

# 土钉支护软土边坡的加固机理实验研究\*

曾宪明<sup>1</sup> 林 泉<sup>1</sup> 易 平<sup>2</sup> 尤萍丽<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 大连理工大学土木工程系 大连 116023) (<sup>2</sup> 总参工程兵科研三所 洛阳 471023)

**摘要** 采用多元坐标系分析方法, 阐述了土钉支护软土边坡的加固机理实验及其结论。

**关键词** 软土, 土钉, 加固机理, 研究

**分类号** TU 41

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2002)03-0429-05

## 1 概 述

作者的研究表明: 锚杆包括锚索支护法主要取锚固机理, 土钉墙方法主要取加固机理, 土钉支护法则主要取加固基础上的锚固机理。这是三者的根本区别之所在。土钉支护在锚杆支护法和土钉墙方法均不甚适用的软土、流砂介质中均已获得大量成功的应用。但是, 迄今为止, 国内外尚未见有关土钉支护机理的试验研究成果发表。作者此前曾论述了土钉支护的锚固机理<sup>[1]</sup>, 本文则重点讨论土钉支护的加固机理。

加固作用研究一般需牵涉到外加掺量品种、工艺和范围等。仅就水泥掺量范围而言, 国内冶金部建筑设计研究院为 5%~25%, 浙江大学为 5%~20%; 前苏联为 10%~15%; 美国为 3%~20%; 日本为 4%~28%。土钉支护软土边坡加固机理实验研究所使用外加掺量除水泥外, 尚有其他多种外加剂和添加剂, 其工艺方法与所谓水泥加固土的构筑亦不相同, 不可类比。本研究所用外加掺量的范围为 0~36%, 较国内外一般水泥加固土的研究、应用范围宽 50%~80%。

## 2 实验概况

兹假定: 土钉的特殊注浆材料和特殊注浆工艺使软土的物理力学性质发生改变, 而成为一种其性能较加固前有显著改善、自稳能力和支撑能力明显

提高的新地质体。为验证这一假设成立, 采用以下方法进行了原理探索性实验。

据实际工程支护所使用砂浆配合比、水灰比、注浆量变化范围以及凝结时间等参数, 将水泥砂浆等外加掺量掺入软土中, 制备成系列试件进行实验, 测定其物理力学参数指标值, 进而分析外加掺量对这些参数的影响及其限度, 并与数值模拟计算及相似模型实验结果进行比较。

不同龄期, 不同外加掺量的 30 组(每组 3 个)试件见表 1。

表 1 中除无外加掺量的 8<sup>#</sup>, 9<sup>#</sup>, 14<sup>#</sup>, 15<sup>#</sup>和 20<sup>#</sup>试件无法测出力学参数外, 其余物理力学参数均作了较可靠的测定。

## 3 外加掺量对软土物理参数的影响

### 3.1 实验结果

不同外加掺量对软土物理参数影响的实验结果见图 1。实验表明, 随着外加掺量的增加, (1) 软土含水量  $W$  降低; (2) 软土孔隙度  $n$  和孔隙比  $e$  减小; (3) 软土饱和度  $S_r$  降低; (4) 软土干重度  $\gamma_d$  和天然重度  $\gamma$  增加。

上述规律在两组不同龄期(2h 和 48h)的试件中是完全一致的。比较图 1(a)和 1(b)还可见: (5) 随着龄期的增长, 上述(1)~(4)各项参数指标值减少( $W$ ,  $e$ ,  $n$ ,  $S_r$ )或增加( $\gamma_d$ ,  $\gamma$ )的幅度加大。

### 3.2 实验结果分析

外加掺量对软土介质物理参数的影响, 是软土

2000年3月27日收到初稿, 2000年6月17日收到修改稿。

\* 国家人民防空委员会资助重点科研项目(R99-101)。

作者 曾宪明 简介: 男, 1951年生, 博士, 1975年毕业于原军委工程兵训练队防护工程专业, 现为黄河水利工程技术研究所副总工程师, 主要从事岩土工程、防护工程等方面的科研工作。

