城市轨道交通施工力学的新挑战

周顺华*

同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804

* E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn

收稿日期: 2015-12-10; 接受日期: 2016-02-17; 网络出版日期: 2016-04-13

摘要 介绍了我国城市轨道交通运营线路概况和在建工程规模, 分别从复杂的工程地质条件和严格的环境制约条件两个方面分析现阶段我国城市轨道交通建设所面临的技术难题. 工程地质条件方面, 极软土产生的大变形和整体破坏, 砂卵石地层面临的滞后坍塌、施工机械磨损等困难以及多变地层、高水压和沼气等给施工安全带来挑战; 在环境制约方面, 下穿铁路、下穿建筑物和下穿文物对施工造成困难. 上述难题给施工力学在特殊条件下的破坏描述和高精度小变形的计算要求等方面带来了挑战, 需要从施工力学模型、附加小幅值动应力的施工安定性理论和复杂多因素预测理论三方面寻求突破.

关键词 城市轨道交通, 施工, 地质条件, 下穿施工, 安全控制

1 引言

城市轨道交通作为大运量的公共交通模式, 在解决大城市的交通问题中起到非常重要的作用. 截至 2014 年底, 我国 22 座城市开通城市轨道交通线路共 100 条, 运营总里程达 3173 km, 其中地铁 2361 km, 占 74.4%^[1,2]. 此外, 目前有 40 座城市近 200 条线路在建, 在建线路长 4073 km, 其中地铁线路 3154 km^[1], 根据各在建城市盾构机数目的初步统计, 我国在各地地下推进施工的盾构机总数超过 400 台, 在国际上实属罕见. 图 1 是我国自 2007 年以来城市轨道交通运营里程数和每年新增运营里程数^[2], 从中可以发现我国已经步入每年新增数百公里运营线的高速发展期. 到 2020 年, 我国城市轨道交通运营总里程将超

6000 km^[1], 分布如图 2 所示. 届时运营里程规模将超过世界上其他所有国家和地区的总和. 可以预见, 在不远的将来, 我国将成为城市轨道交通的超级大国.

图 1 (网络版彩图)我国城市轨道交通运营里程统计

引用格式: 周顺华. 城市轨道交通施工力学的新挑战. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 560–569

Zhou S H. New challenges in construction mechanics of urban rail transit (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 560–569, doi: 10.1360/N092015-00318

图 2 (网络版彩图)2020 年我国城市轨道交通规模和分布

城市轨道交通基础结构建设既具有隧道工程、市政工程、公路工程等方面的施工特点,但也有其显著的特殊性,由于受到城市既有建筑和布局的影响,其施工场地不如铁道工程和公路工程空旷,工程体量又比一般的市政工大,施工周期相对较长,且周边影响和干扰因素繁多。因此,随着我国的城市轨道交通建设规模逐年扩大,技术复杂程度亦有逐年提高的趋势,研发或引进新技术、新装备、新方法正成为不少城市轨道交通建设所面临的课题。显然,新的技术和方法受制于工程界的认识程度和理论水平,现有的经典力学理论在解决工程问题时发挥了重要的作用,但对于一些特殊条件或特殊环境经典理论还存在不足,需要从新的角度重新审视施工力学方法。

本文在分析城市轨道交通工程建设面临技术问题的基础上,提出了城市轨道交通施工力学理论的突破点。

2 城市轨道交通施工面临的工程技术问题

2.1 复杂的工程地质条件

历史上大城市的形成需要河流等便于水运的自

然条件,这就决定了城市所处的地层条件大多为第四纪残积、冲积、洪积或滨相沉积层。图 3 是我国城市轨道交通在建城市的分布及其对应的主要工程地质概况,从中可以发现沿海发达城市大多含有滨相沉积形成的软土层,甚至有不少区域的地基基本承载力小于 50 kPa,低于上海、东京等典型软土层;此外,另有一些地区存在交互的砂、砾石、卵石层并常含承压水;中西部城市则以粉土、黄土并夹砂卵石以及地层断裂带等为主;南部城市则以黏土、粉土、卵石、软硬岩以及溶洞、膨胀岩等为主。如此复杂多变的地质条件,给我们的工程建设造成了极大的困难。

