

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220719001

小剪跨比 RC 柱及钢管增强 RC 柱多次冲击的 响应行为*

陈林, 周戴江, 李乐平, 刘涛

(湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要:近年来钢筋混凝土(RC)墩柱遭受车船撞击的风险日益增加,且车船撞击一般发生在RC柱靠近地面或底部承台的位置,导致柱体出现小剪跨比条件下的脆性剪切破坏。而随着力学性能良好的钢管混凝土在工程中越来越广泛地应用,其小剪跨比下的抗冲击性能也需要更加深入的研究。为进一步研究小剪跨比RC柱的剪切损伤机理以及钢管对RC柱抗剪性能的增强效果,使用大型刚性摆锤装置分别对1根RC柱、内置钢管增强RC柱和外置钢管增强RC柱进行了侧向冲击试验,考察了试件的损伤特征、冲击力和位移等试验结果。结果表明:RC柱在承受两次冲击后发生剪切破坏,而两个钢管增强RC柱在经历额外两次大能量冲击后仍保持较好的整体形态,即钢管可有效提升RC柱的抗冲击性能;在相同截面配钢率下,外置钢管增强RC柱相比内置钢管增强RC柱整体上具有更强的抗冲击性能,但内置钢管可更有效地降低核心混凝土的剪切损伤;由于外置钢管RC柱具有三者中最高整体刚度和表面刚度,其对相邻构件承载力和刚度的要求也更高。

关键词:小剪跨比; 钢管增强RC柱; 侧向冲击; 动态响应; 抗剪性能

中图分类号: TU398.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0463-11

Response Behavior of RC Column and Steel-tube Strengthened RC Columns with Small Shear-to-span Ratios under Multiple Impacts

CHEN Lin, ZHOU Daijiang, LI Leping, LIU Tao

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In recent years, the risk of reinforced concrete (RC) piers being hit by vehicles and ships has gradually increased, and the collision of vehicles and ships on the RC columns generally occurs near the ground level or pile cap, which results in brittle shear failure of the columns under the condition of small shear-to-span ratios. As concrete-filled steel tubes with good mechanical properties are widely used in engineering practice, their impact resistance under small shear-to-span ratios also needs more in-depth study. To further study the shear damage mechanism of RC columns with small shear-to-span ratios and the enhancement effect of steel tubes on the shear performance of RC columns, lateral impact tests were conducted on an RC column, an internal steel-tube strengthened RC column, and an external steel-tube reinforced RC column, respectively, using a large rigid pendulum device. The damage characteristics, impact force, and displacements of the specimens were investigated. The re-

* 收稿日期:2022-07-19;修回日期:2022-12-24

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52278500)、湖南省教育厅重点项目(21A0293)资助

作者简介:陈林(1986—),男,教授,博士。主要从事结构抗冲击研究。E-mail: civil-chenlin@hnust.edu.cn

sults show that RC column experienced shear failure after two impacts, while the two steel tube reinforced RC columns remained in comparatively better overall conditions even after two additional high-energy impacts, highlighting that the steel tubes can effectively improve the impact resistance of the RC column; Furthermore, with an identical sectional steel ratio, the external steel-tube reinforced RC column demonstrated generally stronger impact resistance than the internal steel-tube reinforced one. But the internal steel tube was more effective in mitigating the shear damage of the core concrete; Given that the external steel-tube reinforced RC column presented the highest overall and surface stiffness among the three specimens, it would also place higher demands on the bearing capacity and stiffness of the adjacent members.

Keywords: small shear-to-span ratio; steel-tube strengthened RC column; lateral impact; dynamic response; shear resistance

0 引 言

近年来,我国交通基础设施建设发展迅速^[1],但作为交通枢纽的桥梁结构却面临越来越严峻的车辆或船舶等撞击风险^[2]。目前桥墩广泛采用钢筋混凝土(RC)柱类构件,而车船对桥墩的撞击往往发生在靠近地面或承台位置,导致柱体出现小剪跨比的受力特征,并容易造成桥墩剪切断裂甚至桥梁倒塌^[3]。显然,对小剪跨比RC柱的抗冲击性能以及增强措施进行深入研究显得十分必要。

由于足尺试验费用高昂,目前仅有极少数足尺RC桥墩的碰撞试验研究^[4-6]。大多数研究者采用有限元方法对车船与桥墩的碰撞过程进行仿真分析^[7-10],或采用室内缩尺构件试验对RC柱的冲击响应行为进行研究^[11]。与静力行为不同,RC柱在冲击作用下表现出明显的惯性效应和应变率效应,二者对构件的弯曲和剪切响应行为均会产生显著影响。目前,RC构件在冲击下的弯曲响应行为已研究较多^[12],但关于小剪跨比RC柱冲击响应行为(尤其是冲击剪切行为)的研究还不够深入。C.Demartino等^[13]使用试验小车对RC圆柱进行了近地端的侧向撞击,讨论了冲击作用下小剪跨比RC柱的动力响应和剪切损伤特征。汪俊文等^[14]对水平冲击作用下的RC柱进行了数值模拟,分析了构件的破坏形态、受力状态和加速度响应等。T.Peng等^[15]采用静态加载试验对小剪跨比RC柱的剪切响应行为进行了研究。结果表明,小剪跨比条件下的普通RC柱即使配箍率很高也很难避免剪切破坏。因此,如何提升小剪跨比RC柱的抗剪能力成为桥墩抗车船撞击的一个关键问题。

另一方面,由于具有良好的力学性能,钢管混凝土结构已逐渐在桥梁和建筑等领域得到广泛应用^[16]。一些学者已开始对钢管混凝土柱的抗冲击性能进行研究。例如,刘亚玲^[17]发现两端约束强的构件抗冲击性能更优。任够平等^[18]、李珠等^[19]、曾希等^[20]及熊雷^[21]通过落锤冲击试验或数值仿真对钢管混凝土圆柱的冲击响应与损伤特征进行了研究,朱翔等^[22]则对不同轴压比下外包钢管加固RC柱的变形响应进行了深入研究。郭玉荣等^[23]揭示了钢管混凝土柱在冲击作用下的破坏机理,并将整体失效过程分为冲击区局部响应、柱顶支座响应、稳定响应和卸载响应4个阶段。M.R.Bambach^[24]则指出钢管混凝土构件相对RC构件虽可提高抗弯承载力,但填充的混凝土对构件吸能能力影响不大(甚至会降低吸能能力),尤其是针对细长构件。W.Xian等^[25-26]及X.Zhu等^[27-28]则对双钢管混凝土圆柱和钢骨增强钢管混凝土柱的侧向冲击响应进行了落锤试验和有限元分析。已有研究表明,钢管混凝土柱不仅具有良好的抗冲击性能,其在抗剪性能方面相对普通RC柱也有较大的提升^[29-30]。

