

湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划

项 目 结 题 报 告

项目名称: 土岩组合基坑微型支护桩型钢回收试验研究

项目编号: H1619

学生姓名 吴家伟、张非、孙英韬、常珂、李苏哲

所在学校和院系: 湖南工学院/建筑工程与艺术设计学院

项目实施时间: 2016-2019 年

指导教师: 谷淡平、庞朝晖

联系电话: 13607343336

填表日期: 2019 年 3 月 25 日

湖南省教育厅
2018 年制

一、基本情况

项目名称		土岩组合基坑微型支护桩型钢回收试验研究				
立项时间		2016 年 12 月		完成时间	2019 年 3 月	
项目 主要 研究 人员	序号	姓 名	学号	专业班级	所在学院	项目中的 分 工
	1	吴家伟	1400440121	土木 1401	建工学院	方案设计
	2	张 非	1400440122	土木 1401	建工学院	数据分析
	3	孙英韬	1400440112	土木 1401	建工学院	实验操作
	4	常 珂	1400440102	土木 1401	建工学院	材料购买等
	5	李苏哲	1300440312	土木 1303	建工学院	实验操作

二、研究成果简介

1. 研究目的及其意义

微型支护桩施工方便，施工设备简单，但配筋率较大，钢筋消耗量大。支护体系为临时结构，大配筋率限制了微型桩的发展与应用，支护筋材残留土中对土体环境也是一种破坏。同时，钢筋耗材的增大与当前节能减排的基本国策不符，回收微型桩中的型钢有助于微型桩支护体系的推广与应用，其与我国可持续发展战略是一致的。

课题通过试验测试、理论分析和数值模拟相结合的研究方法对土岩组合基坑微型支护桩型钢回收技术进行了系列研究，研究的主要意义概括为以下两个方面：

理论意义：通过试验研究，对土岩组合基坑微型桩支护体系中型钢起拔过程进行研究，深入分析起拔机理，为改进和完善起拔技术提供理论支撑。

工程意义：在遵从起拔机理的基础上，对现有的起拔技术进行改进，推广型钢回收的应用。

2. 研究内容

本研究是以国内外现有的研究为基础，结合本地区的工程实践，运用足尺寸的模型

试验、数值模拟和理论分析等手段研究回收微型桩型钢的可行性；运用摩擦理论和弹性理论对回收型钢起拔力进行预测，并得出起拔力初步计算公式的公式；同时对比试验和数值模拟结果分析得出微型桩型钢拔出机理和影响起拔力的主要因素，为微型桩型钢回收的推广和研究积累相关的试验数据。

3. 重要观点

(1) 试验完成了型钢的回收，论证了型钢微型桩的型钢回收的可行性，型钢回收大大减少了支护桩的用钢量，支护结构的费用降低约 25%。

(2) 通过实测得出了影响型钢起拔力的主要因素有：型钢周边注浆体的抗剪强度、桩周的土压力、型钢是否涂抹减摩剂。

(3) 通过试验得出了完整的型钢微型桩型钢起拔过程，如图 1 所示，在此基础上对型钢起拔机理分析如下：

第一阶段：初期阶段，型钢起拔力与型钢位移成比例增加，这说明型钢和水泥土完全胶结。

第二阶段：起拔力大于 T_0 后，起拔力继续增加，型钢位移和起拔力成非线性关系，型钢和水泥土开始脱开。

第三阶段：起拔力达到 $T_{\max}$ 后，随着型钢的位移增加起拔力逐渐减小，型钢与水泥土最终完全脱开。

第四阶段：型钢和水泥土脱开后，型钢与水泥土之间主要阻力为摩阻力，摩阻力随着型钢的拔出而减小。

(4) 通过起拔实测结合土力学和摩擦学原理得出了，型钢微型桩型钢回收时的最大起拔力估算公式：

$$T_{\max} = \int_0^l u e_z \mu dz + c u l + G$$

式中： $T_{\max}$ 为最大起拔力； u 为型钢周长； l 为型钢长； e_z 为 z 深度处的静止土压力大小； μ 为摩擦系数； c 为桩土表面的粘结力； G 为型钢重力。

