

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

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)

摘要: 锚固类结构具有国内外一致公认的技术先进性, 它们对人类工程式建设的贡献是巨大的。但锚固类结构至今仍存在着若干令人勿庸置疑的问题亟待研究解决。这些问题制约着锚固类结构的可靠应用与进一步发展。问题之首, 当属锚固类结构诸界面剪应力相互作用关系与设计方法问题。资料显示, 国内外对锚固类结构诸界面剪应力相互作用关系的系统研究未见报导, 而对锚固类结构的设计, 国内外技术标准均采用了以第2界面平均剪应力为主的设计方法, 这既不符合工程实际和大量严谨的试验结果, 又使工程存在潜在危险性, 是工程事故频发的重要原因之一, 应予以摒弃。

关键词: 锚固类结构 诸界面剪应力 相互作用 设计方法 研究

1. 问题

锚固类结构是指注浆锚索、锚杆和土钉一类岩土工程加固、支护结构。诸界面剪应力是指锚固类结构第1、第2和第3界面剪应力。第1界面是指锚杆(索)杆体与注浆体之间的界面, 第2界面是指注浆体与孔壁之间的界面。第3界面发生在锚孔周围被加固岩土介质内部, 是一个广义的因介质不同而相异的“界面”。由我国倡导的第二届锚固类结构与岩土工程稳定性国际会议将于2006年12月在新加坡召开。

锚固类结构具有勿庸置疑的技术先进性。人类应用锚杆有据可查的历史至少已有134年(1872), 应用锚索的历史至少已有72年(1934), 应用土钉墙技术已有36年(1970)左右时间, 应用土钉支护和复合土钉支护也已有14年时间(1992)。它们在全世界各类岩土工程中的应用数量巨大, 对人类工程建设的贡献和所产生的社会效益是无法数计的。但是, 锚固类结构至今仍存在若干同样令人勿庸置疑的问题亟待研究解决。这些问题制约着锚固类结构的可靠应用与进一步发展。

1999年, 笔者对当时及之前发生在我国的243例边坡和基坑工程事故进行了调查、统计和分析, 计有工程失事原因311条, 其中“设计”

原因的频率为39.9%, “规范”原因的频率为0.6%。在148例采用各种支护结构型式的工程中, 桩锚(支撑桩加锚杆或锚索)支护工程失事频率占6.1%, 板锚(钢板桩加锚杆)支护工程占0.7%, 喷锚网(含单一锚杆)支护工程占10.1%; 三项合计为16.9%。在90例失事工程的加固处理中, 墙锚(地下连续墙加锚杆或锚索)占1.1%, 喷锚网(含预应力锚杆或锚索)占30.0%; 二项合计占31.1%。2003年10月, 为着求教的目的, 在丹东召开的中国岩土锚固工程第十二次学术会议上, 笔者列举了“锚固类结构的十大问题”; 2005年8月, 为了同样的目的, 在洛阳召开的岩石力学与工程学会锚固与注浆专业委员会学术会议上, 又列举了“锚固类结构的十三大问题”, 引起与会专家极大关注。

在上述问题中, 首要的是锚固类结构诸界面剪应力相互作用关系与设计方法问题。诸界面剪应力分布状态和演化规律是建立相应设计理论与方法的基本依据和前提条件。

锚固类结构与被加固支护的岩土介质构成一个复杂系统, 锚固类结构诸界面剪应力间存在着强烈而复杂的相互作用、相互影响的关系。对此, 相关的研究成果国内外未见发表。

已有的关于诸界面剪应力的研究,一般是独立进行的。即便在这些独立进行的研究中,大多也不很充分,其间存在着不容忽视的问题。国内外对第1界面剪应力研究较多,在相关的文献资料中,约占90%,但对其峰值与零值剪应力同浆体材料局部破坏同时发生向钻孔深部的转移特性及规律并未搞清楚。对第2界面剪应力研究较少,在相关的文献资料中,约占9%,而理想第2界面剪应力分布国内外并没有真正测到过,所测得的仅是邻近第2界面剪应力。对第三界面剪应力研究甚少,迄今为止尚停留在理论分析和数值模拟阶段,系统而完备的实测数据国内外未见发表;在相关的文献资料中,仅占1~3%左右。

