

DOI: 10.11779/CJGE20240080

夯土遗址掏蚀区夯补体-本体界面阻裂措施性能与机理研究

崔凯^{1,2}, 许鹏飞^{1,2}, 于翔鹏^{1,2}, 邵会安^{1,2}, 韦鑫^{1,2}

(1. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学丝绸之路文化遗产保护研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 夯补体与原遗址本体交界面工后开裂是目前夯土遗址根部掏蚀区加固普遍存在的痛点问题。研究通过设置无阻裂措施(WZ)与设置垫层(DC)、界面锚固(MG)、界面刻槽(KC)以及设置垫层+界面锚固+界面刻槽组合加固(DMK)4种阻裂措施的现场加固试验、应变和含水率的连续同步监测。分析了各阻裂措施下界面宏观裂缝发育、界面单日应变和界面塑性累积应变的变化规律,阐释了各阻裂措施对界面的阻裂性能与机制。结果表明:基于文中所设计的5种工况,在水分快速散失过程中,界面宏观裂缝发育、界面单日应变以及界面塑性累积应变的大小关系始终表现为WZ>DC>MG>KC>DMK,DMK的阻裂效果表现最佳,在该模式下界面的黏结强度主要由界面黏结力,锚杆的锚固力、摩擦力和销栓力,凹槽咬合力和黏结力等共同承担。

关键词: 夯土遗址; 掏蚀区; 界面阻裂; 性能; 机理

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)07-1454-10

作者简介: 崔凯(1980—),男,教授,博士生导师,从事西北干旱区岩土劣化机理与加固的研究工作。E-mail: cuik09@lut.edu.cn。

Performance and mechanism of crack prevention measures at interface between rammed earth supplement and original body in the erosion area of rammed earth sites

CUI Kai^{1,2}, XU Pengfei^{1,2}, YU Xiangpeng^{1,2}, SHAO Hui'an^{1,2}, WEI Xin^{1,2}

(1. Western Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation Education Ministry Engineering Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Silk Road Cultural Heritage Protection Research Institute, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The interface cracking between the rammed earth supplement and the original site body, after construction, is a common issue for the reinforcement of the erosion area at the base of rammed earth sites. The on-site reinforcement experiments with four crack prevention measures are conducted: no-crack measures (WZ), setting a cushion layer (DC), interface anchoring (MG), interface grooving (KC) and a combination of cushion layer + interface anchoring + interface grooving (DMK). Continuous and synchronous monitoring of strain and moisture content is included. The development of macroscopic cracks at the interface, daily interface strain and accumulated plastic strain under each measure are analyzed, explaining the crack prevention performance and mechanisms. The results indicate that under the five operating conditions designed in this study, during rapid moisture loss, the development of macroscopic interface cracks, daily interface strain and accumulated interface plastic strain consistently ranked from the largest to the smallest are as follows: WZ > DC > MG > KC > DMK, with DMK showing the best crack prevention effects. Under this model, the interface bonding strength is mainly borne by the interfacial adhesion, anchoring force of the anchor bolts, the friction and shear pin force and the interlocking and bonding forces of the groove.

Key words: rammed earth site; erosion zone; interface crack prevention; performance; mechanism

基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFF0905902); 国家自然科学基金项目(52068050, 41562015) This work was supported by the National Key Research and Development Plan (Grant No.2023YFF0905902) and The National Nature Science Foundation of China (Grant Nos.52068050, 41562015).

收稿日期(Received): 2024-01-25 **修回日期(Revised):** 2024-10-22 **接受日期(Accepted):** 2024-10-31 **网络出版日期(Online):** 2024-11-01

0 引言

夯补支顶加固是目前对掏蚀病害区进行加固的惯用手段^[1-3],但是经过大量的现场调查发现,掏蚀区夯补体在夯筑完成后至夯补体内水分散失至一稳定范围的过程中,夯补体与本体的交界面会逐渐发育有宽度大小不一的裂缝,并随着时间推移和外界环境的不断劣化,界面裂缝在逐渐扩大并向内部延伸,进而使得夯补支顶措施失效,形成了二次病害的问题(见图1)。因此,开发既适用于夯土遗址体加固又能与掏蚀区支顶加固技术相结合的界面阻裂措施,消除夯补体-本体界面开裂失效、增强夯补支顶措施加固的持久性是目

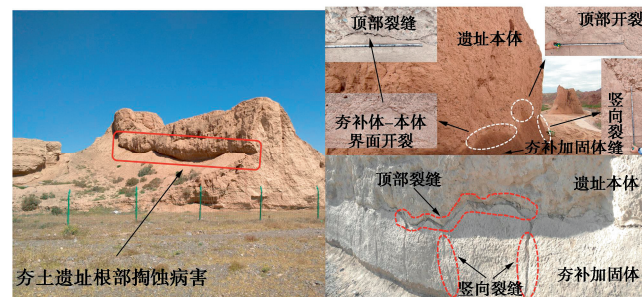


图1 夯土遗址根部掏蚀病害加固界面开裂后形成二次病害问题

Fig. 1 Problem of secondary diseases induced after fortification interface cracks due to erosion at base of rammed earth sites

夯补体-本体界面裂缝的发育和发展是由于夯补体的干缩固结、地基的沉降以及界面区域温度和湿度梯度的剧烈变化引起土体的胀缩变化导致的^[4];从应力角度分析则是由于界面处夯补土体中孔隙水的表面张力和土体失水干燥过程中引起的基质吸力会在界面土体中形成张拉应力场,当张拉应力场的大小大于土体界面的抗拉强度或界面夯补体土颗粒与遗址本体土颗粒间的联接强度时裂缝便会产生,并随含水率的不断降低,裂缝的长度和宽度逐渐增大^[5]。因此,提高界面间的黏结强度、减小地基的沉降和变形是阻止界面裂缝发育和发展的关键。通常情况下,夯补体与本体界面间的黏结主要是物理力起作用,包括宏观尺度上颗粒间的机械咬合力、微观尺度上的范德华力^[6-7]以及非饱和土中毛细水收缩膜的表面张力^[8]。现有研究表明,通过涂刷界面化学黏结剂、扩大界面黏结面积、增大界面粗糙度以及添加界面锚固措施等方式可以显著提高界面的黏结强度^[9];而目前阻止地基沉降最有效的措施则是进行垫层换填。朱红兵等^[10]采用5种不同界面剂对全轻质陶粒混凝土与普通混凝土界面黏结性能进行研究,通过力学试验和扫描电镜试验发

