降雨前复合土钉支护填土边壁(坡)相似模型试验研究

杜云鹤[1, 2]，李世民[3]，曾宪明[3]，文高原[3]，梁仕发[3]，赵　强[3]

(1. 昆明理工大学，云南 昆明　650093；2. 成都军区科研设计所，四川 成都　650031；3. 总参工程兵科研三所，河南 洛阳　471023)

摘要：在给出降雨前复合土钉支护填土边壁(坡)相似法则基础上，论述了大型相似模型试验的条件、方法、结果和结论。研究指出，复合土钉支护具有显著减小填土边壁(坡)位移性能。同无支护条件相比，前者最大垂直位移和位移速率，以及最大水平位移和位移速率，分别为后者的 0.005 和 0.021 倍；前者的水平锚管应变峰值点连线、观测线显著位移点连线，与后者的最终滑塌面(线)三者，其分布形态和位置均很相近，说明“加固后滑塌线后退”的说法不成立；水平支护锚管里端部应变均非零值点，这是复合土钉支护锚固作用存在性的证明。

关键词：土力学；复合土钉支护；填土边壁(坡)；相似模型；试验研究

中图分类号：TU 43　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000－6915(2006)增 1－2833－08

SIMILARITY MODEL TEST STUDY ON COMPOSITE SOIL-NAILED SUPPORTING FILLED SIDEWALL(SLOPE) BEFORE RAINFALL

DU Yunhe[1, 2]，LI Shimin[3]，ZENG Xianming[3]，WEN Gaoyuan[3]，LIANG Shifa[3]，ZHAO Qiang[3]

(1. *Kunming University of Science and Technology*，*Kunming*，*Yunnan* 650093，*China*；

2. *Research Institute of Chengdu Military Area*，*Chengdu*，*Sichuan* 650031，*China*；

3. *The Third Research Institute of Engineering Corps*，*General Staff of PLA*，*Luoyang*，*Henan* 471023，*China*)

Abstract：Based on the established similarity law of composite soil-nailed supporting filled sidewall(slope) before rainfall，the conditions，methods，results and conclusions of large-scale similarity model test are discussed. The study shows that the technique of composite soil-nailed supporting can reduce the displacement of filled sidewall (slope) remarkably. The vertical displacement and displacement rate of the filled sidewall(slope) supported with composite soil-nailed are 0.005 times of those of the filled sidewall(slope) without supporting. The horizontal displacement and displacement rate of the former are 0.021 times of those of the latter. The peak strain line of horizontal anchor-pipes and the remarkable displacement line of the observation lines of the former are close to the final slump section(line) of the latter. Their distribution shape and position are very close. The result shows that the standpoint that the slump line will stand back after reinforcement is not correct. The strain of the inner ends of all horizontal anchor-pipe is not zero. This has testified the presence of the reinforcement effect on composite soil-nailed support.

Key words：soil mechanics；composite soil-nailed support；filled side wall(slope)；similarity model；test study

---

收稿日期：2005－05－20；**修回日期：**2005－10－24

基金项目：国家自然科学基金资助项目(5027904)

作者简介：杜云鹤(1966－)，男，现为成都军区工程科研设计所高级工程师、博士研究生，主要从事岩土工程与防护工程方面的设计和研究工作。E-mail：dyh620823@sina.cn

1　引　言

复合土钉支护最初被称为改良法[1]。复合土钉支护是近 10 a 来在土钉支护基础上发展起来的一种应用非常广泛的岩土工程加固支护工法。它是土钉支护的研究不断深化、且与各种岩土工程的其他工法有机结合的产物。钱七虎院士[2]指出，土钉支护具有浓厚的中国特色。土钉支护在概念、工作原理、设计方法与应用范围方面大大拓展了国内外土钉墙工法，使我国与国外在锚固类结构研究与应用方面的差距，缩短了 10～15 a 时间。而在土钉支护基础上发展起来的复合土钉支护更具有其新颖性和先进性，然而国外作为专用名词并无此称谓，尽管国外也不乏采用土钉墙工法与锚杆或锚索及其他工法并用的工程实例。

复合土钉支护业已在我国岩土工程的诸多行业中应用，但工程数量最大的仍然是建筑深基坑的支护。实际上，该工法也可有效地应用于岩土边坡工程、地基工程、地下工程和大坝工程等的加固与支护。复合土钉支护适用性强，安全可靠，经济快速，在建筑工程市场很受投资者欢迎。

