

引用本文:王秀丽,孔祥龙,陈志华,等.开槽混凝土夹芯板受弯状态开裂荷载分析[J].建筑科学与工程学报,2024,41(6):1-9.
WANG Xiuli,KONG Xianglong,CHEN Zhihua,et al. Cracking load analysis of slotted concrete sandwich panels under bending condition[J].
Journal of Architecture and Civil Engineering,2024,41(6):1-9.

DOI:10.19815/j.jace.2022.11097

开槽混凝土夹芯板受弯状态开裂荷载分析

王秀丽^{1,2},孔祥龙¹,陈志华^{1,2,3},张振坤¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,甘肃 兰州 730050; 3. 天津大学 建筑工程学院,天津 300072)

摘要:为了减弱裂缝对混凝土结构承载能力以及耐久性的影响,提出了开槽混凝土夹芯板;研究了槽深以及开槽位置对于夹芯板吊装以及正常使用过程中开裂行为的影响,通过ABAQUS建立了有限元模型并验证了其可靠性,在此基础上以槽深以及开槽位置为变量进行了参数化分析,最后通过理论公式对模拟结果进行对比验证。结果表明:在有效控制裂缝位置的前提下,对夹芯板板底合理开槽不会导致其在吊装过程中产生裂缝;在两端简支条件下,开槽构造主要影响夹芯板的开裂荷载,而对于极限荷载影响较小;在裂缝发展的前中期,通过设置适当的槽深以及位置,由于应力集中效应可使得夹芯板拉应力在槽及其附近达到较大值,从而达到控制裂缝产生位置的效果;随着槽深以及槽数量增加,裂缝产生位置得到有效控制,但将导致夹芯板开裂荷载减小。

关键词:开槽混凝土夹芯板;数值模拟;弯曲性能;开裂荷载

中图分类号:TU375.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)06-0001-09

Cracking load analysis of slotted concrete sandwich panels under bending condition

WANG Xiuli^{1,2}, KONG Xianglong¹, CHEN Zhihua^{1,2,3}, ZHANG Zhenkun¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to reduce the impact of cracks on the bearing capacity and durability of concrete structures, slotted concrete sandwich panels were proposed. The effects of slot depth and position on the cracking behavior of sandwich panels during lifting and normal use were studied. A finite element model was established using ABAQUS and its reliability was verified. Based on this, parametric analysis was conducted using slot depth and position as variables. Finally, the simulation results were compared and verified using theoretical formulas. The results show that on the premise of effectively controlling the location of cracks, reasonable slotting of the bottom of sandwich panel will not cause cracks to occur during lifting process. Under the condition of simple support at both ends, the slotted structure mainly affects the cracking load of sandwich

收稿日期:2023-11-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD1101004);甘肃省建设科技攻关项目(JK2020-26)

作者简介:王秀丽(1963-),女,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:1135739056@qq.com.

通信作者:陈志华(1966-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:zhchen@tju.edu.cn.

panel, and has a relatively small impact on the ultimate load. In the early stage of crack development, by setting appropriate slot depth and position, the stress concentration effect can cause the tensile stress of sandwich panel to reach a large value in the slot and its vicinity, thereby achieving the effect of controlling the location of crack generation. As the depth and number of slot increase, the location of cracks is effectively controlled, but it will lead to a decrease in the cracking load of sandwich panel.

Key words: slotted concrete sandwich panel; numerical simulation; bending property; cracking load

Author resumes: WANG Xiuli (1963-), female, PhD, professor, E-mail: 1135739056@qq.com; CHEN Zhihua (1966-), male, PhD, professor, E-mail: zhchen@tju.edu.cn.

0 引言

夹芯板由内、外叶板、保温板以及剪力连接件组成,是一种集保温、承重、装饰于一体的复合保温墙板,由于其出色的力学性能被广泛用作屋面板、墙板以及隔板等。为了提高装配式建筑工业化水平,夹芯板因其施工工期短、节约成本、构造简单等优点得到关注^[1],但由于多使用混凝土作为基本材料,存在自重、易开裂等问题。

在混凝土结构中,根据裂缝产生原因将裂缝分为结构裂缝和非结构裂缝。结构裂缝主要在混凝土生产、运输、使用过程中产生,非结构裂缝大部分由于混凝土材料收缩产生。为了控制混凝土夹芯板中结构裂缝的产生,可在板中使用预应力筋^[2-3]以及增加两侧面板板厚等^[4],而非结构裂缝的产生可以通过在板中铺设网格布以及涂敷抗裂砂浆达到控制效果^[5]。其中,使用预应力筋除了可以延缓裂缝出现时间外,还能够改善夹芯板结构的承载能力、延性、组合性能以及提高板的抗弯刚度,但由于造价昂贵,施工工艺复杂,目前并不适用于普通建筑。

