

GFRP 约束混凝土构件在防护工程中的应用及数值模拟^{*}

刘颖芳 尹 平 张湘冀

(中国人民解放军后勤工程学院军事土木工程系,重庆 400041)

摘要 首先分析了一种由玻璃纤维增强塑料(GFRP)约束混凝土制作的新型抗冲击、抗爆炸的防护构件的力学性能,研究表明 GFRP 约束混凝土既提高了混凝土的压缩强度,又提高了混凝土的延性,从而提高了该种构件抗侵略的能力。最后利用 LS-DYNA 软件进行了数值仿真,结果表明,GFRP 约束混凝土防护构件的抗侵略能力比普通混凝土防护构件有很大提高。

关键词 玻璃纤维增强塑料 约束混凝土 防护工程 侵略

我国从 20 世纪 80 年代后期开始对纤维增强塑料加固修复土木建筑结构技术进行研究和工程应用以来,已取得大量的科研成果^[1]。如采用碳纤维加固混凝土梁和钢结构,采用高强玻璃纤维布与碳纤维布混杂加固混凝土梁柱^[2]等。国外除了开展纤维增强塑料加固修复土木建筑结构的研究外,还进行了纤维增强塑料加固混凝土构件的抗爆炸性能研究^[3]。考虑到玻璃纤维增强塑料(GFRP)除了具有优异的力学性能外,还有一个显著的优点就是价格便宜。因此,GFRP 加固修复构件在民用和军事上得到了广泛的应用。尤其是在军事防护方面的应用引起了研究者的关注^[4],因为海湾战争、科索沃战争和最近的伊拉克战争充分说明防护在军事战斗中的重要作用。为此,笔者探讨了用 GFRP 约束混凝土所制构件的力学性能及其在军事防护工程特别是在抗侵略方面的应用。研究表明,GFRP 约束混凝土既提高了混凝土的压缩强度,又提高了混凝土的延展性,从而提高了混凝土构件抗侵略能力。为 GFRP 约束混凝土构件在防护工程中的应用提供了一定的理论基础。

1 GFRP 约束混凝土抗侵略机理研究

普通混凝土是一种脆性材料,在承受爆炸和冲击载荷时将产生裂缝和脆性破坏。因此用普通混凝土构筑的防护工事其抗冲击、抗爆炸的防护等级不会很高。为了提高它的防护等级,可以从两个途径来解决这个问题,第一个途径是研制强度等级很高的混凝土来提高它的抗力等级,但目前的研究表明^[5],混凝土的强度越高,其脆性也就越大,因而综合防护抗力等级提高不大;第二个途径是在混凝土中添加钢纤维,因为钢纤维增强混凝土在提高强度等级的同时,延性也得到提高,但当钢纤维含量增加时,钢纤维增强混凝土会出现结团现象,从而制约了

钢纤维增强混凝土抗力等级的提高。为了同时提高混凝土的强度和延性,笔者将 GFRP 约束混凝土的概念引入到防护工程领域。首先,制作一个模具,然后在该模具的外面利用树脂、促进剂、固化剂和玻璃纤维制作出具有一定厚度的 GFRP 管,经固化后,将该 GFRP 管取出,然后在 GFRP 管上安装适当的联接件,将多个 GFRP 管联接成蜂窝结构,最后在该蜂窝结构中浇注普通混凝土或钢纤维增强混凝土或高性能混凝土,从而制得 GFRP 约束混凝土高抗冲击复合构件,如图 1 所示。

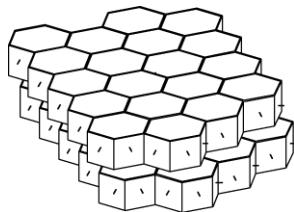


图 1 GFRP 约束混凝土组成的遮弹构件

GFRP 约束混凝土之所以有较高的抗侵略能力,主要是因为内部混凝土受到 GFRP 的约束后处于三向受力状态。而现有的研究已经表明,如果混凝土横向处于约束状态,不但可以提高它的压缩强度,而且还可以大大提高其延展性。以单轴压缩强度为 30 MPa 的混凝土为例,从笔者的初步试验来看,GFRP 约束混凝土其轴向强度和极限应变分别比普通混凝土单轴压缩强度提高了 3.14 倍和 16.2 倍。显然,随着强度和延展性的提高,试件抗侵略的能力也将得到极大的提高。

2 GFRP 约束混凝土抗侵略数值模拟

为简便起见,笔者对 GFRP 约束混凝土组成的防护构件中的单个结构应用 LS-DYNA 软件进行

^{*} 总后科研资助项目(41A1C51)

收稿日期:2004-03-16

抗侵彻的数值模拟。LS-DYNA 软件是由美国劳伦斯·利弗莫尔国家研究所的 J. O. Hallquist 博士主持开发并完成的, 其最初的主要目的是为武器设计提供分析工具, 后经不断地改进和扩充, 目前已成为著名的非线性动力分析软件, 在武器结构设计、内弹道和终点弹道、军用材料研制等方面得到了广泛的应用。

