

# 回转式钢筋湿接缝疲劳试验设计

曹皓

安徽省交通控股集团有限公司

**摘要:** 回转式钢筋湿接缝是一种用于钢筋混凝土预制结构节段之间连接的新型钢筋连接现浇缝形式, 为明确回转式钢筋湿接缝在车轮反复荷载作用下的疲劳性能, 完善预制混凝土梁板回转式钢筋湿接缝的设计理论, 制定了新型回转式钢筋湿接缝疲劳试验方案, 详细介绍了疲劳试验目的、测试内容、试验构件设计、疲劳荷载施加流程等内容, 为探明回转式钢筋湿接缝的受力机理、疲劳破坏模式及受力性能研究奠定了基础, 研究成果可直接用于指导湿接缝疲劳试验与实际湿接缝工程设计。

**关键词:** 桥梁; 湿接缝; 疲劳; 回转式钢筋; 试验; 设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.02.100

## 引言

随着我国桥梁事业的飞速发展, 预制桥面板结构越来越多地应用于桥梁建设中。节段预制桥面板一般采用配筋现浇缝进行连接, 其中主筋常采用焊接连接。为提高工程的装配化程度, 提出接缝回转式钢筋搭接的连接方式, 即预制板上下缘钢筋采用通长的环形钢筋, 并与相邻预制板的伸出钢筋进行搭接, 在重合区域内放置横向钢筋, 然后进行混凝土浇筑<sup>[1]</sup>。

湿接缝作为桥梁结构中重要组成部分之一, 不仅受到静力荷载作用, 还承受移动车辆疲劳荷载的作用。目前, 同济大学已联合开展了回转式钢筋混凝土接缝性能试验研究、理论分析、受力性能参数研究以及回转式钢筋接缝设计计算方法研究<sup>[1]</sup>, 探究了回转式钢筋接缝的承载能力、传力机理和破坏模式。但是近年来, 桥梁结构的疲劳已成为学术界和工程界持续关注的问题, 各国学者也开展了大量的疲劳试验与理论研究。田启贤等<sup>[2]</sup>对超高性能混凝土(UHPC)-钢正交异性板组合桥面体系开展了静力承载性能、疲劳承载性能试验研究, 结果表明组合桥面体系具备较大的静力承载能力, 在500万次疲劳加载后未出现明显的疲劳损伤。杨勇等<sup>[3]</sup>对钢板-混凝土组合桥面板开展了大量等幅疲劳试验研究, 探讨了组合桥板的疲劳破坏模式及疲劳损伤程度。黄侨等<sup>[4]</sup>根据车辆荷载弯矩与抗弯承载力计算结果得到GFRP-混凝土组合桥面板疲劳试验200万次加载的上下限值。还有文献按试件极限承载力乘以折减系数确定疲劳上限, 按疲劳上限与疲劳下限的比值确定疲劳下限<sup>[5-6]</sup>。

但是, 目前国内外对于回转式钢筋湿接缝力学性能的研究很少, 无相关规范条文对这种湿接缝连接形式的详细构造进行规定, 不能直接指导湿接缝设计。回转式

湿接缝在安徽省众多工程中得到应用, 静力性能得到验证, 但是其疲劳性能试验研究目前尚未有资料报道。因此, 本文基于静力试验研究的基础上, 率先开展回转式钢筋湿接缝疲劳试验设计研究, 为以后回转式钢筋湿接缝疲劳性能及疲劳响应的研究奠定基础。

## 一、传统湿接缝结构

已有工程实践表明, 回转式钢筋接缝的疲劳作用特性主要与梁板的不同结构形式及湿接缝的不同构造有关。回转式钢筋接缝的典型应用范围和其构造类型包括以下几种形式:

### (1) 钢板组合梁、桩板式道路结构的横向湿接缝

公路桥梁结构中主要应用横向湿接缝的结构主要以钢混组合梁桥、桩板式道路结构为典型代表, 面板的厚度一般为220mm~260mm, 纵向钢筋主筋一般为18mm~25mm, 接缝的宽度在工业化建造技术提升情况下, 一般可优化至300mm。

