

地下管道计算

黄清猷

湖北科学技术出版社

江苏工业学院图书馆
藏书章

最后，本书在撰写中不囿于旧有观念的藩篱，除了尽量采用较新近的研究成果外，还对国内外广泛沿用的A. Marston (1913年)管涵土压力理论和И.М.ЕМЕЛЬЯНОВ的地下柔性管计算公式(1961年)等基本问题进行较详细的商榷，提出了新的计算方法。对于所搜集到的国内外实验资料和规程、规范进行了适当的归纳评述。书中所编制的曲线、图表对设计有参考价值。

拙著初稿曾蒙潘家铮先生(中国科学院学部委员)及清华大学多位师友赐审，并择要发表于《土木工程学报》、《水利学报》等刊物，且得若干重要手册及专著所引用(如全国“给水、排水工程结构设计手册”1984年版)。值此出版之际、敬向审阅、编辑与关心此书出版的诸君，深表谢意。

由于地下管计算涉及面广、较为复杂，笔者虽饱经曲折试著成卷以应设计、教学的需要，但由于学识浅陋，书中谬误之处尚望读者批评指正。

黄清猷

1985年于武汉市建筑设计院

前 言

凡以填埋方式施工的各种地下圆柱壳形状的结构物，从广义上说，都可称为“地下管”。

地下管在国民经济的许多领域中有广泛的用途，例如运输系统中的隧洞、地铁；能源工业中的油、气、水管，以及土坝、路堤底下的廊道、管涵等。地下管特点是工程隐蔽、投资巨大、重要性高，一旦发生事故，后果严重（如油、气泄漏引起的公害），所以各工业发达的国家都进行专门研究。

本书试从下述三个方面对地下管的力学模型与计算方法进行阐述。

首先，作用于地下管上的荷载种类繁多，其管壳内力计算也比较复杂，为择精语详，本书将侧重管道周边土压力分布性态的分析与壳面环向内力的计算这两个重点。因为前一问题是奠定管壳弹性稳定性（柔性管）、强度和刚度（变形）计算的基本荷载的力学模型，同时也是当前土工基础的重要课题之一；后一问题将是生产实用的设计目的。

其次，对地下压力钢管，由于用途日益广泛，管径不断增大，而目前可供借鉴的资料和所进行过的科研工作都很有限，所以笔者将较系统地从理论基础至设计方法作一详细叙述，以图能弥补这个专题作一个尝试。

目 录

第一章 概 述	1
一、地下管的定义、用途及分类	1
二、地下压力钢管的结构组成和工作原理	5
三、管道铺设原则与基础种类	11
四、荷载种类与荷载组合	17
五、地下薄壁管道的设计理论、材料性能和容许应力	22
六、地下压力钢管的设计内容	30
第二章 地下管土压力分析及地面荷载的作用	36
一、影响管道土压力性态的主要因素	36
二、管顶垂直土压力分析法之一（散体极限平衡法）	44
三、管顶垂直土压力分析法之二（有限元件法）	69
四、对A.马斯顿（A.Marston）管涵土压力理论的商榷	82
五、对“土柱法”与“卸荷拱法”的商榷	94
六、国外埋管管顶垂直土压力的实用计算法	98
七、管侧水平土压力分析	108
八、管底支承反力分析	120
九、填埋式柔性管管周土压力实用计算方法	125
十、地面荷载对埋管的附加压力	127
第三章 地下压力钢管的弹性稳定性	168
一、填埋式地下钢管的失稳过程	169

第一章 概 述

一、地下管的定义、用途及分类

(一) 地下管的定义和用途

在国民经济的诸多领域中，广泛应用敷设在地面下的各种管道来输送油、气、水及各种固体等介质。例如市政建设中的给水管、排水管和煤气管；在能源工业中有火电厂与核电厂的冷却水供水干管、热力管和输送石油、天然气的油管、气管；在地下运输系统中有填埋式施工的圆形隧洞、地铁和战备通道；在水利工程中有引水管、坝下埋管（如输水廊道）以及铺设于河床下面的虹吸管等等。由上述部分实例，可概括出这样的定义：凡是埋置在地面下的、用于不同用途的圆柱壳形状的结构物，从广义上说，都称为“地下管”。

