

# 自密实微膨胀混凝土对空心板铰缝应力传递改善效果分析

周福

中铁二十四局集团江苏工程有限公司

**摘要:** 针对空心板铰缝在正常使用状态下较易发生破坏的工程问题, 提出使用自密实微膨胀混凝土改善铰缝的工作性能。利用通用有限元软件ANSYS, 建立有无自密实微膨胀混凝土的对照试验组模型, 采用面荷载的加载方式模拟车轮作用在跨中相对不利的位置处, 研究自密实微膨胀混凝土对于铰缝的预应力效应作用。研究表明: 微膨胀效应对于支座附近的裂缝开展具有延缓作用, 达到极限荷载后, 可以改善内部混凝土裂缝的开展。

**关键词:** 桥梁工程; 铰缝; 自密实微膨胀混凝土; 有限元法

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2022. 08. 051

## 引言

预应力混凝土空心板梁是公路桥梁中应用最为广泛的一种, 虽然其具有的自重轻、构造简单、施工方便和工期短等优点<sup>[1]</sup>, 但空心板梁桥在运营期铰缝屡见不鲜。造成铰缝病害的原因众多, 其中由于铰缝空间狭小、铰缝钢筋密集等造成混凝土振捣不足、养护困难等, 进而导致铰缝混凝土出现空洞、黏结不密实等引发病害。为此, 自密实微膨胀混凝土近年来在工程中得到应用, 改善铰缝混凝土结构的力学性能。

自密实微膨胀混凝土常被用于振捣困难的环境中。通过添加膨胀剂如氧化镁等, 解决钢管内混凝土脱空问题, 包括沉管<sup>[2]</sup>、钢管<sup>[3][4]</sup>、钢管格构<sup>[5]</sup>等。此外, 自密实微膨胀混凝土也被应用装配式结构接缝处、空心板铰缝处。张吉红<sup>[6]</sup>研究了自密实混凝土收缩性能和基本力学性能的影响规律, 提出使用膨胀剂含量大于10%实现装配式结构接缝预防早期收缩开裂的病害。韩根生<sup>[7]</sup>研究了自密实微膨胀混凝土对于空心板铰缝抗剪性能

的影响, 证明其显著提升了抗剪能力, 并降低了施工难度。尽管自密实微膨胀混凝土在工程中应用技术基本成熟<sup>[8]</sup>, 但对其改善结构受力性能的研究仍较为匮乏, 尤其是对空心板铰缝。

本文将利用通用有限元软件ANSYS, 通过数值分析的方法研究自密实微膨胀混凝土铰缝应力传递机理, 并建立一组对照模型分析自密实微膨胀混凝土对延迟铰缝开裂的效果。

## 一、工程背景与有限元模型

### (一) 工程背景

本文依托某城市快线工程一座空心板简支梁桥, 跨径为16m, 空心板、铰缝和桥面铺装混凝土标号均为C50, 钢筋采用HPB300和HRB400两种。空心板中板的尺寸如图1所示, 铰缝钢筋构造如图2所示, 桥面铺装层厚度为10cm。

