

锚固类结构抗爆性能研究进展

李世民^{1,2}, 韩省亮¹, 曾宪明², 林大路², 肖玲²

(1. 西安交通大学 工程力学系, 陕西 西安 710055; 2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 在分析国内外大量文献资料基础上, 综合评述锚固类结构抗爆性能的研究进展, 指出国内外具有共性的问题: (1) 对复合锚固类结构抗爆性能的研究还很欠缺; (2) 特殊型式的复合锚固类结构具有良好的开发应用前景, 应深入研究; (3) 对新型锚固类结构抗爆性能的研究还需进一步加强; (4) 对试验研究及应用成果, 还未能提升到系统、严密、公认的理论阐释程度。

关键词: 爆炸力学; 锚固类结构; 复合锚固类结构; 爆炸荷载; 抗爆性能; 研究进展

中图分类号: O 38

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3553 - 10

RESEARCH PROGRESS OF EXPLOSION-RESISTANCE BEHAVIOR OF ANCHORAGE TYPE OF STRUCTURE

LI Shimin^{1,2}, HAN Shengliang¹, ZENG Xianming², LIN Dalu², XIAO Ling²

(1. Department of Engineering Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

2. The Third Research Institute of Engineering Corps, General Staff of PLA, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: Based on the analysis of a large number of relevant literatures at home and abroad, the research progress of the explosion-resistance behavior of anchorage type of structure is reviewed, and the common problems are pointed out: (1) the deficiency of the research on the explosion-resistance behavior of composite anchorage type of structure; (2) the need of further research on the application of special composite anchorage structure; (3) the reinforcement of the research on new anchorage type of structure; and (4) the improvement of experimental research and application results to systematical, strict and acknowledged theoretical explanations.

Key words: mechanics of explosion; anchorage type of structure; composite anchorage type of structure; blasting load; explosion-resistance behavior; research progress

1 引言

锚固类结构是指锚杆、锚索、土钉、加筋土等一类岩土工程加固、支护结构^[1]。复合锚固类结构是指各种单一锚固类结构彼此或与其他传统工法联合使用的岩土工程加固、支护结构。复合锚固类结构形式很多, 其间存在优化复合问题, 已有若干工

程范例的有: 锚杆与土钉结合、土钉与锚索结合、锚索与锚杆结合、土钉与桩或地连墙或内撑结合, 等等。大量工程实践表明, 复合锚固类结构具有优异的抗静载性能, 较之单一锚固类结构具有受力更合理、安全性更高的特点^[2]。对于复合锚固类结构, 已有的研究表明, 在特别考虑优化复合条件下, 复合锚固类结构具有更加优异的抗动载性能。

本文试就锚固类结构抗爆性能的研究进展作综

收稿日期: 2007 - 01 - 04; **修回日期:** 2007 - 03 - 12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772199)

作者简介: 李世民(1978 -), 男, 硕士, 2000年毕业于甘肃工业大学土木工程专业, 现任工程师, 主要从事防护工程与岩土工程方面的研究工作。

E-mail: lishimin306@sina.com

合评述。

2 国内研究进展

我国开展单一锚固类结构抗爆性能研究较多，而开展复合锚固类结构抗爆性能研究相对较少。研究主要是从现场试验、数值计算和设计理论探讨三方面展开的。

2.1 试验研究

试验研究结果可靠性好，置信度高，较接近实际情况，是研究该问题的主要方法。

20世纪70年代末至今，国内已进行较多的单一锚固类结构抗爆试验研究，并获得许多颇有价值的研究成果。根据大量的喷锚支护岩石坑道抗顶爆试验^[3]，指出：锚杆的受力特征是先受压缩作用，后受拉伸作用，且拉应力峰值要高于压应力峰值；喷层的抗爆作用主要在于防止不稳定岩石的崩落和阻止稳定围岩在强大爆炸冲击荷载作用下的剥离；锚杆的抗爆作用主要在于改善坑道受力状态、减轻和限制围岩剥落以及悬吊大块险石。

采用喷锚网支护作为我国第一条内爆试验巷道的永久性支护方案^[4]。内爆试验巷道用于模拟矿井下爆炸及研究相应防爆措施。王学礼^[5]报道这条巷道在370余次炸药、煤尘及瓦斯等爆炸试验中均完好无损。

对砂砾地层中直墙拱顶形坑道喷锚支护在顶爆和侧爆条件下的抗爆性能进行了试验比较^[6]。结果发现：(1) 同等条件下，侧爆破坏的作用要明显大于顶爆；(2) 爆心距坑道较近时，喷锚支护不仅会出现严重的破坏，而且爆炸产生的一氧化碳气体还会从裂缝中渗入坑道内，引起坑道内人员中毒；(3) 顶爆时，喷层基本上是环向受压，内力分布较对称，而侧爆时，喷层基本上是承受弯矩作用，内力分布明显不对称；(4) 侧爆时，坑道断面位形的变化是平移、变形、扭转三者的复合，顶爆时，坑道断面位形的变化仅在于形状的改变；(5) 在冲击振动方面，侧爆和顶爆相比，坑道底板的加速度较大，而且振动频率亦较低，因此，侧爆对坑道内人员和设备的威胁更大。

曾宪明等^[7~9]进行了黄土坑道喷锚网支护抗爆性能的试验研究。试验结果^[7]分别论述了在顶部平

面装药和集团装药爆炸作用下，喷锚网支护黄土坑道和无支护黄土坑道的破坏形态。结论包括：(1) 在地面空气冲击波作用下，黄土坑道的破坏发生在两侧边墙中部，支护参数设计须在此部位给予加强，坑道断面形状宜选择曲墙；(2) 地面空气冲击波作用下黄土坑道喷锚网支护受力破坏这一动力问题，工程上可作为一个拟静力问题考虑；(3) 集团装药爆炸作用下，黄土坑道的破坏主要在爆心投影点下的坑道拱顶附近，支护参数设计须在此部位给予加强。

肖峰和曾宪明^[8]介绍了上述2种加载条件下，喷射混凝土、喷网、喷锚支护和无支护黄土坑道的围土动压分布形态；对围压分布形态与破坏形态的关系以及试验中发现的爆炸压密效应、嵌固层效应作了讨论；比较了2种加载条件下，坑道支护的不同受力变形特点，并与有限元计算结果进行了比较分析。

