

DOI: 10.7672/sgjs2026100030

# 高铁站房大跨缓粘结预应力混凝土开洞梁 框架结构力学性能分析

张 扬<sup>1</sup>,熊学玉<sup>1,2</sup>,颜 阳<sup>1,3</sup>,姚懿伦<sup>4</sup>,曾 伟<sup>5</sup>

(1. 同济大学土木工程学院,上海 200092; 2. 同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室,上海 201804; 3. 中铁上海设计院集团有限公司,上海 200070; 4. 中铁北京工程局集团有限公司,北京 102308; 5. 中铁十一局集团有限公司,湖北 武汉 430061)

[摘要] 为提升建筑净高并方便设备管线穿越,某高铁站房采用大跨缓粘结预应力混凝土开洞梁框架结构,基于该项目完善了预应力开洞梁洞口区域相应的设计方法,并结合 ABAQUS 有限元分析验证了其在不同工况下的应力状态与损伤情况。结果表明:在承载力极限阶段,开洞梁由于洞口剪切效应,跨中挠度较无洞梁增加 5.6%,洞口角部和下弦杆会出现少量细裂缝;正常使用极限阶段,跨中、梁端和洞口的上、下弦处于弹性阶段,没有出现拉裂和压溃现象,洞口角部因应力集中产生拉伸损伤;多遇地震组合阶段,层间位移角满足规范要求,洞口外侧箍筋与内侧斜筋应力较大,表明上述配筋具有必要性;所提洞口区域设计方法可使预应力开洞梁的力学性能近似等效于无洞梁。

[关键词] 混凝土;框架结构;设计;荷载;应力;有限元分析

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0030-07

## Mechanical Properties Analysis of Long-span Retard-bonded Prestressed Concrete Perforated Beam Frame Structure of High-speed Railway Stations

ZHANG Yang<sup>1</sup>, XIONG Xueyu<sup>1,2</sup>, YAN Yang<sup>1,3</sup>, YAO Yilun<sup>4</sup>, ZENG Wei<sup>5</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China;

4. China Railway Beijing Engineering Group Co., Ltd., Beijing 102308, China;

5. China Railway 11th Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430061, China)

**Abstract:** To enhance the clear height of the building and facilitate the passage of equipment pipelines, a high-speed railway station building adopts a large-span, retard-bonded prestressed concrete perforated beam frame structure. Based on this project, the corresponding design method for the prestressed perforated beam opening area has been improved, and its stress state and damage under different conditions have been verified through ABAQUS finite element analysis. The results show that at the ultimate limit stage of bearing capacity, due to the shear effect at the opening, the mid-span deflection of the perforated beam increases by 5.6% compared to a beam without an opening. A small number of fine cracks appear at the corner of the opening and on the lower chord. At the serviceability limit stage, the upper and lower chords at the mid-span, beam ends, and openings are in the elastic stage, with no tensile cracking or crushing phenomena. Tensile damage occurs at the corner of the opening due to stress concentration. In the frequent earthquake combination stage, the inter-story displacement angle meets the specification requirements. The stresses in the stirrups outside the opening and the oblique bars inside are relatively high, indicating the necessity of the aforementioned reinforcement arrangement. The proposed

[作者简介] 张 扬,博士研究生,E-mail:y Zhang229521@ tongji. edu. cn

[通信作者] 熊学玉,教授,E-mail:xiong\_xueyu@ tongji. edu. cn

[收稿日期] 2025-09-05

design method for the opening area can make the mechanical properties of the prestressed perforated beam approximately equivalent to those of a beam without an opening.

**Keywords:** concrete ; frame structure ; design ; load ; stress ; finite element analysis

0 引言

为满足旅客舒适度、方便设备管线穿越、提升建筑净高,提出大跨度预应力混凝土开洞梁框架结构建造铁路客运站房(见图1)。但洞口的存在会破坏结构整体性和连续性<sup>[1]</sup>,在洞口角部易产生应力集中,导致过早开裂,影响耐久性。同时,随着洞口高度和长度的增加,梁的抗剪承载力显著下降<sup>[2]</sup>,挠度明显增加。若直接在大跨预应力混凝土框架结构的梁腹位置开洞,不采取洞口补强措施会削弱梁的强度与刚度,从而影响开洞梁在静荷载和地震作用下的受力。



图1 大跨预应力混凝土开洞梁框架结构

Fig. 1 Long-span retard-bonded prestressed concrete perforated beam frame structure

