[文章编号] 1003－4684(2026)01-0108-07

基于三维渗流数值模拟的堤防减压井井列线布置形式研究

田 密[1]，陈斯鹏[1]，朱 梅[2]，秦 强[3]，盛小涛[4]

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068；2 湖北省水利水电科学研究院，湖北 武汉 430064；
3 湖南省水务规划设计院有限公司，湖南 长沙 410153；4 武汉大学资源与环境学院，湖北 武汉 430079)

[摘 要] 通常堤防减压井布置设计主要考虑井间距、井列线离堤脚线距离。井列线采用平行于堤脚线单排布置，而往往忽略了改变井列线形式对二元堤基渗流控制的作用。针对上述问题，依托阳新长江干堤棋盘洲段的地形地貌分布及减压井布置，利用 GMS 建立了区域内堤防的三维渗流数值模型，并提出了井列线之字形交错的新型布置形式。采用数值计算方法系统地对比了常规井列线单排布置与之字形交错布置下减压井的排水减压效果，研究了减压井交错布置参数(包括井间距和错距)对堤基渗流控制效果的影响规律。研究结果表明，减压井井列线之字形交错布置相较于常规的单排布置有较为明显的削减承压水头效果，且井间距对交错布置减压井的排水减压效果有明显影响。当减压井设计间距小于 40～50 m 时，井列线之字形交错布置能降低减压井井间断面地下水水头，并且随着错距增加减压井井效逐渐提升。但当减压井设计间距大于 50 m 时，井列线之字形交错布置与常规单排布置方案的排水减压效果相当。研究成果可为堤防减压井布置设计提供理论依据。

[关键词] 堤防减压井；MODFLOW；三维渗流模型；井列线布置

[中图分类号] TV68 [文献标识码] A

中国幅员辽阔，江河众多，堤防工程是抵御洪水的重要屏障。每年汛期由于暴雨和洪水频繁发生，堤防工程时常发生管涌险情[1-3]。减压井作为堤防险情应急整治和除险加固的重要措施，通过排泄强透水层地下水，迅速降低地基承压水头，控制险情发生，在堤防工程中得到了广泛应用[4-7]。国内外诸多专家对堤防减压井设计开展了大量的研究，表明影响减压井系统排水减压效能的因素有很多[8]，主要是结构设计及空间布置[9-11]。结构设计因素有井径、井管长度、过滤段长度、级配及缠丝间距等；空间布置包括井的位置、井间距、井数及贯入度等因素。通常减压井设计参数需要通过模型试验或数值模拟等确定，由于模型试验受模型尺寸等限制，难以全面反映堤防渗流过程，且存在成本高、耗时长等问题[9]。而数值模拟方法可以通过渗流模型较为真实地反映实际工况，计算成本低、精度较高，已广泛应用于堤防工程的渗流问题分析[11-15]。目前已有许多学者开展了堤防减压井排水减压效果数值模拟研究，如李景娟等[10]基于二维稳定渗流分析研究了减压井贯入深度、井管直径、井间距、出水口高程以及滤层透水性等对减压井功效的影响。徐文兵等[9]通过堤防瞬态渗流数值分析发现减压井位置及贯入深度对减压井防渗效果影响显著。崔皓东等[15]长江干堤瓦湾段堤防三维渗流数值分析得出了该类堤防在设计洪水位条件下减压井合理的布置间距。陈思涵等[16]采用三维有限元模型研究了减压井位置、井间距、井内抽水高程等对渠底及边坡的减压效果。Salmasi 等[11]通过三维渗流有限元计算分析了减压井直径、间距及布置对堤防渗流场的影响。Hadj-Hamou 等[17]制作减压井径向流模型，研究了过滤层级配与缠丝间距对井效影响。

减压井排水可降低承压水头，且距离井中心越远，作用越小，井列线中最薄弱处位于井间断面。缩短井间距、提高单井排水量均能提高井间断面防洪能力。目前堤防减压井布置设计主要考虑井间距、井列线离堤脚距离，井列线采用单排布置，如岳阳长江干堤堤防减压井[15](图 1)、安庆江堤 149 口减压井均采用平行堤脚线单排布置[18]。而变换井列线

[收稿日期] 2024－01－03

[基金项目] 国家自然科学基金(52009037)；湖南省水利科技项目(XSKJ2021000－09)；武汉市知识创新专项项目(2022020801020268)

