

文章编号:1006-7329(1999)03-0036-05

中强肋筋预应力空心板动力性能研究

36-40

钟烈贤¹, 吴德伦¹, 严正平²

TU378.501

(1 重庆建筑大学 建筑工程学院 400045; 2. 四川省建筑科学研究院, 成都 610081)

摘要 对于中强冷轧 800 MPa 级带肋钢筋预应力空心板在各种不同的集中荷载作用下的动力特性进行了全面的试验研究。文中给出了板的自振特性、阻尼比和动力刚度在冲击过程中的变化规律。对冲击荷载作用下板在强度、变形、裂缝、地震响应等方面的特性进行了讨论。

关键词 预应力空心板; 动力特性; 冲击荷载

中图分类号 TU318.02

文献标识码 A

我国预应力构件生产中,已逐步用中强钢筋代替低强冷拔钢丝。为了解决了中强钢筋与混凝土之间的锚固问题,常将中强钢冷轧为带肋钢筋。目前常用的为 800 MPa 级中强带肋钢筋,直径最小为 4 mm,最大可达到 12 mm。4~6 mm 的肋筋可用于民用建筑的预应力空心板和小梁构件的生产中。静力研究表明,800 MPa 的带肋筋用于中小型预应力梁板构件生产,具有节约钢材、变形性能优越、握裹力强、施工方便等优点,有较好的经济效益。本文是在静力研究的基础上,为进一步解决这种带肋筋板的动力性能所作的工作。利用美国 MTS 公司“计算机电液伺服试验系统”进行试验,采用各种不同形式的冲击荷载和不同加载速度研究了板的动力性能和动力响应,并通过其数据采集和数据处理系统进行比较全面的分析研究。本文根据试验成果给出了板的自振频率,阻尼比,动力刚度等在冲击过程中的变化规律,着重讨论了冲击荷载作用下板的强度,变形,裂缝,地震响应等方面的动力特征。

1 理论基础

板的自振特性可以按一无限自由度体系的梁进行计算。对于简支板,其频率为

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad n = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中, EI 为板的弯曲刚度, m 为板单位长度的质量, L 为板的跨度, ω_n 为第 n 阶圆频率。工程频率 f_n 和周期 T_n 分别为 $f_n = 2\pi/\omega_n$ 和 $T = 1/f_n$

板的自振周期是板试验时控制加载速度的一个重要的参考时间。因为只有加载时间(常指荷载达到其最大值的时间)比结构或构件的自振周期小得多时,才能属于动力荷载的范畴。动力荷载使受载物体的质点速度发生显著变化,从而产生可观的动应力和动应变。这时结构材料的力学行为是由它的动力性能控制的。如采用冲击加载方式,只要略去冲击体与板接触后的惯性影响,同时不考虑冲击过程中应力波的传播所引起的能量耗散,则冲击物施加的动能便完全转化为板内的形变能。

工程结构在动荷载作用下的应力和变形常用动力系数 β 表示与静力作用的关系。

对于梁的冲击,如果考虑冲击时梁的惯性影响,则动力系数 β 为

收稿日期:1998-07-03

作者简介:钟烈贤,(1941-),女,四川简阳人,副教授,主要从事结构力学应力分析研究。

$$\beta = 1 + \sqrt{1 + \{2h / [(1 + \alpha Q/P) \delta_d]\}} \quad (2)$$

这里, h 为自由落体高度, Q 为梁的重量, P 为冲击体重量, α 是与冲击位置有关的系数, 当在简支梁跨中冲击时, $\alpha = 0.486^{[3]}$ 。

在任意冲击荷载 $f(t)$ 的作用下, 如把冲击简化为一单自由度阻尼振动问题, 则动力系数 β 为^[5]。

$$\beta = (\omega^2 / \omega_r) \int_0^t f(\tau) e^{-\zeta \omega(t-\tau)} \sin \omega r(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

