

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.260159

压型钢板-混凝土组合板在人非桥中的应用

张彦

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 对某人非桥采用压型钢板-混凝土组合板作为桥面板的设计方案展开分析,研究这种常见建筑楼板形式应用于桥梁结构中的可行性和先进性。通过分析压型钢板-混凝土组合板在桥梁结构中的特殊功能需求、对比其与常规钢-混凝土组合桥面板在构造及原理方面的异同,梳理主要的设计思路。针对非机动车荷载和室外环境的特殊需求,具体分析压型钢板-混凝土组合板结合面的纵向抗剪能力、抗冲切能力和抗疲劳能力等关键指标,验证压型钢板-混凝土组合板的适用性,为桥梁设计提供依据。

关键词: 压型钢板-混凝土组合板;人非桥;纵向剪切;抗冲切;抗疲劳

中图分类号: U448 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2026)08-0199-05

Application of Profiled Steel Sheet - Concrete Composite Slab in
Pedestrian and Non-motored Vehicle Bridge
ZHANG Yan

[Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The design scheme of using profiled steel sheet - concrete composite slabs as the bridge deck for a pedestrian and non-motored bridge is analyzed, and the feasibility and advancement of applying this common building floor slab form in bridge structures are studied. By analyzing the special functional requirements of profiled steel sheet - concrete composite slab in bridge structures, and comparing the similarities and differences in structure and principle between it and the conventional steel-concrete composite bridge deck, the main design ideas are sorted out. Aiming at the special needs of non-motored vehicle loads and outdoor environment, the key indicators such as the longitudinal shear resistance, punching resistance and fatigue resistance of the joint surface of the profiled steel sheet - concrete composite slab are specifically analyzed, and its applicability is verified, providing a basis for the bridge design.

Keywords: profiled steel sheet - concrete composite slab; pedestrian and non-motored vehicle bridge; longitudinal shear; punching resistance; fatigue resistance

0 引言

压型钢板-混凝土组合(楼)板(见图1)是高层建筑中一种常见的楼板结构形式,是由混凝土板与压型钢板共同受力的组合结构。压型钢板位于组合板的底部,发挥类似受拉钢筋的作用,提供截面抗拉承载力;混凝土板位于组合板的上层,提供截面抗压承载能力。两者通过接触面的机械咬合、摩擦力及支承处剪力钉的共同作用实现稳定结合^[1-9]。压型钢板是标准化成品,板厚一般在1.5 mm以内。

在桥梁结构中,钢-混凝土组合桥面板得到较为广泛的应用,它由钢底板和混凝土通过剪力钉、开孔

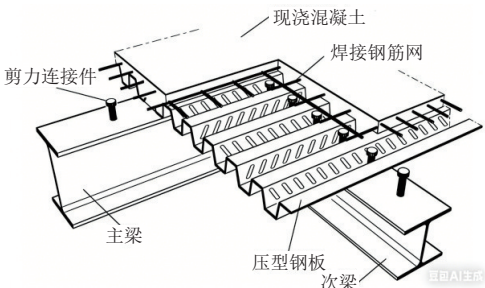


图1 压型钢板-混凝土组合板构造

板连接件等剪力构件结合而成。在钢-混凝土组合桥面板中,钢底板多采用钢板、带肋钢板或波折钢板,连接件沿横向和纵向均匀分布,因此更为牢固;混凝土多采用高强度、高性能材料,如超高性能混凝土(UHPC)等^[10-13]。这种桥面板整体构造更类似于钢-混组合梁结构(见图2),多用于车行桥设计。由于钢-混凝土组合桥面板的钢板刚度(板厚在6 mm

收稿日期: 2026-02-11
作者简介: 张彦(1980—),女,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

