

交通运输部科技项目

交通编号:

合同号: 2009 318 000 105 单位编号:

密 级: 分 类 号:

中等跨度钢管混凝土桁架连续梁桥成套技术研究

报告简本

主研单位: 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院

参研单位: 中铁二十三局集团有限公司

四川雅西高速公路有限责任公司

福州大学、清华大学

武汉理工大学、西南交通大学

2012年10月 成都

目 录

一、立项背景及研究思路	1
二、研究内容	1
1、主要研究内容	1
2、主要试验内容	1
三、关键技术及创新点	1
1、提出了新理念	1
2、开发了新结构	2
3、开发了新方法	3
4、开发了新体系	6
5、发展了新工艺	7
四、主要技术经济指标的先进性及取得相关知识产权的情况	9
1、主要技术指标	9
2、主要经济指标	9
3、社会效益	9
4、学术论文与人才培养	9

一、立项背景及研究思路

随着高速公路向盆周山区的延伸，桥梁设计将面对地形地质条件复杂、地震烈度高、运输条件差、施工场地狭窄、结构架设困难等实际问题，原惯用的简支梁桥，工程造价高，施工困难，已不能完全适合复杂山区桥梁建设需要。开发新桥型、新结构、新工艺，是山区公路桥梁建设的必然要求。通过比较论证，提出了采用钢管混凝土桁架式梁桥方案，并于 2009 年在交通运输部立项，开展“中等跨度钢管混凝土桁架连续梁桥成套技术研究”（编号 2009 318 000 105）的系统研究。

项目研究从理论分析入手，结合调查分析，依靠结构计算为手段，用室内试验和现场测试的总体思路。试验与理论研究相结合，以试验为主；结构计算与现场测试、以结构计算为主。技术路线的核心是：从桥梁发展技术需要出发，以技术、经济为目标，采用从实际需要中来，通过理论、试验、技术总结等过程，将成果指导设计、施工及桥梁养护的科学研究路线。

该项目依托雅西高速公路干海子大桥工程开展研究，于 2009 年 6 月开工建设，2011 年 11 月完成主梁架设，2012 年 4 月完成全桥施工并投入使用。

二、研究内容

1、主要研究内容

项目开展了 10 项子课题、3 项目辅助课题研究，编写了子课题、辅助课题报告和技术、工作报告等。

2、主要试验内容

根据课题研究需要，完成了干海子大桥 1:10 主梁模型、节点疲劳与静力、桁式、与组合式桥墩模型、受拉钢管混凝土构件等系列试验，开展了动力性能模型试验和实桥动力对比分析试验；开展了高抛灌注、泵送压住混凝土试验，开展了依托工程钢管混凝土密实度试验、成桥荷载试验等全面的试验研究。

三、关键技术及创新点

1、提出了新理念

现代山区高速公路，地形环境条件特别复杂，地震烈度高，通过简支 T 梁桥、钢板梁桥、钢管桁架梁桥的比较论证，由于钢管混凝土桁架梁与钢板梁的重量相当，而钢管混凝土桁架梁与简支 T 梁的工程造价相当，因此，推荐采用钢管混凝土桁架梁，既能减轻重量，提高桥梁结构抗震能力，又能减少材料用量，节约工程造价。桥墩、主梁全部采用钢管混凝土桁架结构的梁式桥梁，既可以利用钢管混凝土延性提高钢管混凝土

抗震能力，同时减轻自重 50~55%，减小地震内力，提高桥梁结构的地震抗力，实现高烈度地震区改善桥梁性能、节约工程造价的目标。为山区桥梁比重极大的中小跨度桥梁提供了比较论证的新桥型。

