

压实黄土场地湿陷沉降机理与黄土高原平山造城适宜性

祁生文^{1,2,3*}, 侯晓坤^{1,2,3}, 于永堂⁴, 张亚国⁵, 胡燮⁶, 张琳鑫^{1,2,3}, 李志清^{1,2,3}, 郭松峰^{1,2,3}, 张帆宇⁷,
李同录⁸, 彭建兵⁸

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;

3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

4. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 西安 710043;

5. 长安大学建筑工程学院, 西安 710061;

6. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;

7. 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000;

8. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

* 联系人, E-mail: qishengwen@mail.igcas.ac.cn

2022-06-22 收稿, 2022-10-14 修回, 2022-10-17 接受, 2022-11-16 网络版发表

国家自然科学基金(41790442)资助

摘要 黄土高原城市用地紧张与用地需求日益增大的矛盾使得平山造城工程应运而生, 大规模平山造城工程会引起场地水文环境变化, 诱发填土地基失稳、建筑物破坏等, 其工程长期适宜性是人们最关切的问题。通过现场调研、原位监测、室内试验、模型试验、数值模拟和InSAR分析等工作, 探究了压实黄土场地湿陷沉降机理及黄土高原平山造城工程适宜性。研究结果发现, 场地压实黄土的物理力学性质和微观结构同天然黄土差异较大, 其力学性质差、孔隙连通性差、空间变异性大; 湿陷变形本质为含水率增大引起土体刚度降低而发生的压密变形, 湿陷过程中压实黄土的结构变化整体上表现为颗粒间孔隙的局部压密, 颗粒及孔隙形态基本不变; 非饱和压实黄土的蠕变特性同屈服应力与上覆荷载的大小密切相关, 增大压实土体的干密度可提高屈服应力, 缩短蠕变稳定时间, 还可显著降低土体的渗透特性; 典型平山造城场地厚层压实黄土中的含水状态基本能维持长期稳定, 有缓慢的向下水流补给地下水; 场地累积变形量随填方土厚度增大而增大, 地表变形减缓, 沉降速率递减, 预测工后15年场地变形可达稳定; 增大压实土体干密度和合理设置地下水排水设施可有效减小地表总变形量、变形稳定期和局部破坏。研究结果论证了整体地基的长期稳定性和局部灾害的工程可控性, 从理论和实践上证实平山造城工程基本可行, 提出了黄土高原平山造城工程的适宜性原则, 为未来的平山造城工程提供科学指导。

关键词 黄土高原, 平山造城, 水分迁移, 湿陷机理, 沉降规律

黄土高原是地球上分布最集中且面积最大的黄土区, 总面积为 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$, 横跨青、甘、宁、内蒙古、陕、晋、豫7省区, 地势由西北向东南倾斜, 大部分为厚层松散黄土覆盖, 经流水长期强烈侵蚀, 逐渐形成千

沟万壑、支离破碎的地貌。城镇多沿河谷地带分布, 适宜人生活居住的面积有限^[1]。近年来, 随着城市化进程快速发展和人口快速增长, 黄土高原城市空间不足的问题日益突出。为了推进城市发展和现代化进程, 平山

引用格式: 祁生文, 侯晓坤, 于永堂, 等. 压实黄土场地湿陷沉降机理与黄土高原平山造城适宜性. 科学通报, 2023, 68: 1844–1860

Qi S W, Hou X K, Yu Y T, et al. Collapse and subsidence mechanism of compacted loess and suitability of mountain bulldozing and city creation projects in the Loess Plateau of China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 1844–1860, doi: 10.1360/TB-2022-0686

造城工程应运而生。兰州和延安是两座典型的河谷城市，地处黄土丘陵沟壑区的河谷两岸，呈条带状展布，空间狭窄，城市空间亟待拓展，因此它们也成为目前平山造城工程数量最多、规模最大的城市。

平山造地虽然有效缓解了城市用地压力，但它重塑了场地的地貌形态，扰动了黄土的原始结构，改变了地下水径流、补给和排泄条件，打破了工程地质和水文地质平衡，《自然》杂志(Nature)发表评论文章讨论该类工程可能诱发的环境工程问题，引起了国际关注^[2~4]。

大规模平山造城工程带来的工程风险主要表现为过量的场地工后沉降变形，包括水文环境改变引起的增湿变形以及上覆应力条件下的压缩蠕变变形两个方面。增湿变形指土体在一定外荷载或自重荷载作用下变形稳定后，由于含水率的增加而产生的附加变形。当含水率增加至饱和时，增湿变形又称为湿陷变形^[5]。增湿变形的大小与试样的干密度、初始含水率和上覆压力的大小有关^[6,7]。通常干密度越大，初始含水率越大，湿陷变形越小。此外，湿陷变形随上覆压力的增大一般先增大后减小^[8,9]，但当上覆压力小于饱和土体的屈服应力时，增湿不会发生湿陷变形^[10]。关于增湿(湿陷)变形的内在机制，根据其研究方法可分为三类：传统法、微结构法和基于土力学的方法^[9]。传统方法多将湿陷机理归因于假说和猜想，如毛细假说、盐溶解假说、水膜楔入假说和黏粒膨胀假说等^[11~13]；微结构法主要基于扫描电子显微镜、X射线衍射和压汞试验等技术手段获取的微结构信息，认为黄土中存在的架空结构是湿陷发生的先决条件^[14,15]；基于土力学的方法包括非饱和土力学和损伤力学，前者认为基质吸力的改变是湿陷发生的力学原因^[16,17]，后者将湿陷归因于颗粒胶结处的结构损伤^[18,19]。上述方法从定性解释和定量分析的角度阐明湿陷发生的条件和力学机制，但湿陷过程中微结构演化及其对宏观变形的影响鲜有涉及，湿陷机理尚未完全明晰。从非饱和土力学角度，任何非饱和土在一定外力(大于饱和土的屈服应力)条件下增湿均会产生增湿变形^[8,20]。厚层黄土中的增湿变形是随水分在土中迁移逐渐累积的一个过程，其本质是非饱和土的渗流和变形耦合问题。工程上通常用湿陷系数法计算场地湿陷变形，然而该方法假设整个土层完全饱和，同场地实际水分状态不符，其预测值和实际值也差距甚大^[21]。目前，水分在厚层非饱和黄土中的分布及迁移规律是水循环研究的前沿科学问题^[22]，适用于场地

的增湿(湿陷)变形定量刻画的方法仍有待探究。

蠕变变形是高填方区工后沉降变形的主要因子，厘清黄土蠕变规律是准确预测工后沉降稳定期的关键。大量不同含水率黄土的三轴剪切蠕变试验结果表明，蠕变变形分为减速蠕变、稳定蠕变和加速蠕变(破坏阶段)3个阶段，通常初始干密度越小，含水率越大，土体的蠕变变形越大，且加速蠕变阶段出现的时间越早^[23]。侧限压缩蠕变试验结果表明，土体的蠕变变形速率随时间递减，初始干密度越小，含水率越大，蠕变变形越大^[24,25]。微结构观测结果显示蠕变过程中土体孔隙变小，存在一定的颗粒和孔隙的定向分布^[23]。从微观机理上，干密度和含水率对压实黄土长期蠕变的影响同土体中弱结合水厚度有关，干密度越大，含水率越小，水膜厚度越小，土颗粒间静电引力越大，土颗粒相互作用越强，蠕变效应越弱^[24]。现有描述土体蠕变行为的模型包括双曲线模型^[26]、类双曲模型^[27]、Burgers模型及其改进模型^[25]等。上述模型多为实验数据的数学拟合模型，且多针对饱和土体的蠕变行为，不能系统反映干密度和含水率对蠕变特性的影响。

平山造城工程无先例可循，尚缺乏系统成果，因此亟须开展压实黄土湿陷沉降机理及平山造城工程的长期适宜性研究。基于此，通过现场调研、原位监测、室内试验、模型试验、数值模拟和InSAR分析等工作，揭示压实黄土物理力学性质、微结构特征和非饱和渗透特性，刻画压实黄土中水分迁移过程、湿陷机理、增湿变形和蠕变特性，在此基础上分析延安这一典型平山造城场地水文演化、场地沉降变形规律和局部宏观变形破坏特征，论证场地地基的整体稳定性和局部破坏的工程可控性，总结了平山造城工程适宜性的一般原则。

1 压实黄土取样及制备

平山造城场地填方规模巨大，填方土体多就地取材，为附近山体的黄土和古土壤，其成分混杂，不同深度样品的古土壤和黄土含量无明显规律性，无法区分明显层位。平山造城场地存在填方区和挖方区两种类型的场地。挖方区天然沉积黄土性质均匀，工程地质条件良好。相比之下，由于填方厚度、土质、夯实质量、含水率等方面的差异，填方区压实黄土具有不同程度的压缩性和湿陷性。

在延安平山造城典型场地的填方区和挖方区开挖探井内，以1 m为间隔取样测试土体的干密度、液塑

限、压缩模量、含水率、黏粒含量和粉粒含量等物理力学指标，对比分析场地压实黄土和天然黄土之间的性质差异。填方区探井深 25 m，挖方区探井深 29 m，挖方区探井剖面上的黄土主要为离石黄土，探井及取样地点见图 1(c)。

此外，在山体开挖出露剖面上的易取样位置(图 1(b))，取天然黄土(时代为 Q₂，第六层黄土 L₆)原状样和散土，开展室内微结构、水力特性、增湿和蠕变试验等。该天然黄土的干密度为 1.54 g/cm³，含水率为 10%。室内制备不同干密度(1.50、1.60、1.70、1.80 g/cm³)压实样探究压实度对土体水力学性质的影响，制样依据《土工试验方法标准 GB/T 50123-2019》进行。

2 压实黄土物理力学性质及微结构特征

2.1 物理力学性质

通过对延安平山造城典型场地挖方区和填方区开挖探井取样测试土体物理力学性质发现，场地压实黄土在水平方向上的异质性大于天然黄土(Q₂)，在垂直方向上的异质性小于天然黄土(Q₂)^[28](图 2)。天然黄土的干密度随着深度的增加而增加，但压实黄土干密度随

深度增加不明显，且同一深度上干密度波动范围大；天然黄土的含水率变化范围要大于压实黄土。此外，与天然黄土相比，场地压实黄土的液限、塑限、塑性指数、黏粒和粉粒含量均较小。这是由于不同历史时期黄土的颗粒组分不同，干燥和寒冷环境中黄土含有更多的砂粒和粉粒，而炎热和潮湿环境中有更多的黏粒，且黄土形成年代越早，细粒含量越多；在实际施工中，用来填筑原有沟道的黄土取自原山体顶部，黄土形成年代较新，而挖方区黄土为原山体下部土体，形成年代较早，因此填方区黄土的黏粒和粉粒含量较小，土体液塑限和塑性指数也较小。整体上看，压实黄土的压缩模量较天然黄土小，这说明场地压实黄土更容易变形。此外，增大压实土体的干密度至 1.70 g/cm³可使得压实土体的压缩特性接近干密度为 1.54 g/cm³的天然黄土(Q₂)^[28]。

