

# CPT 理论分析及提高触探能力的新思路

毛玉坤<sup>1</sup>, 刘奉银<sup>1</sup>, 李 宁<sup>1,2</sup>, 戚长军<sup>1,3</sup>

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 机械工业勘察设计研究院, 陕西 西安 710043)

**摘要:**介绍了静力触探在我国的发展历史与研究现状, 利用已有的触探理论分析了影响静力触探贯入能力的主要因素及静力触探在实际应用中的局限性。进一步提出了一种提高触探试验贯入能力的新思路, 意在解决静力触探在我国西部坚硬黄土、冻土以及软岩地区中应用困难的问题, 并建立上述岩土材料的基本力学性质指标与旋转触探过程中实测物理量之间的关系。

**关键词:**静力触探; 贯入能力; 旋转触探; 黄土

中图分类号: TU413.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2007)01-0040-05

## CPT Theory Analysis and A New Idea for Improving Penetration Capability

MAO Yu-kun<sup>1</sup>, LIU Feng-yin<sup>1</sup>, LI Ning<sup>1,2</sup>, QI Chang-jun<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;

3. Institute of Investigation and Design of Machinery Industry, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The history and present situating of the cone penetration test (CPT) in China are introduced. Using different theories related to CPT the main factors affecting the penetration capability, and the dimitations and complexity of CPT in practice are analyzed. Meanwhile a new way is put forward to improve the capability of penetration, in order to solve the problems the CPT met in hard loess, frozen earth and soft rock areas in west part of China. By means of the lab test we take effort to establish the relationship of the parameters of the soils with the measured data from gyration penetration process.

**Key words:** Cone penetration test; Penetration capability; Gyration penetration; Loess

## 1 静力触探的发展与应用

### 1.1 静力触探的发展历史

静力触探 (cone penetration test, CPT) 是随着实用土力学和理论土力学的建立, 首先从欧洲一些软土地区国家发展起来的一种原位测试方法, 它是把一定规格的圆锥形探头借助机械匀速压入土中, 用以测定探头阻力等。

静力触探在我国的发展可以追溯到上世纪 30 年代曾在我国出现过的荷兰机械式静力触探仪。1954 年由陈宗基教授自荷兰引进此项技术, 并且在黄土地区开展试验研究<sup>[1]</sup>。此后 1964 年王钟琦教

授研制成功了我国第一台电测式静力触探仪<sup>[2]</sup>。但是由于上世纪 60 年代初到 70 年代末我国与国际交流较少, 使得在静力触探技术发展上形成了与国际不同的技术标准, 一定程度上制约了我国静力触探的发展。目前国内常用的静力触探探头主要有单桥探头 (我国独有) 和双桥探头, 而孔压探头自上世纪 80 年代引入我国以来基本上主要用于科研领域, 在工程实际中的应用相对较少。

### 1.2 静力触探的应用与局限

卢肇钧院士认为<sup>[3]</sup>: ① 土的性质及其复杂且具

收稿日期: 2006-05-12

基金项目: 陕西省黄土力学与工程重点实验室项目 (04JS18)

作者简介: 毛玉坤 (1980-), 男 (汉族), 硕士研究生, 主要从事非饱和土力学研究工作。

有区域性。② 还没有任何一种土力学理论能在一  
次计算中概括土的全部复杂性质。③ 计算参数的  
选取最重要, 无论计算技术如何精确, 实际的计算  
结果不能超过其参数的测定精度。④ 土力学的发展  
方向是现场试验和长期监测, 并根据实测的数据不  
断反馈修正原有的设计参数。卢院士同时还提出了  
土力学的发展战略“现场试验, 原型观测, 反馈修  
正”。

静力触探作为一种常用的原位测试方法已经广  
泛应用到岩土工程勘察、设计等多个领域, 可以建立  
土的状态指标、强度指标、变形指标与静力触探实测  
值之间的关系, 同时还可以有效获得工程设计参数  
(如地基承载力、桩承载力)。此外, 静力触探还可  
用以检验压实填土质量及强夯效果; 黄土湿陷性评价;  
判定土质滑坡滑动面、土洞及冻融土的强度; 地基事  
故检验等<sup>[4-7]</sup>。

