

SOIL M
PROBI

CAL ENGINEERING
TRUCTION

工程建设中的土力学及岩土工程问题

王长科论文选集

王长科 主编

中国铁道工业出版社

工程建设中的土力学及岩土工程问题 ——王长科论文选集

王长科 主 编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程建设中的土力学及岩土工程问题——王长科论文选集/王长科主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 5
ISBN 978-7-112-22019-9

I. ①工… II. ①王… III. ①工程地质-文集②土力学-文集
IV. ①P642-53②TU43-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 060064 号

本书选编了王长科先生在工程勘察、地基基础、地下空间工程和岩土地震工程方面的科技文章, 涉及旁压试验、载荷试验、基床系数、地基承载力、沉降计算、地基处理、基坑支护、岩土地震等领域。这些成果源于工程实践, 有一定的理论深度, 实践和理论结合较好, 有许多独到见解, 至今仍保持了较高的学术和工程应用价值。

本书可供从事工程勘察及岩土工程专业的科研和技术人员使用, 也可供高等院校相关专业师生参考。

* * *

责任编辑: 王 梅 杨 允

责任校对: 王 瑞

工程建设中的土力学及岩土工程问题——王长科论文选集

王长科 主 编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18 字数: 435 千字

2018 年 6 月第一版 2018 年 6 月第一次印刷

定价: 70.00 元

ISBN 978-7-112-22019-9

(31922)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

编委会名单

主 编：王长科

副 主 编：杨金雷 孙会哲 陆洪根

常务编委：张卫良 张春辉（兼秘书） 段永乐

编 委：王瑞华 王云龙 刘 阳

籍晓蕾 黄 彬 高 阳

蔡月辉 谢彦朝 程 佳

苗现国 苗雷强

王长科简介

王长科，男，汉族，1964年10月出生，河北邯郸永年人，工学硕士，注册土木工程师（岩土），正高级工程师，河北省工程勘察设计大师。北方工程设计研究院有限公司职工董事、科技委委员，中国兵器工业北方勘察设计院有限公司总经理、法定代表人，河北省地下空间工程技术研究中心主任（建设期）。

教育经历：1980年毕业于河北永年第二中学；1984年本科毕业于河北农业大学水利系，农田水利工程专业、岩土工程方向，本科毕业论文：土的非线性应力应变关系试验研究，指导教师：骆筱菊教授，获工学学士学位；应届考取华北水利水电学院北京研究生部硕士研究生，岩土工程专业、土力学方向，师从我国著名土力学家王正宏教授，硕士研究生毕业论文：对旁压试验中几个问题的分析和试验研究，1987年研究生毕业，获得中国科学院水利电力部水利水电科学研究院工学硕士学位。

工作经历：研究生毕业后，先后在河北省水利水电第二勘测设计研究院、石家庄市勘察测绘设计研究院和中国兵器工业北方勘察设计院有限公司从事岩土工程工作，历任助理工程师、工程师、副总工程师、科技质量处处长、岩土工程公司经理、副院长兼总工程师、总经理等职。

社会兼职：全国注册岩土工程师执业资格考试专家组副组长，全国注册土木工程师（岩土）继续教育专家委员会委员，住房和城乡建设部工程勘察与测量标准化技术委员会委员，中国勘察设计协会工程勘察与岩土分会副会长，中国土木工程学会土力学及岩土工程分会施工技术专业委员会委员，中国建筑学会工程勘察分会常务理事、地基基础分会理事，中国土工合成材料工程协会理事，河北省土木建筑学会地基基础学术委员会副主任，河北省地理信息产业协会副会长，河北省BIM学会副理事长兼秘书长，河北省工程建设标准化协会副会长等。石家庄铁道大学、河北大学、河北农业大学、河北地质大学、河北科技大学、防灾科技学院等高校兼职教授。

技术擅长与研究方向：工程勘察、地基基础工程、地下空间工程。

研究成果：主持完成河北岗南水库加固、多项兵器工业与民用建设项目的工程勘察及岩土工程，多次获得省部级优秀工程勘察设计奖。撰写科技文章98篇，出版著作11部，详见附录。

