

砂卵石地层条件下 盾构掘进机理与实践

The Mechanism and Practice of Shield
TBM Tunneling in Sandy Cobble Stratum

高明忠 张 茹 龚秋明 ©著

中国建筑工程工业出版社

U4ff.43

20131

砂卵石地层条件下 盾构掘进机理与实践

高明忠 张 茹 龚秋明 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

砂卵石地层条件下盾构掘进机理与实践/高明忠, 张茹, 龚秋明著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-112-14931-5

I. ①砂… II. ①高… ②张… ③龚… III. ①砂土-地层-盾构法②卵石-地层-盾构法 IV. ①U455. 43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 283331 号

砂卵石地层条件下盾构掘进机理与实践

高明忠 张 茹 龚秋明 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

北京市燕鑫印刷有限公司印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 5 字数: 132 千字

2012 年 12 月第一版 2012 年 12 月第一次印刷

定价: 20.00 元

ISBN 978-7-112-14931-5

(23005)

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)

本书以成都地铁 1 号线为工程案例，系统研究砂卵石地层地质力学特性、盾构选型、掘进参数及其盾构掘进性能的影响因素。根据国内外研究现状，对当前隧道掘进机进行了科学分类。结合现场及室内试验分析了该类地层的力学不稳定特性，探讨了导致盾构掘进性能低下的主要原因。同时，介绍了专为该类地层开发的数据模型生成系统，进行了卵石空间形态对力学性能影响的深入探讨。并推导该类地层力学特性的理论计算模型，通过数值方法进行了验证。

本书既介绍了隧道掘进机分类、盾构选型依据、盾构选型方法及盾构掘进参数优化过程，又阐述了卵石地层的力学特性，可为专业技术人员在类似地层中修建城市地下铁道、交通隧道时确定盾构选型、掘进参数等提供参考。

* * *

责任编辑：辛海丽 郭 栋

责任设计：张 虹

责任校对：张 颖 陈晶晶

前 言

随着地下空间技术的发展,隧道在城市地下交通、公路工程、水电建设、废水排放系统、电缆、通信设施等方面都得到了广泛应用,与此同时,隧道开挖技术也得到了空前的发展。经过近 200 年的发展,隧道掘进机施工已具有自动化程度高、连续掘进、速度快、作业人员安全、节约劳动力资源、可控制地面沉降、对周围环境影响小、围岩表面光滑、精度高等优点,尤其在城市建筑群密集区或地层条件地质差、地下水位高、隧洞线路长、埋深较大等情况下隧道掘进机施工法具有明显技术经济优越性,故已被当做高速开挖和有效支护隧道的方法,成为城市地铁、隧道建设中不可缺少的隧道建设工具。国务院《关于加快振兴装备制造业的若干意见》中,将隧道掘进机确定为振兴我国装备制造业的 16 个重点领域之一。

本书主要依据成都地铁现场施工数据及隧道掘进机施工中遇到的问题,对卵石土类混合材料进行了理论、室内试验及数值模拟等方面的研究,解决了卵石土混合材料等效弹性模量预测、卵石不同形状及方位对卵石土混合材料力学性能的影响机理、隧道掘进机在该地层的破岩机理及破岩模式以及复杂数值计算模型的生成等问题。

成都地铁 1 号线沿线卵石地层为典型的混合工作面,隧道掘进机主要穿越由冲积黏性土、粉土、砂土和卵石或漂石混合组成的第四系覆盖层。为充分阐述隧道掘进机在该类地层的选型、掘进参数确定及其掘进性能的影响因素,本书共分 7 个章节进行介绍。第 1 章主要介绍成都地铁 1 号沿线地质概况,并结合国内外研究现状对隧道掘进机进行了全面介绍和科学分类;第 2 章通过

现场数据分析隧道掘进机在卵石地层掘进的影响因素；第 3~6 章针对卵石地层的力学特殊性，分别进行了现场试验、室内试验、数值模拟及理论分析，探讨卵石地层对盾构选型、掘进的影响要素；第 7 章综合前 6 章介绍内容，以成都地铁 1 号线为工程案例对理论模型进行了验证，为类似地层掘进机的选型、设计与施工方法提供一定的依据，并为下一步施工提出了相应的改进措施，以期提高掘进机掘进效率和经济效益。

