李识博,田宇轩,马建全,等.硫酸盐对饱和黄土动孔压影响及孔压模型研究[J].地震工程学报,2027,49(1):94-102.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250424004

Li Shibo, Tian Yuxuan, Ma Jianquan, et al. Effects of sulfates on the dynamic pore pressure in saturated loess and the corresponding pore pressure model[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 94-102. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250424004

硫酸盐对饱和黄土动孔压影响及孔压模型研究

李识博[1], 田宇轩[1], 马建全[1], 安玉科[2], 赵晓杰[3], 邱勇强[4]

(1. 西安科技大学 地质与环境学院,陕西 西安 710054;
2. 甘肃省公路交通建设集团有限公司,甘肃 兰州 730030;
3. 金堆城钼业股份有限公司矿山分公司,陕西 渭南 714100;
4. 中冶地集团西北岩土工程有限公司,陕西 西安 710061)

摘要:饱和黄土在动力荷载下的孔隙水压力特性直接影响土体液化潜能,而硫酸盐(如Na_2SO_4)的存在可能通过改变其结构性和渗透性进一步改变这一过程。以甘肃省永靖县黑方台灌区黄土为研究对象,开展一系列动三轴试验,分析不同硫酸盐含量及围压条件下饱和重塑黄土的动孔隙水压力响应规律,探究硫酸盐及围压对孔隙水压力累积、增长速率的影响。试验结果表明:多级荷载作用下动孔隙水压力曲线均呈"阶梯状"增长;围压对动孔隙水压力的增长速率及幅值具有抑制作用;硫酸盐含量存在1.0%临界值,低于该值时促进孔隙水压力增长,高于该值则产生抑制效果;引入含盐系数与修正参数建立动孔隙水压力模型,验证结果表明该模型可有效预测含盐黄土的孔隙水压力演化规律($R^2>0.97$)。

关键词:硫酸盐;饱和黄土;动孔隙水压力;孔隙水压力模型

中图分类号:TU411.8 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2027)01-0094-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250424004

Effects of sulfates on the dynamic pore pressure in saturated loess and the corresponding pore pressure model

Li Shibo[1], Tian Yuxuan[1], Ma Jianquan[1], An Yuke[2], Zhao Xiaojie[3], Qiu Yongqiang[4]

(*1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*
2. Gansu Highway Traffic Construction Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, Gansu, China;
3. Mine Branch of Jinduicheng Molybdenum Co., Ltd., Weinan 714100, Shaanxi, China;
4. China Metallurgical Group Northwest Geotechnical Engineering Co., Ltd., Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The characteristics of the pressure in the pore water of saturated loess under dynamic loading directly influence its liquefaction potential. The presence of sulfates may affect these characteristics

收稿日期:2025-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41602359);甘肃省重点研发计划(22YF11GA302)

第一作者简介:李识博(1987-),女,博士,副教授,主要从事岩土体稳定与地质灾害防治方面的的教学与科研工作。E-mail:lishibo@xust.edu.cn。

通信作者:马建全(1983-),男,博士,副教授,主要从事岩土体稳定与地质灾害防治方面的的教学与科研工作。E-mail:majianquan@xust.edu.cn。

by altering the structure and permeability of the soil. This study investigates remolded loess from the Heifangtai Irrigation District in Yongjing County, Gansu Province, through a series of dynamic triaxial tests. The response of the pressure in the pore water was analyzed for various Na_2SO_4 contents and confining pressures. The results indicate that under multi-stage cyclic loading, the dynamic pore water pressure curve exhibits a stepwise growth pattern and that confining pressure inhibits both the rate and magnitude of pore water pressure development. A critical sulfate content of 1.0% was identified: sulfates promote pore water pressure accumulation below this threshold, whereas they inhibit pressure accumulation above it. A new model incorporating a salinity coefficient and correction parameters is therefore proposed to describe the dynamic evolution of the pore water pressure, demonstrating high predictive accuracy ($R^2>0.97$) for saline loess. These findings improve the understanding of pore pressure behavior in sulfate-bearing loess under dynamic conditions.

Keywords: sulfate; saturated loess; dynamic pore pressure; pore water pressure model

0　引言

动荷载作用下孔隙水压力的发展规律是决定土体变形与强度演化的关键因素[1]。黄土多分布于地震高发区域，地震荷载作用下土体孔隙水压力会短时间快速上升，土体内有效应力随之降低，进而诱发黄土液化灾害[2-3]，如海原地震即引发了大范围黄土液化现象[4-5]。我国是全球黄土分布面积最广、沉积厚度最大的国家，黄土覆盖面积约 6.3×10^5 km^2，约占全国陆地总面积的6.6%[6]。因此，探究黄土液化过程中孔隙水压力增长对土体变形破坏的影响具有重要工程意义。

