

文章编号: 1001-1455(2002)04-0368-05

高强高含量钢纤维混凝土抗侵彻性能试验研究*

刘瑞朝^{1,2}, 吴 飏², 张晓忠², 沈贵松², 牛小玲²

(1. 中国矿业大学北京校区岩土工程研究所, 北京 100083;

2. 洛阳水利工程研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 用试验方法研究分析了各种钢纤维含量的高强钢纤维混凝土与素混凝土抗侵彻性能的同异之处。试验结果表明, 高强高含量钢纤维混凝土与素混凝土相比, 具有良好的抗侵彻性能。这主要是因为混凝土中掺加大量钢纤维后, 材料的抗压强度及抗冲击韧性大幅提高的结果。

关键词: 高强高含量钢纤维混凝土; 侵彻; 抗压强度; 抗冲击韧性

中图分类号: O385; TU528.572 文献标识码: A

1 引言

对普通混凝土的抗侵彻性能已进行了大量研究^[1-3]。混凝土的抗侵彻能力与抗压强度有很大关系, 抗压强度越高, 其抗侵彻能力越强。但是受材料性能及施工工艺等方面的限制, 要极大提高普通混凝土的抗压强度是非常困难的。

实践已经证明, 在混凝土中掺加钢纤维可以提高混凝土强度^[4-5]。但是对钢纤维混凝土的抗侵彻性能研究并不多, H. Langberg 等^[6]对高强钢纤维混凝土的抗侵彻能力进行了研究, 指出在混凝土中掺加钢纤维, 可明显提高混凝土的抗侵彻能力, 但系统的研究结论无法得到; 孙伟等^[7]对 7% 含量的高强钢纤维混凝土的抗侵彻性能进行了试验研究。

本文中, 主要利用试验研究手段, 初步分析得出各种钢纤维含量的高强钢纤维混凝土与素混凝土的抗侵彻性能、抗侵彻机理异同之处, 试图为高强钢纤维混凝土在实际工程中的应用奠定基础。文中各符号说明: σ 为抗压强度; σ_f 为抗折强度; φ_f 为钢纤维体积分数; E_N 为材料抗冲击韧性; H 为侵彻深度; v 为射弹速度; D 为弹体直径; M 为射弹质量; S 为成坑面积; S_P 为弹体截面积; n 为弹体磨失量。

2 高强高含量钢纤维混凝土基本物理力学性能分析

为了研究高强高含量钢纤维混凝土的抗侵彻性能, 必须对与其侵彻相关的基本物理力学性能有深入了解。主要测试抗压强度、抗折强度、抗冲击韧性三项指标。在试验中, 为了突出钢纤维含量的不同对材料物理力学性能的影响, 所有试件的水灰比相同, 添加剂含量相同, 考虑到高含量钢纤维混凝土的施工可行性, 砂和石子的配比随着试件钢纤维含量的不同有所调整。具体参数: 水灰比为 0.26, 减水剂掺量为 1.3%, 硅灰掺量为 15%, 砂子与水泥硅灰质量比为 1:1。试验结果见表 1 和图 1。

从图 1 可以看出, 随着钢纤维含量的增加, 混凝土的抗压强度大幅度增加, 当钢纤维含量达 10% 时, 其抗压强度提高了 52%。这充分说明在混凝土中掺加钢纤维对其抗压强度有明显提高。但当钢纤维含量达到 12% 时, 混凝土的抗压强度反而下降了。这主要是由于钢纤维含量太高, 混凝土要想拌匀和捣实在实际施工中已变得非常困难, 因而其强度无法增高到预期值。从图 1 还可以看出, 随着钢纤维含量的增加, 混凝土的抗折强度比素混凝土提高了 6.5 倍。

