

P、C 斜拉桥基本结构型式的简要归纳与分析

邱式中

P、C 斜拉桥是由下部结构连同梁、塔、索三要素组成，从一个或多个塔柱上伸出的钢索，沿桥跨的许多点来支承上部结构的桥型。整个体系影响因素众多，按照王伯惠等人对主跨 330 米的大洋河桥研究提出了 1. 影响斜拉桥结构各部受力的最根本因素是梁、塔、墩之间的结合方式；2. 在梁端加水平约束、边跨加支承墩，加外边孔，中部设铰等等，只是改善受力的一些措施，其对梁、塔受力的影响则处于第二位；3. 其他如梁、塔、索本身形式的变化等一般说来对本身或局部的受力或变形有影响，对整个结构体系其他部分受力和变形影响不大等，周念先教授在《斜张桥设计构思》一文中提到的 15 个设计变量：L、M、B、H、h、A、l、S、J、λ、ai、di、Ea'、Eb'、K 的设计中，假如对每个变量代入两个认为合理的数据并进行搭配，则 $2^{15}=32768$ 个。如何将这变梳成辫，归纳为几个系统，然后再辅以正交优化设计，确定结构每个部位的确切尺寸，那将对正确构思一座斜拉桥，从设计角度提高其经济效益，是十分有益的。P、C 斜拉桥基本结构型式是 P、C 斜拉桥体系内容研究的一部分，本文仅就上述内容进行一些归纳，并作简要分析，供设计施工人员参考，其中错误之处，希不吝指正。

一、塔柱、主梁、桥墩三者的连接型式

塔、梁、墩三体是密切相关的。它们之间的连接必须根据作用在塔柱上的垂直力和水平力的大小和它们之间的关系来决定固结或铰结。其连接型式主要有以下五种。

1、完全刚性的连接型式（即塔、梁、墩三者均为固结）

邱式中：上海市基础工程公司 教授级高工

由于塔、梁、墩三者均为固结，故增大了整个结构的刚度，以适应在塔柱底部产生较大的弯矩和悬臂拼装施工时，塔柱两侧因荷载不等而产生的弯矩以及结构稳定要求等。刚性连接多采用刚度大的 A 字形塔，甚至做成双 X 形墩来减少支点弯矩和增加塔柱的稳定性。这样就会增大基础承台和它下面的群桩基础或其它基础的结构尺寸。这种整体结合方式多适合在地质良好的地方；在大跨度桥中除早期因混凝土桥梁自重大，基础必须相应扩大时才采用，1962 年在委内瑞拉由莫兰底工程师设计的马拉开波桥（Lakl Maracaibo Bridge），即是这种整体连接型式。还有意大利的波尔维拉高架桥（Polcevera Viaduct）、利比亚的瓦迪库夫桥（Wadi Knf Bridge）、我国的四川三台桥、上海的恒丰北路桥都属于这一类型。

2、塔、墩固结、塔梁（或梁墩）铰结型式

即塔、墩固结，梁与塔柱间的模梁以铰相连，或梁座落在将塔柱连成整体的墩上。

塔、墩固结刚度大、整体性和稳定性都好。梁的大部分荷载通过索传递，经塔柱到基础；一部分荷载通过铰传至塔柱间横梁上或墩上，再由塔柱或墩传至基础，这样可以减少铰座的受力。但考虑到主梁连接处可能产生较大的弯曲应力，需预留出千斤顶高度以通过调节支点的标高来控制梁的内力。我国主跨 126 米的东北长兴岛桥，主跨 104 米的山东青岛大沽桥、上海的主跨 590 米的徐浦大桥便是这种型式。

3、塔墩固结、主梁悬浮结构

塔和墩固结，塔、梁分离，主梁支点处被斜索吊住，便称悬浮（或漂浮）结构。可避免垂直

支座在梁上产生的负弯矩，并具有向桥侧两侧及边跨斜索均匀分部拉力的效果，尤其对控制边跨斜索的松弛更为有效。特别对强地震区采用此种型式可获得良好的抗震性能。济南黄河大桥，蚌埠淮河大桥，美国哥伦比亚河上的 P—K 桥（主跨 299 米），上海的主跨 423 米的南浦大桥、主跨 602 米的杨浦大桥均属此种连接型式。

