

压实— 黄土的工程性质— 研究

YASHI
HUANGTU DE GONGCHENG XINGZHI
YANJIU

杨 晶 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

压实黄土的工程性质研究

杨 晶 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

压实黄土的工程性质研究/杨晶著. —武汉:武汉大学出版社,2016. 11
ISBN 978-7-307-18773-3

I. 压… II. 杨… III. 黄土区—土力学性质—研究 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 249561 号

责任编辑:方竞男 路亚妮

责任校对:杜筱娜

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:10.25 字数:257千字

版次:2016年11月第1版 2016年11月第1次印刷

ISBN 978-7-307-18773-3 定价:62.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

随着改革开放和现代化建设的不断推进,我国国民经济取得了长足发展,社会化进程不断加快。然而建设规模的不断扩大、城市化进程的加快与自然环境产生了不可避免的冲突,自然环境恶化、建设用地紧张的问题日益突出,而开山填洼、人工造地的办法很好地解决了建设用地紧张的问题。我国西北、华北等地区多位于黄土高原地带,山多川少,特殊的地形地貌导致了在经济建设加快发展过程中大量填方工程的出现,其中不乏高填方工程。此外,我国西北、华北地区广泛分布着黄土。黄土工程性质特殊,具有水敏性。因此,针对黄土状填土的岩土工程问题逐渐凸显。长期以来,人们对原状黄土各种工程性质的研究已较为深入,但对于压实黄土的变形或结构方面的系统研究尚不多见。

未经处理或处理不当的填土地基往往存在不均匀沉降或过大沉降等问题,从而引发上部建(构)筑物开裂、下沉等各种工程事故。压实或强夯是目前处理填土地基最常用的手段,而填土的压实质量直接影响地基或路基的工程质量,保证填土压实质量是保证回填地基或路基工程质量的关键,也是保证上层建(构)筑物正常使用的重要环节。对黄土作为填土材料的工程力学性质进行分析研究,揭示黄土的压实特性以及压实黄土强度、变形等变化规律受击实含水量、击实能及浸水等因素的影响,并通过将宏观力学性质与微观结构分析相结合,将为进一步深入认识和把握压实黄土的工程力学特性,正确评价压实黄土的性状及压实质量,有效开展黄土地区回填工程设计、施工质量控制等提供相关的物理性质指标和参数。本书重点针对山西地区黄土经压实后的工程性质进行研究讨论,希望能对当地回填工程的建设有所帮助。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不足之处,欢迎广大读者批评、指正。

本书有关彩图可扫描下面二维码获取。

著 者

2016年7月



目 录

1 绪论	(1)
2 黄土基本性质及国内外研究现状综述	(3)
2.1 黄土的一般性质	(3)
2.1.1 黄土的定义及特点	(3)
2.1.2 黄土的粒度组成	(3)
2.1.3 黄土的物理、化学性质和矿物组成	(3)
2.2 黄土的主要工程性质	(4)
2.2.1 黄土的分类	(4)
2.2.2 黄土的结构性	(5)
2.2.3 黄土的湿陷性	(7)
2.2.4 黄土的压实特性	(8)
3 黄土的压实试验研究	(19)
3.1 概述	(19)
3.2 室内击实试验	(19)
3.2.1 试验用土的基本物理性质指标	(19)
3.2.2 室内击实试验结果	(20)
3.3 土体压实效果的评判指标	(26)
3.3.1 压实度	(27)
3.3.2 压实度超百现象	(27)
3.3.3 合理的压实度与压实能耗问题	(28)
3.3.4 压实度作为压实质量控制指标的讨论	(29)
3.3.5 国内相关压实规范中对含水量的规定	(31)
3.3.6 国外相关压实规范	(32)
3.4 空气体积率作为压实质量附加评判指标的合理性	(32)
3.4.1 空气体积率	(32)
3.4.2 空气体积率作为黄土压实指标的合理性研究	(33)
4 压实黄土的压缩特性研究	(37)
4.1 概述	(37)
4.2 试验方案及注意事项	(37)
4.3 压缩试验结果分析	(38)

4.3.1	含水量和击实能对初始孔隙比的影响	(38)
4.3.2	含水量和击实能对 $e-p$ 曲线的影响	(40)
4.3.3	含水量和击实能对压缩应变的影响	(44)
4.3.4	含水量和击实能对压缩系数 α_{1-2} 和压缩模量 E_{s1-2} 的影响	(47)
4.4	影响压缩变形的多因素分析	(51)
4.4.1	初始含水量和击实能对压缩系数 α_{1-2} 的双因素极差分析	(51)
4.4.2	初始含水量、击实能和垂直压力对压缩应变 ϵ_s 的三因素方差分析	(52)
4.5	压实黄土的湿陷变形研究	(55)
4.6	ϵ_s-p 曲线在压实黄土非线性沉降计算中的应用	(55)
4.6.1	规范法计算地基沉降量	(55)
4.6.2	割线模量法在地基沉降计算中的应用	(56)
5	压实黄土的 CBR 强度特性研究	(70)
5.1	概述	(70)
5.2	CBR 试验方案及操作步骤	(71)
5.2.1	CBR 试验方案介绍	(71)
5.2.2	CBR 试验主要操作步骤	(72)
5.3	CBR 试验结果分析	(73)
5.3.1	初始含水量和击实能对 CBR 强度的影响	(74)
5.3.2	初始含水量对膨胀量以及不浸水和浸水 CBR 差值的影响	(76)
5.3.3	击实能对膨胀量以及不浸水和浸水 CBR 差值的影响	(77)
5.3.4	从 CBR 强度看压实黄土的水稳性	(78)
6	压实黄土的抗剪强度特性研究	(80)
6.1	土的强度理论	(80)
6.1.1	概述	(80)
6.1.2	常见的土体破坏准则	(81)
6.1.3	决定土体抗剪强度的主要因素	(82)
6.2	压实黄土的直接剪切试验	(83)
6.2.1	试验方案和过程	(83)
6.2.2	直剪试验结果	(84)
6.2.3	浸水饱和对压实黄土直剪试样抗剪强度的影响	(89)
6.2.4	影响直剪试验抗剪强度指标的多因素分析	(92)
6.3	压实黄土的三轴压缩试验	(95)
6.3.1	试验方案介绍	(96)
6.3.2	试验操作过程和注意事项	(97)
6.3.3	三轴压缩试验结果分析	(101)
6.3.4	压实黄土三轴压缩应力-应变关系的数学表达式	(123)

