

【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

基于电参数同步测试的砂土损伤本构模型

王宇航^{1,2}, 韩瑀萱³, 周轲⁴, 张文居³, 周晗旭¹, 车爱兰^{1,2}

1) 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2) 上海交通大学四川研究院, 四川成都 610213; 3) 四川藏区高速公路有限责任公司, 四川成都 610041; 4) 四川久马高速公路有限责任公司, 四川成都 610041

摘要: 土体损伤的发展会导致土体强度劣化, 显著影响力学响应。通过三轴压缩-电阻率同步测量和计算机断层扫描(computed tomography, CT)试验, 研究不同围压及含水率下砂土的电阻率、变形和强度变化规律。基于三轴压缩过程中的电阻率同步测试结果提出损伤变量评价指标, 对比CT试验的孔隙结构和分形维数分析损伤演化过程; 结合扰动状态概念, 分别使用经典Duncan-Chang模型和极限应力模型描述砂土的相对完整状态和完全调整状态, 构建中砂土的损伤扰动非线性弹性本构模型。结果表明, 损伤发展可分为细微损伤阶段和加速损伤阶段, 损伤变量随轴向应变呈幂函数变化趋势, 且与CT试验分形维数变化规律一致, 验证了以电阻率参数作为砂土损伤演化表征指标的有效性。与Duncan-Chang模型相比, 损伤扰动本构模型预测的应力-应变曲线更加接近试验数据, 尤其在大应变情况下能够更准确地表征应变软化特性。研究成果可为电测量方法在岩土材料损伤演化机制分析中的应用提供借鉴。

关键词: 岩土工程; 电阻率; 三轴压缩; 中砂损伤; 扰动状态概念; 损伤本构模型

中图分类号: TU44

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2026.02233

Damage constitutive model of sand based on synchronized electrical parameter testing

WANG Yuhang^{1,2}, HAN Yuxuan³, ZHOU Zhou⁴, ZHANG Wenju³,
ZHOU Hanxu¹, and CHE Ailan^{1,2}

1) School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P. R. China

2) Sichuan Research Institute, Shanghai Jiao Tong University, Chengdu 610213, Sichuan Province, P. R. China

3) Sichuan Tibetan Area Expressway Co. Ltd., Chengdu 610041, Sichuan Province, P. R. China

4) Sichuan Jiuma Expressway Co. Ltd., Chengdu 610041, Sichuan Province, P. R. China

Abstract: The development of soil damage leads to strength deterioration of soil and significantly affects its mechanical response. Triaxial compression tests with synchronized electrical resistivity measurements and computed tomography (CT) scanning were conducted to investigate the variations in electrical resistivity, deformation, and strength of sand with different moisture contents under various confining pressures. A damage variable evaluation index was proposed based on the results of electrical resistivity measurements during triaxial compression. The damage evolution process was further analyzed by comparing the pore structure and fractal dimension obtained from CT scans. Based on the disturbed state concept, the classical Duncan-Chang model and the ultimate stress model

Received: 2025-04-08; **Accepted:** 2025-09-16; **Online (CNKI):** 2025-10-28

Foundation: Natural Science Foundation of Sichuan Province (2024NSFSC0110); Youth Project of Shanghai Natural Science Foundation (25ZR1402285); Startup Fund for Young Faculty at Shanghai Jiao Tong University (AF0100187)

Corresponding author: Assistant research fellow ZHOU Hanxu (zhx1234@sjtu.edu.cn)

Citation: WANG Yuhang, HAN Yuxuan, ZHOU Zhou, et al. Damage constitutive model of sand based on synchronized electrical parameter testing [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2026, 43(2): 233-242. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



were employed to describe the relatively intact state and fully adjusted states of sandy soil, respectively, a damage-disturbance nonlinear elastic constitutive model for medium sand was established. The results show that the damage development can be divided into two stages: a micro-damage stage and an accelerated damage stage. The damage variable increases following a power-law trend with axial strain, being consistent with the variation of the fractal dimension obtained from CT scans, confirming the effectiveness of electrical resistivity as an indicator for characterizing the damage evolution of sand. Compared with the Duncan-Chang model, the stress-strain curves predicted by the proposed damage-disturbance constitutive model are more consistent with the experimental data, especially in accurately characterizing the strain-softening behavior under large strain conditions. The findings provide a valuable reference for the application of electrical testing techniques in elucidating damage-evolution mechanisms in geotechnical materials.

Key words: geotechnical engineering; electrical resistivity; triaxial compression; medium sand damage; disturbed state concept; damage constitutive model

土体在外部荷载作用下的力学性能劣化,本质上是其内部损伤累积的宏观表现. 这一过程涉及裂隙扩展、颗粒接触面滑移及胶结结构破坏等细观机制^[1], 最终导致土体强度与刚度的显著降低. 准确表征土体损伤演化过程, 对边坡工程稳定性评估具有重要意义.

传统岩土损伤本构模型的研究方法主要有两种: 一是基于物理参数的模型驱动方法, 通过弹性模量、超声波波速和损耗能等参数定义损伤变量^[2-3], 如徐娜等^[4]基于能量损失理论建立的混凝土受压损伤模型; 二是基于统计理论的概率模型方法, 采用 Weibull 分布等概率分布函数描述微缺陷演化规律^[5-7], 如郅彬等^[8]构建的高温结构性黄土统计损伤模型. 然而, 现有模型损伤参数的获取通常依赖室内破坏性试验, 并多针对特定岩土材料开发, 难以适用于复杂环境条件下的岩土材料损伤表征, 这极大限制了其在工程实践中的应用.

近年来, 电阻率测量技术因能对土体结构的变化进行表征受到广泛关注. 研究表明, 电阻率与土体含水率^[9]和孔隙率等关键物理参数具有显著相关性^[10-11], 电阻率测量技术已成功应用于边坡稳定性监测^[12]、模型试验^[13]及室内土体参数测试^[14]等领域. 特别是 ZHOU 等^[15-16]通过同步测量应力-应变-电阻率关系, 证实了电阻率变化与材料损伤进程具有关联性, 这为利用电阻率参数对土体开展损伤评价提供了新思路. 基于此, 学者们相继利用电测量技术针对土体损伤开展了相关研究, 如 BAI 等^[17-18]分别针对红土压缩过程和黄土边坡冻融-地震耦合作用开展了基于电测量方法的损伤演化过程研究. 然而, 现有研究仍存在以下关键问题亟待解决: 电阻率参数与损伤变量间缺乏普适性定量关系^[19]; 电

测量技术在力学损伤演化建模中的方法适应性仍需系统验证^[20]; 模型普适性不足, 不同土类需构建特定的电阻率评价体系^[21].

