

文章编号: 1000-7598(2012)11-3219-06

坑道口部管棚加固抗爆性能模型试验研究

许宏发¹, 佟 隼¹, 王广建², 王德荣¹

(1. 解放军理工大学 国防工程学院, 南京 210007; 2. 解放军 72464 部队, 济南 250022)

摘 要: 正确评估管棚加固围岩的抗爆性能, 对坑道口部防护设计十分重要。基于相似模拟理论, 用不同配比的水泥土替代自然岩体和注浆岩体, 用塑料管替代钢管, 模拟管棚超前支护坑道口部在爆炸荷载作用下的抗爆性能。制作了口部相似模型3件, 模型长×宽×高为2 m×2.2 m×2 m, 在顶部直接爆炸, 分别模拟无管棚、1层管棚和3层管棚下, 坑道口部动力响应和破坏特征。试验表明: 管棚超前支护能有效加固坑道围岩, 整体性增强, 受力分布合理; 随着管棚层数增加, 口部破坏明显减弱, 拱顶破坏范围从1.55 m减小到0.45 m、主裂缝最大宽度由25 mm减小到3 mm、网状裂缝最大宽度由24 mm减小到0.3 mm、裂缝条数由14条减少到3条、模型顶部爆坑体积由0.12 m³减小到0.05 m³。管棚超前支护能有效地将爆炸荷载的破坏作用控制在管棚加固层之外, 抗打击能力明显增强。

关 键 词: 坑道口部; 管棚支护; 模型试验; 抗爆性能

中图分类号: TU 93

文献标识码: A

Model experiments on anti-detonating performance of tunnel entrance using pipe roof reinforcement

XU Hong-fa¹, TONG Quan¹, WANG Guang-jian², WANG De-rong¹

(1. School of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. The Unit 72464 of PLA, Jinan 250022, China)

Abstract: It is very important for protective design of tunnel entrance that assessing anti-detonating performance of surrounding rock using pipe roof reinforcement. Based on principle of similarity simulation, nature or grouting rockmass and steel pipe were replaced using cement soil of different cement-mixing ratios and plastic pipe respectively. Using the model tests, anti-detonating performance of tunnel entrance reinforced with pipe roof under explosive load was simulated. Length, width and height of three models are 2 m, 2.2 m and 2 m respectively. The dynamic response and failure characteristic on tunnel entrance reinforced with none, one layer and three layers pipe roof were simulated using the three models respectively under direct explosion in the model top. Experiments show that the pipe roof supporting can reinforce surrounding rock effectively, enhance integrity and make the distributions of stress more reasonable; the entrance failure decreases significantly with the increase of pipe roof layer, such as failure range from 1.55 m to 0.45 m, the maximum main crack width from 25 mm to 3 mm, the maximum netty crack width from 24 mm to 0.3 mm, the crack number from 14 to 3 in the arch crown of tunnel, and the blasting pit volume from 0.12 m³ to 0.05 m³ in the model top. The pipe roof advance support can control effectively explosion damage outside the pipe roof reinforced layer.

Key words: tunnel entrance; pipe roof reinforcement; model experiments; anti-detonating performance

1 引 言

地下坑道的口部直接暴露在外, 其上面覆盖层较薄, 面临着被侦察发现和高强度精确打击的危险, 通常成为地下坑道抗敌武器打击的薄弱环节, 因此, 地下坑道口部的防护一直是工程技术人员关注的问题之一。管棚超前支护技术是地下隧道工程

常用的施工技术, 常用于破碎岩体的超前加固^[1-3], 对其作用机制也有很多学者研究。董新平等^[4]建立了考虑施工过程和管棚与支护之间相互作用的等效管棚空间分析模型, 论证了棚架体系在纵向和横向对开挖荷载合理释放和调节的有效性。Hisatake等^[5]利用离心模型试验论证了管棚在隧道开挖面对位移的控制机制。贾剑青等^[6]采用超前管棚+工字钢架+

收稿日期: 2012-07-11

基金项目: 国家 973 计划(No. 2009CB724608); 国家自然科学基金创新研究群体基金(No. 51021001); 国家杰出青年科学基金(No. 50825402)。

第一作者简介: 许宏发, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: xuhongfa126@126.com

