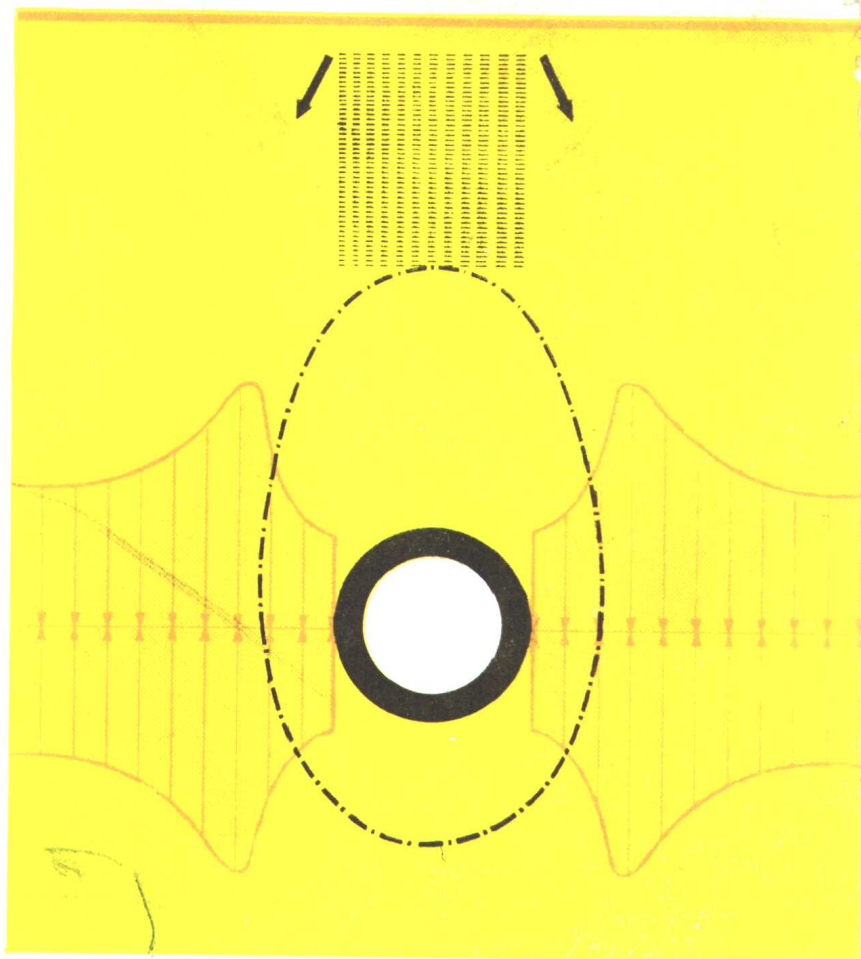




顶管工程

下 册

静力计算 设计 施工

[西德] 马 · 谢 尔 勒 著

漆平生 杨顺喜 李 周 译

中 国 建 筑 工 业 出 版 社

顶 管 工 程

下 册

静力计算 设计 施工

[西德] 马·谢尔勒 著

漆平生 杨顺喜 李周 译

中国建筑工程出版社

《顶管工程》分上下两册。上册从实践的角度全面介绍了最新顶管施工技术的各个细节，这种技术在各种条件下的具体应用以及施工设施、机具的配置与使用方法等内容。

下册从理论的角度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，作了细致的定性和定量分析，并且根据分析结果提出了相应的计算方法和设计准则。全面论述了顶进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领域中，从事管道工程设计和施工的技术人员，有关部门的科研和教学人员参考。

Dipl.-Ing. Max Scherle

Rohrvortrieb

Band 2

Statik Planung Ausführung

Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1977

* * *

顶 管 工 程
下 册

静力计算 设计 施工

漆平生 杨顺喜 李周 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

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：12³/₈ 字数：332千字

1983年4月第一版 1983年4月第一次印刷

印数：1—9,000册 定价：1.50元

统一书号：15040·4390

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，为了避免地下构筑物的障碍，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这种施工技术。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。国外每台班进尺可达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的研究。

本书是一部技术性和理论性很强的顶管施工专著。著者系统地总结了自己的多年技术实践和理论研究成果。本书出版以后受到国内外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，本书所介绍的技术比较新颖，立论也比较明晰。我们认为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局长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，谨请读者指正。

