

JIEGOUXING NIAN TU GONGCHENG XINGZHUANG
DE JIEGOU SUNSHANG JI DONGLI XIANGYING TEZHENG YANJIU



结构性黏土工程性状 的结构损伤及动力响应特征研究

臧 濛 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

JIEGOUXING NIANTU GONGCHENG XINGZHUANG
DE JIEGOU SUNSHANG JI DONGLI XIANGYING TEZHENG YANJIU



结构性黏土工程性状 的结构损伤及动力响应特征研究

臧 濛 著

图书在版编目(CIP)数据

结构性黏土工程性状的结构损伤及动力响应特征研究/臧濛著. —武汉:华中科技大学出版社, 2022.8

ISBN 978-7-5680-8617-2

I. ①结… II. ①臧… III. ①粘土结构-研究 IV. ①TU411.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 141373 号

结构性黏土工程性状的结构损伤及动力响应特征研究

臧 濛 著

Jiegouxing Niantu Gongcheng Xingzhuang de Jiegou Sunshang ji

Dongli Xiangying Tezheng Yanjiu

策划编辑: 王一洁

责任编辑: 周江吟

封面设计: 王 娜

责任监印: 朱 玟

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话: (027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编: 430223

录 排: 华中科技大学惠友文印中心

印 刷: 武汉科源印刷设计有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 16.5

字 数: 303 千字

版 次: 2022 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 99.80 元



本书若有印装质量问题, 请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

内 容 概 要

天然黏土普遍存在结构性,其重要性早为太沙基所指出。结构性黏土在 1936 年于美国召开的第一届国际土力学与基础工程会议上就受到重视。结构性黏土定量描述的难度很大,研究进展缓慢。结构性黏土分布广泛、性质独特,某些结构性黏土地基往往在缺乏预兆情况下产生突然性破坏而引起灾害。我国广泛分布着深厚软黏土地层,同时,高速公路、铁路、地铁、高层建筑、机场跑道与码头等工程项目正在大量建设,建成后必然受到各种外部荷载作用。如何科学论证各类静、动荷载作用对黏土变形、强度和稳定性的影响,成为软黏土工程建设的焦点问题之一。因此,深入研究结构性黏土的变形特性与结构损伤演化规律及循环荷载作用下的动力响应特征和沉降变形预测是十分必要的。

本书以湛江黏土为研究对象,采用试验探究与理论分析相结合的方法,开展了静力和动力特性研究,较为系统地研究了湛江黏土的变形特性与结构损伤演化规律及循环荷载作用下的动力响应,以为循环荷载作用下结构性黏土长期变形沉降的预测以及模型的建立提供依据。主要完成工作和所得结论如下。

(1) 通过开展室内试验及原位测试,说明湛江黏土是一种典型结构性黏土,其压缩曲线、应力-应变关系、强度包络线线型、固结系数与渗透系数在其结构破坏前后均有很大不同。研究了不同取样角度的湛江黏土在结构强度、固结系数、抗剪强度、抗压强度以及破坏形态上的差异,探讨了各向异性对湛江黏土的固结变形、强度及破坏形式的影响,并从土质学特征出发,结合湛江黏土的物质组成、物理化学性质以及微观试验结果,得出其工程力学特性与土质学特征密切相关的结论。

(2) 针对实际工程涉及的基坑、隧道开挖过程中存在的应力释放现象,开展了不同应力路径条件下湛江黏土的静力剪切试验,分析了应力路径对等向固结结构性黏土应力-应变关系、不排水剪切强度、孔压特性、有效应力路径及强度指标的影响,发现了不排水剪切强度受应力路径影响显著。模拟基坑开挖工程中不同的卸荷方式及开挖速度,研究了不同卸荷路径与不同卸荷速率作用下土体应变、孔压及强度特性,以为软黏土地区地下空间的利用提供理论支撑。

(3) 基于原状土与重塑土的共振柱试验结果,得到了最大动剪切模量 G_{\max} 随固结应力水平的演化规律,发现湛江原状土经孔隙比函数归一化后的最大剪切模量随有效围压的变化呈现先增大后减小的特征;并初步探究了动剪切模量与土体结构损

伤的关联性的内在机制,认为结构性黏土的 G_{\max} 同时受土体压硬性的正效应与结构损伤的负效应双重影响。此外,针对 Hardin 公式未考虑结构性损伤的影响与表征方式难以延伸适用于广义应力水平的不足,提出了改进的 Hardin 公式。

