

铁路散粒体道床

曾树谷 编著

中国铁道出版社

1997年·北京

前 言

散粒体道床是指由散体颗粒材料组成的道床,包括碎石道床、筛分卵石道床、天然级配卵石道床、砂子道床和熔炉矿渣道床。它和混凝土道床、沥青道床、板式道床等整体道床相比,具有弹性好、易于施工、易于养护、造价低廉等优点,既适用于桥、隧等刚性基础,又适用于残余沉降量大的土质路基。因此,自有铁路一百多年以来,散粒体道床不仅仍保持其旺盛的生命力,而且在很多情况下,具有不可取代的地位。

散粒体的状态和性能,有其共同的规律性。而由不同的散粒体材料,根据不同的断面尺寸、结构形式、边界条件,由不同的工艺所修建起来的散粒体结构,又有不同的规律。在荷载作用下,特别是在模拟列车的重复交变荷载作用下,其内部的应力、应变规律,其结构的弹性和塑性变形,其颗粒的破碎和级配变化,更不相同。散粒体道床的研究,就是要从道碴材质、道床结构及断面尺寸、道床边界条件及不同的道床铺设、维修工艺入手,寻找一种物理、力学性能最好,维修工作量最省,清筛周期最长的道床结构形式。同时,还要建立一套评估道床状态的参数和检测手段,以便及时掌握道床状态的变化,并采取相应的养护维修措施。

本书选编的内容主要来自作者多年所积累的资料,特别是直接主持的国家攻关课题《铁路碎石道碴标准》及铁道部重点课题“道床状态的检测与评估”的研究成果。其中,“铁路碎石道碴”及与之配套的“铁路碎石道碴试验方法”,已列为铁道部行业标准,并分别获得铁道部科学技术进步奖和铁道部科学研究院科技成果奖。“道床密度测试仪”已作为全路推广产品在全路推广使用,并获铁道部科学研究院科技成果奖。“轨枕支承刚度测试仪”、“道床横向阻力测试仪”也已在北京铁路局等单位相继推广使用。本书所编入

的有关碎石道碴材质,材料试验方法及道床状态检测等主要内容,曾编写成“重载线路的道碴、道床”的论文,在第五届国际重载轨道会议上发表,受到一致的好评,并收入第五届国际重载轨道会议论文集。

我国最近已引进大型道碴动三轴试验机,它对我国散粒体道床的研究必将起到推动作用。本书所介绍的有关散粒体材料及散粒体结构的各项试验技术,对这些研究有重要的启示和参考价值。本书所编入的有关散粒体道碴材料标准和试验方法,道床断面尺寸,都是我国现行的铁道部行业标准,不仅可以供设计单位、工程局及采石部门的有关工作人员直接使用,而且还可根据本书所编入的有关标准制订的指导思想及说明,可以对标准条文有更全面的了解,以保证标准的准确、全面地贯彻执行。本书所编入的有关道床工作状态的演变、道床的累积变形和养护维修,道床的脏污和清筛,道床状态的检测和评估等内容,对于铁路局、工务段以及所有从事铁路工务工作的人员都有重要的参考作用。

本书的选材、编写及文整工作、得到了张绍华同志的大力帮助,特此致谢。

由于作者的水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,欢迎广大读者批评、指正。

曾树谷

1997年8月

本书所采用的主要符号

A_i ——级配指数

$a_{\max}, a_{\min}$ ——最大, 最小粒径

B ——体积变形系数

C ——单位粘聚力(或嵌制力)

C_u ——均匀系数(Coefficient of uniformity)

C_c ——压缩指数(Compression index)

$\bar{C}_c$ ——曲率系数(Coefficient of Curvature)

D ——最大筛孔边长

d ——密实度(density)

d_i ——筛孔边长

E ——变形模量(杨氏模量)

E_k ——针状指数

E_r ——回弹杨氏模量(Resilient Young's modulus)

