

真三轴力-水路径下原状黄土增湿变形特性研究

王泽驰¹, 邵帅¹, 邵生俊^{1,2}, 吴昊¹, 张彬¹, 张少英¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究真三轴力-水路径下原状黄土增湿变形特性, 采用刚-柔-柔型加载边界的真三轴仪, 对西安原状黄土开展了不同球应力、中主应力参数和应力比条件下的真三轴单线法增湿试验, 全面分析了真三轴力-水路径对原状黄土增湿变形特性的影响。试验结果表明: 增湿体(偏)应变与球应力的关系曲线呈现缓-陡-缓3个阶段, 球应力在第2阶段时土体的增湿湿陷性最大, 可发生较大的增湿变形; 一定应力比时, 增湿体应变随着球应力逐渐增大, 当球应力超过200 kPa后增湿体应变的增大幅度减小; 分析了试验因素与各增湿应变变量之间的变化规律, 并依据试验结果给出了考虑中主应力的黄土湿陷变形计算表达式。

关键词: 真三轴试验; 原状黄土; 单线法; 分级增湿; 湿陷变形

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2025)11-3451-11

Wetting deformation characteristics of undisturbed loess under true triaxial stress-water path

WANG Ze-chi¹, SHAO Shuai¹, SHAO Sheng-jun^{1,2}, WU Hao¹, ZHANG Bin¹, ZHANG Shao-ying¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: To study the wetting deformation characteristics of undisturbed loess under true triaxial force-water path, the true triaxial apparatus with rigid-flexible-flexible loading boundary was used to carry out the true triaxial single-line humidification test of undisturbed loess in Xi'an under different spherical stresses, intermediate principal stress parameters and stress ratios. The influence of true triaxial force-water path on the humidification deformation characteristics of undisturbed loess was comprehensively analyzed. The test results show that the relationship curve between the wetting volumetric (deviatoric) strain and the spherical stress presents a three-stage of slow-steep-slow. When the spherical stress is in the second stage, the wetting collapsibility of the soil is the largest, and a large wetting deformation can occur. At a certain stress ratio, the wetting volumetric strain gradually increases with the spherical stress, and the increase of the wetting volumetric strain decreases when the spherical stress exceeds 200 kPa. Finally, the variation law between the intermediate principal stress and each humidification strain is analyzed, and the calculation expression of loess collapsible deformation considering the intermediate principal stress is given according to the test results.

Keywords: true triaxial test; undisturbed loess; single line method; graded humidification; collapsible deformation

1 引言

黄土在我国西北地区广泛分布, 其天然状态下具有欠压密、大孔隙的特征。这种特殊的微观孔隙结构致使黄土具备湿陷性, 即在增湿条件下, 颗粒间胶结作用弱化, 进而引发结构塌陷, 造成强度与

稳定性降低。这一特性使得黄土地基上的建筑物与构筑物面临着严重的安全隐患。特别是在复杂工程环境中, 黄土受到应力历史、地下水位波动、降雨入渗等多因素的耦合作用, 经历着动态变化的力-水耦合路径, 其增湿变形现象对工程安全具有重要影响^[1]。鉴于此, 揭示复杂应力-水力路径下原状黄

收稿日期: 2024-12-18

录用日期: 2025-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 52108342); 陕西省自然科学基金计划-引汉济渭联合基金项目(No. 2019JLP-21, No. 2019JLZ-13); 陕西省水利科技计划项目(No. 2021slkj-12)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(52108342), the Basic Research Program of Natural Science in Shaanxi Province-Han-Wei Joint Found Project(2019JLP-21,2019JLZ-13) and Shaanxi Water Science and Technology Program Project(2021slkj-12).

第一作者简介: 王泽驰, 男, 1998年生, 博士研究生, 主要从事土工试验仪器研发与黄土力学方面的研究。E-mail: 569759968@qq.com

通讯作者: 邵帅, 男, 1991年生, 博士, 副教授, 主要从事黄土力学及土动力学的研究。E-mail: 315602024@qq.com

土的湿陷变形规律, 已经成为黄土地基灾害防控领域的重要问题。

目前, 学者们对于黄土增湿变形的研究多数集中于侧限压缩^[2]、单轴压缩^[3-5]和轴对称应力状态^[6-9], 并通过单线法或双线法探究力-水耦合作用下的湿陷响应。陈正汉等^[2]通过侧限压缩试验发现, 由于刚性边界对侧向变形的限制, 导致该方法得到的湿陷系数对地基中应力比较大的土单元偏大, 反之偏小。相比之下, 单轴压缩试验虽不限制侧向变形, 对黄土地基湿陷的描述更为准确, 但其忽略了侧向应力的影响。实际工程中黄土受水湿陷时, 土的应力状态是三维的, 除了会产生竖向沉降外, 还会出现侧向变形^[10]。常规三轴仪可以考虑围压对增湿变形的影响, 但它仅能描述轴对称应力状态, 难以反映出在实际三维复杂应力状态下, 中主应力对黄土增湿变形的影响^[11]。

真三轴应力路径能够实现三维应力的独立控制以及三维应变的独立量测, 从而按需模拟土体复杂的应力状态^[12]。方瑾瑾等^[11]在真三轴应力状态下对原状黄土开展了双线法增湿试验, 揭示了净围压等因素对增湿变形的影响。然而, 围压控制主要反映的是土体初始侧向约束对增湿变形的影响, 对于整体应力水平变化过程中土体特性研究相对不足。而球应力能综合反映土体在三维应力状态下的整体应力水平^[13], 通过控制球应力进行增湿试验, 可以更全面地研究不同整体应力水平对土体增湿变形的影响。此外, 相较于双线法, 单线法更贴近实际工程中黄土先受荷载后渐进增湿的历程, 能精准反映渐进增湿时的变形特征^[14]。

为深入研究真三轴条件下原状黄土增湿变形响应, 本研究采用刚-柔-柔加载边界的非饱和土真三

轴试验系统, 开展不同球应力、中主应力参数和应力比的真三轴应力路径下原状黄土单线法增湿试验, 以模拟实际黄土的渐进增湿过程, 深入探讨在力-水耦合作用下, 球应力、中主应力和应力比与各应变分量间的相应关系, 建立了考虑中主应力的黄土湿陷变形经验计算表达式。研究成果对湿陷性黄土地区的工程建设具有一定的参考价值。

2 试验材料与方案

2.1 试验土样及试样制备

试验所用黄土取自西安市东郊某工地, 深度为7~8 m。采用人工取土方式, 按照方向区分后, 使用保湿袋进行密封保存。土样运回试验室并放置在阴凉处备用。通过测量并取其平均值得到试样的物理参数: 天然干密度为 1.37 g/cm^3 , 初始孔隙比为 0.96, 初始含水率为 20.8%, 塑限含水率为 21.6%, 液限含水率为 31.7%。土样利用原状土削样器削制成尺寸为 $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$ 的长方体原状试样。通过水膜转移法或自然风干法将原状试样的含水率调整至试验所需的含水率, 将配置好含水率的试样用保湿膜包裹, 并储存于保湿缸中备用。

