

土钉支护软土边壁(坡)机理相似模型实验研究

曾宪明

(总参工程兵科研三所 洛阳 471023)

林润德

(同济大学结构理论所 上海 200092)

摘要 在描述土钉支护软土边壁(坡)相似模型试验现象和结果基础上, 对其加固、支护机理作了探讨。分析了土钉弓形受力分布有一个产生、形成、发展和畸变的过程, 并非如C. K. Shen等人给出的固定弓形形态。同时论述了土钉支护面层的鼓形受力特点, 与软土边壁的流鼓破坏模式密切相关。

关键词 土钉, 软土, 机理, 实验

分类号 O411.3

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2000)04-0534-05

1 概述

相似模型的原理和方法由著名学者江守一郎在本世纪70年代进行了归纳^[1]。江氏潜心收集并验证了涉及13个领域的600余例世界有名的模型实验结果, 但尚未见涉及软土边壁(坡)的相似模型问题研究的例子。国内岩土工程领域, 也未见此类研究与应用成果发表。为了探讨土钉支护软土边壁(坡)机理, 我们根据相似模型的原理, 建立了相似法则, 并进行了系列相似模型实验研究。实验结果与原型试验及理论分析计算结果规律相同, 数据误差最大不超过25%。

2 实验简况

系列相似模型实验在长×宽×高=3.75m×0.6m×1.5m试箱内进行。试箱两侧光滑, 其中一侧透明; 其高度和长度分别为软土临界自稳高度的2倍和5倍。实验介质采用原状软土重塑而成, 固结期间定期对有关物理力学参数进行测定, 至基本达到原状介质相应参数值时即开始实验。相似模型的支护材料及开挖、支护方法与实际的相同, 但严格保持与原型的几何相似。原型与相似模型的支护参数见表1。相似法则的推导及验证, 试箱及系列相似模型的设计可参见文^[1, 2]。

表1 原型与相似模型的支护参数

Table 1 Support parameters of the similarity model and the prototype

	土钉	喷射混凝土	钢筋网	超前土钉	锚管
原型	Φ25@1.000L 20.000	δ200 C20	Φ10@150	Φ25L 3.000 @ 300	Φ48
相似模型	Φ3.6@145L 2.985	δ29.0 C20	Φ1.4@22	Φ3.7L 4.48 @ 44.8	Φ7.4

3 喷网面层受力变形特性

3.1 测试结果

4号相似模型的喷网支护面层受力变形分布形态测试结果见图1。测试结果表明:

(1) 应变量值显著受开挖因素影响。下部开挖可使上部已做面层支护受力变形急剧增大。以第7次开挖为例, 开挖后最大应变值比开挖前增大约300%。

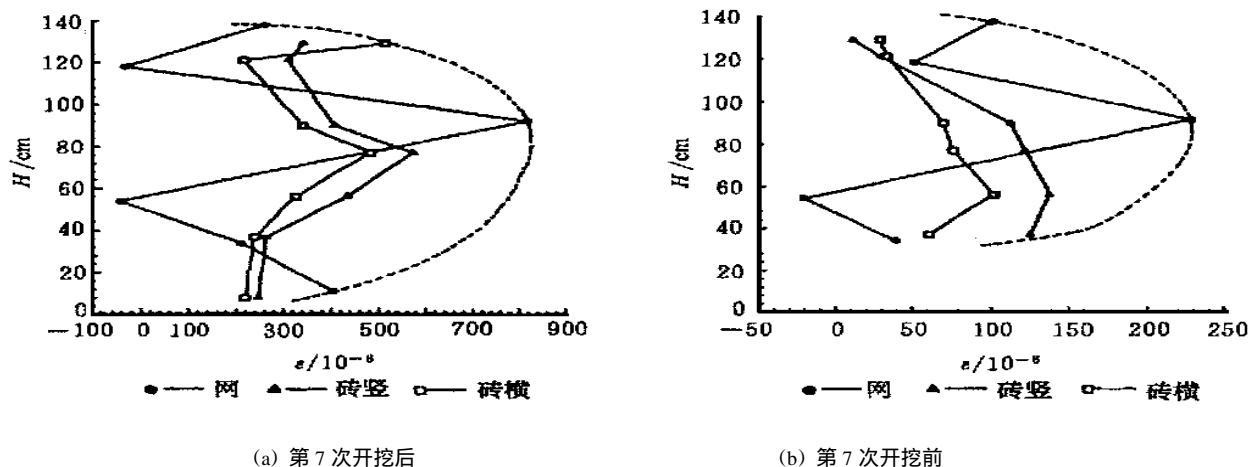
(2) 喷层应变分布较为规律, 横向应变和竖向应变基本一致, 沿壁高大体呈鼓形。该分布形态同钢板面层(厚20mm)的试验结果相近, 其量值比钢板面层的略大。钢筋网最大、最小应变量值差别较大(约1000 $\mu\epsilon$)。

