

锚固类结构诸界面剪应力相互作用关系 与设计方法问题研究（续）

曾宪明 范俊奇 汪剑辉 赵强 林大路 路遥

（总参工程兵科研三所 洛阳 471023）

（续接上期）

澳大利亚Vienne技术大学的Brandl H.在2004年10月南京“土钉支护与岩土工程稳定性国际会议”（International Conference on Soil Nailing & Stability of Soil And Rock Engineering）上所作专题报告（2004）^[51]中指出，土钉与周围土体相互作用，由于受多种因素影响，只能在有限范围内采用计算方法进行分析，对其破坏机理的研究可借助拉拔试验来进行。他介绍了法国早期的一个在松散砂中完成的足尺现场试验情况。但这个著名事例研究的却是第1界面剪应变的函数值分布。

H. Stang 等研究了滑移与剪应力分布规律，指出采用他们的分析模型可以推导出沿钢纤维的界面剪应力分布^[52]（1990）。在此计算模型中，剪切层外的浆体材料被假设为刚性材料，并且不考虑泊松比的影响。笔者分析认为，钢纤维是直接打筑在浆体材料中的，因而上述模型描述的是第1界面剪应力分布形态，并且是按平均剪应力处理的。

Here, Patrikis, Andrews和Yong等根据其他研究者的工作，推导建立了沿钢纤维界面剪应力的分布模型^[53]（1994）。在此模型中，作者应用了cox的剪力层理论并且考虑了泊松比的影响。与文献[52]分析模型相似，该模型也是以第1界面为研究对象的。这两个模型都显示出当钢纤维的长细比较小（如 $L/D=1$ ）时，界面剪应力趋向于均匀分布。笔者认为，这一结论在理论上是无可非议的，也与美国的极限概念和我国顾金才先生主张的“拉拔试验段要尽可能短”相

一致。问题是：①.锚杆能不能简化为钢纤维？大量试验证明是不行的；②.实际锚固段长度（L）怎么可能只与锚孔直径（D）一般大？③.锚固段长度很短，发生破坏和转移的峰值剪应力及其演化特性就难以测得。

香港科技大学Zongjin Li等也提出了类似于文献[52, 53]的分析模型^[54]（1991），并指出，当钢纤维长细比很小时，界面开裂时的受力即为最大拔出力；界面粘结被破坏后，由于界面正压力的存在，机械咬合作用与界面摩擦力仍对钢筋滑移产生抗力，此时摩擦力沿钢纤维分布也可视为均匀分布。如果界面剪应力沿钢纤维长度方向为均匀分布，则界面剪应力可很容易求得。文献[54]提出的第1界面剪应力的公式再次回到了我国现行规范的形式，较大的区别在于纤维的长细比 L/D 很小。

新加坡Luo S.Q等^[55]（2004）认为土钉界面相互作用机理十分复杂，主要有两种理论方法计算土钉极限侧面阻力。一种是弹性分析方法（Schlooser,1982），另一种是塑性分析方法（Jewell, 1990; Jewell和Pedley, 1990和1992）。但对这两种方法均有争议。于是作者在2001年提出了一个“塑性土—弹性钉破坏模型”。这个模型有其新颖性。作者的本意是研究注浆钉的第2界面剪应力，但为验证此模型而试验的3排16个应变测点均粘贴在钉体表面，因而测得的是第1界面剪应力分布。

朝鲜Hongik大学Kim Hong-Tack等为研究面层刚度对土钉“摩擦应力”（friction stress）（宜为粘结应力）的影响^[56]（2004），进行了不

同面层刚度的土钉室内系列对比试验。结果表明,面层刚度越大,第2界面摩擦应力越大,而作者所采用的实测元件应变片则是粘贴在钉体表面的,即测取的是第1界面上的轴向应变。

水利部和能源部东北勘测设计院周增富^[57](1991)翻译了日本山田邦光一篇名为《岩土边坡锚固》的文献资料。作者在分析讨论锚索张力与其安全系数的关系时,提出了一个计算第2界面上的粘结力公式。该公式以锚固段长度L内的平均粘结强度为基础来表述总粘结力F。