大跨预应力混凝土开洞梁框架结构具有经济上和结构性能上的优势,但关于大跨预应力混凝土开洞梁框架结构的设计规范很少,只有《混凝土结构构造手册》给出了普通钢筋混凝土开洞梁的构造措施。因此,本文针对某站房大跨缓粘结预应力混凝土开洞梁框架结构进行深入研究,进一步推广大跨缓粘结预应力混凝土开洞梁框架结构的应用。

1 工程概况

某站房综合楼候车大厅采用27m大跨缓粘结预应力框架结构,建筑结构安全等级为2级,抗震设计烈度为7度,基本地震加速度为0.165g,抗震设防重要性类别为标准设防类。设计地震分组为第2组。抗震等级为2级,建筑场地类别为IV类,场地周期为0.75s,水平地震影响系数为0.1375。

本工程中预应力开洞梁跨度为27m,梁截面尺寸为800mm×1900mm,2个洞口左、右对称布置,洞口尺寸1400mm×700mm,孔高小于0.4倍梁高,洞口位于截面略偏上布置,左、右洞口中心距轴线的距离均为7500mm,如图2所示。参考JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》:框架梁上开洞

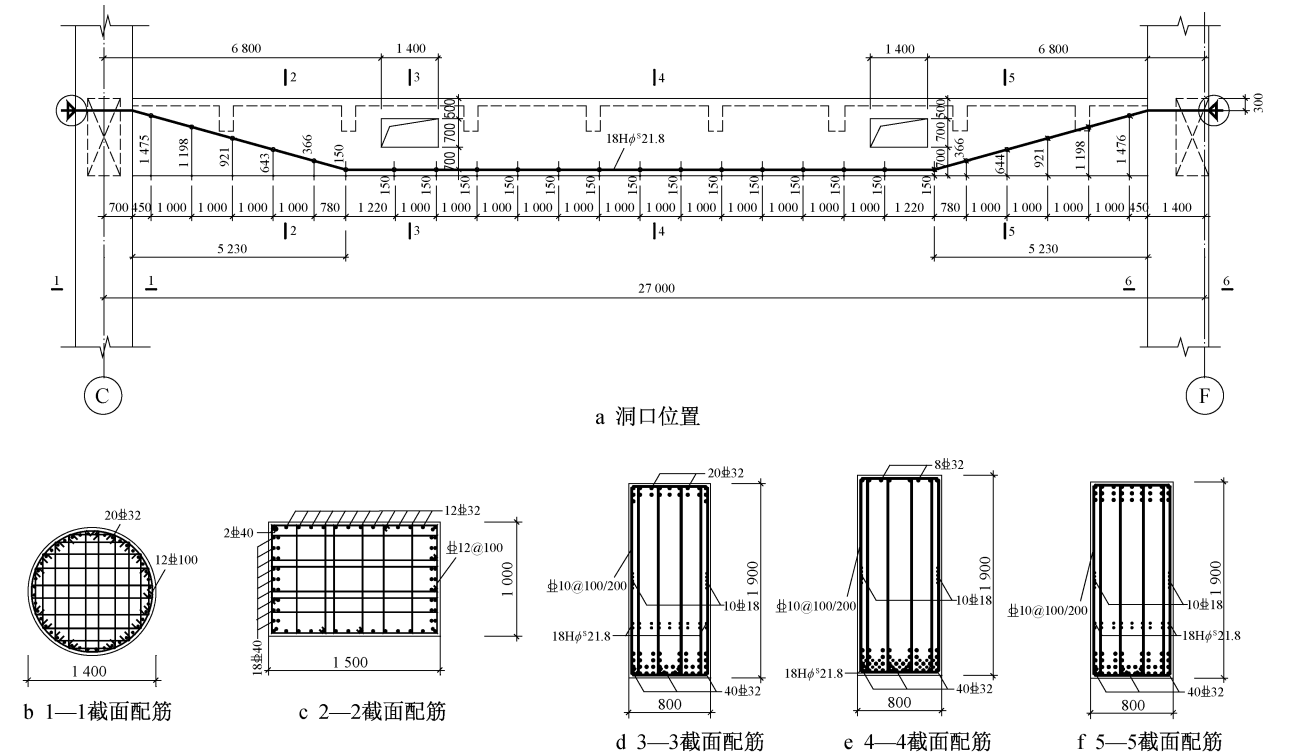


图2 开洞梁洞口位置及配筋

Fig. 2 Location and reinforcement of perforated beam openings



强度依据 Jawdhari 等<sup>[7]</sup>研究确定。

$$\sigma_t = \begin{cases} E_c \varepsilon_t & \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr} \\ f_{cr} e^{[350(\varepsilon_{cr} - \varepsilon_t)]} & \varepsilon_t > \varepsilon_{cr} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{cr} = 0.625 \sqrt{f_{co}} \quad (6)$$