**表 1 具有不同龄期和不同外加掺量的试件**  
**Table 1 The samples with different consolidation age and grouting quantity**

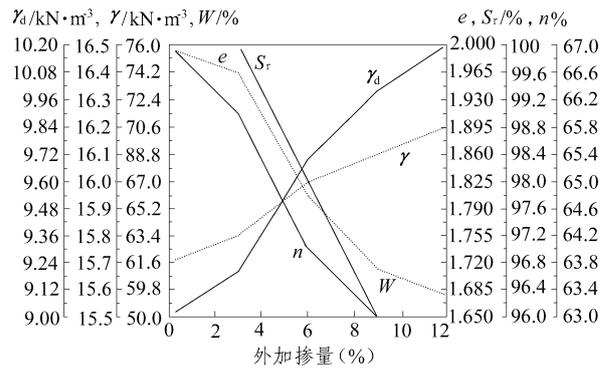
试件编号	外加掺量/%	备注
1 <sup>#</sup>	2	
2 <sup>#</sup>	4	
3 <sup>#</sup>	6	
4 <sup>#</sup>	8	
5 <sup>#</sup>	10	龄期 28 d
6 <sup>#</sup>	1	
7 <sup>#</sup>	1	
8 <sup>#</sup>	0	
9 <sup>#</sup>	0	
10 <sup>#</sup>	1	
11 <sup>#</sup>	1	龄期 6~12 h (蒸气养护)
12 <sup>#</sup>	3	
13 <sup>#</sup>	3	
14 <sup>#</sup>	0	
15 <sup>#</sup>	0	
16 <sup>#</sup>	3	龄期 6~2 h
17 <sup>#</sup>	6	
18 <sup>#</sup>	9	
19 <sup>#</sup>	12	
20 <sup>#</sup>	0	
21 <sup>#</sup>	3	龄期 48 h
22 <sup>#</sup>	6	
23 <sup>#</sup>	9	
24 <sup>#</sup>	12	
25 <sup>#</sup>	1	
26 <sup>#</sup>	6	龄期 72 h
27 <sup>#</sup>	9	
28 <sup>#</sup>	18	
29 <sup>#</sup>	27	
30 <sup>#</sup>	36	

中的矿物成分、水与作为胶结材料的水泥和其他增强剂、添加剂之间发生复杂的物理、化学反应的结果<sup>[2]</sup>。主要反应机制为物理吸附和物理化学吸附。

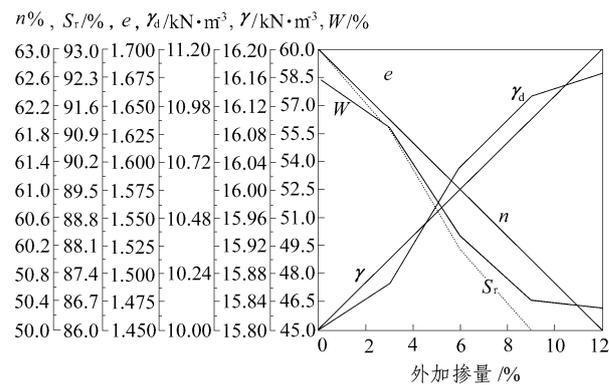
物理吸附主要表现为外加掺量在固化过程中吸收土壤水分，从而使原有含水量及饱和度降低；水泥砂浆等在渗透和固化过程中，部分地填充土壤原有孔隙，使得原有孔隙度和孔隙比减小，干重度和天然重度增加。

物理化学吸附即离子交换，体现在电解质凝聚和溶胶的相互凝聚方面。胶体中具有导电性质的离子(凝聚离子，即阳离子)与粘土颗粒表面的负电荷发生反应，便产生凝聚作用。凝聚离子的原子价愈高，其凝聚能力愈强。水泥等与软土颗粒及水中的活性氧化硅和氧化铝与氧化钙相互作用，不断生成具有水硬性的稳定化合物：含水硅酸钙和含水铝酸钙，并胶结成结晶网。两种带有相反电荷的胶体颗粒相混合时即发生相互凝聚作用。

## 4 外加掺量对软土力学参数的影响



(a) 龄期 2 h



(b) 龄期 48 h

图 1 外加剂掺量对软土物理性质的影响

Fig.1 The effect of grouting quantity on physical parameters of soft clay

### 4.1 实验结果

不同外加掺量对软土力学诸参数影响的实验结果见图 2。实验表明，随着外加掺量的增加，(1) 土壤  $c$ ， $\phi$  值显著增加。外加掺量为 6%，龄期 28 d 后，软土抗剪强度可达到一般粘土的水平。(2) 土壤变形模量  $E$  增加。其规律为：当外加掺量为 1% 时，增加幅度较小，当掺量为 2% 以上时，增加幅度较大，并明显受砂浆龄期的影响。龄期越长， $E$  值增加幅度越大。(3) 土壤抗压强度  $R$  增高，压缩系数  $a$  减小。