因此, 对于给定的荷载函数 $f(t)$, 总可以用上式近似地估计动力系数 β 的大小。上式中 ω 是结构的第一阶自振频率, ζ 为阻尼比。当板在跨中受到冲击时, 式中的第一阶固有频率为

$$\omega = \sqrt{48 Elg / QL^3} \quad (4)$$

$$\omega_r = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega \quad (5)$$

这里, $\zeta = cg / 2Q$, C 为粘性阻尼系数, g 为重力加速度。

以上公式可以作为板的冲击实验研究的理论基础。

2 实验简况

2.1 试样

800 MPa 冷轧带肋筋是由成都钢厂生产的, 其基本性能如表 1 所示。

表 1 800 MPa 级冷轧带肋钢筋力学性能指标

公称直径 (mm)	级别代号	条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ_{100} (%)	反复弯曲		应力松弛 ($\sigma_{ra} = 0.7 \sigma_b$)	
					r (mm)	次数	1000小时%	10小时%
4	LL800	≥ 640	≥ 800	≥ 3.5	1.0	≥ 4	≤ 8	≤ 5
5	LL800	≥ 640	≥ 800	≥ 4	1.5	≥ 4	≤ 8	≤ 5

试验板按西南结构标准图集 G211 设计; 取用 YXB-335, 其 800 MPa 带肋筋按四川省建筑科学院提供的等强代换表设计。混凝土为 C28, 试验板由垫江电力局杆塔制品厂生产。共制作 8 块板, 编号为 $B_1 - B_8$, 其中仅 B_2 和 B_8 为 650 MPa 光圆冷拔丝预应力板, 其余皆为 800 MPa 肋筋预应力板。

为了测量板的应力和应变, 在板的上下面和板的各主筋不同跨度处有多处应变片 (篇幅所限, 图略)。

2.2 试验装置

材料试验是在英国 Instron 材料试验机上进行的。

板的冲击试验加载为 MTS 的触动器, 最大出力为 250 kN, 加载频率可达到 10 Hz。试验时用力控制方式加载, 经过函数发生器给设计的动力荷载波形, 以控制触动器的加载。实际输出地震波荷载直接由计算机控制器上的荷载传感器传来的信号给出。这种跨中位移和冲击力的响应由 MTS 的数控通道进入 Microvax-1132 微机。其采样频率为 100 Hz, A/D 转换精度为 16 位。此外, 板上混凝土和钢筋的应变则经过动态应变仪由 XR-310 磁带记录仪采集模拟信号, 再经过美国 HP3562 动态信号分析进行数据处理, 最后由打印机输出结果。

2.3 试验内容

对于钢筋: 静力和动力条件下的 σ_b , $\sigma_{0.2}$, δ_{100} , σ_{sb} , $\sigma_{d0.2}$, δ_{d10} 等材料力学参数。

对于混凝土, 主要是作静力和动力条件下的 f_c , E_c , f_{ct} , E_{ct} 等, 动力加载速度为 $\epsilon = 10^{-3} S^{-1}$ 和 $10^{-2} S^{-1}$ 等速度。

对于板,作了以下几个方面的试验:

自振特性:板在试验前和试验后各作一次自振特性测试,以比较自振频率和阻尼的变化。

静力试验:用带肋筋板 B_1 和光圆筋板 B_2 进行对比试验,得出 $P-\Delta$ 曲线,开裂荷载和破坏荷载,钢筋的 $P-\epsilon$ 曲线以及板的裂纹分布图。

冲击试验:进行各种冲击荷载的各种力幅和冲击时间下的试验。其荷载包括矩形脉冲荷载、三角形荷载、梯形荷载和半波简谐荷载以及随机荷载 G_3 波。

3 实验结果与分析

下面分别就板的动力参数,冲击荷载性质、板的动力刚度,动应力和动应变变化规律,板对随机荷载响应等方面进行讨论。

3.1 板的动力参数

板的动力参数中主要是自振频率和材料阻尼比。对于自振频率,采用简支梁无限自由度的理论解(1)式的结果与六块板实测平均值比较如表 2 所示。

从表中可以看出,第四阶振型以后的偏差越来越大,且实测值都比理论值低。

这是因为理论解中忽略了梁的剪变形导致较大的误差。事实上由于剪变形产生的剪切滞后作用,在高阶振动越来越显著,使得频率减小、周期增长,从而产生明显的剪切动力滞后作用。