2.2 微结构特征

微观结构与土体宏观水力性质密切相关^[29,30]。基于三维微米 CT 无损高精度扫描，获取了压实黄土和天然黄土(Q₂)高分辨率(1 μm)微观结构，发现干密度为 1.70 g/cm³的压实黄土多见大孔隙镶嵌结构，小颗粒多包裹大颗粒的团聚体，颗粒轮廓不清晰；而天然黄土

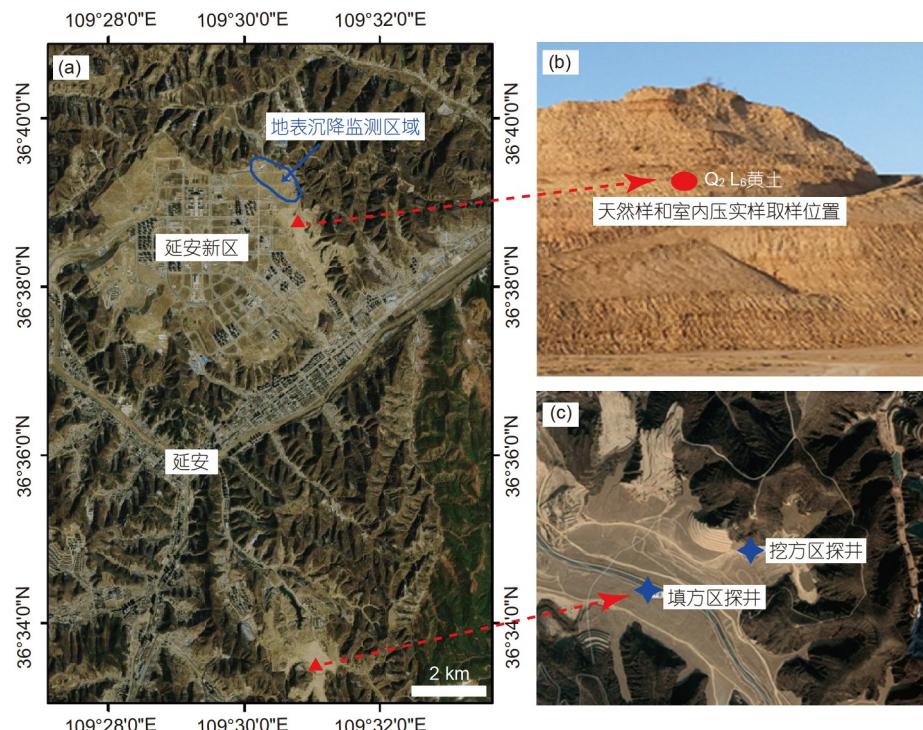


图 1 (网络版彩色)取样位置图

Figure 1 (Color online) Sampling location

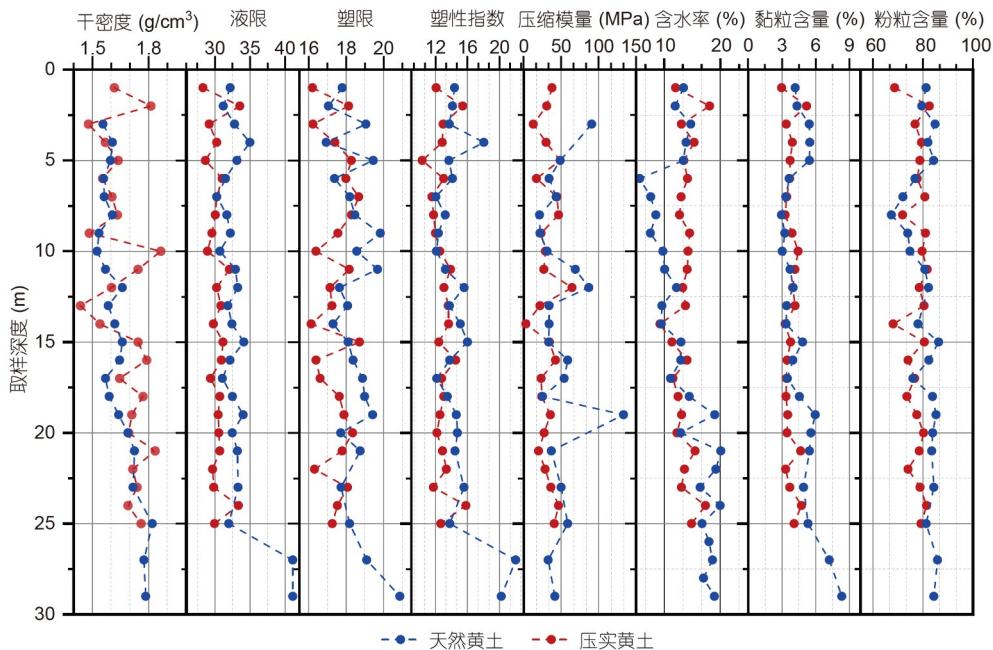


图 2 (网络版彩色) 场地压实黄土和场地天然黄土基本物理力学指标. 该含水率为质量含水率. 修改自文献[28]

Figure 2 (Color online) Basic physical and mechanical indexes of compacted and intact loess at the engineering site. The soil water content refers to the gravimetric water content. Adapted from Ref. [28]

(Q₂)多架空结构, 柱状颗粒较多, 团聚体粒径均匀且颗粒轮廓清晰(图3(a), (b)). 此外, 基于高分辨率($1 \mu\text{m}$)微观结构, 提取其三维孔隙结构, 统计分析孔隙的等效孔径、孤立孔隙度和连通孔隙度等参数(图3(c)). 可以发现, 天然黄土(Q₂)连通孔隙体积占比较大, 孤立孔隙较少. 对于压实黄土, 随着干密度的增大, 连通孔隙所占比例逐渐减小并渐趋稳定^[31].

土体孔径分布曲线的差异一定程度上代表了土体微观结构的差异. 从图3(d)可知, 压实黄土试样中体积占比最大的孔隙(优势孔隙)的孔径随着干密度增大而减小, 小孔或者微孔基本保持不变, 压实过程中黄土大孔隙逐渐被压缩变为小孔隙^[31, 32]. 天然样($\rho_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$)孔径分布曲线与干密度为 1.70 和 1.80 g/cm^3 压实样的孔径分布曲线相似, 优势孔的孔径基本相同^[31, 32]. 上述结果表明, 压实黄土具有不同于天然黄土的孔隙结构, 这决定了其具有不同于天然黄土的渗透特性与变形强度特性.

3 压实黄土中水分迁移过程及特征

3.1 压实黄土的渗透特性

渗透特性对水分在土体中的运移至关重要. 土水

特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC)和非饱和渗透性函数(hydraulic conductivity function, HCF)是描述土体非饱和渗透特性的两个参数, 也是探究水文环境变化的关键参数.

基于自行研制的小土柱试验方法^[33, 34], 测试得到了不同干密度压实黄土和天然黄土的SWCC与HCF(图4(a), (b)). 现有的非饱和渗透系数测试方法中, 基质吸力测试探头(水平入渗法和瞬态剖面法)或轴平移技术(溢出法)所能监测或控制的基质吸力范围有限, 非饱和渗透系数的测试多集中在低基质吸力范围内($< 500 \text{ kPa}$), 尚未见全吸力范围内非饱和渗透系数测试方法的报道. 此小土柱试验方法可实现全吸力($0 \sim 10^6 \text{ kPa}$)范围内非饱和渗透系数的测试, 并可同时获得SWCC^[33, 34]. 测试结果表明, 天然黄土的饱和渗透系数为 $5.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, 干密度为 1.60 、 1.70 和 1.80 g/cm^3 的压实黄土饱和渗透系数分别为 1.01×10^{-6} 、 5.62×10^{-6} 和 $0.98 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, 土体饱和渗透系数随干密度增大而增大. 由图4(a), (b)可知, 干密度对HCF和SWCC的影响主要集中在低基质吸力(高含水率)段, 高基质吸力(低含水率)段基本落在同一条曲线上. 在相同基质吸力下, 干密度越小, 土体的持水性能越好(含水率越高), 其非饱和渗透系数也越大. 值得注意的是, 天然黄土和压实

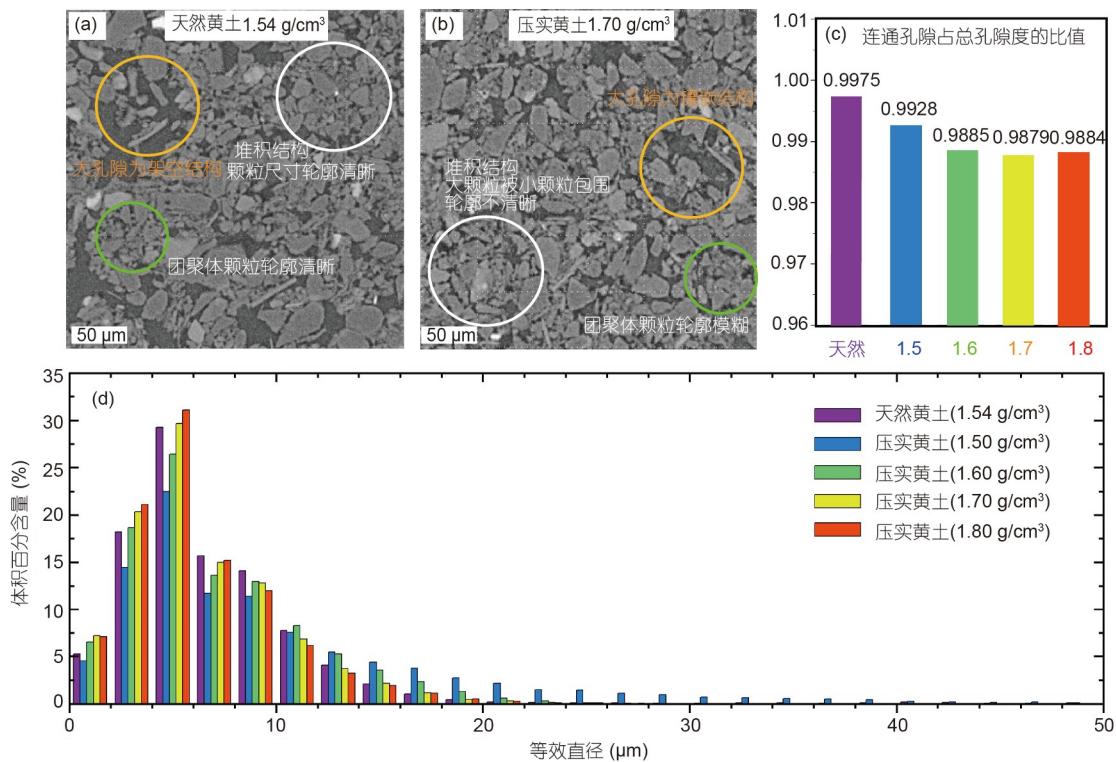


图 3 (网络版彩色)天然和压实黄土的微观结构。(a) 天然黄土微结构; (b) 压实黄土微结构; (c) 连通孔隙度和孤立孔隙度; (d) 孔径分布曲线。修改自文献[31]

