

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.03.006

轻骨料混凝土梁弯曲性能试验研究

唐军务¹,张琦彬¹,雷霜如²,黄长虹¹

(1.海军工程大学后勤指挥与工程系,天津 300450;2.海军后勤部军港管理处,北京 100841)

摘要:通过对 5 根梁试件(2 根轻骨料混凝土梁、1 根纤维轻骨料混凝土梁和 2 根普通混凝土梁)的试验,研究了轻骨料混凝土受弯梁在单调荷载作用下的基本力学性能,包括破坏形态、正截面承载力、挠度变化规律和裂缝开展过程等,对轻骨料混凝土梁、纤维轻骨料混凝土梁和普通混凝土梁的受力性能进行了对比.结果表明 轻骨料混凝土梁、纤维轻骨料混凝土梁均能满足 JGJ 12—2006《轻骨料混凝土结构技术规程》的挠度限值要求 按照现行规程进行使用荷载下最大裂缝宽度的验算是足够安全的,但应用于纤维轻骨料混凝土梁时,宜作适当修正.

关键词:轻骨料 混凝土梁 弯曲性能 挠度 裂缝宽度 聚丙烯纤维

中图分类号: TU377.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)03-0269-05

与普通混凝土相比,轻骨料混凝土具有自重轻、保温性能好、抗渗能力强、抗震性能好的优势.由于轻骨料混凝土在自重荷载占荷载比重较大的大跨度、高层结构应用中具有其独特的优越性,因而轻骨料混凝土成为现代混凝土技术发展的趋势之一^[1].

我国轻骨料混凝土应用和研究起步较早,但主要应用于非承重结构,且主要针对轻骨料混凝土材料性能的研究,对轻骨料混凝土承重结构构件的研究相对较少,有关纤维轻骨料混凝土构件力学性能的研究更是寥寥无几^[2].本文将通过 3 根轻骨料混凝土梁以及 2 根普通混凝土受弯梁试验结果的对比分析,研究轻骨料混凝土梁、纤维轻骨料混凝土梁的受弯力学性能及其与普通混凝土梁的异同.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计 5 根矩形截面梁试件,其中 3 根为轻骨料混凝土梁(1 根掺入聚丙烯纤维),2 根为用于对比的普通钢筋混凝土梁.试验梁各设计参数如下^[3-4]:

a. 试件尺寸及配筋.5 根试验梁采用相同的截面形式及配筋,具体截面尺寸如图 1 所示.受拉钢筋采用 HRB400 级热轧带肋钢筋,实测屈服强度 $f_y = 565 \text{ MPa}$.

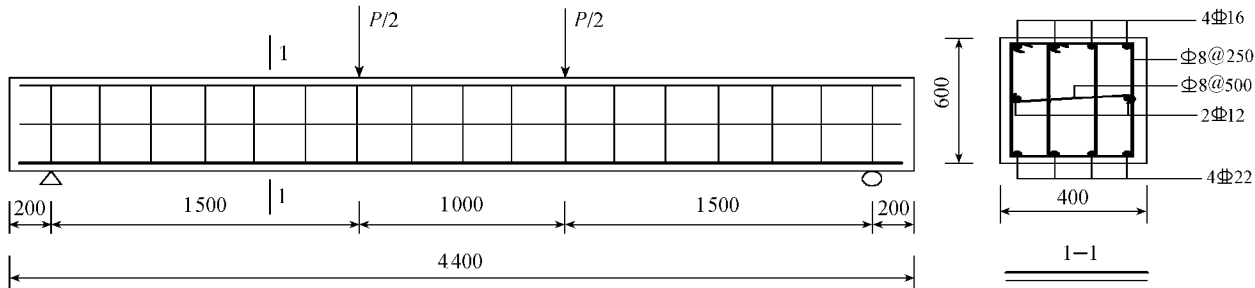


图 1 试验梁截面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Sectional dimensions and reinforcements of specimens (units:mm)

b. 混凝土强度等级.轻骨料选用 900 级碎石型页岩陶粒,轻骨料混凝土、纤维轻骨料混凝土及普通混凝土的设计强度等级均为 C40,实测强度如表 1 所示.

