

# 带平钢板-栓钉组合连接件的钢板组合梁静力性能研究

林上顺, 胡祖安, 林昕, 谢广东

(福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 提出了一种适用于钢板组合梁(SPCCT梁)的平钢板-栓钉组合连接件(PSCC), 有望提高钢板组合梁的施工效率与便利性。为了解该型连接件钢板组合梁(SPCCT梁)的受力性能, 开展了1根SPCCT梁的静力性能试验; 采用经试验验证的ANSYS有限元模型, 研究了PSCC对SPCCT梁受力性能的影响, 结果表明, SPCCT梁具有较高承载力和塑性变形能力, 试验梁最终呈剪切破坏形态; 相较于使用栓钉连接的SPCCT梁, PSCC可使有板托SPCCT梁的极限承载力提高27.43%, 延性性能提升214.02%, 使无板托SPCCT梁的极限承载力提高10.97%, 延性性能提升53.28%; 对SPCCT梁设计时, 钢板处的抗剪连接程度应大于工字钢上翼缘处。相关研究可为SCCT梁在实际工程的推广应用提供参考借鉴。

**关键词:** 桥梁工程; 组合梁; 组合连接件; 承载力; 延性

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)06-0511-08

## Study on static performance of steel plate composite beams with plate-stud combination connectors

LIN Shangshun, HU Zu'an, LIN Xin, XIE Guangdong

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** A plate-stud combination connector (PSCC) for I-beam-flat steel plate concrete combined T-beam (SPCCT) is proposed, which is expected to improve the construction efficiency and convenience of steel plate composite beams. To understand the stress performance of SPCCT with this type of connector, the static performance test of one SPCCT beam was carried out; and the effect of PSCC on the stress performance of SPCCT beam was investigated by using the experimentally verified ANSYS finite element model. Results show that: the SPCCT beam has high load carrying capacity and plastic deformation capacity, and the test beam finally shear failure pattern; compared with the SPCCT beam with bolted connections, the PSCC can increase the ultimate load carrying capacity of the SPCCT beam with plate joists by 27.43%, and increase the ductility performance by 214.02%, so that the ultimate load carrying capacity of SPCCT beam without plate supports is increased by 10.97%, and the ductility performance is increased by 53.28%; for the design of SPCCT beam, the degree of shear connection at the steel plate should be greater than that at the upper flange of the I-beam. The related research can provide reference for the popularization and application of SPCCT beam in practical engineering.

**Keywords:** bridge engineering; composite beams; combination connectors; bearing capacity; ductility

连接件作为钢板组合梁的重要组成, 其构造及施工方式极大影响着钢板组合梁的施工效率与

便利性。

栓钉凭借较好的连接性能与施工便利性成为

收稿日期: 2024-11-18

基金项目: 福建省交通科技计划项目(202024)

第一作者简介: 林上顺(1972—), 男, 福建永泰人, 教授, 博士, 研究方向: 组合结构。



试件设计参数见表 1, 钢筋均采用 HRB400; 其中纵筋分上、下两层布置, 由于钢板能充当部分钢筋, 故下层纵筋数量少于上层纵筋。钢材的力学性能如表 2 所示, 其中  $t$  与  $d$  分别为板厚与钢筋直径,  $f_y$  与  $f_u$  分别为钢材的屈服强度和极限强

度,  $E_s$  为钢材的弹性模量。混凝土均选用 C45 海工混凝土, 其弹性模量、轴向抗压强度、立方体抗压强度分别为 33 845 MPa、29.06 MPa、38.24 MPa; 栓钉材质均为 ML15AL, 其屈服强度为 320 MPa、极限抗拉强度为 460 MPa。

表 1 试件设计参数

Tab.1 Specimen design parameters

位置	栓钉直径/mm	栓钉纵向间距/mm	栓钉个数/个	抗剪连接程度 $\eta$	纵筋配筋率/%		配箍率/%
					上层	下层	
工字钢	16	165	30	0.37			
钢板	10	330	32	0.17	1.21	0.86	0.51

