

岩土工程技术创新方法与实践

刘汉龙

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 岩土工程学科发展, 创新是灵魂。基于笔者与其创新团队对近年来开展的岩土工程新技术研发工作, 从技术创新的角度进行了归纳, 并力求从技术创新过程中探讨产学研实践方面的研究问题。首先介绍了岩土工程技术创新的内涵和分类, 围绕集成、逻辑推理和联想等思路, 着重探讨了优缺点互补创新法、逆向思维创新法、组合技术创新法、希望点列举创新法、触类旁通创新法、强制联想创新法和扩散(发散)思维创新法7种方法, 基于笔者近年来研发的系列创新技术, 围绕上述的7种创新方法, 分别阐述每种新技术的研发背景、研发过程和技术内容。以现浇混凝土大直径管桩(即PCC桩)技术创新为例, 阐述了产学研的研究思路和研究过程。

关键词: 岩土工程; 技术创新; 创新方法; 创新思维; 工程科学问题

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)01-0034-25

作者简介: 刘汉龙(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 教育部长江学者创新团队负责人。1986年浙江大学本科毕业, 1994年在河海大学获博士学位, 1997年日本国立港湾技术研究所博士后出站。主要从事土动力学与岩土地震工程、软土力学与地基基础工程领域的教学与科研工作, 在高土石坝与堤防工程抗震、高速公路与高速铁路软土地基处理研究方面取得创新性成果, 获国家技术发明二等奖和国家科技进步二等奖各1项、省部级科学技术奖一等奖4项、二等奖5项, 获何梁何利基金科学与技术创新奖, 国家授权发明专利26项, 软件著作权5项, 发表SCI、Ei检索论文135篇。E-mail: hliuhhu@163.com。



Technological innovation methods and practices in geotechnical engineering

LIU Han-long

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Innovation is the soul for the development of geotechnical engineering discipline. Based on the researches and development of new geotechnical technologies made by the author and his team in recent years, the relevant work is summarized in the view of technological innovation. The aim is to solve the research problems in production-teaching-research aspect in the process of technological innovation. Firstly, the connotation and classification of technological innovation in geotechnical engineering are introduced. The following seven methods are involved: the complementary advantages and disadvantages innovation method, the reverse thinking innovation method, the combination technology innovation method, the hope point listing innovation method, the analogy innovation method, the compulsory association innovation method and the divergent thinking innovation method. Secondly, the research background, process and technical content of each innovation method are introduced based on the research results of a series of innovation technologies. Finally, the research mentality and process of the production-teaching-research aspect are discussed through an example of technological innovation of PCC piles.

Key words: geotechnical engineering; technological innovation; innovation method; creative thinking; engineering science problem

0 引言

科技创新分为原始创新和跟踪创新两种。两种创

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT1125); 国家杰出青年科学基金项目(50825901)
收稿日期: 2012-10-25

新的思维方式有很大不同，可以分别比喻为啄木鸟方式和蜜蜂酿蜜方式^[1]。要把科学严谨化、科技兴国、科技为国家建设和经济发展服务，就需要原始创新。各个层次、各个方面都有它的原始性创新的问题，都有一个源头的问题、探索的问题。不仅在理论上，技术上也是如此。技术上的属于技术创新，学术上则是知识创新，建设上有工程创新^[2]。技术创新最早起源于美籍奥地利人、经济学家约瑟夫·A·熊彼特1912年所创立的“创新理论”。熊彼特在《经济发展理论》^[3]一书中认为创新的内容包括5种情况：一是引入新产品；二是引用新的生产方法和工艺；三是开辟新市场；四是获得原材料或半成品的新供给来源；五是实现新的企业组织形式。

技术创新主要是指新产品和新工艺构想的产生、研究开发、投入或应用于生产、进入市场销售并实现商业利益过程的技术经济活动。技术创新活动主要由产品创新和工艺创新两部分构成。产品创新主要是指技术上有变化的产品的研究开发生产及商业化，包括全新产品、显著改进产品。工艺创新主要是指对全新的或有显著改进的生产方法的研究开发及应用，包含新工艺、新设备等。技术创新的基本特征：它是技术经济概念，强调技术与经济的结合，是一个技术经济过程；强调技术变化，并以新技术（新产品、新工艺等）的投入为前提，注重新技术的首次应用；强调企业是技术创新的主体；判断技术创新成功与否的主要标志是其市场实现程度，而不是技术上的完善程度。

近年来，随着我国基础设施建设的快速发展、岩土工程技术创新进入到了一个欣欣向荣的阶段，新技术、新工艺和新产品层出不穷，显示出我国在技术创新方面引领国际态势。岩土工程新技术只有在工程应用中才能体现出它的价值，这就需要企业、高校、科研院所相互结合、分工合作，共同完成一项新发明从技术开发、科学研究到推广应用的整个过程，这就是产学研合作的发展方向。

岩土工程技术创新的内涵丰富，本文拟着重探讨优缺点互补创新法、逆向思维创新法、组合技术创新法、希望点列举创新法、触类旁通创新法、强制联想创新法和扩散（发散）思维创新法7种创新方法，并基于笔者近年来研发的一系列创新技术，围绕上述的7种创新方法，分别阐述了其创新背景、创新思路与方法、创新内容等。以PCC桩技术为例，阐述了产学研一体化的研究思路。

1 优缺点互补创新法

优缺点互补创新方法内涵是：将两种或多种技术

结合，克服其缺点，结合其优点，取长补短，从而得到新的技术发明。我们生活中常发生这样的趣事：当某物的缺点移到别一物时，有可能成为该物的优势；将两物的缺陷进行叠加，也会产生出一个很有特点的事物。一项发明创造能不能采用优缺点互补创新法创造成功，关键取决于所选取的两个对象之间的优缺点是否具有互补性（如图1）。如果所选取的两个对象的优缺点类似，或者两个对象之间的优缺点毫无关联，一个对象的缺点不能被另一个对象的优点克服，则这项发明创造很难采用优缺点互补创新法发明成功。因此在发明创造之前，对象的选取非常重要，必须选取优缺点互补的两个对象，才可能创造一个有用的新对象。

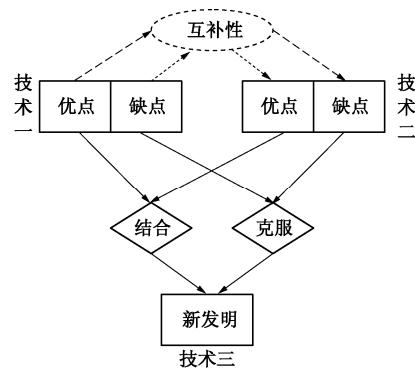


图1 优缺点互补创新法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of complementary advantages and disadvantages innovation method

1.1 现浇混凝土大直径管桩（PCC桩）技术^[4-13]

（1）研发背景

目前，随着我国经济建设的高速发展，大规模的高速公路、高速铁路、市政工程、大型港口和机场工程等建设进入了新的快速发展时期。而我国沿海和内地湖泊地区存在大量的软弱土环境问题，在软土地基上修建以上构造物对沉降变形提出了更高的要求，迫切需要开发新的优质高效的地基沉降控制技术。复合地基是目前国内外软土地基加固的主要方法，它包括柔性桩复合地基和刚性桩复合地基两大类。总体上来说，柔性桩技术优点是造价低且普及性广，但缺点是桩身强度低、加固深度有限且工后沉降控制较难，而刚性桩桩身强度高、加固深度大，但缺点是费用成本高，大面积推广投资大。因此如何吸收柔性桩和刚性桩两种技术的优点，克服其相应的缺点，研制开发出具有刚性桩的加固效果却仅有柔性桩的加固成本的新的优质桩型技术具有重要的工程意义。

（2）研发思路与方法

桩基的承载力来源于侧摩阻力和桩端阻力，对于

图 2 所示的两种类型桩，一个是左侧小直径的实心混凝土桩，另一个是右侧具有同等截面积的大直径空心混凝土管桩。从图中可见，由于空心管桩的桩侧面积和桩端阻力面积明显增大，其侧摩阻力 P_2 和端承力 Q_2 都远大于实心桩 P_1 和 Q_1 ，且大直径空心管桩还有内侧摩阻力 P_3 ，因此，在使用同等混凝土量的前提下，大直径空心管桩的承载力远大于实心桩。PCC 桩就是利用该思路开发的，通过研发新的关键设备技术和施工工艺，可以充分发挥单方混凝土的效能，大量节省混凝土用量并有效地提高基桩承载力且减少地基沉降量。

本发明采用的方法主要来源于优缺点互补创新法的思路。其目的是针对目前复合地基处理中上述柔性桩和刚性桩的优缺点，克服两种桩型的缺点，结合两者的优势，寻求一种具有加固效果好、加固费用低的新桩型，即采用柔性桩的成本达到刚性桩的加固效果。所谓加固效果好，是指桩的承载力高，也就是桩基侧摩阻力或桩端阻力高，沉降控制效果好；所谓加固费用低，是指混凝土材料用量少。为达此目的，需开发一种桩基承载力高且混凝土用量少的新桩型。此外，作为软土地基处理复合地基中的桩基，一般是以摩擦为主型桩，因此要提高承载力，必须尽量提高基桩侧摩阻力，提高侧摩阻力又可以通过增大基桩的侧表面积实现，而增大桩的周长可达到增大侧表面积的效果。显然，桩径越大，桩周长就越大，然而混凝土用量也相应增大，因此，既要增大周长、又要减少混凝土用量，只有将桩的形式变成空心管桩，故大直径空心混凝土管桩应运而生。本发明通过列举柔性桩和刚性桩的优缺点，以取长补短作为发明的思路，使 PCC 桩这一优质桩型的发明水到渠成。

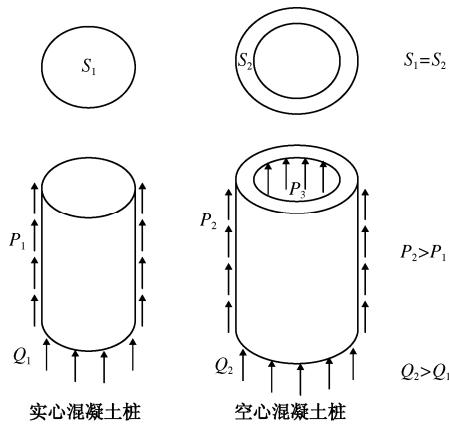


图 2 PCC 桩开发原理图

Fig. 2 Schematic diagram of PCC pile invention

(3) 技术内容

为实现本发明的思路，研发了 PCC 桩桩机设备系统（如图 3 所示），由底盘、塔架和卷扬机、加压振动头、沉模装置、防水活瓣桩靴、成模造浆器、混凝土

分流器 7 个部分组成。沉模桩外径 1000~1500 mm，壁厚 120~150 mm，沉模长度 25 m。本设备创新性地采用了两个固定同心的大直径钢管组成环形桩基沉模装置，该沉模装置底端内外侧设置成模造浆器以减少沉桩时阻力，沉模装置上端进料口内部设置混凝土分流器使浇筑混凝土均匀，沉模装置下端内外钢管之间设置活瓣桩靴，该桩靴在沉模装置下沉地基时闭合，阻止地基中的泥水进入管腔，在沉模上拔时自动打开。该桩机系统自动化程度高，操作方便，可控性强。



图 3 PCC 桩桩机设备示意图

Fig. 3 Schematic diagram of PCC pile equipment

在大量的工艺试验研究基础上，研发了 PCC 桩及复合地基施工工艺（如图 4 所示）。首先进行场地平整和定位等准备工作，然后通过 PCC 桩桩机上部振动头将特制两个固定同心的大直径钢管组成的环形沉模装置在活瓣桩靴的保护下打入地基设计深度，通过混凝土分流器向该沉模装置的环形域均匀注入混凝土，然后振动拔出该沉模装置，在沉入和拔出过程中，成模造浆器向该沉模装置内、外侧壁注入润滑泥浆，活瓣桩靴结构在该沉模装置进入地基时闭合，拔出时自动分开，使之形成混凝土管桩。

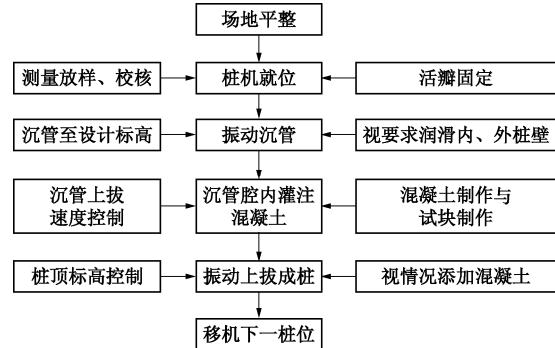


图 4 PCC 桩施工流程图

Fig. 4 Construction process of PCC piles

1.2 复合桩靴结构装置^[14]

(1) 研发背景

沉管灌注桩的桩尖有活瓣桩尖和预制桩尖两种形

式(图5)。活瓣桩靴施工方便,可反复使用,经济性好,但由于是三角形分布,在实际工程施工过程中,三角形钢片的尖部存在应力集中现象,从而导致活瓣闭合不严、活瓣钢片容易变形或者卡住不能及时打开等缺点,容易导致水或泥砂进入桩管影响成桩质量,或者无法成桩。另外在套管沉入地基之前,一般需要用铅丝或草绳将活瓣临时绑扎。预制桩靴可以有效地克服闭合和开启问题,但由于需要在工厂预制,体积大(一般灌注桩直径至少50cm),运输和施工不便,且不能回收,造价太高。本发明试图研发一种能克服活瓣桩尖和预制桩尖的缺点且能结合两者优点的新桩尖结构形式。

(2) 研发思路与方法

要克服活瓣桩尖顶部尖角的应力集中和闭合不严的缺点,就必须对活瓣桩尖的尖角部分进行改造,设置成非尖角的形式。容易想到,将桩尖部分的尖角剔除即可,这时桩尖的每块活瓣变成了梯形活瓣。由于预制桩尖具有强度高、不存在闭合和开启问题等优点,因此剔除的桩靴尖角部分可用预制的小桩尖代替。通过梯形活瓣桩靴与预制小桩靴组合而成了复合结构形式。这种复合桩靴结构利用圆锥形闭合稳定严密的特点,活瓣桩靴采用上大下小的梯形片闭合时形成的多棱锥台形结构与预制小桩靴相结合,构成整体呈三角形的复合桩靴结构。本发明充分结合了原有的活瓣桩靴和预制桩靴的优点,克服了其各自的缺陷,并使二者结合产生协同作用,取得了意想不到的独特效果。

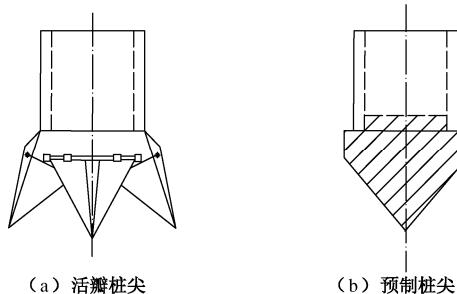


图5 活瓣桩尖和预制桩尖示意图

Fig. 5 Schematic diagram of valve and precast pile shoes

本发明采用的创新方法为优缺点互补创新法。图6给出了本发明创新方法示意图,图中分别列举了活瓣桩尖和预制桩尖的3个优点和3个缺点。活瓣桩尖的优点正好和预制桩尖的缺点互补,而预制桩尖的优点也正好和活瓣桩尖的缺点互补。预制桩尖需要预制、运输不便的缺点正好可以通过设置成部分活瓣的桩尖来解决;预制桩尖不能回收利用的缺点正好和活瓣桩尖可重复使用的优点互补;预制桩尖体积大、造价高的缺点正好可被活瓣桩尖经济性好的优点克服;活瓣

