

碾压混凝土的层面结合 与渗流

杨华全 任旭华 著



碾压混凝土的 层面结合与渗流

杨华全 任旭华 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统介绍了碾压混凝土坝的层面结合与渗流特性,建立了碾压混凝土坝的渗流分析方法,提出了碾压混凝土坝的最优渗流控制方案,阐述了碾压混凝土坝失稳破坏机理及安全评价标准。

本书重在应用,其内容涉及碾压混凝土坝设计、施工及科研等众多所关心的领域,结合大量工程实践,给出了多个工程应用实例。本书可供广大从事碾压混凝土坝设计、施工、科研工作的技术人员及大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

碾压混凝土的层面结合与渗流/杨华全,任旭华著. —北京:中国水利水电出版社, 1999

ISBN 7-5084-0093-3

Ⅰ. 碾… Ⅱ. ①杨… ②任… Ⅲ. 混凝土坝: 碾压混凝土坝
Ⅳ. TV642.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 30909 号

书 名	碾压混凝土的层面结合与渗流
作 者	杨华全 任旭华 著
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	850×1168 毫米 32 开本 7.125 印张 188 千字
版 次	1999 年 9 月第一版 1999 年 9 月北京第一次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	18.00 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

碾压混凝土是一种可用土石坝施工机械设备运输及铺筑，用振动碾压实的特干硬性混凝土。我国从 1978 年开始对碾压混凝土筑坝技术进行研究，在大量试验研究的基础上，将其广泛应用于实际工程，如 1986 年建成了我国第一座高 57m 的碾压混凝土重力坝——坑口坝。我国目前已建、在建的碾压混凝土坝约 40 座。经过近 20 年的努力，我国在碾压混凝土材料性能研究和碾压混凝土坝设计、现场施工组织及施工工艺等方面积累了丰富的经验，正在形成较为配套的具有中国特色的碾压混凝土筑坝技术。

本书是我国第一部关于碾压混凝土坝层面结合与渗流特性的专著，通过室内外试验，系统地研究了碾压混凝土材料特别是碾压混凝土层面的物理力学特性和渗流特性。建立了碾压混凝土坝的渗流分析方法，提出了碾压混凝土坝的最优渗流控制方案，深入系统地研究了碾压混凝土坝的失稳破坏机理及安全评价标准。

本书共分十章，分别介绍了碾压混凝土筑坝技术的发展现状和趋势、碾压混凝土本体及层面渗流特性的试验研究成果、碾压混凝土筑坝材料的特性、碾压混凝土现场碾压试验的主要参数及层面原位抗剪试验、碾压混凝土坝渗流计算模型及其数值模拟、碾压混凝土坝的渗流特性和渗流控制、碾压混凝土坝应力场位移场的有限元法、碾压混凝土重力坝失稳破坏的机理、碾压混凝土重力坝的安全评价方法和安全标准的研究及应用，以及碾压

混凝土坝渗流与应力的耦合作用等。

本书在编写过程中，得到了河海大学夏颂佑教授、长江科学院周守贤教授高级工程师的精心指导，并对书稿提出了许多建设性意见，沈洪俊和邝亚力高级工程师分别参加了第二章、第四章的部分编写工作，王晓军、邓建武、彭茂林等也对本书给予了大力支持，中国水电建设工程咨询公司，李浩钧教授对书稿进行了详细的审阅，在此表示衷心的感谢。书中引用了“八五”龙滩碾压混凝土坝技术攻关部分成果，文中未一一标出，一并致谢。

由于作者水平有限，书中难免有许多不妥之处，恳请读者予以批评指正。

著 者

1999 年 5 月

第一章 绪 论

1.1 碾压混凝土筑坝技术的发展和趋势

碾压混凝土起源于 30 年代的干贫混凝土, 70 年代进入世界的科学试验阶段。此间, 美、英、日等国在这方面做了大量的工作, 中国、加拿大、巴西、澳大利亚、巴基斯坦, 以及南非等国也开始涉足这个领域。