2.1.1 含淤泥的极软土层

我们对软土的认识是孔隙比大($e > 1.0$)、含水量高(w 接近或大于液限)从而导致强度低、易于变形,即使国内外对软土的力学性质和工程特征开展了大量的研究,获得了丰富的研究成果^[3~8],但软土地层的工程实践表明,无论是施工阶段还是运营阶段,人们对软土地区工程的设计计算依然存在算不准、认不清、把不住等问题。就我国软土地层较为典型的上海地铁建设为例,既积累了丰富的经验,也有许多教

图3 我国城市轨道交通建设所面临的场地地质情况分布

训^[9~14]，以2003年上海地铁4号线的事故为例，我们对施工全过程的力学分析以及对破坏的认识尚有许多工作有待深入开展。

由于软土的强度变化范围很大，以前工程中所遇到的软土大多为淤泥质土即土体的孔隙比处于 $1.0 < e < 1.5$ 。当土体的孔隙比 $e > 1.5$ 时被称为淤泥，其对应的工程力学性质比淤泥质土差，且两者的工程行为差别甚大，尤其是对盾构推进施工以及后续管片的受力影响很大^[4]，不妨把含淤泥的深厚软土层作为特殊的软土层。

当前我国城市轨道交通的建设不仅面临上海这种典型的软土层，而且还面临土层的强度比上海软土低、灵敏度比上海软土层高的含淤泥的极软土，如宁波、温州、佛山等地。这类极软土的变形和破坏，迄今我们还难以描述清楚。图4是2005年发生在萧甬铁路的路基滑塌事故。萧甬铁路于1937年建成，经过半个多世纪的运营，路基土的强度应该有所提高，但导致该事故发生的原因是在线路的保护区之外100 m有一取土坑，正是取土坑的存在导致路基的滑塌。宁波地铁的建设便面临这种受小应力幅值作用且影响范围广的含淤泥层的极软土问题。

图5(a)是某地铁明挖区间基坑工程在含淤泥的极软土层中施工发生的另一类事故。基坑深10 m，宽约12 m，采用钻孔灌注桩作为围护结构。当基坑开挖接近基底时，发生承压水突涌，导致基坑围护结

图4 铁路地基整体滑塌事故

构整体下沉，下沉量约1.5 m，部分型钢围檩发生了意想不到的变形，如图5(b)所示。可见结构所受到的土压力远大于既有理论的计算值，但此时基坑依然保持整体。这是发生在极软土层与承压水共同作用下的基坑所发生的整体沉降破坏，如图5(c)，迄今的力学理论尚无法描述。

2.1.2 砂卵石

砂卵石或砾石层形成于冲积或洪积层，在我国分布及其广泛，北京、成都、广州、杭州、深圳等地均有砂卵石层或砾石层。这种地层的主要特征是散粒，而且颗粒坚硬，但其工程行为受级配的影响甚大^[15~23]，当卵石层中无胶结体时，呈松散状，坍塌过

图 5 (网络版彩图)极软地层中基坑整体下沉

(a) 基坑整体下沉; (b) 型钢围檩受压变形; (c) 基坑整体沉降破坏示意图

程极短, 当胶结体的含量达到一定比例时, 可以形成致密的整体性非常好的地层, 如图 6(a)所示, 该类地层具有极好的自稳性, 基坑无支护开挖深度可达 10 m, 而且周边地表几乎不发生沉降变形; 但当砂卵石层中缺少胶结物或比较松散时, 则极易坍塌, 如图 6(b)所示.

盾构机在砂卵石层中施工的最大困难是掘进和

图 6 (网络版彩图)砂卵石地层中的工程开挖

(a) 整体性较好的砂卵石地层; (b) 基坑随挖随塌

出渣^[24,25]. 在密实的砂卵石中如何让卵石进入土仓, 在松散的砂卵石层中如何控制进入土仓的卵石数量不致引起超挖, 土仓中的卵石如何顺利地螺旋输送机中送走, 这些都是盾构施工的难题. 图 7(a)是盾构机在砂卵石中掘进引起的刀具磨损情况, 图 7(b)是卵石在螺旋输送机中导致主轴折断的情况. 当然在施工中卡机的情况就更为普遍. 盾构机在砂卵石层掘进的另一大难题是超挖控制问题, 图 7(c)为盾构隧道贯通之后所发生的坍塌到地面的情况.

