

天津大学

硕士学位论文

海河流域平原区地基土体渗透变形研究

姓名：张志恒

申请学位级别：硕士

专业：水利工程

指导教师：冯耀龙;杨计申

20071101

摘 要

海河流域平原区发育了巨厚的第四系松散堆积物, 由于永定河泛滥、黄河改道, 使松散堆积物的成因类型和物质组成均较复杂, 但基本以细粒为主。不同时代、不同成因类型土体具有层状、薄层状、微细层状和微结构特征。高地下水位使土体基本处于饱和状态。这就构成了海河流域平原区水利水电工程基本的地质环境。

海河流域平原区工程土体主要由第四纪松散土(岩)体组成。由于成土环境和成因类型的复杂性(包括冲积、洪积、冲积海积、湖积及坡洪积相等)及物质组成的不均一性, 导致土体具有空间分布的不连续性、物理力学及水理性质呈现较大不均一性的特点。当水工建筑物上下游水位差产生的水力坡降超过地基土体允许水力坡降时, 地基土体将发生渗透破坏, 因此, 渗透变形是其主要工程地质问题之一。

国内外的工程实践表明, 渗透变形可引起建筑物地基强度降低, 渗透性增大, 甚至导致工程失事。因此, 查明地基土体成因类型、土体颗粒组成及土体结构特征, 选取合理的临界水力坡降值, 成为正确评价地基渗透稳定性及工程处理措施决策的关键。对工程安全及投资等具有非常重要的现实意义。

鉴于研究区地貌、地基土体物质组成、工程建设水平及国内外研究现状, 尤其是目前国内外普遍采用的临界水力坡降计算公式存在的问题, 本文依据室内土工试验成果资料, 重点分析影响土体临界水力坡降的基本因素, 包括成土时代、土体成因类型、土体物质组成及土体结构等, 通过合理的数值分析, 提出不同成土时代、不同土体临界水力坡降的计算公式。并对区内建筑物地基土体渗透变形的防治工程措施及其可能带来的环境地质问题进行了分析、探讨。

关键词: 松散堆积物 渗透变形 临界水力坡降 渗透稳定性

ABSTRACT

Several hundreds meters loose Quaternary deposits of various geological origin and complex compositions distribute at the plain of Haihe Basin due to flooding of Yongding River and course changes of Yellow River, which mainly still consist of fine soils, having medium to thinly laminated bedding or microstructure. Soils are saturated in general as the water level is fairly high. This is the general geological settings for the hydroelectric projects on the Haihe Plain.

Since the foundation soil mass on the Haihe Plain were deposited under various settings or different geological origins, the nature and state of the soil may be changed widely both in short distance and depth, which results in variability of soil behaviour. When the hydraulic head between the upstream and downstream of the embankment is higher than the critical hydraulic gradient of the foundation soils, seepage failure would be occurred. Seepage deformation thus is one of the main engineering geological problems.

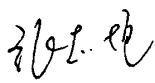
As shown by project experiences both at home and abroad, strength reduction and permeability increase of foundation soils, even foundation failure may be arose from seepage deformation. Therefore, critical hydraulic gradient of soil mass is an important parameter in analysis of foundation stability against seepage and selection of engineering measures, it has practical meanings for project safety and cost.

In view of study area morphogenic characteristics, soil compositions and geotechnical development situations, especially the limitations of the critical hydraulic gradient calculation equations that widely applied at home and abroad, factors that obviously influenced the critical hydraulic gradient are discussed in this paper based upon data from laboratory tests, including age, origin type, nature and state of the foundation soils. A new equation for calculating critical hydraulic gradient, based on numeric analysis, is proposed for each soil type in different age. Engineering measures and relevant environmental geological problems against seepage deformation of foundation soils are also included in this paper.

Keywords: Loose deposits Seepage deformation Critical hydraulic gradient
Stability against seepage

独创性声明

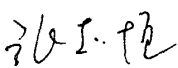
本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得天津大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 签字日期：2007年12月15日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解天津大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权天津大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：2007年12月15日

签字日期：2007年12月15日

第一章 前言

1.1 论文选题背景及意义

兴建水利工程可以有效防洪和合理调节利用水资源,以促进社会经济发展和保障人民生命财产的安全。解放以来,海河流域修建了规模不同,类型众多的水利工程,它们的建设为当地经济的发展做出了重大贡献,产生了显著的经济效益、社会效益和环境效益。

海河流域平原区建筑物地基土体主要由第四纪松散土(岩)体组成。由于成土环境和成因类型的复杂性(包括冲积、洪积、冲积海积、湖积及坡洪积相等)及物质组成的不均一性,导致土体具有空间分布的不连续性、物理力学及水理性质呈现较大不均一性的特点。尤其平原区中东部,古河道发育,其内大多为粉细砂等砂性土组成,砂性土结构相对疏松,渗透系数大于 $n \times 10^{-4} \text{cm/s}$,属于弱~中等透水性,当建筑物直接坐落于砂性土地基上时,工程土体与堤基土体接触带,最易成为集中渗水通道,当上下游水位差异明显,依渗流路径实际计算的水力坡降超过地基土体允许水力坡降时,地基土体将会发生渗透破坏。基于该区土体结构、颗粒组成及水理性质特性,渗透变形是其主要工程地质问题之一。

渗透变形可引起建筑物地基强度降低,渗透性增大,甚至导致工程失事。渗透变形是造成大坝或堤防失事的重要原因之一,N·斯尼特尔(1976)的统计表明,在世界上所有大坝的破坏事例中,有28%归因于土体的管涌。国际大坝委员会统计资料(1989)亦说明在他们统计的45座因环境地质问题失事的坝中,有25座(占55%)是与渗透破坏有关⁽¹⁾。渗流变形可在小范围内发生,也可发展至大范围,导致坝体沉降、坝坡塌陷或形成集中的渗流通道等,危及大坝的安全。

国内外松散土(岩)体坝基类库坝失事的比例数字及其失事的原因充分说明,如果对坝基松散土(岩)体的工程特性认识不清,不重视对松散土体地基的渗漏与渗透变形问题进行研究,或者研究不够深入,搞不清问题的根本所在,造成渗漏或渗透变形问题处理不彻底,必然会给大坝的建设留下隐患。

如区内修建于漳河上的一座大型水库,始建于1959年。其主坝为碾压式均质土坝,对坝基渗流研究得出的结论是“局部坝段坝基渗透水力坡降已接

近和略超过允许水力坡降，坝基渗透变形已处于临界状态”。由于历次观测、反演分析研究得出的水力坡降存在一定的差异，难以提出合理的临界水力坡降、允许水力坡降，最终以“从水库长期安全运行角度出发”为由，对坝基采取防渗墙处理措施，仅该项工程投资达 2700 万元，对下游坝坡还进行了压坡处理。

综上所述，临界水力坡降值取值的合理性成为正确评价地基渗透稳定性及工程处理措施决策的关键。因此，查明地基土体颗粒组成、合理评价其渗透稳定性，对工程安全及投资等具有非常重要的现实意义。

综上所述，对于松散土（岩）体地基上的工程安全运行而言，对于地基或坝基土体渗透稳定性研究是极其重要的。因此，松散土体上的水利工程建设，必须研究地基土体渗透破坏条件，以确保地基土体在渗透力作用下的稳定。

1.2 国内外研究现状

土体的渗透稳定性决定于渗透水流对土体的作用力与土体的阻抗力这一对矛盾的发展变化过程。渗流对土体的作用力，其大小决定于地下水的水力坡降或渗透流速，它亦是引起渗透变形的动力。土体对渗透水流的阻抗能力叫抗渗强度，其大小决定于土的颗粒组成、排列方式、固结程度、胶结状况、物理力学性质及透水性等。影响松散土（岩）体渗透稳定性的因素复杂，包括土体颗粒组成及排列形式、渗透破坏类型、破坏水力坡降（抗渗坡降或抗渗强度）的确定方法等，实际工程除了现场试验外，多是采用一些常用的理论或半理论半经验公式计算。其中破坏类型的判别方法包括按不均匀系数判别、按细粒粒径与孔隙直径比判别、考虑颗粒组成曲线形状和混合料中粗料孔隙两种因素的判别方法、中科院 Cu 的综合判别方法等；抗渗坡降的计算方法包括太沙基公式、扎马林公式、伊斯托明娜方法、康德拉捷夫方法、沙金煊方法、中科院方法等。

建国以来，我国对土体的渗透变形的研究取得了很大的进展。近年来，对泥化夹层、断层带等试验研究也做了很多工作，这对水利水电工程的地基土体渗透稳定性评价及渗流防治工程措施设计，以及对病险水库的鉴定及加固工程设计都起了积极的作用^{〔1〕}。

《水利水电工程地质勘察规范》（GB50287-99）对于库坝的工程地质勘察虽然是在广泛调查研究的基础上，总结了我国水利水电工程地质勘察的实践经验，吸收了有关科研成果，参考了有关国际标准和国外先进经验，对水利

水电工程的库坝区地质勘察评价方法和标准进行了统一，但评价地基渗透变形的重要参数——临界水力坡降还是规定采用太沙基公式计算。

实践表明，采用太沙基公式计算的临界水力坡降 (J_{cr}) 与试验得出的临界水力坡降 (i_k) 之间差异明显，如图 1-1，即使孔隙率相同，其临界水力坡降差值亦较大，因此，对其原因进行研究是非常必要的。

近年来，对土体渗流理论和渗流稳定特性的研究，使地基处理及控制渗流技术在水利工程建设中起着重要的作用。近年来，国内外松散土（岩）体地基库坝因渗漏与渗透变形引起工程失事现状，促使控制渗流及渗透变形技术的研究有了很大的发展。对于控制渗漏在土石坝运行中的重要性，牛运光（2002 年）就全国一些土石坝渗漏与渗透变形典型实例，对产生渗透变形的各种因素进行分析，指出控制渗漏与渗透变形依据的基础资料是对坝基进行详细的水文地质调查，采用垂直防渗以防止坝基渗漏⁽²⁾；张景秀（2002 年）指出控制渗漏的前提是做好基础地质工作，有效的防渗方案的确定在很大程度上依赖于对坝址地质条件的正确掌握和理解，只有通过细致的工作，才能准确地判断在哪些地段需要作防渗堵漏工程处理，哪些地段只需要排水降压工程措施，哪些地段需两种工程措施兼用⁽³⁾；杨光煦（2000 年）在论述砂砾石地基防渗方案及防渗工程布置时指出，影响防渗方案选择的主要因素是查明松散土（岩）体的厚度（土体结构亦要很好分析）与组成（松散堆积物颗粒组成是主要的）⁽⁴⁾。

显然，只有查明松散土（岩）体的渗透特性，才能结合其它因素，有针对性的采取上游阻渗（铺盖）、中游截渗及下游排渗等不同的防治工程措施，有效控制库坝的渗漏与渗透变形的发生。

松散土（岩）体防渗工程技术研究包括施工设备与防渗技术两方面。施工设备研究包括反循环回转新型冲击钻机、液压抓斗挖槽机、高压定向喷射灌浆机等，这些设备的使用为防渗技术的成功实施提供了保证。防渗工程研究方面包括垂直防渗中的软粘土截水槽、塑性混凝土和固化灰浆等低弹性材料防渗墙、自凝灰浆及泥浆防渗墙、板桩灌注防渗墙、灌浆帷幕（如水泥粘土浆）等；上游防渗铺盖工程；下游排水减压工程措施包括水平排水层/沟、减压井及透水盖重等。

作者认为，目前关键对土体结构的研究不够，现有理论难以描述之。所以，应在总结分析试验成果的基础上，反演分析，使因客观条件不具备、不能进行试验的情况下，估算土体临界水力坡降更趋合理。

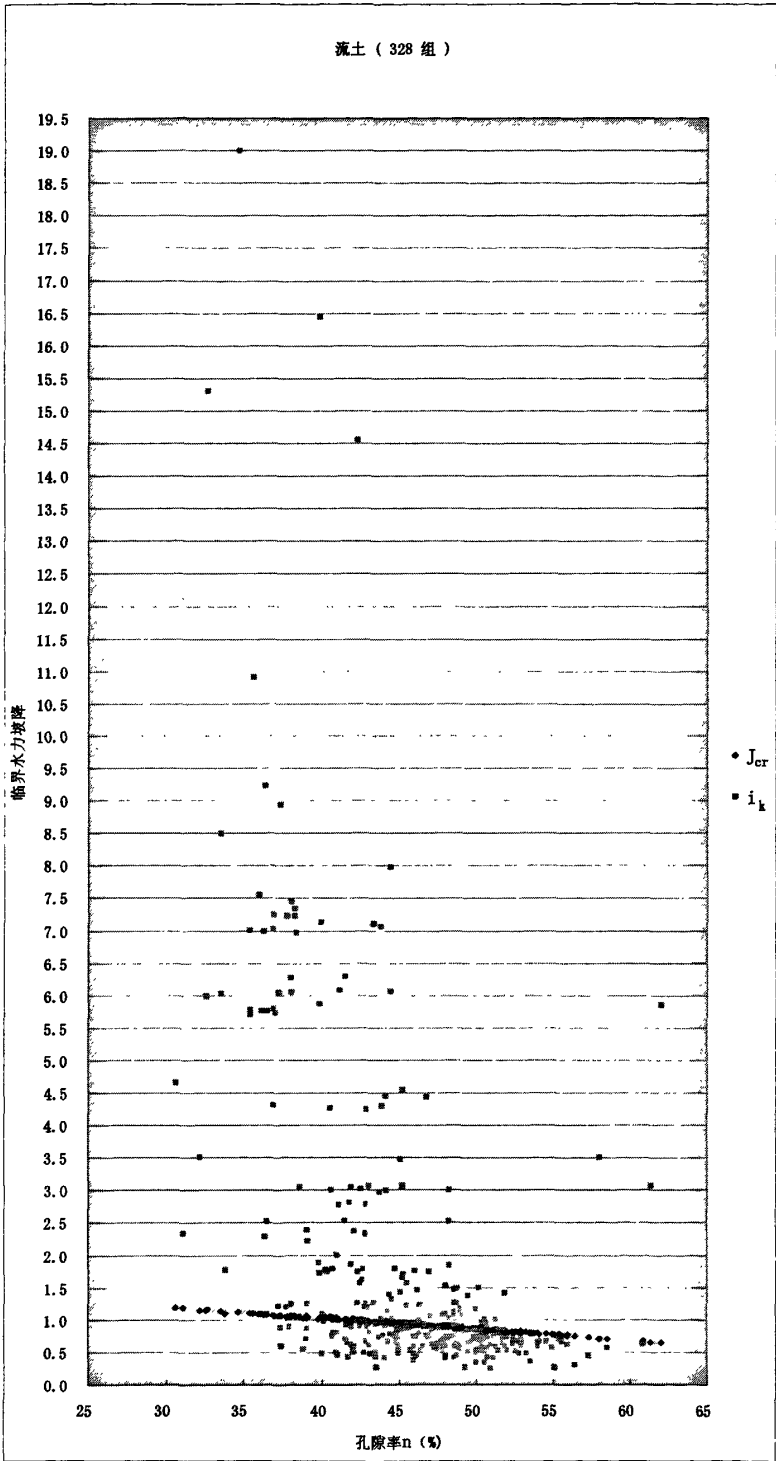


图 1-1 孔隙率与临界水力坡降关系散点图

1.3 本文研究内容

鉴于研究区地貌、地基土体物质组成、工程建设水平及国内外研究现状,本文在综合分析室内土工试验资料的基础上,重点分析影响土体临界水力坡降的基本因素,通过合理的数值分析,提出不同成土时代、不同土体临界水力坡降的计算公式。并对渗透变形的防治工程措施进行了分析、总结,具体研究内容如下:

(1) 分析影响土体临界水力坡降的基本因素,包括成土时代、土体成因类型、土体物质组成及土体结构等;

(2) 通过与室内土工试验成果对比,分析现行国标中临界水力坡降计算公式存在的问题;

(3) 采用数值/回归分析方法,提出不同边界条件下土体临界水力坡降的计算公式;

(4) 分析探讨区内建筑物地基土体渗透变形的特点及防治工程措施。

第二章 海河流域平原区工程地质环境概况

2.1 地形地貌

海河流域平原区，系第三纪以来以下降为主，受河、湖、海堆积作用形成的平原地貌单元，如图 2-1。由西向东，平原地貌再次可分为：

(1) 洪坡积平原——洪坡积倾斜地、残坡积倾斜地分布在太行山、燕山山前低山丘陵的前缘，由于山地急剧抬升，平原区剧烈下降，该地貌单元呈狭长带状分布，地势平缓，与山地近直角相接。由季节性水流和坡面水流堆积而成。

(2) 洪冲积平原——分布于山前平原与丘陵盆地相接地带，或与洪坡积平原相接，是季节性洪流和常年水流共同作用的结果，可谓混合成因的洪冲积平原，区内分布面积最大的为漳河、滹沱河、永定河、滦河的洪积扇；地形坡度在出山口处约为 $1/300$ ，逐渐变为 $1/1000 \sim 1/3000$ 。此地貌单元还可细分为扇上和扇前洼地、洪冲积扇和缓斜地等次级地貌单元。

(3) 冲积平原——由海河、黄河等变迁、泛滥、冲积形成。分布面积广，是平原区的主要地貌类型，地形平均坡度 $1/6000 \sim 1/5000$ ；区内古河道多而长，呈微高地分布，古河道之间分布一系列洼地，构成明显的岗、坡、洼地等相间分布的地貌形态，在平原区南东和东部有规律的呈 $NE30^\circ$ 方向的条带状展布（如南运河两侧地带等）。在冲积平原区内，可再次分为：河漫滩、河间洼地和泛滥洼地、泛滥坡平地及冲积平原、决口扇、冲积扇的缓坡地、河流故道高地和微高地等次级地貌单元。

(4) 冲湖积平原——大多分布在山前坡地与洪冲积扇或洪冲积扇与冲积平原交接地带，其展布方向和规模决定于交接地带展布方向及其地形形态。地势低洼易涝，地形坡度 $1/10000$ 左右，往往成为地表水的汇集区和地下水的排泄区。如宁津泊、白洋淀和黄庄洼等。

(5) 海积、冲洪积平原区——以海积作用为主，由海积和冲洪积共同作用形成的堆积地貌。地势平坦，高出海平面不超过 $5m$ ，微向海方向倾斜，地形坡降 $1/20000 \sim 1/5000$ 。分布于柏各庄—天津西—黄骅—沾化—东营一线以东地带。该地貌单元内，可再分为：海滩、泻湖地、滨海洼地、滨海低平地 and 河口三角洲等次级地貌单元。综上所述，平原区微地貌形态复杂，形成了复杂的自然环境。

