

四川省2020—2021年度重点图书出版规划项目

海南 环岛高速铁路 设计关键技术研究与应用

姚裕春 郑长青 陈思孝 潘自立 杨佳 著



西南交通大学出版社



四川省 2020—2021 年度重点图书出版规划项目

海南环岛高速铁路 设计关键技术研究与应用

姚裕春 郑长青 陈思孝 潘自立 杨佳 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目（C I P）数据

海南环岛高速铁路设计关键技术研究与应用 / 姚裕春等著. —成都：西南交通大学出版社，2021.4
ISBN 978-7-5643-7890-5

I. ①海… II. ①姚… III. ①高速铁路—铁路工程—研究—海南 IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2020）第 244575 号

Hainan Huandao Gaosu Tielu Sheji Guanjian Jishu Yanjiu yu Yingyong
海南环岛高速铁路设计关键技术研究与应用

姚裕春 郑长青 陈思孝 潘自立 杨佳 / 著

责任编辑 / 姜锡伟

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

（四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031）

发行部电话：028-87600564

网址：<http://www.xnjdcbs.com>

印刷：四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸 210 mm × 285 mm

印张 25.25 字数 648 千

版次 2021 年 4 月第 1 版

印次 2021 年 4 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-7890-5

定价 168.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

前言

海南环岛高速铁路是全球第一条环岛高速旅游铁路，正线全长 653 km。项目所处环境具有高温、高湿、高盐、强台风、强降雨、强腐蚀等热带海洋性气候特点，海南环岛高铁地基土层主要为花岗岩全风化层，该项目的建设需要解决以下几个关键技术难题：

（1）揭示海南环岛高铁花岗岩全风化层路基的沉降特性，提出花岗岩全风化层路基的沉降计算方法和高速铁路地基处理原则，可以有效避免出现实际沉降值明显小于计算沉降值造成工程浪费的问题，以及为在工期限制情况下选择合理、经济的地基处理措施提供依据。

（2）美兰机场地下车站为国内外首个高速铁路地下车站，揭示高速列车通过地下车站隧道的气动效应规律，构建车站隧道气动效应综合缓解技术体系及设计标准，是实现美兰机场地下车站隧道安全运营的关键。

（3）海南环岛高铁桥梁通过海水潮汐渐变段多位于 L3、H4、Y4 及以上的严重腐蚀环境中，《铁路混凝土结构耐久性设计规范》（TB 10005—2010）未提出相应设计标准，建立高温高湿海洋环境桥梁混凝土结构防腐蚀新评价技术体系，提出严重腐蚀环境下铁路桥梁混凝土防腐技术，是实现高铁桥梁百年耐久性的关键。

（4）海口东站为国内外首次连续梁桥铺设无砟轨道交叉渡线道岔和简支梁桥铺设 12 号单开道岔的车站，必须揭示简支梁桥无砟无缝道岔、连续梁桥交叉渡线的动力响应特征，建立简支梁桥上无砟无缝道岔及连续梁桥交叉渡线道岔计算理论及设计方法。

（5）海南环岛高铁所处的地区为沿海强台风强降雨频发区，必须提出有效的强台风、强雷电、强腐蚀环境下电气化装备结构形式、防雷方式及防腐蚀技术体系，并建立强台风环境下接触网结构计算方法。

（6）海南岛为强台风强降雨频发区，提出沿海强台风强降雨条件下路基边坡有效加固防护形式是确保路基稳定和列车安全运行的基础保障。

针对海南环岛高速铁路建设存在的技术难题，通过资料调研、室内外试验、模型试验、数值模拟、理论分析、现场测试等手段，对花岗岩全风化层地基修建高速铁路

路基的沉降控制和强降雨强台风路基边坡防护、高速铁路地下车站隧道气动效应影响控制、高温高湿海洋环境桥梁混凝土结构防腐蚀、高架梁桥无砟轨道岔区设计，以及强台风、高腐蚀、强雷电条件下电气化装备可靠性等关键技术难题进行了系统研究，取得了以下重要成果：

（1）揭示了花岗岩全风化层路基的沉降特性，提出了花岗岩全风化层路基沉降计算方法和高速铁路地基处理原则。

（2）揭示了高速列车通过地下车站隧道的气动效应影响规律，提出了地下车站隧道气动效应及屏蔽门系统气动荷载取值，构建了车站隧道气动效应综合缓解技术体系。

（3）建立了桥梁灌注桩混凝土性能评价新指标，提出了灌注桩和墩身承台耐久性提升技术，研发了适应严重腐蚀环境的混凝土表面涂装涂层防护体系，形成了严重腐蚀环境下铁路桥梁混凝土防腐施工技术。

（4）提出了简支梁桥无砟道岔和连续梁桥交叉渡线无砟道岔的“车-岔-桥”耦合分析模型及设计方法，研发了简支梁桥 12 号无砟单开及连续梁桥交叉渡线无砟道岔结构，形成了桥上无砟道岔设计和维修技术标准。

（5）提出了沿海强台风环境下高速铁路接触网防风型整体腕臂和绝缘刚性吊弦悬挂系统及其设计方法，创新了将回流线升高兼作避雷线的防雷方式，构建了防强台风、强雷电、强腐蚀的接触网技术体系。

