

DOI: 10.11779/CJGE201507001

压实黏土梁弯曲开裂性状试验研究

凌道盛^{1,2}, 徐泽龙^{1,2}, 蔡武军^{1,3}, 王云岗⁴

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058;

3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 4. 浙江大学城市学院, 浙江 杭州 310015)

摘 要: 裂缝的存在显著降低黏土层的防渗性能。研制了土梁弯曲试验装置, 研究了不同含水率压实黏土梁张拉开裂性状, 分析了裂纹扩展过程, 并采用 PIV 技术揭示了裂纹尖端的应变局部化现象, 获得了不同含水率下压实黏土的开裂应变。试验结果表明: 三点弯梁拉伸区可能出现多个应变局部化区域, 其中靠近跨中的一个发展为宏观裂纹; 裂纹宽度随中点挠度近似呈线性增长, 且受含水率影响较小; 含水率对土梁开裂特性和开裂应变影响很大, 随着含水率由 32.6% 增至 37.0%, 土梁断裂挠度显著增加, 裂纹尖端的应变局部化区域变大, 开裂应变从 2.4% 增大至 4.1%, 跨中荷载挠度曲线呈现由跳回型向跳过型变化, 荷载峰值明显降低, 土梁由脆性断裂逐渐转变为延性断裂。

关键词: 压实黏土; 三点弯梁; 裂纹扩展; 开裂应变

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)07-1165-08

作者简介: 凌道盛(1968-), 男, 教授, 主要从事土动力学、计算土力学方面的研究。E-mail: dsling@zju.edu.cn。

Experimental study on characteristics of bending cracks of compacted soil beams

LING Dao-sheng^{1,2}, XU Ze-long^{1,2}, CAI Wu-jun^{1,3}, WANG Yun-gang⁴

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of

Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha

410014, China; 4. City College, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: The waterproofing properties of compacted clay barrier at landfill site will be significantly weakened by cracks. To reveal the characteristics of bending cracks of compacted soil beams with different water contents, a bending test apparatus is developed. Then the process of crack propagation is investigated. The strain localization near the crack tip is analyzed using PIV technology, and cracking strain of compacted soil beams with different water contents is obtained. The experimental results show that many strain localization regions are observed in the tensile zone of the beam, and the strain localization region near the mid-span becomes the macroscopic crack. The crack width increases linearly with the growth of mid-span displacement, which is independent of the water content. However, the water content has great influence on the cracking characteristics and strain of the beam. As the water content increases from 32.6% to 37.0%, the crack deflection of the beam increases markedly, the area of strain localization near the crack tip expands, and cracking strain increases from 2.4% to 4.1%. Additionally, as the water content increases, the pattern of load versus the mid-span displacement changes from “snap back” to “skip through”, and the peak load decreases noticeably. It is indicated that the crack pattern of compacted soil beams changes from brittle fracture to ductile one.

Key words: compacted clay; three-point bending beam; crack propagation; cracking strain

0 引 言

张拉裂缝广泛存在于黏性土层中, 如黏土屏障和土石坝黏土心墙中的变形裂缝^[1-2], 黄土地区的张拉型地裂缝^[3], 土坡和基坑坡顶的拉伸裂缝^[4-5]等。裂缝的存在显著降低黏土层的防渗性能等工程性质^[6], 深入研究黏性土层开裂机制十分必要。

国内外许多学者通过模型试验和单元体试验, 研究了含水率和干密度等因素对黏土抗拉强度和极限拉

应变的影响。在模型试验方面, Camp 等^[7]通过在黏土层表面设置标记点测量土体应变, 开展了土梁的四点弯曲试验, 研究了含水率和干密度对起裂位置应变

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2014CB047000); 浙江省自然科学基金面上项目 (LY12E08011); 国家自然科学基金项目 (51278451); 浙江省自然科学基金重点项目 (LZ12E09001)

收稿日期: 2014-04-22

*通讯作者

(strain at crack initiation) 的影响, 指出随着含水率上升, 开裂应变增大; Viswanadham 等^[8]研究了黏土的类型、含水率和击实功等对土梁弯曲性状的影响, 发现起裂位置处的抗拉强度随着含水率的上升而下降; 李雷等^[9]利用应变控制式土梁挠曲仪, 对东北黑土、西北黄土、华南红土等几种黏性土的 200 多组试验土样进行了试验, 发现随着含水率增加, 开裂应变相应增大。在单元体试验方面, 孙萍等^[3]通过单轴拉伸试验, 分析了地裂缝发育区域原状土和重塑黄土的张拉破裂特性; 张琰等^[10]研究了压实黏土在三轴拉伸下的应力应变特性; 张云等^[11]通过单轴拉伸试验研究了不同含水率和干密度等因素对击实黏土拉伸特性的影响, 指出具有相同干密度的土样, 其抗拉强度随含水率的增加而减小, 其应力-应变曲线可由应变强化型发展为应变软化型。可以看出, 已有研究成果主要关注土的抗拉强度和开裂应变指标, 而对土体中的裂纹扩展, 尤其是应变局部化区域的演化过程的研究尚少见报道。