(4) 通过在 GDS 应力路径仪上添加弯曲元系统来测试湛江黏土固结和剪切全过程的剪切波速和剪切模量,研究结构性黏土的模量响应特征及演化规律。结果表明,结构性黏土剪切模量的衰减是平均有效应力降低和结构损伤共同作用的结果。并提出了利用剪切模量的劣化定量评价结构性黏土剪切过程中的结构损伤方法,得到了变形发展的损伤参数的演化规律;最终,在沈珠江院士提出的岩土破损力学与双重介质模型的基础上,建立了结构性黏土的脆弹塑性模型。

(5) 对循环荷载作用下湛江原状土和重塑土的动变形、动强度和动孔隙水压力与土结构性之间的内在联系进行了系统的试验研究,发现动荷载下结构性黏土具有脆性破坏特征。静偏应力对结构性黏土动力特性的影响存在分界值:小于该值时,静偏应力对土体的压密作用提高了土体的临界动应力和动强度;大于该值时,土体结构损伤,临界动应力和动强度均呈下降趋势。通过模拟对不同深度处不同爆破能量下的湛江黏土和天津海积软土进行的冲击荷载试验,发现湛江黏土的应力-应变曲线峰值强度高,需要用更大的外部荷载才能实现同样的爆破效果。

(6) 软土地基在长期循环荷载作用下的变形特性十分重要,而经验模型是预测动荷载引起的土体变形的实用方法。根据典型结构性黏土的动力变形曲线,叠加指数型函数 $a(\delta^N - 1)$ 与指数双曲线函数 $bN^m / (1 + cN^m)$,提出了一种能更好描述黏土在循环荷载作用下黏土累积变形的改进经验模型,该模型能同时描述“稳定型”和“破坏型”应变曲线,其对呈脆性破坏特征的强结构性黏土的变形特性表征具有明显的优越性。

(7) 软黏土具有一定的流变性。为了对循环荷载作用下黏土长期变形沉降进行预测,从动力蠕变角度出发,系统研究了土体循环蠕变随动应力水平和时间的变化规律,并通过改进伯格模型,建立了对不同累积应变类型曲线(衰减型、临界型、加速型)均具有良好适用性的四元件参数模型。

以上研究表明,湛江黏土作为一种典型结构性黏土,结构强度高且力学性能独特,其静力及动力响应均与结构性相关。本书从改进经验模型和理论模型两个角度描述了湛江黏土的动力变形特性,以期结构性黏土在长期循环荷载作用下的沉降变形分析提供力学依据与支撑。

前 言

本书是作者在武汉轻工大学根据近年来对结构性黏土的研究成果撰写,系统研究了结构性黏土的变形特性、结构损伤演化规律及循环荷载作用下的动力响应特征,内容系统全面,资料翔实可靠,可为土木工程专业(岩土方向)学生及相关从业人员提供指导,具有较为深刻的理论和实际工程意义。

天然黏土普遍存在结构性,其在长期循环荷载作用下会经历结构强度的丧失,尤其是对于具有较强结构性的土体地基,会因其结构性损伤而导致土体的强度和刚度急剧下降,在毫无预兆的情况下产生大变形,严重危害基础设施的安全稳定运行和国民经济安全。土体的变形和强度是岩土工程最为关心的两大问题。黏土的结构性对土体的变形与强度等工程性质有着重要的影响。天然黏土常表现出与重塑土不同的性状,需要特别考虑其稳定性、沉降变形预测以及土体动力响应特征等。为了保证大型建(构)筑物的安全与稳定,充分认识结构性黏土在静、动力条件下的力学特性及结构损伤特征,合理利用土体的结构性可避免土体骨架结构不稳定的不利影响。而准确预测和评价结构性黏土在长期循环荷载作用下的循环动力特性,是一个兼顾工程应用与理论创新价值的课题。

本书以结构性黏土为研究对象,采用试验探究与理论分析相结合的方法,开展了结构性黏土的静力学和动力学试验研究;分析了结构性黏土的土质学特征、物理化学特性及工程力学特性(应力-应变关系、强度包络线线型、固结系数与渗透系数等);研究了不同应力路径条件下土体强度指标的应力路径依赖性;探讨了不同卸荷路径及卸荷速率对应力-应变关系、孔压变化规律及破坏强度特性的影响;系统开展了原状土和重塑土的共振柱试验,揭示了湛江黏土在小应变条件下的动剪切模量随固结应力水平的演化规律,证实了其最大动剪切模量随有效围压变化特征与其结构性损伤阶段密切相关;基于剪切模量的劣化定量评价了结构性黏土在剪切过程中的结构损伤,探究了变形发展的损伤参数的演化规律;通过原状土和重塑土的循环三轴试验,对循环荷载作用下的动变形、动强度、动孔隙水压力以及这些特性与土的结构性的内在联系进行了系统性的试验研究;最后,分别借鉴经验模型和蠕变模型建立了软土地基在长期循环荷载作用下变形沉降预测的实用方法,该方法可近似计算土体的临界循环动应力,模型对不同结构性土体与应力水平下土体的动力变形响应性状具有很好的普适性,为循环荷载作用下结构性黏土长期变形沉降的预测以及