前 言

岩土工程是各类工程建设及社会发展活动中关于地形地质、岩石、土、地下水、地下气体、地下洞室、固体垃圾、土壤污染物等的勘察、检测、监测及其开发、利用、治理和保护的工程技术,包括工程勘察、岩土材料、挖填、地基、基础、地基处理、桩、基坑、边坡、地下水治理、土工建筑物、车辆地面力学工程、土工合成材料工程应用、地下空间工程、深部岩土力学及地下工程、地质灾害防治、土岩爆破、岩土防护工程、岩土地震工程、岩土气候工程、岩土环境工程、岩土生态工程、地质旅游工程、岩土遗产保护工程等。岩土工程专业全领域、全过程覆盖了人类在地球表面及以下一定深度范围的活动,具有很强的社会性、实践性、科学性和行业地域特殊性,是一门半经验半理论、半脑力半体力、极富有探索性的学问,需要地学、力学、结构、环保和工程测试、工程施工等学科知识与经验的支撑,做好岩土工程,需要建筑师的创造性、地质师的洞察力、结构师的算术、建造师的经验和科学家的求真精神。

王长科先生 1984 年从河北农业大学水利系本科毕业,应届进入华北水利水电学院北京研究生部攻读岩土工程专业硕士学位,师从我国著名土力学家王正宏教授,1987 年研究生毕业,获得中国科学院水利电力部水利水电科学研究院工学硕士学位。参加工作后,一直从事岩土工程专业技术工作,期间跟随过林宗元大师工作学习,并受到张苏民大师、汤福南高级工程师和高大钊教授的指点。

王长科先生紧密结合自身工程实践,对工程建设中的土力学及岩土工程问题进行研究,提出许多有益新见解,积极用于实践,取得良好效果。在探索工程实践背后的理论上,下了功夫,做到了实践和理论相结合,分别在工程勘察、地基基础、地下空间工程、岩土地震工程等领域提出了新理论、新方法、新公式和新理念。对推动解决当期工程实践难题和促进岩土工程行业科技进步做出了贡献。

在工程勘察方面,延伸了旁压试验基本理论;提出了三个塑性区理论和孔壁剪应力通解,应用上提出了用旁压仪测定地基原位水平应力、土的抗剪强度指标、弹性模量、固结系数、基床系数、地基承载力的理论和方法;提出了用抗剪强度指标直接计算地基承载力特征值的途径;对沉降计算中的压缩模量进行研究,提出计算方法;针对天然地基及复合地基,对基床系数的特殊性进行了研究,提出了固结试验基床系数换算为地基基础设计基床系数的计算方法;对深井载荷试验测定土的变形模量提出了新见解。

在地基基础方面,研究了地基承载力基本理论,提出了地基第一拐点承载力理论计算公式;研究了散体桩、实体桩、实散组合桩、夯实水泥土桩等的临界桩长、单桩承载力、沉降计算理论;提出了复合地基承载力深宽修正方法;提出了基础-垫层-复合地基共同作用原理;给出了复合地基褥垫层厚度设计计算公式;建议了复合地基变形计算深度确定方法;提出了复合地基承载力设计新思维。

在地下空间工程方面,研究土钉支护技术,改进了土压力分布模型、滑裂面模型,提

出了“石家庄土钉法”；提出了护坡桩抗剪承载力的公式、基坑边坡临界坡角计算公式、基坑边坡直立高度计算公式；提出了基坑工程设计荷载组合建议；开发并编制了基坑支护横向受力桩的受力变形反分析方法与计算机软件。

在岩土地震工程方面，分析并提出了液化判别深度、场地类别划分深度的改进建议。

在软件方面，编制了岩土工程专业 108 个模块的计算机软件 and 手机软件，尤其是其中的地基沉降计算电脑版软件，应用广泛。

在“嫦娥三号”登月研究中，成功研制出第一代低重力模拟月壤，为成功登月做出了贡献。

本书选编了王长科先生在工程勘察、地基基础、地下空间工程和岩土地震工程领域的科技文章 60 篇，内容涉及旁压试验、载荷试验、基床系数、地基承载力、沉降计算、压缩模量、地基处理、基坑支护、岩土地震等领域。这些文章源于工程实践，有许多独到的见解，至今仍有较高的科技价值，可供从事工程勘察及岩土工程专业的科研、生产、教学等人员使用。

