

新型混合连接件双钢板 混凝土夹层梁抗弯性能数值模拟

毕继红^{1,2}, 李彩强¹, 赵云¹, 王照耀¹, 张金波¹

(1.天津大学 建筑工程学院,天津 300072;2.天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:对一种具有新型混合连接件的双钢板混凝土夹层梁(SCS夹层梁)的四点弯曲试验进行了数值模拟。考虑了材料和几何的非线性行为,采用实体单元对结构中的剪力钉、高强螺栓、钢面板、混凝土芯等元件建模,同时考虑剪力钉连接件、高强螺栓以及钢面板和混凝土芯之间的复杂相互作用,建立了双钢板混凝土夹层梁的三维有限元模型,并将有限元计算结果与试验梁的跨中荷载-位移曲线、破坏模式、跨中荷载-应变曲线进行对比,对三维有限元模型的准确性进行了验证。进一步探究了夹层梁的混凝土芯强度、钢面板材料特性对梁抗弯性能的影响。结果表明,提升混凝土强度对梁的弹性刚度和承载能力的影响不明显;钢面板特性对梁的弹性刚度影响不大,但可显著提高梁的承载能力。

关键词:混合连接件;夹层梁;数值模拟;参数研究

中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)02-0001-06

0 引言

双钢板混凝土夹层梁是由外部钢面板以及内部混凝土芯组成的夹层结构,这种夹层结构充分发挥了混凝土材料的抗压以及钢面板的抗拉性能,在各工程领域广泛应用,例如:桥梁加速施工^[1]、沉管隧道^[2]、盾构隧道管片^[3]、高层建筑核心墙^[4]、抗爆防护结构^[5]以及北极海洋结构抗冰墙^[6]等。相比于钢筋混凝土结构,双钢板混凝土夹层结构优势明显。一方面,外部钢板结构可以充当混凝土模板,避免了传统钢筋混凝土结构施工过程中的繁杂支模、拆模环节,提高了现场施工效率。另一方面,SCS夹层结构无需额外配置钢筋,避免了钢筋的加工以及钢筋笼的绑扎。此外,内部混凝土芯在一定程度上可以避免钢板过早地发生局部屈曲,外部钢板可以有效限制混凝土的变形,避免混凝土裂缝的外露,显著提高结构的耐久性和强度。

双钢板混凝土夹层结构复合作用的充分发挥依赖于钢面板与混凝土的有效连接,早期的夹层结构主要通过环氧树脂等黏性材料将钢面板与混凝土芯黏结在一起,由于黏性材料的本身缺陷,黏结强度较差,在钢板与混凝土界面处极易发生脆性破坏^[7],极大地降低了夹层结构的整体性,不宜应用于工程结构。与黏性材料相比,机械连接件更能将钢面板与混凝土芯有效连接在一起,连接件嵌入混凝土芯内部,阻止了钢板与混凝土界面的纵向分离与横向滑移,具有较高纵向抗拉强度及横向抗剪强度。

国内外学者针对连接件形式及作用效果进行了大量研究。带头剪力钉一端焊接在钢面板上,其余部分嵌入混凝土芯内部,易于操作组装,被广泛应用于双钢板混凝土夹层结构,但在动态荷载作用下剪力钉与混凝土芯极易发生剥离,进而导致结构失效。将光圆钢筋通过焊接机焊接到钢面板上得到的双钢板混凝土结构具有更好的完整性,在混凝土浇筑过程中能够抵抗内部压力,但由于焊接机的尺寸原因,对2块外部钢面板的间距有所限制。带贯通螺栓的双钢板混凝土夹层结构通过高强螺栓将钢面板与混凝土芯连接,避免了内部焊接,但大量的螺栓孔在一定程度上破坏了钢面板完整。具有J型钩连接器的双钢板结

收稿日期:2023-01-10 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230011

基金项目:国家自然科学基金(51227006)

作者简介:毕继红(1965—),女,教授,研究方向为钢纤维自密实混凝土。E-mail:jihongbi@163.com

毕继红,李彩强,赵云,等.新型混合连接件双钢板混凝土夹层梁抗弯性能数值模拟[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(2):1-6.

