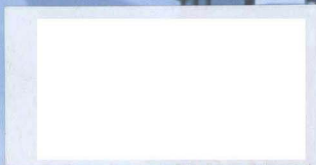


盾构隧道施工 灾变机理与工程实践

杨宇友 张子新 著



Dungou
Suidao Shigong
Zaibian Jili Yu
Gongcheng Shijian

中国建筑工业出版社

盾构隧道施工 灾变机理与工程实践

杨宇友 张子新 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

盾构隧道施工灾变机理与工程实践/杨宇友, 张子新著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-112-17309-9

I. ①盾… II. ①杨… ②张… III. ①隧道施工-盾构法-灾害防治 IV. ①U455.43②U456.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 226342 号

复杂地质环境下隧道施工灾变机理一直是国际上关注的热点和难点, 同时也是我国越江跨海盾构法隧道工程迫切需要解决的难题。

本书共分 5 章, 依托我国大量的盾构法工程实践和多年的研究成果, 构建了复杂地质环境下盾构隧道开挖面灾变模型, 进行了基于流固耦合理论的工程案例数值分析, 形成了盾构隧道穿越建(构)筑物关键技术。书中突出隧道工程灾变机理、施工技术和工程面临的诸多挑战以及新技术和新工艺的运用。同时结合研究成果还介绍了一些新的见解与工程实践, 并在工程实践中得到了检验。

本书对隧道工程灾变机理和工程实践作了系统、全面的总结和阐述, 可为科研人员、工程设计人员提供很好的借鉴并有所参考助益。

* * *

责任编辑: 吉万旺
责任设计: 张虹
责任校对: 李欣慰 刘梦然

盾构隧道施工灾变机理与工程实践

杨宇友 张子新 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 21½ 字数: 418 千字

2014 年 11 月第一版 2014 年 11 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-17309-9
(26095)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



前 言

近年来，随着现代盾构装备技术的进步，盾构法在地铁隧道、公路隧道等工程中得到了大量应用，一大批在国际上具有重大影响的跨江、跨海盾构隧道或城市核心区穿越隧道工程相继建成，如上海长江隧道、钱江隧道、南京长江隧道、武汉长江隧道和北京地下直径线隧道等。我国已成为世界上盾构隧道工程建设数量最多的国家之一。

在盾构隧道施工过程中，常常由于复杂的地质环境而面临诸多工程技术难题，如复杂地质环境下盾构隧道开挖面灾变失稳、富水地层隧道施工的地下水问题、砂卵石地层盾构施工难题以及盾构隧道穿越敏感环境的微扰动控制理论与关键技术等，上述问题给隧道建设者和相关科研工作者带来了新的挑战。本书作者对此开展了一系列相关研究工作，并取得了一定的研究成果，在收集大量盾构工程建设的一线技术资料的基础上，结合理论分析与工程实践对比，对复杂地质环境下隧道施工灾变机理与工程案例进行了系统研究和总结，最终形成此书，如能对有关科研人员及工程技术人员有所助益，将是作者莫大的欣慰。

全书内容共分5章，第1章全面阐述本书研究课题的研究现状和当前存在的问题；第2章主要针对复杂地质环境下隧道开挖面稳定性问题，通过理论分析、模型试验、数值模拟等手段研究了大直径、双圆盾构隧道开挖面三维破坏模型；第3章研究了地下水与隧道工程相互作用问题，采用蠕变流固耦合模型来预测和评价长期地面沉降；第4章研究了富水砂卵石地层盾构隧道施工引起的地层响应及其对不同位置建（构）筑物的影响；第5章以上海盾构隧道穿越既有建（构）筑物的典型工程为例，研究了复杂敏感环境下盾构穿越微扰动机理和主动控制技术与方法。

本书第1、2、3章由杨宇友撰稿，第4、5章由张子新撰稿。

作者衷心感谢李宏安博士、涂晓明硕士等在本书完成过程中给予的大力支持！作者十分感谢国家自然科学基金（41202220、41472278）和北京高等学校青年英才计划项目对本专著研究的资助。

