

DIERJIE SHENJICHUGONGCHENG XINJISHUYUXINSHEBEIFAZHANLUNTANLUNWENJI

2012

第二届深基础工程 新技术与新设备发展论坛论文集

中国建筑业协会深基础施工分会

王新杰

北京南车时代机车车辆机械有限公司

黄志文

主编

中国·重庆



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

ERJIE SHENJICHUGONGCHENG XINJISHUYUXINSHEBEIFAZHANLUNTANLUNWENJI

2012

第二届深基础工程 新技术与新设备发展论坛论文集

TL473.2-53
1
:2012

中国建筑业协会深基础施工分会
北京南车时代机车车辆机械有限公司

王新杰
黄志文

主编

中国·重庆

知识产权出版社
全国百佳图书出版单位

内容提要

本论文集重点介绍我国复杂地层深基础施工安全以及新技术、新工法、新设备等新成果本论文集收录的论文是作者从事设计、施工、科学试验与工程实践等方面的探索与总结,反映了我国深基础工程新技术与新设备发展的先进水平,具有较高的学术性、实用性和参考价值。

责任编辑:陆彩云

图书在版编目(CIP)数据

2012 第二届深基础工程新技术与新设备发展论坛论文集/
王新杰,黄志文主编. --北京:知识产权出版社,
2012.3

ISBN 978-7-5130-1095-5

I. ①第… II. ①王… ②黄… III. ①深基础—工程
施工—文集 教材 IV. ①TU473.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 025418 号

2012 第二届深基础工程新技术与新设备发展论坛论文集

中国建筑业协会深基础施工分会 王新杰 主编
北京南车时代机车车辆机械有限公司 黄志文

出版发行:知识产权出版社

社址:北京市海淀区马甸南村1号

网 址: <http://www.ipph.cn>

发行电话:010-82000860 转 8101/8102

责任编辑:010-82000860 转 8110

印 刷:三河市国英印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

版 次:2012年3月第1版

字 数:510千字

定 价:65.00元

ISBN 978-7-5130-1095-5/TU·039 (3979)

邮 编:100088

邮 箱:bjb@cnipr.com

传 真:010-82005070/82000893

责任编辑:lcyl@cnipr.com

经 销:新华书店及相关销售网点

印 张:21.5

印 次:2012年3月第1次印刷

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

第二届

深基础工程新技术与新设备发展论坛

组织委员会：

荣誉主任：许溶烈 陆学文

主任：张晋勳 郝新民 刘元洪

副主任：杜峰 黄志明 郭传新 李永红 唐勇 杨剑
黄志文 孔庆华

委员：刘长文 郝跃 刘富波 王凤良 于好善 罗红武
曹高峻 于建池 刘国宇 王来昌 孔繁年 刘国庆
孙铁光 李耀良 林登 林永基 张博友 朱建新
张法德 徐群清 袁鸿 胡钰雨 董立春 杨明友
张久 郝荣会 黄玉文 李哲 王慧基 孟广义
杨崇庆 贺德新 王庆军 欧阳立志 皇甫长云

技术委员会：

主任：王新杰

副主任：顾宝和 史佩栋 何毅良 赵锡宏 桂业琨 周国钧
高文生 康景文 饶毅 冯爱军 刘钟

委员：夏可风 黄宏伟 何开胜 赵伟民 李显忠 刘金波
丛蔼森 亢新华 冉志伟 朱良锋 许志林 许厚材
文波 杜嘉俊 李康 刘光武 王伍仁 王继忠
刘志明 张立超 岳铭滨 周浩亮 徐方才 梁田录
彭满华 焦家训 沈耀冲 钟显奇 彭桂皎 李武仁
虞兴福 王宗禄 陈明辉 吴岳 李玲 张忠海
李全民 佟丽华 李虹

序 言

“深基础工程新技术与新设备发展论坛”继 2011 年 8 月在山东威海举办第一届之后，今年 3 月 15~18 日又在重庆市迎来第二届大会的召开。这次大会是深基础工程与工程机械两个专业的专家、学者们共同携手合作举办的、倍受欢迎的学术交流会。这种新技术与新设备结合起来的学术、技术交流，是近几年深基础工程与工程机械两个不同专业相辅相成、相互交融的结果。

众所周知，近几年大规模的基础设施建设大大促进了深基础工程技术的发展，许多新工法、新设备应运而生，仅桩工就有数十种的创新，尤其是多样化旋挖成孔桩工艺技术和成套设备机具的研制，加之大量的工程实践，已使我国成为桩机应用与制造的大国。此外，交通、水电、市政建设在引进、消化、研发、创新的方针指导下，也使我国成为隧道掘进机应用与制造的大国。

本次大会是深基础工程和工程机械两方面专家、学者共享发展的一次盛会，由中国建筑业协会深基础施工分会、重庆市建筑业协会基础工程分会、中国工程机械工业协会桩工机械分会联合主办，并得到《基础工程》杂志和一些大型设备制造商的承办、协办，会议前征集论文 78 篇，经技术委员会审核录用 54 篇，论文集涵盖了桩基、深基坑支护、连续墙、隧道开挖等岩土工程和工程机械研制两方面的文章，考虑到本次会议在西南地区召开，特征集了岩溶地区桩基工程和重庆地铁工程方面的文章，对岩溶地区建设工程、勘察、设计、施工、检测及后处理等各环节继续深入研究和实践有一定参考价值。

