

DOI: 10.11779/CJGE201808014

# 拱北隧道“钢管-冻土”复合结构承载力试验研究

胡向东<sup>1, 2</sup>, 邓声君<sup>\*1, 2</sup>, 汪洋<sup>3</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 苏州电力设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215400)

**摘要:** 管幕冻结法作为一种新型的隧道预支护工法, 目前已被应用于港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道施工中。管幕冻结法是利用顶管技术在隧道四周顶入大直径顶管, 并利用冻结法将顶管之间的土体冻结起来, 形成水密性的预支护结构。为了研究钢管-冻土复合结构在确保封水时的极限承载力和变形能力, 以探求合理冻土温度, 采用冻土单轴压缩试验机, 对4种不同冻土温度进行钢管-冻土复合结构模型试验, 并提出了封水条件下的极限状态判据, 通过分析荷载-位移曲线, 得到复合结构在封水条件下的极限承载力和变形能力。试验结果表明: 温度较高时, 冻土协调变形能力较好, 但由于冻土本身强度较低, 复合结构在封水条件下的极限承载力和变形能力较差; 类似地, 冻土温度较低时, 强度较大, 但由于冻土跟随钢管协调变形能力较差, 在封水条件下的极限承载力和变形能力也较差; 当温度适中时, 冻土跟随钢管协调变形能力和冻土本身强度均处于相对理想状态, 此时复合结构在封水条件下的极限承载力和变形能力相对较强, 即在确保封水性能时所能承受变形的能力和极限荷载均较大。试验研究确定了该理想温度约为-10℃, 该温度在拱北隧道管幕冻结实际施工中被采用, 对类似工程施工具有一定的参考价值。

**关键词:** 管幕冻结法; 拱北隧道; 港珠澳大桥; 钢管-冻土复合结构; 模型试验; 冻结温度

**中图分类号:** TU449      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2018)08-1481-10

**作者简介:** 胡向东 (1961-), 男, 副教授, 主要从事人工地层冻结施工理论与技术方面的研究工作。E-mail: anton.geotech@tongji.edu.cn。

## Mechanical tests on bearing capacity of steel pipe-frozen soil composite structure applied in Gongbei Tunnel

HU Xiang-dong<sup>1, 2</sup>, DENG Sheng-jun<sup>1, 2</sup>, WANG Yang<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Suzhou Electric Power Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215400, China)

**Abstract:** The freezing-sealing pipe roof (FSPR) as an innovative pre-supporting method in tunnel engineering has been applied to Gongbei Tunnel of Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge, which is the first application in the world. The definition of FSPR is that large-diameter steel pipes are laid out in a circle around the cross section of the tunnel in advance, and then the artificial ground freezing method is adopted to the freeze soil between steel pipes to form waterproof curtain. To study the bearing capacities of the steel pipe-frozen soil composite structure and the appropriate temperature of frozen soil between steel pipes in the actual project, the mechanical tests on steel pipe-frozen soil composite structure are conducted by using a uniaxial compression testing system of frozen soil with four different temperatures. The criterion for the ultimate deformation state of steel pipe-frozen soil composite structure under waterproofing is proposed. The bearing and deformation capacities of the composite structure under waterproofing are judged from the load-displacement curves in the tests. The results show that at relatively higher temperature, the deformation capacities of frozen soil following the steel pipes are better, but the bearing and deformation capacities of composite structure are relatively poor due to the low strength of frozen soil. Similarly, at relatively lower temperature, the results are relatively poor due to the poor plasticity of the frozen soil. When the temperature is moderate, the bearing and deformation capacities of composite structure are relatively strong, that is, the capability to withstand deformation and to bear the ultimate load is the largest. The ideal temperature of the frozen soil between steel pipes is about -10℃ and it has been adopted in the actual construction of

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478340); 交通运输部建设科技项目(2013318J11300)

收稿日期: 2017-05-12

\*通讯作者(E-mail: 1310213@tongji.edu.cn)

Gongbei Tunnel, which is of reference value for similar construction.

**Key words:** freezing-sealing pipe roof; Gongbei tunnel; Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge; steel pipe-frozen soil composite structure; model test; freezing temperature

## 0 引言

管幕冻结法作为一种新型的隧道预支护工法,被应用于港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道施工中,这是该工法在国际上的首次应用<sup>[1-2]</sup>。管幕冻结法是指在隧道断面四周预先布设大直径钢管形成管幕,再采用人工地层冻结法将钢管之间的土体冻结形成冻土止水帷幕,构成“管幕-冻土”复合结构,起到既承载又封水的作用,保障隧道开挖时周围土体的稳定,其结构如图1所示,冻土主要起到封水作用,管幕主要起承载作用<sup>[3]</sup>。

与之类似的是“管棚-冻土”复合结构,两者主要区别在于钢管的直径与间距的相对关系。管棚间距大于直径,管幕间距小于直径,几乎挨着,常用锁扣相连;加上冻土之后,管棚冻结的冻土厚度远远大于管棚直径,而管幕的冻土厚度相对较小,因此两者的设计理念和力学机理明显不同<sup>[4-5]</sup>。

目前,“管幕冻结法”在国际上尚无应用实例。

“管棚冻结法”的应用也非常罕见,其中德国柏林地铁系统扩建工程U55线路中有工程实例<sup>[6]</sup>,隧道长度为90 m,每根钢管中布置了4根冻结管,钢管中充填混凝土,最终得到了良好的工程效果,隧道顺利完工。日本株式会社精研有过“管棚+冻结”工法的设想与初步研究,鎌倉友之等<sup>[7]</sup>、浜口幸一等<sup>[8]</sup>对这一施工方法做了概述性介绍。夏慧民等<sup>[9]</sup>考虑冻结管对于人工冻结构件的加筋作用,通过物理试验和数值模拟揭示了加筋作用对增强冻结构件强度、减小变形量起到了重要作用。

