8. 玄武岩纤维在震后结构加固修复中应用的突出优势

吴　刚[1]　吴智深[1,2]　吕志涛[1]　魏洪昌[3]　胡昱奇[4]

（1 东南大学城市工程科学国际研究中心，南京　210096；
2 日本茨城大学工学部，日立 316－8511；3 北京特希达科技集团，
北京　100011；4 浙江石金玄武岩纤维有限公司，横店　322118）

摘　要：玄武岩纤维作为一种新型的建筑材料，在土木工程领域有广阔的应用前景。本文主要介绍了连续玄武岩纤维在震后结构加固修复中的突出优势，重点为作者课题组最新开发的与玄武岩纤维相关的几个结构加固与修复关键技术，包括预应力碳、玄武岩纤维混杂布抗弯加固混凝土结构，预应力碳、玄武岩纤维混杂筋抗弯加固混凝土结构，玄武岩纤维约束抗震加固柱、桥墩，玄武岩纤维网格加固隧道和水下结构，可用于移动式房屋和临时桥面板的 FRP—钢—AAC 复合夹层板，玄武岩纤维—钢筋复合筋（SFCB 筋）及其嵌入式加固技术等，同时，总结了玄武岩纤维用于加固改造的成熟条件，指出玄武岩纤维作为一种新型的建筑材料发展的几点建议。

关键词：玄武岩纤维；预应力；混杂；抗震加固；复合夹层板；复合筋；嵌入式加固

1　引言

四川省汶川县 8.0 级特大地震，是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最广、损伤最为惨重的一次地震。地震对房屋、桥梁、隧道、公路、大坝等基础设施造成了非常严重的破坏，以交通基础设施为例，地震造成损坏的高速公里 200km、国省干线 3500km、农村公路 1.8 万 km，损伤桥梁 2900 多座，15.2 万延米，损伤隧道 3.7 万延米。仅交通基础设施损失就高达 580 亿元，接近前三年四川省交通建设完成投资的总和。初步估计恢复重建资金上万亿元。另一方面，这次地震后，结构的抗震安全性能将进一步得到重视，相关部门已经在全国范围优先对中小学校等重要建筑进行抗震普查，对不符合抗震要求的建筑进行加固，排除抗震安全隐患。加固要求安全、经济、快速，加固技术很多，本文重点介绍连续玄武岩纤维在震后结构加固修复中的突出优势。

2　日本阪神地震与碳纤维加固技术

FRP 早期首先应用于航天工业，在土木工程中的应用始于 20 世纪 60 年代的美国，但在其后的 20 多年里，未能得到很大的发展，在美国洛杉机和日本神户地震后，大量的采

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用碳纤维（CFRP）和芳纶纤维（AFRP）进行抗震修复和加固，实现了高性能纤维在建筑工程和结构领域中应用的重大突破，并迅速地在工业领域中扩展。图1给出了日本阪神地震（1995年1月）前后日本碳纤维用量的变化，震后1996年的碳纤维用量是震前1994年的十几倍之多。

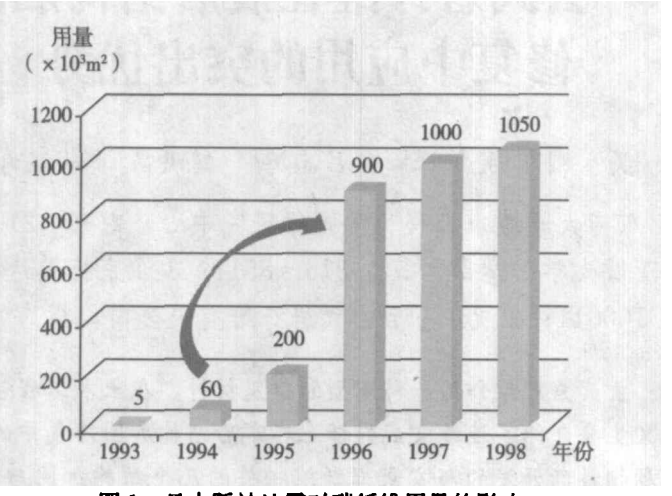


图1 日本阪神地震对碳纤维用量的影响

3 玄武岩纤维及其与其他纤维材料的比较[1]~[6]

目前工程常用的纤维增强聚合物（FRP）包括碳纤维（CFRP）、芳纶纤维（AFRP）和玻璃纤维（GFRP），这些纤维在结构中的应用均存在一些不足之处：①碳纤维：综合性能理想，但价格太高，原丝技术基本受国外垄断和控制；②玻璃纤维：价格低，已国产化，但弹性模量低，尤其耐久性还不太理想；③芳纶纤维：强度和弹性模量均较高，特别是有极好的韧性及抗冲击性能，但耐潮湿和耐紫外线辐射性差，压缩强度和模量低，另外，价格也较高，原丝技术也基本受国外垄断和控制。

玄武岩纤维是以火山岩为原料经1500℃高温熔融后快速拉制而成的连续纤维，以玄武岩纤维为增强体可制成各种形式的玄武岩复合材料（BFRP），相对于CFRP、GFRP和AFRP，BFRP具有很多优点和特殊的性能：以天然岩石为原料，是纯天然无机材料，具有优异的力学和极为理想的耐久性，对各种环境的适应性强；原材料丰富，具有自主知识产权，正在逐步国产化；成本低，目前价格大约是碳纤维的1/8～1/5左右，且有望在近期接近玻璃纤维水平，可突破FRP应用的价格瓶颈；极限应变大，延性好，尤其适用于结构的抗震；另外，其抗疲劳性能好，与树脂的结合力强，与金属、塑料、碳纤维等材料有着良好的兼容性。表1给出了BFRP与其他纤维材料的力学性能比较，可以看出，其强度约为CFRP的2/3，高于GFRP、AFRP和Dyneema纤维，伸长率与高延性的Dyneema纤维相当。当然，玄武岩纤维也有其缺点，如较脆，弹性模量也不是特别的高等，尤其对于抗弯加固，需要重点解决其弹性模量低的缺点，我们建议可通过与其他材料（如高弹性模量或高强度的碳纤维、铝合金、钢等）的混杂或者复合、施加预应力等进行改善。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