本研究通过开展三轴压缩-电阻率同步测量试验, 系统研究砂土的力学特性与电阻率的变化规律, 并基于 Desai 扰动状态理论和 Duncan-Chang 模型框架, 提出一种新型的砂土电阻率损伤本构模型, 为研究复杂环境条件下岩土材料损伤演化机制提供新的方法支撑.

1 试验土样和方法

1.1 试验土样

试验土样为中国云南省漾濞市大漾云公路边坡残积砂土, 天然状态下, 砂土天然含水率为 11% (质量分数), 天然密度(ρ)为 2.00 g/cm³, 干密度(ρ_d)为 1.80 g/cm³, 颗粒比重(G_s)为 2.63, 孔隙比(e)为 0.46. 过筛烘干并碾碎后制作重塑试样, 试样的含水率(质量分数)分别为 7%、9%、11% 和 13%, 密度为 1.93 ~ 2.03 g/cm³. 该非饱和砂土颗粒在粒径区间 (0.00, 0.07)、[0.07, 0.50)、[0.50, 1.00)、[1.00, 1.50) 和 [1.50, 2.00) mm 的质量分数分别为 13.67%、55.13%、21.76%、3.14% 和 6.30%. 根据《土的工程分类标准》(GBT 50145—2007), 该类砂土为中砂.

1.2 三轴压缩-电阻率同步测量试验

采用自主改装的三轴仪及电测量一体化测试仪器进行三轴压缩-电阻率同步测量试验, 实现在三轴压缩过程中同步测量土样电阻率. 三轴仪采用南京泰克奥科技有限公司 TKA-TTS 系列全自动三轴仪, 可自动完成数据采集.

按照目标干密度称取一定量的干燥土体, 根据目标含水率计算所需水的质量, 将水均匀喷至土体上, 充分搅拌混合, 以制样器分层击实的方法制作砂土试样. 土样高度为 80 mm, 直径为 39.1 mm. 每个含水率制作 3 个砂土试样, 分别用于 100、200 和 300 kPa 围压下的三轴压缩-电阻率同步测量试验.

电阻率测量采用四极法, 以减少土样和端部电极的接触电阻. 在土样的上端和下端分别安置铜质电极以传递电流, 在土样的中间则环绕两圈铜制导电薄膜作为电压测量点. 导电薄膜不完全封闭, 防止在压缩过程中薄膜约束土体变形. 铜电极与导电薄膜之间的间隔为 10 mm, 两个导电薄膜之间的距离为 60 mm. 电极导线穿过橡皮膜与电极接触, 橡皮膜穿透处用防水胶密封, 防止压缩时试样在高压环境下被破坏. 在压力室内将试样与导线相连, 采用热缩管与胶水密封, 通过压力室底座孔洞与压力室外电法仪相连, 实现三轴压缩试验与电阻率测量同步.

在不同围压下对砂土试样进行不固结不排水的三轴压缩试验, 剪切速率设为 0.1 mm/min, 在轴向应变达到 18% 时终止试验. 从施加指定围压开始前到加载结束泄掉围压, 全过程使用高精度直流稳流电源进行电阻率测量. 为有效抑制极化效应的影响, 试验过程中采用通电 0.2 s、断电 2 s 的模式连续采集 2.4 h. 对试样在三轴压缩前、后分别开展计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 试验. 试验方案见表 1 所示. 其中, w 为试样试验含水率, σ_3 为围压.

表1 砂土试验方案

Table 1 Testing scheme for sandy soil

编号	$w / \%$	$\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	σ_3 / kPa	测量方法
1	7	1.8	100	CT 和三轴压缩-电阻率同步测量
2	7	1.8	200	
3	7	1.8	300	
4	9	1.8	100	三轴压缩-电阻率同步测量
5	9	1.8	200	
6	9	1.8	300	
7	11	1.8	100	三轴压缩-电阻率同步测量
8	11	1.8	200	
9	11	1.8	300	
10	13	1.8	100	三轴压缩-电阻率同步测量
11	13	1.8	200	
12	13	1.8	300	

1.3 CT试验

CT 试验设备采用 ZEISS Xradia 520 Versa X 射线显微镜. 选取含水率为 7% 的 3 个试样, 将试样包装在橡皮膜内并缠绕保鲜膜, 防止水分流失和土体结构性破坏. 在试验前先对 3 个试样进行 CT 扫描, 获得试样此时的细观结构状态. 对该组试样开展三轴压缩-电阻率同步测量试验, 再进行 CT 扫描, 获得试验后的细观结构状态.

2 同步测量试验与 CT 扫描试验结果

2.1 电阻率-应力-应变关系和破坏模式

偏应力是连续介质力学中引发材料形变的关键应力分量, 表现为总应力张量中偏离静水压力的部分, 在本实验中为轴向应力 (σ_1) 与围压 (σ_3) 之差, 直接影响到砂土的强度和破坏形式. 根据实验结果绘制各砂土试样的偏应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 和电阻率 (r) 随轴向应变 (ε) 的变化曲线, 如图 1 所示.

图 1 显示, 随着轴向应变增大, 扰动砂土试样的切线模量逐渐减小. 当偏应力超过峰值后, 偏应力-轴向应变曲线的切线模量由正值转变为负值. 随着轴向应变的继续增加, 偏应力呈现下降趋势, 其切线模量的绝对值逐渐增大, 表明材料进入了应变软化阶段. 在小变形阶段, 土体强度主要由颗粒骨架结构及其胶结作用提供. 随着变形的发展, 颗粒间的摩擦阻力逐渐增大. 当荷载达到土体峰值应力时, 颗粒接触面的摩擦作用达到极限状态, 导致骨架结构开始破坏. 此后, 土体强度主要由残余摩擦作用维持, 由于骨架支撑作用的丧失, 最终表现出典型的应变软化行为.

