

第25届
全国结构工程学术会议
论文集

第Ⅱ册

PROCEEDINGS OF THE 25TH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. II

主编：陆新征

《工程力学》杂志社

2016.8

CSTAM2016-P66

第 25 届

全国结构工程学术会议

中国 包头
BAOTOU CHINA
8.13 ~ 8.14, 2016

主办单位 中国力学学会结构工程专业委员会
内蒙古科技大学
中国力学学会《工程力学》编委会
清华大学土木工程系
水沙科学与水利水电工程国家重点实验室（清华大学）
土木工程安全与耐久教育部重点实验室（清华大学）
内蒙古自治区土木工程安全与耐久重点实验室（内蒙古科技大学）
内蒙古自治区建筑结构防灾减灾工程技术研究中心（内蒙古科技大学）

学术委员会

主 席 : 袁 驷

委 员 : (按姓氏拼音为序)

陈以一 陈 璞 陈宝春 陈 明 岑 松 崔京浩 杜修力 范 重 范 锋 方 秦
葛耀君 韩林海 郝际平 金 峰 李宏男 李忠献 李 斌 刘汉龙 刘 香 龙志飞
陆新征 罗建辉 吕振华 牛建刚 宋二祥 王 涛 魏德敏 徐世烺 薛 刚 杨庆山
杨亚政 张建民 曾 攀 赵根田 朱宏平 庄 茁

组织委员会

主 席 : 李 斌

常务副主席: 宋二祥

副 主 席 : 赵根田

委 员 : (按姓氏拼音为序)

曹万林 陈云敏 陈志华 陈 明 樊健生 傅向荣 顾祥林 韩建平 贾连光 李正良
李 斌 刘 香 陆新征 茹继平 谭 平 万 馨 王怀忠 王 伟 闻 洋 吴 波
吴 刚 肖 岩 邢 峰 徐礼华 叶康生 余志武 闫 鑫 赵世春 赵根田 张顶立
张 鑫 郑建岚 周新刚

秘 书 处

秘 书 长 : 刘 香

副秘书长 : 陈 明

学术秘书 : 黄丽艳(负责组织论文宣读、排序、分组、评定等学术工作)

秘 书 组 : (按姓氏拼音为序)

高春彦 郝润霞 万 馨 王英浩 闻 洋 闫 鑫 于景飞 陈 旭 陈亚栋 曹美玲
贾 然 李肖波 梁蓬勃 刘江森 落凯妮 孟春才 倪 晶 宋 浩 王 达 王丽娜
于洲欢 运喜刚 张 超

郑重声明

全国结构工程学术会议每年召开一届，并出版论文集属内部学术交流资料。为了扩大影响，确保作者论文能够得到广泛交流和宣传，便于同行学者及有关部门随时查阅、检索和引用，论文组织委员会每届均作如下的承诺和声明：

1. 会议论文集向全国 70 多个省市（包括港澳台地区）200 多所高等学校图书馆和情报部门免费赠送，总数有 300 多套
2. 为了扩大学术交流，会议论文集被中国有关信息部门及学术期刊光盘版收录。
3. 会议严格执行文责自负的原则。关于涉及保密问题及有关抄袭等学术不端行为，均由作者本人负责。

序

一年一度的全国结构工程学术会议去年在厦门度过了它 24 岁生日，今年在内蒙古包头召开第 25 届全国结构工程学术会议。

内蒙古幅员辽阔，资源丰富，号称“东林西矿、南农北牧”。稀土金属储量居世界首位，拥有我国最大的草原牧区，草原、森林和人均耕地面积居全国首位。并孕育了历史悠久的草原文化，使中华文明更加多姿多彩。

包头位于我国华北与西北的交通要冲，赵武灵王曾在包头境内筑“九原城”，此后包头就一直是我国古代沟通北方草原游牧文化与中原农耕文化之间的重要枢纽。包头名称源于蒙古语“包克图”的谐音，意为“有鹿的地方”，所以又有“鹿城”之称，拥有广袤的草场资源。中华人民共和国建国以来，包头的工矿业得到迅猛发展，被誉称“草原钢城”、“稀土之都”，是我国重要的基础工业基地和稀土产业中心。

今年会议的东道主内蒙古科技大学是内蒙古自治区直属大学。它始建于 1956 年，最初为包头钢铁工业学校和包头建筑工程学校，1958 年两校合并组建包头工学院，1960 年更名为包头钢铁学院，隶属原冶金工业部，1998 年划归内蒙古自治区管理，成为中央与地方共建的高等学校。2000 年内蒙古煤炭工业学校并入，2003 年更名为现在的校名“内蒙古科技大学”。经过 55 年的建设与发展，内蒙古科技大学已发展成为以冶金、采矿、煤炭、稀土为特色，以工科为主，工、理、文、管、经、法、艺术、教育协调发展的多科性大学。拥有“内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室”（省部共建国家重点实验室培育基地），“白云鄂博矿稀土及铌资源高效利用省部共建教育部重点实验室”等一批优良的办学资源和一批优秀的教学科研人才。学校作为内蒙古高校管理体制改革的试点单位，秉承“自强不息、敢为人先”的校园精神和“百炼成钢”的校训，近年来在科学研究、人才培养、社会服务等方面都做出了很多重要成果。