桩尖应力集中、易变形的问题与预制桩尖强度高、变形小的优点互补;活瓣桩尖闭合不严、开启不便的缺点正好可被预制桩尖不存在闭合、开启问题的优点解决;活瓣桩尖需要绑扎的缺点正好和预制桩尖不需绑扎的优点互补。找到了两个对象之间优缺点互补的规律,就可以将优点结合、将缺点克服,形成部分活瓣部分预制的复合桩靴形式。形成复合桩靴之后,具有施工方便、大部分可重复使用、桩尖不存在应力集中、不卡管、不需绑扎、经济性好等优点,同时两种桩尖的缺点完全得到了克服。

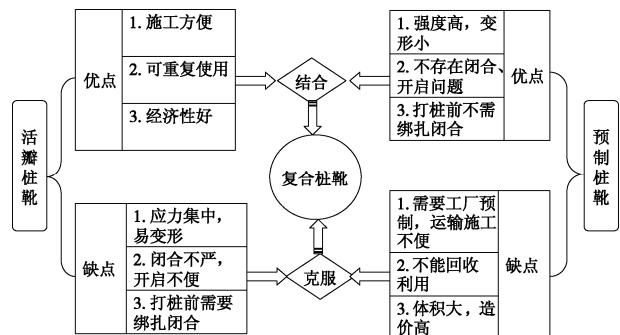


图6 复合桩靴创新方法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of invention of composite pile shoe

(3) 技术内容

本发明的技术原理如图7所示。图中,钢制桩套管通过锁轴与梯形活瓣桩靴铰接,梯形活瓣桩靴由多个上大下小的梯形钢片组成,锁轴活动连接各梯形钢片的上端;梯形活瓣桩靴未闭合时其多个梯形钢片各自分开,闭合时各梯形钢片上端在锁轴内转动,其下端向中间聚拢,整体呈多棱锥台状形,这样各梯形钢片的下端不会碰撞在一起,也就不会碰坏,也不会互相咬死而影响浇注混凝土。预制小桩靴结构呈圆锥形,其上部断面为圆形、中间有带把;上部断面由里向外斜向突起,形成中间凹陷,即形成凹口;在凹口上设置一层橡胶垫圈,以防止水和砂土渗漏,加强密封,在整个用混凝土制成的预制小桩靴中加入钢筋,以加强刚性。梯形活瓣桩靴闭合后,其下端嵌入预制小桩靴上部的凹口,这样,梯形活瓣桩靴与预制小桩靴结合为一体,下面呈圆锥形,上面是多棱锥台形,整体却呈三角形。

1.3 抗液化排水刚性桩^[15-16]

(1) 研发背景

地震作用下砂性土地基中将产生超静的孔隙水压力,由于不能快速消散从而导致地基液化破坏。一般工程场地采用碎石桩作为竖向排水通道来抵抗地基液化,同时,碎石桩本身也具有承载性能,能使(构造物)地基得到加固。碎石桩孔隙大,排水速度快,还对周围土体有挤密作用,因此其抗液化效果好,但碎

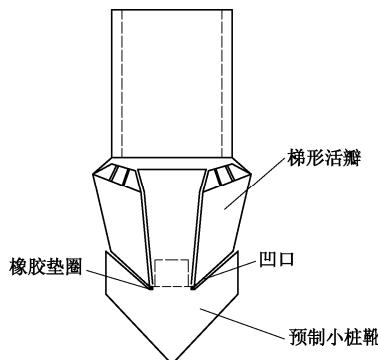


图 7 复合桩靴结构示意图

Fig. 7 Structure of composite pile shoe

石桩是一种柔性桩，桩基承载力不高，桩体变形大，因此不能承担较大的上部荷载，对房屋建筑等地基不适应。工程中对于房屋等建筑物地基，普遍采用刚性桩来提高地基承载力，刚性桩承载力高，变形小，但不能排水，在液化地基中容易丧失承载力而引起刚性桩基础的破坏，继而导致房屋破坏，这种灾害实例在每次大地震中都有记录。本发明力求开发一种具有碎石桩抗液化能力和刚性桩承载能力的新桩型。

(2) 研发思路与方法

要发明一种桩型，既具有碎石桩的排水效果，又具有刚性桩的承载性能，要结合两者的特点，可有两种思路：思路一是在碎石桩的基础上进行改进，即设法提高碎石桩的承载能力，但又不降低其排水效果。目前提高桩基承载力的常用方法为注浆加固，可以采用注浆法使碎石桩加固，形成浆固碎石桩，这种方法能提高桩基承载力，减小桩基变形，但是碎石桩注浆后，桩基的排水能力丧失，显然这种思路行不通。另一种思路是在刚性桩的基础上进行改进，即要在尽量不减少刚性桩承载力的基础上，使刚性桩具有排水能力，有了这个想法之后，创新思路就很明显了，只要人为地在刚性桩中设置一排水通道即可。

本发明采用的创新方法也为优缺点互补创新法。创新始于对两种桩型优缺点的分析。碎石桩为柔性桩，承载力较低，桩身压缩变形大，但具有排水效果，可抗液化，而刚性桩则相反，其承载力高，桩身压缩变形小，但缺乏排水功能，不适应于液化土层。可以看出，这两种桩型的优缺点正好可以互补，一种桩型的缺点正好是另一种桩型的优点，两者可以相互克服、相互补充。有了这个想法之后，就需要寻求一种实现该创新思路的桩型。从前面的分析可知，可以从提高碎石桩承载力或增加刚性桩排水性能两个方面着手，但前者较难实现，而后者比较容易实现。通过在刚性桩侧壁设置凹槽，在凹槽里面放置排水能力大的材料，即可实现刚性桩的排水性能，同时，由于开设的凹槽

尺寸本身不要求很大，因此桩基并未丧失多少承载能力。通过优缺点互补创新法，就发明了这种抗液化效果好的具有排水性能的刚性桩。

(3) 技术内容

如图 8 所示，刚性桩为钢筋混凝土预制桩，在预制时，在其侧面设置圆形凹槽或方形凹槽。

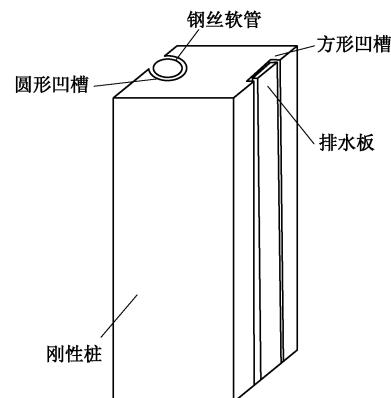


图 8 抗液化刚性排水桩示意图

Fig. 8 Schematic diagram of anti-liquefaction rigidity-drain pile

在圆形凹槽内放置圆形排水钢丝软管，在方形凹槽内放置方形塑料排水板，形状互相匹配即可，大小、尺寸以不超出刚性桩侧面为准。当然，也可两侧同时设置圆形凹槽及圆形排水钢丝软管，或两侧同时设置方形凹槽及方形塑料排水板。当刚性桩侧面设置圆形凹槽时，该圆形凹槽呈开环状，也即不闭环，但只有整个圆形的少部分，圆形排水钢丝软管仍然不突出至刚性桩的侧面，以利于超静孔隙水进入圆形排水钢丝软管中。在开始实施过程中，通过常规的打桩设备将抗液化排水刚性桩打入到地基的预定深度，地震时产生的超静孔隙水可以迅速地通过圆形凹槽中的圆形钢丝软管，或者通过方形凹槽中的方形塑料排水板进行消散，从而达到消除液化的目的。

2 逆向思维创新法

逆向思维是一种求异思维，即不按照一般常理思考问题，而是采用与一般常理相反的方法进行思考。我国有很多谚语都含有逆向思维的观点，例如“反其道而行之”，“明知不可为而为之”，“明知山有虎、偏向虎山行”，“最危险的地方就是最安全的地方”等。

生活中或者童话故事中也有很多故事含有逆向思维的思想。例如小学语文课本里面有一个关于“乌鸦喝水”的故事，故事讲的是一只乌鸦想喝瓶子里面的水，但是瓶子里面水位较低，而瓶口太小，乌鸦的嘴伸不进去，因此喝不到水。按照正常的思维方式，就是将瓶子倾斜，把水倒出来就能喝到了，但是聪明的乌鸦却不这么想，它往瓶子里放很多小石头，使瓶子

里面的水位上升,这样就能喝到水了。这种不动瓶子,而动里面水位的方法就是一种逆向思维。此外,“司马光砸缸救人”的故事在中国也广为流传,这其中也包含了逆向思维的思想。按照正向思维,一个小孩掉到水缸里面了,最容易想到的办法就是把小孩从水缸里面捞出来,水是不动的。而司马光当时也是小孩,没有能力从水缸里捞出落水小孩,于是采用逆向思维,要救小孩,只要水流出来即可,因此灵机一动,用石头将水缸砸一个缺口,水流出来了,小孩得救了。

2.1 消除桥头跳车的装置^[17-18]

(1) 研发背景

目前高速公路桥头跳车问题依然是一个世界性的难题。其原因一是地基土软弱,压缩性大;二是由于路堤填土高,而土的重度又大。两者均会造成过大的工后沉降,而桥梁基础一般均采用桩基础,沉降较小,从而导致桥与路之间产生不均匀沉降,造成桥头跳车。解决这一问题时,常用的方法是对地基进行加固以消除桥头跳车现象,但收效甚微。

(2) 研发思路与方法

为了克服目前解决桥头跳车问题常用方法中存在只能降,不能升,且精度很难控制等问题,本发明提出一种精度更高、技术更全面的可以准确进行桥面标高降低或升高调节的消除桥头跳车的技术装置;即螺栓的底座与隔振垫连接,螺栓上端的固定件与隔振垫连接,固定件下端面上设置有凹槽,与活动螺母上端面的凹槽对应,形成一个圆圈,两个凹槽咬合处设置活动滚珠。与常规凹槽技术相比,该技术方案调节桥面标高的准确性高,能降能升,可方便地降低桥面标高,也可方便地提高桥面标高,使桥面标高随时适应路基的沉降变化,有效地解决桥头跳车难题,可适用于不同地质条件下的各种桥梁结构,且整体平衡和协调性好。

本发明的思想来源于逆向思维创新法。桥头段路堤由于土体沉降大于桥台沉降导致两者沉降差异,引起桥头跳车。传统的思维方式是桥面不能动,通过处理桥头软基路段的沉降达到控制桥头跳车的目的。本发明采用逆向思维,就是要反其道而行之,即保持桥头软基路段不动,而调节桥面标高。本发明以逆向思维的角度,通过设置可降、可升的装置来实现差异沉降的控制,在此基础上进行逆向思维作为新技术发明的思路,使消除桥头跳车的技术装置发明得以水到渠成。

(3) 技术内容

本发明桥头跳车装置如图9所示。图中,螺栓的上和下分别是一隔振垫,用橡胶材料制成;下面的隔

振垫与螺栓的底座固定连接;上面的隔振垫与固定件固定连接,该固定件专门固定隔振垫;在固定件的下端面上有一圈凹槽,与活动螺母上端面上的凹槽相对应,形成一圈圆形,两者合在一起后的凹槽内放置若干个活动滚珠。本装置放置在桥面与桥墩之间,上面的隔振垫与桥面下端面接触连接,下面的隔振垫与桥墩接触连接。当路面产生工后沉降时,只要用工具转动活动螺母,桥面即可下降。如果需要将桥面标高抬升,则反向转动活动螺母即可。也可将本装置的活动螺母与电机转轴连接,通过给电机动力,使多个装置同时升降。

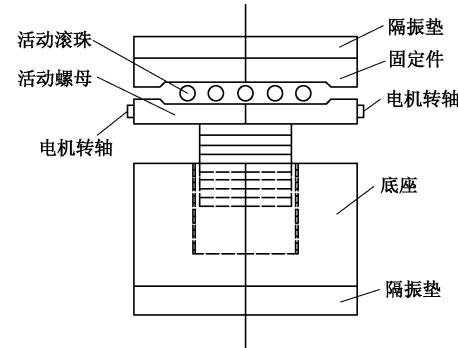


图9 消除桥头跳车装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of equipment to avoid bumping at bridge-head

2.2 既有高速公路桥头跳车的处理方法^[19-20]

(1) 研发背景

在软土地区修建高速公路,需要解决路基的不均匀沉降问题,这在桥头位置尤为重要。我国《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)规定:桥头段的工后沉降小于10 cm。我国目前修建的高速公路,很多桥头路段由于地基处理强度不够,致使桥头软基路段和桥台之间产生较大的差异沉降,导致桥头跳车,甚至影响高速公路的正常使用。

(2) 研发思路与方法

为了克服目前常用处理桥头跳车方法中需封闭施工、增铺材料导致新的沉降等问题,合理有效地、一次性地解决桥头跳车问题,本发明提出一种一次性解决既有高速公路桥头跳车问题、且施工时不影响高速公路正常使用的处理方法。要使软基路段不沉降,有两种方法:一种是传统的增加地基土体强度;另一种是采用轻质土减轻路堤荷载,但主要应用于在建的路堤。对于已通车的高速公路路堤,要在不影响通车情况下将轻质土置换原来的路堤土,需要解决一系列的技术难题。本发明就是基于该思路进行创新。

本发明的思想来源于逆向思维创新法。桥头段路堤由于土体沉降大于桥台沉降导致两者沉降差异,引

起桥头跳车；通常情况下，通过增加填筑材料，使桥头段路基的标高填筑到与桥台齐平。这种方法可以暂时消除桥头现象，但是不能从根本上解决桥头跳车问题，往往由于新增填筑的材料，引起新的附加应力和新的沉降。此外，新填筑材料需要道路封闭施工，影响道路正常运营。本发明采用逆向思维，不是将路堤荷载增加，反而将路堤荷载减小，从而减少地基上部应力、减少整体路基沉降，一次性有效地解决桥头段路基与桥台差异沉降问题；通过路堤两侧钻杆施工，不影响道路正常运营。从而发明了既有桥头路段差异沉降的控制方法。

(3) 技术内容

既有高速公路桥头跳车处理方法的原理如图 10 和图 11 所示。采用拌和机在现场拌和轻质材料，拌和机在底部开孔通过软管与增压泵相连，再通过软管连接到钻杆上端部，形成轻质材料的输送通道。采用螺栓钻杆分别在高速公路桥头路段左、右两侧路堤边坡处倾斜钻孔，钻杆旋转钻进并通过螺纹口向外自动排土，钻孔深度接近路堤填土中心。边旋转边缓慢外拔长螺旋钻机的钻杆，同时开启增压泵，通过钻杆中心管将轻质材料泵送到钻孔。轻质材料通过钻杆中心的孔洞喷出，从下而上逐渐填满孔洞，置换掉了原来的路堤填土。与常规增铺材料处理桥头差异沉降方法相比，该技术方案具有处治效果好、施工便捷、且不影响道路正常运营等显著优势。

