黄河放淤固堤工程淤背的合理施工速率

沈细中[1,2]，张　惠[3]，赵寿刚[1]

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院，河南 郑州 450003；2. 中国科学院武汉岩土力学研究所，湖北 武汉 430071；3. 长江水利委员会长江科学院，湖北 武汉 430010)

摘　要：采用淤背方式加固黄河大堤时，河南、山东一期工程堤身多处出现裂缝。目前尚无淤背对堤身影响的定量研究成果，因而放淤固堤的合理施工速率难以确定。淤背体及堤防土体的水分消散过程实际上是非饱和流固耦合问题；淤背分级施工的变水头边界问题，可等效成多级常水头边界问题。采用非饱和渗流分析方法，计算出每级施工后堤防及淤背体的浸润线；将其作为已知边界条件，考虑堤防土体力学特性、排水条件等影响，进行非饱和流固耦合分析，据此提出相应的淤背施工合理速率。研究表明，该模型计算结果与实际情况相符，因而可为黄河标准化堤防工程设计与施工提供理论依据，并可供其它河流治理时参考。

关键词：黄河；标准化堤防；淤背；施工速率；非饱和流固耦合

作者简介：沈细中(1969－　)，男，工程师，博士，主要从事岩土数值分析方面的研究。

0　引　　言

近年来，国家投资514亿启动了黄河标准化堤防建设[1-2]，利用水力管道将河道中的泥沙输送至大堤背河侧沉放（简称：淤背）。因淤背施工速度过快，河南、山东一期工程多处出现裂缝，严重危及黄河大堤的安全。20世纪70年代以来，淤背方法始用于治理黄河，人们对淤背及其影响以定性分析为主，未进行过定量研究[1-2]，因而淤背施工速率设计缺乏必要的理论依据。随着大型有限元商业分析程序的开发与推广，非饱和流固耦合模型在土木水利等行业已有了初步的应用[3-4]。现以山东某堤段为例，采用非饱和流固耦合方法模拟施工过程，并进行多种特定工况(土质、排水条件、施工速率)分析，据此提出标准化堤防工程淤背的合理施工速率。

1　非饱和流固耦合模型[4-5]

1.1　有效应力原理

对于非饱和土，有效应力表达式可表示如下

$$\sigma' = (\sigma - u_a I) + \chi(u_a - u_w)I \quad 。 \tag{1}$$

式中　σ 为作用于土体的总应力向量；u_w 为孔隙水压力；u_a 为孔隙气压力；(u_a-u_w)为基质吸力；σ' 为作用在土骨架上的有效应力向量；χ 为孔隙压力系数;单位向量 I={1,1,1,0,0,0}。

1.2　虚功方程

非饱和流固耦合时，令饱和度 s 为状态变量，假定由负孔隙水压力引起的土体的变形与外荷载作用机理相同，则在时刻 t，土体内部的虚功方程可表示为

$$\begin{aligned}&\int_V ((\sigma' + u_a I) - \chi(u_a - u_w)I) : \delta\varepsilon \mathrm{d}V \\ &= \int_S t \cdot \delta v \mathrm{d}S + \int_V f \cdot \delta v \mathrm{d}V + \int_V sn\rho_w g \cdot \delta v \mathrm{d}V 。\end{aligned} \tag{2}$$

式中　$\delta\varepsilon \overset{\text{def}}{=} sym(\partial \delta v / \partial x)$ 为虚变形率；δv 为虚速度场；t 为表面单位面积的张拉应力；f 为单位体积的体积力（液体重量除外）；ρ_w 为流体密度；g 为重力加速度向量；n 为孔隙率；s 为饱和度；S 为单元表面面积；V 为单元的体积。

1.3　水流连续性方程

在多孔介质分析中，假定在变形过程中水和土颗粒的变形量很小，则在一个时间增量内，土体内部的流体体积有如下关系：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\int_V sn \mathrm{d}V\right) = -\int_A sn n \cdot v_w \mathrm{d}A \quad , \tag{3}$$

式中，v_w 为流体相对于固相的平均速率（渗透流速），n 为单元体表面朝外的法线向量。

1.4　非饱和土的渗透性

非饱和土体中的水流渗流一般认为满足 Darcy 定律，即

$$snv_w = -\hat{k} \cdot \left(\frac{\partial u_w}{\partial x} - \rho_w g\right) \quad 。 \tag{4}$$

