

全回收的基坑围护体系 (RESS) 研究

张继红^{1, 2}

(1. 上海地固岩土工程有限公司, 上海 200092, 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 以笔者近年来在环境岩土工程与基坑工程交叉领域提出的 15 项专利与专有技术为基础, 介绍了全回收基坑围护体系主要构成要素, 包括可回收的竖向围护结构与可回收的水平承载结构两大部分。其中可回收的竖向围护结构可采用 WSP 桩, 可回收的水平承载结构可以是内支撑体系, 也可以是可回收的锚杆体系。详细介绍了 WSP 桩与可回收的复合锚杆之结构构造、工作原理、回收工艺。在此基础上研究了全回收基坑围护体系的经济适用性。指出全回收的基坑围护体系适用于多种地质条件与各种深度基坑。在节约基坑围护造价的同时, 可消除基坑围护结构在土体中的残留, 具有十分可观的经济效益、环境效益与广阔的应用前景。可供基坑工程中相关的设计、施工、建设、管理单位参考使用。

关键词: 基坑; WSP 桩; 可回收的复合锚杆; 全回收围护体系

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0287-05

作者简介: 张继红(1975-), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程与环境岩土工程领域的科研、咨询、设计与施工工作。E-mail: digusky@163.com。

Recycling excavation support system (RESS) for foundation pits

ZHANG Ji-hong^{1, 2}

(1. Shanghai Geo-anchor Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the fifteen patents in environmental geotechnical engineering and excavation engineering proposed by the author in recent years, the main elements of the recycling support system for foundation pits, are introduced including recycling retaining wall and recycling horizontal bearing structure. The recycling retaining wall can be the waterproofing steel precast piles (WSP), and the recycling horizontal bearing structure can be struts or recycling composite anchors (RCA). The construction, working principle and recycling process of the WSP and the RCA are introduced. The economic applicability of the recycling support system is discussed. The results show that this kind of support system is applicable to various soils and deep foundation pits. It is of economic and environmental benefits. The outcomes can be used by the designers, constructors, investors, management units in excavation engineering.

Key words: excavation; WSP; recycling composite anchor; recycling support system

0 引言

经过长期的科研、设计、咨询与施工实践, 笔者认为环境岩土工程是指在人类的工程建设活动中, 为了美化或保护环境而采取的针对岩土介质的工程活动。在可预见的将来, 环境岩土工程包括岩土体中废弃物的回收与再利用、地下污染物的控制、地下水土资源的保护与岩土介质环境美化四部分主要内容。基坑围护工程是指为了确保基坑与基坑周边环境的安全与正常使用而对基坑周边的水土进行支挡隔断的临时性工程。

近些年来, 国内各地的基坑围护工程量日益增加, 积累了大量的基坑工程设计施工经验。同时基坑工程

建设的投入亦与日剧增, 部分区域基坑围护在日趋保守的同时, 基坑工程事故频发, 基坑的安全问题已引起行业界与管理部门的高度重视。

在环境问题逐步引起国人重视, 举国上下力推节能减排的今天, 岩土工程师应考量基坑围护这一临时性工程的能耗与炭排放, 须关注基坑围护工程完成后废弃物的去留与岩土环境保护。这也正在逐步引起相关部门与行业的重视。继上海之后, 苏州、无锡、台州、昆明等诸多城市制定了围护结构临时超越用地红线需回收高强度固体残留物的相关规定。

为了推进基坑围护工程节能减排, 保护岩土环境, 笔者经过长期潜心研究, 提出了全回收的基坑围护体系 (RESS)。全回收的基坑围护体系包括可回收的竖向围护结构与可回收的水平承载结构两大部分, 笔者研制的预制隔水桩 (即 WSP 桩) 系列技术, 安全可靠、施工便利快速、造价低, 且可回收再利用, 可作基坑的竖向围护结构。笔者研发的可回收的复合锚杆系列技术可作为基坑围护的水平承载结构。当然, 目前采用的钢支撑与钢筋混凝土支撑亦可作为水平承载结构。全回收基坑围护体系的核心在于: 基坑回填后, 可回收基坑围护结构, 做到岩土体中无残留, 在节约造价的同时, 保护岩土环境。下文主要介绍 WSP 桩与可回收的复合锚杆之结构构造、工作与回收机理, 进而研究其经济适用性。

