

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.068

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



钢筋混凝土简支深梁拓扑优化设计方法试验研究

张鹤志¹,徐文韬¹,蒋滇¹,吕伟荣¹,易伟建²

(1. 湖南科技大学 土木工程学院;结构抗风与振动控制湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;

2. 湖南大学 土木工程学院,长沙 410082)

摘要:运用拓扑优化辅助完成工程设计是近年的一种新方法。利用钢筋分离模型 GBESO 获取基于应力均匀化分布的最优钢筋拓扑,为解决钢筋混凝土深梁等二维构件的工程配筋设计难题提供新思路。分别参照该优化算法的解和按中国规范推荐的深受弯构件经验设计方法完成了一组钢筋混凝土简支深梁配筋设计,并进行静力对比试验。结果表明:钢筋分离模型 GBESO 设计的构件钢筋消耗量较低,极限承载能力较高,裂缝开展能力较强,且在破坏过程中表现出更佳的耗能能力,由此证明以斜钢筋补强斜截面的配筋设计方式更符合构件的受力机理和特性。钢筋分离模型 GBESO 在深梁配筋设计方面的能力得到一定的验证。

关键词:钢筋混凝土;深梁;配筋设计;拓扑优化;结构优化设计;静力试验

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)04-0091-08

Experimental study on topology optimization design method for simply supported reinforced concrete deep beams

ZHANG Huzhi¹, XU Wentao¹, JIANG Dian¹, LV Weirong¹, YI Weijian²

(1. School of Civil Engineering; Hunan Provincial Key Laboratory of Structures for Wind Resistance and Vibration Control, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: The use of topology optimization to assist in the completion of engineering design is a new method in recent years. The paper adopts the genetic bi-directional evolutionary structural optimization (GBESO) discrete model to obtain the optimal reinforcement topology based on the uniform stress distribution, which provides a new idea for solving the engineering reinforcement design problems of reinforced concrete deep beams and other two-dimensional components. With reference to the solution of the optimization algorithm and the empirical design method of deeply flexural members recommended by the Chinese code, a group of reinforced concrete simple-supported deep beam reinforcement designs have been completed and static comparison experiments were carried out. Results show that the component designed by GBESO has lower steel bars consumption, higher ultimate bearing capacity, stronger crack development capacity, and better

收稿日期: 2020-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(51508182);湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(18B207)

作者简介: 张鹤志(1984-),男,博士,副教授,主要从事混凝土结构设计基本理论与结构优化设计研究, E-mail: zhanghz_hnu@163.com。

Received: 2020-02-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51508182); Excellent Youth Foundation of Hunan Educational Committee (No. 18B207)

Author brief: ZHANG Huzhi (1984-), PhD, associate professor, main research interests: concrete structure theory and structural optimization design, E-mail: zhanghz_hnu@163.com.

energy dissipation capacity during the failure process. It proves that the reinforcement design method of the oblique section reinforced with oblique steel bars is more in line with the force mechanism and characteristics of the members. Ability of the GBESO discrete model in the design of deep beam reinforcement has been verified to a certain extent.

Keywords: reinforced concrete; deep beams; reinforcement layout design; topology optimization; structural optimization design; static test

现代建筑在使用中承受的荷载工况越来越复杂,作为主要承重和受弯构件的钢筋混凝土深梁得到日益广泛的工程应用。关于深梁的设计,包括中国现行规范 GB 50010—2010^[1]在内的多国规范都推荐参考杆系结构设计方法再修正的经验设计方法,但实际上深梁受弯截面正应变呈非线性分布,这种基于平截面假定的设计方法已明显不合理。因此,采用应力设计方法的相应设计成为研究热点,当前也有部分国家或地区采用了一些具有可操作性的弹性应力设计方法,如美国规范 ACI 318-14^[2]推荐的拉压杆模型方法。

