_1+\sigma'_3}{2}+2c'\cos\varphi'。\quad(4)$$

得到土体侧向卸荷的强度指标 c' 为 24.5 kPa，φ' 为 43.5°，相比于轴向加荷三轴试验，黏聚力减小而摩擦角增大。基于 Lambe 土体强度理论，李宝平等[13]指出侧向卸荷试验条件下后期应变量变化较快，应力-应变曲线趋于水平，内聚力对抗剪强度的影响削弱，而摩擦的影响则增强，最终导致土体 c' 值偏小，φ' 值偏大。

在图 5 中绘制侧向卸荷-轴向加荷破坏线，得到土体在该应力路径下的强度指标 c' 为 30.7 kPa，φ' 为 30.4°，与轴向加荷三轴试验强度指标近似。因此侧向卸荷-轴向加荷应力路径下土体的有效强度指标仍可取常规三轴试验所得的值。这意味着土体附近基坑的存在对土体轴向加荷强度指标的影响较小，深层土体在基坑影响下经历侧向卸荷后，在附加应力下加荷的初始横向应力减小，在与原状土体基本相同的加荷强度指标下所能承担的附加应力更小，因此宏观上达到的主动土压力更小，土体的承载力进而降低。

4　结论

本研究以济南市黄河隧道盾构始发工作井为工程背景，结合理论分析与应力路径三轴试验，系统研究了基坑分层开挖及后续吊装施工全过程中不同区域土体单元的应力演化规律，重点分析了主应力轴旋转特征，得出以下主要结论。

（1）与传统仅考虑平均压应力 p 与广义剪应力 q 的二维应力路径描述相比，引入大主应力偏转角 α 的三维应力路径（p-q-α）能够更全面地反映不同区域土体单元在复杂施工工况下的真实应力状态变化，尤其适用于描述主应力轴旋转显著的工况。

（2）基坑开挖阶段，坑内土体以竖向卸荷为主，卸荷作用发生前，竖向应力为土体的大主应力，随开挖进程推进，土体平均压应力持续降低，广义剪应力不断增大，大主应力轴发生显著的顺时针旋转；而坑外土体以侧向卸荷为主，平均压应力虽出现一定程度的衰减，但广义剪应力基本保持稳定，主应力轴的旋转幅度较小，二者的应力路径演化模式存在本质区别。

（3）坑内土体的大主应力轴旋转具有明显的阶

跃式特征,随开挖深度增加呈现突变式增长,缺乏中间过渡阶段,最终偏转角接近 90°。旋转幅度表现出显著的空间效应,随距基坑中心距离增大而逐渐减小。该特征与常规三轴加载试验的应力路径存在本质区别,表明在基坑开挖阶段的变形与稳定性分析中,应考虑坑内土体的主应力轴旋转效应对土体强度与刚度参数的劣化影响。相比之下,坑外土体主应力轴旋转幅度较小,工程计算中可近似忽略其影响。

参考文献:

[1] 刘丽. 考虑开挖应力路径的基坑土体变形性状研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 64-69.
Liu Li. Study on deformation behavior of soil considering stress path during deep excavation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016: 64-69.

[2] 孙岳崧, 濮家骝, 李信. 不同应力路径对砂土应力-应变关系影响[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(6): 78-88.

[3] 李海波, 梁立孚, 陈德民. 考虑主应力轴旋转土体的应力增量分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22(4): 56-60.
Li Haibo, Liang Lifu, Chen Demin. Analysis of stress increment considering rotation of principal stress axes of soil[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2001, 22(4): 56-60.

[4] 李璋, 白森, 郑建国, 等. 基坑开挖对西安黄土地层中既有盾构隧道围岩压力及变形影响分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2025, 7(1): 35-47.
Li Zhang, Bai Sen, Zheng Jianguo, et al. The influence of foundation pit excavation on the surrounding soil pressure and deformation of existing shield tunnel in Xi′an loess stratum[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2025, 7(1): 35-47.

[5] 曾国熙, 潘秋元, 胡一峰. 软粘土地基基坑开挖性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(3): 13-22.
Zeng Guoxi, Pan Qiuyuan, Hu Yifeng. The behavior of excavation in soft clay ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(3): 13-22.

[6] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 18-23.
Liu Guobin, Hou Xueyuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 18-23.

[7] 吴宏伟, 施群. 深基坑开挖中的应力路径[J]. 土木工程学报, 1999, 32(6): 53-58.
Ng Wangwai Charles, Shi Qun. Changes of stress path caused by stress relief during excavations[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(6): 53-58.

[8] 袁静, 龚晓南. 基坑开挖过程中软土性状若干问题的分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2001, 35(5): 465-470.
Yuan Jing, Gong Xiaonan. Analysis of soft clay during excavation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2001, 35(5): 465-470.

[9] 何世秀, 朱志政, 杨雪强. 基坑土体侧向卸荷真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 869-872.
He Shixiu, Zhu Zhizheng, Yang Xueqiang. A study of true triaxial test on lateral unloading of soil mass of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 869-872.

[10] 应宏伟, 李晶, 谢新宇, 等. 考虑主应力轴旋转的基坑开挖应力路径研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1013-1017.
Ying Hongwei, Li Jing, Xie Xinyu, et al. Research on stress path during excavation considering rotation of principal stress axis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1013-1017.

[11] 刘熙媛, 窦远明, 闫澍旺. 模拟基坑开挖过程的三轴试验研究[J]. 工程勘察, 2005, 33(5): 1-3.
Liu Xiyuan, Dou Yuanming, Yan Shuwang. Study on triaxial tests for the simulation of excavation process[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005, 33(5): 1-3.

[12] 杨雪强, 朱志政, 韩高升, 等. 不同应力路径下土体的变形特性与破坏特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2181-2185.
Yang Xueqiang, Zhu Zhizheng, Han Gaosheng, et al. Deformation and failure characteristics of soil mass under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2181-2185.

[13] 李宝平, 郭兴峰, 张玉, 等. 侧向卸荷条件下黄土的变形特性试验[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(6): 87-93.
Li Baoping, Guo Xingfeng, Zhang Yu, et al. Test on deformation characteristics of loess under lateral unloading condition[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(6): 87-93.

(编辑:宋艳)