

## 鄱阳湖圩堤管涌险情分析与防治措施

薛凯喜,李明吉\*,曹凯,胡艳香

(东华理工大学 土木与建筑工程学院,江西 南昌 330013)

**摘要:** 为了进一步防治管涌险情,以鄱阳湖防洪圩堤为研究对象,建立了管涌预测的理论模型,运用 GeoStudio2018 软件对防洪圩堤进行模拟分析,设置了降雨强度、降雨类型和降雨时刻三个关键因素和四种工况,分别用 Seep/W 模块和 Sigma/W 模块对防洪圩堤进行破坏计算。结果表明,只有在固定库水位下不同降雨会出现管涌现象,管涌出现破坏的有固定库水位 23 m+降雨时刻 20~30 d+降雨强度 0.06 m/d,管涌点位于下游坡脚 0.2 m 处;提出了反滤铺盖方案,并建立了相应的数值模拟模型。经验证,该方案符合相关规范要求。

**关键词:** 防洪圩堤;管涌;GeoStudio;反滤铺盖

**中图分类号:** TV871

**文献标识码:** A

## Analysis and Prevention Measures of Piping Hazards in the Embankment of Poyang Lake

XUE Kaixi, LI Mingji\*, CAO Kai, HU Yanxiang

(School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

**Abstract:** In order to further prevent and control the risk of piping, a theoretical model for piping prediction is established using the flood control embankment of Poyang Lake as the research object. The GeoStudio 2018 software is used to simulate and analyze the flood control embankment, setting three key factors of rainfall intensity, rainfall type, and rainfall time, as well as four working conditions. The damage calculation of the flood control embankment is carried out using the See/W module and Sigma/W module, respectively. The results show that only under the fixed reservoir water level, different rainfall will occur. The phenomenon of pipe surge, and the pipe surge will be damaged by the fixed reservoir water level of 23 m+rainfall time 20~30 d+rainfall intensity 0.06 m/d, the pipe gushing point is located at the foot of the downstream slope 0.2 m; A reverse filtration covering scheme was proposed, and the corresponding numerical simulation model was established. The solution has been verified to meet the requirements of the relevant specifications.

**Key words:** flood control embankment; piping; GeoStudio; inverted filter blanket

管涌是指在渗流作用下,土体中的细颗粒被地下水从粗颗粒的空隙中带走,从而导致土体形成贯通的渗流通道,造成土体塌陷的现象<sup>[1-2]</sup>。以 2020 年鄱阳湖区圩堤险情为例,据统计,在该险情中管涌发生次数最多<sup>[3]</sup>,占比接近 50%,管涌的出险位置范围大,离堤脚的最远距离可达 800 m。此次鄱阳湖发生的洪涝灾害造成的直接

经济损失约 313.3 亿元,波及约 673.3 万人,74.2×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup> 农作物受到影响,导致近 19.2×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup> 农作物绝收。管涌险情在圩堤洪涝灾害中高居前列,在岩土工程中防洪圩堤一直是研究热点。

诸多学者针对管涌破坏预测和防洪措施进行了大量相关研究,针对管涌预测模型的领域,目前

收稿日期:2023-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42167024)

作者简介:薛凯喜(1981-),男,山东沂水人,博士,教授,主要从事岩土工程相关领域的教学科研工作。

\* 通信作者:李明吉(1997-),男,海南万宁人,硕士研究生,从事岩土工程方面的研究。

有沙金焯等<sup>[4-5]</sup>根据渗流理论,推导了堤防背水坡脚附近发生管涌的计算式和管涌侵蚀临界水力坡降的表达式;张我华等<sup>[6]</sup>根据机理模型和因素作为系统输入,将理论机理模型和改进的BP神经网络模型相结合,建立预测判定堤防和土石坝中管涌发生的人工智能方法,对管涌发生的可能因子进行了预测。此外Li等<sup>[7]</sup>提出无人机图像采集功能对潜在管涌的预测。王霜等<sup>[8-9]</sup>利用有限元分析软件模拟了管涌发展不同阶段堤基内部渗流场分布,对比分析了各区域水力梯度与各区域土体侵蚀临界水力梯度,从而确定管涌发展各阶段颗粒流失的区域和范围。针对管涌防洪措施领域,目前有雷声等<sup>[10]</sup>从多角度分析了管涌险情并且构建了圩堤安全风险评估体系,该体系于2020年得到成功应用。邬爱清等<sup>[11]</sup>针对减压井淤堵引起的管涌险情,研制了可快速安全清洗的应急洗井装备。Wang等<sup>[12]</sup>针对管涌侵蚀形成复杂渗流路径提出了一种将水力-机械耦合方法与随机有限元分析相结合的概率评价框架,即满足防渗要求又降低施工成本。黄旭等<sup>[13]</sup>针对管涌险情提出土质改良、截水防渗、人工降低地下水位等防治措施。

然而,在诸多学者研究成果中,以鄱阳湖圩堤为对象,研究管涌破坏预测和防洪措施的依旧较少。因此,本文以鄱阳湖九合联区防洪圩堤为例,运用GeoStudio2018软件对防洪圩堤进行模拟分析并建立管涌预测的理论模型。设置了降雨强度、降雨类型和降雨时刻三个关键因素和四种工况,分别用Seep/W模块和Sigma/W模块对防洪圩堤进行破坏计算,并提出了反滤铺盖管的涌防洪措施,为管涌险情的应对提供了有力的理论指导基础和重要的理论支持。

## 1 鄱阳湖圩堤工程概况

### 1.1 自然地理

九合联圩位于江西省九江市永修县东北部修河段下游尾闾地区,是对鄱阳湖水位影响最大的地区之一。在2020年江西省遭遇洪水灾害期间,

九合联圩堤坝出现了管涌和泡泉等危险情况。九合联圩区域主流在永修县城附近与最大支流潦河形成交汇点,干流全长422 km。河流分为上游河段、中游河段和下游河段,其中下游河段分为柘林—永修和永修—吴城两段。

### 1.2 土层岩性

九合联圩修河段堤坝土层主体为黏土和壤土,其干密度 $\rho_d$ 、最优含水率 $\omega$ 如表1所示,堤身填土和堤基土的抗剪强度参数指标和饱和渗透系数如表2所示。