与诸界面剪应力相互作用效应紧密相关的是设计方法问题。总参工程兵科研三所研究员、中国工程院院士顾金才在其主持研究的《预应力锚索作用机理、设计方法与深钻孔精度研究》(国家科技进步二等奖)过程中,采用多种技术措施,测得与第2界面“邻近的”的“交结面”上剪应力分布规律后指出,剪应力沿孔壁的分布远不是均匀的。中国工程院院士郑颖人早在1982年发表的一篇题为“锚喷支护参数分析与选用原则”的论文中就曾指出,“粘结式锚杆各段受力不同,靠近洞壁段受力大,反之则小,这里只算平均拉力”。实际上,关于锚固类结构诸界面剪应力分布的非均匀性问题,数十年来,已为许多研究者所测得和认识,只不过对第2界面而言测得的仅是邻近第2界面剪应力而已。但是我国的相关技术标准至今采用的仍然是基于平均剪应力的概念与设计方法。《岩土工程勘察规范》(GB50021-94)第3.7.6条关于计算粉土和砂土以及粘性土中锚杆抗拔力的方法、《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89)第8.7.1节关于单根锚杆抗拔力计算方法、《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-99)关于锚杆受拉极限承载力计算方法(参照美国锚杆标准导得)、《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)第8.6.3条关于

单根锚杆抗拔承载力值 R_t 的计算方法、《铁路隧道新奥法指南》(铁道部基本建设总局,基技[1988]111号)第5.1.6条关于锚杆抗拔力的检查和安全标准、《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB50086-2001)第4.2.5条关于粘结型锚固体锚固段长度的计算方法、《水工预应力锚固设计规范》(SL212-98)第4.2.2条关于胶结式锚杆锚固段长度的计算公式、《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2002)第7.2.3条和第7.2.4条关于锚杆锚固体与地层和锚杆钢筋与锚固砂浆锚固长度的计算方法、中国工程建设标准化协会标准《岩土锚杆(索)技术规程》(CECS22:2005)7.5节关于锚固段长度的算式和经验值等,莫不如此,仅是公式形式略有差异。

在国(境)外,美国永久土钉委员会(Permanent Soil Nail Committee,2000)颁布的永久土钉锚杆规程(Recommended Guideline for Permanent Soil Nail Anchors)、美国材料试验科学(American Society for Testing and Materials,简称ASTM)委员会2002年颁布的现行美国“Reinforcing Steel Properties ASRM A615”和“Prestressing Steel Properties ASTM A722”、1989~1996年间美国交通部联邦公路总局(FHWA)出版的《土钉墙设计施工与监测手册》(Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls)、《锚杆》(FHWA/RD-82/047)、《永久地层锚杆》(FHWA-DP-68-IR)、《土钉加固现场检验员手册》(FHWA-SA-93-068)、《用于公路边坡稳定和开挖的土钉加固》(FHWA-RD-89-198)、英国技术标准理事会(British Board of Agre' ment,简称BBA)2002年颁布的“公路工程建设规程”(Highways Agency Requirements)、《英国地锚施工标准规范》(BS8081:1989;至1997年仍在使用)、《英国增强土/加筋土及其他填料标准》(BS8006:1995)、澳大利亚《Austroads桥梁设计规范》和《混凝土结构》(AS3600-1997)中关于锚索的设计、澳大利亚《标准锚固力测定程序》(1971,参照美国标

准),以及法国、瑞士、捷克和日本等先后在上世纪70~90年代颁布的地层锚杆技术规范、锚索技术条例、土钉技术指南等,均采用了以第2界面为主的平均剪应力的概念与设计方法。

平均剪应力最大的害处在于:只要设计锚固力不够,就增加锚杆(索)体长度,于是就出现了类似于8m深淤泥基坑中土钉被设计成50余米长度的许多荒唐事情。一方面,锚固类结构诸界面剪应力具有极其显著的非均匀性是不争的事实;另一方面,国内外相关技术标准仍普遍采用平均剪应力的概念和设计方法也是不争的事实。二者反差如此之大,原因究竟何在?笔者分析原因有四:一、受1953年发表的新奥地利隧道施工法的影响;二、受国外先进国家技术标准影响;三、受平均剪应力的基本理论“钢纤维与水泥浆体材料界面的微观结构理论”(Pinchin D J, Tabor D, 1978)的影响;四、与科研的急功近利与浮躁之风有关。其实,土钉支护和复合土钉支护在软土一类不良地质体中的大量成功应用就已打破新奥法的应用禁区;钢纤维与水泥浆体材料之间的界面剪应力在长细比等于1时被证明是比较均匀的,但将其推广应用于锚杆钢筋就是一种确定无疑的误导。

综上所述可知:

①锚固类结构诸界面剪应力相互作用关系及机理,国内外均未进行过系统的研究。孤立的研究难窥全豹。

②即使孤立的研究迄今为止大多也很不充分,尤其是第2、第3理想界面剪应力并未真正测到过。

③基于平均剪应力的概念与设计方法,既不符合剪应力分布特征与演化规律的实际,又存在潜在的危险,已到了不得不进行修改的地步。

④国外的成果仅限于借鉴。新奥法有其适用范围。微观结构理论是平均剪应力的理论基础,但具有无可争辩的误导性。

⑤开展锚固类结构诸界面剪应力相互作用

关系与设计方法研究,建立诸界面剪切破坏判据和更符合实际的设计计算方法,将有力地推动锚固技术的进步,促进国家经济建设的发展,避免和减少灾难性事故发生,具有极为重要的科研价值和广泛的应用前景。