译者

一九八二年五月

目 录

3.顶进管的荷载与规格设计	1
3-1 顶进管在横跨管轴方向上的荷载	1
3-1-1 地面施工的计算方法	2
3-1-2 关于土压过程的探讨	3
3-1-2-1 未扰动土层中的应力状态	4
3-1-2-2 已扰动土层中的应力状态	9
3-1-3 顶管施工中的相应土压力过程	12
3-1-4 横跨管轴的各种内力的计算	25
3-1-4-1 各种荷载状态	25
3-1-4-2 各种支承状态	29
3-1-4-3 内力数值计算表	33
3-1-5 外部水位对内力的影响	46
3-1-6 内部水位对内力的影响	50
3-1-7 外部与内部水位的叠加	51
3-1-8 压缩空气对内力的影响	52
3-1-9 时间对内力的影响	54
3-2 顶进管的轴向荷载	58
3-2-1 当纵向力偏心着力时怎样计算顶进管上的应力	59
3-2-2 作为静力单元的木垫环	93
3-3 横跨管轴的与管轴方向上的荷载所引起的应力的叠加	109
3-3-1 顶进管的双向应力状态	112
3-3-1-1 管子两端的双向应力状态	112
3-3-1-2 管子中部的双向应力状态	113
3-3-2 关于双向应力状态的研究	114
3-3-2-1 关于双向应力状态的一般性讨论	116
3-3-2-2 混凝土在双向应力状态下的特性	120
3-3-2-3 石棉水泥在双向应力状态下的特性	124
3-4 波动荷载	126
3-4-1 关于“波动疲劳极限”的一般性观察	128
3-4-2 顶进管的波动疲劳极限	135

3-4-2-1	钢筋混凝土顶进管的波动疲劳极限	135
3-4-2-2	石棉水泥顶进管的波动疲劳极限	159
3-5	波动荷载下的双向应力状态	170
3-6	波动荷载双向应力状态下的应力验算	172
3-6-1	钢筋混凝土管的应力验算	180
3-6-2	石棉水泥顶进管的应力验算	216
3-7	纵向力偏心度的极限	222
3-8	顶进管荷载的特殊状态	227
3-9	缺口作用引起的应力集中现象	241
3-10	中压站管子的应力验算	247
3-11	中压站均压环上的应力验算	253
3-12	主顶压站分压环上的应力计算	261
4.	顶管工程的设计、招标和施工	263
4-1	顶管工程的设计	263
4-2	顶管工程的招标	278
4-2-1	地区条件的介绍	278
4-2-2	招标项目清单的编制	291
4-2-2-1	工地设备	292
4-2-2-2	技术劳务	294
4-2-2-3	顶压坑和连接坑	295
4-2-2-4	顶进管的购置	300
4-2-2-5	推顶	303
4-2-2-6	降低地下水位措施	308
4-2-2-7	压缩空气的生产	315
4-2-2-8	排障停顿时间	323
4-2-2-9	补充项目	325
4-3	委托人、承包人以及制管厂商之间的相互关系	326
4-4	期限和违约罚款	329
4-5	顶管工程的施工	331
4-5-1	管长的影响	331
4-5-2	顶压坑的装备	334
4-5-3	顶进管路的起顶	335
4-5-4	推顶	336

4-5-5 顶进管路线的测量	337
4-5-6 推顶的中断	340
4-5-7 在充气顶管施工中怎样降低空气耗量	344
4-5-8 铁路下的顶管施工	348
4-5-9 水域下的顶管施工	362
5. 顶管施工的工程缺陷和工程损害	365
5-1 顶管施工中的工程缺陷	366
5-1-1 推顶之前即已存在于材料上的缺陷	366
5-1-2 通过推顶而出现在材料上的缺陷	372
5-1-3 顶管施工的缺陷	376
5-1-4 辅助工作和扫尾工作的缺陷	379
5-1-5 结论	380
5-2 顶管施工造成的损害	381
6. 结束语	387
参考文献	388