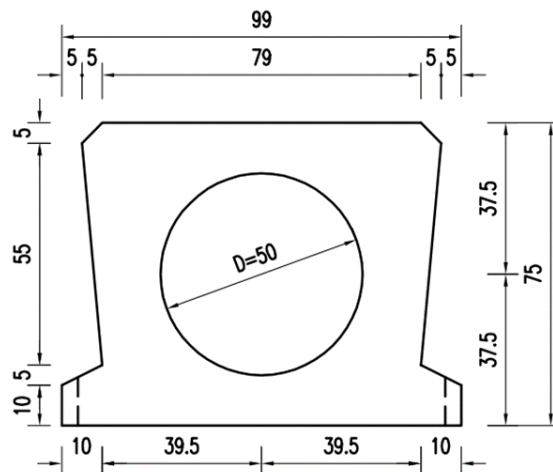
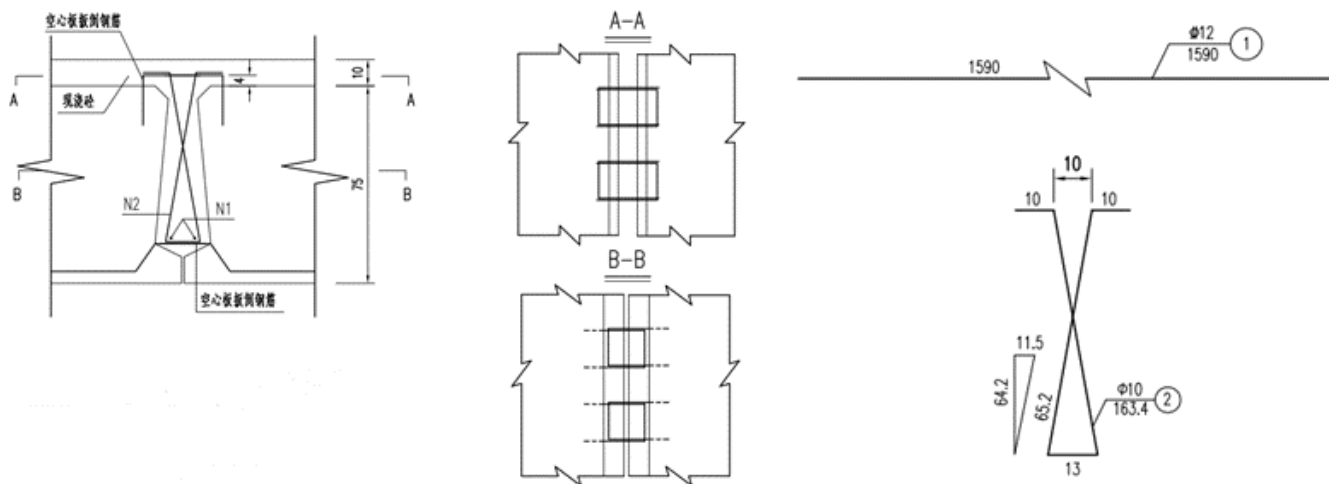


图1 空心板中板尺寸 (尺寸单位: cm)



(a) 铰缝钢筋布置图 (尺寸单位: cm)

(b) 钢筋细部图 (尺寸单位: mm)

图2 铰缝钢筋构造

(二) 模型构建

1. 混凝土

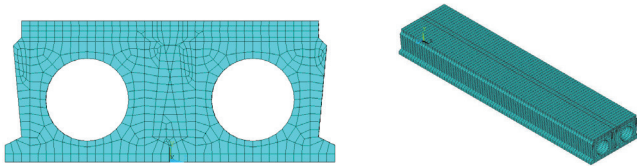
空心板、铰缝和桥面铺装均为C50混凝土，其中桥面铺装采用SOLID45单元，铰缝和空心板采用SOLID65单元。SOLID65单元的本构关系为非线性，用于考虑铰缝混凝土破坏过程，其采用Willam-Warnke五参数破坏准则，包括张开裂缝的剪力传递系数  $\beta_t = 0.5$ 、闭合裂缝的剪力传递系数  $\beta_c = 0.95$ ，以及混凝土的单轴受压应力-应变关系按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010)规定取值。对于铰缝处混凝土，单独赋予其线膨胀系数的材料特性，并在之后通过升温模拟混凝土的微膨胀。铰缝混凝土的线膨胀系数为  $1.2 \times 10^{-5}$ ，膨胀率为0.025%。

2. 钢筋

铰缝内的钢筋包括纵向钢筋、交叉钢筋和扳倒钢筋(如图1-2所示)；空心板内底部受拉钢筋和顶部受压钢筋，不考虑箍筋。钢筋采用LINK8单元。

3. 空心板及铰缝有限元

本模型由两片空心板和一根铰缝构成，为避免应力集中以及计算结果精度，横桥向网格长度为0.05m；基于铰缝钢筋布置间距为10cm，纵桥向网格长度为0.1m，空心板、铰缝和桥面铺装网格划分完成示意图如图3所示。



