

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220303001

基于瞬态分析法的预应力与非预应力钢筋 混凝土梁动力响应对比分析*

郑文华^{1,2}, 官剑飞^{2,3}, 刘明保^{2,3}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司地基基础研究所, 北京 100013; 2. 住房和城乡建设部防灾研究中心, 北京 100013; 3. 中国建筑科学研究院有限公司建筑机械化研究分院, 北京 100007)

摘要: 提出了基于瞬态动力分析完全法的预应力钢筋混凝土梁爆炸冲击模拟方法, 并采用已有试验结果验证了方法的合理性, 进一步对比探讨了非预应力钢筋混凝土梁与预应力钢筋混凝土梁的动力响应差别和响应机制。研究表明: 爆炸荷载作用下, 钢筋混凝土梁的跨中底部位置最先发生塑性变形, 混凝土容易受拉开裂, 且爆炸荷载越大开裂越严重; 由于预应力筋的存在, 预应力钢筋混凝土梁跨中挠度显著减小, 预应力钢筋混凝土梁开裂范围大幅减小, 裂缝深度也显著降低, 但是浅层裂缝的横向分布范围稍有增加; 预应力改善了梁的受力状态, 使得梁所受荷载均布转移, 在爆炸冲击荷载作用下, 大部分应力都由预应力筋来承担, 非预应力钢筋的应力较小, 预应力筋是提高结构抗爆性能的关键点; 当脉冲荷载卸载至零后, 梁跨中的挠度均能恢复至自重状态下的变形量, 说明预应力钢筋混凝土梁在爆炸冲击荷载作用下, 仍处于弹性工作状态, 这与非预应力钢筋混凝土梁显著不同。模拟研究结果对预应力钢筋混凝土结构抵抗爆炸荷载领域的应用有一定的参考意义。

关键词: 瞬态动力分析; 冲击荷载; 预应力; 混凝土; 爆炸

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1304-09

Comparative Analysis on Dynamic Response of Prestressed and Non-prestressed Reinforced Concrete Beams Based on Transient Method

ZHENG Wenhua^{1,2}, GONG Jianfei^{2,3}, LIU Mingbao^{2,3}

(1. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

2. Disaster Prevention Research Center, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100013, China;

3. Institute of Building Mechanization, China Academy of Building Research, Beijing 100007, China)

Abstract: Based on the complete method of transient dynamic analysis, the simulation method of the prestressed reinforced concrete beam explosion impact is presented. The validation of this method is supported by empirical test results. In addition, the dynamic response difference and the response mechanism of the non-prestressed reinforced concrete beams and prestressed reinforced concrete beams are discussed. The results show that the plastic deformation primarily occurs at the bottom of the middle span of the reinforced concrete beam under blast load, and the concrete is easy to crack under tensile load, and the crack is more serious with the increase of blast load. Notably, prestressed beams exhibit significantly reduced mid-span deflection, decreased crack range and depth, albeit with a slight increase in the shallow crack's transverse distribution. This indicates that prestressing marked-

* 收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-03-28

作者简介: 郑文华(1986—), 女, 硕士, 副研究员。主要从事地下结构性能研究。E-mail: wenhuacabr@163.com

ly enhances the beam's stress state, promoting uniform load distribution. Under the blast load, the prestress bar absorbs most stress, reducing the load on non-prestressed bars, thereby highlighting the crucial role of prestressed tendons in bolstering anti-explosion performance. When the impulse load drops to zero, the beam's mid-span deflection returns to its original state under self-weight. It shows that the prestressed reinforced concrete beam maintains the elastic working state under the impact load of explosion, which is significantly different from the non-prestressed reinforced concrete beam. These insights offer valuable guidance for the application of prestressed reinforced concrete structures in the field of blast loading resistance.

Keywords: transient dynamic analysis; impact load; prestress; concrete; blast

0 引言

近年来,随着我国城市化建设的加速,城市规模不断扩增,建筑用地日趋紧张,公共及民用建筑深入地下寻求空间已成必然趋势。地下空间的利用不仅可以提高土地利用率,同时能够有效缓解城市交通压力。地下空间开发与利用已成为实现城市可持续发展的重要途径。

地下空间的大力发展,也带来了一些潜在的危险问题。如地下建筑的密闭空间和大量聚集的人群,极易成为恐怖分子袭击的目标。尤其是近年来,随着恐怖活动的日益猖獗,爆炸袭击因其产生的巨大破坏力及其所造成的影响,愈发成为恐怖分子发动袭击的主要方式。随着偶然爆炸和人为恐怖爆炸事件的不断增多,地下结构的爆炸安全防护问题研究也越来越有实际意义,爆炸作用下结构的抗爆、防爆研究已成为当前国际上的热点问题。

预应力混凝土技术在我国起步较晚,1956年以前基本处于学习阶段。在房屋建筑领域,预应力混凝土主要用来替代单层工业厂房中的一些钢屋架、木屋架和钢吊车梁。后来,随着技术的发展、工艺的改进,预应力混凝土技术逐步用于代替多层厂房和民用建筑中的一些中小型钢筋混凝土构件和木结构构件。近三十年,预应力混凝土技术得到进一步的拓展应用,已成功应用于民用建筑、大跨度和大空间公共建筑、高层建筑、高耸结构、地下结构、海洋结构、压力容器和大吨位围船结构等领域,具有广阔的发展前景^[1-4]。

