

文章编号 1000-5013(2005)04-0373-04

钢纤维混凝土的超声测强试验

黄奕辉 王全凤 罗才松 陈华艳

(华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 362021; 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 对 240 组钢纤维混凝土试件进行了超声波检测, 研究其抗压强度并对试验结果进行回归分析, 建立钢纤维混凝土检测的超声波波速与抗压强度之间的超声波测强曲线. 结果表明, 利用该曲线测定超声声速可推定钢纤维混凝土的强度, 超声波检测方法用于钢纤维混凝土无损检测是可行和适用的.

关键词 超声波检测, 钢纤维混凝土, 抗压强度, 无损检测

中图分类号 TU 317+.8; TU 37 **文献标识码** A

结构混凝土无损检测技术工程应用的主要范围是, 结构混凝土的强度、内部缺陷及其他性能检测. 混凝土超声检测是混凝土非破损检测技术中的一个重要方面, 因其对服役结构没有任何损害, 同时不影响结构的正常使用且操作方便, 已广泛应用于建筑、水电、交通、铁道等各类工程中. 目前, 我国已制定的相关规程, 有《GJ/T 23-2001 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》、《CECS 02-88 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》、《CECS 21-2001 超声法检测混凝土缺陷技术规程》. 另外, 一些地区已建立了地区或专用测强曲线. 但将超声检测技术应用于钢纤维混凝土的研究却很少. 基于这个原因, 本文利用超声检测技术对钢纤维混凝土进行检测, 再对检测后的试件进行抗压试验. 通过回归分析, 建立钢纤维混凝土检测的超声波波速与抗压强度之间的超声波测强曲线, 进而研究超声波检测技术在钢纤维混凝土中的应用情况.

1 试验用原材料

本试验用水泥为湖北武汉亚东有限公司生产的, 强度等级为 42.5 MPa 的洋房牌涂料普通硅酸盐水泥, 其物理力学性能如表 1 所示. 表中, E_{3d} , E_{28d} 分别为 3 d, 28d 的抗折强度, P_{3d} , P_{28d} 分别为 3d, 28d 的抗压强度, 初凝时间为 t_0 , 终凝时间为 t_{end} . 钢纤维混凝土对粗骨料有较高的要求, 宜选用坚硬密实的.

表 1 水泥涂料物理力学性能

| | | | | | | |
|-----|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 安定性 | t_0 / min | t_{end} / h | E_{3d} / MPa | P_{3d} / MPa | E_{28d} / MPa | P_{28d} / MPa |
| 合格 | 155 | 4.3 | 6.7 | 33.8 | 9.6 | 55.0 |

岩石碎石作粗骨料, 如石灰石、辉绿石、花岗岩和正长石等, 应避免使用石英岩、砂岩作集料. 同时, 粗骨料的粒径不宜大于钢纤维长度的 $2/3$. 其粒径一般为 5~20 mm, 最大不宜超过 20 mm, 且粗骨料的级配应符合要求, 否则会影响钢纤维混凝土拌合物的流动性和水泥用量^[1]. 本次试验用粗骨料是粒径为 5~20 mm 级配良好的碎石, 其表观密度 ρ_g 为 $2.73 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 堆积密度 ρ 为 $1422 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$, 压碎指标为 11.8%, 针片状质量分数为 0.042. 粗骨料粒经筛分析, 试验结果如表 2 所示. 细骨料为天然河砂, 细度模数 M_x 为 2.47, 表观密度 ρ_s 为 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 堆积密度 ρ 为 $1334 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$, 泥和泥块质量分数分别为 0.029, 0.025. 本试验用钢纤维是武汉汉森有限责任公司生产的, 密度为 $7800 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$, 长度与直径之比(l/d)为 33; 减水剂为 NFJ1 型萘系高效减水剂.

收稿日期 2004-12-27
作者简介 黄奕辉(1962), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构加固与工程管理的研. E-mail: huangyh_hqu@163.com
基金项目 福建省建设厅科研基金资助项目(JK9910)

表 2 粗骨料筛分析试验结果

| | | | | | | |
|-----------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 筛孔尺寸/mm | 26.5 | 19.0 | 16.0 | 9.50 | 4.75 | 2.36 |
| 分计筛余质量/kg | 0 | 0.107 0 | 1.025 5 | 2.537 0 | 0.321 0 | 0.002 0 |
| 分计筛余质量分数 | 0 | 0.026 8 | 0.256 4 | 0.633 0 | 0.080 3 | 0.000 5 |
| 累计筛余质量分数 | 0 | 0.026 8 | 0.283 2 | 0.917 5 | 0.997 8 | 0.998 3 |

2 试件设计

由于本试验采用的粗骨料直径为 5~ 20 mm, 因此试验配制的混凝土试块采用 100 mm× 100 mm× 100 mm 的立方体混凝土试件. 混凝土制作采用机械搅拌, 机械振捣成型. 成型后的试件采用标准养护, 试验过程中混凝土拌合物的坍落度控制在 10~ 30 mm 之间.

