**关于预应力混凝土梁桥典型病害防治及加固关键技术**

**申报山东省科学技术进步一等奖的公示**

**一、项目名称**

预应力混凝土梁桥典型病害防治及加固关键技术

**二、申报奖种**

山东省科学技术进步奖

**三、申报单位**

山东大学/齐鲁交通发展集团有限公司/东南大学/中交第四公路工程局有限公司/四川升拓检测技术股份有限公司/江西省交通科学研究院/山东交通学院/上海应用技术大学/河海大学

**四、推荐单位意见**

推荐单位：山东大学

推荐意见：

课题组组织9家单位的百余名科研人员，历经近十五年科研攻关与工程实践，最终形成了预应力混凝土梁桥病害防治及加固关键技术。项目提出了7种新型检测技术，提出了5种病害评估方法，研发了3种加固技术。提升了预应力混凝土梁的施工质量；攻克了预应力混凝土梁开裂后的受力性能评估难题。建立了桥梁墩柱冻融损伤的服役性能评估方法。攻克了体外预应力加固梁体的基础理论难题，提出了采用横向预应力加固空心板梁铰缝病害的加固技术。钢扣件和FRP联合加固技术抑制了FRP剥离的工程病害。课题研究成果在胶州湾跨海大桥、邹城火车站转体桥；陕西西铜、铜黄、咸旬、宝汉、汉川及柞山高速；山西蔚汾河特大桥；广州罗行大桥；江西昌宁、吉莲高速；宁夏改扩建项目及叶盛黄河特大桥；四川岷江特大桥；西藏拉林铁路桥上开展了大规模工程推广应用，成果推广应用了8个省份近50座桥梁工程中。产生经济效益约2.59亿元。

本项目形成行业标准1项，地方标准1项，授权国家发明专利8项、软件著作权2项，出版专著7部，发表论文143篇，其中SCI/EI 检索75篇，2篇获得“中国百篇最具影响优秀国内学术论文”。有力促进了行业科技进步，在桥梁工程领域起到了重要的引领和示范作用。

我单位认真审阅了该项目推荐书及其附件材料，确认全部申报材料真实有效，相关栏目均符合山东省科学技术奖励的填写要求。按照要求，我单位和项目完成单位都已对该项目的拟推荐情况进行了公示，公示期间无异议，建议推荐该项目为2017年度山东省科技进步一等奖。

**五、项目简介**

预应力混凝土梁无论在经济合理性和工艺成熟性上，都是具有强劲可比性的桥型，因此在我国得以飞速发展。但随着这些桥梁逐步投入营运，经历荷载及时间的考验，施工工艺的适用性及各种典型病害也在逐步暴露。预应力施工质量不达标、波纹管道压浆不密实及温度应力过大会引起梁体发生开裂，桥梁墩柱在冻融循环作用下会发生损伤，影响梁桥整体的服役及安全性能。因此，针对预应力混凝土梁桥的病害开展预防及加固措施的研究就具有重要理论和工程应用价值。课题针对以上问题开展了以下研究，取得的主要科技创新成果有:

1.研发了7种预应力混凝土梁桥的检测技术：提出针对直径25mm和32mm精轧螺纹钢筋竖向预应力双参数（张拉力和锚固段刚度增大系数）模型，建立了精轧螺纹钢筋外露段动力特性与张拉力的关联模型，提出的精轧螺纹钢筋张拉力无损检测方法解决了以往箱梁竖向预应力无法快捷、有效检测的难题。自行研发了预应力钢绞线的拉脱法检测设备，提出了预应力钢绞线锚下有效张拉力的控制标准，提出有效的“拉脱法”测试张拉力合格判别标准，该成果已获得山东省和宁夏回族自治区的地方标准立项。同时提出“振动法”和“压电陶瓷”测试钢绞线拉应力技术；提出了预应力波纹管道压浆密实度的综合评价方法；研发了基于弹性模量的混凝土桥梁承载力的无损测试方法；提出了海水冻融和侵蚀后混凝土表层损伤厚度的无损检测方法。形成地方标准1项,授权发明专利8项，出版专著2部，发表论文23篇。