2、开发了新结构

(1)、新型桥梁的论证

项目依托干海子大桥，该桥原设计采用 25m、40m 的简支 T 梁桥，共计 51 孔。钢筋混凝土空心薄壁桥墩和 280 根 2m 直径的群桩基础，最大分联长度 200 米，全桥长 1805m。变更设计采用了 44.5m、62.5m 的钢管混凝土桁梁桥，共计 36 孔。钢管混凝土桁式桥墩、混合桥墩和 120 根 1.8 米直径的群桩基础，最小联长 268 米，最大联长 1045 米，全桥长 1811m。

比较论证表明：原施工图设计简支 T 梁桥材料指标，混凝土为： $3.263\text{m}^3/\text{m}^2$ ；钢材为 $444.7\text{Kg}/\text{m}^2$ 。钢管混凝土桁架连续梁桥材料指标，混凝土为： $1.177\text{m}^3/\text{m}^2$ ；钢材为 $339.7\text{Kg}/\text{m}^2$ 。因此，采用钢管混凝土桁梁桥具有明显的社会经济优势。

(2)、总体布置

①总体布置

干海子大桥整体布置在地形起伏地段，主梁分联刚度与桥墩高度密切相关。根据地形条件确定的不同桥墩高度，结合主梁、桥墩受力与刚度匹配设计要求，全桥主梁分为三联。第一联长度为 486.3 米，其中 4 个高桥墩与主梁固定连接；第二联长度为 1045.1 米，靠近两端伸缩缝处为阻尼橡胶支座，高桥墩与主梁固结连接；第三联长度为 279.6 米，采用主梁与桥台固结连接，而不设置伸缩缝，仅在桥墩处设置伸缩缝的单端纵向变位体系的新型结构体系。

②曲线梁的设计

该桥位于圆曲线、缓和曲线和卵型曲线上，其中最小平曲线半径为 356 米，主桁梁的桁式节点位于曲线上，节点间以“直”代“曲”。曲线内桥墩的盖梁、墩柱、桩基沿曲线径向布置，保证结构构造的标准性和线性的顺畅。由于曲线引起的超高，主要通过桥墩横向高度的不同，调整桥梁的横向坡度，而主梁的横向高度是一致的。

(3)、构造设计

①主梁构造

主桁高 440cm、桁间距 440cm，主梁下弦采用 C60、管径 $\Phi 813\text{mm}$ 的钢管混凝土，腹管为 $\Phi 406\text{mm}$ ，62.5 米跨度主梁高度相同，在桥墩处设斜撑。主梁为左、右分幅设

计，每幅桥由一个“三角形”组成，两幅桥间设置“V”形横撑。桥面板为厚 20 厘米的 C50 预应力混凝土结构。

②桥墩构造

桥墩分为钢管混凝土桁式桥墩、混合桥墩两种。桥墩高度大于 60 米采用混合桥墩，桥墩底部 30 米高度范围内设厚度为 40 厘米的钢筋混凝土纵向腹板，组合桥墩与桁式桥墩过渡处，设置腹板倒角，满足桥墩刚度过渡需要。