3 混凝土强度的测定

混凝土强度的测定采用两种方法进行. 首先采用超声波测定混凝土的密实度, 经超声波检测后的试件, 再在压力机上测其抗压强度.

3.1 超声波检测混凝土强度

试验采用 CTS-45 型非金属超声波检测分析(广东汕头仪器厂) 进行混凝土强度的测定. 该仪器主要用于混凝土的无损检测和工程质量的评估, 也可用于岩石、木材、塑料、橡胶、石墨、碳素纤维、陶瓷等非金属材料的无损检测. 试验测定的混凝土龄期(d) 分别为 7, 14, 28 和 60 的超声波声时值. 然后, 根据公式 $v = \frac{L}{t_m}$ 计算超声波波速 $v(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$ ^[2,3].

3.2 混凝土抗压强度测定

超声检测结束后, 用洗涤剂洗净混凝土表面的浆糊, 擦净水分后, 再进行混凝土抗压试验. 以 3 个试块的算术平均值作为该组试块的抗压强度(P) 值. 由于 100 mm× 100 mm× 100 mm 试件和标准试件相比有小尺寸效应, 即环箍效应. 因此, 在所得混凝土强度的基础上, 乘以 0.95 换算成 150 mm× 150 mm× 150 mm 标准试件的强度^[4]. 试验测得的超声波波速(V) 及抗压强度(P) 结果, 如表 3 所示. 由于数据太多, 本文仅列出其中的部分数据, 回归分析时建立的测强曲线仍以原始的 240 组数据为依据. 表中, 砂率 w 为砂在砂加石块(或粗骨料) 中质量分数, v 为钢纤维的体积分数, W/C 为水灰比, M 为质量.

表 3 C40 钢纤维混凝土配合比及超声波声速及抗压强度

| 编号 | W/C | w | $M_{\text{水泥}}/\text{kg}$ | $M_{\text{水}}/\text{kg}$ | $M_{\text{砂}}/\text{kg}$ | $M_{\text{石}}/\text{kg}$ | v | $V/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ | | | | P/MPa | | | |
|----|-------|------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------|-----------------------------------|------|------|------|----------------|------|------|------|
| | | | | | | | | 7 d | 14 d | 28 d | 60 d | 7 d | 14 d | 28 d | 60 d |
| 1 | 0.41 | 0.38 | 451 | 185.0 | 674 | 1 104 | — | 6.20 | 6.32 | 6.87 | 6.99 | 44.5 | 43.1 | 55.0 | 55.0 |
| 2 | 0.41 | 0.38 | 361 | 148.0 | 726 | 1 183 | — | 6.63 | 6.92 | 7.08 | 7.25 | 49.1 | 54.2 | 58.5 | 59.2 |
| 3 | 0.41 | 0.38 | 307 | 148.0 | 722 | 1 217 | — | 6.42 | 6.75 | 7.15 | 6.95 | 45.9 | 51.4 | 59.7 | 54.1 |
| 4 | 0.41 | 0.42 | 477 | 195.5 | 723 | 999 | 0.002 | 6.51 | 6.83 | 7.30 | 7.33 | 47.3 | 52.3 | 59.9 | 60.8 |
| 5 | 0.41 | 0.46 | 484 | 198.5 | 782 | 918 | 0.004 | 6.21 | 6.51 | 6.87 | 7.34 | 42.8 | 47.3 | 52.8 | 60.8 |
| 6 | 0.41 | 0.42 | 491 | 201.5 | 707 | 976 | 0.006 | 6.51 | 6.73 | 6.86 | 7.28 | 46.0 | 50.6 | 54.7 | 59.2 |
| 7 | 0.41 | 0.47 | 499 | 204.5 | 780 | 880 | 0.008 | 6.38 | 6.68 | 6.89 | 7.23 | 45.3 | 49.8 | 55.2 | 58.5 |
| 8 | 0.41 | 0.45 | 506 | 207.5 | 738 | 903 | 0.010 | 6.41 | 6.92 | 7.03 | 7.24 | 45.8 | 53.7 | 55.5 | 58.7 |
| 9 | 0.41 | 0.46 | 512 | 210.5 | 746 | 876 | 0.012 | 6.50 | 6.81 | 6.82 | 7.31 | 47.1 | 51.5 | 51.9 | 60.4 |
| 10 | 0.41 | 0.48 | 521 | 213.5 | 768 | 832 | 0.014 | 6.26 | 6.55 | 7.15 | 6.99 | 43.5 | 48.3 | 59.7 | 54.9 |
| 11 | 0.41 | 0.48 | 528 | 216.5 | 758 | 822 | 0.016 | 6.28 | 6.40 | 6.75 | 6.90 | 43.8 | 46.0 | 52.9 | 53.3 |
| 12 | 0.41 | 0.48 | 535 | 219.5 | 749 | 812 | 0.018 | 6.34 | 6.41 | 6.81 | 7.10 | 44.8 | 46.2 | 53.9 | 56.6 |
| 13 | 0.41 | 0.48 | 543 | 222.5 | 739 | 801 | 0.020 | 6.41 | 6.84 | 7.01 | 7.30 | 45.7 | 52.9 | 57.4 | 59.9 |
| 14 | 0.41 | 0.44 | 393 | 161.0 | 790 | 1 005 | 0.006 | 6.68 | 6.76 | 7.18 | 7.53 | 50.8 | 53.1 | 57.9 | 65.2 |
| 15 | 0.41 | 0.45 | 400 | 164.0 | 799 | 977 | 0.008 | 6.79 | 6.83 | 7.18 | 7.56 | 53.6 | 54.2 | 58.0 | 65.9 |
| 16 | 0.41 | 0.45 | 405 | 166.0 | 792 | 968 | 0.010 | 6.89 | 7.11 | 7.40 | 7.63 | 54.8 | 59.1 | 62.1 | 67.1 |

