

铁路工程设计技术手册

桥梁地基和基础

(修订版)

铁道部第三勘测设计院 主编

中国铁道出版社

1991年·北京

前 言

为了适应铁路建设的需要和配合《铁路桥涵设计规范》(TBJ 2—85)的使用,根据铁道部基建总局的指示,由我院负责,并由大桥工程局和第四勘测设计院参加,共同编写本设计手册。

本手册由胡人礼同志负责主编。各章编写分工如下:

第一章至第七章由胡人礼、符接翼同志编写;

第八章和第九章由丁饶、慎俊同志编写;

第十章由石开祜、朱梅生、周开炯同志编写;

本手册由张耀聪、方根男和许东林等同志审定。

我们诚恳欢迎读者对本手册提出批评和指正。

铁道部第三勘测设计院

1990年6月

内 容 简 介

本书除介绍铁路桥梁地基和基础设计的有关规定、地基和基础的一般设计计算方法和资料,以及特殊土地基的处理和加固等内容外,重点介绍桩基础、弹性地基梁、埋柱基础、沉井基础的设计和计算,并附有各类基础的设计计算实例。

本书为桥梁工程技术人员的工具书,并可供一般土建工程技术人员参考。

铁路工程设计技术手册

桥梁地基和基础

(修订版)

铁道部第三勘测设计院主编

*

中国铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

责任编辑 张苍松 封面设计 刘景山

中国铁道出版社发行 各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092mm 1/16 印张: 29.75 插页: 3 字数: 712千

1978年2月 第1版

1984年3月 第2版

1991年2月 第3版 第3次印刷

印数: 13000—18000册

ISBN 7-113-00799-6/TU·185 定价: 17.90元

目 录

第一章 地基土的性质和分类 1	第五节 刚性基础的地基弹性抗力及刚性基础弹性侧移和弹性倾斜量的计算46
第一节 岩石地基土的组成和物理性质..... 1	一、《桥规》中的方法.....46
一、岩石地基土的组成和分类..... 1	二、近似方法.....51
二、岩石的物理性质指标..... 1	第四章 墩台下地基滑动的检算53
第二节 非岩石地基土的形成、组成和物理性质..... 3	第一节 弧形滑动的检算方法.....53
一、非岩石地基土的形成..... 3	第二节 滑动面上滑坡的推力.....54
二、非岩石地基土的组成..... 4	第五章 明挖基础的设计57
三、土的物理性质指标..... 6	第一节 明挖基础设计的一般要求.....57
四、砂类土和碎石类土的特性指标..... 9	一、明挖基础埋置深度的要求.....57
五、粘性土的特性指标.....10	二、明挖基础各台阶襟边宽度的要求.....57
六、冻土的分类.....11	三、明挖基础底面倾覆稳定性、滑动稳定性和弧面滑动稳定性的要求.....59
第三节 地基土的力学性质.....12	第二节 明挖基础底面处地基应力和外力偏心的检算.....60
一、土的渗透性.....12	一、基底应力的检算.....60
二、土的压缩性.....14	二、基底外力偏心的检算.....61
三、土的抗剪强度.....17	第三节 明挖基础下地基土的承载力.....61
第二章 地基土中应力的分布和计算19	一、按《桥规》确定一般地基土（即非岩石地基土）的承载力.....61
第一节 均质、各向同性地基土中应力的分布.....19	二、按《桥规》确定岩石地基的承载力.....66
一、应力分布的平面课题.....19	三、用静力触探法确定一般地基土的承载力.....66
二、应力分布的空间课题.....21	四、用动力触探的标准贯入试验确定一般地基土的承载力.....68
三、非均质地基中的应力分布.....31	第六章 桩基础和桩的设计69
第二节 地基土自重应力的计算.....33	第一节 桩基础的构造和设计的一般要求.....69
一、均匀地基土自重产生的应力.....33	一、桩基础的形式.....69
二、地下水对地基土自重应力的影响.....33	二、桩基础的构造.....71
三、不透水土层（半干硬状态粘土、硬塑状态粘土）对地基土自重应力的影响.....34	第二节 桩基础中单桩的受力分析.....73
第三节 基础底面处地基土应力的分布.....34	一、《桥规》中的地基系数法的基本方法.....73
一、基础底面处实际接触压应力的分布.....34	二、《桥规》中地基系数法的简化法.....84
二、基础底面接触压应力分布的简化计算图式.....35	三、采用地基系数的有限差分法.....103
第四节 基础底面以下软弱下卧土层应力的检算.....36	四、采用地基系数的有限元法.....105
第五节 桥头路基填土和锥体护坡对桥台基础底面处应力影响的计算.....38	第三节 桩基础（群桩）的受力分析.....107
第三章 基础的沉降计算和倾斜计算39	一、刚性承台座板的桩基础分析.....107
第一节 基础沉降和墩台顶面水平位移的检算要求.....39	二、柔性顶帽桩排架式桥墩台的桩身和顶帽内力分析.....128
第二节 基础最终沉降（总沉降）的分层总和算法.....40	第四节 桩基础分析例题.....133
第三节 桥梁施工期间基础沉降的估算.....43	一、竖直桩低桩承台分析例题.....133
第四节 根据基础两边缘不等沉降值求算基础倾斜量的方法.....43	二、承受纵向、横向荷载和扭矩的竖直桩桩基础分析例题.....138

三、带斜桩的高桩承台分析例题	143
四、承受土压力的高桩承台分析例题	146
五、柔性顶帽排架式桥墩的桩身内力 分析	149
第五节 按土阻力确定单桩的轴向承载力	152
一、静力法	152
二、动力法	159
三、关于摩擦单桩桩底轴向容许承载 力的确定和桩身自重影响的考虑 等问题	164
第六节 按土阻力确定群桩基础的竖向 承载力	165
第七节 桩的设计	166
一、桩的构造	166
二、外荷载作用下桩身的屈曲分析	171
三、外荷载作用下桩身稳定性和材料 强度的检算	171
四、桩的抗裂性检算	206
五、预制桩在存放、吊运和吊立时桩身 强度的检算以及沉桩过程中桩身的 受力分析	208
六、外荷载作用下钢筋混凝土管桩、 实心圆桩及预应力先张混凝土管桩 强度检算例题	212
第八节 单桩沉降和群桩沉降的分析	216
一、关于检算群桩基础（桩基）沉降 的要求	216
二、单桩的沉降计算	216
三、群桩的沉降计算	216
第九节 地震区桩基础的设计	217
一、计算图式	217
二、地震力的计算	217
三、振型 x_{ni}^* 的求算	219
四、柔度系数 f_{li} 的求算	222
五、土的液化	226
六、计算例题	226
第十节 特殊地基地区桩基础的设计	233
一、软弱粘土层中桩基础的设计	233
二、黄土地区桩基础的设计	234
三、多年冻土地地区桩基础的设计	234
四、岩溶地区桩基础的设计	235
第十一节 板桩围堰的计算	236
一、简化法	236
二、有限元法	239
第七章 弹性地基梁的设计	247
第一节 弹性地基梁的设计要求	247
第二节 弹性地基梁的受力分析	248
一、计算的基本假定	249
二、计算用表	249
三、计算中的有关问题	285
第三节 弹性地基梁的材料强度检算	286
第八章 管柱基础的设计	311
第一节 管柱及管柱基础的构造	311
第二节 管柱基础的计算	336
第三节 施工时管柱的受力计算	341
第四节 管柱计算	346
第五节 算例	356
第九章 沉井基础的设计	372
第一节 沉井构造和一般要求	372
第二节 一般沉井的计算	386
第三节 带气筒的浮式沉井的计算	402
第四节 一般沉井基础设计算例	422
第十章 特殊地基设计	438
第一节 湿陷性黄土地基	438
一、湿陷性黄土地基的设计要点	438
二、湿陷性黄土地基的处理	439
三、湿陷性黄土地基的防水措施	443
四、其它情况	444
第二节 软土地基	444
一、软土的工程特性及成因类型	444
二、软土地基容许承载力计算	445
三、软土地基上桥涵沉降量的计算	446
四、软土地基上桥涵基础类型之选择及 其经验教训	449
五、软土地基加固措施	451
第三节 多年冻土地基	459
一、多年冻土分布及其特点	459
二、多年冻土地基与基础的设计要点	461
三、冻胀、融沉防止措施及基础冻拔， 融沉稳定计算	463
第四节 岩溶、断层地基处理	467
一、岩溶地基处理	467
二、断层地基处理	467
附录 圆形桩大偏心受压强度检算系数 A、B曲线图	插页

