

# 预应力低碳工法桩技术与基坑工程应用

余巍<sup>1</sup>, 刘松玉<sup>2, 3, \*</sup>, 朱明群<sup>2, 3</sup>, 王超<sup>1</sup>, 谷庆<sup>1</sup>, 刘义怀<sup>1</sup>, 潘宇翔<sup>2, 3</sup>

(1. 南京东大岩土工程勘察设计研究院有限公司, 江苏 南京 210018; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 211189; 3. 东南大学 江苏省低碳与绿色岩土工程重点实验室, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 近年来, 我国基坑工程建设规模空前, 面临巨大的材料消耗和渣土排放问题, 如何降低基坑工程造价、减少资源浪费是基坑工程领域面临的挑战。工法桩作为高效的基坑支护方式, 近年来得到新的发展与应用。本文提出了预应力低碳工法桩 (PMW) 技术, 该技术采用预成孔灌注流态固化渣土成桩, 再插入体外预应力 H 型钢, 通过施加预应力提高工法桩抵抗变形的能力。针对该新型工法桩技术, 开展了体外预应力 H 型钢的室内加载试验, 揭示了 PMW 的受力变形特性, 推导了 PMW 变形内力的理论计算公式, 并将该技术进行现场工程应用。结果表明, 随预应力的增加, H 型钢向作用力方向的变形显著减小, 甚至出现“0”变形, 预应力钢绞索轴力增长量与预应力无关; 现场应用效果表明, PMW 控制变形能力较强, 可减少或取消支撑, 大幅降低工程造价和施工工期, 并消纳工程渣土, 具有显著的低碳经济环保优势, 展现出广阔的应用前景。

**关键词:** 预应力; 流态固化土; 工法桩; 变形; 轴力; 基坑支护

**中图分类号:** TU473      **文献标识码:** A      **文章编号:**

**作者简介:** 余巍(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地下工程、地基处理等方面的研究工作。E-mail: 410629439@qq.com。

## Prestressed Mixing Wall Technology and Its Application in Excavation Engineering

YU Wei<sup>1</sup>, LIU Songyu<sup>2, 3, \*</sup>, ZHU Mingqun<sup>2, 3</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, GU Qing<sup>1</sup>, LIU Yihuai<sup>1</sup>, PAN Yuxiang<sup>2, 3</sup>

(1. Nanjing SEU Geotechnical Engineering Investigation and Design Research Institute Co.Ltd., Nanjing 210018, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Low Carbon and Sustainable Geotechnical Engineering, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** In recent years, excavation engineering in China has expanded at an unprecedented rate, posing significant challenges concerning excessive material consumption and muck disposal. Mitigating construction costs and minimizing resource wastage have emerged as critical concerns in this field. As an efficient foundation pit support technique, construction piles have experienced significant advancements and are increasingly utilized in engineering practice. This study introduces the Prestressed Mixing Wall (PMW) technology, which utilizes muck to form piles, followed by the insertion of externally prestressed H-shaped steel to enhance resistance to deformation. Laboratory loading tests were conducted on H-shaped steel sections to investigate the deformation behavior of PMW. Theoretical formulas were derived to quantify internal forces and deformations, and field applications were carried out to validate the technology's effectiveness. The results indicate that as prestress increases, the deformation of the H-shaped steel in the direction of the applied force is significantly reduced, even reaching a state of "zero" deformation, while the axial force increment in prestressed steel strands remains independent of the applied prestress. Field applications further validate the strong deformation control capability of PMW, allowing for the reduction or even elimination of additional support structures, which substantially reduces engineering costs and construction duration while facilitating the efficient utilization of muck. These advantages highlight its notable low-carbon, economic, and environmental benefits, underscoring its broad potential for widespread application.

**Key words:** prestressed; fluid solidified soil; construction pile; deformation; axial force; foundation pit support

## 0 引言

随着城市规模的不断扩大和城市土地供应的限制, 地表可用土地资源日趋紧张, 开发利用城市地下空间

成为必然的趋势<sup>[1]-[2]</sup>。近年来, 地下工程建设规模空前, 基坑工程的开挖规模和难度越来越大, 工法桩作为一种高效的支护方法, 在基坑工程中得到广泛应用。

2020 年中国明确提出了 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和的目标，而建筑工程建设碳排放量占比巨大<sup>[3]</sup>，严重影响生态环境。因此，开发低碳的工法桩技术极为必要，是响应国家双碳战略目标的重大需求。

工法桩也称为型钢水泥土搅拌墙，是一种在连续搭接的水泥土搅拌桩内插入 H 型钢形式的水泥土柱列式挡墙，其将承受荷载与防渗挡水结合起来，是同时具有受力与抗渗两种功能的支护结构的围护墙<sup>[4]</sup>。日本在 1972 年提出 SMW 工法 (Soil Mixing Wall)，并于 1977 年实现该技术在日本的首次商用<sup>[5]</sup>。SMW 工法在 90 年代引入欧洲、美国、新加坡和东南亚等国家，成为基坑工程中广泛应用的工法。此外，工法桩技术还包括 MJS 工法桩 (Metro Jet System)、PC 工法桩 (Pipe-Combination Pile) 和 TRD 工法桩 (Trench cutting Re-mixing Deep wall) 等。

