

目 录

第一篇 海域岛礁精细化综合勘察技术

第一章 绪论	1
第一节 海域岛礁桥梁地基勘察现状	1
第二节 精细化勘察目的与任务	6
第二章 海域岛礁工程地质特征	8
第一节 岩性特征	8
第二节 地貌特征	17
第三节 水文地质特征	20
第四节 不良地质	22
第五节 工程地质岩组划分	25
第三章 海域岛礁工程测量	27
第一节 技术设计	27
第二节 平面和高程控制测量	28
第三节 地形测量	30
第四节 地质勘探工程测量	37
第四章 工程地质调查与测绘	41
第一节 工程地质调查与测绘的方法	41
第二节 工程地质调查与测绘的内容	42
第三节 结构面的调查	42
第五章 工程地质钻探	49
第一节 工程地质钻探特点和要求	49
第二节 工程地质勘探钻孔类型及其适用条件	50
第三节 复杂地质体的钻进技术	50
第四节 海域钻探影响因素及钻场类型	52
第五节 海域钻探施工工艺	54
第六节 海域钻探施工难点和对策	57
第七节 海域钻探施工安全措施	58
第八节 海域钻探实例	59
第六章 工程物探	61
第一节 弹性波测井	61
第二节 弹性波 CT	74
第三节 数字钻孔摄像	80
第四节 浅层地震勘探	83

第五节 其他物探方法	89
第七章 水文地质试验	101
第一节 试验目的和意义	101
第二节 试验任务和要求	101
第三节 试验原理及适用条件	102
第四节 试验方法的选择和工作量布置	104
第五节 现场试验及资料整理	106
第六节 水文地质试验成果的分析与应用	120
第八章 基岩工程物理力学试验	126
第一节 室内试验	126
第二节 现场直剪试验	138
第三节 岩基载荷试验	145
第九章 勘察方法的综合应用	147
第一节 勘察方法选择配置的基本原则	147
第二节 勘察工作的布设	148
第三节 多技术手段的综合分析应用	150
第二篇 精细化勘察实践	
第十章 西垵门大桥工程勘察实录	151
第一节 概述	151
第二节 自然地理及区域地质	152
第三节 勘察测试主要方法及新技术的应用	154
第四节 水文地质条件	156
第五节 工程地质条件	158
第六节 不良地质及特殊岩土	167
第七节 岩土工程的分析与评价	169
第八节 重点岩土工程问题专题研究	171
第九节 桩基承载力的分析与讨论	171
第十节 结语	173
第十一章 西垵门大桥北塔位老虎山边坡稳定性分析及对策措施研究	174
第一节 前言	174
第二节 场地工程地质条件	175
第三节 老虎山岸坡稳定性三维有限元分析	181
第四节 老虎山南侧山体南侧边坡稳定性分析与评价	221
第五节 老虎山南侧山体整体稳定性评价及加固措施建议	256
第六节 老虎山边坡稳定性研究结论	257
第七节 老虎山南侧山体加固设计	258
第八节 工程监测设计	269
第九节 施工技术要求	271
参考文献	280

第一篇 海域岛礁精细化综合勘察技术

第一章 绪 论

第一节 海域岛礁桥梁地基勘察现状

随着改革开放的深入进行,社会发展的程度进一步加深,原先条件艰苦、交通不便的海域岛礁也逐渐被开发建设。其功能有旅游开发、港口码头等基础设施建设、能源基地开发建设、工业住宅建设等多种类型。而各类建(构)筑物设计建设前必须对其所处的工程场址进行工程地质勘察,在查明场址工程地质条件的前提下,有针对性地、目的明确地进行设计与施工,最大程度地减少建设投入,为拟建物选择合理的地基方案提供必要的依据。

海域岛礁桥梁(隧道)为联系各岛礁间的通道,跨越海域,其长度根据岛礁间距离有 100 余米至数公里,乃至数十公里。其地貌类型也多跨越海岛丘陵与海域等多种形式,地质条件复杂、多样。在该工程类型区域进行工程地质勘察,其难度与不确定性较一般的工程地质勘察要大很多。本书通过调查、收集 20 余份中国沿海地区不同海域典型的跨海桥梁(隧道)的工程地质勘察成果,对各工程所采用的勘察技术方法及手段等方面进行总结和归纳。

一、勘察手段

海域岛礁桥梁工程地质勘察基本执行《公路工程地质勘察规范》(JTJ 064—98)的相关要求。海域桥梁(隧道)工程地质勘察现状调查(表 1-1)表明,除有特殊要求或重要的特大桥外,目前绝大多数海域岛礁桥梁工程地质勘察采用的是常规手段,如地质调查与测绘、钻探、原位测试(标准贯入试验、重型圆锥动力触探试验、钻孔 PS 波速测试)、取样和室内试验、水文试验及浅层地震剖面等。个别大桥勘察时采用了现场剪切试验、钻孔声波测井、孔内电视摄像、跨孔声波 CT 探测、高密度电法、陆地声纳及瞬变电磁法等新技术手段。

(一)工程地质调查与测绘

按一定比例尺要求对桥(隧)附近的大陆及岛屿进行踏勘和地质调查,配以槽探、坑探、平硐等辅助工作,对工程近场区的地质、构造条件进行调查测绘。在基岩出露区,采用界线追踪法和垂直界线法确定岩性界线,观测点间距小于 20m;对一般地质观测点和地质界线,以明显的地形、地物和其他测点作控制点;对有特殊意义和对工程有重要影响的地质观测点,用仪器法定位。在人工填土分布区,以地貌形态结合钻孔揭示的地层进行岩性分区。

