

支挡结构土压力计算研究综述

李 涛, 霍九坤, 贺 鹏, 刘显宽, 方雪飞

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 鉴于土压力计算问题在支挡结构设计中的重要意义, 系统地总结分析了土压力研究的基本现状, 详细阐述了土压力计算的几个关键问题: 土拱效应、水-土压力、位移效应、时间效应以及特殊土等, 并指出了土拱效应在不同位移模式以及位移和时间的耦合等方面研究的不足。最后指出完善试验模拟系统和数学计算模型、土拱效应和蠕变抽象影响因素的量化、数值分析和室内外试验相结合、加强特殊土体研究、加强现场监测和原位试验是土压力问题未来研究的重要方向。

关键词: 支挡结构; 土压力; 计算问题; 研究现状

中图分类号: TU432

文献标志码: A

0 引 言

近年来, 伴随着城市化进程的不断发展, 地下空间得到了广泛的开发利用, 同时也产生了许多工程问题, 如深基坑开挖对已有建筑物或构筑物的影响、地下工程施工对地表沉降的影响、渗流对地下结构稳定性影响等。这些问题归根结底都涉及到支挡结构土压力计算这一最基本也是最重要的内容。

经典的 Coulomb 和 Rankine 土压力理论因其计算简单、力学概念明确, 自建立以来一直为工程设计所采用。两种经典理论都假定: (1) 挡土结构均视为刚体; (2) 土体均为理想刚塑性体; (3) 都遵循莫尔-库仑准则。经典土压力理论得到的是土体在极限平衡状态下的土压力值, 且为线性分布。故经典土压力理论存在着明显的弱点: (1) 要求土体变形达到极限平衡状态的临界条件; (2) 两者都没有考虑挡土结构位移的模式以及位移大小对土压力分布的影响; (3) 大量的试验及现场测试结果都与经典土压力理论计算结果存在一定的偏差。

国内外学者通过理论分析和试验对经典土压

力理论进行了修改和完善, 提出了与实际土压力更加接近的土压力计算方法。因此, 本文在综述支挡结构土压力计算研究状况的基础上, 分析探讨了影响土压力的几个关键因素, 指出了今后土压力计算的研究方向。

1 理论研究

1.1 分析方法

支挡结构的受力分析是基坑设计的主要内容之一。支挡结构的受力主要来自周围土体的土压力, 目前针对支挡结构土压力的平衡方法有极限平衡法、滑移线法、极限分析和有限元分析法等。

(1) 极限平衡法。极限平衡法是在基坑围护结构设计早期提出的基坑支护设计计算方法, 一直被我国相关设计人员广泛应用。该方法具有计算简单、使用方便、理论知识明确等特点, 常用于空间效应不明显、地层较均匀、周围环境较稳定的支护结构的设计。此方法不考虑墙体本身和横向支撑变形引起的墙体的倾斜, 仅考虑由土压力计算引起的墙体倾斜。土压力的计算是极限平衡法的关键和难点。Coulomb 土压力理论^[1]假定墙

收稿日期: 2015-09-01

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51508556); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2009QL02); 北京高等学校青年英才计划项目 (YETP0944)

作者简介: 李 涛 (1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 地下工程, litaocumb@163.com。

引文格式: 李涛, 霍九坤, 贺鹏, 等. 支挡结构土压力计算研究综述 [J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37 (1): 94-102.

后滑动土体为刚性, 通过墙踵的滑裂面为平面或者曲面等, 滑裂面和墙土接触面同时达到极限平衡状态, 然后根据滑动土体静力平衡方程和极值原理近似求得极限土压力合力。Rankine 研究了半无限弹性土体处于极限平衡状态时的应力状态后提出了 Rankine 土压力理论^[2]: 假定挡土墙墙背垂直、光滑, 墙后土体表面水平并无限延伸, 作用在挡土墙上的土压力就相当于半无限弹性土体处于极限平衡状态时的应力状态。Resal 等将朗肯土压力计算方法推广到粘性土, 进一步完善了朗肯土压力理论。彭明祥^[3]基于极限平衡理论和平面滑裂面假定, 提出极限土压力是由墙后塑性土体产生, 修正了经典 Coulomb 土压力理论存在的某些缺陷, 由此建立了更为完善的滑楔分析模型。朱大勇等^[4]通过改进传统的极限平衡条分法, 提出一种计算无粘性土在不超载情况下土压力系数的新途径。陈建功等^[5]推导出了一般情况下主动土压力的泛函极值的等周模型, 并证明了 Coulomb 土压力理论滑动破坏的合理性。何思明等^[6]研究了动土压力系数、动土压力合力作用点位置随地震时程的变化特征及地震加速度对挡土墙动土压力分布的影响。

(2) 滑移线法。滑移线法就是利用材料塑性变形过程中最大切应力迹线的性质, 求解塑性力学边值问题的一种方法, 主要用于求解刚塑性材料的平面应变问题。所谓滑移线, 就是指材料处于塑性状态时形成的剪切破坏面的联接曲线。Kotter^[7]首先推导了沿滑移线的极限平衡方程, 为从数学上严格求解极限平衡问题奠定了理论基础。在此基础上, 文献 [8-11] 分别在不同方面完善了沿滑移线的极限平衡方程, 并用该方法解决了条形基础的基础极限承载力、基础两侧有均布荷载的基础极限承载力、不同破坏模式的基础极限承载力以及地震作用下挡土墙的极限土压力等问题。在国内, 彭明祥^[12]将滑移线法运用到挡土墙土压力求解中, 结果表明: 主动土压力一般大于或等于库仑解, 而被动土压力一般小于或等于库仑解。