伸缩缝作为公路桥梁的重要组成部分^[6],具有控制桥梁两端翘曲角度,解决由于温度变化引起的桥梁伸缩等功能。从中受到启发,本文考虑在夹芯板板底开槽,控制非结构裂缝的产生从而达到节省造价、简化施工工艺的作用。通过对可能产生的裂缝位置进行预处理,如填封密封胶等,从而减少裂缝对夹芯板正常使用的影响。当在板底开槽后,由于结构的几何连续性遭到破坏,在槽附近不仅薄膜应力增加,同时会造成较大的弯曲应力^[7],导致结构一般先在此处发生破坏。通过上述理论,利用应力集中效应使得裂缝先出现在截面削弱处,从而控制初期裂缝的产生位置,同时起到分割板的作用,减少混凝土由于伸缩变形的影响,且因面板内配有钢筋网

片,使得截面削弱对板整体的承载力降低不明显。赵雷等^[8]通过在带肋叠合板底板合理开槽,发现墙体可以满足使用需求。

为了分析开槽对夹芯板受弯过程中开裂荷载的影响,取文献^[9]中所提构造建立有限元模型,并进行了对比验证,在此基础上参数化分析了槽深以及开槽位置对于夹芯板开裂荷载、极限荷载以及应力分布的影响。

1 基本参数

1.1 几何尺寸

文献^[9]中预制混凝土夹芯板(简称夹芯板)试件 FQB1 的构造如图 1 所示,其中板长 2 800 mm,板宽 1 860 mm,板厚 150 mm,内、外叶混凝土板厚均为 50 mm,混凝土强度等级为 C30,面板内设有 $\Phi 4@150$ 双向冷拔钢丝网片。保温层为 50 mm 厚的挤塑板(XPS)。内、外叶板之间通过 $\Phi 6$ 钢筋桁架连接件连接,相邻两连接件间距为 750 mm。

1.2 加载方式

采用力加载模式,通过在顶板的 8 个加载垫块施加集中荷载模拟夹芯板在实际过程中所受的均布荷载。根据夹芯板在吊装过程以及使用过程的受力与约束情况,采用四点支撑以及两端简支两种支撑方式进行模拟,见图 2。

2 数值模拟与结果

2.1 有限元模型建立

使用 ABAQUS 建立了夹芯板的简化模型,见图 3。两侧面板及保温板均采用三维实体单元 C3D8R,钢丝网片采用三维桁架单元 T3D2,考虑到连接件可能产生的剪切变形,钢筋桁架连接件采用三维梁单元 B31。各材料参数见表 1。混凝土使用 ABAQUS 中的塑性损伤模型,参考《混凝土结构设

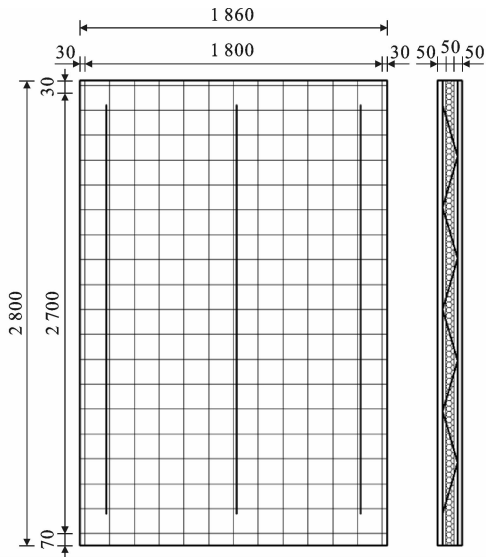


图 1 试件 FQB1 构造(单位:mm)

Fig. 1 Structure of specimen FQB1 (unit:mm)

计规范》(GB 50010—2010)^[10]取值,见表 2。

2.2 模型可靠性分析

通过 ABAQUS 有限元软件模拟与文献[9]中的荷载-位移曲线见图 4,两条曲线走势吻合较好,验证了模型的可靠性,同时说明有限元软件可以很好地模拟夹芯板受弯性能。

2.3 参数化分析

选取试件 FQB1 为标准试件,根据内叶板厚度(35~50 mm)、开槽深度(2~15 mm)、开槽位置(n 等分线)以及支撑方式(四点支撑或两端简支)建立了多个模型,见表 3。除表 3 中罗列参数外,其余参数取值均相同,如槽宽为 10 mm 等。