（6）揭示了路基边坡不同防护形式、不同植被护坡和不同自然森林形态的抗强降雨强台风的防护效果，提出了沿海强台风强降雨条件下路基边坡加固防护形式选择原则。

海南环岛高铁的成功建设可有效提升海南国际旅游岛的品质，为热带海岛高速铁路工程建设树立标杆，尤其可为东南亚热带海洋地区国家高铁建设提供重要的借鉴。

本书按概述、花岗岩全风化层地基沉降特性及处理技术研究、地下车站高速列车隧道空气动力学效应及工程对策研究、高温高湿海洋环境桥梁混凝土结构防腐蚀技术研究、高架桥梁桥上无砟无缝岔区技术研究、沿海强台风强降雨条件下路基边坡加固防护研究、沿海强台风地区电气化装备适应性研究共 7 章对研究取得的成果进行系统论述。

本书编写时参阅和引用了相关参考资料，在此对相关作者表示感谢！鉴于本书编写时间仓促及作者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，敬请专家、读者批评指正。

作 者

2020 年 10 月

目 录

1	概 述	001
1.1	海南环岛高速铁路项目背景	001
1.2	国内外相关技术现状	004
1.3	项目研究主要内容	015
2	花岗岩全风化层地基沉降特性及处理技术研究	017
2.1	花岗岩全风化层物理力学性质试验研究	017
2.2	花岗岩全风化层地基现场原位试验研究	022
2.3	花岗岩全风化层地基离心机模型试验研究	030
2.4	花岗岩全风化层地基现场监测研究	039
2.5	花岗岩全风化层地基沉降变形仿真模拟研究	046
2.6	花岗岩全风化层沉降特性综合分析	064
2.7	花岗岩全风化层地基加固设计技术	070
3	地下车站高速列车隧道空气动力学效应及工程对策研究	076
3.1	高速铁路车站隧道空气动力学标准研究	076
3.2	高速列车车站隧道气动效应基本规律研究	081
3.3	洞身减压井设置必要性及设置参数研究	097
3.4	车站屏蔽门设置必要性及设置参数研究	112
3.5	洞口缓冲井设置必要性及设置参数研究	127
4	高温高湿海洋环境桥梁混凝土结构防腐蚀技术研究	141
4.1	高温高湿海洋环境桥梁混凝土结构腐蚀机理	141
4.2	高温高湿海洋环境桥梁混凝土制备技术研究	150
4.3	混凝土结构强化防腐蚀措施的适用性研究	170

4.4	适于湿热海洋环境的桥梁混凝土防腐强化材料制备	206
4.5	湿热海洋环境桥梁混凝土结构防腐强化措施施工技术	240
4.6	湿热海洋环境桥梁混凝土结构防腐强化措施检测评定技术	249
5	高架桥梁桥上无砟无缝岔区技术研究	254
5.1	无砟道岔应用概况	254
5.2	桥梁地段客运专线 12 号无砟道岔关键技术理论研究	255
5.3	客运转线 12 号无砟道岔测试	295
6	沿海强台风强降雨条件下路基边坡加固防护研究	314
6.1	沿海强台风作用下边坡防护数值模拟研究	314
6.2	强降雨对边坡影响模型试验研究	327
6.3	强台风强降雨对边坡影响现场试验研究	337
7	沿海强台风地区电气化装备适应性研究	347
7.1	强台风环境电气化装备防风技术研究	347
7.2	强雷电环境电气化装备防雷技术	372
7.3	高温、高湿海洋环境下电气化装备表面防腐技术	376
	参考文献	390

1.1 海南环岛高速铁路项目背景

海南环岛高铁是全球唯一环岛高速旅游铁路，正线全长 653 km。项目所处环境具有高温、高湿、高盐、强台风、强降雨、强腐蚀等热带海洋性气候及位于高烈度地震区等特点。海南环岛高铁的成功建设可有效提升海南国际旅游岛的品质，为热带海岛高速铁路工程建设树立标杆，尤其可为东南亚热带海洋地区国家高铁建设提供重要的借鉴。该项目的建设需要解决以下几个关键技术难题。

1.1.1 花岗岩全风化层地基沉降特性及处理技术

海南环岛高铁地基大多为深厚花岗岩全风化层，按现行《建筑地基基础设计规范》(GB 50007)，花岗岩全风化层属中等压缩性土。根据现有设计规范沉降计算理论，在花岗岩全风化层上修建高速铁路特别是无砟轨道高速铁路，其计算沉降通常不满足设计要求。我国在京津、武广、京沪等无砟轨道高速铁路建设中均采用了大量的 CFG 桩（水泥粉煤灰碎石桩）、钢筋混凝土桩板结构、钢筋混凝土桩网结构等地基加固处理措施，但各线大量的沉降实测资料表明，实际沉降值明显小于计算沉降值，其地基土也大多为中等压缩性土。可见掌握花岗岩全风化层这种中等压缩性土地基的沉降特性及选择合理的沉降计算方法、合理的沉降计算参数至关重要，可做到避免实测沉降明显小于计算沉降造成工程浪费的问题。国外高铁施工工期较长，路堤竣工后一般要放置 2 年以上，待沉降稳定经评估满足设计要求后，才能铺设无砟轨道；国内路堤施工后放置时间一般较短，在没有掌握花岗岩全风化层沉降特性的情况下，很难确定其沉降变形与时间的关系，并难以在工期限制情况下选择合理的、经济的工程加固措施。