(5) 实测得出桩后主动土压力呈抛物线状分布，桩前被动土压力呈倒梯形分布，被动土压力在基坑失稳前始终未达到极限状态。

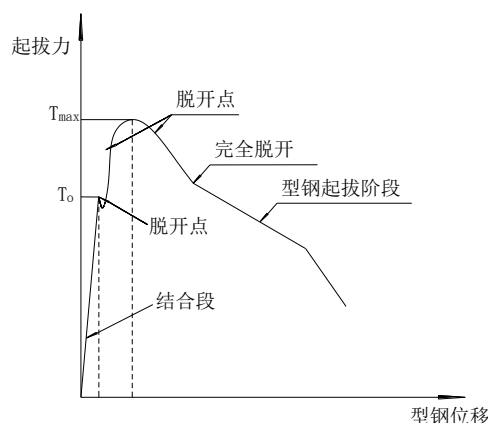


图 1 型钢起拔力与位移的关系

4. 项目的创新点和特色

(1) 支护体系支护桩钢材的消耗占主要部分，从低耗节能的角度出发，首次结合湘南地区型钢微型桩工程实践情况，提出了土岩组合基坑微型支护桩的型钢回收再利用。

(2) 通过试验验证、数值模拟和对比研究的方法，对微型桩注浆体、减摩剂、桩身变形等影响型钢回收起拔力的主要因素进行分析。

(3) 引入摩擦学原理和弹性理论对型钢起拔过程进行分析，得出型钢起拔力理论值，推导型钢回收所需起拔力简化计算公式，并结合试验实测与数值模拟结果，分析阐明型钢拔出机理。

(4) 实测得出桩周主动土压力呈抛物线状分布，被动土压力呈倒梯形分布。

5. 实践意义和社会影响

(1) 通过本次研究性学习和创新性实验提高了课题组同学科研水平和科研素质，对培养科研创新人才意义重大。

(2) 在试验过程中，课题组成员需要查阅大量的研究材料，了解了本课题研究领域的研究现状，也掌握了相关的专业知识及其应用。

(3) 型钢回收减少了钢材消耗，这与当前节能减排的基本国策相符，回收微型桩中的型钢有助于微型桩支护体系的推广与应用，与我国可持续发展战略是一致的

(4) 试验研究为微型桩型钢回收的推广和研究积累相关的试验数据。

6. 研究成果和研究方法的特色

（1）研究成果

研究小组成员现已发表学术论文 5 篇：

[1] 凌同华, 谷淡平, 曹峰等. 软土地区型钢水泥土搅拌墙墙-土相互作用试验研究[J], 防灾减灾工程学报, 2018,3 (38): 409-418. (CSCD 核心库)

[2] 谷淡平, 黄阜, 庞朝晖. 案例教学法在应用型高校土力学与地基基础教学中的实践[J]. 大学教育, 2018, 98(08):105-107.

[3] 谷淡平, 庞朝晖..考虑空间效应的 SMW 工法水泥土承载比和墙顶位移分析[J], 湖南工学院学报, 2018.17(4):1-9.

[4] 谷淡平, 庞朝晖.考虑参数不确定性的台阶式边坡强度参数反演分析[J]. 铁道科学与工程学报, 拟录待发. (CSCD 核心库)

[5] 谷淡平, 黄阜, 易红卫, 唐斯.基于微课的翻转课堂教学模式在土力学与地基基础教学中的实践[J], 大学教育, 拟录待发.

