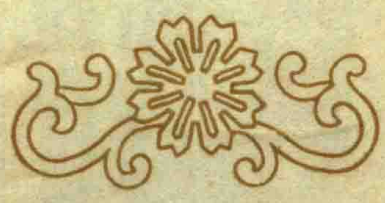


891083
RMT
14

1963^本年铁路科学技术论文报告会文集

第 14 辑

隧 道



1963年铁路科学技术论文报告会文集

第 14 輯

隧 道

桥梁隧道专业会议学术委员会选编

人 民 铁 道 出 版 社

1964年·北京

1963年铁路科学技术论文报告会文集
第 14 輯

隧 道

桥梁隧道专业会议学术委员会选编

人民铁道出版社出版、发行

(北京市霞公府甲24号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 010 号

人民铁道出版社印刷厂印

书号1972 开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张 $9 \frac{3}{4}$ 插页2 字数227千

1 9 6 4 年12月第 1 版

1 9 6 4 年12月第 1 版第 1 次印刷

印数 0001—920 册 定价(科六) 1.30 元

目 录

论地下结构物计算理论的演变及研究方向	1
圆形隧道衬砌的计算	13
带仰拱马蹄形隧道衬砌的应力分析	25
隧道仰拱计算方法的商榷	47
用差分法计算弹性地基梁的分析	60
再论浅隧道山体压力的计算	96
地层压力现场实地研究的若干结果	102
隧道施工中地层压力的观测和处理	114
隧道上下导坑先拱后墙施工法对混凝土拱圈产生裂纹的探讨	128
蒸汽牵引铁路隧道运营通风中存在的二个主要问题	137

論地下結構物計算理論的 演變及研究方向

唐山鐵道學院 高渠清

內容提要

地下結構物指的是埋置在地層中的結構物。它的計算理論，在發展的不同時期里，受建築材料的強度性能及工程施工工藝等條件的影響。因為這些條件，在不同程度上決定了結構物的剛度範圍、構造特點等計算理論的基本根據。

與地面結構物比較，地下結構物受力作用及破壞過程具有明顯的特點：埋置地層不同荷載的分布特徵及數值也很不同；結構物向地層的彈性變形，使結構物的周邊，有着不同程度的與地層間的相互作用；結構物的受力破壞，具有比較複雜的內力及抗力的調整過程。

到現階段人們能夠基本上掌握地下結構物承受的荷載分布規律及結構與地層間的相互作用情況，並對各種受力條件的地下結構物的計算圖式作出建議，是通過比較長時間的生產實踐及理論總結，才得以實現的。關於地下結構物的破壞過程的分析，我們所累積的資料還很有限。

確定動荷載作用下地下結構物的作用情況，是一個新的研究課題，由於抗爆工程發展的要求，近幾年來在計算理論方面有了一定的發展。

本文試圖對在不同時期里的地下結構物計算理論及其演變作一個概括的敘述及分析，並提出今后的研究方向。

地下結構物的計算理論，是隨着地面結構物的計算理論的發展而向前發展的。實際上在一定時期里地下結構物僅作為一定型式的地面結構物（支撐在邊牆上的拱圈）來分析的。僅經過一段比較長時期的生產實踐，人們才逐步了解到地下結構物的作用特點，而把它與地面結構物分開來作為一種受力情況不同的結構物進行分析。從發展過程看，地下結構物計算理論的基礎主要建築在以下兩方面的條件上：第一方面是在不同的時期里，地下結構物的施工技術及所採用的材料性能條件決定了結構物的構造特點。第二方面是人們對處在地層中的地下結構物承載和受力情況的了解。我們將在以下敘述中提到在不同時期中，地面結構物計算理論發展的主要方向及其與地下結構物計算理論發展的關係及上述兩方面條件影響地下結構物計算理論內容的情況。

（一）磚石圬土砌築的重型地下結構物——壓力線理論的發展及應用。

19世紀是結構物計算理論逐步形成的時期，在這時期的地面及地下工程中廣泛採用磚石砌築的拱形圬工建築物。所採用材料的抗拉強度很低。結構物具有明顯的接縫。當內力偏距超出一定範圍時截面即產生裂縫。為了維持結構的穩定，構件剛度就要定得很大，相應地結構的彈性變形就很小。根據這些特點，及對這種類型結構物作用情況的實地觀測及理論研究，在19世紀初埃握（Atwood）波依斯達（Boistard）拉維爾（Navier）等對拱形塊體圬工結構的工作情況，作出了理論分析的建議。到19世紀中葉經過斯耐爾（Snell），蘭金（Rankine）庫倫（Coulomb）等的發展逐步形成了分析拱形圬工結構的壓力線理論。

理论的中心内容是假设拱圈系由刚块组成的固端拱，并按静力平衡条件决定圬工结构承载时的压力线。结构承载时的压力线位置决定后，作用在构件各截面上内力合力的大小，方向及其作用点均可决定。

问题的性质是超静定的。许多作者发现，仅从静力平衡条件出发，可以得到无限多的解答。但由物理现象解答单一性，在一定的荷载分布特征及拱圈形状条件下，只可能有一条压力线满足该结构的静力平衡及变形条件。所以许多研究工作者均致力于如何决定真实压力线的研究。

减少可能解答数目的途径是采用结构承载能力的极限状态作为计算基础。许多作者假设拱形结构破坏前在三个截面上开裂（拱顶及两边拱脚）即为了维持结构的平衡，压力线一定要通过三处截面上的指定点。很明显这个假设也只能将我们的解答限制在拱身截面一定区域内。由于我们可能选择不同的开裂截面的位置及其受力状态，拱身压力线仍可能得到多数解答。