众多学者针对工法桩技术进行了大量研究。楼春晖等<sup>[6]</sup>根据杭州深厚软黏土中采用 SMW 工法加钢筋混凝土内支撑作为围护体系的超长基坑实测数据，针对围护桩的变形进行系统分析。李爱地等<sup>[7]</sup>结合南京青奥线梅子洲过江通道接线工程，对深基坑 SMW 三轴搅拌桩围护结构进行了系统研究。Xian 等<sup>[8]</sup>在郑州某高层建筑深基坑工程中采用 SMW 桩，研究了砂土地区 SMW 桩的力学性能。Tu 等<sup>[9]</sup>以软土地区采用内环支护与 SMW 支护相结合的深基坑工程为背景，对开挖过程中支护结构、周边建筑、地下水位监测数据进行分析，研究了内环支护与 SMW 支护组合结构在开挖过程中的应力变形特性。徐晓兵等<sup>[10]</sup>针对 MJS 工法桩进行三组试桩，研究了护壁方法、喷浆时长和型钢插入准备时长对杭州典型粉土粉砂地层中 MJS 工法桩成桩质量的影响。姚志雄等<sup>[11]</sup>结合福州滨海首例 MJS 工法桩涉铁深厚软基加固工程，提出 MJS 工法桩软基加固施工工艺参数。Zhang<sup>[12]</sup>以西安某深基坑工程为基础，研究了地下连续墙的变形和相邻古建筑在有无 MJS 桩加固情况下的沉降变形。韦实等<sup>[13]</sup>通过 3D 打印技术制作钢管桩与钢板桩模型，开展 PC 工法桩组合围护结构的悬臂基坑开挖相似模型试验，探明了 PC 工法桩围护结构的受力变形特性以及承载机制。吴国明等<sup>[14]</sup>通过型钢等厚度水泥土搅拌墙施工技术 (TRD) 在南昌绿地中央广场的开发利用，系统介绍了该工法在复杂地层、嵌岩复合围护结构的施工工艺。谭轲等<sup>[15]</sup>选取上海典型软土地层，采用三维“m”法建立模型，对 TRD 工法型钢水泥土搅拌墙围护结构的承载和变形特性进行了分析和研

究。

现有 SWM 工法桩技术主要适用于较浅的基坑工程，往往需要水平支撑，施工工艺较复杂，消耗大量水泥，经济成本较高。为解决上述问题，本文提出了预应力低碳工法桩 (PMW) 技术，开展了不同外荷载和预应力条件下体外预应力 H 型钢的室内加载试验，揭示了 PMW 的变形与内力分布规律，给出了 PMW 的变形与内力计算方法，并成功应用于多项基坑工程实践。

## 1 PMW 原理

PMW 采用预成孔灌注流态固化渣土成桩 (墙)，再插入体外预应力 H 型钢，通过施加预应力，形成现场自稳式的支护结构。其中，流态固化渣土 (可控低强度材料) 指利用城市建筑工程中产生的固废 (渣土、建筑垃圾等)，经破碎筛分、解泥等工艺流程后，加入一定比例的胶凝材料、水和外加剂，经充分搅拌加工而成的流动性填料<sup>[16]</sup>，28 d 固化后无侧限抗压强度  $\leq 8.0$  MPa，具有流动性、低强度、自密实性、低渗透性、稳定性好、强度控制灵活、固化时间可控等特点。

PMW 的构造如图 1 所示，其以 H 型钢为主体，分为锁定端和固定端，由调节螺母、固定螺母和高强螺栓组成，两端由预应力钢绞索连接。

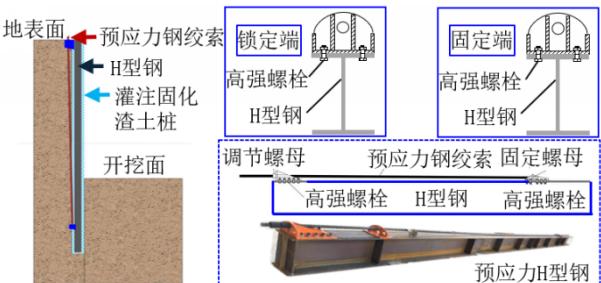


图 1 PMW 的构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PMW structure

PMW 通过施加预应力的方式对挡土结构预加反向弯矩，以此来减小支护桩工作状态下的桩身弯矩，可改善挡土结构工作状态下的内力分布，控制桩身变形，减小桩顶位移，如图 2 所示。该技术具有自稳好、占空间小、减少内支撑、施工速度快、控制变形能力强的优势。

