

大直径可回收锚杆力学特性数值分析

陈志博^{1, 2}, 王向军³, 丁文其^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘要: 大直径可回收锚杆具有单锚拉拔承载力大、经济性好的特点, 在基坑及边坡等各类支护工程中具有较好的应用前景。采用大型商业化有限元软件对大直径可回收锚杆的承载变形特性进行了数值模拟分析。通过参数分析表明: 大直径可回收锚杆的承载变形特性与锚固体的特性直接相关, 并给出其极限承载力随着锚固体长度和直径增大而增大的变化规律; 当锚杆的水平倾角在 $15^\circ \sim 35^\circ$ 之间时, 锚杆的承载变形特性优于其它角度时的承载变形特性。上述结论可为工程实践提供一定的参考价值。

关键词: 大直径可回收锚杆; 承载变形特性; 数值分析

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0172-05

作者简介: 陈志博(1988-), 男, 辽宁盘锦人, 硕士研究生, 主要从事基坑工程与地下工程数值计算的研究工作。E-mail: 060838fly@mail.tongji.edu.cn。

Numerical analysis of mechanical behaviors of large-diameter recoverable anchors

CHEN Zhi-bo^{1, 2}, WANG Xiang-jun³, DING Wen-qi^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. East China Architectural Design Institute, Shanghai 200002, China)

Abstract: The large-diameter recoverable anchor has many notable advantages, including good load-bearing capacity and economic benefits, thus it will have good application prospect in excavation and slope engineering. Based on the FEM, the bearing and deformation behaviours of large-diameter recoverable anchors are analyzed. The results indicate that the bearing and deformation behaviors of large-diameter recoverable anchors have a close relation with those of bonding segments. The ultimate bearing capacity increases with the growth of the length and diameter of bonding segments, and when horizontal angle of bonding segments is between 15° and 35° , the anchors have better behaviours. These results may provide reference for some projects.

Key words: large-diameter recoverable anchor; bearing deformation behavior; numerical analysis

0 引言

由于地层工程性质较差, 传统锚杆支护方式在软土地地区的应用受到极大限制; 并且锚杆杆体易出红线, 钢筋(钢绞线)等杆体在地下结构完工后留置于土层中, 成为邻近地下构筑物施工时的障碍物, 也不利于其在用地紧张区域的推广应用。而大直径可回收锚杆的工程实践有望改善锚杆支护方式在软土地地区基坑工程中的应用。大直径可回收锚杆属压力型锚杆, 其杆体与锚固体之间通过套管隔离, 在锚固体端部设置一承载板与杆体连接, 杆体受力后, 首先传递至承载板, 通过承载板作用于锚固体, 最后由锚固体与周边土层的摩阻力传递于周边土层^[1-2], 如图1所示。

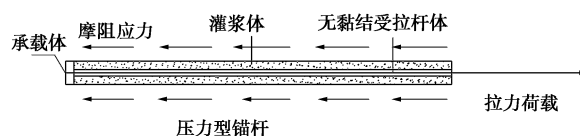


图1 压力型锚杆传力机理示意图

Fig. 1 Structure and stress mechanism of pressure-type anchor

当前对于压力型锚杆受力变形特性的研究并不少见, 且以理论和模型试验研究为主, 如赵明华等根据能量原理, 推导了压力型锚杆的轴力与位移计算式^[3];

基金项目: 上海市科委课题(10231200600); 上海市科委课题(11231202703)

收稿日期: 2012-08-24

张永兴等为研究在软质沉积岩条件下压力型锚杆的力学性能,进行了缩尺模型试验^[4];张爱民等利用无限体内一点受集中力作用的 Love 位移与应力函数解,得到压力型锚杆锚固段锚固效益特性^[5];孙玉宁等通过电测试验等方法对锚端可回收锚杆锚固段力学特征进行研究^[6]。

传统压力型锚杆在硬土地区应用较多,且锚固体直径多小于 300 mm,而当前大直径可回收锚杆的工程应用尚处于起步阶段,对于其承载变形特性的研究较为匮乏。大直径可回收锚杆是指利用特殊施工机械,在土层中用旋喷搅拌法形成水泥土桩体,并插入钢绞线(或钢筋、型钢)等锚筋,形成直径可达 300~800 mm 的压力型可回收锚杆。拟通过加大锚固体直径的方式,增大锚固体与周边土层的接触面,从而达到提高其承载力的目的。