许多专家学者都把 21 世纪定义为地下工程建设的世纪，但 21 世纪才刚刚走过十年之余，纵观全球，作为定义世纪之名的标志性地下工程案例还未出现和未获共识，未来地下工程建设任重道远，我国高度重视地下工程的开发建设。“十一五”课题项目已取得丰硕成果，“十二五”计划项目已落实开题，主要内容涉及地下空间规划、设计建造技术、地下空间开挖的地下水控制技术等，以满足地下工程建设综合化、深层化、数字化的发展趋势，这不仅为我们从事岩土工程和地下工程机械制造工作者提供了广阔的市场和施展才能智慧的平台，同时也提出了极大的挑战，其中一些关键技术与难题的解决都将依赖于土木、机械两方面专家学者的共同努力。

期盼业内同行共勉，为地下工程之建设再铸辉煌！

中国建筑业协会深基础施工分会首席顾问



2012. 2. 23

目 录

1. 岩石地基承载力的几个认识问题	顾宝和 (1)
2. 复杂地质条件下轨道交通长大越岭隧道设计技术	张晋毅 (9)
3. 薄壁筒桩在河岸支护工程中的设计浅析	陈东曙 胡少捷 (23)
4. 重庆超高层螺杆桩复合地基的应用	刘 双 (31)
5. TR160D 旋挖钻机液压系统设计	张焰明 徐丽丽 (36)
6. 钻孔灌注桩施工常见问题原因分析及防治措施	许厚材 (39)
7. 大扭矩螺旋挤土灌注桩桩机	王 铁 (46)
8. 螺旋挤土灌注桩及其制作设备	张 超 (49)
9. 25 吨多功能桩机液压系统设计	孙从伟 杨庆香 胡艳华 (54)
10. 长螺旋钻孔压灌混凝土后插钢筋笼灌注桩在北京地区的应用	吴耀红 祁慧轩 (59)
11. 长螺旋压灌 CFG 桩对环境影响现象分析	王凤灿 于克猛 陈立龙 (64)
12. 复杂地基深基坑工程的设计探讨	丛蔼森 (68)
13. 河岸边冲洪积地层上超高层、高层建筑地基处理与基础方案	李 靖 (82)
14. 紧邻历史保护建筑的深基坑工程设计与实践	李进军 王卫东 邸国恩 (88)
15. 基于 CoDeSys 和 SPN5000 的旋挖钻机成孔深度监控方案	张石磊 (96)
16. 潜孔锤同步跟管成孔设备的施工应用	王红兵 于克猛 (101)
17. 浅谈 YNZ 系列振动壮锤用耐振三相异步电动机的设计与应用	张秉松 (105)
18. 琅琊山抽水蓄能电站上水库高压帷幕灌浆	许厚材 (107)
19. 基桩承载力准静态试验新技术	韩 亮 (112)
20. TC320VH 底盘静强度有限元分析	聂 刚 任国业 童 毅 (115)
21. 河北省建筑地基处理技术现状及其特点	许志林 杨亚莉 冯翠娜 (121)
22. 双轮铣削式连续墙施工机械的发展及应用原理	赵伟民 程德考 常保平 祖海英 (126)
23. 旋喷搅拌水泥土加劲桩变形计算模型及其验证	廖晓忠 刘全林 (135)
24. 地内压力可控式水平旋喷桩施工关键设备与技术	黄均龙 张冠军 (143)
25. 双折线绳槽卷筒在旋挖钻机上的应用	陶明超 吕后仓 (149)
26. 北江桥超深长大直径桩基础施工关键技术	李明忠 吴木怀 何锦明 (152)
27. 超大型旋挖钻机双机冗余控制系统的设计	李均良 冀 翼 (167)
28. 深基坑渗透水处理及防水体系施工	李明忠 吴福涛 张永财 (176)
29. 针对超大吨位旋挖钻机的转盘结构设计	吕后仓 李远虎 (185)

30. 槟城第二跨海大桥海上超深桩基础混凝土配制技术	江和明	荣劲松	江健伟	(191)	
31. 一种新型的旋挖钻机吊锚架	李远虎		吕后仓	(200)	
32. 贵广铁路佛山隧道深基坑开挖技术	何锦明	董亚东	石云	(205)	
33. 超深嵌岩钻孔灌注桩成孔施工与控制	荣劲松	刘宇峰	刘学才	(213)	
34. 旋挖钻机主卷扬双向合流控制系统	牛慧峰		陈莎莎	(221)	
35. 软弱地基下导墙施工要点	涂启达		徐霜海	(225)	
36. 三轴搅拌桩施工质量监控“黑匣子”装置及其应用	黄均龙		张冠军	(230)	
37. 一种多轴钻机用高起动转矩三相异步电动机的开发			李春艳	(234)	
38. 基于负流量控制的旋挖钻机液压系统研究	张焰明	牛慧峰	佟金玉	(238)	
39. 顶驱减速箱润滑系统的设计	陶明超		吕后仓	(242)	
40. 立轴行星式搅拌系统装备技术			张瑞	(246)	
41. 岩溶区嵌岩桩综合施工技术综述	张智浩	杨松	孙映霞	张慧乐	(256)
42. 利用既有人防隧道扩建为地铁车站扩挖方法研究	叶建军	张晋毅	易立	(264)	
43. 旋挖钻机主卷扬咬绳原因分析及对策	黄志明		王强华	(269)	
44. 关于连续墙液压成槽机的抓斗装置挖掘能力的分析			方东辉	(274)	
45. 大跨地铁车站下穿地面建筑施工风险控制及工法选择	易立	张晋毅		(278)	
46. 提高旋挖钻机性能的若干问题探讨	尹华	李建锋	高超	苏晖	(283)
47. 螺旋挤土成孔在预应力管桩施工中引孔技术	雷斌	张超		(286)	
48. 连续墙液压抓斗在施工中的应用及成槽垂直度分析			禹昭	(294)	
49. 利用既有人防隧道改造、扩建地铁区间隧道方法探讨	魏锋	张晋毅		(299)	
50. 旋挖钻机变幅系统运动异响问题分析及解决	陈玉磊	常延沛		(305)	
51. 超深基坑地下连续墙施工技术	高明巧	周佳奇	罗会东	(308)	
52. 旋挖钻机并发故障诊断推理方法			费胜巍	(319)	
53. 旋挖钻机的好帮手——复合式全锁扣加压钻杆			郝荣会	(324)	
54. 旋挖钻机回转机构故障分析及其设计优化	尚志红	曹杰劼	王小刚	施勇威	(329)