玄武岩纤维与其他纤维材料的比较 表1

纤维布种类	厚度（mm）	设计强度（MPa）	弹性模量（GPa）	伸长率（%）
高强度碳纤维	0.111	3550	235	1.5
高弹模碳纤维	0.143	2000	550	0.4
芳纶纤维	0.193	2100	120	1.8
玻璃纤维	0.118	1500	74	2
PBO纤维	0.128	3500	235	1.5
Dyneema纤维	0.258	1800	60	3
玄武岩纤维	0.119	2400	90	2.7

4 基于玄武岩纤维的若干新材料和加固新技术

4.1 预应力碳、玄武岩纤维混杂布抗弯加固混凝土结构[7]~[10]

粘贴FRP的加固方法已经得到了较为广泛的应用，为进一步保证加固对梁使用阶段性能的提高以及保证加固材料的充分有效利用，最近，预应力FRP加固技术得到了重视，但目前是研究多、应用少，主要是存在一些瓶颈问题。例如，将连续纤维材料含浸硬化后的FRP复合材料粘贴在表面存在一定凹凸的混凝土表面时，即使在试验室也很难得到理想的粘结性能，而且含浸后的FRP因缺乏柔韧性而不能弯曲从而增加了运输等方面的难度。因而，将无含浸的纤维布拉伸后用树脂粘贴在结构上的加固增强技术可以作为解决上述问题的一个有效方法，课题组开发了相应的在无含浸状态下的张拉粘贴技术，预先对纤维布间隔粘贴提高其张拉性能（图2）。但是，大量试验研究发现对于长度为2m的普通碳纤维布，当张拉到其含浸布的张拉强度的10%时，便开始出现逐渐的纤维断裂，当拉伸到其含浸布张拉强度的30%～40%时整个纤维布即会断裂，并随着试件长度的增加其张拉强度还进一步的降低。通过将碳纤维布和高延性玄武岩纤维布进行混杂，利用普通高延性纤维布较高的极限应变和良好延性，在碳纤维受力逐渐出现断裂时，高延性纤维布处在相对比较低的应力状态，还具有足够的被张拉余量，可以充分承担由于碳纤维逐渐断裂所转移的载荷和产生的冲击，碳纤维的微观断裂及随后所出现的断裂快速连续扩展可以有效地得到控制，从而有效地提高无含浸碳纤维布的张拉性能，能达到其设计值的60%以上，极限应变达到9000～10000με，且与高延性纤维的混杂比没有明显的依存关系。据此，可利用预应力碳、玄武岩纤维混杂布抗弯加固，该预应力加固方法简单实用，解决了含浸布运输不方便，而无含浸纤维布张拉应力低的缺点，所用的高延性纤维布成本低廉，其性能与碳

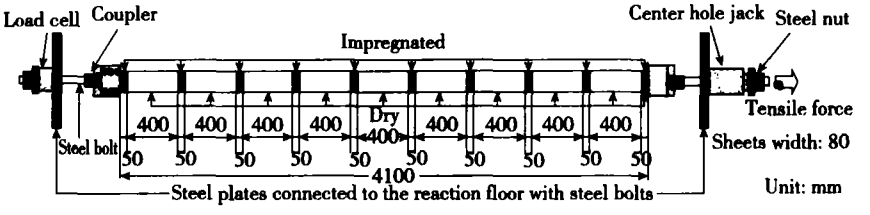


图2 无含浸状态下的张拉粘贴技术（4m 9个分区）

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

纤维类似，价格比碳纤维便宜很多，另外，课题组提出了锚具嵌入法、外置锚具法、逐步减小被张拉 FRP 的层数等多种端部锚固方法，大大改善了 FRP 片材预应力外粘结加固技术中的端部应力集中问题。张拉控制应力和端部锚固应力集中等相关问题的解决，为预应力 FRP 片材加固技术广泛应用于土建、交通及能源结构加固等领域打下坚实的基础。

4.2 预应力碳、玄武岩纤维混杂筋抗弯加固混凝土结构[10][11]

近来年，体外 FRP 索加固结构已经得到重视，但还存在以下的不足：（1）对锚固性能要求很高，锚具及锚固区有特殊要求，有时候锚具还不便于设置；（2）张拉时要求在梁端部有较大的作业空间，施工工艺较为复杂；（3）为有效施加预应力、保证加固效果，需在梁上设置转向装置，增大了摩擦力损失；（4）若不采取特殊措施，易于被人为破坏，对重大工程的加固时存在安全隐患；（5）即使有足够的端部锚固，张拉预应力将在端部造成很大的应力集中，给端部造成很大的负担；（6）FRP 索材与结构无粘结，加固效果有限。

针对以上的缺点，课题组提出了预应力碳、玄武岩纤维混杂筋嵌入式抗弯加固混凝土结构。首先开发出一套专用的、轻巧的张拉设备和完善的施工工艺，张拉非常方便，能在 24 小时完成所有的过程（图 3、图 4）；其次，针对 CFRP 筋强度高、弹性模量大、相对价格高，玄武岩纤维国产化程度高，价格便宜等特点，提出了将碳纤维和玄武岩纤维混杂配置制成混杂复合筋，理论和试验证明，筋材的初期刚度能够随设计需求进行有效设计，而且筋材中低延性、高弹性模量的纤维（CFRP）先于高延性低弹性模量的纤维（BFRP）断裂，即产生类似于钢筋屈服的“伪延性”。经过这种混杂之后，试验中还发现了低延性高弹性模量的纤维（CFRP）的断裂应变大于纯 CFRP 筋的断裂应变，即出现所谓的“混杂正效应”。