此外，露天构筑的圆柱壳结构，还可用作立式贮仓（如谷仓）、化工厂的各种塔式结构物，以及水池等。

目前地下工程使用的大型预应力钢筋混凝土管，其直径已超过9m，每个管节重达350t，需生产专用车辆来搬运。常用的直径 $\Phi = 2000\text{mm}$ 的地下压力钢管，每公里长度造价约100万元，由于管线较长，投资巨大，而且地下管线又属隐蔽工程，一旦发生事故，检修比较困难，并可能造成后果严重的公害（如天然气或石油的泄漏）。所以各工业先进国家都对地下管进行专门的研究，并制订出一套设计与施工方法。

在目前最常用的地下管中，有钢筋混凝土管和钢管。它

们在性能上各有优缺点，而且前者优点往往是后者的不足，反之亦然。因此工程选用，要综合分析。一般说来，对于管内压力较大，运行可靠性要求高的（如输油管等），宜用钢管；对于管内压力不太高的给、排水管，可选用钢筋混凝土管，但在技术经济论证合理的条件下，也可选用钢管。对于大口径管道（如 $\Phi > 2400\text{mm}$ ）在高填土地段（如管顶填土高度 $H > 5\text{m}$ ），若选用钢管，因管壁较薄，刚度不足，需要大大增加壁厚，其结果可能经济效果较差。为了使管材选择合理和符合经济原则，设计中需要先算出沿管线的水能比降线（由水力学计算得出）和管顶土压力分布线（由荷载计算得出），然后综合分析沿管线所经过地段对管壳的控制因素：当管道由强度控制时，可选用钢管，并检查管壳的弹性稳定性；当管道由刚度控制，宜选用钢筋混凝土管，这样沿管线就可能出现由不同的管材组成的混合结构。

钢管的优点除了上面所讲过的能承受很高的内压力和运行可靠性较高外，它在管壳制作、焊接与弯头、岔管等异型部件的加工方面，都比钢筋混凝土管的制作加工容易，此外钢管在运输、安装方面也较轻便，不需要大型运输、起吊等设备。但它不足的是耗钢量比较大，而且管壁易受土壤等腐蚀，需要增加防腐措施等。

钢筋混凝土管也有它的长处，如具有相当的承载能力，它的刚度又远比钢管大；在外压力作用下不会发生丧失弹性稳定性的危险；它运行耐久性良好，一般不需要管壁的防腐处理；它自身重量较大，虽有运输不便的缺点，但敷设安装还是比较简单，运行时它的水力糙率变化小。总之，应用钢筋混凝土管最大好处是可以节约大量钢材。（目前我国各地的水泥制品厂，对常用管径已有较成熟的制管工艺，可以批量生产。）

最后，对于素混凝土管，由于承压能力有限，一般仅用于低水头、小管径的管道中。对于陶瓦、砖石结构，仅用于无压和低压管。为了节约木材，我国一般不用木管。

(二) 地下管的分类

1. 按制管材料可分为：

(1) 脆性管——混凝土管、铸铁管、石棉水泥管、陶土管和砖砌管等。

(2) 塑性管——钢管、波纹钢管和钢筋混凝土管等。

由于脆性管抗拉强度低和耐冲击性能差，所以遇到高内压时是不适用的。一般重要工程尤其大型工程，大多数使用强度高、延伸率和冲击韧性好的钢管或预应力钢筋混凝土管。

2. 按管道与土壤的相对刚度（即相对变形）来分：

所谓相对刚度，这里指的是管道的自身刚度与管道周围土壤的刚度之比，简称为管土相对刚度比。

(1) 柔性管（管、土相对刚度比小于1）：

钢管和薄壁预应力大口径的钢筋混凝土管等，一般都属柔性管。它们的特点是在土压力等作用下管断面的变形量很大，例如钢管所允许的变形量可达 $2 \sim 3\% D$ ，（ D ——管道直径）。计算时不可忽略，否则将导致错误。

