文章编号：1001-1455(2006)03-0256-06

部分预应力混凝土梁抗冲击性能试验研究*

李砚召[1,2]，王肖钧[1]，郭晓辉[2]，曹 海[2]，赵 凯[1]
(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系，安徽 合肥 230026；
2. 洛阳水利工程技术研究所，河南 洛阳 471023)

摘要：通过在跨中施加一落锤冲击荷载的方法，研究了 3 根无粘结部分预应力混凝土梁的抗冲击性能，给出了典型的实测波形曲线，测得了无粘结部分预应力混凝土试验梁在落锤冲击荷载作用下的动态位移延性和极限承载能力，分析了落锤重力势能对预应力混凝土梁动力性能的影响，并根据相似模拟理论，得出了与试验梁相似的 12 m 跨度的实际无粘结部分预应力混凝土梁的极限抗冲击承载能力。肯定了无粘结部分预应力混凝土试验梁具有很好的抗冲击性能，不会发生脆性破坏，完全可用于大跨度地下结构。

关键词：爆炸力学；抗冲击性能；试验研究；预应力混凝土梁；动力特性；落锤
中图分类号：O383 **国标学科代码**：130・3520 **文献标志码**：A

1 引 言

随着我国城市建设的飞速发展，地下大跨度结构逐渐增多。而在战争或自然灾害发生时，城市建筑大片倒塌时落下的构件或飞散的碎片不可避免地会撞击周围的地下工程。部分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，非常适合大跨度结构，因此设计和应用部门迫切希望将部分预应力混凝土结构用于大跨度地下工程。目前，人们对预应力混凝土结构的抗冲击性能了解不多，担心预应力混凝土结构延性低、在强冲击荷载作用下会发生脆性破坏，因此对预应力混凝土在地下大跨度工程中的应用一直持谨慎和回避的态度。到目前为止，国内尚未进行过此类研究，国外也只有美国海军土木工程试验室和日本北海道发展局等[1~4]少数几个单位开展过这方面的研究。因此开展部分预应力混凝土梁抗冲击性能的研究对于加快预应力混凝土结构在大跨度地下工程中的应用具有十分重要的意义。

2 试验概况

本试验采用落锤在梁的跨中施加一冲击荷载，通过测量落锤的冲击力、预应力混凝土梁的混凝土应变、预应力钢绞线的拉力、普通钢筋的应变、梁跨中的挠度和加速度等研究了 3 根无粘结部分预应力混凝土简支梁的抗冲击性能。

2.1 试验梁的尺寸及配筋

试验所用无粘结部分预应力混凝土梁的几何尺寸为：长 2.6 m，宽 22 cm，高 16 cm。混凝土强度等级为 C50；非预应力筋配筋采用普通光面钢筋，压区配筋为 2∅8，拉区配筋为 2∅12，箍筋为∅6@100，纵向非预应力筋的混凝土保护层为 2 cm；预应力筋采用强度等级为 1860 MPa 的钢绞线，布筋形式为开口向上的抛物线，最低点位于跨中，混凝土保护层厚度为 4 cm，在梁的两端面钢绞线通过端面的形心。

2.2 试验装置与布置

试验梁两端置于钢筋混凝土边墙上，边墙厚 20 cm，经中心到两边墙的距离为 2.4 m，在梁的正上方设置落锤冲击试验架，图 1(a)为预应力混凝土梁落锤试验装置示意图，图 1(b)为力传感器及传力装置。落锤下落时首先撞击钢球，通过钢球、传力钢板和传力钢板下的沙袋将落锤的冲击力均匀地传递到梁的