岩石地基承载力的几个认识问题

顾宝和

(建设综合勘察研究设计院)

岩石地基的承载力和变形参数比上质地基高得多,作为一般建筑物的天然地基,有相当大的裕度,如果岩土工程师未能深入研究岩石地基的问题,就容易产生一些认识误区,而这些误区对处理岩石地基的工程问题是很不利的。需要说明的是,岩石地基实际上指的是岩体地基,本文拟对工程界经常谈到的一些问题,谈谈自己的看法,请同行们指正。

1 Mohr-Coulomb 准则是否适用于岩石地基

有人认为,岩石是脆性破坏,是压碎, Mohr-Coulomb 准则阐述的是剪切破坏,只适用于土,不适用于岩石。

事实上,在岩石力学领域,有三个常用的强度准则,即 Mohr-Coulomb 准则、Griffith 准则和 Hock-Brown 准则。

Mohr-Coulomb 准则假定材料剪切破坏,表现为颗粒间的滑移,以黏聚力和内摩擦角表征抗剪强度,极为简明,在土力学中广为应用,岩土工程师都非常熟悉。该准则用于岩石地基的主要问题在于以下三方面:一是不适用于拉应力情况,在拉伸条件下,破裂面分离,内摩擦角没有意义,而脆性岩石实质是拉伸破坏;二是不反映强度参数的非线性,把黏聚力和内摩擦角视为常数;三是不能反映结构面的影响。

Griffith 准则假定材料存在许多随机分布的微裂隙,在荷载作用下,裂隙尖端应力高度集中,当方向最有利的裂隙尖端附近的最大应力超过材料特征值时,导致裂隙扩展、分叉、贯通,使材料破坏。Griffith 准则解决了 Mohr-Coulomb 准则不能解决的拉应力问题,较适用于脆性岩石。该准则作为一种数学模型很有意义,但与试验结果并不完全符合,例如理论上岩石的抗压强度为抗拉强度的 8 倍,而试验结果可达 15 倍,也不能反映结构面的影响。

Hock-Brown 准则注意了与室内试验和现场试验结果的吻合,建立了能反映单轴抗压、单轴抗拉、三轴抗压和结构面影响的非线性经验强度准则,强度包线为抛物线。正应力较低时,岩块锁定,内摩擦角较高;正应力较高时,岩块错动,内摩擦角降低;侧限压力较大时,黏聚力增大。Mohr-Coulomb 准则在 $\sigma - \tau$ 和 $\sigma_1 - \sigma_3$ 直角坐标系中呈线性,而试验结果并非如此;Hock-Brown 准则充分注意了岩体强度的非线性。但对于塑性岩石的剪切破坏, Hock-Brown 准则不如 Mohr-Coulomb 准则简明。

岩石地基的破坏是岩体的破坏,比单一材料的破坏机制要复杂得多,可以归结为三类:第一类是剪切破坏,主要发生在塑性岩石,破坏机制大体与土体类似, Mohr-Coulomb 准则完全可以适用;第二类是拉伸破坏,发生在低围压下的脆性岩石, Mohr-Cou-

lomb 准则显然不适用；第三类是沿弱面滑动，即沿层面、节理面、软弱夹层等结构面滑动，是沿特定的弱面剪切，也不适用于 Mohr-Coulomb 准则。所以，Mohr-Coulomb 准则是否适用于岩石地基，不能一概而论，取决于岩体的性质、围压的高低和弱面是否起控制作用。对于建筑物地基，由于荷载相对较小，硬岩的承载力一般没有问题，结构面的作用远不如边坡问题和地下工程问题突出，要关注的主要是泥质岩石、强风化岩石、极破碎岩石等地基的承载力，因此，Mohr-Coulomb 准则在多数情况下是适用的。

2 用抗剪强度指标计算岩石地基承载力是否合理

既然岩石地基在多数情况下符合 Mohr-Coulomb 准则，那当然可以用抗剪强度指标计算岩石地基承载力。但有两种情况应当注意。一种情况是脆性岩体上的小基础，破坏最初阶段是产生脆性裂纹，接着是压碎，形成楔体，最终发展成剪切破坏。虽然最终也是剪切破坏，但设计者要求地基变形控制在线性范围内，线性极限是不应超越的临界点，不容许压碎，剪切破坏时岩体已经碎裂，强度参数已经改变，已经不是初始状态的强度指标了。另一种情况是倾斜的层状岩层，由于层面对应力传递的影响，塑性破坏区呈不规则状，甚至沿结构面滑移，Mohr-Coulomb 准则的适用性也成了问题。结构面起控制作用的岩体，就更不能用 Mohr-Coulomb 准则计算地基承载力了。

