

DOI: 10.11779/CJGE201601007

裂隙诱导各向异性对边坡降雨入渗的影响

袁俊平^{1, 2}, 蔺彦玲^{1, 2}, 丁 鹏^{1, 2}, 韩春雷^{1, 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 裂隙破坏了土体的完整性, 使土体渗透性在不同方向上呈现出明显差异, 从而显著地影响了边坡降雨入渗规律。为了揭示裂隙诱导各向异性对边坡降雨入渗的影响规律, 利用 Seep/W 软件进行了数值模拟分析, 分别就各向异性方向、各向异性程度、各向异性分布区域等因素进行了讨论。最后结合工程实例分析了计算结果的合理性。结果表明: 裂隙诱导各向异性方向、各向异性程度、各向异性分布等因素均对边坡降雨入渗有一定的影响, 在边坡排水设计与稳定分析时须予以考虑, 降雨强度大于顺裂隙方向渗透系数时, 裂隙诱导各向异性的影响才会表现出来。裂隙诱导各向异性主要影响降雨初期渗流场, 随降雨历时增大, 裂隙诱导各向异性的影响逐渐减小, 长历时降雨条件下可不考虑这种影响。

关键词: 裂隙; 各向异性; 边坡; 降雨入渗

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)01-0076-07

作者简介: 袁俊平(1975-), 男, 湖北麻城人, 副教授, 博士, 主要从事非饱和土和堤坝工程研究。E-mail: yuan-junph@163.com。

Influence of anisotropy induced by fissures on rainfall infiltration of slopes

YUAN Jun-ping^{1, 2}, LIN Yan-ling^{1, 2}, DING Peng^{1, 2}, HAN Chun-lei^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Engineering Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Fissures destroy the integrity of soil mass, which makes the permeability of soil in different directions vary greatly and thereby significantly affects the rainfall infiltration laws of slopes. In order to reveal the influence of anisotropy induced by fissures on the rainfall infiltration slopes, the software Seep/W is used to conduct a series of numerical simulation analyses, and the factors such as the anisotropic direction, degree of anisotropy and anisotropic distribution are discussed. Finally, based on engineering examples, the rationality of the calculated results are analyzed. It is concluded that the anisotropic direction, degree of anisotropy and anisotropic distribution all have a certain influence on the rainfall infiltration of slopes, and they should be considered in the drainage design and stability analysis of slopes. Only when the rainfall intensity is greater than the permeability coefficient along the direction of the main fractures, the anisotropy induced by fissures will exert an effect. And the anisotropy mainly affects the rainfall infiltration of slopes in the initial period or the slope soil with lower water content, and as the rainfall duration increases to a degree, the influence of the anisotropy on the rainfall infiltration of slopes can be ignored.

Key words: fissure; anisotropy; slope; rainfall infiltration

0 引 言

当边坡土体中出现裂隙时, 由于沿裂隙方向的渗透性不同于周围土体, 土体渗透性在不同方向上会呈现出明显差异, 即出现裂隙诱导各向异性。产生裂隙后, 降雨入渗所形成的边坡渗流场也会因此而发生显著变化, 雨水可沿裂隙快速入渗到边坡内部^[1]。特别地, 当原土体渗透性很弱时(如膨胀土等), 裂隙的产生可能完全改变边坡整个浅层的渗流场^[1-2]。因此, 要合理地进行边坡防渗排水设计, 必须搞清这种裂隙诱导的岩土体各向异性对边坡渗流场的影响特点和规

律。

目前, 已有不少学者通过室内测试、模型及原位试验、数值模拟等方法, 对含裂隙岩土体的渗透特性及测试方法、裂隙的数值模拟方法、裂隙对边坡渗流场及边坡稳定影响特点等开展了研究。如 David^[3], Wei 等^[4]、丁立丰等^[5]、王洪涛等^[6]、程国明等^[7]对岩质边坡裂隙渗流进行了研究, 而陈铁林等^[1]、袁俊平

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378008); “十二五”国家科技支撑计划(2011BAB10B04); 中央科研业务费(B15020060)