预应力钢筋混凝土结构承载能力高,能够大幅度减小截面的尺寸,适合于大跨度结构,并可节约经济成本。预应力钢筋混凝土结构的抗裂性能优

于非预应力钢筋混凝土结构,经久耐用,能延长结构的使用寿命。预应力钢筋混凝土结构的相关研究成果也日渐增多^[5-7]。国内外针对预应力钢筋混凝土构件开展过一系列爆炸相关的模型试验^[8-14],但此类模型试验多是采用落锤试验设备开展,且研究对象多集中在构件尺度,缺少系统性的规律研究。此外,模型试验耗费时间长,费用高,且爆炸属于瞬时荷载,结构的响应受测试手段的影响较大。因此,越来越多的学者倾向于数值方法,开展结构爆炸冲击响应研究^[15-19]。

截至目前,对于地下预应力钢筋混凝土结构的冲击动力分析尚不充分,特别是随着民用建筑防护要求的提高,地下预应力钢筋混凝土结构在爆炸荷载作用下的动力响应亟需解决。基于上述原因,本文结合已有的模型试验资料,对预应力钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的响应进行了数值模拟分析,探讨了爆炸荷载的简化模拟分析方法。基于ansys,提出了利用瞬态动力分析完全法进行预应力钢筋混凝土梁爆炸冲击模拟,并采用已有试验测试结果验证了方法的合理性,进一步对比探讨了非预应力钢筋混凝土梁和预应力钢筋混凝土梁的动力响应差别和响应机制。

1 爆炸荷载简化计算方法

爆炸瞬间,核心区域产生高温高压气体并迅速向周围膨胀,此时会在空气中形成强烈的冲击波,即爆炸波或爆轰波。爆炸冲击波是爆炸瞬间形成的高温火球猛烈向外膨胀、压缩周围空气形成的高压气浪。以超音速向四周传播,随距离的增加,传播速度逐渐减慢,压力逐渐减小。当冲击波从波源向外运行时,波阵面后的压力也下降,在某一距离处,波阵面后的压力下降到比周围大气压低,形成

负压区。在负压区的尾部,压力又回升到与周围相同^[20]。对于空气中某一固定点,空气冲击波侧向超压随时间很快衰减。自由空气爆炸产生的冲击波典型的压力时程曲线如图1所示^[21]。 P_0 为目标点的大气压,自由空气中的爆源起爆后产生的冲击波经过时间 t_A 到达目标点,目标点处的压力瞬间迅速上升至峰值 P_{s0} 。随着冲击波的向前传播,目标点处的压力逐渐下降,经过时间 t_0 后恢复到大气压。之后,目标点的压强并不是停留在大气压上,而是随着冲击波的向前传播继续下降至负压,直到降到负的峰值 P_{s0}^- ,然后逐渐恢复到大气压强,负压的持续时间为 t_0^- 。

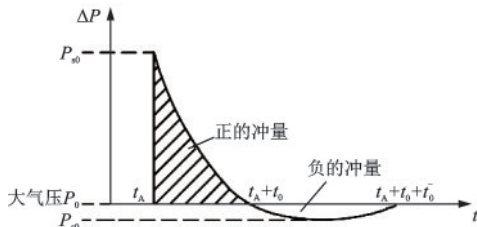


图1 爆炸冲击波的典型压力时程曲线^[21]

Fig.1 Typical pressure time history curve of blast wave^[21]

在实际工程应用中,常进行等冲量简化计算^[22],将指数型的空气冲击波压力衰减曲线简化为线性下降的三角形冲击波压力衰减曲线,如图2所示。

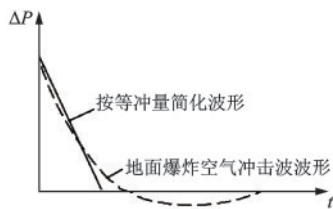


图2 爆炸冲击波的等冲量简化计算曲线^[22]

Fig.2 Simplified calculation curve of equal impulse of explosion shock wave^[22]

2 非预应力钢筋混凝土梁爆炸试验^[23]

为进行模型的对比验证,选取清华大学筒支梁抗爆模型试验为计算工况,进行爆炸荷载作用下非预应力钢筋混凝土梁的响应分析,并分析不同爆炸荷载作用下非预应力钢筋混凝土梁的响应情况。

2.1 试验概况

钢筋混凝土筒支梁的断面为 $19.7\text{ cm} \times 29\text{ cm}$,长 165 cm ,试验时取筒支跨度 145 cm 。梁的箍筋为 $\Phi 6@10\text{ cm}$,主筋为螺纹钢筋,直径 12 cm 。梁的混凝土用普通硅酸盐水泥、中砂、卵石配制而成,试验时龄期约为2年,此时的混凝土立方体强度已达 46 MPa 。根据《混凝土结构设计规范》^[24],该混凝土相当于C45,其轴心抗压强度标准值为 29.6 MPa ,轴心抗拉强度标准值为 2.51 MPa 。试验在清华大学自行研制的筒简单管式核爆炸模拟器上进行,如图3所示。

