

黄土公路隧道结构性能劣化 机理与评价处治技术

来弘鹏 谢永利 刘禹阳 ◎ 著

非
外
借



科学出版社

黄土公路隧道结构性能劣化 机理与评价处治技术

来弘鹏 谢永利 刘禹阳 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对在役黄土公路隧道结构病害问题,在总结已有黄土公路隧道相关研究成果的基础上,详细研究黄土围岩浸水恶化后隧道衬砌结构性能演化特征和劣化机理,并选取适用于围岩浸水恶化情况下黄土隧道衬砌结构的相关评价指标,建立相应的隧道健康评级体系。同时,选取适用于隧道衬砌结构裂缝修补的地聚合物胶凝材料的最佳配合比,并研究地聚合物胶凝材料在两种状态下的黏结性能和修补效果,论证了地聚合物胶凝材料作为衬砌裂缝修补材料的可行性。

本书适合隧道工程方面的科研、设计、施工人员阅读,也可供高等院校、科研院所相关专业的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土公路隧道结构性能劣化机理与评价处治技术/来弘鹏,谢永利,刘禹阳著. —北京:科学出版社,2018. 5

ISBN 978-7-03-056902-8

I. ①黄… II. ①来…②谢…③刘… III. ①土质隧道-公路隧道-隧道工程-结构性能-研究 IV. ①U459. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 049619 号

责任编辑:周 炜 张晓娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:338 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着国家路网建设的逐步完善,我国中西部地区大量黄土公路隧道相继竣工并投入运营。黄土独特的结构性与水敏性使得黄土围岩浸水后力学指标变化较大,导致大量黄土公路隧道运营时在水环境变化下出现了不同程度的病害问题,特别是地下水位变化、降水入渗、农业灌溉等水环境改变引起的隧道开裂、底鼓、渗水、掉块等病害屡见不鲜。这些病害的出现不仅影响衬砌结构的美观和耐久性,破坏结构的完整性,缩短隧道的维护周期和使用寿命,同时降低行车人员的感官安全,甚至可能造成隧道的整体坍塌,导致巨大的经济损失和不良的社会影响。因此,围绕围岩浸水恶化下黄土隧道衬砌结构性能演化特征与劣化机理,带裂缝衬砌安全性能的评价标准、评价方法和评价体系,以及隧道衬砌结构裂缝和渗漏水修补材料的研制和防治技术等问题亟须解决。

本书在总结已有黄土公路隧道相关研究成果的基础上,以黄土结构性与水敏性为切入点,引入黄土结构性参数与黄土结构性本构关系,运用有限元二次开发、数值计算、物理模型试验和数理统计等手段,结合自主研发的“隧道衬砌结构力学性能测试平台”,详细研究黄土围岩浸水恶化后隧道衬砌结构性能演化特征和劣化机理;引入隶属度和隶属函数,构建安全等级隶属函数,改进隧道健康等级评价中常用的分级评定方法,利用模糊综合评价法和短板效应理论,选取适用于围岩浸水恶化下黄土隧道衬砌结构的相关评价指标,建立相应的隧道健康评级体系;最后利用自主研发的“隧道衬砌裂缝诊治平台”,选出适用于隧道衬砌结构裂缝修补的地聚合物胶凝材料的最佳配合比,并通过“隧道衬砌裂缝诊治平台”模拟隧道衬砌裂缝的张拉应力开裂和带水状开裂,研究地聚合物胶凝材料在两种状态下的黏结性能和修补效果,论证了地聚合物胶凝材料作为衬砌裂缝修补材料的可行性。

本书相关的研究得到了国家自然科学基金项目(51008029、51378071)的资助,在此表示衷心的感谢。陈锐老师以及硕士研究生宋维龙、杨文辉、崔达、乔永强等参与了部分研究工作,在此对上述做出贡献的相关人员表示衷心的感谢。