2. 国内研究进展

将锚固类结构的第1、第2和第3界面明确地给予划分和界定,主要是为了方便讨论,而国内外确存在将诸界面互相混指和彼此替代的现象。此外,为了追根溯源,笔者不得不提到某些早期(上世纪60年代~80年代)的重要相关文献,但以近期的为主。

铁道部第二勘测设计院蒋忠信研究了拉力型锚索第2界面剪应力分布特性^[1](2001),指出其分布符合高斯曲线,并与四个现场的实测结果作了比较。不过,这4个现场的测试结果均不是理想第2界面上的应变分布。这也是不得已而为之。铁道部第二勘测设计院科研所在用钢纤维混凝土喷锚墙加固DK146膨胀岩试验工点路堑边坡的两个断面5排长4m的锚杆中,对每根锚杆布置了4个钢筋计进行测试,所得结果为邻近锚杆杆体的砂浆介质内部的电阻式应变分布^[2](1995)。铁道部科学院西北分院在上述膨胀岩土工程试验中,对用土钉加固南昆铁路DK50+437.5膨胀性红土试验工点路堑边坡断面的6根长4m的土钉,除去两端0.5m外,等间距地安装了4个电阻应变式钢筋计进行测试,所得结果与[2]同。四川省建筑科学研究院余坪等在试验锚索的长3m锚固段内粘贴6个应变片,进行了6级张拉试验,所得结果为第1界面剪应力分布状态^[3](1996)。冶金部建筑研究总院程良奎等对北京京城大厦深基坑工程中长12m拉力型锚杆,粘结应变片进行了5级拉拔试验,所得结果仍为锚杆第1界面应变分布状态^[4](1996)。

武汉水利电力大学水电学院朱焕春报导了反复张拉荷载下锚杆工作机理的现场试验研究^[5](1999),不仅测试了第1界面上的轴向应变分布状态(沿杆体全长粘贴应变片),而且测试了邻近第2界面上的一定范围(在孔口1m范围内

的孔壁上预置应变砖，其上粘有三向应变片）的剪应变分布状态。后者研究的是邻近第2界面问题。

总参工程兵科研三所郑全平研究员完成了预应力锚索内锚固段受力特点与破坏特征模拟试验研究^[6]（1998）。为获得第2界面剪应力分布规律，先在紧贴锚索受力筋处粘贴多个45°应变花；每一个应变花可得一点三个方向的应变变量 ε_1 、 ε_2 和 ε_3 ，再联合求解得到剪应变 $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3$ ，最后利用注浆体剪切模量 G_g ，通过 $\tau_{xy} = G_g \cdot \gamma_{xy}$ ，求得该点剪应力 τ_{xy} 。同法可求得各点剪应力。这实际上是根据量测结果计算确定的第2界面剪应力。

顾金才院士等在洛阳市龙门东山的石灰岩中，完成了预应力锚索内锚固段受力特点现场试验研究^[7]（1998）。顾先生指出：“现场试验技术难度很大，主要是在钻孔内的注浆体中布置测试元件的方法和测试元件的防潮绝缘技术问题不好解决。我们经过多方努力，才攻克这两个难题，使试验获得了圆满成功。”“注浆体与孔壁之间的剪应力分布状态”，是“通过实测的注浆体与孔壁之间的剪应变 γ_g ，按公式 $\tau_g = G \gamma_g$ 换算成剪应力，然后画出沿内锚段长度的分布状态”。就是说，这里所谓第2界面上剪应力分布状态采用了与文献[6]完全相同的“测试加计算”的方法。采用这种方法，首先要测得“紧贴锚索受力筋处”（即第1界面）的三向应变变量。

长江科学院岩基研究所邬爱清等在国家自然科学基金资助下进行了单孔复合型锚杆锚固体应力分布特征的研究^[8]（2004）。测试参数主要是应变，测试方法是在钻孔的不同位置埋设应变砖，测试长度为3.2m。应变砖通过灌浆方式固定于钻孔的不同位置。每个应变砖中沿锚杆轴向和垂直于锚杆轴线方向分别布置有应变测试元件，并进行了三维有限元分析计算。作者给出的仍然是邻近第2界面上的剪应变分布结果；虽然对垂直于锚杆轴线方向的应变作了测试，但未给出结果，估计是由于锚孔内空间有

限，该方向的分布规律难以测出。作者指出，测试结果与计算结果在反映锚固体应变变化规律方面具有较好的一致性。笔者估计在量值方面是难以一致的，因为两者毕竟不是同一个界面（计算按理想第2界面进行）。