2.开展5种预应力混凝土梁桥病害评估方法研究：提出了考虑预应力钢筋刚度及荷载效应的实体退化分层组合壳单元，解决预应力模拟难题；提出了裂缝密度参数，建立了裂缝密度梁体节段刚度损伤的模型，研究了箱梁开裂和下挠的耦合计算方法；揭示了箱梁合龙段底板崩裂机理为孔肋间拉断及冲切破坏，提出了对应设计公式；据2年长期观测数据，并计算出最大温差标准值、频遇值和准永久值。研究了墩柱冰荷载及波浪荷载作用，建立了混凝土冻融损伤后的三轴强度准则，考虑混凝土弹性模量损伤，建立了冻融和侵蚀作用下的桥墩耐久性评估方法；已出版专著3部，发表论文77篇，获得软件著作权1项。2篇获得“中国百篇最具影响优秀国内学术论文”。

3.研究了3种预应力混凝土梁桥的加固技术：建立了体外预应力混凝土梁的等效塑性区长度与破坏截面中性轴比值的转换关系式。提出了无粘结部分预应力混凝土梁的开裂界面惯性矩和挠度计算方法。建立了考虑侧压力的铰缝抗剪强度计算模型，研发了体外横向预应力整体化加固空心板梁桥技术。研发了FRP与钢扣件联合加固桥梁技术，解决了困扰工程界的FRP易剥离的难题，同时提出了抗弯及抗剪梁的设计计算公式。形成行业标准1项，出版专著2部，获得发明专利1项，发表论文43篇。

课题研究成果在山东胶州湾跨海大桥、邹城火车站转体桥；陕西西铜、铜黄、咸旬、宝汉、汉川及柞山高速；山西蔚汾河特大桥；广州佛山罗行大桥；江西昌宁、吉莲高速；宁夏改扩建项目及叶盛黄河特大桥；西藏拉林铁路桥上开展了大规模工程推广应用，成果推广应用了8个省份近50座桥梁工程中。取得了显著的经济和社会效益。

**六、客观评价**

1. 科技鉴定评价

 （1）山东省交通运输厅组织专家鉴定委员会，对《冰冻海域海水冻融和侵蚀作用下桥梁下部结构耐久性评估研究》进行了鉴定，鉴定结论为：“建立了海水冻融和侵蚀耦合作用下的混凝土三轴强度破坏准则和本构关系模型。”“建立了基于可靠度的承载能力和正常使用状态下结构耐久性评估方法。”“提出了基于超声波检测的青岛海湾大桥冻融损伤厚度确定方法和判定标准。”“课题研究成果总体上达到国际领先水平。”

（2）江西省交通运输厅组织专家鉴定委员会，对《体外预应力加固桥梁关键技术研究及工程示范》进行了鉴定，鉴定结论为：“建立了适合高强钢筋、FRP筋等体外预应力筋的极限应力统一计算方法。”“提出了外荷载作用下普通钢筋屈服前，体外部分预应力混凝土梁的短期挠度计算方法。”“研发了一种体外预应力加固桥梁的新型钢结构锚固转向体系。”“提出了一种改进的空心板梁体外横向预应力整体化加固技术与设计计算方法。”“该研究成果总体达到了国际先进水平，其中，体外预应力筋的极限应力统一计算方法达到国际领先水平。”

（3）山西省科学技术厅组织专家鉴定委员会，对《预应力混凝土梁检测评估关键技术研究》进行了鉴定，鉴定结论为：“提出了施工阶段基于锚具振动性的预应力钢绞线张拉力测试技术，具有准确、快捷的有点。”“首次提出单排波纹管道压浆密实度空洞估算模型，根据测试数据定量评定压浆密实度，突破了以往仅能定性评估密实度的不足。”“修正和完善了空心板铰缝抗剪强度计算方法。”“系统万完善了箱梁开裂后的刚度损伤评估方法。”“该课题研究的成果对完善预应力混凝土梁检测评估技术具有重要支撑作用，取得了显著的经济效益和社会效益，整体达到国际领先水平。”

（4）山西省科学技术厅组织专家鉴定委员会，对《重载铁路连续刚构施工控制关键技术》进行了鉴定，鉴定结论为：“提出了防止底板崩裂的箍筋计算方法。”“提出了箱梁竖向预应力精轧螺纹钢筋张拉力的幂函数模型及检测方法，提高了检测精度。”“提出了一种基于摩擦刚度理论的纵向预应力钢绞线张拉力智能检测技术。”“课题成果成功应用于重载铁路蔚汾河特大桥工程实践，社会经济效益显著，具有广阔的应用推广前景，研究成果总体达到了国际领先水平。”