### 4.2 实验结果分析

土壤  $c$ ， $\phi$  值增加，则土体抗剪强度提高，有利于软土边坡(坡)的稳定。土壤变形模量增大，则土体整体刚度提高，变形减小，这与具有高压缩性的软土压缩系数  $a$  减小的试验结果一致。软土变形量大，有效减少和控制边坡(坡)变形具有重要工程意义，因为软土边坡破坏形态表明，其主要破坏特征大多是以变形破坏表现出来的，如边坡鼓出变形、底板隆起变形、地面流动沉陷变形以至开裂等等<sup>[3]</sup>。

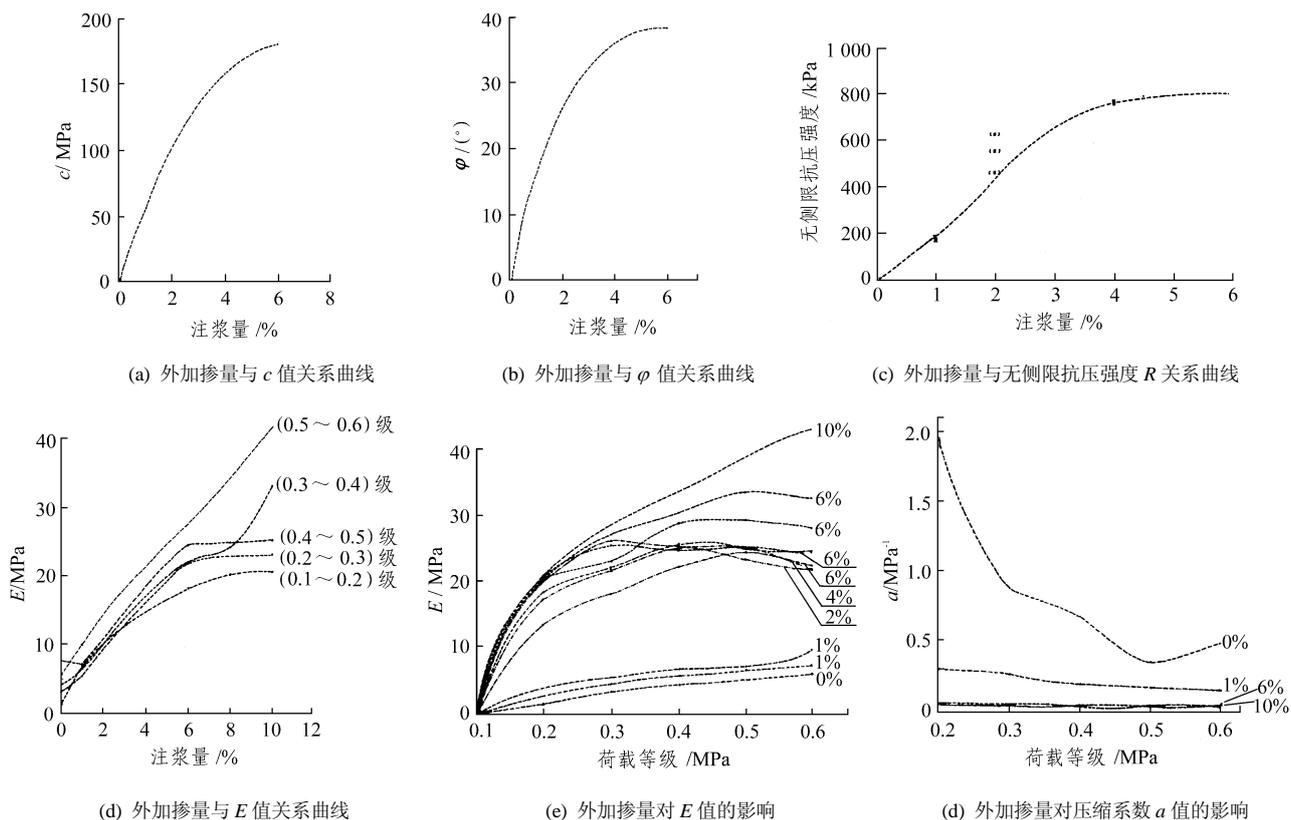


图 2 外加掺量对软土力学参数的影响

Fig.2 The effect of grouting quantity on mechanical parameters of soft clay

水泥砂浆等注(渗)入软土中后,其力学性能得以改善的根本原因,归根结底还是其物理性质首先被改变的结果<sup>[4]</sup>。土壤内摩擦力来源于土颗粒粗糙产生的表面摩擦力,以及粗颗粒之间镶嵌、联锁作用产生的咬合力,粘聚力主要源于土颗粒之间的电分子吸引力和土中天然胶结物质(如硅、铁物质和碳酸盐等)对土粒的胶结作用。因而土粒的矿物成分,颗粒形状与级配,土的密度、含水量等对  $c$ ,  $\varphi$ ,  $E$  值均产生影响。颗粒越大,表面越粗糙,  $\varphi$  值越大;密度越大,土粒间表面摩擦力和咬合力就越大,故  $\varphi$ ,  $E$  值越大;而土的密度越大,则孔隙越小,颗粒间接触就越紧密,因而  $c$  值越大;含水量越小,水分在土粒表面形成的润滑效应越小,则  $\varphi$  值越大,与此同时,粒间薄膜水越薄,粒间电分子力越强,  $c$  值越大。