模型的建立提供了理论依据。本书的撰写主要得到以下课题的支持。

1. 国家自然科学基金项目(11802215):循环荷载下结构性黏土的动力响应特征及主应力轴旋转效应。

2. 国家自然科学基金项目(51179186):结构性黏土的动力损伤效应与荷载作用模式关联性。

本书在撰写过程中,得到了很多的帮助。首先感谢孔令伟研究员在研究过程中给予的指导与帮助,感谢张先伟老师在土质学和微观试验方面给予的指导,感谢曹勇博士在冲击荷载方面给予的帮助,感谢研究生李露在各向异性实验和应力路径试验中付出的努力。

本书为黑白印刷,书中相关彩图可扫描下方二维码查看。

由于作者的水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。



书中相关彩图

臧 濛
2022年1月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 结构性黏土的研究现状	(3)
1.3 土体力学特性应力路径依赖性研究现状	(14)
1.4 土的小应变剪切模量研究现状	(18)
1.5 循环荷载作用下结构性黏土的研究现状	(21)
1.6 循环荷载作用下软黏土流变特性研究现状	(29)
1.7 本书主要研究工作	(31)
参考文献	(33)
2 湛江黏土的工程特性和土质学特征	(52)
2.1 引言	(52)
2.2 湛江黏土的工程地质特性	(53)
2.3 湛江黏土的力学特性	(59)
2.4 湛江黏土的土质学特征	(76)
2.5 小结	(84)
参考文献	(85)
3 不同应力路径下湛江黏土的力学特性试验研究	(87)
3.1 引言	(87)
3.2 湛江黏土不同应力路径试验研究	(89)
3.3 不同应力路径下湛江黏土的力学特性	(93)
3.4 卸荷速率与卸荷路径影响下湛江黏土力学特性研究	(107)
3.5 小结	(118)
参考文献	(120)
4 小应变振动下湛江黏土的刚度特性	(123)
4.1 引言	(123)
4.2 湛江黏土的共振柱试验	(124)
4.3 湛江黏土动剪切模量结构损伤效应	(133)
4.4 机制分析与讨论	(141)

4.5	小结	(145)
	参考文献	(146)
5	湛江黏土剪切过程结构损伤响应特征	(148)
5.1	引言	(148)
5.2	湛江黏土固结和剪切过程动模量响应特征	(149)
5.3	结构性黏土的脆弹塑性模型	(164)
5.4	小结	(166)
	参考文献	(166)
6	湛江黏土的动力特性	(169)
6.1	引言	(169)
6.2	结构性对湛江黏土动变形特性的影响	(171)
6.3	结构性对湛江黏土动孔压特性的影响	(179)
6.4	静偏应力对结构性黏土动力特性的影响	(181)
6.5	冲击荷载下结构性黏土的力学响应	(196)
6.6	小结	(205)
	参考文献	(206)
7	描述循环荷载作用下黏土累积变形的改进模型	(209)
7.1	前言	(209)
7.2	改进模型的提出	(210)
7.3	改进模型的适用性分析	(214)
7.4	基于改进模型的临界动应力与应变破坏标准判识	(218)
7.5	小结	(221)
	参考文献	(222)
8	湛江黏土的动力蠕变模型	(224)
8.1	引言	(224)
8.2	流变理论基础	(225)
8.3	土体的动力循环蠕变特性	(227)
8.4	结构性黏土的动力蠕变模型	(232)
8.5	小结	(248)
	参考文献	(249)
9	结论与展望	(251)
9.1	结论	(251)
9.2	展望	(254)

1 绪 论

1.1 引 言

我国沿海地区广泛分布着深厚软土层,这些软黏土的含水率大、压缩性高、透水性差、承载力低。沿海地区是我国经济相对发达地区,改革开放以来经济快速发展,城市规模扩大以及人口急剧增加,房屋建筑、轨道交通等大型工程大量兴起,大部分设施都建筑于软黏土地基上。由于软黏土地基强度低、稳定性差、沉降问题突出,且具有一定的流变性和触变性,在外部荷载作用下土体破坏表现出突然性破坏,给工程建设造成极大危害。软黏土由于具有结构性,因此常表现出与重塑土不同的工程性状。世界各地均有结构性黏土的存在,如挪威、瑞士、印度沿海地区以及东南亚地区等,对具有特殊工程性质的黏土,需要特别考虑其稳定性、沉降变形以及土体动力响应特征等。