曹长林和曾宪明^[9]则在对黄土坑道临界破坏进行约定的基础上，用逼近法求得了毛洞、素喷混凝土支护坑道、喷网支护坑道和喷锚支护坑道的临界承载力。

康天合和薛亚东^[10]分析指出了回采巷道的基本特征：围岩松软、成层性显著及受爆破震动和开采动载的反复作用，并提出回采巷道锚杆支护抗爆设计的一些基本原则。

侯忠杰^[11]对某巷道内爆破对树脂锚杆的影响进行了现场观测。结论如下：(1) 爆破振动会导致树脂锚杆卸载，甚至会使其完全丧失支护能力；(2) 锚杆预应力不同，锚杆卸载后的终值也不同；(3) 受爆破影响的树脂锚杆须进行重复加载，才能保证其设计预应力。

宋茂信^[12]指出，1989年底，在漫湾水电站左岸边坡预应力锚索加固工程中，进行了国内首次大吨位预应力锚索对边坡开挖爆破适应性的现场观测试验。结果显示：预应力锚索对爆破动载有较好的适应性，在一定的条件下对锚固性能影响不大；只要选择合理的装药量，锚索施工质量可靠，可以保证锚索的锚固性能。

张云和刘开运^[13]对李家峡水电工程边坡锚固结构(1 000 kN级预应力锚索和600 kN级预应力高强锚杆)对近区爆炸的响应进行了现场测试。得出以

下结论: (1) 在李家峡爆破安全准则条件下, 距预裂面 3 m 以外的岩体动力响应不会对锚固结构产生很大影响; (2) 爆破的主要影响来自预裂爆破和主炮爆破, 其设计的合理性是降低对锚固结构影响的关键; (3) 锚固结构的预应力有利于限制外锚头松动和减小锚固结构横向振动。

根据李家峡水电工程高边坡施工中开展的现场试验^[14, 15], 研究了爆炸对锚固结构的影响。得出如下主要结论: (1) 开挖爆破时, 由于药量大、距离近, 将产生较大的冲击荷载, 介质及层面的反、折射作用等都会对边坡上已建或正在施工的锚固结构带来较大的不利影响。(2) 600 kN 预应力高强锚杆的实测最大轴向加速度为 2.8 g, 垂直向为 1.75 g; 实测锚索最大轴向加速度为 1.50 g, 垂直向为 0.35 g, 相应的轴向振速为 5.12 cm/s。(3) 采用动静力分析法在计入爆破对预应力锚杆(索)的不利影响条件下, 对李家峡左肩典型滑面 f_{24} —2 080 m(高程), f_{20} —2 080 m(高程)的水平剪切面进行稳定分析, 说明该滑面是最危险滑面之一, 在开挖爆破单响药量为 100~300 kg 的条件下, 由于岩体的水平惯性力作用, 该滑面安全系数将下降 4.4%~6.8%。

苏华友和张继春^[16]对紫坪铺高陡边坡施工开挖期间爆破对预应力锚索的影响进行测试研究, 分析了多点位移计测得的位移-时间曲线, 得到边坡下部岩石开挖爆破振动效应与边坡上部预应力锚索拉固作用之间的关系, 为进一步优化进水口高陡边坡预应力锚索的设计提供试验依据。

周德培^[17]分析指出: 爆破是锚索预应力损失的一个重要因素, 当在距锚索 3 m 以内进行爆破时, 锚索预应力有明显损失, 其量值比锚索在相应时间受静载作用所发生的约大 36 倍, 但在距 5 m 以远, 普通爆破的影响不太显著; 爆破冲击作用还会使锚固段的锚固力发生变化, 尤其对破碎松散岩体会产生较大的影响。

盛宏光和张勇^[18]介绍了屈服锚杆的原理及制作和安装方法, 并报道了某次试验中对其抗爆性能的验证。屈服锚杆是一种充分利用杆体材料接近屈服时的强度而杆体又能自由伸长的锚杆。能使锚杆材料接近屈服荷载的构件, 可放在内锚头部位, 也可放在外锚头部位。放在内锚头部位时, 内锚头由胀壳和带锥度的拉模组成, 拉模的外径小于钻孔直

径, 其内径稍大于锚杆直径(以保证杆体在其内无阻滑动), 但小于杆体前端螺纹的外径。放在外锚头部位时外锚头由拉模、垫板和螺帽组成, 拉模外车有螺纹, 以便上锚固螺帽, 拉模外径小于钻孔直径, 拉模里端开口呈颈形, 其内径稍大于锚杆体外径, 但小于颈形外被墩粗杆体上螺纹的外径。试验坑道为圆形断面, 围岩采用屈服锚杆与喷网联合支护, 锚杆的屈服构件在外锚头部位。根据爆后的实测结果, 屈服锚杆所受到的压应力和拉应力均很大, 超出了材料的屈服应力, 接近材料的极限抗拉强度, 说明屈服锚杆在爆炸荷载作用下, 能较充分地发挥加固围岩的作用。

相对于单一锚固类结构, 国内对复合锚固类结构抗爆性能的试验研究则少得多。

朱如玉和王承树^[19]对某次坑道抗爆试验中预应力锚索的加固效果进行了调查分析。根据爆后宏观调查, 处在断层破坏带与节理纵横交错地段, 岩石完整性差的大锚杆段(锚索+锚杆+喷网联合支护)未遭到破坏, 而与大锚杆段相邻的毛洞段和离壁被复段却遭到严重破坏。大锚杆段中除 4 根锚索遭到破坏外, 其余的锚索未见破坏。在遭到破坏的锚索中, 有 2 根位于坑道两侧拱脚处, 钢绞线断口均呈颈缩状, 是被塌落的结构体所打断, 整块的落石尺寸分别为 5.0 m×3.9 m×1.9 m 和 3.0 m×2.0 m×1.9 m; 另 2 根锚索, 一根是锚头, 另一根是锚头和不长的一段锚索固定在断层的下盘上, 其他部分则固定在断层的上盘上。

