

LUANSHI DICENG ZHONG DIXIA TIEDAO SHIGONG LIXUE DE
KELI LISANYUANFA MONI JISHU JI YINGYONG

王明年 魏龙海 刘大刚 著

卵石地层中地下铁道施工力学的 颗粒离散元法 模拟技术及应用



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

卵石地层中地下铁道施工力学的 颗粒离散元法模拟技术及应用

王明年 魏龙海 刘大刚 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

卵石地层中地下铁道施工力学的颗粒离散元法模拟技术及应用 / 王明年, 魏龙海, 刘大刚著. —成都: 西南交通大学出版社, 2010.5

ISBN 978-7-5643-0654-0

I. ①卵… II. ①王…②魏…③刘… III. ①卵石—地层—地下铁道—工程施工—结构力学—研究生—教材
IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 076577 号

**卵石地层中地下铁道施工力学的
颗粒离散元法模拟技术及应用**

王明年 魏龙海 刘大刚 著

责任编辑	孟苏成
特邀编辑	杨 勇
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮 编	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm×230 mm
印 张	12.375
字 数	224 千字
版 次	2010 年 5 月第 1 版
印 次	2010 年 5 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-0654-0
定 价	22.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

卵石地层一般由卵石、粗细砂、黏性土等组成，偶遇巨石块，大多数卵石地层结构松散，分布不匀，具有强烈的离散特性，与砂土、黏土等均质土在工程力学性质上有本质区别，连续介质力学不能反映其本质特点。

目前，我国地下铁道建设发展迅速，以四川成都为代表的很多城市遇到了在卵石地层中修建地下铁道的问题。到目前为止，在卵石地层中应用明挖、盾构及浅埋暗挖等施工方法修建地下铁道的成功经验还较少，为了满足地下铁道工程建设的需要，本书以四川成都地下铁道建设为背景，对卵石地层地下铁道施工力学颗粒离散元法模拟技术进行了总结。

本书共分7章，第1章为概述，第2章为颗粒离散元法细观模型及理论，第3章为颗粒离散元程序实现，第4章为颗粒离散元模型细观参数标定方法，第5章为颗粒离散元在卵石地层深基坑工程中的应用，第6章为颗粒离散元在卵石地层盾构隧道中的应用，第7章为颗粒离散元在卵石层浅埋暗挖隧道中的应用。

书中引用了国内外已有的专著、文章、规范、研究报告等成果，在此向其作者及有关人士一并表示感谢。虽然我们尽了很大努力，但由于学识水平有限，疏漏不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2010年3月

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 颗粒离散元的发展概况	1
1.2 颗粒离散元的研究现状	2
1.3 成都地铁 1、2 号线工程概况	7
第 2 章 颗粒离散元法细观模型及理论	10
2.1 颗粒流方法的基本思想	10
2.2 颗粒离散元基本理论	13
2.3 颗粒离散元接触本构关系	26
2.4 体系稳定性判断	33
第 3 章 颗粒离散元程序实现	35
3.1 三维离散单元法的接触检验搜索技术及数据结构	35
3.2 计算流程	38
3.3 三维离散单元法软件介绍	39
3.4 应用实例	42
第 4 章 颗粒离散元模型细观参数标定方法	59
4.1 颗粒流方法解题途径	59
4.2 模型细观参数与材料宏观参数关系的标定方法	61
4.3 成都地铁卵石土层及相关结构宏观细观参数标定	74
第 5 章 颗粒离散元在卵石地层深基坑工程中的应用	76
5.1 概 述	76
5.2 卵石地层土压力大小及分布规律研究	81
5.3 天府广场深基坑施工安全性分析	95