(2) 刚性管（管、土相对刚度比大于1）：

铸铁管和混凝土管等都属刚性管。它们在土压力等作用下管断面变形量很小，计算时可以不计，这时将管子视同绝对刚体。

必须指出，在一般管周填土为粘土等情况下，钢筋混凝土管也属于刚性管。

按管、土相对刚度分析管道性态，是管道力学分析的基础，这点在后面将详细阐述。

3. 按埋管的施工方法分类（图2—8）：

埋管按施工方法分类主要的目的不是为了研究施工的工艺，而是因为管顶的垂直土压力集度性态直接取决于埋管时的施工方法。

（1）沟埋式 沟埋式埋管也称窄槽式埋管。埋管前沿管线开挖很狭窄的矩形断面的沟槽，然后敷管、回填土料并加分层夯实。这多数应用于坚硬的原状土地带才能开挖成直壁的沟槽。若土质不甚坚实，需放坡开挖成较宽的梯形断面，这时从管槽施工断面来看，可以说是沟埋式，但从管顶所受土压力分析将与窄槽直壁式埋管有所不同，这在本书第二章将会叙述到。

（2）上埋式 在原状地面上敷管，后复土夯实。例如铁路、公路或堤坝下的预埋管道（如排水涵洞等）。此外，在开槽埋管中，按现行施工规定在管侧都留有较大的空间，以供施工操作、通行。例如：当管径 $D > 1000\text{mm}$ 时，管侧空间宽 $b = 700\text{mm}$ （见图1—6）。这时施工开挖断面虽属沟槽式，但管顶所承受的垂直土压力应为上埋式，具体也在第二章叙述。

（3）隧道式 此法多用于圆管的顶管施工。目前常用的有两种方法：一是先挖后顶，即用人力或机械在管子前面按管径尺寸挖出土料，然后用千斤顶将管子顶入土内；另一方法是先顶后挖，即在管前套上钢制的刃脚作为切土的工具，再用千斤顶将钢质刃脚的套筒顶入土内，并将所切下的土料挖运出来。前者方法多用于穿越铁路、公路的管涵，后者用于穿越建筑物或河道（土质为粉细砂或淤泥类土）等情况。

4. 按管道结构分类。以地下钢管为例可分为：

（1）光面钢管 它由金属板材切割后焊接成表面光滑的钢管。

(2) 设置有刚性环(即加劲环)的钢管 由于光面钢管的刚度较小,在管外土压力等作用下,容易被压瘪(即失去弹性稳定),为了提高管壳的整体刚度,通常需要在管壳外面设置间距相等的刚性环(图1—2)。一般说来,当填土高度在 $2^m \sim 3^m$,管道直径 $\Phi \geq 1400^{mm}$ 的地下钢管,即可设置刚性环。