1971 年美国在福特 (Tims Ford) 坝开始进行碾压混凝土的现场试验, 浇筑两层 0.6m 厚贫混凝土, 并提出试验成果。同年美国陆军工程师团在维克斯帕 (Vicksburg) 工程, 次年在洛斯特溪 (Lost Creek) 进行了现场试验, 取得良好效果。1978 年美国陆军工程师团在邦纳维尔 (Bonner Ville) 坝浇筑碾压混凝土, 保护开挖出的基岩, 并在洛斯特溪坝溢洪道消力池上浇筑碾压混凝土。1980 年在柳溪 (Willow Creek) 坝作现场试验, 为大面积使用碾压混凝土积累经验。1974 年至 1979 年巴基斯坦在塔贝拉 (Tarbela) 工程中, 利用就地开挖的骨料和少量水泥拌合的混凝土用于回填修补工程。在隧洞塌方部位、溢洪道消力池冲刷部位及其他修补工程中使用干贫混凝土, 并采用土石方施工机械施工。在这个工程中, 首次将这种混凝土正式命名为碾压混凝土 (Roller Compacted Concrete)。

英国人帕顿 (Paton) 在 1971 年国际大坝会议中提出将这种干贫混凝土用于坝体。1973 年莫法特 (Moffat) 提出进一步发挥干贫混凝土的优点, 更合理地用于重力坝的论点, 使碾压干贫混凝土重力坝的设计思想得以发展。碾压混凝土筑坝技术经过六七十年代不同途径工程实践的摸索, 终于在 80 年代初在日本建成 89m 高的岛地川坝, 美国建成 52m 高的柳溪坝。在此后的十多年, 碾压混凝土筑坝技术迅速得到推广应用, 并逐步应用于高坝建设中。据不完全统计, 截至 1992 年底, 世界上已建和在建的大坝工程项

目达 116 座，分布遍及五大洲。日本宫瀨碾压混凝土重力坝，坝高 155m，为目前最高的碾压混凝土大坝。规划兴建的中国龙滩碾压混凝土重力坝，坝高达 216m（第一期 192m）。

我国于 1986 年在福建坑口水电站建成 57m 高的第一座碾压混凝土坝，从而填补了我国筑坝领域这一技术空白。此后，碾压混凝土筑坝技术在我国水利水电工程建设中得到极大重视。我国虽然起步较晚，但发展很快，先后建成了 18 座各种用途的碾压混凝土重力坝、施工围堰等，还在贵州普定拱坝建设中成功地运用了这项技术，并获得了一批科研成果。据不完全统计，我国目前已建和在建的碾压混凝土坝近 40 座，其中在建和近期拟建的高度在 100m 以上的坝有：龙滩（192m）、江垭（131m）、百色（126m）、大朝山（120.5m）、棉花滩（111m）。我国碾压混凝土坝的设计和施工技术水平不断提高，在建的坝高度已超过 130m，正在向 200m 级高坝冲刺。我国已建的碾压混凝土坝，在吸取国际先进技术的基础上，逐步发展形成我国特色的筑坝技术。在碾压混凝土坝建设中，采用低水泥用量、高掺粉煤灰、复合外加剂等，防渗结构类型多样。这些技术成就标志着我国碾压混凝土坝的建设，无论是建设的规模、设计水平和施工技术水平，还是重要技术关键的研究深度和广度，均已跨入世界先进行列。

碾压混凝土坝在我国之所以发展很快，并成为极有生命力的新坝型，是与该坝型自身的优点分不开的。碾压混凝土坝既具有常规混凝土坝断面小、安全度高的特点，又具有土石坝施工程序简单，可进行大规模机械化快速施工的优越性。人们对工程要求的安全性和经济性在碾压混凝土坝中更好地体现出来，这在坝工界已基本形成共识。其次，我国碾压混凝土坝的发展，是依靠科学技术、重视科学研究的过程。在“八五”期间还将碾压混凝土坝关键技术研究列入国家重点科学攻关计划，组织设计、科研、建设单位 and 高等院校进行协同攻关，使科研成果直接转化为生产力，使碾压混凝土坝设计和施工技术日臻成熟。

