

DOI: 10.11779/CJGE2014S2085

压力注浆参数对土钉受力性状影响的试验研究

张广兴, 管林波

(同济大学浙江学院土木工程系, 浙江 嘉兴 314051)

摘要: 通过对不同压力注浆参数下土钉现场抗拉试验, 分析了不同土钉长度下注浆量、浆液水灰比等注浆参数对土钉受力性状的影响。分析结果表明, 在试验范围内, 相同注浆量下, 土钉极限抗拉强度随着水泥浆液水灰比的减小而增大。对于单位长度内注浆量较高的短土钉, 注浆量越高, 浆液水灰比对极限抗拉力变化率的影响越小, 反之, 在单位长度内注浆量较低的长土钉中, 注浆量越高, 浆液水灰比对极限抗拉力变化率的影响越大。相同浆液水灰比下, 土钉极限抗拉强度随着注浆量的增大而增大。对于单位长度内注浆量较高的短土钉, 水灰比越大, 注浆量对极限抗拉力变化率的影响越大, 反之, 在单位长度内注浆量较低的长土钉中, 水灰比越大, 注浆量对极限抗拉力变化率的影响越小。

关键词: 土钉墙; 压力注浆; 受力性状; 抗拉试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0489-06

作者简介: 张广兴(1979-), 男, 黑龙江阿城人, 硕士, 副教授, 主要从事基坑支护、桩基工程等方面的教学和科研工作。E-mail: zgxzju@163.com。

Experimental study on effect of pressure grouting parameters on bearing capacity behavior of soil nailings

ZHANG Guang-xing, GUAN Lin-bo

(Department of Civil Engineering, Tongji Zhejiang College, Jiaxing 314051, China)

Abstract: Based on the soil-nailing tensile experiments under different pressure grouting parameters, the effect of grouting parameters such as grouting amount and water-cement ratio on bearing capacity of soil nailings with different lengths is analyzed. The results show that, in the experimental range, under the same quantity of grouting, the ultimate tensile strength of soil nailings increases with the decreasing water-cement ratio. Specifically speaking, for the short soil nailings with higher grouting quantity in unit length, the higher the grouting quantity is, the lower the effect of water-cement ratio on the change rate of the ultimate tension is. On the contrary, for the long soil nailings with lower grouting quantity in unit length, the effect of water-cement ratio on the change rate of the ultimate tension is larger while the quantity of grouting is higher. Meanwhile, under the same water-cement ratio, the maximum tensile strength of soil nailings increases with the quantity of grouting increases. Here, for the short soil nailings with higher grouting quantity in unit length, the higher the water-cement ratio is, the larger the effect of grouting quantity on the change rate of the ultimate tension is. Conversely, for the long soil nailings with lower grouting quantity in unit length, the higher the water-cement ratio is, however, the lower the effect of grouting quantity on the change rate of the ultimate tension is.

Key words: soil-nailing wall; pressure grouting; bearing capacity behavior; tensile experiment

0 引言

土钉墙技术是在土体内放置一定长度和分布密度的土钉体与土共同作用, 土钉依靠注浆体与土体之间的界面黏结力或摩擦力, 使土钉沿全长与周围土体紧密连结成为一个整体, 形成一个类似于重力挡土墙结构, 抵抗墙后传来的土压力和其它荷载, 从而保证开挖面的安全^[1]。

在土钉墙失稳中, 大多数是因为土钉被拔出而引

起的, 而压力注浆通过在钢管土钉壁上设置注浆孔并注入水泥浆, 能够大幅提高土钉与土体之间的摩擦力并提高注浆土体的强度^[2], 因此, 对土钉的受力性能非常重要。在土钉注浆的设计过程中, 注浆量、浆液水灰比、注浆压力等参数都会对土钉受力性状产生影

基金项目: 浙江省教育厅科研项目资助(Y201330102)