收稿日期:2009-04-02

作者简介:唐军务(1971—),男,江苏溧水人,教授,硕士,主要从事港口混凝土维修加固及耐久性研究. E-mail:junwutang@sohu.com

表 1 试验梁的特征及承载力试验结果

Table 1 Characteristics and experimental results of bearing capacity of specimens

编号	混凝土类型	$f_{cu,100}/\text{MPa}$	$f_{cu,150}/\text{MPa}$	弹性模量 E_c/GPa	保护层厚度 c/mm	开裂荷载 P_{cr}/kN	破坏荷载 P_u/kN	使用阶段弯矩 $M_k/(\text{kN}\cdot\text{m})$	使用阶段荷载 P_k/kN
TC-30	轻骨料混凝土	44.9	42.7	21.3	30	130	480	222.83	297.11
TC-50	轻骨料混凝土	44.9	42.7	21.3	50	130	430	214.02	285.36
TX-50	纤维轻骨料混凝土	46.8	44.5	20.3	50	150	480	214.57	286.09
PC-30	普通混凝土	51.1	48.5	39.5	30	130	510	221.36	295.15
PC-50	普通混凝土	51.1	48.5	39.5	50	120	500	212.57	283.43

注： $f_{cu,100}$ 为混凝土 100 mm 边长试块实测强度， $f_{cu,150}$ 为混凝土标准试块强度换算值，换算公式为 $f_{cu,150} = 0.95f_{cu,100}^{[5]}$ 。

c. 保护层厚度. 试验采用 30 mm 和 50 mm 2 种保护层厚度.

1.2 加载制度及量测项目

5 根试验梁均采用跨中 2 点对称集中加载，集中力作用点到相邻支座距离为 1 500 mm，中间纯弯段长 1 000 mm，具体加载方式如图 2 所示. 采用手动油泵配合液压千斤顶加载，通过压力传感器配合静态电阻应变仪获取数字读数，手工记录. 试验采用单调一次性加载，按照 GB 50152—92《混凝土结构试验方法标准》^[6] 的规定进行分级加载.

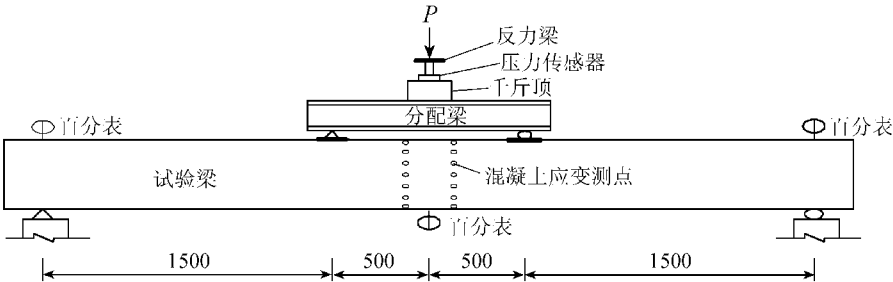


图 2 试验梁加载装置及测点位置(单位: mm)

Fig. 2 Loading devices of specimens and location of measuring points (units: mm)

试验中量测项目包括混凝土应变、钢筋应变、跨中挠度、支座沉降、开裂荷载、破坏荷载、裂缝宽度等.

2 试验结果及分析

2.1 试验过程及承载力分析

试验过程中,轻骨料混凝土梁受弯过程可分为以下 3 个阶段:第 1 阶段为加载开始至开裂荷载前的阶段,钢筋混凝土梁处于弹性工作阶段;第 2 阶段为裂缝发展阶段,该阶段裂缝发展基本稳定,表现为裂缝数目、裂缝宽度以及裂缝高度基本变化不大,梁呈现出明显的弹塑性特征;第 3 阶段为破坏阶段,梁呈现出明显的塑性特征^[7].

各梁的承载力试验结果如表 1 所示.由表 1 对比及试验结果可知:

- a. 轻骨料混凝土梁的开裂荷载值和普通混凝土梁的开裂荷载值接近.
- b. 由于轻骨料混凝土自身材料所具有的脆性特征,导致轻骨料混凝土梁在开裂后裂缝迅速发展^[8],其最大裂缝宽度较普通混凝土梁更早达到 1.5 mm 的破坏标志,所以轻骨料混凝土梁的破坏荷载低于普通混凝土梁,为普通混凝土梁破坏荷载的 86%.
- c. 纤维轻骨料混凝土梁的开裂荷载和破坏荷载均比轻骨料混凝土梁大,其原因是加入纤维后,聚丙烯纤维的阻裂作用有效地限制了裂缝产生和发展^[8],保证了轻骨料混凝土梁的整体工作性能,从而推迟了轻骨料混凝土梁的开裂及破坏.