海南环岛高铁花岗岩全风化层是我国海南、广东、福建等地广泛分布的花岗岩全风化层的典型代表。鉴于现有的花岗岩全风化层地基加固处理技术尚不成熟，影响高速铁路路基的工后沉降控制及施工工期规划的不利因素还很多。全面深入地掌握花岗岩全风化层地基沉降特性和应力传递规律，优化室内外力学特性试验方法，积累岩土参数和地基沉降资料，对此类地基的设计和施工具有非常重要的工程价值。研究花岗岩全风化层沉降特性及地基加固技术，可给工程设计及应用提供重要参考依据。

1.1.2 地下车站隧道高速列车气动效应控制技术

海南环岛高铁美兰机场隧道，是我国首座设置地下车站的高速铁路隧道。隧道全长

4.6 km，设计速度 250 km/h，中部设置美兰机场车站，车站采用双岛式站台，站台长 230 m，隧道平面如图 1.1-1 所示。

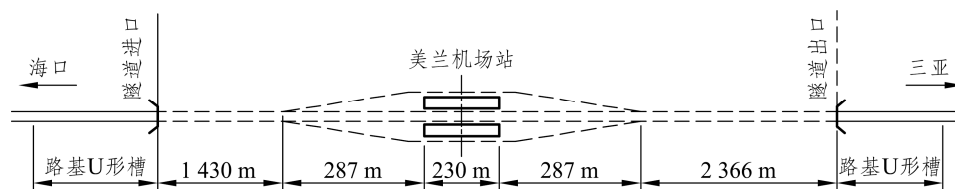


图 1.1-1 美兰机场地下车站隧道平面示意

当列车高速通过车站隧道时，会产生空气压力波动和活塞风等气动效应。不同于密封列车内的旅客，在车站站台上的候车人员，会受到气动效应的直接作用。站台附近最大风速达到 11~15 m/s，对候车人员安全造成了严重威胁；站台内瞬变压力达到 2.6~3.2 kPa/3 s，候车人员将感到不适。

设置站台屏蔽门系统能隔绝气动效应对候车人员的影响，但设置后列车的运行及站内会车会使屏蔽门产生长期的疲劳荷载，其荷载参数需要研究确定。另外，在车站范围内还可能产生微压波，对车站候车环境及相关设施造成影响。同时，国内外尚无高速铁路地下车站压力波动、微压波、风速等相关控制标准。

为解决国内首个高速铁路车站隧道空气动力学效应问题，为工程设计施工提供科学依据，开展高速列车车站隧道空气动力学效应及工程对策研究具有重要意义。研究提出的缓解高速铁路车站隧道气动效应的关键技术，是美兰机场隧道成功建设及安全运营的关键，并为今后高速铁路车站隧道设计提供了重要指导。

1.1.3 高温高湿海洋环境桥梁混凝土结构防腐蚀技术

海南环岛高速铁路位于高温高湿海洋环境中，腐蚀环境类别复杂多样，全线桥梁多位于海水潮汐渐变段，处于 L3、H4、Y4 级的严重腐蚀环境，以及大于 Y4 的极端严重腐蚀环境中，仅通过提高混凝土保护层材料的质量、厚度或采用高性能混凝土等耐久性设计措施无法满足本线混凝土结构的设计使用年限。现行《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB 10005)规定：当混凝土结构位于极端严重的腐蚀环境中时，其耐久性技术措施应进行专门研究和论证；当混凝土结构处于严重的腐蚀环境中时，应根据工程的具体情况，对混凝土结构采取一种或多种防腐蚀强化措施，明确防腐蚀强化措施所用主要材料的性能指标、检测方法及其有效防护年限。

在混凝土防腐蚀强化措施中，涂层防护被认为是最为经济有效的手段，其作用在于阻止腐蚀所需的水分和氧进入混凝土内部。然而，涂层总会有一定的渗透性，一般的涂装很难形成严密坚固的屏蔽保护层；常规涂层的使用年限也受限于其自身的耐候性，使用耐候性欠佳的涂层体系将大大提高其重涂遍数，耗费大量维护成本，且海南的严重腐蚀环境条件会加剧涂层的老化。

针对海南环岛高速铁路的特点，必须根据桥梁所处环境，研究混凝土结构的防腐蚀强化措施，提出防腐蚀强化措施所用主要材料的有效防护年限、性能指标及其检验方法。鉴于相关研究及论证资料相对缺乏、行业间的设计理念和使用年限存在差异等，开展高温高湿海洋环境桥梁混凝土结构防腐蚀技术研究具有重要意义。

1.1.4 高架桥梁无砟轨道岔区设计技术

海口东站为高架桥车站，位于海口市繁华的南海大道附近，城市用地昂贵且紧张。高架车站采用无砟道岔，这种道岔具有恒载轻、整体性强、稳定性好、坚固耐用、轨道变形小等优点。新海口城市高架特大桥全长 21.3 km，桥上有长流、秀英、汽车南、海口东 4 个车站，其中海口东站为配线车站。海口东站需要布置 2 组 12 号交叉渡线（道岔平面采用专线 7623）和 4 组 12 号固定辙叉单开道岔（道岔平面采用专线 4249），均为无砟轨道基础。除一组交叉渡线铺设于（32+48+32）m 连续梁桥上外，其他道岔均铺设于简支梁桥上，道岔平面如图 1.1-2 所示。正线轨道按一次铺设跨区间无缝线路设计。