（2）研究方法的特色

课题运用了试验研究、数值模拟和理论分析的相结合的研究手段，研究以试验为基础，再得出基础数据的基础上，通过数值模拟分析拓宽研究深度和广度，再引入相关理论对微型桩型钢回收的过程和起拔机理进行了系列研究。通过本项目的研究大大提高了研究小组的试验研究水平和综合运用理论知识解决实际问题的能力。

三、项目研究总结报告

1. 预定计划执行情况

本课题在申请立项时，一方面：对学校的试验条件预期较高，学校试验设备购置进度的延迟，使得试验的开展未能顺利进行；另一方面：试验的难度较大，经过多次试验，才取得了较好的试验结果，故本课题的研究进展缓慢，未能按期完成相关工作。最终，本课题在老师的指导和课题组成员的努力下完成了预定计划的工作要求，达到了预期的研究效果。

经过三年的研究，总体上完成了上述研究内容，但是由于在实际研究过程中产生了一些新的研究方法和思路，因此未能完全按照课题申报书上预定的研究方法和路线对研究目标进行分析。在预定研究目标以外也取得的一些研究成果：如实测得出主动土压力呈抛物线状分布，被动土压力呈倒梯形分布等。

原计划发表论文 1~2 篇，现发表论文 5 篇，其中见刊 3 篇，2 篇录用待刊，其中两篇为 CSCD 核心库论文，部分成果还在整理挖掘中。

2. 项目研究和实践情况

(1) 前期准备

①场地选择：考虑水电接入、器材搬运等，模型试验场地初步选择在湖南工学院结构实验室北面空地。

②模型相似比例确定：相似常数越大，土体的受力变形规律越接近原型，试验结果的准确性越高。综合考虑试验的精度、制作模型的工作量、经济指标、模型材料、实验室现有的模型试验设备、测试技术和试验技术等因素，模型确定的几何比尺约为现实常见尺寸的 1/5，比尺较大，型钢入土量初定为 3m。

③试验材料准备：型钢（3600mm×40mm×20mm×2mm）、应变片（1/4 桥）、减摩剂、502 胶、AB 胶、云石胶、硅酸盐水泥等。

④试验设备准备：设备来源主要为湖南工学院结构试验室设备，本次试验主要设备包括：WAW-600 型万能试验机、PLD-2000 伺服结构试验系统、YA-2000 型压力机、SC-100 岩石钻孔取样机、SCQ-4A 岩石切割机、SCM-200 双端面磨平机、WG-5 固结仪、TSW-40 真三轴试验系统、YE2538 程控静态应变仪、DH3816 多测点静态应变测试系统、YH0720 振弦式土压力盒、YH6406 土压力采集仪、YCW100E 液压千斤顶、BHR-EB 负荷传感器等。

⑤场地土体和岩土物理力学性质试验，主要包括：岩（土）密度试验、土工三轴试

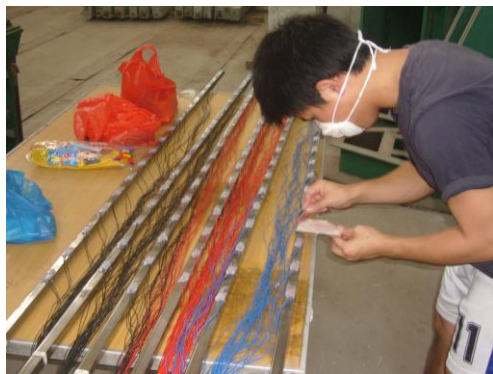
验、土的固结试验、岩（土）的比重试验、土的界限含水率、岩石单轴抗压强度试验、岩石单轴压缩变形试验、岩石的抗剪试验等。

试验桩周土层参数：粘聚力 $c=15\text{ kPa}$ 、内摩擦角 $\varphi=14.0^\circ$ 、塑性指数 $I_p=15$ 、液性指数 $I_L=0.65$ 、初始孔隙比 $e_0=0.72$ 、颗粒比重 $d_r=2.75$ 、重度 $\gamma=1.85\text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、含水量 $w=21\%$ 、