3.2 测试结果分析

钢筋网应变分布特点与钢筋网同土钉的联结方

1999年1月25日收到初稿, 1999年5月4日收到修改稿。

作者 曾宪明 简介: 男, 博士, 1975年毕业于原军委工程兵训练队防护工程专业, 现任副总工程师兼高级工程师, 主要从事岩土工程, 防护工程等方面的工作。



(a) 第7次开挖后

(b) 第7次开挖后

图1 面层应变分布形态

Fig 1 Strain distribution shapes of the surface layer

式有关。在钢筋网与土钉接触点处,二者被牢固焊接在一起,未接触的则不焊接。在焊接点及其附近的钢筋网外表面,由于土钉的锚固力作用,可使其受压产生负应变;在远离焊接点处,钢筋网外表面则受拉产生正应变。但总的说来,将喷层、钢筋网最大应变值点用包络线连接起来,即构成明显的鼓形。

按标定曲线,将面层的应变换算成应力知:在有效支护条件下,面层受力呈鼓形,这与无支护条件下的壁面鼓形位移形态密切相关^[2]。或者是鼓形位移(无支护或支护失效),或者是鼓形受力(有效支护),二者必属其一。这是因为,质点位移则力被释放,质点受力则变形被限制的结果。

钢筋网产生负应变是其在面层中骨架作用的体现;喷网面层在将所承受土压力传递给土钉时发挥着垫板效应。

4 土钉受力变形特性

4.1 测试结果

土钉应变测试结果见图2。测试结果具有以下特点:

(1) 土钉应变值最初较小,随着时间推移而逐步增加,特别是开挖之后,往往发生急剧变化(图2a)。

(2) 土钉应变分布,一般是开挖较浅时,临近壁面的外固结段应变值较大;随着下挖深度增加,峰值应变逐步向土钉中部转移,产生“弓形”分布现象(图2b, c);进一步发展,“弓形”后部上翘,应变值逐渐增大,最后“弓形”归于消失(图2d)。

4.2 测试结果分析

土钉是土钉支护的主体,其重要作用有二:一

是土钉注浆对软土的改良加固作用,即注浆介质对软土介质物理力学性质的改善作用(另文讨论);二是对加固介质的补强(在优势滑移控制线之内)和锚固(在优势滑移控制线之外)作用。土体开挖后势必产生变形。喷网面层,超前垂直锚管及其渗浆体,将使这种变形的量值减小,变形速度减缓;土钉注浆使软土物理力学性能大为改善,变形量及变形速度又进一步减小。土钉安装后,土钉连同渗浆体与土体发生相互作用,土体仍有变形产生,因而土钉连同渗浆体也会产生变形。但土钉(连同注浆体及渗浆体) E 值较高,土体 E 值较低,二者变形主要受土钉控制,致使土体变形得到有效限制。土钉应变分布产生由外向内的峰值迁移现象,主要是优势滑移控制面随挖深增大而不断向土体纵深方向发生转移引起的,并与土体变形滞后效应有关。在满足力平衡条件前提下,把土钉内固结段受力控制在设计允许锚固力之内,其锚固作用将得到充分发挥。

