

砂砾石地基工程地质

石金良 刘麟德 徐福林 张宝山
白玉华 编 著



水利电力出版社

砂砾石地基工程地质

石金良 刘麟德 徐福林 张宝山
白玉华 编 著

水利电力出版社

内 容 提 要

“砂砾石地基工程地质”是在生产实践中发展起来的工程地质学的一个分支，它汇集了多年来砂砾石地基的实践经验和科研成果。本书共6章，内容包括：砂砾石概论；砂砾石的成生；砂砾石地基勘探；砂砾石地基试验；砂砾石地基工程地质评价；砂砾石地基处理和观测。

本书适合于水利水电、工业交通、民用建筑等工程地质人员阅读，也可供有关院校师生参考。

砂砾石地基工程地质

石金良 主编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 10.125印张 225千字

1991年2月第一版 1991年2月北京第一次印刷

印数 0001—2190册

ISBN 7-120-01174-X/TV·436

定价 7.80元

序

工程地质学的发展既有综合的一面，又有分解的一面。近年来，环境工程地质学的崛起就是工程地质学科走向更高级综合的体现。同时，随着工程地质学知识的大量积累，许多专门经验的日益丰富，使得工程地质学的分支学科繁荣昌盛起来。《砂砾石地基工程地质》正是这种分支化丰硕成果的佳品。

工程地质学的发展由定性走向定量，要在定性的基础上发展定量的评价方法，这是国内外工程地质学家所公认的，也是大家致力的方向。《砂砾石地基工程地质》的作者在这方面作出了卓有成效的努力。砂砾石地基不是一种简单的材料，而是一种地质历史产物。在地质成因研究的基础上，认识它的分布规律和类型，指导勘测和地基的定量评价，这是工程地质工作者独到的工作路线。正是这种坚定的信念，使工程地质学鲜明地和现代材料科学区别开来。但是，本书的作者并未停留在经典的界碑上，他们继续向前迈进，走向定量评价。事实上，从物理力学特性到工程地质作用缺乏定量的参数是难于解决工程实际问题的。

工程地质学是一门应用性很强的学科，它的理论都要一一落足实际。不实用的工程地质学算不上是真正的工程地质学。本书从工程地质问题的定量评价到地基工程处理，重于应用，重于实际，是突出的。

《砂砾石地基工程地质》一书的问世，以它的专门性、

系统性和实用性，使工程地质学的宝库增添了新的篇章。

中国科学院地质研究所所长、研究员
国际发展地球科学家协会理事长

王思敬

1989年2月于北京

前 言

工程建筑物都以一定的岩土做为天然地基。砂砾石、尤其是第四纪砂砾石，因其分布广泛，常是天然地基的主要组成部分。铁路、桥梁、厂房、码头和各种工业民用建筑物大都建筑在砂砾石地基上。在水利水电建设中，砂砾石更占有重要地位，其不仅做为水电站附属建筑物地基，还做为主体工程——大坝地基。到目前为止，国内外已有四五十座大、中型水利水电工程建筑在砂砾石地基上。如加拿大买加心墙土石坝，坝高244m，为世界上建筑在砂砾石地基上的最大水坝；我国在砂砾石地基上兴建的最大水坝是陕西石头河水库心墙土石坝，最大坝高115m。

为总结砂砾石地基工程实践，探讨学科理论，填补我国砂砾石地基工程地质论著方面的空白，在水利电力部成都勘测设计院院领导的支持与组织下，由石金良（主编）、刘麟德、徐福林、张宝山、白玉华等编著了《砂砾石地基工程地质》一书。

中国科学院地质研究所所长、国际发展地球科学家协会理事长王思敬研究员阅读书稿后为本书作序；水利电力部北京勘测设计院张继超、崔诗礼等同志共同审阅了书稿，提出了许多改进意见，使书稿更趋完善；成都勘测设计院王雨江、陆继伯、邹天培、何朝新、许天海、曾维汉、宋振中、刘银珍、余世英、龙疆红等同志为本书的编写做了有益的工作。在此，对以上同志表示衷心感谢。

