



# 第六章 弯、斜梁桥与立交桥

## § 6.1 弯梁桥

## § 6.2 斜梁（板）桥

## § 6.3 立交桥与高架桥

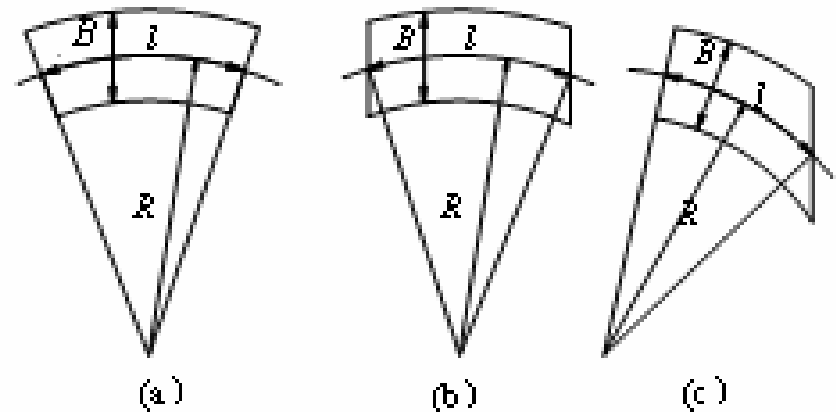
## § 6.1 弯梁桥

- 一、概述
- 弯桥：桥梁轴线在平面上呈曲线的桥。
- 弯梁桥：承重结构为梁式结构的弯桥。

(1) 按曲线平面形状：扇形弯梁桥；斜交弯梁桥



福建 漳龙高速公路上的弯梁桥



扇形弯梁桥和斜交弯梁桥





- **(2) 曲线形状：圆曲线、缓和曲线**
- 圆曲线采用得最多，其次是采用缓和曲线，有时还采用由两种不同曲线组合而成的曲线。
- **(3) 建造材料：钢弯梁桥、钢筋混凝土弯梁桥和预应力混凝土弯梁桥**
- **(4) 横截面：板、T梁、I梁和箱梁**
- **(5) 结构体系：连续梁体系**
- **(6) 施工方法：整体现场浇筑施工、预制拼装施工、顶推法等。**



## 香港大埔干线桥采用顶推法施工

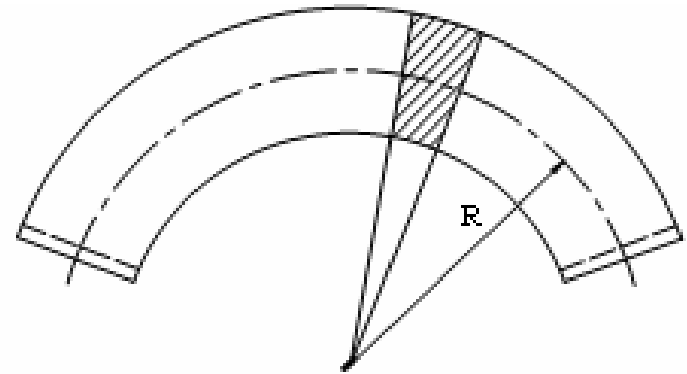




## 二、弯梁桥的特点

### 1. 弯梁桥的受力特点 (1) 恒载作用

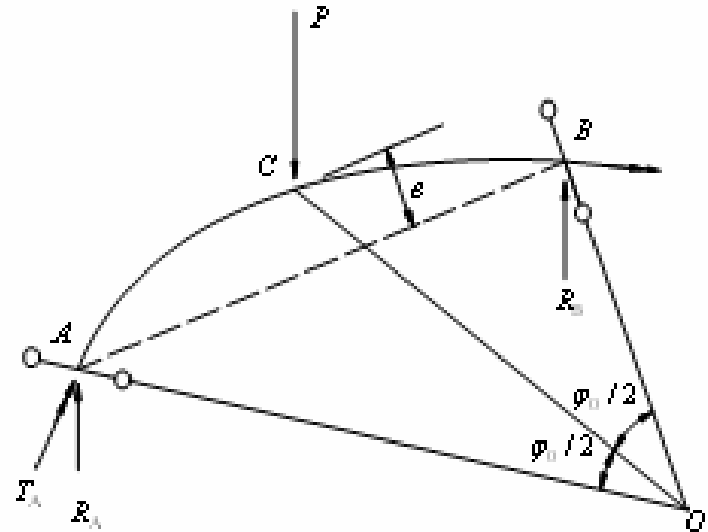
即使桥面上为均布荷载，对弯梁桥的作用也可分解为一个作用于桥中心线的垂直分力和向外弧侧倾翻的扭矩。



弯梁桥体积重心的偏心

- ( 2 ) 活载作用
- 1) 汽车荷载

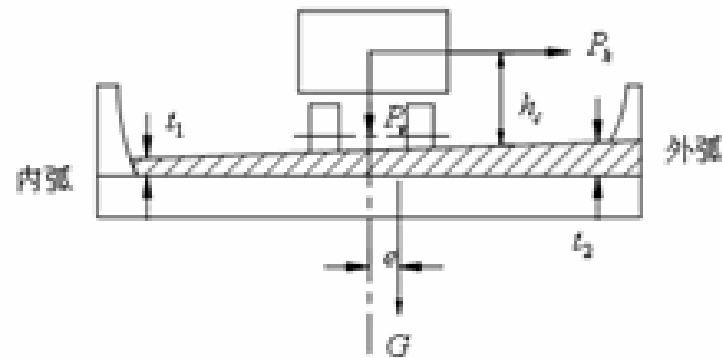
在桥跨内每个截面上除了弯矩以外，还产生有扭矩，曲率半径愈小，此扭矩值愈大。



弯桥受集中力 P 作用



## ■ 2) 汽车离心力



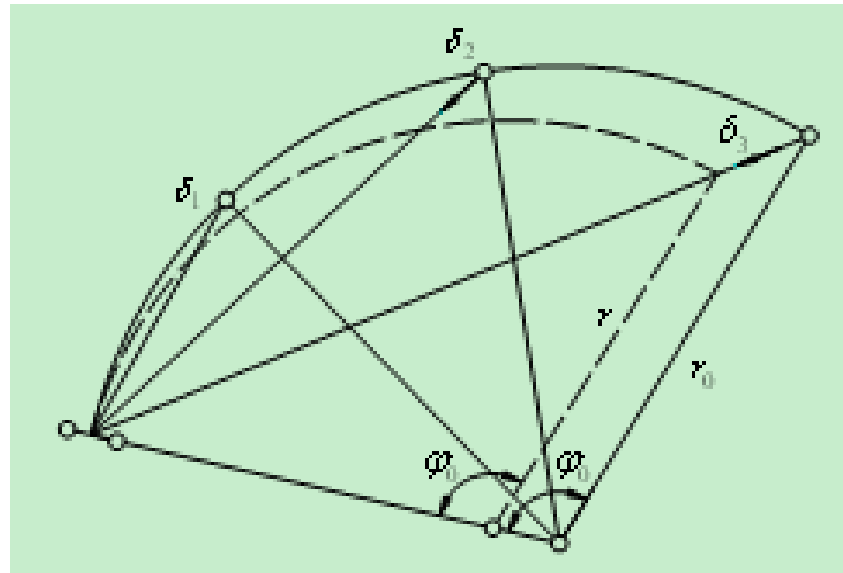
弯梁桥横坡和离心力的影响





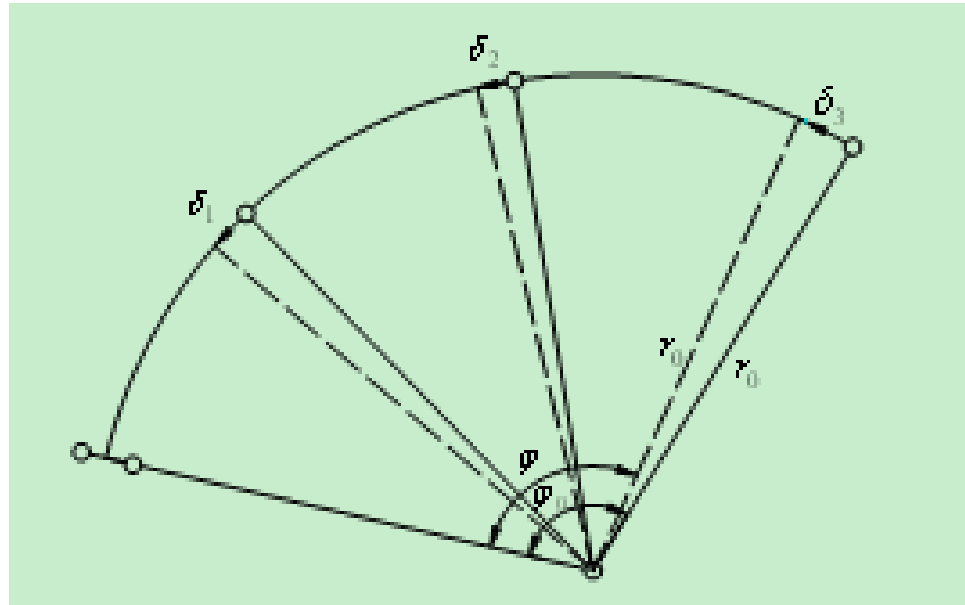
- 弯梁桥的受力特点主要有以下三点：
  - ① 在结构自重作用下，除支点截面以外，弯梁桥外边缘的挠度一般大于内边缘的挠度，而且曲线半径愈小这种差异愈严重。
  - ② 在自重和外荷载作用下，梁截面内在产生弯矩的同时，必然伴随产生“耦合扭矩”，即所称的“弯—扭”耦合作用。
  - ③ 对于两端均有抗扭支座的弯梁桥，其外弧侧的支座反力一般大于内弧侧，曲率半径较小时，内弧侧还可能出现负反力。

- 2. 弯梁桥的平面内变形特点
- (1) 由于温度变化和混凝土收缩引起的水平位移



温度变化和混凝土收缩引起的水平位移

- (2) 由于预加力和混凝土徐变引起的水平位移



预加力和混凝土徐变引起的水平位移



- **(3) 弯梁桥的爬移**
- 弯梁桥的转动中心不在中轴线上，而位于桥梁平面外。
- 混凝土收缩、徐变、温度变化和外荷载作用引起的变形很复杂，轴向位移时常伴有“横桥向位移”，这个“横桥向位移”长期累积后，会出现桥跨结构发生偏转“爬移”现象。
- 弯梁桥的爬移实际上是由横桥向的水平累计位移引起。解决的方法是在墩台上设置限制侧向位移的构造。



## 实例一：深圳黄木岗单柱支撑型立交桥破坏情况

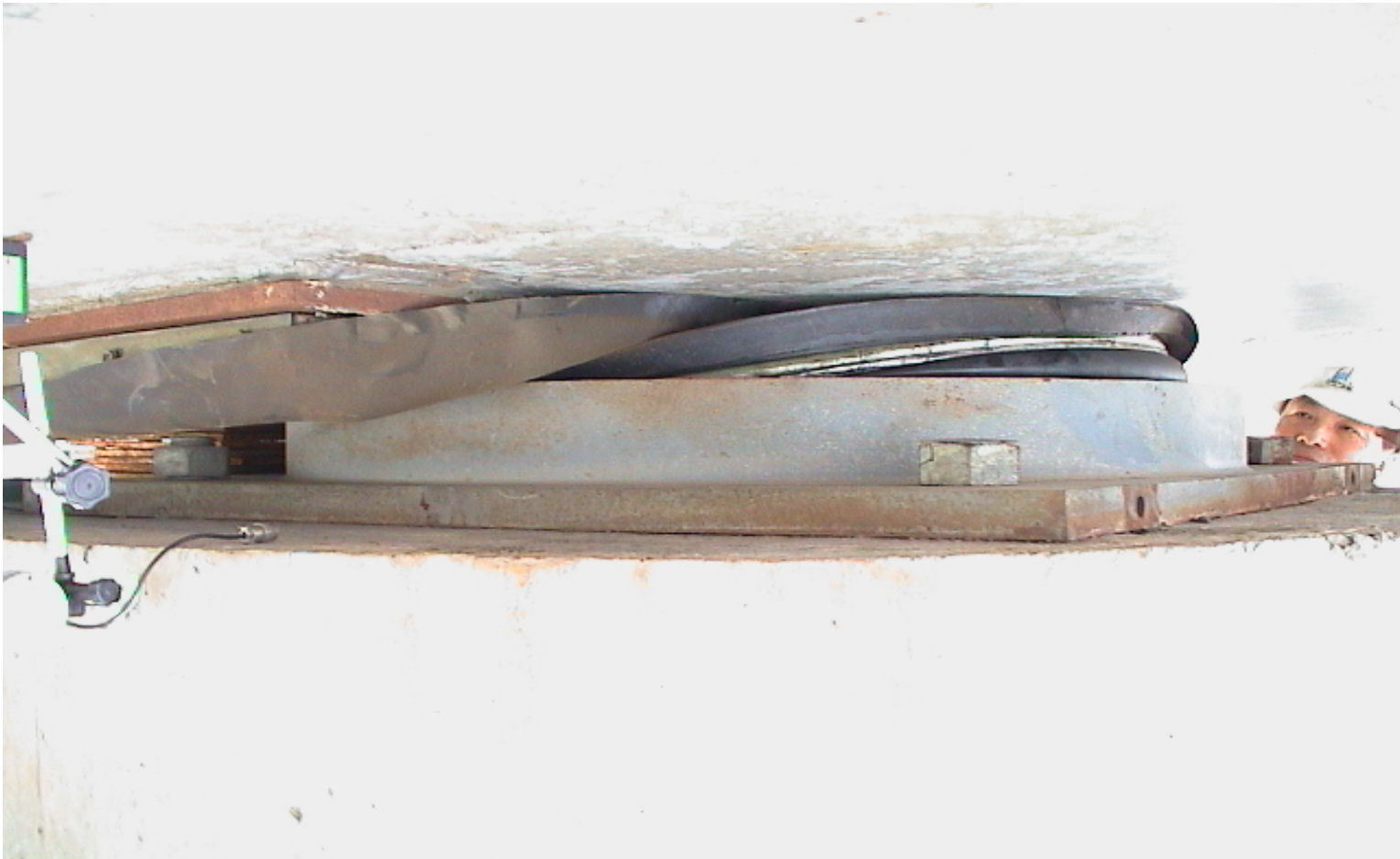
2000年6月，该桥A匝道第三联突然产生向曲线外侧的整体位移与转动，致使交通中断。检测发现，其跨中向外位移达47cm，且联端内支座脱空，中间支座大部分被剪切破坏。















