

DISIJIE ZHONGGUO SHUILISHUIDIAN YANTULIXUE YU

GONGCHENG XUESHU TAOLUNHUI JI

DIQIJIE QUANGUO SHUILI GONGCHENG SHENLIU XUESHU YANTAOHUI LUNWENJI

第四届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会暨 第七届全国水利工程渗流学术研讨会论文集

主编 王复明



黄河水利出版社

第四届中国水利水电岩土力学与工程 学术讨论会暨第七届全国水利工程 渗流学术研讨会论文集

主 编 王复明
副主编 蔡正银 王俊林 汪自力
姜 彤 肖昭然 李 斌

黄 河 水 利 出 版 社

· 郑 州 ·

图书在版编目(CIP)数据

第四届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会暨第七届全国水利工程渗流学术研讨会论文集/王复明主编. —郑州:黄河水利出版社,2012. 8

ISBN 978-7-5509-0343-2

I. ①第… II. ①王… III. ①水利水电工程-岩土力学-中国-学术会议-文集②水利工程-渗流力学-中国-学术会议-文集 IV. ①TV-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 202869 号

组稿编辑:王志宽 电话:0371-66024331 E-mail:wangzhikuan83@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:40.75

字数:940 千字

版次:2012 年 8 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2012 年 8 月第 1 次印刷

定价:120.00 元

第四届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会暨 第七届全国水利工程渗流学术研讨会

(2012年9月 中国·河南·郑州)

主办单位

中国水利学会岩土力学专业委员会

中国水利学会工程管理专业委员会

承办单位

郑州大学

黄河水利委员会

黄河水利科学研究院

黄河勘测规划设计有限公司

小浪底水利枢纽建设管理局

华北水利水电学院

河南工业大学

河南省水利勘测设计研究有限公司

中国水利水电科学研究院

南京水利科学研究院

长江科学院

中国科学院武汉岩土力学研究所

国家大坝安全工程技术研究中心

协办单位

《岩土工程学报》编辑部

《岩土力学》编辑部

《岩石力学与工程学报》编辑部

《郑州大学学报》编辑部

河南省水利学会

河南省岩石力学与工程学会

水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心

河南省岩土力学与结构工程重点实验室

河南省岩土工程检测与防护重点实验室

大会学术委员会

名誉主席:钱七虎

主 席:葛修润

副 主 席:(按姓氏笔画排序)

马洪琪	王梦恕	王思敬	毛昶熙	包承纲	杨秀敏	陈祖煜
吴中如	张超然	李广信	杨启贵	林 皋	郑颖人	郑守仁
周丰峻	钟登华	邴能惠	梁文灏	龚晓南		

委 员:(按姓氏笔画排序)

丁留谦	孔宪京	王君利	王建华	王建国	王复明	王俊林
冯忠居	乐金朝	刘汉东	刘汉龙	刘俊修	孙胜利	朱俊高
邢义川	邬爱清	闫澍旺	陈生水	陈正汉	陈云敏	李 宁
李 靖	李国英	汪小刚	汪自力	冷元宝	邵生俊	吴关叶
吴昌瑜	吴梦喜	杨光华	杨泽艳	张伯骥	张宗亮	张建民
张家发	张爱军	栾茂田	肖昭然	周创兵	郑 刚	郑永来
段祥宝	姚仰平	胡再强	徐卫亚	陶忠平	郭雪莽	盛 谦
常向前	黄 强	黄志全	黄醒春	章为民	谢永利	蒋明镜
温彦锋	程展林	赖远明	路新景	蔡正银	蔡袁强	谭界雄
魏迎奇	戴济群					

大会组织委员会

主 任:申长雨

副 主 任:(按姓氏笔画排序)

刘汉东	陈生水	汪小刚	汪在芹	苏茂林	李海波	屈凌波
姚文艺	高丹盈	景来红	翟渊军			

委 员:(按姓氏笔画排序)

