

风化花岗岩开挖弃料配制三峡二期围堰防渗墙材料

李青云¹, 张建红², 包承纲¹

(1. 长江科学院 空间信息技术应用研究所, 湖北 武汉 430010; 2. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084)

摘要: 本文介绍了三峡二期围堰防渗墙柔性材料的研制过程。采用三峡坝区开挖弃料-花岗岩风化砂代替塑性混凝土中的砂石骨料, 用当地黏土代替膨润土, 配制防渗墙柔性材料, 通过均匀设计理论和人工神经网络技术相结合的方法对该材料的配合比进行了优选, 满足了三峡二期围堰防渗墙的设计要求, 该材料已运用于三峡工程二期围堰, 效果良好。

关键词: 三峡工程; 防渗墙; 风化花岗岩; 塑性混凝土; 人工神经网络; 配合比优化

中图分类号: TV223.4 **文献标识码:** A

三峡工程二期围堰高82.5m, 属于深水高土石围堰。设计拦洪量 $2 \times 10^9 \text{m}^3$ 。堰体由石渣截流戗堤、水下抛填花岗岩风化砂(简称风化砂)组成。堰体内设置竖向防渗墙, 防渗墙最大高度74m, 总面积近 $9 \times 10^4 \text{m}^2$, 浇筑方量约 $1 \times 10^5 \text{m}^3$ 。由于堰体是在60m深水中抛填风化砂形成, 密实度低, 弹性模量小, 运行初期变形较大。因此, 设计要求防渗墙材料不仅具有较低的弹性模量, 以适应堰体较大的变形, 还要有较高强度, 以承受墙体上的荷载, 同时还应满足抗渗性的要求。为此, 设计采用塑性混凝土作为二期围堰防渗墙的材料。塑性混凝土在国外的应用始于20世纪70年代, 初期主要用于中、低水头的防渗墙, 80年代开始用于高水头防渗墙。国际大坝界对塑性混凝土防渗墙技术也给予了很大关注, 第14、15、17届国际大坝会议上介绍了塑性混凝土防渗墙在智利的科尔本心墙土石坝、阿根廷的亚西雷塔心墙土石坝、日本心墙堆石坝、西班牙阿尔翁心墙土石坝等工程中的应用实例。我国在80年代也已开始塑性混凝土防渗墙的研究^[1,2], 水口电站主围堰、山西册田水库南付坝和十三陵抽水蓄能电站尾水围堰、小浪底枢纽上游围堰等工程中的应用, 均取得了良好的效果。

配制塑性混凝土需要大量的砂石骨料, 但三峡坝区长江天然河砂料源不足, 需要寻找替代料。用其它材料代替混凝土中的砂石骨料, 国外已有先例, 文献[3]对此进行了综述。但用弃料代替塑性混凝土砂石骨料, 以往尚未见到研究报告。三峡坝区有储量丰富的花岗岩风化砂, 同时也是主要的施工开挖弃料, 如能将其作为砂石骨料的替代料, 将具有显著的经济效益和环保效益, 对此, 长江科学院从1984年开始开展了系列研究, 采用花岗岩风化砂代替塑性混凝土中的砂石骨料, 当地黏土代替膨润土, 并省去塑性混凝土中粉煤灰组分, 研制出一种特殊的塑性混凝土, 取名为风化砂柔性材料(以下简称柔性材料)。经过十几年大量的室内配合比优化实验、现场试验和先期工程应用, 1998年应用于三峡工程二期围堰, 取得了良好的工程效益^[4]。本文重点介绍均匀设计理论和人工神经网络技术相结合方法在柔性材料配合比优选中的应用。

1 柔性材料组成

收稿日期: 2003-10-26

作者简介: 李青云(1963-), 男, 山西河曲人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事环境岩土工程、水工新材料和空间信息技术应用的研究。

