二、特邀报告

饱和土与桩基动力相互作用分析的基本理论与算法

王建华[1]，陆建飞[2]，周香莲[1]，陈锦剑[1]
（1. 上海交通大学土木工程系，上海 200240；2. 江苏大学理学院，江苏 镇江 212013）

摘　要：滨海沿江饱和软土地区广泛采用桩基作为高层建筑、桥梁、高铁等结构物的基础。以 Poulous 为代表的学者们应用单相介质弹性理论对桩基开展了系统的解析解研究，其成果在工程界广泛应用，但未涉及孔隙水压力的作用。随着城市建设发展和人居环境舒适度要求的提高，桩基在地震波、环境振动和交通荷载作用下的性能保障及振动控制问题日益突出。实际上，动荷载作用下的孔压变化是影响桩基性能的关键因素之一。受分析理论和计算方法限制，对动力作用下饱和土孔压变化规律及桩基响应的解析解研究进展缓慢。本文着眼饱和土与桩基础动力相互作用的力学机制，建立了不同荷载条件下饱和土孔压响应的基本解体系，提出了桩土相互作用的解析解和高效算法，克服了解析解超大规模动力计算难题，为饱和软土地区桩基设计和地铁高铁的环境振动控制提供理论依据和技术支撑。主要研究内容如下：

（1）考虑饱和土中桩基承受的不同动力荷载形式，采用积分变换及势函数解耦等方法，构建了均质及层状饱和土的完整基本解体系。首次提出了层状半空间饱和土动力分析的 TRM 方法及饱和土的 2.5D 基本解，奠定了从固定到移动、简谐到瞬态等不同荷载条件下饱和土与桩基相互作用解析分析的理论基础。

（2）基于上述饱和土基本解，系统地建立了饱和土中单桩、群桩和排桩等各类桩基的积分方程计算模型，揭示了饱和土-桩基体系在复杂土层和不同荷载条件下的响应机理与特征。以桩、土应变为协调变量，解决了积分方程在桩土共同作用分析中所面临的收敛性难题。

（3）提出了针对大规模桩土动力分析的高效计算模型和优化算法。首次建立了高频情形下 Biot 理论中流固牵引力的分数导数模型和波数域内饱和土的 2.5D 边界元方法，提出了波数域内排桩的积分方程及边界元计算模型，实现了饱和土体与结构动力相互作用的高效计算。

关键词：饱和土；桩；动力问题；积分方程；解析解

黄土隧道面临的问题与探讨

谢永利
（长安大学公路学院，西安 710064）

摘 要：以往在黄土分布区修筑的隧道一是数量少，二是要求低，存在的技术问题并不十分突出。随着国家西部大开发的不断深入以及路网的逐渐完善，隧道工程建设快速进入经济欠发达的西部省区，穿越黄土地区的隧道也越来越多。伴随着黄土地区隧道的修筑，针对黄土公路隧道的研究已取得了一批成果，为黄土地区修筑隧道提供了有力的技术支持。但由于黄土结构与性状的独特性以及对隧道工程更高的技术要求，新的问题不断暴露，在建和已建隧道存在和出现了不少病害，致使人们越来越意识到黄土隧道的一些深层次技术问题尚需不断探索，要在理论上实现发展与突破。笔者在总结黄土隧道 10 余年研究成果的基础上，进一步针对工程中遇到的实际问题，对黄土隧道面临的新问题进行了深入思考和探讨：现有的方法低估了一些黄土公路隧道深浅埋的分界深度；从近几年的研究成果可以得出，无论按《公路隧道设计规范》、谢氏公式，还是按太沙基公式，其对不同断面、不等间距的浅埋黄土公路隧道围岩压力的计算均与实测值存在较大偏差，围岩压力计算公式应进一步优化；荷载作用机理尚不明确，揭示黄土公路隧道围岩压力在复杂多变环境下的作用机理很有必要；隧道初支系统偏弱，研发一种大刚度、抗变形能力强、可快速施工的新型初支型式很有意义，势在必行；隧道施工塌方多与地形有关，在围岩变化不大时，隧道洞身穿越深切地形时要加强纵向连接，必要时增设纵向槽钢来避免施工灾害的发生;湿陷性黄土隧道地基不进行合理处理,会导致隧道整体沉降和不均匀沉降，地基处理有时非常必要；黄土隧道系统锚杆应结合围岩条件和环境效应进行合理有效布设；研发一种既可减少施工过程中质量控制难度，又可对排水系统实现常规检查，实现“可维可达”的新型防排水系统应用前景广阔；开展在役黄土隧道结构的动态时空环境效应、结构性能与环境耦合作用机制、复杂环境下的隧道结构材料全寿命期性能劣化机理研究显得尤为必要。笔者坚信,通过我们的不懈努力，今后黄土隧道遇到的问题会越来越少,在黄土隧道的设计、施工和服役环节实现理论与技术的新突破。