第 6 章 颗粒离散元在卵石地层盾构隧道中的应用	105
6.1 概 述	105
6.2 卵石地层盾构开挖面变形与破坏模式研究	110
6.3 卵石地层盾构开挖面极限支护压力数值模拟	118
6.4 卵石地层盾构开挖面极限支护压力计算模型	125
6.5 成都地铁 1 号线某盾构开挖面稳定性案例分析	144
第 7 章 颗粒离散元在卵石层浅埋暗挖隧道中的应用	151
7.1 概 述	151
7.2 成都地铁天府广场北端暗挖试验段工程情况	152
7.3 卵石地层隧道坍塌破坏机理及加固措施研究	154
7.4 卵石地层浅埋暗挖隧道施工工法研究	168
参考文献	181

第 1 章

概 述

1.1 颗粒离散元的发展概况

离散元法的思想源于较早的分子动力学 (molecular dynamics)。在 1971 年 Cundall 提出了适于岩石力学的离散元法,而后他与 Strack 联合在 1979 年又提出了适于土力学的离散元法,并推出二维圆盘 (disc) 程序 BALL 和三维圆球程序 TRUBAL (后发展成商业软件 PFC-2D/3D),形成较系统的模型与方法。离散元分为两个大的分支,一种是以块体为基本单元的块体离散元法,另一种是以圆盘或圆球为基本单元的颗粒离散元法。其中颗粒离散元法是基于最初的圆盘和圆球颗粒模型发展起来的,适用于颗粒数目较多且单个几何形状可用圆球近似而不产生显著差异的情况,圆盘属于固体力学平面问题,没有任何实际颗粒是柱状的,故不是很好的模型,优点是简单。Cundall 和 Strack 证实了用圆盘程序 BALL 模拟的接触力线图与前人的圆盘组合体光弹性实验的接触力场相当吻合,为离散元法的可应用性提供了证据,但多数研究者已普遍采用圆球模型。

1989 年英国 Aston 大学 Thornton 引入 Cundall 的 TRUBAL 程序,从发展颗粒接触模型入手对程序进行了全面改造形成 TRUBAL-Aston 版,后定名 GRANULE。它完全符合弹塑性圆球接触力学原理,能模拟干-湿、弹性-塑性和颗粒两相流问题。Leeds 大学等校也利用它用于模拟。在英国 DEM 研究较深入的还有 Surrey 大学的 Tuzun 研究组 (以 DEM 模拟和实验研究见长),Leeds 大学的 Ghadiri 研究组,Swansea 大学 Owen 的研究中心 (以有限元-离散元法结合见长) 等。在英国多次举办相关主题的学术会议,促进了颗粒离散元法的发展。

20 世纪 90 年代以来,离散元法在国外得到足够的重视,并且得到了迅猛发展。这一时期,各种离散单元法商用软件相继出现,美国 ITASCA 公司开发和完善了基于圆盘形和球形离散单元的 PFC2.0 和 PFC3.0,这些软件在很多领域得到了广泛应用,从而使离散元法在工程中的应用向前迈进了一大步。

美国在 1989 年、1993 年和 2002 年连续召开了三届离散单元法国际会议,

德国和日本分别于 2002 年和 2004 年针对离散元商用软件 PFC2.0 和 PFC3.0 连续召开了两届国际会议。

日本、德国、法国、俄罗斯、以色列等国均有很多学者研究和应用离散单元法,并且大部分已经形成研究团队。就日本来说,就有 5 个学术团体对离散单元法进行系统研究。研究较多的有 Saitama 大学的 Oda,京都大学的 Oida,大阪大学的 Tsuji 和 Tanaka,东京农工大学的 Horio.Oda 以及东北大学的 Satake 和 Kishino 等,其中 Horio.Oda 等人编写专著系统介绍了离散单元法。

离散元等方法的研究又出现了不少改进模型和方法,初步形成了以固体接触力学和流体力学为基础、颗粒细观力学为体、颗粒技术为用的具有交叉特征的计算散体力学学科。国际散体细观力学大会自 1989 年起,先后在法、英、美、日召开,出版论文集,其中离散元法研究占有一定比重。世界颗粒技术大会、化学工程大会等也有文章发表。国际英文期刊中 *Powder Technology*, *Particulate Science and Technology* 和 *Advanced Powder Technology* 常有这些方面的文章发表。

