文章编号：1002-0268（2004）09-0013-03

岩石 GFRP 锚杆的可行性研究

袁 勇[1]，贾 新[1]，闫富友[2]
（1. 同济大学土木工程学院，上海 200092；2. 郑州大学土木工程学院，河南 郑州 450002）

摘要：锚杆支护在边坡加固、隧道喷锚支护、大型洞室支护、建筑结构加固等土木工程领域中应用广泛。锚杆作为支护结构的核心组成部分应当具有足够的安全度和耐久性，由于钢材料容易受到环境腐蚀，常用的钢锚杆的耐久性应当引起关注。应用于船舶、航空、化工等领域的复合纤维增强塑料（Fiber Reinforced Polymer；简称 FRP）具有轻质、高强、耐腐蚀、绝缘、易加工等优良性能。本文从技术经济指标分析 FRP 用于岩石锚杆的可行性，以促进这类高性能材料的工程应用。

关键词：锚杆；耐久性；复合纤维增强塑料；可行性；性价比
中图分类号：U455.48^{+}2 文献标识码：A

Feasibility Study on GFRP Rock Bolts

YUAN Yong[1]，*JIA Xin*[1]，*YAN Fu-you*[2]
（1. College of Civil Engineering，Tongji University，Shanghai 200092 China；
2. Department of Civil Engineering，Zhengzhou University，Henan Zhengzhou 450002，China）

Abstract：Rock bolt is a support widely used in slope engineering，tunnel and large cave supporting，as well as restoration of engineering structure. As the kernel portion of supporting system，the reliability and durability of bolts must be the most important aspects. However，steel tends to corrosion under extremely worse environment. To mitigate or prevent adverse effects new material for rock bolts should be investigated. FRP，which had been used in the area of shipbuilding，aviation and chemical industries，has the advantage of light in weight，high strength，corrosion resistance，and easy to work. From the technical-economic point of views，this paper presents the feasibility study on the application of GFRP bolts in rock engineering.

Key words：Rock bolt；Durability；Fiber Reinforced Polymer（CFRP）；Feasibility；Performance-value ratio

锚固，作为一种技术经济优越的技术手段，目前广泛应用于冶金、水利水电、铁路公路、军工及建筑等工程之中。国内锚固技术与理论研究也取得了丰硕的成果，面临可持续发展的时代，有必要全面总结国内外的研究趋势，提出新的研究思路解决锚固技术存在的问题。

土木工程中锚杆支护主要以预应力锚索、土层锚杆、土钉墙、喷锚支护等形式用于岩土加固工程。锚杆支护有些用作临时性结构，如基坑围护工程，更主要的是作为永久性结构的一部分，如隧道支护结构、边坡加固工程、库岸护堤、地下室抗浮结构，等等，这些工程大部分处于恶劣的地质或气候环境，传统的锚杆材料或粘结材料必然存在耐久性问题。因此，本文就这一议题评价未来开发岩石锚固材料的可行性。

1 钢材的缺陷及新型锚杆材料

1.1 钢材的缺陷

设计合理、施工质量可靠、使用环境良好的钢筋混凝土结构，在正常条件下具有良好的耐久性。实际情况是不存在满足上述条件的情形，导致钢筋锈蚀而影响结构的正常使用和耐久性，甚至导致安全性事故。混凝土结构中钢筋锈蚀的主要原因有：

（1）因混凝土保护层过薄或密实性较差，空气中的二氧化碳渗入保护层，使保护层碳化，钢筋锈蚀，

收稿日期：2003-07-07
作者简介：袁勇（1963—），男，云南景东人，同济大学教授，博士生导师，从事结构工程研究.

混凝土胀裂。

（2）氯离子腐蚀。当由于施工原因混凝土中加入了外加剂，或冬季为防止混凝土桥梁、路面结冰而撒盐等，都会导致氯离子与钢筋和混凝土发生复杂的电化学反应，从而导致钢筋锈蚀，混凝土顺筋胀裂，结构失效。

（3）混凝土结构处于侵蚀性和暴露环境，导致钢筋提前锈蚀。

据有关资料介绍[1]，美国每年因钢材锈蚀造成的损失高达 700 亿美元。据美国有关部门统计，20 世纪 50 年代前建造的桥梁大部分因钢筋锈蚀而破坏严重。目前美国近 60 万座桥梁中，有近 10 万座钢筋锈蚀严重。英国建造在海洋及含氯化物介质的环境中的钢筋混凝土结构中，因钢筋锈蚀需要重建或更换钢筋的占 1/3 以上。在日本，由于较多地区采用海沙作为混凝土中的细骨料，使钢筋锈蚀成为一个严重的问题。对冲绳地区 177 座桥梁和 672 座房屋的调查表明，桥面板和混凝土梁的损坏率达到 90％以上，校舍一类民用建筑的损坏率也在 40％以上。

