DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250977

组合销组合梁创新设计

陈　亮,颜　海,姜　洋
[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘　要: 组合销组合梁取消了常规组合梁的钢顶板及其上焊钉,钢腹板按照一定形状切割后嵌入混凝土中,使得钢与混凝土形成组合销连接件。该新型预制组合梁结构有利于提升桥梁工业化水平,因此,首先总结了组合销组合梁在国外的技术发展,然后介绍了泉州中环城匝道桥组合销组合梁的创新设计。泉州中环城匝道桥标准跨径 30 m,结构简支,桥面板连续,4 跨 1 联;桥梁总宽 8.5 m,采用 4 主梁结构,组合梁高 1.6 m;钢梁采用 Q345C,桥面板采用 C50;横桥向桥面板与 2 片钢纵梁在现场先形成 π 形预制组合梁,分别吊装至墩顶后再采用宽 0.25 m UHPC 纵向湿接缝连接。由于取消了中横梁和腹板加劲设置,组合梁用钢量仅 148 kg/m^2,既降低了工程成本,又便于施工及后期管养。

关键词: 组合销;组合梁;中横梁;工业化;设计优化
中图分类号: U443.3;TU997　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0001-04

Innovative Design of Combined Pin Composite Beam

CHEN Liang, YAN Hai, JIANG Yang
[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The combined pin composite beam eliminates the steel top plate and the welding nails on it of the conventional composite beam. The steel web is cut into a certain shape and then embedded in the concrete, which makes the steel and concrete form a combined pin connection. This new precast composite beam structure is conducive to enhancing the industrialization level of bridges. Therefore, the technical development of combined pin composite beams at home and abroad is summarized firstly. And then the innovative design of combined pin composite beams for the ramp bridges in Zhonghuan Town of Quanzhou is introduced. The standard span of the ramp bridges in Zhonghuan Town of Quanzhou is 30 m, the structures are simply supported, the bridge deck is continuous, and the four-span per unit is adopted. The total bridge width is 8.5 m. The four-girder structure is used. The composite beam is 1.6 m high. The steel girders are made of Q345C, and the deck slabs are made of C50. The transverse deck slabs and two steel longitudinal girders are firstly formed into the π-shaped prefabricated composite beams on site, which are respectively hoisted onto the pier top, and then connected by a 0.25 m wide UHPC longitudinal wet joint. Due to the elimination of the middle crossbeam and web stiffening settings, the steel consumption of the composite beam is only 148 kg/m^2, which not only reduces the engineering cost, but also facilitates the construction and later maintenance.

Keywords: combined pin; composite beam; middle crossbeam; industrialization; design optimization

0　引　言

组合结构梁充分利用了钢结构抗拉和混凝土结构抗压各自的优点,实现了受力分配的合理优化。另外,凭借其预制装配化的便捷性,契合了工业化绿色建造的需求。因此,组合结构桥梁在国内外均得到了广泛应用。然而,组合结构材料指标相对偏高,关键构造的设置尚存优化空间,需要通过精细化设计来降低工程成本。另外,组合结构预制装配化程度尚有待进一步发展,需要结合新型组合结构的开发来提升桥梁工业化水平。

传统钢板组合梁由工字形钢梁和混凝土顶板组成。中小跨径组合梁的钢梁上翼缘距组合截面中性轴较近,对截面抗弯承载力贡献很小,其尺寸由焊钉布置需求决定,钢梁上翼缘材料未得到充分利用。在欧洲发展起来的 PRECOBEAM 体系取消了钢梁的上翼缘板,钢腹板按照一定形状切割后嵌入混凝土中,并在钢销凹槽之间插入钢筋,使得钢与混凝土形

收稿日期:2025-10-15
基金项目:上海市科委科技计划项目(23DZ1202305)
作者简介:陈亮(1975—),男,博士,正高级工程师,从事组合结构桥梁的设计工作。

成组合销结构[1]。与传统连接件相比，组合销结构的静力性能和疲劳耐久性能均具有显著优势。与传统组合梁相比，该结构无需钢顶板及焊钉焊接施工，有利于降低工程成本、提高施工效率。

