

带约束构造剪力键钢 - 混凝土组合箱梁数值分析

张红伟¹, 戚菁菁¹, 马英建¹, 曹 华², 邹杰雄¹

¹湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

²湖南省建筑设计院集团有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年11月18日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月23

摘要

针对钢 - 混凝土组合梁的纵向局压劈裂与负弯矩区混凝土板易受拉开裂, 提出将带约束构造剪力键与负弯矩区附加钢板应用在组合梁中。通过数值模拟研究了采用上述两种构造的40 m钢 - 混凝土组合箱梁的受力性能, 分析探讨了不同挠跨比下组合箱梁的承载力、刚度及应力状态。研究结果表明: (1) 有限元模型结果与理论计算值吻合较好, 可实现组合梁中组合力学性能的量化, 为组合梁优化及精细化设计提供了通用简化方法; (2) 连续组合梁采用附加钢板形成双重组合后, 可将变截面梁简化等效为等截面组合梁, 简化组合梁的设计与应用, 能高效提高组合梁的刚度、材料利用效率, 降低建造成本, 但中支座剪跨段栓钉连接件剪力是边支座剪跨段的4.3~4.5倍, 应加强剪力连接件疲劳强度及结合面混凝土耐久性验算; (3) 算例中简支组合梁可取挠跨比1/500作为正常使用极限状态的挠度控制指标, 连续组合梁取不大于挠跨比1/600作为正常使用极限状态的挠度控制指标; (4) 组合梁的优化及设计应建立简化实用的精细化分析模型, 对组合梁中组合力学性能和耐久性进行量化; 通过数值分析, 可逐步建立组合梁中混凝土、钢以及结合面的各个部位在不同工作状态下的数值技术标准, 为组合梁的进一步发展应用提供参考。

关键词

钢 - 混凝土组合梁, 带约束构造剪力键, 数值模拟, 受力性能, 参数分析

Numerical Analysis of Steel-Concrete Composite Beams Connected by Shear Connectors with Constrained Measures

Hongwei Zhang¹, Jingjing Qi¹, Yingjian Ma¹, Hua Cao², Jiexiong Zou¹

¹School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Hunan Architectural Design Institute Limited Company, Changsha Hunan

文章引用: 张红伟, 戚菁菁, 马英建, 曹华, 邹杰雄. 带约束构造剪力键钢-混凝土组合箱梁数值分析[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 3040-3054. DOI: 10.12677/hjce.2025.1412326

Received: November 18, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 23, 2025

Abstract

In view of the longitudinal penetrating cracks and negative moment zone which is easy to crack in concrete slab of steel-concrete composite beams, it is proposed in this paper to apply the shear connectors with constrained measure and additional steel plate in the negative moment zone to the beam members. The mechanical performance of 40 m steel-concrete composite box girder with the above two structures is studied by numerical simulation, and the stiffness, stability and stress state of the composite box girder with different deflection span ratios are analyzed and discussed. The results show that: (1) the results of the finite element model in this paper are in good agreement with the theoretical calculated values, which can realize the quantification of the combined mechanical properties of composite beams, and provide a general simplified method for the optimization and fine design of composite beams; (2) after the continuous composite beam is formed with additional steel plates, the variable section beam can be simplified to equal section composite beam, simplifying the design and application of composite beam, the stiffness and material utilization efficiency of the composite beam can be effectively improved under the premise of durability, and the construction cost can be reduced. However, the shear force of stud connectors in mid-support is 4.3 to 4.5 times that of the edge support, the fatigue strength and durability of the stud connectors and the concrete at the bonding surface should be checked and calculated; (3) in the example, the deflection span ratio of 1/500 of simply-supported composite beam can be used as the deflection control index of the normal use limit state of the simply-supported composite beam, and the continuous composite beam is taken as no more than 1/600 of the deflection span ratio as the deflection control index of the normal use limit state; (4) for the optimization and design of composite beams, a simplified and practical fine analysis model should be established to quantify the combined mechanical properties and durability of composite beams. Through numerical analysis, the numerical technical standards of concrete, steel and various parts of the joint surface in the composite beam can be gradually established under different working conditions, and the further development and application of the composite beam can be guided and promoted.

Keywords

Steel-Concrete Composite Beam, Shear Connectors with Constrained Measures, Numerical Simulation, Mechanical Behavior, Parameter Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中小跨径桥梁采用钢 - 混凝土组合梁适用于桥梁结构装配工业化产业政策，综合效益十分显著[1]。但是，组合梁在使用过程中尚存在混凝土板开裂，材料利用效率低的工程技术难题[2][3]。究其开裂原因，主要有：组合构件中栓钉剪力键“剪撬”局压效应造成的纵向劈裂；负弯矩区混凝土板受拉开裂。

为此，国内外学者提出了各种解决方法。针对局压劈裂：陈志丹[4]等通过推出试验对钢-UHPC组合梁的长栓钉连接件抗剪性能进行研究发现构件均为栓钉受剪破坏，栓钉根部受压侧的 UHPC 压碎，但破坏程度和范围较小，栓钉上方与 UHPC 之间出现明显的滑移缝隙；姜俊[5]等对传统剪力键进行改进，通过有限元研究分析发现，改进后的剪力键各模型变形较小，承载力高且混凝土损伤较小；聂建国[6]等将

普通混凝土板替换成高强混凝土研究发现，采用高强混凝土能充分发挥混凝土和钢材的优势，弥补普通混凝土延性差的特点；Wang [7]等通过UHPC推出试验得出控制栓钉长径比大于1.5，则不会发生UHPC板劈裂的现象。黄彩萍[8]对提出了一种新型弯折贯穿钢筋PBL剪力键，研究表明弯折钢筋PBL剪力键能够提高抗剪承载力以及抗剪刚度；Maghaghi Bilal [9]提出并研究了5种新型槽形抗剪连接键，研究表明槽形剪力键形状的改变对混凝土与剪力键之间的关系有积极的影响。

针对负弯矩区混凝土板受拉开裂：聂建国[10]提出了一种抗拔不抗剪连接新技术，并开发了相应的连接部件结构形式，研究发现新技术可以提高钢筋混凝土板在弯矩区抗裂性能，而组合梁整体刚度和强度基本不变；李聪[11]对组合梁负弯矩区抗拔不抗剪连接件的抗裂效果进行了验证，证明了抗拔不抗剪连接件对负弯矩截面承载力的折减不大，有效缓解了桥面板的开裂；邹杨[12]等通过12个PBL连接件推出试验，对混凝土板处于拉应力时连接件的剪切性能及承载机理进行了研究，结果表明，拉应力下的连接件开裂荷载小且裂缝发展快，增加贯通钢筋能一定程度上减弱拉应力对其的削弱作用，而增加纵向钢筋的配筋率后试件的横向裂缝显著减少，有效抑制了混凝土在负弯矩作用下的损伤和开裂；Wang [13]等得出混凝土桥面使用预应力筋，可以有效解决组合梁负弯矩作用下混凝土开裂的问题。

综上所述，国内外学者对组合梁混凝土开裂的问题已经有了一定的进展，但这些方法仍然存在一定的局限性，工程造价偏高、施工复杂、效率较低等；组合结构中组合力学性能的模拟与量化缺乏落地推广的实用化计算程序与标准化定型产品，制约了组合结构的设计优化。