尽管十几年来我国碾压混凝土筑坝技术已取得了长足的进

步，但由于筑坝技术的复杂性，以及我们对问题、事物认识的不断发展，有不少技术问题尚有待深化提高。工程建设的发展迫切需要完善能充分体现和发挥其特点的坝工设计理论，制订相应的设计准则。针对连续浇筑上升新施工方式及层面胶结特性，合理确定大坝抗滑稳定分析方法及安全准则，寻求更为合适的渗流控制技术，探索开发超贫混凝土新坝型。这些不同的领域都有一些高难度的课题需要深入研究。

1.2 碾压混凝土坝的渗流与渗流控制研究现状

1.2.1 碾压混凝土渗透特性研究

近十几年来随着碾压混凝土筑坝技术的应用，国内外对碾压混凝土的渗透特性作了一些探索和研究，但由于碾压混凝土层面渗流问题的复杂性，国内外对其进行全面、细致的研究工作开展的不是很多。我国是开展这项工作较早的国家之一，国内主要在“八五”期间结合龙滩工程国家重点科技攻关课题中开展了这方面的工作，以往主要在铜街子、观音阁、普定、岩滩等工程中作了某些试验。

国内外有些学者结合工程实际和科学试验，对碾压混凝土的渗透特性提出了一些看法，如河海大学朱岳明教授等（1995）提出，根据碾压混凝土及碾压混凝土坝是由碾压混凝土本体和本体间层面所构成的成层体系的结构特点，认为这种千层饼式的结构其渗流和强度行为是由碾压混凝土本体与层面的渗流和强度特性所决定的，具有明显的各向异性特性。对一般坝工而言，可视碾压混凝土本体是一种均质各向同性体介质，其渗流特性可用简单的 Darcy 渗透定律来表示；层面是上下层碾压混凝土本体层由施工的间歇性所造成的界面缝隙。其渗流行为缝隙水流，与层面的水力隙宽、粗糙度、连通率、层面应力应变行为及加载历史有关。在进行渗流分析时，简化成等效模型来处理，其主要参数由碾压

混凝土本体的渗透系数、立方定律及层厚等参数来描述。这些研究的共同特点是对碾压混凝土层面进行等效处理,简单、方便。为准确模拟碾压混凝土层面的渗流特性、大坝的渗流行为及渗流对结构的作用机理,对层面单独研究是必要的。

河海大学速宝玉教授等于 90 年代初开始涉足碾压混凝土渗透机制的研究。他们通过对不同配合比、不同工况、不同碾压标准的现场施工试验块的取样,在室内进行了不同方位、不同条件的大量试验,获得了系统的资料。指出碾压混凝土本体的渗透系数与常规混凝土基本一致;层面是渗水的主要通道,水平向与垂直向渗透各向异性比可达几十倍甚至几百倍;高水头作用下的碾压混凝土层面,存在水力劈裂的危险性。提出高碾压混凝土坝上游面必须设置防渗层;通过专门的设备,进行了碾压混凝土渗流与应力的耦合试验,揭示了碾压混凝土随应力变化的机理、建立了碾压混凝土渗流——应力耦合的对数基本关系式。这些成果对人们充分认识碾压混凝土的渗透规律起到了促进作用。以往研究通常试块尺寸偏小(一般为 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$),并且未能将碾压混凝土本体及碾压混凝土层面的作用区分开,而碾压混凝土层面却往往是控制的关键,故有关碾压混凝土层面的渗透本质有待深入揭示。

中国水利水电科学研究院的张有天教授等根据沿层面渗流极不均一这一碾压混凝土坝的渗流特点,指出如何建立统计模型以代表层面渗透极不均一性是渗流分析的前提。他们用不相关的随机模型作为层面渗流统计模型,将要分析的层面划成等面积的小区,每个小区渗透系数按正态分布,由给定的渗透系数均值及方差(或 C_v)用计算机生成一组正态分布的渗流分析的层面统计模型的样本。这个模型考虑了施工质量的离散性而造成的渗透系数的离散性,而渗透系数的离散性对渗控设计的影响是相当大的。这种观点及做法理论上说是先进的。

