

文章编号:1007-6069(2004)03-0015-06

聚丙烯纤维高性能混凝土剪力墙 动力反应分析

刘志伟 周克荣 李杰

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

摘要:对掺聚丙烯纤维的高性能混凝土剪力墙的动力反应特性进行了研究。首先通过试验测得聚丙烯高性能混凝土的一些力学参数,而后编写了结构动力反应计算程序,最后利用该程序对一 15 层剪力墙实例进行计算,比较了普通混凝土与高性能混凝土剪力墙结构的动力反应结果,结果表明聚丙烯高性能混凝土剪力墙比普通混凝土剪力墙具有更好的抗震性能。

关键词:高性能混凝土;聚丙烯;动力反应;剪力墙

中图分类号:P315.9 **文献标识码:**A

An analysis on the dynamic response of HPC shear wall with polypropylene fibers

LIU Zhi-wei ZHOU Ke-rong LI Jie

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The research of the dynamic response of HPC shear wall with polypropylene fiber has been presented in this paper. At first, we obtain the mechanic parameters of polypropylene HPC by testing. Then, a program for calculating the dynamic response of HPC shear wall has been developed. Finally, we calculate the dynamic response of an exemple shear wall of a 15 storied building and compare the results of polypropylene HPC wall with those of ordinary concrete wall and HSC wall. The results show that polypropylene HPC wall has better seismic performance than ordinary concrete wall and HSC wall.

Key words: HPC; polypropylene; dynamic response; shear wall

1 引言

高性能混凝土 HPC(High Performance Concrete),具有高强度、低渗透、高抗冻^[1]等优点。但混凝土的一个缺点就是随着混凝土强度的提高,其延性下降。这对于作为高层建筑主要抗震结构的剪力墙来说是一个非常不利的因素。但已有试验^[2]表明,在混凝土中添加低弹模的聚丙烯纤维可以显著改善混凝土的延性。为了研究这种掺聚丙烯纤维的 HPC 剪力墙结构的抗震性能,特别是整体结构的非线性动力反应特征,本文在试验的基础上采用结构非线性动力反应的时程分析法,分析了掺聚丙烯纤维的高性能混凝土剪力墙结构,并与普通混凝土和普通高强混凝土剪力墙结构进行了比较。

收稿日期:2003-11-08; 修订日期:2004-04-18

基金项目:教育部 21 世纪教育振兴行动计划专项基金(2000)

作者简介:刘志伟(1978-),男,湖北赤壁人,硕士研究生,主要从事高性能混凝土剪力墙结构抗震性能与性能设计方面的研究工作。

2 剪力墙结构动力反应分析模型和方法

结构抗震设计已从简单的地震系数法过渡到考虑结构动力特性的反应谱理论设计法。然而,由于地震是一个随时间变化的过程,反应谱法未能反映结构在地震过程中变形、内力随时间的变化,有时不能找出结构真正的薄弱部位。随着计算机技术的发展,时程分析法逐渐得到更多的实际应用。

2.1 建立模型

钢筋混凝土房屋结构非线性地震反应分析的力学模型一般可分为三类,即层间模型、杆系模型和平面应力元模型,各种模型的利弊详见参考文献^[3,4,5]。从实用出发,本文结构分析模型是建立在如下基本假定基础上的:

- (1) 结构的质量按就近原则集中在楼板处;
- (2) 构件考虑弯曲剪切变形,不计轴向变形,不考虑转动惯量;
- (3) 剪力墙只考虑在平面内的刚度,平面外刚度不计;
- (4) 结构底部与基础完全固接,不考虑上部结构和基础的共同作用。

这样剪力墙结构的计算模型简化为图1所示的多自由度串联杆系模型。串联多自由度体系弹塑性动力分析模型通常有剪切模型和弯剪模型两种。由于用于高层建筑中的剪力墙的整体高宽比通常都大于4,所以结构振动时弯曲效应不容忽视。因此,本文选用同时考虑弯曲变形和剪切变形的弯剪模型。

