引文格式:乔敬淇,南东敏,杨星宇,等. 含水率对平遥夯土城墙物理力学性质的影响及其稳定性分析[J]. 太原理工大学学报,2026,57(5):897-908.

QIAO Jingqi, NAN Dongmin, YANG Xingyu, et al. Influence of moisture content on physical and mechanical properties of rammed earth wall in Pingyao ancient city and its stablity analysis[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(5): 897-908.

含水率对平遥夯土城墙物理力学性质的影响及其稳定性分析

乔敬淇[1],南东敏[1],杨星宇[1],武开浩[1],石宇辰[1],韩鹏举[1,2],
白向灵[1,2],何 斌[1,2]

(1. 太原理工大学 土木工程学院,山西 太原;2. 平遥古城岩土工程技术研究中心,山西 晋中)

摘 要:**【目的】**针对受赋存环境变化影响夯土城墙的含水率分布存在差异,探究不同含水率下夯土体的物理力学性质的变化规律,为平遥夯土城墙及类似夯土建筑的预防性保护和修缮土体选取提供理论依据。**【方法】**以平遥古城夯土体为研究对象,通过设置不同目标含水率夯土体,利用固结仪、直剪仪对不同含水率下土体的的压缩模量、黏聚力以及抗剪强度等力学性能指标进行了测试,利用ABAQUS中强度折减法计算其不同含水率下城墙的稳定性系数,探讨了不同含水率土体对城墙稳定性的影响。**【结果】**当土的含水率$w<13.0\%$时,随着含水率w逐渐增加,土体的压缩模量E_s、抗剪强度τ、黏聚力c均呈现上升趋势;当土的含水率$w>13.0\%$时,随着含水率w逐渐增加,土体的压缩模量E_s减小、压缩性提高。含水率继续增加,土体逐渐由低压缩性土向中压缩性土过渡,土体的黏聚力c、抗剪强度τ逐渐降低,城墙安全稳定系数大体上呈逐渐下降趋势;夯土城墙在不同含水率下最大剪应力表现为外墙大于内墙、底部大于顶部,塑性应变集中在内墙底部。

关键词:夯土体;含水率;物理力学性质;平遥古城;有限元分析

中图分类号:TU41 **文献标识码**:A

DOI:10.16355/j.tyut.1007-9432.20240522 **文章编号**:1007-9432(2026)05-0897-12

Influence of Moisture Content on Physical and Mechanical Properties of Rammed Earth Wall in Pingyao Ancient City and Its Stablity Analysis

QIAO Jingqi[1], NAN Dongmin[1], YANG Xingyu[1], WU Kaihao[1], SHI Yuchen[1], HAN Pengju[1,2], BAI Xiangling[1,2], HE Bin[1,2]

(1. *College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*;
2. *Pingyao Ancient City Geotechnical Research Center, Jinzhong, Shanxi, China*)

Abstract:**【Purposes】** In response to the changes in the surrounding environment, the moisture content distribution of rammed earth walls varies. To investigate the law of physical and mechanical properties of rammed earth bodies with different moisture contents, the rammed earth bodies of the World Cultural Heritage site of Pingyao Ancient City are selected as the research object. **【Methods】**

收稿日期:2024-07-02;**修回日期**:2024-10-21

基金项目:国家自然科学基金(41807256);山西省自然科学基金(202203021211136,20210302123139)

第一作者:乔敬淇,硕士研究生,(E-mail)2395900782@qq.com

通信作者:何斌,教授,博士生导师,主要从事岩土工程方面的教学与研究,(E-mail)hebin@tyut.edu.cn

Different target moisture content rammed earth bodies were set up, and the compression modulus, cohesion, and shear strength of the soil bodies with different moisture contents were tested by using consolidation apparatus and shear apparatus. At the same time, the stability coefficient of the walls with different moisture contents was calculated by using the strength reduction method in ABAQUS, and the influence of moisture content in soil bodies on the stability of the walls was discussed. **【Results】** The findings indicate that when the soil's moisture content w is less than 13.0%, the soil's cohesion c, compression modulus E_s, and shear strength τ all exhibit an increasing tendency as the moisture content increases. When the soil has a moisture content of more than 13.0%, the soil's compressibility increases and its E_s decreases. Low-compression soil gradually becomes medium-compression soil as w increases. The soil experiences a drop in c and τ, leading to a decrease in soil stability. With the increase of w, the safety and stability coefficient of the wall shows a gradual downward trend in general. For the maximum shear stress and equivalent plastic strain of the rammed earth wall with different moisture contents, the maximum shear stress of the outer wall is greater than that of the inner wall, that of the bottom is greater than that of the top, and the plastic strain is concentrated at the bottom of the inner wall. The research results can provide a theoretical basis for the preventive protection and repair soil selection of rammed earth walls and similar rammed earth buildings in Pingyao Ancient City.

Keywords: rammed earth body; moisture content; physical and mechanical properties; Pingyao Ancient City; finite element analysis

平遥古城是中国历史文化名城之一,拥有大量保存完好的明清时期的古建筑,1997年被联合国教科文组织列入《世界遗产名录》[1]。平遥古城始建于西周时期,至明朝初年重筑城墙才形成了较为完整的城镇建制[2],至清朝完善为砖砌城池,是中国境内唯一一座以整个城镇为单位入选世界文化遗产的古城。平遥古城墙周长6 162.68 m,墙底宽8~12 m,墙顶宽3~6 m,墙高8~10 m,以其独特的夯土结构为核心外包砖砌体形式而闻名于世(见图1)。

夯土结构具有优异的物理力学性质,被广泛应用于古代城墙、房屋和道路的建设中。我国西北地区分布着众多夯土遗址[3],比如汉代建造的雷墩子遗址、明朝建造的嘉峪关明长城、清朝建造的文一城遗址等。夯土建筑是人类精神文明的延续,更是今人与古人对话的载体,不仅承载着过去的记忆,亦昭示着未来的美好期望。然而,由于长期受自然环境和人为因素的影响,平遥古城夯土城墙出现了不同程度的劣化问题(见图2)。

