

文章编号: 1000-7598(2014)增 2-0135-07

注浆体对土钉受力特性的影响研究

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: 基于土钉抗拔力学模型的解析解, 结合现场土钉抗拉试验工程实测数据, 分析了水泥注浆体弹性模量 E_g 及钉土剪切变形系数 K 的变化对土钉受拉力学特性的影响。结果表明, 随着 E_g 的增大, 最大荷载下钉头位移逐渐减小, 浅部钉土间相对位移和剪力有所减小, 而深部则有所增大。 E_g 越大, 钉土间相对位移和剪力沿钉身的变化越小, 各部分侧阻分布趋于均匀。随着 K 的增大, 最大荷载下土钉沿钉长各处的相对位移均减小, 且减小比率逐渐降低, 注浆对土钉的影响逐渐趋弱。相同变化率下 K 对土钉荷载-位移曲线的影响要大于 E_g , 而对钉土间剪力的影响则不及 E_g 的影响大。

关 键 词: 土钉; 注浆; 受力特性; 荷载-位移曲线

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Effects of grouting on mechanical properties of soil nailing

ZHANG Guang-xing, GUAN Lin-bo

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

Abstract: Based on the analytical solution for soil nailing tension model and the field measured data of soil nailing tensile test, the influences of elastic modulus of cement grout E_g and shear deformation coefficient of soil nailing K on the mechanical properties of soil nailing are analyzed. The results show that the displacement of nail head under the maximum loading decreases as E_g increases. With the increase of E_g , the relative displacement and shear force between soil and nail, decrease in the shallow part of the nail body, and increase in its deep part, respectively. Furthermore, the variations of relative displacement and shear force between soil and nail along the nail body direction become much smaller with the increase of E_g , resulting in more homogeneous distribution of side friction resistance along the nail body. As K increases, the relative displacement between soil and nail under the maximum loading decreases and the variation of relative displacement along the nail body direction becomes much smaller, indicating the effect of grouting on soil nailing gradually becomes marginal. With the same change rate of K and E_g , the influence of K on the load-displacement curve of soil nailing is greater than that of E_g , while the influence of K on the shear force between soil and nail is lower than that of E_g .

Key words: soil nailing; grouting; mechanical properties; load-displacement curve

1 引 言

土钉墙技术是在土体内按一定密度放置一定长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他荷载, 从而保证开挖面的安全^[1]。

对于土钉抗拔受力机制分析, 国内外学者已有较多的研究, 如丁振明等^[2]将支护体系的抗拔力分

成由钉土作用抗拔力和土体自承作用抗拔力两部分, 对抗拔力进行理论求解。曹洁等^[3]通过离心模型试验, 研究了土钉加固黏性土坡的承载力、变形和破坏规律以及坡角对其破坏规律的影响。杨光华^[4]对土钉支护中土钉力和位移的计算进行了研究, 并提出了基于经验和理论相结合的土钉力计算公式。而大量的研究发现, 土钉墙失稳大多数是因为土钉被拔出而引起的, 因此, 注浆体与土体之间的黏结强度以及注浆体本身强度特性对土钉在荷载作用下的受力性能的影响非常重要。国内外一些学者

收稿日期: 2014-05-30

基金项目: 浙江省教育厅科研项目资助 (No. Y201330102)。

第一作者简介: 张广兴, 男, 1979 年生, 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

已经对硬化水泥浆体及注浆水泥土的特性等方面进行了一些研究,如Haecker等^[5]对不同水灰比变化下不同龄期的硬化水泥浆体弹性模量及剪切模量的变化进行了研究,张广兴^[6]对不同水泥掺入量的土体物理性质及力学性质的变化进行了研究,王文军^[7]对纳米材料改性的硬化水泥浆体及注浆水泥土力学性质进行了研究。很多研究结果表明,水泥浆水灰比、龄期等对硬化水泥浆体及注浆水泥土的抗压、抗剪强度特性有着较大的影响。一些加入纳米材料的改性水泥浆也会对硬化水泥浆体及注浆水泥土的强度特性产生较大影响。而对于钻孔注浆型土钉,这些水泥注浆体强度特性的变化及注浆体与土体之间黏结强度的变化都会对土钉在荷载作用下的受力性能产生影响,但目前对于这一方面的研究还鲜有报道,工程上多采用经验水泥注浆方法,土钉设计界面黏结强度也是设计人员根据规范给出的参考值确定的。