式中　$\hat{k}$ 为渗透系数；x 为点的座标，即 $x_j(j=x,y,z)$ 的缩写。

式（2）、（3）为非饱和流耦合分析的总控制方程。在非饱和情况下，s 是变化的.目前已有很多饱和度与基质吸力关系的经验公式[4-5]，将其代入式（3），就可得到非饱和渗流的总控制方程。非饱和流固耦合分析非常复杂，大多数情况下只能采用数值方法求解。ABAQUS 软件中有非饱和流固耦合模型[4]。

2　淤背合理施工速率分析方法

2.1　计算方法

淤背合理施工速率分析时，先利用非饱和渗流模型[4]计算出多种工况（土质、排水条件、施工速率）下，每级施工后堤防及淤背体的浸润线；然后将其作为已知边界条

基金项目：科技部科研院所社会公益研究专项（2005DIB3J054）

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

件，考虑施工速率的影响，利用非饱和流固耦合模型进行特定工况计算与对比分析，据此提出淤背的合理施工速率。

2.2 水头边界条件

分析放淤固堤工程时，可把堤身、堤基、淤背体作为一个整体考虑。淤背体水分向堤身入渗的过程是一个变水头边界问题，可采用多级常水头边界来代替连续的变水头边界[4]。为简化起见，假定淤背体入渗的水分，已经在堤身形成了稳定的浸润线作为计算的初始条件；并假定3种排水工况，具体如表1。

2.3 堤防纵向裂缝判别方法

倾度法[6]是计算土层不均匀沉陷后水平面的倾斜角度 γ。破坏临界倾度 γ_c 一般在0.5%～1.8%内变化。

当堤防土体的拉应变大于土的极限拉应变时，就会产生裂缝，据此可用拉应变法[6]来判别堤防的变形状况。粘性土的临界拉应变大致在0.1%～0.3%之间。

3 实例分析

3.1 工程概况

168+050断面[6]地处山东东明，该断堤防的裂缝较多，该剖面的情况如图1。该堤段修路与淤背主体施工系2004年12月开始，2005年6月结束。因工期紧，淤背施工基本上是连续进行的，淤背表层有积水；2005年3月至5月在堤顶堆有3 m左右的土层。该堤段2005年4月份堤顶路中心开始出现纵向裂缝；随着施工的推进，裂缝不断扩展；特别是堤顶道路投入运行后，因重载施工车辆行驶，堤身

表1 水头边界条件的确定

工况	初始水头边界			施工完成水头边界		
	淤背体	堤身	堤基	淤背体	堤身	堤基
充分排水	淤背体表面水头为0	浸润面水头为0	堤基淤背体以外部分原地下水位处的水头为0	淤背体底面水头为0	无浸润面	堤基淤背体以外部分原地下水位处的水头为0
中等排水	淤背体表面水头为0	浸润面水头为0	同上	淤背体总高度1/2处的水头为0	因淤背提高的浸润面高度的1/2处的水头为0	同上
不排水	淤背体表面水头为0	浸润面水头为0	同上	淤背体表面水头为0	浸润面水头为0	同上