本文将带约束构造剪力键运用在组合梁上，并在连续组合梁负弯矩区混凝土板顶附加抗拉钢板(附加抗拉钢板上的栓钉与钢梁上翼缘栓钉相互咬合布置)形成组合板抗拉、钢梁受压翼缘附加混凝土，形成连续梁中支座双重组合梁截面(如图1所示)，充分利用钢板高抗拉强度、混凝土高抗压强度，解决材料利用效率低的工程技术难题。上述构造措施已通过推出试验[14][15]与中支座双重组合连续组合梁试验[16]，验证得到：该新型栓钉剪力键能有效约束栓钉的剪撬局压劈裂及劈裂发展，能够有效提高栓钉线弹性抗剪刚度；双重组合作用下，中支座截面可迟于跨中形成塑性铰或不形成塑性铰，连续组合梁线弹性刚度可较简支梁提高1.5倍，中支座混凝土开裂前，连续梁构件的刚度是相应简支梁刚度的1.7倍。本文通过建立钢-混凝土组合箱梁工程算例数值模型，实现了大跨度组合梁的结构参数分析、设计优化，该模型可实现组合梁中组合力学性能的模拟与量化，为组合梁优化设计提供了数值基础。

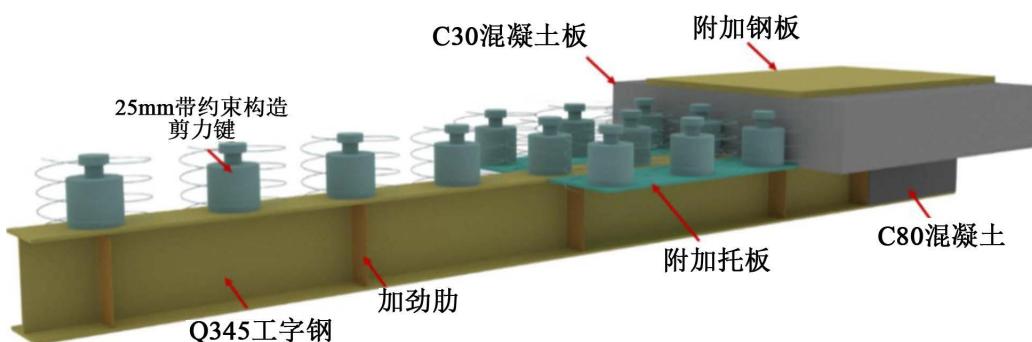


Figure 1. Diagram of structural arrangement in the negative moment region of continuous composite beams
图 1. 组合连续梁负弯矩区构造示意图

2. 设计概况

本文以《钢-混凝土组合结构桥梁》[17]中的设计示例为基础，跨径为40 m，计算跨径 l 为39.2 m，由于边梁往往受力最大，故将边梁作为该计算模型。简支组合梁横截面如图2(a)所示。钢箱梁上翼缘布

置带约束构造剪力键，栓钉直径为 22 mm，其高度为 150 mm，每道上翼缘共布置 $n_s=3$ 列栓钉，横向及纵向间距 p 均为 150 mm，同时在钢箱梁内沿桥纵向每 4 m 设置一道隔板。连续梁中支座横截面如图 2 所示，受压钢底板上混凝土板长度为 6 m ($0.153l$)，其跨中截面形式同简支梁。钢材等级为 Q345，弹性模量 E_s 为 2.06×10^5 MPa，混凝土强度等级为 C50，弹性模量 E_c 为 3.45×10^4 MPa。

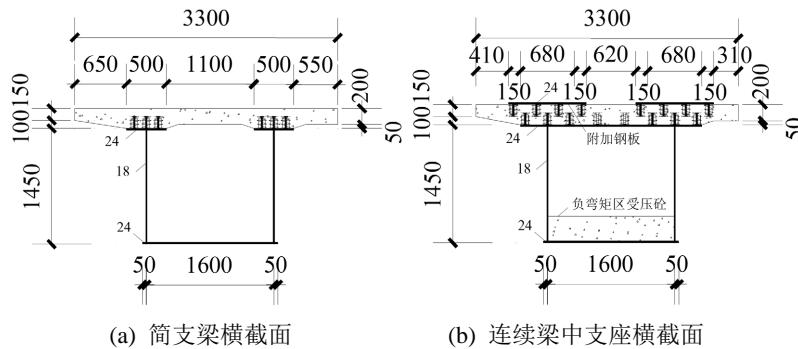


Figure 2. Edge beam cross-section

图 2. 边梁横截面

3. 模型建立

采用 Midas gen 进行数值模拟，栓钉采用梁单元，C50 钢筋混凝土板、钢梁、C80 混凝土填充部分均采用板单元；钢梁、混凝土的材料属性选用 Midas 软件数据库中的 Q345、C50、C80；带约束构造栓钉剪力键的材料属性使用自定义材料，视栓钉与约束构造为一个整体部件，并将文献[14][15]试验与式(1)拟合得出的结论代入有限元模型中：带约束构造剪力键弹性阶段的刚度为传统栓钉的 3 倍。即在有限元模拟中将栓钉弹性模量放大 3 倍。

$$\mathbf{D}_{sc} = \beta(\mathbf{D}_s + \mathbf{D}_c) = \frac{12E_s I_s}{l^3} \left[\frac{E_c}{4E_s} (n^4 - 1) + 1 \right] \beta \quad (1)$$

混凝土本构选择 Midas 软件中的随动硬化模型，在定义其塑性损伤时设定其初始单轴屈服应力，硬化系数，其应力应变关系参考《混凝土结构设计规范》[18]，破坏准则为强度准则，不考虑混凝土压碎；钢材为理想的弹塑性材料，采用两折线本构，钢材为各向同性材料，选取 Von Mises 屈服准则；栓钉用荷载-滑移本构。

钢梁翼缘、混凝土板、附加钢板三者重合部分网格划分为 50 mm，其余部分为 150 mm。网格划分后将混凝土板内栓钉周围的四个网格材料属性调整为 C80 来模拟带约束构造栓钉周围高强混凝土。钢梁上翼缘与附加钢板上的栓钉通过与混凝土板中性轴共节点使三者组合在一起。边界条件具体为：简支梁对位于支座处的混凝土板中性轴以及钢梁上翼缘约束 Dy 方向，其中一个支座处的钢梁下翼缘约束 Dx、Dy、Dz 方向，另外一个支座处的钢梁下翼缘施加 Dy、Dz 方向的约束；连续梁对中支座处附加钢板以及钢梁约束 Dx、Dy、Dz、Rx、Ry、Rz、Rw 方向，右端支座处的混凝土中性轴及该处的钢梁中上部约束 Dy 方向，最后对右端支座处的钢梁下翼缘约束 Dy、Dz 方向。求解控制采用 Newton-Raphson 平衡迭代法，子步骤内迭代次数设置为 30，收敛条件为位移控制，有限元计算模型如图 3 所示。

此算例中简支组合梁按全跨建模，而连续组合梁为减少计算量，采用半跨建模。为分析桥梁的应力状态，加载方式为对简支梁、连续梁跨中施加向下的强制位移，每一级为 40 mm，即考虑最不利荷载情况，忽略钢梁与混凝土结合面之间的粘结作用。