收稿日期: 2014-12-24

等^[2]、姚海林等^[8]则对裂隙土降雨入渗问题开展了理论与数值模拟研究。

尽管通过这些研究,大家已经认识到裂隙对岩土体工程特性有重要影响,是边坡渗流及稳定分析中不可忽略的关键因素。然而,裂隙诱导各向异性对边坡土体渗流场影响规律,尚未见较全面的研究成果报道,特别是不同各向异性参数(如各向异性方向、各向异性程度、各向异性分布区域等)到底对降雨入渗规律的影响规律和程度如何,仍有待研究。为此,本文采用数值方法,分析比较不同各向异性参数对边坡降雨入渗规律的影响,以期进一步深入认识裂隙其对边坡的影响机理和规律,并为边坡防渗排水设计提供参考。

1 研究思路

目前,用数值方法研究裂隙对土质边坡渗流和稳定性影响时,裂隙一般采用以下 3 种方法来模拟:

(1) 将裂隙作为边界条件,即认为裂隙渗透性远大于原状土,雨水入渗时裂隙很快饱和,计算时将裂隙作为水头或孔压边界处理^[9]。

(2) 将裂隙区域土体等效为不同于原状土的另一种材料,等效后裂隙区域按均质材料考虑^[10-11]。

(3) 前两种处理方法的综合,即宽深裂隙按已知边界条件考虑,细浅裂隙按均化处理^[10-11]。

为方便起见,本文采用了第(2)种方法,将边坡土体分为裂隙土和原状土,其中裂隙土视为一种各向异性材料。计算分析中,裂隙引起的土体各向异性由裂隙面与竖向方向夹角 α 和顺裂隙方向与垂直裂隙方向渗透系数的比值 η 来反映。为简化问题起见,设裂隙方向均一致,沿裂隙方向与竖向夹角 α 即等于裂隙单元局部坐标与整体坐标间的夹角(图 1)。下式可将裂隙单元局部坐标下渗透系数转换为整体坐标。

$$\begin{pmatrix} k_{wx} \\ k_{wy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k'_{wx} \\ k'_{wy} \end{pmatrix}, \tag{1}$$

式中, α 为顺裂隙方向和竖直方向夹角, k_{wx} , k_{wy} 分别为整体坐标系下水平和竖直的渗透系数, k'_{wx} , k'_{wy} 分别为局部坐标系下水平和竖直的渗透系数。

此外,根据姚海林等^[8]、刘华强等^[12]、郑少河等^[13]研究成果,裂隙处于边坡不同位置或裂隙开展深度不同时,边坡降雨入渗规律有较大差异。因此,讨论裂隙诱导各向异性对边坡渗流场影响时,有必要将裂隙位置和深度的影响也考虑在内。下文计算方案中分别考虑了裂隙处于边坡不同位置(坡顶、坡中和坡脚)以及裂隙开展深度不同(2 m 和 4 m)的影响(详见表 1)。

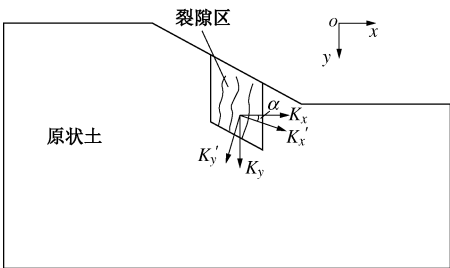


图 1 裂隙土局部和整体坐标下渗透系数转换
Fig. 1 Transformation for permeability coefficient of fissured soil between local and global coordinate systems

2 计算网格、参数与计算方案

2.1 计算网格及边界条件

计算采用了坡高 10 m、坡比 1:2 的简单边坡。为考虑裂隙位置的影响,在坡顶、坡中和坡脚 3 处各设 1 个裂隙区域,边坡稳定地下水位距坡底约 5 m,详见图 2。在坡顶、坡面和坡底设降雨边界,雨强 0.02 m/d(相当于中雨),该雨强大于原状土的饱和渗透系

表 1 计算方案

Table 1 Schemes for numerical analysis

方案编号	裂隙位置	裂隙深度/m	裂隙方向 $\alpha/(^{\circ})$	裂隙渗透性 η	分析内容
A0	—	—	—	—	无裂隙方案(各向同性)
B1	坡顶	4	0	100	各向异性方向 (角度 α)
B2			26.5		
B3			60		
B4			90		
C1	坡顶	4	0	1	各向异性程度 (渗透性)
C2				10	
C3				100	
C4				10000	
D1	坡顶	2	0	100	各向异性程度(裂隙深度)
D2		4			
E1	坡顶	4	0	100	各向异性分布
E2	坡中				
E3	坡脚				

