戴世安,崔振东,廖红建.分阶段加载条件下饱和软黏土动孔压演变规律及模型预测研究[J].地震工程学报,2027,49(1):120-129.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250729002

Dai Shian, Cui Zhendong, Liao Hongjian. Evolution and model prediction of dynamic pore pressure in saturated soft clay under staged loading conditions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 120-129. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250729002

分阶段加载条件下饱和软黏土动孔压演变规律及模型预测研究

戴世安[1], 崔振东[2], 廖红建[3]

(1. 西安交通大学城市学院 智能建造与环境学院,陕西 西安 710018;
2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116;
3. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院,陕西 西安 710049)

摘要:以高铁沿线软黏土为研究对象,通过系统的动三轴试验,探究分阶段加载条件下动应力幅值、有效平均主应力及循环应力比对孔隙水压力发展的影响规律。结果表明,相较于常规连续振动不排水条件,分阶段加载模式下不同排水条件对土体动孔压演变具有显著影响。根据试验数据,提出一种描述振动阶段孔压累积与间歇阶段孔压消散的数学模型,分别采用指数函数和对数函数表征两个阶段的孔压演化规律。通过拟合分析确定不同工况下的模型参数,结果表明模型预测结果与试验数据的吻合度较高。研究成果可为高铁软黏土地基的设计与施工提供可靠理论支撑。

关键词:分阶段加载;软黏土;动孔压;预测模型

中图分类号:TU45 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2027)01-0120-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250729002

Evolution and model prediction of dynamic pore pressure in saturated soft clay under staged loading conditions

Dai Shian[1], Cui Zhendong[2], Liao Hongjian[3]

(*1.School of Intelligent Construction and Environment, Xi'an Jiaotong University City College, Xi'an 710018, Shaanxi, China;*
2.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;
3.School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Taking the soft clay along high-speed railway lines as the research object, this study carried out systematic dynamic triaxial tests to investigate the effects of the amplitude of the dynamic stress, the effective mean principal stress, and the cyclic stress ratio on the development of pressure in the pore water under staged loading conditions. Compared with conventional analyses of continuous vibrations under undrained conditions, the results show that different drainage settings under staged

收稿日期:2025-07-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52378381);陕西省教育厅一般专项科学研究计划项目(24JK0528)

第一作者简介:戴世安(1995-),男,硕士,讲师,主要从事软土沉降方向研究。E-mail: dsa1019@foxmail.com。

通信作者:崔振东(1978-),男,博士,教授,主要从事岩土工程方向研究。E-mail: cuizhendong@cumt.edu.cn。

loading significantly influence the dynamic evolution of the pore water pressure in the soil. Based on the experimental data, a mathematical model was established to describe the accumulation of pressure in the pore water during the different vibration stages and its dissipation during the intermittent stages. Exponential and logarithmic functions were used to characterize the pore pressure evolution in these two stages, respectively. Through a fitting analysis, the model parameters were determined under different working conditions, and the model predictions agreed well with the experimental data. These findings provide reliable theoretical support for the design and construction of soft clay foundations for high-speed railways.

Keywords: staged loading; soft clay; dynamic pore pressure; prediction model

0　引言

高速铁路的快速发展对软黏土地基的稳定性和长期沉降控制提出了更高要求[1]。软黏土因高含水率、低渗透性和显著的压缩性，在循环荷载作用下易产生超孔隙水压力（简称“孔压”）。室内试验和原位观测数据表明，软黏土的动态响应特性中，孔压与变形模量、刚度参数之间存在显著的关联性，进而影响地基的变形特性[2-4]。特别是在高铁运营过程中，列车荷载的反复作用导致孔压的累积与消散，对软黏土地基的长期性能产生重要影响[5-6]。因此，深入研究分阶段加载条件下软黏土孔压的演变规律，对确保高铁工程的安全性和耐久性具有重要意义。

国内外学者已从多重影响因素（如温度、频率、初始应力）和复杂应力路径（如主应力轴旋转、循环围压、多向剪切）角度，对软黏土动孔压特性开展了广泛研究[7-12]。例如，丁修恒等[7]采用固结不排水动三轴试验，系统研究了温度、动应力及初始偏应力等变量对孔压的影响机制，构建了温度效应下的动孔压-振次预测模型。Matsuda等[11]通过单向与多向循环单剪试验，系统研究了高岭土在复杂应力路径下的响应，发现相较于单向剪切，多向剪切会引发更高的超孔压累积和震后沉降。然而，现有研究主要针对单一、连续的加载模式，难以体现高铁运营中周期性间歇运行的实际特征。

相对于连续加载，分阶段加载条件更能反映高铁实际运营工况，其中间歇期的排水效应对孔压的消散过程具有重要影响。雷华阳等[13]、Yıldırım等[14]、王军等[15]及丁建宇等[16]通过设置分阶段加载条件对土体动力特性进行研究，发现该加载方式对土体轴向应变及孔压的发展过程具有显著影响。Huang等[17]探讨了循环围压变化与间歇加载的共同作用，指出围压的间歇性波动会显著改变软黏土的变形机制与孔压累积路径。Liu等[18]在高岭土的间歇循环试验中，观测到孔压发展具有强烈的阶段依赖性，并分析了排水条件对消散过程的关键控制作用。Wu等[19]从本构关系角度揭示了黏土在循环与单调荷载下响应的共通性，为理解分阶段加载中的能量耗散与累积机制提供了理论依据。尽管上述研究已考虑到列车荷载的分阶段加载特性，但间歇期排水条件的设置多采用不排水或完全排水模式，与地基在自然状态下的部分排水特性存在差异，且对孔压的分析局限于定性阶段，缺乏定量研究。

