

非饱和黄土路基水分场的数值分析

王铁行

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 考虑含水率和密度影响, 给出了非饱和黄土路基水分场的计算模型, 探讨和确定了模型参数。指出非饱和黄土水体积变化系数 m_2^w 并非恒值, 不仅随含水率的变化而变化, 还明显受到干密度的影响。在含水率相同时, 密度变化引起的 m_2^w 值的变化在高含水率时比较大, 在低含水率时比较小。密度对非饱和黄土渗透系数 k_w 亦有显著影响。进一步考虑参数 k_w 、 m_2^w 和水头之间的非线性关系, 探讨了时间步长的取值问题。然后, 应用编制的有限元程序, 模拟不利降雨条件, 对黄土路堤入渗过程进行了计算分析。揭示出黄土路基湿软区随时间的增大过程, 湿软区域大小受到土体密实度的显著影响, 密度较小路基湿软区域大小明显大于密实度较大的路基。比较大的湿软区域易导致路基路面病害。增加路基土体密实度, 对防止雨水入渗危害也是有利的。

关键词: 非饱和土; 黄土; 渗流; 路基; 数值分析

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)01-0041-05

作者简介: 王铁行(1968-), 男, 博士, 教授, 从事黄土、冻土工程理论和实践方法等方面研究。E-mail: wangtx@xauat.edu.cn。

Moisture migration in unsaturated loess subgrade

WANG Tie-hang

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Taking the soil density and water content into account, a numerical model of moisture migration in unsaturated loess subgrade was given, and parameters of the model were obtained. It was put forward that the coefficient of water volume change m_2^w was not only related to moisture content, but also to soil density. The change of m_2^w resulted from density change was large in loess with more moisture content, and is was small in that with less moisture content. Coefficient of permeability k_w was also related to the loess density. Based on analysis of nonlinear relationship between k_w , m_2^w and water potential, time interval was got. Furthermore, by simulating unfavorable rainfall, moisture migration in loess subgrade was studied. The slaking scope in subgrade by seepage was gradually enlarged. The slaked area was related to the loess density, small density of subgrade loess resulted in large slaking scope. Eonstructing subgrade in loess with large density was advantageous to avoid seepage damage.

Key words: unsaturated soil; loess; permeability; subgrade; numerical analysis

0 前言

黄土路基病害产生的原因很多, 其中水是一个重要的影响因素。黄土地区每年的降水很不均匀。一般来说夏秋多雨、冬春干旱, 这就造成了黄土含水率往往随季节呈动态变化。由于黄土路基周边边界条件的差异, 黄土路基中含水率的变化并不是均匀的。黄土含水率对土体强度有显著的影响^[1-3], 因此, 含水率不均匀变化可导致强度不均匀, 从而使变形不均匀, 不均匀变形可导致黄土路基出现一系列的病害。因此, 对黄土路基含水率随气候的变化过程进行研究是必要的。有关黄土路基含水率随气候变化的文献尚比较少。基于此, 参考相关文献^[4-9], 本文基于非饱和土水分迁

移模型, 对非饱和黄土路基水分场变化问题进行研究, 重点对非饱和黄土水分迁移参数进行探讨, 建立适用于非饱和黄土路基水分场计算的数值模型, 实现对黄土路基水分场变化过程的计算, 为进一步研究路基水分场变化引起的变形和稳定性问题提供基础资料。

1 计算模型及参数

由于气候变化造成路基中的含水率分布不断随时间变化, 因此, 黄土路基中的水分场是非稳态的。路

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50308024)

收稿日期: 2007-01-19

基问题可简化为二维问题, 二维非稳态渗流问题的有限元方程为

$$[D]\{h\} + [E]\left\{\frac{\partial h}{\partial t}\right\} = \{F\}, \quad (1)$$

式中, $[D]$ 为刚度矩阵, $\{F\}$ 为反映边界条件的流量矢量列阵, $[E]$ 为容量矩阵, $\{h\}$ 为水头列阵。

采用向后差分格式, 式(1)即为

$$([D] + \frac{[E]}{\Delta t})\{h\}_{t+\Delta t} = \frac{[E]}{\Delta t}\{h\}_t + \{F\}, \quad (2)$$

