

国 家 自 然 科 学 基 金 资 助 出 版
陕 西 省 优 秀 科 学 文 艺 著 作 出 版 基 金

黄土力学与工程

刘祖典 编著

陕西科学技术出版社

前 言

黄土在世界上分布较广,在世界各国中以我国西北地区黄土地层最厚,最完整,发育好,地层全,分布连续,其特性较典型。在工程建筑方面属具有特色的建材和地基,建国 47 年来结合国家基本建设,一直是我国岩土工程界研究的对象。50~80 年代结合当时的基本建设,对黄土的时代成因、基本性质、变形强度特性在广度和深度上的变化规律;对黄土的湿陷变形特性、湿陷类型、评价标准、黄土地基的承载力与变形和处理方法如夯实、挤密及不同类型的桩箱基的研究与实践都取得了显著成果,解决了许多实际工程问题。80~90 年代对黄土的微结构进行了深入研究,指出黄土的骨架颗粒成分、形态、排列方式、孔隙特征、胶结物种类以及胶结程度等,对黄土的工程地质性质有着重要影响,并从微结构特征阐明黄土的结构强度与湿陷性本质;对黄土在静动载荷作用下的应力应变关系和本构模型,在不同湿度、密度条件下的振陷与动强度特性等的研究也取得了创新成果。汇综所取得的研究成果和实践经验,先后制订了“66、78、90 湿陷性黄土地区建筑规范”(以下简称“规范”),“规范”不仅反映了建国数十年来对黄土工程性质的研究成果与实践经验,并为黄土地区工程建筑的设计施工提供了理论与实践基础。改革开放以来对黄土的研究又有新的进展:如对非饱和土力学特性的理论和吸力测试技术的研究;湿陷性黄土增减湿度后湿陷性的变化和结构强度的研究; Q_2 黄土层的湿陷性和湿陷性黄土深基处理新技术等都取得令人瞩目的成果。总之结合工程实际,随着改革开放的深入发展,对黄土的变形强度问题的研究更加深入和广泛,提出许多新问题和新技术:如深基坑开挖与支撑;

饱和黄土地基的处理;高陡黄土边坡路堑和水库岸坡的坍塌机理和增稳措施;加筋土的变形强度的研究等都获得了可喜成果。又如黄河上游龙羊峡电站库区南岸,高陡库岸坡滑塌机理与稳定性预估以及陕西宝鸡峡引渭工程 98km 干渠高陡黄土边坡的坡形和坡比设计的研究与实践都取得举世瞩目的效果。

国外苏联、东欧国家和美国对黄土的工程性质研究都较早,但多偏重于黄土湿陷特性水土流失规律的研究,对黄土其他工程性质研究成果较少,至今尚未有一本较系统的“黄土力学和工程”专著。这对黄土力学和工程建设是一极大缺陷,为了填补这一空白,应首先将我国多年积累的科研与实践成果总结编著成册,以促进岩土工程学科中的黄土力学与工程事业的发展与进步,适应当务之急。

本书从 1985 年开始编写提纲,先编写出黄土力学研究生教材,试用几年后结合自然科学基金课题的完成以及多年积累的大量科研成果和工程实践经验,重新整理删改,提出新的稿本,共计 9 章 47 节,约计 35 万字,各章主要内容为:第 1 章评述了我国黄土的基本性质,详述我国黄土的时代成因,地层序列和结构,地区分布、地质特征、微结构和物理化学性质等;第 2 章黄土的力学性质,如黄土的结构强度,压缩变形和线弹性模量,剪切强度与强度指标的变化规律,黄土的渗透性和动力特性等;第 3 章黄土的湿陷变形特性,如湿陷变形类型、等级和评价,湿陷性的塑性特性和湿陷本构关系以及振动湿陷变形特性等;第 4 章黄土的非线性变形,如黄土的应力应变关系曲线类型,不同类型曲线的力学特性和模型参数,非线性 $E-\mu$ 和 $K-G$ 模型和参数,考虑剪胀和软化特性的 $K-G$ 模型等;第 5 章黄土变形的弹塑性本构关系,如黄土弹塑性理论基础、屈服函数、流动法则、硬化规律和加卸载准则、帽盖函数,弹塑性本构关系的矩阵和有限元解法等;第 6 章黄土天然地基和箱桩复合地基的承载力与变形分析等;第 7 章黄土地基处理方

