

锚固基坑模型试验研究

Research on model test of anchored excavation

张向阳, 顾金才, 沈俊, 陈安敏
(总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 应用模型试验方法, 探讨了在开挖过程中基坑墙面水平位移特点和预应力锚索受力特点, 给出了锚固基坑与非锚固基坑的水平位移变化特征、不同的锚索类型对基坑变形的影响和锚索应力的变化特征, 提出了合理的锚索结构形式。

关键词: 基坑; 预应力锚索; 模型试验

中图分类号: TU 753 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2003)05-0642-05

作者简介: 张向阳(1973-), 男, 河南南阳人, 助理研究员, 1999年获岩土工程硕士学位, 1999年至今在总参工程兵科研三所地质力学模型试验室工作, 主要从事岩土工程领域静载和动载方面的模型试验研究。

ZHANG Xiang-yang, GU Jin-cai, SHEN Jun, CHEN An-min

(The Third Scientific Research Institute of the Corps of Engineers of PLA, Luoyang 471023, China)

Abstract: This paper researches characters of the horizontal displacement of slope and the stress of anchor cables during excavation by model test. The horizontal displacement of the anchored slope and un-anchored slope, the influence of different types of anchor cable on the slope displacement, stress of cables, and rational structure type of anchor cable are given.

Key words: excavation; prestressed anchor cable; model test

0 前言*

随着社会的发展, 我国许多城市涌现出大量的高层建筑, 其下面一般有一层或多层地下室。为保证地下室正常施工, 往往需要对基坑墙面进行加固处理。通常情况下, 采用普通的喷锚支护就可以保证基坑的安全; 但在特殊情况下, 如基坑较深、地质条件复杂、相邻建筑物很近时, 就需要采用更强的锚固技术——预应力锚索加固技术。为了探讨在开挖和超载过程中基坑预应力锚索受力特点与变化过程、锚固基坑与非锚固基坑的位移变化特征及锚索类型对基坑变形的影响, 笔者采用模型试验方法对上述问题进行了研究。本文介绍了在开挖过程中基坑的水平位移变化特征、预应力锚索受力特点及其预应力变化过程。

1 试验设计

1.1 主要考虑

本试验不针对具体工程进行, 按一般工程对象考虑, 基本情况如下。

(1) 基坑。为使试验工作简单又具有一定的代表性, 选取的基坑深 16 m, 长宽足够大, 保证在边长中部 8 m 宽度内满足平面应变条件。土体为均匀连续介质, 单轴强度 0.2~0.3 MPa, 容重 $\gamma = 18 \text{ kN/cm}^3$, 无地下水 and 流砂等不利因素。

(2) 基坑周边荷载。在基坑表面距基坑开挖边缘

2 m 处有均布建筑荷载 $q_0 = 1.8 \text{ MPa}$, 分布宽度 6 m, 沿基坑边长通长分布。

(3) 开挖步骤。为研究分步开挖对基坑的影响, 基坑分 4 步开挖, 每步开挖深度 4 m, 每开挖一步, 设置一层喷层与锚索, 喷层厚 5~7 cm。

(4) 开挖坡度。为研究开挖坡度对基坑的影响, 基坑左侧墙坡度为 83° , 右侧墙为垂直开挖。

(5) 锚索类型。锚固基坑预应力锚索有全长粘结式锚索和自由式锚索两种类型。自由式锚索内锚固段长 2 m。锚索由上到下成梯次布置, 第 1 排锚索长为 8.6 m, 第 2 排锚索长为 7.8 m, 第 3, 4, 5 排锚索长分别为 7.0, 6.2 和 5.4 m。横向间距 2.0 m, 纵向间距 2.4 m, 预应力吨位 $T = 32 \text{ t}$ 。

本试验简化假设是: ①试验中不考虑时间因素; ②截取基坑边长中段 8 m 宽度作为研究对象, 并假设该段满足平面应变条件; ③不考虑锚索受力后成股扭转效应, 而用薄壁管材代替钢绞线; ④建筑物荷载以千斤顶压力代替。

1.2 研究内容

本项研究共进行 4 组模型试验, 每组一块模型, 各模型编号及主要特征见表 1。限于篇幅, 本文只介绍模型 M1、M3 和 M4 的部分研究内容。其他内容及数值研究成果以后介绍。表中 T_0 为锚索初始预应力值, R_c 为模型材料的抗压强度, F 为垫墩底面积。