黄土属于特殊含盐土体，内部易溶盐含量与孔隙水压力变化均会显著改变其工程力学特性。一方面，黄土中氯盐、硫酸盐、碳酸盐等易溶盐的类型与浓度是控制土体抗剪强度的核心因素。现有研究表明，盐分对土体强度的影响呈现复杂非线性特征，例如黄土强度随NaCl浓度升高表现为先增后减的变化规律，说明盐分浓度存在临界阈值[7]。盐分与土体强度存在明确关联，但二者的作用机制、临界阈值会随土性、盐分种类及试验条件改变而存在差异[8-9]。另一方面，孔隙水压力演化是影响土体强度与变形行为的另一重要因素。围绕饱和黄土的孔隙水压力特性，国内外学者开展了大量室内试验研究：揭示了饱和黄土孔压累积增长规律及主控因素[10-11]；构建并讨论了多因素耦合下的孔隙水压力增长模型[12-13]；分析了应力路径、原状/重塑试样等条件对孔隙水压力响应及土体强度的影响[14-16]；同时评估了各类现有孔压模型的适用范围[17]。上述研究共同证实，饱和黄土的动孔隙水压力响应受应力路径、土体结构、荷载特征等多因素共同控制，演化规律复杂。尽管饱和砂土孔隙水压力增长机制已形成较为成熟的研究体系[18-19]，但黄土具备大孔隙、垂直节理等独特结构性，使其动荷载下孔隙水压力的累积速率、增长模式与砂土存在显著区别。针对该差异，诸多学者基于动三轴试验建立了适用于黄土的孔隙水压力预测模型[20-26]。

综上，现有研究大多单独探讨易溶盐对黄土抗剪、动强度的作用规律，或仅分析孔隙水压力的演化特征，针对盐分与孔隙水压力耦合效应的综合研究较为匮乏。尤其在饱和含盐黄土动力特性领域，盐分-孔隙水压力协同作用机理尚不清晰；同时现有孔隙水压力模型在含盐环境、复杂应力路径下的适用性存在明显局限。鉴于此，本文在前人研究基础上以黑方台黄土为试验材料，采用动三轴仪开展不同围压、不同含盐量对比试验，分析盐分、围压对饱和黄土动孔隙水压力累积增长特征的影响，并建立对应的饱和黄土动孔隙水压力预测模型。本文研究成果可为黄土地区动孔隙水压力演化规律相关研究提供理论支撑。

1　试样及试验方案

1.1　试样采集及基本物理性质

本次研究取样区域为甘肃省永靖县黑方台某滑坡后壁，土体呈灰黄色，含少量植物根系。取样点坐标为 36°06′35.15″N，103°20′11.79″E，如图 1 所示。为查明土体盐分含量情况，对滑坡后壁自下而上、水平向内开挖 1.5 m，选取 12 处点位进行取样。对取回的试样根据《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》[27]进行了易溶盐含量检测分析，检

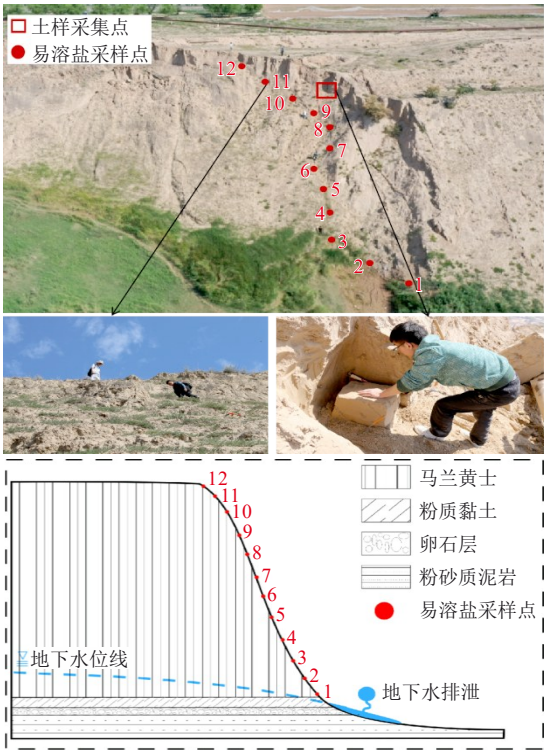


图 1　取样点及地层剖面示意图

Fig. 1　Schematic diagram of sampling points and stratigraphic profile

测结果列于表 1[7]。试样中易溶盐含量最小值为 0.29%，最大值为 1.37%，平均值为 0.70%。其中，阳离子以 Na^+ 与 K^+ 为主，最大含量可达 3 084 mg/kg；阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主，SO_4^{2-} 含量最大可达 8 982 mg/kg。上述数据表明，土样中易溶盐主要是以 Na_2SO_4 与 NaCl 为主。通过室内试验得到所取土样的基本物理性质，如表 2 所列。采用激光粒度仪对土样进行粒度分析，得到天然黄土土样粒径级配曲线，如图 2 所示。

表 1　土样易溶盐成分及含量

Table 1　Composition and content of soluble salts in soil samples

分类	可溶盐成分及含量/(mg/kg)						易溶盐含量/%
	$Na^+ + K^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	
最小值	222	61	326	107	44	1 531	0.29
最大值	3 084	486	1 152	534	1 598	8 982	1.37
平均值	954	170	676	237	568	3 219	0.70

表 2　土样基本物理性质

Table 2　Basic physical properties of soil samples

干密度 ρ/(g/cm^3)	天然含水率 ω/%	孔隙比 e	相对密度 G_S	液限 ω_L/%	塑限 ω_P/%	土性分类
1.45	7.01	0.88	2.71	25.66	14.64	黏质粉土

