

钢混组合梁力学性能的研究

张宏云

[昆明市工程设计研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650228]

摘要: 由于钢混组合梁形式较多,选取波纹钢腹板与平钢腹板组合槽形梁为研究对象,对两种形式的组合梁进行力学性能对比分析;以某试验梁为依托,建立平钢腹板和波纹钢腹板2种腹板形式的实体有限元模型并对其进行破坏加载,比较两者的截面应变分布、荷载-位移曲线、刚度,并对钢腹板全过程力学行为进行分析。结果表明:波纹钢腹板对强度的影响并不明显,但平钢腹板极易出现屈曲破坏状态;波纹钢腹板混凝土槽形组合梁、平钢腹板混凝土槽形组合梁荷载-位移曲线总体上均具有显著的弹性阶段、弹塑性阶段、弱化阶段;平钢腹板组合梁在弹塑性阶段位移增长较快,弱化阶段强度下降速率较快;加载过程中,刚度、Mises应力均小于波纹钢腹板。

关键词: 波纹钢腹板;平钢腹板;割线刚度;屈曲破坏

中图分类号: U441

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)07-0210-04

0 引言

进入21世纪以来,我国经济水平快速发展,基础设施的建设如火如荼,对于桥梁工程建设的要求日益提高。传统混凝土桥梁有自重、易开裂、跨越能力较低的缺陷。随着钢结构桥梁在我国的推广和应用,钢-混凝土组合梁桥得到了长足的发展。钢-混凝土组合梁结构桥梁的类型多种多样^[1],较为常见的有钢管-混凝土组合结构、工字型钢-混凝土板组合梁、钢腹板-混凝土组合梁^[2]、钢腹板-混凝土组合槽形梁。槽型梁结构主要由主梁、腹板、横梁、桥面板4个部分组成。其中,钢腹板主要用以承担剪力,可解决传统混凝土梁桥腹板易在弯曲、剪力共同作用下产生斜向裂缝的问题。

传统的平钢腹板具有自重轻、安装简易、施工方便的优势,但由于其腹板厚度较小,也存在易屈曲失稳、刚度低的劣势。为解决平钢腹板所存在的问题,日本学者首先提出了使用波纹钢腹板代替传统的平钢腹板,并与2005年建成了世界上第一座波纹钢腹板组合梁桥^[3]。韩国学者对比了钢桁腹板与波纹钢腹板之间的力学行为差异,通过对试验梁进行三点弯曲静载试验对比分析了两者在刚度、剪切性能、承载力方面的差异^[4]。

平钢腹板与波纹钢腹板各具优势,为对比两者之间的力学行为的差异,以某试验梁为依托,基于

ABAQUS非线性有限元软件,建立实体有限元模型并对其进行破坏加载,对两者全过程力学行为进行分析,分析两者的截面应变分布、荷载-位移曲线、弯曲刚度等。

1 案例背景

波纹钢腹板混凝土组合槽形梁、平钢腹板混凝土组合槽形梁截面如图1(a)、图1(c)所示,主要由上翼缘板、底板、波纹钢腹板或平钢腹板3个部分组成。依据参考文献[5],组合梁结构尺寸构造为:波纹钢腹板混凝土组合槽形梁、平钢腹板混凝土组合槽形梁长6.5 m,计算跨径6.3 m。

组合梁截面尺寸构造如图1(a)、图1(c)所示,梁高0.49 m,梁宽1.238 m,底板宽1.238 m,厚0.11 m,顶板宽0.17 m,厚0.1 m。组合梁梁底板布置2根预应力钢筋,张拉控制力为1 395 MPa。波纹钢腹板尺寸如图1(b)所示,波长为0.3 m,波高为0.05 m,钢板厚4 mm。平钢腹板尺寸如图1(d)所示,长度为3 150 mm,高度为280 mm。