土体的变形和强度是岩土工程最为关心的两大问题。软黏土承受高层建筑、桥等静力荷载作用时,会因荷载过大而降低安全系数,变形过大而失稳。而岩土工程在其使用期内,土体也会受到环境因素或人类活动等动荷载的影响,通常土体在动荷载作用下的响应比静荷载更加复杂。动荷载如交通、波浪冲击与地震等反复荷载作用也会导致结构性黏土发生突然破坏而失稳,如图 1-1 所示。其中图 1-1(a)为地震诱发的侧向大变形,图 1-1(b)为铁路路基在反复荷载作用下剪切破坏示意图。沿海地区的机场、高速公路、铁路、地铁等大型交通工程都建在软黏土地基上,投入运营之后必然会受到循环荷载作用,常出现竣工后沉降大的问题,对工程造成了极大的安全隐患。如温州机场跑道由于飞机起降引起了地基沉降,建成 4 年后沉降达 16.6 cm,目前已达 55 cm,远高于 8 cm 的设计值。跑道空鼓现象时有发生,大大增加了维护成本。循环荷载引起的软土路基不均匀沉降,必然会影响建筑的美观,甚至会破坏建(构)筑物结构,降低其使用年限,影响道路下的管线和行车安全等。

土体结构性对其固结、压缩、变形以及强度等工程性质均有相当程度的影响,结构性黏土压缩曲线、应力-应变关系曲线、强度包络线线型、固结系数与渗透系数均在其结构破坏前后的性状具有很大不同^[1],存在明显转折点,现场观测的沉降过程线、孔隙压力系数的变化及水平位移曲线也如此。原状土在低应力水平下呈低压缩

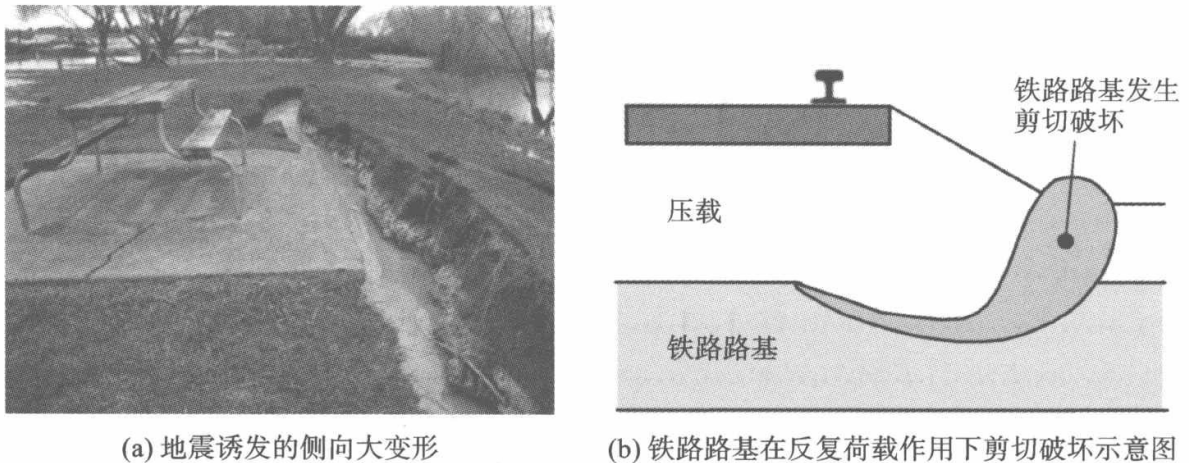


图 1-1 地震及路基在循环荷载作用下失稳

性,而当应力水平超过结构屈服应力后,由于结构性丧失而强度降低,土体抵抗变形和破坏的能力减弱,土体性质逐渐趋向于重塑土。然而,大部分工程实践都是基于重塑土或扰动土的室内试验结果,从而使设计偏于安全,不能合理利用土的结构性,造成经济上的浪费。孔令伟^[2]等结合湛江海域防波堤软土层的结构性破损程度分析、稳定性评价与变形监测,提出该下卧结构性软土可作为防波堤的持力层的结论。防波堤多年运营效果验证了利用软土结构性潜能的合理性。