目 录

序

前 言

第一章 砂砾石概论	1
第一节 砂砾石的地质特征	1
第二节 砂砾石的成因类型	8
第三节 砂砾石的分布规律	10
第四节 砂砾石的工程地质分类	15
参考文献	15
第二章 砂砾石的成生	16
第一节 单一冲积型砂砾石	16
第二节 复合加积型砂砾石	29
第三节 巨厚沉积型砂砾石	47
第四节 中国一些河流的砂砾石层状况	50
参考文献	62
第三章 砂砾石地基勘探	64
第一节 勘探布置	64
第二节 物探	68
第三节 钻探	91
第四节 井探	117
第四章 砂砾石地基试验	123
第一节 物理性质试验	123
第二节 砂砾石地基承载力及其变形试验	132
第三节 砂砾石抗剪强度试验	144
第四节 砂砾石地基的渗透及渗透变形试验	167

第五节 饱和砂土液化试验	174
参考文献	188
第五章 砂砾石地基工程地质评价	191
第一节 砂砾石地基组合分类	191
第二节 砂砾石地基承载性能及其变形稳定	196
第三节 地基抗滑稳定	206
第四节 渗流稳定	211
第五节 饱和砂基液化	233
参考文献	254
第六章 砂砾石地基处理与观测	255
第一节 砂砾石地层建坝概述	255
第二节 砂砾石地层建坝的工程措施	263
第三节 砂砾石地基防渗措施	269
第四节 防治砂基液化的工程措施	306
第五节 原型观测	312
参考文献	316

第一章 砂砾石 概论

第四纪是地球在其漫长的地质历史发展时期内的最新阶段。在这个阶段，地壳表面经受了内外地质营力的综合作用，形成了一系列与地质构造及气候环境相联系的第四纪堆积物。砂砾石就是其中主要的内容。

砂砾石是第四纪沉积物中的一种具有鲜明特征的松散粗碎屑堆积层。它既不同于已胶结的砂岩、砾岩，也不同于细粒的粘性土；它既不是独立的地层单位，也不属于同一的成因类型。砂砾石是一个综合地质体。它可以根据岩性、成因、结构、构造、粒度成分和胶结程度进行分类和评价。

第四纪砂砾石与古老地层相比，有它显著的特点：①形成时间很短，最老的堆积物其绝对年龄亦不过300万年左右，有的正处于现代堆积时期；②一般尚未固结成岩，大多保持松散状态；③成因类型复杂，岩性、岩相、厚度变化甚大；④分布广泛，在高原、山地、丘陵、平原以及江、河、湖、海底部都有砂砾石堆积；⑤与工农业生产和国计民生关系十分密切，既可以作为建筑物的天然地基，又可以提取砂矿和充当天然建筑材料。因而，对砂砾石的论述具有重要的理论与现实意义。

第一节 砂砾石的地质特征

第四纪砂砾石虽然所处的地理位置不同，地质发展史不同，但它们都是内营力与外营力相互制约作用的结果，是特

定地质环境的产物，因此是有规律可循的。成因的多样性和结构的松散性是砂砾石的主要地质特征。

一、砂砾石的地层系列

第四纪砂砾石是第四纪地层的组成部分，按照第四纪地层的划分原则，它分属于下更新统（ Q_1 ）、中更新统（ Q_2 ）、上更新统（ Q_3 ）和全新统（ Q_4 ）。第四纪地层堆积的层序，在平原地区，随着地面的不断下降，老地层逐渐被埋藏在较深的地方。但是另一些地区的堆积顺序与分布却不完全相同。例如，河流冲积物，由于地壳的隆起，高阶地上的堆积物时期较早。因此，从地层角度研究砂砾石，除分析地貌特征外，还须对动、植物化石、古人类活动及文化层进行必要的绝对年龄测定。由于第四纪砂砾石绝大部分未成岩，很容易被风化、破坏与再搬运，形成再堆积，致使在新地层中常见有老地层的成分，或这种沉积物中有另外一种类型的物质，使得对第四纪砂砾石的研究比对古老地层的更为复杂。

