

SRP 加固预制节段拼装桥墩在车辆撞击下的动态响应

李清华, 张于晔

(南京理工大学土木工程系, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了减轻车辆对预制节段拼装桥墩的撞击作用, 采用高强钢丝织物复合材料 (Steel Reinforced Polymer, SRP) 加固预制节段拼装桥墩并进行数值模拟与分析。使用 LS-DYNA 建立预制节段拼装桥墩受冲击的数值模型, 并与已有实验数据对比, 验证了该数值模拟方法的准确性。在相同车辆撞击条件下, 对比分析了 RC 墩与 SRP 加固墩撞击力时程曲线、侧向位移和墩身损坏情况。以 SRP 加固位置、SRP 包裹层数和初始预应力水平为变量, 研究其对车辆-桥墩接触面撞击力和桥墩变形的影响规律。研究表明: 采用 SRP 对预制节段拼装桥墩进行合理加固, 可以有效减小接触面撞击力、墩身位移和桥墩损伤; 在桥墩底部及接缝处采用 SRP 加固对墩身具有更好的保护作用; SRP 包裹层数由 1 层增加到 3 层可以更好地限制墩身位移变形。

关键词: 预制节段拼装桥墩; 车辆撞击; 动态响应; 高强钢丝织物复合材料

中图分类号: U443.22; U441⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)05-0959-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.05.009

引言

随着交通运输行业的发展, 车辆撞击桥墩事故的发生概率逐年上升。车桥碰撞事故不仅对人员安全造成巨大威胁, 还会引发交通瘫痪, 产生巨大的经济损失^[1]。同时, 预制节段拼装桥墩因其突出的优点而被广泛应用。与现浇桥墩相比, 预制装配式桥墩有着构建质量可控、施工效率高、建设工期短等优势, 但在受到车辆撞击时, 其动态响应与现浇桥墩会有较大的区别: 预制装配式桥墩受撞后将产生节段间滑移变形和较大的挠度。因此, 对预制节段拼装桥墩抗车辆撞击性能的研究显得尤为重要。

已有许多关于不同结构在冲击荷载下的动态响应问题的研究。丁北斗等^[2]对单层柱面网壳结构进行冲击试验, 分析了冲击力、位移、加速度等时程曲线并确定其稳定承载力; 王延斌等^[3]采用双剪应力强度理论, 求解了简支圆板在冲击荷载作用下的动力响应问题。而针对预制节段拼装结构的桥墩在冲击荷载作用下动态响应的相关研究则非常有限。Zhang 等^[4]通过摆锤冲击试验系统对设计的预制节段柱进行侧向冲击实验, 结果表明节段间会出现较严重的剪切滑移变形; Do 等^[5]对预制节段拼装桥墩受车辆撞击的状况建立仿真模型并进行数值分析,

发现受撞击的桥墩会出现严重的位移变形和塑性铰区域混凝土损伤。因此对预制节段拼装桥墩进行合理的防撞击加固是必要的。

目前已提出了多种桥墩防撞击措施。张于晔等^[6]使用泡沫铝对桥墩进行了外包装加固, 分析了其抗车辆撞击的效果; Fan 等^[7]对车辆撞击下高性能纤维混凝土加固的桥墩进行了性能及参数敏感性研究; 郑植等^[8]设计了 FRP 复合材料防撞套筒, 与桥墩采用了蝴蝶型连接结构, 研究其可靠性能。但是这些加固措施都以整体现浇桥墩为研究对象, 其加固方法对于节段拼装桥墩不一定适用。为了提高预制节段拼装桥墩在侧向冲击下的抗剪性能, Zhang 等^[9]设置了梯形棱柱剪力键, 由于应力集中, 观察到更严重的混凝土破碎现象, 其后改进的拱形剪力键对混凝土破坏较小; Zhang 等^[10]采用 FRP 对拱形剪力键的节段拼装桥墩进行包裹, 证明 FRP 加固可以有效提高混凝土的强度, 减小桥墩的变形和损伤。然而, 对桥墩拱形剪力键的设置, 每个桥墩节段采用全包裹的加固方式和 FRP 本身偏贵的成本都会给该方法的推广造成困难。

高强钢丝织物复合材料是一种由高强钢丝编织而成的结构受力增强材料, 其钢丝织网是由纵向高强度钢丝扭成的钢绳与横向普通钢丝相互交织构成的。在加固混凝土结构方面, SRP 具有资源充足、

收稿日期: 2020-03-10; **修订日期:** 2020-07-16

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20211196); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目 (2019-JZ-013); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (30920021154)

成本低、抗剪切性能好等优势^[11]。Ascione等^[12]通过试验研究表明,SRP材料沿不同方向的强度具有较好的均匀性,而且SRP加固的结构在破坏时可以表现出更高的韧性和能量耗散。因此推测SRP在限制预制节段拼装桥墩在车辆撞击作用下的位移变形方面具有很强的适用性。王向阳等^[13]的研究也表明SRP加固可以有效减小爆炸冲击荷载对桥墩的破坏作用。然而,采用SRP加固节段拼装桥墩的方法尚未被提出,对撞击力、位移等动态响应的影响也尚不明确。

鉴于此,本文采用SRP对预制节段拼装桥墩进行合理加固,研究其受到车辆撞击时的动态响应。本文首先建立了车辆撞击桥墩的数值模型,并对预制节段拼装桥墩和SRP的建模方法进行了准确性验证。然后采用SRP对预制节段拼装桥墩进行了底部和接缝处的加固,并与未加固的桥墩进行相同车辆撞击条件下的撞击力时程曲线、位移-高度曲线及墩身应力分布和损伤情况的对比,以具体研究SRP加固预制节段拼装桥墩的抗车辆撞击效果。最后以SRP加固区域,SRP包裹层数和初始预应力水平为研究变量,进一步探究其对预制节段拼装桥墩受车辆撞击时动态响应的影响规律。

1 数值模型及验证

为了检验本研究中数值模拟方法的准确性,选用Zhang等^[4]的摆锤冲击实验作为参照标准,使用LS-DYNA建立与实验条件相同的三维实体数值模型,通过对比撞击力时程曲线,侧向位移时程曲线,墩身形态和损伤情况进行验证。同时建立SRP的数值模型,并与经销商公布的SRP应力-应变曲线进行对比,以此验证SRP材料数值模拟的准确性。

