

# 特深基坑排桩冻土墙围护结构的 冻胀力模型试验研究

姚直书, 程桦, 夏红兵

(安徽理工大学 土木工程系, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇基坑深 29 m, 平面尺寸为 69 m×51 m, 采用排桩冻土墙围护结构, 为解决该结构设计中冻胀力取值难题, 进行深基坑排桩冻土墙围护结构冻胀力物模试验研究。首先根据相似理论, 推导模拟试验的相似准则; 然后, 进行模型设计和制作; 最后, 通过模拟试验, 首次得到没有卸压孔时, 排桩所受水平冻胀力为 0.238 MPa, 当在冻土墙外侧施工卸压孔时, 排桩所受的水平冻胀力平均值为 0.133 MPa。并给出了随着基坑开挖的卸压作用, 桩上受到的水平冻胀力呈现减小趋势, 最大衰减率达 40%。从而为这种新型围护结构的工程应用提供设计依据。

**关键词:** 土力学; 特深基坑; 排桩; 冻土墙; 水平冻胀力; 模型试验

**中图分类号:** TU 41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)02 - 0415 - 06

## MODEL TEST STUDY ON FROST-HEAVING FORCE IN RETAINING STRUCTURE OF ROW-PILES AND FROZEN SOIL WALL OF SUPER DEEP FOUNDATION PIT

YAO Zhishu, CHENG Hua, XIA Hongbing

(Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** The retaining structure of row-piles and frozen soil wall will be adopted in the south anchor deep foundation pit of south branch suspension cable of Runyang Bridge, which is 29 m deep and 69 m×51m in plan. To solve the problem of determining the frost-heaving force in design, model test is made to study the frost-heaving force in the retaining structure of row-piles and frozen soil wall of super deep foundation pit. First, the similarity criterion of the model test was deduced according to similarity theory. Then the design and model construction are carried out. Finally, the horizontal frost-heaving stress against row-piles without pressure relief holes is 0.238 MPa, which is obtained by test firstly. And the average horizontal frost-heaving stress against row-piles with pressure relief holes is 0.133 MPa. The horizontal frost-heaving force is attenuated in the process of excavation with the maximum attenuation rate being 40 percent. The research results can provide designing basis for this kind of retaining structure.

**Key words:** soil mechanics; super deep foundation pit; row-pile; frozen soil wall; horizontal frost-heaving force; model test

**收稿日期:** 2006 - 04 - 03; **修回日期:** 2006 - 05 - 31

**基金项目:** 安徽省自然科学基金资助项目(99047106)

**作者简介:** 姚直书(1963 -), 男, 1984 年毕业于安徽理工大学矿山建设专业, 现任教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: zsyao@aust.edu.cn

# 1 引言

润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇位于镇江市润州区蒋乔镇五摆渡村大伍西组南侧，锚碇中心距江边大堤 540 m。锚碇基础为矩形结构，平面尺寸为 69 m×51 m(长×宽)，基础顶面高程 +3 m，基底高程 -26 m。锚碇基坑开挖深度为 29 m，穿过的土层自上而下分别为灰色亚黏土、淤泥质亚黏土夹薄层粉砂或粉砂互层、灰色粉细砂、中细砂，底部局部为中粗砂，并进入风化基岩内。因此，该基坑具有深度大、穿过的地层既有软弱土层又有岩层、且富含水等特点。所以，它的施工难度大、技术要求高，选择合理的施工方法至关重要。

悬索桥锚碇深基坑通常采用沉井法或地下连续墙法施工，这两种方法虽然均是成熟的施工方法，但对于本深、大基坑的施工尚还存在着一定的技术难题。如对于沉井法，由于基底岩层倾角较大，当沉井下沉至基岩位置时易出现偏斜。且该沉井规模较大、穿过土层又过深，因此往往会出现下沉困难等；对于地下连续墙法，当进入基岩后，嵌岩成槽较为困难。而在厚砂层中，会出现槽壁稳定性差等问题<sup>[1]</sup>。