田 凯	关绍康	刘金勇	刘泽明	吴建军	吴泽宁	陈 淮
李 倩	沈细中	张俊霞	赵寿刚	赵明喈	聂相田	蒋敏敏

秘 书 长:王复明

副秘书长:蔡正银 王俊林 汪自力 姜 彤 肖昭然 李 斌

前 言

随着 2011 年中央一号文件的落实,水利工程建设和管理也进入了新的发展时期,各种大型水利水电工程建设规模大,遇到的岩土与渗流问题也日趋复杂,提出了许多新的土力学和岩土工程及渗流力学问题。这些问题的出现,给广大岩土工作者带来了挑战 and 机遇,推动了水利水电岩土力学与工程以及渗流力学的发展和进步。为此,特举办以“水利与岩土工程安全”为主题的“第四届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会暨第七届全国水利工程渗流学术研讨会”,对我国近年来水利水电岩土力学与工程以及渗流力学领域的最新研究进展进行广泛学术交流搭建平台。

本次会议于 2012 年 9 月在郑州召开,会议主要研讨水利水电岩土力学与工程以及渗流力学的基本理论、实践探索、新技术和新方法等,会议收到的论文除在《岩土工程学报》、《岩土力学》、《岩石力学与工程学报》和《郑州大学学报》(工学版)各出一期专刊外,其余论文经评审后共有 86 篇被收入论文集并正式出版,这些文章反映了这些领域最新的研究成果和发展动态,凝聚了作者的心血和智慧。本论文集包括以下 11 个方面的内容:①岩土基本性质和测试技术;②岩土工程数值仿真与物理模拟技术;③渗流理论与工程应用;④土动力学与地震工程;⑤特殊土工程技术;⑥土石坝与堤防工程;⑦隧道与地下工程;⑧边坡工程;⑨基础工程与地基处理;⑩环境岩土工程与地质灾害防治;⑪岩土工程中的新技术与新材料。

水利部及水利学会给予本次会议以极大的鼓励和支持,承办单位和协办单位在人力、物力、财力等方面给予大量的支持与帮助,从事岩土工作的各位专家、学者及科研部门积极投稿并推荐代表。在此,向所有关心和支持本次会议的领导、专家、学者及工作人员表示诚挚的谢意。

由于时间仓促,书中存在疏漏或差错之处在所难免,敬请读者批评指正。

编委会
2012 年 6 月

目 录

前 言

一、岩土基本性质和测试技术

滑带土中黏粒含量及含水量的变化对其强度影响的试验研究	彭 鹏 等(3)
非饱和膨胀土抗剪强度参数的试验研究	姜 彤 等(12)
多功能离心机四轴机器人操纵臂的开发	任国峰 等(23)
大型三轴内衬橡胶板对试料力学特性影响的试验研究	何鲜峰 谢义斌 乔瑞社(31)
饱和黏土固结 - 渗透试验研究	刘 凯 等(38)
饱和变质火山角砾岩变形与强度特性试验研究	王如宾 徐卫亚(43)
黏土液塑限与压缩指数相关性研究	朱启银 等(50)
状态相关砂土模型的隐式积分算法在 ABAQUS 中实施	司海宝 等(56)
筑坝砂砾料大型三轴动力特性试验研究	赵寿刚 等(64)
循环荷载作用下饱和海黏土动模量弱化性质研究	蒋敏敏 蔡正银 肖昭然(71)
玄武岩纤维混凝土性能试验研究	刘紫阳 等(78)
心墙掺砾料大型三轴试验研究	李海芳 等(86)
南水北调中线工程安阳段渠坡膨胀岩若干工程特性的试验研究	章峻豪 陈正汉 姚志华(92)
可控源音频大地电磁法(CSAMT)在深部盐岩溶腔探测中的应用	王志荣 张利民 蒋 博(99)
胶凝砂砾料大型三轴力学特性试验研究	何鲜峰 高玉琴 乔瑞社(104)
基于防渗墙质量检测的高密度弹性波 CT 图像的 RB - NN 融合	杨 磊 董伟峰(110)
软土地基的不排水强度	方涤华(115)

二、岩土工程数值仿真与物理模拟技术

基于 ABAQUS 的复合地基灌注桩水平承载特性三维分析研究	李华伟 等(125)
核电厂泵房直立挡土墙振动台模型试验及颗粒流数值模拟研究 ..	邹德高 等(133)
基于拟静力法的地下洞室群地震响应分析	张玉敏 等(142)
基于裂隙网络有限元的地下洞室围岩锚杆支护作用分析	朱泽奇 等(149)
FWD 在沥青路面层间结合状况评价中的应用研究	郭成超 王 鹏 姚学东(158)
探地雷达在堤坝渗漏探测中的应用研究	郭成超 等(169)