1.1 参照实验

Zhang等^[4]的摆锤冲击实验测试桥墩为五节段桥墩,每个节段高160 mm,桥墩横截面尺寸为100 mm×100 mm,中间留有直径为15 mm的预应力筋孔,基础承台的尺寸为400 mm×400 mm×140 mm,桥墩顶部是混凝土块和五片铁制法兰盘,共提供288 kg的恒载重量。桥墩每个节段都有直径为4 mm的纵向钢筋和横向钢筋构成的独立钢筋笼,同时由七股钢绞线组成的直径约9.3 mm的预应力筋底端锚固于基础,穿过预应力筋孔通过后张拉方式对墩身施加预应力,预应力大小约为30 kN。冲击测试系统是由固定框架装置,摆臂及钢冲击块组成的,冲击块的质量为300 kg。实验中,通过调整摆臂

的幅度大小来调节冲击的初始速度,然后释放出冲击块撞击桥墩中心。实验示意图如图1所示。

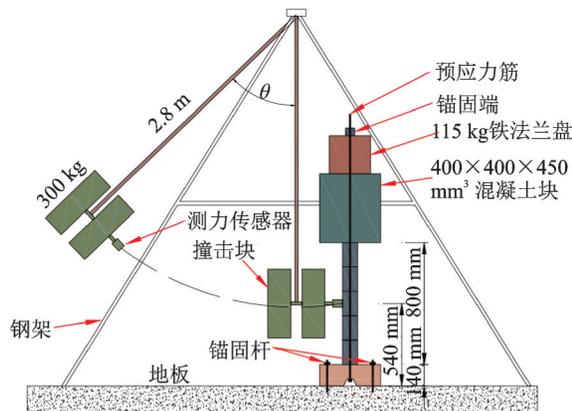


图1 摆锤冲击试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pendulum impact test

1.2 数值分析模型

基于摆锤冲击试验使用LS-DYNA建立同比例三维实体数值模型。连续帽盖模型^[14](*MAT_CSCM)在模拟中可以充分考虑混凝土在受到冲击时的应变率效应、损伤效应、应变强化及软化作用的影响,被用以模拟预制节段拼装桥墩墩身混凝土部分,其中混凝土的立方体抗压强度为34 MPa。对于钢筋则使用考虑应变率效应、塑性变形对屈服应力影响的分段线性塑性模型^[14](*MAT_PICEWISE_LINEAR_PLASTICITY)。在仿真模型中钢筋与混凝土以共节点的方式共同作用,同时分别对混凝土和钢筋定义侵蚀失效关键字(*MAT_ADD_EROSION)以使破损混凝土和失效钢筋退出计算。钢筋与混凝土材料主要参数如表1所示。

表1 混凝土与钢筋主要材料参数

Tab. 1 Main material parameters of concrete and reinforcement

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa
混凝土	2400	34	5	30
钢筋	7800	-	400	200

预制节段拼装桥墩节段与节段之间的连接主要是通过预应力筋提供的预应力来达到,仿真中一般采用温降法^[15]来模拟后张预应力的施加。温降法的原理是利用预应力筋材料热胀冷缩的特性,定义温度曲线使温度在极短的时间内瞬间降低,从而使预应力筋收缩带动锚固端挤压墩身,产生预应力挤压效果。预应力的和温差的关系遵循以下公式^[15]

$$\Delta T = \frac{f}{\alpha} \left(\frac{1}{A_c E_c} + \frac{1}{A_s E_s} \right) \quad (1)$$

式中 ΔT 代表温差大小; f 代表预应力大小; α 代表预应力筋的热膨胀系数; A_c 和 A_s 分别代表墩身混凝土截面面积和钢筋截面面积; E_c 和 E_s 分别代表混凝土和钢筋的弹性模量。预应力筋材料参数^[5]如表 2 所示。

表 2 预应力筋材料参数

Tab. 2 Material parameters of prestressed reinforcement

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量/ GPa	泊松 比	屈服 强度/ MPa	塑性硬化 模量/ MPa	热膨胀 系数
7800	210	0.3	1860	1200	0.0001

本文选用市场上存在的一种 SRP(型号为 3×2-B12)进行建模验证。如图 2^[16]所示,这种 SRP 每英尺包含 12 根钢绳,每根钢绳包含 3 根直钢丝和 2 条缠绕钢丝,每根钢绳有效截面面积为 0.481 mm²,每层 SRP 带等效厚度为 0.227 mm^[17]。在实际工程应用中,先对所需加固的混凝土构件表面进行清洁干燥处理,然后在构件表面涂抹环氧树脂或者粘钢胶等粘结材料,将 SRP 粘接在混凝土构件表面,最后再次涂抹一层环氧树脂作保护作用。已有的 SRP 与混凝土基底粘接性能试验研究^[12]表明,SRP 与混凝土脱粘时所需应力与 SRP 被拉断时的应力几乎相同,因此在仿真中选用塑性随动模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC),并采用共节点的方法使其与墩身混凝土共同作用。SRP 材料的主要力学性能参数如表 3 所示。

为了能够有效提取撞击力等信息,模型中的接

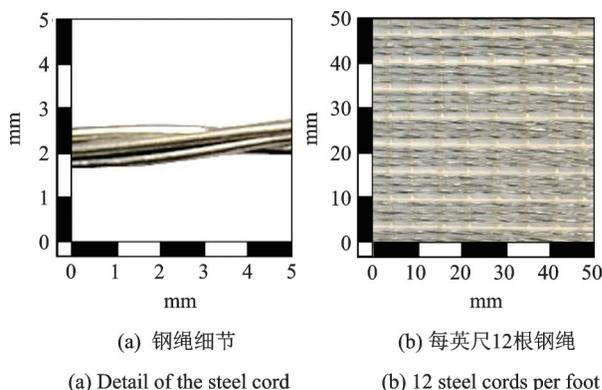


图 2 超高强度钢丝织物^[16]

Fig. 2 Ultra high tensile strength steel textiles^[16]

表 3 SRP 材料力学性能参数(纵向)

Tab. 3 SRP material mechanical property parameters (portrait)

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量/GPa	泊松比	极限抗拉 强度/MPa	极限拉 应变/%
7929	190	0.3	3070	1.6

触采用面面自动接触(ASTS),依据文献[5]取节段间混凝土静摩擦系数为 0.6,铁撞击块与混凝土桥墩静摩擦系数为 0.3。约束承台底部所有自由度,以模拟实验中对承台的锚固约束作用。考虑桥墩自重作用,撞击块以横向 1.37 m/s 的初速度对墩身中间节段进行冲击。

