

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.04.022

# 有无预应力内置压型钢板装配式 宽连梁抗爆性能研究

周文君,李令令,聂红鑫  
(吉林建筑科技学院,吉林 长春 130000)

**摘要:**通过对内置压型钢板装配式宽连梁抗爆能力与预加截面压应力影响关系研究,总结出通过施加预应力优化连梁抗爆性能的合理方案。分别建立无预应力及施加预应力下的宽连梁有限元模型,进行相同爆炸荷载下的数值模拟,对比无预应力下及施加不同截面预压力情况下的宽连梁损害程度。结果表明:爆炸冲击作用下,施加预应力能够有效的提升宽连梁的抗爆性能;截面预压力值不断增加的过程中,抗爆能力先随之提升,然后降低;截面预压力过大会加速宽连梁在爆炸荷载下的破坏。计算结果表明适当的施加预应力是提升内置压型钢板装配式宽连梁抗爆能力的有效手段。

**关键词:**宽连梁;装配式;抗爆;预应力;有限元

**中图分类号:** TU317

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2020)04—0134—04

## Anti Explosion Performance of a Prestressed Wide Coupling Beam in Steel Plates

ZHOU Wenjun, LI Lingling, NIE Hongxin

(Jilin University of Architecture and Technology, Changchun, Jilin 130000, China)

**Abstract:** The wide coupling beam of prestress and common built-in steel plates has good seismic performance and general antiknock ability. Prestress can improve the anti-knock performance through the research of influence that explosion and prestress, the reasonable scheme on the antiknock performance of coupling beam is summarized. The finite element model is established which is exerted prestress or not to compare the damage degree of wide coupling beam under the condition of common and different prestress. The results are as follows. Under the impact of explosion, prestress can effectively improve the antiknock performance of wide coupling beam. With the increase of prestress, the antiknock ability first increases and then decreases. If the wide coupling beam is exerted excessive prestress, the damage will be aggravated. The conclusion shows that the appropriate prestress is an effective means to ensure the antiknock ability of the built-in profiled steel plate assembly wide coupling beam.

**Keywords:** wide coupling beam; prefabricated; antiknock; prestress; finite element

大量工程实践及科学试验表明宽连梁具有增大梁剪压区范围、提高跨高比值,优化结构的整体性能的特性。装配式体系引进宽连梁构件,既能显著提高建筑预制装配化程度,又能充分发挥剪力墙-宽连梁的结构优势<sup>[1-3]</sup>。

针对现有技术存在的问题,沈阳建筑大学孙丽教授提出一种内置压型钢板凹槽结构的装配式宽连梁构件,图1为此宽连梁的装配形式以及多连梁构

造的装配形式。预制时,将压型钢板围成的U型凹槽作为内模板,预制完成的宽连梁两端形成“凹槽结构”且宽度应大于预制剪力墙板。装配时将预制连梁宽梁吊装剪力墙预留的连梁卡位,钢筋穿过凹槽浇筑混凝土,成为一种新型混合联肢墙体系。自内置压型钢板装配式宽连梁-剪力墙结构提出以来,孙丽教授已经在其他各方面做了充分研究。

笔者在研究箍筋对内置压型钢板装配式宽连梁

- 剪力墙抗爆性影响时发现,其连梁破坏初期多由混凝土抗拉能力差导致,施加截面预压力能有效改善抗拉能力不足的缺点。基于此,笔者应用基于 HyperMesh 的专业爆破前处理插件 TCE (TechChat - Exploding, TCE) 建立了内置压型钢板装配式宽连梁 - 剪力墙结构流 - 固耦合有限元模型,应用 Ls - Dyna 的显示求解功能,在相同爆炸荷载下改变截面预应力值,对内置压型钢板装配式宽连梁抗爆性与预应力的影响关系进行研究。

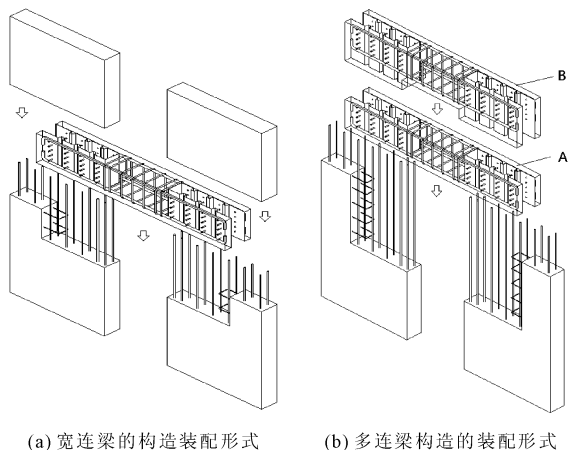


图1 内置压型钢板凹槽结构的装配式宽连梁

## 1 材料模型

本数值模拟中,炸药 TNT 特性应用 Ls - Dyna 求解器封装材料库提供的 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSION\_VE\_BURN 材料模型,结合 \* EOS\_JWL 状态方程模拟;空气特性应用 Ls - Dyna 求解器封装材料库提供的 \* MAT\_NULL 空材料模型,并结合 \* EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程模拟<sup>[4-6]</sup>。

