

改进铁路简支梁桥结构设计刍议

北京交通大学 贺光梁

编者按：科学技术是第一生产力，就铁路建设而言对已有规章制度既要严格执行，以保证行车安全，又要通过实验，随着技术进步不断创新，才能获得更大的效益。贺光梁教授对新建铁路桥梁占 90% 以上的一般简支桥梁，提出只按现桥规范改善设计，可节省圬工 1/4，若进一步改革，可以节省更多工程量和费用；并提出对无缝线路与桥梁交叉专业亟待进行综合研究，以促进铁路桥梁技术的发展。希望有更多的人重视探讨这方面的问题。

60 年代以来，我国对铁路简支梁桥上列车制动力、桥上无缝线路、柔性墩桥、板式橡胶支座等课题进行了系统试验研究和实践，取得宝贵的成果。综合研究利用这些成果，对改善简支梁桥结构及桥上线路受力情况，可得到很好的启迪。

目前我国采用厂制梁现场架设的中小跨度桥梁，占新建铁路大中桥 90% 以上，积极而稳妥地分阶段改进这类桥梁结构设计，能取得具有普遍意义的技术经济效益。本文作为引玉之砖，希望得到同行的指正与重视，逐步完善并付诸实现。

一、轨道对简支梁桥结构的影响及对策

轨道的存在，是铁路桥梁结构区别于其他桥梁的特点之一，但我国现行《铁路桥涵设计规范》(TBJ2—85) (以下简称《桥规》) 除第 2、3、7、条由于轨道的需要，规定了温度跨度较大的桥梁须设置温度调节器外，未考虑轨道对桥梁结构的影响，似欠妥善。

(一) 轨道对简支梁桥结构的影响。笔者认为，轨道可视为通长地“扣压”在全桥和桥头路基上的、具有较大轴向刚度和强度的“杆件”。虽然“扣压”不同于结构中的铰接或固接，是一种比较松散的联系，当桥上为普通短轨线路时，钢轨接头还在某些情况下，削弱“杆件”的刚度和强度，使轨道对桥梁结构的影响，显得有些模糊和难以捉摸，但大量实测资料用桥上无缝线路的研究设计成果表明，轨道对简支梁桥结构至少有挠曲力、温度力，相邻梁间或台梁间的纵向约束水平力三个方面的影响。而且桥上采用无缝线路是线路技术发展的方向，《桥规》忽视与桥梁有密切关系的桥上线路发展的需要，在既有线或新建线桥梁上铺设无缝线路时，由线路研究设计人员根据《桥规》以外的规定，协助检算桥梁结构的作法，也是不恰当的。试论述于下。

1. 挠曲力 图 1a 示两端分设固定和活动支座的简支梁的活载挠曲变形，由于梁面向右

的挠曲位移和轨梁间纵向约束阴力 r 的影响,使钢轨产生轴力 T_1 (拉) 和 T_2 (压),墩顶产生挠曲力 $H_1 = T_1 + T_2 + H_2$ (式中 $H_2 = R \cdot f$, R 、 f 分别为活动支座反力和摩擦系数。在无缝线路设计中,假定 $H_2 = 0$)。