2.2 试验仪器

本试验使用的仪器是具有刚-柔-柔加载边界的真三轴仪, 其主要结构组件加载原理详见图 1。该仪器的竖向加载为刚性, 而侧向则通过液压囊施加水压。液压囊与压力室之间通过橡胶隔离垫进行分隔, 侧向主应力的液压囊之间采用了径向弹性伸缩和平面弹性转动的隔离技术。试样的竖向变形和大主应力 σ_1 由安装在压力室盖板上的位移传感器和压力传感器分别测定, 而中主应力 σ_2 和小主应力 σ_3 与其对应的应变则由安装在伺服步进电机加载系

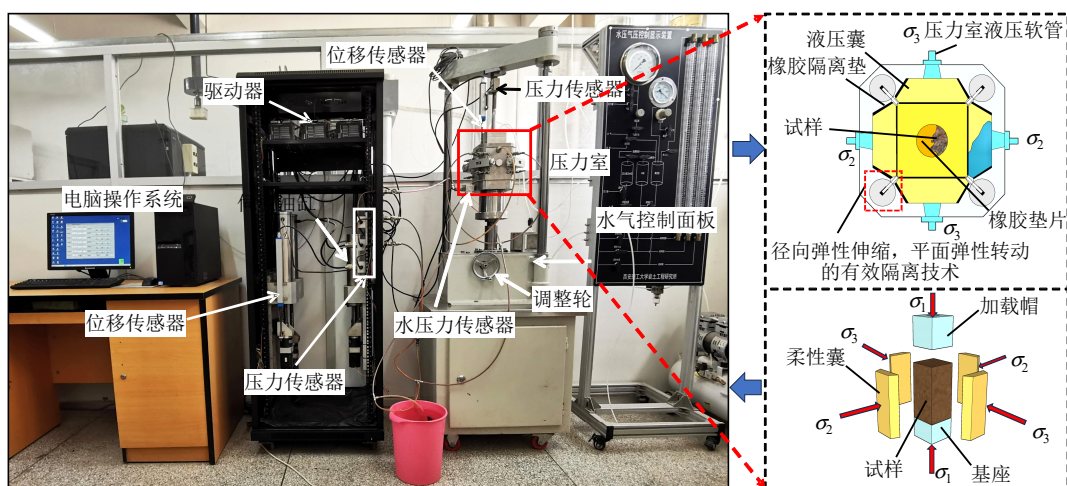


图 1 真三轴仪的主要构成部分

Fig.1 Main components of true triaxial apparatus

统上的位移传感器和输水管上的压力传感器进行测量^[15]。该仪器能够开展多种复杂应力路径下的力学试验，并且通过连接水气控制面板精确控制气压值，同时对排（注）水量进行控制和测量^[16]。它能够实现非饱和土的真三轴试验^[16]、非饱和土的往返加卸载试验^[17]、土的平面应变试验^[18]以及复杂路径下的增湿试验等多种测试^[11]。

2.3 试验方案与试验步骤

本文开展了不同球应力、中主应力参数和应力比条件下的单线法原状黄土真三轴应力路径下的增湿湿陷试验，具体的试验方案见表 1。首先根据试验方案确定 3 个主应力值，并在该应力状态下进行固结直至稳定，随后逐级进行增湿。每级增湿变形稳定后方可进行下一级增湿，直至试样饱和。需要说明的是，在球应力 $p \geq 200$ kPa 且应力比 $\eta = 1.25$ ，以及 $p = 300$ kPa 且 $\eta = 1.00$ 的情况下，土体在未增湿时就已经发生破坏，无法继续承受增湿处理。为了防止原状试样含水率差异而导致的试验误差，采用自然风干法将所有原状试样的含水率统一为 20%，考虑到真三轴试样的尺寸较大，试验周期长，将单线法分级增湿的含水率目标分别设定为 20%（增湿水平 $S_w = 0$ ，饱和度 $S_r = 56.3\%$ ）、24%（增湿水平 $S_w = 0.33$ ，饱和度 $S_r = 67.5\%$ ）、28%（增湿水平 $S_w = 0.67$ ，饱和度 $S_r = 78.8\%$ ）以及 31.5% 即饱和状态（增湿水平 $S_w = 1.00$ ，饱和度 $S_r = 88.6\%$ ）。本文采用增湿水平描述试样的增湿过程，其物理意义为试样增湿后的含水率相对初始含水率的变化值与饱和含水率变化值之比，具体公式为^[19]

$$S_w = \frac{w_i - w_0}{w_s - w_0} = \frac{\Delta w}{w_s - w_0} \quad (1)$$

式中： w_0 为初始含水率； w_i 为增湿后的含水率； w_s 为土体饱和含水率； Δw 为增湿前后含水率变化差值。

表 1 真三轴条件单线法增湿湿陷试验方案
Table 1 Single-line humidification and collapsibility test plan for true triaxial conditions

球应力 p / kPa	中主应力参数 b 值	应力比 η	增湿水平 S_w
50	0.5	0.00, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25	0.00→0.33→0.67→1.00
100	0.5	0.00, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25	0.00→0.33→0.67→1.00
	0.0	0.50, 0.75, 1.00	
150	0.5	0.00, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25	0.00→0.33→0.67→1.00
	1.0	0.50, 0.75, 1.00	
200	0.5	0.00, 0.50, 0.75, 1.00	0.00→0.33→0.67→1.00
250	0.5	0.00, 0.50, 0.75, 1.00	0.00→0.33→0.67→1.00
300	0.5	0.00, 0.50, 0.75	0.00→0.33→0.67→1.00

试验的具体步骤如下：①复核试样的质量，确保所有试样含水率一致；②对饱和后的透水石和滤纸进行称重，并将透水石放入试样囊中，将其固定在压力室底座上，同时放置饱和的滤纸；③将试样小心放入试样囊内，并在上部先后放滤纸与透水石；④安装真三轴压力室、侧向应力柔性囊和垫片等部件；⑤安装试样帽与轴向应力和位移传感器；⑥进行真三轴等向固结，待试样完成固结并达到稳定状态后，按照计算得出的增湿水量通过增湿系统实施分级增湿控制。试验过程中采用水气控制面板的压力控制器对增湿过程进行调节：首先将无气水注入压力控制器的增湿液压缸中，然后控制液压缸与试样帽连接的橡胶软管均充满无气水，橡胶软管配备止水阀。液压缸由步进电机驱动，通过液压缸的液面面积、步进电机的位移量可以计算浸水量，增湿过程保持 4.7 g/h 的恒定浸水速率（量测系统精度为 ± 0.1 g），且浸水方向遵循自上而下的路径，每级增湿完成后即刻关闭止水阀停止注水。当 3 个主应力方向的变形值在 2 h 内低于 0.01 mm，判定试样变形稳定；同时当 2 h 内浸入水量与渗出水量达到平衡时，则判定试样达到饱和状态。⑦试验结束后，对滤纸和透水石的质量进行复测，用于复核实际的浸水量，并且测定试样上、中、下部的饱和度，其饱和度需满足均大于 80% 的要求，且含水率相差在 1% 以内。记录并保存试验过程中的相关数据。