该方法是海域岛礁工程地质勘察必备手段之一。

表 1-1

跨海桥梁(隧道)工程地质勘察采用的勘察手段调查情况一览表

工程名称	勘察手段	地质调查 与测绘	钻探	取样	岩石试验		水文地质试验		原位测试		工程物探							
					室内 试验	原位 剪切 试验	抽水 试验	压水 试验	标准 贯入 试验	圆锥动 力触探 试验	钻孔 PS 波速 测试	钻孔 声波 测井	孔内 彩色 电视 摄像	跨孔 声波 CT 探测	地震 反射 勘探	高密度 电法	声纳 探测	磁法 探测
青岛海湾大桥		✓	✓	✓	✓			✓		✓	✓	✓						
青岛胶州湾隧道		✓	✓	✓	✓			✓		✓	✓	✓			✓			
舟山朱家尖海峡大桥			✓							✓	✓							
洞头县三盘大桥		✓	✓	✓	✓					✓	✓							
洞头县五岛相连工程 2 号桥 (花岗大桥)		✓	✓	✓	✓					✓	✓							
舟山岑港大桥~响礁门大桥		✓	✓	✓	✓					✓	✓							
桃天门大桥		✓	✓	✓	✓					✓	✓							
同三复线玉环大桥		✓	✓	✓	✓					✓	✓						✓	
杭州湾跨海大桥		✓	✓	✓	✓					✓	✓						✓	
宁波象山港大桥		✓	✓	✓	✓					✓	✓							✓
舟山西堠门大桥		✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
厦门东通道			✓	✓	✓					✓	✓				✓			
舟山金塘大桥		✓	✓	✓	✓					✓	✓							
厦门集美大桥		✓	✓	✓	✓					✓	✓				✓			
梅山大桥及接线		✓	✓	✓	✓					✓	✓							
厦漳跨海大桥		✓	✓	✓	✓					✓	✓					✓	✓	
港珠澳大桥		✓	✓	✓	✓					✓	✓						✓	✓

注:表中“✓”表示该勘察手段在相应工程中得到应用。

(二) 钻探

采用泥浆护壁、回转钻进、全孔段取芯的钻探工艺。根据场地环境的不同,其钻探装置亦不同。海域施工中钻探装置通常有钻探平台和钻探船两种,其中钻探平台为架空钻场,是通过固定设施直接将承载钻探设备的作业平台固定在底质岩土层中,兼具陆域勘察施工的一般性;钻探船为漂浮钻场,是将钻探设备及附属设备、管材、工具及其他材料等承托在水面上的装置。

根据海域岛礁的地形特征,不同地段应选择不同的勘察装置。如岛礁上凹凸不平或无法整平地段及潮间带宜采用钻探平台装置;水下岸坡及浅海带宜采用钻探船装置。其中基底为泥质的潮间带,在水深条件允许的情况下,宜采用钻探船装置。

钻探是工程地质勘察的直接手段,也是最常用的勘察手段。

(三) 取样与岩石试验

中、微风化岩样在技术性钻孔岩芯中选取,若技术孔岩样不足时,则在其相邻钻孔中选取。岩石室内试验主要有:天然密度、含水率、吸水率、单轴抗压强度、抗剪(直剪、三轴)强度、抗拉强度、三轴压缩、岩矿鉴定、(岩块)纵波波速及点荷载试验等。

取样和室内试验是获取岩土体物理力学实验参数的主要方式,是工程地质勘察的主要手段之一。

(四) 水文地质试验

水文地质试验常用的试验方法主要有抽水试验和压水试验。

抽水试验是以地下水井流理论为基础,通过在实际井孔中抽水时,水量和水位变化的观测来获取水文地质参数,评价水文地质条件,为预计基坑、井、孔的涌水量和评价岩土层的渗透性和富水性等提供依据。

压水试验是一种在钻孔中进行的原位渗透试验。由于一般裂隙岩体的透水性差,不易进行抽水试验,只有通过压水试验来取得岩体的透水性资料。

海域岛礁工程地质勘察中水文试验的目的,通常是确定岩层的水文地质参数(渗透系数、透水率),推断岩体的完整程度(裂隙发育程度)评价其透水性和富水性。

水文试验是一种在钻孔内进行的原位渗透试验,其主要任务是测定岩体的透水性,为评价围岩的渗透特性和设计防渗措施提供基本资料。一般应用于有基岩隧道或悬索桥锚碇区开挖等情况的跨海桥梁勘察中,因此,该勘察手段为选择性采用。

(五) 原位测试

工程地质勘察中较常用的原位测试手段有标准贯入试验(SPT)和圆锥动力触探试验(DPT)。

1. 标准贯入试验(SPT)

采用63.5kg落锤,落距为76cm,自动脱钩自由下落,先击入15cm不计击数,再记录后30cm中的每10cm的锤击数。在海域岛礁工程地质勘察中,主要用于全至强风化岩体中,测试风化岩层的密实程度,为常用勘察手段。

2. 圆锥动力触探试验(DPT)

采用63.5kg落锤,自由落距76cm,每贯入10cm记录一次锤击数,连续贯入30cm,取其最后20cm的平均值。对未达到10cm或20cm、动探击数大于50击,停止锤击,记录实际贯入度与

实际锤击数,内业整理将最后 20cm 换算成 10cm 平均锤击数标注。主要应用于残坡积碎石土和碎块状强风化岩层中,为常用勘察手段。

(六) 工程物探

物理勘探最早多用于油气勘探和地质找矿中。近年来,由于地勘事业的迅猛发展,特别是规模大、难度高的各类建设项目不断涌现,对地质勘察提出了新的要求和挑战,于是多种物探技术在工程地质勘察中应运而生,并取得了良好效果。跨海桥梁(隧道)项目勘察中,工程物探方法有弹性波测井(钻孔 PS 波速测试、钻孔声波测井)、孔内彩色电视摄像、跨孔声波 CT 探测、地震反射勘探、高密度电法、声纳探测和磁法探测等。各工程物探手段简述如下:

1. 弹性波测井

弹性波测井是利用地震波或声波在岩体中传播,通过仪器接收信号和计算处理,测取不同岩石的弹性波速度,计算岩体的弹性力学参数,评价岩体完整性、风化程度等。

该手段在海域桥梁基岩地基勘察和隧道围岩评价中多有应用,为较常用的勘察辅助手段。

2. 孔内彩色电视摄像

孔内电视是以钻孔为研究对象而设计开发的数字式全景钻孔摄像系统,可以通过高精度数字钻孔图像获取到钻孔内部的岩芯及结构面信息,可以精确划分岩体的破碎程度,更直观地观察岩体在无扰动状态下的裂隙发育情况,有效弥补单一钻探手段在破碎岩体勘察中的不足,准确确定岩体的工程性能。该手段一般应用于地质结构特别复杂或对地基岩体有特别要求的大型桥隧工程,为偶用的勘察辅助手段。

3. 跨孔声波 CT 探测

声波 CT 源于医学 CT,是一种新的工程无损检测方法,也称层析成像方法,它可以从结构的外部测量,数据准确、可靠地反演构件内部结构的直观图像。可用于查明岩体中的断裂位置、产状、断裂带宽度及充填情况,为桥梁地基稳定性分析和承载能力评价提供依据。通过本次调查发现,该手段在目前的跨海桥梁(隧道)勘察中应用很少,仅西堠门大桥勘察中得到应用,因此该手段为不常用的勘察辅助手段。

4. 地震反射勘探

地震反射勘探是研究地震波在不同弹性介质分界面上按一定规律产生反射的原理,利用人工激发地震波在岩土介质中的传播规律,探测浅部地质构造或测定岩土物理力学参数,进行物理分层、寻找构造带的一种成熟的地球物理勘探方法。根据本次工程地质现状调查,地震反射勘探主要用于查明水下地形、地层岩性、地质构造(断层、破碎带)、不良地质(如风化深槽)及水下障碍物(浅层气、沉船、锚)等的分布,该手段是海域桥梁(隧道)勘察常用的物探手段之一。

5. 高密度电法

高密度电法是以地下被探测目标体与周围介质之间的电性差异为基础,人工建立地下稳定直流电场,依据预先布置的若干道电极采用预定装置排列形式进行扫描观测,研究地下一定范围内大量丰富的空间电阻率变化,从而查明和研究有关地质问题的一种直流电法勘探方法。在跨海桥梁(隧道)工程地质勘察中,高密度电法主要用于探测岩溶、洞穴、断层、破碎带和地质界线的产状等。通过本次调查发现,该手段在目前的跨海桥梁(隧道)勘察中应用很少,仅西堠门大桥勘察中得到应用,因此该手段为不常用的物理勘探手段。

6. 声纳探测

声纳是利用水中声波对水下目标进行探测、定位和通信的电子设备,是水声学中应用最广泛、最重要的一种装置。在工程地质勘察中,声纳技术主要用于水文测量和海底地质地貌、地质构造的勘测等。通过本次调查发现,该手段在目前的跨海桥梁(隧道)勘察中应用很少,仅西堠门大桥勘察中得到应用,因此该手段为不常用的物理勘探手段。

7. 磁法探测

其原理是测量地磁异常以确定含磁性矿物的地质体及其他探测对象存在的空间位置和几何形状,从而对工作地区的地质构造、有用矿产分布及其他情况作出推断。通过本次调查发现,该手段在目前的跨海桥梁(隧道)勘察中应用很少,仅西堠门大桥勘察中得到应用,因此该手段为不常用的物理勘探手段。

二、勘察原则

(一) 勘探孔平面布置

海域岛礁桥梁工程地质勘察的勘探孔平面布置,一般根据《公路工程地质勘察规范》(JTJ 064—98)的要求按轴线布置。以沿桥梁轴线按墩、台位置布置(逐墩或隔墩)为主,对于第四系厚度较大的桥址,桥梁基础采用第四系作桩端持层的,也有采用沿桥址轴线以 50 ~ 100m 等距布置。

而对于采用拱桥、悬索桥结构形式的桥梁工程地质勘察,除沿轴线布置勘探孔外,于岛礁处的拱座、塔基等重要部位也增加相应的勘探工作量,一般沿基础轮廓线采用方形布孔的方式布置钻孔,孔距小于 20m。

如温州洞头县五岛相连工程 2 号桥(花岗大桥)拱座部位按拱座轮廓线布置了勘探孔;采用悬索桥结构形式的舟山西堠门大桥除对锚固区、塔基周边、角点按方形布置勘探孔外,对于地质构造发育部位、岛礁边坡对构筑物可能有影响部位也布置了相应的勘探孔。

(二) 勘探深度

勘探孔的深度应穿越第四系松散堆积层及全、强风化带至性质稳定的中~微风化层。其中,对于第四系厚度不大的桥址,孔深均钻探至微风化层,进入该层的深度按要求,一般为可能的持力层以下或桩端以下 3 ~ 5m。对于第四系厚度较大的桥位,结合桥梁的要求,一般按揭示中~微风化层 3 ~ 5m 确定勘探孔深度。如:舟山岑港大桥桥位由于其第四系厚度较大,其勘探孔的深度则按可能采用的桩基最大深度要求,确定勘探孔深度,一般以揭示中风化层一定深度为终孔原则。

对于有特殊要求的锚固区等重要结构部位,则按其实际要求的深度确定孔深。如:对于西堠门大桥锚碇区即按锚碇的尺寸(82.5m × 60m × 60m),为满足岩体开挖及岩壁稳定性分析的要求,确定勘探孔的深度。

由于跨海桥梁(隧道)一般跨越不同地貌单元,地质条件复杂,结合桥梁(隧道)自身的结构特点,桩基持力层选择不尽相同,则勘察时孔深确定也有所不同,因此,具体工程勘察中各勘探孔的孔深要以场地的实际地质情况并结合工程结构特点综合确定。

三、其他

跨海桥梁(隧道)安全等级高,对工程场地稳定性的研究为首要任务。对于大部分跨海桥梁(隧道)工程而言,进行场地地震安全评价是必要的前期工作,该工作通过对工程场地、近场地震构造进行调查,对工程场地地震危险性和地震动参数取值进行分析和校核,进而评估工程场地的稳定性和工程建设的适宜性。