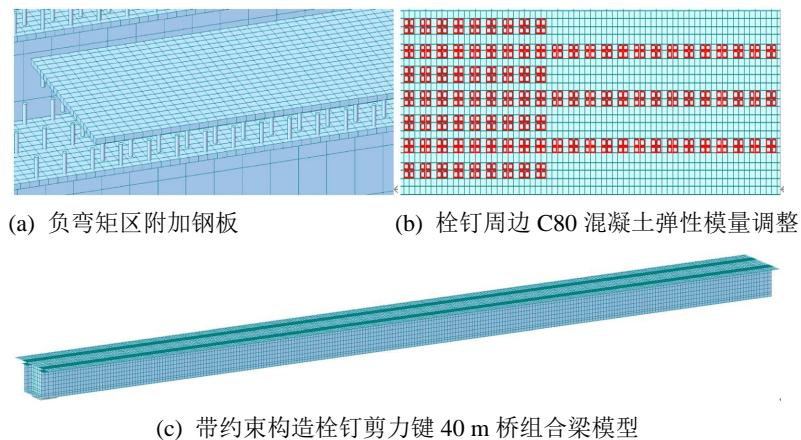


Figure 3. Finite element computational model

图 3. 有限元计算模型

4. 模型验证

基于上述建模方法与文献[16]的试验结果做对比，并引入文献[19][20]的试验结果，其荷载-挠度曲线对比结果如图4所示。由图4可知：有限元模型能够较好的模拟弹塑性阶段，但不能模拟出塑性阶段是由于局部不收敛导致整个模型不收敛，在误差允许的范围内，可初步反映有限元模型的准确性；带约束构造剪力键简支组合梁、连续组合梁相较文献中构件承载力分别提高28%~56%与48%~65%。

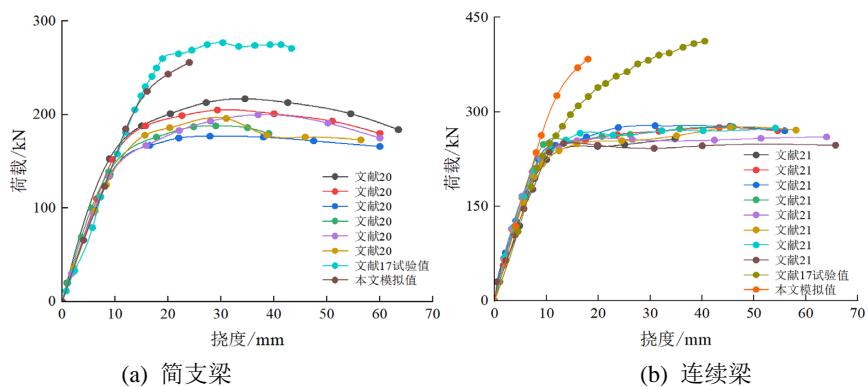


Figure 4. Load-deflection curve comparison chart

图 4. 荷载 - 挠度曲线对比图

为再次验证带约束构造剪力键钢-混凝土组合箱梁模型计算模型的正确性,以简支梁为例,主要对汽车荷载作用下构件的计算刚度以及挠度与有限元模拟结果进行对比。根据《公路桥涵设计通用规范》[21],车道荷载取为 10.5 kN/m ,计算跨度为 39.2 m ,将其折算为面荷载,荷载值 q_k 为 3.18 kN/m^2 。集中荷载通过线性插值取 P_k 为 316.8 kN ,有限元中使用均布荷载与节点荷载布置方法,将荷载均布在混凝土板和跨中 37 个节点上,每个节点为 8.5 kN 。桥梁为 4 车道,取边梁荷载横向分布系数为 0.67。计算方法采用刚度折减法计算汽车荷载作用下的跨中挠度,总挠度为集中力荷载下构件产生的挠度 f_1 和均布荷载下构件产生的挠度 f_2 总和。计算结果如下:

$$A_0 = \frac{A_c A_s}{n A_e + A_s} = 56426.64 \text{mm}^2 \quad (2)$$

$$I_0 = I_s + \frac{I_c}{n} = 4.034 \times 10^{10} \text{ mm}^4 \quad (3)$$

$$A_l = \frac{I_0 + A_0 d_c^2}{A_0} = 1.578 \times 10^6 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

其中, $d_c = y_c - y_s = 928.91 \text{ mm}$ 。

$$k = N_v^c = 0.7 A_s r f = 95492 \text{ N} \quad (5)$$

式中, k 为抗剪连接件刚度系数; A 为栓钉面积; f 为栓钉抗拉强度设计值; r 为栓钉材料抗拉强度最小值与屈服强度比。

假设栓钉材料性能等级为 4.6, 取 $f = 215 \text{ N/mm}^2$, $r = 1.67$ 。

$$\eta = \frac{36 E_s d_c p A_0}{n_s k h l^2} = 0.080 \quad (6)$$

$$j = 0.81 \sqrt{\frac{n_s k A_l}{E_s I_0 p}} = 4.88 \times 10^{-4} \quad (7)$$

$$\xi = \eta \left[0.4 - \frac{3}{(jl)^2} \right] = 0.032 \quad (8)$$

$$B = \frac{E_s I_z}{1 + \xi} = 1.777 \times 10^{16} \text{ mm}^4 \quad (9)$$

其中, ξ 为刚度折减系数; B 为考虑滑移效应的折减刚度。

$$f_1 = 0.67 \frac{P_k l^3}{48 B} = 12.17 \text{ mm} \quad (10)$$

$$f_2 = 0.67 \frac{5 q_k l^4}{384 B} = 14.99 \text{ mm} \quad (11)$$

其修正后计算总挠度 f 为 27.16 mm 。有限元集中力荷载作用下最大挠度为 23.24 mm , 均布荷载作用下最大挠度为 18.51 mm , 总挠度为 41.75 mm , 将其乘以汽车荷载横向分布系数 0.67 为 27.97 mm , 与计算值基本吻合。由表 1 可见, 有限元模拟下的刚度与计算刚度基本吻合, 为计算刚度的 97%, 由此可验证该模型的准确性。

为探究在长期荷载作用下带约束构造栓钉剪力键钢-混凝土组合箱梁的刚度降低值, 将有限元模型中的 C50 混凝土板弹性模量乘以 0.5 代入计算, 结果如表 2 所示, 由表 2 可知, 长期荷载作用下的刚度为短期荷载作用下的 84.5%, 有限元模型结果与理论计算值吻合良好。

Table 1. Comparison of stiffness between calculated values and finite element simulation values

表 1. 计算值与有限元模拟值刚度对比

规范计算值/mm	模拟值/mm	计算荷载/kN	模拟荷载/kN	计算刚度/(N/mm)	模拟刚度/(N/mm)	刚度比
27.16	27.97	728.4	727.34	26,818	26,004	0.970

Table 2. Comparison of finite element model stiffness under long-term and short-term loading

表 2. 长期荷载作用与短期荷载作用有限元模拟值刚度对比

折后模拟值/mm	模拟值/mm	长期作用模拟荷载/kN	短期作用模拟荷载/kN	长期荷载作用模拟刚度/(N/mm)	短期荷载作用模拟刚度/(N/mm)	刚度比
33.09	27.97	727.2	727.34	21,976	26,004	0.845

5. 简支梁有限元分析

带约束构造栓钉剪力键钢-混凝土简支组合梁结合面抗剪连接度为 5.2, 截面计算参数详见表 3, 其有限元分析结果详见表 4。由表 4 可见:

(1) 简支组合梁形成组合截面后在挠跨比达到 1/327, 混凝土板的最大压应力超过 $0.6f_{ck}$, 但组合梁混凝土的整体、局部数值指标均在设计值范围内。

