

DOI: 10.11779/CJGE201705004

透明土中连续球体型锚杆拔出机理研究

夏元友¹, 陈 晨¹, NI Qing²

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. School of Engineering, University of Warwick, Coventry, UK CV4 7ES)

摘 要: 采用透明土材料和粒子图像测速法 (PIV) 技术, 通过物理模型试验研究锚杆拔出机理。在模型试验中采用 A、B 两种不同尺寸的连续球体锚杆锚固段, 试验获得各锚杆锚固段上移对周围土体的扰动规律、锚杆位移与锚固力变化曲线以及拔出破坏时破裂面的位置及形状。通过分析连续球体锚杆锚固段的极限承载力和锚固段破坏机理, 推导出连续球体锚杆抗拔力的计算公式。试验结果分析表明: 本文试验条件下, 锚杆拔出时竖向位移最大影响范围与连续球体的半径和间距有直接关系; A、B 型连续球体锚杆的极限承载力, 分别比普通圆柱型锚杆提高 52% 和 117%; 连续球体锚杆锚固段在上拔破坏过程中抗拔力的贡献可分为 3 个部分: 直杆与土层的黏结、肩部端承力和黏土黏聚力。

关键词: 土层锚杆; 模型试验; 透明土; 土体位移; 锚固机理

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)05 - 0804 - 09

作者简介: 夏元友(1965 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学与研究。E-mail: xiayy1965@126.com。

Pull-out mechanism of continuous ball shape anchors in transparent soil

XIA Yuan-you¹, CHEN Chen¹, NI Qing²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Engineering,

University of Warwick, Coventry, CV4 7ES, UK)

Abstract: A physical modelling system is developed to study the pull-out mechanism of embedded soil anchors using transparent soil and particle image velocimetry (PIV). In the system, two different continuous ball shape anchors are set in the experiment to observe displacement impact areas, soil displacement, load-displacement curve and shape and location of pull-out failure interface. After analyzing the ultimate bearing capacity and the failure mechanism of the soil anchors, a suggested method is given. From the results, based on the circumstances of this model, the maximum vertical displacement impact areas have direct relationship with the radius of the ball and the distance between the balls during pull-out of the soil anchors. The continuous ball shape soil anchors (type A and B) can effectively provide 52% and 117% more force than the normal cylinder anchors. The pull-out force of the continuous ball shape soil anchors can be divided into three different parts: adhesion on shaft, end bearing in clay and cohesive through clay.

Key words: soil anchor; model test; transparent soil; soil displacement; anchoring mechanism

0 引 言

各种类型的土层锚杆在岩土加固工程中得到广泛应用, 根据土体的不同类型和工程施工要求, 高压注浆产生的异形锚杆锚固段也备受关注。目前国内锚杆的锚固体常用结构大致可分为圆柱型、端部扩大头型和连续球体型三类。在淤泥、淤泥质土层及要求有较高承载力的锚杆宜采用连续球体型锚固体^[1]。锚杆利用土体本身的抗剪强度与周围土体和构造物拉力的传递, 来提供足够的锚固力。高压注浆产生的异形锚杆锚固段是利用高压注浆来提高锚固段与土界面的压力, 以及不同锚杆锚固段的抗拔结构来提高锚固力的。对端部扩大头型锚杆, 许多学者开展过深入的研究。郭钢等^[2]通过室内模型试验研究了不同深径比的扩体

锚杆在不同埋深条件下存在的 3 种破坏模式, 同时郭钢等^[3]还通过模型试验对扩体锚杆拉拔过程中锚固段的破坏形态进行了深入研究, 建立了扩体锚杆破坏模型与承载力计算方法。李志刚等^[4]通过对比高压注浆土钉与普通土钉的力学性质, 说明了高压注浆土钉的优越性。张慧乐等^[5]通过改变扩体锚杆尺寸进行模型试验研究, 研究发现扩体锚固段直径因素对锚杆的极限承载力影响很大, 而扩体段长度因素对扩体锚杆极限承载力影响相对较小。胡建林等^[6]通过对扩体锚杆工艺试验和拉拔试验研究发现扩体锚杆较普通锚杆的

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51374163)

收稿日期: 2016 - 08 - 28

承载力平均提高 20%~30%，同时发现扩体锚杆的轴向应变陡降现象明显，具有明显的端承效应。锚杆的极限抗拔荷载值通常作为锚杆安全特性的重要指标之一，为此学者们也对锚杆拔出时的轴力进行了大量研究。赵明华等^[7]通过对锚杆在拔出过程中剪胀效应的研究，建立了适当的荷载传递函数，探讨了锚杆锚固段摩阻力沿锚固长度的分布规律及其影响。黄明华等^[8]对拉力型锚杆锚固段的受力通过实测数据进行对比验证，发现锚杆锚固段荷载传递经历加载和滑移破坏两个阶段。韩军等^[9]根据试验资料分析了影响锚杆灌浆体与岩土体间黏结强度因素，发现在计算锚杆抗拔力公式中对不同锚固长度的锚杆均采用单一的黏结强度值是不合理的，而应引入锚固长度对黏结强度的影响系数。陈昌富等^[10]通过室内锚杆拉拔试验，对锚-土界面摩擦特性进行研究，提出了一种锚-土界面全过程本构模型。Kilic 等^[11-12]通过对改变锚杆的不同粗细，不同长度，制作锚杆混凝土的不同养护时间，不同形状的扩体锚杆锚固段进行拔出试验，试验还对不同锚杆表面，扩大端的不同个数，锚杆不同长度分别进行了研究；通过试验发现圆锥形隆起的扩大端因为有肩部效应，能够提供很好的锚固力。Chai 等^[13]通过三轴试验和直剪试验对埋在砂土里的锚杆锚固段进行拔出试验，试验结果表明提供抗拔力的不仅是由剪切强度，还包括附加普通应力产生的膨胀效应。