虽然静力触探已经广泛应用于工程建设中, 但  
其适用范围有一定局限性, 统一程度还不高。首先,  
由于国内各科研单位、设计院、高校等单位所选用的  
土的参数和计算模型不同造成了计算公式不能统  
一, 而根据不同理论、不同参数、不同模型所推导  
出来的经验公式在不同专著或已发表的文章中更不  
胜枚举, 甚至在相同地区的不同单位针对该地区的  
岩土材料就有自己独立的经验公式, 这样就造成了  
静力触探试验在实际应用中难以统一。其次, 我国  
国土辽阔, 各地区的土层情况不尽相同, 主要分布  
有粘性土、粉土、砂土及软岩等几大类土层, 因此  
静力触探在应用中的局限性和地域性较强, 一般  
适用于相对松软的粘性土、粉土和砂土, 对于硬土  
(如高深地层硬黄土、冻土) 和软岩却无能为力。  
尤其在我国西北大部分地区覆盖有大面积黄土, 处  
于干旱半干旱地区, 含水量较低, 且年平均气温较  
低, 多年冻土和季节性冻土十分常见。在上述地  
区由于土层较硬, 贯入阻力较大, 由于触探机功率  
及自重和反力有限, 使得静力触探不能很好地在  
工程实际中发挥作用。由于这些土类在工程建设  
中不可避免, 那么如何准确、快速测定上述土类  
的性质指标将成为重要问题。

## 2 静力触探理论研究

目前, 国内外专家学者研究静力触探贯入机理  
的方法主要有: 承载力理论、应变路径理论、孔穴  
扩张理论等。

### 2.1 承载力理论

由于 CPT 的贯入过程类似于桩的打入过程, 很  
早就有人尝试借用深基础极限承载力理论来求  
CPT 的端阻力。承载力理论就是将土体视为理想  
的刚塑性体, 并存在连续的破坏滑动面, 用滑移线  
法或极限平衡法求其极限承载力, 进而求得静力  
触探过程中的锥尖贯入阻力:

$$q_c = C_u N_c + \sigma_v N_q \quad (1)$$

式中:  $C_u$  为土的不排水抗剪强度;  $\sigma_v$  为上覆土压  
力;  $N_c$ 、 $N_q$  为承载力系数, 与滑动面的选择有  
关。

### 2.2 应变路径理论

应变路径理论基本思想是: 通过观察探头在饱  
和软粘土中的不排水贯入, 假设在深贯入过程中  
存在严格的运动限制(上覆压力大, 探头周围土体  
在高应力水平下深度重塑、强制性流动及不排水  
条件下的土体不可压缩等), 探头周围土体的变形  
和应变受土的抗剪性质影响很小。应变路径法  
是一种将应变场和应力场分开计算的分析方法,  
为解决深贯入问题开辟了一条新路径, 同时也得  
到了一些研究成果, 如估算承载力系数和超孔隙  
水压力。

### 2.3 孔穴扩张理论

孔穴扩张理论主要用以研究无限均质各向同性  
弹性体中圆柱形或球形孔穴受均布压力作用的问  
题, 用柱状孔穴扩张解释旁压试验机理和沉桩,  
用球形孔穴扩张来估算深基础承载力和沉桩对  
周围土体的影响。它类似于弹性力学问题的一般  
提法, 列出三组基本方程(平衡方程、几何方程及  
本构关系), 配以破坏准则及边界条件求解。球  
穴扩张理论采用球形孔的扩张, 把探头贯入的  
三维问题简化模拟成平面应变和球对称问题。  
应力、应变和位移仅是径向坐标  $r$  的函数, 边  
界条件简单, 采用数值方法就可以纳入各种本  
构模型, 并可以考虑土的许多复杂性质。总的  
来说, 孔穴扩张理论应用简单, 所需参数易于  
获取, 目前仍在继续用来解释触探贯入和沉桩  
的机理, 许多研究学者还在进一步研究。