由于海域岛礁地质条件相对复杂,地貌形态变化大,对场地内存在影响工程建设及运营的不良地质或特殊地质体,在工程可行性研究阶段常进行一些专题性的研究。如厦门东通道在初步设计阶段进行了针对风化槽的专题地质勘察研究,舟山西堍门大桥针对关键问题——大桥北塔位(老虎山)边坡稳定性进行了专题研究并完成报告《舟山东大陆连岛工程西堍门大桥北塔位老虎山边坡稳定性研究》等。

另外,个别项目在勘察过程中还采用了高新技术,如杭州湾跨海大桥对拟建桥位区开展了遥感地质工作,对桥位区的地形、水文、第四纪地质和地貌、断裂构造等地质信息进行了遥感探测和分析等。

综上所述,目前海域岛礁桥梁工程地质勘察多数采用的是常规的工程地质钻探、物探勘察、地质调查测绘等手段。只有对于有特殊要求的重、特大桥梁,才会采用诸如钻孔波速测试、跨孔声波 CT、孔内电视摄像等新技术手段,以便更进一步了解、查明勘探深度范围内的地层与地质构造情况。

常规的工程地质钻探、地质调查测绘工作可在一定程度上反映出地层岩性、构造特征,但也存在一定的缺陷。比如,钻孔可以揭示岩体的岩性、完整程度、风化程度等,但难以准确反映结构面的产状等特征;地质调查测绘可以反映岩体于地表的变化特征及构造发育程度,但不能反映中深部地层与构造的发育特征及变化规律。因此,根据工程特点选择采用多种手段对海域岛礁桥梁地基进行综合勘察,有利于更详细地查明场址地质条件,为工程设计提供详尽的地质资料,更好地服务于工程建设。

第二节 精细化勘察目的与任务

一、精细化勘察目的

针对海域岛礁大跨径、高塔柱桥梁地基赋存的地质环境,在场地地形和水文气象条件差、地质露头少、工程地质条件难以查明的前提下,联合多种勘察手段和高新技术方法进行综合应用和研究,查明场地内对工程建设有影响的地质结构的细部特征,并取得较精确的地质参数。

二、精细化勘察任务

针对大跨度、高塔柱结构桥梁对地基要求高的特点,以及海域岛礁特殊的场地地质条件,精细化勘察应与设计紧密结合,分阶段进行,不同勘察阶段的要求如下:

(1)可行性研究勘察阶段是为研究各工程方案场地内的区域工程地质条件,尤其是对工程方案的比较有关键性影响的不良地质、特殊性岩土、重点工程地段的工程地质条件,进行必

要的工程地质勘察,并提出工程方案比选的地质依据。工程地质勘察工作应在充分收集已有地质资料的基础上,以调查为主,并对重点地段进行少量必要的钻探和物探工作。

(2)初步勘察阶段应在可行性研究勘察资料的基础上,对桥位处进行工程地质调查与测绘、钻探、物探和原位测试,初步查明场地的区域地质、水文地质和工程地质条件,从地质角度保障场地选择的合理性和设计方案确定的正确性。

(3)详细勘察阶段应按桥梁塔柱、墩台、锚碇等具体构造物位置布置工作量,提出详细的工程地质资料和设计、施工所需的岩土参数,对地基类型、基础形式和不良地质作用的防治等提出建议。

精细化勘察应采取综合勘察手段,根据勘察阶段和场地工程地质条件等合理选用工程地质调查与测绘、物探、钻探、原位试验与室内试验等方法 and 手段。其最终的基本任务是:

(1) 查明桥梁地基岩体岩性、风化状况、软弱夹层及物理力学性质;

(2)查明断层、破碎带、裂隙密集带的具体位置、规模和性状,特别是顺坡向、缓倾角和优势结构面;

(3)查明不良地质作用和地质灾害,特别是海蚀作用产生的如海蚀洞(穴)、海蚀沟(槽)、海蚀崖等分布情况;

(4) 查明桥梁地基的水文地质条件,评价和分析岩体的渗透性以及和海水的联系;

(5) 查明桥梁地基影响范围内水下岸坡的稳定性。

第二章 海域岛礁工程地质特征

中国近海海域包括渤海、黄海、东海、南海及台湾岛以东海域。在近海海域,尤其是临近大陆,分布有众多星罗棋布的大小岛屿,这些海岛按成因可划分为大陆岛、海洋岛两大类,其中海洋岛又分为火山岛、冲积岛和珊瑚礁岛三类。

大陆岛,是指那些在地质构造上和形成动力上与邻近大陆基本一致的岛屿,它们在第四纪低海面时,往往曾是大陆的一部分,与大陆相连,后因气温回升,海面上升,才淹没了其与大陆相通的陆地,被海水包围,形成今天的大陆岛,如台湾岛、海南岛、东山岛及舟山群岛等。

火山岛,是由海底火山喷发凝结堆积,最终出露于水面而形成的。在我国沿海诸岛中,火山岛尚不多见。

冲积岛,是由于河流入海,携带的泥沙受海水的顶托、水流的分散及坡度的降低等诸多因素的影响,导致泥沙逐渐沉积下来,日久天长堆积形成一个沙岛,即为冲积岛。最典型的冲积岛是位于长江入海口处的上海崇明岛。

珊瑚礁岛,是由一种叫珊瑚虫的骨骼逐渐堆积,出露于水面而形成的。这种造礁珊瑚的生长条件十分苛刻,如海水温度必须在 $25 \sim 29^{\circ}\text{C}$ 之间,海水盐度要在 $27\% \sim 40\%$ 之间,且要求海水洁净、透明。因此,珊瑚礁岛只出现在北、南回归线之间的热带亚热带海域上,我国的珊瑚礁岛主要集中在南海诸岛、台湾岛和澎湖列岛,以及两广沿海部分岛屿。

由基岩构成的大陆岛占中国岛屿总数的 90% 以上,它们受新华夏构造体系的控制,多呈 NNE 向,以群岛或列岛形式作有规律的分布,如长山群岛(又称长山列岛)、庙岛群岛、舟山群岛、万山群岛等。