(2) 随挠跨比增加, 组合梁承载能力持续增加, 挠跨比 1/196 时, 混凝土板出现受压屈服, 组合梁整体刚度在挠跨比 1/163 时出现刚度下降, 挠跨比增长 3 倍, 承载力增长为 2.87 倍。

(3) 混凝土板中性轴与钢梁翼缘板的纵向位移差也由 0.5 增大为 1.3 mm, 剪切角由 1/325 增大为 1/125 (剪切角为中性轴位移差与栓钉头部至钢梁上翼缘中性轴距离的比值), 栓钉周边的混凝土最大局压应力为 35.3 MPa, 已大于 C50 混凝土的标准值 32.4 MPa, 但小于 C80 约束混凝土的设计值 35.9 MPa。此时在混凝土板受压屈服后, 剪力键仍可保证结合面的牢固可靠连接, 共同工作。

(4) 建议简支组合梁可取挠跨比 1/500 作为正常使用极限状态的挠度控制指标。此时结合面抗剪连接工作状态系数为 0.39 (剪跨段实际计算的栓钉剪力和与混凝土、钢强度的低值之比)。

Table 3. Calculation parameters for simply supported composite beam sections

表 3. 简支复合梁截面的计算参数

跨高比	E_s/E_c	I_c (mm ⁴)	I_s (mm ⁴)	A_c (mm ²)	A_s (mm ²)	y_0 (mm)	I_0 (mm ⁴)	y_{0q} (mm)	I_{0q} (mm ⁴)
24.6	5.97	2.2×10^9	4×10^{10}	6.6×10^5	1.15×10^5	1076	8.9×10^{10}	922	7.2×10^{10}

注: 其中 y_0 、 I_0 、 y_{0q} 、 I_{0q} 分别为组合梁截面中性轴至梁底距离、组合梁截面惯性矩、荷载准永久组合下的组合梁截面中性轴至梁底距离、荷载准永久组合下的组合梁截面惯性矩。

Table 4. Finite element analysis results of simply supported composite beam

表 4. 简支组合梁有限元分析结果

		挠度(mm)	40 mm	80 mm	120 mm	160 mm	200 mm	240 mm	280 mm	320 mm
混凝土	挠跨比		1/980	1/490	1/327	1/245	1/196	1/163	1/140	1/123
	跨中集中荷载(kN)	554	1107	1662	2202	2770	3176	3372	3446	
	跨中弯曲应力屈服范围	/	/	/	/	0.005l	0.077l	0.127l	0.153l	
	压应力值(MPa)	7.2	14.5	21.7	28.9	33.5	33.75	34.1	34.3	
	栓钉剪力最大值(kN)	4.4	8.8	13.2	17.6	22.0	25.3	31.2	35.2	
	C80 混凝土最大应力值(MPa)	7.5	15.0	22.5	29.9	33.8	35.3	36.3	36.8	
栓钉	栓钉周边混凝土屈服范围	/	/	/	/	0.010l	0.117l	0.163l	0.194l	
	中性轴最大位移差(mm)	0.3	0.5	0.8	1.0	1.3	1.5	1.7	1.9	
	钢梁下翼缘屈服范围(mm)	/	/	/	/	0.015l	0.099l	0.115l	0.176l	
	下翼缘应力值(MPa)	71.1	142.2	213.3	284.4	346.7	347	348.9	351	
钢梁	钢梁腹板屈服范围(mm)	/	/	/	/	0.008l	0.092l	0.115l	0.153l	
	上翼缘应力值(MPa)	32.1	64.1	96.2	128.2	145.8	161.6	185.5	196.4	

注: 1. 压应力值指在混凝土板屈服范围内的压应力平均值, 未屈服时则为最大值; 2. 下翼缘应力值指应力最大值; 上翼缘应力值指当下翼缘屈服时对应的上翼缘应力平均值, 未屈服时则为最大值, 忽略栓钉周边 4 个单元; 3. l 为计算跨度, 取 39.2 m; 表中的挠度为形成组合截面后产生的挠度; 4. 考虑结合面滑移特性的有限元分析模型, 在形成组合构件后正常使用挠跨比(L/490)对应的跨中集中荷载 1107 kN 与不考虑结合面滑移对应的跨中集中荷载之比 1251 kN 之比为 0.885。理论计算所得跨中组合截面的弹性承载力设计值为 2612 kN、塑性承载力设计值为 2830 kN、屈服承载力为 3201 kN、极限承载力为 4361 kN。

5.1. 荷载 - 挠度曲线

带约束构造剪力键与传统栓钉剪力键简支组合梁有限元模拟的荷载 - 挠度曲线如图 5 所示。由图可知 40 m 简支组合梁桥在挠度跨 1/196 前, 模型梁处于弹性阶段。当挠跨比达到 1/196 时, 荷载 - 挠度曲线开始呈现非线性关系, 此时钢梁下翼缘开始屈服, 中性轴最大位移差也已达 1.3 mm。随着荷载的增大, 下翼缘屈服区域向内部不断扩展, 抗弯刚度不断降低, 当挠跨比超过 1/196 后, 跨中塑性程度迅速发展, 位移随荷载增大迅速增加, 组合梁较线弹性刚度降低约 0.78 倍。对比两种剪力键的荷载 - 挠度曲线, 尽管传统栓钉与约束构造栓钉在组合梁荷载挠度曲线上差距很小, 但由表 4 数据可知即使在混凝土板受压屈服后, 剪力键仍可保证结合面的牢固可靠连接, 共同工作, 栓钉构造能有效约束栓钉的剪撬局压劈裂及劈裂发展, 极大的降低组合梁的时变劣化, 提高组合梁的结合面的耐久性。算例中组合梁中性轴位于钢梁上翼缘向下 374 mm 处的腹板内, 钢 - 混凝土结合面剪力需求较小, 而剪跨段结合面的剪力连接度为 5.2; 形成组合截面后在挠跨比达到 1/490, 栓钉剪力为 8.8 kN, 远小于直径 22 mm 栓钉的疲劳截止线对应的栓钉剪力幅值 21 kN; 栓钉连接度可降低, 为桥面板采用预制装配式结合面栓钉束式连接布置提供了相应应用空间。

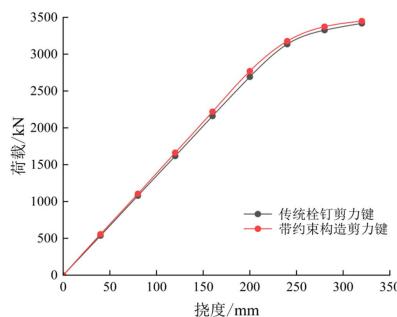


Figure 5. Simply supported beam load-deflection curve

图 5. 简支梁荷载 - 挠度曲线

5.2. 混凝土板应力

挠跨比 1/500 作为正常使用极限状态的挠度控制指标时, 混凝土板的最大压应力值为 14.5 MPa, 此时可按 0.2% 配筋率配制钢筋。

挠跨比为 1/123 时, 带约束构造剪力键简支组合梁跨中混凝土板应力图如图 6(a)所示(黑色叉号代表屈服)。混凝土板屈服范围为 $0.153l$, 其栓钉周边混凝土屈服范围达到 $0.194l$, 而此时传统简支组合梁混凝土屈服范围为 $0.145l$, 如图 6(b)。带约束构造剪力键组合梁混凝土板屈服范围大于传统栓钉剪力键组合梁, 这说明带约束构造剪力键能够将力传递给更多的混凝土共同受压, 减小混凝土的应力集中, 材料利用率、耐久性能得到提高, 组合效应更强。