其控制侵彻过程的动量方程为:

$$\rho \ddot{u} = \sigma_{ij,j} + f_i \quad (1)$$

式中: ρ ——当前质量密度;

$\ddot{u}$ ——加速度;

$\sigma_{ij,j}$ ——柯西应力;

f_i ——为单位质量体积力。

经单元计算并组集后, 可得到运动方程为:

$$M \ddot{u}(t) = P(u, t) - F(u, u) \quad (2)$$

式中: M ——总体质量矩阵;

$\ddot{u}(t)$ ——总体节点加速度矢量;

P ——总体载荷矢量, 由节点载荷、面力、体力等形成;

F ——单元应力场的等效节点力矢量(应力散度)组集而成, 即:

$$F = \sum_{m=1}^n \int_{v_m} B^T \sigma d v \quad (3)$$

式中: u_m 为第 m 单元体积; B 为应变位移矩阵; $d v$ 为微段体积。在计算 $\int_{v_m} B^T \sigma d v$ 时, 应力增量由应变率 $\dot{\epsilon}$ 根据材料本构关系求出, 而应变率 $\dot{\epsilon}$ 与单元速度场 u_1, u_2, u_3 有关, 即:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \frac{\dot{u}_1}{x_1} & \dot{\epsilon}_2 &= \frac{\dot{u}_2}{x_2} & \dot{\epsilon}_3 &= \frac{\dot{u}_3}{x_3} \\ \dot{\epsilon}_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{u}_1}{x_2} + \frac{\dot{u}_2}{x_1} \right) & \dot{\epsilon}_{23} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{u}_2}{x_3} + \frac{\dot{u}_3}{x_2} \right) \\ \dot{\epsilon}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{u}_3}{x_1} + \frac{\dot{u}_1}{x_3} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: x ——位移坐标。

材料在弹性范围内的物理关系由虎克定律给出:

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_j + 2G \epsilon_{ij} - \delta_{ij} q \quad (5)$$

式中: σ_{ij} ——应力张量;

ϵ_j ——应变张量;

λ, G ——拉梅常数;

δ_{ij} ——克氏符号张量;

q ——人工粘性。

在数值模拟时, GFRP 材料采用线弹性模型, 单位面积质量为 300 g/cm^2 , 弹性模量为 $7.4 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 泊松比为 0.26, 屈服应力为 $1.5 \times 10^9 \text{ Pa}$; 弹体以弹径 40 mm、弹身長 100 mm 进行数值分析, 采用刚体模型, 它的质量密度为 7800 kg/m^3 , 弹性模量为 $2.31 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 泊松比为 0.3; 混凝土采用随动硬化塑性模型, 它的质量密度为 2400 kg/m^3 , 弹性模量为 $3.75 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 泊松比在单向受力状态时取为 0.15, 在三向受力时为 0.45, 混凝土的动强度为 50 MPa, 混凝土的失效应变为 0.002。

GFRP 约束混凝土和普通混凝土模型的网格划分分别如图 2、图 3 所示。计算所得 GFRP 约束混凝土和普通混凝土在弹体速度为 250 m/s 时的侵彻深度和速度随时间的变化曲线分别如图 4、图 5 所示。

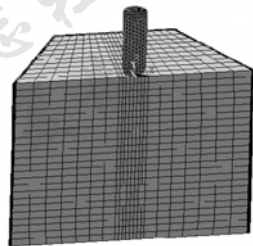


图 2 GFRP 约束混凝土模型网格划分

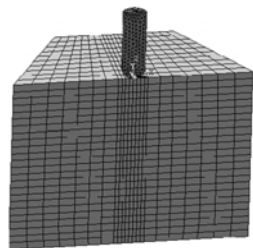


图 3 普通混凝土模型网格划分

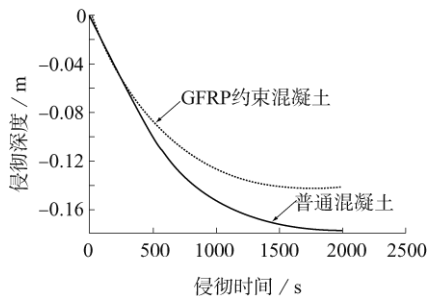


图 4 两种构件中弹体侵彻深度的对比

3 结论

混凝土经 GFRP 约束组成构件后, 使混凝土处于三向受压状态, 大大限制了混凝土微裂缝的扩展, 使混凝土的承载能力和延性大幅度提高, 从而极大地提高了构件抗冲击、抗侵彻的能力, 抗力等级得到了明显提高, 因此 GFRP 约束混凝土是一种新型的

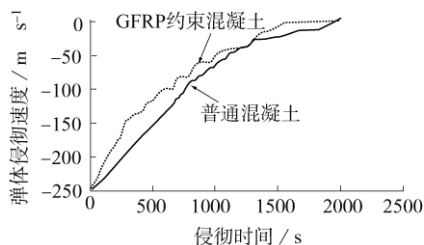


图5 两种构件中弹体侵入速度的对比

防护结构体系,将在防护工程中得到进一步的应用。

参考文献

1 岳清瑞.纤维增强塑料(FRP)在土木工程结构中应用技术的进

展.第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会议文集.昆明:2002.