第一章 地基土的性质和分类

第一节 岩石地基土的组成和物理性质

一、岩石地基土的组成和分类

地基土是包括岩石和非岩石在内藉以支承建筑物的各类土的统称。

岩石地基土是由一种或数种矿物组成的集合体，其中以多种矿物组成的居多。因熔融的岩浆在地表或地壳内冷凝而成的岩石称为岩浆岩。因地表岩石受大气、水、生物的风化剥蚀作用而破坏成碎屑沉积于水中或陆地上再经压密成岩作用重新形成的次生岩石称为沉积岩。地表的岩浆岩或沉积岩在高温、高压或化学性活泼的物质作用下经变质而成的岩石称为变质岩。岩浆岩、沉积岩和变质岩中的主要岩石见表1—1所列。

二、岩石的物理性质指标

- (一) 岩石的比重 (见表1—2)
- (二) 岩石的天然容重 (见表1—3)
- (三) 岩石的节理

岩石在地应力作用下，产生裂缝和断层，前者通常称为节理或裂隙。节理两侧的岩石没有或仅发生微小的移动，而断层两侧的岩石沿破裂面产生明显的相对错动。节理的存在会加速岩石的风化、破

岩浆岩、沉积岩、变质岩中的主要岩石

表1—1

岩浆岩		沉积岩		变质岩	
深成岩	花岗岩 正长岩 闪长岩 辉长岩 橄榄岩 辉岩	碎屑沉积岩	砾岩 角砾岩 砂岩 凝灰岩	片状岩	片麻岩 片岩 (云母片岩、绿泥石片岩、滑石片岩、角闪石片岩)
		粘土岩	页岩 泥岩		千枚岩 板岩
浅成岩	花岗斑岩 正长斑岩 玢岩 辉绿岩	化学及生物化学沉积岩	石灰岩 泥灰岩 白云岩	块状岩	大理岩 石英岩
喷出岩	流纹岩 粗面岩 安山岩 玄武岩				

岩石的比重

表1—2

岩石名称	比重	岩石名称	比重	岩石名称	比重
花岗岩	2.5~2.84	玄武岩	2.5~3.3	花岗片麻岩	2.63左右
闪长岩	2.6~3.1	砂岩	1.8~2.75	角闪片麻岩	3.07左右
辉长岩	2.7~3.2	页岩	2.63~2.73	石英片岩	2.6~2.8
橄榄岩	2.9~3.4	石灰岩	2.48~2.76	绿泥石片岩	2.8~2.9
斑岩	2.3~2.8	贝壳灰岩	2.7左右	板岩	2.7~2.84
玢岩	2.6~2.9	泥质灰岩	2.7~2.8	大理岩	2.7~2.87
辉绿岩	2.6~3.1	白云岩	2.78左右	石英岩	2.63~2.84
流纹岩	2.65左右	凝灰岩	2.56左右	蛇纹岩	2.4~2.8

岩石的天然容重

表1—3

岩石名称	天然容重 (kN/m³)	岩石名称	天然容重 (kN/m³)	岩石名称	天然容重 (kN/m³)
花岗岩	23~28	玄武岩	26~31	片麻岩	26~33
正长岩	25~30	砾岩	19~23	片岩	23~26
闪长岩	25.2~29.6	砂岩	22~26	板岩	26~27
辉长岩	25.5~29.8	页岩	24~27	大理岩	27左右
辉绿岩	25.3~29.7	石灰岩	18~26	石英岩	28~33
玢岩	24~28.6	泥质灰岩	23~25	蛇纹岩	26左右
粗面岩	23~27.7	白云岩	21~27		
安山岩	27~31	凝灰岩	7.5~14		

坏，使边坡发生滑动或崩塌，降低岩石地基的承载能力。《铁路桥涵设计规范》(TBJ 2—85) (以下简称《桥规》) 根据节理宽度将节理分为四级，见表 1—4。根据节理的等级可以判定节理发育的程度，从而可以考虑节理对基础工程的影响大小。《桥规》将节理发育程度分为四级，见表 1—5。

岩石节理宽度的分级 表 1—4

分 级	节理宽度 (mm)
密闭节理	< 1
微张节理	1 ~ 3
张开节理	3 ~ 5
宽张节理	> 5

岩石断层对桥梁是非常不利的，可能降低地基的承载能力，或影响桥梁基础的稳定性，或产生不等沉降，特别是地震区岩石断层上的桥梁，可能因地震发生时断层产生移动，造成桥梁倒塌。
《桥规》将岩石受地质构造的影响程度分为四级，见表 1—6。
岩石可能因物理风化作用而发生风化。在判定

岩石对这种风化的抵抗力时，《桥规》规定按表 1—7 考虑。表中岩石软化系数为饱和状态下与风干状态下的极限抗压强度之比，它是判定耐风化能力的指标之一。

节理发育程度的分级

表 1—5

分级	基 本 特 征	对基础的影响
节理不发 育	节理 1 ~ 2 组，规则，为构造型，间距在 1m 以上，多为密闭节理。岩体切割成巨块状	无影响
节理较发 育	节理 2 ~ 3 组，呈 X 型，较规则，以构造型为主，多数间距大于 0.4m，多为密闭节理，部分为微张节理，少有充填物。岩体切割呈大块状	影响不大
节理发 育	节理 3 组以上，不规则，呈 X 型或米字型，以构造型或风化型为主，多数间距小于 0.4m，大部分为张开节理，部分有充填物。岩体切割成块石、碎石状	影响较大
节理很发 育	节理 3 组以上，杂乱，以风化和构造型为主，多数间距小于 0.2m，以张开节理为主，一般均有充填物。岩体切割成碎石状	影响严重

岩石受地质构造影响程度的划分

表 1—6

影响程度	地 质 构 造 特 征
轻 微	地质构造变动小，节理不发育
较 重	地质构造变动较大，位于断裂（层）或褶曲轴的邻近地段，可有小断层，节理较发育
严 重	地质构造变动强烈，位于褶曲轴部或断裂影响带内；软岩多见扭曲及拖拉现象；节理发育
很 严重	位于断裂破碎带内，岩体破碎呈块石、碎石、角砾状，有的甚至呈粉末泥土状，节理很发育

