

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.03.005



新型组合梁板连接中板的抗弯性能

孙林¹, 黄辉辉², 杨俊杰³, 傅剑平¹, 黄宗明¹

(1. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 土木工程学院, 重庆 400045;
2. 广东省建筑设计研究院, 广州 510010; 3. 湖北省电力勘测设计院, 武汉 430040)

摘要:在高层建筑结构设计中,由于上部荷载较大或梁的跨度较大,使得梁的截面高度较高,通常会影响到建筑的有效层数和建筑的总高度。为了减小各层梁板结构高度,有效增大各层净高,提出了一种钢箱梁嵌入现浇板的新型组合梁板连接方式。针对这种新型连接方式,对 6 个钢箱梁混凝土板组合连接区域进行了板承受支座负弯矩的单调加载试验,对比分析了采用钢箱梁嵌入混凝土板组合楼盖与传统栓钉连接组合楼盖中板抵抗支座负弯矩的性能差异;并利用 ABAQUS 对试件进行了有限元分析。试验与有限元分析结果表明:采用钢箱梁嵌入板连接组合方式,其混凝土板抵抗支座负弯矩的能力与传统连接方式板抵抗支座负弯矩能力没有明显差异。

关键词:组合结构;嵌入式连接;抗弯性能;延性

中图分类号:TU375.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)03-0035-09

Slab flexural behavior of a new composite beam-slab connection

Sun Lin¹, Huang Huihui², Yang Junjie³, Fu Jianping¹, Huang Zongming¹

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area(Chongqing University), Ministry of Education; School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Architectural Design and Research Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510010, P. R. China; 3. Power China Hubei Electric Engineering Corporation, Wuhan 430040, P. R. China)

Abstract: In structural design of high-rise buildings, due to large upper loads or span, the beam section height is large, which usually affects the effective story height and the total height of building. To reduce the height of beam-slab structure and increase the clearance height of each floor effectively, a new connection method of composite beam-slab structure with steel-box beam embedded was proposed. As for the new connection method, monotonic loading tests were carried out on composite connection area of six steel-concrete slabs with steel-box beam embedded, to study the negative moment resistant. The difference in negative moment resistant capacity between the concrete composite floor with steel-box beam embedded and the concrete composite floor with traditional stud connection was analyzed. The finite element analysis was carried out by using ABAQUS. Experimental results and finite element analysis show that, as for the connection method of composite beam-slab with steel-box beam embedded, the negative moment resistant capacity of concrete slab has no significantly difference with the concrete slab with traditional stud connection.

收稿日期:2016-10-12

作者简介:孙林(1990-),男,主要从事结构抗震研究,(E-mail)slcqdx@163.com。

黄宗明(通信作者),教授,博士生导师,(E-mail)zmhuang@cqu.deu.cn。

Received:2016-10-12

Author brief:Sun Lin(1990-), main interest: structural seismic,(E-mail)slcqdx@163.com.

Huang Zongming(corresponding author), professor, doctoral supervisor,(E-mail)zmhuang@cqu.deu.cn.

Keywords: composite structure; embedded connection; flexural behavior; ductility

钢-混凝土组合结构已广泛应用于高层、超高层建筑结构以及桥梁结构等领域。在建筑工程中应用较为广泛的钢梁-混凝土板组合楼盖是一种常用的组合楼盖形式,钢梁和混凝土楼板之间设置抗剪连接件将二者连接成为一个整体而协同工作。

Viest^[1]对栓钉抗剪连接件进行了研究,提出了栓钉的抗剪临界值。Slutter等^[2]对完全抗剪连接的组合梁进行了研究,单独对抗剪连接件进行了推出试验,提出了钢-混凝土组合梁极限抗弯强度的计算方法。Johnson等^[3]对部分抗剪连接的组合梁进行了试验研究,根据试验结果和前人研究的理论计算,提出了部分抗剪连接的组合梁的抗弯强度及其挠度的计算方法。Gattesco^[4]开发了有限元程序对钢-混凝土组合梁进行了有限元分析,用杆单元模拟栓钉剪力连接件的工作性能。Valente等^[5]对钢-轻质混凝土组合梁进行了试验研究,主要研究了抗剪连接件的布置以及荷载分布对组合梁性能的影响。近年来,Pavlović等^[6]对作为抗剪连接件的螺栓和栓钉进行了推出试验研究和有限元分析,研究了抗剪连接件的受力性能。Zona等^[7]针对箱型组合梁开发了考虑剪切滑移变形的组合梁单元,用以分析组合梁的弯曲、扭转以及屈曲问题。Hwang等^[8]建立了用于模拟采用部分抗剪连接的后张法组合梁非线性行为的有限元模型。Pathirana等^[9-10]对螺栓连接和栓钉连接的组合梁进行了组合梁的抗弯性能和抗剪连接件的推出试验和有限元分析,研究参数有混凝土的强度、钢材的屈服强度以及抗剪连接件的数量等。中国对钢-混凝土组合梁的研究起步较晚。李铁强等^[11]对采用弯筋作为剪力连接件的组合梁进行了系统的试验研究和理论分析,对国外规范采用简化塑性方法设计组合梁的可行性进行了验证。聂建国等^[12-16]对钢-混凝土组合梁的挠度和承载力计算进行了试验和理论研究,考虑的因素有滑移效应、抗剪连接程度和剪力滞后等。李国强等^[17]提出了一种腹板嵌入式钢-混凝土组合梁,并对该梁的整体抗弯性能进行了研究,与现行规范中的采用栓钉作为剪力连接件的组合梁进行了对比分析。徐荣桥等^[18]对部分抗剪连接组合梁挠度计算的不同方法进行了对比分析,针对现行规范中采用的折减刚度法所存在的问题,提出了部分抗剪连接组合梁挠度计算的改进折减刚度法。丁发兴等^[19]进行了3组栓钉剪力连接件推出试验,研究栓钉直径和栓钉屈服强度对试件受剪承载力的影响。薛铖^[20]采用混