希望本书的出版,能够进一步完善黄土隧道病害防治和养护理论研究,促进隧道裂缝和渗漏水处治新材料的研发,为我国隧道相关规范(或规程)修订提供必要的基础数据和科学依据。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 目的及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 黄土本构关系及其在衬砌结构研究中的应用	3
1.2.2 隧道衬砌试验设备研发	5
1.2.3 黄土隧道围岩恶化对衬砌结构的影响研究	8
1.2.4 隧道衬砌结构裂缝研究	9
1.2.5 健康评价体系研究	11
1.2.6 隧道裂缝修补方法及材料研究	12
1.2.7 地聚合物胶凝材料及性能研究	15
1.3 本书主要内容	18
第 2 章 结构性邓肯-张本构模型及其二次开发	20
2.1 概述	20
2.2 黄土的结构性参数及公式拟合	20
2.2.1 三轴剪切条件下黄土结构性参数 m_{∞}	20
2.2.2 三轴剪切条件下黄土结构性参数 m_{∞} 的公式拟合	22
2.2.3 三轴剪切条件下黄土结构性参数 m_{∞} 计算软件设计	27
2.3 静荷作用下非饱和黄土的结构性邓肯-张本构模型	29
2.3.1 结构性邓肯-张本构模型的推导	30
2.3.2 黄土结构性邓肯-张本构模型的二次开发	32
2.3.3 ANSYS 中黄土结构性邓肯-张本构模型的验证	40
2.4 小结	42
第 3 章 围岩浸水恶化后黄土隧道衬砌受力数值计算	43
3.1 概述	43
3.2 黄土隧道围岩浸水及衬砌结构劣化的客观存在	43
3.3 黄土裂缝浸水扩散范围	45
3.4 建立有限元模型	46
3.4.1 本构关系与单元选择	47
3.4.2 边界条件和模型参数	47

3.4.3	计算工况的确定	48
3.5	二次衬砌表面接触压力结果分析	50
3.5.1	两侧拱脚围岩浸水	50
3.5.2	两侧拱腰围岩浸水	52
3.5.3	一侧(右侧)拱脚围岩浸水	55
3.5.4	一侧(右侧)拱腰围岩浸水	56
3.5.5	一侧(右侧)拱脚围岩与另一侧(左侧)拱腰围岩浸水	58
3.6	小结	59
第4章	隧道衬砌结构力学性能测试平台的研发与试验设计	61
4.1	概述	61
4.2	隧道衬砌力学性能测试平台的设计	61
4.2.1	驱动系统	62
4.2.2	加载系统	63
4.2.3	控制系统	64
4.3	试验测试平台安全性验算	66
4.4	测试平台的操作流程	71
4.5	试验测试平台可靠性验证	73
4.6	黄土围岩浸水恶化下隧道衬砌模型试验设计	75
4.6.1	相似理论及量纲分析	75
4.6.2	试验相似条件及相似常数	78
4.6.3	衬砌相似材料试验	80
4.7	模型衬砌制作	84
4.8	试验测试内容及元件布设	89
4.8.1	量测内容与目的	89
4.8.2	测试元件布设	89
4.9	加载工况	90
4.9.1	开始加载至未浸水阶段加载	90
4.9.2	不同浸水工况下加载	91
4.9.3	浸水 5m 至模型失稳阶段加载	94
4.10	小结	95
第5章	黄土围岩浸水恶化下衬砌结构力学性能演化特征	96
5.1	概述	96
5.2	不同浸水工况下衬砌应变分布规律	96
5.2.1	未浸水阶段	97
5.2.2	不同浸水工况	98

5.3 围岩浸水过程中衬砌内力变化及分布	108
5.3.1 衬砌轴力变化及分布	108
5.3.2 衬砌弯矩变化及分布	118
5.3.3 内力变化及分布	128
5.4 小结	129
第6章 黄土围岩浸水恶化下衬砌结构性能劣化机理	132
6.1 概述	132
6.2 衬砌变形和裂缝发展规律	132
6.2.1 两侧拱脚围岩浸水	132
6.2.2 两侧拱腰围岩浸水	135
6.2.3 一侧(右侧)拱脚围岩浸水	138
6.2.4 一侧(右侧)拱腰围岩浸水	141
6.2.5 一侧(右侧)拱脚围岩与另一侧(左侧)拱腰围岩浸水	144
6.3 围岩浸水条件下衬砌裂缝分布特征	147
6.3.1 横断面裂缝类型分布规律	147
6.3.2 裂缝形态分布规律	149
6.3.3 开裂部位分布规律	150
6.3.4 纵向贯穿长度分布规律	150
6.3.5 开裂深度分布规律	152
6.3.6 贯通类型分布规律	154
6.3.7 内外侧分布规律	155
6.3.8 压板相对位置分布规律	156
6.4 衬砌结构能量变化分析	158
6.4.1 衬砌开裂对整体结构卸能范围分析	158
6.4.2 衬砌开裂对局部结构卸能范围分析	161
6.5 带裂缝衬砌可承担荷载比	167
6.6 围岩浸水衬砌劣化后衬砌重点加固位置及加固目标	169
6.6.1 裂缝分布特征判断围岩浸水类型	169
6.6.2 围岩浸水恶化下衬砌劣化后衬砌重点加固位置及加固目标	169
6.7 小结	171
第7章 围岩浸水恶化下黄土公路隧道结构健康综合评价体系	174
7.1 概述	174
7.2 评价体系构建总体思路	174
7.3 评价等级的确定	175
7.4 安全隶属度函数构建	176