在中国力学学会结构工程专业委员会、内蒙古科技大学、《工程力学》编辑部等单位的共同努力下，本次会议得到了广大与会代表的大力支持。论文集共征集到论文 236 篇，涵盖了包括土木工程、水利工程、机械工程、航空航天工程等诸多领域。相信各位与会代表一定可以在本次会议上得到丰硕的收获。

论文集主编 陆新征

陆新征

2016 年 8 月

第 25 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 236 篇，共计 1594 页，分装成 3 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II 册、第 III 册只载本册目录。

第 I 册论文 70 篇（共 534 页），包括特邀报告和两个学科类别：特邀报告；1. 力学分析与计算；2. 钢结构、材料与构件；

第 II 册论文 84 篇（共 526 页），包括四个学科类别：3. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构；4. 公路、铁路、桥梁、水工与港工；5. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构；6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

第 III 册论文 82 篇（共 534 页），包括四个学科类别：7. 钢筋混凝土结构、材料与构件；8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析；9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

第 25 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 II 册目录

3. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

危岩的外表和内部裂隙拉结加固方法研究	陈 航 曾祥勇 朱爱军 (001)
结构-土-结构相互作用的模型对比与影响因素分析	陈 晶 陈清军 (007)
各种处理措施对高填方边坡稳定性影响的研究	 陈金锋 刘 佳 甘厚义 赵尚毅 周海清 (012)
堆载预压强夯组合排水固结法加固软土地基的室内试验研究	 丁继辉 马 娜 全小娟 (020)
多种缺陷桩低应变检测与数值特性研究	 侯世伟 胡世健 赵俭斌 郭少坡 张 鑫 (026)
破碎煤岩体渗流系统的结构稳定性研究	李顺才 李 强 郭静那 (032)
软土地区地铁基坑踢脚破坏的数值模拟研究	彭湘文 袁端才 (039)
基于 Hoffman 准则的层状岩体巷道稳定性研究	孙培峰 杨天鸿 (044)
砂土中自源微生物诱导的防渗封堵试验研究	王 草 郭红仙 李 萌 程晓辉 (051)
无支护条件下基坑开挖空间效应数值分析	王维玉 赵 拓 (056)
既有建筑桩基础开挖条件下承载特性试验研究	王忠帅 贾 强 (060)
矿山法隧道开挖对既有管线沉降的影响分析	魏畅毅 刘 飞 董 军 (069)
基于全尺寸试验的挖掘机具作用埋地输气管道的多体动力学仿真	 徐涛龙 姚安林 李又绿 蒋宏业 曾祥国 (077)
轴力作用下预应力高强混凝土管桩抗弯性能研究	杨志坚 李幅昌 王 琦 (086)
超大基坑围护结构的三维有限元模拟分析	张 海 杨国岗 苏 籍 (093)

4. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

大型钢桁拱桥的整体试验模型设计研究	杜南刚 陈太聪 苏 成 (102)
钢箱梁缩尺模型爆炸冲击波作用下破坏实验研究	耿少波 刘亚玲 薛建英 (107)

单箱三室不等壁厚箱梁受弯与约束受扭时的力学特征.....	龚耀清 曹 海 (114)
某中承式钢管混凝土桁式拱肋节点疲劳开裂分析.....	黄汉辉 陈康明 吴庆雄 王 渠 (123)
横梁布置方案对索道桥横倾稳定性能的影响研究.....	景天虎 刘均利 莫时旭 王晓峰 (129)
分离双扁平箱梁气动力干扰效应研究	李少杰 刘小兵 杨 群 刘庆宽 马文勇 (135)
斜拉索表面粗糙度对干索驰振振幅影响的研究	卢照亮 刘晓玲 郑云飞 刘庆宽 马文勇 刘小兵 (139)
福建某整体桥极限长度研究	马 盛 薛俊青 Bruno Briseghlla 陈宝春 Miguel Walter Munoz Machicao 黄育凡 (144)
变速车辆作用下拱桥吊杆的动态内力分析	邵 元 孙宗光 陈一飞 (150)
移动荷载作用下简支梁振动的影响因素分析	施鸿展 董 军 (157)
大跨度连续钢箱梁系杆拱桥顶推施工方案设计	宋郁民 (162)
波形钢腹板导梁局部承压的加强构造与试验	苏庆田 杜 霄 曾明根 林 航 (168)
4×30m 简支转连续箱梁桥上部结构设计分析	王华阳 曹 霞 (176)
基于灰色关联度的拉索状态评估理论与试验研究.....	王修勇 韩骞子 钟 桔 孙洪鑫 (183)
风攻角对分离双扁平箱梁涡振特性的影响	张胜斌 刘小兵 杨 群 刘庆宽 马文勇 (190)
基于 CFRP 吊杆中承式拱桥静力特性分析.....	赵 斌 高 婧 郑毓玲 (194)
端板尺寸对斜拉索节段模型测压试验结果的影响.....	郑云飞 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (198)
基于结构模型试验的路面结构层模量反算分析	周兴业 王旭东 张年梅 (202)

5. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构

大型宽体客机舱门密封结构的分析研究	白 阳 潘 阳 (206)
流体作用下燃料箱动态响应数值模拟	陈 伟 秦仙蓉 郝婧兰 潘 杰 杨志刚 (210)
有限元 Riccati 法在火箭振动特性计算中的应用	董 严 付小燕 张怀宇 (217)
振动浇注装置的振动幅值研究	付小燕 李锡文 薛 江 (221)
Kevlar 缠绕增强机匣包容过程研究	何泽侃 胡燕琪 吴亚楠 宣海军 (226)
导管架平台遭受球鼻艏撞击的试验研究及数值模拟.....	姜 超 胡志强 刘 昆 王 晋 (233)
斜浪中船体梁的逐次崩溃行为研究	裴志勇 朱 波 张水林 朱志辉 吴卫国 (240)
冰区航行 LNG 船舷侧抗撞性能评估	徐双东 胡志强 陈 刚 (248)
大型 FLNG 船体波浪诱导载荷及全船弯扭强度研究	张倩倩 胡志强 陈 刚 (255)
加筋板有限元建模方法研究	周 坤 李道奎 蒋国庆 (263)
弹性机翼静气动弹性数值研究	朱世权 李海元 陈志华 (270)

6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

高铁环境激励对镗床基础减隔振影响测试与分析.....	陈建琪 张晓敏 孙 勇 赵 武 (274)
区域建筑震害模拟方法分析对比	程庆乐 曾 翔 熊 琛 许 镇 陆新征 (280)
X 形钢挡块与混凝土挡块抗震性能对比分析.....	崔侠侠 项乃亮 李建中 (289)
高强钢中空夹层钢管混凝土抗撞性能有限元分析.....	辜应卓 李 威 韩林海 赵晓林 (296)
基于子结构试验的土-结相互作用实现研究	郭 珺 唐贞云 李 易 李振宝 (303)
高性能计算在土木工程中的应用	何 韬 何 煌 邓国强 陈 斌 (311)
云南省少数民族地区农村房屋结构调查与分析	何世钦 姚晨辰 李 悦 纪颖波 (318)
基于 ALE 算法的近地面 TNT 爆炸数值模拟研究.....	何长林 胡其高 刘靖晗 汪庆桃 (323)
旋转运动导电圆板磁气弹性横向强迫振动	李文强 胡宇达 (329)
酸雨腐蚀后圆钢管混凝土柱抗震性能有限元分析.....	林博洋 陈梦成 黄 宏 (334)
爆炸荷载作用下弹簧支撑防护门动力响应分析	刘靖晗 胡其高 何长林 汪庆桃 (345)
手机保护套防屏幕跌落破坏分析研究	刘子尚 王 飞 付志一 汪长智 杨风利 (351)
分层土—桩—结构相互作用体系地震反应分析	楼梦麟 韩 飞 (356)
滚石撞击钢筋混凝土墩柱试验研究	罗 征 王小荣 李应根 谷志敏 王银辉 (362)
采用界面单元协调子结构方法研究	罗清宇 王 涛 (369)
刚性弹侵彻岩石靶工程模型	蒙朝美 谭清华 蒋志刚 宋殿义 (375)
复杂地形地震反应中峰值位移分布特征研究	彭小波 章小龙 李小军 洪海春 杨伟林 (381)
基于土-结构相互作用的桥墩结构地震响应分析	申彦利 王竹青 张杨娟 (387)
村镇建筑新型简易隔震技术研究	谭 平 徐 凯 刘 晗 张亚飞 周福霖 (394)
局部振型对吊索拱桥中拉索地震反应的影响	谭晋鹏 潘旦光 雷素素 (399)
矮塔斜拉桥减隔震设计研究	万尚辉 项乃亮 李建中 (406)
侧向冲击下钢管混凝土构件受力性能试验研究	汪友弟 代春辉 蒋秀根 丁 敏 (413)
甘肃省农村生土结构房屋现状调查与分析	王 辉 常建军 李 悦 纪颖波 (417)
19Cr19Mn2Ni0.88N 高氮奥氏体不锈钢动态压缩性能与微观组织研究	王彦莉 贾古寨 张 婷 李鹏飞 李丰显 梁景恒 (422)
基于性能的钢筋混凝土构件抗爆设计研究综述	王子琪 柳锦春 (426)
分层壳单元法在核岛屏蔽厂房钢板混凝土结构中的适用性研究.....	魏 超 周国良 唐 晖 (431)
某框架-剪力墙基础隔震结构的动力响应分析	吴 迪 霍维刚 谭 平 (435)
中欧规范设计的钢筋混凝土桥墩抗震性能对比	吴家杰 聂尚杰 薛俊青 Briseghella Bruno Camillo Nuti (443)
金属吸能结构在舰载设备抗冲击中的应用研究	熊 鑫 金 晶 吴新跃 (450)

高速公路防撞垫概念模型的优化及控制参数研究.....	姚如洋 赵振宇 尹冠生 (456)
液压剪叉式升降台刚柔耦合模型的动力学仿真	袁端才 江民书 (463)
风向角对方形断面细长结构气动力特性的影响	岳光强 马文勇 刘庆宽 刘小兵 (469)
竖向加载装置对 RC 桥墩抗震性能影响试验研究	
..... 吴家杰 薛俊青 Briseghella Bruno Camillo Nuti 聂尚杰 Toto Davide (473)	
两种剪切波速不确定性分析方法的对比	张 海 季新星 尤红兵 王 震 (479)
密闭空间内三种防爆隔墙的减爆吸能效应分析	张建亮 夏志成 周竞洋 姚 新 (486)
考虑碰撞的隔震桥梁易损性分析	张磊鑫 龙晓鸿 樊 剑 陈蓓蕾 (492)
基于数值子结构方法的低延性 RC 框架结构抗震性能精细化分析	
..... 张沛洲 孙宝印 古 泉 欧进萍 (499)	
AP1000 核岛厂房动力特性参数化分析与优化	赵春风 陈健云 王静峰 (510)
串列双方柱气动力试验研究	赵会涛 刘小兵 杨 群 刘庆宽 马文勇 (515)
基于 Bode 图的实时混合试验稳定性分析方法研究	周惠蒙 冉田苒 李梦宁 王 涛 (519)