现有软土动孔压预测模型大致可分为孔压-应变模型、孔压-应变软化模型、负指数模型、对数模型、幂函数模型及三角函数模型等[20-21]。孔压-应变模型[22]与孔压-应变软化模型[23]能直接表征土体应变与孔压之间的关系，但其计算结果受试验条件影响较大，且模型参数的标定过程较为复杂。负指数模型[24]在软黏土中应用较少，多用于粉土与砂土。对数模型[25]虽基于现场实测，具有较强的应用性，但未考虑循环应力比等因素。幂函数模型[26]在孔压发展初期拟合较好，但后期收敛性较差。三角函数孔压模型[27]在纯压缩不排水条件下具备一定拟合效果，但在工程适用性、参数普适性及多因素耦合影响等方面存在明显不足，仍需进一步优化。更重要的是，上述模型均针对连续不排水工况进行预测，其物理机制与数学形式决定了它们无法描述间歇期排水固结这一核心物理过程。

基于此，本文以高铁沿线软黏土为研究对象，通过系统的动三轴试验，探究分阶段加载条件下动应力幅值、有效平均主应力及循环应力比对孔压发展的影响规律，并根据试验数据提出一种描述振动阶段孔压累积与间歇阶段孔压消散的数学模型。研究成果旨在为高铁软黏土地基的设计与施工提

供理论依据，并为类似工程条件下的软黏土地基处理提供参考。

1 原状软黏土动三轴试验设计

1.1 试样制作

试验用土取自上海地区第④层淤泥质黏土，取土深度为7.2～7.7 m。该层土附加应力占总应力的62%，为核心受力区，广泛分布于上海绕城高速以内区域，是高铁、地铁等重大工程建设中常见的核心软弱层。为减少水分流失对试验结果的影响，取样后立即密封，运回实验室后制成高100 mm、直径50 mm的圆柱形试样，并将其安装在双向循环加载三轴仪（图1）底座上。试样经真空饱和及分级反压饱和后，饱和度达98%以上，满足试验要求。土体的基本物理力学参数列于表1。

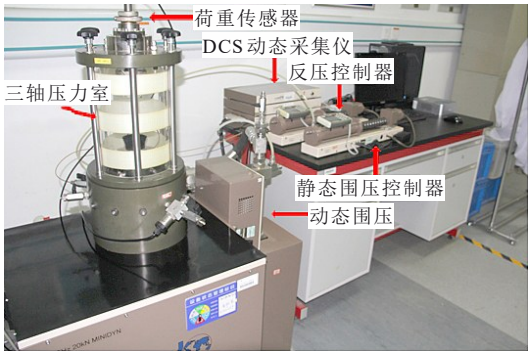


图1 双向循环加载三轴仪

Fig. 1 Bidirectional cyclic triaxial apparatus

表1 土体基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of soil

初始密度 ρ_0/(g/cm^3)	孔隙比 e_0	含水率 w_n/%	液限 W_L/%	塑限 W_P/%	压缩指数 C_c
1.71	1.32	45.6	42	22	0.42

1.2 试验参数及试验方案

（1）试验参数

根据规范及高铁荷载在地基土体中随深度衰减规律[28-29]，动应力幅值取10、20、30 kPa三个水平。频率和振动次数根据我国高速铁路运营的CRH3型电力动车组确定[30]。该型动车组每节车厢前后转向架固定轴距为2.5 m，同节车厢前后转向架中心距为15.5 m，相邻车厢转向架的距离为5.35 m。为简化计算，取24.5 m作为同节车厢前后转向架的等效间距，暂不考虑相邻车厢转向架间距的影响。结合试验依托线路实际运营条件（车速300 km/h、16节车厢编组、日均运行72辆车次），通过经验公式$f=v/l$（其中v为列车速度，l为相邻车厢或同节车厢前后转向架间距），算得高铁荷载对地基产生的频率约为3 Hz，等效换算得到日均理论振次为24.5/(300/3.6)×3×72×16≈1 016次。基于试验效率与土体响应有效性的平衡，以此理论值为基准，将分阶段加载的振动期振次设置为1 000次。

根据取土深度及相应附加应力，为模拟试样的天然应力状态，设置反压为63 kPa。有效平均主应力根据公式$p_0'=(\sigma_1'+2\sigma_3')/3$计算得到。其中，$\sigma_1'$为土体的初始有效轴压，由高铁轨道、路基等附加应力与上覆土层重力之和减去反压得到；σ_3'为有效围压，由初始轴向应力与侧压力系数之积减去反压得到。综合考虑不同取土深度，最终确定有效平均主应力取71、87、117 kPa三个水平。循环应力比（Cyclic Stress Ratio，CSR）由公式$CSR=\sigma_d/(2p_0')$算得，其中σ_d为动应力幅值。

考虑高铁白天运行、夜间停运维护及发车间隙的实际运营工况，采用“振动阶段—间歇阶段—振动阶段”的分阶段加载方式。振动期排水条件设置为不排水，间歇期为固结排水。考虑高铁地基与室内试样在尺度及排水条件上的差异，依据文献[31]确定的时间相似比，将现场10 h的间歇时间（含列车运行间隔与夜间停运）折算为室内试验的24 min。

（2）试验方案

试样加载过程包含5个振动阶段与5个间歇阶段，加载示意如图2所示。具体试验方案列于表2。

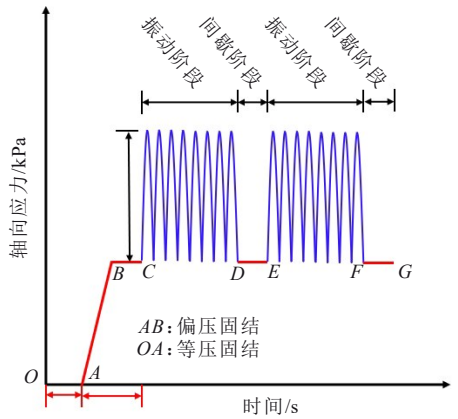


图2 试验分阶段加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of staged loading in the test