因此,笔者在前人建立的土钉抗拔试验力学模型的基础上^[8],通过土钉受拉荷载值的解析解,结合现场土钉抗拉试验的工程实测数据,分析了硬化水泥浆弹性模量及钉土剪切变形系数的变化对土钉受拉后荷载位移曲线、钉土间剪力、钉土相对位移、土钉轴力等沿钉长分布的影响。

2 注浆对土体力学性质的影响

为了研究注浆对土体力学性状的影响,笔者对掺入水泥浆的泥浆土在凝固 30 d 后进行了压缩试验和直剪试验^[6],水泥掺入量分别为 10%、20%、30%、40%,水灰比为 0.5,得到了随着水泥掺入量变化时土体压缩模量、黏聚力和内摩擦角的变化规律,试验结果见图 1~3。

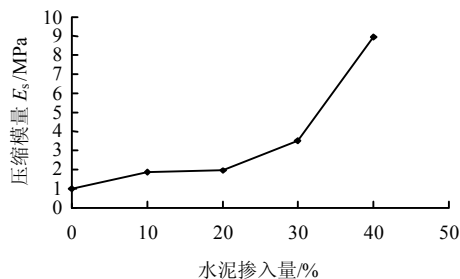


图1 不同水泥含量混合土的压缩模量

Fig.1 Compressibility modulus of cement mixed soil with different cement contents

由图1可以看到,掺入水泥浆后土体的压缩模量显著提高,当水泥浆含量由10%提高到40%时,其压缩模量由1.86 MPa提高到8.96 MPa,压缩性

大大降低。

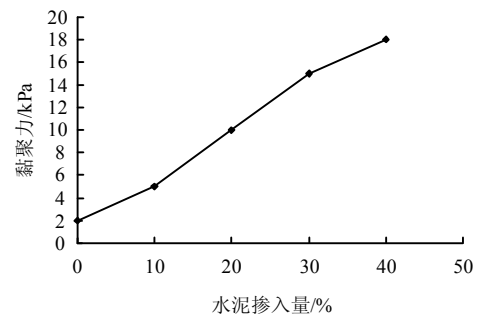


图2 不同水泥含量混合土的黏聚力

Fig.2 Cohesion of cement mixed soil with different cement contents

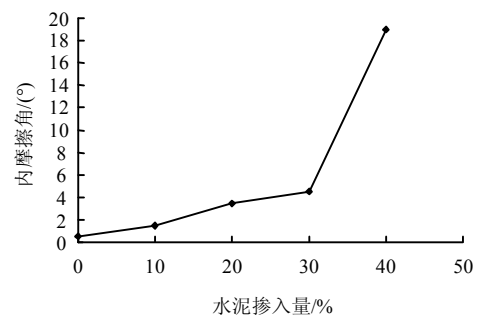


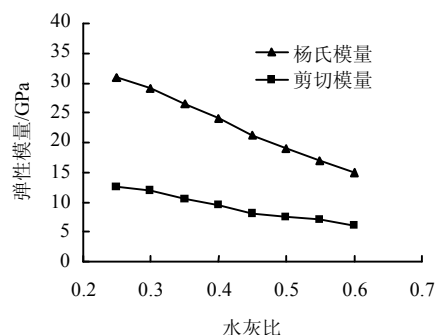
图3 不同水泥含量混合土的内摩擦角

Fig.3 Friction angle of cement mixed soil with different cement contents

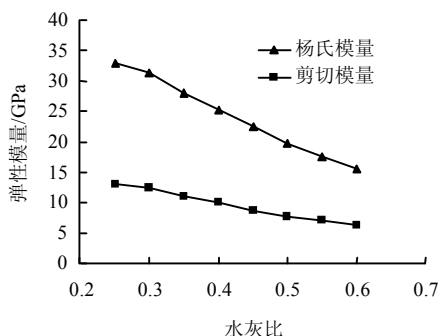
从图2、3试验结果可以看到,掺入水泥浆后土体的黏聚力和内摩擦角也有了大幅提高,当水泥浆含量由10%提高到40%时,黏聚力由2 kPa提高到18 kPa,土体的内摩擦角由0.5°提高到19°,其抗剪强度得到了大幅提高。