我国西沙群岛珊瑚礁科学钻探工程---千米深钻工程实录

汪 稔，朱长歧，孟庆山
（中国科学院武汉岩土力学研究所，武汉 430071）

摘 要：2014 年 4 月 21 日至 12 月 5 日，由中国科学院武汉岩土力学研究所、中国科学院南海海洋研究所组成的珊瑚礁科学钻探工程项目组，于我国西沙群岛的琛航岛上实施了珊瑚礁科学钻探工程。

本次钻探共完成钻孔 2 个（即琛科 1 井和琛科 2 井），钻孔位于琛航岛东南砾石堤的内侧，2 孔相距 36.87m，孔口高程分别为 6.429m 和 4.859m。孔深分别为 901.9m 和 928.75m，均钻穿了珊瑚礁地层并进入基岩内，揭露的礁灰岩厚度分别为 886.2m 和 873.55m，进入基岩内的深度分别为 15.7m 和 52.2m。

本次钻探的目的，是为了全取珊瑚礁岩心样品，建成我国第一个珊瑚礁岩心样本库。为此钻孔设计为 4 级套管结构，上部最大口径 146mm，终孔最小口径为 76mm；采用双管单动金刚石钻进绳索取芯工艺；为保持孔壁的完整及沉渣的顺利上返，钻进过程中根据钻遇地层条件分别采用了无固相、低固相及固相钻井液钻进。并采取了以下 3 项主要措施来提高礁灰岩的取芯率：一，尽量减小回次进尺，使其控制在 1.5m 以内；二，尽量采用大口径取芯钻具；三，对极弱至中等胶结的泥粒生物砂屑灰岩层，采用小水量、低转速配合超前底喷金刚石钻头钻进工艺。最终 2 钻孔分别取芯 416.62m 和 646.79m。

钻探发现，从岩性、结构及力学角度进行分层，琛航岛的礁灰岩至少可以分成 14 层，其地层具有旋回的沉积规律，系海相的物理化学沉积和海洋生物沉积 2 种沉积规律的综合，每个沉积旋回的顶部多有沉积间断，或会伴随矿物成分的变化（如白云岩化等）及溶蚀构造；地面以下至 15.85-23.47m 间，为未经胶结（或固结）的松散层，主要为由珊瑚断肢、碎块、生物砂砾等组成的珊瑚碎石土层，含孔洞，未经固结密实。

为了获得更多的地层信息，来弥补钻孔取芯率的不足以及为进行合理的地层划分提供技术支持，钻探过程中还进行了钻孔孔壁数字摄像及数字物探测井等多项无损测试，获得了全孔的地层岩性图像以及至少 6 个物探参数（声波时差、天然伽马、人工伽马、电阻率、孔斜及方位角、地温等）随深度的变化规律。

珊瑚礁地层破碎、孔洞发育，给珊瑚礁钻探工程带来了巨大的挑战，影响珊瑚礁钻探工期的主要因素是各种钻探事故（如断钻、垮孔、埋钻等）的处理、物资补给的不及时以及台风等恶劣的自然气候条件的影响，平均起来，珊瑚礁钻探的平均日进尺为 20m 左右，但有时 1 次严重的断钻事故的处理就要用时 20 天（如琛科 2 井于 744.74m 处的断钻事故）。本次钻探过程中共有 3 个强台风经过井场，每个台风的来袭都会影响工期 3 天左右，同时也会给生命及财产造成严重损失，如 21 号台风“蝴蝶”经过时造成我国渔民 55 人遇难，30 号台风“海燕”造成菲律宾上万人的死亡，钻探及测试设备（发电机、井架、测井设备等）在台风中也多次受损。

琛航岛珊瑚礁科学钻探工程，是国家科技基础性工作专项“南海中北部珊瑚礁本底调查”项目的

一部分，该钻探工程由中国科学院武汉岩土力学研究所汪 稔研究员牵头，现场由孟庆山、朱长歧研究员分别负责实施。

琛科 1 井、琛科 2 井是继“西永 1 井”（1974 年）后在我国南海珊瑚岛礁上实施的又 2 口贯穿礁灰岩层的钻孔，也是第一次实现全取芯的钻孔。该钻探工程的成功实施，必将为南海珊瑚礁的成因及演化规律研究、全球海平面及气候变化研究乃至珊瑚礁灰岩的岩土工程特性研究提供最基础的物质条件支撑。