3 真三轴路径下的增湿应力应变特性

本文整理并分析了在控制中主应力参数、应力比和球应力等条件下黄土的增湿变形规律。以下是文中涉及的物理量的含义及其计算公式。

中主应力参数 b ：

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (2)$$

球应力 p ：

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (3)$$

偏应力 q ：

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2} \quad (4)$$

应力比 η ：

$$\eta = \frac{q}{p} \quad (5)$$

增湿体应变 ε_{vs} ：

$$\varepsilon_{vs} = \frac{1}{3} (\varepsilon_{1s} + \varepsilon_{2s} + \varepsilon_{3s}) \quad (6)$$

式中： ε_{1s} 、 ε_{2s} 、 ε_{3s} 分别为增湿大、中、小主应变值。

增湿偏应变 ε_{ss} ：

$$\varepsilon_{ss} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{1s} - \varepsilon_{2s})^2 + (\varepsilon_{2s} - \varepsilon_{3s})^2 + (\varepsilon_{1s} - \varepsilon_{3s})^2} \quad (7)$$

其中，式(6)与式(7)均取自文献[20]所提出的3个广义湿陷系数之中^[19]。

3.1 不同增湿水平条件下的增湿变形规律

图2展示了 $b=0.5$ 时，不同增湿水平和应力比条件下湿陷性黄土增湿过程中的增湿体应变与球应力的关系曲线。可以观察到，当高应力比($\eta=1.25$)且球应力较大时($p>150$ kPa)，增湿途中试样便达到剪切破坏标准。其他曲线的斜率随着球应力的增加呈现出缓—陡—缓的3阶段变化，即增湿体应变速率经历了由慢到快再变慢的过程^[21]。以 $S_w=0.67$ 、 $\eta=0.50$ 的情况为例，在初始阶段(结构压密阶段)，球应力小于100 kPa时，土体颗粒间存在着较强的咬合作用和摩擦力，颗粒位置只能发生微小调整，增湿时，水分主要在颗粒表面的吸附水膜中发生微弱的扩展和增厚，难以深入到颗粒内部的孔隙结构中去，因此产生的增湿体应变较小，并且变形速率较慢，在此应力条件下，土体对增湿不敏感。在中间阶段(结构破坏阶段)，球应力处于100~150 kPa之间，随着球应力和偏应力的增加，土体颗粒间接触关系发生变化，一些较弱的颗粒连接点开始破裂，原有的架空孔隙结构稳定性被破坏。同时，增湿过程中水分更容易浸入到颗粒内部孔隙中，这可能会加速土体内部结构的快速破坏和重组，因此增湿体应变与变形速率均增大。在最后阶段(固结压密阶段)，球应力大于150 kPa时，土体颗粒经过重新排列后，逐渐形成了较稳定的新结构。此时，颗粒间的接触更加紧密，孔隙体积减小，增湿时，水分在较小孔隙中渗流阻力增大，难以引起较大的体积变

化，因此增湿体应变的变形速率减小，逐渐趋于稳定。总体而言，在工程实践中，当土体承受的应力位于中间阶段时，土体的增湿湿陷性增强，可能产生较大的增湿湿陷应变。

在球应力保持不变的条件下，应力比越大，试样所承受的偏应力越高，土体原结构便愈易失稳，则增湿体应变亦随之增大。在这种应力路径下，土体更早地结束了结构压密阶段，而更晚地进入固结压密阶段。原因在于较大的应力比意味着更大的偏应力，而土体结构的破坏主要依赖于偏应力。相比之下，球应力对土样结构的压密作用小于偏应力对土样结构的破坏效果，这使得新的稳定土体结构难以形成。在一定的应力比条件下，随着增湿水平的提高，增湿体应变也随之增大。这是因为增湿水平的提高可能削弱了胶结物对土体结构的加固作用，并增强了颗粒间的润滑效果，这些因素共同加速了土体原有结构的损伤，导致土体增湿变形的增加。增湿体应变随球应力的变化规律(如图2所示)与增湿偏应变随偏应力的变化规律(如图3所示)相似，它们都反映了土体在不同应力路径下增湿过程中结构损伤与愈合的过程。

3.2 不同应力比条件下的增湿变形规律

图4表明，球应力一定时，增湿体应变随增湿水平的升高而增大，但增速渐缓。这一现象反映了黄土的水敏性特征，即随着增湿水平的提高，黄土对水分的敏感性逐渐降低。在应力比一定时，增湿体应变随球应力的增大而增大，但增速逐渐减小。在等向压缩状态下，球应力的增加同样能够引起湿陷变形，这表明土体的增湿湿陷变形不仅受偏应力的影响，球应力的作用也同样重要，这与文献[2]得到的结论一致^[2]。图5则描绘了增湿体应变与增湿偏应变之间的关系曲线，两者显示出了良好的线性关系，且应力比与曲线斜率之间存在正相关性，这

