

# 复合土钉支护厚杂填土边坡现场试验研究

郑志辉<sup>1</sup>, 贺若兰<sup>2</sup>, 徐勋长<sup>3</sup>, 杨章甫<sup>3</sup>

(1. 河南科技大学 建筑工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 长沙理工大学 桥梁与结构工程学院, 湖南 长沙 410076;  
3. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**对杂填土内土钉的受力特点及边坡的位移特性进行了现场试验研究, 得出了若干有意义的结果和结论。首次测得并分析了杂填土中土钉的双弓形应变分布形态, 指出这是填土边坡中存在 2 个或以上潜在滑动面的结果; 首次测得并分析了土钉临界锚固长度, 指出在本试验条件下, 其长度约为 9 m, 并认为临界锚固长度是应变(应力)峰值点、零值点和破坏点同时发生转移而形成, 锚固类结构(锚杆、锚索、土钉)均具有此特点。

**关键词:**地基基础; 杂填土; 复合土钉; 预应力锚杆; 基坑支护

**中图分类号:** TU 472

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)05-0898-07

## IN-SITU TESTING STUDY ON RETAINING MISCELLANEOUS FILL SLOPE BY USING COMPOUND SOIL NAILING

ZHENG Zhi-hui<sup>1</sup>, HE Ruo-lan<sup>2</sup>, XU Xun-chang<sup>3</sup>, YANG Zhang-fu<sup>3</sup>

(1. Institute of Civil Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;  
2. School of Bridge and Structure Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;  
3. The Third Engineering Institute, General Staff of PLA, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** In-situ testing study on the mechanical behavior of soil nailing and the displacement characteristics of miscellaneous fill slope is carried out. A number of significant conclusions are proposed. For the first time, double arciform strain of the soil nailing is observed in the miscellaneous fill. It is considered as the result that there are two (or more) potential slide planes in the miscellaneous fill. The critical anchorage length is analyzed and determined for the first, which is 9 m in this experiment. The critical anchorage length is formed because of the transfer of the peak value point, the zero value point of the stain (stress) and the wreck point at the same time. It is found out that all anchorage structure (anchor-bolt, anchor-cable and soil nailing) have this characteristic.

**Key words:** ground and foundation; miscellaneous fill; compound soil nailing; prestressed anchor-bolt; excavation retaining

## 1 引言

杂填土是人类活动所形成的无规则的堆填物。其成分复杂, 无规律性, 含腐殖质及水化物, 性质随堆填龄期变化。杂填土结构松散, 压缩性高, 物理、力学性质在水平、垂直方向上均呈现不均匀性,

稳定性较差。在同一场地的不同位置, 此类土层的地基承载力和压缩性也有较大的差异。

杂填土的处理是城市建设中经常遇到的疑难问题。对杂填土地基的处理国内有很多文献进行了报道, 常用的方法有表层压实法、换土垫层法、桩基础和各类复合地基<sup>[1, 2]</sup>。但这些方法难以用于边坡支护。

**收稿日期:** 2003-12-12; **修回日期:** 2004-02-27

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50279054)

**作者简介:** 郑志辉(1962-), 男, 硕士, 1984年毕业于中国人民解放军工程兵工程学院防护工程系, 现为高级工程师, 主要从事岩土工程方面的研究与教学工作。E-mail: zhzhui@mail.haust.edu.cn.

有关深厚杂填土边坡支护的文献极为有限。文[3]指出用化学注浆法可解决局部的渗漏水问题,对注浆附近的杂填土性能改善起到一定作用。文[4]针对采用 13 m 的深层搅拌桩和土钉墙联合支护了 7.5 m 深杂填土基坑边坡的情况,指出在杂填土中防水至关重要。文[5]指出在杂填土中不易形成深孔,意味着锚杆的抗拔力可能不足,可采用加密锚杆的方法进行补救(间距加密到 300~500 mm),以密集的短锚杆群支撑加固滑动面。

对于设计中常用的  $c, \varphi$  指标来说,城市杂填土由于其不均匀性,更多的是一种相对的量值,离散性比较大。由于城市杂填土材料非常复杂,所以不能认为其一个试验的解析结果与其他地区的就相同,应该收集并分析研究各地基土的调查数据,从而能够系统地利用城市杂填土地基<sup>[6]</sup>。所以,施工时必须与监测相结合,以便必要时修改设计。