二、砂砾石的地貌形态

中国地势西高东低。按高度的变化，可分为三级阶梯。我国河流如长江、黄河、黑龙江、珠江等均依地势由西而东流入太平洋。横断山区的大江大河向南流出国境，注入太平洋或印度洋。在我国北部和西部，还有许多内陆河流，至下游积水成湖或消失在沙漠中。第四纪砂砾石就是在这种地势基础上形成与发展的。

第四纪砂砾石，由于成生之不同，地貌上也表现出不同的形态。河流冲积物形成冲积平原、冲积扇、河流阶地、河漫滩与现代河床堆积。冰碛物构成冰碛垅岗、冰水阶地、外冲平原以及冰碛堰塞湖积等。不同的地质作用，在形成砂砾石

堆积的同时，也塑造出相应的地貌景观。因此，为了更深入地研究与认识砂砾石，必须认真注意地貌形态的研究。

三、砂砾石的古气候标志

第四纪时期，幅员辽阔的中国大陆，受到世界性气候变迁的影响，有过多次冰期与间冰期的出现。著名地质学家李四光教授提出我国第四纪冰期问题后，经冰川工作者的充实与完善，划分出：大理、庐山、大姑、鄱阳4个冰期。由于工作的不断深入，近些年来又发现鄱阳冰期之前还存在一个冰碛层，定名为“红崖冰期”（或称“龙川冰期”），并得出中国第四纪下限大于300万年的结论。

随着第四纪冰期与间冰期、湿润期与干燥期的更替，引起沉积环境的改变，使第四纪砂砾石的性质、成因类型和分布规律等各有独居的特性。冰碛砂砾（块）石，冰水砂砾石和冰川泥流沉积等，是冰期的产物；冲积砂砾石、湖积层、泥岩和红土等，是间冰期和湿润气候的产物；而干燥气候则形成黄土和风成砂等。

四、砂砾石的新构造标志

第四纪时期，由于新构造运动频繁，不仅导致地壳或大面积地块的升降运动，而且在局部范围内也导致地块或断块的差异运动，形成褶曲或断裂。砂砾石的性质、厚度、分布和变形特征，无不受控于或反映着新构造运动的方式和强度。一般，砂砾石分布范围广、厚度大的地区，都是新构造运动下降区，如华北平原、松辽平原、江汉平原、成都平原以及某些山间盆地等。第四纪砂砾石层多沿老断裂呈带状分布，如渭河地堑盆地中的第四纪沉积物，不仅呈带状分布，而且厚度达1000m以上；大渡河中游与安宁河的断裂谷内，堆积着厚逾百米的覆盖层。河谷阶地、洪积扇、埋藏堆积等亦是新

构造运动迹象的反映。第四纪砂砾石层的弯曲、变位、错断，在我国西南、西北地区更是不泛实例。四川渡口、西昌、石棉等地还多处见到新断层将基岩推覆于第四纪堆积之上。新构造运动使得砂砾石的工程水文地质条件变得更加复杂，由此还可以利用第四纪砂砾石层中新构造迹象来评价工程的区域稳定性。

五、砂砾石的岩性特征

第四纪沉积物主要是碎屑沉积物。按其颗粒大小，可分为粗碎屑土、砂土和粘性土三类。就其堆积方式而言，有独立成层堆积、各类互层堆积和混合堆积三种。自然土体中，所有以漂石（块石）、卵石（碎石）、砾石（角砾）为主，含有砂土及少量粘性土粒的粗碎屑堆积物，在广义上统称为砂砾石。

由于砂砾石成因复杂、类型繁多，使其岩性成分、结构、颜色等都具有很大差别。

砂砾石的物质成分，随着搬运介质、距离以及堆积方式的不同，有着很不相同的状况。一般地说，短距离搬运的近源堆积，物质成分与剥蚀点的原岩相一致，堆积物成分单一，颗粒粗大，棱角鲜明，颜色单调；而远距离搬运的砂砾石，物质组成复杂，颗粒坚硬，粒径较小，磨圆度好，颜色混杂。

