

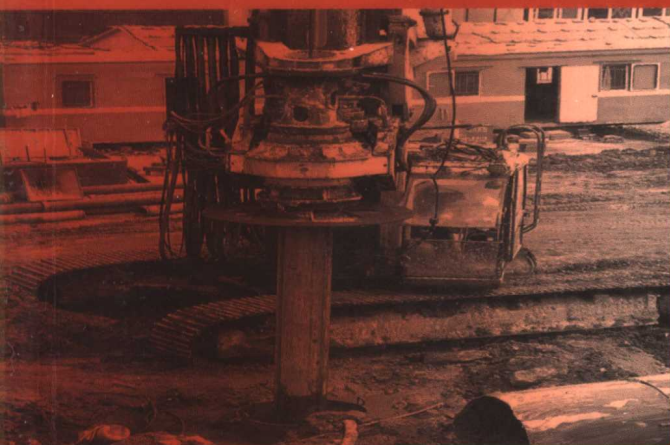
土木工程辅导丛书

土力学

复习与习题

袁聚云 汤永净 编著

同济大学出版社



土力学复习与习题

袁聚云 汤永净 编著



同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土力学复习与习题/袁聚云,汤永净编著. —上海:

同济大学出版社, 2004. 1

(土木工程辅导丛书)

ISBN 7-5608-2740-3

I. 土… II. ①袁… ②汤… III. 土力学—高等学校—教学参考资料 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 095721 号

土力学复习与习题

袁聚云 汤永净 编著

责任编辑 周竞欧 责任校对 徐 栩 封面设计 晓 陆

出 版 行	同济大学出版社
	(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)
经 销	全国各地新华书店
印 刷	江苏大丰印刷二厂印刷
开 本	787mm×960mm 1/16
印 张	14.25
字 数	285000
印 数	1—3500
版 次	2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5608-2740-3/TU·524
定 价	19.80 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换

前 言

土力学是将土作为建筑物的地基、材料或介质来研究的一门学科,主要研究土的工程性质以及土在荷载作用下的应力、变形和强度的问题。它把土作为物理-力学系统,根据土的应力-应变-时间关系提出力学计算模型,用数学力学方法求解土在各种条件下的应力分布、变形以及土压力、地基承载力与土坡稳定等课题,为设计与施工提供土的工程性质指标、评价方法及土的工程问题的分析计算原理,是土木工程专业的技术基础课。

本书是为了配合土木工程专业的土力学学习需要而编写的,同时也是为了满足各类从事土木工程人员掌握及运用土力学知识的需要,通过对土力学知识要点的复习以及大量习题的练习,以期读者能在较短的时间内掌握土力学知识以及提高运用土力学的能力。

本书分三部分。第一部分为复习要点,主要对土力学知识进行归纳和提炼,包括土的物理性质及工程分类、土中水的运动规律、土中应力计算、土的压缩性与沉降计算、土的抗剪强度、土压力计算、土坡稳定分析、地基承载力等土力学基本知识,便于读者复习和提高;第二部分为习题,针对第一部分复习要点,作者收集并编写了大量的选择题、判断题及计算题,以利于读者举一反三,巩固所学的土力学知识;第三部分为习题的参考解答及答案。

本书由袁聚云和汤永净编著,其中部分习题选自同济大学胡中雄教授等老师的供稿,本书同时还引用了许多教材及习题集中的习题及解答,并尽可能地在文献目录中列出。同济大学的研究生王丽平、张劲峰、庞贵磊和本科生闵之光等,为本书部分习题的解答以及文字和插图的输入做了大量的工作,在此一并表示深深的感谢。