从1984年开始,采用三峡坝区的花岗岩风化砂、黏土和水泥以及少量添加剂,研制出第一批柔性材料。其主要材料的特点如下:(1)风化砂。三峡坝区花岗岩全风化带风化砂,天然状态粒径一般小于20mm,其中大于5mm的约占1/3(这部分含量用 P_5 表示),小于0.1mm的细料含量(俗称含泥量)通常小于5%,不均匀系数 C_u 为8~12。(2)土料。宜昌雅雀岭料场的黏土粉,黏粒含量一般大于40%,主要成分为水云母、蒙脱石。所用黏土需配制成一定密度的泥浆。为方便施工及质量控制,后期还研究了用膨润土代替黏土进行干掺拌和的施工工艺。(3)水泥。普通硅酸盐水泥或矿渣水泥。(4)外加剂。分散剂采用纯碱(Na_2CO_3),在湿掺法拌和中用以增大黏土的分散度,满足泥浆密度。干掺拌和不需分散剂。添加剂主要采用木质素磺酸钙,起缓凝、减水作用,提高拌和物流动性。(5)拌和水。采用自来水或清洁的江河水。

1987年优选出的配合比配制的柔性材料,其28d强度为2.5~3.0MPa,初始切线模量在500~700MPa,抗折强度在0.5~0.7MPa,渗透系数 k 小于 10^{-7} cm/s。该材料1987~1988年在清江隔河岩电厂围堰中试用,1993年在三峡工程一期围堰防渗墙中全面使用,取得良好的成墙效果,但当时柔性材料的力学指标尚不能满足三峡工程二期围堰防渗墙的设计要求(见表1)。

表1 二期围堰防渗墙材料主要设计要求

参数名称	技术指标	试件尺寸/cm	测试方法
抗压强度 R_{28} /MPa	4~5	15×15×15	单轴压缩
初始切线模量 E_t /MPa	<1000	15×H30	应变控制式,加荷速率0.2mm/min
渗透系数 k /(cm/s)	< 10^{-7}	15×H12	塑性混凝土渗透仪
允许渗透比降 J	>80		
坍落度/cm	初始18~22, 1h>15	10×20×H30	混凝土拌和物坍落度试验方法
凝结时间/h	初凝>9	6.5×7.5×H4	水泥凝结时间测定仪

2 柔性材料配合比的优选

在前期的研究中发现,通常情况下,柔性材料的渗透系数均小于 10^{-7} cm/s,抗渗透破坏比降均大于200,即柔性材料的抗渗性能一般可满足防渗墙的设计要求。因此,配合比优选主要是针对其抗压强度和初始切线模量而言,即优选出的配合比要同时满足防渗墙设计指标中单轴抗压强度和初始切线模量要求(见表1)。影响柔性材料力学性质的主要因素有水泥、风化砂、土料、水以及外加剂的用量,柔性材料配合比试验就是将前三种材料(即因素)用量(水平)进行不同的搭配组合,成型养护后,按照表1中所列的试验内容逐一测定其力学参数,据此优选出满足要求的配合比。然而,由于上述各组分对于柔性材料性质的影响非常复杂,并且每组配合比的试验周期长达40d。因此,如何调整材料配合比并减少优选过程中的试验数量成为研究的关键。

为此,引入均匀设计理论^[5]设计了10组配合比的优选试验方案^[6](见表2)。10组柔性材料配合比的测试结果见表3。

表2 柔性材料配合比均匀设计试验方案(单位: kg/m³)

配合比	试验号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
水泥	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
黏土	150	110	180	140	100	170	130	90	160	120
风化砂	1400	1650	1350	1600	1300	1550	1250	1500	1200	1450

根据试验设计理论,这10组配合比试验效果与全部1000组试验相近。因此,表3的试验结果能较全面地反映柔性材料各原材料含量对其力学指标的影响规律,为试验结果的统计分析建立了较为可靠的基础。

从表3可以看出,10组配合比中只有7、9号配合比与表1的设计指标比较接近,还需进行优选。为此,必须从这10组配合比的试验结果中,发掘出所隐含的信息,进一步优选出满足设计要求的柔性材料配合比。表3的试验结果可以大致反映柔性材料中水泥、风化砂、黏土含量与其强度、初始模量的定性关系,为进一步优化配合比,需要在均匀设计试验结果的基础上建立半定量模型来指导配合比优选。