岩石抗风化能力的分级

表 1—7

项目	分级	
	指标	和特征
软化系数	>0.75 ≤0.75	
耐 冻 性	耐 冻 的 不耐冻的	
岩浆岩的结构	细 粒 的 粗 粒 的	
造岩矿物	以石英为主	橄榄石、辉石、角闪石较多
胶 结 物	硅质的	钙质的
耐风化时间	暴露后一、二年尚不易风化 暴露后数日至数月即出现风化壳	

长石、黄铁矿、黑云母含量较多
泥质的

第二节 非岩石地基土的形成、组成和物理性质

一、非岩石地基土的形成

非岩石地基土是岩石经过物理风化、化学风化和生物风化作用形成的颗粒大小不同、保留在原地或受自然界风、水、波浪、冰川、重力的搬运、沉积的各种新的土层。其中,保留在原地的土称为残积土,而经自然界力量搬运、沉积形成的土称为运积土。

物理风化是指地表岩石由于气温变化,使岩石的表面受热或受冷,造成岩石表面的膨胀或收缩与岩石内部的膨胀或收缩不一致,岩石表层与内部之间的结合力逐渐遭到破坏,使岩石表面产生裂缝,以至久而久之崩解成碎屑的机械破坏现象。另外,岩石表面的裂隙水因气温降低而冻胀使表面岩石崩解成碎屑也属于物理风化现象。物理风化现象在干旱地区或严寒地区较为明显。物理风化的特征除岩石崩解形成碎屑外,其崩解后所形成的碎屑的化学成分却没有发生变化。

化学风化是指地表的岩石或岩石的碎屑由于空气中的水、氧、二氧化碳以及各种水溶液的化学作用,而形成破坏的现象。化学风化现象在湿热多雨地区较为明显。化学风化的特征除土的颗粒较小外,土的化学成分有了较大的变化。

生物风化是指生物活动过程中对地表岩石产生的破坏现象,它可分为物理的和化学的两种。如植物的根在岩石裂缝中生长,引起岩石劈裂,属于生物的物理风化(或称机械风化)作用。如生物新陈代谢析出的有机酸使岩石分解破坏,则属于生物的化学风化作用。

物理风化、化学风化和生物风化往往同时存在,只不过在不同地区,它们的表现有主次之分而已。

《桥规》附录十三将岩体的风化现象划分为五个等级,这些风化等级的野外鉴定特征和风化程度参考指标见表1—8所示。

岩石风化程度的划分 表 1—8

风化等级	风化程度	野外鉴定特征				风化程度参考指标	
		岩石、矿物颜色	结 构	破碎程度	坚硬程度	K_R (压强比) $= R_w / R_f$	K_V (弹性波速比) $= (V_{pf} / V_{ps})^2$
1	未经风化	岩石、矿物及其胶结物,颜色新鲜保持原有颜色	保持岩体原有结构	除构造裂隙外,肉眼见不到其他裂隙,整体性好	除泥质岩类可用大锤击碎外,其余岩类不易击开,放炮才能掘进	>0.9	>0.9
2	轻微风化	岩石、矿物颜色较暗淡。节理面附近有部分矿物变色	岩体结构未破坏,仅沿节理面稍有风化现象或有水锈	有少量风化裂隙,裂隙间距多数大于40cm,整体性仍较好	要用大锤和木楔子才能剖开。泥质岩类用大锤可以击碎。放炮才能掘进	0.9~0.65	0.9~0.75
3	颇重风化	岩石、矿物失去光泽,颜色暗淡,部分易风化矿物已变色(如长石、黄铁矿、橄榄石等);黑云母失去弹性变为黄褐色	结构已部分破坏,裂隙可能出,现风化夹层。一般呈块状或球状结构	风化裂隙发育,裂隙间距多数为40~20cm,整体性差	可用大锤击碎,用手锤不易击碎。大部分需放炮掘进	0.65~0.4	0.75~0.45
4	严重风化	岩石及大部分矿物变色,形成次生矿物,如斜长石风化成高岭土,黑云母呈棕色	结构已大部分破坏,形成碎块状或球状结构	风化裂隙很发育,岩体破碎,裂隙间距为20~2cm,完整性很差	用手锤即可击碎,用镐就可掘进,用锹则很困难	—	0.45~0.1
5	极严重风化	岩石、矿物已完全变色,大部分发生变异,长石变成高岭土、叶蜡石、绢云母,角闪石绿泥石化,黑云母变为蛭石	结构已完全破坏,仅外观保持有原岩。矿物晶体失去联结,石英松散呈砂状	风化破碎呈碎屑状或土状	用手可捏碎。用锹就可掘进	—	<0.1

注: R_w ——风化岩石抗压强度; R_f ——未风化岩石抗压强度; V_{pf} ——风化岩体纵波波速; V_{ps} ——未风化岩体纵波波速。

岩石经风化保留在原地的残积土具有这样的特点：风化残积土和下部的基岩没有明显的界限，而是渐变的；残积土没有明显层次，土粒大小混杂在一起，土粒带有棱角；残积土具有较大的孔隙，其强度较基岩低得多。

运积土按其成因可分为：

1. 坡积土——岩石风化后形成的土经雨水、融化雪水冲动沿斜坡向下搬运或移动，或岩石风化后形成的土由于自身重力作用从悬崖崩塌，堆积在斜坡上或坡脚处的堆积土或由流水的洗刷作用所形成的沉积层称为坡积土。坡积土一般以岩石风化后形成的粘土、砂粘土为主，并含有棱角状的大颗粒岩石屑，其粒径由山坡向下至坡脚逐渐变小。坡积

土的厚度在山坡处较薄，坡脚附近变厚。坡积土层的成分与其覆盖的基岩之间没有关系。

2. 洪积土——山区的山洪急流将岩石风化后的土顺山沟或河谷搬运至沟口（或河谷口）或山前平原时因水流突然变缓而沉积下来，称为洪积土。洪积土在靠近沟口（或河谷口）处往往为较大粒径的块石、碎石与泥砂混杂的沉积土，而渐离沟口（或河谷口）则渐为粒径愈来愈小的砂土或粘性土。另外，由于山洪是周期性的，且每次大小不相同，因此堆积下来的土不一样，其粒径大小也不相同，这样就使洪积土呈现不规则的层理，甚至使洪积土中存在夹层、尖灭层及透镜体（其形状似透镜），见图 1—1。

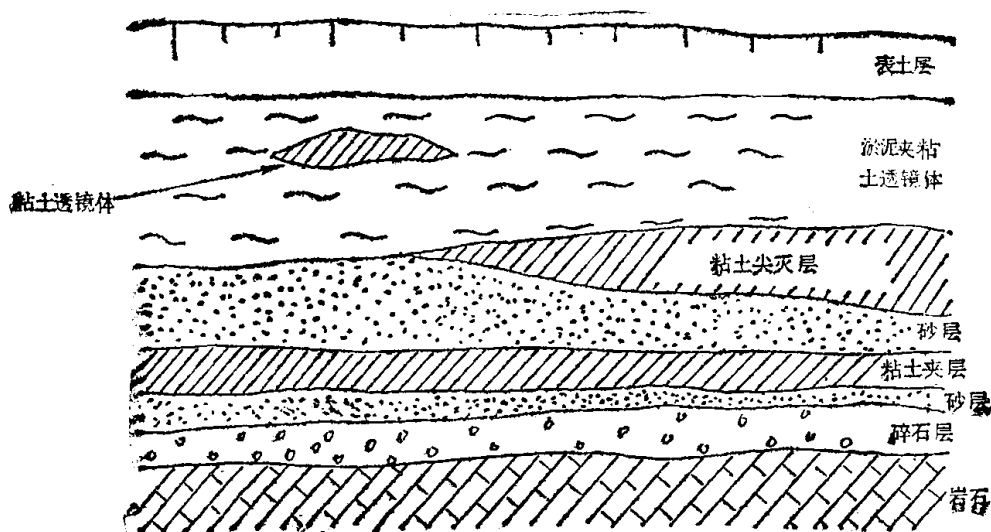


图 1—1

3. 冲积土——河流将岩石风化后的土搬运和沉积于河流坡度比较平缓的地区，通常称其为冲积土。由于河流将原来带有棱角的土粒经过长距离的滚磨，所以冲积土中多为圆形的土粒，如圆砾、卵石和漂石等。

