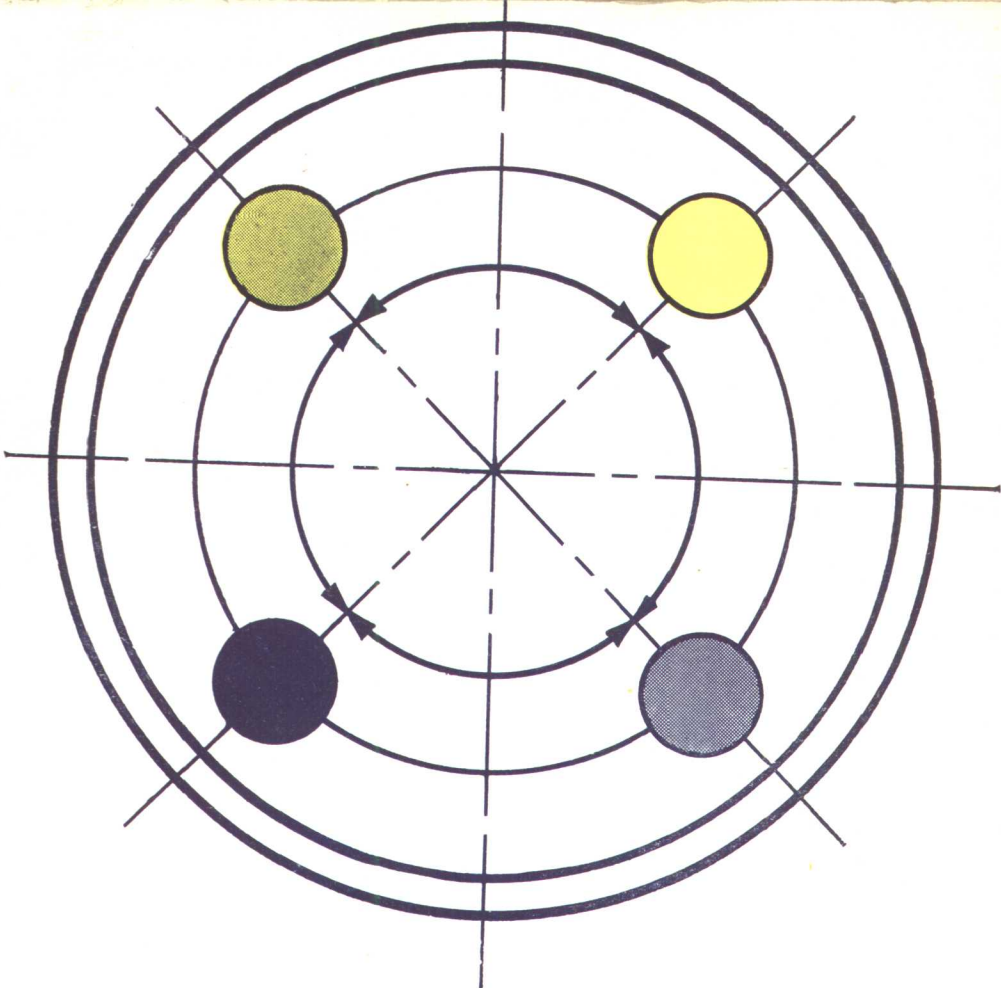




顶管工程

上册

技术 机具 设备

[西德] 马·谢尔勒 著

漆平生 杨顺喜 李明堃 译

中国建筑工业出版社

顶 管 工 程

上 册

技术 机具 设备

[西德] 马·谢尔勒 著

漆平生 杨顺喜 李明堃 译

中国建筑工程工业出版社

本书分上下两册。上册从实践角度全面介绍了最新顶管施工技术的各个细节,以及在各种条件下的具体应用和施工设施、机具的配置与使用方法等内容。

下册从理论角度阐述了对顶进管道在施工过程中和交付使用以后的荷载与应力状态,并作了细致的定性和定量分析,还根据分析结果提出了相应的计算方法和设计准则。全面论述了顶管施工的规划与设计原则以及施工过程中行之有效的管理方法。指出了施工过程中可能出现的工程问题、对地面造成的影响以及相应的补救措施。

