

基于LS-DYNA的ECC管桩的抗冲击性能分析

曾庆有¹,叶晨峰¹,刘俊俊²,冯凯²,程沛媛¹,陈伟宏^{2*}

(1.福建省交通规划设计院有限公司,福建 福州 350000;2.福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

摘要:为研究工程水泥基复合材料(Engineering Cementitious Composite, ECC)管桩的抗冲击性能,采用Ansys/LS-DYNA对管桩受竖向落锤冲击作用进行模拟。基于静态拉压试验和动态压缩试验获得关键参数,建立ECC管桩的HJC(Holmquist-Johnson-Cook)本构模型,通过霍普金森压杆试验(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)验证有限元模型的正确性。对不同锤体质量和冲击速度组合的管桩模型进行参数化分析,得到管桩在不同冲击能量下的位移、能量时程曲线和有效塑性应变图等动力响应。结果表明:在竖向冲击作用下,ECC管桩的最大残余变形只有高强混凝土(High-Strength Concrete, HC)管桩的66.0%,最小残余变形仅为HC管桩的13.7%;且ECC管桩释放的变形能占比平均为HC管桩的6.26倍。表明ECC管桩较HC管桩有更好的抗损伤能力和弹性恢复能力。

关键词:管桩;工程水泥基复合材料(ECC);抗冲击性能;LS-DYNA;高强混凝土(HC)

中图分类号:U443.2

文献标志码:A

Impact Resistance of ECC Pipe Piles Based on LS-DYNA

ZENG Qingyou¹, YE Chenfeng¹, LIU Junjun², FENG Kai², CHENG Peiyuan¹, CHEN Weihong^{2*}

(1. Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China ;2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: To study the impact resistance of Engineering Cementitious Composite (ECC) pipe piles, this paper used ANSYS/LS-DYNA to simulate the impact of a vertical drop hammer on the pipe piles. The HJC constitutive model of ECC was established based on key parameters obtained from static tension and compression tests and dynamic compression tests. The correctness of the finite element model was verified by split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) tests. The parametric analysis conducted on the pipe pile models compounded with different hammer mass and impact velocity yielded dynamic responses including the displacement, time-history curve of energy, and effective plastic strain diagrams of the pipe piles under various impact energies. The results show that under the action of vertical impact, the maximum residual deformation of ECC pipe piles is only 66.0% of that of high-strength concrete (HC) pipe piles, and the minimum residual deformation is only 13.7% of that; in addition, the proportion of deformation energy released by ECC pipe piles is 6.26 times that of HC pipe piles on average. These results show that ECC pipe piles have better damage resistance and elastic recovery ability than HC pipe piles.

Keywords: pipe pile; ECC; impact resistance; LS-DYNA; high-strength concrete

0 引言

混凝土管桩是基础工程中广泛使用的一种重要

桩基构件^[1-2]。但是,混凝土是一种脆性材料,在锤击施工过程中,桩身容易开裂,桩头也会出现部分破损的情况。对于开裂混凝土管桩而言,服役环境中

收稿日期:2022-07-28

基金项目:福建省交通科技计划项目(编号:202021);福州大学开放测试基金项目(编号:2021T036)

作者简介:曾庆有,男,教授级高工.E-mail:191023444@qq.com

*通信作者:陈伟宏,男,博士,副研究员.E-mail:4262134@qq.com

的有害物质(如酸、除冰盐、氯离子等)会沿着裂缝快速侵入混凝土内部,引起钢筋锈蚀,造成耐久性下降。因此,在公路水运工程中,混凝土管桩被限制使用。

为提高管桩混凝土的抗冲击性能,可以使用不连续短纤维、辅助胶凝材料等来增强混凝土^[3-5]。李为民等^[6]通过 SHPB 试验研究了玄武岩纤维对混凝土抗冲击性能的影响。发现掺入体积比为 0.1% 的玄武岩纤维使混凝土的动态抗压强度和吸能能力分别提高了 26% 和 14%; Wang 等^[7]采用霍普金森压杆装置对普通混凝土和钢纤维混凝土进行了应变率为 20~60 s⁻¹ 范围内的多次冲击试验,发现掺入 1.5% 和 3% 体积比的钢纤维可以将混凝土的抗冲击次数分别提升 5 倍和 9 倍;基于 Mo 等^[8]的落锤冲击试验结果,发现在 1% 的总体积纤维比例下,0.9% 钢纤维与 0.1% 聚丙烯纤维的混杂纤维混凝土展现出最佳抗冲击性能,冲击延性指数分别是钢纤维混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)和素混凝土的 1.9 倍和 8.4 倍。但是,这种技术无法解决因混凝土开裂导致的钢筋腐蚀问题。

