

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2023.01.012

【新装备新工艺】

基坑工程钢支撑高脚螺栓-模袋混凝土固支端及其承载性能

张明聚, 刘文杰, 郭彩霞*, 李鹏飞, 高云昊, 单余含
(北京工业大学 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 基坑工程钢支撑端节点是位于钢管端部和基坑侧壁之间的连接构件, 其功能为承受并传递钢支撑轴力, 并可少量调节钢支撑拼装长度。但实际工程中钢支撑体系的失稳破坏多数为节点刚度或强度不足造成的, 节点弱化可能导致基坑的连续坍塌破坏。本文在分析基坑工程事故原因的基础上, 设计了一种钢支撑高脚螺栓-模袋混凝土固支端, 阐述了新型固支端的结构组成、工作原理及施工工艺流程, 通过有限元数值模拟手段分析了固支端结构的抗压、弯承载性能。结果表明固支端具有可调节支撑长度、施加预应力的特点, 其抗压、弯刚度大, 承载力高, 承载性能主要与材料强度、短接头长度相关。

关键词: 基坑工程; 钢支撑; 固支端节点; 工作原理; 承载性能

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)01-0082-09

A fixed end composed of high-foot bolt and bag concrete for steel supporting and its bearing capacity in foundation pit engineering

ZHANG Ming-ju, LIU Wen-jie, GUO Cai-xia*, LI Peng-fei, GAO Yun-hao, SHAN Yu-han
(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology,
Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: The steel support end node of the foundation pit engineering is a connecting member located between the end of steel tube and the sidewall of foundation pit. Its function is to withstand and transfer the axial force of steel support, and the assembly length of the steel support can be adjusted in a small amount. However, most of the instability and damage of the steel support system in practical engineering is caused by the insufficient stiffness or strength of the joints. The weakening of joints may lead to the progressive collapse damage of the foundation pit. Based on the analysis of accident, a fixed end mainly composed of high-foot bolt and bag concrete is designed for steel supporting. Its structure composition, working principle and construction process is expounded. And its compressive and flexural bearing performance are analyzed by finite element model numerical simulation. The results show that the fixed end has the characteristics of adjustable support length, prestressing, high compressive, bending rigidity, and high bearing capacity. The bearing capacity is mainly related to the strength of the material and the length of the short joint.

Key words: foundation pit; steel support; fixed end node; working principle; bearing capacity

0 引言

在内撑式基坑工程中, 钢支撑作为一种装配式结构, 具有轻质、可回收利用、施工速度快等优点, 并且通过施加预应力对控制围护结构变形

和基坑的稳定起到有利作用, 因而广泛应用于车站明挖基坑内支撑支护结构^[1-2]。钢支撑需要在端部设计传力的节点构件, 通过节点调节支撑长度, 并传递围护结构作用于钢支撑的轴向力, 其刚度大小和稳定性是决定钢支撑承载力的重要因

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51978018); 国家自然科学基金重点项目 (51738010); 北京市自然科学基金项目 (8222005)。

作者简介: 张明聚 (1962—), 男, 北京人, 博士, 主要从事岩土工程、隧道及地下工程等方面的教学和科研工作。E-mail: zhangmj@bjut.edu.cn。

*通信作者: 郭彩霞 (1984—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 副教授, 主要从事建筑施工、智能建造等方面的教学和科研工作。E-mail: guocaixia@bjut.edu.cn。

素^[3-5]。大量基坑事故表明,钢支撑端部节点连接处存在局部弱化问题,节点连接薄弱造成基坑连续破坏。如2004年新加坡地铁环线C824标段的一段明挖区间隧道发生严重的坍塌事故,事故原因之一是在钢支撑与围檩的连接设计中高估了结构的屈曲失稳极限荷载,并且采用槽钢代替胫板使得体系发生脆性破坏^[6];2008年杭州地铁1号线湘湖车站基坑,由于对支撑钢管和地下连续墙的连接节点没有相应的技术要求,引起局部范围地连墙产生过大侧向位移,导致支撑体系的整体失稳^[7]。钢支撑结构本身轴向受力具有较大的安全冗余度,事故的发生往往起源于端部节点,节点薄弱继而出现整体松动、失稳的连续倒塌破坏^[8]。