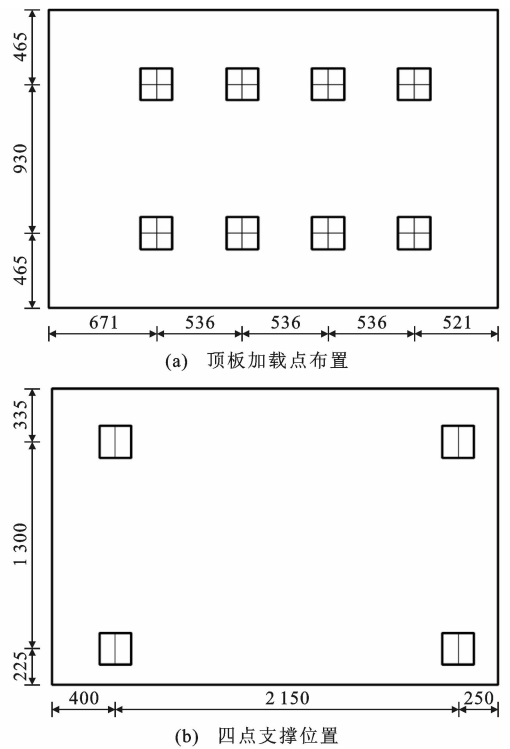
2.4 有限元分析结果

2.4.1 四点支撑荷载-位移曲线

为了研究夹芯板在吊装过程中的受力情况,采用四点支撑方式模拟,分析开槽是否会对吊装产生影响,以及夹芯板在此状态下是否会发生破坏。各试件荷载-位移曲线见图 5。由图 5 可知:

(1)荷载-位移曲线分为两个阶段。初始阶段为混凝土未开裂前的弹性段,此时夹芯板保持较大的初始刚度,随着荷载增加,曲线斜率基本保持不变。当板底混凝土开始产生裂缝,由于夹芯板内钢筋还未屈服,随着混凝土失效,夹芯板由弹塑性阶段向塑性阶段转化,夹芯板的整体刚度降低,曲线出现斜率下降段。

(2)夹芯板由弹性段进入弹塑性段处的点称为拐点,此时认为夹芯板出现裂缝,拐点处的荷载值称为开裂荷载,见图 5。图 5(d)中的变化参数为底板

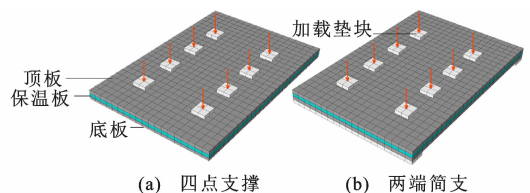


(b) 四点支撑位置

(c) 两端简支位置

图 2 加载示意图(单位:mm)

Fig. 2 Loading diagram (unit:mm)



(a) 四点支撑

(b) 两端简支

图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比
C30 混凝土	30 000	0.2
冷拔钢丝网	200 000	0.3
钢筋桁架	205 000	0.3
XPS 板	4	0.2

表 2 混凝土损伤塑性模型参数

Table 2 Concrete damage plasticity model parameters

膨胀角/(°)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性系数
30	0.1	1.16	0.666 7	0.000 5

注： f_{b0} 和 f_{c0} 分别为双轴和单轴受压时的极限应力； K 为拉压子午面第二应力不变量比。

板厚,当底板板厚分别减小 2~15 mm,夹芯板开裂荷载较标准试件 FQB1 分别降低了 4.78%~32.27%。槽深由 2 mm 增大至 15 mm 时,夹芯板开裂荷载分别降低了 7.31%~16.28%,这说明在