损伤因子的计算方法有很多种,本文采用能量等价原理的推导公式计算损伤因子<sup>[8]</sup>。

在 CDP 模型中输入单轴混凝土应力-应变关系时,受压本构需输入非弹性应变  $\varepsilon_c^{in}$ ,而受拉本构则输入开裂应变  $\varepsilon_t^{ck}$ ,可分别通过式(7)和(8)进行转换。

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \sigma_c / E_c \quad (7)$$

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \sigma_t / E_0 \quad (8)$$

### 3.1.2 普通钢筋

普通钢筋均为 HRB400 级钢筋,屈服强度为 360MPa,弹性模量为  $2.0 \times 10^5$ MPa。在 ABAQUS 有限元软件中,普通钢筋采用理想弹塑性模型(两折线模型)。

### 3.1.3 预应力筋

预应力筋为缓粘结预应力筋,屈服强度为 1 320MPa,弹性模量为  $1.95 \times 10^5$ MPa。对于预应力钢绞线,本构关系采用常见的两折线强化模型。

### 3.2 单元类型、网格、相互作用和边界条件

有限元模型中,混凝土和钢板采用 C3D8R 单元,普通钢筋与预应力钢筋采用 T3D2 单元。混凝土单元网格取最小截面尺寸的 1/8 为网格尺寸(100mm),钢筋网格尺寸为 180mm。为避免过度约束,预应力筋的网格尺寸为 270mm。

本文模型不考虑普通钢筋与混凝土间的黏结滑移,采用 ABAQUS 中 Embed 功能定义普通钢筋与混凝土间的接触关系。施工阶段,由于缓黏结剂尚未固化,缓粘结预应力筋类似于无粘结预应力筋,采用 coupling 功能,通过释放预应力筋在切向局部坐标下的约束作用,以实现无粘结筋与混凝土间的自由滑动;无粘结筋两端则分别与混凝土 Tie 在一起的 2 个钢垫块完全耦合,以模拟锚固作用。使用阶段时,由于缓黏结剂已固化,缓粘结预应力筋类似于有粘结预应力筋,采用 Embed 功能定义预应力筋与混凝土间的接触关系。

加载点处布置与混凝土相 Tie 的钢垫块,将竖向荷载均匀施加于框架梁上,整个柱底面为固定约束。根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015 年版),现浇楼盖还应考虑楼板作为翼缘对梁刚度和承载力的影响。因此,翼缘板宽度取 3 425mm,厚 180mm,配筋为  $\phi 10@150$ (双层双向拉通)。通过在预定义场中采用降温法对缓粘结预应

力筋施加预应力,降低的温度  $\Delta t$  由式(9)确定:

$$\Delta t = \frac{\sigma}{(\alpha E_p)} \quad (9)$$

式中: $\sigma$  为预应力; $\alpha$  为预应力筋的线膨胀系数,取  $1.2 \times 10^{-5}$ ;  $E_p$  为钢绞线的弹性模量。

## 4 荷载效应组合分析

### 4.1 施工阶段 1(预应力)

施工阶段 1 完成后,预应力开洞梁有限元分析结果如图 5 所示。由图 5 可知,预应力开洞梁洞口上弦处于压缩状态,反拱为 9.7mm。相对应的预应力无洞梁反拱为 9.7mm,侧向挠度为 2.2mm,跨中混凝土应力分别为 -0.1, -4.6MPa。由此可知,预应力开洞梁在应力状态和变形状态下与预应力无洞梁相似,说明预应力开洞梁加强后,在施工阶段 1 可达到与无洞梁同样的效果。开洞梁的预应力为 1 051.1MPa,尚处于弹性阶段。除了预应力筋折线处由于应力集中现象出现了拉伸损伤(尚未开裂),开洞梁几乎没有出现拉伸损伤。