喷射混凝土联合支护技术成功处理了软弱围岩隧道开挖施工,有效控制了地表沉降。贾金青等^[7]基于 Pasternak 弹性地基梁理论,推导出管棚的挠度方程和内力计算公式,计算表明,管棚能够有效地将开挖面附近的上部荷载向未开挖区传递。

但这些研究只是建立在顶部岩体静力自重作用下的管棚力学效应,而对爆炸荷载作用下管棚支护岩体的作用机制的研究未见报道。本文将管棚技术应用于坑道口部防护,以提高口部的抗打击和抗滑塌能力。通过相似模型试验,定量验证多层管棚超前支护方法对提高工程口部抗力的有效性,为地下坑道口部防护施工和设计提供依据。

2 试验方法

2.1 试验原理和目的

本组试验运用结构相似材料模型,结合某实际工程,确定了试验模型的几何尺寸、模型的材料物理参数、模拟装药量等。通过 3 种模型(未加管棚、加 1 层管棚、加 3 层管棚)的对比,比较对相同爆炸荷载作用下,3 种模型的动力响应情况及整体破坏情况。验证多层管棚超前支护方法对提高地下坑道口部抗力的有效性。

2.2 模型制做

2.2.1 模型几何尺寸

本试验采用 A、B、C 3 种结构模型进行对比模拟试验,其中:A 为模拟未加管棚的情况;B 为模拟加 1 层管棚的情况;C 为模拟加 3 层管棚的情况。A、B、C 3 种结构模型尺寸为长×宽×高=2 m×2.2 m×2 m,其正视图分别为图 1(a)~(c)所示,侧面图如图 1(d)所示。

2.2.2 模型材料

坑道围岩采用抗压强度为 0.92 MPa 的水泥土模拟。注浆加固层采用抗压强度为 1.68 MPa 的水泥土模拟,注浆加固层厚度为每层 200 mm(以每层钢管中心线为基准,向里、向外各 100 mm)。由于注浆加固层和围岩的抗压强度不同,在模型制作中,可采用二次浇筑的方法制作,即先浇筑模拟注浆加固层,再浇筑模拟围岩层。水泥土的土质为黏土,天然含水率为 40%~50%,掺入 C32.5 级水泥,水泥掺入比分别为:黏土水泥土为 12%和 20%。水泥土的养护龄期为 74 d,两种水泥土各做一组试块(6 块),实测水泥土试块的无限侧抗压强度均值分别为 0.92、1.68 MPa。

注浆钢管采用 PVC 管模拟。PVC 管的直径为 20 mm、壁厚为 1~1.2 mm。管内灌入水泥浆,模

拟注浆后的管棚。

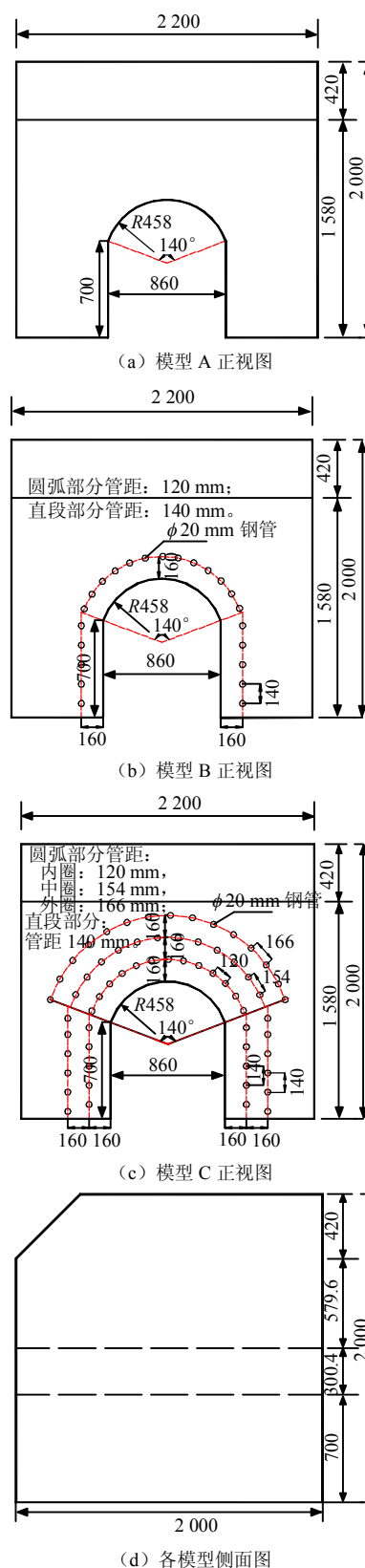


图 1 各模型正视图和侧面图(单位: mm)
Fig.1 Front and side views of three models (unit: mm)