在荷载作用下, 中砂的偏应力-轴向应变曲线均为先升后降的应变软化型, 而电阻率-轴向应变曲线先微降后陡升, 二者变化趋势相反^[19, 21]. 初始试验阶段电阻率的下降源于土体原生裂隙闭合和颗粒间距缩小导致的导电通路改善, 当荷载超过屈服点后, 微小裂隙的萌生与扩展造成导电网络破坏, 促使电阻率急剧上升. 该现象证实了电阻率参数与土体损伤演化过程具有相关性, 为利用电阻率参数建立损伤扰动函数提供了理论基础.

图 1 的试验结果显示, 电阻率加速上升的转折点与应力峰值同步出现, 应力屈服点、弹性模量拐点及电阻率曲线拐点三者具有一致性. 基于这种力学-电阻率协同变化规律, 可将砂土剪切过程划分

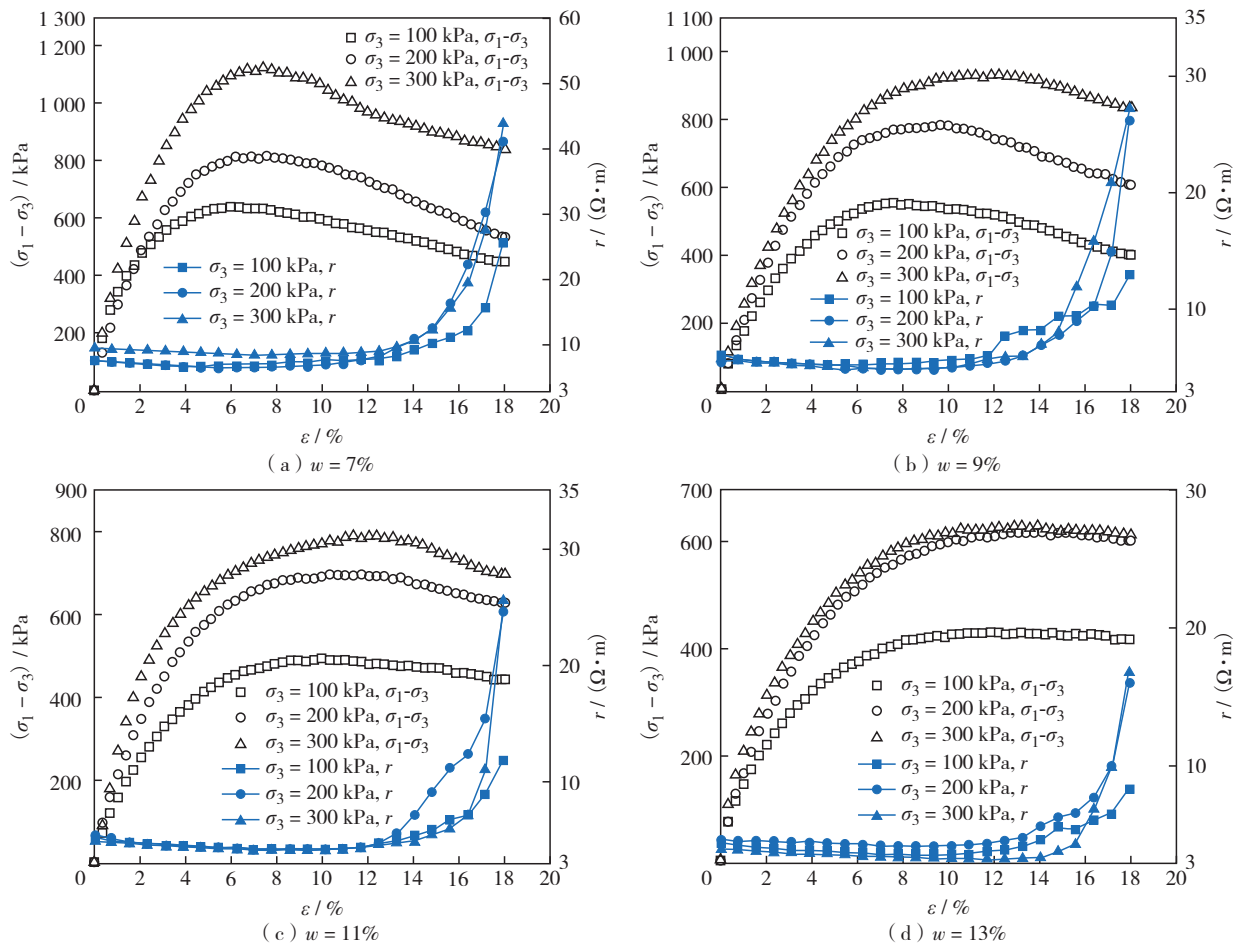


图1 偏应力和电阻率随轴向应变的变化曲线

Fig. 1 Curves of deviatoric stress-axial strain (black shape) and electrical resistivity variation (blue line) under confining pressures of 100 kPa (square), 200 kPa (circle), and 300 kPa (triangle). Each figure corresponds to specimens tested under different moisture contents.

为细微损伤和加速损伤两个典型阶段。

细微损伤阶段：在压缩初期，各种工况都会出现电阻率轻微下降的现象，降幅在 $2 \sim 4 \Omega \cdot \text{m}$ 。应力迅速增大，土体处于非线性弹性变形阶段。在此阶段，随着应力的增加，土样受压导致原生孔隙闭合变小，孔隙气体被排出。压密效应导致土体的导电能力提高，电阻率变小。

加速损伤阶段：在接近峰值应力时，土体进入加速损伤阶段。此阶段土体经过塑性屈服后逐渐进入残余变形阶段，土体压密效应和裂隙扩展效应同时存在。随着压缩继续，土体内部裂隙显著扩展并贯通，空气逐渐取代原有骨架结构。由于空气的绝缘特性，土体电阻率呈现加速上升趋势。此阶段，微小裂隙不断贯通，导致电阻率变化率持续增大，土体结构迅速劣化。