离散元法在我国的研究和应用虽然起步较晚,但发展非常迅速。东北大学的王泳嘉教授和淮南矿业学院的剑万禧教授于 1986 年在第一届全国岩石力学数值计算及模型试验讨论会上,首次向我国岩石力学与工程界介绍了离散元法的基本原理和几个应用的例子。自此,关于离散元理论和应用方面的研究论文在国内刊物上不断出现。

我国散体力学研究文章散见于力学和各工程期刊,中国颗粒学报 *Particuology* 于 2003 问世,国内外的学者在此刊物发表了关于颗粒学领域中的研究、工程和应用方面的优秀原始论文,包括颗粒测试与表征、颗粒制备与处理、流态化、气溶胶和超微颗粒等。它反映中国颗粒学研究的最新成果,及时追踪国际颗粒学领域的最新动态。国内周健、池永等(2000、2002)应用颗粒流理论模拟了砂土和黏性土平面应变试验的应力-应变关系曲线和剪切带的形成过程;张洪武等(2006)建立了非线性接触本构模型模拟了颗粒圆筒二维平面应变的数值试验。

颗粒流理论及其数值实验平台 PFC2D 和 PFC3D 在国外已取得一些研究成果。在德国盖尔森基兴举办了第一届颗粒流数值模拟大会(2002),在日本京都大学举办了第二届颗粒流数值模拟大会(2004)。

1.2 颗粒离散元的研究现状

目前,离散单元法作为一种公认的数值方法,几乎已经渗透到了岩土工程的所有领域:巷道支护,边坡工程,地下开采,动载问题,冰雪力学,核废料的处

理, 散体介质问题, 断裂力学, 自然界的风蚀、崩塌和泥石流, 节理-岩桥问题。对于特殊的颗粒离散单元的应用, 可以分为如下的几个方面。

1.2.1 土力学研究

土力学研究是散体力学发展中的一个重要方面, 从 Cundall 和 Strack 开始有很多离散元模拟都集中于典型的土力学的实验模拟, 以便研究各种理想状态下散体的本构关系, 这也是衡量该方法有效性的重要标志。

Walton 和 Braun (1985) 研究了散体纯剪切问题。

Williams 和 Rege (1997) 对圆盘、椭圆盘和方形颗粒样本完成了双轴压缩数值实验, 指出颗粒形状对压缩性质有显著影响, 他们还研究了剪切带的形成问题。

Oda 和 Kazama (2000), Iwashita 和 Oda (2000) 进行 T 剪切带问题和剪胀与失效的机理课题的研究。

Thornton 和 Antony (2000) 研究了软颗粒的剪切问题。

Zhang 和 Thornton (2002) 用球元模拟了土力学的直剪试验。

Iwashita K, Oda M (2000) 不但考虑了颗粒的滑动, 而且考虑了颗粒滚动的离散元法。MDEM 研究了土骨架的应力应变模拟和剪切带的形成过程, 得出了剪切带范围呈现柱状并且该范围内的颗粒转动梯度最大的结论。

国内有关研究人员也对将颗粒离散元数值方法应用到土力学中的可行性进行了探索, 开展的研究主要如下:

周健等应用 PFC 软件, 对土体破坏细观机理、管涌现象细观机理等问题进行了颗粒离散元数值模拟, 结果与试验基本吻合。

葛修润、尹小涛等利用 PFC2D 和 PFC3D 对岩土材料的工程性质进行了数值模拟, 研究认为岩石几何尺寸最佳长径比在 2.5~3.0 较合适。

罗勇等应用 PFC2D 软件, 对桩墙、支撑等围护结构进行了数值模拟, 结果认为颗粒流 PFC2D 能够用于分析围护结构在外荷载作用下的宏观力学响应。该课题组还利用三维颗粒离散单元对无黏性土的工程力学性质进行了模拟, 得到了与室内试验相似的结果。