应用孔穴扩张理论研究静力触探锥尖阻力方  
面主要有: 利用砂性土内球形孔扩张所消耗的  
功能与孔周围土体发生体变和形变所吸收的能  
量守恒的原理和力平衡条件, 给出球形孔扩  
张最终压力解答, 并用以求解触探锥尖阻力<sup>[8]</sup>;  
以 Mohr-Coulomb 破坏准则和不相关联的流  
动法则考虑土体屈服塑性流动和剪胀特性, 用  
对数应变来描述土体的变形, 在此考虑了大变  
形的影响, 给出球形孔扩张的弹塑性解析解,  
并进行了探头阻力影响因素的分析<sup>[9]</sup>; 基于  
Mohr-Coulomb 破坏准则在推导球形孔扩张的弹

塑性解时,没有考虑中间主应力的影响,为此周小平<sup>[10-11]</sup>等曾分别以双剪强度理论和统一强度理论,对球形扩张问题进行了讨论。此外,龚晓南<sup>[12]</sup>也对圆孔扩张问题进行了深入的研究,同时给出了圆孔扩张的基本模型及解法。

应用基于变形控制的球穴扩张理论<sup>[5]</sup>在求解静力触探锥尖阻力时,首先通过球穴扩张理论求得球形孔扩张到任一状态下的扩孔压力,然后再根据扩孔压力来计算触探锥尖阻力。通常情况下得到的锥尖阻力解析式为

$$q_c = 2.49(\ln M'I_r + 1)C_u \quad (2)$$

式中: $C_u$ 为土的不排水抗剪强度, $C_u = \sigma_v \tan \varphi_{cu} + C_u$ ( $\varphi_{cu}$ 为土的内摩擦角, $C_u$ 为不排水粘聚力); $I_r$ 为刚度指数, $I_r = \frac{E}{2(1+\nu)C_u}$ ;  $M'$ 为无量纲系数, $M' = MN|\epsilon_{\theta_R}|$ ,  $M = \left[ \frac{4}{3-\beta} \right]$ ,  $N = \left[ \frac{1 + \frac{1}{MI_r}}{1 + |\epsilon_{\theta_R}|} \right]^3$ 。

考虑探头锥角变化时,通过基于变形控制的球穴扩张理论求解静力触探锥尖阻力,可由下列方程获得。首先,球形孔的扩张半径在经过时间  $dt$  后的

根据式(6)、式(7)可得

$$N = \left\{ \frac{\left( \frac{1 + \text{ctg} \frac{\alpha}{2}}{2} \right) \left( \frac{D}{2} + Udt \text{tg} \frac{\alpha}{2} \right) [6E + (1 + \nu)(4C_u - 3P_0)]}{6E \left[ \frac{1 + \text{ctg} \frac{\alpha}{2}}{2} \right] \left( \frac{D}{2} + Udt \text{tg} \frac{\alpha}{2} \right) + U \sin \frac{\alpha}{2} dt} \right\}^3 \quad (8)$$

所以由上述表达式可得  $M'$

$$M' = \frac{12C_u}{4C_u - 3P_0} * N * \frac{U \sin \frac{\alpha}{2} dt}{\left( \frac{1 + \text{ctg} \frac{\alpha}{2}}{2} \right) \left( \frac{D}{2} + Udt \text{tg} \frac{\alpha}{2} \right)} \quad (9)$$

将上述方程整理并化简,可得

$$q_c = \left[ \frac{1 + \text{ctg} \frac{\alpha}{2}}{2} \right]^2 (\ln M'I_r + 1)C_u \quad (10)$$

式(10)即为在锥角变化下的静力触探锥尖阻力解析表达式。

用上式求解锥尖阻力时,必须先要确定初始应力  $P_0$  和孔壁处的环向应变  $\epsilon_{\theta_R}$ 。

(1) 初始应力  $P_0$  的确定可由下式计算:

$$P_0 = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2\sigma_h) = \frac{1 + 2K_0}{3}\sigma_v \quad (11)$$

式中: $\sigma_v$ 为上覆土压力, $\sigma_h = \gamma h$ ;  $h$ 为入土深度; $\gamma$

变化可由下式表示:

$$r_u = \left( \frac{D}{2} \text{ctg} \frac{\alpha}{2} - Udt \right) \text{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

式中: $D$ 为探头底面直径; $\alpha$ 为探头底面锥角; $U$ 为

贯入速度。又因为, $R_u = \left( \frac{1 + \text{ctg} \frac{\alpha}{2}}{2} \right) r_u$ ,所以将式(3)代入,球形孔扩张后的半径可以表示为

$$R_u = \left( \frac{1 + \text{ctg} \frac{\alpha}{2}}{2} \right) \left( \frac{D}{2} + Udt \text{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \quad (4)$$