4、塔梁固结、梁墩铰结型式

此种连接型式多适应于悬臂独塔或 H 型双柱直塔，配合塔中吊梁，成为对外的静定结构，可适应软土地基不均匀沉降的需要。至于全桥荷载通过索的垂直分力传递至铰座处，对钢铰来说支座反力 5000 吨为控制主跨的标准，对氯丁橡胶板式支座尚可加大，这样的连接对挂兰悬臂施工，需加设临时固结措施。上海主跨 200 米的浏港大桥，浙江章镇的独塔斜拉桥，广西铁路公路桥—红水河桥，世界上著名的主跨 320 米的法国波鲁东纳桥，都是这种连接型式。

5、塔墩铰结、塔梁铰结或悬浮结构型式

塔墩采用铰结型式可不承受弯矩，但在施工阶段，在塔、梁、索三者未形成整体时，塔柱需外部支承满足稳定要求。由莫兰底工程师设计的意大利马格利安纳高架桥(Magliana Viaduct)和上海中山北路立交桥采用此连接型式。

二、主梁的结构型式

主梁的结构型式一般有三种。

1、超静定的连续梁型式

超静定的连续梁型式刚度大，整体性强，对抗风抗震有利。在相同条件下，其跨中挂孔型式



图 1 小本川平行索连续梁图

要少，但要求桥址地质条件要好，不能产生较大沉降，济南黄河大桥，蚌埠淮河大桥，东北长兴岛桥，日本的小本川铁路桥，美国跨径 396 米的鲁克—阿—楚克桥(Ruck—A—Chnev)即是这种结构型式(见图 1)。

2、超静定的跨中铰结构型式

台北的光复桥，为主跨 134 米的斜拉桥，在主桥正中处，设有传递剪力的钢筋混凝土铰，它容许梁体转动(见图 2)。

3、对外静定的跨中带挂孔型式

此种结构型式分为刚构悬臂梁型式和挂孔悬臂梁型式两种。由于对外为静定结构，可适应软土地基不均匀沉降需要，能调节混凝土徐变和温度应力带来的影响。但它有活荷，跨中挠度大，行车不和顺，抗震性能差等缺点。上海浏港桥为跨中带挂孔的单悬臂结构型式。四川三台桥和委内瑞拉的马拉开波桥为刚构悬臂型式(见图 3)。

三、P、C 斜拉桥基本结构型式

P、C 斜拉桥基本结构型式，共有 5 种塔、梁、墩连接型式和三种梁的结构型式的组合，可以有非常多的组合形式。这里，仅仅就常用的几种基本结构型式的组合叙述如下。

1、塔墩固结、塔梁悬浮的连续梁型式。

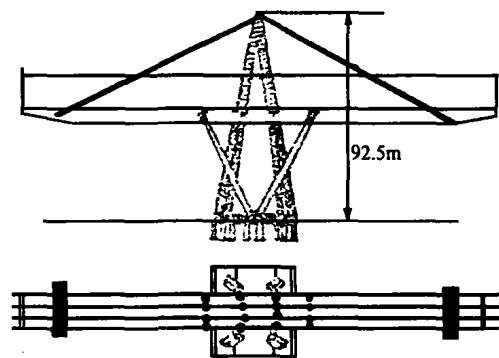


图 3 主跨 X 型支墩马拉开波桥



图 2 光复桥跨中铰接图

山东济南黄河大桥实例：

山东济南黄河大桥为主跨 220 米的五孔预应力钢筋混凝土斜拉桥，主桥长 488 米，桥面宽 19.5 米，采用“密索、A 型塔、塔墩固结、悬浮的连续体系”。

(1) A 型塔：索塔全高 68 米，斜腿断面 2×2 米²，直塔断面 3×2 米²。具有刚度大，施工稳定的特点，采用 2000 吨万能构件塔设脚手分段浇注。

(2) 密索：扇型密索、冷铸墩头锚，索的水平间距 8 米，共 11 对。

(3) 连接型式：塔墩固结，塔梁悬浮。在相同条件下，较塔梁固结，塔墩较结型式跨中最大挠度小 6~10%。采用悬索悬吊主梁，使主梁悬浮于索之上，它不但能使主梁纵向刚度均匀，减少塔下主梁的内力，而且获得较好的抗震性能。

(4) 主梁结构：为连续梁，梁高 2.75 米。梁跨 $2.75/220=1/80$ ，高宽比 $2.75/19.5 \approx 1/7$ ，刚度大，挠度小。