表 1 模型编号及主要特点
Table 1 Main character of model

模型	主要特点
M1	左右两墙均不锚固
M2	左右两墙均用喷层锚固
M3	左右两墙均用喷层与自由式锚索联合锚固, $T_0/(R_cF) = 3.6$
M4	右侧墙用喷层与全长黏结式锚索联合锚固, $T_0/(R_cF) = 3.6$
	左侧墙用喷层与自由式锚索联合锚固, $T_0/(R_cF) = 1.8$

从表 1 可以看到, 试验研究内容有 4 项: ①坡角对基坑稳定性的影响; ②锚索类型对其加固效果的影响; ③锚索初始预应力大小对加固效果的影响; ④锚固与非锚固基坑的受力、变形特征等。

1.3 相似比尺

应力比尺 $K_\sigma = 10$, 几何比尺 $K_L = 20$, 集中力比尺 $K_p = K_\sigma \cdot K_L^2 = 4 \times 10^3$, 容重比尺 $K_\gamma = K_\sigma / K_L = 1/2$ 。三块模型的尺寸一样, 锚索的长短及布置一样, 只是结构形式不一样, 荷载作用位置也一样。模型尺寸及锚索布置如图 1(图中尺寸单位为 cm, 下同)。在锚固墙面上, 每个墙面布置 20 根锚索, 每个墙面的第一排以及第二列锚索为量测锚索, 共计 8 根。

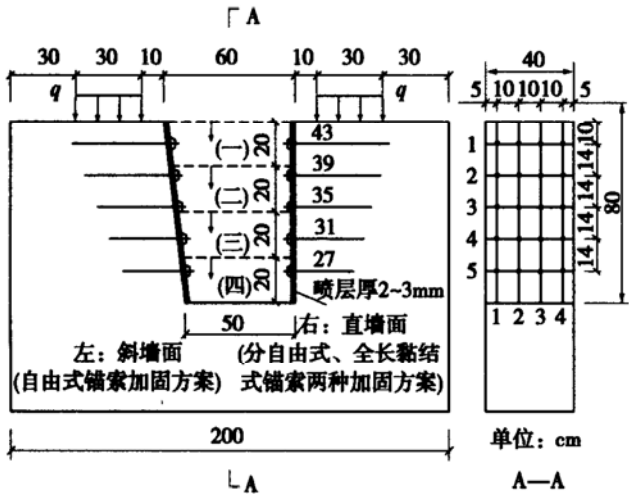


图 1 模型尺寸及锚索布置

Fig. 1 Model size and arrangement of anchor cables

1.4 模型材料的选择

(1) 模型介质材料

模型介质材料选用重晶石粉加铁砂的混合物, 配比(按重量计): 重晶石粉: 铁砂 = 1: 0.61, 含水率为干料重的 1%, 容重为 36 kN/m^3 , 满足相似比尺 $K_\gamma = 1/2$ 的要求, 其力学参数见表 2。

表 2 介质材料力学参数

Table 2 Mechanical parameters of model material

R_c /kPa	R_t /kPa	E /MPa	c /kPa	φ /(°)	γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
25	3.5	800	4.5	41	36

(2) 喷层材料

喷层材料配比(按重量计)为水泥: 水: 速凝剂 = 1: 0.64: 0.2, 水泥为 425[#], 速凝剂为 8604 型。在向坑壁上喷射水泥浆之前先喷一层薄薄的酒精漆片溶液, 用以固结砂粒, 然后用普通喷漆枪向坑壁喷射 2~3 遍水泥浆, 厚度即可达到 3 mm 左右的设计厚度。