土体的力学特性受含水率和围压共同影响^[22]。相同围压条件下，含水率升高会显著推迟应力峰值

的出现并降低其数值。这是由于孔隙水压力升高会降低颗粒间的有效应力，水膜润滑作用削弱颗粒间的摩擦阻力，黏聚力和内摩擦角随含水率的增加而减小。上述因素的协同作用显著降低了土体抗剪强度。另外，含水率固定时，围压增大不仅提高峰值应力值，同时会推迟其出现。这源于围压对土体侧向变形的约束，该约束增大了颗粒间的接触压力，进而提升土体的结构整体稳定性与抗剪强度。

电阻率演化与力学响应呈现显著的协同变化特征。固定围压下，含水率升高会推迟电阻率的加速上升；含水率固定时，围压增大也会推迟电阻率的加速上升。这种协同行为可通过细观结构演变机制解释。含水率较高时，土体电阻率主要由孔隙水决定，水膜厚度增加降低了土体颗粒接触电阻的敏感性，需要更大的应变促使更多孔隙贯通，从而引起电阻率上升；围压增大提高了颗粒间的接触压力，抑制了裂隙的扩展速率，从而推迟了电阻率的加速

上升.由此可见,电阻率变化特征能够有效反映土体损伤演化全过程,其变化规律与力学状态转变具有对应关系.

不同含水率中砂的破坏方式见图2.图2显示,破坏试样存在斜向破坏剪切面,斜向贯穿整个试

样.恒定围压下,随着含水率的降低,试样破坏面剪切带特征加剧,破坏模式逐渐由压缩肿胀主导的塑性变形转变为剪切破坏.在相同含水率时,围压的增大显著增强了试样侧向约束效应,导致破坏面发育程度降低.

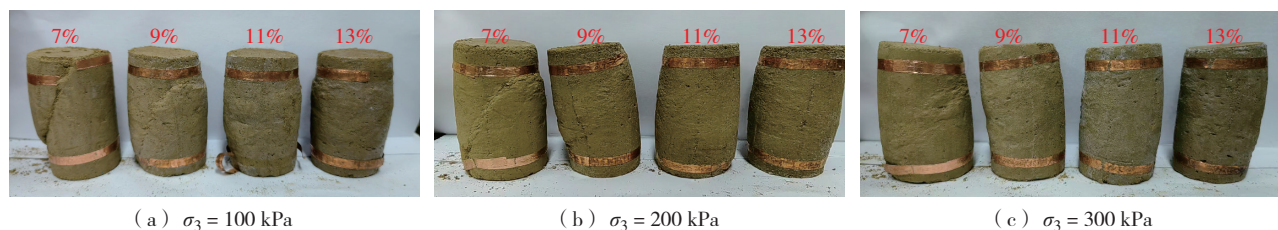


图2 不同围压下不同含水率中砂的破坏方式

Fig. 2 Failure modes of medium sand at different moisture contents under different confining pressures.

2.2 CT扫描分析

选取试样1、2和3中将试样均分的4个切片(S1—S4)作为研究对象,分析切片受荷载前后的细观结构变化.为定量评估土壤细观结构的演化,可通过式(1)计算3个试样12个切片三轴压缩前后的分形维数 F

$$\lg P = F/2 \times \lg A + C \quad (1)$$

其中, P 为孔隙周长(单位: mm); A 为孔隙面积(单位: mm²); C 为常数^[23].分形维数是表征孔隙分布形状的参数,可以量化表征材料内部微裂隙的数量和复杂度,与材料力学性能的变化密切相关^[24].分形维数越大,代表材料内部的裂隙数量越多,裂隙的形状和分布也越复杂.

试样1的切片S2受荷载前后孔隙结构的对比见图3,试样1、2和3受荷载前后切片的分形维数对比见图4. CT试验结果与三轴试验破坏模式相互印证,揭示了土体损伤演化的宏-细观特征.图3显示,试样受荷载后出现孔隙重构现象,原有大孔隙被压缩,同时形成沿潜在破坏面方向分布的贯通裂

隙.图4中各切面的分形维数在试验后呈上升趋势,证实了试样内部微裂隙网络的复杂化发展过程.进一步分析CT三维重建结果发现,微裂隙最终在斜向约45°形成贯通破坏面,与图2宏观剪切带位置一致.孔隙结构分析表明,试验过程中土体内部孔隙经历了压密、萌生、扩展与贯通的完整演化过程,最终形成剪切破坏面,导致试样电阻率显著增大.

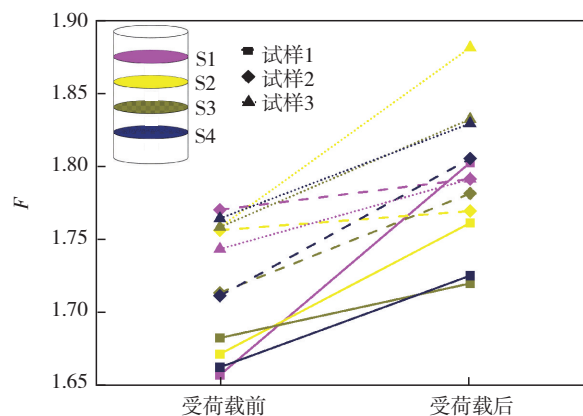


图4 试样1、2和3受荷载前后切片的分形维数

Fig. 4 Fractal dimension of slices from specimen 1 (square, solid line), specimen 2 (triangle, dashed line) and specimen 3 (diamond, short dotted line), before and after loading.

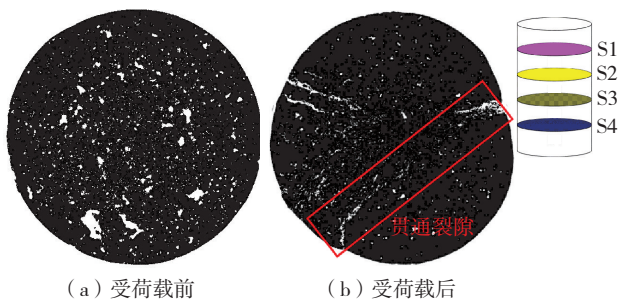


图3 试样1切片S2受荷载前后孔隙结构对比

Fig. 3 Comparison of pore structures of slice S2 of specimen 1 (a) before loading and (b) after loading. The red rectangle indicates through-going fracture.

