

# 软土地下工程与深基坑

黄茂松<sup>1,2</sup> 王卫东<sup>3</sup> 郑刚<sup>4</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 华东建筑设计院有限公司, 上海 200002; 4. 天津大学建筑工程学院, 天津 300036)

**摘要:** 针对当前国内外软土地下工程研究现状进行了系统概括和评述, 重点探讨了深基坑和盾构隧道两种典型地下工程涉及的关键土工问题。其一是复杂地质及环境条件下软土基坑工程的分析方法与新技术, 包括基坑围护结构受力分析、基坑抗隆起稳定性分析、渗流对基坑稳定性的影响、深基坑工程中的冗余度问题、软土基坑工程的新技术; 其二是软土隧道工程的稳定与变形问题, 包括隧道开挖面稳定性分析、渗流对隧道开挖面稳定性的影响、隧道纵向不均匀沉降与长期沉降、隧道地震响应分析与动力模型试验; 最后是软土地下工程施工的环境土工效应, 包括基坑开挖引起的土体变形、隧道开挖引起的土体变形、地下工程开挖对周围环境的影响。

**关键词:** 软土; 地下工程; 深基坑; 隧道; 研究现状

**中图分类号:** TU4 **文献标识码:** A

**文章编号:**

## Underground engineering and deep excavations in soft soils

Huang Maosong<sup>1,2</sup> Wang Weidong<sup>3</sup> Zheng Gang<sup>4</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. East China Architectural Design Institute, Shanghai 200002, China; 4. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract :** Current researches on underground engineering in soft soils are reviewed and commented. Three main key geotechnical problems in deep excavations and shield tunnelling are discussed. The first one is concerning with analysis methods and new techniques of deep excavations in soft soils under complicated geological and environmental conditions, such as the stress analysis of retaining structures for foundation pits, basal stability analysis of excavations, the influence of seepage on the stability of deep excavation, the redundancy of deep excavations, and the new technique of excavations in soft soils. The second one is related to the stability and deformation analysis of tunnel in soft soils, such as the stability analysis of tunnel face, the influence of seepage on the stability of tunnel face, the longitudinal differential settlement and the long-term settlement of tunnel, theoretical analysis and model test of the seismic response of tunnel. The last one involves the ground deformation induced by deep excavation and tunneling, and the environmental effect of underground construction.

**Keywords :** soft soil; underground engineering; deep excavation; tunnel; current researches

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

## 前 言

随着我国城市化进程的加快, 各大中城市纷纷开发地下空间。而且发展速度很快, 以地铁工程为例, 北京、上海、广州等多个城市已拥有多条地铁, 并还有多条线路仍正在建设及规划建设, 地铁建设热潮已蔓延至众多内陆城市。另一方面, 随着区域经济的迅速发展, 越来越多城市趋向于的一体化方向发展。为缩短城市间的交通距离, 提高通行流量, 大型城际交通设施也得到了大量建设。近年来, 越江(跨海)隧

道呈现大直径、长距离等特点, 如上海长江隧道外径达 15.43m, 盾构推进距离达 7.5km, 是世界直径最大的隧道之一; 在建的钱塘江过江隧道盾构直径与长江隧道相同, 全长 4.2km, 将穿越著名的钱江涌潮河段。为避开既有地下设施, 城市地铁的深度也在逐渐加深, 如当前上海地铁最大埋深已经超过 30m。随着建筑体的巨型化, 当前基坑工程规模也越来越大, 如上海 500kV 世博变电站基坑开挖深度超过了 33m, 是目前世界上最大的全地下变电站, 上海虹桥综合交通枢纽工程基坑总面积超过 15 万多平方米。

随着地下工程建设规模的扩大和密度的提高, 面临的技术挑战和施工风险也越来越大, 特别是在沿江

**作者简介:** 黄茂松, 博士, 教授  
**收稿日期:** 2011-09-29

沿海软土地区由于其地质环境极脆弱敏感，其建设难度剧增。近年来，地下工程导致的工程事故屡见不鲜，如 2003 年 7 月，上海地铁四号线浦西联络通道特大涌水事故引起严重地面沉降，黄浦江大堤断裂、周边建筑倒塌，经济损失达 15 亿元。2007 年 12 月，南京地铁 2 号线汉中门站至上海路站区间隧道施工涌水，市区主干道路面塌方，形成约 10m 深、50 平方米的大坑。2007 年 3 月，北京地铁 10 号线苏州街站东南出入口处发生坍塌事故，塌方面积约 20 平方米，深约 11 米，造成 6 人死亡。2008 年 11 月，杭州地铁一号线湘湖站基坑工程倒塌失稳特重大事故，地下连续墙围护结构完全倒塌，11 辆汽车坠入坑中，21 人死亡。2009 年 3 月，德国科隆市中心南部地铁线路中的一段在建设过程中全部倒塌，造成周围地面数栋建筑被毁，使得科隆历史档案馆严重受损，损失了无数的具有珍贵历史价值的档案及资料。2011 年 3 月，深圳地铁一号线续建工程大新站三号出入口发生基坑失稳事故，基坑附近路面塌陷，出现直径约 4 米、深 3 米的大坑，并导致市政排污干管爆裂。由于地下工程施工常在管线密布、建筑物密集、车流和人流流量大的环境下进行，施工造成的地基变形将危害到临近既有建筑物、市政管线及既有地下设施，并可能影响人们的人身安全。以往已发生过一些地下工程施工引起的环境影响的实例，如地铁工程中，施工后发生地表沉降的概率较高。以深圳地铁一号线的建设为例，施工期内，地面沉降事故占了总事故的 25%，其中一期工程暗挖施工段最大地表沉降达到了 300mm。

冗余度可以被看作是结构(构件)抵抗连续倒塌的能力。结构冗余特性是指结构在初始的局部破坏下改变原有的传力路径，并达到新的稳定平衡状态的能力特征。充分的结构冗余特性允许结构“跨越”初始的局部破坏而不向外扩展，从而避免连续性破坏或倒塌的发生。国外对结构连续倒塌问题及建筑的冗余度已经进行了 30 余年的研究，连续倒塌分析受到了广泛的关注，并形成了相应的指导性文件。国内对连续倒塌分析也已针对一些重大工程开展了研究，并已在部分重要建筑的设计过程中引入了这一分析方法。从近几十年来的重大基坑工程事故来看，单纯的土体强度引起的基坑失稳所占比例有限，很多基坑事故都是由于挡土结构或支撑体系等结构的局部破坏或局部变形过大引起。因此，有必要针对重要地下工程与基坑工程引入冗余度设计理论，以提高基坑工程这种多场多体的复杂工程的安全性和稳定性。

基坑工程的周边环境越来越复杂、环境保护要求日趋严格、节能减排、走可持续发展道路等要求给软土基坑工程新技术的表现提供了广阔的舞台。支护结构与主体结构相结合技术、超深水泥土搅拌墙技术、软土大直径可回收式锚杆支护技术、预应力装配式鱼腹梁支撑技术等新技术以其鲜明的技术特点、有利于节能降耗和可持续发展等优点进入了工程应用行列，取得了良好的经济和社会效益。

地铁运行后，多种因素引起的软土隧道沉降，对地铁运营造成较大的影响。随着国内外地铁的大量建设和运营，盾构隧道长期运营不断暴露的问题逐渐引起人们的重视。如上海地铁 1 号线 1994 年建成通车至今，某些区段最大沉降量已接近 30cm，地铁 2 号线 2000 年 4 月到 2001 年 4 月平均沉降量达到了 14.25mm，沉降速率已相当大。在软土地区，由于下卧土层软弱且分布不均，长期运营后极易引起局部不均匀沉降。长期不均匀沉降将影响隧道结构内力、变形、接头防水及轨道的平整度等，影响地铁乘坐的舒适度及安全运营。由于盾构法隧道的施工特点，隧道衬砌通常采用通缝拼装或者错缝拼装，在饱和软土地层中，不论错缝拼装还是通缝拼装，在隧道长期沉降的发展过程中，这些拼装缝不可避免的会产生局部渗漏水现象，隧道的局部渗漏会加速隧道长期沉降的发展，进一步损害隧道衬砌结构的安全。上海打浦路越江隧道投入使用后的 16 年中，其长期沉降增量达到 120mm，造成隧道的挠曲并发生环向裂缝。根据上海地铁一号线十年来的沉降监测数据，隧道在建成后沉降一直在发展，局部最大沉降量超过 200mm，至今仍没有稳定的趋势。目前在建的钱江隧道，当建成运营后，隧道结构不仅要承受大流量车辆运营荷载，还将受到钱江涌潮及河床冲刷导致隧道局部埋深变化等多种复杂因素影响，其长期沉降尤其是不均匀沉降需引起足够的重视。

由于地下工程位于地下的特殊性，以往普遍认为地下结构由于受周围土体约束，具有良好的抗震性能，再加之大部分地下工程设施均为近年来建成的，大多没有经历过地震，因而这方面的研究往往被忽略。但在 1995 年日本阪神地震中，地铁车站及区间隧道受到严重破坏，才逐渐引起人们对地下结构抗震研究的重视。在近年来发生的几次大地震中，如土耳其伊兹米特地震（1999）、台湾集集地震（1999）、伊朗巴姆地震（2003）、四川汶川地震（2008）以及最近的日本（2011）大地震都说明了地震对地下工程的破坏性，地震的频发使得人们越来越重视地下结构的抗震问

题, 目前该研究已成为岩土工程领域的热点。美国、日本等国曾对地铁等地下结构的抗震设计理论进行过大量研究, 我国在这一领域研究目前相对滞后。

软土地下工程涉及面广, 影响因素多, 一直是岩土工程界的研究热点。目前, 相关研究主要集中在以下几个方面。

## 1 软土基坑工程的分析方法与新技术

### 1.1 基坑围护结构受力分析

基坑围护结构的受力分析是基坑设计分析的主要考虑因素之一, 目前除无支护放坡开挖, 围护结构的主要形式有: 土钉墙、水泥土重力式挡墙、灌注桩排桩围护墙、钢板桩围护墙、钢筋混凝土钢板桩围护墙、型钢水泥土搅拌墙和地下连续墙。目前针对围护结构的分析方法有极限平衡法、地基反力法和有限单元法。