数。降雨过程线见图3。

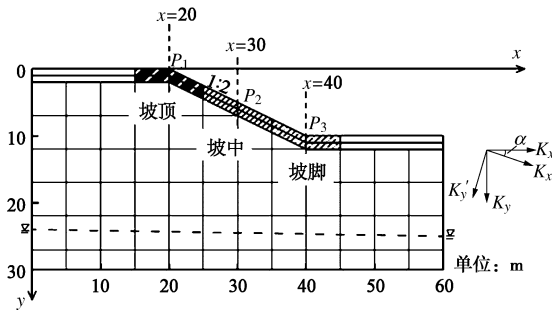


图2 边坡计算模型

Fig. 2 Slope model

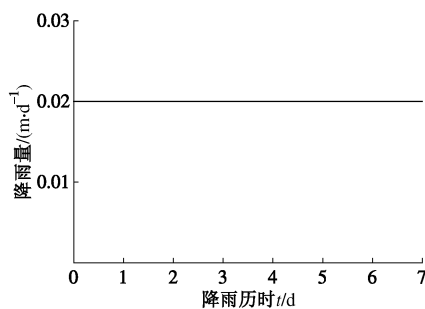


图3 降雨过程线

Fig. 3 Diagram for rainfall process

2.2 计算参数

吴珺华等^[14]利用滤纸法分别测定了裂隙膨胀土和原状膨胀土的土水特征曲线,发现两者基本相同。根据这一试验结果,本文计算中,裂隙土的土水特征曲线模型参数取值与原状土相同。按文献[11]结果,原状土土水特征曲线采用VG模型,参数如下: $a=166.7$ kPa, $n=1.567$, $\theta_s=0.495$ cm³/cm³, $\theta_r=0.262$ cm³/cm³。

原状土饱和渗透系数 $k_{sat}=2.83 \times 10^{-4}$ m/d, 裂隙土垂直裂隙方向的饱和渗透系数为 $k_{satr}=2.83 \times 10^{-2}$ m/d。为比较不同各向异性程度对降雨入渗规律的影响,计算中取顺裂隙方向饱和渗透系数 k'_{sat} 分别为垂直裂隙方向饱和渗透系数的1倍、10倍、100倍和10000倍(详见2.3节),即顺裂隙方向饱和渗透系数比原状土饱和渗透系数高2, 3, 4和6个数量级。可由饱和渗透系数和VG模型参数推算出原状土和裂隙土垂直裂隙方向的渗透系数-吸力关系曲线,见图4。

研究表明,裂隙遇水后闭合会引起渗透系数减小。但具体减小程度和随时间变化规律如何,不同学者持有不同观点。如:张家俊^[16]认为即使裂隙闭合,裂隙土的饱和渗透系数仍可能较原状土高3~4个数量级;而袁俊平等^[17]则发现浸水后裂隙膨胀土的渗透性显著降低约1~2个数量级,与原状土渗透性相近。因此,

为简单起见,本文计算分析中不单独考虑降雨过程中裂隙渗透系数的变化。

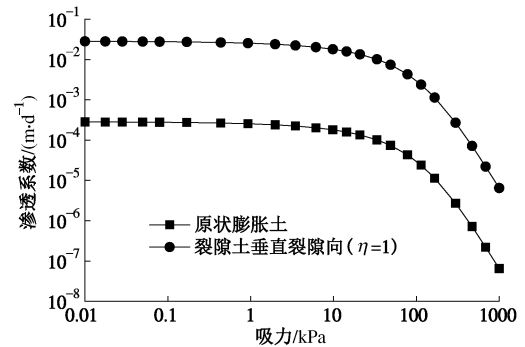


图4 原状土与裂隙土垂直裂隙向的非饱和渗透系数与吸力关系曲线

Fig. 4 Curves of unsaturated permeability coefficient vs. suction for integrated and fissured soil perpendicular to direction of fissure

