第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0106-05

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:孙国帅, 顾　威, 柳春光. 碳纤维增强聚合物-钢管混凝土构件轴压承载力灰熵关联度分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 106—110

Sun Guoshuai, Gu Wei, Liu Chunguang. Analyses on grey entropy correlation degree of the bearing capacity of concrete filled carbon fiber reinforced polymer-steel tube under axial compression[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 106—110

碳纤维增强聚合物-钢管混凝土构件轴压承载力灰熵关联度分析

孙国帅[1]　顾　威[2]　柳春光[3]

(辽宁工业大学管理学院[1],锦州 121001;辽宁省交通高等专科学校道桥系[2],沈阳 110122;
大连理工大学建设工程学部[3],大连 110624)

摘　要　为进一步研究碳纤维增强聚合物(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)-钢管混凝土组合结构构件的力学性能,以极限承载力为测试指标,分析了极限承载力各相关影响因素的作用规律。以试验数据和理论公式为基础,利用灰熵关联度理论,论证了不同厚度的 CFRP 筒约束情况下,钢管厚度、屈服强度和核心混凝土截面尺度等因素在提高组合结构构件极限承载力方面贡献的主次关系。结果表明:灰关联熵理论是一种简单实用的分析方法,可用于 CFRP-钢管混凝土组合结构极限承载力的多因素关联度评价;CFRP-钢管混凝土结构极限承载力各关联因素的贡献大小受 CFRP 约束效应的影响。研究结论可为 CFRP-钢管混凝土组合结构各材料占比的有效优化提供参考。

关键词　CFRP-钢管混凝土　　极限承载力　　灰熵关联度　　约束效应

中图法分类号　TU398;　　**文献标志码**　A

随着建筑事业的发展和建设水平的需要,近年来国内外建筑结构领域不断地涌现出许多新型组合结构构件。由于混凝土材料在三向受压条件下抗压强度有很大提高,因此,利用混凝土这一特点设计的新型组合结构构件及其性能分析正成为土木工程领域研究的热点课题之一。在工程实践中通常采用在筒体内填充混凝土的形式来实现混凝土三向受力的效果,而目前应用得较多的筒体材料是钢管和 CFRP(carbon fiber reinforced polymer)筒[1,2]。CFRP-钢管混凝土结构是通过结合钢管混凝土结构和 CFRP 约束混凝土结构的各自优势而衍生出来的一种新型组合结构形式,近年来受到许多研究人员的关注,进行了大量的理论和试验研究工作,主要包括轴压短柱的承载力试验与承载力计算公式分析[3,4]、偏心受力构件理论与实验分析[5,6]、核心混凝土的本构关系和影响因素分析[7,8]、组合构件的稳定性分析[9]等。现有的理论和实践研究中,CFRP-钢管混凝土结构构件的截面形式主要有两种:圆截面和方截面,如图 1 所示。

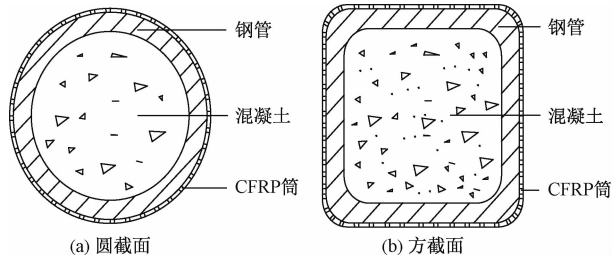

图 1　CFRP-钢管混凝土结构截面形式

Fig. 1　Section of concrete filled CFRP-steel tube

由于 CFRP-钢管混凝土结构构件是混凝土、钢管和 CFRP 三种材料组成的一种复合结构,三种材料互相协作、共同受力,因此,在满足一定的承载力要求前提下,确定三种材料在受力过程中的贡献成为考虑该类结构的经济性的一个重要课题。目前,用来辨析影响因素主次关系权重的研究方法主要有层次分析法、模糊综合评价法、熵权法、主成分分析法、灰色关联度分析等[10]。而灰色关联度熵分析方法的基本原理是基于研究对象各个影响因素序列的微观或宏观几何接近,是分析和确定各个影响因素主要贡献度的有效方法,已在系统贫信息条件下得到实践应用。因此,本文将依据课题组的前期试验结果,主要采用灰色关联熵理论来对 CFRP-钢管混凝土轴压短柱构件各组成材料的承载贡献度进行分析。