[第一作者] 田 密(1988－)，女，湖北武汉人，工学博士，湖北工业大学副教授，研究方向为堤防渗流控制、水工岩土工程可靠度与风险分析。

形式对二元堤基渗流控制作用往往被忽略。

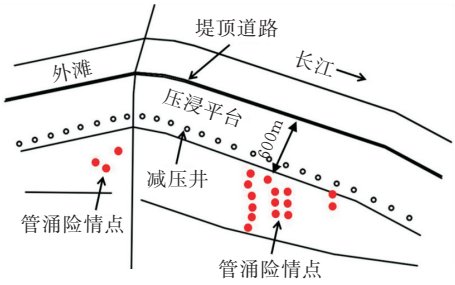


图 1　岳阳长江干堤堤防减压井[15]

针对现有研究不足，以阳新长江干堤棋盘村段减压井布置设计为例，该堤段沿线建设有 24 口减压井，2016 年遭遇长江大洪水，堤内多处发生管涌险情，汛后考虑新建减压井作为堤防除险加固措施。根据该堤段工程地质条件，建立了堤防三维渗流数值计算模型，通过数值模拟方法对比减压井井列线单排布置与之字形交错布置时排水减压效果，研究减压井之字形交错布置参数对堤防渗流控制效果的影响规律。为提高减压井排水减压效果提供参考，也为堤防减压井布置设计提供理论依据。

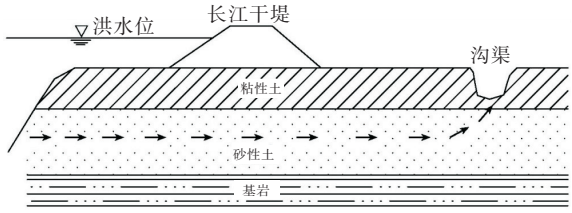
1　研究区概况

阳新长江干堤（海口江堤棋盘洲险段）位于长江中游下段南岸的黄石市阳新县境内韦源口镇，本段堤长约 2 km。区内长江干堤堤顶亦为主要交通通道 S112 省道（道路里程 K123＋000～K125＋000）。该堤防段为典型险工段，1983－1998 年长江干堤棋盘洲段历史上发生过管涌、散浸、翻砂鼓水等险情 15 处，为历史老管涌区[18]。历年长江水位一旦超过警戒水位，则管涌等险情易发频发。例如 2016 年 7 月份长江流域普降暴雨，2016 年 7 月 4 日至 7 月 9 日，在棋盘村（对应堤防桩号 No.22＋500～No.23＋000）接连发生管涌、翻砂鼓水等险情，其中管涌 5 处、翻沙鼓水点 10 处。

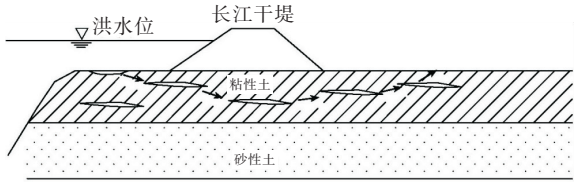
海口江堤棋盘洲险段管涌险情易发频发与该堤段地质条件密切相关，该堤段堤基地质结构主要为双层结构（Ⅱ），即上部主要由粉质粘土、粘土组成，具有微弱、弱透水性；下部以粉细砂主，具有强的透水性，且两种土层渗透系数之比大于 100。其渗透变形、破坏的发生主要有以下两种情况：

1）堤内覆盖层相对较厚，但原始地形中存在深切的水渠和渊塘导致局部粘土盖层的实际厚度减小。由于长期受到水渠和渊塘等地表水的浸泡，沟渠及渊塘底部土层强度被削减，在汛期高承压水作用下，江水会沿着下部砂性土层向堤内渗透，如图 2a 所示。在堤内薄弱部位，当水力坡降超过临界水力坡降时，砂性土层中的承压水可能使盖层发生击穿，导致管涌、流土等险情。

2）堤基上部粘性土中存在断续分布的粉细砂及粉土等砂性土条带或透镜体，汛期时江水可能沿此类不良地层向堤内渗透，如图 2b 所示。渗流过程中带出土层中的细颗粒，降低堤内盖层强度，增加堤基发生流土或管涌险情的风险。