目前模型试验中土体应变主要采用标记点法测量^[7]或者通过挠曲线近似计算^[2], 但这些方法只能得到某一区域的平均应变, 不能揭示应变局部化区域内的应变特征。PIV 技术^[12]通过识别土体纹理, 追踪土体表面的位置变化, 得到变形前后的位移场, 可以克服已有方法的缺点, 清晰地揭示裂纹附近, 尤其是裂纹尖端区域内的应变分布特征, 广泛应用于边坡、地基、隧道开挖面及断层的变形和剪切带观测^[13-16]。

本文通过研制位移控制的土梁 3 点弯曲试验装置, 试验研究不同含水率土梁弯曲开裂性状, 采用 PIV 分析技术分析裂纹尖端的应变局部化现象, 高精度

确定不同含水率下压实黏土的开裂应变。

1 试验方案

1.1 试验装置

土梁弯曲试验装置如图 1 所示, 该装置主要由反力支架、加载系统和测量系统 3 部分组成。

反力支架由 4 根钢杆和 3 块钢板组成。支架的顶板和底板分别与杆固定并调平, 加载板与杆之间采用直线滑块连接。另外, 将宽度 20 mm、厚度 4 mm 的聚乙烯薄板设置于土梁中间顶部与支座接触的位置, 以防支座刺入土梁。

加载系统由伺服电机 (包括电机和伺服控制器)、行星减速机和滚珠丝杆升降机 3 部分组成, 可实现竖向正反匀速稳定加载, 加载速率的可调节范围为 0.05~5.00 mm/min, 本文采用的加载速率均为 0.1 mm/min。

测量系统主要包括位移传感器 (L1、L2、L3、L4、L5)、S 型力传感器。位移传感器的量程为 50 mm, 测量精度为 0.1%, 将其布置于土梁顶面, 用于测量土梁顶面的竖向位移; S 型力传感器的量程为 1 kN, 测量精度为 0.3%, 用于测量土梁跨中荷载。在试验过程中, 数据采集周期为 2 s。

1.2 土梁制备

采用制样模具进行制样, 图 2 为制样模具示意图。制样模具内尺寸为 500 mm×100 mm×180 mm (长×宽×高), 由 5 块钢板相互嵌固、拼装而成; 侧面 4 块板之间采用螺栓进行连接, 再整体嵌固于底板的槽口中, 并通过螺栓与底板相连; 另外, 在两块侧板顶部设置螺杆以约束侧向变形。

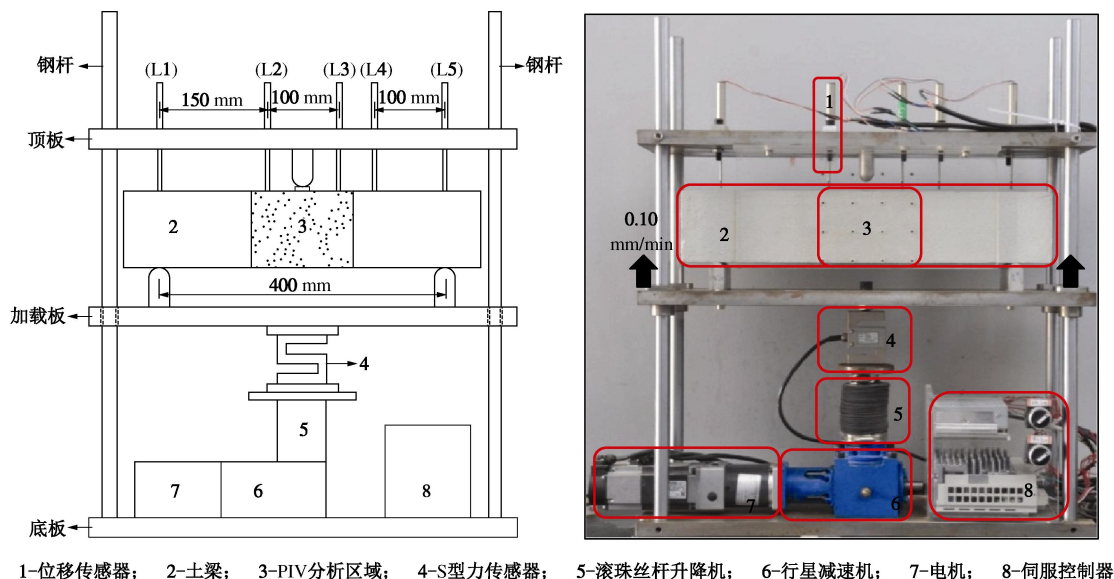


图 1 土梁 3 点弯曲试验装置图

Fig. 1 Apparatus for three-point bending tests on soil beams

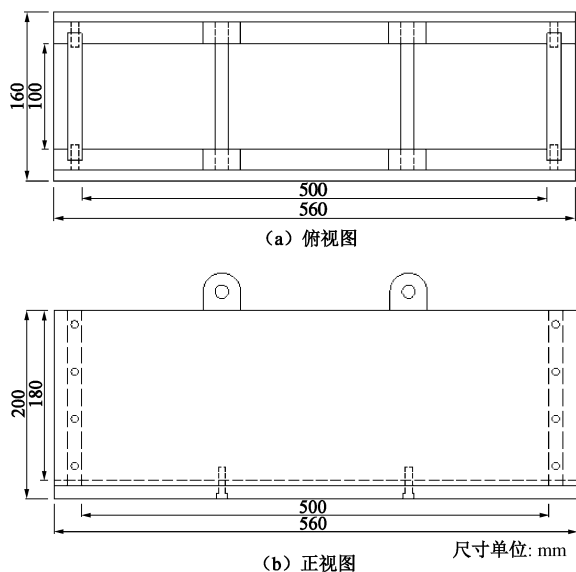


图 2 制样模具示意图

Fig. 2 Sketch of devices for making compacted samples

试验土料采用软质高岭土, 其基本物理参数: 相对密度为 2.61, 液限为 67.1%, 塑限为 32.5%, 塑性指数为 34.6, 最优含水率为 33.6%, 最大干密度为 1.31 g/cm³, 颗分曲线如图 3 所示。