岩土工程因其研究对象的广泛性、特殊性，决定了这一学科仍需要不断探索和积累经验，具有常研常新和永葆青春活力的特征，期望本书的出版，对丰富我国岩土工程学科技术发展及启发青年技术人员的学习成长，有所借鉴和裨益。

本书在编纂出版过程中，得到了中国兵器工业北方勘察设计研究院有限公司的大力支持，河北省工程勘察设计大师李宏义和杨金雷、孙会哲、陆洪根等专家领导给予了重要支持，张卫良、张春辉、段永乐等编委会全体成员付出了辛勤劳动，在此一并表示衷心感谢！

本书编委会

2018 年 2 月 26 日

目 录

第 1 篇 工 程 勘 察

正交各向异性介质中孔穴扩张的弹塑性理论解	3
旁压试验孔壁剪应力的通解	9
用旁压试验推求土体强度指标的方法探讨	13
旁压试验 p_0 值物理含义及其求法的研究	16
应力路径法在旁压试验分析中的应用	21
旁压模量物理含义及其计算方法的研究	28
用旁压试验原位测定土的强度参数	31
快速法载荷试验沉降量外推计算	34
饱和黏性土旁压固结试验	39
土的压缩模量计算探讨	43
地基变形计算参数勘察评价试验研究	47
天然地基及复合地基的基床系数测评	54
对旁压仪试验基本理论和工程应用的再认识	59
压缩模量精度的影响因素分析	65
浅议地下水勘察和地下室抗浮水位压力计算	67
《岩土工程勘察报告》提供压缩模量 E_s 值探讨	68
三轴试验固结排水条件模拟工程实际的不适应性分析与改进建议	70
基床系数的特殊性分析与设计使用换算方法建议	73
深井载荷试验测定井底土的变形模量	77

第 2 篇 地 基 基 础

用旁压试验确定浅基础地基承载力初步研究	83
散体材料桩复合地基承载力计算	93
散体材料桩临界桩长计算	99
浅基础地基承载力计算新方法	103
基础-垫层-复合地基共同作用原理	108
基坑底载荷试验实测承载力的深度修正	114
夯实水泥土桩复合地基设计	118
实散组合桩承载原理及应用	122
用载荷试验检测桩土复合地基承载力中的承载力换算问题	126
实体桩复合地基承载原理	129

关于夯实水泥土桩承载力的两个问题	134
地基承载力特征值计算研究	137
复合地基承载力深宽修正分析	144
地基承载力修正系数的理论分析与实测反算	148
路基沉降控制设计中的几个问题	154
人工挖孔扩底桩分析研究	160
沉降计算的现状和思考	166
地基第一拐点承载力	171
湿陷性黄土灰土挤密桩间距设计初探	178
关于素混凝土桩复合地基承载力检测的思考和建议	182
素混凝土桩复合地基承载力设计新思维	184
压实填土最大干密度经验公式的理论依据	186
土的桩侧摩阻力确定	187
地基承载力的“深度修正系数”宜改称为“超载修正系数”	189
地基承载力理论计算公式简明汇总	190
浅议复合地基变形计算深度	194
复合地基褥垫层厚度的设计计算	196

第 3 篇 地下空间工程

边坡开挖设计的简化弹塑性法	201
土钉技术的发展及其在我国工程建设中的应用	205
悬臂式钻孔灌注护坡桩实践中的若干问题	221
石家庄土钉支护设计分析	231
石家庄南三条深基坑土钉支护工程实录分析	240
土钉支护的发展	247
护坡桩的抗剪计算	255
基坑边坡临界坡角的简易计算公式	258
朗肯土压力理论和基坑开挖支护的不适应性分析	260
基坑开挖坑壁直立高度的三种算法	263
基坑支护设计荷载组合分析与建议	265