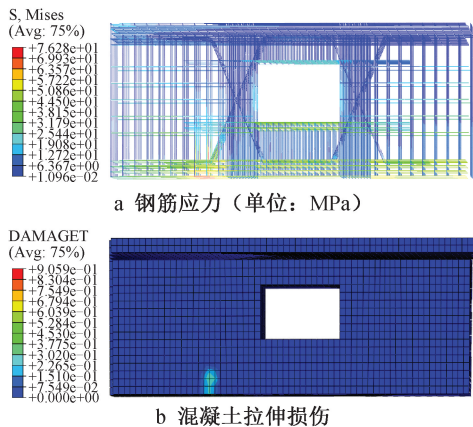


图 5 施工阶段 1 有限元分析结果

Fig. 5 Finite element analysis results of construction stage 1

### 4.2 施工阶段 2(自重、预应力和施工荷载)

施工阶段 2 完成后预应力开洞梁有限元分析结果如图 6 所示,施工荷载按  $1.5 \text{ kN/m}^2$  取值。施工阶段 2 完成后,预应力开洞梁竖向跨中挠度为 16.2mm。对应的预应力无洞梁跨中挠度为 15.6mm,侧向挠度为 3mm,跨中混凝土应力分别为 -6.3, 1.3MPa。由于洞口剪切变形的作用,开洞梁的跨中挠度较大(提高 3.8%)。因此,本文完善的洞口区域设计方法,使预应力开洞梁近似等于预应力无洞梁。预应力开洞梁跨中混凝土应力略大于预应力无洞梁。开洞梁预应力为 1 036.6MPa,尚处于弹性阶段。洞口的角部出现了一些应力集中现象。预应力开洞梁几乎没有出现压缩损伤和拉伸



损伤。预应力开洞梁预应力筋折线处和洞口角部的混凝土出现了损伤,但尚未开裂。表明预应力开洞梁经加固后,洞口区域应力状态与变形状态在施工阶段 2 是满足要求的。

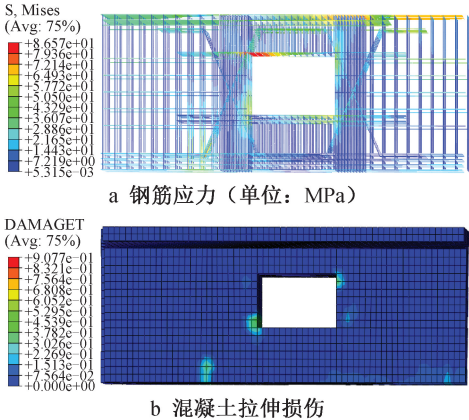


图 6 施工阶段 2 有限元分析结果

Fig. 6 Finite element analysis results of construction stage 2

4.3 正常使用极限阶段

正常使用极限阶段时预应力开洞梁有限元分析结果如图 7 所示。由图 7 可知,正常使用极限阶段时,预应力开洞梁竖向跨中挠度为 24.2mm。同时,预应力无洞梁跨中挠度为 23.2mm,侧向挠度为 2.9mm,跨中混凝土应力分别为-9.7,1.7MPa。由于洞口剪切变形的作用,预应力开洞梁跨中挠度较大(相较无洞梁提高 4.3%)。因此,本文洞口区域设计方法使预应力开洞梁近似等于预应力无洞梁。预应力开洞梁和预应力无洞梁跨中区域的混凝土应力差异性较小,混凝土尚未开裂。预应力开洞梁预应力为 1 103.1MPa,尚处于弹性阶段。由于出现了应力集中现象,钢筋应力较大。洞口角部和下弦的混凝土出现些许的拉伸损伤。这表明,预应力开洞梁加固后,正常使用极限状态下预应力开洞梁的设计是满足要求的。

4.4 承载力极限状态

承载力极限阶段时预应力开洞梁有限元分析结果如图 8 所示。由图 8 可知,承载力极限阶段时,预应力开洞梁竖向跨中挠度为 37.6mm。同时,预应力无洞梁跨中挠度为 35.6mm,侧向挠度为 4.2mm,跨中混凝土应力分别为-13.6,1.4MPa。预应力混凝土开洞梁由于刚度的削弱,跨中挠度增加了 5.6%。预应力开洞梁预应力为 1 327.3MPa。洞口角部区域出现了应力集中现象,下弦杆和洞口角部的混凝土出现了拉伸损伤,甚至出现了一些裂缝,但裂缝宽度较小。这表明,预应力开洞梁加强后,洞口区域不会形成薄弱区域,在承载力极限状态下洞口