凝土暗梁作为抗剪连接件,通过试验及有限元数值模拟,研究了新型钢-混凝土组合梁的受力过程、破坏过程和组合梁组合作用的影响因素。童乐为等^[21]进行了钢-混凝土组合梁在负弯矩作用下的受力性能试验,研究了H形钢的腹板高厚比、抗剪连接栓钉数量等因素对组合梁受力性能的影响。刘奇顺^[22]对栓钉连接件承载力和荷载-滑移关系曲线的研究成果进行了统计归纳,得到了承载力和荷载-滑移曲线的计算公式,并基于OpenSEES提出了用于钢-混凝土组合梁分析的双层纤维梁模型。

为了减小建筑整体高度,采用了一种钢箱梁嵌入混凝土板的新型连接方式,组合梁采用钢板作为抗剪连接件,目前还没有学者针对这种钢箱梁嵌入式的连接方式进行研究。为探讨钢箱梁嵌入混凝土板这种新型连接方式的受力性能,笔者进行了该连接方式的现浇板在支座处的抗弯性能以及组合梁的抗弯性能的研究,本文主要针对现浇板在支座处的抗弯性能进行研究,通过试验研究和有限元分析,对比分析采用钢箱梁嵌入混凝土板的新型连接方式与传统栓钉连接方式中板抵抗支座负弯矩能力的差异,以及两类组合形式中板的延性。

1 试验研究

1.1 试件介绍

实际结构采用的梁板截面如图1所示。

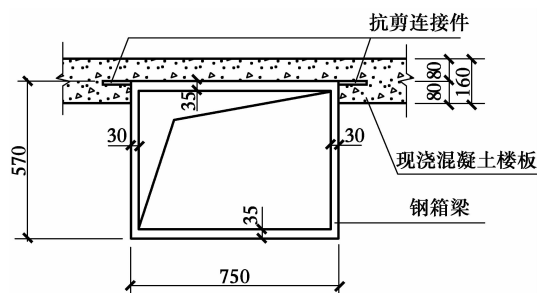


图1 实际结构采用的钢箱梁-板组合截面图

Fig. 1 The section of composite beam-slab with steel box beam embedded in actual structure

考虑实验室的条件和研究目的,试验混凝土现浇板的实际结构板厚取为150 mm,试件的钢箱梁根据梁的腹板刚度进行了缩尺。共设计了6个试件,试件的设计参数如表1所示。作为连接件的钢板厚度为14 mm,钢箱梁截面均采用125 mm×250 mm的矩形截面,壁厚为16 mm,所有试件混凝土板的钢筋均采用直径为6.5 mm的HRB600钢筋。试件设

计如图 2 所示。

表 1 试件设计参数
Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	连接方式	连接件	混凝土板跨度/m
KW1	嵌入连接	大钢板	0.925
KW3	传统连接	栓钉	0.925
KW4	嵌入连接	大钢板	0.925
KW5	嵌入连接	小钢板	0.925
KW7	嵌入连接	小钢板	1.05
KW8	传统连接	栓钉	1.05