排桩冻土墙围护深、大基坑是一种全新的支护结构<sup>[2]</sup>。其设计思想为：排桩加内支撑作为承载结构，利用人工冻结地层的方法，在排桩外侧四周形成冻土墙止水帷幕。设计时冻土墙不参与围护结构的受力计算，排桩所受的外荷载为水土压力、地面超载和冻胀力。这样受力体系清晰且偏于安全。该支护结构充分利用了冻土墙具有极好封水性能和钻孔灌注桩易于嵌岩等优点，是排桩式围护结构与冻结工法的有机结合，是我国岩土工程施工方法的一项技术创新。

在排桩冻土墙围护结构中，先施工好排桩和压顶梁，然后人工冻结土体形成一圈冻土墙。这样，在土层冻结过程中，冻土墙将产生体积膨胀，而内侧先施工好的排桩会阻止冻土墙膨胀变形，从而使得排桩受到一个较大的作用力(即水平冻胀力)。针对冻胀这一自然现象，国内外学者<sup>[3~6]</sup>都进行了大量的基础性研究，取得了一系列成果，但由于土体冻胀力影响因素十分复杂，目前在结构设计中还难以精确计算，主要靠工程经验

和现场实测。由于排桩冻土墙围护结构为国内外首次运用于深、大基坑支护，目前尚缺少冻土墙形成过程中排桩所受冻胀力数值的研究资料，而这又是本基坑围护结构设计时必不可少的参数。为了科学、合理地设计该围护结构，确保工程万无一失，本文就排桩冻土墙围护结构中的冻胀力问题进行了模型试验研究。

# 2 试验方案

初步设计构思钻孔灌注桩直径  $\phi 1.5$  m，排桩中心线组成的矩形平面尺寸为 70.5 m×51.0 m，桩间距为 1.643 m。冻结孔位于排桩外侧，二轴线相距 1.4 m，冻结孔间距也为 1.643 m，平面上与灌注桩呈插花布置，冻结壁厚 1.3 m，深 40 m，平均温度 -7 ℃。设计中采取在冻土墙外边缘施工卸压孔措施，使冻土体积膨胀少受约束而减小作用在排桩上的冻胀力<sup>[7, 8]</sup>。卸压孔位于冻结孔外侧，二轴线相距 1.3 m，卸压孔直径 0.25 m、间距为 0.825 m。模型具体尺寸见图 1 所示。

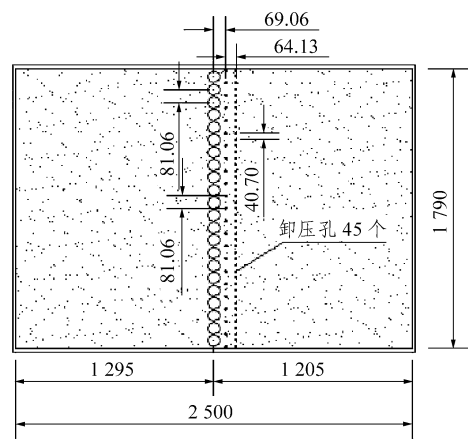


图 1 模型平面尺寸示意图(单位: mm)  
Fig.1 Diagram of model plane(unit: mm)

针对围护结构设计中存在的冻胀力取值难题，本次物模研究主要进行以下 3 个试验：

试验一：无卸压孔情况下，冻土墙形成过程中，排桩受到的水平冻胀力大小；

试验二：施工卸压孔情况下，冻土墙形成过程中排桩受到的水平冻胀力大小；

试验三：基坑开挖过程中，水平冻胀力的变化规律。

为了确保试验结果的可靠性，每个试验都先

后进行二次以上。

### 3 相似准则确定

#### 3.1 冻结温度场模拟

冻土壁的形成是一个热传导过程，它受热传导方程、边界条件和初始条件所制约。由数理方程可得相似准则方程<sup>[9]</sup>：

$$F(F_0, K_0, R, \theta) = 0 \quad (1)$$

式中： $F_0$ 为傅里叶准则，且 $F_0 = a\tau/r^2$ ，其中 $a$ 为土体导温系数， $\tau$ 为时间， $r = \xi$ 为冻结壁面位置； $K_0$ 为柯索维奇准则，且 $K_0 = B/(Ct)$ ，其中 $B$ 为单位土体冻结时放出的潜热， $C$ 为比热， $t$ 为温度； $\theta$ 为温度准则，可用 $t_0/t_y$ ， $t_d/t_y$ ， $t/t_y$ 表示，其中 $t_0$ 为岩土初始温度， $t_y$ 为盐水温度， $t_d$ 为冻结温度； $R$ 为几何准则，可用 $\xi/r$ 表示。

