

DOI: 10.11779/CJGE201404017

# 高聚物锚固体与粉土间黏结性能试验研究

石明生<sup>1,2</sup>, 夏威夷<sup>1</sup>, 王复明<sup>1,2</sup>, 刘恒<sup>1</sup>, 潘艳辉<sup>1</sup>

(1. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州大学水利与交通基础设施安全防护河南省协同创新中心, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 以竖向高聚物注浆锚杆为对象, 对高聚物锚固体与粉土间的黏结性能进行了大量试验, 详细研究了锚固体直径、密度、长度对黏结强度的影响; 同时研究了不同锚固体长度下黏结应力的分布情况, 及其在不同荷载作用下的变化规律。试验结果表明: 钻孔孔径、锚固体密度、锚固体长度对黏结强度均有重要影响; 黏结强度随锚固体密度的增大而增大, 在小密度情况下增幅更为明显; 黏结强度随锚固体长度的减小而增大, 短锚固长度(2.5~4 m)下土体的抗剪强度几乎能完全发挥, 长锚固体(5 m)时仍具有较长的有效黏结长度; 黏结强度基本随孔径的增加而减小。高聚物锚杆有较显著的黏结应力集中分布现象, 主要黏结区域随着荷载增大逐渐向底部转移和扩大。

**关键词:** 高聚物; 锚固体; 密度; 孔径; 长度; 粉土; 黏结强度; 黏结应力分布

**中图分类号:** TU502.6; TU578.12

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2014)04-0724-07

**作者简介:** 石明生(1962-), 男, 河南南阳人, 博士, 副教授, 主要从事基础工程加固与高聚物注浆技术方面的研究工作。E-mail: sms315@126.com。

## Experimental study on bond performance between polymer anchorage body and silt

SHI Ming-sheng<sup>1,2</sup>, XIA Wei-yi<sup>1</sup>, WANG Fu-ming<sup>1,2</sup>, LIU Heng<sup>1</sup>, PAN Yan-hui<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Conservancy and Transportation Infrastructure Safety Protection, Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The bond performance between polymer anchorage body and silt is studied through the ultimate pullout tests on vertical polymer anchors. Based on the field tests, the effects of pore size, density and length of anchorage body on the mean bond strength are investigated. Meanwhile the distribution of axial force of polymer anchor steel bars is also measured, and the distribution of bond stress between polymer anchorage body and silt under various loads is calculated subsequently. The test results show that the size, density and length of anchorage body have great impacts on the bond strength. The bond strength increases with the density and more obviously in low density. With the decreasing length of anchorage body, the bond strength increases, short anchor (2.5~4 m) is optimum to exert the shear strength of soil mass, and long anchor (5 m) still has long effective bond length. The bond strength increases with the reduction of hole size. The concentrated bond stress area existing in the polymer anchor moves and widens to the bottom with the tensile load.

**Key words:** polymer; anchorage body; density; pore size; length; silt; bond strength; distribution of bond stress

## 0 引言

随着国内外基础设施、矿山及地下工程建设的进行, 锚固施工的岩土环境变得更加复杂多样, 锚杆未来将向着高强度、超高强度方向发展<sup>[1]</sup>。传统锚固使用的水泥砂浆灌浆材料固化干缩, 锚固力较小, 协调变形能力不足, 限制了更高强度锚杆的发展。现阶段迫切需要将性能更好、适用范围更广、技术更先进的锚固注浆材料引入到锚固支护技术当中。近些年来关于锚固灌浆材料的研发多是基于对水泥砂浆的改良, 即在普通的水泥、砂浆中掺入改性材料形成新型灌浆体, 虽然在工程实践中得到了成功应用, 但仍然存在

不少问题, 如含水式水泥卷的制作繁琐, 成本较高, 运输贮存不便; 浸水式水泥卷易潮解, 容易吸湿变质, 使水泥卷贮存期短、性能降低; 水泥基材料难以在现场随时调节胶凝时间及其强度, 无法适应工程岩土环境复杂多变的特点等<sup>[2]</sup>。且此类材料大多未脱离有水反应模式, 固化后干缩, 因而锚固力提高有限。

双组份非水反应类聚氨酯高聚物由多元醇和异氰酸酯构成主要反应成分, 同时外掺适量发泡及催化剂

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51179175); 国家自然科学基金青年基金项目(51008285)

