**一、项目名称**

新型复合材料腰梁和抗浮锚杆关键技术与工程应用

**二、申报奖种**

山东省科学技术进步奖二等奖。

**三、项目简介**

本项目受国家自然科学基金、国家“十一五”科技支撑项目及教育部高等学校博士学科点专项科研基金等课题资助，在土木工程（岩土工程）领域开发新型玻璃纤维增强复合材料（GFRP材料）应用新技术。通过系统试验研究，首次将GFRP材料成功地引入基坑支护的腰梁和抗浮锚杆，解决了传统材料不能解决的问题，为GFRP材料在土木工程中的应用开拓了全新领域。主要创新工作如下：

（1）研发了一种新型双腹板工字形GFRP腰梁，代替传统型钢腰梁，构件的稳定性得到加强，材料的强度特性得到充分发挥。采用弹簧反力装置首次对GFRP拉挤构件进行了大吨位徐变特性的试验研究，验证了GFRP腰梁长期力学性能可以满足实际工程要求。

（2）首次将GFRP腰梁应用于实际基坑工程，获得了腰梁弹性和徐变性能对锚索预应力损失的影响规律。通过内置套筒式GFRP腰梁连接方法，形成腰梁可拆卸的施工工艺，从而实现腰梁循环利用。因GFRP材料重量轻，可免除大型机械施工。

（3）采用植入式裸光纤光栅串对原型GFRP抗浮锚杆进行多界面受力测试，深入探索GFRP抗浮锚杆的应力应变分布，揭示了GFRP抗浮锚杆的破坏机制，论证了GFRP材料应用于抗浮锚杆的合理性与先进性；开发了一种新型的锚固系统–螺母托盘锚具，并将其用于抗浮锚杆的外锚固（与基础底板的锚固），解决了GFRP抗浮锚杆外锚固的难题。

（4）基于全螺纹全长黏结GFRP抗浮锚杆在长期荷载作用下拉拔蠕变试验，得到GFRP抗浮锚杆的蠕变规律，建立了GFRP抗浮锚杆抗拔的蠕变力学模型并对其正确性进行验证，引入时间损伤效应的概念，明确了GFRP抗浮锚杆的损伤变量随时间变化规律，推导出GFRP锚杆的长期抗拔力；建立以变形及承载力双控的GFRP抗浮锚杆分析理论，提出“全变形”的概念和GFRP抗浮锚杆实用设计方法；建立了考虑抗浮锚杆真实服役状态（基础底板–GFRP抗浮锚杆体系）的数值计算方法。

本项目获得国家授权发明专利8项，实用新型专利9项，主要包括GFRP腰梁支护装置，非金属抗浮锚杆的研发、提高非金属抗浮锚杆抗剪强度的方法、非金属锚杆蠕变试验加载装置、用于蠕变试验的螺旋式穿心千斤顶、纤维筋的拉力和应力测试装置以及配置非金属筋材的微型抗浮桩等。编制了《复合材料腰梁支护技术及施工工艺技术指南》1部，发表相关学术论文20余篇（SCI、EI收录11篇），主编出版《青岛市深基坑工程实践》专著1部，广泛推广本项目技术。培养博士生2名，硕士生9名。本项目成果已在包括青岛地铁在内的工程中推广应用，节约工程造价30%～40%，取得了良好的经济效益。。同时，用GFRP材料代替金属材料，可以减少污染，绿色施工，有着非常重要的经济、环境及社会效益。

**四、客观评价**

2011年7月25日，住房和城乡建设部建筑节能与科技司在北京组织了“十一五”国家科技支撑计划重点项目“地下开挖工程加固关键技术研究”课题三“基坑支护优化新工艺与新材料研究（2008BAJ06B03）”课题验收会，由土木工程学会张雁秘书长为专家组组长、中国建筑科学研究院腾延京研究员为副组长、城市建设研究院梁艺英高级会计师为财务专家组组长等组成的验收专家组（共11位专家）听取了项目汇报，审阅了相关验收材料，经质询和认真讨论，认为该项目符合验收要求，完成了任务书中规定的研究内容，达到考核指标的要求，完成了新型复合材料腰梁关键技术研究及工程示范，并编制了《复合材料腰梁支护技术及施工工艺技术指南》，专项经费支出基本符合科技部有关财务规定，自筹经费足额到位。验收专家组同意该项目通过验收。