表1 土体干密度与最优含水率  
Tab. 1 Dry density and optimum moisture content of soil mass

土体	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率 $\omega/\%$
粉质黏土	1.88	25.9
(粉质)黏土	1.97	27.8
壤土	2.00	23.4

## 2 管涌预测理论模型

本模型以鄱阳湖九合联圩防洪圩堤的历史大洪水时间出现的险情情况进行具体水文、堤基地质状况调查分析得到的数据为基础;根据管涌预测模型等理论依据推导了防洪圩堤下游坡脚附近发生管涌的计算式,据此可以预测防洪圩堤内管涌出险点的范围。根据管涌涌出地表土层的性质,防洪圩堤将考虑细砂层以下四层土及其上部的砂壤土层。九合联圩防洪圩堤断面图如图1所示,堤基上部砂壤土为弱透水层,其厚度为 $T_r$ ,渗透系数为 $k_r$ ,其下部为强透水层,厚度为 $T_q$ ,渗透系数为 $k_q$ ,上游河水渗入堤基并在防洪圩堤下游CE段逸出。

设防洪圩堤上下游堤基段覆盖层长度分别为 $L_1$ 和 $L_2$ ,为了方便分析,将其分别转化为等效不透水层 $L_{1e}$ 和 $L_{2e}$ ,即堤基弱透水层在BB及CC断面上的渗流量和水头损失相同,由本奈特公式计算得:

表2 防洪圩堤抗剪强度参数指标和饱和参数系数

抗剪强度指标	堤身填土			堤基土				
	粉质黏土	(粉质)黏土	壤土	砂壤土	细砂	粗砂	砾砂	圆砾
黏聚力 $c/kPa$	23	18	14	8	0	0	0	0
内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	19	14	19	21	22	28	32	36

Tab. 2 Shear strength parameter indicators and saturation parameter coefficients for flood control embankments

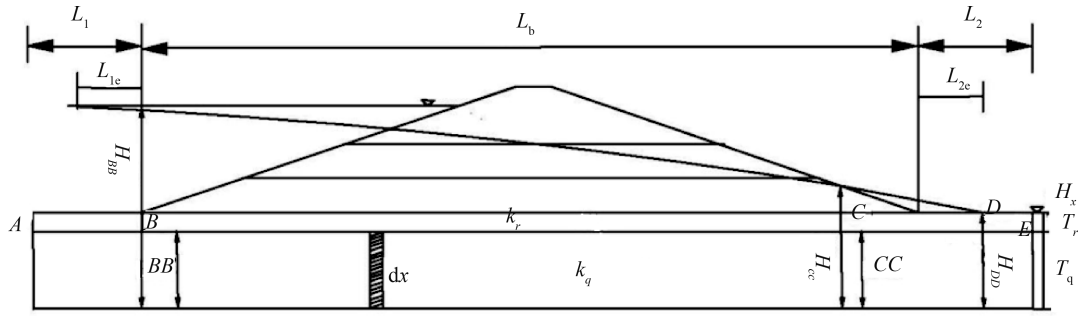


图 1 九合联圩防洪圩堤断面图

Fig. 1 Cross section diagram of flood control embankment of Jiuhe Lianwei

$$L_{1e} = \frac{\tanh(aL_1)}{a}; L_{2e} = \frac{\tanh(aL_2)}{a} \quad (1)$$

其中越流系数  $a = \sqrt{k_r/k_q T_r T_q}$ 。

基于此,堤基就产生由假想的不透水覆盖层作为顶面的有压渗流,其渗径长度  $L = L_{1e} + L_b + L_{2e}$ ,在此区域内渗流水头呈线性变化,作用在  $B$ 、 $C$  和  $D$  点上的渗流水头分别为  $H_{BB}$ 、 $H_{CC}$  和  $H_{DD}$ ,且  $H_{DD} = H_x$ ,因此得:

$$H_{BB} = H_x + \frac{(H_s - H_x)}{(L_{1e} + L_b + L_{2e})}(L_{2e} + L_b)$$

$$H_{CC} = H_x + \frac{(H_s - H_x)}{(L_{1e} + L_b + L_{2e})}L_{2e} \quad (2)$$

实际上,作用在弱透水覆盖层底面  $CE$  段上的渗流水头为  $h_x$ ,且呈非线性变化,在微分段  $dx$  的覆盖层上,向上逸出的渗流量为

$$dq_n = k_r \frac{\Delta h_x}{T_r} dx \quad (3)$$

式中:  $\Delta h_x = h_x - H_x$ 。

通过堤基垂直断面的渗流量以及  $dx$  长度上的堤基渗流量增量分别为

$$q = k_q T_q \frac{d(\Delta h_x)}{dx}; dq = k_q T_q \frac{d^2(\Delta h_x)}{dx^2} dx \quad (4)$$

令  $dq_n = dq$  得:

$$\frac{d^2(\Delta h_x)}{dx^2} = a^2 \Delta h_x \quad (5)$$

两边积分进而得到公式(5)的通解为  $\Delta h_x = c_1 e^{ax} + c_2 e^{-ax}$

$$x = 0; \Delta h_x = H_{CC} - H_x$$

$$x = L_2; \Delta h_x = 0 \quad (6)$$

结合上述边界条件得:

$$h_x = H_s + (H_{CC} - H_x) e^{ax} - c_2 (e^{ax} - e^{-ax})$$

$$c_2 = \left[ \frac{(H_{CC} - H_x) e^{aL_2}}{e^{aL_2} - e^{-aL_2}} \right] \quad (7)$$

根据公式(7)求得堤基覆盖层的渗流水头  $h_x$  后即可计算各点渗流逸出坡降:

$$i = \frac{h_x - H_x}{T_r} = \frac{1}{T_r} (H_{CC} - H_x) e^{ax} - \frac{1}{T_r} c_2 (e^{ax} - e^{-ax}) =$$

$$\frac{1}{T_r} [(H_{CC} - H_x) - c_2] e^{ax} + \frac{1}{T_r} c_2 e^{-ax} \quad (8)$$