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见和建议。

编 者

2003年11月

目 录

前 言

第一部分 复习要点	(1)
第一章 土的物理性质及工程分类	(3)
第一节 土的颗粒特征	(3)
第二节 土的三相比例指标	(3)
第三节 粘性土的界限含水率	(6)
第四节 砂土的密实度	(7)
第五节 土的工程分类	(7)
第二章 土中水的运动规律	(9)
第一节 土的毛细性	(9)
第二节 土的渗透性	(9)
第三节 流网及其应用	(11)
第四节 土在冻结过程中水分的迁移和积聚	(13)
第三章 土中应力计算	(15)
第一节 土中自重应力计算	(15)
第二节 基础底面的压力分布与计算	(15)
第三节 竖向集中力作用下土中应力计算	(16)
第四节 竖向分布荷载作用下土中应力计算	(17)
第五节 有效应力原理	(20)
第四章 土的压缩性与地基沉降计算	(22)
第一节 土的压缩性试验及指标	(22)
第二节 地基沉降计算方法	(24)
第三节 饱和粘性土地基沉降与时间的关系	(29)
第五章 土的抗剪强度	(36)
第一节 土的强度理论与强度指标	(36)
第二节 土的抗剪强度指标的试验方法及其应用	(37)
第三节 土的天然强度及其在荷载作用下的强度增长	(40)
第六章 土压力计算	(41)
第一节 静止土压力计算	(41)

第二节	朗金土压力理论	(42)
第三节	库仑土压力理论	(46)
第四节	几种特殊情况下的库仑土压力计算	(48)
第七章	土坡稳定分析	(49)
第一节	砂性土的土坡稳定分析	(49)
第二节	粘性土的土坡稳定分析	(49)
第三节	几种特殊情况下的土坡稳定分析	(55)
第八章	地基承载力	(57)
第一节	临界荷载的确定	(58)
第二节	极限承载力计算	(59)
第三节	地基容许承载力的修正	(61)
第二部分	习题	(63)
第一章	土的物理性质及工程分类	(65)
第二章	土中水的运动规律	(74)
第三章	土中应力计算	(78)
第四章	土的压缩性与地基基础沉降计算	(85)
第五章	土的抗剪强度	(96)
第六章	土压力计算	(106)
第七章	土坡稳定分析	(114)
第八章	地基承载力	(122)
第三部分	习题参考解答	(129)
主要参考文献		(220)

第一部分

复习要点

第一章 土的物理性质及工程分类

土是由固体颗粒(固相)、水(液相)和气体(气相)三部分组成的,称为土的三相组成。随着三相物质的质量和体积的比例不同,土的性质也随之发生变化。

土的固相包括无机矿物颗粒和有机质,是构成土的骨架最基本的物质。

土的液相是指存在于土孔隙中的水。

土的气相是指充填在土孔隙中的气体。

第一节 土的颗粒特征

天然土是由大小不同的颗粒组成的,土粒的大小称为粒度。

土的粒度成分是指土中各种不同粒组的相对含量(以干土质量的百分比表示),它可用以描述土中不同粒径土粒的分布特征。

常用的粒度成分的表示方法有表格法、累计曲线法和三角坐标法。

(1) 表格法 是以列表形式直接表达各粒组的相对含量。表格法有两种表示方法,一种是以累计含量百分比表示的,另一种是以粒组表示的。

(2) 累计曲线法 是一种图示的方法,通常用半对数纸绘制,横坐标(按对数比例尺)表示某一粒径,纵坐标表示小于某一粒径的土粒的百分含量。

在累计曲线上,可确定两个描述土的级配的指标:

不均匀系数

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

曲率系数

$$C_s = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (1-2)$$

式中, d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别相当于累计百分含量为10%、30%和60%的粒径, d_{10} 称为有效粒径, d_{60} 称为限制粒径。

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况,曲率系数则是描述累计曲线整体形状的指标。

(3) 三角坐标法 也是一种图示法,它是利用等边三角形内任意一点至三个边的垂直距离的总和恒等于三角形之高的原理,表示组成土的三个粒组的相对含量。

第二节 土的三相比例指标

土的三相物质在体积和质量上的比例关系称为三相比例指标。三相比例指标反

映了土的干燥与潮湿、疏松与紧密,是评价土的工程性质的最基本的物理性质指标,也是工程地质勘察报告中不可缺少的基本内容。

把在土体中实际上是处于分散状态的三相物质理想化地分别集中在一起,构成如图 1-1 所示的三相图。土的体积 V 为土中空气的体积 V_a 、水的体积 V_w 和土粒的体积 V_s 之和;土的质量 m 为土中空气的质量 m_a 、水的质量 m_w 和土粒的质量 m_s 之和;通常认为空气的质量可以忽略,则土的质量就仅为水和土粒质量之和。