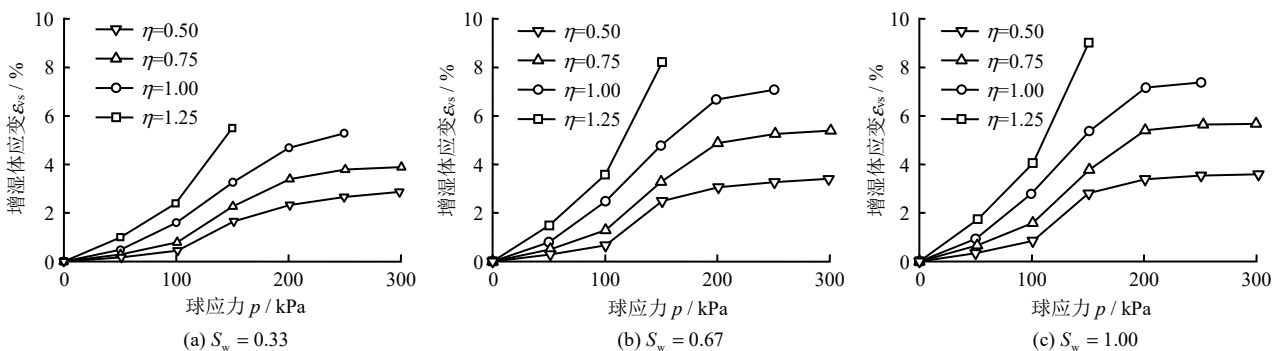


图2 增湿体应变与球应力的变化规律

Fig.2 Variations of wetting volumetric strain and spherical stress

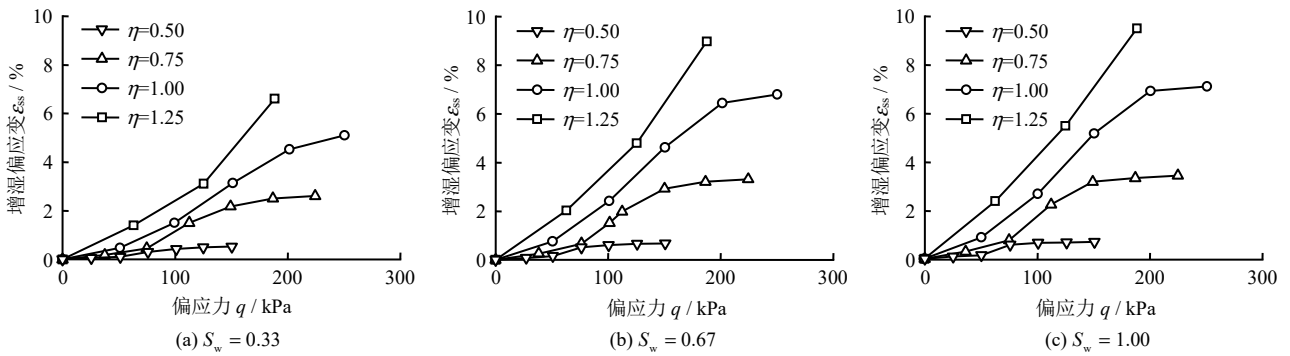


图 3 增湿偏应变与偏应力的变化规律

Fig.3 Variations of wetting deviatoric strain and deviatoric stress

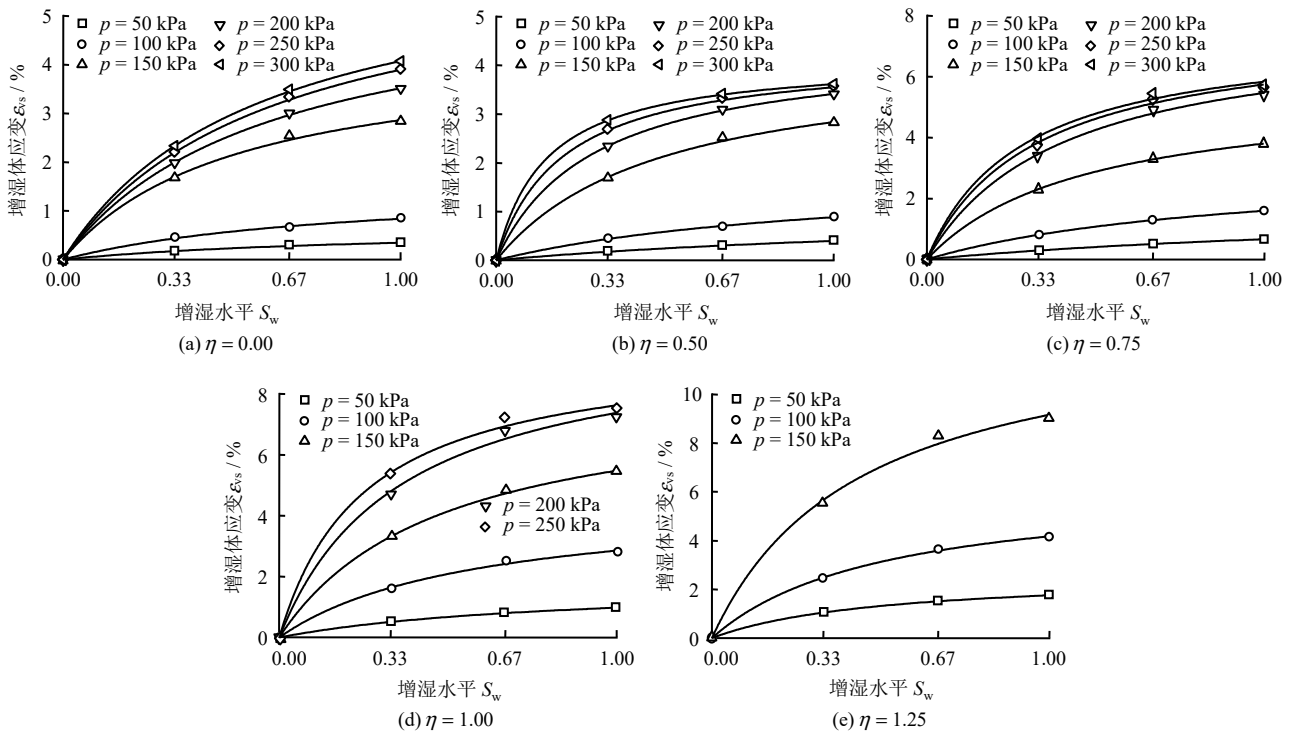


图 4 不同应力比条件下εss-Sw关系曲线

Fig.4 εss-Sw relationship curves under different stress ratios

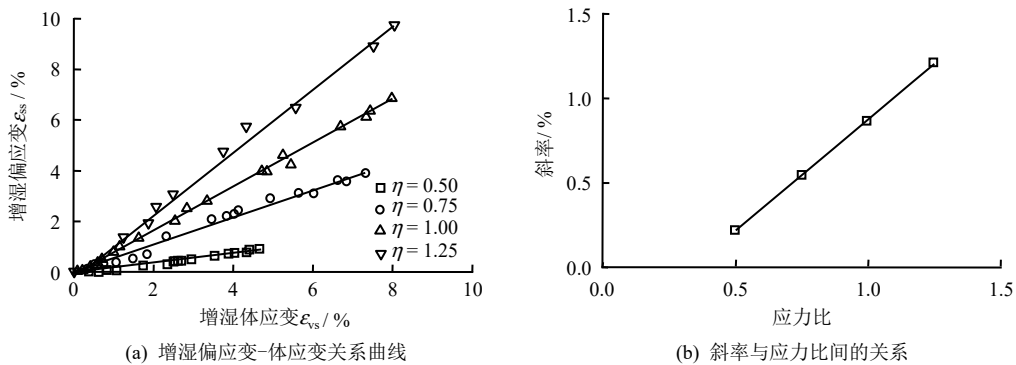


图 5 增湿偏应变-体应变关系曲线

Fig.5 Humidified deviatoric strain-volumetric strain relationship curves

一现象与文献[20]得到的研究结论一致。在较小应力比作用下，土体的增湿变形主要表现为增湿体应

变，而随着应力比的增加，增湿偏应变的影响逐渐增大。

3.3 不同中主应力条件下的增湿变形规律

本研究利用真三轴仪对 3 个主应力方向进行独立加载, 并测量其应变。图 6 展示了球应力为 150 kPa, 在 3 个不同应力比和不同中主应力参数条件下的湿

陷应变值增湿水平的关系曲线。当增湿水平一定时, b 值越大, 对应的增湿轴向应变越小。对于增湿中主应变, 在较小应力比条件下, 较大 b 值的曲线位于较小 b 值曲线的上方, 且均为压缩变形; 而在较