收稿日期: 2014-07-28

响,国内外学者通过现场试验、理论研究及有限元分析对土钉特性有了比较多的研究^[3-8],但目前,对于高压注浆土钉注浆参数对土钉受力性状的影响方面的研究还比较少。

因此,笔者通过不同压力注浆参数下的土钉抗拉现场试验,对不同土钉长度、不同注浆量、不同浆液水灰比下的几组土钉的受力性状进行了对比,详细地分析了不同土钉长度下注浆量、浆液水灰比等注浆参数对土钉受力性状的影响。分析结果可以为压力注浆土钉的优化设计提供参考。

1 试验方案

为了研究不同的注浆参数对土钉受力性状的影响,笔者对不同长度的钢管土钉进行了现场试验,试验土层为黏性土,土层参数见表 1,其中土钉采用管壁带孔的钢管,钢管直径 24 mm,土钉长度分别取为 4 m 和 8 m 两组,打入土层后注入水泥浆液,注浆参数水灰比分别取为 1:0.3 和 1:0.7 两组,注浆量分别取为注入水泥量 20 kg 和 25 kg 两组,注浆方式分别为一次注浆和二次高压注浆两组。注浆后 30 天,共对 10 根土钉进行了破坏性抗拉试验^[9],各试验土钉情况如表 2 所示。

表 1 土层的参数

Table 1 Parameters of soil layers						
土层 名称	w /%	γ /(kN·m ⁻³)	e	E_s /MPa	固快指标	
					c_{cq} /kPa	φ_{cq} /(°)
黏土	31.5	18.5	0.94	4.6	26.7	13.6

表 2 注浆土钉试验方案

Table 2 Experimental schemes of grouting soil-nailings				
土钉 编号	土钉长 度/m	水灰比	注入水泥量 /kg	注浆方式
#1	4		0	未注浆
#2	8		0	一次注浆
#3	4	1:0.3	20	一次注浆
#4	8	1:0.3	20	一次注浆
#5	4	1:0.3	25	二次注浆
#6	8	1:0.3	25	二次注浆
#7	4	1:0.7	20	一次注浆
#8	8	1:0.7	20	一次注浆
#9	4	1:0.7	25	二次注浆
#10	8	1:0.7	25	二次注浆

2 试验结果及分析

2.1 不同浆液水灰比的影响(土钉长度 4 m)

针对 4 m 长度的土钉,分别采用不注浆、注浆水灰比 1:0.3 和注浆水灰比 1:0.7 进行比较,根据注浆量的不同分为两组, #3、#7 土钉注浆量为 20 kg, #5、#9 土钉注浆量为 25 kg,注浆参数及抗拉试验结果见

表 3。

对土钉进行的破坏性抗拉试验,得到土钉的抗拉力与位移曲线,见图 1、图 2。

表 3 注浆土钉参数及抗拉试验结果

Table 3 Parameters and tensile test results of grouting soil-nailings

土钉编号	土钉长 度/m	水灰比	注入水泥 量/kg	极限抗拉 力/kN
第一组	#1	4	0	12.2
	#3	4	1:0.3	18.3
	#7	4	1:0.7	27.1
第二组	#1	4	0	12.2
	#5	4	1:0.3	21.4
	#9	4	1:0.7	30.1