（a）管涌或流土



（b）散浸或清水漏洞险情

图 2　研究区堤基渗透变形破坏模式

总体而言，研究区堤基渗透破坏形式以管涌为主，少量散浸，险情部位主要位于堤内深切沟渠、堰塘等处，且常为老险情的复发部位。为了消减强透水地基承压水头，阳新长江干堤棋盘洲段险情整治采取了增设减压井的措施。

2　MODFLOW 的渗流数值模型

2.1　渗流控制方程

连续多孔介质的三维饱和稳定渗流场控制方程为[12]

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = q \tag{1}$$

式中，K_x、K_y、K_z 分别是沿 x、y、z 方向的渗透系数，m/d；q 为输入或输出的流量，m^3/d。

采用 GMS（groundwater modeling system）软件 MODFLOW 模块建立三维渗流有限差分模型并求解。MODFLOW（三维有限差分地下水流模型）是专门用于孔隙介质中地下水流动数值模拟的软件，已经成为最为普及的地下水运动数值模拟的计算机程序[19-22]。

2.2　数值模拟模型及网格划分

结合研究区地质勘察及水文调查资料，利用 GMS 软件建立阳新长江干堤三维渗流数值模型，计算模型采用 USG 非结构化网格，为提高模型刻画的精确性，对模型进行二次剖分，单元尺寸在减压井布置处加密至 0.1 m，单元总数约为 180，000。如图 3 所示。模型区域面积为 500 m×600 m，堤顶高程

为 27 m，堤顶宽 8 m，迎水坡及背水坡坡比均为 1∶3，模型底高程为－40 m。

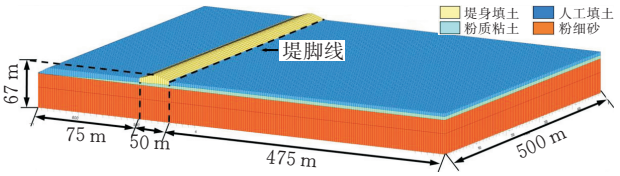


图 3 堤防三维渗流数值模型

简化地层自上而下分别为：堤坝填土（厚度约 7 m）、上覆弱透水层厚度为 6～10 m、强透水层底高程为－40 m，地层渗透系数见表 1。

表 1 模型地层渗透参数

地层	渗透系数/(m·d^{-1})		
	K_x	K_y	K_z
堤身填土	0.08	0.08	0.02
人工填土层	0.11	0.11	0.03
粉质粘土层	0.014	0.014	0.0035
粉细砂层	1.43	1.43	0.36

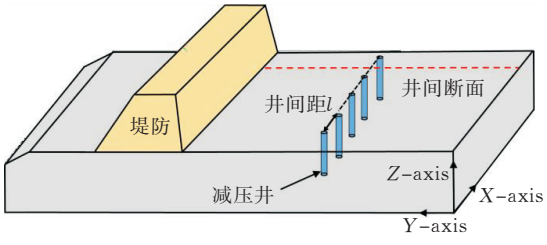
在堤内布设减压井，减压井直径为 0.6 m，长度为 30 m，包括透水筛管段（20 m）及不透水段（10 m），其中透水筛管段进入细砂层深度超 20 m。采用 MODFLOW-USG 中的连接线性网络（CLN）与排水模块（DRN）组合对区域内减压井进行模拟[19-20]。

模型计算仅考虑稳定流计算工况，上游水头边界为该堤段设计洪水位，取为 26.0 m；下游水头边界为远场地形最低点，取为 17.0 m；依据减压井自流特征，以井口高程作为井的一类边界条件。

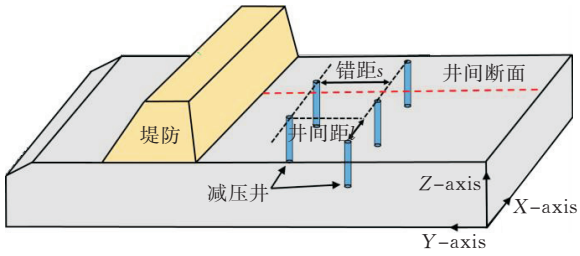
2.3 减压井布置方案

传统的减压井布置通常采用平行于堤脚线的单排布置形式，如图 4a 所示。在此基础上，本研究提出了一种井列线之字型交错布置，具体实施方法是将部分减压井向堤脚方向偏移，如图 4b 所示。井列线单排布置参数主要为井间距 l，交错布置参数包括井间距 l 和错距 s（横向投影距离）。

