

文章编号: 1001-8360(2003)04-0080-05

# 钢管混凝土拱(单圆管)面内受力 双重非线性有限元分析

陈宝春<sup>1</sup>, 秦泽豹<sup>1</sup>, 彦坂熙<sup>2</sup>, 陈友杰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>福州大学 土木建筑工程学院, 福建 福州 350002; <sup>2</sup>日本九州大学 土木工程系, 日本 福岡 812-8581)

**摘 要:** 提出钢管混凝土应力-应变关系采用纤维单元模型的钢管混凝土拱(单圆管)面内受力双重非线性有限元分析方法。对模型拱进行的分析表明,本文提出的方法能较好地反映钢管混凝土拱受力全过程的非线性性能。分析还表明,钢管混凝土拱的受力应考虑双重非线性问题,其中材料非线性的影响要大于几何非线性的影响。

**关键词:** 钢管; 钢管混凝土; 拱; 非线性; 有限元

**中图分类号:** U442; U448.22 **文献标识码:** A

## Analysis of concrete filled steel tubular (single tube) arch subjected to in-plane loads by nonlinear finite element method

CHEN Bao-chun<sup>1</sup>, QIN Ze-bao<sup>1</sup>, HIKOSA KA Hirodshi<sup>2</sup>, CHEN You-jie<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan)

**Abstract:** WTA method to analyze the behavior of CFST (single tube) arch is presented. Both the material and geometric nonlinear property are taken into account in the method. A fiber element model of stress-strain relation of CFST is proposed and used. Comparisons of numerical results with the test results indicate that the method proposed herein can get out the basic mechanic behaviors of the CFST arch on the whole loading progress. The analyses of the nonlinear property of the CFST arch indicate that both the material and geometric nonlinearity take role in the mechanic behaviors of CFST arch and the material nonlinear is more seriously than the geometric nonlinear.

**Key words:** steel tube; concrete filled steel tube; arch; nonlinear; finite element

钢管混凝土拱的面内受力非线性性能和极限承载力是钢管混凝土拱桥计算理论研究中受关注的课题之一<sup>[1]</sup>。由于钢管混凝土拱属于曲线状的细长结构,模型制作困难,试验费用高,因此迄今为止所做的试验研究不多<sup>[2,3]</sup>。建立通过实验验证、能够反映结构实际受力情况的有限元计算程序,是了解其受力性能的一个有效途径。试验研究表明,为反映结构受力的实际情况,有限元分析中应同时考虑材料非线性和几何非线性(双重非线性)。在双重非线性分析中,几何非线性已有较成熟的算法,因此,材料非线性分析是其关键问题。文献[3]和文献[4]应用钢管混凝土统一理论

的非线性材料模型(合成本构关系)分别对钢管混凝土拱的空间和面内受力全过程进行了分析。计算的荷载-位移曲线在受力前期与试验结果吻合较好,但在受力后期计算曲线明显高于实测曲线。分析认为其主要原因在于钢管混凝土拱受力较小时拱肋以受压为主,计算所采用的混凝土轴压应力-应变关系与实际较为吻合;而当受力较大时,拱肋除受轴压外,还有较大的弯矩(空间受力时还有扭矩的作用),计算所采用的混凝土轴压应力-应变关系与实际情况有较大的差异。虽然在截面计算时采用了条带积分,但在非轴压作用时应力梯度以及剪应力等均对钢管与混凝土的材料行为产生较大的影响,而合成本构关系中没有考虑这一影响。此外,钢管混凝土合成本构关系是将钢管混凝土视为单一的材料,通过大量的试验结果回归建立起来的。在数值分析中,求出钢管混凝土构件的名义应

收稿日期: 2002-10-14; 修回日期: 2003-02-28  
基金项目: 国家自然科学基金资助(50078016)  
作者简介: 陈宝春(1958—),男,福建福州人,教授,博导。

变和名义应力后,还要根据核心混凝土的应力-应变关系求混凝土的应力,把钢管混凝土的名义应力减去核心混凝土的应力求得钢管的应力。这样,常常导致钢管的应力规律性很差,与试验结果相差较大。同时,采用合成法的本构关系,在程序设计中无法将钢管混凝土简化为空钢管的情形,难以将程序扩展到分析钢管混凝土施工和部分充填混凝土的拱桥的受力中。