2.2 恢复力模型

本文采用常见的三线型刚度退化恢复力模型,如图2所示。此恢复力模型由骨架曲线和滞回曲线两部分组成,骨架曲线包括了开裂点、屈服点、极限点等界点。利用这种模型,在动力计算开始前仅要存储骨架的界点值。为了确定这些界点值,首先利用静力非线性全过程分析方法分别计算出墙单元的弯矩-曲率曲线和剪力-位移曲线,然后利用三折线拟合出两条骨架曲线。滞回曲线的刚度退化规则及其刚度修正过程在参考文献^[6]中已做了详细介绍,本文不再累述。最后将修正后的剪切刚度和弯曲刚度代入总刚表达式中得到修正后的总刚矩阵。

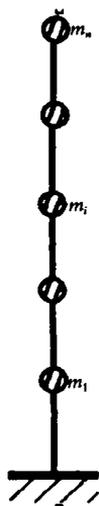


图1

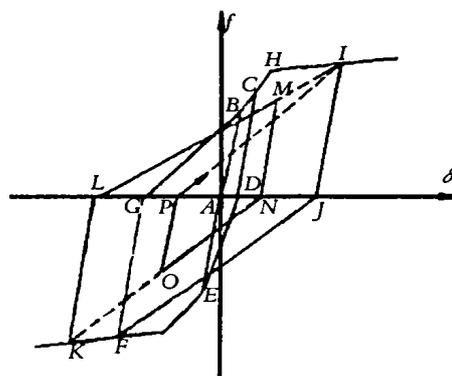


图2 恢复力模型

2.3 计算方法

结构振动的运动微分方程表示为

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (1)$$

式中: $\ddot{x}_g(t)$ 为地面运动加速度; $[M]$ 为对角质量矩阵; $[K]$ 为结构弹性阶段抗侧移总刚度矩阵; $[C]$ 为结构Rayleigh阻尼矩阵,取质量矩阵 $[M]$ 和刚度矩阵 $[K]$ 的线性组合,其表达式为:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

式中, α, β 可以通过结构体系的第*i*、*j*振型的自振频率 ω_i, ω_j 来求得:

$$\alpha = 0.1\omega_i\omega_j/(\omega_i + \omega_j)$$

$$\beta = 0.1/(\omega_i + \omega_j)$$

上面的运动方程在每一楼层处包含两个自由度,即剪力墙的侧移和剪力墙的转动,可用凝聚法消去转动自由度。本文采用无条件收敛的 Wilson- θ 法来求解微分方程(1)。先求时间步长内刚性楼板质心处的位移增量 $\Delta x(t)$ 、速度增量 $\Delta \dot{x}(t)$ 和加速度增量 $\Delta \ddot{x}(t)$, 然后求出各构件的杆端力及变形增量,根据三线型退化恢复力模型获得构件新的刚度,再进行下一步数值积分。具体过程见参考文献^[7]。

3 材料性能试验

3.1 高性能混凝土的配制

为了提高混凝土的延性,在混凝土中掺了乱向分布的单丝聚丙烯短纤维。此外,还添加了磨细矿渣和 FDN 高效减水剂来提高混凝土的强度。机械搅拌后塌落度达到 18cm。

3.2 试验结果

(1) 单丝聚丙烯短纤维的力学参数

抗拉强度为 400MPa;弹性模量为 5~7GPa;

密度为 9kN/m³;纤维直径为 40 μ m;

长度为 15~20mm;延伸率为 8%;

纤维体积掺量为 0.30% (每立方米混凝土掺 0.0030 立方米)。

(2) 高性能混凝土配合比

配合比按 C50 设计,其中碎石直径不超过 20mm,见表 1。

表 1 配合比设计(重量比)