注:KW4 在钢箱梁内浇注了混凝土,主要是为了增强钢箱梁的腹板刚度,探索钢箱梁腹板的刚度能否有效承受混凝土板受弯时受压区混凝土传递的压力。

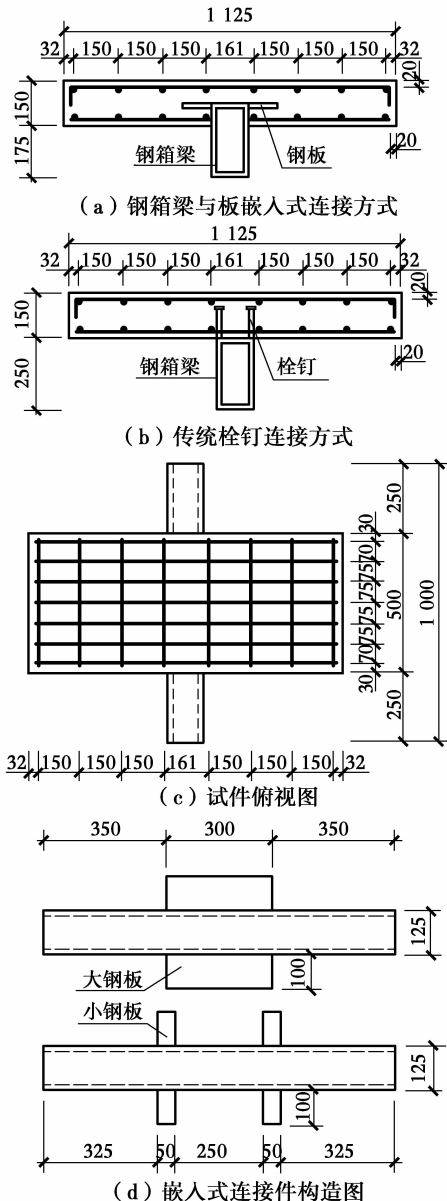


图 2 试件设计图

Fig. 2 The design of specimens

1.2 材料参数

钢筋和钢板的材性试验按《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[23] 的要求进行,在 INSTRON 试验机上完成了拉伸性能试验,得到直径为 6.5 mm 的 HRB600 钢筋和 Q235B 钢板的力学性能指标如表 2 所示。

表 2 材料力学性能

Table 2 Material properties

拉伸对象	f_y /MPa	$\epsilon_y/10^{-6}$	f_u /MPa	$\epsilon_u/10^{-6}$	E /GPa
6.5 mmHRB600	872.03	4 300	998.62	57 000	201
Q235B	292.50	1 400	429.62	120 700	204

注:表中 f_y 为屈服强度; ϵ_y 为屈服应变; f_u 为极限强度; ϵ_u 为极限应变; E 为弹性模量。

混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 根据与试件同条件养护的边长为 150 mm 的立方体试块测得,参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[24],混凝土的轴心抗压强度 f_c 、抗拉强度 f_t 分别按式(1)、(2)计算,混凝土的弹性模量 E_c 按式(3)计算,计算得到力学性能指标如表 3 所示。

$$f_c = 0.76 f_{cu} \quad (1)$$

$$f_t = 0.395 f_{cu}^{0.55} \quad (2)$$

$$E_c = 10^5 / (2.2 + 34.7 / f_{cu}) \quad (3)$$

表 3 混凝土力学性能指标

Table 3 Mechanical performance indices of concrete

试件编号	f_{cu} /MPa	f_c /MPa	f_t /MPa	E_c /GPa
KW1	37.73	28.67	2.91	32.1
KW3	33.70	25.61	2.73	31
KW4	33.90	25.76	2.74	31
KW5	50.67	38.51	3.42	34.7
KW7	50.67	38.51	3.42	34.7
KW8	46.01	34.97	3.24	33.9

1.3 加载方案和测量方案

试件采用单调加载,装置如图 3 所示。试验过程中采用力和位移混合控制的方法进行加载,前期采用力控制加载,荷载按照每级 10 kN 施加,当试件达到承载力峰值后采用位移控制加载。

在混凝土板跨中的中间位置安装百分表,测量跨中位移,在试验过程中同步绘制出荷重-位移曲线 ($P-\Delta$ 曲线)。为了减小位移测量的误差,在混凝土板的跨中边缘位置对称布置两个百分表,根据这两个百分表的测量数据,对荷载-位移曲线进行修正,百分表安装位置如图 4 所示。