(3) 极限分析法。将土体看作服从流动法则的理想塑性材料, 当外力达到某一定值时, 在外力不变的情况下土体发生塑性流动, 所受荷载达到极限荷载, 即应用上下限定理分别推求极限荷

载的上限和下限。姜朋明等^[13]在上下限定理推论的基础上, 根据应力不连续和速度不连续的性质, 再考虑有重土、土和墙体摩擦情况下, 通过数值计算, 解三类边值问题。

(4) 有限元法。计算机技术的发展, 结合有限元分析方法使采用更为严密的应力应变分析方法分析土工建筑物或构筑物成为可能。有限元法适于处理非线性、非均质和复杂边界问题, 而土体与支挡结构之间的相互作用分析恰恰就存在这些问题, 因此很适合用有限元法来考虑。Clough 等^[14]首先用有限元法分析土坝问题, 自此有限元法在岩土工程中的应用迅速发展, 并取得了丰富成果。从 Clough 和 Duncan 开始, 许多国内外学者对土压力问题相继采用有限元法来进行研究分析, 并指出有限元法主要的两个问题是: 一是接触面的本构关系; 二是接触单元体。

极限平衡法概念清晰、计算方法简便, 但其需满足的条件苛刻、限制性大, 且应用此法计算的土压力和现场实测土压力有一定的差距。滑移线法一般只适用于平面应变或轴对称问题, 并且极限平衡法和滑移线法均未考虑土体的应力-应变之间的关系。极限分析法将土体看作理想的塑性材料, 与真实土体的复杂性有差距, 使其真实土压力位于上、下限之间。而随着计算机和数值分析方法的发展, 研究者基于有限元的分析方法, 将其与滑移线法和极限分析法相结合, 发展了滑移线法和极限分析法, 使其计算更为严谨合理。

1.2 主要影响因素讨论

1.2.1 土拱效应 土拱效应是由于土体内部应力转移而引起的, 这种应力转移的实现要通过土体抗剪强度的发挥。自 Terzaghi 通过活动门试验发现了土拱效应以来, 在岩土工程界引起了广泛关注。所谓土拱效应就是: 当支撑土体一部分屈服时, 屈服土体将从原有位置移出, 与其邻近静止土体的相对移动将受到两部分土体间剪应力的阻碍作用, 由于剪应力阻力有使屈服土体保留在原有位置的趋势, 使得屈服区域土压力减小而邻近静止土体土压力增大, 这种土压力从屈服区域转移到邻近静止区域的现象, 被称为土拱效应。土拱效应原理如图 1 所示, 其中: $\Delta P \approx \alpha \frac{\delta}{l} E$ 。

土拱效应计算的核心理论核心问题是侧土压力系

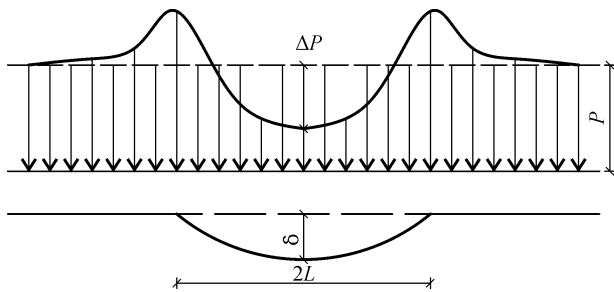


图1 土拱效应原理

Fig. 1 Principle of the soil arch effect

数,而土拱形状、挡墙的变位方式等是影响侧土压力系数的关键因素。Handy^[15]将土拱定义为小主应力的悬链式轨迹线,假设墙后土体滑裂面倾角为 45° ,挡土墙后滑裂面处的小主应力方向为水平方向,进而得到挡土墙后土压力分布及侧土压力系数,并根据水平微分单元法求得挡土墙土压力。蒋波、应宏伟等^[16-17]假定挡土墙后土体小主应力拱为圆弧形,根据土拱形状计算平均竖直应力,得到了对应不同内摩擦角和墙土摩擦角的侧土压力系数,应用水平微分单元法求解挡土墙主动土压力,得到了挡土墙主动土压力强度、土压力合力和合力作用点的理论公式。Shubhra 和 Patra 假设土拱形状为抛物线,研究滑裂面形状对于考虑土拱效应的主动土压力计算结果的影响,对比滑裂面形状分别取平面和抛物线时的计算结果。朱建明等^[18]通过应力莫尔圆及静力平衡法分别给出了考虑土拱效应下主动土压力及被动土压力计算所需的两大因素:侧向土压力系数及竖向平均应力公式。土压力是土与支挡结构之间相互作用的结果,两者之间的相互作用是分析土压力大小的关键。随墙体位移增大,墙后土体塑性区也随之发展,这使得填土抗剪强度的发挥和墙土接触面上摩擦力的发挥也发生变化,因而这又决定挡土墙上土压力的大小不同。涂兵雄等^[19]以填土为黏性土的刚性挡土墙为研究对象,研究考虑挡土墙后的土拱效应时,挡土墙在平移模式下的主动土压力系数和主动土压力解析解。黄睿^[20]研究了考虑土拱效应影响的平移模式刚性挡土墙在受地震作用时主、被动土压力分布和合力作用点的表达。由于以往普遍认为地下结构受周围土体约束,抗震性能很强,加之大量的地下工程设施均为近年来建成的,没有经历过地震作用,因而此方面的影响作用往