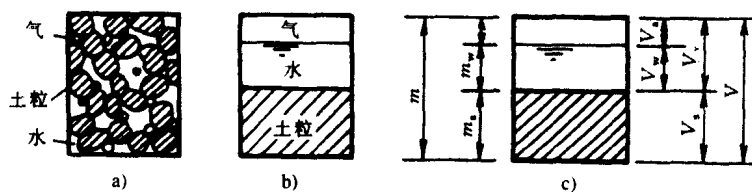


图 1-1 土的三相图

a) 实际土体; b) 土的三相图; c) 各相的质量与体积

土的三相比例指标可分为两类:一类是试验指标,另一类是换算指标。

(一) 试验指标

通过试验测定的指标称为试验指标,包括土的密度、土粒比重和含水率。

1. 土的密度 ρ

土的密度是指单位体积土的质量,单位为 g/cm^3 ,若土的体积为 V ,质量为 m ,则土的密度 ρ 可由式(1-3)表示:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3)$$

由土的质量产生的单位体积的重力称为土的重力密度 γ ,简称为重度,其单位为 kN/m^3 ,由式(1-4)表示:

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

对天然土求得的密度称为天然密度或湿密度,相应的重度称为天然重度或湿重度。

2. 土粒比重 G_s

土粒比重是指土粒质量 m_s 与同体积 4°C 时纯水的质量之比,由式(1-5)表示:

$$G_s = \frac{m_s}{V_s \rho_{w1}} = \frac{\rho_s}{\rho_{w1}} \quad (1-5)$$

式中, ρ_{w1} 为纯水在 4°C 时的密度 ($=1\text{g}/\text{cm}^3$), ρ_s 为土粒密度。

3. 土的含水率 w

土的含水率是指土中水的质量 m_w 与土粒质量 m_s 之比,由式(1-6)表示:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1-6)$$

(二) 换算指标

通过计算求得的指标称为换算指标,包括土的干密度、饱和密度、有效密度、孔隙比、孔隙率和饱和度。

1. 土的干密度 ρ_d 、饱和密度 ρ_{sat} 和有效密度 ρ'

干密度是土的颗粒质量 m_s 与土的总体积 V 之比,单位为 g/cm^3 ,由式(1-7)表示:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1-7)$$

土的饱和密度是当土的孔隙中全部为水所充满时的密度,即全部充满孔隙的水的质量 m_w 与颗粒质量 m_s 之和与土的总体积 V 之比,单位为 g/cm^3 ,由式(1-8)表示:

$$\rho_{sat} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (1-8)$$

式中, V_v 为土的孔隙体积, ρ_w 为水的密度 ($\approx 1\text{g}/\text{cm}^3$)。

单位土体积中土粒的质量扣除同体积水的质量后,即为单位土体积中土粒的有效质量,称为土的有效密度(又称浮密度),单位为 g/cm^3 ,由式(1-9)表示:

$$\rho' = \frac{m_s - V_v \rho_w}{V} \quad (1-9)$$

当用干密度、饱和密度和有效密度乘以重力加速度 g ,则分别为干重度 γ_d 、饱和重度 γ_{sat} 和有效重度 γ' ,单位为 kN/m^3 ,由式(1-10)~式(1-12)表示:

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (1-10)$$

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} g \quad (1-11)$$

$$\gamma' = \rho' g \quad (1-12)$$

2. 土的孔隙比 e 和孔隙率 n

土的孔隙比是土中孔隙的体积 V_v 与土粒体积 V_s 之比,以小数计,由式(1-13)表示:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-13)$$

土的孔隙率是土中孔隙的体积 V_v 与土的总体积 V 之比,以百分数计,由式(1-14)表示:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-14)$$

3. 土的饱和度 S_r

土的饱和度是指土中孔隙中水的体积 V_w 与孔隙体积 V_v 之比,以百分数计,由式(1-15)表示:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-15)$$