桥墩用四根 $\Phi 813$ 毫米钢管、内灌 C50 混凝土，纵横向用钢管连接组成，桥墩纵桥方向按 1: 50 放坡，最高墩底最大宽度达 7.8 米。

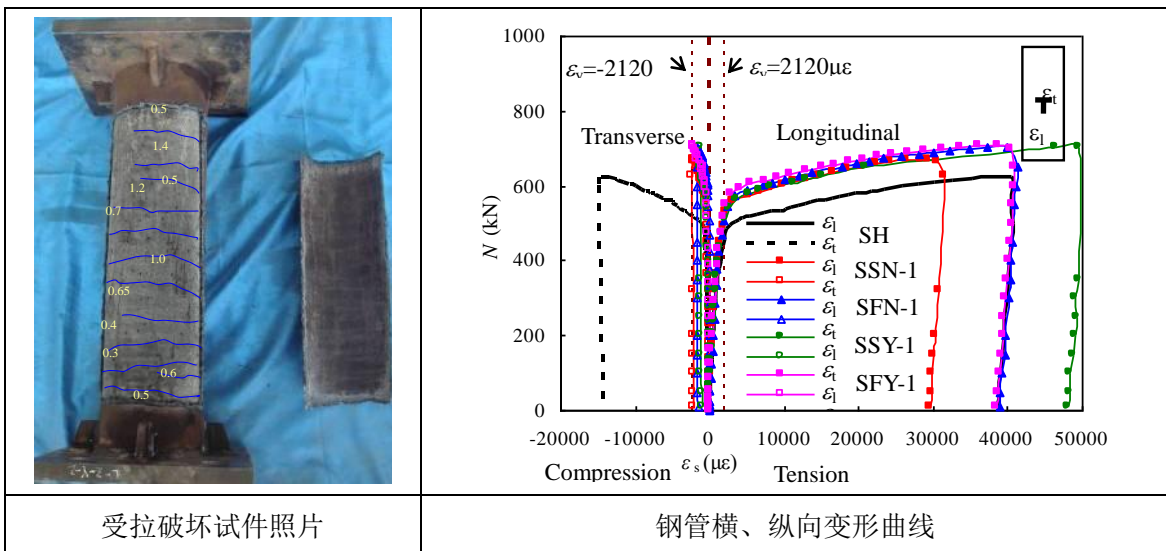
③钢管内混凝土灌注

通过现场对竖直、水平钢管的足尺模型高抛和水平泵送灌注工艺试验，确定了桥墩采用高抛工艺灌注钢管内混凝土，主梁下弦钢管内采用泵送顶升灌注 C60 钢纤维混凝土。

3、开发了新方法

(1)、受拉钢管混凝土

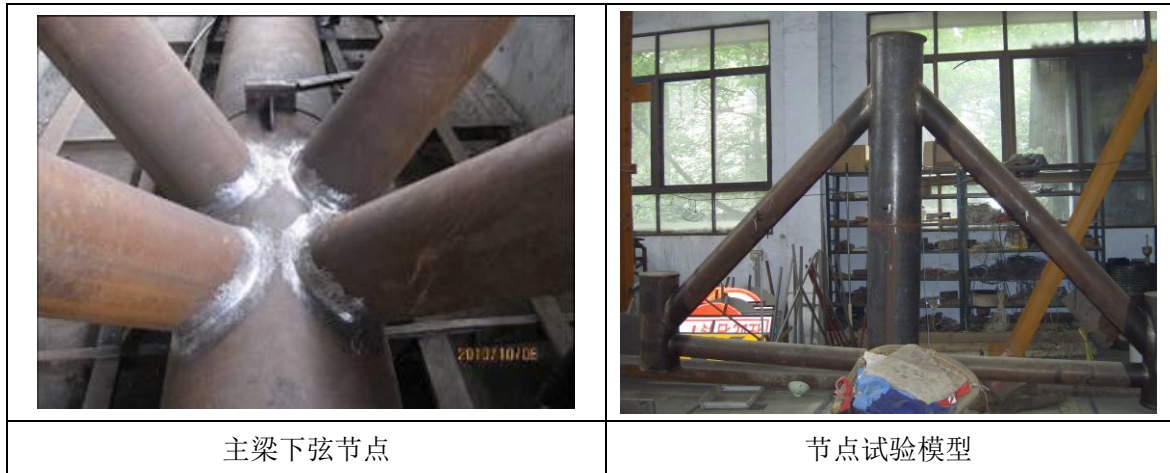
通过钢管混凝土的受拉试验表明，是否灌注混凝土对受拉钢管混凝土对轴向、径向受力及破坏状态影响显著，试验表明，受拉钢管混凝土为三向受力状态。



试验数据表明：①钢管混凝土相比同条件的空钢管，承载力提高约 10%~15%左右 (SI=1.10~1.15)；②钢管混凝土构件的轴拉刚度初期有较大的提高，随后由于混凝土的开裂，构件的轴拉刚度趋向于空钢管。③轴向荷载达到约为 0.6 倍轴拉极限承载力之后，钢管混凝土试件屈服。④内填钢纤维的钢管混凝土承载力比自密实钢管混凝土提高约 5%左右，这与钢纤维混凝土的韧性提高有关。