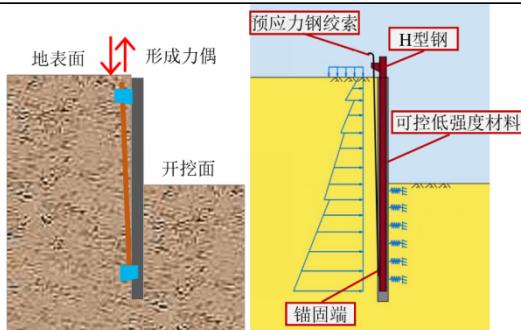


图 2 PMW 支护原理

Fig. 2 Support principle of PMW

## 2 体外预应力 H 型钢受力变形特性室内加载试验研究

### 2.1 试验设计

为了探究不同外荷载和不同预应力条件下体外预应力 H 型钢的变形与内力分布规律, 开展了一系列室内加载试验。

制作足尺 H 型钢预应力挡土结构试件, H 型钢采用 Q235 B 轧制型钢, H 型钢长度 12.0 m, 规格 HN 700×300×13×24。预应力钢绞索采用 PSB 1080 级螺纹钢筋, 直径 36 mm, 长度 10.8 m。锁定端与固定端采用 Q345 B 钢材加工而成, 高强螺栓与 H 型钢固定连接, 模拟 7 m 深悬臂基坑荷载, 加载装置如图 3 所示。在预应力钢绞索上布设轴力计, 沿 H 型钢每隔 1 m 位置布设 1 个位移计, 用于测量加载过程中预应力钢绞索的轴力和位移变化情况, 如图 4 所示。



图 3 加载装置图

Fig. 3 Schematic diagram of loading device

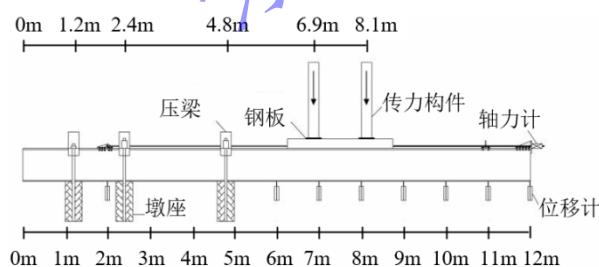


图 4 加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading

对同一根 H 型钢分别进行 5 种不同外荷载 (0-240 kN) 和 5 种不同预应力 (0-360 kN) 工况下的加

载试验, 加载工况如表 1 所示。

表 1 加载工况表

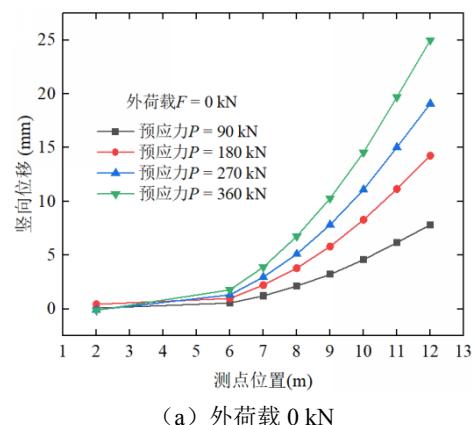
Table 1 Loading conditions

序号	外荷载 $F$ (kN)	多级动态预应力 $P$ (kN)
1	0	0、90、180、270、360
2	60	0、90、180、270、360
3	120	0、90、180、270、360
4	180	0、90、180、270、360
5	240	0、90、180、270、360

### 2.2 变形分析

图 5 (a) 为无外荷载情况下 H 型钢的变形规律, H 型钢向上变形为 “+”, 向下变形为 “-”。可见, 随预应力和测点位置与端头距离的增加, H 型钢发生向上的位移, 且位移逐渐增加。当预应力为 90 kN 时, H 型钢的竖向位移从 0 mm 逐渐增加至 7.8 mm; 当预应力为 360 kN 时, H 型钢的竖向位移从 0 mm 逐渐增加至 25.0 mm, 且增加幅度逐渐变大。

图 5 (b) - (e) 为外荷载 60 kN-240 kN 情况下 H 型钢的变形规律。总体来看, 在有外荷载时, H 型钢发生向下的位移, 且位移随预应力的增加而减小。当外荷载为 120 kN, 预应力为 0 kN 时, 随测点位置与端头距离的增加, H 型钢的竖向位移从 1.9 mm 逐渐增加至 44 mm; 预应力为 180 kN 时, H 型钢的竖向位移从 1.3 mm 增加至 27.5 mm; 预应力为 360 kN 时, H 型钢的竖向位移从 0.8 mm 增加至 16.8 mm; 当外荷载为 240 kN, 预应力为 0 kN 时, 随测点位置与端头距离的增加, H 型钢的竖向位移从 2.8 mm 增加至 88.6 mm; 预应力为 180 kN 时, H 型钢的竖向位移从 2.9 mm 增加至 73.1 mm; 预应力为 360 kN 时, H 型钢的竖向位移从 2.5 mm 增加至 62.5 mm。