令  $i = i_{kp}$  (覆盖层土的临界坡降);  $\Delta H_{CC} = H_{CC} - H_x$ , 则有:

$$(\Delta H_{CC} - c_2) (e^{ax_{kp}})^2 - T_r i_{kp} e^{ax_{kp}} + c_2 = 0 \quad (9)$$

解该一元二次代数方程,得发生管涌范围:

$$x_{kp} = \frac{1}{a} \ln \left[ \frac{i_{kp} T_r - \sqrt{i_{kp}^2 T_r^2 - 4(\Delta H_{CC} - c_2)c_2}}{2(\Delta H_{CC} - c_2)} \right] \quad (10)$$

可作如下预测:(1)  $x_{kp} < 0$ , 整个  $CE$  段均不会有发生管涌的可能性;(2)  $0 < x_{kp} < L_2$ , 则  $0 \sim x_{kp}$  处于发生管涌地段,  $x_{kp} \sim L_2$  处于不会发生管涌地段;(3)  $x_{kp} > L_2$ , 整个  $CE$  段均会发生管涌。特别说明,上述的  $x_{kp}$  值只是计算值,据此可以确定堤坊易发生管涌的具体范围。

### 3 防洪圩堤数值模拟

本研究选取江西省鄱阳湖经济区内九合联圩修河段的防洪圩堤作为研究对象,旨在探究库水位升降与降雨等耦合因素(如固定库水位、库水位升降速率、降雨强度、降雨时刻以及降雨类型)对防洪圩堤特征场响应和稳定性的影响,以识别库水位升降与降雨联合作用下可能导致防洪圩堤破坏的形式,从而采取必要的加固措施。在实际工程中,防洪圩堤往往面临地层环境复杂、几何外形不规则等复杂情况。在建立数值模型时,为了满足计算的收敛要求以获得更精确的结果,通常需要对实际的防洪圩堤模型进行简化处理,例如将不规则、起伏不平、陡峭或渐缓不一的边坡简化为

直线或规则曲线。

### 3.1 边坡几何形态设定

防洪圩堤分层从上往下依次设定为堤身粉质黏土、堤基粉质黏土、壤土、砂壤土、细砂、粗砂、砾砂、圆砾八种水平成层的防洪圩堤,层厚依次为 6、3.5、3.5、2、2、2、2 m,堤长 104 m,堤宽 3.5 m,堤高 23 m,上下游坡坡比 1 : 2.5,为了更好地反映九合联圩防洪圩堤的完整情况,数值模型均设置左侧为下游坡,右侧为上游坡。模型几何形态如图 2 所示。

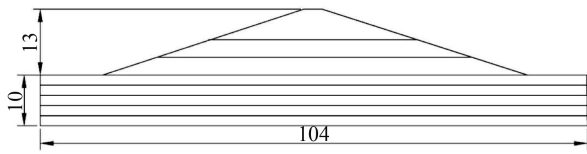


图 2 防洪圩堤几何形态

Fig. 2 Geometric form of flood control embankments

为研究库水位升降耦合降雨工况下防洪圩堤渗流稳定情况,本文设置四种工况分别加入降雨

强度、降雨类型、降雨时刻三种因素。通过探究这些因素与库水位升降的耦合对层状防洪圩堤的影响,来分析多种因素对其稳定性的影响。库水位升降速率采用了永修县九合联圩水文站历年地质报告中的数据,而降雨数据则根据永修县气象局的相关标准和规定进行设置。防洪圩堤模拟工况参数详见表 3。

### 3.2 各特征场计算网格划分

如图 3 所示,为保证试验与实际情况相吻合,本文对防洪圩堤进行了全局单元尺寸为 0.5 m 的加密处理,共设置 6 534 个节点和 6 334 个单元。本文主要研究边坡的各特征场,通过设置 7 个监测点对各工况下的特征场及特殊节点的变化规律进行全面分析。

在试验计算模型中,防洪圩堤的初始应力场由自重产生。右侧坡体为上游坡,最高压力水头为 23 m;左侧坡体为下游坡,设定常水头为 10 m。顶部设定为与大气进行水气热交换的边界,而左

表 3 防洪圩堤模拟工况参数

Tab. 3 Simulated working condition parameters for flood control embankments

工况编号	库水位		降雨		
	库水位/m	升降速率/(m · d <sup>-1</sup> )	降雨强度/(m · d <sup>-1</sup> )	降雨时刻/d	降雨类型
I	[10, 23] ∈ N	—	0.06	0~10	前锋型
	[10, 23] ∈ N	—	0.06	10~20	中锋型
	[10, 23] ∈ N	—	0.06	20~30	后锋型
II	12↔23	0.5	—	—	—
	12↔23	1	—	—	—
	12↔23	2	—	—	—
	12↔23	4	—	—	—
	12↔23	4	0.06	0~10	—
III	12↔23	4	0.03	10~20	—
	12↔23	4	0	20~30	—
	12↔23	4	—	—	前锋型
IV	12↔23	4	—	—	中锋型
	12↔23	4	—	—	后锋型

注:“↔”代表库水位上升以及库水位下降

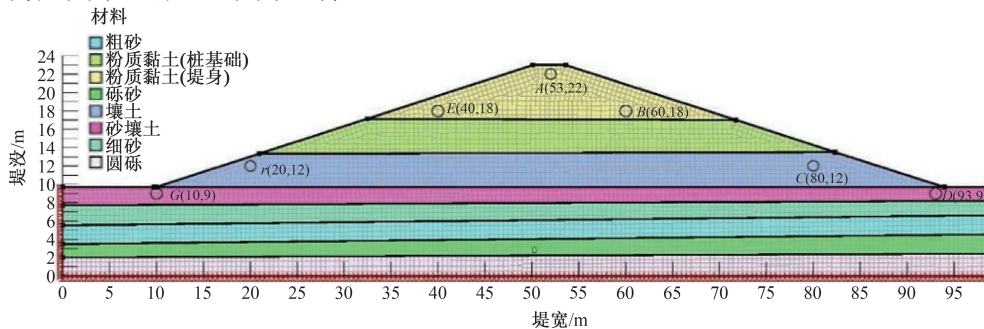


图 3 网格划分、监测点布设及位移边界条件

Fig. 3 Grid division, monitoring point layout, and displacement boundary conditions