E_1 ——岩石弹性模量

e ——空隙比(Void ratio)

e_0 ——初始空隙比

F ——剪切面积

F_p ——片状指数

f ——内摩擦系数

G ——剪切模量

K_T ——剪切比例系数

$K_{\mp}$ ——石料干耐磨硬度系数

$K_{\text{湿}}$ ——石料湿耐磨硬度系数

M_A ——散粒体球磨硬度

- L_{AA} ——散粒体洛杉矶磨耗率
 N ——垂向荷载
 $\bar{n}$ ——孔隙率 (porosity)
 n ——级配指数
 $N_{\text{初}}$ ——石料冲击韧度
 P ——轨枕底面作用到每粒道碴上的正压力
 $\bar{P}$ ——通过筛孔的颗粒所占重量百分率
 P_r ——颗粒之间的接触正压力
 P_x ——作用于容器壁上的正压力
 P_z ——作用于散粒体上的垂向压力
 Q ——在荷载状态下的体积有效应力
 r ——球形颗粒半径
 r_1 ——颗粒接触面半径
 T ——水平力
 T_{up} ——散粒体抗剪力
 u ——孔隙水压力
 V_c ——颗粒均匀系数
 W ——含水量
 α ——应力扩散角
 β_c ——自然坡角
 γ_p ——颗粒物质 (岩石) 密度
 γ_w ——水的密度
 γ_d ——散粒体的内部空隙全部被空气充满时的容重
 γ_s ——散粒体的内部空隙部分被水、部分被空气充满时的容重
 γ_{Bs} ——悬浮于水中的散粒体的容重
 $\bar{\gamma}_{xy}, \bar{\gamma}_{yz}, \bar{\gamma}_{zx}$ ——剪切应变
 Δ ——水平位移 (剪切变形量)
 δ ——合力与剪切面法线之间的夹角

- ϵ_v ——体积应变
 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ —— x, y, z 轴方向的正应变
 ϵ_{lr} ——弹性应变峰峰值的一半
 ϵ_{rc} ——弹性压缩应变
 ϵ_{re} ——弹性拉伸应变
 ϵ_N ——重复荷载作用 N 次后的累积残余应变
 μ ——散粒体的抗剪模量
 γ ——泊松比
 ξ_0 ——侧压系数
 σ_0 ——粘性压应力
 σ' ——核算法向应力
 σ ——正应力, 总应力
 $\sigma_{\max}$ ——最大应力
 σ'_v ——垂向有效应力
 τ ——剪应力
 τ_{up} ——剪应力极限值
 φ ——内摩擦角
 φ_0 ——摩擦角
 ω ——饱和度

目 录

本书所采用的主要符号	1
第一章 散粒体的基本物理、力学性能	1
第一节 散粒体道床结构的特点	1
第二节 散粒体道床结构的种类及其基本的职能要求	2
第三节 散粒体的粒径、颗粒形状和颗粒组成(级配)	3
第四节 散粒体的物理性能	5
第五节 散粒体结构的抗剪强度	13
第六节 散粒体结构的可动性	17
第七节 散粒体颗粒间的荷载、应力和变形的计算	21
第八节 散粒体结构的变形	27
第二章 散粒体道床材料	30
第一节 概 述	30
第二节 碎石道碴	31
第三节 碎石道碴标准	67
第四节 垫碴(Subballast)	81
第五节 国内主要采石场的道碴材质试验及供求关系的预测	109
第三章 散粒体结构的荷载、应力和变形特性	125
第一节 散粒体结构的室内试验	125
第二节 各刚度参数之间的关系	134
第三节 散粒体结构的强度和破坏状态	136
第四节 散粒体结构在重复荷载下的性能	144
第五节 道碴三轴试验	154
第六节 道碴的重复荷载试验	157
第四章 道床断面	167

第一节	道床断面的主要参数·····	167
第二节	确定道床断面主要参数的原则·····	171
第三节	道床断面维修规则及旧线道床断面设计·····	195
第五章	道床状态的检测和评估·····	197
第一节	概 述·····	197
第二节	道床脏污率和颗粒指数特性的测量·····	199
第三节	道床的密实度·····	201
第四节	道床弹性·····	216
第五节	轨枕横向阻力·····	225
第六节	道床的渗水性能·····	243
第六章	道床的残余变形和累积下沉·····	245
第一节	道床中的塑性变形和残余应力·····	246
第二节	道床下沉的累积规律·····	260
第三节	影响道床下沉的主要因素·····	282
第四节	起道、捣固作业所导致的轨面不平顺的固有性 (Inherence)和记忆性(remembrance)·····	288
第五节	道床修理及改善道床工作状态的措施·····	293
第六节	道床维修模型·····	297
第七章	道床脏污及清筛·····	308
第一节	脏污源的分类·····	308
第二节	道床脏污成份的分析·····	312
第三节	道床脏污的形成、发展及其危害·····	324
第四节	道床清筛标准和清筛周期·····	331
第五节	道床修理的经济核算·····	341
第六节	减少道床脏污的措施及道床防脏·····	353
附 录	·····	368
附录一	中华人民共和国铁道行业标准 TB/T2140—90《铁路碎石道碴》·····	368
附录二	中华人民共和国铁道行业标准 TB/T2328.1 —92《铁路碎石道碴试验方法》·····	377