季节性冻土地区高速铁路路基冻胀规律及控制

叶阳升 [1,2]
（1. 中国铁道科学研究院高速铁路轨道技术国家重点实验室， 北京 100081；
2. 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所， 北京 100081）

摘 要：高速铁路对路基冻胀变形控制提出了新的要求，传统意义上的不冻胀填料的微冻胀已经不能忽略，由此产生了一系列新的问题。目前我国在建和已建的季节性冻土地区高速铁路有哈大、哈齐、沈丹、盘营、长吉、哈牡、京沈等线路，共计约 7000 公里。中国首倡的“一带一路”发展战略也对冻土路基提出了新的需求。本报告介绍高速铁路路基的冻胀特征、微冻胀填料的冻胀机制、高速铁路路基防冻胀结构及冻胀维护整治措施等内容。

目前已建的严寒地区高速铁路，尽管采取了一系列的防冻胀措施，但仍然普遍出现了冻胀问题。以哈大高速铁路为例，全线路基 903.939km，其中冻胀量≤4mm 的约占 61%，4～10mm 约占 33%，≥10mm 约占 6%。个别冻胀较大的地段，往往与填料的细粒含量、降水下渗、横向疏排水以及地下水的影响等密切相关。与气温变化和基床结构特征相吻合，哈大高速铁路路基冻胀发展变化过程可分为冻胀初始波动、冻胀快速发展、低速稳定持续发展、波动融沉、融沉稳定五个发展阶段；冻深发展则分为冻深持续发展和双向融化两个阶段，可采用最大冻结指数的对数形式表示。

微冻胀填料主要为含有少量细颗粒的粗粒土填料。由于其内部结构的离散性和水分传递的非连续性，冻结时不同部位基本处于“封闭”的状态，主要表现为“原位冻胀”，冻胀随冻结温度呈“瞬时性”，无明显的宏观水分转移。微冻胀填料中的细颗粒是冻胀的主要根源。冻结时细颗粒中的水分向外转移集聚会导致新的空间占位，其作用远大于水变冰的体积增量；而粗颗粒表面吸附的少量水分，仅会产生相变体积膨胀。考虑内部的作用，可以将微冻胀土看作是由粗粒骨架与骨架中的填充料及未充填的剩余孔隙组成。冻结时填充料体积膨胀，一方面产生填充作用，充填剩余的孔隙；另一方面产生抬升作用，导致骨架颗粒微移，造成宏观上的冻胀。微冻胀填料的实际冻结过程是一个充填作用与抬升作用的平衡过程。基于能量最低原理和充填料的冻胀特性，可以得出微冻胀填料冻胀的计算公式。

严寒地区高速铁路防冻胀结构采用填料抗胀和水的“防排疏渗”相结合的原则进行防冻胀控制。通常在冻深范围内采用非冻胀填料，细颗粒含量不超过 5%，保持较大渗透性，增强疏排下渗，减小自然持水率。路基顶面及两侧一般配有完善的防排水系统，包括路基面的防水封闭层、两侧的渗水盲沟及排水侧沟等。表面封闭层结构缝的处理对于其防水效果至关重要。地下水较高的地段，也采用混凝土基床的形式或保温措施。地表水有淤积地段，也采用渗水盲井措施将积水导入地下。

冻胀变形轨道的维护，以撤垫调低和平顺垫高相结合的方式。由于冻胀发生位置和量值具有一定重复性，为保证冬季作业的效率往往采取入冬前预垫，冻胀后撤垫的方式。冻胀较大地段，采用厚度较小、高程调整范围大的调低铁垫板，可减少调高垫板的使用数量。在哈大高速铁路的维护过程中，还提出了动态平顺的处理方法，将线路平顺性调整到兼顾冬夏季节的程度，冻胀前后不再需要调整，有效保证了线路的平顺性，大大降低了维护工作量。对于需要整治的冻害地段，根据冻害产生原因，可采用加强表层封堵、基床表层填料反冲洗、渗水盲沟、井点降水、外保温层覆盖、地热循环加热路