为“深入了解砂浆锚杆工作机理，合理进行锚固工程设计计算”，武汉大学水利水电学院荣冠等进行了螺纹钢与圆钢锚杆工作机理对比（模拟）试验研究^[9]（2004）。测试方法是在模拟锚杆（长为1.0m，直径为32mm）杆体上粘贴应变片，在模拟加固介质混凝土内布置三向应变砖。锚杆直接打筑在混凝土中，与一般钻孔注浆锚杆工艺有别。前者测出的是第1界面（类似于击入钉，无第2界面）上的轴向应变分布，后者测出的是剪应变在介质中的衰减特性。

武汉大学水电学院杨松林等报导了混凝土中锚杆荷载传递机理的理论分析和现场试验^[10]（2001）。理论分析的对象是理想的第1界面，采用的是Mindlin弹性理论解，现场试验则与文献[9]同。作者指出“理论值和实际值的明显差别”，“主要是现场张拉实验不满足变形协调条件。”不过，笔者认为，与理论的适用性、特别是理论与试验研究的对象并不是同一个界面似也有关。

河海大学吴胜兴（音）等报导在小湾拱坝进行了锚杆与混凝土之间粘结—滑移的系列动力试验研究^[11]（2004）。矩形混凝土试件特征尺寸为长×宽×高=600mm×600mm×2200mm（下部加宽至1300mm），锚杆沿高度方向设置。螺纹钢锚杆杆体内部（通过切开后车槽）和混凝土试件表面均贴有应变片。由文章的示意图看，锚杆是打筑在混凝土试件中的。作者既给出了界面上剪应力沿锚杆长度的分布形态，也给出了混凝土试件表面应变沿锚杆长度的分布曲线，还通过力的平衡分析，给出了一个计算界面剪应力的拟合公式。该项试验设计是很新颖的，成果质量也很好，只是如果锚杆是打筑在混凝土中的，那就不存在第2界面，同文献[9]

试件条件相近，与一般的注浆锚杆从钻孔工艺到注浆材料均有较大差异。

中国矿业大学刘波（音）等报导，在北京某工程现场进行了土钉界面应力、应变状态等的测试和分析^[12]（2004）。试验将测试元件应变片等间距地粘贴在土钉杆体表面，所测结果为第1界面上的轴向应变分布形态。

总参工程兵科研三所徐景茂等进行了锚索内锚固段注浆体与孔壁之间峰值抗剪强度试验研究^[13]（2004），提出了两种测试第2界面峰值剪应力方法：①. 将已测到的邻近理想第2界面剪应力分布曲线进一步简化为三角形，然后通过积分求得；②. 沿锚索张拉体试件两端各施加一个大小相等、方向相同的力 P_1 和 P_2 （ P_1 为拉拔力， P_2 为推力），根据叠加原理，认为此时剪应力沿试验段全长近似为均匀分布状态。第一种方法类似于美国方法，在长度为 L 范围内所求得的是平均剪应力；在 $L \rightarrow 0$ 时求得的是峰值剪应力，但其分布形态为未知，尤其是与零值剪应力和注浆体局部破坏同时发生向深部转移的峰值剪应力也为未知。 $L \rightarrow 0$ 时求得的剪应力与发生转移时最大剪应力在概念上有所不同，后者更有实际意义。上述第二种方法与锚索实际受力状态有所不同，且有应力集中的问题产生（应力重叠部分）。此外， P_1 相当于拉力型锚索的拉力， P_2 相当于压力型锚索的拉力，二者的剪应力分布是否完全对称且量值相等还有待于试验证实。

中国科学院与水利部成都山地灾害与环境研究所何思明等，对预应力锚索破坏特性和极限抗拔力进行了研究^[14]（2004）。研究提出了一个描述锚索破裂面形状的双参数方程，并根据极限平衡原理及岩体的Hoek—Brown准则，研究了锚索的极限抗拔承载力。计算分为两种情况：①. 浆体材料和接触面强度小于（孔周）岩石强度；②. 浆体材料和接触面强度大于（孔周）岩石强度。情况①中考虑了较多影响因素，但剪应力 τ^* 值仍然是平均分布在锚固段上的，因为 $\tau^* = P_{\text{拉}} / \pi d L$ ，式中 P 为拉拔力； d 为锚索

直径； L 为锚索长度； π 为圆周率。第②种情况是假定第1、第2界面抗剪强度均足够大，从而会出现第3个由一个幂次函数确定的曲线锥形破裂面（即第3界面）。这是同时考虑第2、第3界面的不多的例子。

湖南五凌水电开发有限责任公司、清华大学岩土工程研究所杨松林等，对岩体节理剪切过程中锚杆的变形进行了研究^[15]（2004）。“当锚杆与砂浆的粘结未破坏时，以指数曲线来描述锚杆的侧剪应力分布；而对锚杆与砂浆的粘结遭到破坏的区段，采用抛物线来拟合。”显然，作者这里研究的是锚杆第1界面问题。