为此,本文根据钢管混凝土偏心受压试验结果<sup>[5]</sup>,提出了钢管混凝土偏心受压构件的应力-应变纤维单元模型,并将其应用于钢管混凝土拱的分析之中。这种纤维单元模型假定钢管和混凝土完全粘结,不设联结单元;钢管与混凝土均采用一维的应力-应变关系形式。钢管与混凝土相互作用使钢管处于三维受力的影响略去不计。核心混凝土的应力-应变关系则考虑了钢管对混凝土的套箍作用。套箍作用体现在以一维形式表达的核心混凝土的应力-应变曲线之中,而且在偏心受压时,考虑了截面上应力梯度对套箍作用的影响。

本文的研究对象限于钢管混凝土拱面内受力(单圆管),双重非线性有限元方法以文献[4]为基础。在试验验证的基础上,应用本文提出的有限元方法对模型拱的非线性性能进行了分析。

### 1 有限元方法<sup>[4]</sup>

双重非线性有限元分析时,将拱沿拱肋轴线方向划分为有限个直梁单元,以分段折线代替拱的曲线。梁单元两端之间的截面内力近似为线性变化,取单元两端截面的计算刚度平均值作为单元刚度。

截面刚度计算时,将全截面划分成有限个条带。当条带足够小时,认为每个条带上的应变可以取中值

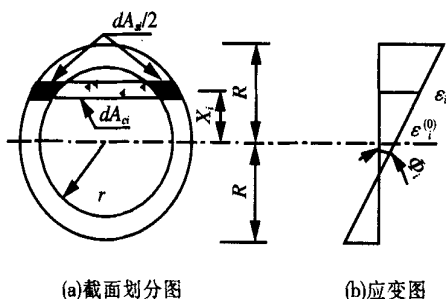


图 1 截面单元划分

进行计算。截面的条带划分如图 1 所示。设第  $i$  块的面积为  $dA_i$ , 则其面积等于该块钢管面积  $dA_{si}$  与混凝土面积  $dA_{ci}$  之和。先由假定的截面几何中心的初始应变  $\epsilon_i^{(0)}$  和曲率  $\kappa_i^{(0)}$  求得第  $i$  分块形心处的应变

$$\epsilon_i = \epsilon_i^{(0)} + \kappa_i^{(0)} x_i \quad (1)$$

然后由材料的应力-应变关系求得分块的钢管和混凝土的应力  $s_i$ 、 $c_i$ , 最后根据内外力平衡条件, 求得  $i^{(0)}$  和  $\kappa_i^{(0)}$ 。假如内外力不等且大于允许误差, 再进行调整直至满足平衡条件。截面计算时的钢管和核心混凝土的应力-应变关系公式详见下节。

考虑几何非线性影响的刚度计算采用流动坐标法 (UL 法)。将材料非线性问题嵌套在几何非线性之中形成双重非线性问题, 用混合法解双重非线性问题, 即将受力全过程的荷载分为有限个增量, 假定每级荷载增量下的结构刚度为常量。在求每级荷载下的解时用 Newton-Raphson 的迭代法。有限元方法的细节详见参考文献[4]。

## 2 钢管混凝土的应力-应变关系

### 2.1 钢材的应力-应变关系

钢材的应力-应变曲线经简化后常由线弹性段、非线性弹性段、塑性段、强化段和二次塑流段共 5 个线段组成<sup>[6]</sup>。为简化计算, 一些研究中, 将钢材的应力-应变简化为理想弹塑性。试验研究表明, 钢管混凝土拱在受力后期, 钢管的应变可以达到数万个微应变, 因此不考虑强化作用的计算结果与实际相比可能产生较大的偏差。本文综合考虑了计算简单性和合理性, 提出 4 段直线构成的钢材一维应力-应变曲线, 如图 2 所示, 略去了较短的非线性弹性曲线段进行了简化。其

