

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.07.017

基于破坏模式分析的平转施工桥梁球铰设计方法研究

张琪峰

[悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司, 江苏 苏州 215123]

摘要:平转施工桥梁采用的球铰有钢制球铰和混凝土球铰两种形式。通过对其构造和受力特性进行分析,认为控制球铰设计的破坏模式为局部承压下的横向受拉破坏,进而提出了以有效支承半径为控制指标的球铰设计理论,统一了钢制球铰和混凝土球铰的设计方法和流程。通过对钢制球铰和混凝土球铰各自的受力情况进行理论分析和计算推导,给出了有效支承半径的准确计算公式,用于指导球铰几何尺寸拟定和相关参数取值。最后,与实际工程实例数据进行对比。结果表明,数据吻合性较好,具有较强的指导意义。

关键词:桥梁平转;破坏模式;球铰设计;有效支承半径

中图分类号: U443.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)07-0063-05

0 引言

转体施工是一种特殊的桥梁施工工艺,因其具有非原位施工、不中断交通的优势,在跨越山谷、河流和既有线路等建设条件下,具有较大的优势^[1]。桥梁转体施工可分为平转、竖转和平竖转结合三种^[2]。其中,竖转主要用于山区跨越河谷,平竖转结合主要用于特殊场地条件,平转广泛应用于平原地区。近年来,随着我国经济水平的快速提高,交通量日益增大,在跨越既有繁忙交通线的项目中,越来越多地采用平转施工工艺,取得了良好的社会效益^[3]。而且平转施工的转体重量也不断突破,目前国内平转施工桥梁最大转体吨位是保定乐凯大街转体桥母塔(转体重量45 600 t),国外最大转体吨位是瑞士的本·艾因桥^[4](转体重量19 100 t),均采用钢制球铰。混凝土球铰的工程实践相对较少,从查阅到的文献来看,转体吨位最大的是兴郭路跨苏嘉杭高速转体桥^[5](转体重量6 646 t)。

尽管在实践层面桥梁平转施工技术飞速发展,但在理论研究方面仍相对落后^[6],尤其是对于平转工艺的核心部件——球铰的设计,多根据经验设计,缺乏基本的理论支撑。本文基于球铰的受力特性分析,提出球铰设计的实用方法和计算公式,为平转施工桥梁的球铰设计提供理论依据。

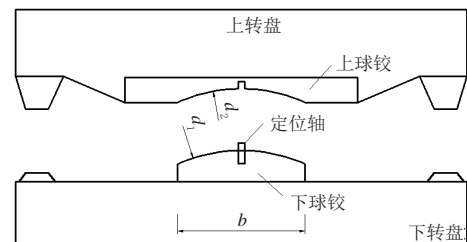
收稿日期: 2021-10-22

作者简介: 张琪峰(1986—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

1 球铰破坏模式分析

1.1 球铰构造特点

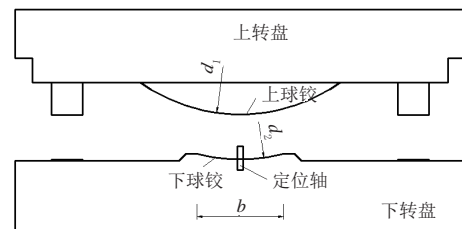
目前,转体桥主要采用两种形式的球铰,一是混凝土球铰,一是钢制球铰。混凝土球铰的上下实体和接触面均为混凝土^[7],如图1所示,采用上凹下凸的形式,利于打磨和转动。这种球铰对施工工艺和精度要求很高,不仅要求打磨光滑,还要求保证贴合度,避免局部受力导致混凝土开裂。



注: d_1 为凸面直径; d_2 为凹面直径; b 为名义支承直径。

图1 混凝土球铰

钢制球铰采用与混凝土球铰相反的布置方式——下凹上凸,如图2所示。由于钢制球铰的接触部分均为预制高强度构件,其制作精度和强度都可以得到保证,采用下凹上凸更利于稳定^[8]。