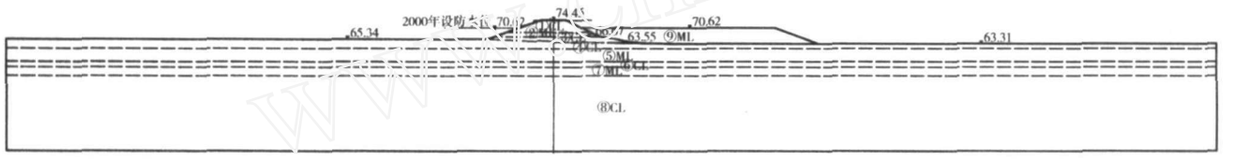


图1 168+050断面计算剖面

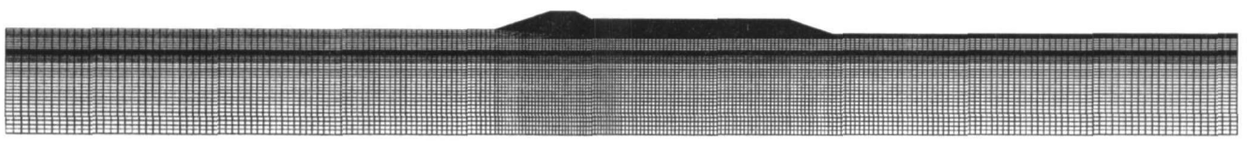


图2 168+050断面计算网格

表2 168+050断面计算参数

土层编号	土性	土粒比重	干密度 /(kg·m^{-3})	湿密度 /(kg·m^{-3})	饱和密度 /(kg·m^{-3})	孔隙比	含水率 /%	渗透系数 /(cm·s^{-1})	k	n	R_f	k_b	m	A_{ur}	c /kPa	φ /(°)
1	自然 低液限粘土	2.70	1520	1699	1955	0.78	11.80	6.79×10^{-4}	290.4	0.32	0.67	169.0	0.32	2.5	27.8	18.0
	饱和 低液限粘土								195.4	0.42	0.68	112.2	0.33	2.5	20.8	14.0
2	自然 低液限粉土	2.70	1460	1755	1919	0.85	20.20	1.73×10^{-4}	150.1	0.63	0.83	60.3	0.65	2.5	16.3	22.0
	饱和 低液限粉土								121.8	0.66	0.72	60.0	0.64	2.5	13.0	22.0
3	自然 低液限粘土	2.70	1520	1699	1955	0.78	11.80	6.79×10^{-4}	290.4	0.32	0.67	169.0	0.32	2.5	27.8	18.0
	饱和 低液限粘土								195.4	0.42	0.68	112.2	0.33	2.5	20.8	14.0
4	自然 低液限粘土	2.72	1300	1750	1905	0.90	22.00	6.18×10^{-7}	103.2	0.60	0.74	39.3	0.40	2.5	27.8	18.0
	饱和 低液限粘土								78.2	0.34	0.70	22.9	0.55	2.5	20.8	14.0
5	自然 低液限粉土	2.70	1460	1755	1919	0.85	20.20	1.73×10^{-4}	150.1	0.63	0.83	60.3	0.65	2.5	16.3	22.0
	饱和 低液限粉土								121.8	0.66	0.72	60.0	0.64	2.5	13.0	22.0
6	自然 低液限粘土	2.70	1520	1699	1955	0.78	11.80	6.79×10^{-4}	290.4	0.32	0.67	169.0	0.32	2.5	27.8	18.0
	饱和 低液限粘土								195.4	0.42	0.68	112.2	0.33	2.5	20.8	14.0
7	自然 低液限粉土	2.70	1460	1755	1919	0.85	20.20	1.73×10^{-4}	150.1	0.63	0.83	60.3	0.65	2.5	16.3	22.0
	饱和 低液限粉土								121.8	0.66	0.72	60.0	0.64	2.5	13.0	22.0
8	自然 低液限粘土	2.72	1520	1699	1966	0.78	11.80	6.79×10^{-4}	290.4	0.32	0.67	169.0	0.32	2.5	27.8	15.0
	饱和 低液限粘土								195.4	0.42	0.68	112.2	0.33	2.5	20.8	15.0
9	自然 低液限粉土	2.70	1460	1755	1919	0.85	20.20	1.73×10^{-4}	150.1	0.63	0.83	60.3	0.65	2.5	11.3	22.0
	饱和 低液限粉土								121.8	0.66	0.72	60.0	0.64	2.5	6.9	22.0

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

出现了 2～4 条纵向次生裂缝。

3.2 计算模型与计算参数

根据计算剖面图 1，剖分四边形网格如图 2，该模型的节点为 12489 个，单元为 12180 个。土体采用 Duncan-Zhang 模型，考虑土体卸荷的影响及土体开裂后的应力转移[7]，计算参数如表 2，土壤饱和度与孔隙负压的关系参考选取[6]。堤基边界的水平、铅直位移固定；堤防临河、背河边界的水平位移固定。堤防临河边界地下水位取 0.5 m；背河边界地下水位取 1.0 m；堤防背河侧渗流边界按 淤背体干湿状态确定。该堤段堆土的位置为堤顶道路中线至堤坡侧，高为 3 m，宽 9 m，堆土的密度取 1350 kg/m^3。堤防道路运用时，车辆荷载采用竖直均布标准轴载（压力为 0.7 MPa）[3]。堤防道路作为弹性材料考虑[3]，道路宽 6 m，厚度为 0.34 m，弹性模量为 9.66×10^5 kPa，泊松比为 0.33，密度为 2050 kg/m^3。

3.3 计算工况

根据 168+050 断面的实际施工情况，确定基本计算工况如表 3，利用该工况对模型进行验证分析。经验表明[2]，放淤固堤施工速率 1 m/月时，堤防不易产生裂缝。放淤固堤合理施工速率分析时，可对多个工况进行对比分析，从而确定放淤固堤最优施工速率，具体工况如表 5（Duncan-Zhang 模型中压缩参数 k 值简称为压缩参数）。