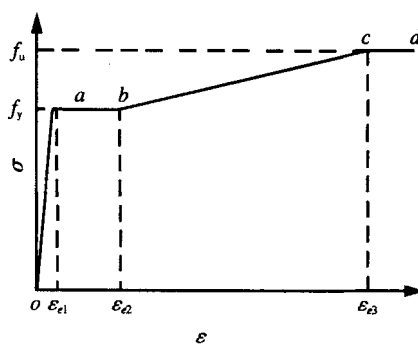


图 2 简化的钢材应力-应变关系曲线示意图

具体表达式为

$$\begin{cases} \text{弹性段}(0a \text{ 段}) : & = E_y \quad (0 < \epsilon < \epsilon_{e1}) \\ \text{屈服段}(ab \text{ 段}) : & = f_y \quad (\epsilon_{e1} < \epsilon < \epsilon_{e2}) \\ \text{强化段}(bc \text{ 段}) : & = f_y + E_y/150(\epsilon - \epsilon_{e2}) \quad (\epsilon_{e2} < \epsilon < \epsilon_{e3}) \\ \text{二次塑流段}(cd \text{ 段}) : & = f_u \quad (\epsilon > \epsilon_{e3}) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $E_y$  为钢材弹性阶段的弹性模量;  $\epsilon_{e1}$  为弹性极限应变;  $f_y$  和  $f_u$  分别为钢材的屈服强度和极限强度, 取屈服极限应变  $\epsilon_{e2} = 10 \epsilon_{e1}$ , 强化极限应变  $\epsilon_{e3} = 100 \epsilon_{e1}$ , 钢材极限强度  $f_u = 1.6 f_y$ <sup>[6]</sup>。

### 2.2 核心混凝土的应力-应变关系

钢管混凝土偏心受压构件的试验研究表明<sup>[5]</sup>, 偏心率对构件的延性影响较小, 但是对强度影响较大。偏心率引起截面上纵向应力的梯度分布, 导致钢管环向应力的梯度分布, 削弱了钢管对核心混凝土的套箍作用。偏心率越大, 这种削弱作用也越大; 钢管纵向应变越大, 这种削弱作用越明显。当核心混凝土的应力-应变关系采用一维形式表达、考虑钢管对混凝土的套箍作用时, 应力梯度对套箍作用的削弱应在混凝土的应力-应变关系中得到反映。

根据以上分析, 本文提出在文献[7]的核心混凝土应力-应变模型中加入应力梯度对套箍作用修正系数的核心混凝土应力-应变关系模型。

修正后的套箍系数

$$= K_e \times \quad (3)$$

式中, 套箍系数  $= f_y A_s / f_{ck} A_c$ , 其中  $A_s$ 、 $A_c$  分别为钢管和混凝土的截面积;  $f_y$  为钢材的屈服强度;  $f_{ck}$  为混凝土的抗压强度。

修正系数  $K_e$  是应力梯度的函数, 它可以用偏心率来表示。当偏心率为零(即轴压构件)时, 修正系数  $K_e$  为 1, 实际上未修正; 当偏心率等于 1 时,  $K_e$  为零, 认为钢管对混凝土的套箍作用不提高其承载力, 仅提高其延性; 偏心率介于 0 和 1 之间时采用线性插值, 即

$$K_e = \begin{cases} 1 - e/r_c & (e/r_c \leq 1.0) \\ 0 & (e/r_c > 1.0) \end{cases} \quad (4)$$

本文提出的考虑应力梯度修正系数后的核心混凝土的应力-应变关系模型

$$c = \left[ A \frac{\sigma_c}{f_{ck}} - B \left( \frac{\sigma_c}{f_{ck}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$c = \begin{cases} 0.1(1 - q) + 0.9q \left( \frac{\sigma_c}{f_{ck}} \right)^{0.1} & (0.12 \leq \frac{\sigma_c}{f_{ck}} < 1.0) \\ 0 \left( \frac{\sigma_c}{f_{ck}} \right) \frac{1}{\left( \frac{\sigma_c}{f_{ck}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\sigma_c}{f_{ck}} \right)} & (\frac{\sigma_c}{f_{ck}} > 1.0) \end{cases} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中,

$$\sigma_c = f_{ck} [1.194 + (13/f_{ck})^{0.45} \times (-0.07185 \sigma_c^2 + 0.5789)]$$