本文首先总结了组合销组合梁在国外的技术发展，然后以泉州中环城项目为背景，介绍了组合销组合梁的创新设计。

1　技术发展及基本形式

1.1　技术发展

组合销连接件最早可追溯到 20 世纪 80 年代由 Leonhardt 发明的开孔板连接件。但因实际施工时，这种闭合边界形式的开孔板连接件（PBL 连接件）在钢筋穿孔时较为困难，会影响施工效率，为克服这一缺陷，可以开放钢板的闭合边界，形成开口形式的连接件。由于钢板上的切口相对于钢板的总表面积来说很小，这种连接件的破坏模式为混凝土剪切破坏或局部压溃，所以这类连接件也被称为混凝土连接件。

为充分发挥钢材和混凝土的性能，近年来出现了一种新型剪力连接件，由特定形状的钢板（钢销）和钢板凹槽内的钢筋混凝土（混凝土销）两部分组成，被称为组合销连接件。其破坏模式可能是混凝土破坏，也可能是钢材失效破坏。在改进过程中逐渐产生了如图 1 所示的 4 种形状，分别为 SA 形、PZ 形、CL 形、MCL 形[2]。其中 MCL 形组合销连接件由于切削半径平滑，在静力性能和疲劳耐久性能方面均具有显著优势，被认为是最适合用于桥梁工程的形式。与传统连接件相比，组合销连接件承载能力更高，并有足够的变形能力，属于延性剪切连接件。此外，施工时只需将钢筋放入钢销凹槽中的指定位置即可，避免了 PBL 连接件钢筋插入困难的问题，提高了施工效率，因此具有良好的发展前景。

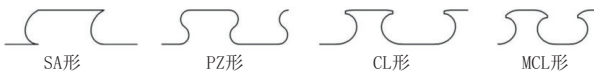

图 1　常见的组合销连接件形状

组合销连接件受力性能研究开始于 2006 年欧洲的国际研发项目，研究者采用有限元和试验方法对不同形式连接件的静力性能和疲劳性能进行了研究。2010 年，Lorenc 等[3]首次提出了 MCL 形组合销连接件，并通过试验研究了其抗剪性能和钢销的应力分布情况。2011 年，Dudzinski 等[4]对欧洲研发项目中有关疲劳试验、数值分析的方法和结果进行了详细阐述，通过梁式试验发现 MCL 形组合销连接件的疲劳性能优于 PZ 形组合销连接件。2017 年，Classen 等[5]对 PZ 形和 MCL 形组合销连接件的剪力滑移曲线进行了研究，提出了适用于不同混凝土等级、钢销尺寸、混凝土保护层厚度的组合销连接件的剪力滑移曲线公式。2018 年，Kopp 等[6]给出了 MCL 形和 PZ 形组合销连接件的构造细节和配筋规定，提出了组合销连接件钢破坏和混凝土破坏的破坏模式（见图 2），推导了不同破坏模式下组合销连接件的抗剪承载力计算公式。2020 年，Kożuch 等[7]采用理论推导、试验数据库分析、试验和数值分析相结合的方式，对 MCL 形组合销连接件在正常使用极限状态以及承载能力极限状态下的力学行为进行了系统研究，为后期的设计标准编制提供了依据。2020 年，Lorenc[8]以 Wierna Rzeka 桥为背景，对采用 MCL 形组合销连接件的预制梁进行了疲劳试验，钢销的厚度为 27 mm，试验表明混凝土发生了疲劳破坏。2020—2022 年，Christou 团队[9-11]对组合销连接件的疲劳性能开展了系统研究，基于试验总结了常见的疲劳破坏模式，并完善了疲劳设计方法。