2018 年 6 月 6 日收到　　国家自然科学基金(51678107)和辽宁省教育厅基金(JW201615406)资助

第一作者简介:孙国帅(1979—),男,汉族,辽宁凌海人,博士,讲师。E-mail:gs. sun@ aliyun. com。

1　试验概况

课题组前期进行了 CFRP-钢管混凝土轴压短柱承载力分析的试验[3]。试验共包括 12 个试件,构件的高度取 400 mm,混凝土配合比如表 1 所示;钢管采用 Q345 无缝钢管,弹性模量为 206×10^3 MPa。通过改变 CFRP 的厚度、钢管的厚度、构件的截面尺度等参数来进行不同试件的设计。各试件的轴压极限承载力实测值如表 2 所示。

2　组合构件协同工作原理

以圆截面轴心受压组合构件为例,根据混凝土三向受压条件下的承载力提高特性,钢管和外部约束的 CFRP 在组合构件中的主要贡献是对核心混凝土起着“套箍”作用,以 ξ_s、ξ_{cf}分别表示钢管和 CFRP 针对核心混凝土的约束效应系数,三者协同工作。组合构件各组成部分在承载过程中的受力特点如图 2所示。

因此,在不考虑轴压构件失稳破坏情况下,可进一步得到 CFRP-钢管混凝土组合构件受压极限承载力 N_u 的计算公式[4]:

$$N_u = \frac{1}{2}(\xi_s + \xi_{cf}) f_{ck} A_c + \frac{f_{ck} A_c}{2k_c} + f_{ck} A_c \times \sqrt{\left(\frac{1}{2k_c} - 1\right)^2 + \frac{1}{2}(\xi_s + \xi_{cf})(k_c - 1)} \tag{1}$$

式(1)中:k_c 为核心混凝土材料系数,取$\frac{f_{ck}}{f_{tk}}$;f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值;A_c 为核心混凝土截面积。

表 1　混凝土配合比

Table 1　Mix proportion of concrete

水泥用量/(kg·m^{-3})	水泥:砂:石	水灰比(w/c)	高效减水剂/%
490	1:1.35:2.20	0.35	1.0

表 2　CFRP-钢管混凝土轴压短柱极限承载力及影响因子

Table 2　The ultimate bearing capacity and influence factor of composite structure

序号	钢管厚度 t_s/mm	钢管屈服强度 f_y/MPa	钢管外径 D_s/mm	极限承载力 N_u/kN	备注
1	1.5	350	127	890	无 CFRP 加固
2	2.5	350	129	1 140	无 CFRP 加固
3	3.5	310	131	1 293	无 CFRP 加固
4	4.5	310	133	1 528	无 CFRP 加固
5	1.5	350	127	1 086	一层 CFRP 加固
6	2.5	350	129	1 294	一层 CFRP 加固
7	3.5	310	131	1 348	一层 CFRP 加固
8	4.5	310	133	1 698	一层 CFRP 加固
9	1.5	350	127	1 128	二层 CFRP 加固
10	2.5	350	129	1 506	二层 CFRP 加固
11	3.5	310	131	1 593	二层 CFRP 加固
12	4.5	310	133	1 856	二层 CFRP 加固

3　灰熵关联度分析过程

灰熵关联度分析理论是在已有的灰关联分析法的基础上引入灰熵的概念,自提出以来经过不断地发展和完善,现已在新型复合材料性能、骨料配合比相关影响因素以及决策评价等方面得到了广泛的应用[11—14]。因此,灰熵关联度理论的有效性和科学性已得到许多研究人员的实践验证,可具体应用于 CFRP-钢管混凝土构件轴压承载力各影响因素贡献度的分析。

