

复合土钉支护设计与施工

◎ 曾宪明 郑志辉 戴瑞奇 李世民 编著

中国建筑工业出版社

复合土钉支护设计与施工

曾宪明 郑志辉 戴瑞奇 李世民 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

复合土钉支护设计与施工/曾宪明等编著. —北京: 中国
建筑工业出版社, 2009

ISBN 978-7-112-11216-6

I. 复… II. 曾… III. ①土钉支护-设计②土钉支护-
工程施工 IV. TU753.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 151638 号

复合土钉支护是一种公认先进的岩土工程加固、支护工法, 具有浓厚的中国特色, 在不良地质条件下, 大有取代单一土钉支护的趋势。本书总结归纳了近十余年来复合土钉支护在我国边坡、基坑、隧道、地基等工程中的应用的主要成果和经验, 其内容涉及工程勘察、设计、施工、监理、质检等方面技术工作, 可供相关工程技术人员参考。

* * *

责任编辑: 丁洪良

责任设计: 赵明霞

责任校对: 刘 钰 梁珊珊

复合土钉支护设计与施工

曾宪明 郑志辉 戴瑞奇 李世民 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 23½ 字数: 572 千字

2009 年 10 月第一版 2009 年 10 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-11216-6

(18441)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

1. 编著者初衷

复合土钉支护是指单一土钉支护与其他一种或以上传统工法结合形成的岩土加固支护方法。它最初被称为改良土钉支护法，简称改良法。复合土钉支护技术自 1992 年首次在深圳文锦广场应用以来，已走过 16 年历程。目前，复合土钉支护在我国岩土工程加固支护领域，已成为一种公认主流技术，它对我国工程建设产生的社会和经济效益不可低估。

应用复合土钉结构加固支护了数不胜数的岩土基坑、边坡、隧道和地基工程，其中绝大多数都获得了成功，取得许多正面经验；也有极少数工程因故出现了险情或失稳事故，尚有若干反面教训。在广泛开展工程应用同时，我国工程技术人员围绕复合土钉支护工作原理、作用机制和设计方法等，开展了不少室内外试验研究、工程监测、数值模拟和设计理论探讨等工作，又提出诸多研究成果。

对上述工程经验、反面教训和研究成果进行归纳、整理和提炼，使之形成一本复合土钉支护设计与施工实用图书，这就是本书编著者创意和初衷。相信本书面世会适逢其时，受到欢迎。

需要指出，采用某项技术发生工程事故后，人们常把事故归罪于该技术方法本身。这有失公道，且于事无补。

2. 应用 16 年，迄今无标准

工作在第一线的工程质检、监理、勘察、设计、施工技术人员深感缺乏并不断以不同方式呼吁尽快建立复合土钉支护设计施工标准，事实上，我国目前还没有这类技术标准。复合土钉支护是与土钉支护相继产生并在我国广泛推广应用起来的，前者大有取代后者的趋势，特别是在不良地质条件下。对于土钉支护，我国先后出版过中国工程建设标准化协会标准《土钉支护设计与施工技术条例》和《基坑土钉支护技术规程》CECS96: 97，同济大学出版社 1997 年出版《岩土深基坑喷锚网支护法原理·设计·施工指南》，中国建筑工业出版社 2000 年出版《土钉支护设计施工手册》，人民交通出版社 2007 年出版《土钉支护技术规范》GJB 5055—2006（国家军用标准）。此外，还有若干省市编制了地区性土钉技术标准。然而，关于复合土钉支护，哪怕是非强制性技术标准也未编制过一部。这与复合土钉支护目前作为我国岩土工程加固支护主流技术之一的状况是很不相称、很不相适应的。

但愿本书能为编制相应强制性技术标准奠定一定基础。

3. 我看敏感问题

何为敏感问题？锚杆和土钉区分问题，土钉墙与土钉支护差异问题，单一土钉支护与复合土钉支护界定问题。尤其是前两个问题，一直争论很激烈。

我国岩土工程界对上述问题还未取得统一认识。这种情况国外也普遍存在，并不稀奇，国外月亮也有阴晴圆缺。对此，读者可参见本书专题研究中所举多处例证。在这种情

况下，有专家就主张，什么锚杆、土钉、锚索，一律都叫锚杆或新奥法。这样做是简而化之，不过，这对这些技术的研究、应用与发展未必就有利。况且新奥法并不等于锚杆支护。新奥法在 1955 年才发表，而锚杆在 1872 年以前就已有研究和应用了，早了前者 83 年。