ECC 具有高延性、良好的裂缝控制能力,极限拉应变可达到 2%,最大裂缝宽度可控制在 50 μm 以下,并且具有良好的抗冲压性能^[9-12]。将其替代混凝土,可以有效提高管桩的抗裂、抗冲击性能。利用有限元软件 LS-DYNA 显示动力分析程序对 ECC 管桩和 HC 管桩的落锤冲击试验进行数值模拟,研究不同锤体质量和冲击速度组合下的冲击荷载对两种混凝土管桩内能、桩顶轴向变形和破坏形态的影响。评价在冲击荷载作用下,ECC 管桩和 HC 管桩的抗冲击性能。

1 有限元模型与验证

1.1 分析对象

分析对象为 ECC 管桩与 HC 管桩,研究内容为落锤冲击作用下的管桩动力响应。通过设置一定的落锤锤重,调节不同落高,来反映不同程度的能量冲击。模型为了有一定的缓冲作用设置了桩垫和锤垫,垫层材料均使用胶合板材料。冲击作用点位于桩顶。假设管桩构件下端固定,忽略桩-土效应。管桩构件的几何尺寸与钢筋配置图见图 1。

1.2 几何模型

模型共由 7 部分组成,如图 2 所示。忽略落锤变

形;将固结约束直接施加在管桩底面。通过改变锤体的初始速度或质量(通过改变锤体密度)来实现不同程度的能量冲击。

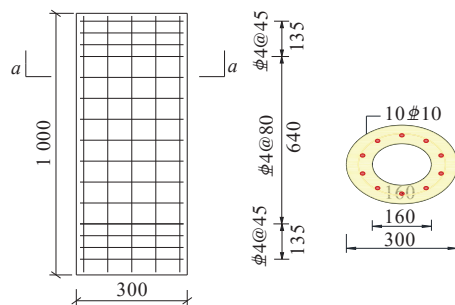


图 1 管桩尺寸与配筋图(单位:mm)

Figure 1 Pipe pile size and reinforcement (unit:mm)

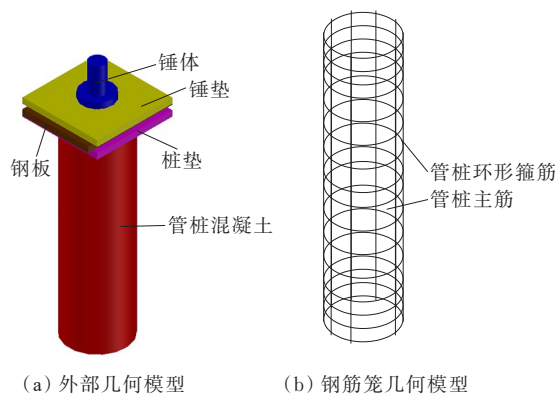


图 2 几何模型

Figure 2 Geometric models

1.3 材料本构模型

1.3.1 ECC 的 HJC 损伤本构模型

采用 HJC 混凝土损伤本构模型模拟 ECC 混凝土在高应变率、大变形下的动态性能。为了获取模型参数,完成了立方体抗压试验、单轴拉伸试验和 SHPB 动态压缩试验。由 100 mm 的立方体试验确定了 ECC 的立方体抗压强度为 62.4 MPa,其 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体抗压强度实测值为 31.5 MPa。由单轴拉伸试验确定了 ECC 抗拉强度均值为 3.06 MPa,极限拉应变均值为 2.27%,单轴拉伸试验试件尺寸和加载装置如图 3、4 所示。

此外通过 SHPB 试验,研究 ECC 在不同应变率下的冲击压缩性能。采用直径为 80 mm 的分离式霍普金森压杆作为冲击加载装置(图 5)。SHPB 装置主要包括 4 部分:加载驱动系统、压杆测试系统、数据采集系统和数据处理系统。共设计 12 个 $\phi 71 \times 36$ mm 的圆柱体作为 SHPB 试件,分别对应 4 种冲击气压,

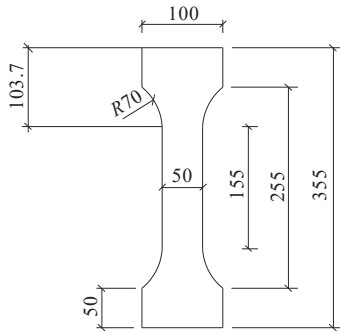


图3 狗骨试件尺寸(单位:mm)

Figure 3 Specimen size(unit:mm)

即 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa, 每组 3 个试件。试验得到 ECC 试件在不同冲击气压下的应变率、峰值应力、峰值应变和动态强度增长因子(Dynamic