7.4.1	现行分级评定标准缺陷	176
7.4.2	安全等级隶属度	176
7.4.3	建立安全等级隶属函数	177
7.5	评价体系各构建要素分级	178
7.5.1	裂缝(内因)分级	178
7.5.2	围岩(外因)分级	186
7.5.3	耦合程度分级	186
7.5.4	耦合关系分级及调整标准	188
7.6	综合评价体系评定原则及评价流程	189
7.6.1	综合评价体系评定原则	189
7.6.2	隧道评定区段评定单元划分	191
7.6.3	各评定单元健康等级评定	191
7.6.4	隧道衬砌结构整体健康等级评定	192
7.6.5	评价流程	192
7.7	衬砌结构健康综合评价体系可靠性验证	193
7.7.1	检验工况选取	193
7.7.2	检验工况评价过程演示及评定结果	193
7.7.3	其余检验工况评定结果	195
7.7.4	检验工况评定结果分析	200
7.8	小结	201
第8章	隧道结构裂缝修补材料的配合比及性能研究	203
8.1	概述	203
8.2	试验原材料	203
8.3	地聚合物胶凝材料的配合比	204
8.3.1	地聚合物胶凝材料的影响因素	204
8.3.2	配合比对抗折强度的影响	205
8.3.3	配合比对抗压强度的影响	210
8.3.4	配合比对黏结强度的影响	213
8.3.5	最佳配合比的确定	216
8.4	地聚合物胶凝材料的性能试验	217
8.4.1	地聚合物胶凝材料的抗压强度试验	217
8.4.2	地聚合物胶凝材料的抗折强度试验	219
8.4.3	地聚合物胶凝材料的凝结时间试验	220
8.4.4	地聚合物胶凝材料的 X 射线衍射试验	222
8.4.5	地聚合物胶凝材料的 SEM 试验	223

8.5 小结	224
第9章 试验平台研制与试验设计	226
9.1 概述	226
9.2 隧道衬砌裂缝诊治平台简介	226
9.3 平台应力公式的推导	230
9.3.1 力学公式	230
9.3.2 力学计算	231
9.4 试件的制作和修补材料的调配	232
9.4.1 混凝土试件的制作	232
9.4.2 修补材料的调配	233
9.5 平台应用	234
9.6 小结	235
第10章 隧道衬砌裂缝修补模型试验及工艺流程	237
10.1 概述	237
10.2 无张拉应力状态下裂缝修补试验及结果分析	237
10.3 张拉应力状态下裂缝修补试验及结果分析	240
10.4 带水状态下裂缝修补试验及结果分析	242
10.4.1 带水状态下裂缝修补试验	242
10.4.2 地聚合物防水性能试验	245
10.5 地聚合物胶凝材料修补工艺流程	246
10.5.1 无渗漏水隧道裂缝的修补工艺	247
10.5.2 渗漏水隧道裂缝的修补工艺	248
10.6 小结	248
参考文献	250

第 1 章 绪 论

1.1 目的及意义

黄土是在暖湿、冷湿、干旱气候的反复波动和逐渐交替过渡环境中,沿袭不同古地貌,上覆于不同地层岩性,经受同期或非同期多次不同程度地质作用改造而形成的一套不同时代、不同成因,具有独特物质组成、物理、力学特征和地貌景观的第四系大陆松散堆积物^[1,2]。

黄土分布广泛,全球各大洲均有分布,总面积约1300万 km²,占陆地面积的9.3%。我国黄土分布面积约64万 km²,占国土面积的6.3%。其中,湿陷性黄土在我国的分布面积约占到全世界的3/4。黄土具有显著的多孔性且垂直节理发育,结构性明显,竖向透水性较强,同时,粉末性的颗粒组成决定了黄土具有湿陷性,遇水后固结能力减弱,强度下降明显,常常会引起强烈的沉陷和变形^[3,4]。

我国黄土公路隧道工程建设开始较晚,根据资料记载,第一座黄土公路隧道为修筑在陕西北部黄土高原上的黑山寺隧道,单车道、青砖衬砌,1958年试验性修建,1965年建成,早期黄土分布区修筑的公路隧道数量少且要求较低,存在的技术问题并不十分突出,随着国家基础设施建设力度的进一步加大、西部大开发的不断深入以及路网的逐渐完善,隧道工程建设快速进入经济欠发达的西部省区,穿越黄土地区的隧道也越来越多,近年来先后在甘肃、陕西、山西、河南等省修建了大量黄土隧道,部分公路隧道概况见表1.1^[5]。

