

文章编号:1001-4888(2005)02--

# 预应力混凝土结构抗爆性能试验研究<sup>\*</sup>

李砚召<sup>1,2</sup>, 王肖钧<sup>1</sup>, 张新乐<sup>2</sup>, 曹海<sup>2</sup>, 郭晓辉<sup>2</sup>

(1. 中国科技大学 力学与机械工程系, 安徽合肥 230026; 2. 洛阳水利工程技术研究所, 河南洛阳 471023)

**摘要:** 随着我国城市建设的飞速发展, 人们迫切希望能将预应力混凝土结构用于平战结合的大跨度地下工程。但由于迄今为止国内外对预应力混凝土结构的抗爆性能知之甚少, 长期以来预应力混凝土在抗爆结构中的应用一直是个禁区。本文给出了一例后张无粘结部分预应力混凝土梁板柱形结构模型在平面装药爆炸条件下的大比尺化爆相似模拟试验。模型的几何相似比例为 1:5, 加载平面空气冲击波超压分别为 70 kPa、130 kPa 和 320 kPa。试验结果给出了在完全弹性状态、荷载略高于设计承载力状态和接近极限破坏状态下无粘结部分预应力混凝土结构的宏观试验现象和大量实测试验参数和实测波形曲线, 并进行了简单的数据分析。试验结果表明: 设计合理的预应力混凝土梁板柱形结构具有很好的延性, 不会发生令人担心的脆性破坏, 完全可以用于抗爆结构。

**关键词:** 预应力混凝土; 抗爆结构; 动力性能; 试验研究; 平面装药

**中图分类号:** O383      **文献标识码:** A

## 1 引言

改革开放以来, 随着我国综合国力的不断增强, 城市建设飞速发展, 地下商场、地下停车场、地下娱乐厅等大跨度设施逐渐增多。这些地下工程由于跨度较大, 难以达到较高的抗力, 在强动载特别是爆炸荷载作用下很难保证结构及内部人员和设施的安全, 若采用普通钢筋混凝土结构, 则必须增大结构的截面尺寸, 增加基坑的开挖深度, 这势必提高工程建设的投资。

预应力混凝土结构具有截面尺寸小, 承载能力强, 抗裂性能好, 空间利用率高和综合经济效益显著等优点, 更适合于大跨度结构。因此许多设计和应用部门都迫切希望能将预应力混凝土结构用于大跨度地下工程建设。但是, 由于迄今为止国内外在预应力混凝土结构抗爆性能方面的研究开展得很少, 人们担心预应力混凝土结构延性低、易发生脆性破坏, 所以, 长期以来预应力混凝土在抗爆结构中的应用一直是个禁区。因此, 开展预应力混凝土结构抗爆性能的研究具有十分重要的意义<sup>[1~4]</sup>。

## 2 预应力混凝土结构抗爆性能试验概况

### 2.1 试验目的

为了研究预应力混凝土结构的抗爆性能, 我们首先开展了一系列预应力混凝土基本结构构件的静动载试验研究<sup>[5,6]</sup>, 并取得了一些有关预应力混凝土基本结构构件抗爆性能的试验结果。本试验是在这些研究成果的基础上设计的, 目的在于检验预应力混凝土基本结构构件抗爆性能研究成果在整体结构中的应用效果。

\* 收稿日期: 2004-06-06; 修订日期: 2005-01-17

基金项目: 国家人防科研九五计划项目

通讯作者: 李砚召(1962—), 男, 中国科学技术大学博士, 洛阳水利工程技术研究所副研究员, 从事结构抗爆性能研究。

## 2.2 试验模型平面布置

在实际地下工程中经常采用梁、板、柱体系多跨结构。为能较真实地模拟实际工程结构，并兼顾现有试验条件，经过综合考虑，整体结构模型选用2跨×2跨，即主框架梁取2跨，次梁也取2跨连续梁；模型比例为1/5，模型主框架梁跨度为1.62m，次梁跨度为2.4m，次梁间距为0.54m，模型顶部覆土0.3m。模型的结构平面布置如图1所示。

