

# 综合报告

## (四)

### 土方构筑物 and 地下岩土工程

陈祖煜 (水利水电科学研究院)

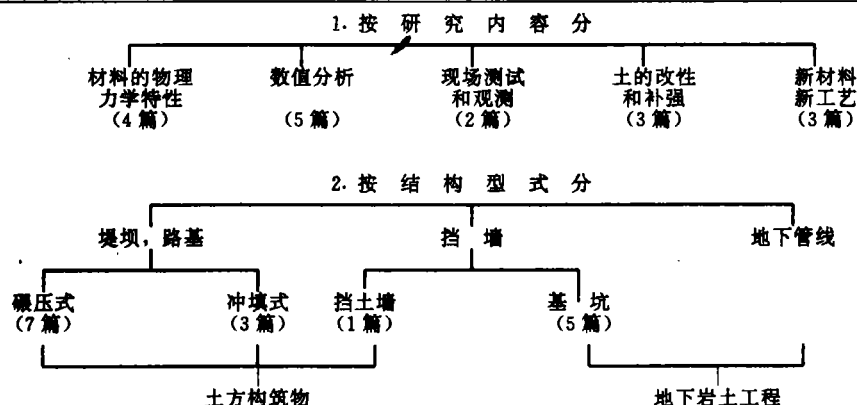
章旭昌 刘前曦 (同济大学)

土方构筑物和地下岩土工程涉及在地面和地下通过填筑或开挖修建的以土为主体的建筑物。从结构型式角度,我们把堤坝、路基和挡土墙这样一些地面工程列入土方构筑物,而将采用明、暗挖方式修建的地下隧道和管道列为地下工程,表 1.1 总结了本次会议收到的论文在这两种结构型式中的覆盖情况。从土力学和基础工程的研究领域角度,我们把论文的讨论的问题分为材料的物理力学特性、数值分析、现场测试、土的改良和补强、新材料、新工艺几个方面。表 1.2 反映了本次会议论文在这几种领域的分布情况。

可以看出,近年,随着经济的高速发展,高土石坝、高速公路、地下隧道、机场跑道等大型土方工程促进了土力学和基础工程的基础理论和应用研究的发展。另一方面,也应注意到,我们的认识水平仍然有待于在实践中不断地深化。例如,1993年,在我国发生了沟后水库面板坝的垮坝事故,为面板坝这种新坝型的发展留下了阴影。这座面板坝以砂砾石作为筑坝材料,从失事后坝体内发现的极高的浸润线位置可以推断,坝体没有象大部分面板坝那样,提供自由排水能力,失事时发生的喷水 and 听到的巨响是管涌和滑坡的征状。座落在正在沉陷的坝体上防浪墙的开裂,又是导致大坝漏水的直接原因。这一事故揭示了面板坝设计领域中的一些尚未认识的问题,需要开展多方面的科学研究,以期对砂砾石面板坝的失稳机理作出科学的判断和分析。

土方构筑物和地下岩土工程专题收到论文分类

表 1



## 土方构筑物

土方构筑物可以广义地理解为以土为主体的承受自重和设计外荷的建筑物，土方构筑物可大致分为堤坝、路基和挡土墙两类，堤坝和路基通常依靠自身和边坡保护稳定，挡土墙的稳定则依靠墙和土的联合作用。

堤坝和路基包括上部的填筑体和下部的地基两部分。填筑体又分为碾压式和冲填式两种。前者通过人工或机械压密；后者则依靠土体本身的固结达到要求的密实度。堤坝的地基作为建筑物的一个重要组成部分，同样要起承载和防渗作用。在填筑体或地基无法达到承载和防渗要求时，需要对其进行改良或加固。挡土墙包括墙和土体两部分，同样，当墙体无法承担土压力时需要对接后土体进行加固或补强。数值模型通常是对土方构筑物进行动、静稳定分析和工程设计的主要手段。土方构筑物中的边坡与挡土墙和地下工程中的基坑有共同处，因此有些问题将在下节介绍。

### 一、土的压密

岩土工程师很早就发现，在一定的压实功能条件下，粘性土的压密度相对于含水量存在一个峰值，即存在一个最优含水量，相应最大的压实干密度。对于这个现象的解释存在着毛管润滑说、粘着水说、颗粒定向说、有效应力说等理论（杨荫华，1992）。

冯冠庆、杨世基“高等级公路湿粘土路基压实性状”对广西土和无锡土两种粘性土进行了仔细的孔隙水压（吸力）的测试工作，发现在同一含水量条件下，广西土的负压随密度增加而减少，无锡土则随密度增加而增加，从而解释了为什么有些类似无锡土那样的地基使用重型压实标准压密经过一个雨季后含水量又回到塑限附近，因而压密度降低。这一个研究成果无疑具有很高的学术价值和实用意义。杨世基“细粒土路基和压实控制”讨论了细粒含量和塑性指数较大的湿粘土采用重型碾压机具的压实标准控制为宜。作者指出，在确定压实标准时，要考虑土的吸力（负孔压）特征，对湿粘土，以稠度、饱和度测定干密度）进行最佳压实度控制较为合宜。