2.3 计算方案

本文就各向异性方向、各向异性程度、各向异性分布等因素对边坡渗流的影响分别进行了计算分析,计算方案详见表1。表1中,裂隙方向 α 指顺裂隙方向与竖直方向夹角;裂隙渗透性参数 η 指顺裂隙方向饱和渗透系数与垂直裂隙方向饱和渗透系数的比值;裂隙分别分布在坡顶($x=20$)、坡中($x=30$)和坡脚($x=40$);根据现有研究,土中干缩裂隙深度一般为2~4 m^[15],故裂隙深度考虑了2 m和4 m两种情况。

3 计算结果及分析

3.1 各向异性方向的影响

图5给出了不同各向异性方向条件下,降雨后不同时刻、坡顶处($x=20$)土体体积含水率随埋深的变化情况。

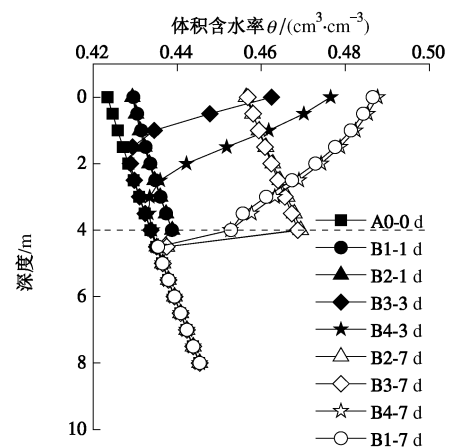


图5 不同各向异性方向时坡顶处($x=20$)土体体积含水率沿埋深分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of volumetric water content vs. depth at top of slope ($x=20$) under different anisotropic directions

(1) 降雨初期 (不超过 3 d), 裂隙方向 α 为 0° 和 26.5° 时, 埋深 4 m 范围内土体含水率均迅速增加, 表现出含水率随深度均匀增大, 含水率随深度的分布曲线与初始含水率分布曲线近似平行, 且不同 α 对边坡的含水率的影响差异较小; 而 α 为 90° 和各向同性时含水率变化规律相同, 裂隙区域内土体含水率均随降雨历时增加而增加, 含水率随埋深增加而减小。

(2) 随降雨历时增长, 不同裂隙方向导致的边坡含水率分布差异逐渐减小 (到第 7 天时, α 为 90° 和各向同性的计算结果曲线几乎重合), 表明经历长时间降雨后, 裂隙方向诱导各向异性对边坡渗流场的影响在减小。

(3) α 越小降雨对原状土区域的影响深度越大, 降雨 7 d 时, α 为 0° 和 26.5° 的影响深度为 1 m, α 为 90° 和 120° 时的影响深度为 0.5 m。可见, 不同裂隙方向主要对较短降雨历时裂隙区域渗流有影响, 降雨历时较长时, 裂隙区域或原状土区域所受影响较小。

笔者认为, 不同裂隙方向对边坡含水率变化影响存在以上规律的原因是: ① α 不同时, 裂隙区域土体竖向渗透系数也不同。当 α 为 0° 和 26.5° 时, 竖直方向的渗透系数大于雨强, 地表的雨水迅速向下入渗到达裂隙区域和原状土的界面。 α 越小, 顺裂隙方向越接近竖直, 雨水下渗速率越大, 降雨初期裂隙区域内土体不易饱和, 不会出现水分聚集, 故裂隙区域土体含水率表现为沿埋深增加而增大; 当 α 为 90° 和 120° , 土体竖向渗透系数较小, 雨水下渗缓慢并在浅层聚集, 导致土体含水率沿深度分布呈现为逐渐减小趋势; ② 降雨历时较长时, 裂隙区域内土体逐渐饱和, 其竖向渗透系数均超过雨强, 入渗过程受雨强控制, 从而不同裂隙方向时土体含水率沿埋深分布的差异较小。

3.2 各向异性程度对边坡渗流的影响

裂隙诱导各向异性程度的高低主要表现在顺裂隙方向渗透性强弱和裂隙深度大小。顺裂隙方向渗透性越强, 裂隙发展深度越大, 各向异性程度也就越高。

(1) 裂隙渗透性的影响

图 6 给出了顺裂隙方向渗透性不同时, 不同时刻坡顶处 ($x=20$) 土体体积含水率沿埋深分布情况, 其中图 6 (a) 为降雨 3 d 时; 图 6 (b) 为降雨 7 d 时。