此类大直径可回收锚杆在少数工程实践中得到了应用,但对其承载变形特性的研究很少见诸报道。本文拟通过大型商业化有限元软件 ABAQUS 对其受力过程进行模拟,并进行了不同长度,不同直径,及不同倾角等参数的影响分析。

1 数值分析简化模型

本文有限元模拟以某实际工程中的现场拉拔试验为对照,建立模型时参数均参考实际工程进行取值。为简化模型便于计算,通过加权平均法将多层土简化为均质土。锚固体重度同土体,锚固体直径为 500 mm,锚固段长 8 m,自由段长 9 m。由于单根锚杆拉拔试验对周边土体影响有限,因而土体范围尺寸为 25 m×10 m×14 m。其余部分参数具体如表 1 所示。

表 1 有限元数值模拟参数

Table 1 Simulation parameters of finite element analysis				
项目	重度 /(kN·m ⁻³)	凝聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模量 /MPa
土层	18.8	30	17	5.5
锚固体	18.8	60	34	300
锚索	—	—	—	210000
锚板	—	—	—	210000
挡墙	—	—	—	30000

数值模拟的几何模型如图 2 所示。

模拟分析中土体本构模型采用广义 Mohr-Coulomb 准则,接触问题采用基于直接约束的接触算法,在锚固体、锚板与土体的交界处分别设置接触面,并采用修正的滑动库仑摩擦模型。施工工况共分为 4 步:①平衡地应力;②施加挡墙,开挖部分土体,便于施加拉拔荷载;③施工锚杆杆体;④施加拉拔荷载,采用施加位移的加载方式。

为比较不同参数对锚杆力学特性的影响,在保证其他参数一致的情况下分别改变锚固体长度、锚固体直径与锚固体水平倾角,共建立 12 个模型并依照上述方式进行加载计算,结果如下。

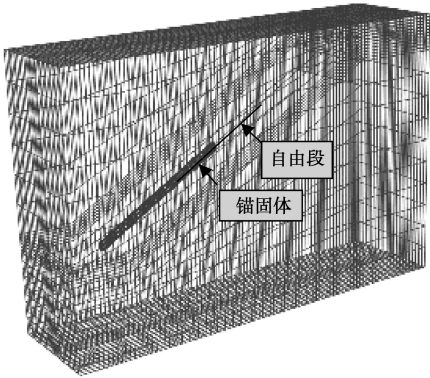


图 2 数值分析模型示意图
Fig. 2 Model of numerical analysis

2 数值模拟结果与分析

2.1 锚固体受力对周边土体的影响

初始模型施加位移荷载至极限状态时,整体变形云图与锚杆变形云图如图 3 所示。

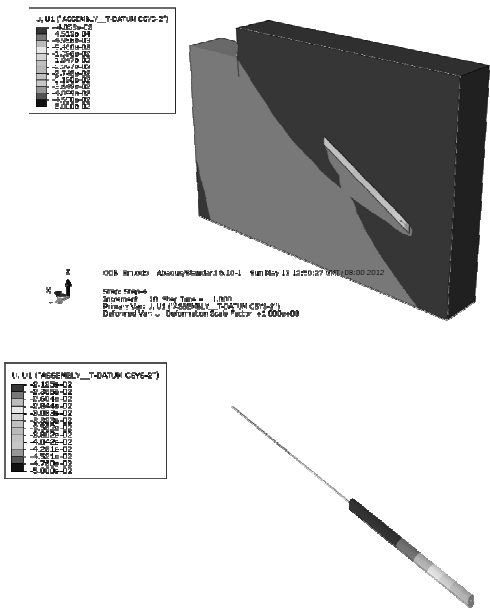


图 3 极限状态时整体与锚杆变形云图
Fig. 3 Nephogram of whole model and anchor in limit state

从极限状态时,锚固体与周边土层关系可以看出,产生变形的范围基本仅限于锚固体本身,对周边土层的影响较小,受影响土层范围约在 1 倍锚固体直径范围以内。从锚杆体的变形图可以看出,锚杆体将荷载通过承载板直接传递到锚固体中,锚固体底端锚板处的变形最大,达到约 30 mm,且锚杆体的变形量由底