由于实际工程中对土体内部的观测受到限制，难以对土体与锚杆锚固段界面特性进行研究，导致对于扩体锚杆的研究仅限于拉拔试验和数值模拟。在规范^[1]中对连续球体锚杆锚固段的规定相对较少，其他规范都基本没有涉及。本文基于透明土物理模型试验，根据规范中规定的连续球体锚杆锚固段进行锚杆拔出试验，探讨锚杆在竖直拔出时，锚杆的极限拔出荷载、锚固段上移对周围土体扰动规律及锚固段破坏机理问题。通过对比圆柱型与连续球体锚杆锚固段的试验，提出连续球体锚杆极限承载力计算公式。

1 模型试验系统

1.1 模型锚杆的选型及制作

锚杆采用经过攻丝的钢条外面包裹上混凝土材料来模拟真实的注浆体^[14]。制作出的成品如图 1 (a) 所示，锚杆锚固段详细尺寸如图 1 (b) 所示，锚杆头部加塑料套管模拟自由段如图 1 (c) 所示。

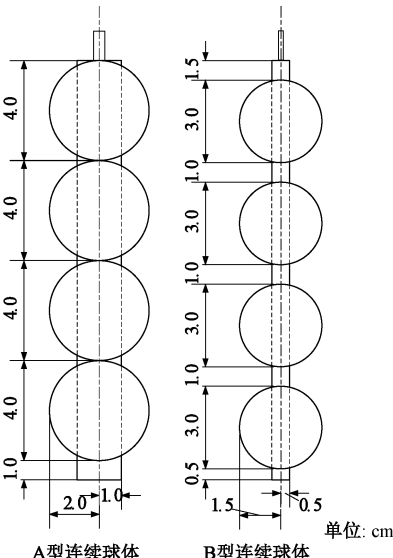
1.2 透明土材料准备与固结

透明土是由矿物油和硅粉混合而成，油和硅粉 (Hi-Sil T600) 的质量比为 9%^[15]，其中矿物油包括 N-Paraffin C5-C20 和 Technical White Oil 15，两种油的最佳配比随温度的高低而变化^[16-18]。混合均匀的透

明土放入尺寸为 20 cm×20 cm×30 cm 的有机玻璃盒子里分四次进行横向固结，其间将锚杆埋入^[14]。试验用透明土，通过十字板剪切试验 (图 2) 测得透明土不排水抗剪强度为 $C_u=12.71$ kPa。其工程性质类似天然黏土，但是其强度会略大于普通黏土。此透明土材料，Iskander 等^[18]已对其工程性质有过非常深入的研究。



(a) 连续球体锚杆实物图



(b) 连续球体锚杆尺寸



(c) 模拟试验锚杆自由段塑料套管

图 1 试验用锚杆和套管

Fig. 1 Soil anchors and plastic caps for tests

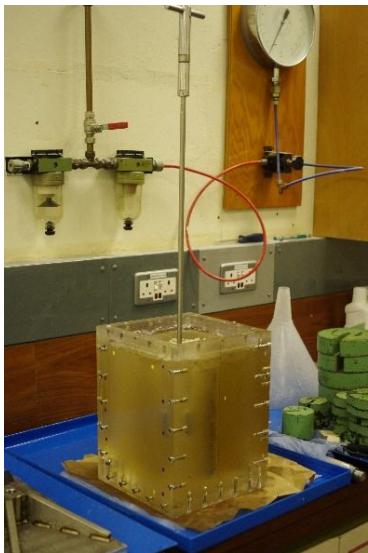


图 2 透明土的十字板剪切试验

Fig. 2 Vane shear tests on transparent soil

1.3 试验控制与测试

在试验中锚杆拔出的速度控制在 13.8 mm/min，这是由自主研制的试验机（见图 3）拔出时的参数与 DSLR 相机的拍摄速度来决定的。在试验中采用应力环对拔出时的锚杆轴力进行测试。



图 3 透明土试验控制与测试

Fig. 3 Control and measurement of transparent soil tests

2 试验结果与分析

2.1 锚杆锚固段周围土体位移矢量图

试验中用 DSLR 数码相机进行拍摄，拍摄的图片采用 Matlab 软件进行分析。首先将图中待分析区域划分成很多正方形网格，软件通过追踪每张图片上各个网格的位置来分析土体的位移，此方法称为“Geo-PIV”法，是 White 等^[19]首先提出和发展而来的。锚杆拔出过程中，锚杆锚固段周围的土体可以通过带箭头的矢量图来表示土体的位移趋势。锚杆从开始拔出经过时间 t 到锚固段破坏为止，两种尺寸的锚杆周围土体的位移矢量图分别如图 4（a）和 4（b）所示。