Figure 3 (Color online) Microstructure of intact and compacted loess. (a) Microstructure of intact loess; (b) microstructure of compacted loess; (c) connected porosity and isolated porosity; (d) pore size distribution curve histogram. Adapted from Ref. [31]

黄土SWCC和HCF的差异也主要集中在高含水率(或低基质吸力)段, 低含水率(或高基质吸力)段基本一致。上述结果表明, 干密度对土体的饱和/非饱和渗透特性影响较大, 增大土体的干密度可降低土体的渗透性。

为阐明微结构对土体水力特性的控制作用, 利用压汞法测试得到试样的孔径-孔隙分布密度曲线(图4(c))和累积进汞曲线(图4(d)), 可清楚观察到不同干密度试样的小孔隙($<0.2 \mu\text{m}$)基本一致, 孔径曲线的差异主要体现在优势孔的孔径大小和孔隙分布密度上, 即干密度越大, 优势孔的孔径越小, 孔隙分布密度也较小。天然黄土和压实黄土在孔径分布曲线上差异同微米CT (computed tomography)三维微观结构的统计规律(图3(d))一致, 即天然样($\rho_d=1.54 \text{ g}/\text{cm}^3$)孔径分布曲线同干密度较大压实样($\rho_d=1.70$ 、 $1.80 \text{ g}/\text{cm}^3$)的孔径分布曲线相似, 优势孔的孔径基本相同, 但优势孔的孔隙分布密度较大。此外, 对于压实黄土, 累积进汞量随干密度的增大而显著降低。但天然黄土($\rho_d=1.54 \text{ g}/\text{cm}^3$)的累积进汞量大于干密度为 $1.50 \text{ g}/\text{cm}^3$ 的压实黄土, 由于汞无法

进入孤立孔隙, 压汞法测试的孔隙为连通孔隙, 可知天然黄土的连通孔隙总体积较大, 这亦同微米CT三维微观结构的统计规律(图3(c))一致。

根据Young-Laplace方程(式(1)), 可知孔径越大对应的基质吸力越小:

$$\psi = u_a - u_w = -\frac{2T_s \cos \theta}{r}, \quad (1)$$

其中, ψ 为基质吸力, u_a 为孔隙气压, u_w 为孔隙水压, T_s 为表面张力, θ 为固液气三相介质接触角, r 为孔隙半径。

天然黄土与不同干密度压实黄土的土水特性和渗透特性之间的差异跟孔径分布密切相关, 优势孔隙控制着土体在高含水率段/低基质吸力段的非饱和渗透特性。

3.2 压实黄土水分迁移过程

黄土高原地处于干旱半干旱地区, 地表受降雨和蒸发影响强烈。在延安平山造城厚层($>60 \text{ m}$)压实黄土地设立一个水文观测站, 观察不同埋深处土体含水率

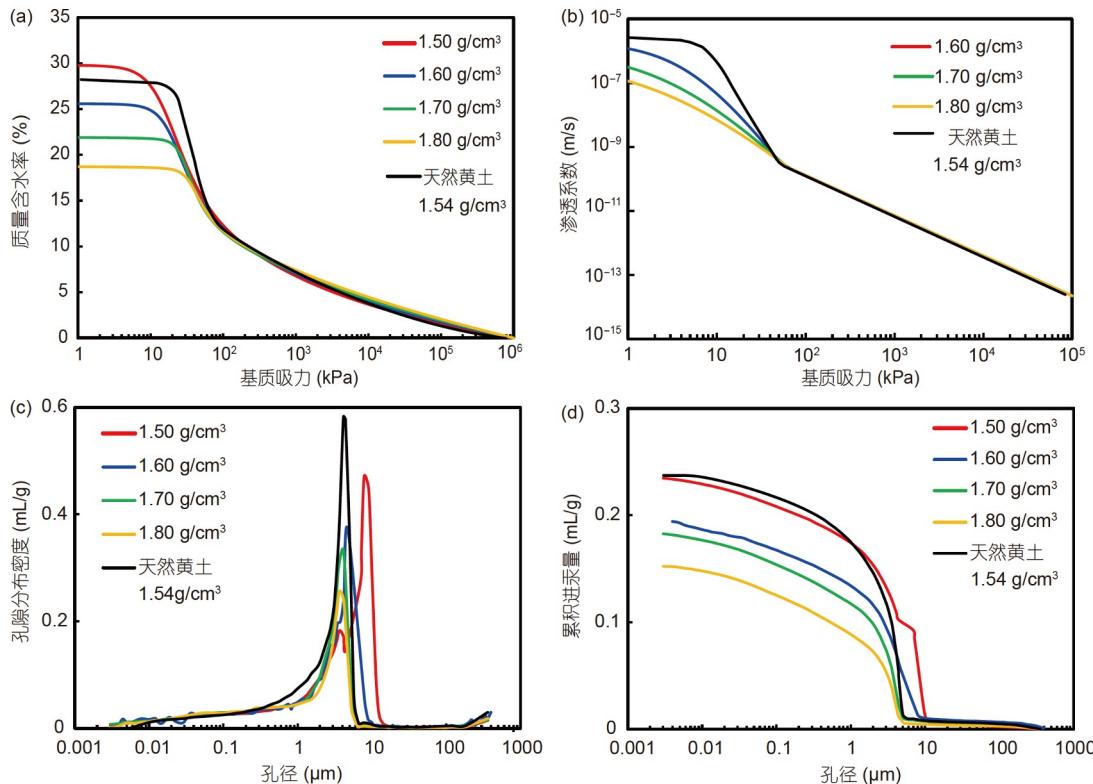


图 4 压实和天然黄土的非饱和渗透特性参数与孔径特征. (a) 土水特征曲线SWCC; (b) 非饱和渗透性函数HCF; (c) 孔径分布曲线; (d) 累积进汞量曲线. (a, c) 修改自文献[32]

Figure 4 Unsaturated permeability coefficients and pore size characteristics of compacted and natural loess. (a) Soil water characteristic curve (SWCC); (b) unsaturated hydraulic conductivity function (HCF); (c) pore size distribution curve; (d) cumulative intruded mercury curve. (a, c) Adapted from Ref. [32]

变化的情况。观测数据表明降雨仅引起表层土体含水率变化(0~2 m)，下层土体含水率基本不变(图S1(a), (b))。此外，甘肃正宁黄土塬上97.5 m厚非饱和天然黄土层的观测结果也表明，降雨和蒸发仅引起表层土体含水状态发生变化(0~4 m)^[35]。上述监测结果证实，在非饱和厚层压实黄土与天然黄土层中均存在含水率稳定带。

为厘清水分在非饱和黄土中的迁移过程及驱动机制，我们设计了室内大型土柱渗流模型试验^[36]，开展了考虑大气与土相互作用的数值模拟试验^[10]，研发了非饱和土中水分迁移规律的水动力学模型^[37](图S1(c), (d))，从试验规律、物理现象和理论机制角度阐明了水分在非饱和黄土中的迁移过程与驱动机制。

根据土体含水率的大小，水在非饱和土中的状态可分为残余态、过渡态和毛细饱和态^[38]，分别对应于土水特征曲线的残余段、过渡段和平缓段(图5(a))。(1)在残余态，较小的含水率变化会引起基质吸力的显著

改变，水分以结合水形式赋存在土颗粒周围或以独立小水珠的形式存在于土中的小孔隙或小角落中，不存在连续水流，水分多以薄膜的形式进行迁移^[34]。(2)在过渡带，基质吸力的较小改变会引起含水率的显著改变，土中存在连续的自由水流，同时也存在连续的气流通道。(3)在毛细饱和态，土体近似饱和，不存在连续的气流通道，土体渗透特性也接近于饱和时的渗透性。

自然界中的水文状态总是处于平衡状态或向平衡状态转化阶段。根据有无地下水、地下水位埋深或非饱和黄土层厚度，Hou等人^[36]可将黄土高原上的水分分布概括为3种情况(图5(b))。第1种情况：当黄土层中不存在稳定地下水位时，大气降雨基本不会补给地下水，黄土中含水率极低，多处于残余态，基本不会有连续的水流(图5(b), (i));第2种情况，当黄土层中有稳定地下水位时，大气入渗、非饱和黄土中水分迁移、地下水的径流和排泄三者基本处于动态平衡状态(图5(b), (ii));第3种情况，当地下水位埋深很浅或黄土层较薄时，

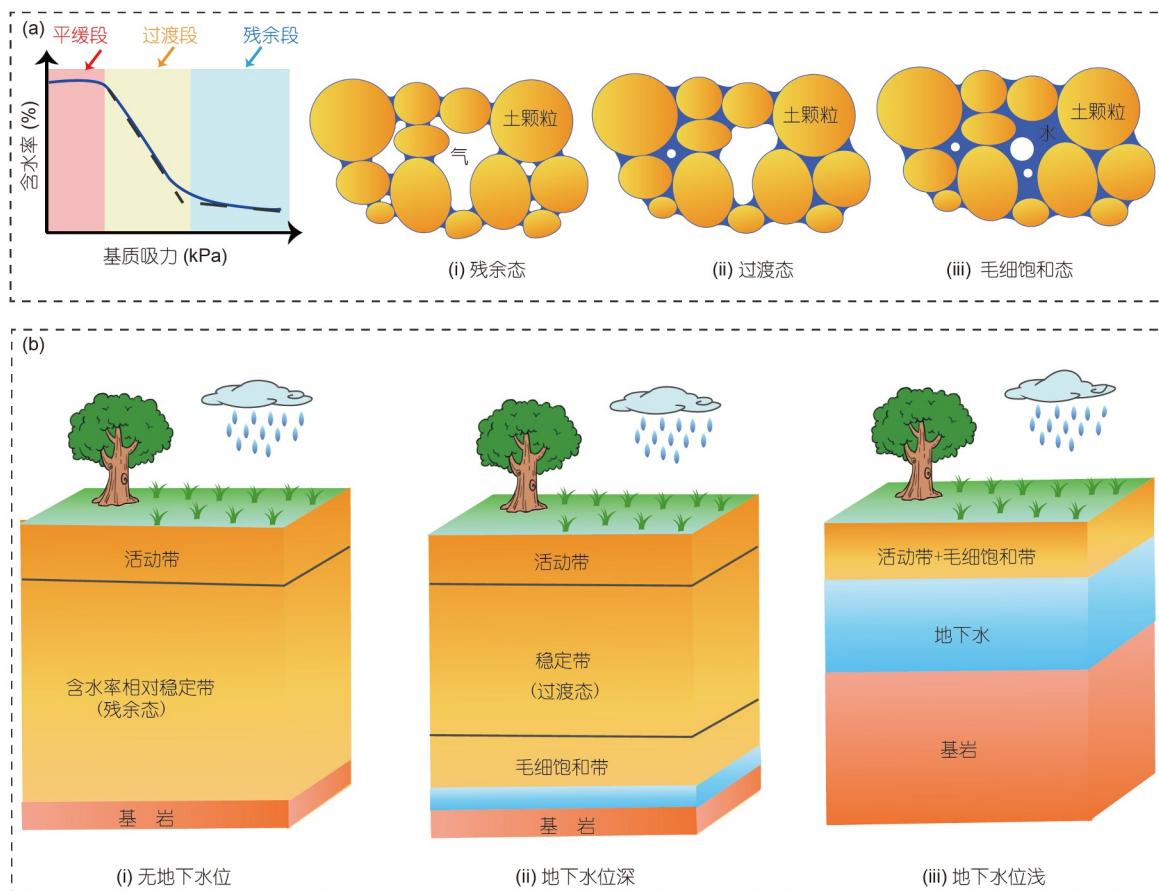


图 5 (网络版彩色)水在非饱和土中的赋存状态(a)及在黄土包气带中的分布和运移(b)