1 可回收的 WSP 围护桩^[1]

竖向围护结构是基坑围护结构的重要组成部分之一, 目前常用的竖向围护结构主要有钻孔灌注桩加隔水的水泥土桩、地下连续墙、钢板桩、SMW 工法桩四大类。其中, 前两类为现场浇筑而形成的以钢筋混凝土为主的桩 (墙) 体, 耗材、耗能多, 造价较高, 容易因现场施工质量控制问题产生安全隐患。钢板桩与 SMW 工法桩一般在施工完成后拔出其中的钢材, 围护桩 (墙) 的主要材料可循环使用, 因此相对耗材、耗能较小, 属于较经济环保的围护桩 (墙) 形式。但是, 钢板桩之间的搭接无法满足较严格的隔水要求, 当基坑挖深较深时, 钢板桩往往漏水严重, 加之钢板桩刚度较低, 限制其推广应用。SMW 工法桩为了解决挡土隔水问题, 需在受力构件 (即 H 型钢) 之间施工水泥土桩局部挡土并隔水。但当基坑较深时, 水泥土桩受力开裂, 可能导致隔水失效, 加之水泥土不可回收, 有一定的材料消耗, 因此造价仍然较高, 应用受到限制。基坑围护是一类临时性的工程, 在基坑回填后即完成工程的所有使用价值。因此, 采用可回收的预制构件 (如抗弯抗剪性能好的 H 型钢) 进行围护, 可节材、节能, 大幅度降低工程造价, 且施工质量易控制, 具备广阔的发展前景。预制构件连接处的隔水问题是制约其发展的瓶颈, 也是国内外岩土工程领域中的一项空白。

1.1 WSP 桩结构构造

张继红研发了预制隔水桩 (WSP 桩)^[1], 其构造包括预制桩体、隔水空腔与隔水连接 3 部分, WSP 桩的构造如图 1 所示。

WSP 桩是基坑围护工程领域中的一种预制隔水桩, 其构造包括预制桩体、隔水空腔与隔水连接 3 部

分, WSP 桩的构造如图 1 所示。

可根据工程需要, 选用不同尺寸的 H 型钢、槽钢、钢板桩、钢管桩等作为预制桩体, 也可以根据工程需要选择多种形状与结构的隔水空腔。本文列举了部分可供选用的预制桩体及隔水连接如图 2 所示。

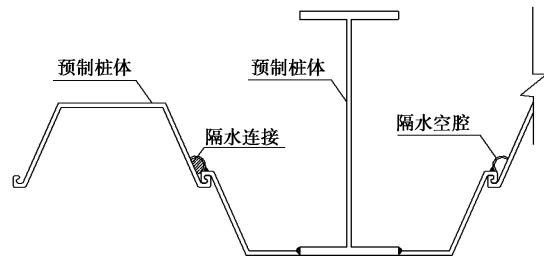


图 1 WSP 桩构造示意图

Fig. 1 Construction of WSP

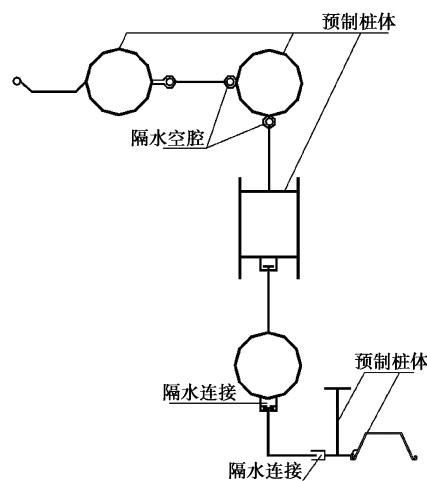


图 2 WSP 桩结构形式示意图

Fig. 2 Types of WSP

1.2 WSP 桩工作机理

可根据工程需求不同, 设置相适应的隔水连接。隔水连接可设置为可回收的材料, 在相邻的预制桩体施工完成后, 向隔水空腔内充填可回收的止水材料作为隔水连接。在基坑围护期间, 各根预制桩体通过隔水连接成为一整体围护墙, 既可挡土, 亦可有效止水, 形成安全可靠的竖向围护结构。基坑回填后, 拔出预制桩体前, 将隔水连接解除, 便可逐根拔出预制桩体。