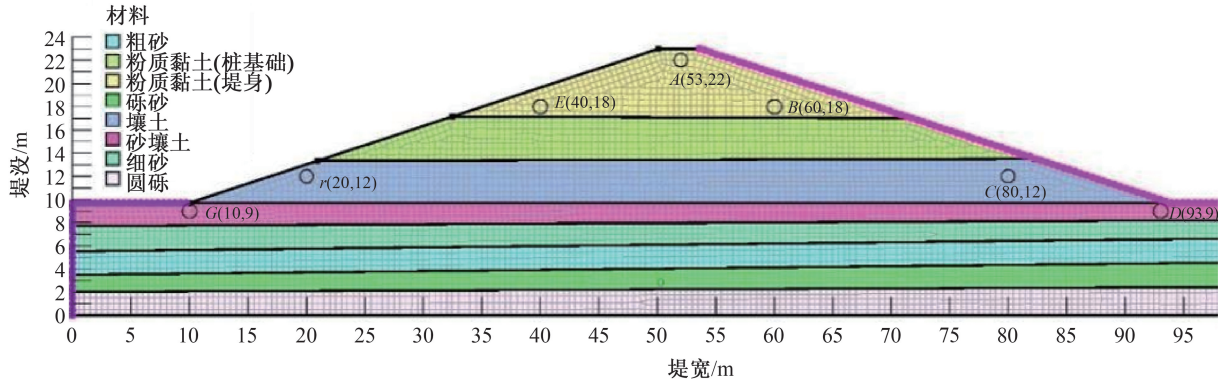


图 4 水流边界条件

Fig. 4 Water flow boundary conditions

表 4 防洪圩堤渗流计算结果部分统计表

Tab. 4 Partial statistical table of seepage calculation results for flood control embankments

固定库水位	安全系数 $K$	逸出点高程/m	抗滑稳定系数 $i$	临界坡降 $i_{cr}$
死水位 12 m	1.162	11.512	0.669	1.019
正常蓄水位 20 m	1.150	11.740	1.018	1.019
防洪水位 23 m	1.001	12.727	1.298	1.019

右两侧地下水位以上部位及底部设定为不透水边界。

考虑降雨和库水位两种水流边界条件。如图 4 所示,当库水位固定时,以对应库水位高度作为总水头。当库水位升降时,上游坡地表边界的流量将随之变化。当库水位升降与降雨同时出现时,需要定义下游坡的降雨强度、降雨时刻或降雨类型。如果单位降雨量大于土体入渗能力,则自动切换为常水头边界条件。

#### 4 防洪圩堤破坏计算

本研究采用了 Seep/W 模块和 Sigma/W 模块两种数值分析方法,对防洪圩堤的破坏情况进行深入的计算和分析,模拟了防洪圩堤在不同工况下的渗流情况。考虑了降雨强度、降雨类型和降雨时刻等因素,以分析防洪圩堤在这些复杂条件下的渗透行为。

综合 Seep/W 模块和 Sigma/W 模块的分析结果,全面了解防洪圩堤在四种工况下的破坏情况,从而为防洪圩堤防护措施提供了科学的依据和理论支持。

##### 4.1 工况 I 计算结果及分析

工况 I 最危险的险情为固定库水位 23 m+降雨时刻 20~30 d+降雨强度 0.06 m/d,下游逸出点高程均处于壤土层,其比重为 2.70,孔隙比为

0.667,通过计算可以确定该点逸出坡降,综合三种固定库水位下的最小安全系数  $K$ 、下游逸出点高程、下游逸出坡降等计算结果,如表 4 所示。

综上可分析出,防洪圩堤的最大渗透坡降和下游逸出点高程会随着库水位的升高而增加,但最小安全系数会随着库水位的升高而降低,这对下游堤坝的安全稳定不利。当防洪库水位中  $i > i_{cr}$  时,土体可能会发生流土破坏险情,在降雨时刻 20~30 d 之间出现。此外,其最小安全系数小于现行《堤防工程设计规范》中抗滑稳定系数正常运行条件 1.10 的要求,会存在脱坡险情。这是由于降雨过程中雨水的润滑作用会降低潜在滑移面的摩擦,同时降低颗粒之间的粘结,并且雨水入渗对土颗粒也会产生渗透力,增加滑动力矩。

##### 4.2 工况 II 计算结果及分析

主要探究不同库水位升降速率情况下逸出坡降的变化特征和最小安全系数的变化特征。

###### 4.2.1 逸出坡降的变化特征

在库水位上升过程中,下游逸出点的逸出坡降呈先增大后减小趋势,最终稳定在 0.125 (图 5)。这表明随着上游水位的上升,水的渗入导致坝体内的水力坡降增加。当上游水位达到稳定后,水力坡降开始减小,最终趋于最小值。水位上升速率越快,逸出坡降最大值也越大。在库水位下降过程中,逸出坡降呈先减少后稳定的趋势。

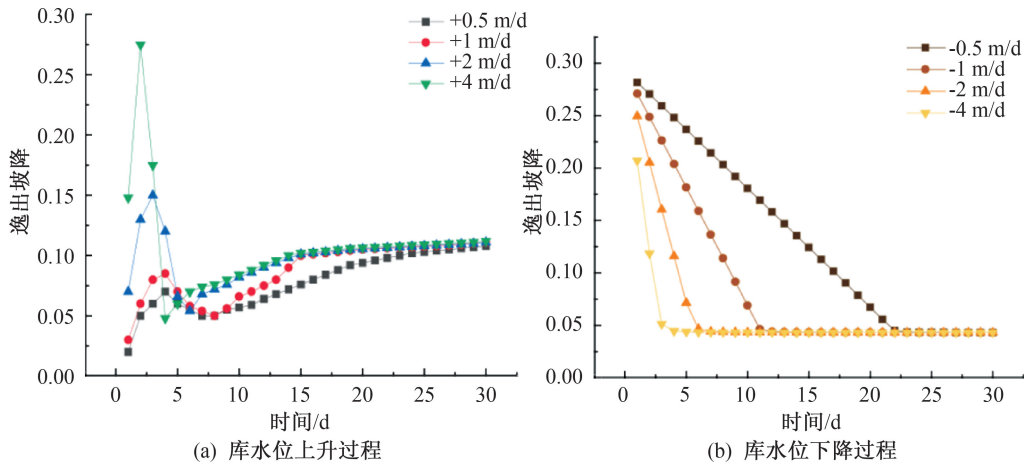


图5 不同库水位升降速率逸出坡降随时间变化曲线

Fig. 5 Relationship curve between the rate of rise and fall of different reservoir water levels and the evolution of the slope over time