2.2 挠度分析

2.2.1 挠度变化影响因素分析

为分析轻骨料混凝土梁、纤维轻骨料混凝土梁和普通混凝土梁在变形能力上的异同,以及挠度变化的各影响因素,将各试验梁的荷载-挠度关系曲线进行对比,如图 3 所示.

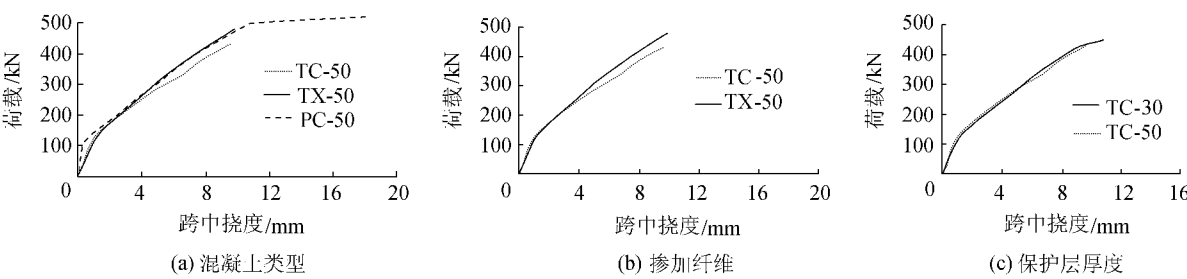


图 3 挠度影响因素
Fig. 3 Factors of load-deflection curves

分析图 3 可知：

a. 相同荷载作用下,轻骨料混凝土梁的挠度比普通混凝土梁大,而且无论开裂前后,轻骨料混凝土梁荷载-挠度曲线的斜率都要比普通混凝土梁小.这种现象在加载后期(0.7 倍破坏荷载之后)更为明显.其原因是轻骨料混凝土的弹性模量要比普通混凝土低,因而相同条件下,轻骨料混凝土梁截面刚度要比普通混凝土梁小,表现在荷载-挠度曲线上即为斜率较普通混凝土梁小.

b. 加载前期,纤维轻骨料混凝土梁与轻骨料混凝土梁的变形性能基本相同,但在开裂后,特别是在加载后期,轻骨料混凝土梁挠度增长明显比纤维轻骨料混凝土梁快.产生这样的结果,主要是因为纤维的掺入限制了轻骨料混凝土梁开裂后裂缝宽度及裂缝高度的迅速增长,维持了轻骨料混凝土梁的整体受力性能,间接提高了梁的刚度^[9].以上分析说明,加入纤维可明显改善轻骨料混凝土梁的变形性能,使其变形性能接近普通混凝土梁.

c. 混凝土保护层厚度的变化对轻骨料混凝土梁的变形能力没有明显影响.

2.2.2 使用荷载下挠度限值讨论

首先确定各试验梁的使用荷载.将材料的实测强度除以相应的材料分项系数,求出试验梁的设计承载力 M ,按标准荷载效应组合求出荷载分项系数的平均值为 1.267,由构件的设计承载力 M 除以 1.267 即得未扣除自重影响的试验梁使用阶段的弯矩值 M_{k1} ,进而扣除试验梁、分配梁、千斤顶等加载设施自重的影响 M_s ,得到试验梁使用阶段的弯矩值 M_k 和使用荷载 P_k ,如表 1 所示.

根据 JGJ 12—2006《轻骨料混凝土结构技术规程》^[10],当计算跨度小于 7 m 时,受弯构件的最大挠度不应超过其计算跨度的 1/200.试验梁的计算跨度为 4 000 mm,所以规范允许的最大挠度限值为 20 mm.考虑短期挠度的折减系数 0.6,则短期荷载作用下试验梁的挠度限值应为 20 mm×0.6=12 mm.

由各试验梁的荷载-挠度曲线,可得到各试验梁在使用荷载作用下的跨中挠度值:TC-30 为 5.39 mm,TC-50 为 5.01 mm,TX-50 为 4.56 mm.说明在使用荷载下,轻骨料混凝土梁、纤维轻骨料混凝土梁均能够满足 JGJ 12—2006《轻骨料混凝土结构技术规程》所规定的挠度限值的要求.