**收稿日期:** 2013-07-17

制成。研究表明<sup>[3]</sup>, 高聚物注浆材料化学反应时产生的膨胀力与其浆液注入量密切相关; 高聚物材料的抗压强度与固化密度的关系为近似 2 次抛物线, 最大可达 50 MPa; 抗拉强度亦随密度增大而增大, 在常用注浆密度范围 (0.2~0.3 g/cm<sup>3</sup>) 内其值可达 2~4 MPa; 弯曲强度在 2~35 MPa 之间, 且在小密度下表现出塑性, 而在 0.3 g/cm<sup>3</sup> 以上逐渐转化为脆性; 高聚物材料具有优良的工程力学性能。高聚物作为一种新型的地基加固及堤坝防渗注浆材料, 相较于混凝土等其它工程材料具有独特优势: 密度小, 可减轻支护结构的负担; 强度提高快, 不需养生, 适合隧道、矿山初期支护及工程抢险; 柔韧性好, 能与岩土体协调变形; 膨胀力大, 最大可达 10 MPa, 对岩土体有挤密胶结作用, 从而产生较大锚固力; 无水反应, 不干缩; 隔水及耐久性能好等<sup>[4-5]</sup>。近些年在很多行业得到广泛应用, 显示出了巨大的应用空间和发展前景。石明生等<sup>[6]</sup>通过粉土中高聚物及普通水泥锚杆的对比试验, 认为高聚物是一种性能优良的锚固注浆材料, 高聚物的自膨胀性使得灌浆体与孔壁的黏结力显著增加, 锚固力比普通水泥锚杆提高了近 1 倍, 材料反应后 15 min 即形成 90% 左右的强度, 不需养生, 为不宜使用水泥浆液作为锚杆固结材料的湿陷性黄土、膨胀土以及各类应急抢险锚固支护工程提供了一种新的锚固技术。

采用原位试验方法, 以竖向高聚物锚杆为对象, 研究了高聚物锚固体与粉土间的平均黏结强度及多种参数对其影响, 以及锚固体与土体间的黏结应力的分布情况, 为高聚物锚杆的工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 工程地质概况

试验场地位于郑州市高新区, 地形平坦, 试验场地土层的物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 试验场地土层物理力学性质指标

| Table 1 Properties of silt |       |                                    |             |                   |      |        |
|----------------------------|-------|------------------------------------|-------------|-------------------|------|--------|
| 岩土名称                       | $I_p$ | $\gamma$<br>/(kN·m <sup>-3</sup> ) | $c$<br>/kPa | $\varphi$<br>/(°) | $e$  | $w/\%$ |
| (1) 粉土                     | 9.4   | 17.6                               | 17.0        | 24.3              | 0.78 | 21.0   |
| (2) 粉土                     | 9.8   | 17.9                               | 14.0        | 23.2              | 0.72 | 21.5   |

1.2 锚杆参数

锚杆杆体为单根 Φ28 螺纹带肋 HRB335 钢筋, 沿杆体每隔 0.3 m 焊接一组对中支架, 每组支架由 3 根 Φ6 光圆 HPB235 钢筋沿环向对称构成。采用两步注浆法施工: 先在孔口杆体上绑扎土工布袋, 通过往布袋内注入高聚物浆液而有效密封钻孔, 以避免锚固注浆浆液在高膨胀力作用下溢出; 封孔注浆完成后, 再利

用导管往布袋底部以下孔内进行锚固注浆。布袋以抗拉强度较大的涤纶长丝制成, 袋长 0.4 m, 封孔注浆密度 0.2 g/cm<sup>3</sup>; 为避免群锚效应, 锚杆均按 3 m 间距布置。

黏结强度及应力分布试验锚杆其他参数如表 2, 3 所示, 共 18 组。每组设置 3 根锚杆, 若每组得到的极限抗拔力的最大差值小于 10% 时取平均值, 超过 10% 则适当增加该组试验锚杆数量, 剔除误差较大部分, 且按 95% 的保证率计算该组锚杆极限抗拔力。其中表 2 的黏结强度试验锚杆在加载前挖去土工布袋及其周围土体, 以在极限拉拔力中剔除布袋与土体间摩阻力。而表 3 中黏结应力分布试件为另一组独立试验, 其为避免损坏从布袋中引出的应变片导线而保留了布袋; 考虑到封孔注浆时布袋大膨胀效应会使封口处应变片出现扰动、脱离, 将第一个应变片设置于 0.5 m 处; 其锚固体密度为 0.3 g/cm<sup>3</sup>, 成孔直径 100 mm。