由于试验用土取自施工现场，则模型材料为原材料，其相似常数 $c_a = 1$ ， $c_c = 1$ ，含水率相同，结冰时放出的潜热相等，可得相似指标为

$$c_r = c_t^2 \quad (2)$$

$$c_i = 1 \text{ 即 } t = t' \quad (3)$$

式(3)表示模型中各点温度与原型各对应点温度相等。所以，要使模型与原型冻结温度场相似，在模型设计中主要应满足冻土壁的几何尺寸、平均温度、地层性质相似。

#### 3.2 水迁移模拟

冻结过程发生水分迁移现象，其实质是冻结过程的湿度场问题。由数理方程可得相似准则：

傅里叶准则 $F_h = b\tau/r^2$ ， $b$ 为导湿系数；几何准则 $R = H/r$ ；湿度准则：

$$\Theta = h/h_0 \quad (4)$$

式中： $h$ 为湿度。由式(4)可知，水迁移过程与导热过程在数学上是相似的，两者均有傅里叶准则。因此在几何相似条件下，只要温度场相似，湿度场可以达到“自模拟”而相似<sup>[10]</sup>。

#### 3.3 力的模拟

根据排桩和冻土壁的实际受力，罗列参数得方程：

$$F(\sigma, E, \varepsilon, \delta, b, \mu, \rho, H, A, P) = 0 \quad (5)$$

式中： $\sigma$ 为应力， $E$ 为变形模量， $\varepsilon$ 为应变， $\delta$ 为

变形量， $b$ 为冻结壁厚度， $\mu$ 为泊松比， $\rho$ 为密度， $H$ 为深度， $A$ 为侧压系数， $P$ 为水平压力。

采用量纲分析法可得相似准则<sup>[11]</sup>为： $\sigma/E$ ； $P/E$ ； $P/\rho H$ ； $\varepsilon$ ； $\mu$ ； $A$ ； $\delta/b$ 。

由于采用了现场原状土 $C_E = 1$ ，则有

$$\left. \begin{aligned} C_\sigma &= C_p = C_E = 1 \\ C_\varepsilon &= C_\mu = 1 \\ C_\delta &= C_l \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)要求模型应力、压力与现场相等。又因压力 $P = \rho g H$ ，而 $C_p = 1$ ，则 $C_\rho = 1/C_l$ ， $\rho' = \rho C_l$ ，这就是说模型土体密度要增大 $C_l$ 倍，故无法找到这种材料，因此，在模型试验中通过施加面荷载来模拟重力作用。即试验中施加到模型上的面荷载要与原型相一致，则试验中测得的应力值即为原型的应力值<sup>[12, 13]</sup>。

## 4 模型设计及制作

#### 4.1 模型尺寸设计

考虑到南锚碇基坑围护结构的对称性、边界条件、试验台座尺寸、开挖问题和所要研究问题的主要性质，最后确定选用基坑长边的一半结构进行模拟试验。本次模拟试验的几何相似比 $C_l = 20.27$ ，模型平面尺寸见图 1 所示。实际基坑开挖深度为 29 m，由已确定的几何相似常数，模型土体高度取为 1 430 mm。根据上面确定的模型尺寸，加工了刚性模型箱体，试验系统如图 2 所示。