第 4 篇 岩土地震工程

关于地震液化判别深度的思考和建议	269
素混凝土桩复合地基抗震思考	271
浅析抗震设计中的场地类别划分	272
附录：著作和论文清单	274

第1篇 工程勘察

正交各向异性介质中孔穴扩张的弹塑性理论解

【摘 要】 本文假定介质具均质、正交各向异性和弹塑性,运用现代力学的概念和方法,研究了介质中圆柱形孔穴扩张的应力应变场,给出了理论解。

1 引言

在土木工程实践中,经常会遇到介质中孔穴扩张的问题,如水工有压隧洞、钻孔压浆、钻孔旁压试验、静力触探试验和桩基实践等。介质中孔穴扩张的理论分析成果业已很多^[1,2],但大多是建立在古典力学基础上,所以实践上应用起来,结果常偏离实际,越来越不能满足日益求精的工程要求。鉴于此,作者假定介质为正交各向异性体,运用现代弹塑性力学的概念和方法,推演并得出了介质中孔穴扩张的弹塑性理论解。作者曾将该理论应用于钻孔旁压试验的机理分析和成果应用,辟出新路,得出了许多新成果。相信本理论在其他土木工程领域的应用前景也很广阔,现予简要发表,供土木工程学者参考。

2 基本假定

- (1) 介质是均质无限体,孔穴是圆柱形孔穴,孔穴扩张处于平面应变状态。
- (2) 介质具正交各向异性和弹塑性,在孔穴径向和环向上的性质相同,但其轴向性质不同。轴向为竖向,径向和环向为水平向。
- (3) 介质是连续的且处于平衡状态。
- (4) 孔穴扩张时,介质的应力-应变关系能用增量弹性理论描述,屈服面用摩尔-库仑方程表示。
- (5) 介质初始应力在水平面上与方向无关。即初始径向应力和初始环向应力相等。

3 几种可能的应力状态

孔穴内壁受到内压力 p 后,根据孔周各部位介质承受不同应力情况,随孔穴扩张沿径向可定义出四种可能的应力状态区(见图1)。

孔穴扩张初期,孔周介质径向应力增加,环向应力减小,介质富有弹性可张性质,这种应力状态称为弹性应力状态。采用柱坐标系,并考虑几何条件与加荷条件的轴对称性,可知 $\sigma_1 = \sigma_a$, $\sigma_2 = \sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$ (σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别表示三个主应力, σ_a 、 σ_r 、 σ_θ 分别表示轴向、径向和环向应力)。

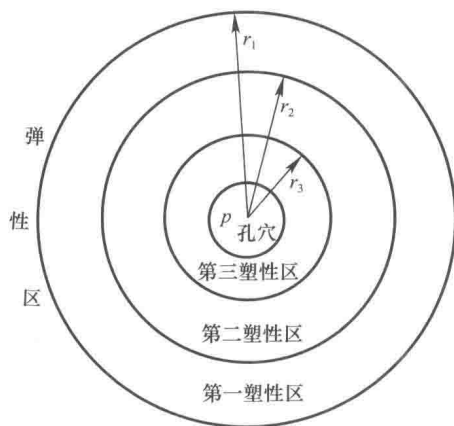


图1 孔穴周围应力状态区示意图

随着孔穴的进一步扩张,当孔周介质应力状态满足摩尔-库仑方程时,孔周介质便进入塑性应力状态。若 $\sigma_1 = \sigma_a$, $\sigma_2 = \sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$, 即最大、最小主应力方向较之弹性应力状态区的最大、最小主应力方向未发生变换,则该塑性应力状态称为第一塑性应力状态。

随孔内压力的增大,待孔周介质径向应力 σ_r 大于轴向应力 σ_a 时,最大主应力方向变换为沿 σ_r 方向,最小主应力方向仍为 σ_θ 方向,即 $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_2 = \sigma_a$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$, 该塑性应力状态称为第二塑性应力状态。

若孔穴内压力再进一步增加,则孔周介质中处于第二塑性应力状态的点,其环向应力和径向应力会继续增大(见后文)。当孔壁环向应力增至并超过轴向应力时,孔壁介质的最小主应力方向由环向变换为轴向,而最大主应力方向仍为径向,即 $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_2 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_a$, 该应力状态称为第三塑性应力状态(极限状态)。

