

外壳预制核心现浇装配式 T 型节点抗爆性研究

温全^{1,2},周文君³,李忠富¹,丁兆洋⁴

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学研究生院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 吉林建筑大学城建学院, 吉林 长春 130000; 4. 沈阳建筑大学公共分析与检测技术研究
中心, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究外壳预制核心现浇装配式结构体系在爆炸环境下的变形及力学性能, 分析其在爆炸情况下的可靠性. 方法 建立了相同配筋率的整体现浇和外壳预制核心现浇 T 型节点有限元模型, 进行相同爆炸荷载下的节点结构数值模拟及损害特征程度分析. 结果 两种不同施工工艺的 T 型节点钢筋应力和位移变化基本一致; 新型 T 节点预制外壳提升了对核心混凝土的保护作用, 与现浇 T 节点相比其损坏情况较弱; 爆炸冲击波对新型 T 节点虽也造成了局部破坏, 但未出现大面积混凝土碎裂. 结论 外壳预制核心现浇装配式结构具有良好的整体性和抗爆性.

关键词 装配式; 混凝土; 外壳预制; T 型节点; 爆炸

中图分类号 TU317 文献标志码 A

Research on Anti-explosion Performance of T-type Joint with Precast External Shell and Cast-in-place Concrete Core

WEN Quan^{1,2}, ZHOU Wenjun³, LI Zhongfu¹, DING Zhaoyang⁴

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024; 2. Graduate School, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Jilin University of Architecture and Technology, Changchun, China, 130000; 4. Analysis and Testing Center, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The construction technology of precast external shell and cast-in-place core prefabricated concrete has the advantages of convenient construction and template saving. A finite element model was developed to simulate the T type joints made by the integral prefabricated shell core cast-in-place under the same reinforcement ratio. The developed model was validated by the experimental data, and it was used to conduct the numerical simulation of the joint structure and analysis of the damage features under the same blast loading. The simulation results reveal that the stress and displacement variation of the bar in the T type joints were almost the same despite the employment of the different construction techniques. Moreover, the new T type joint made by the precast external

收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478276); 辽宁省自然科学基金项目(201602604); 沈阳市科技计划项目(17-217-8-00)

作者简介: 温全(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事绿色建造与工程项目管理方面研究.

shell method enhanced the protection of the core concrete. Compared with the integral cast-in-place, the new type joint also featured low damage of the core concrete. Although the blast wave incurred a tiny local damage, concrete fragmentation in large area were not observed. Structural system of precast external shell and cast-in-place core concrete has good antiknock ability.

Key words: prefabricated; concrete; precast external shell; T type joint; explosion

装配式结构具有工业化生产、绿色环保等优点,引领着现代建筑业发展的潮流。装配式结构的发展经历了长期的探索,最早于1960年法国建筑科技中心(CSTB)认证的Camus工业构法,代表着大型板PCa构法的诞生;1969年日本借助欧洲PCa构法,研发W—PC(板式混凝土)构法;美国于20世纪50年代开始大力推广预制混凝土结构。国内20世纪60年代引入装配式大板结构,即整体式预应力装配式板柱体系^[1]。

2016年,国务院印发了《关于大力发展装配式建筑的指导意见》,鼓励全国推进发展装配式结构,2017年,全国已建成装配式建筑项目1.27亿m²。在政策的大力支持下,国内装配式结构研究技术得到了迅猛发展,赵唯坚^[1]开展了装配式混凝土框架剪力墙结构低周往复试验,采用有限元软件对装配式和现浇结构进行低周往复加载计算,提出了薄弱部位加强构造措施的设计方法。周天华^[2]研究了钢框架—预制混凝土抗侧力墙板装配式结构体系的抗震性能,对2榀钢框架—预制混凝土抗侧力墙板结构足尺试件进行拟静力试验,得到增大墙体型钢含钢率有助于提高结构耗能性能的结论。邓开来^[3]提出了基于抽柱法的无粘结预应力装配式框架结构连续倒塌分析,采用抽柱法对6层无粘结预应力装配式框架结构和现浇框架结构进行连续倒塌分析,无粘结预应力装配式框架结构展现了优良的防连续倒塌性能^[4]。