为确保试验结果的可靠性，对CSR=0.173 1的典型工况进行重复性试验。图3展示了重复试验与

表 2　分阶段加载条件下土体动三轴试验方案

Table 2　Dynamic triaxial test scheme for soil under staged loading conditions

试样编号	p'_0/kPa	初始偏应力 σ_s/kPa	σ_d/kPa	CSR	排水条件
SD01	87	20	10	0.057 7	间歇排水
SD02	87	20	20	0.115 4	
SD03	87	20	30	0.173 1	
SD04	71	16	20	0.140 2	
SD05	117	28	20	0.085 2	

原始试验结果的对比。由图可知，重复试验所得动孔压发展曲线与初始试验结果高度吻合，其变化趋势与孔压累积峰值、消散谷值的离散性均小于3%，表明本试验方法及所得数据具有良好的重现性与稳定性。

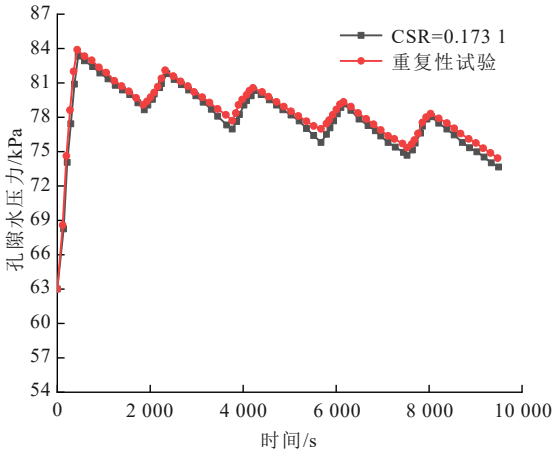


图 3　CSR=0.173 1 工况下的重复性试验结果

Fig. 3　Repetitive test results when CSR=0.173 1

2　土体动孔压试验结果分析

2.1　动应力幅值对孔压发展的影响规律

为清晰描述分阶段加载下孔压的动态演化规律，分别对“孔压累积”与“孔压消散”两个核心过程进行量化分析。其中，“孔压累积”指振动阶段内孔压从谷值增长至峰值的过程，其衡量指标为各振动阶段结束时的孔压峰值；“孔压消散”指间歇阶段内孔压从峰值下降至谷值的过程，其衡量指标为各间歇阶段结束时的孔压谷值。通过提取连续阶段的孔压峰值与谷值序列，可以清晰地分离并量化振动与间歇两种状态下土体的动力行为。

图 4 展示了不同动应力幅值下饱和软黏土孔压的总体演化过程。观察可知，其发展模式与连续振动有显著区别，呈现明显的“阶跃式”特征。具体表现为：动应力幅值越大，各振动阶段内孔压累积幅度越大、峰值越高；间歇阶段孔压消散量也更加显著。

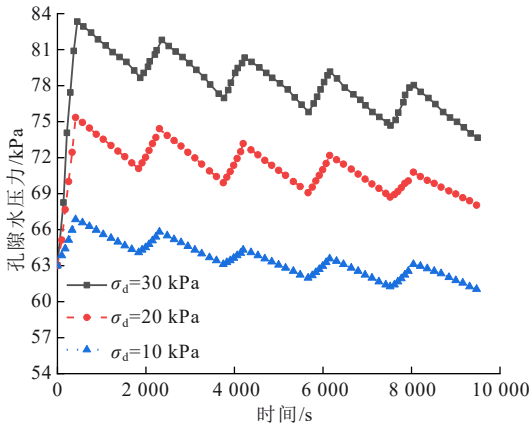


图 4　不同动应力幅值下动孔压随时间发展曲线

Fig. 4　Evolution curves of dynamic pore water pressure over time under different dynamic stress amplitudes

为进一步量化分析，将振动阶段孔压峰值与间歇阶段孔压谷值绘制成曲线，分别如图 5 和图 6 所示。由图 5 可知，在同一动应力幅值下，孔压累积峰值随振动阶段推进呈逐渐衰减的趋势。图 6 表明，间歇阶段孔压消散曲线形态亦受动应力幅值影响，幅值越低，曲线越早趋于平缓。

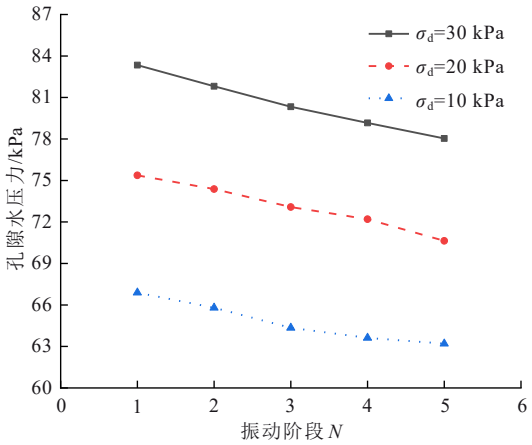


图 5　不同动应力幅值下累积孔压随振动阶段发展曲线

Fig. 5　Evolution curves of accumulated pore water pressure during the vibration stages under different dynamic stress amplitudes

上述现象可能与外部能量输入及土体内部结构演化的共同作用有关。在振动阶段，外部动应力向土体输入能量。高动应力幅值（如 30 kPa）输入能量

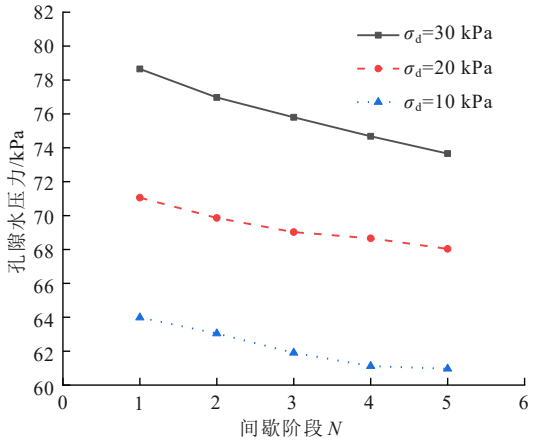


图 6 不同动应力幅值下孔压消散随间歇阶段发展曲线

Fig. 6 Evolution curves of pore water pressure dissipation during the intermittent stages under different dynamic stress amplitudes