第一章 散粒体的基本物理、力学性能

第一节 散粒体道床结构的特点

所有土木工程结构(如桥梁、隧道、堤坝、厂房)都要求有一个稳固的、在长期使用中不出现残余变形的基础。唯独有碴轨道结构不同,它的基础是由散粒体碎石所组成的道床,道床底下通常就是普通的土质路基。在运营过程中,道床、甚至还有路基必然出现残余变形,进而影响轨道的正常几何状态。因而,一支庞大的维修队伍和浩大的经常维修费用,就成为铁路轨道运营的显著特点。

多年来,人们为了开发维修省力化轨道,在用整体式轨下基础取代散粒体道床方面进行了广泛的研究。在国内主要有混凝土整体道床和沥青道床,在国外还有填充道床、铺装道床等形式。但是所有整体式轨下基础都有一些带根本性的问题没有得到完善的解决,因而影响了它们大面积的推广。这些问题是:

1. 要求有相当稳固的路基基础,否则在运营过程中会由于路基下沉而造成整体基础破损,日后维修相当困难。

2. 施工精度要求比较高。在新线施工过程中,往往由于施工队伍或施工期限的原因,给整体式轨下基础的推行带来困难。在旧线上,由于与行车之间的相互干扰而使整体式轨下基础的推行几乎不可能。

3. 整体式轨下基础的弹性比较差,它给胶垫、扣件、特别是钢轨使用寿命带来的影响不可忽视。

4. 和散粒体道床相比,整体式轨下基础的残余变形慢、维修周期长。但是整体式轨下基础一经出现残余变形,修复起来就比较困难。特别是目前,相应维修机具的研制、配套、维修方法、工艺及

经验的积累还都很不完善。

5. 造价比较昂贵。

因此,目前不论在国内还是国外,整体式轨下基础主要还是用于车站、隧道、高架结构等特定地段。而碎石道床恰恰在上述五个方面具有突出的优点。因而,自有铁路一百多年以来,散粒体碎石道床仍保持其旺盛的生命力,是当今各国铁路主要的轨下基础形式。

第二节 散粒体道床结构的种类 及其基本的职能要求

目前国际上通用的散粒体道床结构有碎石道床、卵石道床、炉碴道床和砂道床。其共同的职能和基本要求主要有下列三个方面:

1. 承受并传递来自轨枕的压力。
2. 保持轨道在横向、竖向及纵向的稳定,提供平、直的行车轨道。
3. 起轨道弹性垫层的作用,减缓和吸收轮轨的冲击和振动。

为了完善地履行上述职能,道床在结构、材质及养护条件方面必须具备下列性能:

在结构方面

1. 道床作为轨道结构的一个部件,必须具有足够的强度、刚度和抗剪能力,以保持轨道结构的整体性和稳定性。
2. 对轨枕荷载具有良好的扩散能力。从而使轨枕荷载通过道床的扩散,达到基床表面的容许应力限度之内。
3. 道床在轨道的纵向和横向具有均匀而足够的弹性,以保证行车的平顺,降低轮轨动力附加荷载。
4. 道床结构在运营过程中,残余变形的积累速率必须在容许限度之内。

在材质方面

1. 良好的抗冲击、抗磨损、抗压碎性能。在重复的冲击、振动作用下,不易破碎和粉化。

2. 良好的抗大气腐蚀和风化的性能。即在温度、干湿、冻融交变、盐碱及酸雨等恶劣环境条件下不龟裂、不崩解。

3. 道碴粉末有良好的渗水性。即不滞水、不粘团、不板结。

4. 有足够的电阻值,以保证在采用轨道电路的信、集、闭区间,电路的正常运营。

在养护条件方面

1. 方便的扒、起、捣、拨作业条件及作业后快速密实、稳定的性能,便于及时维修并经常保持轨道的平直性。

2. 对基床有良好的覆盖、保护性能,防止基面冬季冻害和春夏季杂草丛生。

3. 防止自然风砂、车辆渗漏、机车撒砂、轮轨磨屑等外部脏物的渗入。

第三节 散粒体的粒径、颗粒形状 和颗粒组成(级配)