往被忽略。但经历了几次地震灾害后,使人们越来越重视地震作用对地下结构的影响作用。周亦涛等^[21]基于土拱效应原理,研究了在有地震时非垂直刚性挡土墙主动土压力的分布情况。

综上所述,挡土墙土拱现象主要有以下特点:(1)土压力分布呈非线性;(2)总压力大小及作用点与 Rankine 和 Coulomb 的不同;(3)墙底竖向平均应力小于 γH 。土拱效应对支挡结构土压力大小及其分布的影响是不言而喻的,但现阶段有关支挡结构土拱效应计算理论主要集中在砂性土填料在平移模式下的土压力计算。对于黏性土填料下的挡土墙土压力计算理论以及不同位移模式和有限填土等条件下考虑土拱效应的计算方法的研究非常不足。因而,有必要对黏性土填料下以及不同位移模式下的土拱效应计算理论进行更加深入的分析研究与探讨,并且地震的影响作用也要进一步研究。

1.2.2 水-土压力 准确计算支护结构水-土压力是合理设计支挡结构的先决条件,但现阶段水土压力设计理论尚存在很多不完善的地方。关于地下水位以下饱和土体侧向水压力分算和合算在学术界和工程界一直存在很大争议,没有达成基本的一致。众多工程人员和学者在此问题上也作了大量相关研究:魏汝龙^[22]提出了固结应力法的概念,并提倡静水压力和土压力分开计算;李大鹏等^[23]以理想饱和砂土模型为分析对象,以水土分算为基础,推导出了水土压力合算与分算的统一计算公式,实现了水土压力计算结果从砂土到黏性土的过渡;李广信^[24]认为水土合算的思想与土力学基本原理有冲突,在计算机理上有诸多不明之处;而赵明华等^[25]通过3组不同渗透性土样对支挡结构的水土压力进行试验研究,得出当渗透系数小到一定程度时,水土合算的结果合理;王钊等^[26]总结和分析了在不同水压力作用下,挡土结构上水土压力的计算方法,强调要对挡土墙进行结构稳定性临界状态分析,根据具体工程选用合适的强度指标进行稳定分析;徐日庆等^[27]指出产生水-土压力分算和合算分歧的关键在于二者都没有充分考虑土体的物理特性,提出考虑土体渗透性的水-土压力计算方法;霍然^[28]以粘土和亚粘土模型为分析对象,引入静水压力传递系数将土体的多种物理性质如渗透性、有效粒度等

考虑在内，得到水土压力新算法；姚秦^[29]考虑填土中粘性颗粒含量的影响，提出了水 - 土压力的混合算法。

分析可知，无论是现有规范的“水土分算”和“水土合算”，还是研究学者提出的方法都是建立在一定工程地质和工程经验之上的，因此在选用土压力计算方法时，要结合当地的工程地质和工程经验。但从工程实用性分析，无论应用哪种计算方法，都应该选用相对应的抗剪强度指标。抗剪强度指标选择不一样往往导致土压力计算结果相差很大，所以不同的算法或者不同土质要选用不同的抗剪强度指标。水土合算时，对正常固结和超固结土，土的抗剪强度指标应采用三轴固结不排水抗剪强度指标 c_{cu} 、 φ_{cu} 或直剪固结快剪强度指标 c_{cq} 、 φ_{cq} ；对欠固结土，宜采用有效自重压力下三轴不固结不排水抗剪强度指标 c_{uu} 、 φ_{uu} 。水土分算时，土的抗剪强度指标应采用有效应力强度指标 c' 、 φ' ，对砂质粉土，缺少有效应力强度指标时，也可采用三轴固结不排水抗剪强度指标 c_{uu} 、 φ_{uu} 或直剪固结快剪强度指标 c_{cq} 、 φ_{cq} 代替；对砂土和碎石土，有效应力强度指标 φ' 可根据标准贯入试验实测击数和水下休止角等物理力学指标取值。

1.2.3 位移效应 由于基坑开挖和支挡结构的支设等工程具有现场机械扰动大等特点，若想墙后的土压力计算更符合实际情况，要充分考虑位移以及墙体不同位移模式等因素对其的影响。在静止状态(静止土压力)与极限平衡状态(主动土压力、被动土压力)之间，土压力与位移呈非线性关系(图 2)，Allan T、Haliburton、王建林等把土压力与位移间的非线性关系简化为分段线性关系，用图中虚线来模拟地基的非线性特性。