假设研究区段总共布设 9 口减压井，为了系统分析井列线之字形交错错距对减压井排水减压效果的影响，选定井间距 20 m 条件下设计 2 m、5 m 及 10 m 三种交错错距，以此研究减压井交错布置方案的排水减压效果，共计算 5 种工况，如表 2 所示。



(a)井列线单排布置



(b)井列线之字形交错布置

图 4 不同减压井井列线布置形式示意图

表 2 计算方案列表

编号	井列线布置形式	井间距/m	错距/m
F1	无减压井	20	/
F2	单排布置	20	0
F3	之字形交错布置	20	2
F4	之字形交错布置	20	5
F5	之字形交错布置	20	10

为进一步研究井列线交错布置参数（井间距和错距）对减压井排水减压效果的影响，设置 6 种不同井间距，分别为 5 m、10 m、20 m、30 m、40 m 及 50 m。每种井间距条件下交错错距分别设置为 2 m、5 m 及 10 m，具体计算方案如表 3 所示。由于井列线中最薄弱处位于井间断面，通过比较不同井列线交错布置参数条件下井间断面堤基等势线分布，分析减压井的排水减压效果。

表 3 不同井间距交错布置方案列表

编号	井列线布置形式	井间距/m	错距/m
C1	之字形交错布置	5	2、5、10
C2	之字形交错布置	10	2、5、10
C3	之字形交错布置	20	2、5、10
C4	之字形交错布置	30	2、5、10
C5	之字形交错布置	40	2、5、10
C6	之字形交错布置	50	2、5、10

3 数值计算结果分析

3.1 井列线单排布置时渗控效果分析

为分析井列线布置形式对堤基承压水头控制效果的影响，选取模型中最危险断面作为分析断面，该断面位于相邻减压井间且垂直于堤身，此断面位置减压井影响效果最弱，且堤基下伏承压水头最高。3.1－3.2 节中所选取分析断面位于距模型边界 240 m处，模型网格透视图及分析断面位置如图 5 所示。

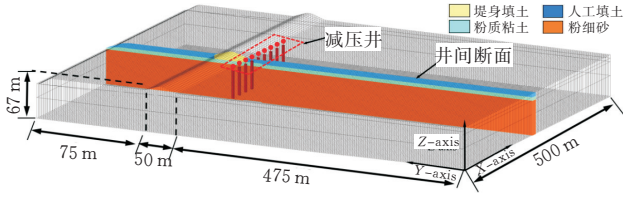


图 5 模型网格透视图及分析断面位置

首先采用井列线常规单排布置形式,9 口减压井布置间距为 20 m,即表 2 中方案 F2,模拟得到 F2 情况下堤基井间断面总水头分布(图 6)。从图 6 看出,设计洪水位条件下等势线在减压井布置处出现骤减。为了进一步说明减压井排水效果,图 7 给出了阳新长江干堤无减压井时堤防三维渗流场。对比图 6 和图 7 可知,在相同设计洪水位条件下,设置单排减压井后(方案 F2)堤基承压水头整体下降,井间断面堤脚处承压水头为 22.32 m,而无减压井时(方案 F1)承压水头为 24.58 m,承压水头消减了 2.26 m。由此可见,减压井功效显著。

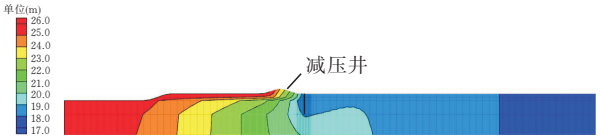


图 6　井列线单排布置时井间断面渗流场分布(方案 F2)

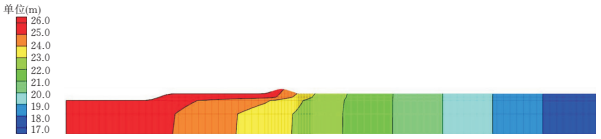


图 7　无减压井时井间断面渗流场分布(方案 F1)

3.2　井列线之字形交错布置时渗控效果分析

同等条件下,减压井井列线采用之字形交错布置(如图 4b 所示布置形式),井间距 l 设计为 20 m,交错错距 s 设计为 10 m,即针对方案 F5 采用数值模拟方法分析减压井井列线之字形交错布置下井间断面堤基水头分布(图 8)。