全书大部分内容为作者在瑞士联邦理工大学留学期间的研究总结，得到了谢和平院士与赵坚教授及邓建辉教授的悉心指导与帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不足与错误之处，恳请读者批评指正。

2012 年 10 月

于成都

目 录

第 1 章 成都地铁 1 号线概况	1
1.1 地质概况	1
1.1.1 区域地质构造	1
1.1.2 水文地质条件	3
1.1.3 工程地质条件	4
1.2 成都地铁盾构选型与设计	5
1.2.1 隧道掘进机分类	5
1.2.2 盾构各部件性能描述	10
1.2.3 成都地铁盾构设备选型	12
1.2.4 盾构主要设计要点	15
1.2.5 管片概况	16
第 2 章 成都地铁盾构掘进性能及影响因素分析	17
2.1 时间分析	17
2.2 性能研究	21
2.2.1 进度分析	21
2.2.2 影响因素	22
2.3 成都地铁中遇到的问题	24
2.3.1 刀具磨损	24
2.3.2 刀盘堵塞	35
2.3.3 地表沉降	36
2.4 对策	39
2.4.1 土体改良	39
2.4.2 盾构改造	41
2.4.3 其他措施	42

第3章 卵石土性能试验研究	43
3.1 卵石形态现场试验	43
3.1.1 卵石直径分布规律	44
3.1.2 卵石形状指标	45
3.1.3 卵石方位统计	46
3.2 试样准备	47
3.2.1 卵石级配确定	48
3.2.2 卵石密度试验	48
3.2.3 土样选择	50
3.2.4 试验用量计算	50
3.3 试验过程	51
3.3.1 试验方案	51
3.3.2 试验步骤	52
3.4 试验结果与分析	54
3.4.1 数据整理方法	54
3.4.2 数据整理结果	55
3.4.3 试验结果分析	56
3.5 试验成果对成都地铁盾构施工的指导意义	58
第4章 混合材料数值模型生成算法与程序设计	59
4.1 随机数的产生	59
4.1.1 蒙特卡罗法	59
4.1.2 均匀分布随机数的产生	60
4.1.3 正态分布随机数的产生	60
4.1.4 指数分布随机数的产生	61
4.2 卵石随机定位技术	63
4.2.1 模型网格化分	63
4.2.2 网格点随机序列生成	65
4.3 卵石相互位置关系判断	66
4.3.1 圆的生成判断	66
4.3.2 椭圆生成判断	66

4.3.3 矩形与矩形	69
4.3.4 通用覆盖判别法	70
4.4 二次开发 AutoCAD	70
4.5 与 ANSYS 接口	72
4.6 程序运行流程	75
第 5 章 卵石空间、几何特性对混合体变形性能的影响	76
5.1 计算条件	76
5.1.1 软件 ANSYS 介绍	76
5.1.2 模型边界条件	78
5.1.3 研究目的	79
5.2 椭圆方位的影响	80
5.2.1 数值模型	80
5.2.2 结果分析	82
5.3 椭圆扁平度的影响	86
5.3.1 数值模型	86
5.3.2 结果分析	86
第 6 章 卵石土混合材料变形性能理论预测模型推导	92
6.1 模型综述	92
6.1.1 并联模型	94
6.1.2 串联模型	94
6.1.3 有效介质	95
6.1.4 能量理论	96
6.1.5 变分原理	97
6.1.6 其他模型	97
6.2 新理论模型推导	98
6.2.1 矩形包含物	99
6.2.2 球形包含物	104
6.2.3 椭球包含物	105
6.3 影响范围研究	110
6.4 理论模型与试验结果比较	113

6.5 理论公式与数值计算结果比较	114
第7章 理论强度预测模型在盾构中的应用	117
7.1 RFPA 软件原理	117
7.1.1 软件介绍	117
7.1.2 材料非均匀性描述	119
7.1.3 均质度确定	121
7.1.4 本构模型	121
7.2 模型建立	122
7.2.1 模型尺寸确定	122
7.2.2 单刀作用	123
7.2.3 双刀作用	123
7.2.4 边界条件	124
7.3 参数确定	125
7.3.1 宏观与微观参数转化	125
7.3.2 刀具参数	126
7.3.3 卵石参数	126
7.3.4 卵石土参数	127
7.4 计算结果分析	128
7.4.1 单刀作用	128
7.4.2 双刀作用	131
7.5 数值模拟结果及其工程应用	134
7.5.1 数值分析结果	134
7.5.2 结果分析	135
7.5.3 工程应用	135
参考文献	137