所示位移图都相对锚杆各自的最小半径 R 进行归一化处理^[15, 20-21]，网格尺寸为 50×50 pixels。由图 4 可知，锚杆锚固段从开始到锚固段破坏的时间区间 t 内，两种锚杆锚固段周围土体的位移规律基本相同。由图 4(a)可以看出 A 型锚杆最上面一个球体所产生的“肩部”效应并不明显，土体的竖向位移范围基本没有超过连续球体的直径所在的圆柱形区域。B 型锚杆由于钻孔半径与扩孔半径的差值大于 A 型锚杆，使得在锚杆锚固段顶端“肩部”位置产生的“肩部”效应较 A 型锚杆要明显。由于透明土的透明特性受温度影响很大，同时在 B 型锚杆拔出试验时由于粒子面部分粒子分布不是很均匀，可以从图 4（b）土体位移矢量图中看到部分位置出现不规则的“噪点”，但土体位移变化还是可以从图中清楚看出，不影响对整个土体位移场的分析。

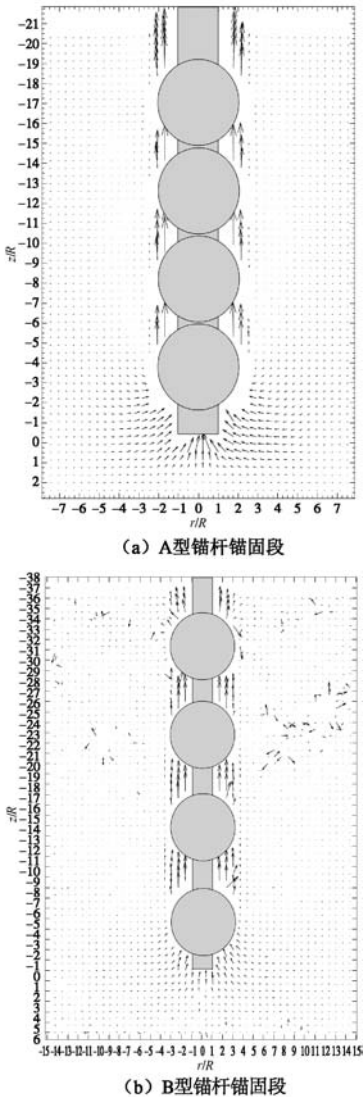


图 4 锚杆拔出过程中锚固段周围土体位移矢量图

Fig. 4 Displacement vectors around anchors under pulling process

2.2 锚杆周围土体位移等值线轮廓图

将锚杆各自破坏时间 t 分成 $0.2t$ 、 $0.6t$ 和 $1.0t$ 的不

同时段, 绘制出锚杆周围土体的水平位移和竖直位移的等值线图, 如图 5, 6 所示。同样所示位移图都相

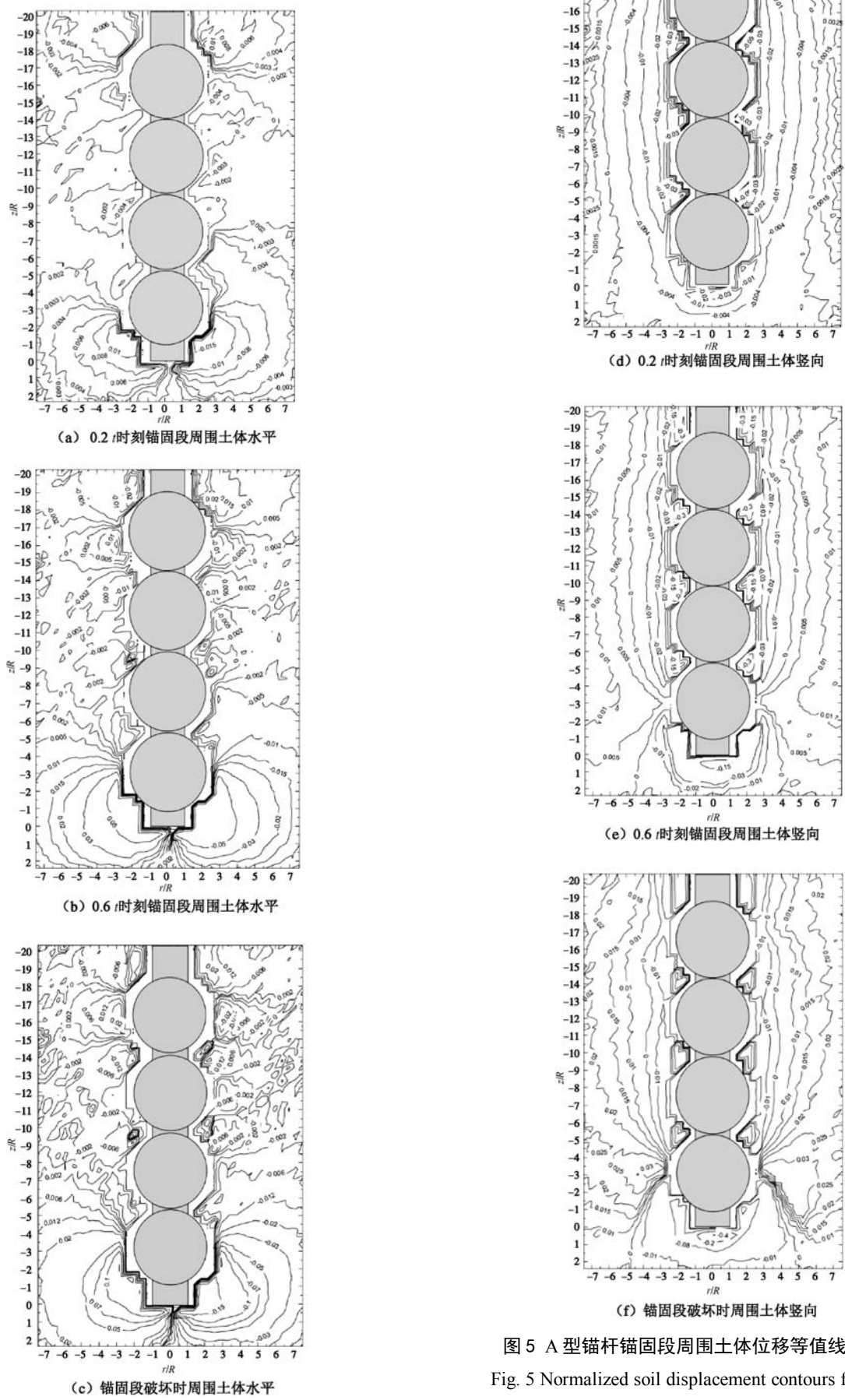
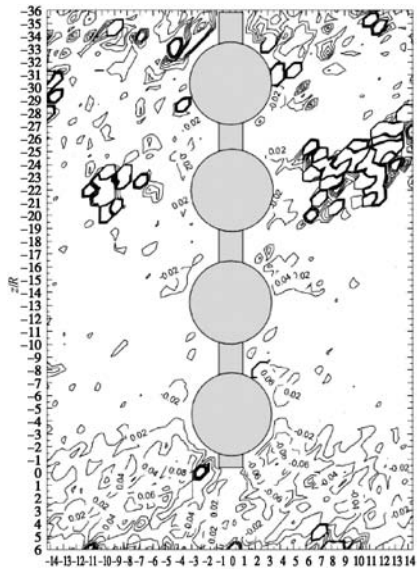