### 二、土的固结

桂和荣、陈兆炎、杨学明“淮南段淮河北坝水力冲填扩坝最大冲填高度研究”探讨应用水力冲填法筑坝为保证边埂和坝体稳定必需控制的填土速率。施健勇、周春儿、高正夏、吕民康“某汽车公路沉降计算经验修正”一文提供了实际资料和应用太沙基一维固结理论计算值的对比，发现粤东地区地基的实际固结系数是室内固结系数的 2.5 倍。因此，对于按照理论预测的沉降值，应赋以  $m_s=1.2$  的修正系数。

根据实际观测值来修正设计过程中使用的参数，反映了岩土工程中重视现场资料反馈的正确的工作方法。但是，对于数值分析和实测成果的偏差，还需要从理论角度予以分析。注意到上述两篇论文都是建立在传统的沙太基固结理论基础上的，因而包含有以下几个和大部分现场实际情况不一致的重要局限性：（1）小变形；（2）在多级加荷过程中，压缩系数和渗透系数都被视为常数；（3）忽视了渗透力引起的附加固结。岩土工程师很早就意识到了通过常规的室内固结试验参数来预测现场实态可能会带来了误差。因此，在固结分析理论方面，引入了考虑非线性、二次固结和大变形（Suklie, 1978; Carter, 1977; Booker, 1977）等因素的固结分析方法。在室内试验方面，一些学者对常规的固结试验做出改进，提

出了常变形速度试验 (CRD)、常水力梯度试验、常加荷速率试验(CRL)。Suthaker (1994) 讨论了有关的诸问题, 并针对大量的水力冲填式坝填体的半流体状态固结问题, 试制了一种泥浆固结仪, 较合理地考虑了上述的几个局限因素。我们期待在这方面更多的我国学者的研究成果, 以解决越来越多的水力冲填坝和软弱地基工程中的固结问题。

### 三、土的改良和加固

堤坝和道路都是建立在作为支撑体的地基上的, 不同的建筑物对其地基提出不同的改良和加固要求:

#### 1. 防渗墙

用于蓄水 (包括存放泥浆、尾矿浆等) 目的的碾压或冲填式坝均要求坝基具备阻水功能。在我国, 混凝土防渗墙是应用最广泛、最成功的一种结构。防渗墙顶部承受很大的坝的自重应力, 上游侧承受库水压力, 如果墙位于斜墙底部, 则还承受不平衡的向上游方向的侧向土压力, 因此, 采用模量与筑坝材料更为接近的塑性墙, 是改善坝体和墙身应力的一条途径。

塑性墙的应用受到国际大坝会议的肯定 (1985), 并在国外一些工程中得到应用。国际大坝会议对塑性混凝土防渗墙的配比建议值如下 (每立方米含量): (1) 膨润土浆 400~500l; (2) 水泥 100~200kg (灰水比在 0.1~0.3 之间); (3) 骨料含量为: 在级配良好时, <1500kg; 级配不良时 <1300kg。 (4) 膨润土相对水含量 (重量比) 视水化率不同, 在 2~12% 之间选用。相应的密度为 1.8~2.1 g/m<sup>3</sup>。

濮家驹、于玉贞“塑性混凝土防渗墙应力分析”比较了大坝地基使用塑性和刚性混凝土防渗墙的墙体应力分布, 发现塑性墙的应力全部为压应力。墙顶和墙底的  $\sigma_y$  值相差不大, 说明承受较小的拖曳力, 因而较刚性墙更适用于高土石坝的坝基防渗。

尽管塑性墙相对刚性墙有一定的优越性, 但是, 在防渗墙十分普遍我国, 应用的实例仍极为有限, 基本上限于临时或小型工程 (例如小浪底工程大坝的围堰)。希望这方面的研究, 会促进塑性墙技术的发展, 使其在更大范围内得到应用。

#### 2. 灌浆

灌浆作为地基防渗漏强的工艺, 已有悠久的历史, 一般来说, 可以将灌浆分成以下几种类型: (1) 水力劈裂灌浆; (2) 压密灌浆; (3) 渗透灌浆 (包括帷幕灌浆, 固结灌浆); (4) 旋喷。上述四种类型的灌浆技术在我国均有广泛的应用。

在本届会议中, 仅收到崔双立“高压喷射灌浆技术在小龙口水库的应用”一文。该文介绍了在含泥砂卵石地基中应用旋喷工艺修建大坝防渗墙的经验。针对防渗墙主要用于防渗目的的特点, 使用了水泥浆作为灌浆材料。在现场进行了压水试验证实其单位吸水率可以满足坝体防渗要求, 这一工程实例为在粒径较小的含砾地基使用旋喷工艺修建防渗墙提供了重要的经验。

