

# 梁桥恒载跨中挠度允许值 $[f_t]$ 确定

郭圣栋<sup>1</sup> 任亮<sup>2</sup>

(1 江西省交通设计院 江西南昌 2 华东交通大学土建学院 江西南昌)

**摘要:**长期以来,我国桥规对梁桥恒载跨中挠度允许值 $[f_t]$ 空缺;一般均用活载挠度 $f_p=[L/600]$ 来代替。经过近20年研究,认为这是造成中国P.C连续梁跨中普遍下挠、底板开裂的一个重要原因。通过论文分析,提出设计应控制合拢前初始挠度 $[f_0] \leq L/4800$ 才能确保桥梁安全。

**关键词:**恒载 零弯矩 零挠度

## 1 恒载梁跨中允许挠度值 $[f_t]$

### 1.1 国内外P.C连续梁存在问题

(1) 发展规模。20世纪末,中国在改革开放方针指引下,国民经济突飞猛进,大规模的基础工程建设如火如荼,截至2007年底中国公路总里程已达360万公里(高速公路6万公里);桥梁数量60万余座(2.8万米);各项指标说明中国已成为世界桥梁大国。如表1,在世界上前20座大跨连续刚构桥中,中国占有14座,数量占70%。1992年广东虎门大桥建成时,其270m跨径为世界第一。目前按跨径大小,中国位于4、5、6名,但都是高速公路双向六车道的重载桥。其规模都大于前三位。

的重载桥。其规模都大于前三位。

(2) 存在问题。原国际结构砼协会(CEB)调查了27座跨径自53~195m的P.C连续梁的跨中下挠情况,发现在通车8~10年后挠度仍有明显增长趋势。例如:英国Kingston桥(62.5+143.3+62.5=268.3m),1970年建成后跨中挠度一直在缓慢地增大,至今已超过30cm( $L/478$ ),并发现大量跨中裂缝。美国pavvotts渡桥(99+195+99=393m)在使用12年后,主跨下挠63.5cm( $L/307$ ),跨中大量开裂。1977年建成帕劳共和国Korov Babeidaob桥(72+241+72=385m),1996年发现下挠1.20m

表1 国内外240m以上连续刚构桥一览表

序号	桥名	国家	建成年	跨径	截面	备注
1	斯托马桥	挪威	1998	94+301+72	单室箱	主跨中部182m轻质砼
2	拉夫特桑德特大桥	挪威	1998	86+202+298+125	单室箱	中部224m轻质砼
3	RaftSendet桥	挪威	2002	120+298+120	单室箱	中部225m轻质砼
4	虎门大桥辅航道桥	中国	1997	150+270+150	双单室箱	桥在R=7000m平曲线上
5	苏通长江大桥辅桥	中国	2008	140+268+140	双单室箱	跨中设体外索
6	云南元江大桥	中国	2003	182+265+194	单室箱	桥高163m
7	门道桥	澳大利亚	1985	145+260+145	单室箱	边跨悬出与引桥相连
8	宁德下白石大桥	中国	2003	145+2×260+145	双单室箱	梁底用1.6次抛物线
9	泸州长江二桥	中国	2002	150+252+55	单室箱	边跨重力式锚碇桥台
10	Schottwien桥	奥地利	1989	250	单室箱	四跨连续刚构
11	Doutor河桥	葡萄牙	1991	250	单室箱	双线铁路
12	重庆黄花园大桥	中国	1999	137+3×250+137	双单室箱	连续长度1024m
13	马鞍山嘉陵江大桥	中国	2001	146+3×250+146	双单室箱	连续长度1042m
14	广州海心沙桥	中国	2004	138+250+138	双单室箱	全桥仿真分析,8束体外索
15	宜水路金沙江大桥	中国	2005	140+249+140	单室箱	C65砼
16	黄石长江大桥	中国	1995	163+3×245+163	单室箱	连续长度1060m, C55砼
17	江津长江大桥	中国	1997	140+240+140	单室箱	C50砼
18	重庆高家花园大桥	中国	1997	140+240+140	双单室箱	---
19	重庆龙溪河大桥	中国	1999	140+240+140	双单室箱	---
20	贵州六广河大桥	中国	2002	145+240+145	双单室箱	桥墩高73m和90m

( $L/205$ )，加固后3个月就倒塌。在中国桥梁普查和养护中，也发现普遍出现跨中下挠现象，如表2列有数十座大桥发现跨中下挠和底、腹板开裂现象。中小跨径桥梁腹板开裂多出现在支座和跨径 $L/4$ 处，出现斜裂缝也是有明显的规律。

(3) PC连续梁桥加固费用高。在大量文献中可以看到广东、湖北、山东、河南、浙江和湖南等省，其加固费早已过亿。仅湖北省一座黄石大桥就高达7500万元。

(4) 桥梁规范亟待补充、修改完善。国内众多桥梁下挠和开裂的普遍性和规律性的事实，使我们有理由怀疑桥梁技术规程中有关变形指标规定的可靠性。2004年交通部颁布《JTGD-2004》新桥规，在荷载组合、汽车荷载取值、抗裂验算、设计强度、温度作用的取值等等有关

强度验算方面的技术内容，均有所改进，但在控制变形（挠度、拉应变）等方面仍无突破。本文就恒载跨中挠度允许值 $[f]$ 大小进行专题研讨，供正在修改的“桥规”参考。

## 1.2 梁桥恒载跨中挠度允许值 $[f_c]$ 的提出

(1) 广东虎门大桥辅航道桥主跨 $L=270m$ ，是中国最大跨径连续刚构桥。其设计先进，施工获得《鲁班金奖》，1997年建成时为世界最大跨径。运营后在前五年实测跨中下挠 $\delta$ 值与时间( $t$ )关系基本上为直线，处于弹性状态相对挠度( $L/1687$ )。但到了第七年发生突变，发现跨中下缘和腹板同时出现裂缝，这震动了全国桥梁工程界。由此引起PC连续刚构桥跨中恒载允许值的大讨论。虎门大桥工程实践表明：挠度( $L/1687$ )是一个下挠与开裂的分界线，见图1。