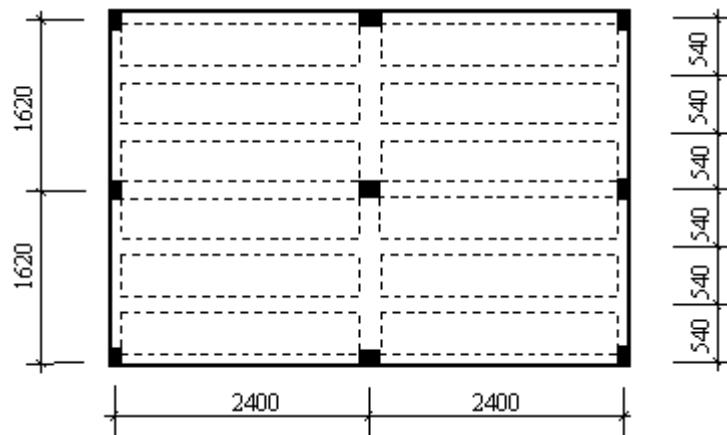


图1 模型结构平面布置俯视图

Fig. 1 Plan form of model structure

## 2.3 模型构件尺寸

模型各构件的尺寸取值如下：

顶板厚度8cm；底板厚度30cm；所有柱高均为1m；主梁跨度1.62m，梁高21cm，中主梁腹板宽20cm，边主梁腹板宽12cm；次梁跨度2.4m，边次梁宽15cm，高18cm(含顶板的厚度)，其余次梁宽12cm，高17cm(含顶板的厚度)。

## 2.4 模型构件配筋

模型的承载力按覆土上表面动荷载为0.1 MPa(等效静荷载为170kPa)设计。混凝土采用C50，预应力筋采用强度为1860 MPa的钢绞线，钢绞线的初始张拉预应力取 $0.60 \times 1860$  MPa，所有梁均为后张无粘结部分预应力混凝土梁。混凝土保护层厚度：梁和底板纵筋20mm，梁钢绞线40mm，顶板纵筋15mm；梁中钢绞线采用抛物线布置，跨中抛物线开口向上，支座处抛物线开口向下，两抛物线光滑连接。以上述荷载和模型构件的尺寸及材料参数，经计算和检验<sup>[7,8]</sup>，预应力配筋为：中主梁配2根 $\varphi 12.7$ 的钢绞线，边主梁配1根 $\varphi 12.7$ 的钢绞线，边次梁配1根 $\varphi 12.7$ 的钢绞线，其余次梁配1根 $\varphi 15.24$ 的钢绞线。主梁和次梁中的钢绞线布筋形式相同，其布筋形式如图2所示。梁中的非预应力筋配置见表1。梁在不同截面处的预应力度PPR值见表2。顶板及底板均为双层配筋，顶板沿平行于框架梁方向的配筋为 $\varphi 6.5 @ 170$ ，沿平行于次梁方向的配筋为 $\varphi 6.5 @ 180$ ，底板沿两个方向的配筋均为 $\varphi 12 @ 200$ 。

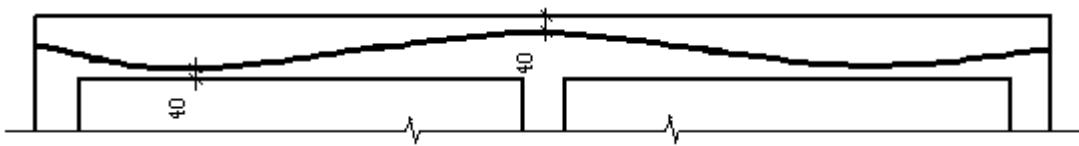


图2 梁中的钢绞线布筋形式示意图

Fig. 2 Sketch of steel strand in the beam

## 2.5 加载方法及荷载取值

本试验的试验模型构筑在地面以下，模型结构顶面覆土30cm，覆土上表面与自然地面平，平面装药加载面在覆土的上表面，加载面积长5.52m，宽4.04m，加载方法采用化爆平面装药方法加载<sup>[9]</sup>，在覆土的上表面即自然地面上产生一竖直向下传播的平面波，以模拟核爆炸空气冲击波均布荷载对预应力混凝土整体结构的作用。平面装药加载试验布置如图3所示。加载平面波入射超压分别为0.07 MPa、