2.3 裂缝分析

2.3.1 试验梁裂缝开展过程

试验过程中 5 根试验梁裂缝间隔均匀,每根梁前后面的裂缝开展走势相似,破坏时裂缝开展完全,呈现较好的受弯破坏形态.通过试验现象对比可以发现：

- a. 轻骨料混凝土梁与普通混凝土梁相比,平均裂缝间距和最大裂缝宽度均较小.
- b. 掺加纤维可以明显减小轻骨料混凝土梁的平均裂缝间距和最大裂缝宽度,纤维轻骨料混凝土梁的裂缝开展表现出细而密的特点,裂缝分布更加均匀.

2.3.2 最大裂缝宽度限值对应荷载的影响因素分析

各试验梁的荷载-最大裂缝宽度关系曲线如图 4 所示.研究对象的应用环境为港口室外环境,按照 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》^[11]及 JGJ 12—2006《轻骨料混凝土结构技术规程》^[10],三类环境(滨海室外环境)下,普通及轻骨料混凝土结构构件的最大裂缝宽度限值为 0.2 mm.由图 4 可得各试验梁的最大裂缝宽度达到 0.2 mm 时的荷载值 $P_{0.2}$:TC-30 为 280 kN,TC-50 为 250 kN,TX-50 为 350 kN,PC-50 为 220 kN.由各试验梁 $P_{0.2}$ 之间的对比可见：

- a. 在最大裂缝宽度达到 0.2 mm 的情况下,轻骨料混凝土梁的荷载值大于普通混凝土梁,即轻骨料混凝土

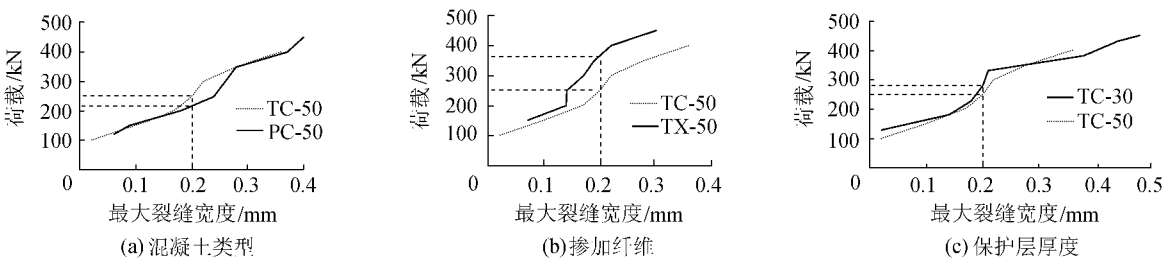


图4 裂缝宽度影响因素
Fig. 4 Factors of maximum crack width

土梁的使用阶段更长.

- b. 30 mm 保护层厚轻骨料混凝土梁的 $P_{0.2}$ 大于 50 mm 保护层厚轻骨料混凝土梁.
- c. 由于纤维的阻裂作用,纤维轻骨料混凝土梁的 $P_{0.2}$ 较轻骨料混凝土梁有明显提高,从而使用阶段更长.

2.3.3 短期最大裂缝宽度实测值与计算值的对比

根据混凝土材料的不同,对每一根试验梁在使用阶段弯矩 M_k 作用下分别按文献[10]和文献[11]中提供的计算公式计算其使用阶段的最大裂缝宽度.试验梁使用阶段弯矩 M_k 作用下的短期最大裂缝宽度实测值和计算值如表2所示.

由表2可见,短期最大裂缝宽度实测值与计算值的比值均小于1,说明使用我国现行规范和规程公式进行短期最大裂缝宽度的验算是足够安全的.纤维轻骨料混凝土梁最大裂缝宽度的实测值与计算值之比仅为0.592,其原因是纤维在混凝土中起到了阻裂作用,从而使相同荷载下纤维轻骨料混凝土梁的最大裂缝宽度大大减小[12].可见规程公式应用于纤维轻骨料混凝土时,应考虑纤维对于最大裂缝宽度的影响而作适当修正.