基等技术进行处理。

关键词：高速铁路；季节性冻土；路基冻胀；冻胀机制；防冻胀结构；维护整治

深大基坑工程设计实践与创新

王卫东 [1,2]
（1. 华东建筑设计研究总院，上海，200002；2. 上海基坑工程环境安全控制工程技术研究中心，上海 200002）

摘 要：我国大规模的高层建筑地下室、地下商场的建设和大规模的市政工程如地下停车场、大型地铁车站、大型交通枢纽、地下变电站、大型排水及污水处理系统等的施工都面临深基坑工程。且基坑工程的规模越来越大、深度越来越深，基坑周边的环境条件也日趋复杂。一方面，城市区域基坑工程环境保护要求高，设计和施工难度大，稍有不慎就可能对周边环境产生较大影响，影响其正常使用，因此环境影响控制是深大基坑工程设计和施工需重点关注的问题。另一方面，深大基坑承压水长时间降水减压可能导致大面积地面沉降，并对周边环境产生不良影响，因此合理处理承压水问题是深大基坑工程设计的重要课题。此外，传统临时支护造价高、施工周期长、拆除的废弃物处置困难，浪费大量人力、物力和社会资源；逆作法技术可大量节省临时支护结构的使用，有利于基坑工程的可持续发展，成为深大基坑工程支护的重要发展方向。本报告针对上述三个方面，基于上海、天津、南京、武汉、苏州等沿江沿海地区的大量工程实践，阐述了基坑工程中环境影响控制技术、承压水控制技术以及逆作法技术，并介绍了这些技术在具体工程中的实践与应用。

环境影响控制技术与应用方面。首先分析了基坑工程环境影响因素。其次，提出了基坑工程环境影响评价与分析方法，重点介绍了基坑工程对环境影响的数值分析方法，讨论了数值分析需重点考虑的问题、土体本构模型的适用性以及上海软土典型土层 HS-Small 模型参数的确定方法；分析了海光大厦、申能能源中心、南京绿地紫峰大厦等基坑工程开挖对周边地铁隧道或建筑物的影响，取得了与实测数据吻合较好的结果。第三，介绍了基坑工程的变形控制新技术，包括分区施工、坑内土体加固、分块开挖、钢支撑轴力伺服系统变形控制技术、变形传播路径和建(构)筑物抵抗变形能力方面的控制技术等；进一步介绍了这些技术在具体工程中的应用，包括挖深达 22.15m、紧邻 6 条地铁隧道的盛大中心；基坑面积 3.8 万 m^2、挖深 16m、紧邻越江隧道和共同沟的上海世博会 A 片区绿谷一期；挖深达 15m、邻近地铁隧道和车站的苏州中心广场；基坑面积 2 万 m^2、挖深 21m、紧邻历史保护建筑物的鼎鼎外滩工程等，取得了良好的变形控制效果。

承压水控制技术与应用方面。首先介绍了承压水降水对环境影响的分析方法。其次，较系统地介绍了深大基坑承压水隔水技术，包括超深地下连续墙技术和超深等厚度水泥土搅拌墙技术—TRD 工法；在超深地下连续墙技术方面介绍了成槽技术（抓钻结合、抓冲结合、抓铣结合等成槽方式）、接头技术(工字型钢接头、V 型钢板接头、套铣接头)和地下连续墙接缝的 RJP 工法封堵技术；在超深水泥土搅拌墙技术方面介绍了 TRD 工法的技术原理和在全国的应用情况。第三，介绍了地下水抽灌一体化技术及其应用，采用基坑降水的原水回灌既可有效避免地下水资源的浪费，又可保护基坑周边环境。超深地下连续墙技术在武汉绿地中心和南京世界贸易中心中成功应用，其中武汉绿地中心基坑面积 3.6 万 m^2，主楼最大挖深 30.4m，采用深达 50m 的地下连续墙进入中风化基岩隔断承压水；南京世界贸易中心基坑面积 3.6 万 m^2，最大挖深 19.1m，采用深达 60m 的地下连续墙进入强风化基岩隔断承压水。超深 TRD 工法在淮安雨润中央新天地和上海国际金融中心工程中成功应用，其中淮安雨润中央新天地

基坑面积 4.4 万 m^2，最大挖深 27.6m，采用厚 850mm、深达 45m 的 TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙隔断承压水；上海国际金融中心基坑面积 4.8 万 m^2，最大挖深 28m，采用厚 700mm、深达 53m 的 TRD 工法等厚度水泥土搅拌墙作为悬挂隔水帷幕。超深地下连续墙和超深水泥土搅拌墙在这些工程中隔水效果显著，有效地保护了基坑周边的环境。