从地质学角度看,两种物理、力学性质明显不同的地质体,可认为是相异地质体。软土在被加固前后,其物理力学性质差异很大,因此,加固后的软土边坡(坡)(相对于加固前的)可看作是一种新的地质体。

## 5 新地质体的性能

### 5.1 特征频度图

采用多元坐标系分析方法<sup>[5]</sup>,将加固介质物理力学参数绘成特征频度曲线,如图 3 所示。它们有

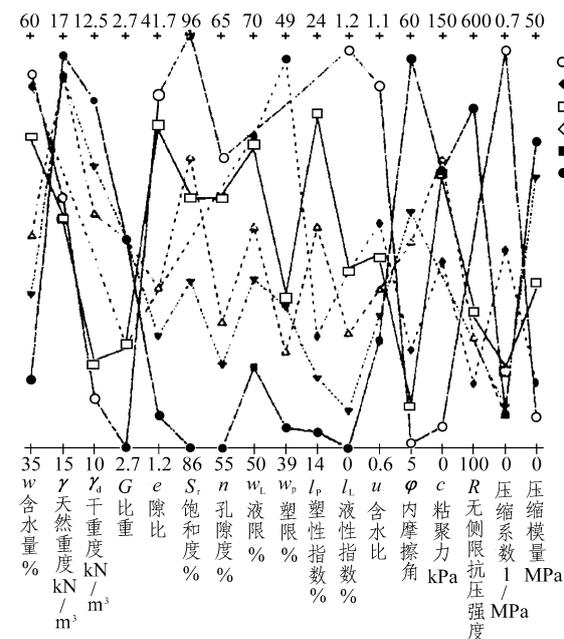


图 3 软土及其加固介质特征频度曲线

Fig.3 The characteristic frequency curves of the undisturbed soft clay and the reinforced medium

以下规律:

(1) 随着外加掺量增加, 各项参数指标值向着使其性能改善的方向趋于增加或减小。软土试件的主要力学参数指标值不易测定, 试以外加掺量为1%的试件数据代之, 结果任一掺量大于1%者, 其物理力学性能均获得明显改善。由此可见, 加固介质的各项物理力学参数指标值均优于软土的同名参数指标值, 并随着掺量增加, 改善程度提高。

(2) 在外加掺量为9%~18%时, 其内摩擦角 $\varphi$ 值与典型粘土的接近; 掺量为6%时, 其粘聚力 $c$ 值与典型粘土的相当, 无侧限抗压强度则为后者的3倍左右; 当掺量为18%以上时, 其压缩模量与典型粘土的为同一数量级。

(3) 在相同纵坐标中, 软土的相应参数指标值始终为上限值或下限值, 与此相对应地, 外加掺量最高者则为下限值或上限值, 二者的曲线即构成一个不规则区域; 所有介于上述掺量之间者, 其曲线