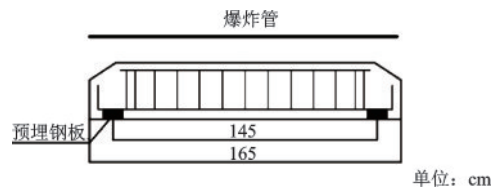


图3 清华大学爆炸试验示意

Fig.3 Schematic diagram of explosion test in Tsinghua University

2.2 试验结果简介

清华大学爆炸模型试验梁在第一次加载下测得的荷载峰值压力为 0.52 MPa ,跨中最大挠度为 3.3 mm ;钢筋的最大应力濒临屈服强度(达 600 MPa),梁已经处于弹性工作阶段的极限。在第二次加载时,峰值压力为 0.62 MPa ,钢筋的应力已超过屈服强度,结构进入塑性工作阶段,结构最大挠度为 6.4 mm 。在第三次加载时,峰值压力为 0.82 MPa ,混凝土开始剥落,挠度继续增大,最大值达到 32.5 mm ;卸载后梁严重开裂且扭曲显著,详见表1。

表1 清华大学爆炸模拟试验测试结果对比

Table 1 Comparison of test results of explosion simulation test in Tsinghua University

加载顺序	峰值压力/ MPa	工作阶段	最大挠度/ mm	试验后外观
1	0.52	弹性	3.3	完好
2	0.63	塑性	6.4	裂缝明显
3	0.82	破损	32.5	压区混凝土轻度剥落, 剩余挠度约为 3 mm

3 非预应力钢筋混凝土梁爆炸冲击响应数值模拟

3.1 有限元模型

建立简支梁轴对称模型,进行清华大学钢筋混凝土简支梁动力试验的数值模拟分析,支座处设置弹性垫板,垫板底面法向固定。其中,混凝土用 solid65 单元,该单元能考虑混凝土的开裂现象;钢筋采用 link8 单元;混凝土采用 MKIN 本构模型,钢筋采用 BKIN 本构模型。在计算过程中,梁顶面施加爆炸产生的竖向脉冲荷载。计算模型如图 4 所示。

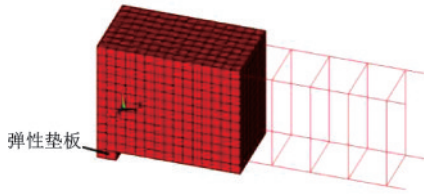


图 4 非预应力钢筋混凝土梁数值计算模型

Fig.4 Numerical model of non-prestressed reinforced concrete beam

3.2 材料模型和参数

对于混凝土在单轴受压下的应力应变关系,国内外学者已经做了大量的试验研究工作,并在此基础上提出了多种混凝土受压应力应变关系曲线方程。其中,最具代表性的是 Hongnestad 曲线^[25]。将混凝土的应力应变关系曲线分为上升段和下降段。上升段为二次抛物线,下降段为斜直线,如图 5 所示。

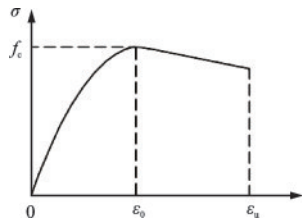


图 5 混凝土材料应力应变关系曲线

Fig.5 Stress-strain curve of concrete material

$$\text{上升段: } \varepsilon \leq \varepsilon_0, \sigma = f_c \left[2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\text{下降段: } \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u, \sigma = f_c \left[1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right] \quad (2)$$

式中, f_c 为峰值应力; ε_0 为峰值应力时的应变, 取为 0.002; ε_u 为极限压应变, 取为 0.003 8。

数值分析时,采用 Hongnestad 模型建立混凝土的应力应变关系,作为参数输入。混凝土和钢筋的材料参数取值见表 2。

表 2 混凝土和钢筋材料参数

Table 2 Material parameters of concrete and reinforcement

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比	抗压强 度/MPa	抗拉强 度/MPa
混凝土	2.5×10^3	2.81e4	0.2	29.6	2.51
纵向钢 筋	7.8×10^3	2.07e5	0.3	/	600
箍筋	7.8×10^3	2.07e5	0.3	/	350

3.3 爆炸荷载施加方法

采用脉冲荷载法模拟试验中施加的爆炸荷载,脉冲荷载的升压时间为 5~10 ms,取中间值 8 ms 达到峰值荷载;降压时间为 1 s,最终衰减至 0,如图 6 所示。

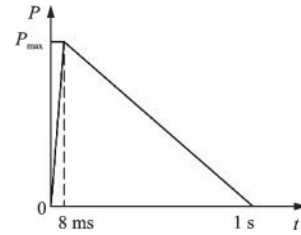


图 6 模拟计算所用爆炸脉冲荷载压力时程曲线

Fig.6 Time-history curve of explosion pulse load used in simulation calculation

ansys 具有强大的非线性分析功能,能实现多场及多场耦合功能,并且集前后处理、分析求解和多场分析于一体。采用瞬态动力学分析模块研究爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的响应。