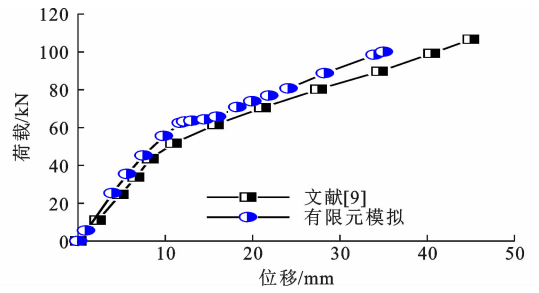


图 4 模型验证

Fig. 4 Model validation

表 3 混凝土夹芯板参数

Table 3 Concrete sandwich panel parameters

支撑方式	组别	试件编号	高度/mm	宽度/mm	厚度/mm	内叶板厚/mm	槽深/mm	槽深与内叶板厚之比	
四点支撑	标准试件	FQB1	2 800	1 860	150	50			
	I a	B1-2	2 800	1 860	150	50	2	1/25	
		B1-5	2 800	1 860	150	50	5	1/10	
		B1-10	2 800	1 860	150	50	10	1/5	
		B1-15	2 800	1 860	150	50	15	3/10	
	II a	B2-2	2 800	1 860	150	50	2	1/25	
		B2-5	2 800	1 860	150	50	5	1/10	
		B2-10	2 800	1 860	150	50	10	1/5	
		B2-15	2 800	1 860	150	50	15	3/10	
	III a	B3-2	2 800	1 860	150	50	2	1/25	
		B3-5	2 800	1 860	150	50	5	1/10	
		B3-10	2 800	1 860	150	50	10	1/5	
		B3-15	2 800	1 860	150	50	15	3/10	
	IV a	NB2	2 800	1 860	148	48			
		NB5	2 800	1 860	145	45			
		NB10	2 800	1 860	140	40			
		NB15	2 800	1 860	135	35			
	两端简支	标准试件	SQB1	2 800	1 860	150	50		
		I b	SB1-2	2 800	1 860	150	50	2	1/25
			SB1-5	2 800	1 860	150	50	5	1/10
SB1-10			2 800	1 860	150	50	10	1/5	
SB1-15			2 800	1 860	150	50	15	3/10	
II b		SB2-2	2 800	1 860	150	50	2	1/25	
		SB2-5	2 800	1 860	150	50	5	1/10	
		SB2-10	2 800	1 860	150	50	10	1/5	
		SB2-15	2 800	1 860	150	50	15	3/10	
III b		SB3-2	2 800	1 860	150	50	2	1/25	
		SB3-5	2 800	1 860	150	50	5	1/10	
		SB3-10	2 800	1 860	150	50	10	1/5	
		SB3-15	2 800	1 860	150	50	15	3/10	
IV b		NSB2	2 800	1 860	148	48			
		NSB5	2 800	1 860	145	45			
		NSB10	2 800	1 860	140	40			
		NSB15	2 800	1 860	135	35			

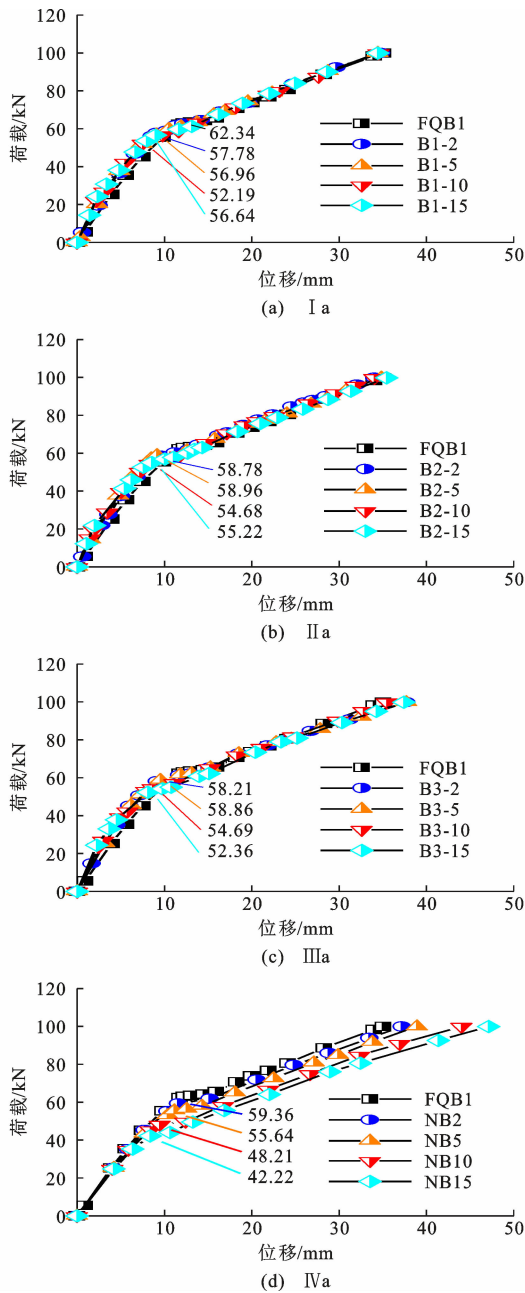


图 5 四点支撑荷载-位移曲线

Fig. 5 Four-point support load-displacement curves

夹芯板板底开槽不等于减小与槽深相同大小的底板厚度。

(3)分析夹芯板在不同槽深及开槽位置下的荷载-位移曲线发现,试件 B1-15 开裂荷载降低幅度最大,达到 16.28%,此时夹芯板在开裂前所能承受的荷载为 52.19 kN。在此情况下,夹芯板正常吊装过程中并不会产生裂缝。