提出进一步决定真实压力线位置的条件根据是必要的。例如库伦（Coulomb）温克列尔（Winkler）等，对此均作出了建议。沿用较广的是卡氏（Castigliano）的假设，认为由砖石圬工组成的结构，在接缝未开展前可按连续弹性结构分析。

根据上述作者的建议，我们可以对拱身压力线的位置作出较为明确的估计，但是从不同理论假设所得出的内力值是不同的，对安全度作出的估计也是不同的。采用上述计算方法还忽略了材料塑性性质对截面内力分布的影响，和基础变位结构弹性变形及由此两个原因所引起的地层弹性抗力对结构受力的影响。因而所决定的内力值，在某些控制截面是加大了，而在另一些截面是减小了。

总之，根据压力线理论计算的结果具有不确定性，但是在一定时期里，仍得到广泛的应用。

不同的工作者对计算方法提出改进建议：例如，康米列利（Kommerelli）作了考虑作用在边墙上弹性抗力的建议，他认为在主动水平力作用下边墙可以自由转动，抗力沿墙背按直线图形分布，抗力大小按边墙转动及静力平衡条件决定。

根据压力线理论计算地下结构物构件截面尺寸时必须与已有结构物进行比较。曾经有过对混凝土衬砌的经验公式：当隧道直径每增加一呎时，衬砌墙厚必须增加一时（最小厚度在软地层中应为8时在硬地层中为6吋）。

在这个时期中我们虽然对拱形圬工建筑物的作用情况，以及地下结构物的作用特点还理解得很不够，但仍成功地修建了许多长度及直径均较大的地下结构物，例如圣哥达（St. Gothard）1872~1882；圣尼斯（Mt. Cenis）1871，龙科（Ronco）1882~1888，胡萨（Hoosac）1854~1876，塞文（Severn）1877~1886等均成功地采用砖砌圬工修建的衬砌。亚伯（Arlberg）~1885，辛普伦第一线（Simplon I）1895~1906及大兴安岭隧道等。均成功地采用石砌圬工修建的衬砌。

（二）整体砌筑的连续弹性系统结构——按弹性系统（允许应力）计算方法的采用。

19世纪设计实践证明，由于对建筑材料性能掌握得不够，结构理论很难沿着按极限平衡状态设计的方向发展。建筑材料强度的提高，混凝土的逐渐被采用，使结构物具有较好的整体性。这些条件促使按极限平衡算法被逐步地抛弃，并为按弹性系统（允许应力）的计算方法所代替。到19世纪末这个过渡已建本完成。结构理论领域中的这个发展也被引用到地下结构物计算理论中去。

按弹性系统的计算法，对各种类型的结构物的设计具有普遍意义，在此时期中地下结构物除采用各种类型的砖石圻工建筑外，混凝土开始被采用，例如：在此时期修建的亚平宁（Appenine）1920~1931，亚塞（Artherpass）1908~1923，丹那1918~1933等长隧道均采用混凝土衬砌。在地下铁道及水底隧道中采用了金属衬砌（伦敦地下铁道1886~1890，圣克来水底隧道，1884~1890，黑牆水底隧道1892~1897等）。混凝土结构及用螺栓连接的铸铁管片圆形衬砌所具有的比较完整的连续性，更加强了地下结构物按弹性结构进行计算的概念。但在这个时期中按压力线的计算方法仍广泛被采用。

应用最小功原理按超静定连续弹性体系来解地下结构，在力学上并不存在什么困难。

按自由变形弹性系统的计算方法，不能全面的反映地下结构物的真实作用情况。衬砌结构的变形特征为：在垂直荷载作用下，衬砌顶部下垂，脱离地层形成脱离区，由于拱脚推力的作用，结构两侧向地层挤压形成抗力区，这种结构与地层间的相互作用大大加强了结构的抵抗外载的能力，所以在计算理论中不考虑结构与地层间的相互作用是不合理的。

实践证明，由于外形不同，刚度分布不同，也使各种类型衬砌具有比较明显的不同作用特点，进一步计算方法的发展也必须估计到各种类型地下结构物作用的这些特点。

（1）重型边牆弹性拱圈地下结构物

20世纪初罗札诺夫（Розанов）在前人工作的基础上对具有实体边牆的衬砌，提出了考虑侧向抗力的计算法。罗札诺夫假设拱圈系两端固定，边牆为单独作用的刚性结构，这个假设显然与按连续弹性体系计算的基本原则相矛盾。

1936年达维多夫在总结前人理论的基础上，提出了按考虑地层抗力的实体边牆计算法。对地层应力与应变的关系，引用了温氏假定。达维多夫的这个建议在可能范围内考虑了影响衬砌受力的主要因素，因而现在仍被广泛采用以计算实体边牆的衬砌。

1935年苏联地下铁道设计院，广泛采用了对刚性边牆衬砌考虑弹性抗力的计算法，在此以后，别朱霍夫（Безухов）对具有刚性牆的衬砌作了详细的分析，包括边牆底面出现拉应力，侧面抗力达到土壤的极限承载力，边牆底部土中应力超出极限承载力等情况时地下结构的受力情况。

经过以上作者的研究，对具有实体边牆的衬砌已有了比较明确的计算方法，但是理论分析及实验工作均证明对地层受力变形采用温氏假定，具有明显的不合理性。所以许多地下结构物的理论工作者都力求摆脱采用局部变形理论作为计算地层受力变形关系的根据。