逆作法技术与应用方面。系统地介绍了逆作法的关键技术，包括墙体相结合技术（地下连续墙两墙合一技术、桩墙合一技术）、竖向构件相结合技术、逆作结构施工技术等。根据工期、造价、环境保护等不同要求，创新性地发展了不同的逆作法方式。介绍了这些逆作法方式在重大工程的应用情况，其中基坑面积 4.2 万 m^2、挖深 21~24.3m 的上海白玉兰广场采用分区顺逆作结合的方式；基坑面积 4.8 万 m^2、最大挖深 28m 的上海国际金融中心采用顺逆作交叉实施的方式；基坑面积 1.1 万 m^2、挖深 14~20m 的南京青奥中心双塔楼采用上下同步逆作的方式，底板浇筑完成时，上部结构核心筒已施工至第 18 层；基坑面积 3.9 万 m^2、挖深 15~22m 的武汉永清综合开发项目 A1/2/3 地块采用上下同步逆作的方式，底板浇筑完成时，裙楼区域完成地上 6 层楼的施工；基坑面积 2.6 万 m^2、挖深 27.7~32.4m 的苏州中南中心采用主楼顺作、裙楼逆作方式。不同方式的逆作法在这些重大工程中成功应用，取得了很好的技术经济效果。

关键词：基坑工程；变形控制；环境保护；承压水控制；逆作法

港珠澳大桥海底隧道的地基问题与挑战

杨光华 [1,2]
（1. 广东省水利水电科学研究院,广州市 510610；2. 广东省岩土工程技术研究中心,广州 510610）

摘 要：本报告主要介绍了港珠澳大桥岛隧工程中遇到的一些地基处理的难题、处理方法，并指出值得进一步研究的科学问题。

港珠澳大桥隧道工程是世界上最长的沉管隧道工程，隧道工程造价约 70 亿，其地基处理工程的难度也堪称世界之最，挑战土力学的基础问题。隧道地基处理真正要求按变形控制设计，这是对地基沉降计算难题的挑战。。

沉管隧道工程长 5.6km，由 33 节沉管组成，每节沉管长 180m，宽 40m，每节沉管由 8 节长 22.5m 的管节连接而成。沉管在岸上预制好，然后浮运到预先开挖并按照变形控制要求处理好的海底基槽中沉放、对接。

隧道和大桥的连接是通过海上填筑的人工岛实现的，两个人工岛分别为长 625m，横向最宽处为 215m，单个人工岛造价超过 20 亿。

岛隧工程地基中最大难度的是地基处理和沉降控制。大桥是端承桩基础，而隧道工程的两端是通过人工岛与大桥连接，这必须要控制人工岛的工后沉降。同时，隧道基底通过软硬不同的土层，分别有淤泥、淤泥质土、粉质粘土、砂层，砂层以下是岩层。隧道基底土层软硬不同、厚度不均。隧道由人工岛逐步向海床底部延伸。隧道底埋深最大为海平面以下约 45m，隧道顶面不同位置会面临不同的回淤荷载。因此，要保证长约 6km 的海底隧道工程的结构安全，关键是控制隧道结构工后沉降的均匀性，保证隧道结构由于沉降在纵向上的受力安全。要控制隧道结构的沉降过渡的合理性，关键是能否准确计算隧道地基的沉降，由沉降大小决定隧道地基的处理方案。而地基沉降能算准吗？这虽然是土力学的一个最基本的问题，但目前的水平多是经验算法，并没有把握能算准，但工程需要可靠的结果，这对于工程来说无疑是一个有挑战性的问题。以往工程界一直提倡地基基础按变形设计，但真正严格的实践并不多。

港珠澳大桥隧道地基经过多方论证，最后地基处理方案分别采用了预应力管桩复合地基、旋喷桩复合地基、挤密砂桩复合地基及天然地基等多种地基方案进行过渡，对各种地基处理的效果均采用了原位载荷试验这样的可靠方法进行了检测验证，确保了工程的可靠性。

对于人工岛，采用大型钢护筒快速筑岛，取得了很好的效果，但对钢护筒的受力变形计算仍是一个尚须进一步深入研究的问题。岛内地基采用塑料排水板通过填砂降水预压处理，形成比较好的一维压缩条件，整个人工岛地基处理取得了良好效果。而钢护筒护壁工程是快速建造人工岛的成功典范。

回顾岛隧工程地基处理方案的历程，其最大的挑战在于沉降变形控制，而其关键在于地基的沉降和变形能否算准？而影响地基沉降变形计算准确性最大的是土的变形参数的准确确定。由于土体的结构性，加卸载不同受力状态的影响，通常工程中由取样进行室内试验而得到的参数与实际原位土参数有较大差异，因此，要提高沉降变形计算的准确性，进行现场原位测试确定原位土参数是最为重要的。