

多轴应力下塑性混凝土 力学性能及破坏特征

王四巍 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

多轴应力下塑性混凝土 力学性能及破坏特征

王四巍 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书通过单轴压缩、常规三轴、侧压恒定、侧向位移近似恒定、侧向位移恒定的三轴试验,研究了塑性混凝土强度和变形特征,推荐了塑性混凝土配合比中各组分的用量、塑性混凝土室内测试弹性模量和渗透系数的方法和计算公式,拟合了其单轴压缩和常规三轴压缩条件下的本构关系,建立了复杂应力下的强度准则,论述了塑性混凝土变形特征与侧限条件的关系。

全书共7章,包括绪论、塑性混凝土配合比设计、塑性混凝土基本力学性能试验研究、三轴应力下塑性混凝土力学性能试验研究、单轴循环加载下塑性混凝土力学性能试验研究、塑性混凝土渗透性能试验研究、除险加固工程塑性混凝土防渗墙应用研究等。

本书内容丰富,理念清晰,可供水工、建筑、岩土工程相关领域的科研人员、工程技术人员、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

多轴应力下塑性混凝土力学性能及破坏特征 / 王四巍著. — 北京:中国水利水电出版社, 2015.9
ISBN 978-7-5170-3688-3

I. ①多… II. ①王… III. ①塑性—混凝土—力学性能—研究 IV. ①TU528.01

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第229513号

书 名	多轴应力下塑性混凝土力学性能及破坏特征
作 者	王四巍 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 11印张 210千字
版 次	2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	30.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

PREFACE

塑性混凝土防渗墙具有优越的力学性能和经济性，在防渗工程中得到广泛应用。塑性混凝土是由膨润土（黏土）、水泥、水、砂和石子经搅拌、凝结而形成的一种新型建筑材料。它具有弹性模量低、极限变形大，强度较高，抗渗性能好，工作性能好，施工方便快捷，同时配合比中水泥用量大大减少，工程造价较低等诸多优点。为了进一步推广塑性混凝土，总结其优良力学性能，特编写本书。

本书共分七章。第一章为绪论，介绍了塑性混凝土防渗墙的应用情况和塑性混凝土材料性能的研究现状。第二章为塑性混凝土配合比设计，介绍了塑性混凝土配合比设计的原则和经验，推荐了配合比设计中各组分的用量，论述了用水量与其他材料的关系式。第三章为塑性混凝土基本力学性能试验研究，主要介绍塑性混凝土室内试验加载速率，弹性模量的试验方法和计算公式，重点分析了膨润土和水泥用量对塑性混凝土力学性能的影响，论述了其单轴受压下轴向应力应变关系。第四章为三轴应力下塑性混凝土力学性能试验研究，介绍了在常规三轴、侧压恒定、侧向位移近似恒定、侧向位移恒定的三轴试验下塑性混凝土的强度和变形性能，分析了三轴应力下塑性混凝土的变形特征、本构关系和强度准则。第五章为单轴循环加载下塑性混凝土力学性能试验研究，介绍不同加卸载循环模式下塑性混凝土的强度和变形。第六章为塑性混凝土渗透性能试验研究，对比了两种测试塑性混凝土渗透系数的方法，介绍了不同试验参数对渗透系数的影响。第七章为除险加固工程塑性混凝土防渗墙应用研究，介绍了河南省

窄口水库除险加固工程塑性混凝土防渗墙的应用实例分析。

由于作者水平有限，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2015 年 9 月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 塑性混凝土的研究现状	2
参考文献	23
2 塑性混凝土配合比设计	27
2.1 概述	27
2.2 塑性混凝土设计指标的确定	27
2.3 塑性混凝土配合比设计	28
2.4 小结	34
参考文献	35
3 塑性混凝土基本力学性能试验研究	36
3.1 概述	36
3.2 塑性混凝土单轴抗压性能	36
3.3 塑性混凝土抗拉性能	47
3.4 塑性混凝土剪切性能	49
3.5 塑性混凝土弹性模量	54
3.6 膨润土及水泥用量对塑性混凝土力学性能的影响	63
3.7 塑性混凝土单轴受压本构关系	68
3.8 小结	76
参考文献	77
4 三轴应力下塑性混凝土力学性能试验研究	78
4.1 概述	78