构,由于其 J 型钩的拉结互锁,整个夹层结构具有较好的抵抗动力荷载的性能,但大量的 J 型连接器会造成混凝土浇筑的阻塞问题^[8],同时需要精准对齐,给外部面板的组装带来了一定的困难。角钢^[9]用作连接件,嵌入混凝土芯深度较浅,钢面板与混凝土在界面处发生脱离,发生脆性破坏。YAN et al^[10]最新开发了具有带螺栓 C 型槽钢连接件的双钢板混凝土夹层梁,并研究了其抗弯性能,实验发现具备该种形式连接器的夹层结构复合作用强,但较多的螺栓孔破坏了钢面板的完整性,且有大量的装配工作需要。综合考虑各种类型连接器的优缺点,WANG et al^[11]开发了一种同时具有多种形式连接件的新型混合型连接单向钢双钢板混凝土夹层梁,其通过焊接肋板有效提高了夹层梁的整体性,只在部分区域设置少量剪力钉既实现了钢面板与混凝土芯的有效复合,又保证了混凝土浇筑的正常进行,仅在底部钢面板设置螺栓连接既保证了连接强度,又避免了因螺栓孔数量过多而破坏钢面板完整性。在此基础上,对这种新型夹层梁的抗弯性能进行了研究。

随着计算机技术的不断发展,各种有限元软件不断完善,有限元分析技术被广泛应用于工程结构分析。已有许多学者通过数值模拟方法,对具备各种类型连接器的双钢板混凝土结构抗弯性能进行了研究。依据文献[11]中的实验研究,运用 ABAUQS 建立了三维有限元模型,并进行了一系列参数化分析,探究了混凝土强度、钢材强度对结构弹性刚度和承载能力的影响规律,能够为双钢板混凝土夹层结构的推广应用提供参考。

1 试验简介

WANG et al^[11]对夹层梁进行了四点弯抗弯试验,在准静态条件下实行位移加载,试件尺寸 2 000 mm×100 mm×624 mm,净跨度 1 800 mm,支座距梁边缘 100 mm,剪切跨度 600 mm。混凝土、钢面板、剪力钉、高强螺栓的材料特性如表 1 所示,其中, E 为弹性模量; ν 为泊松比; f_c 为混凝土抗压强度; f_y 为钢材屈服强度; f_u 为钢材极限强度。

表 1 材料参数

材料	E/GPa	ν	f_c/MPa	f_y/MPa	f_u/MPa
混凝土	24.7	0.17	36	—	—
钢板	201.0	0.30	—	332	573
剪力钉	200.0	0.30	—	375	450
高强螺栓	200.0	0.30	—	640	800

2 有限元分析

2.1 模型概述

基于试验梁对称的几何结构和加载方式,为了提高计算效率,选取试样的 1/4 模型进行分析,加载垫块以及支座建模为刚体、钢面板、螺栓、剪力钉以及混凝土芯均采用实体单元建模,采用 C3D8R 网格单元进行划分,整体模型如图 1 所示,建模细节情况如图 2 及图 3 所示。网格划分过程中,涉及到对模型中大量的剪力钉、螺栓以及不规则的混凝土芯的处理,若对剪力钉按照实际几何尺寸精确建模,将对预留孔洞的混凝土芯网格的规整划分带

来巨大挑战,计算收敛困难。连接件的承载力与其横截面积和高度紧密相关,因此将圆头型剪力钉简化成横截面面积、高度相同的方头形剪力钉,以利于网格划分。三维模型单元数目多,同时伴随着剪力钉、钢面板、肋板、高强螺栓与混凝土芯各部分之间大量且复杂的接触分析运算,因此,采用动力显式算法对结构进行准静态分析,相比于隐式计算更易收敛。同时,为提高计算效率,采用 ABAQUS 软件中质量缩放设定功能来缩