外壳预制核心现浇装配式结构具有方便施工、节约模板等优点,是装配式混凝土构件的一种新型连接方法。外壳预制体现在保护层连同钢筋预制(预制外壳),核心现浇体现

在外壳装配并配置主筋后浇筑核心混凝土部分,最后现浇形成整体装配结构。该结构能较好地应用于装配式框架结构、框剪结构等体系中。爆炸也是建筑在使用阶段可能承受的荷载形式,已有研究中还没有关于对外壳预制核心现浇装配式 T 型节点抗爆性能的研究。基于此,笔者建立了装配式和现浇 T 型节点的有限元模型,配置梁柱主筋和节点核心区箍筋,应用 LS-DYNA 求解器的显示分析方法,对外壳预制核心现浇装配式节点抗爆性能与整体现浇混凝土结构进行对比分析,研究表明外壳预制核心现浇装配式结构具有良好的整体性和抗爆性。

1 材料模型

数值模拟利用 LS-DYNA 材料库提供 *MAT_HIGH_EX PLOSIVE_BURN 模型以及状态方程 *EOS_JWL 模拟炸药,利用空材料模型 *MAT_NULL 和线性多项式状态方程 *EOS_LINER_POLYNOMIAL 实现对空气的模拟。

1.1 混凝土材料模型

笔者采用 LS-DYNA 材料库提供的 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 材料模型(简称 HJC)模拟混凝土^[3],HJC 模型充分考虑了混凝土材料受大应变、高应变率和高压影响的材料特性,以累积塑性应变为衡量标准的损伤本构关系模型,同时考虑了压力效应及应变率敏感性,适用于 Lagrange 和 Euler 单元算法^[4]。其等效屈服强度是压力、应变和损伤的函数,压强是体积应变的函数且包含压实效应,积累损伤是塑性体积应变、等效体积应变和压力的函

数^[5].材料的等效屈服强度表达式为

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}][1 - c \ln(\dot{\epsilon}^*)]. \quad (1)$$

式中: σ^* 为等效屈服强度; P^* 为标准化压力; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变率; D 为模型中损伤因子, $0 \leq D \leq 1$.

1.2 钢筋材料模型

钢筋为各项同性材料,应变率十分敏感,与受静力荷载相比,在高应变率的爆炸荷载作用下会发生快速的变形,故对钢材的动态描述,选用LS-DYNA材料库提供的非线性塑性 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC,该材料模型考虑了应变率效应的影响,适用于模拟各项同性和塑性随动硬化材料,有效节约计算时间,适用于梁单元、壳单元和体单元.该材料模型基于Cowper-Symonds模型来考虑有关应变率的问题,采用与应变率有关的因数描述屈服应力:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}). \quad (2)$$

表1 混凝土材料参数

Table 1 Parameters of concrete model

压溃点压力/MPa	应变率影响系数	特征化最大强度	质量密度/(kg·m ⁻¹)	准静态单轴抗压强度/MPa	压实点的压力/MPa	剪切模量/10 ⁴ MPa	最大静水压力/10 ⁴ MPa
16.7	0.007	7.0	2 400	40	800	1.486	4

表2 钢筋材料参数

Table 2 Parameters of steel material model

切线模量/MPa	泊松比	质量密度/(kg·m ⁻¹)	屈服应力/MPa	杨氏模量/MPa
2 100	0.3	7 850	292.5	2.06 × 10 ⁵

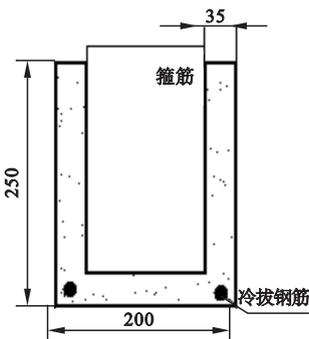


图1 U型RC梁外壳

Fig. 1 The RC-BEAM shell of U-shape

式中: $1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}}$ 为屈服应力放大因子; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; σ_0 为初始屈服应力; C 、 P 为Cowper Sym-onds应变率参数; β 为硬化参数,当 $\beta = 0$ 时为塑性随动强化模型,当 $\beta = 1$ 时为各向同性硬化模型,当 $0 < \beta < 1$ 时为塑性随动强化和各项同性硬化混合模型; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变; E_p 为塑性硬化模量.