在砂卵石层中无论进行钻孔桩还是地下连续墙的施工同样会遇到各种各样的困难. 首先是往下钻孔或成槽的设备能力, 图 8 是杭州滨江地铁站的地质剖面, 若地下连续墙要隔断砂卵石中的承压水(该承压水与钱塘江连通), 则墙体须嵌入岩层, 首先需要穿透砂卵石层, 为此选用了国内成槽能力最强的成槽机, 密实的砂卵石曾导致 2 台功率最大的成槽机损坏, 不得不终止施工并调整施工方案.

2.1.3 多变地层

曾经海边的礁石, 在地质年代中随着地面的下沉礁石周围淤积成淤泥, 然后地面又隆起, 形成今天

图 7 (网络版彩图)砂卵石层中地铁工程技术问题

(a) 刀具磨损; (b) 螺旋输送机主轴折断; (c) 砂卵石层地面坍塌

图 8 (网络版彩图)杭州滨江站地质剖面图

的城市. 此时在地下修建地铁隧道, 任何人都感叹地层的多变. 图 9 是南宁地铁某区间隧道的横剖面图, 隧道横断面的土层有砂层、淤泥层, 与淤泥层紧邻的是强度接近 200 MPa 的岩层, 与硬岩相比淤泥的抗剪强度可以忽略不计. 地层发生如此大幅度的变化, 对我们的工程建设来说, 其难度可想而知^[26~28]. 类似的多变地层在青岛、大连、深圳、杭州、南京等地均有分布.

2.1.4 高水压

水是地下工程建设遇到的万害之源, 诸多的事故都与地下水的活动有关^[29~32]. 事实上, 地层中的潜水已经给我们的施工带来了极大困难, 上海地铁在 1 号线施工的基础上, 总结过车站基坑抽条加固的

经验. 一方面是为了解决软土基底的稳定性问题, 另一方面也是为了方便富含水区分层施工的施工作业问题. 当地层中含有承压水层或遇到高压水时, 与潜水相比问题要严峻得多^[33~36]. 图 10 是某地铁基坑受承压水作用出现的“泉眼”群, 此时基底土的强度已完全丧失.

高地下水压对地铁施工来说, 具有突发性强, 破坏力大, 抢修困难等特点, 对施工安全和后续的结构防水带来了较大的挑战.

图 9 复合多变地层中盾构掘进

图 10 (网络版彩图)基坑承压水突涌

2.1.5 沼气

地层中沼气的存在不仅使我们面对的地层变为复杂的多相体,同时沼气由于无味而有毒,对工人的人身安全产生极大的危害.在地铁施工中常常会遇到沼气^[37,38],图 11 所示为地铁维护桩施工中沼气燃烧的照片.

沼气的浓度高到一定程度(3%)会发生爆炸事故,图 12 为杭州地铁建设时遇到的高浓度和高压力沼气,释放出的沼气带水冲出约 10 m 高,燃烧时火苗超过 5 m,测得沼气的浓度达到 4%,压力达到 0.4 MPa,这是地铁建设所面临的新课题.

2.2 复杂的周边环境制约

城市建设的一般规律总是先易后难,随着我国近 20 年大规模的城市轨道交通建设的发展,我们的城市轨道交通建设将面临越来越苛刻的周边制约影响.

2.2.1 下穿铁路

铁路是我国国民经济的大动脉,也是我国主要的长途客运工具,近年来随着高铁建设的推进,高铁也正悄悄地改变国民的生活方式.不仅如此,高铁还改变了若干城市布局.于是城市轨道交通建设需要下穿铁路和高铁的数目也日益增加^[39,40].