2 熊光晶,蒋小青,杨建中,等.高强玻璃纤维布碳纤维布混杂加固混凝土梁柱的试验研究.工业建筑,2003,33(9):14

3 Muszynski L C, Purcell M R. Use of composite reinforcement to strengthen concrete and air-entrained concrete masonry walls against air blast. Journal of Composites for Construction, 2003,7(2):98

4 石少卿,尹平,刘颖芳,等.玻璃纤维约束混凝土抗侵入机理研究.玻璃钢/复合材料,2004(1):6

5 蒲心诚,王冲,王志军,等.C100-C150超高强高性能混凝土的强度及变形性能研究.混凝土,2002(10):3

6 赵海鸥.LS-DYNA动力分析指南.北京:兵器工业出版社,2003.

APPLICATION OF CONCRETE COMPONENT CONFINED WITH GFRP ON DEFENSE WORKS AND ITS NUMERICAL SIMULATION

Shi Shaoqing, Liu Yingfang, Yin Ping, Zhang Xiangji

(Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, PLA, Chongqing 400041, China)

ABSTRACT The mechanical properties of the anti-impact and anti-blast defense component that made of concrete confined with glass fiber reinforced plastic (GFRP) are analyzed. The research shows that the concrete confined with GFRP can not only enhance compressive strength of concrete, but also increase its ductility. Therefore, the concrete confined with GFRP can improve the anti-penetrated capability. By using the software LS-DYNA, the numerical simulation about penetrating is done, and the results indicate that the defense component made of concrete confined with GFRP is much better than the normal one made of common concrete in terms of anti penetration.

KEYWORDS glass fiber reinforced plastic, confined concrete, defense works, penetration

新型可降解塑料项目在江苏投产

“光-氧生物降解技术”可降解塑料项目日前在江苏省姜堰市开始投产。该项目采用北京大学科研成果,由澳门建辉集团投资1.38亿元兴建。到2005年项目全部建成投产后,可形成年产环境降解塑料母粒12万t、环境降解塑料膜10万t和环境降解餐盒90亿只的生产规模。据有关人士介绍,国内部分可降解塑料生产线生产的制品仍属于不能完全降解的塑料,有的纸代型的纸制品、草浆制品则需要大量木材,且价格昂贵,消费者难以接受。江苏投产的“光-氧生物降解技术”可降解塑料项目已经国家环保总局审批、认定,是一种新型全降解塑料,通过特殊的配方生产,用后丢弃可自然降解,不会对环境造成任何污染。(王振华)

快速切换系统带来新的效益增长

最近德国的两大管材生产商安装了2条生产线,采用一种新的快速切换系统,它可以根据客户需要变换产品口径,极大地提高了生产效率,为生产商带来了新的效益增长点。

标准PE管材市场有两个关键因素,即价格和交货时间。缩短交货时间可以通过两条途径,即保持大量库存和利用适时生产。2003年5月,德国Egeplast公司开始使用由克劳斯-玛菲公司制造快速切换系统。新系统已经为公司,在产品转换中节省了90%的成本。在从口径为160mm的产品切换到250mm的产品过程中的成本已经由790欧元降低到75欧元。同时,该公司160~250mm的产品库存也降低

了50%。减少库存对Egeplast公司具有重要的意义。该公司发现生产非标准的管材和小批量管材很有市场潜力,主要原因是由于转产成本高昂,其他生产商不愿意涉及这一缝隙市场。而2003年,Egeplast公司生产了1000件管材制品。因此,如果该公司能够在适时生产的同时减少库存,将可以腾出空间用于生产和降低经常性费用。对于传统管材挤出生产线来说,如果生产口径为160~250mm的管材,平均每月需要变换15次产品口径。标准管材生产线转换产品时需要耗时6h以上,每月保养机器的时间为4h,每月清洗一次模头,需要耗时3h。安装快速切换系统之后,维修周期可以延长至每3月一次,生产线可以夜以继日地转装。如果一条标准管材生产线的工作时间按6345h/a计算,那么装有快速切换系统的管材生产线的工作时间可以延长到7341h/a,这就多增加996h/a的工作时间。这样对于加工商来说,每年可多销售582t管材,也即增加效益10.9万欧元。Egeplast公司为了满足客户需求,经常一天改换三次口径。由于对客户需求能够做出快速反应,公司从中也获得了更多的经济效益。为了将此观念推销给其他加工商,Egeplast公司和聚乙烯生产商法国阿托菲纳公司及比利时BP Solvay公司已经联合起来提供聚合物、加工设备和工艺配方。到目前为止,一家俄罗斯管材加工商购买了两条自动生产线,罗马尼亚管材挤出加工商Magureni Constructii公司正在考虑购买此技术。(中化)