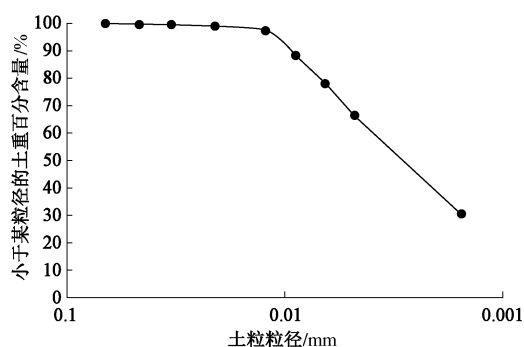


图 3 高岭土颗分曲线

Fig. 3 Particle-size distribution of kaolin clay

试验用土梁尺寸为 500 mm × 100 mm × 100 mm, 其制备过程主要包括配土、压样、养护和纹理制作 4 个步骤, 具体如下:

(1) 配土。称取一定质量的风干高岭土, 反复喷水搅拌; 测量土料含水率, 并调整含水率使其接近预期值; 将所配土料采用塑料袋密封保存, 直至各位置含水率差值小于 0.5%。

(2) 压样。在制样模具内侧涂抹润滑油, 并铺设 2 层聚乙烯薄膜; 分 4 次称取等质量土料, 依次将其均匀水平铺设于模具内; 待 4 次铺设完成后逐级施加荷载, 直至土梁高度达到 100 mm。

(3) 养护。将制备土梁采用双层塑料薄膜严密包裹, 在温度 20℃、湿度 95% 的环境下养护 24 h 以上。

(4) 纹理制作。在试验观测面, 采用直径为 0.1 mm 钢针密集扎下针孔, 并以此作为黏土表面纹理。

由于含水率对黏土梁开裂应变的影响最为显著, 本文研究了干密度为 1.29 g/cm³, 含水率分别为 32.6%, 34.6%, 35.6% 和 37.0% 的压实黏土梁的开裂性状。

1.3 基于 PIV 的应变测量方法

PIV 是一种非接触式的位移测试技术, 可以根据变形前后拍摄的照片自动识别和追踪土体的纹理变化, 获得变形后的位移分布, 其基本原理如图 4 所示。根据变形前一定区域 (单元 A) 的纹理分布特征, 与变形后照片中搜索区域的纹理进行全场匹配和相关性运算, 并根据峰值相关系数确定单元 A 在变形后所对应的位置。

采用 PIV 技术得到分析区域内各单元在不同时刻的位置, 可进行水平拉压应变计算, 计算原理如图 5 所示。本文取 x_0 大小为 30 个像素 (约为 0.16 mm)。

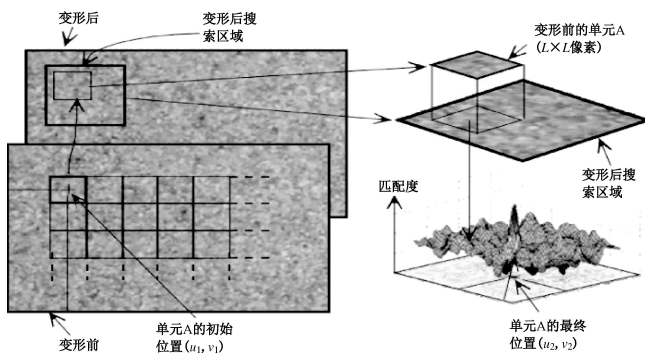
图 4 PIV 分析基本原理^[14, 17]

Fig. 4 Principles of PIV analysis

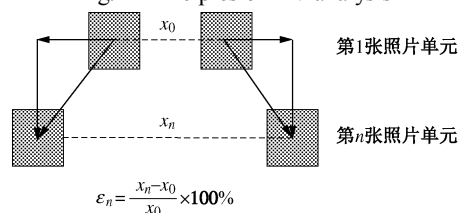


图 5 拉压应变计算原理

Fig. 5 Calculation of tensile and compressive strains

2 试验成果及分析

2.1 裂纹扩展过程和断面特征

图 6 给出了不同含水率下, 裂纹深度随中点挠度的发展过程。由图可以看出: ①裂纹产生时, 挠度随含水率增加而明显增大, 表明土梁抵抗差异沉降的能力不断提高; ②裂纹产生后, 前期扩展速度很快, 而当裂尖达到 1/2 梁高附近后, 裂纹扩展速度明显放缓, 约为前期的 1/2~1/3; ③土梁弯曲断裂时的挠度受含水率影响很大, 含水率越高, 断裂时挠度越大, 含水

