

复杂应力状态下沥青混合料

FUZA YINGLI ZHUANGTAI XIA LIQING HUNHELIAO QIANGDU TEXING YANJIU 强度特性研究

◎ 黄拓 刘宏富 编著



非
外
借



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

复杂应力状态下沥青混合料 强度特性及破坏准则研究

黄 拓 刘宏富 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

· 长 沙 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

复杂应力状态下沥青混合料强度特性研究 / 黄拓, 刘宏富编著. --长沙: 中南大学出版社, 2018. 10

ISBN 978 - 7 - 5487 - 1830 - 7

I. ①复… II. ①黄… ②刘… III. ①沥青拌和料—应力状态—强度—研究 IV. ①U414

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 070908 号

复杂应力状态下沥青混合料强度特性研究

黄拓 刘宏富 编著

☐责任编辑 韩 雪

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

☐印 装 长沙理工大印刷厂

☐开 本 720 × 1000 1/16 ☐印张 10.25 ☐字数 200 千字

☐版 次 2018 年 10 月第 1 版 ☐2018 年 10 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 1830 - 7

☐定 价 68.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

前 言

沥青混合料在复杂应力状态下的强度特性和破坏准则是沥青路面结构非线性分析和设计的基础。目前,人们对沥青路面材料和结构的分析越来越精细,为了适应这一发展需要,本书系统地总结了该领域的研究成果,供高校师生和设计人员参考应用。

本书共分6章,第1章介绍了沥青混合料强度试验方法及强度理论研究的意义和发展动态;第2章研究了沥青混合料在拉、压、弯、劈裂等简单应力状态下的强度特性;第3章介绍了自主研发的沥青混合料三轴试验装置及方法;第4章分析了沥青混合料的基本强度特性及破坏曲面的特点;第5章给出了混合料的三轴试验结果,建立了复杂应力状态下的破坏准则,论证了应用三维破坏准则进行路面结构设计和分析的优越性。第6章对全书内容进行了总结,并提出了对未来研究的展望。全书由黄拓统稿,其中第1章、第4章及第6章由刘宏富编写完成。

本书在内容组织方面的最大特点是先创新三轴试验方法,然后测定三轴破坏强度,并据此建立理论模型。在试验成果的介绍中,与读者分享了大量宝贵的试验数据,为沥青混凝土材料及结构的一体化设计提供了试验依据和理论参考。但由于沥青混合料的力学特性非常复杂,其强度实验结果的离散性大,再加之以往关于沥青混合料三轴强度特性的研究成果非常有限,所以有些试验数据难免与真实值存在误差,如有不当,敬请各位读者批评指正,以便去芜存菁、去伪存真,提高我们的认识水平。

本书的编写工作是在郑健龙院士的指导下,及其团队成员的参与和支持下完成的。本书获长沙理工大学出版资助,及国家自然科学基金项目(51608055、51608058)、湖南省自然科学基金项目(2017JJ3337)、交通运输部建设科技项目(2015318825120)、长沙市科技计划等项目的资助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请各位专家和读者不吝赐教,批评指正。