## 实例二：福州紫阳立交桥侧移情况



紫阳立交桥侧向位移



## 紫阳立交桥侧向位移



## 紫阳立交桥支座脱空



## 紫阳立交桥支座变形

福州大学《桥梁工程》—福建省精品课程

<http://civil.fzu.edu.cn/BridgeCourse/>



## 实例三：福州兰圃（青口）互通B匝道桥

- 兰圃（青口）互通B匝道桥设计荷载汽-超20，挂-120，全桥共六联，总长624.7m，上部结构为现浇预应力混凝土空心板，下部结构为柱式桥墩肋式桥台及钻孔灌注桩基础。
- B匝道桥第一联处于 $R=200$ 米圆曲线上，桥面为 $17.89+3\times 20+17.8$ 等截面连续空心板结构，联端采用双柱墩，中间采用独柱墩。
- B匝道桥第三联处于 $R=95$ m的圆曲线上，桥面为 $17\text{m}+32\text{m}+17\text{m}$ 变截面连续空心板结构，联端采用双柱墩，中间采用独柱墩。

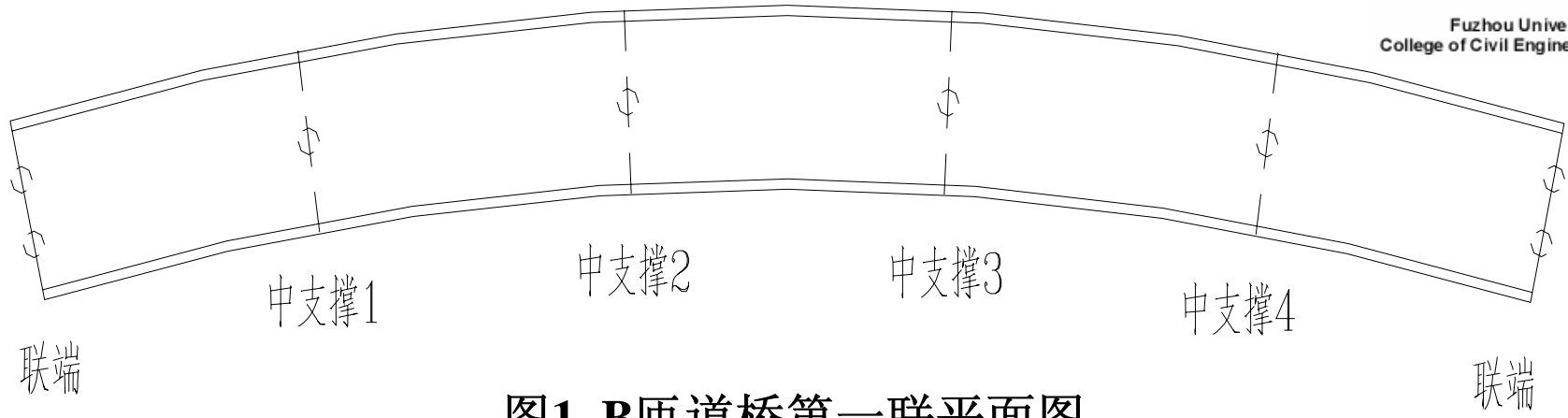


图1 B匝道桥第一联平面图

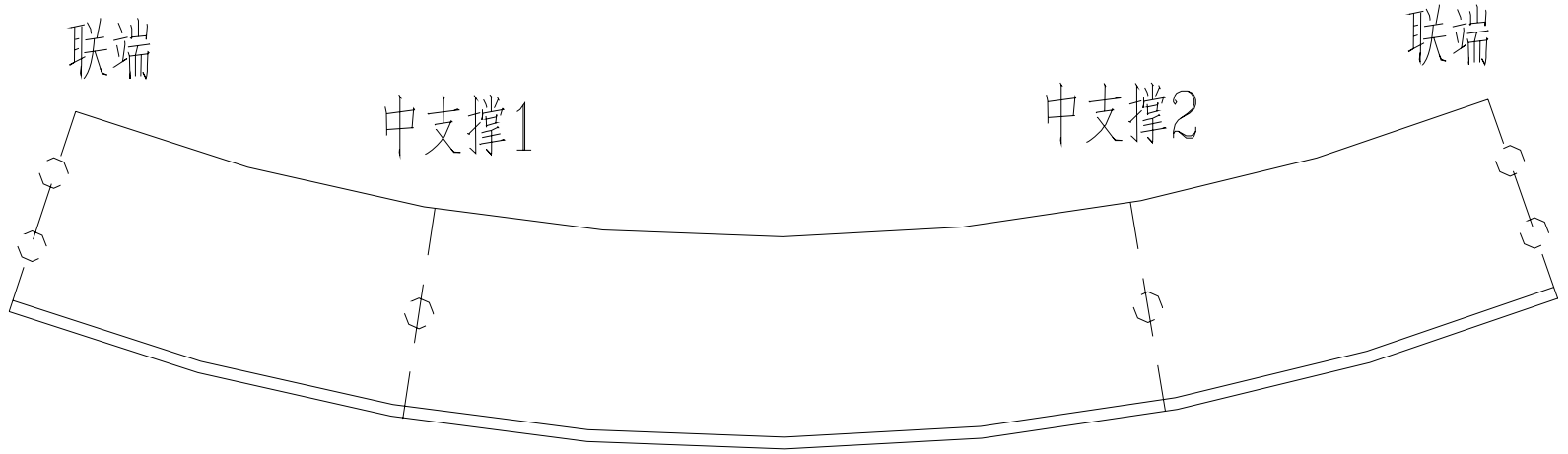


图2 B匝道桥第三联平面图





- 第一联施工中的出现状况：
- **2004年4月27日**，在浇筑第一联内侧半幅桥面铺装层期间（注：两侧护栏、外侧半幅桥面铺装层已施工完毕），当砼搅拌车行驶至外侧桥面某一位置时，发生联端内侧支座脱空现象（约**2cm**），后随着砼搅拌车退出外侧桥面，内侧桥面铺装砼施工的完成，匝道内侧支座也逐渐恢复正常。



- 第三联施工中的出现状况：
  - **2003年3月7日**，在第三联施加预应力、管道压浆等正常工序后脱模，发现该联两端内侧支座均发生脱空现象（约**3cm**）。**3月21日**，在桥面弯道内侧实施均匀沙袋压重一层后（约**8t**），发现曲梁向外侧爬行，其中**13#墩处9cm**，**12#墩处4cm**，**11#墩处1cm**，**10#墩处未发生变位**。

在准备施加外侧四部车加载时，在车辆就位过程中发现0号墩内侧支座上翘22.5mm，支座上翘位移较大。



图4 第一联外侧加载下跑车



图5 0#墩内侧桥面翘起



图6 0#墩内侧防撞栏翘起



图7 0#墩外侧防撞栏下沉



## 三、弯梁桥总体布置与构造

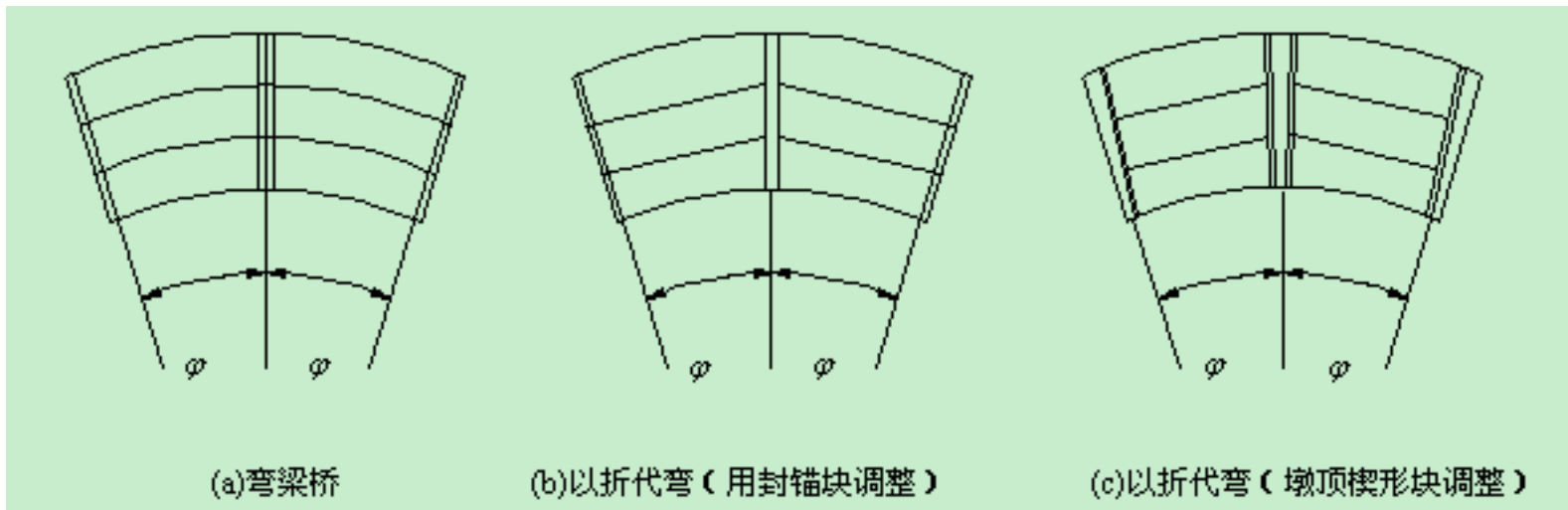
- **1. 平面和纵、横断面布置**
- 平面布置：服从整体线型布置的要求
- 立面布置：结构体系的选择，桥梁分孔，梁高选择，墩、台型式选择和基础方案的选用。  
桥梁纵坡一般服从全线纵坡设计的要求。
- 横断面布置：超高横坡设置在墩顶；或通过墩顶或梁底设置垫块；或在桥面铺装上进行调整。



- 2. 弯梁桥的横截面形式
- 截面形式：板式、肋板式、肋式和箱式
- 板式、肋板式、肋式截面多采用整体式和预制装配式；
- 箱式则多采用现浇方式

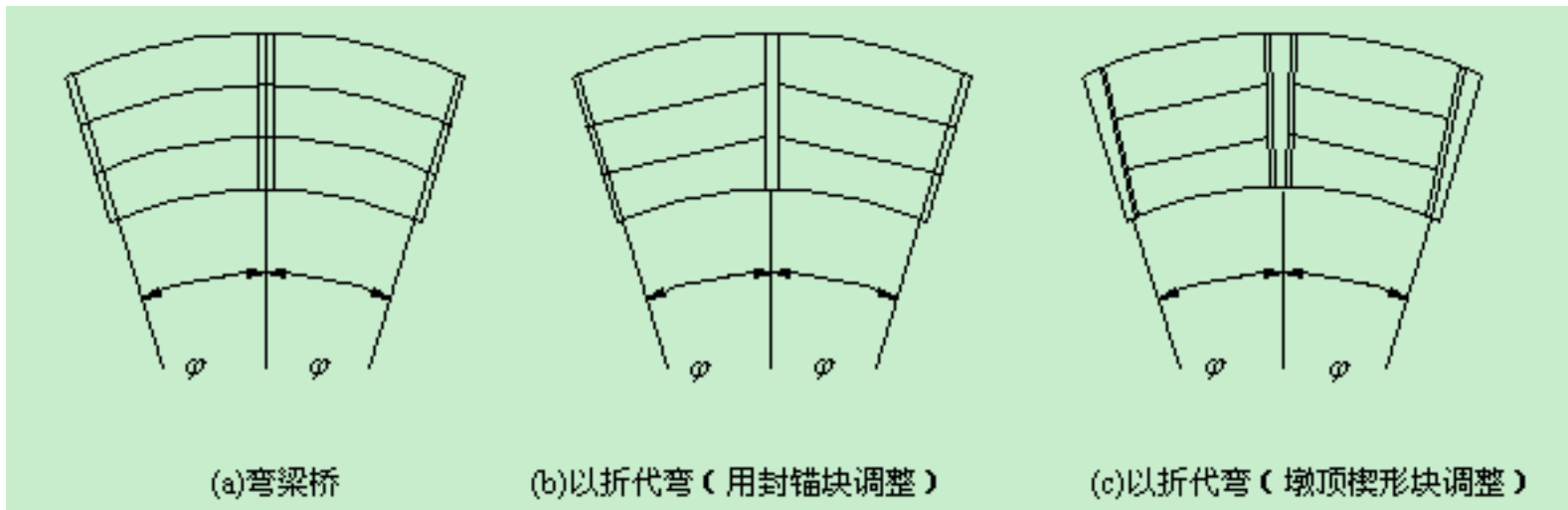
### ■ 3. 弯梁桥的构造及布置

- 对支架现浇和平面曲度较大的预制装配式弯梁桥，腹板应做成曲线形。
- 对平面曲度不大的弯梁桥，其横截面形状可以采用直线桥的横截面形状（以折代弯），但由于弯梁桥的工作特性与直线桥不同，横截面的刚度应设计得比同类直线桥大。



### ■ 3. 弯梁桥的构造及布置

- 对支架现浇和平面曲度较大的预制装配式弯梁桥，腹板应做成曲线形。
- 对平面曲度不大的弯梁桥，其横截面形状可以采用直线桥的横截面形状（以折代弯），但由于弯梁桥的工作特性与直线桥不同，横截面的刚度应设计得比同类直线桥大。





Fuzhou University -  
College of Civil Engineering



## 腹板为曲线形的弯梁桥

福州大学《桥梁工程》—福建省精品课程

<http://civil.fzu.edu.cn/BridgeCourse/>







## 以折代弯的弯梁桥

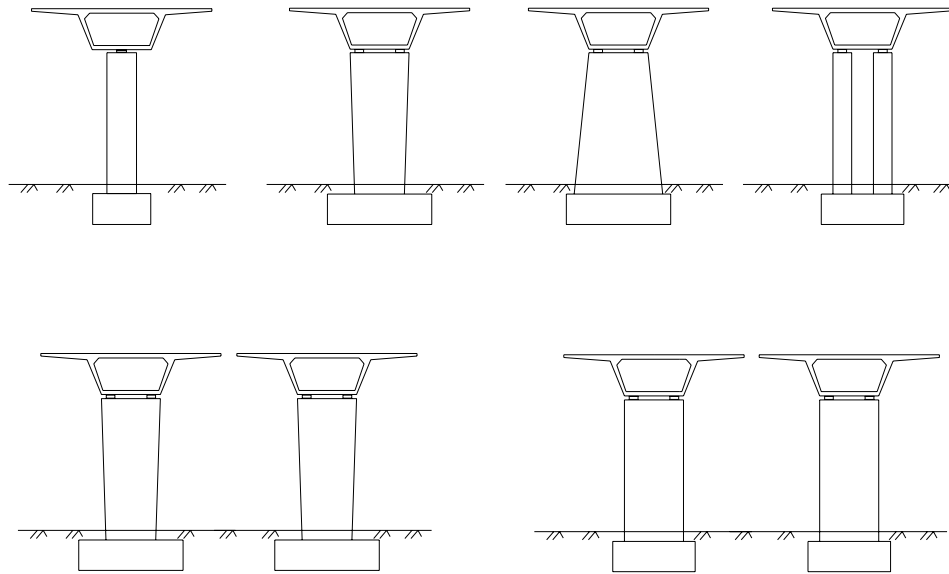




## ■ 4. 弯梁桥的墩台形式

- 弯梁桥的受力特点，在设计中应考虑以下几点：
  - (1) 必须配合支座布置，合理设计抗扭约束的墩台；
  - (2) 弯梁桥内外侧梁的受力不均，在设计中应注意墩台在横桥向的受力不均；
  - (3) 桥面上存在离心力和横向力矩作用，对横向刚度小的独柱墩构造，应注意此项作用的影响。