极限平衡法在基坑设计早期提出, 一直被广泛应用, 是目前我国相关设计人员最熟悉的基坑支护设计计算方法之一。由于它计算简单, 使用方便, 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。该方法不考虑墙体变形和横向支撑变形, 仅通过已知的土压力计算墙体的倾斜。极限平衡法的关键和难点在于土压力的计算。Janbu 以及 Peck 首先对基坑周边土压力分布和计算进行了研究。魏汝龙(1997)对开挖卸载和被动区的土压力计算进行了研究。杨晓军和龚晓南(1997)考虑了地下水水压力对基坑的围护结构上土压力影响, 提出了有地下水时土压力的计算方法。李广信(2000)对支护结构上水土压力的分算与合算进行了分析, 李广信等(2002)则进一步针对渗透对土压力的影响进行了分析。

与极限平衡法相比, 地基反力法可以考虑支撑轴力、墙体弯矩、土压力等随开挖过程的变化, 能合理解释结构刚度和土刚度的作用, 目前地基反力法以  $m$  法应用最为广泛。王建华等(2006)建立空间三维  $m$  法并将其应用于深基坑的支护分析中。

有限单元法可以考虑深基坑工程的复杂性, 模拟很多常规方法难以反映的因素, 如土体的非线性、弹性、桩土接触面的摩擦效应等, 因此该方法在实践中得以广泛应用。Ou 等(1996)利用三维有限元技术分析了基坑的边角效应对围护体系的影响。俞建霖和龚晓南(1999)用三维空间有限元研究了基坑开挖过程中围护结构变形、土压力的空间分布及基坑的几何尺寸效应。Finno(2007)利用三维有限元分析了基坑尺寸、围护墙刚度对基坑支护和周边土体位移的影响。

### 1.2 基坑抗隆起稳定性分析

基坑的抗隆起稳定性分析对保证基坑稳定和测控基坑变形有重要意义。当地基土和地面活荷载在基坑基底所产生的垂直荷载超越了基底以下的土体所能承受的极限荷载时, 地基中的平衡状态受到破坏, 就会发生坑壁土的流动现象, 导致坑顶下陷, 坑底隆起, 基底破坏等严重后果。其分析方法可以分为三大类: 传统的极限平衡法、极限分析法和基于强度折减的弹塑性有限单元法。

应用极限平衡法研究基坑抗隆起稳定性主要有两类: 其一是基于地基承载力的概念; 其二是圆弧滑动法(比如 O'Rourke 等, 1997; 胡展飞等, 2001)。Terzaghi 以及 Bjerrum 和 Eide 均假设黏土基坑的稳定性由不排水抗剪强度控制, 基于地基承载力模式分析黏土基坑抗隆起稳定性, 并给出了稳定系数表达式。但这两种方法均适用于柔性挡土墙, 而目前基坑工程中大多采用刚度较大的支挡结构(如地下连续墙, 围护桩)。张耀东和龚晓南(2006)在 Bjerrum-Eide 方法的基础上进行了相关的改进, 提出的抗隆起稳定计算修正公式可以考虑支护墙体的入土深度、坑底下的软土层深度、坑底地基处理和工程桩等的影响。王成华等(2006)基于 Terzaghi 承载力理论提出了基坑抗隆起稳定分析的临界宽度法, 定义了最可能发生基坑抗隆起失稳破坏的坑外临界宽度。我国基坑工程实践中也常用基于圆弧滑动破坏模式的抗隆起稳定分析方法, 新修订的上海市工程建设规范《基坑工程设计规范》(DG/TJ08-61-2010)对分层地基中基坑抗隆起稳定分析的圆弧滑动模式给出了更为明确的计算公式。

极限平衡法是在假定破坏面上进行验算, 在理论上是不严格的, 其解与真实解的关系无法确定。相比之下极限分析法在理论上要比极限平衡法严格得多。Su 等(1998)使用考虑非均质和强度各向异性的上限公式解析方法, 分析了窄而深基坑的抗隆起稳定安全系数。Chang 等(2000)根据地基承载力的 Prandtl 破坏模式并应用上限理论推导了基坑抗隆起稳定性的解析公式, 并对一些工程实例进行了计算与对比。姜洪伟等(1997)将 Sekiguchi-Ohta 的各向异性本构方程求得各向异性不排水剪强度应用到深基坑的抗隆起稳定分析中, 计算结果表明: 各向异性显著影响基坑抗隆起稳定安全系数, 忽略各向异性的影响将带来偏于不安全的结果。邹广电(2004)基于 Prandtl 破坏模式得到了基坑抗隆起稳定的上限分析公式, 但是由于在确定速度场时使用了简化方法, 因此并非严格意义上的上限解。黄茂松等(2008)基于经典的 Prandtl 破坏

模式, 结合 Casagrande 和 Carrillo 推荐的考虑土体应力主轴旋转的软粘土强度公式, 运用塑性极限分析上限定理推导了非均质土层中深基坑开挖的抗隆起稳定公式, 研究了基坑开挖土体强度各向异性比、支护墙体入土深度、坑底软土层厚度对抗隆起稳定安全系数的影响。黄茂松等 (2011) 进行进一步的修正, 推导了更为严格的基于 Terzaghi 机构和 Prandtl 机构的基坑抗隆起稳定上限解析解。

数值极限分析方法往往比一般极限分析的解析方法得到更合理的破坏面和稳定安全系数。数值极限分析方法主要包括极限分析有限元法和多块体极限分析方法。Ukritchon 等 (2003) 采用的极限分析有限元法计算了不排水和各向异性条件下基坑抗隆起稳定系数的上限和下限, 既有极限分析法理论上的严格性又有有限元适用性强的特点。秦会来等 (2010) 提出了支护墙体刚性条件下的用于饱和黏土基坑抗隆起稳定分析的多块体相容破坏模式并使用 Monte Carlo 搜索技术进行了优化, 讨论了基坑宽度、坑底软土层厚度、支护墙体与土体间侧摩阻、支护墙体入土深度和土体强度非均质和各向异性等因素的影响。

弹塑性有限单元法分析基坑抗隆起稳定性主要使用强度折减有限单元法 (SSRFEM)。Goh 等 (1994) 运用 SSRFEM 方法计算了软土中深基坑的抗隆起稳定性并给出了一个计算基坑抗隆起稳定性的简便公式。Cai 等 (2002) 在 Goh (1994) 的基础上, 分析了圆形基坑的抗隆起稳定性, 并给出了圆形基坑坑底抗隆起稳定性的设计图表。Faheem 等 (2004) 的进一步针对矩形基坑的三维分析表明: 抗隆起稳定性还受基坑长宽比的影响, 当基坑长宽比大于一定值时可忽略三维影响。陈福全等 (2008) 采用 SSRFEM 方法, 分析了不排水条件下软土地基中内撑式排桩支护基坑开挖的抗隆起稳定性。基于强度折减技术的弹塑性有限单元法比较适用于复杂土层条件以及采用土钉和复合土钉支护的基坑分析。

### 1.3 渗流对基坑稳定性的影响

当基坑开挖达到或者是超过地下水位时, 地下水渗流不可避免的将对土体的稳定性产生重要影响, 而大量的工程实践显示, 渗流问题是许多基坑工程事故的主要原因之一。南京马台街基坑破坏主要是由管涌和流砂造成的, 导致周围道路建筑物破坏; 上海地铁 2 号线西延伸段由于承压水涌出造成大面积渗水和地面塌陷。因而在基坑稳定性分析和计算中必须高度重视地下水及其渗流作用。

黄春娥和龚晓南 (2001) 利用有限元法计算渗流场, 然后采用考虑渗透力的圆弧滑动法分析基坑稳定性。在数值分析方面, 董诚等 (2009) 应用 PLAXIS 模拟基坑内降水条件下基坑开挖过程的真实状态, 分析渗流作用对深基坑整体稳定性的影响, 同时采用有限元强度折减法并考虑流固耦合计算得到基坑整体稳定安全系数。另外对于深基坑工程, 往往由于坑内降水使得坑内外水头相差很大容易造成渗透破坏极大威胁基坑工程的安全。冉龙和胡琦 (2009) 通过模型试验和数值模拟对深基坑渗透破坏模式进行了分析研究。

### 1.4 深基坑工程中的冗余度问题

对于基坑支护体系来说, 其进行冗余度设计的目的就是, 通过合理的布置支护体系、采取必要的连接构造节点, 在不增加支护体系造价或造价增加很小的前提下, 增加支护体系的冗余度, 防止局部支护体系发生局部破坏引起整个支撑体系的变形显著增大或出现整体破坏。目前国内外还未针对基坑工程开展冗余度的研究。基于工程实践和理论研究, Zheng 等 (2011) 等近期提出了基坑工程的冗余度的概念和基坑支护体系冗余度的分类:

#### 1.4.1 基坑水平支撑系统的变形冗余度

即水平支撑体系的承担竖向支挡结构传递来的荷载时产生变形的冗余度。水平支撑的布置应保证整个水平支撑体系在不同的与竖向支挡结构连接的位置具有大致相同的刚度, 整体上不同部位的变形差异不至过大。当水平支撑体系中个别杆件强度或刚度不够时, 水平支撑体系能够将初始局部薄弱区域的荷载有效传递到能够承担这些冗余荷载的周边结构上, 使薄弱区域的变形不会显著增加。

#### 1.4.2 基坑水平支撑系统的稳定冗余度

包括三个方面, 即 (1) 同一道水平支撑系统的冗余度: 对重要基坑工程的水平支撑系统进行合理设计, 使其在局部范围内主要水平受力构件失效后仍能保证荷载的有效传递; 或者在局部构件削弱时可将多余荷载传递到其它受力路径; 或者局部位置作用冗余荷载 (例如基坑边局部施工荷载过大) 传递至邻近构件, 从而避免整个水平支撑体系出现破坏。(2) 多道水平支撑的冗余度: 当水平支撑系统有多道时, 当某一道水平支撑失效时, 其它标高的水平支撑可对竖向挡土结构 (地下连续墙、柱列式排桩等) 的破坏起到延迟的作用。这也是重大基坑工程应具有冗余度。(3) 水平支撑与竖向挡土结构 (或腰梁) 的连接节点冗余