为了揭示深梁的受力机理和破坏机制,开展了大量试验研究,如 Patil 等^[3]、Shin 等^[4]、Oh 等^[5]通过不同跨高比的深梁试验探讨其应变分布规律、剪切强度与破坏模式等力学性能; EL-Sayed 等^[6]、Marí 等^[7]和 Ashour 等^[8]则对纤维增强混凝土深梁的受剪性能及相关承载力计算开展试验研究;邓明科等^[9]则基于修正拉-压杆理论完成了型钢混凝土深梁试验探索。近年来,计算机技术与有限元等分析技术飞速发展,基于数值分析与优化方法的应力设计方法随之兴起。Najafian 等^[10]通过数值仿真研究建立使深梁满足平截面假定的非线性模型,实现了精细化配筋。Kwak 等^[11]利用渐进结构优化算法(简称 ESO)获取拉压杆模型,给出了最佳荷载传递以指导复杂受力构件配筋设计,并进行了试验验证。Liu 等^[12]提出遗传演化结构优化(简称 GESO),并利用其建立了开洞深梁的拉压杆模型,与经验方法设计构件进行了对比试验^[13]。考虑到拉压杆模型构建存在结果不唯一、主观依赖性强等问题,Zhang 等^[14]在此基础上又进一步发展出钢筋分离模型的遗传演化结构优化,直观演化钢筋布置并参照完成构件配筋设计,进而开展试验验证^[15]。

结合已有的双向渐进结构优化^[16](简称 BESO)与 GESO^[12],开发出的遗传双向演化结构优化(简称 GBESO)是近几年得到关注的新算法,基于钢筋

分离模型的 GBESO 从理论上可以直观演示出更接近全局最优解的最优钢筋拓扑方案。但这样的新设计方法在工程设计应用中是否合理可靠还有待验证。因此,笔者基于经验设计方法与钢筋分离模型 GBESO 优化设计方法的静力对比试验,从承载能力、钢筋应变、耗能能力、裂缝开展与破坏形态多方面进行对比分析,提出了基于弯剪破坏特征且可用于实际工程设计的配筋方案。

1 GBESO

1.1 GBESO 的基本思想

GBESO 结合了 GA 与 BESO,即将群体的思想引入 BESO,在个体的淘汰机制中引入概率性舍去机制,逐代淘汰经历仿生学中选择、杂交、变异等遗传过程的劣等个体,并且同时逐代复活已淘汰个体中经历遗传筛选的优等个体,最终演化出最优拓扑。以进行优化结构的所有单元为初始群体,在结构优化中也称为基结构,通过二进制“0”、“1”对每个单元进行基因编码,通过基因执行杂交、变异操作。

1.2 钢筋分离模型 GBESO

钢筋分离模型 GBESO 把基结构中的每个钢筋单元模拟成 GA 群体中的个体,并以钢筋单元的应变能灵敏度作为每个钢筋单元的适应度,以此评价该钢筋单元的优劣,适应度高的钢筋单元个体存活到下一代中的几率也相对较大,相反适应度低的钢筋单元个体则被淘汰的可能性高。在此基础上,每代在淘汰的钢筋单元个体中复活适应度高的钢筋单元个体。这些钢筋单元中因适应度高而存活的个体和复活的个体与不参与优化的混凝土单元一起进入下一代优化,反复迭代并循环上述过程,历经一定代数后,群体中只存留适应度高的钢筋单元个体,由这些个体组成最优钢筋拓扑。本文中的优化以 ANSYS 有限元分析软件为平台,分别采用 Solid65 和 Link10 单元模拟混凝土单元和钢筋单元,每代根据单元应变能的排序,通过遗传算法中轮盘赌的方