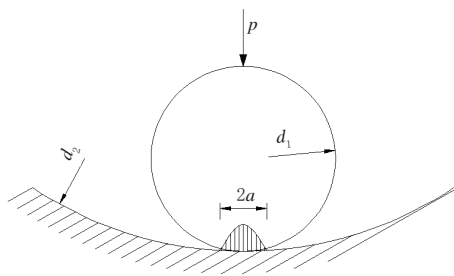
注: d_1 为凸面直径; d_2 为凹面直径; b 为名义支承直径。

图2 钢制球铰

1.2 受力特性分析

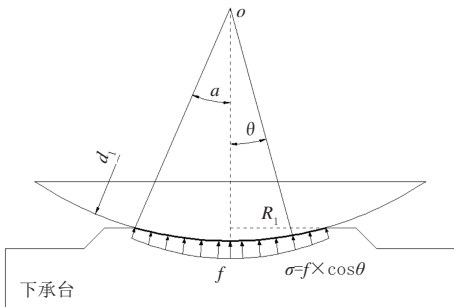
由图 1、图 2 可知,球铰的接触实则为球面与球面的接触,且相较整个球铰构造而言,仅为局部小片区域。总结球铰受力特点,可以概括为以局部区域接触受力来传递整体巨大荷载。同时,由于混凝土球铰和钢制球铰的构造形式不同,导致受力的分布呈现不同特点。

混凝土球铰的受力特性接近铁摩辛柯材料力学中关于球在球座中的受力情形^[9],如图 3 所示。该理论认为,接触面是以半径为 a 的圆形,越靠近中心,压应力越大。



注: a 为有效支承半径。
图 3 球在球座中的接触面受力情形

钢制球铰由于上下球铰的半径非常接近,如图 4 所示,可以认为整个半径为 R_1 的范围均为接触面。同时,利用弹性力学知识,参考半平面体在边界上作用集中力时的径向应力解答可知^[10],受力分布也呈现越靠近中心,径向应力越大,且应力值与 θ 角的余弦值成正比。



注: R_1 为名义支承半径; d_1 为凸面直径; σ 、 θ 分别为球铰面上某处的压应力和偏转角; a 为最大偏转角; f 为中心处最大压应力。

图 4 钢制球铰接触面应力分布模式

1.3 球铰破坏模式

基于上述对混凝土球铰和钢制球铰的受力分析,推断球铰的破坏模式,由于钢材的抗压抗拉强度都远高于混凝土,本文认为球铰破坏只可能是混凝土破坏,是由于混凝土局部承压,在较小的面积上承担较大的荷载,泊松效应显著^[11],在局部压力的横向会产生较大的拉应力,导致受拉破坏,如图 5 所示。

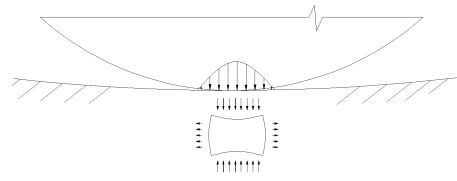


图 5 球铰接触面受压混凝土泊松效应

进一步分析可知,混凝土的抗拉强度一般为抗压强度的 $1/10$,而混凝土泊松比为 0.2 ,即局部拉应力为压应力的 $1/5$ 。因此,这两种破坏模式中,受拉必定会先于受压破坏。本文将局部承压下的横向受拉破坏作为球铰设计的控制破坏模式。

2 球铰设计关键参数控制与计算

2.1 球铰设计关键参数控制

如前所述,球铰破坏模式为局部承压下的横向受拉破坏,控制公式为:

$$\sigma_t \leq f_{ik} \quad (1)$$

式中: σ_t 为局部承压下的横向拉应力; f_{ik} 为混凝土抗拉强度。

本文认为,局部承压的范围对于整个球铰体来说相对较小,且上下球铰的半径相差不大,接触面应力分布较为均匀,因此可等效地认为在有效支承半径 a 范围内,均匀分布着值为 σ_{ec} 的压应力,即

$$\sigma_{ec} = \frac{P}{\pi a^2} \quad (2)$$

同时,根据泊松效应关系得到下式:

$$\sigma_t = 0.2\sigma_{ec} \quad (3)$$

有效支承半径是球铰的关键参数,也可与实际的几何尺寸发生关联,具有较强的实用意义。因此,本文提出通过控制有效支承半径的球铰设计实用方法,可由式(1)、式(2)和式(3)结合算得:

$$a \geq \sqrt[3]{\frac{P}{5\pi f_{ik}}} \quad (4)$$

2.2 有效支承半径计算

2.2.1 混凝土球铰

混凝土球铰的接触面有效支承半径计算,如图 3 所示,根据铁摩辛柯材料力学球在球座中的受力分析,接触面应力分布在半径为 a 的范围内,且呈现由中心向四周逐渐变小的趋势,但考虑到在集中受力状态下,混凝土横向膨胀受到约束,混凝土抗拉强度会提高的原因,本文将铁摩辛柯该公式的 a 值作为有效支承半径,即:

$$a = 0.88 \sqrt[3]{\frac{P}{E} \frac{d_1 d_2}{d_2 - d_1}} \quad (5)$$

2.2.2 钢制球铰

钢制球铰的接触面应力分布如图4所示,根据弹性力学给出的半平面体在边界上作用集中力的应力解答,径向应力的表示式为:

$$\sigma = \frac{2P}{\pi} \frac{\cos \theta}{d_1} \quad (6)$$

式中: σ 为球铰径向应力; P 为集中力大小; θ 为球面上某点的径向角度; d_1 为凸面球铰直径。

可见,半平面体在边界上作用集中力时,径向应力与 $\cos \theta$ 成正比。那么对于本工程中球铰的受力模式,也可参考此解答,认为球铰接触面上的正应力与 $\cos \theta$ 成正比,径向应力表达式可写成:

$$\sigma = f(d_1, P, R_1) \times \cos \theta \quad (7)$$

式中: σ 为球铰径向应力; d_1 为凸面球铰直径; R_1 为球铰名义支承半径; θ 为径向角度。

径向应力的竖向分量沿球面积分的结果为上部结构荷载 P ,即:

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha} d_1^2 \sin \theta (f \cos^2 \theta) d\theta d\varphi \quad (8)$$

求解式(6),可得下式:

$$f = \frac{3P}{2\pi d_1^2 (1 - \cos^3 \alpha)} \quad (9)$$

将式(7)代入式(5)得

$$\sigma = \frac{3P \cos \theta}{2\pi d_1^2 (1 - \cos^3 \alpha)} \quad (10)$$

将 α 由 R_1, d_1 表示,则式(5)变为

$$\sigma = \frac{3P \cos \theta}{2\pi d_1^2 [1 - (d_1^2 - R_1^2)^{3/2} / d_1^3]} \quad (11)$$

将球铰接触面简化为平面,接触面应力按照均匀分布考虑,则

$$\sigma_e = \frac{P}{\pi R_1^2} \quad (12)$$

式中: σ_e 为按平面考虑平均分布的应力。

由式(10)得知,当 θ 等于0时,即在球铰中心处,应力最大为:

$$\sigma_{\max} = \frac{3P}{2\pi d_1^2 [1 - (d_1^2 - R_1^2)^{3/2} / d_1^3]} \quad (13)$$

当 θ 等于 α 时,即在球铰接触面边缘处,应力最小为:

$$\sigma_{\min} = \frac{3P [(d_1^2 - R_1^2)^{1/2} / d_1]}{2\pi d_1^2 [1 - (d_1^2 - R_1^2)^{3/2} / d_1^3]} \quad (14)$$

为了研究 $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ 与 σ_e 的偏差,用 β 表示球铰直径 d_1 与名义支承半径 R_1 的倍数关系,即:

$$\beta = R_1 / d_1 \quad (15)$$

由式(12)、式(13)、式(15)可得

$$\sigma_{\max} = \frac{3\beta}{2[\beta^3 - (\beta^2 - 1)^{3/2}]} \sigma_e \quad (16)$$

由式(12)、式(14)、式(15)可得,

$$\sigma_{\min} = \frac{3(\beta^2 - 1)^{1/2}}{2[\beta^3 - (\beta^2 - 1)^{3/2}]} \sigma_e \quad (17)$$