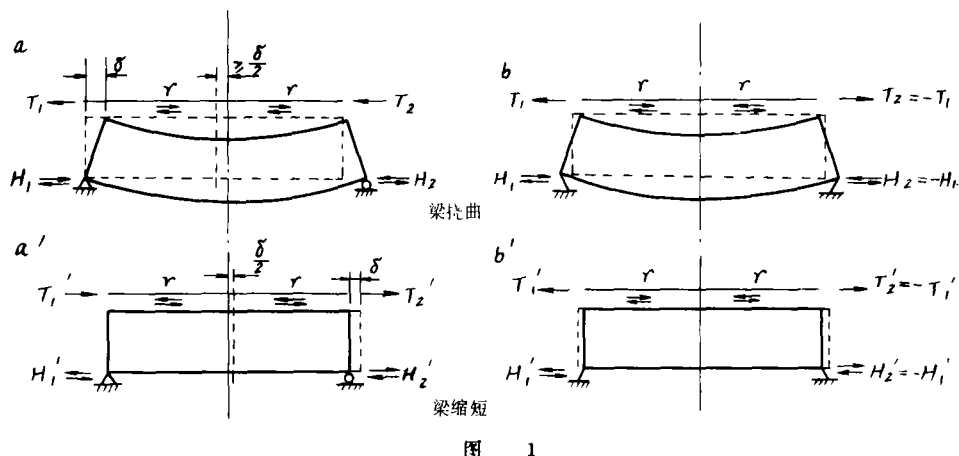


图 1

挠曲力的大小,与桥梁跨度、梁轨间纵向相对位移量和约束阻力、桥墩的推力刚度、固定支座的固定程度(与构造缝隙等有关)、活动支座的摩阻力等有关。实测资料表明,普通短轨线路同样存在 T_1 、 T_2 、 H_1 、 H_2 。只是 T_1 和 T_2 难以超过轨道的接头阻力而已。

根据铁科院《桥上无缝线路计算办法附录》,40m 上承钢板梁顶最大活载挠曲水平位移为 12.44mm,为了使梁轨间具有必要的纵向约束阻力,防止轨道爬行,除梁顶每隔不超过 3~4m 即设置一对防爬角钢外,还须加强轨道扣件的扣压力或设置一定数量的防爬器。由于因活载挠曲产生的梁轨间的纵向相对位移及相互作用力具有频繁、往复、数值又较大的特点,梁轨间纵向约束阻力过大,可使扣件(包括防爬器)滑移、松动、失效,枕木劈裂,逐步降低防爬性能。梁轨间纵向约束阻力太小,则易出现轨道爬行,对行车安全不利。例如梁轨间纵向阻力较大的郑州黄河大桥(桥上为普通短轨线路的 71 孔 40m 上承钢板梁)为了防范道钉浮起,防爬器松动,保证必要的防爬性能,要求每隔 2 小时即进行一次检查。而长东黄河大桥通车不到半个月,由于轨道防爬性能薄弱,100 孔 40m 钢板梁上轨道最大爬行量达 320mm,25m 钢轨连续瞎缝达 11~12 个(见《铁道标准设计通讯》1987 年第 11 期“多跨 40m 简支板梁桥一般轨道钢轨防爬问题的研究”一文)。这些都是铁路桥梁结构设计应该重视的问题。

《桥规》规定:双线桥固定支座均设在同一方向,即下坡端,靠近车站端或重车方向”。“双线桥采用一线制动力”。从九江长江大桥引桥 40m 简支梁上无缝线路设计的计算资料可以查到:双线活载作用于墩顶的挠曲力(主力)为一线制动力(附加力)的 1.66 倍,充分说明挠曲力的不容忽视,《桥规》宜作出补充规定。

除挠曲力外,梁上活载还可同时产生制动力,桥上为普通短轨线路的实测资料表明,桥墩顶固定支座一侧各孔梁满布最大活载制动力,挠曲力和制动力共同作用于该墩顶的“制

挠力”一般均大于制动力或挠曲力的最大值,而按《桥规》规定则只计制动力,偏于不安全。

2. 温度力

(1) 伸缩力:如图 1a'所示,梁顶因温度伸缩产生的位移受到钢轨的约束,可像挠曲力一样产生作用于墩顶的伸缩力 $H_t = T_1' + H_2' + H_2'$,在无缝线路设计中均予检算(日本铁路还具体规定:一般在有道碴区间的长钢轨纵向荷载可按每条线路 1 吨/米考虑,作用于固定支座上。见人民铁道出版社《日本国有铁道混凝土结构设计标准和解释》)。普通短轨线路的 T_1' 、 T_2' 均难以超过钢轨接头阻力,其影响一般小于挠曲力。但对于上承梁,梁轨间伸缩位移最大值出现在活动端,挠曲位移最大值出现在固定端,而且梁跨中心线产生的前后串动量也较大(\geq 梁端位移量的 1/2)。对加强线路锁定,合理决定不同梁段位置的轨道扣件的扣压力,甚为不利。

