

DOI: 10.11883/bzycj-2017-0429

爆炸冲击作用下预制节段拼装桥墩的 动态响应与损伤分析*

杨 旭, 张于晔, 张 宁

(南京理工大学土木工程系, 江苏 南京 210094)

摘要: 为研究爆炸冲击作用下预制节段拼装桥墩的动态响应与损伤, 采用 ANSYS/LS-DYNA 建立圆形截面预制节段拼装桥墩受爆的三维实体分离式模型。通过与已有实验结果的对比分析, 验证了该模拟方法的可靠性。基于该模型, 研究了爆炸冲击作用下节段长细比、初始预应力水平及桥墩体系对圆形截面预制拼装桥墩动态响应与损伤的影响规律。结果表明: 减小节段长细比使墩身由剪切破坏逐渐变为节段间相对位移, 并减小墩身的整体侧向位移; 提高初始预应力水平可以在一定程度上提高桥墩的抗爆性能; 爆炸冲击作用下混合体系桥墩兼具完全节段和整体现浇桥墩的破坏特征。

关键词: 节段拼装桥墩; 爆炸响应; 抗爆性能; 损伤分析

中图分类号: O383 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

为提高桥梁的抗爆能力, 重要桥梁工程结构和构件的抗爆性能亟待提高。关于桥梁的抗爆性能已有较多研究^[1-2]。张宇等^[3]在总结桥梁结构抗爆的基础上, 认为起主要支撑作用的桥墩对爆炸冲击的敏感性较大。Suthar^[4]通过对比地震作用与爆炸冲击作用下桥墩的破坏模式, 发现桥墩在爆炸冲击作用下会发生局部破坏, 但不会产生较大水平位移。Williams 等^[5]基于整体现浇桥墩的受爆实验, 认为在桥墩抗爆性能中抗剪设计比抗弯设计更重要。在一些大型桥梁中, 预制拼装桥墩已被一定程度地应用^[6-7]。王震等^[8]、Bu 等^[9]、Zhang 等^[10]对其地震作用和冲击荷载展开了理论分析、实验研究及数值模拟工作。但爆炸冲击不同于低速冲击和地震作用, 其瞬时冲击会对桥墩造成巨大的剪切效应, 且预制拼装桥墩由于墩身不连续而抗剪能力较弱, 故有必要深入研究预制节段桥墩在爆炸作用下的响应及其抗爆性能。

本文中基于 ANSYS/LS-DYNA 建立圆形截面预制节段拼装桥墩的三维实体分离式模型, 结合实验数据验证该三维分离式模型的准确性; 在此基础上, 讨论节段长细比、初始预应力水平和桥墩体系类型 3 种关键设计因素对圆形截面预制节段拼装桥墩的爆炸响应及损伤影响; 通过对爆炸冲击作用下各预制拼装桥墩动态响应与损伤结果的对比分析, 研究此类桥墩的抗爆性能及其关键影响因素, 以期为今后预制装配式桥墩的抗爆设计与研究提供参考。

1 有限元模型

1.1 模型介绍

基于 Rutner 等^[11]对桥墩的调查, 选取的桥墩结构原型如图 1 所示。有限元模型取桥墩的主要部分, 如图 2(a) 所示。目前对节段拼装桥墩的抗爆试验还没有统一的尺寸标准, 但根据美国太平洋地震工程研究中心(PEER)^[12]的桥墩尺寸统计, 抗震试验桥墩直径多为 40~50 cm。本文中取墩高为 3 m, 圆形截面直径为 0.5 m。按规范 JTG D62—2004^[13]对墩身进行配筋。纵筋采用 10 根 $\phi 16$ mm 钢筋, 截面配筋率

* 收稿日期: 2017-11-24; 修回日期: 2018-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(51508276); 国家山区公路工程技术研究中心开放基金(GSGZJ-2017-02); 江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX17-0371)

第一作者: 杨 旭(1995—), 男, 硕士研究生, yangxu@njust.edu.cn;

通信作者: 张于晔(1986—), 男, 博士, 副教授, zyy@njust.edu.cn。

1.02%，箍筋采用 $\varnothing 8$ mm 钢筋，箍筋间距 10 cm，混凝土保护层厚度取 4 cm。采用共节点法来假设钢筋和混凝土之间位移完全协调^[14]，如图 2(b) 所示。