根据  $|\epsilon_{\theta_R}| = Vdt/R_u$ ,可得

$$|\epsilon_{\theta_R}| = \frac{U \sin \frac{\alpha}{2} dt}{\left( \frac{1 + \text{ctg} \frac{\alpha}{2}}{2} \right) \left( \frac{D}{2} + Udt \text{tg} \frac{\alpha}{2} \right)} \quad (5)$$

其次,可根据  $M$ 、 $I_r$  及  $\epsilon_{\theta_R}$  的表达式求得

$$1 + \frac{1}{MI_r} = 1 + \frac{6E + (1 + \mu)(4C_u - 3P_0)}{6E} \quad (6)$$

$$1 + |\epsilon_{\theta_R}| = 1 + \frac{U \sin \frac{\alpha}{2} dt}{\left( 1 + \text{ctg} \frac{\alpha}{2} \right) \left( \frac{D}{2} + Udt \text{tg} \frac{\alpha}{2} \right)} \quad (7)$$

为土的容重; $K_0$ 为侧压力系数, $K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$ ;  $\nu$ 为泊松比。

(2) 对于  $\epsilon_{\theta_R}$  的求解可以按照不同的孔径与时间的组合,由下式进行试算:

$$|\epsilon_{\theta_R}| = Vdt/R_u \quad (12)$$

式中: $V$ 为球面扩张速率,根据贯入速度  $U$  可以得到, $V = U \sin \frac{\alpha}{2}$ ;  $R_u$ 为扩孔后的半径。

### 3 静力触探锥尖阻力影响因素分析与提高触探能力的新思路

### 3.1 影响锥尖阻力的因素

本文对可能影响静力触探锥尖阻力的几个因素(如贯入速度、锥尖角度、锥底直径)进行了计算分析,并得到了不同参数下的锥尖阻力贯入曲线。计算参数取为: $E=3.86\text{ MPa}$ ,  $c=20\text{ kPa}$ ,  $\varphi=24.5^\circ$ ,  $\gamma=16.5\text{ kN/m}^3$ ,  $\nu=0.34$ 。计算中假定土层为各项同性的均质土层,贯入深度为 20 m,分别计算了不同锥角、锥径及贯入速度下的锥尖阻力值,并绘出了锥尖阻力随贯入深度的变化曲线。

图 1 表示锥角  $60^\circ$ ,贯入速度  $2\text{ cm/s}$  时,不同锥底面直径( $D=35.7\text{ mm}$ ,  $43.7\text{ mm}$ ,  $50.4\text{ mm}$ )对应的锥尖阻力变化曲线。如图所示,在计算深度范围内锥尖阻力随着贯入深度的增加而增加,这一规律符合以往的认识,同时还可以看出锥底面积越小,单位面积所受的锥尖阻力越大,而总锥尖阻力越小。经计算,随锥底面积逐渐减小,贯入深度范围内的单位面积平均锥尖阻力增大约为 4%,这与前人对这一问题的试验研究成果基本相符。只是由于不同学者的试验对象不同,研究表明随锥底面积的增大,其锥尖阻力增大幅度约在 10% 以内。

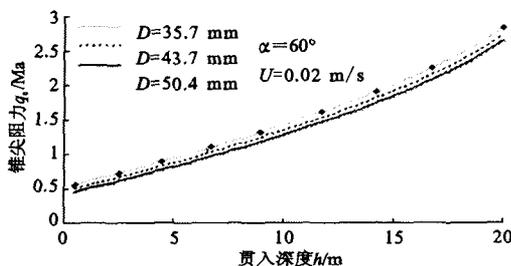


图 1 不同锥底面直径对锥尖阻力的影响  
Fig. 1 Effect of different diameters at the bottom of probe on resistance at the tip of probe.