(2)、节点力学性能

试验节点模拟干海子大桥，确定的模型与原型节点见图所示



通过对钢管混凝土节点的疲劳试验研究，得出以下结论：

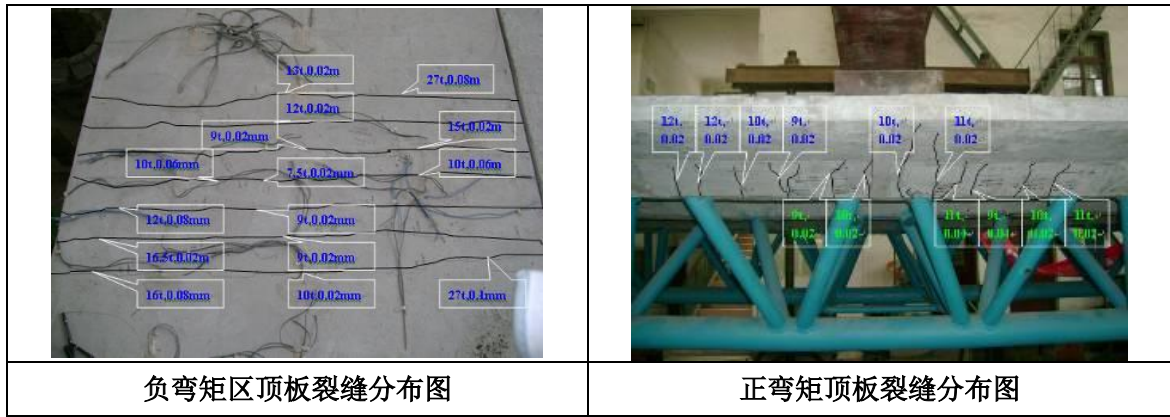
①干海子大桥钢管混凝土节点疲劳寿命超过 200 万次，疲劳试验结果证明该节点满足设计耐疲劳寿命的要求；②试验采用以疲劳裂纹深度穿透主管管壁的失效判别标准来确定疲劳寿命，是安全的。③试验证明钢管混凝土节点在满足相贯线焊接接头质量要求和焊趾作焊后修磨的条件下，疲劳强度可达到较高的水平。

(3)、主桁梁受力性能

①模型设计与制造，模型设计为两跨连续梁，分别按相似比例制造和测试正负弯矩、腹杆、横撑等部位的受力行为和破坏状态。



②节段模型破坏形态为顶板混凝土结构先期出现裂纹，后正弯矩跨中出现裂纹，继续加载，裂纹扩展速度慢，而钢管混凝土桁梁没有出现破坏的预兆，直至加载设备破坏。



③主要结论：试验加载过程中，结构破坏始于负弯矩区混凝土顶板首先出现的横向裂缝，出现裂缝后继续承载，直至试验荷载为 27t 时，停止加载，结构最大挠度 5.85cm。正弯矩区混凝土顶板受压，但应力水平低；钢管混凝土下弦杆受拉，F=16t 时钢管下缘屈服；F=24t 时，钢管全截面进入屈服，钢管腹杆与下弦杆的相贯节点位置并未出现破坏。

(4)、钢管混凝土混合桥墩

依托工程存在桁式、混合式桥墩的结构形式，根据受力可能存在的状态，拟定了桥梁荷载加载方式，其加载分级和可能存在的偏心距等因素均包括在加载图示中。

通过对荷载试验系列数据分析研究，建立数学、物理模型对比分析，推导了混合桥墩偏心弯矩折减系数计算方法。

$$\varphi_e = \begin{cases} \frac{1}{1+2e_0/h} & (e_0/h \leq \varepsilon_b) \\ \frac{\xi_0}{(1+\sqrt{\xi_0+\xi_0})(2e_0/h-1)} & (e_0/h \geq \varepsilon_b) \end{cases}$$