法,如砂石与灰土垫层,灰土挤密桩和箱桩基础等;第 8 章黄土边坡(路堑)的设计,破坏机理与稳定分析,增稳与锚固措施以及多年工程实践经验等;第 9 章黄土洞室的围岩压力,如黄土洞室围岩压力形成机理与规律,影响围岩压力的地质与工程因素分析,黄土洞室围岩压力的数理统计公式和弹塑理论解等。

总之,本专著是在长期科研与实践经验积累基础上的撰编成果,理论与实践并重,充分反映了当前我国黄土力学与工程研究的理论和实践经验以及发展前景。为今后在本领域的研究与发展提供了一定基础。但限于我们的理论水平和实践经验,其中难免还会有不足之处,希同行专家批评指正。

1996.8

Mechanics and Engineering of Loess

Forwards

The loess area widely spreads over the world with an area of about $13 \times 10^6 \text{ km}^2$. China the loess area covers only 640,000 km^2 , distributing mainly along the middle reaches of the Yellow River Valley, and constituting one of the most important parts of the Chinese regional and physical geography and the Loess Plateau. Loesses on the loess plateau are famous over the world for their fine behaviors such as stratigraphical integrity, fully-developed formation, good sequence of strata, deep and thickness reaching from 100 meters to 200 meters and even in some areas with their thickness reaching 300 meters in depth, continuous distribution, special microstructures, physical mechanics and collapsibility, etc. Loesses are also a kind of useful material and foundation of building structure in this region.

Since the 1950s in this century and in accordance with national developing plan, such wonderful progress has been made in the investigation and study of the geotechnical properties of loesses that their behaviors and engineering properties of loesses have attracted the significant attention and interests among the geotechnical scientists and engineers in China with the Northwest Part of the country in particular. They have carried out the various laboratory and field tests as well as actual engineering practices with a lot of valuable achievements and engineering experience obtained and summarized as follows:

Much has been done on the study of the microstructures, physical mechanics, collapsibility, stress-strain relationship, e-

lastic—plastic constitutive models of loesses and the assessment of stability of loessal slopes, etc, with much research information obtained in this book. On the basis of which a book consisting 9 chapters has been contributed. In the first chapter of this book, it gives a brief introduction to the basic features and classifications of loesses; in the second chapter, the principles of static and dynamic mechanical properties of loesses are discussed; the third, fourth and fifth chapters are the main parts of this book. They describe the collapsibility, lineal, non—lineal and elastic—plastic constitutive models of loesses, numerical computer programs for solving the practical problems of loessal structure with finite element method (FEM); the sixth and seventh chapters mainly deal with the bearing capacity and deformation of loessal foundation and foundation treatment method with lime soil pile and various concrete piles to decrease the collapsibility and increase the strength of loessal foundation; and in the last two chapters, the book presents in detail the design method of loessal slope and tunnels as well as their stability assessment. In conclusion, I believe that this book would be the useful and helpful reference to geotechnical engineers and soil mechanics for further promoting technical exchanges and cooperation in their work.

目 录

第 1 章 黄土的基本性质	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 黄土的地质特征	(1)
1.2.1 黄土的地层划分	(2)
1.2.2 我国黄土沉积的分区	(4)
1.3 黄土的微结构特征	(6)
1.3.1 黄土的微结构特征及骨架颗粒形态	(6)
1.3.2 黄土骨架颗粒的连接形式	(7)
1.3.3 黄土骨架颗粒的排列方式和孔隙	(8)
1.3.4 黄土的微结构分类	(9)
1.3.5 黄土的胶结物质和胶结类型	(9)
1.3.6 黄土的物理力学性质	(11)
第 2 章 黄土的主要力学性质	(19)
2.1 黄土的压缩变形特性	(19)
2.1.1 概述	(19)
2.1.2 黄土欠压密特性的形成机理	(20)
2.1.3 黄土的压密分类和压密状态	(20)
2.1.4 黄土的压缩曲线和压缩指数	(21)
2.1.5 黄土的压缩变形模量	(27)
2.2 黄土剪切强度特性	(37)
2.2.1 黄土剪切强度的工程意义	(37)
2.2.2 黄土的抗剪强度特性	(38)
2.3 黄土的强度指标及其变化规律	(46)