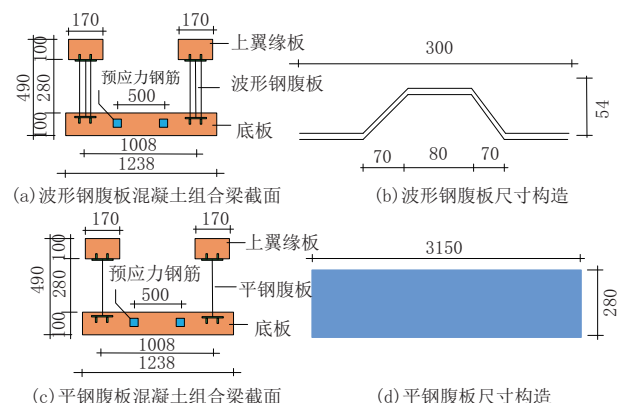


图1 尺寸构造(单位:mm)

收稿日期: 2022-07-21

作者简介: 张宏云(1986—),男,硕士,高级工程师,从事道桥工程设计研究工作。

2 有限元模型的建立

2.1 本构参数的选取

混凝土本构采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中对于混凝土本构的定义,如式(1)、式(2)所示。混凝土参数取值见表 1。

$$\sigma = (1-d_t)E_c \varepsilon \tag{1}$$

$$\sigma = (1-d_c)E_c \varepsilon \tag{2}$$

式中: σ 表示应力; d_t 表示拉伸损伤参数; d_c 表示压缩损伤参数; E_t 表示拉伸弹性模量; E_c 表示压缩弹性模量; ε 表示应变。

表 1 混凝土材料参数

膨胀角	偏心率	屈服应力比	屈服常数	黏性系数
38	0.1	1.16	0.666 667	100×10^{-5}

钢筋均采用无屈服点钢筋应力 - 应变曲线,钢筋本构表达如式(3)所示,钢腹板材料参数见表 2。

$$\sigma_p = \begin{cases} E_s \zeta_s & \zeta_s \leq \zeta_y \\ f_{y,r} + k(\zeta_s - \zeta_y) & \zeta_y \leq \zeta_s \leq \zeta_u \\ 0 & \zeta_s \geq \zeta_u \end{cases} \tag{3}$$

式中: E_s 表示钢筋的弹性模量; σ_s 表示钢筋应力; ζ_s 表示钢筋应变; $f_{y,r}$ 表示钢筋的屈服强度代表值; ζ_y 表示与 $f_{y,r}$ 相对应的钢筋屈服应变; k 表示钢筋硬化段斜率。

表 2 钢腹板材料参数

材料	f_y /MPa	f_u /MPa
钢腹板	400	498

2.2 边界条件与网格的划分

建立 1/4 数值模型如图 2 所示,以波形钢腹板混凝土槽形组合梁为例,说明数值模型边界条件与网格划分。上翼缘板、底板均采用 C3D8R 单元(C 表示为实体单元,3D 表示为三维模型,8 是这个单元所具有的节点数目,R 指这个单元是缩减积分单元),波形钢腹板、平钢腹板也采用 C3D8R 单元,钢筋采用 T3D2 单元(T 代表杆单元,3D 代表三维模型,2 代表两个节点)。