编 者

2018年3月

目 录

第1章 绪 论 / 1

1.1 研究背景及意义 / 1

1.2 国内外研究现状 / 2

1.2.1 沥青混合料强度试验方法综述 / 2

1.2.2 复杂应力试验设备 / 6

1.2.3 强度理论研究现状及沥青混合料强度理论研究存在的不足 / 13

1.3 主要研究内容 / 22

第2章 不同试验方法的沥青混合料强度特性分析 / 24

2.1 原材料试验及配合比设计 / 24

2.2 不同试验方法的沥青混合料强度试验研究 / 27

2.2.1 小梁弯曲试验 / 30

2.2.2 直接拉伸试验 / 37

2.2.3 间接拉伸试验 / 41

2.3 不同试验方法的沥青混合料破坏准则研究 / 49

2.4 本章小结 / 53

第3章 沥青混合料三轴试验系统研发 / 54

3.1 气囊三轴试验系统及方法 / 54

3.1.1 结构原理 / 55

3.1.2 气压控制原理 / 61

3.1.3 破坏状态的判定方法 / 63

3.1.4 气囊三轴试验系统的操作方法 / 66

3.1.5	气囊三轴试验离散性判定	/ 66
3.2	气囊三轴试验方法的优点	/ 67
3.3	本章小结	/ 68
第4章	沥青混合料基本强度特性、建立破坏准则的理论基础及破坏曲面的特点	/ 70
4.1	沥青混合料基本强度特性	/ 70
4.1.1	拉压强度差效应	/ 70
4.1.2	静水应力效应	/ 71
4.1.3	正应力效应	/ 73
4.1.4	中间主应力效应	/ 74
4.2	建立破坏准则的理论基础	/ 76
4.3	破坏准则的一般特点	/ 81
4.3.1	破坏准则的描述方法	/ 81
4.3.2	破坏曲面的特点	/ 83
4.4	本章小结	/ 85
第5章	复杂应力状态下沥青混合料破坏特征、强度特性及破坏准则研究	/ 87
5.1	沥青混合料气囊三轴试验条件	/ 87
5.2	常规三轴条件下沥青混合料力学特性研究	/ 90
5.2.1	平面等压/轴向压缩条件下的力学特性及破坏特征	/ 90
5.2.2	平面等压/轴向拉伸条件下的力学特性及破坏特征	/ 96
5.3	双向应力状态下沥青混合料力学特性研究	/ 100
5.3.1	平面拉压条件下的力学特性	/ 100
5.3.2	平面受压/轴向压缩条件下的力学特性及破坏准则	/ 106
5.4	三向应力状态下沥青混合料力学特性研究	/ 113
5.4.1	平面拉压/轴向压缩条件下的力学特性及破坏准则	/ 113
5.4.2	平面拉压/轴向拉伸条件下的力学特性及破坏准则	/ 117
5.4.3	平面不等压/轴向压缩条件下力学特性及中间主应力效应研究	/ 122
5.5	沥青混合料破坏准则的数学表达式	/ 127
5.6	本章小结	/ 138

第6章 结论与展望 / 142

6.1 主要结论 / 142

6.2 主要创新点 / 144

6.3 研究展望 / 145

参考文献 / 146

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

至2017年底,我国已建成通车高速公路13.6万公里,居世界第一位,其中90%以上为沥青路面;预计此后十几年内还要新建数万公里高速公路和百万公里普通公路。在高等级公路沥青路面的施工建设过程中,道路工作者解决了大量的技术难题、积累了丰富的实践经验。但从近年来已投入运营的沥青路面使用状况来看,许多沥青路面结构未达到设计寿命,便出现了不同程度的损害,造成了巨大的经济损失。特别是重载超载车辆的大幅增加,使得沥青路面受到各种各样的破坏与损伤。在研究这些问题时,一次荷载作用下的强度问题是研究各种破坏问题的基础。

长期以来,沥青混合料强度特性研究一直是国内外道路工作者关心的热点问题。在车轮荷载作用下,沥青路面处于明显的三维复杂应力状态,其承受的三向主应力不等,且可能是压或拉应力的不同组合。在三向压缩荷载作用下,沥青混合料的强度会有所增大;在拉、压荷载作用下,沥青混合料的强度可能会有所减小。因此,现行的以最大拉应力作为破坏准则的沥青路面结构设计方法,有时会偏于保守,有时也会很危险。事实上,一些学者早就认识到复杂应力状态下沥青混合料强度特性研究的重要性,只是苦于缺乏相应的复杂应力试验设备,故未能开展相关的工作。在这一背景下,本书开展了沥青混合料强度试验方法与强度理论的相关研究。

沥青混合料强度特性研究中存在的问题可概括为:单轴强度试验多、多轴强度试验少,强度影响因素分析多、强度理论研究少。道路工作者多数是分析材料组成结构、材料性质、加载速度、试验温度等因素对沥青混合料单轴强度的影响,却较少去研究复杂应力状态下沥青混合料的强度特性。已有研究存在的不足主要体现在以下三个方面:

一是应用得较为广泛的弯曲试验、直接拉伸试验及间接拉伸试验,它们存在着破坏原因不明的问题。由于缺乏强度理论的系统研究,故对沥青混合料进行强

度试验以及强度取值时存在着任意性。弯曲试验、直接拉伸试验、间接拉伸试验的条件和受力状态不同,所得到的强度指标迥然不同,却较少有人从强度理论的角度研究这些破坏现象之间的内在联系,从而导致沥青路面结构设计时所选用的强度指标存在着随意性,其结果对结构设计的科学性的影响是不言而喻的。