### 1.1 混凝土材料模型

本数值模拟中,混凝土 C40 特性应用 Ls - Dyna 求解器封装材料库提供的 \* MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE 模型(简称 HJC)进行模拟。其中 HJC 模型针对求解爆炸冲击荷载,这种会引起材料产生大应变、高应变率等的工况极为合适。HJC 模型是以累积塑性应变为衡量标准的损伤本构关系模型,具有反应压力效应及应变率的敏感属性,其特性应用于 Lagrange 和 Euler 单元的有限元计算中非常合适<sup>[7]</sup>。模型中等效屈服强度变量是标准压力、应变和损伤变量相关联的函数。其中标准压力变量又是体积应变变量的函数,即包含压实效应,累积损伤是塑性体积应变、等效体积应变和压力变量相关的函数。材料等效屈服强度计算公式如下<sup>[8-9]</sup>:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}][1 - \ln(\dot{\epsilon}^*)] \quad (1)$$

式中: $\sigma^*$  为等效屈服强度; $P^*$  为标准化压力; $\dot{\epsilon}^*$  为无量纲应变率; $D$  为( $0 \leq D \leq 1$ )混凝土材料模型中的损伤因子。

### 1.2 钢筋材料模型

钢筋为应变率十分敏感的各向同性材料,与受静力荷载不同,钢筋在高应变率爆炸荷载的作用下会发生极速的材料变形,故对于模拟钢材的动态特性,笔者选用 Ls - Dyna 求解器封装材料库提供的 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATI 非线性材料模型模拟,该材料模型考虑了应变率效应对应力的影响,适用于模拟具有各向同性和塑性随动硬化特性的材料,有效节约计算时间,在梁单元和壳单元中计算优势更明显。\* MAT\_PLASTIC\_KINEMATI 材料模型应用 Cowper - Symonds 关系来考虑和应变率有关的影响,采用与应变率的有关因数描述屈服应力<sup>[10]</sup>:

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^P \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (2)$$

式中: $1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^P$  为屈服应力缩放因子; $\dot{\epsilon}$  为应变率; $\sigma_0$  为初始屈服应力; $C$ 、 $P$  为 Cowper - Symonds 模型应变率参数; $\beta$  为硬化参数; $\epsilon_p^{eff}$  为塑性有效应变; $E_p$  为硬化塑性模量。

## 2 有限元分析模型

### 2.1 构造及材料

内置压型钢板装配式宽连梁 - 剪力墙尺寸、钢筋分布及炸药几何尺寸,见图 2。构件箍筋及纵筋采用 HRB400 级钢筋,参数见表 1;混凝土采用 C40 级混凝土,参数见表 2。其中,预应力钢筋公称直径为 25 mm,屈服强度 785 MPa,其他参数参照 HRB400 级钢筋,见表 1;TNT 炸药体积  $60 \text{ mm} \times 180 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$  ( $\text{LB} - 1 = 60 \text{ mm}$ 、 $\text{LB} - 2 = 180 \text{ mm}$ 、 $\text{LB} - 3 = 120 \text{ mm}$ )<sup>[11-15]</sup>。

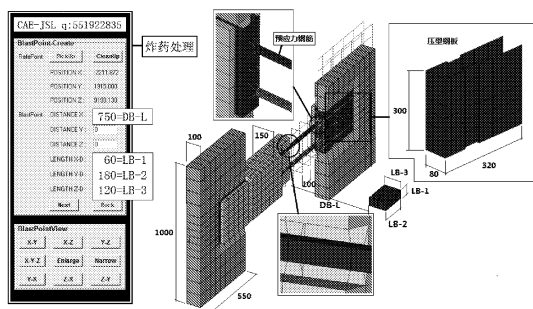


图2 模型尺寸及钢筋分布(单位:mm)



混凝土损伤程度最轻。0.47 s 时钢筋骨架达峰值位移 1.66 mm,见图 5。

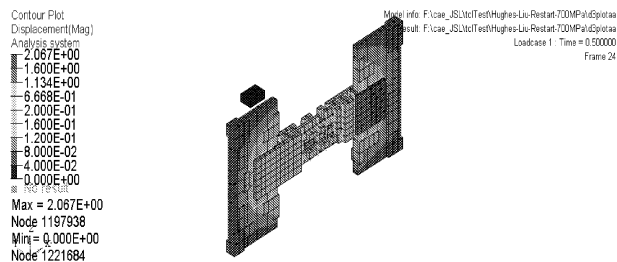


图6 截面预压力 1 400 MPa 宽连梁位移云图

(4) 截面预加压力 1 600 MPa 时,爆炸全过程中未出现混凝土梁截面贯穿损伤,0.34 s 后爆炸冲击不再引起宽连梁进一步损伤,混凝土单元损伤量占混凝土单元总量 39.83%,见表 3,表明混凝土损伤程度较轻。0.49 s 时钢筋骨架达峰值位移 2.35 mm,见图 5。

