多元结构抬田饱和—非饱和渗流三维控制数模优化分析

郝红科[1,2]，詹美礼[2]，盛金昌[2]，罗玉龙[2]

（1. 杨凌职业技术学院，陕西 杨凌 712100；2. 河海大学 水利水电学院，江苏 南京 210098）

摘　要：以江西省峡江库区土料实测数据为依据，通过实验获得土料基本物理参数，用 Van Genuchten（VG）模型拟合土壤水分特征曲线及非饱和导水率，建立由耕作层、犁底层、防渗层和垫高层组成的抬田多元地基结构。采用饱和—非饱和渗流三维有限元分析方法建立数学模型进行计算，通过数值计算结果与实验模型数据对比，证明该数学模型是合理可靠的。在此基础上，建立数学模型模拟计算各土层不同压实度、不同厚度对抬田渗流的影响。通过模拟分析计算，大幅减小了试验工作量，并得出了可供工程使用的结构参数。

关键词：土壤水吸力；非饱和渗流；多元结构；三维有限元

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2011)05-0259-04　　**中图分类号**：S152.7+2

Optimizing Saturated and Unsaturated Seepage of Raising-farmland Based on Multi-component Three-dimensional Finite Element Analysis

HAO Hong-ke[1,2], ZHAN Mei-li[2], SHENG Jin-chang[2], LUO Yu-long

(1. *Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu* 210098, *China*)

Abstract: The soil water characteristic curve and unsaturated hydraulic conductivity gained from seepage tests in Xiajiang reservior area of Jiangxi Province, were fitted by the Van Genuchten (VG) model, and a new multi-component model consisting of plough layer, plough pan, impermeable layer and raising layer was established for the raising-farmland. A three-dimensional saturated-unsaturated mathematical model was also used to simulate the tests based on the parameters of the VG model. The results show that the mathematical model was reasonable and reliable. In addition, the effects of soil compaction and the thickness on the raising-farmland seepage were investigated. A large number of experiments were reduced by the mathematical analysis and the simulated parameters could be used in the engineering design and construction.

Keywords: soil water suction; unsaturated seepage; multi-structure; three-dimensional finite element

为了减小库区的淹没损失，在库区采用防护、围垦、抬田等多种工程措施以保证非搬迁区农业人口生产用地。抬田多元地基结构技术是将浅淹没区田面抬高，将耕作层表面抬高至水库正常蓄水位 0.5～1.0 m以上[1]，减小库区水位上升对耕作区形成淹没，从根本上解决生产用地紧张问题。抬田是由耕作层、犁底层、保水层和底部垫高层组成的多元结构地基。耕作层利用剥离的原耕作层回填以保证作物较好的生长；保水层由防渗性能较好的黏土组成以防止灌溉水分过快产生深层渗漏，同时可以防止库水上涨顶托对作物根部的浸泡；用作抬高地基的底部垫高层采用当地风化料或砂砾石填筑。目前多元结构地基抬田的关键控制技术在国内外尚无理论依据和实践经验，研究多元结构地基抬田的技术指标，保障作物的正常生长和保墒保肥要求，显得尤为重要。本文以江西省峡江库区土料实测数据为依据，建立由耕作层、犁底层、防渗层和垫高层组成的多元结构地基实物模型，监测在不同灌溉条件下多元结构地基中水势变化规律，研究满足作物生长的不同土层的物理指标要求，并通过建立理论模型进行有限元分析，在大量实验和理论分析的基础上，寻找符合作物生长的最优结构形式以及各层的物理参数，为抬田结构的研究提供科学的分析方法和计算依据，并为江西省峡江库区的抬田施工提供理论参数。

收稿日期：2011-06-06　　修回日期：2011-08-22
资助项目：国家自然科学基金项目“重大水利工程运用对下游区域防洪影响综合评价研究：以三峡—鄱阳湖系统为例”(51079039)；“三向受压状态下土体的渗流—侵蚀—应力耦合管涌机理研究”(51009053)
作者简介：郝红科(1968—)，男(汉族)，陕西省西安市人，副教授，主要从事农业水土工程及水资源研究。E-mail：hongkeh88@163.com。

1 研究方法

本研究主要采用三维数学模型有限元分析方法。对于建立的有限元数学模型，其参数依据来源于抬田区土料实验室测试数据，并用物理模型测试的结果修正数学模型，以保证建立的数学模型计算结果与实际测试结果一致，用修正后的数学模型做不同压实度、不同厚度共计43种组合分析，在分析计算结果的基础上，提出控制参数。