2.4.2 两端简支荷载-位移曲线

夹芯板在实际使用过程中两端受梁约束,板面受风荷载以及可能的垂直于板面的分力作用,采用两端简支支撑方式研究其受力性能。各试件荷载-

位移曲线见图 6,曲线同样包含混凝土未开裂前的弹性阶段以及混凝土开裂后的弹塑性阶段。

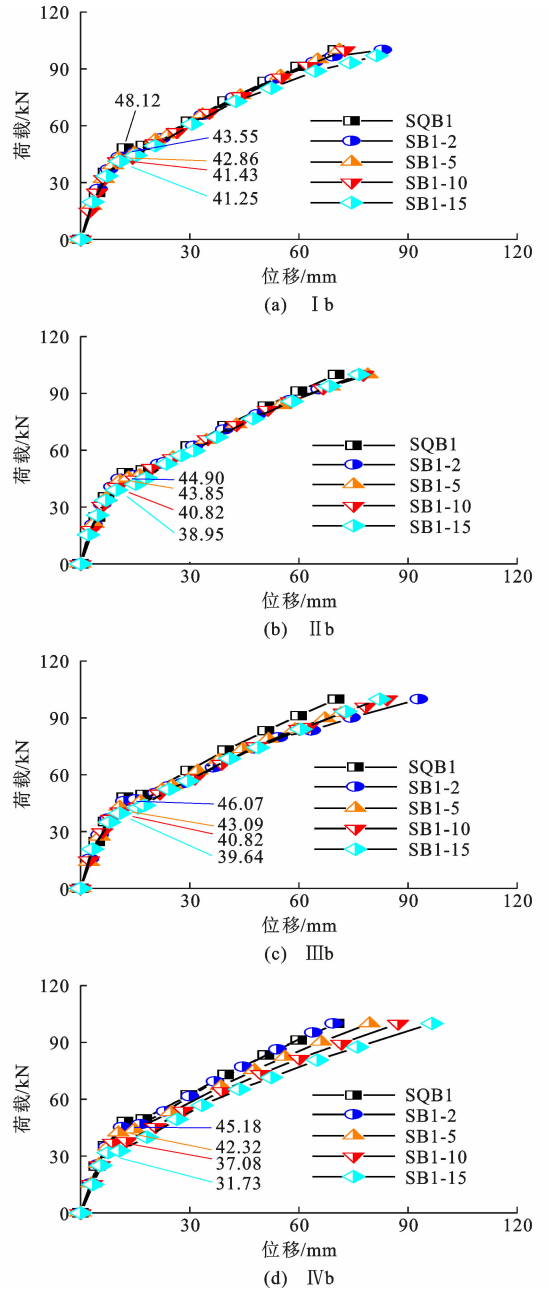


图 6 两端简支荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of simple support at both ends

各试件开裂荷载见表 4,对比标准试件 SQB1 均有降低。保持槽深不变,变换开槽数量及位置,试件的开裂荷载变化不明显,呈现波动状,这种波动主要受槽深以及开槽位置所导致的应力集中影响。各试件开裂荷载相比标准试件 SQB1 降低幅度控制在 20%以内。当槽深取底板板厚 1/25 时,开裂荷载降低均值为 6.82%;槽深取底板板厚 1/10 时,开裂荷载降低均值为 10.08%;槽深取底板板厚 1/5 时,开

表 4 两端简支开裂荷载

Table 4 Cracking load of simple support at both ends

试件编号	开裂荷载/kN	下降幅度/%
SQB1	48.12	
SB1-2	43.55	9.50
SB1-5	42.86	10.93
SB1-10	41.43	13.90
SB1-15	41.25	14.28
SB2-2	44.90	6.69
SB2-5	43.85	8.87
SB2-10	40.82	15.17
SB2-15	38.95	19.06
SB3-2	46.07	4.26
SB3-5	43.09	10.45
SB3-10	40.82	15.17
SB3-15	39.64	17.62
NSB2	45.18	6.11
NSB5	42.32	12.05
NSB10	37.08	22.94
NSB15	31.73	34.06

裂荷载降低均值为 14.75%；槽深取底板板厚 3/10 时，开裂荷载降低均值为 16.99%，随着槽深增加，开裂荷载降低幅值增大，但不呈线性变化。

根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[11]可以认为，弯曲挠度达到跨度的 1/50 时，试件进入极限状态，各试件极限荷载见表 5。当槽深取底板板厚 1/25 时，极限荷载降低均值为 3.98%；槽深取底板板厚 1/10 时，极限荷载降低均值为 3.59%；槽深取底板板厚 1/5 时，极限荷载降低均值为 4.08%；槽深取底板板厚 3/10 时，极限荷载降低均值为 6.21%。当槽深不大于板厚 1/5 时，开槽夹芯板极限荷载降低幅值控制在 5% 以内。

由表 5 可知，减小底板厚度对于夹芯板极限承载能力影响显著，当板厚由 50 mm(试件 SQB1)降低至 35 mm(试件 NSB15)，夹芯板的极限承载力由 84.3 kN 降低至 71.19 kN，降低了 15.55%。