鉴于作者知识及认识的局限性，书中难免有不妥之处，恳请各位专家、学者和广大读者提出批评、指正。

杨宇友
2014年8月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 盾构隧道开挖灾变机理研究	1
1.2 流固耦合模型及其在隧道工程中的应用研究	7
1.3 砂卵石地层盾构隧道施工研究	9
1.4 隧道穿越敏感环境主动控制方法和技术.....	13
1.5 本书研究的主要内容.....	15
第 2 章 盾构隧道开挖面灾变机理研究	17
2.1 大直径盾构隧道开挖面灾变机理与模型研究.....	17
2.1.1 “牛角状”三维盾构隧道开挖面破坏模型	19
2.1.2 “牛角状”三维破坏模型上限法计算	20
2.1.3 “牛角状”三维破坏模型计算结果分析	22
2.1.4 多块体三维盾构隧道开挖面破坏模型	25
2.1.5 多块体三维破坏模型上限法推导	27
2.1.6 多块体三维破坏模型计算结果分析	28
2.2 砂-黏复合地层大直径盾构隧道开挖面坍塌破坏试验研究	32
2.2.1 砂-黏复合地层基本力学特性大型三轴试验	32
2.2.2 砂-黏复合地层盾构隧道开挖面稳定性模型试验	40
2.3 砂-黏复合地层盾构隧道开挖面稳定性数值分析	67
2.3.1 土压平衡盾构隧道施工力学过程的数值实现	67
2.3.2 开挖面支护力形式和极限支护力的确定.....	70
2.3.3 大直径盾构与常规盾构开挖面稳定性对比分析	71
2.3.4 大直径盾构开挖面稳定性分析	76
2.4 大直径盾构隧道工程实例	106
2.4.1 工程概况	106
2.4.2 数值模型及材料参数	109
2.4.3 数值计算结果与实测结果分析	110
2.5 双圆盾构隧道开挖面三维破坏理论分析	113
2.5.1 双圆盾构开挖面三维坍塌破坏模型	114
2.5.2 上限法推导	116

2.5.3	计算结果分析	118
2.6	双圆盾构隧道开挖面破坏数值分析	119
2.6.1	数值建模	120
2.6.2	数值结果分析	120
2.7	双圆盾构隧道工程实例	125
2.7.1	工程概况	125
2.7.2	双圆盾构隧道施工力学行为数值模拟	126
2.7.3	材料参数及三维模型	127
2.7.4	数值结果与实测数据对比分析	128
2.8	本章小结	131
第3章	流固耦合模型与工程数值模拟	134
3.1	富水地区盾构工法隧道的流固耦合模型及其工程应用	134
3.1.1	Biot 固结理论	134
3.1.2	盾构区间隧道流固耦合分析案例一	137
3.1.3	盾构区间隧道流固耦合分析案例二	141
3.2	基于蠕变流固耦合数学模型研究地面长期沉降	149
3.2.1	蠕变流固耦合模型	149
3.2.2	日晖港内隧道施工引起长期沉降数值模拟分析	160
3.3	本章小结	175
第4章	砂卵石地层盾构隧道施工分析	176
4.1	地表无超载时盾构施工过程数值模拟及分析	176
4.1.1	常用沉降分布计算公式	176
4.1.2	数值模拟的施工过程模型建立	178
4.1.3	数值模拟计算结果	181
4.1.4	PFC ^{2D} 二维颗粒流程序的模拟分析	228
4.2	盾构隧道穿越建筑物基础的数值模拟及分析	234
4.2.1	工程特点及难点	234
4.2.2	拟穿越建筑物的桩基承载力分析	235
4.2.3	盾构正下方穿越建筑物桩基数值分析	237
4.2.4	盾构斜穿建筑物基础的数值分析	240
4.3	盾构隧道穿越铁路轨道的数值模拟及分析	250
4.3.1	工程特点及难点	250
4.3.2	数值模型的建立	251
4.3.3	数值计算结果分析	252
4.4	本章小结	258

第 5 章 盾构隧道穿越敏感环境主动控制方法和技术	260
5.1 地下工程下穿越施工微扰动控制原理	260
5.2 盾构穿越既有建筑扰动控制方法与工程实践	261
5.2.1 建筑安全评估的方法和准则	261
5.2.2 考虑建筑既有变形的盾构穿越施工扰动变形控制标准	266
5.2.3 上海轨道交通 11 号线工程实例	268
5.3 大型泥水平衡盾构平行穿越已有隧道技术	283
5.3.1 打浦路隧道复线工程简介	283
5.3.2 穿越前准备工作	287
5.3.3 穿越中技术措施	292
5.3.4 后期措施	297
5.3.5 施工效果	298
5.4 大型泥水平衡盾构超小半径平曲段施工技术	301
5.4.1 施工概述	301
5.4.2 前期准备工作	302
5.4.3 过程技术控制措施	311
5.4.4 实施效果	314
5.5 长距离下穿老旧污水管线施工技术	319
5.5.1 施工情况概述	319
5.5.2 施工监测	322
5.5.3 穿越中的技术措施	322
5.5.4 穿越后检查	323
5.5.5 数据分析	323
5.6 本章小结	324
参考文献	328