3. 顶进管的荷载与规格设计

在业已敷设完毕之后，顶入的管子与地面埋入的管子便没有多大区别。地面埋设的管子所承受的荷载有：

管子自重；土荷载；交通荷载；管内水压；管外水压；固定附加荷载（例如建筑物荷载），以及临时附加荷载。所有这些荷载都按照横跨管轴的方向起作用。

顶进管在横跨管轴的方向上承受的荷载则有：

管子自重；土荷载；交通荷载；管内水压；管外水压；充气顶管时的内部空气压力；强制力；固定附加荷载（例如建筑物荷载），以及临时附加荷载。

此外，顶进管被顶入时在管轴方向上受到的荷载还有：

推顶力；充气顶管时的空气压力；控制力，以及强制力。

3-1 顶进管在横跨管轴方向上的荷载

管路的敷设无论采用哪种施工方式，横跨管轴的荷载在表面形式上皆有相似之处，所以顶进管承载能力的计算，大多仍沿用地面埋设管子的荷载与尺寸规格计算方法。但由于这种计算方法只考虑横跨管轴的荷载，因而便把顶管时通过管轴方向上的荷载产生的应力分开来计算。

然而，尽管在埋置状态下有着表面形式上的相似性，但顶进管毕竟由于敷设方法的不同而与地面埋入的管子有着很大的区别。由此而产生的问题便是，为地面埋设的管子所规定的荷载计算与尺寸设计法则是否也适用顶进管。

3-1-1 地面施工的计算方法

对于以地面施工方式敷设的管子，是按照开沟条件和堆堤条件进行计算的。

按照开沟条件进行计算时，所根据的原理是，在管道敷设与管沟回填完毕之后，沟壁与回填土之间会产生剪力作用，从而把沟中回填土的一部分重量传递到管沟两旁未经扰动的土层中去，于是导致减轻管子的荷载（图101a）。

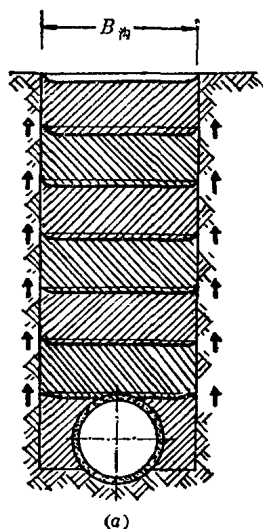


图 101(a) 直壁管沟中的沉降过程

因此，开沟条件的前提便是：

a) 必须开有一条管沟。

b) 回填土与相邻土层之间必须存在滑动面。

c) 两旁的土层无论在挖沟或是回填时皆未遭到扰动。

d) 两旁土层和沟中回填土之间需有一个相对运动，即使数量为无穷小也罢，方能按照詹森的筒仓理论形成起减载作用的剪力，而且根据施潘格勒的论证，只要存在运动的倾向，即足以产生出这种微量的相对运动。

按照堆堤条件进行计算时，所根据的原理是，由于垒堤时堆起的泥土（图101b）以及斜坡管沟或很宽的管沟中回填的泥土（图101c）在管子上方及其两旁的沉降度有所不同，故而产生了起加载作用的剪力。

顶进管的敷设与堆堤条件下的管子埋设毫无相似之处。因此在计算顶进管承载能力时，无须考虑堆堤条件。

顶进管的敷设同样也并不符合应用开沟条件的前提。因此，应用开沟条件计算顶进管的荷载并不能得出切合实际的结果。在最常用的计算方式中，是以一条宽度与管子外径相等的假设管沟

为依据，这样得出的荷载值一般偏于过小。所以，在顶进管承载能力的计算中，也必须将开沟条件排除在外。

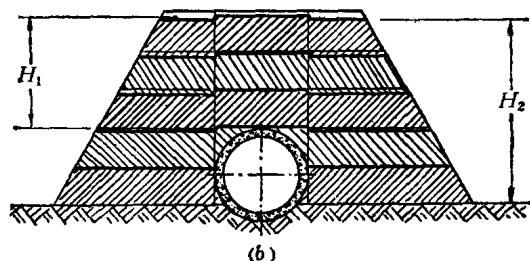


图 101(b) 土堤中的沉降过程

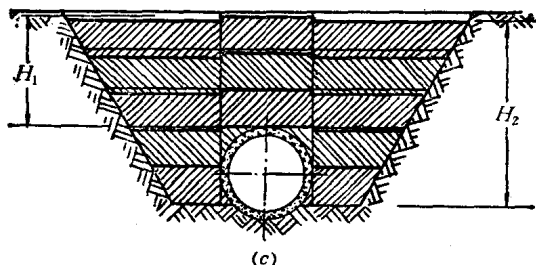


图 101(c) 斜坡管沟中的沉降过程

3-1-2 关于土压过程的探讨

顶进管的敷设是一种地下施工的方法，因而与矿山掘进的方法很为相似。所以，计算顶进管荷载与尺寸规格的法则，只能根据隧洞与坑道的静力计算理论来推导。当然，也要充分考虑到顶管施工和隧道掘进之间在方法上的根本差异性。