应该指出, 旋喷工艺的应用范围极广, 修建防渗墙仅是其极小的一部分。作为地基改良的手段, 旋喷被广泛地用于修建桩, 提高建筑物或堤坝的承载能力, 例如意大利 Montelimpino 堤坝工程, 曾成功地在路堤泥炭地基按间距 2.75m 修建直径 2.1m 的旋喷桩。旋喷的工艺一般有“一种流体” (水泥浆), “二种流体” (水泥浆和空气) 和“三种流体” (空气、水泥浆和冲洗水) 之分, Gallaveresi (1992) 提供了在不同地基条件下浆液的配比和改良后的土的主要力学指标。近年来, 十分重视施工时记录钻孔在钻进时的贯入速率、旋转速度、

力矩、水压等，作为了解地基特性的间接手段，据此调整浆液配比和工艺参数（浆液流量和压力），同时，拌和站配有现代化的电子仪器来监控浆液质量。旋喷技术甚至用于地下隧道时的土体补强（Gallaveresi, 1992）。

### 3. 人工合成材料

石名磊、姚代禄、陈晓龙“加筋土挡墙有限元分析”应用传统的有限元方法分析具有加筋材料的挡土墙的墙体压力和位移，并与实测资料做了对比。

史存林、叶阳升、俞锡健、杨灿文“应用聚苯乙烯泡沫塑料整治路基冻害的试验研究”，是一篇利用人工材料对地基进行非力学加固的例子。该文介绍了EPS材料的动、静力参数和导热系数、吸水率等指标。通过室内外试验确认经过EPS保护的路基相应的冰冻深度有所提高，因而肯定了EPS材料作为铁路路基防冻材料的适用性。其特征均能的分析计算方法具有参考价值。

近一、二十年，人工合成材料成功地作为排水、反滤、加筋和防渗材料用于地基、堤坝和挡墙。Sprague等（1992）曾报告美国陆军工程师团在28个工程中成功地应用高强度、高模量材料的例子。Fouler（1978）等曾报告将土工材料用于加固非常软弱的地基的实例。尽管土工材料获得了成功的应用，但是大多数人对仍然持谨慎和保留态度。试举几例。

——Roth（1991）等为美国大坝会议提供的专题报告中建议，土工织物不能作为保证大坝安全的唯一措施，应主要用于那些可以揭露，便于修复的部位。

——Cheng（1991）对美国公路部门的调查表明，有50%的土质陡边坡只是在常规的手段失效时才考虑使用土工织物进行加固。毫无疑问，这个问题只有通过在实践中不断总结经验方可解决。

Koerner（1992）详细地讨论了土工织物在最终成为普遍承认、应用广泛的材料，需要克服的技术障碍：

（1）如何正确地选用土工织物作为反滤材料，使它同时起排水和防止细颗粒流失作用。需要进行各种室内试验来确定被保护的土应使用的土工织物的型号或具体技术标准，表2为一般性的设计原则。

土工织物作为反滤材料防止细粒流失的建议标准（Giroud, 1982） 表 2

| 相对密度 $D_R$          | $1 < C_v < 3$               | $C_v > 3$                    |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 松 $< 50\%$          | $O_{95} < (C_v)(d_{50})$    | $O_{95} < (9 d_{50})/C_v$    |
| 中 $50\% < O < 80\%$ | $O_{95} < 1.5(C_v)(d_{50})$ | $O_{95} < (13.5 d_{50})/C_v$ |
| 密 $> 80\%$          | $O_{95} < 2(C_v)(d_{50})$   | $O_{95} < (18 d_{50})/C_v$   |

注： $C_v$  = 不均匀系数； $d_{50}$  = 筛余量为50%的相应颗粒直径。 $O_{95}$ 为土工织物表观孔隙直径，确定该值可有多种方法。详见Falyse（1985）。

（2）如何合理地考虑蠕变和应力松弛效应。蠕变和应力松弛是应用土工织物进行土体加固时必须考虑的两个因素，目前已有许多研究成果。Findley（1987）对聚氯乙烯和聚乙烯的26年的试验认为土工织物的应变 $\epsilon$ 随时间 $t$ 的变化满足下式：

$$\epsilon(\tau) = E_0 + \epsilon^a t^n \tag{1}$$

其中 $E_0$ 、 $a$ 和 $n$ 为常数。关于应力松弛效应Koerner（1992）等建议应力 $\sigma$ 随时间 $t$ 的蜕变由下式决定

$$\sigma(t) = Ct^{-b} \quad (2)$$

其中  $C$  和  $b$  为常数

(3) 如何防止和减缓老化, 如何确定土工织物的使用年限。

#### 四、稳定和变形的分析

王元汉、周晓青“一种改进的边坡稳定分析的条分法”采用了与传统的条分法不同的假定, 即土条侧面法向力和切向力的增量与摩擦系数成正比, 其比例系数为一常量, 即安全系数的倒数。需要指出: (1) 导出这一假定的前提是土条的侧面也发生了相对滑动, 但对土条进行垂直条分的极限平衡法的理论框架中, 一般是没有这一前提的; (2) 这个方法毕竟没有考虑力矩平衡, 属于美国陆军工程师团和简化 Janbu 法之类的稳定分析简化方法, 不属于 Morgenstern-Price 法, Janbu 法这一类同时满足力和力矩平衡的严格方法。