度：当局部水平支撑承受过大荷载时，除水平支撑本身应具有前述的冗余度外，水平支撑与竖向挡土结构（或腰梁）之间连接节点也应具有相应的冗余度。

#### 1.4.3 基坑竖向支挡结构的变形冗余度

基坑竖向支挡结构的变形冗余度是指基坑局部出现坑外过大荷载、局部土质条件较差、基坑局部深挖等导致竖向支挡结构可能出现局部的变形过大时，由于基坑平面性状、竖向支挡结构形式（地下连续墙、排桩等）等，可将局部过大的荷载传递至相邻土体或竖向支挡结构，避免局部变形过大的能力。例如，而在向外凸出的基坑支挡结构部位，在凸出部由于土拱等空间效应，加之地下连续墙或排桩中的腰梁、以及水平支撑的作用，向相邻部位转移冗余变形的能力就比向坑内突出的阳角形基坑好，后者变形的冗余度就较差，需加强腰梁及水平支撑，提高其冗余度。

#### 1.4.4 基坑竖向支挡结构的稳定冗余度

基坑竖向支挡结构的变形冗余度是指基坑局部出现坑外过大荷载、局部土质条件较差、基坑局部深挖、竖向支挡结构局部强度不足、插入坑底以下深度不足等导致竖向支挡结构可能出现失稳破坏时，由于基坑平面性状、竖向支挡结构形式（地下连续墙、排桩等）等，可将局部因稳定不足而产生的冗余荷载转移至相邻土体或竖向支挡结构，避免局部失稳的能力。很显然，地下连续墙比排桩更具有稳定冗余度。

#### 1.4.5 水平支撑竖向支承结构的冗余度

指支承水平支撑系统的竖向立柱的受力、变形及稳定的冗余度。例如，在软土地区，当基坑开挖导致基坑内土方高差过大时可导致立柱承受较大水平荷载、深基坑开挖隆起可导致立柱因水平支撑约束而产生较大附加轴力、挖土机及重物的侧向碰撞均可能导致立柱产生失稳，导致水平支撑坍塌。

对重大的基坑与地下工程来说，引入冗余度设计思想，考虑深基坑与地下工程的具体特点，可起到如下作用：（1）通过对基坑支护体系进行冗余度分析，可在不增加造价或增加较少造价的情况下，提高基坑支护体系抵抗因局部破坏或局部变形过大引起整个支护体系失效或变形过大的能力；（2）通过对支护结构体系进行冗余度设计，在支护结构构件和支护结构体系方面均保证其有预期的安全度；（3）由于基坑支护体系的变形、受力及安全是极大程度依赖于施工过程，因此，进行考虑施工不同阶段、不同施工方案的支护结构体系的冗余度分析，可优化施工方案、最大程度保障支护结构体系安全；（4）通过对基坑支护体系中

各构件进行冗余度分析，可明确地确定对支护结构体系安全有重大影响的构件，可指导施工过程中对其重点保护，并对制定基坑监测中针对性地选择重点监测构件、监测项目等起到有力指导作用，使基坑工程信息化施工提到更高的一个水平。

### 1.5 软土基坑工程的新技术

#### 1.5.1 支护结构与主体结构相结合技术

支护结构与主体结构相结合是采用主体地下结构的一部分构件（如地下室外墙、水平梁板、中间支承柱和桩）或全部构件作为基坑开挖阶段的支护结构，不设置或仅设置部分临时支护结构的一种设计和施工方法。

从构件相结合的角度而言，支护结构与主体结构相结合包括三种类型，即地下室外墙与围护墙体相结合、结构水平梁板构件与水平支撑体系相结合、结构竖向构件与支护结构竖向支承系统相结合。关于墙体相结合，除了采用地下连续墙两墙合一的方式外，工程中也开始尝试采用钻孔灌注桩兼作地下室外墙的桩墙合一作法。

按照支护结构与主体结构结合的程度进行区分，可将支护结构与主体结构相结合工程归为三大类型（王卫东和王建华，2007），即周边地下连续墙两墙合一结合坑内临时支撑系统采用顺作法施工、周边临时围护体结合坑内水平梁板体系替代支撑采用逆作法施工、支护结构与主体结构全面相结合采用逆作法施工。

目前我国大部分深基坑工程仍采用常规的临时支护方法。临时围护体如钻孔灌注桩工程费用巨大，而其在地下室施工完成后，就退出工作并被废弃在地下，造成很大的材料浪费；临时水平支撑及竖向支承系统往往造价高、施工周期长、土方开挖与地下工程结构施工不便，且混凝土支撑还需拆除，而混凝土支撑拆除困难，浪费了大量的人力、物力和社会资源；采用锚杆虽然可以避免设置内支撑，但其在地下室施工完成后即被废弃在地下，为后续工程留下了严重隐患。与传统的深基坑工程实施方法相比，支护结构与主体结构相结合技术具有利于保护环境、节约社会资源、缩短建设周期等诸多优点，符合国家节能减排的发展战略，是进行可持续发展的城市地下空间开发和建设节约型社会的有效技术手段。

#### 1.5.2 超深水泥土搅拌墙技术

随着地下空间开发向超深方向发展，承压水处理成为一个棘手的问题。对于环境条件苛刻的基坑工程，有时需采用水泥土搅拌墙截断或部分截断深部承压水

层与深基坑的水力联系，控制由于基坑降水而引起的地面沉降，确保深基坑和周边环境的安全。由于成桩深度大，下层往往进入标贯高达 40 击以上的砂土层。常规三轴水泥土搅拌桩施工设备仅适用于标贯击数不大于 30 击的土层，且最大成桩深度仅为 30m，无法满足这种隔水帷幕的成桩要求。这就需采用超深水泥土搅拌桩工艺。

目前国内已从日本引入预钻孔结合连续加接长钻杆法三轴搅拌桩新型施工工艺，其施工设备采用大功率动力头，并采用可以连续接长的钻杆和适用于标贯击数大于 50 的密实砂土层钻进的镶齿螺旋钻头，搅拌桩的深度可达到 50m。该工艺在上海、天津等多个项目中得到了成功应用，取得了良好的技术效果。

铣削深层搅拌技术（CSM）是另一种创新性深层搅拌施工工法，它通过钻具底端的两组铣轮以水平轴向旋转切削搅拌土体，同时注入水泥固化剂与土体进行充分搅拌混合，形成矩形槽段改良土体。CSM 工法铣轮的切削扭矩大，可以用于较坚硬的地层如粉砂、砂层、卵砾石层等，可以切削强度 35MPa 以内的岩石或混凝土。CSM 施工深度可达 50m；形成的水泥土墙体均匀、强度高，超过 5MPa；垂直度控制精度高（小于 1/400）。天津医院及天津于家堡金融起步区 B3 车站基坑支护成功地采用了该工艺。

TRD 工法也是一种新型水泥土搅拌墙施工技术，采用链锯型切削刀具插入土中横向掘削，注入固化剂与原位土体混合搅拌，形成水泥土搅拌墙。TRD 工法可以适用于  $N$  值在 100 以内的软、硬质土层及  $q_u \leq 5\text{MPa}$  的软岩中施工。TRD 工法施工深度可达 60m，在墙体深度方向上可保证均匀的水泥土质量，因此强度高（水泥土无侧限抗压强度在 0.5~2.5MPa 范围之内），离散性小，截水性能好。TRD 工法已在天津、南昌等多个工程中得到成功应用。

### 1.5.3 软土大直径可回收式锚杆支护技术

锚杆目前主要应用于岩石及硬土层中，对于软土基坑工程，由于土的工程性质较差，锚杆支护技术由于其锚固力不高、变形控制效果不好，其应用受到很多限制。另一方面，锚杆体埋置于地下结构周边的地层中，当工程结束后，作为基坑支护结构的锚杆就失去了作用，一般就被废弃在地层中，形成城市地下建筑垃圾，就会影响周边地下空间的开发与利用。近年来，工程界提出了一种旋喷搅拌大直径锚杆支护结构，该技术是采用搅拌机械在软土中形成直径达到为 500~1000mm 的水泥土锚固体，通过在锚固体内加

筋，并对锚杆体预先施加应力，从而形成一种大直径预应力锚杆，该技术对软土基坑的变形控制产生了较好效果。同时，通过对可回收式锚杆技术的开发与应用，实现了锚杆体的再利用，减少或消除地下建筑垃圾的产生。通过在上海、天津、武汉等地多个软土基坑工程的应用，取得了良好的经济效益和技术效果。

### 1.5.4 预应力装配式鱼腹梁支撑技术

当基坑采用传统钢支撑时，杆件一般较密集，挖土空间较小，在一定程度上降低了挖土效率。预应力鱼腹梁装配式钢支撑系统（IPS）是一种以钢绞线、千斤顶和支杆来替代传统支撑的临时支撑系统。该技术在韩国、日本、美国等国家已得到广泛运用，近年来也已被引进国内。预应力鱼腹梁装配式钢支撑系统采用现场装配螺栓连接、不需焊接，且大大增大了基坑的挖土空间，可显著缩短基坑工程的施工工期，材料全部回收重复使用，彻底避免混凝土等建筑材料的使用，降低了造价。预应力鱼腹梁可随时调节预应力，便于周围土体位移控制和由温度变化引起的支撑伸缩量控制，可以较好地控制深基坑的变形，有效地保护基坑周边的环境。此外 IPS 支护结构的破坏模式为延性破坏，因此针对可能发生的较大水土压力或突发载荷采取有效而及时的应急措施。IPS 技术已在上海轨道交通 5 号线西渡站配套工程等多个工程中成功应用。

## 2 软土隧道工程的稳定与变形问题

### 2.1 隧道开挖面稳定性分析

在盾构隧道掘进进程中，合理地确定开挖面支护压力是盾构掘进施工中的一项关键技术。若支护压力施加不当，隧道工作面可能产生较大范围的垮塌等安全隐患或地表的隆起，造成生命财产损失或对周围建筑环境造成不利的影 响，因此研究隧道开挖稳定性及相关问题具有重要的现实意义。