在工程实践中,一定区域内土的质地和结构一般不会发生太大变化,然而由于受降雨、蒸发、灌溉

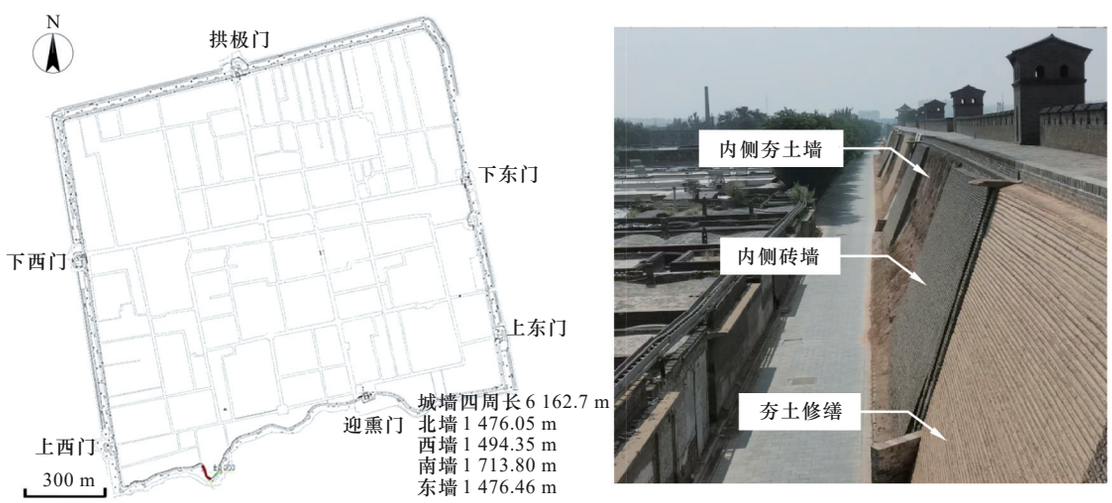
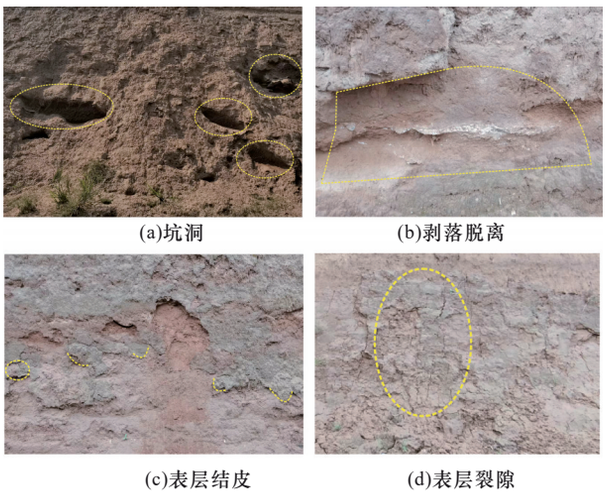


图1 平遥古城夯土结构

Fig. 1 Pingyao ancient city rammed earth structure



(a)坑洞　(b)剥落脱离　(c)表层结皮　(d)表层裂隙

图 2　平遥古城夯土城墙病害

Fig. 2　Pingyao ancient city rammer wall damages

等因素影响，土体的含水率变化很大[4]。对于夯土体而言，含水率是影响其物理力学性质的重要因素。张浩扬等以万全右卫城为研究对象对其进行原位回弹仪试验和室内物理力学试验[4]，得出土体含水率是影响城墙稳定性的重要因素的结论。黄琨等研究非饱和土的抗剪强度及其含水率的变化规律，得出结论：随着含水率的增加，土的抗剪强度降低，含水率对抗剪强度的影响主要是降低了土的黏聚力，而对内摩擦角的影响较小[5]。李黎、李最雄等以西北地区土遗址为研究对象进行研究，得出土遗址淘蚀、失稳坍塌等病害与土体含水率升高有关的结论[6,7]。任克彬、王旭东等以潮湿环境土遗址为研究对象，发现土体含水率升高会导致古城墙失稳坍塌，认为水是潮湿环境土遗址保护的主要问题[8,9]。

从地质角度来讲，平遥古城墙建造在由第四系洪积成因的粉土、粉质黏土及少量粉细砂组成的地基上，地基已压实稳定且基本均匀，地下水位维持在 8 m 左右。平遥古城城墙为生土基材料分层夯筑，坡度较缓。降雨使其内墙夯土严重缺失，而微观的毛细水也威胁着城墙稳定。城墙底部毛细水携带盐碱等化学成分挥发后，盐碱会残留在城墙砌体表面，造成城墙下部砖大面积粉化。这一因素影响到外墙的整体稳定性，削弱其对内部夯土的挡土作用，使内墙下部形成了一片潮湿酥软带。长此以往，当夯土体内部强度达到临界状态，会导致内墙夯土局部滑落。

因此，探究夯土城墙的临界状态及含水率对城墙稳定性的影响，以及夯土体在不同含水率下的力学性能特征对于夯土城墙的保护具有重要的意义。然而，目前对于平遥古城夯土体在不同含水率下物理力学性质的试验研究几乎没有相关文献可供参考。本研究制备不同含水率的夯土土样，对其进行密度测定、固结试验、湿陷性试验和剪切试验；通过对比分析不同含水率下的试验结果，探讨其对夯土体物理力学性质的影响规律。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

通过检测对比平遥明代夯土城墙土样和平遥区域五个土场（东湖村）土样，5 号土场出产的黄土与明代夯土城墙土质最为接近。试验用土取自山西省平遥县平遥古城内墙补夯修复原生粉土（5 号土场）。采集时间选择在非雨季，秉承保护文物的原则，挖掘取样时佩戴一次性手套，及时清理铲子以防污染，将样品置于袋子后密封并粘贴标签，在样品运输过程中未接触其他器具物品，到达实验室后分装密封保存，室内试验时尽量减少土样消耗。

土样颜色为土黄色，质地较为均匀。经过碾散、过筛等一系列操作后，测得土的基本物理性质见表 1，土的颗粒分析结果见表 2。

表 1　平遥古城夯土的基本物理性质

Table 1　Basic physical properties of rammed earth in Pingyao Ancient City

指标	数值
天然含水率 w/%	17.36
土粒比重 G_s/(g·cm^{-3})	2.71
塑限 w_P/%	17.3
液限 w_L/%	25.9
塑性指数 I_P	8.6
液性指数 I_L	-1.93
最大干密度 ρ_{dmax}/(g·cm^{-3})	1.79
最优含水率 w_{op}/%	15.0

表 2　土的颗粒分析试验结果

Table 2　Particle distribution of soil

粒径/mm	≥ 0.075	< 0.075	< 0.05	< 0.01	< 0.005	< 0.002
w(土)/%	0.9	11.8	61.6	9.3	16.4	0

1.2　样品制备

对采集到的夯土样品破碎和筛分，以获得一定的颗粒分布。随后，将样品置于烘干机中预处理，确保土样的干燥状态。采用水分加入法，通过向烘干土样中逐渐添加自来水，制备不同含水率的土样。制备完成后，使用CSK-VI型多功能电动击实仪对土样进行轻型击实处理，并使用环刀法进行土样取样。

根据《土工试验方法标准》GB/T 50123—2019[10]的规定，以最优含水率w_{op}为基准，制备五组不同含水率的重塑土压缩土样。每个土样的面积为3 000 mm^2，高度为20 mm。经过击实试验，确定本次土样的最优含水率约为15.0%。根据标准要求和试验所测数据，试验用土的饱和含水率为18.97%，因此取最优含水率附近相邻2个试样含水率差值为2%，制备含水率分别为11.0%、13.0%、15.0%、17.0%、19.0%五个不同含水率的土样，以便进行后续实验研究。

1.3 夯土工艺调查

平遥城墙始建至今较大的修缮共有4次，因时期不同，技术发展也不同，所以每次修缮使用的工艺也不尽相同。筑造平遥城墙主要采用宋代《营造法式》记载的“桢干筑墙之法”，四次大修在此基础上不断改进创新。结合文献记载以及实地走访调查，对四次夯土墙修缮技艺进行了归纳，结果如表3所示[11]。