2.3 试验步骤

(1) 应变计在洞口壁周具体布置如图 2 所示。

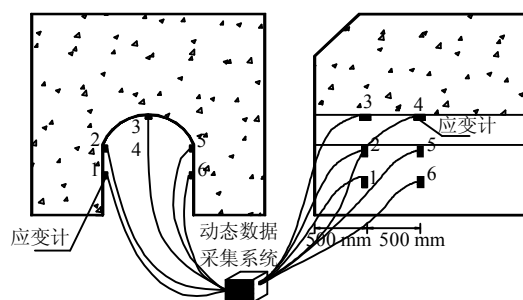


图 2 应变计的布置

Fig.2 Layout of strainmeters

(2) 现场仪器设备的安装与调节, 应变计与动态数据采集器的连接。

(3) 坑道拱顶抗爆性能, 采用两次爆炸来模拟。

第 1 次, 动力响应测试试验。为了更好地测量爆炸荷载下, 模拟岩体的整体动力响应情况, 根据爆炸作用理论, 采取埋入式钻孔非耦合装药。炸药采用 2[#]岩石乳化炸药, 装药量为 75 g, 炸药密度 1.30 g/cm³, 钻孔直径为 4 cm, 药包直径为 3.2 cm, 药包埋入深度为顶部位于孔深 10 cm 处, 采用碎土孔口堵塞压实。起爆装置的安装严格遵循爆破操作手册。其具体装药布置如图 3 所示。起爆后, 立即进行数据 (各观测点在冲击荷载作用下的应变) 的采集记录。

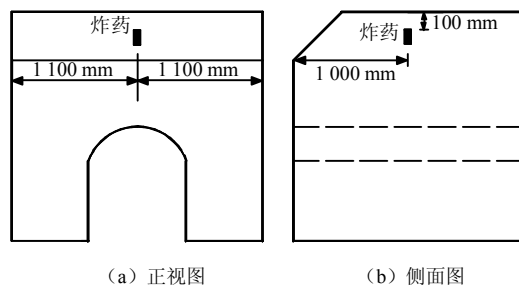


图 3 第 1 次爆破点布置

Fig.3 Layout of burst point in the first blasting

第 2 次, 结构破坏性试验。在第 1 次试验的基础上, 采取埋入式钻孔非耦合装药。炸药采用 2[#]岩石乳化炸药, 装药量为 150 g, 装药密度为 1.30 g/cm³, 钻孔直径为 4 cm, 药包直径为 3.2 cm, 药包埋入深度为顶部位于孔深 30 cm 处。在结构顶部安装炸药及电起爆装置。其具体装药布置如图 4 所示, 对结构进行破坏性试验, 看其整体破坏情况。