1.3 模型验证

1.3.1 桥墩模型验证

图 3 为实验与仿真的撞击力时程曲线对比。在 1.37 m/s 初速度的撞击块冲击下,实验与仿真中的撞击力都迅速达到最大峰值,其后因为节段自振和墩身的总体振动作用都呈现出多个较小峰值。因为仿真中没有考虑悬臂对摆锤的约束作用,在撞击力峰值出现时间上表现出略微滞后的现象,峰值数目上也与实验数据存在略微差异。而在最关键的撞击力最大峰值上,实验数据为 20.9 kN,仿真数据为 19.3 kN,误差为 7%;实验数据的撞击力持续时间为 90 ms,仿真数据为 86 ms,误差为 4%。由此可知仿真数据与实验数据结果是相近的。

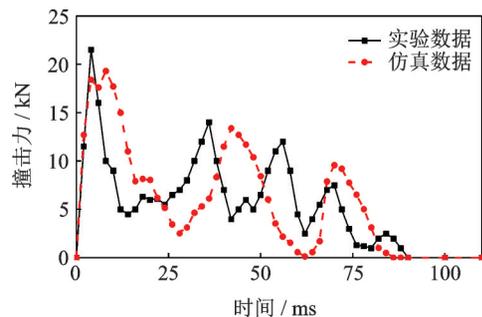


图 3 撞击力时程曲线对比验证

Fig. 3 Comparison and verification of the impact force time-history curve

图 4 为实验与仿真的桥墩受撞击位置处的侧向位移时程曲线对比图。可以看到仿真中侧向位移时

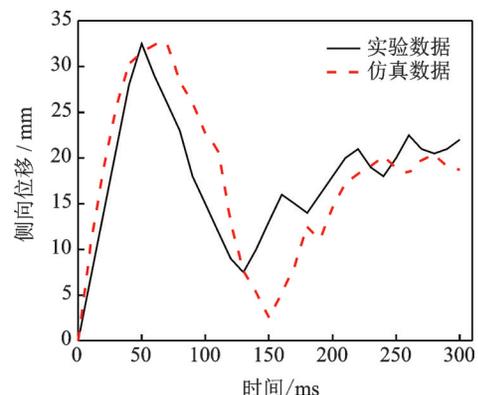


图 4 侧向位移时程曲线对比验证

Fig. 4 Comparison and verification of the time-history curve of lateral displacement

程曲线与参照实验的侧向位移总体变化趋势几乎相同。虽然仿真中第一段峰值冲击力持续时间更长导致了更久的最大侧向位移持续时间,但实验数据与仿真数据中最大侧向位移都在 32.5 mm 左右,侧向位移变形的数据拟合较好。

图 5 为 45 ms 时刻墩身形态与损伤情况对比图。可以看到,撞击块接触桥墩 45 ms 时刻桥墩受撞击节段与上部相邻节段出现了张合,底部节段也出现了张合,墩身整体呈现一定的挠度,仿真模型与实验的墩身形态表现完全相同。仿真与实验中桥墩的损伤区域都出现在受撞击节段迎撞面和底部节段塑性铰区域,破坏形态都表现为混凝土的受压损坏。其中,受撞击节段的损伤较为明显,这是因为撞击作用导致该节段与上部节段出现张合,迎撞面混凝土受压严重产生了损伤。可以说明,仿真模型可以对混凝土的损伤位置和破坏形态有较准确的预测。

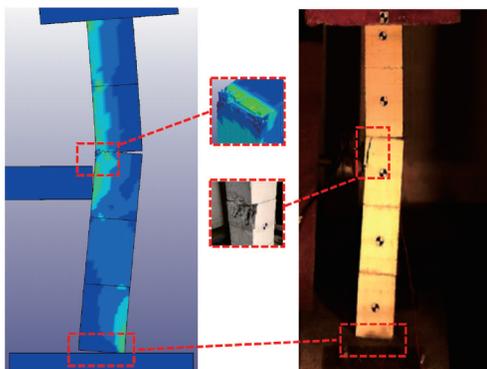


图 5 墩身形态与损伤情况对比

Fig. 5 Comparison of the shape and damage position of the pier

通过对仿真与实验中冲击力、侧向位移变形和墩身形态与损伤情况的对比分析,可知本研究中的桥墩撞击模型具有较高的精度,采用的数值模拟方法准确可靠,可以满足桥墩动态响应分析的需求。

1.3.2 SRP 材料模型验证

Annalisa 等^[16]为了研究 SRP 材料的机械性能,采用配有液压机构的材料试验系统对多种型号的 SRP 材料进行了直接拉伸试验,得到 SRP 材料的应力-应变关系曲线。基于此实验,本文对型号为 3×2-B12 的 SRP 材料进行相同工况的建模,设置与实验中相同的 SRP 材料参数以保证其力学性能的准确性,并对计算结果与实验数据进行对比分析,以验证 SRP 材料模型的合理性。对比结果如图 6 所示。

由图 6 可以看到,仿真计算得到的应力-应变数据点与实验数据拟合较好,仿真中 SRP 最大屈服应力为 2950 MPa,试验数据为 3050 MPa,误差约为 3.2%,说明 SRP 材料的数值模型可以满足计算的精

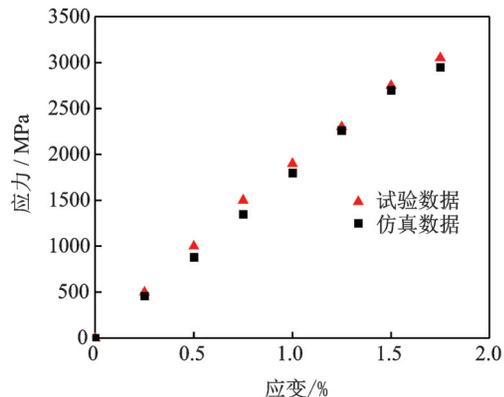


图 6 SRP 材料验证

Fig. 6 SRP material verification

度需求。

2 桥墩动态响应分析

2.1 车辆撞击模型

基于数值模型验证中使用的材料本构、预应力施加方法、接触和边界约束设置以及恒载施加方式,建立了与预制节段拼装桥墩及车辆实际尺寸相同的数值模型,以更好地接近实际情况研究 SRP 的加固效果,其可行性已由使用相同方法的文献证明^[5]。对质量为 1129 kg 的 1998 Chevrolet S10 皮卡车基于相关文献的方法^[18]进行简化,并依据欧美相关规范控制撞击位置及撞击接触面面积^[19],具体情况如图 7 所示。

为了研究 SRP 加固预制节段拼装桥墩在抗车辆撞击方面的有效性,设置了未经 SRP 加固的混凝土 (Reinforced Concrete, RC) 桥墩和经 SRP 加固底部和接缝处的桥墩在受到相同车辆撞击条件下的对比工况,SRP 包裹层数为 2 层,加固位置如图 7 所示,车速设置为 40 km/h。