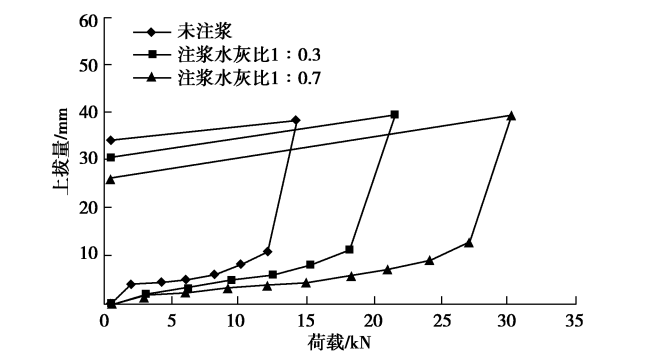


图 1 #1、#3、#7 土钉抗拉荷载-位移曲线

Fig. 1 Load-displacement curves of test soil-nailings No. 1, 3 and 7

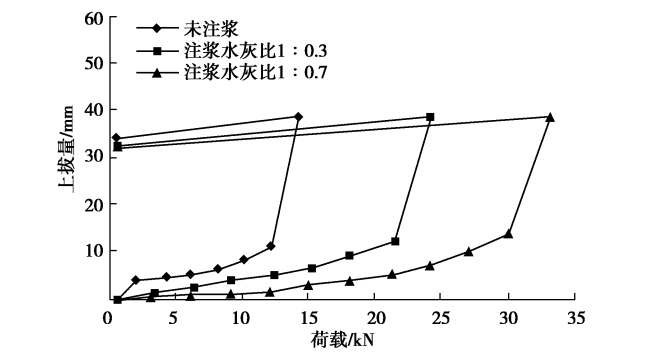


图 2 #1、#5、#9 土钉抗拉荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of test soil-nailings No. 1, 5 and 9

从试验结果可以看到,5 根 4 m 长的土钉荷载位移曲线形状较为相似,在荷载较小时呈现线性变化,随着荷载的增大,上拔量变化率逐渐增大,当荷载超过某一值时,上拔量快速增大,土钉被拔出破坏。

第一组 #1 土钉(未注浆)极限抗拉力为 12.2 kN,对应拔出位移为 10.94 mm; #3 土钉(水灰比 1:0.3)极限抗拉力为 18.3 kN,对应拔出位移为 11.34 mm; #7 土钉(水灰比 1:0.7)极限抗拉力为 27.1 kN,对应拔出位移为 12.84 mm。可以看到注浆后土钉的极限抗拉强度比未注浆时分别增大了 50.0%和 122.1%。

第二组#1 土钉（未注浆）极限抗拉力为 12.2 kN，对应拔出位移为 10.94 mm；#5 土钉（水灰比 1：0.3）极限抗拉力为 21.4 kN，对应拔出位移为 12.03 mm；#9 土钉（水灰比 1：0.7）极限抗拉力为 30.1 kN，对应拔出位移为 13.66 mm。可以看到二次高压注浆土钉的极限抗拉强度比未注浆时分别增大了 75.4%和 146.7%。

从两组试验结果可以看出，相同注入水泥量的土钉极限抗拉强度均随着水泥浆液的水灰比而变化，水灰比越小，土钉抗拉强度越大。第一组注浆量 20 kg 的土钉当水灰比从 1：0.3 降低到 1：0.7 时，极限抗拉强度增大了 48.1%。第二组注浆量 25 kg 的土钉当水灰比从 1：0.3 降低到 1：0.7 时，极限抗拉强度增大了 40.7%。可见水泥浆液浓度对土钉抗拉强度有着较大的影响，由于钉长较短，单位长度内注浆量较大，此时低注浆量时的水灰比对极限抗拉力变化率的影响要高于高注浆量时，但如果浓度过大又将难以注入，因此需选择合适的浆液水灰比。

2.2 不同浆液水灰比的影响（土钉长度 8 m）

针对 8 m 长度的土钉，分别采用不注浆、注浆水灰比 1：0.3 和注浆水灰比 1：0.7 进行比较，根据注浆量的不同分为两组，#3、#7 土钉注浆量为 20 kg，#4、#8 土钉注浆量为 25 kg，注浆参数及抗拉试验结果见表 4。

对土钉进行的破坏性抗拉试验，得到土钉的抗拉力与位移曲线，见图 3，4。

表 4 注浆土钉参数及抗拉试验结果

Table 4 Parameters and tensile test results of grouting soil-nailings

土钉编号	土钉长度/m	水灰比	注入水泥量/kg	极限抗拉力/kN
第一组 #2	8		0	22.1
第一组 #4	8	1：0.3	20	30.5
第一组 #8	8	1：0.7	20	33.3
第二组 #2	8		0	22.1
第二组 #6	8	1：0.3	25	33.1
第二组 #10	8	1：0.7	25	39.4