(2) 横向力:桥上钢轨因轨温升降 $\pm \Delta t$ 产生的轴向力 $P_{\Delta t} = \pm A \cdot \Delta t \cdot \alpha \cdot E$ (式中 A 、 α 、 E 分别为钢轨截面积、膨胀系数、抗压弹模),可使曲线桥产生横向力 $H_{\Delta t} = \frac{P_{\Delta t} \cdot L_p}{R}$ (式中 L_p 为梁的跨度, R 为曲线半径)。普通短轨线路可取 $P_{\Delta t}$ 为轨道接头阻力。《桥规》忽略了 $P_{\Delta t}$ 、 $H_{\Delta t}$ 的影响,偏于不安全。

3. 相邻梁间及台梁间轨道纵向约束水平力

我国历时 10 年的简支梁桥上纵向水平力实测资料表明,简支梁桥有明显的纵向整体作用,桥上的列车制动力有很大一部分传出桥外,而且桥愈短,桥墩刚度愈小,传出桥外的制动力所占比重愈大,桥墩承受的制动力愈小。而按《桥规》规定精神:①标准活载图式可任意截取;②固定支座可全部传递梁上出现的最大制动力;③活动支座的活性性能足以“割断”相邻墩台的纵向水平联系;④不考虑梁上钢轨的存在(即不考虑钢轨的接头阻力,设计时必然将每个桥墩均当作墩顶为自由端并单独承受一孔梁上可能出现的最大制动力的压弯构件。这样的桥墩,适应《桥规》要求的“截面合力偏心”、“墩顶位移”的性能较差,是当前桥墩设计颇有“胖墩”之嫌的重要根源。

笔者认为,上述四条都是值得研究的。例如“标准活载图式可任意截取”的规定,只宜应用于竖向活载(因轨道的抗挠刚度远小于梁部结构)。由于钢轨具有较强的轴向刚度,作用于轨顶的制动力,必然通过钢轨直接向前后传递,不可能“立即全部”通过轨道扣件、道床、支座等较易出现位移或变形的部位传给桥墩台,故“任意截取”的规定,不能应用于制动力。当桥墩推力刚度较小时,受前后钢轨及“活动”支座的约束,还可将一部分原本由该墩承受的制动力进行“再分配”,因而实际承受的制动力将更小。以上分析已为实测资料所证实。因此,上述四条有必要作进一步研究,在《桥规》中体现简支梁桥具有纵向整体作用的特点。

(二) 过渡对策

为争取时间,建议分两步解决上述 3 个方面的问题,即过渡对策和全面对策。

所谓过渡对策系已有一定基础,便于立即付诸实行,但还不够完善的对策。有下述两种途径:

1、对采用固定和活动支座的桥梁，应完善现有桥上无缝线路设计办法，纳入《桥规》附录，立即付诸实行。同时，补充短轨线路（指将来不可能发展为无缝线路的桥梁）事实上存在的挠曲力、制挠力计算办法。

2、采用和发展不分固定与活动支座的桥梁。如图 1b、b' 所示，不分固定与活动端的板式橡胶支座，能使简支梁的活载挠曲变形及梁温伸缩均以梁跨中心为不动点，向梁两端对称伸缩，从而使图中 $T_2 = -T_2'$ 、 $T_1' = -T_2'$ ，可消除或大幅度消减作用于墩项的挠曲力与伸缩力，便于在名孔梁跨中附近锁定桥上线路，且梁上制动力可分散由两端支座传递于墩台，也消除了前述“制挠力”的不利影响。《桥规》已明确规定， $L_p < 20m$ 梁可使用板式橡胶支座。据二院设计的直线矩形桥墩通用图，改用板式橡胶支座可减少重力式桥墩圬工量约 25%。因此板式橡胶支座可在总结已有实践经验的基础上，在其他墩型全面采用。但板式橡胶支座的适用范围太小，而三院和二院正在试用的组合支座，最近已通过室内试验，性能较好，适用范围较广，应立即扩大试用范围，以便早日取得技术经济效益。