1. 国家及省部课题验收意见

国家自然科学基金委员会对《HB-FRP加固钢筋混凝土梁的抗剪性能研究》（51108249）批准结题。

陕西省交通厅组织专家对《大跨宽箱梁施工期防裂技术及裂后承载性能评估方法》进行了验收。验收意见为：“提出了箱梁零号块合理拆模时机计算方法；提出针对直径25mm和32mm精轧螺纹钢筋竖向预应力双参数（张拉力和锚固段刚度增大系数）无损检测方法。”“提出了考虑裂缝密度的大跨连续刚构桥刚度损伤定量评定方法。”“实现了对箱梁损伤位置的识别。”“编制了《预应力混凝土箱梁节段抗裂及裂后评估指南》。”“研究成果总体上达到了国际先进水平，其中精轧螺纹钢筋竖向预应力检测方法和箱梁裂后评估方法达到国际领先水平。”

1. 行业领域评价

 侯保荣院士对《冰冻海域海水冻融和侵蚀作用下桥梁下部结构耐久性评估研究》提出了课题成果评价意见，指出“课题总结了冰冻海域的桥梁下部结构性能退化规律，初步建立了混凝土冻融损伤破坏准则及其损伤本构模型，发展了海水冻融和化学侵蚀共同作用下，混凝土耐久性评估室内试验与现场条件的关联模型。该研究成果对桥梁下部结构的耐久性设计具有重要的参考价值。”

1. 学术评价

本项目出版专著7部，发表SCI/EI检索75篇，其中发表的《预应力高强混凝土梁极限承载力分析》入选2007年“中国百篇最具影响国内学术论文”，《预应力混凝土梁开裂后的受力性能分析》入选2006年“中国百篇最具影响优秀国内学术论文”。

1. 应用效果评价

项目研究提出的《冻融和侵蚀作用下混凝土结构耐久性评定方法和工程措施》成功应用于海域国家重点工程中桥梁浪溅区的混凝土施工中，研究提出的实验室的侵蚀检测需要进行引气混凝土的含气量、混凝土的抗冻等级和离子侵入性的电量指标或扩散系数测定，规定了凝土中各种外加剂含量的要求，有效的提高了桥梁下部结构混凝土的抗冻和抗侵蚀性能，为确保大桥服役100年提供了质量保证，取得经济效益达6892万元。项目研究提出的《预应力混凝土梁桥施工期防裂及裂后评估技术》避免了预应力混凝土桥梁病害的发生，节约了病害调查、评估、处置费用8900万元。

在桥梁建设中，初期的零号块在冬季施工中发生了开裂。后期应用成果中的箱梁零号块合理拆模时机计算方法，避免了箱梁开裂；初期的几个箱梁节段存在竖向预应力张拉不足的情况，后期应用了项目提出的竖向预应力筋的无损检测方法指导施工，大幅提高质量，避免了腹板开裂；通过研究提出了箱梁合龙段底板防崩工程措施，有效抑制了箱梁施工期发生重大工程事故的风险；应用项目成果节约了桥梁荷载试验及人工检查费用。项目研究提出的《预应力混凝土梁桥施工期防裂及裂后评估技术》成功应用于多个桥梁中，避免了预应力混凝土桥梁病害的发生，节约了病害调查、评估、处置费用9220万元。

本项目研究成果形成了体外预应力方法在桥梁加固中的成套技术，弥补了现有体外预应力加固技术分析不足，并大大加快体外预应力加固技术的普及与应用，为混凝土桥梁加固与提载提供有效依据，研究成果在昌樟高速公路药湖大桥维修加固工程、吉安市井冈山大桥维修加固工程、上饶市胜利大桥维修加固工程、樟树赣江公路特大桥维修加固工程、广东省南海市雅瑶立交桥维修加固工程应用，减少不必要的加固措施处理费7800万元。