1939年达维多夫在1935年的建议基础上提出了应用共同变形理论以计算实体边牆衬砌的方法，建议包括以下几个要点：在考虑衬砌所承受的荷载时，他认为作用在衬砌边牆上的土压力为地层的重力水平分力，这个水平分力在一般地层特征数值范围内要比主动极限值大得多。衬砌边牆考虑为位在弹性无限体的角形缺口中。达维多夫建议用两个弹性层（垂直的与水平的）来代替弹性无限体。采用链杆来代替边牆与弹性层间的相互作用。在计算链杆推力在弹性层上所产生的下沉值时，达氏考虑了各个链杆推力所产生下沉的相互影响，这样就在一定程度上摆脱了温氏假定的不合理性。以链杆代替衬砌与地层间的相互作用就使衬砌结构成为一个多次超静定（多支撑）的连续弹性体系。

达维多夫在他的著作中，对具有刚性牆及弹性牆（考虑边牆的弹性变形）的大跨度衬砌作了详尽的分析。由于设计工作者们对达维多夫所采用的土压力值持有异议及方法本身计算步骤的繁复程度，这个新建议没有得到广泛的采用。

已建的实体边牆地下结构，例如：巴黎地下铁道的单拱式车站系由石料拱圈混凝土边牆

修成的重型边牆结构；莫斯科地下铁道第一期所修建的单拱式车站结构系由混凝土修成；日本大阪等都市的地下铁道单拱式车站系钢筋混凝土结构；许多双线及多线山岭铁路隧道及公路隧道亦多修成为单跨重型边牆的结构。

(2) 均匀刚度，马蹄形地下结构物

在结构物的跨度与高度比值较小，及中等和小跨度的地下结构物中，即可采用等厚或比较均匀变厚度的衬砌结构。在建筑材料强度提高及钢筋混凝土被采用于地下结构中的情况下，这种型的结构更显得合理，这种类型衬砌的特点是具有完整的连续性，结构刚度较小，弹性变形较大，因此与地层间的相互作用较为紧密。针对这些特点，朱拉波夫——布加耶娃对无压水工隧道曲线边牆马蹄形衬砌的计算方法，拉乌莫夫对垂直边牆马蹄形衬砌的计算方法作出了建议。建议是根据这一类型衬砌的变形特点来拟定的，虽然在不同程度上均付有假设条件，但实践证明，这些方法能较真实地反映此种类型地下结构物的作用情况。

在英美文献中对此种类型衬砌多建议作为自由变形结构进行计算，例如斯坦利(Stanly)等人的建议即属此类型。

我国解放后成功地采用了布——朱及纳乌莫夫等方法以设计铁路单线隧道马蹄形衬砌结构。根据地层强度的不同，铁道部专业设计院标准设计处曾作出了成套的定型设计图，并曾被广泛采用于新建的铁路隧道中。在意大利、德国、日本等国家，单线铁路隧道中亦几乎一致地采用此种类型的结构，德国地下铁道的区间隧道亦曾采用此种类型的结构。

(3) 等刚度及变刚度圆形衬砌

圆形衬砌的计算方法，是根据它的构造及作用特点拟定的，由铸铁、钢、混凝土、钢筋混凝土等材料修成的圆形衬砌结构，具有比较好的连续性，所以在受力的一定阶段可以考虑作为弹性结构进行计算。

按自由变形结构的算法，曾较长期地被采用以计算圆形衬砌，但实践证明，仅只在淤泥流砂中，这种算法才能反映它的真实受力情况。在具有一定抗剪强度的地层中，不同程度地存在着地层与衬砌间的相互作用。第一个提出对圆衬砌考虑弹性抗力的是惠特(Hewett)，他根据圆衬砌水平直径处位移等于零的条件来计算地层给予衬砌的抗力。这个建议的缺点，在于不正确地考虑了衬砌变形情况。

1936年苏联工程师波德洛夫及哥里列克根据苏联地下铁道实践的经验，应用温氏假设以三角级数来表示衬砌的径向位移值，并应用最小功能原理来确定级数各项的系数，由于计算步骤比较繁复这个方法未得推广应用。

1939年波德洛夫及马捷里，提出大家所熟知的按链杆法计算衬砌的方法。在链杆法中以刚性链杆代替衬砌结构与地层间的直接接触作用，这些链杆安设在产生抗力的区域内，地层受力与变形的关系按温氏假定。

苏联地下铁道设计院曾根据链杆法对承受各种单位均布荷载的圆形衬砌作出图解。根据这些图解可推算各种材料的圆形衬砌的控制截面内力。从这个图解所得到的计算数字可作为初步设计的根据。

1944年在美国安德斯——布尔提出了对圆衬砌合理考虑弹性抗力的建议。他的建议曾引起了广泛的讨论。布尔在决定抗力时采用了这样的步骤：决定在不同位置的单位集中力作用下沿圆环各等分点的径向位移（此时假设衬砌在最低点的位置固定）采用叠加原理，可求得在任何组合的集中荷载下，沿衬砌各等分点的径向位移值。各等分点对地层的位移还应包括衬砌作为一个刚体沿垂直方向向下移动时所产生的位移值。上述两部分位移代数和应当等于

相应点的地层的沉陷值。

根据每等分点衬砌位移值与地层沉陷值相等的条件及作用于衬砌上垂直力平衡的条件可决定出各等分点的弹性抗力。

根据上述步骤求出的各点抗力值与由链杆法求出者具有相同的准确度。

在上述方法的基础上布尔对各种不同刚度的圆形衬砌作了比较分析。

埃梅利安诺夫 (Л. М. Емсельянов) 所提出的对柔性圆管的计算方法, 也可引用以计算圆形地下结构。以三角级数来表示作用在圆管周围的径向及切线方向外力, 并根据柔性管受挠的内力及位移微分方程, 可求出在均布的垂直及水平荷载作用下管壁内力的公式, 一般地说管壁内力可以等于在主动力作用下所发生的内力乘以一个比单位值小的系数。埃氏曾将计算结果与 A. R. E. A. 1925 年对涵管的实验进行比较。证实他的分析是符合实际的。