单纯土钉墙支护和土钉墙锚杆复合支护研究	杜明芳 刘志刚 杜伟鹏(176)
常体积模量下黏弹性体两类微分算子的关系	王东栋 等(182)
微型桩复合支护结构作用机理模拟分析	高 伟 闫富有(191)

三、渗流理论与工程应用

黄河堤防土体污染前后渗透系数变化研究	伍 艳 等(203)
基于 Neumann 展开 Monte - Carlo 法的碾压混凝土坝随机渗流场分析	娄一青 等(211)
昌马水库土石坝渗流监测布设及成果分析	赵寿刚 等(218)
覆盖层上高面板堆石坝渗流特性的有限元分析	岑威钧 等(225)
防渗墙开裂对下坝地混凝土心墙坝渗流场的影响分析	张顺福 刘昌军 丁留谦(231)
穿堤管道工程对堤防渗流安全影响的数值分析	李少龙 翁建平 张家发(239)
伊江上游某水电站 1#副坝坝基断层对渗控效果的影响研究	严 敏 等(244)
一个新的偏态模型及其在碾压混凝土渗流特性研究中的应用	詹美礼 等(252)
心墙水力劈裂的孔压探讨	张红日 等(258)
未按设计施工成因病险小型水库工程典型实例分析与评价	李宏恩 何勇军 范光亚(265)
水工渗流计算软件可视化编程研究	李 斌 诸葛梅君 宋志宇(272)
渗流稳定性中地下水作用力计算问题探讨	郭培奎 程江涛(281)
三维可视化计算软件 GWSS 在地下硐室群复杂渗流场分析中的应用	刘昌军 等(286)
流体应力方向、运动方程、广义应力公式综述	刘福祥(294)
流体力学中随体导数概念的推广	刘福祥(297)
考虑为长方形形状和半透水边界的模袋固结问题的求解	牛 犇 唐晓武 陈秀良(299)
基于等势面的地下水渗流量计算方法	李 斌 景来红 宋海亭(305)
面板堆石坝中过渡区的反滤功能及级配研究	定培中 周 密 陈劲松(312)
某灰渣库渗漏原因分析及除险加固渗控措施研究	廖井霞 等(321)
中央分隔带渗水对公路稳定性的影响研究	奥村运明 等(329)
管涌、流砂与液化	毛昶熙 段祥宝 吴金山(334)
强透水复杂坝基三维有限元渗流场计算	谈叶飞 谢兴华(339)

四、土动力学与地震工程

桩 - 土 - 渡槽动力相互作用反应谱分析	王 博 徐建国 申金虎(349)
水利工程震害中土工结构低应力破坏实例分析	杨玉生 等(354)

水库泄洪洞扩建工程爆破振动对大坝安全影响监测分析	刘超英 葛双成(365)
--------------------------------	--------------

五、特殊土工程技术

冻融环境下混凝土路面的实用设计方法研究	巩妮娜(373)
南水北调中线高地下水位地区膨胀土挖方渠段排水措施优化研究 ...	崔皓东 等(378)
软土地区公路工程地质勘察体系研究	尹利华 张留俊 张 微(387)

六、土石坝与堤防工程

深厚覆盖层沥青混凝土心墙坝基座与心墙接头型式研究	许诏君 等(397)
高心墙堆石坝三维耦合模型渗流边界处理方法探讨 ...	杨连枝 伍小玉 吴梦喜(405)
逐步回归分析法在西龙池抽水蓄能电站下水库工程安全监测项目中的应用研究	赵 波 张桂荣(414)
帷幕灌浆在某坝基防渗工程中的应用及效果分析	郭 印(419)
堤坝典型填筑土体渗透破坏过程试验研究	丛日新 等(424)
泰山抽水蓄能电站混凝土面板堆石坝安全监测及资料分析	张小旺 鞠 霞(431)
某黏土心墙坝反滤试验研究	陈劲松(443)

七、隧道与地下工程

黄土隧道围岩工程特性及纵向位移分析	扈世民 张顶立(455)
黄土隧道中管棚长度与土体埋深关系分析研究	钟燕辉 李晓龙 夏 添(465)
地下洞室围岩松动圈的位移方法研究	马 莎 贾景超 黄志全(473)
公路隧道施工动态风险分析方法与应用研究	于品登 杨 珍(486)
深部纵跨巷道动态分步分段控制及加固技术研究	查文华 符小民 于剑英(494)
尺度核支持向量机在隧道围岩变形预测中的应用	李晓龙 等(502)