1.2　试样制备

洗盐处理[28]：向土样中加入去离子水并充分搅拌均匀，静置 24 h 后抽取上层浸出液，再次加注去离子水，重复该流程若干次。逐次测定浸出液电导率，当电导率低于 1 000 μS/cm 时，初步判定洗盐满足试验要求。再采用化学试剂复检洗盐效果：向浸出液中分别滴加氯化钡溶液、硝酸银溶液，观察有无白色沉淀生成；若出现白色沉淀，则继续用去离子水洗盐并重复上述检测，直至无白色沉淀析出，即代表洗盐完成。

常规试样制备流程：将洗盐后的土样置于烘箱，105 ℃恒温烘干 24 h；冷却至室温后碾碎，过 2 mm 筛。将筛后干土分层装入配样盒，每层均匀喷洒纯

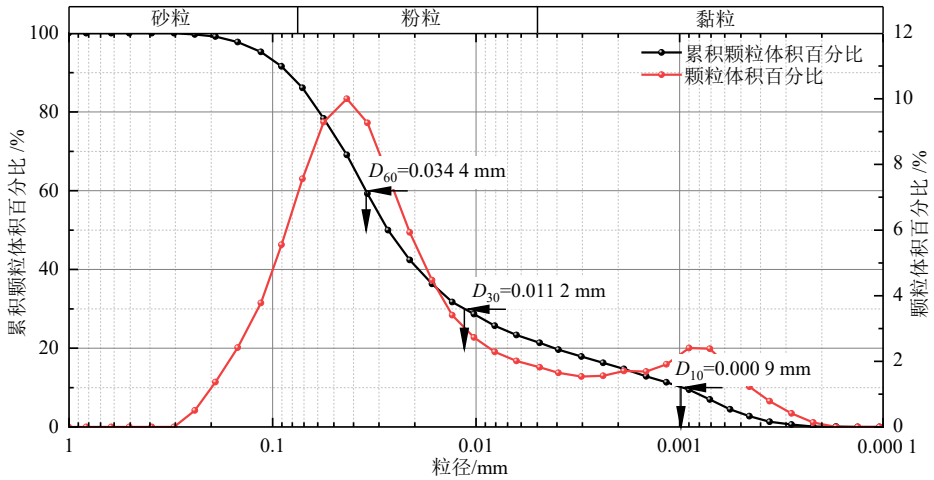


图 2　土样粒径级配曲线

Fig. 2　Particle-size grading curves of soil samples

水调配至天然含水率，静置 24 h 使水分充分渗透，之后充分拌匀。

含盐试样制备流程：黄土中典型易溶盐包含氯盐、硫酸盐、碳酸盐等，含盐量对黄土强度的作用规律受盐分种类、浓度共同控制[28-31]。现有多数研究证实，硫酸盐对黄土土体结构的损伤效应更为突出[32]，因此本文选取硫酸钠制备含盐试样。含盐量以硫酸钠与干土质量百分比表征，制备流程与常规试样基本一致；需提前配制硫酸钠溶液，与过筛干土充分拌合，静置 24 h，保证盐分完全溶解并均匀赋存于土体内部。

三轴试样制备流程：本试验采用 Φ38 mm×h76 mm 标准重塑三轴试样。制样时按照目标干密度分四层击实，利用三轴制样器将土体压制至对应孔隙比的高度；每层击实完成后对层面刮毛，增强层间结合，规避分层缺陷。制样完成后将试样置于保湿盒静置 24 h，使土体状态趋于稳定。

1.3　试验仪器及试验方案

试验设备采用德国 WILLE 公司 LO7010/5/DYM 非饱和动静三轴仪。试验动荷载选用等幅正弦循环荷载，荷载幅值由最大动应力 σ_{1max}、最小动应力 σ_{1min} 控制（二者分别代表单次振动循环内动应力峰值、谷值），采用分级加载方案，加载工况列于表 3。

表 3　试验加载方案

Table 3　Experimental loading protocol

Na_2SO_4 含量/%	有效围压 σ_0'/kPa	σ_d/kPa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.0 0.3 0.7 1.0 1.4	50	σ_{1max}	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
		σ_{1min}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100	σ_{1max}	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
		σ_{1min}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	200	σ_{1max}	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
		σ_{1min}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

试验操作步骤：将制备好的试样套入承膜器内的橡皮膜，保证试样与橡皮膜紧密贴合无空隙；试样上下端面铺设滤纸与透水石，整体安放于三轴仪试样台；拆除承膜器，用橡皮箍紧固橡皮膜上下两端，防止水体渗入；装配压力罩并向三轴腔注水，腔体完全充水后关闭进水、排气阀门。

不排水条件下分级施加围压饱和试样，当孔隙水压力增量与围压增量之比大于 0.9 时，判定试样饱和完成；随后在 K_C（固结比）=1 的条件下完成固结。然后施加频率 1.0 Hz 正弦动荷载分级加载，共 10 级加载，加载完毕终止试验。分级加载方式：逐级提升动应力幅值，每一级动荷载循环至规定振次后，增大动荷载幅值进入下一级，依次完成全部 10 级加载。

2　试验结果分析

2.1　孔隙水压力随围压变化规律

图 3 给出了不同围压条件下，饱和黄土试样在动荷载作用下孔隙水压力比（μ_d/σ_0'）与振次比（N/N_z）的关系曲线。其中，μ_d 为孔隙水压力，σ_0' 为有效围压，N 为实验振次，N_z 为试样破坏时振次。从图 3 能够发现，不同围压下，饱和黄土的 μ_d/σ_0'-N/N_z 曲线呈现出相似的变化规律。