2.4 试验测量系统组成

本试验采用了动态量测技术, 运用动态数据采集系统, 对模型的各观测点的应变进行测量和采集, 测量系统如图 5 所示。

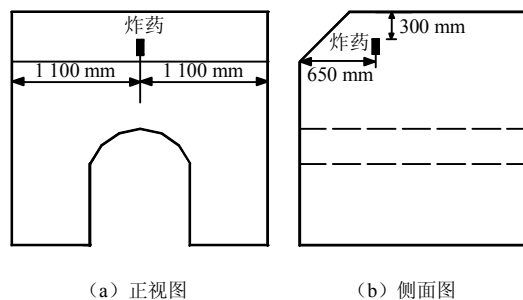


图 4 第 2 次爆破点布置

Fig.4 Layout of burst point in the second blasting



图 5 试验量测系统

Fig.5 Test measurement system

3 试验结果及分析

3.1 动力响应测试试验

根据 3 个模型各观测点的应变-时程曲线 (见图 6), 得出各观测点在爆炸荷载下的应变最大幅值如表 1 所示。

表 1 各观测点最大和最小应变值
Table 1 Maximum and minimum strains of measuring points

模型 编号	各测点应变最大幅值/ 10^{-6}					
	1	2	3	4	5	6
A	57.2	116.6	125.8	112.1	176.7	123.1
	-50.4	-132.5	-129.6	-93.5	-592.0	-181.2
B	86.2	61.6	153.1	511.7	145.1	171.0
	-141.3	-53.9	-244.6	-275.2	-159.8	-131.5
C	129.8	244.8	111.7	154.4	232.2	470.4
	-324.0	-341.8	-293.5	-258.7	-184.3	-427.3

注: 本表中数据正为拉应变, 负为压应变。

由表 1 和图 6 可以看出:

(1) 通过管棚加固后, 各观测点的应变幅值相应增大, 说明了模拟岩体的整体性得到了增强、强度得到了提高, 使得应力波的传播耗能减少, 衰减减缓, 更利于应力波的传播。