表3 平遥古城夯土工艺调查表

Table 3 Rammed earth repair technologies in Pingyao Ancient City

修缮时间	修缮原因	修缮工艺	共同特点
明洪武三年（1370）	扩建重筑	素土夯实，桢干筑墙之法，夯土层中曾有木栓，直径6～7 cm，木栓平面分布的间距为2～3 m。夯墙全部为人工夯筑、圆夯，夯窝直径15 cm，深2～3 cm，夯层12～15 cm。	始终坚持采用具有地方特色的传统材料，修筑或是近代修缮均采用传统建筑工艺，坚持“不改变文物原状，修旧如旧”的文物保护原则，使城墙墙体复原如故[16]。
1979—1993年	1977年大洪灾	原素土夯实基础，改为3∶7灰土夯筑，将原来的露明基础，改为埋深0.7 m。墙体夯筑部分仍沿用分层夯实的作法。	
2007年	两年三次倒塌	分层铺设三七灰土，逐层夯实。灰土共四步，填三打二，总厚度65 cm。灰土夯打时，采用锥形石夯人工夯建[12]。将原露明的基础，改为地下深埋近1 m的作法[13]。	
2021—2022年	特大暴雨	沿用宋代桢干筑墙之法，创新地采用添加护脚墙的保护方法[14]，并且探索性地选择了一些新材料，采用了一些新方法[15]。	

1.4 固结试验

试验在WG型单杠杆固结仪上进行，加压等级为50、100、200、400 kPa。通过计算得到土样的初始孔隙比e_0、各级压力下固结稳定后的孔隙比e_i、某一压力范围内的压缩系数α_v、压缩模量E_s和体积压缩系数m_v。

1.5 湿陷性试验

使用已制备的五组土样，采用WG型单杠杆固结仪将原状土样逐级加压到实际受到的压力p，施加的荷载等级与固结试验相同。试验结束后通过计算得到土样的湿陷性系数。

1.6 剪切试验

使用已制备的五组土样，每组准备4个环刀土样。采用应变控制式直剪仪，对每个土样在垂直压力p=100、200、300、400 kPa下进行直剪试验。根据试验结果绘制抗剪强度τ与垂直应力σ关系曲线，得到内摩擦角φ和黏聚力c的值。

2 试验结果及分析

2.1 击实试验

土样采用干法制备，取一定量的代表性风干土样，依次按相差约2%的含水率制备一组（不少于5个）土样。本试验击实功为591.6 kJ·m^{-3}。

在相同的击实功下进行击实试验，所得数据如表4所示。

表4 击实试验数据结果

Table 4 Data of compaction test

土样序号	加水质量/g	含水率/%	平均含水率/%	干密度/(g·cm^{-3})	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm^{-3})
1	184.8	10.77 10.77	10.77	1.60		
2	226.2	12.79 12.60	12.70	1.63		
3	280.5	14.81 14.96	14.88	1.72	14.88	1.72
4	317.9	16.56 16.64	16.60	1.69		
5	351.5	18.56 18.48	18.52	1.65		

图3击实曲线反映了重塑土样的压实特性。对于试验土样，在击实功=591.6 kJ·m^{-3}、w=15.0%时最有利于土粒受击时发生相对移动，这时土样能够达到最密实，因此在击实曲线上出现一峰值。峰点所对应的纵坐标即为最大干密度ρ_{dmax}=1.72 g·cm^{-3}，横坐标即为最优含水率w_{op}=15.0%。当$w<w_{op}$时，土的干密度受含水率变化的影响较大，即土偏干时含水率变化对土的干密度的影响比土偏湿润时更显著，因此峰点左段击实曲线的坡度比右段较陡。

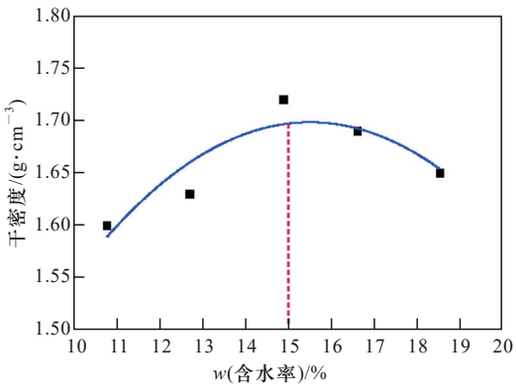


图 3　重塑土样的含水率-干密度关系曲线

Fig. 3　Moisture content-dry density curve of remodeled soil samples

击实曲线之所以呈现上述曲线变化的特点，与土中的水分所处状态有很大的关系。当土处于低含水率时，土中水分主要是结构水或强结合水，由于颗粒表面基本无薄膜水，击实时摩阻力随着干密度的增大而增大，击实功较多消耗在克服土体移动的摩阻力上，有效击实功随之降低，因此土体不易被压实。当含水率逐渐增大时，颗粒表面水膜逐渐变厚出现大量的薄膜水，水膜的润滑作用增大，击实时颗粒表面摩阻力相应减小，有效击实功随之增加，压实效果增强。但当含水率超过某一值后，土颗粒中孔隙内的自由水逐渐增多，大量自由水被封闭不易排出，击实功将大量消耗在自由水中，击实效果将降低，同时大量孔隙被自由水占据，土的干密度就会减小[17-19]。对于夯土墙的维修工程，在不考虑施工中其他因素前提下，应尽量使得配制的重塑土接近最优含水率，以便达到最大的密实度和最经济的压实效果。

2.2　固结试验

为探究土的压缩模量随含水率的变化关系，对制备土样进行固结试验。试验的结果如表 5、表 6 所示。

表 5　不同含水率下逐级施压时土的孔隙比

Table 5　Porosity ratio of soil with step-by-step pressure and different moisture contents

w(含水率)/%	压力/kPa			
	50	100	200	400
11.0	0.621	0.616	0.607	0.591
13.0	0.552	0.543	0.536	0.529
15.0	0.570	0.565	0.557	0.541
17.0	0.591	0.581	0.565	0.547
19.0	0.610	0.592	0.566	0.548

2.2.1　不同含水率下土的压缩曲线

假设土体受到的压力由小增大，土体相应的孔隙比 e 则由大减小。一般情况下，土的压缩曲线越平缓，土的压缩性越低，说明土质较硬；土的压缩曲线越陡峭，土的压缩性越高，说明土质较软。图 4 所示为在不同含水率 w 下土的压缩曲线。为了便于比较，采用压力段由 100 kPa 到 200 kPa 时的压缩系数 α_{1-2} 来评定土的压缩性。评定标准如下：$\alpha_{1-2}<0.1$ MPa^{-1} 时，为低压缩性土；$0.1\leqslant\alpha_{1-2}<0.5$ MPa^{-1} 时，为中压缩性土；$0.5\leqslant\alpha_{1-2}<1$ MPa^{-1} 时，为高压缩性土。图 4 中 β 具体代表某一试验土样在 100 kPa 到 200 kPa 时压缩曲线的压缩系数。