3.1　灰关联度

设 X 为灰关联因子集,$x_0 \in X$ 为参考列,$x_j \in X$ 为比较列,$j = 1,2,\cdots,m$,有:

$$\begin{cases} x_0 = [x_0(1), x_0(2), \cdots, x_0(n)] \\ x_1 = [x_1(1), x_1(2), \cdots, x_1(n)] \\ x_2 = [x_2(1), x_2(2), \cdots, x_2(n)] \\ \vdots \\ x_m = [x_m(1), x_m(2), \cdots, x_m(n)] \end{cases} \tag{2}$$

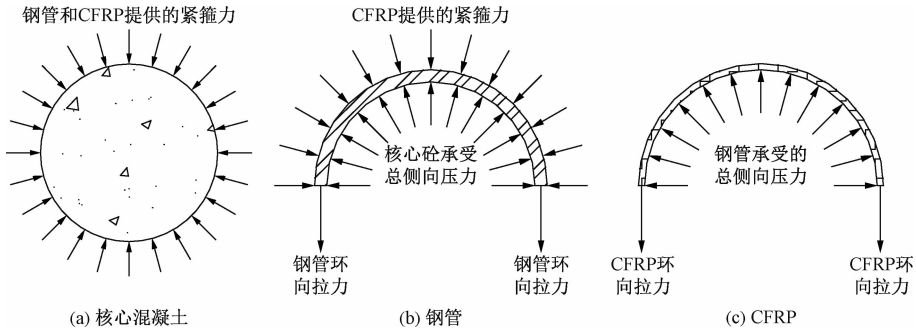

图 2　三种材料受力特点分析

Fig. 2　Stress characteristics of various materials

则比较列与参考列之间的关联系数为

$$r[x_0(k),x_j(k)] \equiv \frac{\min\limits_j \min\limits_k |x_0(k)-x_j(k)| + \xi \max\limits_j \max\limits_k |x_0(k)-x_j(k)|}{|x_0(k)-x_j(k)| + \xi \max\limits_j \max\limits_k |x_0(k)-x_j(k)|} \tag{3}$$

式(3)中：$\min\limits_j \min\limits_k |x_0(k)-x_j(k)|$为两极最小差，$\max\limits_j \max\limits_k |x_0(k)-x_j(k)|$为两极最大差，其中，$k=1,2,\cdots,n$，$\xi$为分辨系数，其大小决定了各个因子对关联系数的影响大小。由式(3)可以看出，灰关联系数的实质是两点间距离的反映。

针对 CFRP-钢管混凝土组合构件，将不同厚度 CFRP 加固效果后的构件极限承载力定义为参考序列χ_0，则：

$$x_0 = [x_0(k) \mid k=1,2,\cdots,12] \tag{4}$$

为了进行接下来的组合构件灰关联熵分析，将表2中涉及不同厚度 CFRP 加固效果的构件参数的原始数据进行无量纲化处理。然后，根据式(3)计算各相关影响因素与极限承载力之间的灰关联系数，结果如表3所示，其中，ξ取值0.5。

表3 组合构件极限承载力灰关联系数

Table 3 Gray relational coefficients of ultimate bearing capacity of composite structure

k	r_1	r_2	r_3
1	0.543	0.440	0.531
2	0.799	0.759	1
3	0.817	0.743	0.972
4	0.535	0.446	0.539
5	0.378	0.599	0.760
6	0.510	1	0.777
7	0.829	0.588	0.709
8	0.717	0.343	0.390
9	0.449	0.765	0.952
10	0.463	0.684	0.598
11	0.737	0.487	0.542
12	1	0.368	0.406

3.2 灰关联熵分析

3.2.1 灰关联系数分布映射

设灰关联系数分布映射值P_h为分布的密度值，有：

$$P_h \equiv \frac{r[x_0(h),x_j(h)]}{\sum\limits_{k=1}^{n} r[x_0(k),x_j(k)]}, \quad h=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

则针对的组合构件极限承载力各关联影响因素的分布密度值如表4所示。

表4 组合构件极限承载力灰熵关联分布密度值

Table 4 Gray entropy correlation densities of ultimate bearing capacity of composite structure

k	P_{h1}	P_{h2}	P_{h3}
1	0.202	0.184	0.174
2	0.297	0.318	0.329
3	0.303	0.311	0.320
4	0.198	0.187	0.177
5	0.155	0.237	0.288
6	0.210	0.395	0.295
7	0.341	0.233	0.269
8	0.294	0.135	0.148
9	0.170	0.332	0.381 8
10	0.175	0.297	0.239 8
11	0.278 5	0.211	0.217
12	0.378	0.160	0.163