我国在 1981 年对华南 18 座钢筋混凝土码头的调查表明，尽管使用期仅 7～15 年，但有 16 座码头的钢筋严重锈蚀。1984 年对浙江镇海的 22 座中小型海工建筑物的调查表明，967 根构件中由于钢筋锈蚀导致顺筋开裂破坏的有 538 根，占构件总数的 56％。而进入 21 世纪以后，钢材料的腐蚀问题更加严重。

值得注意的是，锚杆支护结构是隐蔽工程，工作现状难以检测，一旦出现耐久性问题无法更换与控制。

1.2　新型锚杆材料的研究

用钢材作锚杆材料有强度高、延展性好等优越性，但其抗腐蚀能力差。塑料、陶瓷、复合材料等非金属材料科学发展迅速，力学性能也大为改观，有取代金属材料之势，如复合纤维增强塑料（Fiber Reinforced Polymer）、PP（聚丙烯塑料）、PVC（聚氯乙烯塑料）等均具有良好的力学性能和耐腐蚀性，在一些领域已经取代钢材。

2　复合纤维增强塑料（FRP）材料

2.1　FRP 材料的分类

FRP 是由多股纤维采用基底材料胶合后，经过特制的模具挤压、拉拔成型的。

根据纤维的不同，FRP 可分为玻璃纤维增强塑料（Glass FRP 以下简称 GFRP）、碳纤维增强塑料（Cabon FRP 以下简称 CFRP）、芳纶纤维增强塑料（Aramid FRP 以下简称 AFRP）。

2.2　FRP 材料发展动态

在欧洲，初期的开发研究工作以德国为中心，近年来德国的 GFRP 生产公司已经批量生产出和同等直径的螺纹钢价格相同的 GFRP 螺纹杆，并具有一系列配套的附件，如螺帽，托板等（参见图 1）。这种产品也已经大规模应用于岩石边坡、隧道的支护工程当中。

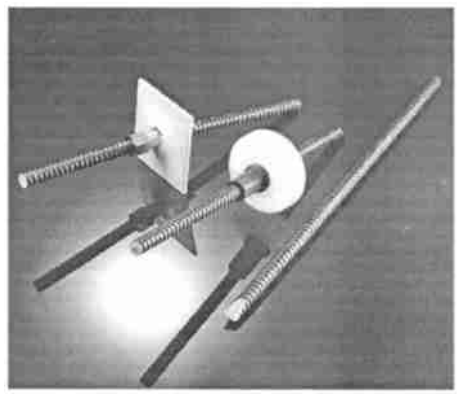

图 1　GFRP 锚杆

近几年来，日本 FRP 材料在土木建筑领域的应用发展迅速，FRP 材料的使用形式主要有：（1）混凝土补强用连续纤维筋；（2）混凝土补强用连续纤维片材；（3）替代钢构架结构用的纤维增强材料；（4）纤维补强混凝土。

同欧洲及日本相比，在纤维增强材料用于土木工程的技术上，美国并不占优势，这一现状已引起了美国土木工程方面专家的重视。为此，美国材料协会最大的一个分支机构——复合材料研究所市场开发联盟出面组织协调制定了一系列土木工程用结构复合制品的研究开发项目，其目标是：价格较为低廉，维修保养率低，生产率高，施工便捷，选择最能体现其价值的工程作为突破口[2]。

加拿大 Sherbrooke 大学 Benmokrance 教授对 FRP 材料用作锚杆、锚索进行了大量的试验研究和工程实践，取得了丰富的研究资料[3]，对将 FRP 材料广泛应用于工程实际中起到了极大的推动作用。

在我国，应用较多的 FRP 产品主要是 GFRP 产品，也就是我们通常所说的玻璃钢。近年来，我国的玻璃纤维工业有了较大的进展，全国玻璃纤维生产企业 240 多家，从业人员达 10 多万人。进入 20 世纪 90 年代后，稳步发展，无论从产量、品种开发、工艺技术和企业规模上都出现历史上从未曾有过的成绩。目前我国玻璃纤维产品有 60 多个品种，600 多个规格。其应用范围，主要为增强基材、绝缘材料基材、防水