以上)较大,且连接强度远高于压型钢板-混凝土组合板,因此,其组合作用效果明显不同。

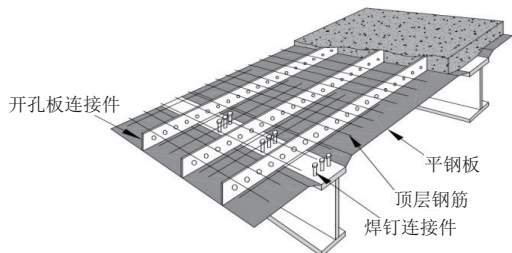


图2 桥梁结构中常规的组合桥面板构造

这2种组合板的共同优点包括3个方面:一是相较于钢筋,钢板提供的抗拉承载力更大,结构抗弯强度更高;二是钢板由工厂预制,防腐效果更好,有利于预制化施工;三是钢板既可以作为混凝土浇筑的模板,又能作为施工作业平台,不仅节省了模板成本,还满足了快速施工的要求。

相较于常规桥梁组合桥面板,压型钢板-混凝土组合板一般不布置或较少布置底缘钢筋,除支承处外不布置剪力件,钢板不需焊接,因此,其构造更为简单,预制化程度更高,经济性更好,与“人行道与非机动车道桥”(下文简称“人非桥”)桥面板的适配性很高。但目前学界尚未对压型钢板-混凝土组合板在桥梁结构中的应用开展系统性研究。

1 主要研究内容

2种组合板在构造与设计方面既有相似,又存在很大区别。

压型钢板-混凝土组合(楼)板的设计、施工和验收,目前主要遵循《组合楼板技术规程》(T/CECS 273—2024)^[14]的规定,重点关注建筑规范中的相关荷载及其计算规定,以及室内使用场景。桥梁结构中的钢-混凝土组合桥面板的设计与发展,则源于建筑的组合楼板。其在结合组合梁桥的设计及受力特点的基础上,经过一系列的理论与试验研究^[15],形成了自己的体系。2025年《钢-混凝土组合桥面板技术规程》(T/CECS 1934—2025)^[16]颁布,主要是对车行桥的荷载需求作出规定。

本文主要研究压型钢板-混凝土组合板在人非桥中的应用,围绕组合板的设计、计算方法及理论分析,讨论其在桥梁工程应用中的适用性和设计要点。

2 案例工程

本文案例工程为山西省某地1座新建人非桥,主桥跨越拥有“双向4车道+非机动车道”的城市主干

道,道路宽度为20 m,设计车速为40 km/h,落地梯(坡)道位于道路两侧。受到占地面积及地下构筑物的限制,梯(坡)道长度有限,因此需尽量降低主桥梁高度。在综合对比景观影响、造价、施工难度与施工周期等因素后,主桥设计最终采用简支鱼腹式钢桁架梁桥形式(见图3)。

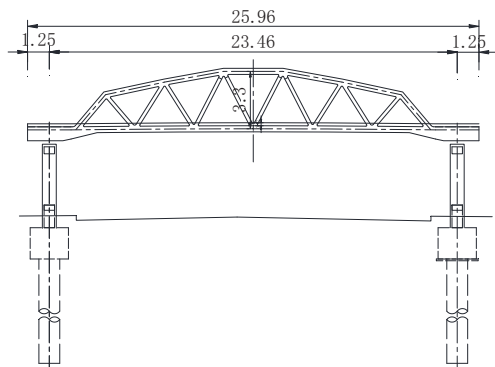


图3 主桥立面图(单位:m)

主桥跨径为23.46 m,桥面宽度为4.5 m,主梁跨中处矢高为3.3 m。断面采用倒梯形桁架结构(见图4),上弦杆、下弦杆、斜腹杆及平联均采用Q345qD材质的矩形钢管。

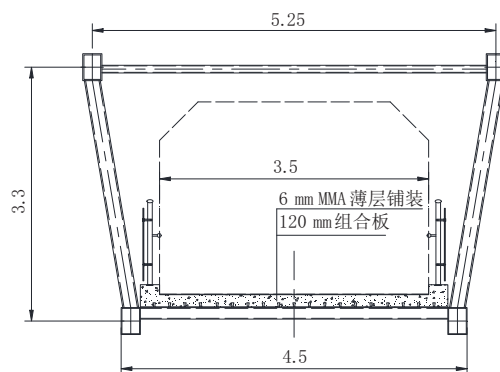


图4 跨中处断面(单位:m)