根据防洪圩堤险情判据可知,逸出坡降最大值均小于允许坡降和临界水力坡降,因此不会发生流土破坏。

#### 4.2.2 最小安全系数的变化特征

利用前述数值分析方法,计算出防洪圩堤在0.5、1、2、4 m/d四种库水位升降速率,对应的防洪圩堤安全系数最低值,并将防洪圩堤稳定性最小值与库水位升降速率进行多元函数拟合,得到的函数关系曲线如图6。

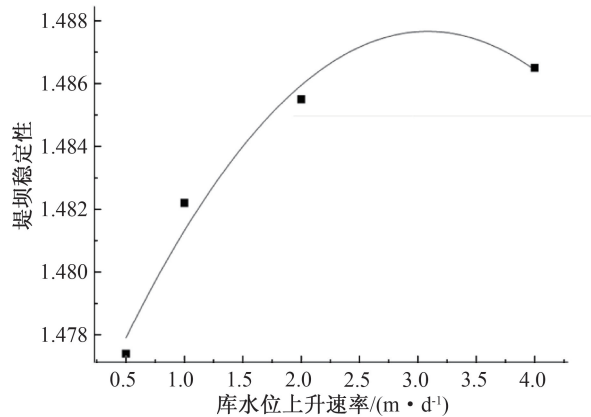


图6 防洪圩堤稳定性最小值与库水位升降速率的关系曲线

Fig. 6 Variation curve of overflow slope with time under different rates of water level rise and fall in reservoirs

利用防洪圩堤稳定最小值与固定库水位升降速率的函数公式,计算出防洪圩堤稳定最小值与其对应的库水位升降速率。此外,该防洪圩堤在不同库水位升降速率下的最小安全系数均大于《堤防工程设计规范》抗滑稳定技术正常运行条件规定的值1.10。因此,可以通过函数判据耦合脱坡险情判据来认定该堤不会发生脱坡

险情。

#### 4.3 工况 III 计算结果及分析

主要探究本节库水位升降速率耦合降雨强度(或降雨时刻)情况下逸出坡降的变化特征和最小安全系数的变化特征。

##### 4.3.1 逸出坡降的变化特征

下游逸出点的逸出坡降随着降雨时段0~10 d逐渐减小并保持稳定,但与10~20 d和20~30 d呈现相同的变化趋势。在0~10 d的降雨时段,0~10 d、10~20 d和20~30 d逸出坡降的最大值分别为3.366、1.231、1.296(图7),该数据表明库水位上升及降雨入渗会导致防洪圩堤土体流失破坏。在固定库水位下降的情况下,下游逸出点呈现短时间单峰变化趋势,并且各降雨时段的逸出坡降均小于临界坡降,因此该防洪圩堤不会发生流土破坏。

##### 4.3.2 最小安全系数的变化特征

通过观察下游逸出点的破坏特征,根据图8可以得出以下结论:在固定库水位升降的情况下,最不利的工况是在雨强0.06 m/d+时刻,在0~10 d内库水位上涨,然后在20~30 d内下降。当库水位下降时,地下水的渗流会增加下游坡面的下滑力,导致下游坡面失稳。同时,雨水的润滑作用和孔隙水的残留量也会对防洪圩堤的稳定性产生影响。因此,可以确定存在脱坡的危险情况。

#### 4.4 工况IV计算结果及分析

由图9可知,库水位升降速率与不同降雨类型的耦合变化趋势如下:前锋型逐渐减少并保持稳

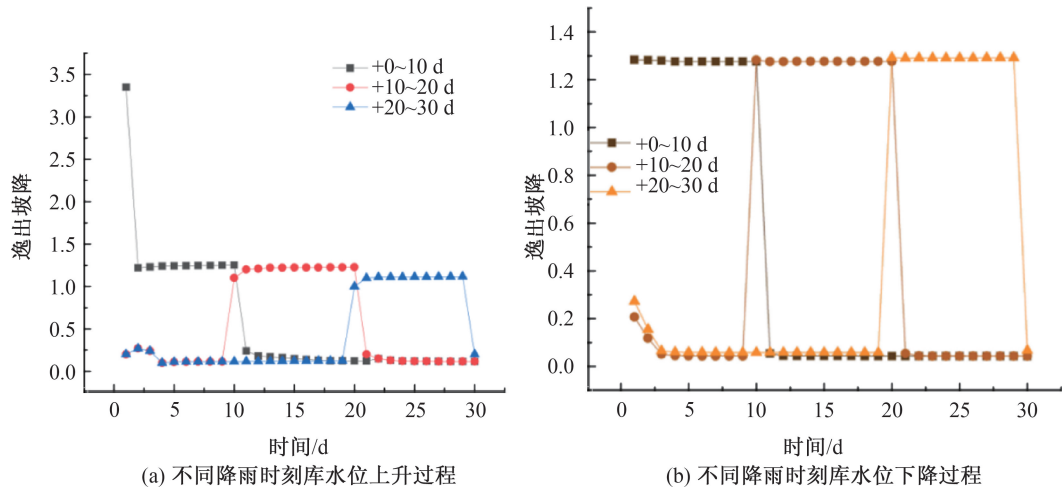


图 7 不同降雨时刻逸出坡降随时间变化关系

Fig. 7 Relationship between the slope gradient and time at different rainfall moments