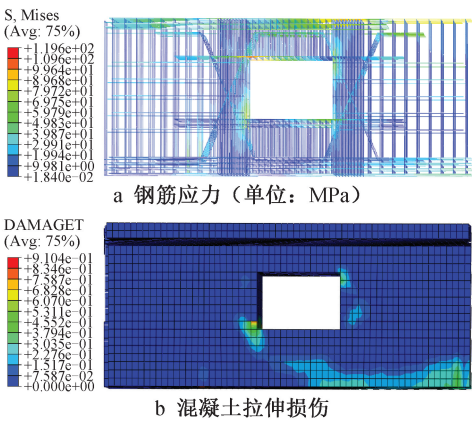


图 7 正常使用极限阶段有限元分析结果

Fig. 7 Finite element analysis results of the limit state under normal use stage

区域处,本文完善的设计方法是满足要求的。

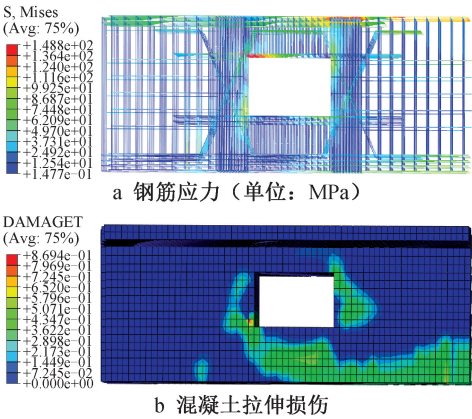


图 8 承载力极限阶段有限元分析结果

Fig. 8 Finite element analysis results of the ultimate load-bearing capacity stage

4.5 多遇地震组合阶段 1

多遇地震组合阶段 1 时预应力开洞梁有限元分析结果如图 9 所示。多遇地震组合阶段 1 时,预应力开洞梁竖向跨中挠度为 29.2mm。同时,预应力无洞梁跨中挠度为 27.9mm,侧向挠度为 10.4mm,跨中混凝土应力分别为-11.0,1.6MPa。预应力混凝土开洞梁由于刚度的削弱,跨中挠度增加了 4.7%。预应力开洞梁的预应力为 1 091.3MPa,层间位移角<1/50。洞口区域出现了应力集中,钢筋尚处于弹性阶段。洞口角部和下弦混凝土出现了拉伸损伤,甚至可能会出现一些裂缝(宽度较小)。这表明,在多遇地震组合阶段 1 时,本文完善的设计方法是合理可靠的。

4.6 多遇地震组合阶段 2

多遇地震组合阶段 2 时预应力开洞梁有限元结果如图 10 所示。多遇地震组合阶段 2 时,预应力开洞梁的跨中挠度为 21.1mm,相较无洞梁(跨中挠度

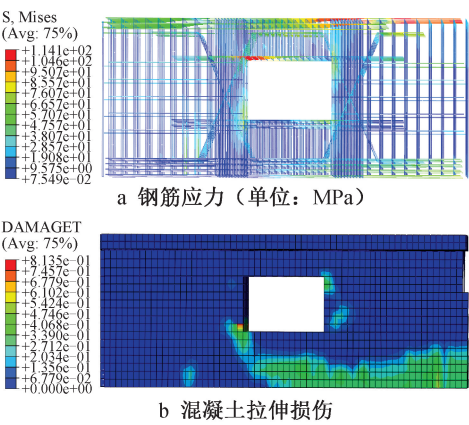


图 9 多遇地震组合阶段 1 有限元分析结果

Fig. 9 Finite element analysis results of frequent earthquake combination stage 1

为 20.1mm)增加了 5%。预应力无洞梁的侧向挠度为 9.3mm,跨中混凝土应力分别为-8.9,1.7MPa。预应力开洞梁的预应力为 1 091.3MPa,尚处于弹性阶段。层间位移角<1/50,满足规范要求。