**七、推广应用情况**

提出了预应力波纹管道压浆密实度的综合评价方法；研发了基于弹性模量的混凝土桥梁承载力的无损测试方法；提出了海水冻融和侵蚀后混凝土表层损伤厚度的无损检测方法。提出了考虑预应力钢筋刚度及荷载效应的实体退化分层组合壳单元，解决预应力混凝土梁材料非线性数值模拟的预应力模拟难题。提出了可用于实际桥梁的裂缝调研精确评估的裂缝密度参数，建立了裂缝密度梁体节段刚度损伤的模型，克服了梁体开裂后的刚度损伤评估难题。研究了箱梁开裂和下挠的耦合计算方法。揭示了箱梁合龙段底板崩裂机理并提出了对应设计公式。研究了预应力混凝土梁太阳辐射导致的温度应力，避免了梁体发生温度裂缝。建立了冻融损伤后的桥墩耐久性评估方法。建立了体外预应力筋的极限应力计算方法，提出了无粘结部分预应力混凝土梁的开裂界面惯性矩和挠度计算方法，为体外预应力加固梁提供了理论基础。研发了体外横向预应力整体化加固空心板梁桥技术，解决了空心板普遍出现的铰缝损伤加固难题。研发了FRP与钢扣件联合加固桥梁技术，提出了抗弯及抗剪梁的设计计算公式，解决了困扰工程界的FRP易剥离的难题。研究成果在多座大桥上使用，且基于研究成果推出的设备取得了良好的经济效益和社会效益。

本项目研究成果形成了体外预应力方法在桥梁加固中的成套技术，弥补了现有体外预应力加固技术分析不足，并大大加快体外预应力加固技术的普及与应用，为混凝土桥梁加固与提载提供有效依据，研究成果在昌樟高速公路药湖大桥维修加固工程、吉安市井冈山大桥维修加固工程、上饶市胜利大桥维修加固工程、樟树赣江公路特大桥维修加固工程、广东省南海市雅瑶立交桥维修加固工程应用，减少不必要的加固措施处理费。

**八、主要知识产权证明目录**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 附件名称 | 附件类别 |
| 1 | 预应力钢绞线张拉力智能检测方法 | 知识产权证明 |
| 2 | 预应力混凝土壳体结构非线性有限元数值模拟软件 | 知识产权证明 |
| 3 | 一种桥梁预应力孔道灌浆密实度测试方法及系统 | 知识产权证明 |
| 4 | 一种测试预应力锚固体系张力的无损检测方法 | 知识产权证明 |
| 5 | 一种基于弹性模量的混凝土桥梁承载力的无损测试方法 | 知识产权证明 |
| 6 | 一种混凝土梁预应力值和预应力损失监测方法 | 知识产权证明 |
| 7 | 反拉式有效预应力检测仪软件v1.0 | 知识产权证明 |
| 8 | （地方标准）桥梁预应力孔道注浆密实性无损检测技术规程(DB 14/T 1109-2015) | 知识产权证明 |
| 9 | （行业标准）公路桥涵加固设计规范(JTG/T 22-2008) | 知识产权证明 |
| 10 | 一种桥梁预应力孔道灌浆密实度无损检测方法 | 知识产权证明 |

**九、主要论文专著目录**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 附件名称 | 附件类别 |
| 1 | 箱梁施工期防裂技术和裂后评估理论及工程应用-第二版 | 论文专著 |
| 2 | 海水冻融与侵蚀耦合作用下桥梁下部结构耐久性评估 | 论文专著 |
| 3 | 无粘结预应力混凝土结构——试验、理论及应用 | 论文专著 |
| 4 | 预应力混凝土连续箱梁开裂后的刚度退化模型 | 论文专著 |
| 5 | 箱梁合龙段底板崩裂机理及设计 | 论文专著 |
| 6 | 日照作用下混凝土箱梁的温差代表值 | 论文专著 |
| 7 | 考虑海水冻融和侵蚀耦合作用的混凝土Ottosen强度准则 | 论文专著 |
| 8 | Deflection of unbonded partially prestressed concrete continuous beams | 论文专著 |
| 9 | 装配式混凝土铰接板桥铰缝剪力计算 | 论文专著 |
| 10 | HB-FRP加固混凝土结构的粘结滑移模型 | 论文专著 |