7 压实黄土的微观结构分析	(130)
7.1 土体微观结构研究概述	(130)
7.2 压实黄土微观试样的制备	(131)
7.3 压实黄土微观图像分析	(133)
7.3.1 微观图片的获取	(133)
7.3.2 压实黄土微观结构的定性分析	(134)
7.3.3 压实黄土微观结构的定量分析	(140)
7.4 微观现象对宏观性质影响的解释	(142)
8 结语	(145)
参考文献	(146)

1 绪 论

黄土是第四纪时期形成的松散沉积物,因其特有的外部形态、物质成分和工程性质而在工程土类中占据一定的特殊地位。黄土和黄土状土在全世界的分布面积约为 1300 万平方公里,大约占陆地总面积的 9.3%。除我国外,俄罗斯南部、美国中西部、法国东部和北部、加拿大、澳大利亚及欧洲中部等地区均有分布。我国是世界上黄土分布最为广泛的国家之一。我国黄土因具有地层全、厚度大、面积广、发育好和分布连续等特点而著称于世。黄土在我国的分布面积达 63 万~65 万平方公里,占国土总面积的 6.3%~6.6%,尤其以黄河中游一带最为典型,西起贺兰山,东到太行山,北起长城,南到秦岭,几乎全部被黄土所覆盖。而除分布广、厚度大等特点外,分布在黄河中游地区的大部分黄土还具有湿陷性。黄土的湿陷性是指黄土在上覆土层的自重应力或自重应力与附加应力的共同作用下,遇水湿陷后其结构迅速破坏而发生显著附加下沉,强度也随之迅速降低的特性。因此,湿陷性是黄土最典型也是最特殊的工程性质之一。

20 世纪 80 年代以来,随着我国国民经济的飞速发展和城市化进程的不断推进,建筑工程、道路(公路、铁路)桥梁工程和水利水电工程等建设规模不断扩大,同时国家经济政策向西部的倾斜更使得西北各省、区的基础设施建设突飞猛进。以建筑工程为例,从 21 世纪初到 2005 年年底,西部地区开发重点工程项目累计 70 余项,而仅 2006 年西部地区就新开重点工程 12 项,投资规模达数万亿元。这些重点工程项目的实施,提高了西部地区的基础设施水平,加快了西部地区特色优势产业的发展,为促进区域经济协调起到了非常重要的作用。另外,我国在公路工程建设方面取得的成就同样举世瞩目。20 世纪 90 年代开始,高速公路建设迅速发展,我国高速公路通车里程数不断创出新高,且预计在近期及未来较长一段时间内,高速公路的建设仍将快速发展。然而,随着建设规模的不断扩大和城市化进程的加快,与基础设施建设和经济发展并存的是日益突出的建设用地紧张问题。于是,开山填洼、人工造地成为常用的解决办法。例如,始于 2012 年 4 月份的延安“造城运动”,其发展战略是“中疏外扩、上山建城”,于是大规模的“削山填沟、造地建城”的工程建设活动轰轰烈烈地以超常规的方式开展实施。据悉,该“削山造城”活动将在近 10 年的时间里为延安另扩展出 78.5 km² 的新区建设面积,而该工程是目前世界上在湿陷性黄土地区进行的规模最大的岩土工程项目,在世界建城史上也属首例。然而在开山填洼、人工造地势在必行的同时,必然会出现大量的填土方面的工程问题。因此,对填土,特别是具有特殊工程性质填料的填土进行专项课题研究,引起了岩土工程界广大研究人员的重视。

填土是指由人类活动而堆积的土。其通常可分为素填土、压实填土、杂填土及冲填土等,其中压实填土是将素填土经过分层压实或夯实形成的填土。压实填土一般都是将当地的黏性土、中粗砂、砾卵石等性能较为稳定的土体作为填料。我国西北、华北地区建筑材料种类单一,其他建筑材料匮乏,为降低工程造价,在黄土地区的道路工程或其他建筑工程中利用大量当地黄土进行回填是必然的。因此,对黄土状填土有关性质的研究逐渐成为相关研究领域的重要

研究课题之一。回填后的压实是保证回填土地基或路基达到工程质量要求的最普遍、最快速,也是最便捷且廉价的手段。目前,在公路施工,机场建设和建筑、水利工程的施工过程中,压实作为一种最基础的施工方法已被广泛使用。压实是通过专用机械或设备对土体施加作用力,使土体内部颗粒在外力作用下被迫产生移动,从而重新排列并变得更为密实的过程。压实可在一定程度上提高地基土质或路基的强度和稳定性,有效压实能显著地改善填土地基或路基的承载能力、降低渗透性、减少沉降。因此,针对具有特殊工程性质的黄土压实特性的研究,其天然结构受到破坏、重塑压实后的工程力学特性及合理压实等问题已逐渐引起了相关工作者的广泛关注。