黄承贤^[20]也介绍了某次预应力锚索加固洞室的抗爆试验研究。试验结果表明: 采用锚索+锚杆+喷网联合支护形式, 对于改善坑道的受力状态、减少最小防护层厚度、缩减相邻洞库间的安全距离等具有较高的实用价值。

曾宪明等^[21]进行了土钉支护与复合锚固结构(土钉+构造措施)黄土洞室在 TNT 集团装药顶爆下的原型与模型对比试验。构造措施是指在支护段土钉内端延伸方向造一圆柱空腔。研究指出: (1) 毛洞在相对平面度 $\xi=0.6$ 条件下具有一定的抗动载能力。(2) 在相同条件下, 土钉支护和复合锚固结构的抗动载压力, 分别为毛洞的 3.7 和 17.0 倍, 相应的装药量分别为毛洞的 5 和 33 倍。(3) 复合锚固结构具有更好的抗动载性能。(4) 复合锚固结构优异

的抗爆性能源于介质的弱化机制。(5) 弱化效应与弱化比面积及介质特性有关, 因而存在抗爆效应的优化问题。(6) 研究建立相似模型的相似法则 $\pi_1 = l^3/l^3$, 经试验验证是正确的, 可据此进行类似的试验设计。(7) 黄土毛洞在 $\zeta = 0.6$ 条件下的临界承载能力比 $\zeta = 1.0$ 条件下的低 42%~56%。这是仅见的型式不同的锚固类结构的抗爆性能对比试验研究。

2.2 数值计算

数值计算是试验研究的重要辅助手段, 可以给出试验难以获得的一些信息, 有助于了解问题的实质。但由于锚固类结构抗爆问题的数值计算较为复杂, 迄今为止, 中国在这方面所做工作尚不多。

孙永志和刘朝^[22]进行土中喷锚支护洞室在侧爆条件下的非线性动态有限元分析。计算模型简化为平面应变状态。锚杆材料模型选取为几何非线性杆单元, 喷射混凝土和洞室近区土体的材料模型取为 Drucker-Prager 模型, 洞室远区的材料模型取为线弹性。荷载取为三角形荷载。研究获得了洞室周边位移、喷层应力、塑性区范围、围岩应力及锚杆受力状况的计算结果, 并与试验结果进行了比较, 两者在规律上较为一致。

赵幸源^[23]对隧道中软弱围岩无支护、喷薄层混凝土、喷薄层混凝土+径向锚杆、喷薄层混凝土+径向锚杆+超前锚杆、喷较厚层混凝土+径向锚杆+超前锚杆 5 种支护形式, 对爆破激振力作用下的位移场和应力场进行了有限元分析。分析结论对软弱围岩隧道安全施工具有较重要意义。

郑际汪和陈理真^[24]采用 ANSYS 软件对锚杆支护隧道围岩在爆炸荷载作用下的应力波传播过程进行了数值模拟。爆炸荷载采用国际上常用的计算模式。计算表明: 有支护隧道围岩在爆炸荷载作用下振速随距离变化有明显的衰减特征, 锚杆应力分布并不对称, 故设计时不一定选用对称布置方式。

杨苏杭和沈俊^[25]运用基于三维快速拉格朗日有限差分原理的数值计算软件, 分析了预应力锚索对洞室的抗爆加固机制。计算完整地模拟了炸药起爆、爆炸应力波传播、应力波与结构体相互作用, 以及应力波对结构破坏效应的全过程。计算利用程序提供的锚索单元专门模拟锚索的作用, 而不是将锚索的预应力作为集中力施加在加固面上, 较为准确地模拟锚索与被加固介质的共同工作, 比较符合

试验的实际情况。计算结果与试验结果在规律性上较为一致。

荣耀和许锡宾^[26]对无支护及有支护隧道围岩在爆炸荷载作用下的应力波传播特性进行了有限元数值模拟。分析表明: 在近距离的爆炸波传播中, 计算结果具有很好的规律性; 锚杆对应力波的传播衰减作用明显, 其关系可用指数函数来拟合; 爆炸荷载作用下围岩周边各点的速度各不相同, 且相差较大, 建议在设计支护系统时, 可采用不对称的支护系统。

上述文献中, 除赵幸源^[23]研究中的第 4, 5 种支护型式是复合锚固类结构外, 其余均是单一锚固类结构。

2.3 设计理论探讨

锚固类结构抗爆问题的理论分析较复杂, 涉及到爆炸力学、应力波理论、岩石动力学、强度理论、结构动力学等多方面的专业知识。

王承树^[27]在诸多试验基础上, 根据坑道锚喷支护破坏的受力特点, 将其从受力机制上区分为 5 种类型, 即“结构力学型”破坏、受压破坏、剪切破坏、拉伸剥离破坏和横向断裂破坏。并指出爆炸动载有其动态效应和准静态效应。准静态效应下, 坑道支护的破坏形态与静态下的破坏形态相仿, 而拉伸剥离破坏和横向断裂破坏是动态效应特有的破坏形式。

王承树^[28]还根据试验实测资料, 分析了顶爆下围岩与坑道锚喷支护相互作用的一些特点。指出锚杆的一端固定在围岩深部, 通过砂浆与喷层表面的垫板, 有效约束了锚杆长度范围内围岩的变形, 承担了围岩中较大份额的荷载, 锚杆的应变波形比围岩的应变波形饱满得多, 亦即在动载作用的全过程中, 锚杆发挥了很好的支护作用。

易长平等^[29, 30]运用应力波理论, 并利用波函数展开法, 研究爆炸应力波与锚杆的相互作用, 给出爆破振动作用下砂浆锚杆周围砂浆体中动应力和峰值振速分布特性, 比较不同频率应力波对锚杆的影响, 导出不同频率应力波作用下砂浆锚杆的安全质点振速范围。结果表明: 入射频率越高, 砂浆锚杆所允许的安全质点振速范围越大。