第 1 章 绪 论

近些年来,为了解决交通拥堵问题,全国范围内主要城市的地铁建设进入高峰期。特别像北京、上海、广州等特大型城市,在奥运会、世博会、亚运会前后,都以空前的速度建成了多条地铁线路。以北京为例,目前已运营地铁线路里程达 450km,计划在 2015 年前建成 660km,2020 年的线网规划达 1000km 以上。

目前地铁隧道广泛采用盾构法施工,我国已成为盾构法隧道施工大国,约占全球市场份额的 60%。在盾构隧道施工理论与工程实践方面,我国已经取得了举世瞩目的成就,但复杂环境下隧道工程灾变事故仍时有发生,灾变机理亟待揭示,防控技术亟待提升。

1.1 盾构隧道开挖灾变机理研究

(1) 极限分析法

极限分析法是开挖面稳定性研究中最常用的理论分析方法之一,首先假定开挖面前方土体破坏模型,然后利用上、下限定理计算支护压力的上下限。Broms & Bennermark (1967) 首先研究了黏性土不排水条件下的开挖面稳定性问题,并提出了开挖面稳定系数的经典概念,如式 (1-1) 所示:

$$N = (\sigma_s - \gamma H - \sigma_t) / S_u \quad (1-1)$$

式中 N ——开挖面稳定系数;

σ_s ——地面超载;

γ ——土的重度;

H ——隧道轴心到地表的距离 (m);

σ_t ——开挖面支护压力 (kPa);

S_u ——隧道轴心处土体的不排水抗剪强度 (kPa)。

利用开挖面稳定系数的概念可以很方便地判断开挖面的情况,通过研究现场实测数据以及开展室内试验发现:如果 $N > 6$,开挖面即发生失稳破坏;如果 $4 < N \leq 6$,则开挖面地层处于塑性变形阶段;如果 $2 < N \leq 4$,则开挖面地层为弹塑性变形;如果 $1 < N \leq 2$,则开挖面地层为弹性变形;如果 $N < 1$ 时,则开挖面地层无变形。

基于 Broms & Bennermark 提出的开挖面稳定系数的概念, Davis (1980) 提出了圆柱体和球形破坏模型, 利用塑性极限分析上限法研究了开挖面坍塌和隆起的破坏机理, 考虑 Tresca 材料中无支护横、纵平面应变稳定问题, 给出了稳定系数的两个下限解, 如式 (1-2)、式 (1-3) 所示:

$$N = 4\ln(2C/D + 1) \quad (1-2)$$

$$N = 2 + 2\ln(2C/D + 1) \quad (1-3)$$

式中 N ——开挖面稳定系数;

C ——隧道埋深 (m);

D ——隧道直径 (m)。

极限分析法是基于上、下限定理提出的, 所以又称为上、下限解法。

对于上限法, 首先需要建立相应的破坏模型, 确定一个包括滑动破坏面在内的速度场, 然后利用式 (1-4) 求得极限支护压力的大小。

$$p_e \leq P_v \quad (1-4)$$

式中 p_e ——作用在模型上的所有外荷载所做的总功;

P_v ——发生破坏时体系内的耗散功。

下限法的核心是构造一个包括滑动破坏面在内的满足平衡条件和材料屈服准则的应力场, 然后利用应力场可直接求得极限支护压力的大小。

Leca & Dormieux (1990) 提出了锥体破坏模型 (如图 1-1 所示), 假设土体服从 Mohr-Coulomb 屈服准则, 分别采用极限分析上限法和下限法进行分析, 得到了极限支护压力的表达式, 见式 (1-5) 和式 (1-6):

$$\sigma_{Tmin} = N_s^- \cdot \sigma_s + N_\gamma^- \cdot \gamma \cdot D + (N_s^- - 1) \cdot c \cdot \cot\phi \quad (1-5)$$

$$\sigma_{Tmax} = N_s^+ \cdot \sigma_s + N_\gamma^+ \cdot \gamma \cdot D + (N_s^+ - 1) \cdot c \cdot \cot\phi \quad (1-6)$$

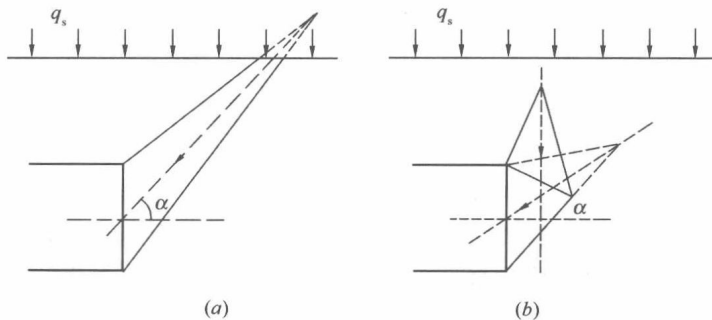


图 1-1 Leca & Dormieux 提出的锥体破坏模型

(a) 只有一个块体的坍塌破坏模型; (b) 包含两个块体的坍塌破坏模型

式中 σ_T ——开挖面支护压力 (kPa);
 σ_s ——地面超载 (kPa);
 γ ——土的重度 (kN/m³);
 D ——隧道直径 (m);
 c ——土体黏聚力 (kPa);
 ϕ ——土体内摩擦角;
 N_s^- 、 N_s^+ ——分别为对应地面超载的无量纲系数;
 N_γ^- 、 N_γ^+ ——分别为对应土体自重的无量纲系数。