0.13 MPa 和 0.32MPa, 正压作用时间 $\geqslant 100$  ms。

表 1 梁的非预应力筋配筋一览表  
Table 1 Un-prestress reinforcing bar in the beam

位置		中主梁	边主梁	边次梁	其余次梁
梁跨中	上部	2Φ14	2Φ14	2Φ12	2Φ14
	下部	2Φ12+1φ10	2Φ10	2Φ12	2Φ12
中间支座	上部	4Φ14	2Φ14	Φ14+2Φ12	1Φ16+2Φ14
	下部	2Φ12+1φ10	2Φ10	2Φ12	2Φ12

表 2 梁在不同截面处的预应力度 PPR 值  
Table 2 Prestress degree of the beam at different sections

截面位置	中主梁	边主梁	其余次梁	边次梁
最大正弯矩处	69%	66.5%	68%	67%
最大反弯矩处	50%	50%	50%	50%

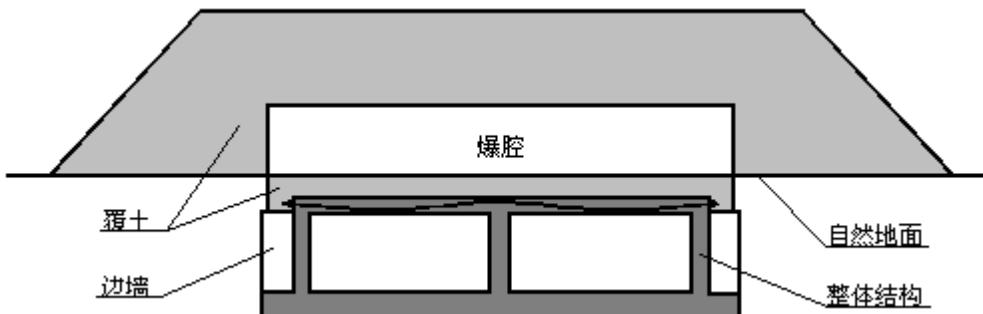


图 3 平面装药加载试验布置剖面图  
Fig. 3 Sketch of profile of plane charge loading

## 2.6 测量参数

整体结构试验加载前测量的静态参数有: 预应力筋的有效预应力, 主梁跨中、次梁跨中和板跨中的反挠度, 结构在未覆土前和覆土后的振动参数等。

试验加载时测量的动态参数有: 爆腔的入射空气冲击波超压, 结构表面的压力, 预应力钢绞线的拉力, 主梁跨中、次梁跨中和板跨中的绝对位移, 主次梁受压钢筋和受拉钢筋的应变, 受压区混凝土的应变, 梁底面跨中的加速度等。

## 3 试验结果

### 3.1 第一炮

全部试验共进行了三炮, 第一炮实测爆腔空气冲击波超压如图 4, 超压峰值为 0.07 MPa, 这是对结构承载力的最低要求。主梁、次梁钢筋的拉应变和压应变均不大于  $200\mu\epsilon$ , 主梁、次梁和顶板混凝土应变均较小, 一般为  $200\sim 300\mu\epsilon$ , 主梁靠近中柱处下底面混凝土受压应变略大, 为  $550\mu\epsilon$ , 钢绞线拉力基本无变化, 加载过程中结构始终处于弹性状态, 结构上所有位置均无任何肉眼可见裂纹。