另外,Haecker等^[5]对不同水灰比变化下不同龄期的硬化水泥浆体弹性模量及剪切模量的变化进行了研究,得到了不同水灰比的硬化水泥浆体在28 d龄期和56 d龄期时的弹性模量及剪切模量变化,见图4。从试验结果可以看到,随着水泥浆水灰质量比从0.2变化到0.6,龄期28 d硬化水泥浆体的杨氏弹性模量从31 GPa下降到15 GPa,剪切模量从12.5 GPa下降到6.0 GPa,龄期56 d硬化水泥浆体的杨氏弹性模量从33 GPa下降到16 GPa,剪切模量从13.0 GPa下降到6.5 GPa。

从上述试验结果可看到,不同注浆参数将对硬化浆体本身的弹性模量、剪切模量产生较大影响,对注入水泥浆液的土体也可以大大地降低压缩性,提高抗剪强度和摩擦力,进而对钻孔注浆土钉在受拉荷载下的受力性状产生影响。



(a) 28 d



(b) 56 d

图 4 不同水灰比硬化水泥浆体弹性模量及剪切模量变化
Fig.4 Young's modulus and shear modulus of hardened cement pastes with different water/cement mass ratios

3 注浆土钉的抗拔试验力学模型分析

目前, 规范中要求以现场土钉抗拉试验来测定土钉抗拉承载受力变形特性, 拉力作用下钉-土系统荷载的传递过程可以简单描述为: 土钉的位移和轴力向内(沿长度方向)递减, 土钉的侧摩阻力向内逐渐被调动起来^[9]。

土钉的抗拔试验剪应力-位移关系可简化成图 5 中的 opq 曲线, op 段表示随着位移的增加, 剪应力与位移呈线性增加, 表现为土体被压实, 并具有弹性体性质; pq 段说明当钉-土间的相对位移达到一定值后, 钉-土间的剪应力保持不变, 整个土钉发生均匀移动, 土体已发生剪切破坏^[8-9]。

根据图 5 所示, 可以得到

$$\tau_x = Ku_x, u_x \leq u_p \quad (1)$$

$$\tau_x = Ku_p = \tau_p, u_x \geq u_p \quad (2)$$

式中: τ_x 为与土钉端部 O 点距离 x 的截面(以下简称 x 截面, 见图 6(a))处的剪应力; τ_p 为峰值剪应力; u_p 为达到峰值剪应力时所需的最小位移; u_x 为土钉 x 截面处的位移; K 为剪切变形系数(kPa/m), 其值与土体性质、土钉表现的特性、土钉上部的垂直应力大小等因素有关, 可通过现场抗拔试验实测

资料由下式确定。

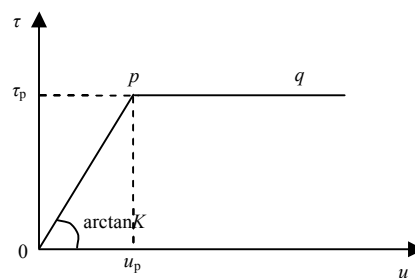


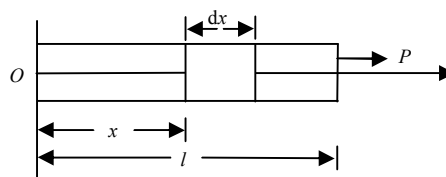
图 5 土钉抗拔试验的剪应力-位移关系

Fig.5 Shear stress-displacement in soil nailing pullout test

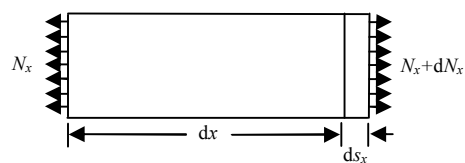
$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \Delta F_i \cos \alpha / (\Delta U_i l \pi D)}{n-1} \quad (3)$$

式中: n 为加载级数; ΔF_i 为相邻两次加载施加力的差值; ΔU_i 为相应的相邻两次加载钉头位移的差值; α 为土钉倾斜角度; l 为土钉长度; D 为土钉直径。