河海大学土木工程学院曹国金博士等研究提出了一种确定拉力型锚杆支护长度的方法^[16]（2003）。其方法为：在Mindlin问题位移解基础上，导出拉力型锚杆受力的弹性解，给出锚杆在计算条件下的有效锚固长度约为2m，并对影响锚杆有效锚固长度的因素进行了分析。作者“假设水泥浆体与岩体为性质相同的弹性材料”，“锚杆与水泥浆体之间的变形处于弹性状态”，从而“可得锚杆所受的剪应力沿杆体分布”状态为一以锚杆长度 z 为变量的指数函数。这里作者研究的是第1界面问题。

河南科技大学王霞等采用ANSYS程序对“锚索锚固段摩阻力分布及扩散规律”进行了模拟研究^[17]（2004）。这是对第2界面剪应力分布及其衰减规律所作研究的为数不多的例子之一。但作者所给出由其他人测得的两个试验结果，其中一个为第1界面上的“锚杆轴力和摩阻力沿锚固段长度的分布”，另一个则是邻近第2界面上“锚固体与孔壁之间剪应力”分布，而剪应力的衰减特性则无可资验证的试验结果和结论。

国家电力公司昆明勘测设计研究院研究所赵华等报导了“小湾水电站岩锚支护试验研究”^[18]（2002），其中对锚索内锚段应力进行了测试。测试方法为采用加拿大ROCTEST公司进口的钢缆测力计和电阻应变片对锚索内锚固段和自由段的应力分布规律进行量测。这里试验

研究的对象和方法显然与文献[2]同,即邻近第2界面问题。

西北勘测设计院谷建国等报导,为提高李家峡水电站双曲拱坝左岸拱肩安全度,开展了“特大吨位预应力锚索试验研究”^[19](2002)。研究方法是在钢绞线上粘贴应变片,研究的对象是第1界面。

云南大朝山水电有限责任公司甘文鸿报导^[20](2002)的大朝山水电站地下洞室锚杆、锚索的测试方法和研究对象与文献[19]同。

煤炭科学研究总院闫莫明研究员提出了单束锚索树脂锚固条件下锚固段长度的确定方法^[21](2002)。所给出的树脂锚固剂与钢绞线的贴结(即第1界面)长度、树脂锚固剂与钻孔岩壁的贴结(即第2界面)长度公式与我国现行规范给出的基本一致,它建立在平均粘结强度基础之上。

大连理工大学贾金青博士引述了程良奎给出的一个计算锚杆抗拔阻力转而计算第2界面剪应力的公式^[22](2004)。该公式是对平均剪切强度公式的有益修正。

大约在上世纪80年代中期(书损不详),我国煤炭科学研究院出版了一本名为《锚杆技术及应用》的书。该书由段振西审阅,淮南矿务局、冶金建筑研究总院等许多单位提供了宝贵资料^[23](约1975)。书中讨论了“杆体与锚固剂之间的锚固力与粘结力”、“锚固剂与锚固体(围岩、混凝土)之间的锚固力与粘结力”、“锚固体出现锥形剪切破坏的可能性”。作者指出:“粘结强度的测定,一般均是通过拉拔得到锚固力,再除以粘结面的总面积而得出,它是一个平均值。假定粘结力沿整个锚长内为均匀分布”。可以认为,这是这个时期有代表性的专著有代表性的观点。

西安冶金建筑学院赵树德在上世纪80年代初发表了一篇名为“岩洞工程短锚支护的探讨”文章,强调对于全长锚固的砂浆锚杆来说,其锚固力并不随锚杆长度增长而增大。拉拔试验结果是赵文的主要依据之一。赵文还指

出最佳锚固长度 $L=(20\sim30)d$,这里 d 为锚孔孔径。作者对试验现象的敏锐观察甚为难得,尽管还未涉及第2、第3界面剪应力分布状态及转移特性等问题。

中国工程院院士、原空军工程学院郑颖人等^[24](1982)为确定由于锚杆受拉而增加的洞周附加抗力 σ_b 时指出:“必须先弄清锚杆所受拉力。楔缝式和胀壳式锚杆所受拉力各处都相同,但粘结式锚杆各段受力不同,靠近洞壁段受力大,反之则小,这里只算平均拉力。”郑文可说明两点:①.第2界面剪应力分布不均匀;②.当时也是按平均值处理的。

铁道部专业设计院撰文^[25](1983)提出了一个“选定锚杆直径通常以锚杆能承受最大拉力或承载来确定”的方法。该方法所述锚杆与围岩间的剪切强度,即为第2界面上的平均剪切强度。