截面预加压力可以有效改善内置压型钢板宽连梁的抗爆性能。延长宽连梁达到最终破坏的时间,降低混凝土的损伤程度,减弱钢筋骨架在爆炸荷载下的位移变形。但是预加截面压力值应该在一定范围内,如本例截面预加压力小于 1 000 MPa 时,未能明显改善宽连梁抗爆性能;大于 1 600 MPa 后又开始不利于宽连梁抗爆性能提升。

### 3.3 有无预应力抗爆性对比

由表 3 中失效单元占比数知,施加截面预加压力的内置压型钢板装配式宽连梁抗爆能力总体强于同规格的普通宽连梁。初始预应力值在 1 400 MPa 时抗爆能力提升到顶峰。

施加截面预加压力,大幅度改善普通宽连梁在爆炸荷载下的脆性特性。减少混凝土单元损伤量的同时,延缓终止破坏时间达无预应力宽连梁的近 10 倍。

施加截面预加压力,一定程度上改善宽连梁钢筋骨架在爆炸荷载下的变形程度。由图 5 可知,骨架位移-时间曲线,预加压力 1 000 MPa 时,出现几条钢筋骨架位移曲线的位移幅值最大值,同时振动幅度最大;随着预加压力增加至 1 200 MPa ~ 1 400 MPa 范围内,位移幅值变小,位移振动幅度也下降,振动趋于稳态;随着施加预加压力值的继续加大,位移幅值逐步增加,振动幅度也有所提高。

## 4 结论

(1) 采用预应力技术,可以一定程度上提升内置压型钢板宽连梁抗爆性能。

(2) 改善内置压型钢板宽连梁在爆炸荷载下的脆性弱点,可以通过预应力技术达到目的。

(3) 采用预应力技术改善内置压型钢板宽连梁抗爆性能时,截面预压力值应该控制在一定范围内,预压力值过高或过低,都可能达不到预期效果,预加压力最适控制在 1 200 MPa ~ 1 400 MPa 范围。

### 参考文献:

- [1] 赵唯坚,钟全,贾连光,等. 装配式混凝土框架剪力墙结构低周往复加载分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(2):276-285.
- [2] 王向阳,林友杨,冉瑞江. SRP 材料加固钢筋混凝土的抗爆性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017,41(3):439-442.
- [3] 周清,王学武. 爆炸荷载下 RC 框架结构的破坏形态与其结构构件的动力响应[J]. 河南城建学院学报,2019,28(3):18-25.
- [4] 于小芹,杨霞林. 钢桁腹-混凝土组合箱梁偏载系数取值影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):203-208.
- [5] 周清,丁杰,张新鑫,等. 各因素对简支 T 形截面钢筋混凝土梁抗爆性能的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(1):247-254.
- [6] 娄凡. 预应力混凝土连续 T 梁的抗爆性能试验研究[D]. 南京:东南大学,2018:32-38.
- [7] 温全,周文君,李忠富,等. 外壳预制核心现浇装配式 T 型节点抗爆性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(3):394-401.
- [8] Ji X D, Wang Y D, Zhang J S, et al. Seismic behavior and fragility curves of replaceable steel coupling beams with slabs[J]. Engineering Structures, 2017, 150(4): 622-635.
- [9] 吴赛,代岩. 复式钢管混凝土柱抗爆性能影响因素研究[J]. 建筑安全,2019,34(9):62-66.
- [10] 刘晓蓬,陈健云,徐强. 混凝土重力坝爆炸荷载数值分析及抗爆性能研究[J]. 计算力学学报,2018,35(2):174-181.
- [11] Wang W Q, Wu C Q, Li J. Numerical simulation of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns under close-range blast loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2018,22(5):04018036.
- [12] Li, Hao H, Wu C Q. Numerical study of precast segmental column under blast loads[J]. Engineering Structures, 2017,134(MAR1):125-137.
- [13] Zhang F. Numerical modeling of concret-filled double-skin steel square tubular columns unde blast loading[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015,29(5):B4015002.
- [14] 任根茂,吴昊,方秦,等. 普通混凝土 HJC 本构模型参数确定[J]. 振动与冲击,2016,35(18):9-16.
- [15] 罗水华,黄文颖,吴应雄. 基于有效翼缘内板筋影响的 RC 框架结构破坏机制分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):169-174.