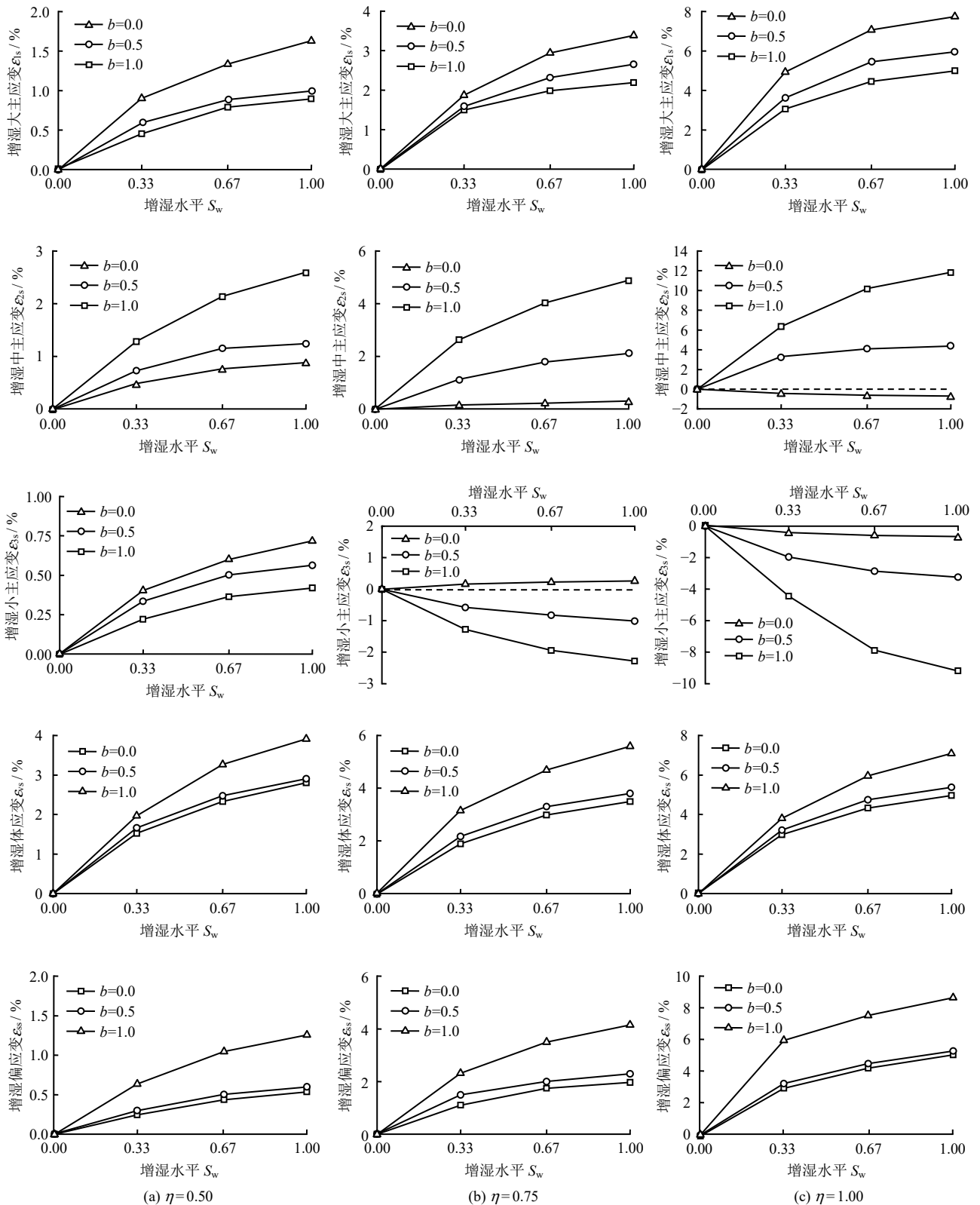


图 6 增湿应变与增湿水平的关系曲线
Fig.6 Curves of humidification strain and humidification level

大的应力比条件下,小 b 值的试样出现了膨胀变形。这是因为 b 值较小时,应力比越高,中主应力方向的约束越弱;在同等增湿作用下,该向湿陷无法抵消轴向压缩诱发的鼓胀趋势,最终表现为鼓胀变形。总体来看,该方向的应变随着 b 值的增加而趋向于压缩变形。对于增湿小主应变,在一定增湿水平下,较大 b 值的曲线始终低于较小 b 值曲线,在较小应力比条件下,该方向均为较小的压缩变形,随着应力比的增加而向膨胀变形发展,且在大 b 值和大应力比条件下,增湿小主变更容易发生较大的膨胀变形。随着 b 值的增大,增湿体应变和增湿偏应变呈现出明显增大的趋势。较大 b 值之间的应变曲线间隔相对较大。以湿陷体应变为例,当 $b=0.5$ 时,湿陷体应变值较 $b=0$ 时增大约 10%~15%;而当 $b=1.0$ 时,湿陷体应变值相较于 $b=0.5$ 时增大约 25%~40%。这一现象表明,随着 b 值的增大,土体结构湿陷损伤的加剧程度愈加显著。这是因为 b 值的增加导致主应力差异增大,进而引发湿化试样局部应力的集中,且试样小主应力方向变得更加薄弱易变形。此种应力分布不均的现象加速了土颗粒的运移,促进了土体结构的变形破坏。

4 增湿变形计算模型

真三轴应力条件下的增湿湿陷试验结果证实了中主应力对湿陷变形具有显著影响。这是因为中主应力加速结构损伤,使土体更早剪坏、且增湿变形更大。本节将利用试验数据对黄土的增湿变形进行定量分析,旨在得出湿陷性黄土增湿变形的计算表达式,为评价真三轴应力条件下黄土地基的湿陷性变形提供科学依据。

4.1 增湿体应变

经拟合分析发现,图 4 的增湿体应变与增湿水平间呈双曲线关系时的拟合效果最佳,平均拟合优度 R^2 为 0.99,表明该关系可描述为

$$\varepsilon_{vs} = \frac{S_w}{\alpha + \beta S_w} \quad (8)$$

式中:参数 α 为初始增湿体变模量的倒数;参数 β 代表湿陷体应变的倒数与初始增湿体变模量的差值。

首先考虑 $b=0$,即试样处于三轴压缩状态时,这时增湿体应变 $\varepsilon_{vs,0}$ 与增湿水平间的关系为

$$\varepsilon_{vs,0} = \frac{S_w}{\alpha + \beta S_w} \quad (9)$$

可以将式 (9) 转化为

$$\frac{S_w}{\varepsilon_{vs,0}} = \alpha + \beta S_w \quad (10)$$

对式 (10) 求导可得

$$J_t = \frac{d\varepsilon_{vs,0}}{dS_w} = \frac{\alpha}{(\alpha + \beta S_w)^2} \quad (11)$$