一、散粒体的粒径、颗粒形状

散粒体颗粒的粒径以筛分时,颗粒所在粒级的上、下筛孔尺寸(以 mm 计)来表示。

颗粒的形状决定于它的长度 a 、断面尺寸 b 和 c 之间比例。分为棱角状、尖角状和圆角状。

二、颗粒组成

颗粒组成或颗粒级配是指以占试样总质量的百分数表示的各种粒径颗粒的相对含量。散粒体的颗粒组成是用不同孔径的筛子对试样进行逐级筛分来确定。因此把试样分成粒级,每一粒级包括规定的该级最小尺寸和最大尺寸之间的全部颗粒。粒级的级别由通过和留住该粒径级筛子的筛孔尺寸来决定。在级配分析中,常用通过该筛孔尺寸的颗粒占试样总质量的百分率(过筛质量百分率)

来绘制颗粒组成(级配)曲线,如图 1—3—1。图中,横坐标为筛孔尺寸,纵坐标为过筛质量百分率。

在散粒体的粒径级配分析中,通常将尺寸从最大 $a_{\max}$ 到 $0.8a_{\max}$ 的颗粒总合叫做最大颗粒级。

在所研究的本试样中这级的百分含量在图 1—1—1 上是用字母 A 表示的。

根据颗粒组成的均匀性程度又将散粒体分为级配好的和级配不好的两种。

当最大和最小颗粒尺寸之比 $\frac{a_{\max}}{a_{\min}}$

>2.5 时为好的级配,当 $\frac{a_{\max}}{a_{\min}} \leq 2.5$ 时为不好的级配。

在每种散粒体中都有一种对该种散粒体来说其尺寸最为典型的颗粒。通常对级配好的散粒体,应把下面的尺寸作为最典型的尺寸。

1. 如果最大颗粒级的含量小于 10%, 取 0.8 倍的最大颗粒尺寸

$$a_T = 0.8a_{\max} \quad (1-3-1)$$

2. 如果最大颗粒级的含量超过 10%, 取最大颗粒尺寸

$$a_T = a_{\max}$$

对于级配不好的散粒体,则取颗粒的平均尺寸作为最典型尺寸

$$a_T = \frac{a_{\max} + a_{\min}}{2} \quad (1-3-2)$$

散粒体根据颗粒尺寸的分类列于表 1—3—1 中。

尘埃状的散粒体不可能用筛分法分成粒级。为此,要采用水分法。

对于土矿物颗粒,按粒径分类,见表 1—3—2。

大碎块土和砂粒土,根据颗粒分析的组成成分,如表 1—3—3 所列的种类。

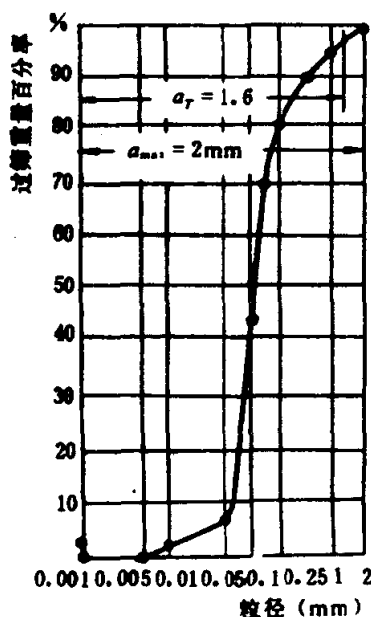


图 1—3—1
颗粒组成(级配)曲线

散粒体按颗粒粒径分类

表 1-3-1

散 粒 体	颗粒典型尺寸 (mm)
大 块 的	大于 160
中 块 的	160~60
小 块 的	60~10
粒 状 的	10~0.5
粉 状 的	0.5~0.05
尘埃状的	小于 0.05

土矿物颗粒按粒径分类

表 1-3-2

颗 粒	颗粒尺寸 (mm)
砾 石	大于 20
砂 砾	20~2
粗 砂	2~0.5
中 砂	0.5~0.25
细 砂	0.25~0.05
粗 粉 砂	0.05~0.01
细 粉 砂	0.01~0.005
粘 土	小于 0.005