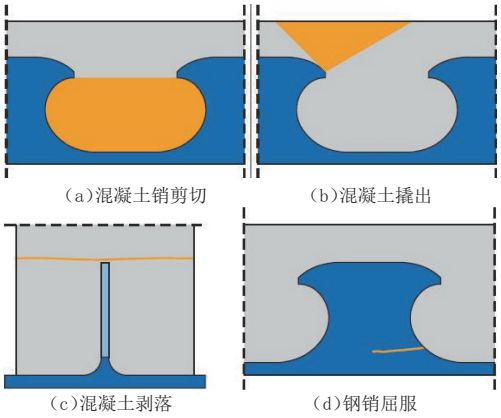

图 2　组合销连接件破坏模式

国内对组合销连接件的相关研究较少。2009 年，李现辉等[12]通过 10 个推出试件试验，研究了腹板嵌入式组合梁中连接件的抗剪承载力，结果表明连接件具有较高的受剪承载力，且随混凝土强度等级、钢板厚度的增加而提高，并根据试验结果拟合了抗剪承载力计算公式。2020 年，孔凡磊等[13]采用推出试验方法，对 MCL 形组合销连接件和 PBL 连接件承载力进行了对比研究，试验考虑了椭圆孔、黏结摩擦力等影响因素，基于试验提出了考虑椭圆孔作用的 MCL 形连接件承载力计算公式。

1.2　基本形式

随着组合销连接件的发展，组合销组合梁也在

逐步发展，截至目前主要有 3 种形式，见图 3[14]。类型Ⅰ为钢腹板组合梁，组合销连接件布置于组合梁中性轴附近，典型实例如罗马尼亚 A1 高速公路桥[15]；类型Ⅱ为体外钢增强混凝土组合梁，组合销连接件距组合梁中性轴较远，钢截面部分受拉，可认为是混凝土结构的体外钢筋，典型实例如罗马尼亚 Frâncesti 新桥[14]；类型Ⅲ为混合腹板组合梁，梁体腹板由纯钢截面（跨中段）、纯混凝土截面（支点段）、钢-混凝土组合截面（过渡段）混合而成，能在增大刚度和稳定性的同时减轻结构自重，其典型实例如波兰的 Elblag 桥[2]。

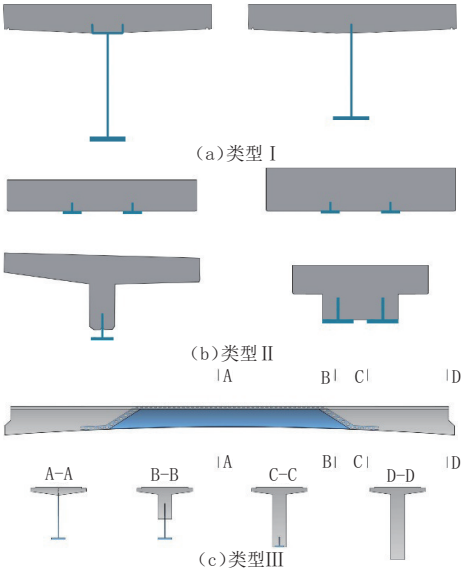

图 3　组合销组合梁基本类型

2　创新设计

2.1　设计要点

泉州中环城贯通工程包括黄龙北大道快捷化改造工程、黄龙南大道快捷化改造工程、南环路快捷化改造工程。其中南环路快捷化改造工程包括南环路连续高架、南环路与黄龙南大道 2 条转向匝道。部分转向匝道采用组合销组合梁方案，效果如图 4 所示。匝道桥标准跨径 30 m，结构简支，桥面板连续，4 跨 1 联，共 3 联。桥梁总宽 8.5 m，结构宽度 8.2 m，采用 4 主梁结构，组合梁高 1.6 m，其典型断面见图 5。