现使用界面剂可以减小新旧混凝土之间的微裂缝宽度,有效降低界面过渡带的孔隙率,改善界面区结构,显著增强界面的力学性能和黏结强度;Tian等^[11]通过剪切试验研究了UHPC-NC沟槽界面的黏结性能,试验发现沟槽增加了界面黏结面积,有效提高了界面的黏结性能,并且沟槽密度的增加使得界面的粗糙度增大,进而导致试样界面的黏结强度较高;Wang等^[12]对不同处理下的夯层界面进行抗拉、抗压和抗剪试验,发现增加层间界面的深度和均匀摩擦面积以及层间接触面的粗糙度可有效提高界面的抗剪强度;曹海莹等^[13]对不同类型的原状土和重塑土试样进行直剪试验发现,界面土的抗剪强度与上下土层的结合类型相关,土层的粗糙度越大、土体接触越充分,则力学性质越好;李星等^[14]对淤泥-新填土的接触面在直剪过程中采用电镜进行扫描研究,发现接触面颗粒间胶结和土颗粒结构的改变是影响界面抗剪强度增加的主要原因。Chen等^[15]和Pan等^[16]通过大量直剪试验来研究表面粗糙度对土-混凝土界面的影响,研究发现表面粗糙度对界面剪切强度和剪切行为有显著影响,界面剪切强度和剪切破坏的剪切位移随表面粗糙度水平的增加而增大;肖成志等^[17]对界面有、无锚筋的老混凝土试件进行了劈拉试验和双面剪切试验,结果表明植筋锚固界面的黏结强度明显增强;Poncelet等^[18]研究了石灰处理土干燥过程中体积变化和裂缝的发育,并开展了拉伸和压缩试验,发现石灰处理对于减少干燥软土的收缩和开裂具有良好的作用。综上所述,以往通过对于界面施加阻裂措施以增加界面黏结强度的研究多用于新旧混凝土界面以及土-结构物界面,对于古代夯土与现代夯补土界面开裂的抑制研究还未涉及,不同阻裂措施对差异性质土-土界面阻裂效果和机理的研究亟待开展。

基于此,本文以明长城夯土遗址加固工程为依托,通过在遗址掏蚀病害区域分别进行无阻裂措施与4种界面阻裂措施的对比支顶加固试验以及加固过程中对夯补体-本体交界面区域的连续应变监测,分析了不同阻裂措施下界面顶部、侧面宏观裂缝开展、界面区域不同位置不同方向单日应变以及累积应变的变化规律,从中遴选出最佳的阻裂措施;并基于对不同阻裂措施的性能对比分析,阐释了各措施对二元性质土体界面裂缝的阻裂机制。研究结果为夯土遗址根部掏蚀夯补支顶措施失效问题提供了实际有效的解决方案。

1 现场试验与监测

1.1 现场试验方案

依托宁夏水洞沟明长城抢险加固工程的实施,研

究选择具有典型掏蚀病害的明长城区段为加固试验区，在试验区分别设计无阻裂措施（WZ）、设置垫层措施（DC）、界面锚固措施（MG）、界面刻槽措施（KC）、设置垫层+界面锚固+界面刻槽组合措施（DMK）进行古代夯土与现代夯补土界面阻裂措施的比对试验。5种工况设置如下：①无阻裂措施（WZ）：即为单独夯补支顶加固，界面及地基等均不作任何处理（图2（a））；②设置垫层措施（DC）：对夯补体下方设置20 cm（高）的三七灰土垫层（石灰：素土的体积比为3：7）（图2（b））^[19]；③界面锚固措施（MG）：锚杆采用直径5 cm的楠竹，长度为100 cm，入本体深度30 cm，夯体搭接长度70 cm，锚孔角度为7°~9°，

每层锚杆错位布置呈梅花形（图2（c）），间距20 cm，排距35 cm；④界面刻槽措施（KC）：界面刻槽根据谭炜等^[20]的研究，结合现场试验环境设计凹槽宽度5 cm，深度3 cm，从掏蚀区底部沿掏蚀面每隔5 cm刻凹槽一道，则凹槽和凸起宽度都为5 cm，形成凹凸起伏界面（图2（d））；⑤设置垫层+界面锚固+界面刻槽组合措施（DMK）：界面刻槽+锚杆搭接夯补体的设计为上述界面刻槽搭接和界面刻槽搭接的组合，并且将此夯补体垫层设置为三七灰土夯筑（图2（e））。