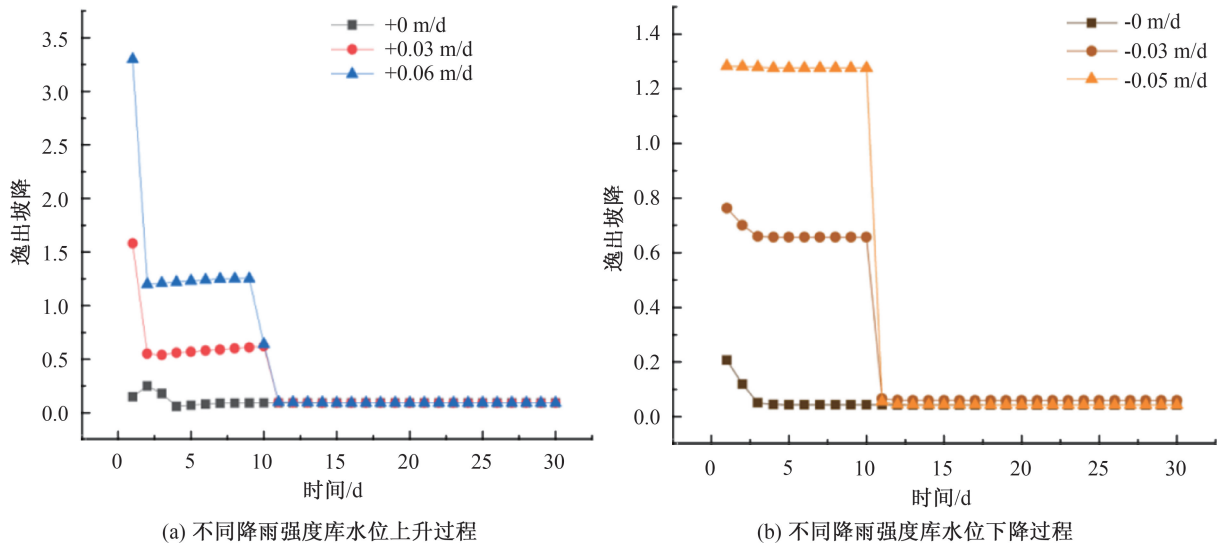


图 8 不同降雨强度逸出坡降随时间变化关系

Fig. 8 Relationship between different rainfall intensities and the variation of slope over time

表 5 不同降雨类型下安全系数与逸出坡降

Tab. 5 Safety factor and escape slope under different rainfall types

降雨类型	库水位升降	安全系数最小值 $K_{min}$	逸出坡降 $i$	安全系数规定值 $K_{(允许)}$	临界坡降 $i_{cr}$
前锋型	↑	1. 213	2. 870	1. 10	1. 280
前锋型	↓	1. 262	1. 255	1. 10	1. 280
中锋型	↑	1. 166	1. 240	1. 10	1. 280
中锋型	↓	1. 160	1. 275	1. 10	1. 280
后锋型	↑	1. 359	0. 650	1. 10	1. 280
后锋型	↓	1. 331	0. 645	1. 10	1. 280

定,中锋型和后锋型呈现出一个波峰形态,即先增加后减少最终保持稳定。在库水位上升和下降过程中,每种降雨类型都存在最大逸出坡降值。当固定库水位升降变化时,前锋型的逸出坡降大于

临界坡降,而其他降雨类型的逸出坡降均小于临界坡降,这可能导致土体流动破坏。依据表 5 的数据可知,固定库水位升降与不同降雨类型的最小安全系数均大于规定值 1. 10。

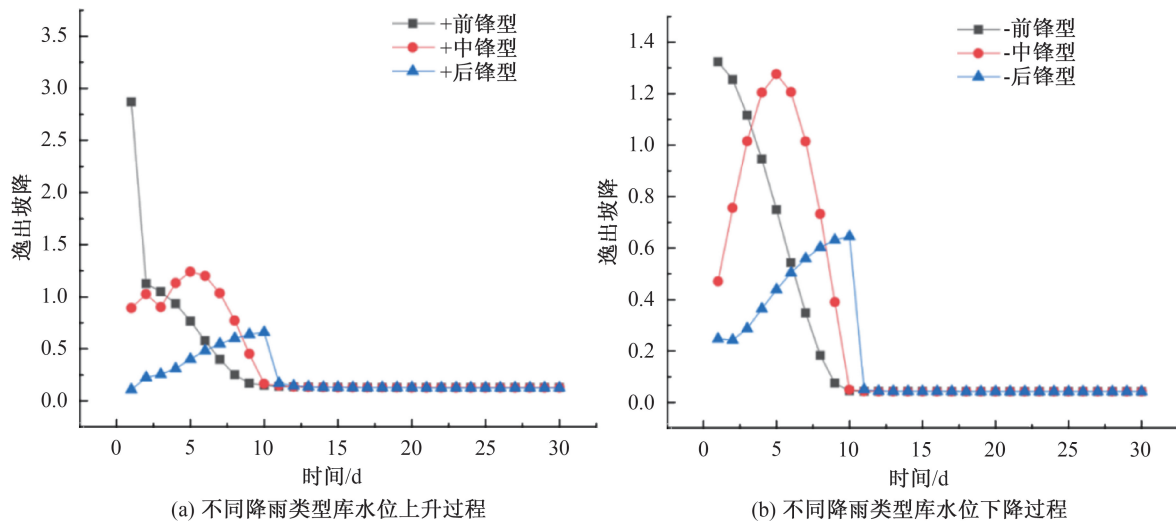


图9 不同降雨类型逸出坡降随时间变化关系

Fig. 9 Relationship between the slope gradient of different rainfall types and their variation over time

表6 库水位升降耦合降雨工况管涌预测模型数据汇总表

Tab. 6 Summary table of pipeline surge prediction model data for coupled rainfall conditions of reservoir water level rise and fall

工况编号	危险组合	覆盖层土的临界坡降 $i_{kp}$	C点渗透水头 $H_{cc}$	CE段上的渗流水头 $H_x$	弱透水层渗透系数 $k_r$	强透水层渗透系数 $k_q$	发生管涌范围 $x_{kp}$
I	23 m+20~30 d+0.06 m/d	1.298	12.782	10	$3 \times 10^{-4}$	0.151	0.200
II	4 m/d	0.280	12.715	10	$3 \times 10^{-4}$	0.514	-0.756
III	4 m/d+0.06 m/d+ 20~30 d	3.366	12.727	10	$3 \times 10^{-4}$	0.514	-7.717
IV	4 m/d+前峰型	2.870	12.683	10	$3 \times 10^{-4}$	0.514	-7.344