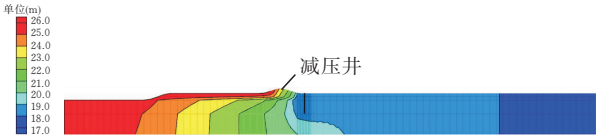
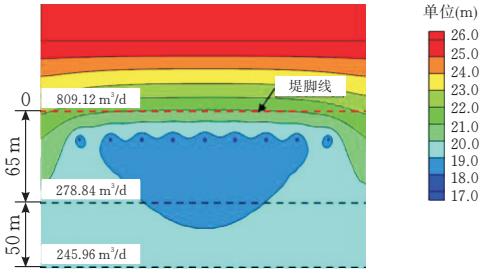


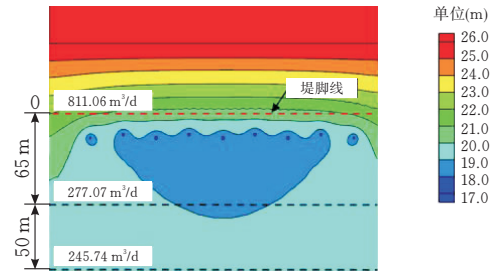
图 8　交错布置时井间断面渗流场分布(方案 F5)

由图 7 和图 8 可以明显看到,减压井井列线采用之字形交错布置后井间断面堤基承压水头较单排布置时显著降低。此时,井间断面堤脚处承压水头为 22.00 m,较单排布置时承压水头降低 0.32 m,减压井功效有所提升。由此可见,井列线之字形交错布置形式较传统单排布置能提升减压井排水减压效果,降低堤基承压水头。

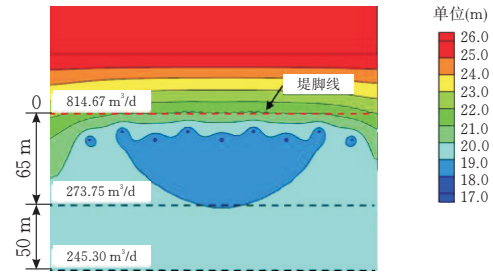
选取堤脚、距堤脚 65 m、115 m 及 165 m 处共 3 个断面分析不同交错布置参数条件下减压井排水效果。图 9a—d 为方案 F2-F5 条件下地表渗流场分布及 3 个过流断面的流量分布。由图 9 可看出,井列线单排布置时距堤脚 65 m 处纵断面处过流量为 278.84 m^3/d。采用交错布置形式后,不同交错错距下距堤脚 65 m 处纵断面过流量分别为 277.07 m^3/d、273.75 m^3/d 及 269.35 m^3/d,显然距堤脚 65 m 处断面过流量呈减小趋势。由图 9 还可知,随着减压井交错错距增大,堤脚纵剖面压力水头减小,减压井排水量增加。如图 9a 所示,单排布置条件下减压井排水量(即图中减压井上下游两个过流断面流量差,如取堤脚及距堤脚 115 m 处两个纵断面),其过流量差值为 563.16 m^3/d,也即减压井排水量为 563.16 m^3/d。采取井列线交错布置后(图 9b-d),减压井排水量分别提高至 565.32 m^3/d($s=2$ m)、569.37 m^3/d($s=5$ m)及 579.64 m^3/d($s=10$ m)。由此可见,对于井列线交错布置方案 F2-F5,堤后减压井因靠近堤防导致地下水不断排入井中,减压井管出水量增加,进而导致堤基承压水头降低。



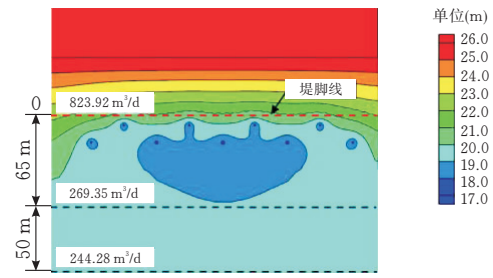
(a) 井列线单排布置(方案 F2)



(b) 井列线之字形交错布置 $s=2$ m(方案 F3)



(c) 井列线之字形交错布置 $s=5$ m(方案 F4)



(d) 井列线之字形交错布置 $s=10$ m(方案 F5)