(a) 外荷载 0 kN

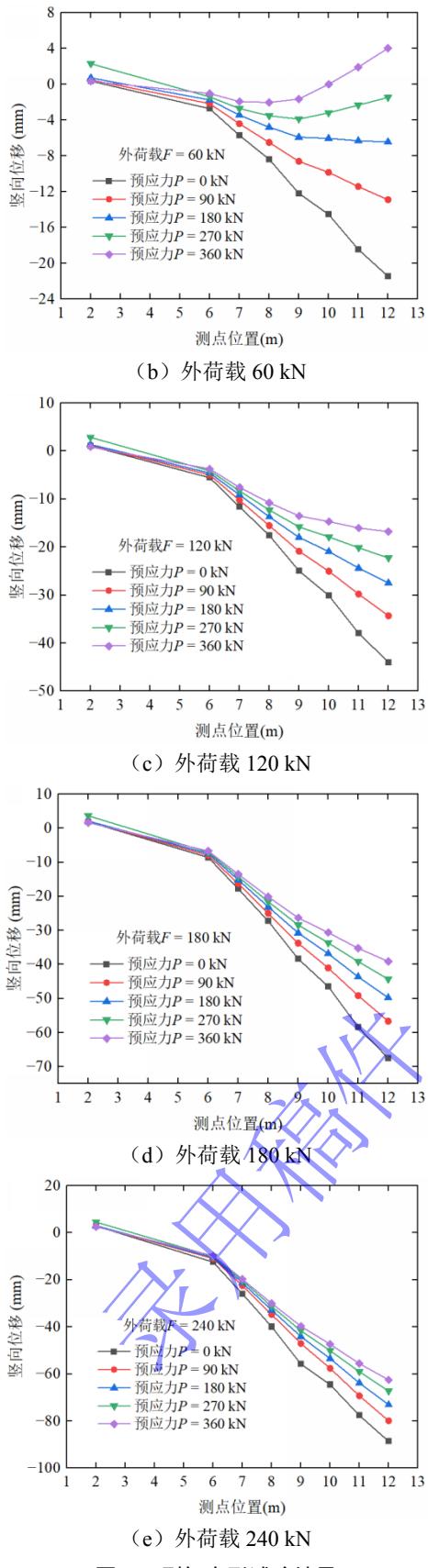


图 5 H 型钢变形试验结果

Fig. 5 Experimental results of H-shaped steel deformation

图 6 为预应力与 H 型钢最大位移关系图。可见，在相同外荷载作用下，预应力越大，H 型钢自由端位移越小，近似呈线性关系。在本试验阶段中 H 型钢

材料强度处于弹性阶段，未发生塑性变形。当外荷载为 0 kN 时，在预应力从 0 kN 增加到 360 kN 的过程中，H 型钢的最大竖向位移从 0 mm 增加至 25 mm；当外荷载为 120 kN 时，H 型钢的竖向位移从 44 mm 减小到 16.8 mm，减小幅度约 62%；当外荷载为 180 kN 时，H 型钢的竖向位移从 67.5 mm 减小到 39.1 mm，减小幅度约 42%；当外荷载为 240 kN 时，H 型钢的竖向位移从 88.6 mm 减小到 62.5 mm，减小幅度约 29%。随外荷载的增加，H 型钢位移随预应力的减小幅度逐渐降低。

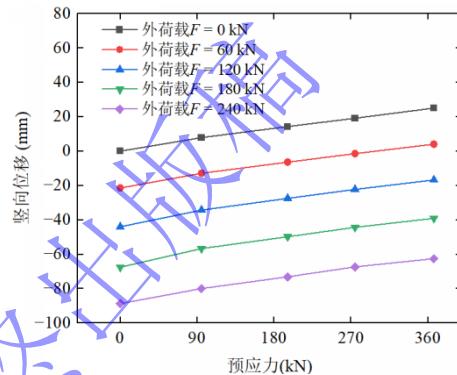


图 6 预应力与 H 型钢最大变形的关系

Fig. 6 Relationship between prestress and maximum deformation of H-shaped steel

预应力可以明显控制结构向外荷载作用力方向的变形，H 型钢结构的变形均出现明显降低，甚至出现“0”变形。当外荷载为 60 kN 时，预应力加载到 270 kN 可以出现“0”变形；当外荷载为 120 kN 时，预应力加载最大级别可以减小 80% 的变形。随外荷载的增加，预应力抵消变形的能力有所降低。

### 2.3 预应力钢绞索轴力分析

图 7 (a) 为预应力钢绞索轴力与外荷载的关系。可见，预应力钢绞索轴力随外荷载的增加近似呈线性增长，同时预应力钢绞索轴力随预应力的增加而增加，且不同初始预应力锁定值的增长比率接近一致。当预应力为 90 kN 时，在外荷载从 0 kN 增加到 240 kN 的过程中，预应力钢绞索轴力从 90 kN 增加至 168.9 kN，增加幅度约为 88%；当预应力为 180 kN 时，预应力钢绞索轴力从 180 kN 增加至 266.9 kN，增加幅度约为 48%；当预应力为 270 kN 时，预应力钢绞索轴力从 270 kN 增加至 346.7 kN，增加幅度约为 28%；当预应力为 360 kN 时，预应力钢绞索轴力从 360 kN 增加至 439.5 kN，增加幅度约为 18%。随预应力的增加，预应力钢绞索轴力随外荷载的增加幅度逐渐减小。