4.2	塑性混凝土常规三轴强度与变形性能	80
4.3	塑性混凝土真三轴强度与变形性能	92
4.4	中间主应力对塑性混凝土变形性能的影响	105
4.5	塑性混凝土强度准则	109
4.6	真三轴应力下塑性混凝土的变形破坏机理	115
4.7	小结	118
	参考文献	120
5	单轴循环加载下塑性混凝土力学性能试验研究	123
5.1	概述	123
5.2	试验概况	123
5.3	试验结果分析	124
5.4	小结	135
	参考文献	135
6	塑性混凝土渗透性能试验研究	137
6.1	概述	137
6.2	试验概况	138
6.3	试验结果分析	139
6.4	小结	147
	参考文献	147
7	除险加固工程塑性混凝土防渗墙应用研究	149
7.1	概述	149
7.2	工程概况	149
7.3	有限元法基本原理	155
7.4	窄口水库坝体塑性混凝土防渗墙加固有限元分析	159
7.5	小结	169
	参考文献	169

1 绪 论

1.1 研究意义

塑性混凝土防渗墙广泛应用于土石围堰、水库除险加固、坝体心墙防渗、地基抗渗、边坡护坡等工程中。塑性混凝土是一种强度介于土与普通混凝土之间的柔性工程材料,由膨润土、黏土、水泥、砂、石和水等原料经搅拌、浇筑、凝结而成。与普通混凝土相比,塑性混凝土有如下特性:①弹性模量低(一般为 $100\sim 3000\text{MPa}$,而普通混凝土的弹性模量一般大于 10000MPa),由于其弹性模量与地基弹性模量相近,能较好地适应地基变形,使塑性混凝土构筑物与地基联合受力,具有比普通混凝土大得多的极限变形,因而有较好的抗裂性能;②渗透系数小,降低了构筑物渗漏量;③拌和物工作性好,不易离析,不堵管,易于泵送且不需振捣,能自流平、自密实,初凝和终凝时间比普通混凝土长;④早期强度低,后期强度上升快;⑤水泥用量少,能节约大量水泥,降低工程造价。正是由于塑性混凝土具有上述优良特性,其在防渗墙等工程中得以广泛应用。世界上第一座塑性混凝土防渗墙于1957年在意大利修建,使用效果良好,之后在国外大规模推广。20世纪80年代,塑性混凝土防渗墙技术被引入我国并得到迅速推广。

水利部2004年年底的统计数据表明,全国已建成水库8.5万座,其中病险水库3.7万座,从1954年至2003年年底累计溃坝3484座,年均溃坝近70座,已严重影响了人民的生命和财产安全。渗漏是病险水库的主要病害,是造成水库溃坝的主要原因。全国大中型和重点小型病险水库的除险加固已得到中央及各级地方政府的高度重视,统计数据表明,截至2012年年底1.46万多座大中小型病险水库已完成除险加固。但是未除险的病险水库还很多,除险加固工程量浩大,任务艰巨,时间紧迫。塑性混凝土防渗墙技术在处理病险水库的渗漏问题上优势显著,其在解决我国病险水库渗漏工程中已得到广泛应用,后期推广应用会更广泛。此外,在工程围堰、堤防加固、垃圾(污水)处理场、人工湖等工程中,塑性混凝土防渗墙也具有广泛的应用空间。

因此,为了更好、更大规模推广塑性混凝土材料的应用,需要更加全面、系统地了解塑性混凝土的性能,准确把握其不同受力状态下的力学性能变化特征,需要通过塑性混凝土的配合比试验、基本力学性能试验、三轴及真三轴

试验、单轴循环加载试验和渗透试验等,深入研究塑性混凝土的强度、变形性能和本构关系、破坏准则和渗透性能,以及进行塑性混凝土防渗墙等实际工程应用研究,这对塑性混凝土更大规模地推广应用具有重要的理论意义和实用价值。