1.3 WSP 桩设计方法

WSP 桩设计主要内容包括以下 3 项:

- (1) 桩长设计: 主要根据基坑挖深、工程地质条件, 计算 WSP 桩的桩长、入土深度。
- (2) 截面与间距设计: 结合水平承载体系的布置, 计算 WSP 桩的弯矩、剪力、位移, 根据内力与变形计算成果, 选定预制桩体的截面、间距。
- (3) 隔水连接设计: 结合施工工艺要求, 设计隔

水连接的布置与可回收隔水结构。

1.4 WSP 桩优缺点

与现有基坑围护桩(墙)相比, WSP 桩有以下优越性:

(1) WSP 桩是全回收的基坑竖向围护结构, 因可全回收再利用, 因此能耗低、造价低, 使用后土中无残留, 环境效益显著。

(2) WSP 桩可根据需要选择所需的强度、刚度, 选用大截面的 H 型钢等各种尺寸的预制桩体作为围护墙, 桩体的强度、刚度可满足任意深度基坑围护需要, 适用范围广。

(3) WSP 桩隔水性能安全可靠。WSP 桩采用可回收的连接材料将相邻预制桩体连接为整体围护墙, 适用基坑深度大。WSP 桩的隔水性能具备自修复特性, 即使出现漏水问题, WSP 桩的隔水连接可自行修补漏点。另外, 在 WSP 桩隔水连接施工时, 可对隔水空腔的性状进行检验, 确保隔水连接安全可靠。

(4) WSP 桩为预制桩体的组合。因此, 施工质量可控, 可避免基坑竖向围护结构施工时的偷工减料现象, 施工方便, 工艺简单, 速度快, 工期短。

WSP 桩在具备上述优点的同时, 在使用时应考虑预制桩体插拔施工时拖带沉降的影响。对挖深较深的基坑, 设计时应有效控制预制桩体的稳定性, 可采用张继红提出的稳定控制结构, 当 WSP 桩较长时, 可采用张继红提出的简单可靠的接头^[2-3]。

2 可回收的复合锚杆

全回收基坑围护体系的水平承载结构可以选用内支撑体系, 在换撑后可将支撑拆除并再利用, 在文中不再赘述。目前, 地下空间开发的规模日益扩大, 基坑的挖深与面积均大幅度增加。当基坑面积较大时, 采用内支撑体系, 造价十分昂贵, 施工周期长。下文重点介绍可回收的复合锚杆, 以节约工程造价, 保护岩土环境, 降低基坑围护能耗。

2.1 锚杆应用于基坑围护的障碍

对于基坑围护工程, 使用锚杆代替内支撑体系, 在造价节省、工期节约方面的优势众所皆知。但锚杆应用往往受到很大的限制, 主要体现在以下 3 方面:

(1) 在软土地区, 由于土体强度低, 锚杆承载力低使锚杆应用受到很大限制。

(2) 在软土地区, 锚杆成型难是限制锚杆应用的另一关键因素。在软土地区, 锚杆成型难主要体现在成孔难与对心难两大问题。软土地区成孔难使得钻孔灌注锚杆难以应用。近年来出现了倾斜施工的高压旋喷桩内插入钢筋或钢绞线而形成的锚杆形式。由于锚