多级动荷载作用下，孔隙水压力呈阶梯式持续上升；整个演化过程大致可分为两个阶段：初期近似线性累积阶段与后期非线性加速增长阶段。振动初期土骨架结构相对稳定，逐级施加的动荷载使土体内部产生孔隙水压力，伴随荷载循环累积，孔压近似线性平稳增长。随动荷载持续作用，土颗粒发生重组，推动孔隙水压力持续、快速累积；荷载进一步作用后，孔压增长速率明显提升，非线性演化特征显著。

孔隙水压力比对应的拐点振次比随围压升高逐步增大。由图 3(d) 可知：围压 50 kPa 时，拐点振次比为 0.5；围压 100 kPa 时拐点振次比为 0.58；围压 200 kPa 时拐点振次比升至 0.7。饱和黄土的极限孔隙水压力比随围压增大逐步降低，图 3(a) 结果显示，围压 50 kPa、100 kPa、200 kPa 对应的最大孔隙水压力比分别为 0.57、0.47、0.23。综上可知，围压提升能够抑制孔隙水压力的增长幅度与发展速率。

2.2　孔隙水压力随硫酸盐变化规律

图 4 为不同含盐量饱和黄土试样在动荷载作用下的孔隙水压力比（μ_d/σ_0'）与振次比（N/N_z）关系曲线。由图可知，硫酸钠含量对饱和黄土孔隙水压力

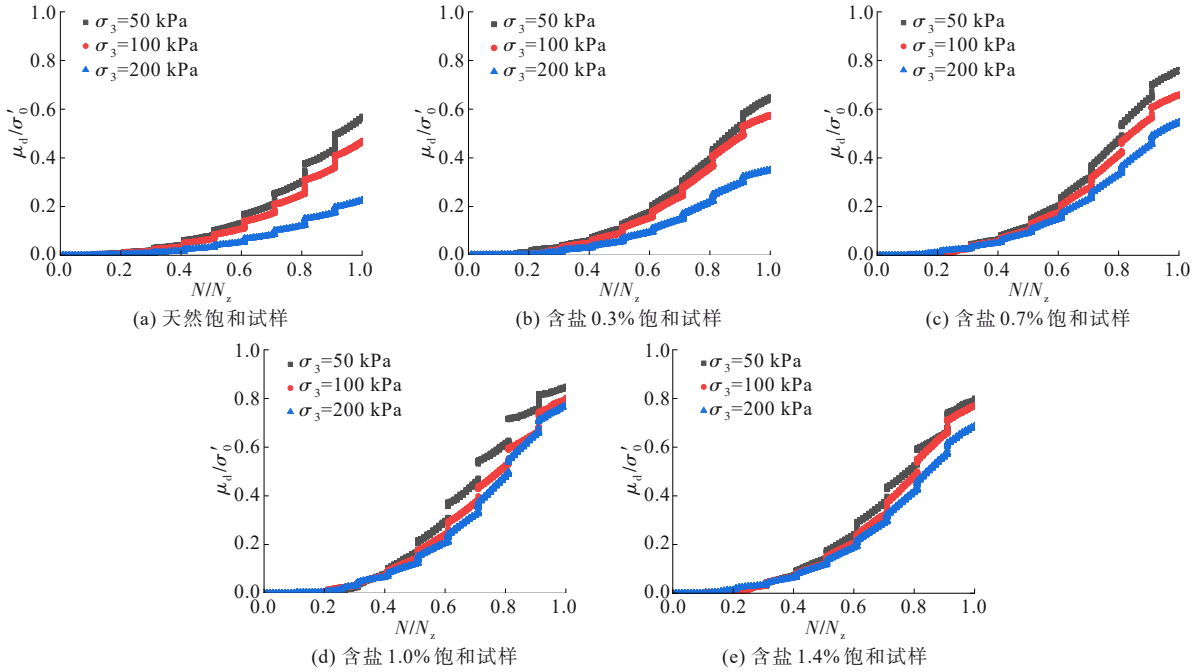


图 3 不同围压下饱和黄土孔隙水压力增长曲线

Fig. 3 Growth curves of pore-water pressure for saturated loess under different confining pressures

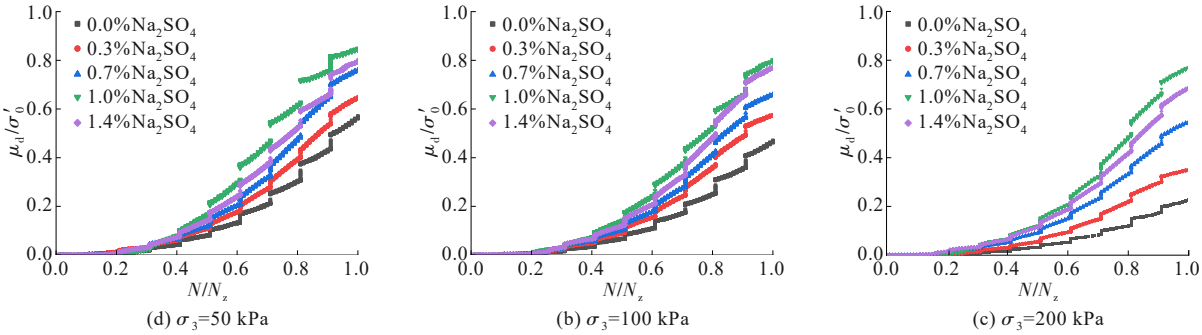


图 4 不同含盐量饱和黄土孔隙水压力增长曲线

Fig. 4 Growth curves of pore-water pressure for saturated loess with different salt contents