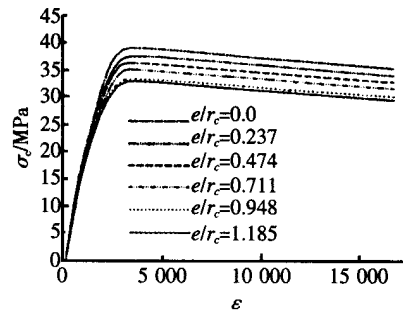
$$\sigma_c = c + [1400 + 800 \left( \frac{f_{ck} - 20}{20} \right)] \sigma_c^{0.2}$$

$$c = 1300 + 14.93 f_{ck} (\mu)$$

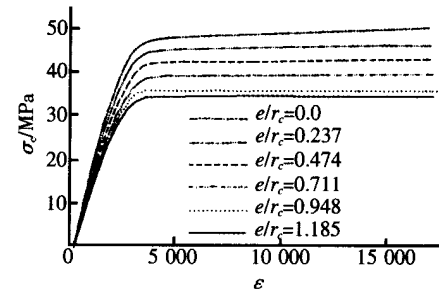
系数  $A$  和  $B$  分别为:  $A = 2.0 - K$  和  $B = 1.0 - K$ , 其中  $K = 0.1 - 0.745q$ ;  $q = k / (0.2 + 0.1k)$ ;  $\mu = (0.236 \times 10^{-5})^{1.025 + (-0.570)} \times 5.0 \times (f_{ck})^2 \times 10^{-4}$ 。

式(5)和式(6)中,  $c$  为普通混凝土应力-应变关系曲线峰值点对应的应变,  $\sigma_c$  和  $\sigma_c$  为核心混凝土应力-应变关系曲线第一段(式(5))与第二段(式(6))交接点的应变和应力。

本文提出的核心混凝土的应力-应变关系曲线当混凝土等级和套箍系数相同时不再是一根而是一组(见图3)。当偏心率  $e/r_c = 0$ , 即轴心受压时, 修正系数  $K_e = 1$ , 式(5)、式(6)则是文献[7]提出的核心混凝土的应力-应变关系曲线模型。



(a)  $\xi=0.605$ , C40 混凝土



(b)  $\xi=1.200$ , C40 混凝土

图3 本文提出的核心混凝土应力-应变曲线

### 3 实例分析

#### 3.1 实例简介

文献[2]进行了两根钢管混凝土单圆管肋拱的面内受力全过程试验。模型拱净跨径为 460 cm, 净矢高  $f = 153.3$  cm。拱肋钢管为  $\delta 76 \text{ mm} \times 3.792 \text{ mm}$  的无缝钢管, 肋拱下缘曲线为二次抛物线。管内灌注 C30 混凝土。相同尺寸的钢管混凝土模型拱制作了  $A_1$  和  $A_2$  两根。 $A_1$  模型拱在  $L/4$  点处加集中力,  $A_2$  模型拱在  $L/2$  点处加集中力, 具体试验内容和结果详见文献[2]。

#### 3.2 计算结果与实验结果比较

应用本文提出的非线性有限元计算方法, 对钢管混凝土模型拱的受力全过程进行分析, 并与文献[4]提出的钢管混凝土采用合成法本构关系的双重非线性有限元计算结果进行比较。计算中模型拱分为 48 个梁单元, 截面划分为 800 个条带。典型截面的荷载-挠度

曲线见图 4。

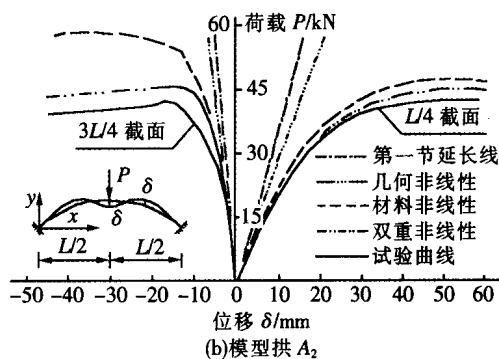
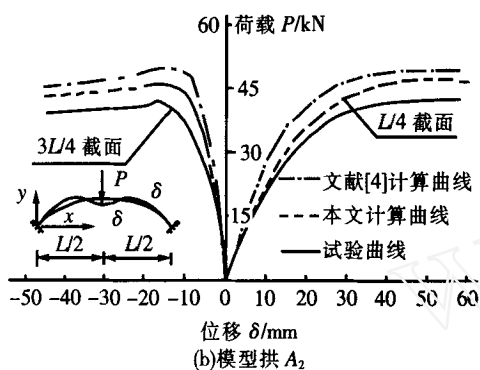
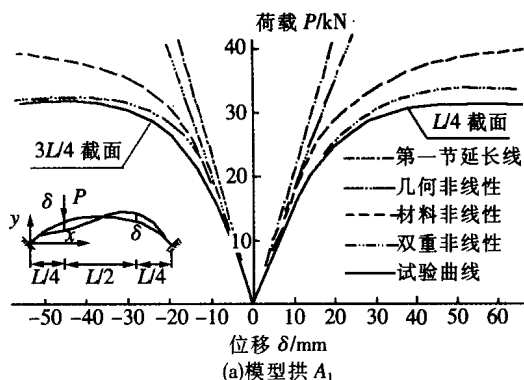
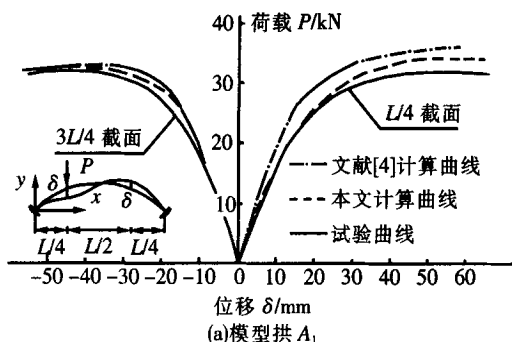