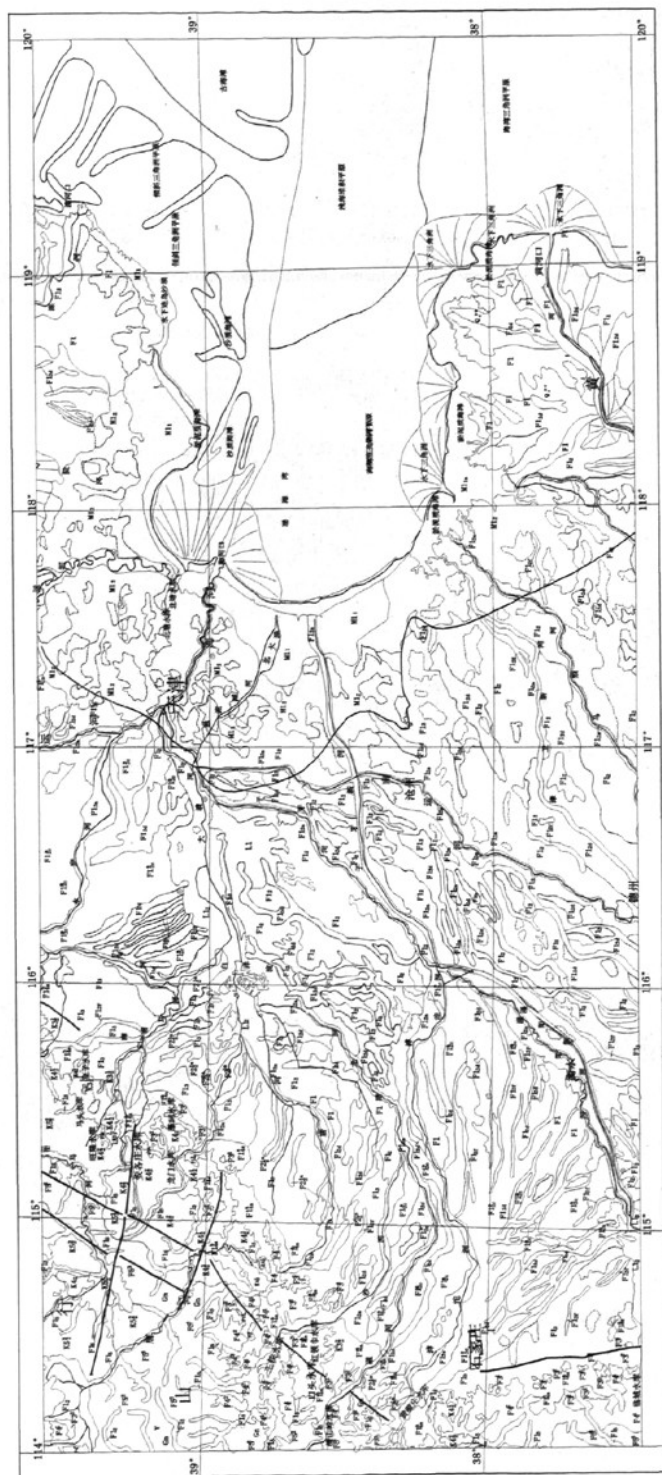


图2-1 海河流域平原区地貌略图

说明：本图在中国地貌图北京幅基础上修编而成。

比例尺:

例	例
---	---

[illegible]

2.2 地层岩性

平原区自第三纪以来，一直处于振荡下降，形成了巨厚的第四系松散堆积物。由微地貌类型的复杂性，可以判断松散堆积物成因类型亦很复杂，但由于物源以山西黄土高原的黄土搬运为主，即使沿海堆积物，亦部分物质由海流自黄河入海口搬运而来，所以第四系地层的分布规律还是很明显的。

华北地区第四纪继承了晚第三纪地史发展的特点，除个别山间盆地外，山区继续上升，平原区仍在均衡下降，内部差异运动进一步减弱，进入喜马拉雅运动的衰退期。第四纪的沉积作用受气候变化的控制，从早更新世早期到全新世，山区可明显划分出四次冰期、三次间冰期和一次冰后期，并且在平原区的松散堆积物和孢粉组合特征上有相应的反映。

海河流域平原区第四系沉积物，由南西北东方向，随沉积环境的不同，可大致分为三个小区，即鲁西北小区、冀中南小区和天津南部小区。在不同区段，堆积物组成和堆积厚度均存在一定的差异，如表 2-1。

表 2-1 海河流域平原区第四系划分对比

层序	地层代号	鲁西北小区		冀中南小区		天津南部小区	
		分组	层厚(m)	分组	层厚(m)	分组	层厚(m)
全新统	Q ₄	—	18~28	岐口组 高湾组 杨家寺组	2~10 10~40 5~15	天津组	20
上更新统	Q ₃	—	20~90	欧庄组	60~154	塘沽组	50~60
中更新统	Q ₂	—	60~100	杨柳青组	150~190	佟楼组	110~130
下更新统	Q ₁	—	60~160	固安组	150~210	马棚口组	200
第三系上新统	N ₂	明化镇组					

2.2.1 鲁西北小区

(1)下更新统 (Q₁)

主要有冲积、湖泊堆积、海积及玄武岩等。堆积物组成为棕黄、褐黄色

壤土夹粘土质砂、粉细砂，砂层厚 1~10m。普遍含有钙质结核或铁锰质结核及钙质淀积物。该统厚度 60~160m。

(2) 中更新统 (Q_2)

主要有冲积、湖积、海积及玄武岩、凝灰岩等。堆积物组成为灰黄、棕黄色粘土质砂、壤土夹细砂等。该统厚 60~100m。

(3) 上更新统 (Q_3)

主要为冲积、湖积和海积堆积物。堆积物组成为灰黄、土黄色粘土质砂、壤土及砂层，砂层厚 1~15m。该统厚 20~90m。

(4) 全新统 (Q_4)

以冲积为主，其次为冲洪积、湖沼堆积和海积等。上部为灰黄、土黄色粘土质砂、粉砂；中部为灰黑色淤泥质壤土或粘土质砂、淤泥层等；下部为土黄色粉细砂等。本统以稳定砂砾层或第一海相层底为界，厚度 18~28m。

2.2.2 冀中南小区

(1) 下更新统因安组 (Q_{1g})

下段为冲积、湖积粘土、壤土夹砂砾层。以棕红色为基色，混有锈黄色、灰绿色及斑杂色，在黄骅凹陷，本段底部局部有凝灰岩堆积，厚度 80~110m；上段为冲积、湖积壤土、砂壤土与细砂互层，以红棕色、棕色为基色，混有锈黄色，厚 70~100m。

(2) 中更新统杨柳青组 (Q_{2y})

下段以棕色、浅棕红色为主，为冲积、湖积含砂壤土夹砂砾层，部分地区底部夹玄武岩及火山碎屑岩，厚度 80~100m；上段以棕黄色、黄棕色为主，由冲积、湖积壤土夹砂层组成，厚度 70~90m。

(3) 上更新统欧庄组 (Q_{3o})

可分为三段，下段为冲积、湖积壤土、砂壤土互层，夹细砂层，底部局部地段夹玄武岩及火山碎屑岩，厚度 30~60m；中段为冲积、湖积壤土、砂壤土互层，夹细砂层及淤泥层，局部夹泥炭层，厚度 20~54m；上段为冲、湖积细砂、砂壤土、壤土互层，厚度 10~40m。

(4) 全新统 (Q_4)

可分为杨家寺组、高湾组和岐口组等地方地层单位，均为冲、湖积壤土、砂壤土，或二者的互层。部分地段湖相堆积中夹有淤泥或泥炭，厚度均小于 40m⁽⁶⁾。

2.3 地质构造与地震

海河流域平原区，位于华北断块区内。中生代时期，该断块区表现为西部凹陷和东部隆起，海河流域平原区位于东部隆起区内。东部隆起区内主要表现为 NNE 走向相间排列的复背斜和复向斜构造，由西向东依次为：冀西复向斜、沧津复向斜、陵秦（陵县——秦皇岛）复向斜、渤东（渤海东）复向斜，并形成一些规模宏大的左行平移断裂系，即太行山前断裂、沧东断裂、聊城——兰考断裂和郟庐断裂等。

侏罗——白垩纪的构造变动，在冀中断块区形成了一系列剪切断裂系，奠定了新生代盆地发展的基础，控制了断块内次级构造的格局。

早第三纪，区内构造活动相对平静，遭受强烈的剥蚀夷平作用，形成了准平原的地貌形态。始新世初，印度板块与欧亚板块碰撞及太平洋板块由 NNW 向转为 NWW 向运动~中国东部构造变形开始了新的阶段，该阶段主要表现为断陷盆地的发育，断陷区基本沿中生代褶皱或隆起的轴部发生，呈 NNE 向展布，反映了右旋走滑拉张作用下的构造活动特征，表明区域构造应力场发生了重大变化。

晚第三纪基本继承了早第三纪的构造格局，晚第三纪沉积物主要分布在早第三纪的断陷盆地内。由于断陷盆地区的整体下降，在早第三纪的断陷区或凸起区内，也堆积了厚度不大的晚第三纪沉积物。早第三纪与晚第三纪等厚线的形态基本一致，反映了晚第三纪应力场基本继承了早第三纪应力场的特征。

第四纪时期，本区构造活动有一定变化。在阳原、蔚县盆地、泥河湾组与下伏三趾马红土呈角度不整合，类似情况在山西地盆地带亦可见到；南部的三门峡盆地、伊洛盆地、济源盆地开始回返上升；与此相应，在华北断陷盆地内，西缘的太行山前断裂活动性减弱，第四纪沉积中心向东偏移，同时在华北断陷北部发育了一条 NW 向凹陷带，即沙河、顺义至渤海湾凹陷带，它是在第三纪构造格架基础上叠加发育而成。如图 2-2。

现今的构造活动基本受控于第四系构造系。如表 2-2。

根据地震活动的时空分布特征、主要地震带地震活动特点与地震趋势的研究分析，利用 1400 年以来 5 级以上地震资料，河北平原地震带未来百年可能发生 6 次 6 级以上地震；根据马尔科夫模型，未来百年发生 $M \geq M_0$ 地震的概率如下（河北平原地震带）：

$$P_{100}(M \geq 6.0) = 0.89$$

$$P_{100}(M \geq 6.5) = 0.66$$

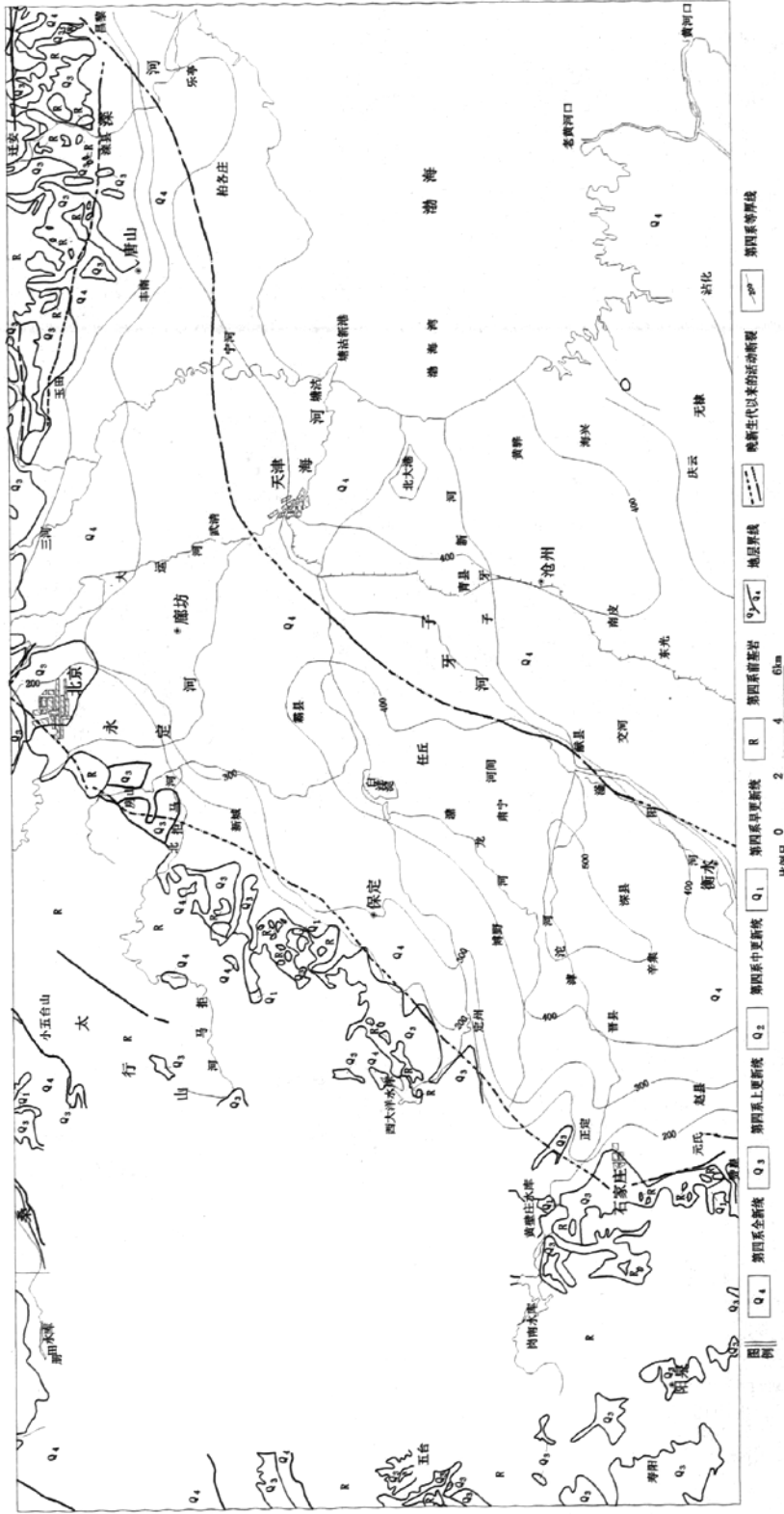


图 2-2 区域地质略图

表 2-2 区域新构造运动分区

新构造分区			新构造运动特征
阴山~燕山隆起区			间歇性整体抬升，内部差异活动不明显，内部地震活动微弱。
山西隆起区	汾渭断陷带	延怀盆地	次级盆地右行斜列排列，总体走向 NNE，平面上呈“S”形。盆地的形成受断裂控制，上新世开始裂陷，由南往北发展，第四纪继承性活动。盆地边界断裂第四纪活动强烈，地震活动强度大、频度高。
		大同盆地	
		忻定盆地	
		太原盆地	
		临汾盆地	
		运城盆地	
吕梁山隆起		以间歇性上升为主，内部差异活动较弱，发育个别山间盆地。地震活动水平较低，以中小地震活动为主。	
太行山隆起			
华北平原沉降区	渤海湾断陷	北京凹陷	华北断陷盆地由多个次级盆地组合而成，这些盆地大致于始新世在中生代构造隆起背景上发生裂陷作用形成，中新世时整体沉降，形成统一的盆地，但盆地内部的差异活动仍以次级盆地或断块的活动为基础。华北断陷盆地断裂活动以 NNE 向右旋走滑拉张为主，断陷内地震活动强烈，强震活动与 NE 向的断陷盆地及其边缘断裂有关，但同时又受控于 NW 向构造带。
		冀中凹陷	
		沧县凸起	
		黄骅凹陷	
		埕宁凸起	
		济阳凹陷	
		临清凹陷	
		汤阴地堑	
		内黄隆起	
		东明凹陷	
	鲁西隆起		以隆起为主，西部边缘发育 NE 向沉降带，地震活动较弱，西部有中等地震。
豫皖差异运动断块	伊洛回返上升区		山间盆地发育。这些盆地早第三纪强烈沉降，上新世以来活动逐渐减弱。地震活动总体水平较弱。
	开封周口沉降区		主要是开封凹陷，该凹陷发育于中生代，新生代继续沉降，地震活动微弱。

$$P_{100}(M \geq 7.0) = 0.46$$

$$P_{100}(M \geq 7.5) = 0.18$$

综上所述，经对华北地区各地震带地震活动特点分析和统计，未来百年内，河北平原地震带可能发生的最大地震为 6.5 级左右⁽⁶⁾。

2.4 水文地质

综上所述，海河流域平原区，堆积了巨厚的、不同成因类型的第四系松散堆积物，由于成因类型的不同，致使松散堆积物颗粒组成在平、剖面上都很复杂。它们的透水性和含水性的差异亦很大，但均为孔隙含水层。在平原区西部和北部近山前地带，大多以孔隙潜水含水层为主，接受大气降水和山区地下水的迳流补给，迳流较强烈，向河床和平原区深部迳流排泄。平原区中部和东部地带，浅部为孔隙潜水含水层，呈条带状埋藏于古河道地带。而河间地块则成为条带状的相对隔水带，即使含水，水量亦很小，且在南部地带多为咸水苦水；接受大气降水补给，迳流微弱，局部呈相对封闭状水体，以蒸发排泄为主。中、东部地带深部则分布有孔隙承压含水层，由于埋深相对较大，除接受上部含水层越流补给外，主要接受山前地带地下水的迳流补给，迳流较强烈，向渤海方向排泄。近年来，由于大量开采深部地下水，不仅使京广铁路附近及其以西地带地下水位大幅度下降，还在衡水、德州、沧州、大城、天津等地形成大面积地下水下降，形成几近连在一起的大降落漏斗。

就工程体的水文地质环境而言，平原区的孔隙潜水埋深浅，在天津及其周边地带，地下水位埋深仅有 1m 左右或者更浅。所以，研究孔隙潜水的水位水质的特点及其变化，具有更重要的工程意义。

综上所述，海河流域平原区地貌和微地貌特征、巨厚松散堆积物的成因类型、地质构造的发展及其活动性、水文地质条件等，构成了海河流域平原区工程建筑物的最基本的地质环境。如何使建筑物适应这样特定的地质环境、预测工程体与地质环境相互作用可能产生的环境地质问题，就成为地质工程师的重要任务。如沉降变形、渗透稳定性、少粘性土体地震液化及软土的震陷等。在此，作者仅对土体渗透稳定性进行研究。

第三章 渗透变形的基本概念及其基本研究方法

3.1 基本概念

为有助于对研究内容的理解,对有关渗透变形的几个基本概念简述于后。

3.1.1 渗透变形及其类型

渗透变形是指在渗透水流的作用下,土(岩)体中的某些颗粒移动或颗粒成分、结构发生改变的现象。对水工建筑物来讲,是指建筑物挡水后,上下游形成水头差,地基土(岩)体所受渗透力加大,超过一定值时,可使地基土体或断层带、泥化夹层、风化层,以及含可溶盐类地层的组成和结构发生改变或破坏的现象⁽¹⁾。