本次支顶加固试验用土取自长城遗址周边一定范围内的黄土，尽力保持加固所用土体的基本物理性质与原遗址夯土相近，基本物理性质见表1。根据现场

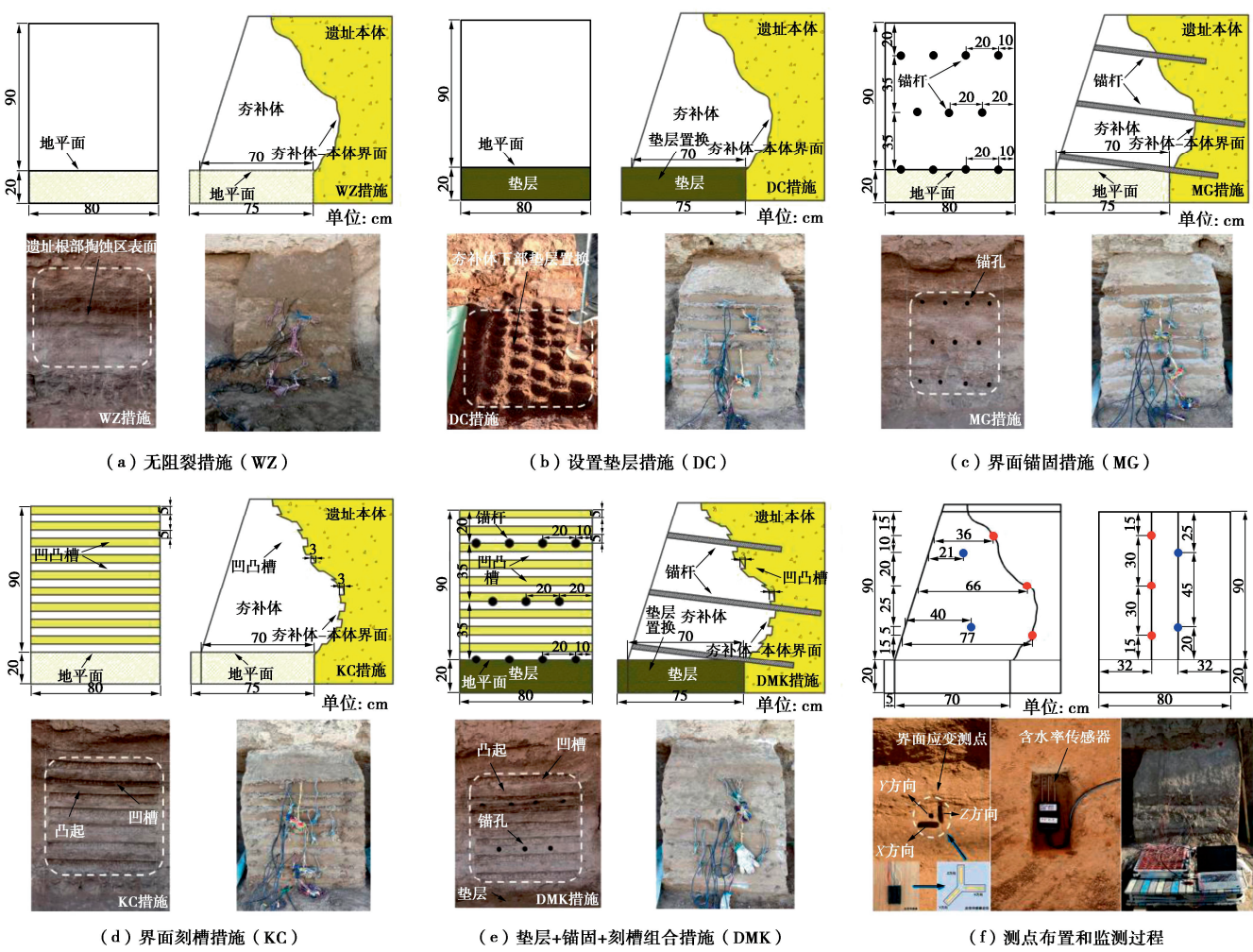


图2 5种工况下夯补体试验设计以及测点布设与监测

Fig. 2 Experimental design of tamping supplement bodies under five operating conditions and arrangement and monitoring of measuring points

表1 遗址土体与夯筑土体基本物理性质对比

Table 1 Comparison of basic physical properties between soil body of sites and rammed earth body

类型	天然含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	土粒相对密度	最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%	液限/%	塑限/%
遗址土	1.05	1.52	1.50	2.69	18	1.89	44.0	23.8	16.0
夯筑土	1.09	1.49	1.47	2.61	17	1.80	43.7	21.0	14.3

实际测量掏蚀区的大小情况设置 5 种工况试验支顶夯补体的尺寸统一为 80 cm (长) × 70 cm (宽) × 90 cm (高) (图 2)。采用版筑法, 即将土放入两板之间夯实, 人工夯筑, 每次覆土虚铺厚度为 12 cm, 击实后夯层厚度为 8 cm, 与原遗址夯层相同。

1.2 应变监测系统

在 5 种工况支顶夯补体夯筑过程中需要对夯补体-本体界面区域上、中、下 3 个位置埋置应变传感器, 编号分别为 J-1、J-2 和 J-3, 其中每个测点分别测试 X、Y、Z 3 个方向的应变, 并规定沿本体走向的水平方向为 X 方向, 垂直于本体方向为 Y 方向, 竖直方向为 Z 方向; 在夯补体中上部和中下部埋设水分传感器, 编号分别为 S-1 和 S-2 (图 2 (f)); 应变传感器采用敦煌研究院研发的夯筑体内部应力应变测量装置^[21] (型号: BX120-20AA; 量程: 0~20000 $\mu\epsilon$; 电阻: (120±0.3) Ω ; 灵敏系数: (2.08±1)%), 应变采集仪为东华测试的静态应变测试仪, 水分传感器采用仁科土壤温度水分传感器 (型号: RS-WS-TR; 量程: 0~100%; 精度: 0.1%), 传输设备使用仁科工业级 USB 转 458 模块。监测以每日 8:00—20:00 共计 12 h 为日间监测, 以 20:00—第二日 8:00 共计 12 h 为夜间监测, 监测至夯补体水分场变化趋于动态稳定时停止, 共计监测 24 d。在试验前对传感器进行标定并在监测仪器开机 30 min 后数据趋于稳定时进行数据采集, 监测过程中同时对夯补体-本体界面裂缝的开裂变化情况进行实时测量, 测量分为界面顶部 (横向) 和侧面 (纵向) 宏观裂缝两部分。

2 试验结果

2.1 界面宏观裂缝发育情况

5 种工况下夯补体-本体界面顶部 (横向) 和侧面 (纵向) 宏观裂缝可见迹长累积长度对比情况见图 3。由此可知: ①各措施下界面裂缝的发育时间有前后差别, 对于界面横向开裂, WZ 和 DC 在第 5 天开始发育, MG、KC 和 DMK 在第 6 天开始发育; 对于界面纵向开裂, 各措施下界面裂缝统一在第 6 天开始发育。②从裂缝开始发育到监测结束过程中, WZ、DC、MG、KC、DMK 5 种工况下界面裂缝开裂过程累积曲线的斜率在横向上分别为 1.07, 1.00, 0.79, 0.53, 0.32, 在纵向上分别为 2.06, 1.92, 1.27, 0.95, 0.74, 可以发现 DMK 的斜率最小, 开裂速度最慢。③基于文中所设计的 5 种工况, 监测结束后界面裂缝累积长度的大小关系无论在横向还是在纵向总是表现为 WZ>DC>MG>KC>DMK, 而且在任意阻裂措施下, 纵向裂缝的累积长度总是要大于横向裂缝。