我的看法是，不宜简单地从表象上去区分，而应从本质上予以区别。单根注浆锚杆与单根注浆土钉在施工工艺上是完全相同的，但它们工作原理就有可能不同。它们的大小、长短、疏密、预应力的有无及高低等，均是表象和相对概念，且与工程大小及重要性程度、基坑深浅、岩土介质优劣等密切相关。在不同工程、地质、环境和水文条件下，锚杆设计的长度比土钉短、密度比土钉密、直径比土钉细、预应力比土钉低，都不是不可能的，并非总是相反。锚杆与土钉的差异在于工作原理、作用机理和设计方法不同，土钉墙与土钉支护、单一土钉支护与复合土钉支护亦然。

注浆锚杆与锚索仅为材质上差异，一般都需考虑力平衡条件，不稳定体力须用内锚固段锚固力来平衡，内锚段须穿过滑移面锚固在稳定地层中，因而主要取锚固原理。土钉墙方法是对新奥法的改进和发展，它同样要考虑力平衡条件，但对不稳定体力主要不是通过锚固力来平衡，而是通过土钉杆体和注浆体以及面层对岩土介质进行改性加固作用，使之成为一种物理力学性质得到显著提高的稳定的新地质体，因而其长度不一定要穿过滑移面，故主要取加固机理。土钉支护是在土钉墙基础上发展起来的，它是在土钉加固改性后仍不稳定条件下将其杆体延伸至滑移面之外，利用延长部分锚固力来平衡不稳定新地质体的方法。因而它取加固基础上的锚固机理。复合土钉支护是土钉与其他传统工法有机结合的产物，形式众多，其作用机理也比单一土钉支护复杂得多，但存在优化复合问题。

4. 打破微观结构理论的一统天下

锚杆、锚索、土钉拉拔试验国内外做了成千上万次，但最近几十年来占主导地位思维模式却是由 D. J. Pinchin 和 D. Tabor (1978) 提出的，此后又由 A. Benter, S. Diamond 和 S. Mindess (1985) 等人进一步研究和发展的著名微观结构理论。

微观结构理论认为：浆体材料在界面处存在一个相对较弱的界面区。此界面区主要由氢氧化钙晶体、C-S-H 等组成，对界面力学特性起着非常重要的作用。由于界面层材料的微观构造尺寸即使与很细的钢纤维相比仍然非常小，因而纤维直径的变化不会引起界面层微观结构的变化。鉴于此，提出了基于平均剪应力的界面剪切强度与摩擦剪应力计算方法，并认为可以用表面处理相同的钢条或钢筋替代钢纤维进行试验，以确定锚杆界面的力学特性。

锚杆界面微观结构理论在国际上的影响是不言而喻的，以致影响到了许多国家，其中也包括我国现行相关技术标准的制定。但是，这个理论在将钢纤维从基体中拔出的试验研究结论推广应用于锚杆设计是存在重大缺陷的，准确地说，这种推广与大量原型锚杆拉拔试验结果不符。编著者也曾撰文列举大量中外研究人员的试验研究结果和结论以及本人研究所得，证明这种推广存在的严重问题（读者可参见本书专题研究）。

究其原因主要有二：①该理论的应用超出了本身适用范围；②尺度效应影响。锚杆界面微观结构理论承认即便很短的钢纤维在从混凝土和水泥浆基体中拔出时也不是理想均匀的。但是，钢纤维直径与锚杆直径尺寸通常相差 2 个数量级。本来就不很均匀的钢纤维与基体间界面剪应力在被放大 100 倍以后，仅就相似模型原理的几何相似而言不就是我们所

不能容忍和接受的锚杆与浆体界面间平均剪应力的问题吗？

5. 平均剪应力概念和方法应彻底摒弃

对于多锚杆体系的情况，R. A. Cook 等学者还提出了一种计算紧密排列的锚杆锚固强度的方法，在理论推导中，为简化计算，假设粘结剪应力沿锚固段长度均匀分布。据说这已为实验结果和有限元分析所证明。采用平均剪应力的弊端在于：①它不符合科学事实；②它使工程设计存在潜在危险。危险在于：锚固力不够就延长锚固类结构杆体长度，而在岩土介质中锚固长度是有限制的，即存在一个临界锚固长度，超过此长度既是一种浪费，又无法满足设计要求。当然，摒弃平均剪应力概念和方法有一个较长过程，在规范没有修订之前，我们还不得不用它。因此，在本书中不可避免地还将见到它的身影。