1.2 塑性混凝土的研究现状

1.2.1 塑性混凝土的应用

普通混凝土防渗墙技术起源于 20 世纪 50 年代初期,首先在意大利、法国等国家应用,后在墨西哥、加拿大、日本等国家有了发展。20 世纪 60 年代起,混凝土防渗墙在世界坝工中得到迅速而广泛的应用,最深的为加拿大的马尼克(Manic)3 号主坝,最大墙深达 131m。但是,工程实践表明,刚性混凝土(也称普通混凝土)用于防渗墙存在一些难以解决的问题:一是应力集中,产生不均匀沉降,刚性混凝土防渗墙弹性模量高出周围岩土体弹性模量数十倍乃至数百倍,在荷载作用下其变形能力较小,防渗墙体顶部与周围土体的沉降差别大,出现不均匀沉降,难以与周围岩土体协调变形,从而使防渗墙顶受巨大压力,两个侧面受到很大的摩擦力,导致墙体内部应力集中,应变也比混凝土极限应变高很多,因而墙体易产生裂缝,降低了防渗效果,威胁大坝等建筑物的安全;二是工程造价较高,刚性混凝土防渗墙水泥、钢筋用量大,造价高;三是施工困难,质量较差,由于刚性混凝土防渗墙强度大,槽孔接头施工困难,容易形成渗漏隐患部位。

例如,加拿大的马尼克 3 号坝,位于马尼夸根河,主坝是冰碛土心墙坝,坝高 108m,坝顶长 395m。该坝基础覆盖层厚达 130m,共布置两道普通混凝土防渗墙,最大墙深 131m,墙厚上下均为 61cm,两墙中心间距 3.2m。防渗墙建于 1971—1972 年,1975 年 8 月水库开始蓄水,1976 年 1 月完成蓄水。

①防渗墙沉降变形:坝体填筑及蓄水过程中防渗墙沉降变形较大,其中河床中央剖面墙体顶部开始蓄水时最大沉降 101.5mm,蓄水完成后最大沉降 129.6mm,运行 15 年后防渗墙顶部最大沉降 162.3mm;大约 80% 的沉降发生在大坝填筑及蓄水期,后期沉降主要由混凝土的徐变变形产生;②防渗墙水平变形:坝体填筑及蓄水过程中防渗墙水平变形较大,其中河床中央剖面墙体顶部开始蓄水时最大水平变形 168.7mm,蓄水完成后最大水平变形 284.4mm,运行 15 年后防渗墙顶部最大变形 326.0mm;大约 87% 的水平变形发生在大坝填筑及蓄水期,后期变形也主要由混凝土的徐变变形产生;③防渗墙应力:1974 年 11 月、1975 年 9 月和 1976 年 10 月,监测到的防渗墙最大

主应力分别为 14.96MPa、24.13MPa 和 25.79MPa，其最大值甚至超过了混凝土的强度；监测成果也表明，防渗墙的压应力约 85% 来自负摩阻力，15% 左右来自上覆压力作用。

又如墨西哥的拉·维力太 (La Villita) 土坝，最大坝高 60m，为黏土心墙堆石坝，覆盖层最大深度 80m，为防止基础渗透破坏修建一道 0.6m 厚的普通混凝土防渗墙，防渗墙两侧做了 26m 深的灌浆区。1966 年 7 月防渗墙和灌浆完成，然后填筑坝体，1967 年 12 月填到坝顶，1968 年蓄水。竣工后，心墙中线最大沉陷 28cm，水平位移最大 10cm，防渗墙顶部位移一般为 10cm，墙底最大位移 15cm，但最大断面处灌浆区底部防渗墙有破坏迹象。有限元计算也证明，墙内最大压应力 26.3MPa，最大拉应力 2.6MPa，从而验证了防渗墙与灌浆体终端出现了剪切破坏和在灌浆冲击层与未灌浆冲击层接触部位的防渗墙由于拉应力过大而遭到破坏。