隧道一般是在衬板或者盾构的保护下就地建成，位置不再挪动。

对于顶进管，则是在一段或长或短的距离上借助一个很大的推力来克服所有各种阻力，从而将它压入土层中去。因此，顶进管在敷设过程中总是既要在横跨管轴的方向上承受荷载，也要在管轴本身的方向上承受荷载。

3-1-2-1 未扰动土层中的应力状态

在未经扰动的土层中，每一个土体单元都承受着垂直力 $p_{\text{直}}$ 造成的荷载，同时又有一个同等大小的反作用力 $p'_{\text{直}}$ 与之互相抵消。与垂直力 $p_{\text{直}}$ 和 $p'_{\text{直}}$ （图102）同时存在的有两个水平分力 $p_{\text{平}}$ 和 $p'_{\text{平}}$ ，

其大小与 $p_{\text{直}}$ 和 $p'_{\text{直}}$ 之间存在一个既定的、取决于土壤性质的比率。

于是便有 $p_{\text{直}}=p'_{\text{直}}=\Delta F \cdot \gamma \cdot H$

$$p_{\text{平}}=p'_{\text{平}}=\lambda \cdot p_{\text{直}}=\lambda \cdot \Delta F \cdot \gamma \cdot H$$

式中 ΔF =土体单元的面积；

γ =土体容重；

H =复土高度；

λ =静止土压力系数。

如果我们设想在任意深度 H

上有一个水平截面（图103a），

于是在这一平面的每个面积单元

ΔF 上都有一个垂直力 $p_{\text{直}}=\Delta F \cdot$

$\gamma \cdot H$ 在起作用，同时又有一个同等大小的作用力 $p'_{\text{直}}$ 与之抵消。

如果我们从假想的平面上截取一部分面积 F ，那么对于这一

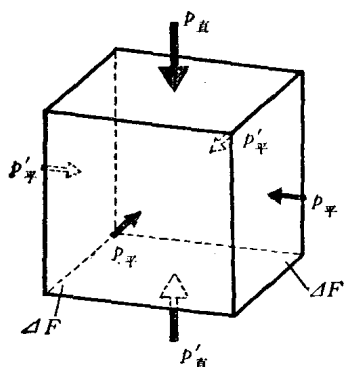


图 102 作用于一个土体单元上的土压力

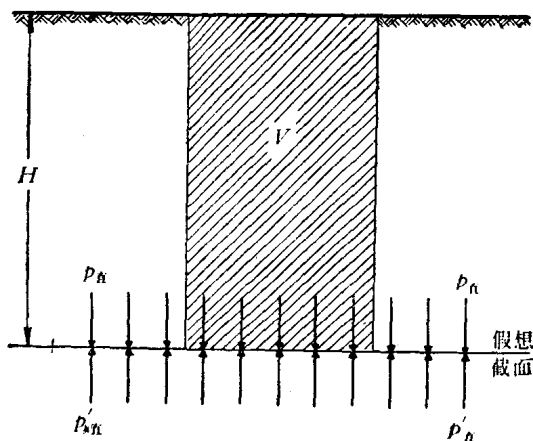


图 103 a 作用在一个水平截面上的土压力

平面上存在的土体来说,其体积便是 $V=F \cdot H$,重量则是 $G=F \cdot \gamma \cdot H$ 。设 $\Delta F=1$,则 $G=F \cdot p_{\text{土}}$ 。由于每一个 $p_{\text{土}}$ 都有一个同等大小的反作用力 $p'_{\text{土}}$ 与之抵消,所以对于面积为 F 的土体也有一个反作用力 $P=F \cdot p'_{\text{土}}=F \cdot \gamma \cdot H$ 在相反的方向上起作用。因为 $P=G$,所以便是对这一面积起作用的反力承受着这一面积上的土体重量。