综上所述,当前关于钢管混凝土柱的冲击响应行为已有较多研究,但仍存在以下不足:(1)大多数钢管混凝土柱没有配置钢筋,即并非从钢管对RC柱的增强效应的角度进行研究;(2)对小剪跨比条件下钢管混凝土柱抗冲击性能的研究仍不充分;(3)钢管位置(内置或外置)对RC柱抗剪性能的影响规律尚不清楚;(4)已进行的试验多采用落锤的方式进行,鲜有进行水平侧向冲击的试验研究,而后者更符合实际情况。有鉴于此,本文通过自主研发的大型摆锤装置分别对1根小剪跨比的RC柱、内置钢管增强RC柱和外置钢管增强RC柱(即带钢筋

笼的钢管混凝土柱)进行了水平侧向反复冲击试验,分析了每次冲击后试件的动力响应,并讨论了钢管对RC柱抗剪性能的增强效应。

1 摆锤冲击试验方案

本研究通过自主研发的大型摆锤装置分别对1根RC柱、1根内置钢管增强RC柱和1根外置钢管增强RC柱进行水平侧向反复冲击试验,并对摆锤冲击力以及柱子损伤状态、位移和钢筋应变等响应进行观测。

1.1 试件设计

本次试验共设计了三个试件,分别为普通钢筋混凝土(RC)柱、内置钢管增强钢筋混凝土(ISRC)柱和外置钢管增强钢筋混凝土(ESRC)柱,如图1所示。

各试件均为方形截面柱,截面边长200 mm,柱高1 200 mm。三根试件的柱身均布置4根直径14 mm且等级为HRB400的纵向钢筋,箍筋采用直径6 mm且等级为HPB300的光圆钢筋,箍筋间距100 mm。方钢管材质为Q345钢,且内置钢管的截面边长(外边距)和厚度分别为130 mm和5.5 mm,而外置钢管的截面边长(外边距)和厚度分别为200 mm和3.5 mm,从而保证内置和外置钢管的截面面积均约为2 740 mm²(误差小于0.5%)。柱身所用钢材的材料属性见表1。所有试件采用同等级的混凝土进行整体一次性浇筑,实测混凝土立方体抗压强度平均值为37.0 MPa。试件基座的长、宽和高分别为900、400、300 mm,柱体位于基座中央且纵筋锚固到基座中。基座沿长度方向上、下两层各均匀布置5根直径12 mm且等级为HRB400的受力钢筋,且每隔100 mm设置一道直径8 mm且等级为HPB300的箍筋。

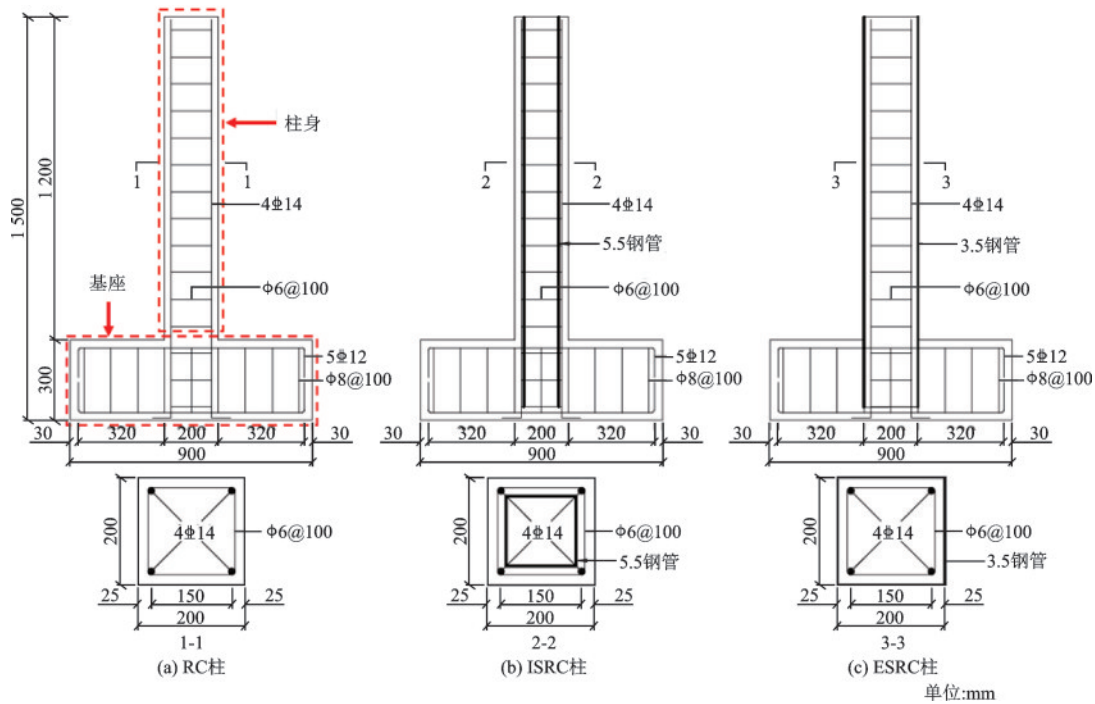


图1 试件尺寸及配筋示意

Fig.1 Illustration of geometric dimensions and reinforcements of specimens

表1 钢材的材料属性

Table 1 Material properties of steel

材料	钢筋直径(钢管壁厚)/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB400	14	487.3	665.7
HPB300	6	372.0	514.0
内置钢管	5.5	320.0	602.0
外置钢管	3.5	310.0	574.0

1.2 加载及测量方案

本试验采用的加载装置为课题组自主研发的一套大型刚性摆锤试验装置,如图2所示。试验时,首先利用动力装置将摆锤提升至预定角度,随后通过远程遥控脱钩器对摆锤进行释放,从而使得摆锤在重力作用下发生沿旋转轴的转动,并最终在最底