该项目完成验收后，2014年6月14日山东省教育厅在青岛组织了复合材料腰梁及抗浮锚杆的研究应用成果鉴定会，由郑颖人院士为主任委员、唐春安和刘泉声等教育部长江学者特聘教授为副主任委员组成的鉴定委员会（共7名专家）听取了项目汇报，审阅了鉴定资料，经质询和讨论，形成如下鉴定意见：

1. 该项目资料齐全、完整，符合鉴定要求。

2. 研发了一种新型双腹板工字形GFRP 腰梁，构件的稳定性得到加强，材料的强度特性得到充分发挥。采用弹簧反力装置首次对GFRP 拉挤构件进行了大吨位徐变特性的试验研究，验证了GFRP腰梁长期力学性能可以满足实际工程要求。

3. 首次将GFRP 腰梁应用于基坑工程实践，获得了不同材料特性（弹性和徐变性能）的腰梁对锚索预应力损失的影响规律。通过内置套筒式GFRP 腰梁连接方法，形成腰梁可拆卸的施工工艺，从而可实现腰梁循环利用。

4. 首次将非金属GFRP 材料应用于抗浮锚杆，克服了传统金属锚杆存在的地下水腐蚀和电化学腐蚀问题，GFRP抗浮锚杆具有较强的适用性；

5.采用植入式裸光纤光栅串对GFRP 抗浮锚杆进行全长受力测试，揭示了GFRP 抗浮锚杆的应力应变分布规律及黏结破坏机理；获得了GFRP 抗浮锚杆与地下室底板混凝土锚固性能和蠕变特征，提出了“全变形”的概念。

鉴定委员会一致同意通过鉴定，认为该成果达到国际先进水平。建议继续对GFRP 腰梁和GFRP 抗浮锚杆加强推广工作，促进工程应用。

**五、推广应用情况**

自2008年青岛理工大学、中基发展建设工程有限责任公司及青岛久瑞建筑工程有限公司合作进行了新型复合材料腰梁及抗浮锚杆力学特性和工程特性的研究应用，相关技术广泛用到相关建筑工程及轨道交通工程。

2013年1月-2015年12月，青岛世纪悦华建筑工程有限公司在烟台市海洋国际帆船俱乐部基坑支护工程、中国海洋大学崂山校区法政学院办公楼基坑支护工程及青岛市李沧区下王埠旧村改造E区基坑支护工程中采用了新型玻璃纤维复合材料（GFRP）腰梁，通过使用附属连接件实现腰梁的循环使用，替代传统的钢筋混凝土腰梁或型钢腰梁，保证基坑安全施工；在高科园装饰城三期基坑抗浮工程采用GFRP抗浮锚杆设计，工程造价比采用钢筋锚杆低约50%，比采用抗拔桩低约70%，经济效益十分显著，不仅解决了抗浮锚杆的耐久性，而且少用钢材保护了环境，彻底解决抗浮锚杆的耐久性问题。2013年8月～2015年12月，青岛久瑞建筑工程有限公司在青岛地铁2号线控制中心基坑抗浮工程、青岛李沧区印象湾住宅基坑工程、青岛市即墨市人民医院基坑工程、青岛市崂山区国际创新园基坑工程中应用了玻璃纤维复合材料抗浮锚杆。工程造价比采用钢筋抗浮锚杆低50%，比采用抗拔桩低约70%，经济效益十分显著，而且绿色环保。2013年1月-2015年12月，中基发展建设工程有限责任公司在北京朝阳公园北项目，北京建安怀柔区山天家园项目，北京新中元大厦基坑项目，太原万达项目，重庆杨家山片区商住项目一期1号地块等项目进行了本研究成果的推广应用，取得了良好的经济效益。