(三) 三相比例指标的互相换算

土的三相比例指标之间可以互相换算,根据土的密度、土粒比重和含水率三个试

验指标,可以用换算求得全部计算指标,也可以用某几个指标换算其他的指标,土的三相比例指标的换算关系见表 1-1。

表 1-1 土的三相比例指标换算关系

换算指标	用试验指标计算的公式	用其他指标计算的公式
孔隙比 e	$e = \frac{G_s(1+w)\rho_w}{\rho} - 1$	$e = \frac{G_s\rho_w}{\rho_d} - 1$ $e = \frac{wG_s}{S_r}$
饱和密度 ρ_{sat}	$\rho_{sat} = \frac{\rho(G_s - 1)}{G_s(1+w)} + \rho_w$	$\rho_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \rho_w$ $\rho_{sat} = \rho' + \rho_w$
饱和度 S_r	$S_r = \frac{\rho G_s w}{G_s(1+w)\rho_w - \rho}$	$S_r = \frac{wG_s}{e}$
干密度 ρ_d	$\rho_d = \frac{\rho}{1+w}$	$\rho_d = \frac{G_s}{1+e} \rho_w$
孔隙率 n	$n = 1 - \frac{\rho}{G_s(1+w)\rho_w}$	$n = \frac{e}{1+e}$
有效重度 ρ'	$\rho' = \frac{\rho(G_s - 1)}{G_s(1+w)}$	$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w$

第三节 粘性土的界限含水率

土体从一种状态变到另一种状态的分界点称为界限含水率,流动状态与可塑状态间的界限含水率称为液限 w_L ;可塑状态与半固体状态间的界限含水率称为塑限 w_p ;半固体状态与固体状态间的界限含水率称为缩限 w_s 。

液限 w_L 可用锥式液限仪或碟式液限仪测定,塑限 w_p 是用搓条法测定。

粘性土可塑性的大小可用土处在可塑状态的含水率变化范围来衡量,从液限到塑限含水率的变化范围愈大,土的可塑性愈好,这个范围称为塑性指数 I_p 。

$$I_p = w_L - w_p \quad (1-15)$$

塑性指数习惯上用不带%的数值表示。

液性指数可以用来表示反映粘性土所处的状态,由下式定义:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (1-16)$$

液性指数越大,表示土越软。可塑状态的土的液性指数在 0 到 1 之间,液性指数大于 1 的土处于流动状态,小于 0 的土则处于固体状态或半固体状态。

第四节 砂土的密实度

对砂土评价的主要问题是正确地划分其密实度,孔隙比、相对密度和标准贯入击数都可以描述砂土的密实程度。

(一) 相对密实度

土的孔隙比一般可以用来描述土的密实程度,但砂土的密实程度并不仅仅取决于孔隙比,而在很大程度上还取决于土的级配情况。

当砂土处于最密实状态时,其孔隙比称为最小孔隙比 $e_{\min}$;而砂土处于最疏松状态时,其孔隙比则称为最大孔隙比 $e_{\max}$ 。砂土的相对密实度 D_r 可按式计算:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1-17)$$

当砂土的天然孔隙比接近于最小孔隙比时,相对密实度 D_r 接近于 1,表明砂土接近于最密实状态;而当天然孔隙比接近于最大孔隙比时,则表明砂土处于最松散的状态,其相对密实度接近于 0。

根据砂土的相对密实度,可将砂土划分为密实、中密和松散三种状态。

(二) 标准贯入试验

在工程实践中通常用标准贯入击数来划分砂土的密实度。

标准贯入试验是用规定的锤重(63.5kg)和落距(76cm)把标准贯入器(带有刃口的对开管,外径 50mm,内径 35mm)打入土中,记录贯入一定深度(30cm)所需的锤击数 N 值的原位测试方法。标准贯入试验的贯入锤击数反映了土层的松密和软硬程度,是一种简便的测试手段。

根据标准贯入锤击数可将砂土划分为密实、中密、稍密和松散四种状态。

第五节 土的工程分类

(一) 碎石土分类

碎石土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量超过总质量 50% 的土,按粒径和颗粒形状可进一步划分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾和角砾。

碎石土的密实度一般用定性的方法由野外描述确定,卵石的密实度可按超重型动力触探的锤击数 N_{120} 划分。

(二) 砂土分类

砂土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量不超过总质量 50% 且粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过总质量的 50% 的土。砂土可再划分为 5 个亚类,即砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂。

(三) 细粒土分类

粒径大于 0.075mm 的颗粒含量不超过总质量 50% 的土属于细粒土,细粒土可划分为粉土和粘性土两大类。根据塑性指数,粘性土可再划分为粉质粘土和粘土两个亚类。