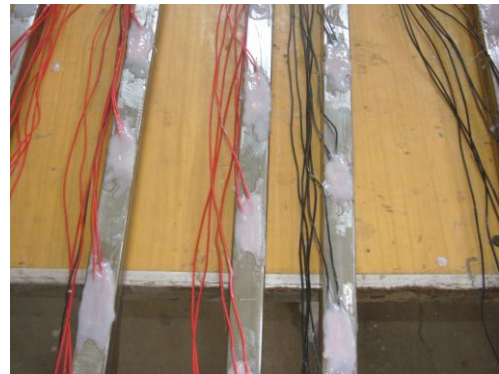
水泥土主要强度指标：抗压强度 $f_{cs}=1.56\text{ MPa}$ ，抗剪强度 $c_s=360\text{ kPa}$ 、 $\varphi_s=23^\circ$ ，弹性模量 $E_w=200\text{ MPa}$ ， $\gamma_s=2.0\text{ N cm}^{-3}$ 泊松比 $\nu=0.28$ 。

（2）模型试验主要试验数据测试

①型钢轴向应变测量：微型桩型钢的应变采用应变片测量（见图 2），应变片经过打磨型钢表面-粘应变片-焊端子及导线-刷防水层四道工序黏贴于型钢表面或内侧，试验选择采用 BE120—3AA 型电阻应变片，该片桥路为 1/4 桥，应变的采集系统为 DH3816 多测点静态应变测试系统。应变片的桥路为 1/4 桥，需布置补偿片，补偿片应该不止在稳定土体。试验设计型钢长为 3.6m，其中 3m 入土，0.6m 露出地面用于起拔，应变片从桩底 5cm 起，隔 150mm 贴一个片，每根型钢均共贴 19 个片，根据试验需要初步确定共布置 6 根桩。



（a）应变片黏贴



（b）应变片防潮



（c）型钢桩布置



（d）型钢桩测试

图 2 模型试验过程

②型钢回收起拔力测量

起拔力大小是试验的关键，为了减小起拔力，型钢埋设前需在型钢表面涂刷减摩剂。型钢通过 YCW100E 液压千斤顶起拔回收（见图 2），起拔时在千斤顶端头布置 BHR-EB 负荷传感器测量起拔力，该传感器为应变传感器需通过 YE2538 程控静态应变仪读取受压应变值，然后反算得出起拔力大小和变化。试验前应对千斤顶、负荷传感器进行标定。

③微型桩周土压力测量

土压力是支护结构所受外荷载，土压力盒布置在微型桩注浆体和土体之间（见图 3），土压力盒从桩底开始，每隔 30cm，布置土压力盒一个，主要测试起拔前、起拔时、起拔后的土压力值。土压力采用 YH0720 振弦式土压力盒测量，通过 YH6406 土压力采集仪读取土压力值。