525#水泥	磨细矿渣	水	砂子	石子	FDN 减水剂
312	208	168	600	1120	5.2

对混凝土试块分组取样进行立方体和棱柱体抗压试验,每组 3 个,共 4 组。混凝土试块大小为 10cm \times 10cm \times 10cm 的立方体和 10cm \times 10cm \times 30cm 的棱柱体,取平均值得高性能混凝土的材料特性值;在用棱柱体测弹性模量时,分别在棱柱体的两侧各贴一片 10cm 的应变片,利用计算机自动采集全过程的压力和微应变,取两侧的微应变平均值以消除细微的偏心误差,算出的结果为 2.1×10^4 MPa,这与文献^[8]中的试验结果和法国预制混凝土工业研究中心的试验结果比较接近。普通混凝土和普通高强混凝土的材料特性值分别取自规范 GB50010 中 C30 和 C60 混凝土的标准值。

此外,还做了三片聚丙烯 HPC 剪力墙进行反复加载试验,测得其屈服时和极限承载力时的层间位移角分别为 1/256 和 1/83 左右,这里偏于安全的取为 1/300 和 1/150。由于目前规范规定的剪力墙层间位移角限值的主要目的是使高层建筑不出现影响正常使用的裂缝或损坏,因此实际中结构的极限位移角比规范规定的限值要宽松得多。文献^[9]中统计出抗震墙的极限位移角主要分布在 1/333~1/125 之间,本文分别取普通混凝土和普通高强混凝土剪力墙的极限位移角为 1/200 和 1/300。材料力学性质见表 2。

表 2 材料力学性能表

混凝土类型	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E_c (10^4 MPa)	极限位移角
聚丙烯高性能混凝土	38.0	2.83	2.1	1/150
普通高强混凝土	38.5	2.85	3.6	1/300
普通混凝土	20.1	2.01	3.0	1/200

4 算例

根据以上原理编制了计算程序,利用该程序分别对聚丙烯 HPC 剪力墙和普通混凝土剪力墙进行了动力反应计算。此剪力墙的尺寸为:层高 3m,共 15 层,剪力墙宽度为 12m,厚度为 0.4m,每一层质量为 500 吨。

由于结构对不同地震波的反应差异较大,所以选取了两条不同的地震波,一条是 El Centro(NS)地震波,另一条为 Taft 波。El Centro 波的最大幅值为 0.3194g,Taft 波的最大幅值为 0.1551g。两条地震波作用时间均为 10 秒。

4.1 El Centro 地震波作用下的剪力墙反应

在 El Centro 地震波作用下,剪力墙的顶点位移、底部剪力和底部弯矩时程曲线分别见图 3、图 5 和图 6;图 4 所示为各层最大层间位移;剪力墙的地震反应数据见表 3。