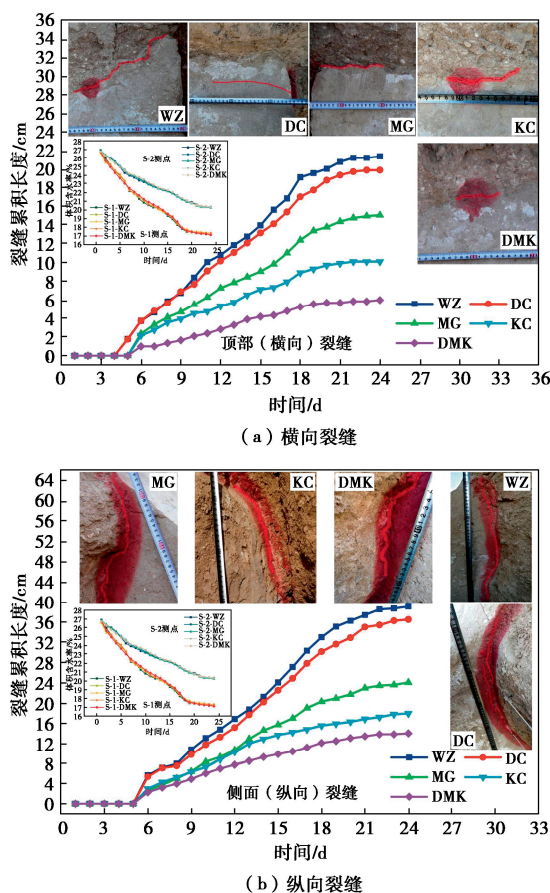


图3 不同阻裂措施下夯补体横向和纵向宏观裂缝可见迹长开展情况

Fig. 3 Development of horizontal and vertical macroscopic crack lengths visible under different crack prevention measures in rammed patches

2.2 界面区域单日应变变化情况

夯补体-本体界面区域的应变变化情况是各阻裂措施对界面裂缝阻裂效果的直观体现, 监测过程中发现, 相同气象条件下夯补体-本体界面同一测点的三向应变随单日温度的起伏变化表现出增长-下降的不断循环, 任意一天界面处土体应变变化规律基本相似, 因此选择应变变化规律明显且具有代表性的一天来分析不同阻裂措施下界面各测点、各方向应变的变化情况。为了使不同阻裂措施下界面应变变化情况对比分析更加直观, 分析前把应变初始值统一归零处理。不同阻裂措施下界面某日各测点应变变化情况如图 4 所示。结果表明: ①基于文中所设计的 5 种工况, 在任意测点的任一方向, 界面单日应变最大值的大小关系总是表现为 WZ>DC>MG>KC>DMK; 在同一方向, 任意措施下各测点单日应变最大值的大小关系表现为 J-1>J-2>J-3, 即界面上部应变变化最大。②对于任意测点: 在 X 方向, KC 与 DMK 的最大值接近且两者相对较小, DC、MG 与 WZ 的最大值基本相同, 说明

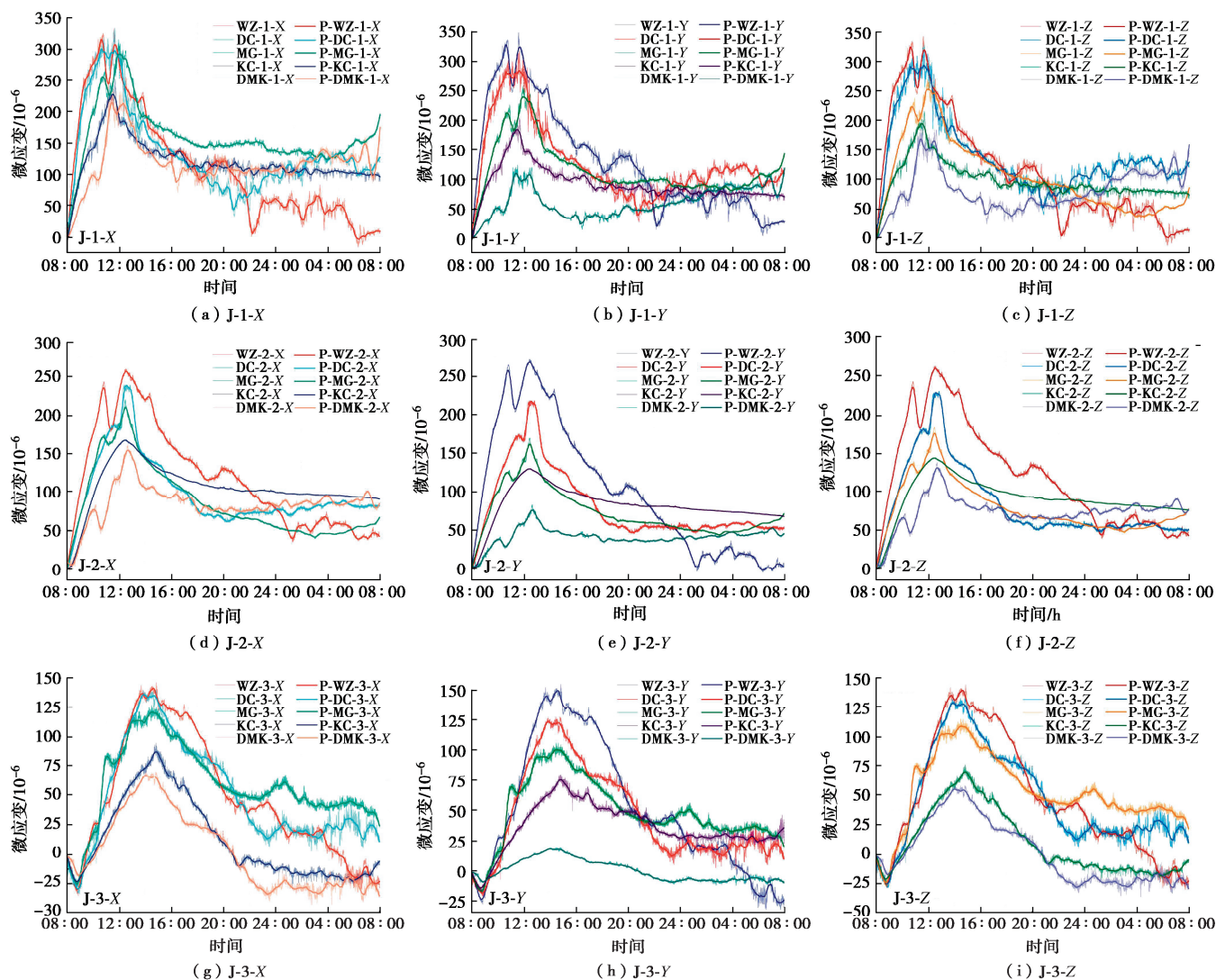


图4 界面各测点、各方向的单日应变变化情况

Fig. 4 Variation of daily strain at each measuring point and in each direction on interface