率 37.0% 的土梁断裂挠度约为 32.6% 的土梁断裂挠度的 2.5 倍；④不同含水率下，裂纹的扩展速度存在较大差异，整体表现为低含水率下，裂纹扩展迅速，而高含水率下，裂纹扩展缓慢。

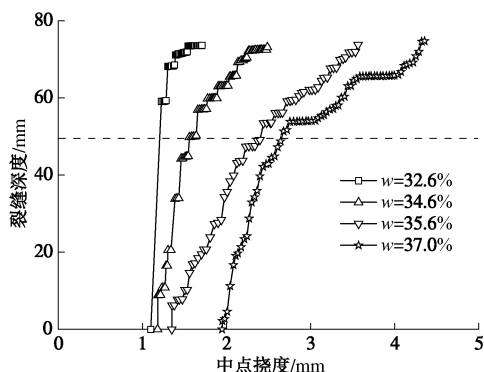


图 6 裂缝深度 - 中点挠度关系曲线

Fig. 6 Relationship between crack depth and displacement of mid-span

图 7 给出了不同含水率下，裂纹宽度随中点挠度的发展过程。由图可以看出，黏土梁开裂后，裂纹宽度随土梁中点挠度近似呈线性增长，且不同含水率土梁的裂纹宽度增长速率基本相同。由图还可以看出，对于相同高度的土梁含水率越大，断裂时表面裂缝宽度越大，表现越明显；反之，断裂破坏发生越具有隐蔽性。

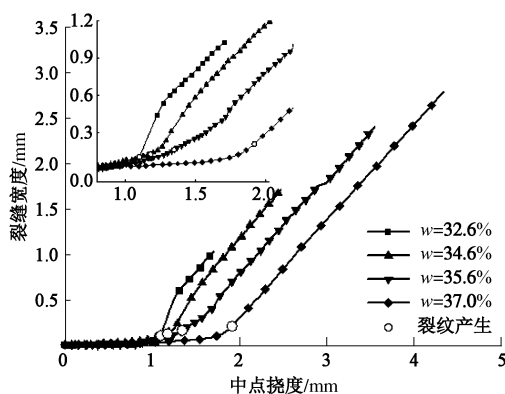


图 7 裂缝宽度 - 中点挠度关系曲线

Fig. 7 Relationship between crack width and displacement of mid-span

图 8 给出了 $w=34.6\%$ 时土梁中的裂纹发展过程。当中点挠度达到 1.18 mm 时，土梁跨中底部拉伸区将出现肉眼可辨的物理裂纹。随中点挠度增大，裂纹逐渐向上扩展，表面裂缝宽度逐渐增大。当裂纹接近贯通时，土梁将在自重作用下，瞬间发生断裂破坏。另外，在土梁顶部的受压区没有观察到明显的破坏现象。

由图 8 还可以看出，由于试样的不均匀性，裂纹

并非直线扩展，而且随着含水率的增加，这一现象更加明显。

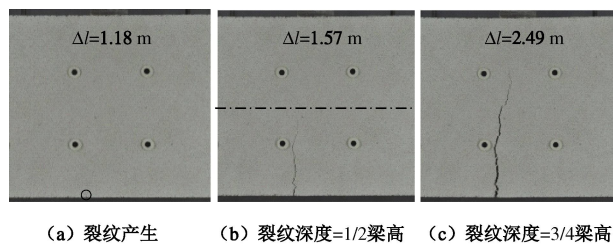


图 8 裂纹扩展过程

Fig. 8 Process of crack propagation

图 9 给出了含水率分别为 32.6% 和 37.0% 时土梁侧面开裂缝和横向断裂面。可以看出，含水率为 32.6% 时，黏土梁侧面裂缝较平整，但断裂面较为粗糙，有明显颗粒感，表现出很强的脆性断裂特征；随含水率增大至 37.0% 时，黏土梁侧面裂缝逐渐变得粗糙，而断裂面的粗糙程度不断增加，土梁延性破坏特征越为显著。

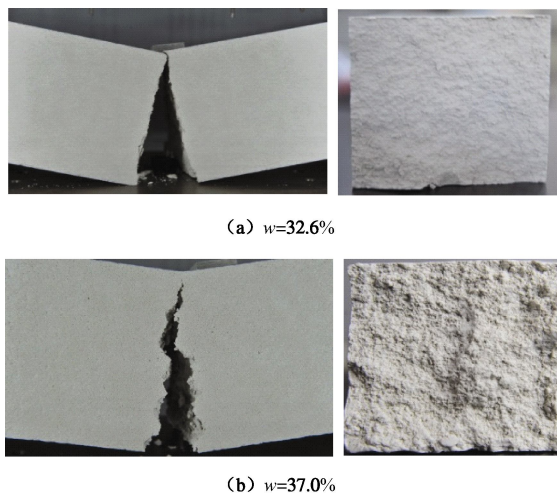


图 9 土梁侧面开裂缝和横向断裂面

Fig. 9 Side and front views of fracture surface of beam

2.2 土梁顶部荷载 - 位移关系

图 10 给出了不同含水率下，压实黏土梁中点位置的荷载 - 挠度曲线。由图可以看出，荷载 - 挠度曲线经历了 3 个不同阶段，即线性增长阶段、非线性强化阶段和软化阶段，如图 11 所示。随着含水率提高，土梁初始抗弯刚度迅速减少，跨中荷载峰值显著降低，但裂纹产生时的挠度和断裂破坏时的挠度明显加大，断裂能有一定程度提高。说明低含水率土梁具有较高的抗弯承载能力，而高含水率土梁具有较好的抵抗差异沉降的能力。由图还可以看出，低含水率 ($w=32.6\%$) 条件下荷载 - 位移曲线可能存在跳回现象，由于试验采用位移控制加载而未能很好地捕捉到这一现象。

