

文章编号:1673-9469(2016)03-0067-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2016.03.014

## 改进叠合板式剪力墙受力性能分析

张文莹,余少乐

(同济大学 土木学院,上海 200092)

**摘要:**叠合剪力墙结构是一种新型的装配式结构,适应建筑工业化生产的要求,在建筑领域运用越来越广泛。现场常用的叠合剪力墙有两种形式,一种是边缘构件现浇的叠合墙体,一种是边缘构件预制的叠合墙体。边缘构件预制的叠合剪力墙施工更加方便,工厂化生产更具有优势,因此更加值得推广。针对边缘构件预制的叠合墙体,本文提出了一种改进形式。基于 OpenSEES 采用对改进后的叠合板式剪力墙的受力性能进行模拟。模拟结果表明,改进的叠合剪力墙不仅能够提高叠合剪力墙的极限承载力,还能够增强墙叠合剪力墙界面抗剪能力。

**关键词:**建筑工业化;叠合剪力墙;改进构造;OpenSEES

中图分类号:TU375;TU312

文献标识码:A

## Mechanical performance analysis of the structural improved superimposed shear walls

ZHANG Wenying, YU Shaole

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The superimposed shear wall is a new assembly-type RC structure, it has been found more and more applications in building construction because of its adaptation to building industrialization. There are two common forms of superimposed shear wall; the superimposed shear wall with prefabricated boundary element and with cast-in-situ boundary element. The superimposed shear wall with prefabricated boundary element is more convenient to the construction than superimposed shear wall with cast-in-situ boundary element. The superimposed shear wall with prefabricated boundary element is of much more practical value in actual production. The structural improvement of superimposed shear wall is proposed. A simulation with OPENSEES finite element software was given to analyze the behavior of improved superimposed shear wall. The analysis shows that the improved superimposed shear wall not only has higher ultimate bearing capacity than unimproved superimposed shear wall, but also increases shear capacity of the interface of new-to-old concrete.

**Key words:** building industrialization; superimposed shear wall; structural improvement; OpenSEES

建筑工业化是目前国家大力推行的绿色建筑改革方式,建筑构件在工厂里流水线式制作,运至现场进行拼装,不仅能够节省大量的劳动力,而且施工现场能够减少建筑垃圾、改善施工场地及周边的环境。叠合剪力墙是预制装配式结构中一种新的产品,它融合了预制构件和现浇构件的特点,既能够工厂化生产,又保留了现浇结构整体性的优点。因此受到越来越多的关注。现在施工现

场的叠合剪力墙有两种常用的形式,一种是边缘构件现浇的叠合墙体,一种是边缘构件预制的叠合墙体。边缘构件预制的叠合剪力墙施工更加方便,工厂化生产更具有优势,因此更加值得推广。目前国内外针对叠合剪力墙开展了一系列的研究工作<sup>[1-6]</sup>,但对构造形式研究的还较少。本文利用 OpenSEES 程序对改进的边缘构件预制的叠合剪力墙的受力性能进行分析。

收稿日期:2016-04-07

基金项目:上海市科委重大课题(14DZ1202100)

作者简介:张文莹(1987-),女,陕西西安人,博士研究生,研究方向薄壁钢结构、装配式结构。

### 1 叠合剪力墙的制作过程

叠合板式剪力墙的工厂化制造过程一般如下:首先在工厂模板上摆放受力钢筋及预埋件,然后浇筑一侧的混凝土,养护后再在模板上浇筑另一侧混凝土,使用翻转机将已经养护好的墙板压进混凝土中,养护后运到指定场地堆放。

改进模型的思想是用箍筋和竖向钢筋构成的连接钢筋替代桁架钢筋,文献[6]中证明了叠板式剪力墙中的桁架钢筋不仅起连接作用,边缘构件处桁架钢筋还参与受力。因此采用暗柱形式的连接方式不仅增加了边缘构件中竖向钢筋数量,还能够增强墙叠合剪力墙界面抗剪能力。