图 5 A 型锚杆锚固段周围土体位移等值线轮廓图

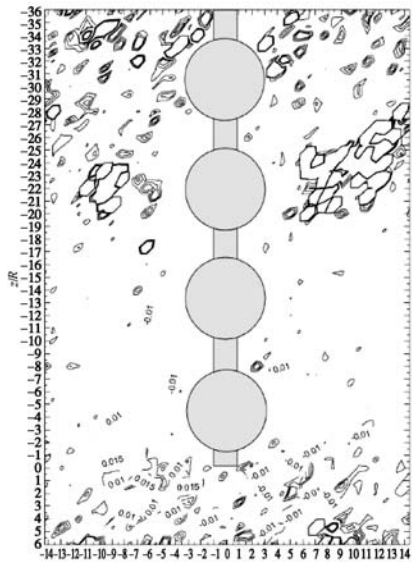
Fig. 5 Normalized soil displacement contours for type A

对锚杆各自的最小半径 R 进行归一化处理。在土体位移矢量图中出现的不规则“噪点”的原因,是由于温度变化影响了透明土的透明度,以及粒子面部分粒子分布不很均匀,在数据处理时“噪点”的部位形成类似斑块状的图形如图 6 所示,不影响对整个等值线场的分析。

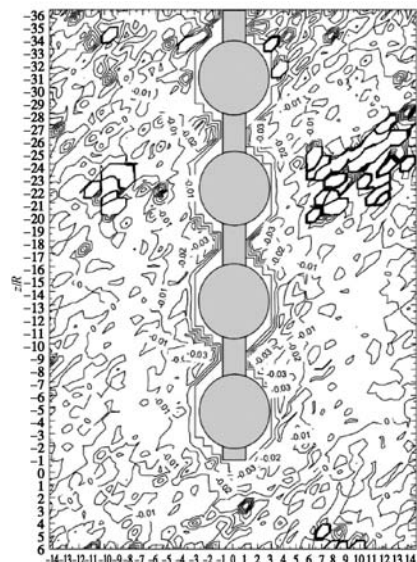
由于两种锚杆均属于连续球体锚固段,其钻孔半径、球体半径以及球体间距的不同,导致锚杆拔出形成的周围土体等值线轮廓图存在差异。由图 5, 6(a)~(c) 可知:两种锚杆在拔出过程中水平扰动除底端外都非常小。锚杆锚固段竖向位移等值线由图 5, 6(d)~(f) 所知:锚杆竖向位移等值线成纺锤型分布。4 个连续球体中其最下面球体下半球部分的锚固段基本没有参与抗拔过程,而 B 型锚杆这一现象不如 A 型锚杆明显。分析原因是 B 型锚杆钻孔半径、球体半径尺寸