目前基坑工程钢支撑常用的节点构件是钢楔式活络头,具有安装方便、结构简单的优点。但活络头为铰支节点,整体承载能力低,容易出现预应力损失大、偏心受力等现象,使得钢支撑整体承载力得不到充分发挥。王振信^[9]强调钢围檩和支撑节点处理不当就可能导致围檩结构变形,甚至支撑结构的整体失稳,围护结构、钢围檩和支撑之间的接触面应当尽可能做到平整密贴。有不少学者对活络端的承载性能进行了研究并提出了很多改进方案,刘国彬、王卫东^[10]强调严禁在活络头插入过多钢楔块,钢楔块表面相互挤压,易使节点偏心受力。卢烽^[11]对某深基坑事故分析时指出,内支撑活络头钢楔块采用钢筋替代属违规,钢支撑架设得不平顺,使支撑的可靠性、有效性不足。李宏伟、王国欣^[12]指出,对钢支撑体系应研究和改进节点连接形式,加强节点构造措施,确保连接节点满足强度及刚度要求。周与诚、郭跃龙^[13]指出部分单位将端节点设计为无活络接头的方法是不可取的,此种设计无法保证钢支撑轴心受力,存在基坑安全隐患。

本文摒弃活络端方案的传统思维,针对钢支撑体系的端部结构进行了研发改进,设计了一种创新性钢管支撑节点-高脚螺栓-模袋混凝土固支端,阐述了固支端的结构设计和工作原理,利用有限元软件分析研究了固支端结构的受力性能,为基坑工程钢管支撑体系节点选型和应用提供一种新的结构和工艺。

1 结构设计及工作原理

1.1 结构组成

钢管内支撑高脚螺栓-模袋混凝土固支端由空

心法兰盘、高脚螺栓、模袋混凝土和钢管短接段组成,如图1~2所示。空心法兰盘采用Q235-B级钢,直径1100mm,厚25mm,表面平整,并开设12个与螺帽直径匹配的螺栓孔,保证高脚螺栓可从空心法兰盘一侧穿过;模袋采用涤纶长丝无纺布,该布料具有一定的透水透气性能,抗拉强度较高,模袋使用时缝制为圆柱体外形,侧边开设直径约60mm大小的圆孔以便安装灌注混凝土装置;灌注装置包括对丝管件、螺母和垫片等部件,对丝管口与混凝土灌注泵管口相连;高脚螺栓螺杆长20cm,通过螺栓调节空心法兰盘和钢管短接段之间的距离,改变模袋混凝土厚度达到调节固支端总长度的目的,每个固支端可调节长度范围为50~130mm。

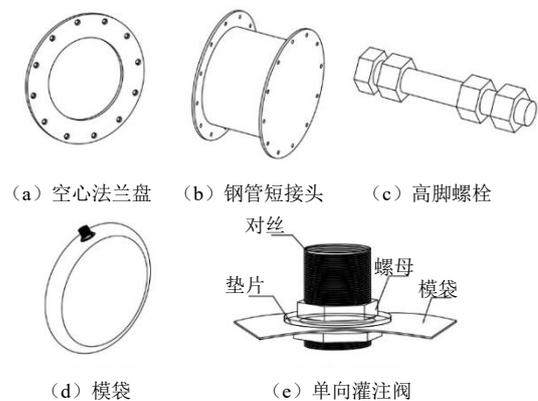


图1 固支端结构部件

Fig. 1 Structural components of the fixed end

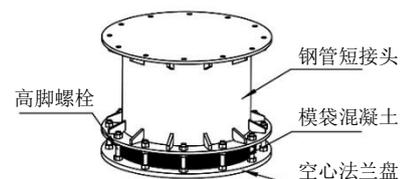


图2 固支端整体装配

Fig. 2 Fixed end assembly

1.2 工作原理

高脚螺栓-模袋混凝土固支端结构由模袋混凝土和多组高脚螺栓承担轴向作用力,节点构造简单,传力方式明确,其受力分析方式如图3所示。

基坑开挖时由土压力产生的侧向荷载 F 通过围护结构的预埋钢板传递给空心法兰盘 F_1 、模袋混凝土 F_2 ,然后传递至钢支撑短接段,最后传递与其相连的钢支撑标准段。同预埋钢板相贴的法兰盘为空心状,设计目的是使得混凝土均匀密实地填充法兰盘空心部分,保证固支端模袋混凝土结构面和预埋钢板表面直接接触,并直接把围护结构的大部分侧压力 F_2 传递给钢支撑,以避免法兰

板与预埋钢板之间由于施工误差导致的脱空而引起刚度损失。该组合型承载结构受力情况可简化看作钢筋混凝土轴心受压构件，根据混凝土结构设计规范要求^[4]，以最不利条件下，即模袋混凝土厚度最大（130 mm）时的承载力为设计值，可得装配式组合固支端节点的抗压设计承载力 N 与结构各个材料参数的关系为：

$$N = 0.9\varphi(f_c A + f_y' A_s') \quad (1)$$

式中： N 为轴心压力设计值；0.9为可靠调整系数； φ 为钢筋混凝土轴心受压构件的稳定系数； f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值； A 为构件截面面积； f_y' 为钢筋抗压强度设计值； A_s' 为钢筋的截面面积。