(2) 随着管棚层数的增加, 模拟围岩各观测点之间的应变幅值差距减小, 说明了管棚加固层使得围岩拱体的受力更均匀。

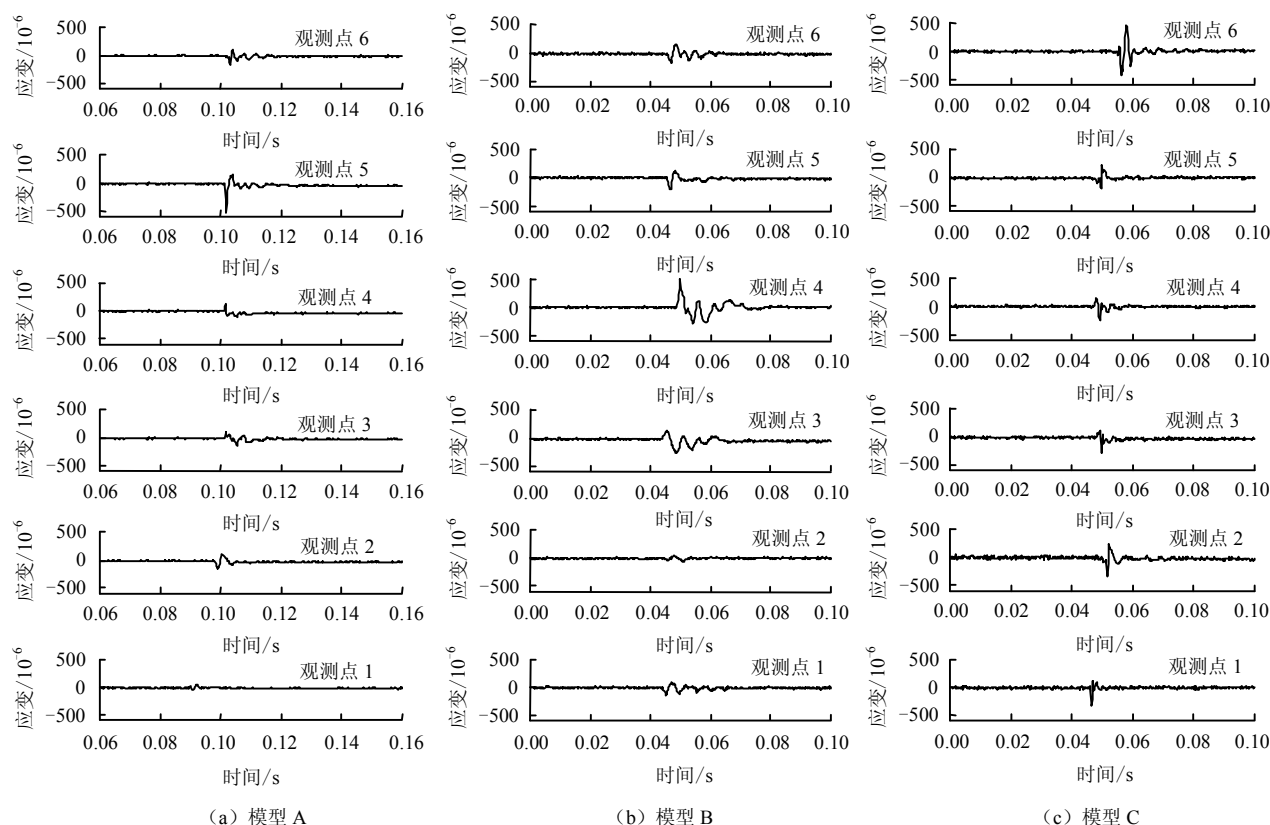


图 6 各观测点应变-时程曲线

Fig.6 Strain time-history curves of measuring points

(3) 随着管棚层数的增加,拱顶观测点 3、4 的应力幅值,在同一模型中与其他各点相比,明显降低;且不同模型相比,点 3、4 其相应点的压应变相对增大,拉应变相对减小,说明了管棚层的存在使得拱结构受力更合理,更能发挥其结构的抗压优势。

3.2 破坏性试验

经爆破后,3 个模型的破坏形式大致相同,但破坏程度不同,破坏具体情况如下。

3.2.1 整体破坏情况

3 个模型的破坏形式大致相同,弹坑大致成漏斗形,在洞口上部外表面有 3 条主要裂缝,在拱顶

位置出现不同程度的开裂。A、B、C 3 个模型的整体破坏情况如图 7 所示。

3.2.2 洞口外表面破坏情况

3 个模型在洞口外表面的破坏形式基本相同。3 个模型都有 3 条明显的裂缝,两边两条成“八”字分布,向洞口两侧延伸;中间一条,向洞口顶部延伸。但裂纹宽度和规模有较大不同,如表 2 所示。可以看出,随着管棚层数的增多,可以有效地降低裂缝的宽度,整体性增强,抗爆性能也随之增强。

3.2.3 拱顶破坏情况

坑道拱顶的破坏情况如图 8 所示。



(a) 模型 A

(b) 模型 B

(c) 模型 C

图 7 各模型整体破坏情况

Fig.7 Blasting damages for three models

表 2 坑道口部外表面裂缝对比
Table 2 Crack contrasts on outside surfaces
of tunnel entrance

模型 编号	裂缝 位置	裂缝最大宽度 /mm	裂缝平均宽度 /mm
A	左侧	12	4
	中间	40	11
	右侧	23	12
B	左侧	5	3
	中间	9	3
	右侧	30	14
C	左侧	2	1
	中间	3	2
	右侧	3	2



(a) 模型 A



(b) 模型 B



(c) 模型 C

图 8 各模型拱顶破坏情况

Fig.8 Arch-crown damages of three models

由图可以看出, 3 个模型拱顶破坏模式类似, 在模型拱顶沿洞轴有 1~2 条主裂缝, 沿主裂缝分布有网状细小裂缝。裂缝的规模如表 3 所示。由表可以看出, 随着管棚层数的增多, 主裂缝最大宽度由 25 mm 减小到 3 mm, 裂缝条数由 14 条减少到 3 条,

主要破坏范围从 1.55 m 减小到 0.45 m。

表 3 坑道拱顶裂缝对比
Table 3 Crack contrasts on arch-crowns
of tunnel entrance

模型 编号	破坏范围 (距洞口) /m	裂缝类型	裂缝最 大宽度 /mm	裂缝平 均宽度 /mm	裂缝 条数
A	1.55	主裂缝	25	16.0	1
		网状裂缝	24	11.0	13
B	1.15	主裂缝	4	1.5	2
		网状裂缝	1	0.5	6
C	0.45	主裂缝	3	1.0	1
		网状裂缝	0.3	0.1	2

3.2.4 弹坑情况

洞口模型顶部爆炸成坑。弹坑可近似看成倒锥形。模型 A 为倒圆锥形, 模型 B、C 为近似倒等腰三棱锥形, 大小如表 4 所示。随着管棚层数的增加, 模型顶部弹坑体积随之减小, 由 0.12 m^3 减小到 0.05 m^3 。

表 4 弹坑大小对比
Table 4 Contrasts of crater sizes

模型 编号	弹坑形状	弹坑口尺寸 /m	弹坑深度 /m	弹坑体积 / m^3
A	近似倒圆锥	直径 1.04	0.43	0.12
B	近似倒等腰三棱锥	底 1.15	0.32	0.08
		高 1.35		
C	近似倒等腰三棱锥	底 0.95	0.26	0.05
		高 1.25		