(5) 基础：主桥主墩各有直径 150 厘米钻孔

灌注柱 24 根，桩长 82 — 88 米的嵌岩桩。每根桩设计荷载 1200 吨。在选用水上平台，打钢板桩围堰后，以 120 — 160 吨震动锤下沉钢筋混凝土护筒，最后有 SPJ — 300 型钻孔机钻孔灌注。

2、塔墩固结、塔梁（墩）较结的连续梁型式
长兴岛（辽宁复县）斜拉桥实例（见图 4）：

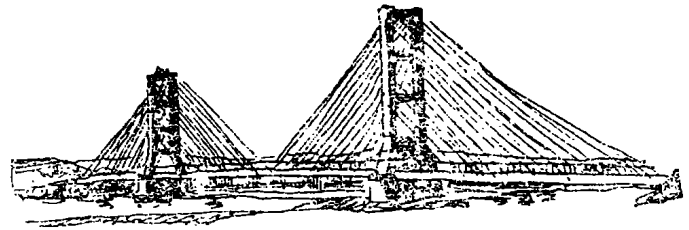


图 4 东北长兴岛桥透视图

长兴岛桥系钢筋混凝土斜拉桥，设计荷载为汽—15 挂—80。主梁为三跨连续梁，跨径 83.2+176+83.2 米，桥长 355 米，桥宽 10 米。采用“密索、门式塔、塔墩固结、梁墩较结连续梁体系”。

(1) 基础：每座桥墩设置 12 根冲孔灌注桩高桩承台，桩径 1.8 米，入岩部份桩径 1.6 米。桩长

基本结构型式	塔墩固结，塔梁悬浮的连续梁型式	
		<p style="text-align: center;">山东济南黄河桥</p>
采用的塔型	大多采用门式塔，A 型塔或倒 Y 型塔	
塔、梁墩连接处截面内力	各构件分开承受截面内力，故主梁应力较小，负弯矩均比较支承型式、完全刚性的型式、塔梁固结型式小。但边跨负弯矩大于上述各种连接型式。塔柱应力较大。	
梁的支座及其内力大小	悬吊代替支座	
悬臂施工法	悬臂施工时，需从塔柱搭设牛腿，钢排架浇注架设挂兰的 0 号主梁段，并需做临时固结处理。	
运营性	伸缩缝在左右二端处，运营性最好。	
分担地震力	由左右桥墩中的任一桥墩受全部水平力，抗震性能好。	
对地质的要求	要求较好的地质条件，大多采用嵌岩桩以承受较大的压力和减少基础沉降	
斜索受力、跨中挠度	斜索受力（1#2# 外索）比跨中吊梁型式小，跨中挠度比吊梁型式小 31.6%	
塔柱稳定要求	施工时塔柱可承受弯矩，不需要临时支撑措施，但支座需加一横向约束	
对温度应力及混凝土徐变适应能力	混凝土徐变及温度影响较大需要采取一定措施：a. 尽可能采用预制段以减小收缩与徐变；b. 待两个悬臂段完成一段时间后，再做连续段；c. 若有可能在安装混凝土合拢段后，对两个悬臂段施加对顶推力，使其突出几厘米的缝，并用混凝土填充，作为徐变缩短的预留储量（例如黄河桥、长兴岛桥）；d. 设计时将上两索之间的距离取短些，约为 $(0.04 \sim 0.08) l_2$ 以减少弯矩	

16.56~15.76 米。嵌入岩内 4.1 米 ~5.5 米。

(2) 门式塔：塔高 42.77 米，用提开式支架进行滑模和提模法施工。

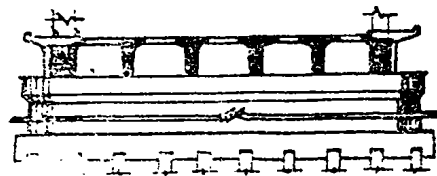
(3) 密索：拉索有国产 $\phi 5$ 毫米高强度钢丝（工地自行镀锌）。呈扇型密索布置，索塔每侧 13 道