对预应力嵌入式加固混凝土梁的抗弯性能试验研究表明，预应力的施加可以充分利用纤维高强度的优点，提高混凝土梁的抗弯刚度，延缓裂缝的出现和发展，降低结构的挠度；利用碳纤维与玄武岩纤维的混杂筋加固，相对于纯碳纤维筋加固，可以降低成本、增加延性，相对于玄武岩纤维筋加固，可以增加梁的刚度。

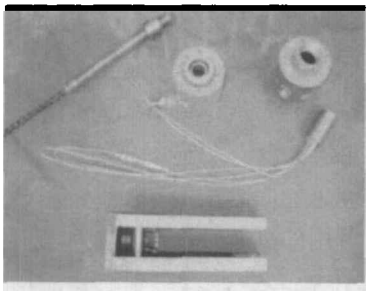


图 3 张拉设备



图 4 实际张拉图

4.3 玄武岩纤维约束抗震加固柱、桥墩[12]~[14]

针对钢筋混凝土墩柱抗剪承载力的提高、抗震性能的改善以及震后结构损伤的修复，广大研究者一直在寻求不同的加固材料，最早，用作约束材料的主要是钢板、钢丝绳等；日本阪神地震以后，FRP 约束抗震加固结构得到广泛应用，其具有轻质、高强、抗腐蚀及施工方便、快捷等特点，但是，FRP 也具有不同的缺陷，例如 CFRP 较高的价格，GFRP

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较差的比强度、化学稳定性，这些缺陷制约着这一方法的推广应用，连续玄武岩纤维为这一方法提供了新的发展空间，其不仅具有我国自主知识产权，价格便宜，而且延性比碳纤维好，耐久性理想，特别适合用于约束抗震加固。

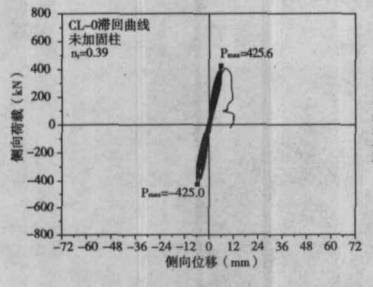
为了验证 BFRP 抗震加固的效果，课题组对 BFRP 与 CFRP 缠绕加固混凝土柱进行了对比试验。图 5、图 6 分别给出了未加固柱 CL－0、4.5 层 CFRP 加固柱 CL－4.5C 和玄武岩丝束缠绕加固柱 CL－BF 的破坏模式和滞回曲线。可以看出：未加固柱过早发生剪切破坏，极限位移极小，延性极差，耗能能力低；加固柱 CL－4.5C 和 CL－BF 均发生弯曲破坏，延性很好，滞回环饱满，耗能能力强；比较 CL－4.5C 与 CL－BF，两者的滞回曲线比较接近。结果表明，BFRP 缠绕加固能够显著提高混凝土柱的抗剪能力，转变试件的破坏形态，在相近侧向约束刚度下，连续玄武岩纤维加固柱对承载力的提高及延性、耗能等结构性能的改善都能够达到、甚至超过 CFRP 加固柱，而前者具有更低的价格，故在约束加固提高混凝土柱抗震性能方面玄武岩纤维是首选的 FRP 材料。

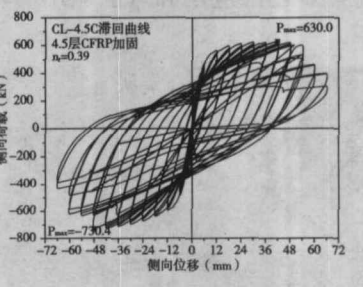






图 5　各柱破坏模式





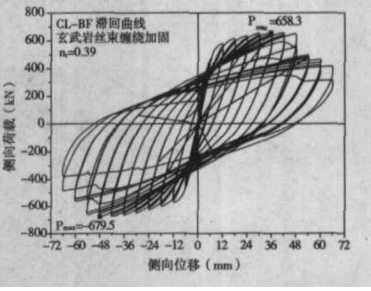


图 6　各柱滞回曲线

从汶川地震的大量桥梁、房屋破坏情况来看，结构中竖向结构承载力和延性的保证对结构的安全至关重要，如图 7 为绵竹某立交桥端部塑性铰区约束不足在地震作用下的破坏情况，图 8 为都江堰某框架柱端部的破坏，柱端部出现非常明显的塑性铰，强柱弱梁无法得到保证。所以，对桥梁中的桥墩和建筑中的柱子的抗震性能加固显得尤其重要，BFRP 为我们提供了墩柱抗震加固的又一种新的材料选择，其具有与 CFRP 相似的墩柱抗震加固效果，有着耐腐蚀、质量轻、施工方便、快捷等优点，更具有成本低、价格便宜等独特的优势，值得在工程中大力推广应用。用 BFRP 加固普查后需要提高抗震性能的混凝土柱，修复震后有损伤的结构，可以提高结构的承载力与延性，实现大震不倒的要求，保证结构的抗震性能。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

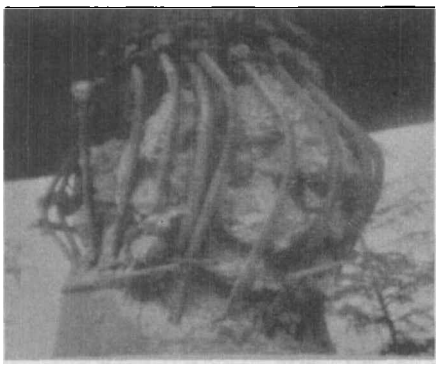


图 7 绵竹某立交桥端部破坏



图 8 都江堰某框架柱端部的破坏

4.4 玄武岩纤维网格加固隧道和水下结构[15]