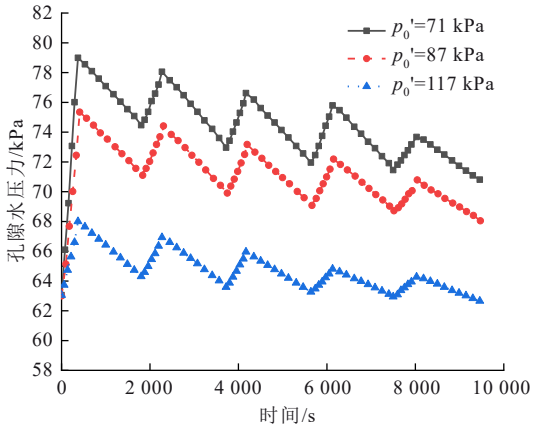


图 7 不同有效平均主应力下孔压随时间发展曲线

Fig. 7 Evolution curves of pore water pressure over time under different effective mean principal stresses

较高，剧烈扰动土骨架，加剧颗粒间滑移与塑性体积应变，引发孔压快速攀升；低动应力幅值（如 10 kPa）的输入能量主要用于弹性变形与少量颗粒边界调整，孔压累积有限。在间歇阶段，排水条件引发孔压消散，同时振动阶段积累的应变能使土颗粒处于非稳定态，其在固结排水条件下通过重新排列与定向形成更稳定结构。当动应力幅值为 10 kPa 时，观测到间歇阶段孔压低于反压的现象，这源于低 CSR 下土体表现出的剪胀性响应与弹性回弹机制。该现象与 Sakai 等[6]及 Yıldırım 等[14]的观测一致，揭示了循环荷载后土体内部应力释放与结构调整的物理本质。

2.2 有效平均主应力对孔压发展的影响规律

图 7 展示了不同有效平均主应力下饱和软黏土孔压的演化过程。由图可知，有效平均主应力对孔压发展具有显著的抑制作用：有效平均主应力越高，振动阶段累积的孔压峰值越低，整体孔压发展水平也越低；反之，则孔压累积更为显著。

为深入揭示其变化规律，将振动阶段孔压峰值与间歇阶段孔压谷值绘制成曲线，分别如图 8 和图 9 所示。图 8 显示，有效平均主应力从 71 kPa 增至 117 kPa 时，累积孔压呈逐渐减小趋势。图 9 显示，不同有效平均主应力下孔压均呈非线性衰减，且随有效平均主应力增大，消散速率逐渐降低。

上述现象与有效平均主应力所表征的土体初始结构与状态有关：较低的有效平均主应力对应较疏松的初始结构，颗粒间结合弱，振动作用下易发

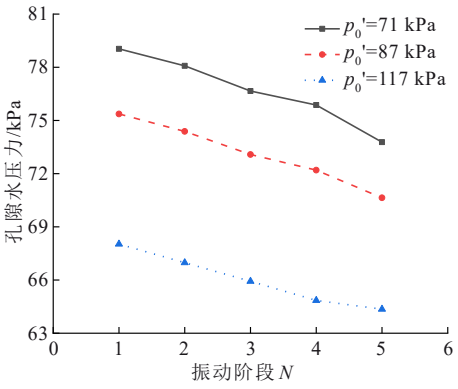


图 8 不同有效平均主应力下累积孔压随振动阶段发展曲线

Fig. 8 Evolution curves of accumulated pore water pressure during the vibration stages under different effective mean principal stresses

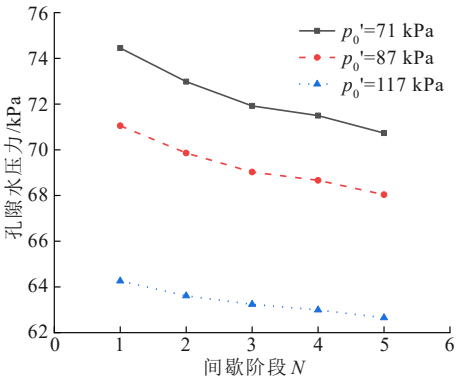


图 9 不同有效平均主应力下孔压消散随间歇阶段发展曲线

Fig. 9 Evolution curves of pore water pressure dissipation during the intermittent stages under different effective mean principal stresses

生滑移与重新排列，导致孔压快速上升；而当有效平均主应力较高时，土体固结充分，结构紧密且骨架刚度增强，能有效抵抗外部剪切变形，从而抑制孔压累积。间歇阶段的孔压消散曲线呈现出典型的反比例衰减形态，且消散速率随有效平均主应力增大而逐渐降低。这说明，高固结压力下土体的渗透性略有降低，但其结构刚度更高，排水回弹效应增强。综上，有效平均主应力越高，土体越密实，孔压的累积量越小、消散速率越低。

2.3　循环应力比对孔压发展的影响规律

为探究动应力幅值与有效平均主应力的共同作用，引入循环应力比(CSR)进行分析。图 10 展示了不同CSR下土体孔压随时间的发展曲线。从图中可以看出，CSR与孔压发展呈显著正相关，即CSR值越大，孔压的累积速率越大，最终达到的水平也越高。这表明土体在高CSR条件下更易发生结构破坏与塑性变形。

