

土层灌浆锚杆的蠕变损伤特性研究

Creep damage effects of pulling grouting anchor in soil

许宏发^{1,2}, 卢红标¹, 钱七虎¹

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院人防工程系, 江苏 南京 210007; 2. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093)

摘要: 蠕变行为是土层锚杆拉拔的重要特征之一。根据砂浆锚杆的抗拔蠕变试验, 研究了锚杆抗拔的力学模型, 计算出了模型中的力学参数和砂浆锚杆的长期抗拔力。另外, 就锚杆拉拔损伤效应问题进行了讨论, 引入了变形损伤效应和时间损伤效应的概念。结果表明, 时间效应对锚杆抗拔性能有较大的影响, 在粉质粘土中砂浆锚杆的长期抗拔力比瞬时极限抗拔力下降 1/4~1/3。

关键词: 锚杆; 蠕变; 抗拔力; 损伤

中图分类号: TU 471; U 455. 7

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)01-0061-03

作者简介: 许宏发(1964-), 男, 江苏泰州人, 博士, 副教授, 南京大学在读博士后, 主要从事岩土力学与工程的科研和教学工作。

XU Hong-fa^{1,2}, LU Hong-biao¹, QIAN Qi-hu¹

(1. Engineering Institute, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: On the basis of pulling creep test on grouting anchor in silty clay, a mechanical model of pulling anchor has been established, and the parameters of the model and the long-term pulling strength of anchor were derived in this paper. The damage effect of pulling anchor was discussed, and the concepts of the deformation damage effect and the time damage effect were developed. The results have shown that there were great influences of the time effects on pulling properties of the anchor and the long-term pulling strength on grouting anchor in silty clay is less about 1/4 to 1/3 than immediate limit pulling strength.

Key words: anchor; creep; pulling strength; damage

1 前言*

锚杆技术在土建工程中已得到广泛的应用, 不仅用于临时支护, 而且还大量用做永久性的结构。在土层锚杆的设计中, 一般用瞬时极限抗拔力作为设计依据, 没有考虑锚杆抗拔的时间效应^[1]。而时间效应是软土中锚杆拉拔的重要特征, 对其研究有重要的理论和实践价值。本文根据某工地粉质粘土中的砂浆锚杆抗拔蠕变试验, 建立了锚杆抗拔的流变力学模型, 并在此基础上, 进一步推导了砂浆锚杆的长期抗拔力和模型中的力学参数。另外, 就损伤效应问题进行了讨论, 提出了变形损伤效应和时间损伤效应的概念。本文通过 Burgers 模型、试验数据拟合以及蠕变损伤模型估计得到的长期抗拔力基本一致, 说明本文提出的分析方法是可行的, 可作为实际锚杆工程设计时一个重要参考资料。

2 拉拔蠕变试验及结果

笔者在某基坑工程, 对淤泥质粉质粘土中的水泥砂浆锚杆进行了拉拔蠕变试验。试验土层埋深 3~9 m, 层厚 3.6~10.8 m, 基坑设计参数取值为(直剪固快) $c = 12.6 \text{ kPa}$, $\varphi = 22^\circ$, 土的含水率为 32%~35%。锚杆倾斜放置, 与水平面夹角为 25° 左右。锚杆的施工工艺流程为: 成孔→注浆→安装锚杆→二次压浆。试验锚杆主要参数见表 1。试验采用逐级加载法, 分别

施加轴向拉拔力 $F_0 = 80, 110, 140, 170, 200, 210, 230, 260, 290 \text{ kN}$ 。试验蠕变曲线如图 1 所示。由试验可以估计得平均瞬时极限抗拔力为 300 kN 左右。

表 1 试验锚杆主要参数

Table 1 Parameters of the test anchor

锚杆长度 /m	锚杆直径 /mm	钻孔直径 /mm	砂浆配比	施工时间 /d	注浆压力 /MPa	二次压浆压力 /MPa
17	3026	120	1:1	26	0.2~0.3	0.5~0.6