海域岛礁具有复杂的地质条件,岛礁岩体遭受风化、海侵作用明显,特殊的地理环境和地质构造决定了其工程地质特征的复杂性。

第一节 岩性特征

一、岩性分布特征

我国幅员辽阔,海岸线长度为 1.8 万公里,海域岛屿分布有近 5500 座。由于地理跨度大,各地区地质环境差异较大,其地质发展历史也很不相同,因而不同海域的岛礁其工程地质条件差异较大,在岛礁的岩性变化上表现尤为突出。

根据地理位置的不同,按从北往南的顺序对我国沿海不同海区的岛礁岩性作简要说明:

1. 渤海湾北部海域(辽东湾)

以大连长山群岛为代表。该区岛礁分布的地层主要为震旦系~寒武系的古老岩系。震旦系地层为浅变质岩系,寒武系为海相沉积岩系,岩性以页岩等为主。

2. 渤海湾南部(莱州湾)~黄海北部(青岛胶州湾)海域

以山东半岛为代表。该区岛屿分布的地层主要为元古界胶南群和中生代地层及不同地质历史时期形成的侵入岩。

(1) 元古界胶南群主要岩性是以云母斜长片麻岩、变粒岩和斜长角闪岩等为代表的变质岩。

(2) 中生代地层以沉积岩为主, 主要为一套陆源碎屑岩—火山岩沉积建造, 自下而上可划分为莱阳群(K_1l)、青山群(K_1q)及王氏群(K_2w)。莱阳群为一套河湖相沉积碎屑岩组合, 分布零星; 青山群为区域出露较广的地层之一, 主要岩性为凝灰岩、流纹岩、安山岩、少量玄武岩、火山角砾岩、火山集块岩, 夹有粘土岩和粉砂岩; 王氏群以一套河湖相沉积的砖红色—紫红色细~粉砂岩、粉砂质页岩夹橄榄玄武岩为特征。

(3) 区内侵入岩十分发育, 尤其以新元古代晋宁期、震旦期和中生代燕山晚期的中酸性侵入岩最为发育。中元古代变质深成侵入岩(γ_2^2)是测区内最古老的侵入岩, 呈NE向带状分布, 规模小, 分布零星; 新元古代晋宁期岩石变质变形强烈, 片麻状及片状构造发育, 岩性以片麻状二长花岗岩等为主; 新元古代震旦期岩石韧性变形强烈, 岩性有肉红色眼球状中粗粒正长花岗岩、肉红色弱片麻状中粒二长岩、灰白色眼球状中粒石英二长岩等; 中生代燕山晚期侵入岩(γ_3^3), 出露面积广, 总体呈NE向展布, 岩性以花岗岩为主。

3. 东海北部海域

以舟山群岛为代表。该区岛礁分布的地层主要为上侏罗统和下白垩统以及分布于上侏罗统中的侵入岩系。

(1) 上侏罗统以中酸~酸性火山碎屑岩为主, 少量酸性熔岩和火山沉积岩, 属钙碱性系列或弱碱性岩系。自下而上可划分为高坞组(J_3g)、西山头组(J_3x)、茶湾组(J_3c)和九里坪组(J_3j)。其中高坞组岩性单一, 为一套厚层至块状的火山岩岩系, 由沸溢相的流纹质晶屑玻屑熔结凝灰岩或晶屑熔结凝灰岩组成, 主要分布于舟山岛的大沙—龙头街和定海—沈家门一线, 呈近东西向展布。另在秀山岛、郭巨半岛和穿鼻山一带有少量分布; 西山头组主要为中酸~酸性火山碎屑岩夹不稳定火山沉积岩, 岩性变化大, 代表岩性为流纹质含晶屑玻屑熔结凝灰岩和含角砾晶屑玻屑熔结凝灰岩。主要分布在舟山岛、金塘岛和朱家尖岛, 郭巨半岛、大猫山、盘峙岛、长峙岛、白沙山、葫芦岛及一些零星小岛亦有小面积分布; 茶湾组为沉积岩或火山碎屑岩夹沉积岩, 岩性主要为玻屑凝灰岩、玻屑熔结凝灰岩、凝灰质砂岩、粉砂岩和沉凝灰岩。主要分布在郭巨半岛、沈家门、登步岛、老碇头、金塘岛山潭—册子岛等地, 另在摘箬山、刺山、桃花岛、勾山—潘家岙一带和一些零星小岛有少量分布; 九里坪组岩性单一, 为一套酸性熔岩, 岩性为流纹斑岩, 野外常见自碎角砾。主要分布在金塘山潭—册子岛一线, 呈北东向展布, 另在大岗登、沈家门、朱家尖岛及东闪岛、西闪岛、团鸡山等小岛有零星分布。

(2) 下白垩统以沉积岩为主, 少量火山碎屑岩。下白垩统在区内分布范围较小, 根据其岩性组合特征可划分为馆头组(K_1g)。馆头组(K_1g)根据岩性组合可分为上下两部分: 下部为灰紫色凝灰质含砾砂岩和紫红色凝灰质砂岩、粉砂岩; 上部为流纹质含角砾含晶屑玻屑熔结凝灰岩。分布在朱家尖岛北部一小干岛, 位于沈家门火山洼地的北东端, 呈近东西向展布。

(3) 区内侵入岩比较发育, 为燕山晚期岩浆侵入的产物, 围岩为上侏罗统。侵入岩岩性有石英闪长岩、石英二长斑岩、二长花岗(斑)岩、钾长花岗岩、花岗岩和花岗斑岩等。

4. 东海南部~台湾海峡海域

以厦门岛为代表。本区岛屿分布的地层主要为上三叠系文宾山组(T_{3w})、上侏罗系南园组(J_{3n})、上第三系佛县群上段(Nft^b)和侵入岩。

(1) 上三叠系文宾山组见于嵩屿、东渡、火烧屿及大任屿等地,为海陆交互沉积,灰、灰黄色石英细砂岩、粉砂岩、中细粒石英砂岩、长石石英砂岩、灰黑色泥岩及含砂泥岩,经变质具片理化、白云母化。厚度大于100m。