2 有限元分析模型

2.1 梁柱T型节点构造及材料

材料参数见表1、表2.模拟梁外壳建模应用无主筋U型RC梁外壳,截面形式如图1所示,外壳采用C35混凝土,配置 $\phi 6$ 箍筋.柱外壳应用口型RC柱外壳,截面形式如图2所示,外壳采用C35混凝土,柱配置 $\phi 8$ 箍筋.边节点的截面尺寸如图3所示,现浇与装配边节点截面钢筋布置完全相同.

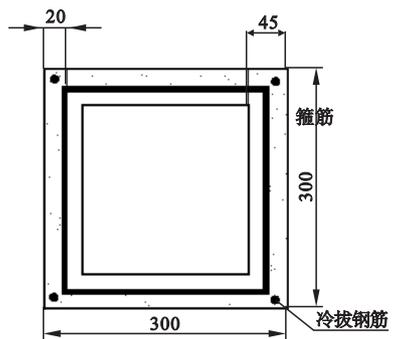


图2 口型RC柱外壳

Fig. 2 The RC-BEAM shell of mouth-shape

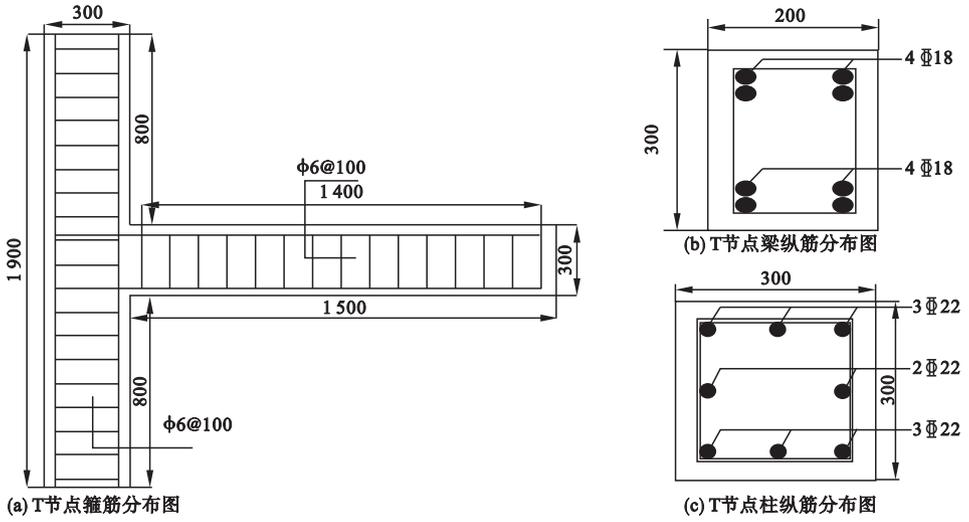


图 3 T 型节点钢筋布置

Fig. 3 The reinforcement layout of T joint

2.2 梁柱 T 型节点有限元网格处理

有限元模型钢筋单元应用 LS - DYNA 显示动力学 BEAM168 单元,钢筋骨架如图 4 所示. 混凝土单元采用显示动力学单元,核心混凝土网格如图 5 所示,预制外壳网格如图 6 所示,单元网格划分尺寸为 50 mm,混凝土单元与钢筋骨架网格共节点. 装配式 T 型节横梁预制 U 型外壳与现浇核心混凝土浇筑及养护时期不同,外壳与核心之间接触存在局部非共节点,故横梁及纵柱的浇注外壳与核心混凝土间选用 spoltwed 单元连接. 纵柱横梁交点附近整体性不好,应用 spoltwed 与弹簧单元间隔连接,进行纵柱横梁的接触点处理.