- 式中： φ_e —为混合桥墩的偏心距折减系数；
- h —为混合桥墩高度；
- e_0 —为桥墩竖向荷载的偏心距；
- ξ_0 —为钢管混凝土的约束效应系数；
- ε_b —为临界荷载效应系数。

(5)、动力试验

根据依托工程主梁、桥墩构造设计，进行了两跨、三桥墩的缩尺（1：10）模型振动试验测试。在弹性范围内的人工地震波一致激励下，当台面输入纵桥向加速度峰

值的人工波时，实测值与计算值的横桥向时程曲线变化趋势一致，表明桥梁结构抗震能力与计算值吻合，满足规范要求。继续提高台面输入纵桥向加速度峰值直至设备容许上限，未发现试验模型破坏迹象，动力位移满足安全容许要求。

4、开发了新体系

为了提高桥梁总体刚度，采用了长联和单端自由的主梁结构体系、墩梁固结连接（采用固结或阻尼连接）、混合桥墩等措施。

(1)、长联结构体系

①分联形式论证

该桥全长共计分为三联，第一联长度为 486.3 米，第二联长度为 1045.1 米，第三联长度为 279.6 米。第二联原分联方案称为分联形式 1，论证联长划分为三段（即三联）称为分联形式 2。

项 目	桥跨布置分联数据	联数
分联形式 1	$(45.1+3\times 44.5+11\times 62.5+3\times 44.5+45.1)$	1
分联形式 2	$(45.1+2\times 44.5) + (44.5+11\times 62.5+44.5) + (2\times 44.5+45.1)$	3

②正常使用状态的墩底内力和位移，短联墩底截面的内力均大于长联（实桥），表明采取长联形式联形（实桥）对正常使用状态下的受力、位移是有利的。

③动力性能分析表明，整联一阶自震频率为 0.204HZ，分为三联时，一阶自震频率为 0.181Hz。因此，长联结构体系的一阶自震频率更大。

④稳定性能的对比分析结果表明，长、短联的一阶稳定安全系数均为 7.51；但是长联扭转稳定安全系数大于短联的一阶扭转稳定安全系数，因此，长联能提高桥梁整体扭转刚度，特别是对于曲线桥梁更有利。