Figure 5 (Color online) Probable states of water in unsaturated soil (a) as well as the water flow and distribution characteristics in the vadose zone of loess layer (b)

降雨和蒸发的影响深度大于地下水位埋深，此时土体含水率受气候影响而处于波动状态(图5(b), (iii)).

针对第2种情况，即黄土层中有稳定地下水位且水位埋深较深时(亦是黄土高原上常见现象)，根据土体含水率波动情况，可将非饱和土层自上而下依次划分为3个带，分别为活动带、稳定带和毛细饱和带^[10,35-37]。在活动带，重力、基质吸力和温度均控制着水分的运移。水分以液态和气态形式向上或向下迁移。土体含水率受大气蒸发、降雨和温度的影响剧烈。在稳定带，土体含水率基本保持不变，水分主要在重力作用下以液态形式向下迁移，其迁移速率基本保持不变，由当地降雨和蒸发条件控制。在毛细饱和带，土体接近于饱和，该区域水分随地下水位的变化而变化。

延安平山造城场地压实黄土区土体的初始含水率为10%~18%(图2)，其非饱和渗透系数为315~3.15 mm/a(据图4(b))，依据土水特征曲线(图4(a))，水分赋存状态

多处于过渡态，尽管表层2.0 m以下土体含水率保持不变，但仍有缓慢向下迁移的水流，多年累积(如几十年)可形成地下水(初始状态无地下水)或补给地下水(初始状态有地下水)。因此，需在填方区沟底合理设置排水设施，避免地下水位的抬升诱发不均匀沉降等灾害。值得注意的是，若当地气候条件发生变化(降雨量显著增大或管道漏水等)，会显著改变非饱和区的水文状态，如甘肃黑方台经20多年大水漫灌从无稳定地下水位的黄土台塬变为地下水位形成并抬升20多米^[10]，陕西泾阳南缘也因多年灌溉造成区域内地下水位显著抬升^[39]。

4 压实黄土增湿变形和压缩蠕变特性

4.1 压实黄土的增湿变形特征和湿陷机理

利用SWC-150 Fredlund压力仪对典型压实黄土进行控制基质吸力的逐级增湿试验，发现湿陷变形可分

为3个阶段(图6(a)), 即湿陷前阶段、湿陷阶段和湿陷后阶段。在湿陷前阶段, 土体变形为弹性变形, 土体结构基本未发生改变; 在湿陷阶段, 土体变形为塑性变形, 基质吸力和孔隙比基本呈半对数线性关系; 在湿陷后阶段, 土体接近饱和时(如饱和度>85%), 吸力的变化对土体体积变形没有影响。基于高精度微米CT原位压缩湿陷试验和离散元数值模拟技术, 构建了反映压实黄土真实微观颗粒形态的离散元三维数值模型, 探究其在湿陷阶段的微结构演化规律。结果显示, 在力学机制上, 湿陷变形主要为含水率增大时因土体刚度降低而发生的压密变形。湿陷过程中压实黄土的结构变化整体上表现为颗粒间孔隙的局部压密(图6(b), (d)), 颗粒及孔隙的形态变化和重新排布不明显(图6(c), (d)), 结构性并未消除(图6(d))。值得注意的是, 当外荷载很大时(如800 kPa), 浸水湿陷变形几乎为零, 孔径分布和孔隙形态基本保持不变(图6(b), (c))。这表明若浸水湿陷前, 土体密实度很大时, 湿陷变形可忽略不计。

Pereira和Fredlund^[40]在进行压实片麻岩风化土的控制基质吸力的逐级增湿试验时首次发现了增湿变形

具有三阶段特征。Hou等人^[41]据此增湿变形特征, 建立了数学模型, 见式(2)。据此模型并结合渗流场分析结果, 可预测场地增湿变形量。增湿变形是随水分在土体中入渗逐渐变化的过程, 其同场地水分分布密切相关。对于压实黄土场地, 含水率变化大的地方湿陷变形大, 当场地因地下水排泄不畅引起局部土体含水率显著增大时, 可能会因增湿变形不均匀而产生差异沉降裂缝, 增大土体压实度可有效减小湿陷变形诱发的灾害。

$$\begin{aligned} e &= e_0, & s \geq s_0, \\ e &= e_0 - \lambda(p) \ln\left(\frac{s_0}{s}\right), & s_{\text{final}} \leq s < s_0, \\ e &= e_{\text{final}}, & 0 \leq s < s_{\text{final}}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, e_0 为某一外荷载变形稳定后, 且在增湿变形之前的初始孔隙比, s_0 为湿陷起始吸力, s_{final} 为湿陷终止吸力, e_{final} 为湿陷终止时的孔隙比。

4.2 压实黄土的侧限压缩蠕变特性

对不同干密度(1.50 、 1.60 、 1.70 g/cm 3)、不同含

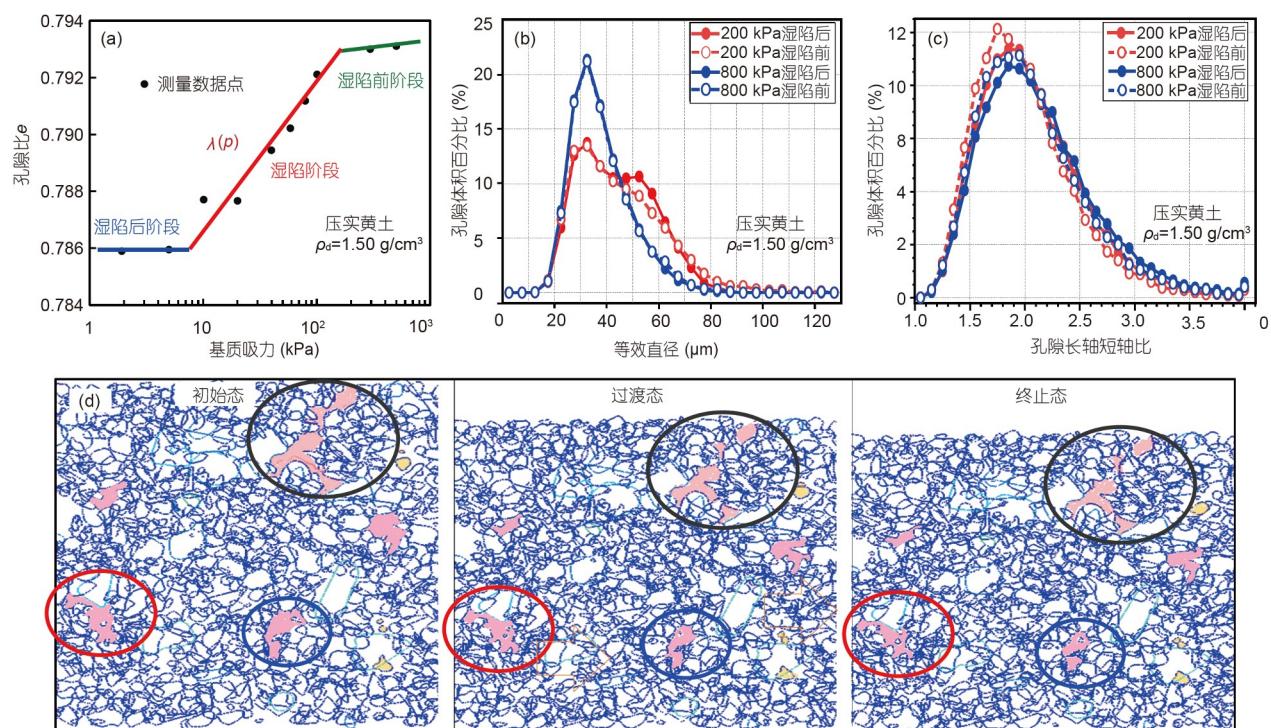


图 6 增湿湿陷宏观变形和微结构演化图。(a) 增湿湿陷宏观变形特征; (b) 湿陷前后孔隙分布图; (c) 湿陷前后孔隙形态变化图; (d) 离散元数值模拟湿陷过程的微结构演化

Figure 6 Macroscopic characteristics and microstructure evolution during wetting-induced collapse deformation. (a) Macroscopic characteristics of wetting-induced deformation; (b) pore size distribution curves before and after collapse; (c) pore morphologies before and after collapse; (d) microstructural evolution during collapse using the discrete element method

水率(10%、15%和饱和)压实黄土和天然黄土(Q_2)开展侧限压缩蠕变试验, 施加每级压力后, 不同时间间隔记录试样高度变化直至变形稳定。从试样典型的变形-时

间曲线(图7(a))和不同时刻的 $e(t)$ -log p 曲线(图7(b))中可发现如下变形规律: (1) 土体变形主要发生在瞬时变形阶段(图7(a)); (2) 对于 $e(t)$ -log p 曲线, 在平缓段和陡降段