6. 锥形破坏面产生条件

在一般完整性较好、强度很高的硬岩或混凝土中钻孔，安装锚固类结构，灌注低强水泥砂浆，锥形破坏模式是很难产生的。其原因在于剪应力在钢筋-水泥浆体-模拟围岩介质的混凝土这三种介质中的空间分布形态是衰减的，并且破坏首先发生在相对较弱的介质中或界面处。只有：①钢筋；②钢筋与水泥浆体之间的界面（即第1界面）；③水泥浆体；④水泥浆体与岩体或混凝土之间的界面（即第2界面）的力学强度均显著高于围岩介质或模拟围岩介质混凝土的时候，锥形破坏面（即第3界面）才有可能产生于岩体或混凝土介质之中。

7. 界面剪应力在两个正交方向上都是衰减的

假如锚固类结构杆体设计长度足够长，剪应力在垂直于杆体轴线方向和沿杆体轴线方向上都是衰减的，并且是从最大值衰减至零。第一个“衰减”证明剪应力在垂直于杆体轴线方向上保持不变的假设不成立，第二个“衰减”说明在杆体轴线方向上“平均剪应力”应摒弃。

8. 注浆体裂缝的转移性、随机性、不确定性

破坏条件下，锚固类结构钻孔中注浆体裂缝是不断延伸、转移的，并且是同峰值剪应力和零值剪应力的转移基本同时发生；如果不是破坏后的水泥浆体还存在一定摩阻效应，上述三者的转移将同时发生。这均已为试验研究结果所证实。一定条件下锚固类结构杆体抗拔力是一定的，但裂缝长度却不确定，既可以在丝米量级或更小（宏观不可见），也可以在宏观可见的开裂、破碎后沿锚固段全长发生，具有相当大的随机性和不确定性。

9. 他人成果选编

本书在编著者研究所得基础上，有取舍地编入了其他专家、学者和研究生的部分成果，并根据需要，斗胆作了改写、删节、补足或润色。他们的成果与结论弥足珍贵，他们的大名及研究成果书中均有评介，编著者无意贪天之功。

其成果部分编入本书的作者有：张凡，杨志银，张飞，孙铁成，宋二祥，杨林德，杨志明，周川杰，李象范，屠毓敏，赖天文，陈清华，段建立，郭清，石建，吕麟信，马金普，许斌，汤凤林，张旭辉，孙晓勉，杨绍祺，杨振军，黄力平，刘彦忠，郑坚，周健，李文丘，赵佩胜，杜飞，孙剑平，许光宇，袁培中，莫暖娇，魏建华，宋建学，周同和，马军，张钦喜，尹骥，陈肇元，闫军，李方震，朱绍新，蒋孙春等，美国交通部联邦总局（FHWA-SA-96-069R）、余诗刚等，Gyaneswor Pokharel，Tatsumi Ochiai 等。

10. 问题多，待后生

复合土钉支护种类繁多，优化复合问题特别突出。复合土钉支护面世 16 年来尚未建立相应技术标准即可说明这一点。复合土钉支护可归类于锚固类结构。本书在专题研究中，较详尽地列举了锚固和复合锚固类结构亟待研究解决的诸多问题，可供有兴趣研究人员参考。问题多，不可怕，要进步，解决它。最可怕的是，有问题，看不见；看见了，懒得管。

11. 小建议，大事情

我在查阅相关文献资料时发现一个较普遍问题，就是对于同一编年，被不同的作者表述成不同的年代。如 1961 年，有说是 60 年代的，有说是 50 年代的，有说是 70 年代的。这实在令人懊恼、啼笑皆非而又无可奈何。

记得千年之交时我国对此曾有过一番公开讨论，看来似乎进行得不彻底，认识未统一，惯性在继续。恰像锚杆与土钉区分之争一样，上述现象表明问题仍处于无序阶段。真乃万事一理！在我先前发表的拙文中，严格算来也有几多类似荒唐处，不免有愧于读者，心常不安。昨日事，今朝看，不一样，时空变。这也正是我执意不愿出版论文选集的缘故。银河在旋，地球在转，年轮在长，时代在变。无穷东西须探讨，瞬息万变皆自然。昨日黄花何须看。