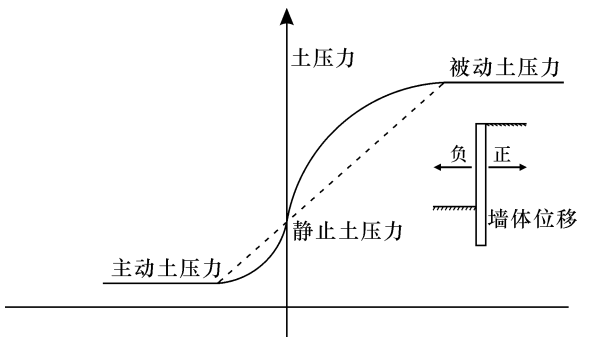


图 2 土压力与位移关系曲线

Fig. 2 Relationship between soil pressure and displacement

墙体位移模式有 3 种基本模式：平移(T)、绕墙底转动(RB)、绕墙顶转动(TR)，在不同位移模式下，随墙体位移变化，墙后土体塑性区的发展是不同的，这使得填土抗剪强度和墙土接触面上摩擦力的发挥也有差异，而这又将导致挡土墙上土压力的大小发生变化。文献 [30 - 31] 研究了刚性挡土墙平动位移效应对土压力计算的影响，考虑墙体平动位移对墙后填土内外摩擦角的影响，得到了考虑位移效应的非极限状态土压力的计算公式。李秀梅等^[32]应用离散元软件 PFC 模拟了砂性填土平移和绕墙底转动两种变位方式下支挡结构的土压力问题，认为平移模式时土压力呈线性分布，绕墙底转动模式土压力基本呈线性分布。Sherif 等^[33]对墙背竖直砂性填土的刚性挡土墙，墙体绕墙底转动的情况作了模型试验。王元战等^[34]基于库仑土压力理论假设，在滑动楔体上沿填土深度方向取水平层薄单元进行分析，研究了墙体绕墙底转动变位模式下，主动土压力强度、合力和合力作用点的理论公式。张永兴等^[35]研究了考虑土拱效应挡土墙绕墙底转动的主动土压力。刘涛等^[36]对黏性填土支挡结构绕墙顶转动下的土拱效应进行了研究，给出了被动土压力系数的求解公式，并指出土拱效应增大，土压力非线性加强。由于边界变形条件的不同，用刚性挡墙的分析方法来进行柔性挡墙结构分析是不太合理的。文献 [37 - 38] 以柔性挡土墙为研究对象，考虑位移效应对柔性挡土墙土压力影响，得到了计算模型。而在基坑工程中多采用多支撑和锚杆围护结构，作用在结构上的土压力受施工方法、水平位移等因素影响，与古典土压力理论有一定的偏差，Terzaghi 和 Peek 建议这种结构的土压力采用如图 3 所示的经验计算图式。其中：图 3a 中 $K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ ；图 3b 中 $K_a = 1 - m \frac{S_u}{\gamma H}$ 。

1.2.4 时间效应 由于土体本身的流变性和固结作用以及深基坑工程的施工特点，要想建立与工程实际情况相符的土压力计算公式，时间效应对其的影响必须考虑。本节总结分析了土压力时间效应的研究现状和需进一步研究的方面。