通常将其分为机械和化学的渗透变形两大类。

由于土体颗粒级配和土体结构的不同,机械渗透变形又可分为流土、管涌、接触冲刷和接触流失4种破坏型式:

(1) 流土

在上升的渗流作用下局部土体表面的隆起、顶穿,或者粗细颗粒群同时浮动而流失称为流土。前者多发生于表层为粘性土与其它细粒土组成的土体或较均匀的粉细砂层中,后者多发生在不均匀的砂土层中。

(2) 管涌

土体中的细颗粒在渗流作用下,由骨架孔隙通道流失称为管涌,主要发生在砂砾石地基中。

(3) 接触冲刷

当渗流沿着两种渗透系数不同的土层接触面,或建筑物与地基的接触面流动时,沿接触面带走细颗粒称接触冲刷。

(4) 接触流失

在层次分明,渗透系数相差悬殊的两土层中,当渗流垂直于层面将渗透系数小的一层中的细颗粒带到渗透系数大的土(岩)层中的现象称为接触流失。

前两种类型主要出现在单一土层地基中,后两种类型多出现在多层结构地基中,除分散性粘性土外,粘性土的渗透变形型式主要是流土⁽⁷⁾。

3.1.2 临界水力坡降

临界水力坡降是指动水压力能使土体开始发生渗透变形，即细粒开始跳动或被水流带走时的水力坡降⁽⁸⁾，通常以 J_{cr} 表示。

3.1.3 破坏水力坡降

破坏水力坡降是指随着水头逐步加大，细粒不断被冲走，渗透流量变大，当水头增加到试样失去抗剪强度时的水力坡降⁽⁸⁾。

3.1.4 允许水力坡降

允许水力坡降是指土的临界水力坡降除以安全系数后的水力坡降。

3.2 基本研究方法

土体的抗渗强度是评价地基土体渗透稳定性的主要参数，应根据工程规模、建筑物特点及地基土体复杂情况确定。

对于一些大型工程或地层结构复杂的地基，应做现场渗透试验或模拟现场渗流条件进行渗流试验等专门试验，以确定地基土体的临界水力坡降和允许水力坡降。对于地质条件比较简单，又无试验条件的工程，可用半理论、半经验公式进行估算，或参考经验数值或类比确定。

3.2.1 计算法

3.2.1.1 流土型的抗渗坡降的计算

流土型的抗渗坡降的计算方法很多，但应用最普遍的是太沙基公式，国标水利水电勘察行业采用的亦是该公式。

它是从理论角度，根据渗透力与土体浮容重二者的合力判别土的渗透变形趋势或渗透的稳定性分析推出的，即：

$$J_{cr} = (1-n)(G-1)(1+0.5\xi \operatorname{tg}\phi) + c/\gamma_s \quad (3-1)$$

式中： $G = \gamma_s / \gamma_w$ 。

对于砂性土，若略去土粒间的摩擦力，则得，

$$J_{cr} = (1-n)(G-1) \quad (3-2)$$

式中： J_{cr} —土的临界水力坡降；

G —土的颗粒密度与水的密度之比；

n —土的孔隙率(%)。

这就是著名的太沙基公式。他认为土体受渗透力顶托时, 一经松动, 土粒间的摩擦力就不存在, 故不必考虑摩擦阻力的影响, 以求安全⁽¹⁰⁾。

3.2.1.2 管涌型或过渡型计算公式(水利水电科学研究院)

$$J_{cr}=2.2(G-1)(1-n)^2 d_5/d_{50} \quad (3-3)$$

式中: d_5 、 d_{20} —分别占总土重的 5% 和 20% 的土粒粒径 (mm)。

3.2.1.3 管涌型计算公式(南京水利科学院金沙煊)

$$J_{cr}=42 d_3/(k/n^3)^{1/2} \quad (3-4)$$

式中: k —土的渗透系数 (cm/s);

d —占总土重 3% 的土粒粒径 (mm)。

3.2.1.4 前苏联水工科学研究院 Б Н И И Г 给出的判断管涌、流土的公式

(1) 管涌

取决于土的颗粒组成和渗流坡降。土体中渗流通过的最大孔隙 d_0 (cm) 可按式 (3-5) 确定。

$$d_0=0.455(1+0.057)\eta^{1/6}\times n/(1-n)\times d_{17} \quad (3-5)$$

式中: d_{17} —级配曲线中含量少于 17% 的土粒最大粒径, cm;

η —不均匀系数;

n —孔隙率, 即单位土体中孔隙所占的百分比。

可被渗流水带走的最大土粒粒径为 $d_c=0.77d_0$, 如土的颗粒组成中只有不到 3%~5% 的土粒粒径小于 d_c , 则这种土可看作非管涌土。

能将粒径 d_c 的土粒带走的渗流临界坡降 J_{cr} 为:

$$J_{cr}=\phi_0 d_c (ng/vk)^{1/2} \quad (3-6)$$

$$\phi_0=0.6(\gamma_s/\gamma_0-1)[0.82-1.8n+0.0062(\eta-5)]\sin(30^\circ+\theta/8) \quad (3-7)$$

式中: v —水的动粘滞系数, m^2/s ;

θ —渗流水流向与重力之间的夹角, $^\circ$;

γ_s 、 γ_0 —分别为土粒容重和水容重;

k —渗透系数。

(2) 流土

分无粘性土与粘性土两种情况。如果含量 3% 以下的细粒土的粒径 d_s 与粗粒土的平均粒径 D_s (以下用 D 表示粗粒土或反滤料的代表粒径, 以 d 表示细粒土或被保护土的代表粒径) 成立如下关系, 则在交界面上不可能发生无粘性土的流土。

$D_a/d_s \leq 5.4$

$D_a = 0.455 \eta^{1/6} \times n / (1-n) \times D_{17}$

当 $\eta \leq 10$ 时，下游无压重的无粘性土的临界逸出坡降为：

$J_{cr} = (1-n) (\gamma_s / \gamma_o - 1) + 0.5n$ (3-8)

对粘性土又分为完整型和有裂缝型两种情况，塑性指数 $I_p \geq 5$ 的完好粘性土，设有反滤时，不发生流土的容许渗流坡降为：

$J_a = 1 / \phi [0.34 / D_0^2 - 1]$ (3-9)

式中： D_0 —反滤料中渗流通过的最大孔隙，cm，按式（3-5）计算；

ϕ —系数，如下表 3-1⁽¹¹⁾。

表 3-1 最大孔隙 D_0 与 ϕ 关系表

D_0 (cm)	...	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.55	0.583
ϕ	...	0.50	0.46	0.42	0.32	0.18	0.08	0

3.2.2 土工试验法

确定临界水力坡降的试验法包括室内试验和现场试验。

3.2.2.1 室内试验

室内试验多在透明的有机玻璃渗透仪或水槽中进行。对扰动的粗粒土样，将其按天然级配和控制密实度拌匀、分层装入仪器，并浸水饱和两天。试验时选择初始渗透坡降和渗透坡降递增值，应先根据细粒含量大致判别试样渗透变形的形式。如为管涌破坏，渗透坡降初始值及递增值要小一些；如为流土破坏，则渗透坡降初始值及递增值要大一些；逐级抬高水头，每级水头下维持稳定 30 分钟至 60 分钟后测记测压管水位，并用量筒测读渗水量 3 次，每次测读间隔时间为 10~20 分钟。对非管涌土，测读间隔时间可适当延长。然后仔细观察，直至出现浑浊、冒气泡、细颗粒的跳动、移动、悬浮等渗透变形现象，同时记录水位、水量及水温等。然后再逐渐降低水头至渗透变形停止，再提高水头至渗透变形发生，如此反复数次，以最低的开始发生渗透变形的水头作为临界水头，从而求出临界水力坡降。对细粒土的原状样，在取样和安装试件的过程中要防止试样扰动、破坏、失水干裂等现象发生。

3.2.2.2 现场试验

现场试验也是逐级升压、逐级稳定，并经历试验及逐级减压两个阶段。

一般在每级压力下稳定 2~3 个小时, 试验历时较长。试验结束, 绘制流量与压力关系曲线或 $\lg J \sim \lg v$ 关系曲线, 以曲线转折点求出 J_{cr} 。

对于砂砾土类, 现场渗透变形试验有堤坝式、围堰式、现场试件式等, 以堤坝式较好。对于软弱夹层, 现场渗透变形试验有辐射法和平行流法。

砂砾石层现场渗透试验是在试坑中注水、在观测坑中做渗流观测。观测坑分圆形、扇形、长方形及上下观测坑等形式, 长方形上下观测坑因可在其两侧挖槽回填粘土成封闭状, 注水量流水较小, 且一次可同时测出两组平均坡降, 为目前较好的一种形式。试验时, 记录注水量、绘制 $\lg J \sim \lg Q$ 关系曲线, 观察观测坑中水流出逸处细粒流失现象, 以确定渗流坡降值⁽¹²⁾。

第四章 影响水力坡降的基本因素分析

影响水力坡降的因素很多，概括起来主要是成土时代、土体成因类型、土体物质组成、土体结构。现分述于后。

4.1 临界水力坡降与成土时代的关系

一般而言，成土时代越早，其固结程度越高。经过固结压密的土体不仅孔隙率降低，干密度增大，粒间的结合力强，所以其允许坡降显著高于颗粒成分相近但未经压密固结的土体。如图 4-1~4-4。

图 4-1~4-4 为不同时代形成的土体的孔隙率与临界水力坡降关系散点图（图中 J_{cr} 为国标计算值， i_k 为土工试验值，括弧中数字为试验组数、地层代号）。

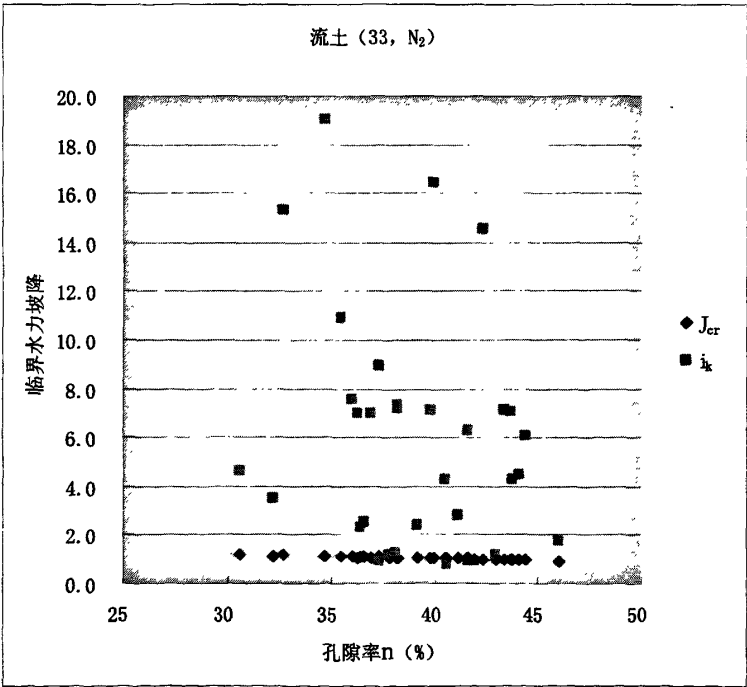


图 4-1 上第三系 (N₂) 土体孔隙率与临界坡降关系散点图

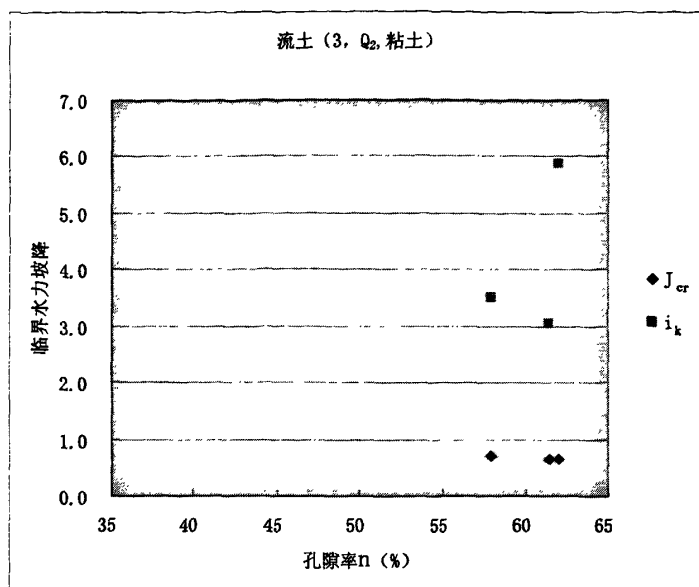


图 4-2 中更新统 (Q_2) 土体孔隙率与临界坡降关系散点图

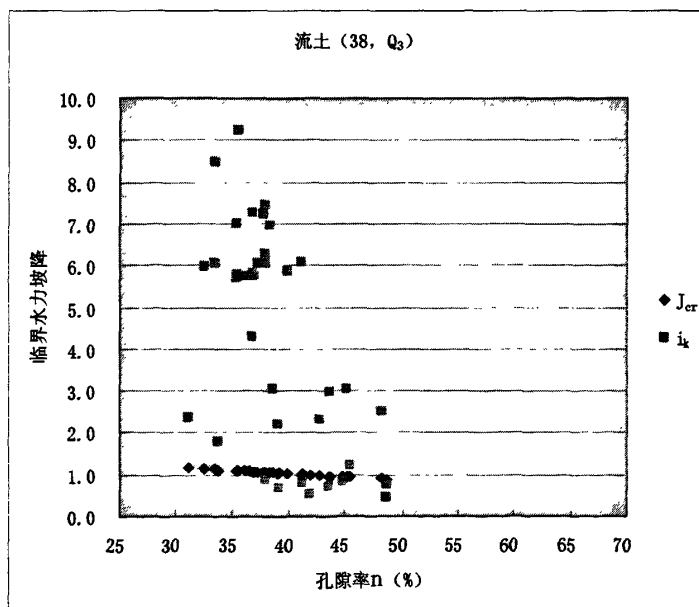
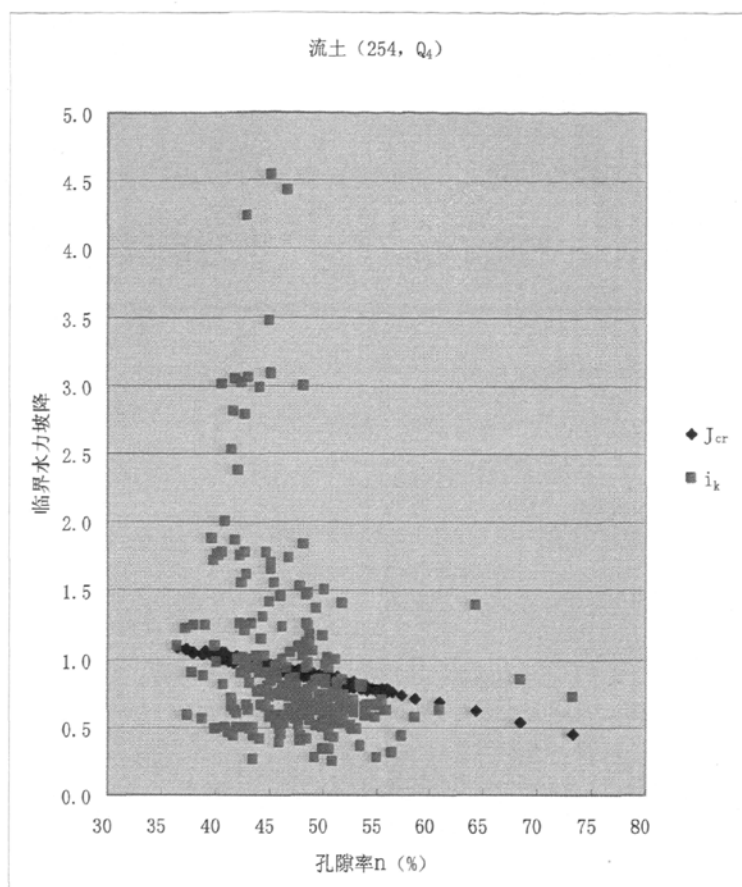


图 4-3 上更新统 (Q_3) 土体孔隙率与临界坡降关系散点图

图 4-4 全新统 (Q_4) 土体孔隙率与临界坡降关系散点图

由图 4-1~4-4 可以看出, 尽管个别土体试验组数较少, 但它们的孔隙率和临界水力坡降间的规律基本是一致的, 不同时代土体的孔隙率、临界水力坡降差异很明显, 如:

图 4-1 上第三系 (N_2) 土体:

土体包括粉质壤土、粉质粘土及粘土。

室内试验获得的孔隙率为 31%~46%, 平均值为 39%; 临界坡降为 0.75~1.19, 平均值为 0.94。而计算获得的临界坡降为 0.94~1.19, 平均值为 1.0。

图 4-2 中更新统 (Q_2) 粘土:

室内试验获得的孔隙率为 58%~62%, 平均值为 61%; 临界坡降为 3.1~5.9, 平均值为 4.14。而计算获得的临界坡降为 0.65~0.71, 平均值为 0.7。

图 4-3 上更新统 (Q_3) 土体:

土体包括粉质壤土、粉质砂壤土、粉质粘土及粉细砂。

室内试验获得的孔隙率为 31%~49%，平均值为 39%；临界坡降为 0.44~9.23，平均值为 4.26。而计算获得的临界坡降为 0.86~1.19，平均值为 1.0。

图 4-4 全新统 (Q_4) 土体:

土体包括粉质壤土、粉质砂壤土、粉质粘土、粘土、粉土及粉细砂。

室内试验获得的孔隙率为 35%~75%，平均值为 47%；临界坡降为 0.25~4.5，平均值为 0.97。而计算获得的临界坡降为 0.45~1.08，平均值为 0.9。

综上所述，不同时代土体临界水力坡降试验值与计算值对比见表 4-1。

表 4-1 不同时代土体临界水力坡降试验值与计算值对比表

地层时代	孔隙率	临界水力坡降	
	n (%)	i_k (试验值)	J_{cr} (计算值)
上第三系 (N_2)	31~46/39	0.75~19/5.91	0.94~1.19/1.0
中更新统 (Q_2)	58~62/61	3.1~5.9/4.14	0.65~0.71/0.7
上更新统 (Q_3)	31~49/39	0.44~9.23/4.26	0.86~1.19/1.0
全新统 (Q_4)	35~75/47	0.25~4.5/0.97	0.45~1.08/0.9
备注	/ 上为范围值，下为平均值		