二是缺乏适合沥青混合料的复杂应力试验设备。试验手段是强度理论研究的基础,但开发试验仪器对测试设备、测试系统、试件加工等技术的要求均较高,且存在着成本高、技术复杂、研发周期长、不确定性大的特点。缺乏相应的试验仪器,已成为复杂应力状态下沥青混合料强度特性研究的瓶颈,虽然自 20 世纪 80 年代以来,复合应力试验机和真三轴试验仪得到不断改进,但这些试验仪器多针对岩土材料和金属材料的研发,而不适合沥青混合料。

三是尚不清楚复杂应力状态下沥青混合料究竟适用何种强度理论。目前,强度理论的研究及成果大多集中于岩石(土)和金属材料,较少有关于沥青混合料强度理论的研究成果。第一强度理论、第二强度理论和莫尔强度理论在路面设计中虽均有应用,但在应用中,都未考虑路面结构实际处于三维复杂应力状态,且中间主应力会对沥青混合料产生破坏作用这一事实,更没有人就各种强度理论对沥青混合料等不同路面材料的适用性开展过研究。

针对上述问题,本书在充分调研的基础上,借鉴国内外已有的研究成果,首先在不同试验方法下对沥青混合料的强度特性进行分析;然后开发沥青混合料三维应力状态下的力学性能试验技术;最后,进行复杂应力状态下的试验,分析沥青混合料强度特性的一般规律,观察沥青混合料的破坏特征。以此为基础,建立沥青混合料的破坏准则。该准则适用于各种应力状态下的抗力计算,有助于提高路面设计的精细化水平。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 沥青混合料强度试验方法综述

常用的沥青混合料强度试验方法有单轴压缩试验、弯曲试验、直接拉伸试验、劈裂试验、三轴试验和剪切性能试验,用以评价材料的拉、压、弯、剪性能。虽然大部分道路工作者对这些试验方法都很熟悉,但在这里还是介绍下这些试验方法并讨论其存在的问题。

1. 单轴压缩试验

单轴压缩试验方法分为圆柱体法和棱柱体法,用于测定沥青混合料在规定温度及加载速率条件下受压至破坏过程的力学性质,试验条件见表 1-1。

表 1-1 沥青混合料单轴压缩试验条件(圆柱体法)

试验方法	试件尺寸/mm	加载速率/(mm·min ⁻¹)	试验温度/℃
我国试验规程 JTG E20—2011	直径 100±2 高 100±2	2	测试模量 20±0.5 验算弯拉应力 15±0.5
ASTM D174	直径 101.6±2.5 高 101.6±2.5	5.08	25±1
AASHTO T167	直径 101.6±2.5 高 101.6±2.5	5.08	25±1

棱柱体法采用长 40 mm×宽 40 mm×高 80 mm 的试件,其形状和尺寸明显区别于圆柱体法,加载速率通常为 50 mm/min。关于单轴压缩试验的文献较多,如延西利通过拉、压试验分析了实验变量对沥青混合料强度构成特性及内在参数黏结力、内摩擦角值的影响。李帅进行了宽域加载速率下的抗压强度试验,得到了抗压强度随加载速率变化的全曲线。

2. 弯曲试验

弯曲试验是国内外常用的评价沥青混合料低温抗裂性能的试验方法。其试验条件如表 1-2 所示。

表 1-2 沥青混合料弯曲试验条件

试验方法	试件尺寸/mm	加载速率/(mm·min ⁻¹)	试验温度/℃
“七五”科技 攻关课题	长 250 宽 25 高 30 跨径 200	50 5 跨中加载	-20~20
我国试验规程 JTG E20—2011	长 250 宽 30 高 35 跨径 200	50 跨中加载	测定力学性质: 15±0.5 评价低温抗裂性能: -10±0.5

国外曾用三点加载试验,测试了长 381 mm×宽 82.55 mm×高 82.55 mm 梁的劲度模量和弯拉强度。也有人在温度为 -20~30℃时,采用 $1\times 10^{-4}\sim 1.9$ mm/s 的应变速率,对 2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm 的试件进行了三点弯曲试验。张肖宁^[4]认为变形速率每降低一个数量级,弯曲破坏特征曲线会向低温区平移 6~7℃。他根据时间-温度换算法则,把各温度下的相同应变速率换算成同一温度下不同的应变速率。按照 $t_B=\varepsilon_B/\varepsilon'$ (ε' 为换算应变速度, ε_B 为破坏时的应变)计算出破坏经历的时间,消除中间变量 t_B 后,得到了不依赖于温度和时间的 σ_B-