大碎块土和砂粒土的种类

表 1-3-3

土	颗粒按粒径的分布(重量%)
碎石(砾石)	粗于 10mm 的, 大于 50
石屑(砂砾)	粗于 2mm 的, 大于 50
砾 砂	粗于 2mm 的, 大于 25
粗 砂	粗于 0.5mm 的, 大于 50
中 砂	粗于 0.25mm 的, 大于 50
细 砂	粗于 0.1mm 的, 大于 75
粉 砂	粗于 0.1mm 的, 小于 75

第四节 散粒体的物理性能

一、空隙比、孔隙率和密实度

散粒体结构的内部孔隙主要是指散粒体颗粒之间的空隙。密实度是指颗粒相互排列、挤密的程度。并定义:

$$\text{空隙比 } e = \text{孔隙体积} / \text{固体颗粒体积} (\%)$$

孔隙率 $\bar{n}$ = 孔隙体积 / 散粒体结构总体积 (%)

密实度 d = 固体颗粒体积 / 散粒体结构总体积 (%)

显然有:

$$\bar{n} = \frac{e}{1+e} \quad (1-4-1a)$$

$$d = 1 - \bar{n} = \frac{1}{1+e} \quad (1-4-1b)$$

对于假想的散粒体,其颗粒为同直径的球,并以最大可能的密度堆积起来,其特征是每个球都位于四面体的顶点如图 1—4—1(a)并与其余 12 个球接触,其空隙比、孔隙率和密实度分别为 $e = 0.352, \bar{n} = 0.258, d = 0.742$

如果是同样的球,但这样来堆积,即把每个球放在立方体的角上并与其它球有 6 个点接触,其中每四个点位于一个平面内如图 1—4—1(b)则 $\bar{n} = 0.476, e = 0.923, d = 0.526$ 。第一种情况的球叫密实堆体,第二种情况叫松散堆体。

由不规则形状颗粒(有时尺寸也不同)组成的天然散粒体,空隙比可以是另外的数值。例如前苏联 M·C·别尔恩什琴和 A·Г·依姆梅尔曼对变化填砂结构所做的试验,得到粒级不太分散的粒径为 0.2~3mm 的砂的空隙比在 0.475 到 0.78 的范围内。对于分选出来的 1~3mm 的粒级,空隙比能够达到 0.812 以上。

当砂以“下雨”方式向容器里撒落,并在撒落的整个期间使砂面都保持近乎水平面时,可达到最密实的结构。

当砂子从移动漏斗中以最小的高度漏下时,得到的砂子结构最松散。

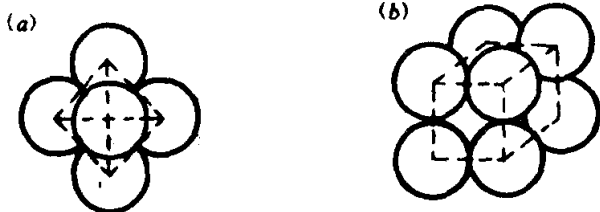


图 1—4—1 假想散粒体的堆体图

前苏联 И·В·考斯特列夫同样用试验方法确定了空气风干砂空隙比的极限值。最大空隙比为 1.012, 是在极限松散状态的粉砂中得到的; 最小空隙比是 0.415, 是在极限密实状态的粗砂中得到的。为了使砂子达到极限密实状态, 需把砂子装在上小下大的圆锥形容器内, 用敲打法使之密实。

极松散状态下的最小空隙比, 是在形状相同的圆粒或半圆粒的级配不均匀的中砂中测到的。同时, 这种砂在密实时也比具有尖角的和无一定形状的颗粒的砂保持有更大的空隙比。

空隙比是道床的重要指标之一。一般说来, 道床经夯实、运营, 内部颗粒形成骨架, 道床达到稳定之后, 会出现道床的最佳工作状态。达到最佳工作状态后的道碴空隙比愈大, 在运营过程中脏污和小颗粒积累的容量就愈大, 其排水性能就愈不容易遭到破坏。另外, 空隙比愈大, 其弹性及抗剪强度会愈高。因此, 道床中的空隙被小颗粒或脏污成分完全填满是绝不容许的。

表 1—4—1 列出了不同粒径、级配道床的孔隙率 n 。

道床孔隙率(%)

表 1—4—1

道碴粒径 (mm)	铺设时不带覆盖层	带下列材料的覆盖层		
		石棉	贝壳	粗、中砂
25~70	34	27	24	17
40~70	38	27	25	19
25~40	33	27	26	21