地下水对杂填土的性能肯定有负面影响<sup>[7]</sup>,文[8]指出垃圾中的粘土粒、有机质的分解产生的胶结物质及垃圾本身的逐渐压密是决定粘聚力大小的主要因素,内摩擦角则是由于垃圾中各材料间的镶嵌及相互摩擦而产生的。排水固结后,垃圾土的  $c, \varphi$  值一般增大。因此,垃圾填埋中合理设置渗滤层及排出渗滤液是至关重要的。这也说明压力注浆不但能改变杂填土的成分,更能把其压密,使杂填土  $c, \varphi$  值增大,所以注浆可改善杂填土的性能指标<sup>[9]</sup>。

总之,杂填土边坡支护有一定难度,虽有成功的先例<sup>[10]</sup>,但坡高一般在 10 m 以内,多为临时边坡。本文结合 1 个深 14.1 m 永久性杂填土边坡的支护情况,完成了复合土钉在杂填土边坡中的现场试验研究。本文是对这一工作的简要总结。

## 2 工程概况

长沙市星电公寓为 27 层商住楼,其东边为城西供电局 7 层办公楼,2 栋房屋均有一层地下室,开挖基坑为这 2 栋房屋的地下室基坑。基坑北边 3.5 m 为交通繁忙的交通主干道——桐梓坡路,路面高出星电公寓地面 9.5 m 左右。未开挖基坑时,北边已有高 9 m 左右、坡角 30°~40° 的由杂填土形成的边坡。人行道已有 5 mm 裂缝。

边坡下部有大量抛置片石,厚约 2 m,施工需要全部取出。开挖后将使该边坡形成长 147 m、深 14.1 m、下部直立的边坡,需进行永久支护。基坑平面如图 1 所示。

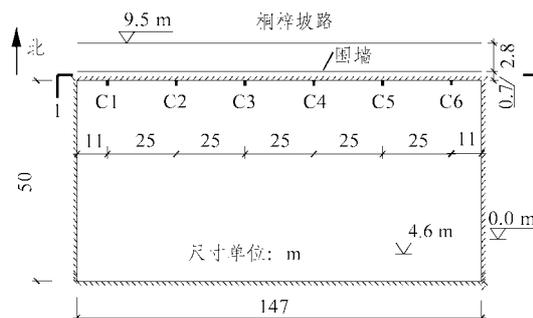
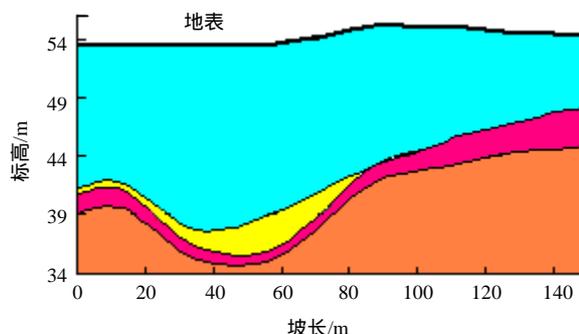


图 1 基坑平面及测点布置图

Fig.1 Ichnography of excavation retaining

## 3 工程地质及水文地质条件

该场地位于剥蚀残丘冲积沟谷,主要由杂填土、粉质粘土层组成(图 2)。各层土的分布及特征如下:



自上而下为:杂填土;粉质粘土;第四系残积粉质粘土;元古界板溪群强风化岩

图 2 地质剖面图(1-1)

Fig.2 Geological section(1-1)

(1) 杂填土:厚度为 10.4~16 m,褐色及褐灰杂色,掺有大量粘性土,夹有 10%~30%的卵石、圆砾石、碎砖、有机质(为腐烂的植物残骸)及其他杂物,结构松散,密实程度不均,由生活垃圾和建筑垃圾组成。

(2) 粉质粘土:灰黄、灰绿色,含有机质及未完全腐烂的植物残骸,湿,可塑,不均匀;并含有 20%~40%的石英质卵石,其粒径 3~5 cm,湿,可塑至硬塑状态,层厚 0~3.0 m。