表2 国内外桥梁跨中相对挠度( $\delta/L$ )比较表

修建年代	跨径组合(m)	跨中徐变挠度			说明
		$f_t$ (mm)	相对 挠度	相对伸长量 ( $\times 10^{-6}$ )	
①1997	150+270+150	300	$L/900$	3.29	$f_t > 160mm$ 出现开裂，已加固
②1995	162+3×245+162	335	$L/731$	4.99	加固两次，加固费用7500万
③1978	72+241+72	1200	$L/205$	66.11	加固后不久倒塌
④1997	140+240+140	320	$L/757$	4.74	出现多条主拉应力斜裂缝
⑤1998	100+220+100	200	$L/1100$	2.20	挪威( $St\Phi V_{set}$ 桥)
⑥1979	99+195+99	635	$L/307$	28.28	桥梁大量开裂，已加固
⑦2000	86+160+86	230	$L/700$	5.51	桥梁大量开裂，已加固
⑧1993	105+4×160+105	220	$L/727$	5.04	桥梁大量开裂，已加固
⑨1993	100+150+100	270	$L/556$	8.64	桥梁大量开裂，已加固
⑩1970	62+144+62	300	$L/480$	11.57	跨中带铰，大量开裂
⑪1992	105+4×140+105	220	$L/636$	6.59	733条，缝最宽0.3mm，已加固
⑫1990	85+140+85+42	110	$L/1273$	1.65	腹板开裂，已加固
⑬1993	75+7×120+75	200	$L/600$	7.41	320条，缝宽0.58mm，已加固
⑭1992	66+120+66	240	$L/500$	10.67	最大缝宽1.15mm，已加固
⑮1990	46+80+46	67	$L/1200$	1.87	腹板裂缝宽度0.47mm，已加固
①' 1982	多孔150(丹麦)	95	$L/1580$	1.07	情况良好，未开裂
②' 1991	75+135+75	30	$L/4500$	0.13	施工中裂缝，运营后未发展
③' 1986	84+3×120+84	75	$L/1600$	1.04	情况良好，未开裂
④' 2002	145+240+145	100	$L/2400$	0.46	情况良好，未开裂
⑤' 2005	138+250+138	80	$L/3125$	0.27	情况良好，未开裂
⑥' 2005	70+2×110+70	15	$L/7300$	0.05	情况良好，未开裂
⑦' 1999	65+4×100+65	22	$L/4545$	0.13	情况良好，未开裂

说明

- 1、本文推荐恒载跨中允许下挠值 $[f] \leq L/1600$ ;
- 2、换算成允许相对伸长量 $[\Delta/L] = 1 \times 10^{-6}$ ;
- 3、已开裂15座桥相对伸长量 $\eta$ 均大于 $1 \times 10^{-6}$ ;
- 4、未开裂7座桥相对伸长量 $\eta$ 均小于 $1 \times 10^{-6}$ 。

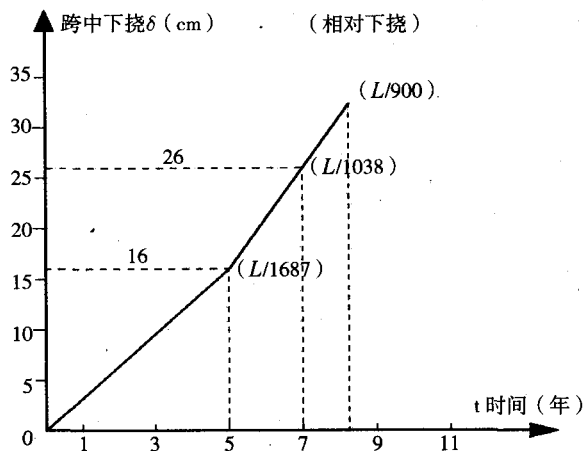


图1 虎门大桥跨中下挠

(2) 现“桥规”对梁桥恒载跨中砼徐变挠度容许值 $[f_t]$ 没有明确规定,一般常用活载允许挠度值 $[f/600]=f_p$ 来代替。如虎门大桥恒载容许下挠值 $[f]=27000/600=45(\text{cm})$ 。但是事实上当下挠 $\delta=26\text{cm}$ 时( $L/1038$ )就出现了裂缝,在表2中接近 $[f/600]$ 的12座桥梁几乎都开裂了,足以证明 $[f_t]=[f/600]$ 的标准来控制P.C连续梁挠度是不恰当的。

(3) 提出 $[f_t]=L/1600$ 的指标理由。众所周知,“检验真理的唯一标准是工程实践”。我们根据虎门大桥和表2调查12座开裂桥梁的恒载跨中相对挠度( $\delta/L$ )均大于 $L/600$ ,而没有开裂的五座桥挠度值均小于该值。因此建议“桥规”梁桥恒载跨中容许相对挠度值可取 $[f_t]=L/1600$ 。此外,原“桥规”曾指出,当计算恒载挠度小于 $[L/1600]$ 时可不设预拱度,这从另一个侧面也说明 $[L/1600]$ 的取值比较安全,是一个能控制连续梁弧长不至于过大增长而引起开裂的恰当指标。

(4) 相对允许的顶面伸长率 $\eta=\Delta/L$ 如图2。

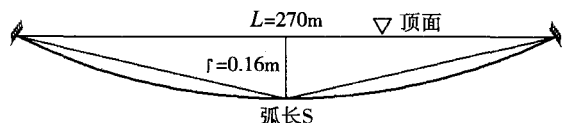


图2 箱梁顶面下挠后弧长

$$\textcircled{1} \text{弧长 } S = 270 + \frac{8}{36} \cdot f^2 = 270 + 0.222 \times (0.16)^2 = 270.005683\text{m}$$

②连续刚构桥顶面下挠 $f=0.16\text{m}$ 后,顶面长度由 $L=270\text{m}$ 增大为 $270.005683\text{m}$ ,绝对伸长量 $\Delta$

$$=0.005683\text{m}=5.68\text{mm}$$

③相对伸长率 $\eta=\Delta/L=0.005683/270=21 \times 10^{-6}$ ,这个指标可作为砼容许拉应变参考值;