在砂砾石体中，构成骨架的卵砾石，不论它是什么岩性，也不论它是什么成因，都具有较高强度，只有它们的含量比例以及接合方式才是地基稳定性的控制因素。

六、砂砾石的机械组分

砂砾石机械组分的研究，是从工程地质观点研究砂砾石的重要内容。砂砾石的机械组分包括：粒度及含量比例，粒态

及砾石表面特征等。

(一) 砂砾石的粒度

1. 粒度分级

天然砂砾石是由无数大大小小的颗粒所构成。其颗粒的大小称为粒度，用颗粒直径来表示。在生产实践中，往往把颗粒大小和性质相近的并为一组，称为粒组。目前通用的粒组有：漂石（块石）、卵石（碎石）、砾石（角砾）、砂粒、粉粒和粘粒。前四组又可合并称为粗粒组，后两者统称细粒组。为适应工程上进一步分析研究的需要，还常将各组详细分出粗、中、细等亚级。

目前，对砂砾石粒度分级的标准，尚不尽统一。现将水电系统、第四纪地质和沉积岩石学三方面的分级标准列表 1-1。

表 1-1 砂 砾 石 粒 度 分 级 表

粒 度 分 级	颗 粒 直 径 (mm)		
	水电系统分级法	土质学分级法	沉积岩分级法
漂石(块石)	>300	>200	>100
卵石(碎石)	300~60	200~20	100~10
砾石(角砾)	60~2	20~2	10~2
砂 粒	2~0.05	2~0.05	2~0.1
粉 粒	0.05~0.005	0.05~0.005	0.1~0.01
粘 粒	<0.005	<0.005	<0.01

2. 粒度分类命名

广义砂砾石都由粗粒各组与细粒各组共同组成。因此，必须根据各粒组在砂砾石中所占含量百分数区别命名。

在砂砾石土体中，粗粒组含量超过细粒组，即含量超过 50%，则土体定为粗粒土，反之为细粒土；在粗粒土体中，

如果卵、砾石组超过砂粒组，即含量超过50%，则该粗粒土定为砾石土，反之为砂土。

对于由各个粒组共同组成的砂砾石，除按含量超过50%的粒组按上述确定其主名外，还需进一步用含量居25%~50%的粒组定出该土体的副名，称为“××质”，写在主名的前面；用含量为10%~25%的居第三位的粒组作为形容，称为“含××”，写在最前面，以形成一个统一完整的名称。

例如，在一个土样中，经过分析：卵、砾石占65%，砂粒占30%，粉粒占5%，则该土样属粗粒土，其名称为砂质砾石。又如，另一个土样砾石占15%，砂粒占60%，粉粒占25%，该土样属粗粒土，其名称为含砾粉质砂土。