(3) 第四系残积粉质粘土:褐黄或褐绿色,呈条纹状,由板岩风化而成,残留少量风化岩块,稍湿,硬塑状态,层厚 0.4~2.8 m。

(4) 元古界板溪群强风化岩:褐黄色,大部分已风化呈土状,揭露厚度为 0~0.6 m。

该场地地下水埋深为路面下 5.8 m 左右。水来源为生活排放水和大气降水,属上层滞水。含水层

为人工杂填土和粉质粘土层。填土层结构松散，属强透水层。场地内地下水对混凝土具弱腐蚀性。

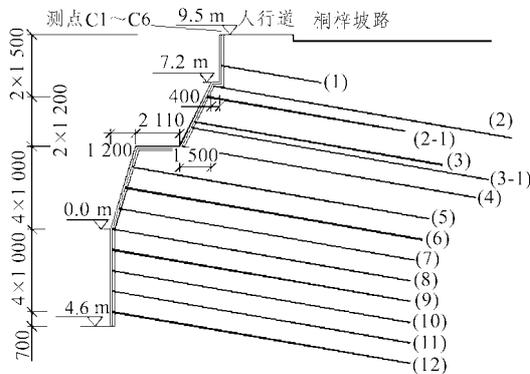
### 4 复合土钉支护方案

本边坡主要由杂填土构成，结构松散，成份复杂，边坡上部地势较高，地下水丰富，又属于永久支护，设计时应考虑边坡的位移与沉降控制，并加强对上层滞水的处理。

由于地质条件复杂，边坡支护应当采用理论计算和工程类比法相结合的原则，结合作者大量的设计和施工经验，认为本边坡可以采用土钉支护。但考虑到永久性边坡应控制边坡位移，所以设计时加入了预应力锚杆。在通过多方案的可行性、安全性、经济性对比，并经专家们论证认可后，确定采用复合土钉支护方案。

#### (1) 土钉参数计算

计算包括土钉长度、喷射混凝土厚度的确定，土钉墙抗滑动、抗倾覆和地基承载力验算。并对土钉的长度、倾角作了少量调整，以避免土钉端部在同一立面上和避开地下市政设施。最终设计剖面如图 3 所示。



尺寸单位：mm。土钉长度：(1) 6 000 mm，(2) 18 000 mm，(2-1) 12 000 mm，(3) 15 000 mm，(3-1) 18 000 mm，(4) 16 000 mm，其他均为 18 000 mm。(5)，(7)，(9)为预应力锚杆，长 18 000 mm。

图 3 边坡支护方案图

Fig.3 Section plane of slope retaining

(2) 土钉和预应力锚杆布置采用梅花型。钢筋网参数为  $\phi 8 @ 200 \times 200$ 。设在面层之间的锚杆加强筋为 HRB335  $\phi 16$ ，随锚杆呈菱形布置，并同锚杆头牢固焊接。喷射混凝土强度为 C20，厚度为  $\delta 100 \pm 20$  mm，土钉和锚杆注浆所用的浆液为水泥净浆，

水灰比为 0.45。注浆压力为：土钉 0.4 ~ 0.6 MPa，预应力锚杆 1.5 MPa，浆液强度 M15。

(3) 把图 3 中第(5)，(7)，(9)排设置为预应力锚杆。

### 5 现场实验结果

现场试验包括：(1) 土钉受力变形特性测试；(2) 边坡位移测试；(3) 地面沉降观测；(4) 土钉拉拔力试验。

土钉受力特性测试选择了 4 根土钉，土钉布置在边坡中部剖面，其位置及其测点布置见图 4；边坡位移和沉降为同一点，测点布置见平面图 1(C1 ~ C6 点)。

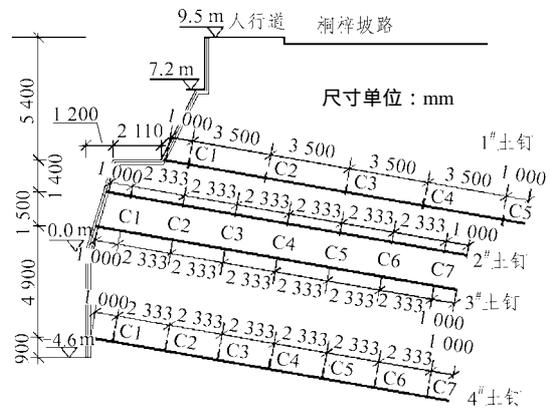


图 4 试验土钉及其应变测点布置图

Fig.4 The collocation of testing soil nailing and the strain monitoring points on them

