

降低滑坡地下水位的充气截排水法最佳充气压力研究

余文飞, 孙红月, 沈佳轶, 吴梦萍
(浙江大学 海洋学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 充气截排水技术拟在潜在滑坡后缘或长边坡坡体上进行充气, 在后缘来水路径上形成非饱和区, 截断后缘汇水或减少后缘水流向坡体内的入渗, 从而降低坡体内的地下水位, 提高边坡的稳定性。为了探讨充气气压对充气截排水效果的影响, 通过二维数值模型对不同气压下坡体水位变化进行分析, 并通过物理模型试验对数值模拟结果进行验证, 得出如下结论: 在坡体中充气能显著降低坡体地下水位, 截流减渗效果明显; 对于特定坡体, 存在与之对应的截排水起始充气压力和最佳充气压力; 只有当充气压力大于截排水起始充气压力时, 充气截排水才有效果, 坡体前缘水位才会下降; 当充气压力介于起始充气压力和最佳充气压力之间时, 随着气压的增大, 坡体前缘水位不断降低, 充气截排水效果随气压增大而增大; 当充气压力大于最佳充气压力时, 充气截排水效果随气压增大而减小。

关键词: 边坡工程; 充气截排水; 数值模拟; 模型试验; 充气压力; 水位

中图分类号: P 64

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)04 - 0890 - 09

Research on optimal air filling pressure for groundwater blocking and draining in slopes

YU Wenfei, SUN Hongyue, SHEN Jiayi, WU Mengping
(Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: The method of drainage cutoff by air filling is a new approach to improve the stability of slopes. Injecting the compressed air into the saturated soil slope forms an unsaturated zone which can prevent the water entering into the critical failure surface of the slope. In this study, laboratory experiment and numerical simulation were carried out to investigate the relationship between the air pressure and interception effect. Results show that the air filling has remarkable effect on water flow interception. For a given slope, there exist a start-up pressure and an optimal pressure of air filling. When the air pressure is greater than the start-up value, the water table can be lowered. When the pressure ranges between the start-up and optimal values, the water table decreases with the increase of air pressure. However, when the air pressure is higher than the optimal value, the water table increases with the increase of air pressure.

Key words: slope engineering; water interception with compressed air; numerical simulation; physical model; aerated pressure; water table

收稿日期: 2016 - 05 - 26; **修回日期:** 2016 - 08 - 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372277); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK10B06); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014QNA4028)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41372277), National Key Technology R&D Program during the 12th Five-Year Plan Period(Grant No. 2012BAK10B06) and Fundamental Research Funds for the Central Universities(Grant No. 2014QNA4028)

作者简介: 余文飞(1993 -), 男, 2014年毕业于安徽理工大学水文与水资源工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事地质灾害防治方面的研究工作。E-mail: 21434060@zju.edu.cn。通讯作者: 孙红月(1970 -), 女, 博士, 现任教授。E-mail: shy@zju.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0562

1 引言

滑坡灾害大多数发生在雨季，降雨是导致滑坡的主要因素^[1-3]。降雨诱发型滑坡的启动时间主要由前期降雨积累程度和降雨强度决定^[4-6]，其破坏特征主要由岩土渗透率分布决定^[7-8]。降雨诱发型滑坡具有滑动前变形不明显、变形滑动迅速、很难及时准确预测等特点^[9]。

对于降雨诱发型滑坡，快速降低坡体地下水位是滑坡治理和工程抢险过程中必须要解决的难题。工程中常用的截排水措施主要包括截水沟、排水孔和地下排水洞等^[10]，虽然这些技术的运用能取得一定截排水效果，但工程的实施需要较长的工期，而多数滑坡的治理总是在出现了明显变形破坏的情况下实施的，如果在治理期间出现明显的强降雨过程，就可能出现治理工程失败。也就是说，许多滑坡治理是一个抢险过程，如降雨诱发的杭新景高速公路边坡变形破坏，采用了占路压脚的临时抢险措施。因此，对降雨诱发型滑坡，需要一种能快速截排水且施工简单的排水方法。

土体是由水-气-固三相体构成的复杂系统，土体中气和水的分布对土的渗透性影响显著^[11-14]。依据非饱和土理论^[15]和土壤学理论^[16]，土中的气体对土中水流入渗有阻碍作用，且土体的饱和度越小，渗透系数越低。依据这一理念，刘长殿等^[17-19]提出充气截排水技术。该技术拟在潜在滑坡后缘或长边坡坡体上充入高压气体，在后缘来水路径上形成非饱和截水帷幕，从而减少坡体后缘向潜在滑坡区入渗量，达到降低潜在滑坡区地下水位、提高坡体稳定性的效果。

目前，采用高压气体改变岩土体中气水分布的技术在地下储气库的建造和地下水位以下压气隧道法施工^[20-22]中已有较成熟应用，但边坡排水工程中以气驱水为理论基础的充气截排水技术尚处于理论和方法体系的构建阶段，许多基础性问题亟待解决。刘长殿等^[17]通过圆桶物理模型试验表明，向圆柱土体中充气可以显著减缓湿润锋的推进并降低入渗率。杜丽丽等^[18-19]通过圆桶物理模型试验表明，向土体中充气的截水减渗效果明显；并通过建立边坡气水两相流数值模型，提出充气截排水技术存在启动压差，即能达到充气排水能力的最小气压力；探究了充气截排水效果与充气气压、土体渗透系数、土体孔隙率之间的关系。杜丽丽^[23]通过小型边坡物

理模型试验对坡体充气截排水构想的可行性进行研究，结果表明，控制充气气压 $P = 8 \text{ kPa}$ 条件下，在坡体中实施充气截水效果明显，减渗率可达 40%，且停止充气后土体中存在的封闭气体仍有一定程度截留减渗作用；试验还表明气压过大会破坏充气孔周围土体，导致渗流量增大，从而使截排水失效，甚至影响边坡的稳定性。