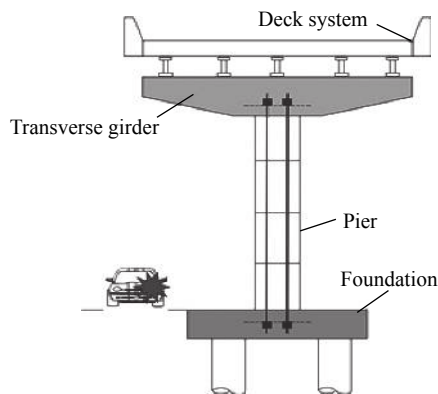


图 1 结构原型图

Fig. 1 Structure prototype

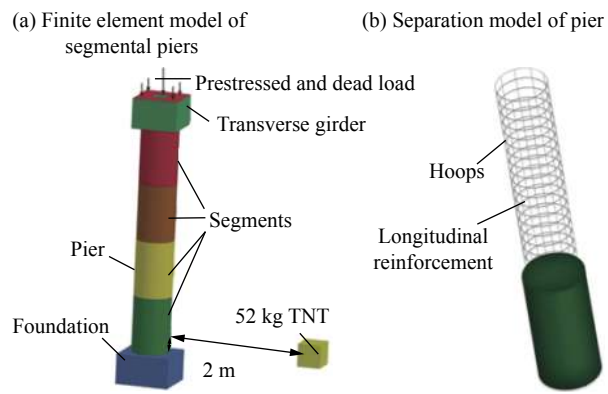


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

不同炸药当量可换算为 TNT 炸药当量^[15]，鉴于恐怖炸弹规模的推算^[16]及本文研究重点，炸药当量拟取 52 kg TNT，爆炸中心离墩身表面 2 m。炸药高度按文献 [1] 对不同车型的汽车炸弹 TNT 当量及爆炸高度大致范围的统计结果，取爆炸中心离地面 0.2 m。

混凝土、空气及炸药采用 Solid164 单元，钢筋采用 Beam161 单元。通过网格收敛性分析，对于桥墩节段，混凝土网格边长约为 2.5 cm，钢筋网格边长 3 cm，空气网格 2.5 cm。采用 ALE (arbitrary Lagrange-Euler) 算法实现流固耦合动态分析，空气四周设置为无边界反射条件。

模拟中，桥梁结构上部恒载考虑为墩身设计轴压的 20%，在模拟过程中保持不变。在预制节段拼装桥墩中，对墩身施加预应力，一般设置初始预应力值使得初始轴压比为 10% (即初始预应力水平为 10%)。

为模拟节段拼装桥墩的边界条件，模型中采用简化的盖梁与基础，根据文献 [17] 对船撞击桥墩的模拟结果，在模拟中对基础施加固定边界。为防止节段间混凝土的相互渗透，节段间采用面面自动接触算法控制。根据文献 [18] 的建议，节段间静摩擦因数取 1.0，动摩擦因数取 0.8，指数衰减因数取 0.5。

1.2 材料参数及破坏控制

正确选取材料的本构模型是模拟的关键。LS-DYNA 对空气及 TNT 炸药提供了不同的材料，并与状态方程联用描述其压力-体积关系。空气和 TNT 炸药的材料模型、状态方程及主要参数见表 1。

对于钢筋，考虑其应变率效应，采用 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 进行定义，应变率用 Cowper-Symonds 模型来考虑。材料参数见表 2。

*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (HJC) 材料模型被广泛用于大应变、高应变速率和高压下混凝土的模拟。预制节段拼装桥墩属于装配式混凝土结构，根据装配式混凝土结构技术规程^[19]，桥墩材料取 C50 混凝土，参数见表 3。

为了准确控制混凝土的破坏对模拟结果的影响，在模型试算时，提取了迎爆面中心的混凝土应变

表 1 空气及 TNT 炸药材料模型及主要参数

Table 1 Material model and main parameters of air and TNT explosive

材料	材料定义	状态方程	主要参数			
空气	*MAT_NULL	*EOS_LINEAR_	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C_0\sim C_3, C_6$	C_4, C_5	$E_0/(\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$
		POLYNOMIAL	1.3	0	0.4	2.5
TNT炸药	*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_	*EOS_JWL	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	p_{CJ}/GPa	A/GPa
			BURN	1.654	6.93	21

注： ρ_0 为材料密度； E_0 为空气的单位体积初始内能； D 为炸药爆速； p_{CJ} 为炸药爆压； $C_0\sim C_6$ 为状态方程系数； A 、 B 为实验确定常数。

表 2 钢筋材料主要参数

Table 2 Main material parameters of steel

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	ν	σ_y/MPa	η_N/GPa	C	P
7 850	200	0.2	550	2.1	40	5