**六、主要知识产权证明目录**

**1. 授权发明专利：**

（1）张明义，章伟，寇海磊，康文，一种复合材料腰梁支护装置，2013.4.3，中国，ZL201010208704.X

（2）张明义，白晓宇，闫楠，寇海磊，郭燕文，汤洪霞，李伟伟，一种提高非金属抗浮锚杆抗剪强度的方法，2015.9.9，中国，ZL201310254756.4。

（3）白晓宇，张明义，张亚妹，闫楠，一种非金属抗浮锚杆蠕变试验加载装置，2015.12.2，中国，ZL201310476174.0。

（4）张明义，白晓宇，张舜泉，闫楠，一种螺旋式穿心千斤顶，2016.1.6，中国，ZL201310474541.3。

（5）张明义，白晓宇，闫楠，丛宇，一种内置非金属筋材的抗浮桩，2016.1.13，中国，ZL201310256290.1。

（6）张明义，白晓宇，汤洪霞，邵志国，刘志刚，一种夹具振弦式纤维筋拉力测量装置，2016.2.10，中国，ZL201310425151.7。

（7）张明义，白晓宇，张亚妹，汤洪霞，一种划分岩石风化程度的标准贯入试验方法，2015.9.30，中国，ZL201310439720.3。

（8）张明义，白晓宇，张亚妹，汤洪霞，一种划分岩石风化程度的标准贯入试验装置，2015.10.14，中国，ZL201310443242.3

**2. 授权实用新型专利：**

（1）章伟，张明义，寇海磊，田丰，一种复合材料腰梁支护装置，2011.1.26，中国，ZL201020236319.1

（2）张明义，寇海磊，郭燕文，一种非金属抗浮锚杆，2013.4.10，中国，ZL201220590978.4。

（3）汤洪霞，张明义，白晓宇，邵志国，刘志刚，一种夹具振弦式纤维筋拉力测量装置，2014.2.19，中国，ZL 201320577788.3。

（4）白晓宇，张明义，张亚妹，闫楠，一种非金属抗浮锚杆蠕变试验加载装置，2014.3.12，中国，ZL201320630223.7。

（5）张明义，白晓宇，张鹏，闫楠，寇海磊，一种非金属抗浮锚杆杆体应力测试装置，2014.3.12，中国，ZL201320627739.6。

（6）张明义，白晓宇，张舜泉，闫楠，一种螺旋式穿心千斤顶，2014.3.12，中国，ZL201320628435.1。

（7）张明义，白晓宇，闫楠，丛宇，一种内置非金属筋材的抗浮桩，2014.5.7，中国，ZL201320369408.7。

（8）张明义，白晓宇，朱磊，刘涛，王永洪，高强，方翔，王鹏，一种非金属抗浮锚杆外锚固装置，2016.6.1，中国，ZL201620007336.5。

（9）张明义，朱磊，白晓宇，刘涛，王永洪，方翔，王鹏，一种非金属抗浮锚杆与混凝土界面相对滑移测试装置，2016.6.1，中国，ZL201620007353.9。

**3. 受理发明专利：**

（1）张明义，白晓宇，张鹏，闫楠，寇海磊，一种非金属抗浮锚杆杆体应力测试方法，中国，ZL201310474063.6。

（2）张明义，白晓宇，张鹏，闫楠，寇海磊，一种非金属抗浮锚杆杆体应力测试装置，中国，ZL201310474100.3。

（3）白晓宇，张明义，朱磊，刘涛，王永洪，方翔，一种非金属抗浮锚杆与混凝土界面相对滑移测试装置，中国，ZL201610004527.0。

