

珠海软土三轴剪切特性及微观结构试验*

张志星^{1,2}, 刘建坤¹, 唐昌意^{2,3}, 闫一辉¹, 汤茂杰¹, 常丹¹

1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519081
2. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519001
3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 611752

摘要:以珠海典型软土路桥过渡段不同种类原状试样作为研究对象,通过开展室内基本物性、三轴剪切和SEM电镜扫描试验,得到了现场原状试样的宏观与微观特性。试验结果表明:原状试样天然含水率较高,真空联合堆载预压后试样天然含水率显著降低。填土的内摩擦角为 36.957° ,黏聚力为1.511 kPa,黏土的黏聚力和内摩擦角均大于淤泥;真空联合堆载预压后淤泥和黏土的黏聚力和内摩擦角均增大。随着土样深度增加,土样微观孔隙尺寸显著减小;真空联合堆载预压后土体的分布分维显著减小,黏性土的集团化程度增强,凝聚力显著增大。

关键词:宏观力学特性; 微观机理; 基本物性; 三轴试验; SEM

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)06-0086-09

Experimental on triaxial shear and microstructure of Zhuhai soft soil

ZHANG Zhixing^{1,2}, LIU Jiankun¹, TANG Changyi^{2,3}, YAN Yihui¹, TANG Maojie¹, CHANG Dan¹

1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519081, China
2. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519001, China
3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611752, China

Abstract: This study takes undisturbed specimens of various types as the research object which from a typical soft soil road-bridge transition section in Zhuhai as the research object. Through laboratory tests, including basic physical property tests, triaxial shear tests, and SEM analysis, the macro- and micro-properties of the in-situ undisturbed specimens were obtained. The test results show that the undisturbed specimens have a high natural water content, which significantly decreases after vacuum combined surcharge preloading. The internal friction angle and cohesion of the fill are 36.957° and 1.511 kPa, respectively. The clay exhibits higher cohesion and internal friction angle than the silty soil, and both parameters increase in clay and silty soil after preloading. As the depth of the soil increases, the microscopic pore size decreases significantly. After vacuum combined surcharge preloading, the fractal dimension of the soil structure decreases markedly, the aggregation degree of cohesive soil is enhanced, and cohesion increases significantly.

Key words: macroscopic mechanical properties; microscopic mechanism; basic physical properties; triaxial test; SEM

* 收稿日期: 2025-05-24 录用日期: 2025-06-23 网络首发日期: 2025-09-23

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2020B1515120083); 四川省重点研发计划(2025YFHZ0300)

作者简介: 张志星(1991年生), 男; 研究方向: 特殊土力学;

E-mail: zhangzhx75@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 常丹(1989年生), 男; 研究方向: 特殊土力学;

E-mail: changd@mail.sysu.edu.cn



ZR20250091



ZR20250091

珠海作为我国海滨城市, 软弱土层分布广泛(陈娇, 2023; 李栋等, 2023a, 2023b; 陈文华等, 2024)。由于软土的高含水量、承载力低和压缩性大等特殊性质, 导致容易遇到地基沉陷和失稳等安全隐患(赵冠华等, 2024)。对于软弱地基, 在工程实践中通常采用真空联合堆载预压进行处治(李朝蓉, 2023; 董浩军, 2025; 刘燕琼, 2025)。因此, 揭示路桥过渡段土体的宏观力学特性和微观结构, 评估处理方法的应用效果有着重要的现实意义(郝腾飞等, 2023; 吴土明, 2025)。

Cai et al.(2020)对海洋黏土开展了大量的循环荷载三轴试验, 并通过数值模拟探讨了循环应力比、加载频率和围压等因素对其力学特性的影响。Yang et al.(2024)通过一系列双向循环三轴试验发现, 与连续循环荷载试验相比, 间歇性循环荷载对累计轴向应变和超孔隙水压力的影响较大。Liu et al.(2025)对不同颗粒间黏结强度和初始孔隙率的人工结构土开展了一系列三轴加载试验, 得到了动应力水平和结构强度对累积变形的影响规律, 并提出了计算三维循环累计变形的简化方法。扈胜霞等(2014)对真空预压后土体开展了固结蠕变三轴试验和微观特性研究, 分析了不同预压荷载对土体沉降量的影响机理, 并得到了微观参数与宏观参数之间的关系。梁志鑫等(2024)从宏微观角度对地基软土的结构演化及损伤机制进行了分析, 提出的微观结构因子能够有效揭示宏观力学特性的响应机制。Sun et al.(2020)对上海原状软黏土开展了一系列三轴应力路径测试和场发射扫描电镜试验, 研究了不同应力路径下软黏土的微观结构参数变化规律, 揭示不同影响因素下天然软黏土加载过程中的微观结构演化。关于软土的宏观和微观力学特性研究较多, 但对珠海地区软土的相关研究则较少。

