

# 预制墩新型钢混组合连接装置力学性能参数分析

吴 曼<sup>1</sup>, 占建宏<sup>2</sup>, 姜兆起<sup>3</sup>, 徐方圆<sup>1,4</sup>, 汤新亮<sup>5</sup>, 魏 俊<sup>4</sup>

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 萧山区交通运输建设发展中心, 浙江 杭州 311215;

3. 杭州市交通运输发展保障中心, 浙江 杭州 310030; 4. 浙江交通职业技术学院, 浙江 杭州 311112;

5. 杭州市交通工程集团有限公司, 浙江 杭州 310008)

**摘 要:** 以工程104国道杭州河庄至衙前段工程南阳北互通NW匝道预制拼装桥墩1#墩~5#墩为研究背景, 建立了精细化的桥墩数值分析模型, 考虑不同屈服强度钢板、壁板高度对预制墩柱力学性能的影响。研究结果表明: 连接装置强度越大, 壁板高度越高, 水平承载能力越强; 降低壁板高度、使用低屈服点钢材, 可以提高墩柱耗能能力; 选用高屈服点钢材, 可使锚杆起到分担荷载的作用, 同时可提高连接装置与墩柱间的连接性能。

**关键词:** 预制墩柱; 连接装置; 屈服钢板; 钢壁板高度; 有限元分析

中图分类号: U443.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0283-08

## Analysis on Mechanical Performance Parameters of New Steel-concrete Composite Connection Device for Prefabricated Piers

WU Man<sup>1</sup>, ZHAN Jianhong<sup>2</sup>, JIANG Zhaoqi<sup>3</sup>, XU Fangyuan<sup>1,4</sup>, TANG Xinliang<sup>5</sup>, WEI Jun<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Xiaoshan District

Transportation Construction and Development Center, Hangzhou 311215, China; 3. Hangzhou Transportation Development and

Guarantee Center, Hangzhou 310030, China; 4. Zhejiang Communications Polytechnic, Hangzhou 311112, China; 5. Hangzhou

Transportation Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou 310008, China)

**Abstract:** With taking the prefabricated assembled piers 1#~5# of Nanyang North Interchange NW ramps in the 104 National Highway Hangzhou Hezhuang to Yaqian Project as the research background, the refined pier numerical analysis model is established to consider the effects of different yield strength steel plates and wall plate heights on the mechanical performance of prefabricated pier column. The results show that the greater the strength of the connecting device, the higher the height of wall plate, and the stronger the horizontal bearing capacity. The reduction of the wall plate height and the use of low-yield point steel can improve the energy consumption capacity of the pier columns, and the choice of high-yield point steel can make the anchor rod play a role in load sharing, and at the same time, can improve the connecting performance between the connecting device and the pier columns.

**Keywords:** prefabricated pier column; connection device; yield steel plate; height of steel wall plate; finite element analysis

## 0 引 言

传统现浇墩柱在施工过程中存在周期长、影响交通、环境污染等问题。因此, 预制拼装技术逐渐成为我国建设桥梁的主流方式。目前我国预制墩柱常使用灌浆套筒连接<sup>[1-4]</sup>、波纹管连接<sup>[5-8]</sup>、承插式连接<sup>[9-12]</sup>以及后张预应力连接<sup>[13-16]</sup>。然而其不足之处

难以避免: 灌浆套筒内灌浆质量不容易被检测<sup>[17]</sup>; 波纹管连接外伸钢筋过长, 不便运输; 承插式连接需要大量混凝土进行后浇筑浪费资金; 后张预应力连接锚具一旦破坏, 整个预应力体系基本丧失。因此, 研究简化施工流程、成本低的预制墩柱新型连接装置是未来桥梁发展的重要方向。

丁怡宣等<sup>[18]</sup>和魏民、王吉生<sup>[19]</sup>分别研究法兰盘安装高度与墩柱直径、壁厚对预制墩柱力学性能的影响, 法兰盘安装高度对墩柱承载力能力影响较大, 特定条件下抗力随壁厚的增加而增加。刘猛等<sup>[20]</sup>对墩柱与承台连接处设计了旋扭式连接, 试验结果显示现浇墩与预制墩最大承载力相同且可提高预制

收稿日期: 2025-01-02

基金项目: 浙江省交通运输厅重大交通建设工程科研项目(2024-GCKY-02)

作者简介: 吴曼(1998—), 女, 硕士, 从事土木工程研究工作。

通信作者: 徐方圆(1987—), 女, 博士, 副教授, 从事混凝土桥梁结构性能研究工作。电子信箱: xfyalla@163.com

墩柱耗能能力。Xin等<sup>[21]</sup>研究了半刚性连接方式,通过拟静力试验研究可知钢筋不施加预应力其延性优于现浇混凝土试件。何云武等<sup>[22]</sup>提出在空心圆墩中后浇混凝土的方法,实现墩柱与承台的连接,后浇混凝土浇筑高度过高会降低预制墩柱的耗能能力与承载能力。徐亚洲等<sup>[23]</sup>提出螺纹钢法兰连接装置,通过拟静力加载试验研究其抗震性能,结果显示螺纹钢法兰连接预制装配桥墩具有一定的自复位能力。上述研究成果主要对比了预制墩柱与现浇混凝土之间力学性能的差异,但较少涉及连接装置受力性能研究。

本文以104国道杭州河庄至衙前段工程为研究对象,基于有限元软件对预制墩柱受力性能进行研究,通过力与位移曲线分析预制墩柱承载能力、混凝土损伤分析破坏过程、锚杆作用力、开孔板连接件剪力、钢壁板应变分布分析连接装置受力情况、开孔板-混凝土相对滑移分析连接性能,研究壁板高度与材料对预制墩柱力学性能的影响。