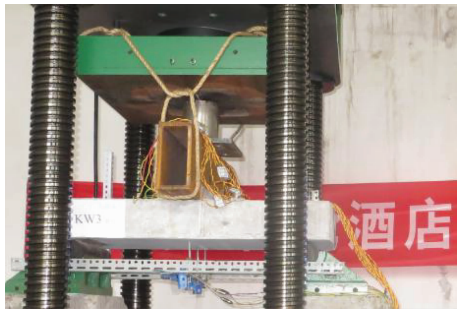


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Experimental loading device



图 4 百分表安装

Fig. 4 The installation of dial indicators

或变形太大不能继续承载而破坏。采用钢箱梁嵌入式连接的组合梁板结构与栓钉连接的组合梁板结构的破坏形态比较接近,各试件的破坏形态如图 5 所示。

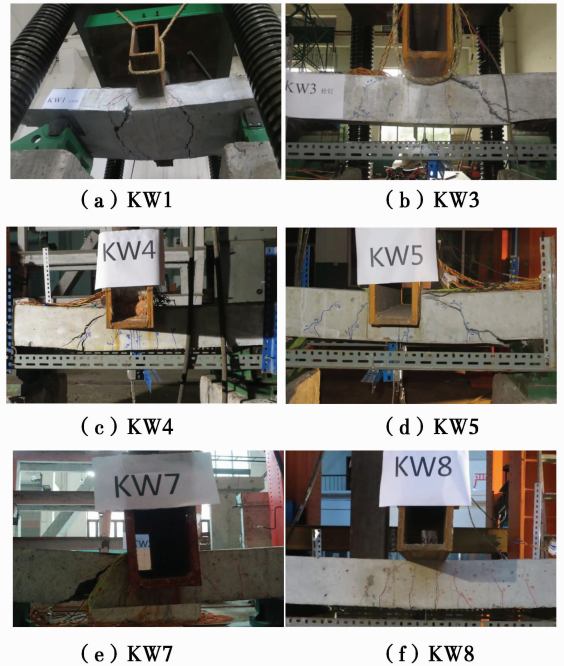


图 5 试件破坏形态

Fig. 5 The failure mode of specimens

2 试验破坏现象及结果分析

2.1 试验现象及破坏特征

试验初始阶段,首先在板底跨中或跨中附近出现裂缝,并向试件两侧面延伸。随着荷载的增大,板底相继出现多条贯通板底的裂缝,并向试件两侧面延伸。加载到后期,大部分试件斜裂缝斜向延伸至板顶和钢箱梁接触处。随后,各个试件均以钢筋拉断

2.2 试验结果及分析

2.2.1 承载力和破坏形态分析 试件的极限抗弯承载力和破坏形态以及根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[24]计算得到的抗弯承载力和抗剪承载力如表 4,计算时不考虑钢箱梁嵌入混凝土板的影响。

表 4 承载力和破坏形态统计

Table 4 The summary of bearing capacity and failure mode

试件编号	峰值荷载 P/kN	破坏弯矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	误差/%	抗弯承载力 荷载值 P_m/kN	P_m/P	抗剪承载力 荷载值 P_s/kN	P_s/P	破坏形态
KW1	110	25.44	1.8	90.7	0.82	258.2	2.35	斜截面弯坏
KW3	108	24.98		90.7	0.84	242.2	2.24	斜截面弯坏
KW4	110	25.44	1.8	90.7	0.82	243.1	2.21	斜截面弯坏
KW5	121	27.98	1.5	90.7	0.75	303.4	2.51	斜截面弯坏
KW7	101	26.51	3.8	79.9	0.79	303.4	3.00	斜截面弯坏
KW8	105	27.56		79.9	0.76	287.5	2.74	正截面弯坏

注:1.表中“误差”一栏为试件 KW1、KW4 相对 KW3 和 KW5、KW7 相对 KW8 的误差分析。

2.表中试件的抗弯承载能力和抗剪承载能力均换算为试验加载点处对应的荷载值。

分析表 4 数据:由试件 KW1 与 KW4 的最终破坏弯矩可知,试验中采用的钢箱梁壁厚足够,刚度足够,在试验过程中,能有效承受混凝土板受弯时受压

区混凝土传递的压力;试件 KW1、KW4 与 KW3 以及 KW5、KW7 与 KW8 的最终破坏弯矩差别均在 5%以内,说明采用钢箱梁嵌入式连接的试件,其抵

抗支座负弯矩能力与栓钉连接的试件基本相同。

如表 4 所示,试件计算的抗剪承载力远远高于抗弯承载力,试验过程中采用新型连接方式的板在支座处均出现了斜向裂缝。分析发现,由于钢箱梁与混凝土板之间连接钢板的存在阻碍了支座处板负弯曲垂直裂缝的开展,导致垂直裂缝旁斜裂缝沿着连接板边缘穿过,形成斜向裂缝,该斜裂缝出现后并未引起承载力的降低。在试验中,试件 KW3 因加载偏快使得试件的变形不大(挠度为跨度的 15%),试件 KW5 混凝土强度偏高,延性变差(挠度小于跨度的 15%)。其余试件在荷载峰值之后 $P-\Delta$ 曲线均出现一段较大的位移平台段,具有良好的变形能力(挠度均大于跨度的 18%),表明新型连接方式和传统连接方式的板均具有比较典型的弯曲破坏特征,因此,试件的破坏形态定义为斜截面弯曲破坏或正截面弯曲破坏。

2.2.2 $P-\Delta$ 曲线对比分析 试件的 $P-\Delta$ 曲线如图 6 所示。

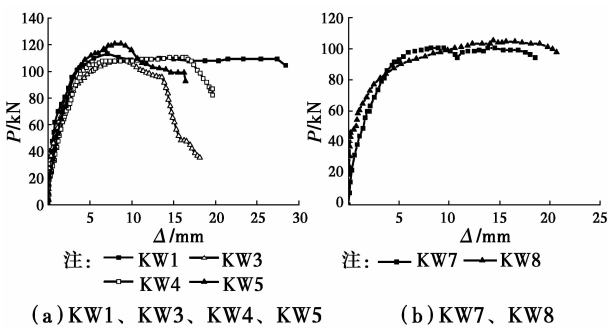


图 6 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 6 $P-\Delta$ curves

图 6 表明:

1) 试件 KW1、KW3 和 KW4 的峰值荷载基本相同,对应混凝土板的抗支座负弯矩能力相同,说明采用钢箱梁嵌入式连接的组合梁板结构与采用栓钉连接的组合梁板结构中板具有基本相同的抗弯承载力。加载前期,曲线走势基本相同,3 个试件的刚度差别不大。