喻晓今等^[31, 32]在曾宪明等^[21]试验研究的基础上, 对土钉支护的瞬态应力和瞬态应变累计效应进

行研究。以黏弹性理论为基础^[31], 推导 Maxwell 模型下洞室拱顶土钉应力解, 通过与试验数据的对比分析得到洞室顶部土钉在爆炸应力波作用下的瞬态应力公式, 并从相应应力的角度检验结果的正确性。考察对比毛洞段、土钉支护段以及复合锚固结构的瞬态应变与爆炸当量的关系^[32]及三者的瞬态应变和加载次数的关系。指出药量、加载次数和不同支护参数是影响瞬态应变的重要因素, 复合锚固结构具有更好的降低应变量值、提高抗力的能力。还提出累次应变综合值的概念^[32]。

上述研究中, 除喻晓今等^[31, 32]研究外, 其余研究对象均是单一锚固类结构。

2.4 小结

(1) 国内对单一锚固类结构抗爆性能研究较多, 而对复合锚固类结构抗爆效应与机制研究较少。

(2) 单一锚固类结构具有良好的抗爆性能, 复合锚固类结构则具有更加优异的抗爆性能。

(3) 锚固技术结合构造措施是一种特殊型式的复合锚固类结构, 具有异乎寻常的研究、开发与应用价值。

(4) 我国对锚固类结构抗爆性能的研究总的来说还不甚深入、细致; 试验研究和工程应用较多, 理论研究还缺乏系统性和可靠性。

3 国外研究进展

国外没有锚固类结构和复合锚固类结构这种称谓。但无论是前者或后者, 在国外岩土工程中均大量存在。只不过在抗爆方面, 国外开展的多是单一锚固类结构抗爆性能的研究, 关于复合锚固类结构抗爆性能的研究尚未见报道。研究主要从现场试验、室内(模型)试验和数值计算三方面展开。

3.1 现场试验研究

国外对锚固类结构抗爆性能进行现场试验研究做的较多、较细。不过, 均为单一锚固类结构。

沈德义和刘五一^[33]报道, 南非曾在一金矿坑道中, 对屈服锚杆和普通锚杆的抗爆性能作过对比试验, 屈服锚杆的屈服构件设在内锚头部位。试验以坑道一侧安装普通锚杆, 另一侧安装屈服锚杆, 在其他条件完全相同的情况下, 装药爆炸后, 采用普通锚杆支护的一侧坑道全部塌落, 而用屈服锚杆支护的一侧则完好。这里重点研究的是屈服锚杆。

B. Stillborg^[34]对锚索在硬岩石中的抗爆加固效果进行现场试验研究。结果表明, 锚索在承受峰值质点速度为 500 mm/s 的爆炸时, 其性能未降低。

R. K. Thorpe 和 F. E. Heuze^[35]对半球形密闭洞室内爆作用下锚杆的动力响应进行现场试验研究。试验测得的压缩波到达时间与利用一维流体动力程序计算的应力波到达时间吻合。动力试验后的静力测试显示, 锚杆的预应力无损失, 说明动力响应处于弹性阶段。试验结果为进一步建立用于分析部分注浆锚杆动力特性的数值模型提供了验证数据, 是一个典型的内爆炸问题研究。

F. O. Otuonye^[36, 37]对矿井内全注浆树脂锚杆对爆炸荷载的动力响应进行了现场试验。结果表明:

(1) 由外锚头附近杆体的应变计测得的锚杆频响与外锚头上的加速度计测得的数据相关性很好, 说明应变计可以用于锚杆动力响应测量。(2) 锚杆外锚头处的振动和应变高于内锚头处的振动和应变。(3) 阻尼自然频率(125.2 Hz)对锚杆的动力作用是主要的, 占 86.5%, 而阻尼频率(1 755.0 Hz)的动力作用较小, 只占 12.9%。(4) 爆炸振动波的衰减可能是由于多次重复爆炸在岩体内形成的裂隙及其扩展所致, 另外, 锚杆与岩体间注浆胶结体被破坏, 也导致爆炸振动波的衰减, 减少通过注浆胶结体传递给锚杆的能量。

G. S. Littlejohn 等^[38, 39]等在 Penmaenbach 隧道施工期间对长度为 6 m, 直径为 25 mm 的树脂锚杆的抗爆性能进行现场测试。结果表明: 即使锚杆在距隧道工作面 1 m 处, 其锚固力也不会有明显的损失, 树脂和锚杆之间的黏结保持良好; 施加预应力可降低爆炸震动对锚杆的影响; 锚杆自由段越长, 锚杆受到的动荷载越大。G. S. Littlejohn 等^[38, 39]还建立了一个锚头处的 PPV 与所受峰值动载的线性关系式。

D. C. Holland 等^[40, 41]对 Penmaenbach 隧道和 Pen-y-Clip 隧道(均位于英国北威尔士)施工过程中安装的树脂锚杆抗爆性能进行研究。D. C. Holland 和 D. K. V. Mothersile^[40]发现预应力的增加将导致对锚杆振动加载作用的降低。在 Penmaenbach 隧道施工现场, A. A. Rodger 等^[41]发现即使锚杆离爆破面仅有 0.7 m, 预应力也未出现显著的损失, 树脂与锚杆也未分离。在 Pen-y-Clip 隧道施工现场, Rodger 等还研究了不同岩体质量对树脂锚杆抗爆加固作用

的影响。两处试验场的研究结果都表明锚头的振动加速度响应谱主要取决于锚杆长度,自由段相对长度、预应力大小及围岩质量等。

D. D. Tannant 等^[42]对坑道中仅端锚的锚杆在爆炸荷载作用下的动力响应进行了现场试验研究。现场试验包括 2 种情形:分别是测量锚杆对邻近坑道内爆炸和本坑道侧壁内爆炸的动力响应。对于第一种情形,爆炸激励起了锚杆的轴向和横向振动,在坑道壁上的 PPV 约为 1 m/s,锚杆振动时间持续了 30~40 s,大于坑道壁的振动时间,锚杆的最大应力低于其屈服应力,爆炸对坑道壁造成了轻微的剥落,降低了一定的锚杆预应力,但破坏不严重;对于第二种情形,横向振动是锚杆的主要振动模式,持续时间为 0.2 s,在坑道壁上的 PPV 大于 1 m/s,锚杆的峰值应力低于其屈服应力,爆炸使坑道壁外凸,降低锚杆的预应力。