1.1 抬田结构土层物理参数测定

对拟实施抬田的地区土料进行实验，测定多元结构地基抬田填筑土层的物理指标。在多元结构地基抬田中，对渗流起控制作用的是防渗层，因此，在测定土料物理参数时，除对防渗层土料全部实验外，其它层土料仅测定最大干密度、最优含水量和不同击实度下的饱和渗透系数。在实验时，考虑到工程施工的实际，不可能将土层的干密度压实到最大干密度，因此分别采用压实度0.88，0.90，0.92这3种情况进行实验。经实验室测定的抬田多元结构各层土料物理指标列于表1。耕作层土料采用原地表剥离土料，其物理指标符合作物生长的要求；垫高层采用当地风化料或砂砾石。抬田结构在渗流过程中，土层含水量由非饱和向饱和逐渐转换，测试土壤非饱和导水率对模型计算影响很大，因此，通过测试防渗层土料的失水过程，采用Van Genuchten(VG)模型拟合参数[2-5]，从而得到防渗层土料的吸力与非饱和导水率之间的关系。

表1 抬田多元结构用土料物理参数

土料名称		最大干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	最优含水量/%	抬田结构优化渗透性参数/($cm \cdot s^{-1}$)		
				压实度0.88	压实度0.90	压实度0.92
防渗层土料		1.58	25	5.90×10^{-6}	4.75×10^{-6}	4.03×10^{-6}
耕作层土料		1.64	20	2.58×10^{-6}	1.74×10^{-6}	1.48×10^{-6}
垫高层料	风化料	1.72	18	3.94×10^{-6}	1.97×10^{-6}	1.67×10^{-6}
	砂砾石	—	—	1.00×10^{-3}	5.00×10^{-4}	1.00×10^{-4}

1.2 三维数学模型的建立

为了对抬田多元结构分层优化的控制进行研究，首先建立实验模型。实验模型采用直径50 cm有机玻璃桶，桶内由下向上依次填筑垫高土料、防渗土料、犁底层土料、耕作层土料，填筑压实度均为0.90，厚度分别为40，40，10，30 cm。桶底设置集水漏斗，收集土柱渗水量。在各层土底部埋入负压传感器，利用TS-3型三维渗流水势及地下水溶质运移水样盐分采集系统，采集观测点位置的土壤水势随时间变化过程。填筑好后，在耕作层土料上持续加水，保证水深5 cm。

三维数学模型的尺寸与实验模型保持一致，数学模型结构从下向上模拟垫高层、防渗层、犁底层、耕作层，按照5 cm大小划分有限元网格。在模拟计算时，模型结构各层的物理参数输入与实验模型保持一致，便于两种模型结果对比。

2 数学模型的验证

2.1 数学模型与实验模型测试结果对比

为了验证数学模型有限元计算结果的正确性，采用实验测定的土样数据，按照建立的数学模型进行三维有限元饱和—非饱和模拟分析[6]，以便获得灌溉后不同时刻水势随埋深的变化关系[7]。在经过10 d左右的入渗，抬田土壤内部各处基本饱和，模拟计算防渗层底部水势约0.2～0.3 kPa，稳定渗流量2.1 mm/d。采用结构相同的实体模型观测结果，在防渗层底部的水势约0.1～0.2 kPa，稳定渗流量1.5～2.0 mm/d，防渗层的最大负压吸力为1.5～1.6 kPa，总体表现为小负压，属于饱和—非饱和的临界状态。

2.2 数学模型与实验模型结果分析

通过对比分析抬田多元结构有限元计算结果和实际模型测试结果可以看出，针对抬田多元结构建立的饱和—非饱和三维有限元计算模型及采用的计算参数所得计算结果与实物模型测试结果在分布规律和数值大小方面基本一致。由于实验模型渗流水势测量和渗透参数实验测量的相对误差是客观存在的，从实验模型测量数据和数学模型计算结果对比可以看出，数学模型渗流场计算结果本质上与实验模型测试结果一致。因此用该数学模型对抬田结构进行有限元计算得到的结论符合要求。

3 抬田多元结构数学模型优化分析

3.1 自由排流时防渗层不同击实度对渗控的敏感性

研究不同击实度对渗流的影响，是工程施工的重要依据。在模拟计算时，选取防渗层厚度30 cm，击实度分别为0.88，0.90，0.92这3种情况研究其对渗流的控制效果。经三维非饱和渗流有限元计算分析，将3种情况下的土壤水势随埋深变化规律绘于图1。

对比分析 3 种击实度条件下的土壤渗压分布可以发现,击实度为 0.88 时土层的渗压传导速度最快;击实度为 0.90 时土层的传导速度次之;击实度为 0.92 时土层的传导速度最慢。由此可见,防渗层非饱和渗压传导速率随土层击实度升高而降低。