### (2) T梁桥纵向湿接缝

目前常用的标准图中, T梁桥的湿接缝宽度主要应用在300mm~800mm之间, 以500mm为典型代表, T梁桥的翼缘厚度一般为160mm, 钢筋直径为16mm。

### (3) 小箱梁纵向湿接缝

目前常用标准图中, 小箱梁的湿接缝宽度基本控制在500mm~1000mm范围, 多实用宽度为500mm~800mm, 翼缘厚度一般为180mm, 钢筋直径一般为16mm。

## 二、试验目的

由于桥梁梁板结构是直接承受车轮局部荷载的结构, 在车轮荷载的反复作用下梁板湿接缝的应力状态始终处于交变状态, 在湿接缝内会产生疲劳效应。考虑到回转式钢筋接缝是一种较新的结构形式, 见图1, 为了检验这种接缝结构在疲劳荷载作用下的受力特点, 明确湿接缝疲劳损伤规律和钢筋构造的抗拉性能, 建立回转式钢筋湿接缝的疲劳性能试验方案。综合静动力性能研究成果, 结合工业化建造的性能需求, 形成了系统的回转式钢筋混凝土湿接缝设计理论与计算方法, 为混凝土桥面板检测与养护提供参考。

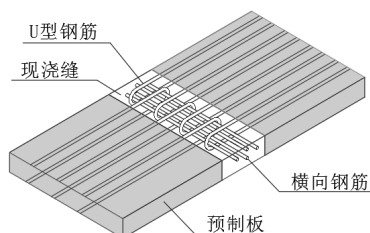


图1 回转式钢筋接缝示意图

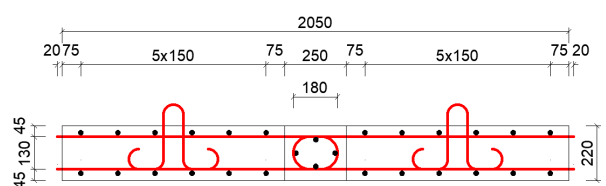
### 三、试验方案设计

#### (一) 试验构件设计

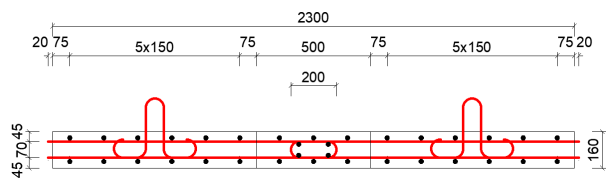
为保证试验研究成果在预制T梁、小箱梁和钢板组合梁桥结构上的适用性和普遍性，分别考虑钢筋直径20mm、16mm两种型号，试件厚度包括220mm、180mm两种形式。试验试件的设计情况见表1，具体S1-S3构件示意图见图2。

表1 试验构件设计

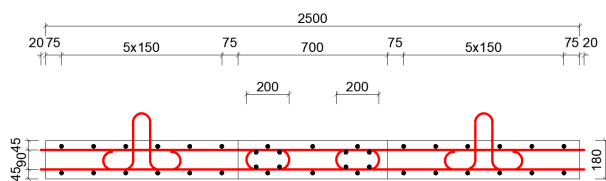
试件编号	S1	S2	S3
试件数量	2	2	2
试件厚度/mm	220	160	180
缝宽/mm	250	500	700
纵筋间距/mm	150	100	100
纵筋直径/mm	20	16	16
重合长度/mm	180	200	200



(a) 试件 S1 构造示意图



(b) 试件 S2 构造示意图



(c) 试件 S3 构造示意图

图2 回转式钢筋接缝试件构造示意图 (单位: mm)