早在上世纪80年代, Sell, R等^[58](1973), Lang, G等^[59, 60](1979), 就对单根锚杆的粘结强度进行了研究。拉拔破坏时不饱和聚脂药卷状粘结锚杆的平均粘结强度,假定为沿锚固段粘结体—钢筋界面全长均匀分布,其值为 $\tau_u \geq 10\text{N/mm}^2$ 。作者认为,该值适用于试块(200mm立方体)抗压强度约为20N/mm²的混凝土和埋深约为9d的情形(d为锚杆直径—笔者注)。研究发现,平均粘结强度随混凝土强度的增加而增加。文献[59, 60]有如下特点:①.界面粘结强度取为平均值;②.研究对象为第1界面。

Cook^[61](1979)在低强度和高强度混凝土中进行了20次产品试验,研究发现,安设有粘结锚杆的混凝土的强度对锚杆粘结强度有一定影响。高强混凝土对粘结强度的影响与产品相关。 $f_{cc}=25\text{N/mm}^2$ 时测得的粘结强度可用于 $f_{cc}=55\text{N/mm}^2$ 的混凝土中。对于强度更高的混凝土,由于钻孔孔壁更为光滑,其粘结强度可能降低。作者讨论的是打筑在混凝土中锚杆的平均粘结强度。

在上世纪80年代及以后,人们就用不同的试件与方法研究了钢纤维与水泥浆体材料界面的微观结构^[62, 63, 64](1978, 1985, 1997)。研究发现:浆体材料在界面处存在一个相对较弱的界面区。此界面区主要由氢氧化钙晶体、C—S—H等组成,对界面力学特性起着非常重要的作用。由于界面层材料的微观构造尺寸即使与

尺寸即使与很细的钢纤维相比仍然非常小,因而纤维直径的变化不会引起界面层微观结构的变化。鉴此,提出了基于平均剪应力的界面剪切强度与摩擦剪应力计算方法,并认为可以用表面处理相同的钢条或钢筋替代钢纤维进行试验,以确定界面的力学特性。文献[62~64]研究的都是打筑在浆体材料中钢纤维(或锚杆钢筋)的力学性能(第1界面),研究也很深入,可看作是平均剪应力的基本理论依据,至今仍有重要影响而被引用。但该理论经不起试验和工程检验是不争的事实,原因可能是其应用超出了理论的适用范围。

澳大利亚煤炭工业研究试验室提出了“标准锚固力测定程序”^[65](1971),据此可以确定界面上的剪应力,作者说明该程序是根据美国的方法发展起来的。测定方法是进行拉拔试验,测定程序是测定“锚头最大锚定力”和“荷载/位移特性”,再根据锚固段长度和孔径参数求出界面上剪应力。这只能求出该界面上的平均粘结强度。

美国波特兰有限公司基础学科副主席及总工程师唐奈J.道特斯等^[66](1971)撰写了一篇关于“岩石锚杆锚固体系的现场试验”的论文,文章“希望对从事现场试验以及岩石锚杆设计等两部门的人员,都具有实用价值”。文章阐述了通过拉拔试验及分析获得设计锚固拉力的方法。该方法以平均剪应力为基础。作者强调的是“荷载”与“变位”参数的测取,并且与澳大利亚“标准锚固力测定程序”的说明^[65]是吻合的。与上述研究相近的工作,我国主要是在上世纪九十年代及以后做的。这表明:①.在对锚固强度的相关研究方面,我国要比先进国家晚起步10~15年时间。这一差距的缩短,与“具有浓厚中国特色的土钉支护”(中国工程院院士、总参科技委常委钱七虎语——笔者注)于1992年以来在我国的蓬勃兴起有关;②.上世纪80年代美国在该问题上研究水平即如文献^[66]所述,用今天的眼光看这还是较为粗糙