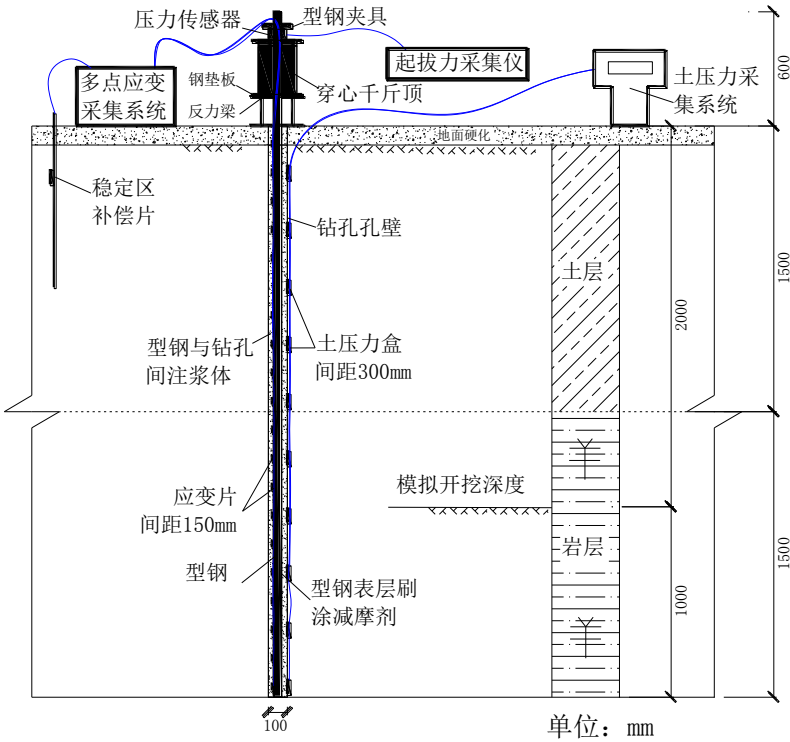


图 3 模型试验示意简图

(3) 数值模拟分析

①本次数值模拟选用 ABAQUS 软件进行有限元分析。通过数值分析对可能影响型钢起拔力的因素包含：摩擦系数、型钢变形、微型桩周土压力、注浆体强度、注浆体截面积、起拔速度、基坑回填后时间及千斤顶压力等分别进行分析比较，量化了影响因素大小，并联系实测数据深入地分析型钢表面摩阻力的差异，优化型钢起拔力简化公式，得出型钢起拔机理。

②本构模型选用和模型简化: 数值模型中岩土体分别采用 Duncan-Chang 本构模型和修正剑桥模型进行对比分析, 型钢与注浆体接触分别采用选用硬接触和粘性接触进行对比处理, 注浆体采用线性弹性模型进行分析, 不考虑地下水的影响。

③分析流程: 首先, 借助 ABAQUS/Pre 前处理器, 建造模型和网格划分, 如图 4 所示。其次, 通过 ABAQUS/Standard, 对分析任务进行提交、监视和控制, 实现问题的分析。最后, 借助 ABAQUS/Post 后处理器, 通过可视化模块 (Visualization) 对计算结果显示分析。

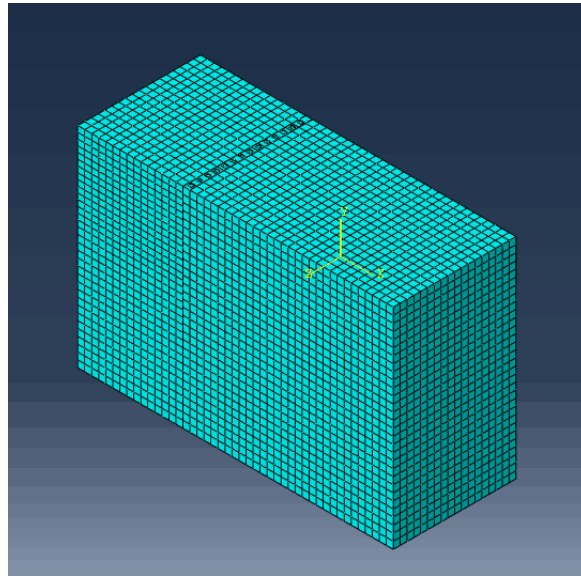


图 4 数值模型网格划分图

(4) 理论分析

型钢起拔过程是一个复杂的摩擦过程, 不仅体现了摩擦复杂系统的基本特征, 而且包含着复杂的摩擦特性, 针对型钢起拔过程参考 SMW 工法的研究成果运用摩擦学原理深入分析起拔机理和影响起拔力的因素等, 并假定型钢起拔时型钢和桩周注浆体为弹性体运用弹性力学原理推导得出起拔力的理论计算公式。

通过起拔实测结合土力学和摩擦学原理得出了, 型钢微型桩型钢回收时的最大起拔力估算公式:

$$T_{\max} = \int_0^l u e_z \mu dz + c u l + G \quad (1)$$

式中: $T_{\max}$ 为最大起拔力; u 为型钢周长; l 为型钢长; e_z 为 z 深度处的静止土压力大小; μ 为摩擦系数; c 为桩土表面的粘结力; G 为型钢重力。

3. 主要成绩和收获

(1) 通过本次研究性学习和创新性实验提高了课题组同学科研水平和科研素质，试验过程中，课题组成员需要查阅大量的研究材料，了解了本课题研究领域的研究现状，也掌握了相关的专业知识及其应用。