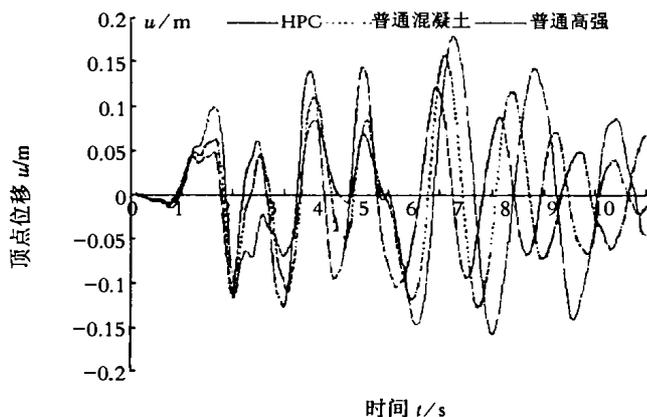


图 3 顶点位移

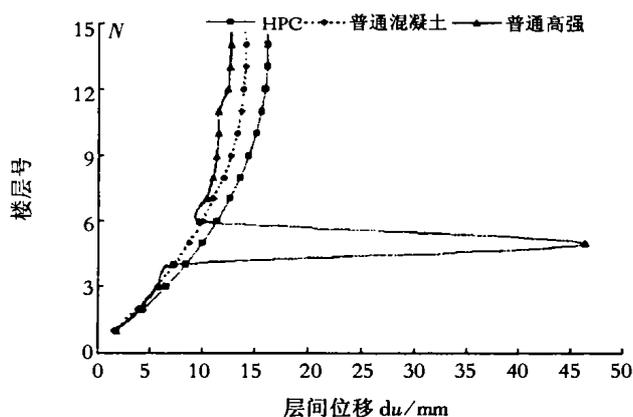


图 4 层间位移

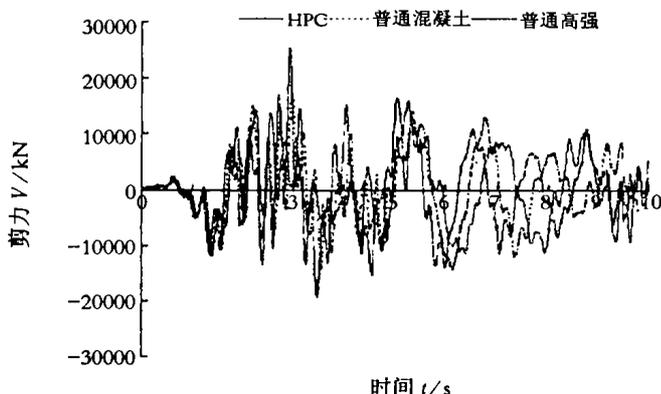


图 5 底部剪力

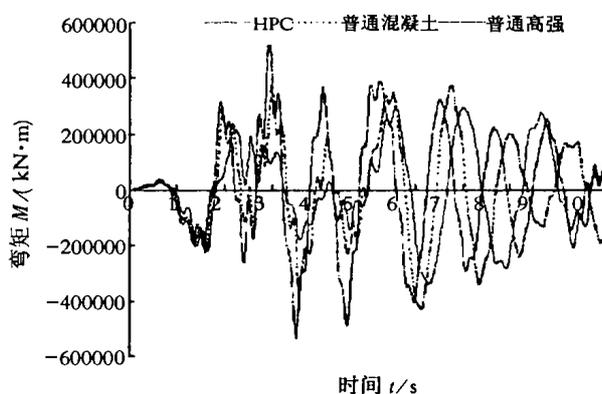


图 6 底部弯矩

表 3 峰值为 0.3194g 的 El Centro 地震波作用下的剪力墙反应数据

混凝土类型	基本自振周期 (s)	顶点最大位移 (m)	最大层间位移 (mm)	底部最大剪力 (kN)	底部最大弯矩 (kN·m)
聚丙烯 HPC	1.5224	0.1783	16.1	14290	340700
普通高强混凝土	1.1627	0.1432	46.4	25230	538200
普通混凝土	1.2737	0.1562	14.0	17040	430800
聚丙烯 HPC / 普通高强	130.9%	124.5%	34.7%	56.6%	63.3%
聚丙烯 HPC / 普通混凝土	119.5%	114.1%	115%	83.9%	79.1%

从图 3、图 4 和表 3 中可以看出聚丙烯 HPC 剪力墙的顶点位移比普通混凝土和高强混凝土剪力墙要稍大;但最大层间位移大于普通混凝土剪力墙而小于普通高强混凝土剪力墙,原因在于普通高强混凝土剪力墙第 5 层在强烈的地震力作用下完全破坏而丧失承载力。而从图 5、图 6 和表 3 中可以看出聚丙烯 HPC 剪力墙的底部剪力和弯矩比普通混凝土剪力墙要小一些,比普通高强混凝土剪力墙要小将近一半。在聚丙烯 HPC 和普通高强混凝土的 f_c (见表 2) 非常接近的情况下,普通高强混凝土剪力墙已完全破坏,而聚丙烯 HPC

剪力墙却没有。这些表明聚丙烯高性能混凝土剪力墙比普通混凝土剪力墙和普通高强混凝土剪力墙具有更好变形耗能能力和更小的地震作用力。

4.2 Taft 地震波作用下的剪力墙反应

在 Taft 地震波的作用下,剪力墙的顶点位移、底部剪力和底部弯矩时程曲线分别见图 7、图 9 和图 10;图 8 所示为各层最大层间位移;剪力墙的地震反应数据见表 4。