**十、主要完成人情况表**

1、姓名：张峰 排名：1/10 技术职称：副教授

工作单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：(1)研发了预应力精轧螺纹钢筋张拉力无损检测技术，研发了相应的测试设备。建立了“拉脱法”的有效判别标准。建立了混凝土冻融损伤厚度检测方法。(2）提出了考虑预应力钢筋的实体退化分层组合壳单元。提出了裂缝密度参数，建立了裂缝密度梁体节段刚度损伤的模型。揭示了箱梁合龙段底板崩裂机理并提出了对应设计公式。建立了冻融损伤后的桥墩耐久性评估方法。(3）研发了FRP与钢扣件联合加固桥梁技术，提出了抗弯及抗剪梁的设计计算公式。

曾获省级以上科技奖励情况：大跨宽箱梁施工期防裂技术及裂后承载性能评估方法研究，13-2-73-D3，2013年陕西省科技进步二等奖，排名第3位；冰冻海域桥梁下部结构耐久性研究，B12-2-034-005，2012年中国公路学会科学技术二等奖，排名第5位；重载铁路连续刚构施工控制关键技术，2015-J-3-068，2013年山西省科技进步三等奖，排名第3位。

2、姓名：周勇 排名：2/10 技术职称：教授级高工

工作单位：齐鲁交通发展集团有限公司

对本项目技术创造性贡献：建立了冰冻海域混凝土材料劣化模型，考虑多重环境因素复合作用下的材料劣化模型，使得评估结果更为有效。获得了室内外材料侵蚀程度的关联模型，有效解决了冰冻海域现场桥梁耐久性评估的难题。建立了确定性评估方法和基于可靠度的结构耐久性评估方法，有效指导了我国北方冰冻海域第一座跨海桥梁-青岛海湾大桥的设计和施工。

曾获省级以上科技奖励情况：青岛海湾大桥高精度卫星三维定位测量控制系统，山东省科技进步二等奖；桥背涵侧填筑材料、设备及工艺的综合研究，荣获山东省交通厅颁发的"山东省交通科技进步二等奖"；JQ160-50架桥机，荣获山东省科技厅颁发的"山东省科技进步二等奖"；冰冻海域桥梁下部结构耐久性研究，B12-2-034-001，2012年中国公路学会科学技术二等奖，排名第1位。

3、姓名：叶见曙 排名：3/10 技术职称：教授

工作单位：东南大学

对本项目技术创造性贡献：提出了考虑预应力钢筋刚度及荷载效应的实体退化分层组合壳单元。提出了可用于实际桥梁的裂缝调研精确评估的裂缝密度参数，建立了裂缝密度梁体节段刚度损伤的模型。揭示了箱梁合龙段底板崩裂机理并提出了对应设计公式。揭示了预应力混凝土梁的水化热影响，提出了箱梁温度梯度。

曾获省级以上科技奖励情况：国家科学技术进步二等奖（2006）。国道205线滨州黄河公路大桥工程综合技术研究（证书号：2006-J-221-2-07-R07）；国家科学技术进步二等奖（2009）。公路在用桥梁检测评定与维修加固成套技术（证书号：2009-J-223-2-03-R07）。

4、姓名：林新元 排名：4/10 技术职称：教授级高工

工作单位：中交第四公路工程局有限公司

对本项目技术创造性贡献：(1) 建立了基于预应力精轧螺纹钢筋外露段振动特性开展张拉力检测评估的方法。(2）提出了可用于实际桥梁的裂缝调研精确评估的裂缝密度参数，建立了裂缝密度梁体节段刚度损伤的模型。

曾获省级以上科技奖励情况：冰冻海域桥梁下部结构耐久性研究，B12-2-034-004，2012年中国公路学会科学技术二等奖，排名第4位；大跨宽箱梁施工期防裂技术及裂后承载性能评估方法研究，13-2-73-D1，2013年陕西省科技进步二等奖，排名第1位；交通部西部交通建设科技项目《黄土地区桥梁桩基合理埋深研究》，获得公路学会二等奖；交通部西部交通建设科技项目《西部地区中小跨径适用桥梁型式的研究》，获得公路学会二等奖。