3 结 论

- a. 轻骨料混凝土梁在破坏前出现挠度明显增长、裂缝宽度激增的现象,并最终梁跨中位置最大裂缝宽度超过1.5 mm为破坏标志,属于破坏前能够给人以明显破坏征兆的延性破坏.与普通混凝土梁相比,其开裂荷载接近,破坏荷载偏低.掺加纤维对轻骨料混凝土梁有提高开裂荷载和破坏荷载的作用.
- b. 相同荷载作用下,轻骨料混凝土梁的跨中挠度大于普通混凝土梁.掺加纤维可以改善轻骨料混凝土梁在加载后期挠度增长过快的现象,使其变形性能接近普通混凝土梁.同时,轻骨料混凝土梁、纤维轻骨料混凝土梁均能满足我国现行规程的挠度限值要求.
- c. 通过对最大裂缝宽度达到0.2 mm时荷载值 $P_{0.2}$ 的对比发现,轻骨料混凝土梁的使用阶段比普通混凝土梁更长,30 mm 保护层厚轻骨料混凝土梁的使用阶段比50 mm 保护层厚轻骨料混凝土梁更长.由于纤维的阻裂作用,纤维轻骨料混凝土梁的 $P_{0.2}$ 较轻骨料混凝土梁有明显提高.
- d. 现行 JGJ 12—2006《轻骨料混凝土结构技术规程》[10] 公式用于验算轻骨料混凝土梁的最大裂缝宽度是安全的,但将其用于纤维轻骨料混凝土梁时,应考虑纤维对裂缝宽度的影响,需要进一步研究并作适当修正.

参考文献:

[1] 张爱军. 钢纤维轻骨料混凝土物理力学性能及韧性的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
[2] 何建. 轻骨料碳纤维宏观观力学性能及细观结构试验研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2007.
[3] 唐军务, 雷霜如, 张琦彬, 等. 高性能陶粒混凝土维修军港码头应用技术研究[J]. 水运工程, 2009(5): 133-136. (TANG Jun-wu, LEI Shuang-ru, ZHANG Qi-bin. Application technology of high-performance light aggregate concrete for navy wharf's maintenance [J]. Port & Waterway Engineering, 2009(5): 133-136. (in Chinese))

- [4] 唐军务,何辉,雷霜如,等.军港码头维修用高性能轻集料混凝土试验研究[J].混凝土,2009(3):121-124.(TANG Jun-wu,HE Hui,LEI Shuang-ru. Experimental research on high performance light aggregate concrete for maintenance and overhaul of wharf in navy port[J]. Concrete,2009(3):121-124. (in Chinese))
- [5] 龚洛书,柳春圃.轻集料混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1996:218.
- [6] GB 50152—92 混凝土结构试验方法标准[S].
- [7] 东南大学,同济大学,天津大学,等.混凝土结构设计原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2008:37-40.
- [8] 张勇.不同纤维对轻集料混凝土韧性性能影响的研究[J].混凝土,2002(5):30-31.(ZHANG Yong. Study of fibers influence on toughness of light weight aggregate concrete[J]. Concrete,2002(5):30-31. (in Chinese))
- [9] 丁庆军,王涛,张峰,等.混掺纤维增加轻集料混凝土研究[J].武汉理工大学学报,2004,26(1):42-45.(DING Qing-jun, WANG Tao,ZHANG Feng,et al. Research on mechanics of mixed fiber reinforced aggregate concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004,26(1):42-45. (in Chinese))
- [10] JGJ 12—2006 轻骨料混凝土结构技术规程[S].
- [11] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
- [12] 唐军务,张琦彬,黄长虹,等.轻集料钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J].海军工程大学学报,2009,21(5):78-81.(TANG Jun-wu,ZHANG Qi-bin, HUANG Chang-hong, et al. Experimental study on bending behavior of light aggregate concrete beams[J]. Journal of Naval University of Engineering,2009,21(5):78-81. (in Chinese))

Experimental research on flexural behaviors of lightweight concrete beams

TANG Jun-wu¹, ZHANG Qi-bin¹, LEI Shuang-ru², HUANG Chang-hong¹

(1. Department of Logistics Command and Engineering, Naval University of Engineering, Tianjin 300450, China ;

2. Administrative Office of Naval Port, Naval Logistics Department, Beijing 100841, China)

Abstract : Based on experiments on five beam specimens (two lightweight concrete beams, one fiber lightweight concrete beam, and two normal-weight concrete beams), the mechanical properties of lightweight concrete beams under a unilateral load were studied, including failure patterns, bearing capacities, change of deflections, and development of cracks. The stress behaviors of the lightweight concrete specimens, fiber lightweight concrete specimen, and normal-weight concrete specimens were compared. The experimental results show that the lightweight concrete and fiber lightweight concrete specimens both meet the requirements of allowable values of deflection of the JGJ 12-2006 specification for lightweight concrete structures. It is safe to estimate the maximum crack width under service loads according to the formula of Specification JGJ 12-2006. However, the formula should be revised when it is used on fiber lightweight concrete beams.

Key words : lightweight aggregate ; concrete beam ; flexural behavior ; deflection ; crack width ; polypropylene fiber