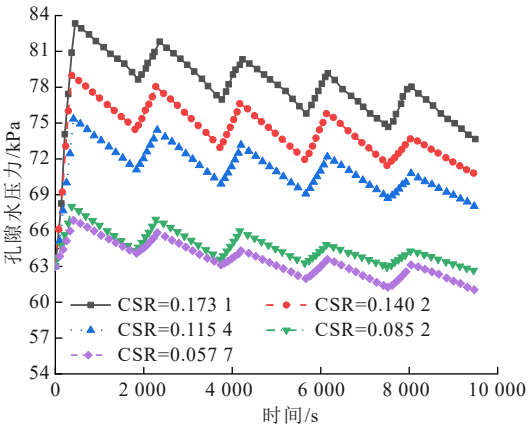


图 10　不同CSR下土体孔压随时间发展曲线

Fig. 10　Evolution curves of pore water pressure over time under different CSR values

将不同CSR下各振动阶段的最大孔压与各间歇阶段的最小孔压分别连接，得到图 11 和图 12。图 11 表明，相同振动阶段下，孔压峰值总体随CSR增大而升高。当CSR由 0.085 2 增至 0.115 4 时，孔压峰值出现较明显的增幅，表明在此区间内孔压累积对CSR的响应发生了明显变化。据此推测，可能存在一个影响孔压累积特性的临界CSR，其取值在 0.085 2～0.115 4 之间。由图 12 可见，孔压消散速率随间歇阶段发展而逐渐降低，且高CSR工况下总体消散量更大。

上述现象与土体所受剪应力水平及其结构状态有关。在振动阶段，高CSR(0.173 1)工况下动应力接近甚至超过土体循环强度，其对土骨架的破坏作用占主导，剧烈的剪切作用导致颗粒间联结大量断裂，产生显著的塑性体积应变，从而引发孔压急剧上升与加速累积；低CSR(0.057 7)工况下荷载多处于土体弹性阈值内，其作用以引起颗粒弹性振动和可恢复的边界调整为主，因此孔压累积缓慢且总量有限。在间歇阶段，孔压消散行为同样受CSR的调控：一方面，高CSR的强烈振动可能扰动土骨架，在局部形成微裂缝或优化排水通道，短期内有利于排水；另一方面，剧烈剪切同样可能导致细颗粒迁移与重新分布，从而堵塞孔隙通道。因此，CSR不仅决定振动阶段的孔压累积特性，还通过改变土体的结构状态，间接调控间歇阶段的排水固结效率。

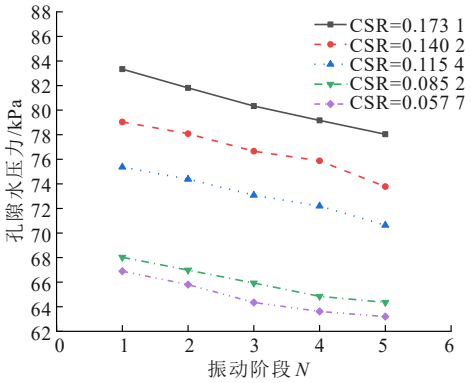


图 11　不同CSR下累积孔压随振动阶段发展曲线

Fig. 11　Evolution curves of accumulated pore water pressure during the vibration stages under different CSR values

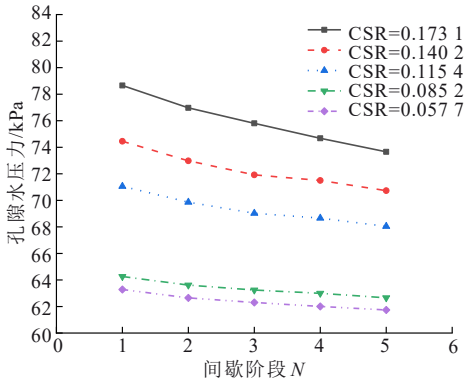


图 12　不同CSR下孔压消散随间歇阶段发展曲线

Fig. 12　Evolution curves of pore water pressure dissipation during the intermittent stages under different CSR values

3　分阶段加载下的动孔压发展模型

根据不同条件下振动阶段与间歇阶段的孔压发展曲线，采用二阶段函数分别描述土体在振动与间歇阶段的动孔压发展规律。

振动阶段孔压累积模型选用指数函数[24]，其理论基础源于循环荷载下土体的能量耗散与累积损伤规律。振动初期，土体结构相对疏松，外部输入能量大量用于克服颗粒间联结并引发塑性滑移，进而转化为孔压，故孔压增长迅速。随着振次增加，土骨架逐渐调整至更密实、更稳定的状态，能量耗散效率降低，损伤累积速率递减，导致孔压增长趋势放缓并最终趋于某一稳定值。该曲线呈现初期快速增长、后期趋于平稳的非线性特征，是岩土动力学中常见的响应形式。

间歇阶段孔压消散选用对数函数，其形式可由太沙基一维固结理论推导得出。在高固结度范围内，孔压消散与时间的对数近似呈线性关系。本文试验中的间歇期属排水固结过程，初期孔压梯度最大，依据达西定律，渗流速率最高，故孔压消散迅速；随后，孔压梯度逐渐减小，土骨架在振动后产生硬化效应，可能导致渗透性降低，消散速率随之减小。这一先快后慢的非线性衰减特征是固结理论中的经典结论。

3.1 孔压模型的建立

基于前文试验结果，本研究提出的振动阶段模型公式如下：

$$u_1=(\alpha_1\mathrm{CSR}+\beta_1)\mathrm{e}^{AN_1} \tag{1}$$

式中：u_1为振动阶段孔压值；α_1为CSR的影响系数，反映振动阶段孔压峰值对外部荷载的敏感性；β_1为固有孔压峰值项，反映CSR以外因素贡献的振动阶段孔压；A为孔压峰值衰减速率因子(负值)，控制孔压峰值随阶段序数增加的衰减速率；N_1为振动阶段次数。