几十年来, 对传统的边坡稳定的条分法改进的文献不计其数 (Duncan, 1992) 但对已有的方法的冲击甚微 (Morgenstern, 1992), 其原因是条分法中包含的假定事实上对计算成果并不敏感。Morgenstern, Duncan 等人认为, 当前的研究方向应转向三维领域。三维极限平衡将滑动土体分为土柱, 使用二维领域类似的处理方法, 例如, Hungr (1989) 假定土柱侧面的力均为水平方向, 仅通过力矩平衡来确定安全系数, 这与二维中的毕肖普简化法类似。但是, 进入三维领域后包含了更多的假定, 求解力的平衡的矢量运算使分析过程的复杂化。

陈祖煜: “边坡稳定分析的塑性力学上限解”介绍一种建立在塑性力学上限定理基础上的边坡稳定分析实用的方法。和常规的条分法不同的是, 该法把滑动土体离散成具有倾斜侧面的条块, 根据外力功和内能耗散相等求解安全系数, 应用最优化方法求解最小安全系数、临界滑裂面和条块侧面倾角。这个方法具有坚实的理论基础, 同时求解步骤仅包含一个功和能相等的标量运算, 十分简单。作者认为, 这一方法有可能在三维领域取得实质性的进展, 因为, 从二维到三维不需要引进更多的假定, 计算的控制方程仍然只是一个标量式。

#### 五、土的动力特性和动力分析

许金余“机场道面的动力荷载及动力相互作用有限元分析”将机场道面-土基作为一相互作用的动力系统, 应用有限元法分析飞机滑行造成的地基和道面的动力响应, 获得了与实测路面沉降曲线一致的结果。

金晓媚、王余庆“尾矿土的现场特性分析”对国内数座尾矿坝的现场实测资料剪切波速  $v_s$ 、标准贯入击数  $N_{63.5}$ 、孔隙比  $e$  和相对密度  $D_r$  随深度  $H$  的关系作了统计分析, 并指出平均粒径  $D_{50}$  是影响现场特性指标的一个重要因素, 文中还注意到固结时间对于尾矿土的现场特性指标有显著的影响。对于缺乏现场实测资料的工程, 这些统计材料可作为设计工作的参考。

## 地下岩土工程

我们将基坑工程 (地面以下开挖形成的边坡和挡土墙) 以及地下隧道工程列入地下岩土工程。自上届年会以来, 地下工程在土力学方面的研究, 尤其是理论研究, 有了进一步的发展。无论是深基坑还是地下隧道工程, 均越来越与施工工艺、施工手段、施工顺序密

不可分。大型计算机及计算技术的开发与应用,已可就此类问题进行比较真实模拟。

## 一、基坑工程

基坑工程主要涉及土性、支护结构、支撑形式、地基处理、防水以及环境影响等方面。目前设计及研究中的主要课题有:墙体及支撑系统刚度、墙体埋深、基坑形状与尺寸、开挖方式及土性等对基坑变形及稳定的影响,其目的在于如何选择既经济方便,技术上可行的围护方案,并使其对周围地层的扰动减至最小,一般而言,可将影响基坑稳定和位移的因素分为三大类,即支撑系统、地层性质及施工工艺与过程。

### 1. 围护结构

目前软土地区深基坑围护方法主要有以下几种:RC地下墙、重力式水泥土搅拌桩、钢筋砼灌注桩和新近开发的加劲H型钢水泥土搅拌桩法(SMW工法,章旭昌、侯学渊,1994)等。结合施工机具、地层位移、安全性、经济性、环境影响多方面的因素,可将围护方法的适用性加以归类。

当开挖深度 $H \leq 5$ 米时,通常采用施工快速、简便且又经济的重力式水泥土搅拌桩,它的优点在于对地下水位较高的基坑围护能有效地起到防水作用,因此又常与其它板桩结构结合使用。由于水泥土搅拌桩的力学指标及受力性能缺乏足够的试验和确切的资料与经验,在其稳定性计算和位移预估上存在着参数不准、位移计算理论不够成熟等问题。而事实上,不可能针对每一工程进行专门的试验,况且其力学性能受施工工艺水平的影响较大。实际工程中其位移往往多达10cm,工程上由于施工质量差导致基坑失稳的事例又屡见不鲜。所以难以在市区建筑物或管线密集地段实施。

叶国良、李士菁、肖大平的“双排钢板桩围堰安全监测分析”介绍了采用双排钢板桩围堰法的施工全过程,分析总结了各施工阶段地基土孔隙水压力、强度及钢板桩位移的变化规律。展示了该方法在围堰中应用的可行性和存在的问题。并测试了各施工过程围堰的土压力和钢板桩的变形。这些现场实测结果具有一定的参考价值。