## 1 新型钢混组合装置连接

为简化施工工序,提高施工质量,新型钢混组合连接装置由传统混凝土内部连接转换为外部钢与钢的连接。主要构件包括连接装置(底钢板、开孔板、钢壁板、加劲板焊接而成)、调平钢板、定位预埋板、六角长螺母(垫片、长套筒、螺栓组成)、螺栓帽、锚杆。图1所示为新型钢混组合连接预制墩柱截面示意图。新型预制墩施工顺序为分别将螺栓插入连接装置主筋预留空中,与长螺母进行旋拧连接;将主筋旋拧入长螺母,实现新型连接装置与主筋成为整体从而实现主筋向连接装置的传力,浇筑混凝土,完成墩柱预制;将预制墩柱垂直吊装在连接装置上部,预埋入承台中的锚杆穿入连接装置锚杆预留孔,通过螺栓帽旋拧,实现墩柱与承台之间的整体连接,具体布置如图2所示。

## 2 有限元模型建立

### 2.1 模型构造与分组

为研究新型连接方式的受力性能,以依托工程104国道杭州河庄至衙前段工程1#~5#墩为原型设置模型,按照1:2比例进行缩尺设计。模型总高度4 220 mm,墩柱尺寸750 mm×750 mm×3 420 mm,承台尺寸2 000 mm×1 400 mm×800 mm。墩柱纵向钢筋直径20 mm,配筋率为1.56%。箍筋直径10 mm,柱底

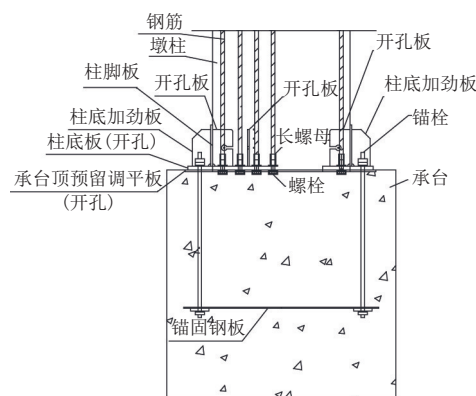


图1 预制墩柱示意图

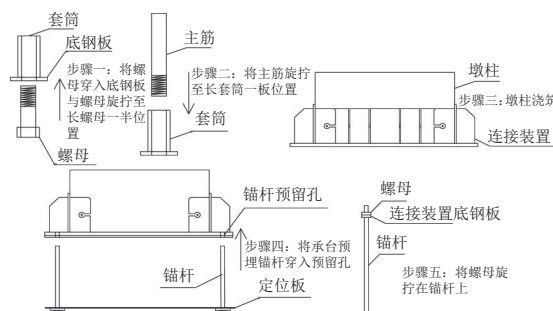


图2 钢混组合连接装置连接步骤图

处箍筋加密间距800 mm,柱顶处箍筋加密间距为750 mm,非加密区间间距为1 500 mm。连接装置底钢板尺寸1 000 mm×1 000 mm×20 mm,中间方形圆孔洞截面尺寸为450 mm×450 mm,角尺寸50 mm,主筋与螺母连接处开设直径为20 mm的圆形孔洞,锚杆与螺栓帽连接处开设直径为26 mm的圆形孔洞。壁板、加劲板、开孔板厚度均为10 mm。预制墩模型具体尺寸如图3所示。为分析材料与壁板高度对新型钢混组合连接预制墩柱力学性能的影响,共设计25个墩柱模型,模型参数设计如表1所列。

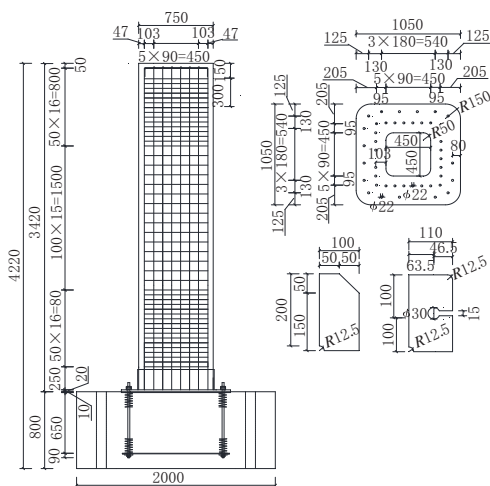


图3 预制墩模型尺寸图(单位:mm)

### 2.2 模型参数

采用有限元软件ABAQUS<sup>[24]</sup>建立新型钢混组合连接装置模型。考虑混凝土失效模式为弹性变形与

表 1 预制墩柱模型参数

| 模型名称      | 壁板高度/mm | 连接装置屈服强度/MPa |
|-----------|---------|--------------|
| H130-Q450 | 130     | 450          |
| H130-Q355 | 130     | 355          |
| H130-Q225 | 130     | 225          |
| H130-Q160 | 130     | 160          |
| H130-Q100 | 130     | 100          |
| H230-Q450 | 230     | 450          |
| H230-Q355 | 230     | 355          |
| H230-Q225 | 230     | 225          |
| H230-Q160 | 230     | 160          |
| H230-Q100 | 230     | 100          |
| H330-Q450 | 330     | 450          |
| H330-Q355 | 330     | 355          |
| H330-Q225 | 330     | 225          |
| H330-Q160 | 330     | 160          |
| H330-Q100 | 330     | 100          |
| H430-Q450 | 430     | 450          |
| H430-Q355 | 430     | 355          |
| H430-Q225 | 430     | 225          |
| H430-Q160 | 430     | 160          |
| H430-Q100 | 430     | 100          |
| H530-Q450 | 530     | 450          |
| H530-Q355 | 530     | 355          |
| H530-Q225 | 530     | 225          |
| H530-Q160 | 530     | 160          |
| H530-Q100 | 530     | 100          |