材料三大类。

3　GFRP 锚杆的可行性分析

3.1　FRP 材料的性能优势

FRP 的性能取决于纤维和结合料的类型、纤维含量和横断面形状。与钢材相比，FRP 配筋材料的优点如下[4]：

（1）同等直径下，其重量仅为钢材的 1/7～1/5，强度与质量密度的比值较高（比钢材高 10～15 倍）；

（2）CFRP 和 AFRP 配筋材料的抗疲劳性能较好，为钢材的 3 倍，但 GFRP 则明显低于钢材；

（3）耐腐蚀性能好，对电磁无作用；

（4）轴向热膨胀系数低，尤其是 CFRP 合成材料。

FRP 具有轻质、高强、抗腐蚀、低松弛、非磁性、抗疲劳等优点。由于 FRP 具有较好的抗腐蚀能力，可用于遭受腐蚀性介质侵袭的结构中；FRP 具有非磁性，可用于有特殊要求的结构如雷达站中；FRP 筋轻质高强可方便施工中筋的布置，节约人工费用；FRP 预应力筋低松弛且弹性模量较小，可以降低由于混凝土徐变和收缩引起的预应力损失，还可减小由于预应力筋松弛引起的预应力损失。

3.2　GFRP 的性价比

虽然 GFRP 材料产品在国内应用比较广泛，但将其应用于岩石隧道衬砌的锚杆支护上还没有成熟的产品和成功的工程实例。鉴于 GFRP 材料的诸多优于钢材的性能，我们拟将 GFRP 代替钢材用作锚杆。其机械、物理、化学性能在以上已有比较，以下将在价格方面进一步讨论优越性。

3.2.1　比较准则

因为 GFRP 材料的价格约为螺纹钢价格的 8 倍左右，而强度最多仅为 Q235 的螺纹钢的 5 倍左右，如果用同等直径的 GFRP 杆件来代替螺纹钢用作锚杆，则成本肯定比钢材要高，不经济，同时 GFRP 杆件的强度也不能充分发挥。为了充分利用 GFRP 材料强度高的特性，我们可以在两种杆件的截面的抗拉能力相同的条件下来比较使用两种材料制作锚杆的工程造价，既按照截面的强度相等的原则来比较两种材料的价格优势，也可以看作两种材料的性价比的比较。

以下各式中 P_f，p_f，D_f，ρ_f，F_f，f_f 分别代表 GFRP 杆件的单位长度的成本、单价、截面直径、密度、截面的抗拉承载力、强度；P_s，p_s，D_s，ρ_s，F_s，f_s 分别代表螺纹钢的单位长度的成本、单价、截面直径、密度、截面的抗拉承载力、强度。

定义 GFRP 与钢材的价格比

$$\frac{P_f}{P_s}=\frac{\frac{\pi D_f^2}{4}\times p_f\times \rho_f}{\frac{\pi D_s^2}{4}\times p_s\times \rho_s}=\frac{D_f^2}{D_s^2}\times\frac{p_f\cdot\rho_f}{p_s\cdot\rho_s} \tag{1}$$

考虑截面抗拉能力相同的条件，即 $F_f=F_s$，可得等式

$$\frac{\pi D_f^2}{4}\times f_f=\frac{\pi D_s^2}{4}\times f_s$$

简化

$$\frac{D_f^2}{D_s^2}=\frac{f_s}{f_f} \tag{2}$$

将式（2）代入式（1），可得

$$\frac{P_f}{P_s}=\frac{f_s\cdot p_f\cdot\rho_f}{f_f\cdot p_s\cdot\rho_s} \tag{3}$$