(a) 横截面示意图 (b) 网格划分整体示意图

图3 混凝土网格划分示意图

基于实际情况考虑优化模拟，本模型将空心板梁两端1m范围内的单元修改材料属性为线性，不再考虑混凝土的破坏准则和弹塑性本构关系。得到混凝土单元后即得到了连接钢筋需要的节点，两两连接相邻节点成钢筋单元。

4. 铰缝与空心板接触面

铰缝与空心板接触面的黏结滑移关系采用COMBIN39单元进行模拟。采用双折线模型黏结滑移曲线作为理论支撑，需要分别确定接触面黏结强度  $\tau_u$ 、双折线模型上升段黏结滑移刚度K和最终滑移与峰值滑移比值  $S_u/S_0$  三个参数。其中接触面黏结强度  $\tau_u$  根据王振领的计算公式  $\tau = 0.06956\zeta f_{cum} + \gamma\mu\rho_s f_y$  来确定，各系数确定如下：由于现场浇筑铰缝混凝土时预先洒水润湿界面，但无界面剂，所以  $\zeta = 1$ ，空心板和铰缝混凝土均为C50混凝土；黏结滑移刚度基于刘沛林<sup>[9]</sup>的研究取15MPa/mm；由于接触面没有设置插入式钢筋，可认为接触面发生脆性破坏，最终滑移与峰值滑移的比值  $S_u/S_0$  取1.5。

二、车辆荷载的布置

本文通过车辆荷载分析铰缝的力学性能变化，标准车辆的前轴和后轴之间距离为12.8m，荷载在跨中位置纵向对称布置，由于本模型只考虑两块板，因此横向

只能布置后轴的单轮，也即单轮70kN，纵向和横桥向车辆荷载布置如图4所示，车轮下等效均布荷载大小为  $5.83 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

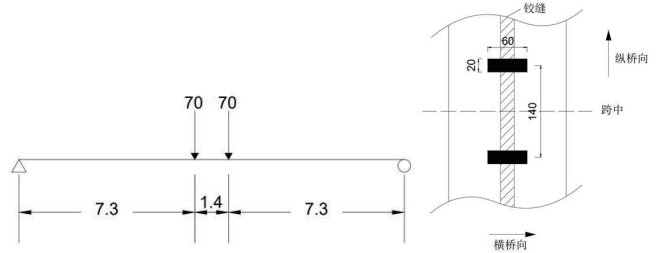


图4 a) 车辆荷载纵向布置(尺寸单位: m; 荷载单位: kN), b) 横向布置(尺寸单位: mm)

三、基于数值分析的铰缝传力机理和破坏过程分析

设立两组分别考虑有无微膨胀混凝土的有限元模型，验证自密实微膨胀混凝土膨胀预应力效应。模型一作为基础模型，铰缝内设置钢筋，不考虑铰缝混凝土的微膨胀；模型二在模型一的基础上，赋予铰缝混凝土材料线膨胀系数，通过升温模拟微膨胀，具体升温数值通过铰缝混凝土的线膨胀系数和膨胀率计算得到，数值为20℃。

根据模型一的计算结果，提取铰缝内应力和弹簧力，分析铰缝内应力分布和接触面黏结性能(三个方向的弹簧力分别表示接触面三个方向的黏结情况)。对比模型一与模型二的破坏模式和极限承载力，得出自密实微膨胀混凝土的微膨胀性能对于接触面预应力效应的作用。