设土钉钉头作用着大小为 P 的拉力, 以土钉尾端为坐标原点, 土钉轴线为坐标轴建立如图 6(a)所示的坐标系。



(a) 土钉抗拔计算简图



(b) 土钉单元应力变形示意图

图 6 土钉抗拔力学模型

Fig.6 Mechanics models of soil nailing pullout

沿坐标轴方向, 在距离坐标原点位置 x 处取一长度为 dx 的单元进行分析(图 6(b)), 取 dx 方向为作用力的正方向, N_x 为 x 截面处的轴向拉力。根据单元的平衡条件^[8-10], 有

$$N_x + dN_x - (N_x + \pi D \tau_x dx) = 0$$

$$\tau_x = \frac{1}{\pi D} \frac{dN_x}{dx} \quad (4)$$

根据土钉拉伸变形 ds_x 与土钉轴力 N_x 的关系, 有

$$ds_x = \frac{N_x}{AE} dx \quad (5)$$

式中: $E = (E_g A_g + E_s A_s)/A$, 为土钉复合体有效弹性模量; E_g 、 E_s 分别为硬化水泥浆体及钢筋的弹性模量; A_g 、 A_s 分别为硬化水泥浆体及钢筋的横截面面积; A 为土钉复合体总横截面面积。

根据 x 断面处的平衡条件得

$$N_x = P - K\pi D \int_x^l u_x dx \quad (6)$$

土钉任一截面处的位移等于土钉的刚体位移与土钉拉伸变形之和, 则断面处土钉的总位移为

$$u_x = u_g + s_x - K\pi D \int_x^l u_x dx \quad (7)$$

式中: u_x 为 x 断面处土钉的拉伸变形; u_g 为土钉刚体位移。

式(7)两侧对 x 求一阶导数, 可得到土钉单元位移与土钉轴力的关系, 再结合式(6)得

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} = \frac{K\pi D}{AE} u_x \quad (8)$$

由式(8)可得 $u_x \leq u_p$ 时的位移为 u_x 的通解为

$$u_x = \lambda_1 e^{rx} + \lambda_2 e^{-rx} \quad (9)$$

$$\text{式中: } r = \sqrt{\frac{K\pi D}{EA}}.$$

将式(9)代入式(6), 得

$$N_x = P - \frac{K\pi D}{r} [\lambda_1 (e^{rl} - e^{-rx}) - \lambda_2 (e^{-rl} - e^{-rx})] + \lambda_3 \quad (10)$$

根据土钉抗拔试验时的边界条件, 当 $x=0$ 时, $N_x=0$; 当 $x=l$ 时, $N_x=P$; 当 $x=l$ 时, $u_x=u_0$ 。

将前两个边界条件代入式(10), 第3个边界条件代入式(9), 便得到土钉钉头的荷载和位移公式如下:

$$\left. \begin{aligned} P &= -\frac{K\pi D}{r} [\lambda_1 (e^{rl} - 1) - \lambda_2 (e^{-rl} - 1)] + \lambda_3 \\ u_0 &= \lambda_1 e^{rl} + \lambda_2 e^{-rl} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_0 &= \frac{K\pi D}{r} \\ \lambda_1 &= u_0 e^{-rl} - \lambda_2 e^{-2rl} \\ \lambda_2 &= \frac{P/\lambda_0 - u_0(1 - e^{-rl})}{(e^{-rl} - 1)^2} \\ \lambda_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

在土钉拉拔试验中, 钉头处荷载 P 和位移 u_0 是可测的, 将所得 λ_1 、 λ_2 代入式(9)、(10)及式(1), 便可求得任一截面处的位移为 u_x 、轴向拉力 N_x 和钉侧剪应力 τ_x 值。

4 注浆体性质对土钉受力特性的影响

从前面的力学模型分析公式可以看到, 注浆体对土钉受力特性的影响主要体现在土钉复合体有效弹性模量 E 和剪切变形系数 K 上, 这两个参数的改变, 将会改变土钉的受力性能。由前文的试验结果可知, 注浆参数(如注浆量、水灰比等)的改变将会改变土钉复合体有效弹性模量 E 和剪切变形系数 K , 进而对土钉受力性能产生影响。

因此, 进行了拉拔试验, 获取土钉实测数据, 结合上述力学模型分析及试验结果, 分析硬化水泥浆体弹性模量 E_g 和钉土间的剪切变形系数 K 对土钉内部受力性状的影响。