Increase Factor, F_{DIF}), 如表 1 所示。动态压缩应力-应变曲线如图 6 所示。试件放置图及部分试件冲击损伤如图 7 所示。

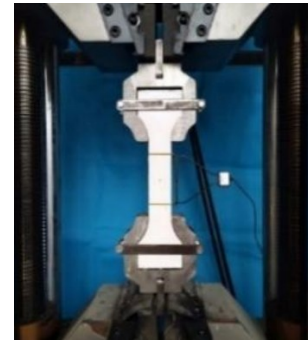


图4 单轴拉伸试验

Figure 4 Uniaxial tensile tests

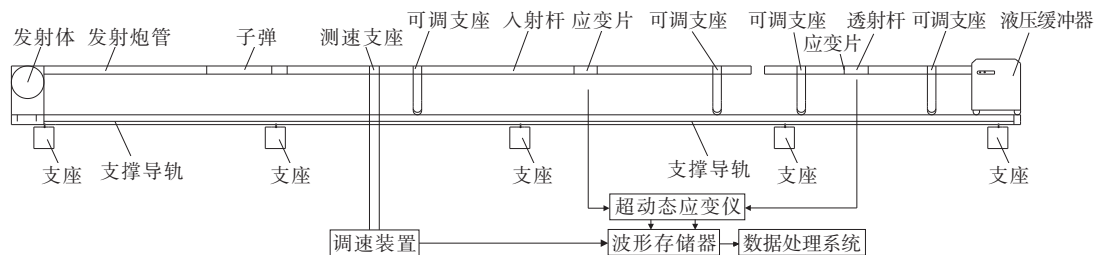


图5 SHPB试验装置示意图

Figure 5 SHPB test devices

表1 SHPB试验结果

Table 1 SHPB test results

试件编号	冲击气压/ MPa	应变率/ (s ⁻¹)	峰值应 力/MPa	峰值应 变/%	F_{DIF}
ECC-0.2	0.2	63.2	32.6	0.799	1.03
ECC-0.3	0.3	106.3	40.4	0.981	1.28
ECC-0.4	0.4	168.9	54.6	1.924	1.74
ECC-0.5	0.5	215.1	60.0	1.863	1.90

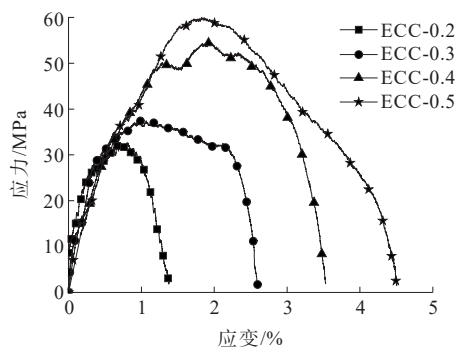


图6 ECC试件动态压缩应力-应变曲线

Figure 6 Dynamic compressive stress-strain curve of ECC specimen



(a) 试件放置图



(b) 试件破坏图

图7 SHPB试验

Figure 7 SHPB tests

HJC 本构模型由屈服面方程、状态方程和损伤演化方程 3 部分组成。

(1) 屈服面方程

屈服面方程函数表达式如式(1)所示:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq S_{MAX} \quad (1)$$

式中: σ^* 为标准化等效应力, 由公式 $\sigma^* = \sigma/f'_c$ 取得, 其中 f'_c 为材料的静态抗压强度; P^* 为标准化静水压力, 由公式 $P^* = P/f'_c$ 取得; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变率, 由公式 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 取得, 其中 $\dot{\epsilon}$ 为实效应变速率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率; A 、 B 、 C 、 D 、 N 和 S_{MAX} 为材料常数, 其中 A 为标准

化黏聚强度, B 为标准化压力硬化系数, N 为标准化压力硬化指数, C 为应变率效应系数, D 为材料损伤参数, S_{MAX} 为标准化最大强度。

(2) 状态方程

状态方程主要由线弹性阶段 ($\mu \leq \mu_{\text{crush}}$)、塑性过渡阶段 ($\mu_{\text{crush}} \leq \mu \leq \mu_{\text{lock}}$) 和无气孔密实阶段 ($\mu \geq \mu_{\text{lock}}$) 3 个阶段组成。3 个阶段的表达式为:

$$P = \begin{cases} K_e \mu & \mu \leq \mu_{\text{crush}} \\ P_{\text{crush}} + K_p (\mu - \mu_{\text{crush}}) & \mu_{\text{crush}} \leq \mu \leq \mu_{\text{lock}} \\ K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3 & \mu \geq \mu_{\text{lock}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 为静水压力; μ 为体积应变; K_e 为弹性体积模量; K_p 为塑性体积模量; μ_{crush} 为压碎体积应变; μ_{lock} 为密实体积应变; P_{crush} 为压碎压力; K_1 、 K_2 和 K_3 为压力常数; 式中 $\bar{\mu} = (\mu - \mu_{\text{lock}}) / (1 + \mu_{\text{lock}})$ 。

(3) 损伤演化方程

损伤演化方程主要通过等效塑性应变、塑性体积应变和静水压力 3 方面来描述混凝土损伤, 其表达式为:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (3)$$

$$f(p) = \epsilon_p^f + \mu_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \geq C_{\text{EFMIN}} \quad (4)$$