KC 和 DMK 对界面 X 方向应变有明显的抑制作用, DC 和 MG 的抑制作用较小; 在 Y 方向, 与 WZ 相比, DC、MG、KC、DMK 的最大值依次减小, 即各措施对 Y 方向应变都有明显抑制作用, DMK 抑制效果最佳; 在 Z 方向, KC 与 DMK 两者最大值接近, DC 与 WZ 两者最大值接近, MG 居中, 表明 KC 和 DMK 对 Z 方向应变抑制发挥主要作用, MG 次之, DC 作用几乎为零。

2.3 界面塑性累积应变变化情况

自 2021 年 9 月 10 日开始至 10 月 4 日夯补体水分场变化趋于动态稳定时监测结束, 各阻裂措施的界面在 X 、 Y 、 Z 方向塑性累积应变变化情况如图 5 所示, 可知: ①在任意方向, 各阻裂措施的界面累积应变都呈现 $J-1 > J-2 > J-3$, 应变从上到下逐渐减小, 界面上部应变变化最剧烈; 基于文中所设计的 5 种工况, 在任意方向的任一测点, 界面测点累积应变值的大小关系

总是表现为 $WZ > DC > MG > KC > DMK$, DMK 最小。②各阻裂措施对界面三向应变变化都有抑制作用, 但具有方向差异性, 以 WZ 为基准, 对 X 方向抑制效果, DC 提高了 2.18~4.09 倍, MG 提高了 3.27~13.01 倍, KC 提高了 20.70~29.53 倍, DMK 提高了 26.45~32.72 倍; 对 Y 方向, DC 提高了 11.16~16.30 倍, MG 提高了 23.74~35.81 倍, KC 提高了 40.18~47.47 倍, DMK 提高了 59.10~75.80 倍; 对 Z 方向, DC 提高了 6.51~9.38 倍, MG 提高了 13.91~28.04 倍, KC 提高了 34.56~40.18 倍, DMK 提高了 38.24~43.29 倍。

3 分析与讨论

3.1 阻裂措施的性能分析

为了直观对比各阻裂措施对界面不同部位、不同方向开裂的阻裂性能, 以 WZ 加固体界面的单日应变最大值为基准, 引入下式计算各措施对界面应变的抑制率来对阻裂性能进行分析:

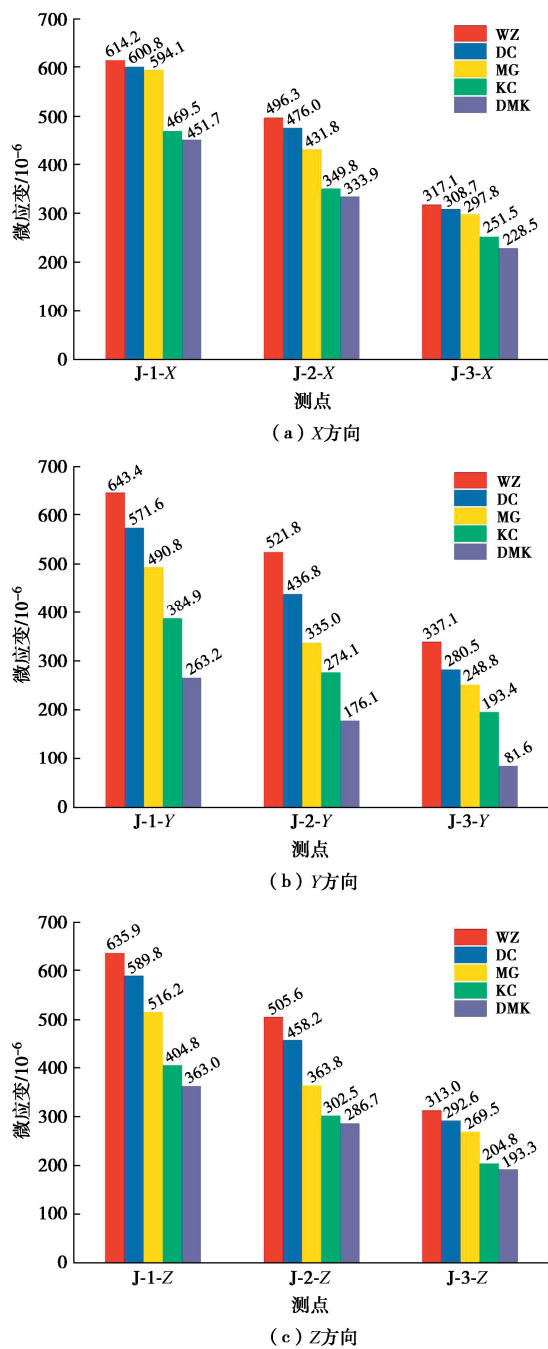


图 5 界面各测点、各方向的累积应变

Fig. 5 Cumulative strains in each direction at each measuring point on interface

$$\lambda = \frac{\varepsilon_{(WZ)\max} - \varepsilon_{(\theta)\max}}{\varepsilon_{(WZ)\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： λ 为不同阻裂措施对界面应变变化的抑制率，该值越大说明抑制效果越好； $\varepsilon_{(WZ)\max}$ 为 WZ（对照组）措施下夯补体-本体界面单日应变变化的最大值； θ 为不同的阻裂措施，包括 DC，MG，KC，DMK 四种。

基于文中所设计的 5 种工况，不同测点、不同方向各阻裂措施对界面应变变化的抑制率见表 2，表明：在任意测点、任一方向，不同阻裂措施抑制效果大小关系总是表现为 $DMK > KC > MG > DC$ ；在任意测点，任一阻裂措施对不同方向应变抑制效果大小关系总是表现为 $Y > Z > X$ ；对于任意方向，任一措施对 J-2 和 J-3 测点抑制效果明显优于 J-1 测点，说明各阻裂措施对界面中、下部区域开裂抑制效果明显，对界面上部开裂抑制效果相对较弱。

以上分析表明各措施对界面应变的抑制性能具有方向和数值差异性，但单日应变变化对于整体开裂过程而言不具有充分性，因此，以整个监测周期内界面各部位、各方向塑性累积应变变化过程为基准，从界面塑性累积应变变化与宏观裂缝开裂过程的相关性来进一步分析各种措施对界面开裂的阻裂性能。图 6 为各阻裂措施夯补体界面监测周期内应变累积变化与夯补体界面横、纵向宏观裂缝可见迹长变化的相关性分析热图，即将相关性数据按一定规律映射为颜色展示，利用颜色变化来可视化比较数据。由图 6 可知：各阻裂措施界面累积应变变化与界面横向和纵向宏观裂缝可见迹长变化的相关性规律基本一致，WZ 界面上、中、下 3 部分的 X、Y、Z 三向累积应变变化与界面横向和纵向裂缝开裂都有较强相关性，其中横向裂缝表现更甚；与 WZ 相比，施加 DC 措施后界面中、下部 Y 方向相关性明显减小，施加 MG 措施后界面中部 Y、Z 方向 and 下部 Y 方向相关性明显减小，施加 KC 措施后界面上、中、下部的 Y、Z 方向相关性明显减小，施加 DMK 措施后界面上部 Y、Z 方向和中、下部的 X、