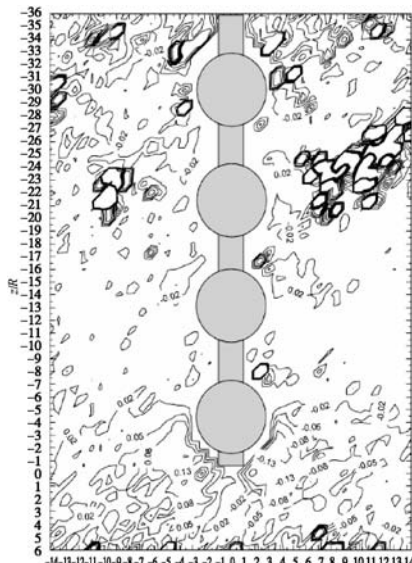
(c) 锚固段破坏时周围土体水平



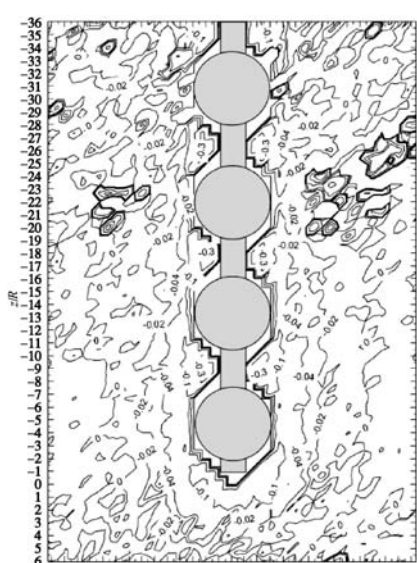
(a) 0.2 t 时刻锚固段周围土体水平



(d) 0.2 t 时刻锚固段周围土体竖向



(b) 0.6 t 时刻锚固段周围土体水平



(e) 0.6 t 时刻锚固段周围土体竖向

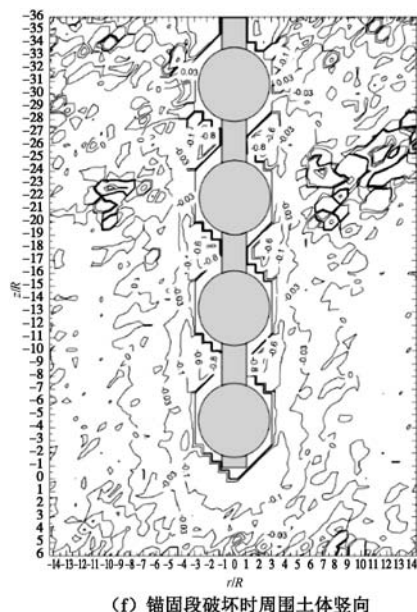


图6 B型锚杆锚固段周围土体位移等值线轮廓图

Fig. 6 Normalized soil displacement contours for type B

较A型锚杆小。以竖直方向位移等值线为零的线为锚杆拔出时竖向扰动范围的界限,靠近锚杆一侧在扰动范围内的土体随锚杆锚固段成上移趋势,另一侧在扰动范围外的土体则成下移趋势。这是由于在锚杆上拔过程中其底端部位会形成“空穴”,其周围的土体由于上部对土体施加竖向压力和自重的影响会向“空穴”部分进行挤压填充。由于试验使用的箱体体积限制,会导致这一现象较真实情况明显。图5,6中“+”号代表土体向下方移动,“-”号代表土体向上方移动。以等值线为零的线来确定锚杆拔出时的影响范围,可以看出锚杆在初期影响范围最大,而随后逐渐内缩,这种竖向剪切位移影响范围向剪切中心偏移内缩的现象也有研究学者提出类似结论^[22]。A型锚杆竖向位移扰动在 $0.2t$ 时刻达到最大的 $6R$;B型锚杆竖向位移扰动在 $0.2t$ 时刻达到最大的 $12R$ 。由图1(b)所示,A型锚杆钻孔半径为 1.0 cm ,球体半径为 2.0 cm ,B型锚杆钻孔半径为 0.5 cm ,球体半径为 1.5 cm 。

说明竖向位移影响范围与钻孔半径无直接关系,与球体的半径及球体的间距有直接关系。B型锚杆球体半径小于A型锚杆球体半径,而B型锚杆球体间距大于A型锚杆球体间距,导致每个球体的上半部“肩部”效果放大,使得两者的竖向位移扰动范围相当。试验中采用中间圆形开口的加压板对透明土体上部加压来模拟锚杆锚固段深埋的情况,如图7(a)所示。加压板中间圆形开口是为了方便锚杆拔出。由于加压板开口导致锚杆上部“肩部”效果降低。从图7(b)中也可以看出锚杆拔出时与土体间破裂面的情况。由于加压板的圆形开口影响,最上面的破裂面与加压板圆形开口面积相当,阻止了“肩部”效果的扩散作用。

从图5,6中也可以看出锚杆锚固段“肩部”的竖向位移曲线并没有形成明显的开口形状。而从第一个球体下半球及以下开始,拔出的锚杆锚固段与拔出的土体形成了圆柱形的混合体。最下面球体的下半球及以下并没有带出土体。

2.3 锚杆上拔过程中荷载-位移曲线

A、B型锚杆的上拔荷载与锚杆竖向位移曲线如图8可以看出,两种连续球体锚杆在初期荷载-位移曲线均非常接近于直线,具有良好的线性,B型锚杆达到锚固力峰值的时间要早于A型锚杆。两者最大上拔荷载值分别为A型锚杆 194.8 N ,B型锚杆 139.0 N 。