式中: D 为损伤因子; $\Delta \epsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别为等效塑性应变增量和等效体积应变增量; ϵ_p^f 和 μ_p^f 为压力 P 作用下破碎时的塑性应变; D_1 和 D_2 为材料的损伤参数; T^* 为标

准化抗拉强度, 由公式 $T^* = T/f_c'$ 取得; 损伤常数 C_{EFMIN} 为材料的最小塑性应变容限值。

HJC 本构模型包含 21 个参数, 即 4 个材料参数 (ρ 、 G 、 f_c 、 T)、5 个材料强度参数 (A 、 B 、 C 、 N 、 S_{MAX})、3 个损伤参数 (D_1 、 D_2 、 C_{EFMIN})、7 个状态方程参数 (K_1 、 K_2 、 K_3 、 P_{crush} 、 P_{lock} 、 μ_{crush} 、 μ_{lock}) 和 2 个软件参数 ($\dot{\epsilon}_0$ 、 f_s)。其中, 材料密度 ρ 、静态抗压强度 f_c 、抗拉强度 T 、弹性模量 E 和泊松比 ν , 可由 ECC 材料试验获得。进而通过表 2 公式计算材料的剪切模量 G , 压碎压力 P_{crush} , 压碎体积应变 μ_{crush} , 密实体积应变 μ_{lock} , 失效类型 f_s 。

表 2 G 、 P_{crush} 、 μ_{crush} 、 μ_{lock} 、 f_s 计算公式
Table 2 Calculation formula for G 、 P_{crush} 、 μ_{crush} 、 μ_{lock} 、 f_s

参数	计算公式
G	$G = E / [2(1 + \nu)]$
P_{crush}	$P_{\text{crush}} = f_c / 3$
μ_{crush}	$\mu_{\text{crush}} = P_{\text{crush}} / [E(1 - 2\nu)]$
μ_{lock}	$\mu_{\text{lock}} = \rho_0 / (\rho_0 - 1)$
f_s	$f_s = -T / f_c$

其余 9 项参数根据已有研究文献[13、14]获得。ECC 管桩的损伤参数和软件参数设置为: $D_1=0.04$ 、 $D_2=1.0$ 、 $C_{\text{EFMIN}}=0.01$ 、 $\dot{\epsilon}_0=1.0$ 、 $f_s=-0.049$ 。

此外, 采用 HC 管桩作为对比模型, 其 HC 的模型参数可依据文献[15]取值。

ECC 与 HC 的 HJC 本构模型参数见表 3、4。

表 3 混凝土本构模型密度、剪切模量和强度参数

Table 3 Density, shear modulus and strength parameters of concrete constitutive model

混凝土种类	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G / MPa	f_c / MPa	T / MPa	A	B	C	N	S_{MAX}
ECC	2 100	8 090	62.4	3.06	0.295	1.83	0.006 7	0.63	11
HC	2 500	20 900	62.0	3.10	0.300	1.73	0.005 0	0.79	7

表 4 混凝土本构模型状态方程参数

Table 4 State equation parameters of concrete constitutive model

混凝土种类	μ_{lock}	$P_{\text{lock}} / \text{MPa}$	μ_{crush}	$P_{\text{crush}} / \text{MPa}$	K_1 / MPa	K_2 / MPa	K_3 / MPa
ECC	0.16	1 050	0.001 7	20.80	85 000	-171 000	208 000
HC	0.11	3 470	0.001 0	26.67	116 000	-243 000	506 000

1.3.2 本构模型的验证

采用有限元软件 LS-DYNA 模拟 SHPB 试验来验证 ECC 材料的 HJC 本构模型的正确性。入射杆、透射杆和试件均采用 Solid 164 三维实体单元建模, 模型计算选用单点积分算法并配合沙漏控制, SHPB 数值模型

如图 8 所示。省略子弹的建模来提高计算效率, 将子弹的入射波直接转化为时程力施加在入射杆端面以模拟加载; 试件与压杆之间的接触采用自动面面接触。入射杆和透射杆均采用线弹性材料模型, 密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 210 GPa , 泊松比为 0.25。

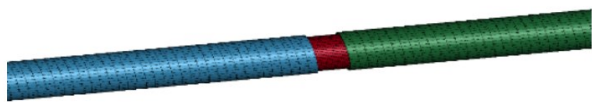


图8 SHPB数值模型

Figure 8 SHPB numerical model

依据三波法原理,对模拟结果进行处理得到试件的动态压缩应力-应变曲线。ECC试件在0.2~0.4 MPa的冲击作用下,模拟所得的应力-应变曲线与试验得到的应力-应变曲线有较好的吻合度,0.2 MPa和0.4 MPa冲击作用下的动态应力应变曲线见图9。说明选取的动态本构模型能较好地反映ECC在动态冲击下的应力-应变行为。