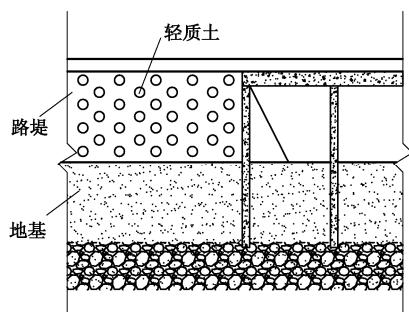


图 10 桥头跳车处理纵断面图

Fig. 10 Vertical section to process bumping at bridge-head

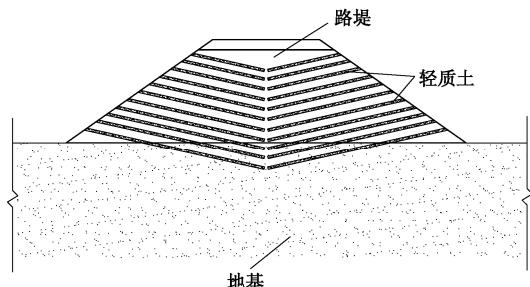


图 11 桥头跳车处理横断面图

Fig. 11 Cross section to process bumping at bridge-head

3 组合技术创新法

生活中常常有一些事物，可以通过互相组合，形成新的事物，而这种“组合体”往往能达到意想不到的目的和效果。例如在 100 多年前，美国有个叫李浦曼的画家，在作画时，经常找不到橡皮来修改画面，因此他想到了将铅笔与橡皮组合在一起。学习生活中常常用到的铅笔和橡皮，本来是两个不同的物体，而橡皮是为了擦除铅笔笔迹的，两者之间本来也有联系，因此可以把联系紧密、具有结合点的事物组合在一起，形成带橡皮头的铅笔，这样携带和使用都很方便，取得了更好的应用效果。这就是组合技术创新法的典型案例。

3.1 浆固碎石桩技术^[21-25]

(1) 研发背景

在道路、桥梁等工程施工中，复合地基施工方法是目前处理软土地基常用的一类方法。碎石桩属散粒体桩，桩身强度低，但造价相对较低。CFG 桩和 PHC 桩等属刚性桩，桩体强度高，加固效果好，但造价高。在实际工程施工中，作为复合地基技术，一般需要中等黏结强度的桩型即可。另外，传统的桩基复合地基加固技术只发挥桩基础本身的作用，对其桩间土改善甚微，而桩间土也会影响地基加固的质量。同时，随着城市建设和发展，大量废弃的砖块、碎石等建筑垃圾以及钢厂大量钢渣等工业垃圾需要进行填埋处理，这既占用了宝贵而有限的耕地，又造成了浪费，也影响了生态环境。

(2) 研发思路与方法

碎石桩复合地基技术，由于其具有施工便捷、造价相对较低等优点，在软基处理工程中得到了广泛应用。但是，由于碎石桩属于柔性桩，其在支撑上部荷载过程中，地基沉降量相对较大；这对于上部构建物沉降控制要求相对较高时，碎石桩复合地基无法满足要求，从而在一定程度上限制了其推广应用。基桩后注浆技术是在基桩成桩之后，通过预埋的注浆管，在桩侧、桩端或桩侧联合桩端灌注水泥浆液等，以提高桩侧摩阻力和桩端阻力的技术方案；该技术方案可以有效提高基桩整体承载力，不过常规注浆桩技术均针对刚性桩。基于此因素考虑，本发明采用将两种技术结合的思路进行创新，形成了浆固碎石桩技术。

本发明的思想来源于组合技术创新法。本发明技术将传统碎石桩复合地基和注浆桩两种技术方法组合在一起，在碎石桩施工完成的基础上，通过预埋的注浆管对碎石等散体材料及桩周土体进行注浆，最终形

成浆固碎石桩。本发明技术通过注浆处理后，使复合地基加固区扩展到桩体、浆液渗透加固体和天然土体三部分组成，可以更好地达到提高地基承载力和减少地基沉降的复合效果。此外，桩体材料可以为碎石、砖块或钢渣等废物作为骨料（散体材料），可以有效保护环境，降低施工成本；由于施工机械高度不高，因此不受现场空间限制。

（3）技术内容

浆固碎石桩技术原理如图 12 所示。该技术方案的施工步骤包括：①成孔。一般用钻机成孔，自然造浆护壁，在孔壁不易保持的情况下，采用人工造浆护壁。在工程应用中采用膨润土加碱进行人工造浆护壁，泥浆的比重控制在一定的范围内。②投石洗孔。钻孔完成后，分两次进行洗孔。第一次洗孔在钻孔结束后，投放骨料前进行。第二次洗孔在投放骨料过程中进行即边投放骨料边洗孔。在投放骨料的过程中，设置专用投料导向器来引导骨料。③注浆加固。浆固桩的注浆首先要使浆液充满于孔内骨料的空隙，以便固结成桩。其次一部分浆液向周围土体扩散，对桩周土体进行注浆加固，提高天然地基土的强度。④褥垫层设置。待桩体凝固后，在桩顶设置碎石和土工格栅组成的褥垫层，从而形成桩土互动的浆固散体材料桩复合地基。

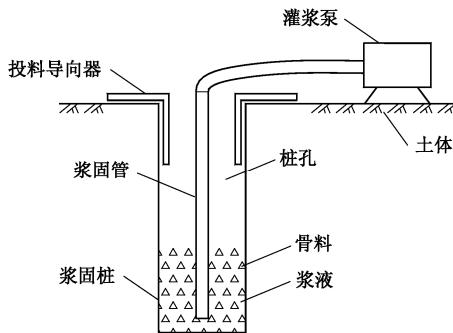


图 12 浆固碎石桩示意图

Fig. 12 Schematic diagram of grouted gravel pile

3.2 高真空击密与深层爆炸挤密联合井点降水地基处理方法^[26-27]

（1）研发背景

在大面积软土地基处理方法中，高真空击密法软土地基处理方法采用高真空井点降水加振动碾压或强夯方法来降低被处理土体的含水率，以提高土体的密实度。该方法由于振动碾压或强夯能量有限，地基处理深度浅，一般只能处理 8 m 以内浅层范围的地基。而随着各类基本建设规模的扩大，尤其是在沿海、沿江及内地湖泊地区进行如港口、市政和高速公路等建设时，软土地基较深，多数情况下都在 10 m 以上。

因此，上述方法应用受到限制，也就无法大规模推广。爆炸挤密法是软土地基加固方法之一，主要是通过在软土内部爆炸产生冲击波导致软土挤密，同时由于爆炸还产生超静孔隙水压力，但如果没排水通道或通道不畅，超静孔隙水压力不易消散而达不到土体固结的目的。

（2）研发思路与方法

目前软基处理工程中广泛应用的高真空击密法，由于受施工机械及施工工艺特点的影响，仅能处理浅层土体；爆炸挤密施工工艺，则主要适用于深层土体的加密处理，对于浅层由于受边界的影响，反而效果不佳。基于两者各自的特点，结合常规软基在 18 m 左右深度范围，发挥高真空挤密法和爆炸挤密法各自的优势和作用范围，组合两者技术，本发明开发了浅层振夯击密与深层爆炸挤密联合真空井点降水地基处理方法，即采用地下深层爆炸挤密与地面机械振动或强夯浅层密实以及高真空井点降水三者相结合的方式进行大面积软土地基处理。通过三种技术的有机优化组合，机械碾压振动或强夯和深层钻孔爆炸强排水与真空井点强降水相结合，有效地加固了大面积浅层和深层软土地基，处理深度可达到 18 m 以上，特别适用于吹填土、粉土、软黏土等地基加固。

本发明的思想来源于组合技术创新法。传统单一的高真空击密法仅适用于浅层土体，单一的爆炸挤密法主要适用于深层土体；单一的真空井点降水法可以处理深厚软土，但是处理效果很难达到较高的程度；基于各种技术方法的适用范围和各自的优点，通过组合技术创新法，将三种技术有机优化组合，形成更经济、有效的深厚软土地基处理方法。

（3）技术内容

本发明的结构示意图如图 13 所示。

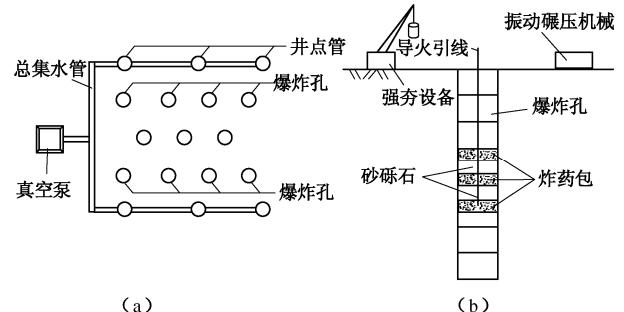


图 13 浅层振夯击密与深层爆炸挤密联合井点降水示意图

Fig. 13 Schematic diagram of combined well-point dewatering method of shallow vibration densification and deep blasting compaction

在被加固区域内大面积竖向插满井点管，井点管连接至总集水管，总集水管与真空泵相连，启动真空

泵排水降低地下水位, 浅层地基土固结。拔出井点管, 在被加固区域地面上布置振动碾压机械或者强夯设备, 启动振动碾压机械或者强夯设备使被加固区域浅层地基土体密实, 并使浅层土骨架中孔隙水析出。撤出振动碾压机械或强夯设备, 用钻机钻出若干爆炸孔至地基深部, 爆炸孔为三角形或梅花形布置, 在爆炸孔内沿深度放置一块或数块竖向管形炸药包及引出导火引线, 炸药包之间用砂砾石堵塞分开, 炸药包内的炸药是抗水塑料炸药, 点燃导火引线起爆深层地基爆炸孔内炸药包, 使深层地基土体密实, 并使深层土骨架中孔隙水析出; 在被加固地基区域地表面竖向大面积布满井点管, 井点管通过总集水管与真空泵相连, 启动真空泵排水, 使地下水位降低, 使振动碾压或者强夯和深层爆炸产生的孔隙水排出, 促使浅层和深层地基土固结强度增长。

4 希望点列举创新法

人们生活中总会有很多的希望。之所谓希望, 就是还没有实现的东西。这些希望有的容易实现, 有的要通过很大努力才能实现, 有的不可能实现。如果我们设法实现了一些希望, 就可能得到创新。对于希望点, 有的可行, 有的不可行, 有的在现有技术条件下不可行, 但经过科学技术的发展可行。例如中国古人就有飞天的梦想, 希望能像鸟儿一样在天空自由飞翔, 这就是希望点, 有人通过在自己身上绑上翅膀, 想实现飞翔, 但是最终失败了, 但是人们始终没有放弃这种飞天的梦想, 随着科技的发展, 飞机得到了发明, 这个飞天的希望点得到了实现。又例如人的肉眼能看到的距离有限, 于是人们又有一个希望, 希望能像传说中的“千里眼”一样能看到很远, 于是发明了望远镜。我们把这种从提出希望到解决希望的发明创造过程称为希望点列举创新法。希望点列举创新法是从发明者的意愿提出各种新的设想, 它可以不受原有物品的束缚, 因此, 它是一种积极、主动性的创造发明方法。

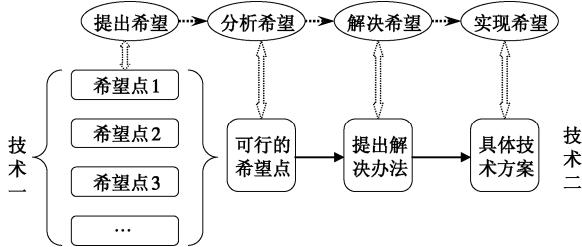


图 14 希望点列举创新法示意图

Fig. 14 Schematic diagram of hope point listing innovation method

4.1 现浇 X 形钢筋混凝土桩技术^[28-33]

(1) 研发背景

软基处理方法的选择使用对工程质量、工期和经济效益均有重要的影响。桩基在软土地基加固中应用广泛, 施工速度快捷、可大大缩短工期, 加固处理深度较其它方法更深, 适宜各种地质条件, 可明显增加路基的稳定性, 减少地基的沉降。长期以来, 无论在建筑工程中, 还是在道路工程中, 都普遍采用圆形混凝土桩用于提高地基的承载力和减小变形, 这其中包括预制桩和现场灌注混凝土桩。由于圆形桩的周长面积比相对较小, 因此并不能充分发挥单方混凝土性能, 造价相对较高。寻求使用较少的混凝土方量, 以实现低造价、高承载力, 并且地基稳定性增加明显的新桩型成为岩土工程界迫切需要解决的问题。

(2) 研发思路与方法

在现有的软基处理方法中粉喷桩一般可处理 15 m 深度以内的软土地基, 该方法不宜用于深层软土处理。插塑料排水板法虽然可以处理深度达 20 m 以上的软基, 但其预压处理时间长, 并且处理后工后沉降较大, 土方增量大。CFG 桩是处理深层软土可行的方法之一, 桩径一般在 50 cm 左右, 桩距一般不大于 1.5 m, 但地基处理造价高。针对圆形实心桩及预制混凝土管桩造价高的不足, 本发明利用一种截面如字母 X 形的钢模代替传统的沉管灌注桩圆形钢模, 形成一种 X 形状的现浇混凝土桩。与传统灌注桩技术相比, 现浇 X 形混凝土桩具有较大的单位体积材料比表面积, 因而可以在不增加工程量的前提下大大提高单桩承载力, 从而提高性能价格比。如图 15 所示, 在截面积(混凝土用量)相同的情况下, X 形桩周长(侧摩阻力)比圆形桩可增加 50%以上; 在等周长(承载力)的情况下, X 形桩的混凝土用量(截面积)节省 50%以上。

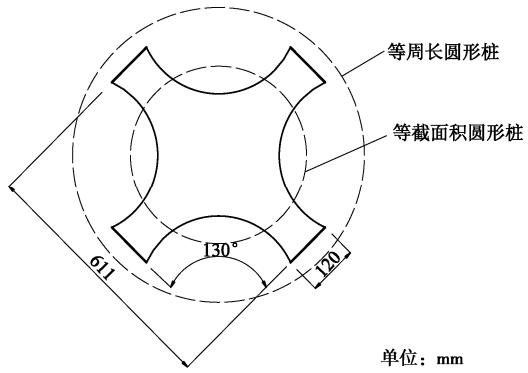


图 15 现浇 X 形混凝土桩和等截面积或等周长圆形桩比较

Fig. 15 Comparison between cast-in-place X-section pile and circular section pile with same sectional area or perimeter

本发明的思想来源于希望点列举创新法。传统的沉管灌注桩一般为圆形截面桩, 本发明在传统圆形沉

管灌注桩的基础上进行改进,希望达到以下两个目标:①在不增加材料用量和施工工艺难度的前提下提高桩基承载力;②在承载力不减少的前提下尽量减少混凝土用量。这就是本发明创新的“希望点”。对于软土地区复合地基中的桩基,一般以发挥侧摩阻力为主,端阻力提高程度有限,因此设法提高侧摩阻力效果更为显著。要提高侧摩阻力,可设法增大桩截面的周长。圆形截面的周长面积比是最小的,只要将圆形截面改成其他形式的截面,周长面积比可以大大增加,即等截面异形周边扩大原理。异形截面可以有多种形式,如方形、薄板形、工字型、三角形等。研究表明,对于X形截面,拥有两个相互垂直的对称轴,在两个方向上截面惯性矩相等,其截面尺寸可通过外包圆直径、开弧间距、开弧角度3个几何参数控制,截面受力特性优越且形式简单,因此本发明选择了以X形截面作为异形桩的优化截面。同样,要在承载力基本不变的条件下尽量节省混凝土,也可以采用类似的方法达到目标。对于摩擦型桩,只要保证截面的周长不变,承载力就基本不变。将传统圆形桩的凸弧部分变成凹弧,保持周长不变,但截面面积大大减小,即混凝土用量减小,采用X形桩截面形式可以达到这一期望的目标。

(3) 技术内容

现浇X形混凝土桩机械设备主要包括底盘、卷扬机、控制台、龙门架、振动锤和桩身X形模板。桩身X形模板是整个机械的核心,其主要由法兰盘、加强勒、进料口、弧形板、内部加强板和活瓣桩靴组成。法兰盘主要起连接作用,通过法兰盘使得X形桩模与上部的振动锤形成一个整体。为了加强法兰盘与下部模板的连接强度,避免发生疲劳破坏,在法兰盘与下部模板之间设置加强勒以增强其整体刚度。通过进料口可以将混凝土等填充料添加进桩身模板内部。现浇X形桩采用常规振动沉管桩机静压辅助振动,将截面如字母“X”形状的钢模打入地基设计深度,投放填充料、振动拔管、空中补充加填充料,填充料固结成桩;同时可根据设计要求设置钢筋笼。