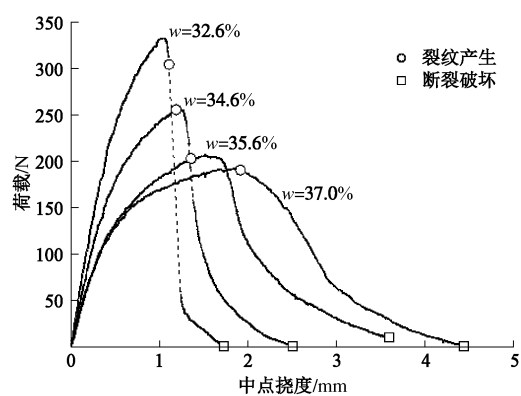


图 10 土梁中点荷载 - 挠度曲线

Fig. 10 Relationship between load and displacement of mid-span

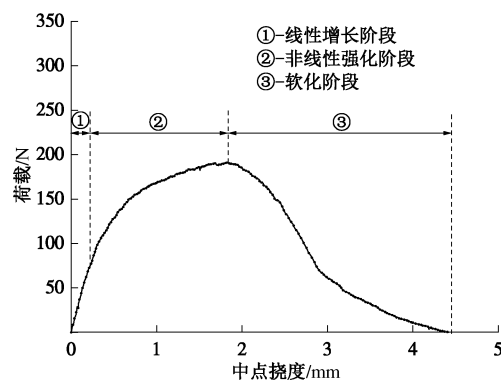


图 11 $w=37.0\%$ 时土梁中点荷载 - 挠度关系变化

Fig. 11 Relationship between load and displacement of mid-span
($w=37.0\%$)

此外, 对于所有含水率的土梁都具有: 裂纹产生和荷载达到峰值时的挠度较为接近; 发生断裂破坏时的挠度约为裂纹产生时的挠度的 2 倍。

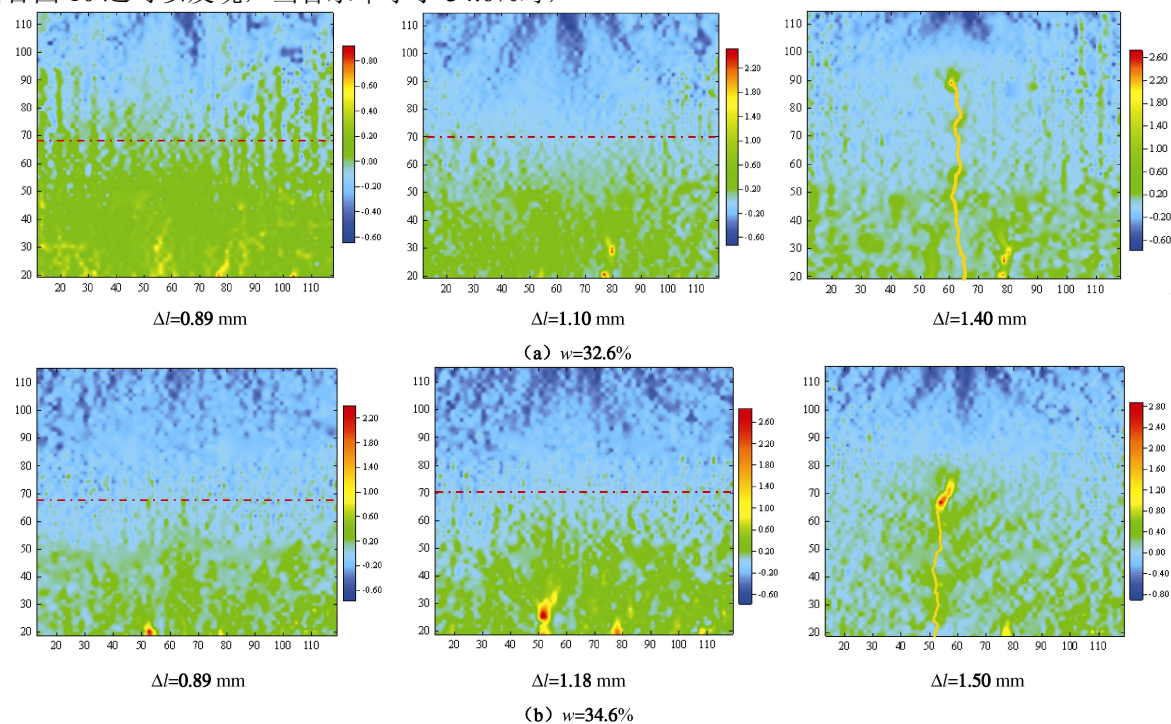
结合图 10 还可以发现, 当含水率小于 34.6%时,

土梁跨中荷载会在开裂后急剧下降; 而当含水率达到 35.6%以上时, 跨中荷载下降缓慢。以上研究成果均表明: 压实黏土的断裂特征与其含水率高低密切相关, 随含水率由 32.6%增大至 37.0%, 黏土梁由脆性断裂逐渐变为延性破坏。