注: E 为弹性模量, ν 为泊松比, σ_y 为屈服强度, η_N 为切线模量, C 和 P 为 Cowper-Symonds 应变率参数。

表 3 C50 混凝土主要参数

Table 3 Main parameters of C50 concrete

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	F_C/MPa	T/MPa	p_C/GPa	ϵ_C
2.314	33.85	50	5	0.16	0.001

注: G 为剪切模量, F_C 为准静态单轴抗压强度, T 为抗拉强度, p_C 为破碎压力, ϵ_C 为破碎体积应变。

率, 约为 200 s^{-1} 。根据 2 组经验公式^[20-22] 计算混凝土材料的动力增强系数。经计算对比, 取抗压动力增强系数为 2.2, 抗拉动力增强系数为 4, 即考虑动力增强系数后混凝土极限抗压强度为 110 MPa, 混凝土极限抗拉强度为 16 MPa。此计算值作为 *MAT_ADD_EROSION 控制混凝土的抗压与抗拉破坏的准则。另外, 静力荷载下的典型混凝土极限拉应变为 2×10^{-4} (约为极限压应变的 1/10), 考虑到软化段、应变率的影响, 同时防止计算中过多的单元删除, 在破坏准则中设置最大主应变为 0.02。

1.3 模拟工况

节段长细比(λ)、初始预应力水平和桥墩体系是影响预制节段拼装桥墩爆炸动态响应与损伤的重要因素, 因此通过建立不同的有限元模型研究上述因素对其动态响应与损伤的影响。计算工况见表 4。

通过对比工况 1~4 研究节段长细比中节段高度的变化对结果的影响, 通过对比工况 3、5、6 研究节段长细比中节段直径的变化对结果的影响; 通过对比 3、4、7~10 研究不同初始预应力水平下的动态响应; 通过对比工况 3、11、12 研究不同桥墩体系受爆下的损伤。

表 4 计算工况

Table 4 Calculation cases

工况	墩身直径/m	节段长度/m	λ	初始预应力水平	桥墩体系
1	0.5	3	6	10%	S
2	0.5	1	2	10%	S
3	0.5	0.75	1.5	10%	S
4	0.5	0.5	1	10%	S
5	0.4	0.75	1.875	10%	S
6	0.6	0.75	1.25	10%	S
7	0.5	0.75	1.5	5%	S
8	0.5	0.75	1.5	15%	S
9	0.5	0.5	1	5%	S
10	0.5	0.5	1	15%	S
11	0.5	0.75			M
12	0.5	0.75		10%	H

注: S表示预制节段拼装桥墩, M表示整体现浇桥墩, H表示混合体系桥墩。

2 模型验证

为了检验本文中模拟方法的准确性, 采用相同模拟方法, 选取文献 [23] 中 U2B 的实验结果进行比较, 实验布置见图 3。在验证模型中, 混凝土柱尺寸和实验相同, 见图 4。混凝土柱采用纤维含量为 2.5% 的超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)。纵筋直径 16 mm, 箍筋直径 8 mm。具体材料参数见文献 [23]。炸药质量按实验配置采用 17.5 kg, 爆炸中心距混凝土柱表面 1.5 m。在模拟中, 混凝土柱一端采

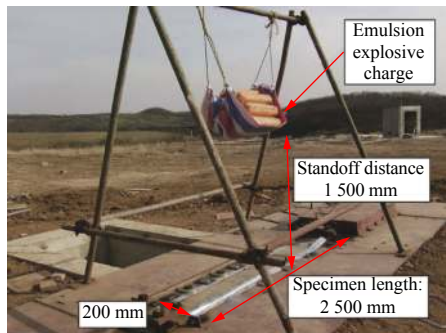


图 3 实验布置

Fig. 3 Experimental set up

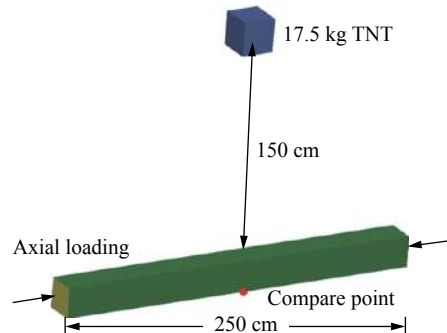


图 4 验证有限元模型

Fig. 4 Finite element model of verification model

用固定约束,另一端不约束柱轴向。轴压为 1 000 kN。

在没有初始预应力的条件下,得到了跨中位移时间曲线,如图 5 所示,柱中最大位移量为 30.3 mm,与实验测试结果 29.3 mm 相差 3.4%。破坏状态如图 6 所示。破坏状态在迎爆面略偏大,在背爆面出现轻微裂缝,破坏状态与实验结果基本一致。这说明本数值模拟是可靠的。