#### 4.5 管涌出险点计算

根据九合联圩防洪圩堤的库水位升降耦合降雨数据,统计得出了最大逸出坡降和最大逸出点高程的汇总结果,详见表6。等效渗透系数的计算公式如公式(11):

$$k_q = \frac{1}{H} \sum_{j=1}^n k_j H_j \quad (11)$$

从防洪圩堤几何尺寸得到  $T_r$  为 2 m,  $T_q$  为 8 m,通过计算求出各工况下的  $x_{kp}$  分别为 0.200、-0.756、-7.717、-7.344,根据管涌预测理论模型的判据可知工况 I 中  $x_{kp}$  满足第二条,则 0~0.2 为发生管涌地段,0.2~10 为不会发生管涌地段,初步可以断定管涌发生在堤脚附近,其余三个工况均满足  $x_{kp} < 0$ ,则说明整个 CE 段均不会发生管涌。

#### 5 管涌治理加固

通过对出险点进行计算研究,发现防洪圩堤只在工况 I 下出现管涌现象,而出险形式以单个或多个管涌点为主。基于这一发现,可以设计采用反滤铺盖(方案一)或反滤围井(方案二)的加固

方案,以及时制止涌砂现象,防止溃堤决口灾害的发生。

依据方案一的反滤铺盖设计理论,以堤脚出险点为例,反滤层材料为砂石土料,盖重厚底为 1.5 m,坡地为 1:2,建立防洪圩堤管涌反滤铺盖治理的数值模拟模型,进而可得设置反滤铺盖后浸润线表现情况(图 10),同理可得方案二的反滤围井设计,通过在围井内设置下层粗砂、中层小石子、上层石子三层反滤料,并在反滤层顶面设置排水管,建立防洪圩堤管涌反滤围井治理的数值模拟模型,可得设置反滤铺盖后浸润线表现情况(图 11),得到工况 I 在两种治理方案下管涌点逸出坡降变化情况,如图 12。

综合图 10—图 12 可知,采用反滤铺盖治理单个管涌点的效果显著,反滤层能够降低浸润线,最大逸出坡降为 0.159,符合管涌级配连续土的允许坡降要求( $0.15 \leq [i] \leq 0.25$ )。无论是否降雨,其封堵效果均较明显,与未治理时相比,最大逸出坡降减少了 87.7%。然而,在持续强降雨情况下,上游库水位的渗透压力增加了砂粒的流出率,同时

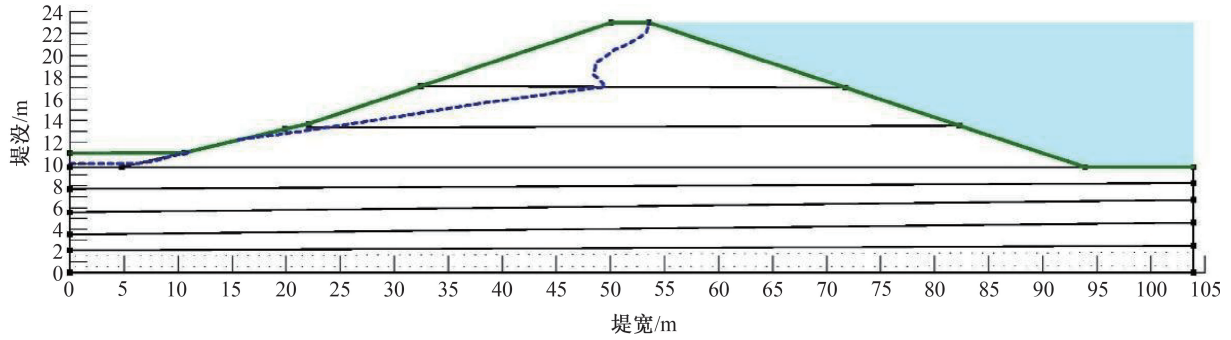


图 10 反滤铺盖治理后浸润线表现情况

Fig. 10 Performance of the infiltration line after the treatment of the anti-filter blanket

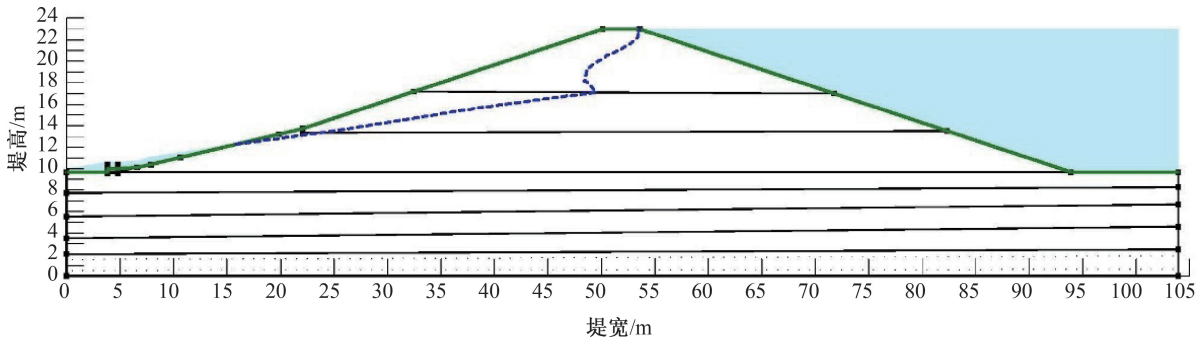
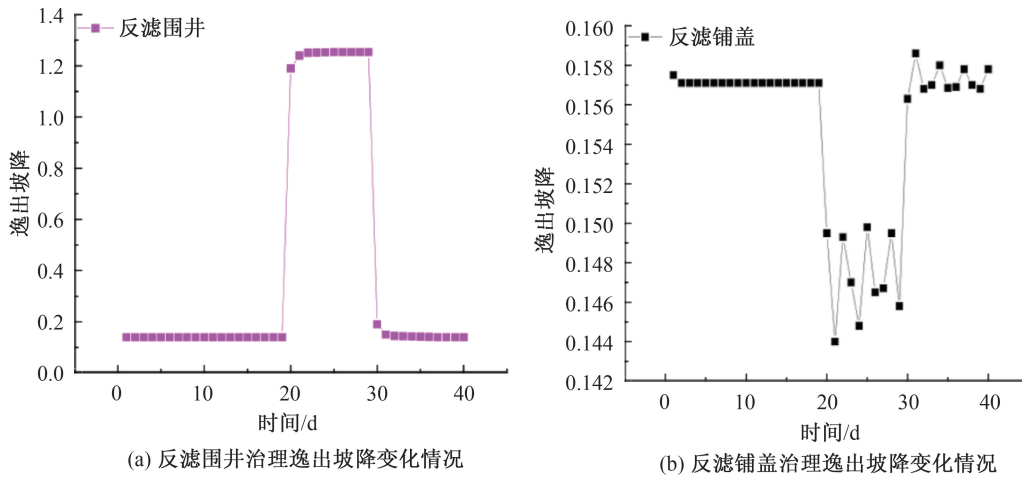