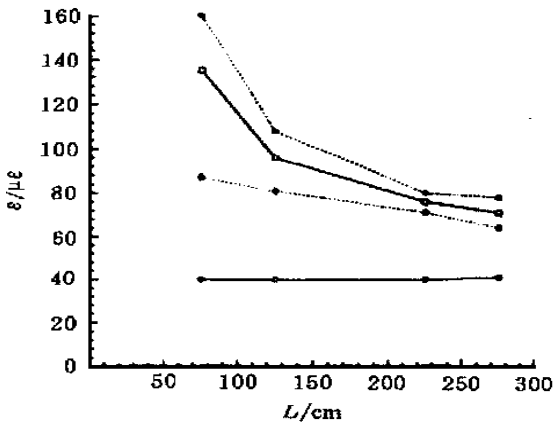
5 地面质点位移特性

5.1 测试概况及结果

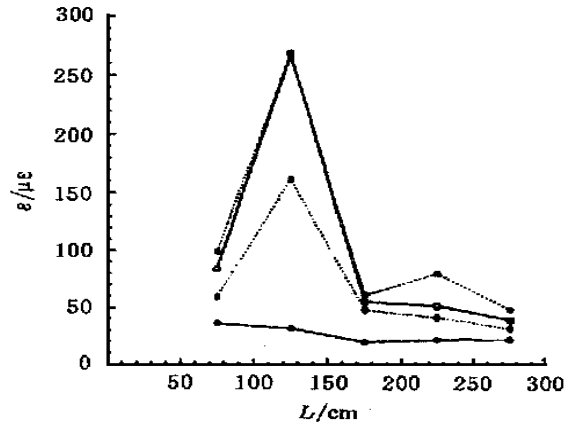
将8个质点随动计和两只百分表分别安设在4号相似模型的上表面中心线及其附近,对土钉支护实验条件下的地面质点位移进行了测试。质点随动计测取的是地面不同质点的真实运动轨迹;百分表测取的则是固定点的垂直位移,它是多个质点运动经过固定点时的瞬时变位记录。测试结果示于图3中,其中图3(b)是据质点随动计记录的原始曲线直接复制的,相应的数据见表2。