（三）全面对策

上述过渡对策，只能解决轨道对简支梁桥结构的不利影响——挠曲力和伸缩力，未能利用轨道的有利因素——相邻梁间或台梁间轨道的纵向水平约束力。为了既能利用有利因素，又能排除不利影响，可采用下列两个步骤，进行全桥按纵向整体计算的实桥试验，以期取得最佳成果。

第一步：利用组合支座的抗剪刚度及限位装置在梁墩（台）间的连接关系，进行全桥纵向整体设计，其结构计算图式如图 2a。我国公路桥梁规范已有规定，但公路桥支座限位装置，铁路桥不宜直接套用。

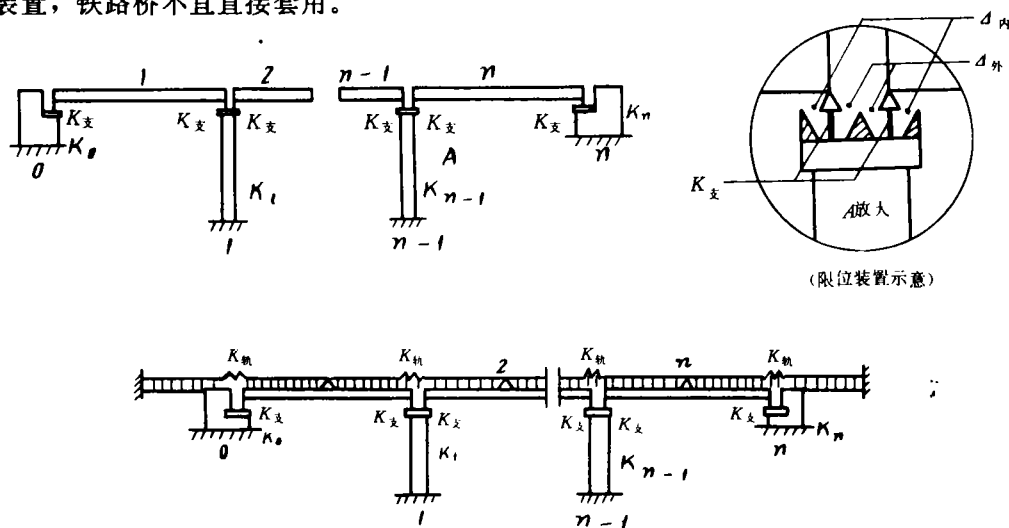


图 2

图中 $K_{轨}$ ——钢轨轴向刚度 $= AE/L$

A、E 为钢轨截面积和抗压弹模，相邻梁间 L = 梁长，台梁间 $L = 1/2$ （梁长 + 桥头锁定线路

长度)

$K_{\text{支}}$ ——组合支座抗剪刚度 $= AG/h_0$

A、G、 h_0 为橡胶板平面面积、抗剪弹模、橡胶层总厚度

$\Delta_{\text{内}}$ 、 $\Delta_{\text{外}}$ ——支座内、外侧活动限量

当 $\Delta_{\text{外}}$ 或 $\Delta_{\text{内}} = 0$ 时, $K_{\text{支}} = \infty$

当钢轨轴力达到接头阻力时, $K_{\text{轨}} = 0$

$K_0 \sim K_n$ ——桥墩台推力刚度 (计至支座顶)