目前, 针对珠海地区软弱土体的研究仍以宏观

力学特性分析为主(卫俊杰等, 2024)。尤其在桥头过渡段这一特殊区域, 关于真空联合堆载预压处理前后土体的微观结构演化规律及其与宏观变形行为之间的耦合机制的研究仍显不足。因此, 本文以珠海某路桥过渡段软弱土体为研究对象, 采用室内基本物性试验、三轴剪切试验和扫描电镜(SEM)试验, 系统分析了真空联合堆载预压处理前后土体的宏观力学特性与微观结构变化特征, 并揭示其宏微观关联机制, 达到为类似地基优化设计提供参考的目的。

1 基本物性

试验土样取自珠海情侣南路路桥过渡段, 地质条件复杂, 土体类型多样。

1.1 试验土样

现场取土点为ZK1和ZK2号孔, 其中ZK1区域土体未采取任何处理措施, ZK2区域土体采用真空联合堆载预压处理。如表1所示, 试样类型包括填土、淤泥和黏土, 取样深度为0.8~27.0 m, ZK1区域主要包括浅层填土和深层淤泥及黏土, ZK2区域主要为经过处理后淤泥质土和黏土。如图1所示, 填土及黏土的原状试样为高20 cm的圆柱体, 淤泥的原状试样为高50 cm的圆柱体, 直径均为10 cm。填土结构较为松散, 淤泥结构完整, 整体成灰黑色, 质地较软。黏土呈红褐色, 韧性较高, 具有明显的层理特征, 局部存在锈蚀状斑点。

1.2 基本物性

土体的基本物性见表2, 其中填土由于粒径较大, 黏聚强度较小, 为结构松散的粗粒土, 因此不具备明显的可塑性变化特性。同时, 由于液塑限主要由颗粒自身的特性决定, 真空联合堆载预压仅能改变土体的结构性, 而不会改变颗粒自身的物理特性, 因此对土体液塑限的影响并不显著, 本研究仅对ZK1号孔的淤泥及黏土开展了界限含水率试验,

表1 试样信息

Table 1 Sample information

编号	类型	取样深度/m	编号	类型	取样深度/m	编号	类型	取样深度/m
ZK1-1	填土	0.8~1.0	ZK1-6	淤泥	24.0~24.5	ZK2-2	淤泥质土	14.5~15.0
ZK1-2	填土	1.0~1.2	ZK1-7	黏土	26.2~26.4	ZK2-3	淤泥质土	16.5~17.0
ZK1-3	填土	1.2~1.4	ZK1-8	黏土	26.6~26.8	ZK2-4	黏土	25.6~25.8
ZK1-4	淤泥	19.0~19.5	ZK1-9	黏土	26.8~27.0	ZK2-5	黏土	26.0~26.2
ZK1-5	淤泥	21.0~21.5	ZK2-1	淤泥质土	12.5~13.0	ZK2-6	黏土	26.2~26.4

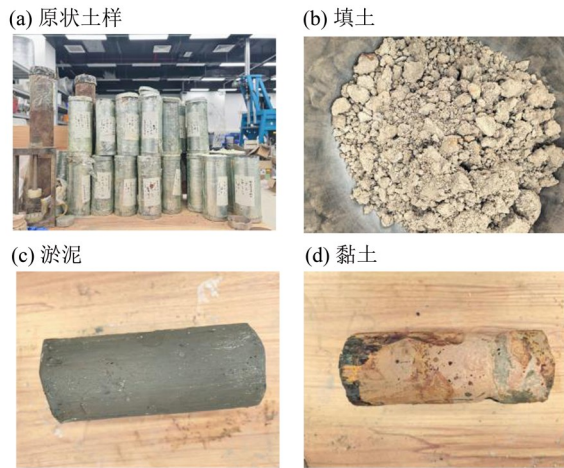


图1 不同类型的原状试样

Fig. 1 The types of original specimens

测定了不同土样的天然含水率 ω_0 、塑限 ω_p 和液限 ω_L , 进一步计算得到塑性指数 I_p 和液性指数 I_L 。

由基本物性参数可以看出填土的含水率较低, 黏土含水率适中; 淤泥天然含水率较高, 塑性指数大, 在天然状态下接近于流动状态, 工程特性较差。通过对 ZK1 和 ZK2 土样的含水率进行比较, 能够发现经过真空堆载预压处理后的区域, 土体的天然含水率更低, 证明真空联合堆载预压有效增强了土体的结构性, 土体内部颗粒接触更为紧密, 孔隙水含量进一步降低。

2 三轴剪切试验

土体的抗剪强度参数等是地基设计中的重要参考指标。对不同土体开展固结不排水常规三轴试验, 获取对应的抗剪强度参数、偏应力-应变关系及孔压曲线等, 并由试验结果进一步分析路桥过渡段土体的力学特性。