注:H、Q 分别为材料和钢壁板高度,其后数字为参数取值。

塑性变形的结合,承台与墩柱混凝土采用塑性损伤本构模型,单轴应力应变关系根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[24]</sup>建议的参数进行计算。锚杆与钢筋笼使用桁架单元(T3D2),预制墩柱其余构件均使用线性 8 节点实体单元(C3D8R)。

选取墩柱顶部的中点作为加载点,施加水平荷载与竖向荷载。主筋、箍筋、锚固钢板与混凝土之间采用“Embedded”接触作用。螺母与主筋通过 Tie

来模拟旋拧连接。开孔板与混凝土设置为通用接触,分析中切向摩擦系数为 0.5,竖向连接采用硬接触。螺栓预紧力使用降温法施加,锚杆上下两端与螺栓帽之间采用耦合约束。有限元模型如图 4 所示。

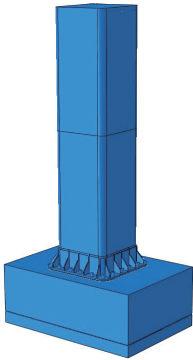


图 4 有限元模型

3 墩柱力学性能分析

3.1 力-位移曲线

图 5 与图 6 所示为不同强度钢板、钢壁板高度对预制墩柱力-位移曲线的对比图。由图可知,模型均呈现位移加载初始阶段,水平力呈线性增长趋势,达到屈服荷载后水平力缓慢上升至峰值荷载,随后下降至墩柱发生破坏。相同壁板高度,材料屈服点越低的模型,水平承载力小,延性大;材料相同,壁板高度高的模型,水平承载力大,延性小。以 H230-Q225 为参照模型,通过应力计算公式  $\sigma = \frac{M}{W}$  可得墩柱柱底在峰值荷载时应力为 2.68 MPa,模型应力为 3.10 MPa,模型网格之间会相互产生作用,因此理论数据小于模拟数据,误差较小证明模型结果的准确性。峰值荷载后使用材料强度低的连接装置预制墩柱水平承载力下降缓慢,延性较好。因此在实际预制墩设计中应按照实际工程需求,调整连接装置构造,高地震区连接装置建议采用低屈服点钢材。