2.3 裂尖应变局部化及开裂应变

图 12 给出了含水率分别为 32.6%, 34.6%, 35.6%, 37.0%时土梁起裂位置附近区域的应变分布特征。从图 12 (b) 可以看出, 当跨中挠度 $\Delta l = 0.89 \text{ mm}$ 时 (非线性强化阶段), 土梁顶部受压, 底部受拉, 拉压应变约为 0.6%, 中性层位于 1/2 梁高附近, 土梁底部出现应变局部化现象。随着跨中挠度增加, 应变局部化现象进一步加剧, 在土梁底部可能同时出现多个应变局部化区域, 当跨中挠度 $\Delta l = 1.18 \text{ mm}$ 时, 其中一个应变局部化区域发展为肉眼可见的裂缝, 裂纹产生。此时, 中性层仍位于 1/2 梁高附近。裂纹向上扩展过程中, 裂纹尖端始终存在一个应变高度集中的应变局部化区域, 如图 12 (a) $\Delta l = 1.50 \text{ mm}$ 时所示。

由图 12 (a)、(b)、(c) 和 (d) 可以看出, 不同含水率下, 压实黏土梁在弯曲过程中均表现出上部受压、下部受拉的弯曲特征。此外, 通过比较不同含水率下应变局部化区域的大小可以发现, 含水率越高, 裂纹尖端的应变局部化区域越大, 裂纹尖端的开裂应变越高; 含水率越低, 裂纹尖端的应变局部化区域越小, 相应的开裂应变越低。这主要是因为, 含水率越高, 土体的抗拉强度越低, 在拉应力作用下越容易屈服, 所形成的应变局部化区域越大。



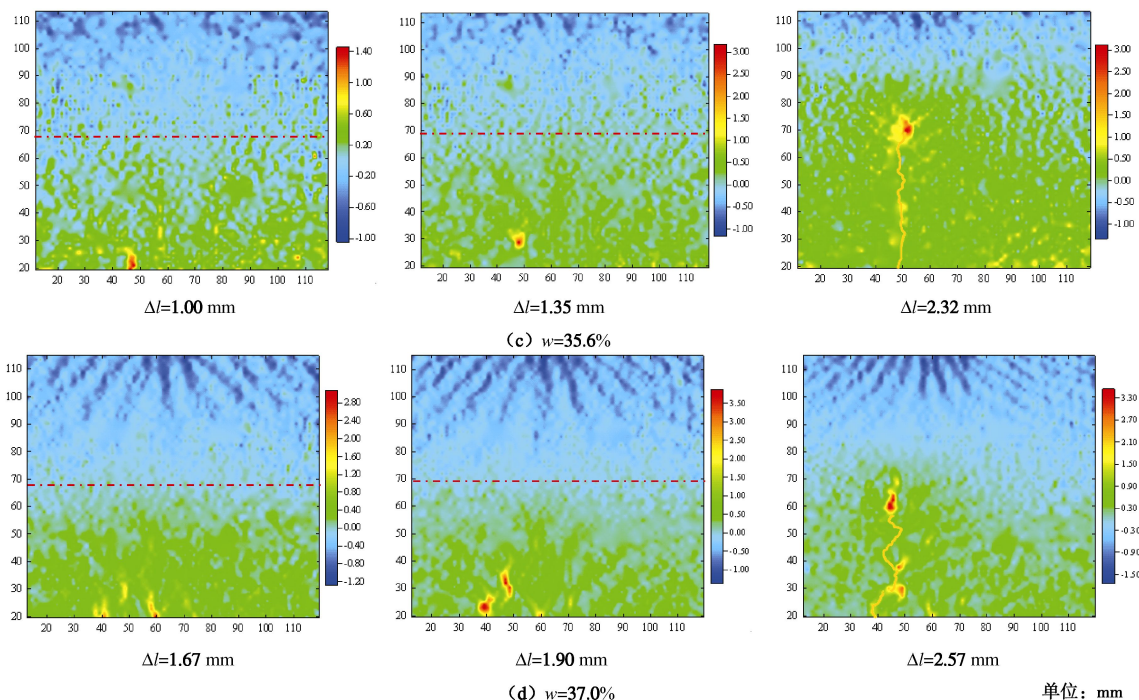


图 12 裂纹附近应变分布

Fig. 12 Distribution of strains near crack

图 13 给出了含水率 $w=34.6\%$ 和 $w=35.6\%$ 时, 土梁底部起裂位置应变随跨中挠度的变化曲线。从图中可以看出, 起裂位置的应变发展过程可分为线性发展阶段和急剧非线性增长阶段。在加载前期, 土梁可视为均匀的线弹性梁, 土梁的中点挠度与跨中底部拉应变之间存在良好的线性关系。