第二步: 利用第一步实桥测试成果, 论证并发展为“用组合支座及桥上轨道分散传递纵向水平力, 进行全桥纵向整体设计”。其结构计算图式如图 2b。笔者曾以 6 孔 32 米梁、计至支座顶的桥台推力刚度 $K_0 = K_6 = 280 \text{KN/cm}$ 、桥墩推力刚度 $K_1 = \dots = K_5 = 100 \text{KN/cm}$ 、钢轨轴向刚度 $K_{\text{轨}} = 860 \text{KN/cm}$ (台梁间 $K_{\text{轨}} = 550 \text{KN/cm}$)、钢轨接头阻力为 540KN、支座抗剪刚度 $K_{\text{支}} = 280 \text{KN/cm}$ 、 $\Delta_{\text{内}} + \Delta_{\text{外}} = 1.46 \text{cm}$ 为例, 计算得墩顶制动水平力及位移均为按《桥规》计算值的 50% 左右, 而且桥长愈短, 效果愈好。

(四) 结 论

占我国当前新建铁路桥梁 90% 以上的混凝土简支梁桥, 为了解决挠曲力、伸缩力、制挠力等问题。应普遍采用不同固定端与活动端的组合支座或板式橡胶支座, 既可改善桥上线路的受力情况, 为桥上铺设无缝线路创造良好条件, 又可大幅度减少桥墩圬工量。如按本文提出的“全面对策”发展为全桥纵向整体设计, 其经济效益将更显著。是改进桥梁设计的一项颇有现实意义和发展前途的研究工作。

至于某些仍必须分设固定和活动支座的简支梁桥, 则不管桥上为无缝线路或普通短轨线路, 均应考虑梁、轨相互作用力的影响, 并对《桥规》作相应的修改。《桥规》现有设置温度调节器的规定, 系着眼于年温变化的要求, 不能作为全面解决挠曲力和伸缩力的依据。

二、适用于柔性墩桥和一般简支梁桥的组合支座

组合支座由铸钢与橡胶两种材料组成, 综合了辊轴支座和板式橡胶支座的特点, 兼有固定和活动支座的性能。它用辊轴支座上下摆间的弧形承压面适应梁端转角需要, 用加劲橡胶板的弹性剪切变形取代辊轴的滚动位移适应梁长向两端等量伸缩需要, 用架梁后安装的限位装置限制支座的纵向位移量和固定横向位置。

组合支座具有良好而又受到合理限制的纵向弹性位移特点, 可定名为弹性支座、限量活动支座或半固定支座, 广泛应用于柔性墩桥和一般简支梁桥。虽然组合支座构造较复杂, 但使用性能及全桥受力情况, 有明显改善, 主要有:

(一)、板式橡胶支座可能提供的容许转角 $[\theta]$, 受到多方面的制约, 橡胶板必须具有较大的压应力 σ 和厚度 h , 较小的纵向尺寸 a 和抗压弹性模量 E —— $\text{tg } [\theta] = \frac{4\sigma h}{aE}$, 式中 σ 接近常数, 当支座支承吨位增大时, h 将随 aE 乘积急剧增大, 影响支座的其它使用性能。组合支座的橡胶板无转角要求, 净橡胶总厚度 h_0 极易满足梁长向两端等量伸缩需要, (注 1) 更

不会受 $\alpha \leq \frac{h}{5}$ 的限制, 因而可提高支座抗压刚度 $\frac{EA}{h}$ 和抗剪刚度 $\frac{GA}{h_0}$ (式中 A、G、分别为橡胶板的平面面积、抗剪模量, E、h、 h_0 的含义同前), 改善支座的使用性能。如因增大抗剪刚度而增大剪切力, 影响橡胶板的滑动稳定时, 可用 J_x-24 胶粘剂消除滑动面, 并考虑是否加强梁底支座锚螺栓的抗剪能力。