(3) 无缝钢管 这只有在小管径或特殊用途时使用。

二、地下压力钢管的结构组成和工作原理

(一) 地下压力钢管的结构组成

地下压力钢管的基本结构组成,可分为管体和闸阀两大部分。前者是过流段;后者是节流段,以控制和调节水流。

钢管管体一般呈直线形的圆筒壳。当管线转弯时出现了弯管段。当一根母管的水流要分流到若干支管时,需用截头锥形管段作为母管与支管的衔接过渡段,同样的一根直线管,当其

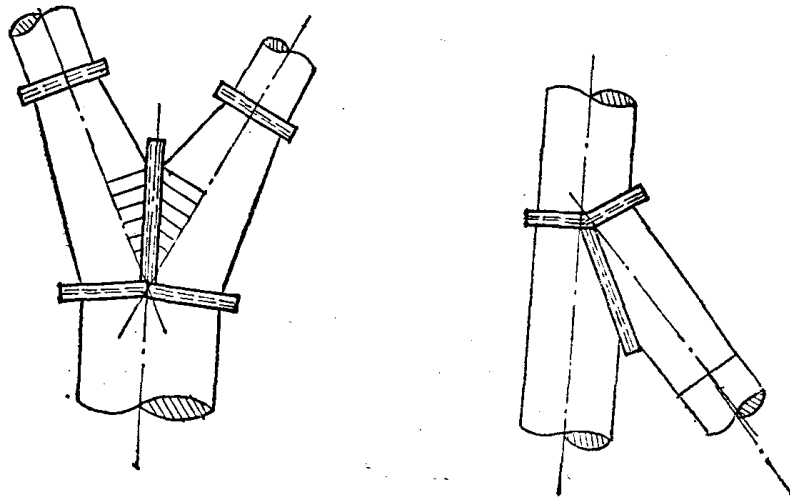


图1—1 Y型及T型岔管

管径变化时，也需要用截头锥形管段来连接。管道由于分流所出现的岔管，其布置型式主要有Y型和卜型（图1—1）。但在特定条件下，也有采用T型布置。比如布置在火电厂厂前区的地下供水钢管，因靠近供水末端，流速低、压力小，加上厂前区地下设施拥挤，场地窄小，所以岔管布置采用T型方案。当然这对局部水力损失稍有不利。

前面讲过，地下钢管是薄壁圆筒壳结构，它在外压力作用下容易失稳，为了增加管壳抗失稳能力，常需设置刚性环，刚性环的型式按其断面形状可有一型、[型、T型和|型等型式，其中最常用的是一型。它们可用型钢也可用组合材制成。其最大使用型号，要考虑当地加工机械的设备能力，例如槽钢按一型布置时，常用[8、[10、[12、[14、[16这几种。一般说来当弯转机械设备能力大时，尽可能使用较大型号的型钢，以求经济效益高些。具体分析参见第三章弹性稳定部分。

此外，为了检修维护钢管（比如为了检修管道内壁的水泥砂浆的防腐蚀层或是清除管内污物等），就需要在管线适当地方设置进入孔，人孔盖板平时密闭。当管内充水和放水时，管上需设通气孔以便排出或补充管内空气。当水质不良或杂物多时，应由专门设置的排污管排出。最后，地下钢管在扩建端或暂时不通水段，需设堵头以截断水流。堵头结构视内水压力和管径大小而定，小管径多用平面钢板，大管径需用锥壳或球壳反向（逆水流方向）满焊于管周。

另方面为了控制管内水流，根据需要，可在管道进口、出口或其它部位，设置各种闸阀。地下管的闸阀，安装在专门构筑的闸门井内，以便操作和检修。

（二）地下压力钢管的工作原理：

地下钢管的工作状态远较地面露天钢管复杂，其主要原因

是在外荷载（如地面荷载、土壤重力等）作用下，管道周围的土壤介质与管壳结构之间存在着变形约束与力的相互作用。这些问题中，有的迄今尚未彻底弄清。目前有效的研究方法是从管、土体系入手，判别管道刚性，进而分析和提出沿管线的管顶垂直土压力集度性态。

1. 管、土结构体系的建立：

埋置在土壤中的管道，在填土垂直压力和地面荷载等作用下，由于薄壁管壳刚度较小，管环断面将迅速失去正圆形状而呈略为扁平的椭圆环，这时由于管道左右侧壁外凸，挤压土体，产生了土体对管壁的弹性抗力，由于这抗力是指向管道中心，它能促使管壳恢复向正圆的趋势，以弥补管壳刚度的不足。由此可见，埋置在土壤里的薄壁柔性管道（如钢管），它支承管顶土压力的能力是由两个因素组成的：一是管道结构本身的强度和刚度，二是因管环受压变形而产生的管侧土壤抗力。这就是说，管周土体它既是作用在管道上的荷载，同时又是管道在其中发生变形的一种介质。因此在研究地下管的工作机理时，必须把管道周围一定范围内的填土体作为结构的一部分加以考虑，从结构力学观点，即是管道与管周土壤介质构成了一个异性体的超静定结构体系，一般称为管、土体系。