盾构施工开挖面稳定相关研究主要包括开挖面极限支护压力大小的确定以及开挖面破坏模式和机理研究。研究的方法及手段主要有经验公式或解析计算方法、现场资料实测分析、室内物理模型试验研究及计算机数值模拟等。

盾构隧道施工中，极限支护压力等计算方法正确合理与否需要现场实际工程应用的验证，然而由于现场盾构隧道施工中未知因素众多，现场测试许多数据难以解释，而且由于测量装置的故障，现场地质及掘进参数的多变及较高的经济费用，使得现场的测试结果质量不高，同时，很难做到把不同现场的两个试验数据结果进行相关分析，因此现场试验在盾构隧



道研究应用中受到限制, 况且实际工程中开挖面失稳破坏不允许出现。开挖面稳定分析现场原位试验条件不足可以通过室内模拟试验得到较好的解决, 使得盾构隧道的相关研究利用模型试验得以广泛应用, 尤其应用于破坏试验研究开挖面破坏形式。

模型试验中, 部分学者早期通过简单的室内小尺寸模型研究了砂土中开挖面破坏稳定问题。试验中为了克服尺寸效应, 普遍采用施加地表面超载实现开挖面土体能够出现破坏状态, 严格讲, 该情况仅适用于开挖面地层上方为非常软弱的土层或地表水, 而能够反应真实应力场及隧道尺寸的离心模型试验可以实现通过小比例模型分析研究各种现场实际开挖问题, 后来研究大多借助于离心试验实现。Kamata 和 Mashimo (2003) 通过离心试验研究均质砂土层中的开挖面稳定性。Juneja 等(2010)研究粘土地层中的开挖面稳定性。这些研究表明, 砂土地层中开挖面破坏形状表现为烟囱状, 而在粘性土层中破坏面表现为下部较缓上部区域较大的盆状。另外, Wu 和 Lee (2003) 在岩土离心模型试验机中模拟了单隧道及双平行隧道开挖失稳过程, 得到隧道的失稳破坏模式, 并监测了失稳过程中隧道周围底层的变形发展。这些模型试验结果为分析开挖面极限支护压力、失稳破坏模式及破坏机理等隧道稳定性理论研究提供了宝贵的试验资料。

基于模型试验的结果, 根据开挖面的失稳破坏机理国内外学者在分析隧道开挖面失稳破坏模式的基础上提出了许多的计算模型, 然后通过经验或者是解析方法研究开挖面极限支护压力的确定。

在理论求解隧道最小支护压力的过程中, 最先出现的是极限平衡法, 其因概念简单而在工程实践中被广泛采用。基于 Terzaghi 松动土压力假设, Eisenstein 和 Samarasekera (1992)、周小文等 (1999) 分别对其进行了改进, 且改进公式计算的松动土压力值与离心模型试验结果较为相近, 并以此来确定最小支护压力。Horn 基于 Janssen 的仓筒理论, 最早提出了盾构隧道三维楔形体模型, 其中开挖面处由于主动土压力形成楔形刚体, 楔形体顶面作用上部土层松动土压力, 该模型简明易懂, 得到后续研究者和工程实践的广泛采用。Comejo (1989) 基于简单的极限平衡分析, 给出了粘土隧道开挖面稳定性系数公式。后来的学者 Jancsecz 和 Steiner (1994)、裴洪军 (2005) 均是在楔形体模型的基础上考虑不同的条件、采用不同的分析方法推导了三维条件下开挖面稳定性的解析公式。

塑性极限分析方法利用极限分析上下限定理计算开挖面极限最大及最小支护压力。Davis 等针对不排水条件下的黏性土浅埋隧道, 提出了隧道 2D、3D 开挖面稳定的简化破坏模式, 得到了隧道开挖稳定的上下限解答。Osman 等 (2006) 根据实际工程及离心试验中观察到的土体位移, 推导了二维隧道开挖面塑性变形模式, 通过极限分析上限法研究了开挖面破坏荷载的上限值。近年来随着计算机技术的发展, 数值分析越来越多的应用到隧道开挖稳定分析中来。Sloan 和 Assadi (1993) 构造 7 个角度的破坏模式、同时采用极限分析有限元法研究了非均质地基中浅埋二维隧道的稳定性问题。在 Davis 等的研究基础上, Leca 和 Dormieux (1990) 提出圆锥形块体的圆弧滑动的上限解法来分析了 Mohr-Coulomb 材料中盾构隧道开挖面的稳定性, 其中假设了三种破坏机制。根据上下限计算结果与 Chambon 和 Corte (1989) 的离心试验结果进行比较, 发现上限估计值与离心试验最小支护压力有较好的一致性。之后 Soubra (2000) 假定盾构隧道开挖面破坏模式由两个刚性截圆锥及一个剪切带组成, 提出了两种改进的破坏模式来考虑开挖面的坍塌与隆起。Subrin 和 Wong (2002) 通过假设两参数对数曲线形式三维破坏面得到了可以考虑摩擦角的开挖面稳定上限解, 并与三维有限元结果符合的很好。Mollon 等 (2009) 针对浅埋圆形盾构隧道提出了一种基于可靠性理论的三维分析及设计方法, 包括了坍塌和顶出两种破坏形式。研究指出, 内摩擦角对破坏模式有很大影响。Mollon 等 (2011) 采用旋转模式对坍塌和顶出都进行了上限分析, 但得到的上限解较平动模式更为远离真实解。吕玺琳等(2011)提出采用类似 Terzaghi 地基承载力的计算方法, 将极限支护压力表示为粘聚力、上覆荷载及土体重度分别乘以各自影响系数的三项叠加。

在目前土体稳定分析中的数值分析手段主要是弹塑性有限单元法。Vermeer 等 (2002) 采用基于 Mohr-Coulomb 模型的弹塑性有限元方法对砂土地基中隧道开挖稳定进行数值模拟, 研究了粘聚力、土体重度及上覆荷载对极限支护压力的影响, 发现水平侧压力系数  $K_0$  不会对极限支护压力产生影响。裴洪军 (2005) 在对盾构法隧道开挖面的非线性特点进行分析的基础上, 讨论了非线性有限元法模拟分析的理论依据, 并给出盾构开挖面失稳的判定方法, 为进一步分析计算提供了依据。朱伟等 (2005) 通过 FLAC3D 对支护压力与开挖面土体变形的关系进行了研究, 确

定了维持砂土地基中开挖面稳定的最小支护压力，并发现盾构隧道开挖面失稳时开挖面附近破坏区域呈楔形形状，其上为烟囱状，当埋深较大时，由于土体拱作用的存在，开挖面破坏发展不到地表面，表现为局部破坏。秦建设（2005）利用能够考虑大变形破坏的拉格朗日有限差分计算程序，对砂土地基中盾构施工中的开挖面稳定问题进行了数值模拟，并与 Chambon 和 Corte（1994）的离心试验研究结果进行了比较分析，证明了数值模拟在研究盾构隧道开挖面稳定方面的可行性。黄正荣等（2006）采用数值模拟方法，研究地下水位和土层参数对开挖面极限支护压力和稳定安全系数的影响，综合考虑极限支护压力和安全系数，给出了合理的开挖面支护压力。Kim 和 Tonon（2010）假设在开挖面上能形成理想的泥膜，采用三维有限元来研究隧道直径、埋深比、水平侧压力系数、土体强度参数等对排水条件下隧道开挖过程中的开挖面稳定及位移的影响，且通过位移荷载曲线可以得到最小支护压力。

另外，当盾构隧道穿越富水地层时，土体开挖常导致地下水渗流，因此考虑渗流条件下的开挖面稳定性分析是十分必要的，尤其是对于越江（海）隧道来说渗流的影响更为显著。Lee 等（2004）、高健等（2009）、乔金丽等（2010）、Li 等（2011）等学者研究表明渗流对开挖面的稳定有很大的影响，并指出渗流力构成了总极限支护压力的主要部分。

## 2.2 隧道纵向不均匀沉降与长期沉降

软土隧道在长期运营过程中产生的沉降问题受到越来越多的关注。从隧道长期沉降的发展效应来看，隧道纵向不均匀长期沉降对隧道的安全和正常运营影响最大。叶耀东（2007）指出隧道周围土层地质条件的差异是导致隧道产生工后不均匀沉降的主要原因。地表堆载对既有隧道的纵向变形也有很大的影响（戴宏伟等，2006）；邻近地下工程施工（如基坑和隧道开挖）对既有隧道的影响也有显著的影响，这将在后文作详细介绍；大范围的工程降水使得地面不均匀，也会造成埋置于其中的隧道沉降的不均匀性；在建的钱江隧道在涌潮水位变化以及河床冲刷等条件下纵向变形特性也是关注的焦点。不多学者还对隧道渗漏进行了模拟，分析其对长期沉降的影响（O'Reilly 等，1991；Shin，2002；郑永来等，2005；吴怀娜等，2009）。对于车辆循环动荷载引起的软土隧道长期沉降问题，刘明等（2006，2009）采用简化的显式模型，结合拟静力有限元法和分层总和法对上海长江隧道和上海地铁

1 号线区间隧道车辆荷载引起的长期沉降进行了分析。

## 2.3 隧道地震响应分析与动力模型试验

隧道的地震响应问题包括横向和纵向分析两个方面，对于隧道结构的横断面抗震分析，现有的分析方法从力学特性上可分为静力法、拟静力法和地层-结构整体动力时程分析法三大类。其中，静力法主要包括早期的地震系数法（Hashash 等，2001）和等代地震荷载法，等代地震荷载法是目前正在修订中的上海市《地基基础设计规范》拟采用的方法，包括等代地震加速度法和惯性力法。常用的拟静力法主要包括相对刚度法（Wang，1993；Hashash 等，2001）、BART 法、响应位移法（Kwashima，1994）、自由场变形法（St. John 等，1987）等，几种方法中，除自由场变形法不能考虑土结构相互作用外，其它几种方法均可考虑。近年来，国内外一些学者在已有的拟静力法的基础上，基于对土体自由场反应或者土结构动力相互作用参数的改进和简化，提出了一些新型的拟静力计算方法（Penzien，2000；Hashash，2005；Huo，2006；张栋梁，2008；黄茂松和曹杰，2010）。整体动力时程分析方法主要包括有限元法、边界元法以及将二者结合起来的混合方法，国内外有不少学者在此方面开展了深入的研究（Gazates 等，2005；Anastasopoulos 和 Gerolymos，2007；Amorosi 和 Boldini，2009；Sedarat 等，2009）。上述的三种分析方法中，整体动力时程分析方法涉及到传递边界的设置及土体非线性等问题，计算过程十分复杂，很难推广应用到具体的工程设计中。而拟静力法形式相对简单，同时又较传统的静力方法考虑的因素更为全面，因此是一种更为精确的分析方法。