(一) 铰缝内应力分布及接触面黏结性能

根据模型一的计算结果，分析铰缝内应力分布和接触面黏结性能，在此以弹簧单元模型的线弹性阶段结果进行说明，然后说明铰缝和空心板接触面黏结强度对结构的影响。

铰缝内应力分布包括横向正应力  $\sigma_x$ 、竖向切应力  $\tau_{zy}$ 、纵向切应力  $\tau_{zx}$  三个应力。

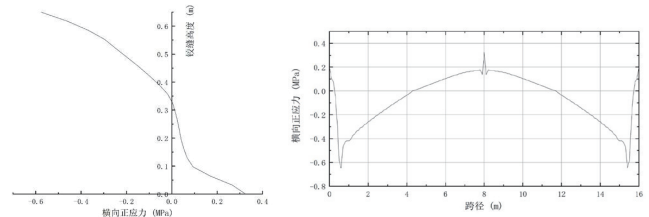


图5 跨中截面横向正应力  $\sigma_x$  沿铰缝高度和纵桥向分布图

跨中截面从铰缝底部到顶部的横向正应力如图5所示。由图可见跨中的铰缝纵截面在上部受压，下部受拉，受拉峰值位于铰缝底部，横向拉应力峰值出现在跨中附近，也即车辆荷载作用位置附近，且横向拉应力在跨中发生一微小的突变；从跨中到支座两端横向正应力逐渐由受拉转为受压，并且在支座处达到受压峰值。

跨中截面从铰缝底部到顶部的竖向切应力如图6所示，跨中铰缝竖向切应力  $\tau_{zy}$  在底部0.06m范围内由峰值应力减小至0，峰值应力出现在铰缝底部，0.06m以上的铰缝竖向切应力基本维持在一个很低的状态，接近于

0，且应力值几乎均为负值，在铰缝断面形状变化处竖向切应力有相应的改变，因此铰缝底部是竖向切应力的薄弱部位。竖向切应力峰值出现在支座附近，从支座向跨中逐渐减小，除支座处全桥范围内竖向切应力几乎均