2) 对比试件 KW1 和 KW4 可知,在钢箱梁中浇筑混凝土对试件抗支座负弯矩性能影响不大,同时表明钢箱梁的壁厚足够。但是,两者的极限位移具有较大的差异,是因为试件 KW1 钢箱梁内未填充混凝土,钢箱梁可以侧向变形,增大了板的变形能力,试件 KW4 钢箱梁中填充的混凝土阻碍了钢箱梁的侧向变形,从而使得其变形小于未填充混凝土的试件。试件 KW1 和 KW4 达到峰值荷载后荷载

维持在一个稳定水平,表现出良好的延性,最终试件因板底钢筋拉断而破坏。

3) 对比试件 KW1 和 KW5,试件的跨度相同,混凝土强度不同,KW5 混凝土强度高,其承载力高,但是其极限位移小,延性差于 KW1。

4) 试件 KW7 和 KW8 曲线走势基本一致,两者的承载力基本相同,说明采用钢箱梁嵌入式连接的组合梁板结构与采用栓钉连接的组合梁板结构中板具有基本相同的承载力,两种连接方式均具有良好的延性。

3 抗弯性能有限元分析

3.1 模型介绍

为了分析试件的受力机理,建立有限元模型,对 6 个试件进行有限元分析,划分单元后的模型如图 7 所示。

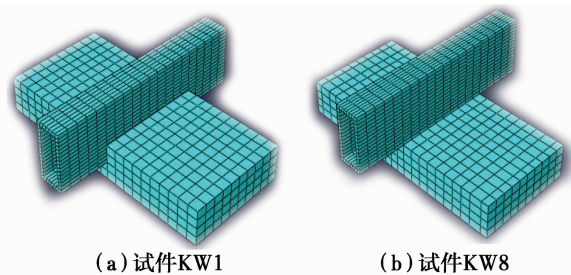


图 7 划分单元后的模型

Fig. 7 The mesh of finite element models

1) 钢箱梁和混凝土采用实体单元 C3D8 模拟,作为抗剪连接件的大钢板和小钢板采用壳单元 S4 模拟,钢筋采用桁架单元 T3D2 模拟。

2) 钢箱梁嵌入式连接的组合梁板结构各部件之间的连接关系是:钢筋网片和作为抗剪连接件的钢板与混凝土采用 embedded 连接,钢箱梁与混凝土板采用接触连接,切向为了避免刚度矩阵的奇异,采用 Penalty 接触属性,法向采用 Hard 接触属性。对于栓钉连接的试件,有限元验算结果表明上部不带钢箱梁的钢筋混凝土板受力与上部带钢箱梁的结构受力一致。因此,对于栓钉连接的试件,可以认为上部的钢箱梁的作用类似于加载梁,模型中不考虑栓钉的作用,同样将钢箱梁与钢筋混凝土板采用接触连接。

3) 钢材和钢筋采用材性试验的数据,本构模型采用等向强化模型, $\sigma-\epsilon$ 关系采用双折线;混凝土采用 ABAQUS 自带的塑性损伤模型,混凝土受拉受压应力应变关系采用规范的应力应变关系。

3.2 分析结果

3.2.1 *P-Δ* 曲线对比分析 通过对钢箱梁嵌入式连接的组合梁板结构进行有限元分析,得到的 *P-Δ* 曲线与试验曲线如图 8。由图 8 可知:有限元分析得到的构件初始刚度和峰值承载力与试验结果吻合良好;钢箱梁嵌入式连接的组合梁板结构中的板与栓钉连接的组合结构中的板具有基本相同的承载力和良好的延性;KW4 模拟曲线上升段刚度偏大,原因是钢箱梁内填充的混凝土可能不密实,有限元模拟无法考虑混凝土不密实的情况。