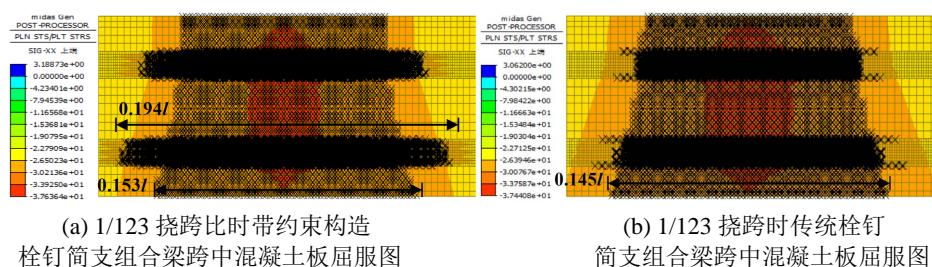


Figure 6. 1/123 buckling-to-yield diagram of concrete slab

图 6. 1/123 挠跨比混凝土板屈服图

5.3. 钢梁应力

挠跨比为 1/123 时, 带约束构造栓钉剪力键简支组合梁钢梁上翼缘跨中最大压应力为 289 MPa, 较于传统栓钉组合梁降低 9%, 且钢梁上翼缘应力从跨中到梁端逐渐变小, 均为负值, 所以上翼缘以受压为主。计算结果显示, 上翼缘依然没有出现受压屈服, 说明简支组合梁中的跨中混凝土承担了主要的压应力, 混凝土板中性轴与钢梁上翼缘板的纵向位移差达到 1.9 mm, 剪切角达 1/85, 组合梁跨中充分发挥了混凝土材料高抗压强度优势, 并克服了钢结构的受压易于失稳的自身缺陷。

带约束构造剪力键简支组合梁钢梁腹板及翼缘应力图如图 7 所示。挠跨比为 1/123 时, 钢梁下翼缘屈服范围扩大至 $0.176l$, 钢材的受拉强度及钢材的延展性得到充分发展, 组合梁承载力增长趋缓, 承载力并未降低, 抗弯刚度较线弹性刚度降低至 78%。钢梁腹板屈服高度扩大至 926 mm, 接近该组合梁的中性轴, 跨中截面的塑性铰基本形成, 材料高受拉强度及高延展性得到充分地利用。

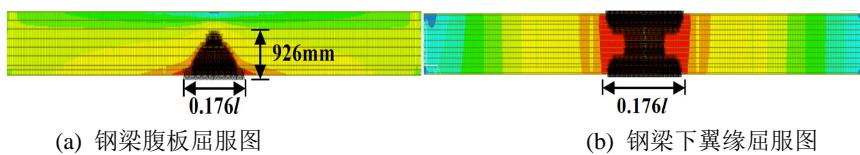


Figure 7. 1/123 deflection-to-span ratio yield diagram of steel beamed

图 7. 1/123 挠跨比钢梁屈服图

6. 连续梁有限元分析

带约束构造剪力键钢 - 混凝土连续组合梁负弯矩区中支座剪跨段混凝土与钢梁抗剪连接度为 3.2, 混凝土板附加钢板抗剪连接度为 4.04, 边支座剪跨段抗剪连接度为 5.56。中支座剪跨段、边支座剪跨段截面计算参数分别如表 5、6 所示(各参数定义与表 3 一致)。由表 5、6 可见中支座双重组合截面为跨中组合截面抗弯刚度的 1.68 倍, 考虑长期效应的组合梁刚度比值为 1.43 倍, 其有限元分析结果详见表 7。从表 7 中可知, 中支座剪跨段在跨中挠度为 40 mm 时剪力键最大剪力为 26.6 kN, 对应剪应力 70 MPa, 超过了《钢结构设计标准》[22]中规定的栓钉剪应力疲劳截止限 55 MPa, 该处应注意疲劳问题, 可增大栓钉直径或增加纵向栓钉排数, 或进行剪力键的疲劳强度验算, 此时将模型中的栓钉直径由 22 mm 增大为 25 mm, 对应剪应力 54 MPa, 即可满足规定的栓钉剪应力疲劳截止限的要求。

Table 5. Calculation parameters for the section of continuous composite beams over the central support span
表 5. 中支座剪跨段连续组合梁截面计算参数

跨高比	E_s/E_c	I_c (mm^4)	I_s (mm^4)	A_c (mm^2)	A_s (mm^2)	y_0 (mm)	I_0 (mm^4)	y_{0q} (mm)	I_{0q} (mm^4)
24.6	5.97	6.2×10^9	5.62×10^{10}	11.4×10^5	1.46×10^5	985	15.1×10^{10}	989	10.7×10^{10}

Table 6. Calculation parameters for the cross-section of continuous composite beams at the end support shear span
表 6. 边支座剪跨段连续组合梁截面计算参数

跨高比	E_s/E_c	I_c (mm^4)	I_s (mm^4)	A_c (mm^2)	A_s (mm^2)	y_0 (mm)	I_0 (mm^4)	y_{0q} (mm)	I_{0q} (mm^4)
24.6	5.97	2.2×10^9	4.53×10^{10}	6.6×10^5	1.24×10^5	1089	9.0×10^{10}	947	7.5×10^{10}

Table 7. Finite element analysis results of continuous composite beams
表 7. 连续组合梁有限元分析结果

挠度(mm)	中支座剪跨段				边支座剪跨段			
	40 mm	80 mm	120 mm	160 mm	40 mm	80 mm	120 mm	160 mm

续表

	挠跨比	1/980	1/490	1/327	1/245	1/980	1/490	1/327	1/245
混凝土	跨中集中荷载(kN)	1310	2635	3953	5190	1310	2635	3953	5104
	混凝土板受拉屈服范围	/	0.2l	0.246l	0.256l	/	/	/	/
	拉应力平均值(MPa)	4.9	8.1	10.7	13.3	/	/	/	/
栓钉	栓钉剪力最大值(kN)	26.6	53.2	79.8	100.6	5.9	11.9	17.8	23.4
	中性轴最大位移差(mm)	0.4	0.8	1.2	1.6	0.3	0.5	0.8	1
钢梁	钢梁上翼缘屈服范围(mm)	/	/	0.017l	0.028l	/	/	/	/
	钢梁下翼缘屈服范围(mm)	/	/	/	0.005l	/	/	/	/
	钢梁腹板屈服高度(mm)	/	/	/	75	/	/	/	/

注：1. 拉应力平均值指在混凝土屈服范围内的同一截面拉应力平均值；2. 腹板屈服高度：钢梁下翼缘往上；3. 连续组合梁考虑结合面滑移特性的有限元分析模型，在形成组合构件后正常使用挠跨比(L/490)对应的跨中集中荷载 2635 kN 与不考虑结合面滑移对应的跨中集中荷载之比 2797 kN 之比为 0.942。理论计算所得跨中组合截面的弹性承载力设计值为 2608 kN、塑性承载力设计值为 3049 kN、屈服承载力为 4344 kN、极限承载力为 5919 kN。