网格状 FRP 是将碳纤维、玻璃纤维或玄武岩纤维等高性能连续纤维浸渍于耐腐蚀性良好的树脂中，形成整体的网格状材料，图 9 所示为网格状 BFRP，网格状 FRP 材料特性主要有：(1) 轻而薄。材料轻，网格交叉部位又在同一面，因此其断面比钢筋断面薄，易于搬运。(2) 耐久性好。材料由纤维和耐腐蚀性良好的树脂复合而成，不会发生腐蚀，在寒冷地带耐寒，沿海地区抗盐，故耐久性好。(3) 加固效果显著。连续强化纤维双向分布，抗粘结滑移性能很好，能使材料高强特性得到更好的发挥。网格状 FRP 加固工艺是在隧道、桥墩及梁等已有结构物混凝土的表面布设纤维网格，然后利用锚栓和聚合物水泥砂浆等与原有混凝土一体化，从而提高结构的承载能力及耐久性。日本从 1986 年开始就有了网格状 FRP 应用的工程实例，以后工程量逐年增加，国内的应用还极少，玄武岩纤维网格结合了 FRP 与网格的特点，已经应用和可能应用的领域包括：

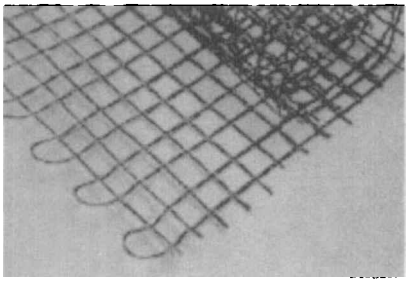


图 9 BFRP 网格

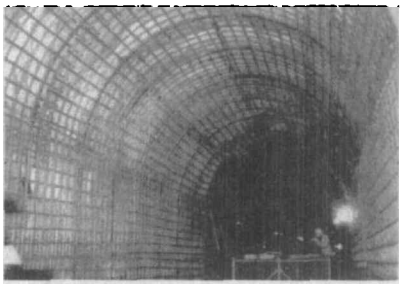


图 10 FRP 网格加固隧道

(1) 隧道加固

四川地震造成多处隧道发生顶部大面积垮塌。现有隧道内表面加固方法主要有钢板补强和纤维补强（主要是玻璃纤维和碳纤维）两种，但由于钢板补强施工工艺较为复杂，造价较高，而承载力提高有限，而纤维补强则具有质轻、易于施工等特点，因此纤维补强优于钢板补强。目前，粘贴碳纤维用于隧道裂缝整治已有相应实例，但由于隧道顶部具有的曲面几何特性，降低了纤维布在实际工程中的应用效果。而对于 FRP 网格，厂家能够制作出适合各种形状和轮廓，故常被用于隧道内壁的翻新和修复，如图 10 所示。由于隧道顶部混凝土结构老化、混凝土脱落，用网格状 BFRP 进行修复加固很有优势。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（2）水下加固

由于水下结构的特殊性，纤维材料的粘结和养护问题需要得到更多的关注。根据以往的研究在水下使用 FRP 布很难均匀地粘贴在混凝土的表面，而采用 FRP 网格就能有效地克服这个问题。为此，吴智深等人还开发出一套完整的水下结构加固技术，如图 11 所示。

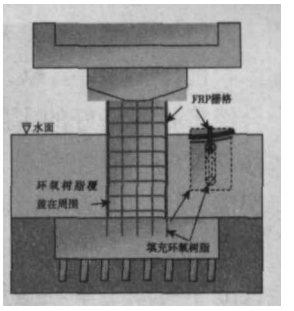


图 11　FRP 网格加固水下结构

国内碳纤维网格应用较少，主要是因为价格高，目前为止，我国的碳纤维原丝主要依赖进口，受外国垄断，CFRP 网格价格必然也很高。要突破网格状 FRP 在工程中大量应用的关键问题是开发出国产化材料，但是，芳纶纤维和玻璃纤维由于耐久性等原因用来制作网格状材料并不太合适，而玄武岩纤维为此提供了可能。因此，若国内相关厂家能够用玄武岩纤维制作出网格状 FRP，应该可以很快在工程中得到推广应用。

4.5　可用于移动式房屋和临时桥面板的 FRP—钢—AAC 复合夹层板[16]

复合材料或复合结构通过两种以上材料复合获得原单组分材料所不具备的新的优异性能，且可设计性强，故在土木工程等领域中应用广泛，典型之一是由上下面板、芯材组成的夹层结构，针对现有各种夹层结构缺点的思考，笔者提出了 FRP—钢—AAC 复合夹层板，如图 12（*a*）、（*b*）所示，其特点有：①轻，主材都是轻质材料（钢材比例很小）；②力学性能优异，纤维混杂效应以及纤维与钢的复合效应保证了优异的力学性能；③耗能理想，多孔的 AAC 芯材和不同材料的混杂与复合保证了理想的耗能能力；④整体性好，FRP 与 AAC 以及树脂相容性都很好，再加上真空辅助 RTM 成型技术的应用，故界面粘结性能理想；⑤可设计性强，设计人员可自由改变参数来优化设计；⑥保温性能好，AAC 导热系数只有普通混凝土 1/10 左右，建造的房屋将是节能的；⑦突出的物理性能，隔声效果好、防火、绝热、环境友好、气候适应性强、耐久性好等；⑧独特的军事功能，除了能良好吸收冲击波外，可以在军事伪装工程中得到应用；⑨价格低，AAC 的价格比现有其他芯材的价格都要低得多；⑩原材料及夹层结构都能工业化生产。FRP－AAC 夹层板的对比试验结果表明（如图 12*c*），FRP－AAC 夹层板能够明显提高 AAC 板构件的抗弯刚度，大幅度增加 AAC 板抗弯承载力。可以预见，随着面板和芯材厚度加大、VARTM 工艺的采用、纤维混杂以及钢与纤维复合等创新思路的进一步集成，夹层板性能会更加理想，其可广泛应用于组装式和移动式房屋以及桥面板等。