徐浩峰等^[39]运用三元件模型中的第 1 个线性弹簧模拟固结作用和 KELVIN 模型模拟土体的流

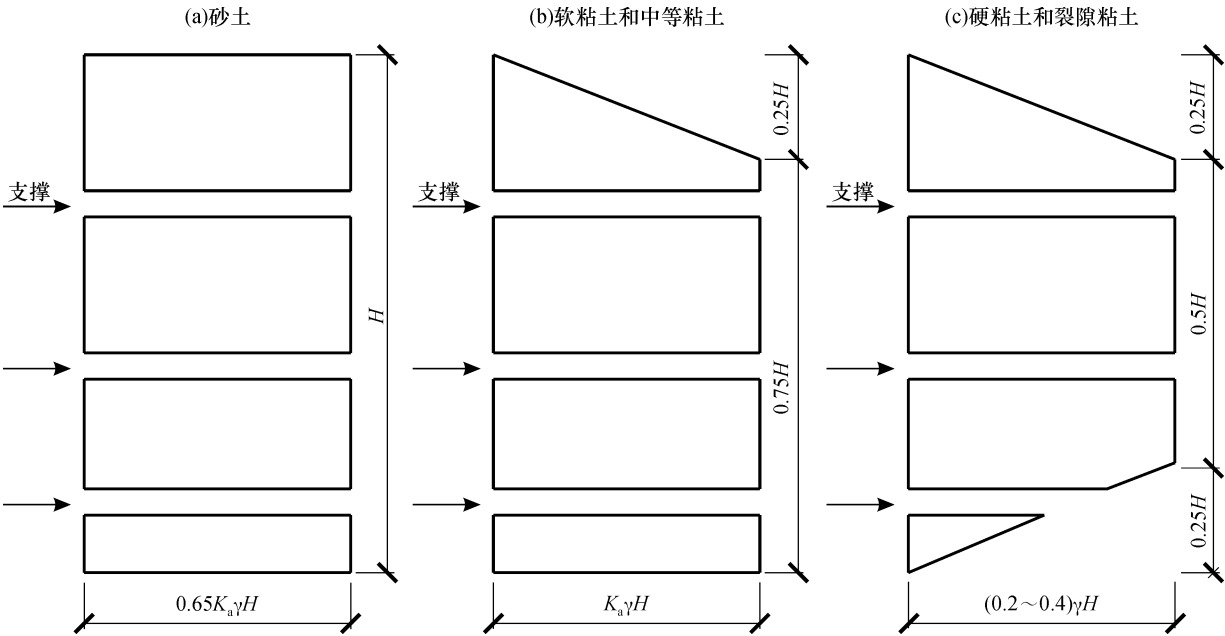


图 3 土压力包络线
Fig. 3 Soil pressure envelope

变性，通过对某饱和软粘土地基深基坑开挖工程实例的分析，较好地反映出基坑的时间效应。张燕凯等^[40]根据土体特性及深基坑工程的实际特点，在前人研究的基础上，运用曲线拟合的方法并结合考虑土体蠕变特点，初步建立了考虑开挖深度和时间效应的土压力计算公式。朱剑锋等^[41]研究了桩-锚基坑土压力计算时，将时间效应因子引入到横向受荷桩的 $p-y$ 曲线方程中，重新推导了土压力计算公式，从而建立了考虑时间效应的土压力计算模型。时间效应对土压力的影响具有长久性，即使工程竣工了其对土压力的影响依旧存在。

时间效应和位移效应的耦合、土拱效应对不同位移模式的影响和内外摩擦角的影响、空间效应等因素对土压力的影响是复杂的、综合性的、持久性的，不能单方面研究某个因素的影响，否则结果就不具备普遍性和实用性。

1.3 试验研究

为了深入研究土压力计算问题，国内外许多学者进行了大量的试验研究，试验类型主要包括常规室内试验、现场实测。

室内试验是研究土压力问题重要方式之一。与现场试验相比，室内试验具有方便长期观测、严格控制主要因素排除次要因素、重复试验次数与耗资少等特点。因此，室内试验成为大多土压

力研究者的研究方式。Terzaghi^[42]通过大量的模型试验，并在 1941 年对土压力进行了现场实测研究，认为只有当土体水平位移达到一定值、土体产生剪切破坏时，Coulomb 和 Rankine 土压力值才是正确的。文献 [33, 43-45] 通过模型试验研究了墙体不同运动形式下，主动土压力强度沿墙高的分布特性及其作用点的位置分布。周健等^[46]研究了不同位移模式下挡土墙水土压力的分布规律。文献 [47-49] 通过模型试验，探讨了挡墙位移量 t 与墙高 h 以及内摩擦角 φ 的变化关系和土压力分布特点。张连卫等^[50]通过离心试验研究了材料的各向异性对主动土压力的影响规律及其机理。刘晓立等^[51]研究了土压力强度因不同挖土深度而变化的分布规律。刘斯宏等^[52]研究了土工袋柔性挡墙土压力沿垂直和水平方向的分布，推导了主动平衡状态下土压力的计算公式。

由于土作业的特殊性，为了进一步研究土压力真实的情况，科研工作者进行了大量的现场实测研究。谭跃虎等^[53]测试了南京国贸大厦基坑支护桩，结果表明：实测的主动土压力小于朗肯土压力理论值，随深度呈“R”形分布，当变形小于 $5H\%$ 时，被动土压力仍能得到充分发挥，与传统的土压力理论相冲突。陈祖煜等^[54]以上海世博会演艺中心为工程背景，指出柔性挡土墙土压力计算宜考虑土压力作用点位置对其计算数值的

影响。黄雪峰等^[55-56]通过现场实测试验研究了黄土边坡和悬臂式围护桩深基坑的土压力分布特点和规律。毕鑫^[57]以秦皇岛珠江道12号深基坑为工程背景,对桩侧土压力进行现场试验,得到桩侧土压力随基坑开挖发生动态变化,并最终呈现为两端小、中部大。黄治云等^[58]通过现场试验和室内试验相结合,研究了桩板墙土拱效应与土压力传递规律之间的关系。

在土压力问题研究中,现场原型试验最能说明问题,但由于各个工程的施工场地地质条件不同、施工周期长短不一、施工方法和人员操作不同等因素,使某个施工经验拥有其独特的局限性,所以只有通过积累大量现场试验研究经验、总结各个工程的普遍共性,再将其应用到工程实践中,才能对新工程起到指导作用。

1.4 特殊土体土压力研究

黄土和膨胀土及其工程问题一直是国内外岩土专家学者广泛关注却未解决的世界性技术难题。随着我国西部大开发战略的实施和国家经济的发展,西部城市快速发展,地铁和超高层建筑陆续兴建,使该地区的深基坑工程无论从规模、深度、周边环境的复杂程度还是地下水处理问题上,都给岩土工作者提出了一系列新的技术课题。

1.4.1 黄土 黄土广泛分布在我国陕西、山西、甘肃等省份。具有大孔隙发育、垂直节理发育、遇水发生湿陷变形及土的抗剪强度参数剧减、失水后土的力学特性显著提高、有显著的结构性等特性。有些特性对工程有利,如失水力学特性提高;有些特性对工程危害很大,如遇水抗剪强度剧减。因此,黄土的深基坑工程围护结构土压力问题非常复杂,本节阐述了黄土土压力的最近研究成果。