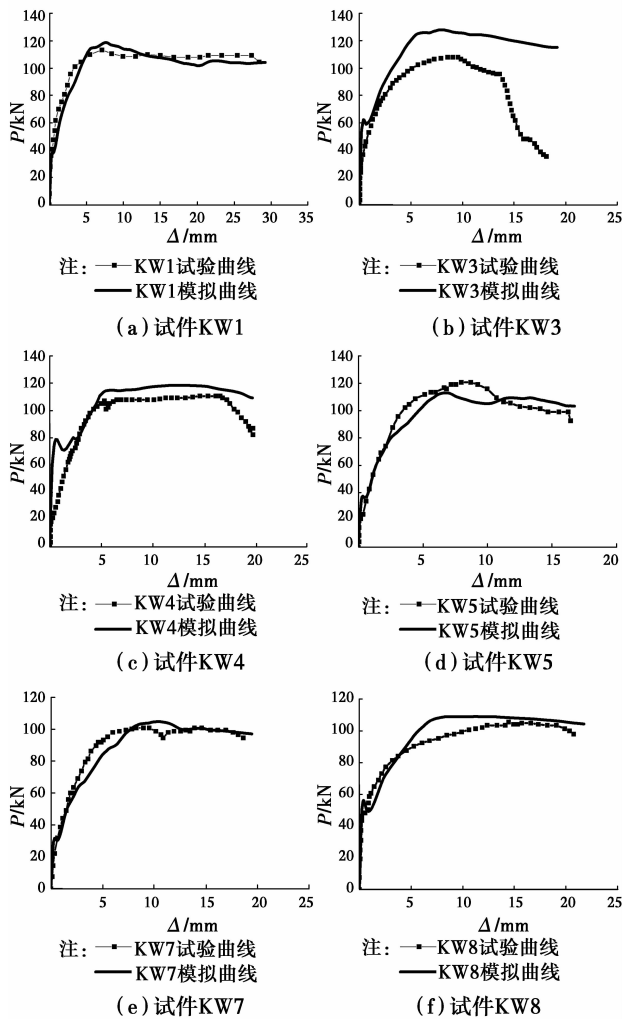


图 8 有限元分析与试验 *P-Δ* 曲线对比
Fig. 8 Comparison of *P-Δ* curves of finite element analysis and test

3.2.2 钢箱梁受力分析 试件 KW1 和 KW7 有限元模型中嵌入的钢箱梁的应力云图如图 9 所示,由于钢箱梁侧面承受混凝土的挤压作用,钢箱梁底板类似于压弯构件。混凝土板受弯时,受压区混凝土传递给钢箱梁腹板压力,使得钢箱梁底板下侧受拉,上侧受压,但拉应力和压应力均较小,压应力大于拉

应力,应力均小于钢箱梁的屈服强度。说明试验钢箱梁的壁厚足够,能够承担混凝土板受弯时混凝土传递给钢箱梁的压力。

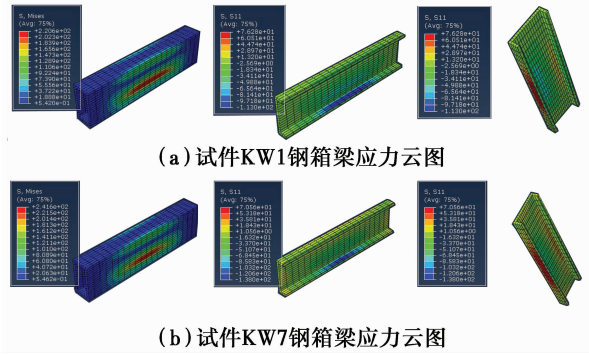


图 9 试件 KW1 和 KW7 的钢箱梁应力云图

Fig. 9 Stress contour of steel box beams of KW1 and KW7

3.2.3 混凝土板受力分析 图 10 给出了试件 KW1、KW7、KW8 混凝土的主拉应变分布(沿板跨度方向取一排单元)。有限元分析的主拉应变分布与试件裂缝分布现象一致,主拉应变最大处对应结构开裂较为严重的地方。

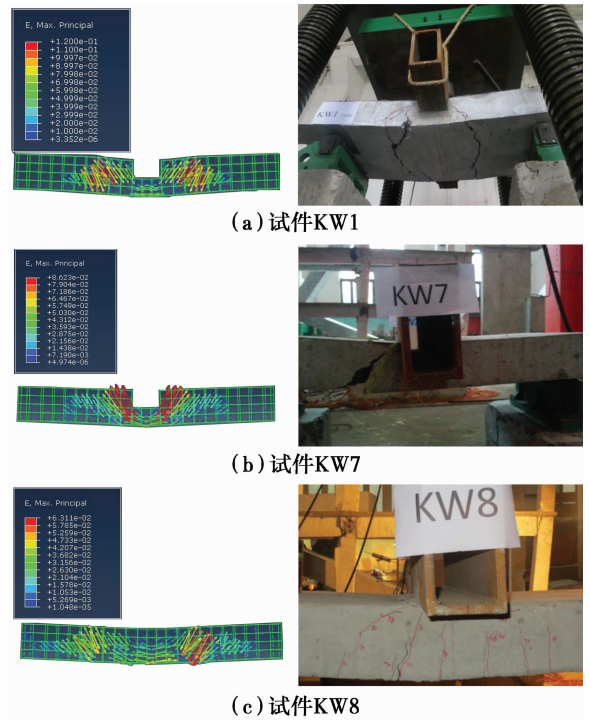


图 10 试件 KW1、KW7 和 KW8 破坏时混凝土的主拉应变与裂缝分布图

Fig. 10 The principal tensile strain of concrete and cracks distribution of KW1, KW7, KW8 when failure