由以上研究可知，要想达到较好的截排水效果，还需合理控制气压大小，并非气压越大截排水效果越好。当气压较大时，气驱水速度加快，气体在较短时间形成了逸出坡体的排泄通道。由于气体的流动性较强，当气体形成较多固定排泄通道时，充气孔周围土体的封气性降低，土体中无法形成较大面积的非饱和区，所以充气截排水的效果变差。另外，当气体压力过大时，还会造成充气孔周围土体结构破坏，气体会沿着土体裂缝逸出，截排水效果会进一步降低。因此，探究截排水效果随充气气压的变化规律和寻找使截排水效果最佳的充气压力对于充气截排水技术十分关键。本研究设计了物理模型试验，对坡体水位进行监测，并与数值模拟相结合，寻找适合于特定物理模型的最佳充气压力。

2 充气截排水模型试验

2.1 模型槽和充气设备

充气截排水物理模型试验在小型钢化玻璃模型槽中进行，模型槽由长 3 m、宽 0.4 m、高 0.8 m 的透明钢化玻璃制成，图 1 为模型试验示意图。模型槽后侧每隔 0.1 m 高度间距设有 7 个排水孔，用于控制坡体后缘入渗水位。模型槽坡前缘(设有 2 个排水孔，用于及时排出坡体中渗出的水量。模型槽后侧为碎石堆砌区，碎石区主要是用于储水，通过往碎石区注水并将多余的水通过后侧的排水孔排出，就可以控制坡体后侧的水位恒定。模型槽内的坡体由砂土分层压实而成，坡体内埋有 1 根充气管和 4

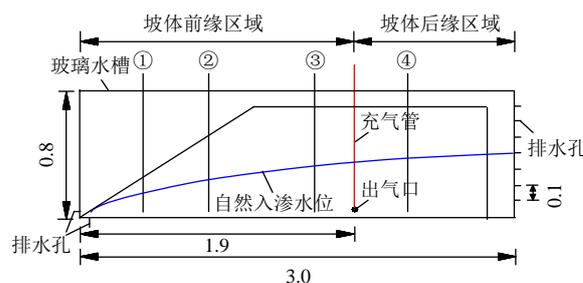


图 1 边坡模型示意图(单位: m)

Fig.1 Sketch of slope model (unit: m)

根水位监测管。充气管埋设在距离模型槽坡前缘 $X = 1.9\text{ m}$ 、距离底部 $H = 0.05\text{ m}$ 的位置。①, ②, ③, ④四根水位监测管依次布置在距离模型槽 $X = 0.4, 0.8, 1.7, 2.2\text{ m}$ 处, 且距离模型槽坡前缘底部 $H = 0.05\text{ m}$ 的位置。图 2 为边坡物理模型实物图。表 1 为本次物理模拟试验采用的样本材料, 表 2 为相应的模型材料的经验参数取值。

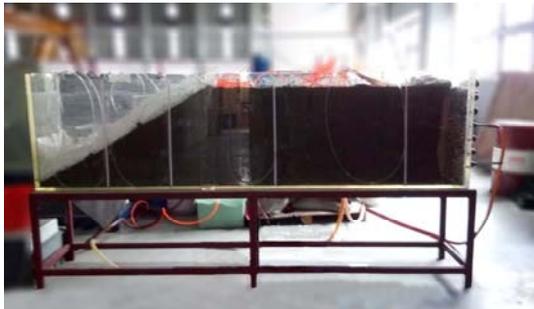


图 2 边坡物理模型

Fig.2 Physical model of slope

表 1 模型材料颗粒级配

Table 1 Particles size grading of model material

颗粒直径/mm	含量/%
>2.000	0.5
0.500~2.000	1.0
0.250~0.500	2.0
0.075~0.25	94.0
<0.075	2.5

表 2 物理模拟材料参数

Table 2 Parameters of physical model material

透水系数 $k/(m \cdot s^{-1})$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa
1.2×10^{-5}	32.0	2.0

充气设备由空气压缩机和稳压阀组成。空气压缩机为试验持续提供高压气体, 但由于空气压缩机在一个工作周期内的输出气压波动幅度较大, 会对试验造成较大误差, 所以增加了一个调压阀装置。将空气压缩机的出气口通过软管与调压阀的进口相连, 通过调节调压阀的仪表盘指针将气体转换至试验需要的气压, 然后通过调压阀出口与充气管相连, 将相对稳定的气压充入坡体。

2.2 试验方法

充气截排水试验通过空气压缩机和调压阀向钢化玻璃模型槽内的坡体中充气, 通过改变充气压力并记录充气过程中水位监测管的水位变化, 研究充气对坡体渗流水位的影响, 探究坡体的最佳充气压

力。

试验过程中, 后侧碎石堆砌区的水位始终控制在 $H = 0.4\text{ m}$, 充气压力控制在 $P = 0$ (自然入渗)~ 14 kPa , 每增加 2 kPa 增设一组试验。

为保证坡体在正式试验时已达到稳定状态, 需模拟自然状态下降雨前后的坡体渗流状态, 对坡体模型进行预处理。其处理步骤如下: 第 1 步: 将坡体模型堆好后, 让其进行自然沉降 7 d ; 第 2 步: 打开 $H = 0.6\text{ m}$ 的出水孔, 通过深井自吸泵向坡体后侧碎石堆砌区注水, 当水流漫过 $H = 0.6\text{ m}$ 的排水孔时, 多余的水会从该排水孔排出, 从而使得坡体后缘的水位能稳定在 $H = 0.6\text{ m}$ 。让坡体在 $H = 0.6\text{ m}$ 水头的状态下进行为期 7 d 的自然入渗; 第 3 步: 关闭深井自吸泵, 让坡体进行为期 7 d 的自然疏干和压密; 第 4 步: 重复第 2~3 步, 共 3 次, 使坡体在进行试验之前尽可能达到稳定状态, 然后再进行充气截排水试验。