粉土是介于砂土和粘性土之间的过渡性土类,它具有砂土和粘性土的某些特征。根据粘粒含量可以将粉土再划分为砂质粉土和粘质粉土。

(四) 按塑性图分类

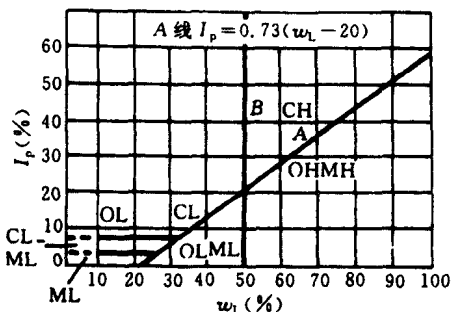


图 1-2 塑性图

塑性图以塑性指数为纵坐标,液限为横坐标,如图 1-2 所示。图中有两条经验界限,斜线称为 A 线,它的方程为 $I_p = 0.73(w_L - 20)$,它的作用是区分有机土和无机土、粘土和粉土,A 线上侧是无机粘土,下侧是无机粉土或有机土;竖线称为 B 线,其方程为 $w_L = 50$,其作用是区分高塑性土和低塑性土。

在 A 线以上的土分类为粘土,如果液限大于 50,称为高塑性粘土 CH,液限小于 50 的土称为低塑性粘土 CL;在 A 线以下的土分类为粉土,液限大于 50 的土称为高塑性粉土 MH,液限小于 50 的土称为低塑性粉土 ML。在低塑性区,如果土样处于 A 线以上,而塑性指数范围在 4 到 7 之间,则土的分类应给以相应的分类 CL—ML。

在应用塑性图分类的液限时,在欧美国家是采用碟式仪测定的,我国“土的工程分类标准”则采用锥式仪沉入深度 17mm 的标准,因此用塑性图分类的结果也可能不同。

第二章 土中水的运动规律

土中水的运动将对土的性质产生影响,在许多工程实践中碰到的问题,如流砂、冻胀、渗透固结、渗流时的边坡稳定等,都与土中水的运动有关。

第一节 土的毛细性

毛细性是指能够产生毛细现象的性质。

土的毛细现象是指土中水在表面张力作用下,沿着细的孔隙向上及向其他方向移动的现象,这种细微孔隙中的水被称为毛细水。

(一) 土层中的毛细水带

土层中由于毛细现象所湿润的范围称为毛细水带。

(二) 毛细水上升高度及上升速度

毛细水上升最大高度的计算公式为

$$h_{\max} = \frac{2\sigma}{r\gamma_w} = \frac{4\sigma}{d\gamma_w} \quad (2-1)$$

式中 σ ——水的表面张力(kN/m);

r ——毛细管的半径(m);

d ——毛细管的直径(m), $d=2r$;

γ_w ——水的重度(kN/m³)。

(三) 毛细压力

两个土粒(假想是球体)的接触面间有一些毛细水,由于土粒表面的湿润作用,使毛细水形成弯面,在水和空气的分界面上产生的表面张力沿着弯液面切线方向作用,它促使两个土粒互相靠拢,在土粒的接触面上就产生一个压力,称为毛细压力 P_k 。由毛细压力所产生的土粒间的粘结力称为假粘聚力。

第二节 土的渗透性

土孔隙中的自由水在重力作用下发生运动的现象,称为土的渗透性。

(一) 土的渗透定律

由于土的孔隙较小,在大多数情况下水在孔隙中的流速较小,可以认为是属于层流(即水流流线互相平行的流动),那么土中的渗流规律可以认为是符合层流渗透定律。这个定律是法国学者达西(H·Darcy)根据砂土的实验结果而得到的,也称达西定律,它是指水在土中的渗透速度与水头梯度成正比,即

$$v = kI \quad (2-2)$$

式中 v —— 渗透速度 (m/s);