危岩的外表和内部裂隙拉结加固方法研究

*陈 航^{1,2}, 曾祥勇^{1,2}, 朱爱军³

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

3. 贵州大学土木工程学院, 贵阳 550025)

摘 要: 加强危岩加固和治理的研究在当前仍具有重要的现实意义。在传统穿透式全长锚固危岩滑移块体的技术基础上, 本文提出了危岩的外表和内部裂隙加固方法, 并对其具体实施方式和工作原理进行了阐述。两种加固方法的实施领域均包括力学机理上的常规滑塌式、坠落式、倾倒式三类危岩的治理, 用于景观危岩、群发式崩塌危岩和地下结构危岩块体的加固治理也是合理可行的。本文的工作对当前的危岩加固理论研究及工程应用具有良好的补充和促进意义。

关键词: 危岩治理; 拉结锚固; 外表裂隙; 内部裂隙; 加固方法

RESEARCH OF DANGEROUS ROCK SURFACE AND INNER FRACTURE COMBINATION AND ANCHOR STRENGTHENING METHODS

CHEN Hang^{1,2}, ZENG Xiang-yong^{1,2}, ZHU Ai-jun³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Promoting dangerous rock treatment and strengthening research still has important realistic significance. Based on the traditional penetrating type and full length dangerous rock anchor technology, surface and inner fracture strengthen methods for dangerous rocks are put forward, and their concrete implementation way and work theory are illustrated. Implementation area of two strengthen methods include three mechanism kinds of sliding, falling, overturning dangerous rock, for landscape dangerous rocks, group collapse dangerous rocks and underground dangerous rock are also feasible and reasonable. The work of this paper has fine supplement and promotion effect for present dangerous rock strengthen theory research and engineering application.

Key words: dangerous rock treatment; combination and anchor strengthening; surface fracture; inner fracture; strengthen method

危岩是在陡峭的岩石边坡上存在的一些摇摇欲坠的岩块。在某些因素影响下, 危岩将坠落下来形成崩塌。危岩必须及时进行治理, 以确保人民生命财产的安全^[1]。

我国幅员辽阔, 山地面积大约占全国面积的 33.45%, 许多城镇均为山地地貌。直到今天, 危岩作为一种主要的地质灾害, 仍经常发生并对人民的安全构成巨大威胁^[2-5]。由此, 提高危岩处治技术水平, 防治危岩灾害, 对保护人民的生命财产安全具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目批准号: 51468008)

作者简介: 陈 航(1989—), 男, 重庆人, 硕士生, 主要从事土木工程防灾减灾研究(E-mail: 2498335720@qq.com)。

曾祥勇(1978—), 男, 湖北人, 副教授, 博士, 硕导, 主要从事岩土工程方面的研究(E-mail: zeng_xiangyong@126.com);

朱爱军(1975—), 男, 贵州人, 副教授, 博士, 硕导, 主要从事岩土工程方面的研究(E-mail: zhugzu@163.com)。

就我们所查阅的现行资料来看,当前的危岩及岩质边坡锚固方法,均采用从岩体外表进入并穿透裂隙面至一定锚固长度的锚杆或锚索,其目的也在于将裂隙(或潜在滑动面)两侧的岩体进行可靠拉结。

与这种传统的危岩治理锚固方法不同,根据危岩内外表裂隙的分布特征,本文提出了危岩外表及内部裂隙拉结加固方法,可以看做传统锚固方法的有益补充,在某些具体的情况下,相对传统的锚固方法,也可能会体现出更好的工程作用和效果。

1 危岩的外表裂隙拉结加固方法

按文献[2],危岩分为滑塌式、坠落式、倾倒式三类,其常规锚固方式如图 1(a)、图 2(a)、图 3(a)所示。

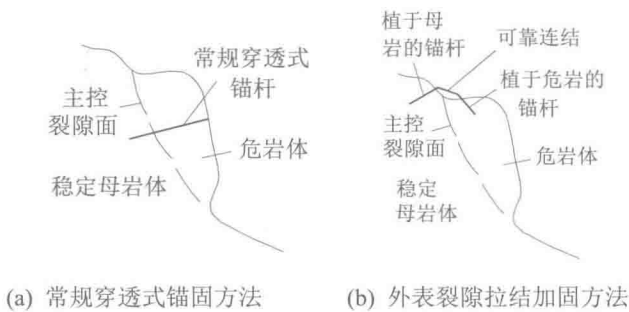


Fig.1 Normal and surface fracture combination anchor strengthening methods for sliding failure type dangerous rock