于是我查阅了《辞海》，它是这样定义“世纪”的：

世纪：历史上的计年单位。百年为一世纪，特别指耶稣基督纪元（公历纪元）之百年分期。每世纪中又以十年为一“年代”。如二十世纪七十年代，通常指 1970—1979 年，即习惯上以出现“70”为七十年代之始；亦有主张 1971—1980 年者。

原来《辞海》也不是圣经。

也许上述思想的混乱就与《辞海》有关。

于是我又请教了大约 60 位同行专家、学者，没想到耳朵听到的与眼睛看到的结果相差无几。我本该意识到这一点：文如其人。

由此我推断，其他行业诸多期刊情形亦相仿。总体看来，乱如一锅粥。

有专家说，讨论这个问题很无聊。

我不这么看。

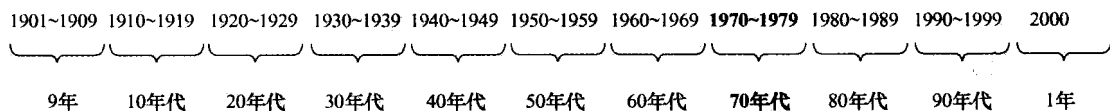
岩土工程一般都认为是很“土”的，没有什么高科技（其实不然，正是因为“土”，我国与先进国家的差距反而小一些，在某些方面，也差不到哪里去，复合土钉支护技术即如此）。但例如岩土工程中的动载量测一般都须精确到毫秒（千分之一秒）量级，请问 30 年是多少毫秒？文章参考文献标注一般要求精确到月份，请问 30 年是多少个月？

习惯是一种惯性，但有好习惯和不良习惯之分。当习惯对社会生活和科技发展带来不良影响时，我们是不是该重视并修正它。

圣人也会犯简单错误。不然的话，2000 年时怎会普天同庆新千年的到来呢？

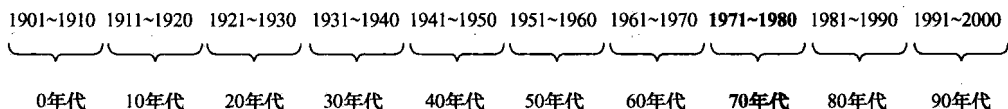
《辞海》差不多是圣人编写的。70 余年来《辞海》也被修订过多次。至少在“世纪”这一条上还应作认真修改。第一，不宜有两种说法，让人无所适从，竟有两难；第二，两种说法均不甚科学，不甚严谨，不甚合理。

对于第一种说法，如果 20 世纪 70 年代是指 1970～1979 年，那么它就是下面的分法：



1901~1909 算什么年代呢？按逻辑推理，只能算零年代，但又只有 9 年，而 2000 年这一年又无所依附，像个没娘的孩子，总不能把它归于第三个千年罢！是不是不伦不类很荒唐。

对于第二种说法，如果 20 世纪 70 年代是指 1971~1980 年，于是就有以下分法：



如果不补充一个“零年代”，100 年就只有 9 个年代，少了 10 年。补了一个零年代，从概念上看又不甚合理。1000 年，100 年（世纪），10 年（年代），年，这是一个系列。既然有零年代，就该有零千年、零世纪和零年。但是，这叫谁读得懂呢？世界上从来就不曾出现过公元零年。

世界科技的发展，从来是从无序到有序，从粗到细再到微，其间过程或长或短能理解。我的建议是：一、修改《辞海》“世纪”条；二、年代定义须统一。这个问题不能一人说了算，不能几人说了算，不能完全凭习惯。习惯如果不科学、不严谨、不合理，理应改，似应该。

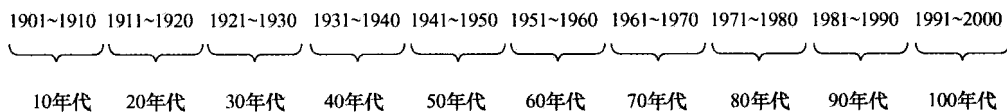
一、修改《辞海》“世纪”条

①《辞海》“世纪”条第一句中宜删除“上的”二字；②第四句中，应将“通常指 1970~1979 年”改为“是指 1961~1970 年”，删除“习惯上”三字，并将“始”改为“末”；同时删除“亦有主张 1971~1980 年者”。

修改后的“世纪”条如下：

世纪：历史计年单位。百年为一世纪，特别指耶稣基督纪元（公历纪元）之百年分期。每世纪中又以十年为一“年代”。如二十世纪七十年代，是指 1961—1970 年，即以出现“70”为七十年代之末。