3 砂土损伤本构模型

3.1 基于电阻率的损伤变量定义

导致材料力学性能劣化的细观结构变化被称为损伤.在宏观层面,引入损伤变量来定义土体材料的损伤状态.

土体的电阻率与孔隙率服从幂函数关系^[10].本

研究结合三轴压缩试验中恒定应变速率加载的特点, 提出以电阻率自然对数的相对变化来定义损伤变量(D_i). 通过对数变换将原本的幂函数关系转化为线性关系, 既直观地反映孔隙率变化, 同时约束损伤变量在 0~1. 砂土试样在试验过程中的电阻率变化呈先降后升的特征. 在电阻率下降阶段, 砂土试样的孔隙被压缩, 空气被排出, 导致土体电阻率减小. 荷载主要由土体骨架承担, 变形以弹性变形为主, 损伤可忽略, 损伤变量取为 0. 电阻率上升阶段, 损伤变量定义为土体电阻率的自然对数差值之比, 为

$$D_i = \begin{cases} 0, & \varepsilon < \varepsilon_0 \\ 1 - \frac{\ln(r_{\max}/r_i)}{\ln(r_{\max}/r_{\min})}, & \varepsilon \geq \varepsilon_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, r_i 为某轴向应变对应的电阻率; $r_{\max}$ 为试样变形过程中的电阻率最大值; $r_{\min}$ 为试样变形过程中的电阻率最小值; ε_0 为试样电阻率开始上升时对应的轴向应变值.

3.2 损伤函数

根据电阻率实测数据, 按式(2)计算土体损伤变量, 选取合适的函数对其进行拟合获得损伤函数, 损伤变量的拟合曲线见图 5. 由图 5 可见, 损伤变量随轴向应变 ε 的增大呈幂函数增长, 因此采用幂函数进行拟合. 由于损伤变量介于 0~1, 将损伤变量进行归一化处理. 规定初始应变为零时其损伤变量为 0, 在轴向应变达到最大($\varepsilon_{\max}$)时砂土试样完全损伤, 损伤变量为 1, 可按式(3)对损伤变量进行拟合.

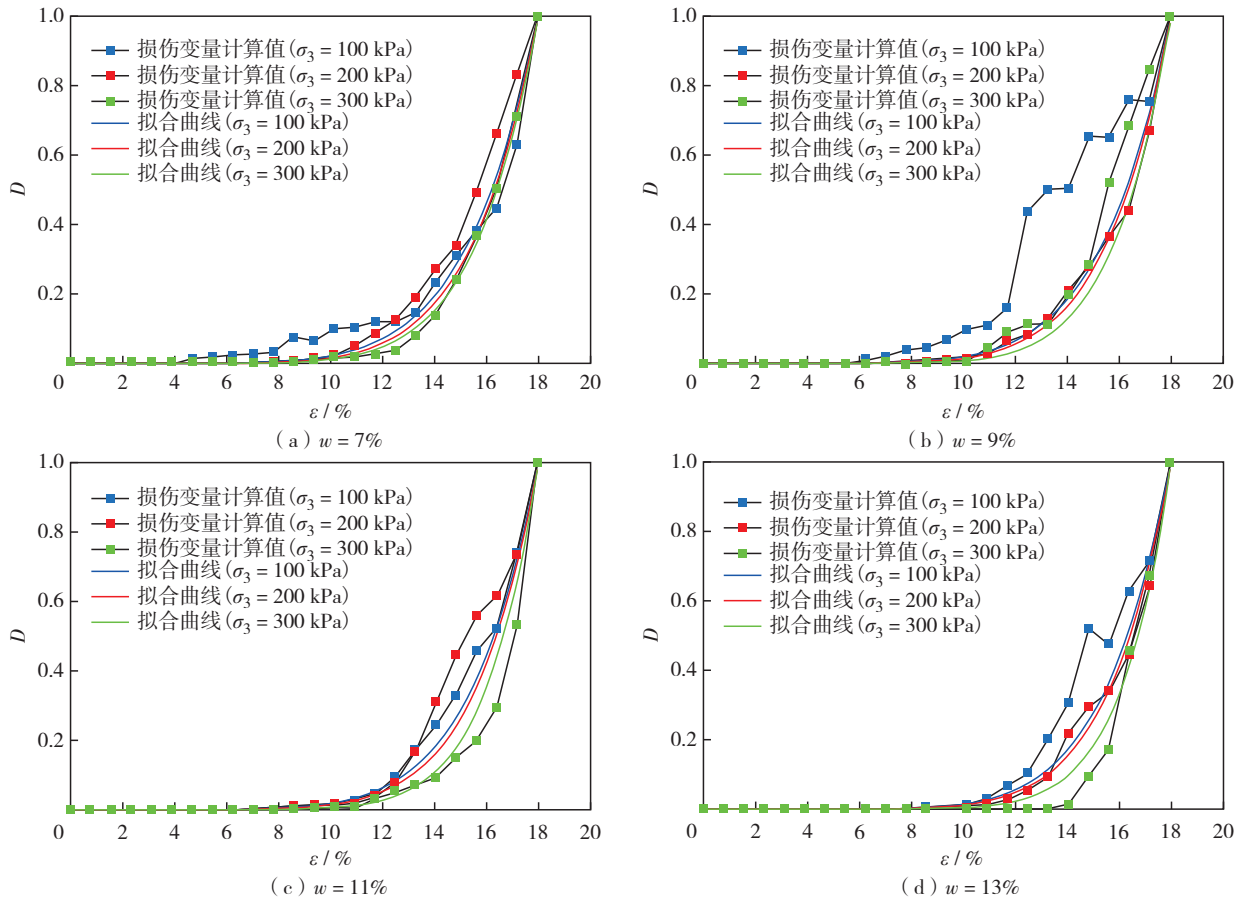


图 5 损伤变量的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves (line) of damage variable (point), under confining pressures of 100 kPa (blue), 200 kPa (red), and 300 kPa (green).

Each figure corresponds to specimens tested under different moisture contents and confining pressures.

$$D = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \right)^c \quad (3)$$

其中, D 为拟合损伤变量; c 为损伤变量幂参数.