维持在0左右，全桥范围内竖向切应力影响最大的是支座位置，即支座处的巨大剪力容易引起铰缝的竖向剪切破坏。

跨中截面从铰缝底部到顶部的纵向切应力如图7所

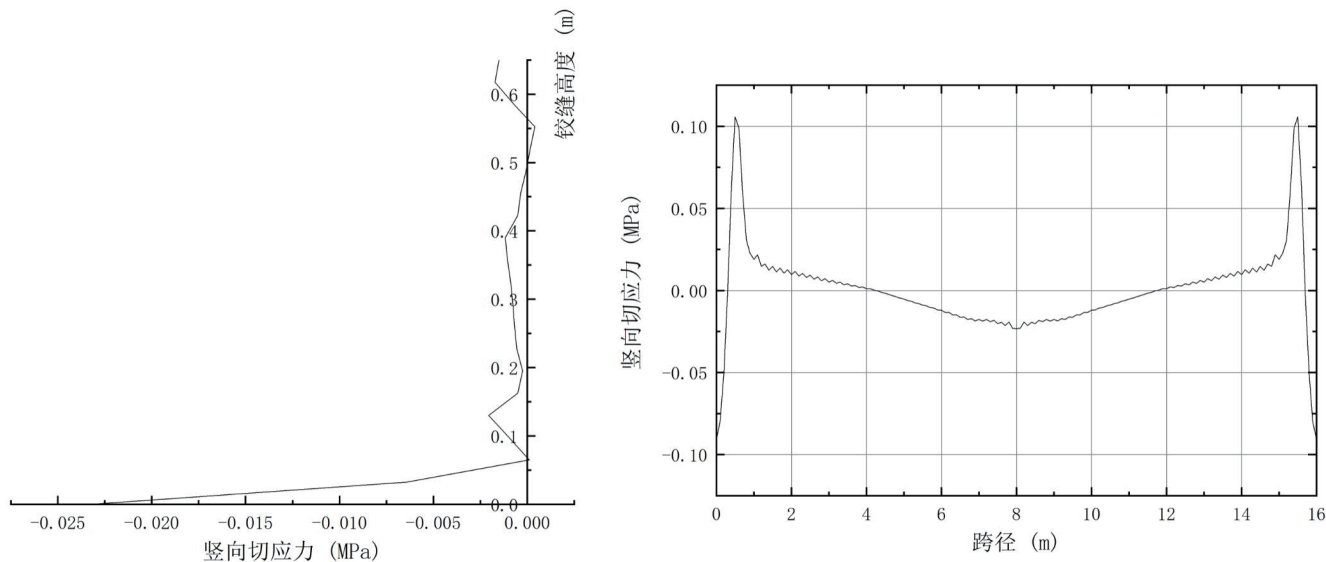


图6 跨中截面竖向切应力 $\tau_{xy}$ 沿铰缝高度与纵桥向分布图

示。切应力在底部0.15m范围内由峰值应力减小至0附近，峰值应力出现在铰缝底部，0.15m以上铰缝竖向切应力由负值逐渐变为正值，并在0.6m突变为负值，应力发生突变的位置与铰缝断面形状变化位置是相对应的，由此可见，铰缝断面形状对于纵向切应力的分布有着很

大的影响。此外，铰缝顶部和底部纵向切应力值都相对较大，铰缝也更容易在顶部发生纵向开裂，在底部发生与混凝土的黏结失效。铰缝底部点的纵向切应力在支座附近出现峰值，从支座向跨中应力逐渐减小，在跨中车辆荷载作用位置迅速减小至0。

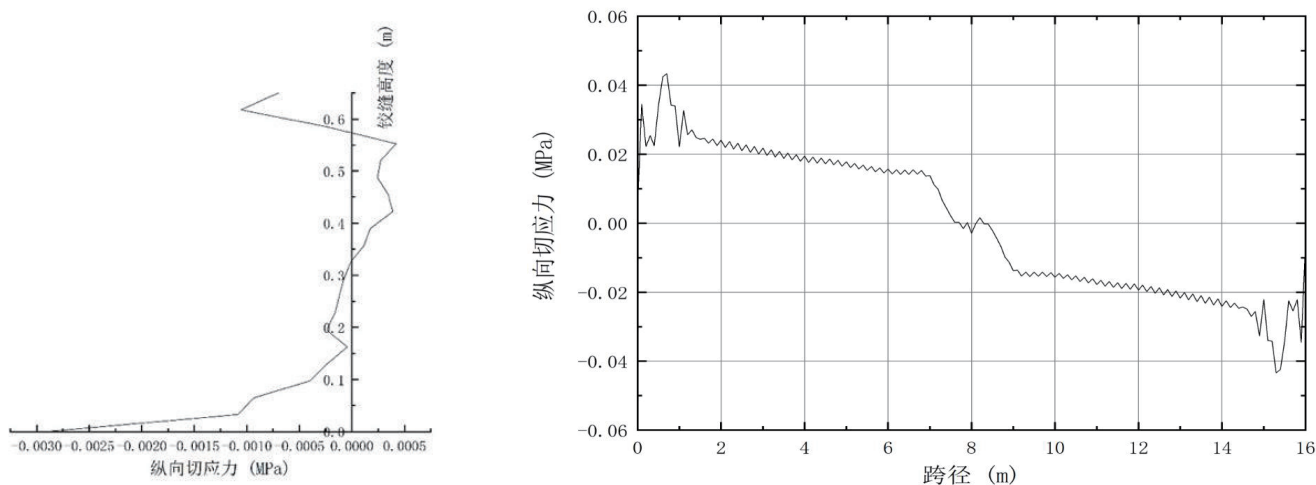


图7 跨中截面纵向切应力 $\tau_{zx}$ 沿铰缝高度与纵桥向分布图

(二) 接触面黏结性能

弹簧单元包括X、Y、Z三个方向，下面分别展示三个方向弹簧力的等值面图像，根据图像选取关键截面采集铰缝底部到顶部的弹簧力。

X向弹簧力表示铰缝和空心板之间的纵向滑移，选

取支座附近弹簧力最大值出现的截面，距离支座端部0.7m，采集接触面上铰缝底部到顶部各点的弹簧力，如图8所示。由图可知，X向弹簧力从底部往顶部逐渐减小，纵桥向的铰缝和空心板的滑移也是从底部往顶部逐渐减小，铰缝底部滑移量最大。