在隧道的纵向抗震分析方面，日本 JSCE（1975）年发表了《沉管隧道抗震设计规范》，提出了响应位移法和质量-弹簧模型法两种方法。韩大建等（1999）将质量-弹簧模型法应用到了广州珠江沉管隧道的抗震设计中。严松宏和潘昌实（2006）以南京长江沉管隧道为例，分析了地基与隧道刚度比等不同因素对质量-弹簧模型的影响。另外，有不少学者开展了 3D 动力时程分析方法的研究（Stamos 和 Beskos，1996；Yang 等，2004；Hatzigeorgiou 和 Beskos，2010）。

动力模型试验不仅可以揭示地下建筑物的地震响应规律及破坏机理，也可为理论分析方法提供验证。徐志英和施善云（1993）较早进行了地下结构振动台试验。陈国兴等（2007）等对土与地铁隧道体系进行了振动台试验，杨林德等（2003）对软土地铁车站结



构振动台试验进行了研究,为建立地铁车站地震反应的分析理论和计算方法提供了试验数据。国外一些学者如 Okamoto 等(1973)曾进行了水底隧道的模型试验。

然而,普通振动台往往不能正确模拟原型应力场,不能满足模型与原型应力、应变相同的要求,近年来形成的土工离心机振动台试验技术则很好地解决了这一问题。Ling 等(2003)通过离心机试验研究了浅埋于饱和土体中大直径管线在地震作用下抗漂浮稳定问题, Yang 等(2004)通过离心试验,对加拿大 George Massey 沉管隧道的抗震性能进行了研究。Izawa 和 Kusakaba(2006)对矩形截面隧道地震响应进行了离心模型试验研究,并同时进行了静力对比试验,证明地震荷载作用下的地下结构惯性力可以忽略。曹杰和黄茂松(2010)进行了砂质粉土层中隧道结构的地震响应离心模型试验,研究了不同强度地震荷载作用下场地与隧道结构的响应。Cilingir(2011)分别进行了圆形及方形截面隧道的动力离心模型试验,研究了不同输入地震动对隧道响应的影响。

### 3 软土地下工程施工的环境土工效应

#### 3.1 基坑开挖引起的土体变形

经过多年的实践以及基坑工程设计水平和施工技术水平的提高,因基坑工程本身失稳引起安全事故大大减少,软土地区基坑开挖对相应变形的控制能力有了很大的提高。目前软土地区基坑工程的关注点已经从基坑工程本身的安全转移到基坑开挖对周围环境的影响。而周围环境分析的关键问题之一是基坑开挖引起的土体变形预测。

基坑工程引起的周围土体变形显然可以通过严格的三维弹塑性有限元分析得到,但由于土体参数和本构模型选择的限制,往往得不到与实际情况相符合的预测结果。因此对于基坑开挖对周围构筑物的影响分析主要是在区域内规模化数量的工程案例实测数据基础上进行规律统计和理论分析,探讨研究区域基坑开挖应力自由边界面的变形形态与基坑有关物理力学参数之间的关系,如围护墙体的侧向变形,坑外地表的沉降等等,并采用数学函数进行变形曲线的拟合(Hsieh 和 Ou,1998; Roboski 和 Finno,2006; Leung 和 Ng,2007; Wang 等,2010)。鉴于实测数据的稀少,目前对基坑工程的变形研究还是停留在开挖应力自由面上,针对基坑外整个自由土体位移场变形分布规律的实测和统计研究几乎没有。

#### 3.2 隧道开挖引起的土体变形

针对软土地区普遍采用的盾构隧道施工法,1969

年 Peck 在第七届国际土力学与基础工程会议上首次提出了地层损失的概念,认为地面沉降体积等于地层损失体积,在大量工程实测数据基础上得到了符合正态分布规律的地表横向沉降槽计算方法。在此基础上,基于实测和试验结果的经验公式地表沉降计算方法得到了很大的发展(Attewell 和 Woodman, 1982; Mair 等, 1993)。另一类是基于间歇参数概念(Rowe 等, 1983; Lee 等, 1992)的解析方法,将土体视作完全弹性体,针对不同的隧道开挖面变形模式采用汇源法、复变函数法、随机介质理论等得到盾构隧道周围土体的垂直沉降和水平移动的解析解(Loganathan 和 Poulos, 1998; Park, 2004; 韩煊和李宁, 2007; 王立忠和吕学金, 2007)。为了考虑地基土体非均质性的影响,Zhang 等(2011)基于弹性层状半空间地基模型,提出了分析多层地基中盾构隧道开挖引起周围土体不排水变形的位移控制边界单元法,并与位移控制有限单元法进行了比较。

#### 3.3 地下工程开挖对周围环境的影响

开挖引起的环境土工效应问题在城市地下工程活动中倍受关注。软土地区地下工程开挖由于施工过程中土体的应力释放而引起地层变形,状况加剧则会危及邻近区域建筑物和地下管线的安全正常使用。目前更大的挑战是:在城市中心区域,建筑物密集管线隧道错综复杂,地下工程开挖的环境敏感程度很高,尤其是一些年代久远的古老建筑和长期腐蚀条件下的市政管线,抵抗变形的承受能力大打折扣,对开挖的反应更为剧烈。地下工程开挖对邻近建(构)筑物的影响,较多的还是采用整体有限元方法(Lee 和 Ng, 2005; 毕继红等, 2006; 方勇和何川, 2007; 杜金龙和杨敏, 2008)。整体有限元方法可以再现复杂的实际施工工况,模拟周围土体介质的力学特性以及建(构)筑物与土体的共同作用,但该方法工作量大大耗时长,需要专业软件并且建模复杂,并且土体本构模型的选择,结构刚度的等效,施工作用的模拟等方面存在的诸多问题均会影响结果的可靠性。在工程界不易推广,仅在重要的工程中使用。鉴于此,基于位移控制理念的简化理论研究工作随之产生。针对天然地基浅基础或短桩基础的建筑物,从安全实用角度出发可以近似认为建筑物的变形与地表变形一致(Mair 等, 1996; 王卫东和徐中华, 2010)。为考虑建筑物的结构刚度对开挖沉降形态的调整,一些学者在有限元数值模拟和实测数据分析基础上提出了基于建筑物结构形式的刚度等效方法(Potts 和 Addenbroke, 1997; Burd 等, 2000;

韩焯等, 2009)。针对高层建筑的长桩基础以及埋管管线, 为保留有限元强大的数值模拟能力又能够直接控制隧道开挖的地层损失比和基坑开挖的变形边界条件提出了位移控制有限元方法 (Cheng 等, 2007; 杨超等, 2007; 杜佐龙等, 2009; 蔡建鹏等, 2010; 朱晓宇等, 2010), 不考虑隧道施工的实际过程, 直接在隧道的边缘以及基坑开挖的应力自由面施加位移边界条件来模拟开挖引起的应力释放过程。该方法不能模拟隧道施工各个环节, 但意义明确, 且能够直接控制地下工程开挖引起的自由土体位移场。位移控制两阶段方法将分析对象视作受土体位移作用的被动弹性地基梁, 分别基于弹性半空间地基模型和 Winkler 地基模型进行理论分析。如 Poulos 等提出的基于均质弹性半空间模型的边界单元法 (Poulos 和 Chen, 1997; Loganathan 等, 2001; Xu 和 Poulos, 2001; Surjadinata 等, 2006), Klar 等提出的基于 Mindlin 基本解的弹性理论法 (Klar 等, 2008; Marshall 等, 2010; Vorster 等, 2005), Goh 等 (1999)、Kitiyodom 等 (2005)、Huang 等 (2009) 以及李早和黄茂松 (2007) 等提出的基于 Winkler 地基模型的有限单元法、有限差分法和解析方法等。由于盾构隧道开挖地层损失比小, 土体能够近似满足弹性半空间的条件, 而基坑开挖更多的需要考虑结构物与土体的非线性作用, 因此隧道开挖更多是基于弹性半空间地基模型开展, 而基坑开挖则大多采用 Winkler 地基模型, 以便进一步拓展结构物与土体的相互作用分析。此外, 天然地基的非均质成层特点、浅基础的结构刚度对建筑物变形的分担以及竖向、侧向变形的耦合和三维效应、埋管管线的接口构造形式对截面刚度的弱化、管线的长期老化腐蚀、结构物周边土体因开挖造成的土体刚度强度的弱化、开挖条件下群桩基础、桩筏基础的群桩相互作用和筏板的约束条件、结构物与土体脱离等方面依然存在许多问题没有解决, 黄茂松等 (2008)、张治国等 (2010) 对上述一些方面进行了初步探讨, 但是还远远不够, 仍然需要进行深入的理论分析和探讨。鉴于地下工程开挖对邻近建 (构) 筑物影响的实测资料较少, 开展室内小比例物理模型试验和离心模型试验以进行机理探讨 (Leung 等, 2006; Jacobsz, 2004; Vorster 等, 2005), 并为理论分析提供依据是地下工程开挖对环境分析必不可少的一个研究内容。