将在该不规则区域内作规律变化, 并与多元坐标系的相对位置无关。

上述规律表明, 软土介质的加固不是以一个或几个物理参数或力学参数而是以一系列物理力学参数得到不同程度(频度)的改善为其原理。加固介质特征频度线一经改变, 即变为另一新介质的相应特征频度线, 可见, 加固介质(包括软土介质)内各物理力学参数间关系具有某种和谐性——相互依存、联系和制约关系。一般软土或其他软弱介质本身及其在被加固改造过程中及其后, 均具有这一特性。

### 5.2 新地质体的破坏模式

图4给出了加固介质与典型粘土相对应的应力-应变、剪应力-剪切位移、直剪 $\tau$ - $P$ 关系曲线。试验结果表明, 在某一外加掺量条件下, 加固介质与典型粘土相应关系曲线具有一致的变化规律和基本接近的量值。因而, 可将前者看作类似于后者的介质, 并具有基本相同的边壁(坡)破坏模式。

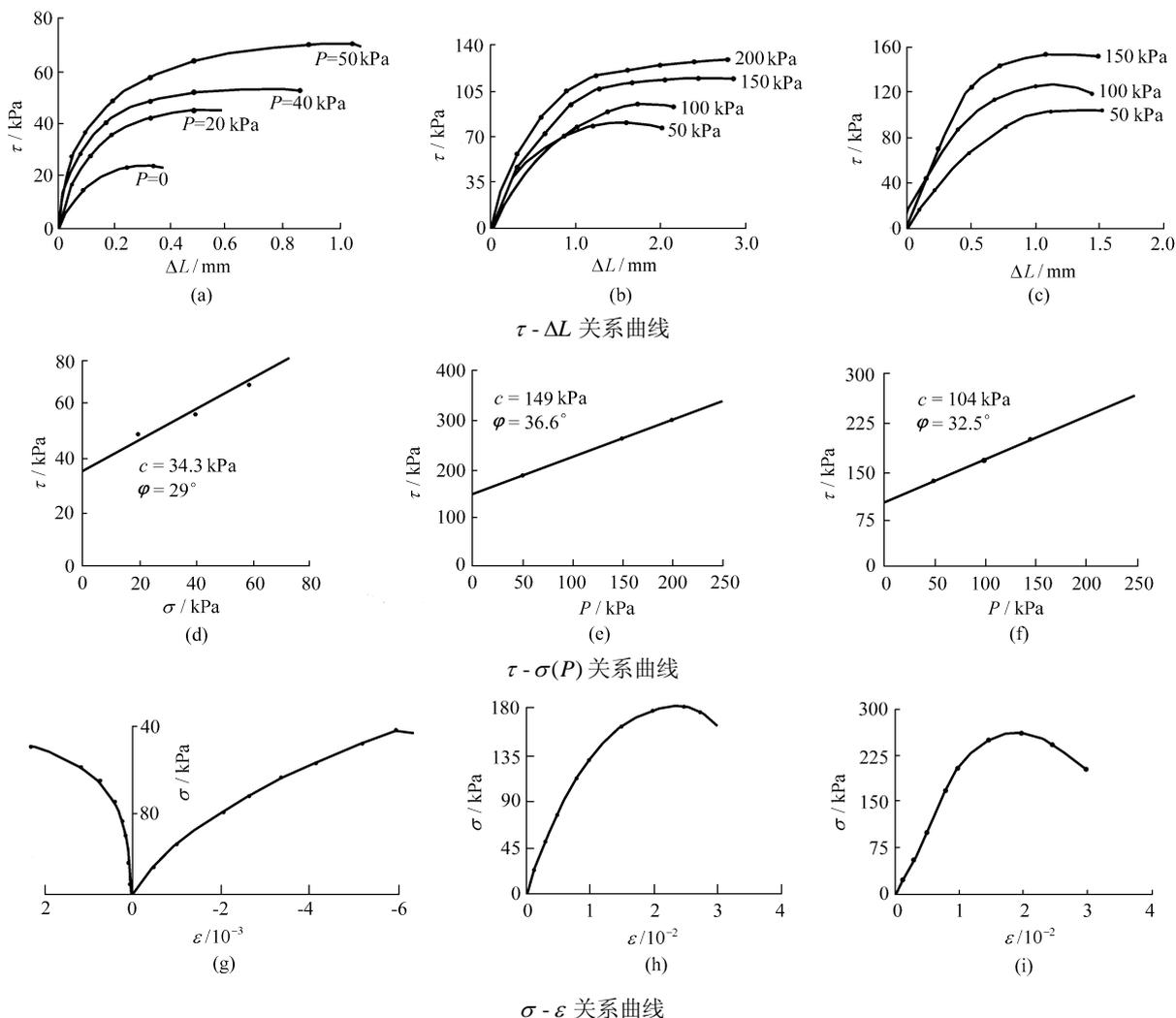


图4 加固介质(d~i)与典型粘土(a~c)相关试验曲线比较

Fig.4 Comparison of the relativity curves of reinforced soft clay (d~i) with general clay (a~c)