间歇阶段模型公式如下：

$$u_2=B\ln N_2+\alpha_2\mathrm{CSR}+\beta_2 \tag{2}$$

式中：u_2为间歇阶段孔压值；α_2为CSR的影响系数，反映间歇阶段孔压谷值对前期振动强度的敏感性；β_2为固有孔压谷值项，反映CSR以外因素贡献的间歇阶段孔压谷值；B为孔压谷值变化趋势因子(通常为负值)，控制孔压谷值随阶段序数增加的变化速率和方向；N_2为间歇阶段次数。

基于式(1)，不同CSR下振动阶段累积孔压的拟合结果如图13所示，相应的拟合参数列于表3。结果表明，该指数模型对累积孔压的拟合效果较好，拟合度(R^2)均大于0.96。参数α_1和β_1在不同CSR条件下均保持不变，这是由于试验反压恒定为63 kPa，试样初始有效应力及固结状态一致，使得孔压峰值对外部荷载的敏感性(α_1)及其固有基值项(β_1)不随CSR变化。因此，不同CSR条件下的差异主要通过衰减速率因子A体现。拟合结果进一步显示，参数A的变化幅度较小，说明该指数模型能够较好地预测振动阶段累积孔压的发展趋势。

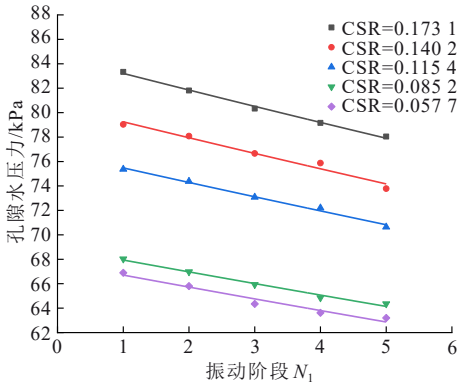


图13 不同CSR下振动阶段累积孔压拟合曲线

Fig. 13 Fitting curves of accumulated pore water pressure during the vibration stages under different CSR values

表3 不同CSR下振动阶段累积孔压试验拟合参数

Table 3 Fitting parameters of accumulated pore water pressure during the vibration stages under different CSR values

CSR	参数			拟合度(R^2)
	A	α_1	β_1	
0.173 1	−0.016	159.11	57.506	0.996
0.140 2	−0.017	159.11	57.506	0.974
0.115 4	−0.016	159.11	57.506	0.992
0.085 2	−0.014	159.11	57.506	0.988
0.057 7	−0.015	159.11	57.506	0.962

基于式(2)，不同CSR下间歇阶段孔压消散的拟合结果如图14所示，相应的拟合参数列于表4。结果表明，该对数模型对消散孔压的拟合效果较好，拟合度均大于0.97。由表4可知，α_2和β_2受反压影响均为固定值，而参数B的波动性明显高于A，表明对数模型的拟合度较高，但离散性也较大。

综上，分阶段加载条件下饱和软黏土在振动阶段与间歇阶段的动孔压发展，分别适合采用指数模型和对数模型进行预测。上述模型均考虑了高铁荷载及自然状态下土体CSR的影响，结果表明CSR对孔压累积与消散均有较大影响，工程中应予以重视。

3.2 模型参数与CSR的定量关系及模型验证

为进一步提升模型的预测能力并明确参数物

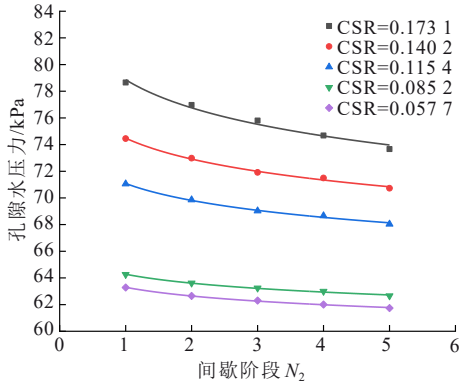


图 14　不同 CSR 下间歇阶段孔压消散拟合曲线

Fig. 14　Fitting curves of pore water pressure dissipation during the intermittent stages under different CSR values

表 4　不同 CSR 下间歇阶段孔压消散试验拟合参数

Table 4　Fitting parameters of pore water pressure dissipation during the intermittent stages under different CSR values

CSR	参数			拟合度(R^2)
	B	α_2	β_2	
0.173 1	−3.043	139.20	54.799	0.983
0.140 2	−2.266	139.20	54.799	0.994
0.115 4	−1.833	139.20	54.799	0.995
0.085 2	−0.967	139.20	54.799	0.994
0.057 7	−0.945	139.20	54.799	0.974

理意义，建立模型参数与 CSR 的定量关系。分析发现，振动阶段参数 A 的值稳定在 −0.015 6 附近，表明其为本类软黏土的固有特性参数，受 CSR 影响甚微，故在模型中取为常数。

通过式(3)，对参数 B 与 CSR 进行拟合分析，发现二者之间存在显著的二次非线性关系(图 15)，拟合度为 0.975。

$$B=-79.872\,6\times \mathrm{CSR}^2-0.893\,7\times \mathrm{CSR}-0.534\,1 \tag{3}$$

上述规律说明，前期振动强度对土体结构的累积性演化存在非线性加速效应，即 CSR 的增大不仅使孔压谷值的下降趋势增强，且增强速率本身亦随 CSR 增大而增大。这揭示了高 CSR 对土体结构的改造作用远强于低 CSR。

基于此，可将原间歇阶段模型优化为更通用的形式，其中参数 B 由 CSR 直接确定：

$$u_2=(-79.872\,6\times \mathrm{CSR}^2-0.893\,7\times \mathrm{CSR}-0.534\,1)\ln N_2+\alpha_2\mathrm{CSR}+\beta_2 \tag{4}$$