## 2 合拢前允许初始挠度 $[f_0]$ 值

### 2.1 $[f_0]$ 值的推算

(1) 预拱度大小与徐变下挠 $f_t$ 无关。设计单位和桥梁设计工程师一般十分重视施工各阶段的强度和应力验算,这是正确的,但对于施工各阶段的挠度控制的重要性常常估计不足。一般认为梁的变形(挠度)可通过施工来控制,只要调整模板标高和设置“预拱度”就可以得到解决。还有不少人误以为,跨中持续下挠是“预拱度”不够所产生的。现从《桥规》附录的砼徐变挠度公式(式1)可见,P.C梁桥的砼徐变挠度 $f_t$ 与砼的徐变系数 $\phi_t$ 成正比,而与预拱度大小无关。

$$\begin{aligned} \text{即: } f_t &= (1+\phi_t) f_0 = [1+(1\sim 3)] f_0 \\ &= (2\sim 4) f_0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\phi_t$ 定义砼徐变系数。反映由于预应力存在而引起砼随时间增长游离水逸出而产生持续变形的现象。影响徐变的因素包括空气相对湿度、砼的水灰比、水泥的品种、骨料的岩性、预应力加载的龄期、砼的结构尺寸厚度和强度大小等等。桥规列出 $\phi_t$ 范围在1~3。无论理论上还是实践中都说明,徐变系数 $\phi_t$ 是一个十分难以控制的值,设计理论与施工实践之间的误差很大,所以计算的精度有问题。因此多年来企图从 $\phi$ 值研究入手,来准确预测 $f_0$ 值常常达不到目的。由式(1)可见PC连续梁的砼徐变挠度 $f_t$ 等于2(至4)倍的合拢前初始挠度 $f_0$ 值(而预拱度 $\delta$ 设置一般等于 $f_0$ )。因此在设计中有意识地减少合拢时初始挠度 $f_0$ 值,才是真正控制跨中下挠的关键所在。

(2) 合拢前的跨中初始挠度 $f_0$ 的允许值可以由推荐砼徐变容许挠度 $[f_t]=L/1600$ 代入(式1)而求得。

$$\begin{aligned} [f_0] &= \frac{f_t}{(2\sim 4)} = (0.5\sim 0.25) f_t \\ &= L/3200 \sim L/6400 \end{aligned} \quad (2)$$

即:如果能控制合拢时的初始挠度 $[f_0]=L/3200 \sim L/6400$ ,则能保持考虑砼徐变后的PC梁桥的长期挠度 $f_t \leq L/1600$ ,而不出现下挠开裂现象。

(3) 工程实例可以说明上述公式的正确性

例如:

①实例1.石南大桥(135m)采用恒载悬臂施工零弯矩配索,其梁内存弯矩几乎为零 $M_e \approx 0$

初始挠度 $\delta_0 = -0.3\text{cm}$  ( $L/45,000$ );  $< [L/3200 = 4.2\text{cm}]$

13年后挠度 $f_1 = -3\text{cm}$  ( $L/4,500$ )  $\ll [L/1600 = 8.4\text{cm}]$ ,不开裂。

②实例2.黄石大桥(245m)按连续梁包络图配索,

初始挠度 $\delta_0 = +20\text{cm}$  ( $L/1225$ );  $> [L/3200 = 7.6\text{cm}]$

13年后挠度 $f_1 = -34\text{cm}$  ( $L/720$ )  $\gg [L/1600 = 15.3\text{cm}]$ ,开裂。

③实例3.虎门大桥(270m),按连续梁包络图配索,

计算初始挠度 $\delta_0 = +10\text{cm}$  ( $L/2700$ );  $> [L/3200 = 8.4\text{cm}]$

7年后挠度 $f_1 = -26\text{cm}$   $\gg [L/1600 = 16.9\text{cm}]$ ,开裂。

## 2.2 合拢前初始挠度 $\delta_0$ 产生的原因

(1)设计计算图式与实际施工不同。众所周知,大跨梁桥最不利状态弯矩 $M_0$ 发生在最大悬臂施工状态,其值相当跨径的简支梁。 $M_0 = 1/8GL$ 。而设计所选择的计算图式是建成后的运营状态(连续梁)。通常按连续梁的最不利荷载组合的弯矩包络图,在保留一定压应力储备,并满足强度要求的原则来确定上缘预应力 $T$ 值。然而悬浇实际施工图式为双悬臂图式,最大悬臂弯矩 $M_0$ 与上缘预应力弯矩 $M_T$ 之差 $M_e = M_0 - M_T$ 将永远留在梁内不会消除。 $M_e$ 存在产生合拢前的初始挠度 $f_0$ ,"桥规"采用了预拱度的方法来消除 $f_0$ ,这样跨中桥高可保持不变,但在合拢后连续梁中 $M_e$ 并没有消除,因此还会继续在连续梁中产生持续下挠 $f_1$ 。

(2)现以 $L = 268\text{m}$ 连续刚构为例,分析梁内存弯矩 $M_e$ 所产生的初始挠度,如图3。

1)半跨箱梁自重 $G = 7.534 \times 10^4$  (kN),悬臂施工产生的自重弯矩 $M_g = -3.92 \times 10^6$  (kN·m)。箱梁上原顶板和腹板下弯索按成桥运营状态包络图配索所产生的正弯矩 $M_T = 3.34 \times 10^6$  (kN·m),梁内存弯矩差 $M_e = 0.58 \times 10^6$

(kN·m),悬臂施工弯矩比 $\eta_1 = M_T / M_g = 3.34 / 3.92 = 0.852 < 1$ 。容易出现下挠和开裂。

2)预拱度计算:

$$\sum \delta = \delta_0 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \quad (4)$$

①初始挠度 $\delta_0 = \int M_{e1} \overline{M_0} ds / EI = -0.202$  (m) (相当 $L/1326$ ),小于( $L/600 = 0.45\text{m}$ )。

式中: $\overline{M_0}$ —单位荷载作用在悬臂梁前端时各截面上的弯矩

$M_{e1} = M_0 - M_T$ —梁内存弯矩差值

$EI$ —梁各截面的抗弯刚度

②跨中合拢张拉底板预应力产生弯矩 $M_e' = 1.5 \times 10^5$  (kN),在连续梁上引起的挠度为:

$$\delta_1 = \int M_e M ds / EI = +0.0087$$
 (m)。

③二期恒载(桥面系)在连续梁上产生的跨中挠度: $\delta_2 = 0.076$  (m)。

④30年梁徐变挠度 $\delta_3 = -0.196$  (m)。

3)跨中总挠度 $\sum f_1 = -0.202 + 0.008 - 0.076 - 0.196 = -0.387$  (m) (相当于 $L/692$ )  $> [L/1600 = 0.17\text{m}]$ 容易开裂。本文推荐的恒载容许挠度 $[f] = L/1600 = 0.17$  (m)。