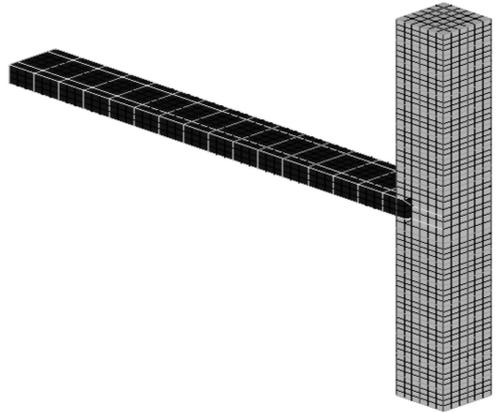


图 5 T 型节点核心混凝土网格模型

Fig. 5 The finite element mesh of core concrete

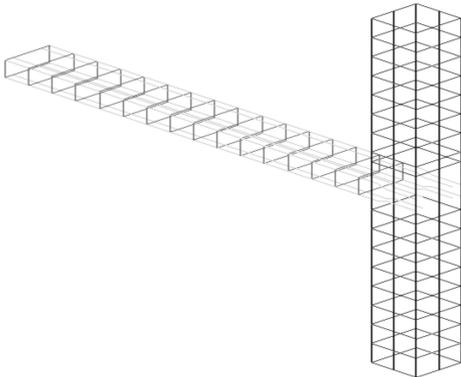


图 4 T 型节点钢筋骨架网格模型

Fig. 4 The finite element mesh of steel cage

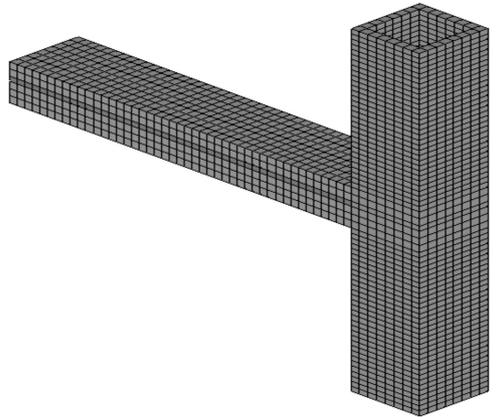


图 6 T 型节点混凝土外壳网格模型

Fig. 6 The finite element mesh of concrete shell

3 有限元分析结果

3.1 节点破坏特征

3.1.1 现浇边节点破坏特征

在梁 T 型节点正前 200 mm 处放置 TNT 炸药, 体积为 200 mm × 200 mm × 200 mm. 在分析计算中设置炸药在 0 ms 时起爆, 第 0.5 ms 时冲击波撞击梁柱表面. 冲击表面处远离边角的混凝土, 受周边混凝土挤压作用, 形成三向受压状态, 混凝土反而未被压碎. 此时, 边角处混凝土在挤压过程中率先出现拉应力状态, 最先被压碎(见图 7). 接着压碎的混凝土围绕节点中心扩张, 在节点区加密钢筋的保护下, 混凝土破损范围不在延伸, 第 5 ms 时冲击波对 T 型节点表面造成了最大峰值伤害(见图 8), 梁柱交点附近混凝土被冲击波压碎脱落, 钢筋裸露. 爆炸过程中钢筋骨架受爆炸影响应力分布如图 9 所示.