2.3.1 黄土强度指标的变化规律	(46)
2.3.2 黄土强度指标与物理性质指标间的关系	(48)
2.3.3 黄土抗剪强度指标的变化范围	(50)
2.3.4 黄土的残余强度	(52)
2.3.5 黄土的抗拉强度	(55)
2.3.6 黄土强度指标的选用问题	(56)
2.4 黄土的渗透特性	(58)
2.4.1 黄土的渗透特性	(58)
2.4.2 黄土渗透性的一般规律	(59)
2.5 黄土的动力特性	(62)
2.5.1 黄土动力学研究的主要问题	(62)
2.5.2 黄土的动力特性指标及其测定	(63)
第3章 黄土的湿陷变形特性	(70)
3.1 黄土的湿陷变形特性	(70)
3.1.1 黄土的湿陷变形曲线和湿陷系数	(70)
3.1.2 黄土场地的湿陷类型和等级	(73)
3.2 影响黄土湿陷性的因素分析	(78)
3.2.1 影响黄土湿陷性的主要因素	(78)
3.2.2 湿陷系数与物理性指标的关系	(78)
3.2.3 关于黄土湿陷特性的讨论	(92)
3.3 黄土地基自重湿陷的敏感性	(95)
3.3.1 浸水面积大小对自重湿陷量的影响	(96)
3.3.2 浸水时间对自重湿陷量的影响	(96)
3.3.3 浸湿范围与裂缝开展距离	(97)
3.3.4 影响自重湿陷敏感性的主要因素	(98)
3.4 黄土湿陷变形的塑性特性和本构关系	(99)
3.4.1 概述	(99)
3.4.2 湿陷的塑性本质	(99)

3.4.3	湿陷变形塑性本构关系的一般形式	(100)
3.4.4	湿陷应力-应变关系的确定	(102)
3.4.5	湿陷起始屈限函数 Φ 的确定	(102)
3.4.6	黄土湿陷变形机理的分析	(105)
3.5	黄土振动湿陷变形特性	(107)
3.5.1	振陷变形曲线及数学模型	(108)
3.5.2	振陷临界动应力	(109)
3.5.3	初始含水量对振陷变形的影响	(110)
3.5.4	固结比对振陷的影响	(111)
3.5.5	振陷指标与湿陷指标间的关系	(111)
3.5.6	振陷量的估算	(113)
第4章	黄土的非线性应力-应变特性	(115)
4.1	概述	(115)
4.2	黄土的应力-应变关系曲线类型	(116)
4.2.1	原状黄土的应力-应变关系曲线	(116)
4.2.2	饱和黄土的应力-应变关系曲线	(118)
4.2.3	挤密黄土的应力-应变关系曲线	(122)
4.2.4	击实黄土的应力-应变关系曲线	(127)
4.3	黄土的 $E-\mu$ 模型参数的确定	(130)
4.3.1	强硬化型应力-应变曲线	(130)
4.3.2	弱硬化型应力-应变曲线	(130)
4.3.3	弱软化型应力-应变曲线	(140)
4.3.4	强软化型应力-应变曲线	(141)
4.4	黄土的 $K-G$ 模型参数的确定	(145)
4.4.1	概述	(145)
4.4.2	切线弹性体积模量(K_t)	(146)
4.4.3	切线弹性剪切模量(G_t)	(147)
4.4.4	考虑剪胀和软化的 K_t-G_t 模型参数	(152)

4.4.5 关于 E- μ 和 K-G 模型的讨论	(158)
第 5 章 黄土变形的弹塑性本构关系	(160)
5.1 黄土的应力-应变关系	(160)
5.1.1 土的应力-应变关系类型	(160)
5.1.2 弹性应力-应变关系	(161)
5.2 黄土的非线性应力-应变关系	(175)
5.2.1 双线和多线模型	(177)
5.2.2 双曲线弹性模型	(178)
5.2.3 非线性问题的类型	(180)
5.2.4 非线性弹性问题的基本解法	(181)
5.3 黄土的弹塑性本构理论	(184)
5.3.1 塑性理论基础	(184)
5.3.2 土的塑性变形	(194)
5.3.3 普遍的弹塑性本构关系	(196)
5.3.4 帽盖模型	(202)
5.3.5 弹塑性本构关系的矩阵化	(215)
5.3.6 弹塑性刚度矩阵的组成	(224)
5.3.7 弹塑性问题的数值解法	(228)
第 6 章 黄土地基的承载力与变形	(249)
6.1 概述	(249)
6.2 黄土地基承载力和变形特征	(250)
6.3 黄土地基承载力的确定方法	(253)
6.3.1 按黄土成因时代和物理性质确定承载力	(253)
6.3.2 按极限平衡理论确定承载力	(255)
6.3.3 按荷载试验确定承载力	(259)
6.3.4 按触探法确定承载力	(260)
6.4 复合地基的特性	(262)
6.4.1 综述	(262)