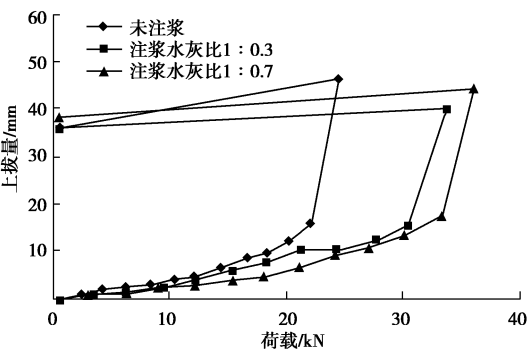


图 3 #2、#4、#8 土钉抗拉荷载 - 位移曲线

Fig. 3 Load - displacement curves of test soil-nailings No. 2, 4 and 8

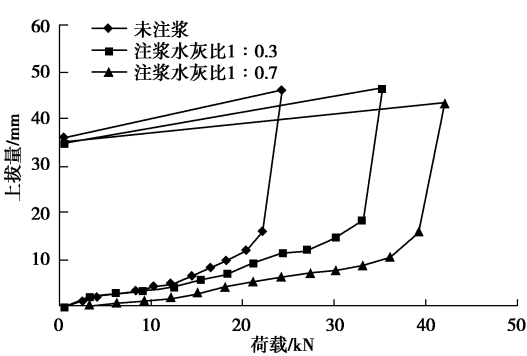


图 4 #2、#6、#10 土钉抗拉荷载 - 位移曲线

Fig. 4 Load - displacement curves of test soil-nailings No. 2, 6 and 10

从试验结果可以看到，5 根 8 m 长的土钉荷载位移曲线形状较为相似，在荷载较小时呈现线性变化，随着荷载的增大，上拔量变化率逐渐增大，当荷载超过某一值时，上拔量快速增大，土钉被拔出破坏。

第一组#2 土钉（未注浆）极限抗拉力为 22.1 kN，对应拔出位移为 15.87 mm；#4 土钉（水灰比 1：0.3）极限抗拉力为 30.5 kN，对应拔出位移为 15.42 mm；#8 土钉（水灰比 1：0.7）极限抗拉力为 33.3 kN，对应拔出位移为 17.66 mm。可以看到注浆后土钉的极限抗拉强度比未注浆时分别增大了 38.0%和 50.7%。

第二组#2 土钉（未注浆）极限抗拉力为 22.1 kN，对应拔出位移为 15.87 mm；#6 土钉（水灰比 1：0.3）极限抗拉力为 33.1 kN，对应拔出位移为 18.34 mm；#10 土钉（水灰比 1：0.7）极限抗拉力为 39.4 kN，对应拔出位移为 15.82 mm。可以看到二次高压注浆土钉的极限抗拉强度比未注浆时分别增大了 49.8%和 78.3%。

从两组试验结果可以看出，相同注入水泥量的土钉极限抗拉强度均随着水泥浆液的水灰比而变化，水灰比越小，土钉抗拉强度越大。第一组注浆量 20 kg 的土钉当水灰比从 1：0.3 降低到 1：0.7 时，极限抗拉强度增大了 9.2%。第二组注浆量 25 kg 的土钉当水灰比从 1：0.3 降低到 1：0.7 时，极限抗拉强度增大了 19.0%。

比较相同注浆参数的 4 m 长度和 8 m 长度的试验土钉，由于注浆量相同，分配在单位长度上的浆液量 4 m 土钉较多，而 8 m 土钉较少，因此，注浆后较长土钉的极限抗拉力增大率要明显小于较短土钉，水灰比对极限抗拉强度的影响也就小于较短土钉。对于单位长度内注浆量较高的短土钉，注浆量越高，浆液水灰比对极限抗拉力变化率的影响越小，反之，在单位长度内注浆量较低的长土钉中，注浆量越高，浆液水灰比对极限抗拉力变化率的影响越大。

2.3 不同注浆量的影响（土钉长度 4 m）

针对 4 m 长度的土钉，分别采用不注浆、注浆量 20 kg 和注浆量 25 kg 进行比较，根据浆液水灰比的不同分为两组，#3、#5 土钉浆液水灰比为 1：0.3，#7、#9 土钉浆液水灰比为 1：0.7，注浆参数及抗拉试验结果见表 5。