八、边坡工程

基于新的模拟滑面策略的土坡最危险滑面搜索	周圆兀 刘娥珍 蔡雪霁(511)
渝黔高速公路綦江服务区滑坡成因及稳定性分析	朱少荣 姚鹏勋 陶金良(516)
土工合成材料对土坡安全系数的影响	王俊林 赵 婉(521)
土性参数空间变异性对排水边坡可靠度的影响	潘 健 等(524)
近厂区黄河岸坡失稳模式及坡面侵蚀分析与预测	兰 雁 张俊霞 陈 永(533)
坡顶堆载引发的滑坡及其治理	陈晓贞 简文彬 李 凯(541)

九、基础工程与地基处理

高层建筑群之间上部结构-基础共同作用分析	胡晓勇 等(551)
吹填土浅层真空预压实例分析	龚丽飞 等(560)
基于支持向量机的桩基缺陷类型识别研究	张 宏 李子兵(566)

深层载荷试验预估单桩竖向抗压承载力的试验方法分析

.....	石明生 张旭 潘艳辉(572)
挤密砂桩在南水北调穿黄工程中的应用	刘起霞 白杨(577)
软土地基在交通荷载下的累积沉降分析	申昊等(582)
螺杆灌注桩在地基处理中的应用及研究	王俊林等(590)

十、环境岩土工程与地质灾害防治

CFG 桩长螺旋钻施工引起的环境岩土工程问题探析	李嘉 张景伟(599)
MIFS 系统在滑坡原位动态变形监测及信息反馈中的应用研究	彭鹏等(603)

十一、岩土工程中的新技术与新材料

基于 M2M 云平台的地质灾害自动监测系统的研制与应用	毛良明(615)
黄河下游水闸安全评估模型研发	张宝森等(621)
分布式光纤传感测试系统(BOTDR)在大型充灌袋应力应变测量中的应用	谢荣星(628)
水域地震反射波法在岩土工程勘察中的应用	刘宏岳等(633)

一、岩土基本性质和测试技术

滑带土中黏粒含量及含水量的变化 对其强度影响的试验研究

彭 鹏¹ 单治钢¹ 钟湖平² 贾海波¹ 董育烦¹

(1. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院 杭州 310000;

2. 江西华东岩土工程有限公司 南昌 330029)

摘要:为了定量分析不同的滑带土颗粒级配情况下黏粒含量及含水量对黏聚力 c 和内摩擦角 φ 等强度参数的影响机制及变化规律,利用卡拉水电站田三滑坡体滑带土,进行了不同级配、不同黏粒含量及不同含水量组合的多组直剪试验,以揭示岩质边坡结构面中黏土矿物含量及含水量的变化对边坡岩体强度参数 c 、 φ 的影响机制及变化规律。试验结果表明:当含水量不大于塑限时, c 值随黏土矿物含量的增加而呈非线性增大,当含水量大于塑限时, c 值随着黏土矿物的增加,先减小后增大,在黏粒含量为35%时 c 值最低; φ 值随着黏粒含量的增加而减小,且在黏粒含量小于25%时 φ 值减小的速度较快,当黏粒含量大于25%时减小的速度减缓,并采用粒子群优化算法对试验成果作一解析。

关键词:水—岩化学作用 边坡稳定性 结构面强度参数 黏土矿物含量 含水量

1 引言

滑坡体由滑坡床、滑坡体和滑带构成,而其稳定性则主要由后者控制。研究表明,滑坡的滑带尤其是后缘贯通性较好的滑面是水—岩相互作用相对活跃的部位。水—岩相互作用,既包括两者之间的物理作用,也包括化学作用。数十年来,对于前者的研究已取得了长足的进展,而对于后者的研究相对滞后一些,但也已经取得了一些可喜的成果^[1-2]。文献[3]指出,黏土矿物是水—岩化学作用的产物,其在滑动面部位的相对聚集可显著影响所在滑带土的物理力学指标,如黏聚力 c 和内摩擦角 φ 等,但有关分析多限于定性方面。

目前,在滑带土强度参数研究中,多是仅从滑带土颗粒组成、成分、形状、性质等方面展开,但对黏粒含量及含水量的不同配比情况下对结构面强度的影响程度研究相对有限^[4-10]。为了定量分析不同的滑带土颗粒级配情况下黏粒含量及含水量对黏聚力和内摩擦角等强度参数的影响机制及变化规律,结合雅砻江卡拉水电站田三滑坡体稳定性研究,对滑带土进行了不同级配、不同黏粒含量及不同含水量组合的多组直剪试验^[11],以探究岩质边坡结构面中黏粒含量及含水量的变化对边坡岩体强度参数 c 、 φ 影响机制及变化规律。