杆周围土体强度低, 杆体难以与高压旋喷桩对心, 有的可能插入土体中, 导致锚杆承载力不稳定。

(3) 锚杆地下超红线是限制锚杆应用的另一障碍。由于锚杆使用后往往在邻近区域遗留杆体, 造成邻近场地地下空间开发困难, 在很大程度上限制了锚杆的应用。为了实现杆体的回收, 现有可回收的锚杆主要有各种通过机械螺纹连接的锚杆、U 型可拆卸锚杆等施工工艺。对于第一类可回收的锚杆, 当锚杆较长时, 难以实现回收的目。第二类可回收锚杆是 U 型可拆卸锚杆, 该技术是将高强钢绞线弯成 U 形, 然后将 U 型钢绞线放置于锚杆钻孔内, U 型钢绞线与锚固体不黏结, 使用完成后通过释放 U 型钢绞线的一端, 并在另一端施加拉力, 将钢绞线强行拉出回收。该技术虽已出现多年, 单因承载力低, 至今仍难以推广。

锚杆在基坑围护应用中的 3 大障碍如图 3 所示。

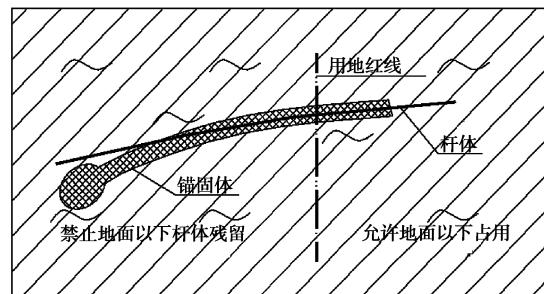


图 3 锚杆应用于基坑围护的三大障碍示意图

Fig. 3 Barriers of anchors in excavation engineering

2.2 可回收的复合锚杆构造

可回收的复合锚杆包括可回收的传力带、钢筋或钢绞线、中空通道与锚固体四部分组成。其中, 锚固体为与岩土体连接提供抗拔承载力的部位。钢筋或钢绞线为通过可回收的传力带与锚固体牢固连接传递锚杆抗拔承载力的结构。可回收的传力带为在锚固段包裹在钢筋或钢绞线外围的且可回收的结构。中空通道为设置于传力带内部沿着钢筋或钢绞线方向贯通的孔道。锚固体可以是水泥土搅拌桩、旋喷桩, 也可以是水泥砂浆等灌注形成的结构。可回收的复合锚杆结构构造如图 4 与图 5 所示。

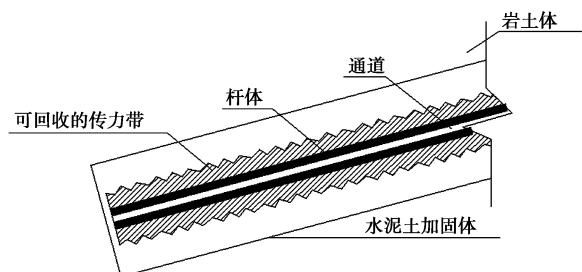


图 4 可回收的复合锚杆纵剖面图

Fig. 4 Longitudinal section of RCA

2.3 可回收的复合锚杆施工方法

可回收的复合锚杆施工方法包括以下步骤：①确定锚杆位置；②用可回收的传力带将钢筋或钢绞线在锚固段位置与锚固体接触处包裹，并设置中空通道，制造可回收的复合锚杆杆体；③在锚杆位置施工锚固体；④在上述步骤③中施工的锚固体凝固前将上述步骤②中制造的复合锚杆杆体插入其中；⑤锁定锚杆，进入锚杆使用期；⑥待锚杆使用结束后，解除上述步骤⑤中对锚杆的锁定；⑦通过上述步骤②中制造的中空通道，使可回收的传力带与钢筋或钢绞线之间的连接强度降低；⑧拔出钢筋或钢绞线及设置于可回收的复合锚杆中其他可回收构件，完成可回收的复合锚杆的安装与回收施工。

2.4 可回收的复合锚杆特点

根据张继红在复合锚杆领域提出的专利技术^[4]，主要消除了锚杆在基坑围护应用中的上述3大障碍，具备如下的特点：

(1) 可回收的复合锚杆实现了使用后杆体的全回收，且在使用时，杆体与锚固体可全长黏结，锚杆承载力大，适于基坑围护中提供水平承载力。因可回收再利用，有利于岩土环境保护，能耗低。

