

波纹钢-混凝土组合板纵剪性能试验研究与设计方法

肖妙武¹, 杨金胜^{2,3}, 张 欢^{2,3}, 耿 悦^{2,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;

2. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;

3. 哈尔滨工业大学 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为研究端部锚固条件对波纹钢-混凝土组合板静力性能的影响, 通过静力试验对比设置/未设置端部锚固组合板的破坏模式、荷载-挠度曲线、荷载-滑移曲线; 采用 ABAQUS 软件建立波纹钢-混凝土组合板纵剪性能有限元模型, 通过参数分析量化端部锚固条件对波纹钢-混凝土组合板纵剪性能的影响, 并提出适用于波纹钢-混凝土组合板的设计方法。结果表明: 设置端部锚固可有效提高波纹钢-混凝土组合板的抗剪承载力, 与无端部锚固组合板相比, 设置端部锚固的组合板抗剪承载力增加 31.5%; 厚度由 120 mm 增大至 160 mm, 抗剪承载力增大 30.5%; 计算跨度由 2 700 mm 提高至 3 300 mm, 抗剪承载力降低 31.7%; 提出的设计方法可有效预测波纹钢-混凝土组合板的抗剪承载力, 计算结果与试验结果误差在 10% 以内。

关键词: 波纹钢板; 组合板; 纵剪性能; 试验研究; 设计方法

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)04-0561-08

Experimental study and design method of longitudinal shear behavior of corrugated steel-concrete composite slabs

XIAO Miaowu¹, YANG Jinsheng^{2,3}, ZHANG Huan^{2,3}, GENG Yue^{2,3}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

3. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters of the Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To study the effect of end anchoring conditions on the static performance of corrugated steel-concrete composite slabs, two sets of full-scale specimens of corrugated steel-concrete composite slabs were designed and fabricated, and the failure modes, load deflection curves and load slip curves of composite panels with or without end anchors are compared through static tests. The finite element model of longitudinal shear performance of corrugated steel-concrete composite slabs was established by ABAQUS software, and the reliability of the model was verified by experimental data. The influence of end anchorage conditions on the longitudinal shear performance of corrugated steel-concrete composite slabs was quantified by parametric analysis, and design method suitable for corrugated steel-concrete composite slabs was proposed. The results show that the longitudinal shear failure of the corrugated steel-concrete composite slab without end anchorage occurs under the action of external load. Setting the end anchor can effectively improve the shear bearing capacity of the corrugated steel-concrete composite slabs, and the shear bearing capacity of the set end anchoring composite slab is increased by 31.5% compared with the endless anchoring composite slab. The proposed design method can effectively predict the shear bearing capacity of corrugated steel-concrete composite slabs, and the error between the calculation result and the test result is within 10%.

Key words: corrugated steel deck; composite slab; longitudinal shear performance; experimental study; design method

收稿日期: 2022-07-04

修改稿日期: 2022-08-12

基金项目: 辽宁省教育厅基础科研项目(lnjc202007); 沈阳市中青年科技人才项目(RC200143); 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2019-K-054)

第一作者: 肖妙武(1974—), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为: 土木工程施工技术. E-mail: 337438542@qq.com

通信作者: 杨金胜(1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为: 钢-混凝土组合结构. E-mail: yangjinsheng@stu.hit.edu.cn

随着我国城镇化水平的不断提高,钢-混凝土组合板因施工速度快、抗震性能好等优点在工程中被广泛应用^[1-5]。波纹钢板是一种平钢板轧制形成的波形板材,由于其抗剪切屈曲能力强、面外刚度大,将其制成波纹钢-混凝土组合板具有较为广泛的应用前景,波纹钢-混凝土组合板构件的力学性能也受到众多学者的重点关注^[6-7]。纵剪性能是影响构件是否发生剪切脆性破坏的主要因素,对结构安全具有重要影响。

部分学者对钢-混凝土组合板的纵剪性能开展相关研究,Porter和Ferrer等^[8-9]通过大量试验数据,提出了 $m-k$ 抗剪承载力计算方法并进行了修正与完善,目前,EC4^[10]、ANSI/ASCE3-91^[11]、《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[12]等均是对于 $m-k$ 计算方法的拓展。部分学者也对 $m-k$ 计算方法进行了简化,聂建国等^[13]提出了部分剪力连接法,假设界面咬合力沿剪跨段均匀分布,界面摩擦力作用于板端,通过图像对比寻找控制截面计算极限承载力。王晓溪等^[14]在部分剪力连接法的基础上尝试计算波纹钢-混凝土组合桥面板的抗剪承载力,但计算结果仅为试验结果的74.0%,主要原因是波纹钢板与混凝土之间的复杂粘结滑移性能与锚固条件均会对计算结果产生影响。目前针对波纹钢-混凝土组合板纵剪性能的相关研究仍然较少。