| 编号 | W/C | w | M _{水泥} / kg | M _水 / kg | M _砂 / kg | M _石 / kg | v | V/km·s ⁻¹ | | | | P/MPa | | | |
|----|------|------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|----------------------|------|------|------|-------|------|------|------|
| | | | | | | | | 7 d | 14 d | 28 d | 60 d | 7 d | 14 d | 28 d | 60 d |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 0.41 | 0.44 | 411 | 168.0 | 767 | 976 | 0.012 | 6.88 | 7.08 | 7.40 | 7.61 | 54.1 | 58.5 | 61.9 | 66.8 |
| 18 | 0.41 | 0.48 | 354 | 171.0 | 843 | 940 | 0.014 | 6.20 | 6.56 | 6.96 | 7.38 | 44.3 | 49.9 | 53.8 | 61.4 |
| 19 | 0.41 | 0.48 | 359 | 173.0 | 835 | 932 | 0.016 | 6.07 | 6.46 | 6.82 | 7.17 | 40.8 | 48.3 | 51.6 | 57.8 |
| 20 | 0.41 | 0.48 | 365 | 176.0 | 826 | 921 | 0.018 | 6.39 | 6.84 | 7.26 | 7.63 | 47.2 | 54.4 | 58.6 | 65.8 |

4 试验数据的回归分析

超声波在混凝土中的传播速度取决于混凝土的密实度和弹性性质, 而混凝土的弹性模量又与抗压强度存在着内在联系. 所以, 混凝土中超声波的传播速度 V 与混凝土抗压强度 P 之间也有着良好的相关性. 从图 1 中我们可以看出, 在钢纤维体积分数一定时, 钢纤维混凝土含砂率对超声波声速和混凝土