(a) 中间圆形开口的加压板 (b) 锚杆锚固段拔出时带出土体

图7 加压板与B型连续球体锚杆拔出试验图

Fig. 7 Compression plate and pull-out of continuous ball anchor of type B

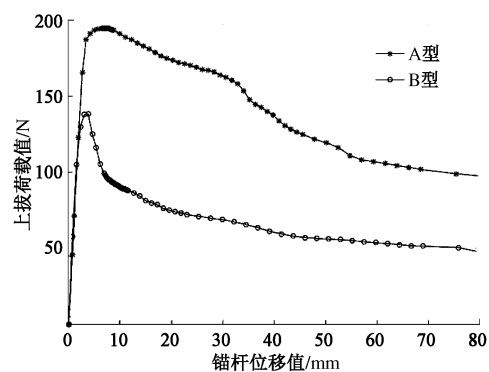


图8 锚杆上拔荷载-位移曲线图

Fig. 8 Load-displacement curves of soil anchors

通过模型试验发现,连续球体锚杆由于本身形状的差异,水平位移会有少量的波动,这与锚固段表面的凹凸有着直接的关系。普通圆柱型锚杆的试验结果^[14]如表1所示:普通圆柱型锚杆Y03是通过试验测出,Y01、Y02与Y04是通过圆柱型锚杆表面积计算得出。

其 A、B 型连续球体锚杆锚固段与各自钻孔半径尺寸的圆柱型锚杆锚固段 Y01 和 Y02 比较, 最大锚固力值分别提高了 52% 和 117%。如果 A、B 型连续球体锚杆锚固段与各自球体半径尺寸的圆柱型锚杆锚固段 Y03 和 Y04 比较, 则最大锚固力值分别减小了 24% 和 27%。

表 1 普通圆柱型锚杆试验与计算结果

Table 1 Calculated and test results of regular cylindrical anchors

圆柱型锚杆	半径/cm	最大轴力值/N
Y01	1.0	128.3
Y02	0.5	64.1
Y03	2.0	256.6
Y04	1.5	190.4

在扩体锚杆(包括连续球体锚杆)承载力计算时, 通常把扩体锚杆锚固段在拔出时锚固段破坏面等同于扩体锚固段最大半径相等的圆柱体的破坏面^[23]。从模型试验中看出, 连续球体锚杆锚固段其实相比相同球体半径的圆柱型锚杆锚固段的最大抗拔荷载值会有不同程度的减弱。这是由于试验条件所限, 锚固段“肩部”效应并不是十分明显, 导致“肩部”效果所产生的锚固力增大不明显。本试验加压板圆形开口与锚固段间隙中的土体并没有竖向的约束, 在锚杆锚固段“肩部”附近的土体会随着锚杆的拔出而竖向移动, 这也导致在锚杆“肩部”附近土体最先破坏而失去抗拔力。在试验中发现锚杆锚固段与周围土体的破裂面会有轻微的波浪状形成, 但是锚固段主体部分基本保持圆柱体的破裂面。其最下面一个球体的下半部分不参与抗拔, 最终的锚杆锚固力进一步减小。

2.4 锚杆锚固段抗拔荷载公式

目前国内外规范中, 还没有针对连续球体型扩体锚杆锚固段的计算公式, 在规范^[1]中, 只是对连续球体锚杆的施工方法以及样式进行了规定, 同时提出锚固于淤泥、淤泥质土层对要求有较高承载力的锚杆, 宜采用连续球体锚固体。在分析处理锚杆拔出破坏时的位移云图(见图 5, 6), 可以看到在连续球体间的土体竖向位移与锚杆拔出时的锚杆锚固段位移基本相同, 所以在计算连续球体间破裂面的时候可以看成类似圆柱型锚杆锚固段破裂面来考虑。由水平位移等值线图同时可以看出, 锚杆最下面球体的下半球并没有参与抗拔过程, 这是由于下半球面与土体在拔出过程中不能形成相对滑动的物理状态, 而圆弧的上半圆会产生类似“肩部”的效果。

将连续球体锚杆锚固段在拔出时产生的抗拔力分为 3 个部分来分析(如图 9 所示): ①直杆与土层的黏结破坏, ②肩部端承力破坏, ③黏土黏聚力破坏。

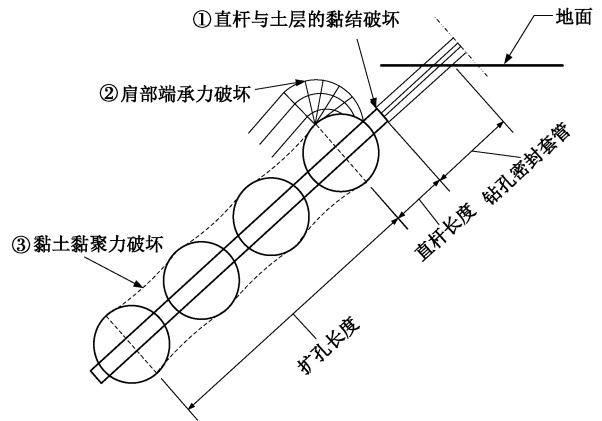


图 9 连续球体型锚杆拔出破坏时极限承载力示意图

Fig. 9 Diagram of continuous ball shape anchor at ultimate capacity

(1) 直杆与土层的黏结破坏

Littlejohn^[24]提出的锚杆锚固段最大抗拔荷载计算公式与国内规范^[25]相同:

$$T_s = \pi d l C_a \quad (1)$$

式中, d 为直杆部分直径即钻孔直径 (m), l 为直杆部分长度 (m), C_a 为直杆部分注浆体与土层间的摩阻强度标准值 (kPa)。

(2) 肩部端承力破坏

$$T_E = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) N_c C_u k \quad (2)$$