(3) 锚索模拟材料

在试验中, 模拟锚索间距不能与工程实际一一对应, 因为这样布置的锚索太密。试验中把实际工程中的几根锚索的作用等效于一根锚索在模型中体现, 既解决了间距较密的问题, 又可使模拟锚索的断面加粗。在本试验中, 锚索长度均按几何比尺的要求确定, 而锚索截面是按锚索抗拉变形刚度(EA)相似确定, 即 $(EA)_p/(EA)_m = K_p$, $(EA)_p$ 和 $(EA)_m$ 分别表示原型锚索和模拟锚索截面的抗拉变形刚度。这样模拟保障了在相似的锚索张力作用下, 锚索体上的应变比尺 $K_\epsilon = 1$ 。试验证明, 这是可行的。锚索模拟材料选用 $\phi 6$ 铜管, 壁厚 2 mm, 结构形式如图 2 所示。待喷层材料具有一定强度时用 $\phi 8$ 的钢杆通过喷层向坑壁内插进(需要用小锤轻轻敲击外端), 插进深度与待安装的锚索长度相等, 然后轻轻拔出, 再把要安装的锚索插入。对于自由式锚索, 内锚固段长 10 cm, 插入前锚索内锚固段与自由段之间裹上二层白胶布(宽 5 mm 左右), 形成止浆环, 以防止注浆时浆液流到张拉段部分。注浆前用少量清水润湿管壁和孔壁, 然后用铁注射器在一定压力下把已拌合好的水泥浆(配比同喷层用水泥浆)注入内锚固段。注浆材料 2 h 后拉拔力可达 120 N(相当于 480 kN 级锚索)。锚索垫墩用水泥浆制作, 底面尺寸为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 。