表 2 不同阻裂措施下抑制效果对比

Table 2 Comparison of inhibitory effects under different crack prevention measures

测点	方向	阻裂措施应变抑制率/%			
		DC	MG	KC	DMK
J-1（上）	X	4.66	7.31	27.71	32.12
	Y	13.31	27.09	43.76	63.73
	Z	9.52	22.34	40.04	47.99
J-2（中）	X	7.08	17.68	34.46	39.50
	Y	18.79	39.58	51.64	71.72
	Z	12.16	32.17	44.70	49.63
J-3（下）	X	7.33	13.61	28.71	38.60
	Y	20.56	32.37	49.19	83.69
	Z	11.06	21.14	42.00	48.54

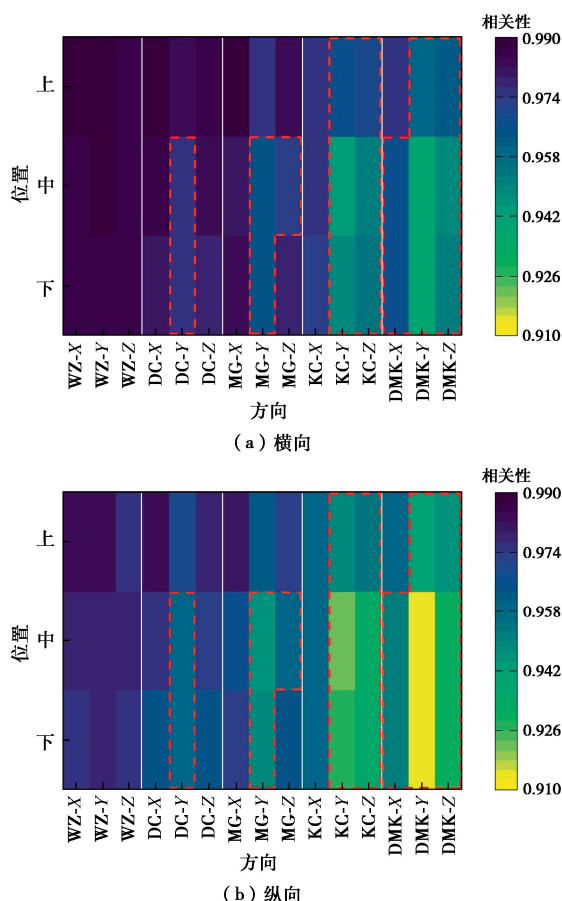


图6 各夯补体界面应变累积变化与WZ界面横、纵向宏观裂缝开裂相关性分析热图

Fig. 6 Heatmap analysis of correlation between cumulative strain changes at interface of each rammed patch and macroscopic transverse and longitudinal crack formation at WZ interface

Y、Z方向相关性最小。因此,与WZ相比,DC的阻裂主要体现在对界面中、下部Y方向土体变形的抑制,MG主要体现在对界面中部Y、Z方向和下部Y方向土体变形的抑制,KC主要体现在对界面上、中、下部的Y、Z方向土体变形的抑制;DMK主要体现在对界面上部Y、Z方向和中、下部的X、Y、Z方向土体变形的抑制,并且其抑制性能相对于其它措施表现最佳。

3.2 措施的阻裂机制讨论

在掏蚀区加固体水分快速散失的过程中,由于夯补体的干缩固结、地基的沉降以及界面区域温度和湿度梯度的剧烈变化引起土体的胀缩变化等都会在界面区域产生力的作用,夯补体-本体界面在受外力作用时主要产生两种开裂模式,一是劈裂张拉开裂,开裂方向垂直于界面,受界面法向黏结强度控制,另一种是剪切滑移开裂,开裂方向平行于界面,受界面切向黏结强度控制,但在界面实际开裂过程中两种开裂模式

往往同时发生^[22]。

对于WZ措施,不施加任何措施,界面黏结强度主要由夯补体和本体间的黏结力来承担,界面受力情况见图7(a),在受外力作用时X或Z方向界面易发生剪切滑移开裂,对滑移起阻碍作用的力为界面上的切向黏结力;Y方向易发生张拉开裂,对张裂起阻碍作用的力为界面上的法向黏结力。

对于DC措施,其主要出发点是减少原有地基沉降对界面可能产生的拉力而设置,然而本次试验监测过程中DC措施虽对界面中、下部应变表现出一定的抑制作用,但抑制效率较小,是由于在夯筑过程中地基主固结沉降即瞬时沉降已经完成,而次固结沉降周期较长在监测过程中未能完全体现而导致的。

对于MG措施,界面黏结强度主要由界面黏结力、锚杆的锚固力和销栓力来承担,界面受力情况见图7(b),受外力作用时,对X或Z方向滑移开裂起阻碍作用的力包括界面切向黏结力、锚杆杆体摩擦力和锚杆销栓力,对Y方向上张拉开裂起阻碍作用的力包括界面法向黏结力和锚杆锚固力,其中锚固力主要为杆体与夯土体的摩擦力。

对于KC措施,界面黏结强度主要由界面黏结力、凹槽咬合力和凹槽黏结力等来承担,界面受力情况见图7(c),(d),KC措施中凹槽两个侧壁和槽底的粗糙度要大于界面表面的粗糙度,对X方向上滑移开裂起阻碍作用的力包括界面切向黏结力、凹槽两侧壁切向黏结力和槽底切向黏结力;对Y方向上张拉开裂起阻碍作用的力包括界面法向黏结力、凹槽两侧壁切向黏结力和槽底法向黏结力;对Z方向上滑移开裂起阻碍作用的力包括界面切向黏结力和凹槽咬合力。