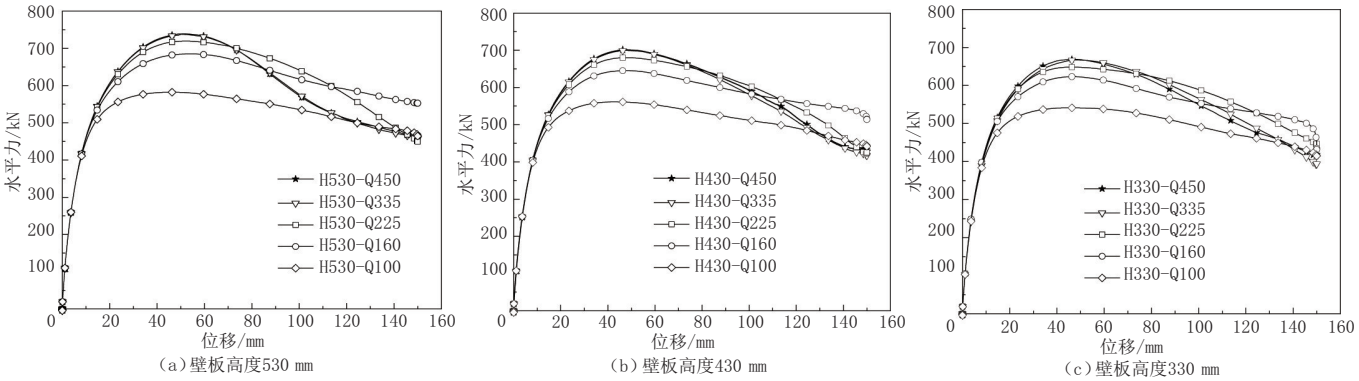


图 5 不同壁板高度预制桥墩力-位移曲线图

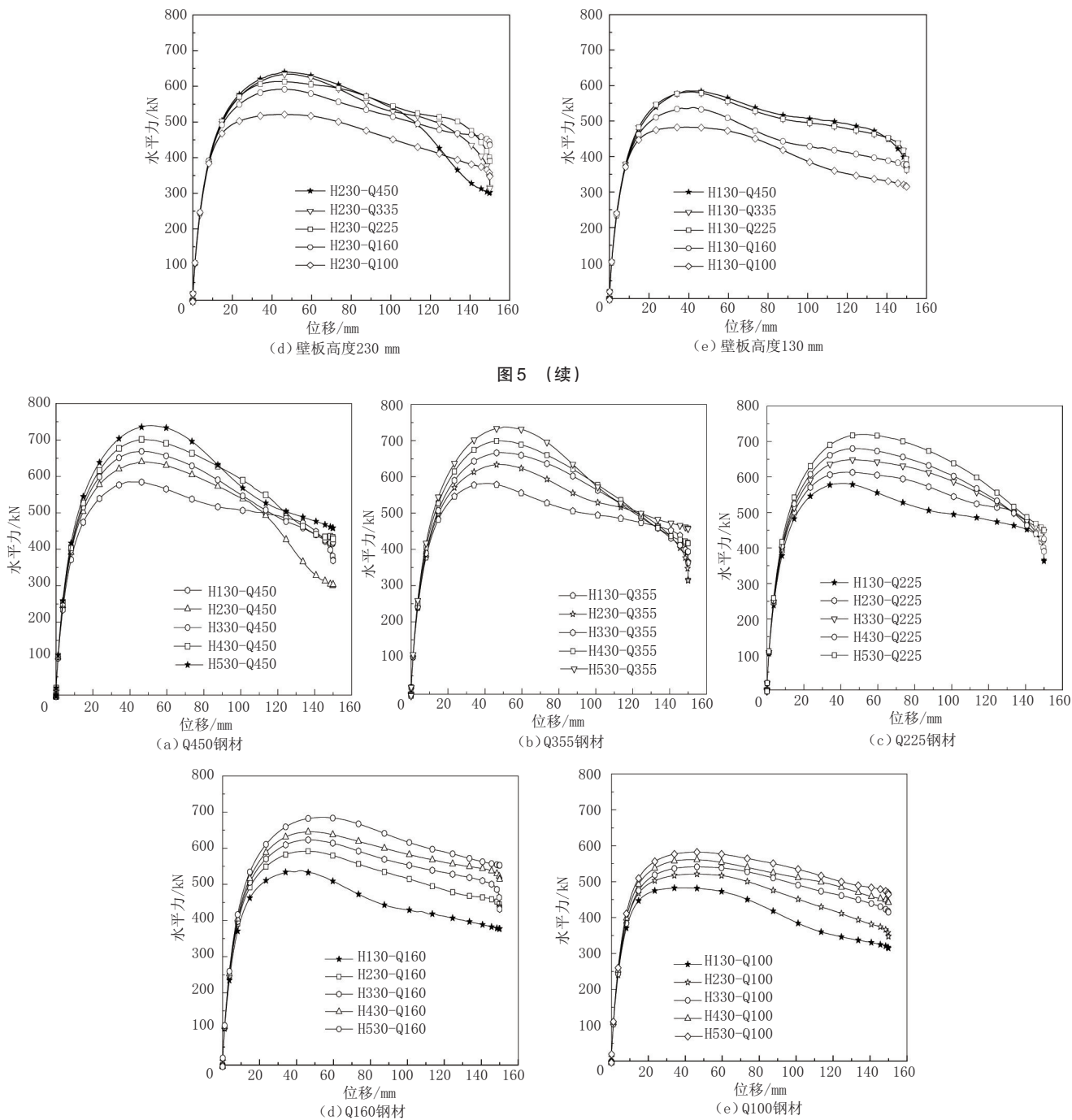


图6 不同钢板材料预制桥墩力-位移曲线图

3.2 混凝土损伤

图7所示为以H230-Q355模型为例的混凝土受拉侧与受压侧损伤分布图。模拟结果显示,损伤分布特征相似,且随着荷载施加,受拉侧混凝土先出现破坏,破坏范围逐渐从墩柱底部向上延伸,当荷载进一步加大时,混凝土损伤范围向平行于水平加载方向的截面开始蔓延,从下至上呈现倒三角形形状,此时受压侧混凝土也发生破坏,破坏区域由开孔板与混凝土接触位置发展至连接装置上侧。

图8所示以钢板强度与壁板高度为参数讨论墩

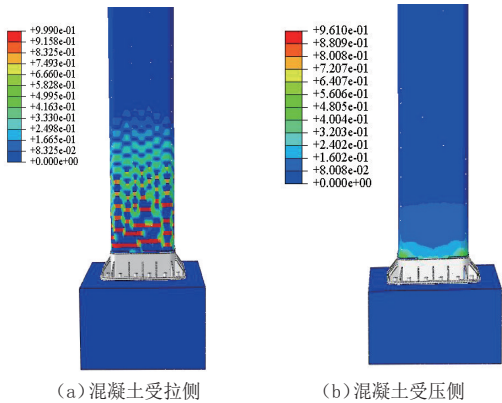


图7 混凝土损伤示意图

柱在峰值荷载时混凝土损伤情况。可知,增加钢板强度与壁板高度会加大混凝土损伤范围,H530-Q450模型受压侧混凝土破坏高度达到H130-Q100模型破坏高度的1.86倍。

3.3 锚杆作用力

通过降温法对锚杆施加106 kN受拉方向的预紧力,锚杆位移-预紧力变化曲线如图9所示。当材料强度大于255 MPa的模型,锚杆预紧力变化均呈现明显先上升后下降的趋势,说明此时锚杆随水平位移的增加分担更多的荷载。极限荷载之后,墩柱发生破坏,此时锚杆预紧力缓慢减小,说明锚杆逐渐退出承担荷载的工作。预制墩柱结构发生破坏后,材料强度为100 MPa时,锚杆预紧力仍呈现缓慢上升趋势