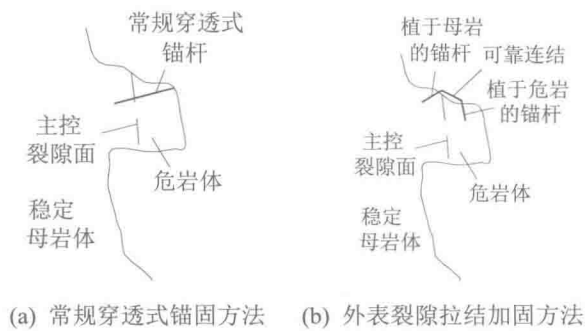


Fig.2 Normal and surface fracture combination anchor strengthening methods for falling failure type dangerous rock

从外表面来看,不一定非要在岩体外表面正对裂隙对岩体进行穿透式钻孔才能将裂隙两侧的岩体进行可靠拉结。从加固方案上来讲,可采用直接在外表面裂隙两侧的危岩体及母岩体上分别钻孔并植筋或锚固拉结,如图 1(b)、图 2(b)、图 3(b)所示,且必要时该拉结也通过一定的技术处理做成预应力拉结的形式。同时视工程规模和拉结裂隙所需拉结力的大小,实现该拉结的方式可采用钢丝、钢筋、钢索、型钢、钢筋混凝土构件等合适的材料及构件。

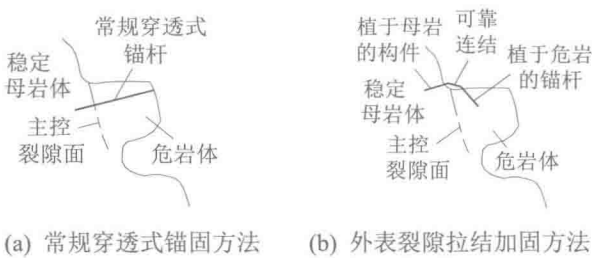


图 3 倾倒式危岩的常规锚固与外表拉结加固方法

Fig.3 Normal and surface fracture combination anchor strengthening methods for overturning failure type dangerous rock

由上可见,外表裂隙拉结加固治理方式同时适用于滑塌式、坠落式、倾倒式三类的危岩整治,从受力来看,由于这种拉结位于外表裂隙上方,因此相对常规穿透式锚固方法而言,能获得更大的力臂及抗倾倒地力矩,同时钻孔深度也能得到有效减小,施工更为简便,并且避免了常规锚杆施工对危岩体的穿透性破坏。

2 危岩的外表裂隙拉结加固方法实施方式及应用领域

危岩外表裂隙拉结首先应为采用钢筋拉结方式，从两个危岩体上伸出的钢筋之连接可以采用焊接和机械套筒两种连接方式。

根据钢筋的埋设位置，焊接方式可选用钢筋对接焊接、搭接焊接、帮条焊接，由此可以方便的实现钢筋的拉结。

危岩外表裂隙拉结钢筋采用机械套筒连接时，其实施方式如图 4、图 5 所示。采用这种方式连接也很简便，只需提前做好钢制套筒，并采用钢筋螺纹滚丝机将危岩锚筋、母岩锚筋、中部连接钢筋预先进行相应的端部螺纹加工即可。

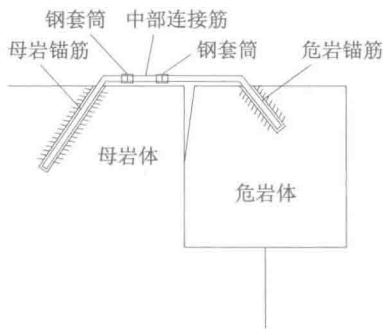


图 4 危岩外表裂隙拉结加固的实施方式

Fig.4 Implementation of dangerous rock surface fracture combination anchor strengthening method

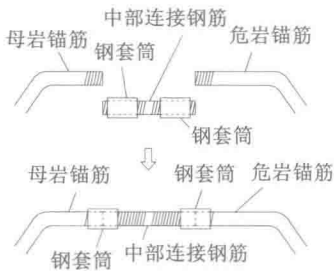


图 5 危岩外表裂隙拉结锚筋机械套筒连接方式

Fig.5 Detail of dangerous rock surface fracture combination anchor bars mechanical sleeve connection

如图 6 所示，钢筋外表拉结完成后，还可以在上面覆盖钢丝网及一定厚度的水泥砂浆进行防护，以保证危岩外表裂隙拉结加固受力钢筋的耐久性。

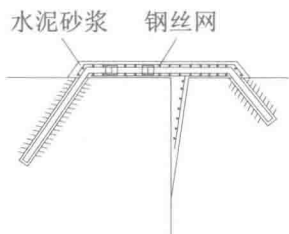


图 6 危岩外表裂隙拉结加固受力筋的防护

Fig.6 Protection of dangerous rock surface fracture combination anchor bars

采用外表裂隙拉结加固时，对于山地斜坡上的危岩体和岩壁上的危岩块体，可以采用如图 7 和图 8 所示的方式进行拉结。

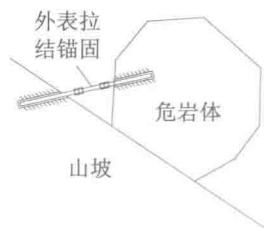


图7 山地斜坡上危岩体的外表裂隙拉结加固方式

Fig.7 Implementation of surface fracture combination anchor strengthening method for dangerous rock on mountainous region slope