3.2.4 钢筋应力分析 图 11 给出了试件 KW1 峰值和极限状态底部钢筋网片的主应力分布。峰值位移时,钢筋的最大拉应力略大于钢筋的屈服强度,后

期随着荷载的加载,钢筋进入强化阶段,应力不断增大。对应试验的极限位移时,有限元模拟的钢筋强度没有达到极限强度。

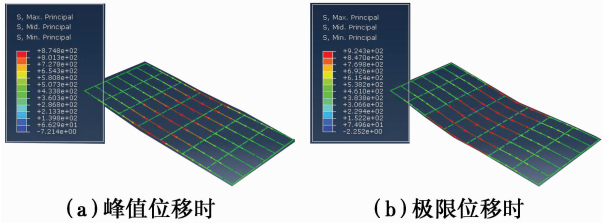


图 11 试件 KW1 钢筋应力

Fig. 11 Stress of reinforcement rebars of Specimen KW1

3.2.5 钢箱梁壁厚与混凝土板厚以及钢箱梁嵌入深度的关系分析 由于钢箱梁嵌入混凝土板,混凝土板受弯时受压区混凝土传递给钢箱梁压力,为了防止钢箱梁腹板变形过大或屈曲,钢箱梁应保证一定的壁厚。混凝土板受弯时受压区混凝土传递给钢箱梁的压力与混凝土板厚以及嵌入深度有关。

通过变化板的厚度以及钢箱梁的壁厚来进行有限元分析,在变化板厚的过程中,钢箱梁嵌入深度均取为板厚的一半。分析计算结果如图 12,其中 t/h 为钢箱梁的壁厚与钢箱梁高度之比。钢箱梁壁厚与混凝土板厚和钢箱梁嵌入混凝土板的深度有关。钢箱梁在受力过程中未进入屈服状态的厚度是安全厚度。以板厚为 150 mm 的试件为例,钢箱梁的厚度 t 取为 14 mm($t/h=0.056$),钢箱梁腹板依然未屈服,说明试件的壁厚 16 mm 是足够安全的。

从图 12 可知,在保持钢箱梁嵌入混凝土板一半的前提下,钢箱梁所需要的壁厚随着混凝土板厚的增加而增加,虽然板厚 120 mm 和板厚 150 mm 所需的壁厚基本一致,但是钢箱梁的应力状态不一致,板厚为 150 mm 情况下,钢箱梁的应力状态更高,如图 13 所示,两者的壁厚均为 12 mm。当然,在考虑钢箱梁壁厚时,同时应考虑组合梁的抗弯强度要求。

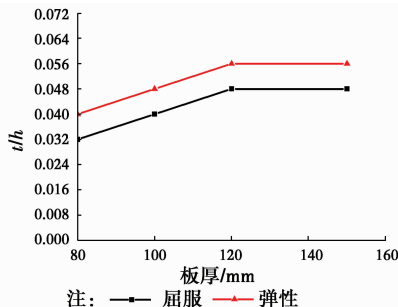


图 12 板厚与钢箱梁尺寸的关系

Fig. 12 Relationship between thickness of slab and dimensions of steel box beam

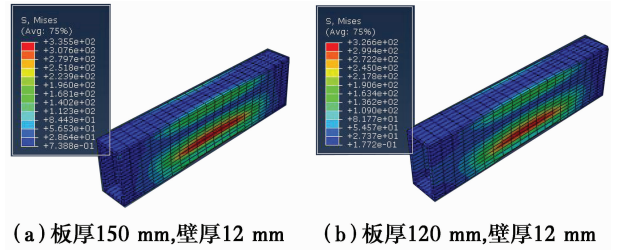


图 13 钢箱梁应力云图
Fig. 13 Stress contour of steel box beams

4 结论及工程设计建议

4.1 结论

通过对钢箱梁嵌入式连接的组合梁板结构进行了试验和有限元分析,得出以下结论:

1)在保证钢箱梁腹板刚度的前提下,采用钢箱梁嵌入式连接方式既能减小各层梁板结构高度,有效增大各层净高,又能保证与工程常用栓钉连接的组合梁板结构具有基本相同的抗支座负弯矩能力和良好的延性。

2)钢箱梁嵌入式连接组合梁板结构与采用栓钉连接的组合梁板结构中的板具有基本一致的破坏形态。

3)钢箱梁壁厚受混凝土板厚度和钢箱梁嵌入混凝土板的深度以及钢箱梁抗弯强度要求的影响。

4.2 工程设计建议

根据研究成果,针对钢箱梁嵌入式连接组合梁板结构的工程应用提出以下设计建议:

1)在计算钢箱梁嵌入式连接的组合梁板结构中板的抗弯承载力时,可依据《混凝土结构设计规范》,不考虑钢箱梁嵌入混凝土板的影响。

2)在进行钢箱梁嵌入式连接的组合梁板结构设计时,钢箱梁的设计除了要满足组合梁抗弯承载力要求,还需考虑混凝土板受压区混凝土对钢箱梁的挤压作用,确保钢箱梁腹板不发生过大变形或屈曲。

参考文献:

[1] VIEST I M. Investigation of stud shear connectors for composite concrete and steel T-beams [J]. Journal of American Concrete Institute, 1956, 27(8): 875-891.

[2] SLUTTER R G, DRISCOLL G C. Flexural strength of steel concrete composite beams [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1965, 91: 71-99.