2.1 试验方案

对不同钻孔、土体类型试样进行固结不排水三轴试验。根据土样埋深, 确定试验的 3 个围压分别为 50、100、150 kPa。为充分反映现场土体的力学特

性, 试样采用原状试样进行加载, 通过切土器将原状试样切削为直径 39.1 mm, 高度 80 mm 的圆柱体试样。试验装置采用湖南拓新 TXTSZ-1.5 土工动静三轴试验仪, 试验采用应变控制, 剪切速率为 0.1 mm/min, 当轴向应变达到 15%, 视为试验结束。

2.2 试验结果

试样固结完成后, 开始剪切, 然后对加载过程中试样的偏应力、轴向应变及孔隙水压力进行监测。不同种类土样的偏应力-应变和孔压曲线(部分), 如图 2 所示。同时, 基于试样的峰值剪切强度, 根据摩尔库伦理论求解不同种类试样的抗剪强度参数, 如表 3 所示。

由试样的偏应力-应变曲线可知, 填土试样以应变软化特性为主, 加载初期应力呈线性增加趋势, 到达峰值点后应力显著降低。淤泥及黏土试样以应变硬化特性为主, 加载初期应力增长较快, 且应力增加速率随着围压的增大而增加; 随着应变的持续增加, 试样逐渐进入屈服阶段, 应力增长速率减小, 但应变持续增大, 进入塑性流动状态。由孔隙水压力曲线可知, 在加载初期, 试样通常先发生体缩现象, 颗粒之间排列更为紧密, 孔隙体积减小; 试样内部的孔压通常会先增大, 随着应变的持续增加, 孔压达到峰值点, 试样转为体胀, 颗粒结构被破坏, 孔隙体积增加, 孔压随之持续减小。

对土样的有效抗剪强度进行分析, 发现填土的内摩擦角最大、黏聚力最小, 黏土的黏聚力和内摩擦角均大于淤泥。对真空联合堆载预压处理前后的土体抗剪强度进行分析。以淤泥为例, 未经处理的淤泥黏聚力为 8.479 kPa, 内摩擦角为 19.807°。真空联合堆载预压处理后, 淤泥质土的黏聚力为 10.580 kPa, 内摩擦角为 24.755°, 黏聚力和内摩擦角显著提升, 表明预压处理显著增强了土体的抗剪强度。这主要是因为真空联合堆载预压过程中, 土体内部孔隙水排出, 孔隙进一步减少, 土颗粒之间的相互作用更为紧密, 导致土体结构的密实度提高,

表2 不同钻孔口试样的物理特性

Table 2 Physical properties of different drilled samples

钻孔口	试样类型	ω_0	ω_p	ω_L	I_p	I_L	%
ZK1	填土	11.13	/	/	/	/	
ZK1	淤泥	46.56	25.10	45.20	20.10	1.06	
ZK1	黏土	29.33	20.56	40.00	19.44	0.43	
ZK2	淤泥质土	44.30	/	/	/	/	
ZK2	黏土	28.77	/	/	/	/	