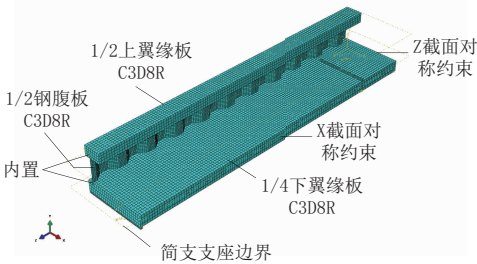


图 2 边界条件与网格的划分

组合梁支座为简支边界条件,为实现数值模型的对称性,对底板采用 X 截面对称约束,对跨中截面采用 Z 截面对称约束,钢腹板与上翼缘板、底板采用内置的方式连接。

2.3 建模结果

波纹钢腹板混凝土槽形组合梁 1/4 有限元模型如图 3 所示,平钢腹板混凝土槽形组合梁 1/4 有限元模型如图 4 所示。

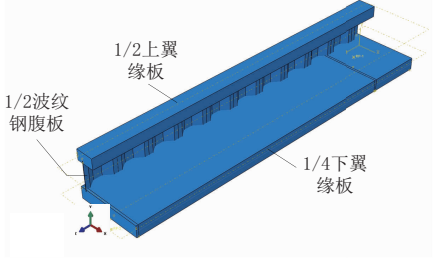


图 3 波纹钢腹板混凝土槽形组合梁建模结果

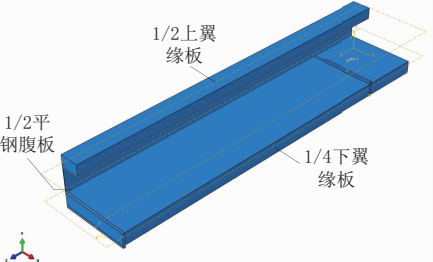


图 4 平钢腹板混凝土槽形组合梁建模结果

3 力学性能对比分析

3.1 计算结果

组合梁承载力计算结果见表 3,波形钢腹板混凝土槽形组合梁极限弯曲承载力为 198.249 kN,平钢腹板混凝土槽形组合梁极限弯曲承载力计算结果为 194.706 kN。与平钢腹板混凝土槽形组合梁相比,波形钢腹板混凝土槽形组合梁可提高 1.82%,两者之间相差不大。上述现象说明,波形钢腹板对强度的影响并不明显。

表 3 弯曲承载力计算结果

项目	波形钢腹板混凝土槽形梁	平钢腹板混凝土槽形梁
极限承载力 /kN	198.248	194.706

平钢腹板变形计算结果如图 5 所示。由图 5 可知,钢腹板在极限状态下出现屈曲变形状态,其横向产生最大位移值为 120.4 mm。平钢腹板虽然对组合梁强度无明显影响,但极易出现屈曲破坏状态,在移动荷载、地震荷载作用下动力性能较差。

3.2 荷载 - 位移曲线对比

波纹钢腹板混凝土槽形组合梁、平钢腹板混凝土

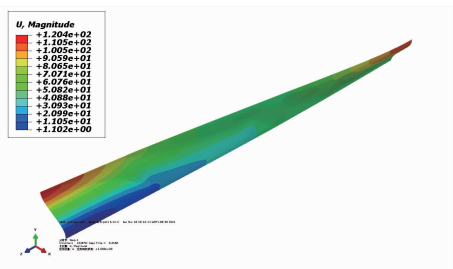


图 5 平钢腹板变形计算结果

土槽形组合梁荷载-位移曲线如图 6 所示。总体上,两者均具有显著的弹性阶段、弹塑性阶段、弱化阶段。两者三阶段对比如下:

(1)弹性阶段

弹性阶段,组合梁荷载-位移曲线拟合程度较高,两者的位移、荷载均一致。这说明在正常使用阶段,波形钢腹板混凝土槽形组合梁、平钢腹板混凝土槽形组合梁之间的力学性能无较大差异。

(2)弹塑性阶段

弹塑性阶段,组合梁荷载-位移曲线开始出现较大差异,两者的位移、荷载不一致,波形钢腹板由于出现横向屈曲现象,组合梁位移开始增大。这说明当桥梁偶然承受较大荷载时,平钢腹板极易产生横向屈曲现象,从而导致破坏失效。

(3)弱化阶段

弱化阶段,波形钢腹板混凝土槽形组合梁强度开始缓慢下降,平钢腹板混凝土槽形组合梁强度迅速下降。产生上述差异的主要原因是平钢腹板屈曲失效导致位移下降较快。

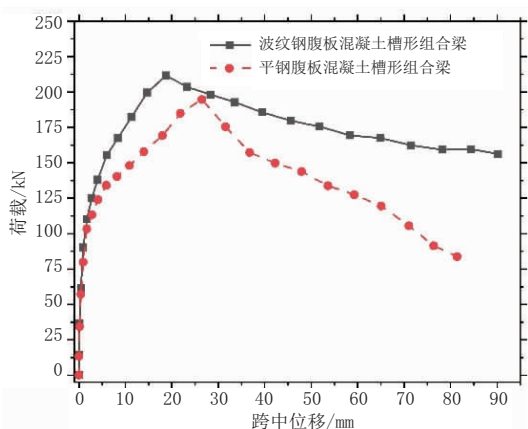


图 6 荷载-位移曲线对比

3.3 刚度对比

波形钢腹板混凝土槽形组合梁、平钢腹板混凝土槽形组合梁加载过程中割线刚度见表 4。由表 4 可知,对于波形钢腹板混凝土槽形组合梁, $K_{0.25}=147.88$ kN, $K_{0.50}=64.26$ kN, $K_{0.75}=16.15$ kN, $K_{1.00}=7.01$ kN。对于平钢腹板混凝土槽形组合梁, $K_{0.25}=137.66$ kN,