同时设置了一组水泥砂浆锚杆, 以对比分析高聚物锚杆在分级循环加载下的荷载位移曲线特性。水泥砂浆锚杆采用 P.O32.5 硅酸盐水泥及中砂, 砂灰比 1.5, 水灰比 0.5, 其他参数同表 2 中锚杆 S9。

表 2 黏结强度试件参数表

| Table 2 Parameters of bond strength specimens |                              |             |             |                      |
|---|------------------------------|-------------|-------------|----------------------|
| 编号  | 密度<br>/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 锚固体<br>长度/m | 钻孔直径<br>/mm | 试验目的                 |
| S1  | 0.2                          | 2.5         | 60          | 锚固体密度<br>与黏结强度<br>关系 |
| S2  | 0.3                          | 2.5         | 60          |                      |
| S3  | 0.4                          | 2.5         | 60          |                      |
| S4  | 0.5                          | 2.5         | 60          |                      |
| S5  | 0.6                          | 2.5         | 60          |                      |
| S6  | 0.3                          | 2.0         | 60          | 锚固体长度<br>与黏结强度<br>关系 |
| S7  | 0.3                          | 3.0         | 60          |                      |
| S8  | 0.3                          | 4.0         | 60          |                      |
| S9  | 0.3                          | 5.0         | 60          | 锚固体直径<br>与黏结强度<br>关系 |
| S10   | 0.3                          | 2.5         | 60          |                      |
| S11   | 0.3                          | 2.5         | 75          |                      |
| S12   | 0.3                          | 2.5         | 90          |                      |
| S13   | 0.3                          | 2.5         | 100         |                      |
| S14   | 0.3                          | 2.5         | 120         |                      |

表 3 黏结应力分布试件参数表

| Table 3 Parameters of bond stress distribution specimens |        |               |       |       |       |       |       |
|--|--------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 编号   | 锚固长度/m | 应变片距锚固段顶部距离/m |       |       |       |       |       |
|  |        | 第 1 个         | 第 2 个 | 第 3 个 | 第 4 个 | 第 5 个 | 第 6 个 |
| D1   | 2      | 0.5           | 1     | 1.5   | —     | —     | —     |
| D2   | 3      | 0.5           | 1     | 1.5   | 2.5   | —     | —     |
| D3   | 4      | 0.5           | 1     | 1.5   | 2.5   | 3.5   | —     |
| D4   | 5      | 0.5           | 1     | 1.5   | 2.5   | 3.5   | 4.5   |

1.3 试验设备

使用 ZU-DP40 步履式静力压孔机进行压孔作业, 以减小钻孔直径误差及对土层的扰动。使用 ZU-PIIGII-LC 集成式高聚物注浆系统作为注浆设备, 以精确控制注浆量。加载装置为 YDC-750 穿心式

千斤顶及配套的油压表等, 千斤顶公称张拉力 750 kN, 额定油压 48 MPa, 张拉缸面积 15680 mm<sup>2</sup>, 试验前进行严格标定。由于高聚物材料注浆材料固化时会产生高达 145℃ 的温度<sup>[7]</sup>, 黏结应力分布试验使用 BB (BAB) 250℃ 系列中温箔式电阻应变片作为钢筋轴力的传感元件, 采用中温屏蔽绝缘导线, 使用 CM-2B-80 静态应变仪进行数据采集分析。

#### 1.4 试验方法及步骤

现场极限抗拔实验采用分级循环加卸载法, 加荷等级及位移观测时间、试验锚杆的破坏标准、极限抗拔荷载的确认均严格参照《岩土锚杆(索)技术规程》(CECS 22: 2005) 有关基本试验的相关规定, 按下式将极限抗拔力换算为黏结强度:

$$\tau = \frac{P}{\pi d L_a}, \quad (1)$$

式中,  $L_a$  为锚固体长度,  $D$  为锚固体直径,  $P$  为试验锚杆的极限抗拔力。

黏结应力分布试验在杆体钢筋上黏贴应变片, 通过钢筋各点应变得出钢筋轴力。这些点将锚固体沿杆长方向分为数段, 利用第  $i$  段锚固体相邻两个应变片  $i+1$  和  $i$  点的轴力值, 计算出该段锚固体与土体间的平均黏结应力, 公式如下:

$$\tau_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{\pi D \Delta L}, \quad (2)$$