演化影响显著,土体孔压累积模式与不同围压下的变化规律相近,同样呈阶梯式累积增长,全过程可分为两个阶段:振动前期近似线性缓慢累积阶段、振动后期非线性加速增长阶段。从图 4(c)能够发现,掺入硫酸钠的饱和黄土,其孔隙水压力累积程度相比无盐试样明显更高;最大孔隙水压力随硫酸钠含量提升呈现先增大后减小的变化规律,即便含盐量达到 1.4%,试样最大孔隙水压力仍高于无盐饱和黄土。试验结果说明,硫酸钠掺入整体会促进饱和黄土孔隙水压力累积。

盐分含量对孔隙水压力发展特征影响明显:硫酸钠含量低于 1.0% 时,孔压增长拐点对应的振次比减小,代表孔隙水压力增长速率增大;含盐量高于 1.0% 时,拐点振次比增大,孔隙水压力速率增长随之放缓。与此同时,最大孔隙水压力比随含盐量增加先升后降。综合分析可知:低硫酸钠含量(< 1.0%)会大幅强化孔隙水压力累积效应;含盐量超过 1.0% 后,增强作用逐步减弱。

3 讨论

3.1 围压对饱和黄土孔隙水压力的影响

选取硫酸钠含量为 1.4%[图 3(e)]的试样为例,进行围压条件对饱和黄土孔隙水压力增长的影响分析。

基于图 5 选取的特征点,得到不同围压与饱和黄土各阶段孔隙水压力的对应关系,如图 6 所示。由图 6 可知:振动初期孔隙水压力比基本保持稳定。该阶段土骨架结构相对完整,可依靠自身刚度有效

传递外部动荷载，孔隙水压力无明显抬升。振动中期孔隙水压力比与围压呈正相关，该规律与土体塑性变形演化特征相关：初期循环荷载下土体结构保持稳定，随分级动荷载持续作用，土体产生塑性变形并累积孔隙水压力；围压越高，土体累积塑性变形越显著，进一步推动孔隙水压力上升。振动后期孔隙水压力比随围压升高逐步降低，主要原因在于高围压作用下土体密实度提升，颗粒间接触作用增强；同等荷载增量下，土骨架压缩变形被显著抑制，孔隙水压力增量偏小。

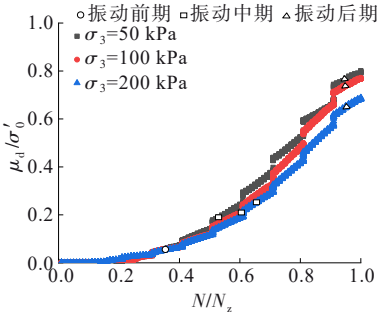


图 5　特征点选取示意图

Fig. 5　Selection of characteristic points

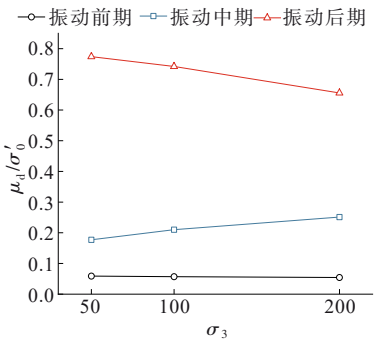


图 6　围压对饱和黄土孔隙水压力影响曲线

Fig. 6　Effect of confining pressure on pore-water pressure of saturated loess

结合图 5 分析可知，加载初期动荷载幅值较低，孔隙水压力增长速率降低；随振动次数与动荷载幅值同步提升，孔隙水压力增速明显加快并持续累积。50 kPa 围压下饱和黄土的孔隙水压力增长速率始终高于 100 kPa、200 kPa 工况。其机理为：高围压对黄土试样的约束作用更强，土颗粒挤压紧密、排列致密，土骨架密实度与颗粒间联结作用大幅提升，动荷载作用下孔隙水压力发展缓慢；低围压下土体结构相对松散，颗粒间联结较弱，动荷载易诱发土骨架大幅变形，孔隙体积快速收缩，孔隙水难以及时排出，最终造成孔隙水压力快速抬升。

综上，围压通过改变土体的密实程度、结构强度与压缩特性，是造成不同围压条件下饱和黄土孔隙水压力累积规律产生显著差异的根本因素。

3.2　盐分对饱和黄土孔隙水压力的影响

以围压 50 kPa 工况试样[图 4(a)]为例，分析含盐条件对饱和黄土孔隙水压力发展规律的影响。

基于图 7 提取特征点，绘制不同硫酸钠含量与饱和黄土各阶段孔隙水压力的对应关系曲线(图 8)。由图 7～8 可知，加载前期孔隙水压力比变化幅度较小、整体保持稳定；加载中后期孔隙水压力比变化幅度显著增大。机理分析如下：加载初期动荷载对土体结构扰动微弱，孔隙水压力变化仅由动荷载诱发的土体弹性变形及少量不可逆变形产生，孔压累积量有限，因此增长平缓。加载中后期，土体结构逐步产生明显损伤，孔隙水开始分担外部动应力，孔隙水压力变化加剧；随动荷载逐级提升，土体结构破损程度持续加深，孔隙水压力增幅进一步扩大。硫酸钠掺入改变了黄土原有结构，循环动荷载作用下含盐试样更易发生渐进式结构损伤，土骨架强度随振次增加快速衰减。盐分引发的土体结构弱化效应，是造成加载中后期孔隙水压力比大幅变化的核心原因。