管棚冻结法中钢管与冻土所形成的复合结构受力特性在国内外已有部分研究成果。上田保司等<sup>[10]</sup>等通过室内试验,研究冻土中加入小尺寸的钢管后所形成的复合材料的弯曲性能。研究表明,在加入小尺寸钢管后复合材料的抗弯性能相比于原冻土有较大的提高,抗弯性能与复合材料的黏结力大小有关。森内浩史等<sup>[11]</sup>通过试验,研究砂性冻土与钢管复合结构在不同温度下钢管跟随冻土变形的能力,试验温度分为-2℃,-5℃,-10℃三个温度,发现在-5℃时冻土追随钢管变形能力最强,且钢管-冻土复合结构达到极限状态时承载力比钢管单体要强。杨维好等<sup>[12]</sup>对处于不同冻结阶段的冻结管受力进行理论分析和数值模拟,得到各阶段冻结管受力变形的规律。周晓敏<sup>[13]</sup>采用复合三角函数曲线逼近扰度曲线近似求解冻结管的内力分

布,提出井帮高度变形值及冻结管的变形刚度是影响冻结管受力的主要因素。森内浩史等<sup>[14]</sup>通过室内试验考察了冻土与钢管复合结构之间的黏聚力,试验结果表明黏聚力对温度的高低,应变速率的大小以及冻土颗粒的尺寸敏感性较小,并且解释了当黏聚力存在的时候,冻土不会出现蠕变破坏。隅谷大作等<sup>[15]</sup>通过对曲线形冻土与半圆柱接触的冻着面进行竖向及水平向的加载,发现在冻着面上安全性能最低,即最容易出现滑动破坏的点是在与竖向轴线方向夹角20°上的点,该文冻着面的研究范围涵盖了与竖向轴线左右呈20°~40°范围内的冻着力。

然而,以上研究多为管棚冻土复合结构或复合结构间黏聚力的力学试验,对本文研究对象“管幕-冻土”复合结构有一定的参考价值,港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道采用的是管幕冻结法,其钢管直径大,管间距很小,管间冻土帷幕很薄,并且实际工程中采用一根管幕钢管充填混凝土,另一根不充填的“一空一实”钢管间隔排布,两管存在差异变形,这对管间冻土帷幕更为不利,管间冻土可能产生微裂纹,导致出现水流通道,造成巨大的工程风险。加上冻土的力学性能随温度而变化,实际工程中复合结构的安全状态难以判断,汪洋<sup>[16]</sup>通过室内试验和数值模拟,对复合结构的力学性能进行了初步探索,马保松等<sup>[17]</sup>依托拱北隧道曲线顶管管幕工程,研究了深埋曲线钢顶管施工过程中的力学特性,对曲线顶管管节轴向与环向应变进行了现场监测分析。为了更好地了解复合结构在封水条件下承载力相对最佳时的冻土帷幕温度,本文从实际工程中提炼出简化的简支梁复合结构力学模型,设计和制作了试验模型,对不同温度进行复合结构力学特性试验,分析冻土跟随钢管变形能力随温度变化的规律,对实际工程中的管间冻土温度取值具有一定的参考作用。

## 1 工程概况

本研究依托港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道项目,以其所采用的管幕冻结法为研究背景,拱北隧道位于珠海市香洲区,毗邻澳门,穿越拱北口岸。

拱北隧道暗挖段全长255 m,平面线形为88 m缓和曲线及167 m圆曲线,下穿拱北口岸限定区域,地理条件复杂,周边环境敏感,东接拱北湾海域明挖段,西接鸭涌河陆域明挖段。由于地处国内第一大陆路口

岸, 要求在施工过程中不能影响口岸的正常通关, 不能影响周边建筑物及地下管线的稳定和正常使用, 地面沉降不能大于3 cm。加之地下水位高, 且地下水位与海水可能存在紧密联系等因素, 管间止水尤为重要, 但常规的锁扣止水方法对于此类曲线顶管难以保证其止水效果, 故提出顶管+冻结工法, 即管幕冻结法。

拱北隧道暗挖段采用36根Φ1620 mm钢管组成的管幕均匀布置在隧道开挖轮廓周围, 形成超前支护帷幕, 管间距355~358 mm, 36根管以拱顶为起始顺时针依次编号, 奇数号管幕在顶管完成后采用微膨胀自密实混凝土进行充填, 偶数号管幕在暗挖施工完成后进行充填, 因此暗挖施工前管幕冻土复合结构中相邻的钢管一根充填混凝土, 一根未充填混凝土, 为“一空一实”间隔排布。采用此种布管形式的目的: ①为了吸收冻胀引起的有害变形, 减小地层隆起和对隧道结构的附加应力; ②预留的空管为土体注浆和温度监测点的布设提供了空间, 也便于对施工过程中的突发状况进行检修排查。

暗挖段管幕的实施通过东、西两个工作井来实现, 管幕冻结法隧道断面如图1所示, 图中所示“一空一实”钢管冻土复合结构即为本文模型试验对象, 冻结管布置如图2所示。管幕顶部距地面平均4~5 m, 管幕南侧距离澳门联检大楼桩基最近1.6 m, 管幕北侧距离免税商场回廊桩基最近约0.46 m。

由于国内尚无管幕冻结法的工程先例, 所以有必要通过室内试验对其力学特性进行研究。

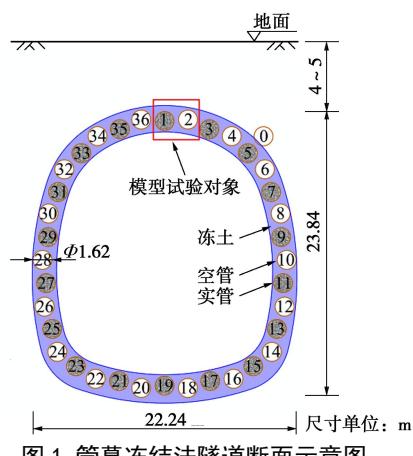


图1 管幕冻结法隧道断面示意图

Fig. 1 Sketch of tunnel section with freezing-sealing pipe roof method

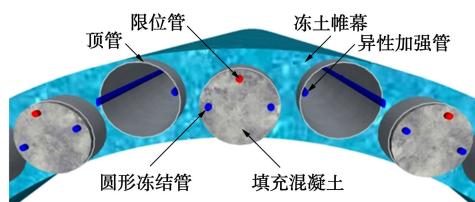


图2 冻结管布置图

Fig. 2 Layout of freezing pipes

## 2 试验设计

### 2.1 试验模型

#### (1) 力学模型

由于实际工程中的“管幕-冻土”复合结构受力状态较复杂, 为了有针对性地研究空管与实管产生的差异变形情况, 综合考虑试验机的空间大小, 选取相邻两根“一空一实”钢管以及周围冻土作为最小结构单元进行力学试验, 分析各种温度条件下复合结构在确保封水时的极限承载力和变形能力, 如图3右侧所示。