复合土钉支护的应用实践是先于理论的，迄今为止某些理论尚不成熟，仍处在发展、完善的过程之中。但围绕复合土钉支护的大量工程问题，我国广大工程技术人员和科研工作者已经开展了许多卓有成效的科学技术研究工作。这些工作又有力地促进了复合土钉支护的发展与应用。例如玄武湖隧道工程现场，深圳畔山花园大厦工程、深圳赛格工程、广州凯城东兴综合大厦工程、长沙星电公寓工程中所作复合土钉支护工作性能测试，大体代表了我国复合工程支护现场测试研究水平[3~7]。而关于复合土钉支护的室内研究进展及其数值分析发展状况也有相当多的报道[8~17]。许多学者还对其设计理论进行了深入探讨[18~20]。

但是，复合土钉支护厚填土边壁(坡)工程系统室内试验研究至今尚未见报导。这里所谓回填土边壁(坡)工程即构成边壁(坡)的土壤介质全部或大部为回填土。研究结果表明，非夯实填土边坡取平面破坏模式[9]，而在降雨条件下取折线破坏模式[10]；夯实填土边坡取平面——凸弧面复杂破坏模式，而在降雨条件下取张裂面～悬链面组合破坏模式[11]。在降雨和不降雨条件下，笔者就复合土钉支护填土边壁(坡)变形破坏特点及边壁(坡)能否稳定进行了试验研究，并介绍了非夯实填土边壁(坡)不降雨条件下复合土钉支护工作性能的试验结果和结论。

2　相似法则

素填土的成分及其堆填过程较为复杂，其应力－应变关系也不清楚，用解析法分析其边壁(坡)变形、破坏性能较为困难。为此，依据相似模型原理，建立并验证了素填土介质相似模型试验的相似法则示意图(如图 1 所示)。图中，π_1，π_2 分别为原

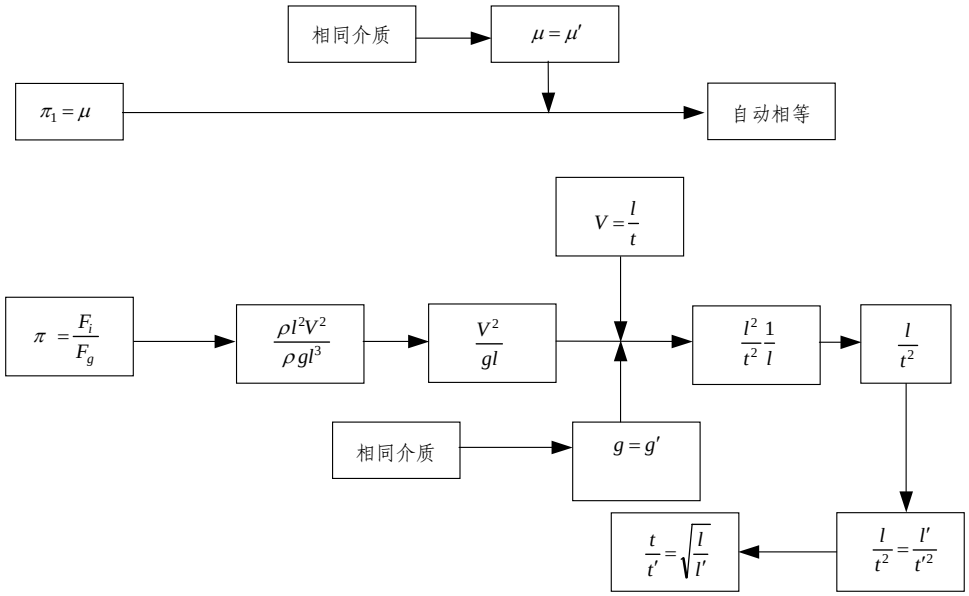

图 1　素填土介质相似模型试验的相似法则

Fig.1　Similar law for model test on plain fill

型与模型的主 π 数；F_i 为土壤的惯性力，F_g 为土壤的重力；ρ 为土壤的密度；μ，μ' 分别为原型与模型土壤的内摩擦系数；l，l' 分别为原型与模型的长度；V 为速度；N 为力；g，g' 分别为原型与模型的重力加速度；t，t' 分别为原型与模型的时间。

据图 1 进行了非夯实填土边壁(坡)复合土钉支护系列相似模型(复制模型)与自模拟原型的设计、制做和试验(见表 1)。

表 1　不同模型的系列时间

Table 1　A series of times of different models

序号	l' / m	t' / h
1	0.3	16.61
2	0.5	21.46
3	0.7	25.39
4	0.9	28.80
5	1.1	31.82
6	1.3	34.61
7	1.5	37.20
8	1.7	39.60
9	1.9	41.86
10	2.1	44.02
11	2.3	46.03
12	2.5*	48.00

注：(1) *为自模拟条件；(2) $\sum_{1}^{12} t' = 415.4\ \text{h} = 17.3\ \text{d}$ 。

3　相似模型试验方法

3.1　试验设备

试验模型在大型试验箱(见图 2)内制作，试箱尺寸为 315 cm×60 cm×250 cm(长×宽×高)。试箱一侧是厚度为 1 cm 的玻璃制成的透明板，另一侧设了三道减摩措施。