### 3.2 第二炮

第二炮主要是检验结构在略大于设计荷载时的工作情况, 实测压力为 0.13 MPa, 实测爆腔空气冲击波超压如图 5。其它的典型实测波形见图 6~图 9。

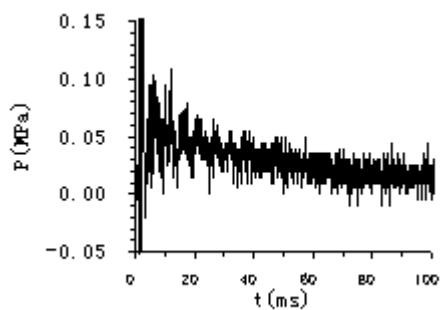


图4 第1炮实测空气冲击波超压  
Fig. 4 Actual air-shock wave of first blast

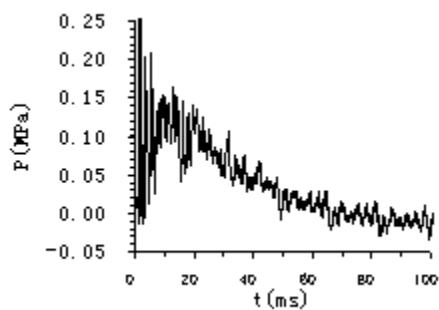


图5 第2炮实测空气冲击波超压  
Fig. 5 Actual air-shock wave of second blast

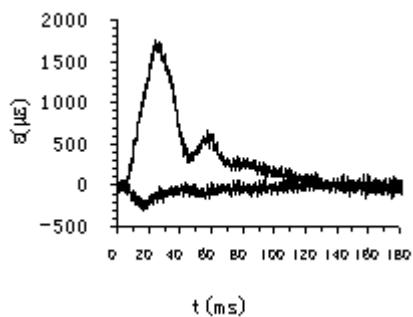


图6 主梁跨中受拉和受压钢筋的应变  
Fig. 6 Strain history of tension/compression bar at the middle of main girder

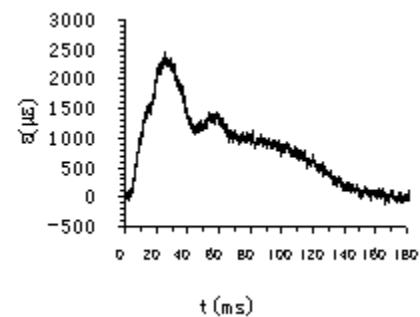


图7 主梁支座处压区混凝土压应变  
Fig. 7 Concrete strain history in the compressive region of main girder

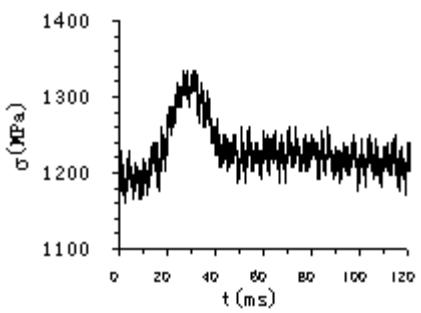


图8 次梁中钢绞线的应力曲线  
Fig. 8 Stress history of steel strand at the middle of junior beam

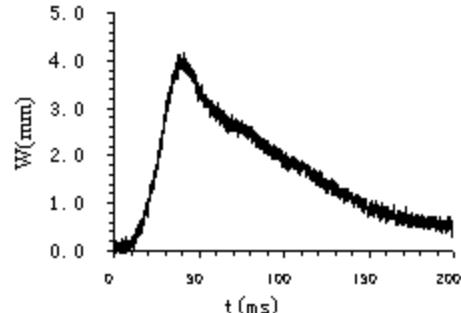


图9 次梁跨中的挠度  
Fig. 9 Deflection history at the middle of junior beam

主要参数的实测结果见表3。表中顶板中心是指以相临两主梁和相临两次梁为边的矩形顶板的几何中心。

### 3.3 第三炮

第三炮实测爆腔空气冲击波超压为0.32MPa，实测空气冲击波典型波形见图11。爆后模型破坏，顶板上表面在中柱上方出现冲击破坏环状裂缝，在中主梁处出现两条平行于主梁方向的弯曲拉伸裂缝，在中主梁与两边主梁之间等分处出现两条弯曲压碎区，顶板破坏实况如图12的照片所示。顶板底面及所有主梁和次梁的跨中均出现弯曲拉伸裂缝，所有主梁及次梁均在端部出现剪切破坏斜裂缝，所有的柱在与梁交接处均出现一定程度的压碎现象，主梁和次梁跨中及柱与梁的交接处局部有混凝土碎块剥离，