ε_B 破坏包络线。森吉昭博等绘出了弯拉强度 σ - 破坏应变 ε - 破坏时间 t 关系的三维模式图。

3. 直接拉伸试验

虽然直接拉伸试验没有列入试验规程,但从受力角度来讲,直接拉伸试验适合评价沥青混合料的抗拉性能,测试指标主要有抗拉强度和拉伸应变。但在试验过程中易产生偏心受力,会影响试验结果的准确性。直接拉伸试验一般采用长 250 mm × 宽 50 mm × 高 50 mm 的棱柱体小梁试件。Haas 曾测试过矩形梁试件的抗拉强度;西安公路交通大学曾在不同温度和不同加载速率条件下,对“八字形”试件进行了直接拉伸试验。吕嵩巍为了防止试验过程中试件偏心受拉,采用球铰形拉头黏接试件,并用圆柱形钢筒对心。刘宏富得到了直接拉伸强度与加载速度的函数关系。沈金安认为抗拉强度与温度的关系呈山峰状,在脆化点温度处出现峰值。

4. 劈裂试验

我国采用劈裂试验结果作为路面设计参数,国内外劈裂试验条件如表 1-3 所示。

表 1-3 沥青混合料劈裂试验条件

试验方法	试件尺寸/mm	加载速率/(mm · min ⁻¹)	试验温度/℃
我国现规程 JTG E20—2011	直径 101.6 ± 0.25 高度 63.5 ± 1.3	50 1	15 ± 0.5 -10 ± 0.5
AASHTO T283	直径 102, 集料小于 25.4 直径 152.4, 集料大于 25.4 未规定厚度	50	
ASTM D4123	直径 101.6 ± 0.25 高度 63.5 ± 1.3	50	5、25、40
英国	直径 101.6 ± 0.25 高度 63.5 ± 1.3	50	
第 18 届世界 道路会议报告	直径 101.6 ± 0.25 高度 63.5 ± 1.3	18 51	-10、25、45

劈裂试验基本是采用马歇尔试件,只是加载速度略有不同。由于试验较为简单,许多单位都进行了相关研究。我国“七五”科技攻关和“八五”科技攻关中,得到了沥青混合料劈裂破坏强度、破坏应变和破坏劲度模量随温度及加载速度的变

化情况。

5. 剪切性能试验

20 世纪 90 年代，加拿大 Carleton 大学研发了第一代现场剪切试验设备 CiSSST(The Carleton In-Situ Shear Strength Test)，该设备用环氧树脂将一钢圆盘固定在路面上，对钢圆盘施加扭矩使路面发生剪切破坏，再根据损坏锥体上的扭矩计算出路面的抗剪强度。2000 年，Carleton 大学研发了第二代现场剪切试验系统 InSiSST，见图 1-1，用于沥青路面车辙变形的预估及长期使用性能的预测。美国公路战略研究计划 SHRP 开发了剪切试验机 SST 以评价沥青混合料的高温抗剪性能。在国内，孙立军提出了单轴贯入试验，在圆柱体试件的上表面通过一个尺寸较小的钢压头加压，来模拟路面的剪应力分布特征。郭忠印设计了同轴剪切试验，模拟垂直荷载和水平荷载综合作用下路表的剪应力分布特征。郑健龙提出了一种能形成锥形剪切破坏面的圆环剪切试验，以评价沥青混合料的抗剪强度及剪切疲劳性能。同济大学设计出 MTS 材料试验机上的斜剪试验，评价桥面铺装层、高等级路面基层和面层层间的黏结力和抗剪强度。苏凯等针对沥青混凝土路面的层间滑移破坏问题，研制出了斜剪试验仪。直剪试验也常用于测定路面结构的层间抗剪强度。



图 1-1 第一代(左)和第二代(右) Carleton 现场剪切试验设备

6. 三轴剪切试验

沥青混合料三轴试验可分为开式和闭式两种，图 1-2 为沥青混合料围压三轴试验机。开式三轴试验仪器比较复杂，应用得较少。闭式三轴试验一般采用直径 (100 ± 2.0) mm $\times$ 高 (200 ± 1.5) mm 的圆柱体试件，将试件用橡皮膜包裹后放在压力室中，通过气体施加围压，使试件处于三向等压应力状态，然后通过活塞在轴向施压以产生偏应力差，直至试件发生破坏。通过测定黏结力 C 及内摩擦角 φ ，评价沥青混合料的高温稳定性。Elvira、Charif 和谢泽华分别通过三轴试验得