#### (二) 主要测试内容及测点布置

##### 1. 测试内容

###### (1) 疲劳性能检验

研究湿接缝在疲劳荷载作用下的总体响应，验证湿接缝结构的疲劳性能。

###### (2) 刚度变化规律

测试湿接缝在疲劳荷载作用下的变形特点及规律，分析构件在经历不同疲劳循环次数后的变形特性是否发生变化，测试刚度退化情况。

###### (3) 开裂和破坏模式

加载过程中的开裂顺序和裂缝发展趋势。构件失效时受压区混凝土、受拉区钢筋和混凝土的形态。

###### (4) 裂缝发展规律

加载过程中随着疲劳循环次数的增加，持续观测裂缝的发展情况，分析裂缝的发展规律。

##### 2. 测点布置

在纯弯区底面对称布置位移计，测量加载过程中接缝处的位移。

为明确荷载作用下钢筋受力情况，对钢筋进行应变测量。在纵向接缝界面位置和接缝内部分别布置钢筋应变片。

在受拉区和受压区混凝土表面分别布置混凝土应变片，以观察受拉区混凝土的开裂情况和受压区混凝土的受力状态。

#### (三) 材料试验

##### (1) 混凝土

浇筑预制板时，同批浇筑混凝土150mm×150mm×150mm试块9块，与试件同条件养护，并在加载当天进行抗压强度检测。

接缝浇筑时，同批浇筑混凝土150mm×150mm×150mm试块9块，与试件同条件养护，并在加载当天进行抗拉和抗压强度检测。

接缝浇筑时，同批浇筑混凝土150mm×150mm×300mm试块3块，与试件同条件养护，并在加载当天进行弹性模量检测。

##### (2) 钢筋

对回转式钢筋和横向钢筋屈服强度和抗拉强度进行材料性能检测。

#### (四) 加载方案

##### 1. 荷载施加方式

试验过程中混凝土预制板下方设置支座，在靠近湿接缝位置处安置垫板，在垫板上通过千斤顶对试验试件施加竖向荷载，竖向荷载采用疲劳荷载进行加载，见图3。

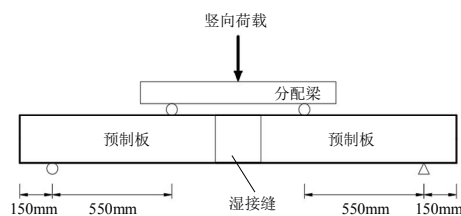


图3 疲劳荷载施加方式

##### 2. 确定疲劳荷载

其中疲劳荷载的计算采用规范[7]中的车辆荷载进行计算，按两个车轮进入桥面板，由于后轴的轴距较近d=1.4m，因此在计算有效工作宽度时要考虑相邻荷载的重叠效应，见图4。

跨中桥面板有效分布宽度a为：

$$a = a_1 + d + \frac{1}{3}l = 2.817\text{m} < \frac{2}{3}l + d = 3.03\text{m} \quad (1)$$

式中：l=2.45m

因此  $a = 3.03\text{m} \quad (2)$

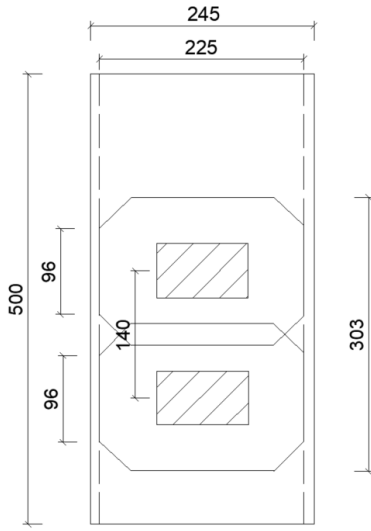


图4 车轮荷载计算图示 (单位: cm)

当荷载位于支承处时, 具有:

$$a' = a_1 + 2t = 0.96\text{m} > \frac{1}{3}l = 0.817\text{m} \quad (3)$$

式中:  $a_1=0.6\text{m}$ ,  $t$ 为板厚。

考虑重叠效应后计算活载引起的跨中弯矩 $M_{0p}$ 为:

$$M_{0p} = (1 + \mu) \frac{2P}{8a} (l - \frac{b_1}{2}) = 32.3\text{kN} \cdot \text{m/m} \quad (4)$$