图 6 (a) 显示, $t=3$ d 时, 若 $\eta \leq 10$, 含水率随埋深增大而减小; $\eta > 10$ 时, 含水率却随埋深增大而增大; 当 η 超过 100 后, 不同方案间几乎没有明显差异。从图 6 (b) 可看出, $t=7$ d 时, 若 $\eta=1$, 含水率随埋深增大而减小; $\eta \geq 10$ 时, 含水率随埋深增加而增大。

比较图 6 (a) 和 6 (b) 还可以看出, 随渗透历时增加, $\eta > 1$ 的各方案间差异逐渐减小。

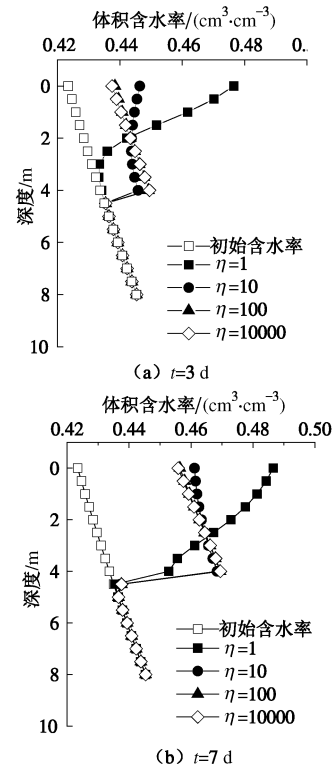


图 6 不同各向异性程度 (渗透性) 时坡顶处 ($x=20$) 土体体积含水率沿埋深分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of volumetric water content vs. depth at top of slope ($x=20$) under different anisotropic degrees

从图 6 看来, $\eta=10$ 似乎是含水率沿深度分布规律变化的一个临界值。分析存在该临界值的原因是, 随降雨入渗历时增加, 土体饱和度增大, 顺裂隙方向渗透系数也随之增大, 雨强与土体渗透系数在相对大小关系就发生了变化, 实际降雨入渗强度由渗透系数控制变为受雨强控制。表 2 给出了 $\eta=10$ 时不同时刻各埋深处土体顺裂隙向渗透系数。可以看出, $t=3$ d 时, 裂隙深度范围内 (<4 m) 顺裂隙向渗透系数最大值为 0.014 m/d, 小于雨强 (0.02 m/d), 此时入渗率受土体渗透系数控制, 入渗雨水量超过土体下渗能力, 从而在较浅埋深处土体含水量会随入渗历时增加而逐渐增大, 使土体含水率沿深度分布呈现逐渐减小趋势; 当 $t=7$ d 时, 该区域内土体渗透系数增大, 均超过 0.022 m/d, 大于雨强, 入渗率受降雨强度控制。由于此时土体入渗能力超过雨强, 降雨能沿裂隙入渗到土体深度, 不在浅层积聚, 从而含水率沿深度分布呈逐渐增加趋势。

为了进一步分析雨强与土体渗透系数相对大小对渗流场的影响规律, 还进行了施加零孔压边界方案的计算 (即雨强远大于土体渗透系数情况)。坡顶处不同

埋深处土体体积含水率随时间变化过程线见图 7。可以看出,当雨强很大时,不同 η 值方案坡顶各埋深处的体积含水率随时间变化规律相同,均随时间增加而增大。 $\eta=100$ 时体积含水率随时间变化过程曲线沿时间轴压缩后的结果;即 η 值越大,顺裂隙向渗透系数越大,土体达到饱和所需时间越短。

表 2 $\eta=10$ 时,不同时刻坡顶 ($x=20$) 各埋深处的顺裂隙方向渗透系数

Table 2 Permeability coefficient at different depths and time at top of slope ($x=20$), $\eta=10$

深度/m		0	1	2	3	4
渗透系数	3d	0.014	0.012	0.011	0.011	0.013
$/(m \cdot d^{-1})$	7d	0.022	0.023	0.025	0.028	0.034