4.2 临界水力坡降与土体成因类型的关系

土的性质是由其母岩成分、成因类型、成土环境、地质历史以及附加荷载作用等因素决定的。区内土体主要成因类型包括冲积相、海积相、洪积相、坡积相、湖积相等。

4.2.1 土体成因类型

4.2.1.1 冲积物

由河流搬运沉积形成的松散堆积物，又称冲积层。其主要特点是：

- (1) 颗粒一般上游粗，下游细；下部粗，上部细，分选性好。
- (2) 山区河流以砂卵砾石为主，平原区河流常为粉细砂和粘性土。
- (3) 颗粒磨圆度高。

- (4) 层次清晰, 常见交错层理。
- (5) 砾石常呈叠瓦状排列, 扁平面倾向上游。
- (6) 厚度变化大, 平原区厚度可达数百米。

河流冲积层由于沉积环境的周期性变化, 常具有粗细相间的层序韵律, 是其显著的结构特征, 也造成其物理力学和工程地质特性的差异。

4.2.1.2 冲积海积物

由河流和海流共同作用堆积而成, 具有以下特点:

- (1) 分布于滨海地区, 地势平坦。
- (2) 颗粒较细, 土体微结构发育, 孔隙率高, 含水量高, 质地软弱, 力学强度低。

4.2.1.3 洪积物

由山区洪水搬运堆积形成的沉积物, 又称洪积层, 具有以下特点:

(1) 多分布在干旱、半干旱地区的山前倾斜平原、洪积扇和山间间歇性河流的河床内。

(2) 分选性较差, 具有很大的不均匀系数、砾石磨圆度差、近上游顶部多粗大岩块, 无明显层理, 多呈透镜体分布, 厚度较大; 至洪积扇前缘或倾斜平原的前缘颗粒变细, 渐有斜交层理, 厚度较小、孔隙度变小和透水性变弱, 外缘有时形成洼地。

(3) 洪积层在厚度、土体结构、颗粒组成及透水性等方面充分显示着上、中、下部较大变化。

4.2.1.4 坡积物

坡地上部母岩的风化产物或其他松散物质, 被地表面流及重力作用搬运, 堆积在斜坡下部或坡脚的堆积物。坡积土有以下特点:

- (1) 坡积物组成取决于斜坡上部母岩或风化残积物组成。
- (2) 颗粒大小不一, 常见岩块、碎石及细粒土混杂。
- (3) 因重力分选, 坡脚和周围散落的粒径较粗、而向上逐渐变细, 表层疏松而下部相对较密实; 与基岩接触部位, 常有细粒土堆积。
- (4) 有时具有不明显的与斜坡倾斜一致的层理。
- (5) 多位于斜坡下部或山麓地带, 围绕山坡形成裙状地形, 称坡积裙。坡积土层因降水淋滤和潜蚀作用, 中上部常出现架空结构, 而底部却富集细粒土, 且含水量高, 呈可塑状态, 抗剪强度低, 构成坡积层的底滑面, 容易沿此面发生滑坡, 是常见的物理现象, 亦易形成工程环境地质问题⁽¹³⁾。

4.2.1.5 湖积物

湖泊环境下的堆积物，具有如下特点：

- (1) 从湖边往湖心粒度由粗到细，成环带状分布，以细粒土为主。
- (2) 层理清晰，岩相稳定，以水平层理为主。
- (3) 化石多。
- (4) 湖泊向沼泽转化，形成淤泥层或泥炭层^[13]。

4.2.2 临界水力坡降与土体成因类型的关系

前文已述及，不同时代的土体具有不同的临界水力坡降。实践证明，即使同一成土时代，由于成因类型不同，土体的颗粒组成、结构和微结构不同，其临界水力坡降也存在明显的差异。

图 4-5、图 4-6 分别为上更新统 (Q_3) 坡洪积相、湖积相粉质砂壤土孔隙率和临界水力坡降的散点图。

由图中可以看出，孔隙率、临界水力坡降差异明显：

图 4-5 上更新统 (Q_3) 坡洪积相粉质砂壤土：

室内试验获得的孔隙率为 32.6%~43.7%，平均值为 36.4%；临界坡降为 2.96~8.49，平均值为 5.79。而计算获得的临界坡降为 0.96~1.15，平均值为 1.1。

图 4-6 上更新统 (Q_3) 湖积相粉质砂壤土：

室内试验获得的孔隙率为 39.1%~48.7%，平均值为 43.6%；临界坡降为 0.54~0.82，平均值为 0.71。而计算获得的临界坡降为 0.87~1.05，平均值为 0.96。

图 4-7、图 4-8 分别为全新统 (Q_4) 冲积相、冲积海积相粉质壤土孔隙率和临界水力坡降的散点图。

由图中可以看出，孔隙率、临界水力坡降差异明显：

图 4-7 全新统 (Q_4) 冲积相粉质壤土：

室内试验获得的孔隙率为 36.6%~70.6%，平均值为 48.2%；临界坡降为 0.43~3.05，平均值为 1.02。而计算获得的临界坡降为 0.75~1.93，平均值为 0.88。

图 4-8 全新统 (Q_4) 冲积海积相粉质壤土：

室内试验获得的孔隙率为 37.4%~57.4%，平均值为 46.6%；临界坡降为 0.26~7.98，平均值为 1.00。而计算获得的临界坡降为 0.73~1.07，平均值为 0.92。

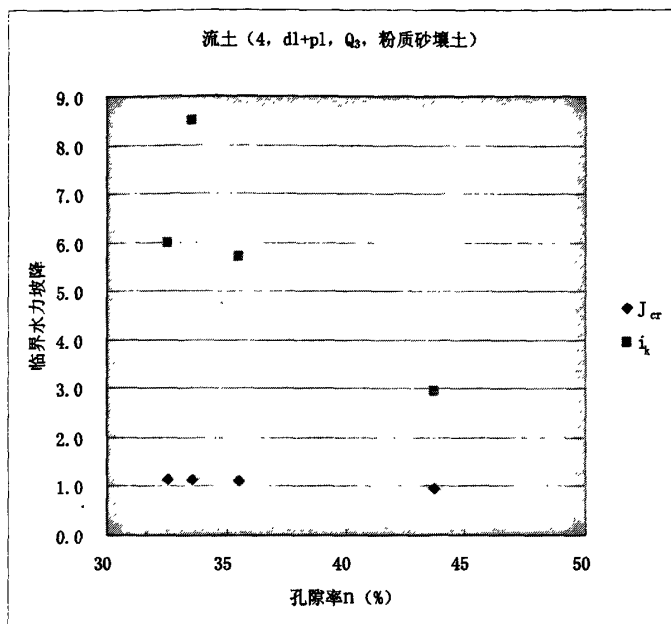


图 4-5 坡洪积物孔隙率与临界坡降关系散点图

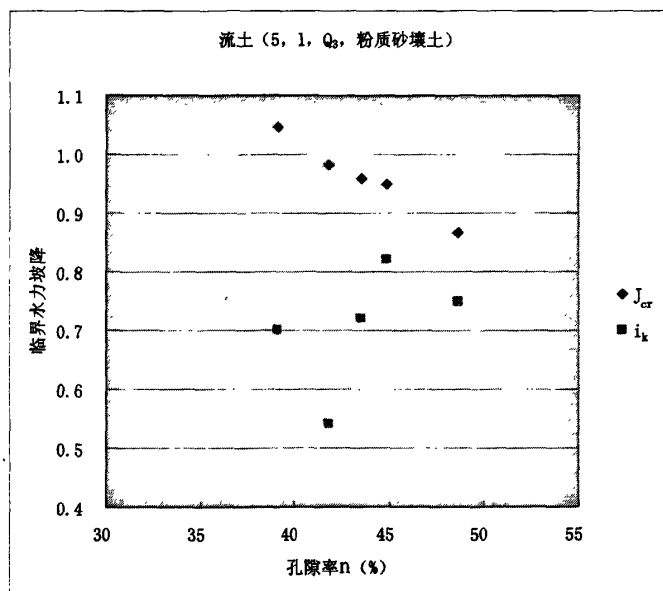


图 4-6 湖积物孔隙率与临界坡降关系散点图

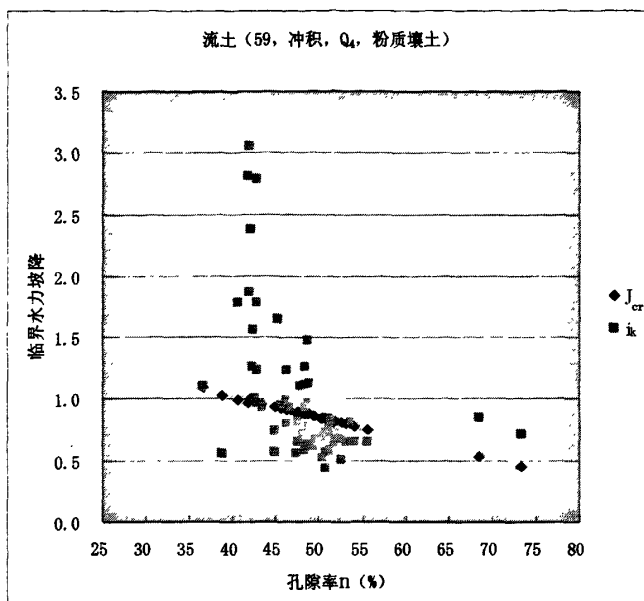


图 4-7 冲积物孔隙率与临界坡降关系散点图

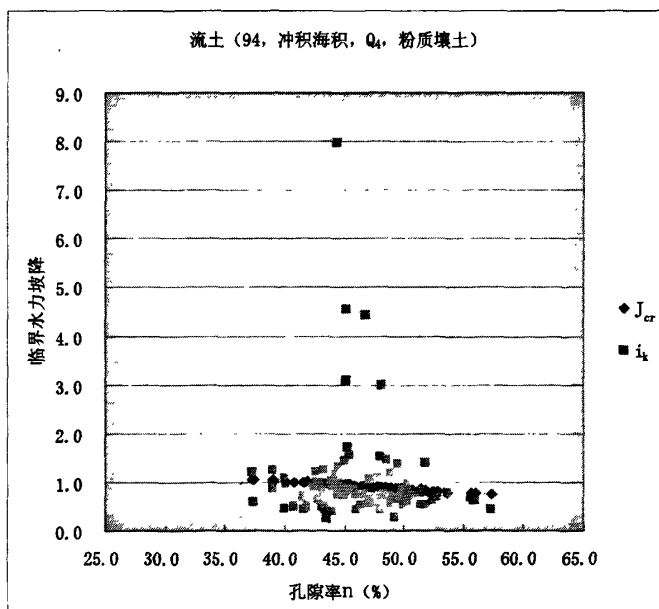


图 4-8 冲积海积物孔隙率与临界坡降关系散点图

图 4-9、图 4-10 分别为全新统 (Q_4) 冲积相、冲积海积相粉质砂壤土孔隙率和临界水力坡降的散点图。

由图中可以看出, 孔隙率、临界水力坡降差异还是很明显的:

图 4-9 全新统 (Q_4) 冲积相粉质砂壤土:

室内试验获得的孔隙率为 38%~81.8%, 平均值为 54.8%; 临界坡降为 0.36~1.24, 平均值为 0.68。而计算获得的临界坡降为 0.31~1.04, 平均值为 0.76。

图 4-10 全新统 (Q_4) 冲积海积相粉质砂壤土:

室内试验获得的孔隙率为 37.9%~51.9%, 平均值为 44.8%; 临界坡降为 0.38~0.9, 平均值为 0.63。而计算获得的临界坡降为 0.81~1.05, 平均值为 0.93。

4.3 临界水力坡降与土体颗粒组成的关系

上述分析表明, 成土时代、土层成因类型、土体结构不同对土体临界水力坡降的影响、差异明显, 那么, 上述影响因素相同, 其与土体颗粒组成的影响关系如何?

图 4-11~图 4-15 分别为第四系全新统 (Q_4) 冲积海积成因的、不同颗粒组成 (粉土、粉质壤土、粉质砂壤土、粉质粘土、粘土) 孔隙率和临界水力坡降的散点图。

由图中可以看出, 孔隙率、临界水力坡降的差异还是很明显的:

由图 4-11 可以看出, 粉土土工试验的孔隙率为 40.3%~50.9%, 平均值为 47.9%; 临界水力坡降为 0.25~1.62, 平均值为 0.74。而计算获得的临界水力坡降为 0.83~0.97, 平均值为 0.88。

由图 4-12 可以看出, 粉质壤土土工试验的孔隙率为 40.3%~50.9%, 平均值为 46.6%; 临界水力坡降为 0.26~1.71, 平均值为 0.80。而计算获得的临界水力坡降为 0.73~1.07, 平均值为 0.92。

由图 4-13 可以看出, 粉质砂壤土土工试验的孔隙率为 37.9%~51.9%, 平均值为 44.8%; 临界水力坡降为 0.38~0.90, 平均值为 0.63。而计算获得的临界水力坡降为 0.82~1.05, 平均值为 0.93。

由图 4-14 可以看出, 粉质粘土土工试验的孔隙率为 40.2%~60.8%, 平均值为 47.7%; 临界水力坡降为 0.34~3.02, 平均值为 1.08。而计算获得的临界水力坡降为 0.68~1.05, 平均值为 0.90。