6.1. 荷载 - 挠度曲线

带约束构造剪力键与传统栓钉剪力键连续组合梁有限元模拟的荷载 - 挠度曲线如图 8 所示。由图 8 与表 7 可见：(1) 对比两条荷载 - 挠度曲线，可以看到带约束构造剪力键在全过程中都具有明显优势，极限荷载相差 1654 kN，提高了 42%。(2) 双重组合后的连续梁线弹性刚度是同条件简支组合梁刚度的 2.38 倍。带约束构造栓钉剪力键连续梁在挠跨比为 1/245 前刚度保持线弹性，即挠跨比达到 1/245 后刚度开始下降，之后承载力增长趋缓，直至模型计算结果不收敛。显然承载能力与正常使用极限状态均由中支座剪跨段确定。(3) 结合面中支座剪跨段栓钉剪力键剪力是边支座剪跨段的 4.3~4.5 倍；当挠跨比达 1/490 时，栓钉最大剪力为 53.2 kN，栓钉剪应力 140 MPa，应进行栓钉剪力键的疲劳强度验算。当挠跨比达到 1/245 时，结合面中性轴最大位移差达 1.6 mm，剪切角达 1/100，栓钉的最大剪力达 100.6 kN，为栓钉抗剪强度设计值 106 kN 的 95%，结合面抗剪刚度呈现显著非线性工作状态。应建立对中支座剪跨段结合面的正常工作状态进行技术参数控制指标，确保提高组合梁组合性能的同时兼顾结合面的耐久性。根据表 7 中数值计算的各项指标，该连续梁可取不大于 1/600 挠跨比作为正常使用极限状态的挠度控制指标，此时中支座剪跨段混凝土与钢梁结合面抗剪连接工作状态系数为 0.6，附加钢板结合面抗剪连接工作状态系数为 0.48。

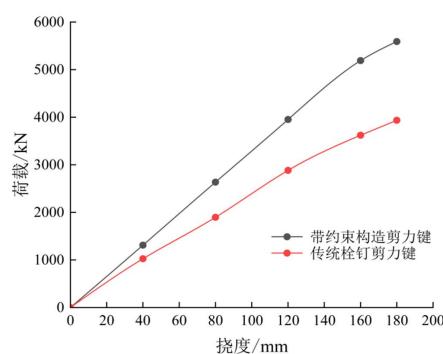


Figure 8. Continuous beam load-deflection curve
图 8. 连续梁荷载 - 挠度曲线

6.2. 混凝土板应力

从表 7 可以看到：带约束构造剪力键连续组合梁在挠跨比为 1/980 时，混凝土板横截面上拉应力达 4.9 MPa，小于 5.3 MPa，程序尚未显示混凝土开裂屈服，若此挠度为正常使用极限状态的控制指标，则

该部位混凝土板的配筋率宜为 1.4%；当挠跨比为 1/490 时，混凝土板横截面上拉应力达 8.1 MPa，开裂范围 $0.2l$ ，若此挠度为正常使用极限状态的控制指标，则该部位混凝土板的配筋率宜为 2.25%；在挠跨比为 1/245 时，混凝土板横截面上拉应力达 13.3 MPa，混凝土开裂范围达 $0.256l$ ，中支座剪跨段的混凝土板的反弯点约在距离中支座 $0.3l$ 处，且混凝土板应力沿板厚方向呈现出显著的弯曲梯度效应。

带约束构造栓钉剪力键连续组合梁跨中混凝土板应力如图 9(a)所示。挠跨比达到 1/217 时，混凝土板纵向屈服范围从跨中向两端扩大，屈服长度横向贯通，纵向屈服范围为 $0.05l$ ，而传统栓钉剪力键连续组合梁屈服范围为 $0.006l$ ，如图 9(b)，相较于简支梁，连续梁混凝土裂缝的分布范围要小得多。此时，带约束构造剪力键组合连续梁混凝土板屈服范围为传统栓钉剪力键组合连续梁 8.3 倍，说明带约束构造剪力键能将力传到更远处，这与简支组合梁得出的结论一致。

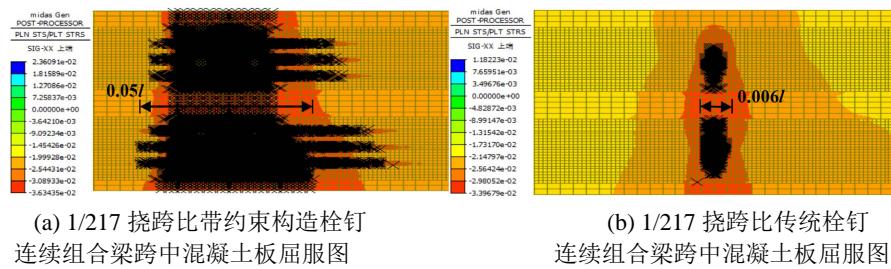


Figure 9. 1/217 deflection-to-span ratio of concrete slab at mid-span of continuous beam

图 9. 1/217 挠跨比连续梁跨中混凝土板

6.3. 负弯矩区附加钢板及上翼缘内力分析

挠跨比为 1/490 时负弯矩区附加钢板及上翼缘带约束构造栓钉剪力键剪力分布如图 10 所示。从图 10 可见，栓钉剪力从左侧中支座往右侧跨中先减小后增大，再趋于平稳，附加钢板上的栓钉剪力与钢梁上的栓钉剪力方向相反，相互咬合，改变了原混凝土板接近轴向受拉的不利状态，该钢板边缘剪力键最大剪力为 29 kN，若将 1/500 的挠跨比作为正常使用极限状态，则应注意疲劳问题。

带约束构造剪力键连续组合梁不同荷载下负弯矩区附加钢板及上翼缘应力图如图 11 所示。图 11(a)：挠跨比达到 1/392 时，负弯矩区上部附加钢板开始出现受拉屈服，钢梁上翼缘未出现屈服。该类屈服点集中位于剪力键与钢板的连接处；图 11(b)、(c)：挠跨比达到 1/217 时，负弯矩区上翼缘及其上部附加钢板屈服单元横向贯通且沿着剪力键布置方向产生屈服点，附加钢板屈服范围为 $0.043l$ ，钢梁上翼缘屈服范围为 $0.032l$ 。此时负弯矩区带约束构造剪力键最大剪力为 106 kN，接近带约束构造栓钉剪力键弹性抗剪强度极限值。相较于带约束构造剪力键简支组合梁，由于结合面中支座剪跨段栓钉剪力键剪力较大，建议采用布置大直径栓钉或增加栓钉排数，或进行栓钉抗剪连接件的疲劳强度验算。中支座剪跨段装配式桥面板采用集束式剪力键布置时应充分考虑剪跨段连接度降低带来的不利影响。



Figure 10. Distribution diagram of shear force for studs in the negative bending moment zone with an additional steel plate and upper flange strap of 1/490 span ratio/kN