式中, Δt 为时间步长。

刚度矩阵元素是节点坐标和渗透系数 k_w 的函数, 容量矩阵元素是单元面积和系数 m_2^w 的函数, m_2^w 是基质吸力变化引起的水的体积变化系数。对计算区域进行网格划分后, 单元面积和节点坐标即确定。

对降雨入渗问题, 主要考虑重力势和基质吸力对水分迁移的影响, 水头 h 由重力水头和基质吸力水头 h_u 组成。对蒸发问题, 需考虑温度影响, 水头 h 由重力水头、温度水头和基质吸力水头 h_u 组成。基质吸力 $u_a - u_w$ 是孔隙气压力与孔隙水压力的差值, 其值随土中含水率的减小而增大, 饱和土的基质吸力等于零, 基质吸力一般通过实测得到, 知道基质吸力 $u_a - u_w$ 后便计算吸力水头:

$$h_u = \frac{u_a - u_w}{\rho_w g}. \quad (3)$$

基质吸力与含水率关系曲线常描述为

$$\theta(h_u) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h_u|^n]^m}, \quad (4)$$

式中, θ 为体积含水率, θ_r 为残留体积含水率, θ_s 为准饱和体积含水率, α , m , n 为系数, $m = 1 - 1/n$ 。

基质吸力和土体密度和温度有关, 笔者实测得到了考虑密度和温度影响的基质吸力与含水率关系。研究夏秋季节降雨入渗问题时, 可不考虑温度变化影响, 温度取定值, 但考虑密度变化影响。考虑密度变化影响, 得到式(4)参数如下:

$$\theta_r = 0.36\rho_d - 0.38, \quad (5)$$

$$\theta_s = 1 - 0.38\rho_d, \quad (6)$$

$$\alpha = e^{7.12 - 7.51\rho_d}, \quad (7)$$

$$n = 0.36 + 0.41\rho_d + 0.22\rho_d^2, \quad (8)$$

式中, ρ_d 为干密度 (g/cm^3)。

基于式(4), 可确定水的体积变化系数:

$$m_2^w = -\frac{d\theta}{d(u_a - u_w)} = -\frac{1}{\rho_w g} \frac{d\theta}{dh_u}, \quad (9)$$

将式(4)代入式(9), 得

$$m_2^w = mn(\theta_s - \theta_r)\alpha \frac{|\alpha h_u|^{n-1}}{\rho_w g(1 + |\alpha h_u|^n)^{m+1}}. \quad (10)$$

将式(5)~(8)代入式(10), 计算得到黄土干

密度分别为 1.3, 1.4, 1.5 和 1.6 g/cm^3 时体积变化系数 m_2^w 与体积含水率 θ 关系曲线, 如图 1 所示。从图中可以看出, 因 m_2^w 是基质吸力的函数, 而基质吸力与含水率密切相关, m_2^w 随体积含水率 θ 的变化而变化。除此之外, m_2^w 还明显受到干密度的影响, 三种密度时体积变化系数 m_2^w 与体积含水率 θ 关系曲线的差异性明显表示了这一点。比较几种密度计算结果可以发现, 在相同基质吸力条件下, 密度变化引起的 m_2^w 值的变化在低基质吸力(饱和度较大)时比较大, 在高基质吸力时比较小。

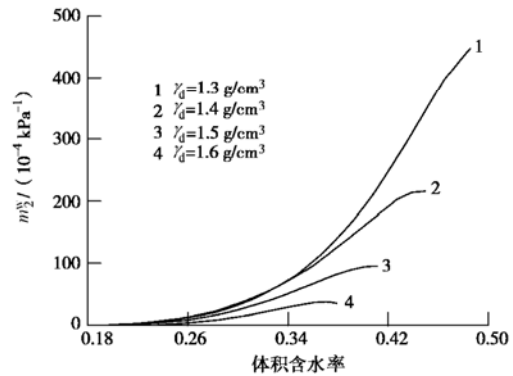


图 1 体积变化系数 m_2^w 与体积含水率关系曲线

Fig. 1 Coefficient of water volume change versus water content

基于水平土柱入渗法测试结果, 考虑密度影响, 得到非饱和黄土水分扩散率与含水率的关系:

$$D = e^{[a\theta^2 + b\theta + 5.7\rho_d - 12]}, \quad (11)$$

式中, a , b 为系数, $a = 84.5\rho_d - 57.1$, $b = 61.8 - 56\rho_d$ 。

非饱和土的渗透性系数等于比水容和扩散率的乘积, 比水容即 m_2^w 与水重度的乘积。基于式(10)、(11)确定系数 m_2^w 和扩散率后, 便可进一步确定非饱和黄土的渗透性系数:

$$k_w = \rho_w g m_2^w D. \quad (12)$$

根据式(12), 计算得到干密度分别为 1.3, 1.4, 1.5 和 1.6 g/cm^3 时非饱和黄土渗透系数与体积含水率 θ 关系曲线, 如图 2 所示。从图 2 可以看出, 非饱和黄土含水率的变化可导致其渗透系数产生几个数量级的变化。渗透系数除与含水率有关外, 还与密度有关, 密度对渗透系数有显著影响。计算曲线出现的波浪变化, 是由于采用了量级坐标, 采用笛卡尔坐标则不会出现这种波浪变化。采用量级坐标是为了使各个量级数值均在坐标中得到反映。

求解方程(2)时, 因为计算参数 k_w 和 m_2^w 均是含水率或基质吸力的函数, 而基质吸力又与各节点处的水头有关。因此, 必须用迭代法求解, 先将初始水头(含水率)代入式(10)、(12)计算参数 k_w 和 m_2^w , 以此求解各节点的水头值 $\{h\}$, 进而再按下式求解基

质吸力值:

$$\{u_a - u_w\} = (\{h\} - \{h_g\})g\rho_w \quad (13)$$

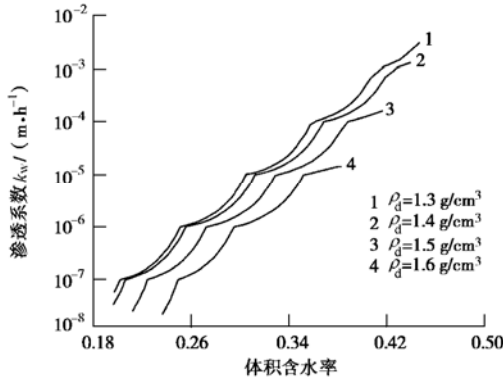


图2 非饱和黄土渗透系数与体积含水率关系曲线

Fig. 2 Water coefficient of permeability versus water content

然后根据实测的基质吸力与渗透系数关系曲线, 依据每一时间步长初始水头和计算水头的平均值, 调整计算参数 k_w 和 m_2^w , 进行迭代计算, 直到收敛为止。为了保证收敛及加速收敛速度, 采用低松弛因子 η , 调整为

$$h^{(n+1)} = \eta \overline{h^{n+1}} + (1 - \eta)h^{(n)} \quad (14)$$

式中, η 为低松弛因子, η 值小于 1, 而且随迭代次数的增加而减小, n 为迭代次数, $\overline{h^{n+1}}$ 为第 $n+1$ 次迭代计算值, $h^{(n+1)}$ 为调整值。根据调整值再求水头, 重复上述步骤, 直到在相继的两次迭代中, 各个节点的水头之差均小于事先规定的容许值。

由于计算参数 k_w 和 m_2^w 均是水头的函数, 参数 k_w , m_2^w 和水头之间呈现非线性关系。迭代计算时依据每一时间步长 Δt 初始水头和计算水头的平均值, 调整参数 k_w 和 m_2^w 进行计算。若时间步长 Δt 较大, 依据 Δt 时段水头平均值得到的 k_w 和 m_2^w 将难以反映 Δt 时段的渗流特征, 从而导致比较大的计算误差。因此, 时间步长 Δt 的选取应适当。从保证计算参数 k_w 和 m_2^w 的准确度来说, 时间步长 Δt 越小越好。