到了沥青混合料抗剪强度随围压增大的线性关系。

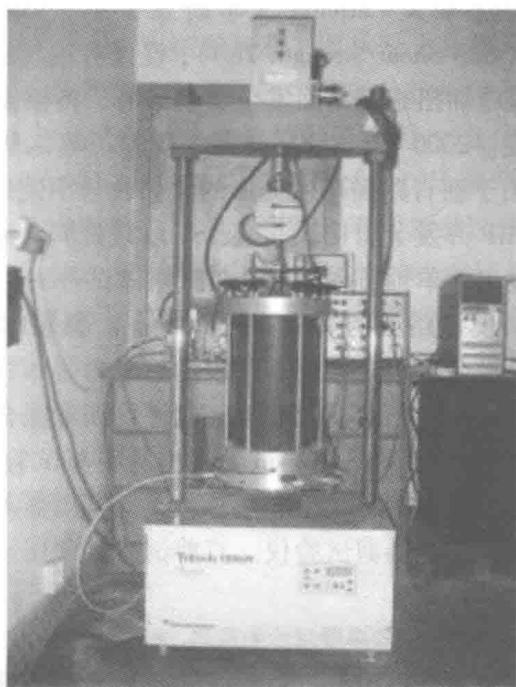


图 1-2 沥青混合料围压三轴试验机

从受力模式来看,三轴试验实现的是一种特殊的、两个主应力数值相等的三向应力状态,其最大缺点是不能反映中间主应力对材料的破坏作用。在车轮荷载和温度荷载的共同作用下,路面结构处于三维复杂受力状态,且可能是拉应力和压应力的不同组合。围压三轴试验方法显然无法模拟,因此也就难以用于沥青混合料破坏准则研究。综上所述,现行的强度试验方法难以模拟路面材料的三维复杂受力状态。因此,有必要研发复杂应力试验设备,以便对沥青混合料的强度特性展开研究。

1.2.2 复杂应力试验设备

强度理论的试验研究是强度理论研究的一个重要方面。“工欲善其事,必先利其器”,试验仪器的优劣直接决定着强度理论研究的成败。近年来,在试验机的研制、试验技术及试验内容等方面,都得到迅速的发展,下面进行介绍。

1. 拉伸(压缩)-扭转试验机

薄壁圆管在拉(压)荷载和扭转荷载作用下,产生一种拉-剪(压-剪)复合应力状态。由于圆杆扭转时的剪应力沿截面成线性三角形规律分布,因此,只有

在管壁较薄时才能形成均匀分布的应力场,这对试件的加工及试验技术的要求都较高。图1-3为轴向力-扭转复合试验机,轴向力-扭转试验多用于金属类材料,较少用于沥青混合料强度特性的研究。