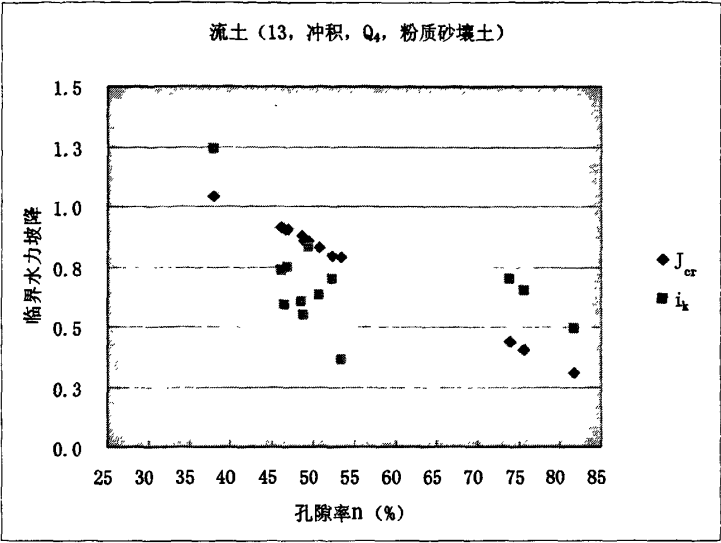


图 4-9 冲积物孔隙率与临界坡降关系散点图

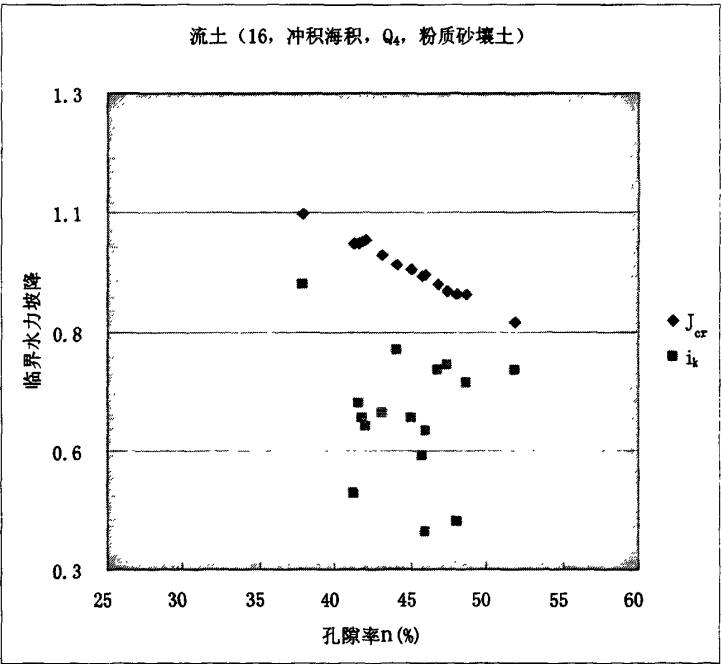


图 4-10 冲积海积物孔隙率与临界坡降关系散点图

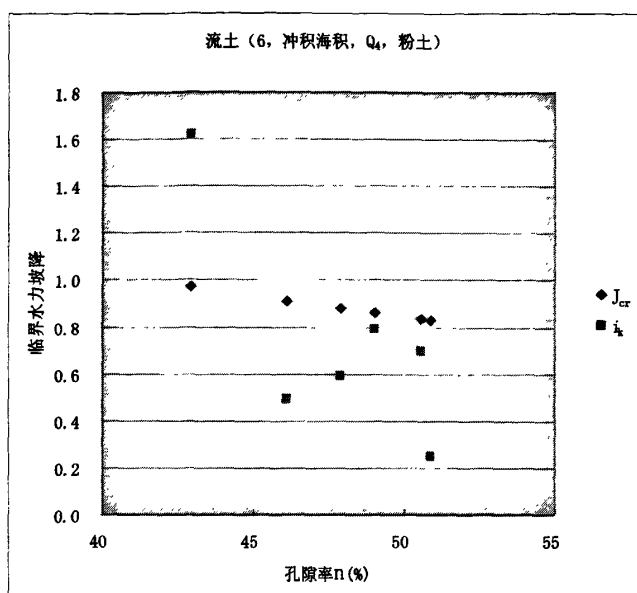


图 4-11 冲积海积相粉土孔隙率与临界坡降关系散点图

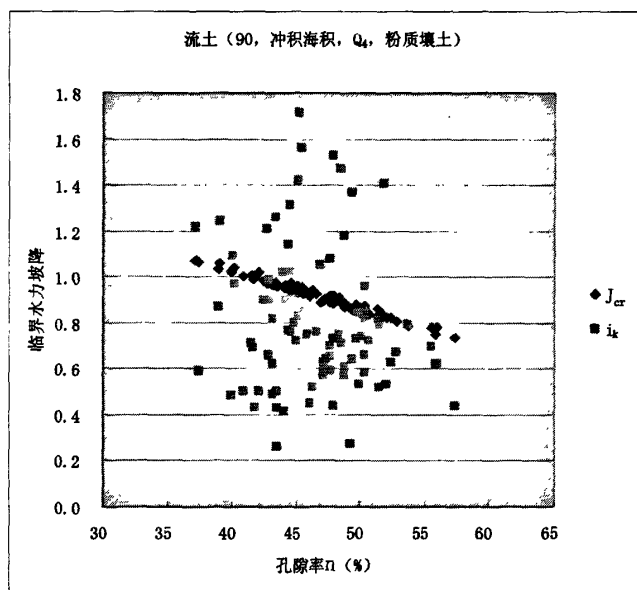


图 4-12 冲积海积相粉质壤土孔隙率与临界坡降关系散点图

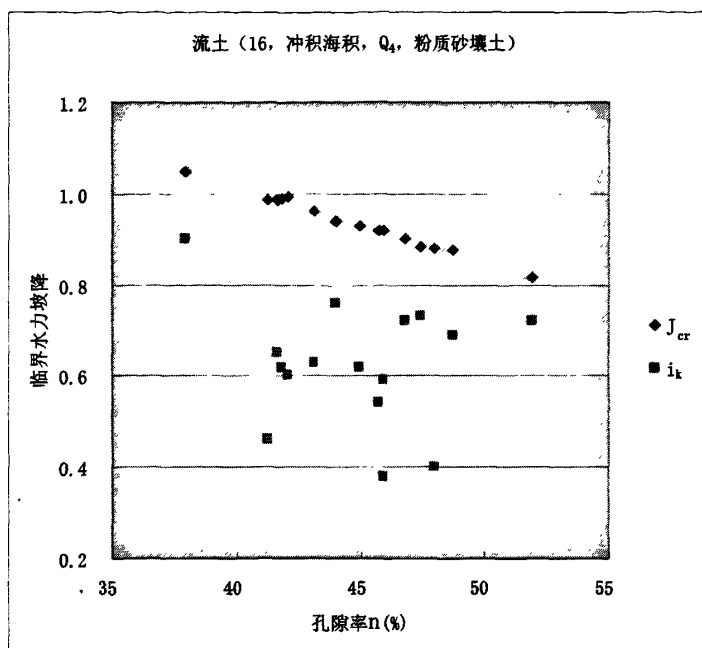


图 4-13 冲积海积相粉质砂壤土孔隙率与临界坡降关系散点图

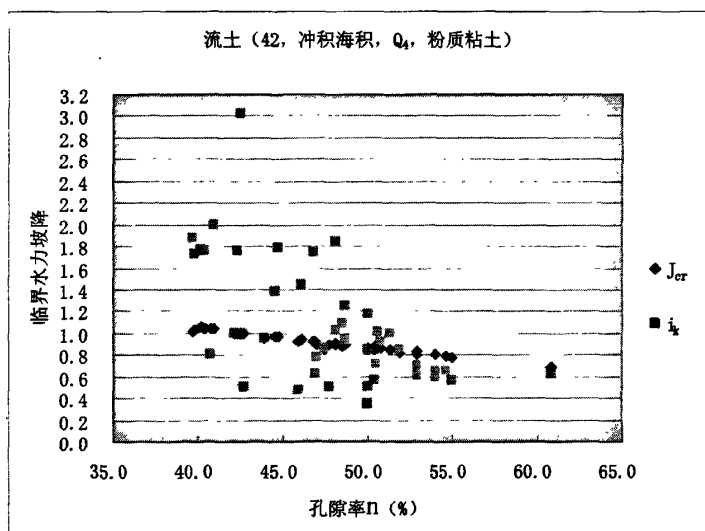


图 4-14 冲积海积相粉质粘土孔隙率与临界坡降关系散点图

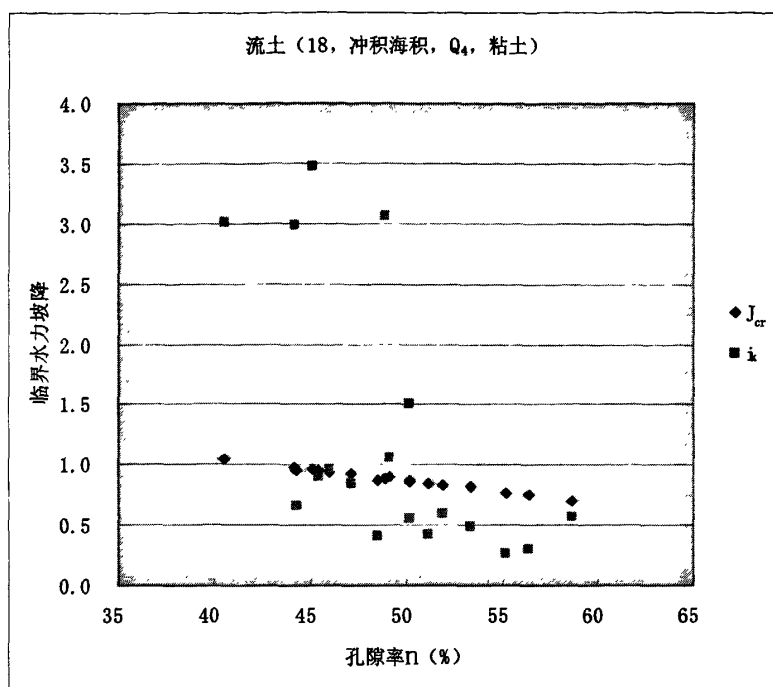


图 4-15 冲积海积相粘土孔隙率与临界坡降关系散点图

由图 4-15 可以看出, 粘土土工试验的孔隙率为 40.6%~58.6%, 平均值为 49.2%; 临界水力坡降为 0.27~3.47, 平均值为 1.23。而计算获得的临界水力坡降为 0.70~1.05, 平均值为 0.88。

4.4 临界水力坡降与土体结构的关系

上述分析表明, 临界水力坡降与成土时代、土体成因类型及土体颗粒组成等因素密切相关。表 4-2 给出了 24 组临界水力坡降试验成果。

由表 4-2 可以看出, 同一组土样, 孔隙率相同, 但其临界水力坡降差异明显, 究其原因, 因其土体结构差异所致。分析认为, 其根源在于土体孔隙水动力学特性的影响。如果将孔隙过水简化视为管道的话, 水在孔隙中渗透流动, 就可简单的视为一水力学问题, 即正如一输水隧洞, 尽管其过水流量相同, 但因断面形态、围岩介质、承压性的差异, 导致流态不同。

此外, 表 4-3 给出了同一成土时代、同一成因类型的粉质壤土, 在同样孔隙率条件下, 原状样与扰动样 (室内制样) 临界水力坡降试验成果。

表 4-2

临界水力坡降室内试验统计表

组号	孔隙率	临界水力坡降	颗粒组成
	n(%)	i_k	
1	33.6	1.77	粉细砂
	33.6	0.44	粉细砂
2	36.9	1.42	粉质壤土
	36.9	0.52	粉质壤土
3	37.4	0.70	粉质壤土
	37.4	1.05	粉质壤土
	37.4	0.53	粉质壤土
4	37.8	0.62	粉质壤土
	37.8	0.27	粉质壤土
5	39.9	4.43	粉质壤土
	39.9	0.50	粉质壤土
	39.9	7.98	粉质壤土
	39.9	3.08	粉质壤土
6	40.1	0.26	粉质壤土
	40.1	1.26	粉质壤土
7	40.7	4.54	粉质壤土
	40.7	1.14	粉质壤土
8	41.1	0.75	粉质壤土
	41.1	2.52	粉质壤土
9	41.6	0.75	粉质壤土
	41.6	1.76	粉质壤土
10	41.9	2.38	粉质壤土
	41.9	16.44	粉质壤土
11	42.0	19.00	粉质壤土
	42.0	7.45	粉质壤土
12	42.4	2.21	粉质壤土
	42.4	9.23	粉质壤土

续表 4-2

临界水力坡降室内试验统计表

组号	孔隙率	临界水力坡降	岩性
	n(%)	i_k	
13	43.2	7.13	粉质壤土
	43.2	3.05	粉质壤土
14	43.4	2.52	粉质壤土
	43.4	0.48	粉质壤土
15	44.3	1.10	粉质壤土
	44.3	0.63	粉质壤土
16	46.0	1.10	粉质壤土
	46.0	0.64	粉质壤土
17	46.1	1.78	粉质壤土
	46.1	2.81	粉质壤土
18	46.7	1.56	粉质壤土
	46.7	0.97	粉质壤土
19	47.8	1.37	粉质壤土
	47.8	0.79	粉质壤土
20	48.0	2.34	粉质壤土
	48.0	0.44	粉质壤土
21	48.7	8.49	粉质砂壤土
	48.7	5.71	粉质砂壤土
	48.7	1.24	粉质砂壤土
	48.7	0.59	粉质砂壤土
22	50.2	0.61	粉质粘土
	50.2	1.39	粉质粘土
23	51.5	0.48	粉质粘土
	51.5	1.02	粉质粘土
24	52.9	0.90	粘土
	52.9	2.99	粘土
	52.9	3.47	粘土

表 4-3 原状样、扰动样临界水力坡降室内试验成果表

组号	孔隙率	临界水力坡降	备注
	$n(\%)$	i_k	
1	43.2	0.82	原状样
	43.2	0.49	扰动样制样
2	44.8	0.80	原状样
	44.8	0.90	扰动样制样
3	42.9	0.99	原状样
	42.9	0.66	扰动样制样

对原状与扰动样室内试验成果对比分析表明,同样的孔隙率,由于制样后土体呈团粒结构,孔隙大小、形状基本是均匀的;而天然条件下土体的孔隙结构是很复杂的。我们知道,土体的组成为团粒,而团粒由不同个数的粘土片依不同的联结方式组成,不同的联结方式又组成土体不同的孔隙结构;成土后的地质环境对土体结构又进行着不同形式和不同程度的改造,加之土体中可能存在的微裂隙,导致两者的临界水力坡降试验值亦存在差异。

综上所述,不同成土时代、不同成因类型、不同颗粒组成的土体,其临界水力坡降值是不同的;即使土层的成土时代、成因类型、颗粒组成相同,但因其结构不同,其临界水力坡降也存在明显的差异。

这就充分反映了水土相互作用的复杂性,水在土体中的存在形式,决不能理解为完全是重力水,对于一定矿物组成的土体而言,只有当孔隙直径大到某个值时,孔隙才有重力水存在,否则土体中只能有结合水和毛细管水,甚至只有结合水。结合水和毛细管水在土体的运动并不遵循达西定律,而必须要给予足够外力,才能使其运动。所以,土体中的孔隙并不是均能透水的,在一定外力作用下的孔隙直径大到某一值时才能透水,否则孔隙是不透水的,因而可以说,水在土体中存在和运动亦是很复杂的。

依据目前对土体组成、水土作用机理的认识和土工试验成果,作者认为:采用一定数量的土工试验成果,利用数值分析方法,制定当地不同土体临界水力比降计算方法是比较符合实际的,亦便于进行地基防渗工程设计和施工组织设计。

第五章 临界水力坡降的数值分析

由第一章图 1-1 可以看出, 现行计算公式求得的临界水力坡降与试验成果之间存在不同程度的差异。因此, 根据试验成果回归分析得出适合本区情况的临界水力坡降, 对指导工程实践以及科学研究都是非常必要的。

5.1 数值分析方法

5.1.1 边界条件

本文根据不同的试验组数, 考虑了临界水力坡降 (J_{cr}) 与 3 个变量的组合关系, 形成不同的边界条件:

其一, 包括天然含水量 (w)、天然密度 (γ) 2 个变量;

其二, 包括孔隙率 (n) 1 个变量;

其三, 包括孔隙率 (n)、比重 (G) 2 个变量, 以便与太沙基公式对比。

5.1.2 分析方法

通过对 Excell 表中数据进行回归分析、推出下列三个关系式:

$$J_{cr} = \{\gamma, w\};$$

$$J_{cr} = \{n\};$$

$$J_{cr} = \{G, n\}.$$

要想确定他们之间的关系, 需要先对 J_{cr} 与 γ 、 w 、 G 、 n 分别进行一元线性拟合、指数拟合及对数拟合, 然后从中对他们的最小二乘估计, 得到拟合关系式及 R^2 值, 取其较小值的拟合关系式子即为最适合的表达式。

例如, 对一元线性关系式: $y = a + bx$

令 $R^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2$, 其实它描述的是 n 个点 (x_i, y_i) 对该直线 l 的偏离程度, 当然, R^2 越小越好。

具体拟合关系式可见下列图 5-1~5-11 中所示。但是通过对比 R^2 值所选关系式不一定为一元线性回归, 可能为指数回归关系, 也可能为对数回归关系, 那么就可以通过将式子中的自变量做适当的变量替换, 非线性回归问题就转化为线性回归分析来处理了。

(1) 对于指数型曲线: $y = ae^{bx}$

若 $a > 0$ ，则令 $v = \ln y$ ，得 $v = \ln a + bx$

若 $a < 0$ ，则令 $v = \ln(-y)$ ，得 $v = \ln(-a) + bx$

(2) 幂数型曲线: $y = ax^b$

若 $a > 0$ ，则令 $v = \ln y$ ， $u = \ln x$ ，得 $v = \ln a + bu$

若 $a < 0$ ，则令 $v = \ln(-y)$ ， $u = \ln x$ ，得 $v = \ln(-a) + bu$

(3) 对数型曲线:

$$y = a + b \log x$$

令 $u = \log x$ ，得 $y = a + bu$

$$\log y = a + bx$$

令 $u = \log y$ ，得 $u = a + bx$

$$\log y = a + b \log x$$

令 $u = \log x$ ， $v = \log y$ ，得 $v = a + bu$

通过上述线性回归及可化为线性回归分析，即可确定每一组数据中 J_{cr} 分别与 γ ， w ， G ， n 的关系，从而利用线性关系式的特点加和即可分别确定每组数据中的 $J_{cr} = \{\gamma, w\}$ 、 $J_{cr} = \{n\}$ 、 $J_{cr} = \{G, n\}$ 复合关系式。

5.2 不同成土时代、不同物质组成土体临界水力坡降的计算公式

5.2.1 综合的临界水力坡降计算公式

对 325 组（包括不同时代、成因土体）试验数据进行回归分析，如图 5-1。

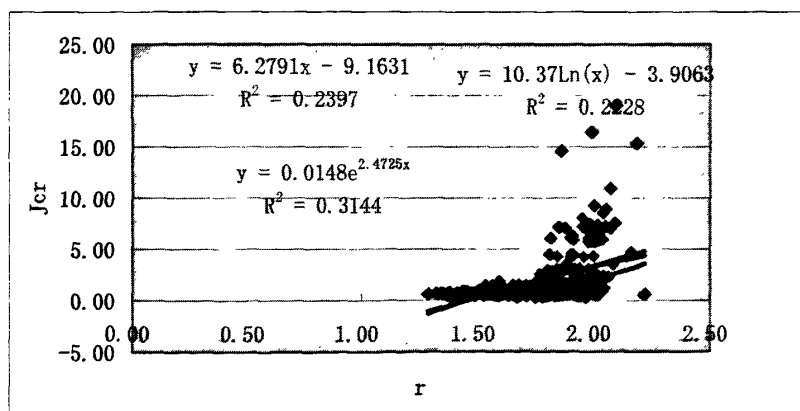


图 5-1 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

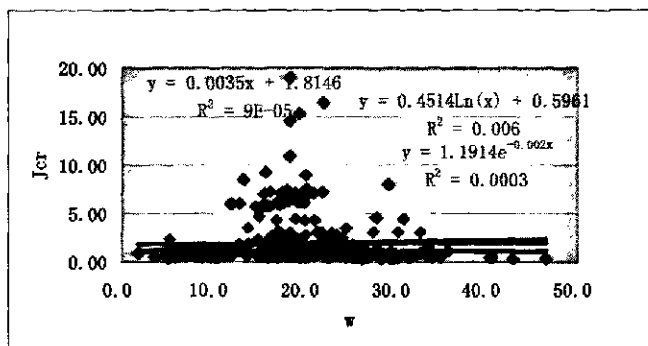


图 5-1 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析

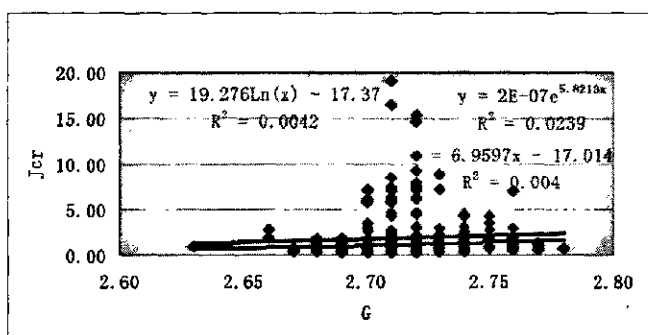


图 5-1 (c) J_{cr} 与 G 回归曲线分析

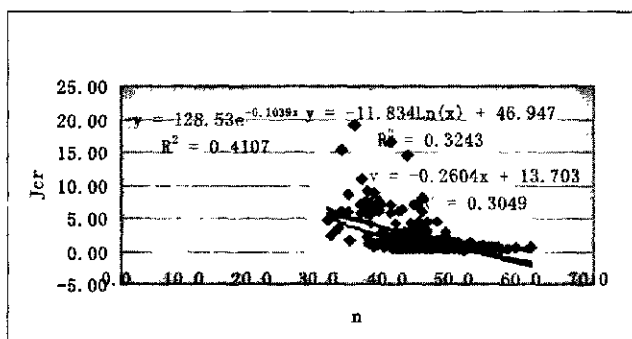


图 5-1 (d) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

对比图 5-1 之 (a)、(b)、(c)、(d) 中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 w 、 n 、 G 均有较好的线性拟和关系, 与 r 有较好的对数关系拟合, 从而得出:

$$(1) J_{cr} = 0.00175w + 5.185 \ln(r) - 1.04585$$

$$(2) J_{cr} = -0.2604n + 13.703$$

$$(3) J_{cr} = -0.1302n + 3.47985G - 1.6555$$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —土体天然密度 (g/cm^3); w —天然含水量 (%); G —土体比重; n —孔隙率 (%).