表 2 钢材力学性能

Tab.2 Mechanical properties of steel

类型	$t$ /mm	$d$ /mm	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	$E_s/10^5$ MPa
翼缘板	14	/	271.6	415.0	1.97
腹板	12	/	324.2	423.7	1.92
钢板	4	/	330.4	427.3	2.00
纵筋	/	12	327.5	420.8	1.80
箍筋	/	10	335.2	425.0	2.00

### 1.2 试验方案及测试方法

#### 1.2.1 加载方案

加载装置如图 3 所示, 试件采用简支边界条件。支座和两端加载位置分别垫厚 20 mm 的钢板, 并采用砂浆修平, 确保试件水平。竖向荷载  $P$  由量程 2 000 kN 的液压千斤顶提供, 采用两点对称加载, 通过分配梁将荷载分配至 SPCCT 梁的两加载点, 两加载点相距 0.8 m。

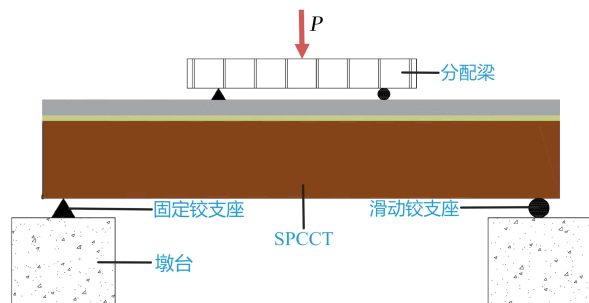


图 3 试件加载装置

Fig.3 Specimen loading device

正式加载前, 先对试件进行 20 kN 预加载, 以消除试件松动及对仪器工作状态校核, 然后卸载。

正式加载采用分级加载, 每级加载完成后持荷 5 min, 观察并记录裂缝的发展与分布, 初始荷载为 50 kN, 接近初裂荷载时 (即裂缝宽度首次达到 0.05 mm 时对应的荷载), 荷载降至 20 kN; 试件屈服后, 荷载降至 10 kN, 直至试件完全破坏。

#### 1.2.2 试验测点布置

位移测点布置见图 4, 位移计 JD-1~JD-3 用于测量试件挠度变化情况; 千分表 JD-4~JD-12 用于测量钢板与混凝土板之间不同位置的相对滑移, 并辅以钢梁上栓钉弯曲程度判定。钢梁与钢板应变测点布置见图 5(a), 选取加载点和跨中共 3 个截面进行测量, 以了解钢板在弯曲过程中对试验梁的作用效果; 混凝土板应变测点布置见图 5(b), 用于观察桥面板横、纵向应变发展情况, 并判断平截面假定对 SPCCT 梁受力分析的适用性。

考虑到钢梁与钢板处栓钉在试件受力过程中所承受的剪力不同, 为了解 PSCC 中两种栓钉对混凝土板的连接情况, 待试验结束后将混凝土板凿除, 根据栓钉弯曲程度以判断钢梁与混凝土板之间的相对滑移情况, 为合理设计 SPCCT 梁抗剪连接程度提供参考依据。

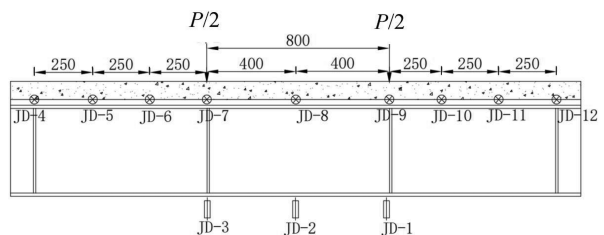
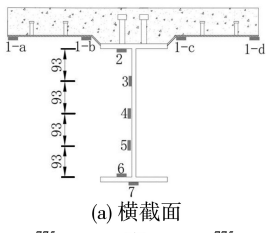
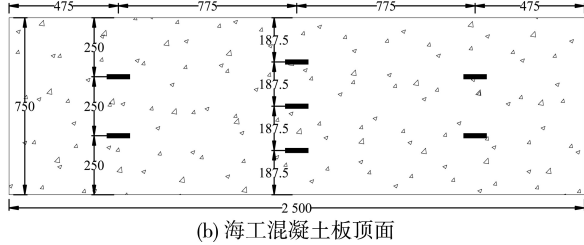