(3)对 $L = 268\text{m}$ 连续刚构采用“恒载零弯矩”观念,通过增加支座梁高到 $D_K = L/15 = 18\text{m}$ ,跨中 $D_S = D_K/2 = 9\text{m}$ ;将预应力采用 $\phi 21.8$ 大直径以及腹板减窄……等等,使悬臂施工弯矩比 $\eta_1 = M_T / M_g = 1.18 > 1$ 。这样跨中总挠度 $\sum f_1 = -0.055 + 0.007 - 0.007 - 0.006 = -0.061$  (cm)相当 $[L/4467] < L/1600$ 。与原 $f_1 = 0.387\text{m}$ 相较,减少六倍,可见恒载零弯矩的效果显著。

## 3 “零弯矩”设计新理念

### 3.1 发展历程

(1)PC梁桥“恒载零弯矩设计理论”是范立础院士1988年编著《预应力砼连续梁桥》书中第301页所提出的。1989年湖南路桥公司总工程师上官兴在承担广东佛山主孔135m跨径石南大桥施工任务时,建议设计采用“零弯矩理论”,并由林继乔工程师完成施工图设计。1991年石南大桥建成后成为中国第一座按“恒载零弯矩理论”设计的P.C连续梁桥。2003年测得跨中下挠 $f = 3\text{cm}$ ,为跨径 $L/4500$ 。

1992年,湖南路桥公司上官兴总工程师在湖南多座采用预制拼装工艺的P.C连续梁桥中,为

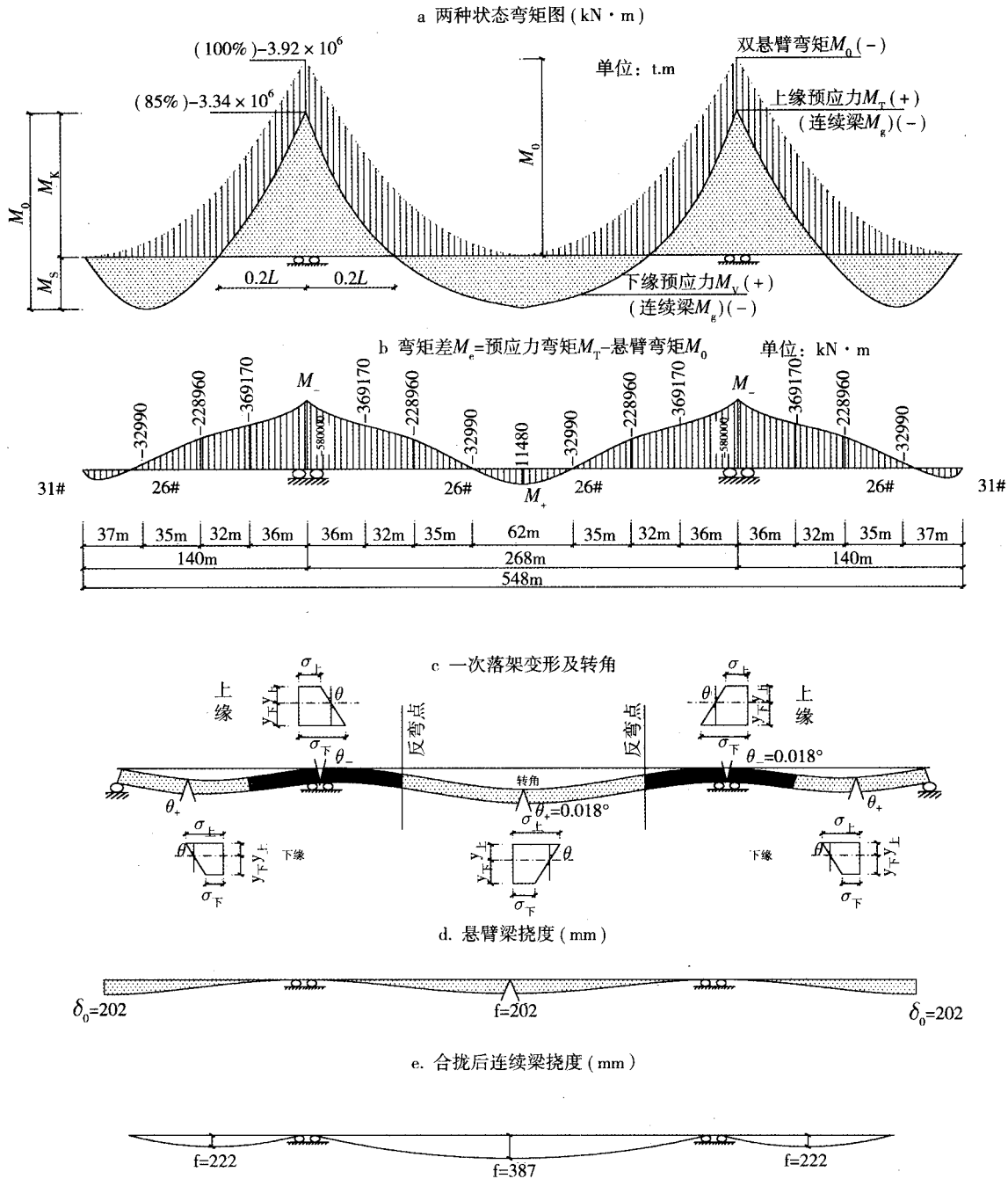


图3 268m刚构挠度分析

方便工程控制全面推广了“恒载零弯矩设计”新理念；即增加上缘预应力使预应力弯矩  $M_T$  与悬臂施工箱梁自重弯矩  $M_g$  相平衡，这样挠度为零，使施工可以取消预拱度。这些桥由于合拢时初始挠度  $\delta_0$  都控制在1cm以内。所以建成后，桥梁下挠值一般都得到有效控制。