Leca & Dormieux 还将理论计算的结果与 Chambon 离心机试验得到的结果进行了对比, 发现二者具有较好的一致性。

此后, 开挖面稳定性理论研究主要是在极限分析理论的框架下, 不断地寻求更优化的破坏模型。A. -H. Soubra (2000) 提出了改进的坍塌和隆起破坏模型, 模型由一个剪切带和两个刚性截圆锥组成, 使得破坏面更加平滑, 得到的数值解优于 Leca & Dormieux 的结果, 也更接近于 Chambon 离心机试验的结果。

A. H. Soubra (2002) 又给出了一个由多个截锥体组成的平移破坏模型 (如图 1-2 所示), 其得到的数值结果也比 Leca & Dormieux (1990) 模型的结果要好。

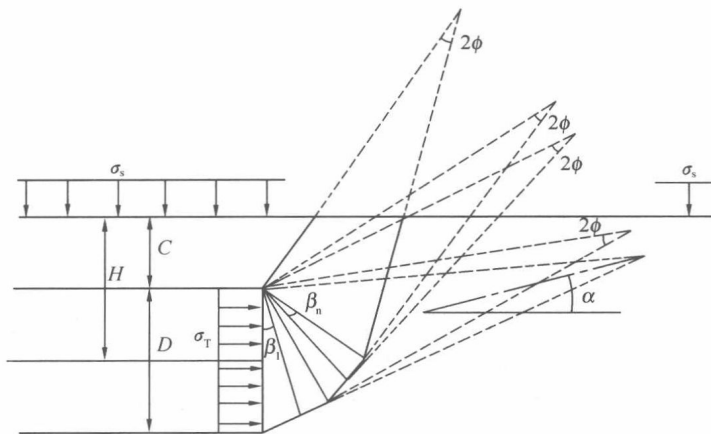


图 1-2 A. -H. Soubra (2002) 提出的多块体破坏模型

Subrin & Wong (2002) 提出了一种三维旋转坍塌破坏模型, 破坏面通过对数螺旋线描述, 整个模型只包含一个块体, 如图 1-3 所示。Subrin & Wong 提出的模型更接近于离心机试验观察到的破坏区域的形状, 与之前的理论分析和数值模拟的结果相比, 其得到的结果更优。