利用共同变形原理以解答圆形衬砌的建议是在 1945 年由奥尔洛夫提出的, 奥尔洛夫计算了弹性无限体中圆形缺口在单位集中荷载作用下周边的相对位移值。从这个基本解答出发使奥尔洛夫可能在采用链杆法以计算圆形衬砌时, 考虑到各链杆所引起下沉值的相互影响。

对于水工有压隧道的衬砌, 当水压力大大超过其他荷载时, 衬砌及周围岩层的受力状态可以直接用加列尔金的解答决定。

以上所述方法尽管在理论上具有较为严密的根据, 但其共同的缺点是计算工作量很大。

对圆衬砌计算方法的另一个类型的建议系在 1943 年由 R. A. 瓦乎尔金及 M. 德鲁凯尔等提出的。建议采用了对水平直径对称并按一定函数变化的侧向水平抗力图形, 抗力图的最大值位在水平直径处, 并按衬砌在该点的水平位移与地层下沉等值的条件求得。

克来因 Г. К. Клейн 在它的著作中收集了不同作者所建议的抗力图形, 并总结不同作者在考虑抗力对衬砌的影响为如下的型式:

$$\zeta_2 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda k r^4}{12 E_c I}} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda k r}{E_c} \left(\frac{r}{h}\right)^3};$$

k 为岩层底床系数; h 衬砌壁厚;

r 为衬砌的平均半径; E_c 为材料弹性模量;

I 为构件断面惯性矩; λ 为依假设图形不同的系数;

在计算控制截面的内力时, 可将 ζ_2 值乘以由垂直荷载所产生的内力值。

对抗力图形更准确的假设系综合研究精确计算结果而总结出来的。

根据链杆法计算的结果, 圆形衬砌的受力情况具有以下特点:

顶部承受比较明显的挠曲, 抗力零点约在与垂直直径成 45° 处, 在下半环的范围内土壤抗力比较均匀, 构件基本是受轴向力的。根据这些特点, O. E. 布加耶娃建议了一个地层抗力的分布图式: 脱离区所对应的中心角为 90° , 直径以上以水平直径处的抗力为基数, 按 $\cos^2 \varphi$ 函数变化, 水平直径以下的抗力以水平直径及垂直直径底点的抗力为基数, 按 $\sigma = \sigma_{\text{水平}} \sin^2 \varphi + \sigma_{\text{底}} \cos^2 \varphi$ 函数变化, 水平及垂直直径处的抗力基数系根据荷载平衡条件及衬砌变形与地层下沉相等的条件决定的。这样就使得在用链杆法计算时的多次超静定的结构简化为二次超静定结构。这个方法在苏联的水工隧道衬砌计算中得到广泛采用。其它作者如阿尔汉格里斯基等亦作出类似的建议。

对于各种特殊构造型式的水工隧道衬砌的计算方法, 在许多专文中都有较详细的讨论, 例如具有初始压力的圆形水工隧道, 可以加列尔金 (Б. Г. Галеркин) 的圆坑道周边应力分布公式为基础进行分析。钢筋混凝土予应力的圆形水工结构的分析, 可以厚壁圆筒的受力情况为

基础等。

(4) 矩形框架及多跨结构

在地下建筑物中广泛采用单跨或多跨的连续矩形框架结构。由于侧牆顶部对地层无水平位移，弹性抗力可略去不计。它的作用情况与地面建筑物基本相同，可按支撑在弹性地基上的自由变形连续框架分析。

在修建东京及其它国家都市的地下铁道时，曾广泛采用各种类型的框架结构。在一定的荷载条件下，现代钢筋混凝土结构理论均可用以分析这种类型的结构。由圓拱组成的多跨结构，可采用与单跨时相类似的假设或对侧跨的抗力图作出估计，或采用链杆法进行计算。

综上所述衬砌计算理论从对重型圬工地下结构物采用压力线理论开始。进而对金属，混凝土，钢筋混凝土地下结构物采用按弹性系统的计算方法，在这过程中对各种结构型式进行研究分析，逐步地掌握了它们的承载作用特点，使计算工作趋于合理化，是一个较长期的实践过程。可以说现在我们已经掌握了各种型式的结构的比较完善的计算方法。但是许多国家在这一时期中仍广泛流行按压力线理论，及按自由变形弹性结构的计算法：如奥森道夫所叙述的在德国流行的计算法及意大利工作者路依吉 (Luigi Lamagna) 所建议的方法均未超出按自由变形结构的计算法。

(三) 考虑结构受力破坏过程及装配式结构的计算理论——按极限状态的计算方法。

实践证明按弹性系统计算结构物的方法具有很多缺点：把结构物视为完美的弹性体，忽视了材料的塑性变形对内力分布的影响；没有考虑到结构物在损失承载能力前，某些截面开裂后，内部应力的重新调整过程，因此，不能真实反映结构的承载能力。采用允许应力及概括的安全系数不能很好地反映结构物的实际安全度。

在钢筋混凝土结构中，由于它不是由弹性均质材料所组成的，构件的破坏是一个比较复杂的过程。

在混凝土中，由于混凝土具有较低的抗拉强度，在受力的早期截面即要开裂，但是从截面开裂到结构真正损失承载能力却是一个比较长的过程。

在估计超静定结构的承载能力时，分析结构在损失承载能力前截面的开裂及因截面开裂所引起的应力重分布的过程，更为重要，因为从结构截面第一次开始裂开到结构损失承载能力的过程比静定结构要长得多。