5.2.2 第四系全新统 (Q_4) 粘土

对 18 组试验数据进行回归分析, 如图 5-2。

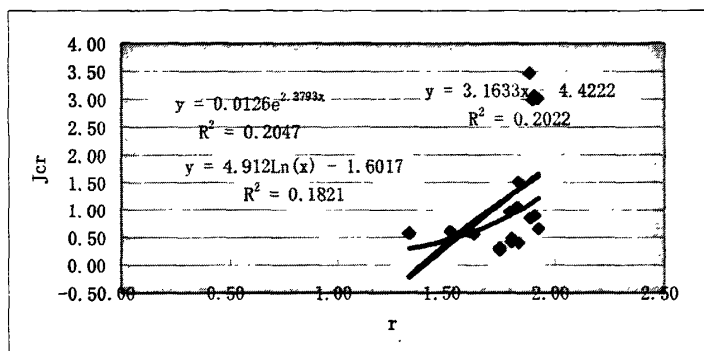


图 5-2 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

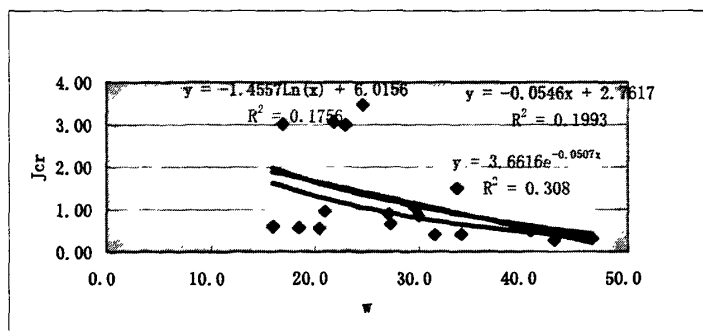
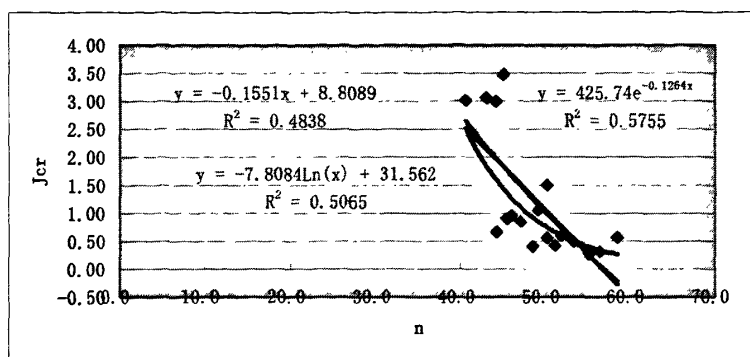


图 5-2 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析

图 5-2 (c) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

对比图 5-2 之(a)、(b)、(c)中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 w 、 r 有较好的对数关系, 与 n 均有较好的线性拟和关系, 得出:

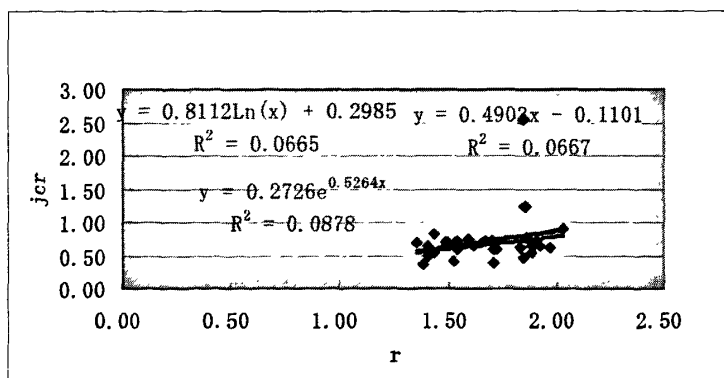
$$(1) J_{cr} = -0.72785 \ln(w) + 2.4561 \ln(r) + 2.20695$$

$$(2) J_{cr} = -0.1551n + 8.8089$$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —土体天然密度(g/cm^3); w —天然含水量(%); n —孔隙率(%).

5.2.3 第四系全新统(Q_4)粉质砂壤土

对 30 组试验数据进行回归分析, 如图 5-3。

图 5-3 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

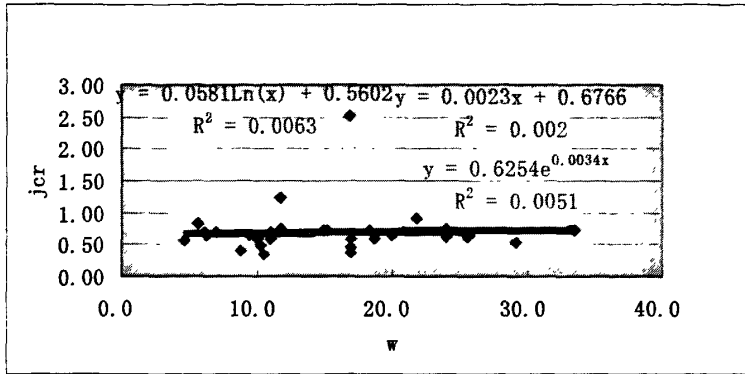


图 5-3 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析

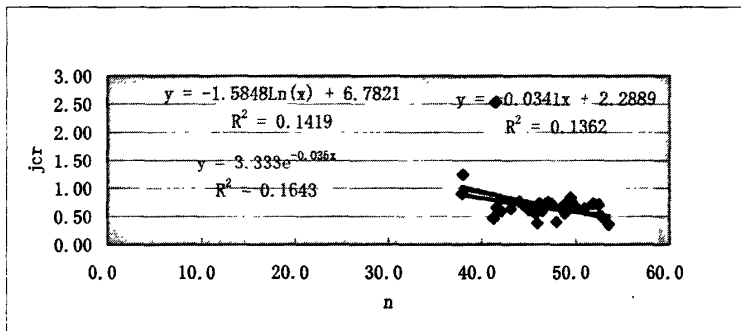


图 5-3 (c) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

对比图 5-3 之(a)、(b)、(c)中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 r 、 w 、 n 的线性拟和较好, 得出:

$$(1) J_{cr} = 0.00115r + 0.24515w + 0.28325$$

$$(2) J_{cr} = -0.0341n + 2.2889$$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —土体天然密度(g/cm^3); w —天然含水量(%); n —孔隙率(%)。

5.2.4 第四系全新统(Q_4)粉质粘土

对 43 组试验数据进行回归分析, 如图 5-4。

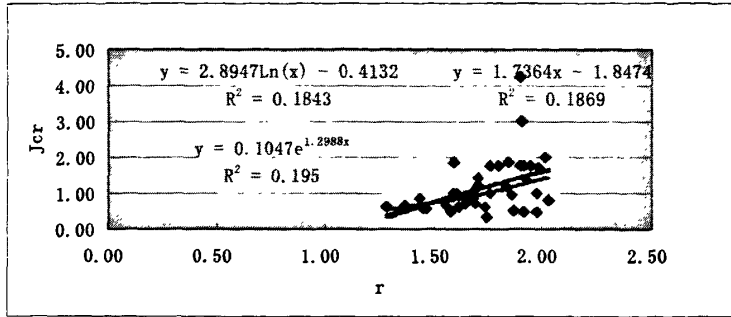


图 5-4 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

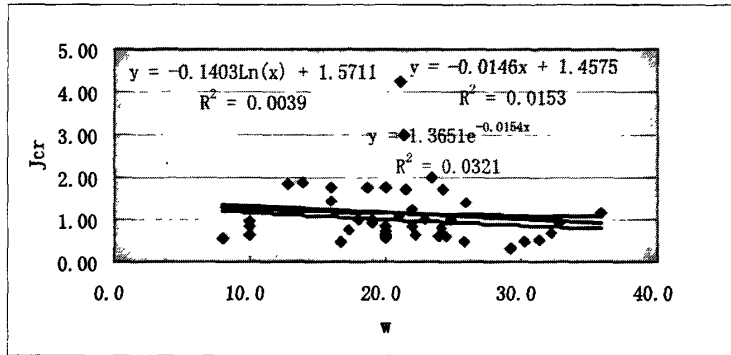


图 5-4 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析

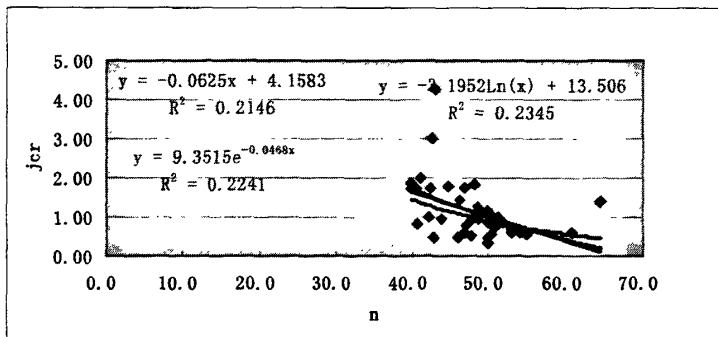


图 5-4 (c) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

对比图 5-4 之(a)、(b)、(c)中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 w 有较好的对数关系, 与 r 、 n 均有较好的线性拟和关系, 得出:

(1) $J_{cr} = -0.070151 \ln(w) + 0.8682r - 0.13815$

(2) $J_{cr} = -0.0625n + 4.1583$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —土体天然密度(g/cm^3); w —天然含水量(%); n —孔隙率(%)。

5.2.5 第四系全新统(Q₄)粉质壤土

对 153 组试验数据进行回归分析, 如图 5-5。

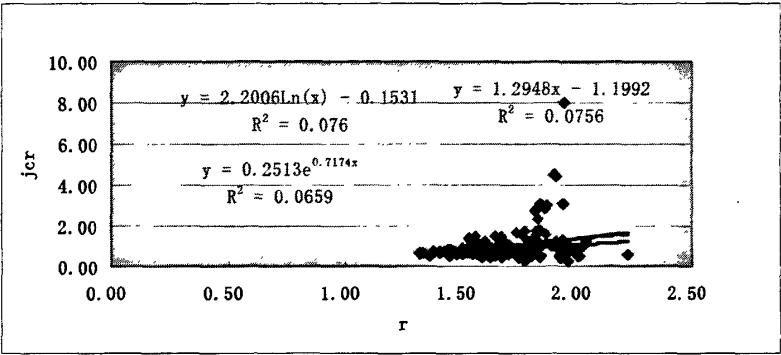


图 5-5 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

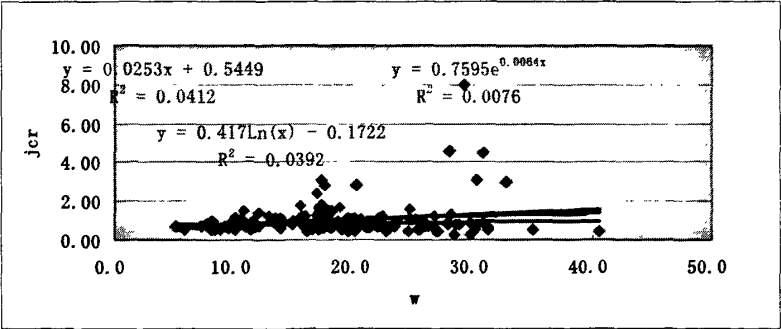
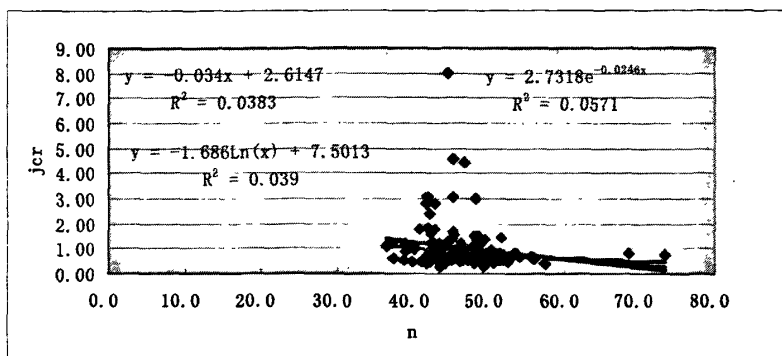


图 5-5 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析

图 5-5 (c) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

对比图 5-5 之 (a)、(b)、(c) 中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 r 、 w 有较好的指数拟和关系, 与 n 有较好的线性拟和关系, 得出:

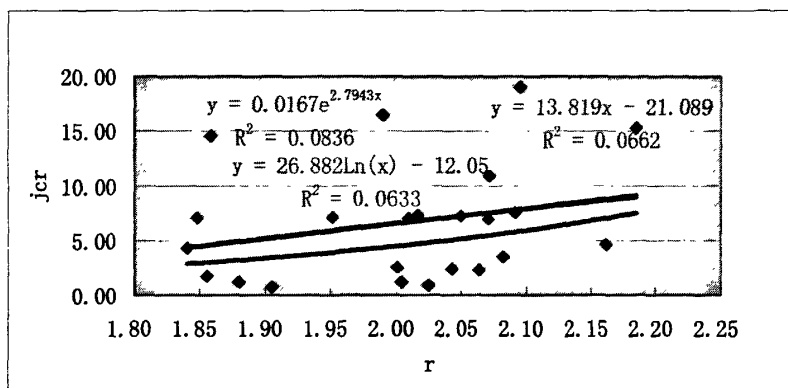
$$(1) J_{cr} = 0.12565 \exp(0.7174r) + 0.37975 \exp(0.0064w)$$

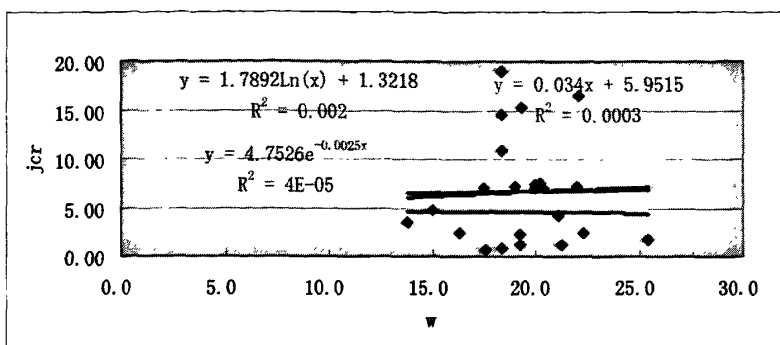
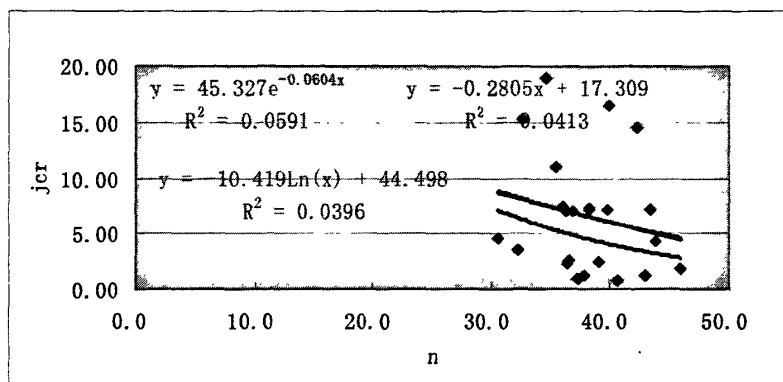
$$(2) J_{cr} = -0.034n + 2.6147$$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —土体天然密度 (g/cm^3); w —天然含水量 (%); n —孔隙率 (%).

5.2.6 上第三系 (N_2) 粉质壤土

对 23 组试验数据进行回归分析, 如图 5-6。

图 5-6 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

图 5-6 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析图 5-6 (c) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

对比图 5-6 之 (a)、(b)、(c) 中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 r 、 n 均有较好的对数关系, 与 w 有较好的指数关系, 得出:

$$(1) J_{cr} = -10.419 \ln(n) + 44.498$$

$$(2) J_{cr} = 13.441 \ln(r) + 2.3763 \exp(-0.0025w)$$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —土体天然密度 (g/cm^3); w —天然含水量 (%); n —孔隙率 (%).

5.2.7 上第三系 (N_2) 粘土-粉质粘土

对 10 组试验数据进行回归分析, 如图 5-7。

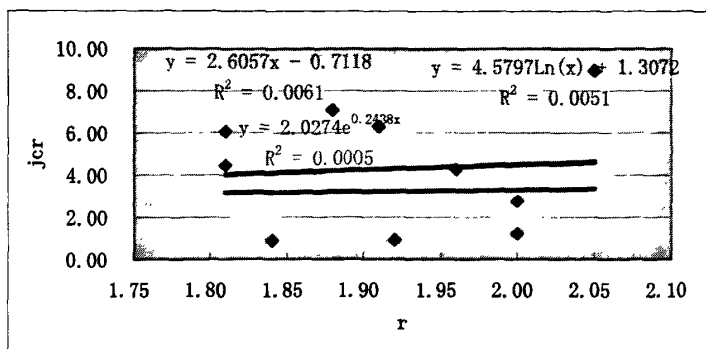


图 5-7 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

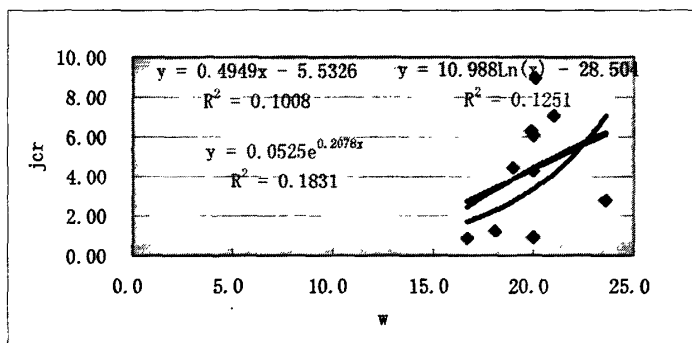


图 5-7 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析

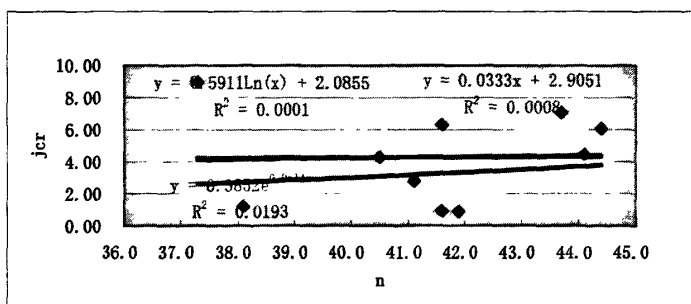


图 5-7 (c) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

对比图 5-7 之(a)、(b)、(c)中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 r 有较好的指数关系, 与 w 有较好的线性关系, 与 n 有较好的对数关系, 得出:

(1) $J_{cr}=1.0137\exp(0.2438r)+0.24745w-2.7663$

(2) $J_{cr}=0.5911\ln(n) +2.0855$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —土体天然密度(g/cm^3); w —天然含水量(%); n —孔隙率(%)。