图 16 X 形桩模

Fig. 16 Mould of cast-in-place X-section piles



图 17 现浇 X 形桩头

Fig. 17 Head of cast-in-place X-section piles

4.2 可全回收式锚杆技术^[34-36]

(1) 研发背景

岩土锚固技术是近代岩土工程领域中的一个重要分支,由于它的安全性、经济性和有效性,广泛应用于水利水电、铁路公路交通、城市建设、国防建设、采矿工程等行业中。岩土锚固是一种能够充分发挥岩土体自身稳定能力的岩土加固技术,具有原岩扰动小、施工速度快、安全可靠、经济有效等优点。随着工程建设规模的不断扩大,锚杆的大量应用为国民经济发展发挥了重要作用,但由于常规锚杆的技术缺陷,支护工程结束后,大量的锚杆埋置于地下,不但造成材料的浪费,而且会对地下空间造成永久性的“污染”。许多曾经埋设过锚杆的场地将面临着二次开发,锚杆的存在将成为再次开发的障碍,给后续工程的开发带来困难的同时,也大大增加了建设费用。

(2) 研发思路与方法

为了克服传统锚杆不能回收,污染地下环境的问题,本发明试图开发一种新型可回收式锚杆,在支护工程结束后可回收。要使锚杆可回收,就需要在传统锚杆的基础上进行改进。由于锚杆是埋设在岩土体内部,因此要回收的话,必须是要能“活动”的,不能像传统锚杆一样直接用水泥浆包裹锚杆。要实现锚杆的活动性,容易想到在锚杆外面套一层PVC管,在PVC管外面灌浆,这样就使锚杆与浆液隔离,为其回收利用创造了条件。但作为锚杆,需要承受拉力,因此锚头必须是固定在锚孔底部的,如果锚杆使用完后要回收的话,固定的锚头是无法回收的,所以回收时必须将锚杆与锚头分离,这样就容易想到要将锚杆和锚头之间的连接设置成“可拆卸”式,通过设置螺纹很容易达到这一目的。因此本发明采用套PVC管的活动式锚杆和采用螺纹式的可拆卸锚头就达到了发明的目的。

本发明的思想来源于希望点列举创新法。针对目前锚杆存在的不足,希望通过改进达到以下两个目标:
①工程结束后将锚杆全回收,回收的钢材可以再利用,

达到节省材料的目的；②锚杆回收后，地下环境仍是一片“净土”，在该场地进行其他地下工程施工时，不受前一个工程锚杆的影响，达到减少地下环境影响的目的。这就是本发明创新的两个“希望点”。从这两个希望点出发进行技术的创新，采用前面所述的创新思路，就很容易实现本发明。所发明的新型可回收式锚杆与其它锚杆的不同之处在于：锚杆杆体回收率较高，承载能力可选范围广，施工操作简单，防腐蚀能力强，适合于处理各种岩土体锚固支护工程。这样，就实现了前面列举的两个“希望点”。

（3）技术内容

可全回收式锚杆采用钢拉杆与活动式锚头螺旋连接（见图 18），在钢拉杆外套接 PVC 花管。

采用常规的锚杆工法和钻机成孔，同一钻孔中安装单一单元锚杆，杆体与承载体采用普通粗牙螺纹连接。通过胶结料把锚杆杆体和地层黏结起来，从而把抗拔力分散在锚固体的全长上。施工时在坡面整理完成后，采用钻机按设计要求的孔径、长度和倾角钻进至设计深度成孔，将组装好的可回收式锚杆（如图 19 所示）推送至预定深度，然后注浆加固。待浆体硬化后，通过张拉设备使锚杆杆体产生弹性变形，在锚固结构上产生预应力，以达到加固锚固结构的目的。工程施工结束后，释放预应力，依靠手工操作反向回拧钢筋杆体使杆体与承载体的螺纹管套脱离，抽出杆体回收即可。

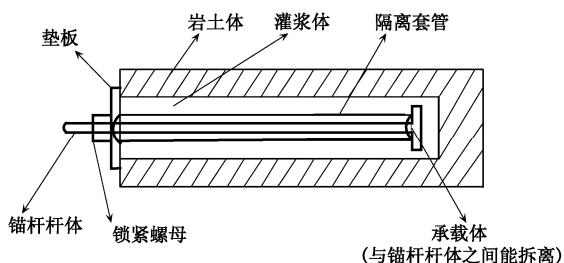


图 18 新型可回收锚杆结构简图

Fig. 18 Structure of new recoverable anchor



图 19 可全回收式锚杆实物图

Fig. 19 Photo of recoverable anchors

4.3 吹填超软地基改性真空预压技术^[37]

（1）研发背景

近年来，建设用地不足已成为制约特别是沿海地区经济和社会发展的瓶颈，因此沿海地区正在进行大规模的围海造地工程。但是，围海造地的地质情况复杂，新吹填泥主要表现为含水率高，渗透性差，强度很低，处于超软状态，人员和施工机械无法直接进入场地。过去对于淤泥质软弱地基常采用真空预压进行加固处理，使之具有一定的强度。方法是先采用机械插设塑料排水板，再铺设砂垫层作为水平排水系统，再进行铺设土工布、铺设真空膜和布置真空泵等工作，这些均是在陆域上实现的。但是，对于吹填超软地基，地基实际上处于流动状态，类似于水域上施工，传统真空预压根本无法实施。传统的真空预压地基处理方法需要采用砂垫层，但是对于超软地基同样存在无法进行砂垫层铺设施工的困难。

（2）研发思路与方法

本发明的创新思路来源于传统真空预压存在不足，无法在吹填土上施工，因此需要采取措施，解决目前技术存在的不足。对于超软状态的淤泥，常规的施工机械根本无法进场，容易想到，要在这种类似于“水”的物质上行走，必须有类似于“船”的工具，在“船”上进行施工。吹填土工程一般都是很大面积的，“船”只相当于一个点，如果采用船进行施工，只能是一个一个点进行施工，因此工作效率很低。为了解决这个问题，本发明想到了在吹填土上修“路”，即在淤泥区上铺设浮桥，浮桥贯穿于整个吹填土加固区域，相当于在淤泥上形成了路。本发明还要解决另一个问题，就是传统真空预压需要采用砂垫层，但是砂垫层在淤泥上是无法铺设的，因此需要找到一种替代砂垫层作为水平排水通道的材料。

本发明采用的创新方法为希望点列举法。首先，针对传统真空预压在处理吹填超软土时的不足，提出希望点：本发明希望克服超软土地基上真空预压施工困难的问题。然后针对希望点进行分析，找到实现希望点的具体难点问题。本发明的难点问题有两个，一个是超软土地基上打设排水板等施工机械无法进场施工的难题；另一个是传统真空预压需要在地基上铺设砂垫层，但是在超软土上砂垫层会沉入土体中，无法铺设砂垫层。找到难点之后，具要想办法解决这些难点，如果难点没有解决办法，那么所列举的希望点是不可行的，需要重新进行创造，如果难点有解决的办法，那么所列举的希望点是可行的，采用希望点列举创新法就能获得成功。对于本发明的两个难点，可以找到对应的解决办法，施工机械无法进场的问题可以

通过铺设浮桥解决，而砂垫层无法铺设的问题可以通过取消砂垫层、采用波纹滤管作为水平排水通道来解决。最后，根据这些解决办法，提出具体的施工方法就实现了本发明创造。

(3) 技术内容

图 20 为改性真空预压结合覆水剖面示意图。本发明吹填超软地基改性真空预压结合覆水预压快速处理方法，主要创新在于以下施工步骤：①从加固场地的一端开始铺泥上浮桥；②将塑料编织布在泥面上展开，四边或至少相对的两边固定在围堤或立柱上；③用橡胶泡沫板和竹胶板制作浮板，浮板可以自行或者靠两根长绳索在围堤或浮桥上的牵引方便地在塑料编织布上移动；④对施工区域进行塑料排水板试插，并对塑料排水板两端进行特殊加工；⑤用刀片在打设塑排板位置将塑料编织布划开，将塑料排水板下端略折叠 10 cm，对准划开的孔口，用人工插板器匀速垂直插入到吹填泥底部；⑥对插好的塑料排水板上端余下的长度，先贴地面放置 20 cm 形成一定的水平段，到邻近的排水支管处从上向下缠绕数周，缠绕的直径要大于排水支管直径的 1.5~2 倍，自然缠绕，避免抱死。再将余下的短板部分插入另一侧泥中，形成一长板一短板的竖向排水系统，以增加真空度的传递；⑦铺设排水支管和排水主管，铺设两层土工布，铺两层真空膜，安装真空泵等真空排水系统，开始抽真空，并在膜上覆水。

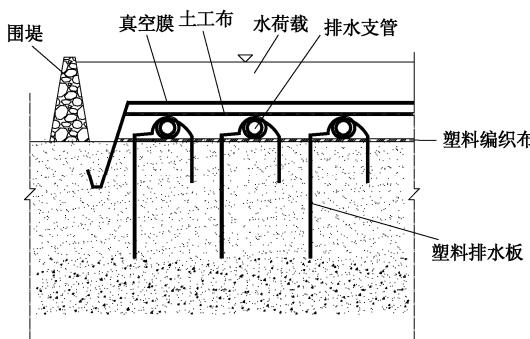


图 20 改性真空预压结合覆水剖面示意图

Fig. 20 Schematic diagram of modified vacuum preload combined with water covered method

5 触类旁通创新法

触类旁通，其含义是接触到一种事物，联想到相类似的其他事物。出自《周易·系辞上》：“引而伸之，触类而长之，天下之能事毕矣也”。应用到岩土工程中，触类旁通是一种技术创新方法。国内外有很多触类旁通进行创新的例子。例如牛顿在苹果树下看到苹果落

地，接触到这一现象之后，牛顿就想到了与之相类似的其他现象，例如人在地上跳起来后又回到地面，地面上的大石头搬起来困难等，于是根据这些现象发现了万有引力定律。另外一个例子是雷达的发明，人们根据蝙蝠在夜间活动能力的特点触类旁通，发明了雷达。

5.1 真空预压地基加固区内水位测量装置与检测方法^[38-40]

(1) 研发背景

真空预压过程中地下水位的变化是真空预压条件下渗流场变化规律的直接反映，也是评价真空预压加固效果以及研究加固机理的重要内容和依据，但有关真空预压过程中地下水位的变化问题一直以来都存在较大争议，难以取得一致认识。根本原因在于真空预压条件下缺乏有效的地下水位测试方法。敞口式测管法是工程上常用的地下水位测试方法，其采用的是测压管原理，由其测得的水位变化反映的实质是水位管滤管段各点水位降深的平均值。在真空预压条件下采用常规方法测出的水位只能代表正常大气压下的相应值，并不是负压状态下地下水位的真实值，两者之间存在着较大误差。若将该方法所得测试结果认为是负压状态下的真实地下水位，则在概念和数值上是错误的。显然，常规地下水位测试方法并不满足真空预压条件下地下水位的测试要求。

(2) 研发思路与方法

针对传统真空预压地下水位测量方法的不足，本发明将克服这些不足，得到一种测量精度更高的测量装置。与传统地下水位测量方法不同，真空预压地下水位测量的测量管必须穿过真空膜，所测量的水位必须与真空预压加固土体的水位相连通，才能保证测量的真实性。但是，必须保证真空膜的密封性，因此所测水位不能与外界相连通，必须使之封闭在真空膜里面。因此，本发明的思路就是要发明一种装置，测量管不影响真空膜的密封性，同时又要能从外界测量到真空膜密封内部的水位。

本发明的创新方法为触类旁通法。本发明要解决的问题是如何测量密封在真空膜内部不与外界大气连通的地下水位问题，即要间接测量水位，测量仪器不可能从外界深入到水位上面。在土工测试中，有一种深层沉降测量装置，将沉降磁环套在塑料管外面，然后将塑料管埋入地基，当土体发生沉降，沉降磁环也跟着土体一起沉降，即沿着塑料管上下滑动，这时采用深层沉降仪深入到塑料管，通过沉降仪前端的电磁感应装置可以测量到磁环位置，就可以推算出沉降。

通过这个沉降磁环装置举一反三, 可以推想到沉降磁环也可放置在水面上, 随着水面高度的变化而沿着塑料管升降, 后续测量方法与深层沉降测量一样, 在管内通过电磁感应装置测量磁环位置就是水位高度。

(3) 技术内容

测试装置由内外管、磁环浮标、限位器、卡口、密封帽、电感应器等部分组成, 构造示意图如图 21 所示。

该装置的基本工作原理是: 地下水通过外管壁上进水孔渗入与大气隔绝的内外管之间, 此时的水位即为负压条件下的地下水位。在两根不同直径且相对位置固定的内外管之间放置的磁环浮标浮于水面上, 且能随地下水位沿内管上下自由浮动, 磁环浮标的位置即可认为是地下水表面位置, 而磁环浮标的位置可以通过钢尺水位沉降仪确定。该装置工作原理清晰, 装置制作简单, 测量时无真空压力泄露损失真空能量, 测试结果直观。

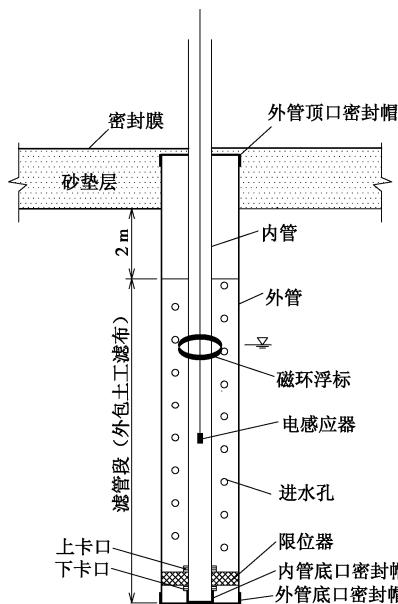


图 21 新型地下水位测试装置构造示意图

Fig. 21 Structure of new equipment to measure groundwater level

5.2 多头小直径长螺旋钻进成墙机^[41]

(1) 研发背景

在堤防、土坝等工程防渗墙施工中, 振动沉模薄壁防渗墙和多头小直径深搅桩薄壁防渗墙是常用的技术。振动沉模薄壁防渗墙技术是利用振动方式将薄壁 H 型空腹模板打入地下, 然后向其内灌注浆液或混凝土形成单元防渗板体。该墙体施工工艺简单、质量易于控制, 纯混凝土墙体防渗性能好, 处理深度可达 30 m 以上。不足之处在于由于振动施工方式和挤土效应容易使堤防或坝体开裂、变形和失稳, 造成工程质量问题, 并且振动对周围环境也会产生一定的影响。多

头小直径深搅桩薄壁防渗墙是通过多头水泥土搅拌桩相互搭接组成排桩, 形成连续的墙体, 实现防渗功能。该技术的不足之处在于水泥与土搅拌不均匀, 施工质量不易控制, 从而导致桩身强度不够, 防渗效果欠缺, 另外该技术处理深度也有限, 一般小于 15 m。上述两种方法还存在着同样的缺陷, 即效率低, 费工费时。