对于塑性变形值比较大的建筑材料如建筑钢等所构成的结构物，我们已经有比较完善的按可能破坏型式推算它的承载能力的理论。对于钢筋混凝土结构来说，按破坏的极限状态来推算其极限承载能力的理论也逐步在形成。由于混凝土被采用作建筑材料的范围较窄，对于超静定混凝土结构的受力破坏过程还研究得非常不充分。生产实践及模型试验等均证明由混凝土修建的地下结构物从第一个控制截面开裂到损失承载能力这个过程要比地面建筑物更长，就是说按弹性系统计算的地下结构物在承载能力上具有比地面结构物更大的承载潜力。

按结构物的极限状态来计算钢筋混凝土砌块组成的圓形衬砌的第一个建议是由苏联地下铁道设计院提出的。计算系按链杆法进行。具有多链杆支持的多次超静定结构，在受力过程中首先在顶部开裂，继而在与垂直直径成 α 角处的截面处开裂，但随着荷载的增加在后者截面处首先被挤压破坏。在此开裂过程中衬砌底部仍维持为多次超静定连续结构，即它的破坏图式是属于局部破坏类型的。混凝土截面的极限法向力系按矩形应力块假设及极限偏心值 $e = 0.225h$ 计算得的。以从拱顶到不同 α 角处部分拱圈为隔离体，求得一系列相应的荷载值，其中最小的荷载值即为极限荷载值。

地下铁道设计院并对马蹄形整体式衬砌的破坏过程作了计算分析。分析包括弹性阶段的内力分布及形成单铰，三铰后内力的可能重分布等情况。

苏联地下铁道设计院对铸铁管片所组成的圆形衬砌的按极限状态的算法亦作出了建议。

上述对钢筋混凝土，混凝土及铸铁衬砌的初步建议没有足够考虑到组成构件接头的受力变形特点，及其对结构可能破坏型式及承载能力的影响。

对混凝土及钢筋混凝土装配式衬砌计算理论的进一步研究，特别要指出的是С.П. 奥尔洛夫的工作。首先它对于控制装配式衬砌强度的各种类型的砌块接头进行了比较广泛的受力变形试验，确定了各种类型接头的变形规律。

奥尔洛夫的计算建议包括对无初缝隙平面接头衬砌和接头处中心传力的大型砌块衬砌的计算；在接头处有初缝隙的砌块衬砌的计算；接头处有初缝隙的由小型砌块拼成的衬砌的计算；在接头处有初缝隙的由大型砌块拼成的衬砌的计算；由小型砌块拼成的具有中心传力接头的衬砌的计算等。可以根据初缝隙的可能组合作出结构的力矩包络图。

上述奥尔洛夫的建议，充分考虑了衬砌的构造特点，它使得有可能更精确地估计衬砌的承载能力。这些建议将逐步经过实践的考验得到改进提高。

随着装配式衬砌广泛的采用，我们将会更明确地掌握其作用特点，计算方法将得到不断的改进。

在地下结构物的计算中采用按极限状态的计算方法还属开始阶段。超载系数，工作条件系数及材料均质系数还必须根据地下结构物的作用特点施工条件等来加以确定。苏联地下铁道设计技术规程对三个上述系数作了规定。

达维多夫在1954年曾对地下结构物的承载情况作了分析，并建议根据结构物顶部的极限沉陷值及地层松动的百分数来估计压力拱的极限高度。它对采用各种不同施工方法可能引起的沉陷值及各种地层松动的百分数极限值作了建议，但是这些建议还缺乏充分的实际资料加以验证。

丹都洛夫 (Дандуров) 对89个总长34,779米的隧道作出的运营调查研究中总结了影响工作条件系数的因素计包括：外部自然因素的作用，例如地质，水文地质条件及隧道冻结的影响，地震力的作用；隧道构造特点，例如回填压浆的影响，余留孔隙的影响；与隧道运营条件有关的因素，包括牵引种类，列车密度，人工及自然通风程度的影响；隧道几何参数，包括隧道长度，隧道横断面，隧道平面，隧道纵断面，隧道埋置深度等。根据对不同因素的影响的估计，并考虑现有地上结构物工作情况的资料丹都洛夫建议了九个影响系数。综合这些因素的影响即可能对工作条件系数作出合理的估计。

根据以上简单的叙述，我们还必须对地下结构物的受力破坏过程作更进一步的理论分析，并综合实地观测及模型试验来进一步了解结构的破坏情况，从而确定在可能的不同极限状态下所应采用的合理计算图示。

三个系数的确定是一个比较广泛累积资料的过程，对于材料均质系数及结构工作条件系数在目前阶段可以参考对地面结构物所拟定的系数来决定，对于超载系数的确定必须从实地的地层量测中累积资料。

(四) 对衬砌受力作用情况进一步的探索

数学力学等理论工具被广泛应用以解决工程技术问题，以及结构应变量测等新技术的发展，使有可能更精确地对地下结构物的受力作用情况进行分析与观测。以下简要叙述这方面

工作的成果。

(1) 按弹性理论的研究成果

在坚硬地层中修筑地下结构物时,常依靠地层本身的强度以支撑外部荷载,在这种条件下我们对坑道周围地层中应力的分布情况,必须加以研究,以确定其稳定性。研究坑道周围地层中的应力状态,对了解较软地层中衬砌受力情况也具有指导意义。