(二) 砂砾石的砾态

砂砾石的砾石形态是查明沉积环境、搬运介质、搬运方式、论证沉积物工程水文地质特性（如孔隙度、渗透性、抗剪强度等）的重要依据之一，因此应该对砾石形态进行分析研究。

通常，砾石具有三个相互垂直的轴，即最大长度（ a ）长轴、最大宽度（ b ）中轴和最大厚度（ c ）短轴三者。

砾态就是用这个三轴之间的比例关系求出的扁平度、球度以及磨圆度系数来表征的。

1. 砾石的扁平度和球度

砾石的扁平度和球度是重要的形态特征。数值的大小，取决于砾石三个轴长的比例，可用下述公式分别计算。

砾石扁平度用扁平系数（ F ）表示：

$$F = \frac{a+b}{2c}$$

砾石球度用球度系数（ Ψ ）表示：

$$\psi = \frac{\sqrt[3]{abc}}{a}$$

砾石扁平度与球度系数是互补的。球度系数等于1的砾石，球度最高，而扁平度最低；而球度系数愈小，扁平度愈高，球度则越低。一些环境中碳酸盐砾石的扁平系数如表1-2：

表 1-2 不同环境砾石扁平系数表①

环 境	扁 平 系 数
河床残留砾石	1.2~1.6
底 砾	1.6~1.8
冰水沉积	1.7~2.0
海 滨	2.3~3.8

2. 砾石磨圆度

圆度是指砾石颗粒在搬运过程中被磨圆的程度。用磨圆系数 (P_1) 表示：

$$P_1 = \frac{2r_1}{a}$$

式中 a —— 砾石的长轴；

r_1 —— 砾石 ab 轴平面之内切圆半径。

磨圆系数 (P_1) 总是 ≤ 1 。磨圆系数愈接近于1，砾石磨圆度愈高。河成砾石磨圆度远比冰川砾石为高。冰川砾石磨圆系数不超过0.09~0.12●。

目测砾石磨圆度，一般分有五级：

●● 北京大学地貌第四纪地质教材。

[0]级 棱角状——颗粒完全未经磨圆，带有尖削而锐利的边缘，具有新鲜断面。

[1]级 次棱角状——颗粒仍保持其原来的形状，只是边缘和棱角部分略受磨圆。

[2]级 次圆状——颗粒边缘和棱角已受强烈磨损而成圆滑的曲线状，颗粒原来形状可辨，但表面积已缩小。

[3]级 圆状——颗粒的所有棱角和边缘都已被磨圆，分界面几乎已完全消失。

[4]级 极圆状——颗粒原来的面、棱、角都不复存在，全部表面都是磨圆的。

对某地一定数量（100~300颗）岩性相同的砾石进行分级统计，在求出各级所占数量后，还可以用下式计算出砾石的磨圆度（ P_1 ）^①：

$$P_1 = \frac{0n_0 + 1n_1 + 2n_2 + 3n_3 + 4n_4}{4N} \times 100\%$$

式中 P_1 ——磨圆度（%）；

$n_0 \sim n_4$ ——相当于圆度分别为[0]~[4]级的砾石的数量；

N ——所测砾石的总数。

根据磨圆度百分数很容易评价所测砾石的磨圆状况，即 $P_1=0$ 时为[0]级，棱角状； $P_1=25\%$ 时为[1]级，次棱角状； $P_1=50\%$ 时为[2]级，次圆状； $P_1=75\%$ 时为[3]级，圆状； $P_1=100\%$ 时为[4]级，极圆状； P_1 值介于上述各值之间时为区间级。

第二节 砂砾石的成因类型

按沉积环境，第四纪砂砾石层分为海相与陆相两大类。

① 北京大学地貌第四纪地质教材。

陆相沉积砂砾石是内外地质营力长期作用的结果，是地壳运动、自然环境和介质因素的综合体现。地壳内营力不仅造成我国地貌基本格架、配置山地、高原、丘陵和平原，而且在很大程度上控制砂砾石的成因机制和分布上的地域性。

但是，在局部分析上，起主导作用的是外营力，不同形式的外营力作用，形成了不同的沉积物，它们各具独特的岩性、结构，也具有一定的地貌标志，这就是我们通常所理解的第四纪陆相沉积物的成因类型。

同是砂砾石层可具有不同的成因类型。而不同成因类型的砂砾石层更具有不同的结构和技术特性。因此，砂砾石的成因类型概念在水文工程地质上具有重要意义。根据工程地质与第四纪地质的基本原则，将陆相砂砾石层作如下成因类型划分，见表1-3。

表 1-3 第四纪陆相砂砾石层成因类型分类表

成 生 系 列	成 因 类 型
水 成 系 列	冲 积 洪 积 湖 积
冰 川 系 列	冰 碛 冰水堆积 冰缘堆积
重 力 系 列	崩塌堆积 滑坡堆积
共 生 系 列	混合堆积

水成共生系列是砂砾石的主要成因类型。其中冲积成因的是河水将剥蚀的碎屑物质进行搬运，并在河流沿线或冲积