(2) 研发思路与方法

长螺旋钻进成墙机技术, 是目前工程中常用的施工地下连续墙的施工方案之一, 具有成桩效果好、造价低等技术优点; 但是整体墙体的施工靠每根长螺旋钻孔桩的分别施工组合而成的, 这就造成施工效率相对较低的问题。为了提高施工效率、缩短施工工期, 本发明研发了一种整体施工的防渗墙方法。

本发明的思想来源于触类旁通创新法。小直径长螺旋钻孔机是施工地下连续墙的有效施工方法; 同时, 目前工程中多头小直径水泥土搅拌桩薄壁防渗墙技术也是一种高效、经济的施工工艺。基于针对施工效率的考虑, 通过触类旁通创新法, 提出多头小直径长螺旋钻孔机的设想。并排设置至少 3 根螺旋钻杆, 可以形成连续的纯混凝土防渗墙。定位架通过接触装置与龙门桩架滑动连接, 可以控制打桩偏斜的问题, 有效地解决地基深部防渗墙搭接不好而导致防渗失效的后果。本发明通过触类旁通法思路, 将多头小直径水泥土搅拌桩薄壁防渗墙技术的优点, 发展到多头小直径长螺旋钻孔机中, 以多头同时施工的技术方法优势, 作为新技术发明的思路, 使多头小直径长螺旋钻孔机这一优质桩机的发明水到渠成。

(3) 技术内容

多头小直径长螺旋钻进成墙机, 它由底盘、卷扬机、龙门桩架、旋转动力装置、弯头、排气阀、混凝土泵、搅拌机及混凝土输送管组成, 其主要技术特征在于龙门桩架上并排设置至少 3 根螺旋钻杆, 螺旋钻杆下端设置钻头, 螺旋钻杆顶部与定位架连接, 定位架与龙门桩架滑动连接, 定位架内设置旋转动力装置, 螺旋钻杆与旋转动力装置连接, 螺旋钻杆中间是空的, 从顶端与混凝土输送管连接, 如图 22, 23 所示。与常规单根小直径长螺旋钻进成墙机相比, 多头小直径长螺旋钻进成墙机可以一次沉桩施工多根螺旋桩, 同时确保多根螺旋桩之间的良好的咬合和链接; 大大优化了施工工艺、缩短了施工工期、提高了施工效率, 节省造价。

6 强制联想创新法

强制联想, 就是把一些看起来毫不相关的事物联系到一起, 然后寻找其共同点, 得到发明创造。中国

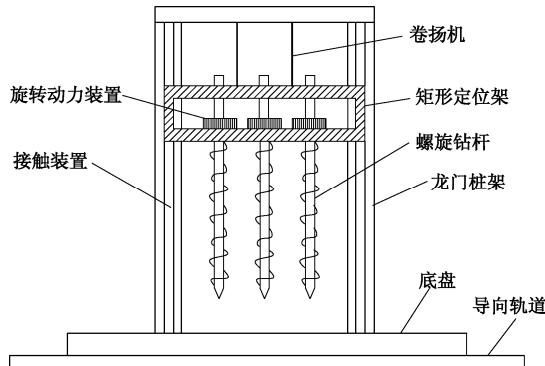


图 22 多头小直径长螺旋钻进成墙机示意图

Fig. 22 Schematic diagram of multiple small diameter long twist drilling wall forming machine

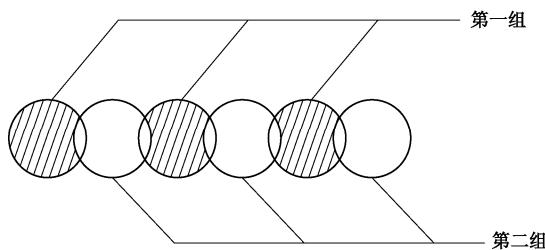


图 23 两组桩咬合示意图

Fig. 23 Schematic diagram of two groups of interlocking pile

古代“曹冲称象”的故事广为流传，其中就采用了这种强制联想的思想。要称量一头大象的重量，以古代的技术条件，不能采用秤直接称量，因为没有这么大的力气将大象提起来，也没有这么大量程的秤。但是秤能称量任何质量轻一些的物体，于是可以将大象与任何质量轻的小物体强制联系到一起进行想象，找到一种采用小物体替代大物体的方法。采用这种强制联想方法，曹冲想到了将大象和石头分别放到船上，船下沉到相同的深度时大象重量和石头重量相等，然后再分开称量石头重量就可。石头和大象本来是两个独立的事物，强制联想到一起，实现了目标。世界上任何事物无不处于普遍联系和变化发展的矛盾运动之中。所以，人们如果强制地运用类比、近似、对比等联想，那么往往可以无孔不入，把独立无关、大相径庭的不同事物外在地或内在地联系起来。

6.1 掺砾料大三轴试验电渗固结法^[42]

(1) 研发背景

在高心墙坝设计计算中，必须了解掺砾心墙料的强度变形特性，因此需要开展三轴试验。由于掺砾料具有较大的粒径，不能开展常规尺寸的三轴试验，因此需要进行大三轴试验，试样直径一般为 300 mm×600 mm。在掺砾心墙料的大三轴强度变形试验中，试样首先需要固结。由于试样直径大（300 mm），排水路径较长，因此固结时间非常长。一个掺砾 50%

的试样，固结时间需要一个星期左右。如果掺砾量更少时，固结时间将长达几个星期。试样固结期间，占用了试验仪器，浪费了宝贵的试验资源。一个土石坝往往需要进行数十组大三轴试验，若按照这个固结时间计算，所需的试验周期将非常长，试验效率低。因此研究一种掺砾料快速固结方法具有重要意义。

(2) 研发思路与方法

在实际工程中，要缩短土体排水固结时间，有多种方法，如：堆载预压、真空预压、电渗固结等。结合室内大型三轴试样条件的限制，无法采用堆载预压和真空预压。因为堆载预压相当于增加试验过程中的试验围压，导致试验条件与真实情况不符；真空预压，即通过对试样进行抽真空提供负压来加快固结，容易导致试样内部应力不均匀；电渗固结方法，作为一种地基排水固结方法，具有加固速度快，对细颗粒、低渗透性土有良好的加固效果等优点，该方法原理明确，工序简单，且在室内试验中得到广泛的应用，积累了丰富的经验。因此考虑如何将电渗技术与室内三轴试验设备进行组合，从而达到缩短土体固结时间的效果。

本发明的思想来源于强制联想创新法。传统的黏土心墙固结排水方法，因试验材料渗透系数小、试样尺寸大、排水路径长等，导致试验周期较长，无法满足工程实践要求。迫使工程技术人员思考，如何缩短试样排水固结时间？基于此，通过引进电渗技术来缩短试样排水固结时间。采用电渗法进行掺砾料大三轴试验试样的固结，克服了传统固结方法由于试样尺寸大、排水路径长导致试样固结慢的缺点，使采用常规围压固结所需时间从数天乃至数星期变成了几个小时，大大缩短了固结时间，提高了工作效率。

(3) 技术内容

本发明在大三轴仪中试样的两端分别设置电动土工合成材料电极，并通过导线与外部电源连接，在电场作用下试样发生电渗固结。其具体技术步骤为：①在大型三轴仪底座上放置绝缘板，在绝缘板上放置电极板，电极板上放置滤纸；②在底座上将掺砾心墙料试样制作好；③在试样顶面上依次放置滤纸、电极板和绝缘板；④将上部的导线穿过盖板和绝缘板上预留的小孔，导线与上部电极板连接好；⑤接好排水管，并将两根导线通过压力室顶面的小孔穿出；⑥将压力室引出的两根导线与外部电源连接，电源采用直流电源，电压可调节；⑦接通电源，试样开始发生电渗固结。本发明可进行正负极的连接相互交换，通过电极转换技术，使试样分别通过上、下端排水，这样不仅加快了固结速度，还能保证固结均匀。在电渗固结的同时，也可在试样周围加上围压，使试样在围压-电

渗联合作用下固结，这样能充分发挥两种固结方法的长处，固结速度更快，固结效果更好（图 24）。

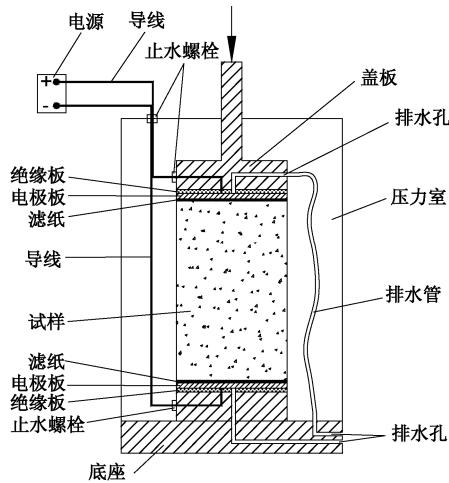


图 24 三轴试样固结示意图

Fig. 24 Consolidation of samples in triaxial tests

6.2 一种运营地铁隧道沉降控制方法^[43]

（1）研发背景

随着国家沿海、沿江软弱土地区地铁隧道等基础设施大量投入运营，这些工程作为生命线工程，其安全性极大地影响着人民生命财产安全，以及社会稳定。运营期间内隧道差异沉降严重影响列车运营安全，控制运营期隧道差异沉降是保证工程质量与安全的关键技术问题之一。但是，由于列车反复荷载作用、不同路段地质情况的变化、不同结构物之间的过渡连接、不同路段地基处理方式的差异、软土的固结沉降时间特性与其结构性以及地下水变化等因素的影响，在地铁隧道运营期容易产生差异沉降等病害。若不从根本上解决此问题，每次都需要花费较多的费用处理差异变形，处理周期长、维修处理施工对隧道运营及周围环境影响大，而且往往处理效果不佳；差异沉降，将严重影响运营安全，导致安全隐患，因此必须要从根本上进行处治。

（2）研发思路与方法

为了有效地解决目前常用运营地铁隧道沉降控制方法无法有效防止由于交通循环动荷载等因素引起软弱土地基沉降问题，针对传统处治方法的不足，试图找到一种控制运营地铁沉降的解决措施。由于地铁位于地基内部，无法采用一般地面上的施工方法来实现该目的，因此联想到地下工程处理的各种方法。桩基础是一种地下支撑结构，一般是桩顶受到荷载作用，但是对于运营地铁，不可能在地铁下面再打桩，因此桩基础不能直接应用于地铁隧道沉降处理。若能在桩顶设置“横梁”，将地铁隧道“托住”，则可以将隧道荷载顺利传递到桩顶。本发明就是基于这一思路开发

的。

本发明的思想来源于强制联想创新法。传统的顶管法施工主要目的是在不进行大量开挖的前提下穿越构筑物施工，技术相对成熟，施工效率高；为了控制运营隧道沉降，将顶管法施工后埋设的横向构件强制联想作为横向支撑结构，同时在横向支撑结构两端打桩形成门形支撑结构物；沿运营隧道方向，不同间距设置门形支撑结构物，形成分段支撑。运营地铁隧道的附加荷载通过横向支撑结构传递到桩体，桩体承载力高，沉降很小，可整体控制运营地铁隧道由于软弱土地层差异沉降引起隧道沉陷扭曲变形问题，使线性通长无支撑隧道改变为分段支撑结构物，有效控制运营地铁隧道结构的沉陷扭曲变形问题。

本发明通过将顶管法施工完成的横向结构和桩基础强制联想到门形支撑构建物，以强制联系发挥顶管施工技术方法的优势的作为新技术发明的思路，使运营隧道沉降控制方法的发明水到渠成（图 25）。

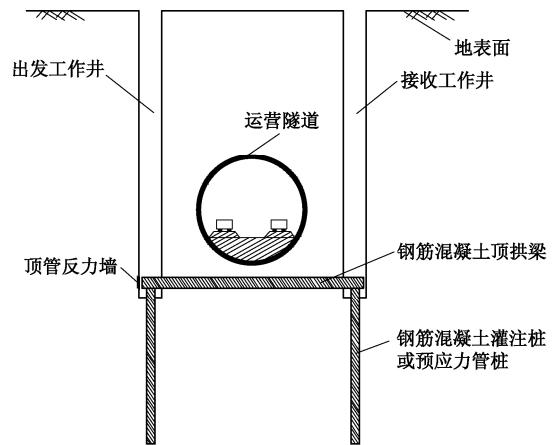


图 25 隧道沉降控制示意图

Fig. 25 Schematic diagram of settlement control of tunnel

（3）技术内容

在运营地铁隧道两侧开挖工作井，然后在两侧出发工作井和接收工作井内进行钻孔灌注桩或者预应力管桩施工，接着在隧道底高程 2~10 m 处通过传力顶铁和导向轨道，用支承于基坑后座上的液压千斤顶将管压入土层中；当第一节管全部顶入土层后，接着将第二节管接在后面继续顶进，这样将一节节管子顶入，作好接口，建成涵管；在涵管孔里放置钢筋笼并水平浇筑混凝土，形成运营地铁隧道底顶横梁，该梁与两侧的钻孔灌注桩或者预应力管桩一起形成运营地铁隧道门形支撑结构，最后回填工作井。沿运营地铁隧道纵向方向软弱土层地段区域间隔 100~500 m 布置一个门形支撑结构，从而达到整体控制运营地铁隧道由于列车荷载导致软弱土地层沉降变形的效果。该技术

方法施工期间不影响隧道正常通车，不需要进行大量开挖，工程量少，工程造价低，对周围建筑物以及运营地铁隧道的影响小，可一次性解决差异沉陷变形问题，永绝后患，减小长期维护费用，保证运营安全。

7 扩散（发散）思维创新法

所谓扩散思维创新法，就是从一个事物或者一个点，发散到与原事物有某种关联的其他事物（图 26）。将一种事物扩散到其他事物可以通过结构、材料、功能、因果、形态、关系、方法等任何与原事物有关联的方面而进行扩散。例如古代有“钻木取火”的方法，可以通过这个联想到其他取火的方法，如“凸透镜点火”、“火柴点火”、“内燃机气体压缩点火”等，这些方法之间一定存在某种关联，目的都是使物体温度提高，达到燃点，采用不同的方法达到相同的目的。

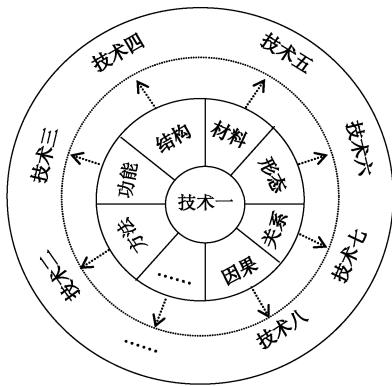


图 26 扩散思维创新法示意图

Fig. 26 Schematic diagram of divergent thinking innovation method

7.1 一种软土地区 PCC 桩地下储藏井制作方法^[44]

(1) 研发背景

储藏井是地下储备的主要结构形式，可以储存石油、天然气、食品、肥料等物资。较之地上储备，地下储备安全环保，可有效防止雷击、恐怖袭击和地震等，有利于国家的战略安全，且可节约土地。能源、材料等储藏于地下，可应对极端条件（战争、恐怖、地震等）下的能源、材料中断等影响。加强能源、材料的地下储备是保障国家安全的重要措施之一，例如我国战国时期就建立过地下军用粮仓。

在软土地区修建储藏井存在着复杂的技术难题。若将储藏井建在软土地基，需要对软土地基进行加固处理，使地面储藏井的承载力和沉降能满足设计要求，而地基处理的费用是非常高的，这种做法不经济，且占用地面空间。若将储藏井建在软土地基的地下，修建地下储藏井时，需要对地基土进行开挖，但是软土