国内外对结构性黏土的特性研究,多数是静力状态下所取得,难以直接应用于描述结构性黏土在交通、波浪、冲击与地震等反复荷载作用下的动力特性。交通荷载是一种特殊的循环荷载,它既不同于静荷载,也不同于地震过程中的短期循环荷载,而是一种长时间往复施加的循环荷载。交通荷载长期循环往复作用引起软黏土地基应变累积、强度降低,可导致重大工程过大变形和失稳等灾变,造成巨大经济损失,甚至威胁生命安全。而土体的动力响应研究一般以砂土与软黏土为主要研究对象,前者以饱和砂土振动液化与液化后大变形为重点,后者多针对重塑土或结构性较弱的软黏土^[3],而强结构性黏土的研究成果较少。结构性黏土在长期循环荷载作用下会经历结构强度的丧失,这将会导致地基在毫无预兆的情况下产生大变形,并因结构突然破坏而承载力急剧下降,引发土体的灾难性破坏。为了保证越来越多大型建(构)筑物的安全与稳定,减少工程事故的发生,不仅要认识结构性黏土在静力条件下的工程特性,充分利用土体的结构性,避免土体骨架结构不稳定的不利影响,还要论证动荷载反复作用对其变形、强度和稳定性的影响。研究结构性黏土在长期循环荷载作用下的不排水循环动力特性并预测和评价这些特性,具有重要意义。

1.2 结构性黏土的研究现状

天然黏土普遍具有结构性, Terzaghi^[4]最早提出土的结构性的概念。土的结构性是指土粒本身的形状、大小、土体颗粒排列形式、孔隙状况、粒间接触和颗粒之间联结作用的总和^[5]。天然黏土是自然历史环境的产物, 颗粒在天然沉积过程中会形成一定的骨架结构, 颗粒间的接触点在地下经长期的物理化学作用会形成胶结, 从而使天然黏土具有结构性和结构强度。土的结构性是决定天然土体力学特性的一个根本的内在因素^[6], 在土力学研究发展中具有重要地位。对结构性软黏土而言, 土的结构性对其力学特性的影响十分复杂, 结构性会使土具有较大的孔隙比和较高的含水量。如日本的天然沉积硅藻土^[7], 含水量高达 141.3%, 孔隙比大于 3。胶结作用对土的力学性质有重要影响, 这种作用增大了土的强度和刚度, 且胶结作用发挥的力学特性与土体受到的应力水平密切相关。洪振舜等^[8]对具有强结构性的硅藻土的微观孔隙入口孔径分布与应力水平的关系进行了研究, 发现外加应力水平达到固结屈服压力时, 微观孔隙入口孔径分布发生了显著变化。因此, 微观结构变化与宏观力学特性的内在联系值得探讨。

1.2.1 土的结构性

Side 等^[9]提出了土体的基本组构, 分为絮凝结构、分散结构及湍层结构, 其中絮凝结构又可分为片架结构和书堆结构。

土体的沉积历史对土体的组构有显著影响, 其中主要的影响因素为沉积速率和水的状态。土体在沉积过程中形成的组构被称为“主组构”, 它在后沉积过程中会有一些的改变。

土的胶结是指土体颗粒之间相互作用的总和。胶结是一种成岩过程, 取决于黏土沉积过程中所存在的物质。胶结黏土含有由强联结结合在一起的颗粒, 这种联结具有与非胶结黏土不同的特性, 在非胶结黏土中占优势的是“有效摩擦力”和“有效黏聚力”所产生的联结^[10]。

Leroueil 等^[11]指出土体的结构性是土体受沉积作用、荷载历史等结果的体现, 从这个意义上来讲, 任何土体在任何状态都具有其相应的“结构性”; 并提出了土体结构四种不同的状态, 分别为土体的原位状态、结构性损伤状态、重塑状态以及再沉积状态。其中, 土体原位状态沉积历史作用产生的土体结构性为本文主要研究内容。

(1) 原位(未扰动)状态(intact state): 指土体沉积的天然状态, 是复杂的成岩过

程(包括沉积环境、固结、侵蚀、触变硬化、风化等)的结果。

(2) 结构损伤状态(destroyed state):土体发生一定的体积变化或剪切变形,其原有的天然结构有相应损伤。

(3) 重塑状态(remoulded state):在足够大的荷载作用下,土体结构发生完全破坏,此时土体强度降至最低,即重塑土的不排水强度。

(4) 再沉积状态(resedimented state):重塑状态的土颗粒混合淤泥固结,这种再沉积状态取决于土体矿物组分、颗粒大小、沉积速率、混合浆的盐分浓度及其他影响因素。

其中,重塑状态土体的性质反映了土体的矿物组分及当前的沉积环境,原位状态土体的性质反映了土体的原生结构性和沉积历史,而土体由原位状态到结构损伤状态再到重塑状态则是土体的天然结构性逐渐丧失的过程。