S. Gisle 和 M. Arne^[43]为了评估近距离爆炸对注浆锚杆的影响,在挪威 Grong 矿场进行现场试验研究,包括锚杆的拉拔试验及对岩石和锚杆进行振动测量。将邻近爆炸点(3.4 m)的锚杆与安装在较远处(22.0 m)的锚杆作对比,发现拉拔强度没有下降。把近期灌浆锚杆与早期灌浆锚杆作对比,发现在爆炸荷载作用后两者的拉拔强度没有区别。对早先拉拔过的锚杆再次拉拔,显示出浆体的“愈合”效应。试验表明爆炸后锚杆/砂浆的性能没有下降。因此得出结论:充分注浆锚杆可以应用在作业面上或接近作业面处。

李晓军^[44]介绍了美军对加筋土掩体进行的抗爆试验。与钢筋混凝土掩体相比,加筋土掩体具有造价低廉、构筑方便的特点。试验中的加筋土采用宽 4.0 cm、厚 0.5 cm、长 4.0 m 的钢带作为增强材料。试验结果表明加筋土掩体是一种有效的防护结构。对于覆土内的爆炸,多数未引起墙板的破坏,最严重的也只是局部性的,未损坏整个结构。由于掩体的构造性质,局部破坏也只是损坏有限数量的墙板,可很快修复。

3.2 室内(模型)试验

同现场试验相比,国外对锚固类结构抗爆性能室内(模型)试验开展得少一些。这可能与模型试验条件离实际工程要远一些有关。

S. Gisle 和 M. Arne^[43]在现场试验研究后还进行了实验室研究,包括测量砂浆的抗压强度和抗弯强

度及分析锚杆、砂浆和岩石组成的岩芯磨光薄片。结果表明,距爆炸点距离不同的锚杆,以及凝固程度不同的砂浆在受到爆炸荷载作用时,在裂缝形态及频度方面没有显示出任何不同。

J. P. Conway 和 K G. Hoge^[45]等对屈服锚杆进行室内动力试验,结果表明屈服锚杆有很好的抗动载性能,并得出与静力试验相比,动力试验屈服荷载略有增加(15%)的结论。

D. K. Mothersille^[46]和 H. Xu^[46]对冲击荷载作用下预应力对锚杆动力响应的影响进行了实验室模型试验。结果表明,动荷载沿锚固段按指数规律变化,冲击荷载大小一定时,锚杆任意点上的动应力都随预应力的增加而减小。

W. D. Ortlepp 等^[48, 49]设计了一种简单有效且可重复的试验方法,对屈服锚杆和普通砂浆锚杆的抗爆性能进行了宏观对比试验,锚杆的屈服构件设在内锚头部位。结果表明:(1)在装药量接近相同的情况下,由 5 根 $\phi 25$ mm 的全注浆锚杆(静抗力 1 350 kN)加固的混凝土块的最大抛射高度为 4.7 m,是无锚杆加固混凝土块最大抛射高度的 90%,3 根锚杆被拉断,2 根锚杆被拔出;(2)由 5 根 $\phi 22$ mm 的屈服锚杆(静抗力 1 105 kN)加固的混凝土块的最大抛射高度仅为 0.5 m,锚杆未受到任何破坏;(3)屈服锚杆在变位 0.5 m 的过程中比全注浆锚杆多吸收了超出 20 倍的能量;(4)屈服锚杆能够承受 12 m/s 的试件抛射速度。

A. Anders 等^[50~52]研制了一种用于抗爆的新型锚杆,称其为“吸能锚杆”。吸能锚杆的杆体用软圆钢制做,不需套管,内锚段杆体呈肋状,并冲压有若干个椭圆形的孔。垫板是一个壳形圆盘。当受高速冲击时,杆体受拉变长,杆径变细,从而内锚段以外部分的杆体与砂浆脱离,锚杆外端便可自由让压。这种全长注浆的锚杆有很好的抗腐蚀效果。

A. Anders 等^[50, 51]介绍了对这种锚杆进行的自由跌落试验。结果表明:与静载试验结果相反,当受动载作用时,杆体的塑性应变沿杆长分布不均匀,自锚杆外锚头向内递减,其塑性屈服没有被充分的利用;动载作用下,外锚头处的螺母以及内锚头段是可靠的;在 12 m/s 的加载速度下,距螺母 50 mm 处,杆体断裂。A. Anders^[52]对这种锚杆(软圆钢)在高速加载机上进行了动力试验,并根据试验结果,提出了对这种锚杆进行抗爆设计的基本原则。

上述文献研究的均为单一锚固类结构。

3.3 数值分析

国外的硬件和软件均有一定的优势, 但发表的相关文献甚少, 这可能缘于单一的计算结论难以用于实际工程的设计与安全评估。

D. D. Tannant 等^[42]采用一维有限差分法对仅端锚的锚杆在爆炸荷载作用下的动力响应进行了数值分析。结果表明, 端锚锚杆的振动可以通过一根梁的轴向和横向振动来分析, 锚杆内锚头与岩体间的连接以及外锚头与垫板间的连接对锚杆的动应变影响很大, 内锚头和岩体间的连接是数值分析中最复杂的单元, 内锚头和外锚头处的连接也是研究端锚锚杆动力特性中复杂的边界条件。

A. Ivanovic 等^[53]采用基于有限差分法的集中参数数值模型计算分析了冲击荷载作用下预应力对锚杆动力响应的影响。主要得出以下结论: (1) 锚杆长度一定时, 自由段长度与锚固段长度比值的增加将导致响应基频的降低; (2) 锚头是锚杆响应对应力变化最为敏感的部位; (3) 锚杆振动加速度的衰减率随预应力的增加而增加; (4) 预应力的增加将导致锚杆锚固段动应力的降低。这些结论与作者先前的试验研究结论一致。