2.2 RC 墩与 SRP 加固墩动态响应对比分析

在相同车辆撞击条件下 RC 墩与 SRP 加固墩冲击力时程曲线如图 8 所示。可以看出,SRP 加固墩的冲击力作用时间为 36 ms,比 RC 墩持续时间少 12 ms。SRP 加固墩在受到车辆撞击时比 RC 墩表现出更小的冲击力峰值,在车辆撞击持续时间内冲击力数值明显较小。这说明 SRP 的合理加固减小了车辆与桥墩节段接触面的局部刚度,同时 SRP 对车辆撞击也起到了一定的缓冲作用,SRP 加固墩也表现出较小的整体刚度,车桥接触面的冲击力更小。由此可知,SRP 的合理加固可以有效减小车辆对桥墩的撞击作用。

图 9 为 3, 24, 141 ms 时刻 RC 墩与 SRP 加固墩

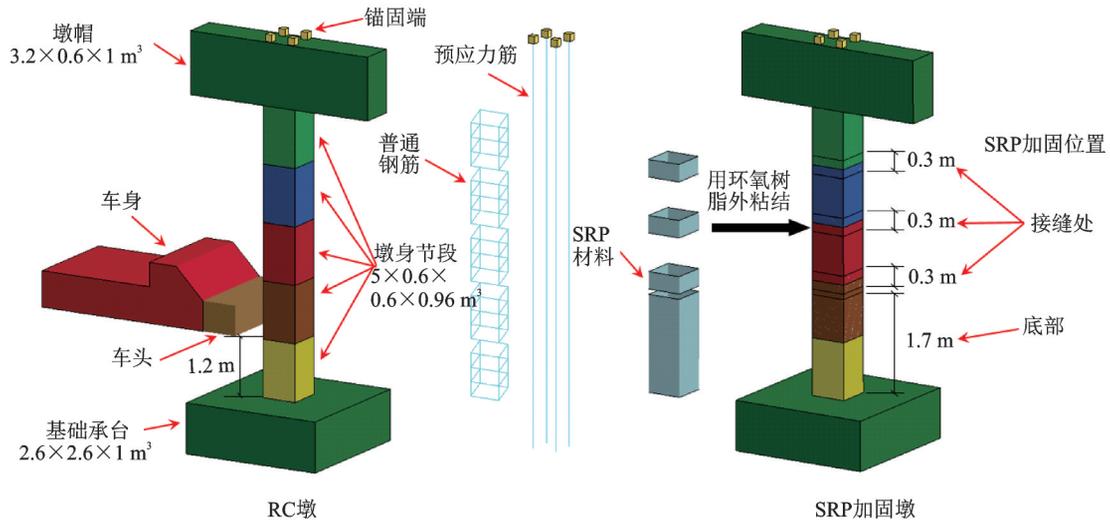


图 7 车辆撞击桥墩模型及有无 SRP 对照设置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of vehicle impact pier model and SRP comparison setting

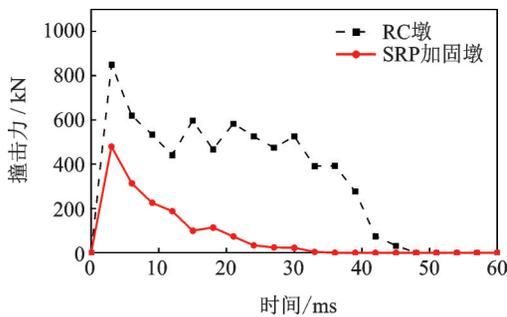


图 8 RC墩与SRP加固墩撞击力时程曲线

Fig. 8 Time history curve of the impact force between RC pier and SRP reinforced pier

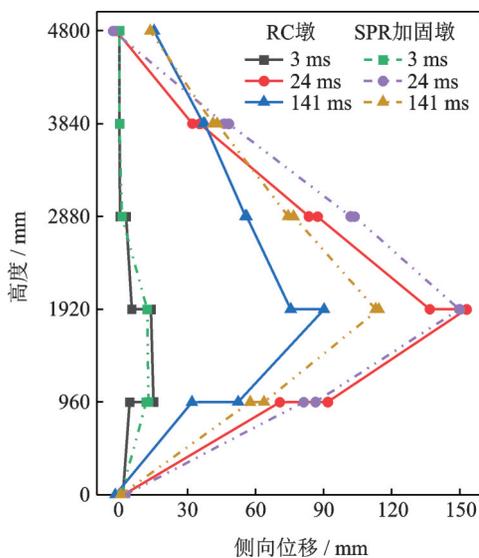


图 9 RC墩与SRP加固墩位移-高度曲线

Fig. 9 Displacement-height curve of RC pier and SRP reinforced pier

位移-高度曲线对比图。可以看出 RC 墩受撞击节段与相邻节段间产生了较大滑移,说明节段间的摩擦力不足以抵抗车辆撞击产生的剪切力,而 SRP 加固墩几乎不存在节段剪切滑移的问题。这说明 SRP

的合理加固可以有效限制节段与节段之间的剪切滑移,减小桥墩的侧向不可逆变形和偏心受压的负作用。图 10 为 RC 墩和 SRP 加固墩受撞击节段的侧向位移时程曲线图,结合图 9 可以看到 RC 墩与 SRP 加固墩因车辆的瞬间撞击作用整体均呈现出一定的弯曲挠度,其中 RC 墩受撞击节段最大侧向位移 159 mm,SRP 加固墩为 131 mm,墩身最大挠度减小了 17.6%,而且 SRP 加固墩的振动幅度更小。这说明 SRP 的合理加固可以有效减小预制节段拼装桥墩的挠度,从而也会减轻塑性铰区域桥墩混凝土的损伤,增强了车辆撞击条件下预制节段拼装桥墩的稳定性。

由图 11 可以看出,未经过 SRP 加固的桥墩在受到车辆撞击 40 ms 时刻受撞击节段与上部相邻节段接缝区域出现了混凝土单元失效状况,车桥接触区域桥墩的混凝土单元失效也较为严重,这说明这些位置的混凝土有着较为明显的损伤。同时,在底部节段塑性铰区域应力分布集中,混凝土单元因受压