4. 湖泊沉积土——湖泊四周岩石风化后的土经湖水涨落而缓慢地被带到湖底低洼处，这样形成的土层称为湖泊沉积土。一般来说，湖泊岸边沉积土的粒径较大，而湖底中部沉积土的颗粒细小。另外，湖底中心处还有生物化学作用的有机物质存在，形成软土，这种土不仅含水量高，而且压缩性大、强度低。

除上述几种沉积土外，还有冰川、海洋和风等搬运作用所形成的沉积土，可见有关文献。

二、非岩石地基土的组成

一般非岩石地基土由土粒（固体）、水（液体）和空气（气体）组成。组成土的这些物质的性质、相对含量以及它们的相互作用，影响到土的轻重、松密、干湿、软硬等物理性质。土的这些物理性质也就必然影响土的受力性质。

（一）土粒

1. 土粒的划分

《桥规》附录十三对一般土的土粒划分如表 1—9 所示。

地基土通常由不同土粒组混杂组成。对于主要由粒径大于 0.1mm 的土粒组成的土，当其中某一土粒组占优势（指质量而言，但实际上按重量进行计算）时，整个土便主要反映该土粒组的土粒性质；而当土中小于 0.1mm 的土粒占全部土的质量（但实际上按土的重量进行计算）的 25% 以上时（或粉粒、粘土粒含量占 15% 以上时），则呈现粘性土的特性。《桥规》附录十三根据土中占优势的粒组规定土的名称，见表 1—10 和表 1—11。

注意，在按表 1—10 和表 1—11 确定碎石类土和砂类土的名称时，应根据土粒粒径分组，由大到小，以最先符合者确定。

2. 土的颗粒级配

非岩石地基土中土粒组的相对含量（指质量而言，但通常以干燥土重的百分数计）称为土的颗粒级配，这种级配的好坏不但影响土的密实度，还影响土的强度、透水性和压缩性。

在分析土的颗粒级配时，先进行颗粒分析，确定各种粒径的土粒占土总重量的百分比；通常对于粒径大于 0.1mm 的土采用筛分法，对于粒径小于 0.1mm 的土采用比重计法（或称沉淀法），如果土

土 粒 的 划 分

表 1—9

土 粒 名 称		粒 径, mm	一 般 特 性
漂石 (浑圆或圆棱) 或块石 (尖棱)	大	大于800	颗粒之间的孔隙大, 透水性强, 无粘性, 毛细水上升高度极微, 不能保持水分, 压缩性较低
	中	800~400	
	小	400~200	
卵石 (浑圆或圆棱) 或碎石 (尖棱)	大	200~60	
	中	60~40	
	小	40~20	
圆砾 (浑圆或圆棱) 或角砾 (尖棱)	大	20~10	
	中	10~5	
	小	5~2	
砂粒	粗	2~0.5	易透水, 无粘性, 毛细水上升高度不大, 并随粒径变小而增大, 遇水不膨胀, 干燥不收缩, 呈松散状, 不表现可塑性, 压缩性甚微
	中	0.5~0.25	
	细	0.25~0.05	
粉粒		0.05~0.005	透水性小, 毛细水上升高度大且较快, 湿润时能出现微粘性, 遇水膨胀轻微, 干燥收缩不多
粘土粒		小于0.005	几乎不透水, 潮湿时呈可塑性和粘性, 遇水膨胀和干燥收缩现象均较明显, 压缩性大, 毛细水上升高度大, 但很慢

碎石类土的名称 表 1—10

土的名称	颗粒形状	土的颗粒级配
漂石土	浑圆或圆棱状为主	粒径大于200mm的颗粒超过全重50%
块石土	尖棱状为主	
卵石土	浑圆或圆棱状为主	粒径大于20mm的颗粒超过全重50%
碎石土	尖棱状为主	
圆砾土	浑圆或圆棱状为主	粒径大于2mm的颗粒超过全重50%
角砾土	尖棱状为主	

砂类土的名称 表 1—11

土的名称	土的颗粒级配
砾砂	粒径大于2mm的颗粒为全重25~50%
粗砂	粒径大于0.5mm的颗粒超过全重50%
中砂	粒径大于0.25mm的颗粒超过全重50%
细砂	粒径大于0.1mm的颗粒超过全重75%
粉砂	粒径大于0.1mm的颗粒少于全重75%

中同时含有大于和小于0.1mm的土粒, 则这两种方

法应并用。关于筛分法和比重计法可参见有关文献。

由土的颗粒分析结果可绘出粒径级配曲线, 如图 1—2 所示。图中的纵坐标表示小于某粒径的土粒占土总重量的百分比, 横坐标表示粒径。如果级配曲线平缓如图 1—2 中的曲线 2, 表示土中各种大小的土粒都有, 颗粒不均匀, 大颗粒之间的孔隙可为细颗粒所填充, 因而土的密度较大, 相应地强度较高, 透水性和压缩性较小, 这就说明其级配良好。反之, 如果级配曲线较陡, 则表示土粒大小比较均匀, 说明其级配不好, 如图 1—2 中的曲线 1。通常以下列不均匀系数 C_u 来衡量颗粒级配的好坏:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

式中 d_{60} ——称为限定粒径, 土中小于该粒径的颗粒占土总重的60%;

d_{10} ——称为有效粒径, 土中小于该粒径的颗粒占土总重的10%。

C_u 愈大, 曲线就愈平, 土粒大小也就愈不均匀, 表示颗粒级配较好; 反之, C_u 愈小, 曲线就愈陡, 土粒大小也就愈均匀, 颗粒级配就较差。一般将 $C_u < 5$ 的土看作土粒大小均匀, 颗粒级配很差, 而 $C_u > 10$ 的土看作级配良好。