5.2 测试结果分析

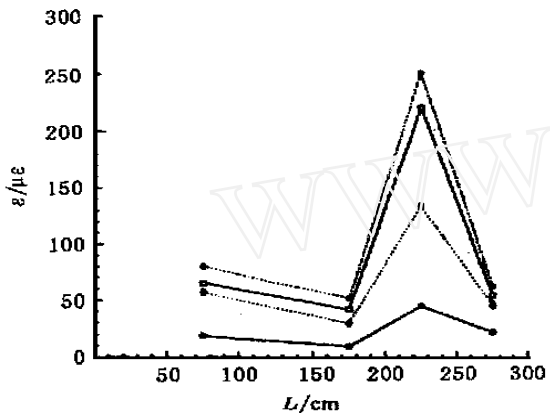
(1) 土钉支护条件下,支护范围内地面质点产生



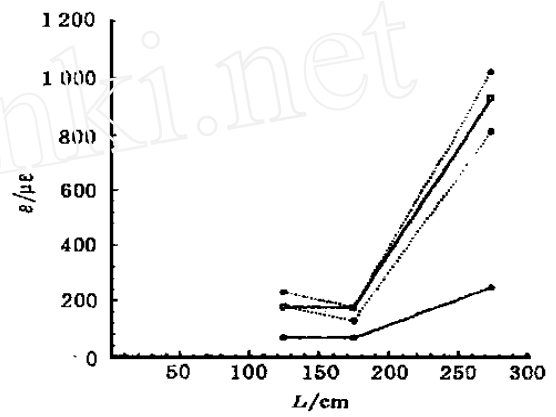
(a) 初始阶段



(b) “弓形”产生



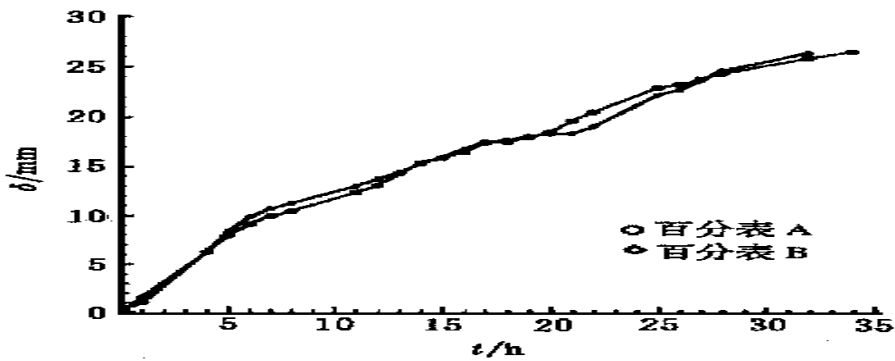
(c) “弓形”转移



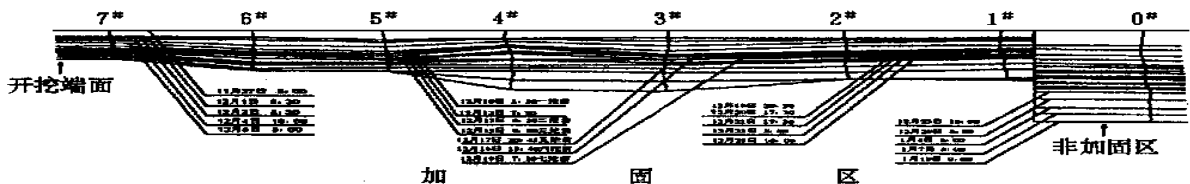
(d) “弓形”畸变

图2 土钉应变分布曲线

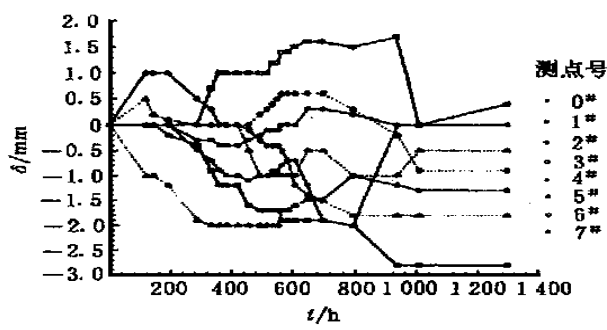
Fig 2 Strain distribution curves of the soil nails



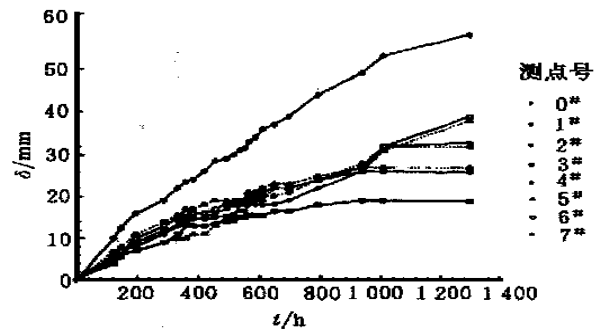
(a) 垂直位移曲线(百分表测)



(b) 地面质点变位曲线(随动计测)



(c) 水平位移曲线(随动计测)



(d) 垂直位移曲线(随动计测)

图 3 土钉支护下地面质点位移曲线

Fig 3 The displacement curves of ground particle under soil nail support

表 2 土钉支护条件下地面质点变位测试结果

Table 2 The measured results of ground particle displacement under soil nail support

测点号	垂直位移 δ /mm	垂直位移率 ξ /‰	水平位移 δ /mm	水平位移率 ξ /‰	垂直位移速度 v /mm · h ⁻¹	水平位移速度 v /mm · h ⁻¹	合位移 δ /mm	合速度 v /mm · h ⁻¹
0	36	24	- 1.6	0.422	0.0373	0.00165	36.03	0.0374
1	20	13.3	- 1.1	0.290	0.0207	0.00114	20.03	0.0208
2	18	12	- 0.9	0.237	0.0187	0.00093	18.02	0.0187
3	23.9	15.9	0	0	0.0248	0	23.9	0.0249
4	28	18.7	- 0.5	0.132	0.0290	0.00052	28	0.0290
5	11.1	7.4	0	0	0.0115	0	11.1	0.0115
6	12.9	8.6	0.5	0.132	0.0134	0.00052	12.91	0.0134
7	8.8	5.9	- 1.7	0.449	0.0091	0.00176	8.96	0.00929

向下位移, 并分为 3 个阶段:

固结阶段: 1997 年 11 月 27 日~ 12 月 10 日, 计 14 d。沉陷量约为 11.0~ 15.5 mm。

开挖阶段: 12 月 10 日~ 12 月 19 日, 计 9 d。沉陷量约为 5.4 mm。

后期阶段: 12 月 20 日~ 1998 年 1 月 19 日, 计 29 d。沉陷量约为 6.1 mm。

在固结阶段, 各质点向下位移量大体趋于一致。开挖阶段和后期位移明显不均衡, 主要是注浆不甚均匀造成的, 这两个阶段的合位移量约为 1.15 cm。

(2) 1[#] ~ 7[#] 测点大都存在一定的水平位移, 表现为曲线的微小波动。1[#] 点的水平位移主要受非加固区的地面沉陷影响所致。

(3) 0[#] 点位于非加固支护区段, 该区段的沉降位移显著, 约为加固支护区段的 2 倍。实际上在两区段交界处, 已有平行于土钉内锚端面的规整裂缝产生, 最大宽度达 2 cm。

(4) 百分表记录了固结、开挖阶段及后期阶段变形的全过程。此二测点距开挖面距离分别为 0.5 m 和 1.8 m, 但曲线基本重合, 表明土钉支护条件下, 地表固定点垂直位移相差甚微, 并与邻近质点随动计测试结果吻合。而在无支护条件下, 对应点的垂直位移相差 15 倍之多。