(2) 在软土区域，通过复合锚杆技术研发，解决了普通锚杆承载力低、变形大的缺点，复合锚杆是软土地区经济适用的锚杆形式。

(3) 通过一次成型等施工工艺，解决了锚杆施工中对心难的难题，使锚杆施工质量稳定、可靠。

(4) 复合锚杆通过水泥土加固体充分挖掘了软土的潜力，通过水泥土加固体中的锚杆施工克服了水泥土与杆体之间连接强度低的缺陷。

3 经济适用性

全回收基坑围护体系，实现了基坑围护这一临时性工程固体残留物的回收再利用，达到了低炭、低能耗、无污染的良好环境效益。同时因工程构件可重复使用，工程造价低。可回收的锚杆使得部分基坑围护可不使用内支撑，节约支撑、挖土费用，并节约工期。

3.1 WSP桩与现有围护桩(墙)经济性比较

每米基坑围护周长WSP桩与现有围护桩(墙)在相同的插入深度，满足同等承载力与变形控制要求的前提下，并以合理可行的WSP桩租期为依据，各竖向围护结构造价概算比较可参照图5。

由图5可以看出，WSP桩较SMW工法桩节约造价约25%，较钻孔灌注桩可节约造价约25%~40%，较地下连续墙可节约造价35%~45%。与SMW工法桩相比，因在相邻H型钢之间设置可靠的钢板连接，

可适用于更深的基坑。较钻孔灌注桩，因可选用大截面的H型钢(如高1000的H型钢)，适用深度更深。与地下连续墙比较，成本节约明显，质量更易控制。

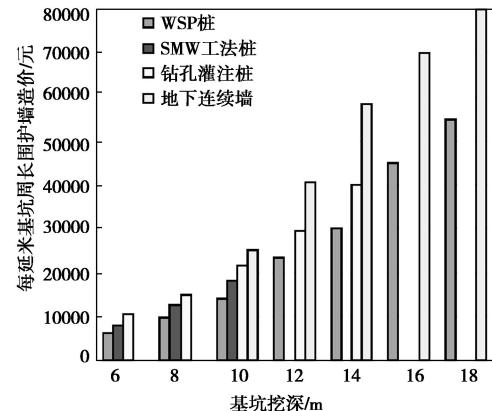


Fig. 5 Comparison of cost between WSP and other retaining walls

3.2 可回收的复合锚杆与内支撑体系经济性比较

可回收的复合锚杆与内支撑体系的造价与基坑的形状、面积密切相关。本文图6仅以正方形基坑为例，估算了内支撑体系与可回收的复合锚杆造价。

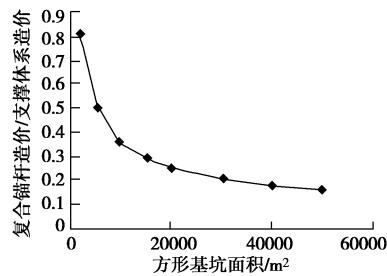


Fig. 6 Comparison of cost between RCA and struts

由图6可以看出，当基坑较小时，如对于面积2000 m²的小基坑，可回收的复合锚杆造价约为内支撑体系造价的80%。而随着基坑面积的增加，可回收复合锚杆的造价较内支撑体系快速减小。如对于10000 m²的基坑，可回收复合锚杆的造价约为内支撑体系造价的36%，对于50000 m²的基坑，可回收复合锚杆的造价约为内支撑体系造价的16%。