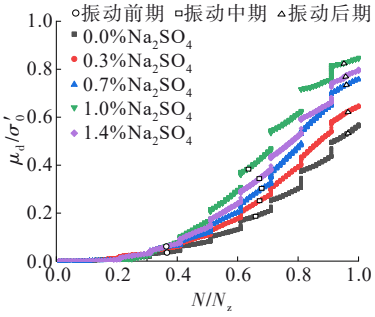


图 7　特征点选取示意图

Fig. 7　Selection of characteristic points

结合图 7 可知，随硫酸钠含量升高，饱和黄土孔隙水压力增长速率与最大孔隙水压力比均呈现先增大后减小的变化规律。当硫酸钠含量低于 1.0% 时，土颗粒表面会吸附更多 Na^+。依据双电层理论，Na^+ 可压缩土颗粒表面扩散双电层，降低颗粒间静电斥力，促使土颗粒排布更致密，孔隙通道收窄、土体渗透性下降，孔隙水难以顺利排出，进而促进孔隙水压力累积。含盐量持续提升过程中，Na^+ 还会置换土体内部高价阳离子，进一步压缩双电层，削弱土体结构稳定性，荷载作用下土体更易产生变

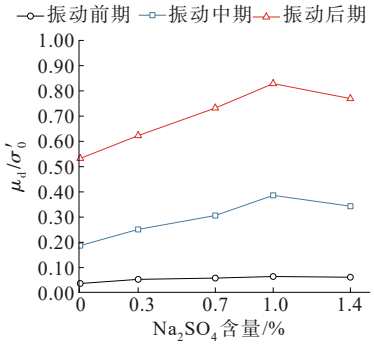


图 8 含盐量对饱和黄土孔隙水压力的影响

Fig. 8 Effect of salt content on pore-water pressure of saturated loess

形,间接加快孔隙水压力发展。

当硫酸钠含量超过 1.0% 后,过量盐分将析出硫酸钠晶体并填充土体孔隙[33]。晶体填充会缩减土体有效孔隙空间、阻碍孔隙水迁移,抑制孔隙水压力快速抬升;同时析出盐晶可与土颗粒形成胶结,强化颗粒间联结,提升土骨架刚度。此时盐晶产生的力学作用掩盖了双电层效应,土体整体结构稳定性提升,孔隙水压力增长速率降低。

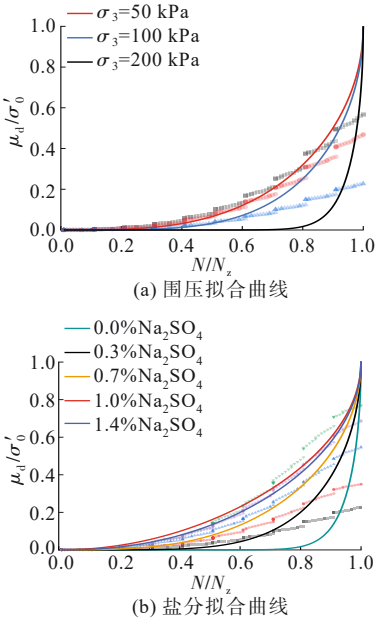
综上,低含量硫酸钠对孔隙水压力发展表现为促进作用;含盐量达到 1.4% 时,双电层已充分压缩,继续增加盐分对双电层厚度的调控效果微弱,盐结晶带来的物理力学效应占据主导。土体骨架弱化程度降低、结构支撑作用增强,该阶段孔隙水压力增长速率明显降低。该规律揭示了硫酸钠对孔隙水压力演化的双重作用机制:低盐含量条件下促进孔隙水压力累积,高盐含量时依靠盐晶析出抑制孔隙水压力增长。

3.3 饱和黄土孔隙水压力增长模型

梳理国内外动三轴试验下土体孔隙水压力演化相关研究可知:文献[22]提出,等压固结条件下孔隙水压力比与振次比满足反三角函数增长关系(图 9);国内张建民等[19]结合已有理论与大量室内试验,建立了多种孔隙水压力增长预测模型。但饱和黄土与砂土的液化机理存在明显区别,二者孔隙水压力发展规律差异显著,上述现有模型难以精准拟合本文试验结果。为此,本文在已有模型基础上引入含盐修正系数,对模型参数进行优化修正,建立可适用于多因素耦合作用下的含盐黄土孔隙水压力增长模型,具体表达式如下:

$$\frac{\mu_d}{\sigma'_0}=\frac{2}{\pi}\arcsin\left(\frac{N}{N_z}\right)^m\exp(k\mu_f)(1+\delta S) \quad (1)$$