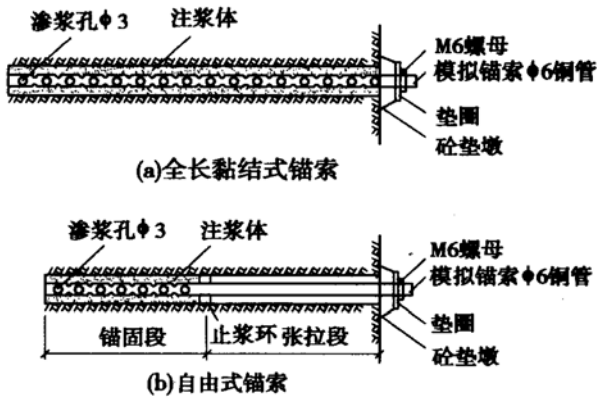


图 2 锚索结构形式

Fig. 2 Structure of the anchor cable

1.5 模型制作与加载装置

试验装置为自行研制的“岩土工程多功能模拟试验装置”, 模型在试验装置上直接制作。制作模型时先将框架旋转成水平状态, 四边支好, 设置纵控梁、纵控

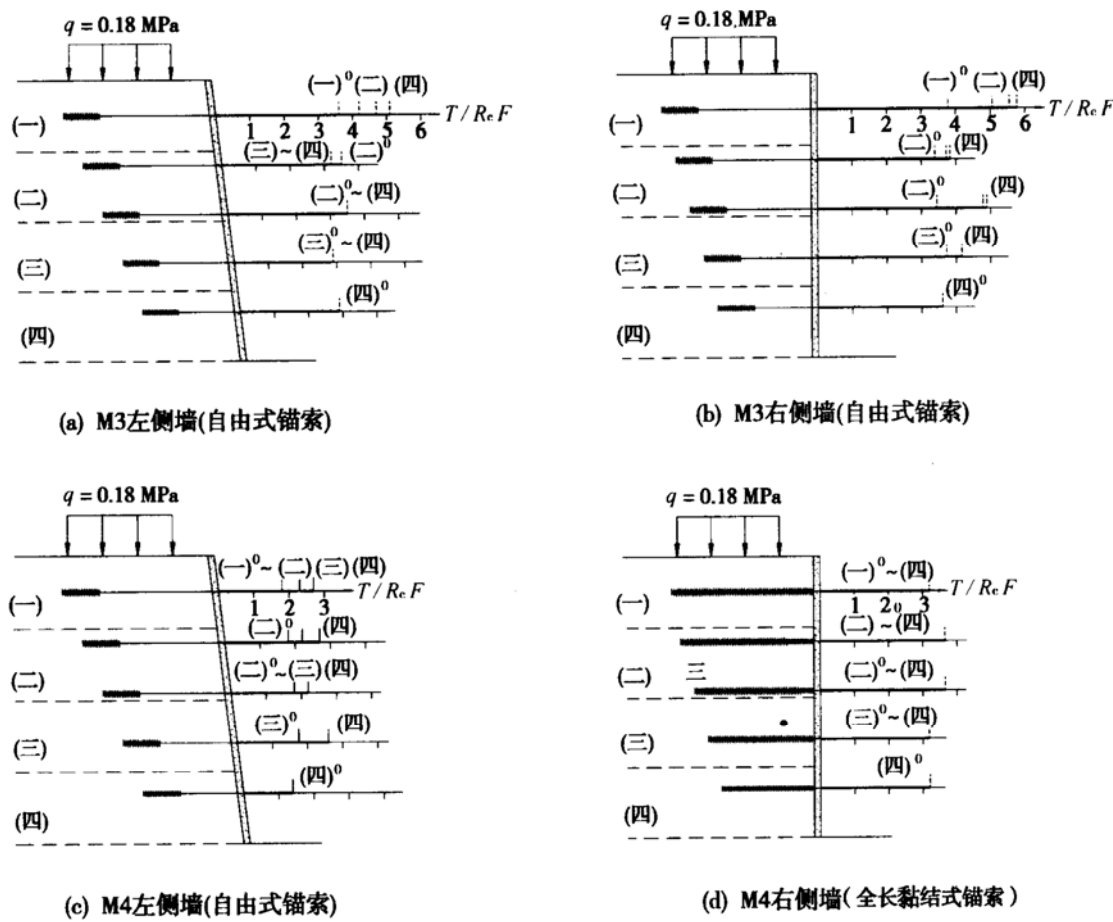


图 5 基坑开挖时锚索应力变化

Fig. 5 Stress of anchor cables during excavation

当层土体的水平位移值大于下部未开挖土体的水平位移值。

(4) 全长黏结式锚索加固(如图 4 所示)与自由式锚索加固相比,直墙面水平位移值略大,说明自由式锚索减少墙中下部位移较明显。这是由于全长黏结锚索是靠锚索与土之间黏结力和摩阻力来限制墙体变形的,墙体变形较小时,其摩阻力也较小,加固效果也就较小,而自由式锚索是依靠预应力限制岩体变形的,安装后能够立即起作用,因而基坑开挖后坡面水平位移较小。

(5) 第 4 次开挖引起的 M1 和 M4 直墙面水平位移急剧增大,其增加量是变形总量的一半左右,而对于 M3 每一次开挖引起的位移增量较稳定。这是因为: M1 直墙面没有加固措施,当开挖第 4 步完成后,基坑边坡已经接近失稳状态(超载试验证明了这一点),故第 4 步开挖引起的位移急剧增大;对于 M4 直墙面,由于前 3 步开挖引起的土体位移较小,其对基坑的加固效果并不明显,所以第 4 步开挖引起的位移较大(这不意味着该边坡接近失稳状态,超载试验证明, M4 直墙面和 M3 直墙面具有相同的比 M1 高的承载力)。

(6) 在同样条件下,直墙面水平位移比斜墙面大,非锚固模型的比锚固模型的大,预应力小的比预应力大的要大,具体数值见表 3。

表 3 开挖完毕基坑水平位移			
Table 3 Horizontal displacement after excavation			
模型编号	M1	M3	M4
直墙面	0.26	0.08	0.09
斜墙面	0.21	0.05	0.09

2.2 开挖过程中锚索应力的变化特征

锚索应力变化详见图 5。图中() 内的数值表示开挖步序,横坐标值表示锚索应力 $T_0/(R_c F)$, 其中() ⁰ 内的数值表示所对应的应力值为锚索初始预应力值。

- (1) 直墙面与斜墙面自由式锚索应力变化特征比较
 - a) 在开挖过程中,直墙面墙顶和墙中锚索应力增加较大,墙的下部锚索应力增加较小。例如, M3 基坑直墙面: 墙顶锚索应力从 $T_0/(R_c F) = 3.8$ 增加到 5.8, 增加了 53% 左右; 墙中锚索应力从 $T_0/(R_c F) = 3.4$ 增加到 4.9, 增加了 44% 左右; 而墙的上部锚索应力只增加了 14% 左右, 墙的下部锚索应力几乎没有增加。
 - b) 斜墙面上的锚索应力只有墙顶锚索应力增加较

大。如 M3 基坑斜墙面: 墙顶锚索应力从原来的 $T_0/(R_c F) = 3.7$ 增加到 5.1, 增加了 38% 左右, 其余部位的锚索应力几乎没有变化, 第 2 排锚索应力不仅没有增加反而有所减少。