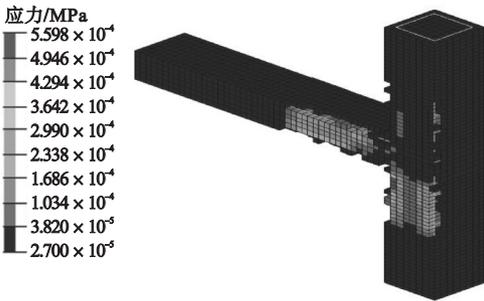


图 7 0.5 ms 时 T 型节点应力分布

Fig. 7 The T joint stress distribution of concrete at 0.5 ms

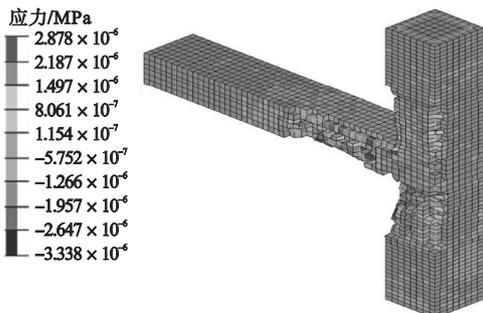


图 8 5 ms 时 T 型节点应力分布

Fig. 8 The T joint stress distribution of concrete at 5 ms

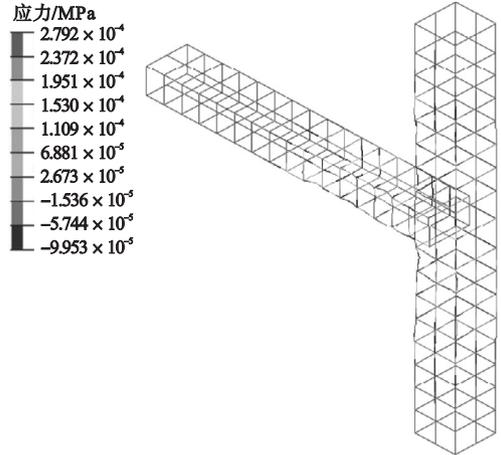


图 9 5 ms 时 T 型节点钢筋骨架应力分布

Fig. 9 The T joint stress distribution of steel star at 5 ms

3.1.2 装配式外壳预制核心现浇节点破坏特征

在梁 T 型节点正前 200 mm 处放置 TNT 炸药, 体积为 200 mm × 200 mm × 200 mm, 分析计算中设置炸药在 0 ms 时起爆, 第 0.5 ms 时冲击波撞击梁柱表面. 在梁柱棱角边缘率先产生破坏的同时, 由于灌注核心与外壳粘连的不充实, 局部失去了核心混凝土对冲击表面的挤压保护作用, 远离边角处的外层混凝土未形成三向受压状态, 故也出现了挤压破坏(见图 10). 与 RC 现浇 T 型节点同一时刻相比, 新型装配式 T 型节点在边柱上产生了更大的应力, T 节点变形略大于 RC 现浇 T 型节点. 第 5 ms 时冲击波对 T 型节点表面造成了最大峰值伤害, 梁柱交点附近混凝土被冲击波压碎脱落, 钢筋裸露(见图 11). 与 RC 现浇 T 型节点同一时刻相比, 柱外壳脱落面积较大, 核心浇注混凝土未有压碎. 爆炸过程中钢筋骨架受爆炸影响应力分布如图 12 所示.