4 结 论

(1) 管棚超前支护能有效加固坑道围岩, 拱顶受力均匀、合理, 延性变好。

(2) 随着管棚层数增加, 整体性增强, 口部表面破坏明显减弱, 裂缝最大宽度由 40 mm 减小到 3 mm, 裂缝平均宽度由 11 mm 减小到 2 mm。

(3) 随着管棚层数增加, 拱顶破坏明显减弱, 主裂缝最大宽度由 25 mm 减小到 3 mm, 网状裂缝最大宽度由 24 mm 减小到 0.3 mm, 裂缝数从 14 条减少到 3 条, 破坏范围从 1.55 m 减小到 0.45 m。

(4) 随着管棚层数增加, 模型顶部爆坑体积明显减小, 由 0.12 m^3 减小到 0.05 m^3 。

研究认为, 管棚超前加固, 能有效地将爆炸荷载的破坏作用控制在管棚加强层之外, 拱部抗打击能力明显增强。

参 考 文 献

- [1] MUSSO G. Jacked pipe provides roof for underground

- construction in busy urban area[J]. **Civil Engineering, ASCE**, 1979, 49(11): 79—82.
- [2] VOLKMANN G, SCHUBERT G. Optimization of excavation and support in pipe roof supported tunnel sections[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, 21(3/4): 404—410.
- [3] 陈金水. 漳龙高速公路龙门隧道的设计与施工[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 237—240.
CHEN Jin-shui. Design and construction of Longmen tunnel of Zhanglong freeway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(2): 237—240.
- [4] 董新平, 周顺华, 胡新朋. 软弱地层管棚法施工中管棚作用空间分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 841—846.
DONG Xin-ping, ZHOU Shun-hua, HU Xin-peng. 3D analysis of function of pipe roof applied in soft ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(7): 841—846.
- [5] HISATAKE M, OHNO S. Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2008, 23(2): 120—127.
- [6] 贾剑青, 王宏图, 刘大鹏, 等. 隧洞地表稳定性监测及计算分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3765—3770.
JIA Jian-qing, WANG Hong-tu, LIU Da-peng, et al. Monitoring and analysis of tunnel surface stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3765—3770.
- [7] 贾金青, 王海涛, 涂兵雄, 等. 管棚力学行为的解析分析与现场测试[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1858—1864.
JIA Jin-qing, WANG Hai-tao, TU Bing-xiong, et al. Analytical approach and field monitoring for mechanical behaviors of pipe roof reinforcement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1858—1864.

上接第 3218 页

- [7] SINGH A, MITCHELL J K. General stress-strain-time function for soils[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, 1968, 94(1): 21—46.
- [8] YIN Jian-hua, ZHU Jun-gao. Elastic visco-plastic consolidation modeling of soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(3): 360—365.
殷建华, 朱俊高. 软土弹黏塑性固结模拟[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 360—365.
- [9] MESRI G, EEHRES-CORDERO E, SHIELDS D R, et al. Shear stress-strain-time behaviour of clays[J]. **Geotechnique**, 1981, 31(4): 537—552.
- [10] 殷德顺, 任俊娟, 和成亮, 等. 一种新的岩土蠕变模型元件[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1899—1903.
YIN De-shun, REN Jun-juan, HE Cheng-liang, et al. A new creep model element for geo-materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1899—1903.
- [11] MESRI G. New design procedure for stability of soft clays[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1975, 101(4): 409—412.
- [12] KABBAJ M, TAVENAS F, LEROUUEILS. In situ and laboratory stress-strain relationships[J]. **Geotechnique**, 1988, 38(1): 83—100.
- [13] 杨爱武. 结构性吹填软土蠕变特性及其本构模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [14] 罗汀, 姚仰平, 侯伟. 土的本构关系[M]. 北京: 人民交通工业出版社, 2010.
- [15] 方安平, 叶卫平. Origin 8.0 实用指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [16] PERZYNA P. fundamental problems in visco-plasticity[C]//Recent Advances in Aoolied Mechanics. New York: Acedemic Press, 1966.
- [17] 孙钧. 岩土材料蠕变力学及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.