这两种墙面自由式锚索受力的共同特征是墙顶第 1 排锚索受力较大, 其余各排锚索受力较小。这与两种墙面开挖后的水平位移分布特征(墙的中上部较大, 墙脚较小)是基本一致的。有些部位自由式锚索应力的增量大小与开挖过程中基坑水平位移大小不一致, 估计这与锚索本身的结构特征和与墙面的变形特征有关, 具体原因尚待分析。

(2) 自由式和全长黏结式锚索应力变化特征比较

从图 5 可以看到, 在整个开挖过程中, 各排全长黏结式锚索应力均未发生明显变化, 这与相同条件下的自由式锚索相比具有非常明显的区别, 与墙面水平位移变化剧烈形成对比。这是因为沿全长黏结式锚索杆体通长分布的土体与锚索之间的黏结力和摩阻力具有一定的阻止介质变形能力, 只要这种阻力较大就可使锚索外端不受力; 而自由式锚索只要介质有变形就要传到锚索外端, 不管其大小都要引起外端锚索应力的变化。

全长黏结式锚索在开挖过程中应力虽然没变化, 但墙面水平位移却仍然有, 并且也是墙的中上部较大, 两头较小。这主要是因为全长黏结式锚索锚固范围是有限的, 它对锚索附近介质有变形约束作用, 对离锚索体较远的大范围的介质变形限制作用就小; 因而那些远离锚索体的介质仍然可以产生较大的变位变形。

(3) 自由式锚索预应力值对应力变化特征的影响

将 M4 模型斜墙面上自由式锚索应力(预应力较小)在开挖过程中的变化, 与 M3 模型斜墙面上的自由式锚索应力(预应力较大)的变化加以对比可以看到: 二者相同点都是墙顶第 1 排锚索应力变化较大, 墙顶以下锚索应力变化较小; 不同的是预应力较小的锚索在开挖过程中锚索应力增量较大, 预应力较大的锚索在开挖过程中应力增量较少。例如, M3 模型在开挖过程中斜墙面上的锚索只有墙顶第 1 排应力从 $T_0/R_c F = 3.7$ 增加到 5.1, 增加了 38% 左右, 其余各排基本上无变化。而 M4 模型斜墙面上的锚索几乎各排应力都有明显增加, 见表 4。

表 4 斜墙上的自由式锚索应力增加百分比

Table 4 The increase of stress in the partially embedded cables in the inclined slopes

锚索排数	锚索应力增加百分比($\Delta T/T_0$) / %	
	大预应力的 M3 模型	小预应力的 M4 模型
1	38	55
2	- 10	48
3	0	41
4	0	15
5	0	0

小预应力的自由式锚索在基坑开挖过程中锚索应力增加大是由于初始预应力小时对基坑的变形限制小, 造成基坑变形大, 所以锚索应力也就增加大。锚索应力增大不一定是坏事, 只要锚索承载能力够, 让土体介质有一定的变形, 引起锚索应力增加, 可以充分利用预应力锚索承载能力高的特点, 提高对基坑的加固效果, 提高锚索的利用效率。当然这种变形应该是有限度的, 不能让土体产生松散破坏, 否则就会带来不利影响。

3 结 论

(1) 位移特征: 每一次开挖均引起基坑墙面的变形, 基坑开挖完毕后, 墙的中上部水平位移较大, 墙下部水平位移较小; 直墙面的水平位移大于斜墙面的水平位移, 锚索预应力小的墙面位移大于锚索预应力大的墙面位移。

(2) 锚索应力特征: 基坑上部的自由式锚索应力增加较多, 下部锚索应力增加较少; 由于墙面变形较小, 黏结式锚索应力几乎没有变化。

(3) 自由式锚索应力增量与墙面水平位移增量基本一致, 当基坑变形较小时, 全长黏结式锚索不能充分发挥锚固效果。

(4) 当对基坑墙壁水平位移值限制不严格时, 可以采用预应力小的自由式锚索或全长黏结式锚索, 这样有利于边坡充分变形, 充分发挥锚索的承载能力和土体的自稳能力, 支护参数可以减弱。

参考文献:

- [1] 顾金才, 沈 俊, 陈安敏. 预应力锚索锚固机理与设计计算方法研究报告[R]. 洛阳: 总参工程兵科研三所, 1998.