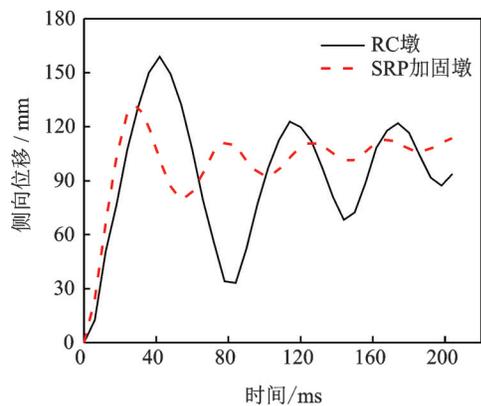


图 10 RC墩与SRP加固墩受撞击节段侧向位移时程曲线

Fig. 10 Time-history curve of the lateral displacement of RC pier and SRP reinforced pier under impact

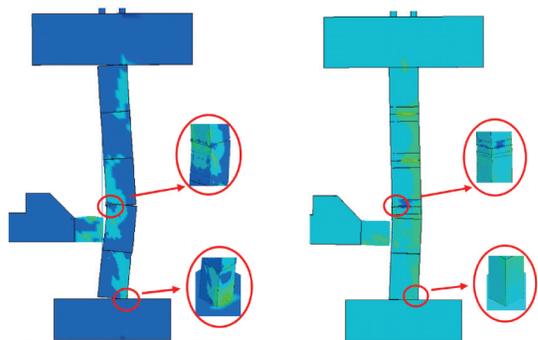


图 11 40 ms时刻 RC墩(左)与SRP加固墩(右)应力分布和墩身损伤

Fig. 11 Stress distribution and pier damage of RC pier (left) and SRP reinforced pier (right) at 40 ms

而失效。而SRP加固墩因为在相应位置有SRP包裹,没有观察到明显的应力集中的现象,同时墩身混凝土也没有出现明显的损伤。这说明SRP对墩身混凝土具有一定的保护作用。

通过以上对RC桥墩和SRP加固墩的对比分析,可以认为采用SRP加固预制节段拼装桥墩主要从以下三个方面提高其车辆撞击下的动载性能:

(1)SRP对预制节段拼装桥墩底部和接缝处的加固可以在车辆撞击过程中起到一定的缓冲作用,减小车桥接触面的局部刚度和桥墩的整体刚度,从而有效减轻车辆对桥墩的撞击作用;

(2)SRP的合理加固有效限制了在车辆撞击条件下桥墩节段间的剪切滑移,同时也减小了桥墩的最大挠度,从而提高了预制节段拼装桥墩的整体稳定性;

(3)SRP的合理加固对桥墩具有一定的保护作用,可以有效减轻车辆撞击下桥墩直接受撞击区域、受撞击节段与上部节段接缝区域以及底部塑性较区域的混凝土损伤。

3 参数敏感性分析

为了探究在相同车辆撞击条件下SRP加固位置、SRP包裹层数、初始预应力水平三个因素对桥墩动态响应的影响规律,采用正交设计方法设置了如表4所示的试验工况及参数,其中初始预应力水平设置为墩身抗压承载力的10%,20%,30%。

3.1 SRP加固位置的影响

SRP对预制节段拼装桥墩不同位置的加固会对撞击力产生明显的影响。如图12所示,SRP底部加固的桥墩撞击力峰值为465 kN,比SRP接缝处加固表现的撞击力峰值减小了54%,而且其撞击力持续时间也相对较短。这说明SRP优异的弹性性能在墩身受撞击过程中起到一定的缓冲作用,从而导

表 4 工况及参数

Tab. 4 Cases and parameters

工况	SRP加固位置	SRP包裹层数	初始预应力水平/%
S1	接缝与底部	2层	10
S2	接缝与底部	1层	20
S3	接缝与底部	3层	30
S4	接缝	2层	20
S5	接缝	1层	30
S6	接缝	3层	10
S7	底部	2层	30
S8	底部	1层	10
S9	底部	3层	20

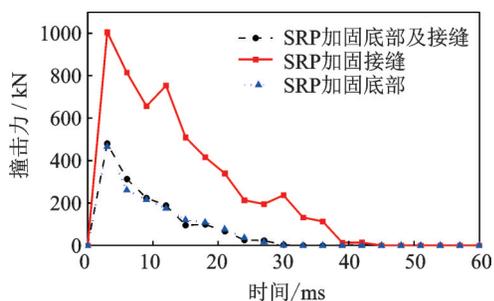


图 12 不同SRP加固位置对应的撞击力时程曲线

Fig. 12 Time history curve of impact force corresponding to different SRP reinforcement areas

致了撞击力的减小。

SRP加固位置对预制节段拼装桥墩侧向位移和节段剪切滑移的影响更为明显。由图13可知,SRP加固接缝处节段间滑移明显减小,而没有SRP加固接缝处的桥墩在车辆撞击下会产生很严重的节段滑移问题,这说明SRP对接缝处的加固可以有效

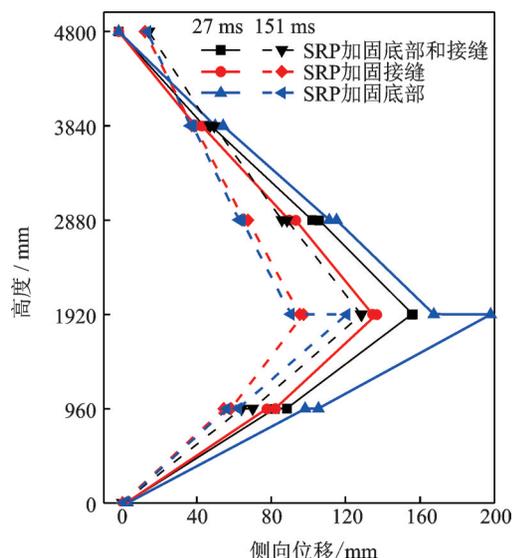


图 13 不同SRP加固位置对应的位移-高度曲线

Fig. 13 Displacement-height curves corresponding to different SRP reinforcement areas

限制节段滑移。从图 14 可以看出,在相同车辆撞击条件下,SRP 底部加固时侧向位移极值最大,而 SRP 同时加固底部和接缝比仅加固底部时的侧向位移极值明显减小,SRP 加固接缝时的侧向位移最为平稳。这说明 SRP 加固接缝位置对限制撞击作用下节段拼装桥墩的侧向位移起到关键作用。