《重庆市建筑地基设计规范》DB50—5001—1997（以下简称《重庆规范》）规定^[7]，岩石地基的承载力可用抗剪强度指标计算，条文说明指出，法国塔罗勃建议用普朗特（Prandtl）公式，但采用的不多；美国多用太沙基公式；加拿大和前苏联用科茨（Coates）公式。由于科茨公式计算结果与格里非斯理论计算结果相近，且较太沙基公式小，故采用科茨公式，地基极限承载力为

$$\begin{aligned} f_r &= N_b \gamma b + N_d \gamma_d + N_c c_k \\ N_b &= \tan^4(45^\circ + \varphi_k/2) \\ N_d &= \tan^5(45^\circ + \varphi_k/2) / 2 \\ N_c &= (N_d - 1) \cot \varphi_k \end{aligned}$$

《重庆规范》对该式并未限定适用于何种岩石地基。但考虑到，硬质岩的岩体抗剪强度参数难以测定和选取，且脆性岩石和节理化岩体用抗剪强度指标描述其强度还存在理论上的不足，故笔者建议该法主要用于可以采取不扰动试样的、完整或较完整的极软岩。

有人强调，先要分清是岩还是土，是“土”即可用 Mohr-Coulomb 准则，可用抗剪强度指标计算地基承载力；是“岩”则不能用 Mohr-Coulomb 准则，不能用抗压强度指标计算地基承载力。其实，有时很难分清是岩还是土，且“岩”有些情况仍适用 Mohr-Coulomb 准则。土状的强风化岩、泥岩、新近系和古近系的砂岩等，其工程特性接近于土，有些似岩非岩，似土非土，如将其作为“岩石”对待，用饱和单轴抗压强度乘以折减系数确定地基承载力，结果比一般的土还低，显然不合理。完整和较完整的极软岩，当可以采取不扰动试样测定天然湿度的抗剪强度指标时，完全可以通过公式计算其地基承载力。但只能用于裂隙不发育，岩块强度可以代表岩体强度的地基。

3 用单轴抗压强度指标确定岩石地基承载力是否合理

《建筑地基基础设计规范》GB50007（以下简称《地基规范》）第 5.2.6 条有如下规定^[6]：

对完整、较完整和较破碎的岩石地基承载力特征值，可根据室内岩石饱和单轴抗压强度按下式计算：

$$f_{ak} = \psi_r f_{rk}$$

式中 f_{ak} ——岩石地基承载力特征值，kPa；

f_{rk} ——岩石饱和单轴抗压强度标准值，kPa；

ψ_r ——折减系数，根据岩体完整程度以及结构面的间距、宽度、产状和组合，由地区经验确定，无经验时，对完整岩体可取 0.5；对较完整岩体可取 0.2~0.5；对较破碎岩体可取 0.1~0.2。

注 2：对黏土质岩，在确保施工期和使用期不致遭水浸泡时，也可采用天然湿度的试样，不进行饱和处理。

1989 版《地基规范》有承载力表，将岩石地基按硬质岩、软质岩及不同的风化程度列表。其修订为 2002 年版时，取消了承载力表，将岩石地基的承载力在正文中专列一条。同时，岩石的工程分类也有修改，采用坚硬程度和完整程度表征岩体工程特性的优劣。该条按此精神编写，以饱和单轴抗压强度表征坚硬程度，以折减系数体现完整性。由于当时缺乏资料，考虑到岩石地基承载力高，容易满足工程要求，故裕度较大，以确保安全。

用单轴饱和抗压强度确定地基承载力存在两个问题：一是由于裂隙的存在，岩体强度肯定低于岩块强度，因此要求乘以小于 1.0 的折减系数，越破碎，折减系数越小，计算方法显然是比较粗糙的；二是单轴抗压强度试验时侧向压力为 0，而地基中岩体为三向应力条件下的竖向压缩，该法偏于安全。因建筑物基础压力一般不大，大多数条件下已能满足要求，且方法简便，可操作性强，故在工程上广为应用。但对于承载力要求较高的建筑物和构筑物，可能偏于过分保守。

岩石试样一般不保湿封装，分别测风干状态和饱和状态的单轴抗压强度。泥质岩石的饱和单轴抗压强度有时太低，按该式计算的地基承载力特征值比土还小，不合理，故有相应的注 2。事实上，不仅泥质岩石如此，易崩解的岩石都有这个问题。而且，地基浸水与试样饱和处理产生的力学效果也有很大不同，注 2 的要求也是偏安全的。

塑性岩土随着围压增加，强度提高，已为业界熟知。其实，脆性岩石也是如此。由第 1 个问题的讨论可知，无论脆性破坏还是塑性破坏，无论 Mohr-Coulomb 准则、Griffith 准则还是 Hock-Brown 准则，岩石和岩体的强度都是随着围压的增大而增高的。单轴抗压强度试验时围压为 0，而建筑地基为三向应力条件下的竖向压缩，随着埋深的增加，围压增大，地基承载力提高，不仅理论上如此，也有试验证明。由张永兴主编的《岩石力学》提供的不同侧压力下的轴向应力应变曲线^[1]可知， $\sigma_3 = 0$ 时，变形很小就达到强度极限；随着 σ_3 的增加，抗压强度提高，变形量增加，类似于塑性破坏的特征。