式中:m 为试验拟合参数;k 为围压系数;μ_f 为最大孔隙水压力;δ 为含盐量系数,均由试验确定;S 为盐含量。



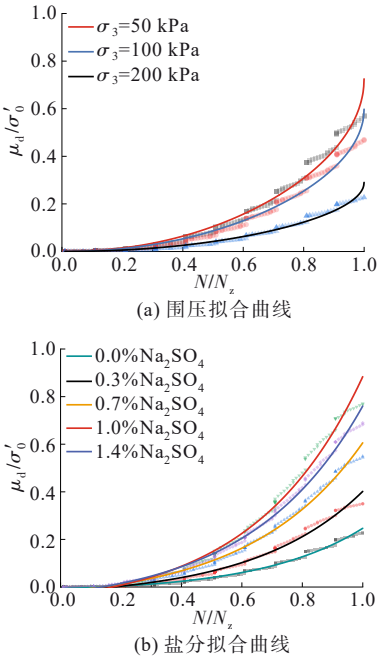
(a) 围压拟合曲线

(b) 盐分拟合曲线

图 9 Seed 函数模型拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of Seed function model

选取本文试验中图 3(a)、图 4(c)的数据,采用式(1)开展拟合,拟合结果曲线见图 10。拟合对应的模型参数与误差指标如表 4 所列。与图 9 中 Seed 模型拟合结果对比可见,本文构建的模型对试验数据的拟合精度更优。



(a) 围压拟合曲线

(b) 盐分拟合曲线

图 10 拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves

表 4　试验结果拟合参数

Table 4　Fitting parameters of test results

加载条件	参数	围压/kPa			Na_2SO_4含量/%				
		50	100	200	0.0	0.3	0.7	1.0	1.4
多级加载	m	2.152 17	2.152 11	2.152 09	2.543 97	2.602 97	2.511 07	2.611 39	2.518 8
	k	0.956 35	0.379 14	1.613 8	0.366 64	1.194 95	1.472 92	1.413 52	1.870 39
	δ	-	-	-	10	10	10	10	10
	R^2	0.979 24	0.979 24	0.979 24	0.993 3	0.993 7	0.997 2	0.993 8	0.997 2

由拟合曲线与拟合参数可知:各组曲线拟合决定系数R^2均大于0.97。由此表明,本文改进的孔隙水压力增长模型可精准拟合本次试验数据,实现对饱和黄土孔隙水压力发展过程的预测。

4　结论

本文依托动三轴试验,系统分析围压、硫酸钠含量对重塑饱和黄土孔隙水压力演化规律的影响,并开展试验数据拟合分析。结合试验结果,得到如下结论:

(1) 围压对饱和黄土孔隙水压力发展存在显著抑制作用。围压升高会降低孔隙水压力的增长速率与累积幅值,同时推迟孔压增长曲线拐点出现,延缓土体进入非线性加速增长阶段。

(2) 硫酸钠含量对饱和黄土孔隙水压力演化影响显著,存在1.0%临界含盐阈值;含盐量低于1.0%时促进孔隙水压力累积,高于该阈值则产生抑制效果。

(3) 基于本次试验数据对现有孔隙水压力模型进行修正,引入含盐修正系数,建立可同时考虑围压与含盐量作用的孔隙水压力增长模型。该模型拟合优度较高,可精准预测饱和黄土孔隙水压力的演化趋势。

参考文献(References)

[1] 王兰民. 黄土地层大规模地震液化滑移的机理与风险评估[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 1-19.
Wang Lanmin. Mechanism and risk evaluation of sliding flow triggered by liquefaction of loess deposit during earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 1-19.

[2] Konstadinou M, Georgiannou V N. Prediction of pore water pressure generation leading to liquefaction under torsional cyclic loading[J]. Soils and Foundations, 2014, 54(5): 993-1005.

[3] 王家鼎, 白铭学, 肖树芳. 强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 445-449.
Wang Jiading, Bai Mingxue, Xiao Shufang. A study on compound mechanism of earthquake-related sliding displacements on gently inclined loess slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 445-449.

[4] Cetin K O, Bilge H T. Cyclic large strain and induced pore pressure models for saturated clean sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(3): 309-323.

[5] 马星宇, 王兰民, 钟秀梅, 等. 地震诱发石碑塬黄土地层液化滑移距离研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(6): 1674-1682.
Ma Xingyu, Wang Lanmin, Zhong Xiumei, et al. Slippage distance of loess deposit triggered by earthquake-induced liquefaction in Shibeiyuan area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1674-1682.

[6] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312.
Xu Zhangjian, Lin Zaiguan, Zhang Maosheng. Loess in China and loess landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312.

[7] Zhang F Y, Wang G H, Kamai T, et al. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodium chloride solution[J]. Engineering Geology, 2013, 155: 69-79.

[8] 马建全, 邱勇强, 赵晓杰, 等. 盐分及含水率对甘肃黑方台黄土强度的影响研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(4): 819-825, 886.
Ma Jianquan, Qiu Yongqiang, Zhao Xiaojie, et al. Effects of salinity and moisture content on the strength of loess in Heifangtai, Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(4): 819-825, 886.

[9] Zhao Y H, Lai Y M, Pei W S, et al. An anisotropic bounding surface elastoplastic constitutive model for frozen sulfate saline silty clay under cyclic loading[J]. International Journal of Plasticity, 2020, 129: 102668.