* **收稿日期**：2005-03-21；**修回日期**：2005-07-28
作者简介：李砚召(1962—)，男，博士。

跨中。试验用落锤质量分别为 45 kg 和 90 kg，落锤的下落高度 H 取 1、2、3、4 m 和 5 m。

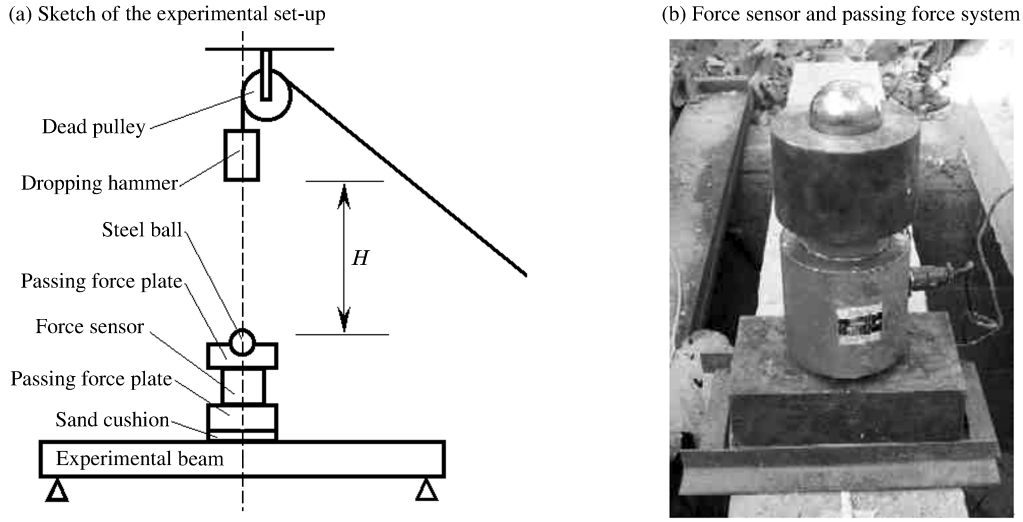


图 1　预应力混凝土梁抗落锤试验装置

Fig. 1　The experimental set-up of prestressed concrete beam against dropping hammer

3　试验结果与分析

3.1　典型的试验波形

大量的试验波形可以表明：落锤的冲击力及冲击压应力具有明显的双峰特性，其冲击作用时间变化不大，基本在 1～3 ms 之间，平均约为 2 ms，梁中钢绞线的拉力变化幅度介于 165～210 kN 之间，对应于钢绞线标准抗拉强度的 63%～84%，其拉力变化的持续时间远大于冲击力的作用时间，可达到冲击力作用时间的十几倍之多。钢筋和钢绞线的应变及梁跨中位移的变化与钢绞线拉力的变化具有大致相似的规律，持续时间也与钢绞线拉力的持续时间基本相同。图 2 是一些典型的实测波形曲线，图中的所有应变波形均以压为正，以拉为负。

3.2　落锤重力势能对预应力混凝土梁动力性能的影响

试验结果表明：当重力势能介于 900～4500 J 之间的落锤作用于本试验的预应力混凝土梁上时，梁的跨中峰值位移、钢绞线峰值拉力、顶面混凝土峰值应变、跨中受拉钢筋应变（绝对值）均随落锤重力势能 E 的增加近似以线性规律增加，如图 3 所示。

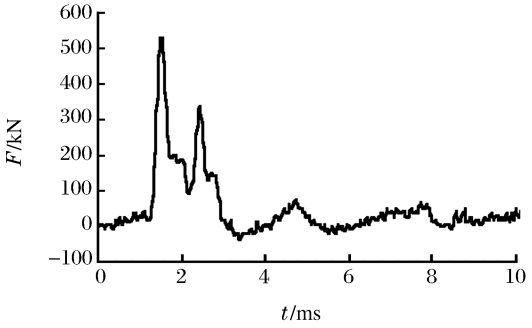
经拟合梁的跨中峰值位移、钢绞线峰值拉力、顶面混凝土峰值应变、跨中受拉钢筋应变与落锤重力势能 E 的关系可用如下函数表达：(1) $W=0.0091E-5.35$，相关系数为 0.99；(2) $W=0.0120E-151.02$，相关系数为 0.98；(3) $W=2.1665E-388.95$，相关系数为 0.94；(4) $W=-1.1667E-575.00$，相关系数为 0.94。