5.2.8 第四系全新统 (Q₄) 冲积海积粉质壤土

对 94 组试验数据进行回归分析, 如图 5-8。

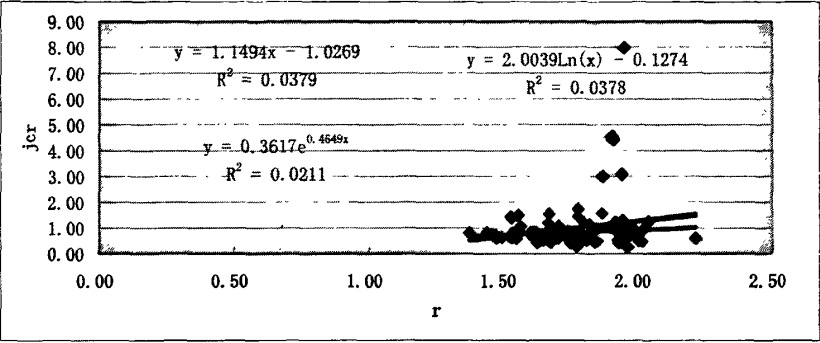


图 5-8 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

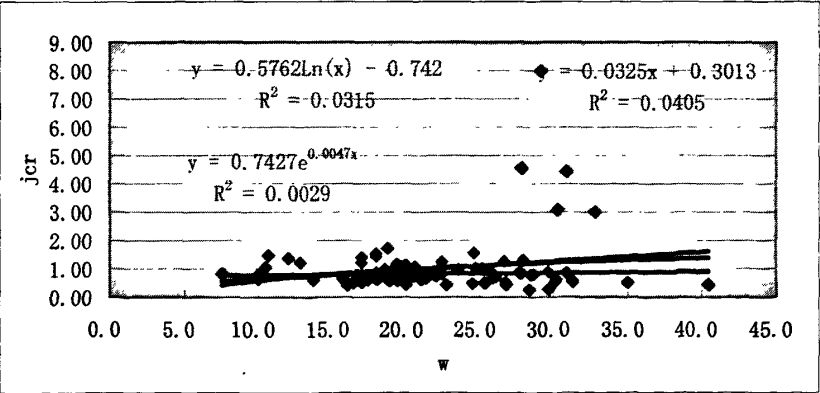
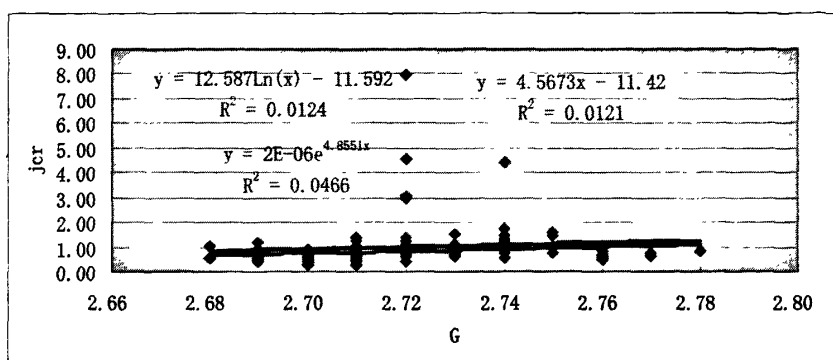
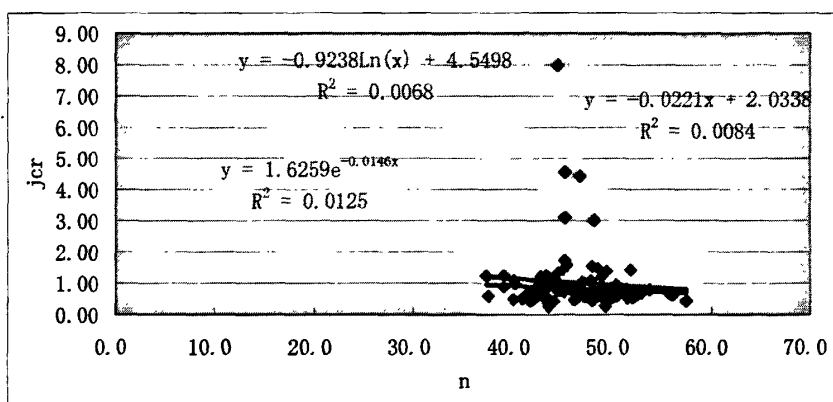


图 5-8 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析

图 5-8 (c) J_{cr} 与 G 回归曲线分析图 5-8 (d) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

对比图 5-8 之(a)、(b)、(c)中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 r 、 w 有较好的指数关系, 与 n 有较好的对数关系, 与 G 有较好的线性关系, 得出:

$$(1) J_{cr} = 0.18085 \exp(0.4649r) + 0.3713 \exp(0.0047w)$$

$$(2) J_{cr} = -0.9238 \ln(n) + 4.5498$$

$$(3) J_{cr} = -0.4619 \ln(n) + 2.28365G - 3.4351$$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —土体天然密度 (g/cm^3); w —天然含水量 (%); G —土体比重; n —孔隙率 (%).

5.2.9 第四系全新统 (Q₄) 冲积海积粉质砂壤土

对 16 组试验数据进行回归分析, 如图 5-9。

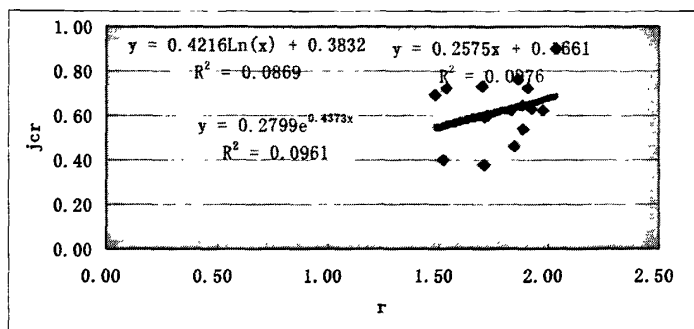


图 5-9 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

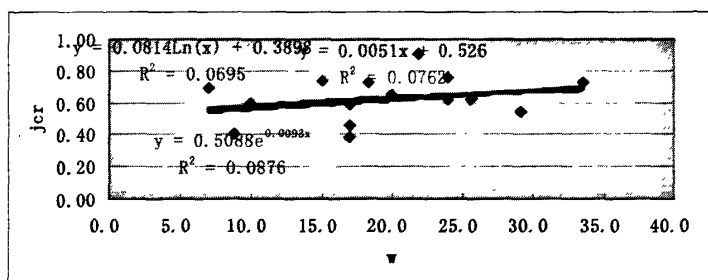


图 5-9 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析

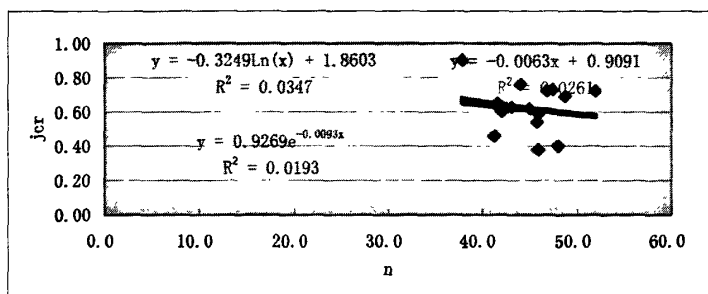


图 5-9 (c) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

对比图 5-9 之 (a)、(b)、(c) 中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 r 、 w 有较好的对数关系, 与 n 有较好的指数关系, 得出:

$$(1) J_{cr} = 0.2108 \ln(r) + 0.4071 \ln(w) + 0.3865$$

$$(2) J_{cr} = 0.9269 \exp(-0.0093n)$$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —土体天然密度(g/cm^3); w —天然含水量(%); n —孔隙率(%).

5.2.10 第四系全新统 (Q_4) 冲积海积相粉质粘土

对 43 组试验数据进行回归分析, 如图 5-10。

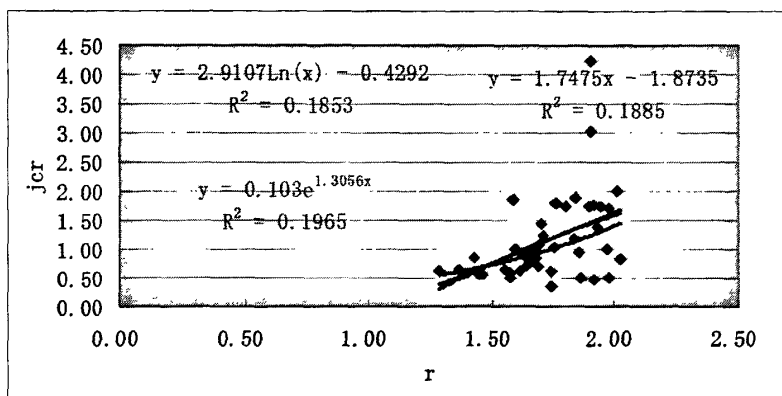


图 5-10 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

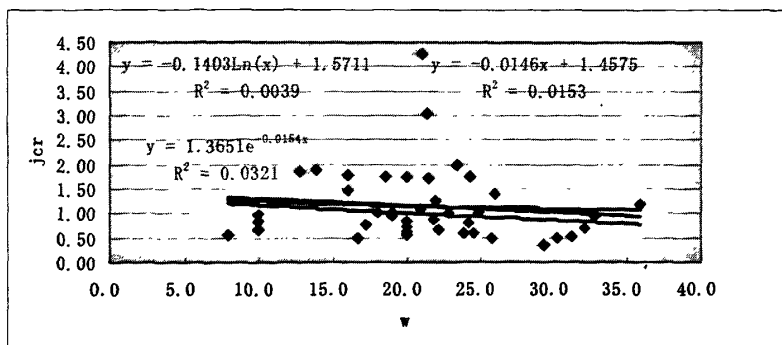
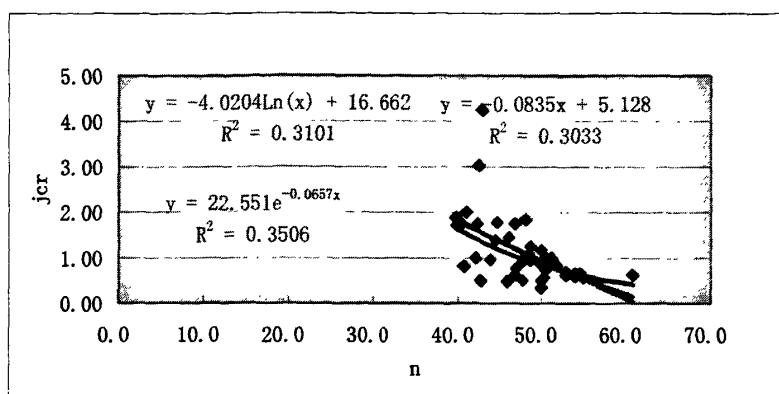


图 5-10 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析

图 5-10 (c) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

对比图 5-10 之 (a)、(b)、(c) 中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 r 、 w 有较好的对数关系, 与 n 有较好的线性关系, 得出:

$$(1) J_{cr} = 1.45535 \ln(r) - 0.07015 \ln(w) + 0.57095$$

$$(2) J_{cr} = -0.0835n + 5.128$$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —土体天然密度 (g/cm^3); w —天然含水量 (%); n —孔隙率 (%).

5.2.11 第四系全新统 (Q_4) 冲积海积粘土

对 18 组试验数据进行回归分析, 如图 5-11。

对比图 5-11 之 (a)、(b)、(c) 中各个关系式中 R^2 值可知, J_{cr} 与 r 、 w 有较好的对数关系, 与 n 有较好的线性关系, 得出:

$$(1) J_{cr} = 2.456 \ln(r) - 0.72785 \ln(w) + 2.20695$$

$$(2) J_{cr} = -0.1409n + 8.1594$$

其中, J_{cr} —土体临界水力坡度; r —天然土体密度 (g/cm^3); w —天然含水量 (%); n —孔隙率 (%).

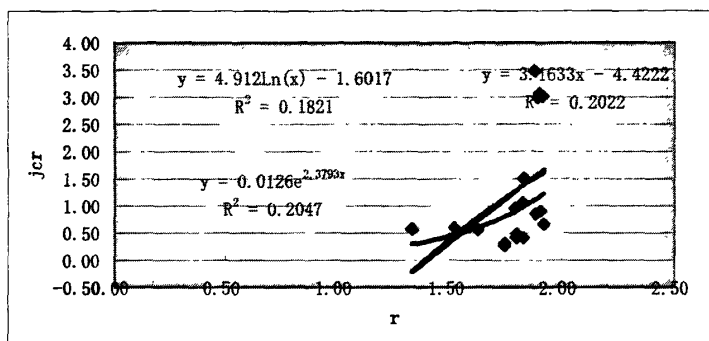


图 5-11 (a) J_{cr} 与 r 回归曲线分析

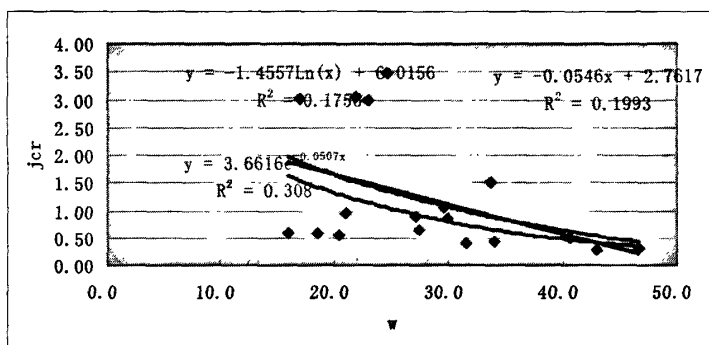


图 5-11 (b) J_{cr} 与 w 回归曲线分析

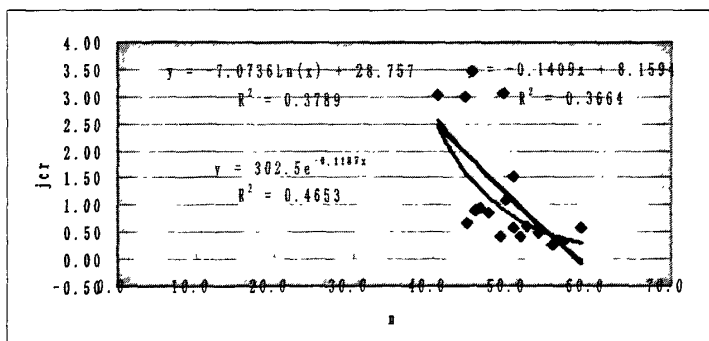


图 5-11 (c) J_{cr} 与 n 回归曲线分析

第六章 渗透变形的条件、评价及防治

作者认为,对于建筑物地基而言,渗透变形是绝对的,而渗透破坏则是相对的,是相对于建筑物地基土(岩)体允许水力坡降而言的。只有在搞清地基渗流边界条件,并在渗透稳定计算的基础上,才能作出确切、合理的评价,这也是对地基土(岩)体是否采取工程措施,以及采取何种措施的依据。

6.1 渗透变形产生的条件

土体的渗透稳定性决定于渗透水流对土体的作用力与土体的抵抗力这一对矛盾的发展变化过程。渗流对土体的作用力,其大小决定于地下水的水力坡降或渗透流速,它是引起渗透变形的动力。土体对渗透水流的抵抗能力叫抗渗强度,其大小决定于土的颗粒组成、排列方式、固结程度、胶结状况、物理力学性质及透水性等。

6.1.1 水动力条件

对于水库大坝或河道堤防工程,库水或河水将入渗坝基或堤基土体而向坝下游或堤防工程内渗透,在一定条件下,库水或河水将由坝下游或堤基内渗出,由于库水位高低或河水位高低不同,形成坝基或堤基所承受的水头不同,导致基本水动力条件各异,但这是评价地基土(岩)体抗渗强度的重要条件。

6.1.2 土的颗粒成分和结构特征

(1) 粗细颗粒粒径比,能在粗颗粒骨架之间孔隙中通过的细颗粒,其粒径必须小于孔隙直径。

(2) 细粒含量。只有较多的粗大颗粒构成骨架,才能形成较大的孔隙,易于产生潜蚀。但是,当细粒含量较多时(如达到 20%~30%),致使粗颗粒间不能相互接触,不能由它构成骨架,孔隙大小决定于细颗粒,发生渗透变形所需要的水力坡降随细粒含量的增加而增大。

粘粒含量增多,孔隙率虽没有太大的变化,但由于颗粒变细,土粒间充满结合水,或有少量毛细管水,结合水和毛细管水具有一定的抗剪强度,使水在土体中渗透阻力更大,因而增加了土体的抗渗能力。据云南某水库的试验,土中粘粒含量<4%时,其含量变化对允许坡降影响不明显;超过 4%后,允

许坡降剧增，达 6% 时，允许水力坡降为 1.0^{〔12〕}。

经过压密固结的土体不仅孔隙率低，土体内孔隙直径变小，因而土粒间的弱结合水接触面减小，而强结合水的接触面相对增大，粒间的结合力增强，所以其允许坡降显著高于颗粒成分相近但并未经压密固结的土体。

6.1.3 地层结构

多层结构的松散层发生渗透变形的可能性决定于透水层与相对不透水层上下组合关系、相对厚度及其沿渗流方向的变化、透水层性质及其连通情况等。相邻土层渗透系数差异大，易产生渗透变形。

实践说明，土坝渗流失事多发生于地下冲刷即潜蚀而形成的管涌洞，而非流土造成。这显然与天然土层不均匀性有关。特别是当地层中夹有粗粒透镜体，或地基与基础间接触不良或有裂缝时，使渗流水集中形成内部冲刷通道，导致管涌而造成失事。因此，工程设计中必须有详细的地质勘察资料，从而发现可能引起管涌与流土破坏的重要土层，如砂砾石、碎石等夹层，以便采用合理的渗流控制工程措施。

6.1.4 渗流出口地形条件

由于渗流出口附近的土体在渗流的作用下能导致冲刷、发生管涌或流土的渗透破坏，因此，研究渗出口附近的渗透或出溢坡降对建筑物的安全有很大意义。

渗流出口处无适当保护或出口处直接临空，易于土的松动和悬浮。如果在渗流出口处增设粒径合适的粗粒透水性保护层（即反滤层或体，其渗透系数一般要比被保土体的渗透系数大 100 倍），就可防止渗透破坏现象的发生。

6.2 渗透稳定性评价

渗透稳定性评价是研究地基土体渗透特性的目的。它是在对地基土体渗透特性研究、预测渗透型式的基础上，结合建筑物地基特性、建筑物规模和重要性，确定一个安全系数，依据临界水力坡降，给出允许水力坡降，作为评价地基土体渗透稳定性的标准。这样就不仅仅把渗透变形看作一种工程地质现象，而是与建筑物联系起来，从建筑物的稳定性出发，就是一个工程建筑物的环境地质问题了。

对建筑物稳定性影响最大的是下游坡脚处的渗透破坏，而这里恰恰是渗

透水流溢出的地段，所以地基稳定性就决定于该处土（岩）体在允许水力坡降作用下的渗透稳定性。所以，在工程实践中，要以该地段为重点，对地基土（岩）体渗透稳定性进行预测。

渗透稳定性的判别应包括下列内容：

- (1) 土的渗透变形类型的判别；
- (2) 临界水力坡降的确定；
- (3) 允许水力坡降的确定；
- (4) 渗透稳定性的判定。

6.2.1 渗透变形的类型的判别

(1) 流土和管涌应根据土的细粒含量，采用下列方法判别：

① 流土： $P_c \geq 1/4 (1-n) \times 100$

② 管涌： $P_c < 1/4 (1-n) \times 100$

式中： P_c 代表土的细粒颗粒含量，以质量百分率计（%）；

n 代表土的孔隙率；

其中土的细粒含量可按下列方法确定：

对于不连续级配的土，级配曲线中至少有一个以上的粒径级的颗粒含量小于或等于 3% 的平缓段，粗细粒的区分粒径 d 以平缓段粒径级的最大和最小粒径的平均粒径区分，或以最小粒径为区分粒径，相应于此粒径的含量为细粒含量。