在管、土体系内，由于管道与土壤的相对刚度（即相对变形量）不同，它们在外荷载（如土体压力等）作用下，管壳与土体之间从作用力的关系来说，将发生主动力（外荷载）与被动力（如土壤抗力）之间的相互作用；从位移关系来说，变形的壳体与受挤压的土体之间存在相互制约与变形协调。当然，作用力大小与位移量是同时消长的，其结果将导致作用于管周的径向土压力集度由初始阶段的极不均匀状态逐渐演变到较为均匀，这就是沿管周的土压力重分布。对管、土相对刚度的分

析，以及由此阐明的变形约束原理，正是我们研究地下柔性管受力状态的一把重要的钥匙。

2. 地下管刚性的转化：

前面已经讲过，地下管的刚度属刚性抑或柔性，是相对其管周回填土的刚度（压缩性）而言，定量上近似的刚、柔性判别方法是：管道自身刚度与管子所占去同体积的回填土的水平圆柱状土梁的刚度之比[2]。也即：在一对垂直均布荷载作用下，若空的管道垂直方向的变形量比上述水平圆柱状土梁的压缩量为大，则称该管道为“柔性管”；反之，为“刚性管”（图3—18）。这就是管道刚性判别的理论基础。

管道的刚度取决于：管材的弹性模量 E 、回填土的总变形模量 E_0 、管道的平均半径 r_0 及壁厚 δ 等因素。具体判别式为：

$$\lambda = \left(\frac{E}{E_0} \right) \left(\frac{\delta}{r_0} \right)^3$$
。当 $\lambda > 1$ 时，为刚性管；当 $\lambda < 1$ 时，为柔性管。

刚性管的变形极小，对管壁内力等计算影响甚小，可略之。而柔性管的变形会产生土壤抗力，它对管壳临界压力的提高（稳定计算）、管壁弯矩值的降低（强度计算）及管断面挠度量的减小（刚度计算）都将产生很大的影响，所以设计中必须适当考虑，不能忽略不计。

常用的中、大口径地下钢管，为了保证管壳的弹性稳定，常设置有刚性环（用型钢制作）。计算表明：刚性环段属刚性管段；两环之间的管壁属柔性管段，故设环钢管应属刚、柔性互为相间的组合管（图1—2）。在其特例中，不设刚性环的光面钢管，应属柔性管；与其反例的混凝土管，则属刚性管。

值得注意的是当管内承受有均匀介质压力时，将使原先已扁平的管断面，迅速恢复向正圆的趋势。当内压力增大到一定

值时，原来的柔性管，由于受到强大内压力的撑涨，而使其断面的挠度量小于等外径土柱的压缩量，按管道刚性定义，这时原先的柔性管已转化为刚性管了。反之，埋置在总变形模量

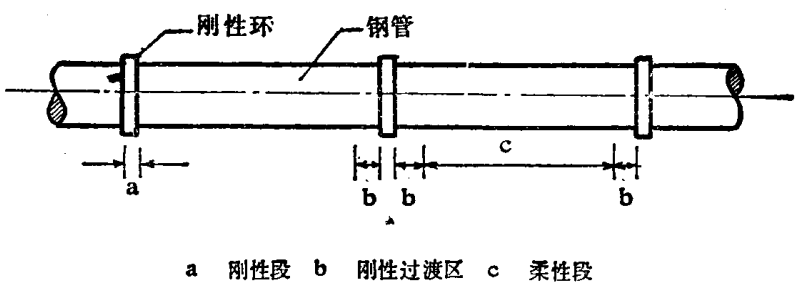


图 1—2 设置有刚性环的地下钢管，沿管轴线刚性划区示意图
E₀值较低的土壤里的刚性管，如果设法将E₀值提高到一定值，原来的刚性管也可以转化为柔性管。

这种由于内压力的撑涨，或由于填土压缩性的减小而造成管道刚性的转化，也正体现着管道与土壤间的相对刚度的变化过程。研究与利用这种管、土刚性的变化特点与规律，对如何减轻管顶垂直土压力，提前调动管侧土抗力，以达到提高管道的承载能力与节约钢材、水泥的目的。