6.4.2	复合地基的承载力	(266)
6.4.3	复合地基桩体的荷载传递规律	(271)
6.4.4	复合地基的设计	(274)
6.5	黄土地基的压缩变形	(275)
6.5.1	天然地基的压缩变形	(275)
6.5.2	复合地基的沉降计算	(281)
6.5.3	桩箱基础的沉降计算	(284)
6.5.4	桩箱基础设计	(289)
6.5.5	桩箱基础设计方法的讨论	(293)
第7章	黄土地基处理方法	(296)
7.1	概述	(296)
7.2	黄土地基处理方法	(297)
7.2.1	灰土垫层	(297)
7.2.2	砂石垫层	(298)
7.2.3	强夯法	(299)
7.2.4	灰土挤密桩	(303)
7.2.5	振冲碎石桩	(304)
7.2.6	打入混凝土预制桩	(305)
7.2.7	灌注桩	(307)
7.2.8	深层水泥搅拌桩	(308)
7.2.9	大直径扩底灌注桩	(310)
7.3	湿陷性黄土地基中桩的负摩擦力	(310)
7.4	黄土地基处理方法的讨论	(312)
第8章	黄土边坡的设计与稳定问题	(317)
8.1	黄土塬边的工程地质特征	(317)
8.2	黄土边坡的设计问题	(319)
8.3	黄土边坡的特点	(320)
8.4	黄土边坡的坡高、坡比和坡型的相互关系	(321)

8.5	黄土边坡设计中强度指标的选用问题	(333)
8.6	黄土边坡设计中影响安全系数的因素分析	(336)
8.7	黄土边坡的变形、破坏和维护措施	(343)
8.8	考虑地震力土坡稳定性闭合解图卡	(345)
8.9	黄土高陡边坡的失稳机理和锚固措施	(355)
8.9.1	黄土高陡边坡破坏机理分析	(355)
8.9.2	锚杆加固措施分析	(357)
8.9.3	抗拔力的确定	(357)
8.9.4	锚杆拉拔变形机理	(359)
8.9.5	锚杆排列形式与间距	(360)
8.9.6	锚固边坡稳定性验算	(360)
8.10	土坡稳定分析方法的讨论	(362)
第9章	黄土洞室围岩压力分析	(366)
9.1	概述	(366)
9.2	黄土洞室设计计算理论研究的发展与现状	(366)
9.3	黄土洞室围岩压力形成机理与规律	(369)
9.3.1	黄土洞室围岩压力规律	(369)
9.3.2	黄土洞室围岩压力机理	(371)
9.4	黄土洞室围岩压力的影响因素分析	(373)
9.4.1	地质因素	(374)
9.4.2	工程因素	(375)
9.5	圆形洞室围岩压力的弹塑性理论解析	(382)
9.5.1	弹性理论解析	(382)
9.5.2	弹塑性理论解析	(386)
9.5.3	粘塑性分析	(388)
9.6	黄土洞室围岩压力的计算	(389)
9.6.1	垂直围岩压务	(390)
9.6.2	水平围岩压力	(396)

9.7 围岩压力分析的有限元法 (398)

参考文献..... (399)

第 1 章 黄土的基本性质

1.1 概 述^[1]

黄土古称“黄壤”，本源于土地之色，是一种第四纪沉积物，具有一系列内部物质成分和外部形态的特征，不同于同期的其他沉积物，在地理分布上也有一定的规律性。世界许多国家，如美国的中西部、俄罗斯的南部和澳大利亚等国都有分布，全世界各洲黄土和黄土状土分布的总面约 1300 万 km^2 ，占陆地面积的 9.3%。我国的黄土和黄土状土的分布面积为 64 万 km^2 ，是国土面积的 6.3%。在黄河中游地区，西起贺兰山，东到太行山，北起长城，南到秦岭几乎全部都被黄土覆盖，面积约 27 万 km^2 。这里黄土发育最好，地层全、厚度大、分布连续，是我国黄土主要分布地区。由于对它的开发利用不合理，造成水土流失，使平整的黄土高原分割而成丘陵沟壑纵横，不仅对农业发展和工业、水利、交通等工程建设造成不利影响，也是黄河泥沙的主要来源，如何合理开发利用好这部分黄土，具有深远的历史意义。