3.2.2 灰关联熵及灰熵关联度

各影响参数的灰关联熵计算公式如下：

$$H(P_h) \equiv -\sum_{h=1}^{n} P_h \ln P_h \tag{6}$$

比较列x_j的灰熵关联度计算公式为

$$E(x_j) \equiv H(P_h)/H_{\max} \tag{7}$$

式(7)中，$H_{\max}=\ln n$，为差异信息列的最大熵。

针对组合构件极限承载力的灰关联熵计算值和灰熵关联度计算值分别按式(6)、式(7)计算，计算结果如表5所示。

表5 CFRP 加固组合构件极限承载力灰关联熵和灰熵关联度

Table 5 Gray relational entropy and grey entropy correlation degree of ultimate bearing capacity of composite structure with CFRP

CFRP 加固层数	影响因子	t_s/x_1	f_y/x_2	D_s/x_3
0 层	$H(P_h)$	1.366	1.352	1.342
	$E(X_j)$	0.985	0.976	0.968
1 层	$H(P_h)$	1.344	1.318	1.355
	$E(X_j)$	0.969	0.951	0.977
2 层	$H(P_h)$	1.329	1.348	1.337
	$E(X_j)$	0.959	0.972	0.964

4 组合构件极限承载力的灰熵关联度分析结果

通过对不同 CFRP 厚度时各影响因素对组合构件极限承载力的灰熵关联度分析，结果如图3所示。

针对试验设计的组合构件，由图3可以看出，当无 CFRP 外部约束时，组合构件极限承载力各相关影响因素的灰熵关联度排序为$E(x_1)>E(x_2)>E(x_3)$，即对组合构件极限承载力影响最大的是钢管厚度；当采用一层 CFRP 外部约束时，组合构件极

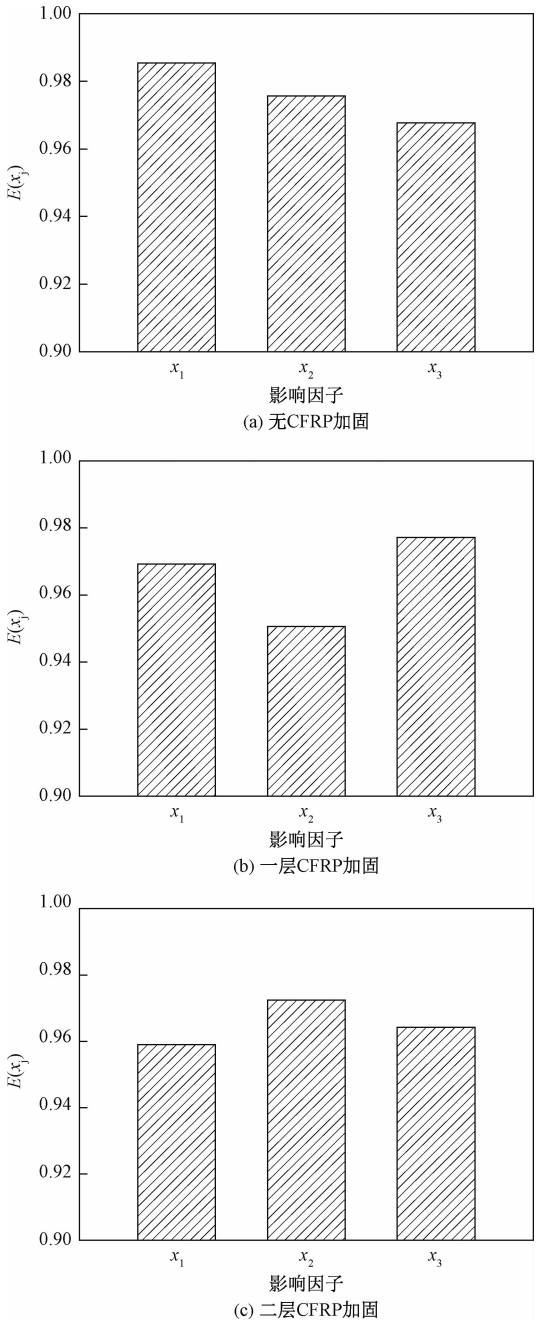

图 3　组合构件极限承载力各影响因子灰熵关联度重要程度

Fig. 3　The contribution degree of various factors associated with the ultimate bearing capacity of composite structure