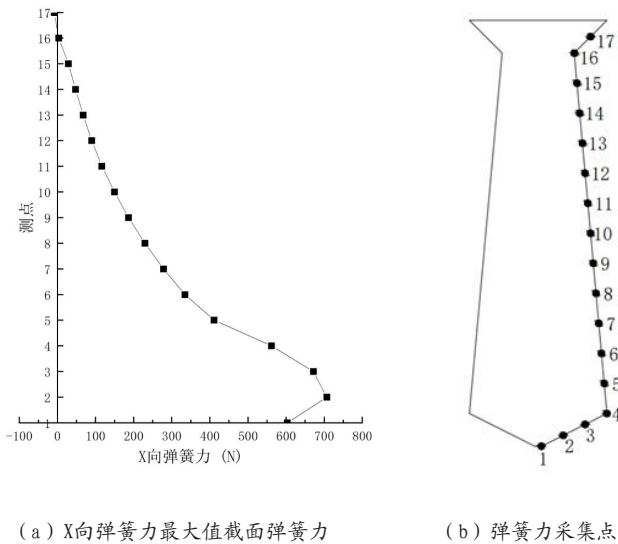


图8 X向弹簧力最大值截面沿铰缝高度分布

Y向弹簧力表示铰缝和空心板之间的竖向滑移，取支座附近弹簧力最大值出现的截面，距离支座端部0.5m，采集接触面上铰缝底部到顶部各点的弹簧力，如图9所示。由图可知，Y向弹簧力从底部往顶部逐渐减小，也即在铰缝下半部与空心板存在明显滑移，铰缝上部滑移量很小。

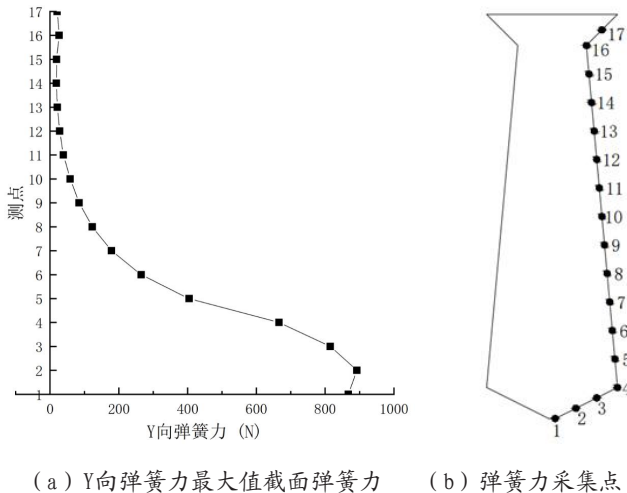


图9 Y向弹簧力最大值截面沿铰缝高度分布

Z向弹簧力表示铰缝和空心板之间的横向滑移，取跨中弹簧力最大值出现的截面，距离支座端部7.6m，即跨中附近，采集接触面上铰缝底部到顶部各点的弹簧力，如图10所示。由图可知，Z向弹簧力从铰缝底部往顶部由受拉变为受压，即跨中附近铰缝底部与空心板有被拉开的趋势，可以得知，跨中铰缝与空心板接触面的