为了改善刚性混凝土防渗墙的性能，引入了塑性混凝土防渗墙技术。1957 年意大利在纳尔尼地区的阿亚 (Aja) 河水电站工程围堰中首次采用塑性混凝土防渗墙。由于塑性混凝土具有弹性模量低、极限应变大、弹强比小等特性，大大改善了防渗墙的运行条件，因而从 20 世纪 60 年代末起塑性混凝土防渗墙在国外得到了广泛应用。其中，最著名的是 1968 年用塑性混凝土防渗墙成功地治理了英国巴尔德赫德 (Balderhead) 土坝心墙的渗漏问题，该坝高 48m，防渗墙高 46.4m，厚 0.6m；智利建成的塑性混凝土防渗墙也比较多，并且在坝高达 116m 的科尔文 (Colbun) 土坝下面建造了深达 68m 的塑性混凝土防渗墙；阿根廷亚西雷塔 (Yacyreta) 水电工程，塑性混凝土防渗墙墙厚 0.6m，最大深度 25m；日本奥只見坝 (Okutadami) 工程在覆盖层中使用塑性混凝土防渗墙，墙体与周围土体相对沉陷仅有几毫米；西班牙阿尔翁 (Arbón) 坝工程中的塑性混凝土防渗墙也取得了令人满意的效果；法国的韦尔奈 (Verney) 面板堆石坝坝高 40m，修筑一道深 50m、厚 1.2m 的悬臂式塑性混凝土防渗墙；加拿大不列颠哥伦比亚省克利夫兰 (Cleaveland) 坝改造工程中修建了最深 23m、宽 0.8m、长 306m 的塑性混凝土防渗墙。

在国内，塑性混凝土防渗墙在 1988 年新疆乌拉泊水库除险加固工程中开始使用，其厚度为 0.8m，最深达 50m。之后，福建水口水电站主围堰、十三陵抽水蓄能电站下围堰、小浪底工程上游围堰、水口水电站二期上游围堰、丹江口水库副坝、隔河岩电厂围堰、岳城水库大副坝、凤亭河水库主坝、三峡二期围堰等工程中应用塑性混凝土防渗墙技术并取得良好效果。此外，在长江、汉江和松花江堤防加固、垃圾（污水）处理场、人工湖等工程中，塑性混凝土防渗墙也得到广泛应用。

1.2.2 塑性混凝土防渗墙设计指标

塑性混凝土是由水、水泥、膨润土、黏土、砂、石子和外加剂拌和浇筑固化后形成的复合体,其中任何一种材料所占比例的改变均直接影响其工作性能、力学性能和渗透性能。按照经验确定的塑性混凝土防渗墙设计指标,在实际防渗墙受力分析中并不是最优的指标。因此,塑性混凝土力学指标的选取直接影响工程的造价和安全。

塑性混凝土防渗墙设计参数主要包括墙体的厚度、高度及材料的工作性、强度指标、弹性模量、渗透指标等。目前,塑性混凝土防渗墙设计参数的选取还没有统一的理论和计算方法,一般采取工程类比法和数值分析法。

塑性混凝土防渗墙厚度计算公式为

$$B = H/[J] \quad (1.1)$$

式中: B 为塑性混凝土防渗墙的厚度, m ; H 为塑性混凝土防渗墙最大设计水头, m ; $[J]$ 为塑性混凝土防渗墙的允许渗透比降。

塑性混凝土防渗墙允许渗透坡降目前还没有完善的理论和精确的计算公式,也没有统一的试验设备和操作规程,利用试验还无法得出其值,一般根据工程经验取值。塑性混凝土防渗墙厚度一般取 $0.3 \sim 1.0m$,在堤防工程中一般取 $0.3 \sim 0.6m$,在坝体中一般取 $0.6 \sim 0.8m$,特殊条件下可取 $0.8 \sim 1.2m$ 。表 1.1 汇总了不同工程的塑性混凝土防渗墙设计指标。

此外,可以采用数值分析法设计塑性混凝土防渗墙厚度。通过分析塑性混凝土防渗墙在坝体不同位置、不同厚度和不同弹性模量下应力分布特征,根据塑性混凝土防渗墙的允许应力来确定厚度及其设计指标。例如,有学者分析了东平湖围坝塑性混凝土防渗墙 $15cm$ 、 $22cm$ 两种厚度,4 种弹性模量下坝体内的应力分布,从而确定一种较优的塑性混凝土防渗墙设计参数。

1.2.3 塑性混凝土配合比设计

塑性混凝土材料的设计指标主要包括单轴抗压强度 (f_{cu})、弹性模量 (E)、渗透系数或者抗渗等级及工作性等。塑性混凝土设计指标的一般要求为: f_{cu} 为 $0.5 \sim 5.0MPa$,弹性模量为 $400 \sim 3000MPa$,渗透系数数量级为 $10^{-7} \sim 10^{-9} cm/s$ 。