当开挖深度 $H \geq 10$ m时,为了安全起见及保护周围环境,往往采用RC地下墙围护结构。应当指出的是,目前在地下连续墙应用较多的日本以及台湾等国家和地区,已越来越多地将地下墙作为永久的结构的一部分。无论是连续墙接头防水技术,还是连续墙的垂直承重设计理论都已达到了相当完善的程度。相比之下,当前国内在此方面的研究及应用仅仅处于一个摸索和尝试的阶段。如上海“外滩京城”大厦地下墙工程。章履远在“地下连续墙刚性止水接头的施工技术”一文中介绍了上海地铁工程某车站地下连续墙刚性止水接头的施工,从构思、施工方法到实际应用及遇到问题后的改进,最后总结出了一套比较成熟的施工技术。

当基坑开挖深度在6~10m时,采用地下墙围护则经济性差,而若采用重力式水泥土搅拌桩则位移较大,安全性较低,所以亦不宜采用。目前常采用钢筋混凝土灌注桩排式结构,并在外围辅以注浆或加做水泥土搅拌桩隔水以及坑底注浆加固,根据目前已有的工程实例来看,该方案在力学上可行,但在防水效果及经济性、工期以及对周围环境的保护方面不易控制。加劲水泥土搅拌桩(SMW法)是一种正在进行研究和投入运用的新型围护结构。利用H型钢的强度并结合防水性能好的水泥土搅拌桩组成类似混凝土与钢筋的复合型结构,能充分利用两种材料的优点,较经济地解决了围护结构的抗弯、抗剪及防水问题,同时由于水泥土搅拌桩对H型钢的握裹作用,防止了H型钢的失稳,从而可以把H型钢做得

很薄。其造价比地下连续墙节省 44%，与灌注桩相当。但大大加快了工期，解决了困扰城市建设的残土处理问题。可以预见，随着施工工艺的进步，H 型钢回收技术的开发，SMW 工法必将在软土地层中的深基开挖中显示其优越性。现将软土地区深基坑工程中各种围护结构的适用范围、经济性及安全性等作如下汇总，以供参考。

各种围护结构比较

表 3

| 类型     | 经济开挖深度 | 费用 | 抗渗漏 | 现场要求   | 设备 | 泥浆管理 | 取土 | 土体施工进度 | 刚度 | 支撑位置  | 挖土 | 技术成熟度 | 结论           |
|--------|--------|----|-----|--------|----|------|----|--------|----|-------|----|-------|--------------|
| 地下连续墙  | 10~15m | 高  | 好   | 高      | 复杂 | 严格   | 要  | 慢      | 一般 | 2~3 道 | 一般 | 一般    | <10m 不适      |
| 灌注桩    | 6~10m  | 一般 | 差   | 一般     | 一般 | 要    | 要  | 一般     | 一般 | 2~3 道 | 一般 | 熟练    | 安全性差         |
| SMW 工法 | 6~10m  | 低  | 好   | 少      | 简单 | 无    | 无  | 快      | 大  | 1~2 道 | 方便 | 国内首创  | 安全, 合适       |
| 拉森钢板桩法 | 5~8m   | 高  | 差   | 往往不能回收 | 简单 | 无    | 无  | 快      | 小  | 3~4 道 | 难  | 熟练    | 防渗漏差, 对周边影响大 |

黄建南、黄集生、林龙辉的“厦门美仁大厦深基坑围护的点滴经验”一文提出了一种人工挖孔桩加底部锚杆拉固的围护方法，对大面积深基坑围护具有一定参考价值。何广讷、张彦鹏的“基坑支护稳定性的非确定值分析”用概率分析方法分析基坑的稳定性，为岩土工程的分析与研究提供了一条新的途径。但对于判断失稳的概率标准、适宜的隶属函数及上下确界和计算参数的模糊性方面有待于通过大量的工程实例来确定与验证。

## 2. 支撑系统

支撑技术是学术界及工程界普通关心的另一问题。人们习惯于把支撑与支撑系统等同。事实上，支撑系统是包括墙体、地层和支撑等多方面内容在内的总体概念（侯学渊等，1989）。理论上，用支撑系统这一概念来分析基坑的稳定与变形比较科学。

支撑系统的刚度大小是衡量基坑稳定的关键。它主要包括支撑刚度、墙体的垂直约束及挠曲刚度、荷载传递位置等三个主要方面。根据荷载传递方式可分为内支撑和外支撑（土锚、土锚钉等）。一般来说，对于中等面积深基坑，采用全面内支撑，刚度大，安全可靠，但出土和施工困难。鉴于此，预应力土锚杆外支撑技术越来越引起人们重视。它的优点在于施工面大，出土方便。但由于土层和安装技术等原因，土锚的可靠性难于保证。在软土地层中，即便在锚固端不产生任何位移的情况下，作用在锚杆上的荷载会使得锚杆自由段的土层产生压缩变形；同时软土自身蠕变和应力松弛也会使锚杆的预应力下降，从而引发基坑不稳定因素，引起较大变形（戴运祥，1993 年）。所以至今仍只有在相对较好的土层中，预应力锚杆支撑法才得以应用，至于在软土地区的推广还需作进一步探索。对于特大基坑，目前已广泛采用中心岛法的支撑形式（放坡一般采用  $H/B=1/2$ ）。