式中, D 为扩大头球体直径 (m), C_u 为扩浆体与土层间的摩阻强度标准值, N_c 为端承力系数(通常值取为 9), 中国规范^[1, 25]及英国规范^[26]在此处取值相同, k 为经验折减系数, 出于对施工方法和注浆方法不同, 一般取值区间为 0.75~0.95。在一些特殊情况下, 如在锚杆锚固段周围有砂或空气等原因折减系数可以取为 0.5^[26]。

(3) 黏土黏聚力破坏

$$T_C = \pi k D L C_u \quad (3)$$

式中, L 为扩孔长度(锚杆首尾两个连续球体圆心之间的距离), k 为经验折减系数, 出于对施工方法和注浆方法不同, 一般取值区间为 0.75~0.95。在一些特殊情况下, 如在锚杆锚固段周围有砂或空气等原因折减系数可以取为 0.5^[26]。

综上所述连续球体锚杆锚固段公式为

$$T = T_s + T_E + T_C \quad (4)$$

即

$$T = \pi d l C_a + \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) N_c C_u k + \pi k D L C_u \quad (5)$$

由于试验中锚杆锚固段采用的是混凝土材料, 表面十分粗糙, 在拔出破坏时, 土体会附着在锚杆锚固段表面, 从而锚固段与土体间的破坏面其实是发生在紧邻混凝土表面的土体, 由此可知式(5)中的 $C_a = C_u$ 。

由于本试验仪器的限制会导致锚杆锚固段“肩部”效果减弱,使得对轴力的贡献很小。由于这种特殊原因,通过式(4)、(5)计算锚固力时不将 T_E 纳入公式中计算。而实际工程中由于锚杆锚固段一般深埋地表以下一定深度,则应该考虑“肩部”作用的影响,计算时应将 T_E 纳入式(4)、(5)中计算。

在式(5)中 k 取值为0.95,对A、B两种连续球体锚杆试验的计算值与试验值进行比较,结果见表2。

表 2 A、B 型锚杆计算值与试验值比较

Table 2 Comparison between calculated and test results of soil anchors of types A and B				
类型	A 型		B 型	
	计算	试验	计算	试验
极限抗拔荷载/N	198.0	194.8	148.5	139.0
误差/%	1.6		6.8	

3 结论与建议

对高压注浆的异形锚杆研究越来越引起岩土工程领域的重视。在参考了中国与英国规范,对两种连续球体锚杆锚固段竖向拔出进行了模型试验研究,分析了锚杆拔出时的土体位移及破裂面,并推导了连续球体锚杆锚固段抗拔极限承载力公式。得出以下 5 点结论与建议。

(1)连续球体锚杆锚固段在上拔过程中的竖向位移影响范围与锚杆的钻孔半径无关,而与连续球体半径及球体间距有直接关系。

(2)此次试验中,两种连续球体锚杆锚固段比各自的钻孔半径圆柱形锚杆锚固段最大锚固力值分别提高了 52%和 117%。

(3)连续球体锚杆锚固段在上拔过程中其抗拔力计算可以分为 3 个部分,分别为:①直杆与土层的黏结,②肩部端承力;③黏土黏聚力。锚杆锚固段最下面一个球体的下半球面不参与抗拔过程,建议在设计时对最下面球体的下半球及以下的钻孔长度不计入抗拔计算。

(4)基于试验结果,推导出了连续球体锚杆锚固段抗拔极限承载力公式,此次推导的公式是在透明土模型试验基础上提出的,其实用性有待工程的进一步检验。

(5)由于试验仪器的限制使得锚杆锚固段的“肩部”效果不明显,但在实际工程中需要考虑“肩部”端承效果的影响。对试验设备与试验设计还需要在今后的试验中进一步完善。

致 谢:感谢国家留学基金委公派第二作者去英国华威大学作

为联合培养博士研究生进行了为期 14 个月的研修。

参考文献:

[1] CECS 22:90 土层锚杆设计与施工规范[S]. 1990. (CECS 22:90 Code for design and construction of soil anchors[S]. 1990. (in Chinese))

[2] 郭 钢, 刘 钟, 杨 松, 等. 不同埋深扩体锚杆竖向拉拔破坏模式试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 123 - 127. (GUO Gang, LIU Zhong, YANG Song, et al. Model test research on failure modes of different embedded depth under reamed ground anchor under vertical pullout[J]. Industrial Construction, 2012, 42(1): 123 - 127. (in Chinese))

[3] 郭 钢, 刘 钟, 李永康, 等. 扩体锚杆拉拔破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1677 - 1684. (GUO Gang, LIU Zhong, LI Yong-kang, et al. Model test research on failure mechanism of underreamed ground anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1677 - 1684. (in Chinese))