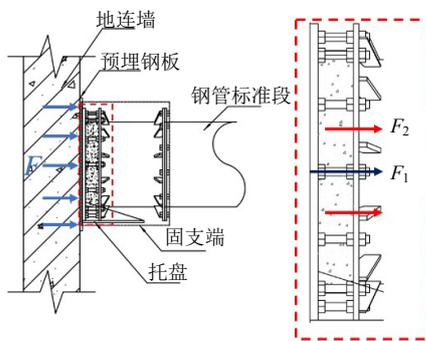


图3 固支端传力方式

Fig. 3 Force transmission of the fixed end

1.3 安装与拆除施作方法

(1) 钢支撑整体架设方案

基坑地连墙施作过程中，在钢支撑设定位置两端提前预埋钢板。当土层开挖至钢支撑设定位置以下0.5 m处，在预埋钢板上焊接托盘，使用龙门吊将拼接完整的钢支撑标准段连同固支端吊放于托盘上。钢支撑两端均需要安装固支端节点，在固支端左右两侧利用千斤顶对支撑体系施加预应力，之后使用混凝土输送泵在两端模袋内压力灌注混凝土。待混凝土均匀、密实地填充端部空隙并达到一定强度时，方可继续开挖土层，钢支撑整体装配效果如图4所示。

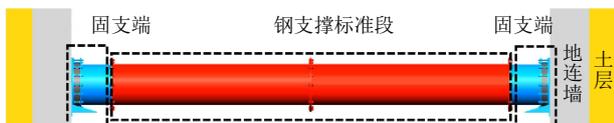


图4 基坑钢管支撑整体装配图

Fig. 4 Overall assembly diagram of the steel tube support for foundation pit

(2) 固支端施作方法

a) 整备状态

固支端的整备状态定义为参与计算钢支撑设计长度的最短值，即短接段长度+承压螺母及垫片厚度+紧固螺母及垫片厚度+空心法兰盘厚度。将空心法兰盘和钢管短接段架设在托盘上，短接段一端靠近钢管标准段，一端贴近空心法兰盘。空心法兰盘与预埋钢板之间的空隙为模袋混凝土填充空间，大小为预留拼装空隙和施工误差之和，施工误差指由于钢板预埋时无法确保垂直放置，可能出现小角度倾斜所产生的空隙，如图5所示。

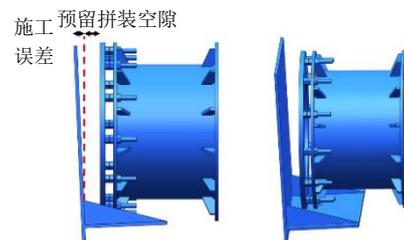


图5 整备状态

Fig. 5 Preparatory state

b) 预加轴力状态

旋转调节螺母，使得空心法兰盘和钢管短接头之间距离为所需模袋混凝土厚度，调节完毕后拧紧承压螺母（螺杆中部的螺母）。为方便施加预应力，可在短接头端面焊接钢板，在固支端两侧各安装千斤顶，如图6所示，对支撑体系施加设计预定的预加轴力。

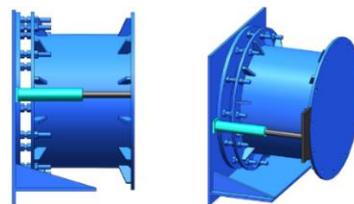


图6 预加轴力状态

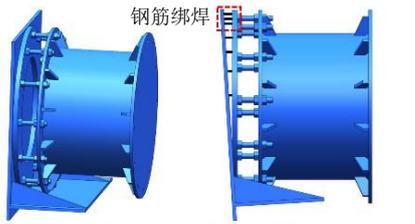
Fig. 6 Pre-axial loading state

c) 空心法兰盘与预埋钢板焊接状态

将空心法兰盘与预埋钢板焊接，法兰盘为空心状，可内、外圈进行施焊作业。若存在施工误差导致法兰盘无法与预埋钢板完全密贴，可对法兰盘部分施焊，并使用钢筋绑焊的连接方式，如图7所示。

d) 加压灌注混凝土成型状态

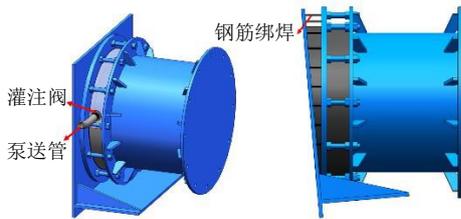
钢支撑两端放入圆柱模袋，使用混凝土输送泵连接模袋侧边的灌注口，两端同时进行混凝土压力灌注，如图8所示。利用灌注压力将混凝土均匀、密实地填充模袋。