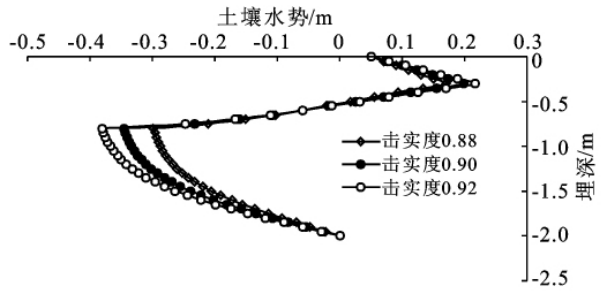


图 1　不同压实度土壤水势对比

比较不同击实度情况下的渗流量变化,将渗流量随时间的变化过程绘于图 2。通过渗流量比较知,防渗层土料击实度为 0.88 时,稳定渗流量约 7.66 mm/d,而击实度分别为 0.90,0.92 时,稳定渗流量分别为 6.48 mm/d 和 5.68 mm/d。经过 97 h 稳定渗流后,不同击实度情况下的稳定渗流量曲线基本平行,而且随着击实度减小渗流线间距有变大的趋势,由此可以证明击实度对渗流比较敏感。尽管不同击实度条件下的渗流量都满足日渗透量为 2～8 mm/d 的控制范围[8],但击实度 0.88 工况则较为接近控制范围上限,因此建议击实度以不小于 0.90 为宜。

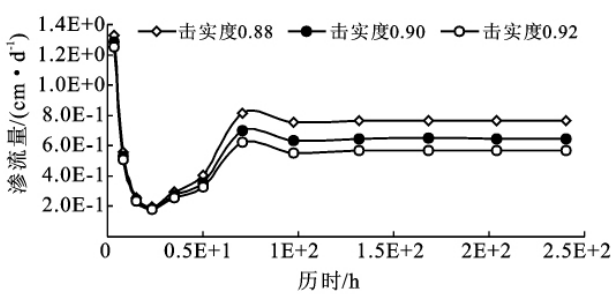


图 2　不同击实度渗流量比较

3.2　自由排流时防渗层不同厚度对渗控的敏感性

在对不同击实度条件下抬田渗控的敏感性分析基础上,还需要研究防渗层不同厚度对抬田渗控的影响。分别取不同击实度和厚度进行组合,因篇幅所限,在此仅将防渗层击实度为 0.90,厚度为 30,40,50 cm 组合情况的计算结果作对比分析。计算得到的土壤水势在不同防渗层厚度底部渗压传导速率变化较小,稳定渗流量计算结果分别为 6.5,6.0,5.7 mm/d。对于不同防渗厚度来说,随着防渗层厚度的增大,渗流量虽然有所减少,但减少的幅度不明显。因此,对于防渗层而言,厚度对稳定渗流有影响,但不显著。

3.3　受库水顶托时防渗层不同击实度对渗控的敏感性分析

受库水顶托影响,防渗层在不同击实度条件下对渗控敏感程度不同,在做有限元分析时,选取防渗层厚 30 cm,击实度分别为 0.88,0.90,0.92 的 3 种情况进行比较,经三维非饱和渗流有限元计算分析,将不同击实度稳定渗流时土壤水势随埋深变化绘于图 3。分析不同击实度条件下的土壤渗压分布情况发现,不同击实度时的渗压传导速度相差极小,可见受库水顶托时非饱和渗压传导速率随防渗层的击实度没有变化。由此可见,击实度的大小对非饱和渗压传导速率的影响可以忽略不计。

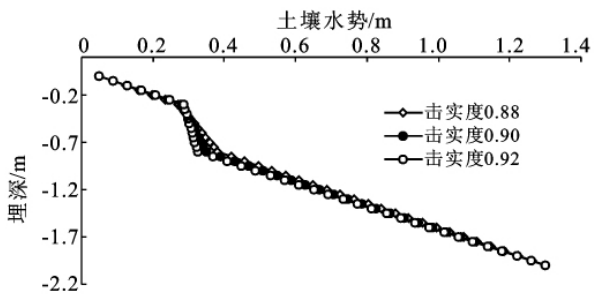


图 3　库水顶托下不同击实度土壤水势比较

将 3 种击实度情况下的渗流量随时间的变化过程绘于图 4,通过模拟计算来比较不同击实度情况下的渗流量变化。通过比较得知,不同击实度情况下渗流量分别为 3.38,3.00,2.72 mm/d,且在 50 h 后渗流趋于稳定。因此,在库水顶托情况下,不同击实度条件对渗流量不敏感,防渗层的压实度确定应主要依据自由排渗情况下的计算结果确定。