尽管对碾压混凝土渗流研究是近年来发展起来的,但人们对裂隙渗流的研究却有三四十年的历史。从法国学者 Louis (1969)、

前苏联学者 Romm (1966)、Lomize (1951), 首先进行平行板裂隙水流试验, 证明立方定律。到后来考虑裂隙面的粗糙度, Louis (1969)、Lomize (1951)、Tsang (1981, 1983)、Neugil (1981)、Barton (1985)、Elsworth (1986) 分别提出了相应的修正立方定律。在单隙面渗流、应力耦合机理方面, Louis (1974)、Jones (1975)、Nelson (1975)、Kranz (1978)、Englender (1981)、Gale (1982)、沈洪俊和夏颂佑 (1995) 等通过试验研究直接得到渗透性与应力的关系式, Barton (1985)、刘继山 (1987, 1988)、沈洪俊和张奇 (1994) 等利用单裂隙面的变形规律间接地得出渗流与应力的关系式, Gani (1978)、Walsh (1981)、Tsang 和 Witherspoon (1981) 都曾试图提出某种理论概念来解释渗流与应力的耦合规律。人们对岩石裂隙面的渗流特性的认识有了长足进步, 并在实际工程加以重视, 但这所有的工作都是针对岩体而言的。由于碾压混凝土层面的形成与岩体层面存在很大差异, 碾压混凝土的渗流有其自身的特点, 有许多与岩体渗流不同之处, 这就迫使人们重视这个问题。尽管人们对碾压混凝土的渗透性作了一些研究, 但大都是对碾压混凝土渗透性的宏观认识, 没有单独研究层面的渗透特性以及与应力耦合机理。基于碾压混凝土层面可能是渗流的集中通道及稳定的薄弱面, 以及渗透水流对碾压混凝土层面的作用机理, 而国内外尚未有人专门以碾压混凝土层面作为研究对象研究其渗透规律以及与应力、变形、水头等外部因素的耦合机理, 因此, 对碾压混凝土渗透特性的研究尚有许多工作要做。

1.2.2 碾压混凝土坝渗流控制技术现状

碾压混凝土坝的渗流及渗流控制问题, 是自出现这一新坝型以来人们普遍关注的焦点。从某种意义上说, 碾压混凝土技术的发展主要取决于渗流控制技术的发展。目前国内外许多科技工作者对碾压混凝土坝的防渗结构进行了多种形式的试验研究和实践, 目的在于寻找出这样一种防渗结构: 即防渗结构自身稳定, 防渗效果好, 适应变形能力强; 工程量小、施工速度快, 对碾压混

混凝土施工干扰小，并有利于为碾压混凝土摊铺创造较大的工作面以充分发挥碾压混凝土筑坝的快速优势，而且耐久、经济、对水质无污染。

目前国内外已试验或采用的防渗形式大致有三种类型。第一种类型是日本普遍采用的“金包银”结构模式，即在迎水面、基础部位及背水面均用常规混凝土防渗与保护，中心部位用碾压混凝土填筑。内部碾压混凝土浇筑层面按施工缝刷毛清洗处理，然后铺砂浆覆盖上层新混凝土以增强层间结合。这种防渗形式和常规混凝土坝相近，同时解决了外部混凝土抗冻融等耐久性问题。这种防渗结构形式效果好、安全可靠，但结构复杂，需设置常规的结构缝并埋设止水系统；外包混凝土容易产生裂缝，可能会导致碾压混凝土也产生裂缝，并逐步向深部延伸。由此造成施工工艺复杂，极大地限制了碾压混凝土快速施工优越性的发挥。第二种类型是欧美国家普遍采用的方式，迎水面没有专设的防渗结构。有的只作常规混凝土保护层，有的采用骨料较细、水泥用量略高的碾压混凝土和在层间铺筑一定范围的细骨料混凝土垫层。这种防渗结构的特点是防渗依靠于提高坝体上游侧碾压混凝土和层面的抗渗性。由于结构简单、机械化程度高，适于快速施工，如控制好施工质量，防渗效果一般良好。第三种类型是在坝上游面用一种防渗性能好的材料或复合型防渗材料做防渗层，如美国温彻斯特坝用加聚氯乙烯板衬在上游面单独承担防渗。这种模式对碾压混凝土施工干扰小，便于快速施工，且可减轻混凝土抗裂的后顾之忧，但其抗渗能力及与混凝土外表面的胶结，则受到薄膜材料性能的限制，还有耐久性问题也容易引起人们的担心。