3.2　模型比例与支护参数

相拟模型的比例为 1/5.8。支护参数为：

(1) 水平锚管，直径为 25 mm，间距为 200 mm，长度为 3 100～1 030 mm，壁厚为 2.15～2.75 mm。

(2) 垂直锚管，直径为 9 mm，间距为 100 mm，长度为 2 500 mm，壁厚为 1 mm。

(3) 钢筋网，钢筋网采用直径为 1.4 mm，间距为 35 mm 的铁丝网制作。

(4) 面层，喷射厚度为 17 mm，强度等级为 C20，

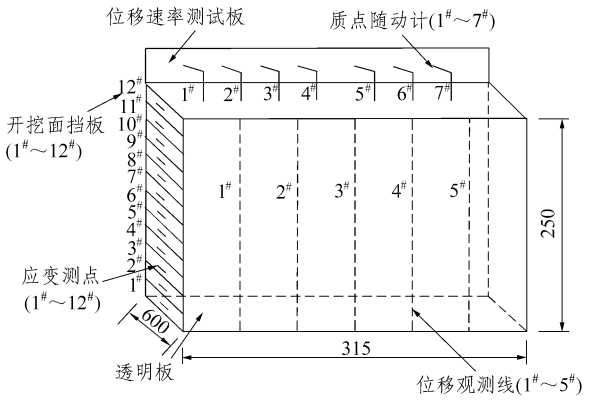

图 2　试验设备示意图(单位：cm)

Fig.2　Schematic diagram of test equipment(unit：cm)

配合比为：水泥∶中砂∶碎石≈1∶2∶2(质量比)，外掺 3%的 8604 型速凝剂。

(5) 注浆，水泥为 32.5R 普通硅酸盐水泥，净浆，水灰比为 0.5，注浆压力为 0.3～0.5 MPa。

3.3　测点布置

在试箱透明板的内侧布置 5 条位移观测线，观测线由彼此无连接约束的直径为 2 mm、长度为 20 mm 的微型塑料管段构成，用于观测土体断面质点的变化规律。试箱一端为开挖面，由 12 块钢板(长×宽×厚 = 60 cm×20 cm×0.2 cm)构成。在每块钢板外侧面的中心点处均贴有水平向应变片，用以测量开挖面在开挖过程中应变变化情况；在试箱上部地表一侧布置了位移速率测试板，可自动记录地表 7 个质点随动计变化轨迹(见图 2)。试验中着重对超前竖直锚管和水平支护锚管、钢筋网和面层混凝土受力变形进行了测试(见图 3，4)，图 3 中 1#～6#为测点号。

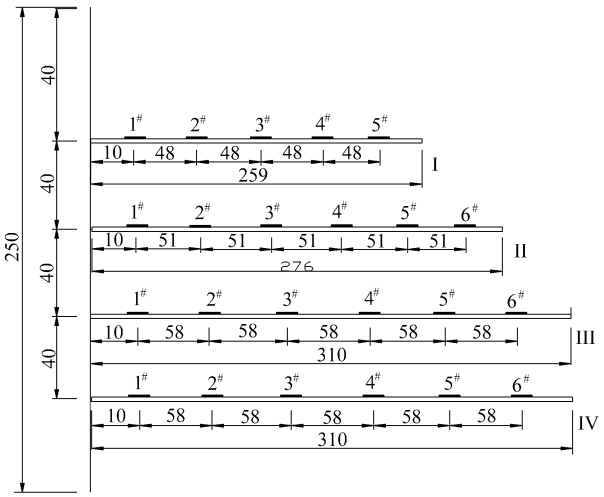

图 3　水平支护锚管测点布置(单位：cm)

Fig.3　Measuring point layout of the horizontal supporting anchor-pipe(unit：cm)

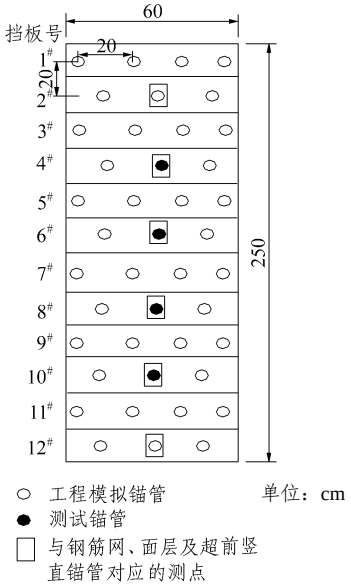

图 4　试验箱立面(开挖端面)测点布置示意图

Fig.4　Schematic diagram of measuring point layout on the vertical surface (excavated section) of the test box