表 6　固结试验数据结果

Table 6　Consolidation test results

w(含水率)/%	压缩系数 α_v/(MPa^{-1})	压缩模量 E_s/(MPa)	体积压缩系数 m_v/(MPa)$^{-1}$
11.0	0.090	18.775	0.053
13.0	0.070	23.625	0.042
15.0	0.079	19.928	0.050
17.0	0.157	10.186	0.098
19.0	0.260	6.192	0.161

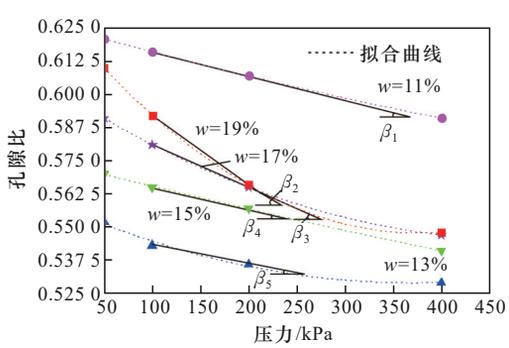


图 4　不同含水率 e-p 曲线图

Fig. 4　e-p Curves of samples with different moisture contents

由图 4 可得出在 w 相同的情况下，e 随着施加外压力的增大逐渐减小的结论。在 w 不同的情况下，e 随着 w 的增大呈现先减小后增大的趋势，且在含水率较小时孔隙比随应力的变化近似为线性。由图 5 可得，在竖向压力相同的情况下，土体孔隙比随含水率的增大呈先减小后增大的趋势。此结论与杨坪等人研究所得结论有所相同[20]。本试验在制样过程中考虑了土样初始含水率对土样内部结构的影响。

由于本试验制作重塑土采用烘干土压实而成的方法，土体颗粒起初处于分散状态无黏聚力。在 w 较低时，随着 w 的增加，一方面土的密度增大，另一方面土颗粒之间因为水的吸附作用使土中的孔隙结构发生改变，孔隙减小的同时土具有了一定的黏聚力而使得抗剪强度增大。而随着含水率的增加到一定值后，土颗粒间的结膜水厚度变大，孔隙水压力造成有效应力降低，又使得土体抗剪强度降

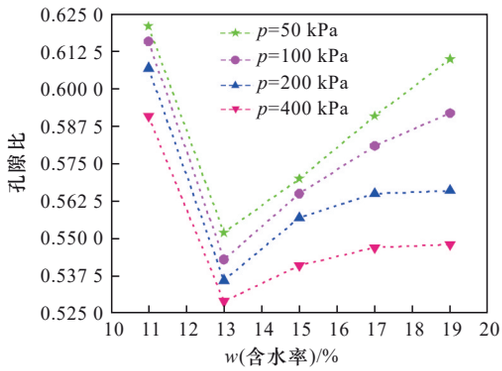


图5 相同压力下土样的含水率-孔隙比曲线图

Fig. 5 Moisture content-porosity ratio curves of soil samples with the same pressure

低。土中的孔隙可以简化为由微观孔隙和宏观孔隙共同组成的孔隙结构。在含水率的变化和外部荷载作用下土中孔隙结构会发生不同的变化。外部荷载作用只对宏观孔隙产生作用,对微观孔隙基本不会产生影响。含水率变化时土水相互作用较为复杂,土颗粒相对位置发生改变,使得土体在水的作用下孔隙结构变化机制不清晰[21]。土体在增湿过程中,只影响土中的宏观孔隙,基本上不影响土中的微观孔隙[22,23]。值得注意的是,宏观孔隙指的是土体中直径较大的孔隙,通常在几毫米以上;微观孔隙通常指的是土体中直径在几微米到几毫米范围内的孔隙。

图6为宏观下不同含水率下压实土块原始图。从中可以观察到w=13.0%时土体表面较为平整,孔隙较少;随着含水率的增大,土体表面孔隙增加,当w=17.0%时土体表面甚至出现裂缝。



(a)w=13.0% (b)w=15.0% (c)w=17.0%

图6 不同含水率下压实土块原始图

Fig. 6 Original photos of compacted soil blocks with different water contents

图7为微观下不同含水率土体SEM扫描电镜图,同列从上到下代表同一含水率,放大倍数分别为500、1 000、2 000。可以观察到在(500×)下,初始含水率越高的土壤样品在试块制备过程中由于颗粒之间的水分有助于粒子聚集,因此越容易形成较大的颗粒团块。w=13%时土体颗粒粘结成块且大小不一;w=15%时孔隙最小、土体最密实,土体颗粒没有明显成块,分布较均匀;w=17%时土体颗粒粘结成块效果最明显,有大小均匀的团块。在(1 000×)下,土体颗粒大小和孔隙区别不明显,可以看出w=13%和w=17%的表面粗糙度较高,团块物质之间连接紧密,形成了结构。在(2 000×)下,可以看到许多不均匀片状组织,其数量随含水率升高变化无明显规则。含水率对土体微观孔隙结构的影响有待深入研究。

2.2.2 土的含水率与压缩模量的关系

E_s也是表示土的压缩性大小的一个重要指标,它与土的压缩系数α_v成反比。α_v是土体在侧限条件下孔隙比减小量与有效压应力增量的比值,可通过压缩曲线进行计算。α_v越大,E_s越小,土的压缩性越高;α_v越小,E_s越大,土的压缩性越低。

按照《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011[24],土的压缩性可按p_1为100 kPa、p_2为200 kPa时相对应的压缩系数值α_{1-2}划分为低、中、高压缩性,根据图8曲线可得,当含水率w=11.0%、13.0%、15.0%时为低压缩性土,当w=17.0%、19.0%时为中压缩性土[25]。