处理不当的填土特别是高填方地基或路基往往存在过大沉降、不均匀沉降等问题而导致的建(构)筑物、市政设施下沉、开裂等工程事故屡见不鲜。黄土地区的填方工程更是如此。由于特殊的地形地貌和黄土特殊的工程性质,黄土地区建筑和道路在建设后期随着运营时间的增加和外界环境的变化,常相继发生各种填土病害,如沉降量过大、基底沉陷,地基不均匀沉降导致的墙体、梁柱及路面裂缝,裂缝处由于差异沉降产生错台,路面纵向裂缝向路肩边缘伸展而形成滑裂面,高边坡滑坡、路基整体滑动,冲刷、滑坍等坡体破坏或坡面破坏,黄土陷穴、溯源侵蚀等。造成黄土地区填方工程病害的原因有很多,如压实施工质量差、地质勘察不详尽、填料不理想等,但究其根本,还是黄土及压实黄土本身的工程力学性质不满足要求所致。由于填土的压实质量直接关系地基、路基的工程质量,且往往是引起上部结构变形、沉降和破坏的直接原因,因此对黄土及压实黄土的工程性质进行深入细致的研究显得尤为重要,只有深刻认识到黄土的压实性质和影响因素,了解不同状态下压实黄土的强度及变形规律,才能够对黄土地区建筑和道路病害的原因做出合理的解释,从而能够采取合理的措施改善黄土压实质量,减少病害发生。

综上所述,填土或黄土状填土的课题目前已引起广大岩土工程界学者的关注。我们在通过人工手段缓解建设用地紧张问题的同时,应深入认识各种填土岩土工程问题,并对这些问题进行恰当合理的处理,从而获得良好的社会、经济和环境效益。相信随着投入的加大和分析、研究的不断深入,填土或黄土状填土等方面的有关理论和技术实践将更为充实和完善。

2 黄土基本性质及国内外研究现状综述

2.1 黄土的一般性质

2.1.1 黄土的定义及特点

世界上对黄土定义的讨论由来已久。由于生成和赋存条件不同,不同地域黄土的性质也不尽相同,其物质成分和工程性质有所差异。许多地质学家、土壤学家对各地黄土从不同角度进行研究,从而对黄土做出的定义也各有差别。其中,国外的奥布鲁切夫、别尔格、杰尼索夫以及国内的张宗祜、刘东升、王永焱等均对黄土的定义和分类提出过自己的看法。综合他们的观点:黄土从广义上可分为两种,即黄土和黄土状沉积,两者分别属于典型黄土和非典型黄土。其中典型黄土的主要特点包括:

- (1) 呈黄色、褐黄色、淡灰黄或淡灰褐色;
- (2) 疏松多孔,成岩度低,肉眼可见大孔隙;
- (3) 无层理,结构均一;
- (4) 粉粒含量大于 50%,粒径大于 0.25 mm 的颗粒几乎没有;
- (5) 垂直节理发育;
- (6) 富含碳酸盐,含量一般大于 10%。

2.1.2 黄土的粒度组成

土的粒度组成是指不同粒径的颗粒在土体中所占的质量比例,通常用百分数表示。粒度组成特征与土的物理力学性质密切相关,是判别土体分类、透水性、塑性和压缩性的衡量标准之一,对评价土体的工程地质性质具有重要的意义。我国在黄土及黄土类土的粒度分析方面进行了大量的研究工作并积累了丰富的资料,为评价土体工程性质提供了理论依据。此外,研究黄土的学者们还非常关注黄土粒度组成在区域上的分布特征,研究成果也颇多。但无论地域如何,总的来看黄土颗粒组成基本上以粉粒为主,粉粒含量通常可达 50% 以上,且一般粗粉粒(0.01~0.05 mm)含量大于细粉粒(0.005~0.01 mm)含量,黏粒含量(<0.005 mm)和砂粒含量(>0.05 mm)相比粉粒含量要少。

2.1.3 黄土的物理、化学性质和矿物组成

黄土的土粒比重一般为 2.51~2.84,其大小与土体的粒度组成有关。当粗粉粒和砂粒含量较大时,土粒比重通常在 2.69 以下;黏粒含量高的黄土比重通常大于 2.72。黄土的天然密度一般为 1.33~1.81 g/cm³,其与黄土的含水量、颗粒大小及含量有关。黄土的干密度是衡量黄土密实程度的重要指标之一,一般为 1.14~1.69 g/cm³。黄土的密实程度还可以通过孔

隙比或孔隙率来表示,孔隙比变化范围通常为 0.85~1.24,特别是以 1.0~1.1 居多。孔隙比与干密度成反比关系,一般随埋藏深度的增加而减小。黄土的天然含水量变化范围较大,多数黄土的天然含水量为 8%~11%,但受粒径组成、埋藏深度、区域、地下水位、年平均降雨量等因素影响,有时可达到 11%~21%,而地下水位以下的饱和黄土,其含水量甚至可高达 28%~40%。