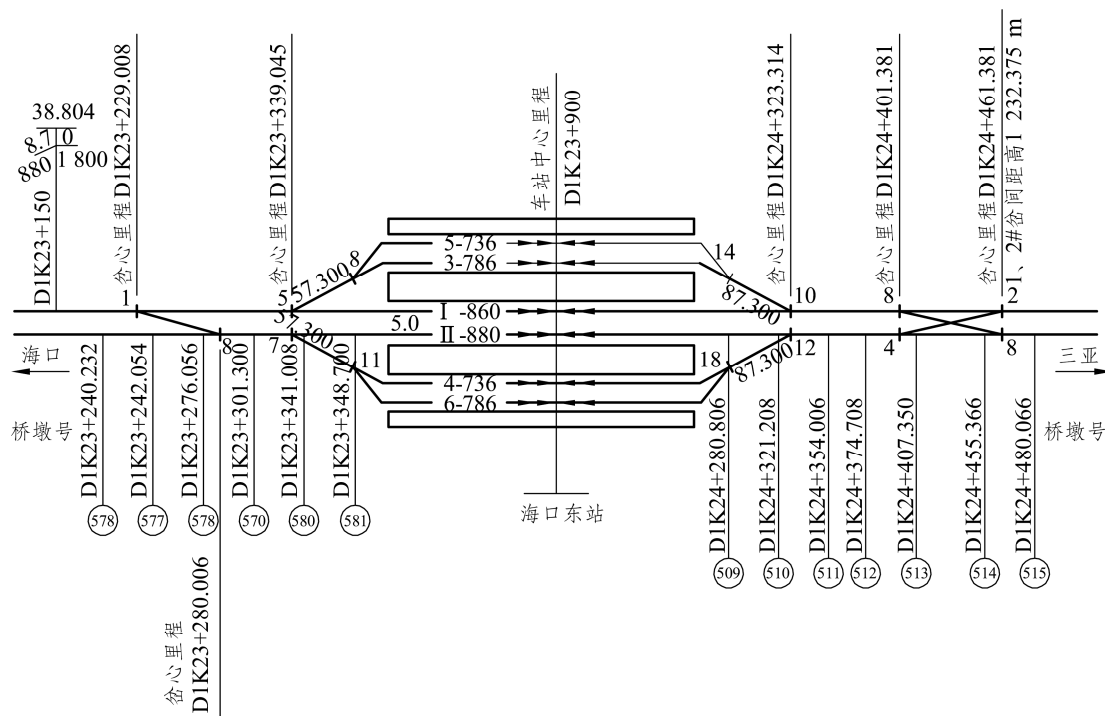


图 1.1-2 海口东站道岔布置平面示意

上述两种道岔只在路基上的有砟轨道中有使用的经验。无砟道岔在德国、日本等高速铁路中有工程应用；国内在地铁和轻轨的正线和辅助线上采用了无砟道岔，在高速铁路路基和连接梁桥上也有相关工程应用。但是，海口东站需要在海口特大桥上铺设无砟轨道交叉渡线道岔和在简支梁桥上铺设 12 号单开道岔，在国内外为首次。因此，开展高架桥梁无砟轨道岔区设计技术研究具有重要意义，可为无砟道岔结构参数确定和铺设方法提供重要技术支撑，填补我国铁路桥梁上无砟交叉渡线设计与施工空白，为客运专线和城际铁路的发展提供技术储备。

1.1.5 沿海强台风强降雨条件下路基边坡加固防护技术

海南省雨量充沛，年平均降雨量为 1 639 mm，有明显的雨季和旱季之分。每年的夏秋季节为雨季，总降雨量达 1 500 mm，占全年总降雨量的 70%~90%，其中台风带来的降雨占有

相当的比例。强台风和强降雨不仅会使护坡植物的树枝折断甚至连根拔起，还会使边坡表层土体产生侵蚀，严重时造成边坡失稳，影响线路的正常运营。强台风强降雨是造成我国东南沿海地区普通土质路基边坡病害的主要原因，而目前针对风和雨尤其是强台风和强降雨联合作用下路基边坡防护工程的研究并不多见。目前，我国边坡防护工程的设计还主要停留在经验基础上，往往照搬固定的模式，初期的防护效果可能较好，但随着时间的推移，防护性能开始减弱甚至消失；所以在边坡防护工程的设计中应注重因地制宜，对护坡工程的防理论进行研究，以达到长久而稳定的护坡效果。因此，需要研究强降雨强台风对路基边坡的影响及路基边坡加固防护措施。

1.1.6 沿海强台风地区电气化装备防风及防腐技术

海南环岛铁路是海南岛上第一条城际电气化铁路。沿海岸线修建的电气化铁路长期面临强台风、高盐腐蚀、强雷电等威胁与考验，给电气化装备的长期、高可靠运行带来了极大的挑战，需要对电气化装备以下几个方面的适应性开展全面深入的研究。