图 9　不同井列线布置形式下地表渗流分布特征

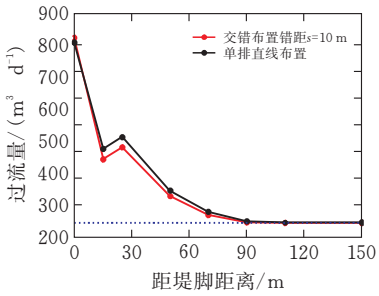


图 10 不同井列线布置形式下堤防纵断面过流量对比

图 10 为减压井井间距 20 m 时两种井列线布置形式下堤防纵断面过流量。从计算结果来看，距离堤脚约 100 m 范围内，井列线之字形交错布置下堤基纵断面过流量整体小于常规单排布置，则说明减压井所排出的地下水越多，排水减压效果越好。距离堤脚超 100 m 以外范围，单排布置形式与交错布置形式下堤基纵断面过流量接近，此时超出减压井交错布置影响范围。

3.3 交错布置参数对减压井渗控效果的影响

为了进一步说明减压井井列线交错布置参数对井效功能发挥的影响，图 11 给出了错距为 10 m 时不同井间距对堤基井间断面承压水头的影响。可以看出：井间距对井列线交错布置减压井功效影响显著，随着井间距减小，堤基承压水头明显降低。特别地，井间距取 10 m 比 50 m 布置时堤脚处承压水头可降低 1.1 m。40 m 与 50 m 井间距交错布置时堤基承压水头变化曲线较为接近。

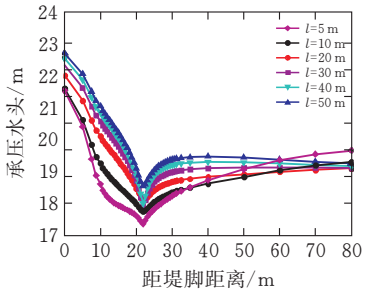
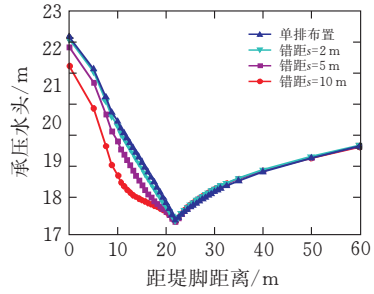
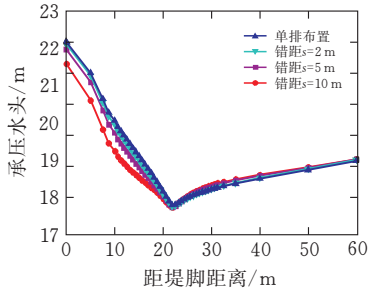


图 11 井间距对交错布置减压井功效的影响($s=10$ m)

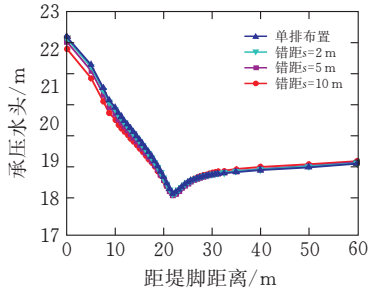
分别获取 C1-C6 方案井列线交错布置减压井不同井间距及错距时井间断面承压水头分布，如图 12 所示。