### 3.4 基于周边环境变形承受能力的基坑变形控制标准

基坑环境影响变形控制标准的提出, 是伴随着城市基坑建筑用地的苛刻条件而来的一个新兴课题, 最

新版《上海市基坑工程技术规范》基于周边待保护建 (构) 筑物的重要程度以及距离基坑远近等因素提出了基坑环境保护等级一级、二级、三级的概念, 限定了围护墙的最大侧移以及基坑外地表最大沉降与基坑开挖深度的关系。该规范对于环境保护等级的定义比较模糊, 并且只是绝对地根据保护等级将开挖深度与围护墙体变形、地表沉降建立线性的关系, 而没有考虑周围建 (构) 筑物自身承受能力的差异, 因此仍然有进一步修正的空间和必要。张陈蓉等 (2011) 及朱晓宇 (2011) 在分析上海软土地区板式支护体系基坑周边土体变形规律的基础上, 采用位移控制两阶段简化分析方法和位移控制有限元分析方法, 基于周边市政管线以及既有建筑物的自身承受能力, 提出了基坑开挖对周边管线及重要建筑物保护的基坑控制标准, 以期为基坑工程提供更为合理的环境影响评价标准。

## 4 结束语

国际土力学与岩土工程协会 (ISSMGE) 成立了 TC204 (原 TC28) 技术委员会-软土地下工程 (Underground Construction in Soft Ground), 该委员会每 3 年召开一次国际研讨会 (International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground), 第 1 届印度新德里 (1994)、第 2 届英国伦敦 (1996)、第 3 届日本东京 (1999)、第 4 届法国图卢兹 (2002)、第 5 届荷兰阿姆斯特丹 (2005)、第 6 届中国上海同济大学 (2008)、第 7 届意大利罗马 (2011)。该委员会还不定期在世界各地召开一些区域性学术研讨会, 如 2001 年在上海同济大学召开过一次区域性会议, 这些都说明了软土地下工程在国际上受关注程度。中国土木工程学会土力学及岩土工程分会新成立了软土工程专业委员会, 主要目的是加强软土地下工程与深基坑工程中有关土工问题的学术交流。

以往有关软土地下工程设计、施工及环境影响评价过多依赖于工程经验。随着当前软土地下工程的大型化、复杂化、对周围环境影响要求的严格化及对抗震性能要求的提高, 同时又缺乏类似工程可以借鉴, 因而只有通过建立完善的理论分析体系来指导设计和施工过程才能保证工程建设和运营的安全。建立理论分析体系的关键在于软土地下工程中土工方面的问题, 进一步开展这方面研究, 不仅有利于提高我国软土地下工程建设的技术水平, 并有利于提升我国在国际岩土工程界的地位。

## 参 考 文 献

- [1] Amorosi A, Boldini D. Numerical modelling of the transverse dynamic behaviour of circular tunnels in clayey soils[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29:1059-72.
- [2] Anastasopoulos I, Gerolymos N, Vasileios D. Nonlinear Response of Deep Immersed Tunnel to Strong Seismic Shaking[J]. *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2007, 9:1067-1090.
- [3] Attewell P B, Woodman J P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives by tunneling in soil[J]. *Ground Engineering*, 1982, 15: 13-22.
- [4] Burd, H J, Houlsby, G T, Augarde, C E, et al. Modelling Tunnelling-Induced Settlement of Masonry Buildings[J]. *Proc. ICE, Geotechnical Engineering*, 2000,143: 17-39.
- [5] Cai F, Ugai K, Hagiwara T. Base stability of circular excavations in soft clay [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 2002, 128(8): 702-706.
- [6] Chambon P, Corte J F. Shallow tunnels in cohesionless soil: Stability of tunnel face[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1994(120):1148-1165.
- [7] Chambon P, Corte J F. Stabilité du front de taille d'un tunnel faiblement enterre: modelisation en centrifugeuse[C]. In: *Proc. Int. Conf. Tunneling and Microtunneling in Soft Ground: From Field to Theory*, Paris, 1989, 307-315.
- [8] Chang M F. Basal stability analysis of braced cuts in clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2000, 126(3): 276-279.
- [9] Cheng C Y, Dasari G R, Chow Y K, et al. Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement controlled model[J]. *Tunneling and Underground space Technology*, 2007, 22(4): 450-466.
- [10] Cilingir U, Madabhushi SPG. A model study on the effects of input motion on the seismic behavior of tunnels[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011;31:452-462.
- [11] Comejo L. Instability at the face: its repercussions for tunneling technology[J]. *Tunnels and Tunneling*, 1989,21: 69-74.
- [12] Eisenstein Z, Samarasekera L. Stability of unsupported tunnels in clay[J]. *Can. Geotech. J.* 1992, 29(4): 609-613.
- [13] Faheem H, Cai F, Ugai K. Three-dimensional base stability of rectangular excavations in soft soils using FEM[J]. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31(2): 67-74.
- [14] Finno R J, Blackburn J T, Roboski J F. Three dimensional effect for supported excavations in clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(1):30-36.
- [15] Gazetas G, Gerolymos N, Anastasopoulos I. Response of three Athens metro underground structures in the 1999 Parnitha earthquake[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005;25:617-33.
- [16] Goh A T C. Estimating basal-heave stability for braced excavations in soft clay[J]. *Journal of geotechnical engineering*, 1994, 120(8): 1430-1436.
- [17] Goh A T, Teh C I, Wong K S. Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1999, 123(9): 792-801.
- [18] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(4): 247-293.
- [19] Hashash Y M A, Park D, Yao J I. Ovaling deformations of circular tunnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20: 435-441.
- [20] Hatzigeorgiou GD, Beskos DE. Soil-structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010,30:851-861.
- [21] Hsieh P G, Ou C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998,Vol.35(6):1004-1017.
- [22] Huang M S, Zhang C R, Li Z. A simplified analysis method for the influence of tunneling on grouped piles[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24:410-422.
- [23] Huo H, Bobet A, Fernandez G, Ramirez J. Analytical solution for deep rectangular structures subjected to far-field shear stresses[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21: 613-625.
- [24] Izawa J, Kusakabe O. Centrifuge modeling on seismic behavior of rectangular tunnels[A]. In: *Proc. 6<sup>th</sup> Inter. Conf. in Physical Modeling in Geotechnics [C]*. London:Taylor and Francis, 2006:1163-1169.
- [25] Jacobsz SW, Standing J R, Mair R J. Centrifuge modeling of tunneling near driven piles[J]. *Soils and Foundations*, 2004,44(1) : 49-56.
- [26] Jancsecz S, Steiner W. Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions[C]. In: *Conference Proceeding Institute of Mining and Metallurgy and British Tunneling Society*. London, 1994, 531-549.
- [27] Japanese Society of Civil Engineers. Specifications for Earthquake Resistant Design of Submerged Tunnels,1975.

- [28] Juneja A, Hegde A, Lee F H, et al. Centrifuge modelling of tunnel face reinforcement using forepoling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(4): 377-381.
- [29] Kamata H, Mashimo H. Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18: 205-212.
- [30] Kim S H, Tonon F. Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane – Drained case[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(5): 526–542.
- [31] Kitiyodom P, Matsumoto T, Kawaguchi K. A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunneling [J]. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2005, 29: 1485-1507.
- [32] Klar A, Marshall M, Soga K, et al. Tunneling effects on jointed pipelines[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45:131-139.
- [33] Kwashima K. Seismic design of underground structures[M]. Japan: Kashima Publishing Company, 1994.
- [34] Leca E, Dormieux L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material[J]. *Géotechnique*, 1990, 40(4): 581-606.
- [35] Lee C J, Chiang K H, Kuo C M. Ground movement and tunnel stability when tunneling in sandy ground[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2004, 27(7): 1021-1032.
- [36] Lee K M, Rowe R K, Lo K Y. Subsidence owing to tunneling I: estimating the gap parameter[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29(6): 929-940.
- [37] Lee G T K, Ng, C W W. Effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2005, 131 (2): 193-201.
- [38] Leung C F, Ong D E L, Chow Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. II: collapsed wall[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2006, 132(1): 45 – 53.
- [39] Leung E H Y, Ng C W W. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2007, 133(2): 129-143.
- [40] Li C L, Miao L C, LV W H. Numerical analysis of face stability during shield-driven tunneling under groundwater table[C]. *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering 2011*, Dallas, Texas.2011:3796-3806.
- [41] Ling H I, Mohri Y, Kawabata T, et al. Centrifugal modeling of seismic behavior of large-diameter pipe in liquefiable soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2003, 129(2):1092-1101.
- [42] Loganathan N, Poulos H G, Xu K J. Ground and pile-group response due to tunneling [J]. *Soil and Foundations*, 2001, 41(1): 57-67.
- [43] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 1998, 124(9): 846-856.
- [44] Mair R J, Taylor R N, Bracegirdle A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. *Geotechnique*, 1993, 43(2): 315-320.
- [45] Mair R J, Taylor R N, Burland J B. Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling[C]. In: *Proc International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. London: Balkema, 1996: 713-718.
- [46] Mair R J, Taylor R N. Theme lecture: Bored tunnelling in the urban environment[A]. In: *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Rotterdam, 1997:2353-2385
- [47] Marshall M, Klar A, Mair R J. Tunneling beneath buried pipes: view of soil strain and its effect on pipeline behavior[J]. *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, 2010, 136(12): 1664-1672.
- [48] Mollon G, Dias D, Soubra A H. Probabilistic analysis and design of circular tunnels against face stability[J]. *International Journal of Geomechanics, ASCE*, 2009, 9(6):237-249.
- [49] Mollon G, Dias D, Soubra A H. Rotational failure mechanisms for the face stability analysis of tunnels driven by a pressurized shield[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011,35(12):1363-1388.
- [50] Okamoto S, Tamura C. Behaviour of subaqueous tunnels during earthquakes[J]. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 1973, 1(3):253-266.
- [51] O'Reilly M P, Mair R J, Alderman G H. Long-term settlements over tunnels; an eleven-year study at Grimsby[C]. *Proceedings of Conference Tunnelling*, London, Institution of Mining and Metallurgy, 1991:55-64.
- [52] O'Rourke T D, O'Donnell C J. Deep rotational stability of tiedback excavations in clay[J]. *Journal of Geotechnical and*

- Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 123(6): 506-515.
- [53] Osman A S, Mair R J, Bolton M D. On the kinematic of 2D tunnel collapse in undrained clay[J]. *Geotechnique*, 2006, 56(9): 585-595.
- [54] Ou C Y, Chiou D C, Wu T S. Three-dimensional finite element analysis of deep excavations[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1996, 122(5):337-346.
- [55] Park K H. Elastic solution for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *International Journal of Geomechanics, ASCE*, 2004, 4(4): 310-318.
- [56] Penzien J. Seismically induced racking of tunnel linings[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Dynamics* 2000, 29: 683-691.
- [57] Potts D M, Addenbrooke T I. A structure's influence on tunnelling-induced ground movements[J]. *Geotechnical Engineering*, 1997, 110(2): 109-125.
- [58] Poulos H G, Chen L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 1997, 123(2): 94-99.
- [59] Roboski J, Finno R J. Distributions of ground movements parallel to deep excavation in clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, Vol.43(1):43-58.
- [60] Rowe R K, Lo K Y, Kack G J. A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, 20(8): 11-22.
- [61] Sedarat H, Kozak A, Hashash YMA, et al. Contact interface in seismic analysis of circular tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009,24:482-90.
- [62] Shin J H, Addenbrooke T L, Potts D M. A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behavior[J]. *Geotechnique*, 2002, 52(6): 391-403.
- [63] Sloan S W, Assadi A. Stability of shallow tunnels in soft ground[C]. In: *Predictive Soil Mechanics*, London: Thomas Telford House, 1993, 644-663.
- [64] Soubra A H. Kinematical approach to the face stability analysis of shallow circular tunnels[C]. In: *Proc. 8th International Symposium on Plasticity*, British Columbia, Canada, 2000, 443-445.
- [65] St John CM, Zahrah TF. Aseismic design of underground structures[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1987,2(2): 165-197.
- [66] Stamos AA, Beskos DE. 3-D seismic response analysis of long lined tunnels in half-space[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1996, 15:111-8.
- [67] Su S F, Liao H J, Lin Y H. Base stability of deep excavation in anisotropic soft clay[J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE*, 1998, 124(9): 809-819.
- [68] Subrin D, Wong H. Stabilité du front d'un tunnel en milieu frottant-un nouveau mécanisme de rupture[J]. *C. R. Mecanique*, 2002, 330(7): 513-519.
- [69] Surjadinata J et al. Combined finite- and boundary- element analysis of the effect of tunneling on single piles[J]. *International Journal of Geomechanics, ASCE*, 2006, 6(5): 374-377.
- [70] Ukritchon B, Whittle A J, Sloan S W. Undrained limit analyses for combined loading of strip footings on clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 1998, 124(3): 265-276.
- [71] Vermeer P A, Ruse N, Marcher T. Tunnel heading stability in drained ground[J]. *Felsbau*, 2002, 20(6): 8-18.
- [72] Vorster T E B, Klar A, Soga K, et al. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005,131(11): 1399-1410.
- [73] Wang J H, Xu Z H, Wang W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2010, 136(7):985-994.
- [74] Wang J N. *Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach*[M]. Monograph, monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc, New York. 1993.
- [75] Wu B R, Lee C J. Ground movements and collapse mechanisms induced by tunneling in clayey soil[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2003 3 (4), 13-27.
- [76] Xu K J, Poulos H G. 3-D elastic analysis of vertical pile subject to "passive" loadings [J]. *Computers and Geotechnics*, 2001, 28: 349-375.
- [77] Yang D, Naesgaard E, Byrne PM, et al. Numerical model verification and calibration of George Massey Tunnel using centrifuge models[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004;41:921-42.
- [78] Zhang Z G, Huang M S, Zhang M X. Theoretical prediction of ground movements induced by tunneling in multi-layered soils[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(2):345-355.
- [79] Zheng G, Cheng X S, Diao Y, et al. Concept and design

- methodology of redundancy in braced excavation and case histories[J]. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*.(Accepted, to be published in 2011)
- [80] 毕继红, 刘伟, 江志峰. 隧道开挖对地下管线的影响分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(8): 1317-1321 (Bi Jihong, Liu Wei, Jiang Zhifeng. Analysis of effects of tunnel excavation on underground pipeline[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(8): 1317-1321(in Chinese))
- [81] 蔡建鹏, 黄茂松, 钱建固, 等. 基坑开挖对邻近地下管线影响分析的 DCFEM 法[J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(1): 120-124 (Cai Jianpeng, Huang Maosong, Qian Jiangu, et. al. DCFEM method for analyzing the influence of deep excavation on adjacent underground pipelines[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6(1): 120-124 (in Chinese))
- [82] 曹杰, 黄茂松, 余行. 硬质土层中隧道结构动力离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(7): 1101-1108 (Cao Jie, Huang Maosong, Yu Xing. Dynamic centrifuge tests on seismic response of tunnels in dense soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(7): 1101-1108.(in Chinese))
- [83] 陈福全, 吕艳平, 刘毓氙. 内撑式支护的软土基坑开挖抗隆起稳定性分析 [J].*岩土力学*, 2008, 29(2): 365-369 (Chen Fuquan, Lü Yanping, Liu Yuchuan. Base stability of braced excavations in soft clays using FEM[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 365-369(in Chinese))
- [84] 陈国兴, 庄海洋, 杜修力, 等. 土-地铁隧道动力相互作用的大型振动台试验-试验结果分析[J].*地震工程与工程震动*,2007,27(1):164-170 (Chen Guoxing, Zhuang Haiyang, Du Xiuli, et al. A large-scale shaking table test for dynamic soil-metro tunnel interaction: Analysis of test results[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*,2007,27(1):164-170(in Chinese))
- [85] 戴宏伟, 陈仁鹏, 陈云敏.地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(3): 312-316 (Dai Hongwei, Chen Renpeng, Chen Yunmin. Study on effect of construction loads on longitudinal deformation of adjacent metro tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(3): 312-316(in Chinese))
- [86] 董诚, 郑颖人, 唐晓松.利用有限元强度折减法进行渗流条件下的基坑整体稳定性分析[J].*土木工程学报*, 2009, 42(3): 105-110 (Dong cheng, ZhengYingren, Tang Xiaosong. Integral stability analysis of foundation pits under seepage by using FEM strength reduction[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(3): 105-110(in Chinese))
- [87] 杜金龙, 杨敏. 软土基坑开挖对邻近桩基影响的时效分析 [J]. *岩土工程学报*, 2008,28 (7): 1038-1043 (Du Jinlong, Yang Min. Time effect analysis of influence of excavation on adjacent pile foundations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008,28 (7): 1038-1043(in Chinese))
- [88] 杜佐龙, 黄茂松, 李早. 基于地层损失比的隧道开挖对临近群桩影响的 DCM 方法[J]. *岩土力学*, 2009, 30(10): 3043-3047 ( Du Zuolong, Huang Maosong, Li Zao. DCM-based on ground loss for response of group piles induced by tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3043-3047(in Chinese))
- [89] 方勇, 何川. 平行盾构隧道施工对既有隧道影响的数值分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 1402-1406 (Fang Yong, He Chuan. Numerical analysis of effects of parallel shield tunneling on existent tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1402-1406 (in Chinese))
- [90] 高健, 张义同, 乔金丽. 渗透力对隧道开挖面稳定性影响分析[J]. *岩土工程学报*,2009, 31(10): 1547-1553 (Gao Jian, Zhang Yitong, Qiao Jinli. Face stability analysis of tunnels with consideration of seepage force[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(10): 1547-1553 (in Chinese))
- [91] 韩大建, 周阿兴, 黄炎生. 珠江水下沉管隧道的抗震分析与设计( I )—时程响应法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*,1999, 27(11):115-121 (Han Dajian, Zhou Axing, Huang Yansheng. Aseismic analysis and design of the pearl river tunnel (I)-time domain response method[J]. *Journal of south china university of technology (nature science)* 1999, 27(11):115-121(in Chinese))
- [92] 韩焯, STANDING J R, 李宁. 隧道施工引起建筑物变形预测的刚度修正法[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(4): 539-545 (Han Xuan, J. R. Standing, Li Ning. Modified stiffness approach to predict deformation of building induced by tunnelling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 539-545(in Chinese))
- [93] 韩焯, 李宁. 隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析研究. *岩石力学与工程学报*, 2007, 29(3): 347-352 (Han Xuan, Li Ning. Comparative analysis of strata prediction models for ground movement induced by tunnel construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 29(3): 347-352 (in Chinese))
- [94] 胡展飞, 周健, 杨林德. 深基坑基底软土稳定性研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(2): 84-95 (Hu Zhanfei, Zhou Jian, Yang Linde. Study on subsoil stability under deep excavation[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(2):