在假想垂直截面(图103b)的每一个面积单元 ΔF 上,都有一个水平力 $p_{\text{平}}=\lambda \cdot p_{\text{土}}=\lambda \cdot \Delta F \cdot \gamma \cdot H$ 在起作用,与之相对起作用的则是一个同等大小的反力 $p'_{\text{平}}$ 。其中 $p_{\text{平}}$ 和 $p'_{\text{平}}$ 都与深度 H 成正比。

如果我们现在用一个假想的环形弯曲截面来代替水平和垂直截面,那么处在这一截面环绕之中的便是一个圆柱体(图104)。在这样假想的圆柱体的圆周上,对每一个土体单元也有两个力 $p_{\text{土}}$ 和 $p_{\text{平}}$ 在起作用,其中 $p_{\text{平}}=p_{\text{土}} \cdot \lambda$ 。相应于每一个 $p_{\text{土}}$,又有一个大小相等的反作用力 $p'_{\text{土}}$ 由假想圆柱体内部与之抗衡,相应于每一个 $p_{\text{平}}$,同样也有一个 $p'_{\text{平}}$ 与之抗衡。所有这些成对的应力 $p_{\text{土}}$ 和 $p'_{\text{土}}$ 以及 $p_{\text{平}}$ 和 $p'_{\text{平}}$ 都是平衡的。这样,假想的圆柱体便也处在与其周围土层互相平衡的状态下(图105)。

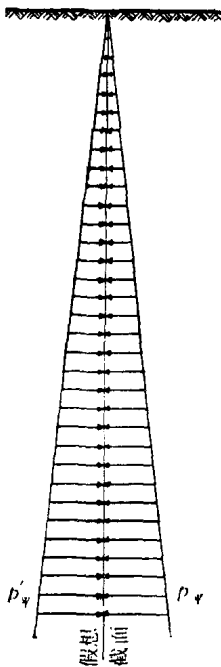


图 103b 作用在一个垂直截面上的土压力

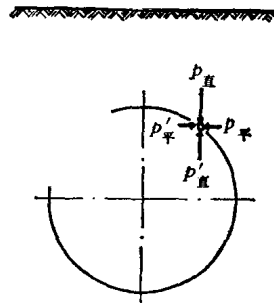


图 104 作用在一个环形截面上的土压力

但如果在一个无限短的时间内将这一假想的圆柱体取出而不加以任何填充，与此同时并不扰动周围的土层，那么全部反作用力 p'_H 便都不存在了（图107）。

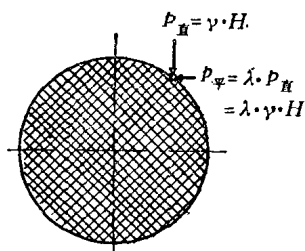


图 105 作用在一个水平圆柱体上的土压力

于是平衡状态突然遭到破坏，原来由假想圆柱体承托的体积为 V 的土体，如果不用其它方式来支承它的重量，便必然会由于重力作用而立即坍落下来。

这时则是两旁的土层借助剪力来起到了支承土体重量的作用（图108）。在这种情况下，每一个受到剪应力荷载的土体单元，都支靠在旁边的土体单元上，与此同时又引起新的剪力（图109）。于是所有毗邻的土层区域都被牵涉在支承土体的作用之中。

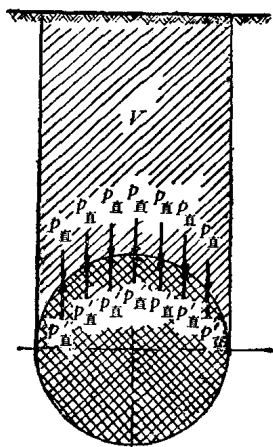


图 106 圆柱体承托着其上的土体

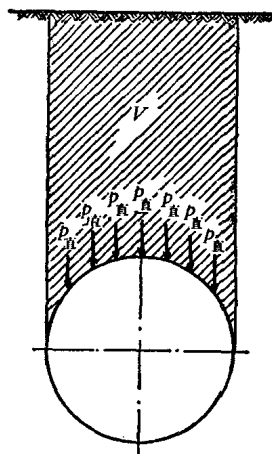


图 107 承托其上土体的圆柱体已被取出

剪应力将与作用在土层中的垂直应力 p_H 叠加在一起，也就是说剪应力会使垂直应力增大起来。由于剪应力在直接靠近取走的圆柱体之处最大，因此这里就形成垂直应力 p_H 集中的现象。