对土钉进行了破坏性抗拉试验，得到土钉的抗拉力与位移曲线，见图 5、图 6。

表 5 注浆土钉参数及抗拉试验结果

Table 5 Parameters and tensile test results of grouting soil-nailings

土钉编号	土钉长度/m	水灰比	注入水泥量/kg	极限抗拉力/kN
第一组	#1	4	0	12.2
	#3	4	1：0.3	18.3
	#5	4	1：0.3	21.4
第二组	#1	4	0	12.2
	#7	4	1：0.7	27.1
	#9	4	1：0.7	30.1

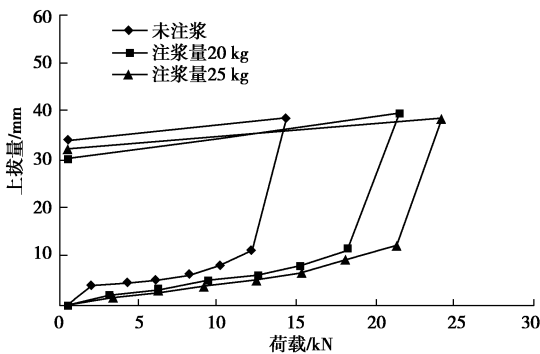


图 5 #1、#3、#5 土钉抗拉荷载 - 位移曲线

Fig. 5 Load - displacement curves of test soil-nailings No. 1, 3 and 5

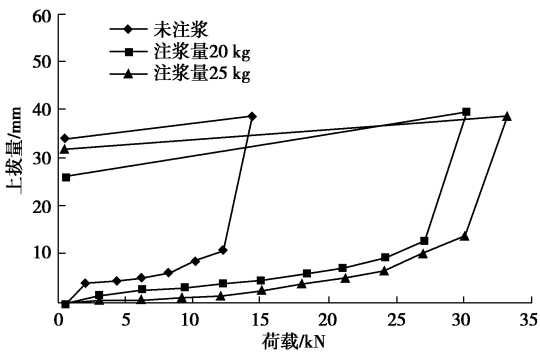


图 6 #1、#7、#9 土钉抗拉荷载 - 位移曲线

Fig. 6 Load - displacement curves of test soil-nailings No. 1, 7 and 9

从试验结果可以看到，5 根 4 m 长的土钉荷载位移曲线形状较为相似，在荷载较小时呈现线性变化，随着荷载的增大，上拔量变化率逐渐增大，当荷载超过某一值时，上拔量快速增大，土钉被拔出破坏。

第一组#1 土钉（未注浆）极限抗拉力为 12.2 kN，对应拔出位移为 10.94 mm；#3 土钉（注浆量 20 kg）极限抗拉力为 18.3 kN，对应拔出位移为 11.34 mm；#5 土钉（注浆量 25 kg）极限抗拉力为 21.4 kN，对应拔出位移为 12.03 mm。可以看到注浆量 20 kg 的#3 土钉的极限抗拉强度比未注浆时增大了 50.0%，注浆量 25 kg 的#3 土钉的极限抗拉强度比未注浆时增大了 75.4%。

第二组#1 土钉（未注浆）极限抗拉力为 12.2 kN，对应拔出位移为 10.94 mm；#7 土钉（注浆量 20 kg）极限抗拉力为 27.1kN，对应拔出位移为 12.84 mm；#9 土钉（注浆量 25 kg）极限抗拉力为 30.1 kN，对应拔出位移为 13.66 mm。可以看到注浆量 20 kg 的#7 土钉的极限抗拉强度比未注浆时增大了 122.1%，注浆量 25 kg 的#9 土钉的极限抗拉强度比未注浆时增大了 146.7%。

从两组试验结果可以看出，相同浆液水灰比的土钉极限抗拉强度随着注浆量的增大而增大，水灰比越小，增大率越高。第一组浆液水灰比 1：0.3 的注浆土钉，当注浆量从 20 kg 增大到 25 kg 时，极限抗拉强度增大了 16.9%。第二组浆液水灰比 1：0.7 的注浆土钉，当注浆量从 20 kg 增大到 25 kg 时，极限抗拉强度增大了 11.1%。可见注浆量对土钉抗拉强度有着一定的影响，但注浆量增大到一定程度时，极限抗拉强度增长率有限。由于钉长较短，单位长度内注浆量较大，此时浆液水灰比大时的注浆量对土钉极限抗拔力的影响要高于浆液水灰比低时。