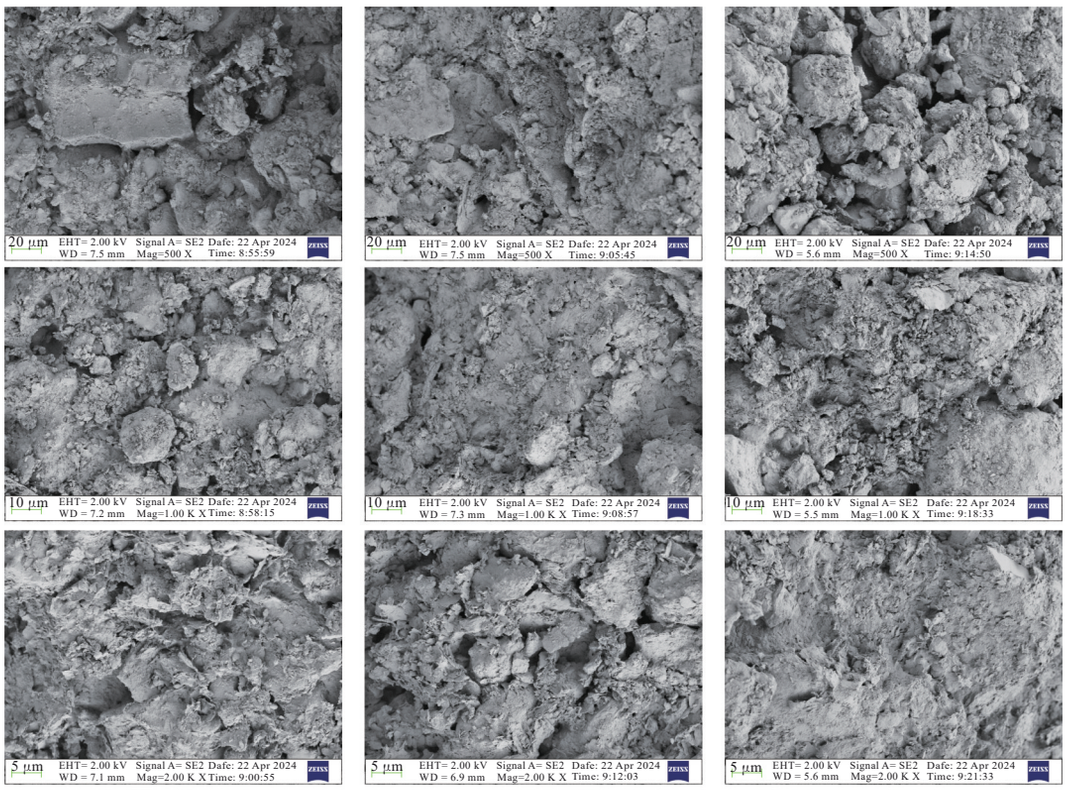
根据前人所得结论,当w相同时,α_v随压力值的增大而减小[26]。从图8可以看出,随着w的增大,α_v先减小后增大,土的压缩性由低变高。土体由低压缩性土转变为中压缩性土时对应的w为17.0%左右。为防止平遥古城墙夯土破坏,需要采取较好的防水措施,因此使土的含水率控制在适当的范围内可以有效防止土体变软。

由于一种土的E_s不是常数,通常规定将压力为0.1~0.2 MPa时的压缩模量来评价土的压缩性[18]。分析图9重塑土样的含水率-压缩模量关系曲线可以发现,随着w的增大,E_s先增大后降低,即土的压缩性先降低后增大。这与在不同w下的α_v结果得出的结论基本一致。

2.3 湿陷性试验

平遥古城所在地区位于黄土高原,分布着大量的湿陷性黄土[27]。黄土的湿陷性受多种因素的影响,其中含水率w的变化对湿陷系数的影响较大[28,29]。由前人研究结论可知,用人工制备的结构性黄土代替原状黄土来研究非饱和黄土的力学特性是可行的[30]。为探究平遥古城城墙夯土是否为湿陷性黄土以及是否具有修缮的使用价值,本研究进行了湿陷性试验,得到在不同含水率下平遥古城夯土的δ_s关系曲线,如图10所示。

黄土的湿陷性和湿陷程度,按室内浸水(饱和)压缩试验在一定压力下测定的湿陷系数δ_s来判定,



(a)w=13.0%　　(b)w=15.0%　　(c)w=17.0%

图 7　不同含水率下土体 SEM 扫描电镜图

Fig. 7　SEM images of soil samples with different water contents

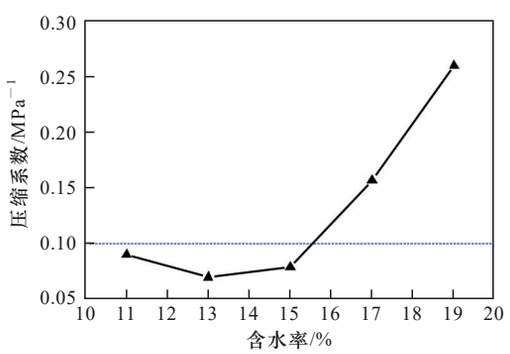


图 8　重塑土样的含水率-压缩系数关系曲线

Fig. 8　Moisture content-compressibility factor curve of remodeled soil samples

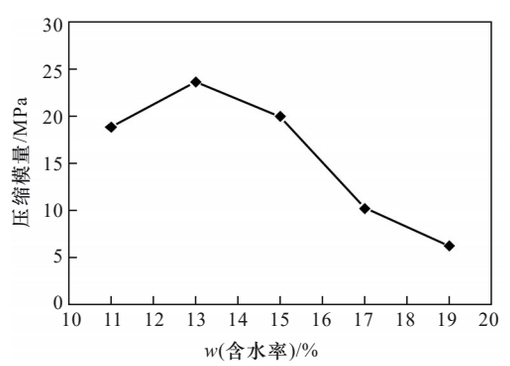


图 9　重塑土样的含水率-压缩模量关系曲线

Fig. 9　Moisture content-compressive modulus curve of remodeled soil samples

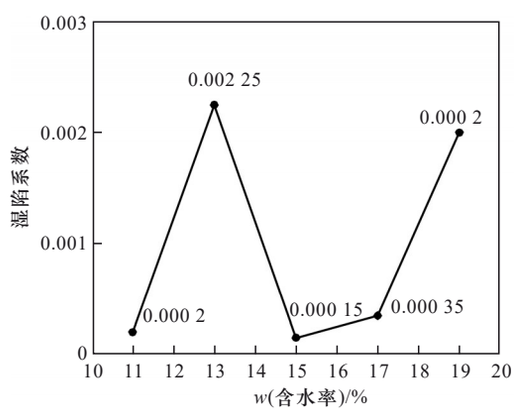


图 10　重塑土样的含水率-湿陷系数关系曲线

Fig. 10　Moisture content-collapsibility coefficient curve of remodeled soil samples

判定标准根据《湿陷性黄土地区建筑标准》GB 50025—2018[31]。在不同含水率下平遥古城夯土的δ_s均小于0.015，为非湿陷性黄土。当土的含水率w较低时，其湿陷系数δ_s受含水率w影响较明显。当含水率w达到13.0%时，土体湿陷系数达到最大值0.002 25，当含水率w=15.0%时，湿陷系数δ_s突然下降到0.000 15。当土体达到足够湿度，即含水率w>15.0%时，湿陷系数δ_s随着含水率w的增大而逐渐增大。由于该土属粉土类，且为非湿陷性土，故其可用作强夯法分层夯筑土墙的材料。

2.4 剪切试验

为探究平遥古城墙夯土在增湿过程中抗剪强度变化的规律，进而得到抗剪强度最大时土的含水率w，本研究进行直剪试验。

本试验采用的是重塑土。相对于原状土而言，它是受到干扰的土，由原状土经烘干、碾碎之后，再按照原状土的密度和含水率重新制成的外形仿原状土的一种试验用土。重塑土的基本物理性质、强度、结构等较原状土也有所改变。控制重塑土的干密度与原状土的干密度相等，试验数据经线性拟合得到的结果如图11、图12所示。