#### 5.1 土钉受力变形测试结果

1#试验土钉应变-时间关系曲线及沿钉长的分布形态见图 5，6。2#试验土钉应变-时间关系曲线及沿钉长的分布形态如图 7，8 所示。3#试验土钉应变-时间关系曲线及沿钉长的分布形态见图 9，10。

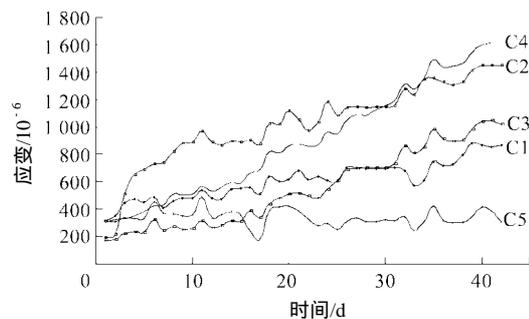


图 5 1#土钉应变-时间关系曲线

Fig.5 Strain-time curves of 1# soil nailing

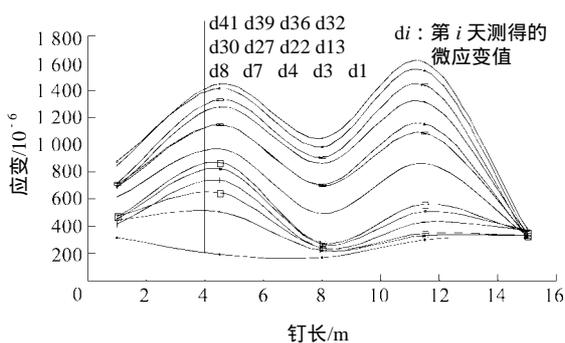


图 6 1#土钉应变沿钉长分布形态

Fig.6 Strain curves of 1# soil nailing along its length

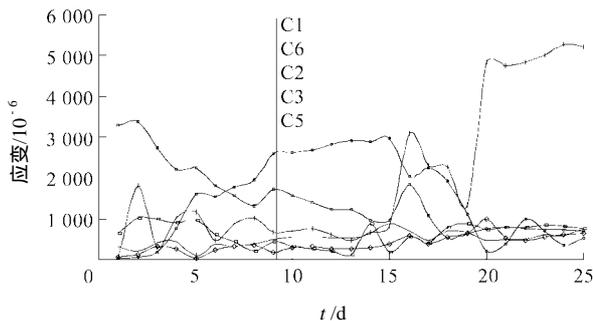


图 9 3#土钉应变-时间关系曲线

Fig.9 Strain-time curves of 3# soil nailing

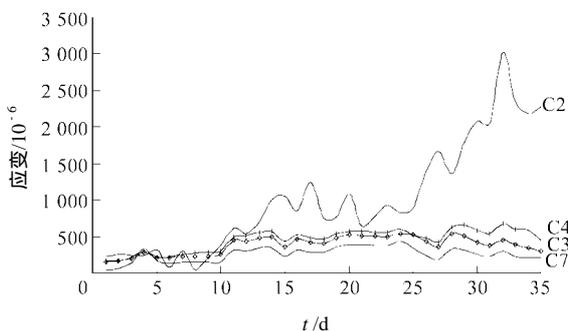


图 7 2#土钉应变-时间关系曲线

Fig.7 Strain-time curves of 2# soil nailing

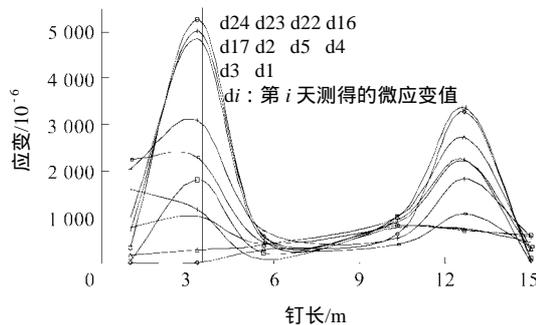


图 10 3#土钉钉长上应变沿钉长分布形态

Fig.10 Strain curves of 3# soil nailing along its length

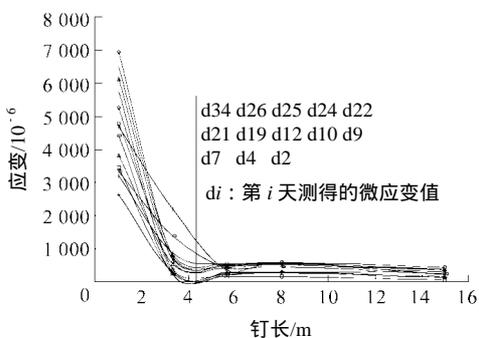


图 8 2#土钉钉长上应变沿钉长分布形态

Fig.8 Strain curves of 2# soil nailing along its length

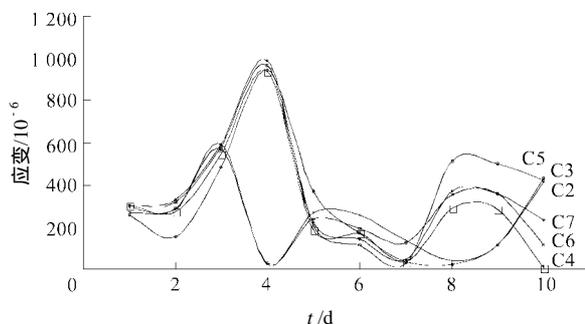