对于典型粘土边壁(坡),一般公认可用圆弧破坏模式来概括,故此,新地质体也可近似地用圆弧破坏模式进行稳定性分析。软土在加固前取流鼓破坏模式,加固后在一定条件下则可能取圆弧破坏模式,表明加固介质在物理力学性质发生变化的同时,其边壁破坏模式亦发生了改变,即边壁变形失稳破坏形态和破坏机理发生了改变。既然新地质体取圆弧破坏模式,它就存在自身稳定问题(此时未考虑杆件的骨架作用)。因加固介质较之软土的临界稳定高度虽有显著提高,但当基坑深度大于其临界稳定高度时,仍存在变形失稳问题,必须给予支护。当考虑杆件骨架作用时,由于弱面效应,也需分析校核局部稳定问题。此外,为有效防止整体倾倒破坏现象发生,必须引入锚固概念及机制。

## 6 结 语

(1) 作为胶结剂的水泥砂浆及其他外加剂和添加剂,对软土的物理力学性能具有显著改善作用,可将软土改造加固成为一种新地质体,其破坏模式也发生了相应变化。加固机制主要为物理吸附和物理化学吸附。

(2) 在通常条件下,新地质体的自稳能力和支撑能力,由于受经济性等的制约,是有限的,在不考虑杆件支护,且外加掺量达到一定指标值时,其变形失稳近似地取圆弧破坏模式;考虑杆件支护,仍难避免支护与加固介质整体倾倒破坏现象发生,并且弱面效应还存在局部失稳的可能性。

(3) 锚固机制不适用于取流鼓破坏模式的软土边壁(坡)支护;土钉墙机制适于对软土的改造加固,但理想意义上的土钉墙难以真正形成,因而边壁(坡)变形失稳问题不能很好解决。土钉支护首先将软土改造加固成为自稳能力和支撑能力有明显提高但仍不足以维持边壁(坡)稳定的新地质体,然后对该地质体进行稳定性分析,并引入锚固机制。因此,土钉支护机制是对土钉墙机制与锚固机制的综合和发展,能有效维护软土基坑边壁(坡)的稳定性,并具有良好的经济技术效果<sup>[6]</sup>。

(4) 加固介质特征频度图,深刻揭示了软土加固、支护原理,适用于一般松散、软弱、裂隙介质本身及其加固后的物理力学性能综合分析,具有较普遍的意义。加固介质内各物理力学参数的和谐性,是此类介质的基本特性之一。

## 参 考 文 献

- 1 曾宪明,林润德. 土钉支护软土边壁(坡)机理相似模型实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 534~538
- 2 胡 昌. 关于在粘性土地层中应用喷锚衬砌的理论探讨[R]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑工程学院, 1978
- 3 曾宪明,林润德. 软土边壁(坡)流鼓破坏模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 336~341
- 4 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989
- 5 曾宪明,易 平. 多元坐标系及其在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 273~276
- 6 李元亮,李 林,曾宪明. 上海紫都C楼基坑喷锚网(土钉)支护变形控制与稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 77~81

## TESTING STUDY ON THE REINFORCEMENT MECHANISM OF SOIL NAILING SUPPORT FOR SOFT CLAY SLOPES

Zeng Xianming<sup>1</sup>, Lin Gao<sup>1</sup>, Yi Ping<sup>2</sup>, You Pingli<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> Department of Civil Engineering, Dalian University of Technology and Science, Dalian 116023 China

<sup>(2)</sup> The 3rd Engineering Army Institute, General Staff PLA, Luoyang 471023 China

**Abstract** The testing study is made on the reinforcement mechanism of soil nailing support for soft clay slope. The testing result is analysed and conclusion is made by using the method of the multi-element coordinate system.

**Key words** soft clay, soil nailing support, reinforcement mechanism, study