(5) 土钉支护条件下的地面质点水平位移速度的量值较小(0~ 0.00176 mm/h); 无支护条件下的量值较大(0.007~ 0.659 mm/h)^[1], 二者最大相差约 373 倍。这说明支护限制位移作用显著。

土钉支护条件下地面质点主要特性是垂直位移和位移速度较小, 水平位移和位移速度更小; 质点间位移速度差不明显; 水平位移“追赶”垂直位移的现象完全消失; 按稳定状态判据判定^[2], 实验条件下边壁处于稳定状态, 对应的原型试验证实了这一点。

6 结 语

(1) 面层支护条件下, 边壁位移显著减小, 地面质点水平位移“追赶”垂直位移的现象消失, 面层应变分布大体呈鼓形。

(2) 边壁的上部开挖, 可使边壁的下部土体受力变形明显增大, 并随开挖深度增加而显著。此时安设超前竖直高压注浆锚管十分必要而有效; 这一有力措施在壁脚下部还将具有截断塑流线, 有效防止基础隆起的作用, 这与一般喷锚和土钉墙的施工法相去甚远。

(3) 土钉的“弓形”受力分布形态, 有其萌生、形成、发展和畸变的过程。它是随开挖深度增大, 边壁

土体优势滑移控制面不断向纵深方向转移的结果, 并与土钉受力大小及作用时间等有关, 并非如美国加州大学 Davis 分校沈智刚教授等给出的那样是一成不变的。固定的弓形受力分布形态不能完整描述软土边壁(坡)中土钉受力的实际情形。

(4) 土钉的高压注浆工艺可使软土物理力学性能得到有效改善, 因而其破坏模式也随新的地质体发生相应变化。土钉既是新地质体的骨架, 也是将边壁变形破坏危机通过面层转移至新地质体深部,

并消除于无形的主要受力构件。

(5) 土钉支护条件下, 由于高压注浆等的作用, 可显著地防止地面沉降变形发生。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 [日]江守一郎著 模型实验的理论和应用[M] 郭延伟, 李安定译 北京: 科学出版社, 1984

TESTING STUDY ON SUPPORT MECHANISM OF SOIL NAILS IN SOFT CLAY SIDE WALLS(SLOPES) USING SIMILAR MODELS

Zeng Xianming¹, Lin Runde²

(¹ The 3th Engineering Army Institute, General Staff PLA, Luoyang 471023 China)

(² Institute of Structural Theory, Tongji University, Shanghai 200092 China)

Abstract The phenomena and results of similar model tests on soil nail support in soft clay side walls (slope) are described, and then the reinforcement and support mechanism are discussed. The bow-shaped stress distribution of the soil nail presents a process of initiation, formation, development and distortion, rather than the fixed bow shape given by C. K. Shen and others. Meanwhile, the convex-shaped stress features of the surface layer is discussed, which is closely related to the Flow-convex Failure Pattern (FFP) of soft clay side walls.

Key words soil nailing, soft clay, mechanism, testing

国家自然科学基金岩土力学及相关学科类 1999 年资助项目题录

1 自由申请项目题录

所属学部	项 目 名 称	负责人	专业职务	单 位	起止年月	资助金额/万元
数理	爆炸地震波传播规律及其毁伤效应	白春华	教授	北京理工大学	2000 01-2002 12	14.00
数理	强冲击荷载下可滑移界面的基本特性研究	陈大年	研究员	宁波大学	2000 01-2002 12	13.00
数理	大别山超高压岩石的碰撞力学成因和流变分析	武红岭	副研究员	中国地质科学院	2000 01-2002 12	17.00
数理	强冲击荷载下各向异性材料中应力波传播规律研究	李永池	教授	中国科技大学	2000 01-2002 12	17.00
数理	盐岩力学特殊性试验研究与理论分析	杨春和	副研究员	中科院武汉岩土所	2000 01-2002 12	17.00
化学	石质文物腐蚀与防护机理研究	张秉坚	副教授	浙江大学	2000 01-2002 12	12.00
地球	区域自然灾害模糊风险算法及其在减灾方案筛选中的应用	黄崇福	副教授	北京师范大学	2000 01-2002 12	15.00
地球	粘性泥石流残留存及其作用	张 军	副研究员	中科院成都山地所	2000 01-2002 12	17.00
地球	泥石流流域降雨的产流与产沙模型研究	余 斌	副研究员	中科院成都山地所	2000 01-2002 12	16.00

(待续)