黄雪峰等^[55]、赵晓峰等^[59]通过现场实测试验研究了黄土边坡和基坑支护结构的土压力分布特点和规律,指出土压力在边坡坡脚和坡顶处最小,在边坡的 $2H/3$ 处最大。为了充分了解黄土的土压力特征,朱才辉等^[60]以吕梁机场黄土高填方试验段为工程背景,根据原位监测结果和三维数值反演分析方法,得到了黄土高填方中部及边界部位包含填方高度 H 、填土加权平均重度 γ 、坡角 β 等参数的土压力计算公式及其空间分布规律。黄土结构性对土压力的影响也很显著,马林等^[61]研究分析了平面应变条件对黄土应力应变规律及其结

构性的影响,得出结论:总主动土压力变大,作用点下移;总被动土压力变小,作用点上移。湿陷性黄土最主要的特性是土体浸水后发生湿陷,与此同时不同深度的土压力也发生相应的变化,引起土层塌陷沉降。李加贵等^[62]通过对湿陷性黄土边坡进行现场试验研究发现,实测黄土边坡土压力远小于朗肯土压力,且浸水条件下非饱和黄土边坡土压力增速较大。罗奇斌等^[63]通过湿陷性黄土现场试坑浸水试验,用土压力数据传感器传输浸水试验数据,记录不同深度土层的土压力变化特征,并与试验沉降监测数据比较,了解了其变化方式和规律,阐明了湿陷性黄土遇水发生湿陷而产生沉降变形的临界条件及时间点。

1.4.2 膨胀土 膨胀土又称为裂土,在我国分布范围很广,如广西、云南、河南、湖北、四川、陕西、河北、安徽、江苏等地均有不同范围的分布,具有吸水膨胀、失水收缩等特性,在岩土工程界有“癌症”之称。

张颖钧^[64]在京广铁路安口车站膨胀土路堤埋设了土压力盒,采集了挡土墙土压力实测值。分析表明:晴天,土压力实测值与库仑土压力值大致相等;下雨后,地表下2 m范围内,土压力随墙高明显增加,其原因主要是雨水引起膨胀土体吸水膨胀产生膨胀力。杨果林等^[65]以广西南友路和湖南常张路的膨胀土为路堤填料,在不同坡度和排水边界条件下,进行了4种不同气候条件下8组膨胀土路堤模拟试验,得出膨胀土路堤土压力变化规律。谢琨^[66]以成都市某膨胀土深基坑为工程背景,采用室内物理模拟试验方法,研究分析了膨胀土土压力和膨胀力随含水率变化规律,得出了其变化规律曲线。

2 未来发展方向

多年来,国内外许多专家学者致力于土压力问题研究,取得了累累硕果。但由于土压力学问题的复杂性,对其认识仍有诸多不明之处,需要进一步深入研究。笔者认为今后应在以下几方面作出努力。

2.1 完善试验模拟系统和数学计算模型

由于工程施工周期长、土体性质复杂且易受施工影响等特点,因此影响土压力的因素非常多。大量试验和研究分析表明:支挡结构土压力同墙

的位移、变位模式、应力路径、土体非线性、土体物理性质、土体蠕变、土体强度变化以及土拱效应和施工条件等诸多因素有关。而在目前的研究中,考虑影响因素比较单一或只考虑了部分因素,未能在试验和理论研究中综合考虑。在今后的研究中,不但要从模拟材料本身入手,如土体的各种物理性质,而且要从最终破坏形式出发,如非极限平衡状态。通过不断完善试验模拟系统,使模型试验尽可能多的涵盖影响因素,更准确地反映土体破坏情况,力求给出贴近工程实际的计算方法,完善数学计算模型,并实现在施工过程中动态模拟。

2.2 影响因素量化研究

诸如土体的蠕变、土拱效应、空间效应等对支挡结构土压力影响的机理已被广大学者接受,但如何将其影响量化应该是下一步研究的重点,将对实际工程有重大的意义。

2.3 数值分析和原位试验相结合

数值分析和模型试验相结合,是研究支挡结构土压力计算问题主要发展方向之一,最终以提出更接近实际土压力的计算方法并验证其实用性为目的。目前研究中多为数值分析和原位试验独立分析,二者结合的研究较少,没有形成成熟的理论体系。因此,二者结合的研究需要进一步加强,这样才能够达到数值模拟和试验研究相互验证。例如,将现场原位试验与数值分析方法相结合,用数值方法模拟原位试验的加载过程,将其得到的应力和变形与原位试验结果进行比较,来检验数值分析是否合理,若合理,则反过来运用数值分析计算原型的应力和变形。

2.4 加强特殊土研究

针对特殊土体如膨胀土和湿陷性黄土,深入进行土体结构对黄土的土压力的影响、湿陷黄土遇水湿陷时其临界土压力的变化情况、膨胀土坡体内水分运移规律的研究等。由于该类土体结构和物理性质等的特殊性,尤其当土体含水量变化时,土压力计算更为棘手,且此方面研究较少,需要对此加强研究。

2.5 加强原位试验和现场监测

在条件许可的情况下,要加强原位试验和现场监测,多积累现场的量测数据。利用现场数据进行数值模拟,通过数值模拟提取土压力计算公

式,并不断优化土压力计算公式。

3 结束语

以往支挡结构的设计、施工以及对周围环境影响的评价过于依赖经验。随着深基坑等地下工程越来越复杂、规模越来越大、深度越来越深以及周围环境要求越来越严格,可以效仿的工程经验越来越少,因此只有通过不断完善支挡结构设计体系来指导施工工程才能确保工程的安全,而土压力计算是支挡结构设计的核心问题,计算方法的选取是关键,进一步深入研究有利于我国提高此方面的施工技术和水平,同时也能提高我国在世界岩土界的地位。