为了防止支座处对两管和冻土变形的影响, 室内试验的力学模型简化为简支梁受压形式, 如图3所示, 取纵向跨中横截面为分析对象。隧道开挖后钢管-冻土复合结构共同承担的围岩压力是均布荷载, 然而在室内试验中, 整个表面均布荷载的施加不易实现, 为了达到与实际工程相同的作用效果, 可将实际工程面荷载等效成一个跨中线荷载, 线荷载的施加由加载头实现。如图3所示, 图中所示荷载为试验机施加的均布荷载。

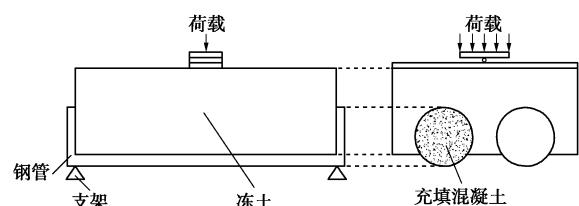


图3 复合结构纵向受力模型

Fig. 3 Longitudinal mechanical model of composite structure

由于简支结构应力分布及变形较为直观, 并易于试验实现, 因此试验模型的支架可做成简支形式, 而此模型受力后挠度最大的地方为跨中位置, 因此可在跨中位置处设置3个位移计, 分别用来测量施加荷载后复合结构中空、实钢管以及管间冻土的挠度变化情况。

#### (2) 相似比设计和模型参数

实际工况与试验模型难以做到严格相似, 为了使试验结果对实际工况有较大的参考价值, 按照相似比设计试验的各项参数, 相似性必须满足几何相似性、材料相似性、强度相似性、荷载相似性这几点要求, 利用一定的关系将试验室模型的各物理量组合在一起, 类比原模型。拱北隧道实际工程中选用直径为1600 mm的钢管, 管间距为350 mm左右, 管壁厚为20 mm。考虑到试验室试验机的空间大小, 试验中钢管的直径为50 mm, 其几何相似比为 $C_L=1/32$ , 故试验管间距应为 $d=10.9$  mm, 钢管壁厚度为 $\delta=0.625$  mm。

考虑到按照几何相似比缩小后管间冻土太薄，尺寸太小可能掩盖其真实的力学性能，在力学试验中适当放大管间距的取值至 30 mm。本试验将荷载简化为一个跨中集中力，等效关系按照纵断面跨中最大挠度相等时，均布荷载与集中荷载在纵断面产生相同的挠度作用效果，以此建立实际工程均布荷载和试验中集中荷载的关系。试验参数选取见表 1。

表 1 试验参数的选取

Table 1 Selection of parameters for mechanical tests

影响参数	选取情况
冻结管的布置	否
冻结管的形状	否
两钢管间距/mm	30
上覆冻土厚度/mm	40
冻土下边界与两管连心线间的距离/mm	15
钢管表面光洁度	否
载荷	大于实际工程
钢管内充填混凝土	一根充填一根不充填
钢管外径/mm	50
钢管壁厚/mm	0.5
钢管长度/mm	250
冻土温度/℃	-5, -10, -15, -20
冻土含盐量	不含盐

### (3) 试样制作

为了得到用于力学试验的试样，需特制试样盒模具。模具由 5 块 10 mm 厚钢板组成，其中两侧钢板切割出钢管的形状，便于插入钢管，钢板均采用螺栓连接，方便拼装拆卸试样脱模。

拼装好的试样盒内部净尺寸为 170 mm×240 mm×80 mm，如图 4 所示。空心钢管与填充混凝土后的实心钢管如图 5 所示。制作试样时，先将空心钢管与内部填充混凝土的钢管放入试样盒中，然后再各接缝处做好防水措施，防止水土渗漏，如图 6 所示。最后将配置好的重塑砂土填入试样盒内，振捣密实。振捣均匀后，将试样盒放入冰箱养护，待砂土冻结后，将试样盒拆卸，拆卸后的试样如图 7 所示。

## 2.2 试验方案

### (1) 试验目的

钢管-冻土复合结构模型试验的主要目的是探索不同冻结温度下，复合结构在确保封水时的极限承载力和变形能力，以得到实际工程中合适的冻结温度。而试验中力学特性最直观的体现是复合结构产生的变形。因此试验中用位移计记录空管、实管以及管间冻土在各个荷载下的变形，通过观察荷载-位移曲线，分析冻土强度和冻土跟随钢管变形能力的随温度变化的规律，以探究适合于实际工程的最合理的冻土温度。



图 4 模型试样盒

Fig. 4 Specimen box of composite structure model

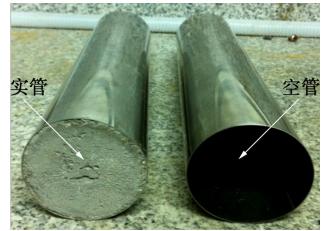


图 5 空心钢管与填充混凝土的实心钢管

Fig. 5 Hollow steel pipe and concrete-filled steel pipe

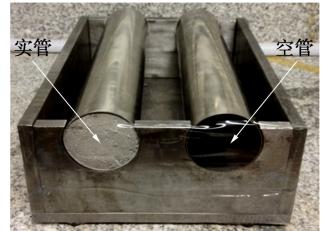


图 6 放入钢管的试样盒

Fig. 6 Specimen box with steel pipes

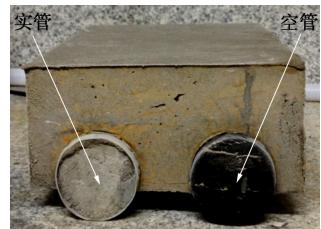


图 7 脱模后的试验试样

Fig. 7 Test specimen after demoulding

### (2) 试验内容

钢管-冻土复合结构在承载时共同变形，若两种材料变形不协调，则两种材料会发生脱离，钢管与冻土之间会产生缝隙，可能会形成透水通道，这样冻土帷幕的封水效果就得不到保证。而在实际工程中，由于相邻的两根顶管，一根为空心钢管，一根为充填混凝土的实心钢管，因此两者刚度差异很大，在承载时会产生差异变形，这样导致管间的冻土不仅受到土体的压力，还会受到因钢管差异变形带来的剪应力，因此要求冻土具有良好的跟随变形能力，即冻土与钢管变形保持一致的能力，使得复合结构内部不产生微裂纹，保证封水效果。而冻土又是一种特殊的材料，其