由于黄土结构与物理力学性状的独特性,新的问题不断暴露,已建公路隧道出现不同程度的病害,个别隧道甚至在使用的开始几年就存在严重的安全隐患,如衬砌开裂、隧道渗漏水、变形侵限、掉块、坍塌、下沉、底鼓等。一般情况下,多种病害会同时存在,并且它们之间相互作用、相互影响。一旦衬砌裂缝未能处治妥当,就会造成结构的渗漏水,这种情况不但不易治理,而且会给隧道的正常运营造成影响,甚至还会造成隧道中照明、通风和消防设施的锈蚀及损坏。除此之外,路面积水也恶化了车辆的行驶环境,降低了车辆的行驶速度。这些病害不仅增加隧道的运营成本,而且严重影响隧道作为快捷便利通道功能的发挥^[6~8]。黄土围岩含水量对高速公路隧道稳定性影响显著,针对不同含水量,黄土隧道需采用不同的支护、加固措施^[9](表1.2)。

表 1.1 近年来部分典型黄土公路隧道概况

隧道名称	长度	线别	贯通时间	备注
羊泉隧道	全长 6146m	青兰高速公路陕西段	2010 年 8 月 7 日	目前西北地区第一长隧道
墩梁隧道	左线全长 1328m 右线全长 1415m	榆商高速公路神木—府谷段	2010 年 12 月 28 日	隧道开挖高度为 12.19m 最大开挖跨度达 17.32m 开挖断面面积达 171m ²
离石隧道	全长 180m	离石高速公路青岛— 银川国道山西省汾阳段	2005 年	我国第一条黄土连拱隧道
西凌井隧道	左线全长 3275m 右线全长 1420m	太贵高速公路东段	右线 2010 年 7 月 19 日 左线 2010 年 7 月 31 日	V 级黄土围岩长 1713m
柯家庄隧道	左线全长 2528m 右线全长 2598m	青兰高速公路陕西段	2009 年 11 月 20 日	V 级黄土围岩长 1550m
王家会隧道	全长 212.5m	军渡段高速公路青岛— 银川国道主干线山西省 离石段	2007 年	目前我国最长的黄土双连拱 隧道
马腾空隧道	全长 1000m	西安绕城高速公路南段	2003 年	最大埋深为 30m 最大跨度为 17.66m 最大开挖高度为 12.8m
南阳山隧道	上行线长 3290m 下行线长 3328m	兰磨西部大道临洮县康 家崖—临夏高速公路段	2010 年 11 月 9 日	—

注:表中数据为调查资料,与实际情况可能有出入。

表 1.2 高速公路隧道黄土围岩含水量与支护关系

黄土含水量/%	特征	支护参数
≤17	天然含水量	围岩稳定性好,按普通黄土隧道设计
17~26	土质变软,施工时仰拱可能积水	围岩较稳定,仰拱开挖后喷混凝土封闭 (5~10cm)
26~32	水从钻孔中流出,若 用手掌接触开挖面, 手掌沾水	围岩稳定性差,按有水黄土设计, 仰拱紧跟,及时封闭,支护加强。 必要时仰拱采用钢花管压浆加固

近几年,农业灌溉、降水入渗、地下水位变化等围岩条件恶化导致的隧道病害屡见不鲜,其中衬砌开裂现象最为普遍^[10]。在降水较多地区和地表农业灌溉区内,大量隧道衬砌在拱顶、拱腰和边墙均存在横向、纵向或斜向分布的裂缝,拱顶正中部位裂缝多为纵向,部分衬砌裂缝存在渗水、白色晶体析出现象。衬砌开裂

不仅影响隧道的美观和耐久性,而且破坏衬砌结构完整性,缩短使用寿命,增加运营成本,严重情况下会造成衬砌的整体崩塌,导致巨大的经济损失和不良社会影响^[11~13]。因此,需要研究黄土隧道在运营阶段的受力、变形、劣化发展的机理,并坚持“预防为主,防治结合”的理念,从而保证隧道结构的安全性和耐久性要求。