时间步长 Δt 具体取值宜通过试算确定。若需计算经过时间 t 的水头分布, 先分别以不同时间步长 Δt 将时间 t 划分为若干时间段, 分别计算时间 t 的水头分布。然后比较采用不同时间步长 Δt 计算结果的差异性, 即可确定适宜的时间步长 Δt 。本文以黄土路基为例进行了试算, 计算某断面经过 200 h 的水头分布, 取时间步长 Δt 分别为 0.1, 1, 10, 100 h, 将时间 200 h 分别划分为 2000, 200, 20, 2 个时间段, 分别计算经过 200 h 的水头分布。计算结果如图 3 所示。从图中可以看出, 当时间步长 Δt 比较大时, 明显减缓了水分迁移进程, 时间步长 Δt 取 100 h 时的水头分布明显滞后于时间步长 Δt 取 0.1, 1 和 10 h 的水头分布,

产生比较大的计算误差。但当时间步长 Δt 分别取 0.1 h 和 1 h 时的水头分布几乎相同, 表明当时间步长 Δt 小于 1 h 时, 时间步长选取导致的计算误差已经比较小。因此, 本文计算时取时间步长 Δt 为 1 h。

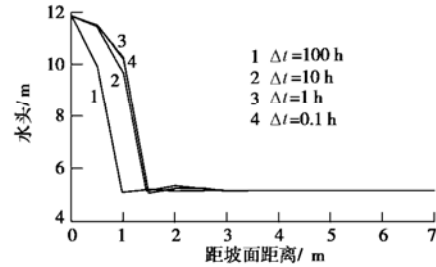


图3 不同时间步长计算结果

Fig. 3 Effect of time interval

求得某一时刻各个节点的水头值后, 便可根据式 (13) 确定各个节点的基质吸力值, 再依据基质吸力与含水率关系曲线, 确定各个节点的含水率, 即确定到该时刻的水份迁移结果。基于体积含水率 θ 可得

$$w = \frac{\theta \rho_w}{\rho_d} \quad (15)$$

基于前述计算模型, 开发了有限元程序。程序计算流程如图 4 所示。

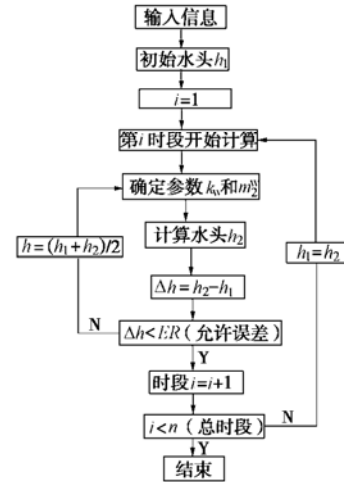


图4 计算流程图

Fig. 4 Calculation flow

2 计算结果分析

首先对本文有限元程序计算结果的可靠性进行了验证。以文献[6]非饱和土土坝渗流为例进行计算, 该文献算例虽然是非饱和土领域的经典算例, 但对参数的选取存在不妥, 例如将水体积变化系数 m_2^w 取为恒值 0.001 kPa^{-1} , 并非合理。应用本文程序进行验证计算时, 为了便于比较, 代入文献参数计算, 计算结果与文献是一致的, 说明了本文计算程序是可靠的。与文献相同的计算结果此处不再罗列。

然后,应用本程序及试验所得参数,即可对非饱和黄土渗流问题进行计算分析,对计算参数的探讨为计算分析奠定了基础,对密度的考虑拓宽了方法的应用范围。黄土路基土体密度所处范围较大,特别是黄土路堑,其原状黄土孔隙比可处于 0.7~1.2 范围,相应干密度范围为 $1.2\sim 1.6\text{ g/cm}^3$ 。黄土路堤填土密度亦受压实质量和压实条件影响。考虑密度影响,可便于分析不同密度黄土路基水分迁移进程和水危害的差异性。该方面研究有待进一步进行,此处仅给出某断面黄土路堤在降雨入渗条件下的水分迁移结果。