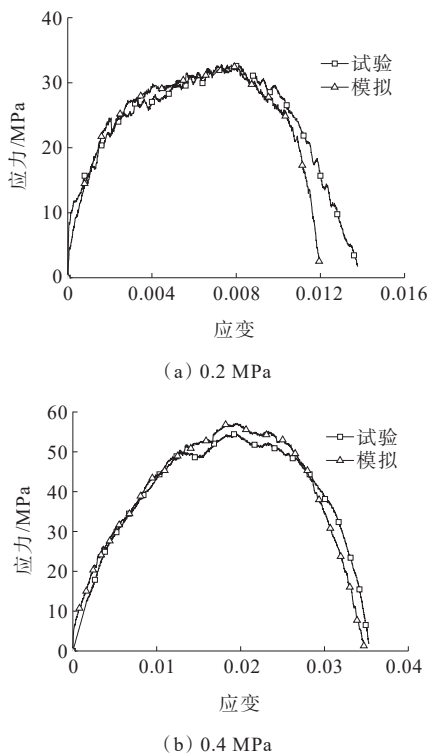


图9 不同冲击作用下试验结果与模拟结果对比

Figure 9 Comparison of test results and simulation results under different impacts

1.3.3 钢筋材料模型

钢筋采用塑性随动强化模型,钢筋材料模型的具体参数为:密度 $\rho=7\,850\text{ kg/m}^3$ 、弹性模量 $E=2.0\times 10^5\text{ MPa}$ 、泊松比 $\nu=0.3$ 、屈服应力 $f_y=425\text{ MPa}$ 、应变参数 $C=40$ 、应变参数 $P=5$ 、失效应变 $\epsilon=0.15$ 。

1.3.4 其余部件材料模型

冲击试验中的桩顶钢板选用线弹性模型进行模拟。锤体采用刚体材料模型,其质量的改变可通过密度换算得到。桩垫与锤垫均采用胶合板材料,选

用线弹性模型。钢材的具体参数为:弹性模量 $E=2.1\times 10^5\text{ MPa}$ 、泊松比 $\nu=0.3$ 、密度 $\rho=7\,850\text{ kg/m}^3$ 。胶合板的具体参数为:弹性模量 $E=6\times 10^5\text{ MPa}$ 、泊松比 $\nu=0.4$ 、密度 $\rho=2\,100\text{ kg/m}^3$ 。

1.3.5 接触、边界条件和求解控制

混凝土、落锤、钢板、桩垫和锤垫均采用三维实体八节点六面体单元Solid 164进行模拟。管桩内的主筋和环形箍筋均采用Hughes-Liu梁单元进行模拟。不考虑钢筋和混凝土之间的黏结滑移。管桩底座与钢地板固定连接。设置落锤、锤垫、钢板、桩垫、管桩之间为单面接触,赋予落锤单元初速度 $V=\sqrt{2gh}$ 。

LS-DYNA显式分析对三维六面体单元选用单点缩减积分,选取刚性沙漏控制类型4,沙漏系数设置为0.1,并设置参数HGEN和RWEN为2使程序进行沙漏能计算,若计算出的沙漏能低于内能的10%,则认为计算结果是合理的。临界时间步长的缩放系数设置为0.9,模型的输出步数设置为800,一次黏性系数和二次黏性系数分别设置为0.06和1.50。

2 有限元模拟结果与分析

2.1 能量时程曲线分析

根据实际沉桩工程,重锤低落是沉桩的主要原则,因此本文统一采取500 kg的锤体进行沉桩,调整下落高度以达到不同冲击能力的目的,10 kJ的冲击能量是500 kg的落锤在冲击高度为2 m时所产生的冲击能量,30 kJ的冲击能量是500 kg的落锤在冲击高度为6 m时所产生的冲击能量。冲击系统能量时程曲线见图10。

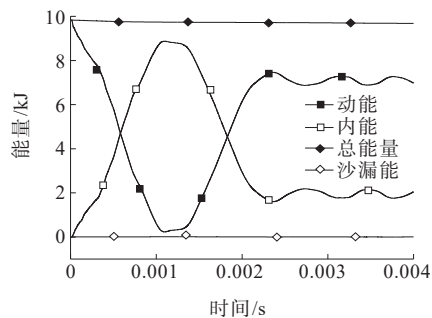


图10 冲击系统能量时程曲线

Figure 10 Time-history curve of energy of impact system

从图10中可以看出:系统的沙漏能比(最大沙漏能与最大动能的比值)远低于10%,可认为模型的计

算结果是可靠的。

图 11 为 10 kJ 和 30 kJ 冲击能量下 ECC 管桩部件的能量时程曲线。从图 11 可知:管桩总能量中内能占主导,当冲击体与管桩接触后,冲击体的动能转化为管桩的内能,内能迅速增大,直到管桩压缩变形达到最大,内能上升至峰值;随后管桩释放部分储存的变形能推动冲击体回弹,内能缓慢下降,最终趋于稳定。随着冲击能量的增加,管桩吸收的变形能显著