3.3　预应力混凝土梁的抗冲击位移延性

当质量 45 kg 的落锤从 2 m 高处落下时，预应力混凝土梁受拉钢筋的实测峰值应变为 0.00155（稍大于受拉钢筋的动载屈服应变 0.00150），对应的梁跨中的峰值挠度为 5 mm，因此预应力混凝土试验梁的屈服挠度近似等于 5 mm，当质量 90 kg 的落锤从 5 m 高处落下时，预应力混凝土梁接近极限破坏状态，此时梁跨中的峰值挠度为 46 mm，故预应力混凝土试验梁的极限挠度近似等于 46 mm。由此可得预应力混凝土试验梁的抗冲击位移延性 $\beta=46/5=9.2$，与相同预应力混凝土试验梁的抗爆炸位移延性相差很小。

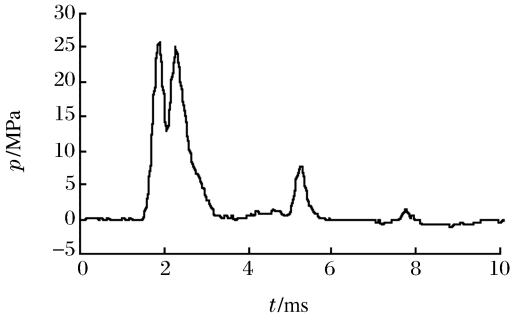
3.4　预应力混凝土梁的抗冲击承载能力

(1) 地下工程的抗冲击标准。



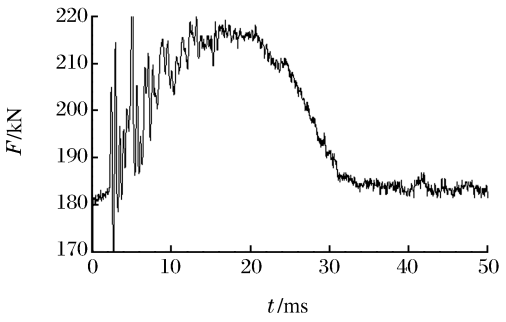
(a) 落锤冲击力

(a) Impact force caused by a dropping hammer



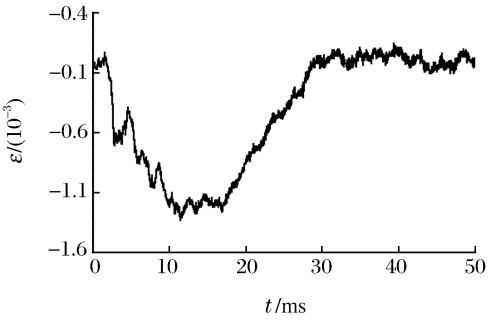
(b) 梁跨中表面压应力

(b) Compressive stress on top surface of beam's middle



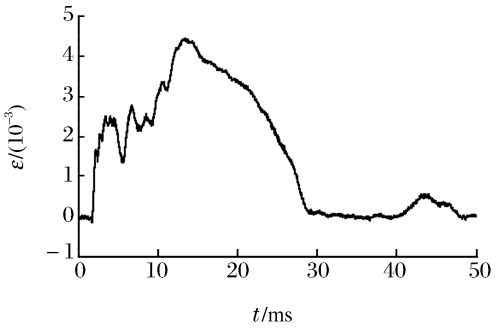
(c) 梁端部钢铰线拉力

(c) Tensile force of steel strand in beam's end



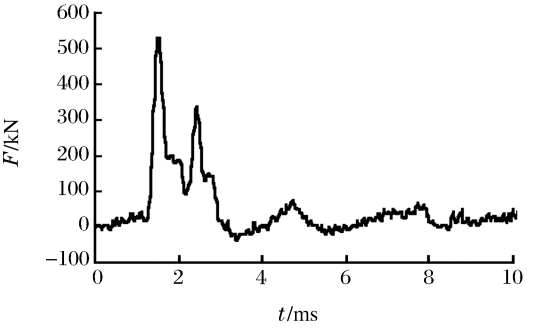
(d) 梁跨中钢铰线拉应变

(d) Tensile strain of steel strand in beam's middle



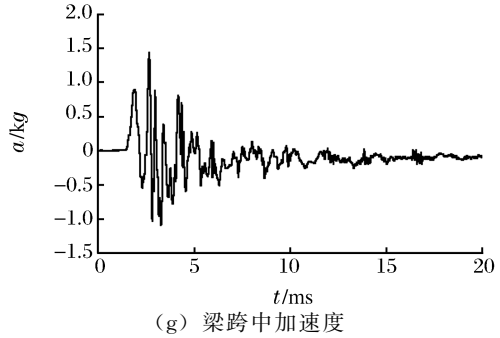
(e) 梁跨中上表面混凝土压应变