弹性无限体中各种不同形状缺口周围应力分布情况的研究是弹性力学研究的主要课题之一,利用数学工具我们已经可能对各种不同形状缺口周围介质中应力分布情况,得出理论解答,并可用光弹性实验加以印证。在这方面特别应该指出穆斯海里斯维里应用复变函数以解答弹性力学平面问题的工作。别列(Бялер)对单圆孔,双圆孔,三圆孔周边应力分布所得出的理论解答,对了解区间及车站周边地层的应力分布是有很大帮助的,对坑道开挖程序的合理安排也具有指导意义。

弗洛赫特关于圆形缺口周围应力集中的光弹性试验结果及苏联A. H. 金尼克及萨文关于地下坑道周围应力分布的理论分析给出了各种不同形状坑道在单向及双向受力条件下周围应力的分布情况。B. Ф. 吐龙姆巴切夫对于矿山坑道周围应力分布的光弹性试验结果等都证明,利用弹性理论的研究结果,可以给出坑道受力的明确概念,包括受力的控制截面可能的应力集中系数。这些资料有助于对在各种岩层中开挖的坑道周边的应力作出估计。Noboru Yamaguti 采用凉粉作为相似材料,曾对圆形及马蹄形坑道周围的应力分布情况作了试验研究,试验证明在圆形缺口周围的应力分布与理论分析结果较相吻合。但凉粉作为模拟试验材料的缺点是具有过大的波桑比值,使得所测定的应力状态与实际地层中的情况有较大的出入。

(2) 模型试验

在实验室里,模拟实际地层的情况,并以一定的比例尺进行地下结构物的承载试验,可以比较详细地考虑它的承载过程中受力变形情况,并对实际建筑物相应于各种规定的极限状态的承载能力作出估计。

模型试验可采用1:1的比例尺,即实际尺寸的结构物。在实验室里进行小模型试验具有很大的方便条件,根据小比例尺实验结果通过一定的模拟关系,可以估计出实际结构物的内力分布情况。

根据重复试验所获得的资料,通过一定的概率统计分析即可归纳出地下结构物受力作用的一般规律。

1933前后S. M. Dixon 曾进行过混凝土砌块组成的8呎直径衬砌模型试验。埋置于砂中的试件,利用千斤顶在横向及垂直方向加压。在试验过程中对衬砌内表面的应力进行了量测,并作了裂纹开展的记录。试验结果证明第一次开裂均在拱顶处,破坏截面则发生在水平直径上面1~2呎处。结构承载能力与两点承载的实验结果相比为13:1,表示周围地层抗力对承载能力的影响大大拉长了地下结构物的破坏过程,并使其具有很大的承载潜力。

苏联运输建筑科学研究院在1958年根据C. A. 奥尔洛夫的建议建立了大比例尺的环形试验台架。台架可承担3环(3米)直径5~6米圆形衬砌的试验工作,总加载能力为8,400T相当于190T/米²。自1958年以来曾进行了列宁格勒地下铁道等5种的管片衬砌试验。试验结果证明现代衬砌计算理论所包含的假设是合理的。并阐明了装配式衬砌在受力过程中的变形及裂缝开展特点。全苏运输科学研究院正在计划修建可容纳9.5米直径的车站结构的试验台架,总的说这方面所累积的资料及经验均比较少。

我们的科研机构及高等学校也已陆续在建立设备并进行这方面的工作。

(3) 实地量测

从实际结构物中量测应变是最直接的了解地下结构物作用情况的方法，在现有进行的此类工作中采用两种不同的方法：一种是量测作用在结构上的地层压力的数值，从地层压力值，来推算结构物的内力；另一种是直接量测在结构物上量测应变。

苏联运输建筑科学研究院隧道试验室，曾对圆形隧道结构所承受的地层压力，进行了较长期的实地量测。量测系在莫斯科，列宁格勒，基辅的地下铁道区间隧道中进行的。衬砌外径5.5~6.0米，并处在各种不同地层中（包括饱和水细沙及粘土等地层）。量测结果证明沿隧道周边地压的分布是非常不均匀的。对地下铁道立柱式车站立柱的内力也进行了量测，与计算比较，深埋车站所受单位面积平均荷载值（粘土顶板）几乎等于全部复盖土层的厚度。当为石灰岩顶板时则小20~30%。施工与架设的程序影响车站构件（立柱）所承担的荷载很大，立柱所承受荷载可能比平均荷载值大1.7倍。

布达佩斯高等工业大学于1960年前后量测了埋于硬岩层中的圆隧道衬砌的应力，量测系在直径5.12米长20.30米的混凝土衬砌的钢钣内壳上进行的，向封闭段内压入空气（3.0；8.5；14.3大气压）并用电阻丝片量测应力，结果证明在受力的各个阶段，沿圆周的应力分布非常不均匀。拱顶及底拱的应力比边墙上的要大得多。这可能是由于钢钣与衬砌间未压入沙浆，因此共同作用差及周围地层压力不均匀的缘故。最大应力与平均值之间的差为46%—103%。

1942年在伦敦新建地下铁道中曾进行过应力量测（隧道直径25呎，埋深100呎）量测结果证明衬砌应力在建成几年后仍继续增加。1955年前后还对50年前修建的伦敦地下铁道隧道量测了衬砌拆除前后应力的改变。从量测中得知对于单独的隧道，埋深是衬砌受力的控制因素。但在车站附近由于管道的排列非常复杂，由地层移动所引起的受力情况是非常主要的。