侯学渊、刘国彬提出的“卸荷下土体模型归一化研究”理论，试图从根本上解决软土地层中由于开挖卸荷而引起的土性改变，为解决由于土体损失而引起的沉降或隆起提供了理论依据，可应用于地下工程确定荷载、设计依据、环境监测等方面。此外，戴运祥、侯学渊、李象范的“软地层中斜拉土层群锚非线性分析”一文考虑锚与土界面的非线性特性，用 Mindlin 解对群锚的受力及变形机理进行了理论研究，主要得到以下三个结论：群锚的承载效率低于单根锚的承载效率；增大锚杆长度、半径及间距可减小群锚的位移；群锚的非

线性分析所得的土锚位移比线弹性分析结果要大。这与桩的作用机理相似,符合实际情况,为土锚的理论工作打下了基础,对土锚的工程应用有很大的参考价值。

### 3. 地层位移及环境影响

基坑开挖时,变形常起着重要的控制作用。在研究支撑体系与变形的关系时,常采用系统刚度来描述。前面已经讲到,支撑体系的刚度包括几方面因素,对这些单因素与地层地移及其分布的关系,国内外学者作了大量的分析,并取得了一些重要成果。同时在这些变形的邻近建筑物及地下管线的影响方面也作了深入的研究。这些研究内容包括:变形与开挖深度、基坑宽度、支撑刚度及变形控制与安全系数的关系等(侯学渊,1991)。另外,对不同基坑形状与变形的关系研究表明,基坑隆起量随基坑宽度增大而增大,直至隆起量达到某最大值后将随宽度增大而减小。对方形基坑与长条形基坑的对比研究表明,窄的长条形基坑开挖比方形基坑开挖时产生的隆起量要大。另外,施工方法对变形的影响也较大。

## 二、地下管线工程

这里所指管线工程,仅指采用推进工法建造的地下工程。推进工法主要可分为两类即盾构法和顶管法。

### 1. 盾构法

该类工程的重要问题是如何维持开挖面的水土平衡及施工间隙的回填。在维持土体稳定方面,常选取适当的支护压力(或土/泥水压力)来平衡前方土体的水土压力或者选取适当的稳定比  $N_s = (\sigma_s - \sigma_T / S_u)$ , 其中  $\sigma_s$  为开挖面中心处土体垂直压力,  $\sigma_T$  为隧道施工中用气压或其它加压方法施加于开挖面的侧向压,  $S_u$  为土体的不排水抗剪强度。在软土地层中,支护压力通常设置在静止土压力上下,即处于主动与被动土压力之间,稳定比  $N_s$  在 2~6 之间。一般认为当  $N_s < 4$  时,土体处于弹塑性状态;当  $N_s$  达到 6 时,土体处于流塑状态,此时土体位移已达到足以破坏周围市政设施的数值。在回填注浆方面,一般采用同步双液注浆技术及时有效地充填施工间隙,以防土体塌向管片。1985年,日本开发了全自动电脑操作系统和先进的盾尾同步注浆系统的盾构机械,盾构正面土压的控制和回填注浆足以把土体沉降限制在较小的范围。在国内,上海地铁一号线工程采用从法国引进的七台此类土压平衡式盾构,使土体沉降基本控制在  $[+1\text{cm}, -3\text{cm}]$  的范围之内,保证了隧道沿线地面建筑及地下管线设施的安全。另外,盾构侧向挤压力对周围环境的影响也不容忽视。据上海地铁一号线有关量测资料表明,最大侧向挤压应力可达 0.15~0.25MPa。李桂花、刘前曦曾对上海地铁一号线盾构掘进过程中侧向挤压应力对控制中心钢管桩基础的影响进行了分析(李桂花,1994)。尽管此类先进设备使得建设初期投资很大,但由于其辅助措施少,环境影响小,最终的单位造价(每掘进单位土方土)与其它机械式盾构(网格式、敞胸式盾构等)相比不相上下。

另外,新近研究的盾构施工技术包括:暗挖法车站施工法、先导盾构法、自动化小断面盾构法、盾构隧道地睛双接法等,尤其引人注目的是“眼镜式盾构”技术,这一技术使得双圆形隧道克服了以往两条隧道分别施工带来的相互影响。

在隧道衬砌设计方面,设计模型与计算理论日趋完善,其发展大致经过了刚性结构阶段、弹性结构阶段、假定抗力阶段、弹性地基阶段、连续介质阶段、数值方法阶段以及极限和优化阶段等七个从低级到高级不同发展阶段。在我国,经过多年来的设计实践,已形成了比较成熟的四种主要设计模型,即经验类比模型、荷载结构模型、地层结构模型以及