由于人天桥下方道路有保通要求,项目团队在对比了钢筋混凝土桥面板、“型钢龙骨+花岗岩面板”等方案后,最终采用压型钢板-混凝土组合板作为桥面板的结构方案。该方案的优点是既可以将压型钢板作为施工操作平台,省去模板支设、脚手架搭建等工序,又可大幅减少钢筋焊接和绑扎等现场作业量。该方案预制化程度高、施工速度快、耐久性好。

施工方案将压型钢板-混凝土组合板放置于下平联之上,在平联处使用剪力钉,将压型钢板与下平联固结。压型钢板在平联处可连续通过,也可采用搭接方式铺设,搭接长度 ≥ 50 mm,平联间距为3.5 m。压型钢板型号为YXB65-185-555(B),材质为Q355B,壁厚为0.91 mm。混凝土采用C40混凝土,桥面板厚度为120 mm(见图5)。方案设计在每道平联对应位

置的压型钢板波谷处设置 $\phi 19 \times 80$ 剪力钉,在组合板上缘布置1层 $D10@100 \times 100$ 钢筋网片,作为负弯矩受力构建使用。

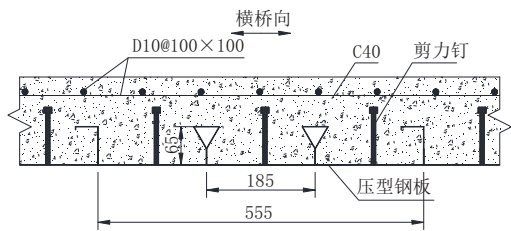


图5 组合板断面(单位:mm)

3 主要设计分析要点

3.1 主要设计理念的区别

压型钢板-混凝土组合板与钢-混凝土组合桥面板,均涉及施工阶段和使用阶段的设计。

在施工阶段,2种组合板除了荷载组合系数有所差别外,主要验算的内容大致相同。在施工阶段,压型钢板-混凝土组合板的主要控制因素是在浇筑混凝土板前,确定压型钢板空板承受施工荷载的能力。由于压型钢板为标准化成品,一般设计可以按照厂家提供的产品手册,结合施工荷载需求,挑选合适的钢板型号。

2种组合板设计主要关注各自在使用阶段的验算(见表1)。而本文关注的是建筑构件在桥梁结构中的应用,两者的关注点略有区别。

表1 设计规范的内容比较

极限状态	验算内容	压型钢板-混凝土组合板 ^[14]	钢-混凝土组合桥面板 ^[16]
承载能力 极限状态	正截面抗弯承载力	○	○
	斜截面抗剪承载力	○	○
	抗冲切验算	×	○
	纵向抗剪承载力	○	×
	连接计算	○	○
	疲劳计算	×	○
正常使用 极限状态	混凝土抗裂	○	○
	刚度(变形)验算	○	○
	舒适度验算	○	×
偶然状态	耐火设计	○	×

注:○表示规范明确需要验算;×表示规范未明确。

从设计规范的内容比较可知,不同设计规范侧重的内容不同。《组合楼板技术规程》《钢-混凝土组合桥面板技术规程》的内容有许多共通处。例如,对于正截面抗弯承载力计算,2部规范均按照“受拉区混凝土退出工作,受压区的混凝土、钢筋、钢材分别达到各自设计强度”的假定进行计算。区别在于《组

合楼板技术规程》不计算受压钢筋的作用,但由于这部分钢筋的配筋率一般较小,如案例人非桥为 $D10@100$,其所产生的差别往往不影响计算结果。

通过长时间的实践应用,压型钢板-混凝土组合板结构设计已经积累了丰富的经验。例如,在抗弯、抗剪、连接及开裂设计等方面,压型钢板-混凝土组合板均已有成熟的经验。通过对比分析发现,案例桥梁的设计结果与建筑规范的要求相差不大,常规楼板设计本身的安全富裕度,可以覆盖桥梁结构的需要,不影响结构的安全性。因此,下文主要针对差异化的部分进行具体计算分析与对比。