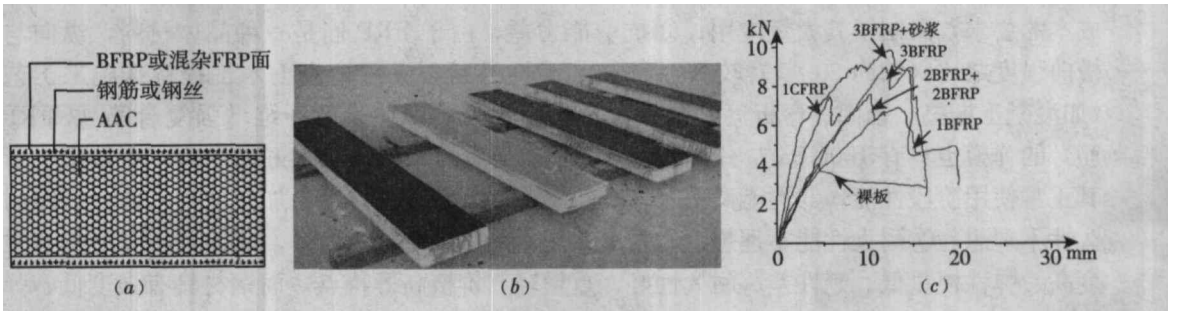


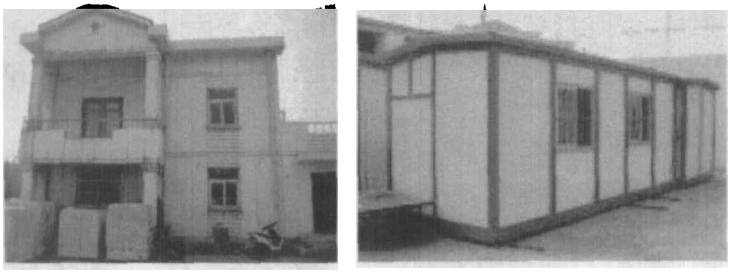
图 12　FRP—钢—AAC 复合夹层板

（*a*）截面形式；（*b*）实图；（*c*）荷载—位移曲线

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

（1）组装式和移动式房屋

FRP—钢—AAC夹层板可用来建造组装式的永久性房屋（图13*a*），如：①节能及综合经济指标良好的多层民用房屋；②长期处于高寒地冻环境的边防哨所，也可以用来建造移动式的临时性房屋（图14*b*）：汶川地震造成四川省城市的房屋536.25万间倒塌，损坏房屋2142.66万间，倒房100万户，房屋严重受损482万户。FRP—钢—AAC夹层板可用来建造安置灾民的临时性用房和救灾人员的临时住所；③可用于野战临时工事，能满足现代战争野战工事轻型化、机动化、标准化等要求。



（*a*）　　（*b*）

图13　FRP—钢—AAC夹层板可能的应用

（*a*）永久性房屋；（*b*）移动式临时性房屋

（2）桥面板

传统的钢筋混凝土桥面板劣化现象很严重，据统计美国大约有929万m^2的混凝土桥面需要更换。国内外已经有一些应用的FRP桥面板（主要是GFRP）还存在价格、耐久性以及结构刚度等方面的瓶颈问题，而FRP—钢—AAC复合新型桥面板有望打破以上瓶颈，特别是其高强且自重轻，可大幅度减少桥面恒载，现场安装快速，用于桥梁快速修复可大大减小对桥面通行的影响，经济和社会效益巨大，故在桥梁建设和维修改造工程中具有十分广阔的应用前景。

4.6　玄武岩纤维—钢筋复合筋（SFCB筋）及其嵌入式加固技术

（1）玄武岩纤维—钢筋复合筋（SFCB筋）的提出[17][18]

近年来，有关FRP筋在土木工程中应用的研究不少，但应用不多，主要原因是存在诸多瓶颈问题，包括：①延性差，现有FRP拉伸极限应变一般不大于3%，故无法满足其增强的结构具有理想延性和高抗震性能的要求；②价格高，无法满足土木工程结构材料低成本的要求，限制了其大量应用；③抗剪能力差，由于FRP筋是一种晶体材料，纵向与横向强度之比（约为20∶1）较大，FRP的脆性易断裂无法适应土木工程特殊施工工艺（如混凝土振捣、锚固、弯折等）的要求；④弹模低，即使是碳纤维增强复合筋（CFRP筋）的弹模也只有150GPa左右，无法保证其增强后的结构具有很好的刚度，直接影响了其正常使用阶段性能；⑤性能离散，FRP筋力学性能比金属材料更加离散；⑥部分纤维耐久性不理想；⑦耐火性能不理想；⑧强度往往不能得到充分的发挥。总体上，FRP具有强度高、弹性模量低、延性差、耐久性好、重量轻、价格高等特点，而钢材具有强度低、弹性模量高、延性好、耐久性差、重量重、价格低等特点，两者具有极强的互补性，从直观上判断，如果把两者进行复合（如图14所示），可以做到扬长避短、优势互补，分析表明，两者复合还会引起力学性能上有了质的变化。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

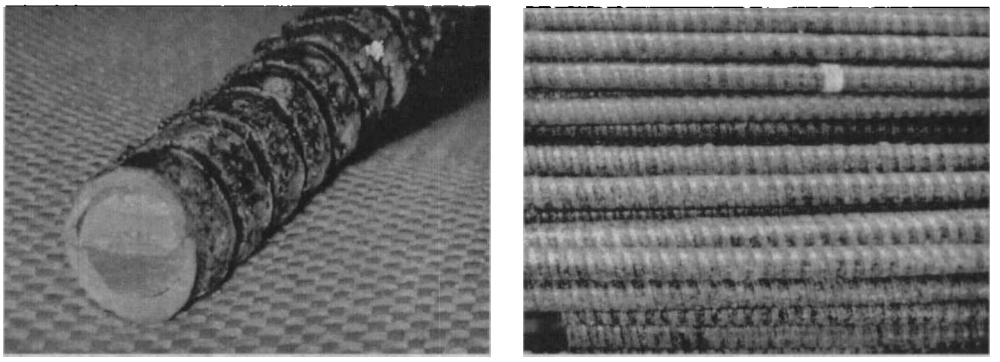


图 14 SFCB 筋制品

(2) 玄武岩纤维—钢筋复合筋 (SFCB 筋) 的性能[19]