具体建议如下，仍以刚过去的公元两千年 20 世纪为例：



这种分法比较科学，比较严谨，比较合理。但有违长者心态，也不太适合纯美最是少年心。比较适于中年人，显得更年青。毕竟感觉是一码事，道理是另码事。不能完全跟着感觉走，有序才是理性化。

二、年代定义应统一

小题大作？没事找事？意在炒作？任你评说。德性功于教化，教化有赖文章，文章几多混乱，岂不应该归一。君不见，准确定义年代，其值高于天。一人力，几人力，总不及。国家力，泰山移。建议由国家有关部门组织专家，立项研究，制定强制性执行标准，

予以统一。否则终究只是公说公理，婆说婆理，读罢美文笑嘻嘻。

12. 鸣谢

感谢复合土钉支护的众多理论工作者和更多的设计施工实践者，他们辛勤劳动的结晶本书中多有展现。

感谢中国建筑工业出版社，长期以来，他们对广泛应用于我国岩土工程的土钉支护和复合土钉支护技术的发展等给予了极大的关注和支持。

感谢我的合作者郑志辉副教授、戴瑞奇总工、李世民助理研究员和王启睿硕士。我们的合作是愉快、无悔和卓有成效的。

最后还要感谢读者对本书的关爱和批评，来信请寄：河南省洛阳市总参工程兵科研三所，邮编：471023；电话：0379-65986206；手机：13503790738；电子邮件地址：Lishimin306@Sina.com.

曾宪明

二〇〇九年三月于洛阳

目 录

图表索引

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 复合土钉支护的试验研究与监测	1
1.3 复合土钉支护的数值分析方法	2
1.4 复合土钉支护的设计理论探讨	3
1.5 复合土钉支护在岩土工程中的应用	4
1.6 复合土钉支护工程失稳原因分析	5
1.7 复合土钉支护研究与应用中存在的主要问题	5
1.8 复合土钉支护的国外研究与应用简况	6
1.9 小结	7
2 复合土钉支护工作性能试验与监测	8
2.1 土钉-深层搅拌桩复合结构的现场测试	8
2.2 土钉-旋喷桩-微型桩复合结构的监测	12
2.3 土钉-锚索(杆)复合结构的现场测试	18
2.4 土钉-锚杆复合结构现场测试	24
2.5 新型复合土钉结构抗动载性能测试	30
2.6 回填土边壁(坡)工程性能测试	37
2.7 降雨导致填土边壁(坡)滑塌的模型测试	45
2.8 降雨前后夯实填土边坡工程性能测试	54
2.9 土钉-止水帷幕复合结构工作特性测试	61
2.10 降雨前复合土钉支护填土边坡模型试验	70
2.11 降雨条件下复合土钉支护受力变形特性测试	78
3 复合土钉支护的数值分析方法	89
3.1 不同土钉结构特性的比较分析	89
3.2 土钉-搅拌桩复合结构工作特性数值分析方法	94
3.3 土钉-锚杆(微型桩)复合结构的变形特性	98
3.4 土钉-双排超前钢管注浆桩复合结构位移特性	102
3.5 土钉-搅拌桩墙复合结构受力变形特性	106