加瑞等应用 PFC2D 对砂土挡板下落试验进行了模拟, 通过对比随挡板下移挡板上力的变化和箱底土压力的变化, 验证了砂土颗粒流模型参数取值的正确性和 PFC2D 模拟土拱效应的可行性, 可以用 PFC2D 来模拟盾构隧道垂直土压力的松动效应。

刘文白等利用颗粒离散元数值方法对桩-土相互作用问题进行了分析。

孟云伟等利用颗粒离散元数值方法,对隧道开挖中破碎带支护结构受力和变形情况进行了研究,探讨了无衬砌支护和有衬砌支护两种状态下围岩位移和隧道断面附近区域拉应力的变化情况。

张志刚利用颗粒离散元方法,对节理岩体强度的确定方法及各向异性特征等问题进行了研究。

王明年、魏龙海等利用颗粒离散元数值方法,对卵石地层隧道稳定性等方面进行了仿真模拟。

对于颗粒与流体之间复杂的相互作用,如图 1.1 所示,罗勇(2007)用到颗粒流 PFC 离散单元模拟颗粒在不同压力下的渗流规律,如图 1.2 所示。能够模拟与 Darcy 定律基本一致的渗流特性,图 1.3 所示为不同渗流梯度 i 下流过颗粒材料的流量 q 。

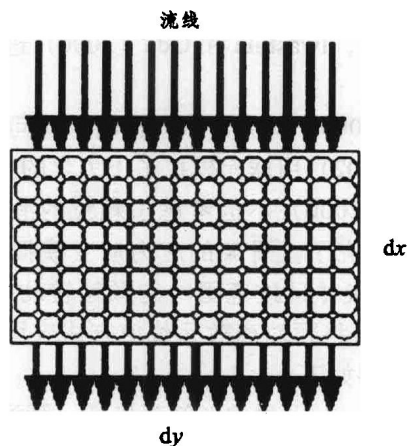


图 1.1 流体域示意

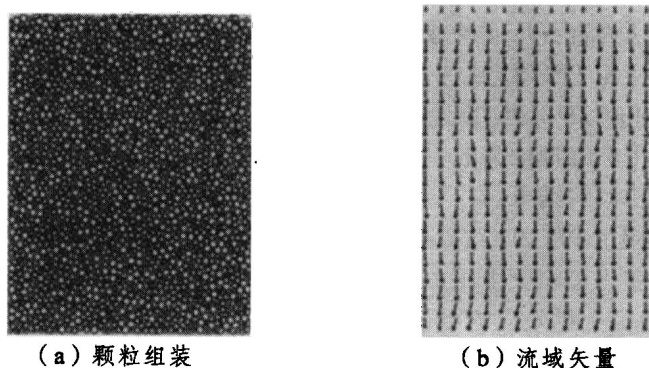


图 1.2 渗流模拟

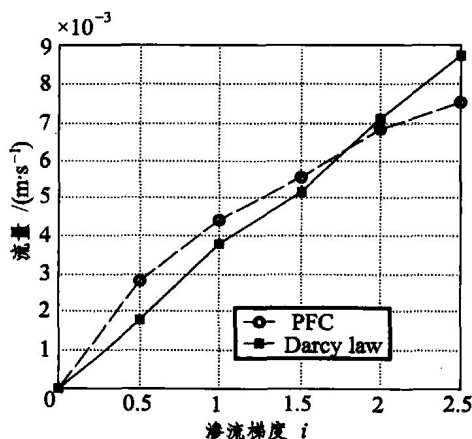


图 1.3 渗流梯度与流量的关系

颗粒物性有材料模量、摩擦系数等，而休止角是一个综合指标，如图 1.4 所示。堆积也是一个典型问题。Matuttis 等 (2000) 研究了颗粒堆积问题。Zhou 等 (2002) 对休止角进行了实验和离散元模拟，二者比较吻合。