取黄土路堤高度 4 m,路面宽度 10 m,边坡坡度 1:1.5。路基坡角以外取 10 m,天然地面以下深度取 10 m。由于对称条件,沿路基中线取一半区域进行计算分析,计算区域网格划分如图 5 所示。取路面为不透水边界,路肩、坡面、坡角以外天然地表为雨水入渗边界,左右边界均为零流量边界(因路基和天然土层的对称性),下边界因埋藏较深亦取为零流量边界。黄土干密度取为 1.5 g/cm^3 ,初始含水率 $w=18\%$ 。为了便于比较,亦给出了干密度为 1.5 g/cm^3 黄土路基计算结果,初始含水率仍取 $w=18\%$ 。模拟不利连阴雨天气,连续降雨 20 d,降雨停止后 10 d 内为阴天。降雨期间入渗边界始终处于饱和状态,边界节点基质吸水水头等于 0,于是取入渗边界水头等于位置水头(第一类边界条件)。降雨停止后,入渗边界即变为蒸发边界,但经过多日降雨,空气湿度大,阴天边界蒸发量小,可取其为零流量边界。计算得到从降雨开始 30 日内的路基水分场变化过程,如图 6 所示。

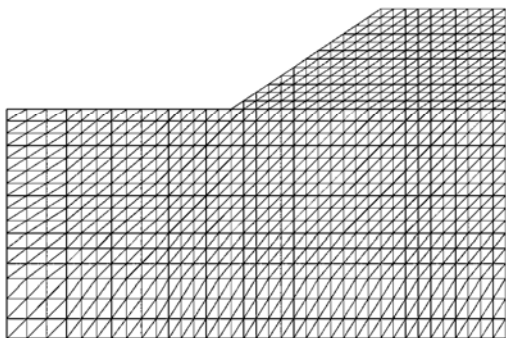


图 5 计算区域网格划分

Fig. 5 Two-dimensional element of subgrade

图 6 给出了初始含水率 $w=18\%$ 的黄土路基,自降雨开始,经过不同时间路基土体增湿后含水率 $w>24\%$ 的区域(湿软区)。工程实践证明,黄土含水率 $w>24\%$ 后,其塑性和变形能力增加,挤密桩地基中的缩孔现象是明显的例证。图 6 表明,随着时间的延长,湿软区域明显增大。湿软区域大小受到土体密实度的显著影响,密实度越小,雨水入渗水分迁移进程越快。其

他条件相同时,密度较小路基湿软区域大小明显大于密实度较大的路基。比较大的湿软区域易导致路基路面出现不均匀变形和纵向裂缝病害,甚至会导致路基塌散。故增加路基土体密实度,对防止雨水入渗危害也是有利的。

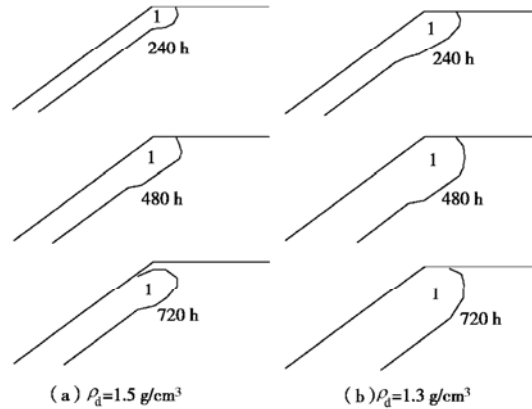


图 6 路基含水率 $w>24\%$ 区域

Fig. 6 Distribution of water content $w>24\%$

图 7 给出了干密度为 1.5 g/cm^3 黄土路基路肩下含水率分布的变化过程。降雨期,雨水逐渐下渗,从上向下土体含水率逐渐增加。降雨停止后,表面已无雨水补给,上部土体水分在重力作用下向下扩散,导致上部土体含水率逐渐减小,下部土体继续经历浸湿过程,其含水率逐渐增加。