1.2 黄土的地质特征

如上所述，黄土在我国分布面积相当广泛，由于各地的地理、地质和气候条件不同，使黄土在沉积厚度、地层特征和物理力学性质上都表现出明显的差异和变化，一般具有以下特征：

- (1) 颜色以黄色、褐黄色为主，有时呈灰黄色；
- (2) 颗粒组成以粉粒(0.05~0.005mm)为主，含量一般在 60%以

- 上,粒径大于 0.25mm 的较少;
- (3)有肉眼可见的大孔隙,较大孔隙,一般在 1.0mm 左右;
- (4)富含碳酸盐类,垂直节理发育。

1.2.1 黄土的地层划分

我国黄土形成经历了整个地质年代的第四纪时期。按形成的年代可分为老黄土和新黄土。老黄土有午城黄土,其标准剖面首先在山西隰县午城镇找到,所以称午城黄土;离石黄土,其标准剖面首先在山西离石县找到,所以称之为离石黄土。新黄土有马兰黄土,其标准剖面首先在北京西北马兰山谷的阶地上找到,所以称之为马兰黄土;新近堆积黄土,形成年代较晚,距今约 5000 年,一般土质疏松。马兰黄土和新近堆积黄土均具有浸水湿陷性,故又称之湿陷性黄土。

陕西洛川县阳术乡北谷村刘家河剖面被认为是较典型的黄土地层剖面,如图 1.1 所示

各层黄土形成年代和成因如表 1.1

表 1.1 黄土地层划分和特性^[2]

年 代		黄 土 名 称			成 因		备 注
全新世 Q ₄	近期		新黄土	新近堆积	次生黄土	以水成为主	杂乱无章,具不均匀性、 高压缩性、强湿陷性
	早期			一般湿陷性黄土		风成为主	浅黄,一般具湿陷性
晚更新世 Q ₃		马兰黄土			原生黄土		
中更新世 Q ₂		离石黄土	老黄土	非湿陷性土			褐红,一般不具湿陷性 或在高压下,具轻微湿陷性
早更新世 Q ₁		午城黄土					

表 1.1 中的午城黄土、离石黄土和马兰黄土属原生黄土,基本由风积而成,全新世的次生黄土是马兰黄土经由风和水的多次搬运沉积而成。水力搬运一般距离较短,所以次生黄土的颜色和颗粒