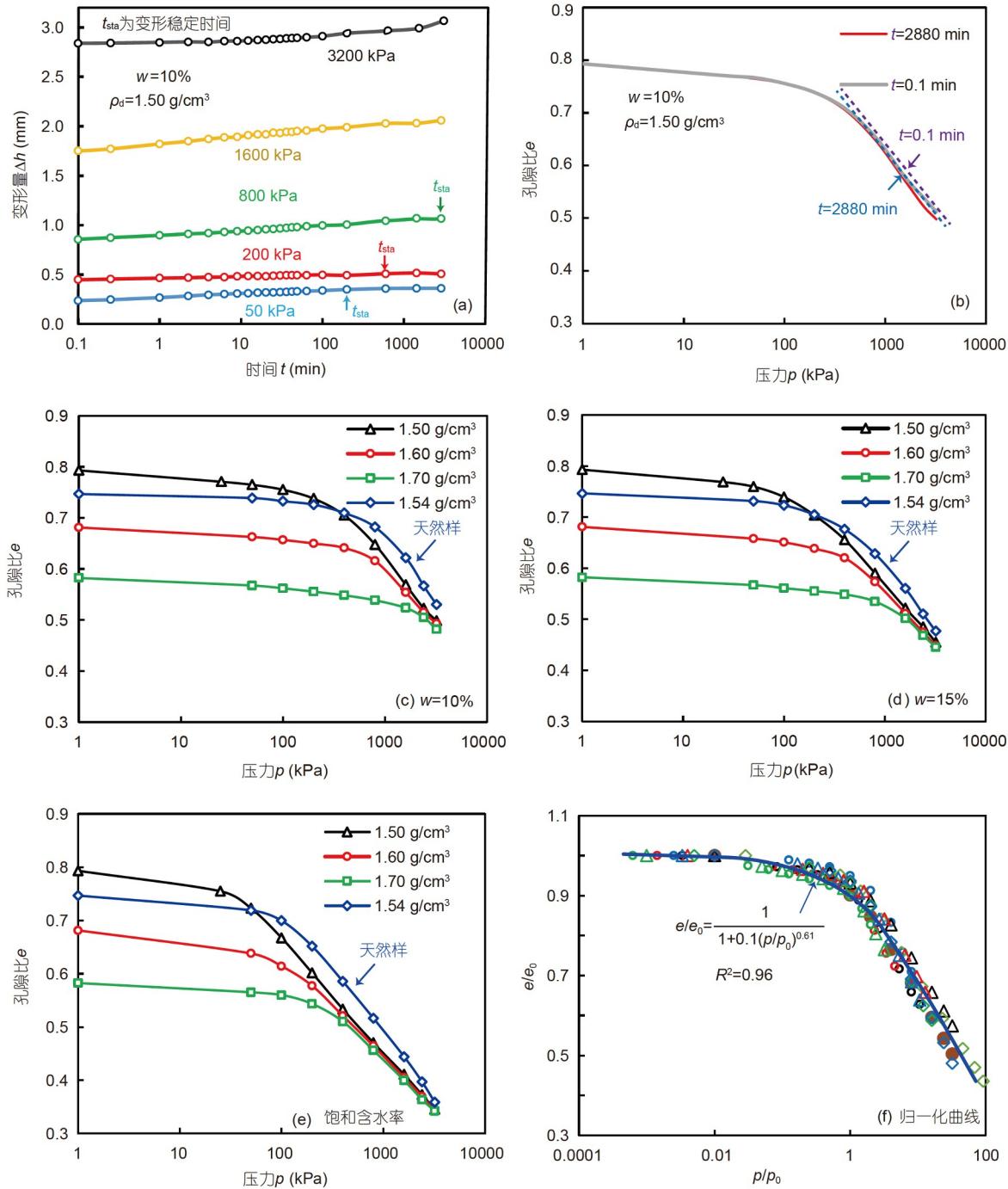


图 7 (网络版彩色)天然和压实黄土压缩蠕变特征曲线。(a) 变形时间曲线 $\Delta h-t$; (b) 等时压缩曲线 $e(t)$ -log p ; (c~e) 不同含水率试样的压缩曲线 e -log p ; (f) 归一化曲线 e/e_0 -log (p/p_0) . e_0 为施加荷载之前试样的初始孔隙比, p_0 为屈服应力

Figure 7 (Color online) Compression and creep characteristics of natural and compacted loess. (a) Deformation versus time curve $\Delta h-t$; (b) isochronous compression curve $e(t)$ -log p ; (c-e) compression curve e -log p of samples with different water contents; (f) normalized curve e/e_0 -log (p/p_0) . e_0 is the initial void ratio before loading, p_0 is the yield stress

之间存在一个明显的值, 可称为侧限压缩屈服应力, 并利用Casagrande A作图法估算。不同时刻下的 $e(t)$ -log p 曲线的屈服应力相差不大, 且 $e(t)$ -log p 曲线的陡降段基本平行(图7(b)); (3) 当上覆荷载大于土体的屈服应力时, 蠕变变形量大, 蠕变稳定所需时间 t_{sta} 长(图7(a)); (4) 当压力小于土体屈服应力时, 蠕变量小, 蠕变稳定所需时间 t_{sta} 短(图7(a))。由此可知, 非饱和土的蠕变特征同屈服应力密切相关。

为了探究干密度和含水率对土体屈服应力的影响, 以每小时变形小于0.01 mm时的总变形量为标准绘制所有土样的 e -log p 曲线, 见图7(c)~(e)。值得指出的是, 此每小时变形量小于0.01 mm的标准为饱和土固结和蠕变阶段的分界点(《土工试验标准GB/T50123-2019》)。对于非饱和土, 目前尚无成熟方法来区分其不同阶段。从图7(c)~(e)中可知: (1) 相同含水率不同干密度压实黄土的屈服应力随干密度的增大逐渐增大, 如10%含水率下, 干密度为1.50、1.60和1.70 g/cm³的试样屈服应力依次为300、700和1800 kPa; (2) 而当干密度相同时, 屈服应力随含水率的增大而减小, 如1.70 g/cm³的试样, 10%、15%和饱和时的屈服应力依次为1800、1000、300 kPa; (3) 当压力大于其屈服应力时, e -log (p) 曲线基本落在同一条直线上(图7(c)~(e)); (4) 天然黄土(Q_2)的 e -log (p) 曲线基本落在压实黄土曲线的右侧, 这表明天然黄土(Q_2)具有较高的抵抗变形能力。试样的干密度越大, 外力作用下土体形变量越小。

将不同试样的 e -log (p) 曲线进行归一化处理后可以发现, 不同干密度的压实黄土和天然黄土(Q_2)的 e/e_0 -log (p/p_0) 曲线基本重合(图7(f)), 其归一化曲线可用式(3)描述。这表明, 含水率对土体压缩曲线的影响主要反映在屈服应力上, 而初始干密度的影响主要反映在初始孔隙比和屈服应力上。在填土施工过程中, 通过强夯碾压等增大场地压实土体的初始干密度可降低工后沉降变形。

表 1 含水率 $w=10\%$ 和 $w=17\%$ 时压实黄土($\rho_d=1.70 \text{ g/cm}^3$)蠕变模型参数

Table 1 Creep model parameters of compacted loess ($\rho_d=1.70 \text{ g/cm}^3$) with water content $w=10\%$ and $w=17\%$

| a | | b | | $E_m(\text{MPa})$ | | $E_k(\text{MPa})$ | | $\eta_k(\text{MPa h})$ | | η_m (MPa h) | p (MPa) |
|--------|--------|--------|--------|-------------------|-------|-------------------|-------|------------------------|-------|---------------------|--------------|
| 10% | 15% | 10% | 15% | 10% | 15% | 10% | 15% | 10% | 15% | | |
| 0.0009 | 0.0034 | 0.0028 | 0.0042 | 10.41 | 7.40 | 158.2 | 95.5 | 967.2 | 550.2 | 10^6 | 0.4 |
| 0.0021 | 0.0080 | 0.0037 | 0.0086 | 13.92 | 9.97 | 216.2 | 92.9 | 900.5 | 552.2 | 10^6 | 0.8 |
| 0.0021 | 0.0351 | 0.0041 | 0.0169 | 18.80 | 13.62 | 390.2 | 94.7 | 900.2 | 300.1 | 10^6 | 1.6 |
| 0.0034 | 0.0813 | 0.0037 | 0.0261 | 25.73 | 18.94 | 864.8 | 122.6 | 2081.1 | 300.5 | 10^6 | 3.2 |

$$e = e_0 \frac{1}{1 + n(p/p_0)^m}, \quad (3)$$

其中, e_0 为施加荷载前试样的初始孔隙比, p_0 为屈服应力, n 和 m 为拟合参数。

蠕变阶段的变形方程可用Yin^[27]提出的类双曲线表达式, 结合式(3), 可得到荷载作用下土体侧限压缩蠕变变形公式, 见式(4)。利用式(4)拟合上述试验结果, 得到 n 为0.1, m 为0.61, p_0 随干密度增大和含水率的降低而增大。根据Yin^[27]建议, t_0 为压缩变形稳定时的时间, 可取值为60 min。此外, a 和 b 整体上表现出随含水率和压力的增大而增大, 见表1。值得注意的是, 当 t 为无穷大时, 蠕变变形的应变极值为 b , 即土体在侧限条件下存在变形极值。

将式(4)同常用的描述岩土体蠕变行为的Burgers模型(式(5))对比可以发现: (1) 新提出的模型(式(4)), 各参数的物理意义较为明确, 且能反映含水率和干密度对压缩蠕变的影响。Burgers模型为数学拟合模型, 含水率和干密度对各个参数的影响规律不明; (2) Burgers模型描述瞬时变形的变量 p/E_m 同本模型中描述压缩变形的项(式(3))相对应, 即 E_m 同 n 、 m 、 p_0 相关; (3) 对于一定的 η_m 值, Burgers模型的变形随时间增大而逐渐增大, 不存在变形极值, 这同实际情况不符。但当 η_m 取值无限大时, Burgers模型预测的应变极值为 p/E_k , 符合实际情况, 与式(4)中的 b 值密切相关。因此, 若用Burgers模型计算侧限压缩变形量, η_m 取值应非常大, 如 10^6 MPa h , 使其蠕变贡献量可忽略不计。表1列出了式(4)中的蠕变参数 a 、 b 及其对应的Burgers模型参数, 其中 η_k 可通过拟合得到。

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \varepsilon = 1 - \frac{1}{1 + n(p/p_0)^m} + \frac{a \ln[(t+t_0)/t_0]}{1 + (a/b) / \ln[(t+t_0)/t_0]}, \quad (4)$$

其中, e_0 为施加荷载前试样的初始孔隙比, Δe 为孔隙比的变化量, ε 为应变, p_0 为屈服应力, p 为上覆压力, n 和 m

为与压缩变形有关的拟合参数, a 、 b 、 t_0 为与蠕变变形有关的拟合参数。

$$\frac{e}{e_0} = \varepsilon = \left\{ \frac{1}{E_m} + \frac{t}{\eta_m} + \frac{1}{E_k} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_k}{\eta_k} t \right) \right] \right\} p, \quad (5)$$