试验步骤如下: 第 5 步: 将后侧水头调至 $H = 0.4\text{ m}$, 每隔 4 h 记录一次水位, 直至连通管①~④的水位稳定不变, 则判断其自然入渗已经稳定。第 6 步: 打开空气压缩机, 将调压阀的输出气压调至 $P = 2\text{ kPa}$, 每隔 4 h 记录一次连通管水位, 直到水位和流量不再继续下降为止, 则判断充气条件下坡体水位已经稳定; 第 7 步: 关闭空气压缩机和水泵, 让坡体在自然状态下疏干, 静置 7 d , 等待下一组试验。这样, 就完成了定水头条件下 $P = 2\text{ kPa}$ 的充气截排水试验。第 8 步: 将气压升高 2 kPa , 重复第 5~7 步操作, 完成 $P = 4\text{ kPa}$ 气压下的充气截排水试验。第 9 步: 重复第 8 步操作, 可以分别完成 $P = 6, 8, 10, 12$ 和 14 kPa 条件下的充气截排水试验。这样, 就完成了 $H = 0.4\text{ m}$, $P = 0 \sim 14\text{ kPa}$ 条件下的充气截排水模型试验。试验流程如图 3 所示。

3 试验数据分析

充气截排水物理模型试验主要通过读取①~④连通管水位来监测各气压条件下坡体渗流情况, 通过各连通管水位的降幅来反映各气压条件下充气截排水效果, 并确定适合于本物理模型坡体的最佳充气截排水气压。

图 4 为试验过程中各气压条件下水位的变化情况。水位监测管①位于 $X = 0.4\text{ m}$ 处, 水位监测管②位于 $X = 0.8\text{ m}$ 处, 水位监测管④位于 $X = 2.2\text{ m}$ 处。①和②位于充气管的左侧, 水位具有相同的变化规

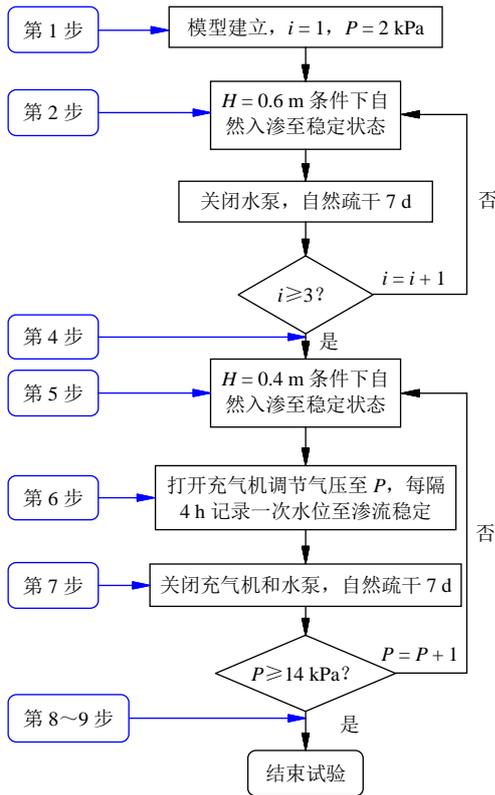
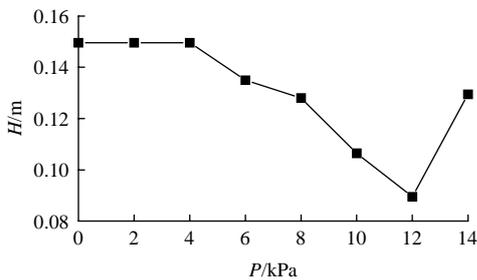
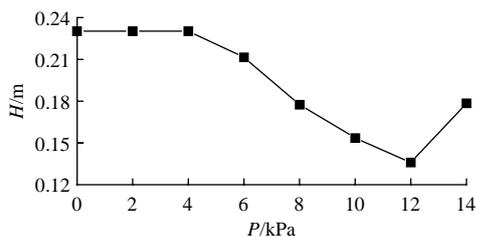


图 3 充气截排水试验流程
Fig.3 Flow chart of the physical model experiment

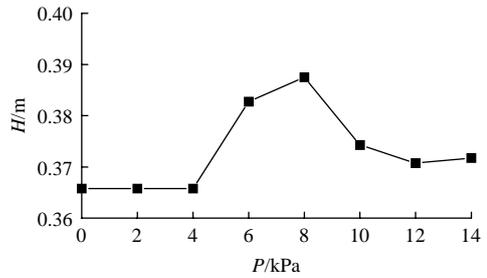
律。当 $P = 2$ 和 4 kPa 时，①，②监测管的水位等于自然入渗($P = 0$ kPa)水位，说明这 2 个气压条件下不能达到充气截排水效果。当 $P = 6 \sim 12$ kPa 时，①和②监测管水位随着气压的增大而降低。当 $P = 6$ kPa 时，①和②监测管水位相对于自然入渗水位分别下降了 9.8%和 8.2%。当 $P = 12$ kPa 时，①和②监测管水位相对于自然入渗水位分别下降了 40.2%



(a) $X = 0.4$ m



(b) $X = 0.8$ m



(c) $X = 2.2$ m

图 4 不同气压条件下坡体水位变化
Fig.4 Water level variation under different air pressure conditions