4.1 土钉实测资料及计算参数

这里引用文献[7]中的一根现场土钉抗拔试验荷载-位移数据, 通过上文建立的力学模型进行分析。土钉杆体材料为 $\phi 25$ 螺纹钢, 孔深为 14 m, 孔径为 130 mm, E_g 取 20 GPa, E_s 取 210 MPa, K 通过实测钉头处荷载-位移数据由式(3)求得, 进而得到土钉钉身轴力分布、最大荷载下钉土间剪力沿钉身分布及土钉与土体间相对位移(以下简称钉土相对位移)沿钉身的变化见图 8~10。实测土钉荷载-位移曲线见图 7。

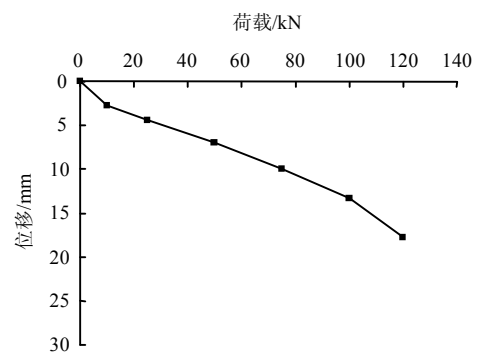


图 7 实测土钉荷载-位移曲线

Fig.7 Measured load-displacement curve of soil nailing

从计算结果可以看到, 当拉力逐渐施加于土钉的外端部时, 靠近拉拔端的土钉单元受到拉伸而产生相对于土体的向外位移, 土钉侧表面受到土体的向内摩擦力, 土钉的位移和轴向拉力均沿钉身向内递减。随着荷载的逐渐增加, 土钉的拉伸变形量和位移量逐渐增大, 土钉周侧的摩擦阻力向内逐渐被

调动起来。

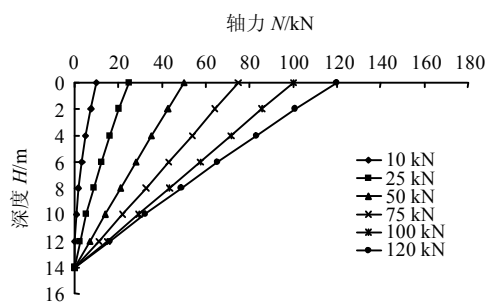


图 8 土钉钉身轴力分布

Fig.8 Axial force distributions of soil nailing

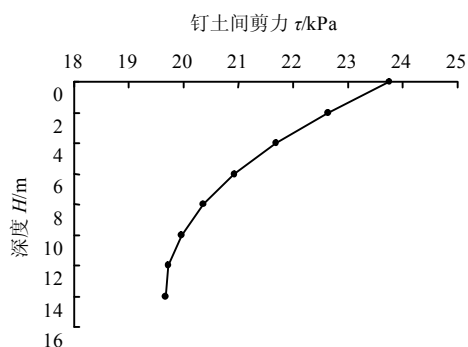


图 9 钉土间剪力沿钉身分布

Fig.9 Nail-soil shear stress distribution along nail

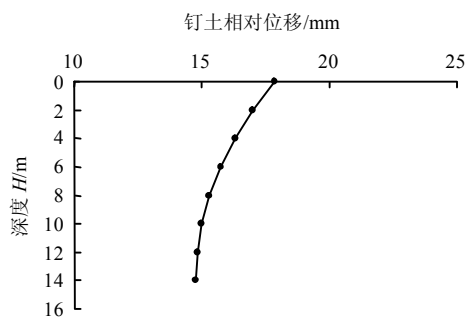


图 10 钉土相对位移沿钉身变化

Fig.10 Nail-soil relative displacement along nail

4.2 硬化水泥浆体弹性模量 E_g 的影响

为研究硬化水泥浆体弹性模量 E_g 对土钉受力性状的影响, 改变参数 E_g 分别取为原 20 GPa 的 0.75、1.25 及 1.50 倍, 同时保持参数 K 不变, 按前述理论计算得到不同 E_g 增大系数下土钉荷载-位移曲线, 钉土间剪力沿钉身分布及钉土相对位移沿钉身分布的变化, 见图 11~13。

从计算结果可以看到, 随着 E_g 的增大, 最大荷载下钉头位移逐渐减小, 增大系数从 0.75 增大到 1.50 时, 钉头位移从 18.96 mm 减小到 16.75 mm。随着 E_g 的增大, 浅部钉土间相对位移和剪力有所减