图 4 模型拱荷载-位移曲线的计算结果比较

图 5 模型拱荷载-位移曲线的非线性性能

从图 4 可以看出,在受力前期,计算曲线和实测曲线均吻合较好。但当结构进入非线性后,采用本文提出的材料非线性模型(主要是在核心混凝土应力-应变关系中引入应力梯度对紧箍作用的修正系数)的计算结果与实测值吻合良好。而文献[4]计算的荷载-位移曲线明显高于实测曲线,且在试验拱进入破坏阶段后,计算曲线仍呈上升趋势,表明在钢管混凝土拱的非线性分析中,由于结构受力后期截面偏心率较大,不考虑应力梯度对紧箍作用的影响,不能反映结构受力的实际情况,将使计算结果偏于不安全。

### 3.3 模型拱的非线性性能分析

图 5 给出模型拱  $A_1$ 、 $A_2$  典型荷载-位移曲线考虑几种非线性因素的计算结果。

线性的荷载-位移曲线,是受力全过程中单元刚度均采用第一级荷载增量作用下计算出来的刚度。在计算纯几何非线性时,材料的应力-应变关系假定为线性,将第一级荷载增量计算所得的各单元的刚度应用于受力全过程的计算,不考虑钢材、混凝土应力-应变的非线性性能,不考虑混凝土在低的拉应力下的开裂,也不考虑钢管与混凝土之间的相互作用,只考虑结构的几何非线性影响。纯材料非线性计算中,不考虑几何非线性的影响,钢管混凝土的应力-应变关系采用本文提出的纤维单元模型。双重非线性的计算见本文第 2 节。为节约篇幅,图 5 中部分计算的荷载-位移曲线

只给出了曲线的一部分,并未出现峰值点。峰值点的荷载与对应的挠度由表 1 给出(表 1 中峰值点模型拱  $A_1$  选取  $L/4$  截面的荷载-位移曲线、 $A_2$  模型拱选取  $L/2$  截面的荷载-位移曲线)。

表 1 模型拱的峰值荷载与挠度

模型	项目	实验值	双重非线性	纯材料非线性	纯几何非线性
$A_1$	荷载/kN	42.07	47.9	60.5	293.3
	挠度/mm	38.96	55.44	176.7	199.7
$A_2$	荷载/kN	31.9	32.8	41.2	179.2
	挠度/mm	60.24	67.28	147.5	199.8

纯几何非线性计算的荷载-位移曲线,其曲率变化不大。 $A_1$  模型拱和  $A_2$  模型拱的极值荷载分别出现在 293.3 kN 和 179.2 kN 时,相应所对应的挠度分别为 199.7 mm 和 199.8 mm,为模型拱跨径的 4.3%。与线性计算结果相比,纯几何非线性计算的荷载-位移曲线,有一定的曲率变化;但与纯材料非线性计算结果相比,其曲率变化很小。因此,纯几何非线性对于模型拱的受力影响不是很大。

纯材料非线性计算的荷载-位移曲线,曲率变化明显,表明钢管混凝土拱的材料非线性问题突出,它是钢管混凝土拱的非线性性能与极限承载力研究中应重点

考虑的问题。

由于在有限元分析中,仅考虑几何非线性问题,有通用的算法和通用的程序可资利用,所以一些研究者进行了钢管混凝土拱仅考虑几何非线性的计算,从图 5 和表 1 可以看出,仅考虑几何非线性的影响将大大地高估钢管混凝土拱的极值荷载,是不安全的。