* 收稿日期: 2002-03-14; 修回日期: 2002-05-23

作者简介: 刘瑞朝(1965—), 男, 博士。

表 1 钢纤维含量对混凝土强度的影响

Table 1 Effect of steel fiber volume on concrete strength

| 试件 编号 | $\varphi_f / (\%)$ | σ_f / MPa | | | $\bar{\sigma}_f / \text{MPa}$ | $\bar{\sigma}_f / \bar{\sigma}_{f0}$ | σ_f / MPa | | | $\bar{\sigma}_f / \text{MPa}$ | $\bar{\sigma}_f / \bar{\sigma}_{f0}$ |
|-----------------|--------------------|-------------------------|-------|-------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------|--------|-------------------------------|--------------------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | | 1 | 2 | 3 | | |
| SF ₀ | 0 | 6.45 | 5.48 | 7.31 | 6.41 | 1.00 | 128.67 | 130.22 | 125.33 | 128.07 | 1.00 |
| SF ₁ | 2 | 10.27 | 7.97 | 7.69 | 8.64 | 1.35 | 130.00 | 130.67 | 131.25 | 130.64 | 1.02 |
| SF ₂ | 4 | 11.97 | 10.27 | 10.41 | 10.88 | 1.70 | 127.11 | 136.00 | 141.78 | 134.96 | 1.05 |
| SF ₃ | 6 | 10.48 | 10.41 | 8.97 | 9.95 | 1.55 | 151.56 | 157.78 | 146.22 | 151.85 | 1.19 |
| SF ₄ | 8 | 29.35 | 32.35 | 32.17 | 31.29 | 4.88 | 182.67 | 170.67 | 170.22 | 174.52 | 1.36 |
| SF ₅ | 10 | 39.83 | 37.24 | 34.48 | 37.03 | 5.78 | 197.11 | 192.67 | | 194.89 | 1.52 |
| SF ₆ | 12 | 51.17 | 48.27 | 44.14 | 47.86 | 7.47 | 163.11 | 150.44 | 158.89 | 157.48 | 1.23 |

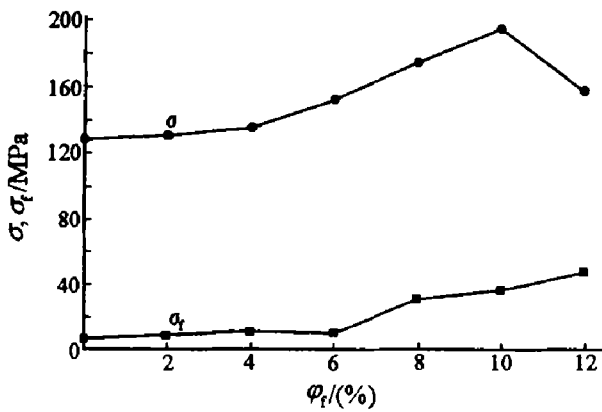


图 1 钢纤维体积分数对材料强度的影响曲线

Fig.1 Effect of steel fiber volume on concrete strength

本文中，混凝土的抗冲击韧性定为如图 2 所示的动载应力-应变曲线所包裹的面积。材料的动载应力-应变曲线与加载速率有很大关系，射弹与材料碰撞时加载速率很高，这样的应力-应变曲线很难测出来，即使在低速情况下，要想得出高强高含量钢纤维混凝土的动载应力-应变曲线也不容易。基于此，采用落锤法测试混凝土材料的抗冲击韧性，见图 3。

需要特别说明的是，图 3 所示的抗冲击韧性数据与定义的材料抗冲击韧性数据并不相同，主要原因有：(1) 加载速率不同。(2) 图 3 所示的抗冲击韧性是用落锤对材料冲击多次后得到的。考虑到非线性动力学冲击能量与加载路径有关，例如：钢纤维体积分数 4% 的混凝土当锤重为 20kg，在 3.96m 高度落下需冲击 3 次，势能能达到 2328.5J 时材料破坏；当锤重为 10kg，在同样高度落下，需冲击 11 次，势能能达到 4268.9J 时材料破坏。所以图 3 所示的数据仅具有借鉴意义。