塑性混凝土配合比设计与普通混凝土配合比设计相比有很大不同。普通混凝土配合比设计准则基于充填原理,即水与胶凝材料组成水泥浆,水泥浆填充砂的空隙组成砂浆,砂浆填充石子的空隙组成混凝土,设计原则基于假定容量法或假定体积法。塑性混凝土配合比设计则是寻找各种材料组分最经济的组合,使塑性混凝土的各种性能满足设计要求。塑性混凝土配合比设计常采用假

坝(堰)体塑性混凝土防渗墙设计指标

表 1.1

序号	工程名称	库容/m ³	墙高/m	墙厚/m	设计指标		
					f_w /MPa	E/MPa	$K/(m/s)$
1	大梁水库	2260 万		0.6	4~9	≤1500	≤10 ⁻⁹
2	安沟水库	1530 万	40				10 ⁻⁹
3	田心水库	288 万		0.4	3~5	≤1000	≤10 ⁻⁹
4	朝阳沟水库	797 万		0.6			≤10 ⁻⁷
5	册田水库	5.8 亿	35~42	0.8	1.0~2.5	≤500	
6	古城水库	1396 万		0.4			
7	CCS 水电站工程		35	0.8	0.5~5.0	≤500	≤10 ⁻⁸
8	黄大山水库	139.4 万	6.7~16.0	0.3	2~4	≤2000	≤10 ⁻⁸
9	太平庄水库	998.0 万		≥0.3	≥4	1500	≤10 ⁻⁸
10	下米庄水库	1142 万	13	0.6	5	1000	≤10 ⁻¹⁰
11	猴子岩水电站大坝		80.9	1.0	≥5	≤2000	≤10 ⁻⁹
12	三溪水库		20.6	0.4			≤5×10 ⁻⁹
13	里底水电站工程			0.6	5		
14	龙湾水库	7091 万	28.1	0.4	≥3	≤1000	10 ⁻⁹
15	沙湾水电站	4867 万		1.0	≥5	≤3600	≤10 ⁻⁹
16	牛角冲水库	21.5 万		0.4	≥5	≤1600	≤4×10 ⁻⁹
17	米茂水库	289 万		0.4	1~8	≤6500	≤10 ⁻⁹
18	大宁水库	4611 万	9~33	0.8, 0.6	≥2	≤1500	≤10 ⁻⁸

续表

序号	工程名称	库容/ m^3	墙高/m	墙厚/m	设计指标		
					f_{ca}/MPa	E/MPa	$K/(\text{m/s})$
19	海勃湾水利枢纽				≥ 4.8	≤ 1500	$\leq 10^{-9}$
20	合东水库	2501 万	47	0.6	≥ 2.5	800~1000	$(1\sim 9)\times 10^{-10}$
21	龙湖调蓄工程				1.5~5.0	500~2000	$\leq 10^{-8}$
22	锦屏二级水电站工程			0.8			$\leq 10^{-9}$
23	引水渠首枢纽工程州河节制闸			0.4	≥ 2	300~700	$\leq 10^{-8}$
24	赤兰溪水库	1281.6 万		0.6	≥ 5	3000~5000	$\leq 10^{-8}$
25	哈达山水利枢纽工程			0.4	≥ 2.5	600~800	$\leq 10^{-9}$
26	师姑庄橡胶坝		11	0.4	3~4	≤ 1000	W4
27	漫水湾引水工程		≤ 41.2		1.0~2.5	6000~8000	$\leq 10^{-9}$
28	窄口水库	1.85 亿	≤ 82.8	0.8	3~8	1000~2500	10^{-11}
29	许家崖水库	2.81 亿		0.4	2	500	$\leq 2\times 10^{-9}$
30	濮阳市引黄灌溉调节水库		26~35	0.4			$(1\sim 5)\times 10^{-8}$
31	七峪水库			0.5	≥ 5	300~1000	$\leq 10^{-8}$
32	长潭水库	7.32 亿	≤ 69		5		$\leq 10^{-9}$
33	黄墅水库	489 万	≤ 19	0.3	3~5	300~1000	$\leq 10^{-9}$
34	茅岭水库	675.95 万		0.6	2.5	1000	$\leq 10^{-9}$
35	象山水库	3.34 亿		0.8	3~5	500~800	$\leq 10^{-9}$
36	清凉寺水库			0.5	2.5~5.0	500~1500	$\leq 10^{-9}$
37	龙怀水库	3393 万		0.6	≥ 2		10^{-9}