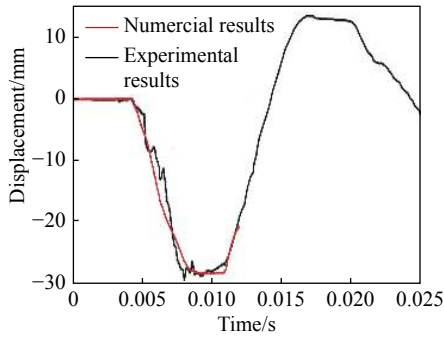


图 5 柱中位置位移时程

Fig. 5 History of displacement in the middle of the column

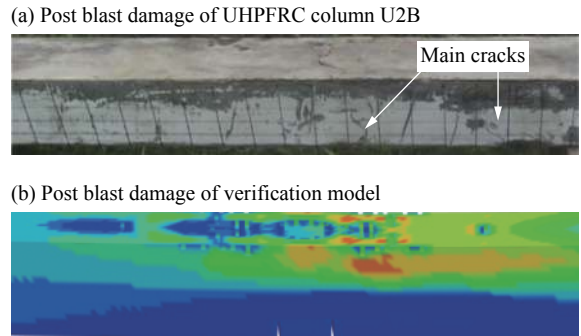


图 6 试件 U2B 的破坏状态

Fig. 6 Damage of specimen U2B

3 结果分析及讨论

3.1 节段长细比的影响

对于不同高度的节段拼装桥墩,节段长细比 λ (节段高度与其直径的比值)是影响节段拼装桥墩抗震破坏的重要因素。故本文中考虑爆炸冲击作用下节段长细比对节段拼装桥墩动态响应及损伤的影响。

对比工况 1~4 的模拟结果,各墩身底面位移时程曲线如图 7 所示。可以看出,在桥墩直径相同的情况下,随着节段长细比的减小,桥墩底面的位移逐渐减小。爆炸冲击结束时,桥墩整体位移曲线如图 8 所示。当 $1 \leq \lambda \leq 2$ 时,随着节段高度减小,对应的节段间最大相对位移减小,分别为 2.07、1.52、0.58 mm。桥墩整体及局部破坏如图 9 所示,当节段长细比 $\lambda=6$ 时,墩身中出现剪切裂缝,表现为剪切破坏;当 $\lambda \leq 2$ 时,墩身主要表现为节段间的相对位移及迎爆面的局部破坏。当 $\lambda=2$ 变为 $\lambda=1$ 时,局部破坏的面积减少;当 $\lambda=1$ 时,底部节段上方接缝混凝土发生破坏,主要是底部节段的微小转角导致接缝混凝土的受压破坏和空气超压导致混凝土受压破坏。墩身由相对位移产生的耗能及底部节段相对位移产生耗能的占比如图 10 所示,长细比越小,节段越多,由相对位移产生的耗能越多。值得注意的是,当 λ 由 1 增加到 1.5 的过程中,相对位移产生的耗能并没有显著提升。