小, 而深部则有所增大。 E_g 值越大, 钉土相对位移和剪力沿钉身的变化越小, 各部分侧阻分布趋于均匀; 相反, E_g 越小, 钉土相对位移和剪力沿钉身的变化越大, 越接近土钉受拉端, 相对位移和剪力越大。

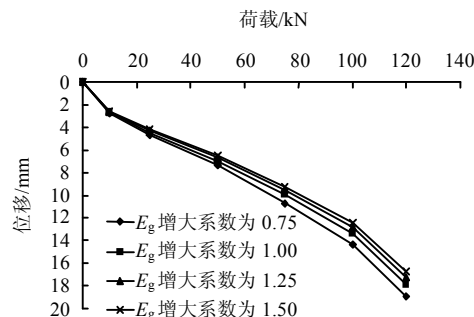


图 11 不同 E_g 的土钉荷载-位移曲线

Fig.11 Load-displacement curves of soil nailing with different E_g

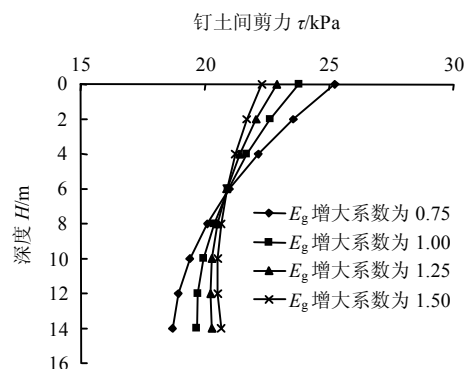


图 12 不同 E_g 的钉土间剪力沿钉身分布

Fig.12 Nail-soil shear stress distributions along nail with different E_g

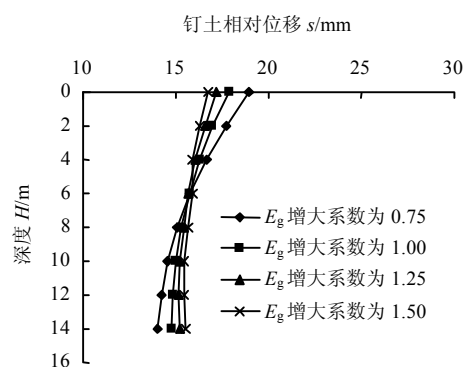


图 13 不同 E_g 的钉土相对位移沿钉身分布

Fig.13 Nail-soil relative displacements along nail with different E_g

4.3 剪切变形系数 K 的影响

为研究剪切变形系数 K 对土钉受力性状的影响

响, 改变参数 K 分别取为原试验值的 0.75、1.25、1.50 及 1.75 倍, 同时保持参数 E_g 不变, 按前述理论计算得到不同 K 增大系数下, 土钉荷载-位移曲线, 钉土间剪力沿钉身分布及钉土相对位移沿钉身分布的变化, 见图 14~16。