式中,  $\tau_i$  是第  $i$  段锚固体与土体间的平均黏结应力,  $P_{i+1}$ ,  $P_i$  分别是  $i+1$  和  $i$  点应变片处钢筋的轴力值,  $\Delta L$  是  $i+1$  和  $i$  点之间的距离。

## 2 试验现象分析

### 2.1 循环加载荷载 - 位移曲线

图 1, 2 是 0.3 g/cm<sup>3</sup> 密度高聚物锚杆 (S9) 及同等情况下水泥砂浆锚杆的极限拉拔试验循环加载荷载 - 位移曲线。相较水泥砂浆锚杆, 高聚物锚杆在加载过程中会产生较大的弹性位移, 且随着荷载增大而持续增大, 同时高聚物锚杆极限拉拔破坏时的总塑性位移相对较小, 该现象与高聚物注浆材料的自身特性有关。高聚物材料属于弹塑性材料, 其韧性较好, 因而同等情况下其极限拉伸率较大, 对锚杆位移有较高要求的支护工程在使用高聚物注浆锚杆时应慎重。

### 2.2 高聚物锚固体形态

锚杆典型破坏模式包括钢筋颈缩拉断、基体椎体破坏、黏结破坏及椎体 - 黏结复合破坏。试验锚杆表现出较大抗拔力, 试验过程中土体未见明显隆起, 同时杆体未拔断, 且未见与锚固体产生相对位移, 破坏模式为黏结破坏。即锚固体与土体交界黏结面处发生滑移破坏, 锚固体被整体拔出。试验结束后挖开锚固

体周围土体, 发现高聚物锚固体形态饱满, 对土体的扩孔挤密效果明显, 如图 3 所示。锚固体呈圆柱形, 其表面粗糙, 与杆体钢筋及周围土体胶结紧密。

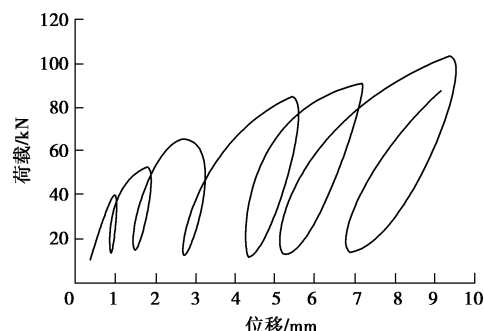


图 1 高聚物锚杆典型循环加载拉力 - 位移曲线

Fig. 1 Load-deflection curve of polymer anchor

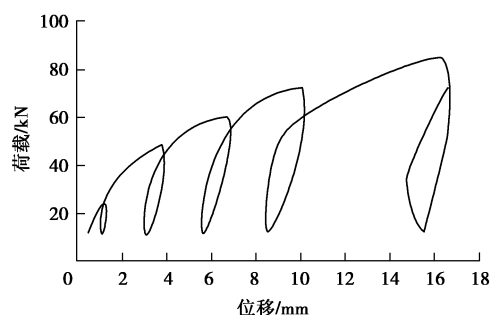


图 2 水泥砂浆锚杆循环加载拉力 - 位移曲线

Fig. 2 Load-deflection curve of cement mortar anchor



(a) 高聚物锚固体拔出

(b) 高聚物锚固体开挖

图 3 高聚物锚固体拔出及开挖效果

Fig. 3 Photos of polymer anchorage body

## 3 黏结强度

### 3.1 锚固体密度的影响

从图 4 中可以看出, 锚固体与粉土间的黏结强度在 0.19~0.24 MPa 之间, 是同等情况下水泥锚杆实测数据<sup>[8]</sup>的 2~3 倍; 其他参数不变时, 黏结强度随着锚固体密度增大而增大, 且锚固体密度小于 0.4 g/cm<sup>3</sup> 时增幅较显著。密度在 0.2~0.4 g/cm<sup>3</sup> 间, 黏结强度增加 30%。密度超过 0.4 g/cm<sup>3</sup> 以后, 黏结强度的增加幅度