颗粒之间的嵌锁作用增强。真空联合堆载预压引起的土体结构变化有助于形成较稳定的颗粒骨架

体系, 进一步提升土体的黏聚力和内摩擦角。

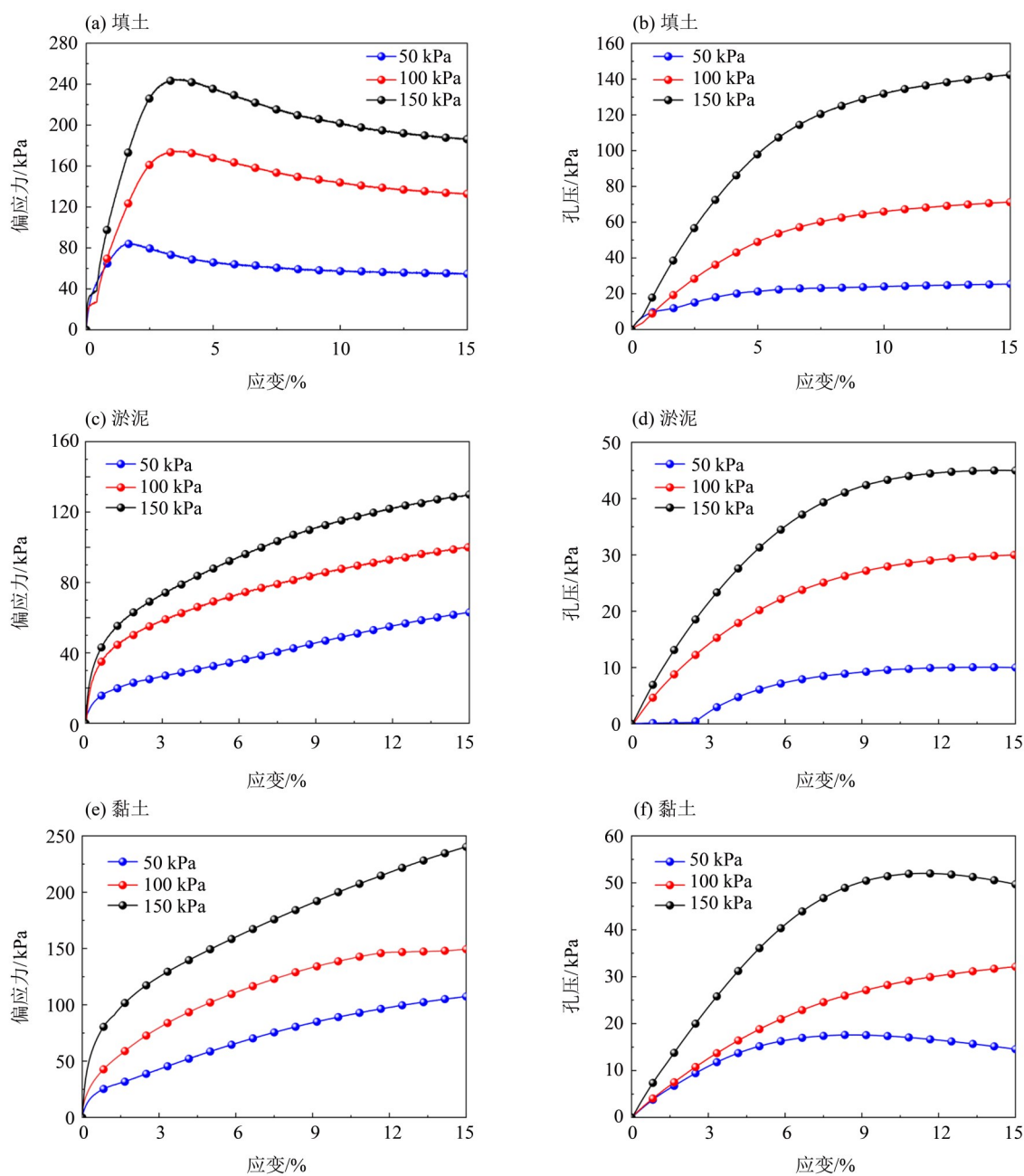


图2 ZK1试样常规三轴试验结果

Fig. 2 Results of conventional triaxial test of ZK1 specimens

表3 不同试样的抗剪强度参数

Table 3 Shear strength parameters of different specimens

土样类型	试验方法	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
ZK1 填土	固结不排水	1.511	36.957
ZK1 淤泥		8.479	19.807
ZK1 黏土		11.065	27.849
ZK2 淤泥质土		10.580	24.755
ZK2 黏土		16.032	31.032

3 SEM 试验

为了深入地阐述土体的微观结构与宏观特性之间的关联机制,开展了SEM电镜扫描试验。对不同试样在高放大倍率下的微观结构进行分析,得到了其内部的孔隙分布,以及各种具体的几何参数和统计参数。

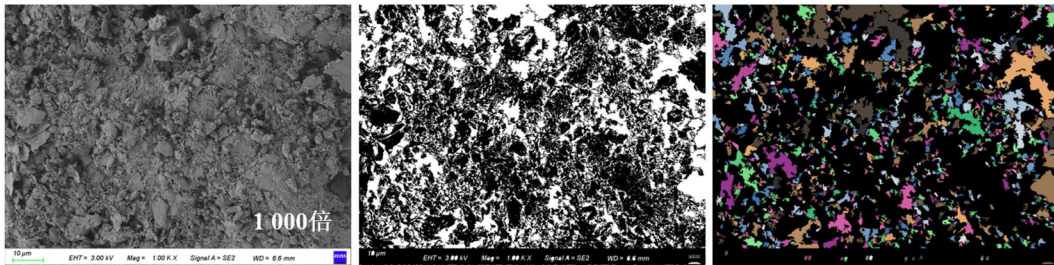
3.1 试验方案

从原状试样中选取部分代表性土样,使用冷冻干燥机在目标冻干工艺下进行快速冻干,冻干结束后取大小合适的试样进行研究。然后,通过在冻干试样表面喷金,消除试样荷电现象,增加试样表面的导电性。最后,采用PCAS软件对SEM图像进行分析,提取能够描述微观结构特征的相关参数,定量分析微观结构的演化机理。