本书可供市政工程、铁道工程、水利工程、国防工程、民用建筑以及厂矿基本建设等方面,从事管道工程设计、施工的技术人员和科研、教学人员参考。

Dipl.-Ing. Max Scherle

Rohrvortrieb

Band 1

Technik Maschinen Geräte

Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1977

* * *

顶 管 工 程
上 册

技术 机具 设备

漆平生 杨顺喜 李明堃 译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市顺义县印刷厂印刷

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 8³/₈ 字数: 223千字

1983年5月第一版 1983年5月第一次印刷

印数: 1—9,000册 定价: 1.05元

统一书号: 15040·4389

译 者 的 话

顶管法施工是一种现代化的管道敷设施工方法。目前，在修建下水道、工业地下管道、地下人行道、穿越铁路公路和河流的通道等地下工程时，为了避免对地下构筑物、风景区和地面建筑物的破坏，以及影响交通等问题，国内外已经广泛地采用了顶管法施工技术。即使从经济效果上来看，顶管法施工也不亚于开槽敷管施工。

我国采用顶管施工法起步并不晚，但是发展速度却比较缓慢，例如目前国外顶管最大管径可达4000毫米以上，我国仅为2600毫米。国外复土深度可达80米以上，我国只有15米左右。国外一次顶进距离可达600米以上，我国只有180米左右。国外每班进尺可达15米以上，我国仅有4米左右。我国顶管施工效率低不仅是因为技术和机具落后，同时也由于我们对有关理论缺乏系统深入的研究。

本书是一部技术性和理论性较强的顶管施工专著。著者系统地总结了本人多年技术实践和理论研究成果。本书出版后受到国际上同行的普遍重视与好评。与我们目前所看到的美国、日本和苏联出版的同类著作相比，这本书所介绍的技术比较新颖，立论也比较明晰。我们认为这本书的翻译出版对我国有关单位的工程技术、科研和教学人员将会有一定的参考价值。

本书承蒙北京市市政工程局副总工程师郑裕峥同志审校，并得到其他一些同志的大力协助，在此一并致谢。

由于本书技术性和理论性比较强，篇幅比较大，加之译者水平所限，不妥之处，请读者指正。

译 者

一九八二年五月

前 言

对于各种地下管道，诸如下水道、用以安装所有各类供应管道的保护套管、以及运输管道等等，敷设工程既可以采取开槽的明挖方式，也可以采取不开槽的暗挖方式。

所谓明挖方式，系指一切在敷设或建造管道时开挖明槽的施工方法，为此既可以按照土壤的自然休止角来挖出沟壁，也可以垂直地挖出沟壁。垂直沟壁一般需加以某种形式的覆盖，例如可以采用板桩墙，同时还要加支撑，以免塌帮。

所谓暗挖方式，系指一切在地下敷设管道而无需由地表面开槽的施工方法，其中主要包括各种采矿掘进法和顶管法。

在不久前，明挖式的施工方法一直被看作是修建地下管道的标准施工方法，暗挖法仅限于特殊情况下使用。

只有在不可能采取明挖法的情况下，例如需要由铁路、高速公路和主要街道下面穿过时，方采取暗挖式的施工方法，在这个问题上一般的看法是，采用暗挖法在费用上会比明挖法昂贵得多。但从近年的经验证明，暗挖法在经济效果上完全可以同明挖法相竞争。

矿山掘进法既可用于岩石地层，亦可用于疏松的土层。

在岩石中掘进隧道时，过去都采用爆破掘进的方法。掘进空间须用坑木加以支护，从而防止岩石坍塌。除了这种目前仍然常用的技术外，近年来也已采用全部机械化的掘进机在岩石中挖掘隧道，并用喷射混凝土来加固掘进空间周壁。

为了在疏松的土层中开挖隧道，除了传统的矿山掘进法外，百余年来也采用了盾构掘进法和插板掘进法。采用盾构掘进法时，借助千斤顶将一个管形盾构向土层中推进，千斤顶则支撑在盾构后部的衬砌环上。盾构一方面向前切割出掘进空间的轮廓，