式,概率性淘汰低适应度钢筋单元与复活高适应度钢筋单元。具体的流程图如图 1 所示。

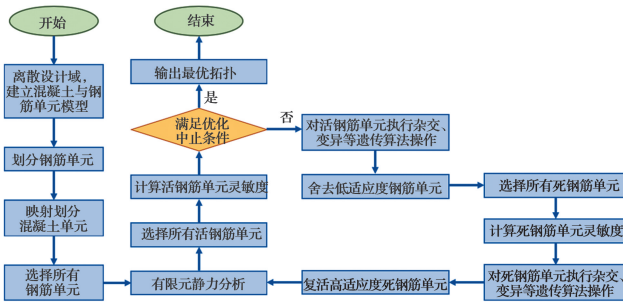


图 1 钢筋分离模型 GBESO 优化流程图

Fig. 1 Flow chart of the separated-elements model GBESO

2 试件设计

2.1 试件基本参数与配筋设计

试验对象为 $1\ 000\ \text{mm} \times 600\ \text{mm} \times 160\ \text{mm}$ 的简支深梁,设计荷载为 $300\ \text{kN}$,在梁顶分成两点加载,具体尺寸参数如图 2 所示。试验共浇筑两根深梁,混凝土强度等级均选用 C30,分别按钢筋分离模型 GBESO 完成优化设计(编号设置为 SL-G)和按经验设计方法完成设计(编号设置为 SL-C)。优化方法中混凝土网格划分为 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ 的矩形,钢筋强度等级采用 HPB300,直径均为 $8\ \text{mm}$,初始钢筋布置为横、竖、斜(与横竖夹角均为 45°)的满布钢筋网格(小格为 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$,试件 SL-G 受力钢筋布置方案基本完全参照钢筋分离模型 GBESO 演化的最优钢筋拓扑结果(如图 3 所示),仅为了施工便利,延长并连接了小部分最优钢筋拓扑中较零碎的钢筋,这些受力钢筋的锚固方式采用弯锚(配筋图中钢筋长度为实际受力钢筋长度),此外,考虑到钢筋分离模型 GBESO 的演化结果仅基于受力分析,所以,SL-G 最终还添加了现行规范 GB 50010—2010^[1]附录 G 中推荐的深受弯构件构造钢筋,最终钢筋总用量为 $8.58\ \text{kg}$,具体配筋如图 4(a)所示。试件 SL-C 完全参照 GB 50010—2010^[1]附录 G 中推荐的深受弯构件经验设计方法进行设计,其中主要受拉纵筋采用 HRB335,直径 $12\ \text{mm}$,构造钢筋采用 HPB300,直径 $8\ \text{mm}$,最终钢筋总用量为 $10.45\ \text{kg}$,具体配筋如图 4(b)所示。但需要说明的是,该优化设计方法仅针对指定工况,而经验设计方法可以涵盖多种常规工况,这可能是造成经验设计方法的钢筋用量明显较高的原因之一。

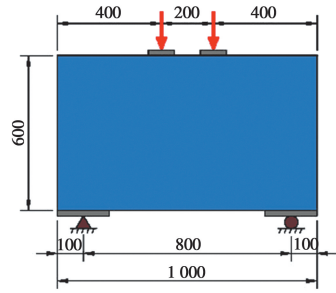
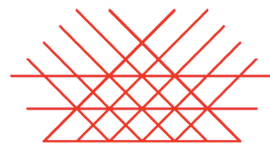


图 2 简支深梁尺寸图

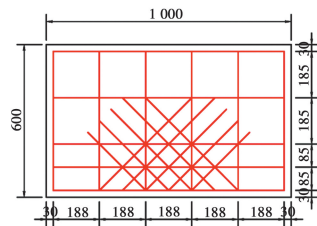
Fig. 2 Dimension of simply supported beam



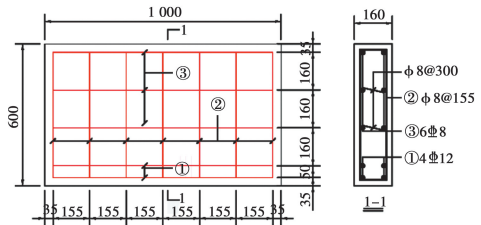
注:图中钢筋均为 $\phi 8$

图 3 最优钢筋拓扑结果

Fig. 3 Optimal reinforcement topology



(a) 试件 SL-G 配筋设计



(b) 试件 SL-C 配筋设计

注:图中未注明钢筋均为 $\phi 8$

图 4 简支深梁配筋图

Fig. 4 Reinforcement layout of simply supported beam

2.2 材料性能参数

试验构件为搅拌混凝土,一次浇筑完成,每一批混凝土预留 3 个边长为 $150\ \text{mm}$ 的标准立方体试块。将试块在标准条件下养护 $28\ \text{d}$,超过龄期后采用压力机完成混凝土强度测试,获得立方体抗压强度平均值 $f_{cu,m}$,再换算出轴心抗压强度平均值 $f_{c,m}$,具体的实测混凝土材料性能参数见表 1。不同直径的钢筋同批次各预留 3 根,加载前完成钢筋拉伸试验,获取钢筋的屈服强度平均值 $f_{y,m}$;屈服应变平均值 $\epsilon_{y,m}$ 和极限抗拉强度平均值 $f_{u,m}$,具体的实测钢

筋材料性能参数见表 2。

表 1 混凝土材料性能

Table 1 Performance table of concrete material

试件编号	$f_{cu,m}/\text{MPa}$	$f_{c,m}/\text{MPa}$
SL-G、SL-C	36.0	24.1

表 2 钢筋材料性能

Table 2 Performance table of reinforcement materials

钢筋等级	直径/mm	$f_{y,m}/\text{MPa}$	$\epsilon_{y,m}/10^{-6}$	$f_{u,m}/\text{MPa}$
HPB300	8	409	1 948	457
HRB335	12	448	2 240	615