续表

序号	工程名称	库容/ m^3	墙高/m	墙厚/m	设计指标		
					f_{cu}/MPa	E/MPa	$K/(\text{m/s})$
38	红沿河核电厂一期工程围堰		15~20	0.8	≥ 1	250~500	$\leq 10^{-9}$
39	漫水湾工程			0.8	1.0~2.5	5000~8000	$\leq 10^{-9}$
40	西泉眼水库	4.78 亿		0.8	3.5~5.0	500~1000	$\leq 10^{-9}$
41	那降水库	2717 万			3~5	300~1000	$\leq 10^{-9}$
42	毛滩水电站工程	3000 万	35~47	0.8	5		
43	丁家二沟水库	1036.25 万		0.4	≥ 2.5	800~1000	10^{-10}
44	乔音水库			0.6	1~9	300~2500	$\leq 5 \times 10^{-8}$
45	上西山水库	546 万		0.4	3~7	2000~7000	$\leq 10^{-9}$
46	阿克达拉水库	5400 万		0.3		800~1000	$\leq 10^{-8}$
47	汉江兴隆水利枢纽				≥ 6	≤ 1500	10^{-8}
48	益塘水库	1.65 亿		0.6	1.5~3.0	300~1000	$\leq 10^{-8}$
49	丰满区二道水库			0.4		≤ 1500	$\leq 10^{-9}$
50	波河水库	2.35 亿		0.4	1.5~5.0	200~300	$\leq 10^{-9}$
51	西河二库水库	176 万	≤ 40	0.6	1~5	≤ 5000	$\leq 5 \times 10^{-9}$
52	黄羊泉水库	5780 万	≤ 30.52	0.4	2	350~450	W6
53	五岳水库	1.22 亿		0.6	1.5~5.0	300~2000	10^{-10}
54	百丈漈一级水电站加固	0.606 亿			2	700	10^{-7}
55	黑龙江依兰县城松干城堤防		10~20	0.3	2	200~1500	10^{-8}
56	Balderhead 土石坝		46	0.6			

续表

序号	工程名称	库容/m ³	墙高/m	墙厚/m	设计指标		
					f_w /MPa	E/MPa	K/(m/s)
57	Verney 面板堆石坝		50	1.2			
58	希尼尔水库	2.2 亿			2~4	100	10^{-8}
59	绰勒水利枢纽坝基防渗墙	2.6 亿	7~17	0.6	5~6		10^{-8}
60	凤亭河水库主坝		28~53	0.7	3.3	1576	1.2×10^{-9}
61	东平湖围坝				2~4	300~1000	10^{-9}
62	都匀市绿茵湖水库大坝加固		48	0.8	2.5	800~1000	10^{-8}
63	随州两河口水库大坝				2~5	1300~2200	10^{-8}
64	蕲春大同水库加固				1~3	1000	10^{-8}
65	米家寨水库加固		70	0.8	5	12000	1.9×10^{-8}
66	三峡工程二期围堰		74	1.0	4~5	1000	10^{-9}
67	佛子岭抽水蓄能电站下库坝基防渗墙			0.6	1.5~3.0	1000~2000	10^{-8}
68	湖北汉江遥堤		18~24	0.25	2	1000	10^{-9}
69	日照水库加固	3.21 亿	36	0.6	2	500~1000	10^{-8}
70	克利夫兰坝加固		23		1.5		
71	荆南长江干堤		11~34	0.25	2	1000	10^{-9}
72	五一水库加固			0.25	2	400	10^{-9}
73	老营盘大坝			0.8			
74	竹坑水库加固				2		10^{-8}
75	青山水库加固	2.15 亿			8	3000	5×10^{-9}