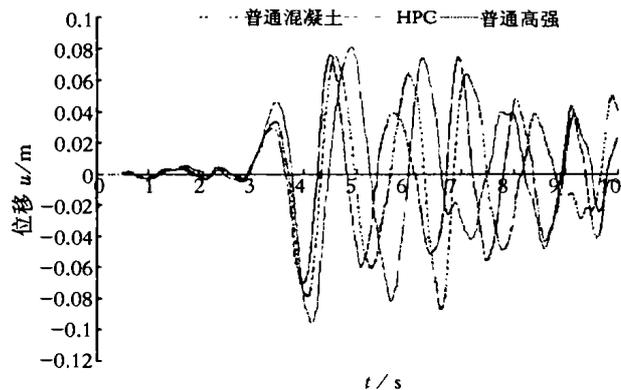


图 7 顶点位移

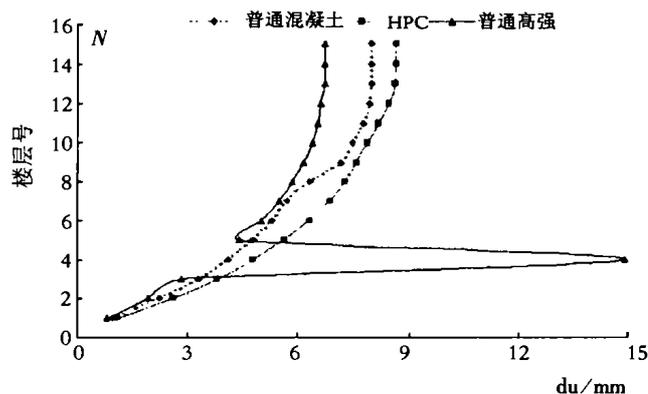


图 8 层间位移

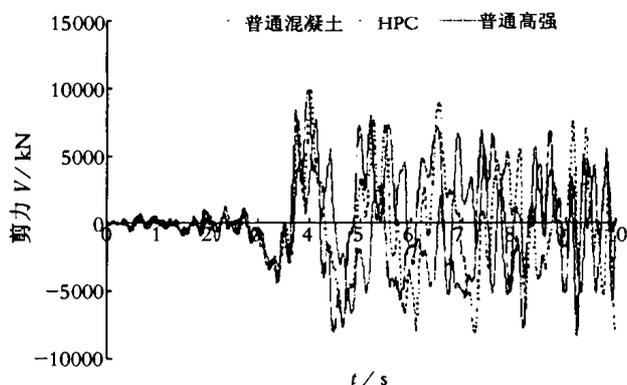


图 9 底部剪力

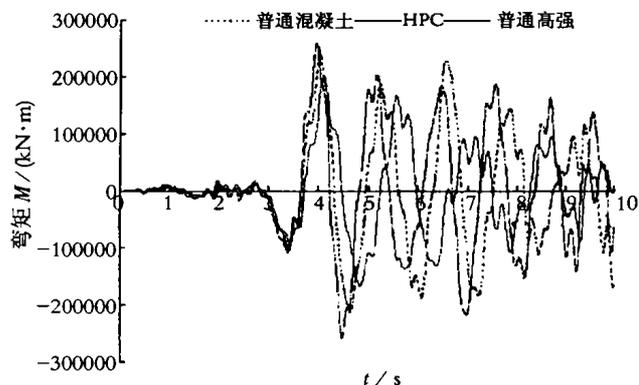


图 10 底部弯矩

表 4 峰值为 0.1551g 的 Taft 地震波作用下的剪力墙反应数据

混凝土类型	基本自振周期 (s)	顶点最大位移 (m)	最大层间位移 (mm)	底部最大剪力 (kN)	底部最大弯矩 (kN·m)
聚丙烯 HPC	1.5224	0.0963	8.63	7690	202100
普通高强混凝土	1.1627	0.0760	14.93	9797	258200
普通混凝土	1.2737	0.0870	7.98	9886	249200
聚丙烯 HPC 普通高强	130.9%	126.7%	57.8%	78.5%	78.3%
聚丙烯 HPC 普通混凝土	119.5%	110.7%	108.1%	77.8%	81.1%