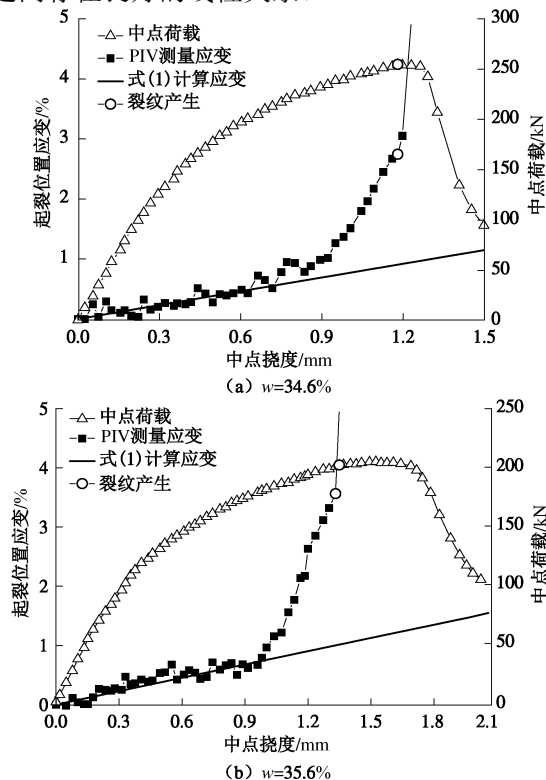


图 13 起裂位置应变随跨中挠度变化曲线

Fig. 13 The strain at crack initiation versus the displacement of mid-span

Scherbeck 等学者指出, 压实黏土层底部边界的拉应变可按式计算:

$$\varepsilon = R_{of} \kappa h \quad (1)$$

式中, R_{of} 为土梁的中性层系数, 即土梁中性层高度与土梁高度的比值, $\kappa = 1/R$ 为土梁的曲率。在加载前期, 本文取 $R_{of} = 0.5$, κ 可根据位移传感器 L2 和 L3 测得的竖向位移按图 14 近似计算, 计算公式为

$$\kappa = \frac{2\delta}{s^2 + \delta^2 + \delta h} \quad (2)$$

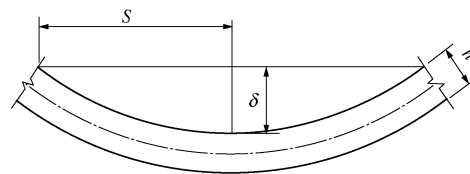


图 14 跨中曲率近似计算简图

Fig. 14 Approximate calculation of mid-span curvature

图 13 同时也给出了按式 (1) 计算得到的起裂位置应变。比较可见, 在线性发展阶段采用式 (1) 计算所得到的应变与 PIV 分析得到的应变基本一致。进入非线性强化阶段后, 式 (1) 的计算结果要远低于实际情况, 这是由于应变局部化和中性层随裂纹扩展而不断上移造成的。

采用 PIV 技术可以获得不同裂纹深度处所对应的裂纹尖端的开裂应变。图 15 给出了压实黏土开裂应变与含水率的关系曲线。分析结果表明, 开裂应变随裂纹深度的变化不大, 且无明显统一的变化规律, 但黏土梁的开裂应变随含水率增大而显著增加, 当含水率由 32.6% 增大至 37.0% 时, 开裂应变将由 2.4% 增至

4.1%。

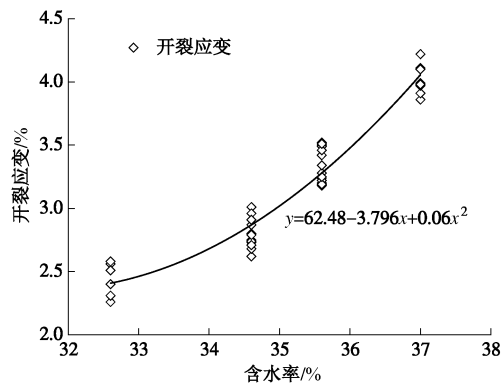


图 15 开裂应变与含水率关系

Fig. 15 Relationship between cracking strain and water content

比较国内外学者在张拉开裂试验中所得到的开裂应变, 发现在 3 点弯梁试验和单轴拉伸试验中, 通过标记点法或挠曲线计算方法所得到的开裂应变大小均在 0.1%~1.0%, 而本试验采用 PIV 技术获得的开裂应变在 2.4%~4.1%之间, 远高于传统的应变测量方法。这主要是因为土体在达到抗拉强度之前, 已形成一个面积较小、应变高度集中的应变局部化区域, 测量方法对该区域应变精度有很大影响。传统的应变测量方法是通过测量较大范围内的位移变化来计算应变, 只能得到某一区域内的平均应变, 而并不能揭示应变局部化区域内的应变特征。因此, 对于存在应变集中的问题, 通过传统应变测量方法所得到的应变要远低于实际情况, 而 PIV 技术则能很好地解决这一问题。

3 结 论

本文通过开展压实黏土梁的 3 点弯曲试验, 研究了不同含水率压实黏土梁的开裂性状, 包括黏土中裂纹扩展和断裂特征、荷载-挠度关系、裂纹附近区域应变局部化和开裂应变等。研究结果表明:

(1) 黏土梁开裂后, 裂纹宽度随土梁中点挠度近似呈线性增长, 且不同含水率土梁的裂纹宽度增长速率基本相同; 含水率由 32.6%增大至 37.0%, 黏土梁由脆性断裂逐渐变为延性破坏。

(2) 随着含水率提高, 土梁初始抗弯刚度迅速减少, 跨中荷载峰值显著降低, 但裂纹产生时的挠度和断裂破坏时的挠度明显加大, 断裂能有一定程度提高; 对于所有含水率的土梁, 裂纹产生和荷载达到峰值时的挠度较为接近, 发生断裂破坏时的挠度约为裂纹产生时的挠度的 2 倍。