端向顶端逐步递减, 锚固体顶端的变形值极小, 约为 2.5 mm。

现场共进行了 3 组拉拔试验, 将模型中不同荷载下的锚杆最大位移进行统计, 并与试验结果对比如图 4 所示。

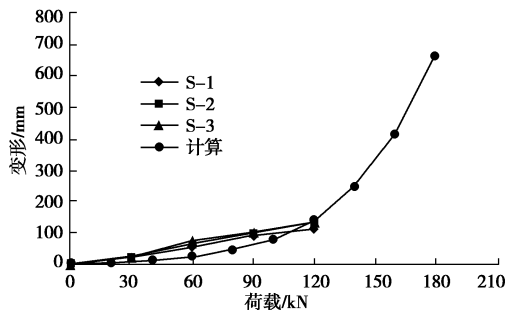


图 4 试验结果与模拟结果的荷载 - 位移曲线比较

Fig. 4 Comparison of load-displacement curves between test and simulated results

从图 4 可以看出, 有限元模拟计算结果与现场实测值较为接近, 表明此时的参数取值情况是较为合理的。

2.2 锚固体长度对大直径锚杆力学特性的影响

锚固体的长度对锚杆承载力有较大的影响, 图 5 为锚固体长度不同时, 锚杆顶部的荷载 - 位移曲线。

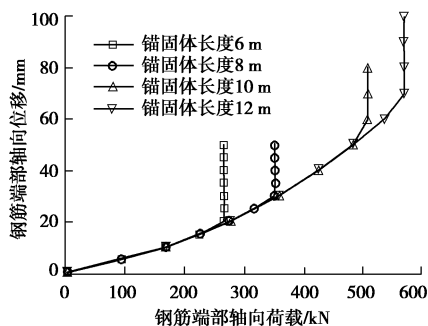


图 5 不同长度锚固体的荷载 - 位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of steel of bonding segments with various lengths

从图中可以看出, 随着锚固体长度增加, 锚杆的极限拉拔荷载也相应增加, 最大荷载与锚固体长度基本呈线性关系。因此增加锚固体长度可以显著增加锚杆能承受的最大荷载。图中也可以看出, 当锚固体长度从 8 m 增加至 10 m 时, 极限荷载从 350 kN 增大至 500 kN; 而当锚固体长度从 10 m 增加至 12 m 时, 极限荷载从 500 kN 增大至 580 kN。这表明在总长度 (锚固段 + 自由段) 不变的情况下, 随着锚固体的增大, 锚杆极限荷载不能无限增大。

图 6、图 7 为施加 275 kN 的拉力时, 不同长度锚杆的锚固体轴力分布曲线和侧摩阻力分布曲线。

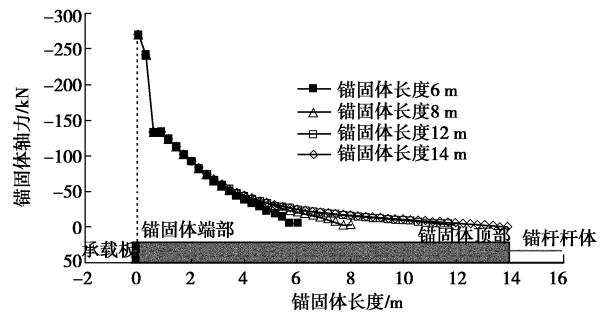


图 6 不同长度锚固体的轴力分布曲线

Fig. 6 Curves of axial force of bonding segments with various lengths

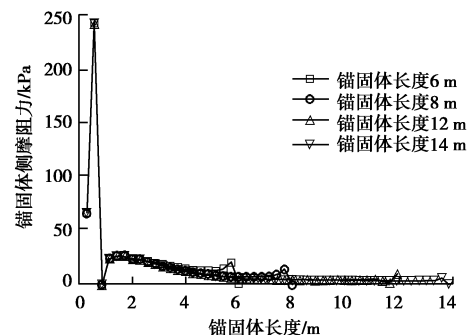


图 7 不同长度锚固体的侧摩阻力分布曲线

Fig. 7 Curves of side friction of bonding segments with various lengths

从图中可以看出, 不同长度锚固体的轴力与侧摩阻力分布均呈端部大, 并向顶部逐渐减小分布形态, 靠近端部的锚固体轴力可达顶部轴力的几十倍甚至上百倍。图中还可以看出, 靠近端部处约 4 m 范围内的轴力和侧摩阻力分布形态不受锚固体长度变化的影响。这也反映了压力型锚杆端部先受荷逐步往锚固体顶部传递的受力模式。