3.2 纵向抗剪设计

混凝土和钢板间的水平剪力与承载力计算,是压型钢板-混凝土组合板结构中的一重要安全指标。在常规桥梁结构设计中,由于全桥纵向与横向均满布剪力构件,设计中可假定水平剪力均布,并由剪力钉等抗剪构件承受,最终转化为连接件的设计。但在压型钢板-混凝土组合板中,设计仅在支承处布置了剪力构件,因此,水平剪力主要由压型钢板和混凝土结合面处的抗滑移力承担。这种受力机理与常规桥梁结构设计有本质上的区别,需要进行纵向抗剪设计。

水平剪力主要包括3种:一是在组合构件受弯时,由钢材与混凝土2种材料间的应变差产生的剪力;二是混凝土收缩徐变产生的剪力;三是温差等效应产生的附加剪力。建筑结构设计主要针对第一种弯曲变形开展剪力效应研究,并且该工况下的计算结果,往往不作为设计控制条件。而桥梁由于处于户外露天的使用环境,后2种因素的影响更为突出,需要重点研究。

《组合楼板技术规程》给出水平剪力设计值(V)的计算公式:

$$V = \gamma V_{1G} + V_{2G} + V_{2Q} \tag{1}$$

式中: γ 为与施工支撑条件相关的支撑系数; V_{1G} 、 V_{2G} 、 V_{2Q} 分别为自重、其他恒载、活载产生的剪力。

由于厂家提供的产品存在区别,为保障桥梁安全,取 $\gamma = 1$ (全支撑)进行设计。

《组合楼板技术规程》未给出混凝土收缩徐变、温差在组合板结合面产生的水平剪力设计值的计算方法。

参考《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[17]关于组合板的相关计算公式取值。

混凝土收缩徐变或温差引起的组合板结合面最

大单位长度在梁端产生的纵桥向水平剪力 V_{ms} 计算如下:

$$V_{ms} = \frac{2 \times V_s}{l_{cs}} \quad (2)$$

式中: V_s 为混凝土收缩徐变及温差的初始效应在结合面产生的水平剪力; l_{cs} 为水平剪力的传递长度, 在主梁相邻腹板间距和 $1/10$ 主梁长度 2 个值中取较小值。

根据公式(1)(2)可知, $V_{恒+人群} = 7.8 \text{ kN}$, $V_{恒+非机} = 6.1 \text{ kN}$, $V_{ms} = 2 \times (29.2 + 8.2) / 2.596 = 29.3 \text{ kN}$ 。

压型钢板-混凝土组合板与钢-混凝土组合桥面板的抗剪承载力计算也有很大区别。压型钢板-混凝土组合板的抗剪切滑移机制, 依靠结合面的黏结摩擦力、机械咬合作用及端部用于锚固的栓钉共同作用。虽然端部的栓钉可以有效提高组合板的抗剪承载力(20%~30%^[18-21]), 但《组合楼板技术规程》仅考虑第一种作用情况, 其纵向抗剪承载力计算公式如下:

$$V_u = m \frac{A_s h_0}{1.25a} + k f_t b h_0 \quad (3)$$

式中: A_s 为计算宽度内组合(楼)板中压型钢板的截面面积, mm^2 ; m 、 k 为剪切黏结系数, 根据试验或查表获得; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值, N/mm^2 。

水平抗剪承载能力 $V_u = 38.7 \text{ kN}$, $\geq 37.1 \text{ kN}$, 可见滑移剪切破坏主要发生在板端 50 cm 范围内。方案设计可通过优化压型钢板形态, 以提升结合面的黏结性能, 以及适当增加钢板厚度、合理提高混凝土强度、设置结构缝等措施, 避免发生滑移剪切破坏。

3.3 抗冲切验算

案例项目位于城郊处的居民聚集区, 附近居民驾驶电瓶车等非机动车出行的需求较大。因此, 项目设计需要验算组合板的抗冲切能力。《组合楼板技术规程》中无相关规定, 可以参考《钢-混凝土组合桥面板技术规程》中的相关规定, 验算桥梁的安全性。