2.4.3 加载过程应力云图

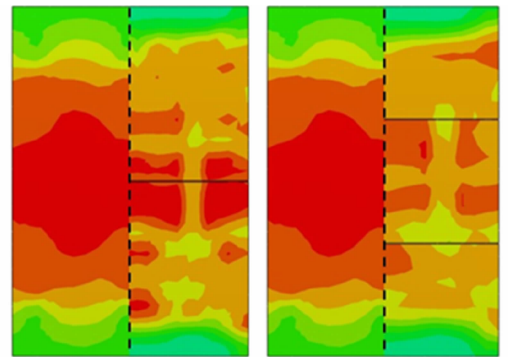
不同开槽深度下，夹芯板板底应力发展规律相似，为了节约篇幅，取试件 SB1-10、SB2-10、SB3-10 分别与标准试件 SQB1 对比，开裂荷载下应力云图如图 7 所示。

由图 7 可知：开槽可以控制板内应力分布，由于应力集中效应，板底应力不同程度集中在槽及其附近；随着开槽数量增多，板底应力分布规律性增加，首先在槽内达到大值，其次在附近发展。

表 5 两端简支极限荷载

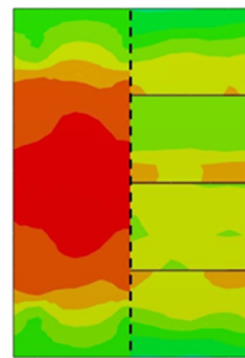
Table 5 Ultimate load of simple support at both ends

试件编号	极限荷载/kN	下降幅度/%
SQB1	84.30	
SB1-2	83.54	0.90
SB1-5	83.47	0.98
SB1-10	82.70	1.90
SB1-15	79.54	5.65
SB2-2	81.67	3.12
SB2-5	81.23	3.64
SB2-10	81.80	2.97
SB2-15	80.57	4.42
SB3-2	77.63	7.91
SB3-5	79.11	6.16
SB3-10	78.09	7.37
SB3-15	77.09	8.55
NSB2	84.19	0.13
NSB5	78.84	6.48
NSB10	75.27	10.71
NSB15	71.19	15.55



SQB1 SB1-10
(a) 标准试件与二等
分开槽试件的对比

SQB1 SB2-10
(b) 标准试件与三等
分开槽试件的对比



SQB1 SB3-10
(c) 标准试件与四等
分开槽试件的对比

图 7 应力云图对比

Fig. 7 Stress nephogram comparison

2.4.4 讨论分析

在夹芯板开槽可满足正常吊装要求；在实际使用情况下，开槽对夹芯板开裂荷载影响较大，其中试

件 SB2-15 开裂荷载较标准试件 SQB1 降低了 19.06%;开槽对于夹芯板极限荷载影响较小,当槽深不大于底板板厚 1/5 时,极限荷载降低幅值在 5%以内;在裂缝产生前中期,开槽可以有效控制板底应力分布,使得裂缝集中在槽及其附近。

3 理论计算

混凝土夹芯板受弯时,内、外叶板通过剪力连接件传递剪力,根据连接件传递剪力能力的大小,将其分为:完全组合板、完全非组合板以及部分组合板。完全组合板中连接件可以很好地传递剪力,使得内、外叶板具有良好的协同工作性能;完全非组合板中,连接件强度及刚度较弱,完全不能传递剪力,内、外叶板按照刚度分配弯矩;部分组合板介于两者之间,连接件可以传递部分剪力。关于组合度评价方法,目前主要有刚度法^[12]、承载力法^[13]及剪力流法^[14],但均需实测数据辅助计算,不能仅通过理论求解。文献[3]认为当试件的抗剪连接件所能提供的剪力大于试件所承受的剪力时,视试件为完全组合板。本文按照完全组合板进行理论计算。

3.1 基本假定

基本假定包括:①板在受力变形过程中符合平截面假定;②混凝土内应力沿板截面均匀分布;③板为完全组合板;④板底混凝土中拉应力达到抗拉强度时,混凝土出现裂缝。

3.2 开裂荷载计算

夹芯板计算简图见图 8,其中 b 为板宽, h_1 为底板厚度, h_2 为顶板厚度, h 为板厚, a 、 a' 分别为底板和顶板的混凝土保护层厚度。将板内的钢筋与混凝土按弹性模量比 n_s 换算为等效截面面积,如式(1)所示。