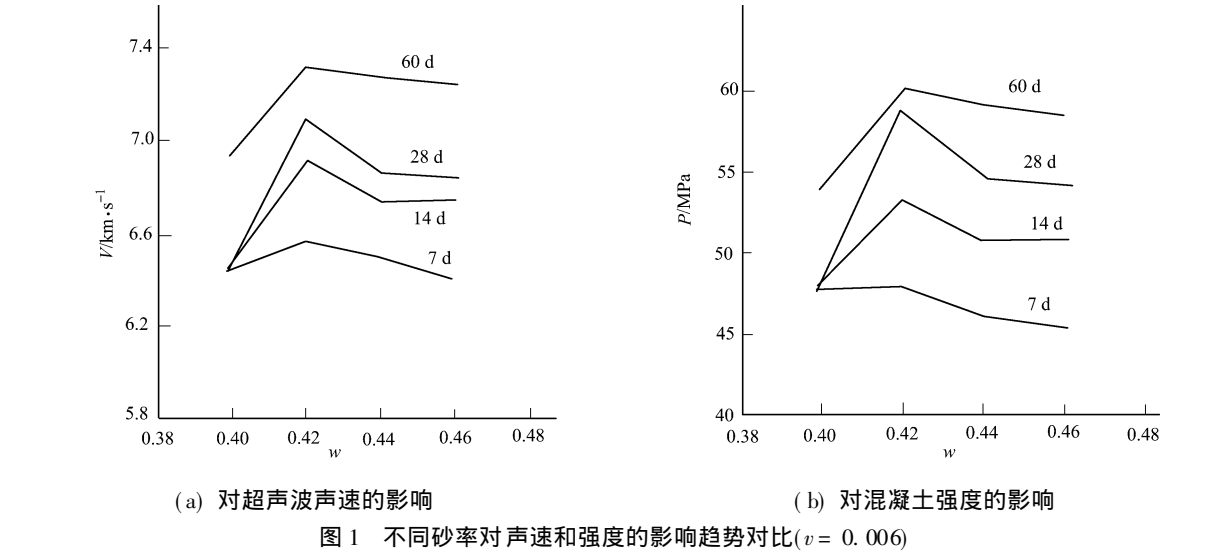


图 1 不同砂率对声速和强度的影响趋势对比($v = 0.006$)

抗压强度的影响趋势是一致的. 从图 2 可以看出, 在含砂率一定时, 钢纤维体积率对超声波声速和钢纤维混凝土抗压强度的影响趋势也是一致的. 由此可以得出, 超声波波速与钢纤维混凝土抗压强度之间必

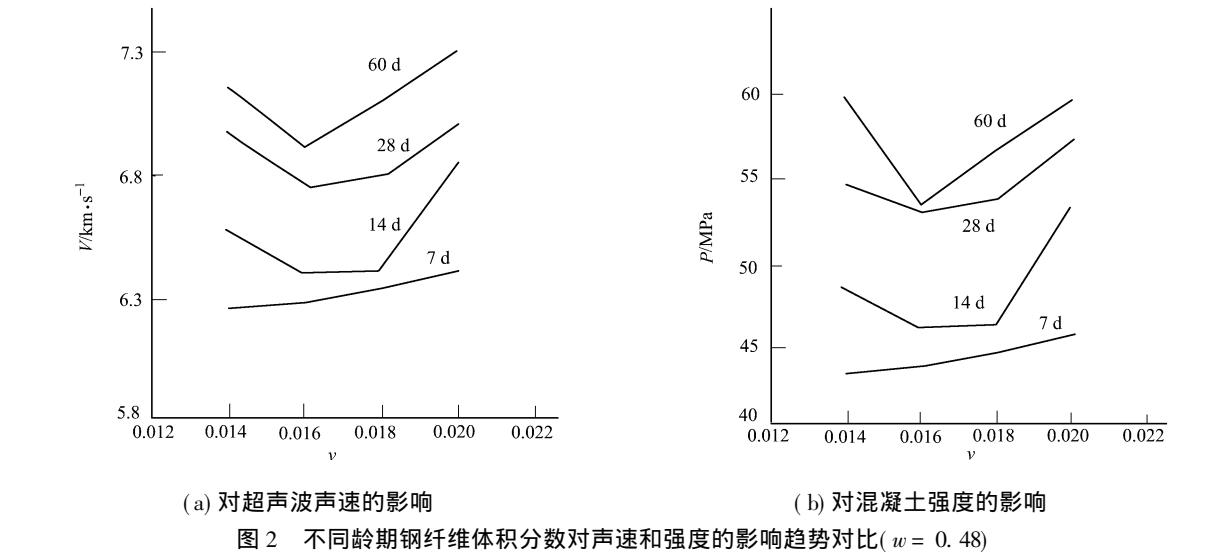


图 2 不同龄期钢纤维体积分数对声速和强度的影响趋势对比($w = 0.48$)

然存在某种相关性. 这样就可以建立超声波声速与钢纤维混凝土抗压强度之间的关系曲线. 在其他条件相同的情况下, 并不是砂、石掺的越多越好, 而是存在着一个最优含砂率. 本试验所采用的钢纤维体积分数为 0.002~ 0.020, 对于每一个钢纤维体积分数, 都采用 4 种不同的砂率进行试验. 从图 1 可以发现, 钢纤维体积分数为 0.006 时, 在不同龄期的条件下, 不同砂率对抗压强度的影响趋势. 当砂率 w 为 0.40