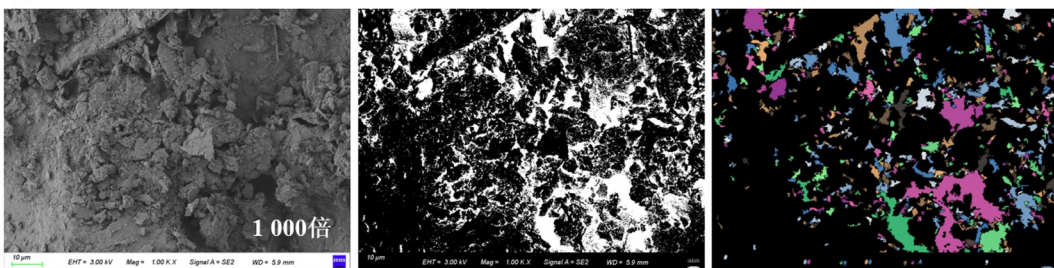
3.2 试验结果

对0.8~27.0 m取样深度范围内的试样开展SEM测试,试样编号如表1所示。由于土体结构致密,土颗粒较小,选取放大倍率为1 000倍的SEM图像进行分析。对于SEM图像而言,其大小是由像素控制,颜色的深浅通过灰度反映,不同的阈值对应着不同的灰度,通常设定全局阈值,将多值数字图像进行二值化,进一步分析土体内部的孔隙分布情况。分析结果如图3~5所示。图3~5为真空联合堆载预压前区域的土体微观结构。填土的结构最为松散,形成了松散而均匀的较大孔隙结构,其孔隙分布明显大于淤泥和黏土。淤泥试样以叠片状结构和蜂窝结构为主,随着深度的增加,孔隙结构由疏松逐渐趋向于致密。黏土试样以絮状结构为主,土体结构最为致密,无明显的大孔隙,主要以小孔隙为主。

(a) ZK1-1填土: SEM原图、二值化图、孔隙识别图



(b) ZK1-2填土: SEM原图、二值化图、孔隙识别图



(c) ZK1-3填土: SEM原图、二值化图、孔隙识别图

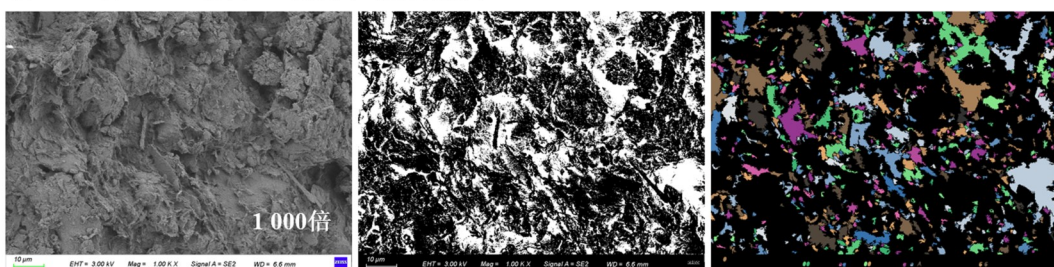
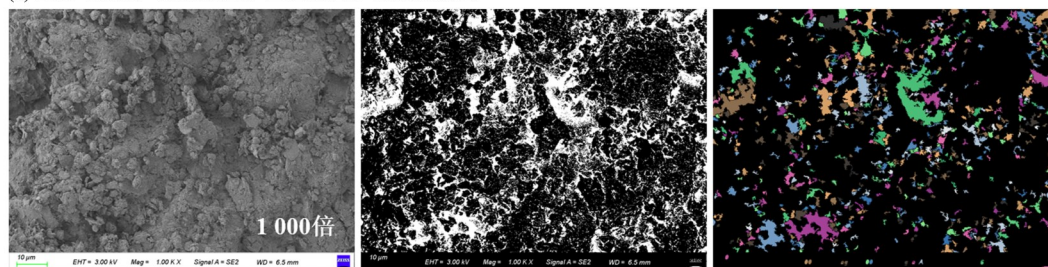