$$n_s = E_s / E_c \quad (1)$$

式中: E_s 为钢筋弹性模量; E_c 为混凝土弹性模量。

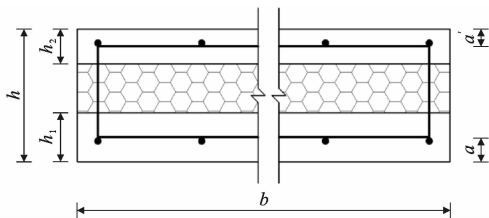


图 8 夹芯板计算简图

Fig. 8 Sandwich panels calculation diagram

混凝土受压区高度 x_0 可通过对中性轴取面积距计算,即

$$bh_1x_0 + (n_s - 1)A_s'x_0 + bh_2x_0 + (n_s - 1)A_sx_0 =$$

$$0.5bh_1^2 - 0.5bh_2^2 + (n_s - 1)(A_s'a' - A_sa + A_s'h) + bh_2h \quad (2)$$

式中: A_s 为受拉区钢筋面积; A_s' 为受压区钢筋面积。

通过式(2)得到按完全组合板考虑的夹芯板受压区高度 x_0 为

$$x_0 = \frac{0.5b(h_1^2 - h_2^2) + bh_2h}{b(h_1 + h_2) + (n_s - 1)(A_s + A_s')} + \frac{(n_s - 1)(A_s'a' - A_sa + A_s'h)}{b(h_1 + h_2) + (n_s - 1)(A_s + A_s')} \quad (3)$$

由此,夹芯板的换算截面惯性矩 I_0 为

$$I_0 = \frac{1}{12}bh_1^3 + \frac{1}{12}bh_2^3 + bh_2(x_0 - 0.5h_2)^2 + bh_1(h - 0.5h_1 - x_0)^2 + (n_s - 1)A_s'(x_0 - a')^2 + (n_s - 1)A_s(h - x_0 - a)^2 \quad (4)$$

换算截面受拉边缘弹性抵抗矩 W_0 得

$$W_0 = \frac{I_0}{h - x_0} \quad (5)$$

当板底混凝土受拉边缘应力达到抗拉强度时,认为板开裂,此时可得开裂弯矩 M_{cr} 为

$$M_{cr} = W_0 f_{tm} = \gamma_m W_0 f_{tk} \quad (6)$$

式中: γ_m 为截面抵抗矩塑性系数,参考文献[15]取值, $\gamma_m = 1.35$; f_{tm} 为混凝土平均抗拉强度; f_{tk} 为混凝土标准抗拉强度。

3.3 算例分析

取标准试件 SQB1 以及试件 NSB2、NSB5、NSB10、NSB15 计算,参数取值为 $b = 1\ 860$ mm, $A_s = 248.06$ mm², $f_{tk} = 2.1$ MPa, $E_s = 205\ 000$ MPa, $E_c = 30\ 000$ MPa。根据式(6)计算得到的开裂荷载见表 6。

表 6 开裂弯矩

Table 6 Moment of cracking

试件编号	计算开裂弯矩/ (kN·m)	模拟开裂弯矩/ (kN·m)	相对误差/%
SQB1	19.26	17.96	7.24
NSB2	18.59	16.95	9.68
NSB5	17.57	15.81	11.13
NSB10	15.86	13.74	15.43
NSB15	14.12	11.73	20.38

表 6 中理论计算值较模拟值偏小,这是因为理论公式认为应力在板底呈均匀分布,而实际上由于内、外叶板之间通过钢筋桁架连接件连接,由剪力连接件传递的剪力存在滞后效应^[16-21],导致在桁架连接件附近混凝土的应力大于远处混凝土的应力,使得截面应力分布不均匀(图 9)。此外随着底板厚度

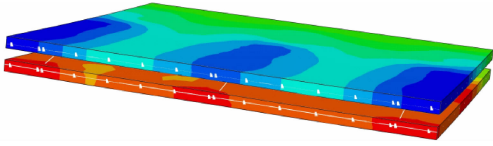


图9 夹芯板剪力滞后效应

Fig. 9 Shear lag effect on sandwich panels

减小,板内剪力滞后效应逐渐明显,从而使误差呈逐渐增大趋势。

4 结 语

(1)四点支撑条件下,通过开槽对夹芯板开裂荷载的最大降低幅值为 16.28%,可以满足正常吊装过程中板不产生裂缝。

(2)由于槽附近的膜应力增加,在板底开槽主要影响夹芯板的开裂荷载,当混凝土开裂后,夹芯板受弯时主要由钢筋承担荷载,因而对极限荷载影响不大。

(3)在裂缝产生前中期,开槽可有效控制板底应力分布,使得裂缝集中在槽及其附近。

(4)随着槽深以及槽数量增加,裂缝产生位置得到有效控制,但会导致夹芯板开裂荷载降低幅值增大。

(5)在四等分线位置开槽,槽深等于底板板厚 1/5 时,夹芯板内裂缝得到较好控制,同时开裂荷载降低幅值不明显。

参考文献:

References:

- [1] 陈定球,刘 斌.低多层装配式混凝土墙板结构体系研究综述[J].建筑结构,2016,46(增1):633-636.
CHEN Dingqiu, LIU Bin. Summary of investigation on low and mid-rise precast concrete wall panels structures[J]. Building Structure, 2016, 46(S1): 633-636.
- [2] 程 红.预制预应力混凝土钢筋桁架叠合剪力墙抗震性能试验研究[D].济南:山东建筑大学,2021.
CHENG Hong. Experimental study on seismic behavior of precast prestressed concrete reinforced truss composite shear wall [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2021.
- [3] 刘光东.预应力混凝土复合墙板抗弯性能试验与理论研究[D].济南:山东大学,2019.
LIU Guangdong. Experimental and theoretical research on flexural behavior of prestressed composite wall panels[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [4] 李琮琦,杨 滢,刘虎山,等.暗肋夹芯式预制轻骨料

混凝土外墙板受弯性能试验研究[J].建筑结构,2022,52(6):18-25,55.