### 2 基于 OpenSEES 的叠合板式剪力墙非线性有限元分析

利用开源程序 OpenSEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation),采用两种不同模型对叠合板式剪力墙进行模拟。第一种是考虑弯曲剪切耦合的模型,第二种是模型是纤维截面模型。首先通过对文献[1]中原模型(W3)进行模拟,模拟结果和试验的对比,验证有限元模型的正确性,进而分析改进模型。对比改进模型分析结果和原模型分析结果,分析改进模型的特点。

#### 2.1 考虑弯曲 - 剪切耦合模型

为了考虑剪力墙结构受力过程中的弯曲和剪切相互作用的效果,Orakcal 提出了一个分析模型<sup>[7]</sup>,通过多垂直单元模型中添加转动弹簧的方法考虑剪力墙的面内受力性能。这个可以考虑弯剪耦合模型是在 Petrangeli et al. 提出的多垂直杆单元方法上通过对 MVLEM 模型中每一个竖向杆单元添加一个剪切弹簧,这时竖向杆单元就能够表达剪力墙面内受力行为,具有壳单元的属性。如图 1 所示。

##### (1) 单元模型

在 OpenSEES 中纤维模型是最常用的,Orakcal et al. 在 Displacement - Based Beam - Column 单元基础上进行改进,提出了可以考虑弯剪耦合模型的 dispBeamColumnInt 单元,这个单元只能用于二维的单调加载分析,不能用于模拟剪力墙在低周反复荷载作用下的受力行为。

##### (2) 材料模型

Orakcal et al. 创建了 concrete06 本构模拟混凝土,

concrete06 本构通过引入受压软化参数和受拉硬化参数,可以考虑混凝土双轴受压软化和受拉硬化效应。Concrete06 本构如图 2 所示,受压骨架曲线采用的是 Thorenfeldt - based 曲线。钢筋通过 Steel02 本构来模拟,Steel02 本构是基于 Giuffre - Menegotto - Pinto 的修正模型,如图 3 所示,能够考虑钢筋等向应变硬化影响,还可以很好的反映包兴格效。

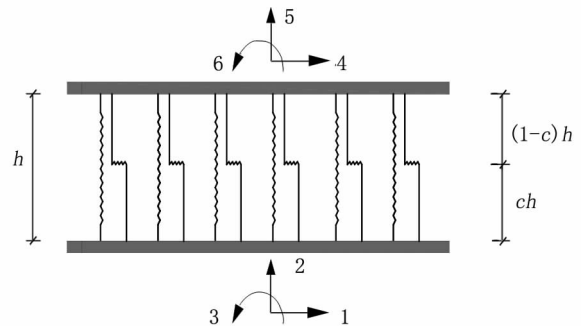


图 1 弯曲 - 剪切耦合元模型

Fig. 1 Flexure-shear interaction model

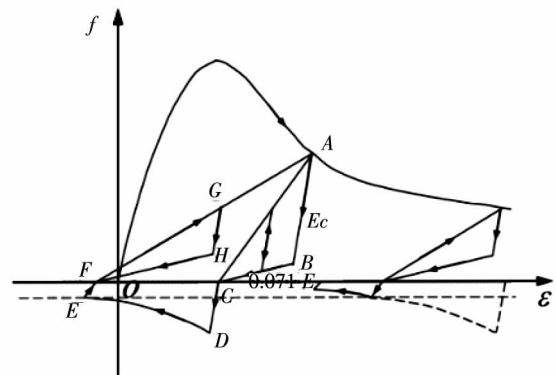


图 2 Concrete06 本构

Fig. 2 Constitutive model of Concrete06

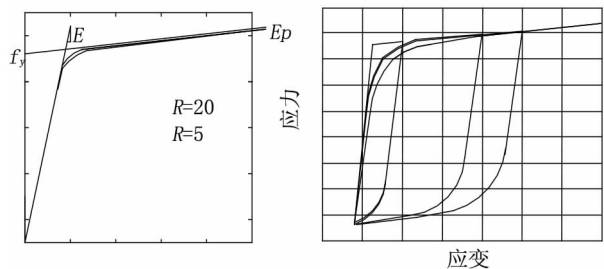


图 3 Steel02 本构模型

Fig. 3 Constitutive model of Steel02

##### (3) 截面模型

Orakcal et al. 在 OpenSEES 中添加了一个称为“FiberInt”的修正纤维截面,这个截面分成许多条带(strips),每一个条带由代表钢筋和混凝土的竖向纤维和代表水平钢筋的水平纤维来表示,如图 4