2.3 加载装置与方案

试验在湖南科技大学结构实验室中进行,为静力试验,2个试件均为梁顶两点加载,加载装置如图 5 所示,加载设备为 100 t 液压千斤顶,其上安置力传感器进行荷载测定。

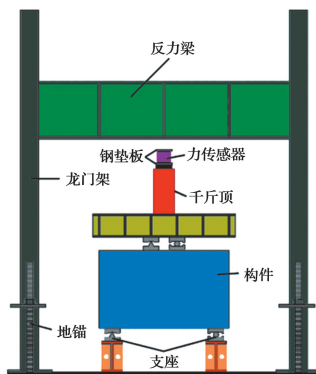


图 5 加载装置图

Fig. 5 Diagram of loading device

加载方案为:首先,分 3 级进行预加载,每级 20 kN,加至 60 kN 后无异常现象再按相同路径完全卸载;然后,正式加载,每级 20 kN,至预估开裂荷载的 90%后减为每级 10 kN,捕捉到开裂荷载后改回每级 20 kN,至设计荷载后减为每级 15 kN,当荷载传感测上的读数不能明显增长时,改为按跨中底部位移控制加载,每级 0.1 mm,直至构件失效。

3 试验结果

3.1 荷载与位移

图 6 为构件 SL-G 和 SL-C 的荷载-跨中挠度曲线,从图 6 中可知,加至相当的荷载值时,试件 SL-G 的跨中挠度总是小于试件 SL-C;尽管最终破坏时的极限跨中变形,试件 SL-G 也略小于试件 SL-C,但是

试件 SL-G 在 500 kN 左右时,荷载-跨中挠度曲线较明显地从接近线性段开始向更为平缓的非线性段转换,表明构件一定的屈服特性,而试件 SL-C 的加载阶段性特征不明显。

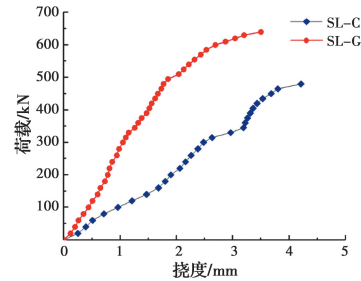


图 6 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 6 Load-midspan deflection curves

两个试件的开裂荷载、极限荷载以及极限跨中底部挠度值见表 3。由表 3 的数据可以看出,试件 SL-C 的开裂荷载略低于试件 SL-G,从理论上讲两者应该接近,但实际上呈现出一定差别是因为试件 SL-G 的裂缝开展整体上较慢,裂缝分布较为细密(从之后的破坏形态可以看出这一点),从微裂缝到肉眼可见的初始裂缝较难捕捉;两个试件的极限荷载均高于设计荷载,其中试件 SL-G 的极限荷载高达设计荷载的 2.1 倍,而试件 SL-C 的极限荷载仅为设计荷载的 1.6 倍,相比之下,试件 SL-G 比试件 SL-C 极限承载力约高出 33%,而其跨中挠度仅较试件 SL-C 小约 17%。

表 3 加载结果

Table 3 Results of load applied

试件编号	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	跨中挠度/mm
SL-G	140	640	3.5
SL-C	100	480	4.2

3.2 荷载-应变曲线

加载前在两个试件的跨中均布置了混凝土应变片,试件浇注前在构件 SL-G 的下部水平受拉钢筋和中部斜钢筋,构件 SL-C 的受拉纵筋、水平构造钢筋与竖直构造钢筋布置了钢筋应变片。首先,跨中混凝土的荷载-应变关系证实了该深梁不符合平面假定;然后,两个试件的主要钢筋荷载-应变曲线如图 7 所示。

从图 7 可知:

1) 在达到开裂荷载前,构件基本处于弹性阶段,所有钢筋应变水平均较低且近似呈线性增长,表明

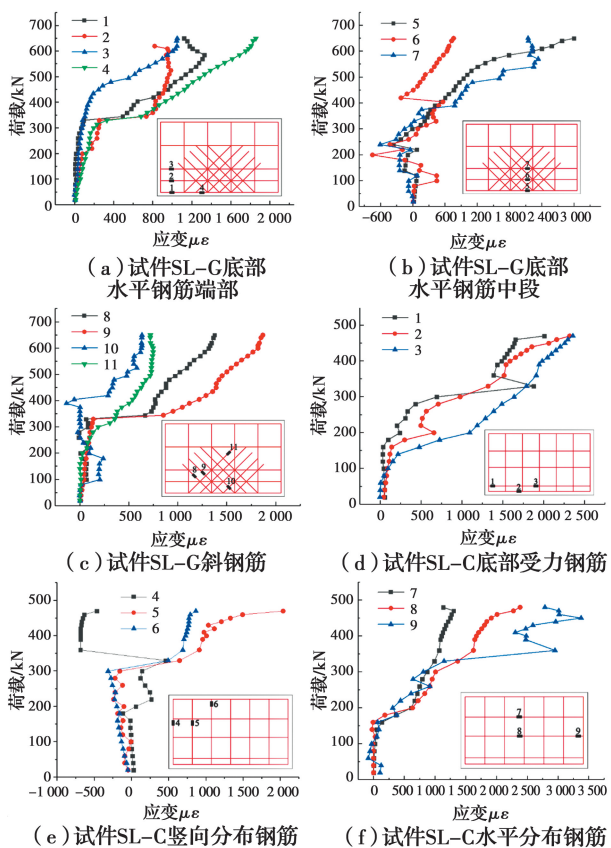


图 7 钢筋荷载-应变曲线图

Fig. 7 Load- strain curves of steel bars

这个阶段以混凝土受力为主。

2)对于试件 SL-G,荷载加大后,随着跨中底部出现正裂缝,底部水平钢筋中间段的应变开始显著增长(见图 7(b));紧接着,水平钢筋靠近两端的部位以及斜钢筋上的应变均开始明显增长(见图 7(a)和图 7(c));达到极限荷载的 50%左右时,以上这些钢筋应变均开始急剧增长(见图 7(a)、图 7(b)和图 7(c)),表明这些钢筋此时在控制裂缝开展和承担拉应力上正发挥着中坚作用;加载至 555 kN,底部水平钢筋出现屈服(见图 7(b));失效时,大部分梁体下部的水平钢筋均已不同程度地屈服(见图 7(b)),但梁腹两侧的斜钢筋最终仅接近屈服(见图 7(c));此外,梁底水平钢筋端部和梁腹斜钢筋,荷载-应变曲线上表现出一定的平台段(见图 7(a)和图 7(c)),而梁底水平钢筋中部的荷载-应变曲线这种平台特征不明显(见图 7(b)),形成这种差别的原因是,前者主要用于提供斜截面抗力,在 330 kN 时斜裂缝开出,斜截面上的混凝土退出抗拉,这些钢筋几乎同一时间在斜截面上开始成为抗拉主角,以致在这前后两级加载间曲线上形成平台段,而后者主要负责提

供正截面抗力,弯曲裂缝的开展是一个相对平缓的过程,随着竖裂缝的延伸,这些钢筋从底至顶依次接替退出,抗拉混凝土承担正截面上的拉应力,从而对应曲线上呈现斜率均大幅大降,但并未出现显著平台段。

3)对于试件 SL-C,开始加载后,同样,首先在跨中底部开出正裂缝,并伴随该部位纵筋应变的开始缓慢增长(见图 7(d)),不久水平分布筋的应变也徐徐增长(见图 7(f));约达到极限荷载的 35%时,水平向的纵筋和分布筋上应变增幅开始迅猛加大(见图 7(d)、(f)),但竖向分布筋上应变变化仍不明显(见图 7(e));加载超过 300 kN 时,竖向分布筋上应变突然开始大幅增长(见图 7(e));加载至 330 kN 时,最底部纵筋开始屈服(见图 7(d));加至 405 kN 时,水平分布筋开始屈服(见图 7(f));失效时,全部底部纵筋应变均略大于屈服应变(见图 7(d)),但仅个别水平分布筋屈服(见图 7(f)),而竖向分布筋都没有达到屈服强度(见图 7(e))。此外,该试件的分布筋应变开展情况,与文献[17]中斜裂缝出现后分布筋应变明显增大,水平分布筋的作用整体上大于竖向分布筋的结论相符,形成映证。