[10] 曾长女, 刘汉龙, 丰土根, 等. 饱和粉土孔隙水压力性状试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1963-1966.
Zeng Changnü, Liu Hanlong, Feng Tugen, et al. Test study on pore water pressure mode of saturated silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1963-1966.

[11] 邓龙胜, 范文, 贺龙鹏. 随机地震荷载作用下黄土的液化特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1274-1280.
Deng Longsheng, Fan Wen, He Longpeng. Liquefaction property of loess under stochastic seismic load[J]. Chinese

Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1274-1280.

[12] 王兰民, 刘红玫, 李兰, 等. 饱和黄土液化机理与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 89-94.
Wang Lanmin, Liu Hongmei, Li Lan, et al. Laboratory study on the mechanism and beheviors of saturated loess liquefaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22 (1): 89-94.

[13] 陈存礼, 杨鹏, 郭娟. 等应力比应力路径下饱和原状黄土的孔压特性[J]. 水利学报, 2007, 38(8): 907-913.
Chen Cunli, Yang Peng, Guo Juan. Pore water pressure characteristics of saturated intact loess under constant stress ratio stress paths[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (8): 907-913.

[14] 郅彬,王番,胡梦玲,等.不同应力路径下饱和黄土应力应变及孔压特性分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(22): 244-248.
Zhi Bin, Wang Pan, Hu Mengling, et al.The influence of different stress path on stress and strain relation and pore pressure charac-teristic of saturated loess[J].Science Technol-ogy and Engineering,2016,16(22):244-248.

[15] 江耀, 谌文武, 孙冠平, 等. 深埋隧洞饱和原状Q_2黄土三轴剪切特性试验[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48 (3): 23-27, 33.
Jiang Yao, Chen Wenwu, Sun Guanping, et al. Test on triaxial shear properties of saturated undisturbed Q_2 loess in deep-buried tunnel[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(3): 23-27, 33.

[16] 刘建民, 邱月, 郭婷婷, 等. 饱和重塑黄土液化孔压增长模型的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 226-232.
Liu Jianmin, Qiu Yue, Guo Tingting, et al. Experimental study on pore pressure growth model of saturated remolded loess sample during liquefaction[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(19): 226-232.

[17] 代言, 邓龙胜, 毛伟, 等. 马兰黄土液化特性及孔压模型参数研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(2): 338-345, 361.
Dai Yan, Deng Longsheng, Mao Wei, et al. Liquefaction characteristics and parameters of pore-water pressure model for Malan loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 338-345, 361.

[18] 王炳辉, 陈国兴. 循环荷载下饱和南京细砂的孔压增量模型[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 188-194.
Wang Binghui, Chen Guoxing. Pore water pressure increment model for saturated Nanjing fine sand subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 188-194.

[19] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力增长的实用算法[J]. 水利学报, 1991, 22(8): 45-51.
Zhang Jianmin, Xie Dingyi. Practical algorithm for increasing vibration pore water pressure in saturated sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 22(8): 45-51.

[20] 王谦, 王峻, 王兰民, 等. 石碑塬饱和黄土地震液化机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 4168-4173.
Wang Qian, Wang Jun, Wang Lanmin, et al. Discussion on mechanism of seismic liquefaction of saturation loess in Shibei tableland, Guyuan city[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4168-4173.

[21] 张晓超, 黄润秋, 许模, 等. 石碑塬滑坡黄土液化特征及其影响因素研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 801-810.
Zhang Xiaochao, Huang Runqiu, Xu Mo, et al. Loess liquefaction characteristics and its influential factors of Shibeiyuan landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (3): 801-810.

[22] Nemat-Nasser S, Shokooh A. A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(4): 659-678.

[23] Ishac M F, Heidebrecht A C. Energy dissipation and seismic liquefaction in sands[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1982, 10(1): 59-68.

[24] Wang H J, Sun P, Liu E L, et al. Dynamic properties of Tianshui saturated remolded loess: a laboratory study [J]. Engineering Geology, 2020, 272: 105570.

[25] 胡志平, 王强, 张雨禾, 等. 应力、应变控制下压实黄土动力特性研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(6): 1161-1167.
Hu Zhiping, Wang Qiang, Zhang Yuhe, et al. Dynamic characteristics of compacted loess under controlled-stress and controlled-strain modes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1161-1167.

[26] 安亮, 邓津, 王兰民. 黄土液化微细观特性试验研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(4): 752-758.
An Liang, Deng Jin, Wang Lanmin. Experimental investigation of micro-mesoscopic features of loess liquefaction [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40 (4): 752-758.

[27] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].
GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S].

[28] 邴慧, 武俊杰, 邓津. 黄土状盐渍土洗盐前后物理力学性质的变化[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 796-800.
Bing Hui, Wu Junjie, Deng Jin. Variations of physical and mechanical properties of saline loess before and after desalting [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 796-800.

[29] 贾艳军, 庄建琦, 王颖, 等. 硫酸钠浓度对黄土强度影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1041-1047.
Jia Yanjun, Zhuang Jianqi, Wang Ying, et al. Experimental study for effect of sodium sulfate's concentration on shear strength of loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1041-1047.

[30] 马欢欢, 常立君. 水盐含量对寒旱区黄土状盐渍土强度特性和渗透特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12193-12203.

(下转第 111 页)