瞬态动力学分析是用于确定结构承受任意随时间变化的载荷动力学响应的一种方法。瞬态动力学分析可以确定结构在静载荷、瞬态载荷和间歇载荷随组合作用下随时间变化的位移、应变、应力及力。瞬态力学分析可以采用三种方法: Full(完全法)、Reduce(减缩法)及 Mode Superposition(模态叠加法)。由于爆炸过程中将出现大变形、大应变等非线性特性,模型采用 Full 方法进行计算^[26]。

为验证计算模型的正确性,进行脉冲荷载施加效果测试,加载后提取梁跨中截面的挠度时程曲线,如图7所示。

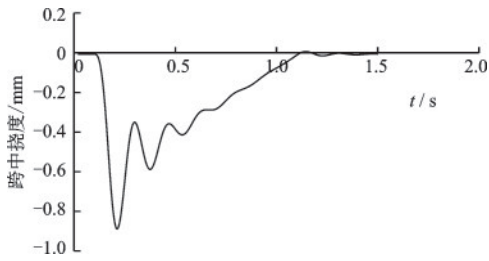


图7 脉冲荷载作用时梁跨中截面挠度时程曲线

Fig.7 Time-history curve of deflection of mid-span section of beam under impulse load

梁跨中截面挠度时程曲线与所施加的脉冲荷载曲线形态一致,并且在冲击荷载施加并卸载至0以后,梁跨中位移恢复至0。由此可以判断出脉冲荷载已有效施加到模型上。

3.4 非预应力钢筋混凝土梁模拟结果对比

从计算结果可以看出,在爆炸荷载作用下,简支梁的跨中底部位置最先发生塑性变形,混凝土受拉开裂,开裂范围在ansys中以红色圆圈标示。且随着爆炸荷载的增加,混凝土开裂现象越严重。两端支座位置由于应力集中也产生小范围混凝土开裂现象。梁跨中底部的竖向位移时程曲线与施加的爆炸冲击荷载时程曲线形态吻合;并且当爆炸发生后,脉冲荷载卸载至0后,梁跨中的竖向位移未恢复至自重状态下的变形量,说明此时梁发生了不可恢复的塑性变形。

对比分析不同爆炸脉冲荷载作用下跨中竖向位移的时程曲线(图8):在脉冲荷载为0.52 MPa时,简支梁最大挠度为3.6 mm,此时混凝土产生轻度裂缝,卸载后残余挠度为0.4 mm;脉冲荷载为0.63 MPa时,简支梁最大挠度为5.9 mm,混凝土产生显著裂缝,卸载后残余挠度为2.4 mm;脉冲荷载为0.82 MPa时,简支梁最大挠度已超过11.25 mm,简支梁发生了较大的塑性变形,混凝土开裂现象严重,模拟计算不收敛。

从梁纵向钢筋的轴力图可知(图9),在爆炸荷载作用下,简支梁顶部的纵向钢筋受压应力的作用,且跨中位置压力最大;简支梁底部的纵向钢筋受拉应力的作用,且跨中位置拉应力最大。两端支座处,箍筋受压应力较大。

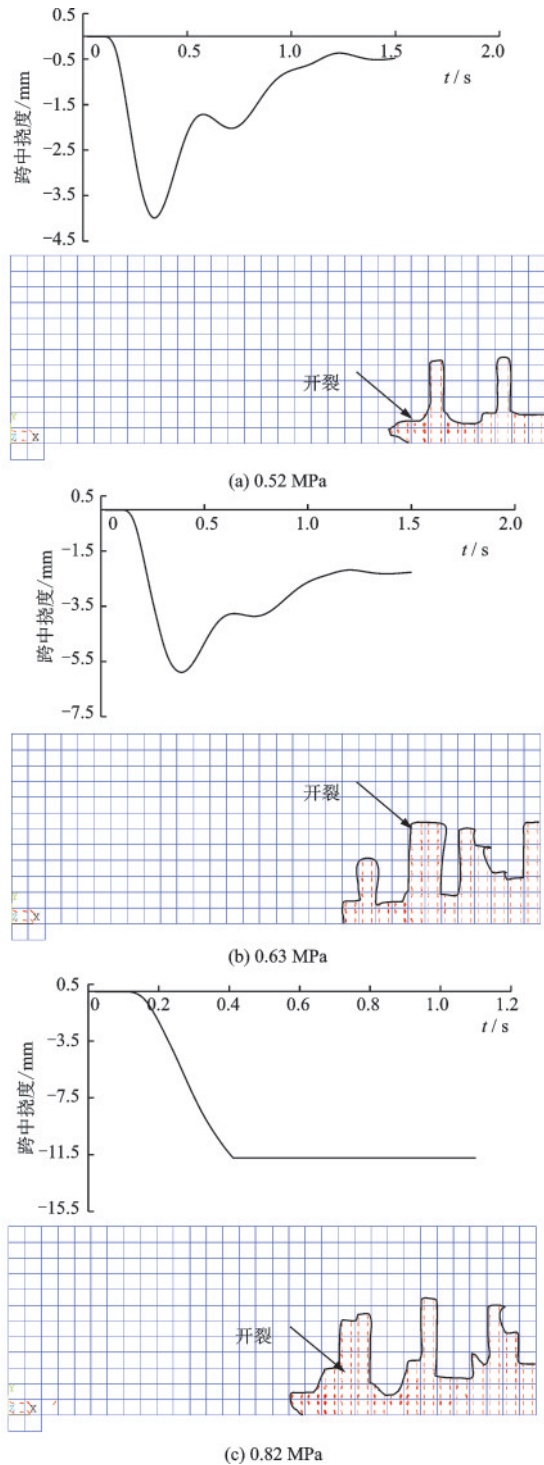


图8 脉冲荷载下梁跨中底部竖向位移时程曲线及开裂示意

Fig.8 Time-history curve and crack diagram of vertical displacement of middle and bottom of beam span