A. H. Soubra 等 (2008) 在 Soubra (2002) 的多块体平移模型的基础上, 提出了更优化的多块体模型 (如图 1-4 所示), 得到的数值结果也更好。

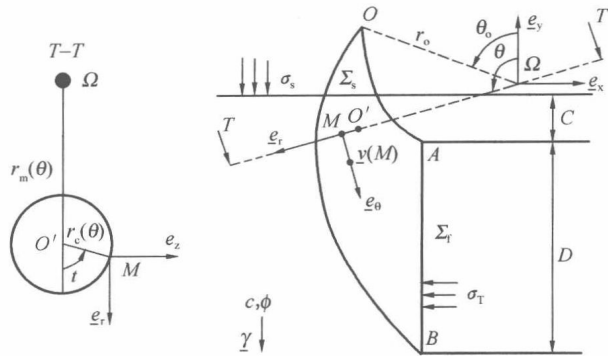


图 1-3 Subrin & Wong 提出的三维坍塌破坏模型

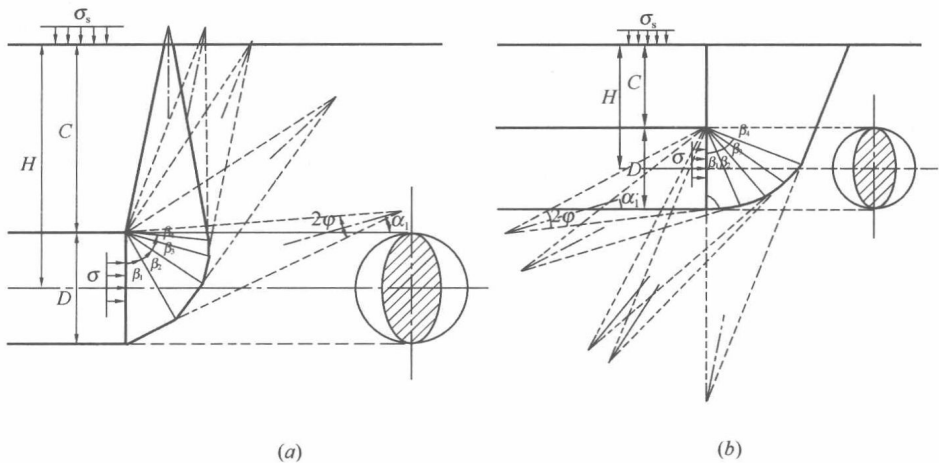


图 1-4 A. H. Soubra 等 (2008) 提出的多块体模型
(a) 坍塌破坏模型; (b) 隆起破坏模型

G. Mollon, D. Dias, A. H. Soubra (2011) 利用空间离散化技术生成了新的旋转破坏模型 (如图 1-5 所示), 与之前的模型相比, 这个模型有两方面重大改进: ①将整个圆形开挖面区域都考虑在内, 而不是只考虑开挖面的内切椭圆区域; ②模型的形状更接近于试验中观察到的破坏区域。

基于极限分析法的隧道开挖面破坏模型已经取得了丰富的研究成果, 其表达式趋于多样化, 但很少考虑到水土耦合作用对开挖面稳定的影响。同时, 上述理论计算模型没有考虑开挖后土拱效应的影响, 因而得出的破坏力偏大; 没有考虑土体内部的应力应变关系, 更无法考虑局部破坏对整体失稳的影响, 计算中事先假定所分析的刚塑性体的边界与实际也有出入。所以, 运用极限分析法分析开挖面稳定性问题还有待进一步的完善。

(2) 极限平衡法

极限平衡法认为土体的破坏是在滑动面上发生的，土体沿滑动面满足屈服条件。通常是先假定一种滑动面破坏形式，如平面、圆弧面、对数螺旋线曲面等，然后对滑动体的每一个隔离体利用静力平衡和力矩平衡条件，求得土体处于极限状态时的极限荷载或安全系数。

基于 Janssen (1895) 的筒仓理论，Horn (1961) 最早提出了三维楔形体模型，如图 1-6 所示，但是文中并未给出极限荷载的计算公式。在此基础上，Jancsecz & Steiner (1994) 对该模型进行了完善，并考虑了上覆土的土拱效应，计算结果以三维土压力指数表示。

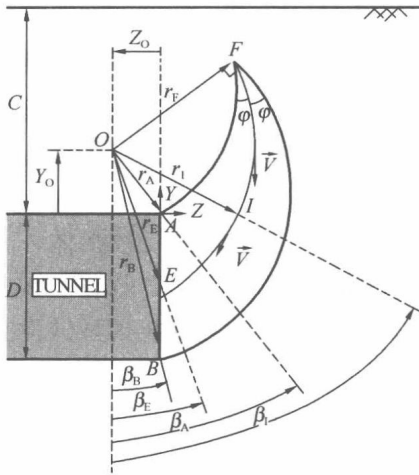


图 1-5 Mollon G. et al. (2011) 提出的旋转破坏模型

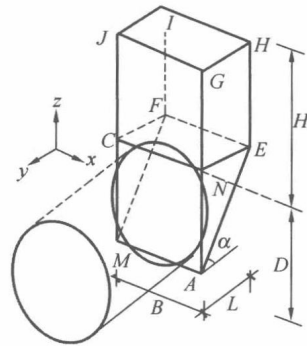


图 1-6 Horn 提出的三维楔形体计算模型图

Anagnostou & Kovari (1994) 利用同样的三维楔形体模型，对泥水式盾构施工中泥水注入的影响、土压平衡盾构施工中地下水渗流的影响进行了讨论，给出了极限支护力的计算公式：

$$s' = F_0 \gamma' D - F_1 c + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c \frac{\Delta h}{D} \quad (1-7)$$

式中 γ' ——浮重度 (kN/m^3)；
 D ——隧道直径 (m)；
 c ——土体黏聚力 (kPa)；
 Δh ——开挖面内外水头差 (m)；
 F_0 、 F_1 、 F_2 、 F_3 ——与 φ 有关的无量纲系数。