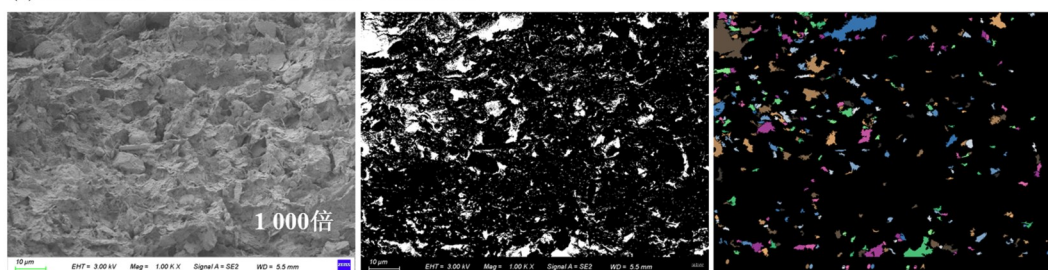
图3 ZK1-1,ZK1-2,ZK1-3试样的SEM结果

Fig. 3 SEM results of ZK1-1,ZK1-2, and ZK1-3 specimens

(a) ZK1-4淤泥: SEM原图、二值化图、孔隙识别图



(b) ZK1-5淤泥: SEM原图、二值化图、孔隙识别图



(c) ZK1-6淤泥: SEM原图、二值化图、孔隙识别图

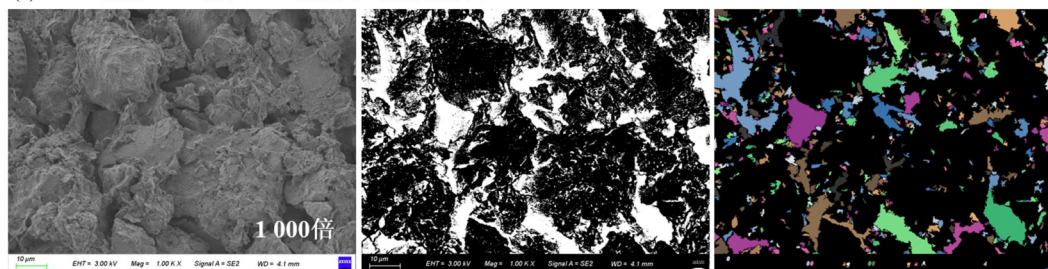


图4 ZK1-4,ZK1-5,ZK1-6试样的SEM结果

Fig. 4 SEM results of ZK1-4,ZK1-5,and ZK1-6 specimens

真空联合堆载预压处理后土体的微观结构见增强出版:附图1。土样内部的孔隙分布相较未处理前更为分散,淤泥质土和黏土内部的孔隙更小,土样结构更为致密,表面趋于平整,形状趋于平均,表明真空联合堆载预压显著促进了土体内部微观结构的密实,显著促进了淤泥质土及黏土微观结构由松散转向致密,整体结构性显著增强。

3.3 定量分析

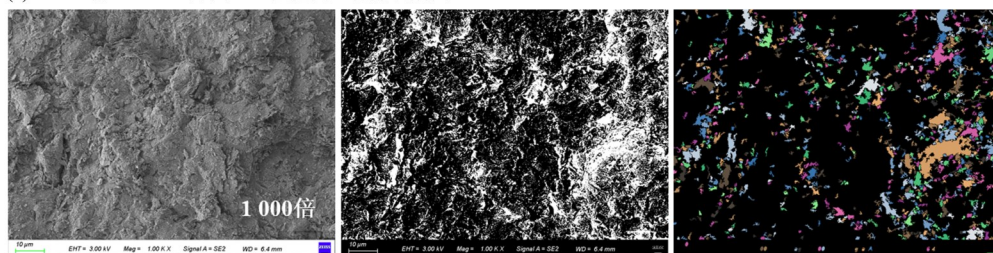
为分析不同土样的颗粒定向性,对各试样的SEM图像进行二值化处理后,统计颗粒长轴与X轴的方向角,绘制定向玫瑰图,并将相关信息汇总于表4。玫瑰图中的角度代表颗粒的方向分布区间,半径表示在该方向上出现的频率。玫瑰图能够直观反映土体内部微观结构的各向异性,从而确定不同土体的颗粒定向角分布情况。其中,ZK1试样的方向玫瑰图如图6所示。

由定向玫瑰图可以发现,土颗粒之间存在一定的方向,部分试样存在两个主方向,玫瑰图呈现

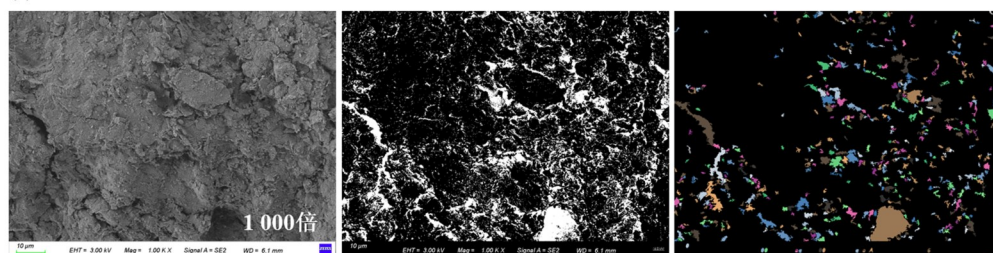
“X”型。填土试样的玫瑰图整体较为均匀,分布形态接近圆形,各方向幅值差异不明显,孔隙方向性特征不明显,表明填土试样内部孔隙排列随机,受天然沉积作用的影响较弱,内部结构较为松散。淤泥试样通常呈现出明显的方向性,表现出沿特定方向伸展的长轴状态,表明孔隙具有一定的取向性。黏土试样的玫瑰图更为规整,整体接近圆形,中心更为紧密,幅值分布均匀,说明黏土内部孔隙较小且排列较为紧密,整体方向性较弱,具有一定的各向同性。

表4中的概率熵是反映土体中颗粒规则程度的重要指标,是指土体微观结构单元体排列的有序性,取值在0~1之间。当概率熵为0时,所有颗粒排列的有序性最高;当概率熵为1时,颗粒排列混乱,有序性最低。土体的概率熵范围为0.9519~0.9935,表明颗粒排列方向有序性较低,颗粒在土体中虽然有一定的主方向,但是分布较为无序,整体上呈现混乱排列。对相同种类、不同深度