3.6	土钉-搅拌桩复合结构稳定性分析	111
3.7	填土边壁(坡)破坏模式相似模型试验的有限元分析	114
4	复合土钉支护设计方法	151
4.1	土钉-超前锚杆复合结构作用机理	151
4.2	土钉-搅拌桩/锚管桩复合结构设计参数敏感性	156
4.3	土钉-搅拌桩复合结构设计方法	159
4.4	挡土挡水复合土钉支护的设计	170
4.5	土钉-搅拌桩复合结构设计的综合法	176
4.6	土钉-搅拌桩复合结构整体稳定性计算方法	183
5	复合土钉支护在岩土工程中的应用	190
5.1	复合土钉支护常用形式与工程实例	190
5.2	土钉-搅拌桩复合结构的应用	194
5.3	土钉-钢管桩复合结构的应用	197
5.4	土钉-微型桩-预锚复合结构的应用	200
5.5	土钉-树根桩-花管复合结构的应用	204
5.6	土钉-桩-锚复合结构的应用	206
5.7	土钉-桩-锚索复合结构的应用	209
5.8	土钉-深层搅拌桩-钢管桩复合结构的应用	212
5.9	注浆钢管土钉-板桩复合结构的应用	216
5.10	土钉(锚杆)-水泥土墙复合结构的应用	218
5.11	土钉-深层搅拌桩复合结构在软土中的应用	221
5.12	多种复合土钉结构在软土工程中的应用	225
5.13	土钉-注浆花管复合结构的应用	231
5.14	土钉-钻孔桩复合结构的应用	234
5.15	多种复合土钉结构在软土地基中的应用	237
5.16	土钉-搅拌桩复合结构在软土中的应用	238
5.17	土钉-搅拌桩-微型桩复合结构的应用	240
5.18	土钉-微型桩-预锚复合结构应用	244
5.19	土钉-锚杆-微型桩-搅拌桩复合结构在重要工程中的应用	248
5.20	钢管土钉-搅拌桩复合结构的应用	252
5.21	土钉-改良加筋土复合结构的应用	256
5.22	复合土钉支护在 CFG 桩复合地基中的应用	260
5.23	土钉-预锚复合结构的应用	263
5.24	锚管-注浆-排水复合系统处理险情工程	268
5.25	注浆钉-击入钉复合结构的应用	270
5.26	小钉管-大钉管-注浆复合结构的应用	273
5.27	土钉-排桩-挡墙复合结构的应用	275

5.28	土钉-搅拌桩复合结构在不良地层中的应用	280
6	复合土钉支护工程事故原因剖析	282
6.1	土钉-搅拌桩复合结构倒塌原因	282
6.2	土钉-搅拌桩-暗墩复合结构两次失稳原因	286
6.3	土钉-双层深层搅拌桩复合结构大变形原因	288
6.4	钢管土钉-单排搅拌桩复合结构坍塌原因	291
7	专题研究	294
专题 I	锚固和复合锚固类结构抗动静性能问题研究	294
专题 II	锚固类结构诸界面剪应力相互作用关系与设计方法问题研究	306
专题 III	岩土高边坡破坏模式、预测预警与防治方法问题研究	321
专题 IV	锚固类结构及其耐久性与使用寿命问题研究	341

图 表 索 引

图 1	梁洲段基坑断面示意图	8
图 2	基坑及测点平面布置图	9
图 3	基坑支护设计方案	9
图 4	A-A 断面测力计布置示意图	9
图 5	基坑开挖与测试土钉设置的进度	10
图 6	水平位移随深度的变化曲线	10
图 7	土钉拉力-时间关系曲线	11
图 8	钉头测试装置示意图	12
图 9	土钉头部测点受力随时间变化曲线	12
图 10	复合土钉支护的常用类型	13
图 11	基坑东侧复合土钉支护剖面	15
图 12	土钉抗拔试验荷载与变形曲线	16
图 13	基坑东侧复合型土钉支护剖面图	17
图 14	最大轴力分布区域图	18
图 15	开挖后土钉最大拉力位置	18
图 16	测试锚杆断面图 (单位: m)	19
图 17	测试土钉支护断面图 (单位: m)	19
图 18	复合土钉支护测试立面图 (单位: m)	19
图 19	土层锚杆轴向拉力-时间关系曲线	20
图 20	永久支护第 1 排土钉轴向拉力-时间关系曲线	21
图 21	永久支护第 3 排土钉轴向拉力-时间关系曲线	21
图 22	永久支护第 4 排土钉轴向拉力-时间关系曲线	21
图 23	永久支护第 6 排土钉轴向拉力-时间关系曲线	22
图 24	土层锚杆拉力沿基坑深度方向的分布图	22
图 25	土钉拉力沿基坑深度方向的分布图	23
图 26	复合支护体系中预应力锚杆与土钉拉力变化图	23
图 27	基坑平面及测点布置图	24
图 28	地质剖面图 (2-2 断面)	25
图 29	边坡支护方案 (1-1 断面)	26
图 30	1# 土钉微应变-时间关系曲线	26
图 31	1# 土钉微应变沿钉长分布形态	26
图 32	2# 土钉微应变-时间关系曲线	26