图 11 4#土钉应变-时间关系曲线

Fig.11 Strain-time curves of 4# soil nailing

4#试验土钉应力-时间关系曲线及沿钉长的分布形态如图 11, 12 所示。

### 5.2 边坡位移测试结果

边坡位移测试结果见图 13~15。

### 5.3 地面沉降测试结果

地表沉降采用水准仪量测, 测试结果见图 16, 17。

### 5.4 土钉拉拔力测试结果

土钉拉拔力测试结果见表 1。

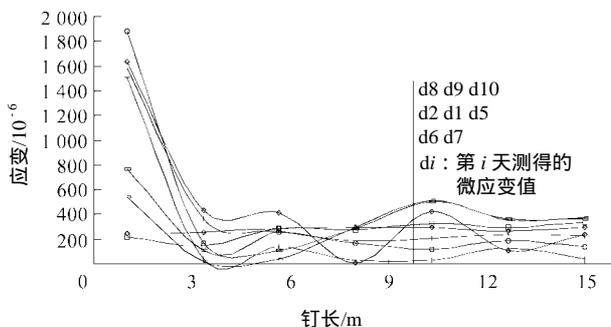


图 12 4#土钉应变沿钉长分布形态

Fig.12 Strain curves of 4# soil nailing along its length

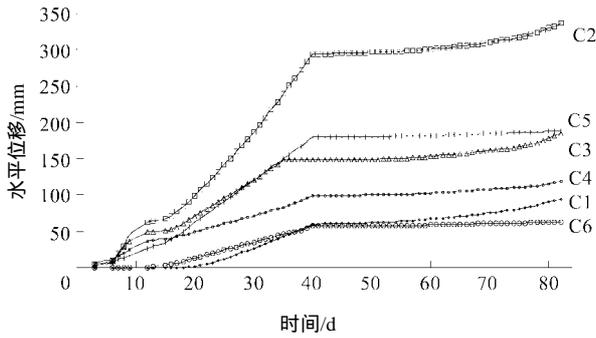


图 13 边坡水平位移-时间关系曲线

Fig.13 Horizontal displacement-time curves of slope

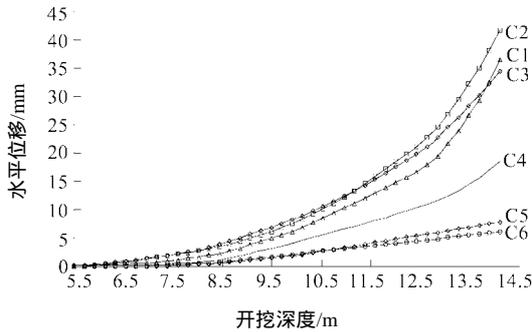


图 14 边坡水平位移-开挖深度关系曲线

Fig.14 Horizontal displacement-deepness curves of slope

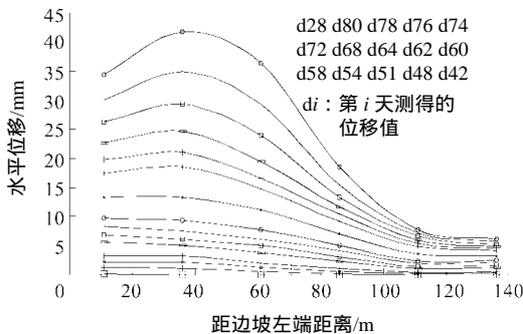


图 15 边坡水平位移-测点位置关系曲线

Fig.15 Relation curves of horizontal displacement and positions of monitoring points of slope

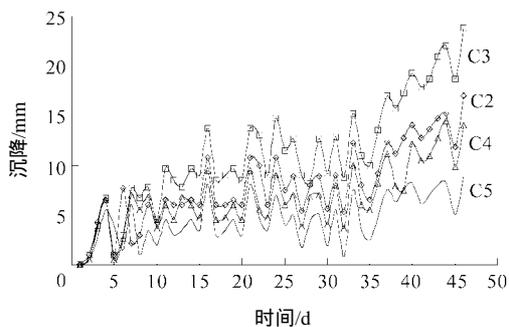


图 16 地表沉降-时间关系曲线