从以上的叙述，可以看出我们所累积的资料，还远远不足以总结出衬砌受力的一般规律，对这方面的工作还必须继续进行。

(4) 地下结构物在动荷载作用下的分析——在上节叙述中，我们考虑衬砌系承受静荷载的地下结构物。在动荷载作用下（地震或爆炸荷载等），在目前阶段，我们一般系将其化作为一当量静载来进行计算。但是随着抗爆结构及抗震结构的发展需要，要求我们更精确地分析在动荷载下地下结构物的作用情况。为此，我们必须根据爆炸波或地震波在地层中的传播规律来分析结构在埋置条件下所承受荷载及其动力作用特征。在这方面各国学者已经进行了一定的理论分析（主要是对地面结构的）实验室及实地量测工作。这些结果是有助于我们更合理设计在动载作用下的地下结构物的。但是到目前为止还难系统地总结出完整的结构计算方法。本文未列举了少数这方面有关的文献。

(五) 研究工作方向

根据以上对衬砌结构理论演变及现状的叙述及分析，建议今后可以就以下几个方面进行总结及探索：

(1) 广泛收集现有地下建筑物的使用情况，尤其是在使用过程中土压力的发展及结构位移变形等情况，以进一步确定地下结构物在地层中的作用规律，并作为确定地下结构物所应采用的安全度的根据。

(2) 按弹性系统的计算方法，仍是目前最主要的计算地下结构物的方法，因此对按弹性系统计算方法的进一步探索仍属非常必要。

- ① 在地下结构物计算中, 地层特征常数 E, μ, k 值的确定;
 - ② 现有计算方法的力学基础的连系及计算结果的比较分析;
 - ③ 计算步骤的简化计算, 应用图表的编制;
 - ④ 在不同地层中衬砌结构的受力特点以及地层物理力学常数, 结构刚度等对地下结构应力分析结果的影响;
 - ⑤ 计算工作中误差分析;
 - ⑥ 施工条件对结构受力的影响;
 - ⑦ 时间因素和材料及地层塑性变形对结构受力的影响;
 - ⑧ 各种不同材料 (片石、砖、石料、混凝土、钢筋混凝土) 衬砌结构的受力特点;
 - ⑨ 采用模型试验 (台架及光弹性等) 进一步确定衬砌结构在弹性阶段的作用特点;
 - ⑩ 对坑道周围应力分布的进一步探索及分析及其实际应用;
- (4) 按极限状态设计地下结构物应当作为一个新的计算理论方向来进行研究:
- ① 对各种类型衬砌的受力破坏过程及破坏型式作一个全面的理论分析并用模型试验来加以印证, 以确定在按不同极限状态进行设计时的合理计算图式;
 - ② 在奥尔洛夫试验基础上对装配式衬砌接头试验研究分析, 及对装配式衬砌计算理论的进一步探索。
 - ③ 收集资料, 进行超载系数, 工作条件系数及材料均质系数的初步分析及确定;
 - ④ 进行按弹性系统设计及按极限状态设计结果的比较分析;
 - ⑤ 研究分析材料徐变收缩等现象对衬砌破坏过程的影响;
- (5) 长期有计划地对在不同地层中地下结构进行实地量测, 确定在各种地层中衬砌结构的作用特点及现有地下结构的安全度; 以作为进一步合理确定地下结构物超载系数及工作条件系数的基础。
- (6) 在动荷载作用下, 地下结构物的受力分析——包括对荷载性质的了解, 及在动荷载条件下地下结构物的动力作用特征。
- (7) 特殊问题——地下结构空间作用; 永冻地区的衬砌结构研究等。

参 考 文 献

- [1] The Analysis of Engineering Structures—Pippard and Baker 568—595.
- [2] 按极限平衡法的结构承载力的计算 —A.A.Гвогдев 21—32。
- [3] Practical Tunnel Driving—H.W.Richardson and R.S.Mayo. 25—33.
- [4] 隧道建筑—C.奥森道夫 65—66. 218—228。
- [5] 隧道工学—小林紫郎 2 页表 1。
- [6] 地下结构物的计算和设计— С.С.Давыдов 11—25. 86—441。
- [7] 铁路隧道—С.Н.Наумов 78—98。
- [8] Calculation of the Dimensions of The Masonry Lining of Tunnels—Luigi Lamagna Monthly Bulletin of The International Railway Congress Association Sept. 1951。
- [9] Stresses in the Linings of Shield Driven Tunnels—Anders Bull №v. 1944, Proceeding A.S.C.E.
- [10] Расчет Труб, Уложенных в Земле—Г.К.Кленн Гос. изд, Антср. По стро. и Арх. 1957 Моск. 77—198。
- [11] A.Semi—Circular Arched Conduit with Uniform Symmetrical Loading—Stanly. Ben-