的,它所采用的概念和方法显然是以平均锚固强度为基础,并且一直延续至今;反观我国的情况又未尝不是如此。

日本隧道技术协会1979年编写了《新奥法量测规则(草案)及解释》^[67],其中第11条明确规定“锚杆拉拔试验是为确认锚杆安设后的锚固效果”,“应用时采取在锚杆上贴应变片的方法进行”。在第14条中规定,“锚杆轴力量测的目的是量测锚杆轴力并依其应力度获得是否增设锚杆等的判断资料。量测采用贴在锚杆上的应变片或量测锚杆”来进行。显然,这里关注的均是第1界面问题。这种作法主要源于新奥法的影响^[68](1982)。

4. 结论

4.1 关于国内的研究

①国内关于锚固类结构第1界面剪应力分布规律的研究,包括室内外试验和理论分析计算,已经做了较多的工作,成果较为丰富。但峰值剪应力转移等特性仍未搞清楚,强制和非强制性技术标准仍然不适当地采用了平均剪应力的概念和方法。

②对邻近第2界面上剪应力分布形态的研究,所做工作还很有限,有些问题还未真正搞清楚,如不同加固介质中锚固类结构杆体的临界锚固长度问题等。

③至于理想第2界面剪应力分布形态,我们还没有真正测到过,还有不少问题需要探讨。

④关于界面剪应力沿垂直于杆体轴线方向衰减问题,所做工作不多,主要还停留在理论探讨阶段,系统的测试未见发表。

⑤在我国工程界和学术界,对锚固类结构的3个破坏界面给予明确区分的意识还不是很强。有时提得较为笼统,有时出现混淆和相互替代现象。

⑥锚固类结构诸界面平均剪应力的概念和方法自上世纪70年代以来是一脉相承的;尽管早已发现了问题,却未真正有效地予以解决。

⑦将第1、第2和第3界面视为一个系统,进

而研究诸界面剪应力的相互作用关系和机理,以及设计方法,这种研究方法和结论,国内未见发表。

4.2 关于国(境)外的研究

①国(境)外尚没有“锚固类结构”、“锚固类结构第1、第2和第3界面”的明确概念,一般是混称的,有时需要仔细阅读才能分辨其所指。

②国(境)外研究锚固类结构界面剪应力的方法主要有以下几种:a.经验法;b.解析法;c.数值分析法(本文述及较少)。但实际用于设计的主要是a和b两种方法。

③国(境)外对锚固类结构界面剪应力分布规律的研究和实践比我国早10~15年时间,经费投入也大得多。尽管如此,关于理想第2、第3界面剪应力分布形态的试验研究成果同样未见报导(数值模拟的除外)。

④国(境)外绝大多数国家和地区关于界面剪应力分布均是采用平均值的概念和方法,在所述及的资料中,只有美国的概念要先进一些,但也未见付诸应用,见之于设计技术标准的主要是通过试验法获得的有效数据,并且同样也是基于平均剪应力的方法。

⑤国(境)外对第1界面受力性能的研究,明显多于第2界面;也有将前者替代后者或混为一谈的情况。这同我国工程界的有些作法是相似的。

⑥国(境)外没有对临界锚固长度、界面剪应力的峰值点和零值点同浆体材料局部破坏部位同时发生转移、界面剪应力沿垂直于杆体轴线方向的衰减规律等进行系统研究,而这些问题均与诸界面剪应力相互作用关系密切相关。

⑦国(境)外早期关于浆体材料的微观结构研究成果,以及将浆体材料中钢纤维的研究结果推广至混凝土中锚杆钢筋的结论,在国际上被广泛引用,可看作是平均剪应力的理论基础。但却具有误导性而不能应用。