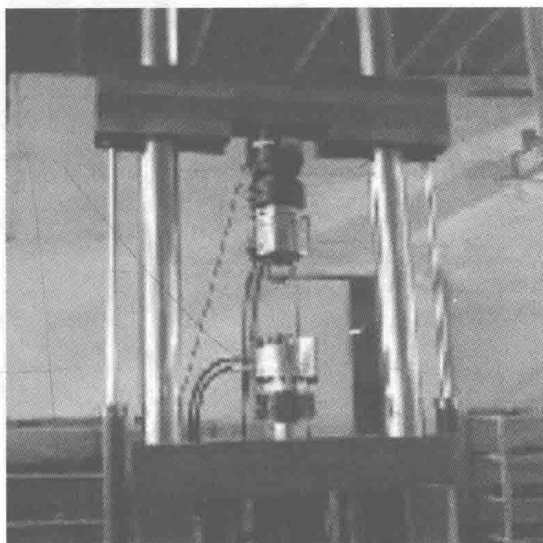


图1-3 轴向力-扭转试验机

2. 双向应力试验机

在自然界的大多数情况下,物体处于三维复杂受力状态。但在一些特定情况下,会出现 $\sigma_1 > \sigma_2, \sigma_3 = 0$ 的两向受力状态,如地下洞室的顶、底和侧墙。由于这种情况比较特殊,故双轴压缩试验没有三轴试验开展得广泛,国内外还没有关于双向加载试验的标准。双向加载试验有着重要的理论价值。双向加载试验系统(图1-4)的基本要求是能够在两个方向独立施加荷载,并将荷载均匀分布到试件上。自20世纪60年代以来,Hobbs、Akaik、Mogik、Parate和Mitri Betoumay分别采用双向加载设备,对不同类型的岩石进行了双向压缩试验,明确了中间主应力对材料强度的影响,认为双向压缩强度通常情况下会大于单轴抗压强度。他们所采用的试件形状包括圆柱体、长方体和立方体。在国内,河南理工大学和加拿大McGill大学联合研发了等刚度双向加载系统IBLS。与以往的双向加载设备相比,该装置在各加载方向上都设置了球形鞍座,可消除加压面间因轻微不平行而造成试件内部受力不均匀的情况。

3. 轴对称三轴试验机

如前所述,轴对称三轴试验设备已普遍使用,它所产生的是一种特殊的、两个主应力数值相等的三向应力状态,即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ 或 $\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$ 的应力状态,

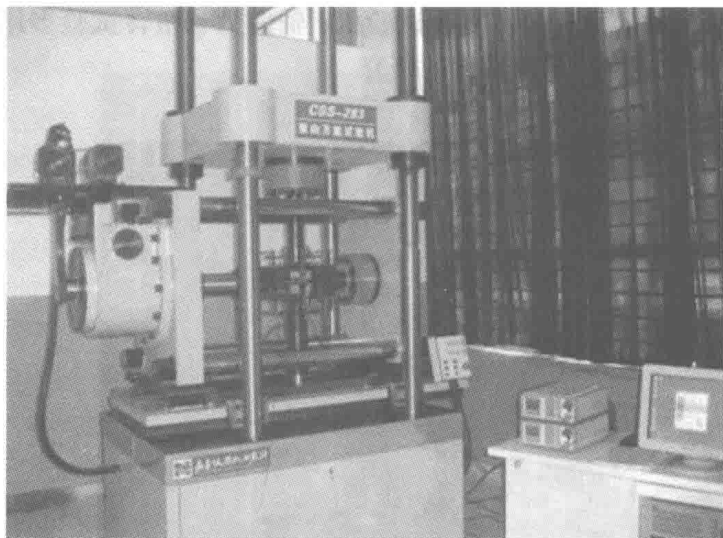


图 1-4 双轴加载试验机

图 1-5 所示为岩石轴对称三轴试验机。



图 1-5 岩石轴对称三轴试验机

4. 真三轴试验机

真三轴试验(图1-6)是从三个主应力方向对立方体试样加载,用于研究复杂应力条件下材料的力学特性。长期以来,真三轴试验机的设计一直是一个活跃并且具有挑战性的研究领域。自 Kjellman 成功设计真三轴仪以来,国内外先后研制了多种真三轴仪。我国水利电力部水利科学研究院、清华大学、同济大学、河海大学、大连理工大学、武汉岩土力学研究所从 20 世纪 80 年代开始研制真三轴试验设备,且取得了较好的效果。按照中间主应力的施加方式,真三轴试验仪一般可分为“刚性加载方式”“柔性加载方式”“刚柔复合加载方式”三种类型。