同时也起着支护作用，掘进空间则用一种叫作“丘宾筒”的预制件加以衬砌，“丘宾筒”可用混凝土、铸铁、铸钢或钢板制成。

采用插板掘进法时，盾构由许多板条组成，这些板条叫做插板，掘进时将这些“插板”单个地或成组地向土壤中推入。支撑在棚架上的插板套壳起着保护掘进空间以防土壤坍陷的作用。工作面前壁则用一块背板来支护，掘进空间周壁大多使用现浇混凝土随即衬砌，浇注混凝土时可将插板套壳用作外模。

因此，各种矿山掘进法的特点即在于，掘进空间的支护与隧道的衬砌是互不相关的两种结构，而且只有隧道的衬砌作为正式的建筑构件敷设在最终确定的地点上，并且不再改变位置。

在采用顶管法的情况下，作为建筑构件的管子被推入地下，与此同时即将挤出的泥土挖掘下来并运送出去。管子这时也起着支撑土层的作用。这样，矿山掘进法中必不可少的掘进空间支护，在采用顶管法时即已不复存在。管子一方面作为掘进空间的支护，防止土壤坍落，另一方面本身也就是最后的建筑构件，这种双重作用，正是顶管法较之矿山掘进法的主要差别和优越性所在。然而也正是这种双重作用，在施工技术上向我们提出了某些与过去全然不同的特殊要求。

就总的概念来说，顶管法便是挤出泥土并随即推入或插入管子、在按水平或倾斜方向钻洞的同时即将管子压入、以及在将管子压入土层中去的同时即将工作面前壁上的泥土挖下、并通过已压入的管道将废土运送出去的方法。

当管子排开泥土以及按水平或倾斜方向钻洞时，是无法在推顶过程中对推顶方向施加影响的，或者至少是不可能施加很大的影响。因此，这种施工方法的应用，除了技术条件所决定的管径限度之外，在推顶长度上也有着一定的限制。

这种将管子压入并同时由工作面前壁上挖下泥土的方法，已发展成为一种极其全面而且可以广泛应用的暗挖施工技术。编写本书的目的，正是为了集中地介绍这一新技术。

著 者 1976年10月

目 录

前 言

1. 顶管技术	1
1-1 顶管施工	1
1-1-1 制管材料	1
1-1-2 顶管的限度	2
1-1-3 土壤或土层	3
1-1-4 顶进阻力	4
1-1-4-1 工作面前壁阻力	4
1-1-4-2 管外壁摩阻力	4
1-1-5 降低顶进阻力的措施	5
1-1-5-1 在工作面前壁上	5
1-1-5-2 管外壁摩阻力	6
1-1-6 对支承-润滑介质的要求	6
1-1-6-1 摩擦定律概要	6
1-1-6-2 从摩擦定律得出的结论	8
1-1-7 作为支承-润滑介质的膨润土	10
1-1-7-1 膨润土悬浮液在疏松土层中的应用	17
1-1-7-2 顶进管在膨润土悬浮液中受到的浮力	25
1-1-8 管外壁摩阻力的计算	27
1-1-9 中继顶压站(中压站)	35
1-1-10 推顶力	37
1-2 控制	39
1-2-1 控制技术	39
1-2-2 控制误差——控制的修正	44
1-3 沉降	52
1-4 拱起	60
1-5 地下水中的顶管施工	61

1-5-1	地面排水	61
1-5-2	降低地下水位	61
1-5-3	压缩空气排水法	62
1-5-3-1	空气耗量	63
1-5-3-2	压缩空气法的应用限度	69
1-5-3-3	防喷冒安全性	71
1-5-3-4	应用压缩空气排水法进行顶管施工的不同方式	74
1-5-3-5	充气顶管的开顶程序	77
1-5-3-6	充气顶管的施工过程	81
1-5-3-7	应用压缩空气排水法进行顶管的两种不同方式的优缺点	82
1-5-4	综合应用压缩空气排水法与降低地下水位措施的顶管施工	85
1-5-5	地下水中的浮力	86
1-6	管子接头	87
1-7	顶压坑	93
1-7-1	承压壁的稳定性计算	94
1-7-2	承压壁的结构	104
1-7-3	管子由顶压坑中向外伸出的孔口	104
1-7-4	双口顶压坑	105
1-7-5	采取压缩空气排水法进行顶管施工时所用的顶压坑	106
2.	顶管施工的机具和设备	107
2-1	刃脚或盾构	107
2-1-1	刃脚或盾构的尺寸规格与结构	107
2-1-2	刃脚或盾构的控制	133
2-1-3	刃脚或盾构的结构形式	144
2-2	中继顶压站	150
2-2-1	中继顶压站的计算	150
2-2-2	中压站的结构	159
2-3	主压站	166
2-3-1	主压站的计算和结构设计	166