端与试件发生碰撞。该摆锤最大旋转角度可达135°(相应冲击速度约9 m/s),并且可根据需求调整锤头质量、形状以及冲击点高度。本试验中摆锤总重484.6 kg,锤头顶板表面为半径500 mm的圆柱面,从而保证锤头在撞击试件时保持良好的接触关系。考虑到实际车船撞击往往导致桥墩出现小剪跨比的受力特征,本试验将名义冲击点设置为基座以上330 mm的位置,即剪跨比约为1.65。试件浇筑时在基座预留了4个圆孔,从而利用四根螺栓将试件固定于两根钢垫梁上(图2),而钢垫梁则另由四根地锚螺栓固定于实验室地槽。考虑到实际桥墩的轴

压比一般不大^[31],且本文主要考察钢管对RC柱冲击响应行为的增强效应而不是对实际桥墩的受力进行精确分析,试验中柱体未考虑轴力作用。

在位移与速度测量方面,试验中采用基于图像处理原理的Imetrum[®]非接触式位移测量系统采集试件的动态位移信息,此系统可采集坐标、位移、速度等数据,L.Chen等^[6]通过与位移计数据的对比验证了此套测量系统的有效性。非接触测点(即视频捕捉点)采用圆形黑白图案制作,并用液体胶粘贴于试件的侧面(尤其是在撞击点以下区域),如图2所示。

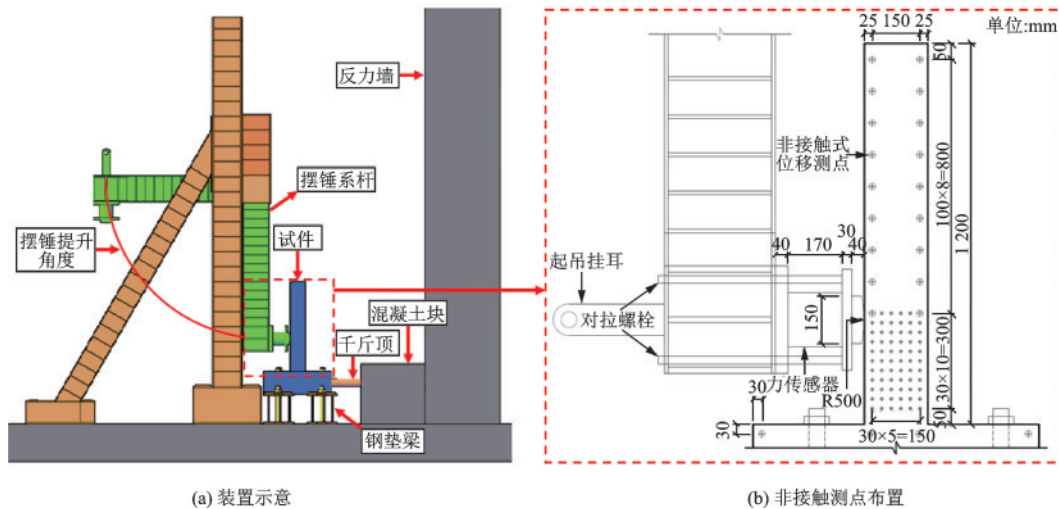


图2 摆锤冲击试验装置及测量方案

Fig.2 Pendulum impact test device and measurement scheme

图3给出了摆锤冲击能量计算示意图。显然,摆锤冲击能量由摆杆和锤头两部分的动能(E_1 和 E_2)组成,通过测量得到的锤头冲击速度 v 及相关参数可以计算出摆锤的冲击能量。表2给出了本试验中摆锤提升角度、冲击速度以及冲击能量的对应关系。

表2 摆锤提升角度、冲击速度与冲击能量的对应关系
Table 2 Correlation among pendulum lift angle, impact velocity, and impact energy

摆锤提升角度/(°)	冲击速度/(m·s ⁻¹)	冲击能量/kJ
30	2.26	0.80
60	4.60	3.33
90	6.68	7.02
120	8.30	10.84

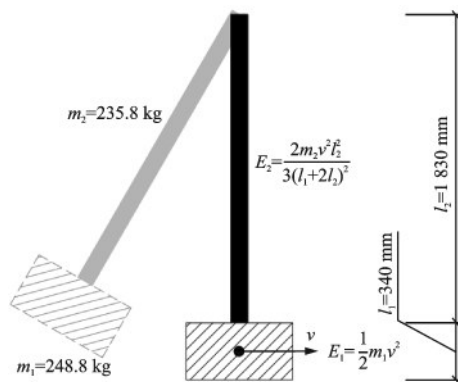


图3 摆锤冲击能量计算示意

Fig.3 Schematic diagram for calculating the impact energy of a pendulum

摆锤撞击力则通过安装在锤头上的应变式力传感器(量程200 t)采集。此外,本试验还对试件中的钢筋应变进行了测量。图4给出了详细的钢筋应变片布置方案。

2 试验结果与分析

2.1 试件损伤特征

图5展示了各试件历次冲击结束后的损伤形

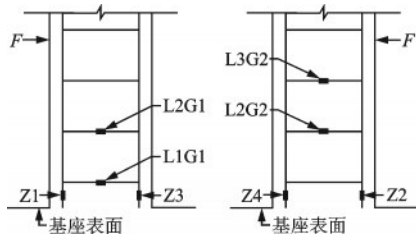


图4 钢筋应变片布置

Fig.4 Layout of strain gauges on steel reinforcements

注:L#代表应变片所在的层数(以基座表面以上第一个箍筋开始计);G#代表箍筋应变片,Z#代表纵筋应变片;F表示冲击力施加的位置和方向。例如,L1G1表示基座以上第一层箍筋的1号应变片

态。图中对各冲击工况进行了统一命名,其中的数字表示摆锤的提升角度。例如“ISRC-30”表示提升角度为30°时摆锤冲击ISRC柱的工况。显然,随着冲击能量的增大,RC柱和ISRC柱的裂缝逐渐增多,而ESRC柱由于外置钢管的存在不能看到每次