图 4 位移测点布置图 (单位: mm)

Fig.4 Displacement measurement point layout (unit: mm)



(a) 横截面



(b) 海工混凝土板顶面

图 5 应变测点布置图 (单位: mm)

Fig.5 Strain measurement point layout (unit: mm)

## 2 试验现象

### 2.1 试件的损伤过程

图 6 为试验梁受力破坏情况,表现为加载点处混凝土被压碎且存在竖向裂缝,剪跨段混凝土板在端部和加载点之间被剪断,加载点附近的裂缝下宽上细,即试验梁最终呈剪切破坏形态;由于本试验设置的剪跨比偏小,在受弯剪区域,随着荷载的增加导致剪应力超过混凝土板的抗剪强度,箍筋不足以限制斜裂缝发展,最终致使斜裂缝逐渐扩展并贯穿混凝土板。



图 6 试验梁破坏形态

Fig.6 Damage pattern of test beam

试验梁的荷载-跨中挠度曲线见图 7,试件的极限荷载  $P_u$  为 1 710 kN,极限挠度  $\delta_u$  为 37.5 mm,其受力大致分为 3 个阶段。

初始加载至 A 过程中,试件处于弹性阶段,钢梁与桥面板整体受力良好,荷载与挠度基本呈线性关系。加载至  $0.15 P_u$  时,由于钢板上的剪力连接度较小,加载点位于相邻栓钉的中间,导致栓钉对加载点区域的混凝土约束能力较弱,故混

凝土裂缝首次出现于左加载点处,此时裂缝宽 0.2 mm,之后随着荷载增加,裂缝相继出现于跨中及右加载点。钢板与混凝土界面初步分离位置位于右加载点左侧,此时荷载为  $0.38 P_u$ ,但该处缝隙发展缓慢;之后分离缝隙出现于跨中,当加载至  $0.56 P_u$  时,跨中分离缝隙达到 3 mm。

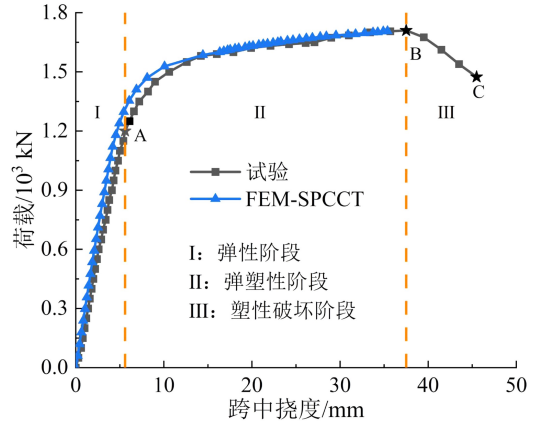


图 7 荷载-挠度曲线

Fig.7 Load-deflection curves

试件进入弹塑性阶段后,钢梁下翼缘受拉屈服,混凝土裂缝发展迅速,混凝土板和钢梁发生界面滑移,抗弯刚度逐渐减小,跨中挠度随荷载的增加而迅速增大。加载至  $0.82 P_u$  时,钢梁出现轻微抖动,并伴有钢板与混凝土的挤压声音,之后剪跨段靠近加载点位置产生纵向平行裂缝;加载至  $0.93 P_u$  时,裂缝斜向下发展至钢板与混凝土板界面处(见图 8),且界面滑移较明显,左端滑移量达到 0.904 mm;继续加载,左端约  $3/4$  剪跨段内的混凝土出现若干较宽的斜裂缝,裂缝由下向上延伸并伴随加载点附近上方混凝土被压碎,最终发展为剪跨段内相邻裂缝间存在较宽的界面分离缝隙,裂缝主要位于靠近加载点  $1/2$  剪跨段内(见图 6)。