力学性质随温度呈现一种动态的特性, 因此需综合考虑冻土跟随变形能力和强度。

为了探究实际工况下, 钢管-冻土复合结构强度及协调变形较好时的管间冻土温度, 根据工程上可能采用的冻结温度, 试验设计-5℃, -10℃, -15℃以及-20℃四个温度, 每个温度下做两个试样, 共计8个试样。

### (3) 试验方法

本试验监测加载时空心管、实心管以及管间冻土跨中处的位移, 试验加载后的变形包括复合结构受压变形和空、实两管刚度差异变形两部分, 如图8所示。

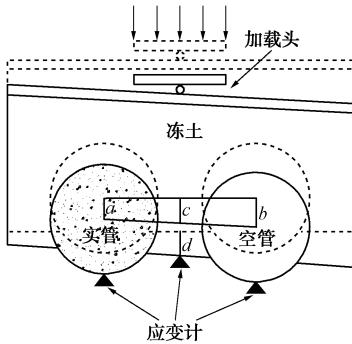


图8 空、实钢管变形示意图

Fig. 8 Sketch of deformation between hollow steel pipe and concrete-filled steel pipe

当钢管-冻土复合结构达到极限承载力之前, 复合结构内部已经产生裂纹, 对于用于止水的“管幕-冻土”复合结构而言, 复合结构在封水功能上已经失效, 产生的裂纹可能会成为水流通道, 造成巨大的风险。因此此类钢管-冻土复合结构的极限判据应建立在封水的前提下, 判断依据如下。

在一定条件下, 冻土材料弹性属性明显, 可将冻土近似为线弹性材料, 且属脆性破坏<sup>[18]</sup>。沈忠言等<sup>[19]</sup>指出冻土拉伸破坏应变小, 属于脆性破坏。而在压缩条件下, 冻土脆性破坏是有条件的, 当应变速率较高(短时荷载或瞬时荷载作用下)、温度较低( $T \leq -5^{\circ}\text{C}$ )且含水率较大( $w \geq 22.3\%$ )时, 冻土破坏可看作脆性破坏<sup>[20]</sup>。

本试验的简支梁模型是由大断面隧道开挖模型简化而来, 开挖卸载属于瞬时荷载, 试验温度-5℃, -10℃, -15℃, -20℃均在-5℃以下, 试验冻土含水率28.5%大于22.3%, 因此可假定冻土和钢管为各项同性线弹性材料, 且冻土和钢管的弹性模量较大, 刚度较大, 满足小变形假设, 位移成线性关系。

假定简支梁跨中实管、空管、管间冻土竖向位移分别为 $a$ ,  $b$ ,  $d$ , 如图8。由于实管和空管的刚度差异, 当共同变形时, 空管竖向位移 $b$ 略大于实管的竖向位移 $a$ , 位移计的水平距离相等, 因此 $a$ ,  $b$ 可分别视为

梯形的上底和下底, 当变形处于弹性范围时, 在几何关系上, 位移成线性关系, 管间冻土变形 $d$ 恰好等于梯形的中位线 $c$ , 即 $d=c$ , 当变形处于非弹性范围时, 变形成非线性, 在冻土内部可能发生微裂纹, 导致可能出现水流通道。

$$d = c = \frac{1}{2}(a+b) \quad . \quad (1)$$

式(1)表示复合结构在封水条件下的极限竖向位移关系, 一旦方程不成立, 代表结构中可能出现水流通道, 此方程为复合结构在封水条件下的极限状态判据, 对应于后文荷载-位移曲线中空、实钢管平均位移曲线和管间冻土位移曲线的分叉点所处状态。

当处于弹性变形阶段时,  $d=(a+b)/2$ ; 一旦进入封水功能失效阶段,  $d < (a+b)/2$ , 复合结构内部可能产生水流通道, 从而导致巨大的风险, 在此将复合结构进入非线弹性变形阶段定义为封水功能失效阶段。

## 2.3 试验设备

### (1) 加载系统

本文的模型试验在同济大学冻土试验室的WDT-100微机控制冻土单轴压缩试验机上进行, 试验装置最大加载能力100 kN, 精度1%。试验按应力速率控制加载方式进行, 应力速率为0.01 MPa/s, 加载和数据全由计算机根据设定好的参数自动控制和采集, 采集间隔为0.1 s。试验机及其计算机数据采集系统的界面如图9所示。

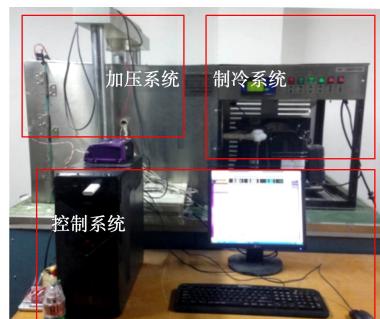


图9 WDT-100冻土试验机

Fig. 9 WDT-100 frozen soil testing machine

试验过程中, 按图8中所示布置位移计, 记录各部位位移情况, 因此试验的支座台也需特殊制定, 见图10, 支座钢板均由厚度为10 mm的钢板焊接而成, 其刚度相对于复合结构而言可认为是无穷大, 加载过程中钢板不会发生变形与转动, 不会影响试验过程中位移计的测量结果。位移计通过螺丝固定在中间位置的板上, 且不会发生转动。