2-3-2 各种主压站结构类型的经济性比较	182
2-4 主压站和中压站的液力计算	186
2-5 液压设备的工作机能	193
2-6 工作阶段进度计划图表	197
2-7 挖土、装土和运土	203
2-7-1 工作面前壁上的挖土工作	203
2-7-2 废土的装车	206
2-7-3 废土的运输	207
2-7-3-1 干法运输	208
2-7-3-2 水力运输	209
2-8 压缩空气的生产	218
2-8-1 压缩空气耗量	219
2-8-2 对压缩空气的要求	224
2-8-3 生产压缩空气的机器	230
2-8-4 空气压缩设备的分配	245
2-8-5 空气压缩设备的调节	247
2-8-6 压缩空气管道的规格设计	253

1. 顶 管 技 术

1-1 顶 管 施 工

以一个事先准备好的地坑（即顶压坑）为出发点，可用液压千斤顶将管子压入土层中，同时并排除和运走挤出的泥土（图 1）；第一节管全部压入土层后，便把第二节管接在后面继续顶进。与此同时再将第一节管内挤出的泥土排除和运走，直到第二节管也全部压入土层。然后再把第三节管接上顶进。只要顶管千斤顶的顶力足以克服顶管时产生的阻力，这个过程便可以一再地重复下去。从理论上讲，千斤顶的顶力可以任意提高，从而也能达到任意长度的推顶距离。但因千斤顶产生的顶力必须全部由管子来承受，所以顶力的提高应以管子的承载能力为极限。

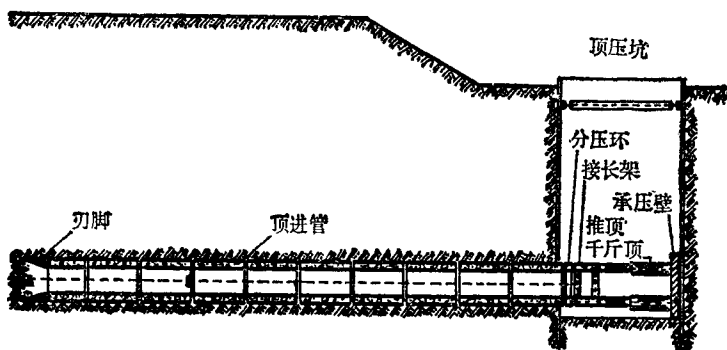


图 1 顶管施工示意

管子受力和传力的能力则取决于制管材料的类型。

1-1-1 制管材料

作为制管材料，可以使用钢、钢筋混凝土、石棉水泥、塑料

混凝土、陶瓷外加钢筋混凝土套壳、以及可锻铸铁等等。

钢作为顶进管的材料不是主要的，因为钢管彼此间的连接只能是焊接，因此管道刚性很大，无法取得管路结构上所要求的活节链形式。而且，钢的价格比钢筋混凝土贵。但最主要的是，在将钢管埋设在地下时，为了避免锈蚀，管子必须带有外包隔离层。然而在顶管的情况下，预先包敷的隔离层在推顶过程中会受到损伤，或甚至完全破坏，而在顶管施工中也无法采取随后再包敷隔离层的方式。因此钢管在顶管工程中的使用始终受到很大的限制。

钢筋混凝土是制造顶进管的常用材料，因为使用这种材料一般不难满足所有各种静力要求。管子柔性接头的问题可以完全得到解决。钢筋混凝土管内外都不怕水，通过选用适当的水泥品种，也能耐受水的侵蚀性。

石棉水泥管的特点是有弹性、表面很光滑，并且由于强度高而可以做得很轻。

塑料混凝土是一种强度和化学耐蚀性都很高的材料。制造塑料混凝土管既可以配钢筋，也可以配置钢筋。但塑料混凝土的价格目前还很贵，所以只是在对材料的化学耐蚀性要求特别高的场合方用以代替钢筋混凝土。