（4）张明义，白晓宇，朱磊，刘涛，王永洪，方翔，一种非金属抗浮锚杆与混凝土界面相对滑移测试方法，中国，ZL201610004753.9。

（5）张明义，白晓宇，朱磊，刘涛，王永洪，高强，方翔，一种非金属抗浮锚杆外锚固装置，中国，ZL201610004754.3。

（6）白晓宇，张明义，朱磊，王永洪，高强，刘涛，方翔，一种非金属抗浮锚杆与混凝土相对滑移测试装置，中国，ZL201610004577.9。

**七、主要完成人情况**

1. 姓名：张明义，排序：1/9，职称：教授，工作单位：青岛理工大学，主要负责整体研究方案制定、项目实施和相关理论研究、指导工程应用，首次将非金属GFRP材料应用于抗浮锚杆，揭示了GFRP抗浮锚杆的应力应变分布规律及黏结破坏机理。通过室内试验，获得了GFRP抗浮锚杆与地下室底板混凝土锚固性能和蠕变特征，提出了“全变形”概念。2003年获山东省科技进步三等奖，排名第1；2006年获建设部华厦三等奖，排名第1；2008年获山东省科技进步二等奖，排名第3；2010年获青岛市科技进步一等奖，排名第1，2015年获青岛市科技进步二等奖，排名第2。

2. 姓名：白晓宇，排序：2/9，职称：讲师，工作单位：青岛理工大学，主要负责技术路线细化、现场具体实施、相关理论研究及相关论文发表与知识产权工作申报，通过GFRP抗浮锚杆现场全长受力测试，揭示了GFRP 抗浮锚杆的应力应变分布规律及黏结破坏机理，研究成果获国家发明专利，通过室内长期拉拔试验，获得了GFRP抗浮锚杆蠕变特征并研制了一种非金属抗浮锚杆蠕变试验加载装置及一种螺旋式穿心千斤顶，研究成果获国家发明专利。2014年获博士研究生国家奖学金；2015年获青岛市科技进步二等奖，排名第3。

3. 姓名：章伟，排序：3/9，职称：副教授，工作单位：青岛理工大学，主要负责GFRP腰梁试验研究与理论研究工作。研发出一种新型结构的双腹板工字型截面GFRP腰梁，并对新型腰梁构件的力学性能进行了试验研究，根据腰梁现场连接施工特点，设计了内置套筒式连接装置，利用弹簧反力装置对GFRP腰梁构件在大吨位荷载作用下徐变特性进行了研究，探讨了GFRP腰梁的长期力学性能。

4. 姓名：王秀丽，排序：4/9，职称：教授级高工，工作单位：中基发展建设工程有限责任公司，主要负责GFRP腰梁的现场应用试验研究。根据腰梁现场连接施工特点，设计了内置套筒式连接装置，将研究成果在基坑支护和结构抗浮工程中推广应用。

5. 姓名：寇海磊，排序：5/9，职称：讲师，工作单位：青岛理工大学，主要负责GFRP抗浮锚杆及腰梁的理论研究及测试。对新型腰梁构件的力学性能进行了试验研究，通过比选，确定GFRP腰梁构件截面形式，借助光纤测试手段，研究GFRP抗浮锚杆的荷载传递特性。

6. 姓名：刘涛，排序：6/9，职称：工程师，工作单位：青岛久瑞建筑工程有限公司，主要负责GFRP抗浮锚杆的现场试验和GFRP抗浮锚杆的推广应用。

7. 姓名：李征翼，排序：7/9，职称：高级工程师，工作单位：中基发展建设工程有限责任公司，主要负责GFRP腰梁的数值模拟。通过对GFRP腰梁的力学性能进行有限元分析，模拟结果与试验结果进行对比分析，研发出一种新型结构的双腹板工字型截面GFRP腰梁。