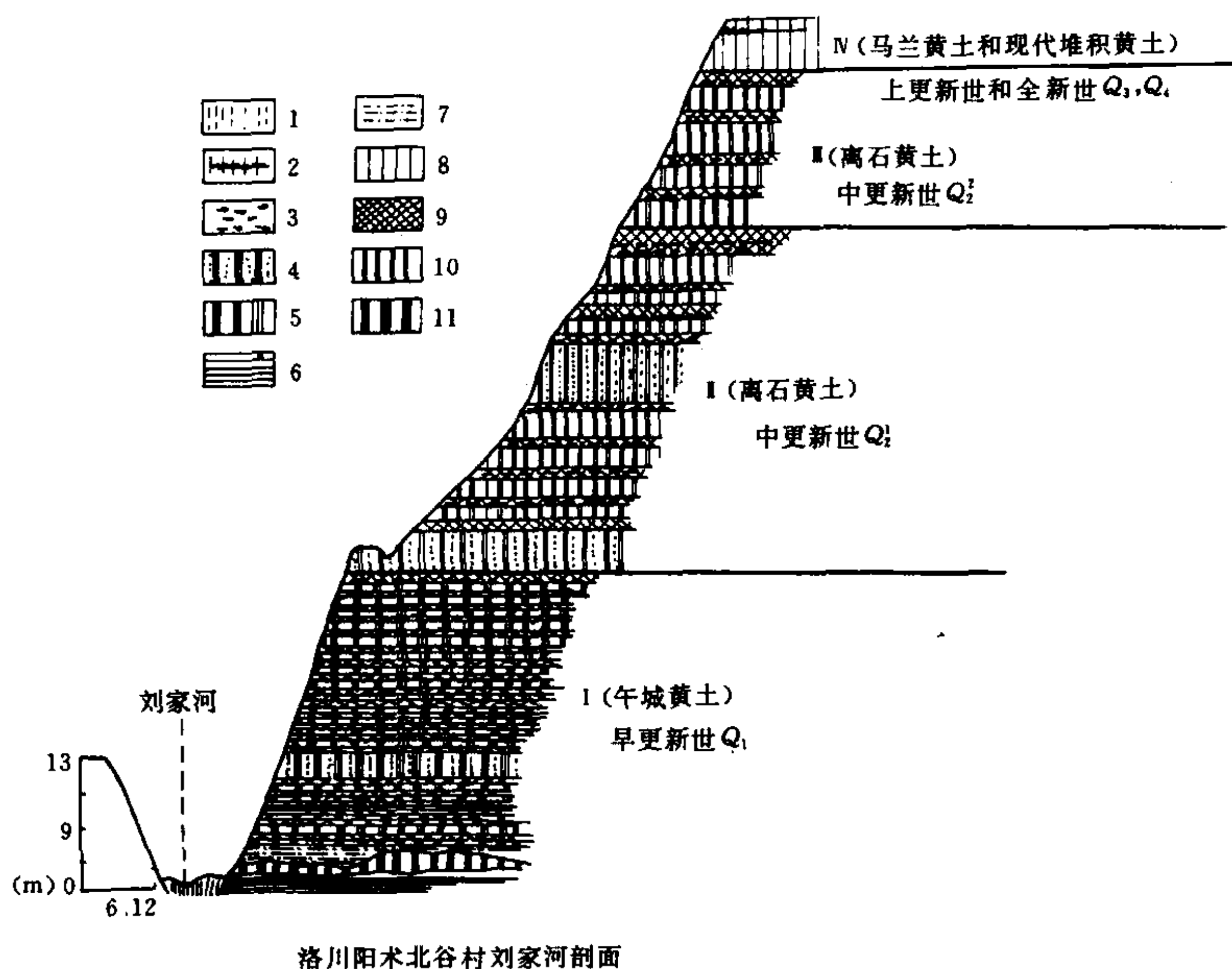


图 1.1 黄土地层层序

洛川阳术北谷村刘家河剖面

1. 亚砂土 2. 黑垆土 3. 钙质结核 4. 粉砂层 5. 午城黄土
6. 三叠纪砂页岩 7. 亚粘土(混合层) 8. 马兰黄土
9. 古土壤(或风化层) 10. 离石黄土 11. 红粘土

组成以及矿物成分都酷似马兰黄土,但其结构更为疏松,大孔隙更为发育,湿陷性更为强烈。

全新世黄土状土为新近堆积,多分布在塬、梁、峁表层及河谷阶地上,坡脚以及阶地上及地层的顶部,受各种自然营力的影响,其物理力学性质的差异较大。质地较疏松,成岩性差,具有湿陷性,甚至强烈的湿陷性。

晚更新世(Q_3)马兰黄土构成黄土层的上部,为典型黄土。其

质地疏松,无层理,大孔结构发育,有垂直节理裂隙,有较强的湿陷性或自重湿陷性。如处理不善常会发生较大的湿陷事故,威胁建筑物安全。

中更新世(Q_2)离石黄土为马兰黄土下面的埋藏黄土层,其间夹有多层古土壤层和钙质结核厚度较大,构成黄土塬的主体。质地较密实,一般无湿陷性,但在高压下仍具有一定的湿陷性。

早更新世(Q_1)午城黄土为老黄土的下部,颜色呈淡红色,含有棕红色的埋藏古土壤层。其质地密实、强度大、压缩性小、厚度较薄,几乎不透水,无湿陷性。

我国黄土地层的命名,于1961年参加在波兰召开的第6届第四纪会议前,在李四光教授指导下将中国黄土系列命名为马兰黄土、离石黄土和午城黄土。当时认为马兰黄土是具有湿陷性的黄土,而离石黄土和午城黄土是不具湿陷性的黄土,但是,最近发现在高压下,离石黄土也具有轻微湿陷性和自重湿陷性。

1.2.2 我国黄土沉积的分区

黄土的沉积具有沉积分选作用,因此根据黄土沉积的特点,中国黄土分布自西而东则有:①西北干燥内陆盆地;②中部黄土高原;③东部山前丘陵及平原三个大区,各区在地理分布和时间演化上各有不同的特点。

1) 西北干燥内陆盆地

该区包括新疆的准噶尔盆地、塔里木盆地、青海的柴达木盆地和甘肃的河西走廊。这些盆地的四周有近东西走向的山脉,自然环境的特点是高山终年积雪,盆地中心是无垠沙漠,黄土覆于山前地带,气候异常干旱、雨量稀少、地面辐射强烈、温差大、风力强烈、黄土基本上处于风扬带内,受风力、冰川再搬运的作用很大,形成各种类型的黄土状土,原生黄土很少见。

2) 中部黄土高原区

由龙羊峡至三门峡的黄河中游区,这是中国黄土分布的中心。