图 8 裂缝向交界面发展

Fig.8 Progression of cracks towards interface

当加载至 B 点时(达到极限荷载  $P_u$ ),此后试件进入塑性破坏阶段,加载点混凝土出现明显压

碎,挠度发展加快,导致钢板发生外突屈曲(见图 9),之后荷载骤降;该阶段内试件跨中挠度随荷载减小而增大,直至 C 点,试件破坏完全丧失承载力,此时滑移量为 1.74 mm;在同侧支座到梁端处,钢板与混凝土的分离缝隙逐渐扩大,最大达到 4.12 mm。

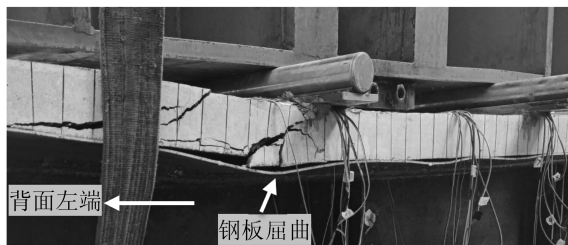


图 9 加载点处钢板屈曲

Fig.9 Buckling of steel plate at loading point

## 2.2 栓钉的破坏形态

栓钉的作用主要是抵抗 SPCCT 界面间的剪力和竖向掀起力,在 SPCCT 受力过程中,栓钉表现为一端固定,另一端为滑动的自由端,当承受拉力时易形成塑性铰,向端部弯曲。钢板上的栓钉受剪弯曲后,如图 10 所示,钢梁上的栓钉继续受力,但不足以承受界面剪力,致使在横截面处,钢板上方混凝土斜裂缝数量较多且宽度较大,而钢梁上方混凝土出现毛细裂缝且数量较少。



图 10 钢板上方栓钉变形图

Fig.10 Deformation of studs above plate

由于界面剪力在栓钉上由底部向顶端呈抛物线形递减至 0,因而界面在承受较大剪力时,刚度较小的钢板由于栓钉的变形而容易迅速屈服。对于钢梁上的栓钉,由于钢板和栓钉受剪变形,极大地分担了界面剪力峰值,同时钢梁较强的抗弯刚度及上翼缘栓钉较强的抗剪刚度,致使钢梁上翼缘处的栓钉并未发生明显变形。表明其栓钉的抗剪承载力与其焊接构件的刚度呈正相关。

## 2.3 界面相对滑移

图 11 为钢梁与混凝土板之间不同位置的界面

相对滑移情况。荷载从 0 加载至  $0.85P_u$ ,荷载-滑移量大致呈正比例关系,加载至  $0.5P_u$  过程中,整体滑移量较小;继续加载,钢板处栓钉的屈服导致 PSCC 的抗剪性能减弱,滑移量随之明显增加;当荷载临近  $P_u$  时,试件右端跨剪段靠近加载点处钢板局部屈曲后导致此处滑移量突变。