同济大学地下建筑教研室撰文^[26](1976)提出了一个根据砂浆与钢筋的粘结力计算锚固长度的方法,该方法假定第1界面粘结强度为平均强度。

为探索锚喷结构有关理论及合理的设计施工方法,国家建委于1972年8月组织水电部水电六局,水电部东北电力设计院,四川省电力建设三公司,交通部科研院西南研究所和同济大学等单位组成课题组开展研究工作。该课题组于1973年5月提出了一本当时在国内很有影响的科技报告:《锚喷支护结构设计理论及施工方法调查汇编》^[27]。其中所提出锚杆与砂浆粘结强度计算公式与文献[25]完全相同。

文献[28](1986)总结归纳了我国水电部门在1986年以前近20年间研究与应用预应力锚索的成果及经验。其中在锚索设计部分,提出了两个计算内锚固段锚固长度 L_m 的公式,一个是按设计荷载校核钢筋或钢绞线与砂浆之间的握裹力是否满足要求;另一个是按钢筋或钢绞线被拉断的极限荷载与总握裹力平衡而建立的。这两个公式中的粘结力均是按平均值考虑的,未涉及第2、第3界面问题。作者列举了:(1)

山水库大坝工程；(2)麻石大坝工程；(3)双牌水库大头坝工程；(4)白山大坝工程；(5)南河大坝墩锚工程；(6)葛州坝闸墩加固工程；(7)丰满坝基锚固工程；(8)丰满大坝西导流壁锚固工程；(9)250工程集渣坑边墙加固工程；(10)某40米跨洞库拱部加固工程；(11)碧口电站隧道加固工程；(12)1170大跨(24米)洞室锚固工程；(13)白山电站地下厂房下流边墙锚固工程；(14)小浪底坝址大跨度隧道加固工程；(15)310工程进水口山体加固工程中预应力锚索的设计、施工与监测情况。在这些工程中完成了大量的试验研究,但均未对第2、第3界面剪应力进行测试,只在(4)、(5)、(8)、(11)和(13)项工程中测试了锚索的第1界面轴向应变分布规律。上述情况大体反映了这个时期我国关于锚索设计与研究工作的主要特点。

2001年12月中国水利水电出版社出版了由水利水电规划设计总院编撰的《预应力锚固技术》^[29]一书。该书是对我国应用预应力锚索技术以来的三十余年间(1964~2001)的研究与实践的全面总结,其中也涉及到英、美、日、捷克等国的相关成果和经验。该书第一章第四节给出了与我国现行规范一致的计算第2界面平均剪应力公式;在第二章第二节则给出了:①以第1界面平均剪应力为基础的按胶结材料同钢丝或钢绞线握裹力决定的计算内锚固段长度的公式;②以第2界面平均剪应力为基础的按胶结材料同岩石孔壁的粘聚力决定的计算内锚固段长度的公式。上述①、②两个公式与文献[28]提出的相同。

该书在提出预应力锚索“内锚固段摩阻力分布规律”之后,有如下一段文字:

“实际上,胶结材料同孔壁之间的摩阻力并不是均匀分布的,许多研究和试验成果表明,锚固段沿孔壁的剪应力呈倒三角形分布,其分布是不均匀的,而沿锚固段长度迅速递减,并不是锚固段越大,其抗拔力越大,当锚固段长到一定程度,拉拔力提高并不显著,所

以增加锚固段长度并不是提高设计张拉力的好办法。正因为如此,国际预应力混凝土协会实用规范(FIP)也特别规定锚固长度不宜超过10m”。

3. 国(境)外研究进展

国(境)外对锚固类结构诸界面剪应力分布规律的研究十分重视,业已做了大量的试验研究工作,其起步也远早于我国,并已初步形成了一些计算方法。只不过这些方法并不完全统一,反映出对该问题的研究还在继续深入进行。

对于注浆锚杆,据国外资料介绍,粘性土中第2界面上剪应力^[30](2000)可表示为 $\tau_u = a s_u$,其中 s_u 为土的不排水抗剪强度; a 为粘结系数,取 $a = 0.3 \sim 0.75$,对硬土取低值。对于低压注浆锚杆,粘结强度与有效注浆压力有关,在无粘性砂土中,取 $\tau_u = P A t g \phi$,其中 A 为小于1的无量纲经验系数; P 为有效注浆压力;具体应用 P 值时通常限制在3.5bar或0.46Hbar以内; H 为复土深度(单位为m); ϕ 为无粘性土内摩擦角。