(a) 理想状态 (b) 存在施工误差状态

图 7 法兰盘与预埋钢板焊接状态

Fig. 7 Welding state of the flange plate and embedded steel plate



(a) 理想状态 (b) 存在施工误差状态

图 8 压力灌注混凝土状态

Fig. 8 State of the pressure-filled concrete

(3) 固支端拆除方法

固支端主要的拆除步骤如下：

- a) 松开承压螺母或切断螺栓：使用扳手将承压螺母松开，或直接切断高脚螺栓；
- b) 破除模袋混凝土释放钢支撑轴力：使用混凝土破碎锤将模袋内混凝土破碎，取出模袋和破碎的混凝土，使得钢支撑体系轴力释放；
- c) 拆除空心法兰：使用切割片或气割方法将两端空心法兰盘和预埋钢板断开；
- d) 钢支撑拆解吊出：将钢管标准段和短接段吊出、回收。

2 结构特点与适用范围

2.1 可调节长度

固支端根据所需模袋混凝土厚度调节螺母位置，达到控制总长的目的。根据设计要求，模袋混凝土厚度为 50~130 mm 之间。固支端最小构造状态指模袋混凝土厚度取最小值 50 mm，最大构造状态指模袋混凝土厚度取最大值 130 mm，如图 9 所示。现场实际状态则介于两者之间，即模袋混凝土厚度为 50~130 mm。该固支端节点设置于钢支撑两端，总调节长度在 100~260 mm，更便于钢支撑拼装长度的选择，如基坑的实测净空跨度为 21.100 m，钢支撑的拼装长度在 20.840~21.000 m 区间内，均能满足钢支撑架设安装要求。



(a) 最小构造间隙状态 (b) 最大构造间隙状态

图 9 固支端不同构造状态

Fig. 9 Different structural states of the fixed end

2.2 可施加预应力

固支端结构在模袋灌注混凝土前可进行支撑系统预应力的施加工作，为方便千斤顶的安装，可在短接段法兰端面两侧各焊接一块小钢板，千斤顶一端顶紧预埋钢板，一端顶紧钢管短接头法兰盘端面，两侧同时对钢支撑施加轴向应力。

2.3 固支端结构

该新型固支端和预埋件的连接形式为固定连接，能够同时承受拉、压、弯、剪应力，同时也是一种组合型承载结构，由模袋混凝土和多套高脚螺栓共同承载，具有承载力高、刚度大的优点。在模袋压力灌注混凝土过程中，混凝土在压力作用下通过无纺布表面孔隙排水，降低了混凝土水灰比，有利于混凝土快速凝固和提高强度，固支端承载力也随之增大。由于固支端节点需要在施工现场进行模袋混凝土的压力灌注作业，待混凝土达到一定强度后方可继续基坑开挖，因此可根据现场应用情况在混凝土拌合物内掺和早强剂，以便节约时间、快速施工。

2.4 适用范围

该固支端对基坑工程围护结构类型而言，可适用于地下连续墙、设有混凝土冠梁的首道支撑和设有混凝土腰梁等围护结构类型。

3 固支端力学性能数值模拟

为了经济、便捷地研究高脚螺栓-模袋混凝土固支端力学性能表现，优化结构设计参数，通过数值模拟方式对固支端结构各工况建立三维模型，分析各设计参数对固支端抗压、弯承载性能变化规律。

3.1 模型建立

采用 ABAQUS 有限元数值模拟软件进行模拟，模型尺寸适用于 $\Phi 800$ 钢支撑，如图 10 所示。单元实体为 C3D8R8 节点六面体单元，减缩积分进行沙漏控制。接触类型法向相互作用为硬接触，切向采用罚函数，罚函数的系数取值为 0.15。试件

中螺栓和螺母、肋板和短接段钢管外壁等焊接部位在模型中均设置为绑定约束。在固支端底部空心法兰盘表面完全约束 ($U_1=U_2=U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$), 螺栓底部设置Z轴方向的位移约束。加载时在短接段法兰盘上表面进行线性加载, 表1列出了所建立的18个数值模型关键的几何信息, 其中 e 、 h 、 $F_{cu,k}$ 和 l 分别表示偏心距大小、模袋混凝土高度(厚度)、混凝土强度和钢管短接段长度, 具体示意如图11所示。由于结构的特殊对称性, 轴心加载为法兰盘圆心位置, 偏心加载采用法兰盘中心任意对称轴方向偏心(X和Y方向相同)。

表1 有限元模型参数

Table 1 Parameters of finite element models

编号	e/mm	h/mm	$F_{cu,k}/MPa$	l/cm
1	0	130	30	60
2~4	45, 90, 130	130	30	60
5~6	0	130	40, 50	60
7~9	0	70, 90, 110	30	60
10~12	45	130	30	40, 50, 70
13~15	45	130	40, 50	60
16~18	45	70, 90, 110	30	60