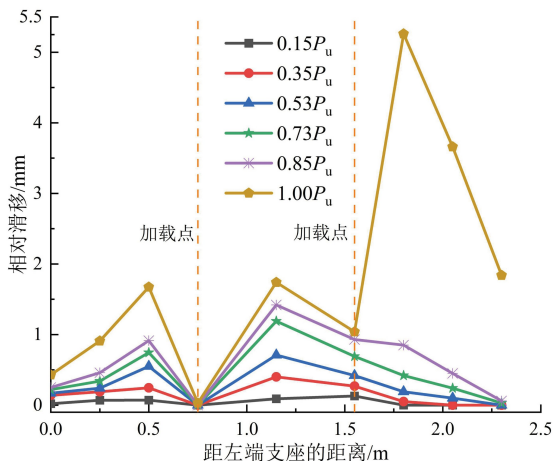


图 11 SPCCT 梁交界面滑移曲线

Fig.11 Interface slip curves of SPCCT

由于支座为钢梁提供了较大的摩擦力,且跨中及加载点附近的钢板与混凝土板出现了分离缝隙,导致靠近支座位置的滑移量很小。同时可以看出,加载点处由于荷载的施加会增大混凝土板与钢梁间的界面摩擦力,从而有效地抑制界面滑移,故 SPCCT 最大滑移位置出现于加载点附近。总体而言,SPCCT 交界面滑移量较小,表明 PSCC 能有效连接钢梁与混凝土板,进而保证 SPCCT 具有较高承载力与延性。

## 2.4 SPCCT 梁跨中应变

图 12 为 SPCCT 梁跨中截面应变沿梁高分布与发展情况,由图 12 可见,在加载过程中混凝土一直受压,钢梁受拉,表明 SPCCT 梁能较充分发挥混凝土的抗压及钢梁抗拉性能;在正常使用阶段,跨中截面的轴向应变沿梁高近似线性变化,表明试件基本符合平截面假定;加载初期,压应力主要由混凝土承受,钢板几乎不受力,故应变极小,而当加载至  $0.29P_u$  时,混凝土与钢板之间应变斜率变化很小,表明混凝土板与钢板的受弯曲率基本相同,即 PSCC 与混凝土板整体工作性能较好;当钢梁下翼缘屈服时,其应变随荷载的增加而迅速加大,但由于上翼缘及钢板应变增幅较小,混凝土并未破坏,因此 PSCC 能与混凝土板较好地协

同工作。

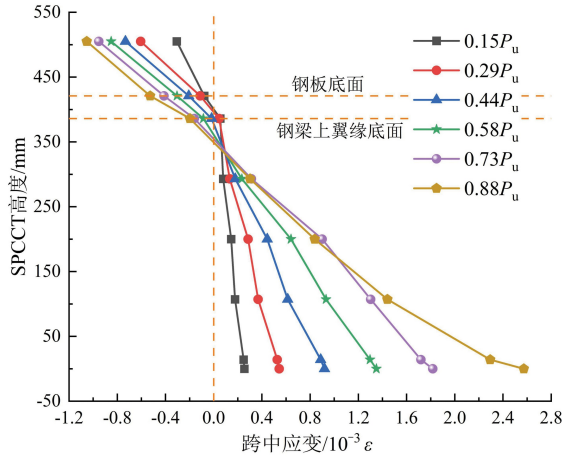


图 12 SPCCT 梁沿高度应变分布

Fig.12 Strain distribution of SPCCT along height

### 3 与 SCCT 梁静力性能对比分析

#### 3.1 有限元模型

由于本试验海工混凝土的力学性能与普通混凝土相似,故其本构关系采用 EIVIND 等<sup>[11]</sup>建议的二次抛物线(上升段)加水平段组成,即下降段按理想塑性变形考虑,其应力-应变关系为:

$$\sigma = \begin{cases} f_c \left[ \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] & (\varepsilon \leq \varepsilon_0) \\ f_c & (\varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_u) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为应力, Pa;  $\varepsilon$  为应变;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度, Pa;  $\varepsilon_0$  为峰值应力对应的压应变,取 0.002;  $\varepsilon_u$  为极限压应变,取 0.003 3。

考虑界面滑移,栓钉本构关系采用 Ollgaard 等<sup>[12]</sup>模型,其关系表达式为:

$$Q = Q_u (1 - e^{-s})^{0.558} \quad (2)$$

式中,

$$Q_u = \min \left[ 0.43 A_s \sqrt{E_c f_c}, 1.19 A_s f_s \left( \frac{E_c}{E_{sd}} \right)^{0.2} \left( \frac{f_{cu}}{f_s} \right)^{0.1} \right] \quad (3)$$