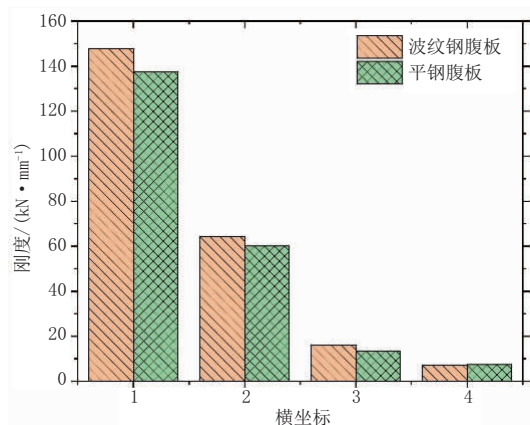
$K_{0.50}=60.11$ kN, $K_{0.75}=13.59$ kN, $K_{1.00}=7.36$ kN。

表 4 刚度对比结果

单位: kN

腹板类型	$K_{0.25}$	$K_{0.50}$	$K_{0.75}$	$K_{1.00}$
波纹钢腹板	147.88	64.26	16.15	7.01
平钢腹板	137.66	60.11	13.59	7.36

两者割线刚度如图 7 所示。由图 7 可知,平钢腹板刚度明显弱于波纹钢腹板。



注:1 代表 0.25 倍极限承载力所对应的割线刚度;2 代表 0.50 倍极限承载力所对应的割线刚度;3 代表 0.75 倍极限承载力所对应的割线刚度;4 代表 1.00 倍极限承载力所对应的割线刚度。

图 7 刚度对比分析

3.4 钢腹板力学行为对比

波形钢腹板混凝土槽形组合梁加载过程中 Mises 应力云图如图 8、图 9 所示。波形钢腹板组合梁在 0.5 倍极限承载力状态下最大 Mises 应力为 4.46 MPa,在 1.0 倍极限承载力状态下最大 Mises 应力为 19.93 MPa。最大应力位置出现在组合梁 1/4 截面。

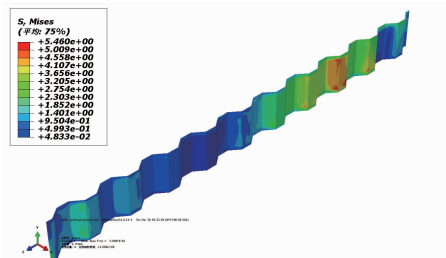


图 8 0.5 倍极限承载力波纹腹板 Mises 应力云图

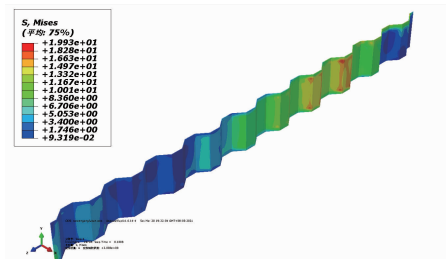


图 9 1.0 倍极限承载力波纹腹板 Mises 应力云图

平钢腹板混凝土槽形组合梁加载过程中 Mises 应力云图如图 10、图 11 所示。平钢腹板组合梁在 0.5

倍极限承载力状态下最大 Mises 应力为 3.5 MPa, 在 1.0 倍极限承载力状态下最大 Mises 应力为 17.59 MPa。最大应力位置出现在组合梁 1/4 截面。