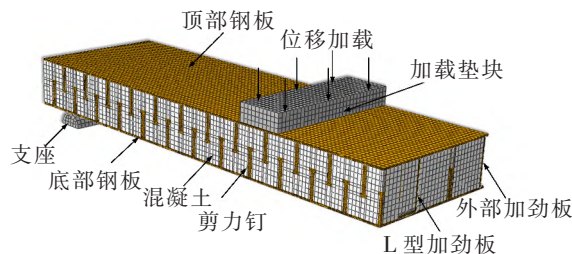


图 1 整体模型示意图

短计算时长。应当注意的是,为保证模型设定质量缩放后计算结果的可靠性,保证整个模型准静态加载过程,要密切关注计算过程中动能、内能、总能量三者大小关系。

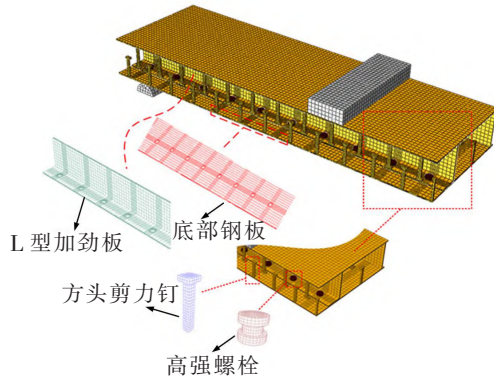


图 2 钢构件细节图

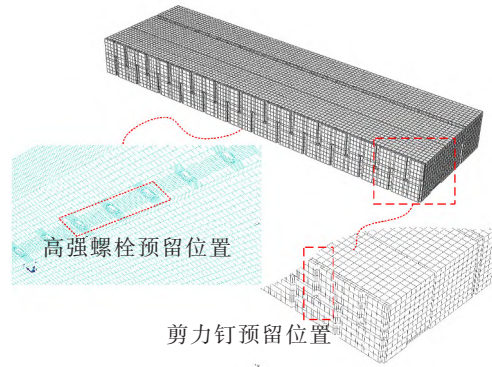


图 3 混凝土芯细节图

2.2 材料本构

混凝土芯特性的适当模拟,对模型的计算准确至关重要。混凝土损伤塑性模型(CDPM)因其在有限元模拟中的通用性和稳定性被广泛采用,其需要定义混凝土拉伸开裂和压缩破碎 2 种破坏机制。CDPM 中所需各项参数由文献[12]推导所得,其应力应变关系为^[13]

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl}) \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad (2)$$

式中, E_0 为混凝土的弹性模量; d_t 、 d_c 分别为受拉和受压本构曲线下降段所对应的损伤变量; ϵ_t 、 $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ 分别为拉应变和受拉等效塑性应变。此外, CDPM 中膨胀角、偏心率、双轴受压与单轴受压强度比值、拉压子午线第二应力不变量和黏性系数等参数,分别取 30、0.1、1.16、0.667 和 0.000 5。

在试验过程中未观察到剪力钉、螺栓杆的断裂,故采用塑性强化^[14]模型来定义以上部件的材料特性,该模型采用 von-Mises 屈服准则,考虑了钢材的各向同性应变硬化,不同钢材的三折线应力-应变曲线如图 4 所示。

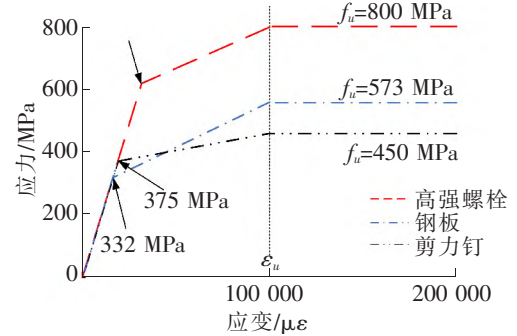


图 4 钢材应力-应变曲线

2.3 荷载、边界条件以及相互作用

对梁跨中横截面施加了对称约束,约束了截面绕 Z 轴及 Y 轴方向的旋转,限制了沿 X 轴方向的平移。对梁纵向中间截面施加对称约束,约束了截面绕 X 轴及 Y 轴方向的旋转,限制了沿 Z 轴方向的平移。对于支座施加完全固定约束,限制其任何方向上的移动。对加载垫块施加竖直向下的位移,限制其余方向的移动。如图 5 所示。