(e) Concrete's compressive strain on top surface of beam's middle



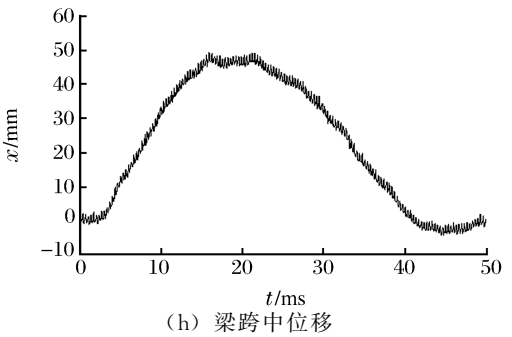
(f) 梁跨中下部钢筋拉应变

(f) Lower rebar's tensile strain in beam's middle



(g) 梁跨中加速度

(g) Acceleration of beam's middle

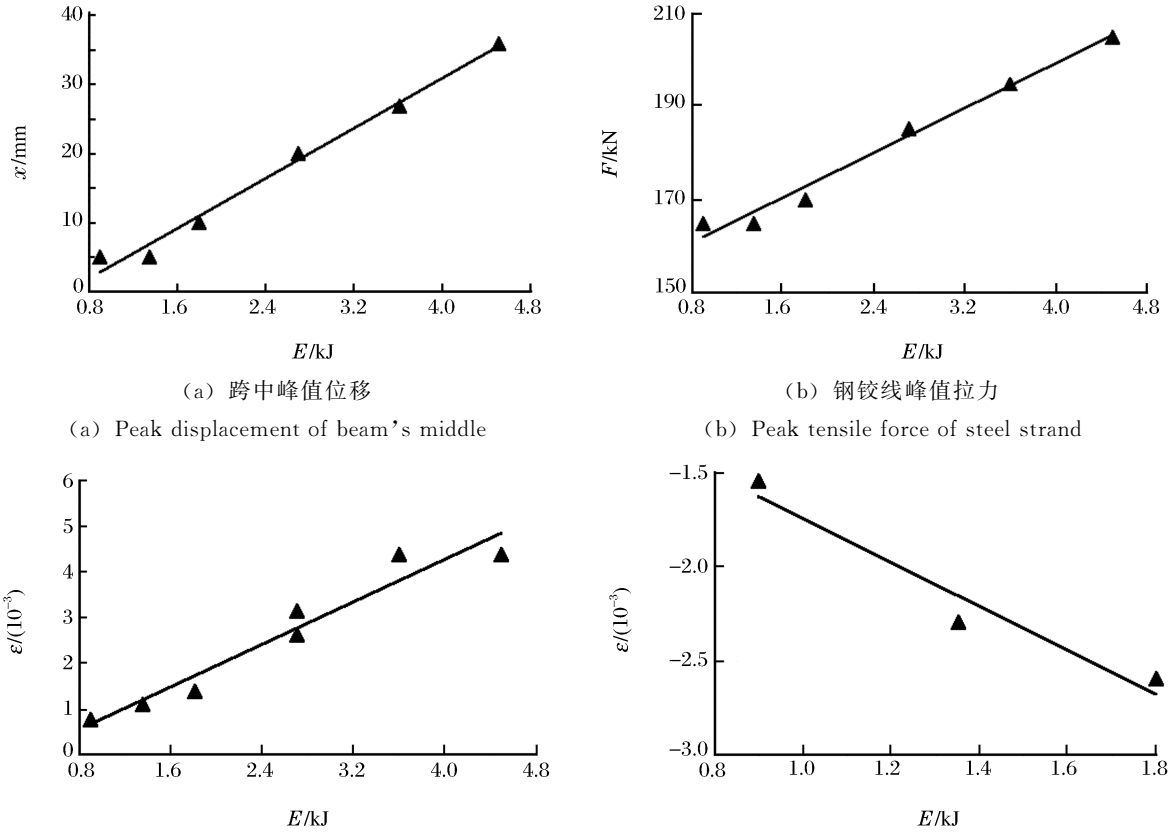


(h) 梁跨中位移

(h) Displacement of beam's middle

图 2 典型的实测波形

Fig. 2 Typical test waves



(a) 跨中峰值位移　(b) 钢铰线峰值拉力

(a) Peak displacement of beam's middle　(b) Peak tensile force of steel strand

(c) 跨中顶面混凝土峰值应变　(d) 跨中受拉钢筋应变

(c) Concrete's peak strain on top surface of beam's middle　(d) Peak strain of tension bar in beam's middle

图 3 落锤重力势能对梁动力特性的影响

Fig. 3 Effect of dropping hammer's gravitational potential energy on beam's dynamic properties

表 1 在重力势能为 4.5 kJ 落锤冲击作用下梁的破坏参数

Table 1 Damage parameters of prestressed concrete beams impacted by dropping hammer with gravitational potential energy 4.5 kJ