作者简介:彭鹏,男,1982年生,博士后,主要从事坝址区工程地质与水文地质研究工作。

2 试验方法及过程

2.1 取样地点

卡拉水电站工程区位于凉山州木里县雅砻江中游河段内,为雅砻江干流两河口至江口段梯级开发 11 级中的第 6 级,上游与杨房沟水电站衔接,下游与锦屏一级水电站毗邻。卡拉水电站工程区自一江至草坪 20 多 km 的河段内,地质条件复杂,边坡稳定性较差,工程区内滑坡体、崩坡积体分布众多,地质条件复杂,两岸冲沟较发育,地形较零乱,分布 9 个滑坡体和 8 个较大型崩坡积体。

为了进一步查明工程区滑体的空间分布、物质组成、结构、变形破坏特征,评价其稳定性及分析其对工程的影响,开展了一系列针对巨型滑坡体群的试验研究,期望为工程处理措施提供地质依据,其中,滑带土的工程特性为研究的重点。滑坡群的滑带土天然状态下黏粒含量为 5% ~ 30%,含水量为 7% ~ 20%,雨季时,含水量会更高。本次试验选取了较典型的田三滑坡体作为研究对象,滑坡体主要由滑坡堆积灰黑、黄灰色含碎石粉土层,粉土夹变质砂岩、砂板岩及大理岩碎砾石组成,细粒组成以粉土为主,粉土含量为 50% ~ 60%,碎石粒径以 2 ~ 20 cm 为主,含量为 40% ~ 50%,局部夹少量块石,稍密,胶结较差。据平硐及多个钻孔揭露,滑坡体的滑带土为含碎、砾石黏土,灰褐色,带宽 1 ~ 2 m,砾石成分为大理岩,粒径 2 ~ 10 cm,含量 10% ~ 25%,次圆,次棱角状,呈软塑 - 可塑。滑面较平直,产状 N50°W NE $\angle$ 30° ~ 40°。滑带上、下界面分带明显,上部为粉质黏土夹碎(块)石层,下部为弱风化较完整岩体。

2.2 试验方案

本文采用重塑土进行试验研究,滑带土主要为粉粒质及粒径 2 mm 以下的砂和黏土矿物的混合物。为了研究滑动带中的黏粒含量及含水量的变化对边坡强度参数的影响,模拟某滑动带中土的粒径进行配比重塑土。级配方案见表 1,控制黏土矿物含量(质量分数)分别为 15%、25%、35%、45%、55%、65%,含水量则分别为 10%、12%、15%、20%、25%。加水调和均匀、浸润,加水量由少到多逐次增加,每加一次水浸润 24 h 后进行直剪。使用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 应变控制直剪仪,通过不固结不排水快速剪切试验,揭示在一定的含水量变化范围内黏粒的含量对其强度参数的影响程度。

表 1 剪切试验级配方案

粒径(mm)		<0.005	0.005 ~ 0.075	0.075 ~ 2	>2
级配方案 (%)	1	15	13.45	43.5	28.05
	2	25	12.65	35.5	26.85
	3	35	11.45	32.5	22.05
	4	45	9.45	27.5	18.05
	5	55	7.65	22.5	14.85
	6	65	5.95	17.5	11.55

将土样配比均匀,取土样测定含水量。取一定数量的土样置于通风处晾干,将风干土

样过 0.5 mm 孔径的筛,取筛下足够试验用的土样充分拌匀,测定风干含水量,装入保湿缸或塑料袋内备用。根据试验所需的土量与含水量制备试样,所需的加水量应按下式计算:

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01\omega_0} \times 0.01(\omega' - \omega_0) \quad (1)$$