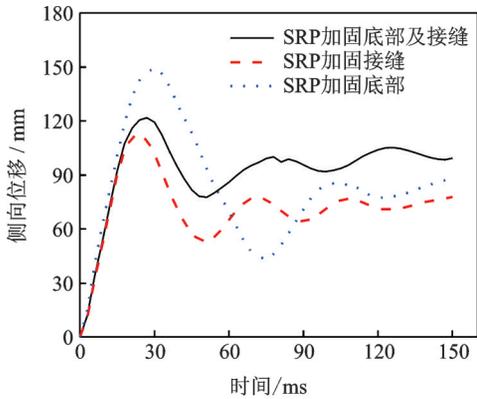


图 14 不同 SRP 加固位置受撞击节段侧向位移时程曲线
Fig. 14 Time-history curves of the lateral displacement of impacted segments at different SRP reinforcement areas

图 15 为 S1 试件受撞面不同高度处的 SRP 纵向残余应变图。对于底部加固的 SRP,与底边距离越远其应变越大,这是车辆撞击作用导致的。对于不同接缝处的 SRP,应变都表现出中间高两边低的规律,说明越靠近接缝 SRP 所受应力越大。在距车辆撞击位置最近的上部接缝处,SRP 的应变为 0.791%,是其他接缝处的约 20 倍,这说明该位置的 SRP 承受了较大的应力,在限制桥墩挠度变形和剪切滑移方面具有重要作用。

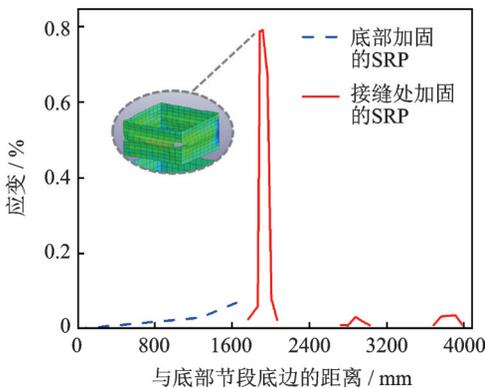


图 15 不同高度处的 SRP 残余应变
Fig. 15 SRP residual strain at different heights

3.2 SRP 包裹层数的影响

图 16 为不同 SRP 包裹厚度所对应的撞击力时程曲线图。可以看出,随着 SRP 包裹厚度的增加,撞击力持续时间和趋势变化并不明显,但 SRP 包裹

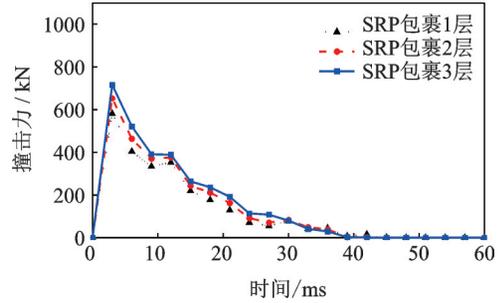


图 16 不同 SRP 包裹层数对应的撞击力时程曲线
Fig. 16 Time-history curve of impact force corresponding to different SRP wrapping layers

1 层时撞击力峰值为 581 kN,SRP 包裹 3 层时撞击力峰值为 716 kN,撞击力峰值增加了 18.8%。这是因为随着 SRP 包裹厚度的增加,车辆与桥墩撞击面的接触刚度跟随增大,从而导致了撞击力的增加。

SRP 包裹层数对车辆撞击下预制节段拼装桥墩的位移响应也有重要影响。由图 17 可以看出,随着 SRP 包裹层数的增加,墩身整体呈现出挠度跟随减小的趋势;从图 18 可以看到,随着 SRP 包裹层数的增加,受撞击节段侧向位移峰值有所减小;由图 19 可知,墩身最大侧移量和节段最大滑移量都随着 SRP 包裹层数的增加而减小。这说明 SRP 包裹层数越多,对桥墩侧向位移变形限制越明显,同时也可以更好地限制节段间的滑移剪切变形。

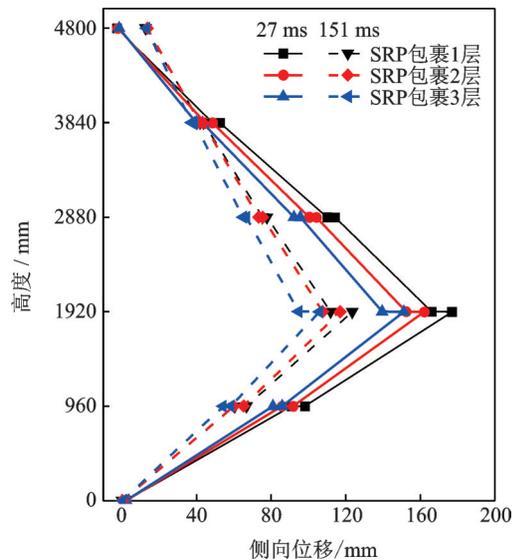


图 17 不同 SRP 包裹层数对应的位移-高度曲线
Fig. 17 Displacement-height curves corresponding to different SRP wrapped layers

3.3 初始预应力水平的影响

初始预应力水平会对撞击力产生轻微的影响。如图 20 所示,初始预应力水平分别为墩身抗压承载力 10%,20% 和 30% 时撞击力的持续时间和变化趋势几乎相同,撞击力峰值则随着初始预应力的增加

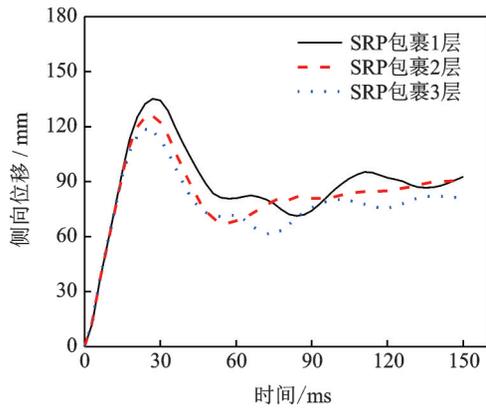


图 18 不同包裹层数下受撞击节段侧向位移时程曲线

Fig. 18 Time-history curve of lateral displacement of impacted segment under different wrapped layers

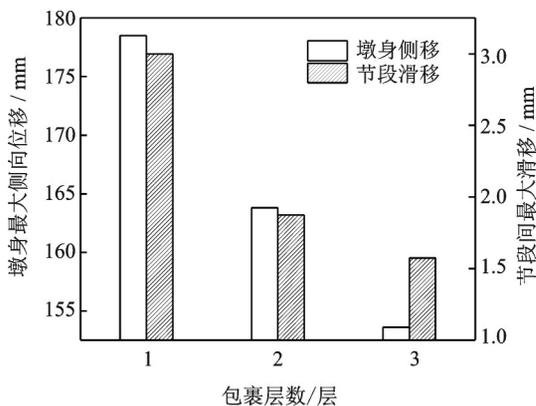


图 19 SRP 包裹层数与墩身最大侧移量及节段最大滑移量的关系

Fig. 19 The relationship between the number of SRP wrap layers and the maximum lateral displacement of the pier body and the maximum slippage of the segment