FRP 应力—应变关系是线弹性的，且极限应变小；钢筋应力—应变关系是弹塑性的，屈服后的钢筋刚度为 0；FRP 和钢复合后的材料，应力—应变关系是非线性的，第 1 阶段钢筋和 FRP 均处于弹性阶段，增强后的结构有很好的刚度和使用性能，第 2 阶段钢筋屈服，但 FRP 仍处于弹性状态，所复合的材料有很好的二次刚度，其增强的结构损伤可控，可恢复性好，第 3 阶段 FRP 断裂，但钢筋处于强化阶段，结构仍有一定承载力并有高的耗能能力和很好的延性。综上 SFCB 具有稳定的二次刚度，能用来建造理想抗震性能的混凝土结构。图 15 为钢—连续玄武岩纤维复合筋与普通钢筋拉伸试验的荷载—应变关系曲线比较，由图可见 SFCB 有着稳定的二次刚度，屈服后荷载仍能持续的增长，其内芯钢筋甚至进入了强化阶段，表明纤维与钢的复合产生了 1+1>2 的效果。

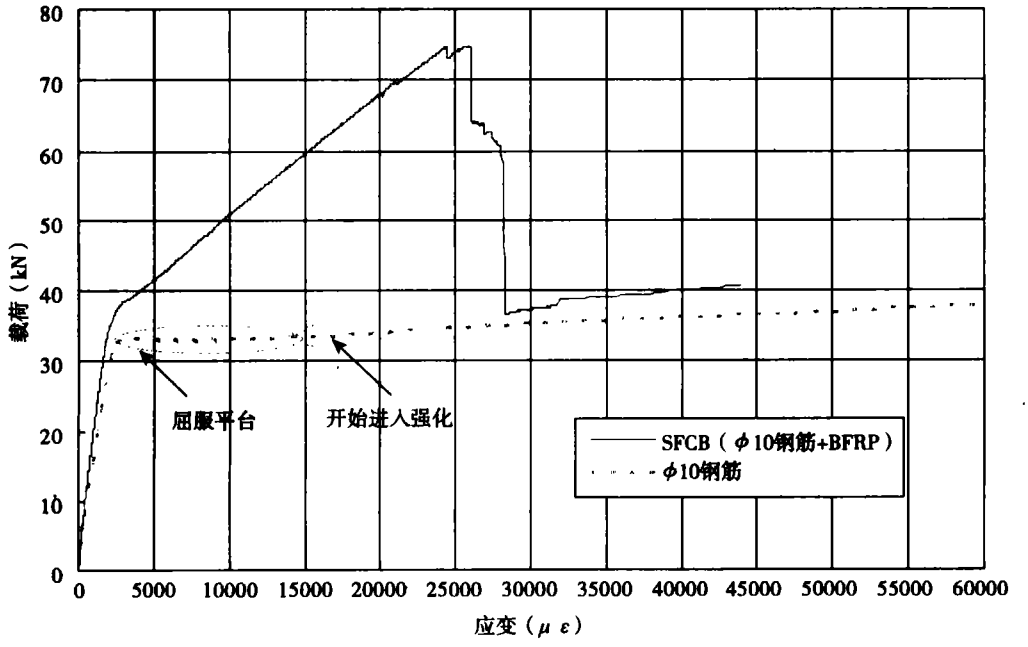


图 15 SFCB、钢筋荷载—应变试验曲线

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（3）嵌入式玄武岩纤维—钢筋复合筋（SFCB筋）抗弯加固[18]

近几年来，嵌入式（Near Surface mounted，简称NSM）加固方法在国外得到了广泛的研究和应用。所谓嵌入式加固方法是将加固材料放入结构表面预先开好的槽中，并向槽中注入粘结材料使之形成整体，以此来改善结构性能的方法，具有粘结性能好、免损伤性好等优点。目前，FRP筋嵌入式加固技术得到越来越多的应用，但也发现其存在一些不足之处：首先，FRP筋嵌入式加固对混凝土结构刚度提高不明显；其次，FRP筋嵌入式加固时其强度有效利用率不高；第三，FRP筋价格相对高昂。研究表明，由FRP外包覆钢筋复合而成的SFCB具有耐腐蚀性好、弹性模量高、延性好、成本低廉的优点，集成了FRP材料耐腐蚀的优点与钢材高模量、高延性、低成本的优势，具备了在具有较高耐腐蚀要求的混凝土工程结构中代替FRP筋作为结构增强材料的基本条件。

为了研究SFCB所增强的混凝土结构的性能，探索SFCB作为混凝土结构增强材料的实际使用效果，课题组尝试了用SFCB代替FRP筋嵌入式加固混凝土结构抗弯性能的试验研究，共完成了4根SFCB嵌入法加固及1根CFRP筋嵌入式加固钢筋混凝土梁的抗弯试验，各试件荷载—跨中挠度关系试验曲线如图16所示，从各阶段荷载、截面刚度、延性、裂缝情况等方面对试验结果进行了全面的分析，嵌入SFCB抗弯加固对受弯构件的刚度、尤其是初始刚度提高显著，在具有FRP筋材卓越耐腐蚀性能的同时，而成本却远低于目前所用的CFRP筋，且避免了目前嵌入式抗弯加固常用的FRP筋材对钢筋混凝土受弯构件刚度提高不明显的缺点，是一种高性能低成本的加固方式。