当管道用于排泄腐蚀性特别强的废水时，可使用附有预制钢筋混凝土套壳的陶管作为顶进管。

可锻铸铁的特点是强度、弹性和防蚀性都很高。

1-1-2 顶管的限度

顶管技术在理论上可应用于任何管径，但实际上也有一定的限度。

顶进管直径之所以不能低于一定的下限，是因为必须在管子内部完成挖土和运土作业。因此就必须保证工人有可能在管内工作。80厘米内径的规格，乃是在管子中进行操作的最低限度。但在这种情况下，对在管内操作的工人要求非常之高，以致工人即是责任心很强，往往也无法满足这样的要求。而且由于空间狭

窄，工作效率也大大降低，所以，从经济的角度来考虑，也以选用较大的直径为宜。因此实际上是采用1米内径为顶管下限。

在判定管径的上限时，必须对制管厂制造完毕后运到工地的管子和直接在工地上制造的管子加以区别。

对于制管厂制造的管子，直径极限一方面决定于制造方法，另方面也决定于运输条件。迄今已制造过内径达到3米的管子。更大一些的管子也可以制造，但这样生产设备的投资就会更高。这无疑会影响价格，因而也影响这种施工方法的经济性。

管径的绝对上限决定于运输条件。管子一般是顺向放在车内运输。公路运输的标准宽度是2.5米。这相当于大约2米的管内径。超宽运输要经过批准，极限约为3.6米，相当于内径3米。若要在公路上运输更大直径的管子，管子就必须在车厢内横放。于是运输宽度的限制所涉及的便是管长，即管长一般不得超过2.5米，最长也不得超过3.0米。最后还有运输高度的限制，连车带货的总高度，未经许可不得超过4米。若用低货位汽车运输管子，装货高度还可以增加大约0.5米。因此可能装运的最大管外径为3.5米，相当于内径约3米。

这样便可以确定，就制管厂制造的管子而言，无论从制造或是从运输的角度来看，上限都是大约3米的内径。

直径更大的管子因而必须在工地附近制造。为此便需要大量的生产设备，而且必须相应地设有很大的成品堆置场，因为即使采用人工蒸汽硬化法，也需要有足够的凝结时间。

这样便可以制造内径5.6米或外径6.6米的顶进管。从顶管技术的角度来看，管径上限大致也是这一数值。

1-1-3 土壤或土层

顶管技术特别适用于在砾石、砂、碎石等非粘性土层中，以及在壤土、砂壤土、粘土和泥灰岩等等粘性土层中敷设管道。对流砂、淤泥、沼泽地以及岩石来说，顶管即使并非完全不可能，也只是有条件地采用。流砂土、淤泥和沼泽地之所以不适于采用顶管技术，一方面是因为难于防止工作面前壁的坍塌，另一方面也

是因为这样的土层中缺乏为推顶管路所必需的导向力，以致整段的管路在推顶中可能改变位置。对岩石来说，顶管法是很难应用的，因为只有采用专门机械或通过爆破法，方能在岩石中掘进。

因此，顶管的实际使用，一般只限于砾石土壤、砂土以及粘性土壤。对于这些土壤，顶管技术既可以在干燥土层中应用，也可以在含水的土层中应用。

1-1-4 顶进阻力

顶进阻力由工作面前壁阻力和管外壁摩阻力组成。

1-1-4-1 工作面前壁阻力

由管壁圆周（切削刃）阻力和支撑工作面前壁以防止泥土坍入管内的顶力所组成。

为使管子压入土层的阻力尽可能地小，在第一节顶进管的前端，配置着一个类似于盾构的刀脚。这种刀脚一般用钢板制成，而且正如它的名称所示，在前端有着一个突出的切削刃。大多呈楔形的切削刃被压入未经扰动的土层中去，它的任务如同一般切削刀具一样，是要切开土壤并将土壤挤入管内。切入阻力取决于所遇土层的密度。根据对照测量的结果，这一阻力的范围是圆周长度每米15到30吨。

通常采取设置格板的方法来支撑工作面前壁，以防止土层坍塌，这样土壤便能按自然休止角度散落在格板上。这些格板压入土层和支撑土层时也引起相应的阻力，这一阻力类似于切入阻力，大小也取决于土层的密度。