式中: J_t 为增湿体变模量。

在开始增湿时, $S_w=0$, $J_t=J_i$, 则有

$$J_i = \frac{1}{\alpha} \quad (12)$$

式中: J_i 为初始增湿体变模量。

在增湿结束时,试样达到饱和状态,式 (9) 中的 $S_w=1$, 则有

$$\varepsilon_{vs,0}^{\text{sat}} = \frac{1}{\alpha + \beta} \quad (13)$$

式中: $\varepsilon_{vs,0}^{\text{sat}}$ 为三轴压缩状态下增湿至饱和时的体应变;用式 (9) 对试验得到的 S_w 和 $\varepsilon_{vs,0}$ 试验点进行拟合,便可得到参数 α 和 β 。其中, α 和 β 分别表示为以 $S_w / \varepsilon_{vs,0}$ 为因变量, S_w 为自变量的直线截距和斜率。该式中的参数 α 和 β 与 p 值的取值有关,通过对不同应力比下 p 值与参数 α 和 β 进行拟合,拟合结果表明, p 值与两者之间均为幂函数关系,如图 7 所示,可表示为

$$\alpha = \alpha_1 \left(\frac{p}{p_a} \right)^{\alpha_2} \quad (14)$$

$$\beta = \beta_1 \left(\frac{p}{p_a} \right)^{\beta_2} \quad (15)$$

式中: α_1 、 α_2 、 β_1 和 β_2 均为无量纲试验参数; p_a 为标准大气压。

式 (14)、(15) 中的无量纲试验参数与应力比有关,对这些系数与对应的应力比进行回归。根据图 8 发现, α_1 、 α_2 和 β_1 均与应力比 η 呈负线性相关,而 β_2 与应力比 η 呈二次多项式关系,它们与应力比 η 的关系式可以表示为

$$\alpha_1 = \alpha_{11}\eta + \alpha_{12} \quad (16)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{21}\eta + \alpha_{22} \quad (17)$$

$$\beta_1 = \beta_{11}\eta + \beta_{12} \quad (18)$$

$$\beta_2 = \beta_{21}\eta^2 + \beta_{22}\eta + \beta_{23} \quad (19)$$

式中: α_{11} 、 α_{12} 、 α_{21} 、 α_{22} 、 β_{11} 、 β_{12} 、 β_{21} 、 β_{22} 和 β_{23} 均为无量纲试验参数。