拉索，水平距 6 米，使用墩头锚，每束钢丝 26~36 根，每道拉索根据钢丝根数（66—144 根）不等，分为 2、3、4 束。分别张拉后，再缠拢为 1 索。

(4) 连接型式：塔墩固结，梁墩铰结，为保证施工阶段的临时稳定，在墩帽上部滚动支座的



a) 光复桥



b) 光复桥主梁剖面图

图 5 台北光复桥

	塔墩固结，塔梁（墩）铰结连续梁型式
基本结构型式	<p>东北长兴岛桥</p>
采用的塔型	大多采用门式塔，A 型塔或倒 Y 型塔
塔、梁、墩连接处截面内力	各构件分开承受杆件的截面内力，故主梁应力较小只在支座处出现较大负弯矩，但塔柱应力较大。
支座受力及其大小	设置支座，但只受主梁部分的反力，故反力不很大，一般为百吨级
悬臂施工法	支座处需做临时固结处理。
运营性	伸缩缝在左右二处运营性最好
分担地震力	由左右桥墩中的任一桥墩受水平力，抗震性能较悬浮为差，如果一个塔墩下是铰支，另一个塔墩下是滚轴支承则温度应力不均衡，滚轴支承塔脚温度弯矩是另一只的 53 倍，则两上塔墩下仍为滚动支承或链杆支承为佳。
其余特性	均同第一种类型

	塔墩固结，梁墩铰结跨中铰结构型式
基本结构型式	<p>台北光复桥</p>
采用的塔型	大多采用门式塔，A 型塔或倒 Y 型塔
塔、梁、墩连接处截面内力	基本同第一、二种型式，但跨中设铰后梁中点弯矩为零。
支座受力及其大小悬臂施工法	同第一、二种型式
运营性	伸缩缝一般在三个地方，运营性一般良好
对地质的要求	对地基沉降适应性比第一、二种强
分担地震力	由左右桥墩中的任一桥墩受全部水平力
斜索受力跨中挠度	设铰使刚度减小，处于连续梁与跨中挂梁之间
塔柱稳定要求	同第一、二种型式
对温度应力及混凝土徐变适应能力	适应性比一、二种要强，但也需采取相应措施，例如光复桥，考虑到由于混凝土徐变收缩可能导致的下沉，施工时在剪力铰的水平高度上增设了 20 厘米预拱度

两侧设墩顶挡块，在 14# 箱梁（墩顶箱梁）下缘与墩顶挡块的相对应位置设箱梁挡块，并通过工字钢和钢丝束进行临时固定。

(5) 主梁结构：为连续梁，梁高 1.75 米，宽 8.4 米，高跨比 1.75/176~1/100，高宽比 1.75/84 ≈ 1/5。中跨采取挂兰悬臂浇注，边跨采取悬臂拼装。

3、塔墩固结、梁墩铰结，跨中铰的型式

台北光复桥实例（见图 5）：

光复桥正桥跨度为 67 米 + 134 米 + 134 米 + 67 米的钢筋混凝土斜拉桥，“疏索、门式塔、塔墩固结、跨中铰悬臂梁”体系。

(1) 基础：正桥部份基础采用长 32~46 米的 60 × 60 厘米预应力混凝土方桩，桩顶设置 22 米 × 10 米的桩帽和 8~9 米高的桥墩。

(2) 塔型：设在桥墩上的塔柱高度 17.5 米，为了抵抗风荷载及地震荷载，左右塔柱在塔顶以横梁连接，成为门式塔。

(3) 索：采用辐射索。每根斜拉索中的 4 根弗来西式 12T13 钢绞线束锚固在塔顶上。

(4) 连接型式：为了保证塔柱能够承受由于

斜拉索的偏心活载而产生的水平力，将塔柱与桥墩刚性连接。

(5) 梁的结构型式：采用跨中铰悬臂梁结构型式。预制梁对恒载按简支梁，对活荷按连续梁进行设计的，在正桥主跨中处设有只传递剪力的钢筋混凝土铰，它容许梁体转动和水平位移。为考虑以后由于混凝土的徐变收缩可能导致的下沉，施工时在剪力铰的水平高度增设了 20 厘米预拱度。