时,前 28 d 龄期钢纤维混凝土抗压强度几乎没有什么变化,不过 60 d 龄期变化较大. 在所有龄期内,砂率对钢纤维混凝土抗压强度的影响几乎都是一致的,并且影响较大. 其中, w 为 0.42 时,钢纤维混凝土抗压强度最高,说明在钢纤维体积分数为 0.006 时,最优 w 为 0.42. 但是随着龄期的增长,强度并没有太大的变化. 从图 2 可以发现, w 为 0.48 时,在不同龄期的条件下,对固定的钢纤维体积分数,超声波声速和混凝土抗压强度都是随着龄期的增长而增大的;在 14 d, 28 d 和 60 d 龄期内,钢纤维体积分数对超声波声速和混凝土抗压强度的影响是一致的,并且影响较大. 其中,钢纤维体积分数为 0.020 时,超声波声速最大为 $7.01\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (28 d),混凝土抗压强度最高为 57.4 MPa (28 d). 但是,在 7 d 龄期时,超声波声速和混凝土抗压强度都是随着钢纤维体积分数的增加而增加的. 对试验结果分别按线性函数、幂函数、指数函数共 3 种模式^[5] 进行回归分析. 经过计算,分析所得的回归方程结果及其相对误差 (δ) 和相对标准差 (e_r),如表 4 所示.

表 4 回归方程表

| 函数类型 | 回归方程 | δ (%) | e_r (%) |
|------|-----------------------------------|--------------|-----------|
| 线性函数 | $f_i = -54.758 + 15.767 1V_i$ | ± 1.8 | 6.28 |
| 幂函数 | $f_i = 0.994 1V_i^{2.0669}$ | ± 1.4 | 5.28 |
| 指数函数 | $f_i = 6.510 4 \times 1.357 3V_i$ | ± 1.5 | 5.66 |

5 结 束 语

通过以上的回归分析和相对误差检验可以看出,幂函数型的模式最好,指数函数型的模式次之,直线型的模式最差. 由此可以看出,钢纤维混凝土抗压强度与超声波波速之间存在着很好的相关性,运用超声波法对钢纤维混凝土进行检测是可行的. 对本次试验,按最优性原则选取幂函数型作为超声声速测强曲线. 另外,对于不同的钢纤维体积掺量,的确存在着最优的砂率. 因此,在设计过程中,不能任意的选择砂率. 由于混凝土强度与超声波波速之间的相关规律是随着技术条件不同而各异的,即定量关系是受原材料和工艺条件如水泥品种、粗骨料品种和含量、龄期、养护条件等因素影响的. 因此,本试验只对钢纤维体积分数为 0.002~ 0.020,粗骨料为碎石,养护条件为标准养护,龄期 (d) 为 7, 14, 28 和 60 的 C40 混凝土有效. 如果要建立统一的测强曲线,必须要进行足够多的试验研究,并经过严格的统计分析. 这样,利用统计测强曲线就可以十分方便的推定钢纤维混凝土的强度,并将其应用于实际工程的检测中. 本文只是对超声检测法在钢纤维混凝土中的应用的初步探讨,还有待今后更为完善的试验研究.

参 考 文 献

1 林小松,杨果林. 钢纤维高强与超高强混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 1~ 39
2 新编混凝土无损检测技术编写组. 新编混凝土无损检测技术[M]. 北京: 中国环境出版社, 2002. 102~ 124
3 胡建恺, 张谦琳. 超声检测原理和方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993. 114~ 126
4 陈莹, 曾志兴. 钢纤维轻骨料混凝土的强度和变形性能[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2003, 24(4): 380~ 384
5 姚俊杰, 陈祖湘. 超声波检测混凝土测强曲线的建立[J]. 广东土木与建筑, 2000, (1): 44~ 46

Ultrasonic Strength Test on Steel Fiber Reinforced Concrete

Huang Yihui Wang Quanfeng Luo Caisong Chen Huayan

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China;

School of Civil Engineering and Mechanics, Science & Technology of Huazhong University, 430074, Wuhan, China)

Abstract Ultrasonic inspection and compressive strength of 240 sets of the steel fiber reinforced concrete test pieces were investigated experimentally. According to the regression analysis of the test results, the authors set up a test curve of the ultrasonic velocity and the compressive strength. Based on this curve, the compressive strength of steel fiber reinforced concrete can be obtained by its ultrasonic velocity. The application of the ultrasonic technology in steel fiber reinforced concrete non destructive inspection is suitable and feasible.

Keywords ultrasonic detection, steel fiber reinforced concrete, compressive strength, non destructive detection