在 20 世纪 90 年代和 21 世纪初,高铁下穿铁路采用管棚法,而近十年采用盾构法施工直接下穿铁路已越来越多.下穿铁路可以分为下穿普通铁路干线和下穿高速铁路两类.所面临的共同问题是:施工期确保铁路行车安全,并经受铁路高频次行车荷载的作用.不同点在于:下穿普通铁路要经受大轴重

图 11 (网络版彩图)围护桩施工沼气燃烧

(a)

(b)

图 12 (网络版彩图)沼气层盾构施工

(a) 沼气释放; (b) 沼气点燃

货车的动力作用,下穿高铁要满足无砟轨道的变形要求和高速列车的舒适性要求.

目前城市轨道交通下穿铁路的施工面临越来越严峻的挑战:在立面上多层次多线路下穿;小夹角下穿;连续穿越多条干线;对下穿高铁来说,面临毫米级的变形控制技术.

2.2.2 下穿建筑物

城市轨道交通除了下穿铁路,另一制约条件就是需要下穿众多建筑物^[41,42],以杭州地铁 1 号线为例,婺江河至城站区间小半径曲线连续下穿 157 栋建筑物,如图 13 所示.这些建筑物中有部分是采用碎石桩基础,基础底部微小的变形或扰动都会导致较大的变形,从而影响建筑物的安全.另外,曲线下穿建筑群,在空间几何关系上会造成各种非对称的斜穿、侧斜穿等形式(图 14).使得建筑物对施工产生的附加荷载难以计算,同时也造成对建筑物差异沉降的控

制难度变大。

另一类下穿问题需要从建筑物的桩基础中穿越或者需要直接从桩体上穿越。如图 15 所示，从桩体上穿越需要截桩，这还常常与桩基础的托换有关联。

2.2.3 下穿文物

我国是文明古国，各个城市都有属于自己的历史，每个城市也都有各自引以为傲的文物，城市轨道交通建设不能破损这些文物。图 16 是宁波城市轨道交通线网和文物的分布情况。宁波是极软土层，任何施工引起的变形都会波及较远的范围。而这些文物大多不具有深基础，稍有不慎便会使千年的文物毁于一旦。以宁波咸通塔为例，该塔建于唐咸通四年（公元 863 年），距今已有 1100 年的历史。地铁 1 号线从咸通塔侧面距离 14 m 穿过，在极软土层中施工引起的变形仅以毫米控制，其难度可想而知。

图 13 杭州 1 号线小半径下穿建筑群(部分)

图 14 非对称下穿建筑物(群)
(a) 曲线下穿; (b) 直线斜穿

图 15 盾构穿越桩基础
(a) 桩间下穿; (b) 桩体下穿(截桩)

3 施工力学面临的挑战

当前城市轨道交通建设所面临的问题可以归纳为两个方面：1) 施工中的安全性问题，以多种形式的坍塌为主；2) 环境保护问题，尤其是苛刻的变形控制要求，需要高精度的计算理论。

造成施工坍塌的直接原因是施工技术措施不到位或者是施工方案不合适，其深层次原因是对施工过程的力学分析不能体现工程的实际情况，以图 5 所示的破坏为例，既有滑动破坏的特征，但又非传统意义上的滑动破坏，同时，围护结构整体下沉约 1.5 m，又难以通过几何非线性获得解答，然而，就围护结构自身而言，还不是大变形，更接近于冲切破坏，造成冲切的原因又是什么？图 6~8 是卵石所导致的施工问题，这既属于散体力学的范畴，又具有连续介质的特征，如图 6(a)，前者尚能用离散元进行模拟，而后者却很难采用合适的力学模型进行分析。目前卵石对施工机械的影响，尚缺乏相应的理论方法，导致机

图 16 宁波轨道交通线网和文物分布情况

械选择具有一定的盲目性。

地下水在工程中的危害非常大, 对应的计算理论建立在以达西定律为基础的渗流场计算理论上, 随后又联合 Biot 固结理论发展成流固耦合计算模型, 但对承压水突涌的计算, 目前更多地采用压重法。无论哪种方法, 都只能反映水在土层中的某些特征, 如果土层中含有一定数量的粉性细颗粒, 渗流会带动其中的一部分颗粒发生迁移, 这一现象目前的理论尚无法描述。同样, 如果在土层中含有沼气等气相, 在一定压力作用下沼气会溶解于水, 这种水气相互作用现象也不是当前的三相力学方法所能描述的。