[3] JOHNSON R P. Partial-interaction design of composite beams [J]. The Structural Engineer, 1975, 53(8):

- 305-311.
- [4] GATTESCO N. Analytical modelling of nonlinear of composite beams with deformable connection [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1999, 152(3): 195-218.
- [5] VALENTE I B, CRUZ P J S. Experimental analysis on steel and lightweight concrete composite beams [J]. *Steel Composite Structure*, 2010, 10(2): 169-185.
- [6] PAVLOVIĆ M, MARKOVIĆ Z, VELJKOVIĆ M, et al. Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 88: 134-149.
- [7] RANZI G, ZONA A. Shear deformable finite beam elements for composite box beams [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2014, 30(2): 223-240.
- [8] HWANG J W, KWAK J H, KWAK H G. Finite-element model to evaluate nonlinear behavior of posttensioned composite beams with partial shear connection [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 141(8): 04014205.
- [9] PATHIRANA S W, UY B, MIRZA O, et al. Strengthening of existing composite steel-concrete beams utilising bolted shear connectors and welded studs [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 114: 417-430.
- [10] PATHIRANA S W, UY B, MIRZA O, et al. Flexural behaviour of composite steel-concrete beams utilising blind bolt shear connectors [J]. *Engineering Structures*, 2016, 114: 181-194.
- [11] 李铁强,朱起,朱聘儒,等. 钢与混凝土组合梁弯筋连接件的抗剪性能[J]. *工业建筑*, 1985(10):6-12.
LI T Q, ZHU Q, ZHU P R, et al. Shear capacity of bent reinforcement connectors of composite steel-concrete beams [J]. *Industrial Construction*, 1985(10): 6-12. (in Chinese)
- [12] 聂建国,吕国斌,曹冬才,等. 钢-混凝土组合梁变形计算的一般公式[J]. *哈尔滨建筑工程学院学报*, 1993(Sup1): 243-247.
NEI J G, LYU G B, CAO D C, et al. General formula predicting the deflection of composite steel-concrete beams [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1993(Sup1): 243-247. (in Chinese)
- [13] 聂建国,沈聚敏. 滑移效应对钢-混凝土组合梁抗弯强度的影响及其计算[J]. *土木工程学报*, 1997, 30(1): 31-36.
NEI J G, SHEN J M. Slip effect strength of composite steel-concrete beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1997, 30(1): 31-36. (in Chinese)
- [14] 聂建国,崔玉萍,石中柱,等. 部分剪力连接钢-混凝土组合梁受弯极限承载力的计算[J]. *工程力学*, 2000, 17(3):37-42.
NEI J G, CUI Y P, SHI Z Z, et al. Ultimate flexural capacity of composite steel-concrete beams with partial shear connection [J]. *Engineering Mechanics*, 2000, 17(3): 37-42. (in Chinese)
- [15] 聂建国,樊健生. 组合梁在负弯矩作用下的刚度分析[J]. *工程力学*, 2002, 19(4):33-36, 28.
NEI J G, FAN J S. Analysis of composite beam stiffness under negative bending [J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(4): 33-36, 28. (in Chinese)
- [16] 聂建国,田春雨. 考虑剪力滞后的组合梁极限承载力计算[J]. *中国铁道科学*, 2005, 26(4):16-22.
NEI J G, TIAN C Y. Moment resistance of composite beam at ultimate limit state considering shear-lag effect [J]. *China Railway Science*, 2005, 26(4):16-22. (in Chinese)
- [17] 李国强,李亮,李现辉,等. 腹板嵌入式组合梁抗弯性能理论和试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(3):1-7,30.
LI G Q, LI L, LI X H, et al. Theoretical and experimental analysis of bending behavior of composite beam with notched web [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering*, 2011, 33(3):1-7,30. (in Chinese)
- [18] 徐荣桥,陈德权. 组合梁挠度计算的改进折减刚度法[J]. *工程力学*, 2013, 30(2):285-291.
XU R Q, CHEN D Q. Modified reduced stiffness method for calculating the deflection of composite beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2): 285-291. (in Chinese)
- [19] 丁发兴,倪鸣,龚永智,等. 栓钉剪力连接件滑移性能试验研究及受剪承载力计算[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(9): 98-106.
DING F X, NI M, GONG Y Z, et al. Experimental study on slip behavior shear bearing capacity for shear and calculation of stud connectors [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(9): 98-106. (in Chinese)
- [20] 薛铖. 新型钢-混凝土组合梁组合作用的研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
XUE C. Experimental and theoretical study on composite behavior of new steel-concrete composite beams [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [21] 童乐为,刘洋,孙波,等. 负弯矩作用下钢-混凝土组合

- 梁受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(10): 1-9.
- TONG L W, LIU Y, SUN B, et al. Experimental investigation on composite beams mechanical behavior of steel-concrete under negative bending [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(10): 1-9. (in Chinese)
- [22] 刘奇顺. 考虑界面滑移效应的钢-混凝土组合梁非线性分析[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- LIU Q S. Nonlinear analysis of steel-concrete composite beams considering the effect of interface slip [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structure: GB50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [25] ABAQUS A. 6. 13 Analysis user's manual [M]. SIMULIA, Providence, IR, 2013.

(编辑 胡英奎)