上述基于楔形体的极限平衡分析都是假定土层为均质的。Broere (2001) 考虑了土体分层的情况，得出了泥水和土压平衡盾构的极限支护力。另外，Kirsch

& Kolymbas (2005) 认为楔形体与上方的棱柱体之间存在摩擦力 (如图 1-7 所示), 对极限支护力公式重新进行了推导。

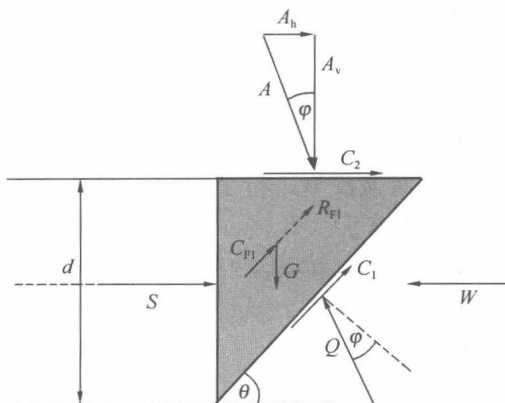


图 1-7 楔形体受力示意图

魏纲 (2005) 认为开挖面失稳破坏时滑动块体形状为梯形楔形体, 而不是三角形楔形体, 而且上部也是梯形棱柱体, 如图 1-8 所示。与之前的楔形体模型相比, 该模型得到的极限支护力结果更优, 而且更接近于离心机模型试验的结果。

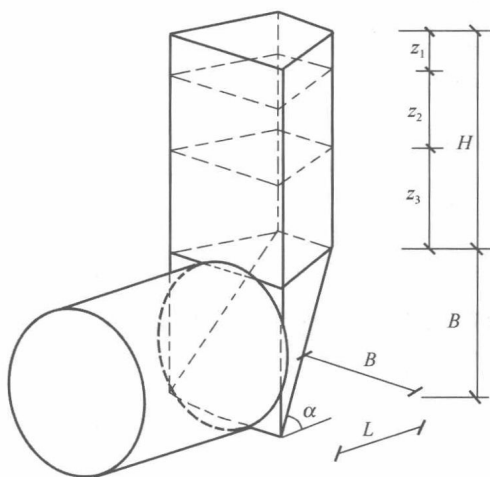


图 1-8 梯形截面的楔形体模型 (魏纲, 2005)

除了三维楔形体模型, 还有学者假设并研究了其他形式的开挖面破坏模型。村山等 (1966) 提出了对数螺旋线描述滑动面的二维破坏模型 (简称村山模型), 如图 1-9 所示, 并给出了不考虑地下水时的极限支护力的计算公式。在此基础上, Fujita (1995) 提出的模型, 假定盾构前方因开挖释放而形成滑动面, 由洞顶的滑动宽度求出盾构前方的松弛范围, 计算松动土压力, 然后假定开挖面前方

土体的滑动始于下部，拱顶高度为铅直的对数螺旋线滑动面，通过假定各种松动范围，利用绕对数螺旋线中心旋转得到的力矩平衡得到求解支护压力的方程，便可求出最大控制水平力，即为满足开挖面稳定的极限支护压力。Krause (1987) 则提出了破坏区域为半圆形、四分之一圆形或三维球状时的破坏模型，通过分析作用于滑动面上的剪应力，利用极限平衡法得出了极限支护力的大小。

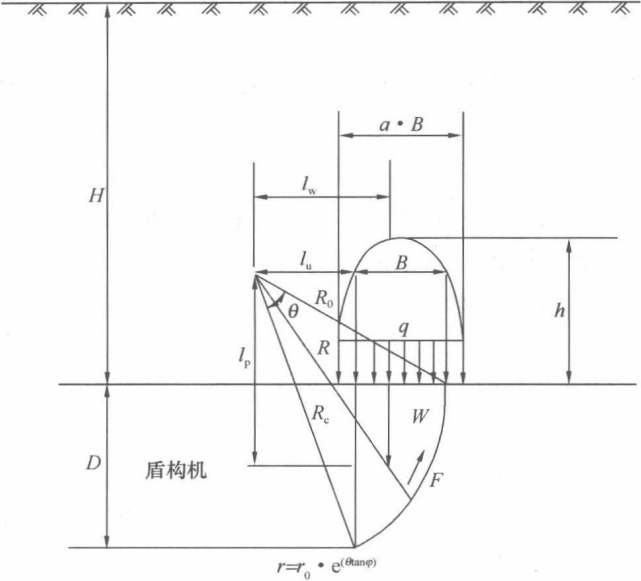


图 1-9 村山模型

极限平衡法假设支护压力在开挖面上的作用形式与实际的泥水或土压平衡盾构中支护压力的分布形式存在很大的差异，所以在计算精度方面低于极限分析法，但在分析地下水渗透作用方面具有计算简便的优势，得到了广泛的应用。

1.2 流固耦合模型及其在隧道工程中的应用研究

流固耦合力学是研究变形固体在流场作用下的各种行为以及固体变形对流场影响的相互作用的一门科学。

在本书中，主要探讨隧道工程领域的流固耦合问题，对“流固耦合”作如下定义：“流”指流体，本书中的流体指的是“水”或者是“水和水气”；“固”在本书中是指土体，即松散的、多孔岩土介质。“耦合”是指流体运动与土体结构之间达到平衡时的相互作用，即连续方程与平衡方程的解，本书中的耦合体现为应力场与渗流场方程的解。