重塑土(reconstituted clay)是指天然结构性土体因重塑而破坏其颗粒间的联结,消除大的孔隙,在宏观尺度表现为一种均匀的组构。Burland^[12]给出了重塑土的制样方法:原状土加水混合成含水量为1~1.5倍液限的泥浆,然后对不经过风干或烘干的土样进行一维固结。此时重塑土的结构性已经遭到破坏,Cotecchia和Chandler^[13]根据电子显微镜观察结果发现,土样在重塑状态的结构是由土体组构和颗粒之间处于稳定结构状态的胶结组成,不会随着扰动而变化;原状土则还包含一些亚稳态结构,这些亚稳态结构是造成原状土和重塑土的性质状差异的主要原因^{[13]~[15]},在重塑过程中会被消除。

因此,重塑土的性质被称为土体内在的本质特征^[12],土体在重塑状态和扰动状态的力学性质同样是土体结构性研究的重要内容。Leroueil和Vaughan^[16]定义了“结构许可空间”——重塑状态和未扰动状态所围成的空间,即为不同程度结构损伤状态的土体可能出现的区域,可表征重塑状态、未扰动状态及结构性损伤状态这三种状态之间的联系^[17]。

1.2.2 黏土结构性的微观研究现状

土的结构性是指土颗粒或颗粒集合体以及它们之间孔隙的大小、形状、排列形式及联结作用等综合特征。土的结构性不仅包含了土骨架和孔隙的几何特征(包括土颗粒和孔隙的大小、形状和特征等),还包含了颗粒之间的联结作用。因此,如果将孔隙看作是反映颗粒排列特征的一个方面,那么土的结构性则是指土中颗粒的几何特性(即颗粒排列特征)和力学特性(即联结特征),前者称为组构,后者称为颗粒联结。

Terzaghi于1925年提出黏粒悬液在电解质和一定的上覆荷重作用下形成的凝

絮状结构为蜂窝状结构。1926年,Goldsemidt^[18]提出了片架排列结构,认为高灵敏性黏土中的颗粒是不稳定的片架排列,低灵敏性黏土则有较稳定的排列。Casagrande^[19]在Terzaghi的蜂窝结构的基础上,提出了“基质黏土”(matrix)和“键合黏土”(bond)的概念。该时期土体微观结构的研究缺乏有效手段,以放大镜观察为主,对复杂的土体结构更是缺乏系统深入的研究,相关研究进展缓慢,且多局限于定性研究。

随着扫描电镜、电子探针、透射电镜等电子技术被陆续引入到土的微结构研究领域,人们对土的微观结构的认识取得了飞跃的发展。Tovey^{[20]~[21]}提出的液氮冻干技术和扫描电镜胶带剥离等技术进一步提高了黏性土原始结构观测的准确性。McConnachie^[22]、Delage等^[23]以及Osipov等^[24]则从土颗粒排列方向及联结力等方面研究了原状土和重塑土微结构特征的变化规律,定量分析了孔隙的变化和土体压缩的各向异性。罗鸿禧等^[25]、谭罗荣等^[26]对湛江黏土微观结构进行了研究,发现其是由片状组构单元形成的架空式的絮凝结构,土体中裂隙和孔洞发育特别,其中充满着大小相等、形状相似的晶体。谭罗荣^[27]还利用X射线衍射法测定颗粒取向排列的特征,提出了黏土微观结构的定向度测定公式。吴义祥^[28]认为黏性土是以结构状态形式存在的,在力的作用下其结构状态发生变化,结构状态可用熵函数来定量表示。张梅英等^[29]将加载装置安装在扫描电镜内的拉伸台上,可直接观测不同受力状态下岩土介质的应力-应变发展过程以及相应的微观结构变化,为开拓新研究领域提供了新的实验手段。

不同的测试技术以及计算机图像处理技术对应着不同的微观结构定量分析方法,并与土体宏观行为相结合。Hicher等^[30]对两种有代表性的黏土(高岭土和火山灰土)进行了各向同性三轴固结试验、单轴固结试验以及三轴排水剪切试验,对试验前后颗粒的形状、大小变化以及组成颗粒单元的定向分布情况进行了统计分析,同时还分析了土体压缩过程中的各向异性。施斌^[31]利用冷冻刀切干燥法处理高含水率土样,用CT技术监测土的微观结构的演变及裂隙和剪切面的形成。王清^[32]通过对不同黏性土SEM图像的处理,提出了黏性土微观结构中针对结构单元体形态、定向性、孔隙特征等结构要素的定量评价指标。孔令伟^{[33]~[34]}等对琼州海域及湛江海域结构强弱不同的两种软土进行了系统室内试验研究,从矿物组成、物理化学性质、胶结特性与孔隙结构特征几方面分析了其特殊工程力学性质的微观机制。刘松玉^[35]、查甫生^[36]利用电阻率测试仪对膨胀土与黄土的电阻率进行了测试,研究了孔隙率、孔隙结构等土壤微结构特征对电阻率的影响规律。唐朝生^[37]基于SEM图像计算了孔隙率和土颗粒形态分形维数,研究了阈值、分析区域、扫描点位置、放大倍率等因素对土体微观结构定量研究的影响以及作用机理。