在0.52 MPa的脉冲荷载下,梁底受拉纵筋的轴向应力最大值为573 MPa,虽然没有超过其屈服极限600 MPa,但是已非常接近,钢筋处于弹性极限状态;在0.63 MPa脉冲荷载下,梁底受拉纵筋的轴向应力最大值为600 MPa,在一定时间内超过其屈服

4 预应力钢筋混凝土梁爆炸冲击响应数值模拟

4.1 预应力有限元模型

基于以上模型,设计预应力束形,开展爆炸荷载作用下预应力钢筋混凝土结构的计算分析。考虑预应力作用效应是为了抵消外荷载的作用,因此预应力束形应按照外荷载作用下的弯矩分布形式进行布置。一般而言,对于梁单元,外荷载的弯矩为抛物线形式,因此预应力束形的布置也是按照抛物线形式。预应力束形如图 10 所示。

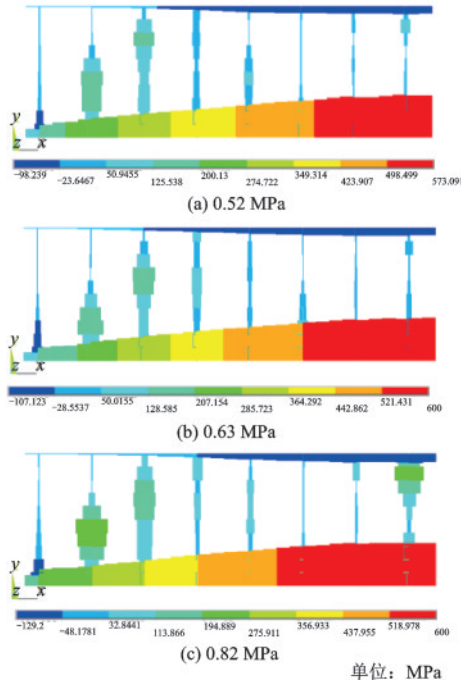


图 9 脉冲荷载下钢筋最大应力分布云图

Fig.9 Cloud diagram of maximum stress distribution of reinforced bar under impulse load

强度,钢筋进入塑性阶段;在 0.82 MPa 脉冲荷载下,梁底受拉纵筋的轴向应力最大值为 600 MPa,大部分时间均超过其屈服强度,钢筋进入塑性状态,且混凝土梁开裂现象严重。

提取了三种脉冲荷载下简支梁跨中截面底部位置的竖向位移,见表 3。从表中可以看出,数值模拟得到的简支梁外观与模型试验的梁外观基本一致;且梁最大挠度值误差在 10% 以内。可以认为该模型能够较为准确地反映爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的跨中挠度及钢筋应力状态,可用于爆炸荷载作用下混凝土结构动力响应的模拟分析。

表 3 非预应力钢筋混凝土简支梁计算结果对比

Table 3 Comparison table of calculation results of non-prestressed reinforced concrete simply supported beams

加载顺序	峰值压力/MPa	最大挠度/mm	数值模拟外观	试验测得挠度/mm	试验外观
1	0.52	3.6	轻度裂缝	3.3	完好
2	0.63	5.9	裂缝明显	6.4	裂缝明显
3	0.82	>11.5	计算不收敛	32.5	混凝土轻度剥落

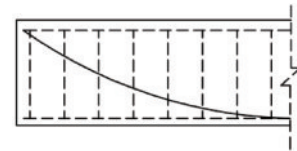


图 10 预应力混凝土梁束形图

Fig.10 Beam diagram of prestressed concrete beam

4.2 预应力模拟方法简介

ansys 软件中对预应力钢筋混凝土的分析方式一般分为等效荷载法和实体力筋法两种^[27]。其中,实体力筋法按照建立力学模型的方法又可分为实体切分法、节点耦合法和约束方程法。等效荷载法是将力筋的作用以荷载的形式作用于结构。等效荷载法建模简单,不必考虑力筋的具体位置,且网格划分简单。但是,该方法不能考虑力筋对混凝土作用的分布和方向,无法真正反映预应力混凝土结构在外荷载作用下的变形行为。实体力筋法是将力筋和混凝土分别用不同的单元模拟,预应力通过不同的方法施加。

本次分析中采用实体力筋法中的约束方程法完成预应力钢筋的建模,预应力采用降温法进行模拟。该方法比较简单,同时可以设定力筋不同位置的预应力分布,能较好地模拟预应力的损失。预应力钢筋为中强度钢丝束, $E=200$ GPa,线膨胀系数 $\alpha=2 \times 10^{-5}$,预应力 $\sigma_p=400$ MPa,极限强度标准值 $f_{ptk}=800$ MPa,按式(3)计算得到降温 100 °C。