基于此,本文进行了波纹钢-混凝土组合板纵剪性能足尺试验,测量了试件的荷载-跨中挠度曲线与荷载-滑移曲线;采用ABAQUS有限元软件建立波纹钢-混凝土组合板模型,根据试验结果验证模型可靠性,并进行参数分析,量化各关键参数对波纹钢-混凝土组合板纵剪性能的影响;基于试验数据与有限元结果,提出适用于波纹钢-混凝土组合板抗剪承载力的计算方法。

1 试验研究

1.1 试件设计及制作

试验共设计制作了2个足尺波纹钢-混凝土组合板试件,两试件的几何尺寸相同,锚固条件不同,试件总跨度为3 000 mm,计算跨度为2 700 mm,板宽600 mm,板厚120 mm,波纹钢板型号为200×55×3。板端设置栓钉的试件编号为NAC-S,栓钉型号为16 mm×90 mm,强度等级4.8,栓钉穿透波纹钢板与垫板焊接连接,两端各设置2个栓钉,横向间距为200 mm,板端无栓钉的试件编号为NAC-N。在混凝土受压区布置3Φ10的纵

筋和16Φ6的分布筋,所有钢筋采用Q235钢材。具体钢筋布置情况及波纹钢板尺寸见图1。

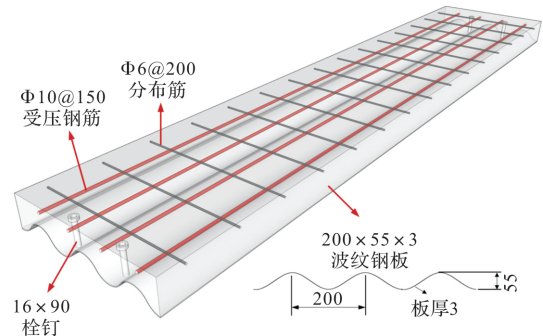


图1 试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the specimen

试件的钢筋部分在实验室进行绑扎处理,随后使用木模板进行支模,混凝土浇筑前在模板内壁均匀涂抹一层油膜,以方便脱模。浇筑混凝土后,依据《混凝土结构试验方法标准》(GB50152-2012)^[15]对混凝土进行振捣,振捣完成后使用保鲜膜进行覆盖,养护14 d后进行模板拆除,随后养护至28 d,养护过程中定期浇水并控制实验室内温湿度,以保证混凝土浇筑质量。

1.2 材料性能

试验中所使用的混凝土设计强度等级为C50,根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[16]测得混凝土28 d立方体抗压强度为62.04 MPa,弹性模量为38.66 GPa。

对于钢材则依照《金属材料弯曲试验方法》(GB/T 232—2010)^[17]及《金属材料拉伸试验:第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[18]测得波纹钢板钢筋及栓钉的屈服强度(f_y)、极限抗拉强度(f_u)及弹性模量(E_s)为201 GPa。

表1 钢材的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of steel

钢材	f_y /MPa	f_u /MPa	E_s /GPa
波纹钢板	397.4	497.2	210
钢筋	242.3	370.6	205
栓钉	320.0	400.0	210

1.3 测点布置及加载方案

波纹钢-混凝土组合板试件的试验加载装置及测点布置情况如图2所示,在试件跨中、对称加载点和组合板端部均布置了LVDT位移传感器用于测量试件的挠度与滑移。对于加载装置而言,采用加载油泵进行加载,使用分配梁与反力梁传递荷载,力传感器用于测得荷载。采用EC4^[10]推荐测量抗剪承载力的加载位置,即4分点加载。加载

方法依据《混凝土结构试验方法标准》(GB50152—2012)^[15]采用分级加载,首先进行预加载,检测加载设备工作情况,随后进行正式加载,在试件开裂前,每级荷载增量为3 kN,试件开裂后,每级荷载增量调整为5 kN,荷载接近极限荷载时,改为缓慢加载,直到试件挠度急剧增大时停止加载。

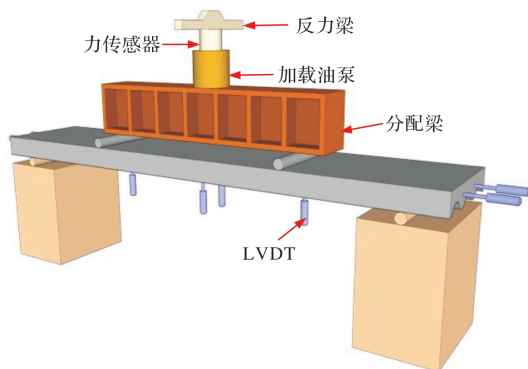


图2 试件加载装置及量测仪器布置图

Fig. 2 Layout of specimen loading device and measuring instrument

1.4 试验结果及分析

1.4.1 试验现象

未设置端部锚固(无栓钉)的试件 NAC-N 在荷载达到 15 kN 时,跨中位置钢板与混凝土界面处出现第一条剪切裂缝;荷载增加至 29 kN 时,试件左侧背面混凝土出现第一条裂缝;荷载增加至 40 kN 时,试件出现巨大响动,左侧出现滑移,右侧的波纹钢板与混凝土产生分离,随后荷载降至 17 kN,随荷载不断增加,试件不断发出声响;当荷载达到 36 kN 时,试件右侧出现滑移,当加载至 74 kN 左右时,试件跨中位移急剧增大,停止加载。