光复桥采用支架法架梁。

4、塔梁墩固结、跨中带挂孔的型式

马拉开波桥实例（见图 6）：

马拉开波桥主桥由 5 跨 235 米的钢筋混凝土

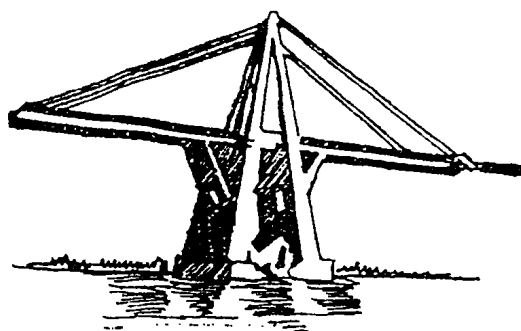


图 6 马拉开波桥

基本结构型式	塔梁墩固结，跨中带挂孔式结构型式	
		<p>委内瑞拉马拉开波桥</p>
采用的塔型	大多采用门式塔，A型塔，甚至A型门式塔	
塔、梁、墩连接处截面内力	按塔柱、主梁、桥墩的刚度比分配截面内力，所以在连接附近的主梁应力相当大，刚结点和塔脚出现极大的温度弯矩，主跨 330 米，大洋河桥温度变化 25℃，塔脚弯矩达 32760 吨一米。	
支座及其大小	不用支座	
悬臂施工法	因为是塔、梁、墩均为固结，不需采取任何临时措施。	
运营性	伸缩接缝在四个地方，挂孔梁上接缝间距短，运营性差。	
分担地震力	分散到 2 桥墩处承受。	
对地质的要求	设计成外力静定体系，可适应由于基础不均匀沉陷的要求	
塔柱稳定要求	施工时塔柱可承受弯矩，不需要临时支撑措施	
斜索受力、跨中挠度	外索受力较大，由于刚构刚度大，跨中挠度较小，但由于跨中为挂孔，相对比连续梁要大	
对温度应力及混凝土徐变适应能力	适应能力强	

斜拉桥组成, 采用“疏索、A型门式塔、塔梁墩完全刚性连接, 跨中带挂孔”的体系。

(1) 基础: 采用桩基, 上为X型框架墩, 为多次浇筑而成。

(2) 塔型: 顺桥向A型塔, 横桥向门式塔型。塔高92.5米, 横断面变化, 从底向顶收小。施工时采用塔式吊机, 混凝土升降机及人员升降机。

(3) 索: 双索面一对索。

(4) 连接型式: 塔、墩固结, 利于挂悬臂安装。

(5) 梁的结构型式: 刚架双悬臂跨中带挂孔型式。

5、塔梁固结, 梁墩铰结, 跨中带挂孔的型式
上海泖港桥实例:

上海泖港桥为主跨200米, 预应力钢筋混凝土斜拉桥。主桥370米, 桥宽12米, 为“密索、双柱式直塔, 塔梁固结、梁墩铰结, 跨中带挂孔”的体系。

(1) 基础: 91根50×50厘米钢筋混凝土预制桩(桩长24.6米左右)打入暗绿色粘性土, 在6000吨荷载作用下约沉20—30厘米。采用对外静定结构适应软土地基沉降的需要。

(2) 沉降调节措施: 为保证结构在主墩沉降

中保持对外静定及满足3%坡度要求, 桥台处压力支座及辅助墩支座采用沉降调节措施。

(3) 大型铰座处理: 泖港桥主墩实体梁上两只塔柱, 每只均设有氯丁橡胶支座(770×350×53毫米×9块), 每只承受3000吨压力。


(4) 采用辅助支墩: 为克服在活载作用下, 跨中挠度比连续梁的大, 泖港桥的桥台中间设置两只辅助支座。在恒载作用时, 辅助支座不受压力, 保持结构为对外静定体系, 在活载到跨中时, 墩中埋设的链杆可承受拉力, 减小变形, 减小跨中挠度, 改善塔的外索受力。

(5) 挂兰悬臂施工临时固结措施: 为防止挂兰悬臂施工时较处转动, 实体梁与主墩间22厘米空隙由300#硫磺胶泥填充, 并用32根48φ5高强钢丝索(称锁定索)采用墩头锚张拉, 将梁墩锁住, 变梁墩铰结为固结。