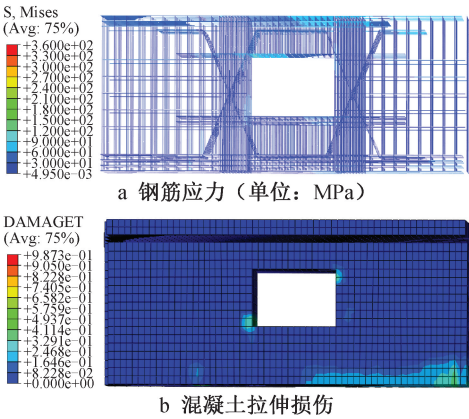


图 10 多遇地震组合阶段 2 有限元分析结果

Fig. 10 Finite element analysis results of frequent earthquake combination stage 2

洞口区域的钢筋没有出现明显的应力集中现象。洞口角部和下弦杆处的混凝土出现些许的混凝土拉伸损伤,没有出现裂缝。表明在多遇地震组合阶段 2 时,预应力开洞梁的设计方法合理可靠。

表 2 预应力开洞梁的混凝土应力、挠度与预应力

| Table 2 Concrete stress, deflection and prestress of prestressed perforated beam |       |      |           |             |           |           |           |            |            |         |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|---------|
| 工况                                                                               | 挠度/mm |      | 混凝土应力/MPa |             |           |           |           |            |            | 预应力/MPa |
|                                                                                  | 跨中    | 侧向   | 跨中        | 洞口 1 上弦     | 洞口 1 下弦   | 洞口 2 上弦   | 洞口 2 下弦   | 梁端 1       | 梁端 2       |         |
| 施工阶段 1                                                                           | -9.7  | 2.3  | -0.1/-4.7 | -0.1/-1.8   | -3.9/-4.3 | -0.2/-1.7 | -3.6/-4.4 | -12.5/0.6  | -9.3/0.8   | 1 051.1 |
| 施工阶段 2                                                                           | 16.2  | 3.1  | -6.9/1.4  | -4.1/-4.8   | -2.3/-0.5 | -3.2/-3.3 | -3.2/1.4  | -7.5/-7.6  | -3.9/-6.9  | 1 036.6 |
| 正常使用极限阶段                                                                         | 24.2  | 3.1  | -9.7/1.6  | -5.7/-6.2   | -1.8/0.8  | -4.5/-4.1 | -3.2/-0.3 | -4.0/-12.5 | -1.7/-11.6 | 1 103.1 |
| 承载力极限阶段                                                                          | 37.6  | 4.6  | -13.6/1.6 | -7.9/-8.3   | -1.5/0.7  | -6.4/-5.9 | -3.6/-0.3 | -4.3/-15.2 | -1.1/-13.7 | 1 327.3 |
| 多遇地震 1                                                                           | 29.2  | 10.8 | -11.0/1.6 | -7.2/-7.1   | -1.0/1.2  | -4.5/-4.4 | -3.5/-0.7 | -6.9/-8.7  | 1.5/-14.4  | 1 118.6 |
| 多遇地震 2                                                                           | 21.1  | 9.7  | -8.9/1.7  | -6.1/-6.2   | -1.7/1.1  | -3.5/-3.7 | -3.9/-1.6 | -7.9/-6.2  | 0.2/-14.4  | 1 091.3 |
| 罕遇地震                                                                             | 30.5  | 52.9 | -10.9/1.7 | -10.21/-7.9 | 0.7/1.4   | -2.3/-3.5 | -5.4/-4.0 | -22.6/1.0  | 0.9/-13.4  | 1 116.7 |

注:“/”前后的数字表示顶部与底部

4.7 罕遇地震组合阶段

罕遇地震组合阶段时,预应力开洞梁有限元分析结果如图 11 所示,开洞梁预应力为 1 116.7MPa,尚处于弹性阶段。开洞梁跨中挠度为 30.5mm,相比无洞梁(跨中挠度为 29.5mm)增加了 3.4%。无洞梁侧向挠度为 52.4mm,跨中混凝土应力分别为-10.8,1.6MPa。由图 11 可知,洞口上弦杆受压,洞口区域没有出现明显的应力集中效应。洞口下弦杆和梁端出现了拉伸损伤,梁端甚至形成了塑性铰。