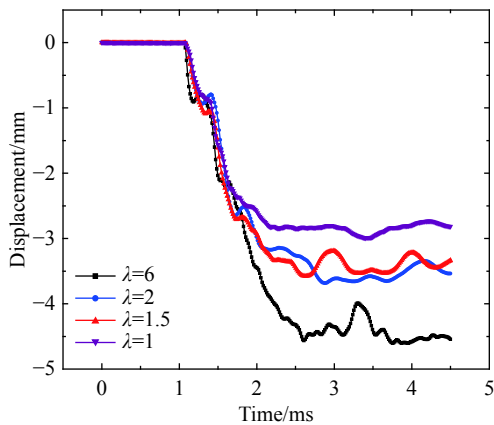


图 7 墩底位移时程曲线

Fig. 7 Time history of displacement in pier bottom

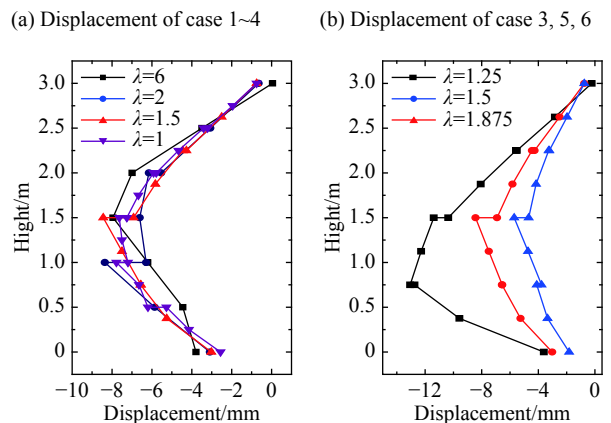


图 8 不同长细比桥墩的最终位移

Fig. 8 Final displacement of piers with different slender ratio

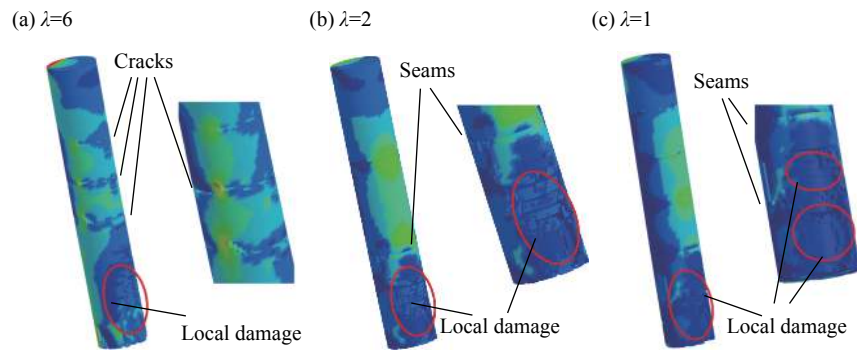


图 9 不同长细比桥墩的最终破坏及局部放大图

Fig. 9 Final damage of piers with different slender ratios and their partial

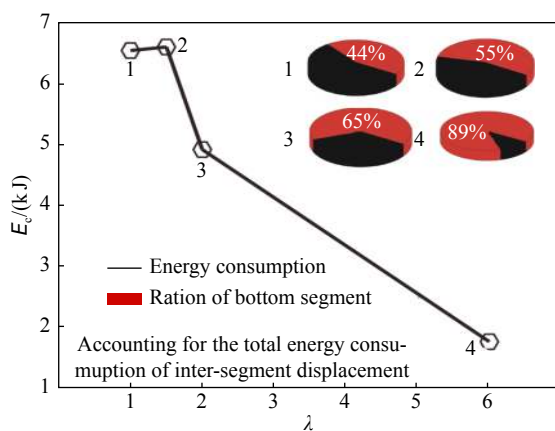


图 10 相对位移的耗能(E_c)曲线

Fig. 10 Energy consumption (E_c) curve of inter-segment displacement

3.2 初始预应力水平的影响

在预应力无粘结节段拼装桥墩中, 初始预应力一般取初始轴压比的 10%。本文中进一步考虑了不同初始预应力水平对爆炸冲击的影响。在模拟中, 对 $\lambda=1.5$ (4 节段) 和 $\lambda=1$ (6 节段) 两种桥墩分别施加 5%、10%、15% 的初始预应力。

距离 52 kg TNT 炸药中心 2 m, 距离桥墩底部 0.2 m(迎爆面中心)的位移-时间曲线见图 11。可以看出, 随着初始预应力的增加, 桥墩的侧移明显减小。对比工况 3、7、8 可知, 4 节段桥墩在 5%、10%、15% 初始预应力下的位移分别为 5.5、4.4、3.4 mm, 10%、15% 初始预应力下的桥墩位移相比 5% 初始预应力水平侧移减小了 20%、22.7%; 对比工况 4、9、10 可知, 6 节段桥墩在 5%、10%、15% 初始预应力下的位移分别为 5.2、4.0、3.3 mm, 10%、15% 初始预应力下的桥墩位移相比 5% 初始预应力水平侧移减小了 24%、17.5%。模拟结束时, 4 节段和 6 节段桥墩的整体变形曲线如图 12 所示, 可以看出: 桥墩整体变形随初始预应力水平的增加而减小, 并且节段间的相对位移主要集中在桥墩的下半段。这是因为, 节段拼装桥墩产生侧移需要节段间的相对

对比工况 3、5、6, 节段长度不变, 节段直径分别为 40、50、60 cm, 桥墩的整体位移曲线见图 8(b)。墩身破坏主要是节段间的相对位移及变形。当 $\lambda=1.875$ 时, 墩身最大侧移为 13.1 mm。当 $\lambda=1.25$ 时, 墩身最大侧移为 5.7 mm。说明当节段高度不变时, 增加墩身直径、减小节段长细比可以提升预制节段拼装桥墩的抗爆性能。

综合分析工况 1~6: 一方面, 节段直径不变时, 节段长细比减小使墩身由剪切破坏变为节段间相对位移; 另一方面, 节段高度不变时, 节段长细比减小能有效减小墩身的整体位移。说明减小节段长细比可以提升预制节段拼装桥墩的抗爆性能。