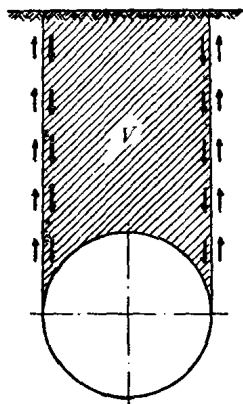


图 108 土体将其重量
传递给两旁的土层

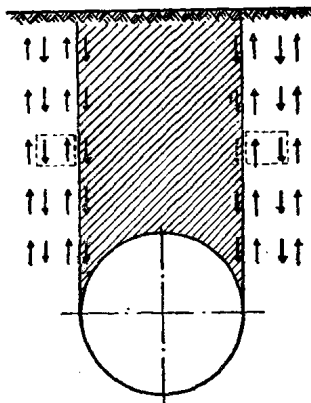


图 109 两旁土层承
受着土体的重量

随着距离加大,剪应力逐渐降低,于是垂直应力的升高量也以同样尺度降低下来(图110)。垂直应力的曲线相应于一个指数函数。其绝对高度和弯曲形状取决于取出的圆柱体的直径、覆盖土层的高度、土壤的性质,而且特别是取决于土壤的抗剪强度和时

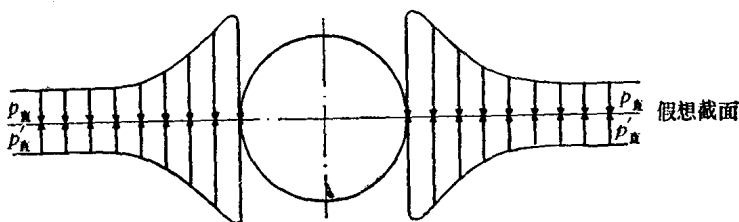


图 110 圆柱体取出之后水平截面上的土压力集中现象

土层传递剪力的能力愈强,也就是说,土层的抗剪强度愈高,荷载峰值便也愈高,而且对垂直应力 p_z 及其伴生反作用力 p'_z 的曲线来说,下降斜度便也愈陡。

土层的沉降,使得被取出的圆柱体直接近处的剪应力减弱,同时并使这一剪应力从原有的通路上向两侧移动。因此,土层沉

降的结果，就使垂直应力曲线愈来愈平缓，同时也使应力峰值愈来愈低。

由于沉降过程总是随着时间的推移而不断地发展，而沉降的速度则决定于土壤的性质，所以，随着土层状况的变化和时间的推移，垂直应力的曲线便逐渐趋于低平（图111）。

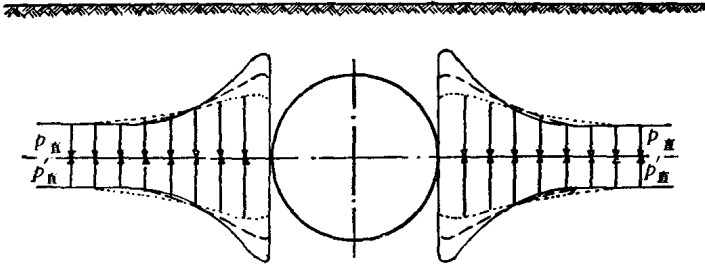


图 111 土压力的集中度相随时间推移而逐渐衰退

由于垂直应力在抽走的圆柱体两侧有所增高，故而毗邻的土层在很大程度上受到压缩，致使抽走圆柱体时呈圆形的截面变成了近似于椭圆的形状（图112）。

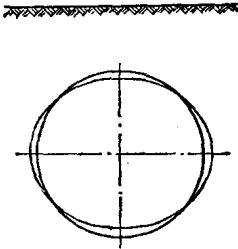


图 112 圆柱形空腔在土荷载下的变形

由于取出圆柱体而升高起来的垂直应力 p_k 和 p'_k ，导致水平应力 p_{π} 也以同样比率增大（图113）。因此便形成了一个新的平衡状态。取出圆柱体后所产生的空腔，只要其内表面不再破裂，便得以借助土层的协同支承作用一直保持下去。