4)比较两个试件的应变发展情况,两个试件的底部水平受力钢筋都在失效前大面积屈服,从而较充分地发挥了材料性能。但仔细比较,试件 SL-G 的底部水平受力钢筋应变水平更高(见图 7(b)和图 7(d)),更大幅度地超过了屈服强度,可见其对该部位的钢筋利用更为充分。这应当是试件 SL-G 承载能力大幅高于试件 SL-C 的原因之一;其他部位的钢筋中,试件 SL-G 中斜钢筋的整体应变水平也略高于试件 SL-C 中的水平分布钢筋,远大于试件 SL-C 中的竖向分布钢筋(见图 7(c)、(e)、(f))。因对试件内的应力重分布防备不足,未能控制住造成试件最终失效的主斜裂缝,这个问题还有待日后进一步研究和改进。但在此前大部分时间内的弹性和弹塑性阶段,这些斜钢筋几乎与梁底水平钢筋应变水平相当,已经较充分地发挥了在其补强区域内的抗拉作用。根据文献[18]试验研究的结论,简支深梁设计中最大主应力角为 54°,也表明这类斜钢筋的布置较水平和竖向分布筋更符合深梁的受力机理,这应当是试件 SL-G 承载能力远高于试件 SL-C 的另一重要原因。

3.3 裂缝开展与破坏形态

图 8 为试验过程中逐级记录的两个试件的裂缝开展与分布图。

1)由图 8(a)可以看出,对于试件 SL-G,当荷载达到 140 kN 时,跨中底部出现第一条细裂缝;加至 375 kN 时,左侧加载点至支座间产生第 1 条斜裂缝;此后较长的一段时间内梁腹部斜钢筋区域出现了较多的细小斜裂缝,从最终的裂缝分布形态来看,这期间的斜裂缝均被布置的斜钢筋捕捉,所以宽度和长度开展均较为缓慢,最大裂缝宽度仅为 0.2 mm,这种局面一直保持至 525 kN;加至 525 kN 时,试件上发生了明显的应力重分布,传力路径随之转移,突然地开展出斜裂缝,该裂缝从所有斜钢筋的尽头绕过,从产生起就迅速发展成为主斜裂缝 C-1;至 640 kN,试件失效,失效时左支座处有混凝土剥落,主斜裂缝 C-1 的最大裂缝宽度约为 1 mm,试件破坏时主裂缝集中在左侧,为斜裂缝,最终破坏形态本质上属于剪切破坏,但正截面上的弯曲裂缝已经得到一定程度的开展。

2)由图 8(b)可以看出,对于试件 SL-C,当荷载达到 100 kN 时,跨中底部出现第 1 条细裂缝,此后一段时间,正裂缝不管是数量还是长度、宽度发展都不大,最大裂缝宽度不超过 0.2 mm;加载至 320 kN 时,右侧加载点至支座间产生第 1 条斜裂缝,并随着荷载的增大缝逐步增大,发展成为主斜裂缝 C-1;加至 480 kN,主斜裂缝 C-1 右侧又突然开展出与其大致平行的主斜裂缝 C-2,但出现瞬间两条主斜裂缝的宽度都超过 2 mm,紧接着就发生了试件失效,失效时主裂缝集中在右侧,为斜裂缝,最终破坏形态也呈现为典型的剪切破坏。

由文献[17-18]的结论可知,钢筋混凝土深梁在基于应力的设计方法下,尽管从破坏形态上看本质上仍属于脆性破坏,但脆性性质较经验设计方法中有所降低。而以上设计方法对比试验也可以得出类似的结论,优化设计方法较之经验设计方法,设计试件的性能已有明显改善,斜钢筋捕捉了斜裂缝的开展,所以耗能延性有所提高,但仍需进一步考虑应力重分布的影响。