(二) 计算梁端实有转角 θ 时, 除静活载的梁端挠曲转角 ($\leq 4\%$) 外, 尚应包括墩顶转角 (约为墩顶位移与墩高之比的 1.0~2.0 倍) 和梁梁后增加的线上及人行道静重与活载冲击力产生的梁端转角。其总值可超出梁上静活载梁端转角的一倍, 达到《桥规》规定的盆式橡胶支座适用的转角 $\geq 5\%$, 增加板式橡胶支座提供容许转角 $[\theta]$ 的困难, 对于静活载梁端转角即已接近 4% (相当于挠跨比为 1/800) 的低高度梁及超低高度梁, 尤为困难。不仅如此, 预应力混凝土梁端的后期徐变上拱角, 可大于上述下挠角, 而梁上无活载时的橡胶板压应力又将成倍减小, 极易使支座内侧脱空, 当邻孔活载产生挠曲力或制动力时, 更为不利。组合支座上下摆间的弧形承压面, 适应梁端转角、墩顶转角和线路纵坡角的性能很强, 还可较自由地增大橡胶板平面尺寸, 提供支承吨位至 150 吨以上。故特别适应于跨度 24~40 米梁、低高度梁、较低较柔的钢筋混凝土桥墩及线路纵坡较陡的桥梁。

(三) 下摆四角设限位装置, 既可有效地防止支座横向位移, 承受曲线桥的离心力, 又可控制支座纵向位移量, 使成为“限量活动”支座。用于地震区, 还能在一定程度上承受地震力。为消除设计或施工过程中难以避免的偏差, 限位装置还可采用安装不同厚度垫板的方式, 准确、及时地调整附图中支座的的活动限量 $\Delta_{\text{内}}$ 、 $\Delta_{\text{外}}$, 使之符合梁长伸缩的实际情况。

(四) 附图中支座内侧活动限量 $\Delta_{\text{内}}$ 采用半孔梁的降温缩短量, 支座外侧活动限量 $\Delta_{\text{外}}$ 采用升温及活载挠曲产生的半孔梁伸长量。另外, 根据设计需要, 上述 $\Delta_{\text{内}}$ 、 $\Delta_{\text{外}}$ 尚应考虑由于制动力 (T) 使橡胶板产生的急剧剪切位移 ($\Delta = \frac{Th_0}{1.5GA}$) 的影响。由于支座活动限量能准确地及时加以调整, 上述 $\Delta_{\text{内}}$ 可不考虑梁长收缩徐变的影响, 如有必要, 还可通过调整 $\Delta_{\text{内}}$ $\Delta_{\text{外}}$, 使一端支座为固定支座, 另一端为活动支座。

(五) 现有用固定支座传力的柔性墩桥, 已得到桥梁专业人员的广泛认可。它具有制动力传递系统明确可靠的优点, 但存在温度跨度由梁长增大为联长, 活动支座处梁缝因活载挠曲产生的伸缩量过大过频的缺点。如将全部支座均改为兼有固定与活动端性能的组合支座, 可在基本不改变柔性墩顶的最大位移的情况下, 使温度跨度由联长恢复为梁长, 并避免活载挠曲频繁产生的梁缝变化及墩顶位移的多孔累计值, 削减伸缩力及挠曲力, 有利于桥上轨道稳定和铺设无缝线路。

(六) 铁二院按《桥规》已有规定设计的 $L_p \leq 20$ 米梁板式橡胶支座直线矩形重力式桥墩, 由于控制截面合力偏心的活载图式由单孔轻载 + 制动力变为双孔满载 + 制动力, 除墩顶位移控制较严外 (墩顶位移应包括支座的快剪位移), 可比原标准设计节省圬工量约 20~30%。如将板式橡胶支座改为组合支座, 可突破《桥规》规定的 $L_p \leq 20$ 米的使用范围, 用于 24~40 米梁, 并取得同样的经济效益。而且组合支座有较大的抗剪刚度, 有利于加强全桥墩台的纵向联合作用, 分散和减小墩顶水平力, 一般说, 桥愈短, 墩愈柔, 支座抗剪刚度愈大, 全桥纵向联合作用愈明显, 经济效益也愈好。(参见 1989 年 7 月《铁道标准设计