(二) 土中的水

通常, 天然土中土粒之间孔隙内存在着水, 这种水根据土粒对其有无吸附力作用, 又分为结合水

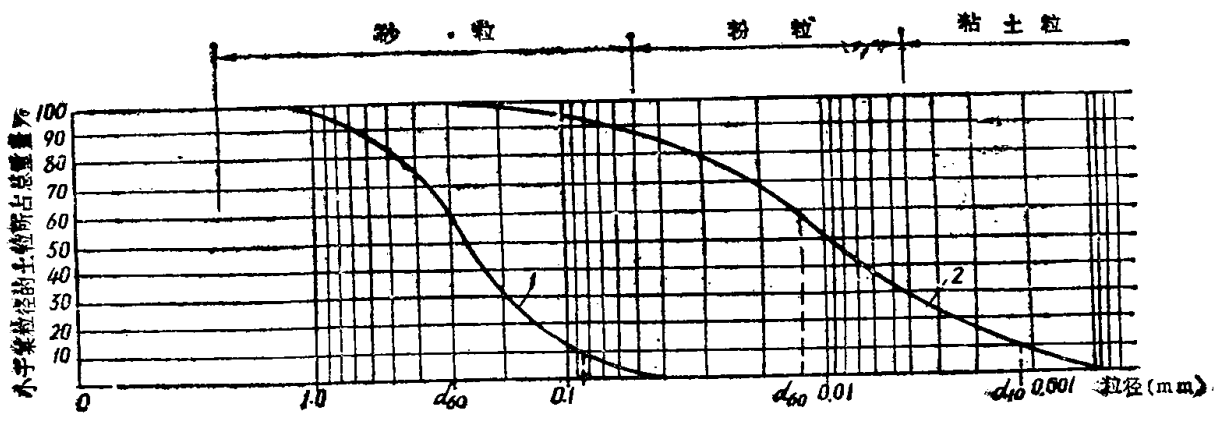


图 1-2

和自由水。

1. 结合水——这是因受土粒吸附力作用附在土粒表面上的水，其中直接位于土粒四周的部分称为吸着水，它对土的性质影响较小，而位于吸着水外面的部分称为薄膜水，它距土粒表面愈远受到土粒吸附力的作用也就愈小，直至没有受到土粒吸附力作用影响处的自由水。薄膜水呈现粘滞状态，粘性土中土粒四周的薄膜水较厚，薄膜水不仅影响粘性土的粘性，还影响粘性土的塑性和压实性等。通常认为砂土不存在薄膜水。

2. 自由水——这是位于土粒吸附力作用影响范围之外的水，其物理性质与普通水相同。位于地下水位以下土粒之间的自由水会因其自身重力作用在土粒之间移动，而且能传递静水压力（如对土粒产生浮力），通常又称自由水为重力水。重力水对土中应力、施工防排水都有影响。位于地下水位以上的土粒之间往往存在毛细水，它是由于土粒之间孔隙内表面张力作用，使地下水位以下的自由水沿着土粒之间的微小孔隙上升到地下水位以上。一般认为粒径大于2mm的土粒（如漂石、块石、卵石、碎石、圆砾、角砾）不存在毛细水。毛细水的上升高度，对于砂土不超过2m，对于粘性土可达5~6m。毛细水对地基稳定、土坡稳定以及地基冻胀等有影响。

(三) 土中的气体

一般来说，土中与大气相通的自由气体对土的性质没有影响，但封闭于土中的气体会使土的弹性和压缩性增大，而使透水性减小。另外，如淤泥和泥炭之类的土，由于微生物作用，使土中产生可燃气体，工程施工时可能影响工人身体健康和安全。这类土因可燃气体存在往往在其自身重力作用下长期得不到压密，形成高压缩性土，这对工程是不利的。

三、土的物理性质指标

用于表达土中的土粒、水和空气的组成比例关系的指标，称为土的物理性质指标，土的对应指标不同，其疏松、干湿、软硬等物理状态就不相同。

(一) 土的物理性质指标的表达式

为了便于说明，将土中的土粒、水和空气划分为三部分（图1-3），并以下列诸符号表示土中这三部分的体积和重量：

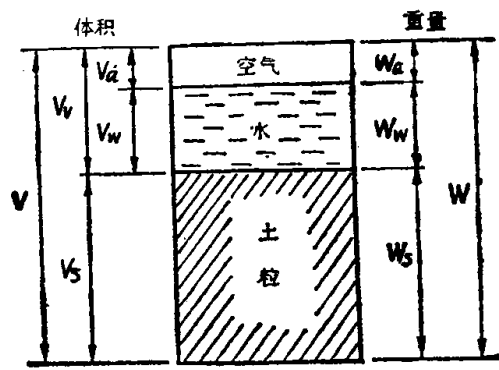


图 1-3

- V ——土样的总体积， m^3 ；
- V_s ——土样中的土粒体积， m^3 ；
- V_w ——土样中的孔隙体积， m^3 ；
- V_w ——土样中水所占体积， m^3 ；
- V_a ——土样中空气所占体积， m^3 ；
- W ——土样的总重量*， kN ；
- W_s ——土样中的土粒重量， kN ；
- W_w ——土样中的水重量， kN ；
- W_a ——土样中的空气重量，通常可忽略不计。

土的物理性质指标的表达式：

1. 土的密度 ρ ——土在天然状态下单位体积的质量， t/m^3 、 kg/m^3 或 g/cm^3 ，用下式表示：

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

式中 M 为相应于土体体积 V 时的土体质量。

2. 土的天然容重 γ （简称容重）——土在天然状态下单位体积的重量， kN/m^3 ，用下式表示：

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-2)$$

*本手册中的“重量”实际上为“重力”，因为考虑到习惯，所以没有采用“重力”，而仍用“重量”。

或

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度, m/s^2 。

3. 土的饱和容重 γ_{sat} ——土中孔隙全部充满水时土的单位体积的重量, kN/m^3 ; 用下式表示:

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V} \quad (1-4)$$

式中 γ_w ——水的容重, 一般可近似采用 10 kN/m^3 。

4. 土的浮容重 γ' ——水下的土受到水浮力作用时, 单位体积土的重量, kN/m^3 ; 用下式表示:

$$\begin{aligned} \gamma' &= \frac{W_s - V_v \gamma_w}{V} \\ &= \frac{W_s + V_v \gamma_w - V \gamma_w}{V} \\ &= \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \end{aligned} \quad (1-5)$$

5. 土的干容重 γ_d ——干土单位体积的重量, kN/m^3 ; 用下式表示:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (1-6)$$

γ_d 愈大, 表示土愈密实。

6. 土粒的密度 ρ_s ——单位体积土粒的质量, t/m^3 或 kg/m^3 ; 用下式表示:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (1-7)$$

式中 M_s ——相应土粒体积 V_s 时的土粒质量。

7. 土粒的容重 γ_s ——单位体积土粒的重量, kN/m^3 ; 用下式表示:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (1-8)$$

或

$$\gamma_s = \rho_s g \quad (1-9)$$

8. 土粒的比重 G ——土粒的重量 (或密度) 与同体积 4°C 的水的重量 (或密度) 之比值, 用下式表示:

$$G = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1-10)$$

G 为一纯量。上式中 γ_w 和 ρ_w 分别为水在 4°C 时的容重和密度。

9. 天然含水量 W_s ——天然状态下, 土中水分的重量与土粒的重量之比, 以 % 表达; 用下式表示:

$$W_s = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1-11)$$

水的含水量增大时, 土的强度则降低。

10. 土的饱和度 S_r ——土中孔隙充水的程度, 用下式表示:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (1-12)$$

上面诸指标中的 γ 、 γ_s 和 W_s 为土的基本物理性质指标, 它们应由试验直接测定。

(二) 由土的基本物理性质指标 γ 、 γ_s 和 W_s 求算土的物理性质指标

根据前面所述, 由试验直接测定的土的基本物理性质指标 γ 、 γ_s 和 W_s 可求算土的物理性质指标。从上述土的基本物理性质指标计算看出其计算结果与所取土样体积 (或重量) 的大小无关, 因此可以假设土粒体积 $V_s = 1$, 则由土体中孔隙体积 V_v 与土粒体积 V_s 之比 (即孔隙比) $e = \frac{V_v}{V_s}$ 得土样的孔隙体积 $V_v = e V_s = e$, 土样的总体积 $V = V_s + V_v = 1 + e$ 。为了方便用图 1-4 表示。