LI Congqi, YANG Ying, LIU Hushan, et al. Experimental study on the bending performance of concealed rib sandwich precast lightweight aggregate concrete external wallboard [J]. Building Structure, 2022, 52(6): 18-25, 55.

[5] 曹东涛.新型保温承重一体化复合墙体的抗震性能及被动式设计方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.

CAO Dongtao. Study on the seismic behavior and passive design method of the new load-bearing and insulation integrated precast composite wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.

[6] 肖 波,许维炳,闫晓宇,等.公路桥面伸缩装置及其对桥梁梁动力性能影响综述[J].防灾减灾工程学报,2021,41(1):167-180.

XIAO Bo, XU Weibing, YAN Xiaoyu, et al. Research overview of bridge expansion joint' disease and its influence [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(1): 167-180.

[7] 胡 超,马兴瑞,黄文虎.板壳结构开孔动静应力集中问题的研究[J].哈尔滨工业大学学报,1999,31(2):75-80.

HU Chao, MA Xingrui, HUANG Wenhui. Advances of stress concentrations in plates and shells with cut-outs [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(2): 75-80.

[8] 赵 雷,赵广军,王晓锋,等.预应力混凝土带肋叠合底板肋部开槽的受力验算及合理性分析[J].建筑结构,2021,51(24):84-91.

ZHAO Lei, ZHAO Guangjun, WANG Xiaofeng, et al. Mechanical checking calculation and rationality analysis about slotting in the ribs of prestressed concrete ribbed composite slab [J]. Building Structure, 2021, 51(24): 84-91.

[9] 韩鹏涛.连接件对预制混凝土夹芯保温外挂墙板结构性能影响研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.

HAN Pengtao. Study on the effect of connectors on the structural performance of prefabricated concrete sandwich thermal insulation external wall panel [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.

[10] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.

Code for design of concrete structures: GB 50010—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.

- [11] 混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
Standard for test method of concrete structures:GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2012.
- [12] SALMON D C, EINEA A, TADROS M K, et al. Full scale testing of precast concrete sandwich panels[J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(4):354-362.
- [13] NAITO C J, HOEMANN J M, SHULL J S, et al. Precast/prestressed concrete experiments performance on non-load bearing sandwich wall panels[R]. Overland Park: Black and Veatch, 2011.
- [14] 江焕芝. 基于钢-纤维复合连接件的预制混凝土夹心保温墙板性能研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
JIANG Huanzhi. Research on behavior of precast concrete sandwich panels with steel-GFRP composite connectors[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [15] 卢逢煦. 钢筋桁架式夹芯混凝土板优化设计与受力性能分析[D]. 长沙:中南大学, 2008.
LU Fengxu. Optimization design and mechanical performance analysis of reinforced truss sandwich concrete panel[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [16] REISSNER E. Analysis of shear lag in box beams by the principle of minimum potential energy[J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1946, 4(3):268-278.
- [17] 李法雄, 聂建国. 钢-混凝土组合梁剪力滞效应弹性解析解[J]. 工程力学, 2011, 28(9):1-8.
LI Faxiong, NIE Jianguo. Elastic analytical solutions of shear lag effect of steel-concrete composite beam [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9):1-8.
- [18] 操俊林. 新型波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应的理论分析及试验研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2018.
CAO Junlin. Theoretical analysis and experimental study on shear lag effect of the new composite box-girder with corrugated steel webs [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2018.
- [19] 周世军, 黄瑜, 江瑶, 等. 单箱双室组合箱梁剪力滞效应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(6):110-115.
ZHOU Shijun, HUANG Yu, JIANG Yao, et al. Analysis of shear lag effect of single-box twin-cell composite box girder [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(6):110-115.
- [20] 周世军, 宋刚. 考虑轴向位移的压弯II形梁剪力滞分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5):196-202.
ZHOU Shijun, SONG Gang. Analysis of shear lag of compression-bending II-shaped girder considering axial displacement [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5):196-202.
- [21] 李立峰, 周延. 大跨径波形钢腹板组合箱梁桥剪力滞效应[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(6):106-112.
LI Lifeng, ZHOU Yan. Shear lag effect of large span composite box girder bridge with corrugated steel webs [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(6):106-112.