冲击后的损伤状态。由图5可知,在摆锤提升角度为30°时,RC柱和ISRC柱均在撞击点和柱底脚之间出现了一条较细微的剪切斜裂缝。当摆锤提升角度增大至60°时,RC柱发生了严重的剪切破坏,即主斜裂缝处混凝土剥落严重,且柱身在斜裂缝处出现明显的剪切错动;而此时ISRC柱的剪切斜裂缝仅出现一定程度的扩展,冲击点上部混凝土出现了两条细小的斜裂缝,并且基座出现了细微的裂缝,但整根试件并未出现显著混凝土剥落。随着冲击能量的进一步增大,ISRC柱在冲击点下部和上部的表层混凝土剪切损伤均逐渐加重,并在柱脚和柱顶出现了混凝土剥落现象。从外观来看,ESRC柱在历次冲击作用下保持了较好的整体形态,但最终在冲击点上下以及冲击点对面的钢管处均出现了轻微隆起;此外,ESRC柱基座开裂较为严重,导致柱体出现明显的倾斜。

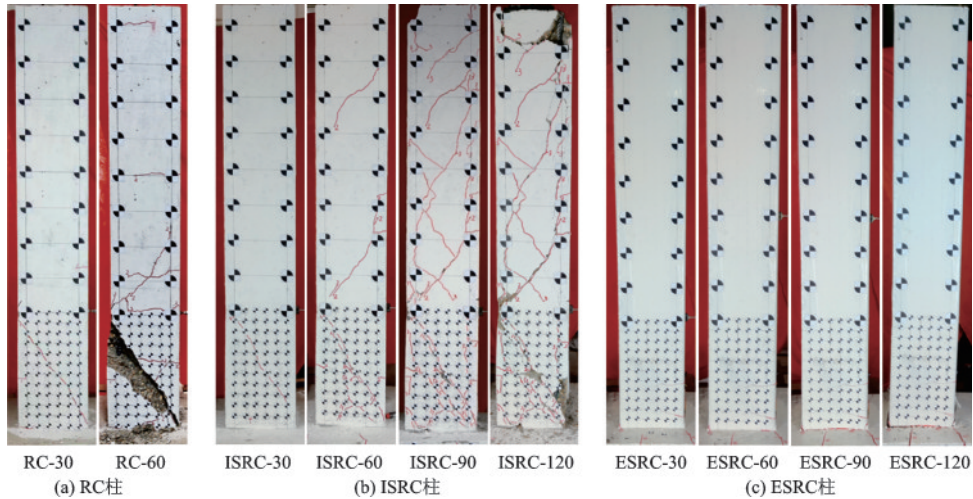


图5 试件损伤形态

Fig.5 Damage patterns of specimens

为了探究钢管布置方案对核心混凝土的保护效果,钢管增强RC柱的钢管被完全拆除以观测试件核心混凝土损伤情况。由图6可以看出,ISRC柱

核心混凝土主要在冲击点附近出现水平裂缝,表现出弯曲损伤特征;ESRC柱在冲击点处的混凝土出现明显剥落,这是因为这部分混凝土直接承受摆锤冲击作用;ESRC柱的裂缝在冲击点处呈放射状展开,剪切损伤特征更为明显。由此可知,在相同的钢管截面面积条件下,内置钢管对RC柱核心混凝土的剪切损伤具有更好的抑制作用。当然,由于本文试验数量有限,关于内置和外置钢管对核心混凝土抗剪性能的影响规律还需要作进一步量化研究。

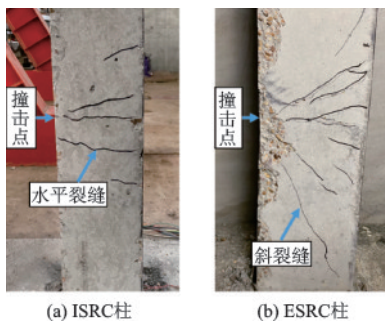


图6 核心混凝土损伤情况

Fig.6 Damage state of core concrete

2.2 摆锤冲击力

图7给出了摆锤在不同提升角度下各试件的冲击力时程曲线。可以看到,冲击力峰值过后,由于

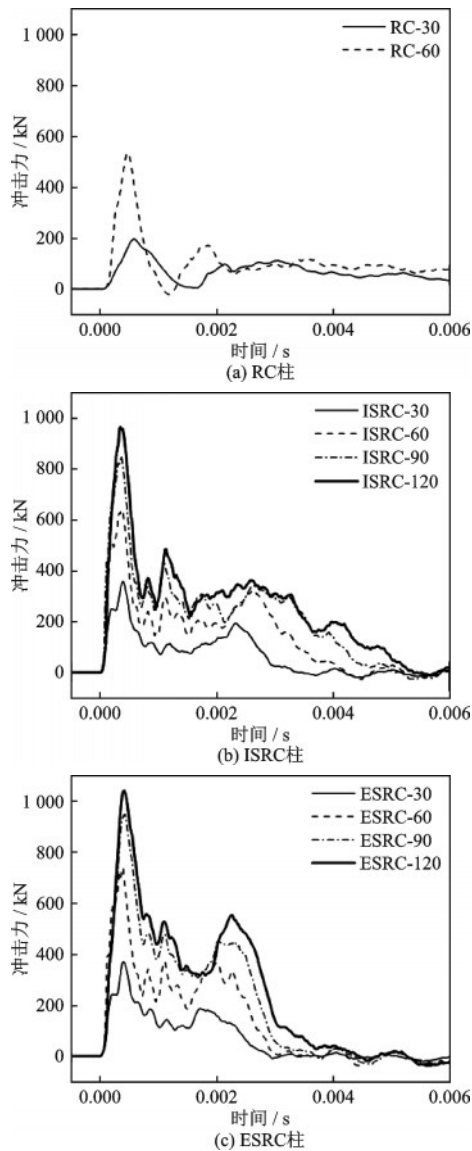


图7 各试件的冲击力时程曲线

Fig.7 Time histories of impact force for each specimen

试件回弹与摆锤锤头发生二次碰撞,冲击力再次来到了一个较大值。随着冲击能量的增大,冲击力总持时逐渐增加。对比三根试件结果可发现,RC柱冲击力峰值之后的波谷值会降到零附近,而另外两根试件则仍保持相对较高的冲击力波谷值,这说明钢管增强RC柱的刚度更大,冲击过程中柱体回弹更快。表3给出了本次试验的一些主要试验结果。由表3可知,相同冲击速度(能量)下三根构件的冲击力峰值表现出明确的规律,即撞击力峰值最大和最小的试件分别为ESRC柱和RC柱,而ISRC柱则介于二者之间。值得一提的是,ESRC柱之所以具有最高的撞击力峰值,一方面是由于外置钢管显著提升了RC柱的整体侧向刚度,另一方面也是因为钢管相比混凝土具有更高的局部接触刚度。