⑤抗震性能对比分析表明，采用长联的结构体系，可以大大降低地震内力的峰值，提高桥梁总体抗震能力；同时，可以降低地震荷载位移峰值，大大提高桥梁的抗震安全性能。

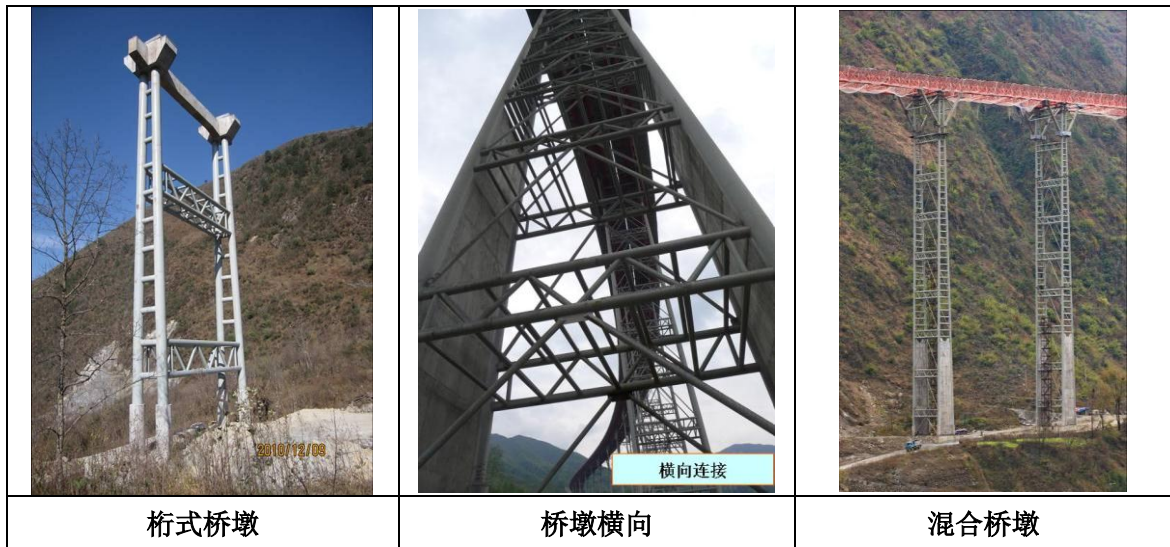
(2)、阻尼橡胶支座

每联桥梁的变位零点位于联长的中心，距离联长中心越远，要求主梁与桥墩相对位移量就越大，因此，设计支座的刚度与联长变位零点距离、桥墩刚度成反比，为此，开发了阻尼橡胶支座的新型结构，实现支座与桥墩刚度匹配。第二联 15~26 号桥墩与主梁固接；11~14 号、27~30 号桥墩有条件地释放纵向自由度；即桥墩为变刚度支座，在温度、收缩徐变、活载作用下，主梁可沿纵向自由移动，其计算容许值为±

50mm（无阻尼），超过该值后，橡胶支座锁定主梁，桥墩参与承受水平力。

（3）、桥墩刚度

提高桥墩刚度采用的技术为：①合理选用高墩钢管直径为 $\Phi 813\text{mm}$ ，当桥墩高度小于 60 米时，钢管直径为 $\Phi 720\text{mm}$ ；②桥墩纵桥向按 1:50 放坡，最高桥墩底纵桥向宽度达 7.8m；横桥向为整体式，宽达 13m，设置水平横撑和交叉撑；③凡是桥墩高度大于 60 米，在桥墩底部 30 米高度范围内纵桥向设置厚为 40cm 的腹板。



5、发展了新工艺

（1）、现场钢结构制造与组装

由于该桥位于拖乌山顶，交通运输十分困难、转运费用高，因此，采用桥位处直接加工制造钢结构。各车间之间，设置施工便道，满足施工车辆运输材料、构件或节段需要，在规定预制场进行组拼和焊接，实现复杂山区桥梁的建造技术。



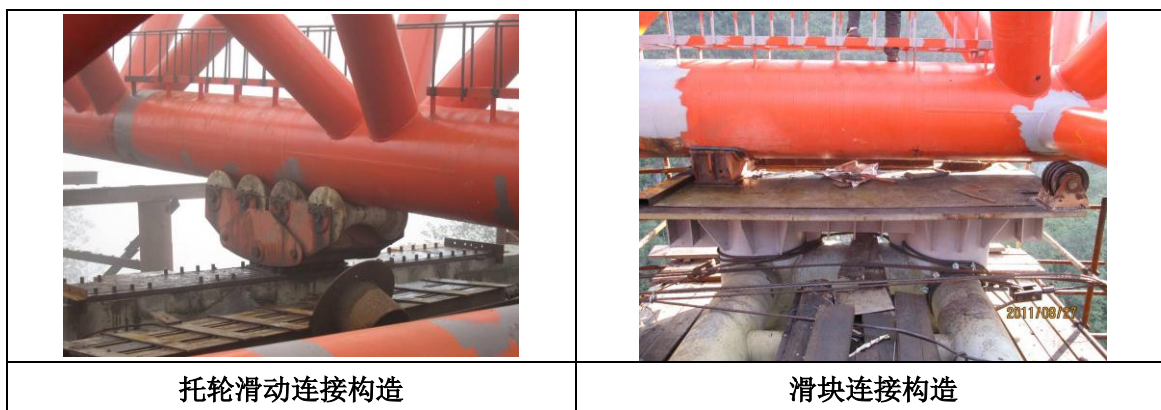
根据实际地形条件，开发的钢管混凝土桁式桥梁，其主梁、桥墩均适合于下料车

间、桁片组装车间、节段组装车间、工地胎架拼装的安装工艺。该工艺制造场地车间面积要求小、装运方便、运输车辆要求小，适合特别复杂山区地形条件桥梁建设，因此，该制造工艺解决了复杂地形条件钢结构制造的难题。