具有高压缩性、低强度等特点，开挖时孔壁不易支护，极易形成塌孔，因此软土地区要开挖深井非常困难。

(2) 研发思路与方法

PCC 桩的优势在于适合于软土地区的地基加固处理，施工过程清晰、成桩质量可靠。PCC 桩直径大（一般都在 1 m 以上），因此其内部空间的体积很大，如果能将这么大的空间加以利用，则更能发挥 PCC 的长处。这就容易让人想到地下储藏结构，例如地下粮仓、地下仓库、地下储油罐等都是在地下储藏物资，在 PCC 桩内部空腔掏空后，可以设置钢筋混凝土底板将桩底完全封闭，然后在桩顶设置盖板，就完全形成了一个圆筒形的地下储藏结构，可用来储藏所需的各种物资。

本发明采用的创新方法为扩散思维创新法。PCC 桩的材料为混凝土，可以联想到其他混凝土材料的事物，如混凝土预制桩、混凝土柱、混凝土板、混凝土框架结构等。PCC 桩的结构为空心圆柱结构，可以联想到管涵、管道、钢管桩等类似结构。这种思维的扩散可以纵向扩散，也可以是横向扩散。例如 PCC 桩有承担上部竖向荷载的功能，那么可以联想到其他桩基础、墩基础、条形基础、筏形基础等；PCC 桩有承担水平荷载的功能，因此可联想到挡土墙、抗滑桩、基坑支护等。前面这种扩散方法属于纵向扩散，即以某一使用功能作为纵向主线，寻找其他有相同功能的东西。此外还有横向扩散，例如 PCC 桩具有承担竖向荷载的功能，也有承担水平荷载的功能，那么是否还能扩散出别的功能？这就是本发明的关键之处，PCC 桩具有内部空间大的特点，这和地下储藏结构如地下粮仓、地下仓库等的功能类似，因此可将 PCC 桩的使用功能扩散到进行物资储藏，由此得到本发明创新。

(3) 技术内容

本发明一种软土地区 PCC 桩地下储藏井制作方法的创新内容主要是采用以下技术步骤实现：①在桩位施工钢筋混凝土 PCC 桩，进行混凝土的养护。②施工场地降水。③开挖桩芯土。可采用人工方式开挖，也可采用高压水冲洗桩芯土形成泥浆后，用泥浆泵抽除桩芯土。④凿除部分桩底混凝土，使桩端露出 20~30 cm 的钢筋头，作为连接钢筋。然后下放底板钢筋，并与桩端连接钢筋连接。⑤浇筑混凝土底板进行封底，进行底板混凝土养护，待达到一定强度方可停止降水。

(6) 制作桩头盖板。盖板可根据工程需要采用外露式，直接露出地表；或采用埋入式，埋入地下一定深度。若采用埋入式盖板，盖板安装后用土层回填，形成地下储藏井（如图 27 所示）。

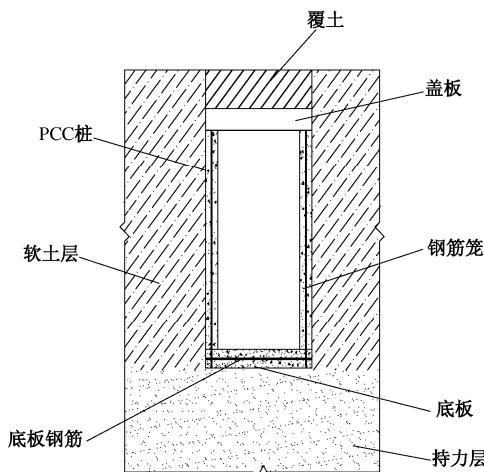


图 27 PCC 桩地下储藏井示意图

Fig. 27 Schematic diagram of underground storage well constructed by PCC piles

7.2 PCC 能量桩技术^[45]

(1) 研发背景

全球气候的变化是全世界关注的问题，采用新能源、减少碳的排放是全世界所倡导的发展方向。地热能是一种清洁能源，无污染、无碳排放，在越来越多的国家得到推广应用。基于对地下空间利用的考虑，工程技术人员将地源热泵技术与建筑桩基础结合起来，提出一种能量桩的技术方案。将常规建筑桩基础中的基桩和地源热泵埋管结合起来，即地源热泵空调系统的桩埋管，称为“能量桩”，属于垂直地埋管换热器的一种。传统的能量桩虽然不增加用地面积，但具有以下缺点：①U形管绑扎在钢筋笼上，并埋设在混凝土中，与桩身一起受力变形，容易造成管道和混凝土的变形和损坏；②U形管埋设在混凝土中，不能回收使用，也不能进行检修；③预制桩需要接桩，U形管的接头难以处理，容易造成热源的损失；④传统能量桩造价相对较高，直径较小，即桩侧表面积小，集热能力有限。

(2) 研发思路与方法

桩基础的类型很多，从桩的材料分，有混凝土桩、钢桩、CFG 桩、水泥土桩等；从桩的成桩工艺分，有现浇桩、预制桩、搅拌桩、旋喷桩等；从桩的结构形式来分，有圆形桩、方形桩、管桩、壁板桩等。对于一种桩型，和地热热泵结合有两种方式，一种方式是将导热管埋在桩身混凝土内部，另一种方式是将导热管埋在桩体内部空腔。显然，对于实心桩只能采取第一种方式，而对于空心桩，既可以采用第一种方式，也可以采用第二种方式。前面所述，将导热管埋在混凝土里面有一定的缺点，因此将导热管埋设在管桩内部空间是一种值得推荐的埋管方式。传统的预制管桩

单根桩长有限，且直径小，内部空间有限，能埋设的导热管数量不多，吸热量不大。钢筋混凝土 PCC 桩的内、外直径都很大，一般在 1 m 以上，具有大直径桩芯，将大直径桩芯土掏空可以得到较大的内部空间，但目前该桩型的桩芯内部空间未得到充分利用（见图 28）。因此如果能将 PCC 桩与地源热泵结合，形成 PCC 能量桩，在承载的同时采集地下热量，一举两得。

本发明的创新方法为扩散思维创新法。扩散思维创新可以从横向扩散，也可以从纵向扩散，只要和原事物有关联，就可以往任意方向扩散，从扩散的思维里面选取可行的方案进行发明创造。本发明创新最初来源于地源热泵技术，地源热泵技术的特征是从地下采集热能，需要将管道埋设到土体里面。从这个思维扩散，可以将管道埋设到水中、淤泥中、矿井中、地下连续墙中、桩基中等。而埋设到桩基中又包括很多类型的桩基，包括预制桩、水泥土搅拌桩、现浇桩等。将导热管埋设到桩里面需要满足两个条件：一是不能降低桩的承载力；二是要能吸收大量地热。而 PCC 桩正好可以满足这些条件。因为 PCC 桩是摩擦型桩，主要靠外侧阻力和端阻力承担荷载，把桩芯土掏空不会影响侧摩阻和端阻，因此承载力没有损失。同时，PCC 桩直径大，与周围土体接触面积大，吸收的热量就多，并且内部空腔体积大，可以埋设很多导热管，也可以直接注入导热液体进行循环，能量吸收面积大，吸收率高。这样，用过扩散思维创新，实现了 PCC 能量桩的发明创造。

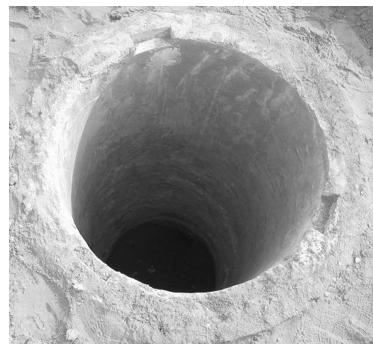


图 28 开挖桩芯土后的 PCC 桩

Fig. 28 Photo of a PCC pile after excavation of core

(3) 技术内容

PCC 能量桩（如图 29）由 PCC 桩、导热液体、盖板、底板、导热管、集热器、检查通道等部分组成。

PCC 桩桩底采用钢筋混凝土完全封闭；PCC 桩顶部设置钢筋混凝土盖板；在盖板上设置多个孔洞；PCC 桩上部一侧设置预留孔，用于导热管穿越；PCC 桩内部空腔内注满导热液体；导热管穿过盖板上的孔洞深

入到 PCC 桩空腔内的导热液体中；深入到 PCC 桩空腔内的导热管可采用开口式和封闭式两种形式；PCC 桩侧壁设置一检查通道，检查通道伸出地表，检查通道出口设置密封盖；导热管可通过盖板上的孔洞或检查通道引出 PCC 桩空腔后与集热器连接，形成导热液体的循环通道。PCC 能量桩检修维护方便，应用范围广，不影响承载力，造价低，侧表面积大，能量传输效率高，是经济高效的节能减排桩型。

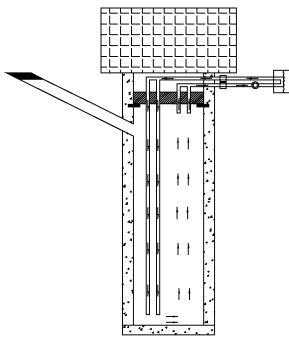


图 29 能量 PCC 桩示意图

Fig. 29 Schematic diagram of energy PCC piles

8 产学研实践研究

岩土工程技术创新不能仅限于新技术的研发，而应围绕提高社会生产力、服务于国家基础设施建设开展后续的试验、开发、应用、推广直至形成新产品、新工艺、新材料、发展新产业等产学研一体化实践研究。在以上研发的新技术中，PCC 桩，现浇 X 形桩，浆固碎石桩，吹填土真空预压地基处理等技术都已经开展了系统的理论和应用研究，取得了一批科研成果。本文以 PCC 桩为例，着重介绍产学研研究的思路和过程。

8.1 技术开发

对于一项岩土工程新技术，采用上述创新方法进行创造之后，需要将之应用于工程实践。在工程应用之前，首先要进行技术的开发。本例主要开展 PCC 桩复合地基技术设备研制、施工工艺开发、性能指标和适用条件确定、质量检测方法建立以及工程实践检验等内容研究，其总体思路见图 30。

PCC 桩的施工机械中的振动沉管由两层同心大直径圆形钢管组成，内管与外管直径相差 20~30 cm，在活瓣桩靴保护下振动下沉时对桩侧土体排土作用较小，并形成环形腔体的模板，在现场浇注混凝土，然后振动提拔钢管，同时混凝土从环形腔体模板内注入环形槽孔内，从而形成沉管、浇注、振动提拔一次性直接形成管桩的新工艺，保证了混凝土在槽孔内良好的充盈性和稳定性。

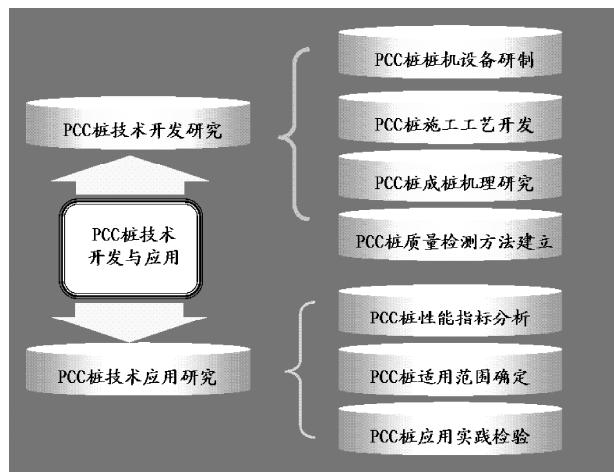


图 30 PCC 桩技术开发总体思路

Fig. 30 General idea of development of PCC piles

8.2 工程科学问题探索

在研发一项新技术之后，需要对该技术的工作机理进行研究，为工程推广应用提供理论依据，即要凝练出相关的工程科学问题，并针对这些工程科学问题开展理论和应用研究。对于 PCC 桩技术，主要工程科学问题包括：①PCC 桩荷载传递特性研究；②PCC 桩复合地基承载力问题研究；③PCC 桩复合地基沉降计算方法研究；④PCC 桩负摩擦力特性研究；⑤PCC 桩内摩擦特性研究；⑥PCC 桩桩芯土特性与土塞效应研究；⑦PCC 桩桩体材料特性研究；⑧PCC 桩施工工法研究；⑨PCC 桩水平承载特性研究；⑩PCC 桩抗弯性能研究；⑪PCC 桩复合地基与上部结构共同作用性状；⑫PCC 桩复合地基按沉降控制设计理论；⑬PCC 桩复合地基优化设计理论；⑭PCC 桩复合地基测试技术研究；⑮PCC 桩的动力特性研究等。

8.3 项目申请

开展工程科学问题的研究需要科研经费的支持。针对一项新技术，可以选择一个或者几个工程科学问题为主题申请科技项目。PCC 桩复合地基技术已获得包括国家及省部级自然基金、交通科学研究计划项目、合作单位投资等项目的支持。如：国家自然科学基金项目“现浇混凝土薄壁管桩复合地基加固机理与计算方法研究（编号：50679017）”；国家自然科学基金项目“PCC 桩水平承载特性与计算方法研究（编号：50778063）”；江苏省自然科学基金创新学者项目“城际高速铁路软土地基沉降变形规律与控制方法基础研究（编号：BK2008040）”和国家自然科学基金重点项目“高速铁路软土地基沉降变形规律与控制方法研究”（编号：U1134207）以及相关重大工程科技项目等。

8.4 室内试验研究

现场试验由于周期长，耗资大，仅应用于较少的

重要工程中。室内试验则能够克服现场试验的不足, 相应的周期短, 耗资小, 能反映桩基特性的一般规律。针对 PCC 桩新技术, 作者及其团队开展了室内小尺寸模型试验和大尺寸模型试验的研究^[46-50]。

PCC 桩室内小尺寸模型试验主要是在一上方开口的长方形模型槽中进行的, 模型槽的净尺寸为: 160 cm(长)×90 cm(宽)×120 cm(高), 模型槽的四边及底面由钢板焊接而成, 周边用槽钢固定, 以保证刚度。通过在两个不同管径的硬质 PVC 管(管径分别为 110 mm 和 75 mm, 长度为 90 cm)之间浇筑混凝土以形成 PCC 模型桩, 用砂土作为桩周土。目前已经在该模型箱中开展了 PCC 桩竖向和水平承载特性试验。

模型槽足尺试验吸收了现场试验与室内试验的优点, 避免了现场试验时间长, 花费大, 室内试验缩尺效应等带来问题的影响, 从而为桩基试验开辟了一条有效的新途径。在“十五”、“211 工程”建设和国家自然科学基金的支持下, 河海大学岩土工程科学研究所自行开发研制了大型桩基模型试验系统, 该系统主要包括: 试验场所(模型槽)、加载系统、测量系统及试验土料和模型桩体等。其中模型槽的尺寸为 5 m(长)×4 m(宽)×7 m(高), PCC 桩的几何尺寸和浇筑材料可以与现场完全一致。目前已开展了 PCC 桩竖向承载、水平承载和低应变检测的足尺模型试验(图 31)。

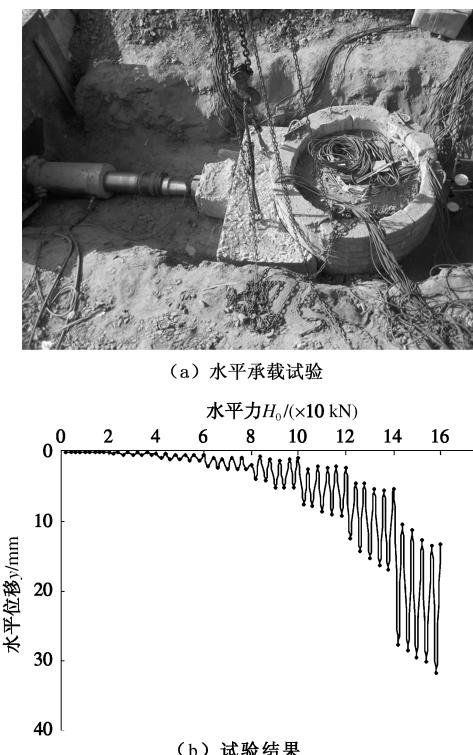


图 31 PCC 桩足尺模型试验

Fig. 31 Full scale model tests on PCC piles

8.5 理论研究

理论分析是研究 PCC 桩荷载传递规律的有效方法。PCC 桩的理论研究是针对以上相关的工程科学问题而展开的。桩的承载变形特性, 是桩基工作性状的直观反应, 也是检测桩基设计、施工质量是否合理的一项重要指标。目前, 对于 PCC 桩已开展了复合地基承载力计算方法、复合地基沉降计算方法、荷载-沉降关系的简化分析方法、负摩阻力、桩土应力比、水平荷载作用下 PCC 桩的工作特性、动力特性等理论方面的研究^[51-58]。