梁	底面裂缝 分布范围/cm	底面裂缝 最大宽度/mm	底面裂缝 平均间距/cm	顶面 压碎区范围/cm	顶面 峰值砼应变
1#	55～220	0.50	10	120～140	0.00440
2#	55～195	0.22	10	125～130	0.00440
3#	40～210	0.30	10	125～130	0.00495
共同特征	不超出 40～220 cm	＜0.50 mm	10 cm	不超出 120～140 cm	＞0.00330
备注	未断，仍有承载能力				

地下工程应能承受的撞击荷载目前尚无可供设计使用的规范和权威性标准，仅文献[5]对地下工程应能承受的撞击荷载提出了如下参考标准：考虑到地下工程可能受到临近高层建筑顶层飞散落体的直接撞击，故落体高度取 $H=45$ m，落体取质量 1 t 的钢筋混凝土柱体，即落体的重力势能为 450 kJ。

(2) 预应力混凝土试验梁的抗冲击承载能力实测结果。

试验结果显示：3 根无粘结部分预应力混凝土梁在 4.5 kJ 落锤(质量 90 kg，高 5 m)冲击荷载的作用下，跨中顶面混凝土应变均已达到混凝土的极限应变，跨中顶面混凝土也均已被压碎，预应力混凝土梁已接近极限破坏，但 3 根预应力混凝土试验梁均未完全断裂，仍具有一定的承载能力，因此可以得出：

预应力混凝土试验梁的极限抗冲击承载能力大于 4.5 kJ。重力势能为 4.5 kJ 的落锤作用后,3 根梁的有关破坏参数见表 1,典型的试验梁顶面和底面的破坏照片见图 4。

(3) 实际预应力混凝土梁的抗冲击承载能力。

根据相似与模拟理论,若几何相似系数为 C_l,在落锤冲击相似模拟试验中,重力势能的相似系数为 $C_E=C_l^3$。

实际预应力混凝土梁多应用于较大跨度的结构,常用的预应力混凝土梁跨度为 12 m 以上,若制作实际梁所用的材料与试验梁的材料相同、几何尺寸相似且配筋率相同,以 12 m 跨度的预应力混凝土梁为例,则实际预应力混凝土梁所能承受冲击落锤的重力势能大于 562.5 kJ,远大于文献[5]提出的 450 kJ的参考标准。