(a) ZK1-7黏土: SEM原图、二值化图、孔隙识别图



(b) ZK1-8黏土: SEM原图、二值化图、孔隙识别图



(c) ZK1-9黏土: SEM原图、二值化图、孔隙识别图

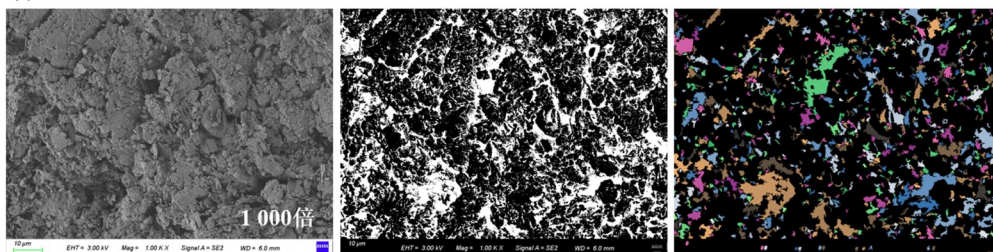


图5 ZK1-7,ZK1-8,ZK1-9试样的SEM结果

Fig. 5 SEM results of ZK1-7,ZK1-8,and ZK1-9 specimens

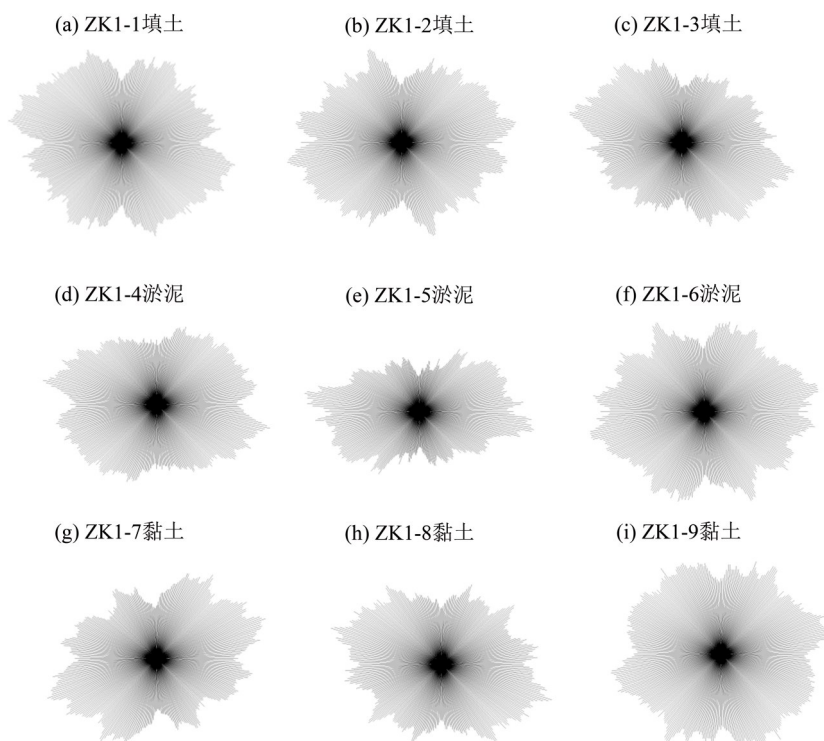


图6 ZK1试样的方向玫瑰图

Fig. 6 Orientation rose diagram of ZK1 specimens

表4 不同试样的微观统计参数
Table 4 Microscopic statistical parameters of different samples

编号	概率熵	平均形状系数	分布分维
ZK1-1	0.990 3	0.358 7	2.279 5
ZK1-2	0.984 2	0.361 7	2.141 2
ZK1-3	0.979 9	0.361 9	1.917 5
ZK1-4	0.986 3	0.338 8	2.625 4
ZK1-5	0.951 9	0.390 6	2.453 4
ZK1-6	0.990 2	0.379 4	2.077 8
ZK1-7	0.979 7	0.336 0	3.242 3
ZK1-8	0.986 1	0.361 3	2.929 0
ZK1-9	0.993 5	0.360 2	2.216 6
ZK2-1	0.972 2	0.377 2	2.607 8
ZK2-2	0.983 0	0.347 1	2.513 8
ZK2-3	0.988 0	0.387 4	2.092 2
ZK2-4	0.979 6	0.338 2	3.059 9
ZK2-5	0.974 0	0.350 7	2.259 4
ZK2-6	0.957 5	0.347 8	2.195 3

的土样概率熵进行对比,发现随着填土深度的增加,概率熵明显降低,颗粒之间的有序性增强,颗粒排列呈现出一定的方向性。但对于淤泥和黏土,随着取样深度的变化,概率熵的变化并不明显。

形状系数能够反映孔隙边缘的粗糙程度,最大值为1.0,对应图形为圆形;正方形形状系数为0.785,孔隙的复杂程度随着形状系数的增大而呈现出降低的趋势。对比ZK1和ZK2钻孔口试样的平均形状系数,真空联合堆载预压后平均形状系数相较于未处理土体的平均形状系数普遍更小,最小为0.336。真空联合堆载预压处理使土体的形状系数减小,孔隙形状相较于未处理土样更为复杂粗糙,说明颗粒间接触增强,结构增强显著。随着取样深度的增大,同样土样的平均形状系数并未表现出明显的变化。