式中:  $1 + \mu$ 为冲击系数, 具体参考<sup>[8]</sup>。

考虑铺装层重量后, 每米板宽的恒载弯矩 $M_{0g}$ 为, 结果乘以1.1倍放大系数:

$$M_{0g} = 1.1 \times \frac{1}{8}gl^2 = 7.99\text{kN} \cdot \text{m/m} \quad (5)$$

$$M_0 = M_{0p} + M_{0g} = 40.3\text{kN} \cdot \text{m/m} \quad (6)$$

由于 $t/h=0.09 < 0.25$ , 因此主梁的抗扭能力较大, 活载引起的跨中弯矩 $M_c$ 为

$$M_c = 0.5M_0 = 20.15\text{kN} \cdot \text{m/m} \quad (7)$$

当试件宽度为520mm, 试验时疲劳荷载弯矩峰值 $M_{max}$ 为

$$M_{max} = 0.52M_c = 10.5\text{kN} \cdot \text{m} \quad (8)$$

要使疲劳荷载达到峰值弯矩, 则应施加疲劳荷载峰值 $P_{max}$ 为

$$P_{max} = M_{max} / 0.55 \times 2 = 38.2\text{kN} \approx 40\text{kN} \quad (9)$$

疲劳荷载下限值 $P_{min}$ 取上限值 $P_{max}$ 的40%, 则

$$P_{min} = 0.4P_{max} = 16\text{kN} \quad (10)$$

经过计算得到的疲劳荷载上下限约为40kN-16kN (S1试件)、30kN-12kN (S2, S3试件), 所对应的构件跨中挠度分别约为2mm-0.5mm。

### 3. 加载流程

疲劳试验加载流程包括预压、预加载、静力加载、疲劳试验与静力加载, 具体见图5。试验过程中记录加载点位移、荷载与位移计的数据及构件破坏特征等, 当完成加载或试件破坏时, 终止试验。

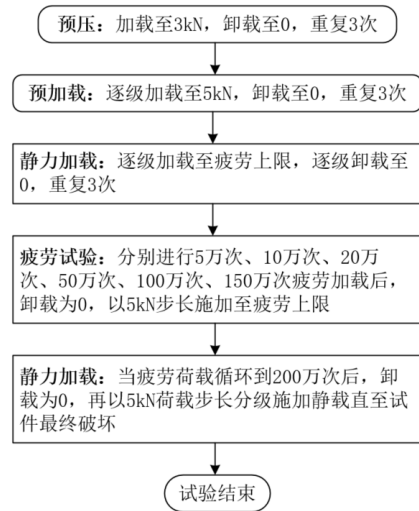


图5 疲劳试验加载流程

## 四、结语

本文为明确回转式钢筋湿接缝在车轮反复荷载作用下的疲劳性能, 完善预制混凝土梁板回转式钢筋湿接缝的设计理论, 通过总结常用桥梁梁板湿接缝类型包括钢板组合梁、桩板式道路结构的横向湿接缝, T梁、小箱梁纵向湿接缝; 制定了新型回转式钢筋湿接缝疲劳试验方案, 详细介绍了疲劳试验目的、测试内容、试验构件设计、疲劳荷载施加流程等内容, 为以后回转式钢筋湿接缝的受力性能研究奠定了基础, 研究成果可直接用于指导湿接缝疲劳试验与实际湿接缝工程设计。

### 参考文献

- [1] 刘志权, 胡可, 石雪飞, 殷晨昂. 预制混凝土面板回转式钢筋接缝的受拉性能参数分析[J]. 公路, 2021, 66(3): 153-157.
- [2] 田启贤, 高立强, 周尚猛, 等. 超高性能混凝土-钢正交异性板组合桥面试验研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(S1): 13-19.
- [3] 杨勇, 霍旭东, 薛建阳, 等. 钢板-混凝土组合桥面板疲劳性能试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 37-44.
- [4] 黄侨, 郑华凯, 宋晓东. GFRP-混凝土组合桥面板的疲劳性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(5): 57-63.
- [5] 唐先习, 孙焕重, 朱彦鹏, 等. 疲劳荷载作用下铰接板桥挠度试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 65-70.
- [6] 霍旭东. 钢板-混凝土组合桥面板静力及疲劳性能试验研究[D]. 西安建筑科技大学, 2011.
- [7] JTG D60-2015. 公路桥涵设计通用规范[S].
- [8] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 人民交通出版社, 1985.

作者简介: 曹皓(1985—), 女, 安徽蒙城人, 本科, 高级工程师, 主要从事高速公路工业化建造研究相关工作。