I —— 水头梯度, 即沿着水流方向单位长度上的水头差;

k —— 渗透系数 (m/s)。

由于达西定律只适用于层流的情况, 故一般只适用于中砂、细砂、粉砂等, 对粗砂、砾石、卵石等粗颗粒土不适合; 而粘土中的渗流规律不完全符合达西定律, 需进行修正。

粘土中自由水的渗流受到结合水的粘滞作用会产生很大阻力, 只有克服结合水的抗剪强度后才能开始渗流。克服此抗剪强度所需要的水头梯度, 称为粘土的起始水头梯度 I_0 。在粘土中, 应按下述修正后的达西定律计算渗流速度:

$$v = k(I - I_0) \quad (2-3)$$

(二) 土的渗透系数

渗透系数 k 是综合反映土体渗透能力的一个指标, 渗透系数可在试验室或现场试验测定。

1. 室内试验测定法

试验室测定渗透系数 k 值的方法称为室内渗透试验, 根据所用试验装置的差异又可分为常水头试验和变水头试验。

2. 现场抽水试验

现场测定渗透系数的方法较多, 常用的有野外注水试验和野外抽水试验等。

3. 成层土的渗透系数

若土层有两层组成, 各层土的渗透系数为 k_1 、 k_2 , 厚度为 h_1 、 h_2 , 则土层水平向的平均渗透系数 k_h 为:

$$k_h = \frac{k_1 h_1 + k_2 h_2}{h_1 + h_2} = \frac{\sum k_i h_i}{\sum h_i} \quad (2-4)$$

土层竖向的平均渗透系数 k_v 为:

$$k_v = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2}} = \frac{\sum h_i}{\sum \frac{h_i}{k_i}} \quad (2-5)$$

(三) 影响土的渗透性的因素

影响土的渗透性的因素主要有以下几种:

1. 土的粒度成分及矿物成分;
2. 结合水膜的厚度;
3. 土的结构构造;
4. 水的粘滞度;
5. 土中气体。

目前, 常以水温为 20°C 时的渗透系数 k_{20} 作为标准值, 在其他温度测定的渗透系

数 k_t 可按式(2-6)换算到水温为 20°C 时的渗透系数 k_{20} :

$$k_{20} = k_t \frac{\eta_t}{\eta_{20}} \quad (2-6)$$

式中, η_t 和 η_{20} 分别为 $t^\circ\text{C}$ 时及 20°C 时水的动力粘滞系数($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)。

(四) 动水力及渗流破坏

水在土中渗流时,受到土颗粒的阻力 $T(\text{kN}/\text{m}^3)$ 的作用,这个力的作用方向是与水流方向相反的,而水流作用在单位体积土体中颗粒上的力称为动水力 $G_D(\text{kN}/\text{m}^3)$,也称为渗流力。 G_D 和 T 的大小相等,方向相反。

1. 动水力的计算可按公式(2-7)

$$G_D = T = \gamma_w I \quad (2-7)$$

2. 流砂现象、管涌和临界水头梯度

若水的渗流方向自下而上,已知土的有效重度为 γ' ,当向上的动水力 G_D 与土的有效重度相等时,即

$$G_D = \gamma_w I = \gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (2-8)$$

式中 γ_{sat} ——土的饱和重度;

γ_w ——水的重度。

这时土颗粒间的压力就等于零,土颗粒将处于悬浮状态而失去稳定,这种现象就称为流砂现象。这时的水头梯度称为临界水头梯度 I_{cr} ,可由式(2-9)得到:

$$I_{\text{cr}} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{\text{sat}}}{\gamma_w} - 1 \quad (2-9)$$

工程中将临界水头梯度 I_{cr} 除以安全系数 K 作为容许水头梯度 $[I]$ 。设计时渗流逸出处的水头梯度应满足如下要求:

$$I \leq [I] = \frac{I_{\text{cr}}}{K} \quad (2-10)$$

对流砂的安全性进行评价时, K 一般可取 $2.0 \sim 2.5$ 。

水在砂性土中渗流时,土中的一些细小颗粒在动水力的作用下,可能通过粗颗粒的孔隙被水流带走,这种现象称为管涌。

流砂现象是发生在土体表面渗流逸出处,不发生于土体内部;而管涌现象可以发生在渗流逸出处,也可以发生于土体内部。

第三节 流网及其应用

构筑物若是长度远大于其横向尺寸,可以近似地认为渗流仅发生在横断面内,或者说在长度方向上的任一个断面上,其渗流特性是相同的,这种渗流称为二维渗流或平面渗流。

(一) 平面渗流基本微分方程