- 对于采用顶推法或悬臂法施工的连续弯梁桥，墩台设计中应考虑施工过程的抗扭约束，并应注意由弯梁恒载产生的弯扭影响，以确保施工期间墩台的稳定性。

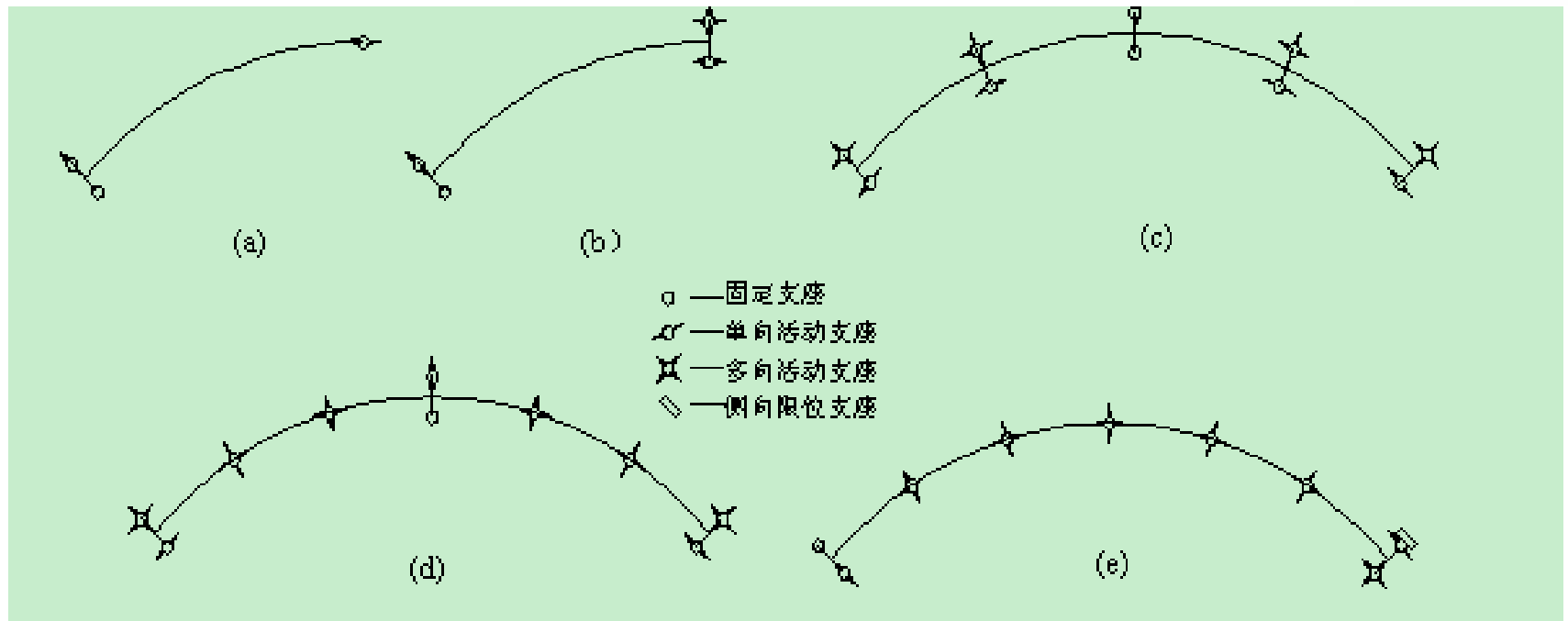


## 箱形上部结构的桥墩横向布置

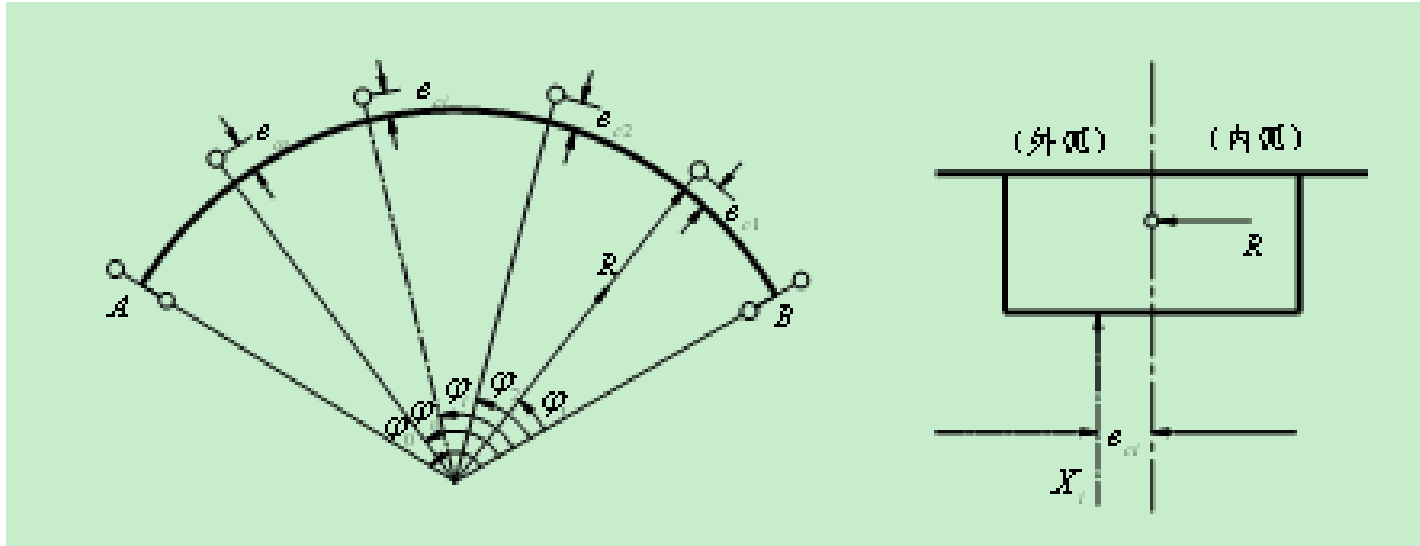


## ■ 5. 弯梁桥的支座布置

- 单跨弯梁桥：简支静定结构和简支超静定
- 连续弯梁桥：一般在一联的两端设置抗扭支座，对于中间支承，当弯梁曲率半径较大时，可在每个墩上布置抗扭支座，也可每隔**2~3**个支墩交替采用当弯梁曲率半径较小，上部结构采用具有较大抗扭刚度的箱梁结构时，可将中间墩全部布置成独柱墩、点铰支承的构造。



## 弯梁桥支座布置方式



## 单点铰支座预偏心布置





## 四、弯梁桥的计算简介

- 把弯梁桥模拟成一根单曲梁，采用纯扭转或者约束扭转理论计算，横截面内力分析采用横向分布理论。  
计算工作量小，能较准确模拟实际结构，且计算结果为截面内力，与现行规范一致。
- 数值计算方法，如有限元、有限条法等，这一类方法根据采用的单元不同，可分为杆系有限元法和三维实体有限元法。  
计算工作量大，且计算结果为应力，比较适合于结构的研究分析



# 五、预应力混凝土弯梁桥预应力筋的布置原则

## ■ 1. 预应力筋的力学特性

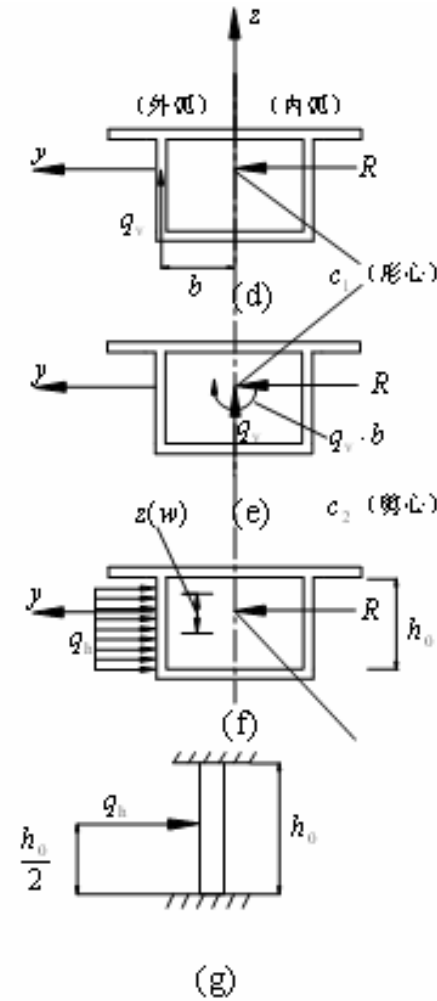
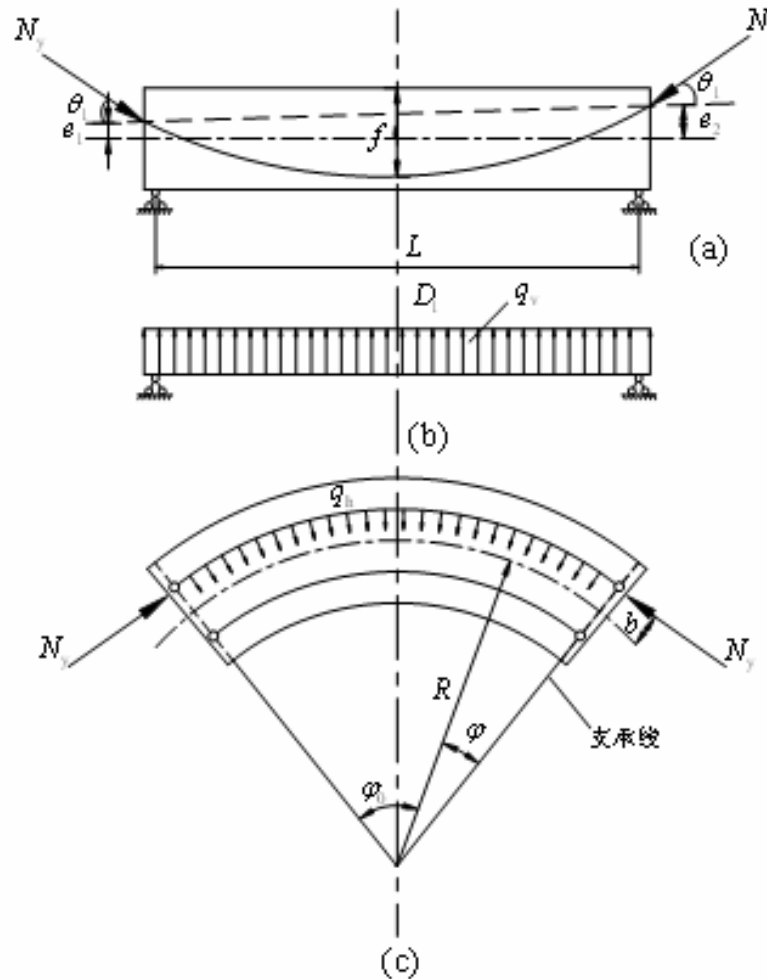
- (1) 等效垂直分力，可以分解为作用于中轴线上的均布力和均布扭矩等效分布径向力除作为水平径向均布荷载作用在“平拱结构”上外，还对扭转中心产生非均匀分布的扭矩[是索位至截面扭心的距离]，并且所有这些垂直力和扭矩都将对结构产生次内力。
- (2) 由于预应力索具有双曲率，故它的摩阻损失比直线梁中的要大，因此，当在连续曲线梁中采用贯通全长的长预应力索时，必须仔细分析各索段产生的预应力摩阻损失，至于其余的预应力损失则与直梁桥的计算相同。



- **(3)** 由于连续曲线梁桥存在弯扭耦合作用，相邻两支座之间的次弯矩图不再呈线性变化，因此，就不能再应用连续直梁桥中通过调整中支座处索的竖向位置后梁内各截面的总预矩仍保持不变，而达到吻合力索的效果。
- **2. 空间曲线预应力筋的摩阻损失计算**
- 平面曲线预应力筋，其与管道壁之间磨擦产生的预应力损失计算式：

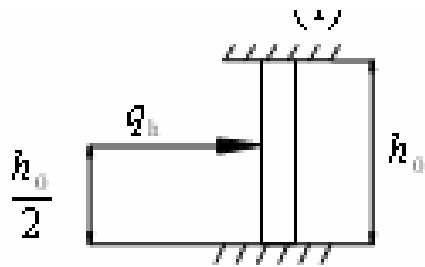
$$\sigma_{l1} = \sigma_{con} \left[ 1 - e^{-(\mu\theta + kx)} \right]$$

# 预应力等效荷载

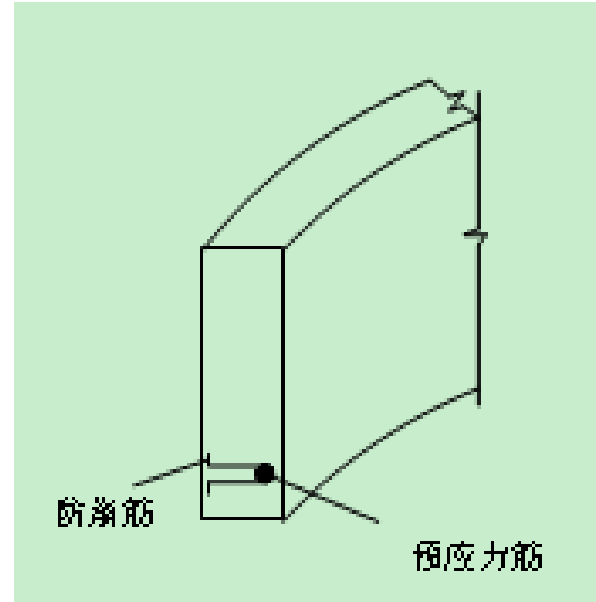


## ■ 预应力筋的侧向防崩

近似地认为 $qu$ 作用在腹板净高 $h_0$ 的中点，并将腹板视为嵌固于顶底板之间的单向板进行计算。为了简化分析，也可以取高 $h_0$ 简支板跨中弯矩的**0.8**倍，来验算腹板的侧向承载能力，以避免腹板发生侧向崩裂。