2.3 锚固体直径对大直径锚杆力学特性的影响

图 8 所示为锚固体直径不同时, 锚杆顶部的轴向荷载 - 位移曲线。

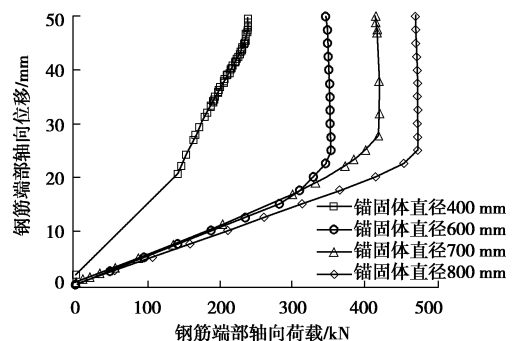


图 8 不同直径锚固体的荷载 - 位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of steel of bonding segments with various diameters

从图中可以看出, 锚固体能承受的极限荷载随直径的增加而线性增加。在相同拉拔荷载条件下, 锚固体直径越大, 其变形越小, 这也表明了大直径锚杆具有更好的承载变形特性。

图 9、图 10 为不同直径锚杆的锚固体轴力分布曲线和侧摩阻力分布曲线。

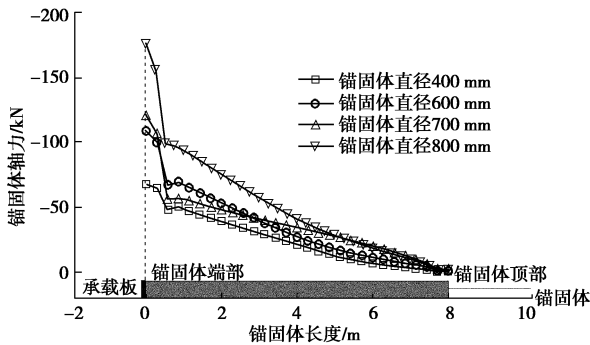


图 9 不同直径锚固体的轴力分布曲线

Fig. 9 Curves of axial force of bonding segments with various diameters

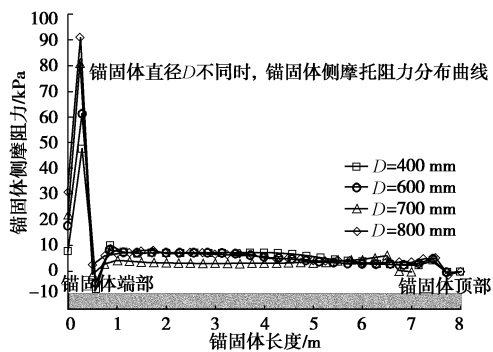


图 10 不同直径锚固体的侧摩阻力分布曲线

Fig. 10 Curves of side friction of bonding segments with various diameters

从两图中可以看出, 锚固体轴力及侧摩阻力分布模式与不同长度时锚杆锚固段轴力及侧摩阻力的分布模式基本一致。且随着锚固体直径增加, 锚固体上同一点轴力基本呈增加趋势, 锚固体侧摩阻力相差很小。这也说明锚固体直径越大, 其能承受更大的拉拔荷载。

2.4 锚固体倾角对大直径锚杆力学特性的影响

图 11 为锚杆水平倾角不同时, 锚杆顶部的荷载 - 位移曲线。从图上中可以看出, 锚固体倾角为 10° 和 20° 时的受力性能明显优于 0° 和 45° 时的受力性能, 表现为端部达到相同位移时, 前者能承受的荷载明显大于后者能承受的荷载。且在相同荷载条件下, 锚固体倾角为 10° 和 20° 时的变形小于 0° 和 45° 时的变形。这说明了锚杆倾角存在一个合理的范围值, 我国地基基础设计规范^[7]中建议锚杆倾角范围为 $15^\circ \sim$

35° 。

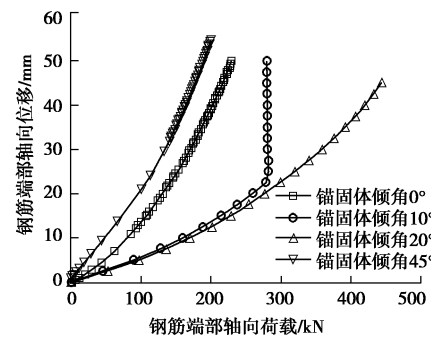


图 11 不同倾角锚固体的荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of steel of bonding segments with various angles