分布分维越大,土体中颗粒分布越分散,颗粒间团聚行为减弱,即集团化程度降低。颗粒的分布分维与土体的凝聚力之间存在一定的关系,当分布分维越小时,颗粒之间的分布更为紧凑,土体之间的凝聚力也更大。对于同一种类土体,随着试样深度的增加,土体的概率熵明显降低。对比ZK1和ZK2钻孔口的淤泥和黏土,未处理前淤泥分布分维为2.625 4,黏土分布分维为3.242 3;真空联合堆载预压处理后土体的分布分维显著降低,淤泥的分布分维为2.607 8,黏土分布分维为3.059 9,颗粒之间

的集团化程度增强,土颗粒之间的凝聚力增大,这与室内三轴试验的结论相符。

4 结 论

针对珠海地区路桥过渡段土体,开展了基本物性、三轴剪切和SEM试验,得到以下结论:

1)原状试样中,填土的含水率较低,黏土含水率适中,淤泥天然含水率较高,最接近流动状态。真空联合堆载预压处理后,各类土体的含水率显著降低。

2)原状试样加载过程中,填土表现为应变软化,黏土和淤泥表现为应变硬化,填土内摩擦角最大、黏聚力最小,黏土的黏聚力和内摩擦角均大于淤泥。真空联合堆载预压处理后淤泥及黏土的抗剪强度更高,表明处理措施显著提升了承载性能。

3)由SEM结果可知,处理前试样的分布分维随着取样深度的增加显著减小,颗粒分布更加集中,凝聚力进一步增强。真空联合堆载预压处理后,土样的概率熵、形状系数和分布分维均有明显的变化,试样内部孔隙减小,颗粒有序性增强。

4)真空联合堆载预压处理后,颗粒之间的凝聚力进一步增强,宏观强度参数与微观结构的变化趋势基本一致,验证了该处理措施对土体内部结构的改良作用。

参考文献:

- 陈娇, 2023. 珠海横琴某厚层软土地真空预压地基处理分析论证[J]. 城市建设理论研究, (33):160-162.
- 陈文华, 万兵, 刘际付, 等, 2024. 珠海地区软土基坑支护桩变形异常分析[J]. 山西建筑, 50(8):70-73.
- 董浩军, 2025. 真空预压在软土地基处理中的应用研究[J]. 广东建材, 41(4):145-148.
- 郝腾飞, 刘勇, 2023. 某高速公路桥头过渡段深层软土路基沉降控制方案探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 34(2):56-58.
- 扈胜霞, 李平, 吴小强, 等, 2014. 预压作用下软土固结蠕变及微观结构试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 10(3):611-618.
- 李朝蓉, 2023. 深厚软土地基路段差异沉降特性研究[D]. 广州:华南理工大学.
- 李栋, 彭松, 常丹, 等, 2023a. 基于压汞试验的珠海软土微观孔隙特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 42(S2):4289-4298.
- 李栋, 吴宏生, 李学, 等, 2023b. 珠海软土HSS模型参数试验研究[J]. 中山大学学报(自然科学版中英文), 62(2):137-145.
- 梁志鑫, 孙红, 牛富俊, 等, 2024. 三轴加载条件下路基软土微观结构演化研究[J]. 交通科学与工程, 40(3):27-34.
- 刘燕琼, 2025. 真空预压技术在地基处理中的应用及其效果分析[J]. 上海建设科技, (1):61-65.
- 卫俊杰, 凌飞, 陈玉林, 等, 2024. 珠海富水软土小应变硬化参数试验研究[J]. 中山大学学报(自然科学版中英文), 63(4):132-140.
- 吴土明, 2025. 路桥过渡段路基路面设计要点及沉降处理策略分析[J]. 凿岩机械气动工具, 51(2):118-120.
- 赵冠华, 朱俊波, 常浩, 等, 2024. 路桥过渡段刚柔连续过渡结构研究[J]. 公路, 69(1):16-23.
- CAI H, ZHANG Q, YE G, 2020. Numerical simulation on undrained cyclic triaxial test of soft marine clay considering end restrictions of soil specimen [J]. Ocean Eng, 216:108100.
- LIU W, TAN J, LV W, et al, 2025. Characteristics and predictions of accumulative deformation of structured soft soil under long-term cyclic loading [J]. Soil Dyn Earthq Eng, 189:109088.
- SUN H, HOU M, CHEN C, et al, 2020. Microstructure investigation of soft clay subjected to triaxial loading[J]. Eng Geol, 274:105735.
- YANG J, CUI Z, XI B, et al, 2024. Experimental study on cyclic triaxial behaviors of saturated soft soil considering time intermittent and variable confining pressure [J]. Soil Dyn Earthq Eng, 179:108508.

(责任编辑 王海蓉)