### (2) 加载方式

试验装置拼装好, 放入制备好的试样, 如图11所示。加载时为防止空心管与支座接触的部位由于应

力集中而首先发生破坏，因此在空心钢管的两头插入实心钢柱，实心钢柱插入的长度与支座钢板壁厚相同。这样在从冷冻箱中取出试样的过程中，也可防止因空气对流而使空管内部温度上升过快，空管周围冻土迅速融化的情况发生。



图 10 支座及位移计

Fig. 10 Bearing and displacement meter



图 11 力学试验加载

Fig. 11 Loading of mechanical tests

考虑到试验加载时空心钢管与实心钢管会产生不同的竖向变形，因此加载头需进行特殊设计，将加载装置的集中荷载转化为复合结构跨中位置的均布荷载，以适应空实两管差异变形的过程，设计的加载头如图 12 所示，既能保证荷载平稳传递到结构上，又能使得结构在加载过程因刚度差异产生的小变形得以体现。为防止加载过程中因应力集中，导致加载头周围土体首先发生破坏而使加载头陷入冻土中，加载头做成 30 mm 的宽度，以减少应力集中的影响。



图 12 加载头装置

Fig. 12 Devices of loading component

### 3 试验结果及分析

模型试验得到不同温度 ( $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ) 下的荷载 - 位移曲线，包括复合结构跨中处的

实管底部竖向位移、空管底部竖向位移、管间冻土下边缘竖向位移。通过复合结构在封水条件下的极限状态判据，得到各个温度下的极限位移和荷载，分析了温度对复合结构承载力的影响规律。

由试验结果可知试验最终破坏形式， $-5^{\circ}\text{C}$  时，复合结构最终在靠近钢管处的局部冻土发生破坏，其它各个温度下的试样最终都是空心钢管与冻土发生脱离破坏，如图 13 所示，若需进一步了解复合结构的破坏过程，可以通过后期的试验与数值模拟实现。



图 13 复合结构破坏图

Fig. 13 Failure of composite structure

#### (1) 荷载 - 位移曲线

钢管-冻土复合结构在确保封水性能时的最大位移发生在跨中，在相同温度和荷载条件下，空心钢管位移最大，管间冻土位移次之，实心钢管位移最小。试验得到  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$  下空心钢管、实心钢管以及管间冻土跨中位置处位移随试验荷载的变化曲线，如图 14 所示，由于钢管刚度差异导致空、实管处位移不等。

当温度为  $-5^{\circ}\text{C}$  时，从图 14 (a) 中可知，实心管、空心管、管间冻土的位移随着荷载增加逐渐变大，当荷载增至 14 kN 时，空心管与管间冻土荷载 - 位移曲线相交，管间冻土变形量开始超越空心管变形量，表明冻土本身强度较低，管间冻土自身变形量较大。图 14 (b) ~ (d) 分别为  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$  时荷载位移曲线，空心管、实心管与管间冻土的荷载 - 位移曲线未相交，以温度为  $-10^{\circ}\text{C}$  为例，从图 14 (b) 中可知， $-10^{\circ}\text{C}$  时冻土已具有一定的刚度，整个试验过程中冻土的位移变化没有超过空心管的位移，但随着试验荷载的增加，管间冻土的位移逐渐接近空心管的位移。整个试验过程中空心管位移随荷载呈非线性变化，刚开始可认为是线性变化，但很快就呈现出非线性，说明空心钢管不仅发生弯曲变形，其跨中处也有可能被“压扁”，需要通过后续试验进一步验证。为探究复合结构在封水时的极限状态，加入空、实两管平均位移进行对比，由图 14 (b) 可知，在试验荷载为 7 kN，管间冻土位移为 0.95 mm，空管位移为 1.4 mm 时，空、实

两管平均位移曲线和管间冻土位移曲线分开, 意味着复合结构内部产生微裂纹, 封水功能失效, 随着分叉量逐渐增大, 最终钢管与冻土发生了脱离。因此在未修正压扁效应情况下空管位移为 1.4 mm 时可假设钢管与冻土正好发生脱开, 记录下空、实两管平均位移曲线和管间冻土位移曲线分叉时的结果, 以分叉点作为钢管与冻土间发生分离的判断依据, 该分叉点所处状态与 2.2 节中极限状态方程相对应。

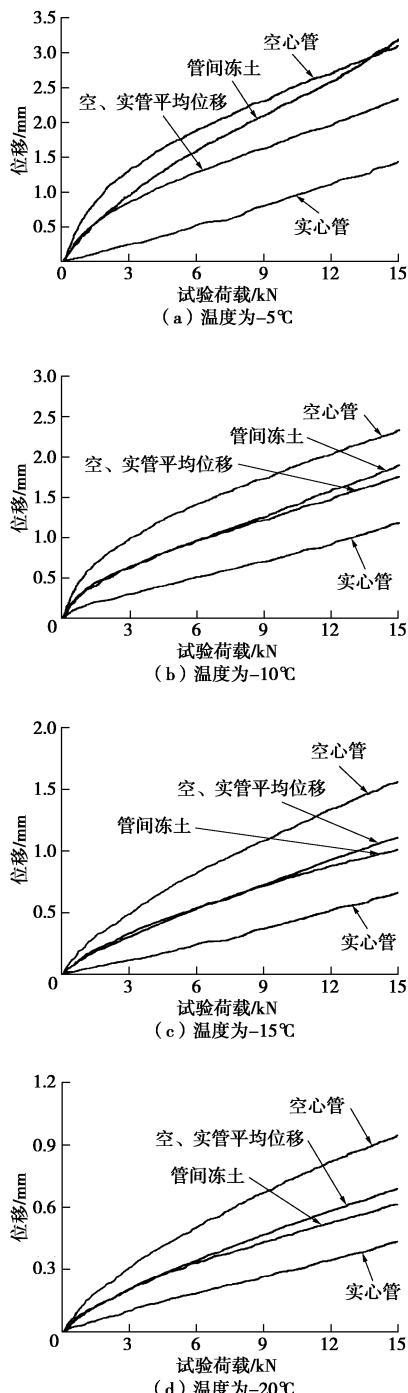


图 14 空、实管及管间冻土荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curves of hollow steel pipe, concrete-filled steel pipe and frozen soil