据赵锡伯、华遵孟的资料^[3]，兰州新近系的细砂岩，成岩作用差，多泥质胶结，含石膏、芒硝等盐类。单轴与三轴试验表明，应力应变关系有明显峰值，为脆性破坏，破坏应

变量仅 1%~3%。但极限强度与围压关系很大,见表 1。

极限强度与围压关系

表 1

围压 σ_3 (kPa)		0	100	200	300	400	500	600	700	800
风(烘)干强度 σ_f		3082	3960	4838	5716	6594	7472	8350	9228	10105
天然强度 σ_f'		79	466	852	1143	1625	2012	2399		
饱和强度 σ_{fn}		0	0	711	1566	2422	3277	4133		
强度	σ_f'/σ_f	0.026	0.118	0.176	0.200	0.247	0.269	0.287		
衰减率	σ_{fn}/σ_f	0	0	0.15	0.27	0.37	0.44	0.49		

彭涛等在徐州商厦工程做了三轴试验^[4],测得围压为 2.0MPa 时,抗压强度比单轴强度提高了 25%~62%,平均 37%;围压为 4.0MPa 时,抗压强度比单轴强度提高了 47%~94%,平均 67%。

素混凝土也是脆性材料,力学性质与硬岩相似。上部结构设计注重截面计算,三向压力下的轴何抗压问题不多。但试验表明,当有一定围压时,抗压强度显著高于单轴抗压强度。这是由于在围压作用下,混凝土中的微裂隙、气孔、骨料胶结面处的应力集中减小,微裂隙难以扩展和贯通所致。据李青松的试验数据^[5],按 Mohr-Coulomb 准则计算,C30 和 C50 混凝土试块的内聚力为 13.6~17.9MPa,内摩擦角为 30.5°~32.20°。这也从另一侧面说明了三向应力条件下岩石和岩体强度的科学规律。

4 岩石地基承载力是否可做深宽修正

地基承载力的深宽修正,是根据无埋深小压板载荷试验的成果,修正为有一定埋深大基础的地基承载力的一种简易方法,避免了抗剪强度指标的测定和复杂的计算,为广大工程界人士所熟悉和接受。其理论基础就是 Mohr-Coulomb 准则,且有大量工程经验和现场试验为依托。那么,如果土质地基可以修正,岩石地基是否也可以修正呢?可做以下分析:

(1) 对于塑性材料,地基破坏的实质为剪切滑移,进行深宽修正没有问题。对于脆性材料,虽然破坏机制与塑性材料不同,但侧向应力可以抑制裂缝的产生和扩展,有利于强度的提高。随着埋深增加:边载提高,侧向应力增大,地基承载力的提高是肯定的。因此,对岩石地基进行深度修正符合岩石力学原理。

(2) 多数规范规定岩石地基不进行深宽修正,估计有两方面考虑:一是岩石地基承载力历来不进行深宽修正,在思想上已形成定式;二是岩石地基承载力较高,一般工程可以满足要求,不必挖掘这个潜力,因而较少下工夫进行这方面的研究和讨论。但对于极软岩和极破碎岩,如过分保守,对荷载大的工程有时很难处理,因此还是应当考虑修正问题。

(3) 岩石地基承载力的深宽修正虽有理论依据,但缺乏工程经验和试验论证。而且,岩石地基情况比土质地基更复杂,不确定性更多,需要留出足够大的安全度,至少日前还应从严掌握。因此,建议对脆性岩石取深度修正系数为 1.0;深度修正系数的大小与内摩擦角有关,故泥岩和土状的强风化岩取低值 2.0;弱胶结的砂岩、砾岩、碎屑状或碎块状的强风化岩取较大值 3.0。总体上偏安全考虑,保证地基变形不超过线性阶段,宽度修正暂不考虑。随着研究的深入和经验的积累,再逐步完善。

5 怎样看待岩石地基承载力的理论计算和经验方法估计

岩石地基承载力的理论计算已有长足进步,从最早借鉴土质地基进行整体剪切破坏、局部剪切破坏、冲切破坏计算,发展到采用极限平衡理论、极限分析上下限理论、滑移线理论,各向同性体和各向异性体的极限承载力计算^[2]。计算模式和推导过程严谨,既提供了计算方法,又深入研究其中的力学机制,对指导工程实践很有意义。但岩石地基承载力的问题太复杂了,岩体是由岩块和结构面组成的复合体,具有非均质、不连续、各向异性和非线性破坏特征,且与地形、荷载、基础的埋深、型式、尺寸、刚度以及施工扰动等因素有关,还有地应力、地下水的影响,地基结构复杂,破坏模式多样,不确定性非常大,而最主要的障碍是岩体参数的难以测定和选取。试想:岩体中发育着很难准确描述的裂隙系统,或长或短,或疏或密,或宽或窄,或光滑或粗糙,或充填或不充填,方向各异,千姿百态,室内试验根本无法测定裂隙岩体的力学参数,原位测试的代表性和可靠性也很有限。计算参数出入过大时,理论计算还不如经验估计可信。

理论计算必须概化,概化肯定与实际条件有所差异。差异有多大,随工程而异,工程师心中必须有数。所谓精确解只是概化条件下的精确解,并非真正精确。况且有些理论(如 Hock-Brown 准则)、参数(如表征破碎和扰动的经验参数 s 、 m)本身就是经验的。土质地基比岩石地基简单,理论计算的可信度尚且有限,更何况结构复杂得多,不确定性大得多的岩石地基。

岩石地基承载力的确定,不是追求精确,不是追求理论上的完美,而是力求在安全、可靠和经济的基础上,尽量简易。力学计算的理论和方法虽然还需继续发展完善,但对工程师来说,主要功用是提高认识,正确导向,尚难直接用于工程。在定量计算困难的情况下,认清概念和正确定性十分重要。