黄土矿物成分复杂,主要的矿物组成包括石英、长石、黏土矿物等,其中石英含量最高。黄土中黏土颗粒矿物的主要成分是伊利石,偶见少量蒙脱石和高岭石等。黄土的化学成分主要是 SiO_2 、倍半氧化物和碳酸盐类。由于 SiO_2 是构成石英的主要成分,因此黄土中 SiO_2 成分最多,存在于各级粒组中。钙、镁碳酸盐在黄土中呈固态或液态,是黄土土体骨架组成部分和重要胶结物。另外,能被盐酸溶解的 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 在土体中以镁铝胶体的形式存在,另一部分能被盐酸溶解的 SiO_2 在土中以无定形硅酸盐的形式存在,两者均属于胶体物质。

2.2 黄土的主要工程性质

我国地质学者早在 20 世纪 50 年代初就对黄土的分布、厚度、地层、沉积环境、地貌条件及物质组成成分等进行了广泛的调查研究,取得了丰硕的成果。由于黄土特殊的工程性质对黄土地区的工程建设有着重要的影响,我国岩土工程界于 20 世纪 50 年代后期开始就对黄土的工程性质进行了大量的试验研究,并在黄土湿陷性的评价和判别方法、黄土地基处理和黄土地基上建(构)筑物设计和施工措施等方面取得了突破性进展。20 世纪 60 年代中期,中国标准出版社出版了适合我国国情的第一本《湿陷性黄土地区建筑规范》(BJG 20—1966),对我国黄土地区的建设起到了至关重要的作用。本节着重对黄土的几个主要工程性质研究概况进行回顾。

2.2.1 黄土的分类

不同类别黄土均具有各自的倾向性和代表性,通过恰当的分类定名体系可反映这些特性,从而更好地了解和应用各类黄土,并获取相应的科学数据和规律特征。然而黄土由于生成年代、成因、地域、环境及历史变迁等不同而具有不同的性质。对于黄土的分类体系,学者们也有各自不同的看法。总的来说,目前常用的黄土分类体系有以下三种。

(1) 以地层、生成年代、成因等地质特征为基础的分类体系。

属于这种分类体系的黄土包括 Q_1 黄土、 Q_2 黄土、 Q_3 黄土、 Q_4 黄土,午城黄土、离石黄土、马兰黄土,老黄头、新黄土、新近堆积黄土,风积黄土、冲击黄土、洪积黄土、坡积黄土等。 Q_1 黄土是早更新世的产物,形成于距今 120 万~70 万年前,以山西隰县午城镇的午城黄土为典型代表,其颜色较红,质地均匀,坚实而致密,压缩性低,无湿陷性; Q_2 黄土是中更新世的产物,形成于距今 70 万~10 万年前,以山西离石县陈家崖的离石黄土为典型代表,其分布面积广、厚度大,土层致密而具有高承载力; Q_3 黄土是晚更新世的产物,形成于距今 10 万~5000 年前,以马兰黄土为典型代表,其呈淡灰黄色,无层理、较疏松,有柱状节理且大孔结构发育,具有湿陷性和强湿陷性,分布广泛,遍及黄土的主要分布地; Q_4 黄土是全新世的产物,形成于距今 5000 年的时间内,其处于地层上部,情况复杂,受各种影响较多,性质差异大。其中,早期堆积黄土沉积时间长,较为密实,湿陷性小;而新近堆积层土质疏松、压缩性高、承载能力低,湿陷差别大,是工程设计上重点关注的对象。由此可见,形成时代早、地层深的黄土密实度高、工程性质好。

此外,一般认为 Q_1 黄土、 Q_2 黄土、 Q_3 黄土甚至更早期的黄土为原生黄土,以风成为主;而 Q_4 黄土或 Q_4 黄土的近期黄土为次生黄土,以水成为主。这种按照生成年代和成因对黄土进行的分类命名深入人心,已为广大岩土工作者所接受。

(2) 以湿陷特性为基础的分类体系。

这类体系的黄土包括非湿陷性黄土和湿陷性黄土。湿陷性黄土还可进一步分为自重湿陷性黄土和非自重湿陷性黄土。湿陷性黄土是指在一定压力下受水浸湿,土结构迅速破坏并产生显著附加下沉的黄土。自重湿陷性黄土是指在上覆土的自重压力下受水浸湿,发生显著附加下沉的湿陷性黄土;非自重湿陷性黄土则是指在上覆土的自重压力下受水浸湿,不发生显著附加下沉的湿陷性黄土。黄土的湿陷性通常由湿陷系数 δ_s 来判定。湿陷系数是指单位厚度的环刀试样在一定压力下下沉稳定后,试样浸水饱和所产生的附加下沉。

我国在《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2004)中将湿陷系数小于 0.015 的黄土定义为非湿陷性黄土,湿陷系数大于或等于 0.015 的黄土定义为湿陷性黄土。将实测或计算自重湿陷量小于或等于 7 cm 时的场地划分为非自重湿陷性黄土场地,大于 7 cm 时的场地为自重湿陷性黄土场地。这种以湿陷性为基础的分类体系被我国历代湿陷性黄土地基规范所采用,因而在岩土工程界影响最为深刻。

(3) 以颗粒组成特征为基础的分类体系。

这一分类体系体现了将土的粒径组成中的黏粒含量视为对土性影响最为活跃的因素这一思想。属于这一分类体系的黄土名称有砂黄土、粉黄土、黏黄土及砂质粉黄土、黏质粉黄土、粉质黏黄土等。颗粒组成是造成土体矿物成分、结构排列、湿密程度及力学特性上存在差异的重要因素。如粗粒土多为单粒结构、石英成分、薄膜水少、透水力强、无黏性,细粒土则多为絮状结构、黏土矿物、薄膜水多、透水性差、有黏结强度等。这一分类体系的优势是名称直白而响亮,将黄土的个性与共性相结合,根据名称即可了解该种黄土的基本特点和信息。如砂黄土架空结构性小、黏聚力小、透水性好;黏黄土则会有较稳定的联结性,黏聚力大、湿陷性小、透水性差;而粉黄土则会具有更小而稳定的粒状架空结构性、湿陷性大等。但是,由于不同土类的分类指标及其界限值尚未明确确定,因此这种分类体系到目前仍没有得到应有的肯定和广泛应用。