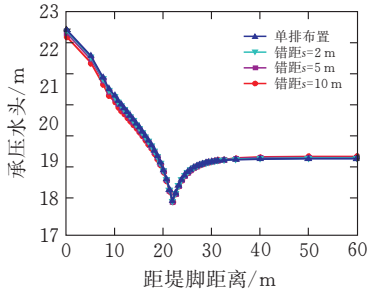
(a) 井间距 $l=5$ m



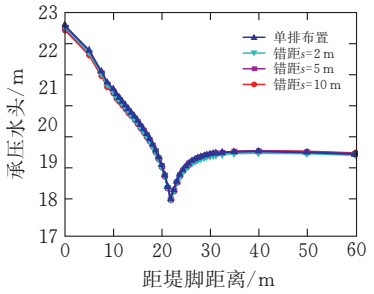
(b) 井间距 $l=10$ m



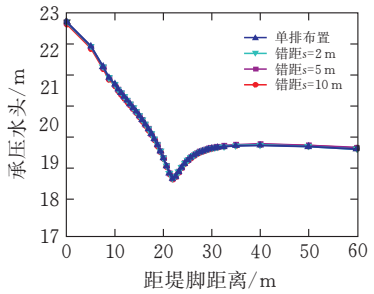
(c) 井间距 $l=20$ m



(d) 井间距 $l=30$ m



(e) 井间距 $l=40$ m



(f) 井间距 $l=50$ m

图 12 井间距及错距对井列线交错布置减压井功效的影响

由图 12 可看出，随着井间距的增加，井列线交错布置减压井排水减压效果逐渐接近于单排布置减

压井，此时增加井列线交错布置错距功效较单排布置改善甚微。表明井间距增大，相邻两口井相互作用影响减弱，井列线交错布置对减压井效果也随之下降，其排水减压效能相当于单排布置。

由图 12 还可以得知，当减压井设计间距小于 40～50 m 时，井列线之字形交错布置能降低减压井井间断面地下水水头、有效提高排水减压效果，并且随着错距增加减压井功效逐渐提升。随着错距增加，减压井靠近堤防上游侧布置，将加大减压井群排泄流量，降低通往下游的流量，及早更大幅度消杀水头，特别是井间距为 10 m 时，井间断面堤脚处承压水头可下降 0.82 m，井群功效提升较明显，而当井列线交错布置减压井间距增大至 50 m，交错布置与传统单排布置形式的排水减压效果相当。由此可见，在实际工程减压井井列线布置形式设计时，应综合考虑减压井之字形交错布置间距与错距的影响。

4　结论

本文改变传统减压井井列线单排布置形式，研究了井列线之字形交错布置方案，以阳新长江干堤棋盘村段为例，根据该段地质条件及减压井渗控措施，基于 GMS 建立了堤防三维渗流数值模型。在此基础上，提出了减压井井列线之字形交错布置形式，并系统地对比了井列线传统单排布置与之字形交错布置时堤防渗流场分布特征，研究了减压井交错布置参数，包括井间距和错距对堤防渗流控制效果的影响规律。主要结论如下：

1）堤防三维渗流数值模拟结果表明设计洪水位条件下井间断面等势线在减压井布置处出现骤减，堤基承压水头整体下降，减压井群排水减压效果显著。

2）通过堤防减压井井列线常规单排布置与之字形交错布置三维渗流数值模拟结果可知，所提出的井列线之字形交错布置形式较传统单排布置能更有效提升减压井排水减压效果，提升消杀水头能力，为减压井布置提供了新的设计思路。

3）井间距对交错布置减压井功效影响显著，随着井间距减小，堤基承压水头明显降低。随着井间距的增加，相邻两口井相互作用影响减弱，交错布置减压井排水减压效能相当于单排布置。

4）当减压井设计间距小于 40～50 m 时，交错布置能降低减压井井间断面地下水水头、提高排水减压效果，并且随着错距增加，减压井功效逐渐提升。而当减压井间距增大至 50 m，之字形交错布置与传统单排布置方案的排水减压效果相当。在实际工程减压井井列线布置形式设计时，应综合考虑减压井间距与错距的影响。

[参　考　文　献]

[1] 海震，李会中，梁梁. 枞阳江堤险情工程地质分析与评价[J]. 人民长江，2019，50(s2)：76-79.

[2] 赵鑫，马贵生，万永良，等. 堤防工程堤基渗流安全评价方法[J]. 长江科学院院报，2019，36(10)：79-84.

[3] 邬爱清，吴庆华. 堤防险情演化机制与隐患快速探测及应急抢险技术装备[J]. 岩土工程学报，2022，44(07)：1310-1328.

[4] 孙厚才，伍碧秀，王幼麟. 荆江大堤减压井物理化学淤堵试验研究[J]. 水文地质工程地质，1990，34(05)：15-17，60.

[5] 张家发，吴志广，许季军，等. 安庆江堤现有减压井运行效果初步分析[J]. 长江科学院院报，2000，17(04)：38-40，44.

[6] 吴昌瑜，张伟，李思慎，等. 减压井机械淤堵机制与防治方法试验研究[J]. 岩土力学，2009，30(10)：3181-3187.

[7] 盛小涛，张伟，李少龙，等. 阳新长江干堤减压井清淤洗井技术研究[J]. 人民长江，2020，51(11)：209-213.