图 7 (b) 为预应力钢绞索轴力增量与外荷载的关系。可见，各曲线基本呈现出重合的趋势，表明当预应力不同时，预应力钢绞索轴力的增长幅度基本一

致, 预应力钢绞索轴力增长量与预应力钢绞索的初始预应力锁定值无关, 仅受外荷载增长的影响。

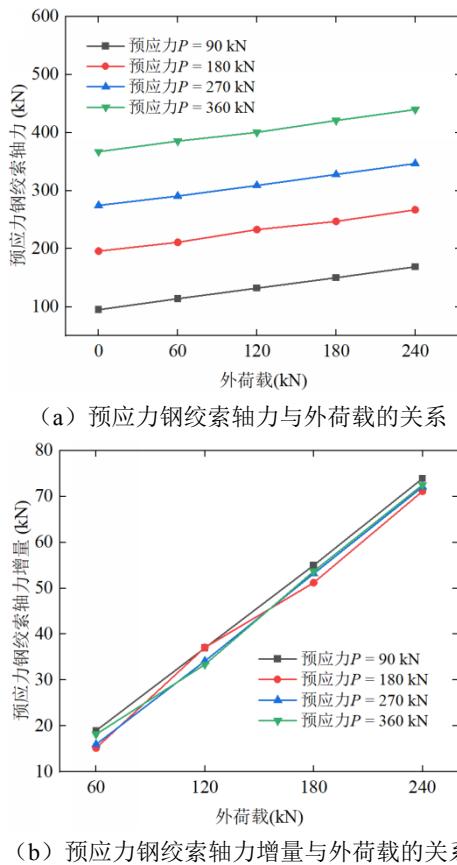


图 7 预应力钢绞索轴力试验结果

Fig. 7 Experimental results of the axial force of prestressed steel strands

### 3 PMW 变形计算

当混凝土外加预应力时, 由于混凝土的收缩膨胀, 会引起预应力的额外损失, 而型钢的收缩膨胀小于混凝土, 因此, 由型钢收缩膨胀引起的预应力损失小于混凝土<sup>[17]</sup>。另外, 在实际应用中, 本文所提支护结构中的预应力钢绞索轴力  $P$  必须满足预期设计要求, 并通过锚索应力计动态监测, 及时进行管控与补加, 以避免预应力损失。故本文只简化考虑 H 型钢的抗弯刚度进行设计。

#### 3.1 计算假设

由体外预应力 H 型钢的加载试验结果可知, 在预应力与外荷载作用下, 结构的变形与内力变化基本服从线弹性规律, 为方便建立计算模型, 做出如下假定:

- (1) 不考虑结构变形对偏心距的影响;
- (2) H 型钢截面符合平截面假定, 中性轴位于 H 型钢截面 1/2 高度处;
- (3) 预应力钢绞索轴力方向垂直于 H 型钢截面。

计算模型示意图如图 8 所示。

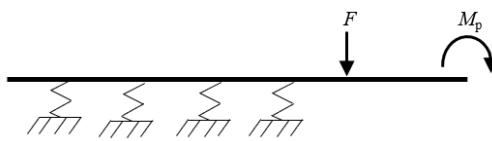


图 8 计算模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of calculation model

#### 3.2 计算方法

##### (1) 结构初始弯矩

预应力与 H 型钢中性轴的偏心关系在 H 型钢上产生的弯矩  $M_p$ , 按下式计算:

$$M_p = P \cdot e_0 \quad (1)$$

$$e_0 = d + \frac{h_0}{2} \quad (2)$$

式中,  $e_0$  为预应力与 H 型钢轴心轴的偏心距,  $d$  为预应力与 H 型钢翼缘板的距离,  $h_0$  为 H 型钢有效高度。

外荷载  $F$  与预应力共同作用下 H 型钢上的弯矩  $M$  按下式计算:

$$M = M_E - M_p \quad (3)$$

式中,  $M_E$  为外荷载在 H 型钢上产生的弯矩。

##### (2) 预应力增长机理

预应力与外荷载共同作用下弯矩让 H 型钢发生变形, 引起预应力钢绞索的伸长变形, 在试验中体现为预应力钢绞索轴力监测增加, 增加部分预应力为  $\Delta P$ :

$$\Delta P = E_{ps} A_s \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

式中,  $\Delta P$  为预应力增量,  $E_{ps}$  为预应力钢绞索的弹性模量,  $A_s$  为预应力钢绞索截面积,  $\Delta L$  为 H 型钢变形诱发的预应力钢绞索张拉伸量,  $L$  为预应力钢绞索有效受拉区段长度。

H 型钢的挠曲带动预应力钢绞索的伸长变形量, 可由材料力学方法给出预应力钢绞索在外荷载作用下的伸长量, 按下式计算:

$$\Delta L = e_0 \cdot \frac{1}{E_s} \cdot \int_0^h M(x) dx \quad (5)$$

式中,  $E$  为 H 型钢弹性模量,  $I$  为 H 型钢截面惯性矩,  $h$  为 H 型钢预应力结构悬臂长度。

##### (3) H 型钢预应力支护结构水平位移计算

###### ① 初始预应力产生变形

结构仅有初始预应力作用, 其在 H 型钢上形成的  $M_p$ , H 型钢结构发生变形计算方式如下:

$$s_0 = \frac{1}{E_s I} \cdot \int_0^h \left[ \int_0^h M_p^0(x) dx \right] dx \quad (6)$$

## ②预应力增量值迭代计算

外荷载作用下, 经过第1次迭代计算得到预应力增加部分 $\Delta P_1$ :

$$\Delta P_1 = E_{ps} A_s \frac{e_0}{L} \cdot \frac{I}{E_s I} \int_0^h [M_E(x) - M_p^0(x)] dx \quad (7)$$

经过第2次迭代, 计算得到预应力增加部分 $\Delta P_2$ :

$$M_p^1 = (P + \Delta P_1) \cdot e_0 \quad (8)$$

$$\Delta P_2 = E_{ps} A_s \frac{e_0}{L} \cdot \frac{I}{E_s I} \int_0^h [M_E(x) - M_p^1(x)] dx \quad (9)$$