设置端部锚固(有栓钉)的试件 NAC-S 在荷载达到 26 kN 时,试件右侧背面混凝土出现第一条裂缝;加载至 75 kN 时,试件右端产生滑移,并伴随较大声响,荷载降低至 55 kN,同时右侧混凝土出现较多裂缝;荷载增大至 79 kN 时,左端出现滑移,伴随较大声响,荷载降低至 64 kN,同时波纹钢板与混凝土之间出现明显的裂缝;荷载增大至 97 kN 时,伴随两侧的声响,荷载降低至 66 kN,波纹钢板与混凝土之间的裂缝逐渐增大。加载至 71 kN 左右时,试件跨中位移急剧增大,停止加载。

图3为具体试验现象,图3(a)为试件 NAC-N 的界面剪切裂缝,图3(b)为试件 NAC-S 的破坏情况。从试验现象可以判断,设置端部锚固的试件

NAC-S 较无端部锚固的试件 NAC-N 纵剪性能有所提升,出现滑移情况较为滞后,这主要是由于栓钉的锚固作用,从而提高了组合板的抗剪承载力。

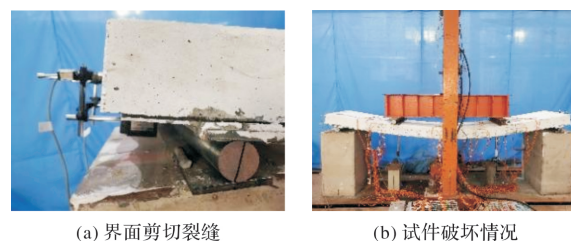


图3 试验现象

Fig. 3 Experimental phenomenon

1.4.2 试件结果分析

图4为试件荷载-跨中挠度曲线,可以看出,设置端部锚固的 NAC-S 试件的极限承载力较无端部锚固的 NAC-N 试件增大 31.5%,并且首次出现滑移时的荷载也较 NAC-N 提高 90.0%,可见栓钉在波纹钢-混凝土组合板产生滑移前就已经承担了部分剪力,但随着试件所承受荷载的不断增大, NAC-S 试件在破坏前夕所承受的荷载与无端部锚固的 NAC-N 基本相同,这主要是因为 NAC-S 试件中的栓钉产生断裂,或者焊缝断裂所导致的,这时的栓钉基本丧失剪力连接件的作用。图5为 NAC-S 和 NAC-N 两试件的沿跨度竖向位移曲线,可以看出,两试件在加载过程中,加载点的竖向位移基本对称,且均在 $0.6V_u$ (V_u 为试件极限荷载)附近发生位移突变现象,说明在此荷载下试件开始出现剪切破坏。

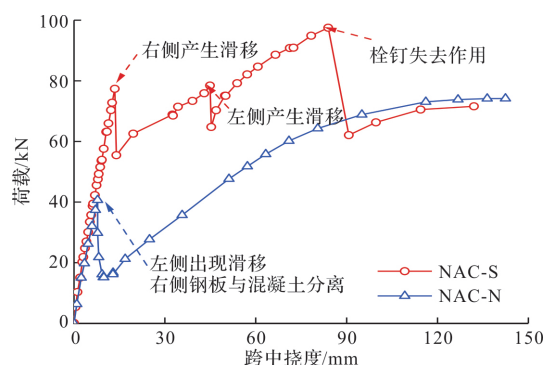


图4 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 4 Load-span deflection curve

图6为试件的荷载-滑移曲线,图中的 R 与 L 分别代表试件的右侧滑移与左侧滑移,可以看出 NAC-N 试件的滑移远大于 NAC-S 试件所产生的滑移,滑移量约为 NAC-S 试件的 6~7 倍,这是因为栓钉的存在使混凝土与波纹钢板间的协同能力有明显提升,同时也提升了组合板的抗剪承载