采用《城市桥梁设计规范》规定的非机动车轮重 5 kN 作为局部计算集中荷载, 参考荷兰规范规定的 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 作为轮压接触面积, 验算压型钢板-混凝土组合板的抗冲切承载力 V_u :

$$V_u = 0.6 f_{tk} c_p h_c \quad (4)$$

式中: f_{tk} 为混凝土的轴心抗拉强度设计值; c_p 为轮压接触面扩散至钢板顶面的临界周界长度。

计算得 $V_u = 137.1 \text{ kN}$, 大于轮重 5 kN。

3.4 抗疲劳验算

人非桥设计并不强制要求验算疲劳效应。但本项目中存在大量的非机动车上桥需求, 桥面板需直接承受非机动车的车轮动力荷载, 加上压型钢板厚度普遍偏薄, 可靠性不如普通的钢-混凝土组合桥面板, 容易出现局部凹陷等初始缺陷, 导致应力集中, 叠加疲劳作用会加重结构的安全隐患。因此, 设计需要综合考虑, 并进行抗疲劳验算。

为计算疲劳应力幅, 设计人员采用 MIDAS Civil NX 软件, 建立“3 m×3.5 m 实体单元+薄板单元”的有限元模型, 横向取 1 块板宽(555 mm)的范围进行建模(见图 6)。

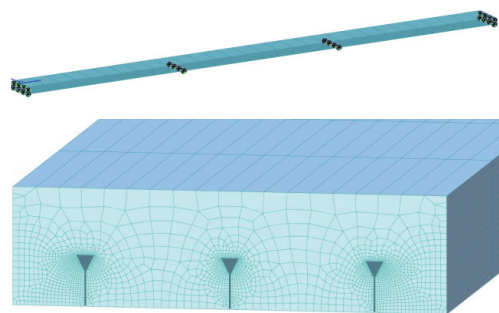


图6 MIDAS Civil 有限元模型

模型共有 10 830 个板单元和 69 810 个实体单元。设计人员在压型钢板波谷中央设置竖向支承(模拟剪力钉与主桥桁架的固定约束)以及两端的纵向弯矩约束, 为减少运算时间, 未模拟横向的弯矩约束。因此, 压型钢板内侧与边缘的波谷处钢板应力存在一定差异, 但计算结果显示, 该差异较小, 不影响计算结果, 可以忽略(见图 7)。

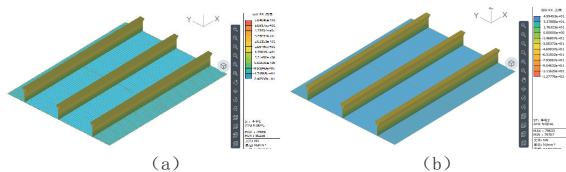


图7 压型钢板在车轮荷载下应力包络图(单位: MPa)

车轮荷载按 5 kN、 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 的接触面积计算, 不计冲击。通过计算分析, 非机动车车轮荷载的疲劳应力幅: 压型板波峰处约为 169 MPa、波谷处约为 72 MPa, 均大于《钢-混凝土组合桥面板技术规程》规定的“应力幅小于 50 MPa”的要求。因此, 本项目需根据该桥位设计预期的非机动车交通流量, 判断是否需要钢板进行加强。

4 主要结论

本文通过对案例桥中的压型钢板-混凝土组合

板的设计计算,比较了建筑组合(楼)板和桥梁组合桥面板设计观念的异同,主要分析了两者在使用阶段的各项安全性能。

(1)两者在正截面抗弯承载力、斜截面抗剪承载力、连接计算等方面的思路较为一致,常规压型钢板-混凝土组合板的设计比较容易满足设计要求。

(2)压型钢板-混凝土组合板应用于桥面板中,主要需关注温差、混凝土收缩徐变等引起的水平剪力,以及非机动车车轮荷载产生的局部效应等。

(3)通过计算发现,由混凝土收缩徐变产生的水平剪力,约是弯曲变形和温差产生的水平剪力的 10 倍,剪力位置位于组合板端部。这也与这种组合板结构在后期时常出现端部开裂等病害相印证。因此,对于安全要求更高的桥梁结构,设计应更加重视,可以通过设置压型钢板凸起块、在下缘布置纵向与横向钢筋、增加剪力连接件等措施,增大钢板与混凝土间的黏结力。