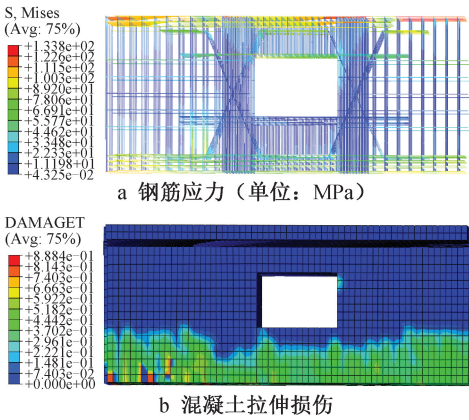


图 11 罕遇地震组合阶段有限元分析结果

Fig. 11 Finite element analysis results of rare earthquake combination stage

洞口上弦处于受压状态,梁端出现了压缩损伤,形成了塑性铰。洞口区域的钢筋处于弹性阶段。洞口上弦杆的箍筋应力较大,洞口内侧斜筋的应力较大。

4.8 对比分析

提取各工况数值模拟结果汇总,如表 2,3 所示。由表 2,3 可知,施工阶段 1 跨中、梁端和洞口上、下弦的混凝土处于弹性阶段,没有出现拉裂和压溃现象;钢筋尚处于弹性阶段;相比于无开洞梁,开洞梁的应力变化差距不大。施工阶段 2 跨中、梁端和洞口上下弦的混凝土几乎均处于弹性阶段,没有出现拉裂和压溃现象;钢筋尚处于弹性阶段。正

表 3 预应力开洞梁的钢筋应力

| Table 3 Reinforcement stress of prestressed perforated beam |             |             |           |           |           |           |            |            |             |             |             | MPa         |
|-------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 工况                                                          | 纵筋          |             |           |           |           |           | 箍筋         |            |             |             | 斜筋          |             |
|                                                             | 跨中          | 梁端          | 洞口 1 上弦   | 洞口 1 下弦   | 洞口 2 上弦   | 洞口 2 下弦   | 洞口 1 上弦/下弦 | 洞口 2 上弦/下弦 | 洞口 1 内 侧/外侧 | 洞口 2 内 侧/外侧 | 洞口 1 内 侧/外侧 | 洞口 2 内 侧/外侧 |
| 施工阶段 1                                                      | 0.5/51.3    | 83.1/61.1   | 0.1/20.5  | 41.8/46.9 | 1.0/19.0  | 37.5/47.2 | 1.7/7.5    | 1.6/9.4    | 17.3/15.8   | 14.7/0.5    | 1.8/4.1     | 2.3/19.4    |
| 施工阶段 2                                                      | 76.2/27.5   | 45.5/54.2   | 47.6/47.3 | 30.3/0.9  | 31.0/40.2 | 29.4/10.9 | 7.5/2.4    | 8.6/6.5    | 14.0/51.5   | 9.8/6.2     | 22.2/16.9   | 23.2/3.8    |
| 正常使用极限阶段                                                    | 95.9/57.0   | 31.1/92.8   | 60.3/53.3 | 23.6/14.9 | 38.6/46.3 | 24.5/2.4  | 8.8/2.2    | 10.7/8.5   | 12.6/60.6   | 8.8/5.9     | 28.3/19.0   | 33.8/10.5   |
| 承载力极限阶段                                                     | 135.0/101.1 | 36.1/130.8  | 83.1/71.2 | 23.2/33.0 | 54.0/67.6 | 25.0/9.3  | 11.8/10.3  | 34.0/33.4  | 20.8/86.6   | 18.4/2.7    | 45.1/34.8   | 71.3/14.0   |
| 多遇地震 1                                                      | 109.1/73.3  | 47.1/69.8   | 75.2/61.3 | 17.0/36.0 | 35.8/51.2 | 26.6/1.1  | 10.8/0.7   | 7.1/19.1   | 14.2/54.0   | 11.0/36.5   | 27.7/18.5   | 52.2/16.9   |
| 多遇地震 2                                                      | 88.2/44.9   | 56.1/39.0   | 63.0/55.1 | 22.2/17.2 | 28.4/42.2 | 31.4/10.3 | 9.5/0.6    | 5.1/5.9    | 13.2/7.2    | 9.0/34.0    | 22.0/13.8   | 32.9/12.4   |
| 罕遇地震                                                        | 106.3/73.5  | 156.3/148.3 | 97.7/72.4 | 2.8/77.7  | 35.8/45.8 | 44.2/31.5 | 14.2/2.7   | 30.1/19.7  | 12.8/17.8   | 10.2/6.7    | 14.6/6.1    | 72.3/36.2   |