以下穿高铁和文物为代表, 对施工变形控制精度的要求已经苛刻到毫米级, 由于岩土和混凝土介质的特殊性, 不存在普遍适用的力学模型, 即便相对合理的模型也有差异性和变异性, 因而计算结果与实际情况总存在各种各样的偏差, 这对于达到毫米级的变形计算精度要求来说是极其困难的。

显然城市轨道交通建设必须面对各种复杂的地质环境, 现阶段的力学理论尚不足以解决复杂条件下施工作用所产生的各种力学响应, 尤其是局部破坏导致的大范围破坏或整体破坏, 以及施工变形的传递和扩散规律等问题, 致使施工力学面临以下挑战。

1) 复杂工程地质条件对应的复杂介质在施工中受介质自身力学特性变化和外部施工作用影响的破坏力学模型。复杂介质包含各种不同粒径颗粒的不同组合及其与水、气的相互作用, 形成既非连续体, 又非单纯的散粒体, 同时又具有多种破坏形态, 破坏的过程不一, 破坏产生的后果各不相同; 同时破坏还受施工作业面和作业方式的影响。在复杂环境中的施工作用不仅仅是简单地边界问题, 甚至会影响介质的力学特性。现代的力学理论对这种复杂系统在复杂过程中的变化尚难以解释清楚。

2) 受施工近地建构筑物严格变形控制要求的影响, 而原本粗放式的施工变形计算理论又难以达到毫米级, 这对于受结构特征、多相组合体以及复杂应力历史过程影响的岩土体来说, 无疑是巨大的挑战, 这需要对模型、施工过程等作精细化的处理, 同时还要解决高精度计算参数的获取问题。

4 施工力学理论的突破点

城市轨道交通施工面临的破坏模式和小变形控

制要求力学理论有新的突破, 但希望把城市轨道交通建设中所遇到的工程技术问题统统纳入到施工力学理论体系中是不现实的, 可以在继承既有连续介质力学和非连续介质力学的研究成果的基础上, 考虑施工作用特征, 从以下几个方面逐一寻求突破。

1) 施工力学模型。能表征施工作用过程的含淤泥层的极软土、砂卵石散粒和部分散粒特征的力学模型。将传统的施工边界问题视为外部的机械干扰并使介质暂时改变局部自重应力场下的平衡状态, 这种局部的干扰以解除介质间的相互约束使自重应力场内某些方向的内应力得以释放为前提; 当然也存在与这一过程相反的问题, 如施加局部的压应力或在介质中人为增加胶结材料以改善介质的力学性质, 如加固。这与现行连续介质力学采用单元体加卸载所获得的力学响应存在一定的差别。内应力释放产生的变形和破坏是城市轨道交通施工力学研究的关键。

2) 附加小幅值动应力场的施工安定性理论。城市轨道交通的施工是在城市功能正常发挥的前提下进行的, 城市道路频繁的行车对我们的施工而言相对于在原来的自重应力场中施加一项动应力, 虽然动应力的幅值不大, 但对于具有散粒特征的土而言, 这一附加动应力会改变部分应力状态下介质的变形和破坏特征。事实上, 杭州地铁 1 号线湘湖发生的坍塌事故与这一特性有关。当然, 受附加动应力影响最为显著的是下穿铁路工程。

3) 复杂多因素共同作用的理论预测模型。正如前文所述, 城市轨道交通的施工面临复杂多变的工程地质条件和苛刻的环境制约条件, 加上各种城市设施正常运转所产生的影响, 使得我们研究这一问题的系统变得非常复杂; 此外, 在施工过程中, 施工装备的性能、配置、操作人员的熟练程度以及管理模式等都会对施工结果产生影响, 如何在经典力学的基础上考虑这些因素, 从而更加准确地预测施工结果, 这就要求建立复杂多因素的理论预测模型。

5 结语

我国的城市轨道交通建设是有史以来规模最大、建设速度最快、最为集中的城市建设工程, 这势必对我国城市的现代化发展起到至关重要的作用。正因为大规模的集中建设, 施工安全也就成为地铁建设的头等大事。

面对复杂的城市轨道交通建设, 我们有理由也有条件在理论上做出有新意的成果. 尤其是针对施工安全和环境控制的施工力学理论, 一方面有助于

攻克高难度的施工技术问题, 另一方面有利于推进我国的基础理论研究, 提升我国城市轨道交通的整体技术水平.