本书针对围岩浸水恶化条件下黄土隧道结构劣化这一研究内容,考虑黄土结构性与水敏性特征,引入黄土结构性参数,编译考虑黄土结构性的本构关系,明确黄土围岩浸水的时空演变,制定并进行相应的衬砌模型试验;探讨黄土围岩浸水的时空演变关系,研究黄土围岩浸水恶化后隧道变形及衬砌结构性能演化特征,给出黄土围岩浸水恶化下隧道衬砌裂缝发生发展过程及分布特征,得到衬砌结构劣化机理;建立黄土围岩浸水恶化下隧道衬砌结构健康评价体系,并开发出适用于渗漏水条件下的隧道衬砌新型修补材料,这些均对围岩恶化条件下在役黄土隧道衬砌结构劣化研究、长期安全性以及隧道修补加固具有重要的理论价值和实际指导意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 黄土本构关系及其在衬砌结构研究中的应用

弹性模型是材料本构关系中最简单的一种。最常见的弹性模型有在 Konder 双曲线基础上的以弹性模量与泊松比为变形参数的邓肯-张(Duncan-Chang)模型及以 K 、 G 为变形参数的 Domaschuk-Valliappan 模型、Battellino-Majes 模型和 Naylor 模型。邓肯-张模型因参数少、物理意义明确且可以利用常规三轴剪切试验确定而成为国内外广泛采用的岩土模型,但该模型的缺点是没有反映土体中主应力、剪胀性、应力路径和土体的各向异性。为了克服邓肯-张模型的这些缺点,沈珠江^[14,15]用体应变氏和剪切应变氏表示成球应力和剪应力的形式,从而反映了土体的剪胀性。以上为双参数弹性模型,其最大的缺点是无法考虑剪胀性。为此,沈珠江建议用三参数剪胀模型。还有考虑更多因素的四、五、七和九参数的模型等。

刘祖典^[16]先后提出黄土湿陷变形以及原状黄土、饱和黄土、挤密黄土、击实黄土、高围压下黄土的应力-应变关系曲线。分析了原状黄土(Q_2 、 Q_3)随沉积年代及侧压力的不同而表现出的不同类型和形式,基本呈三种类型,即软化型、硬化型和理想塑性型,分别得到黄土的非线性弹性模型和弹塑性模型的本构方程,并应用在黄土边坡稳定性分析及考虑上部结构与地基共同作用的饱和黄土地基变形-强度分析中。

陈正汉等^[17]在考虑吸力的基础上进行了两种三轴试验:一是控制净平均应力

等于常数的三轴收缩试验;二是控制室压力、孔隙气压力和基质吸力为常数的三轴排水剪切试验,提出包括土的变形和水量变化的非饱和土的增量非线性模型。该模型考虑了土骨架变形和水体积变形,是饱和土的邓肯-张模型的合理推广,当吸力为 0 时退化为邓肯-张模型;可预测不排水三轴试验中的吸力变化,该模型共有 13 个参数,其中,11 个参数与土的变形和强度有关,另外 2 个参数与水量变化有关,适用于重塑非饱和黄土。

谢定义等^[18]依据土力学研究的方法,首次将土结构的颗粒排列特征和联结特征两个方面结合起来,提出了判断土结构性强弱的标准,建议了一个简明、可靠、实用且能全面反映土结构性的几何特征和力学特征的土结构性参数,同时揭示了它与土变形和强度特征具有密切而规律性的联系。

夏旺民^[19,20]通过常规三轴试验揭示了 Q_1 黄土的应力-应变软化和剪胀特性。对软化型应力-应变曲线提出用驼峰曲线模拟,对体变曲线也提出用能反映剪胀特性的驼峰曲线模拟,建立了 Q_1 黄土的非线性弹性 K 、 G 模型,揭示了势线的硬化部分和软化部分具有相同的椭圆曲线形式,采用椭圆来表示塑性势函数,采用特定塑性功函数为硬化参数建立了 Q_1 黄土的软化型弹塑性本构模型。而后又通过在对原状黄土和其不同干容重的重塑黄土进行大量常规试验的基础上,分析黄土的变形、强度和结构性,根据损伤力学理论,提出一个能够综合反映黄土增湿和加载作用下的弹塑性损伤本构模型,并对黄土工程问题进行模拟分析。

王朝阳^[21]针对非饱和黄土通过三轴试验和无损 CT 扫描技术,对黄土的细观结构、孔隙等变化进行观测,定义了非饱和黄土的损伤变量,将 CT 机得到的 CT 数据与宏观的力学现象联系起来,建立了非饱和黄土的非线性损伤本构方程。

李如梦^[22]首先基于谢定义和邵生俊等提出的对土的结构性的研究方法,对兰州地区原状黄土、重塑黄土、饱和黄土进行了压缩、固结、三轴剪切试验,分析和总结了结构性参数的变化规律。在上述工作的基础上,提出一个新的反映土的结构性损失的指标 m 。基于沈珠江的把变形中的土体看成原状土和重塑土两种材料的混合物,并且用双弹簧模型描述两者分担应力的思路,在土的本构模型中引入土的结构性损失参数,提出一种考虑结构性影响的弹塑性本构模型。