增大,而释放的形能有所减小。

表 5 为在两种不同冲击能量(10 kJ、30 kJ)下,ECC 管桩与 HC 管桩的内能发展情况,表 5 中管桩吸收的最大变形能 $E_{d,max}$ 和初始动能 E_k 的比值可以表征管桩对能量吸收能力;管桩残余变形能 $E_{d,res}$ 和初始动能 E_k 的比值可以表征试件的损坏程度;管桩释放的变形能 $E_{d,rel}$ 和吸收的最大变形能 $E_{d,max}$ 的比值可以表征其弹性恢复程度。

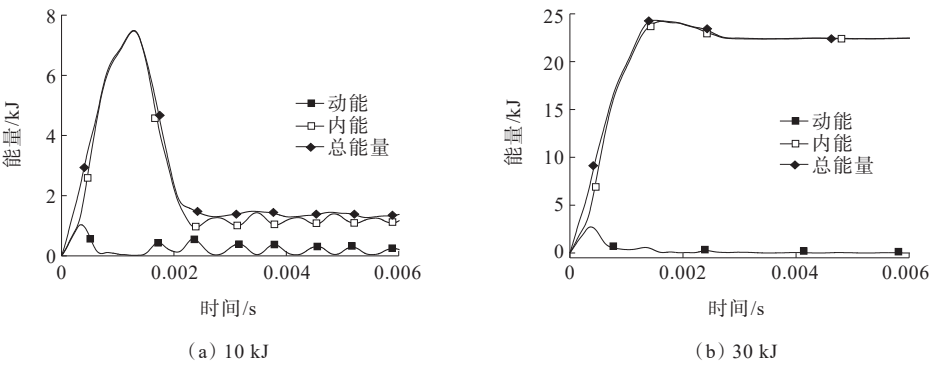


图 11 10 kJ、30 kJ 冲击能量下 ECC 管桩的能量时程曲线

Figure 11 Time-history curve of energy of ECC pipe piles under 10 kJ and 30 kJ impact energy

表 5 冲击过程中管桩能耗结果对比

Table 5 Comparison of energy consumption results of pipe piles during impact

类型	冲击能量/kJ	E_k /kJ	$E_{d,max}$ /kJ	$E_{d,rel}$ /kJ	$E_{d,res}$ /kJ	$(E_{d,max}/E_k)/\%$	$(E_{d,res}/E_k)/\%$	$(E_{d,rel}/E_{d,max})/\%$
ECC 管桩	10	9.8	7.5	6.0	1.5	77.1	15.1	80.1
	30	29.5	24.2	1.8	22.4	82.0	75.9	7.4
HC 管桩	10	9.8	8.2	0.9	7.3	83.7	74.5	11.0
	30	29.5	23.8	0.6	23.2	80.7	78.6	2.5

由表 5 可知:在 10 kJ 冲击能量下,ECC 管桩的吸能占比($E_{d,max}/E_k$)为 80% 左右,而 HC 管桩吸能占比($E_{d,max}/E_k$)仅有 11%。ECC 管桩残余变形能占比($E_{d,res}/E_k$)和释放的变形能占比($E_{d,rel}/E_{d,max}$)分别为 15.1% 和 80.1%,而 HC 管桩仅为 74.5% 和 11.0%。随着冲击能量的提高,管桩残余变形能占比($E_{d,res}/E_k$)增大,释放的变形能占比($E_{d,rel}/E_{d,max}$)减小,损坏程度增加,变形恢复能力下降。当冲击能量为 30 kJ 时 ECC 管桩残余变形能占比和释放的变形能占比分别为 75.9% 和 7.4%,而 HC 管桩仅为 78.6% 和 2.5%。释放的变形能占比和残余变形能占比表明 ECC 管桩的变形恢复能力和抗损伤能力均远高于 HC 管桩。

2.2 破坏机理分析

在数值模拟结果中,通常分析结构构件的有效

塑性应变(Effective Plastic Strain, EPS)累积过程来描述其在冲击过程中的破坏形态变化,其中 EPS 值集中的区域表示塑性应变积累的部分,预示着该部分是产生裂缝的损伤区域或可能发生混凝土压碎的破坏区域。图 12 列出了两种冲击能量(10 kJ、30 kJ)下 HC 管桩与 ECC 管桩的破坏模式对比结果。

由图 12 可知:当冲击能量较低时 ECC 管桩的损伤程度较轻,有效塑性应变主要集中在上部、顶部。随着冲击能量的增加,ECC 管桩中下部开始出现剪切变形,慢慢产生较密集的剪切裂缝。相较 HC 管桩,在相同的冲击能量下,ECC 的有效塑性应变和分布面积均比 HC 管桩小,说明 ECC 管桩抗冲击能力更强。