击入钉是土钉的一种特殊型式,它是靠动力将钉体击入土层中并完全靠摩阻力对不稳定土层进行加固支护的,因而无第2界面。我国对击入钉第1界面剪应力分布研究甚少。国外对击入钉的 τ_u 值有时按下 $\tau_u = \gamma H \mu^*$ 计算,其中: H 为复土深度; γ 为重度; μ^* 为视摩擦系数,在砂土中当复土较深时 $\mu^* = t g \phi$,而在复土较浅时,由于土钉受拉时引起土体的剪胀效应,可产生较高的横向土压力,所以 μ^* 可大于1。当复土小于6m时, μ^* 可增至2,应用时建议不大于1.5。对于无粘性土中的注浆钉,常用压力灌浆来防止孔壁土体松动出现空洞并压密土体,有报导此时 μ^* 值可高到3。但也有资料认为注浆孔壁界面上的横向土压力在不同埋深处均相近。对于粘性土,常有资料取界面粘结强度为 $\tau_u = \gamma H \cdot t g \phi + c$,其中 c 为介质内聚力。但法国的研究结论认为,界面粘结强度与土钉的埋置深度无关。陈肇元院士分析其原因可能是视摩擦系数随深度减小,与正应力随深度增大正好

相反,二者的影响互相抵消。法国对注浆土钉第2界面粘结性能做过比较系统的研究,并将粘结强度与用旁压仪测出的极限压力相联系,但结果也较为离散。

上述工作反映了国外锚杆、土钉在相应地层中的试验结果和经验,非常可贵。不过,都是基于平均剪应力的概念和方法。

美国交通部联邦公路总局的FHWA—SA—96—069R号报告认为:“土钉内部钢筋段的局部平衡表明,沿土钉全长拉力的变化率等于该点单位长度上作用的剪力,用数学表示为 $dT/dL=\pi D \tau=Q$,其中: dT 为长度 dL 上土钉拉力的变化; D 为土钉钻孔孔径(钢筋和水泥浆体的外径); τ 为水泥浆—土体界面上作用的剪应力; Q 为土钉单位长度的作用剪力(抗拔阻力)”^[31](2000)。这个式子在 $dL \rightarrow 0$ 时求得的剪力从概念上看是无隙可击的,但未知与零值点和浆体局部破坏部位同时发生转移的极限剪应力为几何,而且因为杆体过短也无法测得;当 dL 等于锚固段长度时就又回到了平均剪应力的概念,同我国现行的规范相同。显然,这里研究的是第2界面剪应力问题,未涉及第1、第3界面。

实际上美国的设计依据并不以此概念和相应的计算为主,而是以当地经验和实践来估算设计中使用的土钉抗拔阻力。美国在题为《锚杆》,报告号为FHWA/RD—82/047^[32](1982);《永久地层锚杆》,报告号为FHWA—DP—68—IR^[33](1988);《用于公路边坡稳定和开挖时土钉加固》,报告号为FHWA—RD—89—198^[34](1991);《土钉加固现场检验员手册》,报告号为FHWA—SA—93—068^[35](1994)的美国联邦公路总局的几个技术标准中均概述了估算土层锚杆和土钉抗拔阻力以试验为基础的设计指标值。但这些指标值均为平均值。

法国Clouterre研究项目对土钉第2界面粘结性能做过比较系统的研究,并把土钉抗拔试验结果概括成为材料种类和设置技术的函数^[36](1991)。对每种材料类型和施工方法来说,

单位极限粘结应力表示为旁压仪极限压力的函数。旁压仪被广泛用于法国以便初步估算极限钉—土抗拔阻力。然而,这个抗拔阻力是单位粘结应力与钉体长度的乘积,是一个平均值。

德国斯图加特大学的R.Eligehausen, B. Lehr和J.Meszaros等为了研究粘结锚杆的性能^[37](2003),调查破坏荷载的主要影响因素,进行了1200次单根锚杆和350次锚杆组的抗拉试验,研究了安装方法(如洗孔、混凝土湿度)的敏感性,以及混凝土中存在的裂缝对锚杆粘结性能的影响程度,提出了多个计算单锚和群锚粘结性能经验公式。不过,对锚杆诸界面均未布点进行量测。由此不难看出,这是基于诸界面平均粘结性能认识指导的结果。

文献[38, 39, 40](1997, 1978, 1998)研究了温度对粘结强度的影响,指出粘结强度随温度的增加而有所降低。强度的降低与产品有关。对于乙烯树脂和不饱和聚脂树脂,80℃时的粘结强度约为20℃时的0.7倍。文献[41](1994)还研究了冻融循环对粘结锚杆M12蠕变性能的影响。这些工作对我国有一定的借鉴意义,虽然它们只涉及峰值粘结强度而未涉及其转移特性。

Eligehausen、Mall é e、Rehm^[41](1994)、Cook^[42](1993)和其他研究者还给出了粘结锚杆的设计模型。斯图加特大学对此进一步作了开发,认为用它可计算粘结锚杆加固在中心受拉荷载作用下的破坏荷载。该模型描述的是第1界面问题,并将粘结强度取为平均值。