其中, E_m 为描述瞬时变形的蠕变模量, E_k 为蠕变模量, η_m 和 η_k 为黏滞系数, ε 为应变, t 为时间, p 为上覆压力。

上述试验及理论分析结果表明, 平山造城工程施工过程中, 通过增大土体压实度, 提高土体的屈服应力, 可缩小土体侧限压缩蠕变变形, 降低潜在的工程风险。

5 典型压实黄土场地沉降变形特征及预测

针对延安平山造城场地, 在延安新区北区刘家沟流域平山造地区域地表不同位置处开展地表沉降量监测(监测位置见图1)。此外, Hu 等人^[42]通过2000和2015年数字高程模型(digital elevation model, DEM)差分获取延安新区北区的地表高程变化, 同时采用InSAR技术提取该区域的时空地表变形特征。在此基础上, 采用式(6)拟合时序沉降量, 式(7)定量描述场地变形稳定所需时间 t_{sta} :

$$D_{settlement} = a[\exp(bt) - 1], \quad (6)$$

$$t_{sta} = \left| \ln(\gamma\bar{v} / nab^2) / b \right|, \quad (7)$$

其中, $D_{settlement}$ 为累积沉降量(m), t_{sta} 为变形稳定所需时间(a), t 为时间(a), a 和 b 为拟合参数, 单位分别为m和a⁻¹, \exp 为自然对数的底数, γ 为预期变形速率占当前变形速率的比值, 为5%, \bar{v} 为当前变形速率(m/a), n 为量纲单位1/a。

原位监测结果(图8(a))和InSAR分析结果(图8(b)~(d))显示场地变形多发生在填方区, 瞬时沉降已完成, 变形量仍然累计逐渐增加, 变形速率递减, 但尚未稳定, 其累计沉降变形量同填方土厚度基本上呈正相关关系(图8(a))。通过对区域内每个特征点的InSAR位移时间序列进行反演, 以变形速率为2014~2020年平均变形速率的5%(γ)作为判定场地变形稳定的标准, 整体上场地变形稳定时间为0~20 a不等(图8(c), (d)), 而大部分区域15 a内可达到基本稳定状态^[42]。

对延安新区北区刘家沟流域上游区域开展大型流变数值分析, 利用Flac 3D软件建立数值模型(图8(e)), 模型尺寸为662 m(长)×465 m(宽)×105 m(高), 底面固

定, 侧面无法向位移, 顶部可自由移动。填方土层最大厚度为70 m, 建模过程中将其简化为3层, 从上到下依次为20、20、30 m。土体本构方程采用Burgers模型, 考虑到填方区土体的干密度多为1.70 g/cm³(图2), 含水率在10%~18%之间变化(图2), 三层填方土的模型参数依次取表1中含水率为15%时的参数, 并依据实际监测数据适当调整, 最终得到场地沉降变形数值模拟结果与监测结果具有很好的吻合度(图8(f)), 反映了模型的可靠性。根据流变模型计算结果(图8(f)), 填土厚度越大, 场地变形稳定所需时间越长, 当场地填土厚度达到24.5 m, 场地变形稳定时间约为4~5 a, 当填土厚度达到59 m, 场地变形在8 a后趋缓, 稳定时间基本为12 a。这与基于场地地面及InSAR监测数据外推预测的结果基本一致。

根据上述原位监测结果、InSAR分析结果和大型数值模拟结果, 可估算此平山造地区域的变形稳定期基本为工后15 a。若当地气候条件不发生巨大改变, 不出现管道漏水、排水设施故障等人为事故, 场地基本不会发生额外的沉降变形。

6 平山造城工程适宜性讨论

6.1 压实黄土场地整体沉降变形内在机制

压实黄土场地整体沉降变形主要发生在填方区, 变形减缓并逐渐趋于稳定, 总变形量和变形稳定时间随填方土厚度的增加而增加。根据前文研究成果, 其内在机制可归纳为以下4个方面的原因: (1) 挖方区土体多处于卸荷状态, 地表会产生少许回弹变形而非沉降变形^[43,44], 因而沉降变形在挖方区不明显。(2) 压实黄土中的含水状态基本能维持长期稳定(图S1), 若处理好地下水排泄通道, 增湿变形基本可以忽略; 此时, 地表沉降量主要包括场地压实土在自重荷载作用下的压缩蠕变变形和原天然黄土在上覆荷载作用下的压缩蠕变变形, 而压缩蠕变变形随时间渐趋稳定。(3) 在填方区, 受原始沟谷地形影响, 填方土厚度在沟谷中心最大, 并向两侧递减。相同条件下, 天然黄土的屈服应力较压实黄土大(图7(c)~(e)), 且压缩模量也较大(图2), 故其变形量小于压实黄土。相同高度下, 天然黄土厚度越大, 变形量越小, 地表总变形量亦会小于填土厚度大的区域。(4) 填土厚度的增大会使得下部土体的上覆荷载增大, 而变形稳定时间随上覆荷载的增大而增大(图7(a), (b)), 因此变形稳定时间会随着填方土厚度的增加而增大。

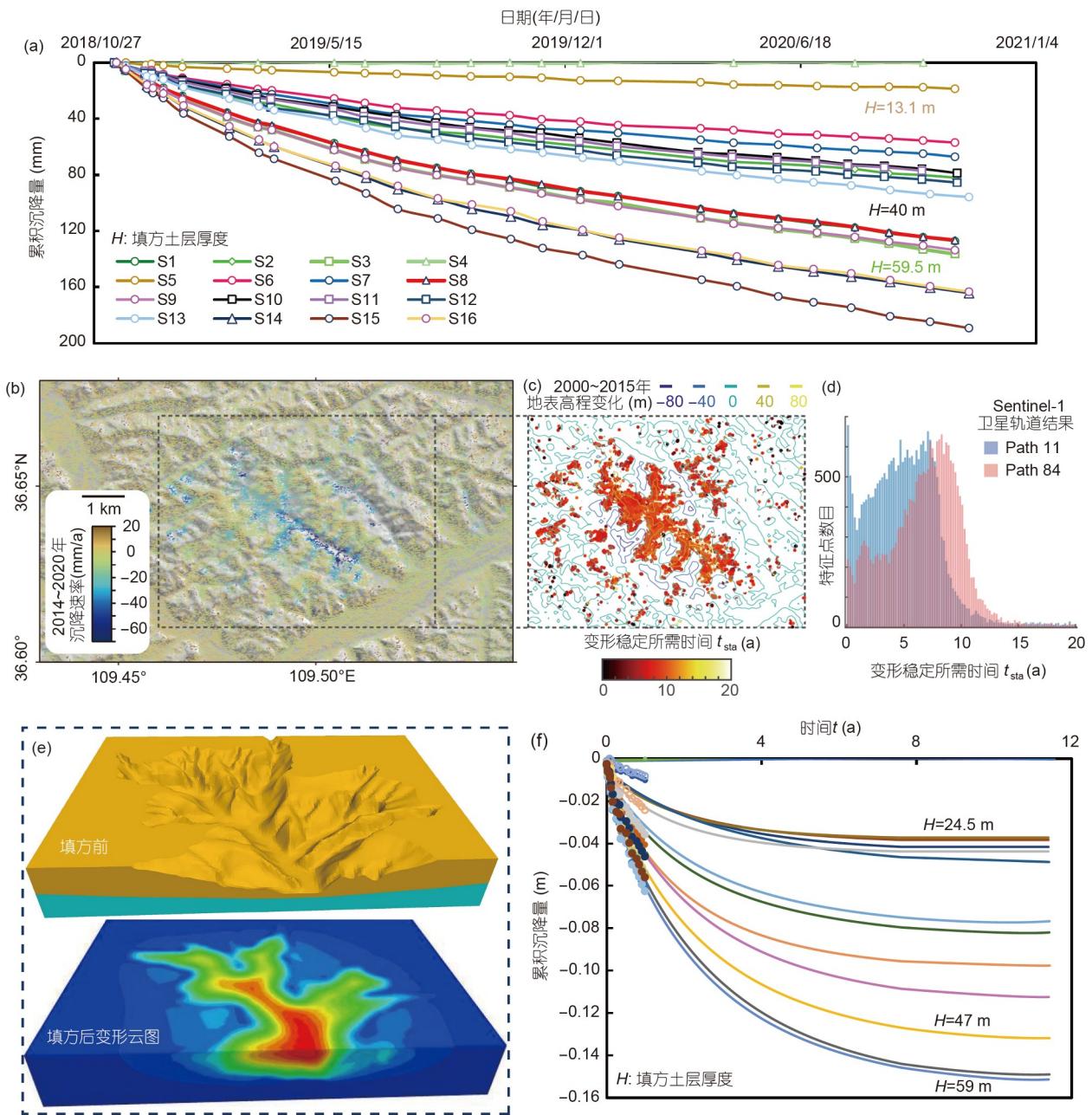


图 8 典型平山造城场地地表沉降变形特征. (a) 原位监测地表沉降量; (b) InSAR分析提取的2014~2020年垂直位移速度图; (c) 变形稳定所需时间的空间分布与2000~2015年地表高程变化叠加图; (d) Sentinel-1卫星两个轨道数据所解算出来的变形稳定所需时间统计直方图; (e) 数值模型和变形云图; (f) 实测结果(散点)和模拟结果(实线)对比图. (b-d) 修改自文献[42]

Figure 8 Ground settlement characteristics of a typical mountain bulldozing and city creation (MBCC) site. (a) *In-situ* observation of ground settlement; (b) vertical displacement velocity map in 2014–2020 by InSAR analysis; (c) spatial distribution of the time required for deformation stabilization and the superimposed map of the surface elevation variation from 2000 to 2015; (d) statistical histogram of the deformation stabilization time calculated from the two orbital data of Sentinel-1 satellite; (e) numerical model and deformation map; (f) measured deformation data (scattered points) and predicted curve using the numerical model (solid lines). (b-d) Adapted from Ref. [42]

值得注意的是, 若场地的水文环境显著改变, 如遇持续性强降雨等极端气候, 水分入渗和地下水排泄不畅时会诱发增湿变形, 使得变形速率和总变形量增

大^[45]. 整体上, 压实黄土地的长期稳定性趋稳变好. 在高填方施工过程中, 施工前对原地基充分处理, 施工过程中保证压实土体的干密度/压实度, 可有效减少施

工引起的沉降变形及缩短工后变形稳定期。

6.2 压实黄土场地的局部宏观破坏机制

尽管通过控制土体的干密度，压实黄土场地整体上不会发生过量沉降变形，且变形会渐趋稳定。但通过对典型平山造城场地野外调查和资料收集，发现场地上会发生局部裂缝灾害，主要分布在填方厚度小于15 m 及距离挖填分界线20 m以内的区域内，以挖填交界过渡带(挖填厚度≤5 m)为主，裂缝走向与挖填界线或原地基的等高线近似一致^[46]。根据其诱发因素，可将裂缝分为界面滑移裂缝(A)、差异沉降裂缝(B)和增湿变形裂缝(C)(图2S(a))。