图 33	2#土钉钉长上微应变随时间变化曲线	26
图 34	3#土钉微应变-时间关系曲线	27
图 35	3#土钉应变沿钉长分布形态	27
图 36	4#土钉应变-时间关系曲线	27
图 37	4#土钉应变沿钉长分布形态	27
图 38	边坡水平位移-时间关系曲线	27
图 39	边坡水平位移-开挖深度关系曲线	27
图 40	边坡水平位移-测点位置关系曲线	27
图 41	地表沉降-时间关系曲线	28
图 42	边坡沉降-测点位置关系曲线	28
图 43	原型试验洞室断面图 (单位: mm)	31
图 44	各试验段支护参数设计	31
图 45	各试验段的测点布置	32
图 46	复制模型洞室的设计 (单位: mm)	36
图 47	模型洞室的临界破坏情况	37
图 48	试验设备示意图	40
图 49	主滑塌面形态	41
图 50	质点随动计的位移轨迹	41
图 51	1~5 号观测线的变化规律	42
图 52	应变沿高度的分布形态	42
图 53	挡板应变随开挖的变化曲线	43
图 54	不同缩尺模型与原型滑塌面对应质点坐标与时间的关系曲线	44
图 55	模型与原型的质点随动位移与时间的无量纲关系曲线	44
图 56	降雨装置示意图	46
图 57	降雨前滑塌崖形态	47
图 58	降雨过程中原滑塌崖与地面变形破坏演变过程	47
图 59	一次性全部拆除挡板后的最终滑塌面	48
图 60	质点随动计的位移轨迹	48
图 61	逐次降雨条件下的渗水曲线	48
图 62	平均渗水速率与沉降速率	49
图 63	位移观测线变化轨迹	50
图 64	挡板应变随持续降雨和强降雨期的变化曲线	50
图 65	不规则冲沟形态	51
图 66	降雨前滑塌崖形态	55
图 67	挡板应变沿高度的分布形态	55
图 68	降雨过程中原滑坡崖和地面变形破坏演变过程	55
图 69	质点随动计的位移轨迹	56
图 70	七条裂缝的发展变化轨迹	56
图 71	逐次降雨条件下渗水曲线	57

图 72	渗水速率与沉降速率比较	57
图 73	降雨过程中五条位移观测线变化轨迹	57
图 74	实测挡板应变值随持续降雨期变化曲线	58
图 75	土钉与止水帷幕复合支护	62
图 76	观测侧面及测点布置 (单位: mm)	63
图 77	端面及土钉布置示意图 (单位: mm)	64
图 78	基坑开挖后地表沉降变形曲线	65
图 79	基底最大隆起-时间曲线	66
图 80	坡面顶部水平位移-时间曲线	66
图 81	普通土钉支护边坡垂直断面变形分布 (单位: mm)	67
图 82	复合土钉支护边坡垂直断面变形分布 (单位: mm)	67
图 83	土钉支护边坡试验位移矢量场及等值曲线	68
图 84	复合土钉支护边坡试验位移矢量场及等值曲线	69
图 85	土钉 (水平支护锚管) 测点布置 (单位: cm)	71
图 86	试验箱立面 (开挖端面) 测点布置示意图	71
图 87	实测挡板应变随开挖变化曲线 (单位: cm)	72
图 88	挡板应变随高度分布曲线	72
图 89	位移观测线变化轨迹	73
图 90	潜在滑移面综合分析	73
图 91	质点随动计位移轨迹	74
图 92	水平锚管应变随开挖支护变化曲线	74
图 93	钢筋网应变随开挖支护变化曲线	75
图 94	面层应变随开挖支护变化曲线	75
图 95	超前竖直锚管应变随开挖支护变化曲线	76
图 96	复合土钉支护及地面封闭条件下渗水线分布形态	80
图 97	位移观测线变化轨迹	80
图 98	降雨过程中地面质点随动计位移轨迹	81
图 99	降雨过程中地面沉降曲线变化特性	81
图 100	渗水速率、渗水速率增量与沉降速率的比较	82
图 101	四根测试锚管应变曲线	82
图 102	实测钢筋网应变随时间变化曲线	83
图 103	实测面层应变随时间变化曲线	83
图 104	实测超前竖直锚管应变随时间变化曲线	84
图 105	基坑开挖后的超静水压分布	91
图 106	复合土钉支护变形网格	93
图 107	一般土钉支护变形网格	93
图 108	复合土钉水泥搅拌桩墙后土压力 (最大 80kPa)	93
图 109	一般土钉支护面层后土压力 (最大 46kPa)	93
图 110	复合土钉支护中典型土钉轴力分布	93