从这些数据我们可以发现剪力墙在 Taft 波作用下的反应和在 El Centro 波作用下的反应是类似的,此时普通高强混凝土剪力墙的薄弱部位出现在第 4 层,可以看出聚丙烯 HPC 剪力墙的抗震性能最好,普通混凝土剪力墙次之,普通高强混凝土剪力墙最差,很容易在某一薄弱层发生脆性破坏。这些也都表明聚丙烯高性能混凝土剪力墙比普通混凝土和普通高强混凝土剪力墙具有更好的变形耗能能力和更小的地震作用力。

通过比较两种地震波作用下的结果发现:三种混凝土剪力墙的位移相差不是太大,但地震作用力却相差很大,使得高强混凝土剪力墙某一薄弱层的地震作用力超过极限承载力,从而导致普通高强混凝土剪力墙的某一层层间位移角大大超过其所能承受的极限层间位移角(见表 2)而使得整个结构坍塌,尽管其它部分都完好无损。还有,不同的地震波作用下结构出现的薄弱层是不同的,这也表明对结构进行动力反应分析是非

常有必要的。

5 结论及建议

通过上面的数据比较,我们可以得出如下结论:聚丙烯 HPC 剪力墙比普通混凝土和普通高强混凝土剪力墙具有更好的变形耗能能力和更小的地震作用力。其主要原因在于:高性能混凝土中掺的低弹模聚丙烯纤维较大地提高了混凝土的延性性能,从而使得混凝土的弹性模量变小,而当截面形状相同时,混凝土的弹性模量越小时,剪力墙的刚度越小,所以其基本周期、顶点位移和层间位移变大,而地震作用力减小。

建议在工程实际中使用聚丙烯高性能混凝土剪力墙,不但强度高、延性好,而且其耐火、耐冻等综合性能都较好,尽管它的层间位移和顶点位移要稍大,但它容许的层间屈服位移和层间极限位移要比普通混凝土大得多。而普通高强混凝土剪力墙地震作用力较大,很容易出现某一薄弱层脆性剪切破坏,建议慎重使用。普通混凝土地震反应介于二者之间,但其强度太低,而且抗火、抗冻及耐久性等较差,可用于一般性建筑物中。

参考文献:

- [1] Sommer H 著;冯乃谦,等译. 高性能混凝土的耐久性[M]. 北京:科学出版社,1998. 4-5.
- [2] 刘志伟,周克荣. HPC 剪力墙抗震性能模型试验[A]. 同济大学 95 周年校庆征文选[C]. 上海:同济大学出版社,2002. 313-319.
- [3] 李国强,等. 钢筋混凝土剪力墙非线性动力分析模型[J]. 世界地震工程,2000,16(2):13-18.
- [4] 孙景江. 钢筋混凝土剪力墙非线性分析模型综述[J]. 世界地震工程,1994,10(1):43-46.
- [5] 汪梦甫,沈蒲生. 钢筋混凝土高层结构非线性地震反应分析现状[J]. 世界地震工程,1998,14(2):1-8.
- [6] 李杰,李国强. 地震工程学导论[M]. 北京:地震出版社,1992. 166-174.
- [7] 吕西林,等. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社,1999. 203-211.
- [8] 李光伟,等. 聚丙烯微纤维混凝土性能试验研究[J]. 水电工程研究,1999,(4):1-7.
- [9] 郭子雄,吕西林. 建筑结构在罕遇地震下弹塑性变形验算的讨论[J]. 工程抗震,1999,13(1):13-18.