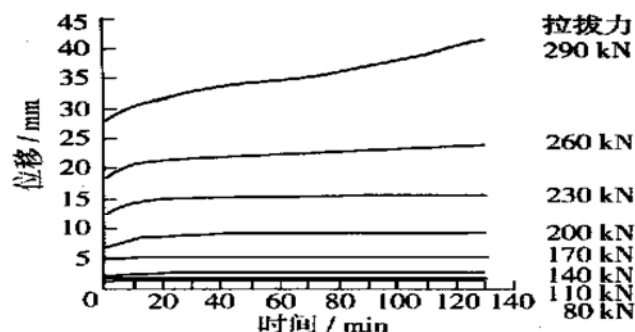


图 1 锚杆拉拔试验时间位移曲线

Fig. 1 Time-displacement curves of creep test on pulling anchor

3 抗拔力学模型

根据试验结果分析, 该拉拔试验的力学模型可用 Burgers 模型表达(见图 2)。

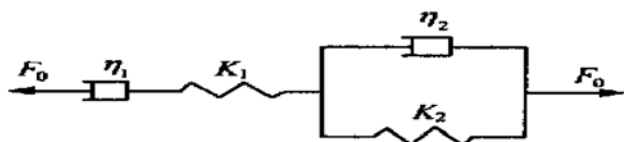


图2 Burgers 模型

Fig. 2 Burgers model

由力学推导^[2], 其蠕变方程为

$$u = F_0 \left[\frac{1}{K_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{K_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{K_2}{\eta_2} t\right) \right) \right] \quad (1)$$

式中 u 为蠕变位移; F_0 为恒定轴向拉拔力; K_1, K_2 为弹簧元件的刚度; η_1, η_2 为粘壶元件的粘滞系数。

将式(1)简写为

$$u = F_0 \{ P + St + Q[1 - \exp(-Rt)] \} \quad (2)$$

式中 $P = \frac{1}{K_1}, S = \frac{1}{\eta_1}, Q = \frac{1}{K_2}, R = \frac{K_2}{\eta_2}$ 。

文献[3, 4]介绍了一种求解力学参数的方法。该方法是建立试验数据多项式回归方程与蠕变方程多项式展开式之间的间接联系, 联立方程组, 求解力学参数。本文也利用此方法求解蠕变方程中的参数值。具体计算步骤见文献[3]。表2为不同恒拉拔力作用下的模型力学参数。

表2 模型力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the model

F_0 /kN	平均位移 /mm	K_1 /(kN·mm ⁻¹)	K_2 /(kN·mm ⁻¹)	η_1 /(kN·min·mm ⁻¹)	η_2 /(kN·min·mm ⁻¹)	$R = K_2/\eta_2$	相关 系数
80	1.40	62.162	416.667	*	4805.832	0.0867	0.9883
110	1.73	68.976	488.723	*	5880.757	0.0831	0.9876
140	2.49	62.484	382.702	*	4502.375	0.0850	0.9882
170	5.05	35.335	401.010	*	4597.702	0.0872	0.9903
200	7.98	29.835	84.382	963254	996.318	0.0846	0.9954
230	14.08	19.424	64.516	57201	755.450	0.0854	0.9791
260	21.19	14.445	90.901	1057	1090.217	0.0824	0.9831
290	34.41	10.485	90.754	411	1088.101	0.0840	0.9958

注: * 为相当大的实数

由表2可以得到以下几点认识:

(1) 随着轴向拉拔力的增大, 模型中元件力学参数有减小的趋势。这是由于微观损伤的结果。

(2) 当 $F_0 < 200$ kN 时, η_1 相当大, 相当于该元件不起作用。并且各元件的力学参数比较接近。说明此时变形引起的损伤可以忽略不计。

(3) 当 $F_0 \geq 200$ kN 时, 各元件参数均有显著减小的趋势, 这是变形引起的损伤结果。

(4) 方程(2)中的指数系数 R 均较接近, 平均值为 0.0848。说明元件 η_2 和 K_2 的损伤是同步的。

以上分析可知, 估计该锚杆的长期抗拔力为 200 kN 左右。

4 时效刚度和时效抗拔力

4.1 时效刚度

根据图1所示的蠕变试验曲线, 可作出一簇不同时刻的等时拉拔力-位移曲线(如图3)。由等时曲线可知, 每条等时曲线都是非线性的。现在用位于 80 kN 和 200 kN 之间曲线段的割线刚度 K_s 进行研究。表3为不同时刻的割线刚度值, 可分析其变化规律(见图4)。