P. J. Zhao 和 T. S. Lok^[54]结合一维弹性波理论和梁的动力分析方法, 将喷锚网支护的钢纤维喷射混凝土层简化为一简支弹塑性梁, 由此建立一种冲击荷载作用下喷层抗剥落的简化设计计算方法。算例表明该方法是可靠有效的。

H. Hagedorn^[55]采用 UDEC 程序评估喷锚支护洞室在 2 次相继冲击作用后的稳定性。结果表明, 钻孔壁与围岩裂隙相交处握裹注浆(环氧树脂)的破坏避免了对锚杆本身的破坏, 因而锚杆对围岩的稳定性仍有加固作用, 但必须要考虑对喷层造成的局部破坏。

3.4 小结

(1) 国外对锚固类结构抗爆性能的试验研究非常重视, 试验做的较多、较细、且较全, 且近 20 a 来在持续进行研究。

(2) 国外关于锚固类结构抗爆性能数值计算文献甚少, 某些用于工程设计的计算结论往往是与相应的试验研究结论相印证。

(3) 在所列举的国外研究中, 研究对象均为单一锚固类结构。复合锚固类结构受力更加复杂, 研

究起来更困难。

(4) 国外对某些新型锚杆(如吸能锚杆)抗爆性能研究成果, 对我国具有借鉴意义。

4 结 论

综上所述, 锚固类结构抗爆性能研究是一个较复杂的问题, 其研究面很宽, 内容主要涵盖锚固类结构在爆炸荷载作用下的动力响应、加固效果及破坏机制, 爆炸对锚固能力的影响, 新型的抗爆锚固技术, 以及复合锚固类结构的优化复合设计等方面。虽然锚固类结构抗爆性能的研究存在很多共同特点, 但对于特定的工程结构、地质环境、锚固形式、荷载大小等条件, 结论往往存在较大差异甚至相互矛盾, 需要具体问题具体分析, 不可以偏概全。因此, 试验研究是主要的研究方法, 而数值计算和理论分析则是辅助的研究手段。

以下问题, 无论国内或国外, 均具有共性:

(1) 复合锚固类结构抗爆性能研究还远远不够, 还需进一步开展研究工作。

(2) 特殊型式的复合锚固类结构(如锚固技术结合构造措施)具有良好的开发应用前景, 应深入研究。

(3) 新型的锚固类结构(如吸能锚杆)具有优异的抗爆性能, 还需进一步加以研究和开发。

(4) 试验研究及应用成果, 还未能提升到系统、严密、公认的理论阐释程度。

参考文献(References):

- [1] 曾宪明, 陈肇元. 锚固类结构安全性与耐久性问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2 235 - 2 242.(ZENG Xianming, CHEN Zhaoyuan. Research on safety and durability of bolt and cable-supportal structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2 235 - 2 242.(in Chinese))
- [2] 汪剑辉, 闫 顺. 复合土钉支护在我国的研究与应用[J]. 施工技术, 2006, 35(1): 15 - 19.(WANG Jianhui, YAN Shun. Study and application of compound soil nail support in China[J]. Construction Technology, 2006, 35(1): 15 - 19.(in Chinese))
- [3] 曹国庆. 喷锚支护抗爆性能与设计[J]. 防护工程, 1979, 1(2): 34 - 51.(CAO Guoqing. Explosion-resistance and design of shotcrete-bolt support[J]. Protective Engineering, 1979, 1(2): 34 - 51.(in