致谢 本文是在同济大学交通运输工程学院轨道交通结构建养课题组多年研究基础上形成的想法, 对课题组全体成员和历届研究生所给予的支持表示感谢.

参考文献

- 1 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2014 年度统计分析报告. 都市快轨交通, 2015, 3: 1-2
- 2 刘仲, 顾保南, 孙世超, 等. 2014 年中国城市轨道交通运营线路统计和分析——中国城市轨道交通“年报快递”之二. 城市轨道交通研究, 2015, 18: 1-6, 95
- 3 Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground. In: Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, 1969. 225-290
- 4 Zhou S H, Ji C. Tunnel segment uplift model of earth pressure balance shield in soft soils during subway tunnel construction. Int J Rail Trans, 2014, 2: 220-238
- 5 孙永玉, 周顺华, 宫全美. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律. 岩石力学与工程学报, 2009, 28: 500-506
- 6 周顺华, 许恺, 王炳龙, 等. 软土地基超载卸载再加荷的沉降研究. 岩土工程学报, 2005, 27: 1226-1229
- 7 Kasper T, Meschke G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling. Tunn Undergr Sp Tech, 2006, 21: 160-171
- 8 方勇, 何川, 江英超, 等. 土压平衡式盾构掘进对地层应变场扰动模型试验研究. 铁道学报, 2013, 35: 85-89
- 9 元翔, 宫全美, 周顺华. 离心模型试验的连续墙变形影响因素. 土木建筑与环境工程, 2012, 34: 39-46
- 10 向科, 周顺华, 詹超. 浅埋地下结构浮力模型试验研究. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38: 346-352, 357
- 11 邹春华, 周顺华, 徐正良, 等. 基于位移反分析法的盾构掘进面土压力计算. 中国铁道科学, 2010, 31: 53-58
- 12 霍军帅, 宫全美, 陈娟. 坑中坑基坑围护结构变形特性分析. 土木建筑与环境工程, 2011, 33: 139-142, 208
- 13 季昌, 周顺华, 许恺, 等. 盾构隧道管片施工期上浮影响因素的现场试验研究. 岩石力学与工程学报, 2013, 32: 3619-3626
- 14 孙永玉, 周顺华, 庄丽. 考虑残余应力的基坑被动区土压力及强度计算. 土木工程学报, 2011, 44: 94-99
- 15 周顺华, 高渠清, 崔之鉴. 开挖应力释放率计算模型. 上海力学, 1997, 18: 91-98
- 16 Thornton C, Liu L F. DEM simulations of uniaxial compression and decompression. In: Compaction of Soils, Granulates and Powders. London: Taylor & Francis Group, 2000. 251-261
- 17 Sachan A, Penumadu D. Effect of microfabric on shear behavior of Kaolin clay. J Geotech Geoenviron ASCE, 2007, 133: 206-318
- 18 Kikkawa N, Nakata Y, Hyodo M. Analysis of shear band on sandy soil in triaxial test using image processing techniques. Geotech JSCE, 2007, 63: 59-71
- 19 庄丽, 周顺华. 散粒体卸载特性的三轴伸长试验研究. 固体力学学报, 2009, 30: 354-360
- 20 庄丽, 周顺华. 砂的静力加卸载试验和应力释放模型研究. 岩土力学, 2009, 30: 2667-2673, 2685
- 21 贾剑, 周顺华, 宫全美. 砂性土成拱应力释放特性的模型试验及数值模拟研究. 岩土力学, 2013, 34: 395-403
- 22 韩高孝, 宫全美, 周顺华. 摩擦型岩土材料土拱效应微观机制颗粒流模拟分析. 岩土力学, 2013, 34: 1791-1798
- 23 吴迪, 周顺华, 贾剑. 开挖问题摩擦效应的有限元计算方法. 岩石力学与工程学报, 2015, 34: 907-914
- 24 许恺, 季昌, 周顺华. 砂性土层盾构掘进面前土体改良现场试验. 土木工程学报, 2012, 45: 147-155
- 25 代仁平, 宫全美, 周顺华, 等. 土压平衡盾构砂卵石处理模式及应用分析. 土木工程学报, 2010, 43: 292-298
- 26 宋克志, 孙谋. 复杂岩石地层盾构掘进效能影响因素分析. 岩石力学与工程学报, 2007, 26: 2092-2096
- 27 王明胜. 复杂地层中盾构法隧道渣土改良技术. 地下空间与工程学报, 2007, 3: 1445-1447, 1463
- 28 陈仁朋, 刘源, 汤旅军, 等. 复杂地层土压平衡盾构推力和刀盘扭矩计算研究. 地下空间与工程学报, 2012, 8: 26-32
- 29 Anagnostou G, Kovarik. The face stability of slurry-shield-driven tunnel. Tunn Undergr Sp Tech, 1994, 9: 165-174
- 30 Alem A, Elkawafi A, Ahfir N D, et al. Filtration of kaolinite particles in a saturated porous medium: Hydrodynamic effects. Hydrogel J, 2013, 21: 573-586
- 31 Fritz P. Additives for slurry shields in highly permeable ground. Rock Mech Rock Eng, 2007, 40: 81-95