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E\alpha} = 100 \quad (3)$$

4.3 预应力钢筋混凝土梁结果对比

从三种脉冲荷载作用下预应力钢筋混凝土梁跨中最大挠度可以看出(表4),由于预应力的作用,跨中挠度大幅减小。在脉冲荷载为0.52 MPa时,预应力梁最大挠度为1.4 mm,此时除锚固段应力集中造成的混凝土开裂外,梁跨中无裂缝产生;脉冲荷载为0.63 MPa时,预应力梁最大挠度为2.0 mm,混凝土产生轻微的裂缝;脉冲荷载为0.82 MPa时,预应力梁最大挠度为3.38 mm,预应力梁产生浅层裂缝。

表4 预应力钢筋混凝土梁数值模拟结果对比

Table 4 Comparison table of numerical simulation results of prestressed reinforced concrete beams

加载顺序	峰值压力/MPa	最大挠度/mm	试验后外观
1	0.52	1.4	除预应力锚固端外,无裂缝
2	0.63	2.0	微小裂缝
3	0.82	3.38	浅层裂缝

三种工况下,当脉冲荷载卸载至零后,梁跨中的挠度均能恢复至自重状态下的变形量,说明预应力梁在爆炸冲击荷载作用下,仍处于弹性工作状态;这与非预应力钢筋混凝土梁显著不同。

此外,根据混凝土的开裂示意图可以看出(图11),由于预应力的作用,使得梁所受荷载转移,并均布化,预应力改善了梁的受力状态。即预应力梁总的开裂范围大幅减小,裂缝深度也显著降低,但是浅层裂缝的横向分布范围较非预应力钢筋混凝土梁稍大。预应力结构通过人为主动动力,有效地转移了外荷载在结构中的分布,这与学者们对预应力的基本认识是相符的^[28]。

从预应力梁的钢筋轴力图可以看出(图12),在爆炸冲击荷载作用下,大部分应力都由预应力筋来承担,非预应力钢筋的应力较小。同非预应力钢筋混凝土梁一样,梁顶部的纵向钢筋受压,梁底部的纵向钢筋受拉,且跨中位置应力最大;两端支座处,箍筋受压应力较大。

在0.52 MPa的脉冲荷载下,预应力筋的轴向应力最大值为389 MPa,非预应力筋的轴向应力最大值为180 MPa;在0.63 MPa脉冲荷载下,预应力筋的轴向应力最大值为450 MPa,非预应力筋的轴向应力最大值为265 MPa;在0.82 MPa脉冲荷载下,

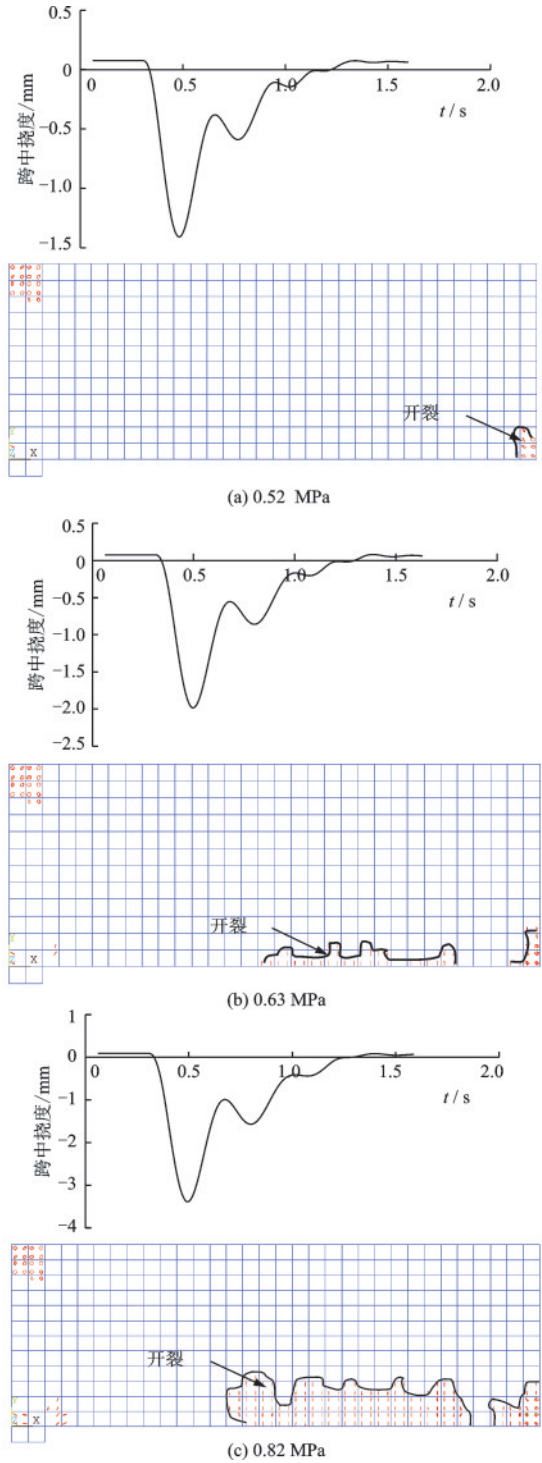


图11 脉冲荷载下预应力梁跨中底部竖向位移时程曲线及开裂示意

Fig.11 Time-history curve and cracking diagram of vertical displacement at the bottom of prestressed beam span under pulse load