(1) 海南岛地处亚热带海洋性季风气候区，每年都会受不同程度的台风袭击，风速普遍在 45 m/s 以上，最高风速达 55 m/s。强风对接触网设计的影响不可忽视，如沿海支柱的最大风载是内地的 5~6 倍，由风载产生的附加荷载相当大，对接触网支柱和装备的安全、稳定不利。研究电气化装备如何适应沿海地区强台风气候，以确保行车安全，全面掌握沿海岸高速铁路牵引供电系统设计技术，提高电气化铁路的稳定性、可靠性及安全性，具有十分重要的现实意义。

(2) 海南岛气候潮湿，环境中含有大量的 Cl^- ，属于典型的高温、高湿、高盐气候，容易造成输电线路及电气化铁路构件的腐蚀，从而影响结构的安全。而靠海越近，海雾中的氯化物含量越高，在该环境中物体上盐分沉积量也越多，造成的腐蚀也越严重。氯化物会加速点蚀、应力腐蚀、晶间腐蚀和缝隙腐蚀等局部腐蚀，如何解决沿线电气化零部件和设备的防腐是沿海铁路设计中的关键问题。

(3) 沿海地区雷电活动频繁，年平均雷电日均在 100 d 左右，防雷措施尤其重要，特别是接触网等暴露在室外的设施，如果防雷措施不当，会造成雷电击穿绝缘子，引起变电所跳闸，严重影响电气化铁路的正常运营。

1.2 国内外相关技术现状

1.2.1 花岗岩全风化层地基沉降特性及处理技术

花岗岩全风化层是花岗岩岩体在物理化学及生物等风化营力作用下，其结构、成分、性质等产生了不同程度变异的岩石。对花岗岩全风化层的研究主要集中在以下几个方面：花岗岩全风化层的分类研究、花岗岩全风化层的物理力学特性研究、花岗岩全风化层作为建筑物持力层的研究、花岗岩全风化层边坡治理方面的研究、花岗岩全风化层作为填料的试验研究。

风化花岗岩的地质问题主要有：边坡冲蚀和崩解，软弱面的楔形破坏，沿垂直软弱面的

倾覆破坏,崩塌落石,岩堆以及花岗岩风化物的滑坡灾害;作为路基填料,花岗岩风化物边坡在雨季经常发生边坡溜坍;风化花岗岩作为路基基床时产生翻浆冒泥;隧道方面,花岗岩岩体内部的断层有较强的隐蔽性,花岗岩岩体内断层病害规模大,处理困难,花岗岩岩体常被后期岩脉所穿插,岩性不均匀;花岗岩的风化程度不均匀,作为地基会产生不均匀沉降;花岗岩风化物遇水后强度降低,造成摩阻力和端承力不足;风化花岗岩地区的沙化现象严重,破坏自然生态环境。

我国的交通、建筑等建设部门通过对本行业所涉及的工程项目中出现的风化产物研究之后,根据自己工程需要,提出了对花岗岩风化产物或粗或细的分带方法。

T. Y. Irfan总结了国外学者对于花岗岩风化带分带的研究情况。吴能森在对花岗岩残积土进行全面的 research 后,对花岗岩现行的分类方法进行改进,提出了综合分类法。吴宏伟等分析了我国香港地区花岗岩风化分级化学指标体系并对香港的风化壳进行了分带。

栾茂田等通过大量土工试验对取自香港不同地区的三种松散花岗岩全风化残积土的剪切特性,包括峰值强度与峰后稳定状态及其本构模型进行了探讨。翟阳等在对重塑试样的不排水三轴压缩试验研究的基础上,分析了花岗岩全风化层松散填土的工程性能,探讨了相对压实度、固结应力对其性能的影响;分析了土样应力应变关系、初始杨氏弹性模量、脆性指数和稳定状态性能。程昌炳、徐昌伟研究了福建地区的花岗岩残积土去胶结物处理前后的力学特性。赵建军、王思敬、尚彦军、岳中琦、曲永新课题组对香港花岗岩全风化层风化程度的化学指标及微观特征、花岗岩全风化层脆性破裂和塑性蠕变特性、固结特性、花岗岩全风化层的抗剪强度以及试验方法对花岗岩全风化层的影响等进行了详细的研究。简文彬等研究了花岗岩残积土的崩解特性。吴小玲等通过对花岗岩残积土动剪切模量室内和原位试验研究,认为花岗岩残积土是一种低灵敏度的土,其重塑土的动剪切模量比对应的原状土低 20%。

张永波等对花岗岩残积土浅层地基承载力评价方法进行了研究,建议采用标准贯入试验确定花岗岩全风化层地基承载力。林永安通过分析花岗岩残积土静压管桩工程常见问题,提出了相应的处治措施。蔡来炳通过对花岗岩残积土持力层人工挖孔桩承载力的研究,认为:以花岗岩残积土为持力层的人工挖孔桩,桩侧阻力呈现明显的软化特性,单桩承载力主要取决于桩端承载力,设计时可以不考虑桩侧阻力作用;必须采取有效排水措施,降低地下水或持力层的含水量。王沁平通过对含孤石的花岗岩残积土上的复合桩基的研究,认为必须重视花岗岩残积土的结构性。