在岩土工程领域，太沙基首先研究了流体-固体变形耦合问题，提出了有效应

力公式，该公式是研究岩土和流体相互作用的基础公式之一。20 世纪中期，Biot 以饱和土体的全应力和孔隙压力为状态变量，建立了比较完善的三维固结理论，奠定了流固耦合理论研究的基础。在很多学者的努力下，流固耦合理论及工程应用都取得了很大进展，以下是近几年来隧道工程中流固耦合问题具有代表性的文献。

杨宇友等（2008、2009）基于流固耦合理论研究了北京地铁 10 号线某区间隧道的地面沉降问题，建议在富水区域可以采用饱和流固耦合的方法进行计算。

夏炜洋（2011）推导了盾构隧道围岩和结构的渗流场与应力场的计算公式，并按照流固耦合理论计算得到了管片衬砌内力的解析解，采用有限元软件研究了流固耦合条件下盾构施工对周边环境的影响。

陈武等（2013）推导了流固耦合的控制方程，对平衡方程和连续性方程分别进行有限元离散和有限差分法离散，对模型进行了数值求解。并对一富水双向隧道施工过程进行了数值模拟，数值模拟得到的围岩应力场及水压力分布、隧道沉降变形结果与监测结果基本吻合。

刘天宇（2013）研究了地下水压力对围岩的作用特性及耦合规律，并采用 FLAC3D 对红石沟隧道工程进行了数值模拟分析，发现渗流场对隧道围岩的应力和变形影响显著。

陈发本等（2013）分别在考虑流固耦合作用和不考虑流固耦合作用下，采用 FLAC3D 对云南某富水隧道围岩进行了数值分析，结果表明，在考虑流固耦合作用下得到的隧道沉降量与实际吻合度更高。

冯利坡等（2014）提出了一种判别盾构隧道开挖面极限支护压力的方法，并且该方法考虑盾构直径的影响及开挖面位移曲线突变和近线性时极限支护压力的判别，并通过数值模拟方法研究了在考虑流固耦合作用下深层盾构隧道砂土层开挖面稳定性问题。

张社荣等（2012）在考虑流固耦合条件下，采用 ABAQUS 软件对软土地区盾构隧道施工引起的地面和周围建筑物变形进行了分析。通过对比监测数据和数值模拟值发现，典型监测点的变形规律与监测规律相同。

沈一涛等（2013）在考虑了盾构施工步骤的情况下，采用 FLAC3D 软件对杭州地铁砂质粉土地层的盾构隧道进行了数值模拟，结果表明考虑流固耦合作用得到的孔隙水压力变化规律和地表沉降与实测数据相近。

陈宇等（2010）在考虑了流固耦合作用下，采用有限差分法对上海轨道交通 M10 线双圆盾构施工中地面沉降和孔隙水压力特征进行了模拟，模拟结果与施工工况能够较好吻合。

陈宇等（2010）以上海双圆盾构区间隧道工程为依托，采用 FLAC3D 的方法在考虑了流固耦合作用下进行了数值模拟，研究了地表位移和孔隙水压力的变化，并将模拟施工参数应用于下立交下双圆盾构推进，结果表明，孔隙水压力对

盾构施工影响显著。

邓宗伟等(2013)对泥水渗透微观机理进行了分析,基于流固耦合原理,采用FLAC3D软件结合实际工程研究了泥水渗流对泥水平衡盾构隧道开挖所引起的地表沉降规律。

李术才等(2013)研制了新型流固耦合模型试验系统及相似材料,并且以青岛胶州湾海底隧道为依托进行了试验,对海底隧道施工中洞壁压力和围岩位移场、渗压场等的变化规律进行了研究。

蔚立元等(2011)开展了流固耦合模型试验,并将试验结果与FLAC3D的数值模拟结果进行了对比,结果表明,试验结果符合一般规律,并且物理试验与数值模拟相比能考虑更多因素的影响。

综合上述文献,地下水赋存与渗流状态对工程力学环境和设计条件的影响以及施工中的地下水问题,都构成了工程建设和运营中的一大难题。地下工程中流固耦合现象是普遍存在的,直接与地铁建设、运营的安全性、环境友好性有密切的关系。因此,开展这一领域的研究具有一定的学术意义和工程实际价值。