[8] 刘川顺. 堤防减压井布置对渗流控制的影响[J]. 中国农村水利水电，2001，43(12)：64-66.

[9] 徐文兵，姚清河，王生，等. 北江大堤的瞬态渗流分析与减压井防渗效果模拟[J]. 中山大学学报(自然科学版)，2019，58(06)：97-103.

[10] 李景娟，杨阳，段祥宝.减压井运行效果影响因素数值分析[J]. 长江科学院院报，2016，33(05)：151-154.

[11] SALMASI F，NOURANI B，ABRAHAM J，NOROUZI R. Numerical investigation of relief well performance for decreasing uplift pressure under embankment dams[J]. International Journal of Environmental Science and Technology，2020，18：1-12.

[12] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京：水利电力出版社，2003：139-166.

[13] 张家发，朱国胜，曹敦侣. 堤基渗透变形扩展过程和悬挂式防渗墙控制作用的数值模拟研究[J]. 长江科学院院报，2004，21(06)：47-50.

[14] 张挺，曹洪，詹杰民，等.北江大堤石角堤段防渗工程效果分析[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(11)：2235-2241.

[15] 崔皓东，陆齐，陈劲松，等. 长江干堤典型管涌险情成因分析及对策研究[J]. 水利水电快报，2021，42(01)：54-58.

[16] 陈思涵，王兵，方攀博，等. 高地下水位渠段管、井相结合复合排水及减压效果研究[J]. 中国农村水利水电，2022，9：36-43.

[17] HADJ-HAMOU T，TAVASSOLI M，SHERMAN W. Laboratory testing of filters and slot sizes for relief

wells[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(09): 1325-1346.

[18] 李玉子, 程孟孟, 盛小涛. 可拆换式减压井技术在阳新长江干堤整险工程中的应用[J]. 长江经济, 2021, 5(03): 67-72.

[19] PANDAY S, LANGEVIN C D, NISWONGER R G, et al. An unstructrual grid version of MODFLOW for simulating groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation[R]. U. S. Geological Survey, 2013.

[20] CHEN Y H, TSAI F T G, CADIGAN J A, et al. Relief well evaluation: three-dimensional modeling and blanket theory[J]. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, 2021, 147(08): 04021054.

[21] 卢洪健, 王卓然. 地下水模拟方法与应用软件研究进展[J]. 地下水, 2022, 44(06): 49-52.

Study on Layout of Well Line of Dike Relief Well Based Three-dimensional Seepage Numerical Simulation

TIAN Mi[1], CHEN Sipeng[1], ZHU Mei[2], QIN Qiang[3], SHENG Xiaotao[4]

(1 *School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068;
2 *Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan* 430064, *China*;
3. *Hunan Water Planning & Design Institute Co., Ltd.*, 158 *Furong North Road, Changsha* 410153, *China*;
4 *The Institute of Smart Water, Wuhan Univ., Wuhan* 430072, *China*)

Abstract: Generally, the layout design of relief wells mainly considers well spacing and the distance between well lines and the toe line of the dike. The well line is usually arranged in a single row parallel to the toe line of the dike. However, the effect of changing the well line on the seepage control of the dike foundation is often ignored. Base on the relief well layout design of Qipanzhou section of Yangxin Yangtze River dike. A three-dimensional numerical model of dike seepage flow is established based on GMS. Then, a new form of zigzag staggered layout of dike relief well is proposed. The drainage and water pressure relief effects of the relief wells arranges by conventional single row layout of well lines and zigzag staggered layout are systematically compared by numerical calculation method. Finally, the influence of relief well staggered layout parameters (including well spacing and staggered distance) on the seepage control effect of dike foundation is discussed. Results show that compared with the conventional single row layout, the zigzag layout of relief wells can effectively improve the drainage capacity and reduce the pressure head of the dikes, and the well spacing has a significant effect on the well efficiency of zigzag staggered relief wells. When the relief well spacing is less than 40-50 m, the zigzag layout of the well lines can reduce the groundwater head at the relief well's discontinuity. With the increase of the staggered distance, the efficiency of relief well gradually increases. When the relief well spacing is greater than 50 m, the staggered relief well layout has the similar drainage effect as the conventional single-row layout. The research results can provide a theoretical reference for the layout design of relief well.

Keywords: dike relief well; MODFLOW; three-dimensional seepage model; well layout

[责任编校: 裴 琴]