开发的有限元模型中有大量接触对存在,采用 ABAQUS 相互作用中通用接触来进行定义和计算。其中钢面板、混凝土芯、以及连接器之间的面面接触均考虑了法向和切向。法向采用硬接触算法,发生接触的 2 个面在法向上传递压力,但不能穿透,受到拉力时两面可以分离。一般将刚度较大面设置为主表面,刚度较小的面设置为从属表面。切向采用库伦摩擦模型算法,并设定摩擦系数为 0.3。剪力钉与钢板之间设置绑定约束,来模拟二者之间的焊接连接。

2.4 有限元模型验证

将有限元分析结果与文献[11]中的试验结果进行对比,以验证有限元模型的准确性。图 6 将试验梁失效模式与有限元分析结果进行对比,发现有限元计算结果所显示的梁破坏模式与实验结果一致,在梁

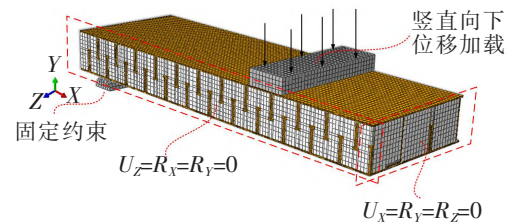


图 5 荷载及边界条件示意图

纯弯区段,混凝土产生一系列垂直裂缝,并伴有梁上部混凝土压碎以及钢板局部屈曲的现象产生。由此可见,建立的有限元模型能够准确地表征夹层梁的破坏模式。图 7 将有限元计算结果与试验所得跨中的荷载-位移曲线进行了对比,整体拟合效果良好,通过分析可知,在曲线初始阶段以及末端存在一定差异,前期的差异主要是由于有限元模型不能考虑钢材材料实际存在的初始缺陷以及混凝土的开裂失效,后期的差异来源于对钢构件材料属性使用三折线模型进行了定义,不能有效模拟钢材料在达到极限应变后强度的下降而导致荷载降低的实验结果。图 8 将计算结果与试验梁跨中顶部以及底部钢面板的荷载-应变曲线进行了对比,结果表明,有限元模型能准确地反映钢面板在加载过程中的应变水平。