经过第n次迭代, 得到预应力增加部分 $\Delta P_n$ :

$$M_p^{n-1} = (P + \Delta P_1 + \dots + \Delta P_{n-1}) \cdot e_0 \quad (10)$$

$$\Delta P_n = E_{ps} A_s \frac{e_0}{L} \cdot \frac{I}{E_s I} \int_0^h [M_E(x) - M_p^{n-1}(x)] dx \quad (11)$$

当 $\Delta P_n \leq P/500$ , 停止迭代计算。此时便得出外荷载作用下的预应力增量, 即:

$$\Delta P = \sum_0^n \Delta P_i \quad (12)$$

## ③最终变形

利用稳定的预应力值, 计算最终的预应力产生的弯矩, 与外荷载产生的弯矩进行叠加计算得到H型钢结构变形为:

$$s_0 = \frac{1}{E_s I} \int_0^h \int_0^h (M_E(x) - (P + \Delta P)e_0) dx dx \quad (13)$$

将理论计算所得H型钢变形和预应力钢绞索轴力与实测值进行对比, 结果如表2-3所示, 可见, 理论值与实测值吻合度较好, 验证了理论计算方法的正确性与有效性。

表2 H型钢变形理论值与实测值对比

Table 2 Theoretical values and measured values of H-shaped steel deformation

外荷载(kN)	预应力(kN)	理论值(mm)	实测值(mm)
0	90	4.8	7.820
	180	10.2	14.247
	270	18.1	19.090
	360	25.4	24.989
60	90	-14.8	-12.893
	180	-6.6	-6.443
	270	-0.5	-1.471
	360	5.8	4.024
120	90	-33.2	-34.317
	180	-25.8	-27.484
	270	-18.4	-22.273
	360	-11.6	-16.790
180	90	-52.8	-56.663
	180	-44.8	-49.760

	270	-38.2	-44.313
	360	-31.0	-39.105
	90	-72.1	-79.891
240	180	-62.3	-73.058
	270	-56.8	-67.282
	360	-48.5	-62.521

表3 预应力钢绞索轴力理论值与实测值对比

Table 3 Theoretical values and measured values of the axial force of prestressed steel strands

外荷载(kN)	预应力(kN)	理论值(kN)	实测值(kN)
60	90	111.36	114.0
	180	201.36	211.3
	270	291.36	290.6
	360	381.36	385.2
120	90	132.72	132.1
	180	222.72	232.9
	270	312.72	308.8
	360	402.72	400.4
180	90	154.08	150.7
	180	244.08	247.2
	270	334.08	327.8
	360	424.08	420.7
240	90	175.44	168.9
	180	265.44	266.9
	270	355.44	346.7
	360	445.44	439.5

## 4 PMW 工程应用

### 4.1 施工工艺

PMW的施工工艺分为桩的预制与装配、钻机成孔材料灌注、H型钢植入、预应力施加等, 如图9所示。



图9 PMW的施工工艺

Fig. 9 Construction technology of PMW

#### 4.2 应用案例

南京江宁生物医药科研楼基坑支护工程, 地点如图 10 所示。土层分布从上到下为以素填土、粉质黏土和不同风化程度的泥质粉砂岩为主。如图 11 所示。



图 10 南京江宁生物医药科研楼

Fig. 10 Nanjing Jiangning biomedical research building

土层名称	深度 (m)	重度 (kN/m³)	固结快剪标准值	
			粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
素填土	2.8	18.99	16.2	10.2
		18.77	29.5	12.3
粉质黏土	7.4	18.82	22.5	11.2
		19.40	45.3	15.8
粉质黏土	19.54	55.2	16.9	
含砾石粉质黏土	7.8	19.64	30.6	20.5
强风化泥质粉砂岩	11.5	21.00	35.0	22.0
中风化泥质粉砂岩	23.0	23.81	50.0	32.0

图 11 现场地层剖面图

Fig. 11 Field geological condition

基坑深度 8.5-10.5 m, 基坑面积 8000 m<sup>2</sup>, 基坑周长 380 m。原支护方案设计为钢筋混凝土灌注桩和高压旋喷桩, 并采用钢筋砼支撑。经优化采用本技术 PMW, 采用  $\phi 850@1400$  型钢预应力工法桩, 支护结构设计如图 12 所示。流态固化土 28 天无侧限抗压强度为 1.0 MPa, H 型钢预应力设计值为 460 kN, 考虑锁定过程中预应力可能会因构件松弛等原因造成损失, 导致桩体水平位移过大, 实际预应力锁定值为设计值的 1.1 倍 (506 kN)。

