

文章编号:1673-2049(2012)02-0043-05

# 钢框架内填钢板深梁协同分析

袁晓洒, 郑 宏, 于长亮

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:**为了满足钢结构房屋刚度一定范围的渐变调幅需要,提高钢结构房屋的抗震性能,提出了一种新型的抗侧力构件——钢板深梁;通过水平低周反复荷载试验对纯钢框架和钢框架内填钢板深梁进行分析,并对结构进行适当简化;通过对 2 种简化模型进行对比得出较为可行的钢板深梁与钢框架协同分析模型。研究表明:内填钢板深梁可以大幅度提高纯钢结构的初始刚度、屈服荷载和极限承载力。

**关键词:**钢板深梁;钢框架;协同性能;极限承载力;刚度

**中图分类号:**TU392.4

**文献标志码:**A

## Interactive Analysis of Steel Deep Beam Infilling Steel Frame

YUAN Xiao-sa, ZHENG Hong, YU Chang-liang

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to meet the need of gradient amplitude modulation of the stiffness of steel structure buildings in a certain range, and improve the seismic behavior of the steel structure buildings, the steel deep beam as a new type of lateral force resistance member was proposed. Through horizontal low cyclic loading test, pure steel frame and steel deep beam infilling steel frame were analyzed, and the structures were simplified properly. The viable interactive analysis model of steel deep beam infilling steel frame was obtained by contrasting two simplified models. The study results show that steel deep beam infilling steel frame can significantly improve initial stiffness, yield load and ultimate bearing capacity of pure steel structure.

**Key words:** steel deep beam; steel frame; interactive performance; ultimate bearing capacity; stiffness

## 0 引 言

在中国城市建设中,超高层和大型复杂建筑越来越多,采用的结构形式也越来越多<sup>[1]</sup>。纯框架结构刚度较弱而框架内填钢板剪力墙结构刚度过强,为了实现刚度在一定范围内的渐变调幅,提出一种新型抗侧力结构形式——钢框架内填钢板深梁。Kahn 等<sup>[2]</sup>于 1979 年最早提出内填钢筋混凝土深梁的框架结构形式,Kesner 等<sup>[3-4]</sup>将纤维混凝土深梁

用于钢框架抗震加固,郑宏<sup>[5]</sup>于 2007 年获得钢板-混凝土组合深梁国家专利,将深梁作为承受水平地震力的耗能构件来研究。

钢框架内填钢板深梁结构由钢板深梁和钢框架组成,水平地震作用下受力性能不尽相同,因此两者之间如何协同工作是迫切需要解决的问题<sup>[6-8]</sup>。

胡立黎等<sup>[9]</sup>通过混凝土深梁与钢框架的协同分析计算,提出分析钢筋混凝土深梁承受水平荷载的模型。郭立志<sup>[10]</sup>分析了将钢-混凝土组合深梁和钢

收稿日期:2012-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50678025);陕西省外国专家局留学人员科技活动择优资助项目(SLZ2008008)

作者简介:袁晓洒(1984-),女,河南襄城人,工学博士研究生,E-mail:yuanxiaosa2009@163.com。

框架之间的连接简化为铰接体系的合理性。

1 试验概况

试验加载采用位移控制。试件分为钢框架和 2 个钢框架内填钢板深梁结构(编号依次为 PF, SD-BF-A, SDBF-B)。框架钢材采用 Q235B, HW200×200×8×12 型钢, 柱轴线距离为 1 800 mm。试件 PF 正立面见图 1, 试件 SDBF-A 构造见图 2, 试件 SDBF-B 构造见图 3。图 3 中钢板上所留孔洞孔径为  $\Phi 22$ , 角钢上所留孔洞孔径为  $\Phi 13$ , 孔洞处所标尺寸均为两孔中心距离。