所谓确定岩石地基承载力的经验方法,是指以载荷试验和工程经验为基础,与某种原位测试指标建立经验关系。经验方法虽然没有明确的力学模型和严密的理论推导,但只要载荷试验成果和工程经验可靠,选用的原位测试指标的数据稳定(自身变异性小),与地基承载力相关密切,经验方法的可靠性甚至不亚于理论计算。

6 可否用岩体剪切波速估计岩石地基承载力

关于这点,笔者认为是可行的。归纳起来,剪切波速用于岩土分级和估计岩石地基承载力具有如下优点:

(1) 岩土的剪切波速是岩土工程勘察的重要指标,是地基地震反应分析的主要参数,一般岩土工程勘察均需测定。

(2) 岩土的剪切波速与岩土的动剪切模量有简单的函数关系,与地基承载力、地基变形参数等静力学性质相关密切。

(3) 剪切波速直接在现场原位测定,概括了岩石和结构面的综合特性,避免取样扰动和室内试验,代表性强。

(4) 剪切波速测试技术比较成熟,数据稳定,经验丰富,人为因素也较少。

(5) 按剪切波速分级,既可用于岩,也可用于土,可对从极硬岩到极软土的全部岩土

进行统一分级。

(6) 按剪切波速分级只需一项指标, 极为简便, 可操作性很强, 不像有的分级方法用多项指标, 相当繁琐。

(7) 岩体的波速分级已有相当多的核电厂勘察资料, 积累了大量经验; 土体已有《建筑抗震设计规范》可以借鉴, 并为广大结构工程师所熟悉。

按剪切波速对岩土进行分级, 目的是为了定性判别地基的优劣, 当然不是否定其他的分级和分类方法。表 2 是初步方案。

岩土体按剪切波速分级

表 2

岩土按剪切波速分级		剪切波速平均值 (m/s)	分级名称	代表性岩土
I 硬岩	I-1	$v_s > 2000$	极硬岩	未风化及微风化花岗岩、石英岩、致密玄武岩等
	I-2	$2000 \geq v_s > 1500$	坚硬岩	微风化花岗岩等
	I-3	$1500 \geq v_s > 1100$	中硬岩	中风化花岗岩等
II 软岩/ 硬土	II-1	$1100 \geq v_s > 800$	中软岩	强风化花岗岩等
	II-2	$800 \geq v_s > 500$	软弱岩、坚硬土	新生代泥岩、全风化花岗岩等, 密实碎石类土等
	II-3	$500 \geq v_s > 300$	中硬土	硬塑~坚硬黏性土 中密~密实砂土等
III 软土	III-1	$300 \geq v_s > 150$	中软土	可塑黏性土 稍密~中密砂土等
	III-2	$150 \geq v_s > 100$	软弱土	软塑黏性土、松散砂土等
	III-3	$v_s \leq 100$	极软土	淤泥、吹填土等

注: 1. 剪切波速 1100m/s 基于核电工程规定, 大于该值可不做地基与结构协同作用计算。

2. 剪切波速 800m/s 及 500m/s 基于《建筑抗震设计规范》, 大于该值分别为岩石地基和可作为基底输入 (核电工程基底输入大于 700m/s)。

3. 剪切波速 300m/s 为核电厂地基的下限。

4. 剪切波速 150m/s 为《建筑抗震设计规范》中软土与软弱土的分界。

该分级方案共 3 大档 9 小档。有了这个分级标准, 设计人员对建筑地基的优劣可以方便地进行初步判断。表 3 是按剪切波速初步估计地基承载力的建议。

岩石地基承载力特征值的初步估计

表 3

剪切波速度平均值 (m/s)	地基承载力特征值 (kPa)	剪切波速度平均值 (m/s)	地基承载力特征值 (kPa)
500	400	1500	5000
800	800	2000	15000
1100	1200	2500	30000

有人认为, 波速是岩体的动力学指标, 地基承载力是岩体的静态指标, 两者没有关

系。其实,经验方法考虑的是两者的相关性,并非函数关系。岩体剪切波速是岩块强度和裂隙发育程度的综合反映,与地基承载力有较为密切的相关性。笔者收集了近年来核电厂勘察的剪切波速数据 125 组,与野外鉴定、室内试验数据做了初步对照,认为用剪切波速估计地基承载力是可行的,继续深入研究有良好前景。其中剪切波速大于 1100m/s 的部分,用饱和单轴抗压强度乘以折减系数计算了地基承载力特征值,均在上表的包络线以内,虽然偏于保守,但安全,一般工程也够用。剪切波速小于 1100m/s 的需以载荷试验为依据,数据较少,应继续积累,逐步完善。

7 确定岩石地基承载力要不要综合判断

《建筑地基基础设计规范》规定^[6]，“地基承载力宜根据野外鉴定、室内试验和公式计算、载荷试验和其他原位测试,结合工程要求和实践经验综合确定”。土质地基是这个原则,岩石地基更应贯彻这个原则。这是因为岩石力学较土力学更不成熟,岩石地基的工程经验较土质地基的工程经验更少的缘故。

野外鉴定、室内试验和公式计算、载荷试验和其他原位测试,各有优缺点,各有适用条件,应综合考虑,相辅相成。有经验的工程师可以根据野外鉴定,对地基承载力做初步估计,但因主观因素多,不宜作为工程设计的依据。用单轴饱和抗压强度乘以折减系数确定地基承载力,因忽略了三向应力状态,故偏于安全。用岩体的抗剪强度指标,根据公式计算地基承载力,有一定的理论根据,但只宜在完整性较好,结构面影响可以忽略的塑性岩体中应用。载荷试验虽是目前公认比较可靠的方法,但费用高,工期长,不能大量进行,代表性也有限。规范规定的承压板直径为 300mm,这是由于承压板大,试验难度大,费用高。承压板越大,效果肯定越好。最终验证地基承载力的是工程实践,因此当地经验和同类工程的经验十分重要。此外,确定地基承载力时还要充分考虑荷载、基础等设计参数和施工扰动因素,所以地基承载力是一个综合判定的问题。