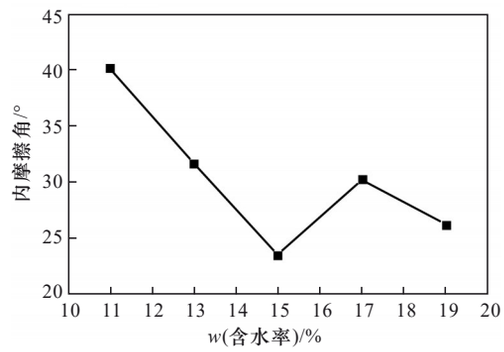


图11 重塑土样含水率-内摩擦角关系曲线

Fig. 11 Moisture content-internal friction angle curve of remodeled soil samples

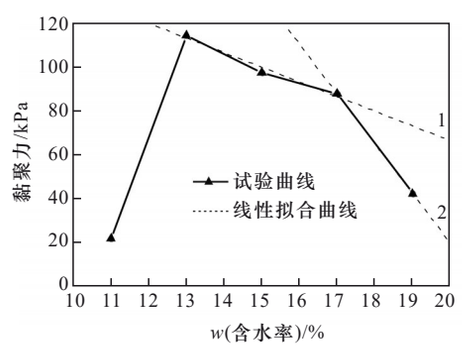


图12 重塑土样的含水率-黏聚力关系曲线

Fig. 12 Moisture content-cohesion curve of remodeled soil samples

由图11可知，土的内摩擦角φ整体上随着含水率w的增加呈下降趋势，两者之间没有明显的线性关系，内摩擦角φ的值在23°～40°之间波动[32]。

由图12可知，随着含水率w的增加，土体的黏聚力c呈现先增大后减小的趋势。当$w<13.0\%$时，土体的c随w增加而增加；而当$w>13.0\%$时，土体的c开始下降，下降段分为两线性拟合段。

土样含水率与土的黏聚力关系曲线可分为3段。当$w<13.0\%$时，c从$w=11\%$时的21.775 kPa增加到$w=13.0\%$时的114.683 kPa，即：随着w的增加，c也增大；当$13.0\%<w<17.0\%$时，c从$w=13.0\%$时的114.683 kPa下降到$w=15.0\%$时的90.060 kPa再到$w=17.0\%$时的70.908 kPa，即：随着w的增加，c近似呈直线下降，下降的幅度呈现由陡峭到平缓的降低趋势，这是水润湿作用与基质吸力共同的作用结果[33]。含水率在±2.0%范围内变化时，黏聚力均匀下降20 kPa左右，其拟合曲线方程的斜率变化范围为$-6.706\ 5\pm1.050\ 78$；当$w>17.0\%$时，c从$w=17.0\%$时的70.908 kPa下降到$w=19.0\%$时的42.380 kPa，其拟合曲线方程的斜率为$-22.738\ 5$。

对于曲线下降段，随着含水率的增加，一方面是土壤中的孔隙空间被水填充，形成了水膜和水桥。这些水膜和水桥能够降低土壤颗粒之间的接触面积，减小了黏聚力的作用，从而导致其降低。另一方面是基质吸力减小，从而减小了黏聚力的作用[34-35]。

通过计算得到不同含水率下土的内摩擦角φ和黏聚力c，如表7所示。

表7 重塑土样含水率与黏聚力和内摩擦角的关系

Table 7 Moisture contents, cohesions and internal friction angles of remodeled soil samples

含水率w/%	黏聚力c/kPa	内摩擦角φ/(°)
11.0	21.775	40.10
13.0	114.683	31.62
15.0	90.060	23.50
17.0	70.908	30.24
19.0	42.380	26.22

土的抗剪强度与黏聚力类似，随w的增加先增大然后逐渐减小（见图13）。试验结果显示初期随着含水率增加，抗剪强度随之增加的情况。这是由于制样的方法是保持干密度不变，通过添加不同质量的水来控制含水率。不同含水率的土样其压实度不相同，土的抗剪强度的变化由含水率和压实度共同影响[36]。试验制作重塑土是使用烘干土压实而成，干土的土颗粒之间缺乏黏聚力，当含水率w较低时，随着w的增加，一方面使土样的密度增大；另一方面土颗粒之间因水的吸附作用，使土具有一定的黏聚力进而使得抗剪强度增大，但此时土的强度很低。而随着含水率增加到一定值后，土颗粒间的结膜水厚度变大，孔隙水压力造成有效应力降低。根据有效应力原理，土体抗剪强度降低。

通过拟合含水率w与法向压应力σ的关系[37]，根据库仑定律得到各个含水率情况下法向压应力与抗剪强度的拟合方程，如表8所示。

在一定固结压力下，城墙夯土的黏聚力c值随含水率w的增加呈现先增大后减小的趋势。当含

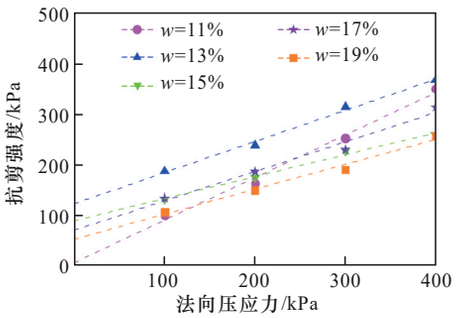


图 13　不同含水率的重塑土样的抗剪强度拟合曲线

Fig. 13　Shear strength fitting curves of remodeled soil samples with different moisture contents

表 8　不同含水率 w 下法向压应力 σ 与抗剪强度 τ 拟合方程

Table 8　Fitting equations of compressive stress and shear strength with different moisture contents

w（含水率）/%	拟合方程
11.0	$\tau_{11\%}=\sigma\tan(40.1^{\circ})+21.775$
13.0	$\tau_{13\%}=\sigma\tan(31.62^{\circ})+114.683$
15.0	$\tau_{15\%}=\sigma\tan(23.5^{\circ})+90.060$
17.0	$\tau_{17\%}=\sigma\tan(30.24^{\circ})+70.908$
19.0	$\tau_{19\%}=\sigma\tan(26.22^{\circ})+42.380$

水率由 w=11.0% 增加到 w=19.0% 时，内摩擦角 φ 的变化在 23°～40°之间；且当含水率由 w=17.0% 增加至 w=19.0% 时，黏聚力 c 值减小幅度最为明显。试验表明夯土增湿软化会加剧内部夯土劣化程度。因此在城墙保护工作中，应加强对城墙内部夯土的防水保护，采取一定防水措施，减少水分入侵。

3　有限元分析

利用有限元进行城墙建模，通过设置不同含水率下土体的参数模拟不同含水率下城墙土体最大剪应力和等效塑性应变，采用折减法求不同含水率下城墙的稳定系数。

3.1　模型建立

模型长度 20.00 m，高度 8.50 m，宽度 10.86 m，内墙的坡度为 70°，外墙的坡度为 78°。土的截面形状为梯形与外部凸出形状（堆积土）的组合图形，表面砖的截面形状为依附在外墙与内墙表面的梯形组合截面。模型承受的荷载有两种，分别为结构自重和顶部人群荷载（2 kN/m^2），分布在城墙顶部中部位置。模型的约束为城墙底部固结、沿长度方向约束。城墙上围护结构简化为均布荷载（3 kN/m^2），分布在城墙顶部两侧。材料的破坏准则为莫尔-库伦定律，即认为在土体单元中任何一个面上的剪应力大于该面上土体的抗剪强度，土单元体即发生剪切破坏。