## (2) 温度对复合结构承载力的影响

通过各个温度下钢管-冻土复合结构力学特性试验, 了解了冻土在不同温度下跟随钢管变形的能力, 得到了管间冻土位移曲线与空、实两管平均位移发生分叉时各位移值及荷载值, 如图 15, 16。

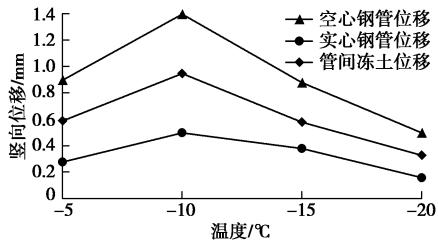


图 15 不同温度下, 位移曲线分叉时的测点位移

Fig. 15 Displacements of steel pipes and frozen soil with different temperatures at separation

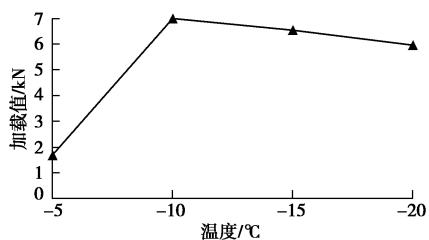


图 16 不同温度下, 位移曲线分叉时的荷载

Fig. 16 Loads of steel pipes and frozen soil with different temperatures at separation

管间冻土位移曲线与空、实两管平均位移的分叉点是复合结构封水性能失效的依据, 也是复合结构保证封水条件下承载能力的体现, 由图 15 可知,  $-10^{\circ}\text{C}$  分叉点的空心钢管, 实心钢管, 管间冻土位移最大, 表明 $-10^{\circ}\text{C}$ 时, 复合结构在封水性能失效前有最大的变形空间。因为此温度下冻土可塑性较好, 跟随钢管变形的能力较强, 在发生较大的位移时也能跟随变形而不与钢管脱开。随着温度的降低( $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ), 冻土塑性变差, 呈现出脆性, 跟随钢管变形的能力下降, 因此在发生较小的位移时就不能跟随钢管变形, 与钢管脱开。而温度相对过高时( $-5^{\circ}\text{C}$ ), 因冻土本身强度太低, 容易发生破坏。因此在试验范围内的 4 个温度中,  $-10^{\circ}\text{C}$ 时冻土跟随钢管变形能力和冻土本身强度均较强, 在复合结构封水性能失效前能产生最大的位移以及最大的差异变形, 即承受变形的能力相对较大。

由图 16 可知,  $-10^{\circ}\text{C}$ 时的分叉点对应的荷载最大, 为 7 kN, 表明 $-10^{\circ}\text{C}$ 时, 复合结构的承载力最强, 此结果与如上位移分析规律一致。

## (3) 实际工程的极限承载力分析

本模型试验遵循相似准则, 根据相似理论的三大基本定理, 相似比可以通过方程推导得到, 通过相似

比可推导出。已知几何相似比  $C_L$  为

$$C_L = \frac{L_m}{L_p} = \frac{50}{1600} = 0.03125 \quad . \quad (2)$$

式中, 下标为 m 的物理量代表模型试验, 下标为 p 的物理量代表实际工程,  $C_L$ ,  $L_m$ ,  $L_p$  分别表示几何相似比、模型试验中钢管的直径、实际工程中钢管的直径。

由于模型试验采用了和工程原型相同的材料, 因此材料相似比  $C_E$  为

$$C_E = \frac{E_m}{E_p} = 1 \quad , \quad (3)$$

式中,  $C_E$ ,  $E_m$ ,  $E_p$  分别表示材料相似比, 模型试验中的材料弹性模量, 实际工程中的材料弹性模量。

其它相似比参数可以根据平衡方程、几何方程、物理方程以及梁的挠曲线方程推导。

$$\left. \begin{aligned} C_p &= \frac{P_m}{P_p} , \\ f_p &= \frac{C_L}{C_p} \cdot f_m = \frac{C_L P_p}{P_m} \cdot f_m , \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,  $C_p$ ,  $P_m$ ,  $P_p$ ,  $f_m$ ,  $f_p$  分别表示荷载相似比, 试验模型在平面应变任意截面上的跨中集中荷载, 实际工程在平面应变任意截面上的跨中集中荷载, 模型试验跨中挠度, 实际工程跨中挠度。

模型试验跨中线荷载:

$$q_m = \frac{P}{d_m} \quad , \quad (5)$$

式中,  $q_m$ ,  $P$ ,  $d_m$  分别表示试验跨中线荷载、试验加载值、与加载头平行的横截面宽度,  $d_m=0.17$  m。其中试验跨中线荷载  $q_m$  与平面应变任意截面上的跨中集中荷载  $P_m$  在数值上相等。

根据简支梁在跨中产生相同挠度, 可以得到集中荷载和均布荷载之间的相互关系, 将实际工程面荷载转换为实际工程跨中线荷载。由于本模型可近似为平面应变问题, 实际工程面荷载可视为平面应变任意截面上的线荷载, 实际工程跨中线荷载可视为平面应变任意截面上的跨中集中荷载, 有

$$\frac{8P_l^3}{384E_p I_p} = \frac{5q_p l_p^4}{384E_p I_p} \quad , \quad (6)$$

推导可得

$$q_p = \frac{8P_p}{5l_p} = \frac{8C_L P_p}{5l_m} \quad . \quad (7)$$

式中  $q_p$ ,  $l_p$ ,  $E_p$ ,  $I_p$  分别表示实际工程在平面应变任意截面上的线荷载, 实际工程模型沿钢管方向的长度, 实际工程弹性模量, 实际工程惯性矩。其中实际工程面荷载  $Q_p$  与实际工程在平面应变任意截面上的线荷载  $q_p$  在数值上相等。