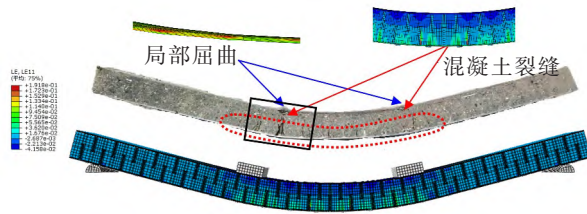


图 6 夹层梁混凝土裂缝及钢板局部屈曲对比图

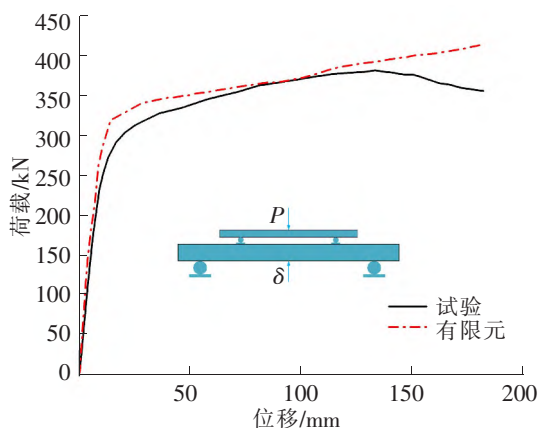


图 7 荷载-位移曲线对比

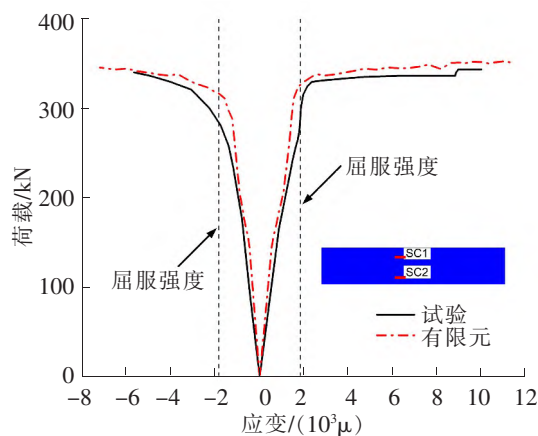


图 8 荷载-应变曲线对比

3 参数化分析

参数化分析主要研究了混凝土强度和钢面板材料特性对夹层梁弹性刚度、屈服荷载以及极限荷载的影响。加载初期阶段,荷载位移曲线表现出线性行为,弹性刚度是指这一阶段夹层梁的刚度,线性行为结束时对应的外荷载即为梁的屈服荷载,极限荷载则是底部钢板达到极限应变时所对应的外荷载或加载过程中所能承受的最大荷载。

图 9 反映了混凝土强度等级对夹层梁荷载-位移行为的影响,可以发现夹层梁前期刚度几乎未发生变化,这是因为前期夹层梁的抗弯刚度主要是由钢面板与混凝土的材料特性以及钢面板与混凝土芯的复合作用所共同决定的,二者的复合作用与连接件的形式及布置密切相关,改变混凝土芯强度等级对二者复合作用几乎不产生影响,且对梁的刚度的影响主要与混凝土的弹性模量相关,随着混凝土由 C30、C45 到 C60,混凝土弹性模量的提升较小,因此梁前期刚度未发生明显变化,屈服强度也未发生明显改变。随着混凝土抗压强度从 30 MPa 提高到 45 MPa 和 60 MPa,加载至梁承载的极限状态时,夹层梁的顶部及底部钢面板应力状态未产生明显变化,但混凝土芯的应力水平有所提高,因此随加载的进行,在加载后期,荷载-位移曲线发生了变化,C60 对应的荷载-位

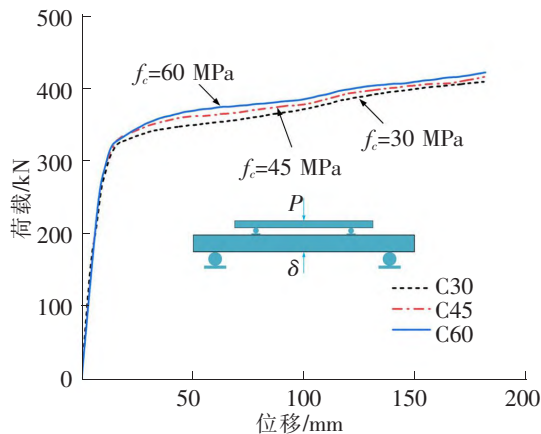


图 9 不同混凝土强度梁荷载-位移曲线

移曲线依次略高于 C45 及 C30 对应的荷载-位移曲线。

图 10 描绘了不同钢材特性情况下夹层梁的荷载-位移行为。可以发现,荷载-位移曲线产生了显著变化,随钢材特性的改变,梁的弹性刚度变化不大,但承载能力显著提高。随着钢材牌号的改变,钢材弹性模量未发生变化,屈服强度与极限强度明显提高,因此梁的弹性刚度几乎不变,但屈服荷载以及极限荷载显著提高。其次,当钢材型号为 Q690 及 Q960 时,荷载-位移曲线末端下降趋势明显,这是因为受压钢面板应力水平较高,过早的产生了局部屈曲,顶部钢板刚度退化严重。同时,位于局部屈曲区域的混凝土因失去外部钢板的约束破坏明显,一定程度上导致了承载能力的降低。