现在,一般采用塑性指数对黄土进行分类定名,学者朱慕仁根据对全国 20226 组黄土试验成果进行的分析,将黄土按照塑性指数分为砂黄土($4 \leq I_p < 6$)、粉黄土($6 \leq I_p < 17$)、黏黄土($I_p \geq 17$),其中粉黄土又细分为砂质粉黄土($6 \leq I_p < 9$)、粉黄土($9 \leq I_p < 15$)和黏质粉黄土($15 \leq I_p < 17$)三个亚类;黏黄土又细分为粉质黏黄土($17 \leq I_p < 20$)和黏黄土($I_p \geq 20$)两个亚类。

2.2.2 黄土的结构性

土体的结构性是指土中颗粒或颗粒集合体及颗粒间的孔隙排列组合联结形成的空间结构体系。土体的结构性在力学性能上表现为保持原有结构不被破坏的能力,如果结构状态受到破坏,则土体的力学性质也会发生突变。对土体结构性进行研究的根本目的就在于揭示结构性及其变化的力学效果,揭示结构性对土体力学行为的影响及内在联系,从而最终建立宏观的应力应变关系。黄土是位于干旱和半干旱地区的沉积物,由于其特定的生成环境和存在的历史环境而形成明显的柱状节理和大孔结构。松散干燥的粉粒随着季节性的短期降雨黏结起来,而随后经历的干旱气候使得土体内水分逐渐蒸发,少量水分和盐类集中在了粉粒的接触点,可溶盐逐渐浓缩为胶结物。随着水分继续蒸发,含水量进一步减少,促使土颗粒彼此靠近,

颗粒间的分子力及结合水、毛细水的联结力逐渐增大,阻碍了土体的自重压密,从而形成以粗粒为主骨架的多孔结构。由于粗粉粒接触点的胶结物联结强度较强,黄土在低含水量条件下表现出较高的强度,但含水量增大时强度就会迅速降低。可见,黄土的结构性对其工程性能起着决定性的作用。

人们对土体结构性的认识经历了从宏观到微观,从定性研究到定量研究的发展变化。传统的岩土本构模型均建立在宏观现象学的基础之上,而随着科学技术的发展和认识的深入,从微观结构角度出发建立土体本构模型逐渐成为研究目标之一。20 世纪的土力学研究中,一个根本性的事件就是将土体结构的微细观研究与宏观力学特性相结合。Terzaghi 在创立土力学时就曾指出土体结构的重要性,沈珠江也指出了 21 世纪土力学的核心问题是建立土的结构性数学模型。谢定义认为,微观结构分析试验与宏观力学特性试验的结合将对创立岩土结构性指标和结构性模型等方面作出有力贡献。

土体结构研究的发展大致可分为早期、中期和现代研究三个阶段。

(1) 早期阶段(20 世纪 20 年代中期至 50 年代初)。

这一时期的研究主要集中在对土体微观结构形态的观察及其对土体力学性质的影响。Terzaghi 早在 1925 年首次提出土的微观结构概念,并将黏粒悬液在电解质作用下产生的絮凝状沉积物在一定上覆荷载作用下形成的结构定义为蜂窝结构。1926 年,Goldschmidt 提出片架结构的概念。Casagrande 利用光学显微镜对土体微观结构进行观察,于 1932 年提出蜂窝结构不是单一存在的,而是填充在粉粒间的较大孔隙中,称为“基质黏土”;粉粒接触处的“蜂窝”被高度压缩,形成粉粒间的黏土键,称为“键合黏土”,起到了粒间连接的作用。这种结构模式与自然界中的土不存在十分均匀单一粒径的状况相符合,比较接近实际。

(2) 中期阶段(20 世纪 50 年代中期至 80 年代中期)。

这一阶段,透射电子显微镜、光学显微镜、偏光显微镜及 X 射线衍射技术等开始广泛应用到土体结构的研究中,人们开始注意到了结构要素的完整性和结构单元的定向分布特征等问题。借助这些手段人们观察到黏土颗粒是片状体,带电的片状体由于电性不同而形成“面-面”“边-面”“边-边”等不同的连接形式。这一时期对土体结构性的研究以 Lambe 最具代表性。Lambe 于 1958 年指出,不同浓度电解质中黏土片的连接形式不同,提出了“无盐絮凝”“盐质絮凝”和“分散结构”等结构模型。我国学者陈宗基于 1957 年提出黏土颗粒空间网络结构模式。常宝琦和林崇义提出土结构分为构造和黏聚性两部分,是颗粒排列的规律性和颗粒间联结性质的规律性两者的统称。这一阶段的后期也就是从 20 世纪 60 年代末到 80 年代中期,是土体微观结构研究进展史上一次大的飞跃。微观图像定量分析和土微观结构受力作用下的模型这两种方法为后来土的结构性的研究架起了至关重要的桥梁。