所示。

(4)分析结果

沿着剪力墙高度分成 10 个单元,每个单元有 15 个条带。分析过程分两步,第一步添加竖向压力,分成十个荷载步完成;第二步施加单调的水平荷载,位移增量为 0.5 mm。对原模型的叠合剪力墙的模拟结果和试验的骨架曲线对比见图 5。

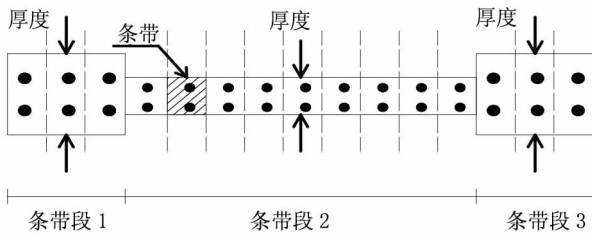


图 4 单元截面模型

Fig. 4 Element section modeling

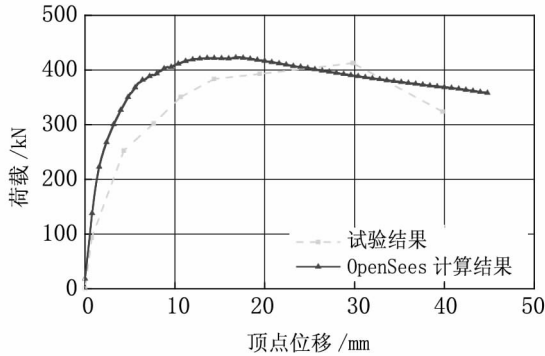


图 5 荷载 - 位移曲线

Fig. 5 Load-deformation curve

从上面的分析结果可以看出,考虑弯曲 - 剪切耦合模型在 0.1 轴压比预测叠合剪力墙的极限承载力上可以达到很好的效果。叠合构件 W-3 的试验测得的极限承 412 kN, OpenSEES 模拟结果为 423 kN, 二者相差 2.7%。模拟结果表明,弯曲 - 剪切耦合模型能够准确的预测叠合剪力墙的极限承载力。对改进后的叠合剪力墙进行模拟,其替代桁架钢筋的暗柱中的竖向钢筋直径取 6 mm, 保持与 W-3 中桁架钢筋中竖向钢筋直径一致。模拟结果如上图 6 所示,改进后的叠合剪力墙极限承载力为 436.4 kN, 未改进的叠合剪力墙为 423 kN, 二者相差很小。其原因是在低轴压比下,受压区高度较小,改进后的叠合墙中边缘构件和原来的叠合墙边缘构件相比竖向钢筋面积只多了 28.3 mm<sup>2</sup>。增大暗柱钢筋直径到 10 mm, 其模拟结果如上图 7 所示。对比结果显示,增大起连接作用的暗柱竖向钢筋直径到 10 mm, 叠合剪力墙的极限承载力为 521 kN, 未改进的叠合剪力墙为 423 kN, 提高了 23.2%。