图 4　组合销组合梁桥效果图

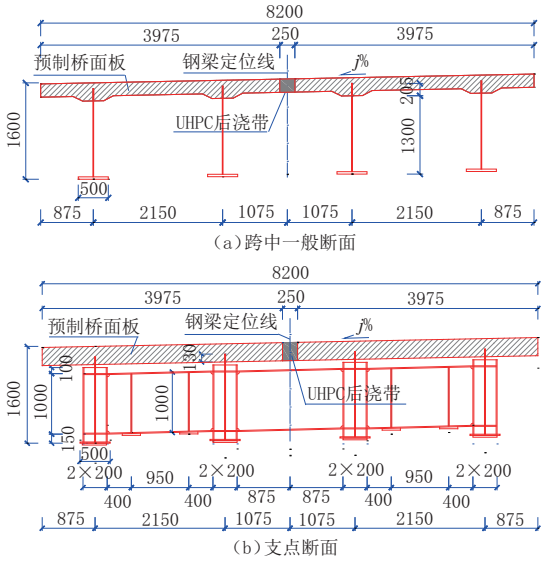

图 5　组合销组合梁横断面图（单位：mm）

混凝土桥面板标准断面横桥向跨中板厚 22 cm，钢纵梁处板厚 30 cm，端部设置 30 cm 等厚段。钢纵梁由腹板和底板组成，钢腹板竖直布置，支点段板厚 16 mm，跨中段板厚 12 mm，光面设计，未设置纵横向加劲肋；底板宽度 500 mm，支点段板厚 20 mm，跨中段板厚 40 mm。仅在支点处设置端横梁，端横梁梁高 1 000 mm，跨间不设置中横梁。钢梁采用 Q345C，预制桥面板采用 C50。组合销连接件主要应用于预制组合梁中，横桥向桥面板与 2 片钢纵梁在现场先形成 2 片 π 形预制组合梁，单片组合梁重约为 98 t，吊装至墩顶后采用宽 0.25 m UHPC 纵向湿接缝连接。组合梁设计中钢主梁用钢量为 148 kg/m^2，具有良好的经济性能。

钢纵梁腹板顶端设置 MCL 形组合销连接件，以实现钢与混凝土之间的连接。在选择组合销剪力连接件板厚时，综合考虑了钢腹板总体抗剪受力需求及组合销局部受力需求，避免因板厚较小而出现钢板破坏失效模式，同时也避免因板厚较大而造成钢材浪费。连接件纵向间距 250 mm，高 100 mm，钢齿构造大样见图 6。

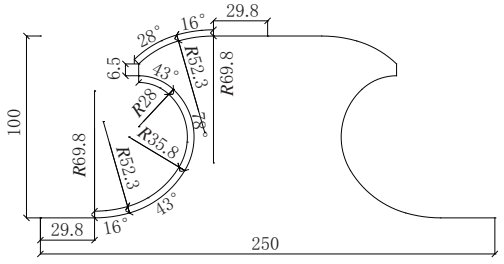

图 6　钢齿构造大样图（单位：mm）

组合销在混凝土板内需满足保护层要求，连接件上方混凝土厚度 95 mm，下方混凝土厚度 105 mm，

混凝土总高 300 mm。剪力销底部设置贯穿钢筋后将大幅提升组合销抗剪承载力，因此在每个销内配有 2 根 ϕ20 的钢筋，兼作桥面板横桥向底部受力钢筋。为保证承力时钢销两侧混凝土的完整性，在钢销两侧配置 ϕ16@125 mm 的约束钢筋。桥面板局部配筋如图 7 所示。组合销相关构造和配筋参数列于表 1，可见各参数均符合文献[1]要求。