(2) 上侏罗系南园组出露于海沧、大帽山、文圃山、东渡、嵩屿等地,主要为浅酸性火山碎屑熔岩。最大厚度约2700m。

(3) 上第三系佛县群上段见于小金门岛,为玄武岩夹砂砾岩,厚度大于100m。

(4) 侵入岩岩体时代均为燕山期,岩石类型以花岗岩为主。其次为二长花岗岩及花岗闪长岩等;脉岩有石英岩脉、细晶岩脉、伟晶岩脉、石英斑岩脉、石英正长斑岩脉、正长斑岩脉、细粒花岗岩脉、闪长岩、闪长玢岩脉、二长岩脉、辉绿岩脉及一些基性岩脉,主要受北东向构造控制,其次受北西向构造控制。

5. 南海中部(珠江口)海域

以澳门、香港及万山群岛为代表。本区岛屿分布的地层主要为元古界震旦系(Z)、古生界石炭系(C)和中生界侏罗系(J)、白垩系上统(K_2)以及侵入岩。

(1) 元古界震旦系由混合岩化和花岗化作用形成,再经过构造作用,基体与脉体已无法分辨,岩性上与岩浆成因的花岗岩类极为相似,具碎裂结构,局部片麻状构造,交代结构发育。区内仅内伶仃岛西部有出露。

(2) 古生界石炭系上部为变质砂岩,下部变质粉砂岩,千枚岩夹石墨片岩,局部夹大理石。主要分布于新界屯门—元朗—新田一线,整体呈NNE向展布。

(3) 中生界侏罗系岩性为细粒长石石英砂岩、砂质石英粉砂岩、粉砂质页岩、安山质角砾晶屑凝灰岩和流纹质晶屑凝灰岩等。在新界大屿山、青衣等岛屿均有大面积分布。

(4) 白垩系上统(K_2)岩性为含砾石英砂岩,砂质石英粉砂岩和石英岩状砂岩等。主要在香港本岛南部有出露。

(5) 本场区中生代岩浆活动极为剧烈,燕山期酸性岩浆岩分布很广,出露面积较大,而且是多期活动的特点,侵入岩常沿同一构造带反复入侵,从而形成不同时期花岗岩混在一起的复式侵入体或岩带。岩性按由新到老的顺序分别为含角闪石次花岗岩($\gamma_3^{(2)}$)、黑云母花岗岩($\gamma_3^{(1)}$)、花岗岩($\gamma_3^{(3)}$)和石英二长闪长岩($\gamma_3^{(2)}$)。侵入岩在本区分布极为广泛,澳门地区、万山群岛及香港地区大部分岛屿均有出露。

6. 南海西部~北部湾海域

以海南岛为代表。本区岛屿分布的地层主要有元古界长城系抱板群(ChB)、青白口系石碌群(QbS)、古生界寒武系美子林组(ϵ_m)、中生界白垩系(K)、晚第三系~第四系玄武岩系以及侵入岩。

(1) 长城系抱板群为一套中深变质岩系。下部以受混合岩化强烈改造的片麻岩为主,上部以片岩类岩石为主,夹变粒岩、石英岩及晶质石墨矿层。抱板群在五指山地区分布颇广,海口地区则隐伏分布于第三纪地层之下。

(2) 青白口系石碌群下部岩性为绢云母石英片岩夹结晶灰岩及石英岩,上部为白云岩、结

晶灰岩、透辉透闪岩夹富赤铁矿层。其分布范围据现有资料仅限于昌江县石碌矿区。

(3) 寒武系美子林组下部岩性为变质石英细砂岩与云母石英片岩不等厚互层,夹黑云长石石英片岩及变质粉砂岩;中部为黑云透辉石英角岩、黑云透辉透闪石英角岩;上部结晶灰岩、石英透辉大理岩。由于掩盖而未见顶底。该组主要见于万宁市北部,小面积分布。

(4) 中生界白垩系在本区出露地层有上白垩统(K_2)和下白垩统(K_1)。上白垩统(K_2)主要岩性为长石砂岩,中下部夹粉砂岩、钙质泥岩,中部夹砾岩。主要分布于白沙—乐东盆地的西南部,岩性较稳定;下白垩统(K_1)以英安质火山岩为主,中部和下部夹少量玄武岩、安山质和流纹质火山岩。主要分布在三亚市的同安岭、乐东县的牛腊岭一带。岩性变化较大,以同安岭火山盆地北村岭剖面火山岩的岩石类型较齐全,包括玄武质、安山质、流纹质火山熔岩。

(5) 晚第三系~第四系玄武岩系与下覆地层呈喷发不整合接触。晚第三系玄武岩系下部为火山碎屑岩夹橄榄玄武岩,上部为辉斑橄榄玄武岩、玄武岩。广泛分布于文昌市蓬莱、海口市居丁至澄迈县白莲镇一线以北地区;第四系玄武岩系为橄榄拉斑玄武岩和橄榄玄武岩等。主要分布于海口龙门、儋州市西北部等地。

(6) 本区侵入岩面积约 12420km^2 , 占全岛面积的 36.62%; 近岸岛屿如七洲列岛、大洲岛、西瑁洲等的岩石也由侵入岩组成。本区地层中长城纪至白垩纪都有侵入岩分布,尤以二叠纪的最发育,分布面积最广泛。侵入岩从镁铁质岩中性岩、中酸性—酸性岩都有,60%以上岩性为二长花岗岩。

综上所述,我国沿海地区主要发育中生界地层及燕山期侵入岩。中生界地层以侏罗系~白垩系火成岩为主,侏罗系地层岩性有晶屑熔结凝灰岩、玻屑熔结凝灰岩、流纹质晶屑玻屑熔结凝灰岩和含角砾晶屑玻屑熔结凝灰岩等;白垩系地层岩性有凝灰岩、流纹岩、安山岩、砂岩和粉砂岩等;燕山期侵入岩多为花岗岩类。