2.4 不同注浆量的影响（土钉长度 8 m）

针对 8 m 长度的土钉，分别采用不注浆、注浆量 20 kg 和注浆量 25 kg 进行比较，根据浆液水灰比的不同分为两组，#4、#6 土钉浆液水灰比为 1：0.3，#8、#10 土钉浆液水灰比为 1：0.7，注浆参数及抗拉试验结果见表 6。

对土钉进行了破坏性抗拉试验，得到土钉的抗拉力与位移曲线，见图 7、图 8。

表 6 注浆土钉参数及抗拉试验结果

Table 6 Parameters and tensile test results of grouting soil-nailings

土钉编号	土钉长度/m	水灰比	注入水泥量/kg	极限抗拉力/kN
第一组	#2	8	0	22.1
	#4	8	1：0.3	30.5
	#6	8	1：0.3	33.1
第二组	#2	8	0	22.1
	#8	8	1：0.7	33.3
	#10	8	1：0.7	39.4

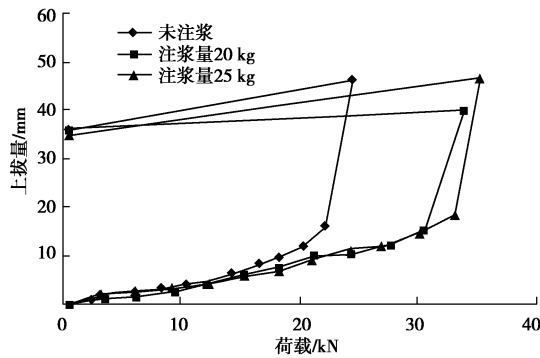


图 7 #2、#4、#6 土钉抗拉荷载 - 位移曲线

Fig. 7 Load - displacement curves of test soil-nailings No. 2, 4 and 6

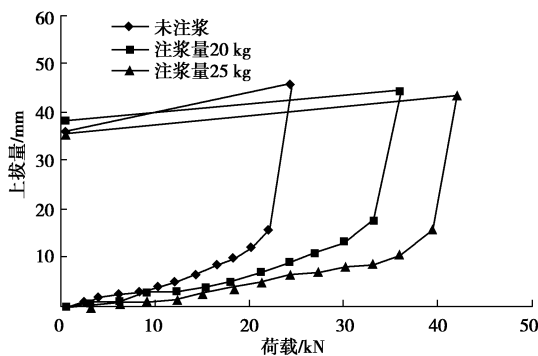


图 8 #2、#8、#10 土钉抗拉荷载 - 位移曲线

Fig. 8 Load - displacement curves of test soil-nailings No. 2, 8 and 10

从试验结果可以看到, 5 根 8 m 长的土钉荷载位移曲线形状较为相似, 在荷载较小时呈现线性变化, 随着荷载的增大, 上拔量变化率逐渐增大, 当荷载超过某一值时, 上拔量快速增大, 土钉被拔出破坏。

第一组 #2 土钉 (未注浆) 极限抗拉力为 22.1 kN, 对应拔出位移为 15.87 mm; #4 土钉 (注浆量 20 kg) 极限抗拉力为 30.5 kN, 对应拔出位移为 15.42 mm; #6 土钉 (注浆量 25 kg) 极限抗拉力为 33.1 kN, 对应拔出位移为 18.34 mm。可以看到注浆量 20 kg 的 #4 土钉的极限抗拉强度比未注浆时增大了 38.0%, 注浆量 25 kg 的 #6 土钉的极限抗拉强度比未注浆时增大了 49.8%。

第二组 #2 土钉 (未注浆) 极限抗拉力为 22.1 kN, 对应拔出位移为 15.87 mm; #8 土钉 (注浆量 20 kg) 极限抗拉力为 33.3 kN, 对应拔出位移为 17.66 mm; #10 土钉 (注浆量 25 kg) 极限抗拉力为 39.4 kN, 对应拔出位移为 15.82 mm。可以看到注浆量 20 kg 的 #8 土钉的极限抗拉强度比未注浆时增大了 50.7%, 注浆量 25 kg 的 #10 土钉的极限抗拉强度比未注浆时增大了 78.3%。