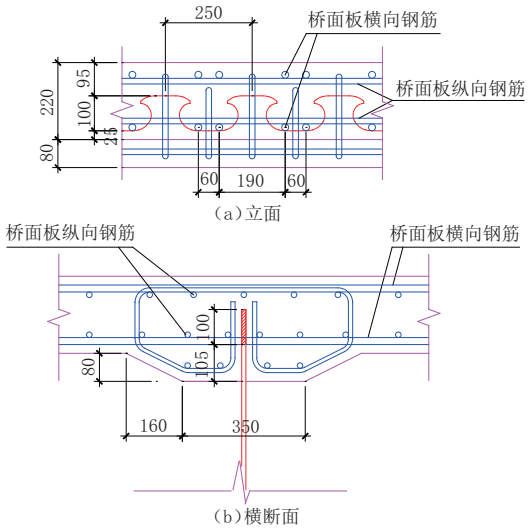

图 7　桥面板局部配筋（单位：mm）

表 1　组合销构造及配筋参数

构造参数	工程设计取值	文献[1]要求
组合销纵向间距/m	250	150~500
钢腹板厚度/m	16/12	6~40
钢销厚度与钢销高度之比	0.16/0.12	0.08~0.5
组合销横向间距/mm	2 150	≥120
组合销上方混凝土厚度/mm	95	≥20
组合销下方混凝土厚度/mm	105	≥20
混凝土总高/mm	300	≥250
销内钢筋/mm^2	628	$\geqslant\frac{P_{ED}\cdot 0.5}{f_{sd}}=310$ mm^2（P_{ED}为单个组合销承受剪力，f_{sd}为钢筋的强度设计值，下同）
约束钢筋/mm^2	402	$\geqslant\frac{P_{ED}\cdot 0.3}{f_{sd}}=186$ mm^2

2.2　分析验证

该工程组合梁设计中取消了常规组合梁的钢顶板、中横梁及相关加劲设置，现对该优化设计进行分析验证。

首先对 0~3 道中横梁作参数分析。中横梁在纵桥向均匀布置，梁高 500 mm，其断面示意图见图 8。对于不同中横梁数量方案，单车道或 2 车道偏载工况下的桥面板最大竖向挠度、钢梁扭转变形、基本组合下钢梁和桥面板应力见表 2。

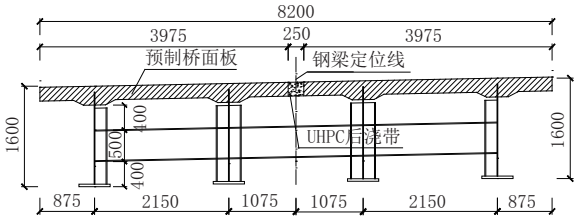

图 8　中横梁断面示意图（单位：mm）

表 2　不同中横梁数量方案计算结果

中横梁数量	汽车荷载下桥面板最大竖向挠度/mm	汽车荷载下钢梁扭转变形/(10^{-3} rad)	基本组合下底板拉应力/MPa	基本组合下桥面板压应力/MPa
0	22.5	2.72	258.7	−18.61
1	23.3	2.83	257.1	−18.30
2	23.1	2.82	256.1	−18.63
3	23.4	2.83	259.0	−16.77

由表 2 可见，设置中横梁后，结构竖向挠度及扭转变形略有增大，但增幅均不到 5%，钢梁以及桥面板应力均无明显变化。由此可得，中横梁设置对结构刚度和强度均无明显影响。究其原因为混凝土桥面板已为结构提供了较强的整体刚度，在密梁体系下，取消中横梁设置是合理可行的。

参照《铁路桥梁钢结构设计规范》（TB 10091—2017）对腹板局部稳定性进行验算，计算得腹板最小安全系数为 1.59>1.35，腹板稳定满足该规范要求，故腹板不设竖向和水平加劲肋是合理可行的。

3　结　语

（1）组合销组合梁设计中取消了常规组合梁的钢顶板及其上焊钉，预制组合梁结构有利于提升桥梁工业化水平。

（2）该工程组合销组合梁在优化分析基础上取消了中横梁及相关加劲设置，进一步降低了工程成本，并便于后期管养。

（3）该工程于 2024 年 10 月开工建设，计划于 2026 年 6 月前竣工通车，其组合销组合梁设计可为类似桥梁设计提供参考。

参考文献：

[1] Design Guide: Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission[R]. Berlin：SSF Ingenieure AG, 2012.

[2] LORENC W. Composite dowels: the way to the new forms of steel-concrete composite structures[Z]. Wroclaw,Poland: 2020.

[3] LORENC W, KUBICA E, KOŻUCH M. Testing procedures in evaluation of resistance of innovative shear connection with composite dowels[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2010, 10(3):

（下转第 10 页）