二、岩石分类

在工程建设的各阶段(规划、勘察、设计和施工)中,正确地对岩石进行分类,进而对工程建设涉及到的岩体质量和稳定性作出评价,是经济合理地进行岩体开挖和加固支护设计、快速安全施工,以及建筑物安全运行必不可少的条件。

工程中常用的岩石分类方法有:按成因分类、按坚硬程度分类、按完整程度分类、按基本质量等级分类、按风化程度分类、按软化系数分类、按质量指标 RQD 分类和按工程特性分类等。

(一) 岩石按成因分类

岩石按其成因应分为岩浆岩、沉积岩和变质岩。

1. 岩浆岩

岩浆岩又称火成岩,是由岩浆凝固结后形成的岩石。

岩浆位于地幔和地壳深处,是以硅酸盐为主和一部分金属硫化物、氧化物、水蒸气及其他挥发性物质组成的高温、高压熔融体。岩浆主要通过地壳运动,沿地壳薄弱地带上升冷却凝结。其中侵入到周围岩层(简称围岩)中形成的岩浆岩称为侵入岩。根据形成深度不同,侵入岩可分为深成岩(形成深度大于 3km)和浅成岩(形成深度小于 3km)。而岩浆喷出地表形成的岩浆岩则称为喷出岩,包括火山碎屑和熔岩(岩浆沿火山通道喷溢地表凝固结而成)。

岩浆岩常根据其所含 SiO_2 的含量划分为不同的类型,即超基性岩(SiO_2 含量 $<45\%$)、基性岩(SiO_2 含量 $45\% \sim 52\%$)、中性岩(SiO_2 含量 $52\% \sim 65\%$)和酸性岩(SiO_2 含量 $>65\%$)。

常见的岩浆岩有花岗岩、闪长岩、辉长岩、辉绿岩、流纹岩、安山岩和玄武岩等。

2. 沉积岩 沉积岩是在地壳表层常温条件下,由风化产物、有机物质和某些火山作用产生的物质,经搬运、沉积和成岩等一系列地质作用而形成的岩石。沉积岩广泛分布于地表,占陆地面积的 75% 。

沉积岩按组成成分、结构和形成条件,可分为碎屑岩、粘土岩、化学岩及生物化学岩类。

常见的沉积岩有砾岩及角砾岩、砂岩及粉砂岩、粘土岩类(泥岩、页岩)、石灰岩、白云岩和泥灰岩等。

3. 变质岩 地壳中已存在的岩石,由于地壳运动和岩浆活动等造成物理化学环境的改变,处在高温、高压及其他化学因素作用下,使原来岩石的成分、结构和构造发生一系列变化,所形成的新岩石称为变质岩。这种改变岩石的作用,称为变质作用。

根据变质作用的地质成因和变质作用的因素,可将变质岩分为区域变质岩、热接触变质岩、动力变质岩、混合岩和交代变质岩等。

常见的变质岩有片麻岩、片岩、板岩、千枚岩、石英岩和大理岩等。

(二) 岩石按坚硬程度分类

在国际分级中,岩石坚硬程度的划分采用岩石饱和单轴抗压强度标准值(f_{rk})。 f_{rk} 是通过岩石饱和单轴抗压强度试验求得,在无条件取得 f_{rk} 实测值时,也可采用实测的点荷载强度指数的换算值,即按本书第八章第一节式(8-30)计算求得(将 σ_c 看做 f_{rk})。

根据实测的(或是换算求得)岩石饱和单轴抗压强度标准值按表 2-1 分为坚硬岩、较硬岩、较软岩、软岩和极软岩 5 个等级。

岩石坚硬程度分类 表 2-1

坚硬程度类别	坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩
饱和单轴抗压强度标准值 f_{rk} (MPa)	$f_{rk} > 60$	$60 \geq f_{rk} > 30$	$30 \geq f_{rk} > 15$	$15 \geq f_{rk} > 5$	$f_{rk} \leq 5$

注:当岩体完整程度为极破碎时,可不进行坚硬程度分类。

(三) 岩石按完整程度分类

岩体完整程度是根据完整性指数 k_v 按表 2-2 划分为完整、较完整、较破碎、破碎和极破碎 5 个等级。

岩体完整程度分类 表 2-2

完整程度等级	完整	较完整	较破碎	破碎	极破碎
完整性指数 k_v	$k_v > 0.75$	$0.75 \geq k_v > 0.55$	$0.55 \geq k_v > 0.35$	$0.35 \geq k_v > 0.15$	$k_v < 0.15$

注:完整性指数 k_v 为岩体纵波波速与岩块纵波波速之比的平方。

(四) 岩石按基本质量等级分类

岩体基本质量等级是根据其坚硬程度和完整程度来划分,见表 2-3。

表 岩体基本质量等级分类

表 2-3

完整程度 坚硬程度	完 整	较完整	较破碎	破 碎	极破碎
坚硬岩	I	II	III	IV	V
较硬岩	II	III	IV	IV	V
较软岩	III	IV	IV	V	V
软岩	IV	IV	V	V	V
极软岩	V	V	V	V	V

(五) 岩石按风化程度分类

岩石的风化程度分级是根据风化波速比 k_w 按表 2-4 划分为未风化、微风化、中风化、强风化、全风化和残积土 6 个等级。

海域岛礁岩石风化程度分级表

表 2-4

风化程度	未风化	微风化	中风化	强风化	全风化	残积土
风化波速比 k_w	$1.0 \geq k_w > 0.95$	$0.95 \geq k_w > 0.75$	$0.75 \geq k_w > 0.55$	$0.55 \geq k_w > 0.35$	$0.35 \geq k_w > 0.20$	$k_w < 0.20$

注:1. 风化波速比 k_w 为岩体压缩波速度与岩块压缩波速度之比;

2. 本表是本书作者在统计了大量资料数据后分析提出的(详见本书第六章第一节第四目)。其中残积土部分由于没有试验数据,本次未作修改,仍沿用《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)的分级标准。