5、姓名：杜进生 排名：5/10 技术职称：教授

工作单位：北京交通大学

对本项目技术创造性贡献：建立了体外预应力筋的极限应力计算方法，提出了无粘结部分预应力混凝土梁的开裂界面惯性矩和挠度计算方法，为体外预应力加固梁提供了理论基础。

曾获省级以上科技奖励情况：无。

 6、姓名：俞博 排名：6/10 技术职称：高级工程师

工作单位：江西省交通科学研究院

对本项目技术创造性贡献：(1)建立了考虑侧压力的铰缝抗剪强度计算模型。(2)研发了体外横向预应力整体化加固空心板梁桥技术，解决了空心板普遍出现的铰缝损伤加固难题。

曾获省级以上科技奖励情况：大跨径公铁两用桥结构安全监测关键技术与方法,B12-1-013-012，2012年中国公路学会科学技术进步一等奖，排名第12位；体外预应力加固桥梁关键技术研究及其工程示范》,J-13-2-18-R05，2013年江西省科技技术二等奖，排名第5位。

7、姓名：吴佳晔 排名：7/10 技术职称：教授

工作单位：四川理工学院/四川升拓检测技术股份有限公司

对本项目技术创造性贡献：(1)研发了“拉脱法”测试设备。提出了基于“振动法”的预应力钢绞线测试技术，实现了预应力混凝土梁桥全生命周期内的预应力钢绞线拉应力动态监测。提升了预应力混凝土梁桥的预应力张拉施工质量。(2) 提出了预应力波纹管道压浆密实度定性及定量测试技术。(3)基于弹性模量的混凝土桥梁承载力的无损测试方法。

曾获省级以上科技奖励情况：西龙池抽水蓄能电站地下厂房机组基础混凝土结构检测，中国水利水电科学研究院应用成果一等奖，2010；预应力管道压浆密实度的质量控制与检测技术研究，中国公路学会科技三等奖，2011；大中跨径桥梁动态施工质量的智能监管技术研究，中国公路学会科技三等奖，2012。

8、姓名：徐向锋 排名：8/10 技术职称：副教授

工作单位：山东交通学院

对本项目技术创造性贡献：(1)研发了精轧螺纹钢筋张拉力的无损检测技术。(2)建立了基于最优化方法的箱梁开裂后的挠度反演刚度的评估方法。

曾获省级以上科技奖励情况：无。

9、姓名：郭智刚 排名：9/10 技术职称：讲师

工作单位：上海应用技术大学

对本项目技术创造性贡献：提出了一种混凝土梁预应力值和预应力损失监测方法，首次提出通过粘贴在预应力混凝土梁的压电陶瓷的压电导纳信号中识别出预应力混凝土梁的预应力值和预应力损失。在没有布置测量预应力值的传感器的预应力混凝土梁上快速得到预应力值和预应力损失，为预应力混凝土梁预应力值和预应力损失的实时监测提供了新的途径。

曾获省级以上科技奖励情况：无。

10、姓名：雷笑 排名：10/10 技术职称： 讲师

工作单位： 河海大学

对本项目技术创造性贡献：对一座具有100 mm沥青铺装层的预应力混凝土梁桥箱梁进行了为期2年的温度效应的观测, 在实测数据的基础上采用统计分析中假设检验和参数分析的方法对混凝土箱梁温度场的日照温差代表值进行了分析计算。依据长期观测数据提出了一种通过统计计算得到混凝土箱梁温差代表值的方法并计算出最大温差标准值、频遇值和准永久值。

曾获省级以上科技奖励情况：无。

**十一、主要完成单位及创新推广贡献**

1、山东大学 排名：1

项目负责单位，全面负责项目研究工作。

主要贡献包括：(1)提出精轧螺纹钢筋张拉力无损检测方法，解决了以往箱梁竖向预应力无法快捷、有效检测的难题；自行研发了预应力钢绞线的拉脱法检测设备，提出了预应力钢绞线锚下有效张拉力的控制标准，该成果已获得山东省和宁夏回族自治区的地方标准立项；提出“振动法”测试钢绞线拉应力技术；提出了预应力波纹管道压浆密实度的综合评价方法；研发了基于弹性模量的混凝土桥梁承载力的无损测试方法；提出了海水冻融和侵蚀后混凝土表层损伤厚度的无损检测方法。(2)提出了考虑预应力钢筋刚度及荷载效应的实体退化分层组合壳单元，解决预应力模拟难题；提出了裂缝密度参数，建立了裂缝密度梁体节段刚度损伤的模型，研究了箱梁开裂和下挠的耦合计算方法；揭示了箱梁合龙段底板崩裂机理为孔肋间拉断及冲切破坏，提出了对应设计公式；研究了墩柱冰荷载及波浪荷载作用，建立了混凝土冻融损伤后的三轴强度准则，考虑混凝土弹性模量损伤，建立了冻融和侵蚀作用下的桥墩耐久性评估方法。(3)研发了FRP与钢扣件联合加固桥梁技术，解决了困扰工程界的FRP易剥离的难题，同时提出了抗弯及抗剪梁的设计计算公式。