(3) 现代研究阶段(20 世纪 80 年代中期至今)。

20 世纪 70 年代以后,扫描电镜被应用于土体微观结构研究。借助扫描电镜,人们可直接观察到土体的颗粒形态,并将微观结构与宏观物理力学性质联系起来,将土的结构研究推向了新的发展阶段。加拿大的 Yong、英国的 Collins 和 McGown 及美国的 Mitchell 对各类土的微观结构进行研究,并予以分类。Unitt 应用扫描电子显微镜的强度等级技术测定了土体图像的定向性。Tovey、Smart 和 Krinsley 等应用计算机图像处理系统对土的微观结构进行了定量分析,并开发一系列计算机图像处理软件,取得了许多重要的成果。白晓红和 Smart 对黏性土排列的定向性及固结不排水剪切过程中土体微观结构的变化进行了定量分析,得到了有意义的结论。

由此可见,土体结构的研究发展与观察手段与现代测试技术的改进和提高是密不可分的。我国开展土体微观结构研究要比国际上晚几十年,但进步较快,取得的成绩还是令人欣喜的。这里,仅就我国学者对黄土结构方面的研究做部分列举。高国瑞等在黄土结构性的微观结构形态方面做了较为系统的研究和论述。他们对黄土的微观结构进行了系统研究,提出了考虑颗粒形态、排列方式和连接形式的黄土微结构类型分类,并将黄土微结构类型同黄土工程性质联系起来。王永焱、雷祥义等也先后利用扫描电子显微镜对我国各地黄土的微观结构和孔隙结构特征进行了研究,指出了决定黄土工程性质的主要结构因素,对黄土微结构类型与湿陷性的内在联系进行了探讨。陈东佐对强夯前后的黄土结构性质进行了比较分析,并对潞城黄土的显微结构进行研究,将黄土的微观结构划分为接触疏松、接触致密、胶结疏松和胶结致密四种结构类型。白晓红等通过室内常规土工试验结合扫描电子显微镜等测试手段,分析了山西潞城黄土的微观结构,将潞城黄土的微观结构分为典型架空结构、架空-镶嵌结构及典型镶嵌结构三部分,并提出了微观结构定性影响、定量决定土体湿陷系数的变化规律。白晓红首次提出了架空孔隙随深度的变化函数,并且根据非线性数学回归分析,提出了湿陷系数随架空孔隙统计量变化的数学表达式,初步建立了黄土微观结构和宏观力学性质之间的定量关系。陈东佐、王梅等对强夯法处理湿陷性黄土土体结构性的变化进行了定向及定量分析,表明强夯使土体中存在的大孔隙基本消除,架空孔隙受夯击波影响发生破坏,变为镶嵌孔隙。黄土在强夯后其结构稳定性增强,消除了湿陷。谢定义、齐吉琳提出了综合结构势这一结构性定量指标,并通过试验检验了其在表征结构性对黄土性质影响方面的功能和合理性。谢定义还指出对黄土结构性的研究应注意揭示土颗粒排列的几何特征和土颗粒联结的力学特征值,同时应将结构和组构相结合,探讨黄土的非匀质性和各向异性。当前的任务要由对结构某些特性侧面确定性的定量化转向对结构综合整体动态性的定量化。将土的微观结构和宏观力学行为相结合,并使两者之间的定性研究被定量关系的研究所代替。土结构研究的中心目标就是将几何和力学特征纳入到同一个统一的力学模型,即结构性力学模型中。

2.2.3 黄土的湿陷性

湿陷性是黄土最主要的工程性质之一,也是黄土成为特殊土的主要原因。受水的影响,黄土土体结构迅速破坏继而发生显著附加下沉,强度也随之迅速降低的特性称为湿陷性。黄土的湿陷变形具有突变性、非连续性和不可逆性,是一种特殊的塑性变形,它对于上部建筑构成了巨大的危害,因此人们在黄土的湿陷性方面进行了大量的研究。

孙广忠较早地(1957年)探讨了黄土的湿陷机制,并认为水膜加厚破坏了黄土的结构连接,从而造成湿陷。孙建中研究了湿陷系数与压力和湿度的关系。郭见杨、林在贯等也在同一时期对黄土的湿陷性进行了研究。之后,林崇义、张宗祜、高国瑞、杨运来、雷祥义等学者对黄土微观结构和黄土的湿陷机制进行了系统研究。

随着试验设备、技术的进步以及研究的不断深入,黄土湿陷性试验的研究不再局限于狭义的浸水饱和湿陷,而是发展到广义的浸水增湿湿陷;不再是单调的增湿变形,而是增湿减湿、间歇性湿陷变形;湿陷量的研究也不仅仅是单纯的浸水湿陷量,而是通过各级湿陷量的不同来反映湿陷的敏感性。特别是黄土湿陷性同增湿减湿的关系一直是近年来黄土湿陷性研究的一个重要方面。