而略微增大。整体来看,初始预应力水平从 10% 增

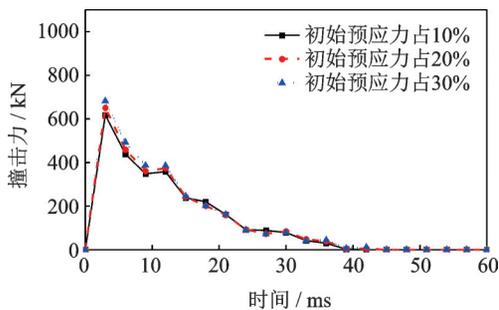


图 20 不同初始预应力水平对应的撞击力时程曲线

Fig. 20 Time history curve of impact force corresponding to different initial prestress levels

加到 30% 没有对撞击力产生明显影响。

初始预应力水平的变化对预制节段拼装桥墩侧向位移的影响规律并不明显。如图 21 所示,在相同车辆撞击条件下不同初始预应力水平所对应的桥墩都呈现出几乎相似的挠度变形趋势;由图 22 可以看到不同初始预应力水平下受撞击节段侧向位移变

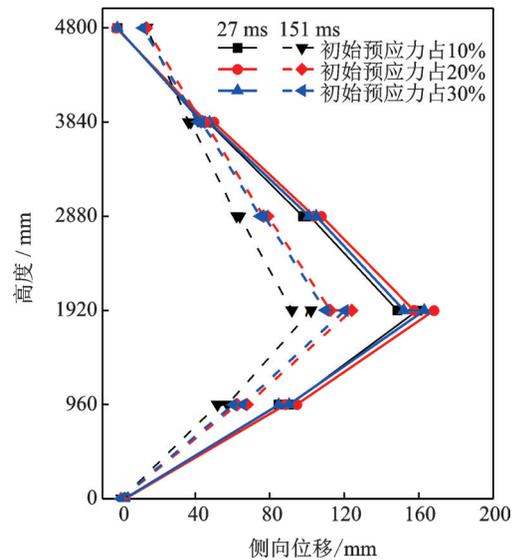


图 21 不同初始预应力水平对应的位移-高度曲线

Fig. 21 Displacement-height curves corresponding to different initial prestress levels

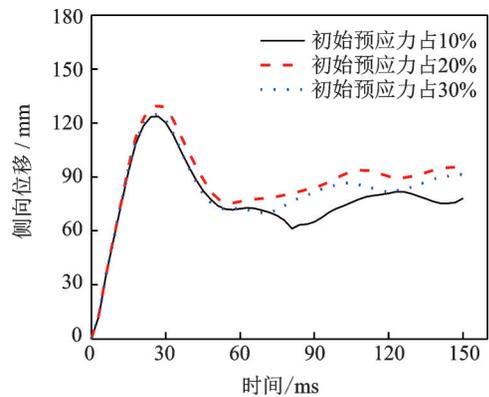


图 22 不同初始预应力水平下受撞击节段侧向位移时程曲线

Fig. 22 Time-history curve of lateral displacement of impacted segment under different initial prestress levels

化趋势几乎相同,初始预应力占墩身抗压承载力 20% 时侧向位移表现略大;由图 23 可以看到随着初始预应力水平增加,节段间最大滑移量有所减小,墩身最大侧移量没有呈现出一定的规律。由此可见,初始预应力水平的增加可以更有效地限制桥墩节段间的剪切滑移变形,但是对墩身侧移变形的影响并不明显。

通过以上参数分析可以得知,SRP 加固预制节段拼装桥墩的动态响应表现对与 SRP 直接相关的参数变化十分敏感,同时也说明 SRP 在提高预制节段拼装桥墩抗撞击性能方面与其他方法有很大的不同。目前存在的大部分桥墩抗撞击加固方法都着重于撞击过程中的加固材料的缓冲作用,通过能量耗散以减轻车辆的撞击,比如泡沫铝^[6]、FRP 防撞浮箱结构^[8]等,但同时也无法避免材料成本过高,结构过于复杂等问题。而 SRP 对预制节段拼装桥墩的加

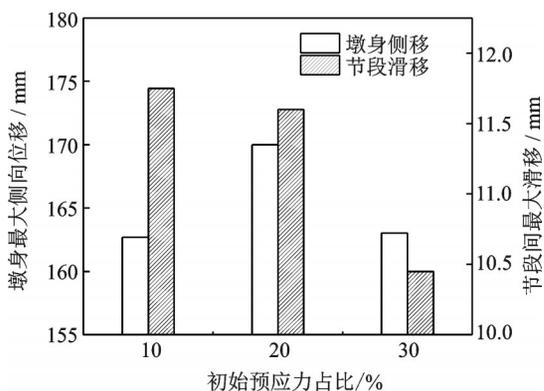


图23 初始预应力水平与墩身最大侧移量及节段最大滑移量的关系

Fig. 23 The relationship between the initial prestress level and the maximum lateral displacement of the pier body and the maximum slippage of the segment

固侧重于提高车辆撞击下桥墩本身的稳定性,通过限制节段间的剪切滑移和整体挠度变形,减小桥墩的刚度表现和减轻混凝土的损伤,来达到提升预制节段拼装桥墩抗撞击性能的目的。同时,SRP本身低廉的成本和简易的加固措施也为该方法的实际应用普及提供了更大的可能性。

4 结论与展望

本文采用数值模拟的方法对SRP加固的预制节段拼装桥墩在车辆撞击下的动态响应进行了研究分析,可以得到如下结论:

(1)在相同车辆撞击条件下与无SRP加固的RC桥墩相比,SRP加固墩撞击力数值和持续时间都明显减小,墩身最大挠度减小了17.6%,几乎不存在节段间的剪切滑移问题,而且没有出现明显的混凝土损伤,说明采用SRP对预制节段拼装桥墩进行合理加固,可以有效减轻车辆对桥墩的撞击作用。

(2)SRP底部加固可以对车辆撞击起到一定的缓冲作用,本研究中SRP底部加固撞击力峰值比SRP接缝处加固减小了54%;SRP接缝处加固则表现出更小的墩身最大侧移和节段剪切滑移,桥墩的位移响应更低;SRP底部和接缝处同时加固会对墩身具有更好的保护作用。