骆亚生^[23]从土的强度和变形受结构性控制的规律是相同的这一结论出发,提出和定义了基于强度考虑的土结构性量化参数,即强度型结构性参数,弥补和发展了变形型结构性参数。通过结构性参数对非饱和黄土静、动应力-应变关系曲线的归一化作用效果分析,揭示了它与土变形和强度特性密切而规律性的关系,提出非饱和黄土在静、动力作用的复杂应力条件下结构性的本构关系。

周飞飞^[24]在饱和正常固结土的非线性弹性本构模型基础上引入黄土结构性损伤演化规律,通过不同含水量和固结围压时常规三轴剪切试验结果的分析,建立考虑非饱和黄土结构性的增湿本构模型,他的研究特点是考虑了增湿和加荷引

起的结构损伤演化规律,强调结构性对本构关系的影响,同时将结构性土体的硬化型和软化型应力-应变关系曲线视为变形统一过程,原因是原生结构损伤和次生结构生成的过程,所谓硬化和软化只是两者在不同状态下(如固结围压 σ_{3c} 和含水量 ω 不同)表现出的相对程度不同。

张腾^[25]在已有结构性参数成果的基础上,采用常规三轴剪切仪和应力控制三轴仪,应力控制三轴仪在试验过程中可改变轴向应力和侧向应力的大小,使黄土在复杂应力条件下的结构性研究更好的实现,更能全面反映土体结构特征的变化规律,使黄土的结构性研究更加全面、完善,最终建立结构性黄土的应变软化和应变硬化的弹塑性本构模型。

冯志焱^[26]考虑了目前能够定量反映土结构性的结构性参数(如综合结构势),仅在偏压的剪切应力状态下,故对其进行改进、完善,使综合结构势的思想扩展应用于对土初始物理状态下结构性的描述和等向应力条件下土结构性的描述,并将它们与已有的偏压剪切应力状态下的结构性参数的研究成果相结合,来跟踪描述土结构性从初始状态到不同受荷状态下变化的全过程,最终将土结构性参数变化规律引入原状黄土的应力-应变关系中,在静力和动力条件下建立非饱和原状黄土的本构模型。

钟祖良^[27]在伊柳辛假设的前提下在应变空间内根据 Q_2 原状黄土的试验结果,对弹塑性变形分离,作出流线和势线图,并假定塑性流动符合相关联流动法则,选用塑性功函数为硬化、软化函数,建立了应变空间的 Q_2 原状黄土弹塑性本构模型。

邓国华^[28]在真三轴条件下对黄土的结构性参数进行研究,在弹塑性剑桥模型的基础上,对屈服面进行修正,从塑性功出发得到随结构性移动和变化的临界状态线和屈服面,假设服从相关联流动法则推导得到修正的剑桥模型。

1.2.2 隧道衬砌试验设备研发

关于隧道衬砌结构试验设备研制和物理模型试验,国内外学者已开展了相关研究:张强勇等^[29]研制出一种岩土地质力学模型试验系统,如图 1.1 所示,该系统可对岩石相似材料包裹的隧道模型施加非线性荷载,从而研究隧道及围岩相应的应力与变形情况。

Chen 等^[30]利用荷载分散梁在围岩上部施加均布荷载,如图 1.2 所示,通过小比例模型试验研究了在极限荷载作用下砖砌隧道的真实力学性能变化。

Seki 等^[31]利用了一种立方体三维加载装置,如图 1.3 所示,全方位约束围岩变形并对隧道下部围岩施加荷载,研究确定了用于评估不同加载工况下导致不同程度路面拱起病害的主要因素。