⑧ 国(境)外关于锚固类结构诸界面剪应力相互作用关系和机理研究成果未见发表。

参考文献

- 蒋忠信. 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模式, 岩土工程学报, 2001, 23(6): 696-699
- 李敏, 蒋忠信, 秦小林. 南昆铁路膨胀岩(土)路堑边坡应力测试分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, (专辑): 60-69.
- 余坪, 余渊. 滑坡防治预应力锚索的试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, (1): 59-63.
- 程良奎. 土层锚杆的几个力学问题[A]. 岩土锚固工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.1-6.
- 朱焕春. 反复张拉荷载作用下锚杆工作机理试验研究, 岩土工程学报, 1999.11, 21(6): 662-665
- 郑全平. 预应力锚索加固作用机理与设计计算方法, 中国防护工程科技报告, 1998.11.
- 顾金才, 明治清, 沈俊, 陈安敏. 预应力锚索内锚固段受力特点现场试验研究, 见: 中国岩土锚固工程协会编, 岩土锚固新技术, 北京: 人民交通出版社, 1998.
- 邬爱清, 韩军, 罗超文, 程良奎. 单孔复合型锚杆锚固体应力分布特征研究, 岩石力学与工程学报, 2004.1, 23(2): 247-251.
- 荣冠, 朱焕春, 周创兵. 螺纹钢与圆钢锚杆工作机理对比试验研究, 岩石力学与工程学报, 2004.2, 23(3): 469-475.
- 杨松林, 荣冠, 朱焕春. 混凝土中锚杆荷载传递机理的理论分析和现场试验, 岩土力学, 2001.5, vol.22 No.1.
- Wu Shenxing. Dynamic experimental study of bond-slip between bars and the concrete in XiaoWan arch dam, New Developments in Dam Engineering-Wieland, Ren & Tan(eds), (c) 2004 Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1536 240 7: 951-959
- Bo Liu, Libing Tao, Longguang Tao. Field Tests of Nails' Strains and Their Spatial Behavior in Vertical Soil Nailing Wall of Deep Excavation, Proceedings of the International Symposium of Civil Engineering in the 21st Century, Beijing, China, 11-13 October, 2000:417-423
- 徐景茂, 顾雷雨. 锚索内锚固段注浆体与孔壁之间峰值抗剪强度试验研究, 岩石力学与工程学报, 2004.11, 23(22): 3765-3769.
- 何思明, 王成华. 预应力锚索破坏特性及极限抗拔力研究, 岩石力学与工程学报, 2004.9, 23(17): 2966-2971.
- 杨松林, 徐卫亚, 黄启平. 节理剪切过程中锚杆的变形分析, 岩石力学与工程学报, 2004.10, 23(19): 3268-3273
- 曹国金, 姜弘道, 熊红梅. 一种确定拉力型锚杆支护长度的方法, 岩石力学与工程学报, 2003.6, 22(7): 1141-1145
- 王霞, 郑志辉, 孙福英, 曾宪明. 锚索内锚固段摩擦力分布及扩散规律研究, 煤碳工程, 2004 No.7: 45-48.
- 赵华, 董泽荣, 李融融, 段会文等. 小湾水电站岸锚支护试验研究, 见: 徐祯祥等主编, 岩土锚固技术与西部开发, 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- 谷建国, 王再芳, 董翌为, 刘鸿俊. 特大吨位预应力锚索试验研究, 见: 徐祯祥等主编, 岩土锚固技术与西部开发, 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- 甘文鸿, 大朝山水电站地下洞室主要支护施工技术, 见: 徐祯祥等主编, 岩土锚固技术与西部开发, 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- 闫莫明, 单束锚索树脂锚固, 见: 徐祯祥等主编, 岩土锚固技术与西部开发, 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- Jia Jingqing, Zheng Weifeng, Song Erxiang, The research on prestressed anchor flexible retaining method for deep excavation, Int'l Conference on Soil Nailing & stability of Soil and Rock Engineering:21-22 October 2004, Nanjing, China
- 煤炭科学研究院, 锚杆技术及应用, 出版不详, 约1975
- 郑颖人, 杨会龙, 锚喷支护参数分析与选用原则, 空军工程学院科技报告, 1982.4
- 铁道部专业设计院, 锚杆支护设计探讨, 铁道部专业设计院科技报告, 1983.11
- 同济大学地下建筑教研室, 锚杆·喷射混凝土支护—地下建筑工程专题, 同济大学科技报告, 1976.8
- 水电部第六工程局, 水电部东北电力设计院, 同济大学, 四川电力建设三公司, 交通部科学研究院西南研究所锚喷小组, 锚喷支护结构设计理论及施工方法调查汇编, 科技报告, 1973.5
- 水利水电地下建筑物情报网, 预应力锚固技术与工程应用, 地下工程技术, 1986, No.1
- 赵长海主编, 董在志, 陈群香副主编, 预应力锚固技术, 北京: 中国水利水电出版社, 2001.12
- 陈肇元, 崔京浩主编, 土钉支护在基坑工程中的应用(第二版), 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.12
- 美国交通部联邦公路总局(FHWA-SA-96-069R)主编, 余诗刚译. 土钉墙设计施工与监测手册, 北京: 中国科学技术出版社, 2000.5
- Weatherby D E. Tiebacks, Federal Highway Administration, Washington D. C., FHWA-RD-82-047, 1982
- Cheney, Richard S., Permanent Ground Anchors, FWHA-DP-68-1R, Federal Highway Administration, Washington D. C., 1988
- Elias V and Juran I., Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations, Federal Highway Administration, Washington D. C., FHWA-RD-89-198, 1991
- Porterfield J A., Cotton D M and Byrne R J., Soil Nailing Field Inspectors Manual, Federal Highway Administration, Washington D. C., FWHA-SA-93-068, 1994
- French National Research Project Clouterre. Recommendations Clouterre 1991 (English Translation) Soil Nailing Recommendations, Federal Highway Administration, Washington D. C., FHWA-SA-93-026, 1991
- (德国) R. Eligehausen, B. Lehr, J. Meszaros, W. Fuchs文, 张新乐译, 两种粘结锚杆抗拉性能与设计, 见: 曾宪明, 王