预应力筋的轴向应力最大值为559 MPa,非预应力筋的轴向应力最大值为480 MPa。在三种脉冲荷载下,纵向钢筋的轴向应力均未达到其屈服强度600 MPa,纵向钢筋处于弹性受力状态。

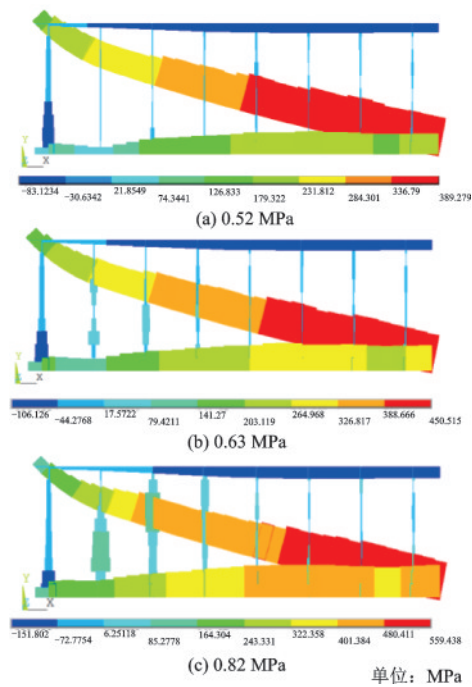


图12 脉冲荷载下预应力混凝土梁钢筋最大应力分布云图
Fig.12 Maximum stress distribution nephogram of prestressed concrete beam reinforcement under pulse load

5 结论

通过ansys软件,利用脉冲荷载法研究了爆炸冲击荷载作用下非预应力钢筋混凝土梁和预应力钢筋混凝土梁的动力响应,经过模拟分析发现:

(1)通过与已有学者试验测试结果的对比验证,瞬态动力分析完全法可用于爆炸冲击荷载的模拟分析,且计算结果能较为合理地反映结构的动力响应规律。

(2)在爆炸荷载作用下,钢筋混凝土梁的跨中底部位置最先发生塑性变形,混凝土容易发生受拉开裂。且随着爆炸荷载的增加,混凝土开裂现象越严重。对于试验梁而言,当爆炸冲击荷载达到0.52 MPa时,梁已产生细微裂缝,钢筋应力接近屈服值,且当爆炸冲击荷载卸载至零后,梁跨中的挠度不能恢复至自重状态下的变形量。

(3)对于预应力钢筋混凝土梁而言,由于预应力筋的存在使得跨中挠度大幅减小,混凝土开裂现象得到显著改善;对于试验梁,在三种爆炸冲击荷载作用下,当卸载至零后,梁跨中的挠度均能恢复至自重状态下的变形量。

(4)在爆炸冲击荷载作用下,大部分应力都由预应力筋来承担,非预应力钢筋的应力较小。同非

预应力钢筋混凝土梁一样,梁顶部的纵向钢筋受压,梁底部的纵向钢筋受拉,且跨中位置应力最大;两端支座处,箍筋受压应力较大。

(5)预应力改善了梁的受力状态,使得梁所受荷载发生转移。即预应力钢筋混凝土梁总的开裂范围大幅减小,裂缝深度也显著降低,但是浅层裂缝的横向分布范围较非预应力钢筋混凝土梁稍大。

参考文献:

- [1] 冯大斌.我国预应力技术发展现状及趋势[C]//第十四届全国混凝土及预应力混凝土学术会议论文集.长沙:中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会,2007:62-68.
Feng D B. Present situation and trend of prestressed technology development in China[C]// Proceedings of the 14th National Conference on Concrete and Prestressed Concrete. Changsha: Concrete and Prestressed Concrete Branch of the Chinese Civil Engineering Society, 2007: 62-68. (in Chinese)
- [2] 张德峰.现代预应力技术在上海地区的发展与应用[C]//第十八届全国混凝土及预应力混凝土学术会议暨第十四届预应力学术交流会论文集.杭州:中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会,2017:168-173.
Zhang D F. Development and application of modern prestressing technology in Shanghai Area[C]// Proceedings of the 18th National Conference on Concrete and Prestressed Concrete and the 14th Symposium on Prestressed Concrete. Hangzhou: Concrete and Prestressed Concrete Branch of the Chinese Civil Engineering Society, 2017: 168-173. (in Chinese)
- [3] 宣越,任恬,王波.预应力技术在结构工程中的应用及发展趋势[J].科技创新导报,2016(3):25-27.
Xuan Y, Ren T, Wang B. Application and development trend of prestress technology in structural engineering [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016 (3): 25-27. (in Chinese)
- [4] 李晨光,王泽强,张开臣.预应力工程施工技术发展展望[J].施工技术,2018,47(6):33-40.
Li C G, Wang Z Q, Zhang K C. Development and expectation on construction technology of prestressed projects [J]. Construction Technology, 2018, 47(6): 33-40. (in Chinese)
- [5] 张志,孟少平,于琦,等.边柱加强型预应力混凝土框架结构振动台试验研究[J].振动与冲击,2012,31(16):111-116.
Zhang Z, Meng S P, Yu Q, et al. Shaking table test of a side-column-strengthened prestressed concrete frame structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31