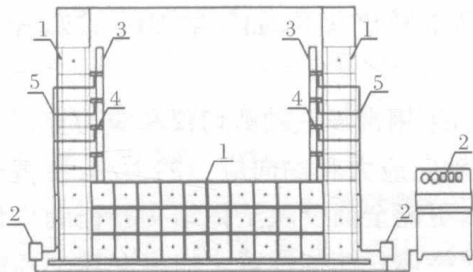


图 1.1 岩土地质力学模型试验系统

1. 盒式台架装置; 2. 液压加载控制试验台;
3. 变荷加载板; 4. 微型千斤顶; 5. 高压油管

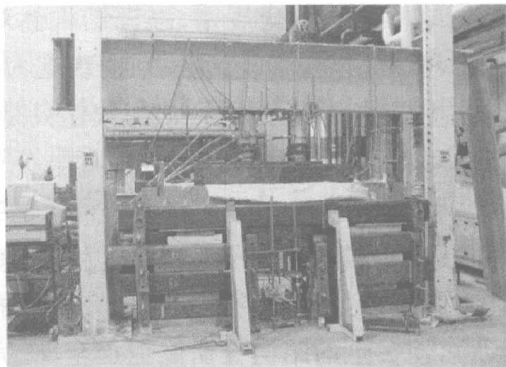


图 1.2 地层加载设备

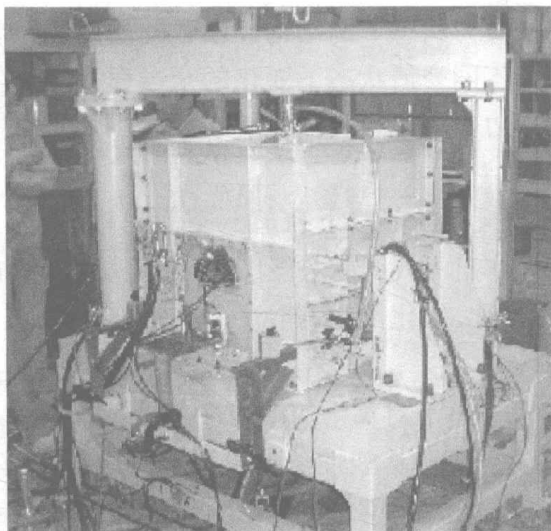
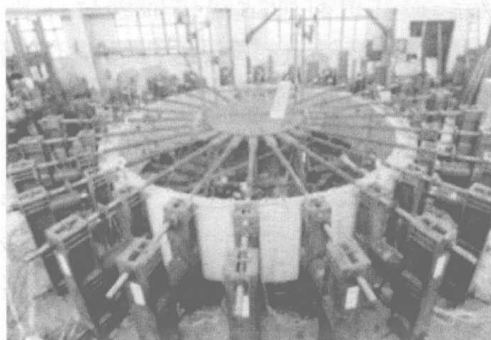


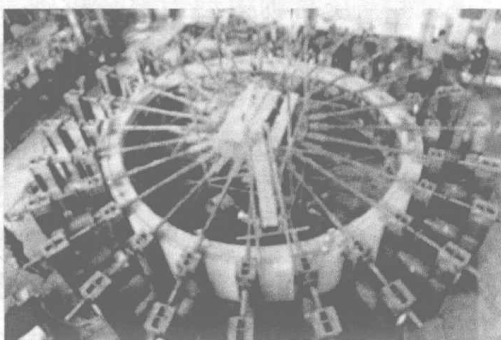
图 1.3 立方体三维加载装置

鲁亮等^[32]、曹文宏等^[33]研制了 1:1 地铁圆形衬砌加载平台,如图 1.4 所示,衬砌周边布设 24 个集中力加载点,模拟地层抗力、水土压力和地面超载等荷载,该平台可用来研究不同加载效应下隧道管片的横向大变形及承载力问题。Zhao 等^[34]利用该平台进行全尺寸模型试验并与数值方法结合,对环氧树脂黏结钢板加固的盾构衬砌提出一种简化的非线性数值模拟方法。

Nakamura 等^[35]研发了一种异性衬砌加载装置,如图 1.5 所示,基坑壁提供有效反力与支撑,用以研究异性衬砌在不同受力情况下的衬砌变形与受力情况。西南交通大学研制了可模拟水荷载的密闭非均匀水压加载装置,如图 1.6 所示,通过对衬砌模型预先施加一定环箍力来模拟水荷载。何川^[36~38]利用该平台研究了



(a) 平台实景(侧面)



(b) 平台实景(立面)

图 1.4 1:1 地铁圆形衬砌加载平台

在衬砌结构产生病害后,不同刚度的内表面补强材料下不同补强范围对衬砌结构最终承载力的影响,得到相应补强形式下结构最终破坏形式和内力分布等情况。何本国等^[39]利用该平台研究了在水压与围岩作用下隧道衬砌结构的内力分布和开裂特性。