主梁跨中的最大挠度为22mm,次梁跨中的最大挠度为147.5mm,次梁跨中的最小挠度为69.5mm,模型内部的破坏实况如图13的照片所示。但是,无论主梁、次梁、顶板和立柱没有任何一根(块)构件完全断裂,结构没有坍塌,并且仍具有一定的承载能力。

表3 第二炮主要参数的实测结果一览表

Table 3 Experiment results of second blast

序号	测量位置	参数名称	实测峰值	实测波形
1	中主梁跨中最大弯矩处受拉钢筋	应变	$1700\mu\epsilon$	见图6上
2	中主梁跨中最大弯矩处受压钢筋	应变	$-220\mu\epsilon$	见图6下
3	中主梁上中柱支座处受拉钢筋	应变	$2000\mu\epsilon$	类似图6上
4	中主梁上中柱支座处受压钢筋	应变	$-600\mu\epsilon$	类似图6下
5	次梁跨中最大弯矩处受拉钢筋	应变	$1500\mu\epsilon$	类似图6上
6	次梁跨中最大弯矩处受压钢筋	应变	$-130\mu\epsilon$	类似图6下
7	次梁上中柱支座处受拉钢筋	应变	$2300\mu\epsilon$	类似图6上
8	次梁上中柱支座处受压钢筋	应变	$-1400\mu\epsilon$	类似图6下
9	中主梁上中柱支座处压区混凝土	应变	$-2300\mu\epsilon$	见图7上
10	中主梁跨中最大弯矩处压区混凝土	应变	$-900\mu\epsilon$	类似图7上
11	次梁上中柱支座处压区混凝土	应变	$-2350\mu\epsilon$	类似图7上
12	次梁跨中最大弯矩处压区混凝土	应变	$-840\mu\epsilon$	类似图7上
13	顶板中心压区混凝土应变	应变	$280\mu\epsilon$	见图7下
14	次梁中钢绞线	应力增量	120MPa	见图8
15	中主梁中钢绞线	应力增量	120MPa	类似图8
16	次梁跨中	挠度	4mm	见图9
17	中主梁跨中	挠度	2mm	类似图9
18	顶板中心	挠度	7mm	类似图9
19	顶板及梁的下表面可见裂纹	裂纹宽度	$<0.06\text{mm}$	见图10

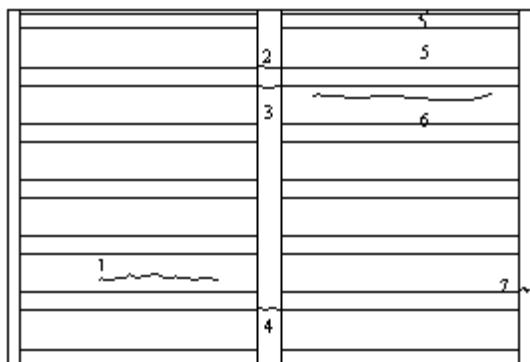


图10 顶板及梁的下表面裂缝分布图

Fig. 10 Undersurface crack profile of top plate &amp; beams

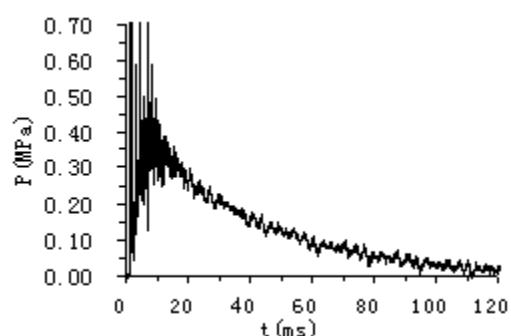


图11 第三炮实测空气冲击波超压波形

Fig. 11 Actual air-shock wave of third blast

#### 4 主要研究结论

查有关材料手册可知:2级钢筋的静态屈服强度为335 MPa,弹性模量为 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ,动态强度提高系数为1.35,由此可计算出其动态屈服应变为 $2260\mu\epsilon$ 。而第2炮的实测数据表明:除次梁LL-1上中柱支座处受拉钢筋的应变峰值为 $2300\mu\epsilon$ ,刚刚达到受拉屈服外,其它所有梁的受拉钢筋均处于弹性状态。此时次梁的最大挠度仅为7 mm,第3炮次梁的实测最大挠度高达147.5 mm,最小挠度也达