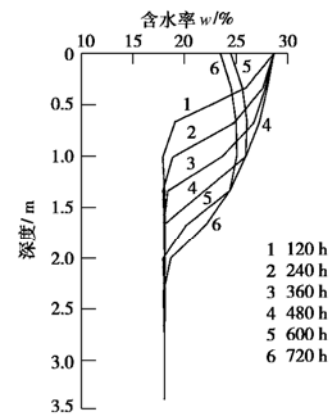


图 7 路肩下含水率变化曲线

Fig. 7 Water content change below subgrade shoulder

3 结 语

给出了非饱和黄土路基水分场的计算模型,考虑含水率和密度影响,探讨和确定了模型参数。指出非饱和黄土水体积变化系数 m_2^w 并非恒值,不仅随含水率的变化而变化,还明显受到干密度的影响。在含水率相同时,密度变化引起的 m_2^w 值的变化在高含水率时比较大,在低含水率时比较小。密度对非饱和黄土

渗透系数 k_w 亦有显著影响。进一步考虑参数 k_w 、 m_2^w 和水头之间的非线性关系,探讨了时间步长的取值问题。然后,应用编制的有限元程序,模拟不利降雨条件,对黄土路堤入渗过程进行了计算分析。揭示出黄土路基湿软区随时间的增大过程,湿软区域大小受到土体密实度的显著影响,密度较小路基湿软区域大小明显大于密实度较大的路基。比较大的湿软区域易导致路基路面出现不均匀变形和纵向裂缝病害,甚至会导致路基塌散。故增加路基土体密实度,对防止雨水入渗危害也是有利的。黄土路基在不利降雨条件下含水率分布的变化过程,是进一步分析黄土路基强度和变形问题的基础。

参考文献:

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋势[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 1 - 13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 1 - 13. (in Chinese))
- [2] 党进谦, 李 靖. 含水率对非饱和黄土强度的影响[J]. 西北农业大学学报, 1996, **24**(1): 56 - 60. (DANG Jin-qian, LI Jing. Study on strength of loess considering water content effect[J]. Acta Univ Agric Boreali Occidentalis, 1996, **24**(1): 56 - 60. (in Chinese))
- [3] 张伯平, 袁海智, 王 力. 含水率对黄土结构强度影响的定量分析[J]. 西北农业大学学报, 1994, **22**(1): 54 - 60. (ZHANG Bo-ping, YUAN Hai-zhi, WANG Li. Study on construction strength of loess considering water content effect[J]. Acta Univ Agric Boreali occidentalis, 1994, **22**(1): 54 - 60. (in Chinese))
- [4] 郭择德, 程金茹, 向井雅之. 黄土包气带土壤水特征曲线研究[J]. 辐射防护, 2000, **20**(1/2): 101 - 106. (GUO Ze-de, CHENG Jin-ru, MASAYUKI Mukai. Study on soil-water retention curves for loess aerated zone[J]. Radiation Protection, 2000, **20**(1/2): 101 - 106. (in Chinese))
- [5] SIMMS P H, YANFUL E K. Estimation of soil-water characteristic curve of clayey till using measured pore-size distributions[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, **130**(8): 847 - 854.
- [6] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soil[M]. CHEN Zhong-yi, ZHANG Zai-ming, CHEN Yu-jiong, translators. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.
- [7] 王铁行, 胡长顺. 冻土路基水份迁移数值模型[J]. 中国公路学报, 2001, **14**(4): 5 - 8. (WANG Tie-hang, HU Chang-shun. A numerical model of moisture migration for frozen soil subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport. 2001, **14**(4): 5 - 8. (in Chinese))
- [8] 景宏君. 黄土路基积水入渗规律研究[J]. 公路交通科技, 2004, **21**(4): 40 - 42. (JING Hong-jun. Study on water infiltration pattern into loess subgrade[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, **21**(4): 40 - 42. (in Chinese))
- [9] 周 勤, 赵发章, 张洪亮. 压实度和含水率对于压实黄土力学特性的影响[J]. 公路, 2006(1): 67 - 70. (ZHOU Qin, ZHAO Fa-zhang, ZHANG Hong-liang. Influence of compactness and water content on mechanical properties of compacted loess[J]. Highway, 2006(1): 67 - 70. (in Chinese))