3.2 梁柱主筋及箍筋应力发展特征

3.2.1 现浇 T 节点

在炸药起爆 2 ms 内, T 节点附近柱上各主筋单元出现峰值应力(0.35 MPa), 钢筋并未发生剪切破坏. 2 ~ 10 ms 钢筋的弹性应变

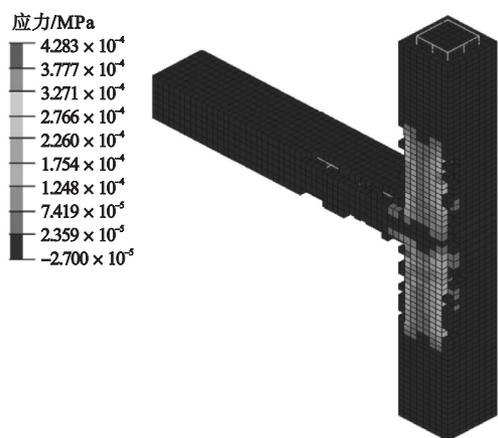


图 10 0.5 ms 时 T 型节点应力分布

Fig. 10 The T joint stress distribution of concrete at 0.5 ms

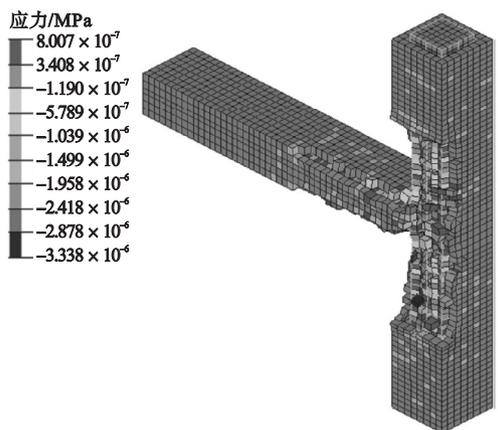


图 11 5 ms 时 T 型节点应力分布

Fig. 11 The T joint stress distribution of concrete at 5 ms

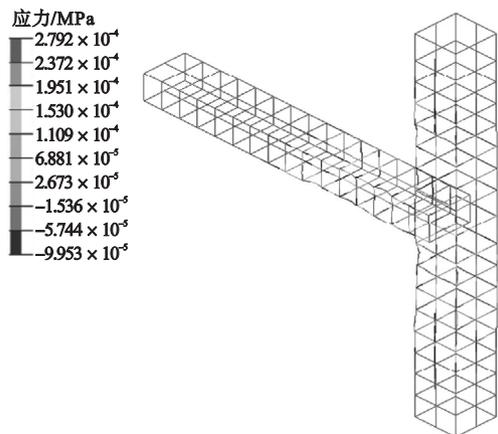


图 12 5 ms 时 T 型节点应力分布

Fig. 12 The T joint stress distribution of steel star at 5 ms

逐步恢复,在混凝土的保护下钢筋未出现屈服(见图 13).同时,T节点附近梁上的主筋单元及节点范围内的箍筋单元均在未到达屈服应变时,就开始恢复了弹性变形,未在冲击波的影响下产生剪切破坏.

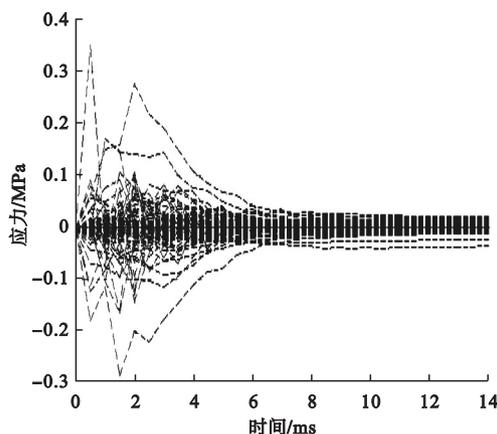


图 13 柱主筋应力时间历程曲线

Fig. 13 The time-stress curves of column main steel cage

3.2.2 装配式 T 节点

在炸药起爆 2 ms 内 T 节点附近柱上各主筋单元出现峰值应力(0.43 MPa),与现浇 T 节点峰值应力接近,钢筋未发生剪切破坏. 2~10 ms 钢筋的弹性应变逐步恢复,钢筋并未出现屈服(见图 14).同时,T节点附近梁上的主筋单元及节点范围内的箍筋单元,均在未到达屈服应变时就开始恢复了弹性变形,峰值应力与现浇 T 节点接近,并且也未在冲击波的影响下产生剪切破坏.

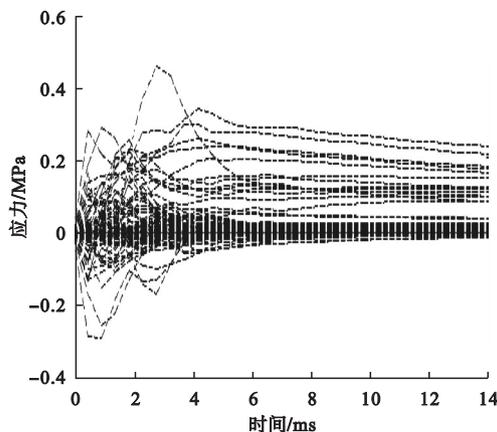


图 14 柱主筋应力时间历程曲线

Fig. 14 The time-stress curves of column main steel cage

3.3 梁柱主筋及箍筋位移变化特征

在现浇梁柱及新型装配式梁柱相交范围内选取有限元模型相同节点位置,得出位移-时间历程曲线.现浇 T 节点位移-时间历程曲线如图 15 所示,装配式 T 节点位移-时间历程曲线如图 16 所示.