界面滑移裂缝(A)多发生在挖填交界面上。在天然黄土和压实黄土的几何界面上，强降雨容易沿几何界面(优势入渗通道)下渗形成软弱接触面，填筑体和自然山体之间产生不均匀沉降。

差异沉降裂缝(B)是由于沟谷地形、填土厚度差异等引起的差异沉降和水平位移引起。一方面，填方区土体的自重对原地基产生附加应力，离心机和数值模拟结果显示挖填界面附近的裂缝为拉剪裂缝(图S2(b))。另一方面，填方区土体沉降变形随填土厚度增大而增大，填筑体表面沉降变形在沟谷中心最大，往两侧逐渐递减(图8(e))。因此，沟谷两侧填土发生朝向沟谷中心的水平位移，引起挖填交界带土体内产生的拉张力大于土体抗拉强度，产生拉张裂缝。

增湿变形裂缝(C)多发生在地下水位排泄不畅形成局部积水区域。积水区域因产生附加增湿变形，与周围土体会形成差异沉降。此外，野外调查发现，在一些填方区域，土体松散堆积未经夯实，在强降雨或管道泄漏情况下，会在地表产生湿陷变形，甚至发育冲沟；当地下水排泄路径被严重堵塞时，场地沟口拦截坝可能会溃坝诱发泥流^[47]。

根据裂缝产生机理，可采取针对性的工程措施减小其发生的可能性。如针对挖填界面问题，可通过对填挖交界处采取台阶式开挖并加密强夯，施工结束后采取土工膜予以防渗加固，来减少强降雨过程中水分沿界面的优先入渗，避免挖填界面产生滑移和过量差异沉降^[48]。针对填筑体差异沉降裂缝，野外监测结果显示，裂缝多出现在填方施工结束1个月后，并在4个月后渐趋稳定，故可在裂缝宽度稳定后将此裂缝周围进行强夯处理^[46]。考虑场地沉降变形稳定需要若干年，差异沉降裂缝很难被预估，为避免此类灾害，根据城市规划，

建议针对拟建重要建筑物的场址，填方施工时严格控制填方土的干密度。干密度越大，整体工后沉降变形越小，其长期蠕变产生的差异沉降越小。针对增湿变形裂缝，在平山造城工程施工前充分调研场地地下水分布及径流特征，在施工过程中严格布设排水设施可最大限度地降低灾害发生风险。

6.3 黄土高原平山造城适应性原则探讨

总结黄土高原丘陵沟壑区平山造城工程的实践，建议适宜开展平山造城的场地位满足以下条件：(1) 工程场区所在区域构造上处在相对稳定完整的地块，场地区域内无活动性断裂存在，确保场地区域地震风险低；(2) 原土基应通过不良地质体处理、淤积土处理、湿陷性黄土处理等系列措施进行处置，填筑体施工时采用分层填筑、冲击碾压、开槽接坡、强夯补强等技术措施进行，确保填筑体均匀、密实和稳定，提高土体的屈服应力，减少原地基和填筑体的沉降与不均匀沉降，确保压实黄土场地3种裂缝的规模有限；(3) 工程场区周边因挖填造地形成的各类边坡，经采取坡体防护处理和设置坡面排水系统后，能够保证挖填边坡的稳定性；(4) 工程应结合地形、泉眼出露和渗流情况设置地下排水系统，将原沟底的地表水、出露泉等排出场区外，保证场区地下水的长期稳定性；(5) 大面积施工时应及时进行试验检测和全过程监测，加强过程质量控制和变形与稳定性监测，确保原地基及填筑体处理质量，及时掌控工程安全稳定状态。延安平山造城场地均较好地满足上述5条适宜性原则，确保了场地的长期变形稳定性。

7 结论

通过现场调研、室内试验、模型试验、数值模拟、原位监测和InSAR分析等工作，探究了场地压实黄土物理力学性质及微结构特征、非饱和渗透特性、水分迁移过程及特征、湿陷变形机理、增湿变形和蠕变特性，典型压实黄土场地水分演化规律、宏观变形特征和沉降预测，探讨了局部宏观变形破坏机理和工程可控性，从室内外现象、理论和物理机制等角度论证了平山造城工程的可行性和科学性，取得的主要结论如下。

(1) 场地压实黄土的物理力学性质和微观结构与天然黄土差异较大，其力学性质差、空间变异性大、孔隙连通性差。压实黄土干密度达到1.70 g/cm³时，其

压缩模量和微观结构与干密度为 1.54 g/cm^3 的天然黄土接近。不同干密度压实黄土与天然黄土的非饱和渗透特性在低含水率时基本相同，在高含水率时差异较大，此种差异受土体的孔径分布控制。

(2) 厚层非饱和黄土层中存在含水率稳定带，当无稳定地下水位时，土体含水率较低，无稳定水流；当存在稳定地下水位时，非饱和土层根据水分变化状态和运移特征基本可划分为3个带：活动带、稳定带和毛细饱和带。在活动带，土体含水率受当地降雨和蒸发影响剧烈；在稳定带，土体的含水率几乎保持不变，存在向下的稳定水流，其渗流速率受当地降雨和蒸发条件控制；在毛细饱和带，土体接近于饱和，水分流动状态受地下水排泄情况影响。

(3) 压实黄土湿陷机理，在力学上表现为增湿使得土体刚度降低而发生的压密变形，在微结构上表现为颗粒间孔隙的局部压密，颗粒及孔隙的形态和重新排布不明显，结构性并未消除。压实黄土的蠕变特征与屈服应力和上覆荷载的大小密切相关，增大压实土体的

干密度，降低含水率，可提高屈服应力，缩短蠕变稳定时间。

(4) 典型平山造城场地厚层填方土中表层以下($<2.0 \text{ m}$)土体含水率基本维持不变，并存在向下的水分迁移，多年累积可补给地下水。通过合理设置排水设施，可有效减少大规模填方对场地水文环境的影响，并减少湿陷变形诱发的灾害。

(5) 典型平山造城场地整体上累积变形量随填方土厚度增大而增大，地表变形减缓沉降速率递减，预测工后15 a场地变形可达稳定。场地会发生局部变形破坏，主要为界面滑移裂缝、增湿变形裂缝和差异沉降裂缝。通过提高压实土体干密度/压实度可有效减小工后沉降变形及局部变形破坏。

(6) 在地震低风险区，严控施工质量确保填筑体均匀密实、合理设置排水系统，施工中进行试验检测和全过程监测，及时发现问题并解决，预测场地变形稳定期，为工后建设提供指导，平山造城工程的稳定性和适宜性可得到保证。

参考文献

- 1 Fu B J. Ecological and environmental effects of land-use changes in the Loess Plateau of China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 3768–3779 [傅伯杰. 黄土高原土地利用变化的生态环境效应. 科学通报, 2022, 67: 3768–3779]
- 2 Juang C H, Dijkstra T, Wasowski J, et al. Loess geohazards research in China: Advances and challenges for mega engineering projects. Eng Geol, 2019, 251: 1–10
- 3 Li P Y, Qian H, Wu J H. Environment: Accelerate research on land creation. Nature, 2014, 510: 29–31
- 4 Liu Y S, Li Y H. China's land creation project stands firm. Nature, 2014, 511: 410
- 5 Zhang S M, Zheng J G. The deformation characteristics of collapsible loess during moistening process (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 1990, 12: 21–31 [张苏民, 郑建国. 湿陷性黄土(Q3)的增湿变形特征. 岩土工程学报, 1990, 12: 21–31]
- 6 Sun J Z. Relationship of loess collapsibility and moisture (in Chinese). Hydrogeol Eng Geol, 1957, (11): 18–21 [孙建中. 黄土的湿陷性及其与湿度的关系. 水文地质工程地质, 1957, (11): 18–21]
- 7 Zheng J G, Zhang S M. The initial pressure and initial moisture content of collapsible loess (in Chinese). Geotech Invest Surv, 1989, (2): 6–10 [郑建国, 张苏民. 黄土的湿陷起始压力和起始含水量. 工程勘察, 1989, (2): 6–10]
- 8 Chen C L, Zhang D F, Zhang J, et al. Compression and wetting deformation behavior of intact loess under isotropic stresses (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2017, 36: 1736–1747 [陈存礼, 张登飞, 张洁, 等. 等向应力下天然黄土的压缩及增湿变形特性研究. 岩石力学与工程学报, 2017, 36: 1736–1747]
- 9 Li P, Vanapalli S K, Li T L. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting. J Rock Mech Geotech Eng, 2016, 8: 256–274
- 10 Hou X K. Water percolation in the unsaturated loess layer and its influence on the slope stability and collapse deformation (in Chinese). Doctor Dissertation. Xi'an: Chang'an University, 2019. [侯晓坤. 水分在非饱和黄土中的运移规律及其对边坡稳定性和湿陷变形的影响. 博士学位论文. 西安: 长安大学, 2019]
- 11 Terzaghi K. Soil moisture and capillary phenomena in soil. Hydrology, 1942, (1): 331–363
- 12 Guan W Z. On soluble salts and the mechanism of loess collapsibility (in Chinese). J Guilin Inst Metall Geol, 1986, (3): 271–278 [关文章. 试论可溶盐与黄土湿陷机理. 桂林冶金地质学院学报, 1986, (3): 271–278]
- 13 Денисов, Н.Я. Architectural Properties of Loess and Loess-like Subclay (in Chinese). Beijing: Geological Press, 1956 [杰尼索夫. 黄土与黄土状亚黏土的建筑性质. 北京: 地质出版社, 1956]
- 14 Gao G R. A structure theory for collapsing deformation of loess soils (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 1990, 12: 1–10 [高国瑞. 黄土湿陷变形的