由式(16)、式(17)可知, $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ 与 σ_e 的比例关系,只与 β 有关。假定:

$$m = \frac{3}{2[\beta^3 - (\beta^2 - 1)^{3/2}]} \quad (18)$$

$$n = \frac{3(\beta^2 - 1)^{1/2}}{2[\beta^3 - (\beta^2 - 1)^{3/2}]} \sigma \quad (19)$$

m, n 随 β 变化的关系如图6所示,由图中数据可知,当满足下式

$$\beta > 3.6 \quad (20)$$

m 值小于1.02且大于1, n 值大于0.98且小于1,即按照球面计算的不均匀分布应力的最大值和最小值,与按平面计算的均匀应力相比,偏差均不超过2%。因此,本文建议当满足式(20)时,可将球铰接触面当作平面计算,有效支承半径等于名义支承半径,即

$$a = R_1 \quad (21)$$

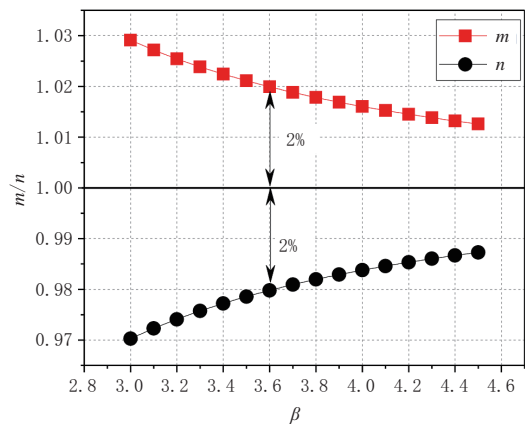


图6 m, n 与 β 的关系

3 球铰设计流程与关键参数取值

3.1 球铰设计一般流程

本节在前面分析基础上,将钢质球铰和混凝土球铰的设计流程统一,提出球铰设计实用流程和关键参数取值方法,如图7所示,主要内容为球铰选型和球铰几何尺寸确定。

3.2 球铰选型

球铰选型即确定选用混凝土球铰还是钢制球铰。混凝土球铰由于面临的施工精度、混凝土开裂、稳定性等风险较大,且混凝土摩擦系数大,往往转体吨位不宜过大,目前最大转体吨位是6 646 t(跨苏嘉杭高速公路特大桥)。同时,混凝土球铰制作简便、造

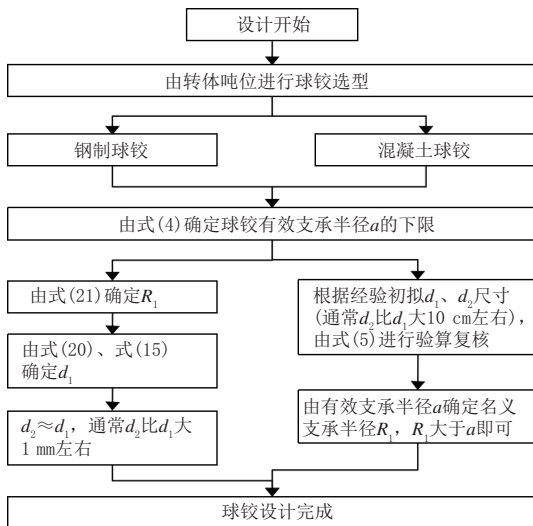


图7 球铰设计流程与关键参数取值

价低,在低重量转体项目中具有较强的竞争力。钢制球铰,上凸下凹,稳定性高,同时接触面为预制钢结构,质量可控精度高,摩擦系数小^[12],能进行大吨位的转体施工,目前最大转体吨位是45 600 t。

由式(4)预测混凝土球铰的转体吨位上限,可转换为算式:

$$P \leq 5 \pi a^2 f_{tk} \quad (22)$$

对于混凝土球铰,随着有效支承半径变大,会导致转动扭矩增加,同时对施工精度提出更高要求。如果施工精度达不到,仍可能出现局部承压破坏,无法满足设计意图。因此,本文根据实际工程经验,混凝土球铰有效支承半径 a 上限取1.3 m,混凝土等级取C60(f_{tk} 为2.85 MPa)。经计算,求得 P 的最大值为7 565.7 t。对于钢制球铰,取有效支承半径 a 为2 m作为参考值,混凝土等级为C50(f_{tk} 为2.65 MPa)时的钢制球铰最大转体吨位为16 650 t。当钢制球铰增加有效支承半径 a ,可以显著提升转体吨位。