式中,  $Q$  为栓钉抗剪承载力, N;  $Q_u$  为栓钉极限抗剪承载力, N;  $s$  为栓钉滑移量, m;  $A_s$  为栓杆横截面积,  $m^2$ ;  $E_c$ 、 $E_{sd}$  分别为混凝土和栓钉的弹性模量, Pa;  $f_s$  为栓钉抗拉强度, Pa;  $f_{cu}$  为混凝土立方体抗压强度, Pa。

钢筋采用双折线模型,即理想弹塑性模型;钢梁和钢板采用三折线模型模拟,其应力-应变关

系为:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ f_y & (\varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_h) \\ f_y + 0.01 E_s (\varepsilon - \varepsilon_h) & (\varepsilon_h < \varepsilon \leq \varepsilon_s) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $E_s$  为钢材的弹性模量, Pa;  $f_y$  为钢材的屈服强度, Pa;  $\varepsilon_y$  为屈服应变;当  $\varepsilon_h = 10\varepsilon_y$  时,认为钢材开始进入强化阶段;  $\varepsilon_s$  为极限应变。各材料参数均按试验实测值取值。

有限元模型的混凝土采用 SOLID65 单元;钢梁与 PSCC 中的平钢板采用 SHELL181 单元;栓钉采用 COMBIN39 单元;混凝土底面与钢板顶面之间采用面-面接触的 TARGE170 和 CONTA173 单元,其中界面摩擦系数取 0.5,黏结力取 0.1 MPa<sup>[13]</sup>。SPCCT 梁有限元模型如图 13(a)所示,为比较实际工程中常见的仅栓钉连接的钢板组合梁(SCCT 梁)及无托板的 SPCCT 梁(SCCT-T)的静力性能,建立 3 个 SCCT 梁的有限元模型(模型中各位置的栓钉数量不变),如图 13(b)~(d)所示,有托板的 SCCT 梁编号命名为 SCCT,无托板的 SCCT 梁编号命名为 SCCT-T。

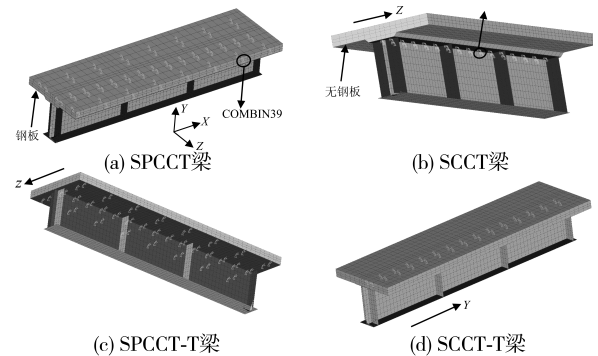


图 13 有限元模型

Fig.13 Finite element model

#### 3.2 模型验证

图 7 为 SPCCT 梁试验值与有限元模型(FEM)计算值的荷载-跨中挠度曲线,由图 7 可知,SPCCT 梁的试验值与 FEM 值的屈服荷载( $F_y$ )之比为 0.908、与弹性刚度( $E_y$ )之比为 0.923、与极限荷载( $F_u$ )之比为 0.998、与极限挠度( $\Delta_u$ )之比为 0.944,即 FEM 模拟的特征值与试验结果最大相差在 10% 以内,表明 SPCCT 梁的试验值与 FEM 值在加载中总体吻合良好。

图 14 为 SPCCT 梁极限荷载下混凝土板、钢

板(带板托)损伤 FEM 的 von Mises 应力云图,其中混凝土抗压强度和钢材屈服强度均已在破坏位置处充分发挥。由图 14(a)可知,模拟的混凝土损伤与试验破坏形态类似;图 14(b)显示,靠近加载点处,外侧钢板发生局部向下屈曲,与试验现象相符。