3.4　试验程序

制模介质采用真实的素填土(洛阳 Q_2 黄土)，填筑前过筛，筛孔尺寸为 2 cm×2 cm。试验时将黄土分层填入大型模型箱体后刮平，不夯实，每层厚度约为 20～30 cm。然后一次性置入超前锚管支护，再自上而下逐层开挖(拆除挡板)，逐层支护(铺设预制钢筋网、喷射混凝土、置入水平支护锚管并注浆；支护材料和工艺与实际工程相同，只是按几何比尺缩小)。

4　试验结果

挡板应变值随开挖的变化曲线如图 5 所示。各测点的终读值随高度的分布曲线见图 6。

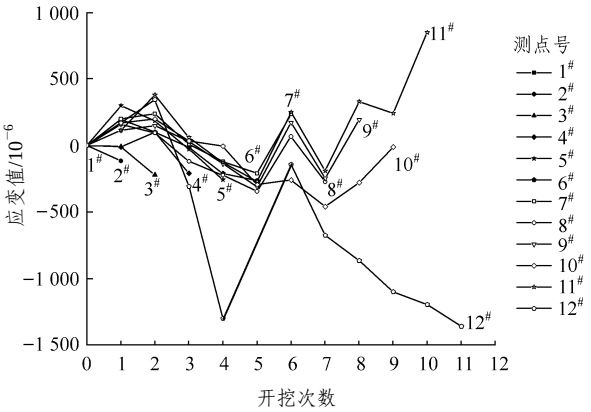

图 5　实测挡板应变随开挖的变化曲线

Fig.5　Curves of the measured strain variation of the baffle plates

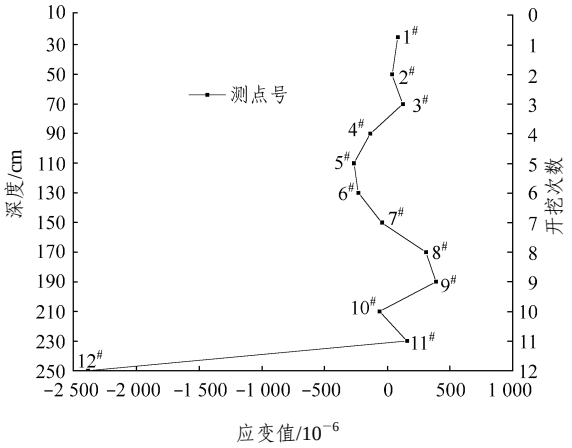

图 6　挡板应变随高度的分布曲线

Fig.6　Curve of the baffle plates′ strain with height

在开挖支护过程中从透明板上记录的位移观测线的变化轨迹如图 7 所示。

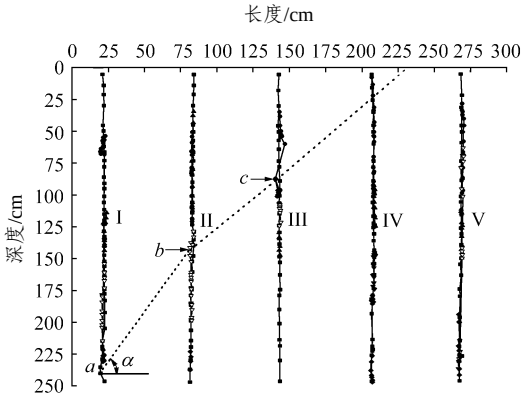

图 7　位移观测线的变化轨迹

Fig.7　Changed traces of the displacement observation lines

图 7 中虚线为位移观测线朝向开挖面的最大水平位移点的连线。与该连线相对应的无支护条件下的最终滑塌面示于图 8。

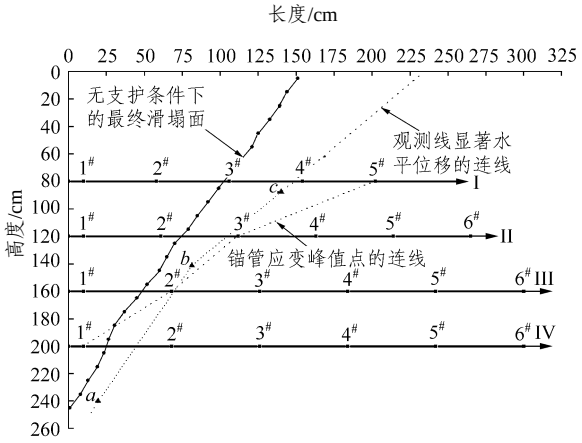

图 8 潜在滑移面的综合分析

Fig.8　Comprehensive analysis of the potential gliding plane

位移观测线朝向开挖面的最大水平位移速率如表 2 所示。

表 2　位移观测线的最大水平位移和位移速率

Table 2　Maximum horizontal displacements and displacement rates of displacement observation lines

观测线序号	最大水平位移/cm	最大水平位移速率/(cm • d^{-1})
I	2.8	0.162
II	2.4	0.139
III	3.2	0.185
IV	0.7	0.04
V	0.7	0.04