为了研究高强高含量钢纤维混凝土的抗侵彻性能，在材料真实的抗冲击韧性无法得到的

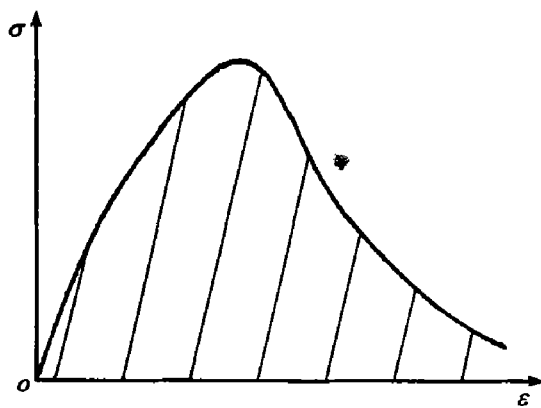


图 2 钢纤维混凝土动载应力-应变曲线

Fig.2 Dynamic stress-strain curve of high strength volume concrete

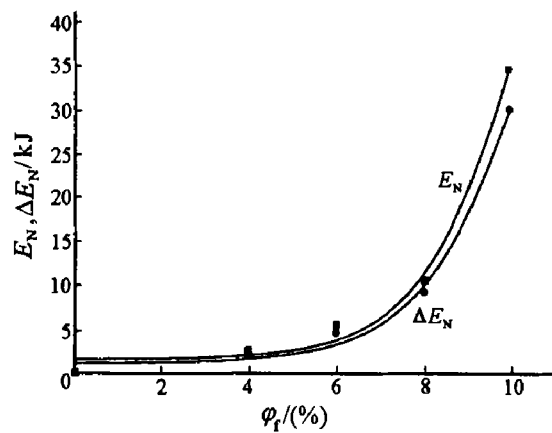


图 3 钢纤维体积分数对抗冲击韧性的影响曲线

Fig.3 Effect of steel fiber volume on concrete toughness

情况下,采用落锤法测试。为了尽可能地减少误差,试验中落锤高度统一,锤重大小要适宜,以尽可能减少冲击次数为标准。

由图 3 可看出,当钢纤维含量增大时,混凝土抗冲击韧性大幅提高。

3 高强高含量钢纤维混凝土抗侵彻试验研究

试验采用 $\varnothing 30\text{mm}$ 炮作为发射装置,弹丸直径 30mm ,弹丸质量 0.529kg ,全部为正侵彻。为了研究钢纤维含量提高对侵彻效应的影响,制作了基体强度为 100MPa 、钢纤维含量分别为 0% 、 2% 、 4% 、 6% 、 8% 、 10% 的靶板,射弹射速分别为 314 、 414m/s 的正侵彻试验。

从图 4 可以看出,随着混凝土中钢纤维含量的增大,射弹侵彻深度明显减小,其减小幅度随着靶速度的不同有所改变。当射弹以 414m/s 速度着靶,同时钢纤维掺量达到 10% 时,其侵彻深比素混凝土减少约 33% ,这说明在素混凝土中加入钢纤维对侵彻效应有明显的影响。其主要原因是钢纤维混凝土强度的提高,关于混凝土抗压强度对侵彻的影响,已有详细研究^[1-3]。图 5 给出了在素混凝土中加入钢纤维后,由于抗压强度的提高对侵彻深度的影响(仅考虑抗压强度,不考虑其它因素影响)。

由图 5 可以看出,随着混凝土中钢纤维含量的增大,其抗压强度越来越高,因而其侵彻深度越来越浅,当钢纤维含量达到 10% 时,与其强度相同的素混凝土比基体混凝土侵彻深度减少约 20% 。

前已提及,在素混凝土中掺加 10% 钢纤维,其侵彻深度共减少约 33% ,其中 20% 为抗压强度所做的贡献,那么另外就是材料的抗冲击韧性所起的作用(图 5 中阴影部分)。材料的抗冲击韧性实质上是射弹对材料冲击破坏所消耗的能量,材料的抗冲击韧性越高,射弹侵彻过程中所消耗的动能就越大,因而缩短了侵彻路径。此外,图 5 也表明普通含量钢纤维混凝土($\varphi_f \leq 2\%$)抗侵彻效果不明显,主要是因为钢纤维含量不高,混凝土的强度及抗冲击韧性增加不明显,因而对侵彻深度的影响也不明显。