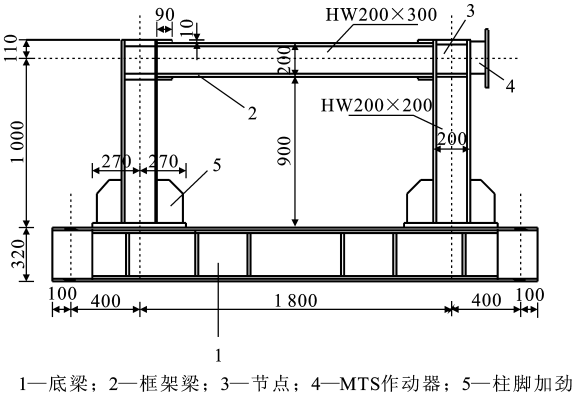


图 1 试件 PF 正立面(单位:mm)

Fig. 1 Elevation View of Specimen PF (Unit:mm)

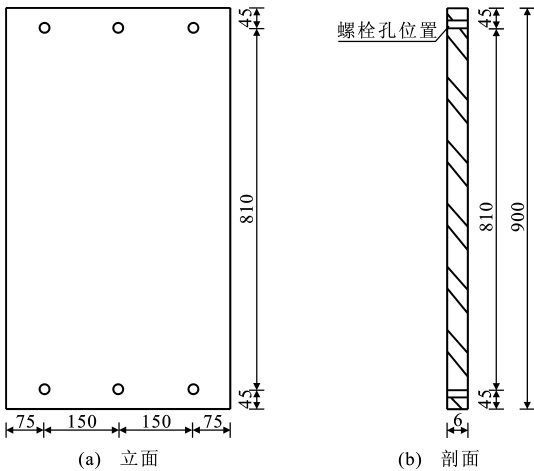


图 2 试件 SDBF-A 构造(单位:mm)

Fig. 2 Details of Specimen SDBF-A (Unit:mm)

试件 SDBF-A 和试件 SDBF-B 通过高强螺栓和框架相连接。

试验加载装置见图 4。首先在柱顶施加 300 kN 轴压力, 在试验过程中保持不变; 然后施加水平低周反复荷载, 采用位移加载方式。屈服前, 每级位移循环加载 1 次; 屈服后, 每级位移循环加载 3 次。荷载加载到水平荷载下降至峰值荷载的 85% 或结构破

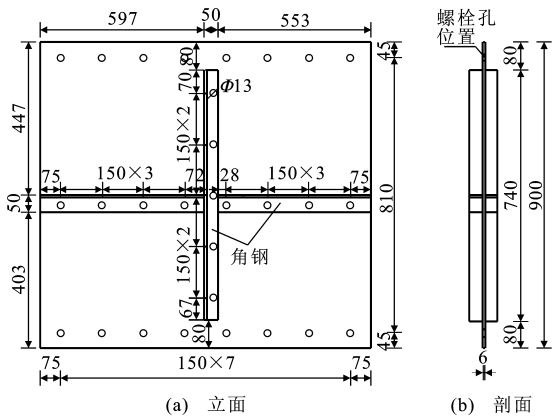


图 3 试件 SDBF-B 构造(单位:mm)

Fig. 3 Details of Specimen SDBF-B (Unit:mm)

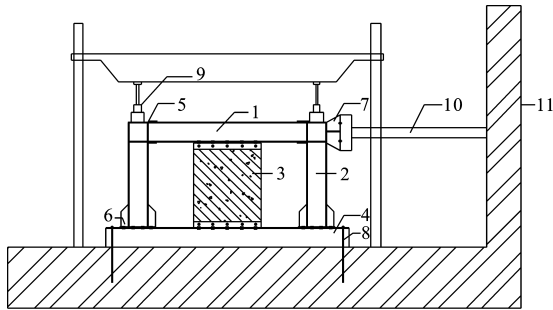


图 4 试验加载装置

Fig. 4 Experiment Loading Apparatus

坏无法加载时刻。

在水平低周反复荷载作用下, 试件 PF 由于框架柱柱脚屈曲, 加载端节点区被拉裂而破坏。SDBF 系列试件的框架破坏与试件 PF 破坏相同, 2 种填充的深梁均是钢板屈曲破坏。