3. 管顶垂直土压力沿管纵轴线呈鞍形分布：

研究管道刚度属性的目的，是为了分析沿管线纵轴方向的管顶垂直土压力分布形态。由实测及理论证明(详见第二章)：在刚性管管顶承受大于填土高度的土柱压力，而柔性管所承受的管顶垂直土压力将小于管上土柱重量。按此结论可知设置有刚性环的地下钢管，沿管线方向，其管顶垂直土压力分布在刚性环处（刚性管段）将大于管上土柱重量，在两环之间的柔性管段（柔性管）将小于管上土柱重量，统观全管线，其管顶垂直土压力分布呈波状起伏（图 1—3）。研究表明[48]：作用

在刚性管上的垂直土压力，沿管道水平直径方向呈上凸抛物线分布律；柔性管可近似取均布考虑，设计中为安全计，其垂直

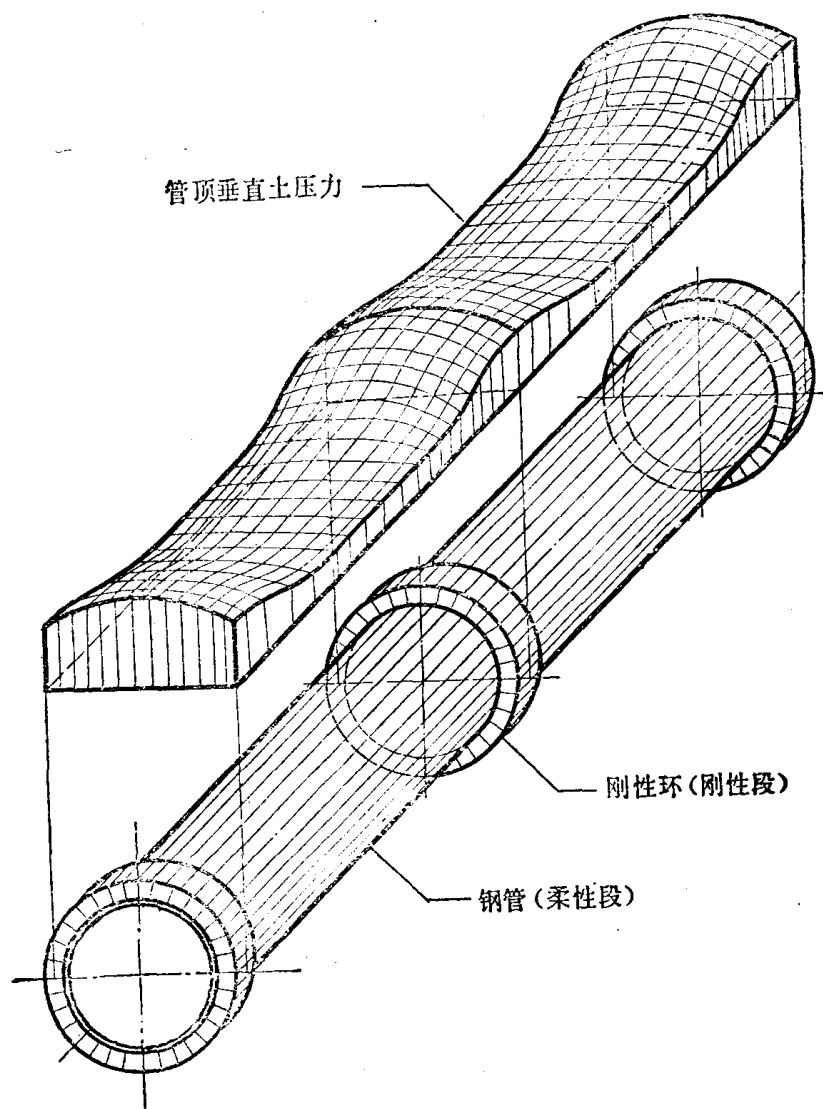


图 1-3 作用在设置有刚性环的钢管上的垂直土压力分布图

土压力，近似取管顶土柱的重量。按上述纵、横两个方向分析，管顶垂直土压力空间分布呈连续鞍形图象（图 1—3）。

研究表明，对于设环钢管，在刚性环处（刚性段）其水平侧压力取近似水平分布（图 1—4）；在两环之间的管段（柔性段），呈抛物线分布律（图 1—5）。同样沿管线方向其水平侧压力分布也呈波状起伏。