1995年，江西省交通设计院郭圣栋高工从龙王庙赣江大桥起，在设计中全面推广“恒载零弯

矩理念”。实践表明江西省至今P.C连续梁至今未出现过大的下挠现象。

2005年，由江西省交通设计院牵头和华东交通大学、佛山市交委等单位共同参与省交通厅“P.C连续梁桥防治跨中下挠”课题的研究。该课题延长到2010年底才结束的原因是探求用双肢波形钢腹板方法，来解决  $L \geq 200\text{m}$  以上的大跨径桥实现恒载“零弯矩”和“零挠度”的难题。

(2) 本文阐述了这种设计新理念。如图4, 由于P.C.连续梁自重有负、正两种弯矩, 故在梁支座上缘和梁跨中下缘, 都要分别设置相应的预应力 ( $T_{上}$  和  $T_{下}$ ), 使其产生平衡弯矩  $M_T$  来抵消箱梁恒载弯矩  $M_g$ 。设计尽量使梁内存弯矩差值  $M_e = M_T - M_g \approx 0$  最小, 这就是恒载“零弯矩”的理念。注意要按施工顺序来分别进行。首先在悬臂状态设计有意识使上缘预应力正弯矩  $M_T$  与自重悬臂弯矩  $M_g$  相平衡, 合拢后再在跨中部使下缘预应力负弯矩与连续梁的恒载正弯矩相平衡。

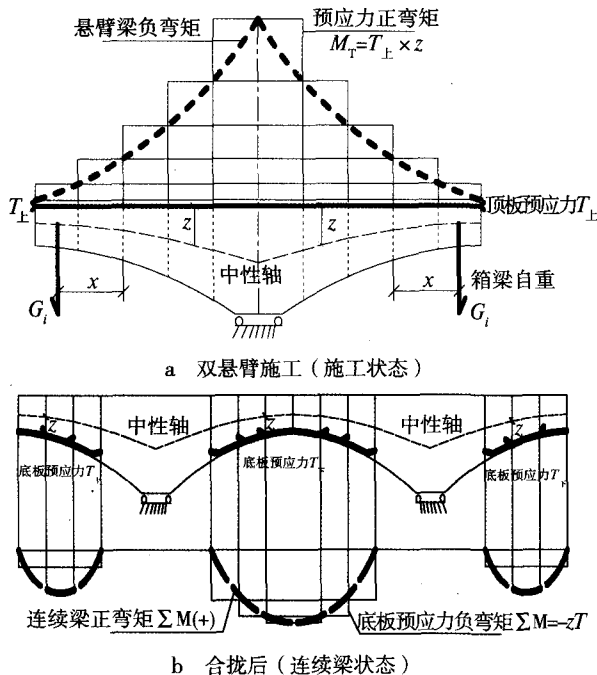


图4 P.C.连续梁恒载预应力“零弯矩”

#### A、悬臂施工 (顶板配索)

- ① 箱梁自重弯矩  $M_0 = x_i \cdot G_i$
- ② 预应力弯矩  $M_T = +T_{上} \cdot z$
- ③  $\sum M_i = M_T - M_0 = 0$

#### ④ 恒载挠度

$$f = \int \frac{M_i M}{EI} ds \approx 0 \quad (5)$$

#### B、合拢后连续梁 (底板配索)

- ① 连续梁正弯矩之和  $\sum M_+$
- ② 预应力弯矩  $M_T = T_{下} \cdot z$
- ③  $\sum M_i = M_T - \sum M_+ = 0$

- ④ 恒载挠度  $f = \int \frac{M_i M}{EI} ds \approx 0 \quad (6)$

### 3.2 判别标准

(1) 采用“零弯矩”理念设计的桥梁, 如

表3, 其中四座连续梁桥顶板预应力弯矩  $M_T$  与自重悬臂弯矩  $M_g$  相比较, 如图5。现用弯矩比  $\eta = M_T / M_g$  来判别P.C.连续梁跨中挠度情况:

①  $\eta > 1$  预应力弯矩  $M_T$  大于悬臂自重弯矩  $M_g$ , 梁轴线上翘。

②  $\eta = 1$  预应力弯矩  $M_T$  等于悬臂自重弯矩  $M_g$ , 梁标高不变, 无挠度。

③  $\eta \leq 1$  预应力弯矩  $M_T$  小于悬臂自重弯矩  $M_g$ , 梁轴线下挠。

(2) 国内PC连续梁桥跨中下挠开裂的主要原因  $\eta = M_T / M_g < 1$ 。即出现箱梁上缘预应力不足 ( $M_T$  不够) 和箱梁的超重 ( $M_g$  增大) 等情况:

① 原设计的  $M_T$  不足, 这是最基本的原因;

② 施工质量不好, 挂篮和模板变形造成砼体积增大超重5%, 致使恒载弯矩  $M_g$  增大;

③ 施工中预应力因管道不顺直, 摩阻系数增大以造成张拉力不足和  $M_T$  的减少;

④ 跨中梁高不够, 抗弯刚度  $EJ$  偏小;

⑤ 运营中超重车增多。

(3) 华东交通大学、同济大学和长沙理工大学多年进行P.C.梁桥的工程“监控”工作经验表明: 按“桥规”弯矩包络图方法设计,  $\eta \leq 1$  的情况下占绝大多数, 出现  $M_e = M_T - M_g$  所造成的初始挠度  $\delta_0$  是不可避免。其后又错误的用了抬高方法来消除砼徐变挠度 (实际上无效), 这是跨中下挠得不到有效控制的根本原因。在表3中的⑦⑧⑨⑩四座桥梁原设计预应力不足 ( $\eta = M_T / M_g < 1$  的情况下) 现将预应力管道加大2cm, 将上缘预应力根数加多达到  $M_T \geq M_g$  的标准, 则运营后的跨中砼徐变挠度  $f_t$  将大幅度减少。因此可以说转变设计观念, 桥规中及早制定《恒载的允许挠度值》是控制跨中下挠的最有效措施。

### 4 防止下挠的综合措施

江西省交通设计院和华东交通大学在执行《大跨径梁持续下挠的控制》课题研究六年来, 通过五届硕士研究生的毕业论文提出了一系列防治措施, 现汇总分项说明其原理。其中特别阐明关于主梁高度优化的新认识。