当实际工程封水性能失效时, 由式(4)、(7) 可得此时实际工程在平面应变任意截面上的线荷载:

$$q_p = \frac{8P_m}{5l_m C_L} \quad . \quad (8)$$

将各材料参数和试验参数代入式(8), 可得到通过相似原理换算后实际工程封水性能失效时的面荷载  $Q_p$ 。-5℃对应的实际工程面荷载最小, 为 2.1 MPa, 表示在冻土温度为-5℃时, 复合结构在确保封水性能时可承受的极限面荷载为 2.1 MPa, 实际工程最大水土压力约 0.2 MPa, 远小于封水条件下的极限面荷载, 故在此温度下, 实际工程不可能发生由于结构受荷过大导致的封水性能失效。

本试验的复合结构力学模型来源于实际工程, 通过试验模型得到适合本工程的最佳冻土温度为-10℃, 此时管幕冻土复合结构的承载力最强。由于实际工况环境复杂, 试验模型无法与实际模型完全等价, 结果仅作为设计和施工的参考。

## 4 结论与建议

钢管-冻土复合结构在承载时共同变形, 若两种材料变形不协调, 则两种材料会发生脱离, 钢管与冻土之间会产生缝隙, 可能会形成透水通道, 这样冻土帷幕的封水效果就得不到保证。而在实际工程中, 由于相邻的两根顶管, 一根为空心钢管, 一根为充填混凝土的实心钢管, 因此两者刚度差异很大, 在承载时会产生差异变形, 这样导致管间的冻土不仅受到土体的压力, 还会受到因差异变形带来的剪应力, 因此要求冻土具有良好的跟随变形能力。而冻土又是一种特殊的材料, 其力学性质随温度呈现一种动态的特性, 为了探求复合结构在封水条件下的极限承载力和变形能力较好的冻土温度, 本章试验设计了 4 种温度, 且实际工程中冻土帷幕温度在这一范围内。通过试验与分析, 可得到以下 4 点结论。

(1) 钢管-冻土复合结构最大位移发生在跨中, 在相同温度和荷载条件下, 空心钢管位移最大, 管间冻土位移次之, 充填混凝土的实心钢管位移最小。试验过程中, 实心钢管位移随着荷载自始至终呈线性变化, 说明实心钢管只发生弯曲变形; 空心钢管在冻土温度较高时变形随荷载呈现非线性, 表明空心钢管不仅发生弯曲变形, 还有可能被“压扁”, 需要后续试验进一步验证。当冻土温度较低时非线性减弱, 表明钢管弯曲变形在整个变形中占的比例较大。因此, 冻土温度越低, 强度越高, 刚度越大, 对空心钢管能起到一种“保护”作用。

(2) 试验加载前期, 管间冻土位移和实空两管平均位移曲线重合, 随着荷载增加, 位移继续增大, 位

移曲线发生分叉, 本文以分叉点作为复合结构封水性能失效的理论依据。

(3) 试验结果表明, 冻土跟随钢管协调变形能力随着温度的降低而变小。对比4个温度下的试验结果, 在位移曲线分叉点出现之前, 复合结构在温度为-10°C时, 空、实两管和管间冻土位移最大, 即承受变形的能力最大。随着温度的降低(-15°C、-20°C), 复合结构跨中空、实两管和管间冻土位移减小, 表明温度越低, 冻土刚度越大, 跟随变形能力越差, 承载力越小。但冻土温度相对过高时(-5°C), 复合结构最终由于冻土自身强度较小而发生破坏。与温度-位移曲线规律一致, 复合结构在-10°C时对应的封水条件下的极限承载力也最大, 达到7 kN。

(4) 综上所述, 以曲线分叉点作为复合结构封水性能失效的依据是合理的, 由于冻土具有一定塑性变形能力, 此判据对于实际工程仍有一定安全储备。就钢管-冻土复合结构承载力而言, 实际工程中管间冻土温度不是越低越好, 也不是越高越好, 综合考虑冻土帷幕强度、复合结构中两种材料跟随变形能力等, 对于实际工程, 考虑到施工时的冷量耗散, 建议将管间冻土温度控制在-10°C至-15°C范围内, 此建议在拱北隧道施工中被采纳和实施。为更好地控制变形, 可及时做好支护和注浆等措施。

本试验对港珠澳大桥拱北隧道管幕冻结法的施工和设计有一定参考价值, 可对今后类似工程提供借鉴。但就试验模型及试验本身仍有诸多可改进之处, 简化的简支梁模型不能完全等效于实际工程中复合结构的受力状况, 仅作为此类复合结构力学研究的初步探索, 为设计和施工提供参考; 对于试验本身可考虑在空管内设置位移传感器测量空管变形情况, 从而了解空管的变形过程, 以及建立包含3根钢管的对称复合结构模型, 通过增设传感器全面了解变形规律, 这些工作有待在今后的试验中得以完善和扩展。