近年来，世界各国碾压混凝土筑坝技术的发展速度比较快，防渗模式在上述日本“金包银”，欧美全断面碾压薄层连续浇筑的基础上有所发展。多数设防渗面层和垫层混凝土以解决防渗问题。与早期修建的碾压混凝土坝不同，有些国家注意在面层及垫层混凝土区下游设置排水系统，有的不仅有垂直排水，还设置了水平排水，形成了网格式的排水系统，同时还注意基础部分的排水。

与几个应用碾压混凝土筑坝技术较多的国家相比,我国碾压混凝土筑坝技术虽起步较晚,历时不长,但发展速度是比较快的。在继承发展原有渗控方式的基础上,在渗流控制方面有所创新。由我国独创的用内填沥青砂浆的混凝土预制板护面作为防渗结构,具有抗渗性好、适应变形能力强、耐久稳定、施工干扰小等优点,在我国第一座碾压混凝土坝——坑口坝中得到成功应用。作为开发碾压混凝土的新型防渗模式来说,这种探索性的尝试是成功的。国外近期的碾压混凝土坝有的也按照类似模式,研究采用了聚氯乙烯膜,预制混凝土面板嵌缝等外附式的单独防渗结构。为了适应这种结构的需要,国内已研制出亲水性强、与混凝土容易粘结、便于喷涂施工、抗渗性能好、拉伸变形大、造价低廉的新品种防渗材料,如聚合物水泥砂浆、环氧基涂料、橡胶贴面等,有的已在坝面上进行了局部试验,取得了良好的效果。

综上所述,碾压混凝土坝的渗流控制应包含两方面的内容,一是减少渗漏,二是降低坝内层面上的扬压力。早期的碾压混凝土工程由于坝高较小,往往只注意渗漏问题,因此在防渗结构上作了大量的工作,而层面的渗透压力问题却未予以重视。随着高坝的建设,层面稳定和应力问题日显突出,降低扬压力成为渗控设计的一个重要内容。而在这一方面已开展的研究工作并不多,由于碾压混凝土渗流的复杂性,如何优化渗控设计仍有许多工作值得深入研究探讨。

1.3 碾压混凝土坝的应力和稳定研究现状

碾压混凝土坝存在众多水平施工层面,这些层面如果间歇时间控制欠妥、处理不当,常可能是一相对薄弱面,形成典型的成层体系结构。早期的碾压混凝土坝的应力计算按材料力学法进行,应力满足无拉应力准则;抗滑稳定则主要依赖于经验和半经验的公式作为判据。随着碾压混凝土筑坝技术的发展,以及高坝建设的需要,迫切需要寻求适于成层体系碾压混凝土坝应力和稳定的

分析方法。

武汉水利电力大学陆述远、段亚辉、常晓林、王宏硕等(1994)用弹塑性有限元法,对碾压混凝土坝层面的应力、点安全系数进行了大量的分析。还用强度储备系数法来模拟碾压混凝土坝失稳破坏机理,指出大坝的破坏失稳表现为块体和层面(包括建基面)自坝趾处向上游侧剪切屈服扩展过程。提出以准弹性准则作为碾压混凝土坝的设计准则。对安全标准的研究,他们综合考虑了超载、工作条件变坏和材料变劣等因素,给出了设计安全系数的算式。

清华大学曾昭扬教授等(1994)在碾压混凝土抗剪断试验基础上,研究了碾压混凝土层面压剪断裂过程的点与层面的应力与变形关系,点与层面的抗剪断强度参数关系,层面抗剪断强度的尺寸效应等问题。提出以连续弹性、剪裂软化、剪断滑移等三种变形形式划分一点的压剪变形过程与层面的压剪断裂区域,建立以位移或以受力为控制条件的碾压混凝土层面非线性压剪断裂数值计算模型。

对碾压混凝土坝而言,层面的应力和稳定是关键,而影响层面应力稳定的因素又复杂多变,不同的结构型式,不同的参数都将对坝的应力和稳定产生影响。国内有些学者,结合国家“八五”科技攻关作了许多有益的研究、探讨,取得了成绩,尽管如此,由于问题的复杂性,仍有许多工作有待深入开展。