#### 4.1 加大跨中梁高是降低活载挠度的关键

##### 4.1.1 公路连续梁高D有明确的规律性

跨中梁高  $D_s$  为支座梁高  $D_k$  /3左右, 支座梁

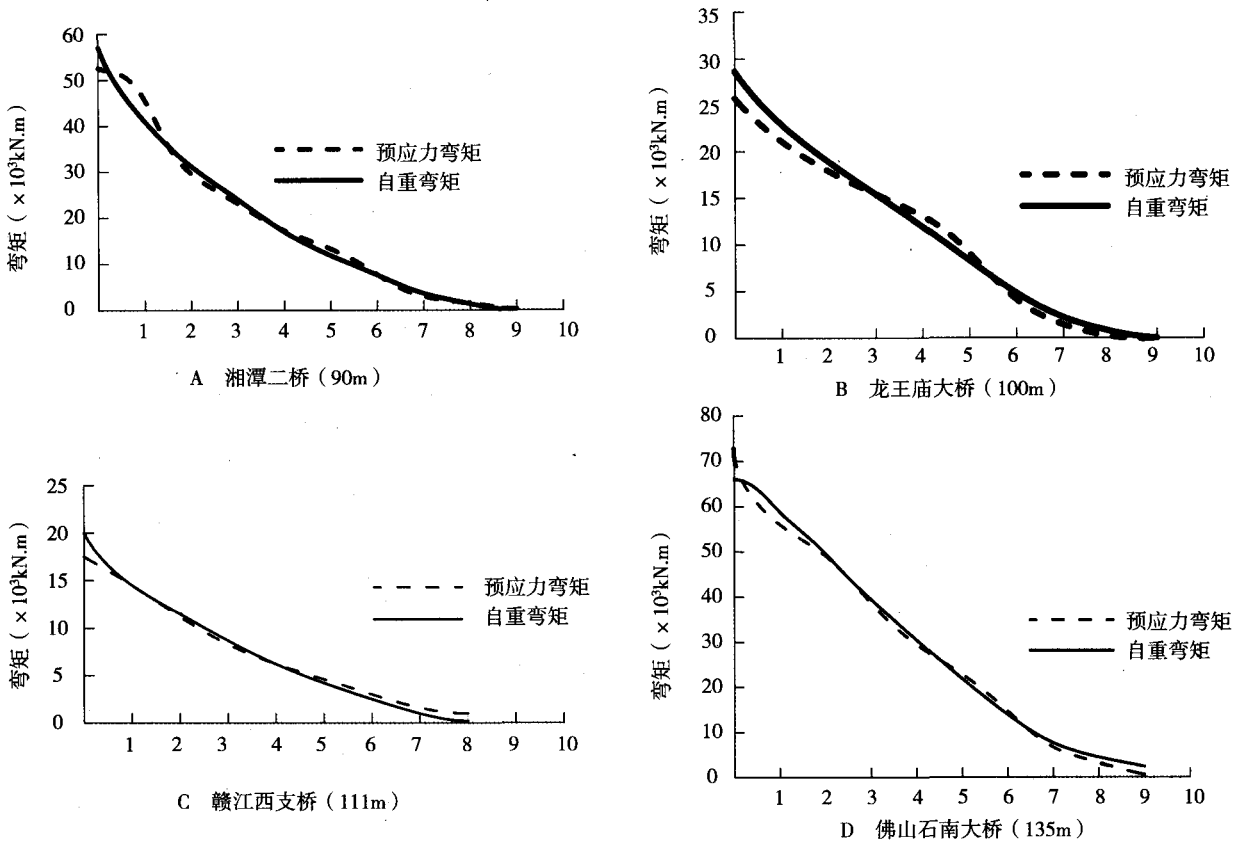


图5 悬臂施工恒载“零弯矩”设计实例

表3 采用恒载“零弯矩”理念设计的桥梁 $f_t$ 比较表

桥名 (跨径组成)	弯矩比 $\eta = M_T/M_g$	跨中初始挠度 $\delta_0$ (mm)	运营后跨中砼徐变挠度	
			$f_t$ (mm)	相对值
1佛山石南桥 (75+135+75)	1.05	3	-30	$L/4500$
2湘潭湘江二桥 (50+5×90+50)	1.06	5	-25	$L/3600$
3安乡大鲸港桥 (8×50)	1.01	5	-	-
4常德石龟山桥 (55+3×80+55)	1.03	10	-	-
5赣江龙王庙桥 (65+4×100+65)	≈1.0	-	-21	$L/4762$
6赣江西支桥 (70+2×110+70)	1.23	12	-30	$L/3667$
7乐安河桥 (45+3×70+45)	1.15	-7	-16	$L/4375$
8西溪大桥 (42+3×72+42)	1.33	10	46	$L/1565$
9王宅大桥 (55+100+55)	1.04	-3	18	$L/5555$
10磨刀门桥 (70+2×120+70)	0.98	-5	27	$L/4444$

注： $M_T$ 为上缘预应力设计弯矩； $M_g$ 为箱梁悬臂施工自重弯矩。

高 $D_k$ 与跨径 $L$ 的比值 $\eta$ 均在 $(1/18)$ 左右；有些文献还认为 $D_k$ 高度有进一步降低的趋势（靠近 $1/20$ ）。这些观点都是以强度为中心而计算得到的，而对变形控制（即挠度）则考虑得不够周到。随着中国国民经济的快速发展，近年来超重车愈来愈多，车辆的密度也愈来愈大，因阻车造成桥面汽车全宽、全长密布，这样活载的梁挠度就逐步上升到相当一个长期存在“恒载”。因此重

新认识梁高的选择原则以及适当加大跨中梁高来加大抗弯刚度，减少活载挠度就显得十分必要。

#### 4.1.2 铁路桥跨中梁高

众所周知铁路火车头重180t，超过汽车重载（55t）近三倍，因此变截面铁路梁桥的跨中高度 $D_s$ 一般为支座梁高 $1/2$ 左右，（比公路桥跨中梁高相当增高50%）。现以广东省广州—澳门的轻轨高速路上容桂水道185m刚构桥来剖析。其跨