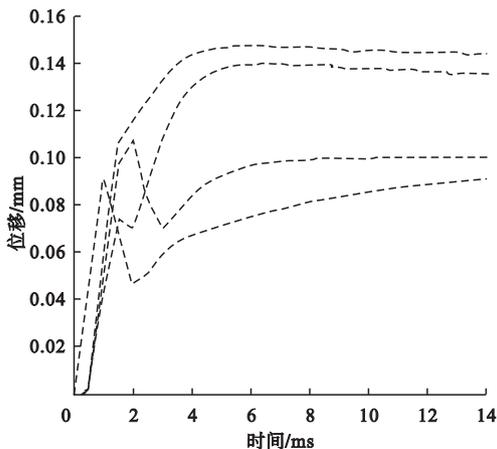


图 15 现浇节点钢筋位移-时间历程曲线

Fig. 15 The time-displacement curves of column main steel cage in cast-in-place concrete joint

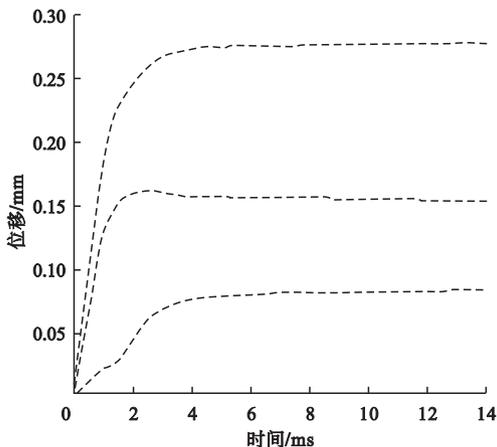


图 16 装配式节点钢筋位移-时间历程曲线

Fig. 16 The time-displacement curves of column main steel cage in fabricated concrete joint

从图 15、图 16 可以看出,在同样爆炸荷载下,新型装配式梁柱 T 节点不同时刻位移变化略大于现浇 T 节点位移,外壳预制现浇核心工艺方法一定程度上提高了混凝土结构在冲击荷载下的延展性.图 15 曲线集中分布在 0.06 ~ 0.14 mm,说明在冲击波侵蚀混凝土梁柱节点处表面受到了大面积损伤.图 16

曲线分布较为松散,大部分曲线集中 0 ~ 0.05 mm,说明冲击波侵蚀对新型混凝土梁柱节点只造成局部破坏严重,而现浇 T 节点整体破坏严重.

4 结 论

(1)在爆炸结束后 RC 新型 T 节点柱外壳混凝土脱落面积较大,与现浇 T 节点相比外壳损坏严重,爆炸过程中吸收掉大部分能量,核心浇注混凝土基本未有压碎,外壳对混凝土核心柱有强大的保护作用,提升外壳的抗爆性能对节点整体抗爆性能提升意义重大.

(2)外壳与核心混凝土的约束力弱于现浇梁柱,工程中需要保证节点处核心混凝土的浇注质量.外壳预制现浇核心工艺方法提高了混凝土结构在冲击荷载下的延展性.

(3)冲击波侵蚀对新型混凝土梁柱节点只造成局部破坏,而现浇 T 节点整体破坏严重.

参考文献

- [1] 赵唯坚,钟全,贾连光,等.装配式混凝土框架剪力墙结构低周往复加载分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,30(3):303-308.
(ZHAO Weijian, ZHONG Quan, JIA Lianguang, et al. Analysis of low-cycle and reciprocating loading of shear wall structure of prefabricated concrete framework [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 30(3):303-308.)
- [2] 周天华,吴函恒,陈军武,等.钢框架-预制混凝土抗侧力墙结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,35(4):42-66.
(ZHOU Tianhua, WU Hanheng, CHEN Junwu, et al. Experimental study on seismic behavior of lateral force resisting wall structure of steel framework-precast concrete [J]. Journal of architectural structures, 2015, 35(4):42-66.)
- [3] 邓开来,潘鹏,陈浩文,等.滚轴式金属屈服耗能阻尼器数值模拟研究[J].工程力学,2014,13(6):70-73.
(DENG Kailai, PAN Peng, CHEN Haowen, et al. Study of numerical simulation of a roller type energy dissipation damper of metallic yielding [J]. Journal of engineering mechanics, 2014, 13(6):70-73.)