4 弹性区理论解

在弹性应力状态区,介质的应力应变本构关系可用下面的增量弹性理论描述^[3]。

$$\{\epsilon\} = [D] \cdot \{\Delta\sigma\} \quad (1)$$

或

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_\theta \\ \epsilon_r \\ \epsilon_a \end{Bmatrix} = [D] \cdot \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_\theta \\ \Delta\sigma_r \\ \Delta\sigma_a \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\Delta\sigma_r$ 、 $\Delta\sigma_\theta$ 、 $\Delta\sigma_a$ 为径向、环向和轴向应力的增量; ϵ_r 、 ϵ_θ 、 ϵ_a 为相应的径向、环向和轴向应变; $[D]$ 为增量弹性矩阵。

对于均质、正交各向异性弹塑性介质,其加荷和卸荷轨迹不同,因而式(2)中弹性矩阵 $[D]$ 将随单元体的增量应力状态变化而变化^[4]。

当 $\Delta\sigma_a > 0$, $\Delta\sigma_\theta < 0$, $\Delta\sigma_r > 0$ 时,弹性矩阵为

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_h^-} & -\frac{\mu_{hh}^+}{E_h^+} & -\frac{\mu_{ah}^+}{E_a^+} \\ -\frac{\mu_{hh}^-}{E_h^-} & \frac{1}{E_h^+} & -\frac{\mu_{ah}^+}{E_a^+} \\ -\frac{\mu_{ha}^-}{E_h^-} & -\frac{\mu_{ha}^+}{E_h^+} & \frac{1}{E_a^+} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, E_h^+ 、 E_h^- 为水平向(径向或环向)加荷、卸荷时弹性模量; E_a^+ 为轴向(竖向)加荷时的弹性模量; μ_{ha}^+ 、 μ_{ha}^- 为水平向加荷、卸荷时轴向的泊松比; μ_{ah}^+ 为轴向加荷时水平方向的泊松比; μ_{hh}^+ 、 μ_{hh}^- 为水平向加荷、卸荷时其垂直水平方向的泊松比。

孔周介质的平衡微分方程为,

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (4)$$

取压应变为正，则几何方程为

$$\begin{cases} \epsilon_r = -\frac{du}{dr} \\ \epsilon_\theta = -\frac{u}{r} \\ \epsilon_a = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中， u 是距离孔穴中心为 r 处介质的位移，顺径向坐标轴方向为正。

孔穴扩张的边界条件为：(1) $r \rightarrow \infty$ 时， $u=0$ ；(2) $r \rightarrow r_i$ 时， $\Delta\sigma_r = \Delta p = p - \sigma_{h0}$ 。其中 r_i 表示孔穴内壁半径， σ_{h0} 表示初始水平应力。

联解式 (2)、(3)、(4)、(5)，并代入上述边界条件，可得弹性区的位移场和应力场为：

$$u = \frac{\Delta p}{E_h^+} \cdot \frac{\frac{\mu_{hh}^+ + \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^+}{1 - \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-} - \frac{1 - \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^+}{\mu_{hh}^- + \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-}}{\frac{-\lambda}{\mu_{hh}^- + \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-} + \frac{1}{1 - \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-}} \cdot \frac{r_i^{1+\lambda}}{r^\lambda} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta\sigma_r = \Delta p \cdot \left(\frac{r_i}{r}\right)^{1+\lambda} \\ \Delta\sigma_\theta = -\Delta p \cdot \left(\frac{r_i}{r}\right)^{1+\lambda} \cdot \frac{E_h^-}{E_h^+} \cdot \frac{\frac{-1}{\mu_{hh}^- + \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-} + \frac{\lambda}{1 - \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^+}}{\frac{\mu_{hh}^+ + \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^+}{\mu_{hh}^- + \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-} - \frac{1 - \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^+}{1 - \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-}} \\ \frac{\mu_{hh}^+ + \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^+}{1 - \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-} - \frac{1 - \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^+}{\mu_{hh}^- + \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-} \\ \frac{-\lambda}{\mu_{hh}^- + \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-} + \frac{1}{1 - \mu_{ah}^+ \cdot \mu_{ha}^-} \\ \Delta\sigma_a \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中， λ 的表达式见文献 [4]。