2 试验结果分析与比较

3 种试件的荷载-位移( $P-\Delta$ )骨架曲线对比如图 5 所示。

由图 5 可知: 初始刚度从大到小依次为: SDBF-

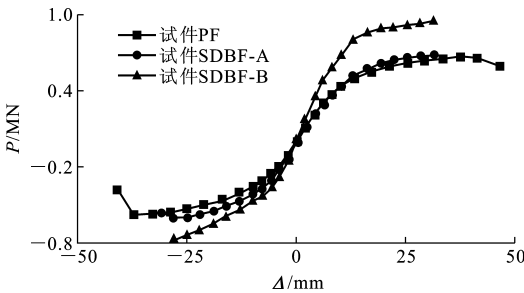


图 5 试件 SDBF-A, SDBF-B 与 PF 的  $P-\Delta$  骨架曲线对比

Fig. 5 Comparisons of  $P-\Delta$  Skeleton Curves of Specimens SDBF-A, SDBF-B and PF

B,SDBF-A,PF。在相同的加载位移下,跨高比较小的深梁 SDBF-B 承载力最高,纯钢框架 PF 相对最低。

试验构件屈服荷载和极限承载力的实测值见表 1,其中, $F_y,F_u$  分别为屈服荷载和极限承载力。

表 1 试验构件屈服荷载和极限承载力的实测值

Tab. 1 Measured Values of Yield Load and Ultimate Bearing Capacity of Test Members

试件编号	$F_y/\text{kN}$	屈服荷载 增幅/%	$F_u/\text{kN}$	极限承载力 增幅/%
PF	555.69		674.68	
SDBF-A	541.08		666.18	
SDBF-B	653.42	18	954.23	41

由表 1 可知,SDBF-A 与 PF 屈服荷载和极限承载力很相近,但是 SDBF-B 的屈服荷载和极限承载力比 PF 分别提高了 18% 和 41%,主要因为其钢板宽度较大,并设置了十字加劲肋,由此可知,内填钢板深梁的跨高比与加劲肋对试件影响很大。合理选择内填钢板深梁在提高钢框架初始刚度、屈服荷载和承载力方面均有显著效果,解决了纯钢框架初始刚度不足的缺陷。

### 3 2 种不同简化模型的协同分析计算

#### 3.1 带刚性边段(刚域)的连梁连接框架柱和深梁的刚接体系

##### 3.1.1 钢板深梁抗弯刚度和钢框架抗侧刚度

利用单位荷载法,假设深梁不承受竖向荷载作用,得

$$EI_{eq}=EI/(1+\frac{3\times 1.2EI}{GAl^2}) \tag{1}$$

式中: $E$  为钢材弹性模量; $I_{eq}$  为等效惯性矩; $I$  为惯性矩, $I=h^3t/12$ , $h$  为深梁的高度, $t$  为深梁的厚度; $G$  为剪切模量; $A$  为深梁截面面积, $A=ht$ ; $l$  为深梁跨度。

框架变形如图 6 所示,其中, $H$  为框架柱高度, $i_c$  为柱的线刚度, $i_b$  为梁的线刚度, $\delta$  为框架柱端相对线位移, $\theta_1,\theta_2$  均为柱的两端转角, $L$  为框架梁长度, $a$  为刚域段长度系数。