限承载力各相关影响因素的灰熵关联度排序为 $E(x_3)>E(x_1)>E(x_2)$,即对组合构件极限承载力影响最大的是钢管强度;当采用两层 CFRP 外部约束时,组合构件极限承载力各相关影响因素的灰熵关联度排序为 $E(x_2)>E(x_3)>E(x_1)$,即对组合构件极限承载力影响最大的是构件的截面尺度。

综上,可以看出,各影响因素对于组合构件极限承载力的贡献程度受 CFRP 约束效应的影响,即"套箍效应"的影响。根据试验数据和极限承载力计算公式表明,在钢管特性和混凝土截面尺度相同情况下,缠绕两层 CFRP 时的组合构件极限承载力最大,而未缠绕时的最小,用灰熵关联度排序的结果解释就是未缠绕时钢管除了起着套箍作用外,还在与核心混凝土共同承受纵向压力方面做出了贡献,但对核心混凝土的约束有限,因此在不同材料的协同工作过程中,核心混凝土强度提高较小;而随着 CFRP 厚度的增加,套箍效应增大,钢管在承受纵向荷载方面的贡献已逐渐减弱。

5　结论

CFRP-钢管混凝土结构是在 FRP 约束混凝土结构和钢管混凝土结构的基础上发展的一种新型组合结构,在 CFRP-钢管混凝土结构相关的三种组成材料中,环向缠绕的 CFRP 的主要贡献是进一步约束核心混凝土,提高三向受压状态下核心混凝土的承载能力。以课题组前期的试验和理论研究成果为基础,利用灰关联熵方法分析了在改变 CFRP 厚度的外部条件下,钢管厚度、强度及核心混凝土的截面尺度等各个因素对组合构件的极限承载力的影响程度。得出的结论证明:灰关联熵分析方法可用于 CFRP-钢管混凝土组合结构极限承载力的多因素关联度评价;CFRP-钢管混凝土结构极限承载力各关联因素的贡献大小受 CFRP 约束效应的影响,随着 CFRP 厚度的增加,钢管厚度在极限承载力各关联因素中的贡献度逐渐降低。

参　考　文　献

1　杨晓杰, 刘晨康, 耿　强, 等. 钢管混凝土短柱轴压力学性能分析及其数值模拟. 科学技术与工程, 2017; 17(32): 233—238
Yang Xiaojie, Liu Chenkang, Geng Qiang, *et al*. Analysis and numerical simulation of concrete filled steel tubular short columns on axial load. Science Technology and Engineering, 2017; 17(32): 233—238

2　李　元, 张　博. FRP 混凝土组合柱研究进展综述. 低温建筑技术, 2016; 38(8): 69—71
Li Yuan, Zhang Bo. Review on research progress of concrete filled FRP composite tubular columns. Low Temperature Architecture Technology, 2016; 38(8): 69—71

3　顾　威, 关崇伟, 赵颖华, 等. 圆 CFRP 钢复合管混凝土轴压短柱试验研究. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2004; 20(2): 118—120
Gu Wei, Guan Chongwei, Zhao Yinghua, *et al*. Experimental study on concentrically-compressed circular concrete filled CFRP-steel composite tubular short columns. Journal of Shenyang Architecture and Civil Engineering University (Natural Science), 2004; 20(2): 118—120

4　孙国帅, 顾　威. CFRP 约束钢管混凝土核心柱承载力简化分析. 水利与建筑工程学报, 2017; 15(4): 74—78
Sun Guoshuai, Gu Wei. Simplified analysis of bearing capacity of concrete filled steel tubularcore columns with CFRP composite materi-

als. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017; 15(4): 74—78

5 朱春阳, 赵颖华, 孙 丽. FRP 约束钢管混凝土柱轴力-弯矩相关关系研究. 计算力学学报, 2017; 34(2): 244—250
Zhu Chunyang, Zhao Yinghua, Sun Li. Study on compression-bending interaction relation of FRP confining concrete filled steel tube column. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017; 34(2): 244—250