69.5 mm,因此梁的位移延性达9.9~21.1。

本试验中预应力混凝土主梁的高仅21cm,若采用普通钢筋混凝土结构,要承担同样大的荷载,则主梁的高度约需30cm。



图12 顶板上表面破坏实况

Fig. 12 Real destroy condition at the top surface of the structure



图13 结构内部破坏实况

Fig. 13 Real destroy condition within the structure

在此试验之前,我们进行的预应力混凝土梁的平面装药加载试验<sup>[6]</sup>的研究结果表明:预应力混凝土梁的预应力强度 PPR 合理取值范围为 50%~70%,初始有效预应力的合理取值范围为钢绞线标准抗拉强度的 0.50~0.60 倍。本试验中所有梁的预应力强度均在 50%~70%,初始有效预应力均为钢绞线标准抗拉强度的 0.60 倍。

根据相似理论可以得出:若模型与原型之间材料相同、荷载峰值相同、荷载正压作用时间的相似比例与几何相似比例相同,当动荷载远远大于静荷载时,大比尺模拟试验的模型结构与原型结构具有承担相同面荷载的能力。由上述三炮预应力混凝土结构平面装药加载试验结果的分析可以得出如下结论:

1) 对于同样的设计荷载,若采用部分预应力混凝土结构,梁的高度可比普通钢筋混凝土结构减小约三分之一。

2) 预应力混凝土整体结构和预应力混凝土梁一样,其预应力强度 PPR 的合理取值范围为 50%~70%,初始有效预应力的合理取值范围为钢绞线标准抗拉强度的 0.50~0.60 倍。

3) 对于无粘结部分预应力混凝土结构,当预应力强度和初始有效预应力在上述合理取值范围内时,能很好地承受设计的爆炸动荷载并确保结构安全,即便荷载大于设计 30%,它仍能正常工作,并可保证结构的安全,不发生破坏。

4) 合理的无粘结部分预应力混凝土结构具有很好的延性,位移延性可达 9.9 以上,不会发生令人担心的脆性破坏,完全可以用于抗爆结构。

5) 合理的无粘结部分预应力混凝土结构,在 3 倍的设计荷载作用下,虽然遭受严重破坏,仍具有一定的承载能力,不会坍塌,不至于对结构内的设备和人员造成毁灭性的破坏。

## 参考文献:

- [1] 王志浩,李志方. 无粘结预应力混凝土梁在快速加载下的抗弯性能[J]. 防护工程,1998. 1(WANG Zhihao, LI Zhi-fang. Bending Behavior of Unbonded Prestressed Concrete Beam under Quick Loadings. Protective Engineering, 1998. 1 (in Chinese))
- [2] 李砚召,张新乐,曹海. 预应力混凝土结构在人防工程中的应用研究 [R]. 中国国防科学技术报告,2002. 12(LI Yanzhao, ZHANG Xinle, CAO Hai. Study on Applications of Prestressed Concrete Structures in Civil Air Defense Engineering. National Defense Science and Technology Bulletin of China, 2002. 12(in Chinese))
- [3] 郑文忠. 预应力混凝土结构抗震性能研究概况 [J]. 哈尔滨建筑大学学报,1996,29(4)(ZHENG Wenzhong. Research Survey on Aseismatic Characteristic of Prestressed Concrete Structures. Journal of Haerbin Architecture University, 1996,29(4)(in Chinese))