对于连续级配的土，区分粗粒和细粒粒径的界限粒径 d_f 按下式计算：

$$d_f = (d_{70}d_{10})^{1/2}$$

式中： d_f 代表粗细粒的区分粒径（mm）；

d_{70} 代表小于该粒径的含量占总土重 70% 的颗粒粒径（mm）；

d_{10} 代表小于该粒径的含量占总土重 10% 的颗粒粒径（mm）⁽⁷⁾；

(2) 对于不均匀系数大于 5 的不连续级配土可采用下列方法判别：

① 流土：

$$P_c \geq 35\%$$

② 过渡型取决于土的密度、粒级、形状：

$$25\% \leq P_c < 35\%$$

③ 管涌：

$$P_c < 25\%$$

(3) 接触冲刷宜采用下列方法判别：

对双层结构的地基，当两层土的不均匀系数均等于或小于 10，且符合下式规定的条件时，不会发生接触冲刷。

$$D_{10} / d_{10} \leq 10$$

式中： D_{10} 、 d_{10} 分别代表较粗和较细一层土的颗粒粒径（mm），小于该粒径的土重占总土重的 10%。

（4）接触流失宜采用下列方法判别：

对于渗流向上的情况，符合下列条件将不会发生接触流失。

① 不均匀系数等于或小于 5 的土层：

$$D_{15} / d_{85} \leq 5$$

式中： D_{15} 代表较粗一层土的颗粒粒径（mm），小于该粒径的土重占总土重的 15%； d_{85} 代表较细一层土的颗粒粒径（mm），小于该粒径的土重占总土重的 85%。

② 不均匀系数等于或小于 10 的土层：

$$D_{20} / d_{70} \leq 7$$

式中： D_{20} 代表较粗一层土的颗粒粒径（mm），小于该粒径的土重占总土重的 20%； d_{70} 代表较细一层土的颗粒粒径（mm），小于该粒径的土重占总土重的 70%。

6.2.2 临界水力坡降的确定

临界水力坡降的确定方法已在第三章论述，至于采取何种方法，应视工程的重要性确定，对于重要的水利工程，应进行专门的现场渗透变形试验。

6.2.3 允许水力坡降的确定

安全系数与工程等级、地质条件复杂程度及地层渗透性等密切相关。有的工程在综合考虑了地质及水文地质条件后，把安全系数确定为 1.5~2.0。对于危险层，例如集中渗漏带内的砾卵砾石层，变形形式为管涌，临界坡降小，则采用安全系数为 2.0，对于比较安全的地层则采用 1.5，但也有些工程则采用安全系数为 2.0~3.0，国内外采用过的管涌最小允许坡降为 0.1^{〔1〕}。

作者认为，根据海河流域平原区地形、地层岩性、水文地质条件，应针对不同建筑物类型、规模、运行工况等特点确定安全系数。如堤防工程或小型围堤水库，由于形成的水头低，来水量小，行洪历时短，形成稳定渗流的频率偏低，可考虑采用较小的安全系数，如 1.5；而对于大中型水库，由于形成的水头较高，形成稳定渗流的频率较高，且延时较长，可考虑采用较大的安全系数，如 2.0。

6.2.4 渗透稳定性的判定

以水在地基土体中渗流路径实际计算的水力坡降与允许水力坡降相比较,如果依渗流路径实际计算的水力坡降小于允许水力坡降则是安全的;反之,则是不安全的,必要时就要采取防渗或排水,或同时采用两种工程措施。

6.3 渗透破坏的防治措施

为防止建筑物地基渗透破坏发生而采取渗流控制措施时,需综合考虑工程特点和工程区地形地貌、地层岩性及水文地质条件等因素。

因自然及人类活动等原因,海河流域平原区坑、塘、洼地及冲沟较多,应根据地基土层结构及渗透性、临界坡降等特点,采取针对性措施,并应注意对其它方面的影响。

6.3.1 防渗及排水

当预测有发生地基渗透破坏可能时,为了保证地基稳定,应采取防治工程措施。其工程措施一般有两个:一是防渗,二是排水。

6.3.1.1 防渗

即对地基土体内采取截渗和延长渗径等办法以切断渗流或减少渗流量及延长渗径,降低上、下游水力坡降。这是常用的方法,应根据具体的工程特点及地基条件综合分析确定。

对于一般厚度的松散堆积物组成的地基(或坝基),若地基土体渗透性强,可能发生渗透破坏,则可采取“硬措施”,如塑性混凝土防渗墙、灌浆帷幕。如漳河上某大型水库,坝基为第四系砂(卵)砾石,呈中等至强透水性,采取了灌浆帷幕和塑性混凝土防渗墙防渗工程措施。

当覆盖层较薄或在坝基下不深处夹有具有一定厚度、延伸较广且较为完整的粘性土层时,可采用截渗土墙。

对于水头较小的堤防或小型挡水工程等,可采取“软措施”,如回填、加土工膜、铺盖等。如在坑塘低洼区,对地基内透水性较强的土层严加保护(施工期及运行期),避免其出露地表,可采取坑塘回填、夯实,范围较大时,应碾压,亦可采取加铺盖等措施;

对于深厚的强透水地基,则应“硬、软”措施结合,应根据工程区具体的地层分布、地层结构、水文地质条件及工程目的、建筑物特点,并在渗透

稳定计算的基础上确定。

6.3.1.2 排水

我国建筑在透水坝基上的土坝较多,实践证明,当采用水平铺盖防渗时,下游必须作相应的排水减压工程(排水沟、减压井)。这是因为铺盖虽然增长了渗径,减小了渗透水力坡降,但渗漏量和溢出地段所承受的水力坡降往往还是较大,须在下游设置排水减压措施,降低溢出地段的动水压力,避免渗透破坏现象的发生。

下游排水减压措施,应根据地质情况选择不同的方式。如坝基为单一透水地层,下游透水条件较好,可以做反滤排水沟。对于双层结构的坝基,即在透水层上覆盖有粘性土层但其厚度不大时,可挖排水沟,将土层挖穿,使排水沟与透水层连通,将压力水排出。排水沟的位置,在不影响下游坝坡稳定性的条件下,宜接近下游坡脚,以便更有效地降低浸润线和压力水头,而且可以有效地防止坝脚与排水沟之间的土层因渗透变形而被顶穿。如果上层土层的透水性小,但厚度较大,排水沟难于切穿,则可采用排水沟结合减压井的综合措施⁽¹⁴⁾。

在此作者要特别提醒的是,在水利工程建设实践中,对土(岩)坝基防渗,大多不是单一工程措施,因为坝基土(岩)体透水性不均一,单一工程措施不一定达到理想的设计效果,所以往往采取坝前防渗、坝后排水的综合工程措施(即通常所言“上堵下排”措施)。

6.3.2 注意对环境的影响

海河流域平原区多属半干旱、半湿润地区,除以供水为主要目的水利工程以外,一般的水工建筑物应以保障建筑物地基不发生渗透破坏为基本前提,采取适当的截渗工程措施,坝下允许有适当的渗漏,不使坝下游河道干枯,以缓解和减弱对下游用水及生态环境的影响。如天津市某蓄水工程,坝基岩体几近滴水不漏,坝上泄水建筑物关闭后,十几公里的河道干枯,河道中的水井亦即没水,故使泄水建筑物长期开启,以供坝下游用水,以保持友好的生态环境。

6.3.3 注意对周围水文地质环境的影响

在考虑渗透破坏防治措施时,不能仅考虑工程本身的功能、效益,还应考虑对周围水文地质环境的影响,否则,会带来不良的后果。如研究区内某堤防工程进行防渗截渗措施,是为防止河水外渗影响背水坡外居民和环境安

全。但是，防渗设计没有考虑河水和背水坡外地下水的关系，采用了深入河床以下的混凝土防渗墙，这样一来，切断了河水外渗的通道，对河水而言，起到了防渗的作用。而河堤背水坡外，地势相对低洼，在一定区域范围内，成为地下水的汇集区，使地下水位不断雍高，即使在河水位较低时，地下水亦不能向河床排泄，破坏了原河水和地下水的互补关系——河水位高时，河水补给地下水；当河水位低于地下水位时，地下水补给河水。使背水坡外水文地质环境恶化，连厂房内都成了湿地。如果堤防工程防渗设计，能同时考虑背水坡外地下水排泄，这种破坏现象产生的可能性就很小了。

此外，工程建成后，还需进行原型观测，以了解渗流控制措施的可靠性，并监测环境地质的变化，为工程维护和有效管理提供信息。

第七章 结论及建议

1、海河流域平原区堆积巨厚的第四系及第三系松散堆积物，成因类型复杂，主要由粉质壤土、粉质粘土、粉质砂壤土、粉细砂及少量砂砾石等组成。基于该区建筑物地基土体结构、物质组成及水理性质特征，地基渗透变形是该区主要的工程环境地质问题之一，对其产生的地质条件及稳定性评价进行研究，以便为工程处理措施提供可靠的依据。工程实践表明，目前普遍采用的太沙基公式计算的临界水力坡降值与试验成果值之间差别明显，为合理地评价地基土体的渗透稳定性，对其重点分析、研究是必要的。

2、研究表明，影响水力坡降的地质因素很多，主要包括成土时代、土体成因类型、土体颗粒组成及土体结构和微结构等，影响最显著的还是土体结构和微结构的差异性这一地质因素。

3、对大量室内渗透变形试验成果采用数值分析方法，得出了不同成土时代、不同土体类别的临界水力坡降计算公式，如：

第四系全新统（ Q_4 ）粘土

$$(1) J_{cr} = -0.72785 \ln(w) + 1.58165r + 1.5934$$

$$(2) J_{cr} = -0.1551n + 8.8089$$

第四系全新统（ Q_4 ）粉质砂壤土

$$(1) J_{cr} = 0.00115r + 0.24515w + 0.28325$$

$$(2) J_{cr} = -0.0341n + 2.2889$$

第四系全新统（ Q_4 ）粉质粘土

$$(1) J_{cr} = -0.07015 \ln(w) + 0.8682r - 0.13815$$

$$(2) J_{cr} = -0.0625n + 4.1583$$

第四系全新统（ Q_4 ）粉质壤土

$$(1) J_{cr} = 0.12565 \exp(0.7174r) + 0.37975 \exp(0.0064w)$$

$$(2) J_{cr} = -0.034n + 2.6147$$

上第三系（ N_2 ）粉质壤土

$$(1) J_{cr} = -10.4191 \ln(n) + 44.498$$

$$(2) J_{cr} = 13.4411 \ln(r) + 2.3763 \exp(-0.0025w)$$

上第三系（ N_2 ）粘土-粉质粘土

$$(1) J_{cr} = 1.0137 \exp(0.2438r) + 0.24745w - 2.7663$$

$$(2) J_{cr} = 0.5911 \ln(n) + 2.0855$$

第四系全新统 (Q₄) 冲积海积粉质壤土

$$(1) J_{cr} = 0.18085 \exp(0.4649r) + 0.3713 \exp(0.0047w)$$

$$(2) J_{cr} = -0.9238 \ln(n) + 4.5498$$

$$(3) J_{cr} = -0.4619 \ln(n) + 2.28365G - 3.4351$$

第四系全新统 (Q₄) 冲积海积粉质砂壤土

$$(1) J_{cr} = 0.2108 \ln(r) + 0.4071 \ln(w) + 0.3865$$

$$(2) J_{cr} = 0.9269 \exp(-0.0093n)$$

第四系全新统 (Q₄) 冲积海积相粉质粘土

$$(1) J_{cr} = 1.45535 \ln(r) - 0.07015 \ln(w) + 0.57095$$

$$(2) J_{cr} = -0.0835n + 5.128$$

第四系全新统 (Q₄) 冲积海积粘土

$$(1) J_{cr} = 2.4561 \ln(r) - 0.72785 \ln(w) + 2.20695$$

$$(2) J_{cr} = -0.1409n + 8.1594$$

这对今后工程建设具有极大的实用价值。

4、文中提出的临界水力坡降的计算公式，主要是在室内渗透变形试验成果的基础上得出的，今后应结合海河流域平原区工程建设及科学研究，进行适量的现场试验，以便对比分析、修正。

5、研究区细粒土分布广泛，与工程实践关系密切，应结合粘性土结合水动力特性的深入研究，进一步探讨土体结构对临界水力坡降的影响。

参考文献

- (1) 能源部水利部水利水电规划设计总院组编, 水利水电工程勘测设计专业综述(勘测)(M), 成都: 电子科技大学出版社, 1993
- (2) 牛运光, 病险水库加固实例(M), 北京: 中国水利电力出版社, 2002
- (3) 张景秀, 坝基防渗与灌浆技术(第二版)(M), 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- (4) 杨光煦, 堤坝及其施工关键技术研究与实践(M), 北京: 中国水利电力出版社, 2000
- (5) 白永年, 孙晓范, 白杰, 土坝渗透破坏的原因及治理技术(J), 水利水电技术, 2002
- (6) 杨计申、李彦坡等, 海河流域平原区堤防工程土体质量及堤基工程地质研究(M), 郑州: 黄河水利出版社, 2004
- (7) 国家质量技术监督局/中华人民共和国建设部, 水利水电工程地质勘察规范(GB50287-99)(M), 中华人民共和国国家标准, 北京: 中国水利出版社, 1999
- (8) 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国行业标准, 土工试验规程(SL237-1999)(M), 北京: 中国水利水电出版社, 1999
- (9) 牛桂林, 瀑河水库坝基渗流稳定分析及处理措施(J), 水科学与工程技术, 2005
- (10) 钱家欢、殷宗泽, 土工原理与计算(第二版)(M), 北京: 中国水利水电出版社, 1996
- (11) 祁庆和, 水工建筑物(第三版)(M), 北京: 中国水利水电出版社, 1997
- (12) 陆兆溱, 工程地质学(第二版)(M), 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- (13) 陈德基主编, 中国水利百科全书(水利工程勘测分册)(M), 北京: 中国水利水电出版社, 2004
- (14) 张咸恭, 工程地质学(M), 北京: 地质出版社, 1983
- (15) 王良, 朱建明, 青山水库坝基渗流问题分析(J), 浙江水利科技, 2005
- (16) 石金良, 刘麟德, 徐福林, 砂砾石地基工程地质(M), 北京: 水利电力出

- 版社, 1991
- (17) 李广诚, 司富安, 白晓民等, 中国堤防工程地质 (M), 北京: 中国水利水电出版社, 2005
- (18) 朱长军, 刘学伟, 地下水的非达西渗流规律研究 (J), 河北建筑科技学院学报, 2004
- (19) 王大纯, 张人权, 史毅虹, 水文地质学基础 (M), 北京: 地质出版社, 1995
- (20) 曹剑锋、迟宝明、王文科等, 专门水文地质学 (第三版) (M), 北京: 科学出版社, 2006
- (21) 张忠胤, 关于结合水动力学问题 (M), 北京: 地质出版社, 1980
- (22) 李庆扬, 数值分析基础教程 (M), 北京: 高等教育出版社, 2001
- (23) 刘汉东, 姜彤, 黄志全等, 岩体力学参数优选理论及应用 (M), 郑州: 黄河水利出版社, 2006
- (24) 曹文柄, 万力, 龚斌等, 水位变化条件下粘性土渗流特征试验研究 (J), 地学前缘, 2005
- (25) 杜恒俭, 陈华慧, 曹伯勋, 地貌学及第四纪地质学 (M), 北京: 地质出版社, 1995
- (26) 林昭, 碾压式土石坝设计 (M), 郑州: 黄河水利出版社, 2003
- (27) 张志恒, 对国标 (GB50287-99) 中临界水力比降计算公式的探讨 (J), 水利技术监督, 2005
- (28) 韩军, 黄小宁, 新疆下坂地水利枢纽工程坝基深厚覆盖层防渗措施试验研究 (J), 水利水电技术, 2005
- (29) P. B. Attewell and I. W. Farmer, Principles of Engineering Geology (M), Halsted Press Book, U. S. A., 1976
- (30) Santosh Kumar Garg, Irrigation Engineering and Hydraulic Structures (M), Khanna Publishers, Delhi, 2002

论文论著发表和科研情况说明

发表的论文、著作：

- (1) 张志恒, “茅草坝水库河谷深岩溶发育浅析”, 《水利水电工程设计》, 2004 年 8 月
- (2) 张志恒, “巴基斯坦高摩赞大坝枢纽悬河的成因初探”, 《天津城市建设学院学报》, 2004 年 12 月
- (3) 张志恒, “巴基斯坦某大坝枢纽工程坝基岩体工程地质分类及可利用岩体选择”, 《水利水电工程设计》, 2005 年 8 月
- (4) 张志恒, “对国标 (GB50287-99) 中临界水力比降计算公式的探讨”, 《水利技术监督》, 2005 年 11 月
- (5) 张志恒, “南非 Katse 水电工程地质问题及处理措施”, 《水利规划与设计》, 2006 年 3 月
- (6) 张志恒, “浅谈深埋长隧洞勘察”(岩土工程勘察论文集), 黄河水利出版社, 2007 年 10 月
- (7) 张志恒, 合著《海河流域平原区堤防工程地质研究》, 黄河水利出版社, 2004 年 12 月。

参加的科研项目：

- (1) 海河流域平原区堤防工程堤身土体质量及堤基工程地质研究, 获 2003 年度全国优秀工程咨询成果三等奖、天津市优秀工程咨询成果一等奖。
- (2) 川东岩溶区岩溶发育规律研究, 2003 年 - 至今。

致 谢

本论文是在冯耀龙副教授、杨计申教授级高工两位导师的激励、鞭策和精心指导下完成的。

感谢我的导师，他们那敏锐的观察力、深邃的洞察力、独特的思维方式、渊博的知识、丰富的工程经验；对待科学实事求是、勇于实践、敢于创新的态度；严谨的工作作风、顽强进取、勤奋好学的精神将使我终身受益；在和他们的交往中，情系师生（徒），相处为友；在实际工程问题的调查研究中，在工作或业余时间对问题的探讨中，他们言传身教，启发引导；使我深深体会到，无论做自然科学研究，还是从事工程实践，要想解决实际问题，都必须准确地理解基本概念、掌握基本方法，扎扎实实地做好基础工作。平时应坚持学习，工作中应目标明确、勤于思考、勤于实践、开拓思路、勇于创新、努力进取，才能有所收获。

感谢中水北方勘测设计研究有限责任公司为我提供了深造的机会和良好的学习环境，使我通过几年的学习，在本专业及相关专业知识和技能方面有所拓宽、加强，并为今后的工作和学习打下了良好的基础。

感谢天津大学研究生院、建筑工程学院的各位老师，在攻读工程硕士学位期间给予我的精心指导和大力帮助。

感谢在攻读工程硕士学位期间和平时工作中给予我大力支持和真诚帮助的各位师长、同事。