2、齐鲁交通发展集团有限公司 排名：2

项目主要参与单位，负责冰冻海域桥梁病害检测技术及评估方法研究。

主要贡献包括：(1)提出了一种基于分层损伤的超声波检测方法，其工程意义及理论价值重要。(2)建立了混凝土冻融和侵蚀耦合作用下强度退化损伤评估模型，提供了桥梁结构整体耐久性评估的理论基础；建立了混凝土冻融和侵蚀后的室内外评估关联模型，构建了桥梁在冻融和侵蚀现场环境下的评估体系；建立了波浪荷载作用下的桥墩设计计算公式，建立了适用于宽幅承台的冰荷载设计公式。 基于混凝土力学性能损伤模型、室内外损伤等效模型和冰、波浪等荷载作用力，研究了冻融和侵蚀耦合作用下的桥梁下部结构服役性能退化规律，指导了冰冻海域桥梁的耐久性设计。(3)总结所有研究成果，提出了冰冻海域桥梁下部结构耐久性评定方法和工程措施，并在青岛海湾大桥设计及施工中进行了验证和应用，实现了青岛海湾大桥全寿命周期内的结构耐久性能评估，研究成果对冰冻海域的桥梁维护具有重要价值。

3、东南大学 排名：3

项目主要参与单位，负责预应力混凝土梁温度梯度和梁体开裂后的受力性能研究。

主要贡献包括：(1)对一座具有100 mm沥青铺装层的预应力混凝土梁桥箱梁进行了为期2年的温度效应的观测,依据长期观测数据提出了一种通过统计计算得到混凝土箱梁温差代表值的方法并计算出最大温差标准值、频遇值和准永久值。(2)以Visual C++和Visual Fortran为平台，采用OpenGL图形开发标准,嵌入提出的组合壳单元模型，考虑钢筋混凝土材料非线性，引入N-R非线性迭代算法，开发了具有实用性的预应力混凝土箱梁非线性分析软件NAC，为实现箱梁开裂后结构行为的定量分析奠定了坚实的基础。基于NAC对国内首座高速公路梁桥破坏性试验结果进行精细化数值模拟，试验将为此类桥梁结构的工程应用和科学研究提供试验资料和有效的依据。

4、中交第四公路工程局有限公司 排名:4

项目主要参与单位，负责预应力混凝土梁有效应力检测技术和预应力混凝土梁开裂预测研究。

主要贡献包括：(1)对精轧螺纹钢筋的锚下有效预应力无损检测计算开展了研究，形成了最终的无损检测方法。通过研究主要得到了2个模型，三参数模型：建立边界条件准确的竖向预应力钢筋外露段长度，锚固段刚度增大系数以及钢筋的外露段竖向预应力钢筋频率的三参数模型。双参数模型：建立适用范围强的张拉力与锚固段增大系数双参数模型。 (2)考虑预应力混凝土梁的施工过程，建立了精细化的梁体开裂预测方法。

5、四川升拓检测技术股份有限公司 排名：5

项目主要参与单位，负责预应力混凝土梁有效应力检测技术和预应力混凝土梁开裂预测研究。

主要贡献包括：(1)研发出的冲击弹性波定性检测法用于对预应力孔道整体注浆密实性的定性判定，适用于孔道两端裸露出预应力锚具和钢束端部的预应力孔道。研发的冲击回波定位检测法用于对预应力孔道各位置处注浆密实性的定量判定。冲击弹性波定性检测法综合考虑了三种方法(全长衰减法、全长波速法与传递函数法)的测试结果，提出了综合注浆指数$I\_{f}$来量化表达。并研发了冲击弹性波定性检测和冲击回波法的测试专用设备。(2)根据混凝土桥梁的类型，将受力区域分为受压、受拉、受剪及不受力的中性区；对各区域进行冲击弹性波波速测试,测得的混凝土弹性模量Ec，推算混凝土的抗压强度；根据各区域的混凝土的切线弹性模量以及混凝土抗压强度，推算相应区域的应力水平及应力状态；根据各区域的应力水平和应力状态，推算桥梁的承载力。该方法可以为桥梁的健康评价提供安全保障资料。(3)联合山东大学，研发了基于“拉脱法”的预应力钢绞线张拉力检测设备。