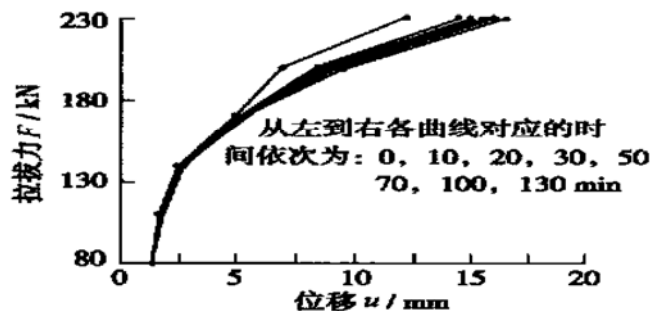


图3 拉拔力-位移等时曲线

Fig. 3 Isochronal pulling force-displacement curves

表3 不同时刻割线刚度

Table 3 Secant stiffness at different time

时间/min	0	10	20	30	50	70	100	130
刚度/(kN·mm ⁻¹)	21.31	19.11	16.91	16.44	15.57	15.25	14.94	14.87

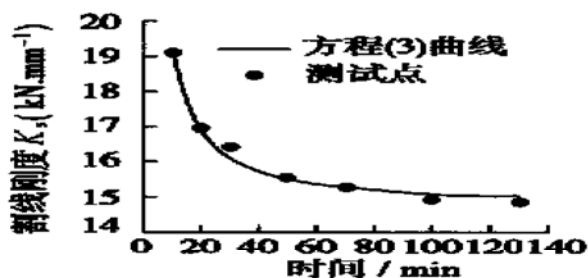


图4 割线刚度与时间的关系

Fig. 4 Relation between secant stiffness and time

用关系式 $K_s(t) = A \cdot \exp(B/t)$ 进行回归, 得到刚度与时间的关系式为

$$K_s(t) = 14.70 \exp(2.71/t) \quad (\text{相关系数为 } 0.9919) \quad (3)$$

当时间 $t \rightarrow \infty$ 时, 可求得该锚杆的长期割线刚度 $K_s(\infty) = 14.70$ (kN/mm)。

4.2 时效抗拔力

文献[5]对软岩的时效弹模和时效强度进行了研究, 发现它们的变化规律具有相似性。本文引用这一观点, 假定拉拔刚度和拉拔强度随时间的变化规律具有相似性, 即

$$\frac{K_s(t)}{F_c(t)} = \frac{K_s(0)}{F_c(0)} \quad (4)$$

$$\text{所以 } F_c(t) = \frac{K_s(t)}{K_s(0)} F_c(0) = \frac{14.7 \exp(2.71/t)}{21.31} \times 300$$

$= 206.95 \exp(2.71/t)$ 。式中, F_c 为不同时刻的屈服强度, 单位为 kN。

当时间 $t \rightarrow \infty$ 时, 可估算得该锚杆的长期抗拔力为 $F_c(\infty) = 206.95$ kN。该计算值和上面第3节的判断结果相一致, 可见假定拉拔刚度和拉拔强度随时间变化规律具有相似性的观点是正确的。

5 拉拔损伤效应

在锚杆的拉拔过程中, 必然伴随着损伤, 损伤不仅是拉拔力或位移的函数, 而且是时间的函数。

5.1 变形损伤效应

表2已经表明, 模型中元件的力学参数随着拉拔力或位移的增加而有减小的趋势。这一现象即为变形损伤效应。当拉拔力小于长期抗拔力时, 变形损伤效应不明显; 当拉拔力大于长期抗拔力时, 变形损伤效应很明显, 直至破坏。本文重点讨论拉拔力小于长期抗拔力的损伤效应, 因此变形损伤效应可忽略不考虑。