图 12、图 13 为不同倾角锚杆的锚固体轴力分布曲线和侧摩阻力分布曲线。

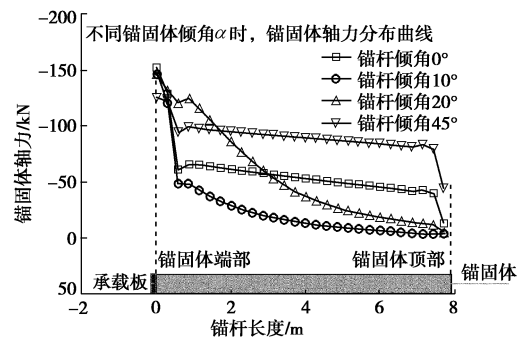


图 12 不同倾角锚杆的锚固体轴力分布曲线

Fig. 12 Curves of axial force of bonding segments with various angles

从图 12 中可以看出, 虽然不同角度的锚杆轴力分布形态均为顶部较小、端部较大, 但锚杆与水平方向夹角为 10° 和 20° 时, 锚杆的轴力分布呈现出不同于 0° 和 45° 轴力分布的形态特征; 前者的轴力变化基本呈曲线型, 仅在锚固体端部有突变; 而后的轴力变化呈分段直线型, 在锚固体的顶部和端部均有跳跃式的突变, 中间段轴力变化较小。从图 13 中可以看出,

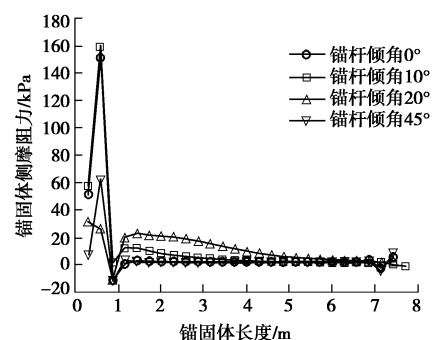


图 13 不同倾角锚固体的侧摩阻力分布曲线

Fig. 13 Curves of side friction of bonding segments with various angles

对各角度锚固体在同一点处的侧摩阻力进行对比,基本趋势为: $20^\circ > 10^\circ > 0^\circ \approx 45^\circ$ 。综合上述两图可知,锚固体与水平方向夹角过小(0°)或过大(45°)均不利于锚杆受力,体现在锚固体轴力呈现“两头突变,中间力小”的形态特征,中间段锚固体不能很好地发挥承载能力。

3 结 论

大直径可回收锚杆很好地弥补了传统锚杆的不足之处,具有广阔的前景。其工程实践及相关的理论研究也处于起步阶段。本文通过建立有限元模型对锚杆的受力形态和与周边土体的相互作用进行计算分析,并通过多个模型分析不同参数对锚杆力学特性的影响,得到的主要结论有:

(1) 锚杆对周边土层的影响很小,受影响土层范围约在1倍锚固体直径范围以内;

(2) 锚固体轴力和侧摩阻力在顶部较小,靠近端部处急剧增加,且靠近端部处轴力不受锚固体长度变化影响;

(3) 锚固体的最大承载力随直径和长度的增加而增加;

(4) 通过不同锚杆倾角模型对比分析得到,夹角过小或过大均导致锚固体受力性能变差,夹角在 $15^\circ \sim 35^\circ$ 间为宜。

参考文献:

- [1] 崔江余. 基坑锚杆支护破裂面模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 337 - 340. (CUI Jiang-yu. Mode analysis of sliding plane for foundation pit anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 337 - 340. (in Chinese))
- [2] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 188 - 192. (ZHANG Ji-ru, TANG Bao-fu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 188 - 192. (in Chinese))
- [3] 赵明华, 刘思思, 黄利雄, 等. 基于能量原理的压力型锚杆数值模拟计算[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 529 - 534. (ZHAO Ming-hua, LIU Si-si, HUANG Li-xiong, et al. Numerical simulation of pressure-type anchor based on energy principle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 529 - 534. (in Chinese))
- [4] 张永兴, 卢 黎, 饶泉宇, 等. 压力型锚杆力学性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2043 - 2050. (ZHANG Yong-xing, LU Li, RAO Xiao-yu, et al. Model test research on mechanical behavior of compression type rock bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2043 - 2050. (in Chinese))
- [5] 张爱民, 胡毅夫. 压力型锚杆锚固段锚固效应特性分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 271 - 275. (ZHANG Ai-min, HU Yi-fu. Anchoring effect of pressure-type anchor rods on anchored section[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 271 - 275. (in Chinese))
- [6] 孙玉宁, 周鸿超, 宋维宾. 端锚可回收锚杆锚固段力学特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 3014 - 3021. (SUN Yu-ning, ZHOU Hong-chao, SONG Wei-bin. Research on mechanical character of bonding segment of end-anchored retrievable resin bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 3014 - 3021. (in Chinese))
- [7] GB50007—2011 建筑地基基础规范[S]. 2011. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)