2.3 试件侧向位移

2.3.1 冲击点位移时程

图8给出了各试件名义冲击点的位移时程曲线。由图可知,随着摆锤提升角度的增加,各试件的峰值位移均在增大。结合表3可知,相同摆锤提升角度下,RC柱的峰值位移最大,ESRC柱的峰值位移最小,但ISRC柱和ESRC柱的峰值位移非常接近。ISRC-120负向位移较大,主要是因为剪跨区的混凝土严重开裂且与钢管分离导致刚度骤降。由图8还可以看到,RC柱在第二次冲击后的残余位移达到了15 mm左右,此时构件已发生剪切破坏;ISRC柱在经历四次冲击后仍然保持较小的残余位移;ESRC柱在四次冲击后的残余位移值要高于ISRC柱,但这主要是由基座开裂引起的柱身倾斜所致。

表3 主要试验结果

Table 3 Main test results

工况	冲击力峰值/kN	冲击点位移峰值/mm	柱顶位移峰值/mm	柱体损伤情况
RC-30	197.2	4.6	16.1	斜裂缝出现
RC-60	537.1	20.4	48.4	斜裂缝贯通,构件剪切破坏
ISRC-30	356.6	2.8	12.0	斜裂缝出现
ISRC-60	642.9	7.1	27.9	裂缝开展,基座轻微开裂
ISRC-90	853.1	10.6	38.4	裂缝从冲击点呈放射状延伸
ISRC-120	965.8	12.5	39.3	主斜裂缝加宽,混凝土部分脱落
ESRC-30	370.8	2.7	10.1	基座轻微开裂
ESRC-60	740.8	6.0	30.0	基座裂缝进一步开展,柱体稍许倾斜
ESRC-90	948.1	10.6	35.1	基座裂缝加宽,柱体倾斜更大
ESRC-120	1 040.7	12.4	37.5	冲击点上下及冲击点对面钢管隆起

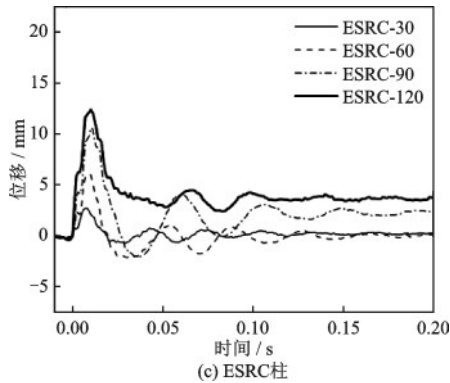
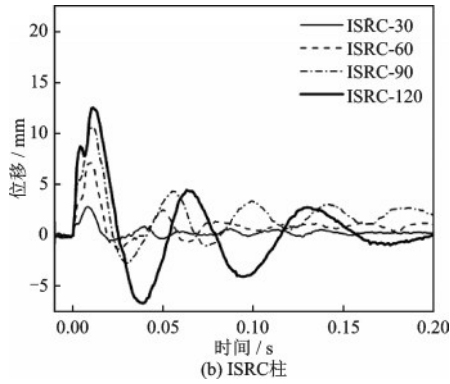
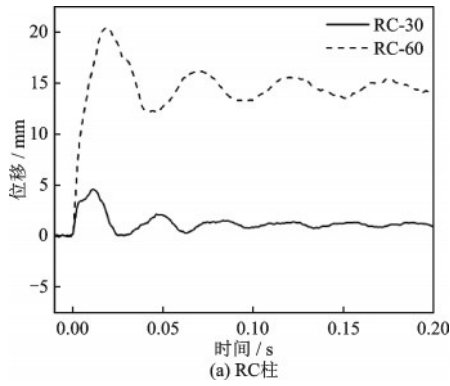


图8 各试件的冲击点位移时程曲线

Fig.8 Time histories of displacement at the impact point for each specimen

总体来讲,即使钢管增强 RC 柱遭受了更大能量的冲击,其位移响应仍远远低于 RC 柱,这表明钢管能有效增强 RC 柱的抗冲击性能。其中,外置钢管对 RC 柱抗冲击能力的提升作用更为显著。

2.3.2 侧向位移分布

图 9 给出了摆锤提升角度为 60° 时各试件侧向位移沿柱高的分布曲线。由图可知,三根试件在冲击开始后的 0.003 s 内,柱顶出现负向位移,且冲击点位移明显大于柱顶位移,这与悬臂柱在静态受力时的变形特征截然不同,表明冲击作用下柱体出现了显著的惯性效应。由图 9 可知,在摆锤提升角度为 60° 时,RC 柱底部出现显著的剪切变形,而 ISRC

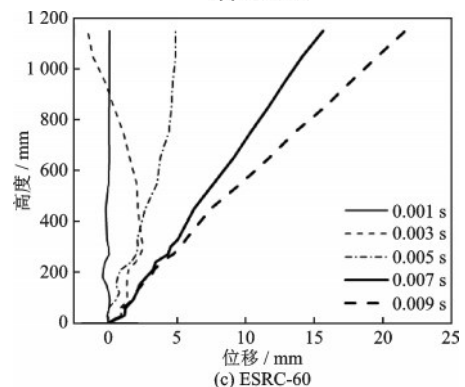
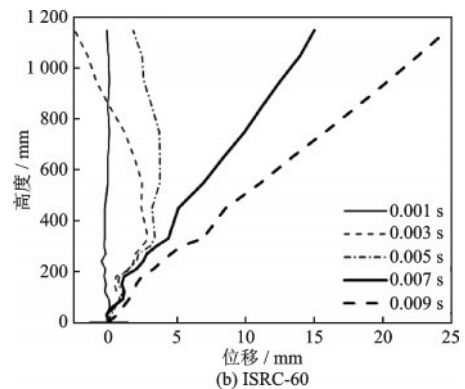
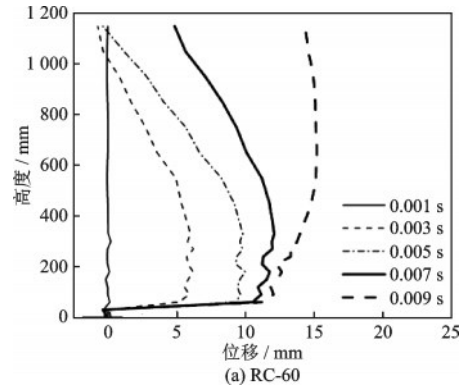