从两组试验结果可以看出, 相同浆液水灰比的土钉极限抗拉强度随着注浆量的增大而增大, 水灰比越小, 增大率越高。第一组浆液水灰比 1:0.3 的注浆土钉, 当注浆量从 20 kg 增大到 25 kg 时, 极限抗拉强度增大了 8.5%。第二组浆液水灰比 1:0.7 的注浆土钉, 当注浆量从 20 kg 增大到 25 kg 时, 极限抗拉强度增大了 18.3%。可见, 浆液水灰比大时的注浆量对极限抗拉力增大的影响趋势要低于浆液水灰比低时的。

比较相同注浆参数的 4 m 长度和 8 m 长度的试验土钉, 由于注浆量相同, 分配在单位长度上的浆液量 4 m 土钉较多, 而 8 m 土钉较少, 因此, 在单位长度内注浆量较高的短土钉中, 浆液越稀, 注浆量对极限抗拉力变化率的影响越大, 反之, 在单位长度内注浆量较低的长土钉中, 浆液越稀, 注浆量对极限抗拉力变化率的影响越小。

3 结 论

本文通过不同压力注浆参数下, 土钉抗拉现场试验, 对不同土钉长度、不同注浆量、不同浆液水灰比下的几组土钉的受力性状进行了对比分析, 在试验范围内, 得到了如下结论:

(1) 注浆钢管土钉抗拔荷载位移曲线, 在荷载较小时呈现线性变化, 随着荷载的增大, 上拔量变化率逐渐增大, 当荷载超过某一值时, 上拔量快速增大, 土钉被拔出破坏。

(2) 相同注浆量的土钉极限抗拉强度均随着水泥浆液的水灰比而变化, 水灰比越小, 土钉抗拉强度越大。对于单位长度内注浆量较高的短土钉, 注浆量越高, 浆液水灰比对极限抗拉力变化率的影响越小, 反之, 在单位长度内注浆量较低的长土钉中, 注浆量越高, 浆液水灰比对极限抗拉力变化率的影响越大。

(3) 相同浆液水灰比的土钉极限抗拉强度随着注浆量的增大而增大。对于单位长度内注浆量较高的短土钉, 浆液越稀, 注浆量对极限抗拉力变化率的影响越大, 反之, 在单位长度内注浆量较低的长土钉中, 浆液越稀, 注浆量对极限抗拉力变化率的影响越小。

参考文献:

- [1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 272 - 274. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 272 - 274. (in Chinese))
- [2] 李志刚, 任佰俪, 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))
- [3] 张明聚, 郭忠贤. 土钉支护工作性能的现场测试研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(3): 319 - 323. (ZHANG Ming-ju, GUO Zhong-xian. Research on behaviors of soil nailing by field test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(3): 319 - 323. (in Chinese))
- [4] 孙铁成, 张明聚, 杨茜. 深基坑复合土钉支护模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(15): 2585 - 2592. (SUN Tie-cheng, ZHANG Ming-ju, YANG Qian. Modeling study on composite soil nailing for deep excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(15): 2585 - 2592. (in Chinese))
- [5] 伍俊, 郑全平, 吴祥云. 复合土钉支护技术的有限元数值模拟及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(4): 388 - 392. (WU Jun, ZHENG Quan-ping, WU Xiang-yun. Numerical simulation in finite element and engineering application of compound soil nail support technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(4): 388 - 392. (in Chinese))
- [6] GULER Erol, BOZKURT Cemal F. The effect of upward nail inclination to the stability of soil nailed structures[J]. Geotechnical Engineering for Transportation Projects, 2004: 2213 - 2220.
- [7] SHEN C K, BANG S, ROMSTAD K M, et al. Field measurements of an earth support system[J]. J Geotech Eng Division, ASCE, 1981, **107**(12): 1625 - 1642.
- [8] SHEN C K, BANG S, Herrman. Ground movement analysis of earth support system[J]. J Geotech Eng Division, ASCE, 1981, **107**(12): 1609 - 1632.
- [9] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese))

(本文责编 明经平)