Fig.16 Surface subsidence-time curves of slope

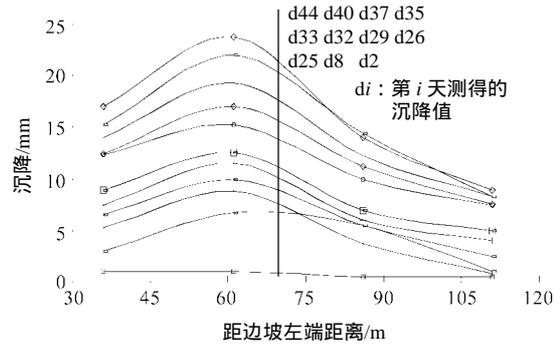


图 17 地表沉降-测点位置关系曲线

Fig.17 Relation curves of surface subsidence and positions of monitoring points of slope

表 1 土钉拉拔力及拔伸位移

Table 1 Drawing loads and displacements of soil nailing

土钉编号	钉长/m	拉拔力/kN		拔伸位移/mm
		设计值	实验值	
5	15	320	360	10.20
6	12	280	320	6.88
7	12	280	320	21.71

## 6 测试结果分析

### 6.1 土钉受力变形特性

土钉受力变形具有以下规律：

(1) 应变值随时间延长而逐步增加，最终趋于稳定，但各点增加的幅度有所不同，如图 5(1#土钉)、图 7(2#土钉)所示。

(2) 各应变测点在不同时刻(初期、中期、终期)分别取得最大值，而后趋于稳定状态，如图 9(3#土钉)、图 11(4#土钉)所示。上述规律是由杂填土的非均质性和松散性决定的。在测点取得峰值的相应点处，可能存在潜在滑移面。这意味着，对松散杂填土而言，边坡潜在滑移面在坡高一定条件下可能不止一个。这是杂土边坡一个十分重要的特性。

### 6.2 土钉应变沿钉长的分布形态

土钉应变沿钉长的分布形态主要有 2 种型式：

(1) 双弓型：由图 6，10 可见，1#和 3#土钉分别在 4 和 12 m 附近，以及 3 和 12 m 附近出现 2 个弓形，它是逐步地有规律地增大的。这种双弓型在一般岩土介质边坡中是不常见的，它表明潜在滑移面在本试验下将不少于 2 个(支护参数加强或减弱，峰值的个数均会发生变化)。这一分析结论与节 6.1 的推断是吻合的。