表3 柔性材料配合比试验

试验号	湿密度 /(t/m ³)	抗压强度 R ₂₈ /MPa	初始切线模量 E _i /MPa	模强比 E _i /R ₂₈	试验号	湿密度 /(t/m ³)	抗压强度 R ₂₈ /MPa	初始切线模量 E _i /MPa	模强比 E _i /R ₂₈
1	2.06	1.75	600	342	6	2.02	3.09	800	258
2	2.11	2.03	796	392	7	2.01	4.24	1110	262
3	1.93	1.62	560	345	8	2.02	4.05	1350	330
4	2.06	2.52	780	309	9	2.00	3.87	920	237
5	2.02	3.20	1110	346	10	2.19	4.67	1800	385

均匀设计试验结果的分析不同于正交设计的主因素分析,它通常是借助于多元统计等手段^[5]。但对于建立柔性材料配合比模型,常规的统计方法并不合适。这是因为一般的统计方法均是先确定数学模型然后进行统计,而柔性材料是一种复杂的材料,很难预知用什么模型来反映柔性材料配合比与其力学参数的关系,另外,一般的统计方法只能建立单因变量的统计关系,而柔性材料中强度弹性模量是一对不可分割的数据,应该建立双因变量模型。

人工神经网络技术具有容错性,个别试验数据的误差不致影响整体网络的性能,网络的输出端点个数不限,因而很适合于多因变量、多自变量统计中的建模,因此,采用人工神经网络技术建立材料含量与其力学参数之间的模型^[7]。训练好的人工神经网络(ANN)模型的联想能力见表4。从表4可以看出,训练好的ANN模型对10组试验数据的联想能力较好,抗压强度相对误差的平均值为9.30%,初始切线模量相对误差的平均值为8.21%。这种误差对于进行配合比优选而言是可以接受的。

表4 ANN模型联想能力检验

试验序号	抗压强度			初始切线模量		
	试验值/MPa	预测值/MPa	相对误差(%)	试验值/MPa	预测值/MPa	相对误差(%)
1	1.75	1.92	9.71	600	523	12.83
2	2.03	2.30	13.30	796	790	0.75
3	1.62	1.99	21.61	560	480	14.29
4	2.52	2.44	4.76	780	698	10.51
5	3.20	3.67	14.69	1110	1166	5.05
6	3.09	2.75	11.00	800	700	12.50
7	4.05	4.11	1.48	1350	1425	5.56
8	4.24	3.90	8.02	1110	1092	1.62
9	3.87	4.13	6.72	920	1032	12.17
10	4.67	4.59	1.71	1800	1677	6.83

用已建立的ANN模型反演出1000组不同配合比柔性材料的力学指标（抗压强度和初始切线模量），将这些数据降维处理，可绘制成一系列配合比图谱^[7]。图1是水泥掺量分别为280kg/m³和1290kg/m³时的图谱。图中每一点均对应一组配合比，图中的阴影区域即表示那些满足不同力学指标要求的配合比（点）的集合。图谱直观地表达了在给定的强度和模强比要求下柔性材料的三组分的复杂的依从关系，因此，根据不同的力学指标要求可以很方便地从图谱中查到所需的柔性材料配合比，即用所建立的图谱可指导配合比优选过程，提高试验研究效率。