计算参数主要采用上述试验所得的实测值。其中城墙土体参数见表 9，城墙表面材料参数见表 10。

表 9　城墙土体参数表

Table 9　City wall soil parameters

含水率/%	E/MPa	泊松比 υ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ	密度 ρ/（kg·m^{-3}）
11.0	18.775	0.3	21.775	40.10°	1 770
13.0	23.625	0.31	114.683	31.62°	1 840
15.0	19.928	0.32	90.060	23.50°	1 970
17.0	10.186	0.33	70.908	30.24°	1 970
19.0	6.192	0.34	42.380	26.22°	1 950

表 10　城墙表面材料参数表

Table 10　City wall surface material parameters

材料	E/MPa	泊松比 υ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ	密度 ρ/（kg·m^{-3}）
外包砖墙	41.4	0.25	50	45°	1 660
路面	41.4	0.25	50	45°	1 660
表面土	69.0	0.32	25	18°	1 650

3.2　计算结果

土体在各个含水率下的最大剪应力云图、等效塑性应变云图如表 11 所示，可以看出，在荷载作用下，外墙最大剪应力要大于内墙，且城墙顶部的最大剪应力要小于城墙底部的最大剪应力。城墙基本未进入塑性变形，内墙墙底发生的塑性应变最大。其中在 w=11.0% 时，由于其土体黏聚力较小，在外墙堆积土中部分产生塑性应变；在 w=13.0% 时，由于其土体黏聚力较大，产生的塑性应变最小。

各个含水率下城墙最大剪应力、等效塑性应变和稳定系数如表 12 所示。

从表 11 及表 12 可知，随着含水率的增大，城墙最大剪应力增大；随着土体含水率的增大以及黏聚力的减小，城墙等效塑性应变增大。当土体含水率较低时（11.0%），由于土颗粒间的摩阻力较大，黏聚力较小，故稳定系数较小；含水率适中时，土体出现最高的稳定系数，土体稳定性最佳；但当含水率过高时，可能使土颗粒间摩阻力降低，甚至可能导致土体流动性增加，从而降低土体的稳定系数。

随含水率的增大，城墙的稳定系数呈减小趋势，这表明渗水是造成城墙失稳的重要因素之一。但当 w=19.00% 时，城墙的稳定系数为 1.548，该值是大多数城墙的正常稳定系数，说明短期微量的雨水渗

表 11 土体在各含水率下的计算结果云图

Table 11 Calculational cloudmaps of soil samples with different water contents

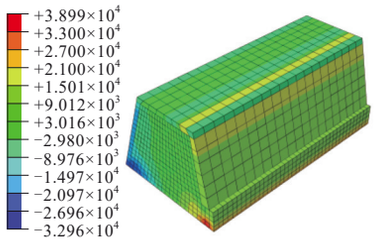
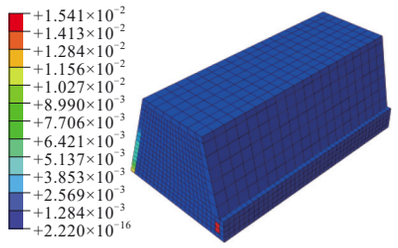
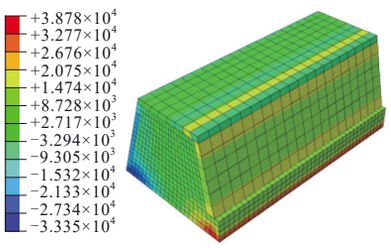
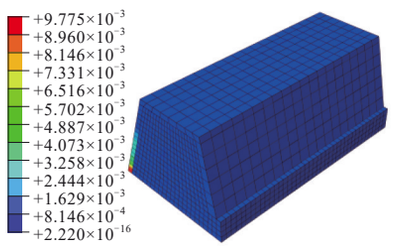
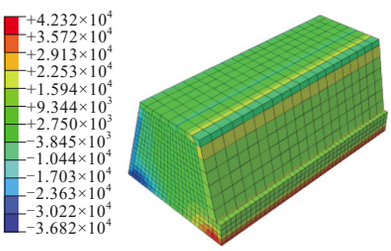
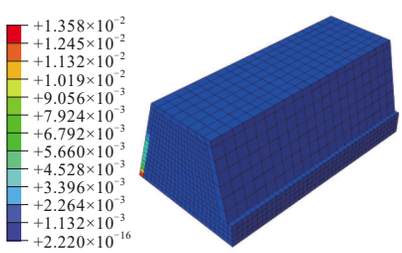
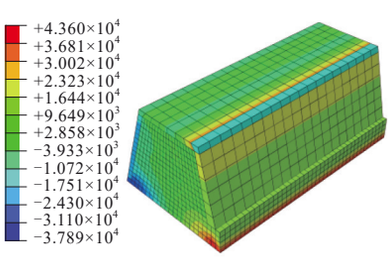
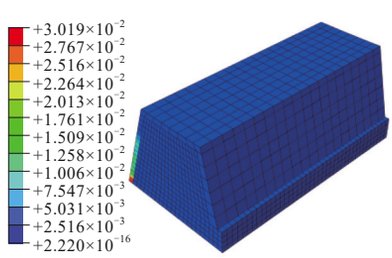
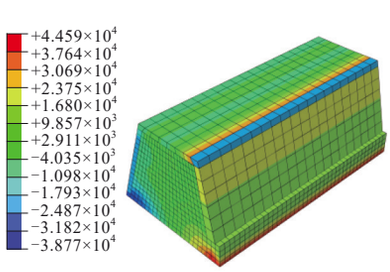
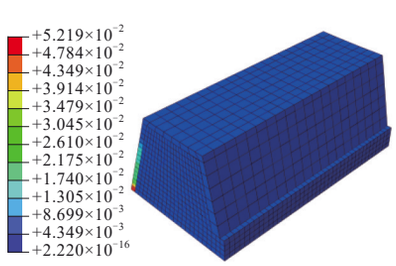
含水率/%	最大剪应力云图	等效塑性应变云图
11.0		
13.0		
15.0		
17.0		
19.0		

表 12 各个含水率下城墙的最大剪应力、等效塑性应变和稳定系数

Table 12 The maximum shear stress, equivalent plastic strain, and safety factor of city wall with different water contents

w(含水率)/%	最大剪应力/kPa	等效塑性应变	稳定系数
11.0	38.99	1.541×10^{-2}	1.254
13.0	38.74	9.775×10^{-3}	1.798
15.0	42.32	1.358×10^{-2}	1.639
17.0	43.60	3.019×10^{-2}	1.638
19.0	44.59	5.219×10^{-2}	1.548