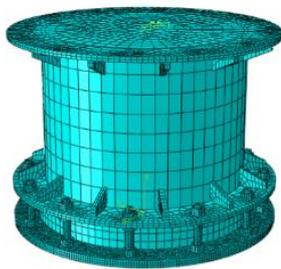


图10 固支端计算模型

Fig. 10 Calculation model of the fixed end

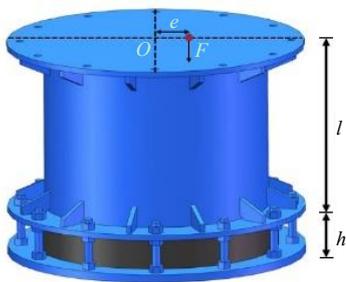


图11 参数示意图

Fig. 11 Illustration of different parameters

3.2 模型参数

模型采用弹塑性本构关系进行模拟, 为简化模型提高计算效率, 模袋混凝土只设置混凝土弹塑性本构, 不考虑模袋与混凝土的黏结作用和环向约束, 模型参数如表2所示。

表2 材料参数

Table 2 Material parameters

部件材料	杨氏模量 $E/(N/mm^2)$	重力密度/ (t/m^3)	泊松比 ν	初始屈服应力 $f_y/(N/mm^2)$
8.8级螺栓	2×10^5	7.89×10^{-9}	0.3	640.0
Q235钢	2×10^5	7.85×10^{-9}	0.3	235.0
C30混凝土	3×10^4	2.3×10^{-9}	0.2	14.3

3.3 分析结果

(1) 抗压承载性能

模型轴心受压应力云图如图12所示, 固支端的主要承载部件为螺栓与模袋混凝土, 节点塑性变形区分布于模袋混凝土外圈边缘和螺栓中上部位置。逐级加载过程中, 初期模袋混凝土和高脚螺栓共同受力, 所受应力不同但变形基本保持一致, 如图13所示为两者的荷载-应变关系曲线, 当荷载为8000kN时, 模袋混凝土首先出现塑性变形区, 而后加载至9400kN, 钢管短接段进入塑性变形阶段, 最后荷载为13000kN时高脚螺栓应力达到屈服。受压时模袋混凝土表现为较明显的应力集中现象, 边缘先于中间部分发生压碎破坏; 螺杆则在轴向压力作用下中部向外弯曲, 属于压弯构件的整体失稳破坏。取端板上表面中心点O处的荷载-位移曲线作为模型的荷载-位移曲线, 如图14所示, 固支端结构线性阶段承载力为9231kN, 结构刚度为7693kN/mm。

节点在设计和使用过程中应当考虑偏心荷载对其力学性能的影响, 为分析偏心受力对固支端结构抗压性能的影响, 模型选取了不同偏心距进行轴向加载, 偏心距增量为偏心方向端板直径的5%。如图14所示为偏心距对固支端线性承载力 F 和初始抗压刚度 k 的关系曲线, 偏心距从0增加到45mm, F 和 k 分别降低了14.9%和21.4%, 当偏心距从45mm增加到90mm, F 和 k 分别降低了12.3%和18.5%, 当偏心距从90mm增加到135mm, F 和 k 均降低了13.8%。线性阶段承载力 F 随着偏心距的增大基本呈线性降低, 刚度 k 在偏心距较小时降低速率较大, 而后逐渐减小。

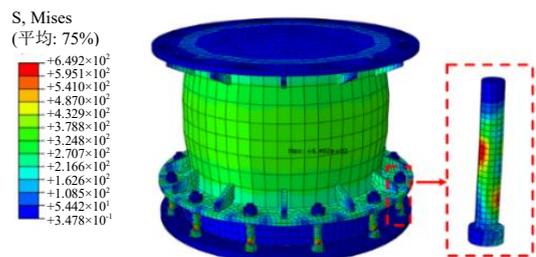
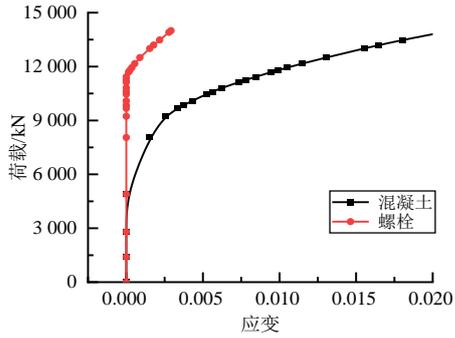
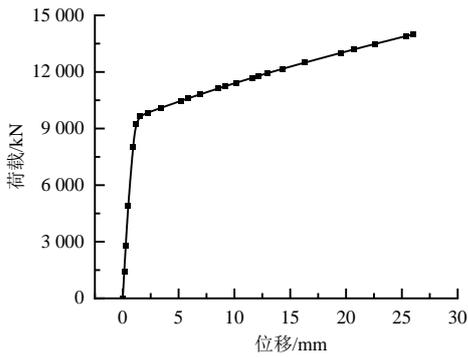