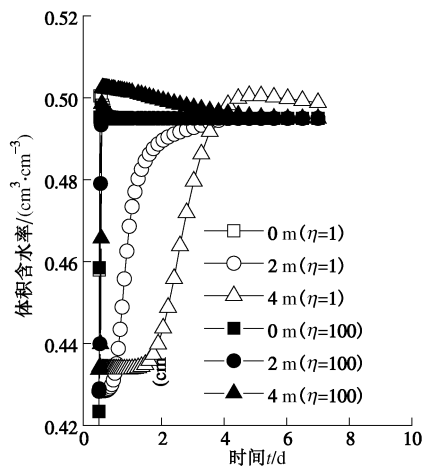


图 7 不同各向异性程度(渗透性)时坡顶 ($x=20$) 各埋深处土体体积含水率-时间曲线

Fig. 7 Distribution curves of volumetric water content vs. time at different depths at the top of slope ($x=20$) under different anisotropic degrees (permeability)

综合上述分析,裂隙渗透系数的各向异性程度对渗流的影响与雨强和渗透系数的相对大小有关。当顺裂隙向饱和和渗透系数大于雨强时,裂隙各向异性对渗透场影响较小;若雨强超过顺裂隙向饱和和渗透系数,边坡渗透场受裂隙各向异性程度影响较大,裂隙各向异性程度越高,对边坡渗流场影响也越大。

(2) 裂隙深度对边坡渗流的影响

图 8 是裂隙深度不同时,各时刻坡顶处 ($x=20$) 土体体积含水率随埋深分布情况。

可以看出,随降雨历时增加,裂隙深度范围内土体的含水率迅速增大。降雨 3 d 时,坡顶埋深 2 m 处土体含水率分别增加了 $0.029 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (裂隙深度 2 m) 和 $0.016 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (裂隙深度 4 m),同一位置,裂隙深度为 4 m 时土体含水率增加量与裂隙深度为 2 m 时相

比降低将近 44.8%。降雨历时从 3 d 增加到 7 d,坡顶埋深 2 m 处土体含水率增加量分别为 $0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (裂隙深度 2 m) 和 $0.013 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (裂隙深度 4 m)。这一结果表明,在裂隙深度范围内,经历相同降雨历时,裂隙深度越小,土体含水率变化幅度越大。

分析其原因,由于顺裂隙方向渗透系数较大,雨水会迅速入渗到达裂隙底部;而原状土渗透系数很小,水分就达裂隙底部附近区域集聚。裂隙深度越小,雨水到达裂隙底部所需时间越短,经历相同降雨历时后,裂隙区域土体水分聚集量越多,从而土体含水率变化幅度也较大。然而,需要说明的是,裂隙深度较大时,雨水能够快速入渗到深部土体,从而影响边坡较大范围的土体,因而对边坡渗流场整体影响更大。

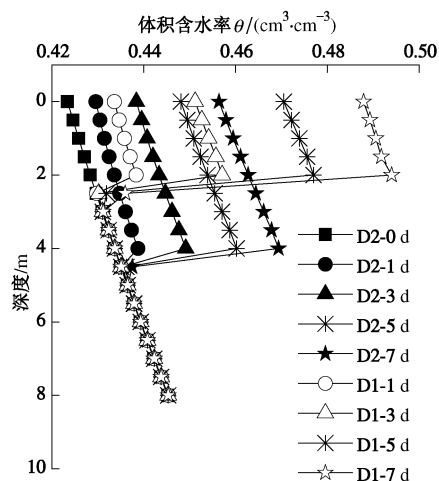


图 8 不同各向异性程度(裂隙深度)时各时刻坡顶处 ($x=20$) 土体体积含水率沿埋深分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of volumetric water content vs. depth at different time at top of slope ($x=20$) under different anisotropic degrees (fissure depth)

3.3 各向异性分布区域对边坡渗流的影响

为了比较不同各向异性分布区域对渗流场的影响,以边坡土体中为各向同性 ($A0$ 方案) 时土体含水率计算结果作为基准,整理了 $E1 \sim E3$ 方案土体含水率计算结果与基准值的差值,得到裂隙处于边坡不同位置、由于裂隙诱导各向异性所造成的土体含水率分布差异,绘制了不同时刻坡顶 ($x=20$)、坡中 ($x=30$)、坡脚 ($x=40$) 处含水率差值沿埋深分布曲线,见图 9。