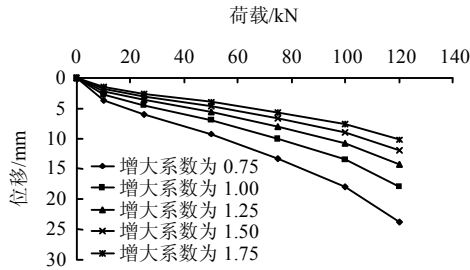


图 14 不同 K 值的土钉荷载-位移曲线

Fig.14 Load-displacement curves of soil nailing with different K

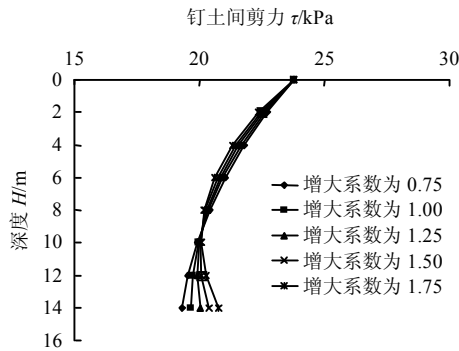


图 15 不同 K 值的钉土间剪力沿钉身分布

Fig.15 Nail-soil shear stress distribution along nail with different K

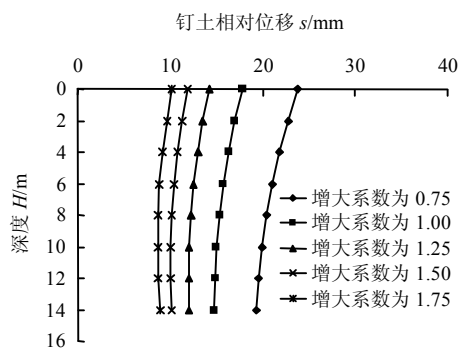


图 16 不同 K 值的钉土相对位移沿钉身分布

Fig.16 Nail-soil relative displacements along nail with different K

从计算结果可以看到, 随着 K 的增大, 最大荷载下钉头位移逐渐减小, 增大系数从 0.75 增大到 1.50 时, 最大荷载下钉头位移从 23.81 mm 减小到 11.90 mm; 当增大系数为 1.75 时, 钉头位移值为 10.2 mm, 但随着 K 的增大, 钉头位移的减小率逐

渐降低。可以看到, 相同变化率下 K 值对土钉荷载位移曲线的影响要远大于 E_g 值。

随着 K 的增大, 土钉沿钉长各处的相对位移均减小, 且减小的比率越来越低, 可见, K 值增大到一定程度后对钉土间的位移影响就比较有限了。随着 K 的增大, 浅部钉土间剪力有所减小, 而深部则有所增大, 但对钉土间剪力的影响远不及 E_g 值的影响大。

4.4 K 与 E_g 的共同影响

由前文的试验结果可看到, 注浆参数 (如注浆量、水灰比等) 的改变将会同时改变 E_g 和 K 值, 进而对土钉受力性能产生影响。由于 E_g 和 K 值的生长关系并没有试验来确定, 因此, 这里对 E_g 和 K 取相同的增大系数来分析其对土钉受力性状的影响。按前述理论计算得到增大系数 (分别取 0.75、1.25、1.00、1.50) 变化下, 土钉荷载-位移曲线, 钉土间剪力沿钉身分布及钉土相对位移沿钉身分布的变化, 见图 17~19。

从计算结果可以看到, 随着 E_g 和 K 的增大, 相同荷载下钉头位移逐渐减小, 增大系数从 0.75 增大到 1.50 时, 最大加载荷载下钉头位移从 25.28 mm 减小到 11.17 mm, 但随着 E_g 和 K 的增大, 钉头位移的减小比率逐渐降低, 即此时再通过调整注浆参数来改善土钉受力性状已经效果不明显。

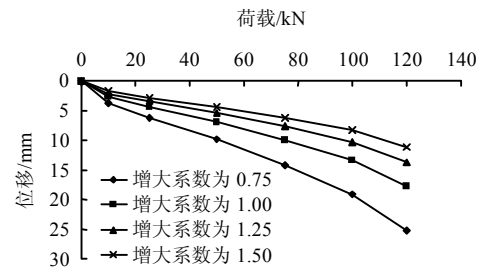


图 17 不同增大系数的土钉荷载-位移曲线

Fig.17 Load-displacement curves of soil nailing with different enhancement coefficients

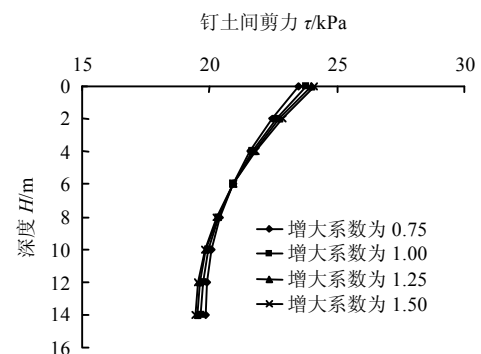


图 18 不同增大系数的钉土间剪力沿钉身分布

Fig.18 Nail-soil shear stress distribution alongs nail with different enhancement coefficients

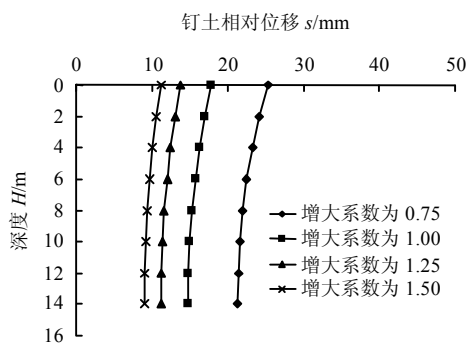


图 19 不同增大系数的钉土相对位移沿钉身分布

Fig.19 Nail-soil relative displacements along nail with different enhancement coefficients