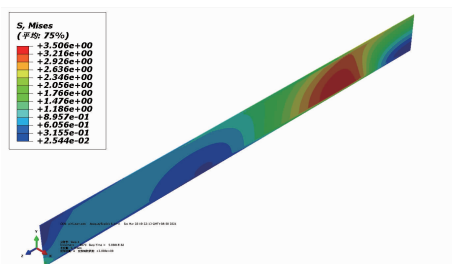


图 10 0.5 倍极限承载力平腹板 Mises 应力云图

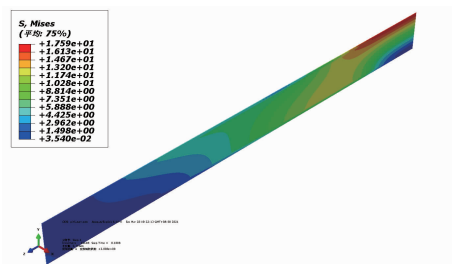


图 11 1.0 倍极限承载力平腹板 Mises 应力云图

由上述现象可知,加载过程中平钢腹板 Mises 应力均小于波形钢腹板。

4 结 论

本文以某跨径为 6.5 m 的新型波形钢腹板组合槽形梁为依托工程,建立 1/4 ABAQUS 非线性波形钢腹板、平钢腹板组合梁有限元模型。通过对该模型进行弯曲破坏加载分析,得出以下结论:

(1)与平钢腹板混凝土槽形组合梁相比,波形钢腹板混凝土槽形组合梁弯曲承载能力仅提高 1.82%,波形钢腹板对强度的影响并不明显,但平钢腹板极易出现屈曲破坏状态。

(2)波纹钢腹板混凝土槽形组合梁、平钢腹板混凝土槽形组合梁荷载-位移曲线,总体上均具有显著的弹性阶段、弹塑性阶段、弱化阶段。

(3)弹性阶段,组合梁荷载-位移曲线拟合程度较高,两者的位移、荷载均一致;弹塑性阶段,组合梁荷载-位移曲线开始出现较大差异,平钢腹板组合梁位移较大;弱化阶段,平钢腹板混凝土槽形组合梁强度下降速率较快。

(4)加载过程中,平钢腹板组合梁刚度明显弱于波纹钢腹板,平钢腹板 Mises 应力均小于波形钢腹板。

参考文献:

- [1] 杨得旺. 钢-混凝土组合梁在我国铁路桥梁中的应用[J]. 山西建筑, 2020, 46(6):131-133.
- [2] 于广龙. 简支钢-混凝土组合箱梁有限元分析[J]. 山西建筑, 2017, 43(28):39-40.
- [3] 王强. 波纹钢腹板箱梁桥截面优化设计和剪力键疲劳性能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.
- [4] 雷聪, 万水, 王毅力. 波形钢腹板组合梁与钢桁腹组合梁的安全性能和使用性能研究[J]. 世界桥梁, 2015, 43(4):30-36.
- [5] 袁鹏飞. 波形钢腹板组合槽形梁桥静动力学性能研究[D]. 广州: 东南大学, 2019.
- [6] 徐超, 罗敏敏, 任非凡, 等. 加筋土柔性桥台复合结构抗震性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊1):179-186, 194.
- [7] 开永旺. 考虑实际场地的矮塔斜拉桥非线性地震响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(2):417-424.
- [8] 石岩, 钟正午, 秦洪果, 等. 装配铅挤压阻尼器的摇摆-自复位双柱墩抗震性能及设计方法[J]. 工程力学, 2021, 38(8):166-177, 203.
- [9] 李敏峰, 徐永峰. 强震区非对称连续梁桥地震响应及性能评价[J]. 地震工程学报, 2020, 42(5):1276-1282.
- [10] 俞瑞芳, 曲国岩, 张冬峰. 空间相关多点非平稳地震动合成及其对大跨结构响应的影响[J]. 振动工程学报, 2020, 33(5):1013-1023.
- [11] 李子奇. 铁路新型柱板式高墩抗震性能试验及数值模拟方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9):1944.
- [12] 刘正楠, 陈兴冲, 张永亮, 等. 考虑行波效应的无砟轨道铁路桥梁纵向地震响应[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4):142-149.
- [13] 王猛, 李林虎, 郭猛闯. 变截面圆端空心桥墩抗震性能目标及性能水准量化[J]. 公路交通科技, 2021, 38(2):90-97.
- [14] 国巍, 王阳, 葛苍瑜, 等. 近断层地震动下高速铁路多跨简支梁桥震致破坏特征[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17):210-218.
- [15] 国巍, 王阳, 宗绍哈, 等. 高速铁路桥梁中旋转摩擦阻尼器减震性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊2):740-745.
- [16] 许成祥, 王粘锦. 双层高架桥框架式桥墩地震损伤试验[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(5):49-56.

(上接第 209 页)