与土质地基比,岩石地基有两个重要特点:一是承载力比土质地基高,中等强度的岩石地基(例如中风化花岗岩),地基承载力以兆帕计,作为一般建筑物的天然地基,有相当大的裕度;二是岩石地基的问题比土质地基更复杂,指标更难测定,计算更不可靠。因此,勘察、设计和研究的重点应当放在有问题的岩石地基上,如极软岩、极破碎岩、特殊性质岩石(膨胀性、易溶性、易风化性等);严重不均匀岩体;不稳定地基(斜坡、溶洞等)。对于承载力和变形都没有问题的岩石地基,定性判断就可作出结论。核电厂规定,剪切波速大于 1100m/s 的地基即可作为嵌固端,不必做地基与结构的协同作用分析;对于一般建筑物,剪切波速大于 800m/s 就可认为承载力与变形都已满足“真正岩石地基”。

8 结论

(1) Mohr-Coulomb 准则、Griffith 准则和 Hock-Brown 准则,各有假设条件。Mohr-Coulomb 准则适用于塑性剪切破坏的岩体;Griffith 准则适用于脆性拉伸破坏的岩体;Hock-Brown 准则是与试验成果吻合的非线性经验强度准则。岩体三大强度准则对认识岩体强度的本质和岩体破坏机制有重要意义。

(2) 由于岩石力学较土力学更不成熟,岩石地基的工程经验较土质地基的工程经验更

少,工程设计应当留有足够的安全裕度。对于实际工程,岩石地基承载力的确定,不是追求精确,不是追求理论上的完美,而是在安全、可靠和经济的基础上,力求简易。

(3) 力学计算的理论和方法虽然还需不断发展完善,但对工程师来说,主要功用是认识机制,正确导向,但还难以直接用于工程,因为计算参数的测定和选取是主要障碍。对于完整和较完整,裂隙系统可以忽略的塑性岩体,并可采取不扰动样试验时,可用抗剪强度指标计算地基承载力。《建筑地基基础设计规范》规定的用单轴抗压强度乘以折减系数确定地基承载力特征值的方法,由于忽略了地基的侧限,故偏于安全。

(4) 岩体的剪切波速综合反映了岩石的强度和岩体的完整性,与地基承载力相关性密切,测试技术成熟,积累了较多经验,可作为岩土分级和估计地基承载力的指标。对于一般建筑物,剪切波速大于 800m/s 的岩石地基,可认为承载力与变形均已满足要求;剪切波速小于 800m/s 的岩石地基,应根据工程要求和具体条件,通过测试和分析,对地基承载力进行综合确定。

(5) 载荷试验仍是确定地基承载力、解决工程问题最可靠的方法。以载荷试验为基础,通过相关分析,结合工程实践总结出来的经验方法,有很强的实用意义,可靠程度甚至不亚于理论计算,应投入力量进行研究。

(6) 围压有利于岩体竖向强度的提高,边载有利于岩石地基的稳定,载荷试验确定的岩石地基承载力可以进行深度修正。

参考文献

- [1] 张永兴. 岩石力学. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- [2] 宋建波, 等. 岩体地基极限承载力. 北京: 地质出版社, 2009
- [3] 赵锡伯, 华遵孟, 张学勤. 兰州地区沉积岩工程地质特征. 西北勘察技术, 1990
- [4] 彭涛, 等. 徐州国际商厦陡倾斜弱岩层嵌岩桩工程勘察实录. 第六届全国岩土工程实录会议, 2004
- [5] 李青松, 等. 混凝土强度与变形特征的围压效应试验研究. 建筑结构, 2011 (5)
- [6] 《建筑地基基础设计规范》GB50007—2002, 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [7] 《重庆市建筑地基基础设计规范》DB50/5001—1997, 1997

复杂地质条件下轨道交通长大越岭隧道设计技术

张晋毅

(北京城建设计研究总院有限责任公司)

摘 要: 本文以国内轨道交通领域第一条复杂地质条件长大越岭隧道^[1]——重庆轨道交通一号线中梁山隧道为工程背景, 针对城市轨道交通长大越岭隧道的设计过程中所采用的新技术和遇到的重难点问题, 着重阐述隧道穿越含瓦斯煤层、采空区、膏岩、富水岩溶等复杂地质体的处理思路和应对措施。同时, 针对城市主城区的生态环境保护特殊要求提出可持续发展的隧道设计理念、思路和方法。以期对今后的类似工程具有一定的启发和参考价值。

关键词: 山地城市; 越岭隧道; 煤系地层; 岩溶; 地表水体

1 前言

随着我国社会经济的飞速发展, 我国的轨道交通建设也得到空前发展, 目前我国至少有 27 个城市^[2]的轨道交通在运营或在建设。山城重庆作为我国西部特大中心城市也于 21 世纪初步入了轨道交通加速发展期, 日前已有 3 条线路在运营, 4 条线路在同时建设。尤其是 2011 年底轨道交通一号线(朝天门—沙坪坝段)的通车, 标志着我国第 1 条山地城市全地下地铁线路成功修建, 开创了我国山地城市修建地铁的先河, 为今后山地城市修建轨道交通工程积累了宝贵经验。