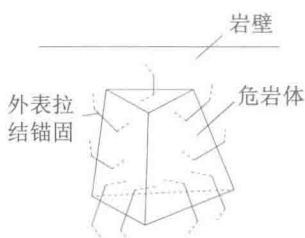


图8 岩壁上危岩体的外表裂隙拉结加固方式

Fig.8 Implementation of surface fracture combination anchor strengthening method for dangerous rock attached on mountain vertical face

如图9所示, 本方法用于地下开挖工程中的危岩加固治理, 能对地下开挖工程围岩进行可靠支护, 有效防止塌方或冒顶事故, 保证地下开挖工作的安全。



图9 地下开挖工程中的危岩外表裂隙拉结加固方式

Fig.9 Implementation of surface fracture combination anchor strengthening method for dangerous rock in underground excavation engineering

如图10所示, 危岩外表裂隙拉结加固的方法用于群发崩塌式危岩的治理, 依次将相邻的危岩用锚杆锚固, 能很好的加强危岩之间的拉结, 效果好, 且不致因大量破坏危岩体而使危岩崩塌。

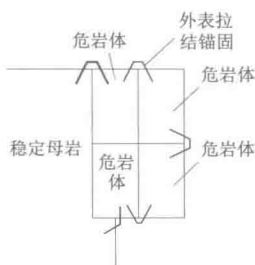


图10 群发崩塌式危岩的外表裂隙拉结加固方式

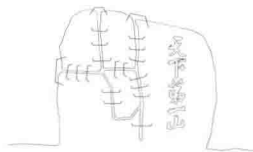
Fig.10 Implementation of surface fracture combination anchor strengthening method for group collapse dangerous rocks

此外, 危岩外表裂隙拉结加固的方法还可用于各类景观危岩的治理, 能有效地使景观得到保护, 同时不致使景观被破坏。

以我国的“五岳”之首, 有“天下第一山”之美誉的泰山某处书法石刻景观危岩为例, 采用危岩外表裂隙拉结方法时, 其加固方案如图11(a)、(b)所示。类似的被裂隙分割成块状堆积的景观危岩体加固治理, 该方法也是非常适用的。



(a) 山东泰山某处书法石刻景观危岩照片



(b) 景观危岩的外表裂隙拉结加固方法治理方案

图 11 山东泰山某处书法石刻景观危岩及其外表面裂隙拉结加固治理方案

Fig.11 Implementation scheme of surface fracture combination anchor strengthening method for calligraphy landscape dangerous rocks from Taishan mountain in Shandong province

对于景观危岩,采用该方法可有效的将各单块危岩拉结在一起,施工简便,大大增强其单块的稳定性及整个组合体的稳定性。如配合浅表刻槽,将外露拉结筋埋在槽内,外敷水泥砂浆,并采用装饰涂料处理,则可将危岩治理的施工痕迹降低到最小程度,从而最大限度的维持景观危岩的历史原貌。

本文的危岩外表裂隙拉结加固方法中,拉结锚杆也可替换为锚索、型钢、钢筋混凝土构件等。此外,除普通非预应力连接外,危岩外表裂隙拉结加固也可采用预应力连接方式,其实施方式参照现有预应力施工技术也应是具体可行的。

3 危岩的内部裂隙拉结加固方法

从内部裂隙来看,危岩作为岩质材料,其单独的岩块整体性是较好的,所以对于危岩治理而言,穿透式锚杆或锚索在其自由段,如图 12(a)、13(a)所示,有没有必要做这么长?尤其是当内部裂隙距危岩外表面较为深远的时候,这是一个值得改进的地方。因此,可对目前采用的常规锚杆进行改进,将其自由段中远离裂隙的一段(自由段超出危岩锚固长度的一段)采用合适的廉价材料替代,如塑料杆等,甚至取消(施工时将内部拉结锚杆采用预制的推杆推入即可),如图 12(b)、13(b)所示。对于大量应用锚杆加固的危岩、岩质边坡、地下岩石开挖工程而言,采用此新型锚杆及内部裂隙拉结加固方法将节约大量钢材及材料费用,同时也减轻了锚杆重量,可节省人力物力等其它费用,整体而言将产生良好的经济效益。



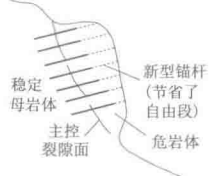
(a) 危岩的常规锚固



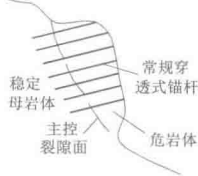
(b) 本文的内部裂隙拉结加固方法

图 12 危岩常规锚固与本文的内部裂隙拉结加固方法(单根锚杆情况)

Fig.12 Normal and inner fracture combination anchor strengthening methods (Single anchor bar circumstance)



(a) 危岩的常规锚固



(b) 危岩的内部裂隙拉结加固应用

图 13 危岩常规锚固与内部裂隙拉结加固方法(锚杆量大时的情况)

Fig.13 Normal and inner fracture combination anchor strengthening methods (Many anchor bars circumstance)

4 危岩的内部裂隙拉结加固方法实施方式及应用领域

如图 14、图 15 所示，与外表裂隙拉结加固方法应用领域类似的，内部裂隙拉结加固方法也适用于潜在的群发崩塌性危岩治理、地下开挖危岩塌方治理，以及景观危岩的治理。