(2)、主桁梁安装

根据桥位地形和主梁架设过程，通过对梁上架梁、导梁架梁、整孔梁段竖直提升和多跨高墩曲梁拖拉架设等工艺论证研究，推荐多跨高墩曲梁拖拉工艺。

拖拉体系组成，包括反力装置、拖拉单元、牵引系统、滑动系统、前后导梁五部分。
 ①反力装置：由于桥墩高度较高，刚度小，将至少四个桥墩采用钢丝绳串联，形成整体受力的反力装置。
 ②拖拉单元：根据主梁拖拉过程中行走的曲线半径、主梁单元长度的弦弧差值和主梁拖拉就位后的合龙要求，将 0-14 跨主梁分为 (2+2+3+3+4) 五个拖拉单元，30-15 跨主梁分为 (5+6+2+1) 四个拖拉单元。
 ③牵引系统：在拖拉主梁单元，将穿心千斤顶与主梁拖拉单元固定，将钢绞线穿过千斤顶与反力支墩连接，张拉千斤顶施加反力于主梁拖拉单元上使其移动。
 ④滑动系统，采用拖轮或滑动垫块连接桥墩（包括支架）与拖拉主梁单元，减少拖拉单元的滑动摩阻力。



导梁构造：由于主梁采用多单元拖拉就位合龙，因此，拖拉单元前后均应设置导梁，导梁构造采用空心钢管桁梁结构，与拖拉主梁单元采用三角形变截面连接构造。



拖拉行走过程，拖拉总体设计为 15 号桥墩为合龙点，在 0 号桥台地基平台和 28-30 号桥墩支架平台上组拼（双幅）主梁合格后，向 15 号桥墩拖拉就位合龙。拖拉单元最小长度为 2×44.5 米、最大长度为 6×62.5 米，拖拉单元行走过孔最多的单元通过了 14 跨 62.5 米的桥梁，拖拉单元行走最小平曲线半径为 356 米，拖拉单元通过的最高桥墩高度为 107 米。

主梁拖拉单元体系转换，采用工具桁梁或摇臂扒杆拆出导梁，实现主梁与桥墩按照设计要求连接的体系转化。

四、主要技术经济指标的先进性及取得相关知识产权的情况

1、主要技术指标

该项目成果，在力学行为、桥梁设计理念、方法、构造、工艺等领域发展了桥梁技术，缩短了施工工期。

2、主要经济指标

该项目依托雅西高速公路干海子大桥，比预应力混凝土简支 T 桥梁减少投资 3600 万元。

3、社会效益

项目研究成果应用，不仅建成了依托工程桥梁，同时，减少混凝土用量 92000m^3 、减少钢材 4500 吨，为生态脆弱的山区实现了资源节约、环境友好理念，保证了重大国家长远利益。

4、学术论文与人才培养

（1）、学术论文

先后在国际学术会议论文集、全国学术正式期刊和公开发表的专题论文集上发表 10 余篇论文；其中，EI 收录 8 篇，国际论文 3 篇。

（2）、项目研究培养博士研究生 3 人，硕士研究生 7 人，高级工程师 16 人，技术工人 80 余人。

（3）、相关知识产权

项目相关研究成果，获授权国家专利技术“中小跨高墩长联桥梁构造”（专利号：ZL 2011 2 0112418.3）、“钢管混凝土混合桥墩”（专利号：ZL 2011 2 0122696.7）、“桥梁阻尼限位抗震橡胶支座”（专利号：ZL 2011 2 0112430.4）3 项。