和 40.9%。当 $P = 14$ kPa 时，①，②监测管水位相对于 $P = 12$ kPa 时的水位要高，相对于自然入渗状态下的水位分别下降了 13.4%和 22.5%。水位监测管④位于充气管的右侧，当 $P = 2$ 和 4 kPa 时，④监测管的水位等于自然入渗($P = 0$ kPa)水位，气压没有对水位造成影响。当 $P = 6 \sim 14$ kPa 时，④监测管的水位均要高于自然入渗状态下的水位，例如 $P = 6$ 和 14 kPa 时水位相对于自然入渗水位分别上升了 4.6%和 1.6%。

根据试验得到的水位对坡体进行稳定性分析，坡体滑动面为同一指定滑动面。各气压条件下进行稳定性分析得到的稳定性系数如图 5 所示。自然入渗状态下指定滑动面的稳定性系数为 1.230， $P = 6, 8, 10, 12$ 和 14 kPa 条件下的稳定性系数相对于自然入渗状态下分别上升了 2.76%，6.02%，9.19%，11.22%和 5.85%。由稳定性系数随气压的变化可知，当 $P = 6 \sim 12$ kPa，稳定性系数随充气压力增大而增大；当 $P = 14$ kPa 时，相对于 $P = 12$ kPa 条件下的稳定性系数反而下降了 5.37%。稳定性系数随气压的变化与坡体水位随气压的变化具有一致性，水位下降越多，坡体稳定性系数越大。

通过对①，②，④水位监测管数据的上述分析可知，充气截排水技术能使坡体水位降低，具有截流减渗、提高边坡稳定性的作用。由 $P = 2$ 和 4 kPa 时的水位变化特征可知，当充气压力较小时，充气截排水没有效果。在土壤自然入渗研究中，许多学者认为土中气体驱水逸出地表的突破压力 H_b 满足关系式^[24-25]： $H_b = h_0 + z_{\min} + h_{ab}$ ，其中： h_0 为土表水头， z_{\min} 为最小的传导层深度， h_{ab} 为土的进气值。土中气体要排开孔隙中的地下水，气体必须克服一定的静水压力和毛细孔压力(土的进气值 h_{ab})。只有当 $P \geq H_b$ 时，充气排水现象才会发生。所以充气截排水存在起始气压，即能达到截排水效果的最

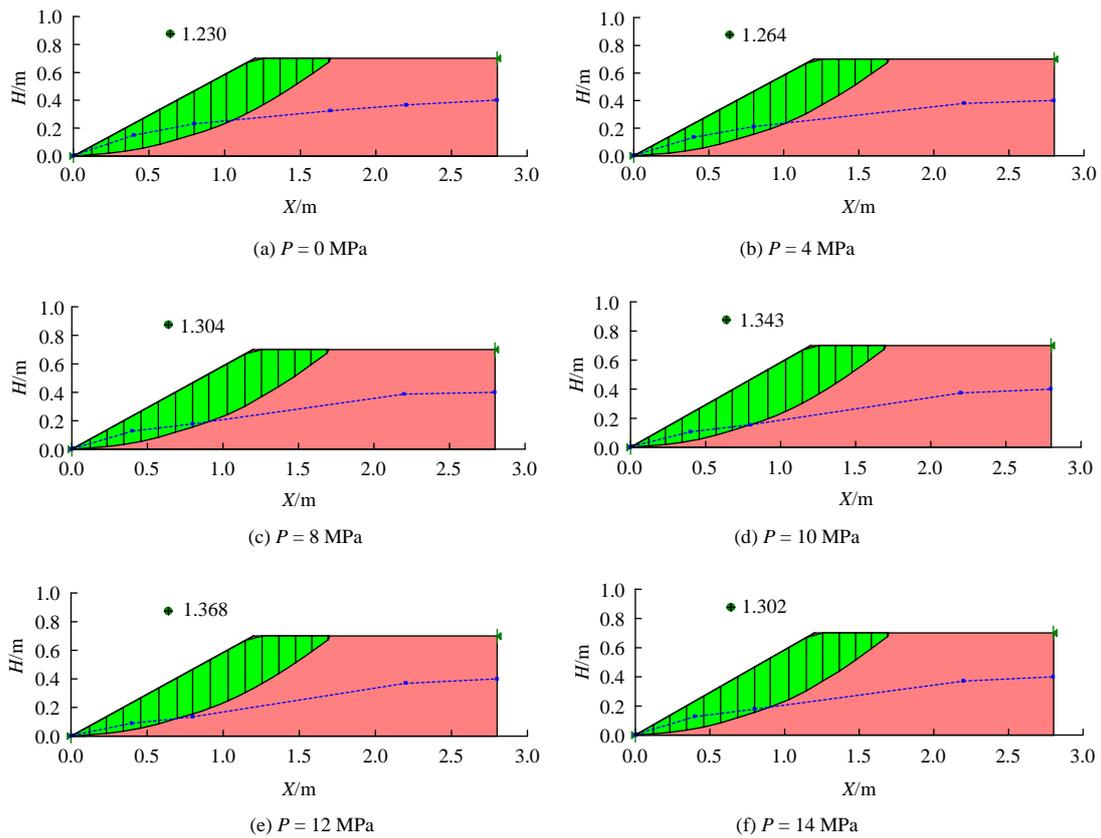


图5 坡体稳定性分析

Fig.5 Slope stability analysis

小充气压力，本试验中的最小充气压力为 6 kPa。

但要达到好的截排水效果，还需合理控制气压的大小。在一定的压力范围内，截排水效果会随着气压的增大而增大，当压力达到上限值，截排水效果反而会降低。如本物理模型中， $P = 6 \sim 12$ kPa 范围内，充气压力越大充气截排水效果越好，当 $P = 14$ kPa 时充气截排水效果反而有所降低。所以，寻求能快速截排水的最佳充气压力对于截排水技术十分关键。根据试验数据分析可知， $P = 12$ kPa 可视为本模型的最佳充气压力。