黏结是受力不利的部位，这与装配式空心板梁桥跨中铰缝易开裂的事实相符合。

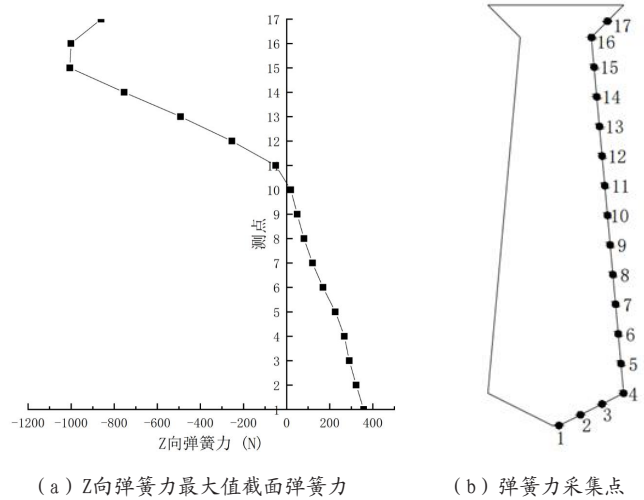


图10 Z向弹簧力最大值截面沿铰缝高度分布

(三) 微膨胀效应分析

对比模型一和模型二，模型二额外考虑铰缝混凝土的微膨胀，对比两者的破坏模式和极限承载力，分析得出微膨胀性能对于接触面预应力效应的作用。

模型一和模型二混凝土开裂过程的汇总如表1所示。

由表可知，跨中裂缝的发展两种模型几乎相同，对于支座附近的裂缝开展，模型二相对延缓，即微膨胀效应使得支座附近的混凝土开裂推迟。表中仅列出了支座附近混凝土顶部出现横向裂缝之前的开裂过程，之后两种模型的裂缝开展不再有类似现象。

模型二开裂过程如下所述，加载到995.95kN时，铰缝与空心板接触面开始出现裂缝，且在纵桥向相当一段长度内均匀分布，如图11所示。

加载到1155kN时，对比模型一，支座附近铰缝和空心板板顶裂缝几乎没有开展，铰缝内裂缝情况主要集中在中下部，裂缝的发生主要集中在接触面附近，如图12所示。

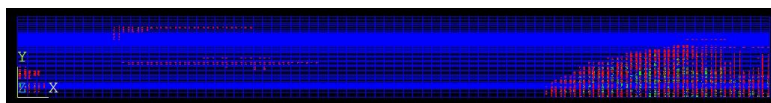
当加载到极限荷载的60%左右时，微膨胀效应对于支座附近的开裂有延缓作用，达到极限荷载后，微膨胀效应对于铰缝内裂缝具有明显改善作用，但需要注意的是接触面上裂缝的开展，接触面裂缝的发展对于接触面的黏结性能会造成一定的影响。

四、结论

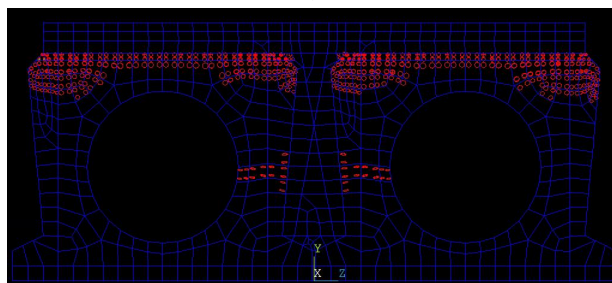
基于ANSYS数值分析的结果分析了铰缝传力机理以及破坏过程，包括铰缝内应力分布和接触面黏结性能，得到了铰缝内钢筋的作用和自密实微膨胀混凝土微膨胀

表1 模型一和模型二混凝土开裂过程汇总表

模型一对应荷载/kN	模型二对应荷载/kN	现象
180.10	-	跨中车辆荷载作用位置铰缝和空心板接触面底部开裂产生横向裂缝
182.41	182.41	跨中初始裂缝迅速向上发展至板高中部
214.17	248.82	跨中裂缝继续向两端开展，支座附近铰缝从底部出现上下拉裂
480.26	536.66	跨中纯弯段分布大量横向裂缝，支座附近裂缝向上发展接近板高中部
677.70	635.37	跨中裂缝继续向两端延伸开展，支座附近铰缝和混凝土顶部出现横向裂缝