(g)



防崩钢筋构造



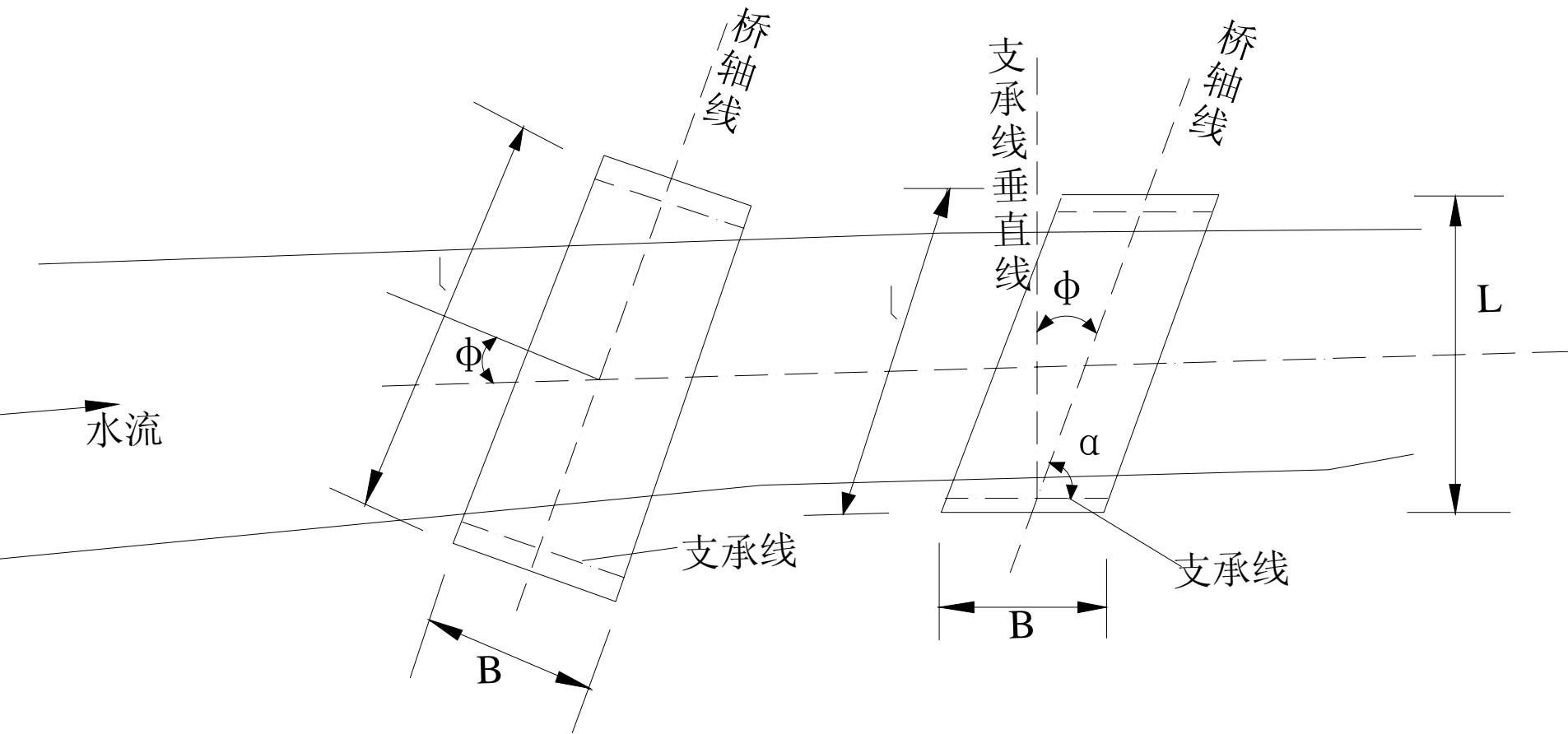
### ■ 3. 预应力筋的布置原则

- 鉴于弯桥中存在弯扭耦合作用，难以像正桥一样配置较为理想的吻合索，“线性变换”原理也不再适用。
- (1) 预配索。参照连续直梁桥的方法，按照抵抗弯矩的要求计算所需预应力筋的数量和线形。
- (2) 移动抗弯预应力筋，尽量抵消外扭矩。具体可采用以下二个方法：
  - ① 内外侧腹板采用不同线形的预应力筋；
  - ② 内外侧腹板上预应力筋线形对称，但张拉力（或数量）不同。
- (3) 计算剩余扭矩和剩余剪力，配置局部预应力筋或普通钢筋。
- (4) 全桥预应力效应校验。



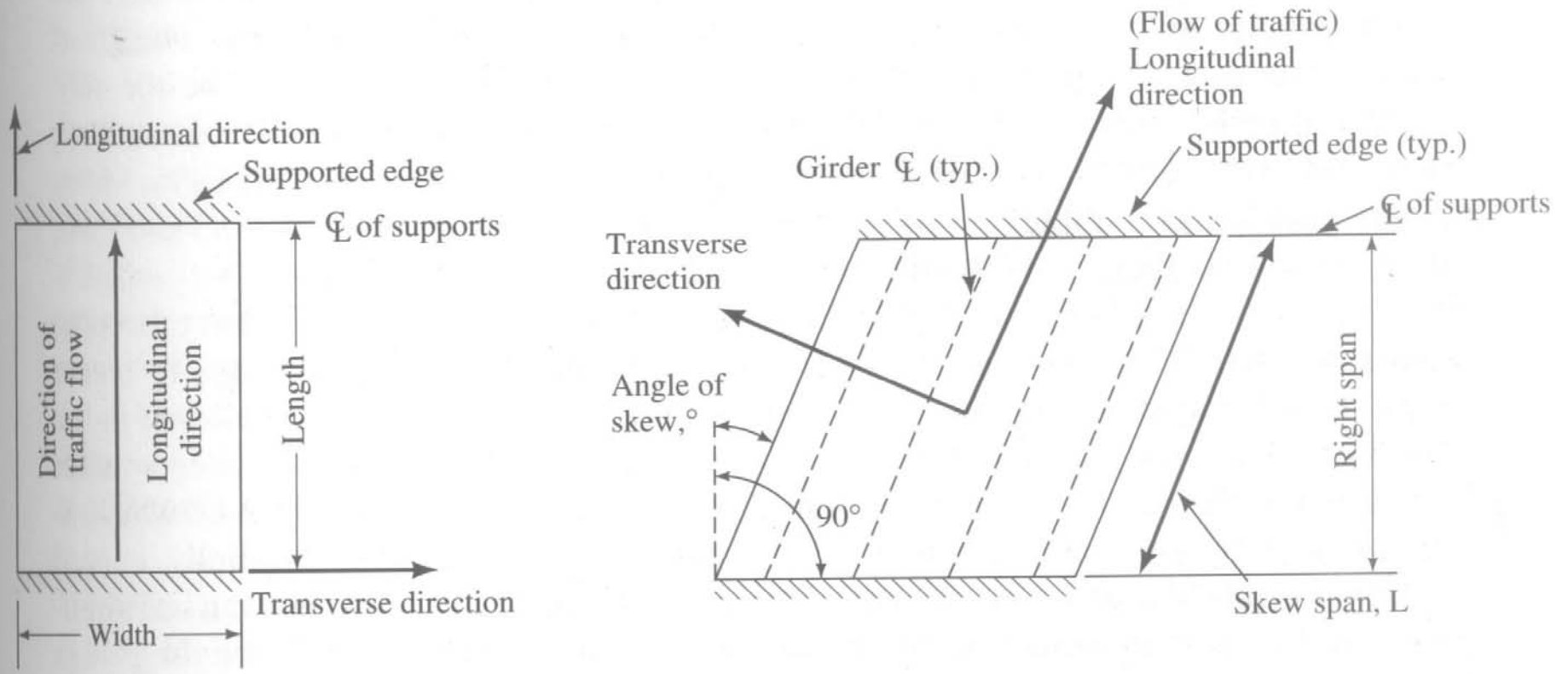
## § 6.2 斜梁（板）桥

- 一、概述
- 斜桥：桥梁上部结构的轴线与桥台、桥墩的支承线不垂直的桥梁。
- 斜梁桥：上部结构为梁式结构。

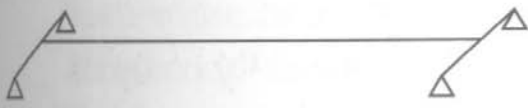


(a) 斜桥正做      (b) 斜桥  
斜交角的定义





Bridge plan (right)



Standard skew

Bridge plan (skew)

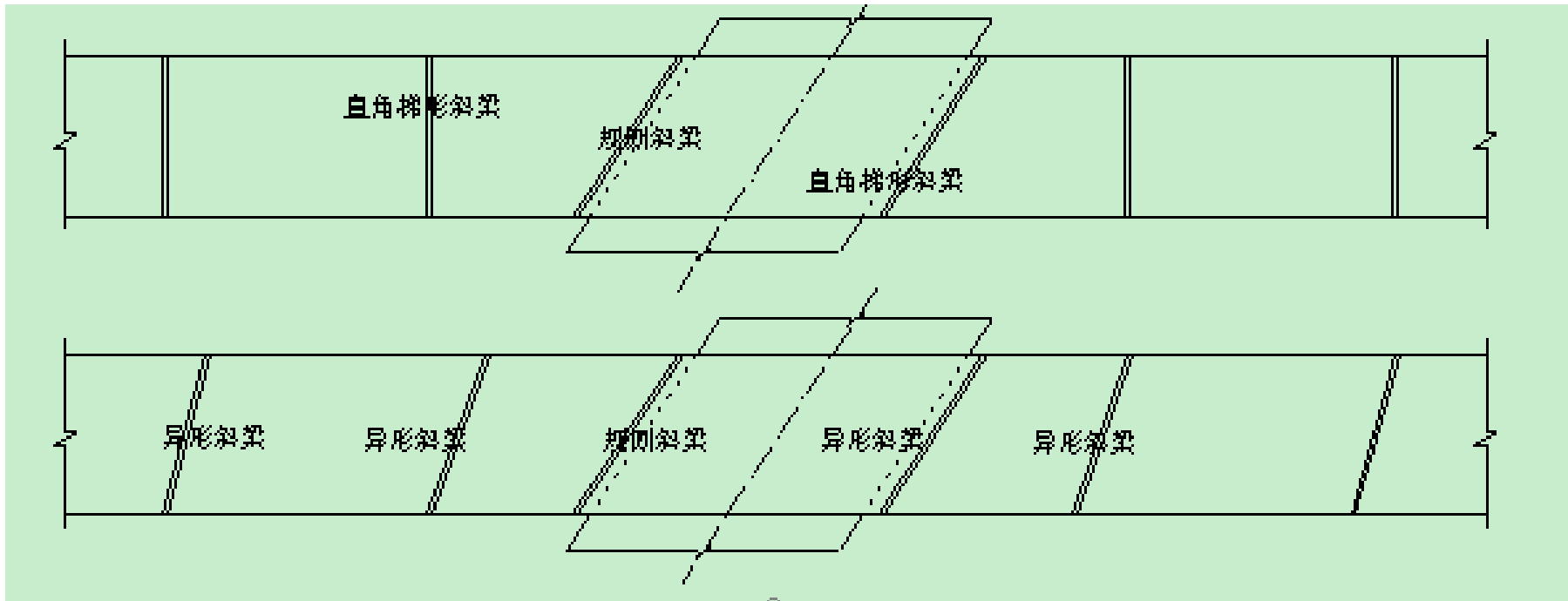


Half skew



Trapezoid skew

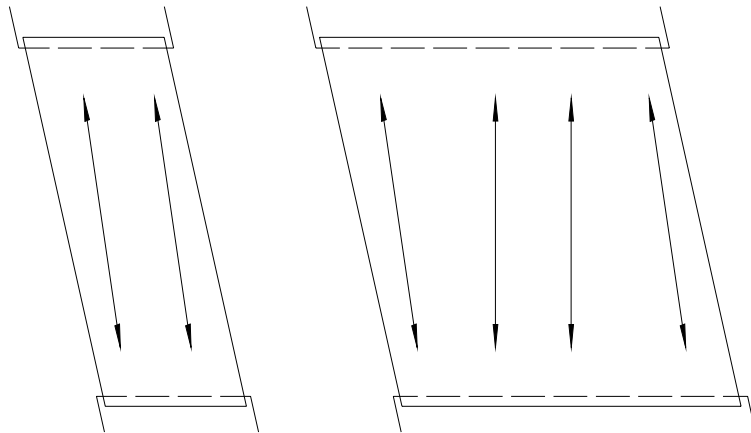
**FIGURE 4.1**  
Definitions of right and skew bridges.