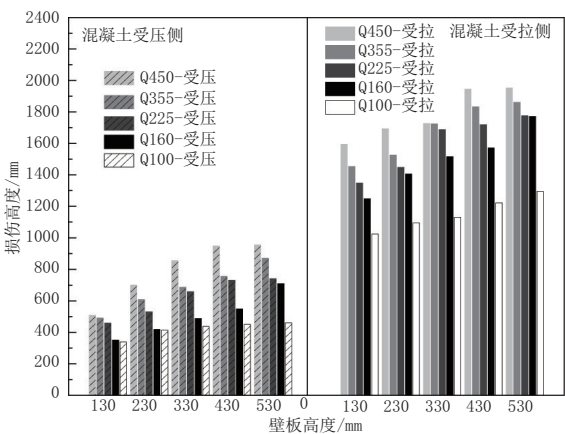


图8 混凝土损伤柱状图

势,说明锚杆始终对承担荷载起到一定作用,因其预紧力远低于材料强度高的模型,此时锚杆主要起到锚固作用。

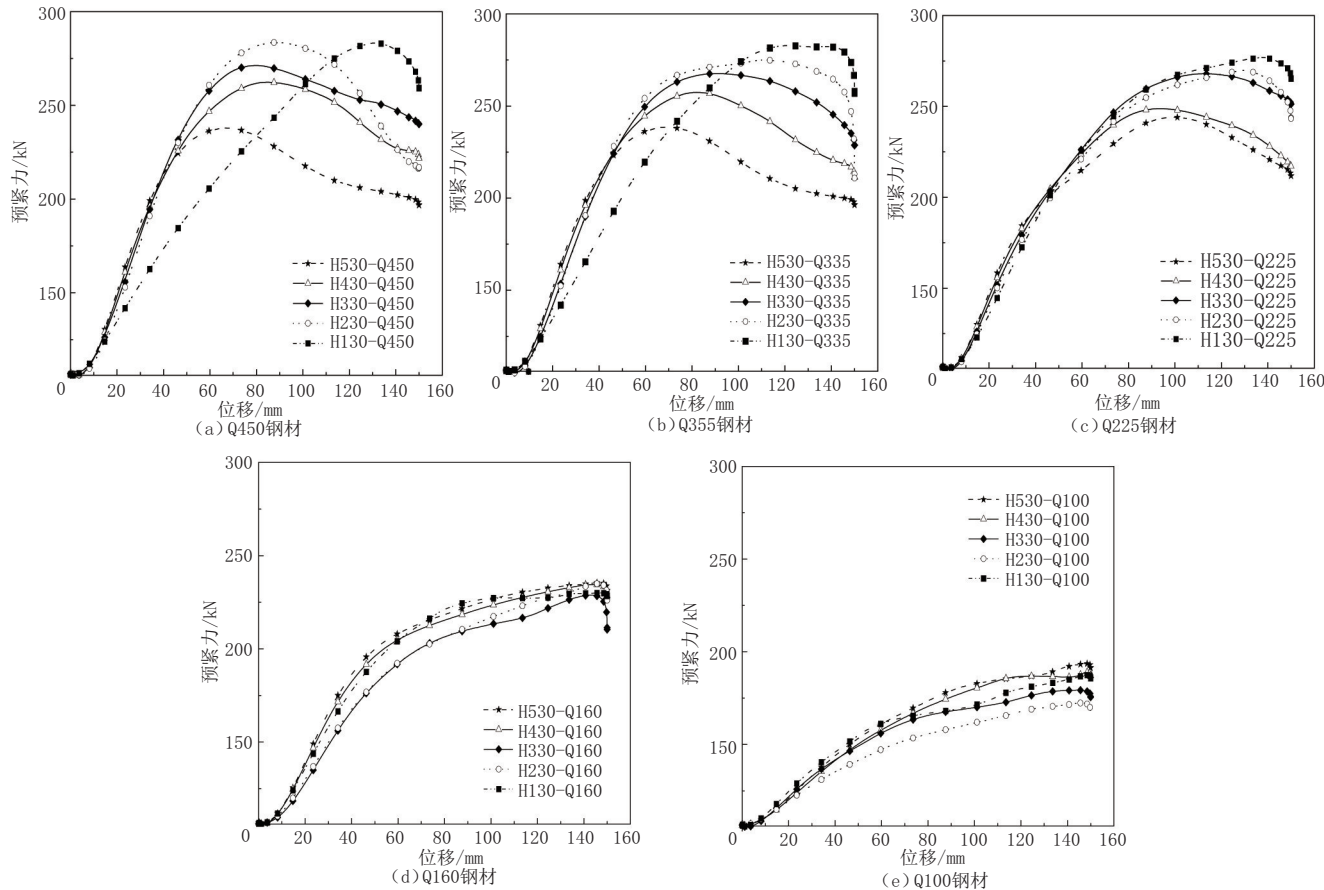


图9 不同材料钢板锚杆预紧力曲线图

3.4 开孔板连接件剪力

图10所示为开孔板孔内剪力在X方向上的分量。由图可知,开孔板内剪力均呈现先上升后下降的趋势。材料强度低的模型,剪力最小,材料为LY100的模型剪力最大,说明材料会影响开孔板内剪力的变化情况。原因为当混凝土所受拉力转化为剪力传递给连接装置时,屈服点更低的模型产生

更大的弯曲变形,混凝土与开孔钢板水平位移较大,导致开孔板孔内剪力增加。极限荷载之后连接装置材料强度大于355 MPa模型开孔板内剪力呈现负值现象,这是由于达到峰值荷载之后卸载过程中,锚杆主要承担墩柱施加的荷载,高钢壁板抑制连接装置变形,开孔板孔内剪力逐渐减小,且沿X轴负方向运动。