由表 1—4—1 可以看出, 粗粒径单(或窄)级配道碴(40~70)的孔隙率较大。但最大粒径受养护条件的限制, 同时粒径粗, 单位面积内的颗粒数目就少, 颗粒之间的压力增大, 从而加速颗粒的破碎和粉化。带覆盖层的道床虽然孔隙率小, 但它有利于防止外部脏污的侵入, 使用在煤运、矿山等外部脏污严重的线路上特别有利。因此, 空隙比或孔隙率只是确定道碴粒径、级配及覆盖层等参数的因素之一, 解决实际问题时, 必须作综合考虑。

二、含 水 量 W

散粒体的含水量是指散粒体内所含自由水和吸着水的质量与固体颗粒的质量之比。

填充散粒体之间全部或局部空隙的水可以是结合水、自由水或气态水。

结合水或吸着水是从周围空气中吸收来的,并靠着分子吸引力以薄膜形式附在散粒体颗粒的表面上。这种水在传给散粒体的压力影响下不能从一个颗粒移到另一个颗粒上。

自由水存在于分子吸引力作用的范围以外,这个吸引力是使水与散粒体颗粒表面联系在一起的。自由水可在重力和表面张力的作用下进行移动。散粒体内所含自由水的数量与它所受到的压力有关。

气态水或说是水蒸气是在散粒体的孔隙中形成的,即使在自由水极少时也会充满孔隙。此外,在散粒体颗粒本身内还可能存在着所谓的化合水。

含有自由水的散粒体称为湿的散粒体。

当散粒体长时间放置在露天空气中时,自由水将被蒸发掉,散粒体将变成天然含水量状态。用把散粒体放在 105°C 温度下烘干到重量固定不变的方法可将吸着水排除掉。这种状态的散粒体称为干燥的散粒体。

散粒体内所含自由水和吸着水的重量与固体颗粒的重量之比称为含水量。含水量按下式确定:

$$W = \frac{G_1 - G_2}{G_2} \quad (1-4-2)$$

式中 G_1 ——该体积的散粒体烘干前的质量;

G_2 ——该体积的散粒体烘干后的质量。

饱和度,即孔隙体积被水充满的程度,按下式来确定:

$$\omega = \frac{W\gamma_s}{e\gamma_w} \quad (1-4-3)$$

式中 γ_p ——颗粒物质的密度,对于有机质,它在 1.2 到 1.4 g/cm³ 范围内变化,对于土成份中所含的大量矿物质,为 2.4~2.8g/cm³;

γ_w ——水的密度。

三、容 重

散粒体的容重是指包括颗粒体积和空隙体积在内的结构单位体积的质量(g/cm³)。它的值和材质、粒径级配、颗粒形状及夯实程度等多种因素有关。散粒体的容重还与颗粒的密度、孔隙率和空隙充水程度有关。

空隙全部被空气充满的散粒体的容重,用式(1—4—4)表示。

$$\gamma_d = \gamma_p(1 - \bar{n}) = \frac{\gamma_p}{1 + e} \quad (1-4-4)$$

空隙全部被水充满的散粒体的容重,用式(1—4—5)表示。

$$\gamma_s = \gamma_p(1 - \bar{n}) + \gamma_w \bar{n} = \frac{\gamma_p + e\gamma_w}{1 + e} \quad (1-4-5)$$

空隙一部分充水,一部分充填空气的散粒体的容重,用式(1—4—6)表示。

$$\gamma_m = \gamma_p(1 - \bar{n})(1 + W) = \frac{\gamma_p(1 + W)}{1 + e} \quad (1-4-6)$$

当散粒体全部浸没于水中时,它将受到托浮并损失一部分重力。但是每一立方米的损失重力不是 9.81~10kN,而是比它小,因为所排开的水只是固体颗粒所占的那部分体积。其结果,悬浮于水中的散粒体的所谓容重为:

$$\begin{aligned} \gamma_{BS} &= (\gamma_p - \gamma_w)(1 - \bar{n}) = \frac{\gamma_p - \gamma_w}{1 + e} \\ &= \gamma_d - \frac{\gamma_w}{1 + e} \end{aligned} \quad (1-4-7)$$

空隙全部充满空气的各种散粒体的容重列于表 1—4—2 中。

前苏联对不同材质和粒径级配的道碴进行容重测试的结果列于表 1—4—3 中。由表可以看出,无论是散粒体处于松散状态或密