未扰动的土层承受荷载后，根据时间的长短可导致如下结果：

a) 如果圆柱体取走之后形成的空腔，在无限短的时间内即用一个新的刚性无限大的物体来填满，便会有一个与抽掉的土体上同样大小的力，作用在这个新的物体上（图105）。

b) 如果圆柱体取出之后形成的空腔，经过无限长的时间后，用一个新的物体来填满，便不会再有任何力作用到这个新的物体上。

c) 但实际上并不存在任何刚性无限大的物体。任何物体在荷载下都会变形。因此，即使在无限短的时间内填入的物体，由于周围土层作用于它的荷载也会发生变形，这就是说，它的体积将要缩小。而土层则将以同样的程度发生膨胀，并通过由此引起的剪力将一部分荷载传递给相邻的土层。

替代物体和周围土层将共同构成一个超静定组合系统。

d) 实际上并不存在任何无限短的时间。因此，在替代物体填入之前，总会由周围土层起到部分的承载作用。这一部分荷载在替代物体与周围土层结合起来起作用时应从替代物体的荷载中减去。

e) 实际上并不存在任何无限长的时间，所以，假想圆柱体取出后的荷载，在替代物体置入之前全部由周围土层承受下来也是不可能的。

3-1-2-2 已扰动土层中的应力状态

以上论述的前提是，在取走圆柱体和将替代物体填入土层中时，土层并未遭到扰动。但取走圆柱形土体而完全不扰动周围土层是不可能的。取走圆柱体时总要或多或少地擦松土层，直接靠近圆柱体的地方擦松得最厉害，随着与圆柱体之间距离的加大，擦松程度逐渐减轻，直至等于零。

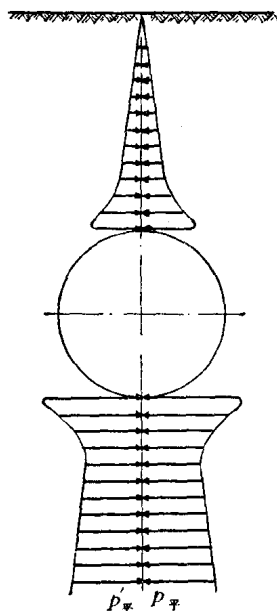


图 113 圆柱体抽去后垂直截面上的土压力集中状况

再者，置入替代物体时，周围的土层受到扰动也是不可避免的。

取走圆柱体时和置入替代物体时的两次扰动合在一起，共同对土层的应力状态和替代物体的荷载产生影响。

为了分析有一部分是同时发生，而又有的一部分是先后发生的过程，我们首先假想，在取走圆柱体之前，先从土层中抽出一定体积的土壤（图114）。

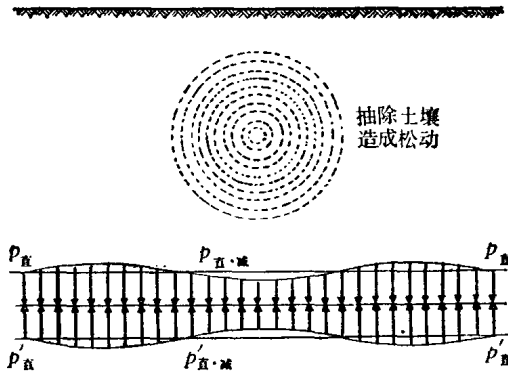


图 114 由于土层松动而造成土压力在水平截面上的变化

由于抽除土壤而引起的松动，使土层承受应力的能力降低了。在松动区中，

$$p_{\text{土}} = \gamma \cdot H \text{ 减小到}$$

$$p_{\text{土} \cdot \text{减}} = \zeta \cdot \gamma \cdot H$$

式中 ζ 是一个缩减系数。

正如假想的圆柱体完全取走时的情况一样，松动区中失掉的荷载量也被转移给了相邻的土层。这样便在松动区的两侧形成较高的应力（图115）。

如果现在从已松动的区域中取走一个假想的圆柱体，那么这个区域中承受的荷载就成为零。这里失掉的荷载量，正象未经扰动的土层中一样，也需要通过剪应力的作用由相邻的土层来承受。这样，松动区又再次被压实（图116）。