- 84-95(in Chinese))
- [95] 黄春娥, 龚晓南. 条分法与有限元法相结合分析渗流作用下的基坑边坡稳定性[J]. 水利学报. 2001, (3): 6-10 (Huang Chune, Gong Xiaonan. Combination of slices method and FEM for slope stability analysis of foundation pit under the seepage condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (3): 6-10(in Chinese))
- [96] 黄茂松, 曹杰. 隧道地震响应简化分析与动力离心试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 271-280 (Huang Maosong, Cao Jie. Simplified analysis of tunnel earthquake response and centrifuge modeling calibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 271-280(in Chinese))
- [97] 黄茂松, 宋晓宇, 秦会来.  $K_0$  固结黏土基坑抗隆起稳定性上限分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 250-255 (Huang Maosong, Song Xiaoyu, Qin Huilai. Basal stability of braced excavations in  $K_0$ -consolidated soft clay by upper bound method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 250-255(in Chinese))
- [98] 黄茂松, 余生兵, 秦会来. 基于上限法的  $K_0$  固结黏土基坑抗隆起稳定分析[J]. 土木工程学报, 2011: 44(3)101-108 (Huang Maosong, Yu Shengbing, Qin Huilai. Upper bound method for basal stability analysis of braced excavations in  $K_0$ -consolidated clays[J]. China Civil Engineering Journal, 2011: 44(3)101-108 (in Chinese))
- [99] 黄茂松, 张陈蓉, 李早. 开挖条件下非均质地基中被动群桩水平反应分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1017-1023 (Huang Maosong, Zhang Chenrong, Li Zao. Lateral response of passive pile groups due to excavation-induced soil movement in stratified soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1017-1023(in Chinese))
- [100] 黄正荣, 朱伟, 梁精华, 等. 盾构法隧道开挖面极限支护压力研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 112-116 (Huang Zhengrong, Zhu Wei, Liang Jinghua, et. al. A study on the limit support pressure at excavation face of shield tunneling[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 112-116 (in Chinese))
- [101] 姜洪伟, 赵锡宏, 张保良. 各向异性条件下软土深基坑抗隆起稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 1-7 (Jiang Hongwei, Zhao Xihong, Zhang Baoliang. Analysis of Heave Resistant Stability for Deep Braced Excavation in Soft Clay under Anisotropic Condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1): 1-7 (in Chinese))
- [102] 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 (Li Guangxin. Estimating the water and earth pressures on the supporting structure around a foundation pit separately and together[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 348-352 (in Chinese))
- [103] 李广信, 刘早云, 温庆博. 渗透对基坑水土压力的影响[J]. 水利学报, 2002,(5): 75-80 (Li Guangxin, Liu Zaoyun, Wen Qingbo. Influence of seepage on water and earth pressure in foundation pit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,(5): 75-80 (in Chinese))
- [104] 李早, 黄茂松. 隧道开挖对群桩竖向位移和内力影响分析[J]. 岩土工程学报, 2007,29(3):398-402 (Li Zao, Huang Maosong. Analysis of settlement and internal forces of group pile due to tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007,29(3):398-402 (in Chinese))
- [105] 刘明, 黄茂松, 李进军. 地铁荷载作用下饱和软粘土的长期沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5): 813-817 (Liu Ming, Huang Maosong, Li Jinjun. Long-term settlement of saturated soft clay under subway loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(5): 813-817(in Chinese))
- [106] 刘明, 黄茂松, 柳艳华. 车振荷载引起的软土越江隧道长期沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1703-1709 (Liu Ming, Huang Maosong, Liu Yanhua. Long-term settlement of tunnels across a river induced by vehicle operation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1703-1709(in Chinese))
- [107] 吕玺琳, 王浩然, 黄茂松. 盾构隧道开挖面稳定极限理论研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 57-62 (Lü Xilin, Wang Haoran, Huang Maosong. Limit theoretical study on face stability of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 57-62(in Chinese))
- [108] 裴洪军. 城市隧道盾构法施工开挖面稳定性研究[学位论文], 南京: 河海大学, 2005 (Pei Hongjun. Study on face stability of tunnelling shield in urban areas[D]. Nanjing: Hohai University. 2005(in Chinese))
- [109] 乔金丽, 张义同, 高健. 考虑渗流的多层土盾构隧道开挖面稳定性分析[J]. 岩石力学, 2010, 31(5): 1497-1502 (Qiao Jinli, Zhang Yitong, Gao Jian. Stability analysis of shield tunnel face in multilayer soil with seepage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1497-1502(in Chinese))
- [110] 秦会来, 黄茂松, 马少坤. 黏土基坑抗隆起稳定分析的多块体上限解[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 73-81 (Qin Huilai, Huang Maosong, Ma Shaokun. Multi-block upper bound method for basal heave stability analysis of

- braced excavations in clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 73-81(in Chinese))
- [111] 秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2005 (Qin Jianshe. Study on face deformation and collapse of earth pressure shield tunnel[D]. Nanjing: Hohai University. 2005(in Chinese))
- [112] 冉龙, 胡琦. 粉砂地基深基坑渗透破坏研究[J]. 岩土力学, 2009,30(1): 241-250 (Ran Long, Hu Qi. Analysis of seepage failure of deep foundation pit in silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(1): 241-250(in Chinese))
- [113] 王成华, 鹿群, 孙鹏. 基坑抗隆起稳定分析的临界宽度法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 295-300 (Wang Chenghua, Lu Qun, Sun Peng. Critical width method for analyzing stability of foundation pits against basal heave failure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 295-300 (in Chinese))
- [114] 王立忠, 吕学金. 复变函数分析盾构隧道施工引起的地基变形[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 319-327 (Wang Lizhong, Lü Xuejin. A complex variable solution for different kinds of oval deformation around circular tunnel in an elastic half plane[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 319-327(in Chinese))
- [115] 王建华, 范巍, 王卫东, 等. 空间 m 法在深基坑支护结构分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1):1332-1335. (Wang Jianhua, Fan Wei, Wang Weidong, et al. Application of 3D m-method in analysis of retaining structures of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1):1332-1335(in Chinese))
- [116] 王卫东, 徐中华. 预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 213(s1):32-38 (Wang Weidong, Xu Zhonghua. Simplified analysis method for evaluating excavation-induced damage of adjacent buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 213(s1):32-38(in Chinese))
- [117] 王卫东, 王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007 (Wang Weidong, Wang Jianhua. Design analysis and case histories of deep excavations supported by permanent structures[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007)
- [118] 魏汝龙. 开挖卸载与被动土压力计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6):88-92.
- [119] 吴怀娜, 胡蒙达, 许焯霜, 等. 管片局部渗漏对地铁隧道长期沉降的影响规律[J]. 地下空间与工程学报, 2009,5(S2) :1608-1611 ( Wu Huaina, Hu Mengda, Xu
- Yeshuang, et. al. Law of influence of segment leakage on long-term tunnel settlement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009,5(S2) :1608-1611 (in Chinese))
- [120] 徐志英, 施善云.土与地下结构动力相互作用的大型振动台试验与计算[J].岩土工程学报,1993,15(4):1-7 (Xu Zhiying, Shi Shanyun. Large-sized shaking table test and calculation for soil-substructure dynamic interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993,15(4):1-7 (in Chinese))
- [121] 严松宏, 潘昌实. 沉管隧道地震响应分析[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(2):15-21 ( Yan Songhong, Pan Changshi. Seismic response analyses of an immersed tube tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(2):15-21(in Chinese))
- [122] 杨超, 黄茂松, 刘明蕴. 隧道施工对临近桩基影响的三维数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(s1): 2601-2607 (Yang Chao, Huang Maosong, Liu Mingyun. Three-dimensional numerical analysis of effect of tunnel construction on adjacent pile foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(s1) : 2601-2607 (in Chinese))
- [123] 杨林德, 季倩倩, 郑永来, 等. 软土地铁车站结构的振动台模型试验[J].现代隧道技术, 2003, 40(1):7-11 (Yang Linde, Ji QianQian, Zheng Yonglai, et al. Shaking table test on metro station structures in soft soil[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(1):7-11 (in Chinese))
- [124] 杨晓军, 龚晓南. 基坑开挖中考虑水压力的土压力计算[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4):58-62 (Yang Xiaojun, Gong Xiaonan. Calculation of earth pressure on excavation considering pore water pressure[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(4):58-62(in Chinese))
- [125] 俞建霖, 龚晓南. 深基坑工程的空间性状分析[J].岩土工程学报, 1999, 21(1):21-25 (Yu Jianlin, Gong Xiaonan. Spatial behavior analysis of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1):21-25 (in Chinese))
- [126] 叶耀东. 软土地区运营地铁盾构隧道结构变形及健康诊断方法研究[D]. 上海:同济大学. 2007 (Ye Yaodong. Research on Deformation and Method of Health Diagnose of Operational Subway Structures in Soft Soil[D].Shanghai: Tongji University. 2007(in Chinese))
- [127] 张陈蓉, 俞剑, 黄茂松. 基坑开挖对邻近地下管线影响的变形控制标准[J]. 岩土力学, 2011 (待刊) .
- [128] 张栋梁, 杨林德, 谢永利, 等. 盾构隧道抗震设计计算的解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 543-549 ( Zhang Dongliang, Yang Linde, Xie Yongli, et. al.

- Analytical solution for aseismic design calculation of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 543-549 (in Chinese))
- [129] 张耀东, 龚晓南. 软土基坑抗隆起稳定性计算的改进 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1378-1382 (Zhang Yaodong, Gong Xiaonan. Improvement on basal heave stability analysis for excavations in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(s): 1378-1382(in Chinese))
- [130] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 层状地基中隧道开挖对临近既有隧道的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 600-608 (Zhang Zhiguo, Huang Maosong, Wang Weidong, Analysis on response of existing tunnels due to adjacent tunneling in multi-layered soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 600-608(in Chinese))
- [131] 郑永来, 李美利, 王明洋, 等. 软土隧道渗漏对隧道及地面沉降影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 243-246 (Zheng Yonglai, Li Meili, Wang Mingyan, et. al. Study on influence of seepage of metro tunnels in soft soil on the settlements of tunnels and ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 243-246 (in Chinese))
- [132] 周小文, 濮家骝, 包承钢. 砂土中隧洞开挖稳定机理及松动土压力研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 9-13 (Zhou Xiaowen, Pu Jialiu, Bao Chenggang. Study on stability mechanism and relaxed soil pressure in sandy soil during excavation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4): 9-13 (in Chinese))
- [133] 朱伟, 秦建设, 卢廷浩. 砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 897-902. (Zhu Wei, Qin Jianshe, Lu Tinghao. Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 897-902(in Chinese))
- [134] 朱晓宇. 地下工程开挖对周边既有建筑物影响研究[硕士学位论文], 上海: 同济大学, 2011 (Zhu Xiaoyu. Research on the influence of buildings due to adjacent underground excavation[D]. Shanghai: Tongji University. 2011(in Chinese))
- [135] 朱晓宇, 黄茂松, 张陈蓉. 基坑开挖对邻近桩基础影响分析的 DCFEM 法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(s1): 181-185. (Zhu Xiaoyu, Huang Maosong, Zhang Chenrong. Displacement-controlled FEM for analyzing influences of excavation of foundation pits on adjacent pile foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(s1): 181-185 (in Chinese))
- [136] 邹广电. 基于一个上限分析方法的深基坑抗隆起稳定分析 [J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1873-1878 (Zou Guangdian. Analysis of stability against upheaval of deep excavation by an upper limit method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1873-1878 (in Chinese))