参考文献:

- [1] Coulomb C A. Essai sur une application des regles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à L'architecture [J]. Memoires de Mathematique et de Physique Presentes a l'Academie Royale des Sciences, 1773, 7: 343-382.
- [2] Rankine W J M. On the stability of loose earth [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1857, 147 (1): 9-27.
- [3] 彭明祥. 挡土墙主动土压力的库仑统一解 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (2): 379-386.
- [4] 朱大勇, 钱七虎. 极限平衡法计算土压力系数的新途径 [J]. 土木工程学报, 2000, 33 (1): 63-68.
- [5] 陈建功, 徐晓核, 张海权. 一般条件下主动土压力的变分求解 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (S2): 310-314.
- [6] 何思明, 王忠福, 王娟. 考虑地震加速度时程影响的挡土墙土压力分布 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2015, 47 (4): 31-37.
- [7] Kötter F. Die Bestimmung des Drucks an Gekrümmten Gleitflächen, eine Aufgabe aus der Lehre vom Erddruck [M]. German: Sitz Konigl Preuss Akad Wissen Berlin 1903: 229-233.
- [8] Hill R. The mathematical theory of plasticity [M]. Oxford: Clarendon Press, 1950.
- [9] Sokolovskii V V. Statics of granular media [M]. Oxford: Oxford University Press, 1965.
- [10] Kumar J, Chitikela S. Seismic passive earth pressure coefficients using the method of characteristics [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39 (2): 463-471.
- [11] Cheng Y M. Seismic lateral earth pressure coefficients for $c-\phi$ soils by slip line method [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30 (8): 661-670.
- [12] 彭明祥. 挡土墙被动土压力的滑移线解 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (3): 460-469.
- [13] 姜朋明, 陆长峰, 梅国雄. 不连续应力边界土压力的严密解法 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (4): 498-502.

- [14] Clough R W, Woodward R J. Analysis of embankment stresses and deformations [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1967, 93 (SM4): 529–549.
- [15] Handy R L. The arch in soil arching [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111 (3): 302–318.
- [16] 蒋波, 应宏伟, 谢康和. 挡土墙后土体拱效应分析 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2005, 39 (1): 131–136.
- [17] 应宏伟, 蒋波, 谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (5): 717–722.
- [18] 朱建明, 赵琦. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力与被动土压力统一解 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (9): 2501–2506.
- [19] 涂兵雄, 贾金青. 考虑土拱效应的黏性填土挡土墙主动土压力研究 [J]. 岩土力学与工程学报, 2012, 31 (5): 1064–1070.
- [20] 黄睿. 复杂条件下地震土压力及稳定问题的计算方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [21] 周亦涛, 陈福全. 考虑土拱效应的非垂直挡墙地震主动土压力 [J]. 岩土力学与工程学报, 2015, 34 (7): 1452–1461.
- [22] 魏汝龙. 总应力法计算土压力的几个问题 [J]. 岩土工程学报, 1995, 17 (6): 120–125.
- [23] 李大鹏, 唐德高, 黄牧, 等. 基于广义有效应力原理的水土压力统一计算理论 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41 (5): 82–89.
- [24] 李广信. 基坑支护结构上水土压力的分算与合算 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (3): 348–352.
- [25] 赵明华, 霍然, 罗宏, 等. 支挡结构上的水土压力特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (1): 55–60, 66.
- [26] 王钊, 邹维列, 李广信. 挡土结构上的土压力和水压力 [J]. 岩土力学, 2003, 24 (2): 146–150.
- [27] 徐日庆, 张庆贺, 刘鑫, 等. 考虑渗透性的水–土压力计算方法 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (5): 961–964.
- [28] 霍然. 基坑水土压力计算方法与试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [29] 姚秦. 基坑工程的水土压力混合法 [J]. 岩土力学与工程学报, 2001, 20 (1): 134–135.
- [30] 徐日庆, 龚慈, 魏纲, 等. 考虑平动位移效应的刚性挡土墙土压力理论 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2005, 39 (1): 119–122.
- [31] 杨庆光, 刘杰, 何杰, 等. 平移模式下挡墙非极限土压力计算方法 [J]. 岩土力学与工程学报, 2012, 31 (S1): 3399–3406.
- [32] 李秀梅, 蒋明镜. 两种位移模式下挡墙主动土压力的离散元模拟 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6 (1): 60–64.
- [33] Sherif M A, Fang Y S, Sherif R I. K_A and K_0 behind rotating and non-yielding walls [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110 (1): 41–56.
- [34] 王元战, 李蔚, 黄长虹. 墙体绕基础转动情况下挡土墙主动土压力分布 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (2): 208–211.
- [35] 张永兴, 陈林. 考虑土拱效应挡土墙绕墙底转动的主动土压力 [J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32 (3): 46–52.
- [36] 刘涛, 钱明, 赵琦, 等. 绕墙顶转动位移模式下黏性土挡土墙的被动土压力研究 [J]. 中国科技论文, 2015, 10 (1): 35–38.
- [37] 李镜培, 马原, 饶平平. 考虑位移的柔性挡墙上土压力计算 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (10): 2937–2941.
- [38] 应宏伟, 朱伟, 郑贝贝, 等. 柔性挡墙的主动土压力计算及分布研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (S2): 1–6.
- [39] 徐浩峰, 应宏伟, 朱向荣. 某软土深基坑工程时间效应有限元分析 [J]. 工程地质学报, 2007, 15 (1): 92–97.
- [40] 张燕凯, 桂国庆, 赵抚民. 深基坑工程中考虑开挖深度和时间效应的土压力计算公式的探讨 [J]. 南昌大学学报 (工科版), 2002, 24 (1): 85–89.
- [41] 朱剑锋, 徐日庆. 考虑时效和土拱效应桩–锚基坑土压力计算方法 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2009, 43 (4): 766–770.
- [42] Terzaghi K. Record earth pressure testing machine [J]. Engineering News Record, 1932, 109 (29): 365–369.
- [43] Fang Y S, Ishibashi I. Static earth pressures with various wall movements [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112 (3): 317–333.
- [44] Fang Y S, Chen T J, Wu B F. Passive earth pressures with various wall movements [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120 (8): 1307–1323.
- [45] 周应英, 任美龙. 刚性挡土墙主动土压力的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1990, 12 (2): 19–26.
- [46] 周健, 高冰, 彭述权. 不同位移模式下挡土墙的模型试验及数值模拟 [J]. 岩土力学与工程学报, 2011, 30 (S2): 3721–3727.
- [47] 何颐华, 杨斌, 金宝森, 等. 深基坑护坡桩土压力的工程测试及研究 [J]. 土木工程学报, 1997, 20 (1): 16–24.
- [48] 岳祖润, 彭胤宗, 张师德. 压实粘性填土挡土墙土压力离心模型试验 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14 (6): 90–96.
- [49] 梅国雄, 宰金珉. 考虑位移影响的土压力近似计算方法 [J]. 岩土力学, 2001, 22 (1): 83–85.
- [50] 张连卫, 张建民. 考虑各向异性的土压力离心模型试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2012, 29 (2): 68–71.
- [51] 刘晓立, 严驰, 吕宝柱, 等. 柔性挡墙在砂性填土中的土压力试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21 (4): 505–508.
- [52] 刘斯宏, 薛向华, 樊科伟, 等. 土工袋柔性挡墙位移模式及土压力研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (12): 2267–2273.
- [53] 谭跃虎, 钱七虎. 作用于支护结构的土压力测试与分析 [J]. 建筑技术, 1998 (S): 250–252.
- [54] 陈祖煜, 迟鸣, 孙平, 等. 计算柔性支挡结构主动土压力的简化方法 [J]. 岩土工程学报, 2010, 31 (S1): 22–27.