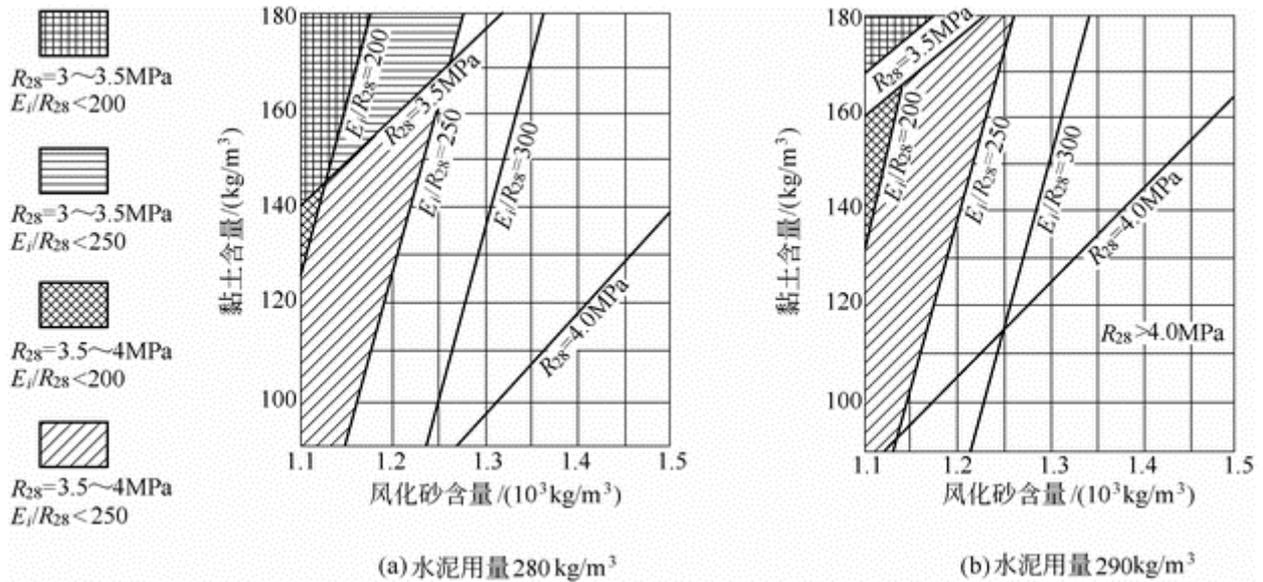


图1 柔性材料配合比图谱

从所建立的柔性材料配合比图谱中可以看出，满足 $R_{28} > 4.0\text{MPa}$ 且模强比小于250的配合比范围很窄。这表明，在柔性材料原材料不变情况下，仅仅依靠配合比的调整来满足上述指标要求，可供选择的余地较小。为此，将水泥品种做了调整，采用强度等级为32.5矿渣水泥（实际检测结果接近42.5）代替普通硅酸盐水泥进行了补充试验，试验用风化砂、黏土及外加剂同前。经过对比试验，同样配合比下，强度等级为32.5的矿渣水泥代替32.5的普通硅酸盐水泥所配制的柔性材料其强度有较大增长，相应地，初始切线模量也有所增大。

参照前面所建立水泥用量280kg/m³图谱中模强比为200~250的配合比区域，选择两组配比进行试验，进行二次优选，提出正式推荐配合比TFK2，该组配合比被中国三峡开发总公司确定为三峡二期围堰防渗墙材料的首选配合比，如表5所示。

表5 优选出的柔性材料配合比及参数复核结果

配比 编号	优化配合比/(kg/m ³)				水胶 比	坍落度/cm		初凝时 间/h	复核参数			
	水 泥	黏 土	风化 砂	水		初始	1h后		抗压强度 R ₂₈ /MPa	初始切线模 量E _i /MPa	模强比 E _i /R ₂₈	渗透系数 k/(cm/s)
TKF2	280	120	1250	368	0.92	20.3	19.2	9.8	5.82	1168	200	<10 ⁻⁷

3 现场施工特性和运行效果

在上述室内配合比基础上，结合现场施工条件要求，又进行了柔性材料施工配合比试验。现场施工条

件的要求是,适当降低水泥用量,黏土更换成 级膨润土,拌和工艺由掺泥浆改成干掺膨润土粉,同时鉴于现场风化砂级配的变化,需要调整膨润土用量以使柔性材料的力学性能和抗渗性能保持稳定。

针对上述要求,在TKF2配合比基础上,将水泥用量减少至 $260\text{kg}/\text{m}^3$,适当增加风化砂用量以补偿柔性材料在水泥掺量减少情况下的强度损失。基准配合比为:水泥 $260\text{kg}/\text{m}^3$,膨润土 $80\text{kg}/\text{m}^3$,风化砂 $1350\text{kg}/\text{m}^3$ 。为保持柔性材料的参数稳定,膨润土用量视风化砂的级配情况适当调整。

表6是现场采用的一组施工配合比及其力学参数。

表6 柔性材料施工配合比

水泥 /(kg/m^3)	膨润土 /(kg/m^3)	风化砂		木钙 /(kg/m^3)	水 /(kg/m^3)	抗压强 度 R_{28}/MPa	初始切线 模量 E_i/MPa	渗透系数 $k/(\text{cm}/\text{s})$	渗透破 坏比降 J	
		含泥 量 P _s (%) (%)	掺量 /(kg/m^3)							
260	70	6.0	22	1370	1.40	370	4.74	898	$<10^{-7}$	>200