图 111	一般土钉支护中典型土钉轴力分布	93
图 112	带转动自由度的 Goodman 单元	95
图 113	基坑平面及测点布置图	96
图 114	不同开挖阶段复合土钉支护水平位移曲线	97
图 115	最大侧向位移计算值与实测值比较	97
图 116	不同开挖阶段地面沉降曲线	97
图 117	不同开挖阶段第一排土钉轴力变化曲线	97
图 118	第二排土钉轴力计算与实测值曲线比较	97
图 119	不同开挖阶段第三排土钉轴力变化曲线	97
图 120	不同开挖阶段第四排土钉轴力变化曲线	98
图 121	不同开挖阶段第五排土钉轴力变化曲线	98
图 122	不同开挖阶段第六排土钉轴力变化曲线	98
图 123	锚杆-土钉复合支护问题的有限元网格	100
图 124	土钉支护与复合土钉支护坑壁位移比较	100
图 125	工程西侧基坑支护结构示意图	105
图 126	各工况面层位移计算与实测曲线比较	106
图 127	基坑平面尺寸示意图	108
图 128	有限元计算网格划分图	108
图 129	不同支护结构开挖变形比较 (挖深为 3.5m)	109
图 130	不同支护结构开挖矢量场比较	110
图 131	不同支护结构由开挖引起塑性区比较	110
图 132	土钉支护实测值与计算值比较	110
图 133	第三步开挖时各排土钉轴力分布曲线	110
图 134	计算循环方法	112
图 135	土钉支护示意图	114
图 136	土体支护后位移矢量图	114
图 137	土钉体位移实测值与计算值比较	114
图 138	开挖完毕后各排土钉轴力分布图	114
图 139	试验设备示意图	114
图 140	不夯实填土边壁 (坡) 滑塌面形状	115
图 141	夯实填土边壁 (坡) 滑塌面形状 (降雨前、后滑塌面)	115
图 142	开挖边界结点	116
图 143	有限元计算模型及初始网格图	117
图 144	各开挖工况的有限元网格局部放大图	118
图 145	不夯实情况下各开挖阶段土体最大剪应力及屈服度等色图	119
图 146	不同开挖阶段不夯实土层边壁 (坡) 局部区域的屈服度等高线及 滑塌趋势线	122
图 147	夯实情况下各开挖阶段土体最大剪应力及屈服度等色图	126
图 148	不同开挖阶段夯实土边壁局部区域屈服度等高线及滑塌趋势线	129

图 149	考虑滑塌的计算模型及初始网格图	132
图 150	各开挖工况的有限元网格局部放大图	133
图 151	考虑滑塌的计算模型及初始网格图	135
图 152	各开挖工况的有限元网格局部放大图	135
图 153	不夯填情况下考虑滑塌体时各开挖阶段土体最大剪应力及 屈服度等色图	136
图 154	考虑土体滑塌影响时不夯填土边壁局部区域屈服度等高线及 滑塌趋势线	138
图 155	夯填情况下考虑滑塌体时各开挖阶段土体最大剪应力及屈 服度等色图	143
图 156	考虑土体滑塌影响时夯填土边壁局部区域屈服度等高线及滑 塌趋势线	147
图 157	逐次降雨条件下的渗水曲线	148
图 158	考虑降雨后部分土体饱和的计算模型及初始网格图	148
图 159	考虑降雨影响土体一次开挖后最大剪应力及屈服度等值线图	149
图 160	考虑降雨影响土体一次开挖后最大剪应力及屈服度等色图	149
图 161	复合土钉支护结构剖面图	151
图 162	超前锚杆抗滑作用	151
图 163	超前锚杆受力分析	152
图 164	超前锚杆嵌固深度计算简图	154
图 165	土钉支护结构布置图	155
图 166	作用于超前锚杆上的土压力	155
图 167	超前锚杆内力分布	155
图 168	圆弧破坏模式示意图	156
图 169	复合土钉支护结构示例	160
图 170	复合土钉支护形式	160
图 171	复合土钉支护与一般土钉支护沉降比较	161
图 172	复合土钉支护位移时程曲线	162
图 173	土钉受力的三个阶段	163
图 174	抗渗流验算简图	163
图 175	土钉长度计算简图	164
图 176	内部稳定性验算简图	166
图 177	外部稳定性验算简图	166
图 178	整体稳定性验算	166
图 179	水泥土桩底部强度验算	168
图 180	复合型土钉支护剖面	175
图 181	土钉抗拔力验算简图	175
图 182	复合土钉支护计算简图	177
图 183	复合土钉支护结构整体稳定性分析	177