4 充气截排水数值模拟

在坡体中充气涉及复杂的气水两相流问题，试验过程中存在许多误差和随机性，通过岩土工程软件 Geo-studio 建立数值模型，对充气条件下坡体水位的变化特征进行探索，可以更加充分地说明充气截排水过程中坡体水位的变化规律。

图 6 为边坡数值模型示意图，数值模型和试验模型的尺寸是一致的。模型后侧的水位 $H = 0.4$ m，9 - 10 边界设为透气边界，坡面 0 - 10 设为透气边

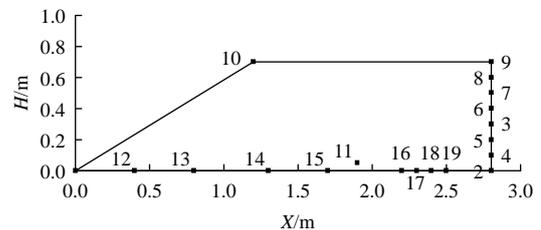


图6 边坡数值模型示意图

Fig.6 Sketch of numerical model of slope

界和潜在渗流面。点 11 为充气点，代表充气管充气口的位置。坡体前缘区域的水位测点 12~15 的位置依次为 $X = 0.4$ m, $X = 0.8$ m, $X = 1.3$ m, $X = 1.7$ m, 后缘区域的水位测点 16~19 的位置依次是 $X = 2.2$ m, $X = 2.3$ m, $X = 2.4$ m, $X = 2.5$ m。数值模拟计算中采用的参数如表 3 所示。

表3 数值模拟计算参数

Table 3 Parameters used in numerical simulation

透水系数 $k/(m \cdot s^{-1})$	饱和含水率 $\theta_s/(m^3 \cdot m^{-3})$	残余含水率 $\theta_r/(m^3 \cdot m^{-3})$	透气系数 $k_a/(m \cdot s^{-1})$
1.2×10^{-5}	0.51	2.7×10^{-2}	7.2×10^{-4}

充气截排水技术通过充气管口向土体中充气，

气体从充气管口向四周扩散，形成类似于球状的控制范围。由于球状区域的形成和扩散需要一个过程，所以在充气的初期，球状区域未扩散至槽壁，水流会沿控制范围绕流到充气管左侧，此时的截排水过程是三维问题。当球状区域扩散至槽壁后，截排水过程可近似为二维问题。同样，当气压较小时，整个截排水过程中球状控制范围都无法扩展至槽壁，故该压力下的截排水过程是三维问题。当充气压力达到一定程度时，充气压力形成的控制范围可以扩展到槽壁，该气压下的截排水过程可近似为二维问题。由于在数值模型中，并不能将不同充气阶段和充气压力区分开来分别建立三维和二维模型，而是均按二维模型来近似代替，故数值模型中使用的部分参数与试验土体实际参数可能存在一定差异，但通过参数敏感性分析发现饱和含水率、残余含水率和透气系数对试验水位的降幅基本没有影响。

该模型中，自然入渗状态下坡体渗流情况如图 7 所示，以图 7 所示的自然入渗结果作为气-水两相流数值模型的初始条件。坡体模型充气稳定后的气-水流动情况如图 8 所示。阴影表示土体中气压力的大小，颜色越深的地方，表明孔隙气压力越大。

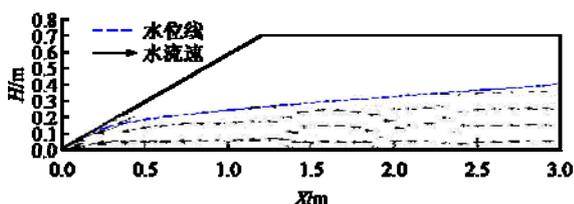


图 7 自然入渗状态下坡体渗流情况
Fig.7 Slope seepage condition under natural state

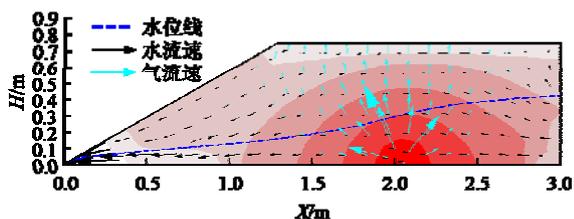


图 8 模型稳定后坡体的气-水流动情况
Fig.8 Air-water seepage under steady state in slope

各气压条件下坡体的稳定水位如图 9 所示。图中水位线最高的那条线代表自然入渗水位线，充气气压为 $P = 2$ 和 4 kPa 条件下的 2 条水位线与图中自然入渗 ($P = 0$ kPa) 条件下的水位线基本重合，说明充气压力为 $P = 2$ 和 4 kPa 时无充气截排水效果。 $P = 6 \sim 16$ kPa 时，充气管左侧水位均有明显下降，这说明对于本模型，在坡体中进行充气可以达到预期的截排水效果。

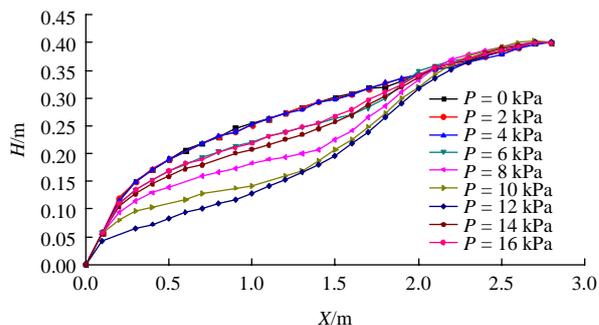


图 9 数值模拟中不同气压条件下坡体稳定水位
Fig.9 Calculated stable water level in numerical simulation of slope under different air pressure conditions