6 王庆利, 牛献军, 冯立明. 圆 CFRP-钢管混凝土压弯构件滞回性能的参数分析与恢复力模型. 工程力学, 2017; 34(增刊 1): 159—166
Wang Qingli, Niu Xianjun, Feng Liming. Parameyric analysis and restoring force model of hysteretic behavior of circular concrete filled CFRP-steel tubular beam-column. Engineering Mechanics, 2017; 34(S1): 159—166

7 Shakir A S, Guan Z W, Jones S W. Lateral impact response of the concrete filled steel tube columns with and without CFRP strengthening. Engineering Structures, 2016; 116(1): 148—162

8 Al-Husainy A. Impact response of recycled aggregate concrete filled steel tube columns strengthened with CFRP. Liverpool: University of Liverpool, 2017

9 Sun G S, Zhao Y H, Gu W. Stability of concrete filled CFRP-steel tube under axial compression. Proceedings of Tubular Structures XII. Abingdon: Taylor & Francis, 2008: 111—116

10 张 杰. 效能评估方法研究. 北京:国防工业出版社, 2009
Zhang Jie. Research on effectiveness evaluation methods. Beijing: National Defence of Industry Press, 2009

11 张岐山, 邓聚龙. 灰关联熵分析方法. 系统工程理论与实践, 1996; 16(8): 7—11
Zhang Qishan, Deng Julong. Grey relation entropy method of grey relation analysis. System Engineering Theory & Practice, 1996; 16(8): 7—11

12 乔建刚, 田亚磊, 张 恒. 聚酯玻纤布防裂性能影响因素的灰熵分析. 材料科学与工程学报, 2018; (2): 250—253,18
Qiao Jiangang, Tian Yalei, Zhang Heng. Grey entropy analysis of factors on anti-cracking performance of polyester glass fiber cloth. Journal of Materials Science & Engineering, 2018; (2): 250—253,18

13 李秀君, 张永平, 许光孝,等. 基于灰熵关联法的泡沫沥青二次冷再生混合料粗集料矿料间隙率影响因素分析. 水资源与水工程学报, 2016; 27(5): 180—184
Li Xiujun, Zhang Yongping, Xu Guangxiao, *et al*. Factors of impacting gap rate of coarse aggregate of foamed asphalt secondary cold recycled mixture based on grey correlation entropy method. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016; 27(5): 180—184

14 房亚东, 李 改, 杜来红. 基于灰熵的城际轨道交通系统决策评价方法. 系统工程, 2015; (2): 152—158
Fang Yadong, Ligai, Du Laihong. Intercity rail transit system decision-making method based on grey entropy. Systems Engineering, 2015; (2): 152—158

Analyses on Grey Entropy Correlation Degree of the Bearing Capacity of Concrete Filled Carbon Fiber Reinforced Polymer-Steel Tube under Axial Compression

SUN Guo-shuai[1], GU Wei[2], LIU Chun-guang[3]

(Department of Management, Liaoning University of Technology[1], Jinzhou 121001, China;
Department of Road and Bridge Engineering, Liaoning College of Communications[2], Shenyang 110122, China;
Department of Construction Engineering, Dalian University of Technology[3], Dalian 116024, China)

[**Abstract**] To study the mechanical property of concrete filled carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-steel tubular structure, the ultimate bearing capacity was as the test index and the influence regularity of relative factors was analyzed. Based on the test data and theoretical equation, the primary and secondary relations of various factors under the CFRP confining with different thickness, including the thickness and yield strength of steel tube and sectional area of core concrete, were demonstrated by the grey entropy correlation degree theory. The results indicate that the grey relation entropy theory is simple and practical, and can be used to evaluate the contribution degree of various factors associated with the ultimate bearing capacity of composite structure; and the value of contribution degree is affected by the confining effect of CFRP. Besides, the research results can provide reference for the effective optimization of the proportion of each component of composite structure.

[**Key words**] concrete filled CFRP-steel tube ultimate bearing capacity grey entropy correlation degree confining effect