续表

序号	工程名称	库容/m ³	墙高/m	墙厚/m	设计指标		
					f_m/MPa	E/MPa	$K/(\text{m/s})$
76	卡尔黑大坝		80		2.0~3.5	700~2000	10^{-10}
77	横山水库加固		17	0.3	2	1000	10^{-8}
78	大河水库加固		13.6	0.4	7.5		
79	黄河水库加固				4	2000	10^{-8}
80	八一水库	3306 万	17.35	0.4	4	700~900	10^{-8}
81	岭澳核电站二期工程防波堤		15	0.8	1	250~3000	10^{-9}
82	山神庙水库加固	14 万		0.4	2~5	1000	10^{-8}
83	阿克拉水库加固	3000 万	12.8	0.3	5		10^{-9}
84	石碌水库加固	1.4 亿		0.6	3~5		W6
85	西段村水库	2970 万		0.6	1.5~2.5	100~300	10^{-9}
86	溪霞水库加固	4936 万	35.5	0.6			10^{-9}
87	张峰水库	3.94 亿	10~34	0.8	1.0~2.5	500	10^{-9}
88	紫坪铺上游围堰			0.8	3~4	1500	10^{-9}
89	武汉长江干堤				2	600	10^{-9}
90	蜈蚣山水库	2249 万			3~5	300~1000	10^{-9}
91	向家坝电站一期围堰		81.8	0.8	4~6	500~700	10^{-9}
92	英山占河水库				7.5	22000	W8
93	澄碧河水库		72.0	0.8			
94	黄羊河水库		64.4	0.8			
95	拓林水电站		63.6	0.8			

定容重法。

塑性混凝土配合比设计与普通混凝土的不同之处主要表现在以下 5 个方面：

(1) 用水量大。塑性混凝土的用水量一般高达 $250\sim 450\text{kg}/\text{m}^3$ ，而普通混凝土只有 $160\sim 180\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 砂率很大。塑性混凝土砂率一般都在 50% 以上，特殊情况下可以达到 100%，即不掺用石子，而普通混凝土砂率一般在 30% 左右。

(3) 水胶比较大。塑性混凝土水胶比一般在 0.7~1.3 之间，而普通混凝土水灰比一般在 0.4~0.7 之间。

(4) 胶材用量较低。塑性混凝土胶凝材料用量与砂率、膨润土的掺量等及由此导致的用水量变化有关。胶凝材料用量对塑性混凝土弹性模量有一定的影响，按比例增加胶材用量有利于降低塑性混凝土的弹性模量，但很不经济。

(5) 塑性混凝土掺减水剂有一定的减水作用，掺引气剂能显著降低弹性模量。

在进行配合比设计时，结合已有文献，塑性混凝土配合比参数范围可参考如下确定：

(1) 塑性混凝土的用水量根据膨润土掺量和减水剂的使用情况，一般可控制在 $250\sim 330\text{kg}/\text{m}^3$ 。然而，考虑到不同塑性混凝土中黏土、膨润土的类型及用量不同，实际配制过程中用水量有时远远超过 $330\text{kg}/\text{m}^3$ ，可达 $450\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 塑性混凝土砂率很大，一般在 60%~95% 之间。塑性混凝土的砂率也可达 100%，配合比设计可考虑不掺用石子。

(3) 塑性混凝土水胶比较大，如立方体单轴抗压强度为 2~5MPa，水胶比一般在 0.7~1.0 之间。工程应用中塑性混凝土的单轴抗压强度一般在 2~5MPa 之间，但推荐水胶比在 0.7~1.0 的范围较大，不利于实际推广应用，应以单轴 2MPa 和 5MPa 为例，具体说明其相应水胶比合理范围。

(4) 当设计立方体单轴抗压强度为 2MPa、5MPa 时，塑性混凝土的胶材用量分别为 $210\sim 300\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $360\sim 450\text{kg}/\text{m}^3$ ，其中膨润土、黏土的掺量在 $70\sim 130\text{kg}/\text{m}^3$ 之间。考虑塑性混凝土的低弹性模量和低造价，塑性混凝土配合比设计时一般减少水泥、膨润土的用量，增加黏土的用量。因此，膨润土、黏土掺量可适当增加。

(5) 减水剂和引气剂的掺量与普通混凝土相同或略低。

塑性混凝土配合比一般的设计方法是根据工程经验，把单位用水量、水胶比、水泥用量、砂率、膨润土（黏土）的掺量等作为基本量，每个基本量取若干个水平，采取正交设计安排试验。试件养护至规定龄期后进行试验，根据试验结果进行极差分析和方差分析确定一种满足要求的配合比。表 1.2 汇总了一些实际工程的塑性混凝土配合比设计。