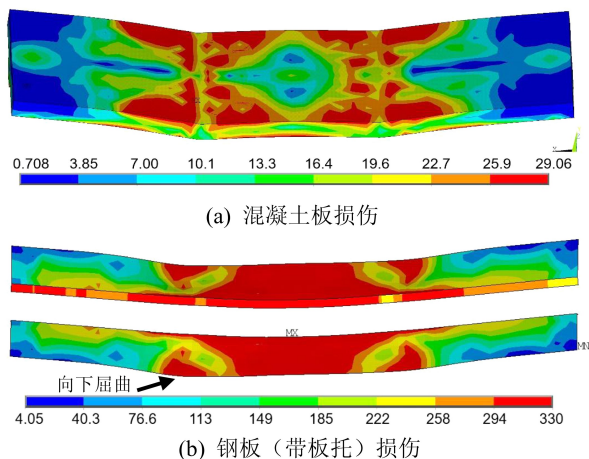


图 14 承载能力极限状态下损伤云图(单位:MPa)

Fig.14 Damage cloud maps under ultimate state of bearing capacity (unit: MPa)

图 15 为钢板、工字钢上翼缘与混凝土之间的界面剪应力云图,由图 15 可知:工字钢上翼缘的剪应力总体小于钢板;结合图 13(a)可知,Y 方向上,跨中与梁端的剪应力最小,加载点与支座间及跨中靠近加载点位置处的剪应力较大;Z 方向上,工字钢上翼缘或钢板越靠近托板处的剪应力越大;因此其剪应力分布与试验现象相符。综上所述并结合图 7 可知,建立的 FEM 能较好地模拟 SPCCT 受力过程,具有较高的精度。

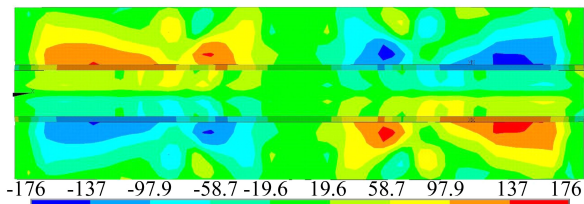


图 15 界面剪应力云图(单位:MPa)

Fig.15 Interface shear stress cloud map (unit: MPa)

### 3.3 有限元计算值比较

图 16 为组合梁的 FEM 荷载-挠度对比曲线图,由图 16 可知,在弹性阶段,SPCCT 梁主要由钢梁下翼缘受拉,混凝土受压,此时 PSCC 受力较

小,主要抵抗混凝土板与钢梁的纵向(梁长方向)滑移,但随着荷载逐渐增加,PSCC 受力也随之增大,最终使得 PSCC 能有效分担混凝土板和钢梁的应力,进而提高 SCCT 的屈服荷载;在弹塑性阶段,中和轴上移,混凝土由于 PSCC 中钢板的存在,使得桥面板塑性变形能力增强。

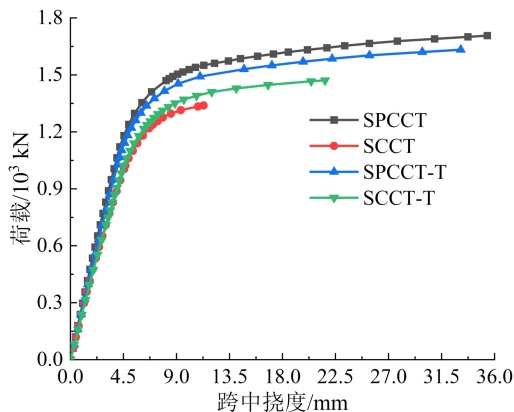


图 16 FEM 荷载-挠度对比曲线

Fig.16 FEM comparison results of load-deflection curves

由 FEM 计算结果可得各有限元比值如表 3 所示,由表 3 可知:PSCC 能有效提高 SCCT 梁的极限承载力,并对其延性提升效果显著,但对其弹性刚度提升较小;由于板托处存在钢板,能帮助此处(平钢板与钢梁上翼缘之间)的混凝土受力,故 SCCT-T 的力学性能优于 SCCT;相较于无板托的 SCCT 梁,PSCC 在有板托的 SCCT 梁中所提升的力学性能更明显(极限承载力多提升 16.46%)。