在开挖支护过程中上表面质点随动计的位移轨迹如图 9 所示。图中所示虚线为各随动计开挖前原点的连线，实线为各随动计开挖注浆后最终点的连线。

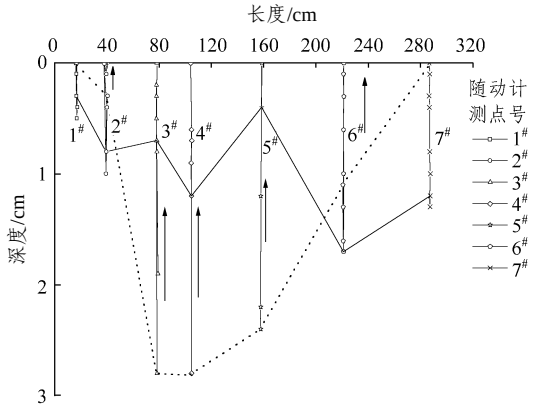

图 9　质点随动计的位移轨迹

Fig.9　Displacement traces of the particle follow-up apparatus

1#～4# 水平支护锚管应变随开挖支护的变化曲线如图 10 所示。

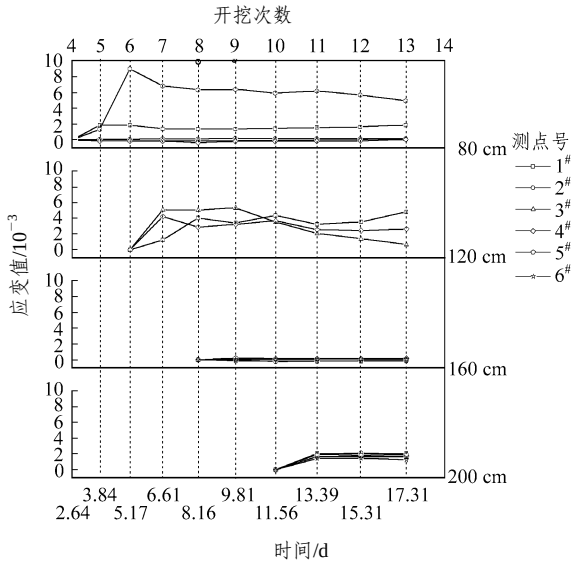

图 10　水平锚管应变随开挖支护的变化曲线

Fig.10　Curves of the horizontal anchor-pipe strain variation excavation and supporting

在分层开挖、支护过程中钢筋网应变分布曲线如图 11 所示。

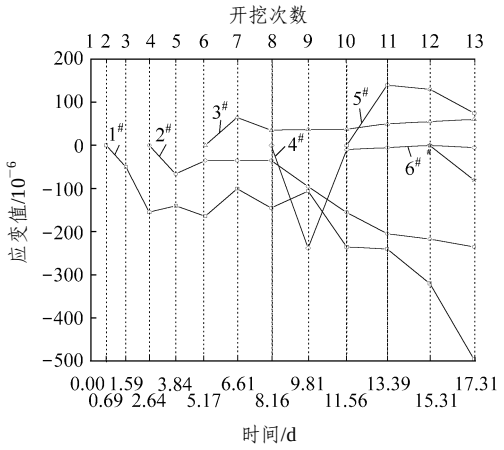

图 11　钢筋网应变随开挖支护的变化曲线

Fig.11　Curves of the steel bar mesh strain variation with excavation and supporting