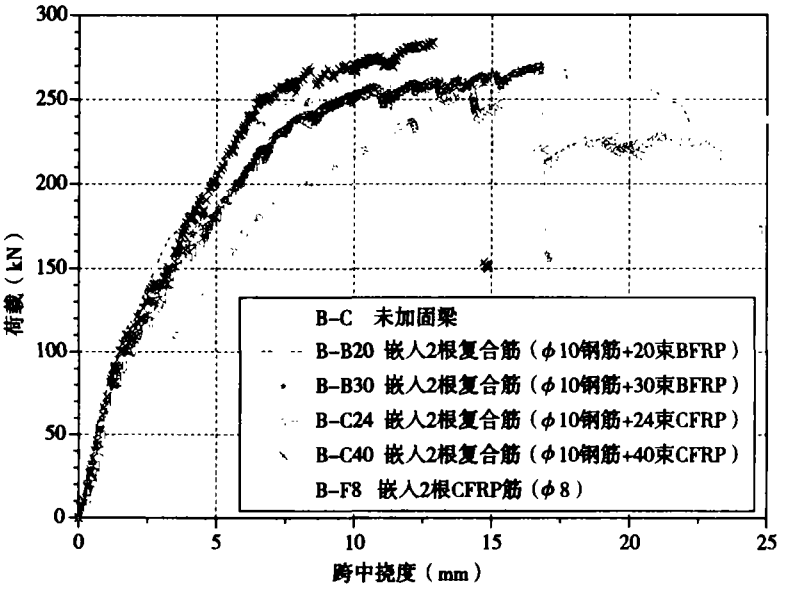


图16 SFCB筋嵌入加固试件荷载—跨中挠度曲线

（4）具有良好可修复性的SFCB增强混凝土柱[17][18]

基于性能的抗震设计方法研究是近年来的热点之一，而传统的钢筋混凝土结构，钢筋的弹塑性决定了结构屈服后的损伤较难控制和定量描述，故基于性能的抗震设计方法还未能进入实用阶段。而要想达到以上的目的，就要保证结构具有很好的“二次刚度”，能够

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实现损伤可控。课题组提出用 SFCB 筋增强的混凝土抗震结构，该结构具有稳定可靠的二次刚度，可恢复性能好，震后易修复，能实现对损伤破坏的控制以及对“中震可修”设防水准的定量描述。

为了研究配置 SFCB 筋的混凝土柱抗震性能，进行了 5 个 SFCB 增强混凝土柱试件及其 RC 柱对比试件的低周反复抗震试验（如图 17 所示），图 18 给出了配置 BFRP—钢复合筋的柱 B30S10 与普通柱 S14 的滞回曲线对比，结果表明，BFRP—钢复合筋混凝土柱屈服后二次刚度稳定、残余变形小，具有良好的可修复性。基于 SFCB 增强混凝土柱的设计理念，不仅要求结构具有良好的延性还要具备一定的二次刚度，在此基础上实现不同性能要求下结构损伤程度的可控性和可恢复性。



图 17 SFCB 筋柱抗震试验

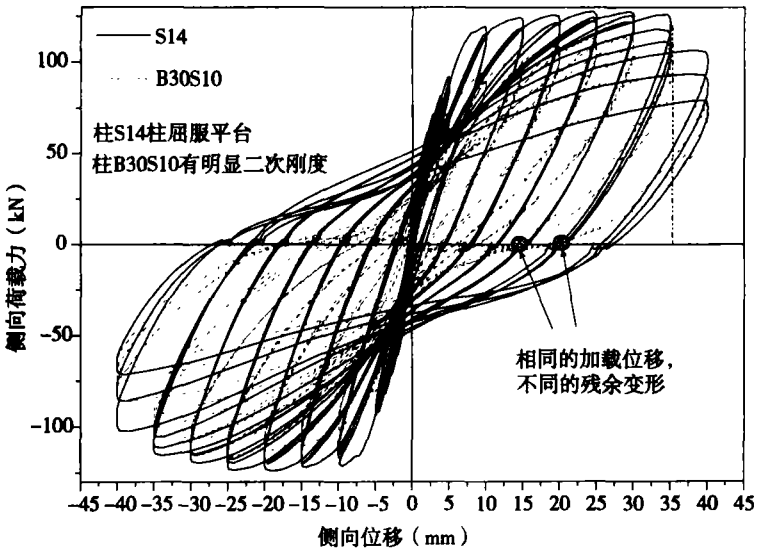


图 18 SFCB 筋柱与普通柱滞回曲线

5 玄武岩纤维用于震后结构加固改造的条件已经成熟

（1）玄武岩纤维力学性能与碳纤维等材料类似，有很多的研究和应用成果可供参考

玄武岩纤维是一种线弹性的纤维材料，其力学性能与已开展较多研究的 CFRP、GFRP 和 AFRP 等类似，因此，可以有很多的科研成果供参考。

（2）有规范、标准的依据

CFRP、GFRP 等开展较多研究的纤维已有了系列规范、标准，为玄武岩纤维的研究与应用提供了很好的参考。另外，已有《水泥混凝土和砂浆用玄武岩纤维》（20078442—T—609）、《玄武岩纤维无捻粗纱》（20078447—T—609）、《结构加固修复用玄武岩纤维复合材料》（20078381—T—609）、《玄武岩纤维及其制品》等 5 本国家或行业标准获得批准，为玄武岩纤维材料的规范应用提供了依据。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（3）玄武岩纤维已能够批量生产

近年来玄武岩纤维产品已能够批量生产，我国已有浙江石金玄武岩纤维有限公司（由横店集团上海俄金玄武岩纤维有限公司与浙江得邦高技术纤维有限公司合并成立）、四川航天拓鑫玄武岩实业有限公司等5家单位具有批量生产玄武岩纤维及其制品的能力，生产厂家数量在国际上最多。