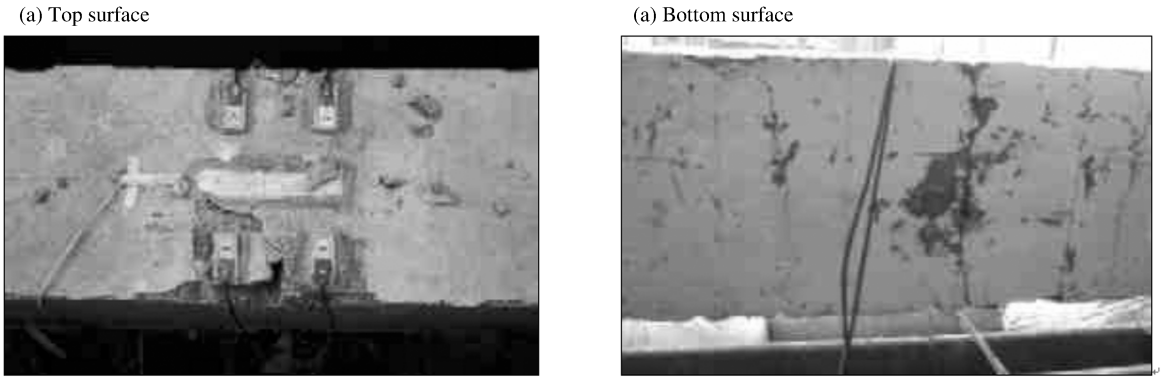


图 4 典型梁顶面和底面的破坏实况

Fig. 4 Real destroy on typical beam's top and bottom surfaces

4 结 论

(1) 无粘结部分预应力混凝土梁的跨中峰值位移、钢绞线峰值拉力、顶面混凝土峰值应变、跨中受拉钢筋应变均随落锤重力势能的增加而近似以线性规律增加。

(2) 无粘结部分预应力混凝土梁在落锤的冲击作用下具有很好的动态位移延性,其动态位移延性可达 9.2,不会发生令人担心的脆性破坏。

(3) 无粘结部分预应力混凝土梁具有很好的抗冲击承载能力,预应力混凝土试验梁可承受的落锤冲击重力势能大于 4.5 kJ,与试验梁相似的 12 m 跨度的实际无粘结部分预应力混凝土梁可承受的落锤冲击重力势能大于 562.5 kJ,完全可以满足地下工程抗高层建筑物倒塌时所产生的冲击荷载的需要,可以用于一般地下工程。

参考文献:

[1] Nishi H, Matsuoka K G, Sato M, et al. Impact test of PC rock-shed with sand cushion[A]. Lok T S. Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures[C]. Singapore: Nanyang Technolgical University Singapore, 1996:347－354.

[2] Saito H, Outagoshi I, Kawase R, et al. Trial design of PC rock-shed with three-layered cushion system[A]. Lok T S. Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures[C]. Singapore: Nanyang Technolgical University Singapore, 1996:385－392.

[3] Kishi N, Mikami H, Matsuoka K. Impact resistance of concrete beams using AFRP road and/or PC steel strands [A]. Lok T S. Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures[C]. Singapore: Nanyang Technolgical University Singapore, 1996:201－208.

[4] Enrin H, Katsuki S, Ishikawa N, et al. Dynamic flexural resistance of prestressed concrete beam[A]. Lok T S. Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures[C]. Singapore: Nanyang Tech-

nolgical University Singapore, 1996:73－80.
[5] 陈肇元,王志浩.核袭击下城市房屋倒塌对人防工程的作用(总结报告)[M].北京:清华大学土木系,2000:118－120.

Experimental study on anti-impact properties of a partially prestressed concrete beam

LI Yan-zhao*[1,2], WANG Xiao-jun[1], GUO Xiao-hui[2], CAO Hai[2], ZHAO Kai[1]
(1. *Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *Anhui, China*;
2. *Luoyang Institute of Hydraulic Engineering and Technology, Luoyang* 471023, *Henan, China*)

Abstract: The dynamic displacement ductility and ultimate load-carrying capability of three partially-prestressed concrete (PPC) beams which were unbonded, were experimentally obtained by applying impact load to their middle with dropping hammers, and the typical measurement wave curves were given. Influences of a dropping hammer's gravitational potential energy on the dynamic properties of the PPC beam were analyzed. Based on the analog simulation theory, the impact-load-carrying capability of the real unbonded PPC beam with span 12 m was gained. Results show that the unbonded PPC beam's anti-impact properties are good, the fragile destruction will not happen, and the unbonded PPC beams can be used in wide-span underground structures.

Key words: mechanics of explosion; anti-impact property; experimental study; prestressed concrete beam; dynamic properties; dropping hammer

* Corresponding author: LI Yan-zhao
E-mail address: yanzhaoli@sohu.com
Telephone: 0379-65986767