为了清晰准确地分析充气条件下坡体水位的变化特征，选取坡体中代表性测点 12~19，对不同气压下水位变化进行分析。图 10 为坡体充气管左侧 4 个水平测点上水位随气压变化情况。当气压 $P = 0 \sim 4$ kPa 时，各测点水位基本不发生变化，这说明当气压较小时，充入坡体的气体不能排开地下水，达不到截排水的效果。当气压 $P = 6 \sim 12$ kPa 时，各测点的水位随着气压的增大而降低。当 $P = 6$ kPa 时， $X = 0.4, 0.8, 1.3, 1.7$ m 四点的水位相对于自然入渗水位分别下降了 10.8%，13%，12.4% 和 11.2%；在点 $X = 0.9$ m 处， $P = 6 \sim 12$ kPa 范围内各气压条件下的水位相对于自然入渗水位分别下降了 13%，29.9%，43.9% 和 52.3%。以上数据说明，在此气压范围内，随着气压的增大，充气截排水效果逐渐增大。当气压 $P = 14 \sim 16$ kPa 时，各测点水位随着气压的增大而减小。当 $P = 14$ kPa 时， $X = 0.4, 0.8, 1.3, 1.7$ m 四点的水位相对于自然入渗水位分别下降了 16.2%，18.6%，17.2% 和 9.7%，明显比 $P = 12$ kPa 条件下的水位要高；当 $P = 16$ kPa 时，4 点的水位相对于自然入渗水位分别下降了 10.8%，14.4%，12.4% 和

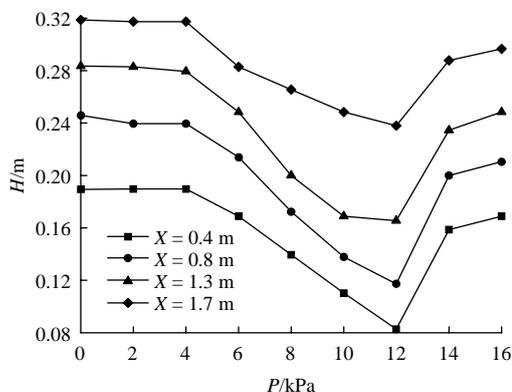


图 10 数值模拟中坡体前缘水位变化
Fig. 10 Water level variation at the leading edge of the slope in numerical simulation

6.9%，相对于 $P = 14 \text{ kPa}$ 条件下的水位有继续升高的趋势。说明当 $P > 12 \text{ kPa}$ 时，充气截排水效果随着气压的增大而降低。

图 11 为数值模拟条件下取坡体固定滑动面进行稳定性分析得到的稳定性系数。当 $P = 0 \sim 4 \text{ kPa}$ 时，稳定性系数均为 1.224；当 $P = 6, 8, 10, 12, 14$ 和 16 kPa 时，相对于自然入渗状态下的稳定性系数分别上升了 3.43%，7.35%，10.21%，13.48%，4.74% 和 3.51%。当 $P = 6 \sim 12 \text{ kPa}$ 时，稳定性系数随充气压力增大而增大；当 $P = 14$ 和 16 kPa 时，稳定性系数随充气压力增大而减小； $P = 14 \text{ kPa}$ 条件下的稳定性系数相对于 $P = 12 \text{ kPa}$ 条件下的稳定性系数下降了 7.70%， $P = 16 \text{ kPa}$ 条件下的稳定性系数相对于 $P = 14 \text{ kPa}$ 条件下的稳定性系数下降了

1.17%。由稳定性系数随气压的变化特征可知，稳定性系数与坡体水位随气压的变化特征具有一致性，水位下降越多，稳定性系数越高。

通过对 $X = 0.5, 0.9, 1.3$ 和 1.7 m 四点的水位变化分析可知，数值模拟结果与试验结果一致。 $P = 6 \text{ kPa}$ 为该坡体模型充气截排水的起始气压，即能达到截排水效果的最小充气压力； $P = 12 \text{ kPa}$ 为该坡体模型充气截排水的最佳充气压力。当充气压力控制在 $6 \sim 12 \text{ kPa}$ 范围时，充气压力越大，坡体水位降幅越大，充气截排水效果越好。当充气压力大于 12 kPa 时，充气压力越大，坡体水位降幅越小，充气截排水效果越差。