张炜、张苏民对湿陷性黄土在增湿和减湿时强度和变形性质的变化进行了深入研究,从黄

土增湿减湿时的强度特性、变形特性,增湿减湿时黄土的湿陷性以及黄土的结构强度几个方面提出了他们的观点。曾国红、裘以惠等通过对湿陷性黄土的增湿减湿室内压缩试验,分析了湿陷性黄土增湿减湿时变形的变化规律,对黄土湿陷起始压力、湿陷起始含水量进行了研究,提出了变形分界压力和变形分界含水量的概念,并对相关经验公式进行了初步探讨,为研究黄土湿陷起始压力、湿陷起始含水量问题提供了一个新思路。李敏、马登科从分析影响黄土湿陷性的主要因素着手,系统研究了湿陷性黄土在浸水含水量、初始含水量和压力等因素变化时的湿陷特性,并提出了充分湿陷、不充分湿陷和剩余湿陷的概念,建立了湿陷系数与其影响因素之间的回归关系,为湿陷性黄土地区建筑地基黄土湿陷类型划分和初步评价应用提供了参考。张洪萍、包卫星对湿陷性黄土在变含水量情况下分别进行了单线法和双线法的浸水湿陷试验,综合试验曲线分析了湿陷性黄土随含水量变化的特征,总结了黄土的压缩变形与湿陷变形随饱和度以及压力变化的规律,讨论了在室内浸水压缩试验时采用单线法和双线法所存在的差异。涂光祉、钱鸿缙对西安5个场地有关黄土的自重湿陷变形和外荷湿陷变形进行原位试验,通过分析自重湿陷的产生与发展过程,自重湿陷量的大小与其沿深度的分布,水平位移及其沿深度的分布,试坑浸水的湿陷影响范围等相关内容,揭示了西安黄土变形规律和影响范围等因素。高凌霄、赵天雁通过对黄土湿陷性影响因素的综合分析,认为湿陷性影响因素可以用宏观物理指标(如含水量、孔隙比和塑性指数)表示,并通过多元线性回归分析,得出湿陷系数与物理指标间的定量关系式。张爱军、邢义川通过非饱和原状黄土湿陷增湿及孔隙压力特性试验得到的黄土增湿过程中的有效应力-应变关系,采用三维非线性数值分析方法,对黄土地基从天然状态到非饱和增湿湿陷,直到饱和湿陷的全过程进行了分析,初步得出了黄土湿陷全过程的变形、应力转换等规律。

除增湿减湿外,赵景波、陈云等还对黄土的湿陷性在垂直方向上的变化规律和区域上的变形进行了研究。另外,对黄土湿陷本构模型的研究也不少。刘祖典、陈正汉首先研究了黄土的湿陷本构关系,研究了黄土的浸水强度和湿陷初始条件,并给出了结合理论分析和试验数据拟合的半经验本构关系式。苗天德等以微结构失稳作为出发点,运用数学突变理论构造了微结构的破坏模型,给出了湿陷性黄土的本构关系,并对湿陷变形的非线性效应进行了阐述。

综上所述,所有这些有关黄土湿陷性和变形机理的试验工作和有关造成黄土湿陷的外因的研究对分析和了解黄土具有重要的意义。

2.2.4 黄土的压实特性

随着工程建设中利用“开山填洼”“人工造地”解决建设用地问题的工程项目逐渐增多,压实黄土广泛应用于建筑物地基、公路和铁路路堤及土坝等回填工程中。压实是指采用某种压实设备和方法对具有一定级配和含水量的新填松土进行压实,使其具有一定的强度。新填土层往往具有抗剪强度低、压缩性高、不均匀和水稳定性差等特点,因此通过人工压实可达到增加强度、减少塌方的目的,改善其工程性质。压实良好的土其工程稳定性能好,且减少了水的浸湿和干燥对土体性质的影响,从而为保障上层建筑物的正常使用奠定了坚实的基础。因此填土的压实一直被工程界所重视。

2.2.4.1 土的压实机理

土体是由固体颗粒、空气和水所共同组成的一种三相体。水和土体颗粒本身通常被认为

是不可压缩的。土的压实过程是指土层在一定的荷载或压实功作用下,克服固体颗粒间的阻力,如摩擦力、黏聚力等,排出固体颗粒间的空气和水分,使土体内部的团粒或单个土颗粒及团粒内部的土颗粒产生移动并重新排列、互相靠近,微小的颗粒填充到粗颗粒间的孔隙中,从而达到减小土粒间孔隙和变形、提高密实度和增大土体强度的目的。在压实过程中,土间阻力随着土颗粒的不断移动而增加,土体渗透性降低、毛细水上升高度减少、水进入到土体中变得较为困难,从而增加水稳性。

黄土颗粒以粉粒为主,属细粒土,其压实性质与粗粒土(如砂土)有很大不同。砂土压实时,砂中多余水分易排出,但黄土不同。要想通过排出黄土中的水分而使其达到压密效果,不是短期内加载就能办到的。因此对于黄土而言,主要是通过排除土体中的空气来实现密实的目的。理论上讲,碾压越密实,土体单位体积内的固体颗粒就越多,空气就越少。当含水量一定时,若土中的空气被全部排出,土会由三相体变为两相体,土体密实程度达到理论上的最大值。当然,这种情况只是理论的假设而已。Seed 和 Lee 通过研究指出,无论对土体进行怎样的压实,由于土颗粒和水分对空气的包裹作用,土体是无法完全达到饱和状态的,即使是压实最好的土,其空气体积含量仍然占到土体总体积的 3%~5%。

关于解释土体压实过程和机理的主要理论包括毛管润滑理论、黏滞水理论、孔隙水压力理论、表面物理化学理论和有效应力原理理论几种。

毛管润滑理论:Proctor 早在 1993 年就对土的压实机理进行了研究。他认为在压实过程中,影响土体的压实性质变化的因素主要有含水量的毛细作用和润滑作用,表明压实曲线的变化转折点出现在最优含水量处与毛细作用和摩擦力有关。受表面张力作用,束缚在土颗粒表面的水分子形成薄的水膜,水膜间接触后由于表面张力而形成毛细压力从而提供了粒间摩阻力。压实功主要消耗在克服黏性土粒间的摩阻力之上。当含水量由少变多时,水在粒间起到了润滑的作用,减小了粒间摩阻力,降低了土的抗剪强度,在击实作用下,颗粒相互间发生滑动,土体干密度增加。当含水量继续增大至水占据空气孔隙时,继续压实并不能增加土的干密度,压实过程完成。Proctor 的这一理论着重强调了水的润滑作用。