图 2 表示锥底面直径为  $35.7\text{ mm}$ ,贯入速度为  $2\text{ cm/s}$  时,不同探头锥角( $\alpha=40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ )对应的锥尖阻力变化曲线。可以看出贯入过程中锥尖阻力随锥角的减小而减小,原因主要是由于锥角变化使得锥面所受阻力的方向发生变化,锥角越小锥面所受阻力越小。计算表明在锥底直径相同条件下,锥角变化过程中每减小  $10^\circ$ ,探头锥尖阻力降低约为 5%。

图 3 表示锥角  $60^\circ$ ,锥底面直径为  $35.7\text{ mm}$  时,不同贯入速度( $U=0.01\text{ m/s}$ ,  $0.02\text{ m/s}$ ,  $0.03\text{ m/s}$ )对应的锥尖阻力变化曲线。从图中反映出锥尖阻力随贯入速度的增大而增大,同时随贯入深度的增加锥尖阻力变化愈加明显。原因主要由于贯入速度加快使得单位时间内探头贯入土体的位移增大,土体

变形量增大,贯入过程中土对探头的抵抗阻力增大,因此锥尖阻力随着贯入速度的加快而增大。此外,随着贯入深度的不断增加,侧壁摩阻力不断增加,探头需要克服的阻力也就不断增加,从而表现出锥尖阻力的变化随贯入深度增加不断增大。通过计算,当探头以上述不同速度贯入土中时,每级贯入速度之间的平均锥尖阻力差约在 5% 左右。

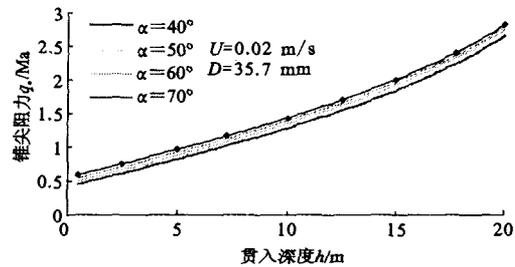


图 2 不同锥角对锥尖阻力的影响  
Fig. 2 Effect of different angle at the probe on resistance at the tip of probe.

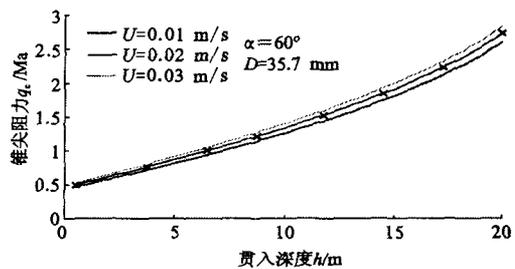


图 3 不同贯入速度对锥尖阻力的影响  
Fig. 3 Effect of different velocity of penetration on resistance at the tip of probe.

此外,还可以根据不同条件下探头所受总贯入阻力,估算贯入过程中不同深度下触探机所需的最小触探力。现将贯入至 10 m 和 20 m 处的结果列于表 1。看出,贯入至同一深度时,探头的锥底面直径越大,触探机所提供的最小触探力越大;贯入速度越低,触探机所提供的最小触探力越小;随着探头锥角的减小,触探机所提供的最小触探力越小。从而

表 1 贯入不同深度时触探机所需的最小触探力

探头形式		贯入速度 m/s	触探机所需最小触探力/kN	
锥角/ $^\circ$	锥底直径/mm		10 m 处	20 m 处
60	35.7	0.02	1.49	3.06
	43.7		2.10	4.38
	50.4		2.66	5.39
60	35.7	0.01	1.28	2.61
		0.02	1.49	3.06
		0.03	1.67	3.44
40	35.7	0.02	1.12	2.28
50			1.25	2.59
60			1.49	3.06
70			1.69	3.49

反映出通过改变探头形式、角度及贯入速度,可以在一定程度上提高触探机的贯入能力,但是效果并不明显。

基于以上对触探过程中锥尖阻力影响因素的分析,并结合大多数学者的研究成果,认为探头在贯入过程中的影响因素主要有:贯入速率、探头的尺寸(探头锥角及锥底面直径)、土性指标、温度等。一般情况下,探头锥角越小、贯入速度越慢、锥底面积越小对提高触探贯入能力有益。此外,土性指标也是一个不能忽略的因素,以往研究表明土材料越疏松,含水量越高,探头贯入时产生的锥尖阻力越小,反之亦然。