图 11 反映了随混凝土强度等级改变,夹层梁弹性刚度、屈服荷载、极限荷载的变化趋势,随着混凝土强度等级由 C30、C45 到 C60,屈服荷载由 262 kN 提升至 269.8 kN 及 270.1 kN,分别提升了 3%、3.1%;弹性刚度由 30.1 kN/mm 提升至 31.3 kN/mm 及 31.4 kN/mm,分别提升了 0.7%、1%;极限荷载由 396.5 kN 提升至 402.4 kN 及 405.6 kN,分别提高了 1.5%和 2.3%。

图 12 体现了随着钢材屈服强度从 235 MPa 提高到 345、460、690、960 MPa,夹层梁弹性刚度、屈服荷载、极限荷载的变化趋势。随着钢材牌号由 Q235 到 Q960,屈服荷载由 231.9 kN 提升至 363.7、489、697.8、975.4 kN,分别提升了 56.8%、110.9%、200.9%、320.6%;弹性刚度由 26.1 kN/mm 改变为 26.2、25.7、25.9、25.7 kN/mm,分别提升了 0.4%、-1.9%、-1.1%、-1.9%;极限荷载由 328.2 kN 提升至 447.1、554.7、776.6、1 007.1 kN,分别提高了 36.2%、69%、136.6%、206.8%。

4 结论

对具备新型混合连接件的双钢板夹层梁进行了数值模拟分析,建立了三维有限元模型,采用验证后模型对混凝土强度以及钢材特性进行了参数化分析,可以得出以下结论:

(1)通过荷载-位移曲线、梁破坏模式、荷载-应变曲线三方面的对比验证了有限元模型,描述的建模方法能够对双钢板混凝土夹层梁的抗弯性能进行有效模拟,为其他学者在双钢板混凝土夹层结构数值模拟方面的研究提供了思路。

(2)提升混凝土芯的材料强度对改变该种新型夹层梁承载能力影响较小,在实际工程中可以考虑采用等级较低的混凝土用于夹层结构。

(3)改变钢材型号可以显著提高夹层梁的承载能力,但要注意考虑当钢材强度较高时,受压钢面板过早的产生局部屈曲而造成的破坏。

参 考 文 献

- [1] FARZADA M, SHAFIEIFARA M, AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on an innovative sandwich system utilizing UPFRC in bridge applications[J]. Engineering Structures, 2019, 180: 349-356.