对于刀脚结构来说，圆周上和格板上的阻力各自有着不同的意义，而单就推顶施工本身来讲，则并无将前壁阻力作这种区分的必要。对顶管有关系的只是工作面前壁的总阻力。根据土层密度的不同，总阻力可取值于刀脚面积每平方米大约30到60吨之间，平均值一般为50吨/米²。但在土壤很硬的情况下，这一阻力甚至可以达到100吨/米²。

1-1-4-2 管外壁摩阻力

如果遇到的是所谓松土层，那么土层便会紧贴着管体四周。

这种情况下的土压过程极其复杂。首先可以从这样一个事实出发，亦即刃脚切入土层时，在管子上面便会形成一个圆拱这一点与隧道或矿山坑道计算中众所周知的情况相类似。因此最初压在管子上的只是周围土层的有限部分，而不是直至地面为止的全部土层。土层全压力只有经过一定时间之后才能起作用，这一时间的长短则与推顶运动、交通振动、地下水运动等等有关。

这种假设可由以下事实获得证明，亦即对于具体某种土壤来说，管外壁每一单位面积上的摩阻力在起初几乎与管顶上存在的复土厚度无关，而保持为常数。根据现有经验，在不使用润滑剂的情况下，干燥土层中管外壁每平方米面积上的摩阻力；

当使用石棉水泥管时约为1.2到1.5吨；

当使用钢筋混凝土管时约为2.0到3.0吨。在出现强制力的情况下，或是在膨胀的土层中，例如冻胀的粘土，上述数值还可能增大到1.5倍，在特别不利的条件下甚至会增大到2倍。

1-1-5 降低顶进阻力的措施

如上所述，从理论上讲，顶管千斤顶的顶力可以任意增高。但是顶力的极限却在于顶进管对纵向力的承载能力，因为全部纵向力必须通过管子来传递。所以，为了达到尽可能长的推顶距离，便有必要尽可能地降低推顶中遇到的阻力。

1-1-5-1 在工作面前壁上

在工作面前壁上，不可能大幅度地降低切入阻力。刃脚必须经常均匀地切入前方的土层中，从刃脚上清除积土时，只能依靠工作面上的操作工人运用熟练的技巧来掌握适当的分寸。工人一方面必须从切削刃和格板上清除掉相当数量的积土，以免无谓地升高推顶力，但另一方面，又绝不可以过多地除土，以免造成土层松散，特别是不能在切削刃附近造成土层松散，否则便有工作面坍塌以致引起上部土层大量沉陷的危险。

适量与否要凭工人的经验来判断。因此，在这方面富有经验的掘土工人，乃是顶管施工中特别宝贵的一支技术力量。

1-1-5-2 管外壁摩阻力

对于管外壁摩阻力，在很大程度上可以通过各种手段来施加影响。首先要注意管子表面的光洁平滑，以保持很低的摩擦系数。此外极为重要的是，管子要尽可能避免圆度误差，并保持直径的一致。在这方面，如果管子是用许多管模制造的，问题可能就出现在制管厂中，因为管模本来就有尺寸公差，而且磨损程度也不相同。此外，如果管子浇注之后脱模过早，或者由于蒸养而发生收缩，也会引起这类的偏差。管子尺寸的不准确在推顶时会导致产生夹紧力，这种力有时可能达到很高的数值。

若使刀脚比它相应于管子外径应有的尺寸稍大一点，就有可能降低管外壁摩阻力。这样能使土层不直接压在管体上。只要土层足够坚硬，这种方法就会起到预期的效果。而如果向管子和土层之间形成的空隙内压入支承介质，这种方法的效力更可以大大提高，并能维持一定的时间，从而足以顶进一段相当长的管路，再则，支承介质在起支承作用的同时，也可以作为润滑剂起到减少摩阻力的作用。