[4] 李志刚, 任佰俤, 秦四清. 高压注浆土钉特性及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1564 - 1567. (LI Zhi-gang, REN Bai-li, QIN Si-qing. Characteristics and applications of high-pressure grouting soil nailing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1564 - 1567. (in Chinese))

[5] 张慧乐, 刘 钟, 徐龚鑫, 等. 扩体锚杆尺寸效应模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 468 - 472. (ZHANG Hui-le, LIU Zhong, XU Yan-xin, et al. Model tests on size effect of underreamed ground anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 468 - 472. (in Chinese))

[6] 胡建林, 张培文. 扩体型锚杆的研制及其抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1615 - 1619. (HU Jian-lin, ZHANG Pei-wen. Development of underreamed anchor and experimental study of uplift resistance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1615 - 1619. (in Chinese))

[7] 赵明华, 龙 照, 邹新军. 基于剪胀效应的桩底嵌岩锚杆荷载传递分析法[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1938 - 1942. (ZHAO Ming-hua, LONG Zhao, ZOU Xin-jun. Load transfer method of rock-socketed anchoring rods under pile tip considering dilatancy effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1938 - 1942. (in Chinese))

[8] 黄明华, 周 智, 欧进萍. 拉力型锚杆锚固段拉拔受力的非线性全历程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2190 - 2199. (HUANG Ming-hua, ZHOU Zhi, OU Jin-ping.

- Nonlinear full-range analysis of load transfer in fixed segment of tensile anchors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(11): 2190 – 2199. (in Chinese))
- [9] 韩 军, 陈 强, 刘元坤, 等. 锚杆灌浆体与岩(土)体间的黏结强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(19): 3482 – 3486. (HAN Jun, CHEN Qiang, LIU Yuan-kun, et al. Bond strength between anchor grout and rock or soil masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(19): 3482 – 3486. (in Chinese))
- [10] 陈昌富, 梁冠亭, 汤 宇, 等. 锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 1115 – 1122. (CHEN Chang-fu, LIANG Guan-ting, TANG Yu, et al. Anchoring solid-soil interface behavior using a novel laboratory testing technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(6): 1115 – 1122. (in Chinese))
- [11] KILIC A, YASAR E, ATIS C D. Effect of bar shape on the pull-out capacity of fully-grouted rockbolts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, **18**: 1 – 6.
- [12] KILIC A, YASAR E, CELIK A G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, **17**: 355 – 362.
- [13] CHAI X J, HAYASHI S. Effect of constrained dilatancy on pull-out resistance of nails in sandy clay[J]. Ground Improvement, 2005, **9**(3): 127 – 135.
- [14] 夏元友, 陈 晨, NI Qing. 基于透明土的四种锚杆拔出对比模型试验[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(3): 399 – 407. (XIA Yuan-you, CHEN Chen, NI Qing. Research on continuous ball shape anchorages pulling-out mechanism by using transparent soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(3): 399 – 407. (in Chinese))
- [15] HOVER E D, NI Q, GUYMER I. Investigation of centreline strain path during tube penetration using transparent soil and particle image velocimetry[J]. Géotechnique Letters, 2013(4): 37 – 41.
- [16] HIRD C C, NI Q, GUYMER I. Physical modelling of displacements around continuous flight augers in clay[C]// Proceedings of the 2nd BGA International Conference on Foundations. Dundee, 2008: 565 – 574.
- [17] LIU J, ISKANDER M G, SADEK S. Consolidation and permeability of transparent amorphous silica[J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, **26**(4): 390 – 401.
- [18] ISKANDER M G, LIU J, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(3): 262 – 273.
- [19] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON, M.D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, **53**(7): 619 – 631.
- [20] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于 PIV 技术的沉桩过程土体位移场模型试验研究[J]. 工程力学, 2014, **31**(8): 168 – 174. (CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Model test on deformation characteristic of pile driving in sand using PIV technique[J]. Engineering Mechanics, 2014, **31**(8): 168 – 174. (in Chinese))
- [21] 曹兆虎, 孔纲强, 周 航, 等. 基于透明土材料的异形桩拔桩过程对比模型试验[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, **11**(3): 71 – 76. (CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, ZHOU Hang, et al. Comparative experimentation on pulling process of profiled pile by using transparent soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, **11**(3): 71 – 76. (in Chinese))
- [22] 李元海, 朱合华, 靖洪文, 等. 基于数字照相的砂土剪切变形模式的试验研究[J]. 同济大学学报, 2007, **35**(5): 685 – 689. (LI Yuan-hai, ZHU He-hua, JING Hong-wen, et al. Experimental investigation of shear deformation patterns in sands based on digital image correlation[J]. Journal of Tongji University, 2007, **35**(5): 685 – 689. (in Chinese))
- [23] MURRAY E J, GEDDES J D. Uplift of plates in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, **113**(3): 202 – 215.
- [24] LITTLEJOHN G S. Soil anchors[C]// Proceedings of Conference on Ground Engineering, ICE. London. 1970: 33 – 44.
- [25] JGJ/T 282—2012 高压喷射扩大头锚杆技术规程[S]. 2012. (JGJ/T 282—2012 Technical specification for underreamed anchor by jet grouted[S]. 2012. (in Chinese))
- [26] BS 8081:1989. UDC 624.137.6. British standard code of practice for ground anchorages[S]. British Standards Institution, London, 1989.