随着对循环荷载作用下土体力学特性和变形研究的深入,国内外学者对动荷载下土体微观结构的研究逐渐取得了一些成果,然而由于黏土结构的复杂性和不确定性,对于动荷载下饱和软黏土微观结构的变化规律的研究多处于探索阶段。Ansal^[38]对循环荷载作用下土体变形和微观结构进行了研究,发现土体变形分为三个阶段:①似弹性阶段(土颗粒的结构无明显变化);②弹塑性阶段(土颗粒发生滑移,微结构发生部分破坏,土体产生残余变形);③软化阶段(土体微结构完全破坏,土体强度降低)。唐益群等^{[39]~[40]}采用扫描电镜对地铁荷载作用下饱和软黏土的微观结构进行了初步揭示,并将微观结构的变化与宏观变形进行了相关性分析。姜岩等^[41]对交通荷载作用下孔隙的分布特征及变化规律进行了研究。Rakesh 等^[42]对循环荷载下散体结构和凝聚结构的高岭土进行了研究,发现两种结构因微观方面的差异展现出不同的宏观特性。曹洋等^[43]通过对比循环加载前、后微观结构特征参数的变化规律,探讨了动荷载频率和动应力比对土体微观结构的影响,以及动力作用下土体宏观变形的微观机制。

压泵法、CT 扫描法、X 射线衍射法、电阻率技术与 SEM 法可用于研究土结构性的微观特征、选取合理的微观结构参数、建立微观结构与宏观特性的联系等,但距工程应用尚有一定距离,加强微观结构定量研究的实用性,是结构性黏土微观结构研究的首要任务。

1.2.3 软黏土结构性模型的研究现状

在对天然黏土结构性有了初步认识和充分重视的基础上,研究人员迫切需要解决的是如何在现有本构模型基础上增加对结构性的考虑或建立全新的结构性软黏土本构模型,进而用于描述天然结构性软黏土的受力变形性状。国内外学者建立了大量的结构性黏土的力学模型,用以描述结构性软黏土的变形特性和结构破坏特征。目前对软黏土的结构性的研究,主要有微观和宏观两个方面。回顾近年来国内外报道的诸多结构性软黏土本构模型,主要描述了结构性黏土的以下特征。

(1) 土体小变形范围内受力变形的非线性特征。土体非线性弹性模型大体上分为 E-U 模型和 K-G 模型两大类。由于 K-G 模型可通过试验直接测定,从参数确定的角度而言,K-G 模型更优。如 Whittle 和 Kavvas^[44]、王立忠等^{[45]~[46]}提出的本构模型,都是以这一特征建立的非线性弹塑性模型或非线性弹性模型。

(2) 土体应力历史以及加载过程中屈服性状的变化。如 Mroz 等^{[47]~[48]}、Provost^[49]提出的本构模型,以弹塑性模型为主,主要有反映结构性影响的多重屈服面模型和界面模型。

(3) 土体的结构在受荷过程中逐渐破损的特征。基于损伤力学的弹塑性模型

中土体屈服面尺寸的减小来模拟结构破损,如 Kavvaadas^[50]、沈珠江^[51] 和刘恩龙等^[52] 提出的本构模型。

这些本构模型的研究方法大致可以分为:以微观结构的试验研究为基础建模,以及从宏观表现为基础描述土体性状。

在微观层面,Nagaraj 等^[53] 给出了灵敏性软土在压缩过程中的微观结构模式,讨论了不同结构状态的土体在压缩过程中的孔径分布和渗透性能规律性及其对土体压缩行为的影响。Matuso^[54] 基于统计方法提出了结构因子概念,用于描述土的变形和强度等基本规律的本构关系。陈嘉鸥^[55] 采用压汞法和 SEM 法对珠江三角洲黏性土进行了研究,从黏性土的微观结构与工程加固效果的相关性着手,得出黏土微结构在不同压力下的变化规律。何开胜等^[56] 提出了点-面接触单元,通过更新的拉格朗日大变形有限元法,对荷载作用下的变形问题进行了跟踪分析,定量探索并分析了土体的变形、破坏和蠕变的内在机理,为建立结构性黏土的本构模型提供了微观基础。Yin 等^[57] 通过分析灵敏性海积黏土的原状土和重塑土在不同加载条件下土样的微观结构特性,建立了可以直接考虑结构性黏土土颗粒间的胶结作用以及胶结破坏的本构模型。