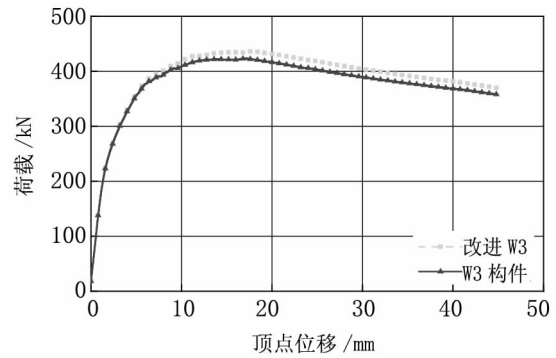


图 6 钢筋直径 6 mm 荷载 - 位移曲线

Fig. 6 Load-deformation curve of 6mm bar diameter

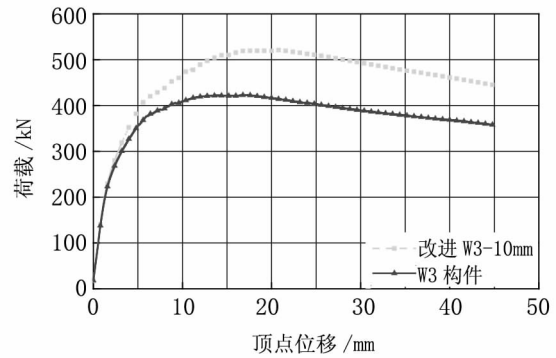


图 7 钢筋直径 10 mm 荷载 - 位移曲线

Fig. 7 Load-deformation curve of 10mm bar diameter

2.2 纤维截面模型

OpenSEES 中纤维截面模型,最早是由 Taucer et al. 开发了,是目前模拟框架结构和剪力墙结构静力和动力性能使用最为广泛的方法之一。在这个模型中,沿着截面分成很多混凝土纤维和钢筋纤维,分别赋予钢筋纤维和混凝土纤维各自的单轴本构。如图 8 所示。

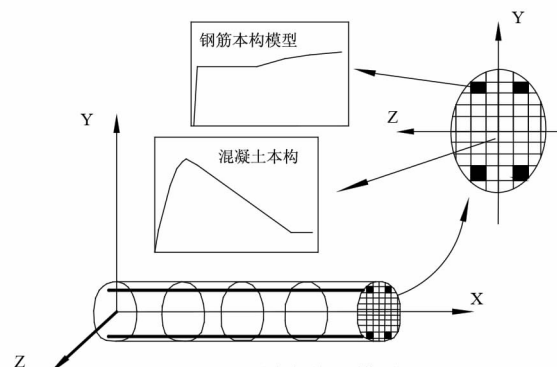


图 8 纤维截面模型

Fig. 8 The section fiber model

(1)单元模型

纤维截面模型中有基于刚度的纤维模型和基于柔度的纤维模型,基于刚度的纤维模型把单元划分为若干个积分区段,积分点处截面的位移通

过3次 Hermit 多项式差值求得,在线性和近似线性的响应下可以得到较为准确的结果,局限于3次差值函数,在不能很好的描述非线性行为,要到达需要的效果,需要在非弹性区域使用非常细的划分;基于柔度的纤维模型,同样把单元划分为若干个区段,积分点处的截面力通过线性差值求得,在模拟弯曲型梁柱构件时,可以达到很好的收敛效果,在混凝土构件非线性分析时能到取得理想的效果。

## (2) 材料模型

Concrete01 本构受压骨架曲线采用的是修正的 Kent - Park 模型,没有考虑混凝土的受拉力学性能。受压骨架曲线分为三段:上升段、下降段和平台段。钢筋通过 Steel02 本构来模拟。

## (3) 剪切变形

由于纤维单元无法指定抗剪刚度,因此无法考虑剪力的影响。在 OpenSEES 中通过截面组装 (Section Aggregator),将定义的抗剪本构与纤维截面进行组装以考虑剪切变形的影响。为了考虑剪切滞回性能,剪力墙的剪切本构选用 Hiroswa 经验公式<sup>[8]</sup>,使用 Hysteretic 材料来描述。

## (4) 分析结果

沿着剪力墙高度分成10个单元,分析过程分为两步,第一步添加竖向压力,分成十个荷载步完成。第二步施加单调的水平荷载,位移增量为5mm。对未改进叠合剪力墙在0.1轴压比下的模拟结果和试验对比如图9所示。