- 振宇, 徐孝华, 杨章甫等编译, 国际岩土工程新技术新材料新方法, 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.5
38. Eligehausen, R.; Mall é e, R. Rehm, G.: Befestigungstechnik. In: Betonkalender 1997, Ernst & Sohn, Verlag F ü r Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1997
 39. Rehm, G.: Langzeitverhalten von HILTI-Verbundankern HVA. Gutachtliche Stellungnahme vom 23.06.1978, not published
 40. Cook, R. A.; Kunz, J., Fuchs, W., Konz, R. C.: Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete. ACI Structural Journal, January-February 1998
 41. Eligehausen, R.; Mall é e, R.; Rehm, G.: Fixings formed with Resin Anchors. Betonwerk+Fertigteile-Technik, Volume 10 to 12, 1994
 42. Cook, R.A: Behavior of Chemically Bonded Anchors, Journal of Structural Engineering, vol. 119, No.9, September, 1993
 43. Fuchs, W.; IExpansion, R., Breen, J.E.: Concrete Capacity Design (CCD) APPROACH FOR Fastening to Concrete. ACI-Structural Journal, pp. 73-94, Vol.92, 1995
 44. [法国] Marc Panet文, 张新乐译, 被动锚杆加固岩体的实用设计方法, 见: 曾宪明, 王振宇, 徐孝华, 杨章甫等编译, 国际岩土工程新技术新材料新方法, 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.5
 45. (澳大利亚) Marc A. Wood Word文, 朱大明译, 锚索设计、试验、监测和施工方法, 见: 曾宪明, 王振宇, 徐孝华, 杨章甫等编译, 国际岩土工程新技术新材料新方法, 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.5
 46. (日本) S. Sakurai文, 张新乐译, 锚杆加固节理岩体的机理与分析方法, 见: 曾宪明, 王振宇, 徐孝华, 杨章甫等编译, 国际岩土工程新技术新材料新方法, 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.5
 47. (英国) M J Turner文, 李世民译, 永久性防腐土钉墙的性能、设计与施工, 见: 曾宪明, 王振宇, 徐孝华, 杨章甫等编译, 国际岩土工程新技术新材料新方法, 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.5
 48. (德国) R. Eligehausen, H. Spieth文, 蔡灿柳译, 插入式钢筋连接的性能与方法, 见: 曾宪明, 王振宇, 徐孝华, 杨章甫等编译, 国际岩土工程新技术新材料新方法, 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.5
 49. (台湾) Wu J, Zhang Z, Experimental study of the pull-out resistance of soil nails, Int'l Conference on Soil Nailing & Stability of Soil and Rock Engineering :21-22 October 2004, Nanjing, China, P205-212
 50. (日本) Chai X. J., Hayashi S., Du Y. J., Contribution of dilatance to pull-out capacity of nails in sandy clay, Int'l Conference on Soil Nailing & Stability of Soil and Rock Engineering:21-22 October 2004, Nanjing, China, P73-80.
 51. (澳大利亚) Brandl H., Adam D., Soil and rock nailing-stability analyses and case studies, Int'l Conference on Soil Nailing & Stability of Soil and Rock Engineering:21-22 October 2004, Nanjing, China, P1-16.