表 3 FEM 的计算比值

Tab.3 Calculated ratio of FEM

编号比	$F_y/kN$	$E_y/kN \cdot mm^{-1}$	$F_u/kN$	$\Delta_u/mm$
SPCCT/SCCT	1.246 2	1.080 5	1.274 3	3.140 2
SPCCT/SPCCT-T	1.066 0	1.001 2	1.045 4	1.067 9
SCCT/SCCT-T	0.931 3	0.998 5	0.910 3	0.521 3
SPCCT-T /SCCT-T	1.088 8	1.077 6	1.109 7	1.532 8

## 4 结论

1) SPCCT 梁受力呈弯剪破坏特征,其交界面整体滑移较小,最大滑移位置位于加载点附近。其中的 PSCC 具有良好的连接性能,使得 SPCCT 梁具有较高的承载力和较好的延性。

2) 采用 ANSYS 建立的 SPCCT 梁有限元模型

得到的屈服荷载、弹性刚度、极限荷载、极限挠度等 FEM 值与试验值的误差均在 10% 以内,具有较高精度,能较好地模拟 SPCCT 梁的受力过程。

3) SPCCT 梁在受力过程中,其钢板上的剪应力总体上大于工字钢上翼缘,因此在设计 SPCCT 梁时考虑钢板上的抗剪连接程度应大于工字钢上

翼缘。

4) PSCC 能有效提高 SCCT 梁的受力性能,并对其延性提升显著;相较于无板托 SCCT 梁, PSCC 对有板托 SCCT 梁的极限承载力能多提升 16.46%,而对弹性刚度的提升相差很小。

## 参考文献:

- [1] ZHANG S, JIA Y M, DING Y X. Study on the flexural behavior of steel-concrete composite beams based on the shear performance of headed stud connectors[J]. Buildings, 2022, 12(7): 961.
- [2] 贺绍华, 杨刚, 房腾鹏, 等. 带开孔板连接件的 HSS-UHPC 组合梁抗弯性能[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(6): 143-157.
- [3] 刘汗青, 钟琼, 霍静思, 等. 预制装配式栓钉连接件钢-混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(5): 1-8.
- [4] 范亮, 谭阳, 李成君, 等. 装配式群钉组合梁与现浇组合梁对比试验研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(6): 59-67.
- [5] FANG J P, ZHOU L Y, ZHU Y B, et al. Experimental study on flexural behavior of modular prefabricated channel-concrete composite beams with dry connections[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 68: 106194.
- [6] 张凯. 中小跨径钢板组合梁桥快速建造技术与应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [7] LONG J J, WANG Y C, LOU G B, et al. Experimental, numerical and analytical investigation of bending performance of bolted demountable composite beams with profiled steel decking[J]. Engineering Structures, 2023, 295: 116887.
- [8] 周现伟, 杨勇, 霍旭东, 等. 带组合桥面板的组合梁受弯承载能力试验[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 547-555.
- [9] 池善庆. 钢板-混凝土组合桥面板组合梁桥受力性能分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(2): 86-93.
- [10] 四川省质量技术监督局. 钢-混凝土组合桥面板技术规程: DB 51/T 1991—2015[S]. 成都: 人民交通出版社, 2015.
- [11] EIVIND HOGNESTAD N W H, DOUGLAS M. Concrete stress distribution in ultimate strength design[J]. ACI Journal Proceedings, 1955, 52(12): 455-480.
- [12] OLLGAARD J G, SLUTTER R G, FISHER J W. Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete[J]. Engineering Journal, 1971, 8(2): 55-64.
- [13] 苏庆田, 杜霄, 李晨翔, 等. 钢与混凝土界面的基本物理参数测试[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 499-506.

(责任编辑: 马晓磊)