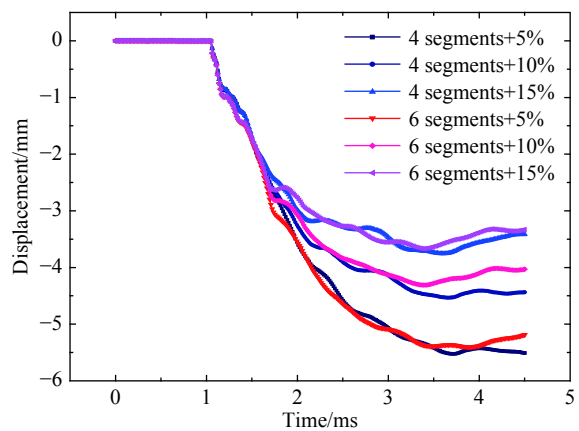


图 11 迎爆面中心位移-时间曲线

Fig. 11 Time history of displacement in the center of blast surface

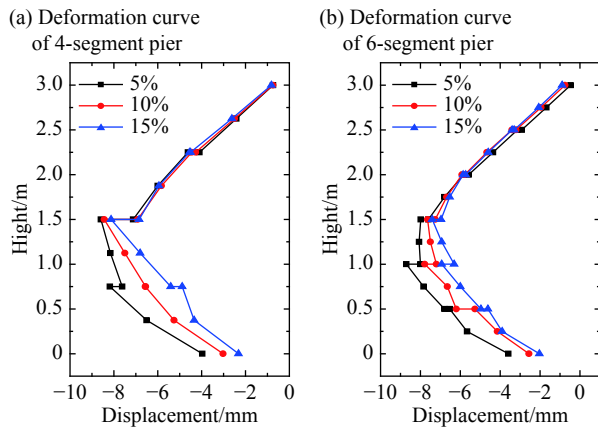


图 12 不同预应力水平时桥墩整体位移曲线
Fig. 12 Lateral displacement of piers with different initial post-tensioning level

系对爆炸荷载的响应。另外,因为整体现浇桥墩一般不设置初始预应力,所以只对预制拼装桥墩和混合体系桥墩施加初始预应力,但保证构件恒载相同。

桥身距离底部 75 cm 处(接缝位置)的位移-时间曲线如图 14 所示。预制拼装桥墩由于底部节段的整体位移,使底部节段产生较大的滑移(6.4 mm);而整体现浇桥墩由于墩身的整体弯曲,使该处位移较大(5.8 mm);混合体系桥墩由于底部节段固结的特点,在该处位移最小(3.2 mm),相比预制拼装桥墩和整体现浇桥墩,位移分别减小了 50%、44.8%。

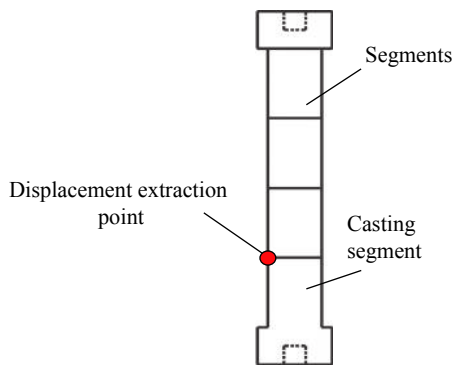


图 13 混合体系桥墩示意图
Fig. 13 Sketch of hybrid system pier

模拟结束时,桥墩整体位移如图 15 所示,混合体系桥墩与节段拼装桥墩在上部的位移基本相同,节段部分并没有出现破坏,但是出现了节段间的相对位移。图 16 给出了不同体系桥墩的破坏情况,可以看出,混合桥墩体系的底部节段与基础连接处出现裂缝,与整体现浇桥墩的破坏相同,如图 16 所示,破坏主要是因为节段接缝处的摩擦和空气超压引起的剪力和弯矩。从总体上说,在爆炸冲击作用下,混合体系桥墩具有预制节段拼装桥墩及整体现浇桥墩的综合特点。

滑动,初始预应力的增加能增加节段间的摩擦力,提升耗能能力;而爆炸产生的冲击破坏是局部的,随着距离的增加,爆炸产生的能量迅速衰减,对远离爆炸中心的地方产生的影响较小。

3.3 桥墩体系的影响

混合体系是将桥墩的底部节段与基础现浇,再与上部节段拼装的一类桥墩,如图 13 所示。对混合体系桥墩的抗震性能,已有一些研究^[24]。但预制拼装桥墩、整体现浇桥墩及混合体系桥墩在相同爆炸冲击下的动态响应与损伤特性的研究比较有限。