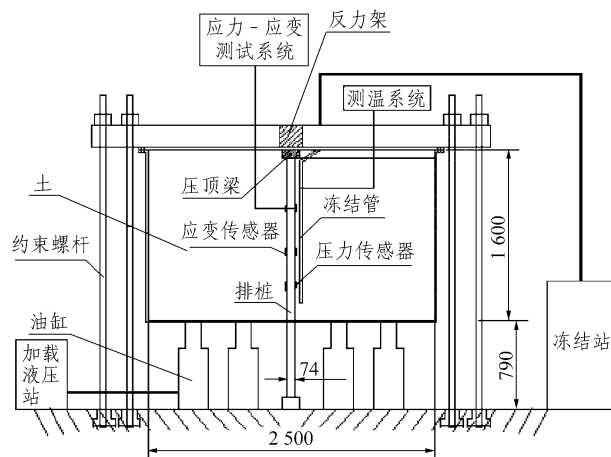


图 2 模型试验系统图(单位: mm)

Fig.2 Model test system(unit: mm)

### 4.2 桩和卸压孔的模拟

根据分析可知，作用在桩上的水平冻胀力大小除与温度场、湿度场、地压、土层性质及其指标有关外，还与桩的挠度大小有关，即与桩的刚度有关。为此，在满足桩的几何相似比的情况下，还应按等刚度要求设计模型桩。现场为钢筋混凝土桩，混凝土强度等级为 C30，模型按照上述等刚度原则进行模拟。模型填土时，采用  $\phi 14$  mm 圆钢按设计尺寸固定在土中，等填土结束后，拔出钢筋，插入 PVC 软管，泵入压力水，以平衡土压力，防止塌孔。

### 4.3 土层模拟

模型试验用土取自施工工地，根据钻孔柱状图，选取了具有代表性的 3 种土层，其具体指标如表 1 所示。

表 1 土层主要物理参数  
Table 1 Main physical parameters of soils

土层名称	高程 /m	土性	含水量 /%	相对密度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )
淤泥质亚黏土	+3~-12	原状土	38.4	17.9
		扰动土	37.9	18.2
亚黏土与粉砂	-12~-19	原状土	29.7	18.5
		扰动土	30.4	18.2
粉细砂	-19~-26	原状土	26.2	19.2
		扰动土	25.8	19.6

模型土填入时先按照表 1 的含水率进行配制，然后分层填入模型箱内，每层厚度控制在 100 mm 左右，用振捣器压实并控制其密实度，每填满一层，用环刀取样测其含水率和密实度，以确保与现场一致。

## 5 试验加载与测试系统

### 5.1 试验加载

试验采用从模型下部施加竖向荷载，通过刚性箱体限制土体侧向压缩变形而产生水平侧向压力，其大小及分布规律是在理论计算的基础上，通过布设在桩上和土中的压力传感器进行监控加载值。

### 5.2 测试系统

本次模型试验测试有温度测试、压力测试和

应变测试 3 个系统组成，各分为 3 个测试水平，分别位于 3 层土的中部。其中温度测试采用热电偶和数据采集器，每一水平沿桩的走向布置 5 个测试断面，每断面布置 5 个热电偶测点，位于温度场的主、界面上，3 个水平共布置热电偶测点 75 个；为了测量试验过程中桩上所受的冻胀力，在靠冻土壁一侧的桩上布置了应变式压力传感器，压力传感器在填土前安设在桩上，每一水平布置 10 个压力传感器，在相应位置的土中埋设水平与垂直压力传感器各 2 个，3 个测试水平共埋设压力传感器 42 个；另外，在桩的表面粘贴了电阻应变片，这不但可求得桩上所受的冻胀力大小，而且还可了解到桩的实际应力应变情况，以评价桩的安全性。

## 6 试验结果及其分析

在模型箱中填好土体，等土体基本稳定后即可进行试验。正式试验前，应调试好各系统。其中，有卸压孔试验于 2001 年 5 月 4 日 22 时正式开始冻结，至 5 月 5 日 3 时冻结壁平均温度达到  $-7$   $^{\circ}\text{C}$ ，接着进行基坑开挖，完成第 1 次试验，随后进行了第 2 次重复试验；无卸压孔的试验于 2002 年 5 月先后进行了 2 次。在整个冻结试验过程中，每 10 min 测量一次，获得了大量的测试数据。

### 6.1 冻结温度场分布规律

在未开冷冻机之前，采用热电偶温度计记录下土体的初始温度，然后开始冻结，并定时测量。在整个试验过程中，采用热电偶监控温度场变化，当冻结壁内平均温度达到  $-7$   $^{\circ}\text{C}$  时，3 个测试水平的温度分布规律见图 3。