黏滞水理论:Hogentogler 从水的黏滞性角度对土体压实机理进行了解释。他认为土体颗粒表面第一层吸附水的黏滞性很高,随着吸附水距颗粒表面的距离变大其黏滞性逐渐减小,直至成为自由水。在含水量较小时,由于接触点间水的高黏滞性,土体具有较高的抗剪强度,土体不易压实,干密度较低;随含水量增加,吸附水层变厚,黏滞性降低,土体的抗剪强度减小,从而干密度增大;当含水量达到某一限值时,水开始起到润滑作用,最大的润滑作用则发生在最优含水量处。

孔隙水压力理论:Hilf 早在 1956 年将孔隙水压力理论应用于非饱和土。他将干密度和含水量绘在孔隙比 e 和水的体积与固体体积比 e_w 的坐标图上,发现两者存在相似的规律,其最小孔隙比的点和标准击实曲线上最大干密度和最优含水量的点相对应。他解释说当含水量超过最优含水量时,由于气体封闭于土中,所施加的击实功由孔隙气压力承受,减小了压实效应,土体处于低密度状态。

表面物理化学理论:1958 年 Lambe 从土的结构和土粒的表面物理化学效应对击实曲线的特点进行了解释。他认为当含水量位于最优含水量干侧时,孔隙水中电溶质浓度高,围绕黏粒的双电层不能充分发展,减小了土颗粒间的溶质排斥作用,土体产生絮凝结构,土粒排列杂乱、抗剪强度高、渗透性大;随含水量增加,双电层的扩大增加了土粒的排斥作用,絮凝度下降,

干密度增大;但当含水量继续增大到位于最优含水量湿侧时,电溶质浓度继续降低,双电层得到更好的发展,粒间排斥作用进一步加大,土体产生分散结构,土颗粒因为水的润滑作用移动形成定向排列,土的渗透性降低,抗剪强度下降。由于水的增加,单位体积土体中固体颗粒减少,干密度减小。

有效应力原理理论:1998年Olson指出上述几种解释黏性土压实机理的理论都未曾得到室内试验的检验。在总结上述有关理论的基础上,他提出用有效应力原理来解释含水量对土体压实的影响。有效应力原理认为,当黏性土的含水量较小时,在一定击实功作用下,粒间黏结力强,土团不易被打散,土颗粒排列方向很不规则,呈片架结构,因此击实后干密度较小;当含水量增大直到不超过最优含水量之前,土中气体与外界连通,击实时气体被排出;随含水量增大,土粒表面水膜逐渐变厚,粒间联结力减弱,颗粒之间发生位移变得容易,且增加的水在土颗粒间起到了润滑的作用,加之土团间水分的润滑作用也使得土体易于变密,因此干密度随含水量的增加而增大;当含水量达到最优时,土中仍然存在部分封闭气体,击实时水、气都不易排出,土中产生孔隙压力。而根据土的有效应力原理,此时土粒间的有效正应力减小,孔隙压力的产生抵消了击实功的作用,这时含水量变化对干密度的影响变得不明显,但由于粒间联结力的减弱使土粒在击实功作用下排列更加定向;当土的含水量超过最优含水量后,孔隙中水的体积增加,孔隙水压力抵消了相当一部分外力,部分排气通道被孔隙水堵塞成为封闭气体,这些封闭气体在外力作用下体积收缩,外力消失后体积又恢复,无法压缩也无法排出,因此消化了部分击实功,加上土体侧壁摩擦力的存在,减小了引起颗粒位移的有效功,致使击实效果变差,干密度减小。

2.2.4.2 土的压实方法

这里将常用压实方法分为现场压实和室内压实两种,并分别对其进行简要介绍。

(1) 现场压实。

现场压实常用的压实方法有静力压实、振动压实和冲击压实。

静力压实是用具有一定重量的滚轮慢速滚过土层,通过静压力使土体产生剪应力并获得永久变形的一种方法。随着静力碾压次数的增多,土体密实度有所增加,永久残留变形减小,直至最后实际残留变形接近于零。这种静力压实方法是利用压路机自身的静荷载对土体材料产生剪应力,当剪应力随压实作业达到或接近土体材料的最大剪切强度时,土体就会产生塑性变形,迫使土颗粒相互靠近,重新移动到更稳定的位置。但是,静力压实的效果并不会随静力压实次数的无限增加而增大。这是因为土颗粒间的摩擦随静荷载增加也在增加,从而土颗粒间的摩阻力阻止了颗粒的大范围运动,因此静力压实存在极限压实效果。无限制地增加静荷载,非但达不到要求的压实效果,反而会破坏土体结构。此外,静力压实的影响随深度变化衰减很快,压实作用主要集中在表层,易产生虚压实现象。常用的静力压实机械有光轮压路机等。

振动压实是通过振动压实机械的往复作用,利用机械的自重和激振器产生的激振力,迫使土体颗粒在振动冲击作用下产生垂直强迫运动,急剧减小土颗粒间的内摩擦力,使原有的土体结构在振动频率和机械重量的共同作用下重新排列,土颗粒间相对位置发生变化,从而相互填充。小颗粒填充了大颗粒间的空隙,水分又填充了小颗粒间的空隙,土体中的空气体积在振动压实过程中减小,从而达到提高密实度的目的。振动过程中,土体材料中水分的离析作用使土