图 11 反滤围井治理后浸润线表现情况

Fig. 11 Performance of the infiltration line after the treatment of the anti-filtration well



(a) 反滤围井治理逸出坡降变化情况

(b) 反滤铺盖治理逸出坡降变化情况

图 12 管涌治理方案的管涌点逸出坡降变化情况

Fig. 12 Changes in the gradient of the overflow point of the piping treatment plan

由于下游坡面的降雨形成径流,使反滤层顶面排水管的排水负担加重,反滤围井排水能力受到影响,逸出坡降上升至与未治理时相近。

## 6 结论

1)在工况 I 下会发生管涌,管涌出现破坏的有固定库水位 23 m+降雨时刻 20~30 d+降雨强度 0.06 m/d,管涌点位于下游坡坡脚 0.2 m 处。并确

定了四种最危险工况下的  $x_{kp}$  值分别为 0.200、-0.756、-7.717、-7.344,根据管涌预测理论模型的判据可知工况 I 满足  $x_{kp} > 0$ ,其余三个工况均满足  $x_{kp} < 0$ 。

2)本研究提出了管涌防治措施,通过模拟分析验证了反滤铺盖符合相关规范要求。在反滤层中浸润线下降,最大逸出坡降为 0.159。无论是否降雨,该方案的封堵效果均明显,与未治理情况相

比,逸出坡降减少了 87.7%。然而,在降雨发生时,方案二的逸出坡降未能达到管涌允许的要求。

#### 参考文献:

- [1] 王小茹,何怀东,游凌云. 堤坝管涌发生的预测方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(2): 169-172.
- [2] WANG G, ZHAO B, ZHAO K, et al. Piping-seepage mechanism of tailings with different fine particle contents [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(11): 04023201.
- [3] CHEN C, WANG Y, ZHANG J, et al. A preliminary study of landslide dam failures induced by the combined influence of piping and overtopping[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 129984.
- [4] 沙金焯. 预测堤防背侧管涌的一种方法[J]. 水利水电工程学报, 2003(4): 57-59.
- [5] ZHANG S, YE F, LIU Y, et al. Critical hydraulic gradient of piping erosion under free flow and seepage flow coupling model[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2023, 60(5): 419-427.
- [6] 张我华,余功栓,蔡袁强. 堤与坝管涌发生的机理及人工智能预测与评定[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004(7): 109-115.
- [7] LI R, WANG Z, SUN H, et al. Automatic identification of earth rock embankment piping hazards in small and medium rivers based on UAV thermal infrared and visible images[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(18): 4492.
- [8] GAO J, DANG J, HAN X, et al. A study on the generation mechanism and development process of piping based on the theory of muddy water seepage [J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 6987524.
- [9] 王霜,陈建生,钟启明. 多层堤基结构管涌动态发展的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 39-45.
- [10] 雷声,孙东亚,万国勇,等. 鄱阳湖圩堤风险评估与应急抢险技术[J]. 江西水利科技, 2021, 47(2): 122-129.
- [11] 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(7): 1310-1328.
- [12] WANG R, CHEN G, LIU Y. Internal piping erosion evaluation of embankment dam considering the spatial variability of soil properties[J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2024, 10(2): 04024006.
- [13] 黄旭,范尧,蔡家宏,等. 双层堤基渗流变形特征分析及管涌防治[J]. 浙江水利水电学院学报, 2018, 30(3): 35-38.
- [13] CASAS J A, GARCÍA-OCHOA F. Viscosity of solutions of xanthan/locust bean gum mixtures[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1999, 79(1): 25-31.
- [14] OAKENFULL D, NADEN J, PATERSON J. Solvent structure and the influence of anions on the gelation of  $\kappa$ -carrageenan and its synergistic interaction with locust bean gum[J]. *Gums and Stabilisers for the Food Industry*, 2000, 251: 221-228.
- [15] PRAJAPATI V D, JANI G K, MORADIYA N G, et al. Locust bean gum: A versatile biopolymer[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 94(2): 814-821.
- [16] LIU J, CHEN Z, SONG Z, et al. Tensile behavior of polyurethane organic polymer and polypropylene fiber-reinforced sand[J]. *Polymers*, 2018, 10(5): 499.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准 GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [18] CHENG Z, GENG X. Soil consistency and interparticle characteristics of various biopolymer types stabilization of clay [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2021, 27(2): 103-113.

(责任编辑 周雪梅)

(责任编辑 王利君)

(上接第 50 页)

- [7] WILES C C. A review of solidification/stabilization technology [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1987, 14(1): 5-21.
- [8] LATIFI N, HORPIBULSUK S, MEEHAN C L, et al. Improvement of problematic soils with biopolymer—An environmentally friendly soil stabilizer[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 29(2): 04016204.
- [9] 刘瑾,张达,汪勇,等. 高分子稳定剂生态护坡机理及其应用[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(03): 420-426.
- [10] JIA Z L, YAN C G, BO L, et al. Experimental study on erosion resistance and ecological slope protection of guar gum treated fiber-reinforcement loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44: 1881-1889.
- [11] 吕家栋,赵立财. 黄原胶改善黏土断裂性能研究[J]. 人民长江, 2023, 54(04): 205-210+217.
- [12] SCHORSCH C, GARNIER C, DOUBLIER J. Viscoelastic properties of xanthan/galactomannan mixtures; Comparison of guar gum with locust bean gum[J]. *Carbohydrate Polymers*. 1997, 34(3): 165-175.