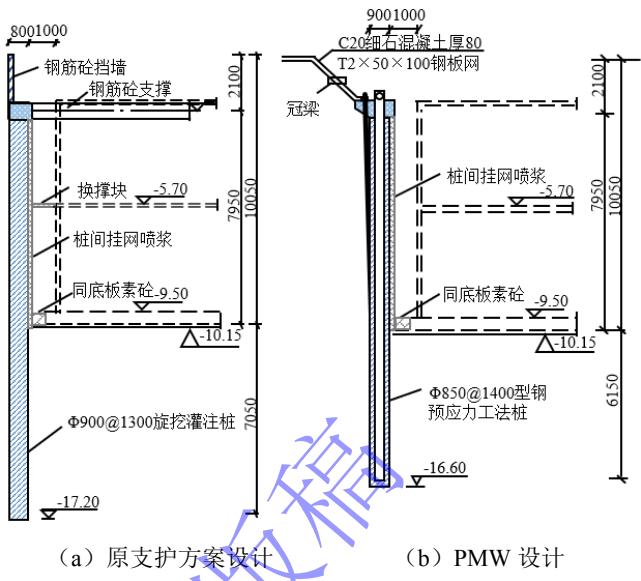


图 12 支护方案对比

Fig. 12 Comparison of support schemes

原支护方案和 PMW 方案工程量对比如表 4-5 所示。原支护方案总造价约 991 万元, PMW 方案总造价约 539 万元, 大幅度降低了成本 (降低约 46%)。PMW 消耗生态流化土 2500 m<sup>3</sup>, 并且大幅减少支撑梁、钢立柱和立柱桩的用量, 方便挖土, 省去支撑架设拆除以及主体结构施工, 工期节省 2 个月。

表 4 原设计工程量

Table 4 Engineering quantities of original design

序号	项目名称	工程量	单价 (元/*)	合计 (万元)
1	成孔费	4700 m	185	86.95
2	钢筋笼	413.6 t	6800	281.248
3	钢筋混凝土	3287.34 m <sup>3</sup>	580	190.666
4	压顶梁	280 m <sup>3</sup>	1500	42
5	支撑梁	1150 m <sup>3</sup>	1300	149.5
6	钢立柱	108.78 t	7500	81.585
7	立柱桩	420 m	1150	48.3
8	挂网喷浆	3330 m <sup>2</sup>	120	39.96
9	高压旋喷桩	3600 m	180	64.8
10	排水沟	360 m	160	5.76
11	管理费	1 项	100000	10
合计			990.769	万元

表 5 PMW 工程量

Table 5 Engineering quantities of PMW

序号	项目名称	工程量	单价 (元/*)	合计 (万元)
1	成桩费	4600 m	150	69

2	H型钢租赁	810 t	2400	194.4
3	生态流化土	2500 m <sup>3</sup>	240	60
4	压顶梁	280.00 m <sup>3</sup>	1500	42
5	支撑梁	108 m <sup>3</sup>	1,500	16.2
6	钢立柱	11.97 t	6,500	7.7805
7	立柱桩	90 m	1,150	10.35
8	挂网喷浆	3330 m <sup>2</sup>	95	31.635
9	锚杆/锚索	888 m	240	21.312
10	排水沟	360 m	160	5.76
11	预应力服务	150 组	5400	81
12	管理费	1 项	100000	10
合计		539.4375 万元		

现场开挖监测数据显示,采用PMW方案,桩顶水平位移平均值为14.3 mm,最大值为23.4 mm;预应力钢绞索轴力平均值为546 kN,最大值为594 kN,实测轴力值高于锁定值,主要是由于桩体水平变形导致预应力钢绞索出现轻微张拉,从而引起轴力增加;预应力钢绞索承受拉力的极限值为1300 kN,远高于锁定值,满足安全要求。现场实测表明PMW具有较强的控制变形能力,取得了很好的应用效果。

## 5 结论

本文提出了预应力低碳工法桩(PMW)技术,揭示了PMW的变形与内力分布规律,给出了PMW的变形与内力计算方法,并将该技术在现场基坑工程中进行应用,主要结论如下:

(1) PMW采用预成孔灌注流态固化渣土成桩(墙),再插入体外预应力H型钢,通过施加预应力的方式,形成自稳式支护结构,具有自稳定性好、水平变形小、低碳环保经济等优点。

(2) 预应力能够显著控制H型钢向外荷载作用方向的变形,预应力抵消变形的能力随外荷载的增加逐渐降低。预应力钢绞索轴力随外荷载的增加近似呈线性增长,且其增长量与预应力锁定值无关。