能力。

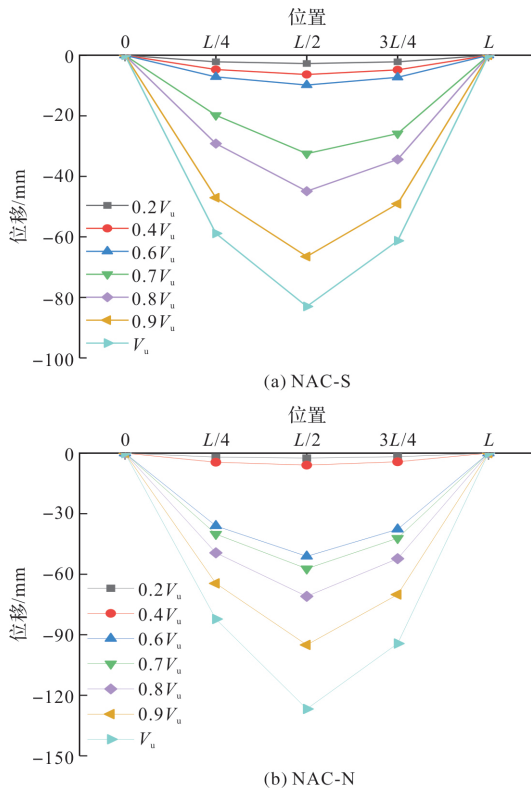


图5 沿跨度竖向位移

Fig. 5 Deflections along the span

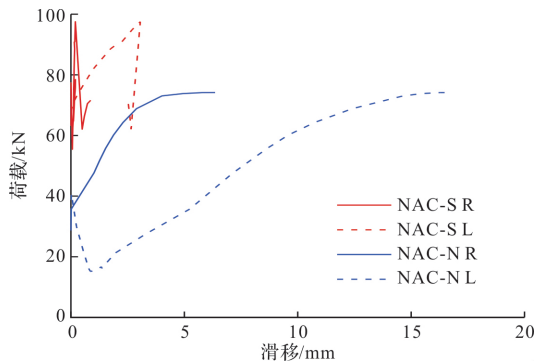


图6 荷载-滑移曲线

Fig. 6 Load-slip curve

结合图4可以看出, NAC-S试件在加载过程中共出现了3次荷载降低的情况, 并且均伴随着滑移的产生。前两次荷载降低的原因是随着荷载的增大, 波纹钢板与混凝土之间界面所承受的剪力大于界面粘结力与栓钉所承受的剪力, 导致界面出现剪切裂缝, 产生了相对滑移, 产生滑移后剪力大部分由栓钉承受; 第三次荷载降低的原因则是栓钉承受的剪力过大, 导致栓钉断裂或焊缝断裂。

2 有限元模型建立及验证

为获得更多数据进行分析, 采用 ABAQUS 软

件建立波纹钢-混凝土组合板精细化有限元模型, 进一步量化锚固条件对波纹钢-混凝土组合板纵剪性能的影响。模型主要包括混凝土、波纹钢板、钢筋、垫板及栓钉, 其中混凝土、垫板采用 3CD8R 实体单元, 波纹钢板采用 S4R 壳单元, 钢筋采用 T3D2 桁架单元。将钢筋嵌入 (Embedded) 混凝土中, 波纹钢板与混凝土之间采用面对面接触 (Surface-to-Surface), 法向设置为硬接触, 防止两者发生穿透, 切向摩擦系数设置为 0.62, 模拟滑移情况。栓钉底部与钢板采用绑定 (Tie) 连接, 栓钉侧面与混凝土间采用面对面接触, 摩擦系数设置为 0.1^[19]。顶部垫板与混凝土之间和底部垫板与波纹钢板之间均采用绑定连接。

模型边界条件采用简支约束, 通过在顶部 4 分点处的垫板施加竖向位移, 直至试件破坏。

2.1 材料参数选取

2.1.1 混凝土

混凝土采用 CDP 塑性损伤模型, 泊松比取 0.2, 采用《混凝土结构设计规范》(GB50010-2015)^[20]给出的混凝土本构关系, 单轴受拉应力-应变曲线按公式(1)~(4)计算。

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \epsilon \quad (1)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^2], & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{t,r}} \quad (3)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \epsilon_{t,r}} \quad (4)$$

式中: d_t 为单轴受拉损伤演化参数; α_t 为下降段参数值; $f_{t,r}$ 为混凝土抗拉强度; $\epsilon_{t,r}$ 为峰值拉应变。

单轴受压应力-应变关系按公式(5)~(9)计算。

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \epsilon \quad (5)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n-1+x^n}, & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x-1)^2 + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \epsilon_{c,r}} \quad (7)$$

$$n = \frac{E_c \epsilon_{c,r}}{E_{c,c,r} - f_{c,r}} \quad (8)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c,r}} \quad (9)$$

式中: d_c 为单轴受压损伤演化参数; α_c 为下降段参数值; $f_{c,r}$ 为混凝土抗压强度; $\epsilon_{c,r}$ 为峰值压应变。

2.1.2 钢材

对于波纹钢板、栓钉及钢筋等钢材的应力-应变模型^[21]见图7所示,其中, f_y 和 f_u 分别为钢材的屈服强度和极限强度.泊松比为0.3,支座处采用刚性垫板,弹性模量 $E_s=2\ 010\text{ GPa}$.