1-1-6 对支承-润滑介质的要求

对支承-润滑介质的要求，可以根据摩擦定律推算出来。

1-1-6-1 摩擦定律概要

除了不在这里讨论的滚动摩擦（图2a）之外，可将摩擦区分为：

a) 粘附摩擦（与静摩擦相同）；

b) 滑动摩擦。

如图2b所示，在粘附摩擦和滑动摩擦的情况下都存在如下的关系：

$$T = N \cdot \mu$$

式中

N ——法向力；

T ——切向力；

μ ——摩擦系数。

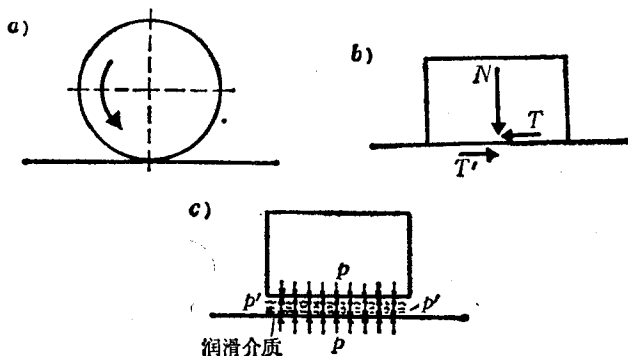


图 2 摩擦过程示意

a) 滚动摩擦; b) 干摩擦; c) 液体摩擦

摩擦系数 μ 是一个材料常数, 与滑动面和滑动物体的表面性质有关, 而却不以接触面积 F 的大小为转移。

无量纲系数 μ 在粘附摩擦的情况下, 一般大于滑动摩擦时的数值, 因为在粘附摩擦的情况下, 表面会由于经常存在的不平度而被“楔紧”。

滑动摩擦又可分为:

b_1) 干摩擦;

b_2) 液体摩擦。

在干摩擦时, 滑动体和滑动面直接接触, 在液体摩擦的情况下, 滑动体和滑动面则被润滑介质隔开 (图 2c)。

在滑动摩擦的情况下, 滑动体和滑动面之间存在相对速度 v 。

在干滑动摩擦的情况下, 摩擦系数 μ 与相对速度 v 无关。

在液体滑动摩擦的情况下, 视在摩擦系数 μ 则相随滑动体和滑动面之间液体的流动阻力而变化。流动阻力则取决于液体的运动粘滞度和流动速度。根据流体动力学可知, 流动阻力与流动速度的平方成正比。

在两个互相接触的物体之间, 起作用的是一个比压:

$$p = \frac{N}{F}$$

在液体摩擦的情况下，作用在润滑液体上的是一个流动压力：

$$p' = f(v^2)$$

若 $p = p'$ ，物体和润滑介质便处于平衡状态。这时运动的物体就“漂浮”在滑动面上。

如果 $p > p'$ ，润滑介质便会从运动物体和滑动面之间的缝隙中逐渐被挤压出去，直到液体摩擦转变为干滑动摩擦为止。液体摩擦的前提在于，无论物体和滑动面都必须是不透水的。如果润滑介质能够渗入物体或滑动面，而又不以同样的数量给予补充，那么液体摩擦就会变成干摩擦。

1-1-6-2 从摩擦定律得出的结论

按照摩擦定律来考虑，对于顶管施工可以得出完全明确的结论如下：

a) 为了保持较小的推顶力，干摩擦须以尽可能小的摩擦系数 μ 为前提。管子表面的光滑，能使摩擦系数降低。管子表面的机械加工和涂抹减摩剂，同样都能起到减小 μ 值的作用。

b) 在干摩擦的情况下，管子表面在推顶过程中会被周围土层磨毛，因而使摩擦系数增大。所以在顶管距离较大时，一般多采取液体摩擦的方式。

c) 液体摩擦须以管子和土层之间存在润滑介质为前提，也就是说，须将润滑介质压入其间。

d) 润滑介质必须保持一定的厚度方能有效。

e) 管子和土层间必须存在一定的空隙，也就是说，要留出一定的空隙，以便在压入润滑介质后能够形成所需厚度的一个液体层。

f) 管子和土层之间充满润滑介质的空隙，在整个推顶过程中必须保持不变。要作到这一点，润滑介质必须能够阻止土层落到管壁上，亦即润滑介质必须承受着各种具体条件下起作用的土压力来托住土层。因此，在润滑介质中必须经常保持相当于土压力的液压。这样，润滑介质同时也起着支承介质的作用（图3）。