PCC 桩与其他桩型的不同之处在于同时存在内摩阻力和外摩阻力的作用, 因此其承载力计算公式为

$$Q_u = Q_{\text{soil}} + Q_p + Q_{\text{sin}} = \psi_p q_p A_p + u \sum \psi_s q_{si} l_i + Q_{\text{sin}}, \quad (1)$$

其中, 内摩阻力 Q_{sin} 的计算公式为

$$Q_{\text{sin}} = 2\pi R_{\text{in}} \int_0^{z_e} a e^{-bz} dz = \frac{2\pi R_{\text{in}} a}{b} (1 - e^{-bz_e}) . \quad (2)$$

8.6 装备研制

在进行了技术开发、室内试验和理论研究之后, 对一项新技术的作用机理有了基本的了解, 下一步就是进行装备的研制, 这是工程应用之前的必须步骤。关于这方面的工作, 需要创造条件与工业界合作。针对 PCC 桩技术, 所研制的装备如图 32 所示^[4, 59-63]。

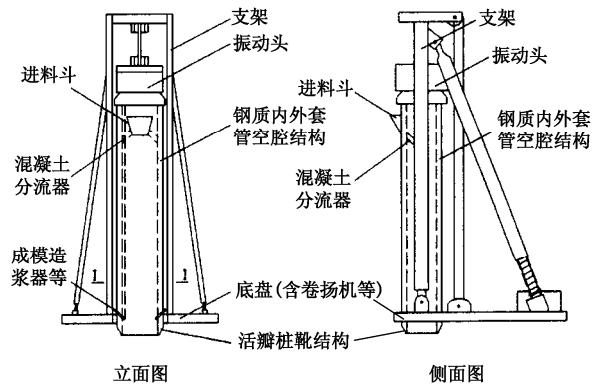


图 32 振动沉模现浇薄壁管桩设备图

Fig. 32 Equipment of vibration sinking mould cast-in-place thin wall pipe piles

8.7 现场试验

研制了装备之后, 需要应用到实际工程, 就要进行现场的工艺试验^[5, 51, 64-70]。开展工艺试验的目的为: ①通过现场施工工艺的研究, 为制定更加完善的施工作业书和有关的操作规范规程提供资料; ②结合试验工程的地质条件, 制定出适合该地质类型的施工参数; ③通过施工工艺的研究完善机械设备, 为进行标准化施工提供数据; ④为类似的工程提供施工经验。

PCC 桩的现场工艺试验在盐通高速公路试验段进行。盐通高速公路是我国沿海大通道在江苏境内的

重要组成部分, 沿线的地面标高 2.8~4.0 m, 地下水位高, 该地区软土层为淤泥及淤泥质土, 部分地段存在超软、深厚的软土, 有的深达 30 m 以上, 技术指标差, 灵敏度高, 受扰动后强度降低幅度大。为了分析 PCC 桩桩长、桩径、置换率等因素对桩土荷载分担、沉降、桩土差异沉降、路堤稳定性等的影响, 现场采取多种加固方案, 共分 7 个不同的加固区进行了比较。通过工艺试验, 研究了混凝土塌落度、拔管速度、充盈系数、打桩顺序等对成桩质量的影响。

现场成桩后需要进行桩基质量检测, 除了常规的静载荷试验方法和低应变测试方法外, 笔者还研发了一种直接开挖检测方法。由于 PCC 桩是大直径管桩, 因此, 当成桩两周后, 可以将桩芯土全部开挖出来, 检测人员可以直接进入桩芯内部检测成桩质量, 可以用视觉检查桩体内有无空隙, 裂缝, 缩颈等缺陷, 可以用冲击电钻穿透桩壁, 以量测不同深度的壁厚, 还可以在桩体内部取样进行强度试验。该方法改变了美国桩基手册前言中所述“桩基质量不能用视觉检查”的结论, 使桩基质量检测更为可靠。

为了进一步评估 PCC 桩复合地基的加固效果, 还可进行现场测试研究, 主要开展表面沉降、差异沉降、深层沉降、侧向位移、桩土应力、孔隙水压力等指标测试。如图 33 为现场实测沉降曲线。

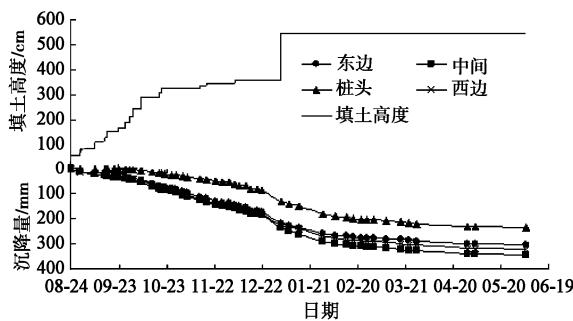


图 33 现场监测 PCC 桩复合地基沉降

Fig. 33 Measured settlements of composite foundation with PCC piles

8.8 人才培养

科研过程促进了人才的培养。在 PCC 桩技术方面, 目前已培养毕业了 7 名博士研究生, 13 名硕士研究生, 与荷兰 Delft 科技大学联合培养研究生 1 名, 并为多个设计、施工和管理单位培养了近千名技术骨干, 如江苏省公路局、中交第二公路设计研究院、中铁第三设计研究院、中铁第四设计研究院、中铁第五设计研究院、中港第二航务设计研究院、江苏省交通规划设计院、江苏省交通科学研究院、浙江省交通规划设计院、福建省交通规划设计院、上海市政工程设计研究院、天津市市政工程设计研究院、上海城建设计

研究院、南京市市政设计研究院和南京水利规划设计研究院等。

8.9 知识产权

新技术研发之后, 可申请知识产权保护。申请知识产权后成果具有独占性, 可转让给相关企业, 在工程中推广。目前, PCC 桩技术已申请专利 15 项, 其中发明专利 10 项。该技术目前已经成套转让给天津华森市政工程建设有限公司、江苏省铁路建设工程有限公司和江苏河海工程技术总公司等单位, 并且转让给越南岩土公司, 使 PCC 桩技术进一步走向国际市场。

8.10 政府标准、工法

新技术的推广离不开政府的支持。在一定的工程实践基础上, 可形成工法和标准。有了工法和标准, 新技术在实际工程中应用就有据可依, 利于更好的推广应用。PCC 桩技术形成的标准和工法包括: 国家行业标准《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》(JGJ/T213—2010)、江苏省工程建设标准《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》(苏 DGJ32/TJ70—2008) 和江苏省省级工法《现浇混凝土大直径管桩施工工法》(JSGF—28—2008)。

8.11 推广应用

笔者从 2001 年开始研制开发 PCC 桩技术, 并在我国江苏、上海、浙江、天津、湖南、河北等省市高速铁路、高速公路和市政工程中推广应用, 在实践中完善和提高设计理论、施工工艺和技术经济分析等工作, 其研究成果先后应用于京沪高速铁路南京南站连接线、沿海高速公路大丰段、上海北环高速公路、浙江杭千高速公路、湖南常张高速公路、天津威武高速公路、天津京沪二期高速公路、河北京秦高速公路、南京绕城高速公路、南京奥体中心滨江大道、镇江开发区沿江大道等工程深厚软基处理之中。该技术的应用, 加快了整体工程进度, 保证了路堤快速施工的稳定性, 并且节省了工程造价, 取得了显著的社会经济效益。该技术开创了高速公路、铁路等深厚软基加固的新途径。

8.12 成果凝练

产学研一体化的最后一个阶段就是成果的凝练。成果的表现形式最直接的就是学术论文。目前, PCC 桩研究已经在国际、国内核心期刊及重要的学术会议上发表了 60 余篇学术论文, 其中被 SCI、EI、ISTP 国际三大检索机构收录 40 余篇。成果获得 2011 年国家技术发明二等奖、2010 年教育部技术发明一等奖、2010 年第二届中国产学研合作创新成果奖, 2012 年第七届中国发明创业奖和 2012 年第十四届中国专利优秀奖等奖励。

9 结语

岩土工程学科是一个实践性很强的学科，如何在实践工程中进行技术创新，并从实践中归纳出工程科学问题，再回到实践中去，在实践中检验和提高理论，并用于指导实践，这就是岩土工程创新总体思路。笔者结合自己近年来技术创新探索，归纳了优缺点互补创新法、逆向思维创新法、组合技术创新法、希望点列举创新法、触类旁通创新法、强制联想创新法和扩散（发散）思维创新法 7 种技术创新方法，并基于近年来研发的系列创新技术，围绕上述的 7 种创新方法，分别阐述了各种技术的研发背景、研发过程和技术创新内容。以现浇混凝土大直径管桩（即 PCC 桩）技术创新为例，总结出从新技术开发、工程科学问题探索、项目申请、室内试验研究、理论研究、装备研制、现场试验、知识产权申请、标准与工法研制、工程推广应用和成果凝练的产学研一体化实践创新之路，借以与同行交流。

岩土工程学科发展，任重而道远。老一辈专家为我们的发展打下了坚实的基础，祖国现代化建设为我们提供了千载难逢的机遇，本文也仅做了一点初步探索和尝试，希望起到抛砖引玉的作用，不到之处敬请批评指正。

致 谢：感谢团队成员丁选明、陈育民、孔纲强博士等为本文整理给予的帮助；感谢陈祖煜院士、龚晓南院士、郑颖人院士、李广信教授、张建民教授、姚仰平教授、赵明华教授、高玉峰教授、洪振舜教授等对文稿的审阅和帮助。

参考文献：

- [1] 沈珠江. 采百家之长、酿百花之蜜——岩土工程研究中如何创新[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 365 - 367. (SHEN Zhu-jiang. Learn the advantages of multiple masters to make own products — How to produce creative work in geo-research[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 365 - 367. (in Chinese))
- [2] 岩土工程要注重创新和规划——访中国工程院院士王思敬[J]. 岩土工程界, 2002, 5(8): 7 - 8. (Innovation and programming in geotechnical engineering——Interview with Wang Sijing, Academician of Chinese Academy of Engineering[J]. Geotechnical Engineering World, 2002, 5(8): 7 - 8. (in Chinese))
- [3] 熊彼得. 经济发展理论[M]. 杜贞旭, 郑丽萍, 刘昱岗, 译. 北京: 中国商业出版社, 2009. (SCHUMPETER Joseph A. Theory of economic development[M]. DU Zhen-xu, ZHENG Li-ping, LIU Yu-gang, translators. Beijing: China Commercial Publishing House, 2009. (in Chinese))
- [4] 刘汉龙, 费 康, 马晓辉, 等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(I): 开发研制与设计理论[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 164 - 168. (LIU Han-long, FEI Kang, MA Xiao-hui, et al. Cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile with vibrating and steel tube mould technology and its application (I): development and design[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 164 - 168. (in Chinese))
- [5] 刘汉龙, 郝小员, 费 康, 等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II): 工程应用与现场试验[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 372 - 375. (LIU Han-long, HAO Xiao-yuan, FEI Kang, et al. Field pour concrete thin wall cased pile technology and its application (II): application and in-situ test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 372 - 375. (in Chinese))
- [6] 刘汉龙, 马晓辉, 宫能和, 等. 软基处治大直径现浇管桩复合地基施工方法: 中国, ZL02112538.4[P]. 2004-07-21. (LIU Han-long, MA Xiao-hui, GONG Neng-he, et al. Construction method of large diameter cast-in-place pipe pile composite foundation for soft foundation treatment: China, ZL02112538.4[P]. 2004-07-21. (in Chinese))
- [7] 刘汉龙, 高玉峰, 马晓辉. 一种现浇大直径管桩混凝土快速浇注装置及施工方法: 中国, ZL200810019690.X[P]. 2009-12-02. (LIU Han-long, GAO Yu-feng, MA Xiao-hui. A concrete quickly pouring device and its construction method of large diameter cast-in-place pipe pile: China, ZL200810019690.X [P]. 2009-12-02. (in Chinese))
- [8] 刘汉龙, 高玉峰, 马晓辉. 一种现浇大直径管桩活瓣桩靴及使用方法: 中国, ZL200810019689.7[P]. 2010-06-09. (LIU Han-long, GAO Yu-feng, MA Xiao-hui. A valve pile shoe and its usage of large diameter cast-in-place pipe pile: China, ZL200810019689.7 [P]. 2010-06-09. (in Chinese))
- [9] JGJ/T213—2010 现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (JGJ/T213—2010 Technical specification for composite foundation of cast-in-place[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [10] XU X T, LIU H L, LEHANE B M. Pipe pile installation effects in soft clay[J]. Geotechnical Engineering, 2006, 159(4): 285 - 296.
- [11] LIU Han-long, FEI Kang, XU Xiang-tao. Development and application of the large-diameter driven cast-in-place