(6) 塔型: 顺桥面为直柱式, 横桥面为交叉风撑双柱式直塔, 塔高44米, 断面为1.2×3.4米², 采用毛竹脚手及提升平台两种方法施工。

(7) 索: 11对竖琴式平行索。双索面, 锚头为冷铸镦头锚, 采用塔上张拉。

(8) 连接型式: 塔梁固结、梁墩铰结。

塔墩固结, 梁墩铰结, 跨中带挂孔型式	
基本结构型式	 上海泖港桥
采用的塔型	双柱式直塔或悬臂直柱塔
塔、梁、墩连接处截面内力	比塔墩固结型式, 主梁承受的截面内力约大15%, 但塔柱截面要小, 全跨均布活荷, 塔身最大弯矩仅为悬浮和支承型的14%, 刚构的11.4%, 塔和梁的温度内力极小。
支座及其大小	支座承受塔柱、主梁及斜索的所有垂直分力, 故需要大型支座, 对大跨径可达万吨级。
悬臂施工法	悬臂施工时, 克服塔柱两侧因载重不同的稳定问题, 需做临时固结处理。
运营性	运营性较差。
分担地震力	分散在左右两桥墩中去。
对地质的要求	对外为悬臂静定体系, 可适应软土地基不均匀沉降的需要。
斜索受力、跨中挠度	外层斜索受力较大, 活荷时跨中挠度比连续梁大得多。
塔柱稳定要求	施工时塔柱可承受弯矩, 不需要临时支撑措施。
对温度应力及混凝土徐变适应能力	适应能力较强

(9) 梁的结构型式：悬臂梁跨中 30 米吊梁，采用挂兰悬臂拼装法，施工时成功地将卞尔曼滤波法应用在控制河跨主梁内力，桥轴标高，取得了高差为 2 厘米的良好效果。

6、塔墩铰结、塔梁悬浮连续梁型式

中山北路立交桥（斜拉桥）实例：

中山北路立交桥为主跨 77.75 米的预应力钢筋混凝土斜拉桥，主桥长 155.5 米，桥面宽 35.8 米，采用“密索、钳塔，塔墩铰结，悬浮结构连续梁”体系。

(1) 基础：钢管桩基础（桩为直径 90 厘米，长 75 米）每只塔脚 18 根，上为钢筋混凝土墩。墩上做钢筋混凝土杯口，内装好氯丁橡胶板支座。

(2) 塔：采用“八”钳形塔。高 62 米，变截面。施工时需满足塔柱稳定要求。

(3) 索：扇形密索 12 对共 50 根，采用冷铸锚头锚，302 ϕ 5 高强钢丝索，施工时满足对称张拉要求。

(4) 连接型式：塔墩铰结，悬浮结构，由于塔墩铰结施工时需采取如下措施。

①墩上塔脚处做一杯口，深 3 米，使塔脚嵌在杯口内，施工时将塔脚与杯口嵌成一体。

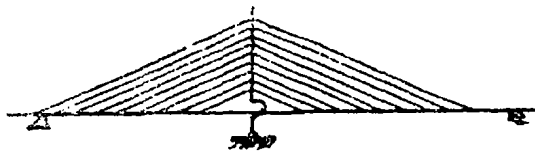
②在塔的一定高度上，安置 24 ϕ 5 高强钢丝索缆风，采用锚头锚，锚在 2# 墩上，另一端下式锚张拉保持塔体稳定。

③在塔的沿桥方向，垂直 10 米高处设置 4 道支撑，使塔在顺桥方向保持稳定。

④施工时先挂好外侧索，并将 2# 墩处链杆铰结，使 2# 墩与塔梁之间成一体。

⑤塔脚下墩内穿有 10 根 302 ϕ 5 高强钢丝索，用冷铸锚头锚张拉，使 A 字形塔脚在横方向保持 43.28m 距离。

(5) 梁的结构型式：采用连续梁型式，两楹主肋呈倒 T 形，间距 15.6m，中间为 T 形预制横梁。主肋两侧为 T 形变截面悬臂梁。主梁施工时采用支架法。该桥后因规划改变未实施。

基本结构型式	塔墩铰结，塔梁悬浮的连续梁型式	
		 <p style="text-align: center;">上海中山北路立交桥</p>
采用的塔型	大多采用门式塔，A 型塔，八型塔	
塔、梁、墩连接处截面内力	各构件分开承受各截面内力，塔底脚处不受弯矩	
支座及其大小	吊索代替支座	
施工法	可采用支架法，如悬臂安装可在塔柱脚上伸出牛腿，然后浇 0 号段，再按挂兰悬臂安装	
运营性	运营性好	
分担地震力	分散到 2 桥墩承受	
对地质的要求	主桥两侧桥墩处做成铰结和链杆可适应一定的沉降要求。	
斜索受力、跨中挠度	跨中挠度较小，斜索拉力比跨中挂梁较小。	
塔柱稳定要求	施工时塔柱不稳定，需采取措施。（见中山北路立交桥实例）	
对温度应力及混凝土徐变适应能力	同 1、2 型，需采取一定措施。	