图 10. 挠跨比 1/490 负弯矩区附加钢板及上翼缘带约束构造栓钉剪力分布图/kN

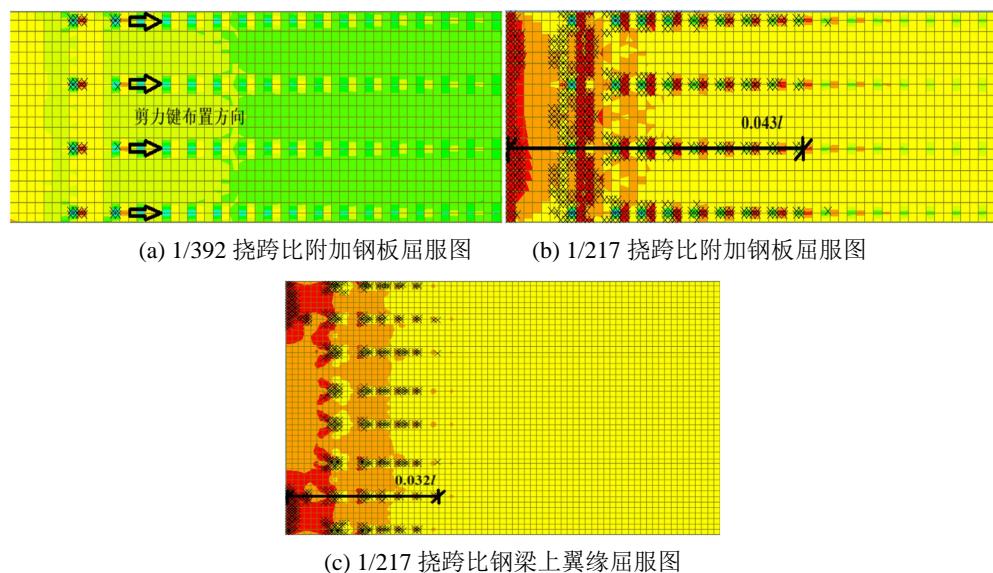


Figure 11. Yield diagram of additional steel plates and upper flange in negative bending moment region with different slenderness ratios

图 11. 不同挠跨比负弯矩区附加钢板及上翼缘屈服图

6.4. 钢梁应力

带约束构造连续组合梁不同挠度下钢梁应力如图 12 所示。当挠跨比达到 1/392 时，混凝土板顶附加钢板首先开始出现局部钢板受拉屈服，此时中支座钢梁上翼缘还未出现受拉屈服(图 12(a))；由于受压区未出现材料屈服，尚不能形成塑性铰。随着挠跨比增大至 1/327 时，中支座钢梁上翼缘、附加钢板屈服范围扩大至 $0.017l$ 、 $0.024l$ ，此时在距离中支座 6 m 处的受压混凝土与钢腹板结合处出现腹板受压屈服，跨中钢板下翼缘出现受拉屈服，显示在正弯矩区跨中截面处形成塑性铰并进一步发展(图 12(b))；当挠跨比为 1/245 时，中支座受压腹板出现 $0.005l$ 的局部屈服，距离中支座 6 m 处的受压混凝土与钢腹板结合处腹板受压屈服范围扩展至宽 $0.08l$ 、高 $0.04l$ (图 12(c))；当挠跨比达到 1/217 时，钢梁上翼缘及混凝土板顶附加钢板受拉屈服范围进一步扩大，屈服范围分别达到 $0.032l$ 、 $0.043l$ (图 12(b)、(c))，此时承载力增长趋缓，但中支座下翼缘屈服范围显著小于跨中受拉屈服的范围(图 12(d))。结果显示：算例中中支座截面为跨中截面抗弯刚度的 1.62 倍的双重组合梁，双重组合梁先在中支座出现钢材受拉屈服，由于中支座底板上混凝土较大的承压增长空间，导致中支座未形成塑性铰，表现为更多的跨中塑性铰变形，连续梁最终在跨中截面产生相对完整塑性铰。

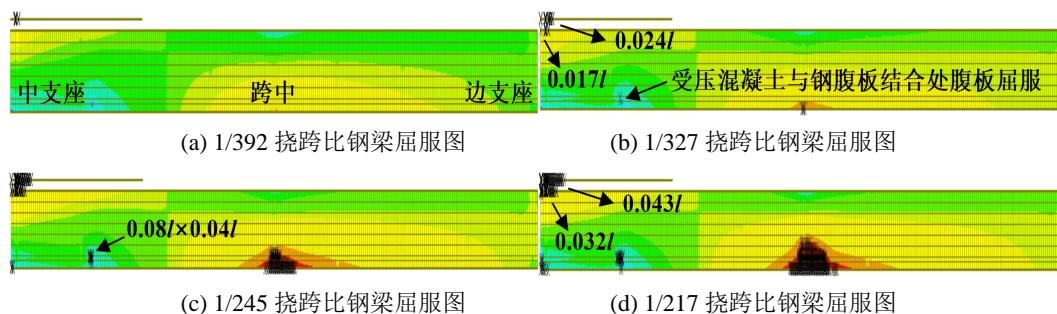


Figure 12. Yield diagram of steel beam under different slenderness ratios of continuous composite beams
图 12. 连续组合梁不同挠跨比下钢梁屈服图

7. 应力验算

带约束构造栓钉剪力键简支组合梁各工况及组合的应力计算结果如表 8 所示。其中施工荷载与二期恒载按传统计算方法计算；温度效应亦按传统计算方法计算，混凝土收缩徐变的影响可通过将混凝土的弹性模量乘以 0.5，此处不再赘述。从表 8 可见，钢梁在施工阶段最大拉应力为 82.55 MPa，最大压应力为 117.60 MPa，均小于钢材的容许应力 295 MPa；在形成组合截面受力的正常使用阶段，钢梁的最大拉应力为 173.32 MPa，最大压应力为 158.48 MPa，钢梁上翼缘最大压应力在形成组合截面后在二期恒载和汽车荷载下仅由施工阶段钢梁的 117.6 MPa 增长了 35%，均小于钢材的容许应力 295 MPa；混凝土桥面板最大压应力为 9.66 MPa，小于混凝土的抗压强度标准值 32.4 Mpa，故满足要求。

Table 8. Stress combination results**表 8. 应力组合结果**

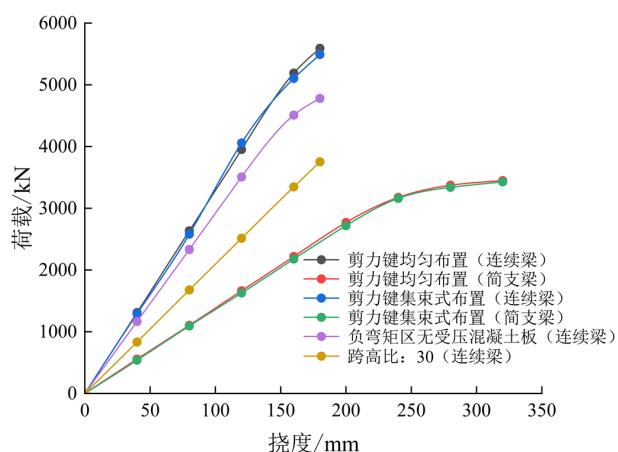
编号	荷载类型	混凝土板正应力(MPa)		钢梁正应力(MPa)	
		σ_{cu}	σ_{cb}	σ_{su}	σ_{sb}
1	一期恒载	/	/	-111.62	78.07
2	施工荷载	/	/	-5.98	4.48
3	二期恒载	-2.06	-1.18	-7.04	23.51
4	汽车荷载	-7.6	-4.8	-39.82	71.74
施工阶段	1 + 2	0	0	-117.60	82.55
正常使用阶段	1 + 3 + 4	-9.66	-5.98	-158.48	173.32

注：1. 表中应力符号以受拉为正，受压为负；2. 各项荷载组合系数均为 1.0。

8. 有无负弯矩区受压混凝土板的影响

本节针对有无负弯矩区钢箱梁底板受压混凝土板、布置形式、跨高比 3 个因素进行参数分析。参数分析中带约束构造剪力键为 3×4 集束式布置，间距为 750 mm，集束度(单个断面预留孔剪力键数量与全梁剪力键总量的比值)为 0.015，而均匀布置间距为 150 mm，简支梁全跨布置，连续梁在附加钢板范围外进行集束式布置。