- concrete thin-wall pipe pile[C]// Proceeding of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan. 2005: 2137 - 2140.
- [12] LIU Han-long, CHU Jian, DENG An. Use of large-diameter, cast-in situ concrete pipe piles for embankment over soft clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(8): 915 - 927.
- [13] LIU H L, NG Charles W W, FEI K. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: case study[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, **133**(12): 1483 - 1493.
- [14] 刘汉龙. 一种复合桩靴结构装置: 中国, ZL200610040416.1[P]. 2009-05-13. (LIU Han-long. A composite pile shoe structure and device: China, ZL200610040416.1[P]. 2009-05-13. (in Chinese))
- [15] 刘汉龙. 一种抗液化排水刚性桩: 中国, ZL200520076660.4[P]. 2007-02-28. (LIU Han-long. An anti-liquefaction rigidity-drain pile: China, ZL200520076660.4[P]. 2007-02-28. (in Chinese))
- [16] 赵楠. 刚性排水桩的抗液化性状试验与分析[D]. 南京: 河海大学, 2008. (ZHAO Nan. Test and analysis on anti-liquefaction behaviors of rigidity-drain pile[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [17] 刘汉龙, 周云东, 丰土根, 等. 消除桥头跳车的液压调节装置: 中国, ZL02220389.3[P]. 2003-03-19. (LIU Han-long, ZHOU Yun-dong, FENG Tu-gen, et al. Hydraulic control device to avoid bumping at bridge-head: China, ZL02220389.3[P]. 2003-03-19. (in Chinese))
- [18] 刘汉龙, 丰土根, 周云东, 等. 消除桥头跳车的机电调节装置: 中国, ZL02220390.7[P]. 2003-03-19. (LIU Han-long, FENG Tu-gen, ZHOU Yun-dong, et al. Mechanical and electrical control device to avoid bumping at bridge-head: China, ZL02220390.7 [P]. 2003-03-19. (in Chinese))
- [19] 刘汉龙, 丁选明, 陈育民, 等. 一种既有高速公路桥头跳车的处理方法: 中国, 201110302492.6[P]. 2011-09-29. (LIU Han-long, DING Xuan-ming, CHEN Yu-min, et al. A processing method to avoid bumping at bridge-head for existing high-speed way: China, 201110302492.6[P]. 2011-09-29. (in Chinese))
- [20] 陈永辉, 王新泉, 刘汉龙, 等. 正常通车情况下路堤横向钻孔轻质置换控制沉降的方法: 中国, 201010518332.0[P]. 2012-07-04. (CHEN Yong-hui, WANG Xin-quan, LIU Han-long, et al. Settlement control method in normal operation condition by horizontal drilling and light replacement in embankment: China, 201010518332.0[P]. 2012-07-04. (in Chinese))
- [21] 刘汉龙, 陈永辉, 宋法宝. 一种桩土互动浆固散体材料桩复合地基施工工法: 中国, ZL200510038903.X[P]. 2007-12-19. (LIU Han-long, CHEN Yong-hui, SONG Fa-bao. A construction method of grouted discrete material pile composite foundation: China, ZL200510038903.X[P]. 2007-12-19. (in Chinese))
- [22] 左威龙. 浆固碎石桩承载性状试验研究与分析[D]. 南京: 河海大学, 2008. (ZUO Wei-long. Test study and analysis on bearing behavior of grouted gravel pile[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [23] 温世清. 路堤荷载下浆固碎石桩复合地基承载特性与沉降计算研究[D]. 南京: 河海大学, 2011. (WEN Shi-qing. Study on mechanical characteristic and settlement calculation of grouted gravel pile composite foundation under embankment load[D]. Nanjing: Hohai University, 2011. (in Chinese))
- [24] 左威龙, 刘汉龙, 陈永辉. 浆固碎石桩成桩注浆影响范围现场试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(12): 3329 - 3336. (ZUO Wei-long, LIU Han-long, CHEN Yong-hui. Field testing analysis of grouting impact of gravel pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(12): 3329 - 3336. (in Chinese))
- [25] 闻世强, 陈育民, 丁选明, 等. 路堤下浆固碎石桩复合地基现场试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1559 - 1563. (WEN Shi-qiang, CHEN Yu-min, DING Xuan-ming, et al. Application of grouted gravel pile in soft subgrade improvement of expressway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1559 - 1563. (in Chinese))
- [26] 刘汉龙, 徐士龙. 浅层振夯击密与深层爆炸挤密联合井点降水地基处理方法: 中国, ZL200910135452.X[P]. 2010-11-17. (LIU Han-long, XU Shi-long. A foundation treatment method by shallow vibration densification and deep blast compaction combining well-point dewatering method: China, ZL200910135452.X[P]. 2010-11-17. (in Chinese))
- [27] 刘汉龙, 徐士龙. 浅层振夯击密与深层爆炸挤密联合高真空井点降水地基处理方法: 中国, ZL200710027872.1[P]. 2009-08-26. (LIU Han-long, XU Shi-long. A foundation treatment method by shallow vibration densification and deep blast compaction combining high vacuum well-point dewatering method: China, ZL200710027872.1[P]. 2009-08-26. (in Chinese))

- [28] 刘汉龙. 现浇 X 形钢筋混凝土桩施工方法: 中国, ZL200710020306.3[P]. 2010-07-28. (LIU Han-long. The construction method of cast-in-place X-section reinforced concrete pile: China, ZL200710020306.3[P]. 2010-07-28. (in Chinese))
- [29] 刘汉龙. 现浇 X 形桩沉模装置: 中国, ZL200720036892.6[P]. 2008-02-27. (LIU Han-long. A sinking mould device of cast-in-place X-section pile: China, ZL200720036892.6[P]. 2008-02-27. (in Chinese))
- [30] 刘汉龙, 王智强, 丁选明, 等. 一种现浇 X 形混凝土桩活瓣桩尖结构装置及使用方法: 中国, ZL200910213162.2[P]. 2011-06-01. (LIU Han-long, WANG Zhi-qiang, DING Xuan-ming, et al. A valve pile shoe and its usage of cast-in-place X-section concrete pile: China, ZL200910213162.2[P]. 2011-06-01. (in Chinese))
- [31] 孔纲强, 丁选明, 刘汉龙, 等. 一种现浇 X 形大直径空心混凝土桩及其施工方法: 中国, ZL201010215965.4[P]. 2012-05-09. (KONG Gang-qiang, DING Xuan-ming, LIU Han-long, et al. A cast-in-place X-section large-diameter hollow concrete pile and its construction method: China, ZL201010215965.4[P]. 2012-05-09. (in Chinese))
- [32] 丁选明, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 一种防止现浇 X 形混凝土桩拔模时带出桩周土体的装置: 中国, ZL201010215957.X[P]. 2011-08-10. (DING Xuan-ming, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. A device to prevent the soil around cast-in-place X-section concrete pile from pulling out: China, ZL201010215957.X[P]. 2011-08-10. (in Chinese))
- [33] LÜ Y R, LIU H L, DING X M, et al. Field tests on bearing characteristics of X-section pile composite foundation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 2012, 26(2): 180 - 189.
- [34] 刘汉龙, 戴会超, 费康, 等. 一种可全回收式锚杆: 中国, ZL200420080559.1[P]. 2005-11-02. (LIU Han-long, DAI Hui-chao, FEI Kang, et al. A fully recoverable anchor: China, ZL200420080559.1[P]. 2005-11-02. (in Chinese))
- [35] 庞有师. 新型可回收锚杆技术开发与力学特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2009. (PANG You-shi. Technological development and mechanical characteristic research of a new-type recoverable anchor[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [36] 龚医军. 新型可回收式锚杆抗拔试验及数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (GONG Yi-jun. Study on pull-out test and numerical simulation of newly recoverable anchor[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [37] 刘汉龙, 曾国海, 高有斌, 等. 吹填超软地基改性真空预压结合覆水预压快速处理方法: 中国, ZL201010158412.X[P]. 2012-03-28. (LIU Han-long, ZENG Guo-hai, GAO You-bin, et al. A quickly processing method of hydraulic fill super soft foundation by modified vacuum preload combining water covered method: China, ZL201010158412.X [P]. 2012-03-28. (in Chinese))
- [38] 顾长存, 王桂珍, 刘汉龙, 等. 一种真空预压地基加固区内水位测量装置: 中国, ZL200620073649.7[P]. 2007-07-18. (GU Chang-cun, WANG Gui-zhen, LIU Han-long, et al. A device to measure groundwater level in foundation reinforced by vacuum preload: China, ZL200620073649.7[P]. 2007-07-18. (in Chinese))
- [39] 顾长存, 王桂珍, 刘汉龙, 等. 一种真空预压地基加固区内水位测量装置与方法: 中国, ZL200610085337.2[P]. 2008-01-02. (GU Chang-cun, WANG Gui-zhen, LIU Han-long, et al. A device and its usage to measure groundwater level in foundation reinforced by vacuum preload: China, ZL200610085337.2[P]. 2008-01-02. (in Chinese))
- [40] 周琦. 真空预压条件下土体渗流特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (ZHOU Qi. Seepage characteristics of soil under vacuum preloading[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [41] 刘汉龙, 马晓辉. 多头小直径长螺旋钻进成墙机: 中国, ZL200610085598.4[P]. 2009-03-04. (LIU Han-long, MA Xiao-hui. Multiple small diameter long twist drilling wall forming machine: China, ZL200610085598.4[P]. 2009-03-04. (in Chinese))
- [42] 刘汉龙, 丁选明, 杨贵, 等. 一种掺砾料大三轴试验电渗固结法: 中国, ZL200910183525.2[P]. 2011-07-06. (LIU Han-long, DING Xuan-ming, YANG Gui, et al. A electroosmosis consolidation method of gravel admixture sample of large scale triaxial test: China, ZL200910183525.2[P]. 2011-07-06. (in Chinese))
- [43] 刘汉龙, 孔纲强, 丁选明, 等. 一种运营地铁隧道沉降控制方法: 中国, 201210199845.9[P]. 2012-06-18. (LIU Han-long, KONG Gang-qiang, DING Xuan-ming, et al. A settlement control method of the tunnel of operating subway: China, 201210199845.9[P]. 2012-06-18. (in Chinese))
- [44] 刘汉龙, 丁选明, 凌九忠, 等. 一种软土地区 PCC 桩地下储藏井制作方法: 中国, CN102296632A[P]. 2011-06-20. (LIU Han-long, DING Xuan-ming, LING Jiu-zhong, et al. A

- production method of underground storage well constructed by PCC pile in soft soil area: China, 201110165214.0[P]. 2011-06-20 (in Chinese))
- [45] 刘汉龙, 丁选明, 吴宏伟, 等. 一种 PCC 能量桩及制作方法: 中国, 201210298385.5[P]. 2012-08-21. (LIU Han-long, DING Xuan-ming, WU Hong-wei, et al. A energy PCC pile and its production method: China, 201210298385.5[P]. 2012-08-21. (in Chinese))
- [46] 张晓健. 现浇混凝土薄壁管桩负摩阻力特性试验研究与分析[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZHANG Xiao-jian. Test study on properties of negative skin friction of thin-wall pipe pile using cast-in-situ concrete[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [47] 姜陈钊. 现浇钢渣混凝土薄壁管桩材料试验与单桩承载特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (JIANG Chen-zhao. Study on the material experiment and the bearing mechanism of cast-in-situ steel-slag concrete thin-wall pipe pile[D]. Nanjing: Hohai University, 2004 (in Chinese))
- [48] 马志涛. 现浇混凝土薄壁管桩水平受力特性试验研究与分析[D]. 南京: 河海大学, 2007. (MA Zhi-tao. Test study on behaviors of cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile under lateral load[D]. Nanjing: Hohai University, 2007 (in Chinese))
- [49] 何筱进. 现浇混凝土薄壁管桩水平承载性状试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (HE Xiao-jin. Research on behaviour of cast-in-situ concrete thin wall pipe pile under lateral load[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [50] 谭慧明. PCC 桩复合地基褥垫层特性足尺模型试验研究与分析[D]. 南京: 河海大学, 2008. (TAN Hui-ming. Full scale model test and analyses on characteristics of cushion[D]. Nanjing: Hohai University, 2008 (in Chinese))
- [51] 费 康. 现浇混凝土薄壁管桩的理论与实践[D]. 南京: 河海大学, 2004. (FEI Kang. Theory and practice of thin-wall pipe pile using cast-in-situ concrete[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [52] 丁选明. PCC 桩纵向振动响应试验与解析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (DING Xuan-ming. Test study and analytic method research on vertical vibratory response of cast-in-situ concrete large-diameter pipe pile[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [53] 温世清. 现浇混凝土薄壁管桩加固软基机理和沉降计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (WEN Shi-qing. Study on the mechanism and settlement computation method of the cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile composite foundation[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- Chinese))
- [54] 刘汉龙, 张晓健. 负摩擦作用下 PCC 桩沉降计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1483 - 1486. (LIU Han-long, ZHANG Xiao-jian. Calculation of settlement of PCC pile subjected to negative skin friction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1483 - 1486. (in Chinese))
- [55] LIU Han-long, FEI Kang, DENG An, et al. Erective sea embankment with PCC piles[J]. China Ocean Engineering, 2005, 19(2): 339 - 348
- [56] 陆海源. 新型 PCC 桩结构直立式海堤技术开发及其抗弯性能研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (LU Hai-yuan. Development of new type of erect dike of cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile and study on the moment resistance of the dike[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [57] DING Xuan-ming, LIU Han-long, LIU Jin-yuan, et al. Wave propagation in a pipe pile for low strain integrity testing[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2011.
- [58] DING Xuan-ming, LIU Han-long, ZHANG Bo. High-frequency interference in low strain integrity testing of large-diameter pipe piles[J]. Science China (Technological Sciences), 2011, 54(2): 420 - 430.
- [59] 刘汉龙, 马晓辉, 储海岩, 等. 用于软基处治的套管成模大直径现浇管桩机: 中国, ZL01273182.X[P]. 2002-10-09. (LIU Han-long, MA Xiao-hui, CHU Hai-yan, et al. Casing mould pile machine of large-diameter cast-in-place concrete pipe pile used for soft ground treatment: China, ZL01273182.X[P]. 2002-10-9. (in Chinese))
- [60] 刘汉龙, 马晓辉, 宫能和, 等. 现浇混凝土薄壁管桩机: 中国, ZL02263293.X[P]. 2003-07-16. (LIU Han-long, MA Xiao-hui, GONG Neng-he, et al. Pile machine of cast-in-place concrete thin-wall pipe pile: China, ZL02263293.X[P]. 2003-07-16. (in Chinese))
- [61] 刘汉龙, 费 康, 马晓辉. 提高现浇混凝土薄壁管桩承载力的灌浆装置: 中国, ZL200420078136.6[P]. 2005-08-03. (LIU Han-long, FEI Kang, MA Xiao-hui. Grouting device to improve the bearing capacity of cast-in-place concrete thin-wall pipe pile: China, ZL200420078136.6[P]. 2005-08-03. (in Chinese))
- [62] 刘汉龙, 高玉峰. 一种螺旋成孔大直径现浇混凝土薄壁管桩机: 中国, ZL200520054396.1[P]. 2007-02-14. (LIU Han-long, GAO Yu-feng. A twist drilling pile machine of large-diameter cast-in-place concrete thin-wall pipe pile: China, ZL200520054396.1[P]. 2007-02-14. (in Chinese))

- [63] 一种 PCC 桩桩模及超长 PCC 桩的施工方法: 中国, ZL200910183526.7[P]. 2011-01-19. (A PCC pile mould and the construction method of super-long PCC pile: China, ZL200910183526.7[P]. 2011-01-19. (in Chinese))
- [64] 刘芝平, 丰土根, 张亚东. 现浇薄壁管桩技术在市政道路软基加固中应用[J]. 河海大学学报, 2003, 31(3): 324 - 327. (LIU Zhi-ping, FENG Tu-gen, ZHANG Ya-dong. Application of cast-in-place thin-wall concrete pipe piles to stabilization of soft foundation of municipal roads[J]. Jouranl of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(3): 324 - 327. (in Chinese))
- [65] 周云东, 刘汉龙, 李明生, 等. 现浇薄壁管桩在威—乌高速公路软基加固中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1671 - 1674. (ZHOU Yun-dong, LIU Han-long, LI Ming-sheng. Application of cast-in-place thin-wall concrete piles to Wei-Wu highway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1671 - 1674. (in Chinese))
- [66] 周云东, 彭 贵, 刘汉龙, 等. 现浇薄壁管桩 (PCC) 复合地基荷载变形特性[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 238 - 240. (ZHOU Yun-dong, PENG Gui, LIU Han-long. Bearing capacity and deformation characteristic of a composite foundation with cast-in-place thin-wall concrete piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S0): 238 - 240. (in Chinese))
- [67] 杨寿松, 刘汉龙, 周云东, 等. 薄壁管桩在高速公路软基处理中的应用[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 750 - 755. (YANG Shou-song, LIU Han-long, ZHOU Yun-dong, et al. Application of cast-in-situ concrete thin-wall pipe piles in soft soil improvement of expressways[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 750 - 755. (in Chinese))
- [68] 杨寿松. 现浇混凝土薄壁管桩复合地基现场试验研究[D]. 南京: 河海大学. 2005. (YANG Shou-song. Field study on the cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile composite foundation[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [69] 张 波. 现浇混凝土薄壁管桩复合地基桩土应力比及荷载传递特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZHANG Bo. Study on pile-soil stress ratio and load transfer characteristics of cast-in-situ concrete thin wall pipe pile composite foundation[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [70] 王振芳. 路堤下 PCC 桩复合地基群桩作用性状研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (WANG Zhen-fang. Study on group effect of cast-in-situ concrete thin wall pipe pile composite foundation under road embankment[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))