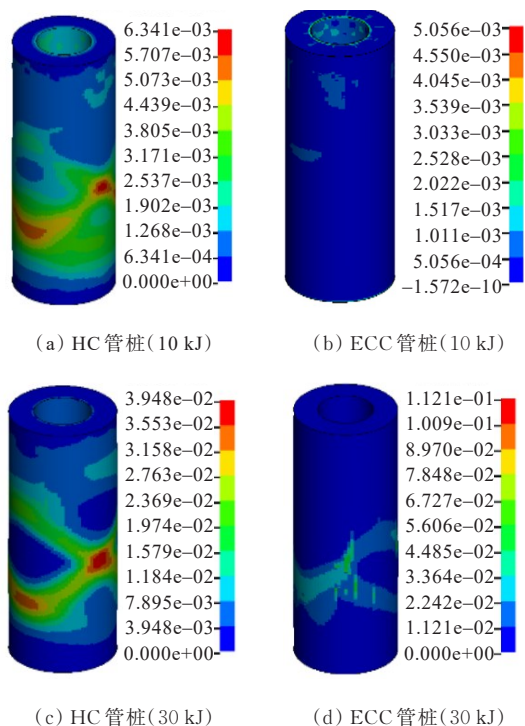


图 12 不同冲击能量下 HC 与 ECC 管桩破坏模式对比

Figure 12 Comparison of failure modes of HC and ECC pipe piles under different impact energies

2.3 冲击力和位移时程曲线分析

在 4 种不同冲击能量 (10 kJ、20 kJ、30 kJ 和 40 kJ) 下,对 HC 管桩与 ECC 管桩模拟得到的冲击力与位移关系见图 13。结果发现:在相同冲击能量下,相比 HC 管桩,ECC 管桩的冲击力-位移曲线更加饱满,说明 ECC 管桩的冲击耗能能力优于 HC 管桩。随着冲击能量的增大,ECC 管桩受到的冲击力没有明显变化,但其轴向变形明显增大,表明 ECC 管桩通过进一步的变形耗散了更多的能量,表现出强大的耗能和变形能力。

图 14 为 HC 管桩与 ECC 管桩在相同冲击高度下的桩身变形对比。

由图 14 可知:相同冲击高度下,ECC 管桩的最大轴向变形和残余变形比 HC 管桩的更小。冲击高度为 2 m 时,HC 管桩的残余变形较大,而 ECC 管桩的残余变形几乎为零,说明 ECC 管桩在较低冲击能量下具有很强的变形恢复能力。随着冲击高度的增加,管桩轴向变形的恢复能力显著下降,这是由于在较高的冲击能量下,管桩发生较大的塑性变形,损伤程度加剧,导致残余变形增大。

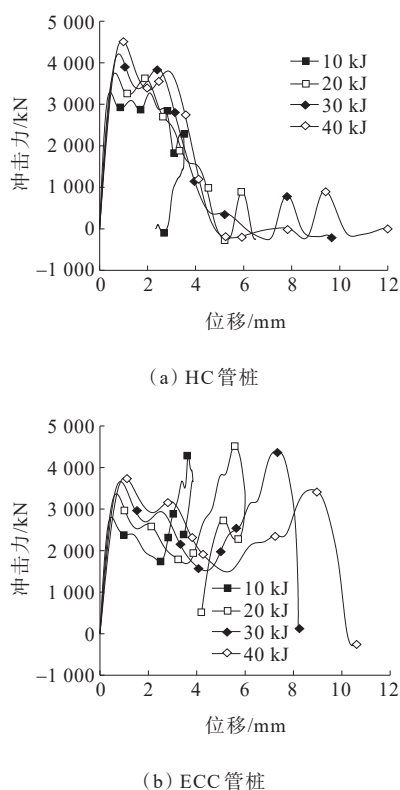


图 13 不同冲击能量下 HC 管桩 ECC 管桩的冲击力与位移关系

Figure 13 Relationship between impact force and displacement of HC and ECC pipe piles under different impact energies

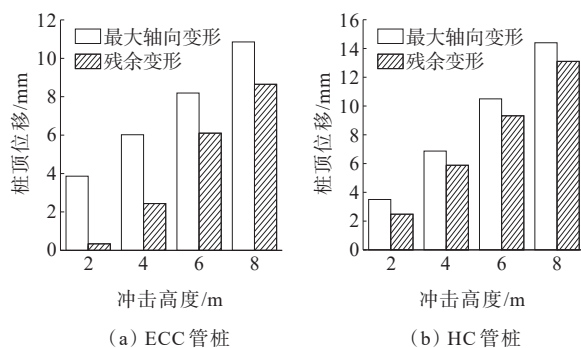


图 14 ECC 和 HC 管桩最大轴向变形和残余变形

Figure 14 Maximum axial deformation and residual deformation of ECC and HC pipe piles