第 1 章 成都地铁 1 号线概况

成都市地铁一期工程为地铁 1 号线红花堰至世纪广场段，主要位于成都市南北主轴线，正线全长 15.15 km，其中地下线长 11.92km，高架及过渡段长 3.23 km。车站 13 座，车辆段及综合基地 1 处。线路途经火车北站、骡马市、市体育中心、天府广场、省体育馆、火车南站、世纪会展中心等重要交通枢纽和人流集散点，交通异常繁忙。

1.1 地质概况

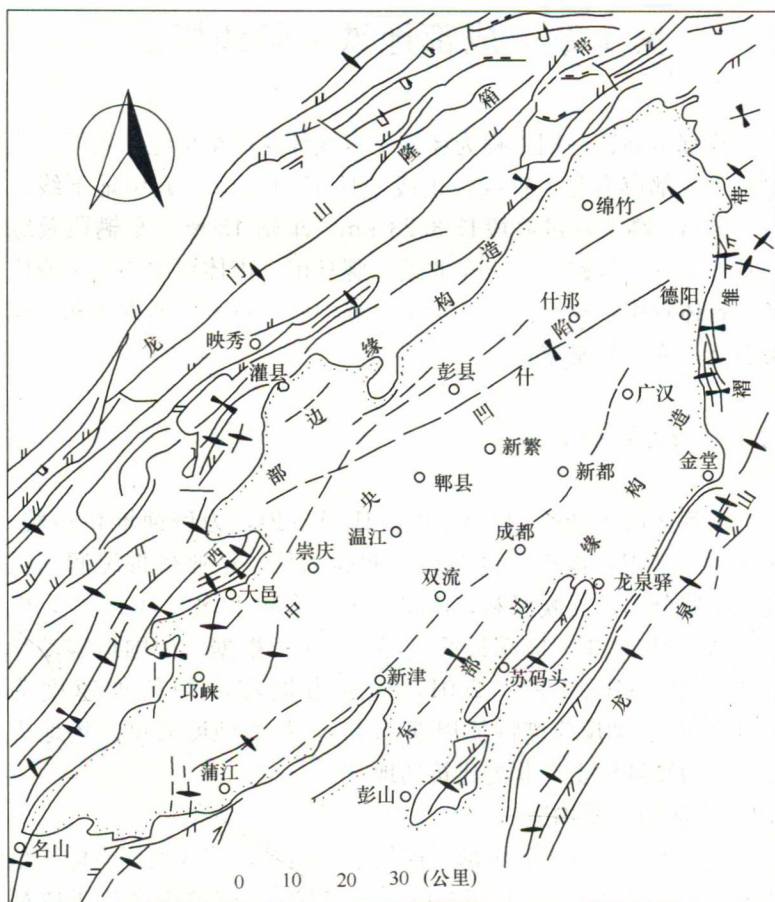
工程区属川西平原岷江水系 II 级阶地，为侵蚀堆积地貌。区内地形平坦，地势西高东低，北高南低。是亚热带湿润气候区，四季分明，气候温和，雨量充沛。多年平均气温 16.2° ，极端最高气温 38.3° ，极端最低气温 -5.9° ；根据《中国地震动参数区划图》GB 18306—2001，成都市地震动峰值加速度为 $0.01g$ ，地震动反应谱特征周期 0.40s，基本烈度 VII 度。场地土的类型为硬场地土，II 类建筑场地。

1.1.1 区域地质构造

成都市位于四川省中部、四川盆地西部，辖区地理坐标：东经 $102^{\circ}54' \sim 104^{\circ}53'$ ，北纬 $30^{\circ}05' \sim 31^{\circ}26'$ 。成都市区位于成都断陷盆地东部地带，西距 NE 向龙门山前陆推覆构造带 50km，东距 NNE 向龙泉山前陆隆起带 20km。在龙门山大断裂和龙泉山边界断裂两相挟持下，控制了 NE 向成都断陷盆地的形成，构成了龙门山西部造山带山前第四系扇状平原的厚大堆积，成都平原腹心地带砂卵石沉积厚度达 540m，岷江扇前的市中区一带，