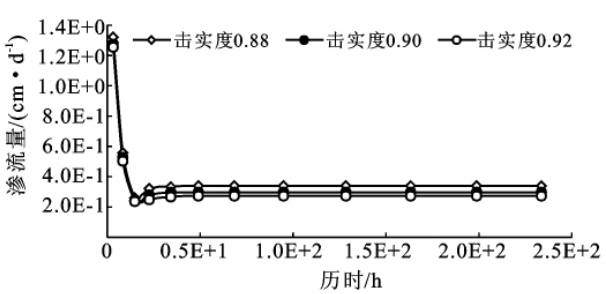


图 4　库水顶托下不同击实度渗流量比较

3.4　受库水顶托时防渗层不同厚度对渗控的敏感性

在上述不同击实度条件下,在对抬田的渗控敏感度分析基础上,还需要研究不同厚度防渗层对抬田渗控敏感度的影响。模拟计算时,采取不同击实度与不同厚度分别组合,因篇幅所限,文中仅列出防渗层击实度为 0.90,厚度分别为 30,40,50 cm 时的土壤水势

随时间变化规律及稳定渗流量变化规律。从渗流量计算结果看,在击实度 0.90 的控制条件下,对不同厚度防渗层在库水顶托条件下,随着防渗层厚度的增大,渗流量有所减小,但减小效果不明显,因此认为不同厚度对渗控不敏感,防渗层厚度的确定仍应以自由排渗情况下计算的结果为确定依据。

3.5 垫高层不同击实度对抬田结构层渗控的影响

取防渗层压实度 0.90,厚度 30 cm,垫高层压实度分别为 0.88,0.90,0.92,模拟计算各土壤底部的土壤水势分布规律和渗流量。从土壤水势分布规律来看,其对防渗层各处的渗压影响较大,说明击实度愈小,愈利于渗透水排出。从渗流量计算结果分析,在垫高层不同压实度的渗流量分别为 6.7,6.5,6.4 mm/d,垫高层压实度对渗流量的影响相差很小,因此可以认为,垫高层压实度对渗控的影响不敏感。

此外,因实际工程现场砂石料较多,如果采用砂石料作为垫高层,需要研究不同压实度对抬田渗流产生的影响,仍然选取防渗层厚 30 cm,压实度 0.90,砂石料击实度分别取 0.88,0.90,0.92,经模拟计算,其稳定渗流量差异极小,即采用砂石料做垫高层时对抬田结构的渗流量影响可以忽略不计。

4 结 论

本文通过对抬田模型结构进行分层优化控制研究,建立了三维有限元数学模型,按照自由排流,受库水上涨顶托,结构土层采用不同压实度、不同厚度及垫高层采用砂石料等情况进行了 43 种组合模拟计算,得出了每种组合情况下抬田各层土层底部土壤水势变化规律和稳定渗流量。

(1) 对于抬田多元地基结构而言,在底部自由排流时,其控制性指标为防渗层的压实度和厚度,压实度对渗流量影响敏感,厚度对渗流量有一定影响,但不明显。经对比分析,防渗层厚度 30 cm 即能满足渗流量要求,压实度取 0.90 较适宜。犁底层的要求与防渗层要求相同,厚度取 10 cm,压实度与防渗层一致。

(2) 在水库水位上涨时,库水会对抬田多元结构形成顶托,经计算,在顶托条件下,防渗层压实度和厚度改变对渗流影响不明显,因此,各层在设计参数选择时应以自由排流的计算结果为准。为了减小库水对抬田渗流的顶托影响,可以考虑加厚垫高层。

(3) 垫高层压实度对渗流影响很小,在不产生过大沉降的条件下,可以选择较小的压实度(但不小于 0.88)。同时,垫高层可以选择渗透系数较大的砂石料。

[参 考 文 献]

[1] 黄文华,吴顺华.浅谈"抬田"措施在水库淹没处理中的应用[J].江西水利科技,2001(10):34-35.

[2] Van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980,44:892-898.

[3] 夏卫生,雷廷武,潘英华,等.土壤水动力学参数研究与评价[J].灌溉排水,2002,21(1):72-75.

[4] Neuman S P, Watherpoon P A. Analysis of non-steady flow with a free surface using the finite element method [J]. Water Res. Res., 1971,12(3):571-574.

[5] 徐绍辉,张佳宝,刘建立,等.表征土壤水分持留曲线的几种模型的适应性研究[J].土壤学报,2002,39(4):498-504.

[6] 张家发.三维饱和非饱和稳定非稳定渗流场的有限元模拟[J].长江科学院院报,1997(3):35-38.

[7] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of soil water Ⅰ: Redistribution[J]. Water Res. Res., 1970,6:851-861.

[8] 中华人民共和国水利部.灌溉与排水工程设计规范(GB50288-99)[S].1999.