图9 试件侧向位移分布

Fig.9 Distributions of lateral displacements of specimens

柱和 ESRC 柱均未出现明显的剪切变形,且二者位移分布形态相似。

2.4 冲击力—位移关系

图 10(a)与图 10(b)分别给出了摆锤提升 30° 和 60° 时三个试件的冲击力和冲击点位移的关系曲线。由图可知,ISRC 柱和 ESRC 柱具有相似的冲击力—位移曲线形态,尤其是初始上升段。冲击力—位移曲线所围面积即为摆锤对柱体的冲击功,通过它可以大致评估柱体吸收的能量。图 10(c)即为摆锤在两种提升角度下对三个试件的冲击功。由图可知,相同冲击能量下,摆锤对 RC 柱的冲击功明显大于两类钢管增强 RC 柱;且摆锤对 ISRC 柱与 ESRC 柱

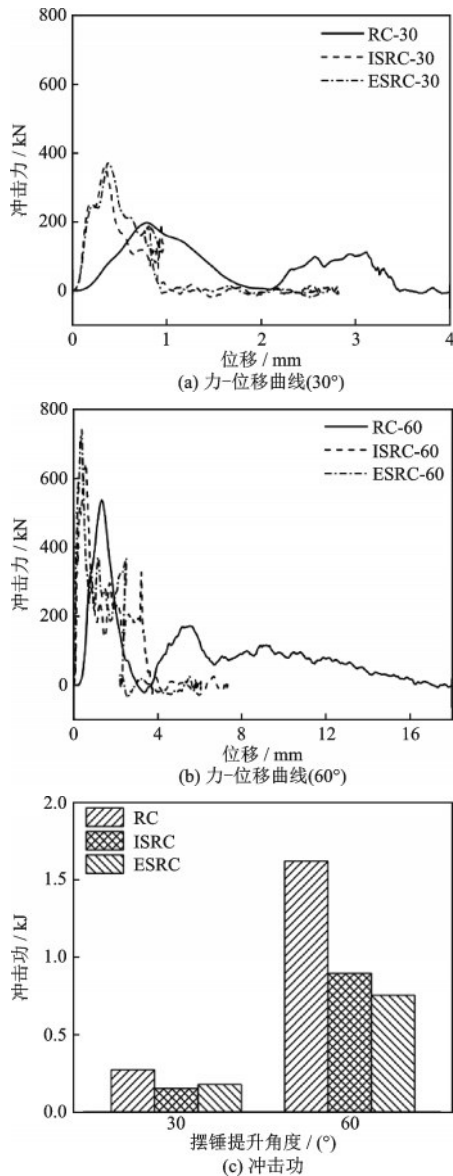


图 10 力-位移曲线与能量吸收

Fig.10 Force-deflection curves and energy absorption

的冲击功相差不大。显然,相同冲击能量下,RC柱相较ISRC柱和ESRC柱吸收了更多的冲击能量,这与试件的损伤状态显然是相关的。

2.5 钢筋应变

2.5.1 纵筋应变

图 11 展示了摆锤提升 30° 时三个试件底部受拉侧纵筋应变时程曲线。对比图 8 和图 11 可知,各试件的纵筋应变和位移变化趋势基本同步,峰值应变和峰值位移变化规律也基本相同,即为 RC 柱、ISRC 柱和 ESRC 柱依次递减。由此可见,各试件的宏观变形和“微观”变形基本一致。

图 12 展示了摆锤提升 60° 对 RC 柱进行冲击以

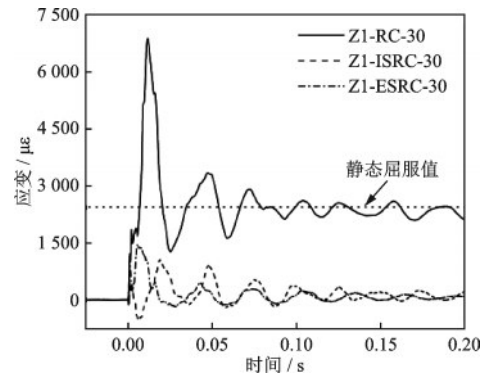


图 11 底部受拉侧纵筋应变时程曲线

Fig.11 Time histories of strain in longitudinal rebars on the bottom tension side

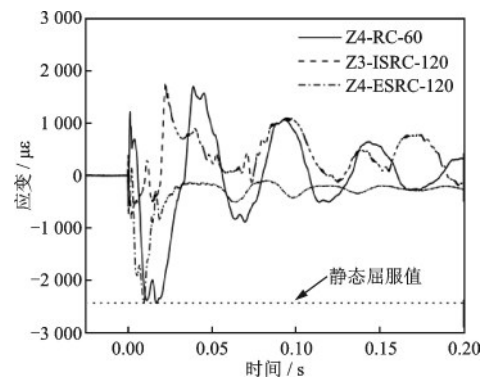


图 12 底部受压侧纵筋应变时程曲线

Fig.12 Time histories of strain in longitudinal rebars on the bottom compression side

及提升 120° 对 ISRC 柱和 ESRC 柱进行冲击时的底部受压侧纵筋应变时程曲线。由图可知,由于应力波效应的影响,三者冲击开始后经历了短暂的受拉变形,然后迅速转变为受压状态。对三条曲线进行对比可以看出,即使冲击能量大大增加,ISRC 柱和 ESRC 柱的钢筋应变仍保持在一个相对较低的水平,这也验证了钢管有效增强了 RC 柱的侧向刚度,并且能较好地约束混凝土的变形。

2.5.2 箍筋应变

图 13 给出了三根试件在各冲击工况下的箍筋应变时程曲线。由图可知,相同冲击能量下,箍筋应变从大到小依次为 RC 柱、ISRC 柱和 ESRC 柱。RC 柱在摆锤提升角度为 30° 时,一侧箍筋应变(L2G1)大于静态屈服值,说明柱体已经产生一定的剪切损伤;当摆锤提升角度为 60° 时,两侧的箍筋应变均远远超出静态屈服值,即箍筋失效,这表明柱体已发生严重的剪切破坏。ISRC 柱在摆锤提升角度为 90° 时,箍筋应变偶有少许超出静态屈服值,意