厚度减薄至 15~40m (图 1.1)^[1]。

新构造活动表现为平原腹心间歇性沉降, 周边间歇性抬升。平原东部蒲江~新津和新都~德阳北东向隐伏断裂, 深延地下



- | | | | | | | | |
|---|------|---|---------|---|------|---|---------|
|  | 正常背斜 |  | 正常向斜 |  | 倒转向斜 |  | 倒转背斜 |
|  | 压性断裂 |  | 压扭性断裂 |  | 扭性断裂 |  | 性质不明断裂 |
|  | 推测断裂 |  | 推测向(背)斜 |  | | | 第四系盆地边界 |

图 1.1 成都平原及周边构造纲要图

3~5.5km 未达地腹，断续延长未穿过市区，最后一次断裂活动 8.8 万年前，至今活动微弱。

1.1.2 水文地质条件

按地下水赋存条件，本工程涉及地下水可分为两种类型：第四系孔隙潜水和基岩裂隙水。第四系孔隙水基本都赋存在全新统 (Q4)、上更新统 (Q3) 和中更新统 (Q2) 的砂、卵石中，含水极其丰富，形成一个整体含水层，含水层总厚度约 13.5~25.8m，为孔隙潜水，局部由于地形和上覆黏性土层控制，形成承压水。根据试验资料可知，卵石土综合含水层渗透系数 K 为 12.53~27.4m/d，平均为 16.32m/d，枯水期水位埋深 3~5m，丰水期水位埋深 2~4m，为强透水层。地下区间隧道基本位于该卵石土层中，受地下水影响较大。上部的黏性土层为不透水或微透水层，地下水含量甚微，对工程影响较小。基岩裂隙水赋存于基岩风化裂隙中，含水量小。根据资料，渗透系数 K 为 0.027~2.01m/d，平均为 0.44m/d，属弱—中等透水层。

区内地下水具有埋藏浅，季节性变化明显，水位西北高东南低，沿河一带高，河间阶地中部低的特点。根据区域水文地质资料，多年平均降雨量 949.0mm，构成地下水的重要补给源；年降雨日 104d，最大日降雨量 195.2mm，成都地区丰水期一般出现在 7、8、9 月份，占全年的 84.1%；枯水期 12、1、2 月份，以 8 月份地下水位埋深最浅，其余月份为平水期，水位年变化幅度一般在 1~3m 之间。在勘察期间，测得地下水位埋深 3.9~8.9m，初见水位标高 496.7~502.4m，稳定水位标高 496.3~502.5m。根据调查分析，由于成都市大规模的工程建设，很多建筑基坑在进行施工降水，使地下水位急剧下降，地下水状态变得紊乱。

根据招标文件，本盾构区间水质类型以 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \text{Mg}^{2+}$ 型为主，对混凝土及钢筋混凝土结构中的钢筋均无腐蚀性，但对钢结构有弱腐蚀性。此外，灌口组泥岩夹石膏、钙芒硝，岩石可能有 SO_4^{2-} 腐蚀性。

区间地下水静止水位埋深 4.1~6.15m, 标高 486.71~489.00m。南河水面标高 493.55m, 岸边河底标高为 492.85m, 可见枯水期地下水位低于南河水位。小天竺一带由河水补给地下水, 倪家桥~会展中心一带地下水向东侧府河排泄。