(4)压型钢板-混凝土组合板具有良好的、承受非机动车车轮冲切作用的能力。

(5)在压型钢板-混凝土组合连续板中,钢板的疲劳应力幅较大,已超过车行桥规范规定的相关要求。虽然人非桥未设相关规定,但说明该组合板在使用中仍存在钢板(尤其是折角处)局部损伤的风险,影响结构的耐久性,在后期日常养护时,应多关注这些部位、及时修复,必要时控制非机动车的流量。

压型钢板-混凝土组合板是一种构造和施工简单、经济性好、设计合理的组合结构,它具有承受一定车轮荷载的能力。未来通过加大板厚、采用高强低缩混凝土等方法,可以进一步提高结构的承载能力,甚至可能应用于车行桥中。

参考文献:

- [1] Friberg B. Frictional resistance under concrete pavements and restraint stresses in long reinforced slabs[J]. Highway Research Board Proceedings, 1960(37): 1-15.
- [2] Dallaire E E. Cellular steel floors mature[J]. Civil Engineering, 1971, 41(7): 70-74.
- [3] Reinhold M S. Composite steel-deck concrete floor system[J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102(5): 899-917.
- [4] Burnet M J, Oehlers D. Rib shear connectors in composite profiled slabs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(12): 1267-1287.
- [5] Cifuentes H, Medina F. Experimental study on shear bond behavior of composite slabs according to Eurocode4[J]. Constructional Steel Research, 2013(82): 99-110.
- [6] Patrick M. A new partial shear connection strength model for composite slabs[J]. Journal of the Australian Institute of Steel Construction, 1990, 24(3): 2-16.
- [7] 王俊浩. 压型钢板-混凝土组合楼板承载力设计方法综述[J]. 四川建材, 2016, 42(4): 88-89.
- [8] 陈世鸣. 压型钢板-混凝土组合楼板设计中的若干问题[J]. 建筑结构, 2003(1): 45-47.
- [9] 陆壮志. 中美压型钢板-混凝土组合楼板设计对比研究[J]. 南方能源建设, 2016, 3(1): 96-100.
- [10] 左海平. ECC 组合桥面板中短栓钉抗剪性能影响因素分析[J]. 西部交通科技, 2024(9): 90-93.
- [11] 陈艳琼. 恒温养护 UHPC 组合桥面板收缩效应监测与参数化分析[J]. 福建交通科技, 2024(6): 48-55.
- [12] 张连振, 宋谋, 李玉生, 等. 组合桥面板切应力分布规律及横向剪力钉布置[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(8): 1636-1646.
- [13] 武彧, 曾明根, 苏庆田. 组合桥面板疲劳荷载后剩余承载力试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(10): 1542-1552; 1568.
- [14] T/CECS 273—2024 组合楼板技术规程[S].
- [15] 苏庆田, 田乐, 曾明根, 等. 正交异性折形钢板-混凝土组合桥面板基本性能研究[J]. 工程力学, 2016, 33(增刊1): 138-142.
- [16] T/CECS 1934—2025 钢-混凝土组合桥面板技术规程[S].
- [17] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [18] 王彦开. 大跨度开口压型钢板-混凝土组合板界面粘结性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
- [19] 许伟, 肖瑞亚, 许峰, 等. 大跨度闭口型压型钢板-混凝土组合楼板界面粘结性能研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(13): 47-50.
- [20] 吕兆华. 带压痕压型钢板-混凝土组合楼板承载能力研究与试验[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [21] 丁华柱, 金建杰, 袁枫, 等. 现浇压型钢板组合楼板混凝土裂缝成因及预防[J]. 四川建材, 2023, 49(12): 8-10.