图 12 为各充气压力下坡体充气管右侧水位变化情况。选取 $X = 2.2, 2.3, 2.4$ 和 2.5 m 四个测点

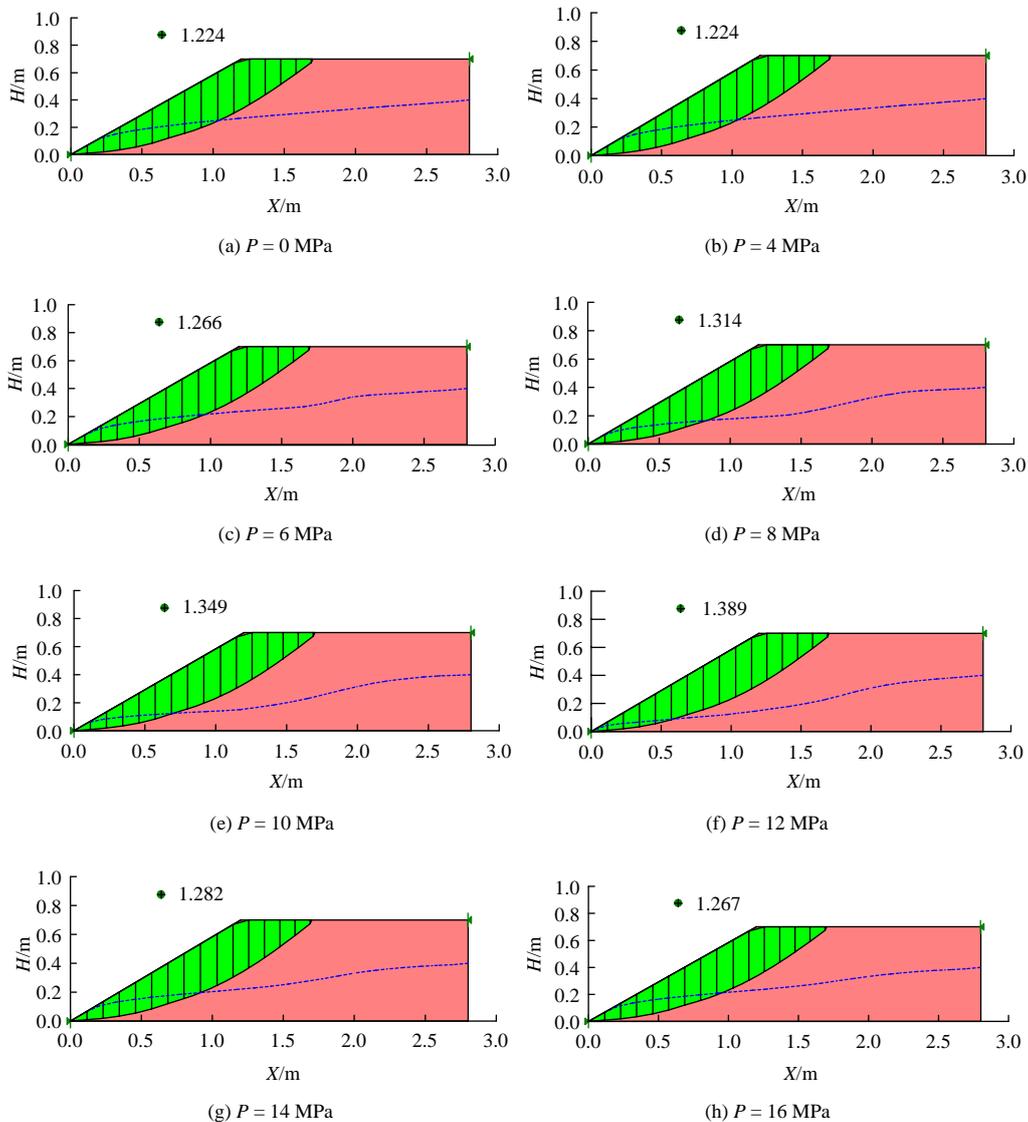


图 11 数值模拟坡体稳定性分析

Fig.11 Slope stability analysis with numerical simulation

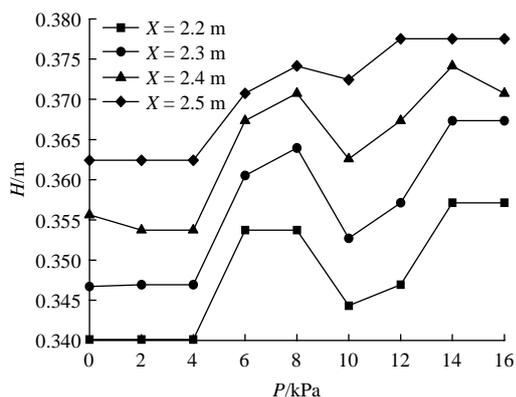


图 12 坡体后缘不同测点水位变化

Fig.12 Water level variation at the rear edge of the slope

的水位进行分析。当气压 $P = 6 \sim 16$ kPa 时, 4 个测点的水位相对于充气前均有不同程度升高。当 $P = 6$ kPa 时, $X = 2.2, 2.3, 2.4$ 和 2.5 m 四点的水位相对于自然入渗状态下分别升高了 4%, 2.5%, 3.3% 和 2.3%; 当 $P = 10$ kPa 时, 四点的水位相对于自然入渗状态下分别升高了 0.4%, 0.3%, 2.0% 和 2.8%; 当 $P = 14$ kPa 时, 四点的水位相对于自然入渗状态下分别升高了 5%, 4.4%, 5.2% 和 4.2%。这与充气截排水技术的预期相符, 当气体截留向前缘入渗的后缘来水时, 后缘水位会因为向前缘入渗量的减少而水位雍高, 从侧面反应了充气截排水技术的有效性。

5 结论

通过物理模型试验和数值模拟, 对不同气压条件下坡体水位的变化特征进行了探究, 得出如下结论:

(1) 对坡体进行充气能有效截留坡体后缘入渗水流, 降低坡体地下水位, 提高边坡稳定性。

(2) 对于特定坡体, 存在与之对应的充气截排水起始充气压力, 本试验模型的起始充气压力为 6 kPa, 稳定性系数可提高 2.76%。只有当充气压力大于充气截排水起始充气压力时, 充气截排水才有效果, 坡体前缘水位才会下降。

(3) 对于特定坡体, 存在与之对应的最佳充气压力, 本试验模型的最佳充气压力为 12 kPa, 稳定性系数可提高 11.22%。当充气压力介于起始充气压力和最佳充气压力之间时, 随着气压的增大, 坡体前缘水位不断降低, 充气截排水效果随气压增大而增大。当充气压力大于最佳充气压力时, 充气截排水效果则随气压增大而减小。

参考文献(References):