本文中在截面形状、纵筋配筋率、混凝土强度以及爆炸冲击相同的条件下,分析不同桥墩体系

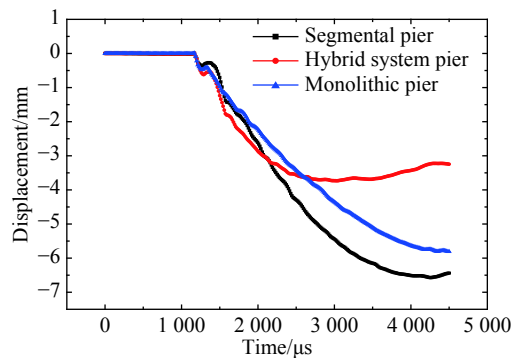


图 14 距墩底 75 cm 处节段位移时程
Fig. 14 Displacement at 75 cm from the pier bottom

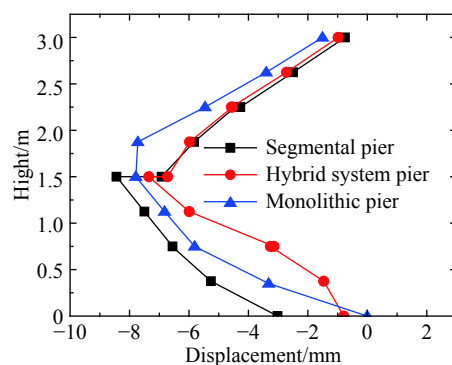


图 15 不同体系桥墩整体位移
Fig. 15 Pier displacement of different system

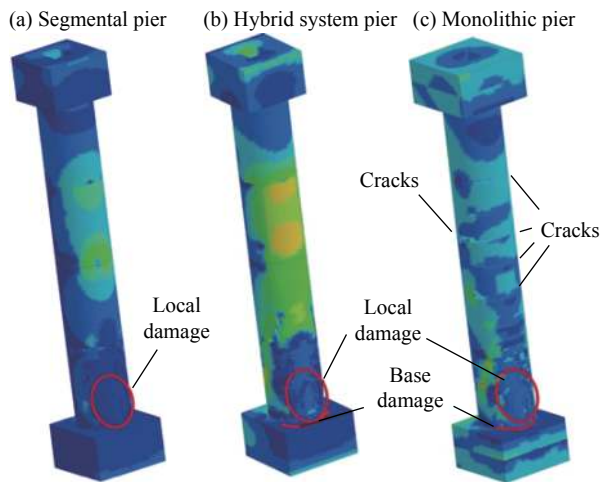


图 16 不同体系桥墩整体破坏

Fig. 16 Overall damage of piers with different system

4 结 论

采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 建立圆形截面预制节段拼装桥墩受爆的三维实体分离式模型。在验证模拟方法可靠的基础上, 研究了圆形截面预制节段拼装桥墩在爆炸冲击作用下的动态响应和损伤。研究表明: (1) 炸药为 52 kg TNT, 爆炸距离为 2 m, 爆炸高度为 0.2 m, 在节段直径不变的情况下, 节段长细比 $\lambda=6$ 时, 预制墩身主要表现为剪切破坏; $\lambda \leq 2$ 时, 底部节段响应表现为局部破坏, 墩身响应主要表现为节段间相对位移; 在节段高度不变的情况下, 节段直径越大, 节段最大水平位移越小, 墩身整体侧移减小; 综合比较表明节段长细比减小有利于提

升节段拼装桥墩的抗爆性能; (2) 增加初始预应力水平可以减小墩身的侧向位移, 从而在一定程度上提高桥墩的抗爆性能; (3) 混合体系桥墩在现浇部分表现出弯剪破坏, 在节段部分表现出节段间相对位移, 总体兼具完全节段桥墩与整体现浇桥墩的破坏特点。

参考文献:

- [1] 朱劲松, 邢扬. 爆炸荷载作用下城市桥梁动态响应及损伤过程分析 [J]. 天津大学学报 (自然科学版), 2015, 48(6): 510-519.
ZHU Jinsong, XING Yang. Dynamic response and damage process analysis of urban bridge subjected to blast load [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2015, 48(6): 510-519.
- [2] TANG E K C, HAO H. Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, part I: model development and response calculations [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(10): 3180-3192.
- [3] 张宇, 李国强, 陈可鹏, 等. 桥梁结构抗爆安全评估研究进展 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(1): 135-144.
ZHANG Yu, LI Guoqiang, CHEN Kepeng, et al. Research advances of safety assessment of bridges under blast load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(1): 135-144.
- [4] SUTHAR K N. The effects of dead load, live and blast loads on a suspension bridge [D]. Maryland: University of Maryland, 2007.
- [5] WILLIAMS G, HOLLAND C, WILLIAMSON E, et al. Blast-resistant highway bridges: design and detailing guidelines [J]. *Structures under Shock and Impact*, 2008, 98: 75-83.
- [6] 吴伟胜, 王仁贵, 王梓夫. 杭州湾跨海大桥高墩区引桥总体及上部结构设计 [C]// 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2005 年全国桥梁学术会议论文集. 杭州, 2005: 86-92.
- [7] 过震文, 黄少文, 邵长宇. 预制拼装技术在上海长江大桥中的应用 [J]. 世界桥梁, 2009(S1): 22-26.
GUO Zhenwen, HUANG Shaowen, SHAO Changyu. Application of precasting and assembling techniques to construction of Shanghai Changjiang River Bridge [J]. *World bridge*, 2009(S1): 22-26.
- [8] 王震, 王景全. 预应力节段预制拼装桥墩抗震性能研究综述 [J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(6): 88-97.
WANG Zhen, WANG Jingquan. Review of seismic performance of prestressed segmental precast and assembled piers [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2016, 33(6): 88-97.
- [9] BU Z Y, OU Y C, SONG J W, et al. Cyclic loading test of unbonded and bonded posttensioned precast segmental bridge columns with circular section [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(2): 1-18.
- [10] ZHANG X H, 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.
- [11] RUTNER M, ASTANEH-ASL A, SON J. Protection of bridge piers against blast [C]// Proceedings of the 6th Japanese-German Bridge Symposium. Munich, Germany, 2005.

- [12] MICHAEL B, MYLES P, MARC E. PEER Structural performance database user's manual [M]. Berkeley: University of California, 2006.
- [13] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [14] 杨军, 杨国梁, 张光雄. 建筑结构爆破拆除数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [15] HAO H, HAO Y F, LI J. Review of the current practices in blast resistant analysis and design of concrete structures [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(8): 1193–1223.
- [16] WINGET DG, MARCHAND KA, WILLIAMSON EB. Analysis and design of critical bridges subjected to blast loads [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(8): 1243–1255.
- [17] SHA Y Y, HAO H. Laboratory tests and numerical simulations of barge impact on circular reinforced concrete piers [J]. *Engineering Structures*, 2013, 46(1): 593–605.
- [18] HAO H, LI J, WU C. Numerical study of precast segmental column under blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2017, 134: 125–137.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [20] Comite Euro-International du Beton. Concrete structures under impact and impulsive loading: CEB Bulletin 187 [S]. Switzerland: Federal Institute of Technology Lausanne, 1990.
- [21] MALVAR L J, ROSS C A. A review of strain rate effects for concrete in tension [J]. *ACI Materials Journal*, 1998, 95(6): 735–739.
- [22] HAO Y, HAO H. Influence of the concrete DIF model on the numerical predictions of RC wall responses to blast loadings [J]. *Engineering Structures*, 2014, 73: 24–38.
- [23] XU J C, WU C Q, XIANG H B, et al. Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns subjected to blast loading [J]. *Engineering Structures*, 2016, 118: 97–107.
- [24] ZHANG Y Y, TENG G. Numerical analysis on seismic performance of hybrid precast segmental bridge columns [C]// LENNART E, JOHAN J. Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment. Stockholm: IABSE Congress, 2016: 1100–1107.

Dynamic response and damage analysis of precast segmental piers under blast impact

YANG Xu, ZHANG Yuye, ZHANG Ning

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

Abstract: In order to study the dynamic response and damage of the precast segmental pier under the impact of explosion, the three-dimensional separate models of the circular-section precast segmental bridge piers under explosion are established based on ANSYS/LS-DYNA. The reliability of the simulation method is verified by comparing with the previous experimental results. The influence of slender ratio of segments, initial post-tensioning level and pier system type on the dynamic response and damage of the circular-section precast segmental pier under blast are investigated based on the verified model. The results show that the decrease of segment slender ratio makes the precast piers gradually change from shear damage to inter-segment displacement and it can reduce the lateral displacement of the pier; the increase of the initial post-tensioning can improve the anti-blast performance of the piers to some extent; the piers with the hybrid system under blast have both the failure characteristics of the segmental and monolithic piers.

Keywords: precast segmental piers; blast response; anti-blast performance; damage analysis

(责任编辑 王小飞)