对于均质各向同性完全弹性介质，式 (6)、(7) 可简化为

$$u = \frac{\Delta p \cdot (1 + \mu)}{E} \cdot \frac{r_i^2}{r} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta\sigma_r = \Delta p \cdot \left(\frac{r_i}{r}\right)^2 \\ \Delta\sigma_\theta = -\Delta p \cdot \left(\frac{r_i}{r}\right)^2 \\ \Delta\sigma_a = 0 \end{cases} \quad (9)$$

这 and 前人成果相同。

5 塑性区理论解

介质的屈服方程（摩尔-库仑方程）为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c \cdot \cos\varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \sin\varphi \quad (10)$$

式中, c 、 φ 为介质的黏聚力和内摩擦角。

1. 第一塑性区理论解

在第一塑性区, $\sigma_1 = \sigma_a$, $\sigma_2 = \sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$, 代入式 (10) 可得第一塑性区环向应力

$$\sigma_{\theta 1} = -\frac{2c \cdot \cos\varphi}{1 + \sin\varphi} + \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \cdot \sigma_a \quad (11)$$

式中, 角标数字“1”表示第一塑性区, 以下同。

将式 (11) 代入平衡微分方程, 并使用边界条件 $\sigma_r|_{r=r_1} = p$, 积分可得第一塑性区径向应力为:

$$\sigma_{r1} = -\frac{2c \cdot \cos\varphi}{1 + \sin\varphi} + \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \cdot \sigma_a + \left(p + \frac{2c \cdot \cos\varphi}{1 + \sin\varphi} - \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \cdot \sigma_a \right) \cdot \frac{r_i}{r} \quad (12)$$

2. 第二塑性区理论解

在第二塑性区, $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_2 = \sigma_a$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$, 代入屈服准则 (式 10) 和平衡微分方程 (式 4), 积分后得

$$\sigma_r = A_2 \cdot \left(\frac{1}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} - c \cdot \cot\varphi \quad (13)$$

其中, A_2 为积分常数。使用孔穴边界条件 $\sigma_r|_{r=r_1} = p$ 可得 A_2 值, 再代入通解式 (13) 可得第二塑性区径向应力为:

$$\sigma_{r2} = (c \cdot \cot\varphi + p) \left(\frac{r_i}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} - c \cdot \cot\varphi \quad (14)$$

将式 (14) 代入屈服准则 (式 10) 后得第二塑性区环向应力

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \cdot (c \cdot \cot\varphi + p) \left(\frac{r_i}{r} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} - c \cdot \frac{\cot\varphi + \cos\varphi}{1 + \sin\varphi} \quad (15)$$

3. 第三塑性区理论解

在第三塑性区, $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_2 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_a$, 代入屈服方程式 (10) 后可得第三塑性区径向应力:

$$\sigma_{r3} = 2c \cdot \frac{\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} + \sigma_a \cdot \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (16)$$

将式 (16) 代入平衡微分方程 (式 4) 得第三塑性区环向应力:

$$\sigma_{\theta 3} = 2c \cdot \frac{\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} + \sigma_a \cdot \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (17)$$

从上述可以看出, 孔周第三塑性应力状态区径向应力和环向应力相等, 并与半径 r 无关, 与孔穴内压力 p 也无函数关系, 说明已达极限状态, 这时孔穴内压力称为极限压力。孔穴极限压力仅是介质初始轴向应力和介质强度指标的函数。

6 正交各向异性弹塑性体各弹性常数间的关系

本节题目似乎与本文题目无十分紧密的关系, 但与本文理论在工程中的应用却有着密

切联系。关于正交各向异性弹性体各弹性常数间的关系，前人早已发现。但对于正交各向异性弹塑性体，其各弹性常数间的关系至今未见报道。为此本文将这一成果发表，供土木工程学者参考。

如图 2 所示，在同一个均质正交各向异性弹塑性体上作用着两种不同的应力状态，由式 (1) 知，将存在着两种不同的应变状态，即

状态 1: $\Delta\sigma'_x, \Delta\sigma'_y, \Delta\sigma'_z; \epsilon'_x, \epsilon'_y, \epsilon'_z$