(六) 岩石按软化程度分类

岩石按软化系数 k_r 可分为软化岩石和不软化岩石。当 $k_r \leq 0.75$ 时,为软化岩石;当 $k_r > 0.75$ 时,为不软化岩石。

(七) 岩石按质量指标 RQD 分类

岩石质量指标 RQD(Rock Quality Designation)是以修正的岩芯采取率来确定的。岩芯采取率是采取岩芯长度与钻孔长度之比。而 RQD 即修正的岩芯采取率是采用 N 型(75mm)二重管金刚石钻头获取的坚固完整的、其长度等于或大于 10cm 的岩芯长度与钻孔长度之比,并用百分数表示。根据岩石质量指标 RQD,可分为好的、较好的、较差的、差的和极差的 5 个质量等级(表 2-5)。

岩体质量指标(RQD)分类

表 2-5

岩体分类	好 的	较好的	较差的	差 的	极差的
RQD(%)	>90	75 ~ 90	50 ~ 75	25 ~ 50	<25

(八) 岩石按工程特性分类

岩体的工程特性指标有很多,如抗剪强度指标、载荷试验承载力指标、岩体纵波波速指标等。本书主要以岩体的纵波波速指标为研究对象。

不同的岩石类型具有不同的纵波速度。表 2-6 列出了海域岛礁常见岩石地震波测井的纵波波速,为岩石分类和评价提供参考。

不同岩类纵波速度特征值表

表 2-6

岩石名称	风化程度	地震波纵波速度(m/s)	
		平均值	变化范围
花岗岩	全风化	1720	1655 ~ 1858
	强风化	2154	1758 ~ 3256
	中风化	3812	2964 ~ 4098
	微风化	4882	3247 ~ 5319
	强风化	1900	1900 *
霏细斑岩	中风化	2422	2100 ~ 2980
	微风化	3450	2970 ~ 3670
	强风化	2566	2379 ~ 2906
辉绿岩	中风化	3663	2653 ~ 4643
	微风化	4540	3526 ~ 4887
含晶屑火山角砾岩	强风化	2419	3193 ~ 3026
	中风化	4143	3693 ~ 4710
	微风化	4576	3061 ~ 5508
流纹斑岩	强风化	1874	1700 ~ 1980
	中风化	2504	1980 ~ 2880
	微风化	3415	3000 ~ 3600
流纹质凝灰岩	强风化	2257	2230 ~ 2280
	中风化	2658	2157 ~ 3064
	微风化	3296	3224 ~ 3429
含角砾凝灰岩	中风化	2854	2614 ~ 3049
	微风化	3393	3228 ~ 3629
晶屑熔结凝灰岩	中风化	2498	2193 ~ 2845
	微风化	5072	3693 ~ 5508
安山质火山角砾岩	中风化	3803	3277 ~ 4567
	微风化	4327	2603 ~ 5065
	强风化	2014	1688 ~ 1924
正长岩	微风化	4969	4237 ~ 5435
安山玢岩	中风化	2772	2772 *
英安玢岩	微风化	4108	2980 ~ 4950

注:带*数据表示只有单个数据参与统计。

三、地质年代

地壳发展和演变的历史叫做地质历史,简称地史。据科学家推算,地球的年龄至少已有46 亿年。在这漫长的地质历史中,地壳经历了许多次强烈的构造运动、岩浆活动、海陆变迁、剥蚀和沉积作用等各种地质事件,形成了不同的地质体。

查明地质事件发生或地质体形成的时代和先后顺序是十分重要的。前者称为绝对地质年代,后者成为相对地质年代。

(一)地质年代的确定方法

1. 绝对地质年代的确定

一般根据放射性同位素的蜕变规律,来测定岩石和矿物年龄。

目前测定同位素年龄广泛采用的方法有:钾—氩($K^{40} \rightarrow Ar^{40}$)、铷—锶($Rb^{87} \rightarrow Sr^{87}$)、铀—铅($U^{235} \rightarrow Pb^{207}$)和碳法($C^{14} \rightarrow N^{14}$)。其中,前三者主要用以测定较古老岩石的地质年龄,而碳法专用于测定最新的地质事件和地质体的年龄。

2. 相对地质年代的确定

(1)地层层序法。地层是指在一定地质年代内形成的层状岩石。在一个地区内原始产出的地层具有下老上新的规律。有时,因发生构造变动,地层层序倒转,就需利用沉积岩的泥裂、波痕、雨痕、交错层等构造特征,来恢复原始地层的层序,以便确定其新老关系。

(2)生物层序法。地质历史上的生物称为古生物。其遗体 and 遗迹可保存在沉积岩层中,一般被钙质、硅质充填或交代,形成化石。生物的演变从简单到复杂,从低级到高级不可逆转不断发展。每个地质历史阶段都有其特殊的生物组合。同一地质历史时期,在相同的地理环境下,形成的岩层常含有相同的化石或化石组合。故可以根据生物的演化阶段来划分地壳发展演化的阶段。

(3)岩性对比法。在同一时期、同一地质环境下形成的岩石,具有相同的颜色、成分、结构、构造等岩性成分和层序规律。因此,可根据岩性及层序特征对比来确定某一地区的岩石地层的时代。

(二)地质年代单位和地层年代单位

根据地壳运动和生物演化等特征,将地质历史划分为若干个大小级别不同的时间段落。地质年代按时间的长短依次是宙、代、纪、世、期。

在地质历史上每个地质年代都有相应的地层形成,与宙、代、纪、世、期一一对应的地层年代单位分别为宇、界、系、统、阶。

(三)地质年代表

通过已经建立的各地区的区域地层系统对比和补充,已建立起包括整个地质时代所有地层在内的、完整的、世界性的标准地层表及相应的地质年代表,其内容包括各个地质年代单位的名称、代号和同位素年龄值以及世界和我国主要的构造运动的时间段落和名称等,见表2-7。表中构造运动的名称源于最早发现并经过详细研究的典型地区的地名。