- [4] BURRELL R P, AOUDE H, SAATCIOGLU M. Response of SFRC columns under blast loads [J]. Journal of structural engineering, 2014, 141(9) : 209 - 214.
- [5] 李国强, 翟海雁, 杨涛春, 等. 钢管混凝土柱抗爆性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(12) : 89 - 96.
(LI Guoqiang, ZHAI Haiyan, YANG Taochun, et al. The explosive load studying of concrete filled steel tube column [J]. Building structures journal, 2013, 34(12) : 89 - 96.)
- [6] CHEN L, FANG Q, FAN J Y, et al. Responses of masonry infill walls retrofitted with CFRP, steel wire mesh and laminated bars to blast loadings [J]. Advances in structural engineering, 2014, 17(6) : 817 - 836.
- [7] 郝大为. 加载速率对钢筋混凝土框架柱动态特性的影响 [J]. 工程建设与设计, 2011(12) : 61 - 64.
(HAO Dawei. Effect of loading rate on dynamic characteristics of reinforced concrete frame column [J]. Architectural and structural design, 2011(12) : 61 - 64.)
- [8] 李敏, 李宏男. 建筑钢筋动态试验及本构模型 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(4) : 70 - 75.
(LI Min, LI Hongnan. Dynamic test and constitutive model for reinforcing steel [J]. China civil engineering journal, 2010, 43(4) : 70 - 75.)
- [9] 雷鲁. 考虑剪切效应的大震下 RC 框架结构抗整体倒塌能力评估 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
(LEI Lu. Investigation on global collapse resistance capacity of RC frame subjected to severe earthquake considering shear effect [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.)
- [10] GOVINDJEE S, KAY J G, SIMO J C. Anisotropic modeling and numerical simulation of brittle damage in concrete [J]. International journal for numerical methods in engineering, 1995, 38(21) : 3611 - 3633.
- [11] MANES A, BRESCIANI L M, GIGLIO M. Ballistic performance of multi-layered fabric composite plates impacted by different 7.62 mm calibre projectiles [J]. Procedia engineering, 2014, 88(4) : 208 - 215.
- [12] YAN S, HAN Z K, QI B X, et al. Response of concrete block masonry wall under blast load [C] // The first international conference of protective structures, UK: Manchester, 2010.
- [13] 史庆轩, 王朋, 李坤. 加载制度对新型型钢混凝土柱的抗震性能影响 [J]. 工程力学, 2014, 31(3) : 152 - 157.
(SHI Qingxuan, WANG Peng, LI Kun. Vibration performance influence of steel reinforced concrete column on new loading system [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(3) : 152 - 157.)
- [14] 王威. 抗剪连接件对内配钢板混凝土剪力墙抗震性能影响的研究 [J]. 西安建筑大学学报, 2014, 46(6) : 810 - 813.
(WANG Wei. Influence of shear connectors on seismic behavior of internal steel plate shear walls [J]. Journal of Xi'an university of architecture, 2014, 46(6) : 810 - 813.)
- [15] ELJADEI A A, HARRIES K A. Design of coupled wall structures as evolving structural systems [J]. Engineering structures, 2014, 73(4) : 100 - 113.
- [16] JI Xiaodong, WANG Yandong, ZHANG Junshan, et al. Seismic behavior and fragility curves of replaceable steel coupling beams with slabs [J]. Engineering structures, 2017, 150(4) : 98 - 101.
- [17] LI Z, SCHAFER B W. Application of the finite strip method in cold-formed steel member design [J]. Journal of constructional steel research, 2010, 66(8) : 971 - 980.
- [18] XU Wu, HAN Linhai, LI Wei. Performance of hexagonal CFST members under axial compression and bending [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 123(4) : 162 - 175.
- [19] 蔡绍怀, 左怀西. 高强混凝土的抗裂强度 [J]. 土木工程学报, 2012, 42(6) : 1076 - 1100.
(CAI Shaohuai, ZUO Huaixi. Crack resistance of high-strength concrete [J]. China civil engineering journal, 2012, 42(6) : 1076 - 1100.)
- [20] 刘军. 混凝土损伤本构模型研究及其数值实现 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
(LIU Jun. Study on concrete damage constitutive model and its numerical realization [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)