状态 2: $\Delta\sigma''_x, \Delta\sigma''_y, \Delta\sigma''_z; \epsilon''_x, \epsilon''_y, \epsilon''_z$

由功的互等定理

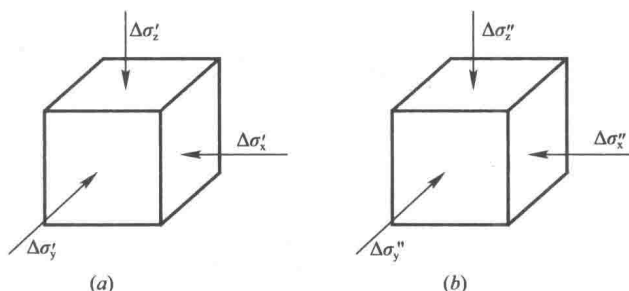


图 2 应力状态示意图

(a) 状态 1; (b) 状态 2

$$\iiint (\Delta\sigma'_x \cdot \epsilon''_x + \Delta\sigma'_y \cdot \epsilon''_y + \Delta\sigma'_z \cdot \epsilon''_z) dx dy dz = \iiint (\Delta\sigma''_x \cdot \epsilon'_x + \Delta\sigma''_y \cdot \epsilon'_y + \Delta\sigma''_z \cdot \epsilon'_z) dx dy dz \quad (18)$$

取 $\Delta\sigma'_x = \Delta\sigma'_y = 0, \Delta\sigma'_z > 0, \Delta\sigma''_x > 0, \Delta\sigma''_y = 0, \Delta\sigma''_z = 0$ ，将式 (1) 代入式 (18)，得

$$\frac{\mu_{ah}^+}{E_a^+} = \frac{\mu_{ha}^+}{E_h^+} \quad (19)$$

同理，可得

$$\frac{\mu_{ah}^-}{E_a^-} = \frac{\mu_{ah}^+}{E_a^+} \quad (20)$$

$$\frac{\mu_{ha}^+}{E_h^+} = \frac{\mu_{ah}^-}{E_a^-} \quad (21)$$

$$\frac{\mu_{hh}^+}{E_h^+} = \frac{\mu_{hh}^-}{E_h^-} \quad (22)$$

对于均质正交各向异性弹性体，上式可简化为

$$\frac{\mu_{ah}}{E_a} = \frac{\mu_{ha}}{E_h} \quad (23)$$

这和人成果相同。其中，a 表示轴向，是 z 方向，h 表示水平向，是 x、y 方向。

7 结束语

本文运用现代力学的概念和方法研究了均质正交各向异性弹塑性介质中孔穴扩张的课

题。这一结果可望应用于旁压试验、静力触探试验、桩基等机理分析研究，也可用于指导劈裂灌浆等工程实践。

对于旁压试验，现有机理理论是基于土体为均质、各向同性、完全弹性或完全塑性，不考虑应力主轴的旋转等假定，应用本文理论可考虑土的正交各向异性和弹塑性，分析结果更符合实际，这已被实践初步证实。

对静力触探试验和桩基实践，现有机理理论是基于土为均质、各向同性和刚塑性。在研究锥侧土横向扩张时采用本文理论，相信会得出新的更符合实际的分析结果。

上海在前几年打桩中就发现，观测到的桩周土的径向应力和环向应力相等，采用本文第三塑性区理论就可予以解释。

总之，本文理论在土木工程实践中的应用前景是广阔的。该理论今后应在不同条件下的具体工程实践中不断应用和验证。

鸣谢：本课题是在王正宏教授指导下完成的，作者在此对王教授的指导表示衷心感谢。

参考文献

- [1] A. B. Vesic, Expansion of cavities in infinite soil mass, SMFD, vol. 98, No. SM3, PP. 265-290, 1972.
- [2] 弗·巴居兰等著，卢世深等译. 旁压仪和基础工程. 北京：人民交通出版社，1978.
- [3] 黄文熙主编. 土的工程性质. 北京：水利电力出版社，1981.
- [4] 王长科（1987）. 对旁压试验中几个问题的分析和试验研究（硕士论文）. 华北水利水电学院北京研究生部，导师：王正宏.