在分层开挖、支护过程中面层应变分布曲线如图 12 所示。

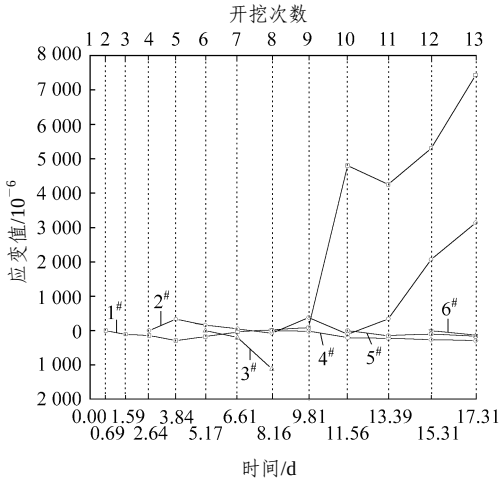

图 12　面层应变随开挖支护的变化曲线

Fig.12　Curves of the skin coat strain variation with excavation and supporting

在分层开挖、支护过程中超前竖直锚管的应变分布曲线如图 13 所示。

5　试验结果分析

5.1　挡板应变随开挖的变化特性

(1) 上部开挖对下部有明显影响。其规律为：总的应变值较小；曲线具有被动性；上部受压，中下部先拉后压再受拉；深度 0.0～1.1 m 范围内变化

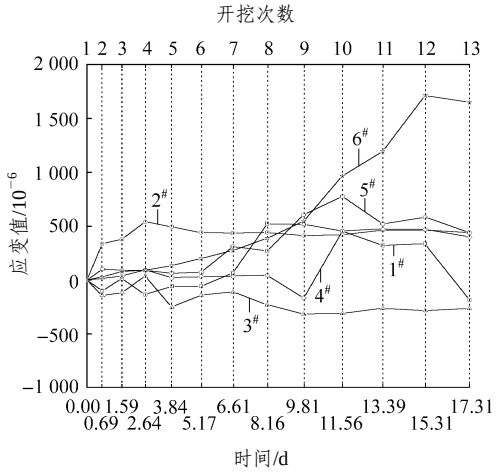

图 13　超前竖直锚管应变随开挖支护的变化曲线

Fig.13　Curves of the vertical anchor-pipe strain variation with excavation and supporting

幅度较小，1.1m 以下逐步增大，至 2.1～2.4 m 深处 $11^{\#}$ 和 $12^{\#}$ 测点绝对值均取得较大值。该部位恰好是无支护不降雨条件下最终滑移面的前沿部位。

(2) 第一次开挖是在所有挡板应变测点读数调平至零的条件下开始的。各挡板的最后一次读数则是在被拆除之后的自然状态下测得的，因而它所反映的是试验条件下真实土压力对挡板的作用效应。由图 6 可知，土体自上而下对挡板的土压力分布特点就绝对值而言是：上部较小，中部较大，下部最大，与 W. J. M. Rankine(1857)土压力分布形态相近；而在未开挖之前，试验条件也是相同的。

5.2　土体位移特性

(1) 由图 7 可知，复合土钉支护条件下，填土边壁(坡)内部及表面质点既存在一定的垂直沉降，也存在一定的水平位移。但位移量值均较小。同无支护条件下的相比，复合土钉支护条件下土体的最大垂直位移和位移速率仅为前者的 0.005 倍，最大水平位移和位移速率仅为前者的 0.021 倍。这表明对于松散的填土，经钉管(垂直与水平)、面层、注浆和渗浆加固之后，在整体上已成为一种新的稳定的位移很小的地质体。

(2) 图 7 中 *a*，*b*，*c* 三点分别为相应的位移观测线朝向开挖面的较显著的水平位移点。在这些点处可能因受力过大而产生了较大的位移。有趣的是，其连线(如图中虚线所示)与无支护不降雨时的最终滑塌面很相近。这是一个很重要的现象。它表明，无支护条件下的最大滑移面，经土钉支护后仍存在不容忽视的优势位移。

5.3　地面位移特性

(1) 分析图 9 可知，随动计所测随动轨迹反映了复合土钉支护填土边壁(坡)在开挖、支护全过程中，地面浅层土壤质点的以下运动特性：① 既有向下的运动，也有向上的运动，且前者是主要的；② 既有朝向开挖面的运动，也有背向开挖面的运动(I～V 观测线测试结果亦如此，参见图 7)，但均不显著；③ 各质点的运动量和运动速率各不相同(见表 2)，但差异不大；④ 质点的垂直运动与水平运动相比，前者是主要的。

(2) 质点运动的方向不同，受控于不同的运动机制。向下的运动主要是重力作用的结果，条件是邻近存在适度的空穴。向上的运动是注浆时浆液渗透、挤压的结果。朝向和背向开挖面的质点的运动机制为：① 开挖效应；② 端面效应；③ 质点在下沉过程中随机进入四周邻近空穴而出现的水平位移分量。

5.4　水平支护锚管受力变形特性

(1) 图 10 为 4 根测试锚管应变随开挖支护的变化曲线，其特点为：边壁中上部锚管应变值较大，下部较小；应变值随开挖次数和时间增加而增大，并逐步趋于稳定。这表明边壁(坡)中上部土钉比下部土钉所承受的土体拉应力更大。

(2) $1^{\#}$～$4^{\#}$ 锚管的受力变形有一个显著特点，即从零点开始随开挖逐步增加，然后趋于某个非零的常数值。而不是呈通常的“弓”形分布形态。可以认为，此常数值是复合土钉支护中锚管的锚固作用存在性的证明。

(3) 将 4 根锚管的应变峰值点连线、观测线显著水平位移值点的连线，以及无支护条件下填土边壁全断面开挖后形成的最终滑塌面(线)统一绘于图 8 中。由该图显见，它们具有大体相近的位置和形态，尽管没有重合(其中存在各种难以完全避免的量测误差)，也不能认为这是一种巧合。这意味着在无支护的滑塌面部位或附近，复合土钉支护后仍存在显著的受力变形。这是对“加固后滑塌面后退”说的反证。