在细微损伤阶段, 偏应力-应变曲线呈现上升

趋势, 其力学行为与经典弹性模型表现出良好的一致性. 该阶段的切线弹性模量始终维持正值, 但逐渐减小, 表明土体内部损伤程度极小, 可近似视为 0. 当偏应力-应变曲线逼近峰值应力时, 土体开始

进入加速损伤阶段. 该阶段应力软化现象显著出现, 土体骨架结构已无法有效承受外部荷载, 内部损伤急剧发展. 损伤变量在接近峰值应力时快速递增, 其数值最终趋近于1, 这标志着土体骨架结构的强度整体失效.

c 影响了函数的上升速率, c 越大, 函数图像越陡. 它决定了砂土进入加速损伤阶段的应变值及后续损伤的发展速率. c 随围压和含水率的变化见图6. 由图6可见, 含水率一定时, c 随围压的增加而增大; 当围压一定时, c 随含水率的提高而增大. 围压和含水率均对 c 有影响. 因此构建考虑了这2项参数的幂参数模型, 来反映环境条件对损伤演化规律的影响:

$$c = (2.39 \times 10^{-4}w + 7.83 \times 10^{-3}) \times (4.03 \times 10^{-3}\sigma_3^2 - 7.62 \times 10^{-1}\sigma_3 + 7.00 \times 10^2) \quad (4)$$

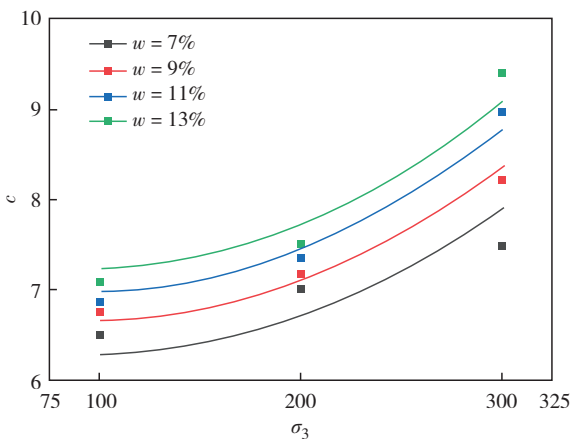


图6 损伤变量幂参数随围压和含水率的变化曲线
Fig. 6 The power-law parameter (solid square) of the damage variable under varying confining pressures and moisture contents. The lines are fitting curves.

3.3 基于扰动状态概念的损伤本构模型

在荷载作用下, 土体损伤会导致强度损失和应变软化, 需建立考虑损伤的本构模型来描述土体的应力-应变特征和力学响应. 根据扰动状态概念, 利用损伤变量对相对完整状态(relative intact, RI)和完全调整状态(fully adjusted, FA)加权叠加, 构建考虑土体损伤的砂土本构模型:

$$\sigma_a = (1 - D)\sigma_{RI} + D\sigma_{FA} \quad (5)$$

其中, σ_a 为损伤状态下土体的力学响应; σ_{RI} 为相对完整状态下土体的力学响应; σ_{FA} 为完全调整状态下土体的力学响应. 相对完整状态和完全调整状态的本构模型分别采用非线性弹性模型和极限应力模型进行描述, 模型曲线分别如图7(a)和(b).

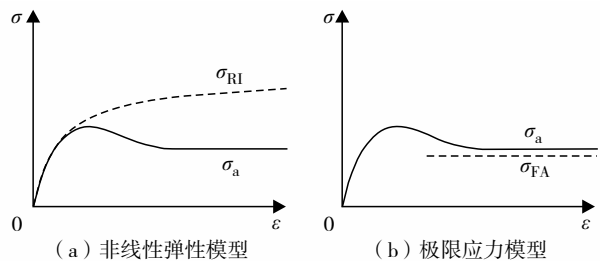


图7 非线性弹性模型和极限应力模型
Fig. 7 (a) Nonlinear elastic model and (b) ultimate stress model.

采用 Duncan-Chang 双曲线模型描述砂土相对完整状态下的应力-应变关系, 为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (6)$$

其中, a 和 b 为试验参数. 根据摩尔-库伦准则, 破坏应力可以表示为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2f \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (7)$$

其中, f 为黏聚力; φ 为内摩擦角. 完全调整状态的极限应力按摩尔-库伦破坏应力计算.

依据文献[25]确定各个工况的 Duncan-Chang 双曲线模型参数 a 和 b , 见表2. 不同含水率下砂土的 c 和 φ 通过绘制摩尔应力圆确定, 见表3.

不同围压及含水率下的砂土偏应力-轴向应变试验数据与损伤本构模型曲线请扫描论文末页右下

表2 Duncan-Chang模型参数

Table 2 Parameters of the Duncan-Chang model			
$w / \%$	σ_3 / kPa	$10^3 \times a$	$10^3 \times b$
7	100	1.28	1.61
7	200	0.785	2.53
7	300	0.623	1.74
9	100	1.50	3.28
9	200	0.953	3.18
9	300	0.775	3.05
11	100	1.60	4.31
11	200	1.10	3.32
11	300	1.02	2.67
13	100	1.86	4.83
13	200	1.21	4.59
13	300	1.26	3.65

表3 相对完整状态摩尔-库伦模型参数

Table 3 Parameters of Mohr-Coulomb model in RI state

$w / \%$	f / kPa	φ / rad
7	100.8	0.582
9	109.6	0.512
11	112.7	0.447
13	120.2	0.360

角二维码查看补充材料图 S1. 为验证模型可靠性, 以 Duncan-Chang 模型和 Weibull 损伤线弹性模型^[8]为例进行对比分析. Duncan-Chang 模型未考虑土体的损伤和应变软化特性, 在所有工况中的应力水平均高于实际土体应力; Weibull 损伤线弹性模型在应变软化阶段应力预测值较低. 本研究模型引入电阻率参数定量表征损伤演化过程, 研究了土体骨架结构的渐进破坏机制, 在应变软化阶段的模型精度显著提升, 使损伤本构模型能够更准确地模拟砂土力学响应.