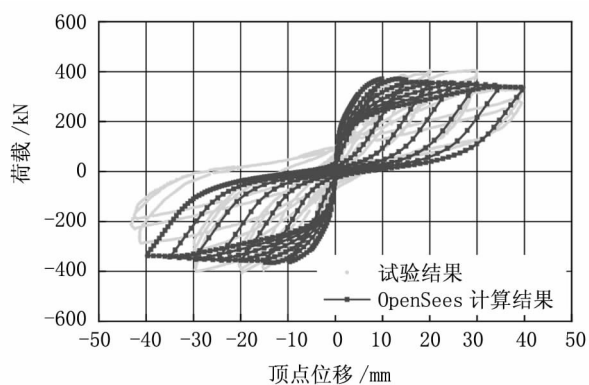


图9 荷载-位移曲线

Fig.9 Load-deformation curve

从以上的分析可知,基于柔度法的纤维单元在0.1轴压比下模拟叠合剪力墙在低周反复荷载作用下的强度降低,刚度退化和捏拢效应,均能够取得较好的效果。叠合构件的极限承412 kN, OpenSEES 模拟结果为371.8 kN,二者相差9.7%。纤维截面模型在0.1轴压比下模拟现浇剪力墙和

叠合剪力墙的极限承载力和试验误差在10%以内,证明模型能够准确的模拟叠合剪力墙的滞回特性。对改进后的叠合剪力墙进行模拟,其替代桁架钢筋的暗柱中的竖向钢筋直径取6mm,保持与W-3中桁架钢筋中竖向钢筋直径一致。模拟结果如上图10所示,改进后的叠合剪力墙极限承载力为387.4 kN,未改进的叠合剪力墙为371.8 kN,二者相差4.2%。增大起连接作用的暗柱竖向钢筋直径到10mm,其模拟结果如上图16所示。对比结果显示,增大起连接作用的暗柱钢筋直径到10mm,叠合剪力墙的极限承载力为444 kN,未改进的叠合剪力墙为371.8 kN,提高了19.4%。

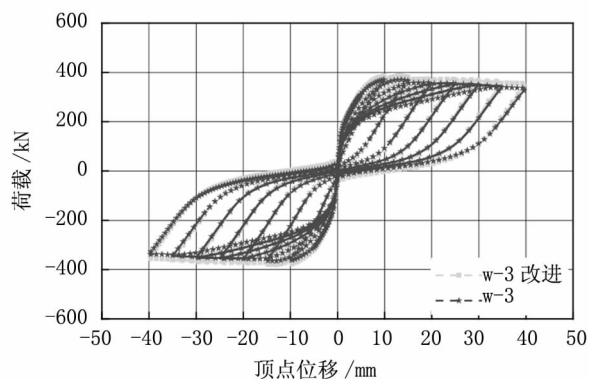


图10 直径6 mm下荷载-位移曲线

Fig.10 Load-deformation curve of 6 mm bar diameter

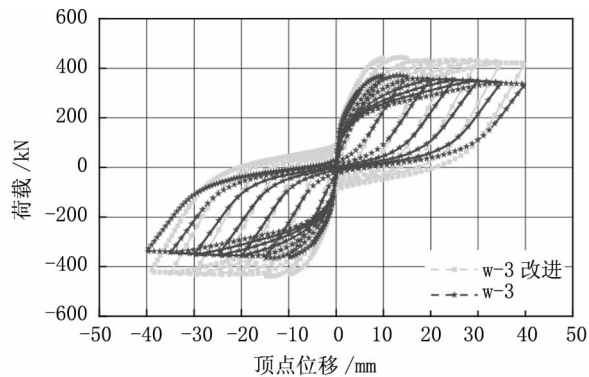


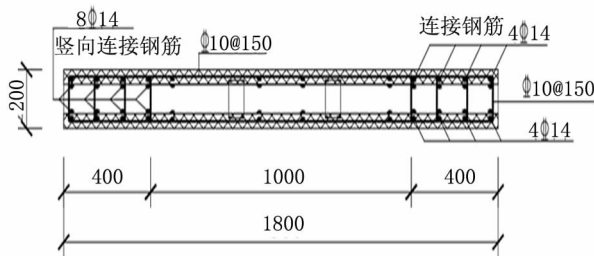
图11 直径10 mm下荷载-位移曲线

Fig.11 Load-deformation curve of 10 mm bar diameter

## 3 高轴压比下分析

在文章[6]中论证了边缘构件预制的叠合墙在高轴压比下承载力更具有优势,因此进一步考察改进后的构件在高轴压比下的抗震性能。《高层建筑混凝土结构技术规程》7.2.14条规定:一、二、三级剪力墙底层墙肢截面的轴压比大于规定时,应在底部加强部位及相邻上一层设置约束边