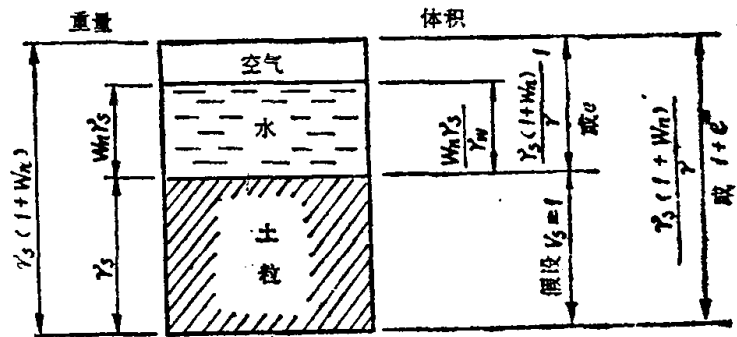


图 1-4

根据 (1-8) 式, 得图 1-4 中的 $W_s = \gamma_s$, 根据 (1-11) 式, 得图 1-4 中的 $W_w = W_s W_s = W_s \gamma_s$, 图 1-4 中的 $W = W_s + W_w = \gamma_s (1 + W_s)$; 根据 (1-2) 式, 得图 1-4 中的 $V = \frac{W}{\gamma} = \frac{\gamma_s (1 + W_s)}{\gamma}$ 及 $V_v = V - V_s = \frac{\gamma_s (1 + W_s)}{\gamma} - 1$; 根据 $\gamma_w = \frac{W_w}{V_v}$, 得 $V_v = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{W_s \gamma_s}{\gamma_w}$ 。注意土的孔隙比 e 不能直接测定, 而由实测的 γ 、 γ_s 和 W_s 三个基本物理特性指标, 用 $e = V_v = \frac{\gamma_s (1 + W_s)}{\gamma} - 1$ 求得。于是

1. 土的饱和容重 γ_{sat} :

由 (1-4) 式, 得

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s + e \gamma_w}{1 + e} \quad (1-13)$$

2. 土的浮容重 γ' :

由 (1-5) 式, 得

$$\gamma' = \frac{\gamma_s + e \gamma_w}{1 + e} - \gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e} \quad (1-14)$$

3. 土的干容重 γ_d :

由 (1-6) 式, 得

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{\gamma_s (1 + W_s)} = \frac{\gamma_s}{1 + W_s} \quad (1-15)$$

由 (1-6) 式, 又可得

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e} \quad (1-16)$$

4. 土的饱和度 S_r :

由 (1-12) 式得

土的物理性质指标

表 1-12

指标名称	符 号	表 达 式		由基本指标 γ 、 γ_s 和 W 求算土的物理性质指标的公式		备 注
		公 式	公式编号	单 位	公式编号	
天然容重 (又称湿容重)	γ	$\gamma = \frac{W}{V}$	(1-2)	kN/m ³		γ 、 γ_s 和 W 为土的基本物理性质指标, 由试验直接测定
土粒容重	γ_s	$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$	(1-8)	kN/m ³		
天然含水量	W_w	$W_w = \frac{W_w}{W_s} \times 100$	(1-11)	%		
孔隙率	n	$n = \frac{V_v}{V} \times 100$	(1-18)	%	(1-18)	公式中的 γ , 亦可由 $G\gamma_s$ 代替
孔隙比	e	$e = \frac{V_v}{V_s}$	—	—	—	
饱和容重	γ_{sat}	$\gamma_{sat} = \frac{W_s + V_v \gamma_w}{V}$	(1-4)	kN/m ³	(1-13)	
浮容重	γ'	$\gamma' = \frac{W_s - V_v \gamma_w}{V}$	(1-5)	kN/m ³	(1-14) (1-15)	
干容重	γ_d	$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$	(1-6)	kN/m ³	(1-5) (1-16)	
土的密度	ρ	$\rho = \frac{M}{V}$	(1-1)	t/m ³ , kg/m ³ 或 g/cm ³		S_r 往往以百分数表示: $S_r = \frac{V_w}{V} \times 100$ 范围 $0\% \leq S_r \leq 100\%$ G 为土粒重量与同体积的 4℃ 时的水 (也有人指蒸馏水) 的重量之比
土粒的密度	ρ_s	$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$	(1-7)	t/m ³ 或 kg/m ³		
饱和度	S_r	$S_r = \frac{V_w}{V_v}$ 范围 $0 \leq S_r \leq 1$	(1-12)	—	(1-17)	
土粒比重	G	$G = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$	(1-10)	—	(1-10)	

$$S_r = \frac{\gamma_s W_s}{e \gamma_w} \quad (1-17)$$

5. 孔隙率 n ——土中孔隙体积与土总体积之比, 以%表达

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100$$

$$= \frac{e}{1+e} \times 100 \quad (1-18)$$

(1—13)式和(1—14)式中的 γ_s 一般可近似采用为 10 kN/m^3 。

关于土的物理性质指标的表达式和根据土的基本物理性质指标 γ 、 γ_s 和 W_s 求算土的物理性质指标的公式见表 1—12。

(三) 土的物理性质指标的常见值范围
土的物理性质指标的常见值范围可见表 1—13 所示。

土的物理性质指标常见值范围 表 1—13

土 类		孔隙比 e	天然含水量 W_s (%)	天然容重 γ (kN/m^3)	土粒容重 γ_s (kN/m^3)	饱和容重 γ_{sat} (kN/m^3)	浮容重 γ' (kN/m^3)	干容重 γ_d (kN/m^3)	饱和度 S_r	土粒比重 G										
砂 类 土	粗砂	0.4~0.5	15~18	20.5	26~26.4					2.66										
		0.5~0.6	19~22	19.5																
		0.6~0.7	23~25	19.0																
	中砂	0.4~0.5	15~18	20.5																
0.5~0.6		19~22	19.5																	
0.6~0.7		23~25	19.0																	
细砂	0.4~0.5	15~18	20.5																	
	0.5~0.6	19~22	19.5																	
	0.6~0.7	23~25	19.0																	
粉砂	0.5~0.6	15~18	20.5																	
	0.6~0.7	19~22	19.5																	
	0.7~0.8	23~25	16.0																	
粘 性 土	粉 质 粘砂土	0.4~0.5	15~18	21.0	26.5~26.6	18~23	8~13	13~18	0~1 或 0%~100%							2.70				
		0.5~0.6	19~22	20.0																
		0.6~0.7	23~25	19.5																
	粘砂土	0.4~0.5	15~18	21.0	26.7~26.8									2.71						
		0.5~0.6	19~22	20.0																
		0.6~0.7	23~25	19.5																
	砂粘土	0.4~0.5	15~18	21.0																
		0.5~0.6	19~22	20.0																
		0.6~0.7	23~25	19.5																
		0.7~0.8	26~29	19.0																
		0.5~0.6	19~22	20.0																
		0.6~0.7	23~25	19.5																
		0.7~0.8	26~29	19.0																
	粘土	0.8~0.9	30~34	18.5																
		0.9~1.0	35~40	18.0																
		0.6~0.7	23~25	19.5																
0.7~0.8		26~29	19.0																	
0.8~0.9		30~34	18.5																	
0.9~1.0		35~40	18.0																	
0.7~0.8		26~29	19.0																	
粘 土	0.8~0.9	30~34	18.5	26.9~27.1																
	0.9~1.0	35~40	17.5																	
	0.8~0.9	30~34	18.5																	
	0.9~1.1	35~40	17.5																	