（4）价格便宜

生产连续玄武岩纤维的工厂成本并不高。目前，生产每吨纤维的成本已经接近于E—玻璃纤维。随着生产技术的提升，大规模批量生产后生产成本还将大幅降低。玄武岩纤维优良的性价比是其他任何一种高技术纤维难以望其项背的，生产成本的低廉性为其大规模的推广使用创造了基本条件。

（5）对玄武岩纤维的认识已经客观、科学

在玄武岩纤维刚出现之际，由于很多人对玄武岩纤维还不了解，给了一些不法施工企业以可乘之机，有些施工企业用玄武岩纤维冒充碳纤维在工程中应用，随着大家对玄武岩纤维认识的深入和广泛，这种现象将必然得到限制和杜绝。

（6）对玄武岩纤维的缺点已经可以通过一些合适方法加以改进

针对玄武岩纤维的一些缺点，比如强度、刚度低等，可通过掺入一定量的高强度、高模量的纤维与玄武岩纤维进行混杂，改进并提高了玄武岩纤维制品的力学性能，在生产成本没有较大提高的基础上使其各方面性能均能满足工程应用的要求。

（7）研究逐渐深入广泛

目前，有越来越多的专家和学者认识到玄武岩纤维的众多优点，并开展更加广泛和深入的研究。如，东南大学还于2007年成立了东南大学—横店集团玄武岩纤维应用研发中心。这是我国第一个专门针对玄武岩纤维应用的研发中心，受到国家科技部以及国内外众多协会等的关注，这也将极大地推动我国玄武岩纤维的发展。

6 结论与建议

本文结合四川地震的震后修复与加固，重点介绍了作者课题组最新开发的与玄武岩纤维相关的几个结构加固与修复关键技术。玄武岩纤维成本低，性价比高，与碳纤维等混杂可降低FRP的应用成本，延性好，尤其适用于墩柱的约束抗震，耐久性好，制成网格，可用于加固隧道和水下结构，制作成FRP—钢—AAC复合夹层板，可用于震后重建的移动式房屋和临时桥面板等，与钢筋复合后的复合筋用于混凝土墩柱，可实现结构屈服后二次刚度、减小残余变形及良好的可修复性。玄武岩纤维作为一种新型的建筑材料，在土木工程领域有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] 吴刚，吴智深，胡显等. 玄武岩纤维在土木工程中的应用研究现状及进展 [C] 工业建筑增刊（第五届全国FRP学术交流会论文集），广州，2007，pp. 410—415.

[2] 张敏，吴刚等. 连续玄武岩纤维增强复合材料力学性能试验研究 [J]. 高科技纤维与应用，2007，32 (2)：15—21.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[3] 吴刚，蒋剑彪，宗晟等. 玄武岩纤维布加固混凝土梁试验研究 [J]. 特种结构，2007，12.
[4] 胡显奇，董国义，鄢宏. 玄武岩纤维在建筑和基础设施中的应用 [C]. 工业建筑增刊（全国第三届FRP会议论文集），南京，2004，pp. 21－26.
[5] 杨勇新，杨萌，赵颜等. 玄武岩纤维布的耐久性试验研究 [J]. 工业建筑，2007，37 (6)：11－14.
[6] 胡显奇等. 连续玄武岩纤维及其复合材料 [J]. 高科技纤维与应用，2002，4 (2)：1－5.
[7] 吴智深. FRP粘贴结构加固中的几个关键问题和技术 [C]. 建筑结构增刊，2007，37 (S1)：2－8～2－14.
[8] 吴智深编. FRP積層ハイブリッド化によるRC構造物の補強効果向上に関する実験及び解析的研究 [J]. 日本文部科学省科研项目（基盤研究C (2)），番号13650501，2004.
[9] Wu Z. S. Structural Strengthening and Integrity with Hybrid FRP Compsites [C]. Preceedings of the 2th International Conference of CICE 2004，Australia，Keynote Lecture，93－105.
[10] 吴智深等. 新型混杂FRP混凝土复合结构 [P]. 国家发明专利申请资料.
[11] 吴刚，吴智深，田野等. 若干新型主动高效式抗弯加固混凝土结构新技术简介 [C]. 工业建筑增刊（第五届全国FRP学术交流会论文集），广州，2007，pp. 131－135.
[12] 吴刚，胡显奇，蒋剑彪等. 连续玄武岩纤维在墩柱抗震加固中的应用研究 [C]. 2005年全国FRP会议论文集，西安，2005，pp. 205－212.
[13] 吴刚，顾冬生，吴智深等. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土圆形柱抗震性能比较研究 [J]. 工业建筑，2007，37 (6)：19－23.
[14] 吴刚，魏洋，吴智深等. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土矩形柱抗震性能比较研究 [J]. 工业建筑，2007，37 (6)：14－18.
[15] 吴刚，吴智深，蒋剑彪等. 网格状FRP加固混凝土结构新技术及应用 [J]. 施工技术，2007，36 (12)：98－102.
[16] 吴刚，吴智深，孙泽阳等. 新型纤维增强复合材料—轻质加气混凝土（FRP－ALC）夹层结构 [C]. 工业建筑增刊（第五届全国FRP学术交流会论文集），广州，2007，pp. 126－130.
[17] 吴智深，吴刚，吕志涛. 具有稳定二次刚度的钢—连续纤维复合筋混凝土抗震结构 [P]. 国家发明专利（公开号CN1936206).
[18] 罗云标. 钢—连续纤维复合筋及其增强混凝土结构性能研究 [D]. 东南大学硕士论文，2008.
[19] 罗云标，吴刚，吴智深等. 钢—连续纤维复合筋拉伸力学性能试验研究 [C]. 力学与工程，2007，pp. 213－218.
[20] 罗云标，吴刚，吴智深等. 钢—连续纤维复合筋（SFCB）力学性能试验方法研究 [C]. 工业建筑增刊（第五届全国FRP学术交流会论文集），广州，2007.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net