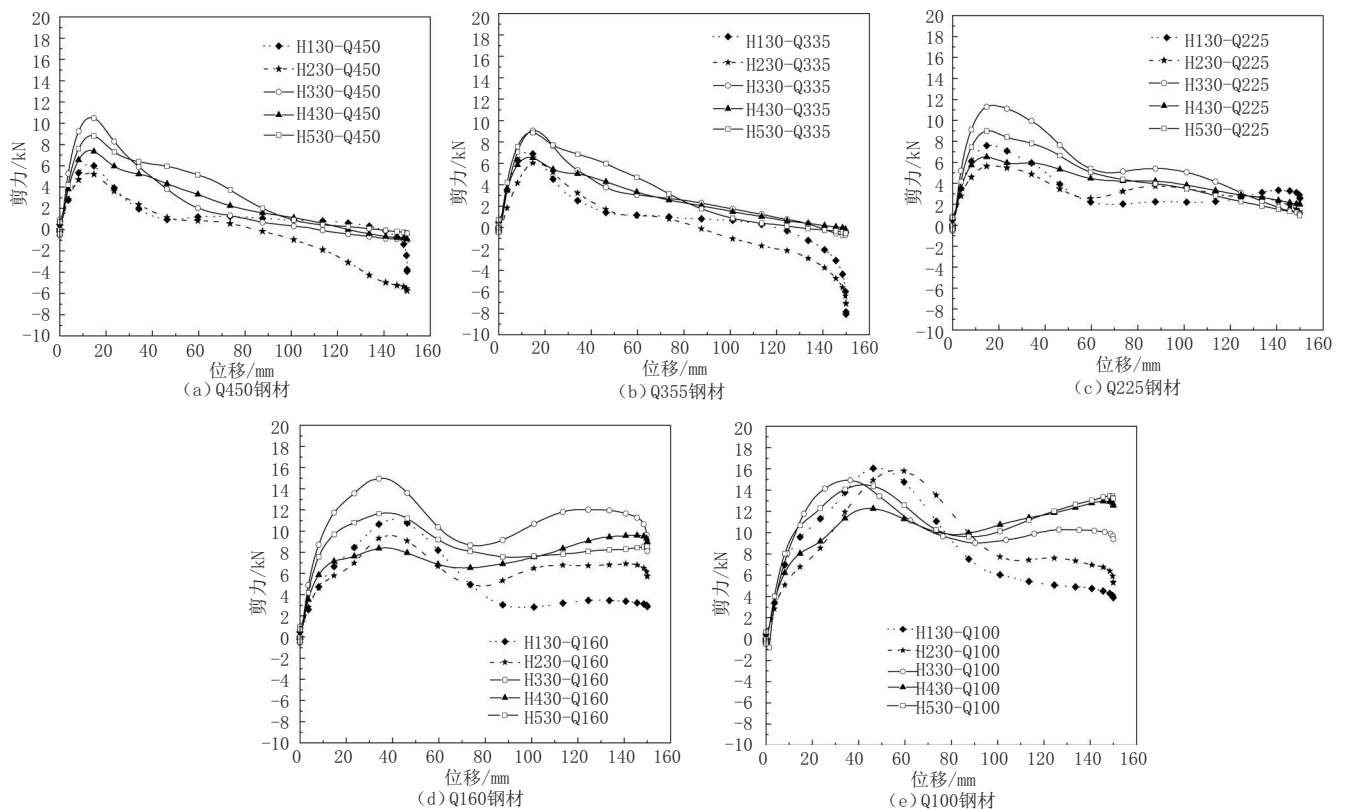


图10 开孔钢板连接件剪力曲线图

3.5 钢壁板应变分布

图11所示给出了峰值荷载时钢壁板应变沿高度方向的变化。由图可知,无论受拉侧钢壁板还是受压侧钢壁板,壁板高度位于中间位置处时应变最大。说明混凝土承受水平荷载产生弯曲时,此时连接装置钢壁板产生了相应的反力,从而应变增加,钢壁板损伤主要发生在连接装置中间区域。壁板应变则随着钢壁板的高度的增加而降低,说明壁板低的模型会产生较大的变形。钢板材料强度低于355 MPa的模型,拉压侧应变变化趋势相似,应变幅度变化小,

说明此时钢壁板整体发生屈服。

3.6 开孔板-混凝土相对滑移

混凝土墩柱与连接装置通过开孔钢板与钢壁板进行连接,模拟分析开孔钢板的竖向滑移可以衡量墩柱与连接装置的连接性能,图12给出了受拉侧混凝土开孔板-混凝土相对滑移变化曲线。由该图可知,H130-Q100的模型相对滑移显著大于其他模型;钢板材料强度大于255 MPa的预制墩柱其相对竖向滑移均呈现先上升后趋于平缓的趋势。在水平荷载加载初期,不同材料的两条曲线接近重合,说明此时