径组合 (108.85+2×185+115.55+94.35) m。桥宽11.6m, 桥面为无渣轻轨。梁在支座处高度为  $D_k=11\text{m}$ , 相当  $L/17$ , 而跨中梁高  $D_s=5.5\text{m}$ , 相当支座梁高  $D_k/2$ , 这种加大跨中梁高的做法在公路桥梁中实属罕见。与常规梁高  $D_s=3.5\text{m}$  (约  $D_k/3$ ) 相比较: 其合拢前的跨中挠度为常规梁挠度的39.6%, 其十年后砼的徐变挠度为常规梁挠度的27.5%, 可见加大梁高、加大惯性矩I、增大预应力索的力臂、加大预应力弯矩  $M_T$  等综合作用, 能大幅度减少P.C铁路连续梁的活载跨中挠度。

#### 4.1.3 公路大跨PC连续梁跨中梁高 $D_s$ 的选择

由前所述, 当今桥梁设计其观念应从以“强度”控制转变为“挠度”控制。由此跨中梁高  $D_s = D_k/3$  已不能满足连续梁跨中零挠度需要。可以认为, 设计梁高不能再按经验数据确定, 而应通过详细计算来保证减少跨中挠度。通过容桂水道桥的启发和我们多座桥梁的分析及比较, 都论证了跨中梁高  $D_s$  提高到  $D_k/2$  为好。跨中梁高不够, 使所有工作都十分被动, 预应力钢索用量大、跨中挠度控制不了。课题组成员《江西省交通设计院》所设计的泰和赣江大桥 (2010年建成), 跨径  $L=155\text{m}$ , 支座梁高  $D_k=8.5\text{m}$  ( $L/18.2$ ), 跨中梁高果断选择  $D=4\text{m}$  ( $D_k/2.12$ ), 这是本课题的研

究成果在公路桥梁中的首次应用, 也是观念转变的证明。

#### 4.2 支座处梁高影响初始挠度 $f_0$

(1) 支座梁高  $D_k=L/18$  的经验数据适用于  $L \leq 200\text{m}$  连续梁桥。如运用在更大跨径时偏矮。我们在进行十多座桥梁零弯矩设计整理时, 发现随着跨径  $L$  的增大,  $D_k=L/18$  不变则很难满足悬臂施工的零弯矩。因为顶板的宽度一定, 能布置的索孔数量有限, 这样上缘预应力索力  $T$  最大值也有限, 要满足自重悬臂弯矩越来越困难。例如268m跨连续刚构, 初始挠度很大, 达  $\delta_0=20.2\text{cm}$ 。如果将根部梁高  $D_k$  增大到18m (相当  $L/15$ )。这时悬臂挠度可降低70% ( $\delta_0=-6.0\text{cm}$ )。新观念要以控制挠度为中心, 经计算在  $L=200\text{m}$  以上的跨径, 将  $D_k$  由  $L/18$  加大到  $L/15$  都有较好的效果, 而当跨径  $L=300\text{m}$  时,  $D_k$  还要加到  $L/12$ 。

#### (2) 梁高不够时的措施采用临时斜拉索

鉴于P.C连续梁桥梁高按“挠度控制”来确定的新理念, 尚未被大多数桥梁工程师所了解, 因此需要研究在梁高不够时, 要控制好梁的挠度所能采用的补救措施。上官兴教授在苏通大桥提出在O#块上设置临时斜拉塔, 用临时斜拉索来辅助合拢的新构思, 如图6。对于268m跨刚构桥,

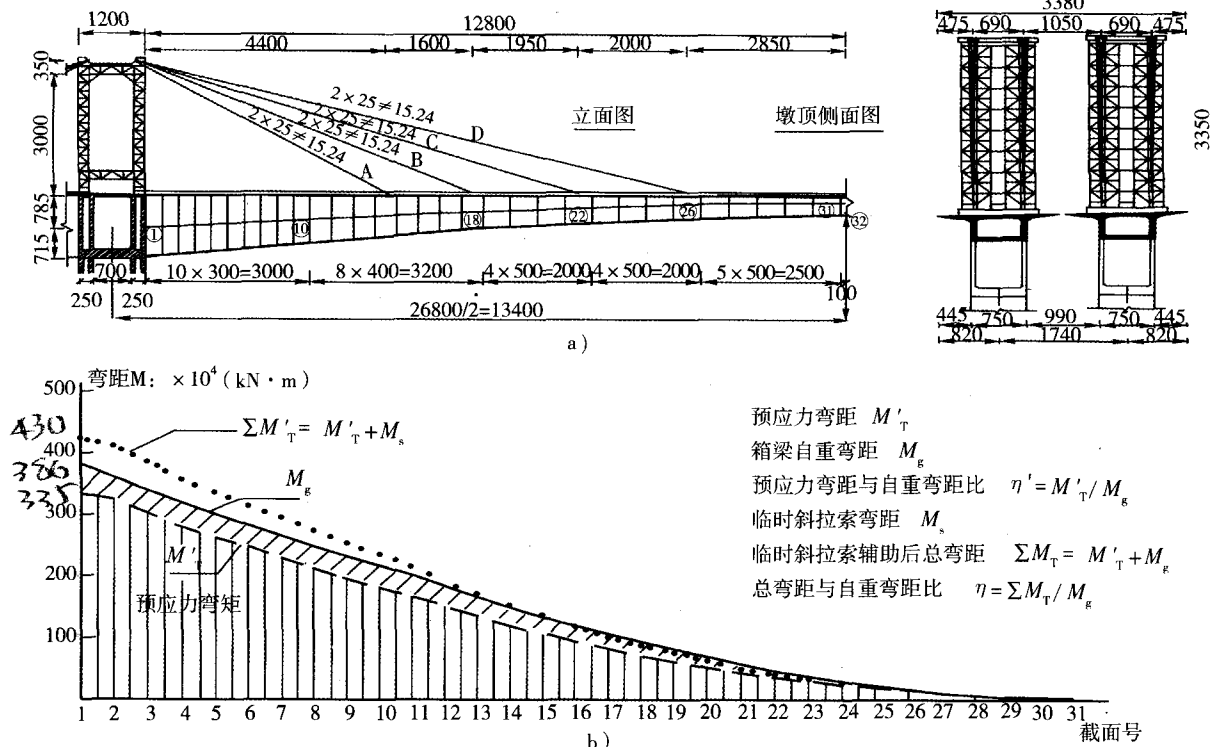


图6 268m刚构桥用临时斜拉索辅助合拢



当悬臂施工的初始挠度  $\delta_0 = -20.2\text{cm}$  时, 用斜拉可产生  $18.7\text{cm}$  的上抬, 最终初始挠度  $f_0 = -20.2 + 18.7 = -1.53\text{cm}$ , 减少  $92\%$ , 可见临时斜拉索在特大跨径中临时斜拉索的效果。