从工程角度来讲,土的微观结构研究一方面可以定性地说说明土体某些工程特性,解释土体某些特殊的力学行为特征,另一方面可以通过定量分析,建立微观结构状态参数与其对应的宏观力学参数之间的联系,并进一步得到相应的微观结构模型,以此得到微观结构与宏观特性之间的定量关系。

在宏观层面,土体结构性模型的研究主要通过引入损伤函数、破损力学理论、扰动状态函数、结构性参数等来描述土体结构的渐进破坏规律和应力应变关系特征,从而反映土体结构性对变形和强度的影响。目前国内外用于描述土体结构性的宏观模型有如下几类。

(1) 结构性黏土的损伤力学模型。沈珠江^[58] 认为天然结构性黏土的逐渐破损是原状土逐渐向扰动土的变化过程,引入损伤力学的概念,提出了考虑黏土结构性破损过程的损伤力学模型。沈珠江认为应当使用宏观与微观相结合的研究方法来弄清土体变形的微观机理,以此为基础重建土的本构关系。之后沈珠江^[59] 从土体微观结构破坏机理出发,提出了一种把变形过程中的结构性黏土看作不同大小的土块集合体的堆砌体模型来描述天然黏土变形过程中伴随的结构破损现象。

(2) 结构性黏土的二元介质模型。Vatsala 等^[60] 认为天然黏土的强度来源于两部分:土骨架的强度和土颗粒间的胶结强度。其建立了一个摩擦元和胶结元并联的结构性模型,用两个元件分别表征土骨架和胶结的颗粒,二者共同承担外部荷载。土骨架部分表现为重塑土的性状,采用修正剑桥模型进行描述,并假定天然土体与

其重塑土微观结构一致,胶结部分的应力则通过相同应变下天然土和重塑土的应力差得到,因此胶结部分的应力-应变关系是通过描述天然土和重塑土的应力差与应变之间的关系来模拟得到的,以此重新建立了一套独立的本构关系。在岩土破损力学的理论框架内,沈珠江^[61]将结构性岩土材料抽象成由胶结性强的结构块和胶结性弱或无胶结的软弱带组成的双重介质,变形过程中胶结块逐步破损并向软弱带转化,引入了反映破损过程的结构破损参数和应力比,建立了结构性黏土的二元介质模型的增量型应力-应变关系。李建红^[62]针对凸多面体相互接触的性质,推导了三维状态下微观接触力和宏观应力的关系,提出了三种破损规律:剪碎型、压碎型、混合型。刘恩龙^[63]通过对棒状和棱柱状结构块的平面试验,验证了二元介质模型对结构性岩土材料力学抽象的正确性,发展了一种模拟岩土材料破损过程的微观数值方法,提出了适用于结构性岩土材料的强度准则,利用了土体积应力的比值来模拟土的结构性。

(3) 结构性黏土的扰动状态模型。Desai^[64]提出了扰动状态概念,采用扰动函数来描述扰动材料的结构演化过程。在扰动概念的基础上,王国欣^[65]对扰动函数进行了扩展,通过拟合方法建立了包含扰动状态参数和微结构参数的数学表达式,建立了结构性黏土的弹塑性扰动状态本构模型。

(4) 考虑结构性参数的结构性模型。谢定义^[66]认为研究土体结构性最好的方法是使土的结构破坏,让其结构势充分表现出来,提出了一个定量定义土体结构性的方法——综合结构势:

$$m_p = \frac{m_1}{m_2} = \frac{S_s/S_o}{S_o/S_r} = \frac{S_r \cdot S_s}{S_o^2} \quad (1-1)$$

式中: S_o 、 S_s 和 S_r 分别为土体的原状样、饱和样和重塑样在某一压力下的变形量或应变变量。

吴小锋^[67]在修正剑桥模型中,引入了应变型和应力型结构性宏观参数来表征土体微观结构的变化,反映了原状土的结构性演化过程,并在此基础上提出了结构性土体的弹黏塑性损伤本构模型。雷华阳^[68]通过对天津海积软土的大量试验,引入结构强度系数,建立了微结构定量参数与力学参数之间的关系,并提出一种综合考虑结构性影响的应力应变关系模型。

(5) 从原状土基本性状入手的本构模型。Liu^[69]基于修正剑桥模型,考虑了天然软黏土与相应重塑土等向固结曲线的差别,引入了孔隙比之差来表征结构性的参数,结构性衰减方程在屈服面上的表现即随着塑性体积变形的增大,椭圆屈服面不断增大。该模型用三个参数 b 、 ω 、 p 来反映土体的结构性:参数 p 表征初始屈服面的大小;参数 b 表征结构性衰减速率;参数 ω 表征结构性对流动法则的影响,随结构性的衰减流动法则逐渐趋向于修正剑桥模型的相关联流动。与修正剑桥模型相比,