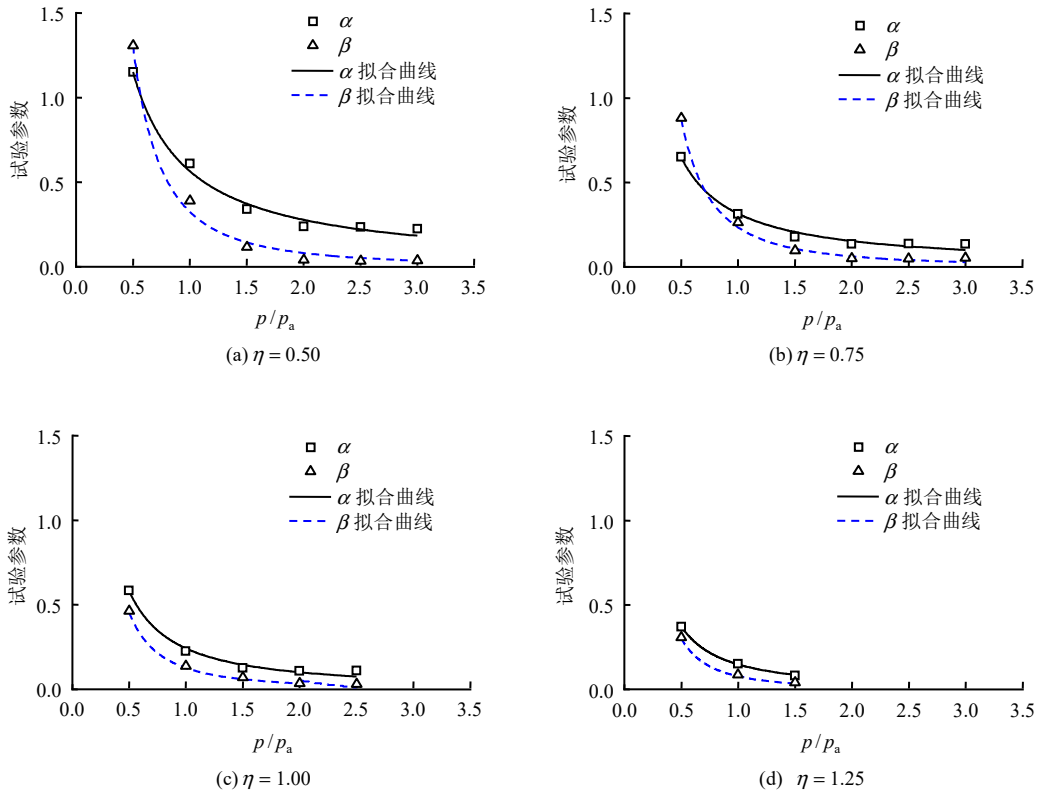


图 7 试验参数与球应力的关系曲线

Fig.7 Relation curves between parameters and spherical stress

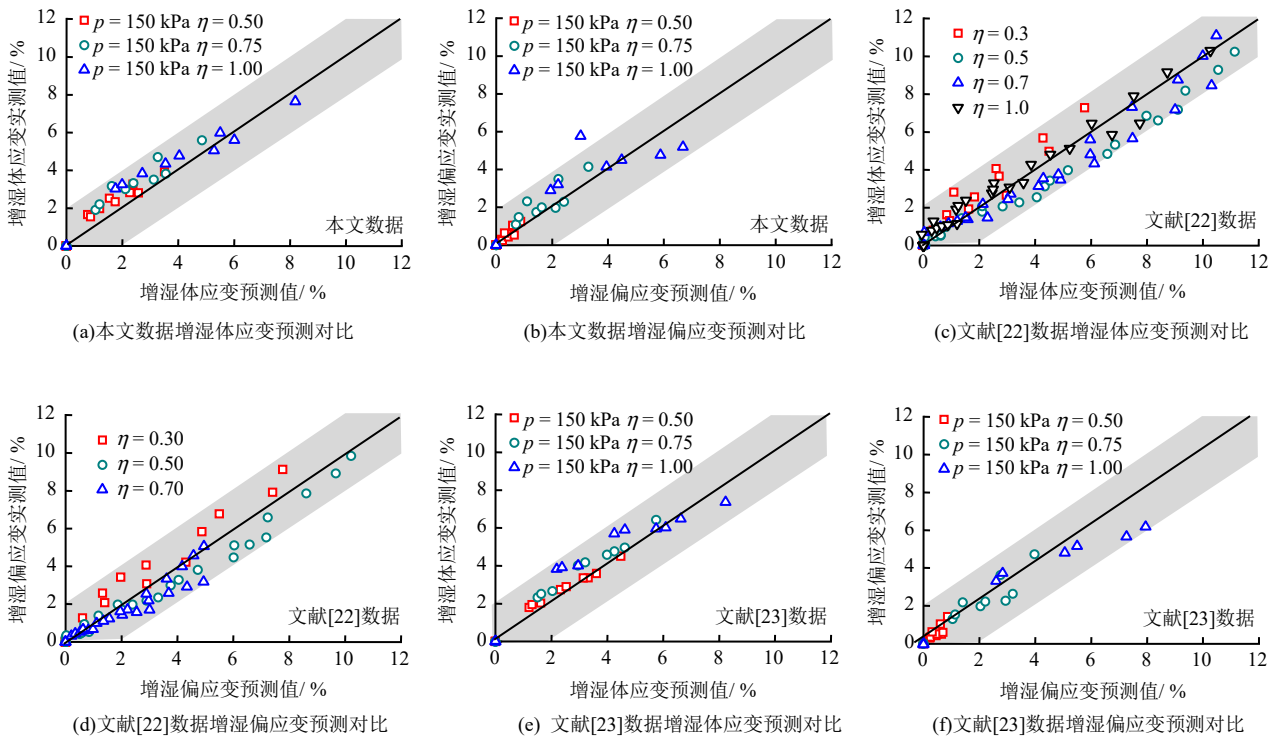


图 8 实测值与预测值的对比

Fig.8 Comparisons of measured value and predicted value

将式 (14) ~ (19) 代入到式 (8), 可以得到 三轴压缩路径下湿陷性黄土增湿体应变的表达式:

$$\epsilon_{vs,0} = \frac{S_w}{(\alpha_{11}\eta + \alpha_{12})\left(\frac{p}{p_a}\right)^{(\alpha_{21}\eta + \alpha_{22})} + (\beta_{11}\eta + \beta_{12})\left(\frac{p}{p_a}\right)^{(\beta_{21}\eta^2 + \beta_{22}\eta + \beta_{23})}} \quad (20)$$

通过绘制大量的 b - $(\epsilon_{vs,b} / \epsilon_{vs,0})$ 关系曲线，发现两者呈现下式的关系：

$$\frac{\epsilon_{vs,b}}{\epsilon_{vs,0}} = \delta_1 b^2 + 1 \quad (21)$$

式中： $\epsilon_{vs,b}$ 为 b 值条件下的增湿体应变； δ_1 为经验拟合参数。

将式 (20) 与式 (21) 合并，得到考虑中主应力的真三轴应力路径下湿陷性黄土的浸水增湿体应变表达式：

$$\epsilon_{vs,0} = \frac{(\delta_1 b^2 + 1)S_w}{(\alpha_{11}\eta + \alpha_{12})\left(\frac{p}{p_a}\right)^{(\alpha_{21}\eta + \alpha_{22})} + (\beta_{11}\eta + \beta_{12})\left(\frac{p}{p_a}\right)^{(\beta_{21}\eta^2 + \beta_{22}\eta + \beta_{23})}} \quad (22)$$

式 (22) 主要用于描述真三轴应力路径下湿陷性黄土的浸水增湿变形特性。其中，球应力 p 、应力比 η 和中主应力参数 b 能够体现力的作用效果，其中 b 值反映了中主应力的影响，而增湿水平 S_w 则能够体现水分的作用。式中也可以发现中主应力越大，增湿体应变越大。

4.2 增湿偏应变表达式

图 5(a) 揭示了增湿过程中体应变与偏应变的演化特征，试验数据显示：当应力比恒定时，增湿体

应变 ϵ_{vs} 与增湿偏应变 ϵ_{ss} 呈现显著的正相关比例关系。为深入表征这一力学机制，通过绘制增湿体应变-偏应变演化斜率 $d\epsilon_{ss,b} / d\epsilon_{vs,b}$ 与应力比 η 的曲线关系，如图 5(b) 所示，发现在本文试验所覆盖的应力比范围内，二者呈现良好的线性规律，其数学表达式可表征为

$$\frac{d\epsilon_{ss,b}}{d\epsilon_{vs,b}} = c_1 \eta + c_2 \quad (23)$$

式中： $\epsilon_{ss,b}$ 为 b 值条件下的增湿偏应变； c_1 、 c_2 分别为经验拟合参数。

则考虑中主应力作用下的真三轴应力路径下湿陷性黄土的浸水增湿偏应变为

$$\epsilon_{ss,b} = \epsilon_{vs,b} (c_1 \eta + c_2) \quad (24)$$

4.3 模型可靠性与局限性

为了验证模型的可靠性，本研究通过对比本文和文献[23]的真三轴试验数据与文献[22]的常规三轴增湿试验数据，评估了模型的预测能力，模型参数详见表 2。如图 8 所示，模型预测值与试验值在增湿体应变和偏应变维度上均沿 45° 参考线分布，这表明模型在真三轴非对称应力路径 ($b \neq 0$) 和常规三轴应力路径 ($b = 0$) 下均具有良好趋势预测能力。相较于传统对称加载模型，本模型通过引入中主应力参数 b ，提升了复杂应力路径下的适应性。然而，模型也存在着一些局限性。例如，室内试验条件难以完全模拟现场的应力状态和浸水入渗情况，因此在工程应用中的适用性尚需进一步研究。此外，由于经验公式中的多数参数是基于统计关系得出的，因此难以在理论上进行深入解释。

表 2 增湿变形模型参数
Table 2 Parameters of wetting deformation model

数据	体应变参数										偏应变参数	
	α_{11}	α_{12}	α_{21}	α_{22}	β_{11}	β_{12}	β_{21}	β_{22}	β_{23}	δ_1	c_1	c_1
本文	-0.900	1.197	0.517	-1.644	-0.113	0.149	-6.124	1.977	-3.894	0.550	1.725	-0.613
文献 20	-0.081	0.229	-0.370	-1.378	-0.538	0.642	-3.339	2.000	-3.272	0.000	1.115	0.116
文献 21	-0.405	0.564	1.116	-1.358	-0.083	0.105	11.01	-14.72	3.447	0.351	1.989	-0.800

5 结 论

本研究采用刚-柔-柔型加载边界真三轴仪，对湿陷性黄土进行了一系列的真三轴路径下的单线法增湿湿陷试验，分别控制了不同的球应力 p 、应力比 η 、中主应力参数 b 值以及增湿水平 S_w ，以探究这些因素对湿陷性黄土增湿变形的影响。通过这些

试验，得出了以下结论：

(1) 在相同的增湿条件下，增湿体应变与球应力、增湿偏应变与偏应力的关系曲线呈现出 3 个明显的阶段：初始阶段 ($p \leq 100$ kPa)，应变增加缓慢；中间阶段 (100 kPa $< p \leq 200$ kPa)，应变增加速率最高，且变形量最大；最后阶段 ($p > 200$ kPa)，应变增加速率逐渐降低。

(2) 在一定球应力作用下, 随着增湿水平的提高, 增湿体应变会增加, 但其增长速度会逐渐减慢。在特定的应力比条件下, 增湿体应变随着球应力的增加而增加, 但增加的幅度会逐渐减小。增湿体应变与增湿偏应变之间有较强的线性关系, 且应力比与这种关系的斜率成正比。在较低应力比时, 土体的增湿变形主要表现为增湿体应变, 而随着应力比的增加, 增湿偏应变也逐渐显著。