板经过冲击荷载作用后,如果产生的微裂缝完全闭合,则自振频率没有显著变化。但是,如果裂缝不能完全闭合,则可能降低自振频率。板在开裂前后自振频率的变化可以用来定量地测定裂缝引起的弯曲刚度的变化,根据(1)式

$$[E1]' = [f'_n/f_n]^2 [E1] \quad (6)$$

式中 $[E1]'$ 和 f'_n 为开裂后板的刚度和自振频率。如果认为板的钢筋和开裂后混凝土的弹性模量保持不变,则刚度的降低主要是由于裂纹产生后截面惯性矩改变的结果,以板 B_6 为例,表 3 各阶频率比均值为 $[f'_n/f_n]^2 = 0.86$,即经过冲击开裂后的弯曲刚度降低系数为 0.86,这与规范规定的抗裂刚度系数 0.85 较为一致。

另一个动力系数是阻尼比。对于板 $B_3 \sim B_6$ 四块板的第一阶振型来说,平均阻尼比 $\zeta = 0.06$,随着振型阶次增高,阻尼比有所降低。到第五阶时,平均阻尼比仅为 $\zeta = 0.0165$,这说明对于简支板而言,冲击激励的高阶振型衰减很慢。事实上,从试验板 B_7 的 G_3 波的响应谱也可以看出,无论是荷载、位移,还是钢筋应变,其响应谱的频率成分十分丰富,说明高频段衰减很慢。

3.2 冲击荷载的影响

板在冲击荷载作用下,破坏荷载高低与荷载作用时间有关。为此,本文用荷载的冲量来度量冲击荷载作用,冲量定义为

$$I = \int_0^u P(t) dt \quad (7)$$

以半波正弦冲击荷载为例,可代入

$$P(t) = P \sin(\pi t/u) \quad (0 \leq t \leq u) \quad (8)$$

积分得到

表 2 板的自振频率(Hz)

阶次	1	2	3	4	5	6
理论值	19.57	78.28	176.13	313.12	489.25	784.52
实测值	17.77	72.88	165.43	273.95	417.05	601.95
偏差%	-9.2	-6.9	-6.1	-12.5	-14.75	-14.56

表 3 开裂板自振频率的变化

阶次	1	2	3	4	5	均值
f'_n	16.4	72.3	147.2	255.4	428.9	
f_n	17.6	78.9	165.1	285.4	430.8	
$(f'_n/f_n)^2$	0.868	0.840	0.795	0.802	0.991	0.860

$$I = 2P_0/\pi$$

板破坏时试验输出的 $I_{\max} = 7.54 \text{ kN} \cdot \text{s}$, 因此, $P_0 = 11.84 \text{ kN} \cdot \text{s}$, 板的周期 $T = 0.57 \text{ s}$ 。令输入历时 $u = \alpha T_1$, 可以得冲击历时与冲击破坏的荷载之关系如表4所示。

表4 冲击时间与破坏荷载的关系

α	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	10	20
$P(\text{kN})$	415	207.7	138.5	103.68	83.06	69.24	20.8	10.39

从表中可见, 当 $u = 20 T_1 = 20 \times 0.057 = 1.14 \text{ s}$ 时, $P = 10.39 \text{ kN}$, 这个值几乎与静力承载能力相同, 说明当冲击荷载历时比第一周期大得多时, 完全可以作为静力荷载进行计算。

3.3 板的动力刚度

板在冲击荷载试验过程中, 如果定义各级加载产生的

$$K_d = P_{\max} / Y_{na} \quad (9)$$

作为动力刚度指标。试验结果表明, K_d 与冲击荷载的历时有关。以板 B_5 为例, 试验时采用荷载幅不变, 改变冲击时间使冲量增加的方法加载。作出该板在各级荷载作用下的 $K_d - u$ 变化曲线。便可看出, 当冲击荷载的作用时间超过 600 ms 时, 其动力刚度的变化很小, 这个时间相当于第一自振周期10倍。