缘构件。约束边缘构件满足规程 7.2.15 条的要求,其体积配箍率  $\rho_v = \lambda_w f_c / f_{yv}$ ,并且剪力墙约束边缘构件阴影部分的竖向钢筋除了应该满足正截面受压承载力计算外,其配筋率一、二、三级时分别不应小于 1.2%、1.0% 和 1.0%,并分别不少于 8 16、6 16、6 14 的钢筋。而试件 W-3 边缘构件中竖向钢筋的配筋率为 0.39%。W-3 剪力墙中竖向和水平分布钢筋的配筋分别为 0.15%、0.39%。不满足《高层建筑混凝土结构技术规程》7.2.17 条规定:一、二、三级剪力墙竖向和水平分布钢筋的配筋率不应小于 0.25% 的要求。未改进的 W-3 构件,由于桁架钢筋改动麻烦因此配筋很难满足要求。而改进构件采用箍筋和竖向钢筋构成的暗柱形式的连接钢筋,配筋易于改动。因此对改进后的 W-3 构件配筋情况进行改进,将约束边缘构件中的所有竖向钢筋改为直径 14 mm,中间分布钢筋并不改动,如下图 12 所示。



注:▨表示预制混凝土

图 12 高轴压比下改进构件配筋情况

Fig. 12 Structural details of improved superimposed shear wall under high axial-load ratios

改进后的试件 W-3 边缘构件中竖向钢筋的配筋率分别为 1.54%,竖向和水平分布钢筋的配筋分别为 0.314%、0.5%。满足《高层建筑混凝土结构技术规程》7.2.17 条规定,一、二、三级剪力墙竖向和水平分布钢筋的配筋率不应小于 0.25% 的要求。使用纤维截面模型,改进后的构件在 0.4 和 0.5 高轴压比下的滞回特性见图 13、图 14。

从上面的分析可以看出,改进后的构件在高轴压比下的滞回环较未改进的构件饱满。改进后的 W-3 构件在 0.4 轴压比下的极限承载力为 997.124kN,未改进的构件极限承载力为 773 kN,提高了 29%;在 0.5 轴压比下改进后的 W-3 构件极限承载力为 1076.81 kN,未改进的构件极限承载力为 859.492 kN,提高了 25.3%。由于未改进的 W-3 构件中配筋没有增加,导致了高轴压比下和改进的构件极限承载力相差较多。

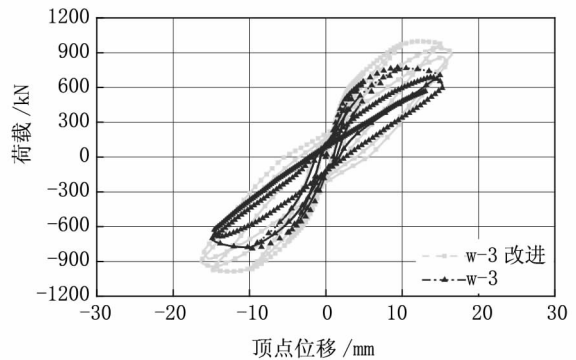


图 13 0.4 轴压比下荷载 - 位移曲线

Fig. 13 Load-deformation curve under 0.4 axial compression ratio

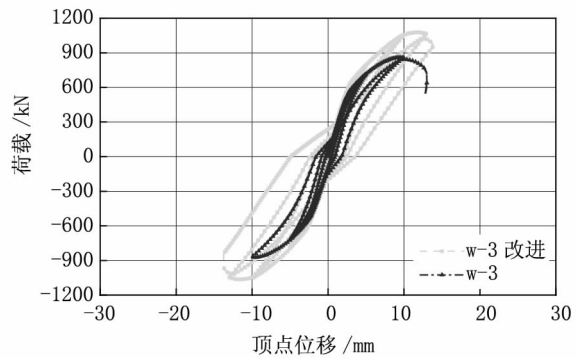


图 14 0.5 轴压比下荷载 - 位移曲线

Fig. 14 Load-deformation curve under 0.5 axial compression ratio

#### 4 结论

1) 用箍筋和竖向钢筋构成的暗柱替代桁架钢筋,不仅能够提高叠合剪力墙的极限承载力,还能够增强墙叠合剪力墙界面抗剪能力。

2) 用箍筋和竖向钢筋构成的暗柱替代桁架钢筋,不仅方便施工,而且增大起连接作用的暗柱中的竖向钢筋直径到 10mm,不同模型下的分析结果均表明叠合剪力墙的极限承载力较未改进的叠合剪力墙提高在 10% 以上。