逐渐变小。可认为高聚物锚杆的极限抗拔力、锚固体与粉土的黏结强度在密度为  $0.4 \text{ g/cm}^3$  时即达到最大值。

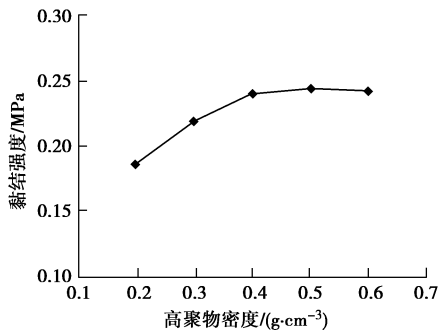


图4 不同高聚物密度条件下的黏结强度

Fig. 4 Relationship between bond strength and density of anchorage body

### 3.2 孔径的影响

从图5可以看出,在其他参数相等的情况下,黏结强度基本随孔径的增加而减小,120 mm 孔径的锚杆具有最大的极限抗拔力和最小的黏结强度。

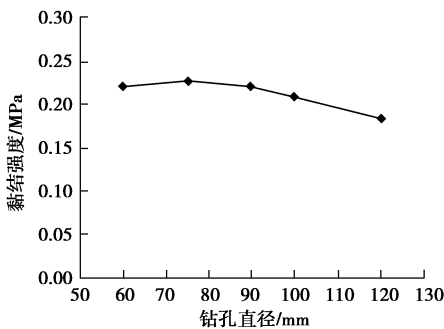


图5 不同成孔直径条件下的黏结强度

Fig. 5 Relationship between bond strength and pore size

锚固体与土体之间的黏结力由两部分组成,计算式如下:

$$\tau = \mu\sigma + c \quad (3)$$

式中,  $\tau$  为黏结强度,  $\mu$  为接触面摩擦系数,  $\sigma$  为正应力(径向压应力);  $c$  为高聚物与土体的胶结力。

正压力越大,接触面越粗糙,摩擦力部分就越大。在其他参数不变的情况下,随着钻孔直径的增加,拉拔破坏时由锚固体传递到孔壁的径向压应力将逐渐减小,所以黏结强度也就减小,从而小孔径具有较大的黏结强度。而随着孔径增加,接触面面积变大,因而较大孔径锚杆的极限抗拔力也较大。

### 3.3 锚固体长度的影响

对黏结型锚杆的众多研究<sup>[9-11]</sup>均表明:受到荷载作用以后,沿长度方向上的黏结应力并非均匀分布,起到锚固作用的有效黏结长度有限,锚杆的轴力和黏结应力都向着杆体根部逐渐衰减;锚固长度越长,这种应力不均匀性越明显,黏结强度也越小。从图6中

可以看出,高聚物锚杆的其他参数不变时,随着锚固体长度的增加其黏结强度逐渐减小,与上述研究结论相一致。

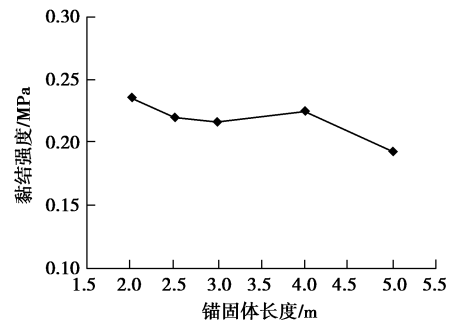


图6 不同锚固体长度条件下的黏结强度

Fig. 6 Relationship between bond strength and length of anchorage body

引入可反映锚固体长度对有效黏结长度影响程度的因子  $f_c$ , 其计算公式如下:

$$f_c = \frac{L_m}{L_a} = \frac{\tau}{\tau_{2.5}} \quad (4)$$

式中,  $L_m$  为锚杆的有效锚固长度,  $L_a$  为锚固体的实际长度,  $\tau$  是实际黏结强度值,  $\tau_{2.5}$  是锚固体长度为 2.5 m 锚杆的黏结强度值。则 2.5 m 锚固体长度对有效黏结长度影响因子为 1, 得到各锚固体长度对有效黏结长度的影响因子  $f_c$  如图7所示。

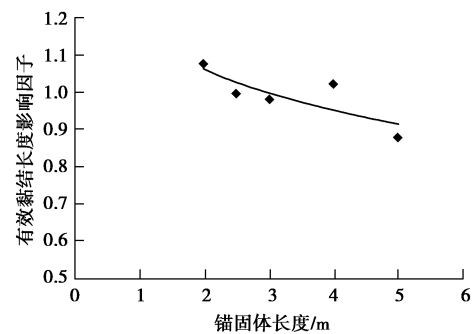


图7 高聚物锚固体长度与有效黏结长度的影响因子关系曲线

Fig. 7 Curve of length of anchorage body vs.  $f_c$

Barley<sup>[12-13]</sup>通过对普通水泥锚杆在极坚硬黏土中的试验,得出了有效黏结长度与锚固长度的关系,其试验表明在锚固体长度为 2.5~3.5 m 之间时,对有效黏结长度的影响因子在 0.95~1.00 之间,而高聚物锚杆锚固体长度在 2.5~4 m 时的影响因子为 0.98~1.02,这表明在使用短锚固长度时,高聚物锚杆和水泥锚杆一样几乎能完全调动其所在土体的抗剪强度。