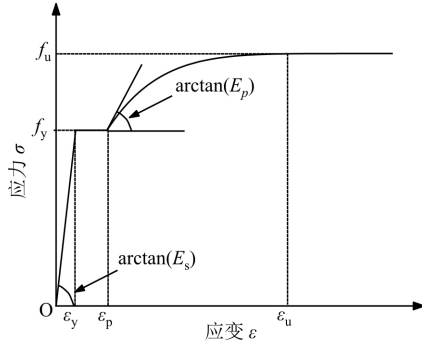


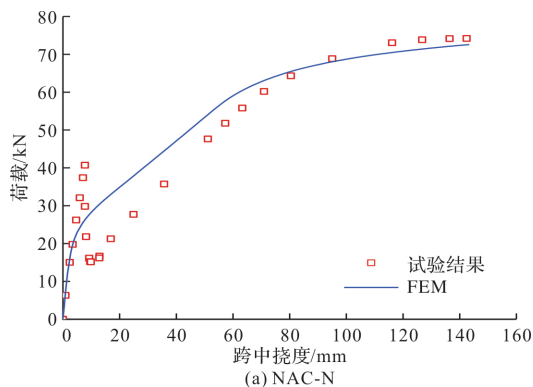
图7 钢材应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of steel

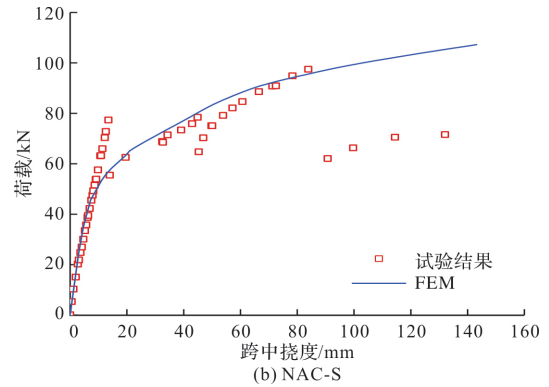
2.2 模型验证

模型验证阶段,各材料性能均按照试验材料的性能设置.图8对比了本文试验结果与验证模型有限元计算结果.图8(a)为未设置端部锚固的NAC-N试件对比情况,可以看出有限元计算结果未较好的模拟组合板出现滑移时的荷载骤降过程.这主要是因为试验过程中产生的滑移是接近瞬时的,造成了荷载急速下降,而在有限元计算中通过调整摩擦系数来模拟的滑移是缓慢产生的.需要说明,这种差异对抗剪承载力没有影响,本文模型可较好地模拟波纹钢-混凝土组合板的抗剪承载力,有限元结果与试验结果相差2.15%.

图8(b)为设置端部锚固的NAC-S试件对比结果,可以看出,除加载早期外,临近破坏前的有限元计算结果与试验结果也存在较大的差异,这主要是因为有限元模型中并未考虑栓钉断裂或焊缝断裂的影响,对于试件NAC-S,栓钉失效前的试验结果与有限元结果相差1.89%,可见本文模型可较好地模拟波纹钢-混凝土组合板的抗剪承载力.



(a) NAC-N



(b) NAC-S

图8 有限元结果与试验结果对比

Fig. 8 Comparison of the finite element results and experimental results

3 有限元参数分析

本节对波纹钢-混凝土组合板进行有限元参数分析,量化各参数对波纹钢-混凝土组合板纵剪性能的影响,选取的主要参数包括组合板厚度(h)、组合板计算跨度(L)、混凝土强度(f_c)、单侧栓钉数量(n)和栓钉间距(d),具体参数的取值范围见表1所示.

模型中的钢筋布置与试验情况相同,波纹钢板强度等级为Q345,钢筋与栓钉采用与试验相同的尺寸及布置方式,强度等级为Q235,混凝土强度等级为C40.

表2 有限元分析参数及其取值范围

Tab. 2 Finite element analysis parameters and their value range

参数	取值范围
h/mm	120、140、160
L/mm	2 700、3 000、3 300
n	0、2、4
d/mm	200、300、400
f_c	C30、C40、C50

3.1 厚度对抗剪承载力的影响

图9为波纹钢-混凝土组合板厚度对抗剪承载力的影响.可以看出,随厚度不断增加,构件的抗剪承载力不断增大,厚度为160 mm和140 mm时较厚度为120 mm时抗剪承载力增大30.5%与12.9%,这是由于随着混凝土厚度的不断增大,截面有效高度增大,组合板的中和轴将向上移动,使构件的承载力有所提升,这也与其他类型钢-混凝土组合板规律相同.