1.4 本书的主要研究工作

本书是作者对多年来从事碾压混凝土层面结合和渗流特性研究科研成果的总结,主要包括:

1. 碾压混凝土及碾压混凝土坝的渗流特性研究

在系统分析和总结已有碾压混凝土渗流特性研究成果的基础上,开发研制了一套适于进行碾压混凝土渗流试验的实验装置;对现场取样的碾压混凝土试块进行了碾压混凝土本体及层面的渗透试验,着重对碾压混凝土层面的渗流特性进行了研究;对应力、水

头等因素对碾压混凝土渗透性的影响进行了探索研究。首次系统地获得了碾压混凝土浇筑层面在不同间歇时间、不同处理方式以及不同水头作用下的渗透特性，为碾压混凝土坝的渗流分析以及渗流对坝体应力和稳定的影响研究提供科学依据。

2. 碾压混凝土物理力学特性研究

通过室内外试验，对碾压混凝土物理力学特性，特别是层面的物理力学特性进行了系统的分析和总结，揭示了碾压混凝土材料的若干新的属性，指出碾压混凝土坝在设计和施工时必须注意的问题。

3. 碾压混凝土坝渗流计算模型及数值模拟

在系统研究各种渗流计算模型的基础上，结合碾压混凝土坝的特点，指出等效处理不能真实反映大坝的渗流行为，提出了适于碾压混凝土坝渗流分析的广义统一域混合介质模型，并给出了相应的计算公式。

4. 碾压混凝土坝渗流控制研究

对不同渗控结构型式的渗控效果进行了比较研究，提出适于高碾压混凝土坝的渗控技术。

5. 碾压混凝土坝应力场位移场有限元法研究

结合碾压混凝土坝结构的特点，提出了坝体成层结构的模拟方法，重点研究了层面本身的非线性特性。

6. 碾压混凝土重力坝失稳破坏机理研究

用三维弹塑性有限元法对碾压混凝土重力坝失稳破坏机理进行了初步探讨，指出了碾压混凝土坝的失稳破坏方式和破坏过程。

7. 碾压混凝土重力坝安全评价方法和安全标准的研究

在系统总结和分析现有大坝安全评价方法的基础，提出了适于碾压混凝土重力坝的安全评价方法，并以实际工程为例进行了大坝安全度评价。

8. 碾压混凝土坝渗流与应力弹塑性耦合分析研究

借鉴岩体耦合法，推导了碾压混凝土重力坝渗流与应力耦合作用的变分公式，并在此基础上提出了有限元迭代解耦方法。对实际大坝进行了耦合分析，指出了设计和施工应注意的若干问题。

第二章 碾压混凝土本体及 层面渗流特性

在系统分析和总结已有碾压混凝土渗流特性研究成果的基础上,开发研制了一套适于进行碾压混凝土渗流试验的实验装置,对现场取样的碾压混凝土试块进行了碾压混凝土本体及层面的渗透试验,着重研究了碾压混凝土层面的渗流特性;对应力、水头对碾压混凝土渗透性的影响进行了探索研究;获得了碾压混凝土不同工况、不同层面处理方式的渗流特性,为碾压混凝土坝的渗流分析以及渗流对碾压混凝土坝应力和稳定的影响研究提供了依据。

2.1 概 述

碾压混凝土筑坝是近 20 年新兴起的一项筑坝技术,这种形式兼有混凝土重力坝和堆石坝的优点,因此,得到广泛应用。由于碾压混凝土是分层碾压而成,而碾压混凝土的浇筑层通常只有几十厘米,这就使得碾压混凝土坝存在大量的水平施工缝。这种水平缝的存在将使坝的渗流特性不同于一般混凝土坝,如处理不当就可能成为碾压混凝土坝渗流集中通道和抗滑稳定的薄弱面。自碾压混凝土坝问世以来,据对国内外已建碾压混凝土坝的运行观测,总体来说筑坝技术是成功的,但普遍存在渗漏问题,人们一直把渗漏视为它的一个天生缺陷。多少年来,人们不断探索研究碾压混凝土及碾压混凝土坝的渗透规律,寻求合适的防渗措施以解决坝的渗流问题。迄今为止,国内外对碾压混凝土渗透特性的研究都是对碾压混凝土渗透性的宏观评价,尚未有人以层面作为研究对象,研究其渗流特性。本章根据工程建设的需要,对从施工现场取得的碾压混凝土试块,进行了层面渗流特性的室内试验研究,获得了一些碾压混凝土层面渗流特性的规律。