流对城墙整体影响较小,可以通过技术手段规避。

4 结论

1)当 $w<13.0\%$ 时,随着含水率 w 的增加,土体的 E_s、τ、c 均呈现上升趋势。当 $w>13.0\%$ 时,随着含水率的增加,土的 E_s 减小、α_v 增大,土体压缩性提高,逐渐由低压缩性土向中压缩性土过渡,c、τ 降低,土体稳定性降低。当土的含水率在 11.0%~

19.0％范围内，均属于非湿陷性黄土。

2）通过模拟城墙在不同湿度条件下的受力情况，得到夯土城墙在不同含水率下最大剪应力、等效塑性应变的分布情况。其中最大剪应力是外墙大于内墙、底部大于顶部，塑性应变集中在内墙底部。这有助于研究平遥古城夯土城墙结构的承载能力和破坏机制。

3）计算不同湿度条件下城墙的稳定系数，得出结论：土体随含水率的增大，城墙的稳定系数呈减小趋势，表明持久渗水是造成城墙失稳非常重要的因素之一。这为古城墙的维修加固技术决策和保护规划编制提供了科学依据。

4）为古城墙的保护提出以下建议：对夯土建筑进行局部夯补时，应加强防水保护措施，并重视夯补材料工程特性的适宜性；夯土建筑应设置防水挡墙及排水沟渠等配套设施，并应加强土质和环境因素的日常监测，预防赋存环境变化导致夯土建筑的水害问题。

参考文献：

[1] 张中俭.平遥古城古砖风化机理和防风化方法研究[J].工程地质学报，2017，25(3)：619-629.

[2] 王进修.平遥古城历史景观特质探析[J].山西档案，2017(1)：174-176.

[3] 崔凯，葛诚瑞，于翔鹏，等.西北干旱区遗址夯土结构特性初探[J].岩土力学，2023，44(7)：1937-1948.

[4] 张浩扬，李新明，任克彬，等.城墙夯土及砌体结构劣化稳定性分析[J].中原工学院学报，2021，32(1)：48-54.

[5] 黄琨，万军伟，陈刚，等.非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J].岩土力学，2012，33(9)：2600-2604.

[6] 李黎，陈锐，邵明申，等.经PS加固土遗址水饱和强度及加固效果的环境影响研究[J].岩石力学与工程学报，2009，28(9)：1074-1080.

[7] 李最雄，赵林毅，孙满利，等.中国丝绸之路土遗址的病害及PS加固[J].岩石力学与工程学报，2009，28(5)：1047-1054.

[8] 任克彬，王博，李新明，等.毛细水干湿循环作用下土遗址的强度特征与孔隙分布特征[J].岩土力学，2019，40(3)：962-970.

[9] 王旭东.潮湿环境土遗址保护理念探索与保护技术展望[J].敦煌研究，2013(1)：1-6.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50123-2019土工试验方法标准[S].北京：中国计划出版社，2019.

[11] 李广林.中国传统生土营建工艺中夯土工艺的发展与应用[J].遗产与保护研究，2019，4(10)：94-99.

[12] 孙书鹏，李玉明.山西平遥古城抢救修缮工程技术措施述要[J].古建园林技术，2009(3)：46-47.

[13] 冯亮.平遥城墙的保护暨维修技术简述[J].文物世界，2011(6)：49-51.

[14] 张谦.平遥古城六十一处受损城墙修缮完工[N].山西日报，2022-11-11(5).

[15] 曲雁，邵高峰，高延继.平遥古城城墙顶部与外侧散水部位夯土结构加固及防水抗渗保护工艺研究与实施[C]//中国工程建设标准化协会建筑防水专业委员会换届会议暨2012全国工程防水技术交流会，2012.

[16] 李小龙.平遥城墙保护研究概述[J].山西建筑，2022，48(3)：10-13.

[17] 杜瑞锋，裴向军，张晓超，等.黄土击实试验曲线峰值点的数值方法[J].试验室研究与探索，2017(8)：44-77.

[18] 李广信.高等土力学[M].北京：清华大学出版社，2005：197-200.

[19] 吴乐天，宋兵伟，慈军，等.不同击实功对新疆非耕地固化戈壁土力学性能的影响[J].新疆农业科学，2019，56(9)：1756-1764.

[20] 杨坪，吴民晖，许德鲜.含水率对重塑黄土的变形特性影响的实验研究[J].工程地质学报，2015，23(6)：1066-1071.

[21] 牛庚，郭晓霞，陈凡秀，等.水-力作用下黏土孔隙结构演化规律研究进展[J].防震减灾工程学报，2023(4)：905-916.

[22] Sasanian S，Newson T A.Use of mercury intrusion porosimetry for microstructural investigation of reconstituted clays at high water contents[J].Engineering Geology，2013，158：15-22.

[23] Rome ro E，Della Vecchia G，Jommi C.An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J].Géotechnique，2011，61(4)：313-328.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50007-2011建筑地基基础设计规范[S].北京：中国计划出版社，2011.

[25] 莫腾飞，郭敏霞，娄宗科，等.含水率变化对伊犁黄土变形和剪切特性的影响[J].中国农村水利水电，2018(4)：87-90.

[26] 宋洋，刘思源，王晨妲.含水率和干湿循环对原状黄土变形特性的影响[J].辽宁工程技术大学学报，2021，40(2)：148-155.

[27] 汪过兵，裴先科，姜伟，等.湿陷性黄土地区某三层砌体结构教学楼止倾加固研究[J].工程抗震与加固改造，2023，45(1)：135-140.

[28] FENG S J，DU F L，SHI Z M，et al.Field study on the reinforcement of collapsible loess using dynamic compaction[J].Engineering Geology，2015，185(5)：105-115.

[29] 谷琪，王家鼎，司冬冬，等.不同含水率下黄土冻融循环对湿陷性影响探讨[J].岩土工程学报，2016，38(7)：1187-1192.

[30] 胡再强，沈珠江，谢定义.非饱和黄土的结构性研究[J].岩石力学与工程学报，2000，19(6)：775-779.

[31] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50025-2018湿陷性黄土地区建筑标准[S].北京：中国计划出版社，2018.

[32] 蔡国庆，张策，黄哲文，等.含水率对砂质Q3黄土抗剪强度影响的试样研究[J].岩土工程学报，2020，42(S2)：32-36.

[33] 肖建勇,严伟,乔世范,等.干密度与含水率对标准砂抗剪强度的影响研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(10):3789-3797.

[34] 王宸宇,孙兆辉,卞汉兵,等.粉质黏土粘聚力影响因素显著性分析[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(4):646-650.

[35] 孟凡超,赵云辉,蔡晓光.人工制备结构性土抗剪强度试验研究[J].建筑结构,2022,52(201):2463-2467.

[36] 潘振辉,肖涛,李萍.压实度与制样含水率对压实黄土微结构及水力特性的影响[J].岩土力学,2022,43(S1):357-366.

[37] 陈鸿宾,陈学军,齐运来,等.干密度与含水率对重塑红黏土抗剪强度参数影响研究[J].工程地质学报,2019,27(5):1035-1040.

(编辑:赵树庆)