(2) 通过试验研究发现型钢微型桩具有较好的支护能力，能广泛的用于土岩组合基坑，在本地区有很好的应用前景，试验完成了型钢的回收，论证了型钢微型桩的型钢回收的可能性，型钢回收大大减少了支护桩的用钢量，支护结构的费用大大降低。

(3) 通过实测得出了影响型钢起拔力的主要因素有：型钢周边注浆体的抗剪强度、桩周的土压力、型钢是否涂抹减摩剂。

(4) 通过试验得出了型钢微型桩型钢起拔机理：

第一阶段：型钢起拔初期，型钢起拔力与型钢位移的成比例增加，这说明型钢和水泥土完全胶结，如图 1 所示。

第二阶段：起拔力大于 T_0 后，随着型钢拔出，起拔力继续增加，型钢和水泥土开始脱开，型钢位移和起拔力成非线性关系。

第三阶段：起拔力达到 $T_{\max}$ 峰值后，随着型钢的位移增加起拔力逐渐减小，型钢与水泥土最终完全脱开。

第四阶段：型钢和水泥土脱开后，型钢与水泥土之间主要阻力为摩阻力，摩阻力随着型钢的拔出而减小，整个型钢的起拔过程与 SMW 工法中型钢的拔出非常类似，型钢起拔力一位移的关系曲线，如图 1 所示。

(5) 通过起拔实测结合土力学和摩擦学原理得出了型钢微型桩中型钢回收时的最大起拔力估算公式。

(6) 实测得出桩后主动土压力呈抛物线状分布，大小间于 Rankine 主动土压力和静止土压力之间，桩体位移达 $0.18\%h$ 时，桩背主动土压力发展为极限主动土压力。

(7) 试验测微型桩周的被动土压力呈倒梯形分布，被动土压力在基坑失稳前始终未达到极限状态，建议被动土压力取朗肯被动土压力理论值的 $1/4 \sim 1/3$ 。

(8) 通过课题研究，课题组成员发表论文 5 余篇，超过了预期成果。

4. 研究工作不足之处

(1) 有限元模拟时桩土界面的模拟难以找到合理界面模型，桩土界面模拟需要根据实测进行二次开发。

- (2) 模型试验为缩尺试验，试验尺寸效应较大，试验与实际工程存在一定的出入。
- (3) 试验场地地质条件与工程实际存在差别，应对不同工程地质情况进行验证。
- (4) 模拟支护桩与实际受力过程不同，无法了解工程中水平受荷变形对的支护桩型钢回收起拔力的影响。

5. 下一步研究工作建议

- (1) 加强研究成果的应用实践研究，开展现场试验研究；
- (2) 对有限元计算理论进行深入学习，尤其对计算机有限元模拟软件和其二次开发进行重点攻关研究；
- (3) 加强弹性力学和土力学方面理论知识学习，为解决今后工作中遇到的实际问题提供理论支撑。

四、经费使用情况

经费合计 16000 元，其中，学校资助 16000 元，其他经费 0 元。	
经费支出情况：	
支出项目	预算金额
设备费	5000 元
能源费	1000 元
材料费	6000 元
试验模型制作加工费	1000 元
试验外协费	1000 元
差旅费	1000 元
管理费	600 元
其他相关费用（打印等）	400 元
合计	16000 元

五、指导教师及学院审核意见

项目指导教师对结题的意见，包括对项目研究工作和研究成果的评价等。

同意结题，学生研究热情高，工作很认真，试验方案设计合理性，通过试验研究了型钢微型桩中型钢回收的可行性，得出了型钢起拔机理，并结合力学原理推导了型钢起拔力的理论计算公式，研究方法合理，结果正确，试验研究基本达到预期的目的，成果具有一定的工程应用价值和研究价值。

负责人签章：

年 月 日

项目主持人所在学院对结题的意见，包括对项目研究工作和研究成果的评价等

负责人签章：

年 月 日

六、学校结题审核意见

学校对项目研究的任务、目标、方法和研究成果水平等进行评价，是否结题。

年 月 日