利用转角位移方

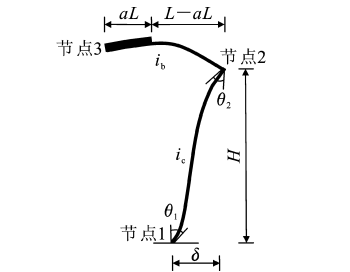


图 6 钢框架侧移与节点转角 1

Fig. 6 Lateral Displacement and Rotor Angle 1 of Steel Frame

程,推导出钢框架柱的侧移刚度  $D$  为

$$D=\frac{12i_c}{H^2}-\frac{36i_c^2}{H^2}\frac{1}{4i_c+m_{23}} \tag{2}$$

式中: $m_{23}$  梁端约束弯矩系数。

#### 3.1.2 协同分析计算

在文献[11]的基础上,对钢框架内填钢板深梁进行协同分析计算。对于深梁而言,由材料力学理论中的弯曲变形、内力和荷载的关系可得

$$M_D=EI_{eq}\frac{d^2y}{dx^2} \tag{3}$$

$$V_D=-EI_{eq}\frac{d^3y}{dx^3} \tag{4}$$

式中: $M_D$  为钢板深梁内部承受的弯矩; $V_D$  为钢板深梁内部剪力。

框架梁的约束弯矩使得深梁截面产生的弯矩  $M_m$  为

$$M_m=m_{32}\theta_2=\frac{6EI(1+a)}{l(1-a)^3}\theta_2 \tag{5}$$

式中: $m_{32}$  为梁端约束弯矩系数。

相应的剪力  $V_m$  为

$$V_m=-\frac{M_m}{H}=-\frac{m_{32}\theta_2}{H} \tag{6}$$

考虑了约束弯矩后,深梁的变形和内力间的关系可表示为

$$EI_{eq}\frac{d^2y}{dx^2}=M_D \tag{7}$$

$$EI_{eq}\frac{d^3y}{dx^3}=-V_D-V_m \tag{8}$$

设  $V_F$  为框架承受的剪力, $C_F$  为框架抗剪刚度,即产生单位层间变形所需的剪力, $C_F=H\sum_{i=1}^nD_i$ , $n$  为同层框架柱的总数, $D_i$  为第  $i$  个框架柱的侧移刚度。当变形角  $\theta=\frac{dy}{dx}$  时,钢框架所受剪力  $V_F$  为

$$V_F=\theta C_F=C_F\frac{dy}{dx} \tag{9}$$

假设深梁顶部作用水平集中荷载  $P$ ,则深梁顶点处的平衡方程为

$$V_F+V_D=P \tag{10}$$

将式(8),(9)代入式(10)可得

$$-EI_{eq}\frac{d^3y}{dx^3}+\frac{m_{32}}{H}\frac{dy}{dx}+C_F\frac{dy}{dx}=P \tag{11}$$

设  $\lambda=H\sqrt{(C_F+\frac{m_{32}}{H})/(EI_{eq})}$ , $\xi=\frac{x}{H}$ ,得

$$-\frac{d^3y}{d\xi^3}+\lambda^3\frac{dy}{d\xi}=\frac{PH^3}{EI_{eq}} \tag{12}$$

边界条件为:①当  $\xi=0$  时,深梁底部转角为 0,

即  $\theta = \frac{dy}{d\xi} = 0$ ; ② 当  $\xi = 0$  时, 深梁底部位移为 0, 即  $y(0) = 0$ ; ③ 当  $\xi = 1$  时, 深梁顶部弯矩为 0, 即  $\frac{d^2 y}{d\xi^2} = 0$ 。由此可得方程通解  $y(\epsilon)$  为

$$y(\epsilon) = -\frac{PH^3(e^\lambda - e^{-\lambda})}{\lambda^3 EI_{eq}(e^\lambda + e^{-\lambda})} + \frac{PH^3 e^\lambda}{\lambda^3 EI_{eq}(e^\lambda + e^{-\lambda})} e^{-\lambda \epsilon} - \frac{PH^3 e^{-\lambda}}{\lambda^3 EI_{eq}(e^\lambda + e^{-\lambda})} e^{\lambda \epsilon} + \frac{PH^3}{\lambda^2 EI_{eq}} \xi \quad (13)$$

将式(13)代入式(9)可得

$$V_F = \frac{PH^2 C_F}{\lambda^2 EI_{eq}(e^\lambda + e^{-\lambda})} (-e^{\lambda - \lambda \epsilon} - e^{-\lambda + \lambda \epsilon} + e^\lambda + e^{-\lambda}) \quad (14)$$

令  $\alpha$  为框架的剪力系数,  $\alpha = \frac{V_F}{P}$ , 则当  $\xi = 1$  时,

可得

$$\frac{V_F}{P} = \frac{C_F H^2}{\lambda^2 EI_{eq}(e^\lambda + e^{-\lambda})} (e^\lambda + e^{-\lambda} - 2) \quad (15)$$

3.2 铰接连杆连接深梁与框架的铰接体系

3.2.1 钢板深梁抗弯刚度和钢框架抗侧刚度

钢板深梁的抗弯刚度见式(1)。框架变形如图 7 所示。

利用转角位移方程, 推导出钢框架柱的侧移刚度  $D$  为

$$D = \frac{V}{\delta} = \left[ \frac{12 i_c}{H^2} \delta - \frac{6 i_c}{H} (\theta_1 + \theta_2) \right] / \delta = \frac{12 i_c}{H^2} - \frac{6 i_c}{H^2} \frac{3}{2 + 3 i_b / i_c} \quad (16)$$