3.4 模型验证分析

通过施加自重荷载模拟堤防放淤固堤过程，淤背施工按分级加载考虑[4]；通过堤防背河侧水压力的变化模拟水位的变化；在考虑土体湿化变形[7]的基础上，采用非饱和流固耦合模型进行分析；根据施工的实际情况，考虑堤顶道路修建、堤顶堆载、车辆荷载作用等工况。

分析时，可根据图 2 的有限元分析网格，利用表 2 的土性参数，采用 ABAQUS 软件[3,4]，通过自编 Duncan-Zhang 子程序及湿化变形子程序，对表 3 的计算工况进行分析，利用倾度法、拉应变法等对堤防的裂缝情况进行评价，其中以倾度值大于 1.1%，拉应变值大于 0.3%作为堤防发生破坏的判据[6]。堤身的堤顶面铅直以下区域的倾度值、拉应变值是判断堤防是否开裂的重要指标。为分析放淤固堤对大堤的影响，将标准化堤防整个建设过程中，堤身的堤顶面竖直以下区域的最大倾度值、最大拉应变值的变化情况列于图 3。

由图 3 可知，淤背施工至第 7 级时（2005 年 4 月），堤身的最大拉应变值、最大倾度值均超过临界值；随着施工的不断推进，堤身的倾度值、拉应变值均继续上升，至堤顶堆载消除后，堤身的倾度值、拉应变值才下降；而且两者的变化规律相近；堤顶堆载后，堤身的倾度值、拉应变值显著增大；施加车辆荷载后，堤身的倾度值、拉应变值均显著增大，说明车辆超载作用会加剧裂缝的产生与扩展。

与实际情况对比分析可知，计算结果与该断面的裂缝形成与扩展情况一致，并与实际情况相符。由此可见，本课题采用的分析参数符合实际情况，采用的模型适当，分析方法合理。

3.5 淤背合理施工速率分析

取 168+050 断面进行特定工况分析，基本资料同前，分析工况如表 4。除特别说明外，分析时将不考虑堤顶堆

表 3 168+050 断面基本工况

时间	2004-12	2004-12	2005-01	2005-02	2005-03	2005-04	2005-05	2005-06
工况	未淤背道路施工	第 1 级淤背	第 2 级淤背	第 3 级淤背	第 4 级淤背	第 5 级淤背、堆载 1 m 第 6 级淤背、堆载 2 m 第 7 级淤背、堆载 3 m	第 8 级淤背 第 9 级淤背	第 10 级淤背 堤顶卸载 车辆荷载
淤背计算高程/m	63.30	64.10	64.90	65.70	66.50	68.17	69.91	70.62
淤背实际高程/m	63.30	64.55	65.00	65.70	66.70	68.30	70.00	70.62

表 4 168+050 断面特定工况

类别	淤背施工速率/(m·月$^{-1}$)						排水情况			堤身、堤基土壤参数							
										压缩参数				渗透系数			
工况	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	充分	中等	不排水	-20%	-10%	+10%	+20%	-20%	-10%	+10%	+20%

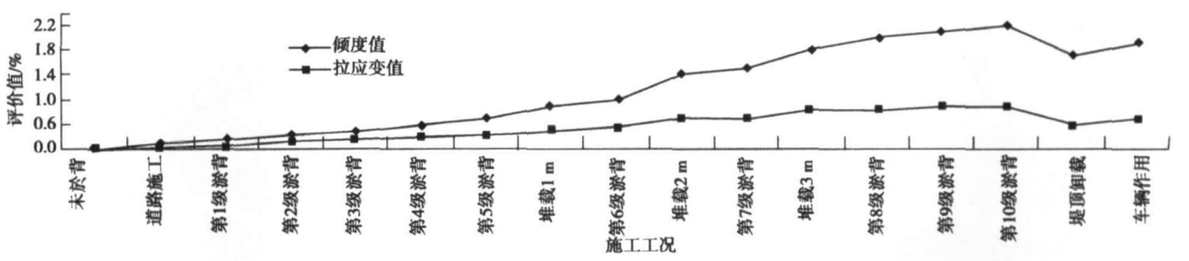


图 3 整个施工过程评价结果

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

载与车辆荷载的作用，并将堤身的堤顶面竖直以下区域的最大倾度值、最大拉应变值分析结果列于图 4，其中图 4（a）分析淤背施工速率的影响时，排水情况为充分排水；图 4（b）分析排水条件的影响时，淤背施工速率为 1.0 m/月；图 4（c）、（d）分析土体力学参数的影响时，排水情况为充分排水，淤背施工速率为 1.0 m/月。