随着长度的继续增加,普通水泥锚杆的有效黏结长度急剧下降,当锚固体长度超过 5 m 以后,其影响因子就降到 0.6 以下,长度为 25 m 时甚至降为 0.25。而高聚物锚杆在锚固体为 5 m 的时候,其对有效黏结长度的影响因子仍然保持 0.8 以上,表明以高聚物作

为注浆材料的锚杆在锚固体长度增加时,其有效黏结长度的减小的程度没有普通水泥锚杆那样显著,较长的高聚物锚杆仍有可观的有效黏结长度。

#### 4 黏结应力分布

由于黏结应力分布试验保留了锚杆封孔布袋,测得的极限抗拔力与 0.5 m 处的杆体轴力间差值由两部分组成:锚固体与土体间黏结力,土工布袋与粉土体间的摩擦力。二者特性差异较大,相对大小也不易确定,因而在对试验结果的分析中,主要关注于对锚固力贡献较大且分布变化较为集中和显著的下部锚固体,而忽略 0~0.5 m 范围内锚固体的轴力变化情况。

图 8 是拉力荷载逐级增加而得到的杆体轴力沿长度方向上分布的变化情况,可以得出以下结论:

(1) 轴力峰值在杆体顶部,随深度增加而减小,杆体底部的轴力值远小于上部,较小荷载下底部轴力甚至趋近于零;锚杆越长,轴力值较小区域占总长度的比重越大。表明离锚杆底端越近,锚固长度越长,锚杆越不能有效发挥杆体与锚固体间的黏结能力。

(2) 随荷载增大,各部位轴力随之增大,锚杆体底部的轴力也从近乎于零增加到一定数值;离锚杆体底部越近,每级荷载增量下的轴力增幅越小。即随荷载的增加,荷载将沿着锚杆杆体向深部扩散,但是扩散的程度随深度逐渐减小,有效的扩散长度范围有限。

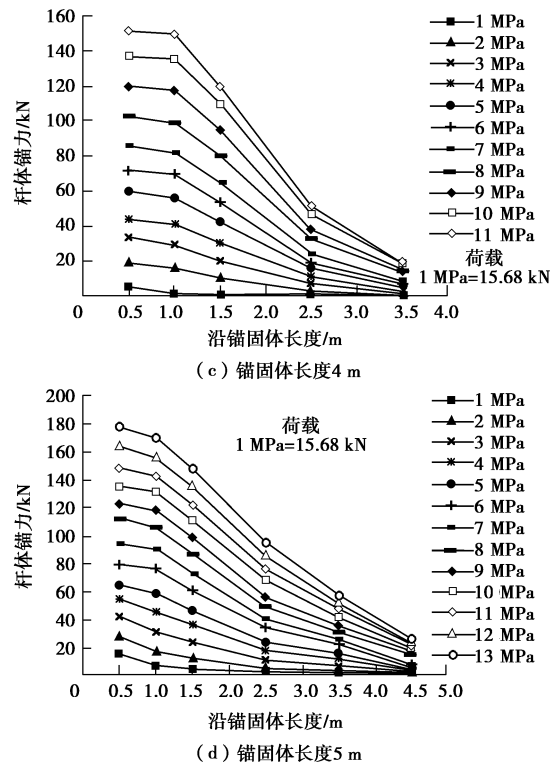
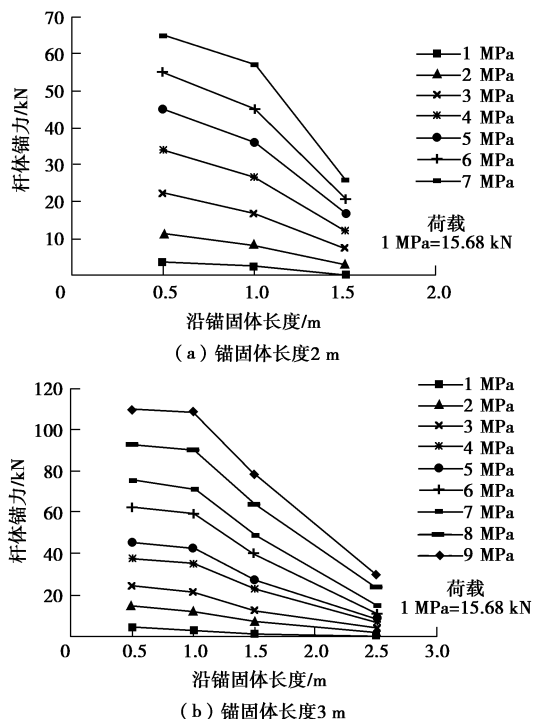