## 正桥与斜桥的过渡



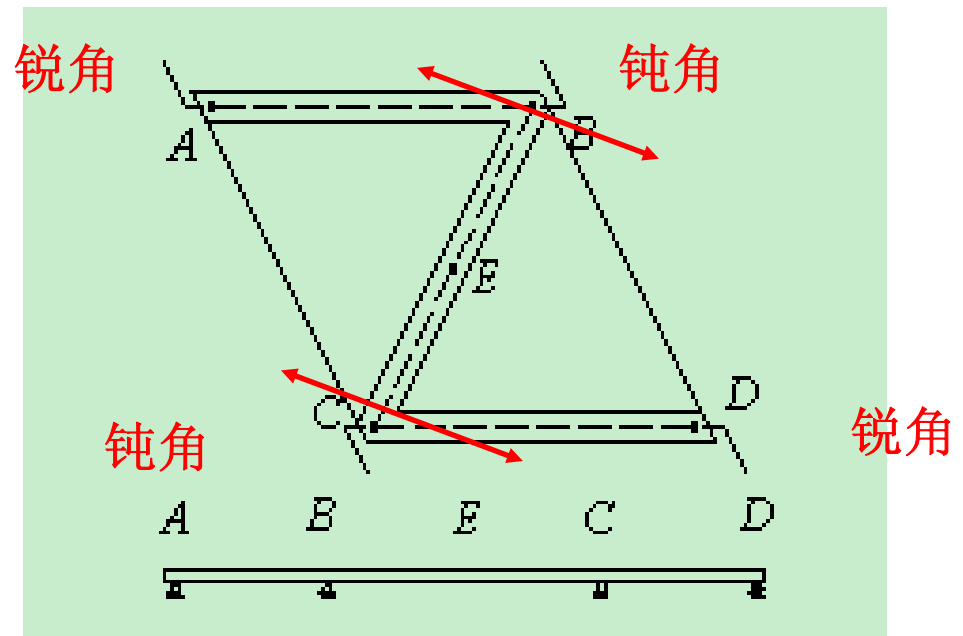
- 二、斜板桥的受力特点与构造
- 1. 斜板桥的受力特点
- (1) 支承边反力
- 斜板在支承边上的反力很不均匀。
- (2) 跨中主弯矩
- 斜板的荷载一般有向支承边的最短距离传递的趋势。

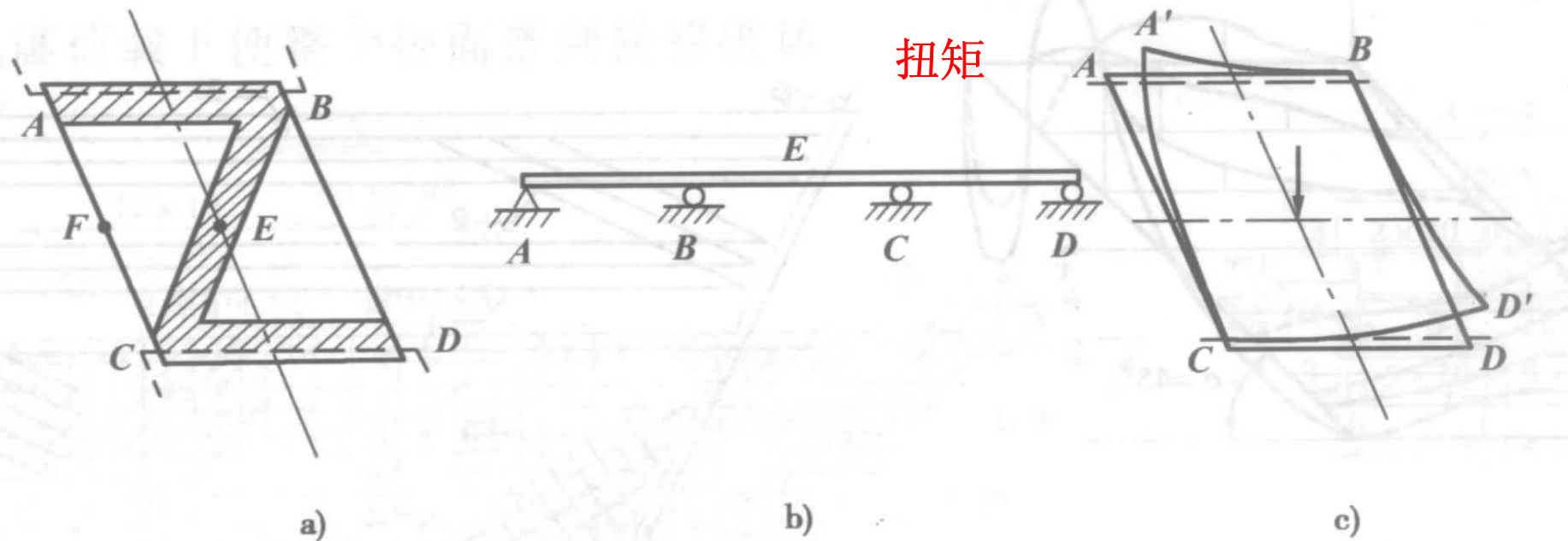


斜板桥的受力状态

- (3) 钝角负弯矩
- 在钝角其负主弯矩的方向接近与钝角的二等分线相正交。
- (4) 横向弯矩
- 横向弯矩的增加量大致上可以认为等于纵向弯矩的减小量
- (5) 扭矩

比拟Z字形连续梁





扭矩

横向弯矩

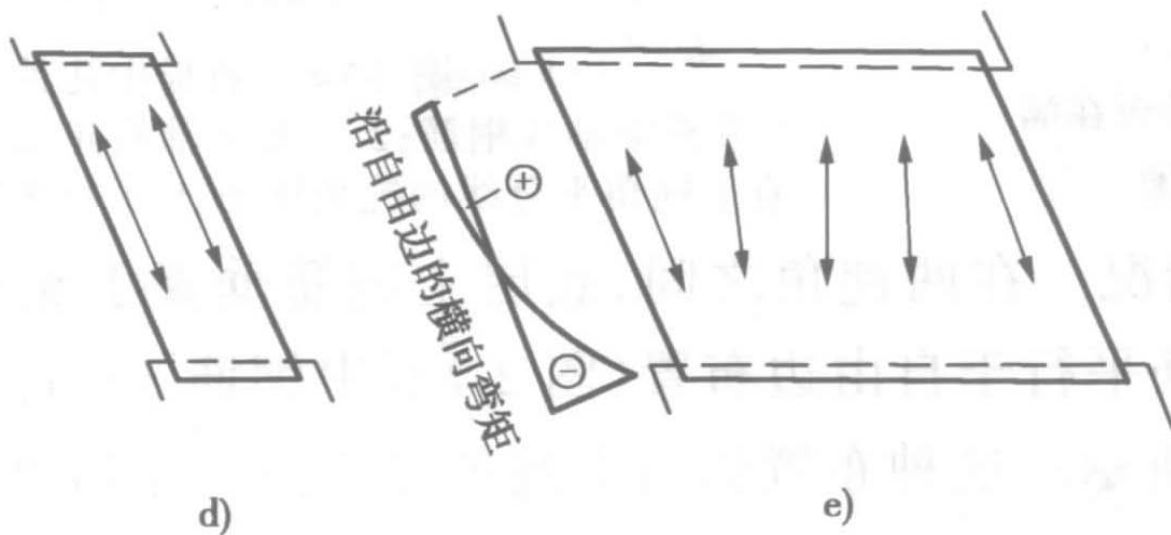
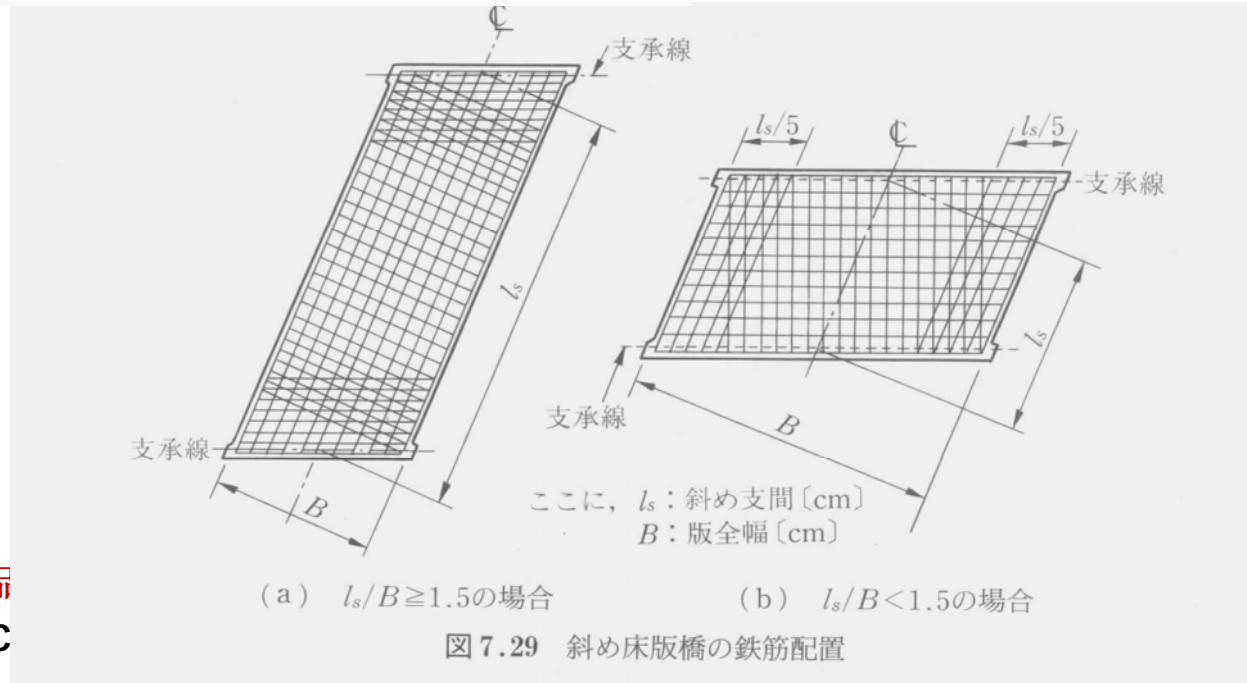
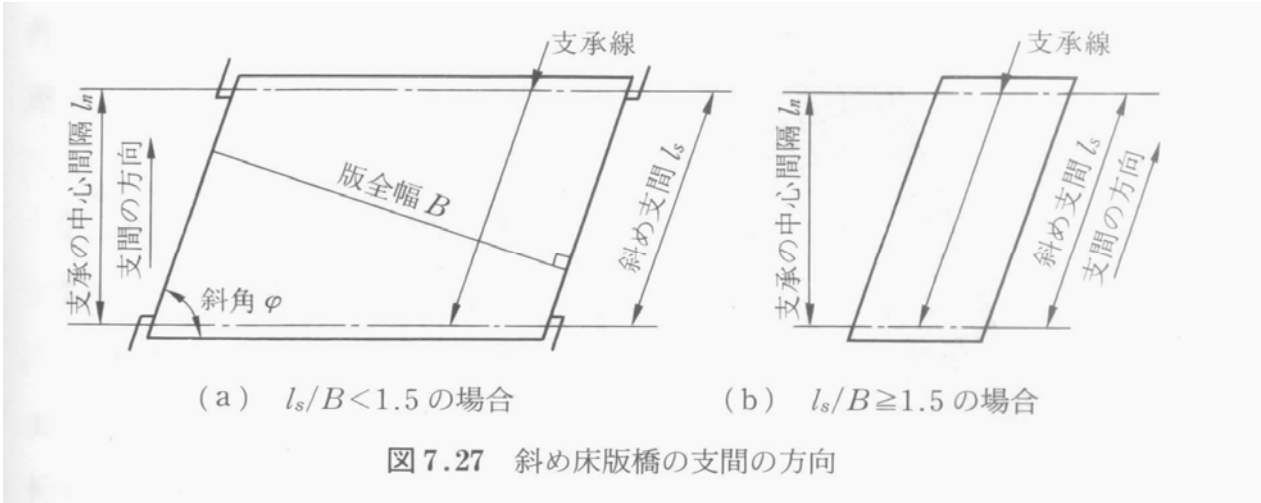
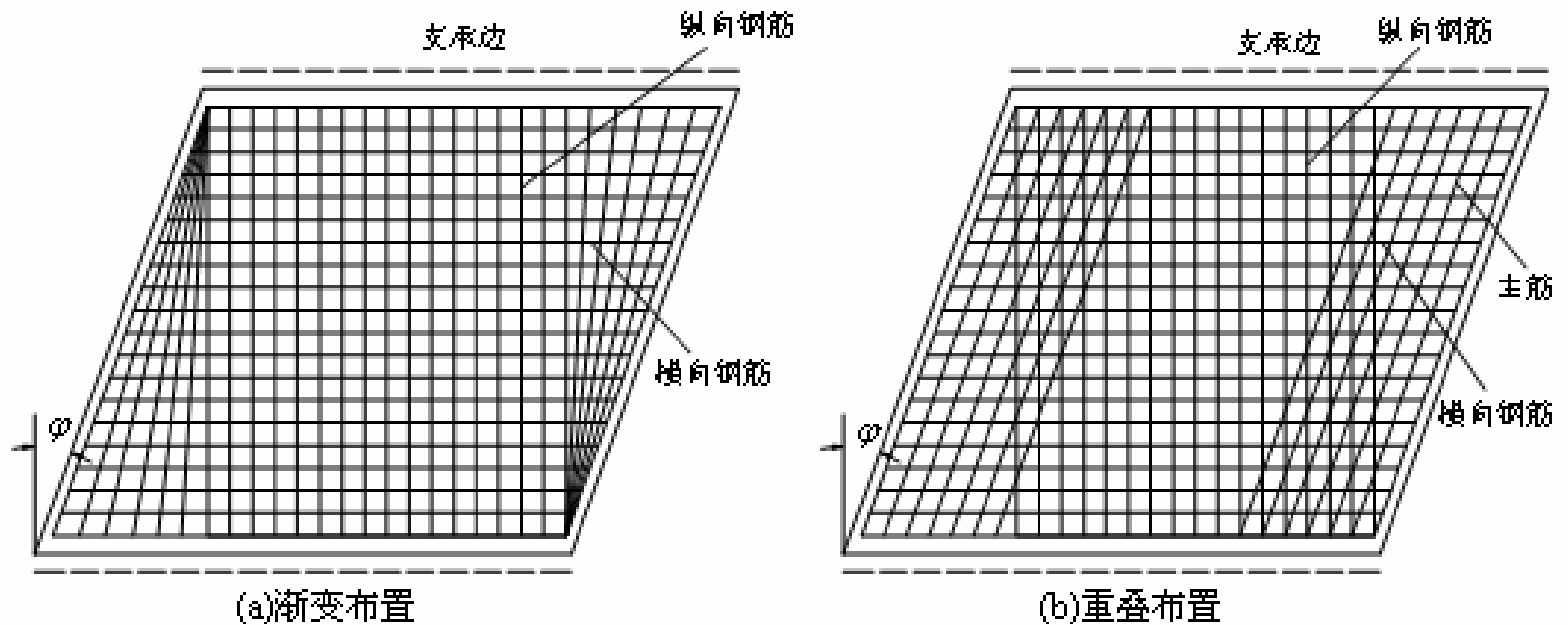