本研究提出的基于电参数的损伤本构模型构建方法相较传统依赖应力或应变参量的方法显著降低了建模成本, 结果证实了利用电参数建立本构模型的可行性, 可为后续利用现场电测量数据快速建模提供基础依据. 但受方法原理和试验条件限制, 仍存在下述局限性: ① 模型是基于砂土电阻率模型和相关试验结果建立的, 其电阻率-损伤关系的建立机制与黏性土存在差异. 砂土电阻率的影响因素主要包括骨架结构和孔隙水电阻率, 而黏土导电性主要包括自由孔隙水的导电性、双电层中扩散层的离子导电性、双电层中固定层的离子导电性和黏土矿物的导电性^[11], 影响黏土电阻率的因素更为复杂和多样化. 由于未考虑黏土颗粒表面导电层的影响, 当前模型需引入双电层导电理论才能推广至黏性土. ② 作为土的一项基本物理参数, 电阻率表征的是土体平均导电能力, 在一定的应变区间内对损伤较为敏感. 小应变阶段裂隙萌生与孔隙压密效应叠加, 电阻率的变化趋势不能充分反映初始阶段的微小损伤. 因此, 提出的构建损伤本构模型方法主要适用于大应变阶段的土体. ③ 损伤变量由四极法测得的体积平均电阻率变化定义, 受限于测量原理(仅获取等效标量值)和试样制备方法(湿捣法制备各向同性砂样)^[26], 损伤变量未考虑损伤的各向异性特征. 后续研究将围绕上述局限性展开, 进一步改进模型构建方法.

<http://journal.szu.edu.cn>

4 结 论

基于三轴压缩-电阻率同步测量试验, 建立了由电阻率变化驱动的砂土损伤本构模型. 利用试验数据拟合模型参数, 并分析了损伤本构模型中砂土的应力-应变响应, 主要结论如下:

1) 砂土在试验过程中经历弹性变形、塑性屈服和残余变形过程, 偏应力-轴向应变曲线表现出应变软化特征. 试样变形依次由土体压密、微裂隙萌生、裂隙贯通主导, 导致电阻率-应变曲线先下降后快速上升. 电阻率-应变曲线与偏应力-应变曲线呈现负相关趋势, 表明电阻率能够表征土体的力学状态变化.

2) 定义了基于电阻率参数的损伤变量, 损伤变量与应变服从幂函数规律. 在弹性压缩阶段, 土体损伤极小, 损伤变量接近于零; 应力临近峰值时, 土体结构开始迅速破坏, 损伤变量快速增大至 1. 基于电阻率参数定义的损伤变量能够反映土体在不同变形阶段的损伤演化.

3) 以电测量方法为手段, 提出了由电阻率驱动的土体损伤扰动函数, 进而结合扰动状态概念建立损伤本构模型. 相较传统模型, 损伤本构模型能更加准确地预测不同围压及含水率下中砂的应力-应变响应.

基金项目: 四川省自然科学基金资助项目(2024NSFSC0110); 上海市自然科学基金青年资助项目(25ZR1402285); 上海交通大学新进青年教师启动计划资助项目(AF0100187)

作者简介: 王宇航(wangyuhang@sjtu.edu.cn), 上海交通大学硕士研究生. 研究方向: 隧道与岩土工程.

引 文: 王宇航, 韩瑞莹, 周轲, 等. 基于电参数同步测试的砂土损伤本构模型[J]. 深圳大学学报理工版, 2026, 43(2): 233-242.

参考文献 / References:

- [1] 徐辉. 土的细观损伤本构模型[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
XU Hui. The micro-damage constitutive model for soil [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [2] 马秋峰, 刘志河, 秦跃平, 等. 基于能量耗散理论的岩石塑性-损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1210-1220.
MA Qiufeng, LIU Zhihe, QIN Yueping, et al. Rock plastic-damage constitutive model based on energy dissipation [J]. Rock Mechanics, 2021, 42(5): 1210-1220.

- pation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(5): 1210-1220. (in Chinese)
- [3] 张革, 曹玲, 王成汤. 考虑多晶冰软化特性的弹塑性损伤本构模型开发及应用[J]. *岩土力学*, 2022, 43(7): 1969-1977.
- ZHANG Ge, CAO Ling, WANG Chengtang. Development and application of elastic-plastic damage constitutive model considering softening characteristics of polycrystalline ice [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(7): 1969-1977. (in Chinese)
- [4] 徐娜, 傅学怡. 基于能量损失理论的混凝土受压损伤本构模型[J]. *深圳大学学报理工版*, 2017, 34(6): 604-610.
- XU Na, FU Xueyi. The compression damage constitutive model of concrete based on the theory of energy loss [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2017, 34(6): 604-610. (in Chinese)
- [5] 李栋伟, 汪仁和. 基于统计损伤理论的冻土蠕变本构模型研究[J]. *应用力学学报*, 2008, 25(1): 133-136.
- LI Dongwei, WANG Renhe. Frozen soil creep model based on statistical damage theory [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2008, 25(1): 133-136. (in Chinese)
- [6] 蒋浩鹏, 姜谔男, 杨秀荣. 基于Weibull分布的高温岩石统计损伤本构模型及其验证[J]. *岩土力学*, 2021, 42(7): 1894-1902.
- JIANG Haopeng, JIANG Annan, YANG Xiurong. Statistical damage constitutive model of high temperature rock based on Weibull distribution and its verification [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(7): 1894-1902. (in Chinese)
- [7] 陈有亮, 肖鹏, 杜曦, 等. 温度与围压耦合作用下基于Weibull分布的岩石损伤本构模型[J]. *工业建筑*, 2022, 52(8): 160-167.
- CHEN Youliang, XIAO Peng, DU Xi, et al. A damage constitutive model for rock based on Weibull distribution under coupling action of temperature and confining pressure [J]. *Industrial Construction*, 2022, 52(8): 160-167. (in Chinese)
- [8] 郅彬, 王成, 王尚杰, 等. 基于Weibull分布的高温结构性黄土统计损伤本构模型[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(12): 118-125.
- ZHI Bin, WANG Cheng, WANG Shangjie, et al. Statistical damage constitutive model for structural loess at high temperature based on Weibull distribution [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(12): 118-125. (in Chinese)
- [9] 滕起, 杨正明, 刘学伟, 等. 特低渗透油藏井组开发过程物理模拟[J]. *深圳大学学报理工版*, 2013, 30(3): 299-305.
- TENG Qi, YANG Zhengming, LIU Xuewei, et al. Well group development process physical simulation of the ultra-low permeability reservoirs [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2013, 30(3): 299-305. (in Chinese)
- [10] 查甫生, 刘松玉. 土的电阻率理论及其应用探讨[J]. *工程勘察*, 2006, 34(5): 10-15, 44.
- ZHA Fusheng, LIU Songyu. Study on the theory of soil electrical resistivity and its application [J]. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 2006, 34(5): 10-15, 44. (in Chinese)
- [11] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(8): 1671-1676.
- ZHA Fusheng, LIU Songyu, DU Yanjun, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(8): 1671-1676. (in Chinese)
- [12] 钱云华, 田明, 陈伟, 等. 强震后公路边坡损伤状态评价及稳定性分析[J]. *重庆交通大学学报自然科学版*, 2025, 44(4): 69-78.
- QIAN Yunhua, TIAN Ming, CHEN Wei, et al. Damage state evaluation and stability analysis of highway slope after strong earthquake [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University Natural Science*, 2025, 44(4): 69-78. (in Chinese)
- [13] 康恩胜, 孟海东, 杜鹏东, 等. 降雨条件下排土场边坡损伤的电阻率变化特征研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(9): 51-61.
- KANG Ensheng, MENG Haidong, DU Pengdong, et al. Study on the resistivity variation characteristics of dump slope damage under rainfall conditions [J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(9): 51-61. (in Chinese)
- [14] 李瑞珂, 车爱兰, 冯少孔. 基于电测法的路基土物理性质室内测试方法研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(1): 51-59.
- LI Ruike, CHE Ailan, FENG Shaokong. Electrical measurement based laboratory testing method of physical properties of subgrade soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(1): 51-59. (in Chinese)
- [15] ZHOU Yu, LI Guoyu, MA Wei, et al. Experimental study