3) 在高轴压比下,改进的叠合剪力墙形式更具有优势,承载力提高幅度更大。

#### 参考文献:

[1] 连星. 叠合板式剪力墙的抗震性能实验分析及理论研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.  
 [2] 张伟林,沈小璞,吴志新,等. 叠合板式剪力墙 T 型, L 型墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29 (6): 196-201  
 [3] 王滋军,刘伟庆,叶燕华,等. 钢筋混凝土开洞叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构(下转第 75 页)

### 3.3 波形钢腹板抗剪强度验算

运行 Midas/Civil 有限元软件,可以得到钢腹板在持久状况下的剪力包络图,如图 6 所示。

本桥钢腹板采用 Q345 钢材,由于钢板厚度不同,取腹板厚度为 18 mm 时得到的钢材最小容许剪应力为 170 MPa,大于箱梁桥腹板实际的最大剪应力值 127.3 MPa,所以波形钢腹板能够满足抗剪强度的要求。

## 4 结论

1) 承载能力极限状态下箱梁桥能够满足正截面抗弯和斜截面抗剪的要求。

2) 正常使用极限状态荷载短期效应组合下,箱梁桥正截面和斜截面满足抗裂的要求。

3) 1.3 倍公路 - I 级荷载作用下,箱梁桥的最大挠度能够满足规范限值的要求。

4) 持久状况下箱梁桥钢腹板的抗剪能力能够满足对腹板抗剪强度的要求。

### 参考文献:

- [1] 闫鹏. 波形钢腹板 PC 组合弯箱梁桥力学性能研究 [D]. 西安:长安大学,2011.
- [2] 栗国君. 波形钢腹板 PC 组合连续箱梁桥的静动力特性分析研究 [D]. 成都:西南交通大学,2010.
- [3] 顾安邦,徐君兰. 波形钢腹板组合箱梁桥的结构与受力分析 [J]. 重庆交通学院学报,2005,24(2):30-32.
- [4] 宋建永,张树仁,王宗林. 波纹钢腹板体外预应力组合梁全过程分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,30(3):52-55.
- [5] 陈宝春,黄卿维. 波形钢腹板 PC 箱梁桥应用综述 [J]. 中国公路学报,2012,12(4):28-31.
- [6] JTG D60-2015,公路桥涵设计通用规范 [S].
- [7] 仁顺,李文虎,任大龙. 波形钢腹板 PC 组合连续箱梁桥有限元静力分 [J]. 中国公路学报,2013,3(2):17-21.
- [8] 窦胜谭. 波形钢腹板连续刚构桥 PBL 剪力键试验与理论研究 [D]. 成都:西南交通大学,2014.

(责任编辑 王利君)

(上接第 71 页)

学报,2012,33(7):156-163.

[4] 叶燕华,孙锐. 预制墙板内现浇自密实混凝土叠合剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报,2014,35(7):138-144.

[5] BCNAYOUNG A, SAMAD A A A. Structural behaviour of eccentrically loaded precast sandwich panels Construction and Building Materials,2006,20(9):713-724.

[6] 杨联萍,余少乐,张其林,等. 不同轴压比下叠合板式剪力墙结构抗震性能分析 [J]. 振动与冲击,2016,35(9):227-239.

[7] ORAKCAL, K., MASSONE, L. M. WALLACE, J. W. Analytical modeling of reinforced concrete walls for predicting flexural and coupled shear - flexural responses [R]. PEER Report 2006/07, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, October 2006.

[8] ALFONSO VULCANO, VITELMO V. bertero. Analytical models for predicting the lateral response of RC shear walls evaluation of their reliability [R]. Report No. UCB/EERC,1987.

(责任编辑 李军)