6、江西省交通科学研究院 排名：6

项目主要参与单位，负责体外预应力加固技术研究。

主要贡献包括：(1)建立了适合高强钢筋、FRP筋等体外预应力筋的极限应力统一计算方法。(2)通过试验，研究了体外预应力混凝土连续梁的弯矩重分布，提出了外荷载作用下普通钢筋屈服前，体外预应力混凝土梁的短期挠度计算方法。(3)提出了一种改进的空心板梁体外横向预应力整体化加固技术与设计计算方法。该研究成果已在简支梁、连续梁、T型等数十座桥梁加固工程中得到了成功应用，具有良好的工程示范效应，取得了显著的社会经济效益。

7、山东交通学院 排名：7

项目主要参与单位，负责精轧螺纹钢筋张拉力无损检测技术和预应力混凝土梁开裂后的损伤评估研究。

主要贡献包括：(1)研发了精轧螺纹钢筋张拉力的无损检测技术。(2)建立了基于最优化方法的箱梁开裂后的挠度反演刚度的评估方法。

8、上海应用技术大学 排名：8

项目主要参与单位，负责基于压电陶瓷的预应力混凝土梁病害检测技术研究。

主要贡献包括：(1)提出了预应力混凝土梁预应力值和预应力损失识别的监测技术。首次提出采用压电陶瓷监测预应力混凝土梁预应力值和预应力损失，提出了识别预应力混凝土梁的预应力值和预应力损失的共振频率偏移指标和均方根偏差偏移指标，建立了计算预应力值和预应力损失的计算公式，攻克了在没有布置测量预应力值的传感器的预应力混凝土梁中无法快速识别预应力值和预应力损失的难题。(2)提出了基于压电陶瓷的预应力混凝土梁裂缝检测技术研究。

9、河海大学排名：9

项目主要参与单位，负责预应力混凝土梁温度梯度及温度应力影响因素研究。

主要贡献包括：对一座具有100 mm沥青铺装层的预应力混凝土梁桥箱梁进行了为期2年的温度效应的观测, 在实测数据的基础上采用统计分析中假设检验和参数分析的方法对混凝土箱梁温度场的日照温差代表值进行了分析计算。依据长期观测数据提出了一种通过统计计算得到混凝土箱梁温差代表值的方法并计算出最大温差标准值、频遇值和准永久值。

**十二、完成人合作关系**

本项目由山东大学、齐鲁交通发展集团有限公司、东南大学、中交第四公路工程局有限公司、四川升拓检测技术股份有限公司、江西省交通科学研究院、山东交通学院、上海应用技术大学以及河海大学九家单位共同合作研发完成。

山东大学与齐鲁交通发展集团有限公司于2008年共同开展冰冻海域海水冻融和侵蚀作用下桥梁下部结构耐久性项目研究，并于2012年共同出版专著《海水冻融与侵蚀耦合作用下桥梁下部结构耐久性评估》。

山东大学、四川升拓检测技术股份有限公司以及中交第四公路工程局有限公司共同开展研究并出版专著《箱梁施工期防裂技术和裂后评估理论及工程应用》（第二版）。

山东大学与东南大学于2014年合作发表论文《箱梁合龙段底板崩裂机理及设计》。

山东大学与山东交通学院于2015年合作发表论文《HB-FRP加固混凝土结构的粘结滑移模型》。

山东大学与江西省交通科学研究院于2012年共同进行预应力混凝土梁施工及检测评估关键技术课题项目的研究，并且成果整体达到国际领先水平，符合鉴定要求。

山东大学与上海应用技术大学于2012年共同发表学术论文《基于摄动理论的压电阻抗损伤识别分析》。

山东大学与河海大学于2009年共同发表论文《预应力混凝土连续箱梁有限元损伤分析》。

联系人：周敬馨

联系电话：88369965