- coster A.C.I. Journal 1943. v. 14.
- [12] Design of Concrete Linings for Large Underground Conduits—R.S.Sandho A.C.I Journal Dec. 1961.
- [13] Тоннели. I. В.П.Волков. 171—330.
- [14] Гидротехнические Туннели Гидроэлектрических станций—Г.Г.Зурабов и О.Е.Бугаева. 138—168. 265—285.
- [15] 圓形隧道衬砌的近似計算方法—М.М.阿尔汉格里斯基 唐院譯述第三期89—94。
- [16] 按极限状态計算地下結構的基本原理 С.С.Давыдов 唐院譯述第三期95—108。
- [17] 按极限状态計算隧道衬砌的方法——苏联国家地下铁道运输勘测设计院編著。
- [18] Коэффициенты Условий работы обделок железнодорожных Тоннели—М.И.Дадуров, Основания Фундаменты Механика Грунтов 1959. 2期 6—9。
- [19] 苏联地下铁道設計技术規程——1956年修訂稿 146—148。
- [20] Обделок Тоннелей—С.А.Орлов。
- [21] 装配式鋼筋混凝土隧道衬砌靜力計算暫行規程——草案——全苏运输建筑科学院隧道衬砌研究室編。
- [22] 孔附近的应力集中——Г.Н.薩文 103—138. 385—411。
- [23] 在平面圓形切口中的結構計算——С.А.Орлов 唐院譯述第三期 63—89。
- [24] 地下坑道周围应力分布——А.Н.金尼克等 唐院譯述第三期 30—58。
- [25] О распределения Давления грунта на обделку Тоннеля кругового сечения-путь и строительство железных дорог-экспресс-ниформзция №29 1962. 13—16。
- [26] On the Investigation of the Stress Distribution in a Tunnel with the Agar—Agar Model Experiments—Noboru Yamaguti Proceedings of the World Engineering Congress Tokyo 1929. v9—10。
- [27] Расчёт обделки подземного сооружения кругового очертания—Бялер Н.Я.Гидротехническое-строительство №11. 1952。
- [28] Определение напряжения в породе вокруг двух параллельных закрепленных выработок бялер. И.Я.Инженерный сборник Т. VII. 1952。
- [29] К.Вопросу о расчёте несущих конструкций много пролетных станций метрополитена—И.Я Бялер. известия академий наук СССР отделение технических наук 7. июль 1954。
- [30] Tunnel Engineering—Rolt Hammond 30—37。
- [31] Исследования горного давления—институт горного дела академия наук СССР 139—168。
- [32] Report of the Building Research Board with the Report of the Director of Building Research for the year 1955. London Her Majesty's Stationery office 1956。
- [33] Механика горных пород—Ж.Талобр 342—344。
- [34] University of Illinois Bulletin №22 А.М.Талбот 1908。
- [35] Proceedings A.R.E.A. 1926. 794。
- [36] Proceedings A.S.T.M. 1924. 680。
- [37] Proceedings A.R.E.A. 1927. 841。
- [38] An Engineering Approach to Blast Resistant Design—N.M. Newmark. Transaction ASCE Vol 102. 1956。
- [39] Design of Underground openings for protection—W.I.Duvall. Protection Construction in A Nuclear Age Vol. 1。
- [40] Some factors to Consider in Site Selection and Design of underground Protective

Structures—T.L.White. Protective Construction in A Nuclear Age Vol. 1.

[41] Design of Blast Resistant Construction for Atomic Explosions—C. S. Whitney, B. G. Anderson, E Cohen. Journal ACI. March 1955.

[42] Underground Shelter Study—E. Landaray, Protection Constuction in A Nuclear Age Vol II.

圓形隧道衬砌的計算

唐山铁道学院 范文田

內容提要

本文从弹性地基上圓拱挠曲时的基本理論出发，根据拱軸挠曲时的基本微分方程，推导了各种常見荷載作用下弹性地基上圓拱內力及位移的初参数解及某些可能的簡化，从而提出了对岩层弹性抗力分布不作任何假定的圓形隧道衬砌計算方法，文中举有实例，并与現有各种常用的計算方法所得結果进行了分析比較。

文中所建議的方法还可用来計算馬蹄形隧道仰拱衬砌及其他工程結構物，如涵管、盾构、豎井、桥梁管柱等。

一、引 言

目前在計算隧道衬砌结构时，因结构朝岩层方向变形而产生的弹性抗力是与外荷載的分布，结构的刚度、尺寸及岩层的性质等有关，而很难事先确定。为了計算簡便，常先假定抗力的分布图形，而将衬砌结构当作一个普通的结构进行分析。对圓形隧道衬砌，很多学者提出过各种各样的抗力图形(1)，由于所假定的图形不同，算得的结果其差别也极大。

另一种常用的方法是将圓形隧道衬砌有弹性抗力的部分看作是一个弹性地基上的曲梁。計算时将曲梁分成许多折线形的直梁，而在折梁各顶点加一个弹性支承链杆来代替弹性抗力的作用，即每段折梁上的抗力看作是均布的，并用集中力表示，每段折梁上的主动外荷載亦用集中力代替。这一方法通常簡称为链杆法，在设计苏联各大城市的地下铁道时广泛应用。此法不仅适用于圓形隧道，对其他任何形状的衬砌结构皆能应用。

预先假定抗力图形的方法，其最大优点是計算工作十分簡便。但由于所假定的抗力图形常不能真实地反映实际的抗力，且不能将影响抗力的各个因素全部考虑在內，因此所得結果的正确与否是值得令人怀疑的。

链杆法中消除了抗力是任意假定的缺点，所得結果较为可靠。但用链杆法計算时，需要解一个多次超靜定结构，計算过程比较繁杂，計算工作量十分浩大，而且第一个链杆的位置(或上零点的位置)需要事先假定，算出后再加以修正，增加了計算的复杂性，此外每段折梁上抗力为均布的假定以及将外荷載及弹性抗力都用集中力代替，都会使計算的精确性有所降低，因而所得結果也是近似的。

对圓形隧道衬砌来说，其軸线是最简单的一种曲线——圓曲线，完全可以不必用折梁来代替曲梁，而直接用曲梁(或称为圓拱)的挠曲理論进行分析。本文即根据弹性地基上圓拱軸线挠曲时的基本微分方程，推算出圓拱內力及变位的計算公式及其可能的簡化，从而提出了弹性抗力不需要作任何假定的圓形隧道衬砌的应力分析方法，并与現有最通用的各种圓形隧道衬砌計算方法进行了比較与分析。