图 8 各级荷载下杆体轴力沿长度分布

Fig. 8 Distribution of axial force under different loads

图 9 中表示的是不同锚固长度下黏结应力分布及随荷载的演化情况,可以总结出以下规律:

(1) 荷载较小时,黏结应力峰值并不出现在锚固体上端部,事实上该处应力值较小;随着深度的增加应力急剧地增大并达峰值,然后逐渐减小,并在锚固体底端趋近于零。长锚杆的黏结应力峰值离加载端距离比短锚杆更近,其能充分发挥锚固体与土体黏结性能的主要黏结区域更靠近自由端。

(2) 在不大的荷载作用下,全部锚杆在黏结应力峰值周围形成的主要应力分布区集中在靠近加载端的位置,远离该区域的部位应力值相对较小。黏结应力峰值相对较大,且主要黏结应力分布区范围较小,锚固体有显著的黏结应力集中现象。

(3) 随着荷载继续增大,主要黏结应力分布区向底端扩大和转移;上部计算点处的黏结应力值先是随着荷载的增大而增大,在达到一定程度后又逐渐减小,而下部点处应力值则一直随着荷载的增大而增大。即随着荷载的进一步增大,锚固体与土体间界面上端部附近区域逐渐出现黏结弱化和滑移,两介质的黏结能力降低,抗拔力转而主要由锚杆下部分提供,长锚杆的这一现象更加明显。即随着锚固长度的增加,高聚物锚杆发挥锚固体与土体黏结性能的能力降低,锚杆越长,破坏时黏结强度将越低。