不同参数的带约束构造剪力键组合梁荷载 - 挠度曲线如图 13 所示。由图 13 可见，无负弯矩区钢箱梁底部受压混凝土板与对连续组合梁刚度影响较大，其最大荷载相差 811 kN。

**Figure 13.** Load-deflection curves under different parameters**图 13. 不同参数下荷载 - 挠度曲线**

带约束构造剪力键钢 - 混凝土组合箱梁负弯矩区增加受压混凝土板与无受压混凝土板的中支座钢箱梁底板应力屈服图如图 14 所示。计算结果对比可见：有受压混凝土板时，箱梁底板屈服范围明显减小，为 $0.017l_p$ ，而无受压混凝土板的屈服范围为 $0.047l_p$ 。由此可得，负弯矩区增加受压混凝土板形成双重组合后，能有效协同钢梁下翼缘抗压，降低钢板压应力值。钢 - 混凝土组合梁中钢梁下翼缘往往需要使用厚钢板，成本较高，而在满足受力要求下，负弯矩区增加受压混凝土板后钢梁受压下翼缘设计厚度可显著减小，节约成本。

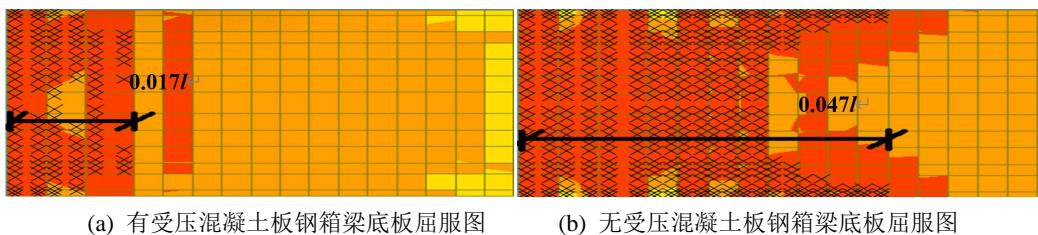


Figure 14. Yield diagram of concrete slab steel box girder bottom plate

图 14. 混凝土板钢箱梁底板屈服图

9. 结论

- (1) 有限元模拟下的带约束构造栓钉剪力键组合梁刚度为计算刚度的 97%，长期荷载作用下的刚度为短期荷载作用下的 84.5%，该模型的有限元模型结果与理论计算值吻合较好，可实现组合梁中组合力学性能的模拟与量化，本文数值计算方法为组合梁优化及精细化设计提供了通用简化方法；
- (2) 算例中弹性极限承载力较于传统栓钉剪力键连续组合梁可提高 42%；结果表明带约束构造剪力键能同时提高组合梁的组合作用和耐久性；
- (3) 数值计算结果显示：算例中简支组合梁可取挠跨比 1/500 作为正常使用极限状态的挠度控制指标，连续组合梁取不大于挠跨比 1/600 作为正常使用极限状态的挠度控制指标；
- (4) 本算例中的双重组合后的连续梁的线弹性刚度是带约束构造剪力键简支组合梁刚度的 2.38 倍，连续组合梁采用附加钢板形成双重组合后，可将变截面梁简化等效为等截面组合梁，简化组合梁的设计与应用；且在满足耐久性前提下，能高效提高组合梁的刚度、材料利用效率，降低建造成本；
- (5) 连续组合梁采用双重组合后，结合面中支座剪跨段栓钉连接件剪力是边支座剪跨段的 4.3~4.5 倍，应加强剪力连接件疲劳强度及结合面混凝土耐久性验算，建议增大栓钉直径或增加纵向栓钉排数，满足疲劳截止线的剪应力幅小于 55 MPa 的要求。在满足疲劳设计的情况下，实际工程中可优先使用集束式预制装配桥面板；
- (6) 负弯矩区增加受压混凝土板形成双重组合后，能提高组合梁的刚度，有效协同钢梁下翼缘抗压，在满足受力要求下，负弯矩区增加受压混凝土板后钢梁受压下翼缘设计厚度可显著减小，节约成本；
- (7) 组合梁的优化及设计应建立实用的精细化分析模型，对组合梁中组合力学性能和耐久性进行量化；并在工程应用中逐步建立组合梁中混凝土、钢以及结合面的各个部位在不同工作状态下的数值技术标准，为组合梁的进一步发展应用提供参考。

参考文献

- [1] 周悬. 中小跨径钢砼组合梁施工技术研究[J]. 智能城市 2021, 7(17): 155-156.
- [2] 袁明, 谭龙田, 颜东煌, 等. PPC 斜拉桥模型疲劳试验及塑性损伤分析[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 94-99.
- [3] 颜东煌, 邹楷为, 袁明, 等. 采用 PPC 设计的斜拉桥模型疲劳试验研究[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 59-63.

-
- [4] 陈志丹, 马冰, 高立强. 钢-UHPC 组合梁的长栓钉连接件抗剪性能研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(6): 79-85.
 - [5] 姜俊, 郭琪, 胡淑军. 十字带侧翼缘型剪力连接件的抗剪承载力研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(6): 32-37, 17.
 - [6] 聂建国, 谭英, 王洪全. 钢-高强混凝土组合梁栓钉剪力连接件的设计计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999(12): 94-97.
 - [7] Wang, J., Guo, J., Jia, L., Chen, S. and Dong, Y. (2017) Push-Out Tests of Demountable Headed Stud Shear Connectors in Steel-UHPC Composite Structures. *Composite Structures*, **170**, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.004>
 - [8] 黄彩萍, 游文峰, 谭金甲, 等. 弯折贯穿钢筋 PBL 剪力键力学性能试验[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(6): 113-120.
 - [9] Maghaghi, B., Titoum, M. and Mazoz, A. (2021) Experimental Evaluation of New Channel Shear Connector Shapes. *International Journal of Steel Structures*, **21**, 883-900. <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00478-x>
 - [10] 聂建国, 陶慕轩, 聂鑫, 等. 抗拔不抗剪连接新技术及其应用[J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 7-14, 58.
 - [11] 李聪, 聂建国, 周心怡, 等. 钢-混凝土连续组合梁桥负弯矩区抗裂设计[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(3): 172-178.
 - [12] 邹杨, 彭洪波, 张中亚, 等. 负弯矩区 PBL 剪力连接件剪切性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(10): 52-66.
 - [13] Wang, Y., Yu, J., Liu, J., Zhou, B. and Chen, Y.F. (2020) Experimental Study on Assembled Monolithic Steel-Pre-stressed Concrete Composite Beam in Negative Moment. *Journal of Constructional Steel Research*, **167**, Article ID: 105667. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.06.004>
 - [14] 陈攀. 带约束构造的栓钉剪力连接件受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019.
 - [15] 谢祖巍. 带约束构造的栓钉连接件界面抗剪性能研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2022.
 - [16] 尚钰程. 带约束构造剪力键钢-混凝土组合梁受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2024.
 - [17] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
 - [18] 中国人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
 - [19] 刘仲武. 钢-混凝土简支组合梁抗震性能试验及理论研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2004.
 - [20] 曹华. 钢-混凝土连续组合梁抗震性能试验研究及理论分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2005.
 - [21] 中华人民共和国交通部. JTGD600-2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
 - [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50017-2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.