收敛限制模型。随着衬砌设计理论的逐步完善,衬砌设计的优化使得衬砌厚度趋向于越来越薄。柔性衬砌设计方法已愈来愈为工程界所接受。事实上,对于所有地层,若衬砌与地层紧贴,地层产生被动抗力时的变形比衬砌的挠曲变形能力要小得多,从现场观察到,甚至在软塑土层中,柔性衬砌直径变形超过10%,还完全地被周围地层有效支承着。所以,衬砌的弯曲应力不是控制设计的主要因素。设计时,应考虑这些直径变化是否为防水等使用要求所允许。作为柔性衬砌,完全有把握设计成能承受均匀径向地层压力和水压力引起的弯曲应力。在非常松软的地层中,隧道变形只与地层刚度有关而几乎与衬砌刚度无关。衬砌的弯曲应力与衬砌厚度成正比,而与轴向应力成反比。侯学渊等(1991)通过对衬砌厚度及接头数量对衬砌内力影响的计算分析与试验表明:在保证防水要求的接头允许张角范围内,柔性结构可使内力减少。达到结构柔性的第一因素是衬砌厚度,选择20~30cm厚度,即直径的3~5%是较优参数;第二因素是接头数量,在软土地层中采用8个接头;第三因素是接头刚度 $k_0$ ,应以8330kN·m/rad为界,不要大于此值。若采用 $k_0=2058\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ,则弯矩可比连续匀质圆环减小一半以上。这种多铰圆环的柔性衬砌结构形式已在国际上广泛采用,显示出其优越性(刘建航,1991)。

尽管盾构技术日益完善,设计理论日臻进步,但盾构工程中存在着一些问题至今仍难以解决。其中最为突出的是盾构施工引起地层位移问题。为此,国内外学者就沉降分析与防治问题纷纷作了深入研究。最重要的研究工作包括两个主要方面:一是开挖面的稳定与开挖面位移及地层损失的关系,最新研究结果是加拿大学者K. M. Lee及R. K. Rowe通过三维弹塑性有限元法对隧道施工过程进行模拟计算而获得的;二是将地层力学性状与施工过程相联系,研究不同施工阶段土的不同应力路径及相应的本构关系,提出施工中沉降的分阶段预测理论与方法。这一研究成果主要是国内侯学渊等(1991)针对上海延安东路越江隧道的沉降监测基础上总结出来的。后来又结合室内试验,进一步提出了“卸荷下的土体模型归一化分析”理论,为隧道沉降分析提供了理论依据。

目前,对于双圆盾构隧道施工的沉降预测,已显得日益重要。由于双圆并行隧道施工的相互影响机理比较复杂,现基本上采用单线隧道的计算方法,通过数值分析和经验数据,考虑两者的相互影响(张学文,1993)。日本藤田采用弹性介质有限元法并根据实测资料加以修正而提出了实用公式。从其计算的地层水平位移变化趋势图上可以看出,先行隧道通过时,地层朝里运动。当第二条隧道通过时,地层变为向外侧移动。最大水平位移发生在隧道顶部。隧道周围地层的位移可表达为两条单线隧道施工分别引起的位移叠加后再根据其间距采用一折减系数。

## 2. 顶管法

顶进工法在国内主要运用于软土地区。顶管法所采用的顶管直径越来越大,从 $\phi 250\sim\phi 3000$ 。顶管材料国内目前以钢筋混凝土为主而以其它如铸铁、素混凝土为辅。对照国内外发展趋势,笼统而言,顶管直径可小至 $\phi 60$ ,大至 $\phi 3000$ ,每一顶段长度可超过1000m,并逐渐能够运用于各种不同的地层,推进曲线也越益复杂。

房延懋的“顶管工程中特殊技术问题及处理方法”对顶管工程中局部降水出洞技术、不降水进洞技术、直接过井技术及井壁强度是否满足顶管反力等问题及处理方法进行了论述,这些技术方法多为国内首次探索采用。

顶管法的技术中的以下几方面问题有待进一步研究开发:

(1) 顶管对地层的适应性将会大大增强, 即不但可在软土地层中推进, 亦可在破碎岩中石推进;

(2) 顶管推进时的中继推进装置将进一步完善, 以能适应具有复杂形状曲线的工程;

(3) 顶管外壁与土壤之间的减摩擦材料将得到进一步发展, 每一顶进段的距离进一步加长;

(4) 顶管直径会进一步扩大, 目前国内最大的为  $\phi 3500$ ;