图12 固支端受力模拟应力云图

Fig. 12 Cloud map of axial compression on the fixed end



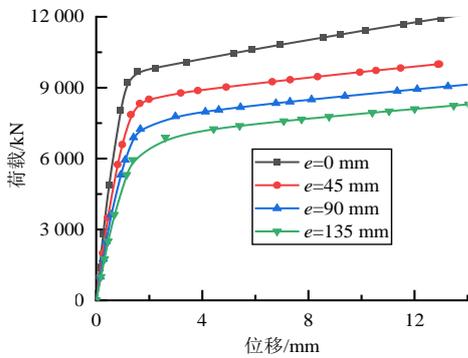
(a) 荷载-应变曲线



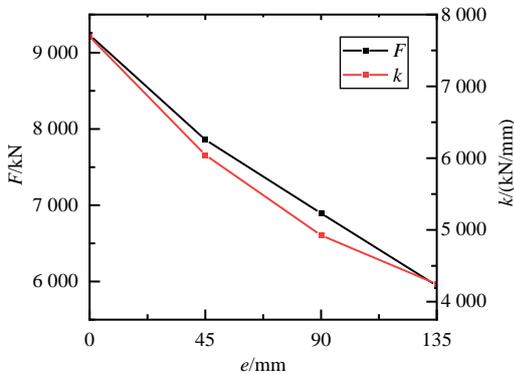
(b) O点荷载-位移曲线

图 13 固支端抗压承载性能

Fig. 13 Compressive bearing capacity of the fixed end



(a) 荷载-位移曲线



(b) e 与 F 和 k 的关系曲线

图 14 偏心距对抗压性能的影响

Fig. 14 Effect of the eccentricity on the compressive performance

为研究结构设计参数对固支端抗压承载力的影响, 分析了不同混凝土强度和混凝土厚度对模型刚度变化情况。如图 15~16 所示, 根据结构荷载-位移关系曲线可知, 随着混凝土强度的增大, 固支端初始抗压刚度 k 有所提高, C30 到 C40 混凝土, k 提高了 9.1%, C40 到 C50 混凝土, k 提高了 2.9%, F 基本保持不变, 为 8 400 kN。初期随着混凝土强度的增大, 结构初始刚度提高更为明显, 当使用高强混凝土时, 固支端整体抗压性能的提升速率逐渐趋于平缓。不同混凝土厚度对结构抗压性能影响很小, F 和 k 基本保持不变。

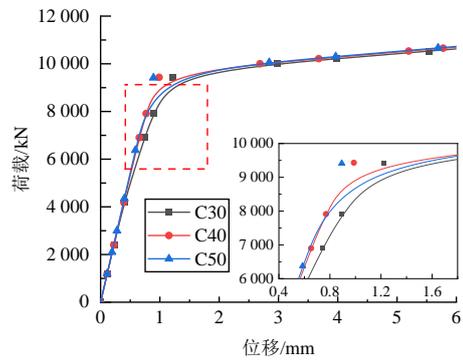


图 15 混凝土强度对抗压性能影响

Fig. 15 Effect of the concrete strength on the compressive performance

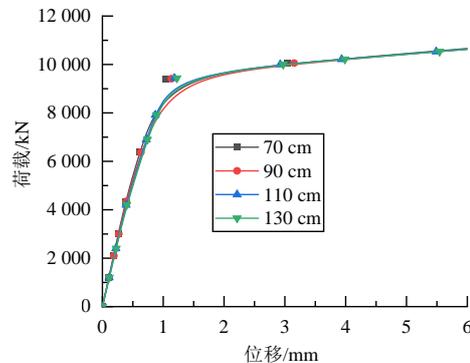


图 16 混凝土厚度对抗压性能影响

Fig. 16 Effect of the concrete thickness on the compressive performance

(2) 抗弯承载性能

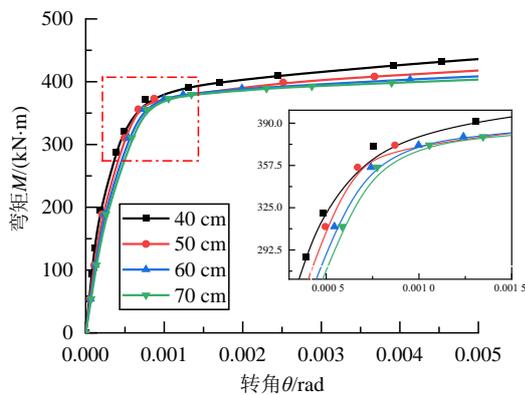
构件在偏心受力作用下会产生一定的倾斜和转角位移, 为研究固支端的抗弯性能, 模型分析了相同偏心距 (45 mm) 情况下, 钢管短接段长度、模袋混凝土厚度和强度对抗弯刚度的影响。取短接头法兰盘上表面中心 O 点的弯矩-转角曲线作为模型的弯矩-转角曲线, 弯矩 $M=Fe$, 其中 F 为模型某一时刻施加的荷载, e 为偏心距, θ 为 O 点的转角。