对于DMK措施,其为DC、MG、KC措施的组合体,由于DC措施作用为减小界面受力并非改变界面搭接形式而增强界面黏结强度,而且本次试验中DC措施作用效果并不明显,因此DMK措施中界面的黏结强度只有MG和KC措施联合发挥作用,则DMK措施中界面的黏结强度主要由界面黏结力,锚杆的锚固力、摩擦力、销栓力,凹槽咬合力、凹槽黏结力等来承担,界面受力情况见图7(e),(f),对X方向上滑移开裂起阻碍作用的力包括界面切向黏结力、锚杆与夯补土体的摩擦力、锚杆的销栓力、凹槽两侧壁切向黏结力和槽底切向黏结力;对Y方向上张拉开裂起阻碍作用的力包括界面法向黏结力、锚杆的锚固力、凹槽两侧壁切向黏结力和槽底法向黏结力;对Z方向上滑移开裂起阻碍作用的力包括界面切向黏结力、

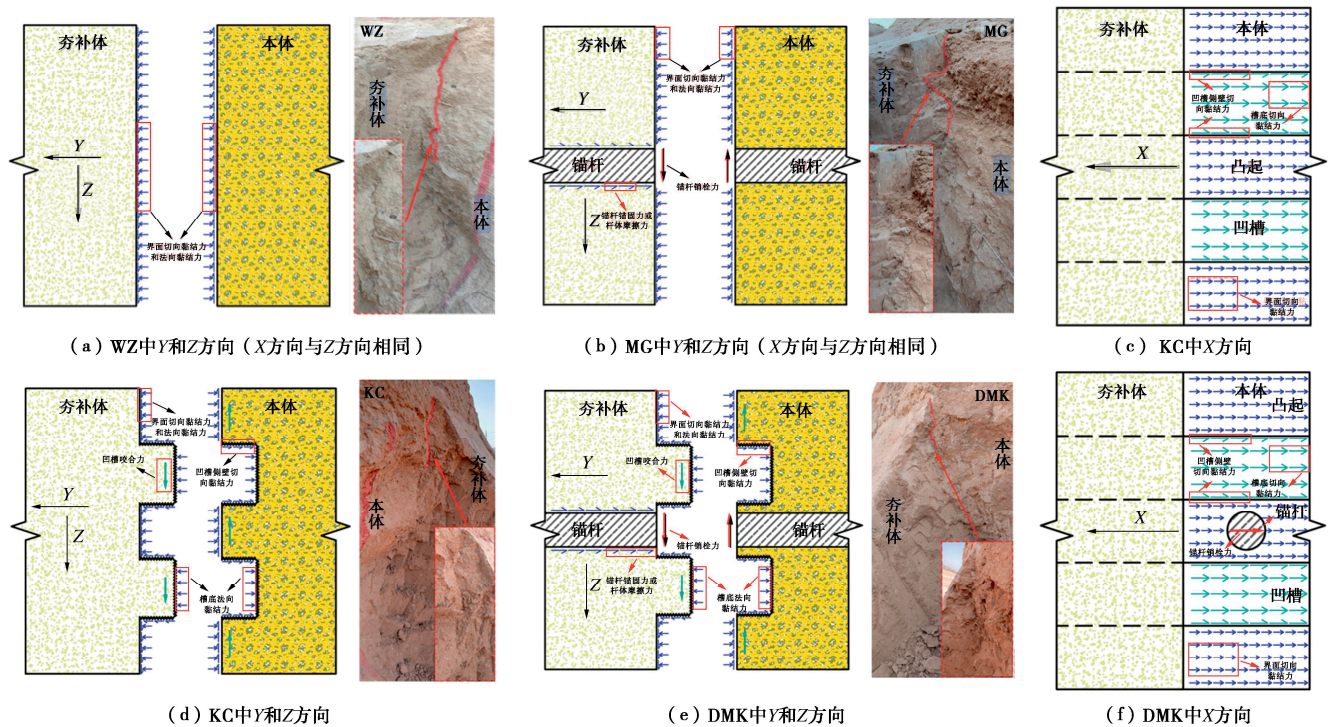


图7 各阻裂措施下界面不同方向力学分析与裂缝在界面内部的延伸情况

Fig. 7 Mechanical analysis in different directions at interface under various crack prevention measures and extension of cracks within interface

锚杆与夯补土体的摩擦力、锚杆的销栓力和凹槽咬合力。

综上所述,对于界面的黏结在未施加任何阻裂措施时主要由夯补体和本体间的黏结力来承担,包括宏观尺度上颗粒间的机械咬合力、微观尺度上的范德华力^[6-7]以及非饱和土中毛细水收缩膜的表面张力^[8],其中土颗粒间的机械咬合力对界面黏结力起决定作用^[9,6,23]。从宏观的角度来讲,机械咬合作用又受本体表面粗糙度的影响,粗糙度越大,界面土颗粒机械咬合力就越强,界面黏结力和黏结强度就越高^[24];在施加改变界面搭接形式等阻裂措施下界面的黏结不仅由界面黏结力来承担,还由施加刻槽措施的凹槽咬合力和凹槽黏结力,施加锚固措施的锚杆锚固力和销栓力等措施力来加强,并且改善界面的粗糙程度、增大界面的黏结面积等措施还能提高原有界面的黏结力。

4 结 论

(1) 基于文中所设计的5种工况,在土遗址掏蚀区夯补体工后水分快速散失过程中,界面宏观裂缝发育、界面区域单日应变以及界面塑性累积应变变化的大小关系始终表现为 $WZ > DC > MG > KC > DMK$, DMK的阻裂效果表现最好。

(2) 根据阻裂措施的性能分析结果,各阻裂措施

对界面中、下部区域开裂抑制效果比上部明显,而且对Y方向土体变形抑制表现最强。

(3) 4种阻裂措施中DC和MG主要抑制界面中、下部Y方向的土体变形进行阻裂,KC和DMK主要抑制界面上、中、下部Y、Z方向的土体变形进行阻裂,其中DMK抑制性能相对于其它措施表现最佳。

(4) 在施加改变界面搭接形式等阻裂措施下界面的黏结不仅由界面黏结力来承担,还由施加刻槽措施的凹槽咬合力和凹槽黏结力、施加锚固措施的锚杆锚固力和销栓力等措施力来进一步加强。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 崔凯、许鹏飞和于翔鹏商讨了论文的思路和方法以及现场实验的设计;许鹏飞参与论文初稿的写作;崔凯对论文进行了审阅和修改并提供实验的资金和项目支持;许鹏飞、于翔鹏、邵会安和韦鑫完成现场实验工作和监测。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。CUI Kai, XU Pengfei, and YU Xiangpeng discussed the research ideas, methodologies, and the design of field experiments. XU Pengfei contributed to the writing of the initial draft of the manuscript. CUI Kai reviewed and revised the manuscript, provided funding for the experiments, and offered project supervision. XU Pengfei,

YU Xiangpeng, SHAO Hui'an, and WEI Xin carried out the field experiments and monitoring work. All authors have read and approved the final manuscript for submission.