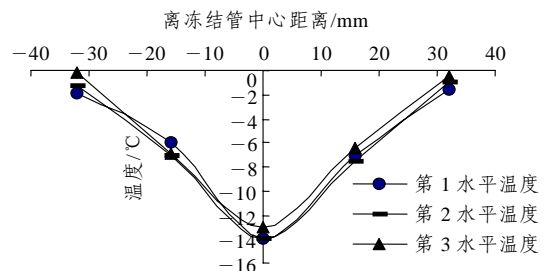


图 3 冻结温度场分布规律

Fig.3 Temperature distribution of frozen soil wall

由图 3 可知，3 个水平温度变化曲线均以冻

结管为最低温度点, 呈近似对称上凹形曲线分布, 其中第 1 水平平均温度较低, 第 2 水平次之, 第 3 水平较高。其主要原因为: 在冻结初期, 因热交换强烈, 盐水温度沿冻结管呈上下高分布所致, 进入维护冻结后, 进、回路盐水温差减小, 同一时间的 3 个水平平均温度趋于一致。

## 6.2 水平冻胀力大小

通过对有、无卸压孔两个试验中 3 个测试水平桩上压力传感器的测试数据进行处理, 得到在冻土壁平均温度达到  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 桩上所受到的水平冻胀力如表 2 所示。

表 2 水平冻胀力试验实测、平均值  
Table 2 Average horizontal frost-heaving force

位置	土层性质	试验实测值/MPa	
		无卸压孔时	有卸压孔时
第 1 水平	淤泥质亚黏土	0.275	0.146
第 2 水平	亚黏土与粉砂互层	0.236	0.127
第 3 水平	粉细砂	0.203	0.126
平均值		0.238	0.133

由表 2 可知, 在冻结过程中, 冻结排桩围护结构的桩上所受平均水平冻胀力可达  $0.238\text{ MPa}$ , 这是相当大的, 其中淤泥质黏土层最大可达  $0.275\text{ MPa}$ , 亚黏土与粉砂互层次之, 粉细砂最小。这主要是由土层本身的冻胀特性所决定的。相反, 在冻土墙外侧施工了卸压孔后, 桩上受到的平均水平冻胀力只有  $0.133\text{ MPa}$ 。由此可知, 在冻土墙外侧施工了卸压孔后, 当土层冻结膨胀时, 由于有了卸压孔的卸压作用, 从而可使桩上所受的冻胀力大大减小。因此, 在实际工程中, 必须要采用卸压措施, 减少冻胀力, 防止钻孔灌注桩受到破坏。

## 6.3 水平冻胀力的变化规律

桩、压顶梁和支撑均按等刚度设计。试验时, 首先进行冻结, 待冻结壁平均温度达到  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 并稳定一段时间后, 再进行开挖。开挖时严格分层进行, 控制开挖速度。整个试验过程中, 每隔  $10\sim 20\text{ min}$  测量一次, 并通过测试系统监控试验过程。通过对桩上埋设的压力传感器测试数据整理可得, 水平冻胀力随基坑开挖过程的变化规律见图 4。

由图 4 可知, 在积极冻结期, 水平冻胀力达

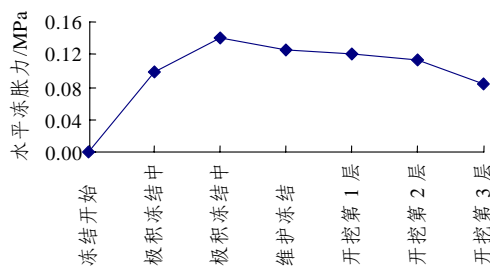


图 4 水平冻胀力随基坑开挖的变化曲线

Fig.4 Change curve of frost-heaving force with excavation

到最大值。在基坑开挖过程中, 因排桩呈跳跃性的变形和卸压, 水平冻胀力减小, 当第 3 层开挖结束时, 冻胀力已由原来  $0.133\text{ MPa}$  减小到了  $0.0798\text{ MPa}$ , 衰减率达 40%。