陈子敬通过对花岗岩残积土边坡破坏机理及规律进行研究,指出了花岗岩全风化层边坡的破坏原因并提出了相应的边坡防护措施。张文华分析了花岗岩残积土的抗剪强度与边坡失稳的规律,认为花岗岩全风化层边坡稳定性主要取决于残积土原生或次生结构面的抗剪强度,对抗剪强度的取值应视不同工程而有所区别,从而指导边坡设计。

胡红梅等对花岗岩残积土进行分类,分析了花岗岩残积土的垂直分带特征及相应的物理力学性能,阐明了花岗岩残积土作为地基持力层和回填土的工程应用,同时指出了福建沿海裸露型花岗岩残积土上部呈硬塑—坚硬,稍湿—稍干,结构中密—密实,属花岗岩全风化层。对于一般低层建筑及建(构)筑物,可充分利用该层残积土作为天然地基持力层。裸露型花岗岩上部残积土液限值一般介于 30%~36%,小于 40%,最优含水量 17%~19%,比天然含水量 16%~17%大,含砂量 10%~20%。这种性能的土料,对于回填碾压夯实十分有利。对于花岗岩残积土回填区的地基处理,主要采用分层压实、强夯、高压注浆、设置振冲碎石桩或低强度混凝土桩等措施。

余自立等、李志勇等对用花岗岩全风化层及其水泥稳定土作为路基填料的工程性质、适用范围和施工工艺进行了研究。王克对残坡积土与花岗岩全风化层混合后用作心墙防渗材料进行了研究,认为花岗岩全风化层颗粒较粗,塑性指数在 10 左右,为砂黏土,但与残坡积土以 1:1 的比例混合后,能满足作为大坝心墙防渗材料使用。马宏剑等通过对广东地区花岗岩全风化层路用性质进行研究,认为在花岗岩全风化层中添加 0.02~1 mm 粒组的细砂,可以提高花岗岩全风化层的 CBR(加州承载比)值,从而满足其作为路基填料的要求。

刘胜娥指出海南省花岗岩残积土的分布面积很广泛,土质多为砂(砾)质黏性土,其物理力学性质及工程地质特征差异较大,但有一定变化规律,垂直分带尤为明显。花岗岩残积土一般为较致密的黏性土,抗剪强度较高,承载力较大,但随其原岩风化程度不同而异。风化程度较弱的花岗岩残积土,砾石的颗粒含量越多,干密度就较大,抗剪强度就越高;风化程度较强的花岗岩残积土,长石高岭土化较完全,土的干密度随着土的含砾量的减少而降低,抗剪强度的降低主要表现为内摩擦角的显著降低。

由上可知,目前虽对花岗岩全风化层的物理力学特性,边坡、路用等花岗岩全风化层的工程性质进行了大量的研究,但是对花岗岩全风化层地区柔性基础下的地基沉降特性仍缺乏系统的研究。在风化花岗岩的沉降、承载力及其相互关系方面,尤其是对于风化花岗岩地基路基工后沉降方面,研究成果还不多见。因此有必要对柔性基础下花岗岩全风化层的沉降变形特性进行系统的研究。

1.2.2 地下车站隧道高速列车气动效应控制技术

1.2.2.1 车站隧道空气动力学效应研究的国内外现状

随着列车运行速度的提高,列车通过隧道时诱发的空气动力学效应将会加剧,引起一系列列车在低速运行时不显著的空气动力学问题:

- (1) 由于瞬变压力造成旅客耳朵不适,乘车舒适度降低。
- (2) 高速列车进入隧道时,会在隧道出口产生微压波,引起爆破噪声并危及洞口建筑物。
- (3) 列车各部件产生的空气动力学噪声加剧(其强度与车速的 6~8 次方成正比)。
- (4) 行车阻力加大,引起对列车动力和总能量消耗的特殊要求。
- (5) 行车阻力加大,引起隧道内热量积聚和温度升高。
- (6) 列车风加剧影响隧道内人员作业,并对铁路员工和车辆产生危害。

上述问题的缓解涉及隧道建筑限界、洞口段形状、洞内设施、轨道构造及车头形状等技术措施的改进。为此,各国在高速铁路隧道结构设计中,都规定了一些技术标准和措施。

当列车进入隧道时,原占据着空间的空气被排开。空气的黏性以及隧道壁面和列车表面的摩擦阻力作用使得被排开的空气不能像在隧道外那样及时、顺畅地沿列车两侧和上部形成绕流。列车前方的空气受到压缩,列车后方则形成一定的负压,这就产生了一个压力波动过程。这种压力波动又以声速传播至隧道口,形成反射波,波的反射、折射、衍射以及干涉将产生一系列复杂的空气动力学效应。这种压力波动过程引起一系列与隧道设计和运营密切相关的空气动力学效应。

解决隧道压力波问题是解决其他隧道空气动力学问题的基础和前提。列车在隧道中运行时空气阻力的合理确定、长大隧道的热环境控制技术以及对运营通风的研究都有赖于隧道压

力波的研究方法和研究成果。列车驶入隧道时所引起的初始压缩波及其在隧道内的传播规律也是研究隧道出口微气压波现象和减缓微气压波效应的基础。

高速列车的速度一般都在 200 km/h 以上, 马赫数将达到 0.17, 属亚声速范围。列车以高速突入隧道, 于列车前端会形成初始压缩波, 该波沿隧道以声速传播。当到达隧道出口时, 大部分向隧道内以膨胀波的形式反射; 一部分则以脉冲状的压力波向隧道出口周围地区辐射出去。该压力波称为隧道微气压波。隧道微气压波在隧道口产生“轰轰”的爆破声, 使洞口附近的房屋门窗“咯嗒咯嗒”作响, 带来环境问题。