4 原型试验

下文主要复合锚杆承载力试验研究复合锚杆在软土地区的承载力^[5]。

试验场地属于上海地区典型的软土地层，试验主要影响土层为上海地区第②层粉质黏土与第④层淤泥质黏土层，该两层土的主要物理力学性指标见表1。

为了研究复合锚杆的承载性能，采用足尺试验研

究了复合锚杆的承载力, 试验锚杆的概况见表 2。

表 1 试验场地土层物理力学性质表

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

层序	土层名称	埋藏深度/m	孔隙比/e	含水率w/%	压缩模量E _s /MPa	直剪固快(标准值)	
						黏聚力c/MPa	内摩擦角φ/(°)
②	粉质黏土	3.5	0.92	36.0	4.60	22.0	20.0
④	淤泥质黏土	13.8	1.38	48.5	2.30	14.0	13.0

表 2 足尺复合锚杆试验概况表

Table 2 Principal characters of test anchors

施工时间	水泥土搅拌桩直径/mm	水泥掺入量/(kg·m ⁻³)	入土深度/m	锚杆钻孔直径/mm	试验时锚杆养护时间/d	杆体钢绞线情况
2010.11	700	150	11	200	>28	3Φ12.7

典型的复合锚杆的承载力基本试验 $Q-s$ 曲线如图 7 所示。

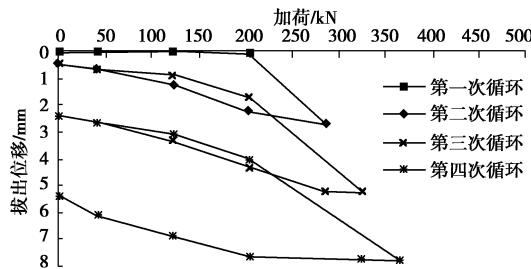


图 7 复合锚杆基本试验 $Q-s$ 曲线

Fig. 7 Test curves of RCA

图 7 中的复合锚杆试验承载力达到 365 kN。试验结束时, 水泥土搅拌桩出现破坏。

5 结 论

鉴于国内基坑围护工程的现状, 结合笔者近年来的研究与设计、施工实践, 本文较全面地论述了全回收基坑围护系统(RESS)、经济特征, 并得出如下的结论与建议:

(1) 在当前举国提倡节能减排的大形势下, 岩土工程师在基坑围护设计时应尽量减少能耗与炭排放,

须关注废弃物的去留与岩土环境保护。

(2) 全回收的基坑围护体系包括可回收的竖向围护结构与可回收的水平承载结构两部分。其中竖向围护结构可采用 WSP 桩实现, 水平承载结构可以是内支撑体系或可回收的复合锚杆(RCA)。

(3) WSP 桩较现有围护墙具有显著的经济优势, 选用时应考虑其插拔施工拖带沉降对周边环境的影响。

(4) 可回收的复合锚杆系列专利技术解决了目前锚杆在基坑围护中的主要障碍, 较内支撑体系可节约大量的工程成本与工期。

参考文献:

- [1] 张继红. 预制隔水桩(WSP 桩)及其插拔施工方法. 中国, 2012100571564[P]. 2012. (ZHANG Ji-hong. Waterproofing steel precast piles and its construction methods. China, 2012100571564[P]. 2012. (in Chinese))
- [2] 张继红. 一种基坑围护预制桩的稳定控制结构. 中国, 2012201066303[P]. 2012. (ZHANG Jihong. A kind of stability control structure of waterproofing steel precast piles. Chinese Patent. 2012201066303[P]. 2012. (in Chinese))
- [3] 张继红. 一种 WSP 桩止水接头. 中国, 2012201066854[P]. 2012. (ZHANG Ji-hong. A kind of adapter connector of waterproofing steel precast piles. China, 2012201066854[P]. 2012. (in Chinese))
- [4] 张继红. 一种复合锚杆及其施工方法. 中国, 201010295594.5[P]. 2010. (ZHANG Ji-hong. A kind of composite anchor and its construction methods. Chinese Patent. 201010295594.5[P]. 2010. (in Chinese))
- [5] 张继红, 陈文娟. 复合锚杆及其足尺试验研究[J]. 《建筑结构》, 2011(增刊): 1334-1336. (ZHANG Ji-hong, CHEN Wen-juan. Composite anchor and its full-scale test research[J]. Building Structure, 2011, 41(S1): 1334-1336. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)