- [4] 李砚召. 预应力混凝土结构在人防工程中的应用研究调研报告 [R]. 中国国防科学技术报告, 1998. 10 (LI Yanzhao. Survey Report of Study on Applications of Prestressed Concrete Structures in Civil Air Defense Engineering. National Defense Science and Technology Bulletin of China, 1998. 10(in Chinese))
- [5] 郭晓辉, 张新乐, 李砚召. 预应力混凝土梁静载试验报告 [R]. 中国国防科学技术报告, 2002. 6 (GUO Xiaohui, ZHANG Xinle, LI Yanzhao. Static Test Experiment Study on Prestressed Concrete Beams. National Defense Science and Technology Bulletin of China, 2002. 6(in Chinese))
- [6] 李砚召, 郭晓辉, 曹海. 预应力混凝土梁平面装药加载试验研究 [R]. 中国国防科学技术报告, 2002. 12 (LI Yanzhao, GUO Xiaohui, CAO Hai. Experimental Study on Prestressed Concrete Beams under Plane Charge Loading. National Defense Science and Technology Bulletin of China, 2002. 12(in Chinese))
- [7] 李砚召, 任辉启, 赵玉祥, 郭晓辉. 有粘结部分预应力混凝土抗弯构件正截面强度设计计算 [C]. 中国土木工程学会防护工程学会第四届理事会暨第七次学术年会论文集, 井冈山, 2000 (LI Yanzhao, REN Huiqi, ZHAO Yuxiang, GUO Xiaohui. Computation of Strength Design for Nominal Section of Flexural Members of Bonded Partial Pre-stress Concrete Structure. 7th Annual Conference Proceedings of Protective Engineering Institute of Civil Engineering Academy of China, Jinggangshan, 2000(in Chinese))
- [8] 李砚召, 张新乐. 预应力混凝土结构抗动载设计计算方法 [R]. 中国国防科学技术报告, 2002. 12 (LI Yanzhao, Zhang Xinle. Design Method for Prestressed Concrete Structures under Dynamic Loadings [R]. National Defense Science and Technology Bulletin of China, 2002. 12(in Chinese))
- [9] 总参工程兵科研三所, 中华人民共和国军用标准 GJBz 20129-93[S]. 平面装药爆炸模拟核爆炸空气冲击波试验规程. 中国人民解放军总参谋部发布, 1993 (Engineer Third Institute of General Staff. Test Code on Plane Charge Explosion Simulating Nuclear Explosion Air-Blast [S]. Military Standard, GJBz 20129-93. Issued by General Staff of P. R. C. 1993(in Chinese))

## Test Study on Anti-detonation Quality of Prestressed Concrete Structure

LI Yan-zhao<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-jun<sup>1</sup>, ZHANG Xing-le<sup>2</sup>, CAO Hai<sup>2</sup>, GUO Xiao-hui<sup>2</sup>

(1. Dept. of Mechanics and Mechanical Engineering, USTC, Hefei 230026, China;

2. Luoyang Institute of Hydraulic Engineering and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** With the fast developing of city construction, it is urgently expected that prestressed concrete structure can be applied to large span underground engineering designed for peace time and war time. However, the application of prestressed concrete structures in blast resistant structure still belongs to forbidden field since the anti-detonation quality of prestressed concrete structure has been known only a little both at home and abroad so far. A large-scale simulation test for post-tension unbonded partial prestressed concrete structure under plane charge loadings is presented in the paper. Geometrical simulative ratio of the model 1:5 was used in the tests. The model was loaded three times by different charges. The peak air shock overpressures in the tests were 70, 130 and 320 kPa respectively. Considerable macroscopic phenomena, some key parameters, and a lot of stress/strain waves of the unbonded prestressed concrete structure were obtained at different blast loadings under states of elastic, a little bigger than that designed, and close to the ultimate destruction, respectively. Brief analysis of the test datum was carried out. The results shown that: (1) prestressed concrete structure (which is made up of reasonable designing beams, slabs and posts) is of good ductility, (2) this kind of prestressed concrete structure can be used safely as anti-detonation structure and the brittle failure which we are afraid would not arise.

**Key words:** prestressed concrete; anti-detonating structure; dynamic properties; test study; plane charge