- 32 吴迪, 周顺华, 温馨. 砂性土层泥水盾构泥浆成膜性能试验. 岩石力学与工程学报, 2015, 34: 3460–3467
- 33 霍军帅, 陈焘, 宫全美, 等. 复杂周边条件下异形基坑承压水抽水试验研究. 岩土力学, 2011, 32: 268–273
- 34 元翔, 宫全美, 石景山, 等. 卵砾石地层深基坑高承压水降压方案分析. 土木建筑与环境工程, 2011, 33: 185–190
- 35 孙玉永, 周顺华. 基于离心模型试验的基坑突涌模式及机制研究. 岩石力学与工程学报, 2010, 29: 2551–2557
- 36 孙玉永, 周顺华, 肖红菊. 承压水基坑抗突涌稳定判定方法研究. 岩石力学与工程学报, 2012, 31: 399–405
- 37 代仁平, 周顺华, 宫全美, 等. 盾构越江隧道囊状沼气爆炸风险事故树分析. 城市轨道交通研究, 2010, 13: 30–34
- 38 卢浩, 王明洋, 戎晓力, 等. 含气地层中气体释放对盾构隧道稳定性影响研究. 岩土力学, 2013, 34: 301–306, 323
- 39 霍军帅, 王炳龙, 周顺华. 地铁盾构隧道下穿城际铁路地基加固方案安全性分析. 中国铁道科学, 2011, 32: 71–77
- 40 吕培林, 周顺华. 软土地区盾构隧道下穿铁路干线引起的线路沉降规律分析. 中国铁道科学, 2007, 28: 12–16
- 41 孙玉永, 周顺华, 向科, 等. 近距离下穿既有隧道的盾构施工参数研究. 中国铁道科学, 2010, 31: 54–58
- 42 宫全美, 徐勇, 周顺华. 地铁运行荷载引起的隧道地基土动力响应分析. 中国铁道科学, 2005, 26: 47–51

New challenges in construction mechanics of urban rail transit

ZHOU ShunHua

Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China

This paper aims to raise concerns about construction mechanics. Firstly, operating railway transit at present and scales of ongoing rail transit projects are briefly introduced. Then, major constraints of urban rail transit construction are analysed in two aspects, including complexed geology conditions and strict environmental requirements. Difficulties caused by geology conditions contains excess settlement and overall failure in very soft soil, the delayed ground collapse and cutter wear of shield tunnelling in sandy cobble stratum, construction safety threats in complex stratum, water bearing stratum and gas-bearing stratum. About environmental restrictions, difficulties of constructions crossing existing railways, buildings and cultural relics are summarised. These difficulties challenge construction mechanics in failure behavior descriptions and calculation precisions. In the end, this paper considers that breakthrough in construction mechanics should be seek in mechanical models, shakedown solutions subjecting slight dynamic load, and multi-factor forecasting models.

urban rail transit, construction, geology conditions, crossing construction, safety control

doi: 10.1360/N092015-00318