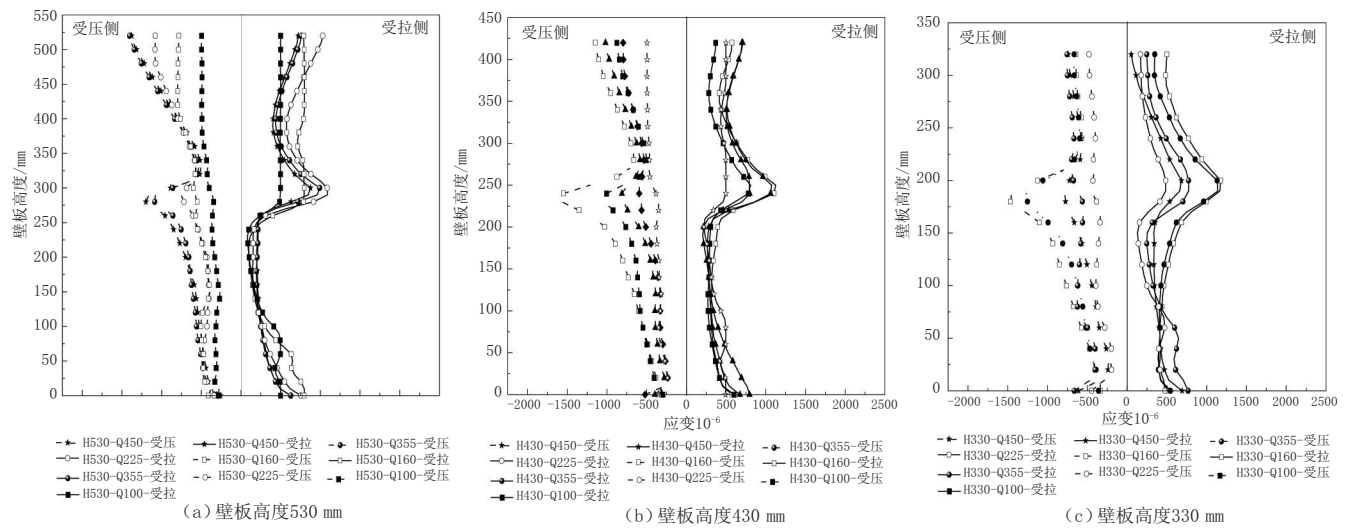


图11 钢壁板应变分布曲线图

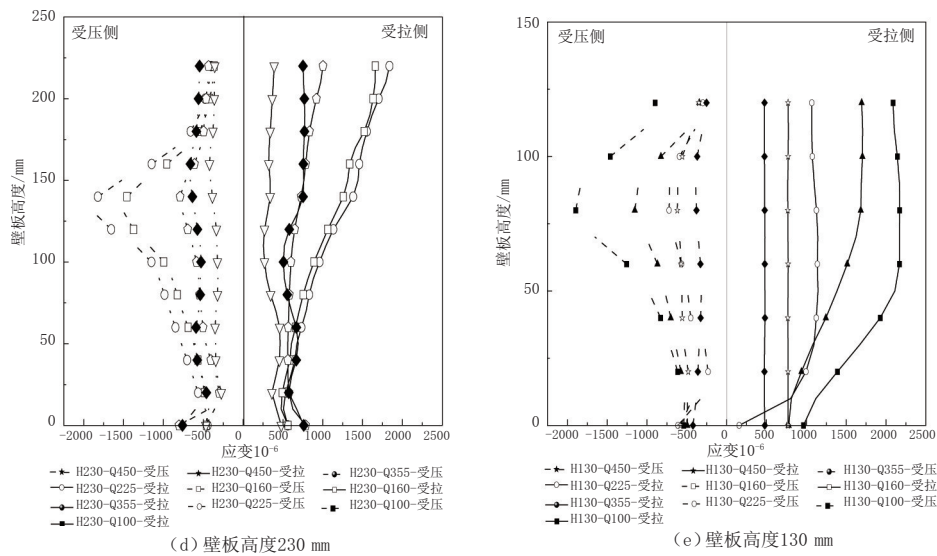


图 11 (续)

材料对墩柱竖向相对滑移作用不明显;随着水平荷载的增加,直至峰值荷载后竖向滑移曲线相对平缓,说明在墩柱破坏之前墩柱与连接装置始终产生竖向位移。

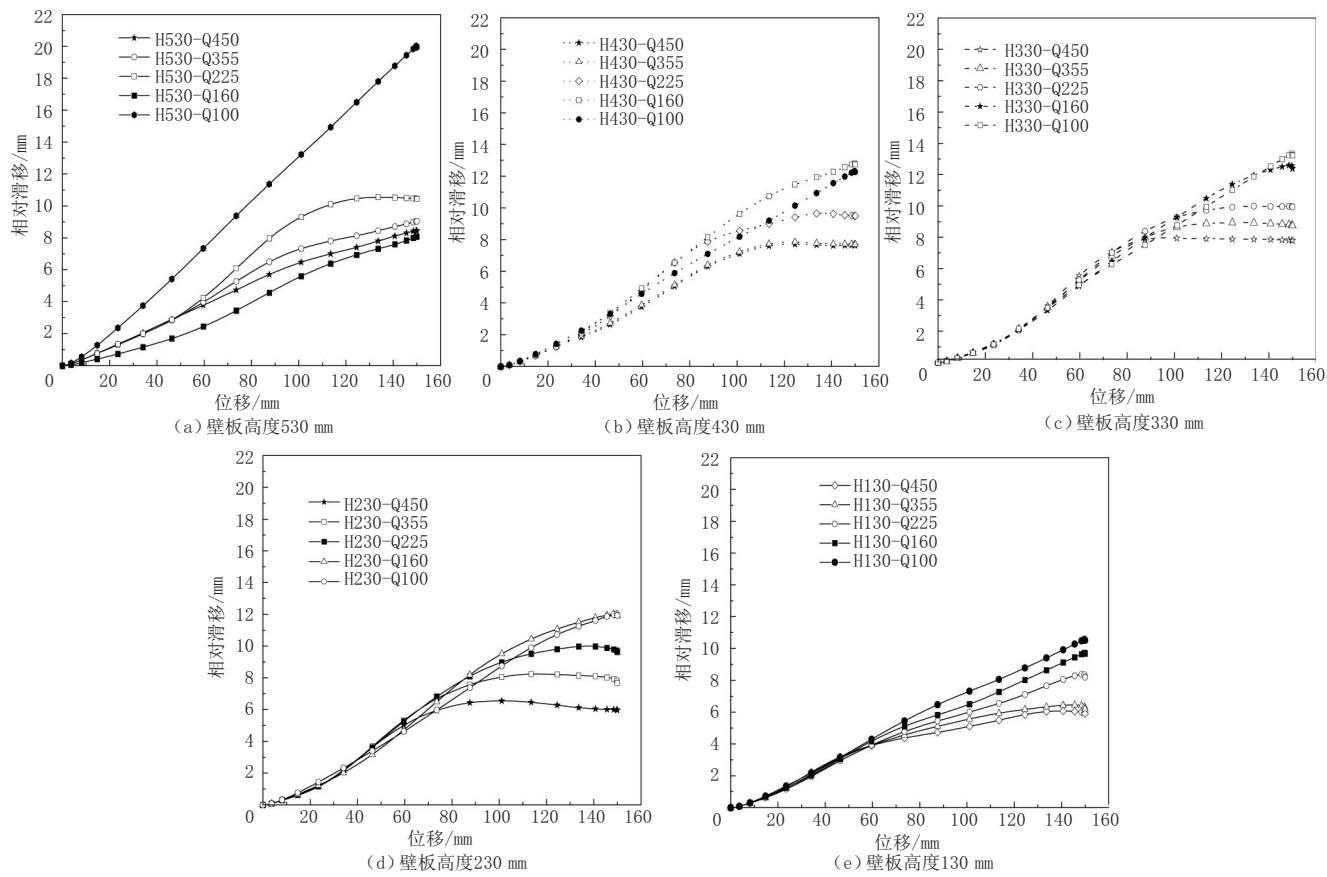


图 12 竖向相对滑移曲线图

基于上述预制墩柱与新型钢混组合连接装置的力学性能模拟分析结果可知,钢壁板过高会显著提高混凝土受压区损伤高度,钢壁板过低会大幅度降低预制墩柱水平承载能力,对此,连接装置壁板高度应适中选取。同时考虑本文研究的104国道依托工程位于低地震灾害区,综合考虑预制墩柱抗震性能