随着 E_g 和 K 值的增大, 最大荷载下土钉沿钉长各处的相对位移均减小, 且减小的比率越来越低, 可见, E_g 和 K 值增大到一定程度后对钉土间的位移影响也比较有限了。

E_g 和 K 的变化对钉土间剪力沿钉身分布影响不太大, 小于单独的 E_g 和 K 的变化对其影响, 是两者变化的叠加, 这与计算中取两者增大系数相同有关, 当实际中两者的增大系数有较大差别时, 将会体现增大系数较大因素的影响。

5 结 论

在前人建立的土钉抗拔试验力学模型的基础上, 通过土钉受拉荷载值的解析解, 结合现场土钉抗拉试验的工程实测数据, 分析了硬化水泥浆弹性模量及钉土剪切变形系数的变化对土钉受拉后荷载位移曲线、钉土间剪力、钉土相对位移、土钉轴力等沿钉长分布的影响, 得到了如下结论:

(1) 随着硬化水泥浆体弹性模量 E_g 的增大, 最大荷载下钉头位移逐渐减小, 浅部钉土间相对位移和剪力有所减小, 而深部则有所增大。 E_g 值越大, 钉土间相对位移和剪力沿钉身的变化越小, 各部分侧阻分布趋于均匀; 相反 E_g 越小, 钉土间相对位移和剪力沿钉身的变化越大, 越接近土钉受拉端, 相对位移和剪力越大。

(2) 随着剪切变形系数 K 的增大, 最大荷载下钉头位移逐渐减小, 但减小比率逐渐降低。相同变化率下 K 值对土钉荷载位移曲线的影响要远大于 E_g 值。随着 K 的增大, 土钉沿钉长各处的相对位移均减小, 且减小的比率越来越低。可见, K 值增大到一定程度后对钉土间的位移影响就比较有限了。随着 K 的增大, 浅部钉土间剪力有所减小, 而深部则有所增大, 但对钉土间剪力的影响远不及 E_g 值的影响大。

(3) 随着 E_g 和 K 的增大, 最大荷载下钉头位移及土钉沿钉长各处的相对位移均减小, 但减小比率逐渐降低, 即 E_g 和 K 值增大到一定程度后对钉土间的位移影响就比较有限了。

(4) E_g 和 K 的变化对钉土间剪力沿钉身分布影响不太大, 小于单独的 E_g 和 K 的变化对其影响, 是两者变化的叠加, 这与计算中取两者增大系数相同有关, 当实际中两者的增大系数有较大差别时, 将会体现增大系数较大因素的影响。

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.
- [2] 丁振明, 秦四清, 刘军, 等. 土钉支护体系抗拔力机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1799—1802.
DING Zhen-ming, QIN Si-qing, LIU Jun. Research on anti-pulling mechanism in soil-nailing supporting system [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 1799—1802.
- [3] 曹洁, 张嘎, 王丽萍. 土钉加固黏性土坡加载的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1697—1702.
CAO Jie, ZHANG Ga, WANG Li-ping. Centrifugal model test on behavior of strip footing on soil nail-reinforced cohesive soil slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1697—1702.
- [4] 杨光华. 土钉支护中土钉力和位移的计算问题[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 137—146.
YANG Guang-hua. Calculation of soil nail forces and displacement in soil nailing retaining wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(1): 137—146.
- [5] HAECKER C J, GARBOCZI E J, BULLARD J W, et al. Modeling the linear elastic properties of Portland cement paste[J]. **Cement and Concrete Research**, 2005, 35(10): 1948—1960.
- [6] 张广兴. 泥皮性状对钻孔桩工程特性的影响研究[M]. 杭州: 浙江大学, 2006: 25—28.
- [7] 王文军. 纳米矿粉水泥土固化机理及损伤特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 27—45.
- [8] 秦四清, 王建党, 王清, 等. 土钉支护机理与优化设计[M]. 地质出版社, 1999: 10—15.
- [9] 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.
- [10] 胡贺松. 深基坑土钉支护结构的工作性能及其设计研究[M]. 长沙: 中南大学, 2005: 34—39.