参考文献:

- [1] 黄克忠. 岩土文物建筑的保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 47-53. (HUANG Kezhong. Protection of Geotechnical Buildings[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998: 47-53. (in Chinese))
- [2] 孙满利. 吐鲁番交河故城保护加固研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006. (SUN Manli. Study on Protection and Reinforcement of Jiaohe Old Town in Turpan[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. (in Chinese))
- [3] 毛维佳. 夯土性能及土遗址支顶加固效果检测研究[D]. 西安: 西北大学, 2019. (MAO Weijia. Study on the Performance of Rammed Earth and the Effect of Supporting and Strengthening the Earth Ruins[D]. Xi'an: Northwest University, 2019. (in Chinese))
- [4] 裴强强, 王旭东, 郭青林, 等. 干旱环境下土遗址夯补支顶加固变形机制室内试验研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(8): 2755-2764. (PEI Qiangqiang, WANG Xudong, GUO Qinglin, et al. Laboratory test of deformation mechanism of rammed roof-propping reinforcement at earthen heritage sites in arid environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(8): 2755-2764. (in Chinese))
- [5] 唐朝生, 施 斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(8): 1415-1423. (TANG Chaosheng, SHI Bin, CUI Yujun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(8): 1415-1423. (in Chinese))
- [6] COURARD L, PIOTROWSKI T, GARBACZ A. Near-to-surface properties affecting bond strength in concrete repair[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, **46**: 73-80.
- [7] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A, et al. Microstructural analysis of the adhesion mechanism between old concrete substrate and UHPFC[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2014, **28**(18): 1846-1864.
- [8] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. John Wiley & Sons, 1993.
- [9] 张 淼. 混凝土-材黏结界面抗剪性能试验研究 U448.22[D]. 成都: 西南交通大学, 2019. (ZHANG Miao. Experimental study on shear behavior of concrete-stone bonding interface U448.22[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [10] 朱红兵, 付正昊, 王 烨, 等. 界面剂对全轻陶粒混凝土与普通混凝土黏结界面力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2024, **41**(6): 3154-3167. (ZHU Hongbing, FU Zhenghao, WANG Ye, et al. Effect of interfacial agents on the mechanical properties of the interface between full lightweight ceramsite concrete and ordinary concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, **41**(6): 3154-3167. (in Chinese))
- [11] TIAN J, JIANG X H, YANG X N, et al. Bonding performance of the grooved interface between ultrahigh performance concrete and normal concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, **336**: 127525.
- [12] WANG X D, PEI Q Q, GUO Q L, et al. Stress mechanism for the rammed layer interfaces of earthen heritage sites with different treatments[J]. Journal of Cultural Heritage, 2019, **39**: 110-119.
- [13] 曹海莹, 郭毅磊, 杜 量. 动、静载环境下界面土直剪试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, **51**(5): 1381-1390. (CAO Haiying, GUO Yilei, DU Liang. Direct shear test of soil interfacial layer under dynamic and static load[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, **51**(5): 1381-1390. (in Chinese))
- [14] 李 星, 王红雨, 柴鹏翔, 等. 淤泥-新填土接触界面渐进剪切破坏微观分析[J]. 工程地质学报, 2023, **31**(1): 78-89. (LI Xing, WANG Hongyu, CHAI Pengxiang, et al. Microanalysis of progressive shear failure on contact in-interface of silt and new fill[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, **31**(1): 78-89. (in Chinese))
- [15] CHEN X B, ZHANG J S, XIAO Y J, et al. Effect of roughness on shear behavior of red clay-concrete interface in large-scale direct shear tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(8): 1122-1135.
- [16] PAN J J, WANG B X, WANG Q, et al. An adhesion-ploughing friction model of the interface between concrete and silty clay[J]. Construction and Building Materials, 2023, **376**: 131039.
- [17] 肖成志, 田稳苓, 刘 波, 等. 设置界面构造锚筋的新老混凝土黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, **32**(1): 75-81. (XIAO Chengzhi, TIAN Wenling, LIU Bo, et al. Experimental study on bonding properties of young and old concrete with constructional steel bar[J]. Journal of Building

- Structures, 2011, **32**(1): 75-81. (in Chinese))
- [18] PONCELET N, HERRIER G, FRANÇOIS B. An effective stress constitutive framework for the prediction of desiccation crack in lime-treated soil: Experimental characterization and constitutive prediction[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2022, **29**: 100265.
- [19] 崔 凯, 王东华, 安欣悦, 等. 旱区土遗址坍塌和掏蚀区的复合地基及施工方法[P]. 甘 肃, 2017-08-29. (CUI Kai, WANG Donghua, AN Xinyue, et al. Composite Foundation and Construction Method for Collapsed and Eroded Areas of Earthen Sites in Arid Zones[P]. Gansu Province, 2017-08-29. (in Chinese))
- [20] 谭 炜. 蒸压灰砂砖砌体力学性能改善试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014. (TAN Wei. Experimental Study on Improvement of Mechanical Properties of Autoclaved Lime-Sand Brick Masonry[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014. (in Chinese))
- [21] 裴强强, 杨善龙, 张 博, 等. 夯筑土体内部应力应变测量装置[P]. 甘肃, 2018-05-22. (PEI Qiangqiang, YANG Shanlong, ZHANG Bo, SHANG Dongjuan, LIU Xiaoying, GUO Qinglin. Tamping Stress and Strain Measurement Device for Earth Mass Interior[P]. Gansu Province, 2018-05-22. (in Chinese))
- [22] 何 澜. 高铁无砟轨道板层间界面力学性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. (HE Lan. Study on Mechanical Properties of Interlayer Interface of Ballastless Track Slab of High-Speed Railway[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese))
- [23] 吴奇泽. 超高性能混凝土与普通混凝土植筋界面抗剪性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022. (WU Qize. Study on Shear Behavior of Interface between Ultra-High Performance Concrete and Ordinary Concrete with Steel Bars[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [24] 常鹏飞. 新旧混凝土界面的连接方法及动力性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012. (CHANG Pengfei. Study on Connection Method and Dynamic Performance of New and Old Concrete Interface[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))