(5) 顶管工程的覆土层越来越浅, 双线顶管的间距也愈来愈小。

## 参 考 文 献

1. Attewell, P. B., Farmer, I. W. and Glossop, N. H., Ground Deformation Caused by Tunnelling in Silty Alluvial Clay, *Ground Engineering*, 1978.
2. Booker, J. R. and Small, J. C., Finite element analysis of primary and secondary consolidation. *Int. J. Solids Struc.* 13, 1977, 137-149.
3. Carter, J. P., Small, J. C. and Booker, J. R., A theory of primary elastic consolidation. *Int. J. Solids Struc.* 13, 1977, 467-478.
4. Cheng, . The use of geosynthetics reinforcement in State highway applications. *ASTM Geo-synthetics Reinforcement Applications Workshop*. Atlanta. 1991.
5. 陈永福, 连续墙式箱基下地基土的受力及变形特性研究, 同济大学博士论文, 1989.
6. 戴运祥, 斜拉土层锚杆的群桩效应, 同济大学博士论文, 1993.
7. Duncan, J., Static stability and deformation analysis. *Stability and Performance of Slopes and Embankments*. ASCE Geotechnical Special Publications. 1992, pp. 222-265.
8. Falyse, E. et. al. Study of different technique used to determine the filtration opening size of geotextiles. *2nd Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembrane*. Edmonton. 1985.
9. Findley, W. N., 26-year creep and recovery of poly (vinyl chorite and polythylene), *Poly. Engin. and Sci.* 27, 1987, pp. 582-585.
10. Gellaveresi, F. Grouting improvement of foundation soils. Giround, J. P., Filter criteria for geotextiles, *Proc. 2nd Int. Conf. Geotextiles*, 1982, pp. 103-109.
11. Hight, D. W., Deformation of Deep Excavation in Stiff Soil and Weak Rock, XIII ICSMFE, 1994.
12. 侯学渊等, 基坑回弹与再压缩性状分析与预估, 第六届土力学及基础工程学术会议论文, 同济大学出版社、中国建筑工业出版社, 1991.
13. 侯学渊、夏明耀、李桂花, 软土深基坑工程的稳定与隆起研究。
14. Hungr, O. et. al, Evaluation of a three dimensional method of slope stability, *Canadian Geotechnical Journal*. 26, 1989, pp. 679-686.
15. Internatinal Commission on large Dams, Filling materials for water tight cut off wall, 1985, *Bulletin* 51. \$
16. Keilchi Fujita, *Soft Ground Tunnelling and Bridge Structures*, XIII ECSMFE, 1994, New Delhi, India.
17. Koerner, et. al., Remaining technical barrier to obtain general acceptance of geosynthetics. *Grouting, soil improvement and geosynthetics*, Vol. 1 *Geotechnical specialpublications*. 1992, No. 30, ASCE. pp. 63-107.
18. 李桂花、刘前曦, 上海地铁一号线盾构掘进对控制中心钢管桩基础的影响, 隧道及地下工程学会第八届年会论文, 1994.
19. Littlejohn, S., *Ground anchorage technology -a forward look*. *Grouting, soil improvement and geosynthetics*, Vol. 1 *Geotechnical Special Publications*, 1992, No. 30, ASCE. pp. 39-61.
20. 刘国彬, 卸荷下土体模型归一化研究, 同济大学博士论文, 1993.

21. 刘建航、侯学渊, 盾构法隧道, 中国铁道出版社, 1991.
22. Morgenstern, N. , The evolution of slope stability -a 25 year perspective. Invited Lecture. Stability and Performance of Slope and Embankments. ASCE Geotechnical Special Publications. 1992, pp. 1-26.
23. Peck, R. B、Deep Excavation and Tunnelling in Soft Gvound , 7tn ICSMFE, 1969, Mekico City.
24. Roth, L. H. and Schneider , J. R. , Consideration for use of Geosynthetics in Dams. Proc. 11th Annual U. S. Meeting on Large Dams Lecture Series. 1991pp. 1-14.
25. 上海市标准地基基础规范 (DBJ08-11-89), 1990.
26. 软土市政地下工程施工技术手册, 上海市市政工程施工管理局编, 1990.
27. Day, P. W. , Factors Influencing the Movement of Retaining Structures, XIII ICSMFE, 1994.
28. Sprague, C. j. et. al. The evolution of geotextile reinforced embankment, Grounting, soil improvement and geosynthetics, Vol. 2, Geotechnical Special Publications, No. 30, ASCE. pp. 1129-1441.
29. Suklje, L. , Stress and strain in non-linear viscous soils. Int, 1978.
30. 孙更生、郑大同, 软土地基与地下工程, 中国建筑工业出版社, 1984.
31. Suthaker, N. and Scott,D. ,Consolidation behavior of oil sand fine tailings,International Land Reclamation and Mine Conference, 1994.
32. 谢尔勒·马, 顶管工程, 中国建筑工业出版社, 1983.
33. 杨荫华, 土石料的压实和质量控制, 水利电力出版社, 1992.
34. 地基处理技术之五——基坑开挖与支护技术, 冶金工业部建筑研究总院主编, 1993.
35. 章旭昌、侯学渊等, SMW 工法在软土地层中的应用, 同济大学同建设计所等, 1994.
36. 张学文, 上海双圆型盾构工法的可行性研究, 同济大学硕士论文, 1993.
37. 朱百里、沈珠江等, 计算土力学, 上海科学技术出版社, 1990.