3.2 计算跨度对抗剪承载力的影响

图10为组合板跨度对抗剪承载能力的影响分析结果.可以看出,构件的抗剪承载力随计算跨度的提高而降低,计算跨度为3 300 mm和3 000 mm时的抗剪承载力较计算跨度为2 700 mm时分

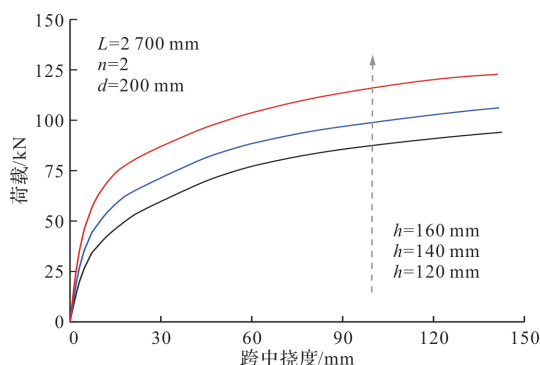


图9 厚度对抗剪承载力的影响

Fig. 9 Effect of slab thickness on shear bearing capacity

别降低 31.7% 与 17.6%。这主要是因为计算跨度的增大导致剪跨长度也随之增大, 构件所承受的弯矩增大, 纵向界面上的剪力也随之增大, 使构件更容易发生纵向剪切破坏。

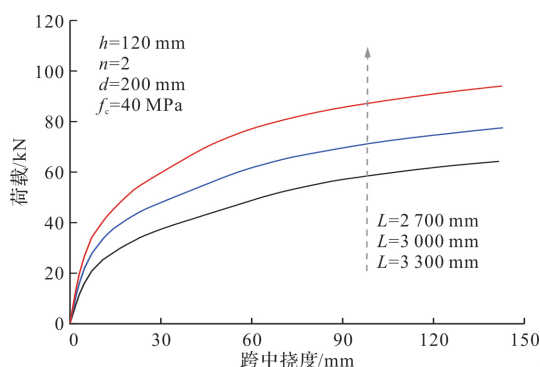


图10 计算跨度对抗剪承载力的影响

Fig. 10 Effect of calculated span on shear bearing capacity

3.3 栓钉数量与间距对抗剪承载力的影响

图 11 为单侧栓钉数量对抗剪承载力的影响, 可以看出随栓钉数量的增加, 构件抗剪承载力随之增大, 单侧栓钉数量为 4 个和 2 个时, 构件抗剪承载力较无栓钉时增大 79.1% 和 56.3%。这主要是因为随着栓钉数量的增加, 混凝土与波纹钢板的锚固作用提高, 使波纹钢板与混凝土之间的界面可以承受更多的剪力。

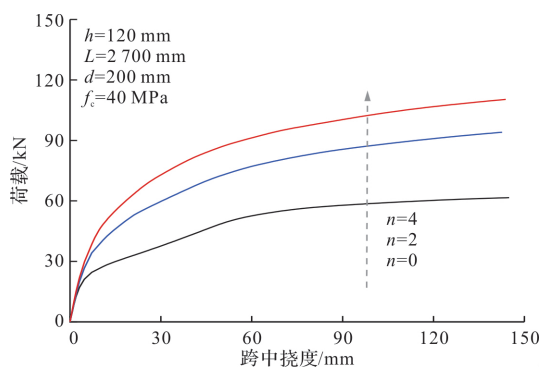


图11 栓钉数量对抗剪承载力的影响

Fig. 11 Effect of the number of studs on shear bearing capacity

栓钉间距对抗剪承载力的影响见图 12 所示, 栓钉间距为 400 mm 时构件的抗剪承载力较栓钉间距为 200 mm 时仅相差不足 1.0%, 因此本文认为栓钉间距对组合板抗剪承载能力影响较小。

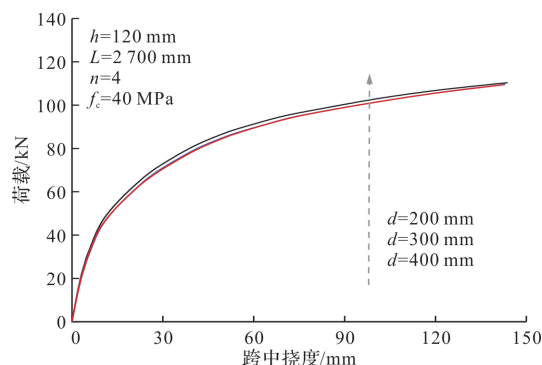


图12 栓钉间距对抗剪承载力的影响

Fig. 12 Effect of stud spacing on shear bearing capacity

3.4 混凝土强度对抗剪承载力的影响

图 13 为波纹钢-混凝土组合板混凝土强度对抗剪承载力的影响, 可以看出, 随混凝土强度不断增加, 构件的抗剪承载力不断增大, 混凝土强度为 C50 和 C40 时较强度为 C30 时抗剪承载力增大 4.6% 与 7.9%, 这是由于随着混凝土强度的不断增大, 混凝土的抗拉强度和弹性模量不断增大, 混凝土开裂程度减小, 因此, 组合板的抗剪承载力随着混凝土强度的增大而增大。