图 2-7-4 斜板桥的受力状态

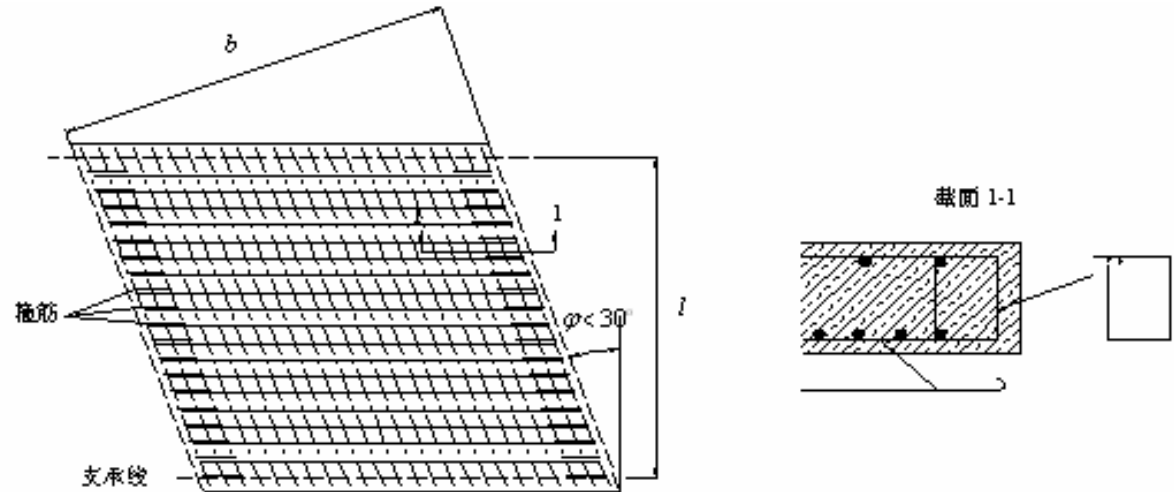
## ■ 2. 斜板桥的钢筋布置及构造特点



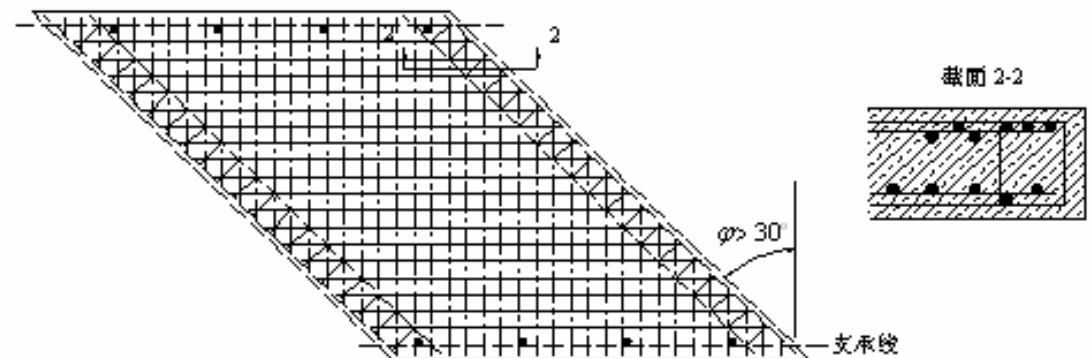
当  $l_{\phi} \leq 1.3b$  时，桥梁宽度较大（整体式斜板桥），纵向钢筋，板中央垂直于支承边布置，边缘平行于自由边布置；横向钢筋平行于支承边布置。



为抵抗自由边的扭矩，可在距自由边一倍板厚的范围内设置加强箍筋

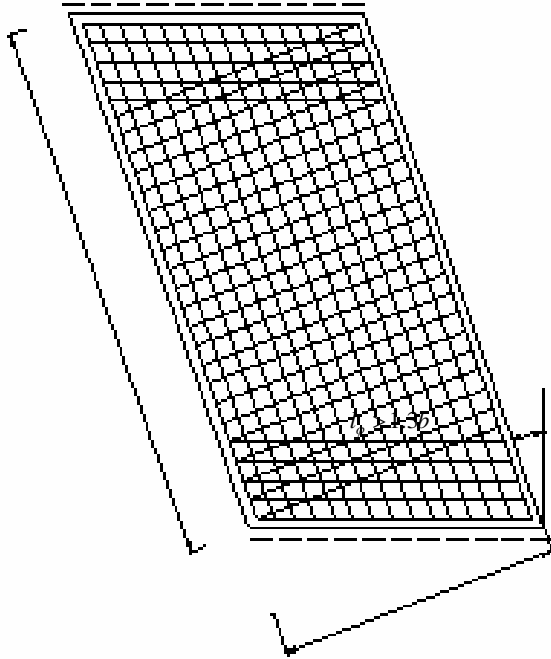


(c) 斜交角  $\varphi < 30^\circ$  时的钢筋布置方



(d) 斜交角  $\varphi > 30^\circ$  时的钢筋布置方向

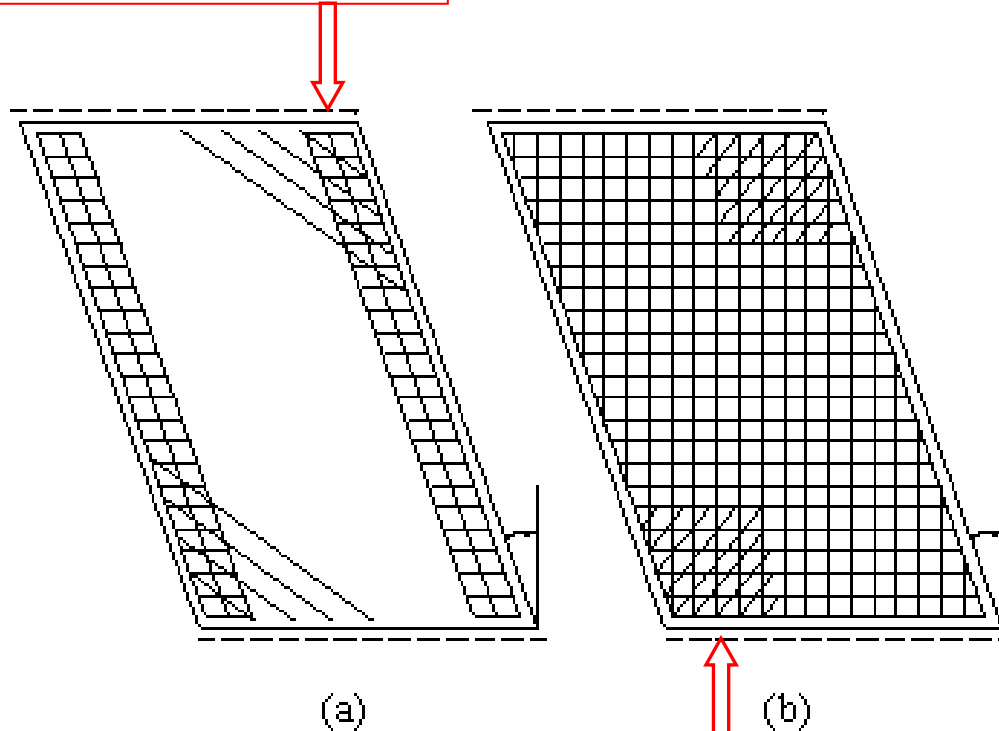




窄斜板桥（或预制装配斜板桥中的预制斜板），纵向钢筋平行于自由边布置；横向钢筋，跨中垂直于自由边布置，两端平行于支承边布置

$l_\phi > 1.3b$  的钢筋布置

在钝角顶面范围内，应在角平分线的垂直方向设置抵抗负弯矩的钢筋。

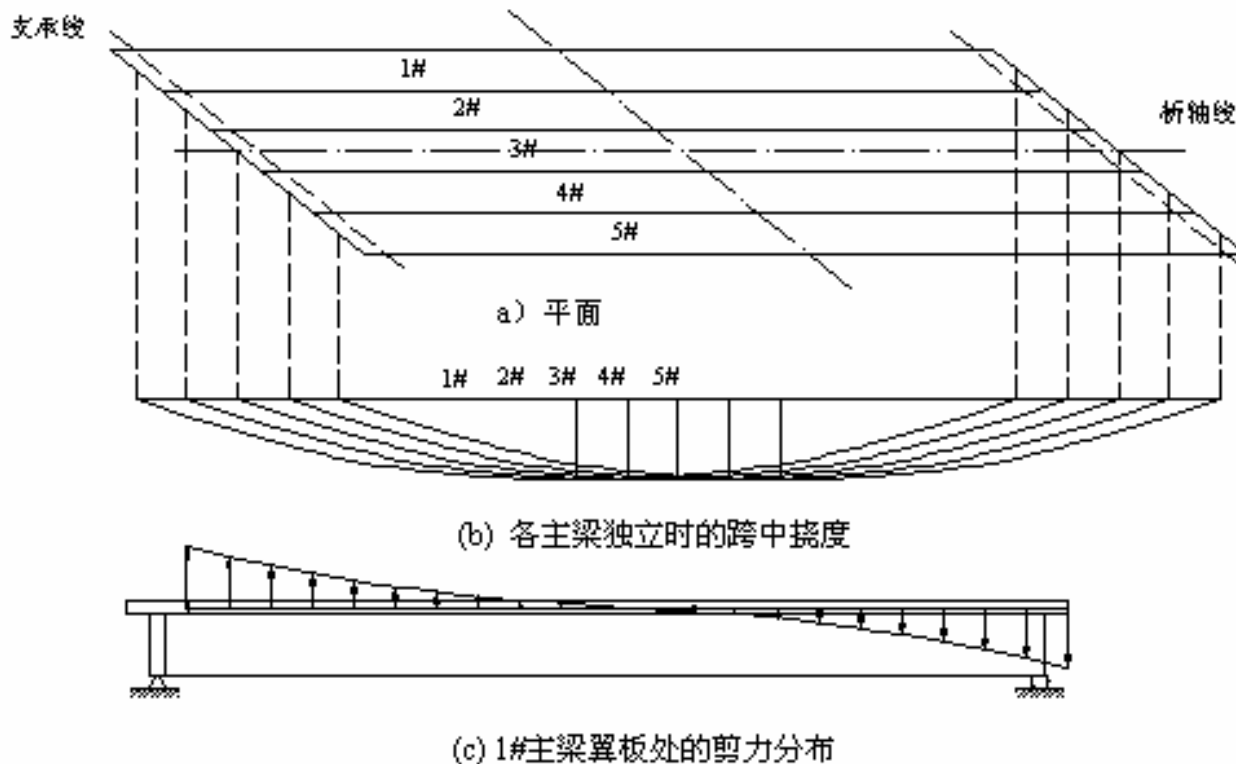


## 钝角部位的加强钢筋

为承担很大的支反力，应在钝角底面平行于角平分线方向上设置附加钢筋

## 三、斜肋梁桥的受力特点

### ■ 1. 恒载（自重）作用下的受力性能

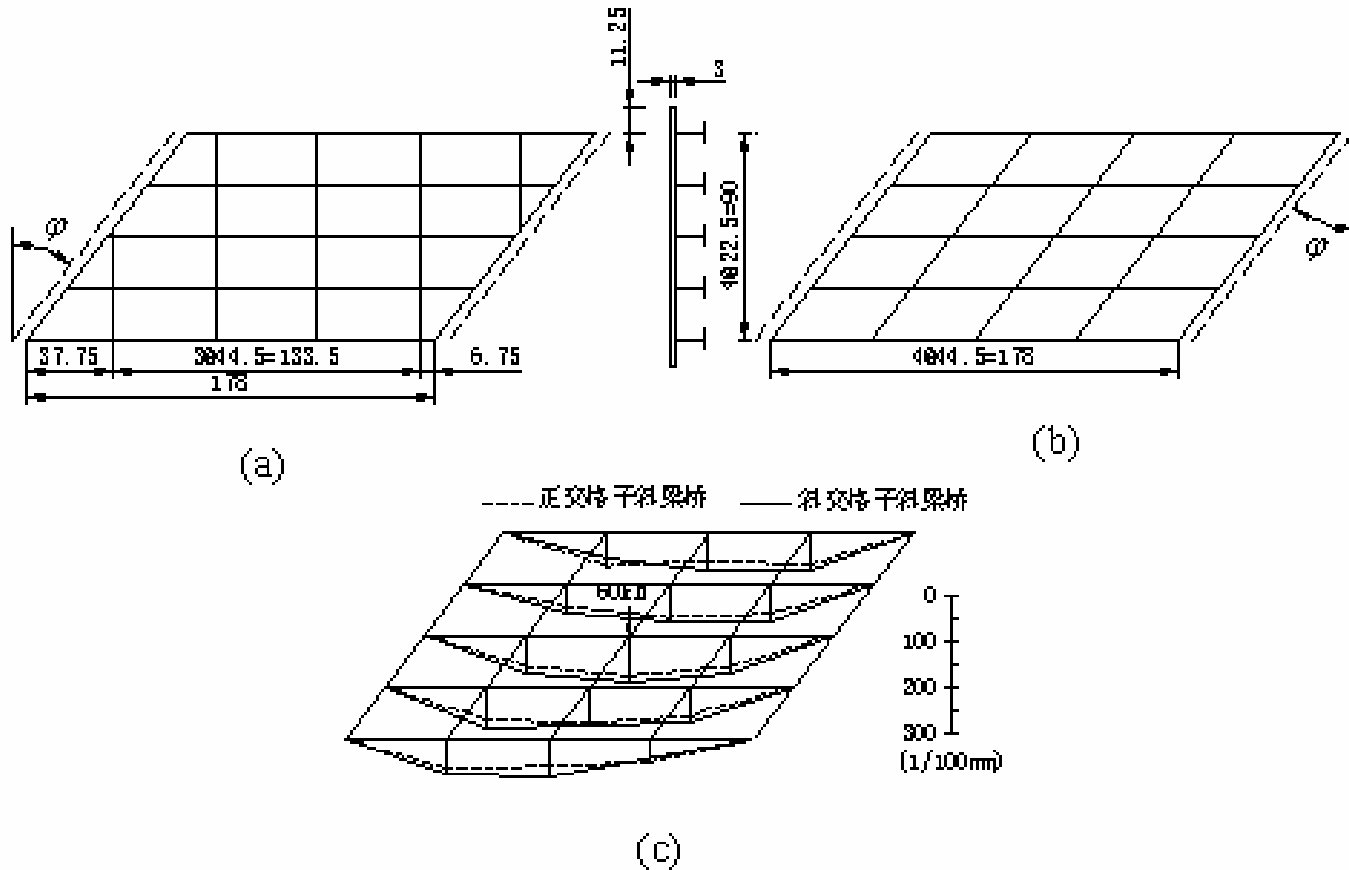


## 斜肋梁桥受力剖析



- **(1)** 每根主梁翼板接合面上的垂直剪切力分布是反对称于其跨中截面的。
- **(2)** 反对称剪力导致各主梁内产生扭矩。
- **(3)** 由于各根主梁之间存在变形差，在设计预制构件时，其翼板和横隔梁不宜从相邻两梁之间的中界线上划分，而应预留有一定宽度的纵向现浇接缝条带，以协调安装后相邻梁留下的变形差。

## ■ 2. 活载作用下的受力性能



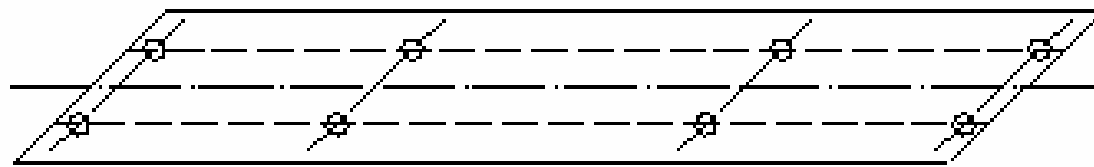
## 两种横隔梁布置方式的比较



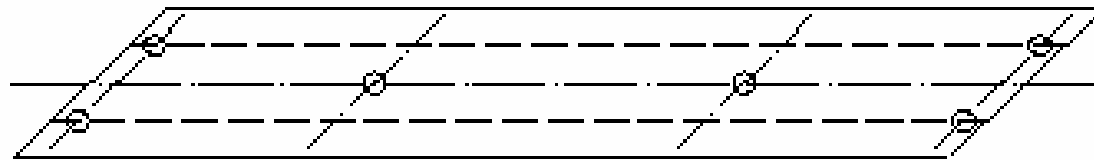
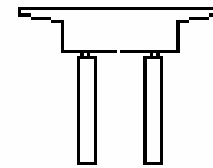
## 四、连续斜箱梁桥的支座布置