## 7 结 论

通过以上大型物理模拟试验, 可得到以下主要结论:

(1) 在排桩冻土墙围护结构的冻结过程中, 没有卸压孔时, 试验得到的平均水平冻胀力为  $0.238\text{ MPa}$ ; 当在冻土墙外侧施工卸压孔时, 试验得到的平均水平冻胀力为  $0.133\text{ MPa}$ 。由此可知, 在冻土墙外侧设置卸压孔, 可有效地衰减土体冻胀力, 确保基坑安全可靠。

(2) 随着基坑开挖的卸压作用, 桩上受到的水平冻胀力呈现减小趋势, 最大衰减率达 40%。

(3) 本次室内模型试验是结合国内、外首次采用排桩冻结新技术围护深大基坑工程进行的, 试验成果为本工程的设计和施工提供了科学的依据。

## 参考文献(References):

- [1] 陈忠汉, 程丽萍. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.(CHEN Zhonghan, CHENG Liping. Deep foundation pit engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.(in Chinese))
- [2] 张志荣, 李海. 冻结排桩法在润扬大桥南锚碇基础中的应用[J]. 施工技术, 2003, 32(8): 6-8.(ZHANG Zhirong, LI Hai. Application of freezing and row of piles method in south anchor foundation pit of Runyang Bridge[J]. Construction Technology, 2003, 32(8): 6-8.(in Chinese))

- [3] 崔成汉, 贺长庚. 冻土工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002. (CUI Chenghan, HE Changgeng. Frozen ground engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.(in Chinese))
- [4] 刘鸿绪, 朱卫东, 朱广祥, 等. 再论冻胀量与冻胀力之关系[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 63 - 66.(LIU Hongxu, ZHU Weidong, ZHU Guangxiang, et al. Research on the relationship of frost-heaving forces and amount of frost-heaving again[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(1): 63 - 66.(in Chinese))
- [5] 李 萍, 徐教祖, 陈峰峰. 冻结缘与冻胀模型的研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1): 90 - 95.(LI Ping, XU Xiaozu, CHEN Fengfeng. State and progress of research on the frozen fringe and frost heave prediction models[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(1): 90 - 95.(in Chinese))
- [6] BROUCHKOV A. Experimental study of influence of mechanical properties of soil on frost heaving forces[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(Supp.1): 26 - 34.
- [7] 李洪升, 王悦东, 李亚民. 冻土材料非线性断裂模型的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1 391 - 1 395.(LI Hongsheng, WANG Yuedong, LI Yamin. Experimental study on nonlinear fracture models of frozen soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1 391 - 1 395. (in Chinese))
- [8] 余占奎, 黄宏伟, 王如路, 等. 人工冻结技术在上海地铁施工中的应用[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 550 - 556.(YU Zhankui, HUANG Hongwei, WANG Rulu, et al. Application of the artificially ground freezing method to Shanghai metro engineering[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(4): 550 - 556.(in Chinese))
- [9] 崔广心. 冻结法凿井的模拟试验原理[J]. 中国矿业大学学报, 1989, 18(1): 59 - 68.(CUI Guangxin. Simulation test theory of freezing method shaft sinking[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1989, 18(1): 59 - 68.(in Chinese))
- [10] 崔广心. 相似理论与模型试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.(CUI Guangxin. Similarity theory and model test[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [11] 魏先祥, 赖远明. 相似方法的原理及应用[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001.(WEI Xianxiang, LAI Yuanming. Theory and application of similarity method[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2001.(in Chinese))
- [12] 张志强, 何 川. 用冻结法修建地铁联络通道施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3 211 - 3 217.(ZHANG Zhiqiang, HE Chuan. Study on construction of cross connection of shield tunnel and connecting aisle by freezing method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3 211 - 3 217.(in Chinese))
- [13] 孙星亮, 汪 稔, 胡明鉴. 冻土弹塑性各向异性损伤模型及其损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3 517 - 3 521.(SUN Xingliang, WANG Ren, HU Mingjian. An elastoplastic anisotropic damage model for frozen soil and its damage analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3 517 - 3 521.(in Chinese))