5.2 时间损伤效应

当拉拔力小于长期抗拔强度且为一恒定值时, 由于只有蠕变位移, 位移量较小, 变形损伤效应不明显, 可以忽略不计。此时产生的损伤主要为时间损伤。现在用损伤变量来度量时间损伤的程度^[6]。本文用模量法来测定损伤变量。则有

$$\omega(t) = 1 - \frac{K(t)}{K(0)} \quad (5)$$

式中 ω 为损伤变量; $K(t)$ 为 t 时刻的变形刚度; $K(0)$ 为 0 时刻的变形刚度。

由式(2)可得到同一拉拔力水平下, t 时刻变形刚度

$$K(t) = \frac{1}{P + St + Q[1 - \exp(-Rt)]} \quad (6)$$

式中, P , Q , R , S 均为拉拔力或位移的函数, 根据拉拔力的值, 由表2插值得到。

由式(6)计算得

$$K(0) = 1/P \quad (7)$$

将式(6), (7)代入式(5)得

$$\omega(t) = 1 - \frac{P}{P + St + Q[1 - \exp(-Rt)]} \quad (8)$$

建立了式(8)损伤演化的方程之后, 就可以利用损伤力学的方法进行拉拔分析。由于蠕变损伤主要发生于拉拔力小于长期拉拔力的情况, 由表2可知, η_1 为相当大的实数, 相当于粘壶元件 η_1 没有作用。因此有

$$S = \frac{1}{\eta_1} \approx 0 \quad (9)$$

式(8)可简化为

$$\omega(t) = 1 - \frac{P}{P + Q[1 - \exp(-Rt)]} \quad (10)$$

长期蠕变损伤变量为

$$\omega_\infty = \frac{Q}{P + Q} = \frac{K_1}{K_1 + K_2} \quad (11)$$

按恒定拉拔力为 200 kN 时的模型参数(见表2)代入式(11)得到长期损伤变量为 0.261。进一步计算得到长期拉拔力为 221.7 kN。该结果同前面的试验结果是基本一致的, 说明建立的流变模型和蠕变损伤模型是正确的。

6 结 论

通过本文的分析, 可以得到如下结论:

(1) 可用 Burgers 模型描述灌浆锚杆的拉拔蠕变特性。随着拉拔力的增加, 模型中元件力学参数有减小的趋势。当拉拔力小于长期抗拔力时, 减小程度不明显; 当拉拔力大于长期抗拔力时, 减小程度很明显。

(2) 锚杆拉拔的变形刚度和抗拔力均为时间的函数, 随时间的延长而降低。由变形刚度和抗拔力随时间变化的相似性规律, 可以得到长期抗拔力。长期抗拔力比瞬时极限抗拔力下降 1/4~1/3。

(3) 在锚杆的拉拔过程中, 必然伴随着损伤, 损伤不仅是拉拔力或位移的函数, 而且是时间的函数。即锚杆拉拔损伤效应包括变形损伤效应和时间损伤效应。在实际工程中, 锚杆拉拔损伤应是这两种损伤效应的综合。

(4) 建立了土层锚杆拉拔流变模型和蠕变损伤模型, 计算结果和试验结果基本一致。

参考文献:

- [1] He Siming. Mechanism of Anchor in Deep Excavation [A]. Shen Z J, Law K T, Li G Y, Fellenius B H. Proc of Second Int Conf on Soft Soil Engineering [C]. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 513- 518.
- [2] Wilhelm Flugge. Viscoelasticity [M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1975. 22.
- [3] 许宏发, 陈新万. 多项式回归间接求解岩石流变力学参数的方法[J]. 有色金属, 1994, 46(4): 19- 22.
- [4] Xu H F. A regressive inversion method to determine parameters of soft soil rheology [A]. Shen Z J, Law K T, Li G Y, Fellenius B H. Proc of Second Int Conf on Soft Soil Engineering [C]. Nanjing: Hohai University Press, 1996. 187- 192.
- [5] 许宏发. 软岩强度和弹模的时间效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 246- 251.
- [6] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.