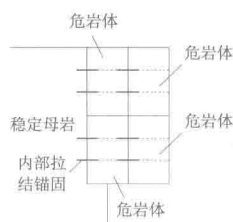


图 14 群发崩塌式危岩的内部裂隙拉结加固方式

Fig.14 Implementation of inner fracture combination anchor strengthening method for group collapse dangerous rocks



图 15 地下开挖工程危岩的内部裂隙拉结加固方式

Fig.15 Implementation of inner fracture combination anchor strengthening method for dangerous rock in underground excavation engineering

5 结论

本文的研究工作可以小结如下：

(1) 危岩外表裂隙拉结加固方法从表面治理的理念出发，将危岩各块体在裂隙间拉结起来，不用穿透式施工，即可对危岩进行锚固。因此，是一种全新的加固理念及手段，不但可应用于危岩治理，也可广泛用于岩体表面裂隙修补、风景地区景观危岩整治、岩质边坡、地下结构开挖不稳定围岩支护等岩石力学与工程项目。

(2) 对危岩内部裂隙拉结加固方法而言，该方法对当前的危岩穿透式锚固支护进行了合理有效的改进，在不影响危岩治理的效果，充分保障被治理危岩稳定性及安全系数的前提下，能有效节约工程治理费用。

(3) 我国国土辽阔，山地广袤，与危岩相关的地质灾害频发，本文的工作对补充和促进当前的危岩地质灾害治理水平，节省相关的危岩地质灾害治理经费均具有积极的意义。

参考文献：

- [1] 黄求顺, 张四平, 胡岱文. 边坡工程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
Huang Qiushun, Zhang Siping, Hu Daiwen. Slope engineering [M]. Chongqing: Chongqing University Publishers, 2003. (in Chinese)
- [2] 陈洪凯, 唐红梅, 胡明, 李强. 危岩锚固计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (8): 1321—1327.
Chen Hongkai, Tang Hongmei, Hu Ming, Li Qiang. Research on anchorage calculation method for unstable rock [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2005, (8): 1321—1327. (in Chinese)
- [3] 建筑边坡工程技术规范(GB50330-2013). 中华人民共和国国家标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Technical code for building slope engineering (GB50330-2013). Standard of the People's Republic of China [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013. (in Chinese)
- [4] 陈洪凯, 唐红梅, 王林峰, 叶四桥. 危岩崩塌演化理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Chen Hongkai, Tang Hongmei, Wang Linfeng, Ye Siquiao. Unstable rock collapse evolution theory and application [M]. Beijing: China Science Press, 2009. (in Chinese)
- [5] 刘传正. 重大地质灾害防治理论与实践[M]. 科学出版社, 2009.
Liu Chuansheng. Theory and practice of prevention and control of major geological hazards [M]. China Science Press, 2009. (in Chinese)

结构-土-结构相互作用的模型对比与影响因素分析

*陈 晶, 陈清军

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 该文以上海软土地地上两栋 12 层桩基框架结构为背景, 采用 ANSYS 软件, 分别建立了结构-土-结构相互作用体系的二维有限元分析模型和三维有限元分析模型, 以 Elcentro 波作为输入, 对比分析了两种模型的加速度反应、位移反应以及内力反应结果, 分析结果表明: 对于地震作用情形, 结构-土-结构相互作用的二维有限元数值结果与三维有限元的数值结果差异明显。在此基础上, 文中采用结构-土-结构相互作用体系的三维有限元模型, 以 Elcentro 波、Loma Prieta 波和上海人工波作为输入, 进一步分析了不同地震波作用下建筑物间距和建筑物高度对结构-土-结构相互作用的影响。结果表明: 当建筑物的净间距大于基础的宽度时, 结构-土-结构间的相互作用已不明显; 随着建筑物高度的增加, 结构-土-结构间的相互作用影响逐渐增大。

关键词: 结构-土-结构相互作用; 地震作用; 分析模型对比; 影响因素分析; 有限元法

土-结构相互作用是地震工程中的重大研究课题, 几十年来一直受到国内外的广泛重视和研究^[1]。而结构-土-结构相互作用问题作为土-结构相互作用问题的一个分支, 最近二三十年才受到重视。国内外学者对结构-土-结构相互作用的研究主要基于三种途径, 其一是基于实际地震记录对结构-土-结构相互作用的研究, Mehmet Çelebi^[2-3]根据实测地震动, 采用谱分析的方法研究了相邻建筑物之间的相互作用; 其二是基于振动台试验对结构-土-结构相互作用的研究, 国外学者 Benjamin Choy^[4]、国内学者赵丽、熊峰^[5]等都进行了振动台试验对结构-土-结构相互作用进行了深入的研究; 其三是基于理论分析和数值模拟对结构-土-结构相互作用的研究, 其中最常用的方法有边界元法、有限元法以及边界元-有限元耦合的方法。

本文采用整体有限元方法, 利用大型有限元分析软件 ANSYS 建立结构-土-结构相互作用体系二维有限元模型及三维有限元模型, 通过对比两类模型的建筑结构加速度反应、位移反应以及内力反应, 选择合适的模型对结构-土-结构相互作用进行计算分析, 然后研究了在不同地震输入下, 建筑物的间距以及建筑物高度两方面因素对结构-土-结构相互作用的影响。