#### 4.3 预应力设计的改进

(1) 箱梁在悬臂施工阶段, 应配足够上缘预应力, 保证各截面的预应力弯矩  $M_T$  与悬臂施工自重弯矩  $M_g$  之比值:  $\eta = M_T / M_g > 1$ 。如因支座梁高偏矮, 造成合拢初始挠度  $\delta_0$  大于  $L/4800$ 。只要跨中梁高  $D_s = D_k/2$ , 则可在底板下缘多布置预应力孔道, 在合拢后张拉预应力将合拢时跨中下挠重新抬高 (这是铁路梁桥的经验做法)。

(2) 腹板结构优化是保证桥梁轻型化的关键。在大跨径刚构中, 引进波形钢新材料是减轻自重, 根除国产竖向预应力不到位的弊病以及增大梁高而不加重、提高抗弯刚度EJ最有效手段。

(3) 采用大直径大吨位预应力钢绞线。国内通常采用的  $\phi 15$  钢绞线, 索力在  $5000 (\text{kN})$  之内而不能满足大跨径梁桥的零弯矩新理念的要求。为了增大预应力来减小恒载徐变挠度, 可以引进日本生产  $19$  丝钢绞线 ( $\phi 21.8$  以及  $\phi 28.6$ )。  $37$  股  $\phi 28.6$  钢绞线预应力可达  $10000 (\text{kN})$ , 这样在顶底板中双层  $\phi 15.20$  钢绞线孔道均可优化为单层大吨位千吨级预应力。从而减薄顶、底结构厚度和加快进度。有关大直径预应力几种规格类型如表4, 其中  $\phi 21$  是湖南公路设计公司研制的  $\phi 7$  平行钢丝群锚体系。1995年荣获湖南省科技进步三等奖, 已在  $11$  座桥梁总长  $7646\text{m}$  成功运用, 其中最大跨径为  $120\text{m}$  顶推系杆拱 (韶关五里亭大桥)。柳州 OVM 公司将多年生产的  $7\phi 7 = \phi^{S21}$  夹片锚具推广应用在日本  $\phi 21.8$  和  $\phi 28.6$  大直径钢绞线的锚具上。

表4 大直径预应力钢绞线一览表

直径(mm)	面积 A (m <sup>2</sup> )	标准强度 R (kN/m <sup>2</sup> )	破断力 T <sub>max</sub> (kN)	破断力比值
$\phi 15$	$1.4 \times 10^{-4}$	$1.86 \times 10^6$	260	1
$\phi 21$	$2.69 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^6$	430	1.7
$\phi 21.8$	$3.13 \times 10^{-4}$	$1.86 \times 10^6$	573	2.2
$\phi 28.6$	$5.33 \times 10^{-4}$	$1.78 \times 10^6$	949	3.7

	(7 根)		(19 根)	
图				
例	$\phi 15 (7\phi 5)$	$\phi 21 (7\phi 7)$	$\phi 21.8$	$\phi 28.6$

#### 参考文献

- [1] 林同炎. 预应力砼结构设计[M]. 中国铁道出版社, 1983.
- [2] 范立础. 预应力混凝土连续梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [3] 林继乔. 石南大桥上部结构设计及工艺[J]. 中南公路工程 59期, 1991.
- [4] 吴同鳌. 90m湘潭二桥悬拼施工[C]. 上海全国桥梁会议, 1995.
- [5] 刘桂生. 连续梁桥分阶段预应力设计[J]. 广东公路测设简报, 1996.
- [6] 牛和恩. 虎门大桥工程——主跨270m连续刚构桥[M]. 北京: 人民出版社, 1997.
- [7] 戴竞. 我国预应力混凝土公路桥的发展与现状[J]. 土木工程学报, 1997, 6.
- [8] 杨高中. 连续刚构桥在我国的应用和发展[J]. 公路, 1998.
- [9] 杨高中. 杨高中桥梁学术论文集[M]. 人民交通出版社, 2001.
- [10] 刘刚亮. 虎门大桥辅航道270m连续刚构悬臂施工控制[J]. 桥梁建设, 2001(5).
- [11] 周军生. PC连续刚构桥的现状和发展趋势[J]. 中国公路学报, 2003年.
- [12] 楼庄鸿. 楼庄鸿桥梁论文集. 人民交通出版社, 2004.
- [13] 石雪飞. 大跨梁桥施工控制现状及展望[J]. 公路交通科技, 2004年11月.
- [14] 张继尧. 悬臂浇筑预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京: 人民出版社, 2004.
- [15] 上官兴. 控制梁桥长期下挠的新技术[C]. 昆明公路桥梁会议, 2004.
- [16] 张 □. 连续梁桥恒载零弯矩设计[D]. 华东交通大学硕士论文, 2005.
- [17] 郭圣栋. 大跨梁桥持续下挠成因[C]. 西宁中外桥梁病害整治大会论文, 2005.
- [18] 上官兴. 临时拉索控制桥梁下挠的新构思[C]. 常熟公路桥梁会议论文, 2006.
- [19] 王汝成. 大跨度连续梁桥长期下挠的控制研究[D]. 同济大学硕士论文, 2006.
- [20] 戴玉明. 大跨梁桥中挠度控制措施[D]. 华东交通大学硕士论文, 2007.
- [21] 王景会. 我国大型桥梁的病害及其机理. 广州公路桥梁会议论文, 2007.
- [22] 梁立农. 广州海心砂大桥设计. 广州公路桥梁会议论文, 2007.
- [23] 龚汉清. 大跨梁桥持续下挠的控制研究[D]. 华东交通大学硕士论文, 2008.
- [24] 张喜钢. 268m连续刚构抗裂性的对策研究. 舟山公路桥梁会议论文, 2008.
- [25] 上官兴. PC连续梁恒载零挠度设计新理念. 南京桥梁加固会议, 2008.
- [26] 石雪飞. 大跨PC梁桥长期挠度预留对策. 全国桥梁学会论文集, 200