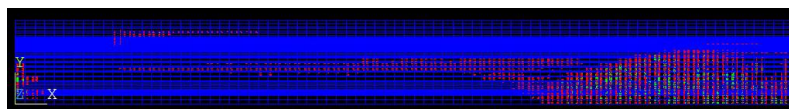


(a) 跨径方向

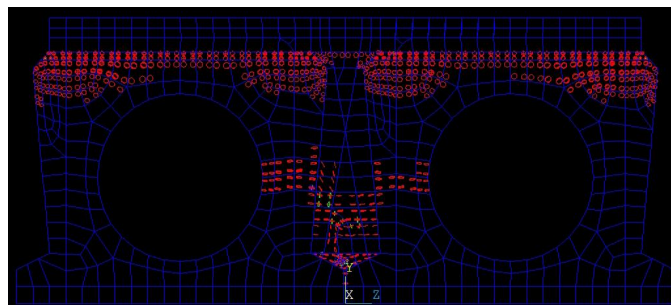


(b) 接触面裂缝横截面图

图 11 加载到 995.95kN 时裂缝图



(a) 跨径方向



(b) 支座附近裂缝横截面图

图 12 加载到 1155kN 时裂缝图

性能的作用，具体结论如下：

1) 空心板梁桥处于线弹性阶段时，铰缝内横向正应力在跨中和支座分别出现最大拉应力和最大压应力，跨中铰缝底部易出现纵桥向裂缝，导致桥面铺装的纵向开裂；竖向切应力在支座附近出现极值，支座处剪力过大易引起铰缝的竖向剪切破坏；纵向切应力相对而言处于一种较低的应力状态，其对结构的破坏不起决定性作用。

2) 铰缝与空心板接触面横桥向、纵桥向和竖向三个方向均在铰缝底部出现最大滑移量，易发生跨中铰缝处接触面的黏结失效，导致底部开裂。

3) 通过试验结果，得出微膨胀效应对于铰缝而言，加载到极限荷载的60%左右时，微膨胀效应对于支座附近的裂缝开展具有延缓作用，达到极限荷载后，可以改善内部混凝土裂缝的开展，与普通混凝土在同等荷载下对比，铰缝内部混凝土的开裂过程得到推迟甚至是改善。

#### 参考文献

[1] 陈宝春, 陈友杰, 赵秋主编. 桥梁工程[M]. 人民交通出版社股份有限公司, 2017: 410.  
 [2] 芮伟国, 彭英俊, 何涛, et al. 微膨胀钢壳沉管自密实混凝土的设计[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(04): 20-26+56.

[3] 朱正国, 彭修宁. HCSA膨胀剂制备C50微膨胀自密实钢管混凝土的方法研究[J]. 混凝土, 2021(01): 115-117+121.

[4] 孙磊, 白英. 基于HCSA的膨胀混凝土制备及其在微膨胀自密实钢管柱混凝土的应用研究[J]. 公路工程, 2020, 45(04): 202-205.

[5] 牟廷敏, 宋晓波, 范碧琨, et al. C50高抛自密实微膨胀钢管混凝土的研究与应用[J]. 混凝土, 2012(09): 103-105.

[6] 张吉红, 李长永, 付妍, et al. 装配式结构接缝微膨胀自密实混凝土收缩和力学性能研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2021, 51(05): 624-630.

[7] 韩根生, 张娟秀, 叶见曙. 空心板自密实微膨胀混凝土铰缝抗剪性能研究[J]. 公路, 2014, 59(03): 53-57.

[8] 郭金亮. 钢管拱桥自密实微膨胀混凝土泵送顶升施工技术[J]. 公路, 2017, 62(07): 129-133.

[9] 刘沛林, 时旭东, 张天申. 装配式钢筋混凝土筒支板梁桥铰缝接触面应力分析[J]. 特种结构, 2010, 27(04): 77-80+84.

作者简介: 周福, 男, 1984.10, 湖北鄂州, 汉, 大学本科, 职称或职务: 工程师, 研究方向: 市政桥梁施工。