(3) 一定增湿水平时, 增湿轴向应变随 b 值的增加而减少; 增湿中主应变在较小的应力比条件时, 试样均表现为压缩变形, 而高应力比下, 小 b 值试样开始出现膨胀变形; 增湿小主应变在低应力比时表现为轻微压缩, 随着应力比的增加, 逐渐转变为膨胀变形, 特别是在大 b 值和高应力比条件下, 更易发生显著膨胀。同时, 增湿体应变和增湿偏应变都随着 b 值的增加而增加。

(4) 基于真三轴应力条件下原状黄土的增湿变形试验结果, 通过曲线拟合方法建立了适用于真三轴应力路径的增湿变形计算公式, 并验证了模型的可靠性。该公式为复杂应力路径下黄土的增湿变形提供了参考。

参考文献

- [1] 苏忍, 张恒睿, 张稳军, 等. 兰州地铁大厚度湿陷性黄土地层的现场浸水试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊 1): 186-193.
SU Reng, ZHANG Heng-ru, ZHANG Wen-jun, et al. Immersion tests on self-weight collapsible loess site with large depth of Lanzhou metro line[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2020, 53(Suppl.1): 186-193.
- [2] 陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 1-12.
CHEN Zheng-han, LIU Zu-dian. Collapsible deformation mechanism of loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1986, 8(2): 1-12.
- [3] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增(减)湿时黄土的湿陷系数曲线特征[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1363-1368.
ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Characteristics of collapsibility coefficient curves of loess during moistening and demoiestening process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1363-1368.
- [4] 杨玉生, 李靖, 邢义川, 等. 压实黄土增湿变形性质及其影响因素试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 626-635.
YANG Yu-sheng, LI Jing, XING Yi-chuan, et al. Experimental study on moistening deformation characteristics of compacted loess and their influencing factors[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(4): 626-635.
- [5] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 基于割线模量法的黄土增湿变形本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 609-617.
ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Study on constitutive relation of loess moistening deformation based on secant-modulus method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 609-617.
- [6] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增湿时黄土的抗剪强度特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1195-1200.
ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Analysis of shear strength characteristics of loess during moistening process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(7): 1195-1200.
- [7] 邢义川, 李京爽, 李振. 湿陷性黄土与膨胀土的分级增湿变形特性试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 546-551.
XING Yi-chuan, LI Jing-shuang, LI Zheng. Deformation characteristics of collapsible loess and expansive soil under the condition of wetted in stages[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 38(5): 546-551.
- [8] 朱元青, 陈正汉. 研究黄土湿陷性的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 524-528.
ZHU Yuan-qing, CHEN Zheng-han. A new method of studying collapsibility of loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(4): 524-528.
- [9] DONG S Y, LIU Z D, Plastic constitutive relation for slumping loess[C]//Proceedings of the International Conference on Engineering Problems of Regional Soil. [S. l.]: [s. n.], 1988.
- [10] 刘保健, 谢定义, 郭增玉. 黄土地基增湿变形的实用算法[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 270-274.
LIU Bao-jian, XIE Ding-yi, GUO Zeng-yu. A practical method for moistening deformation of loess foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 270-274.
- [11] 方瑾瑾, 冯以鑫, 余永强, 等. 真三轴条件下的原状黄土增湿变形特性[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1235-1246.

- FANG Jin-jin, FENG Yi-xin, YU Yong-qiang, et al. Wetting deformation characteristics of intact loess under true triaxial conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(4): 1235-1246.
- [12] 王泽驰, 邵帅, 魏军政, 等. 考虑中主应力变化的原状黄土变形特性研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 854-860. WANG Ze-chi, SHAO Shuai, WEI Jun-zheng, et al. Deformation characteristics of undisturbed loess considering the change of intermediate principal stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(3): 854-860
- [13] 谢生荣, 郜明明, 陈冬冬, 等. 充填开采采场球应力壳分布及演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 16-23. XIE Sheng-rong, GAO Ming-ming, CHEN Dong-dong, et al. Study on the distribution and evolution characteristics of spherical stress shell in backfilling mining stope[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2019, 36(1): 16-23.
- [14] 蔡国庆, 韩博文, 韦靖威, 等. 复杂水-力路径下非饱和和砂质黄土增湿变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊 1): 3073-3080. CAI Guo-qing, HAN Bo-wen, WEI Jing-wei, et al. Wetting deformation characteristics of unsaturated sandy loess under complex hydro-mechanical paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(Suppl.1): 3073-3080.
- [15] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1172-1179. SHAO Sheng-jun, LUO Ai-zhong, DENG Guo-hua, et al. Development of a new true tri-axial apparatus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(8): 1172-1179.
- [16] 郑方, 邵生俊, 张博, 等. 控制吸力的非饱和土真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 33-36. ZHENG Fang, SHAO Sheng-jun, ZHANG Bo, et al. True triaxial tests on unsaturated soils with suction-controlled condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl.2): 33-36.
- [17] 邵帅, 张佳庆, 邵生俊, 等. 重塑黄土的往返加卸载真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7): 1491-1497. SHAO Shuai, ZHANG Jia-qing, SHAO Sheng-jun, et al. Cyclic loading and unloading true triaxial tests on remolded loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2024, 46(7): 1491-1497.
- [18] 赵凯, 邵帅, 邵生俊, 等. 平面应变下原状黄土的剪切带研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(2): 433-441. ZHAO Kai, SHAO Shuai, SHAO Sheng-jun, et al. Study on shear bands of undisturbed loess under plane strain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(2): 433-441.
- [19] 余雄飞, 朱瑞成, 汤高举, 等. 新疆黄土的工程性质[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994. YU Xiong-fei, ZHU Rui-cheng, TANG Gao-ju, et al. Engineering properties of loess in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1994.
- [20] 陈正汉, 许镇鸿, 刘祖典. 关于黄土湿陷的若干问题[J]. 土木工程学报, 1986, 19(3): 62-69. CHEN Zheng-han, XU Zhen-hong, LIU Zu-dian. Some problems on the collapse of collapsible loess[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1986, 19(3): 62-69.
- [21] 王建. 原状黄土的真三轴压缩增湿湿陷变形规律研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. WANG Jian, Study on deformation characteristics of undisturbed loess under true triaxial compression and humidification[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [22] 金松丽, 邢义川, 赵卫全, 等. 基于单线法试验的黄土增湿变形非线性模型研究[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 710-719. JIN Shong-li, XING Yi-chuan, ZHAO Wei-quan, et al. Study on nonlinear constitutive model for loess moistening deformation based on single-line experiment method[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2017, 48(6): 710-719.
- [23] 李瑶璞. 真三轴应力条件下黄土增湿变形及其结构性演化规律研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. LI Yao-pu. Study on humidification deformation and structural evolution law of loess under true triaxial[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.