通讯)“用列车纵向力试验成果,改革桥墩设计”一文)

(七)组合支座兼有固定和活动支座的性能,和一般分为固定端与活动端的支座比较,可改善梁、轨间相对位移和相互约束的作用,削减挠曲力与伸缩力的不利影响,改善桥墩及桥上线路的受力情况,减少桥上线路维修养护工作量,为桥上铺设无缝线路创造有利条件。

综上所述,组合支座构思的特点是:用辊轴支座上下摆间的弧面解决好梁端转角的基础上,以橡胶板的纵向弹性剪切位移适应梁长伸缩的需要,以橡胶板的纵向弹性抗力和限位装置加强全桥的纵向整体作用,防止支座的横向移动。和其他支座比较,组合支座的优越性可概括为:

1. 和所有分固定与活动端的各种支座比较,采及组合支座的桥梁,可改变控制桥墩设计的最不利活载布置图式,使重力式桥墩减少圬工量约 1/4。和所有钢支座比较,组合支座为弹性支承,有降低梁部结构活载冲击力的优点。

2. 和一般板式橡胶支座比较,能较好的防止横向位移,加大支座的抗压及纵向抗剪刚度,改善传力性能,扩大使用范围至 $L_0 \leq 40$ 米梁(注 2),并可在下摆底四周安装密封条,对橡胶加以防护。

3. 具有较好的适应梁长向两端等量伸缩的性能,可克服弧形支座易于“冻死”、剪断锚螺栓、拉裂锚栓附近混凝土的缺点,减小作用于墩台顶的挠曲力。

4. 可避免现有摇轴支座上下弧面采用非同心圆使摩阻力随位移量增大而剧增的缺点(注 3),减少作用于墩顶的挠曲力,减少支座的用钢量。

5. 比盆式橡胶支座构造简单,造价也较低。

6. 组合支座有“限量活动”的性能,用以取代柔性墩桥的全部固定及活动支座,可改善桥上线路。

7. 既有线明桥面钢板梁长桥(如京广线及新荷线两座黄河大桥)改用组合支座,可改善桥上线路,减少线路维修养护工作量,为桥上铺设无缝线路创造条件。

鉴于组合支座比板式橡胶支座昂贵,跨度较小,梁墩挠曲刚度较大以及其他对支座性能要求较低的桥梁,仍应继续采用板式橡胶支座。

(注 1) 现有经过长期使用的 24 及 32 米梁的摇轴支座能提供的最大活动量分别为 ± 1.41 及 ± 1.69 厘米(按上摆底面与摇轴上弧面接触线距上弧边段线为 2.5 厘米计算),据以计算橡胶板的橡胶总净厚度 h_0 为

$1.57 (= \frac{1.41}{2 \times (0.7 - 0.25)})$ 及 1.88 厘米,远小于现有橡胶板设计采用的厚度。

(注 2)《桥规》规定,板式橡胶支座的抗压容许应力为 8MPa,EG25 I 辊轴与平板自由接触的径向容许压应力为 0.55dKN/cm(式中 d 为辊轴直径以厘米计)。当相邻辊轴中心距为 0.6875d 时,以橡胶板取代辊轴可提供的支承吨位恰好相等。在组合支座取代摇轴支座取得成功经验后,将来尚可研究取代辊轴支座,用于更大一些跨度的简支梁。

(注 3)经测试分析,现有非同心的圆摇轴支座的纵向摩阻力应为 $T = 0.05R + \frac{4r-2h}{h^2} \Delta R$ (式中 R 为支座反力、r 为摇轴上下弧面半径、h 为摇轴复度、 Δ 为支座位移量);

远大于《桥规》规定的 $t = 0.05R$ (即上式中 $h = 2r$,适用于同心圆摇轴支座),对桥墩台及支承受纵向力的部件,甚为不利。