式中: m_w 为制备试样所需要的加水量; m 是风干土质量; ω_0 为风干土含水量; ω' 为制备要求的含水量。称取过筛的风干土样平铺于搪瓷盘内,将水均匀喷洒于土样上,充分拌匀后,装入盛土容器内,盖紧润湿 24 h。测定润湿土样的含水量,取样不少于 4 个。按所需的干密度制样,按所需的湿土量应按下式计算:

$$m_0 = (1 + 0.01\omega_0)\rho_d V \quad (2)$$

式中: ρ_d 为试样的干密度; V 为试样的体积(环刀的体积)。根据式(2)计算每个试样需要的湿土量 m_0 ,将湿土倒入装有环刀的压样器内,以静压力通过活塞将土样压实到所需程度。取出带有试样的环刀,称量环刀和试样总质量。

含水量试验时,每个土样取三份试样,每份质量控制在 15 ~ 30 g,放入称量盒内,盖上盒盖,称盒加湿土质量,精确至 0.01 g,打开盒盖,将试验盒置于自动控制的电热鼓风干燥箱内,在 105 ~ 110 ℃ 的恒温下烘 24 h 以上,然后将其从烘箱中取出,盖上盒盖,冷却后称盒 + 干土质量,精确至 0.01 g。每个土样的含水量按下式计算:

$$\omega_0 = \left(\frac{m_0}{m_d} - 1 \right) \times 100\% \quad (3)$$

本试验对每个土样取六个试样进行平行测定,测定的差值符合规范要求。最后对六个测值取平均值作为土样含水量。

剪切试验中以 0.8 mm/min 的剪切速率进行剪切,试样每产生剪切位移 0.2 ~ 0.4 mm 测记测力计和位移读数,直至测力计读数出现峰值,应继续剪切至剪切位移为 4 mm 时停机,测记破坏值;当剪切过程中测力计读数无峰值时,应剪切至剪切位移为 6 mm 时停机。

3 试验结果与分析

以抗剪强度为纵坐标、垂直压力为横坐标,绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线。直线的倾角为内摩擦角,直线在纵坐标上的截距为黏聚力。本试验主要考虑滑带土中随黏粒含量的增加,其抗剪强度参数的变化规律,以及滑坡结构面的填充物中随着黏粒含量和含水量的不同配比情况下,其抗剪强度参数的变化特征。为保证一定的精度,对每个土样取三个试样进行平行测定,最后对三个测值取平均值作为试验结果,试验结果见表 2。

表 2 试验结果

含水量 ω (%)	参数	黏粒含量 Q (%)					
		15	25	35	45	55	65
10	c	22.50	41.35	59.00	65.01	66.20	77.43
	φ	34.49	28.00	26.07	25.10	24.50	25.60
12	c	24.88	44.71	62.35	68.24	71.24	89.89
	φ	32.01	25.42	22.49	21.05	20.10	22.00

续表 2

含水量 ω (%)	参数	黏粒含量 Q (%)					
		15	25	35	45	55	65
15	c	38.83	48.53	65.12	71.00	76.18	85.1
	φ	29.20	24.01	18.84	14.65	13.22	15.00
20	c	26.12	18.35	9.41	15.30	36.47	44.71
	φ	27.60	22.20	12.92	8.83	6.58	9.48
25	c	7.83	4.35	2.35	8.41	10.59	22.35
	φ	25.0	20.30	9.32	4.01	3.09	3.10

注:表中 c 的单位为 kPa, φ 的单位为 ($^{\circ}$)。

3.1 黏粒含量—黏聚力关系曲线特征分析

为了更好地分析黏聚力与黏粒含量的变化特征,作不同含水量情况下黏聚力随黏土矿物含量变化的曲线,见图 1。由表 2 和图 1 不难看出,当试样的含水量 $\omega \leq 15\%$ 时,黏聚力 c 值随着黏粒含量的增加而增大。在含水量分别为 10%、12%、15% 时,黏粒含量小于 35% 的情况下, c 值几乎呈线性增加,增加速度较快。这是由于黏粒逐渐充填在砂粒的空隙中,使土样的单位密度增大,即密实度增大,并且黏粒具有胶结的作用,所以 c 值呈线性增加。当黏粒含量在 35% ~ 55% 时, c 值增加缓慢。这主要是因为在此阶段,砂粒的空隙已被黏粒填满,此时在剪切破坏时,砂和黏粒共同起作用。当黏粒含量大于 55% 时,随着黏粒的增加,砂粒被黏粒所包裹,此时,试样中起主导作用的是黏土矿物,胶结作用进一步加大,故 c 值迅速增加。当含水量大于 15% 时, c 值的变化均是先减小后增大,即 Q 为 15% ~ 35% 时, c 值呈先减小之势,主要是因为此时黏粒含量相对于砂来说较少,此时剪切破坏主要是砂起决定作用,并且由于含水量大,黏土被软化,胶结作用被弱化,另外少量的黏粒起到润滑砂粒的作用,故 c 值减小。但当 $Q > 35\%$ 时,此时黏粒含量增加,包裹在砂粒周围,黏土矿物起到决定作用,胶结、咬合作用得以体现,故 c 值呈增大的趋势。