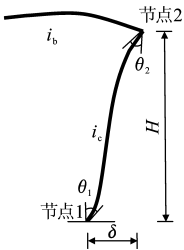


图 7 钢框架侧移与节点转角 2  
Fig. 7 Lateral Displacement and Rotor Angle 2 of Steel Frame

3.2.2 协同分析计算

钢板深梁内部承受的弯矩  $M_D$  见式(3), 钢板深梁内部剪力  $V_D$  见式(4)。钢框架所受剪力  $V_F$  见式(9), 深梁顶点处平衡方程见式(10)。

将式(4), (9)代入式(10)得

$$C_F \frac{dy}{dx} - EI_{eq} \frac{d^3 y}{dx^3} = P \quad (17)$$

定义  $\lambda = H \sqrt{\frac{C_F}{EI_{eq}}}$ ,  $\epsilon = \frac{x}{H}$ , 得

$$\frac{d^3 y}{dx^3} - \lambda^2 \frac{dy}{dx} + \lambda^2 \frac{PH}{C_F} = 0 \quad (18)$$

边界条件为: ① 当  $\xi = 0$  时, 钢板深梁底部转角

$\theta = \frac{dy}{d\xi}$ ; ② 当  $\xi = 0$  时, 钢板深梁底部位移  $y(0) = 0$ ;

③ 当  $\xi = 1$  时, 钢板深梁顶部弯矩  $M_D = EI_{eq} \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} =$

0。由此可得方程通解  $y(\epsilon)$  为

$$y(\epsilon) = -\frac{(e^{2\lambda} - 1)PH}{\lambda(e^{2\lambda} + 1)C_F} + \frac{e^{2\lambda}PH}{\lambda(e^{2\lambda} + 1)C_F} e^{-\lambda \epsilon} - \frac{PH}{\lambda(e^{2\lambda} + 1)C_F} e^{\lambda \epsilon} + \frac{PH}{C_F} \epsilon \quad (19)$$

将式(19)代入式(4)得

$$V_D = \frac{P}{1 + e^{2\lambda}} (e^{\lambda \epsilon} + e^{\lambda(2 - \epsilon)}) \quad (20)$$

令  $\alpha'$  为钢板深梁的剪力系数,  $\alpha' = \frac{V_D}{P}$ , 则当  $\xi =$

1 时, 得

$$\frac{V_D}{P} = \frac{2e^\lambda}{1 + e^{2\lambda}} \quad (21)$$

3.2.3 试验验证

刚接体系剪力分配试验值与理论值对比见表 2, 铰接体系剪力分配试验值与理论值对比见表 3。

表 2 刚接体系剪力分配试验值与理论值对比

Tab. 2 Comparisons of Test Values and Theoretical Values for Shear Force Distribution of Rigid System

试件 编号	$\lambda$	$V_D/\text{kN}$	$P/\text{kN}$	剪力分配 试验值/%	剪力分配 理论值/%	相对误 差/%
SDBF-A	7.46	29.15	440.15	6.62	45.4	85.42
SDBF-B	2.77	267.04	477.61	55.91	90.4	38.15

表 3 铰接体系剪力分配试验值与理论值对比

Tab. 3 Comparisons of Test Values and Theoretical Values for Shear Force Distribution of Hinge System

试件 编号	$\lambda$	$V_D/\text{kN}$	$P/\text{kN}$	剪力分配 试验值/%	剪力分配 理论值/%	相对误 差/%
SDBF-A	3.67	29.15	440.15	6.62	5.10	29.80
SDBF-B	1.12	267.04	477.61	55.91	59.10	5.40

由表 2 可知, 当协同分析采用连接框架柱和深梁为刚接体系时试件深梁剪力分配试验值与理论值相差较大。由表 3 可知, 当协同分析采用连接框架柱和深梁为铰接体系时, 将理论计算结果与试验结果比较发现, 由于计算结果使用了较多假设导致不能与试验结果完全一致, 但两者相差并不是很大。