4 分析与讨论

基于钢筋分离模型 GBESO 及经验设计法设计

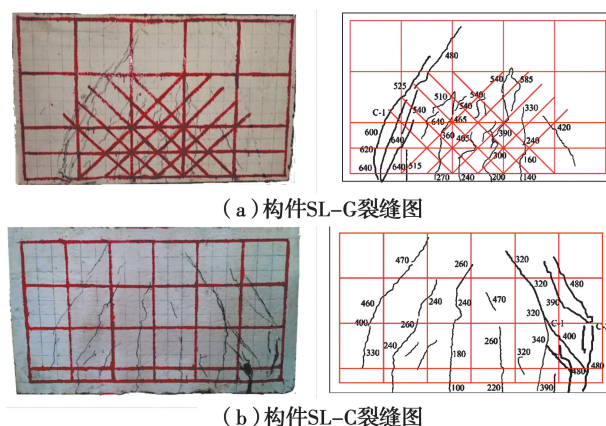


图 8 裂缝开展与分布图

Fig. 8 Crack development and distribution

的深梁静力对比试验,展开以下分析与讨论。

1)参照文献[17-18]的结论可知,目前的深梁设计,无论是采用经验设计方法,还是采用常见的应力设计方法——拉压杆模型设计方法,基本都由斜裂缝控制破坏,破坏形态以剪切破坏为主,而经验设计方法设计深梁和钢筋分离模型 GBESO 完成的优化设计深梁也同样呈现出以剪切为主的破坏形态,这些深梁从本质上看均属于脆性破坏,这是因为它们都有着足够的正截面抗力,且正截面抗力水平均高于斜截面抗力水平。从当前追求延性设计的主流工程设计理念来说,正截面的抗力富余还可以适当削减,而斜截面的抗力水平还需要大幅提高。

2)从相对耗能能力的角度来看,钢筋分离模型 GBESO 设计的深梁跨中极限变形略小于经验方法设计的试件,但它的极限承载力却要高出经验方法设计的深梁不少,所以,相比较而言,钢筋分离模型 GBESO 设计的构件耗能能力更强。但从绝对耗能水平的角度来看,两者的荷载-变形关系都缺乏达到极限承载力之后的持荷持续变形表现,说明两种方法设计的深梁整体耗能水平都不够。

3)钢筋分离模型 GBESO 设计的斜钢筋相当于在一定程度上替代了经验方法要求的水平和竖向分布钢筋,为深梁提供主要的斜截面抗力。无论从斜截面的应变发展水平与钢筋屈服情况来看,还是从斜裂缝开展速度与分布形态来看,又或者从钢筋与斜裂缝的相对走向及限制关系来看,较之水平和竖向分布钢筋,斜钢筋的工作应力状况更接近其优化设定的满应力目标,所以实际利用率更高,同时也更契合构件的受力机理。因此,钢筋分离模型 GBESO

的斜钢筋配置方案在节省了钢材的前提下,同时提高了斜截面抗力水平,相当于深梁的强度和刚度都得到了提高,而且在最优拓扑钢筋解的基础上再增加构造钢筋,相当于再人为增设了一道防线,在实际受力中相对于纯优化解进一步提高了深梁的承载能力,这也在一定程度上提高了设计深梁的可靠度。

4)但钢筋分离模型 GBESO 设计的深梁最终因突然劈出的斜裂缝绕开斜钢筋而几乎完全不受控制地开展,直接导致构件短时间内失效,说明当前的钢筋分离模型 GBESO 对高应力水平下构件内部可能的应力重分布考虑不足,这是日后需重点研究的方面。但是,可以推断,如果这些斜向钢筋能够有效而持续地控制所有斜裂缝的开展,这种方法设计的深梁斜截面肯定不只当前的抗力水平,那么以上的变形能力和耗能能力等延性问题或许就都迎刃而解了。而关于这方面的探讨,又存有两思路,一是延长斜向钢筋,扩大其控制范围;二是适当顺应斜钢筋上的斜裂缝开展,引导应力重分布。

此外,试验中优化设计深梁的配筋方案,包括斜钢筋的夹角,横、竖钢筋的比例等,均仅限于文中指定的深梁跨高比和指定荷载工况。对于工程中其他不同跨高比或不同荷载工况下的深梁设计,可以参照文中的优化设计方法进行,首先利用钢筋分离模型 GBESO 寻得最优钢筋拓扑,然后对之进行必要的归并、简化和整理,最后按照主流规范的锚固长度和构造分布钢筋的要求增加钢筋用量,完成相应的工程配筋设计。

5 结论

1)钢筋分离模型 GBESO 可以直观演化出较接近全局最优解的最优钢筋拓扑方案,为深梁等复杂受力构件的配筋设计提供新的设计参考。

2)钢筋分离模型 GBESO 与经验方法设计的深梁试件都有着较高的正截面承载力,但斜截面承载力有所欠缺,从而都呈现出以剪切为主的脆性破坏形态。较经验方法设计的深梁试件,钢筋分离模型 GBESO 设计的试件更少地消耗钢筋用量,获取更高的极限承载能力。