影响微压波的因素主要有列车进入隧道的速度、隧道的阻塞比(即列车横断面积和隧道横断面积之比)、隧道长度、隧道内部条件(如轨道结构、道床和衬砌表面类型、有无减缓措施等)和隧道出口地形等。同时, 列车头部形状、长细比对隧道出口微压波也有较明显的影响。其中, 列车进入隧道的速度、隧道的阻塞比是最为重要的两个影响因素。隧道压缩波的压力梯度峰值与列车进入隧道速度的三次方成正比, 而微压波的峰值和压缩波到达隧道出口时的压力梯度峰值大致成正比。

1.2.2.2 洞身减压井研究的国内外现状

缓解气动效应经常采用的措施为设置缓冲设施和设置竖井。由于本隧道埋深浅, 具有设置竖井的条件, 因此, 有必要对设置减压竖井的作用及其参数进行研究。

对于竖井缓解气动效应的研究, 国内外许多学者已经取得了一些成果:

(1) 国际铁路联盟(UIC)试验研究所(ORE)。

英国 Vardy 教授提出了一维有摩擦等熵流假说, 从理论上研究了两列列车在有减压竖井和无减压竖井的隧道中交会时, 列车速度以及列车进入隧道后的移动状态对瞬变压力的影响。

在隧道长度为 1 000 m, 横断面积为 47.5 m², 没有竖井或分别设有 1 个、2 个、3 个或 4 个减压竖井, 列车长度为 200 m, 横断面积为 9.5 m², 列车最大速度为 252 km/h 的情况下, Vardy 教授对 60 种列车交会情况进行了研究。研究表明, 减压竖井数量和位置的合理安排, 可将因高速行驶产生的瞬变压力幅值降低 50% 左右。对每一个隧道都有一个最佳竖井数目。竖井位置的选定应尽可能避免在隧道中发生压力波的不利叠加, 并根据隧道的长度、列车长度和运行速度来确定。单纯靠增加竖井的数目并不能使隧道内瞬变压力值得到显著降低, 同样, 一味增加竖井横断面积也只能使隧道内瞬变压力值有微小降低。

隧道中减压竖井的设置会引起波的叠加, 因此, 须对竖井位置进行优化, 确定最有利的位罝。国外研究表明竖井合理位置在下列区域里:

$$\frac{4Ma^2}{(1-Ma)^2} < \frac{X_s}{L} < \frac{2Ma}{1+Ma} \quad (1.2-1)$$

式中: X_s ——竖井至隧道入口的距离;

L ——隧道长度;

Ma ——列车马赫数, 即 $Ma = v/c$, c 为声速, v 为车速。

(2) 西南交通大学骆建军博士对隧道有无竖井, 竖井断面积、竖井位置、竖井数目的变化对隧道内压力及压力梯度的影响进行了研究。研究表明:

① 有通风竖井时的压力梯度明显比无竖井时的压力梯度小。

通风竖井的存在，使列车前方压力较大的空气，不仅由隧道出口排出隧道，而且也由通风竖井排出隧道，因而使得列车前方的压力有较大幅度的降低。

② 适当增大竖井的断面积，可以降低测点处的压力。当竖井断面积与隧道断面积之比在 0~0.3 之间时，降压效果比较明显。竖井的断面积并不是越大越好，而是存在着一个比较有利的隧道断面积，使得隧道内测点处的压力降低达到最佳效果。

③ 存在一个最佳的竖井位置，使得测点处的最大压力变化降低得最快。

④ 在单线隧道中，增加竖井的数目，其降压效果与只具有一个“最佳”竖井时的降压效果区别不明显。因此，并不是竖井的数目越多，竖井的降压效果就越好。对于给定长度的隧道，竖井的数目是确定的，关键是竖井的位置应当选择在“最佳”位置，这样才能达到最佳的降压效果。对于比较长的隧道（如 10 km 以上），有时为了通风的需要，可在隧道中设置了多个竖井。

1.2.2.3 屏蔽门研究的国内外现状

地铁屏蔽门（Platform Screen Doors，简称 PSDs）系统是随着城市轨道交通不断发展而产生的，最初主要用于环控方面。

地铁运营的特点是行车密度大、停站时间短、运送客流量大，而地铁车站的宽度有限又处于地下，为乘客提供一个安全舒适的候车环境是随着轨道交通事业的发展而提出的一项新的要求。1976 年，由美国交通部的都市运输研究和发展管理局出版的《地下铁道环境设计手册》，首次提出将地下铁道车站站台乘客区与轨行区通过气流或隔墙分隔开的概念，以达到节能的目的。采用气流来进行分隔存在很多问题且难以实施，因此该手册建议采用隔墙分隔，从而发展成为现在世界上很多地铁车站应用的屏蔽门系统。