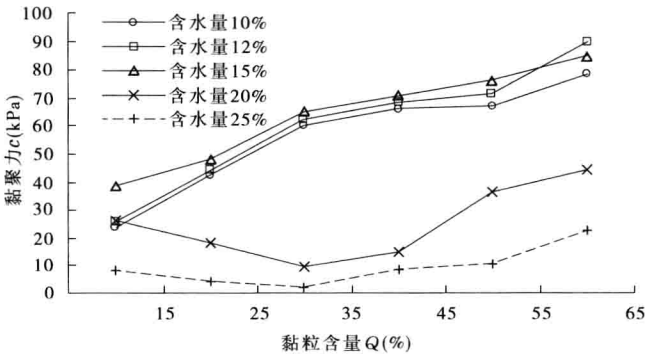


图 1 不同含水量状态下试件黏聚力与黏粒含量的关系

对试验数据用粒子群算法做回归分析,拟合黏聚力与黏粒含量间的关系,结果见表 3。

表3 不同含水量状态下试件黏聚力与黏粒含量的拟合公式及相关系数

含水量 ω (%)	拟合公式	相关系数 R^2
10	$c = 10.149Q + 20.727$	0.907 2
12	$c = 11.587Q + 19.832$	0.943 4
15	$c = 9.148Q + 32.109$	0.965 7
20	$c = 3.580Q^2 - 20.684Q + 43.155$	0.901 6
25	$c = 1.659Q^2 - 8.8327Q + 15.062$	0.961 8

由表3可知,当试样的含水量 $\omega \leq 15\%$ 时,黏聚力 c 值与黏粒含量呈现出正相关的线性关系,相关系数 R^2 在 0.9 以上,表现出较好的相关性;而当试样的含水量 $\omega > 15\%$ 时,黏聚力 c 值与黏粒含量呈现出非线性关系,相关系数 R^2 也在 0.9 以上,亦表现出很强的相关性,不难看出,随着黏粒含量的增加,黏聚力的变化由线性转变为非线性,但始终表现出较好的相关性。

3.2 含水量—黏聚力关系曲线特征分析

不同黏粒含量下,黏聚力随含水量变化的曲线见图2。由图2可知,在相同黏土矿物含量下, c 值随含水量 ω 的增加先增大而后减小。即当含水量 ω 大于 15% (塑限) 时, c 值迅速减小。产生这个现象的原因是,在相同的压实能量下,试样随含水量的增加逐渐压实,密度逐渐增加。当达到塑限时,密度达到最大,强度最高;当超过塑限时,压实性能减弱,强度降低,这就是 c 值随含水量的增加先递增后迅速减小的原因。

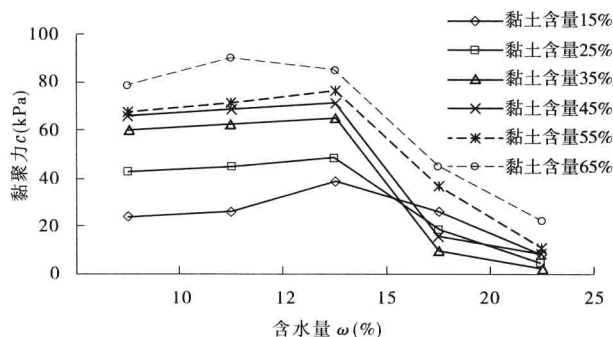


图2 不同黏土含量情况下试件黏聚力与含水量的关系

由图2还可以反映出:在不同的黏粒含量下, c 值随含水量 ω 的增加先增大而后减小,这也与密实度和最优含水量有关。但是,随黏粒含量的不同, c 值有所不同,黏粒含量越高, c 值越大。这与黏土的特性有关,黏土含量越大,其胶结、咬合能力越大,黏聚力越强,故 c 值越大。

对试验数据用粒子群算法做回归分析,拟合不同黏土矿物含量下黏聚力与含水量之间的关系,拟合公式及相关系数见表4。