- on electric resistivity characteristics of compacted loess under different loads and drying-wetting cycles [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 6672430.
- [16] 付伟, 汪稔, 胡明鉴, 等. 不同温度下冻土单轴抗压强度与电阻率关系研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 73-78.
- FU Wei, WANG Ren, HU Mingjian, et al. Study of relationship between uniaxial compressive strength and electrical resistivity of frozen soil under different temperatures [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 73-78. (in Chinese)
- [17] BAI W, KONG L W, GUO A G, et al. Stress - strain - electrical evolution properties and damage-evolution equation of lateritic soil under uniaxial compression [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2017, 45(4): 1247-1260.
- [18] YUAN Ganglie, WU Zhijian, CHE Ailan, et al. Damage evolution mechanism of loess slope under the combination of freeze-thaw cycles and earthquake [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 166: 107778.
- [19] 王庭元, 郝子睿, 姚鑫, 等. 赤泥改良石灰土的应力-应变-电阻率研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(5): 1591-1596, 1603.
- WANG Tingyuan, HAO Zirui, YAO Xin, et al. Study on stress-strain-resistivity of lime soil modified by red mud [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(5): 1591-1596, 1603. (in Chinese)
- [20] 安然, 孔令伟, 柏巍, 等. 单轴荷载下残积土的电阻率损伤模型及干湿循环效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(S1): 3159-3167.
- AN Ran, KONG Lingwei, BAI Wei, et al. The resistivity damage model of residual soil under uniaxial load and the law of drying-wetting effects [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(S1): 3159-3167. (in Chinese)
- [21] 李丽华, 岳雨薇, 李文涛, 等. 固化重金属污染土电阻率与强度特性试验研究[J]. *武汉大学学报工学版*, 2024, 57(9): 1241-1250.
- LI Lihua, YUE Yuwei, LI Wentao, et al. Experimental study on resistivity and strength properties of solidified heavy metal contaminated soil [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024, 57(9): 1241-1250. (in Chinese)
- [22] 王欢, 杨立功, 左殿军, 等. 钙质砂三轴排水试验围压与剪切速率对应力特性影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(增刊1): 249-253.
- WANG Huan, YANG Ligong, ZUO Dianjun, et al. Influences of confining pressure and shear rate on stress characteristics of triaxial drainage tests on calcareous sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(Suppl. 1): 249-253. (in Chinese)
- [23] YUAN Ganglie, CHE Ailan, TANG Hua. Evaluation of soil damage degree under freeze-thaw cycles through electrical measurements [J]. *Engineering Geology*, 2021, 293: 106297.
- [24] 赵宇, 沈光海, 朱伶俐, 等. 基于分形维数的3D打印钢渣水泥基材料单轴压缩试验的细观破坏规律[J/OL]. *复合材料学报*. (2024-12-09) [2025-04-01]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241206.001>.
- ZHAO Yu, SHEN Guanghai, ZHU Lingli, et al. Fractal dimension-based fine-scale damage law for uniaxial compression test of 3D printed steel slag cementitious materials [J/OL]. *Acta Materiae Compositae Sinica*. (2024-12-09) [2025-04-01]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241206.001>. (in Chinese)
- [25] 郑月鑫, 高彦斌. 基于三轴试验确定邓肯-张模型参数的一种数据处理方法[C]// 2016年全国工程地质学术年会论文集. 北京: 中国地质学会工程地质专业委员会, 2016: 930-934.
- ZHENG Yuexin, GAO Yanbin. The data processing method for determining Duncan-Chang model parameters based on triaxial tests [C]// *Proceedings of the 2016 National Engineering Geology Academic Annual Conference*. Beijing: Engineering Geology Professional Committee of the Geological Society of China, 2016: 930-934. (in Chinese)
- [26] 杨仲轩, 李相崧, 明海燕. 砂土各向异性和不排水剪切特性研究[J]. *深圳大学学报理工版*, 2009, 26(2): 158-163.
- YANG Zhongxuan, LI Xiangsong, MING Haiyan. Fabric anisotropy and undrained shear behavior of granular soil [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2009, 26(2): 158-163. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之聿】



补充材料