此优化模型极大减少了经验参数的数量，仅通过 CSR 即可预测不同振动历史下土体的孔压消散

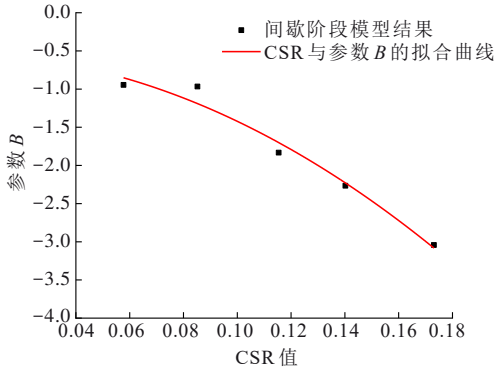


图 15　参数 B 与 CSR 值的拟合关系

Fig. 15　Fitting relationship between parameter B and CSR value

趋势，且各参数均具有清晰的物理意义，提升了模型的理论解释力与工程应用价值。

为验证所提孔压发展模型的可靠性与泛化能力，选取文献[32]中灰色淤泥质粉质黏土在频率为 1 Hz、CSR=0.217 4 工况下的试验数据进行预测验证，结果如图 16 所示。模型预测曲线与试验结果吻合良好，振动阶段拟合度达 0.989，间歇阶段拟合度为 0.976，表明所提模型能够较好地模拟该类土体在分阶段加载作用下孔压的动态发展过程，具有较高的预测精度与适用性。

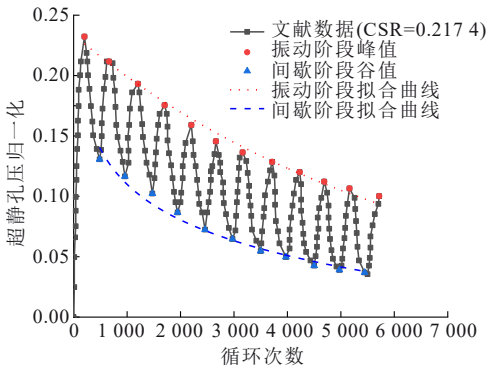


图 16　灰色淤泥质粉质黏土试验数据的预测验证

Fig. 16　Prediction validation using experimental data of gray silty clay

4　结论

通过对高铁沿线原状软黏土试样开展系统的动三轴试验研究，构建了分阶段加载条件下考虑不同 CSR 的振动阶段与间歇阶段动孔压模型，主要结论如下：

(1) 相较于传统不排水条件，分阶段加载条件下引入间歇期排水效应，使土体动孔压呈现累积与

消散交替演化的特征;随着振动与间歇阶段的循环推进,孔压峰值呈逐渐衰减的趋势。

(2) 动应力幅值的增大显著增强了外界能量与土体结构的相互作用,导致累积孔压及其消散量均显著增大;而有效平均主应力的增加则使土体颗粒更加紧密,进而抑制了累积孔压及其消散量的发展。

(3) 不同CSR工况对比表明,累积孔压及其消散速率总体随CSR增大而显著提升,且当CSR处于0.085 2~0.115 4范围内时,孔压累积的响应变化较为明显,表明该区间可能是影响孔压累积特性的临界值区间。

(4) 模型拟合分析表明,在不同CSR条件下,振动阶段孔压的累积规律更符合指数模型,且模型参数的波动性较小;间歇阶段孔压的消散规律则更适宜采用对数模型进行描述。上述模型不仅表现出较高的拟合度,还经既有文献数据验证,能够有效表征分阶段加载过程中孔压的动态演化规律,具有较强的普适性与准确性。

参考文献(References)

[1] 纪颖波, 张继严, 毕俊伟, 等. 高铁荷载下软土地基振动与塑性变形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(12): 4615-4627.
Ji Yingbo, Zhang Jiyan, Bi Junwei, et al. Vibrations and plastic deformations of soft ground induced by high-speed trains[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(12): 4615-4627.

[2] 夏唐代, 郑晴晴, 陈秀良. 基于累积动应力水平的间歇加载下超孔压预测[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1483-1490, 1506.
Xia Tangdai, Zheng Qingqing, Chen Xiuliang. Predicting excess pore water pressure under cyclic loading with regular intervals based on cumulative dynamic deviator stress level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1483-1490, 1506.

[3] Wang S, Cai Y Q, Zhang L Y, et al. Experimental study on dynamic characteristics of saturated remolded soft clay with sand particles[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1265131.

[4] Lin P, Jiao S B, Garg A, et al. Local softening characteristic of soft clay subjected to dynamic loading under low confining pressure[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(5): 5613-5622.

[5] 郭林, 蔡袁强, 王军. 长期循环荷载作用下排水条件对饱和软黏土动力特性影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 94-99.
Guo Lin, Cai Yuanqiang, Wang Jun. Influence of drainage condition on dynamic cyclic behavior of saturated soft clay under long-term cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 94-99.

[6] Sakai A, Samang L, Miura N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(1): 33-46.

[7] 丁修恒, 刘干斌, 陈航, 等. 考虑温度影响的软黏土长期动孔压模型研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 123-128.
Ding Xiuheng, Liu Ganbin, Chen Hang, et al. Study on long-term dynamic pore pressure model of soft clay considering temperature effect[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 123-128.

[8] 丁智, 庄家煌, 魏新江, 等. 越江地铁荷载作用下软黏土孔压试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊1): 3178-3187.
Ding Zhi, Zhuang Jiahuang, Wei Xinjiang, et al. Experimental study of pore pressure model of soft clay under cross-river subway loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 3178-3187.

[9] 黄珏皓, 陈健, 柯文汇, 等. 双向激振循环荷载和振动频率共同作用下饱和软黏土孔压试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊2): 71-74.
Huang Juehao, Chen Jian, Ke Wenhui, et al. Coupling effects of bidirectional cyclic loading and loading frequency on pore water pressure of saturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 71-74.

[10] Huang M S, Yao Z M. Effect of the principal stress direction on cyclic cumulative deformation and pore pressure of soft clay[J]. Procedia Engineering, 2016, 143: 811-819.

[11] Matsuda H, Nhan T T, Ishikura R. Excess pore water pressure accumulation and recompression of saturated soft clay subjected to uni-directional and multi-directional cyclic simple shears[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2013, 7(4): 1250027.