5.5　钢筋网及面层受力变形特性

(1) 由图 11 和 12 可知，钢筋网应变和喷层应变测点位置是相对应的，分布规律亦大体相同，即：就绝对值而言，上部应变最大，中部次之，下部最小。这种分布形态与水平设置的锚管的受力变形特点也是一致的即是稳定态。

(2) 钢筋网应变和喷层应变曲线一般都随开挖

而发生波动，其值或增加或减少，这是由于不断开挖所引起的应力变化和调整的结果。

5.6 超前竖直锚管受力变形特性

(1) 由图 12 知，超前竖直锚管应变分布规律为：① 上部应变值较小，中部较大，下部最大；② 随开挖深度增大而增加或趋于稳定；③ 除 2#，3#点外，均是由负应变逐步过渡到正应变，即由受压状态过渡到受拉状态。应变测试值的正负差异，主要是竖直锚管测点同水平锚管焊接点的不同距离差异造成的，可取绝对值来理解和分析。

(2) 超前竖直锚管受力条件较为复杂。总的说来，与挡板应变分布特点相近。超前锚管与挡板的差异在于：开挖前，有挡板挡住，开挖后，同支护结构有联结。超前竖直锚管的受力，既受侧压力的显著影响，又与边壁连同支护结构的整体位移特性有关。在试验条件下，超前竖直锚管是必不可少的，舍此，直立边壁将难以形成。

6 结　论

(1) 上部开挖对下部有明显影响，曲线具有规律波动性，且在壁角部位附近受力最大。

(2) 挡板土压力呈上小下大的直角三角形分布。这与 W. J. M. Rankine 土压力分布形态相近(试验条件亦相近)。

(3) 复合土钉支护具有显著减小填土边壁(坡)位移性能，同无支护条件下的相比，前者最大垂直位移和位移速率，以及最大水平位移和位移速率，分别为后者的 0.005 和 0.021 倍。

(4) 复合土钉支护条件下的水平锚管应变峰值点连线、观测线显著水平位移点的连线与无支护条件下的最终滑塌面(线)三者，其分布形态和位置均很相近，表明“加固后滑塌面后退”说似不成立。

(5) 复合土钉支护过程中，地面土壤质点群可产生向任意方向的运动，它们受控于不同的运动机制。

(6) 水平支护锚管里端部应变均非零值点，这是复合土钉支护锚固作用存在性的证明。

(7) 超前竖直锚管应变分布特征，与实测挡板应变，以及 C. A. Coulomb 和 W. J. M. Rankine 土压力分布形态相近；在试验条件下，锚管是必不可少的。

(8) 采用复合土钉支护厚填土边壁(坡)是经济、快速和完全可行的。

参考文献(References)：

[1] 曾宪明. 岩土深基坑围护现状与发展趋势[A]. 见：中国土木工程学会防护工程学会第五次学术年会论文集[C]. 重庆：[s. n.]，1996. 413－419.(Zeng Xianming. The actuality and development trend of soil deep foundation pit protection[A]. In：the 5th Academic Proceedings of Menior of Protective Engineering Branch，China Civil Engineering Society[C]. Chongqing：[s. n.]，1996. 413－419.(in Chinese))

[2] 钱七虎. 土钉支护设计施工手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000.(Qian Qihu. Manual of Design and Construction of Soil-nailed Supporting[M]. Beijing：China Architecture and Building Press，2000.(in Chinese))

[3] 张　凡，段建立. 复合土钉支护工作性能的现场测试研究[J]. 建筑技术，2003，34(2)：104－105.(Zhang Fang，Duan Jianli. Field test and study on the shoring performance of composite soil nailing[J]. Architecture Technology，2003，34(2)：104－105.(in Chinese))

[4] 杨志银，蔡巧灵. 复合土钉墙模式研究中土钉应力的监测试验[J]. 建筑施工，2001，23(6)：427－429.(Yang Zhiyin，Cai Qiaoling. The monitoring experiment of nail stress on composite soil nailing wall model[J]. Building Construction，2001，23(6)：427－429.(in Chinese))

[5] 张　飞，刘忠臣. 预应力土层锚杆与土钉墙联合支护的力学工作机制研究[J]. 岩土力学，2002，23(3)：292－296.(Zhang Fei，Liu Zhongchen. The mechanical working mechanisim research on the united supporting of prestressed soil anchors and soil nailing[J]. Rock and Soil Mechanics，2002，23(3)：292－296.(in Chinese))

[6] 郑志辉，贺若兰，徐勋长，等. 复合土钉支护厚杂填土边坡现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(5)：898－904.(Zheng Zhihui，He Ruolan，Xu Xunchang，et al. In-situ testing study on retaining miscellaneous fill slope by using compound soil nailing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(5)：898－904.(in Chinese))