虽然前面分析指出纯几何非线性对模型拱受力的影响不是很大,然而,从图 4 和表 1 可以看出,由纯材料非线性所计算出来的峰值荷载,明显高于实际的极限荷载。这是因为,拱中的轴力在拱的变形上会产生附加弯矩,当拱的轴力很大时,即使很小的变形也会产生很大的附加弯矩;附加弯矩又加大了拱的变形。几何非线性与材料非线性还存在着耦合作用,换言之,双重非线性不是材料非线性与几何非线性的简单叠加。因此,虽然单纯的几何非线性对拱的受力影响不是很大,但在钢管混凝土拱桥的非线性性能与极限承载力的分析中,应考虑双重非线性的影响,而不是仅考虑材料非线性问题。

#### 4 结论

本文提出的钢管混凝土纤维单元应力-应变关系模型,较之统一理论的合成本构关系能更好地反映钢管混凝土单圆管拱面内受力的非线性性能。

对钢管混凝土两个模型拱的非线性分析表明,其受力分析需考虑材料非线性与几何非线性的双重非线性影响。在双重非线性中,材料非线性的影响是主要的,它应是钢管混凝土拱的非线性分析中应主要考虑的问题。在计算钢管混凝土拱的极限荷载时,仅考虑几何非线性的影响将大大地高估结构的极限荷载,是不安全的。

#### 参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集(一)[M]. 北京:人民交通出版社,2002. 17—28.
- [2] 陈宝春,陈友杰. 钢管混凝土肋拱面内受力全过程试验研究[J]. 工程力学,2000,17(2):44—50.
- [3] 杨永清. 钢管混凝土拱桥横向稳定性研究[D]. 成都:西南交通大学,1996. 16—17.
- [4] 陈友杰,陈宝春. 钢管混凝土肋拱面内受力全过程有限元分析[J]. 工程力学,2000(增刊):753—758.
- [5] 陈宝春,欧智菁,王来永,韩林海. 钢管混凝土偏心受压承载力试验分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2002,30(6):838—844.
- [6] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 修订版. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1994. 91.
- [7] 韩林海. 钢管混凝土力学[M]. 北京:科学出版社,2000. 107—108.

(责任编辑 张武美)

### 《铁道学报》荣获 2001 年“百种中国杰出学术期刊”称号

中国科学技术信息研究所首次在 2002 年 12 月中国科技论文统计结果新闻发布会上宣布,《铁道学报》荣获 2001 年“百种中国杰出学术期刊”称号,这是我刊在跨入新世纪的第一年获得殊荣。《铁道学报》编辑部全体人员愿与所有关心和支持《铁道学报》的各级领导和同志们共享这一荣誉。

“中国科技论文统计与分析”年度研究报告是国家科学技术部下达给中国科学技术信息研究所的科研项目,始于 1988 年,旨在对我国的科技论文数量及质量进行统计分析。该所建立的“中国科技论文与引文数据库”,每年将研究成果以“××年中国科技论文与分析(年度研究报告)”的形式向全国发布。此项工作在科技界引起很大反响,受到普遍重视。

该数据库从全国 3000 多种自然科学技术类期刊中选取 1000 多种作为统计源期刊,并进行动态调整。《铁道学报》多年来一直是该库的统计源期刊。在每年公布的统计结果中,主要评刊指标——影响因子和总被引频次,《铁道学报》一直位于交通运输类期刊的前列。2002 年中国科学技术信息研究所首次应用中国科技期刊综合指标评价体系,根据总被引频次、影响因子、即年指标、基金论文比、他引总引比等期刊的多项重要指标,对中国科技论文与引文数据库收录的科技期刊分学科进行综合评定,评出了“百种中国杰出学术期刊”。《铁道学报》能获得“百种中国杰出学术期刊”这一称号,是对《铁道学报》坚持办刊宗旨、提高办刊质量的最好肯定。借此机会,特向给予《铁道学报》支持的编委会、作者、审稿专家、读者以及上级主管、主办单位和省、市级铁道学会、铁道专业委员会、兄弟单位表示深深敬意和衷心感谢!

(本刊编辑部)