站台屏蔽门是设在站台边缘，把站台区域和列车运行区域相互隔开的设备。列车未进站时，屏蔽门处于关闭状态；列车进站后，列车门与屏蔽门严格对准，并使列车门与屏蔽门联动开启，以供乘客上下车，待乘降结束后，列车门与屏蔽门同时关闭。它的两个主要的作用就是节能和保证乘客候车安全。

屏蔽门在国外的应用较早，已经比较成熟。1981 年，在日本地铁在 Portdown 线路中采用了半封闭式的安全门系统，主要是用来保证在站台上乘客的候车安全。20 世纪 80 年代投入运营的法国 Lille 市的地铁采用全自动无人驾驶技术，从确保乘客和列车行驶安全因素考虑采用了屏蔽门系统。

屏蔽门系统在国外地下铁道系统中得到了推广应用。1988 年，新加坡地铁主要基于节能考虑，在 NEL 线上首次使用了屏蔽门系统，并且取得了很好的效果。之后欧洲一些国家如英国、法国、比利时等的地铁出于乘客安全方面的考虑，也安装了屏蔽门系统，主要类型是敞开式的，目的仅仅是将乘客和列车隔开，防止乘客自杀和无意跌入隧道，大大降低了乘客被列车撞伤的危险性。

20 世纪 90 年代，我国香港地铁根据十几年运营实践经验，认识到采用开/闭式环境控制系统存在系统设备容量高、用房面积大、工程投资大、车站建筑布置设计困难、运营成本高且不安全的缺点，在后续新线建设中（例如机场线、将军澳线以及九广铁路等）均采用屏蔽门系统，并对已运营的 3 条地下铁路线的 38 个车站进行改造，加装屏蔽门系统。2002 年 12 月 28 日建成开通的广州地铁 2 号线成为我国内地第一个应用屏蔽门系统的地下铁道系统，

随后该系统在上海、深圳等城市新建地铁线路中得到推广应用。屏蔽门系统在以后的新建地铁或旧地铁线路改造中将会得到越来越广泛的应用。

1.2.2.4 洞口缓冲设施研究的国内外现状

20世纪70年代末,在日本的新干线上,最初的隧道断面积较小(60.5~63.4 m²),阻塞比(列车断面与隧道断面的比值)大于0.2,在列车提速到200 km/h后,出现了较明显的空气动力学效应。为减小压力波和微压波,在隧道洞口处设置了多种缓冲结构,并进行了研究和测试。国内外控制压力波动的标准主要有两个方面:①压力峰值控制标准;②压力梯度最大值控制标准。

已经进行的研究表明:隧道出入口的缓冲设施对于降低隧道内压力峰值和压力梯度都有较好的效果。缓冲结构根据其形式可分为无开口缓冲结构、开口缓冲结构、开槽式缓冲结构和喇叭形缓冲结构。洞口缓冲结构的形式应根据地形、地质及周边环境条件等因素确定。

高速铁路车站隧道与普通高速铁路隧道气动效应有本质区别。目前,缺乏高速铁路车站隧道空气动力学效应基本规律研究,缺乏高速铁路地下车站压力波动、微压波、风速等相关标准,缺乏对高速铁路地下车站启动效应缓解措施及相关设置参数的研究。

1.2.3 高温高湿海洋环境桥梁混凝土结构防腐蚀技术

国外对环境作用等级划分的规范有欧洲 *Concrete* (EN 206-2000)、美国 *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-08)、日本 *Recommendations for Design and Construction Practice of High Durability Concrete* (JS-1991)等。我国对混凝土结构耐久性环境作用等级的划分多是参照欧洲规范 *Concrete* (EN 206-1)以及我国《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001),并结合我国历史气候信息资料与地质资料而确定。混凝土结构环境作用类别划分的原则是混凝土结构中钢筋锈蚀以及混凝土腐蚀机理;环境作用等级确定的原则是腐蚀离子对钢筋或混凝土腐蚀的程度,并综合考虑设计的方便性。《地下工程防水技术规范》(GB 50108—2008)规定了防水等级,没有提及环境类别。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中将环境分为5个类别,5个类别之间无明显的分类依据,且没有确定作用等级。《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)将环境分为一般环境、冻融环境、氯化物环境和化学腐蚀环境,氯化物环境又分为海洋氯化物环境和除冰盐等其他氯化物环境。

《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB 10005—2010)将环境作用分为6个类别,按照对混凝土与钢筋腐蚀程度不同,将每个类别分为3~4个等级,如表1.2-1所示。高速铁路工程条状结构与露天服役环境等特点决定了其混凝土结构必然会经受外部气候和所接触土体与水体的腐蚀作用,基于轨道交通和铁路条状结构分布的近似性,国内地铁、轨道交通多是按《铁路混凝土结构耐久性设计规范》进行设计的。

氯盐环境:在以氯盐锈蚀为主的环境条件下,钢筋锈蚀速度与混凝土表面氯离子的浓度、温湿度的变化、空气中O₂供给的难易程度有关。美国(表1.2-2)、日本(表1.2-3)、欧洲(表1.2-4)等国家或地区将海水环境混凝土结构暴露部位划分为3个区:大气区、浪溅区、水下区。浪溅区钢筋腐蚀破坏最为严重,其次是大气区,水下区几乎不会发生钢筋腐蚀破坏。我国根据大量的海港码头调查发现,在涨、落潮水位变动区域内,腐蚀破坏比较轻,因为在