- [55] 黄雪峰, 李佳, 崔红, 等. 非饱和原状黄土垂直高边坡潜在土压力原位测试试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (4): 500–506.
- [56] 黄雪峰, 张蓓, 覃小华, 等. 悬臂式围护桩受力性状与土压力试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (2): 340–346.
- [57] 毕鑫. 深基坑桩锚支护结构现场试验及数值模拟研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
- [58] 黄治云, 张永兴, 董捷. 桩板墙土拱效应及土压力传递特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (7): 1887–1892.
- [59] 赵晓峰. 黄土基坑围护结构上的土压力 [J]. 勘察科学技术, 2012 (4): 38–41.
- [60] 朱才辉, 李宁, 袁继国. 黄土冲沟中高填方土压力量测及分布规律探讨 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (3): 827–836.
- [61] 马林, 邵生俊, 陈昌禄. 黄土结构性对挡土墙土压力的影响分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9 (3): 596–602.
- [62] 李加贵, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 原状非饱和 Q_3 黄土的土压力原位测试和强度特性研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (2): 433–440.
- [63] 罗奇斌, 王家鼎, 康卫东, 等. 湿陷性黄土试坑浸水试验中土压力变化特征分析 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39 (4): 88–91.
- [64] 张颖钧. 裂土挡土墙模型试验缓冲层设置的研究 [J]. 岩土工程学报, 1995, 17 (1): 38–45.
- [65] 杨果林, 黄向京. 不同气候条件膨胀土路堤土压力的变化规律试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (8): 948–955.
- [66] 谢琨. 成都市某膨胀土深基坑支护设计研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014.

Comprehensive review of earth pressures on retaining structure

LI Tao, HUO Jiu-kun, HE Peng, LIU Xian-kuan, FANG Xue-fei

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the soil pressure calculation in the design of retaining structures, the author systematically did a review about the earth pressure and a detailed elaboration of the soil pressure calculation, the soil arch effect, water and soil pressure and displacement effect, time effect and special soil, etc.. The paper points out some drawbacks of the soil arch effect under different displacement as well as the coupling of displacement and time. It is concluded that the important research is a perfecting test simulation system and math model. The quantification of abstract factors involves the soil arch effect and creep deformation, the combination of outdoor, indoor experiments and numerical analysis by strengthening the research of special soil and site monitoring of the earth pressure, and the in-situ soil test in future.

Key words: retaining structure; earth pressure; calculation problem; current researches