3)钢筋分离模型 GBESO 设计的深梁试件跨中极限变形略小于经验方法设计的试件,但因其极限承载力要高得多,所以其耗能能力较强。此外,受荷

过程中裂缝数量更多,分布更密,表明其裂缝开展更充分,也从侧面证明了其良好耗能能力。这一优势的重要来源是最优钢筋拓扑解所建议的斜钢筋更接近其优化设定的满应力目标,从而实际利用率更高,也更契合构件的受力机理。

4)当前,钢筋分离模型 GBESO 对高应力水平下应力重分布现象的应对能力还有待加强,以期日后可利用来实现深梁延性设计的目标。此外,该方法的设计结果不太利于现场施工,但装配式建筑的工厂化预制构件可以为这方面提供便利。

参考文献:

- [1] 混凝土结构设计规范(2015版): GB 50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
Code for design of concrete structures (the 2015 Edition): GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [2] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318-14 [S]. Michigan, USA: American Concrete Institute, 2014.
- [3] PATIL S S, SHAIKH A N, NIRANJAN B R. Experimental and analytical study on reinforced concrete deep beam [J]. International Journal of Modern Engineering Research, 2013, 3(1): 45-52.
- [4] SHIN S, LEE K, MOON J, et al. Shear strength of reinforced high-strength concrete beams with shear span-to-depth ratios between 1.5 and 2.5 [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 549-556.
- [5] OH J, SHIN S. Shear strength of reinforced high-strength concrete deep beams [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(2): 164-173.
- [6] EL-SAYED A K, EL-SALAKAWY E F, BENMOKRANE B. Shear strength of fibre-reinforced polymer reinforced concrete deep beams without web reinforcement [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2012, 39(5): 546-555.
- [7] MARÍ A, CLADERA A, OLLER E, et al. Shear design of FRP reinforced concrete beams without transverse reinforcement [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 57: 228-241.
- [8] ASHOUR A F, KARA I F. Size effect on shear strength of FRP reinforced concrete beams [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 60: 612-620.
- [9] 邓明科, 马福栋, 李勃志, 等. 基于修正拉-压杆模型的

- 型钢混凝土深梁受剪承载力分析[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 95-103.
- DENG M K, MA F D, LI B Z, et al. Analysis on shear capacity of SRC deep beams based on modified strut-and-Tie model [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34 (12): 95-103. (in Chinese)
- [10] NAJAFIAN H A, VOLLUM R L. Design of planar reinforced concrete D regions with nonlinear finite element analysis [J]. Engineering Structures, 2013, 51 (6): 211-225.
- [11] KWAK H G, NOH S H. Determination of strut-and-tie models using evolutionary structural optimization [J]. Engineering Structures, 2006, 28 (10): 1440-1449.
- [12] LIU X, YI W J, LI Q S, et al. Genetic evolutionary structural optimization [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(3): 305-311.
- [13] 刘霞, 张鹄志, 易伟建, 等. 钢筋混凝土开洞深梁拉压杆模型方法与经验方法试验对比研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(7): 139-147.
- LIU X, ZHANG H Z, YI W J, et al. Testing comparison between strut-and-tie model method and empirical method for RC deep beams with openings [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7): 139-147. (in Chinese)
- [14] ZHANG H Z, LIU X, YI W J. Reinforcement layout optimisation of RC d-regions [J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(7): 979-992.
- [15] ZHANG H Z, LIU X, YI W J, et al. Performance comparison of shear walls with openings designed using elastic stress and genetic evolutionary structural optimization methods [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2018, 65(3): 303-314.
- [16] XIA L, XIA Q, HUANG X D, et al. Bi-directional evolutionary structural optimization on advanced structures and materials: a comprehensive review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2018, 25(2): 437-478.
- [17] 仇一颗, 刘霞, 林云. 钢筋混凝土简支深梁压杆-拉杆模型试验对比分析[J]. 建筑结构, 2012, 42(1): 91-96.
- QIU Y K, LIU X, LIN Y. Experimental study on simply supported reinforced concrete deep beams of strut-and-Tie models [J]. Building Structure, 2012, 42 (1): 91-96. (in Chinese)
- [18] 刘立渠, 王娟娟, 韩继云, 等. 钢筋混凝土简支深梁静力性能试验研究及拉压杆模型分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 137-143.
- LIU L Q, WANG J J, HAN J Y, et al. Research on strut-and-Tie model based on tests of simply supported reinforced concrete deep beams [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 137-143. (in Chinese)

(编辑 胡玲)