四、砂类土和碎石类土的特性指标

砂类土和碎石类土均为无粘性的散粒土。

土的密实度对砂类土和碎石类土的 工程 性质 (主要指地基承载力) 具有很大的影响。确定土的密实程度的方法有多种, 可根据具体情况采用, 也

可采用多种方法互相对照判定。土的天然孔隙比可以体现土的密实程度, 但通常认为以采用下式所示相对密度 D_r 来判别砂类土的密实程度为好:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (1-19)$$

式中 e_{max} ——土在最松散状态时的孔隙比, 或称

最大孔隙比，

e_{max} ——土在最密实状态时的孔隙比，或称最小孔隙比；

e ——土在天然状态时的孔隙比，即天然孔隙比。

当 $D_r = 0$ 时，表示土处于最松状态；当 $D_r = 1$ 时，表示土处于最密实状态。

《桥规》按表 1—14 用相对密度 D_r 划分砂类土的密实程度。

由于实际工作中不易准确确定出砂类土的

砂类土密实程度的划分 表 1—14

分 级		相对密度 D_r	标准贯入锤击数， $N_{63.5}$
密 实		$D_r \geq 0.67$	30~50
中 密		$0.67 > D_r \geq 0.33$	10~29
松散	稍松	$0.33 \geq D_r \geq 0.2$	5~9
	极松	$D_r < 0.2$	< 5

e_{max} 、 e_{min} 和 e ，特别是地下水位以下的砂类土，要采取原状土样就很困难。因此，实际工程中多采用标准贯入试验来判断砂类土的密实程度。所谓标准贯入试验是先用钻具钻至试验土层高程以上约150mm处，然后将标准贯入器换装于钻杆的下端，用63.5kgf的穿心锤以760mm的落距把标准贯入器竖直打入土中150mm（此时不计锤击数），以后再打入土内300mm，并记录打入此300mm所需的锤击数 $N_{63.5}$ 。当 $N_{63.5}$ 愈大时表示土愈密实，反之，则表示土愈松散，见表1—14。关于标准贯入试验要点可见本书第163页所述。

对于碎石类土（漂石土、块石土、卵石土、碎石土、圆砾土、角砾土），密实度无疑也是确定其工程性质的重要指标，但这类土很难进行室内试验和贯入试验，所以对于这类土，《桥规》规定按表1—15所述凭经验野外鉴定其密实程度。

土的潮湿程度对砂类土的工程性质有影响，而对碎石类土一般是沒有影响的。对于砂类土和碎石类土的潮湿程度，《桥规》规定用饱和度 S_r 按表1—16划分。

碎石类土密实程度的划分

表 1—15

密实程度	骨架和充填物	天然坡和开挖情况	钻探情况
密 实	骨架颗粒交错紧贴，孔隙填满密实	天然陡坡较稳定，坎下堆积物较少。镐挖掘困难，用撬棍方能松动，坑壁稳定，从坑壁取出大颗粒处，能保持凹面形状。	钻进困难，冲击钻探时，钻杆、吊锤跳动剧烈，孔壁较稳定
中 密	骨架颗粒疏密不均，部分不连续，孔隙填满，但不甚密实	天然坡不易陡立，在陡坎下堆积物较多，但大于粗颗粒的安息角。镐可挖掘，坑壁有掉块现象。从坑壁取出大颗粒处，砂类土不易保持凹面形状。	钻进较难，冲击钻探时，钻杆、吊锤跳动不剧烈，孔壁有坍塌现象
松 散	多数骨架颗粒不接触，而被充填物包裹，充填物松散	不能形成陡坎，天然坡接近于粗颗粒的安息角。锹可以挖掘，坑壁易坍塌，从坑壁取出大颗粒后，砂类土即塌落。	钻进较容易，冲击钻探时，钻杆稍有跳动，孔壁易坍塌

砂类土和碎石类土潮湿

程度的划分 表 1—16

分级	饱和度 S_r
稍湿	$S_r \leq 0.5$
潮湿	$0.5 < S_r \leq 0.8$
饱和	$S_r > 0.8$

五、粘性土的特性指标

含水量对粘性土的工程性质具有重要的影响。根据不同的含水量，粘性土可划分为坚硬状态（固态）、半坚硬状态、可塑状态（又分为硬塑状态和软塑状态）、流塑状态四种潮湿程度（或软硬程度）。

（一）《桥规》采用液性指数 I_L 来表示粘性土的潮湿程度（软硬程度）：

$$I_L = \frac{W_L - W_p}{W_L - W_p} = \frac{W_L - W_p}{I_p}$$
 (1—20)

式中 W_L ——天然含水量，%；
 W_p ——塑限（即塑限含水量），为粘性土从半干硬状态转变到可塑性状态的分界含水量（即粘性土从一种物理状态转入另一种物理状态的含水量），%；
 W_L ——液限（即液限含水量），为粘性土从可塑状态转变到流塑状态的分界含水量，%；
 I_p ——塑性指数， $I_p = W_L - W_p$ ，用以表示土的可塑程度； I_p 通常以百分数的绝对数字表示。

当粘性土的天然含水量 $W_L < W_p$ ($I_L < 0$) 时，该粘性土处于半干硬状态；当 $W_L \geq W_p$ ($I_L \geq 1$) 时，处于流塑状态*；当 W_L 介于 W_p 和 W_L 之间（即 I_L 在 0~1 之间），则处于可塑状态。 I_L 愈大，土就愈软，反之，土便愈硬。《桥规》按 I_L 将粘性土的潮湿程度（软硬程度）划分为四

* 在此情况下，震击时土体可能变成粘滞流体。

级，可见表 1—17。

粘性土潮湿程度
的划分 表 1—17

潮湿程度的分级		液性指数 I_L
半干硬状态		$I_L < 0$
可塑状态	硬塑状态	$0 \leq I_L < 0.5$
	软塑状态	$0.5 \leq I_L < 1$
流塑状态		$I_L \geq 1$

(二) 《桥规》规定塑性指数 I_p 大于 3 的土为粘性土，并对粘性土用塑性指数 I_p 按表 1—18 进行分类。

粘性土按塑性指数
的分类 表 1—18

土的类别	塑性指数 I_p
粘砂土	$8 < I_p \leq 7$
砂粘土	$7 < I_p \leq 17$
粘土	$I_p > 17$

例如，当某粘性土的 $I_p = 10$ ， $I_L = 0.45$ ，则可判定该粘性土为硬塑状态的砂粘土。

(三) 土的压缩性对于粘性土来说是一种重要的性质。压缩性高的粘性土在外压力作用下产生较大的变形，建于这种粘性土上的桥涵结构可能因地基均匀沉陷过大或因地基产生不均匀沉陷而破坏。《桥规》对粘性土的压缩程度用压缩系数 $a_{0.1 \sim 0.2}$ 按表 1—19 进行划分。 $a_{0.1 \sim 0.2}$ 按下式计算〔见第 15 页 (1—26) 式〕：

$$a_{0.1 \sim 0.2} = \frac{e_1 - e_2}{p_1 - p_2}$$

$a_{0.1 \sim 0.2}$ 以 $(\text{MPa})^{-1}$ 计。式中 e_1 和 e_2 分别为压力 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 和 $p_2 = 0.2 \text{ MPa}$ 时的孔隙比。