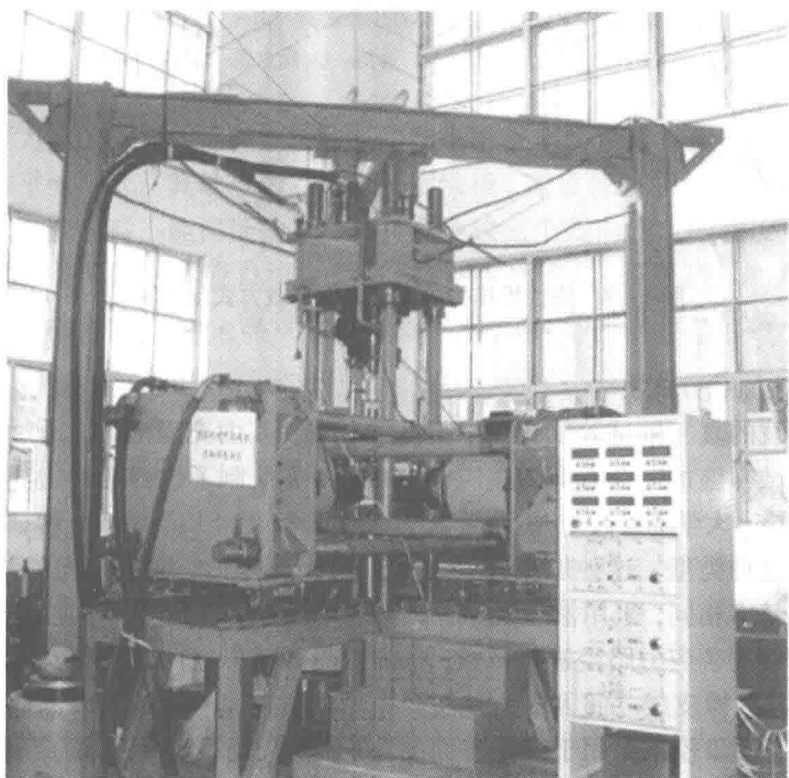


图 1-6 真三轴试验机

(1) 刚性加载方式

刚性加载的真三轴试验仪利用 6 个刚性板对试件施加三个方向的主应力,如图 1-7 所示。其代表是瑞典 Kjellman 和英国剑桥大学 Pearce 研制的真三轴仪器,它们都适用于砂土。这种真三轴仪研制较早,其加载方式的优点为:①应变控制的全刚性加载方式,试件在各方向均产生均匀的应变,应变的测量较为准确;②在主压方向上能产生较大的轴向变形,可模拟复杂的应力应变路径;③能在加载

板上安装空隙压力计及压力盒等。其缺点为：①加载板之间存在摩擦，试件内部应力分布不均匀且难以检验，不适于剪切挠曲；②当轴向应变较大时，会导致加载板互相干扰，不能实现预定的应力路径；③仪器的体积和质量较大，操作复杂。由于刚性加载方式的缺点较多，现在很少有人用这种方式加载。

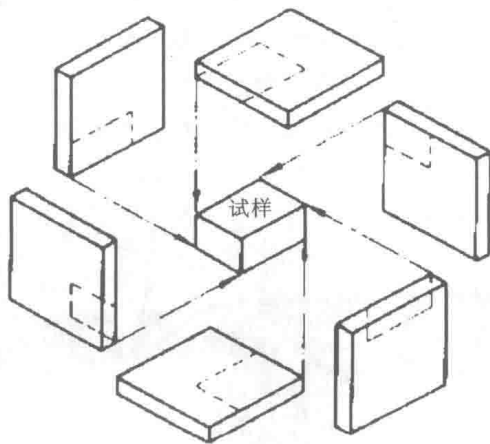


图 1-7 刚性板结构的真三轴仪加载方式示意图

(2) 柔性加载方式

柔性加载的真三轴试验仪有 6 个柔性加载囊，其内充满液体，通过对液体施加压力藉对试样施加三个方向的主应力。Bell 最先研制了这种柔性边界加载的真三轴仪。Surrey 大学 Mengles、墨西哥大学 Marsal 和美国 Ko 和 Scott 等研制的真三轴仪都属于这种类型。这种加载方式的优点为：①其三个加载方向的结构相同，测量精度也基本相同，采用液压加载，试样各表面（除转角处外）应力分布均匀；②能按预定的复杂应力路径进行试验；③加载囊与试样之间的摩擦力较小。其缺点为：①相邻的橡皮袋之间因压力差而产生角隅效应，使得试件内部应力分布不均匀；②只有逐步校正作用于试样表面的法向应力，才能进行平面应变试验；③柔性囊施加的荷载有限，其上限通常为 20 MPa，如图 1-8 所示。

(3) 刚柔复合式加载方式

复合加载是由刚性板加载与柔性面加载组合而成的混合加载方式，即在试件的轴向通过刚性板加载，另外四个表面采用柔性板加载，或者两对应的表面用柔性板加载，另外两对应的表面用刚性板加载。伦敦大学的 Green 最先研制了复合式加载的真三轴仪，日本谷诚研舍、藤株式会社、京都大学，美国 GCTS (Geotechnical Consulting and Testing System) 公司研制的真三轴仪，国内河海大学殷宗泽、同济大学赵锡宏、原吉林工业大学（现吉林大学）许东俊、西安工业大学邵生俊、上海交通大学叶冠初等研发的真三轴仪都属于刚柔复合的加载方式。其