三峡二期围堰防渗墙已于1998年建成^[8],运行期间抵御了1998、1999年的特大洪水,运行状态良好,基坑渗漏量仅为 $60\text{L}/\text{s}$,远低于设计预计值。作为二期围堰五大技术难题之一的防渗墙材料问题得以顺利解决,受到有关专家的高度评价,认为“这一做法,变废为宝,对于降低造价、解决资源和减轻环境污染都起到很好的作用”^[9],为三峡工程的顺利建设奠定了基础。

三峡二期围堰拆除结果还证明,它的耐久性良好,是一种环保型、经济性的防渗墙材料,具有良好的推广应用价值。

4 结论与讨论

(1)利用风化花岗岩开挖弃料代替塑性混凝土的骨料,经过系统的配合比试验,优化出满足“高强度低弹”、具有良好的抗渗性要求的柔性材料,用于三峡二期深水高土石围堰防渗墙,工程的实践表明,用风化花岗岩开挖弃料配制塑性混凝土,可以就地取材、节省造价、方便施工,具有环保效应。(2)柔性材料配合比的优选是强度和弹性模量双目标控制的试验过程,这使得配合比优选比较复杂。应用均匀设计方法对多因素、多水平进行的试验设计,起到了事半功倍的效果。在此基础上采用人工神经网络技术建模,得到配合比图谱,研究了适合于多自变量、多因变量的统计建模思路,结果表明,用人工神经网络技术对均匀设计的试验数据所隐含的信息进行发掘是十分合适的。(3)该新型材料改进了传统塑性混凝土的施工工艺,可以干掺膨润土,省去泥浆池,更加方便施工和质量控制。材料的流动性好,便于导管浇注。用柔性材料浇注的三峡工程二期围堰防渗墙在1998年建成初期就经历了'98大洪水的考验,适应了大变形的苛刻条件,基坑渗漏量极小,远远低于设计预计值。

致谢:研究工作得到了中国长江三峡工程开发总公司的资助。王允明、吴松桂、蒋顺清、孙厚才、陈雯、陈智勇、范一林、宋建平等同志参与了本项工作,特此致谢。

参考文献:

- [1] 于玉贞. 塑性混凝土特性研究及其在高土石坝深覆盖层防渗墙中的应用[D]. 北京: 清华大学, 1995.
- [2] 于玉贞, 濮家骝, 刘风德. 土石坝基础塑性混凝土防渗墙材料力学特性研究[J]. 水利学报, 1995, (8): 21-27.
- [3] T kwan J C, Jardine F M. Ground engineering spoil: practices of disposal and reuse[C]. Geoenvironmental

engineering, Thomas Telford, London, 1997. 397-402.

[4] 张小平, 包承纲. 三峡工程二期围堰防渗墙变形规律及运行状况分析[J]. 水利学报, 2000, (9): 91-96.

[5] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

[6] 李青云, 等. 用均匀设计理论优选柔性材料的配合比[J]. 长江科学院院报, 1996, 13(3): 31-34.

[7] 陈智勇, 李青云, 等. 基于前馈网络的柔性材料配比模型研究[J]. 长江科学院院报, 1996, 13(4): 41-44.

[8] 李青云, 等. 三峡二期围堰防渗墙材料施工检测和施工质量控制[J]. 中国三峡建设, 1999, (5): 40-43.

[9] 潘家铮. 对三峡二期围堰建设的评价[J]. 中国三峡工程建设, 1999, (5): 1-3.

Plastic concrete for cutoff wall using weathered granite sand in stage II cofferdam of Three Gorges Project

LI Qing-yun¹, ZHANG Jian-hong², BAO Cheng-gang¹

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The weathered granite sand is adopted as the aggregates of plastic concrete for cutoff wall in cofferdam of the Three Gorges Project. The local clay is added into the concrete to make it flexible. The uniform design theory and artificial neural network are applied to optimize the mixing proportion to meet the design requirements. The proposed concrete was successfully used in the Project.

Key words: cutoff wall; weathered granite sand; plastic concrete; uniform design; neural network; optimized mixing proportion