3 结论

(1) 在冲击能量为 10 kJ 下,ECC 管桩的最大有效塑性应变值约为 5.3×10^{-4} ,仅为 HC 管桩最大塑性应变的 8.4%,且其抗损伤能力和弹性恢复能力分别为 HC 管桩的 4.9 倍和 7.3 倍。当冲击能量较大时,ECC 管桩的弹性恢复能力也是 HC 管桩的 2.96 倍。

(2) 通过管桩混凝土的有效塑性应变云图发现, HC管桩在10 kJ的冲击能量下出现混凝土损坏, 而ECC管桩能抵抗30 kJ的冲击能量。在竖向冲击作用下, HC管桩塑性应变累积区域涉及桩身上部、中部和下部, 而ECC管桩塑性损伤主要集中在中、下部区域, 且塑性损伤累积程度较低。HC管桩和ECC管桩的破坏模式均以剪切破坏为主。

(3) 相同冲击能量下, ECC管桩的最大轴向变形和残余变形均低于HC管桩。相比HC管桩, ECC管桩的冲击力-位移曲线更加饱满, 耗能更多。

参考文献:

References:

- [1] 李军, 李国维, 熊力, 等. 预应力管桩地基高路堤中土拱演化特征现场试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 186-194.
LI Jun, LI Guowei, XIONG Li, et al. Field study on soil arching evolution of high embankments on soft ground reinforced with PHC piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 186-194.
- [2] 雷金波, 杨康, 周星, 等. 带帽有孔管桩复合地基桩土应力比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3607-3617.
LEI Jinbo, YANG Kang, ZHOU Xing, et al. Experimental study on pile-soil stress ratio of composite foundation with capped perforated pipe pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(sup 1): 3607-3617.
- [3] AL-MASOODI A H H, KAWAN A, KASMURI M, et al. Static and dynamic properties of concrete with different types and shapes of fibrous reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2016, 104: 247-262.
- [4] YOO D Y, BANTHIA N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete: A review[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103389.
- [5] 朱涵, 刘昂, 于泳. 低温下玄武岩纤维混凝土的抗冲击性能[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(4): 600-604.
ZHU Han, LIU Ang, YU Yong. Low temperature impact performance of basalt fiber reinforced concrete[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2018, 36(4): 600-604.
- [6] 李为民, 许金余, 沈刘军, 等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能[J]. 复合材料学报, 2008, 25(2): 135-142.
LI Weimin, XU Jinyu, SHEN Liujun, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2008, 25(2): 135-142.
- [7] WANG S S, ZHANG M H, QUEK S T. Mechanical behavior of fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain-rate compressive loading[J]. Construction and Building Materials, 2012, 31: 1-11.
- [8] MO K H, YAP S P, ALENGARAM U J, et al. Impact resistance of hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 499-507.
- [9] 李艳, 张文彬, 刘泽军. PVA-ECC动态压缩性能研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 513-520.
LI Yan, ZHANG Wenbin, LIU Zejun. Study on dynamic compressive properties of PVA-ECC[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 513-520.
- [10] KAI M F, XIAO Y, SHUAI X L, et al. Compressive behavior of engineered cementitious composites under high strain-rate loading[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(4): 04016254.
- [11] 孟祥竹, 孙宗光. 基于PHC管桩的混凝土抗冲击试验研究[J]. 中外公路, 2016, 36(3): 127-129.
MENG Xiangzhu, SUN Zongguang. Experimental study on impact resistance of concrete based on PHC pipe pile[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(3): 127-129.
- [12] 刘东明, 蔡国军, 荣琦, 等. 基于CPTU测试的桩基承载抗拔特性评价及数值模拟研究[J]. 中外公路, 2020, 40(增刊2): 165-169.
LIU Dongming, CAI Guojun, RONG Qi, et al. Evaluation and numerical simulation of uplift characteristics of pile foundation based on CPTU test[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(sup 2): 165-169.
- [13] 任根茂, 吴昊, 方秦, 等. 普通混凝土HJC本构模型参数确定[J]. 振动与冲击, 2016, 35(18): 9-16.
REN Genmao, WU Hao, FANG Qin, et al. Determinations of HJC constitutive model parameters for normal strength concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(18): 9-16.
- [14] 熊益波, 陈剑杰, 胡永乐, 等. 混凝土Johnson-Holmquist本构模型关键参数研究[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 121-127.
XIONG Yibo, CHEN Jianjie, HU Yongle, et al. Study on the key parameters of the Johnson-Holmquist constitutive model for concrete[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 121-127.
- [15] LIU F, FENG W H, XIONG Z, et al. Impact performance of new prestressed high-performance concrete pipe piles manufactured with an environmentally friendly technique[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 683-697.