从图中可以看出,埋深 1 m 范围内,坡顶处土体含水率差值最大,坡中次之,坡脚最小;埋深 1~4 m 范围内,坡中与坡脚处土体含水率差值相近,均大于坡顶处。导致这种差异的原因可能与不同位置处初始含水率以及所在位置高程有关^[11]。

此外还可以发现,1 m 深度范围内土体含水率差

值均为负, 而 1~4 m 范围内土体含水率差值为正, 超过 4 m+降雨影响后土体含水率没有变化。表明当顺裂隙向渗透系数较大时, 入渗水分快速下渗至裂隙底部, 形成水分集聚, 这与本文前面的分析一致。

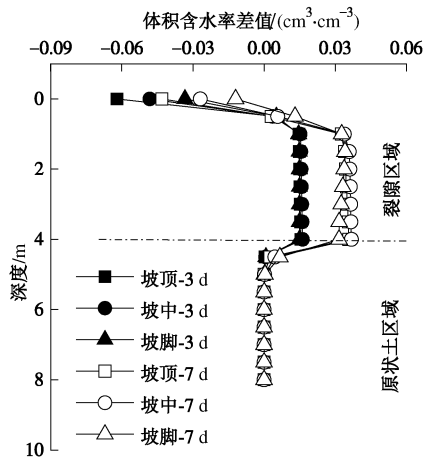


图9 不同各向异性区域时各时刻土体体积含水率差值沿埋深分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of volumetric water content difference vs. depth at different time under different anisotropic distributions

3.4 裂隙各向异性对边坡渗流影响实例分析

文献[18]中介绍了南水北调南阳现场试验段膨胀土边坡滑坡破坏实例。现场调查结果表明, 该现场试验段膨胀土裂隙极其发育, 其中长大裂隙有至少 2 组以上优势方向, 裂隙区域土体发现明显各向异性。裂隙倾向统计结果显示, 主裂隙倾向与坡面几乎平行, 即顺裂隙方向与竖向夹角约为 $50^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。现场观测表明, 降雨后吸湿区范围约为 0.5 m, 吸湿区内土体含水率增大约为 16.5%, 表明这种裂隙倾向条件下, 降雨入渗的影响范围和影响程度均较小。这与本文计算结果相吻合, 即顺裂隙方向与垂直方向夹角较大时, 裂隙各向异性对边坡的渗流影响较小。

4 结 论

本文采用数值模拟方法, 对裂隙诱导各向异性对边坡降雨入渗的影响进行了计算分析, 主要结论如下:

(1) 裂隙诱导各向异性方向、各向异性程度、各向异性分布等因素均对边坡降雨入渗有一定的影响。在边坡排水设计与稳定分析时须予以考虑。

(2) 降雨强度大于顺裂隙方向渗透系数时, 裂隙诱导各向异性的影响才会表现出来。裂隙诱导各向异性主要影响降雨初期渗流场, 随降雨历时增加, 裂隙诱导各向异性的影响逐渐减小, 长历时降雨条件下可不考虑这种影响。

(3) 经历相同降雨历时时, 裂隙深度越小, 裂隙

区域的含水率增加越多, 裂隙从 2 m 增加到 4 m, 埋深 2 m 处(位于裂隙区域)的含水率相差将近 44.8%; 而裂隙深度较大时, 雨水能够更快入渗到边坡深部, 对边坡的渗流影响范围大。

(4) 降雨入渗时, 裂隙位置不同主要影响裂隙深度范围内土体, 且影响程度与埋深有关。较浅埋深处: 坡顶>坡中>坡脚, 而较大埋深处: 坡顶<坡中≈坡脚。

参考文献:

- [1] 陈铁林, 邓 刚, 陈生水, 等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 210 - 215. (CHEN Tie-lin, DENG Gang, CHEN Sheng-shui, et al. Effects of fissures on stability of unsaturated soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 210 - 215. (in Chinese))
- [2] 袁俊平, 殷宗泽. 考虑裂隙非饱和和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟[J]. 岩土力学, 2004(10): 1581 - 1586. (YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze. Numerical model and simulation of expansive soils slope infiltration considered fissures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(10): 1581 - 1586. (in Chinese))
- [3] DAVID T. Anisotropic permeability of fractured media[J]. Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273 - 1289.
- [4] WEI L, HUDSON J A. A coupled discrete-continuum approach for modeling water flow in jointed rocks[J]. Géotechnique, 1993, 43(1): 21 - 36. DOI: 10.1680/geot.1993.43.1.21.
- [5] 丁立丰, 郭啟良, 王成虎. 工程岩体裂隙渗透性试验方法研究及应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2599 - 2604. (DING Li-feng, GUO Qi-liang, WANG Cheng-hu. Research and application of testing methods for engineering rock mass fissure permeability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2599 - 2604. (in Chinese))
- [6] 王洪涛, 王恩志. 各向异性裂隙岩体渗透系数计算方法探讨[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997(2): 49 - 53. (WANG Hong-tao, WANG En-zhi. Finite difference approach for estimation of anisotropic permeability in fractured rock mass[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1997(2): 49 - 53. (in Chinese))
- [7] 程国明, 马凤山, 王思敬, 等. 基于几何测量法的裂隙岩体渗透性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3595 - 3599. (CHENG Guo-ming, MA Feng-shan, WANG Si-jing, et al. Permeability study of fractured rock mass based on geometry measuring method[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3595 - 3599. (in Chinese))
- [8] 姚海林, 郑少河, 李文斌, 等. 降雨入渗对非饱和和膨胀土边

- 坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(7): 1034 - 1039. (YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, LI Wen-bin, et al. Parametric study on the effect of rain infiltration on stability of unsaturated expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(7): 1034 - 1039. (in Chinese))
- [9] 平 扬, 刘明智, 郑少河. 降雨入渗条件下的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **23**(增刊 1): 4478 - 4484. (PING Yang, LIU Ming-zhi, ZHENG Shao-he. Stability analysis of expansive soil slope with rainfall infiltration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **23**(S1): 4478 - 4484. (in Chinese))
- [10] 刘 平. 降雨条件下考虑裂隙的膨胀土边坡非稳定渗流数值模拟[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007. (LIU Ping. Numerical simulation of unsteady seepage of expansive soil slope considering fissure subjected to rainfall[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2007. (in Chinese))
- [11] 胡云进. 裂隙非饱和渗流试验研究及有地表入渗的裂隙岩体渗流数值分析[D]. 南京: 河海大学, 2001. (HU Yun-jin. Experimental study on unsaturated seepage flow in fracture and numerical analysis of seepage flow in fractured rock mass due to surface infiltration[D]. Nanjing: Hohai University, 2001. (in Chinese))
- [12] 刘华强, 殷宗泽. 膨胀土边坡稳定分析方法研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1545 - 1549. (LIU Hua-qiang, YIN Zong-ze. Research on analytical method of stability of expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(5): 1545 - 1549. (in Chinese))
- [13] 郑少河, 姚海林, 葛修润. 裂隙性膨胀土饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊 1): 281 - 285. (ZHENG Shao-he, YAO Hai-lin, GE Xiu-run. Analysis of saturated and unsaturated seepage of cracked expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 281 - 285. (in Chinese))
- [14] 吴珺华, 袁俊平, 杨 松. 基于滤纸法的裂隙膨胀土土水特征曲线试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, **33**(5): 61 - 64. (WU Jun-hua, YUAN Jun-ping, YANG Song. Experimental study on SWCC of expansive soil with cracks using filter paper method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, **33**(5): 61 - 64. (in Chinese))
- [15] 殷宗泽, 袁俊平, 韦 杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2155 - 2161. (YIN Zong-ze, YUAN Jun-ping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2155 - 2161. (in Chinese))
- [16] 张家俊. 干湿循环下膨胀土裂隙、体变与渗透特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. (ZHANG Jia-jun. Study of the fissures, volume change and permeability of expansive soil under wetting and drying cycles[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [17] 袁俊平, 丁 巍, 蔺彦玲, 等. 浸水历时对裂隙膨胀土渗透性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2014(1): 83 - 86. (YUAN Jun-ping, DING Wei, LIN Yan-ling, et al. Influence of soaked period on permeability of cracked expansive soil[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014(1) 83 - 86. (in Chinese))
- [18] 程展林, 李青云, 郭熙灵, 等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(10): 102 - 111. (CHENG Zhan-lin, LI Qing-yun, GUO Xi-ling, et al. Study on the Stability of expansive soil slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, **28**(10): 102 - 111. (in Chinese))