基于以上分析,本文建议6 000 t以下可采用混凝土球铰,8 000 t以上须采用钢制球铰,6 000~8 000 t以内的,经过计算分析和综合对比,再进行球铰选型。

3.3 关键参数取值

(1)确定球铰有效支承半径 a 。选定球铰类型后,由式(15)根据转体吨位计算有效支承半径 a 的下限,式中 f_{tk} 由混凝土等级确定。

(2)混凝土球铰确定 d_1 、 d_2 、 R_1 。混凝土球铰需要现场打磨,施工精度不易控制,为保证能顺利转动,通常采用下凸上凹的构造形式,且上球铰的直径 d_2 要稍大于下球铰直径 d_1 一定数值(通常 d_2 比 d_1 大10 cm)。实际设计中,一般先根据经验初拟 d_1 、 d_2 尺寸,再由式(5)验算是否满足有效支承半径下限。名

义支承半径 R_1 的取值,则要求比 a 值大一定的安全距离,同时便于施工。

(3)钢制球铰确定 R_1 、 d_1 、 d_2 。如前所述,在满足 $\beta > 3.6$ 的情况下,钢制球铰的名义支承半径 R_1 即有效支承半径 a 。得到 R_1 后,再由式(20)确定 d_1 ,通常取 β 在4以上。由于钢制球铰的制作精度较高, d_2 取值可以非常接近 d_1 ,根据经验一般比 d_1 大1 mm。

4 工程验证

通过对国内多座转体施工桥梁的球铰(包括混凝土球铰和钢制球铰)设计资料进行调研,将之与本文提出的设计方法作对比(见表1、见表2)。采用钢制球铰的转体桥对比结果见表1,分析结果如下:

(1)在球铰类型选用上,采用混凝土球铰的最大转体吨位是6 320 t,其他均小于6 000 t,表明在6 000 t以下,混凝土球铰具有较强的竞争力。采用钢制球铰的大部分吨位在8 000 t以上,贵州都拉营大桥(7 100 t)属于采用混凝土球铰风险较高,采用钢制球铰风险大大降低,因此最终采用钢制球铰是合理的。

(2)在有效支承半径 a 的数据对比上,基本上实际工程数据均大于本文方法给出的下限值,即这些工程实例按照本文方法给出的破坏模式和算法,是能够验算通过的。其中,沪杭客运专线桥(16 800 t)、石环公路跨石太铁路桥(16 500 t)、武汉姑嫂树特大桥(17 300 t)和郑州中心区铁路跨线桥(17 100 t)三座桥的有效支承半径与本文方法给出的限值非常接近,说明17 000 t左右,接近2 m支承半径钢制球铰的转体吨位极限。如果要继续增加转体吨位,可通过施加预应力,约束局部承压混凝土横向膨胀,以提高其抗拉强度来实现。

(3)在球铰直径数据分析上,对于钢制球铰只需关注球铰凸面直径 d_1 ,从表中数据可知,实际尺寸均大于本文方案的下限值,采用平面接触的转盘可理解为球铰直径无限大,对受力是有利的。对于混凝土球铰,球铰直径 d_1 、 d_2 基本满足两者相差10 cm的经验做法。

5 结论

本文从分析球铰构造和受力特点出发,研究球铰设计的力学特性和关键参数取值,主要成果如下:

(1)从球铰受力机制出发,提出球铰的破坏模式为混凝土局部承压下的横向受拉破坏,提出并统一了钢制球铰和混凝土球铰的设计流程和方法,以有

表1 钢制球铰设计参数与本文方法对比

桥名	吨位/t	压应力/MPa	控制拉应力/MPa	名义支承半径 R_1 /m	有效支承半径 a /m		球铰凸面直径 d_1 /m	
					实际尺寸	取值下限	实际尺寸	下限值
贵州都拉营大桥	7 100	12.2	2.4	1.35	1.35	1.29	平面	4.86
贵州省北盘江大桥	10 400	10.6	2.1	1.75	1.75	1.56	8	6.30
北京石景山斜拉桥	14 000	12.1	2.4	1.9	1.9	1.82	8	6.84
沪杭客运专线	16 800	13.1	2.6	2	2	1.99	8	7.20
宁波轨道交通4号桥转体桥	14 000	10.9	2.2	2	2	1.82	8	7.20
石环公路跨石太铁路桥	16 500	13.5	2.7	1.95	1.95	1.97	8	7.02
北京六环路跨丰沙铁路立交桥	15 000	13.0	2.6	1.9	1.9	1.88	8	6.84
天津集疏港公路跨铁路桥	13 300	11.5	2.3	1.9	1.9	1.77	8	6.84
武汉姑嫂树特大桥	17 300	13.5	2.7	2	2	2.02	8	7.20
郑州中心区铁路跨线桥	17 100	13.3	2.7	2	2	2.01	8	7.20
山东邹城转体桥	21 000	9.3	1.9	2.65	2.65	2.22	平面	9.54
哈尔滨哈西大桥	29 000	13.4	2.7	2.6	2.6	2.61	12	9.36
保定乐凯大街转体桥母塔	45 600	13.6	2.7	3.24	3.24	3.28	33	11.66
保定乐凯大街转体桥子塔	34 600	12.5	2.5	2.94	2.94	2.85	28	10.58

注:1.混凝土等级为C50, f_{tk} 取2.65 MPa;

2.下球铰凸面直径为“平面”时,表示该钢制球铰接触面制作为平面,相当于凸面直径无限大。

表2 混凝土球铰设计参数与本文方法对比

桥名	吨位/t	球铰类型	名义支承半径	有效支承半径 a /m		球铰凸面直径 d_1 /m	球铰凹面直径 d_2 /m
				实际尺寸	取值下限		
跨苏嘉杭高速公路特大桥	6 646	C60 混凝土	3.02	1.31	1.21	13.5	13.6
G312跨沪宁高速公路跨线桥	5 400	C60 混凝土	1.25	1.19	1.09	13.0	13.1
上海辰塔路大桥	5 500	C60 混凝土	1.25	1.16	1.10	12.90	13.01

注:混凝土等级为C60, f_{tk} 取2.85 MPa,弹性模量 E 取 3.6×10^4 N/mm²。

效支承半径 a 作为拟定球铰几何尺寸的控制参数。

(2)应用铁摩辛柯材料力学球在球座中的应力解答,给出了混凝土球铰有效支承半径 a 的计算公式,用于指导混凝土球铰几何尺寸的拟定。应用弹性力学半无限体的应力解答,对钢制球铰的受力情况进行分析和计算推导,得出当 $\beta > 3.6$ 时,可将球铰接触面当作平面进行计算。

(3)将本文方法与工程实例数据对比验证,表明本文方法理论可靠,方法可行,具有较高的准确性和指导意义。

参考文献:

- [1] 陈宝春,孙潮,陈友杰.桥梁转体施工方法在我国的应用与发展[J].公路交通科技,2001(2):56-57.
- [2] 张联燕,等.桥梁转体施工[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 程飞,张琪峰,王景全.我国桥梁转体施工技术的发展现状与前景

[J].铁道标准设计,2011(6):67-71.

- [4] 钱桂枫,程飞,王景全,等.沪杭高铁超大吨位转体施工拱桥建造技术[M].北京:中国铁道出版社,2012.
- [5] 宁卫强,许俊德.兴郭路跨苏嘉杭高速转体桥梁的设计与施工分析[J].桥隧工程,2013(1):73-75.
- [6] 郭亚娟,李宏哲.邹城转体斜拉桥转盘结构受力分析[J].中外公路,2013(1):119-122.
- [7] 周文胜,朱根云,许柏民.G312跨沪宁高速公路跨线桥转体施工[J].桥梁建设,2004(1):68-69.
- [8] 尹书军.沪杭客运专线跨沪杭高速公路特大桥(88+160+88)m自锚上承式拱桥设计[J].铁道标准设计,2010(5):57-61.
- [9] 铁摩辛柯.材料力学[M].北京:科学出版社,1979.
- [10] 徐芝纶.弹性力学简明教程[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [11] 车晓军,张谢东,朱海清.基于球铰应力差法的T构转体桥不平衡力矩预估[J].桥梁建设,2014,44(4):57-61.
- [12] 魏赞洋,张文学,黄荐,等.连续梁桥水平转体过程中振动加速度与整体稳定性的关系研究[J].铁道学报,2016,38(5):95-102.