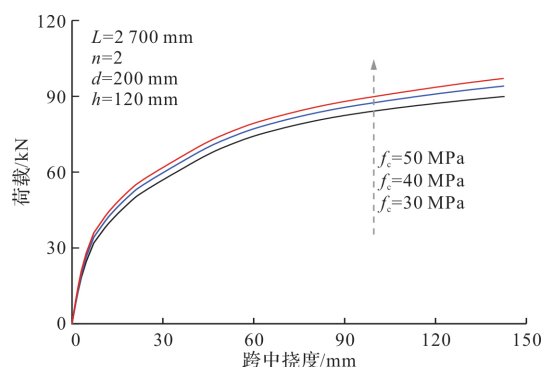


图13 混凝土强度对抗剪承载力的影响

Fig. 13 Effect of concrete strength on shear capacity

4 抗剪承载力设计方法

目前, 使用较为普遍的组合板抗剪承载力计算方法为 $m-k$ 法, 但该方法并未量化栓钉对抗剪承载力的影响, 本文采用聂建国等^[22]基于 $m-k$ 法, 提出考虑栓钉作用的抗剪承载力计算方法, 具体见公式(10)~(11)所示。

$$\frac{V_u}{bh_0 f_t} = m \frac{A_s}{1.25ab f_t} + k \quad (10)$$

$$V_{us} = V_u + 0.5 \frac{nP_a \left(h_0 - \frac{x}{2} \right)}{a} \quad (11)$$

式中: V_u 为无端部锚固试件的抗剪承载力; b 为组合板宽度; h_0 为组合板有效高度; f_t 为混凝土轴心抗拉强度; a 为剪跨长度; A_s 为钢板截面面积; m 、 k 为剪切粘结系数; V_{us} 为考虑栓钉作用的抗剪承载力; n 为单侧栓钉数量; x 为混凝土受压区高度; P_a 为单个栓钉抗剪承载力, 按公式(12)计算^[23]。

$$F_s = 0.43\eta A_{std} \sqrt{f_{cd} E_c} \quad (12)$$

式中: A_{std} 为栓钉截面面积; E_c 为混凝土弹性模量, f_{cd} 为混凝土轴心抗拉强度设计值, η 为群钉效应折减系数。

将有限元计算结果带入公式(10)进行拟合, 可得出无端部锚固试件的剪切粘结系数, m 为 169.6、 k 为 0.138。将计算出的 V_u 带入公式(11)即可计算出考虑栓钉作用的极限抗剪承载力。

图 14 为设计方法与有限元计算结果的对比情况, 可以看出, 本文有限元模拟结果($V_{us,FEM}$)与设计方法计算结果($V_{us,ca}$)的误差在 10% 以内, 判定系数 R^2 为 0.933, 计算值与有限元结果比值均值 μ 为 0.975, 该计算方法适用于波纹钢-混凝土组合板的抗剪承载力计算。

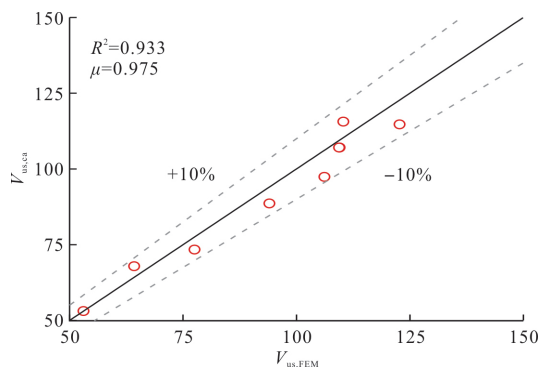


图 14 设计方法计算结果与有限元计算结果对比

Fig. 14 Comparison of the design method calculation result with the finite element calculation result

5 结论

(1) 设置端部锚固对波纹钢-混凝土组合板抗剪性能影响显著。设置端部锚固试件较无端部锚固试件极限抗剪承载力增大 31.5%, 首次出现滑移时的荷载提高 90.0%;

(2) 组合板厚度、计算跨度和栓钉数量均对波纹钢-混凝土组合板抗剪承载力有一定影响; 厚度由 120 mm 增大至 160 mm, 抗剪承载力增大 30.5%; 计算跨度由 2 700 mm 提高至 3 300 mm, 抗剪承载力降低 31.7%; 单侧栓钉数量为 4 个和 2 个时, 抗剪承载力较无栓钉时增大 79.1% 和 56.3%。