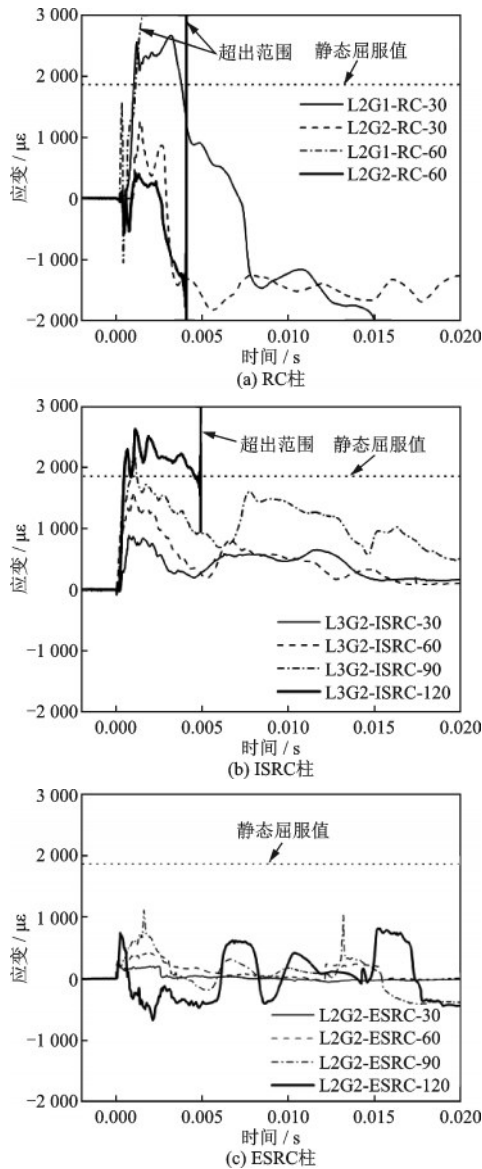


图 13 箍筋应变时程曲线

Fig.13 Time histories of strain in stirrups

意味着此时混凝土(钢管外)出现了轻微的剪切损伤;当摆锤提升角度为 120° 时,箍筋应变急剧增大,据此判断此时外层混凝土已经完全剪坏。此外,ESRC柱的箍筋应变在四次撞击中均完全保持在静态屈服值以下,这表明外置钢管对RC柱箍筋所在的外侧混凝土剪切变形起到了较好的抑制作用。

3 结论

本文对小剪跨比条件下的RC柱、内置钢管增强RC柱(ISRC柱)以及外置钢管增强RC柱(ESRC柱)分别进行了水平侧向反复冲击试验,考察了三根柱子在历次冲击作用下的破坏形态,以及冲击

力、位移和钢筋应变等动态响应,并对钢管对RC柱的增强效应进行了分析,得出以下结论:

(1)内置和外置钢管均能显著提升小剪跨比RC柱的抗冲击性能,包括柱子的抗剪能力。

(2)在相同的冲击能量下,ISRC柱的表层混凝土相比ESRC柱损伤更为严重,但内置钢管相比外置钢管能更有效地降低柱身核心混凝土的剪切损伤。

(3)ESRC柱相比ISRC柱具有更高整体刚度和表面刚度;在相同的冲击能量下,ESRC柱将承受更大的冲击力,且会对其相邻构件传递更大的冲击作用;当相邻构件的承载力和刚度不够时,将导致其发生破坏。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2020年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2021.
PRC. Ministry of Transport. Statistical bulletin of development of China's highway and waterway transportation industry in 2020[R]. Beijing: Ministry of Transport of PRC, 2021. (in Chinese)
- [2] 陈林, 肖岩. 桥墩防车辆撞击研究综述[J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 78-86.
Chen L, Xiao Y. Review of studies on vehicle anti-collision on bridge piers [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(8): 78-86. (in Chinese)
- [3] Butth C E, Williams W F, Brackin M S, et al. Analysis of large truck collisions with bridge piers: phase 1. report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions [R]. Texas: Texas Transportation Institute Proving Ground, 2010.
- [4] Djelebov E, Donchev T. Standard developments of vehicle collision loading on bridge piers [R]. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2008.
- [5] Butth C E, Brackin M S, Williams W F, et al. Collision loads on bridge piers: phase 2, report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions [R]. Texas: Texas Transportation Institute Proving Ground, 2011.
- [6] Chen L, Wu H, Fang Q, et al. Full-scale experimental study of a reinforced concrete bridge pier under truck collision [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26