黄晚清、陆阳 (2006) 在随机生成的单一粒径球体堆积体模型的基础上，采用离散单元法 DEM 模拟以立方体为边界条件的堆积体在重力场中的重新分布，并对颗粒的运动轨迹进行了追踪，结果表明：在重力作用下，堆积体更趋于均匀、致密，表现为最终堆积密度及平均配位数的增大；同时发现堆积体相对边界尺度（颗粒半径与堆积体边界长度之比）对堆积密度、配位数等计算参数影响显著。

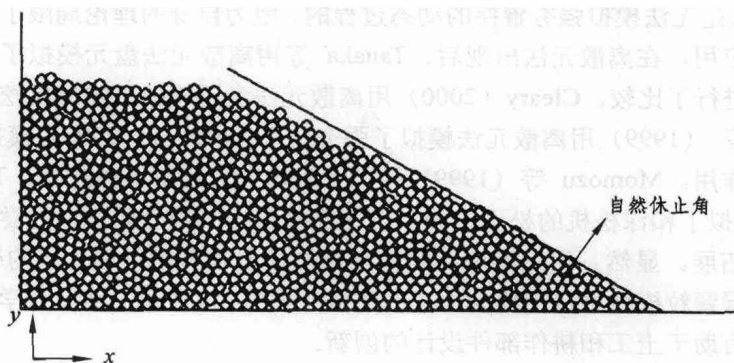


图 1.4 自然休止角

填压和压制是颗粒和粉体技术中的重要过程，余艾冰等 (1997) 做了大量的研究。左树春等 (2002) 模拟了车载散体在紧急制动过程中的惯性力问题。

1.2.2 颗粒流动研究

散体流动性预测与实际的逼近程度是评估模拟效果的重要依据。Walton (1993) 研究了非弹性球颗粒在斜槽中的流动。Hane S 和 Walton (2000) 研究了玻璃球在颠簸的斜槽中的流动。Karion 和 Hufli (2000) 研究了单一粒度和两种粒度混合颗粒的 Couette 流动。

料仓卸料是典型的散体流动过程, 离散元出现后 Langston 等 (1995) 用 DEM 对料仓料斗做过系统研究。Kafui 和 Thornton (1997) 用 DEM 研究了二维 (球心共面) 料仓和三维料斗卸料问题。MaSSon 和 Matinez (2000) 深入研究了力学性质对流动的影响。余良群和邢纪波 (2000) 用 DEM 模拟了圆形料仓的卸料过程并与实验进行了比较。Xu 等 (2002) 用 Thornton 的 DEM 球元模拟了不同颗粒物性对料仓卸料过程的影响, 并解释了料仓坍塌是由于卸料开始时散体从主动状态向被动状态转变时, 仓壁摩擦作用突然增加导致屈曲破坏。

1.2.3 土动力学研究

土动力学或机器-土壤动力学涵盖许多领域的应用, 如土工学中的开挖、钻探、推铲、贯入和管道铺设等过程, 车辆-地面力学中的履带/车轮-地面交互作用和耕作土壤动力学中的耕作、播种和施肥等工艺。这些复杂的散体力学问题过去用传统的土力学或有限元法分析, 当用它们分析松散土壤的动态大变形和切割、破碎时困难重重, 比如说用基于连续介质的模拟方法 (有限元单元法、有限差分网格方法) 是无法模拟强夯置换的动态过程的, 因为自身的理论局限了它们在这一方面的应用。在离散元法出现后, Tanaka 等用离散元法盘元模拟了贯入问题并与实验进行了比较。Cleary (2000) 用离散元法盘元模拟了挖掘机挖斗挖土过程。蒋鹏等 (1999) 用离散元法模拟了强夯过程。oida 等 (2002) 模拟了车轮-地面交互作用。Momozu 等 (1999) 模拟了旋转刀刃切割土体过程。Tanaka 等 (1999) 模拟了和深松机的松土过程。这些模拟是用二维盘元模型的尝试, 但毕竟有一定拓展。显然, 用三维球元的粘连颗粒模型和考虑土壤含水的牛顿/非牛顿流体的湿颗粒模型进行土壤动力学的离散元模拟, 将推动土壤动力学的微观机理分析, 有助于土工和耕作部件设计的创新。