(3)SRP包裹层数由1层增加到3层会使撞击力峰值增大18.8%,但墩身侧向位移和节段剪切滑移都跟随减小,说明SRP包裹层数的增加可以更好地限制车辆撞击下的墩身位移变形,但也会使车桥接触面刚度有所增大。

(4)初始预应力水平由墩身抗压承载力10%提高至30%对车辆撞击过程中撞击力和墩身位移影响规律并不明显。除了初始预应力水平外,对于桥墩混凝土强度、节段长细比等与桥墩直接相

关的参数变量对SRP加固效果的影响还需进一步探讨。

参考文献:

- [1] 陈林,曾玉焯,颜泽峰,等.车辆撞击下钢筋混凝土桥墩的动力响应及损伤特征[J].振动与冲击,2019,38(13):261-267.
Chen Lin, Zeng Yuyue, Yan Zefeng, et al. Dynamic response and damage characteristics of a RC pier under vehicle impacting [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38 (13): 261-267.
- [2] 丁北斗,吕恒林,李贤,等.单层柱面网壳冲击试验研究[J].振动工程学报,2015,28(5):692-702.
Ding Beidou, Lü Henglin, Li Xian, et al. Experimental study on single-layer cylindrical reticulated shell under impact force [J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(5): 692-702.
- [3] 王延斌,魏雪英,俞茂宏.简支圆板在冲击荷载作用下的塑性动力响应分析[J].振动工程学报,2003,16(4):47-53.
Wang Yanbin, Wei Xueying, Yu Maohong. Dynamic plastic response analysis of circular plate subjected to impulsive load [J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(4): 47-53.
- [4] Zhang X, Hao H, Li C. Experimental investigation of the response of precast segmental columns subjected to impact loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 95: 105-124.
- [5] Tin V Do, Pham M Thong, Hao H. Numerical investigation of the behavior of precast concrete segmental columns subjected to vehicle collision [J]. Engineering Structures, 2018, 156(1): 375-393.
- [6] 张于晔,潘瑞阳,蒋冬启.车辆撞击作用下泡沫铝防撞桥墩的动态响应特性[J].振动工程学报,2021,34(1):89-98.
Zhang Yuyue, Pan Ruiyang, Jiang Dongqi. Dynamic response characteristics of the bridge piers with aluminum foam anti-collision devices under vehicle impact [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(1): 89-98.
- [7] Fan Wei, Xua Xin, Zhang Zhiyong, et al. Performance and sensitivity analysis of UHPFRC-strengthened bridge columns subjected to vehicle collisions [J]. Engineering Structures, 2018, 173: 251-268.
- [8] 郑植,耿波,袁佩,等.桥墩FRP复合材料防撞套筒蝴蝶型连接结构可靠性研究[J].振动与冲击,2020,39(1):281-288.
Zheng Zhi, Geng Bo, Yuan Pei, et al. Reliability study of butterfly connection structure of FRP composite anti-collision sleeve box of bridge pier [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39 (1): 281-288.
- [9] Zhang X, Hao H, Li C, et al. Experimental study on the behavior of precast segmental column with domed

- shear key and unbonded post-tensioning tendon under impact loading [J]. *Engineering Structures*, 2018, 173 (15): 589-605.
- [10] Zhang X, Hao H. Improved impact resistant capacity of segmental column with fibre reinforced polymer wrap [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 117-133.
- [11] KrzywoŃa R, Górska M, Dawczyński S. Features of SRP tapes against CFRP composites used for strengthening of concrete structures [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 193: 289-296.
- [12] Ascione F, Lamberti M, Napoli A, et al. An experimental investigation on the bond behavior of steel reinforced polymers on concrete substrate [J]. *Composite Structures*, 2017, 181: 58-72.
- [13] 王向阳, 林友杨, 冉瑞江. SRP 材料加固钢筋混凝土的抗爆性能研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2017, 41(3): 439-442.
Wang Xiangyang, Lin Youyang, Ran Ruijiang. Study on the anti-explosion performance of SRP reinforced concrete materials [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2017, 41(3): 439-442.
- [14] 尚晓江, 苏建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 中国: 中国水利水电出版社, 2008.
- [15] Jiang H, Mi G, Chorzepa. An effective numerical simulation methodology to predict the impact response of pre-stressed concrete members [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 55: 63-78.
- [16] Annalisa N, Gianmarco de F, Stefano De S, et al. Bond behaviour of steel reinforced polymer strengthening systems [J]. *Composite Structures*, 2016, 152: 499-515.
- [17] Napoli A, Realfonzo R. Compressive behavior of concrete confined by SRP wraps [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 217: 993-1008.
- [18] 邹江娜. 基于 LS-DYNA 仿真模拟车-桥墩碰撞及损伤评估研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2014.
Zou Jiangna. The research and damage assessment of vehicle-bridge pier collision based on LS-DYNA simulation [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2014.
- [19] 曾祥国, 朱文吉, 唐光武, 等. 车辆撞击下桥墩动力响应与撞击力的数值分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(增刊2): 171-174.
Zeng Xiangguo, Zhu Wenji, Tang Guangwu, et al. Numerical analysis of dynamic response and impact force of overpass bridge piers under vehicles' collision [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(S2): 171-174.

Dynamic response of SRP-reinforced precast segmental bridge columns subjected to vehicle collision

LI Qing-hua, ZHANG Yu-ye

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to reduce the vehicle impact on the precast segmental columns, the steel reinforced polymer (SRP) was used to reinforce the precast segmental columns and perform intensive numerical simulations. A numerical model of the precast segmental columns was developed using LS-DYNA, and the accuracy of the numerical simulation method was validated comparing with existing experimental data. Under the same vehicle impact conditions, the time-history curves of the impact force, the lateral displacement and the column damage of the RC columns and the SRP reinforced columns were compared and analyzed. The SRP reinforced position, the number of SRP wrapping layers and the initial prestress level were taken as variables, and their influence on the impact force of the vehicle-column collision and the deformation of the columns were studied. The results show that using SRP to rationally strengthen the precast segmental columns can effectively reduce the impact force to the columns. The lateral displacement and damage of the columns are also reduced. The use of SRP reinforcement at the column bottom and the joints has a better protective effect on the columns. Increasing the number of SRP wrapping layers from 1 to 3 can limit the displacement deformation of the columns more effectively.

Key words: precast segmental columns; vehicle impact; the dynamic response; steel reinforced polymer

作者简介: 李清华(1995-),男,硕士研究生。电话:18251956698;E-mail:Mrliqh@163.com

通讯作者: 张于晔(1986-),男,副教授。电话:(025)84315773;E-mail:zyy@njust.edu.cn