[7] 曾宪明，杜云鹤，范俊奇，等. 土钉支护抗动载原型与模型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(11)：1 892－1 897.(Zeng Xianming，Du Yunhe，Fan Junqi，et al. Testing study of prototype and model comparison on resisting dynamical load with soil nail supporting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2003，22(11)：1 892－1 897.(in Chinese))

[8] 孙铁成，张明聚. 复合土钉支护技术[J]. 工程力学，2002，(增 2)：59－62.(Sun Tiecheng，Zhang Mingju. Composite soil nailing techonology[J]. Engineering Mechanics，2002，(Supp.2)：59－62.(in Chinese))

[9] 曾宪明，文高原，李世民，等. 回填土边壁(坡)相似法则和破坏模

式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(22)：3 824－3 829.(Zeng Xianming，Wen Gaoyuan，Li Shimin，et al. Testing study on similarity rule of similar model and failure models of filled-soil side wall(slope)[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(22)：3 824－3 829.(in Chinese))

[10] 文高原，曾宪明. 降雨条件下填土边壁(坡)变形破坏特性试验研究[A]. 见：中国建筑学会建筑施工学术委员会基坑工程专业委员会第三届基坑工程学术讨论会论文集：基坑支护技术与实践[C]. [s. l.]：[s. n.]，2004. 178－186.(Wen Gaoyuan，Zeng Xianming. Testing study on deformation destructive character of filled-soil wall(slope)after rainfall[A]. In：the 3rd Foundations Ditch Academic Conference Menoir of Foundation Pit Engineering Branch，Architecture Society of China Background：Technology and Practice of Pit Supporting[C]. [s. l.]：[s. n.]，2004. 178－186.(in Chinese))

[11] 文高原，姚鹏运，曾宪明. 降雨前、后夯实填土边坡破坏模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(5)：747－754.(Wen Gaoyuan，Yao Pengyun，Zeng Xianming. Testing study on failure mode of filled-soil slope before and after rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(5)：747－754.(in Chinese))

[12] 宋二祥，邱 玥. 基坑复合土钉支护的有限元分析[J]. 岩土力学，2001，22(3)：241－244.(Song Erxiang，Qiu Yue. Finite element analysis of composite soil nailing for excavation support[J]. Rock and Soil Mechanics，2001，22(3)：241－244.(in Chinese))

[13] 杨林德，李象范. 复合型土钉墙的非线性有限元分析[J]. 岩土工程学报，2001，23(2)：149－152.(Yang Linde，Li Xiangfan. The nonliner analysis of FEM on composite soil-nailed retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2001，23(2)：149－152.(in Chinese))

[14] 宋二祥，邱 玥. 复合土钉支护变形特性的有限元分析[J]. 建筑施工，2001，23(6)：370－374.(Song Erxiang，Qiu Yue. Deformation analysis of composite soil nailing by FEM[J]. Building Construction，2001，23(6)：370－374.(in Chinese))

[15] 杨志明，姚爱国. 杆系有限元法求解复合土钉支护结构的位移[J]. 煤田地质与勘探，2002，30(5)：31－34.(Yang Zhiming，Yao Aiguo. Displacement analysis of compoud soil nail support structure for excaration by one dimension finite element[J]. Coal Geology and Exploration，2002，30(5)：31－34.(in Chinese))

[16] 周川杰. FLAC^{2D}进行复合土钉支护稳定性分析[J]. 岩土工程界，2002，5(6)：39－41.(Zhou Chuanjie. Analysis of composite soil nailing by FLAC^{2D}[J]. Geotechnical Engineering Field，2002，5(6)：39－41.(in Chinese))

[17] 钟正雄，李象范. 软土地区复合土钉技术的有限元分析[J]. 上海地质，1999，(3)：28－33.(Zhong Zhengxiong，Li Xiangfan. Finite element analysis of composite soil nailing technology in soft soil area[J]. Shanghai Geology，1999，(3)：28－33.(in Chinese))

[18] 屠毓敏. 土钉支护中超前锚杆的工作机制研究[J]. 岩土力学，2003，24(2)：198－219.(Tu Yumin. Stady on working mechanism of forepoling bolt in soil nailing protection[J]. Rock and Soil Mechanics，2003，24(2)：198－219.(in Chinese))

[19] 赖天文. 复合土钉支护设计参数敏感性分析[J]. 兰州铁道学院学报，2003，22(2)：27－29.(Lai Tianwen. The analysis of sensitivity of composite soil nailing designed parameter[J]. Journal of Lanzhou Railway University，2003，22(2)：27－29.(in Chinese))

[20] 李象范，徐水根. 复合型土钉挡墙的研究[J]. 岩土锚固工程，2002，40(2)：1－12.(Li Xiangfan，Xu Shuigen. Study on composite soil nailing wall[J]. Soil and Anchoring Engineering，2002，40(2)：1－12.(in Chinese))