- Chinese))
- [4] 王学礼. 锚喷网支护在内爆巷道中的应用[J]. 建井技术, 1981, 2(2): 17 - 20.(WANG Xueli. Application of shotcrete-mesh-bolt support to inner explosion tunnel[J]. Mine Construction Technology, 1981, 2(2): 17 - 20.(in Chinese))
- [5] 王学礼. 内压巷道锚、喷、网支护参数的选择及实践效果[J]. 建井技术, 1987, 8(2): 40 - 42.(WANG Xueli. Parameter selection and practical effect of shotcrete-mesh-bolt support in inner explosion tunnel[J]. Mine Construction Technology, 1987, 8(2): 40 - 42.(in Chinese))
- [6] 任辉启. 砂砾地层中坑道喷锚支护在顶爆和侧爆条件下的抗爆性能[J]. 防护工程, 1986, 8(1): 12 - 18.(REN Huiqi. Explosion-resistance of shotcrete-bolt support in grit tunnel under the condition of up and side explosion[J]. Protective Engineering, 1986, 8(1): 12 - 18.(in Chinese))
- [7] 曾宪明, 肖峰. 黄土坑道喷锚网支护的抗爆性能 I, 破坏形态[J]. 防护工程, 1990, 12(3): 20 - 27.(ZENG Xianming, XIAO Feng. Explosion-resistance performance of shotcrete-mesh-bolt support in loess tunnel I, failure configuration[J]. Protective Engineering, 1990, 12(3): 20 - 27.(in Chinese))
- [8] 肖峰, 曾宪明. 黄土坑道喷锚网支护的抗爆性能 II, 围压分布形态[J]. 防护工程, 1991, 13(4): 37 - 45.(XIAO Feng, ZENG Xianming. Explosion-resistance performance of shotcrete-mesh-bolt support in loess tunnel II, distribution configuration of confining pressure[J]. Protective Engineering, 1991, 13(4): 37 - 45.(in Chinese))
- [9] 曹长林, 曾宪明. 黄土坑道喷锚网支护的抗爆性能 III, 支护受力变形特性; 临界承载能力[J]. 防护工程, 1992, 14(1): 46 - 55.(CAO Changlin, ZENG Xianming. Explosion-resistance performance of shotcrete-mesh-bolt support in loess tunnel III, deformation and stress characteristic and of supports critical bearing load[J]. Protective Engineering, 1992, 14(1): 46 - 55.(in Chinese))
- [10] 康天合, 薛亚东. 基于围岩条件与动载作用的回采巷道锚杆支护设计原则[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增 1): 571 - 576.(KANG Tianhe, XUE Yadong. Bolting design criteria of actual mining road way based on surrounding rock control and dynamic load action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(Supp.1): 571 - 576.(in Chinese))
- [11] 侯忠杰. 爆破对树脂锚杆载荷的影响[J]. 矿山压力与顶板管理, 1997, 14(1): 36 - 39.(HOU Zhongjie. Influence of blasting on the load of resin bolt[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1997, 14(1): 36 - 39.(in Chinese))
- [12] 宋茂信. 岩体边坡开挖爆破对预应力锚索锚固性能影响的现场观测[J]. 防护工程, 1998, 20(3): 74 - 77.(SONG Maoxin. Field observation of influence of blasting excavation of rock slope on the anchorage performance of prestressed cable bolt[J]. Protective Engineering, 1998, 20(3): 74 - 77.(in Chinese))
- [13] 张云, 刘开运. 近区爆破对锚固设施的影响研究[J]. 水力发电, 1996, (8): 23 - 26.(ZHANG Yun, LIU Kaiyun. Research on the influence of near-by blasting on anchorage facility[J]. Water Power, 1996, (8): 23 - 26.(in Chinese))
- [14] 陆遐龄. 爆破对 600 kN 预应力锚杆影响及锚固测力探讨[C]// 中国土木工程学会防护工程分会第五次学术年会论文集. [S. l.]: [s. n.], 1996: 453 - 464.(LU Xialing. Influence of blasting on 600 kN prestressed bolt and discussion of anchorage stress measurement[C]// Proceedings of the 5th Annual Learned Symposium of Protective Engineering Branch of Chinese Civil Engineering Academy. [S. l.]: [s. n.], 1996: 453 - 464.(in Chinese))
- [15] 陆遐龄. 岩石高边坡爆破开挖对锚固设施的影响[J]. 爆破, 2000, 17(增 1): 147 - 151.(LU Xialing. Influence of rock high slope explosive excavation on anchored installations[J]. Blasting, 2000, 17(Supp.1): 147 - 151.(in Chinese))
- [16] 苏华友, 张继春. 紫坪铺高陡边坡抗爆破振动分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1916 - 1918.(SU Huayou, ZHANG Jichun. Analysis on blasting vibration effect on prestressed cable bolt of high slope in Zipingpu project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1916 - 1918.(in Chinese))
- [17] 周德培. 锚索预应力损失的影响因素及对策[C]// 中国岩石力学与工程学会第八次学术大会论文集. [S. l.]: [s. n.], 2004: 610 - 613.(ZHOU Depei. Influence factor and countermeasures of prestress loss of cable bolt[C]// Proceedings of the 8th Learned Symposium of Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2004: 610 - 613.(in Chinese))
- [18] 盛宏光, 张勇. 钻地武器侵入爆炸条件下坑道岩体的锚固技术初探[C]// 中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集. [S. l.]: [s. n.], 2004: 1542 - 1547.(SHENG Hongguang, ZHANG Yong. Discussion of anchorage techniques of tunnel rock mass under the condition of penetration and explosion of earth-penetration weapons[C]// Proceedings of the 9th Annual Learned Symposium of Protective Engineering Branch of China Civil Engineering Society. [S. l.]: [s. n.], 2004: 1542 - 1547.(in Chinese))
- [19] 朱如玉, 王承树. 某观察坑道在爆炸荷载作用下的破坏情况的宏

- 观调查分析[J]. 爆炸与冲击, 1982, 2(2): 17 - 26.(ZHU Ruyun, WANG Chengshu. Visual investigation and analysis of the failure of an exploratory tunnel under blast load[J]. Explosion and Shock Wave, 1982, 2(2): 17 - 26.(in Chinese))
- [20] 黄承贤. 在爆炸荷载作用下长锚杆喷锚支护坑道的动态反应[J]. 岩土力学, 1987, 8(3): 1 - 11.(HUANG Chengxian. The dynamic response of gallery supported by long bolts under blasting load[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(3): 1 - 11.(in Chinese))
- [21] 曾宪明, 杜云鹤, 李世民. 土钉支护抗动态原型与模型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 892 - 1 897.(ZENG Xianming, DU Yunhe, LI Shimin. The prototype and model comparison test study of resisting dynamic load with soil nail supporting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 892 - 1 897.(in Chinese))
- [22] 孙永志, 刘朝. 土中喷锚支护洞室非线性动态有限元分析[J]. 防护工程, 1984, 6(1): 19 - 31.(SUN Yongzhi, LIU Chao. Non-linear dynamic finite element analysis of cavern supported by spray anchor in soil[J]. Protective Engineering, 1984, 6(1): 19 - 31.(in Chinese))
- [23] 赵幸源. 隧道爆破开挖效应的动静力有限元分析[C]// 中国土木工程学会隧道及地下工程学会第五届年会论文集. [S. l.]: [s. n.], 1988: 591 - 599.(ZHAO Xingyuan. Dynamic and static finite element analysis of blasting excavation effect of tunnel[C]// Proceedings of 5th Annual Learned Symposium of Tunnel and Underground Engineering Branch of Chinese Civil Engineering Academy. [S. l.]: [s. n.], 1988: 591 - 599.(in Chinese))
- [24] 郑际汪, 陈理真. 爆破荷载作用下隧道围岩稳定性分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, 21(4): 53 - 55.(ZHENG Jiwang, CHEN Lizhen. Stability analysis of surrounding rock of excavation under blasting load[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, 21(4): 53 - 55.(in Chinese))
- [25] 杨苏杭, 沈俊. 预应力锚索对洞室抗爆加固效应的三维动力分析[J]. 防护工程, 2006, 28(1): 20 - 24.(YANG Suhang, SHEN Jun. Three-dimensional dynamic analysis of blast resistance and reinforcement effect of prestressed cable bolt on cavern[J]. Protective Engineering, 2006, 28(1): 20 - 24.(in Chinese))
- [26] 荣耀, 许锡宾. 锚杆对应力波传播影响的有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 115 - 119.(RONG Yao, XU Xibing. The numerical simulating propagation of stress waves in the country rock with bolting underground space[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 115 - 119.(in Chinese))
- [27] 王承树. 爆炸荷载作用下喷锚支护破坏形态[J]. 岩石力学与工程学报, 1989, 8(1): 73 - 91.(WANG Chengshu. Failure modes of shotcrete lining of tunnel under blasting loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanism and Engineering, 1989, 8(1): 73 - 91.(in Chinese))
- [28] 王承树. 动载下围岩与坑道喷锚支护的相互作用[C]// 全国首届结构与介质相互作用学术会议论文集. 南京: 河海大学出版社, 1993: 853 - 857.(WANG Chengshu. Interaction of surrounding rock and shotcrete-bolt support in tunnel under dynamic load[C]// Proceedings of the 1st Chinese Learned Symposium of Interaction of Structure and Medium. Nanking: Hehai University Press, 1993: 853 - 857.(in Chinese))
- [29] 易长平. 爆破振动对地下洞室的影响研究[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉大学, 2005.(YI Changping. The influence of blasting vibration on underground caves[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.(in Chinese))
- [30] 易长平, 卢文波. 爆破振动对砂浆锚杆的影响研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1 312 - 1 316.(YI Changping, LU Wenbo. Research on influence of blasting vibration on grouted rockbolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1 312 - 1 316.(in Chinese))
- [31] 喻晓今, 曾宪明. 土钉瞬态应力的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 1): 4 438 - 4 441.(YU Xiaojin, ZENG Xianming. Testing study on transient stresses in soil nails[J]. Chinese Journal of Rock Mechanism and Engineering, 2004, 23(Supp.1): 4 438 - 4 441.(in Chinese))
- [32] 喻晓今, 余学文. 数种情形下土钉的瞬态应变累积效应分析[J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(4): 1 - 4.(YU Xiaojin, YU Xuewen. Anlysis of the effect of commutation of transient strain on soil nail in several cases[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2006, 23(4): 1 - 4.(in Chinese))
- [33] 沈德义, 刘五一. 国外几种可用于动载条件的锚杆[R]. 洛阳: 61489 部队资料室内部馆藏报告, 1984: 9 - 11.(SHENG Deyi, LIU Wuyi. Introduction of several kinds of foreign bolt for dynamic condition[R]. Luoyang: Inner report collected in the data office of 61489 army, 1984: 9 - 11.(in Chinese))
- [34] STILLBORG B. Experimental investigation of steel cables for rock reinforcement in hard rock[Ph. D. Thesis][D]. Luleå: Luleå University, 1984.
- [35] THORPE R K, HEUZE F E. Dynamic response of rock reinforcement in a cavity under internal blast loading: an add-on test to the pre-mill yard event[R]. [S. l.]: [s. n.], 1985.
- [36] OTUONYE F O. Response of grouted roof bolts to blasting

- loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1988, 25(5): 345 - 349.
- [37] OTUONYE F O. Influence of shock waves on the response of full contact rock bolts[C]// *Proceedings of the 9th Symposium on Explosives and Blasting Research*. California: San Diego, 1993: 261 - 270.
- [38] LITTLEJOHN G S, RODGER A A, HOLLAND D C. Monitoring the influence of blasting on the performance of rock bolts at Penmaenbach tunnel[C]// *Proceedings of the 1st International Conference on Foundations and Tunnels*. Edinburgh: [s. n.], 1987: 99 - 106.
- [39] LITTLEJOHN G S, RODGER A A. Dynamic response of rock bolt systems[C]// *Proceedings of 2nd International Conference on Foundations and Tunnels*. London: [s. n.], 1989: 57 - 64.
- [40] HOLLAND D C, MOTHERSILE D K V. The influence of close proximity blasting on the performance of resin bonded rock bolts[M. S. Thesis][D]. Bradford: University of Bradford, 1989.
- [41] RODGER A A, HOLLAND D C, LITTLEJOHN G S. The behaviour of resin bonded rock bolts and other anchorages subjected to close proximity blasting[C]// *Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics*. Tokyo: [s. n.], 1995: 665 - 670.
- [42] TANNANT D D, BRUMMER R K, YI X. Rock bolt behaviour under dynamic loading: field test and modelling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(6): 537 - 550.
- [43] GISLE S, ARNE M. The influence of blasting on grouted rockbolts[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1995, 13(1): 65 - 70.
- [44] 李晓军. 美军加筋土掩体的抗爆试验[R]. 洛阳: 61489部队资料室内部馆藏报告(防护工程科技信息), 1991.(LI Xiaojun. Explosion-resistance test of retaining soil bunker of American army[R]. Luoyang: Inner report collected in the data office of 61489 army (Science information of protective engineering), 1991.(in Chinese))
- [45] CONWAY J P, HOGE K G. Laboratory studies of yielding rock bolts[R]. Washington: Bureau of Mines, 1975.
- [46] MOTHERSILLE D K V. The influence of close proximity blasting on the performance of resin bonded bolts[Ph. D. Thesis][D]. Bradford: University of Bradford, 1989.
- [47] XU H. The dynamic and static behaviour of resin bonded rock bolts in tunneling[Ph. D thesis][D]. Bradford: University of Bradford, 1993.
- [48] ORTLEPP W D. Grouted rock as rockburst support: a simple design approach and an effective test procedure[J]. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1994, 94(2): 47 - 63.
- [49] ORTLEPP W D, STACEY T R. Performance of tunnel support under large deformation static and dynamic loading[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1998, 13(1): 15 - 21.
- [50] ANDERS A. Testing and modelling of an energy absorbing rock bolt[C]// *Structures and Materials*. [S. l.]: [s. n.], 2000: 417 - 424.
- [51] ANDERS A. Laboratory testing of a new type of energy absorbing rock bolt[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2005, 20(4): 291 - 300.
- [52] ANDERS A. Dynamic testing of steel for a new type of energy absorbing rock bolt[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(5): 501 - 512.
- [53] IVANOVIC A, NEILSON R D, RONGER A A. Influence of prestress on the dynamic response of ground anchorages[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(3): 237 - 249.
- [54] ZHAO P J, LOK T S. Simplified spall-resistance design for combined rock bolts and steel fiber reinforced shotcrete support system subjected to shock load[C]// *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures*. Changsha: [s. n.], 2003: 465 - 478.
- [55] HAGEDORN H. Dynamic rock bolt test and UDEC simulation for a large carven under shock load[C]// *Proceedings of International UDEC/3DEC Symposium on Numerical Modeling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering, Civil Engineering, and Earth Sciences*. Bochum: [s. n.], 2004: 191 - 197.