(2) 峰值点和零值点转移型:如图 8, 12 所示, 2#和 4#钉靠近钉头部位首先产生峰值, 而远离钉头的部位其值较小, 并逐步趋于零。随着峰值进一步加大, 砂浆与介质间粘结力被破坏, 土钉应变峰值下降并发生向邻近里端的转移;与此同时, 零值点也发生类似的转移。峰值点和零值点转移的本质是部分界面粘结力丧失的结果。因此, 峰值点转移, 零值点转移, 同破坏转移是同时发生的。需要指出, 峰值点与零值点之间的距离就是临界锚固长度。本试验条件下, 临界锚固长度约为 9 m。

### 6.3 边壁水平位移特性

边壁水平位移是指基坑靠桐梓坡路一侧的边壁上部倾向基坑内的水平位移。边壁水平位移具有下列特点:

(1) 随着时间延长, 边壁水平位移量值增加;但各测点量值增加的幅度有所不同, 填土厚度越大, 位移越大, 反之亦然;至 40 d 后趋于稳定(见图 13)。

(2) 随着开挖深度增大, 边壁水平位移量值增大, 且测点所处部位的填土厚度愈大, 其位移量值愈大(如  $C_1 \sim C_3$ ), 反之愈小(如  $C_4 \sim C_6$ ), 具有很强的规律性(见图 14)。

(3) 边壁水平位移与相应测点位置的关系曲线见图 15。比较图 2, 15, 可看出, 水平位移曲线的包络线与填土厚度的边界线就几何图形而言是相似的, 它表明, 填土厚度最小者水平位移最小, 填土厚度较大者水平位移较大, 在最大填土厚度点(距西壁 40 ~ 60 m)处, 边壁具有最大的水平位移。

土钉在面层上是大体均匀布设的, 而预应力锚杆仅在桐梓坡路一侧边壁中部布置了 3 排, 注浆压力在各层介质中基本相同。在这种条件下, 由于填土介质比其他土层介质具有大得多的松散性、压缩性和非完整性, 因而认为边壁的变形主要由填土介质所控制是合理的。

### 6.4 地面沉降特性

(1) 由图 16 可见, 地面沉降量随时间延长而增加, 但增加的幅度有所不同, 位于填土厚度较大点处的测点, 其增值较大, 反之较小。

(2) 地面沉降是不均匀的(图 17), 沉降量的大小依测点位置不同而不同。实际上沉降量受控于相应测点下部的填土厚度。在厚度较大的点处, 地面沉降量较大, 反之较小。比较图 15, 17, 二者具有相同的规律性。

### 6.5 土钉的抗拔特性

表 1 表明, 在本试验条件下, 1 组(3 根)土钉的

极限承载力比设计值高约 12.5% ~ 14.3%。松散介质难以提供较大的粘结力或摩阻力。土钉良好的抗拔特性源于土钉的加固作用, 其中水泥浆液在填土介质各种宏观和微观缝(孔)隙中的渗透、挤压作用是其重要因素之一。试验表明, 水泥浆液不规则渗透路径在杂填土介质中可达 20 m 之多。土钉的加固作用使得填土介质成为一种物理力学性能指标更为优越的新地质体, 因而能够提供较大的粘结力和摩阻力。

### 6.6 土钉与预应力锚杆的相互作用

最初的边壁防护设计采用的是单一土钉支护。为进一步控制边壁变形, 3 排预应力锚杆是后增加的。土钉按加固基础上的锚固原理设计, 预应力锚杆按锚固原理设计, 二者对边壁不稳定体的作用按叠加原理考虑。实际情形比这复杂的多。锚杆张拉时, 邻近土钉里端的拉应变增加, 外端拉应变减小或短时波动;锚杆自由段为 4 m, 预应力约 50 kN(低预应力), 它对约束第 1 个潜在滑移面(3 ~ 4 m)是有利的, 但对稳定第 2 个潜在滑移面至少在初期不十分有利。对此还须深入研究。

## 7 结论和建议

(1) 杂填土中土钉应变沿钉长的分布形态之一为双弓型, 它表明潜在的滑移面有 2 个, 推断甚至有多。这是填土边壁(坡)不同于一般粘土边坡的重要特点之一。

(2) 土钉应变峰值点与零值点向土钉里端的转移是同时发生的, 它标志着土钉局部的破坏已经发生(界面粘结力丧失), 与此同时钉体释放了部分能量。这是一般锚固类结构(土钉、锚杆、锚索)的共同破坏特征。