1.2.4 离散单元和其他数值模拟方法的结合及应用

离散单元有其自身无法克服的问题, 有的时候必须和别的数值方法结合, 现

在离散元法和其他数值方法结合进行扩展性研究是一个热点,如离散元与边界元结合研究岩石力学,与计算流体动力学(CFD)结合研究颗粒两相流。离散元法和 CFD 结合的基本思路是将双流体模型中的固相颗粒流部分用颗粒单元取代,把颗粒在流场中的运动与碰撞和颗粒间孔隙的流体流动在整个时间序列内耦合起来。流体相的流动按 CFD 方法计算,颗粒相按干散体接触规律和运动处理,但要考虑曳力作用。

Tsuji 等(1993)最先把 Cundall 离散元法和 CFD 方法相结合,研究了二维气-固(球元)流化床问题,与实验比较在定性上合理,定量上在气流速度和压力变化频率上吻合。Kawaguchi 等(1998)接着用 DEM-CFD 结合模型模拟了二维和三维的同一问题来考察前后板摩擦的影响,与实验基本吻合。Kawaguchi 等(2000)又研究了圆锥筒底吹喷射床问题,其中颗粒相按三维而流体相按轴对称处理,模拟结果与他人实验也基本吻合。

近年来有限元法和离散元法结合解决工程问题的最新进展是 Han 等(2000)的喷丸成形的模拟和 Owen 等(2001)的多重断裂固体和离散系统的模拟研究,能预测工程中连续体在一定条件下部分破裂-破碎以及爆炸力学问题。

如上所述,颗粒离散元法在分析土体发生大变形直至破坏过程的问题时,具有独特的优点。而近年来,随着我国的社会经济快速发展,越来越多的城市开始规划和修建地铁,在此过程中遇到建设在具有强烈离散特性的砂卵石地层中的地下工程越来越多。基于此,本书作者应用颗粒离散元数值方法,对卵石地层地铁建设中遇到的几个亟待解决的问题进行了分析,分别参见后续相关章节。

1.3 成都地铁 1、2 号线工程概况

根据修编的成都市城市快速轨道交通线网规划,成都市快速轨道交通网由 7 条线路组成,线路总长度 274.15 km,其中地下线长度 144.24 km,地上线 129.91 km。其中近期规划建设的成都地铁 1 号线一期工程,北起红花堰站,南止于新的会展中心,线路全长 18.517 km,全部为地下线,共设车站 16 座;2 号线一期工程西起于成灌客运站,东止于经干院站,线路全长 22.790 km,其中地下线 19.808 km,过渡段 0.206 km,高架线 2.776 km,共设车站 20 座,其中地下车站 18 座,高架车站 2 座。

成都地铁 1、2 号线沿线一期工程地处川西平原岷江 I 级阶地,为侵蚀至堆积地貌。该两条线路都是沿城市主干道行进,沿线地形平坦,商铺众多,楼宇密

集,交通繁忙。沿线场区内均为第四系(Q)地层覆盖,地表多为第四系人工填筑层(Q_4^{ml}),其下为第四系冲积(Q_4^{al})黏性土、卵砾石土夹粉细砂,第四系上更新统冰水沉积、冲积(Q_3^{fgl+al})及第四系中更新统冰水沉积、冲积(Q_2^{fgl+al})卵石土夹砂透镜体。下伏白垩系上统灌口组(K_{2g})泥岩。