1 模型参数

1.1 土层参数

本文土层采用上海石门一路附近的土层分布^[6], 土层深度为 41.3m。土层的力学参数如表 1 所示。本文采用整体有限元方法对结构-土-结构相互在作用体系进行建模计算时, 需要用有限的土域来模拟半无限的土域, 这就引入了人工边界, 本文采用自由边界, 计算土域宽度取为 630m^[7]。

众所周知, 土体是非线性很强的材料, 地震动越大, 土体的非线性越强^[8]。本文采用工程中比较常用的等效线性化的方法, 采用等效的剪切模量和阻尼比间接考虑土体的非线性。本文采用《上海市地震动参数区划》中建议的动剪切模量比及阻尼^[9]。

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAK17B04); 科技部国家重点实验室基础研究资助项目(SLDRCE14A-02)

作者简介: *陈 晶(1991—), 女, 山东日照人, 硕士生, 主要从事工程结构抗震研究(E-mail: 1432173@tongji.edu.cn);

陈清军(1963—), 男, 浙江台州人, 教授, 博导, 主要从事工程结构抗震研究(E-mail: chenqj@tongji.edu.cn)。

表 1 土层力学参数

土层编号	土层名称	层底埋深 m	厚度 m	密度/(kg/m^3)	剪切波速/(m/s)	泊松比
1	填土	3.5	3.5	1800	74	0.45
2	灰色淤泥质粉质粘土	8.0	4.5	1740	85	0.40
3	灰色淤泥质粘土	17.6	9.6	1700	110	0.45
4	灰色黏土	26.5	8.9	1770	200	0.45
5	灰色粉质粘土	35.2	8.7	1810	300	0.40
6	灰绿色粘土	41.3	6.1	1990	310	0.45
	草黄-灰色粉砂	>41.3		1960	380	0.40

1.2 结构参数

上部结构模型采用 12 层框架结构，层高为 3.6m，结构的平面布置图如图 1 所示，梁柱的截面尺寸以及各层的混凝土强度等级参照文献[10]。结构的基础形式为带桩基的筏板基础，筏基长 32m，宽 17m，厚 0.8m，桩身长度为 12.5m，桩径为 0.25m。

2 两种有限元模型的建立

本文采用大型有限元分析软件 ANSYS 分别建立结构-土-结构相互作用体系二维有限元模型以及结构-土-结构相互作用体系三维有限元模型，如图 2 所示。对于二维模型，采用 Plane42 单元模拟土层以及筏板，采用 Beam3 单元模拟框架结构梁、柱以及桩基；对于三维模型，采用 Solid45 单元模拟土层以及筏板，采用 Beam188 单元模拟框架梁、柱以及桩基。

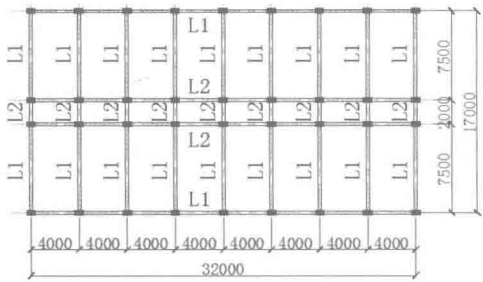
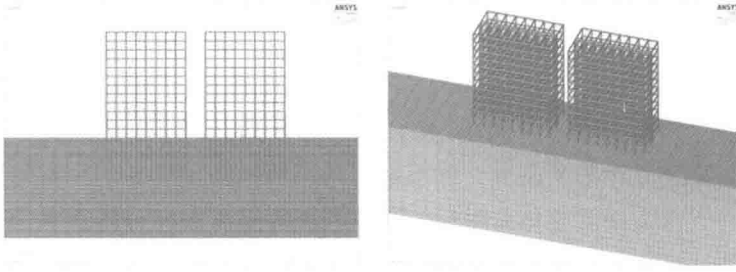


图 1 框架结构平面布置



(a) 二维有限元模型 (b) 三维有限元模型

3 输入地震波的选取

本文假定输入地震波为竖向传播的 S 波，采用 Elcentro 波、Loma Prieta 波和上海人工波三条地震波，将地震波的峰值调整到 0.10g 作为基岩地震动输入，基岩输入的地震加速度时程以及反应谱如图 3 所示。

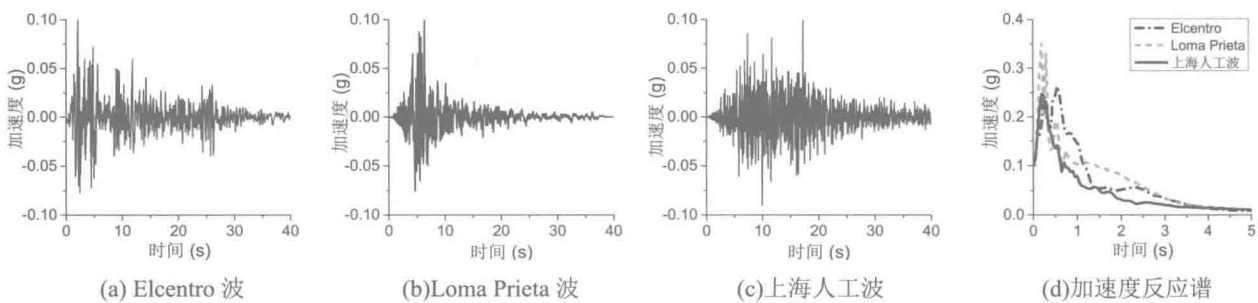


图 3 输入地震加速度时程及反应谱