区间隧道主要在含水量丰富、补给充足的强透水性的砂卵石土中通过, 地下水压力及浮力对隧道施工及结构施工有较大影响。

1.1.3 工程地质条件

根据地勘资料, 1 号线一期工程地铁沿线均为第四系 (Q_4) 地层覆盖, 基岩呈局部隆起和凹陷 (图 1.2)^[2], 地表多为人工

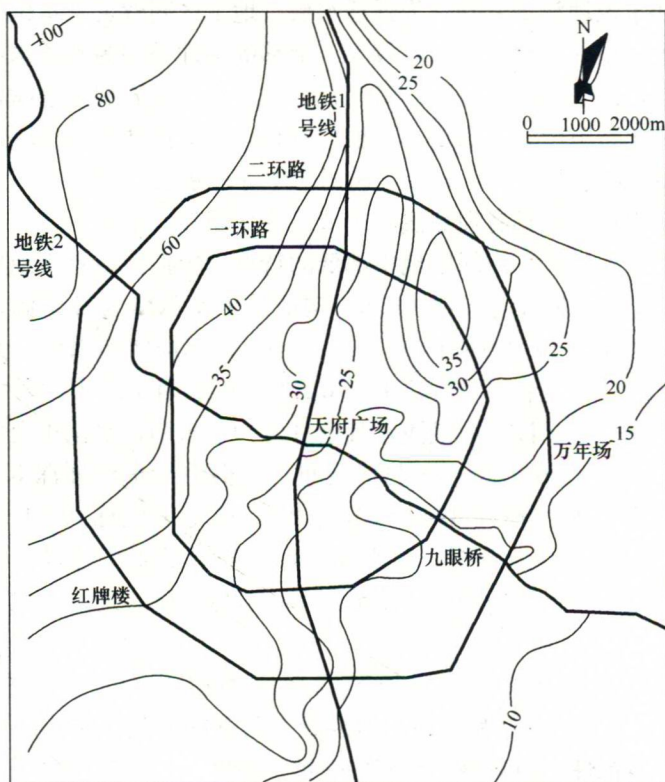


图 1.2 成都市基岩埋深等高线图

填土 (Q_4^{ml}) 覆盖, 其下为全新统冲积 (Q_4^l) 软土、粉土、砂土沉积和上更新统冰水沉积, 之下叠覆上更新统冰水沉积、冲积 (Q_3^{gl+al}) 卵石土及其砂夹层透镜体, 下伏基岩为白垩系上统灌口组 (K_{2g}) 厚层泥岩。

从上到下的地层主要是〈1〉人工填土、〈2-3〉粉质黏土层、〈2-4〉粉土层、〈2-5〉细砂、粉砂层、〈2-6〉中砂、粗砂层、〈2-8〉卵石土、〈3-5〉中粗砂、〈3-7〉卵石土。设计地铁区间隧道主要穿越〈3-7〉卵石土层, 部分地段穿越〈4-4〉卵石土层。

人工填土 (Q_4^{ml}): 由新近堆积建筑废弃土及耕填土组成。新近堆积建筑废弃土呈黄、灰等杂色, 结构疏松, 潮湿, 由黏性土、粉土及砂土混 10%~30% 的碎砖、卵石、混凝土碎块等组成, 主要堆积于车站北段, 厚薄不均, 约 2~4m。耕填土呈灰黑色, 结构较松散, 局部稍密, 潮湿, 含少量植物根茎及有机质, 厚约 1m 左右。

〈3-7〉卵石土: 褐黄、黄色, 中密, 饱和, 卵石含量 60%~70%, 粒径以 30~70mm 为主, 填充物为细砂及圆砾, 含量 10%~30%, 顶板埋深 14.8~15.1m, 层厚 4.9~5.2m。〈4-4〉卵石土: 灰色、深灰色, 中密为主, 部分稍密, 饱和, 卵石含量 75%~85%, 粒径以 30~60 mm 为主。填充物为细砂及圆砾, 含量 15%~30%, 具泥质胶结和微钙质胶结。顶板埋深 21.9~23.7m, 层厚 5.2~6.8m。卵石的最大粒径达 180mm, 隧道穿越土层中局部含有大漂石, 目前发现的局部漂石最大粒径达 670mm。

由于一期工程线路设计高程大多数处于地面以下 10~20m 范围, 因此盾构施工将面临高水压、大漂石、砂卵石破碎、长距离掘进刀盘和刀具磨耗等问题。

1.2 成都地铁盾构选型与设计

1.2.1 隧道掘进机分类

在我国, 通常将应用于软弱地层的隧道掘进机 (Tunnel

Boring Machine, 简称 TBM) 称为盾构机, 而将应用于硬岩地层的隧道掘进机称为 TBM, 事实上这种定义方法是不准确的, 盾构应该只是 TBM 的一个特例。但为与当前习惯性叫法相一致, 本书仍然称适合软弱地层的隧道掘进机为盾构, 而适合硬岩的隧道掘进机为 TBM。隧道掘进机的分类方法很多: 根据其工作原理, 可以分为手掘式、挤压式、半机械式和机械式^[3]; 根据适用土质及工作方式的不同, 又可以分为敞开式、压缩空气式、泥水式、土压平衡式、组合式、插板式以及多断面式隧道掘进机; 根据隧道掘进机直径, 可分为特大、大、中、小及微型隧道掘进机; 按开挖断面, 可分为部分断面开挖和全断面开挖的隧道掘进机等^[4~6]。结合赵坚教授及国际隧道协会 (ITA) 建议的 TM (Tunnel Machine) 较为权威分类方法, 详细见图 1.3^[7], 与之相对应的各种机器类型详见图 1.4。