重庆轨道交通的工程特点与特有的山城特色密不可分, 复杂的地形、地貌和地质条件将成为修建地铁不可避免的问题。重庆市受其地形地貌特点控制, 主城区被中梁山、铜锣山、缙云山、长江和嘉陵江等主要地貌单元切割形成组团式的发展格局, 轨道交通作为联系各发展组团的城市交通动脉必须跨越或穿越这些地貌单元, 在城市主城区修建长大山岭隧道将成为重庆轨道交通建设的必然, 根据重庆市轨道交通线网规划, 重庆市轨道交通建设将至少需要穿越以上 3 条山脉修建 7 座长大越岭隧道^[3]。几条山脉均受褶皱构造影响, 地质条件极其复杂, 修建隧道可能穿越含瓦斯煤层、采空区、膏岩、富水岩溶等不良地质单元, 修建中工程和环境风险极大, 有必要进行深入研究。

本文以重庆轨道交通一号线中梁山隧道为工程背景, 针对工程设计中遇到的复杂地质及环境问题的解决方案和工程验证进行详细的阐述, 以期对今后重庆乃至国内类似工程的修建起到启发和参考作用。

2 工程背景

2.1 工程概况

重庆轨道交通一号线中梁山隧道是目前国内轨道交通领域已建成的最长、地质条件最

复杂的长大越岭隧道，隧道为双碑北站—赖家桥站区间的一部分，两侧与高架线路连接，全长 4.33km，隧道呈东西走向，与中梁山背斜基本呈正交关系，隧道最大埋深约 270m，除洞口段外均为深埋隧道，按新奥法原理设计，采用复合式衬砌结构，钻爆法施工。

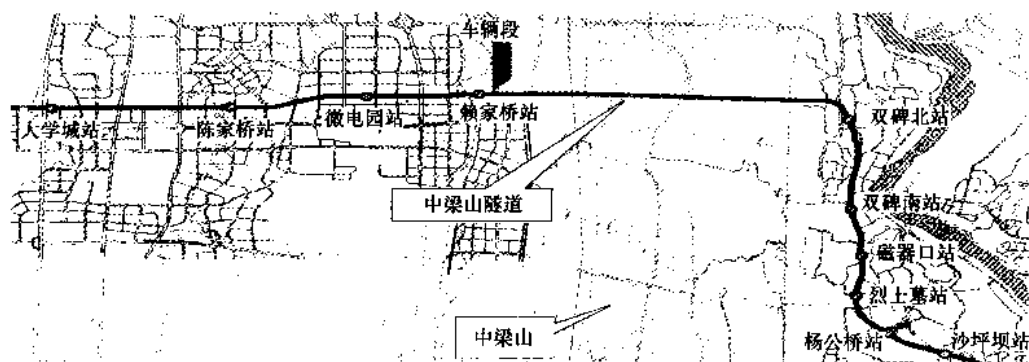


图 1 中梁山隧道平面图

2.2 工程地质及水文条件

中梁山隧道沿线穿越地层主要为第四系崩坡积土，侏罗系的下沙溪庙组、新田沟组、自流井组、珍珠冲组和三叠系的须家河组、雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组地层。隧址区的岩层以碳酸盐岩为主，占岩层的 60% 左右；泥质岩和砂岩为次，占隧道所遇岩层的 40% 左右。

地层富水性受地形地貌、岩性、岩溶及裂隙发育程度控制，其中，新田沟、自流井组地层地下水贫乏；珍珠冲组、须家河组地层内有一定量地下水；碳酸岩盐类岩石包括雷口坡组和嘉陵江组地层岩溶发育含有丰富的地下水；飞仙关组地层灰岩、泥灰岩内岩溶发育，富含岩溶水。

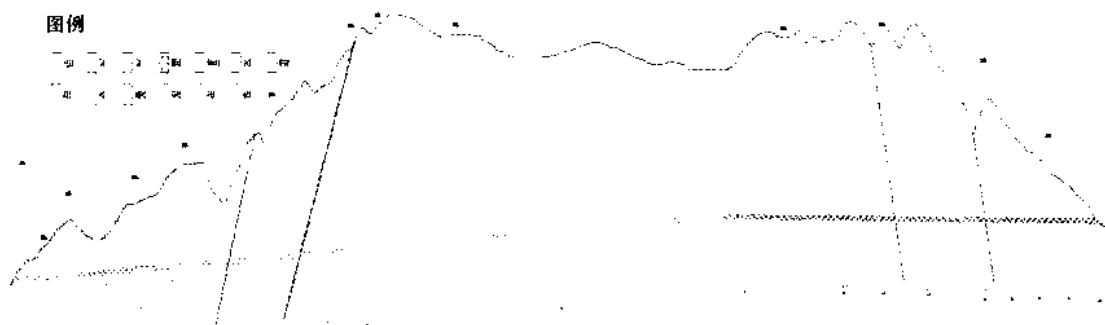


图 2 中梁山隧道地址剖面图

中梁山隧道位于岩溶地下水动力垂直分带的深部循环带上，施工开挖时很可能遇到管道型岩溶水突出，其特点是流量大、压力高，时有流沙，对施工危害大。同时易造成顶部岩溶槽谷现在的井、泉漏失及相应处小范围岩溶塌陷，影响其附近居民生活。预测拟建隧道总涌水量：平常期为 $10596\text{m}^3/\text{d}$ 、雨水期为 $26490\text{m}^3/\text{d}$ ；地下水最大静水压力为 $1.5\sim 1.8\text{MPa}$ 。