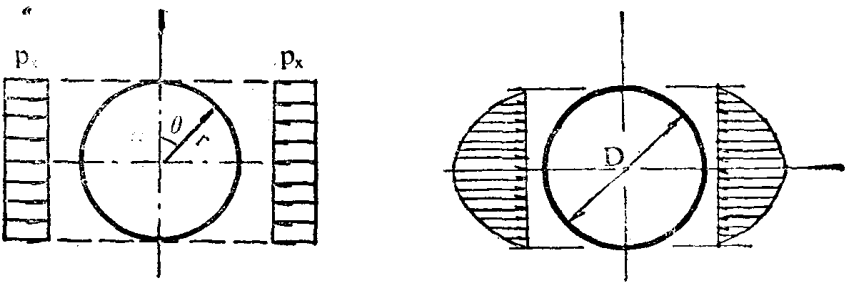


图 1—4 刚性管侧压力分布图 图 1—5 柔性管侧压力分布图

三、管道铺设原则与基础种类

如前简述地下管道的铺设方式可分为沟埋式、上埋式与隧道式三种（图 2—8）。

在窄槽内埋设的管道，称沟埋式；在平基或宽沟内铺设管道，并在一定范围内复土夯填，称上埋式；隧道式常见于顶管工程，当其管周土体稳定性较好时，按隧道法分析管周土压力，否则应按沟埋或上埋等法计算。

（一）沟槽开挖尺寸与管径关系（可参考表 1—1 使用）

表 1—1

管径D (mm)	< 1000	1000~2000	> 2000
b (cm)	600	700	800

注：表中b见图 1—6

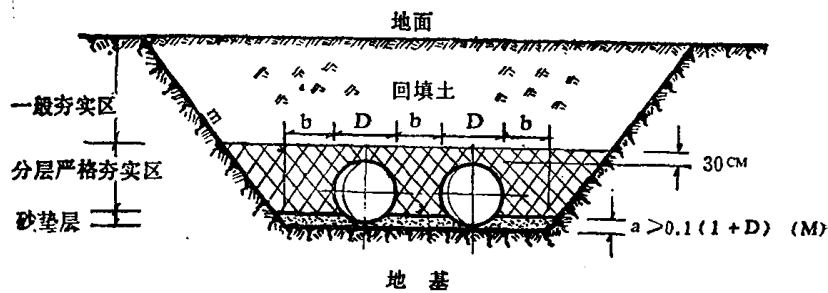


图 1—6

(二) 管顶最小填土高度

对于中、大口径的地下钢管，其最小埋深需要考虑：地面车辆轮子（或履带）压力，土壤冻结最小深度，此外尚需结合当地水文工程的经验确定。一般埋深应不小于80cm。

(三) 基础种类及地基处理

规定管道基础型式，其目的是使管子在规定铺设条件下，其管壁应力较合理，经济效果较好。

管基种类应由管下土壤种类、土壤承载能力及技术经济比较综合而定。

美国无论对于沟埋式或上埋式的铺管条件，分别规定有四种类型：

1. 沟埋式（图 1—7）：

(1) 不允许的管基(D级) 管底基础不适应管道底部外形及周围全用只有局部夯实的颗粒料回填。

(2) 常用的基床(C级) 管底基础注意使土槽形状适应管道底部外形，其宽度不小于管道外直径的50%。管道周围全部空间用颗粒料回填到管顶以上15cm。回填料用铁铲送料和铁铲