如图 17~18 所示为不同影响因素工况下模型

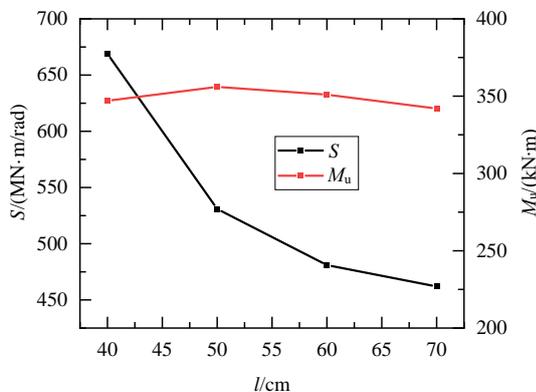
的弯矩-转角曲线, 模袋混凝土强度和厚度对固支端抗弯承载性能影响小, 钢管短接段长度 l 是影响结构抗弯性能的主要因素, 抗弯性能随着 l 的增加而减小。 l 由 40 cm 增加到 50 cm 时, 初始抗弯刚度 S 降低最为明显, 为 20.1%, 由 50 cm 增加到 60 cm, 再由 60 cm 增加到 70 cm 时, S 分别降低了 9.4% 和 4.1%, 随着短接段长度的增加, S 的降低速率越来越小, 而抗弯承载力 M_u 基本保持不变。

(3) 固支端与钢楔式活络头承载性能对比

目前基坑工程钢支撑端节点的传统形式为钢楔式活络头, 包括固支端、钢楔及活动端等部件, 如图 19 所示。钢楔式活络头具有安装简易、快速便捷的优势, 通过活动端的伸缩能够达到调节钢支撑整体长度的目的。在实际应用中, 钢楔式活络头钢楔塞入部位易错位松动, 导致钢支撑出现预应力损失、支撑结构偏心受力, 甚至由于局部弱化发生钢支撑体系的连续倒塌破坏。为此, 张明聚等^[15] 在施工现场抽取了多组钢楔式活络头进行室内轴向加载试验, 根据其试验结果与高脚螺栓-模袋混凝土固支端进行对比分析。



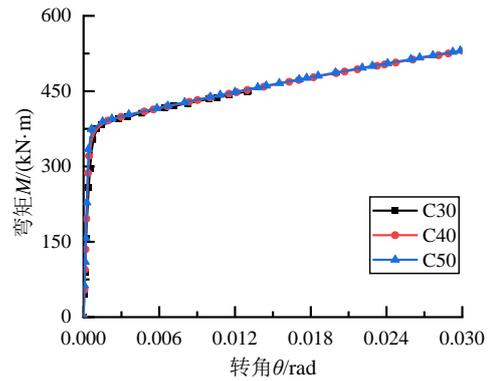
(a) 弯矩-转角曲线



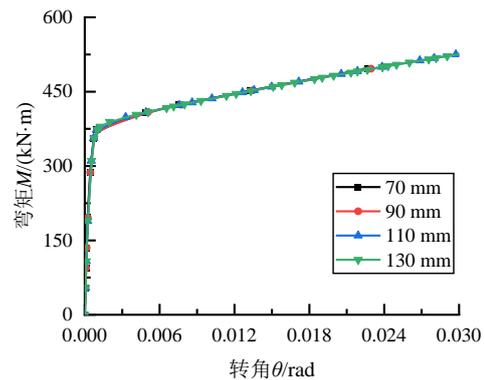
(b) l 与 S 和 M_u 的关系曲线

图 17 短接段长度对抗弯性能的影响

Fig. 17 Effect of the short segment length on the bending performance



(a) 混凝土强度



(b) 混凝土厚度

图 18 混凝土对抗弯性能的影响

Fig. 18 Effect of the concrete on the bending performance



图 19 钢楔式活络头

Fig. 19 Steel wedge-type winding head

钢楔式活络头试验试件分为单厢式 (DXD) 和双厢式 (SX), 钢楔形式包括子母楔和单面楔, 其中 DXD1 为单面楔, 其余均为子母楔。如图 20 所示为钢楔式活络头和固支端结构的荷载-位移变化曲线, 钢楔式活络头屈服荷载最大为 4 790 kN, 低于固支端结构, 仅达到其屈服荷载的一半; 且钢楔式活络头加载至屈服状态时的最大位移为 25~35 mm, 其初始刚度也明显低于固支端结构, 由此得出: 固支端结构相较于传统的钢楔式活络头, 线性阶段承载力和初始刚度等力学性能更优异。试验指出钢楔式活络头在破坏后钢楔块产生了过度变形, 这是由于钢楔在塞入过程中操作不当发生位置偏移使得接触表面不平整, 或其自身在压力作用下会相互挤压造成的。因此, 钢楔块