- (1) **A型**: 全桥各个墩(台)上均布置双支座
- (2) **B型**: 两端为抗扭双支座, 中墩均为单点铰支座
- (3) **混合型**: 部分中墩为单点铰支座, 其余均为抗扭双支座
- (4) 工程设计中还可能采用其他的布置方式, 譬如单点铰支承处改为墩梁固结的形式

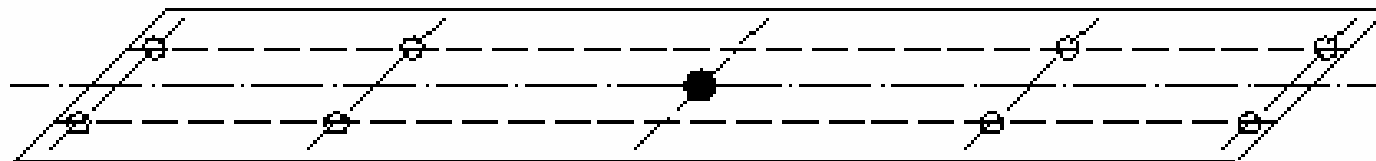
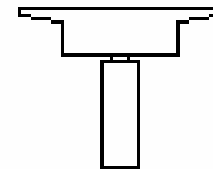
## 连续斜箱梁桥的支座布置



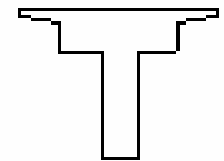
(a) A 型支承连续斜梁桥



(b) B 型支承连续斜梁桥



(c) 复合型支承连续斜梁桥





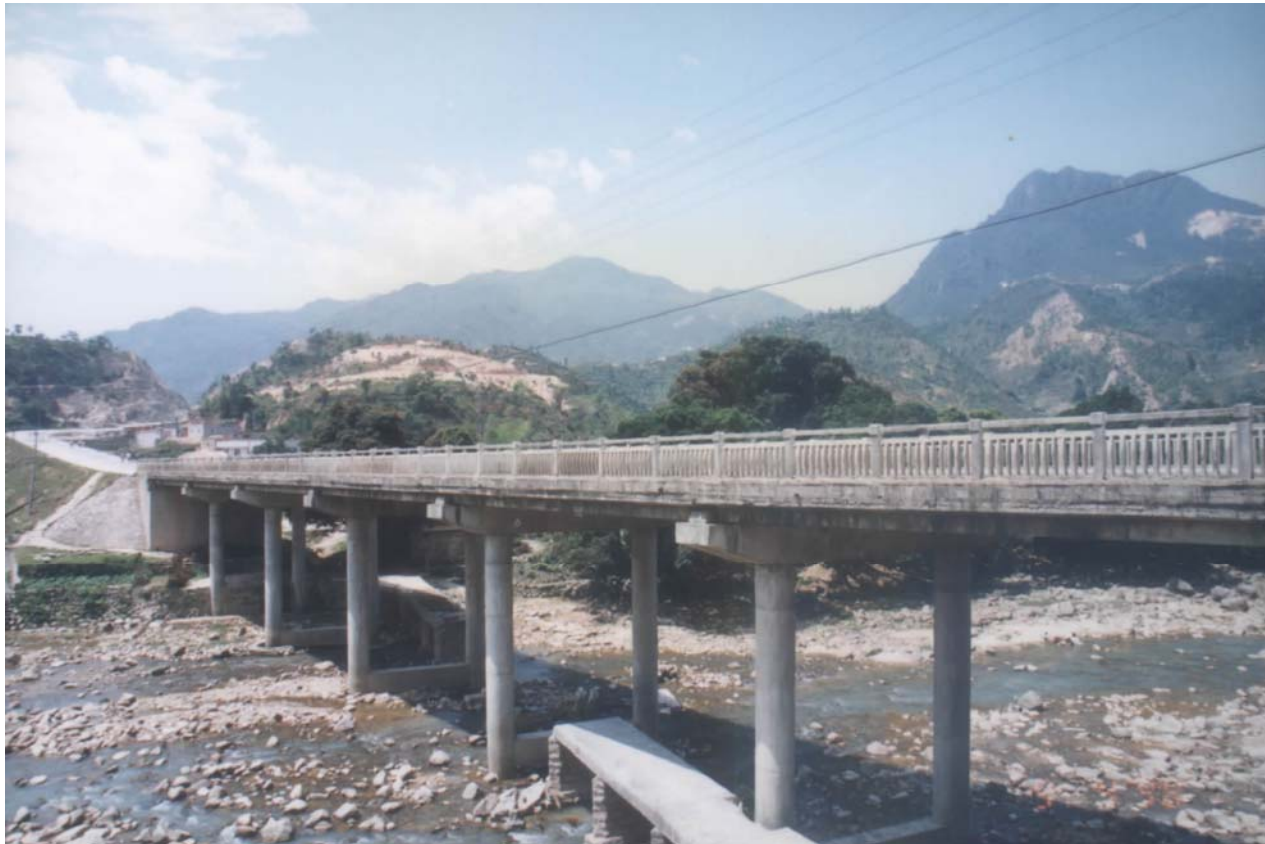
## 连续斜板桥的下部结构(安溪龙门斜桥)







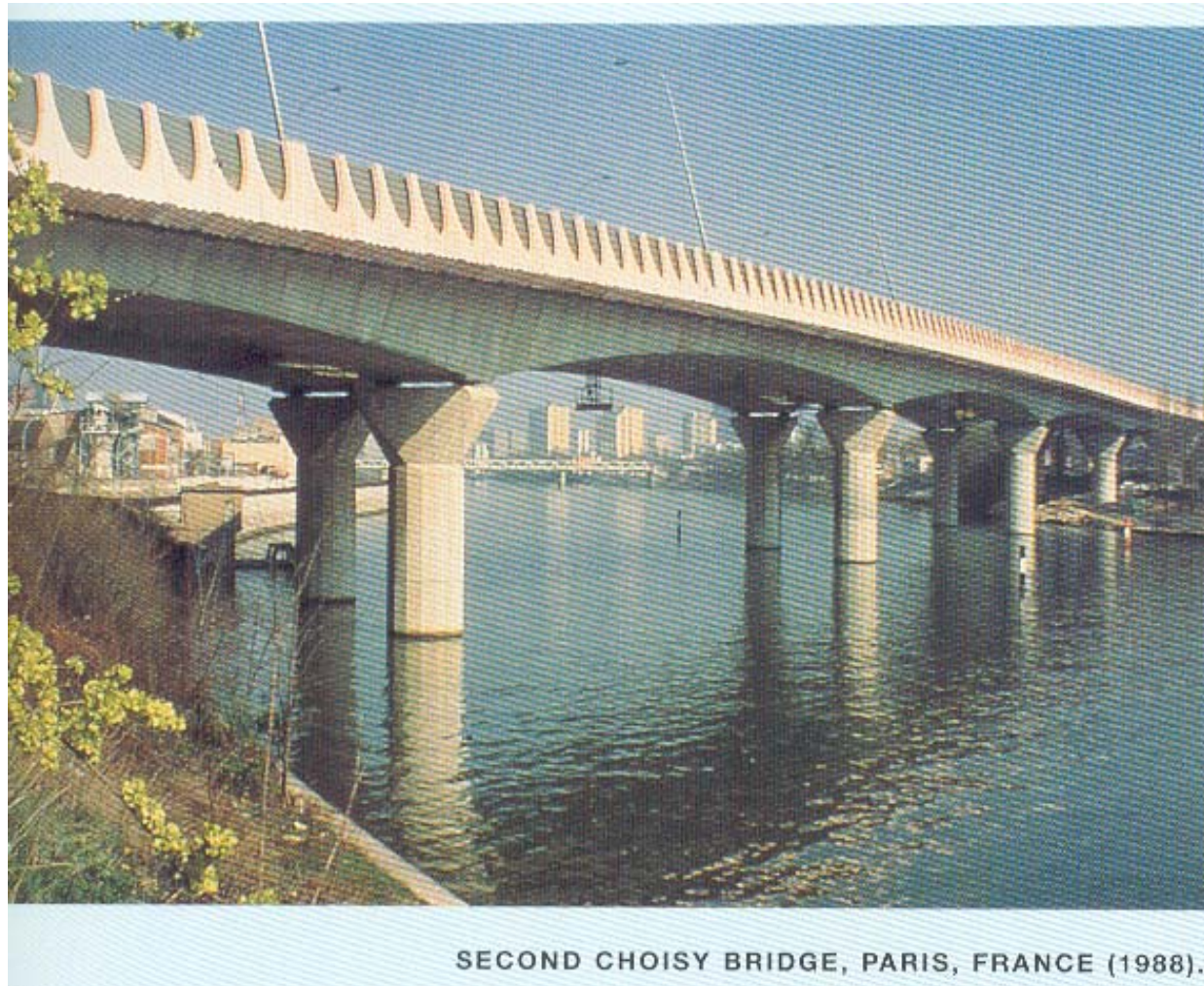
## 斜梁桥的下部结构(安溪某斜桥)





Fuzhou University -  
College of Civil Engineering

## 圆柱式桥墩（斜桥）

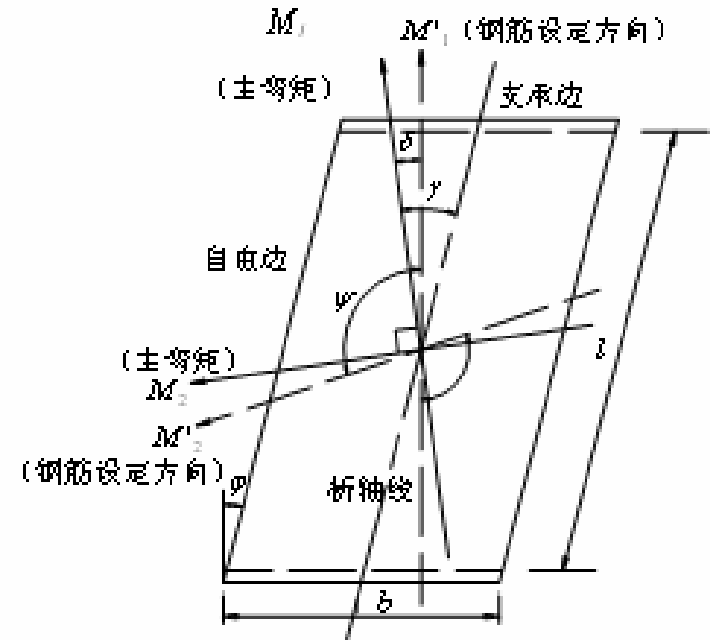


## 五、斜桥计算简介

- 1. 整体式简支斜板桥近似算法
- (1) 恒载内力计算
- 近似算法是将桥面构造（包括斜板自重）的重力视作均匀分布于整个桥面上，然后按照下面的一般表达式计算斜板中央点、自由边中点和钝角位置处在两个正交方向上单位板宽的主弯矩  $M_1$  和  $M_2$ 、

$$M_1 = k_1 ql^2$$

$$M_2 = k_2 ql^2$$



斜板的主弯矩与  
钢筋方向



- 拟配置的钢筋方向的弯矩 $M'_1$  和  $M'_2$ 可根据主弯矩值按下式求算。

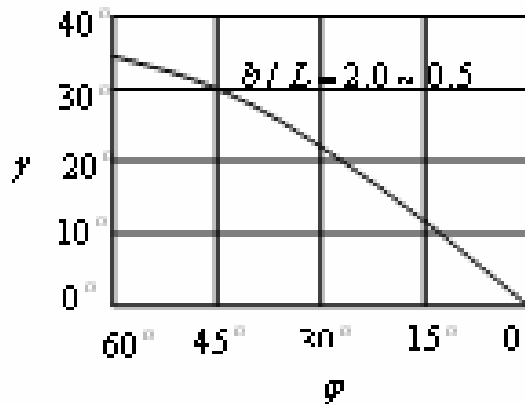
$$\left. \begin{aligned} M'_1 &= \frac{1}{\sin \psi} \{ M_1 \cos \delta \sin(\psi - \delta) + M_2 \cos^2(\psi - \delta) \\ &\quad + M_1 \sin \delta \cos \delta - M_2 \cos \delta \cos(\psi - \delta) \} \\ M'_2 &= \frac{1}{\sin \psi} \{ M_1 \sin^2 \delta + M_2 \cos \delta \sin(\psi - \delta) \\ &\quad + M_1 \sin \delta \sin(\psi - \delta) - M_2 \sin(\psi - \delta) \cos(\psi - \delta) \} \end{aligned} \right\}$$

当  $\psi = 90^\circ$  时（即纵横向钢筋配置互相垂直时）

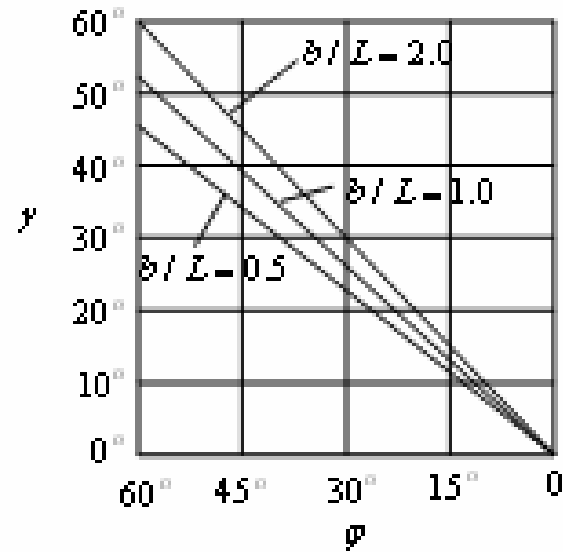
$$\left. \begin{aligned} M'_1 &= M_1 \cos^2 \delta + M_2 \sin^2 \delta + (M_1 - M_2) \sin \delta \cos \delta \\ M'_2 &= M_1 \sin^2 \delta + M_2 \cos^2 \delta + (M_1 - M_2) \sin \delta \cos \delta \end{aligned} \right\}$$



## 主弯矩M1方向



(a) 自由边中点



(b) 跨中中点



## ■ 2. 活载内力计算

- (1) 以斜跨长作为正桥跨径，计算正桥的冲击系数、板的有效宽度和跨中弯矩的最大；
- (2) 计算斜板板跨中央和自由边中点的斜向弯矩、横向弯矩和扭矩。
- (3) 斜板正交的两个主弯矩可由斜弯矩、横向弯矩及扭矩合成而得到。
- (4) 按钢筋方向荷载组合后的内力进行配筋计算。