(3) 在同时转移的土钉应变峰值点与零值点之间的距离即为临界锚固长度。本试验条件下, 土钉临界锚固长度约为 9 m。一般而言, 超过临界锚固长度的设计是不适宜的, 但存在多个潜在滑动面的情形又另当别论。

(4) 复合土钉支护填土边壁(坡)的水平位移和垂直沉降随时间延长和开挖深度增大而增加, 但位移的主要部分在支护均衡条件下是由填土厚度控制的, 厚度越大, 则位移和沉降越大。

(5) 填土边壁(坡)中土钉具有较好的抗拔承载力, 这得益于土钉支护的加固(改性)作用。土钉的抗拔承载力是其最终发挥锚固作用的前提和基础。

(6) 土钉与预应力锚杆的相互作用较为复杂, 某些认识还只是定性的、粗浅的, 有必要进一步作深入研究。

### 参考文献(References) :

- [1] 钱玉林. 扬州地区杂填土处理[J]. 土工基础, 1998, 12(1) : 27 - 28. (Qian Yulin. Treatment of miscellaneous fills in city's reconstruction[J]. Soil Engineering and Foundation, 1998, 12(1) : 27 - 28.(in Chinese))
- [2] 戴韶生, 刘志明. 城市杂填土土工特性的研究及常用地基处理方法[J]. 探矿工程, 2002, 24(5) : 20 - 21.(Dai Shaosheng, Liu Zhiming. The study on miscellaneous fills in city's reconstruction and methods of usual foundation treatment[J]. Exploration Engineering, 2002, 24(5) : 20 - 21.(in Chinese))
- [3] 翟金明, 韩 忠. 化学注浆在杂填土地层止水工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(6) : 50 - 52.(Zhai Jinming, Han Zhong. Application of chemical grouting in waterproofing engineering in loosely filled ground[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, 17(6) : 50 - 52.(in Chinese))
- [4] 刘彦忠. 复合土钉墙技术在杂填土层基坑支护中的应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(4) : 520 - 523.(Liu Yanzhong. Application of compound soil nailing to excavation retaining in miscellaneous fill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4) : 520 - 523.(in Chinese))
- [5] 王永生. 郑州市人才交流中心大楼基坑杂填土层喷锚支护技术[J]. 探矿工程, 2000, 22(1) : 46 - 47.(Wang Yongsheng. Application of anchor net spray support to miscellaneous fill of the talent exchange center building in Zhengzhou city[J]. Exploration Engineering, 2000, 22(1) : 46 - 47.(in Chinese))
- [6] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 22(1) : 35 - 40.(Zhang Zhenying, Wu Shiming, Chen Yunmin. Experimental research on the parameter of life rubbish in city[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 22(1) : 35 - 40.(in Chinese))
- [7] 王彤林, 胡安胜, 王光华. 基坑工程降水对复合地基变形的影响[J]. 河南科学, 2003, 21(5) : 615 - 618.(Wang Tonglin, Hu Ansheng, Wang Guanghua. Discuss on issues about composite foundation settlement caused by groundwater lowering[J]. Henan Science, 2003, 21(5) : 615 - 618.(in Chinese))
- [8] 胡敏云, 陈云敏, 温振统. 城市垃圾填埋场垃圾土压缩变形的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1) : 123 - 126.(Hu Minyun, Chen Yunmin, Wen Zhenyong. Study on the compressibility and deformation of MSW in landfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1) : 123 - 126.(in Chinese))
- [9] 涂平海, 刘惠清. 注浆技术在杂填土中的应用[J]. 岩土工程界(基础工程), 2001, 4(4) : 27 - 29.(Tu Pinghai, Liu Huiqing. Application of grouting technique in impurity fill[J]. Geotechnical Engineering World(Foundation Engineering), 2001, 4(4) : 27 - 29.(in Chinese))
- [10] 高 旗, 李欢秋, 袁培中等. 中国武汉劳动力市场大楼深基坑边坡支护设计与施工[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6) : 919 - 922.(Gao Qi, Li Huanqiu, Yuan Peizhong, et al. Design and construction of the deep pit slope for Wuhan labour market building in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6) : 919 - 922.(in Chinese))