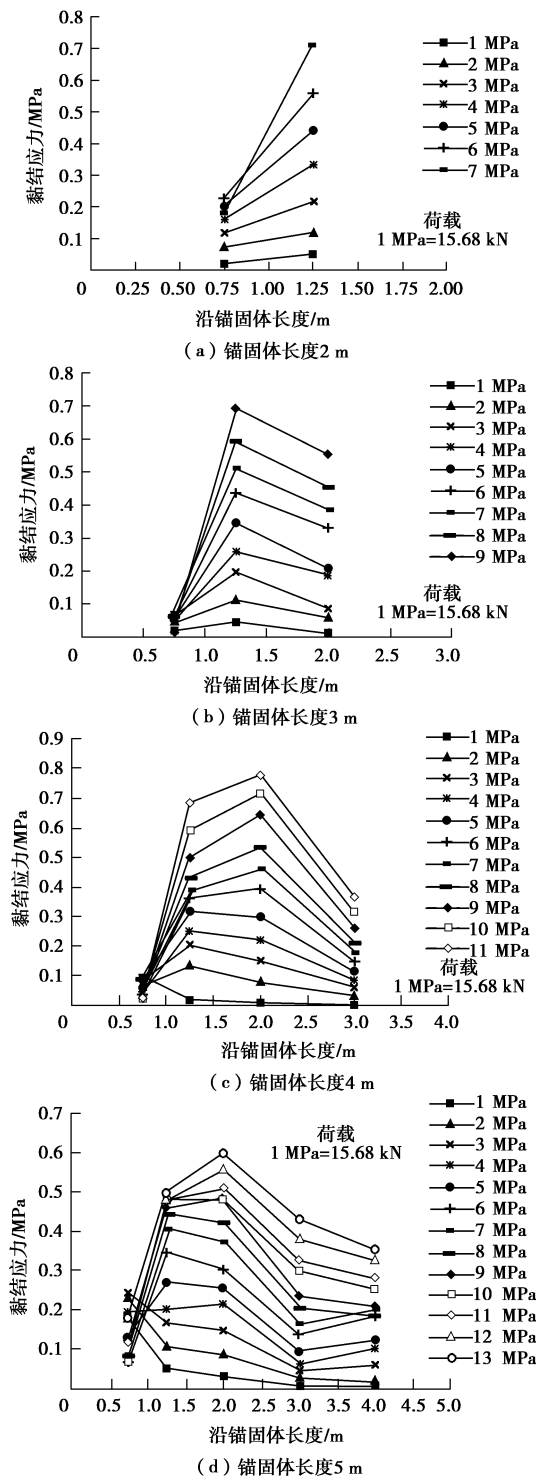


图9 各级荷载下黏结应力沿长度分布

Fig. 9 Bond stress along anchor under different loads

## 5 结 论

(1)高聚物锚固体与粉土间的黏结强度随着锚固体密度增大而增大,密度在 $0.2\sim 0.4\text{ g/cm}^3$ 之间时,黏结强度在 $0.19\sim 0.24\text{ MPa}$ 之间;黏结强度在密度为 $0.4\text{ g/cm}^3$ 以下增幅较显著;超过 $0.4\text{ g/cm}^3$ 以后,黏结强度增加幅度很小。

(2)黏结强度随锚固体长度的增加而减小。短高聚物锚杆几乎能完全调动土体的抗剪强度,而长锚杆有效黏结长度减小的程度不及普通水泥锚杆显著。

(3)黏结强度基本随孔径的增加而减小,而极限抗拔力随孔径的增加而增大。

(4)高聚物锚杆杆体轴力在杆体顶端最大,沿着深度减小,且底部轴力值远小于上部;增加的荷载将沿着杆体向深部扩散,扩散程度随深度减小。

(5)高聚物锚杆有显著的黏结应力集中现象。随着荷载的增加,黏结应力峰值和黏结应力分布区域增大,并向锚固体底端转移。

本文研究的是理想条件下的锚杆极限拉拔试验,有关于高聚物锚杆的耐久性、长期强度等情况的规律有待进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7 - 12, 34. (CENG Liang-kui. Present status and development of ground anchorages[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 7 - 12, 34. (in Chinese))
- [2] 张乐文, 刘传波. 新型锚杆及岩土锚固新技术[J]. 公路交通科技, 2004, 21(7): 26 - 29. (ZHANG Le-wen, LIU Chuan-bo. New type bolts and new anchorages technique of rock and soil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(7): 26 - 29. (in Chinese))
- [3] 石明生. 高聚物注浆材料特性与堤坝定向劈裂注浆机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011: 37 - 61. (SHI Ming-sheng. Research on polymer grouting material properties and directional fracturing grouting mechanism for dykes and dams[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011: 37 - 61. (in Chinese))
- [4] Steven Soltesz. Injected polyurethane slab jacking[R]. Salem: Oregon Department of Transportation Research Group, 2000.
- [5] URETEK Technical Staff in Collaboration with Padua University IMAGE Department. Technical notes and laboratory test results on the latest generation of the Uretek Geoplus expanding resin[R]. Skelmersdale: Uretek UK Ltd., 2004.
- [6] 石明生, 刘 恒, 钟燕辉, 等. 聚氨酯高聚物灌浆材料锚固力试验研究[J]. 中国港湾建设, 2011, 174(3): 39 - 41. (SHI Ming-sheng, LIU Heng, ZHONG Yan-hui, et al. Experimental research on anchorage force of polyurethane polymer anchor grouting material[J]. China Harbour Engineering, 2011, 174(3): 39 - 41. (in Chinese))

- [7] 夏威夷. 土体高聚物注浆锚固试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013: 11 - 15. (XIA Wei-yi. Experimental research on polymer grouting and anchoring in soil mass[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013: 11 - 15. (in Chinese))
- [8] 程良奎, 范景伦, 韩 军, 等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (CHENG Liang-kui, FAN Jing-lun, HAN Jun, et al. Anchoring in soil and rock[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))
- [9] 尤春安. 锚固系统应力传递机理理论及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1272 - 1272. (YOU Chun-an. Theory and application study on stress-transfer mechanism of anchoring system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1272 - 1272. (in Chinese))
- [10] 段 建, 言志信, 郭锐剑, 等. 土层锚杆拉拔界面松动破坏分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 936 - 941. (DUAN Jian, YAN Zhi-xin, GUO Rui-jian, et al. Failure analysis of soil anchors induced by loose interface under pullout load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 936 - 941. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] BARLEY A D. The single bore multiple anchor system[C]// Proceedings of International Symposium on Ground Anchorages and Anchored Structures. London: Thomas Telford, 1997: 65 - 75.
- [13] BARLEY A D. Theory and practice of the single bore multiple anchor system[C]// Proceedings of International Symposium on Anchors in Theory and Practice. Salzburg, AT: [s. n.], 1995: 315 - 323.

### 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)