粘性土压缩程度
的划分 表 1—19

压缩程度分级	压缩系数 $a_{0.1 \sim 0.2} (\text{MPa})^{-1}$
低压缩性的	$a_{0.1 \sim 0.2} < 0.1$
中压缩性的	$0.1 \leq a_{0.1 \sim 0.2} < 0.5$
高压缩性的	$a_{0.1 \sim 0.2} \geq 0.5$

六、冻土的分类

冻土分为季节性冻土和多年冻土两大类。《桥规》根据土中的粉粘粒含量、天然含水量、潮湿状态、地下水位的位置等因素将季节性冻土划分为不冻胀、弱冻胀、冻胀和强冻胀四类，见表 1—20。

季节性冻土的分类 表 1—20

土的名称	天然含水量 W_n (%)	湿度或稠度状态	冻结期间地下水位低于天然冻结线的最小距离 h_w , m	冻胀分级
粉粘粒含量 $\leq 15\%$ (或粒径小于 0.1 mm 的颗粒含量 $\leq 25\%$) 的粗颗粒土 (包括碎石类土、砾砂、粗砂、中砂)	$W_n \leq 10$	潮湿	不考虑	不冻胀
	$W_n > 10$	饱和		弱冻胀
粉粘粒含量 $> 15\%$ (或粒径小于 0.1 mm 的颗粒含量 $> 25\%$) 的粗颗粒土 (包括碎石类土、砾砂、粗砂、中砂) 细砂、粉砂	$W_n \leq 12$	稍湿	$h_w > 1.5$	不冻胀
	$12 < W_n \leq 18$	潮湿		弱冻胀
	$W_n > 18$	饱和		冻胀
粘性土	$W_n \leq W_p$	半干硬	$h_w > 2.0$	不冻胀
	$W_p < W_n \leq W_p + 7$	硬塑		弱冻胀
	$W_p + 7 < W_n \leq W_p + 15$	软塑		冻胀
	$W_n > W_p + 15$	流塑	不考虑	强冻胀

- 注：① W_p ——塑限含水量；
② 当砂类土的 h_w 小于和等于 1.5 m ，粘性土的 h_w 小于和等于 2 m 时，应将表中冻胀级别提高一级，例如不冻胀提高为弱冻胀。
③ 表中天然含水量是指入冬前的含水量。

《桥规》根据多年冻土融化时的下沉特征，不融沉、弱融沉、融沉、强融沉和融陷五个等级，相

应地将多年冻土划分为五类，见表 1—21。

多年冻土的分类

表 1—21

土的名称	土的类别	天然总水量, $W_n, \%$	融化后的 潮湿程度	融沉分级
少冰冻土	粉粘粒含量 $\leq 15\%$ (或粒径小于 0.1mm 的颗粒含量 $\leq 25\%$)的粗颗粒土 (包括碎石类土、砾砂、粗砂、中砂)	$W_n \leq 10$	潮湿	(I) 不融沉
	粉粘粒含量 $> 15\%$ (或粒径小于 0.1mm 的颗粒含量 $> 25\%$)的粗颗粒土 (包括碎石类土、砾砂、粗砂、中砂) 细砂、粉砂	$W_n \leq 12$	稍湿	
	粘性土	$W_n \leq W_p$	半干硬	
多冰冻土	粉粘粒含量 $\leq 15\%$ (或粒径小于 0.1mm 的颗粒含量 $\leq 25\%$)的粗颗粒土 (包括碎石类土、砾砂、粗砂、中砂)	$10 < W_n \leq 16$	饱和	(II) 弱融沉
	粉粘粒含量 $> 15\%$ (或粒径小于 0.1mm 的颗粒含量 $> 25\%$)的粗颗粒土 (包括碎石类土、砾砂、粗砂、中砂) 细砂、粉砂	$12 < W_n \leq 18$	潮湿	
	粘性土	$W_p < W_n \leq W_p + 7$	硬塑	
富冰冻土	粉粘粒含量 $\leq 15\%$ (或粒径小于 0.1mm 的颗粒含量 $\leq 25\%$)的粗颗粒土 (包括碎石类土、砾砂、粗砂、中砂)	$16 < W_n \leq 25$	饱和出水 (出水量小于 10%)	(III) 融沉
	粉粘粒含量 $> 15\%$ (或粒径小于 0.1mm 的颗粒含量 $> 25\%$)的粗颗粒土 (包括碎石类土、砾砂、粗砂、中砂) 细砂、粉砂	$18 < W_n \leq 25$	饱和	
	粘性土	$W_p + 7 < W_n \leq W_p + 15$	软塑	
饱冰冻土	粉粘粒含量 $\leq 15\%$ (或粒径小于 0.1mm 的颗粒含量 $\leq 25\%$)的粗颗粒土 (包括碎石类土、砾砂、粗砂、中砂)	$2.5 < W_n \leq 44$	饱和大量出水 (出水量约 $10 \sim 20\%$)	(IV) 强融沉
	粉粘粒含量 $> 15\%$ (或粒径小于 0.1mm 的颗粒含量 $> 25\%$)的粗颗粒土 (包括碎石类土、砾砂、粗砂、中砂) 细砂、粉砂	$2.5 < W_n \leq 44$	饱和出水 (出水量小于 10%)	
	粘性土	$W_p + 15 < W_n \leq W_p + 35$	流塑	
含土冰层	碎石类土、砂类土	$W_n > 14$	饱和大量出水 (出水量大于 $10 \sim 20\%$)	(V) 融陷
	粘性土	$W_n > W_p + 35$	流动	

第三节 地基土的力学性质

一、土的渗透性

(一) 土的渗透定律

水通过土中孔隙产生流动的现象称为渗透或渗流，而土能使水在中间渗透通过的方便程度称为土的渗透性或渗流性。土的这种渗透性往往对桥梁基础工程具有很大的影响，流砂现象就是其中一例。

通常，水在土中流动时的速度较小，且水流流线互相平行，呈层流状态。根据著名的达西 (Darcy, 1850年) 渗透定律进行推导，可以认为水在砂土中的渗流速度*v*与水力坡度 (或称水力梯度) *i* 成正比，即：

$$v = \frac{Q}{A} = k \frac{h}{L} = ki \tag{1-21}$$

水在粘性土中，当水力坡度*i*大于某一值*i'*时，粘性土才呈现渗透性，因此，对于粘性土，其渗流速度*v*与水力坡度*i*的关系用下式表示：

$$v = k(i - i') \tag{1-22}$$

*i'*的确定是比较困难的。(1—21)式中的*Q*为单位时间内的渗透水量，以 m^3/s 或 m^3/d 计。

上面两式中，*A* 为水渗透的断面积，以 m^2 计；渗流速度*v* 以 m/s 或 m/d 计；*h* 为相距 *L* 的两断面间的水位差，*m*；*L* 亦可视为水的最短渗透路程，*m*； $h = H_1 - H_2$ ，这里 *H*₁ 和 *H*₂ 分别为该两断面处的水头，见图 1—5； $i = \frac{H_1 - H_2}{L}$ ；*k* 为比例系数，从 (1—21) 式看出，当某一 *i* 值时，*k* 值愈大，则*v* 愈大，说明土的透水性较强，