 52. Stang, H., Li z., and Shah, S. P.: The pull-out problem—the stress versus fracture mechanical approach, ASCE,J.Engng Mech., 116[10],(1990), 21 36-50
 53. A. K. Patrikis, M. C. Andrews and R. J. Yong,: Analysis of the single-fibre pull-out test by the use of Ram an spectroscopy. Part I: pull-out of aramid fibers from an epoxy resin, Composites Science and Technology 52(1994)387-96.
 54. Zongjin Li, Barzin M obersher, Surendra P. shah, Characterization of interfacial properties in fibre reinforced ccm entitious composites, Journal of American Ceramic Society, 74, 1991, p2156-64.
 55. Luo S. Q., Stabilization of slopes in residual soils with soil nailing, Int'l Conference on Soil Nailing & Stability of Soil and Rock Engineering:21-22 October 2004, Nanjing, China
 56. Kim Hong-Tack, Kang In-Kyu, Kwon Young-Ho., Park Shin-yong, Influence of Facing Stiffness on Global Stability of Soil Nailing Systems, Int'l Conference on Soil Nailing & Stability of Soil and Rock Engineering:21-22 October 2004, Nanjing, China
 57. (日本) 山田邦光文, 周增富译, 田裕光校, 岩土边坡锚固, 1991.1
 58. Sell, R.: Festigkeit und Verformung Mit Reaktionsharzn ?rtelpatronen Versetzter Anker, Verbindung-stechnik 5, Volume 8, 1973
 59. Lang, G; Vollmer, H.: Dubelsysteme fur Schwerlastverbindungen. Die Bautechnik, Volume 6, 1979
 60. Lang, G.: Festigkeitseigenschaften von verbundanker-systeen. Bauingenieur 54, 1979
 61. Cook, R. A., Bishop, M. C., Hagedoorn, H. S., Sikes, D. E., Richardson, D. S., Adams, T. L., De Zee, C. T.: Adhesive bonded anchors. Structural and Effects of In-service and Installation Conditions. Structural and Materials Research Report No. 94-2A. University of Florida, 1994
 62. D. J. Pinchin and D. Tabor, Interfacial phenomena in steel fiber reinforced cement I: Structure and strength of interfacial region, Cement and concrete research, 8,(1978),15-24
 63. A. Bentur, S. Diamond and S. Mindess, The microstructure of the steel fiber-cement interface, Journal of Materials Science, 20, (1985),3620-26.
 64. M. N. Khalaf, and C. L. Page, Steel/mortar interface: microstructure features and mode of failure, Cement and concrete research, 9, (1997),197-208.
 65. (澳大利亚) 矿业与金属学会编, 交通部科学研究院西南研究所译, 岩石锚杆论文集, 1971
 66. (美国) 唐奈.J. 道特斯, 金尼斯.L.福格文, 空军后勤部设计研究局高厚宽译, 岩石锚杆体系的现场试验, 约1971
 67. (日本) 隧道技术协会编, 关宝树译, 新奥法量测规划(草案)及解释, 情报资料, 1979
 68. 韩瑞庚, 新奥法的量测, 空军工程学院情报参考资料, 1982.10