1.3 砂卵石地层盾构隧道施工研究

在隧道施工中常常遇见富水的砂卵石地层。由于人们目前对砂卵石地层中土压平衡盾构隧道开挖失稳机理认识的缺陷,“地面及地铁施工灾变塌陷”等工程事故频发,如地铁十号线海淀南路坍塌、苏州街车站开挖面塌方均造成人员伤亡和巨大经济损失,给地铁工程建设带来了前所未有的挑战,主要表现在以下几方面:

(1) 砂卵石地层工程地质及水文地质条件复杂多变,且具有特殊的组构特征。例如,北京地铁4、5、10号线穿越的地层为永定河冲洪积层,粉细砂、中粗砂、砂砾等地层,其自稳能力较差,遇水极易坍塌;另外车站与区间隧道埋深多在15~20m左右,受上层滞水、潜水及承压水的影响,而且还存在地下管线渗漏水,盾构隧道开挖面较易发生失稳破坏。

(2) 砂卵石地层一般承载力大、强度及变形指标较高。此外,其中还存在直径大于20cm的砾石及胶结砾石层等特殊沉淀物。地下水主要为砂卵砾石层中赋存的孔隙潜水,一般含水层较厚,透水系数较大。在这样漂石、卵石粒径差异大,结构松散,水位高,含水量丰富的砂卵石土层中采用盾构施工,给盾构开挖面稳定性提出了巨大挑战。

(3) 砂卵石地层渗透系数大,地下水位会随着季节变化,盾构隧道施工不可避免地需要穿越变化的水系,甚至承压水。因此,穿越过程中必然会引起地层变形,同时还有可能使砂卵石地层特殊结构形成的地下“空洞”发生恶化或“制

造”新的地下“空洞”，一旦碰到外界因素干扰，超过“空洞结构”的抵抗能力，就会导致灾变式的突然坍塌事故。

(4) 城市中的地铁或公路盾构隧道沿线工程环境复杂多变，对盾构隧道施工大都不利。例如，城市中的地铁线路大多近邻各种建筑物，而且地下各种管线密布，地下空间十分拥挤，既有各种管线因当时施工时回填压实困难，达不到压实标准，随着时间的延长以及外界因素的影响，地下会逐渐形成大量的松散疏松区或空洞，遇水浸泡，车辆重压或其他原因扰动地层，经常会在盾构隧道开挖过程中诱发出现灾变式塌陷。

鉴于富水砂卵石地层中土压平衡盾构隧道开挖的复杂性，由此引起的盾构开挖面灾变坍塌的机理和破坏特征始终未能得到深入研究，预测与控制都非常困难，而且国内外有关这方面的研究成果很少，而多数经验仅仅具有地域性的特点，也不具有普遍意义。因此，针对富水砂卵石地层盾构施工灾变破坏机理进行深入研究，可降低土压平衡盾构隧道在富水砂卵石地层中施工灾害的发生机率，提高土压平衡盾构隧道施工控制技术，为复杂地层中盾构隧道施工规范的修订奠定基础，具有重要的理论意义和工程价值。

盾构隧道在全断面富水或变水头砂卵石地层中施工为我国近年来遇到的关键难题之一，在国内工程经验较少，在国外也不多见。国内外典型的砂卵石地层中盾构施工工程案例可以归纳如下：

(1) 未来港 21 线山下町隧道

未来港 21 线隧道是典型的盾构穿越砂砾石地层的隧道工程，地质条件较为复杂，由于对富水砂卵石地层破坏机理缺乏深入认识，在实际施工中，遭遇到密闭舱内土砂粘结的事故，发生了灾变性破坏。

(2) 阪神供水管道企业团第 5 期扩建工程

该工程需要穿越佛念寺山断层和甲阳断层等断层破碎带、砂砾层和黏土层互相重迭组合的地层、含有甲烷气地层、包含有孤石（ $\phi 300\text{mm}$ 以上）的积水砂砾和固结性黏土以及易流动化的砂等特殊地层。盾构隧道在富水砂卵石地层中掘进遇到了巨大的挑战。

(3) 近畿干线姬路管线·饰磨工程

盾构穿越的地层主要是由砂、砾、黏土等成分组成，卵石的最大粒径是 250mm，含砾率最大为 82.5%。渗透系数在 10^{-3} 级别上，是渗透性较高的地层。盾构主要掘进土质是掺混着卵石的砂砾层，含砾率超过 70%，细颗粒成分占到 5%~10%，虽有出现 $\phi 200\text{mm}$ 以上的巨砾，然而占到总数的数量是少数，使得气泡的支撑效果比较有效，避免了螺旋输送及排出口处的闭塞现象。但是，当出现 $\phi 400\text{mm}$ 的巨大砾块时，在螺旋输送机的排出口处仍然发生了堵塞现象，造成无法排土。此外，巨砾有时也并非连续排出的，通过人工的辅助，还是能够