- 结构理论. 岩土工程学报, 1990, 12: 1–10]
- 15 Lei X Y. Pore types and collapsibility of Chinese loess (in Chinese). Sci China Ser B, 1987, (12): 48–54 [雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性. 中国科学B辑, 1987, (12): 48–54]
- 16 Tang L S. Synthetic effect of microstructure and uneven suction on loess subsidence (in Chinese). J Eng Geol, 2003, (1): 30–35 [汤连生. 黄土湿陷性的微结构不平衡吸力成因论. 工程地质学报, 2003, (1): 30–35]
- 17 Yuan Z X, Wang L M, Wang J. Discussion water collapsibility of loess considering unsaturated soil and structure characteristics of loess (in Chinese). NW Seismol J, 2007, 29: 12–18 [袁中夏, 王兰民, 王峻. 考虑非饱和土与结构特征的黄土湿陷性探讨. 西北地震学报, 2007, 29: 12–18]
- 18 Miao T D, Wang Z G. Deformation mechanism of collapsible loess considering microstructure instability (in Chinese). Sci China Ser B, 1990, (1): 86–96 [苗天德, 王正贵. 考虑微结构失稳的湿陷性和黄土变形机理. 中国科学B辑, 1990, (1): 86–96]
- 19 Miao T D. Deformation mechanism and constitutive relation of collapsible loess (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 1999, 21: 383–388 [苗天德. 湿陷性黄土的变形机理与本构关系. 岩土工程学报, 1999, 21: 383–388]
- 20 Alonso E E, Gens A, Josa A. A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique, 1990, 40: 405–430
- 21 Hou X K, Zhai Z H, Chao J H, et al. A model for predicting the unsaturated collapse deformation of loess (in Chinese). Hydrogeol Eng Geol, 2016, 43: 94–100 [侯晓坤, 翟张辉, 晁建红, 等. 黄土非饱和湿陷变形的计算模型. 水文地质工程地质, 2016, 43: 94–100]
- 22 Huang T M, Ma B Q, Pang Z H, et al. How does precipitation recharge groundwater in loess aquifers? Evidence from multiple environmental tracers. *J Hydrol.*, 2020, 583: 124532
- 23 Xie X, Qi S W, Zhao F S, et al. Creep behavior and the microstructural evolution of loess-like soil from Xi'an area, China. *Eng Geol.*, 2018, 236: 43–59
- 24 Ge M M, Li N, Zheng J G, et al. Prediction of the post-construction settlement of high filled embankment with considering the time depending deformation of compacted loess (in Chinese). Chin Civ Eng J, 2015, (s2): 262–268 [葛苗苗, 李宁, 郑建国, 等. 考虑黄土时效变形特性的高填方工后沉降预测. 土木工程学报, 2015, (s2): 262–268]
- 25 Zhu C H, Li N, Liu J P. Research on the creep behavior of compacted Q3 Ma-Lan Loess (in Chinese). J Xi'an Univ Technol, 2011, 27: 1–8 [朱才辉, 李宁, 刘俊平. 压实Q3马兰黄土蠕变规律研究. 西安理工大学学报, 2011, 27: 1–8]
- 26 Song E X, Cao G X. Characteristics and simplified calculation method of creep settlement of high fill foundation in mountain area (in Chinese). Rock Soil Mech, 2012, 33: 1711–1718 [宋二祥, 曹光棚. 山区高填方地基蠕变沉降特性及简化计算方法探讨. 岩土力学, 2012, 33: 1711–1718]
- 27 Yin J H. Non-linear creep of soils in oedometer tests. Géotechnique, 1999, 49: 699–707
- 28 Zhang L X, Qi S W, Yu Y T, et al. A comparative study on the physical properties of natural sedimentary loess and manual filling compacted loess. Environ Earth Sci, 2021, 80: 1–17
- 29 Alonso E E, Pinyol N M, Gens A. Compacted soil behavior: Initial state, structure, and constitutive modelling. Géotechnique, 2013, 63: 463–478
- 30 Mitchell J K, Soga K. Fundamentals of Soil Behavior. New York: John Wiley & Sons, 2005
- 31 Zhang L X, Qi S W, Ma L N, et al. Three-dimensional pore characterization of intact loess and compacted loess with micron scale computed tomography and mercury intrusion porosimetry. Sci Rep, 2020, 10: 8511
- 32 Hou X K, Qi S W, Li T L, et al. Microstructure and soil-water retention behavior of compacted and intact silt loess. *Eng Geol.*, 2020, 277: 105814
- 33 Li H, Li T L, Jiang R J, et al. A new method to simultaneously measure the soil water characteristics curve and hydraulic conductivity function using filter paper. Geotech Test J, 2020, 43: 1541–1551
- 34 Li Y, Li T L, Hou X K, et al. Prediction of unsaturated permeability curve of compaction loess with pore-size distribution curve and its application scope (in Chinese). Rock Soil Mech, 2021, 42: 2395–2404 [李燕, 李同录, 侯晓坤, 等. 用孔隙分布曲线预测压实黄土非饱和渗透曲线及其适用范围的探讨. 岩土力学, 2021, 42: 2395–2404]
- 35 Hou X K, Li T L, Vanapalli S K, et al. Water percolation in a thick unsaturated loess layer considering the ground-atmosphere interaction. Hydrol Process, 2019, 33: 794–802
- 36 Hou X K, Vanapalli S K, Li T L. Water flow in unsaturated soils subjected to multiple infiltration events. Can Geotech J, 2020, 57: 366–376
- 37 Zhang Y G, Li T L, Shen W, et al. Hydraulic model of transition of transient to steady flows in the vadose zone. *J Hydrol Eng.*, 2019, 24: 04019052
- 38 Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Can Geotech J.*, 1996, 33: 379–392
- 39 Peng J B, Zhuang J Q, Wang G H, et al. Liquefaction of loess landslides as a consequence of irrigation. *Quart J Eng Geol Hydrogeol.*, 2018, 51: 330–337
- 40 Pereira J H F, Fredlund D G. Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil. *J Geotech Geoenvir Eng.*, 2000, 126: 907–916
- 41 Hou X K, Vanapalli S K, Li T L. Wetting-induced collapse behavior associated with infiltration: A case study. *Eng Geol.*, 2019, 258: 105146
- 42 Hu X, Xue L, Yu Y T, et al. Remote sensing characterization of mountain excavation and city construction in Loess Plateau. *Geophys Res Lett.*, 2021, 48: e2021GL095230

- 43 Zhu C H, Li N, Liu M Z, et al. Spatiotemporal laws of post-construction settlement of loess-filled foundation of Lüliang Airport (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2013, 35: 293–302 [朱才辉, 李宁, 刘明振, 等. 吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析. 岩土工程学报, 2013, 35: 293–302]
- 44 Zhou C D, Lan H X, Bürgmann R, et al. Application of an improved multi-temporal InSAR method and forward geophysical model to document subsidence and rebound of the Chinese Loess Plateau following land reclamation in the Yan'an New District. *Remote Sens Environ*, 2022, 279: 113102
- 45 Yao Y P, Huang J, Zhang K, et al. Numerical back-analysis of creep settlement of airport high fill (in Chinese). Rock Soil Mech, 2020, 41: 3395–3406 [姚仰平, 黄建, 张奎, 等. 机场高填方蠕变沉降的数值反演预测. 岩土力学, 2020, 41: 3395–3406]
- 46 Yu Y T, Zheng J G, Zhang J W, et al. Development and distribution characteristics of ground fissures in high loess filled ground (in Chinese). Chin J Geol Hazard Control, 2021, 32: 85–92 [于永堂, 郑建国, 张继文, 等. 黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32: 85–92]
- 47 Zhang F Y, Yan B B, Feng X M, et al. A rapid loess mudflow triggered by the check dam failure in a bulldoze mountain area, Lanzhou, China. *Landslides*, 2019, 16: 1981–1992
- 48 Zhu C H, Li N. Moistening effects of high-fill embankment due to rainfall infiltration in loess gully region (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2020, 42: 845–854 [朱才辉, 李宁. 降雨对沟谷状黄土高填方地基增湿影响研究. 岩土工程学报, 2020, 42: 845–854]

补充材料

图S1 水分在非饱和土层中的分布及运移特征

图S2 宏观裂缝类型和裂缝演化机理的离心机试验

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “压实黄土地湿陷沉降机理与黄土高原平山造城适宜性”

Collapse and subsidence mechanism of compacted loess and suitability of mountain bulldozing and city creation projects in the Loess Plateau of China

Shengwen Qi^{1,2,3*}, Xiaokun Hou^{1,2,3}, Yongtang Yu⁴, Yaguo Zhang⁵, Xie Hu⁶, Linxin Zhang^{1,2,3}, Zhiqing Li^{1,2,3}, Songfeng Guo^{1,2,3}, Fangyu Zhang⁷, Tonglu Li⁸ & Jianbin Peng⁸

¹ Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

² Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

³ College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710043, China;

⁵ School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

⁶ College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

⁷ College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

⁸ School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, China

* Corresponding author, E-mail: qishengwen@mail.igcas.ac.cn

The contradiction between the shortage of urban land and the increasing demand for land in the Loess Plateau brings the emergence of the mountain bulldozing and city creation (MBCC) project. Large-scale hill filling and mountain bulldozing projects will cause changes in the site's hydrological environment, and induce foundation instability and damage to buildings. The long-term suitability of MBCC projects is the most concerning issue. In this study, field investigations, laboratory experiments, model tests and numerical simulation are utilized to explore the compacted loess's physical and mechanical behavior, microstructure characteristics, permeability behavior, collapse mechanism, humidification, and creep deformation. In addition, the water migration in thick compacted loess, macroscopic deformation and local failure patterns of a typical MBCC site are investigated using field monitoring, numerical modelling and InSAR analysis. The feasibility and suitability of the MBCC project in the Loess Plateau of China are discussed. It is found that the physical and mechanical properties and the microstructure of compacted loess are quite different from those of natural loess. The compacted loess has low stiffness, large spatial variability, poor pore connectivity and low dominant pore density in comparison to natural loess. The unsaturated permeability parameters (i.e., soil water characteristic curve and hydraulic conductivity function) are highly related to the soil's pore size distribution on the microscale and the soil's dry density on the macroscale. Collapse deformation is inherently compaction deformation due to decreased soil stiffness when the water content increases. It is mainly related to the local compaction of inter-particle pores with the particle and pore morphologies unchanged. The creep characteristics are closely related to the yield stress and overlying load. Increasing the dry density and decreasing the soil water content contribute to increase in yield stress, decrease in creep stabilization time, and reduction in hydraulic conductivity. The hydraulic condition in the thick compacted loess layer of a typical MBCC project keeps constant with the variation of soil water content occurring only within the top 2.0 m. Meanwhile, there is a slow downward movement of water without variation in the soil water content in the underlying soil (depth > 2.0 m), which can recharge groundwater tens of years later. The ground subsidence of this typical MBCC mainly occurs in the filling area with a decreasing rate. The cumulative ground subsidence and the time required for deformation stabilization typically rise with the filling soil's thickness. It is expected that the overall ground subsidence tends to terminate 15 a after finishing the project. In addition, local cracks can occur in the transition zone of excavation (natural loess) and filling (compacted loess) areas, which can be prevented and mitigated using engineering measures. Generally, increasing the dry density of the compacted soil and designing drainage facilities probably can effectively decrease the ground cumulative subsidence, shorten the deformation time, and reduce local cracks' occurrence. The results demonstrate the long-term stability of the overall foundation and the engineering controllability of local failures of the MBCC project. At last, the suitability principles of the MBCC project in the Loess Plateau of China are discussed.

Loess Plateau, mountain bulldozing and city creation, water migration, collapse mechanism, subsidence characteristics

doi: [10.1360/TB-2022-0686](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0686)