4 结 语

(1) 钢板深梁不仅在提高钢框架初始刚度、屈服荷载和承载力方面均有显著效果, 解决了纯钢框架初始刚度不足的缺陷, 而且有效约束了框架结构的水平位移, 改善了框架受力和变形, 可作为高层结构的加固体系, 成为抗震设防的第一道防线。

(2) 通过 2 种简化模型计算结果与试验结果比较, 认为协同分析模型采用连接框架柱和深梁为铰接体系时更加合理。

## 参考文献:

## References:

- [1] 张建伟,曹万林,董宏英,等.不同构造措施的钢管混凝土边框钢板剪力墙抗震性能试验研究[J].防震减灾工程学报,2011,31(4):450-456.  
ZHANG Jian-wei, CAO Wan-lin, DONG Hong-ying, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Steel-plate Shear Walls with Concrete Filled Steel Tube Columns and Different Constructional Measures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(4): 450-456.
- [2] KAHN L F, HANSON R D. Infilled Walls for Earthquake Strengthening[J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(2): 283-296.
- [3] KESNER K. Development of Seismic Retrofit and Strengthening Strategies for Critical Facilities Using Engineered Cementitious Composite Materials [D]. Ithaca: Cornell University, 2003.
- [4] KESNER K, BILLINGTON S L. Investigation of In-fill Panels Made from Engineered Cementitious Composites for Seismic Strengthening and Retrofit[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(11): 1712-1720.
- [5] 郑宏. 钢板-混凝土组合深梁: 中国, ZL2006201360-74, 9[P]. 2007-10-31.  
ZHENG Hong. Steel Plate-concrete Composite Deep Beam; China, ZL200620136074, 9[P]. 2007-10-31.
- [6] 郑宏, 杨飞颖, 张维刚. 钢板深梁屈曲分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 31-35.  
ZHENG Hong, YANG Fei-ying, ZHANG Wei-gang. Buckling Analysis on Steel Plate Deep Beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 31-35.
- [7] 叶列平, 孟杰, 王宇航. 拉-压杆模型在钢筋混凝土深梁设计中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 81-86.  
YE Lie-ping, MENG Jie, WANG Yu-hang. Application of Strut-and-tie Model in Design of Reinforced Concrete Deep Beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 81-86.
- [8] 贡金鑫, 林园, 魏巍巍. 均布荷载下深梁设计的压杆-拉杆模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(3): 20-26.  
GONG Jin-xin, LIN Yuan, WEI Wei-wei. Strut-and-tie Model of Deep Beam Design Under Uniform Distributed Loads[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(3): 20-26.
- [9] 胡立黎, 郑宏, 宋晓强, 等. 钢筋混凝土深梁填充钢框架协同工作分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2010, 31(1): 16-19.  
HU Li-li, ZHENG Hong, SONG Xiao-qiang, et al. Interactive Analysis Between Reinforced Concrete Deep Beam and Steel Frame[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2010, 31(1): 16-19.
- [10] 郭立志. 钢-混凝土组合深梁填充钢框架协同分析与静力弹塑性分析[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
GUO Li-zhi. Collaborative Analysis and Pushover Analysis of the Steel-concrete Composite Deep Beams Infilled Frame[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [11] 贾腾飞. 钢框架内填钢筋混凝土深梁协同分析及动力弹塑性分析[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
JIA Teng-fei. Collaborative Analysis and Dynamic Plastic Analysis of Reinforced Concrete Deep Beams Infilled Steel Frame[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.

## 《建筑科学与工程学报》入选“中国精品科技期刊”

国家科技部委托中国科学技术信息研究所每年出版《中国科技期刊引证报告》, 定期公布中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)收录的中国科技论文统计源期刊的总被引频次、影响因子、即年指标、基金论文比、他引率等十几个科学计量指标。从1999年开始, 以这些指标为基础, 研制了中国科技学术期刊综合评价指标体系, 该评价体系是业界公认的客观、全面和科学的期刊评价体系。采用层次分析法, 由专家打分确定了重要指标的权重, 并分学科对每种期刊进行综合评定, 该评定结果客观公正, 代表了中国科技期刊的最高学术水平。2011年共评选出300种“中国精品科技期刊”, 《建筑科学与工程学报》继2008年后第2次入选“中国精品科技期刊”。