(3) 从结构初始弯矩、预应力增长机理和H型钢预应力支护结构水平位移三方面推导了PMW变形内力的计算公式,为PMW的设计应用提供了理论依据。

(4) 现场工程应用表明,PMW具有较强的控制变形能力,可减少或取消支撑,简化施工工序,大量节省工程造价,缩短施工工期,具有推广应用前景。

## 参考文献:

[1] 朱合华, 丁文其, 乔亚飞, 王昕, 韩传峰, 张冬梅, 李晓

- 军等. 简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战[J]. 地学前缘, 2019, 26(03): 22-31. (ZHU He-hua, DING Wen-qi, QIAO Ya-fei, et al; WANG Xin, HAN Chuan-feng, ZHANG Dong-mei, Li Xiao-jun. Issues and challenges in urban underground space utilization in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(03): 22-31. (in Chinese))
- [2] 肖旦强, 詹伟, 胡智, 严鑫, 余以强, 吴剑军等. 交通地下空间体系建设发展对策研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(S2): 130-134. (XIAO Dan-qiang, ZHAN Wei, HU Zhi, YAN Xin, YU Yi-qiang, WU Jian-jun et al. Development countermeasures for construction of underground space system of transportation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(S2): 130-134. (in Chinese))
- [3] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J]. 建筑, 2024, (02): 46-59. (Research report on building energy consumption and carbon emission in China (2023)[J]. Construction and Architecture, 2024, (02): 46-59. (in Chinese))
- [4] 李建清. 工法桩在仰光基坑工程中的应用[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2809-2813. (LI Jian-qing. Application of SMW method in Yangon foundation pit engineering[J]. Building Structure, 2022, 52(S1): 2809-2813. (in Chinese))
- [5] 龚晓南, 杨仲轩. 地基处理新技术、新进展[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 116. (GONG Xiao-nan, YANG Zhong-xuan. New technology and progress of foundation treatment[J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 116. (in Chinese))
- [6] 楼春晖, 夏唐代, 刘念武. 软土地区基坑中SMW围护桩变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 1208-1211. (LOU Chun-hui, XIA Tang-dai, LIU Nian-wu. Deformation characteristics of SMW piles in excavation on soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 1208-1211. (in Chinese))
- [7] 李爱地, 李成勋, 董莹. 淤泥质软土深基坑SMW工法桩围护结构施工技术研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(05): 180-185. (LI Ai-di, LI Cheng-xun, DONG Ying. Research on Construction Techniques for an SMW Retaining Structure for a Deep Foundation Pit in Soft Muddy Soil[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(05): 180-185. (in Chinese))
- [8] XIAN Q J, WANG Z, LIU X S, et al; MA S K, XIAO Z R. Site measurement study on mechanical properties of SMW piles of building structures in sandy soil areas[J]. Buildings, 2022, 12(10): 1733.
- [9] TU B X, ZHENG J H, YE S H, et al; SHEN M L. Study on

- excavation response of deep foundation pit supported by SMW piles combined with internal support in soft soil area[J]. Water, 2023, **15**(19): 3430.
- [10] 徐晓兵, 姜叶翔, 童磊, 羊逸君, 李俊逸等. 邻近地铁基坑后插型钢 MJS 工法桩试桩研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, **17**(S2): 854-860+877. (XU Xiao-bing, JIANG Ye-xiang, TONG Lei, et alYANG Yi-jun, LI Jun-yi. Field tests on MJS piles of post-inserted H-shaped steel in soil excavation adjacent to the subway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, **17**(S2): 854-860+877. (in Chinese))
- [11] 姚志雄, 夏华灿, 黄敏, 陈进, 李健等. 福州滨海软土 MJS 工法桩加固施工及环境效应[J]. 地下空间与工程学报, 2023, **19**(03): 1019-1026+1037. (YAO Zhi-xiong, XIA Hua-can, HUANG Min, et alCHEN Jin, LI Jian. Construction and environmental effect of MJS pile strengthening soft soil in Fuzhou coastal area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, **19**(03): 1019-1026+1037. (in Chinese))
- [12] ZHANG D D. Influences of deep foundation pit excavation on the stability of adjacent ancient buildings[J]. Buildings, 2024, **13**(8): 2004.
- [13] 韦实, 梁荣柱, 李忠超, 陈峰军, 邓成龙, 吴小建, 孙廉威等. 基于 3D 打印的 PC 工法桩基坑围护结构变形特性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, **42**(S2): 4320-4332. (WEI Shi, LIANG Rong-zhu, LI Zhong-chao, CHEN Feng-jun, DENG Cheng-long, WU Xiao-jian, SUN Lian-wei et al. Experimental investigation on the deformation characteristics of PC piles retaining structure based on the 3D printing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, **42**(S2): 4320-4332. (in Chinese))
- [14] 吴国明, 章兆熊, 谢兆良. 型钢等厚度水泥土搅拌墙施工技术在复杂地层、嵌岩深基坑工程中的开发应用[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(S1): 393-397. (WU Guo-ming, ZHANG Zhao-xiong, XIE Zhao-liang. Application of construction technology of steel cement-soil wall with uniform thickness in rock-socketed deep excavations in complex soil strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S1): 393-397. (in Chinese))
- [15] 谭轲, 王卫东, 邱国恩. TRD 工法型钢水泥土搅拌墙的承载变形性状分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(S2): 191-196. (TAN Ke, WANG Wei-dong, QIU Guo-en. Deformation and bearing characteristics of steel cement-soil wall constructed by TRD method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S2): 191-196. (in Chinese))
- [16] 余巍, 王超, 王宁宁, 杨波, 王雪婷等. 基于可控低强度材料的型钢灌注桩技术及应用[J]. 地基处理, 2024, **6**(05): 488-496. (YU Wei, WANG Chao, WANG Ning-ning, et alYANG Bo, WANG Xue-ting. Technology and application of shaped steel cast-in-place pile based on controlled low strength material[J]. Journal of Ground Improvement, 2024, **6**(05): 488-496. (in Chinese))
- [17] 秦士洪, 丁智潮, 何熊. 预应力型钢混凝土构件收缩徐变试验[J]. 中国公路学报, 2008, **21**(04): 74-80. (QIN Shi-hong, DING Zhi-chao, HE Xiong. Experiment on shrinkage and creep of prestressed steel reinforced concrete member[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, **21**(04): 74-80. (in Chinese))