由此，可知两种材料的价格比在截面强度相等的条件下与 GFRP 的强度成反比、与其单价和密度成正比。

3.2.2　提高 GFRP 材料强度的影响

按照公式（3）保持其他因素不变，使 GFRP 材料的强度值在 500～1 100N/mm^2 的范围变化可得图 2。

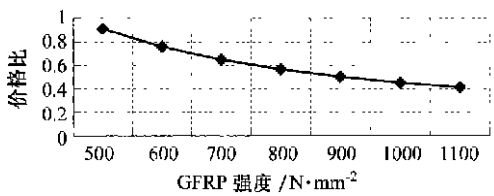

图 2　价格比～GFRP 强度图

螺纹钢密度取 7.8g/cm^3，强度取 210N/mm^2，价格取 2 600 元/t；GFRP 密度取 2.2g/cm^3，价格取为 20 000元/t。

由图 2 可知，随着 GFRP 材料强度的提高，价格比逐渐下降，也就是说使用 GFRP 材料用作锚杆的性价比越高。

3.2.3　降低 GFRP 材料价格的影响

按照公式（3）保持其他因素不变，使 GFRP 材料的价格在 18 000～22 000 元/t 的范围之间变化可得图 3。

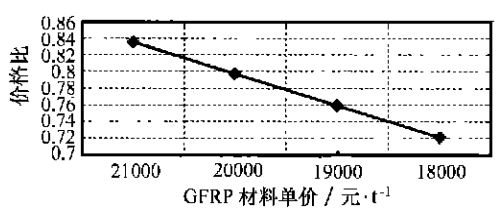

图 3　价格比～GFRP 单价关系图

螺纹钢密度取 7.8g/cm^3，强度取 210N/mm^2，价格取 2 600 元/t；GFRP 密度取 2.2g/cm^3，强度取为 600N/mm^2。

（下转第 20 页）

加速度较大且持时较长时，回填土的变形会迅速增大，其本身的强度突然减小，同时由于出现填土与筋材间的摩擦阻力不足或加筋材的强度不够，发生筋材拉出或筋材拉断。

（3）在加筋土挡土墙的抗震动力特性分析中，无论是采用摩擦加筋理论还是准粘聚力理论，都必须充分考虑到加筋体与土体间的摩擦阻力的重要性，尤其对动似摩擦系数的研究十分必要。但是，采用有限元法与试验法分析比较发现：地震动力对动似摩擦系数减弱的影响，两者的影响程度有一定的差异，有限元法分析结果比试验研究结果更为明显。对其所产生的原因值得再进一步分析与研究。

（4）本次试验所设计的模型自振周期较短，试验输入的地震波要经过压缩，所以地震波的高频分量较大，且高频分量在传播过程中容易被衰减。则输入以高频分量为主的地震动，加速度不但不放大，反而减小。这是由于土体的性能复杂性——随应变增加，弹性模量降低，而阻尼比却增大等所致。

参考文献：

[1] 陈忠达. 公路挡土墙设计 [M]. 北京：人民交通出版社，1999.

[2] 钟国强. 塑料土工格栅加筋土动力特性的试验研究及其动力有限元分析 [D]. 昆明理工大学，2002.

[3] 张小江，等. 纤维加筋土的动力特性试验研究 [J]. 岩土工程学报，1998，20（3）：45－49.

[4] 徐少曼，洪昌华. 土工织物加筋堤坝软基的非线性分析 [J]. 岩土工程学报，1999，21（4）：438－443.

[5] 凌天清. 公路高大加筋土挡墙设计方法的研究 [J]. 中国公路学报，2000，13（2）：13－19.

[6] 中华人民共和国交通部. 公路工程抗震设计规范 [S]. 北京：人民交通出版社，1994.

（上接第 15 页）

由图 3 可得，随着 GFRP 材料单价的降低，价格比也逐渐降低，也就是说 GFRP 材料的性价比随之提高。

3.2.4　其它因素简评

由以上的比较分析可知，GFRP 材料的强度值越高，或单价越低，或钢筋的单价提高，价格比越高。即用较小直径的 GFRP 杆件可以代替较大直径的螺纹钢用作锚杆支护。同时由于 GFRP 材料的密度小的特点，大大降低了锚杆的重量，可以大大降低锚杆的运输、搬运、安装的成本；直径的减小，所需钻孔的直径也将减小，又可以降低一部分成本。

4　结论

（1）钢锚杆因锈蚀等因素其耐久性值得引起重视。

（2）GFRP 具有质轻、高强、耐腐蚀等优良特性，可代替钢材用作岩石锚杆材料。

（3）等强度换算条件下，GFRP 锚杆比钢锚杆占有优势，并且随 GFRP 材料工业的进步（如强度提高和价格降低），优势更加突出。

（4）本文的技术经济比较尚仅限于材料强度换算，诸如 GFRP 锚杆配件制造、搬运、安装等方面的费用有待结合实际工程进行细致评价。但是，本文的比较对 GFRP 材料在锚杆支护领域的应用具有一定的指导作用。

参考文献：

[1] 薛伟辰，康清梁. 纤维塑料筋 FRP 在混凝土结构中的应用[J]. 工业建筑，1999，29（2）：19－21.

[2] 曹征，张俊海，曹晓静. 土木工程中 FRP 的应用状况及发展动向 [J]. 南通职业大学学报，2002，16（2）.

[3] Burong Zhang，Brahim Benmokrane，Phalguni Mukhopadhyaya. Tensile Behavior of FRP Tendons for Prestressed Ground Anchors [J]. Journal of Composites for Construction，2001，15（2）.

[4] 许清风，邱文军，殷勇才，等. FRP 筋的性能和应用 [J]. 建筑技术，2001（5）.