法国Marc Panet^[44](2003)研究提出了被动锚杆加固岩体的两种实用设计方法,即:①.单根被动锚杆对单个不连续面的加固设计方法;②.把被加固介质视为复合材料,并分析其力学性能。这两种设计方法都是以第2界面上所提供的设计锚固力“是足够的”为前提,从而避免了对诸界面剪应力分布形态、剪应力大小及其极限状态转移的讨论。

澳大利亚Marc A. Woodward采用BS8081:1989《英国地锚施工标准规范》,于1997年,在

位于西澳大利亚黑德兰港的耐而森BHP铁矿扩大生产能力的建设项目(CEP)中,进行了预应力锚索的设计、试验、监测和施工方法研究,特别是对内锚段注浆体与地层之间剪应力(即第2界面剪应力)进行了多次相关测试并用于正式设计^[45](2003)。作者指出:“达到800kN加载时锚索试验证明,注浆体与地层之间的粘结应力至少为424KPa”;此时,“锚索标准直径为150mm”,“锚固段长度为4m”。笔者认为,这个粘结应力值正是按照平均剪应力公式算出来的,作者实际上也只测试了各级张拉荷载和对应的拉伸值。作者指出:“现行澳大利亚规范如《Austrroads桥梁设计规范》和AS3600—1997《混凝土结构》中有关锚索设计、施工和试验方面的内容非常有限”才采用英国规范的。这表明,不仅澳大利亚,而且英国所采用确定有关锚索第2界面剪应力的概念和方法,与我国现行规范相同。

日本S. Sakurai对锚杆加固节理岩体的机理进行了室内试验研究^[46](2003)。室内试验的试样由熟石膏制作而成,其中含有不连续面。不连续面由在三维方向上随机放置的许多薄纸片形成。用这些试样模拟节理高度发育的岩体。岩石锚杆由安装于试样内的铜棒模拟,铜棒完全与试样粘结在一起。试验时,在下述三种情形下获得了锚杆轴向应力与轴向应变的关系:①无锚杆;②铜锚杆;③熟石膏锚杆。熟石膏锚杆由熟石膏制作。其制作方法为:在试样中钻孔,然后向孔内注入熟石膏形成。这种特殊的试验使得铜锚杆和熟石膏锚杆都缺失第2界面,类似于击入钉的情形(钉孔与钉体直径相等),与一般注浆锚杆、注浆土钉和锚索的诸界面受力特点尚有较大差异。

英国M. J. Turner采用一种高强、价廉、防腐、抗弯折和抗撕裂性能优异的Paraweb聚脂织带材料替代岩土工程中大量使用的钢筋土钉,并对单个土钉的水泥浆体与土界面上的粘结应力进行了测试^[47](2003)。用永久土钉加固的试验边坡是根据《英国增强土/加筋土及其他填料

施工标准》(BS8006:1995)规定的方法,并采用具有专利权的加筋土/土钉分析程序进行设计的。测试采用了两种方法:①在坡面和加载块上建立测点进行光学测量;②在与①相对应的两个位置上用水平变形测定器测量坡面的水平位移。采用液压千斤顶对永久土钉和常规土钉进行了加载试验,以检验其性能与设计要求是否一致。作者“对这两种形式的土钉的水泥浆与土界面上的设计粘结应力都进行了测试。界面上达到的最大粘结应力为41kN/m²,并且没有损伤和位移”。这里所谓“最大粘结应力”按照所述测试方法为第2界面最大平均粘结应力,并用同文献[45]一样的公式算出来的。

德国R. Eligehausen和H. Spieth为研究锚杆的粘结性能,用单根钢筋进行了不同安装情况、不同厚度握裹层的拉拔试验^[48](2003)。试验介质为混凝土。试验采用两种注浆方法。这两种方法所用浆液均含有乙烯基树脂和水泥混合物。在混凝土试件表面粘贴应变片用以测量其变形。为增大应变片与混凝土之间的匹配性,在混凝土试件表面涂了两层聚四氟乙烯底胶。用液压机对锚杆钢筋进行拉拔。作者指出:“为简化起见,把混凝土握裹层的平均粘结强度用直线连接起来。但粘结强度随握裹层厚度的增加可能是不同的。”由此可知,这里所谓的界面粘结强度同样是基于平均值的概念和方法。

台湾chunghua大学Wu J等采用螺纹钢进行了粉细砂介质中击入钉与注浆钉界面上剪应力量值的室内对比试验,所得剪应力前者比后者低30%^[49](2004)。计算采用界面最大剪应力的公式与我国内地相关规范所采用的完全相同,只是符号不同而已。

日本Saga大学的Chai X. J.等为研究水泥土中水泥含量与注浆土钉(第2)界面上剪应力关系,在砂质粘土中掺入不同比例的水泥(从3.5%~35%),进行了系列室内试验研究^[50](2004),其中界面平均抗剪强度公式与我国现行规范相同。

(待续)