### 3.2 提高触探能力的新思路

通过对静力触探锥尖阻力影响因素的分析研究,我们认为提高触探机贯入能力无外乎以下几种方式:提高触探机功率、减少探头锥角和圆锥底面积、降低贯入速度、改变贯入方式。但首先,提高触探机功率不仅会造成加载困难,而且还将导致设备庞大笨重,运输困难;其次,减小探头锥角和圆锥底面积对于提高贯入能力本身来说相当有限,同时过分减小锥角还会造成探头顶部折断和影响探头的测试精度;再次,降低探头贯入速度理论上能够提高贯入能力,但是相对比较耗费时间,还会影响到测试参数的准确性。因此改变贯入方式将是突破静力触探在硬土(如高深地层硬黄土、冻土)和软岩等地层应用的首选研究对象。

切削理论最初应用于金属加工中,通过高速旋转的切削工具能够产生较大的切削力,将金属工件上多余部分切除。此后该理论被引入到土力学当中,一般将土的切削定义为<sup>[13]</sup>:用楔状刀片以机械的方法将土从土体中剥离出来的过程。目前已有部分学者对土的掘削过程进行了研究,主要分析了土在被切削过程中刀具尺寸参数对切削力的影响及土在被切削时的破坏形态等。

经过研究考证,我们认为借鉴金属切削理论,采用旋转钻进的方式代替原有直接压入的方式能够有效地提高触探机的贯入能力。因为在触探机功率相同的情况下,通过施加旋转扭矩使探头在压入的过程中同时产生旋转,使土的破坏形态发生变化,除了原有的挤压破坏还包含有切削刃对土的剪断作用。此外,旋转触探过程中合理的刀具尺寸参数还可以降低切削阻力,起到提高触探贯入能力的作用。

通过对原有静力触探设备进行适当改进,假若能够获得与静力触探相近的试验参数,通过大量第

一手试验资料能够建立起理论与经验相结合的参数指标,就可以为硬土和软岩地区的岩土工程勘察、设计提供服务。目前笔者已经对此展开了系统的仪器研制和试验研究。

## 4 结语

(1) 静力触探测试方法经过 40 余年的工程实践,在广大岩土工作者的共同努力下,积累了大量的实用经验,被纳入相关的标准规范用于工程建设。但对于硬土(如:高深地层硬黄土、冻土)和软岩却无能为力,充分体现了它应用的局限性和复杂性。具有进一步深入研究和扩展应用范围的必要。

(2) 根据孔穴扩张理论对静力触探锥尖阻力进行了系统分析,对影响静力触探贯入能力的几个参数进行了计算。结果表明:探头尺寸、角度与形式及贯入速度均对锥尖阻力产生一定影响。

(3) 通过对提高触探贯入能力方式的讨论,提出了采用旋转钻进的方式来提高贯入能力的新思路,为静力触探在硬土和软岩地区的应用提供了可能,按新思路进行的仪器研制正在调试完善,后续研究工作正在进行。

### [参考文献]

- [1] 陈强华,俞调梅. 静力触探在我国的发展[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(1): 84-85.
- [2] 王钟琦. 我国静力触探及动静触探的发展前景[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 517-522.
- [3] 卢肇钧. 关于土力学发展与展望的综合评述[A]//陈善蕴, 卢肇钧院士科技论文选集[C]. 北京, 1997.
- [4] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [5] 孟高头. 土体原位测试机理方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [6] 唐贤强, 谢瑛, 谢树彬, 等. 地基工程原位测试技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [7] 刘松玉, 吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 553-556.
- [8] 张季如. 砂性土内球形孔扩张的能量平衡分析及应用[J]. 土木工程学报, 1994, 27(4): 37-44.
- [9] 汪鹏程, 朱向荣, 方鹏飞. 考虑土应变软化及剪胀特性的大应变球形孔扩张的问题[J]. 水利学报, 2004, (9): 78-82.
- [10] 周小平, 张永兴, 王建华. 中间主应力对球形孔扩张的影响[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(3): 26-29.
- [11] 周小平, 张永兴, 王建华. 三向应力状态下球形孔扩张问题的弹塑性解[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(1): 73-76.
- [12] 龚晓南. 土塑性力学原理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [13] 赵伟民, 顾迪民, 诸文农. 土的基本掘削形态及分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 31(1): 95-100.