沿线地下水主要有第四系孔隙潜水和基岩裂隙水两种类型。第四系孔隙潜水为测区内的主要地下水,主要埋藏于上更新统(Q_3)卵石土或由全新统(Q_4)与上更新统(Q_3)卵石土组成的统一含水层中,含水层总厚度一般为15~25 m,为孔隙潜水。

成都地铁1、2号线沿线隧道埋深一般为8~25 m,除个别区段外,隧道主要穿越卵石土层。根据设计,沿线各车站及市区外的部分区间隧道主要是采用明挖法施工的,而市区内区间隧道则主要采用的是盾构法施工,联络通道的施工主要采用浅埋暗挖法,具体如表1.1所示。

表 1.1 成都地铁 1、2 号线情况统计表

项 目 工法名称		成都地铁 1 号线			成都地铁 2 号线		
		隧道长度/车站个数		卵石地层 所占比例	隧道长度/车站个数		卵石地层 所占比例
		全线	卵石层		全线	卵石层	
明挖法	车站	16 个	16 个	100%	18 个	18 个	100%
	区间隧道	12.2 km	12.2 km	100%	2.84 km	1.03 km	36.4%
盾构法		24.5 km	24.5 km	100%	29.4 km	25.6 km	87.2%
浅埋暗挖法		联络通道及部分采用浅埋暗挖法施工的区间隧道,均位于卵石层中					

卵石地层结构松散,分布不匀,自稳性差,透水性强,地下水位较高,水量十分丰富,利用明挖、盾构和浅埋暗挖法在该地层中进行地下工程建设时,可能会出现如下问题:

(1) 采用明挖法在卵石地层中修建地铁车站时,合理计算土压力是确保基坑支护结构设计经济安全的前提条件。卵石地层中砂土、黏土等连续介质的差异较大,因此采用基于连续介质而建立的经典土压力理论进行卵石地层深基坑设计施工的可行性需要进一步探讨,需要明确卵石地层深基坑土压力大小及其分布规律。

(2) 隧道顶部覆土为人工填筑土、黏性土、卵石土夹透镜体砂层,均为松散土体,自稳性差,盾构掘进时采用压力过大,可能引起地面隆起,而压力过小,

则又可能引起地面塌陷,因此,需要研究卵石地层盾构隧道开挖面的稳定性及其合理支护压力的确定方法。

(3) 隧道联络通道主要采用浅埋暗挖法施工,围岩基本为卵石土夹透镜体砂层,卵砾石多、粒径大地层中卵砾石含量一般占 50%~90%,漂石最大粒径为 270 mm。该地层均匀性、自稳性差,开挖面容易发生失稳及造成地面沉降、变形、塌陷等。

(4) 隧道沿线地面建筑物、地下管线密集,隧道施工容易造成周边地面建筑物、地下管线的下沉和变形,应研究卵石地层隧道的开挖工法及其相关的预加固处理措施。

混合粒径的卵石地层地铁建设,无论理论研究还是实际施工都是困难的,这是地下工程施工中比较特殊的问题,不宜用基于连续介质力学问题的有限元等方法解决,而且目前关于卵石地层的理论研究也很匮乏。因此,本书拟根据卵石地层所具有的离散特性,利用能够解决非连续介质问题的颗粒离散元数值方法,针对成都地铁建设中遇到的几个亟待解决的问题进行分析。

第 2 章

颗粒离散元法细观模型及理论

2.1 颗粒流方法的基本思想

松散介质（如砂体）中的颗粒位移是相互独立的，它们之间通过接触点相互作用。这种介质的离散特点决定了它们在加、卸载过程中表现出复杂特性，因此至今尚未建立起满意的本构模型。建立或验证本构关系需要大量的物理试验。然而，由于松散介质内部的应力很难直接测量，只能根据边界条件估算，给试验结果的揭示带来很多困难。新的试验手段（如 X 射线照像技术）虽然已能测量应变，但尚不能测量诸如砂体中的应力等。由于颗粒介质内部应力的这种不确定性，人们只能建立松散介质的简化模型，以便能够计算或测定其内部应力和位移。其中最常用的模型是把颗粒视为圆盘或球，用来解析、试验或数值模拟。