的应力集中现象会导致活络头的承载力低于强度设计值, 而高脚螺栓-模袋混凝土固支端利用模袋内填充混凝土技术, 以面接触的受力形式避免了此类现象的发生。

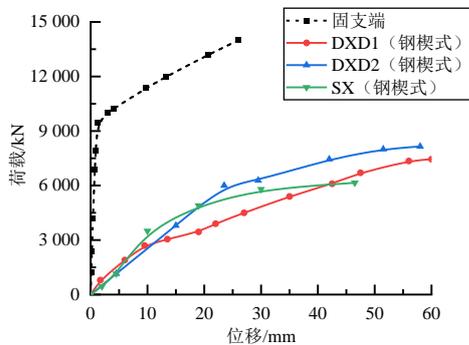


图 20 荷载-位移变化曲线

Fig. 20 Load-displacement curves

4 结 论

本文提出了一种钢管内支撑高脚螺栓-模袋混凝土固支端节点, 详细阐述了其结构组成和工作原理, 并分析了固支端承载性能, 主要结论有:

(1) 固支端设计原理是依靠模袋混凝土填充端部空隙, 高脚螺栓和混凝土组合承载, 法兰盘为空心状, 避免由于施工误差导致脱空引起刚度损失。

(2) 固支端具有可调节支撑体系长度、施加预应力的特点, 能承受压、弯、拉、剪应力, 承载力高、刚度大。

(3) 固支端抗压屈服荷载为 9 231 kN, 承载性能随偏心距的增大而降低, 随混凝土强度等级的增大而提升, 与模袋混凝土厚度相关性较小。

(4) 固支端抗弯承载力主要与钢管短接段长度有关, 随短接段长度的增加, 抗弯刚度下降率先增大后减小。

(5) 固支端结构在设计时应确保模袋接缝缝制牢固, 根据钢支撑实际受力状况, 重点调整高脚螺栓、模袋混凝土强度等级和钢管短接段长度等参数, 以满足钢支撑体系标准段和两端固支端等刚等强为最优方案。

参考文献

[1] TAN Y, LI M. Measured performance of a 26 m deep top-down excavation in downtown Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(5): 704-719.

[2] EL-SAWY K M. Inelastic stability of liners of cylindrical conduits with local imperfection under external pressure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 33(1): 98-110.

[3] ZHANG M J, XIE Z T, LI P F. Experimental and numerical investigation on the bearing capacity of disconnectable coupling (DC) joints for prestressed internal bracing in subway excavations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103501.

[4] 张明聚, 谢治天, 李鹏飞, 等. 基于有限元分析的基坑工程钢支撑活络端偏心受压性能研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 106-116.

ZHANG Ming-ju, XIE Zhi-tian, LI Peng-fei, et al. Research on eccentric compression performance of steel support live end of foundation pit engineering based on finite element analysis[J]. Journal of Civil Engineering, 2021, 54(10): 106-116.

[5] 张明聚, 谢治天, 刘耀轩, 等. 地铁基坑工程钢支撑活络端力学性能及改进措施[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(3): 66-73.

ZHANG Ming-ju, XIE Zhi-tian, LIU Yao-xuan, et al. Mechanical properties and improvement measures of steel support active end of subway foundation pit engineering[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(3): 66-73.

[6] 肖晓春, 袁金荣, 朱雁飞. 新加坡地铁环线 C824 标段失事原因分析(二)——围护体系设计中的错误[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(6): 28-34.

XIAO Xiao-chun, YUAN Jin-rong, ZHU Yan-fei. Cause analysis of the accident in section C824 of Singapore Metro Ring (II) ——Errors in the design of enclosure system[J]. Modern Tunnel Technology, 2009, 46(6): 28-34.

[7] 张旷成, 李继民. 杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 338-342.

ZHANG Kuang-cheng, LI Ji-min. Accident analysis of “08.11.15” foundation pit collapse at Xianghu Station of Hangzhou Metro[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 338-342.

[8] 黄宏伟. 基坑围护结构支撑轴力的动态变化分析[C]//第七届全国结构工程学术会议论文集(第三卷). 石家庄, 1998: 505-509.

HUANG Hong-wei. The dynamic change analysis of the axial force of the retaining structure of the foundation pit[C]//The Seventh National Symposium on Structural Engineering (Volume III). Shijiazhuang, 1998: 505-509.

[9] 王振信. 从基坑工程中汲取教训[C]//全国隧道与地下工程盾构施工技术及管片生产技术创新交流观摩会. 杭州,