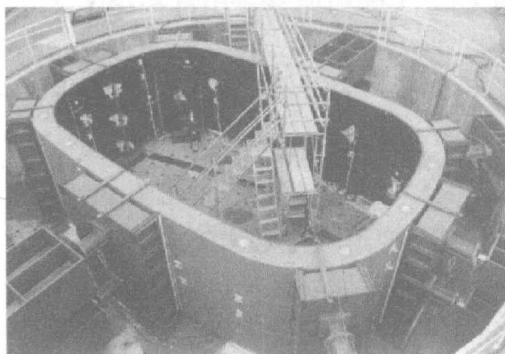


图 1.5 异性衬砌加载装置

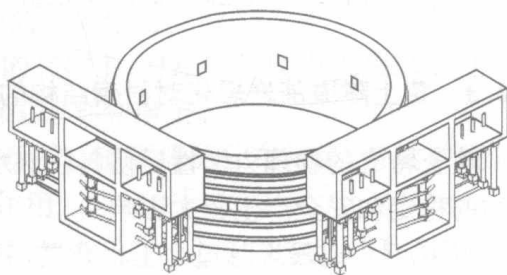


图 1.6 模拟水荷载的密闭非均匀水压加载装置

Wang 等^[40]利用振动平台通过对隧道及围岩施加振动荷载,结合汶川地震现场病害实测值,研究隧道衬砌在振动荷载作用下衬砌裂缝病害的发展情况。Lei 等^[41]利用土工模型试验箱,通过改变围岩地表倾斜角度模拟不同偏压情况,研究浅埋偏压隧道衬砌力学特征和破坏机理。

同济大学用弹簧模拟地层抗力研制了隧道结构加载装置,隧道衬砌仰拱以上布设 7 个加载点,仰拱只布设弹簧模拟地层抗力。刘学增等^[42~44]利用该平台研究了叠合式套拱加固带裂缝隧道衬砌的破坏特征以及偏压和二次受力下衬砌受力影响。俞文生等^[45,46]利用该平台研究了分离式套拱加固带裂缝衬砌的变形规律。

闫治国^[47]研制了可三向加载的多功能衬砌力学性能试验系统,如图 1.7 所

示,该试验系统衬砌模型为部分衬砌,可对马鞍形隧道衬砌结构拱部进行加载。刘学增等^[48]利用该平台研究了叠合式套拱加固带裂缝隧道衬砌受力机理和破坏机制。

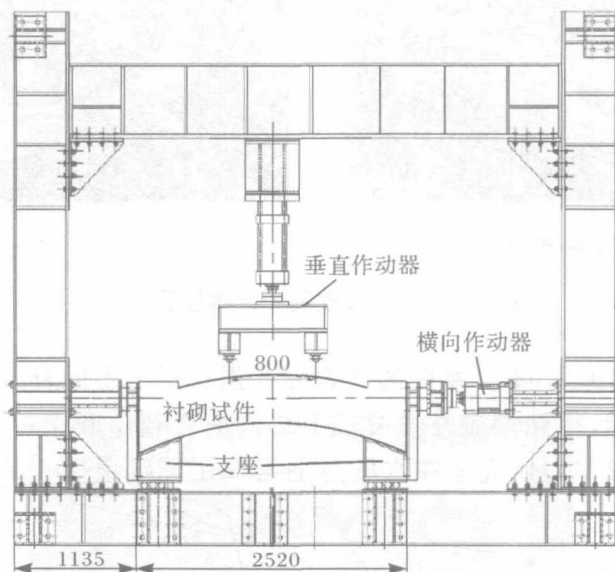


图 1.7 可三向加载的多功能衬砌力学性能试验系统(单位:mm)

1.2.3 黄土隧道围岩恶化对衬砌结构的影响研究

黄土特有的物理力学性质使其在遇水后强度及变形发生较大变化,对地下结构物的稳定和安全产生较大影响。

赵占厂^[49]以浅埋隧道为工程背景,分局部浸水和全面浸水两种工况对围岩发生浸水后隧道结构和土体的受力与变形性状进行了模拟,并针对黄土公路隧道衬砌结构的受力特性,进行了系统全面的大规模现场测试。

来弘鹏等^[50]认为黄土地区隧道病害的基本类型包括渗漏水、塌方、衬砌变形破坏及地表变形,指出黄土的类型、物理力学性质、地层结构特性和人们对黄土渗流场的认识不足是隧道病害的主要原因。

来弘鹏等^[50]针对新庄岭黄土公路隧道衬砌开裂的病害特征,运用数值模拟和现场实测等手段对其产生机理进行详细探讨,对其病害产生原因进行详尽的分析。康佐等^[51]引进了非饱和黄土基质吸力的概念,建立了各向同性对称平面问题的弹塑性解,认为非饱和黄土含水量的增加是隧道结构出现病害的原因。

陈福江^[52]以郑西高铁张茅隧道为工程依托,得出张茅地区黄土的基本物理力学性质指标,分析了该地区黄土的抗剪强度和压缩模量随含水量的变化规律,总结归纳出隧道围岩含水量的变化对隧道形态影响的变化规律。丁兆民等^[53]通过