(3) 黏土开裂前会出现多个应变局部化区域, 其中某一个应变局部化区域将不断扩大, 直至发展为裂

纹, 裂纹向上扩展过程中, 裂纹尖端始终存在一个应变高度集中的应变局部化区域; 随着含水率升高, 裂纹尖端的应变局部化区域变大, 裂纹尖端的开裂应变增大; 当含水率由 32.6%增大至 37.0%时, 开裂应变将由 2.4%增至 4.1%; PIV 技术可以高精度确定不同含水率下压实黏土的开裂应变, 获得的开裂应变在 2.4%~4.1%之间, 远高于传统的应变测量方法。

参考文献:

- [1] GOURC J P, CAMP S, VISWANADHAM B V S, et al. Deformation behavior of clay cap barriers of hazardous waste containment systems: Full-scale and centrifuge tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(3): 281 - 291.
- [2] 清华大学土石坝抗裂小组. 黏性土抗拉特性的测量和对土石坝裂缝的初步研究[J]. 清华大学学报, 1973, 3: 61 - 71. (Research Group on Prevention against Cracking of Earth Dams. Measurement of tensile characteristics of cohesive soils and preliminary investigation on cracking of earth and rockfill dams[J]. Journal of Tsinghua University, 1973, 3: 61 - 71. (in Chinese))
- [3] 孙 萍, 彭建兵, 陈立伟, 等. 黄土拉张破裂特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 980 - 984. (SUN Ping, PENG Jian-bing, CHEN Li-wei, et al. Experimental research on tensile fracture characteristics of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 980 - 984. (in Chinese))
- [4] 姚裕春, 姚令侃, 袁碧玉. 边坡开挖迁移式影响离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 76 - 80. (YAO Yu-chun, YAO Ling-kan, YUAN Bi-yu. Study of centrifuge model tests on transition effect of cut slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 76 - 80. (in Chinese))
- [5] 曾国熙, 潘秋元, 胡一峰. 软黏土地基基坑开挖性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(3): 13 - 22. (ZENG Guo-xi, PAN Qiu-yuan, HU Yi-feng. The behavior of excavation in soft clay ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(3): 13 - 22. (in Chinese))
- [6] 蔡武军, 凌道盛, 徐泽龙, 等. 单一裂隙优势渗流对黏土层防渗性能的影响分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2838 - 2844. (CAI Wu-jun, LING Dao-sheng, XU Ze-long, et al. Influence of preferential flow induced by a single crack on anti-seepage performance of clay barrier[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2838 - 2844. (in Chinese))
- [7] CAMP S, GOURC J P, PLE O. Landfill clay barrier subjected to cracking: Multi-scale analysis of bending tests[J]. Applied

- Clay Science, 2010, **48**(3): 384 – 392.
- [8] VISWANADHAM B V S, JHA B K, PAWAR S N. Experimental study on flexural testing of compacted soil beams[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, **22**(5): 460 – 468.
- [9] 李 雷, 荣卫东. 几种击实土挠曲极限拉应变的试验研究[J]. 水利水运科学研究, 2000, **1**: 43 – 48. (LI Lei, RONG Wei-dong. Experimental study on limit tensile strain under bending of compacted soil[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2000, **1**: 43 – 48. (in Chinese))
- [10] 张 琰, 张丙印, 李广信, 等. 压实黏土拉压组合三轴试验和扩展邓肯张模型[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(7): 999 – 1004. (ZHANG Yan, ZHANG Bing-yin, LI Guang-xin, et al. Combined tension-compression triaxial and extended Duncan-Chang model of compacted clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(7): 999 – 1004. (in Chinese))
- [11] 张 云, 王惠敏, 嫣丽芬. 击实黏土单轴拉伸特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(8): 2151 – 2157. (ZHANG Yun, WANG Hui-min, YAN Li-fen. Test research on tensile properties of compacted clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(8): 2151 – 2157. (in Chinese))
- [12] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, **53**(7): 619 – 631.
- [13] 张 嘎, 牟太平, 张建民. 基于图像分析的土坡离心模型试验变形场测量[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 94 – 97. (ZHANG Ga, MU Tai-ping, ZHANG Jian-min. Displacement measurement using image analysis in centrifuge modeling of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 94 – 97. (in Chinese))
- [14] 刘 君, 刘福海, 孔宪京, 等. PIV 技术在大型振动台模型试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 368 – 374. (LIU Jun, LIU Fu-hai, KONG Xian-jing, et al. Application of PIV in large-scale shaking table model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 368 – 374. (in Chinese))
- [15] 张 敏, 吴宏伟. 颗粒图像测速技术在离心试验变形分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 2): 3858 – 3864. (ZHANG Min, NG Charles W W. Application of particle image velocimetry to deformation analysis in centrifugal tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 3858 – 3864. (in Chinese))
- [16] 汤旅军, 陈仁朋, 尹鑫晟, 等. 密实砂土地层盾构隧道开挖面失稳离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1830 – 1838. (TANG Lü-jun, CHEN Ren-peng, YIN Xin-sheng, et al. Centrifugal model tests on face stability of shield tunnels in dense sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1830 – 1838. (in Chinese))
- [17] WHITE D J. An investigation into the behavior of pressed-in piles[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2002.