- (8):5021008.
- [7] Cao R, Agrawal A K, Ei-Tawil S, et al. Performance-based design framework for bridge piers subjected to truck collision[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(7) :04019064.
- [8] Chen L, Wu H, Liu T. Shear performance evaluation of reinforced concrete piers subjected to vehicle collision [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(4) : 4020026.
- [9] 方乐,曾玉焯,陈林. 针对轻型与中型卡车撞击桥墩的通用车辆力学模型[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(4) : 92-101.
Fang L, Zeng Y Y, Chen L. General vehicle mechanical model for light and medium trucks crashing into bridge piers[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(4):92-101.(in Chinese)
- [10] 邵俊虎,占玉林,陈宁,等. 驳船撞击下RC桥墩的非线性动力响应与损伤特征分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(1):81-91.
Shao J H, Zhan Y L, Chen N, et al. Nonlinear dynamic response and damage characteristic analysis of RC pier under barge collision[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(1) : 81-91.(in Chinese)
- [11] Zhou X, Zhou M, Luo D, et al. Study on the nonlinear response and shear behavior of RC columns under lateral impact[J]. *Structures*, 2021, 34:3834-3850.
- [12] 陈海彬,高静,葛楠,等. 钢筋混凝土柱在冲击荷载作用下破坏模式研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(增2) : 104-108.
Chen H B, Gao J, Ge N, et al. Investigation on failure mode of RC members subjected to impulsive load [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30 (Sup2) : 104-108.(in Chinese)
- [13] Demartino C, Wu J G, Xiao Y. Response of shear-deficient reinforced circular RC columns under lateral impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 109:196-213.
- [14] 汪俊文,周德源. 钢筋混凝土柱抗水平冲击行为数值研究[J]. *结构工程师*, 2019, 35(1):42-48.
Wang J W, Zhou D Y. Numerical investigation on resistant behavior of reinforced concrete columns under horizontal impact loading [J]. *Structural Engineers*, 2019, 35(1):42-48.(in Chinese)
- [15] Peng T, Chen L, Liu T, et al. Static shear performance and residual axial capacity of rectangular RC bridge piers under near-ground lateral loads[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147(12):04021219.
- [16] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 3版. 北京:科学出版社, 2016.
Han L H. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.(in Chinese)
- [17] 刘亚玲. 常见约束类型的钢管混凝土构件侧向冲击响应试验研究与数值分析[D]. 太原:太原理工大学, 2005.
Liu Y L. Experiment research and numerical analysis of lateral impact respond of steel tube-confined concrete at common type restrain [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2005.(in Chinese)
- [18] 任够平,李珠,王蕊. 低速侧向冲击下钢管混凝土柱挠度研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(5):170-175.
Ren G P, Li Z, Wang R. The deflection of concrete filled steel tubular column under lateral impact at low speed [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(5) : 170-175.(in Chinese)
- [19] 李珠,王兆,王蕊. 侧向冲击荷载作用下两端固定钢管混凝土构件的试验研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(增1) : 167-170.
Li Z, Wang Z, Wang R. Experimental study on concrete filled steel tube with fixed-ends under lateral impact loads [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26 (Sup1):167-170.(in Chinese)
- [20] 曾希,熊雷,李召,等. 圆钢管混凝土柱抗冲击性能试验与有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(增1) : 157-164.
Zeng X, Xiong L, Li Z, et al. Experiment and FEA of impact resistance of CFST columns with circular cross-section[J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(Sup1):157-164.(in Chinese)
- [21] 熊雷. 钢管混凝土柱在横向冲击荷载作用下的动力响应分析[D]. 荆州:长江大学, 2017.
Xiong L. Study on performance of circular concrete-filled steel tubular (CFST) columns under velocity transverse impact[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2017.(in Chinese)
- [22] 朱翔,陆新征,杜永峰,等. 外包钢管加固RC柱抗冲击试验研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(6):23-33.
Zhu X, Lu X Z, Du Y F, et al. Experimental study on impact resistance of reinforced concrete columns strengthened with steel jackets [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(6):23-33.(in Chinese)
- [23] 郭玉荣,李炎蓁,霍静思,等. 水平冲击荷载作用下钢管混凝土柱动力响应试验与数值模拟[J]. *建筑科学与工程学报*, 2017, 34(6):28-35.
Guo Y R, Li Y Z, Huo J S, et al. Dynamic response experiment and numerical simulation of CFST columns un-

- der lateral impact load[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2017, 34(6):28-35.(in Chinese)
- [24] Bambach M R. Design of hollow and concrete filled steel and stainless steel tubular columns for transverse impact loads [J]. *Thin-walled Structures*, 2011, 49(10):1251-1260.
- [25] Xian W, Chen W, Hao H, et al. Investigation on the lateral impact responses of circular concrete-filled double-tube (CFDT) members [J]. *Composite Structures*, 2021, 255:112993.
- [26] Xian W, Chen W, Hao H, et al. Experimental and numerical studies on square steel-reinforced concrete-filled steel tubular (SRCFST) members subjected to lateral impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 160: 107409.
- [27] Zhu X, Kang M, Fei Y, et al. Impact behavior of concrete-filled steel tube with cruciform reinforcing steel under lateral impact load [J]. *Engineering Structures*, 2021, 247:113104.
- [28] Zhu X, Zhao P, Tian Y, et al. Experimental study of RC columns and composite columns under low-velocity impact[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 160:107374.
- [29] 钱稼茹,崔瑶,方小丹.钢管混凝土柱受剪承载力试验[J].*土木工程学报*,2007,40(5):1-9.
Qian J R, Cui Y, Fang X D. Shear strength tests of concrete filled steel tube columns[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007,40(5):1-9.(in Chinese)
- [30] 蔡健,梁伟盛,林辉.方钢管混凝土柱抗剪性能试验研究[J].*深圳大学学报(理工版)*,2012,29(3):189-194.
Cai J, Liang W S, Lin H. Experimental study on shear resistance performance of concrete filled square steel tubular columns[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2012, 29(3):189-194.(in Chinese)
- [31] 刘飞.钢筋混凝土桥墩抗车辆撞击机理研究[D].长沙:湖南大学,2017.
Liu F. The mechanism research of reinforced concrete piers subjected to vehicle collisions[D]. Changsha: Hunan University, 2017.(in Chinese)
- (本文编辑:苏泽云)



(上接第 422 页)

- [28] 中华人民共和国自然资源部. 标准地图服务[EB/OL]. [2022-8-24]. <http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>.
- [29] Hong Kong Transport Department. Traffic speed map [EB/OL]. [2021-9-30]. https://data.gov.hk/en-data/dataset/hk-td-sm_1-traffic-speed-map.
- [30] Hong Kong Transport Department. The annual traffic census (2019)[R]. Hong Kong: Hong Kong Transport Department, 2020.
- [31] Geotechnical Engineering Office (GEO). Investigation of some major slope failures between 1992 and 1995 [R]. Hong Kong: Civil Engineering and Development Department (CEDD), 1996.
- [32] Cheung R W M, Tang W H. Realistic assessment of slope reliability for effective landslide hazard management[J]. *Geotechnique*, 2005, 55(1): 85-94.
- [33] Zhang L M, Liang G, Zhou S Y, et al. Stress testing framework for managing landslide risks under extreme storms[C] //Workshop on World Landslide Forum. Cham:Springer, 2017: 17-32.
- [34] Zhang J, Tang W H. Study of time-dependent reliability of old man-made slopes considering model uncertainty [J]. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2009, 3(2): 106-113.
- [35] Corominas J. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(2): 260-271.
- [36] Huang J, Lyamin A V, Griffiths D V, et al. Quantitative risk assessment of landslide by limit analysis and random fields[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 53: 60-67.
- [37] Geotechnical Engineering Office (GEO). Landslides and boulder falls from natural terrain: interim risk guidelines [R]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, 1998.