PFC2D（Particle Flow Code in 2 Dimensions）即二维颗粒流程序，即是在该思路发展起来的一种离散单元法，它通过模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用来研究颗粒介质的特性。在这种颗粒单元研究的基础上，通过一种非连续的数值方法来解决含有复杂变形模式的实际问题。在岩土工程尤其是散粒体介质上的应用，就是从散粒介质的细观力学特征出发，把材料的力学响应问题从物理领域映射到数学领域内进行数值求解的方法。与此相应，物理领域内真实的散粒介质颗粒被数学领域内抽象的颗粒单元所代表，并通过对试样颗粒单元的几何性状的设计，彼此相互作用用接触本构模型代替，以及数值模拟边界条件的确定和试样若干应力平衡状态的迭代分析等，直至达到使数值模拟试样的宏观力学相应特性逼近真实材料的力学相应特性。

2.1.1 颗粒离散元法基本假设

颗粒流方法在模拟过程中做了如下假设：

- （1）颗粒单元为刚性体。

(2) 接触发生在很小的范围内, 即点接触。

(3) 接触特性为柔性接触, 接触处允许有一定的“重叠”量; “重叠”量的大小与接触力有关, 与颗粒大小相比, “重叠”量很小。

(4) 接触处有特殊的连接强度。

(5) 颗粒单元为圆盘形 (或球形)。

对于实际工程系统中大部分变形都被解释为介质沿相互接触面的表面发生运动的情况来说, 颗粒为刚性的假设显得非常重要。对于密实颗粒集合体或者粒状颗粒集合体材料的变形来说, 使用这种假设是非常恰当的。这是因为这些材料的变形主要来自于颗粒刚性体的滑移和转动以及接触界面处的张开和闭锁, 而不是来自于单个颗粒本身的变形。本书研究的材料砂、黏土正属于密实颗粒集合体类型。对于砂、黏土这种特殊材料, 没有必要采用精确的颗粒变形模型来获得整体性的近似。为了获得土体内部的力学特性, 可以将土体看做由许多小颗粒堆积的密实颗粒集合体组成的固体, 并通过定义有代表性的测量区域, 然后取平均值来近似度量土体内部应力和应变率。在颗粒流模型中, 除了存在代表材料的圆盘形或球形颗粒外, 还包括代表边界的“墙”。颗粒和墙之间通过相互接触处重叠产生的接触力发生作用, 对于每一个颗粒都满足运动方程, 而对于墙不满足运动方程, 即作用于墙上的接触力不会影响墙的运动。墙的运动是通过人为给定速度, 并且不受作用在其上的接触力的影响。同样, 两个墙之间也不会产生接触力, 所以颗粒流程序只存在颗粒-颗粒接触模型和颗粒-墙接触模型。

2.1.2 颗粒离散元法的特点

PFC2D 方法既可直接模拟圆形颗粒的运动与相互作用问题, 也可以通过任一颗粒与其直接相邻的颗粒连接形成任意形状的组合体模拟块体结构问题。PFC2D 中颗粒单元的直径可以是一定的, 也可按高斯分布规律分布, 单元生成器根据所描述的单元分布规律自动进行统计并生成单元。通过调整颗粒单元直径, 可以调节孔隙率, 通过定义可以有效地模拟岩体中节理等软弱面。颗粒间接触相对位移的计算, 不需要增量位移而直接通过坐标来计算。接触本构可用下列单元模拟:

(1) 线性弹簧或 Hertz-Mindlin 法则。

(2) 滑动模型。

(3) 可选择连接类型, 如: 一种是点接触; 另一种是用平行的弹簧连接, 这种平行弹簧连接可以抵抗弯曲。

通过重力或移动墙 (墙即定义颗粒模型范围的边界) 来模拟加载过程, 墙可