2.2 国内外已有研究成果综述

目前国内外研究碾压混凝土渗透性方法有三种：第一种是按工程要求的配合比，在实验室成型试件，测定碾压混凝土本体和层面的渗透系数；第二种是现场取样，室内试验测定其渗透特性；第三种是现场压水试验，测其渗透系数。国内外许多学者应用上述方法对碾压混凝土的渗透特性做了许多研究，下面将主要评述几个典型工程的研究成果。

1. 柳溪坝

柳溪坝（美国）曾进行过实验室成型圆柱体试件及现场钻取心样的渗透试验，其主要结果列于表 2-1。

表 2-1 柳溪坝碾压混凝土试件和心样渗透系数测定结果

部 位	最大骨料粒径 (mm)	水泥用量 (kg/m ³)	粉煤灰用量 (kg/m ³)	渗透系数 ($\times 10^{-10}$ cm/s)	
				圆柱体试件	心 样
坝体内部	76	47	19	67.5	18.3
坝体外部	76	104	47	1.68	20.1
溢流面	38	187	80	6.25	67.1

柳溪坝碾压混凝土由于其骨料中小于 0.07mm 的颗粒约占 8%，起到充填碾压混凝土空隙的作用，虽然其胶凝材料用量很低，但渗透系数仍有 6.7×10^{-9} cm/s。柳溪坝蓄水一年后，进行坝体钻孔压水试验，其渗透系数在 $8.5 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-4}$ cm/s 之间，这里包括碾压混凝土本体和层面之间的渗漏，与表 2-1 相比，说明层面的渗漏是相当严重的。

2. 岛地川坝

岛地川坝（日本）的渗透试验，是对从连续浇筑两层的碾压混凝土中钻取的直径 15cm，高 70cm 的心样进行的，而且对钻孔进行了压水试验，其结果列于表 2-2。

表 2-2 岛地川坝碾压混凝土渗透系数测定结果

水胶比	胶凝材料用量 (kg/m ³)		心样平均渗透系数 (cm/s)			现场实地压水试验 平均渗透系数 (cm/s)
	水 泥	粉煤灰	上 层	中 层 (包括层面)	下 层	
0.80	91	39	2.3×10^{-9}	8.3×10^{-9}	1.1×10^{-7}	1.78×10^{-6}

心样的渗透系数在 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ cm/s 之间, 与常规大体积混凝土相比要大一些, 现场压水试验值约比心样大 1 个~2 个数量级, 这是由碾压混凝土材料离析形成的空隙所致。

3. 大川坝

大川坝(日本)从现场钻取 $\phi 17$ cm, 深 3.0 m, 包含 6 层 0.5 m 厚的碾压层进行试验, 心样的渗透系数和现场压水试验的平均渗透系数列于表 2-3。心样试验与现场压水试验结果基本上在一个数量级范围。

表 2-3 大川坝碾压混凝土渗透系数测定结果

水胶比	胶凝材料用量		心样测定结果			现场实地压水试验	
	水泥 (kg/m ³)	粉煤灰 (kg/m ³)	龄期 (月)	抗压强度 (MPa)	渗透系数 ($\times 10^{-6}$ cm/s)	龄期 (月)	渗透系数 ($\times 10^{-6}$ cm/s)
0.80	84	32	20	20.1	4.2	20	1.7~7.4
0.85	84	32	21	16.0	4.5	21	0.29

4. 北环工程

北环工程(美国)进行了碾压混凝土不同层面处理的现场渗透试验, 钻取心样, 测其渗透系数, 其结果列于表 2-4。

表 2-4 不同层面处理方式的渗透系数测定结果

层面处理方法	渗流方向	平均渗透系数 ($\times 10^{-6}$ cm/s)
无 缝	垂直层面	2.30
只洒水	平行层面	2.25
铺水泥浆	平行层面	2.60
铺水泥砂浆	平行层面	0.19