- (16):111-116.(in Chinese)
- [6] 余志武,罗小勇.水平低周反复荷载作用下无粘结部分预应力混凝土框架的抗震性能研究[J].建筑结构学报,1996,17(2):30-36.
Yu Z W, Luo X Y. Study on seismic behavior of unbonded partially prestressed concrete frame under horizontal low cyclic loading [J]. Journal of Building Structure, 1996, 17(2): 30-36.(in Chinese)
- [7] 李志方,王志浩,李蓬.快速荷载下无粘结预应力混凝土梁的延性[J].建筑结构,1999(7):22-24.
Li Z F, Wang Z H, Li P. Ductility of unbonded prestressed concrete beams under rapid load [J]. Building Structure, 1999(7): 22-24.(in Chinese)
- [8] Burns N H, Ripperger E A, Veeraiiah C. Dynamic behavior and resistance of prestressed split beams[J]. Naval Civil Engineering Laboratory, 1972, 5: 26-31.
- [9] Enrin H. Dynamic flexural resistance of prestressed concrete beam, proceedings of Asia Pacific conference on shock & impact loads on structures[J]. Singapore, 1996, 1: 33-38.
- [10] William F Cofer, Debra S Matthews, David I McLean. Effects of blast loading on prestressed girder bridges [J]. Shock and Vibration, 2012, 19: 1-18.
- [11] Natio C, Beacraft M, Hoemann J, et al. Blast performance of single-span precast concrete sandwich wall panels[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(12): 04014096.
- [12] Choi Ji-Hun, Choi Seung-Jai, Jay KimJang-Ho, et al. Evaluation of blast resistance and failure behavior of prestressed concrete under blast loading[J]. Construction and Building Materials, 2018(173): 550-572.
- [13] 李砚召,王肖钧,张新乐,等.预应力混凝土结构的抗爆性能试验研究[J].实验力学, 2005, 20(2): 179-185.
Li Y Z, Wang X J, Zhang X L, et al. Test study on anti-detonation quality of prestressed concrete structure [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(2): 179-185.(in Chinese)
- [14] 程守玉.冲击荷载作用下预应力混凝土梁的性能及设计方法研究[D].南京:南京理工大学,2008.
Cheng S Y. The performance and design method study of prestressed concrete beam under impact load function [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2008.(in Chinese)
- [15] 娄凡,预应力混凝土连续T梁的抗爆性能试验研究[D].南京:东南大学,2018.
Lou F. Experimental study on blast resistance of prestressed concrete continuous T beams [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.(in Chinese)
- [16] Billek A, Marjanishvili S. The evaluation of pre-stressed pre-cast panels subjected to blast[J]. Structures Congress, 2011, doi: 10.1061/41171(401)118.
- [17] Chen W S, Hao H, Chen S Y. Numerical analysis of prestressed reinforced concrete beam subjected to blast loading[J]. Materials and Design, 2015(65): 662-674.
- [18] Maazoun A, Vantomme J, Matthys S. Damage assessment of hollow core reinforced and prestressed concrete slabs subjected to blast loading [J]. Procedia Engineering, 2017(199): 2476-2481.
- [19] Shiravand M R, Parvanehro P. Numerical study on damage mechanism of post-tensioned concrete box bridges under close-in deck explosion [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 81: 103-116.
- [20] 李忠献,师燕超.建筑结构抗爆分析理论[M].北京:科学出版社,2015.
Li Z X, Shi Y C. Blast analysis of building structures [M]. Beijing: Science Press, 2015.(in Chinese)
- [21] 李宝岩.爆炸荷载下预应力T梁动态响应研究[D].长沙:国防科技大学,2018.
Li B Y. Dynamic response study of prestressed t-beams under blasting loads [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.(in Chinese)
- [22] 人民防空地下室设计规范:GB 50038—2005[S].北京:中国计划出版社,2005.
- [23] 陈肇元.爆炸荷载作用下的混凝土结构性能与设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
Chen Z Y. Performance and design of concrete structure under explosion load [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.(in Chinese)
- [24] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [25] 江见鲸,陆新征,叶列平.混凝土结构有限元分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
Jiang J J, Lu X Z, Ye L P. Finite element analysis of concrete structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.(in Chinese)
- [26] 王新敏.ANSYS结构动力分析与应用[M].北京:人民交通出版社,2014.
Wang X M. Structural dynamic analysis and application with ANSYS [M]. Beijing: China Communications Press, 2014.(in Chinese)
- [27] 王新敏.ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
Wang X M. Numerical analysis of engineering structure with ANSYS [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.(in Chinese)
- [28] 熊学玉.预应力混凝土结构理论与设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.
Xiong X Y. Theory and design of prestressed concrete structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.(in Chinese)

(本文编辑:池营营)