3.4 板的动应力与动应变

板在冲击试验过程中, 从受力筋和混凝土表面可采集应变数据, 得出应变随荷载的变化图线。如果将各片的 $\epsilon - t$ 图线作出, 便可以直接从图形中得出冲击后板的振动周期、阻尼、衰减时间等。从这些图线可以看出以下规律:

如果以荷载与应变之比作为材料的动力刚度表征, 则动力刚度随冲击荷载作用的时间增加而降低。

冲击过程中材料的应力-应变关系具有较好的线性, 非线性响应不明显。无论是钢筋还是混凝土上的应变片数据都有这个规律。因此, 冲击过程中, 动应力与动应变的关系可以认为是线性的, 即在动力分析中也可用弹性本构关系。

3.5 板对随机冲击荷载的响应

用地震工程常用的 G_3 作为冲击荷载得出的各种响应谱表明, 随机荷载响应的主要荷载成分是在 10 Hz 内, 高频部分的荷载分量很小, 荷载的最大响应对应于 0.56 Hz , 此值比板的第一阶自振频率 $f_1 = 19.57 \text{ Hz}$ 低得多, 临近 20 Hz 处出现第二个降值区, 这说明板在 G_3 波冲击下产生的挠度主要是第一阶振型起控制作用, 虽然也激励其余各阶振型, 但对于冲击位移的贡献较小。

4 主要结论

本文对 800 MPa 带肋预制空心板的冲击试验研究, 得出以下结论:

1) 板的动力强度与冲击荷载历时关系极大, 如冲击历时大于 $10 T_1$ 其承载能力几乎与静载相同。冲击时间越短, 板的承载能力越大。当冲击荷载是随机荷载时, 只要历时较长, 其承载能力完全由随机荷载的峰值决定。

2) 板的动力刚度也与冲击荷载历时有关, 冲击时间大于 $10 T_1$ 时可以用静力刚度计算, 只要冲击时间充分短, 非线性影响可以忽略不计, 由于动力作用, 冲击破坏的总变形比静力破坏的总变形大得多。

3) 板在冲击时的裂缝特征与钢筋-混凝土之间的握裹力有关。带肋筋板的裂缝细密, 裂纹间

近乎平行,且与板边正交;而光圆板的裂缝则稀疏粗大,且有与板边斜交者,冲击开裂破坏时,钢筋有明显的颈缩现象。

4) 各板破坏时,冲量几乎相同,这说明冲量的大小可以作为板抗冲击时的一个能量准则。

本文的实验工作是在重庆建筑大学结构实验室和岩土工程实验室完成的。谨向两个实验室所有的工作同志表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 清华大学抗震抗爆工程研究室. 钢筋混凝土结构构件在冲击荷载下的性能[M]. 北京:清华大学出版社,1986
- [2] 云南省设计院主编. 预应力混凝土多孔板[M]. 西南 G211
- [3] 四川省建筑科学研究院主编. 冷轧螺纹钢丝预应力混凝土构件设计与施工技术规范[M]. 1992
- [4] J C 皮沙连科等著. 范钦珊,朱祖成译. 材料力学手册[M]. 北京:建工出版社,1981
- [5] 龙驭球,包世华主编. 结构力学[M]. 北京:高等教育出版社,1986
- [6] Clough, R. W and Penzien J., Dynamics of Structures[M]. McGraw - Hill, Inc, 1975

The Dynamic Behaviour of a New R. C. Hollow Plate

ZHONG Lie-xian¹, WU De-lun¹, YAN Zhengping²

(1. Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045, China; 2. Sichuan Institute of Building Science, Chengdu, 610081, China)

Abstract The dynamic behaviour of a new reinforced concrete hollow plate using the medium strength (800 MPa yield strength) ribbed bar as prestressed wire has been studied experimentally under various concentrated impact loads. The test results on the inherent characteristics, frequency, damping, dynamic rigidity etc. are presented. Meanwhile the important points in respect to the strength, deformation, cracking under impact loads and earthquake response of plate have discussed.

Key Words R. C. hollow plate; dynamic behaviour; impact load