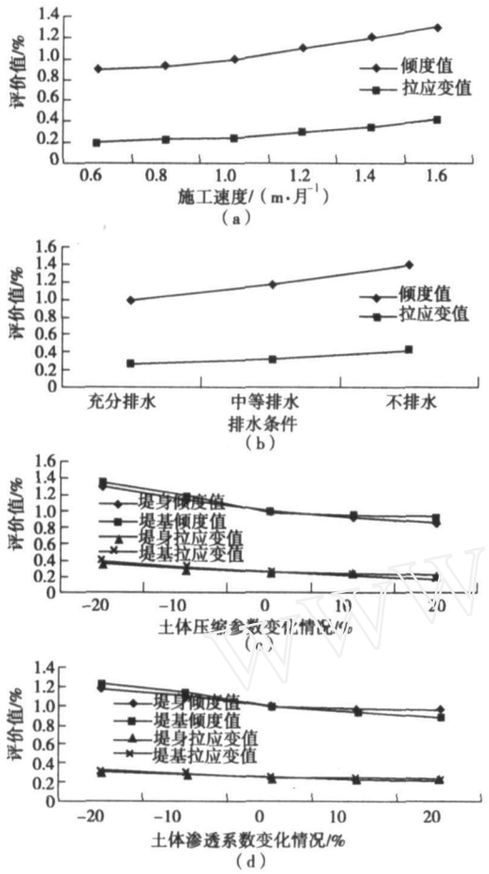


图 4 特定工况分析结果

（1）由图 4（a）可知，淤背施工速率与堤身的最大倾度值、最大拉应变值成正比，可见淤背施工速率是导致堤身开裂的重要原因。对 168+050 断面而言，如果排水情况较好时，采取 0.9 m/月～1.0 m/月的淤背施工速率，即可保证堤防不会开裂。

（2）由图 4（b）可知，充分排水时堤身的倾度值、拉应变值相对较小；不排水时堤身的倾度值、拉应变值相对较大。可见加速排水有利于减轻或避免堤身产生裂缝。

（3）由图 4（c）、（d）可知，堤身、堤基土质的变化对堤身的倾度值、拉应变值的影响较大。当堤身、堤基土体的 k 值、渗透系数提高 20%时，堤身的倾度值、拉应变值均相应降低；反之亦反。因此对于不同土质的堤防，淤背施工时，应采取不同的施工速率。

综上可知，淤背施工速率确定时，应根据不同的土质、不同施工排水条件等因素综合确定。在排水条件良好的前提下，对于土质较好，土壤湿化变形较小，渗透性较强的堤段，淤背施工速率可采用 0.9 m/月～1.0 m/月左右；对于土质较差，土壤湿化变形较大，渗透性较弱的堤段，淤背施工速率可采用 0.6 m/月～0.8 m/月。

4 结 论

（1）168+050 断面分析表明，分析成果与该段堤防的实际情况相符。由此可见，本课题采用的分析参数符合实际情况，分析方法合理，可供标准化堤防及类似工程的设计施工时参考。

（2）放淤固堤合理施工速率与土壤特性、排水条件等因素密切相关。对于土质较好堤段，在排水良好的前提下，淤背施工速率可采用 0.9 m/月～1.0 m/月；对于土质较差堤段，在排水良好的前提下，淤背施工速率可采用 0.6 m/月～0.8 m/月。

（3）黄河标准化堤防建设时，淤背体及堤防土体水分的消散过程非常复杂，数值分析时，进行了必要的简化与假定；加上非饱和土的研究尚处于探索阶段，因而需进一步对模型、参数等进行研究。

参考文献：

[1] 崔建中，张喜泉. 黄河下游标准化堤防建设的思路与对策研究[J]. 人民黄河，2002,**24**(4):11－14.

[2] 杜玉海. 黄河下游淤背固堤技术研究与实践[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002.

[3] 刘萌成，黄晓明，陶向华. 桥台后高填方路堤工后沉降影响因素分析[J]. 交通运输工程学报，2005,**5**(3):36－40.

[4] Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. ABAQUS Theory manual[R]. 2003.

[5] 沈珠江. 非饱和土简化固结理论及其应用[J]. 水利水运工程学报，2003(4):1－6.

[6] 黄河水利科学研究院. 山东东明黄河大堤纵向裂缝形成机理及防治对策研究报告[R]. 2006.

[7] 卢廷浩，高贵全，陈 剑. 蓄水后土石坝应力变形有效应力算法[J]. 岩土力学，2005,**26**(2):247－250.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net