## 参考文献:

- [1] 何小龙, 程勇, 郭小红. 港珠澳大桥珠海连接线工程拱北隧道设计[J]. 土工基础, 2012(9): 244 - 248. (HE Xiao-long, CHENG Yong, GUO Xiao-hong. Gongbei Tunnel design of HongKong-Zhuhai-Macau Bridge connector project[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012(9): 244 - 248. (in Chinese))
- [2] 潘建立, 高海东, 史培新. 拱北隧道暗挖段管幕组合方案优化研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 55 - 62. (PAN Jian-li, GAO Hai-dong, SHI Pei-xin. A study of combined Pipe-Roof scheme optimization for the bored section of the Gongbei Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 55 - 62. (in Chinese))
- [3] HU X, DENG S, REN H. In situ test study on freezing scheme of freeze-sealing pipe roof applied to the Gongbei Tunnel in the Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge[J]. Appl Sci, 2017, 7(1): 27.
- [4] 周晓敏, 张国亮. “冻土+管棚”复合结构的承载性能研究及其应用分析[J]. 市政技术, 2004, 22(增刊): 341 - 344. (ZHOU Xiao-min, ZHANG Guo-liang. Bearing capacity research and application analysis on “frozen soil and pipe lodepole” composite structure[J]. Municipal Engineering Technology, 2004, 22(S0): 341 - 344. (in Chinese))
- [5] 梁洪振, 赵志福. 复合冻土结构的承载性能研究及其应用分析[C]// 矿山建设工程新进展—2006 全国矿山建设学术会议文集(上册). 北京, 2006: 440 - 445. (LIANG Hong-zhen, ZHAO Zhi-fu. Compound frozen earth structure load bearing performance research and its applied analysis[C]// New Progress in Mine Construction Engineering: The Sessions of The National Mine Construction of Academic Essays (The First Volume). Beijing, 2006: 440 - 445. (in Chinese))
- [6] BRUN B, HA H. Underground line U5 'unter den linden' Berlin, Germany structural and thermal fe-calculations for ground freezing design[C]// Proc Int Conf Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Eng for Urban Environment. Berlin, 2006: 225 - 232.
- [7] 鎌倉友, 阿曾利光, 浜口幸一, 等. 小口径シールドの包含による大断面拡幅工法(SR-J工法)の開発[J]. 土木学会第60回年次学術講演会, 2005, 60(1): 165 - 166. (KAMAKURA T, ASO T, HAMAGUCHI K, et al. Development of tunnel expansion method (SR-J) for underground highway junction[J]. Proceedings of the 60 Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers. Japan, 2005, 60(1): 165 - 166. (in Japanese))
- [8] 浜口幸一, 矢部幸男, 吉武謙二. 小口径シールド結合リングによる超大断面拡幅工法(SR-JP工法)の開発[J]. 土木学会第61回年次学術講演会, 2006, 61(1): 139 - 140. (HAMAGUCHI K, YABE Y, YOSHITAKE K. Development of small diameter shield combined large-section widening method (SR-JP)[J]. Proceedings of the 61 Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers, 2006, 61(1): 139 - 140. (in Japanese))
- [9] 夏慧民, 牛富俊. 冻结管对人工冻结构件加筋作用的试验及数值模拟[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 155 - 159. (XIA

- Hui-min, NIU Fu-jun. Experimental study and numerical simulation of the reinforcement of embedded freezing pipes on artificial frozen components[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(2): 155 - 159. (in Chinese))
- [10] 上田保司, 生頬孝博, 鋼管補強による凍土梁の曲げ強度特性の改良[J]. 土木学会論文報告集, 2001, **12**: 81 - 90. (UEDA Y, OHRAI T. Improvement of bending strength of frozen soil beam reinforced by steel pipe[J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 2001, **12**: 81 - 90. (in Japanese))
- [11] 森内浩史, 上田保司, 生頬孝博. 鋼管変形に対する凍土の追隨性把握実験[J]. 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003, **58**(4): 753 - 754. (MORIUCHI K, UEDA Y, OHRAI T. Study on the fitting ability of frozen soil and steel pipes[J]. Proceedings of the 58 Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers, 2003, **58**(4): 753 - 754. (in Japanese))
- [12] 杨维好, 黄家会. 冻结管受力分析与试验研究[J]. 冰川冻土, 1999, **21**(1): 33 - 38. (YANG Wei-hao, HUANG Jia-hui. Theoretical analyses and experimental research on stresses in freezing pipes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, **21**(1): 33 - 38. (in Chinese))
- [13] 周晓敏. 冻结管在冻结壁变形段内的受力计算[J]. 煤炭学报, 1996, **21**(1): 30 - 34. (ZHOU Xiao-min. Stressing of freeze pipe in the deformed section of ice wall[J]. Journal of China Coal Society, 1996, **21**(1): 30 - 34. (in Chinese))
- [14] 森内浩史, 上田保司, 生頬孝博. 鋼管間止水凍土の凍着維持に関する研究[J]. 土木学会論文集, 2008, **64**(2): 294 - 306. (MORIUCHI K, UEDA Y, OHRAI T. Study on the zdfreeze between frozen soil and steel pipes for cutoff of water[J]. Proceedings of The Japan Society of Civil Engineers, 2008, **64**(2): 294 - 306. (in Japanese))
- [15] 関谷大作, 上田保司, 生頬孝博. 曲線形凍土と構造物との凍着維持に関する安全性評価[J]. 第 39 回地盤工学研究発表会, 2004, **39**(6): 1103 - 1104. (SUMIYA D, UEDA Y, OHRAI T. Safety evaluation of interface between frozen soil and structure[J]. Proceedings of the 39 Annual Conference of the Japan Society of Geotechnical Engineering, 2004, **39**(6): 1103 - 1104. (in Japanese))
- [16] 汪 洋. 管幕冻结法钢管-冻土复合结构力学性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2013. (WANG Yang. Mechanical property analysis of steel pipe-frozen soil composite structure in freeze-sealing pipe roof method[D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese))
- [17] 张 鹏, 王翔宇, 曾 聰, 等. 深埋曲线钢顶管受力特性现场监测试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(10): 1842 - 1848. (ZHANG Peng, WANG Xiang-yu, ZENG Cong, et al. Site monitoring of mechanical characteristics of pipes during steel curved pipe jacking under large buried depth[J]. Chinese J Geot Eng, 2016, **38**(10): 1842 - 1848. (in Chinese))
- [18] 李鸿升, 朱元林, 刘增利, 等. 凝土脆性破坏统计理论及尺寸效应[J]. 自然科学进展, 1998, **8**(6): 715 - 720. (LI Hong-sheng, ZHU Yuan-lin, LIU Zeng-li, et al. Statistical theory and size effect of brittle failure of frozen soil[J]. Advanced in Natural Science, 1998, **8**(6): 715 - 720. (in Chinese))
- [19] 沈忠言, 彭万巍, 王显耀, 等. 应变速率及温度对冻结黄土抗拉强度的影响[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(增刊): 71 - 75. (SHEN Zhong-yan, PENG Wan-wei, WANG Xian-yao, et al. Effect of strain rate and temperature on tensile strength of frozen loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(S0): 71 - 75. (in Chinese))
- [20] ZHU Y L, ZHANG J Y, PENG W W, et al. Constitutive relation of frozen soil in uniaxial compression[C]// Proc of 6th ISGF. Beijing: South China University of Technotoge Press, 1991: 211 - 216.