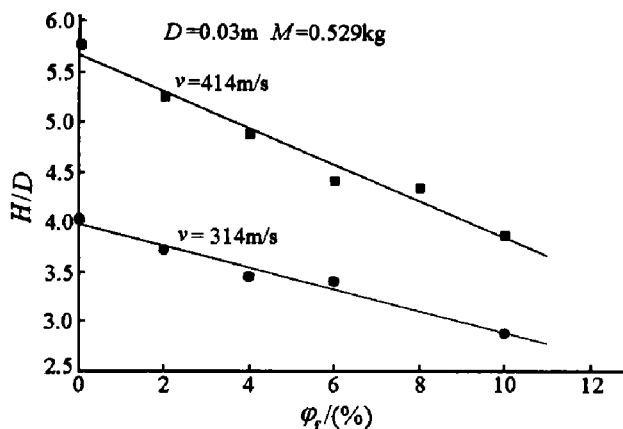


图 4 高强高含量钢纤维混凝土中钢纤维体积分数对侵彻深度的影响

Fig. 4 Effect of steel fiber volume on penetration depth

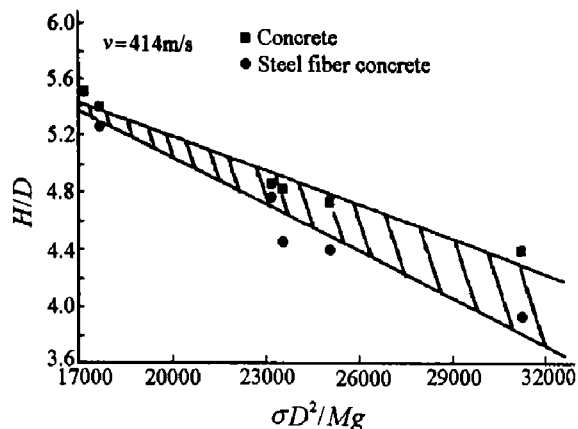


图 5 钢纤维混凝土及素混凝土对侵彻深度的影响比较

Fig. 5 Comparison of penetration depth for example conventional concrete and steel fiber concrete

图 6、图 7 也是从试验数据中总结出来的。图 6 清楚地表明随着钢纤维含量的增大,射弹冲击成坑面积显著减小,在着靶速度为 414m/s 的条件下,由于素混凝土的脆性太大,抗冲击韧性很低,因而冲击成坑面积可达到 $115.25S_p$,当钢纤维含量增加到 10% 时,由于其抗冲击韧性成倍增加,导致冲击成坑面积迅速减小,仅为素混凝土的 24% 。可见高强高含量钢纤维混凝土具有良好的抗冲击剥落成坑性能。此外,从图 6 也可以看出,随着射弹着靶速度的降低,冲击成坑面积显著下降,并且当钢纤维含量增大时,由射弹速度不同所引起的冲击成坑面积差异显著减小。

图 7 表明随着钢纤维含量的增大,钢纤维混凝土的抗压、抗剪性能显著提高,射弹在侵彻过程中弹头所受的阻力及弹体摩擦力也随之增大,因而弹体磨失量随着钢纤维含量的增大而增大,这说明高强高含量钢纤维混凝土对射弹的损伤能力明显优于素混凝土。

综上所述, 高强高含量钢纤维混凝土具有优良的抗侵彻性能, 它是由材料抗压强度的提高及抗冲击韧性的提高共同作用的结果。

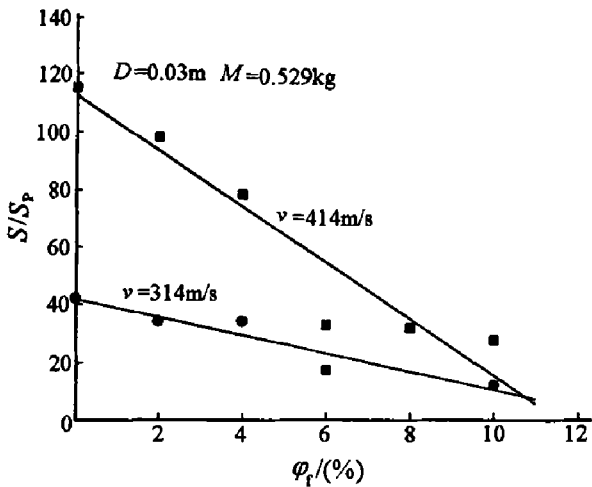


图6 钢纤维体积分数对侵彻弹坑的影响

Fig.6 Effect of steel fiber volume on penetration scab area

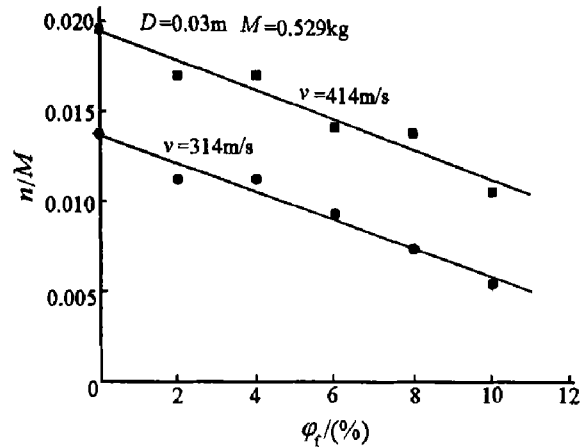


图7 钢纤维体积分数对弹体磨失量的影响

Fig.7 Effect of steel fiber volume on projectiles loss of mass

4 结 论

综合上述分析可以得出以下初步结论:

(1) 高强高含量钢纤维混凝土材料的基本物理力学性能明显优于素混凝土, 当在素混凝土中掺加 10% 含量钢纤维而形成高强高含量钢纤维混凝土后, 其抗压强度比素混凝土提高了 52%, 抗折强度提高了 6.5 倍, 抗冲击韧性增加了几百倍。

(2) 对于高强高含量钢纤维混凝土材料, 除了强度是影响侵彻的主要因素, 材料的抗冲击韧性也是影响侵彻的一个重要因素。在射速 414m/s 的情况下, 钢纤维含量 10% 的高强高含量钢纤维混凝土材料的侵彻深度比基体素混凝土减少约 33%, 它是高强高含量钢纤维混凝土材料抗压强度提高及抗冲击韧性值增大共同作用的结果。

参考文献:

- [1] Young C W. Penetration Equations[R] . SAND-97-2426, DE-98001508, 1997.
- [2] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of Grout and Concrete Targets with Ogive-nose Steel Projectiles[J] . Int J Impact Engng, 1996, 18(5):465-476.
- [3] Fraser R D G. Penetration of Projectiles into Concrete and Soil Working Paper [R] . AW(87)wp13, 1987.
- [4] 孙伟. 钢纤维对高强混凝土的增强、增韧及阻裂效应的研究[J] . 东南大学学报, 1991, 21(1):1-7.
SUN Wei. Steel Fiber Influence on the Effects of Strengthening Toughening and Crack Arresting of High Strength Concrete[J] . Journal of Southeast University, 1991, 21(1):1-7.
- [5] Nuamann A. Exploring a New High Performance Concrete SIFCON[J] . Cement in the Future, 1991, 3(1):26-32.
- [6] Langberg H, Markeset G. High Performance Concrete-penetration Resistance and Material Development[A] . Proceedings of 9th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures[C] . Norwegian Defense Construction Service, 1999.
- [7] LUO Xin, SUN Wei, Chan S Y N. Characteristics of High-performance Steel Fiber-reinforced Concrete Subject to High Velocity Impact[J] . Cement and Concrete Research, 2000, 30:907-917.

Tests on Resisting Projectiles Penetration of High Strength Volume Steel Fiber Concrete

LIU Rui-chao^{1,2}, WU Biao², ZHANG Xiao-zhong², SHEN Gui-song², NIU Xiao-ling²

(1. *Geotechnical Engineering Technical Institute,*

China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. *Luoyang Hydraulic Engineering Technical Institute,*

Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: In this paper, the mechanical performance of high strength volume steel fiber concrete (HHSC) is discussed. The tests have proved that HHSC has perfect effect on resisting projectile penetration. The reason is that compressive strength and impact toughness of the concrete are increased extremely, along with increasing volume of steel fiber. The obvious effect on projectile penetration is not only caused by compressive strength of concrete, but impact toughness of the concrete.

Key words: high strength volume steel fiber concrete; penetration; compressive strength; impact toughness

第六届全国爆轰学术会议通知

中国力学学会爆炸力学专业委员会爆轰专业组决定, 2003 年举行第六届全国爆轰学术会议, 望广大从事爆轰研究的工作者积极投稿, 现将有关事宜通知如下:

一、会议时间: 2003 年 4 月

会议地点: 江西井冈山

二、会议交流内容

1. 起爆理论与方法

6. 膛炸与发射安全性分析

2. 凝聚相、气相及多相爆轰理论

7. 爆炸灾害的预防与控制

3. 爆轰波的传播与作用

8. 爆轰问题的实验技术

4. 冲击、燃烧到爆轰的转化

9. 爆轰问题的数值模拟技术

5. 火工品与引信设计中的爆轰问题

10. 其它与爆轰问题相关的交叉技术

三、会议论文要求

1. 所提交的论文必须是未公开发表的

2. 论文格式参见《北京理工大学学报》

3. 凡录用的论文, 将在《北京理工大学学报》上正式发表

4. 截止时间: 2002 年 11 月底

爆轰专业组将组织专家对论文进行评审, 2002 年 12 月发出录用通知, 会议将对录用的论文收取适当的版面费。

四、主办单位: 中国力学学会爆炸力学专业委员会

承办单位: 北京理工大学

联系人: 黄风雷教授, 张庆明教授, 陈利副教授, 刘彦博士

通讯地址: 100081 北京理工大学机电工程学院

电话: (010)68914284 E-mail: lichenme@bit.edu.cn

中国力学学会爆炸力学专业委员会

北京理工大学爆炸与安全科学国家重点实验室(代章)

2002 年 10 月