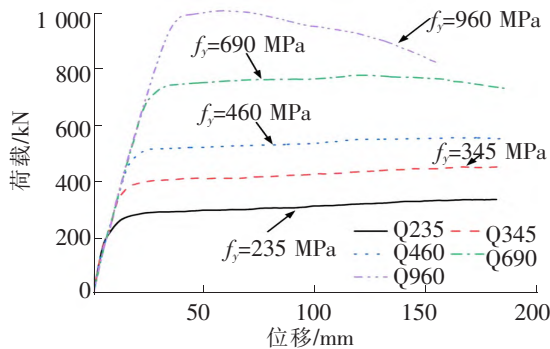


图 10 不同钢材牌号梁荷载-位移曲线

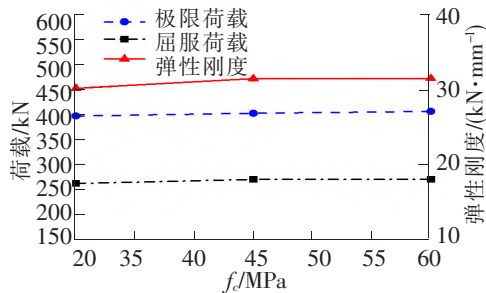


图 11 混凝土强度影响

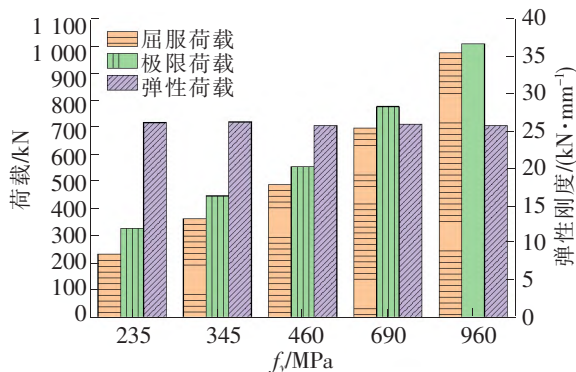


图 12 钢材牌号影响

- [2] LIN M, LIN W, WANG Q, et al. The deployable element, a new closure joint construction method for immersed tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 80:290-300.
- [3] ZHANG W, KOIZUMI A. Behavior of composite segment for shield tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25:325-332.
- [4] NIE G, HU S, FAN S, et al. Experimental study on seismic behavior of high strength concrete filled double steel plate composite walls[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 88:206-219.
- [5] REMENNIKOV A, GAN E C J, NGO T, et al. The development and ballistic performance of protective steel-concrete composite barriers against hypervelocity impacts by explosively formed projectiles[J]. *Composite Structures*, 2019, 207:625-644.
- [6] HUANG Z, RICHARD LIEW, YAN J. Finite element analysis of curved lightweight steel-concrete-steel sandwich panel subjected to lateral loads[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2013, 8/12:2583-2597.
- [7] SOLOMON S, SMITH D, CUSENS A. Flexural tests of steel-concrete-steel sandwiches[J]. *Mag Concr Res*, 1976, 28:13-20.
- [8] ZHANG W, HUANG Z, FU Z, et al. Shear resistance behavior of partially composite Steel-Concrete-Steel sandwich beams considering bond-slip effect[J]. *Engineering Structures*, 2020, 210:1-14.
- [9] YAN J, RICHARD L, ZHANG M, et al. Experimental and analytical study on ultimate strength behavior of steel-concrete-steel sandwich composite beam structures[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48:1523-1544.
- [10] YAN J, GUAN H, WANG T. Steel-UHPC-steel sandwich composite beams with novel enhanced C-channel connectors: Tests and analysis[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 170:1-18.
- [11] WANG Y, LU J, ZHAI X, et al. Flexural behaviours of one-way steel-concrete-steel sandwich panels with novel hybrid connectors: Tests and analysis[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 188:1-13.
- [12] 高文安. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] 刘巍, 徐明, 陈忠范. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J]. *工业建筑*, 2014, 44(增刊 1): 167-171.
- [14] 郭镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

Numerical Simulation of Flexural Behavior of Double Steel Plate Concrete Sandwich Beams with New Type of Composite Connectors

Bi Jihong^{1,2}, Li Caiqiang¹, Zhao Yun¹, Wang Zhaoyao¹, Zhang Jinbo¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In this paper, a four-point bending test of a double steel plate concrete sandwich beam (SCS sandwich beam) with a new hybrid connector was numerically simulated. The nonlinear behavior of material and geometry were considered, and solid cells were used to model the elements of the structure such as shear nails, high-strength bolts, steel panels, and concrete cores, and the complex interactions between shear nail connectors, high-strength bolts, steel panels and concrete cores were also considered to establish a three-dimensional finite element model of the double-plate concrete sandwich beam, and the finite element calculation results were compared with the mid-span load-displacement curves of the test beam. The accuracy of the three-dimensional finite element model was verified by comparing the finite element calculation results with the mid-span load-displacement curve, damage mode, and mid-span load-strain curve of the test beam. The effects of concrete core strength and steel panel material properties of the sandwich beam on the flexural performance of the beam were further investigated. The results show that: the effect of enhancing the concrete strength on the elastic stiffness and load carrying capacity of the beam is not obvious; the steel panel properties have little effect on the elastic stiffness of the beam, but can significantly improve the load carrying capacity of the beam.

Key words: hybrid connectors; sandwich beam; numerical simulation; parameter study