下面介绍几种比较常用的典型掘进机机器类型:

(1) 撑脚座式掘进机 (图 1.5) 通常用于围岩比较稳定且地下水影响不大的地层中, 可分为单、双撑脚座式掘进机, 均通过撑脚座与岩壁作用产生推力, 因此对岩石强度有一定要求。目前, 双撑脚座式发展为多种撑靴模式, 如 X 形或 T 形^[8]。

(2) 单护盾式掘进机 (图 1.6) 是专门针对软岩开发的, 因此只能应用于围岩不稳定的软弱地层或开挖面自稳时间相对较短地层^[9], 护盾可以支撑围岩变形, 同时保证施工人员及设备的安全。通过预制钢筋混凝土管片进行支护, 管片同时提供掘进机前进的推力。

(3) 双护盾式掘进机 (图 1.7) 联合了撑脚座式掘进机和护盾式掘进机的优点, 因此可以应用到更为广泛的地质条件 (如硬岩和软岩)。双护盾式掘进机由前盾 (刀盘、主轴承、驱动系统)、尾盾和辅助推理系统组成, 两护盾之间用伸缩式盾体连接。当掘进和管片同时施工时, 其前进推力将以撑脚座式掘进机方式获得, 刀盘和前护盾由伸缩式辅助油缸提供动力。

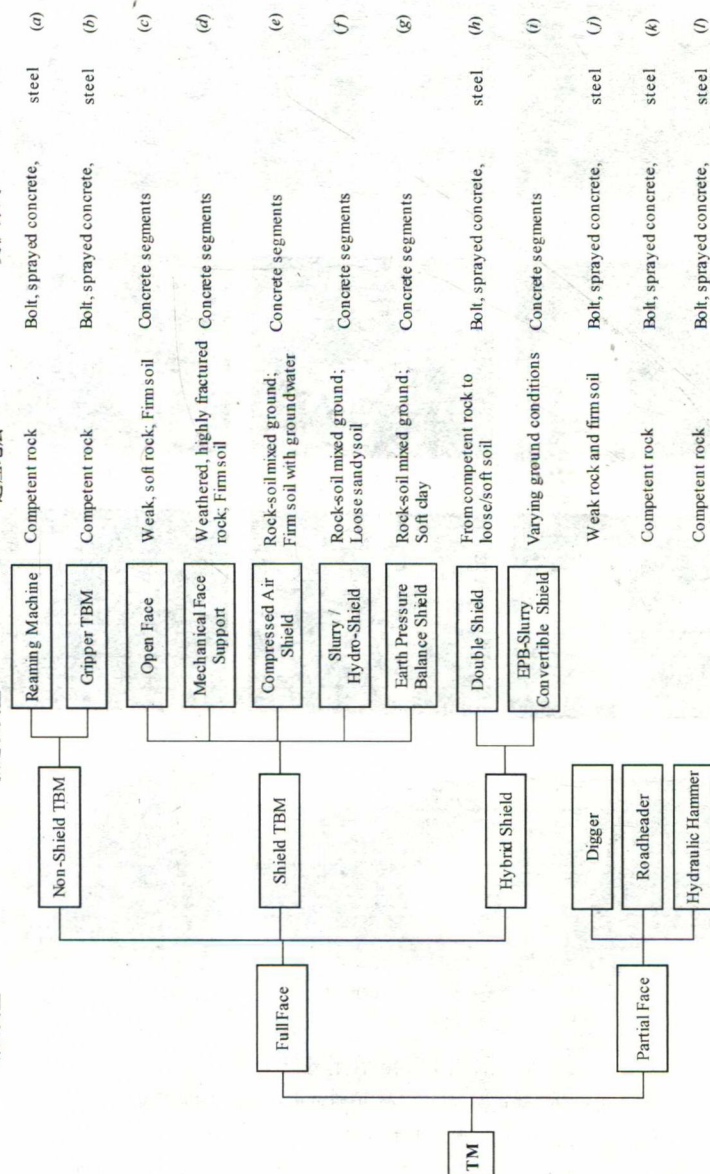


图 1.3 隧道掘进机分类