- [1] COLLINS B D, ZNIDARCIC D. Stability analysis of rainfall induced land-slides[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(4): 362 - 372.
- [2] 刘燕, 王海平, 蒋永才, 等. 长江三峡库区黄腊石边坡地下水作用规律与动态稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3 571 - 3 576.(LIU Yan, WANG Haiping, JIANG Yongcai, et al. Groundwater action law and evaluation on dynamic stability of huanglashi slope in Three Gorges Region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3 571 - 3 576.(in Chinese))
- [3] 李晓军, 马惠民, 吴红刚. 复杂含水条件下滑坡的稳定性分析及治理措施[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 60 - 65.(LI Xiaojun, MA Huiming, WU Honggang. A case study for stability analysis and hazard control of ongoing landslide under complex groundwater conditions[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 60 - 65.(in Chinese))
- [4] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 137(5): 483 - 491.
- [5] RAY R L, JACOBS J M, ALBA P D. Impacts of unsaturated zone soil moisture and groundwater table on slope instability[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(10): 1 448 - 1 458.
- [6] SCHMERTMANN J H. Estimating slope stability reduction due to rain infiltration mounding[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 132(9): 1 219 - 1 228.
- [7] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(3): 185 - 208.
- [8] RAHARDJO H, NIO A S, LEONG E C, et al. Effects of groundwater table position and soil properties on stability of slope during rainfall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(11): 1 555 - 1 564.
- [9] 丁继新, 尚彦军, 杨志法, 等. 降雨型滑坡预报新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 738 - 3 743.(DING Jixin, SHANG Yanjun, YANG Zhifa, et al. New method of predicting rainfall-induced landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 738 - 3 743.(in Chinese))
- [10] 尚岳全, 王清, 蒋军, 等. 地质工程学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 106 - 116.(SHANG Yuequan, WANG Qing, JIANG Jun, et al. Geological engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 106 - 116.(in Chinese))

- [11] 李援农. 土壤入渗中气相对水流运动影响的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 81 - 82.(LI Yuannong. The influence of soil air phases in infiltration on soil water current[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(1): 81 - 82.(in Chinese))
- [12] 李援农, 林性粹. 均质土壤积水入渗的气阻变化规律及其影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(3): 88 - 93.(LI Yuannong, LIN Xingcui. Regularity of the soil air-resistance change and its influences under water-accumulated infiltration in the homogenous soil[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(3): 88 - 93.(in Chinese))
- [13] 张 华, 吴争光. 封闭气泡对一维积水入渗影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增 2): 132 - 137.(ZHANG Hua, WU Zhengguang. Experimental research on the effect of entrapped air on one-dimensional pended water infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Supp.2): 132 - 137.(in Chinese))
- [14] 孙冬梅, 冯 平, 张明进. 考虑气相作用的降雨入渗对非饱和土坡稳定性的影响[J]. 天津大学学报, 2009, 42(9): 777 - 783.(SUN Dongmei, FENG Ping, ZHANG Mingjin. Refined analysis of stability of unsaturated soil slope due to rainfall infiltration considering the effect of gas phase[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(9): 777 - 783.(in Chinese))
- [15] 叶为民, 王初生, 王 琼, 等. 非饱和粘性土中气体渗透特征[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 244 - 248.(YE Weiming, WANG Chusheng, WANG Qiong, et al. Laboratory tests on the characteristics of air-permeation in unsaturated shanghai soft soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 244 - 248.(in Chinese))
- [16] OSAMA K N, LAITH M R. Soil air permeability and carbon dioxide flux measurements from the soil surface[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, 39(9/10): 1 406 - 1 415.
- [17] 刘长殿, 孙红月, 康剑伟, 等. 土体的充气阻渗试验[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2014, 48(2): 236 - 241.(LIU Changdian, SUN Yuehong, KANG Jianwei, et al. experimental investigation of seepage barrier effect by air-inflation in soil[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014, 48(2): 236 - 241.(in Chinese))
- [18] 杜丽丽, 孙红月, 尚岳全, 等. 滑坡应急治理充气截水方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3 954 - 3 960.(DU Lili, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Method of intercepting water by filtering soil with air in emergency treatment engineering of landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 3 954 - 3 960.(in Chinese))
- [19] 杜丽丽, 孙红月, 尚岳全, 等. 充气截排水滑坡治理数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 1): 2 628 - 2 634.(DU Lili, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. simulation of numerical control of pneumatic cut-off method for landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.1): 2 628 - 2 634.(In Chinese))
- [20] 王皆明, 王丽娟, 耿 晶. 含水层储气库建库注气驱动机理数值模拟研究[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(5): 673 - 676.(WANG Jieming, WANG Lijuan, GENG Jing. The numerical simulation study on the gas-drive mechanism of aquifer gas storage[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(5): 673 - 676.(in Chinese))
- [21] 刘 辉, 李仲奎, 廖 宜, 等. 压气新奥法隧道施工中的渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 584 - 589.(LIU Hui, LI Zhongkui, LIAO Yi, et al. Seepage analysis in new Austria tunneling compressed air in urban underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 584 - 589.(in Chinese))
- [22] SNEE C P M, JAVADI A A. Prediction of compressed air leakage from tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 189 - 195.
- [23] 杜丽丽. 滑坡治理的充气截排水方法研究[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2014.(DU Lili. Research of intercepting groundwater with compressed air for landslide emergency treatment[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.(In Chinese))
- [24] WANG Z, FEYEN J, NIELSEN D R, et al. Two-phase flow infiltration equations accounting for air entrapment effects[J]. Water Resources Research, 1997, 33(12): 2 759 - 2 767.
- [25] WANG Z, FEYEN J, NIELSEN D R, et al. Air Entrapment effects on infiltration rate and flow instability[J]. Water Resources Research, 1998, 34(2): 213 - 222.