(3) 基于 m - k 法提出的抗剪承载力计算方法适

用于波纹钢-混凝土组合板, 且预测结果较好, 有限元模拟结果与计算结果误差在 10% 以内, 判定系数 R^2 为 0.933。

参考文献 References

- [1] 李自林, 薛江, 张锴锋. 基于结构参数的新型组合桥梁结构受力性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(4): 463-469, 478.
LI Zilin, XUE Jiang, ZHANG Kaifeng. Study on the mechanical performance for a new-type composite bridge structure base on structure parameters[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2013, 45(4): 463-469, 478.
- [2] 王庆贺, 梁永泽, 张欢, 等. 考虑荷载分布的多跨连续钢-再生混凝土组合板长期性能研究[J]. 工程力学, 2021, 38(2): 198-210.
WANG Qinghe, LIANG Yongze, ZHANG Huan, et al. Time-dependent behaviour of multi-span continuous steel-rac composite slabs considering loading distribution effects[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(2): 198-210.
- [3] 王先铁, 罗古秋, 郝际平, 等. 闭口型压型钢板-混凝土组合楼板纵向抗剪性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(3): 335-341.
WANG Xiantie, LUO Guqiu, HAO Jiping, et al. Study on the longitudinal shear behavior of closed profiled steel sheet-concrete composite slab[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2011, 43(3): 335-341.
- [4] 王庆贺, 董国明, 谷凡, 等. 非均匀收缩变形对两跨连续钢-混凝土组合板长期性能的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(S1): 179-187.
WANG Qinghe, DONG Guoming, GU Fan, et al. Influence of non-uniform shrinkage on long-term behavior of double-span composite steel-concrete slabs[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(S1): 179-187.
- [5] 曹万林, 杨兆源, 周绪红, 等. 装配式轻钢组合结构研究现状与发展[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(12): 1-15.
CAO Wanlin, YANG Zhaoyuan, ZHOU Xuhong, et al. Research and development on prefabricated light-weight steel composite structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(12): 1-15.
- [6] 高丽, 周媛, 王社良, 等. 波形钢腹板 PC 箱梁剪力滞效应的能量变分法解[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(1): 27-34.
GAO Li, ZHOU Yuan, WANG Sheliang, et al. Energy-variational method of shear-lag effect in PC box-girder with corrugated steel webs[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(1): 27-34.

- [7] 贺文涛. 波纹钢-橡胶混凝土组合桥面板力学性能试验研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
HE Wentao. Experimental study on mechanical properties of corrugated steel plate and rubber concrete composite deck[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2020.
- [8] FERRER M, MARIMON F, CRISINEL M. Designing cold-formed steel sheets for composite slabs: An experimentally validated FEM approach to slip failure mechanics [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44 (12): 1261-1271.
- [9] BURNET M. Analysis of composite steel and concrete flexural members that exhibit partial shear connection [D]. Adelaide: University of Adelaide, 1998.
- [10] The European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings: BS/EN 1994-1-1[S]. Brussels: CEN, 2009.
- [11] American Society of Civil Engineers. Standard for the structural design of composite slabs: ASCE. ANSI/ASCE 3-91[S]. New York: ASCE, 1992.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of composite structures: JGJ 138—2016 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.
- [13] 聂建国,左莹,樊健生. 按部分剪力连接计算压型钢板-混凝土组合板承载力的简化方法[J]. 土木工程学报, 2007(7):19-24.
NIE Jianguo, ZUO Ying, FAN Jiansheng. A simplified calculation method for partial shear connection strength of composite slabs with profiled steel sheeting [J]. China Civil Engineering Journal, 2007(7):19-24.
- [14] 王晓溪. 波纹钢板组合加强结构受弯性能试验研究 [D]. 北京:北京交通大学,2019.
WANG Xiaoxi. Experimental study on flexural behavior of corrugated steel plate composite and reinforced structure [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2019.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB50152—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures: GB50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 金属材料弯曲试验方法: GB/T232—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Metallic materials-Bend test: GB/T232—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法: GB/T228.1—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test and evaluation of concrete compression strength: GB/T228.1—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [19] KATWAL U, TAO Z, HASSAN K. Finite element modelling of steel-concrete composite beams with profiled steel sheeting[J]. Journal of constructional steel research, 2018,146(7):1-15.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2017 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [21] TAO Z, WANG X Q, UY B. Stress-strain curves of structural and reinforcing steels after exposure to elevated temperatures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(9):1306-1316.
- [22] 聂建国,唐亮,黄亮. 缩口型压型钢板-混凝土组合板的承载力及变形(一):试验研究及纵向抗剪承载力[J]. 建筑结构,2007(1):60-64.
NIE Jianguo, TANG Liang, HUANG Liang. Load-carrying and deforming capacities of composite slabs with re-entrant trough profiled steel sheeting (I): Experiment and Longitudinal Shear Capacity [J]. Building Structure, 2007(1): 60-64.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

(编辑 沈 波)