和建设成本,依托工程预制墩柱新型连接装置选用壁板材料为Q355、壁板高度为460 mm构造形式。

## 4 结 论

(1)通过新型钢混组合连接装置实现预制墩柱与承台之间的连接。连接步骤可分为两部分:锚杆

一端浇筑在承台混凝土中,另一端与连接装置旋拧连接完成承台与连接装置之间的连接;预制墩柱主筋旋拧至长螺母上半部分,螺栓旋拧在长螺母下半部分完成主筋与连接装置的连接。

(2)通过桥墩承载力及损伤分析可知,当壁板高度相同时,连接装置强度越高,水平承载能力越好;连接装置强度相同时,壁板越高,水平承载能力越强。混凝土发生受拉损伤时,墩柱的损伤高度随水平力的增加而增加。受压侧混凝土破坏区域由开孔板与混凝土接触位置发展至连接装置上侧。

(3)通过分析锚杆作用力可知,连接装置强度低的模型,锚杆主要发挥锚固连接装置与承台的作用,对于预制墩柱施加的承载力分担较少。钢板强度低的模型,开孔板承受水平剪力更高,连接装置横向变形更大。

(4)通过开孔板受力分析结果及开孔板混凝土相对滑移结果可知,使用高强度钢材的连接装置,开孔板孔内承受竖向剪力较小。水平力加载至后期,率先不再发生相对滑移,提高连接装置与预制墩柱的连接性能。

#### 参考文献:

- [1] 吴涛,刘全威,成然,等.钢筋套筒灌浆连接性能试验研究及筒壁应力分析[J].工程力学,2017,34(10):68-75.
- [2] 赵军,杜彦兵,朱万旭,等.灌浆套筒连接构件的有限元分析[J].混凝土,2019,360(10):150-154.
- [3] 郑永峰,郭正兴,曹江.新型灌浆套筒的约束机理及约束应力分布[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(12):106-111.
- [4] 刘洪涛,孔鹏超,王作虎,等.灌浆套筒连接预制拼装柱恢复力模型研究[J].建筑科学,2022,38(11):51-59.
- [5] 蓝亦辉,夏樟华,陈浩冲,等.灌浆波纹管装配式桥墩双向地震损伤评价方法[J].世界地震工程,2022,38(4):167-177.
- [6] 许劲,朱祖科,夏樟华.轴压比对灌浆波纹管连接预制拼装桥墩抗震性能的影响[J].福州大学学报(自然科学版),2022,50(4):521-529.

- [7] 刘朵,李航,熊辉,等.波纹钢管约束承插式拼装桥墩抗震性能研究[J].中国公路学报,2023,36(6):123-131.
- [8] 孟德超.金属波纹管灌浆连接构件力学性能数值分析[J].工程与建设,2024,38(4):832-838.
- [9] 晋智斌,陈科,陆军.预制浅承插式高强混凝土空心桥墩抗震性能试验[J].中国公路学报,2022,35(4):128-139.
- [10] 吕新建,李涛,刘朵,等.预制桥墩承插式连接轴压性能分析[J].结构工程师,2022,38(6):7-14.
- [11] 何岸,郑敦聪,蔡健,等.预制混凝土柱-基础承插式连接构件抗震性能研究[J].建筑结构学报,2023,44(12):110-121.
- [12] 晋智斌,陈科,陆军.预制浅承插式高强混凝土空心桥墩抗震性能试验[J].中国公路学报,2022,35(4):128-139.
- [13] 贾俊峰,赵建瑜,张强,等.后张预应力节段拼装CFST桥墩抗侧力学行为试验[J].中国公路学报,2017,30(3):236-245.
- [14] 包龙生,赵春艳,张远宝,等.预应力连接型装配式混凝土桥墩受力性能研究[J].广西大学学报(自然科学版),2021,46(1):29-41.
- [15] Hung H H, Sung Y C, Lin K C, et al. Experimental study and numerical simulation of precast segmental bridge columns with semi-rigid connections[J]. Engineering Structures, 2017(136): 12-25.
- [16] Dawood H, Elgawady M, Hewes J. Factors affecting the seismic behavior of segmental precast bridge columns[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2014, 8(4): 388-398.
- [17] Chen J W, Wang Z W, Liu Z Y, et al. Experimental investigation of mechanical behaviour of rebar in steel half grouted sleeve connections with defects in water/binder ratio[J]. Structures, 2020(26): 487-500.
- [18] 丁怡宣,曾玉昆,韩军峰,等.法兰连接预制装配桥墩力学性能分析[J].自然灾害学报,2019,28(4):40-51.
- [19] 魏民,王吉生.公路预制高强混凝土空心圆形桥墩及新型法兰连接的研究[J].工程与建设,2018,32(6):914-916;926.
- [20] 刘猛,亓路宽.旋扭式预制拼装桥墩试验分析[J].公路工程,2020,45(3):44-48;61.
- [21] Hsiao-Hui, HungYu-ChiSung, et al. Experimental study and numerical simulation of precast segmental bridge columns with semi-rigid connections[J]. Engineering Structures, 2017(316): 12-15.
- [22] 何云武,李嘉,江建,等.装配式空心墩与承台新型连接的性能影响研究[J].土木工程与管理学报,2021,38(6):60-71.
- [23] 徐亚洲,王志鹏,谢启芳,等.螺纹钢法兰连接预制装配桥墩抗震性能研究[J].土木工程学报,2021,54(5):65-76.
- [24] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].

(上接第239页)

- [11] 胡国伟,张宇宁,程文斌,等.大跨度连续刚构桥V型墩施工过程仿真技术研究与应用[J].中国铁路,2008(5):27-30.
- [12] 焦宁艳.阜阳泉河大桥V形墩及0号段施工技术[J].施工技术,2009(5):61-62;79.

- [13] 周永军.无平衡塔架V形墩施工技术[J].铁道建筑技术,2007(2):48-51.
- [14] 王广建.韩江特大桥深水V型墩顶主梁0号块支撑体系设计[J].铁道建筑技术,2010(5):5-8.