注:纵筋应力中,“/”前后的数字表示顶部与底部;内侧相对于跨中位置来讲,靠近跨中为内侧,原来跨中为外侧,向下为正

常使用极限阶段跨中、梁端和洞口上下弦混凝土处于弹性阶段,没有出现拉裂和压溃现象;钢筋尚处于弹性阶段;洞口上弦箍筋应力大于洞口下弦处应力;洞口外侧箍筋应力大于内侧箍筋应力,相反,洞口外侧斜筋应力小于内侧斜筋应力,这说明洞口侧边的箍筋和斜筋是必要的。承载力极限状态钢筋尚处于弹性阶段;洞口上下弦处箍筋应力类似,洞口外侧箍筋应力大于内侧箍筋应力,相反,洞口外侧斜筋应力小于内侧斜筋应力。多遇地震组合阶段 1 洞口上弦混凝土均尚处于弹性阶段,且洞口上弦均处于受压状态,梁端混凝土也处于弹性阶段;钢筋尚处于弹性阶段,洞口外侧箍筋应力大于内侧箍筋,内侧斜筋应力大于外侧斜筋应力;这表明,在多遇地震组合阶段 1,洞口侧边箍筋与斜筋的作用是显而易见的。多遇地震组合阶段 2 上弦杆处于受压状态,梁端混凝土和钢筋尚处于弹性阶段;洞口上、下弦箍筋的应力较小,内侧斜筋应力较大。

综上所述,在各地震组合阶段,洞口区域经过加强后,不会形成明显的拉伸损伤与压缩损伤,表明本文完善的洞口区域设计方法是满足要求的。

5 结语

1) 预应力开洞梁由于洞口剪切效应,跨中处挠度会大于预应力无洞梁,最大增大率达到 5.6%(承载力极限阶段)。因此,本文完善的洞口区域设计方法,使预应力开洞梁近似等于预应力无洞梁。

2) 正常使用极限阶段时,跨中、梁端和洞口上下弦的混凝土处于弹性阶段,没有出现拉裂和压溃现象。钢筋尚处于弹性阶段。洞口上弦箍筋应力大于洞口下弦处箍筋应力。洞口外侧箍筋应力较大,相反,洞口内侧斜筋应力较大,说明洞口侧边的箍筋和斜筋是必要的。

3) 洞口角部的裂缝控制很重要。洞口角部混凝土由于应力集中效应,会产生拉伸损伤。按本文

完善的设计方法来看,在承载力极限阶段时,洞口角部和下弦杆会出现些许的细裂缝。

4) 基于本文完善的预应力开洞梁洞口区域的设计方法,本工程中的大跨预应力开洞梁在结构设计时采取了较合理的结构布置,并对大跨预应力开洞薄弱处采取了有效的构造措施,从而使结构具有良好的受力性能,各工况的计算结果表明目前的结构措施有效可靠,各项性能指标均符合要求。

参考文献:

[ 1 ] 蔡健,叶嘉彬,左志亮,等.腹部开矩形孔预应力混凝土简支梁受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(8):100-107.  
CAI J, YE J B, ZUO Z L, et al. Experimental study on shear behavior of simply supported prestressed concrete beams with rectangular web openings [J]. Journal of building structures, 2019,40(8):100-107.

[ 2 ] KHALAF M R, ALI AL-AHMED A H. Shear strength of reinforced concrete deep beams with large openings strengthened by external prestressed strands [J]. Structures, 2020, 28: 1060-1076.

[ 3 ] LIU W H, GUO Y L, TIAN Z H, et al. Experimental and numerical study of T-shaped irregularly concrete-filled steel tube columns under combined axial loads and moments[J]. Journal of building engineering, 2023,65:105796.

[ 4 ] POPOVICS S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete [J]. Cement and concrete research, 1973, 3 (5):583-599.

[ 5 ] GANGANAGOUDAR A, MONDAL T G, PRAKASH S S. Improved softened membrane model for reinforced concrete circular bridge columns under torsional loading [J]. Journal of bridge engineering, 2016,21(7):04016037.

[ 6 ] MANSOUR W. Numerical analysis of the shear behavior of FRP-strengthened continuous RC beams having web openings [J]. Engineering structures, 2021,227:111451.

[ 7 ] JAWDHARI A, ADHEEM A H, KADHIM M M A. Parametric 3D finite element analysis of FRCM-confined RC columns under eccentric loading [J]. Engineering structures, 2020, 212: 110504.

[ 8 ] SIDOROFF F. Description of anisotropic damage application to elasticity [M]. Berlin, Heidelberg:Springer, 1981.