[12] Huang J H, Hu J, Wang H C, et al. Excess pore water pressure behavior of saturated soft clay under cyclic confining pressure with different frequencies[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1035889.

[13] 雷华阳, 杨晓楠, 许英刚, 等. 间歇性循环荷载条件下饱和重塑黏土的动力特性试验[J]. 天津大学学报, 2021, 54(8): 799-806.
Lei Huayang, Yang Xiaonan, Xu Yinggang, et al. Experiment of dynamic characteristics of saturated remolded clay under intermittent cyclic loading[J]. Journal of Tianjin University, 2021, 54(8): 799-806.

[14] Yıldırım H, Erşan H. Settlements under consecutive series of cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(6): 577-585.

[15] 王军, 蔡袁强, 郭林, 等. 分阶段循环加载条件下温州饱和软黏土孔压和应变发展规律[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1349-1354.
Wang Jun, Cai Yuanqiang, Guo Lin, et al. Pore pressure and strain development of Wenzhou saturated soft soil under cyclic loading by stages[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1349-1354.

[16] 丁建宇, 王朝亮, 杜运国, 等. 排水条件下阶段性循环荷载作用对饱和软黏土动力特性影响[J]. 世界地震工程, 2017, 33(2): 161-168.
Ding Jianyu, Wang Chaoliang, Du Yunguo, et al. Influence of staged cyclic loading on dynamic behavior of saturated soft clay under drained condition[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(2): 161-168.

[17] Huang J H, Wang J L, Lü Y H, et al. Influences of cyclic confining pressure on deformation behaviors of soft clay under intermittent cyclic loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(4): 06024002.

[18] Liu Z Y, Xue J F. The deformation characteristics of a Kaolin clay under intermittent cyclic loadings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 153: 107112.

[19] Wu T Y, Tong J H, Sun H L, et al. Common characteristics between cyclic behaviours at different frequencies and monotonic behaviours of clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022, 59(9): 1553-1567.

[20] 魏新江, 张涛, 丁智, 等. 地铁荷载下不同固结度软黏土的孔压试验模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2761-2768, 2874.
Wei Xinjiang, Zhang Tao, Ding Zhi, et al. Experimental study of pore pressure model of soft clay with different consolidation degrees under subway loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2761-2768, 2874.

[21] 谭永长. 列车间歇荷载作用下饱和粉土变形特性与孔压模型研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023: 7-11.
Tan Yongchang. Deformation behavior and excess pore water pressure prediction model of saturated silty under intermittent cyclic loading of train[D]. Changsha: Central South University, 2023: 7-11.

[22] 陈春雷, 王军, 丁光亚. 交通荷载作用下饱和软粘土孔压-应变分析模型[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 64-70.
Chen Chunlei, Wang Jun, Ding Guangya. Pore water pressure-residual strain model of soft clay under traffic loading[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(6): 64-70.

[23] 王军, 丁光亚, 潘晓东. 各向异性固结软粘土的循环软化-孔压模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(12): 166-170.
Wang Jun, Ding Guangya, Pan Xiaodong. Cyclic-degradation-pore pressure generation model for anisotropic consolidated clay[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(12): 166-170.

[24] 聂庆科, 白冰, 胡建敏, 等. 循环荷载作用下软土的孔压模式和强度特征[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊1): 724-729.
Nie Qingke, Bai Bing, Hu Jianmin, et al. The pore pressure model and undrained shear strength of soft clay under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 724-729.

[25] 王元东, 唐益群, 廖少明, 等. 地铁行车荷载下隧道周围加固软粘土孔压特性试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 188-194.
Wang Yuandong, Tang Yiqun, Liao Shaoming, et al. Experimental of pore pressure of reinforced soft clay around tunnel under subway vibrational loading[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(1): 188-194.

[26] 叶俊能, 陈斌. 海相沉积软土动强度与孔压特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 55-60.
Ye Junneng, Chen Bin. Dynamic strength and pore pressure property of marine deposit soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 55-60.

[27] 刘建民, 付海清, 郭婷婷, 等. 不同循环荷载作用下软黏土动力特性对比试验研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(4): 973-981.
Liu Jianmin, Fu Haiqing, Guo Tingting, et al. Comparative experimental study on dynamic characteristics of soft clay under different cyclic loads[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 973-981.

[28] 李向国, 黄守刚. 高速铁路技术[M]. 3版. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
Li Xiangguo, Huang Shougang. High-speed railway technology[M]. 3rd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.

[29] 蒋红光, 边学成, 徐翔, 等. 列车移动荷载下高速铁路板式轨道路基动力性态的全比尺物理模型试验[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 354-362.
Jiang Hongguang, Bian Xuecheng, Xu Xiang, et al. Full-scale model tests on dynamic performances of ballastless high-speed railways under moving train loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 354-362.

[30] 杨鑫炎. 高速铁路钢桥疲劳评估标准车型研究[J]. 城市道桥与防洪, 2014(7): 331-333.
Yang Xinyan. Study on evaluation of fatigue standard models of high-speed railway steel bridge[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014(7): 331-333.

[31] 戴世安, 崔振东, 廖红建. 间歇固结排水条件下上海原状饱和软黏土的动力特性试验[J]. 世界地震工程, 2024, 40(1): 175-184.
Dai Shian, Cui Zhendong, Liao Hongjian. Dynamic characteristics test of undisturbed saturated soft clay in Shanghai under intermittent consolidation and drainage conditions[J]. World Earthquake Engineering, 2024, 40(1): 175-184.

[32] 杨家强. 列车动荷载下饱和软土地基动力特性及长期累积沉降研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 38.
Yang Jiaqiang. Study on dynamic behavior and long-term cumulative settlement of saturated soft soil foundation under train load[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 38.

(本文编辑:赵乘程)