8. 姓名：张亚妹，排序：8/9，职称：工程师，工作单位：青岛理工大学，主要负责GFRP抗浮锚杆的室内试验。通过室内拉拔试验，研究GFRP抗浮锚杆在长期荷载作用下的性能，通过试验确定开始产生蠕变时的应力水平，总结出GFRP抗浮锚杆长期荷载作用下蠕变变形规律。

9. 姓名：刘俊伟，排序：9/9，职称：副教授，工作单位：青岛理工大学，主要负责GFRP抗浮锚杆及腰梁的理论研究及数值模拟。利用有限元软件ABAQUS建立了GFRP腰梁两种不同连接方式的三维模型，对构件不同连接方案的受力状态进行分析，在外锚固对拉试验研究的基础上通过有限元软件ANSYS对不同锚固长度锚固试件的荷载—变形进行有限元分析，为GFRP抗浮锚杆外锚固长度的确定提供理论依据。2015年获青岛市科技进步二等奖，排名第1。

**八、主要完成单位及创新推广贡献**

1. 青岛理工大学：本单位组织参与了本项目所有创新研究和推广应用的实施。在人员配备、场地提供、资金支持方面均有贡献。

（1）首次将玻璃纤维增强复合材料（GFRP材料）用于腰梁和抗浮锚杆，通过系统性试验研究及数值模拟，研发出一种新型结构的双腹板工字型截面GFRP腰梁，并对新型腰梁构件的力学性能进行了试验研究和有限元分析；利用弹簧反力装置对GFRP腰梁构件在大吨位荷载作用下徐变特性进行了研究，探讨了GFRP腰梁的长期力学性能。

（2）借助光纤测试等一系列试验，探索GFRP抗浮锚杆应力分布、变形组成、破坏模式、端头外锚方法及长期承载性状，建立以变形及承载力双控制为基础的GFRP抗浮锚杆分析理论，提出GFRP抗浮锚杆实用设计方法。

（3）帮助课题组落实本项目研究成果在青岛地区的推广应用，特别是在地铁眀挖基坑中的应用。

2. 中基发展建设工程有限责任公司：主要负责GFRP腰梁的研制和施工工艺和工程应用，同时负责在青岛地区以外推广应用GFRP腰梁及抗浮锚杆。

（1）根据腰梁现场连接施工特点，组织设计了内置套筒式连接装置；协调建设单位、设计单位和施工单位首次将新型GFRP腰梁应用于基坑工程实践，对GFRP腰梁的施工工艺进行了研究；通过现场对比试验，对新型GFRP腰梁造成的锚索预应力损失的影响进行了研究。

（2）组织了本项目相关技术在北京朝阳公园北项目、北京建安怀柔区山天家园项目、北京新中元大厦基坑项目、太原万达项目、重庆杨家山片区商住项目一期1号地块项目进行了推广应用。组织了GFRP腰梁项目的研究验收。

3. 青岛久瑞建筑工程有限公司：主要负责GFRP抗浮锚杆在青岛地区的推广应用。

将本项目研究成果应用于中国海洋大学崂山校区法政学院办公楼基坑抗浮工程、青岛市李沧区下王埠旧村改造E区基坑抗浮工程及高科园装饰城三期基坑抗浮工程中，工程造价比采用钢筋锚杆低约50%，比采用抗拔桩低约70%，经济效益十分显著。

**九、完成人合作关系说明**

（1）“十一五”国家科技支撑计划重点项目“地下开挖工程加固关键技术研究”课题三“基坑支护优化新工艺与新材料研究（2008BAJ06B03）”由中基发展建设工程有限责任公司承担，其子课题“复合材料腰梁技术研究与示范”由青岛理工大学张明义教授负责。

（2）青岛理工大学与青岛久瑞建筑工程有限公司共同申报“一种非金属抗浮锚杆外锚固装置”和“一种非金属抗浮锚杆与混凝土相对滑移测试装置”等国家发明专利和实用新型专利。

（3）对本次申报的完成人、完成单位排序、贡献没有异议。