- 2、 装配式铰接简支斜板桥近似算法
- (1) 应用铰接板梁法，计算以斜跨长作为正桥跨径的第*i*号斜板设计弯矩；
- (2) 查《公路桥涵设计手册 一梁桥》（上册，270~286页）的表得到相应斜交角折减系数；
- (3) 计算第*i*号斜板跨中弯矩。

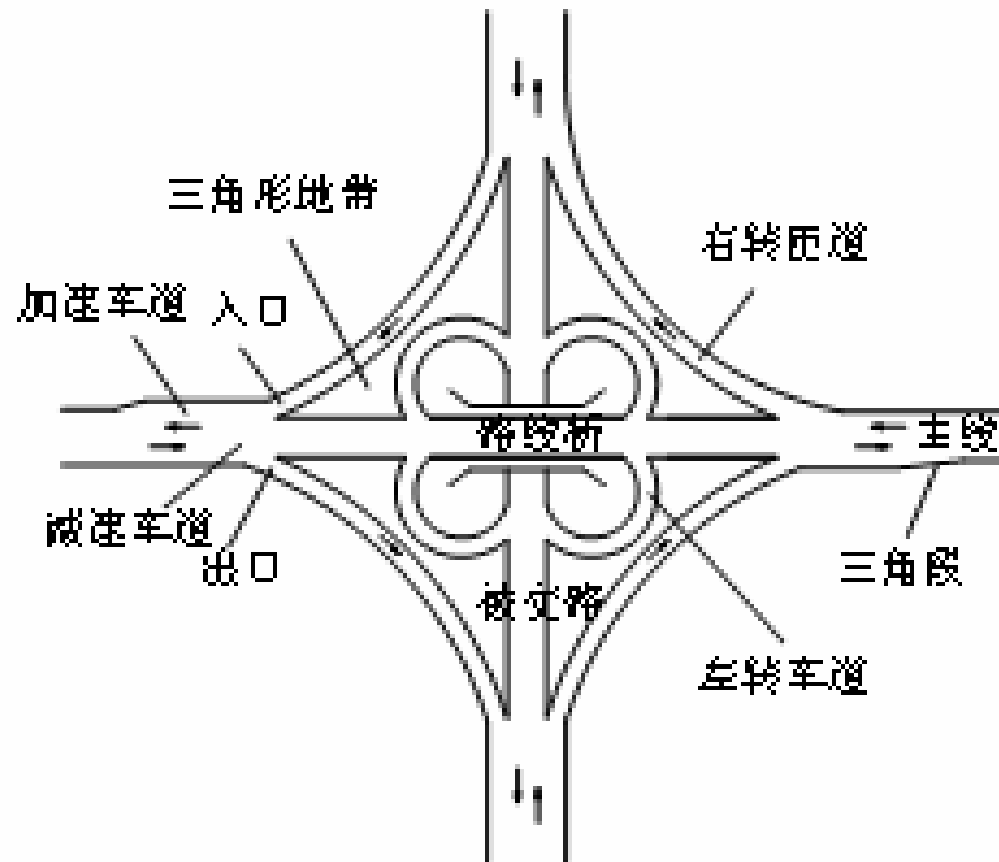


## § 6.3 立交桥与高架桥

- 一、概述
- 1. 立交的概念与组成
- 公路与公路的立交：分离式立交、互通式立交和半互通式立交。
- 立交一般由主线、被交路、构造物、匝道、变速车道、出口与入口、三角地带、辅助车道、集散道路等组成。
- 常见的完全互通的立交的形式，有苜蓿叶形立交、定向式、菱形、喇叭形、环形等。



# 苜蓿叶形立体交叉



## ■ 2. 立交桥的特点

- 基本上是在旱地修桥
- 匝道高架桥的长度一般较长
- 常常是多层的
- 标志性建筑
- 包括上部结构和下部结构两大部分

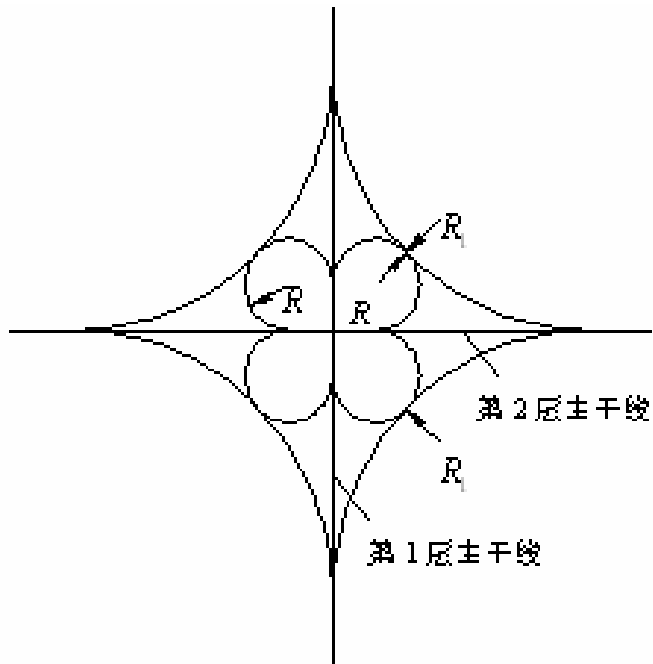
北京四元立交桥



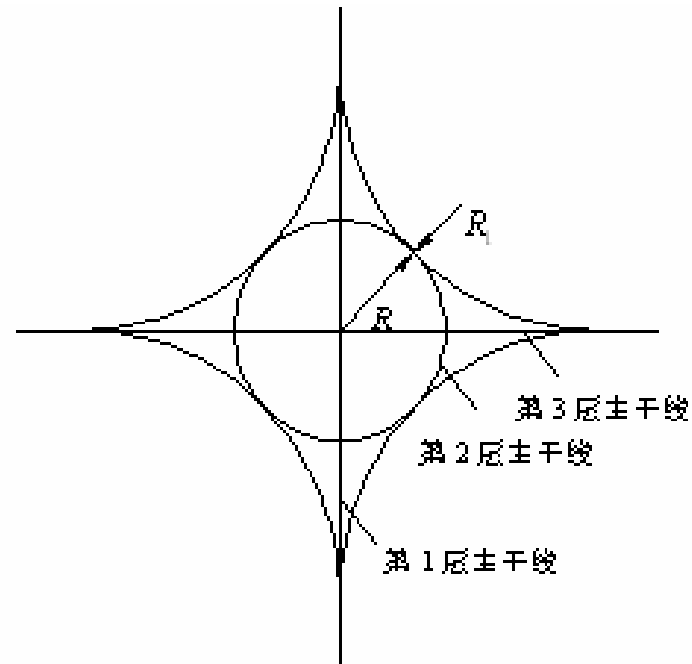


## 二、立交桥与高架桥设计与构造

- 1. 总体布置与构造
- ( 1 ) 桥跨的立面布置
- 立交桥上的纵坡与竖曲线与其它桥梁相同。
- ( 2 ) 桥跨平面布置要求及图式
- 立交桥跨的平面线形原则上应符合线形设计的规定。平面布置应与相衔接的道路标准一致。
- ( 3 ) 横截面布置要求、图式及尺寸
- 桥跨横截面布置应与其衔接的道路技术标准和车道数相适应。

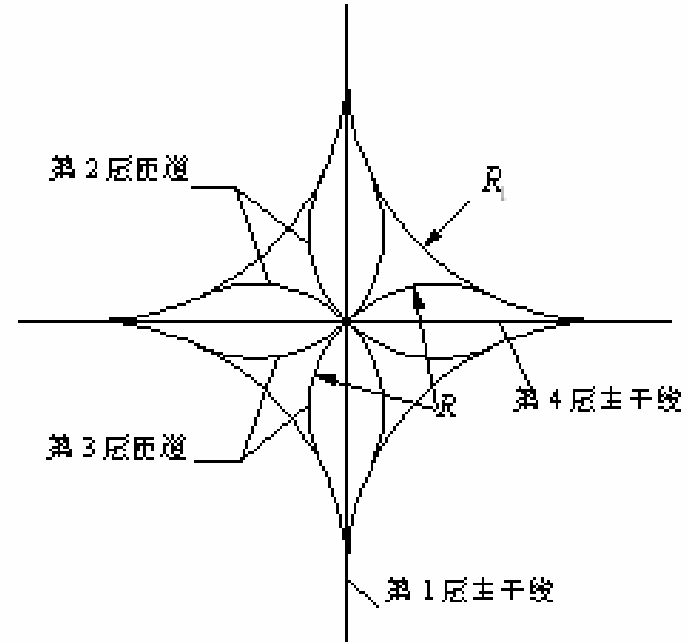
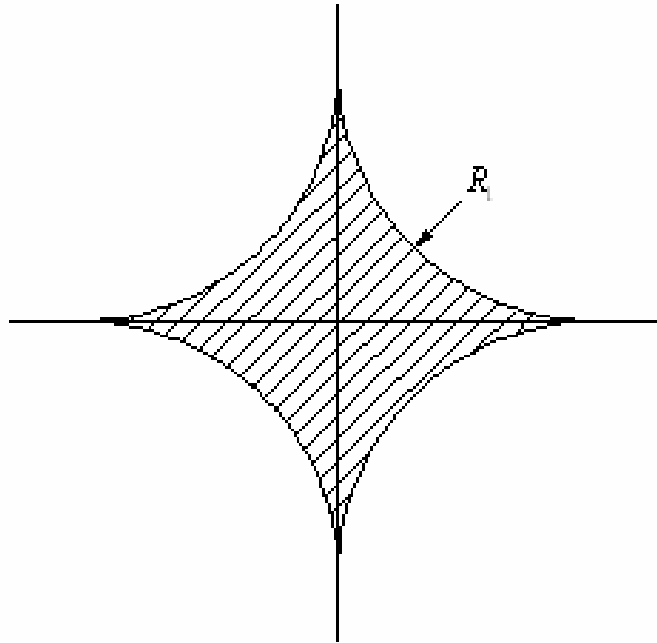


双层苜蓿叶立交



三层环形立交





## 四层立交

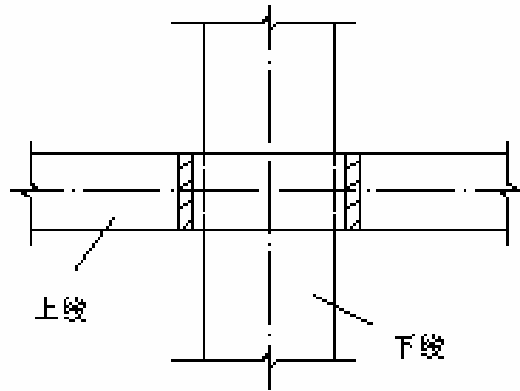


图 6-32 正交桥

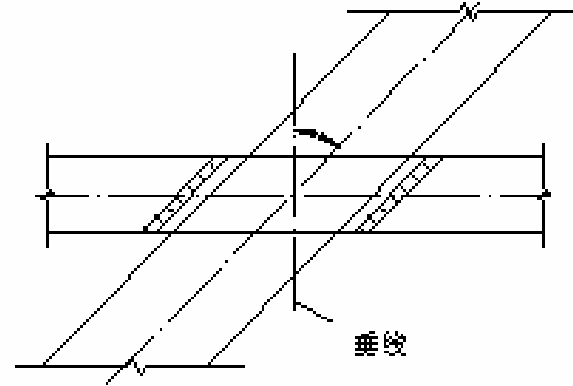


图 6-33 斜交斜做

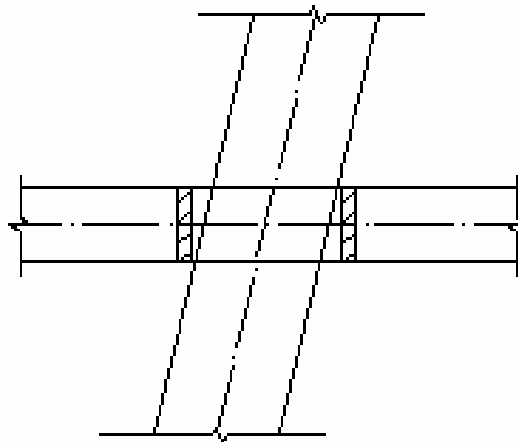


图 6-34 斜交正做

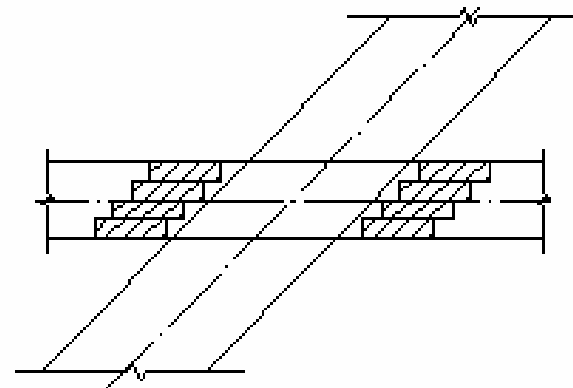
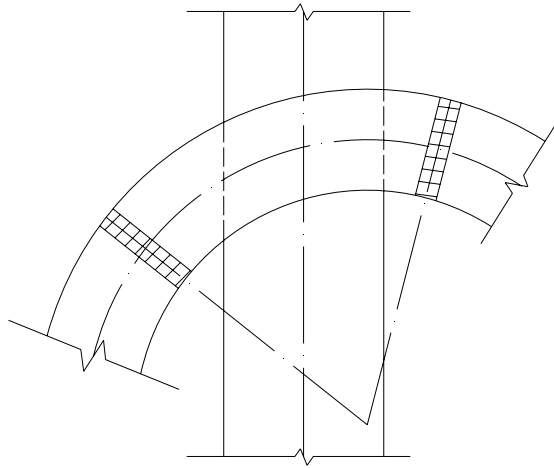
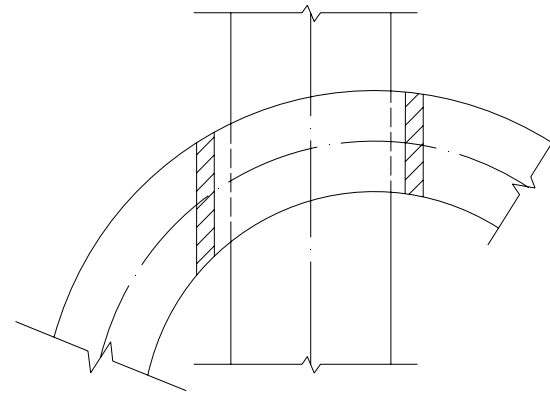


图 6-35 分肋式斜交正做



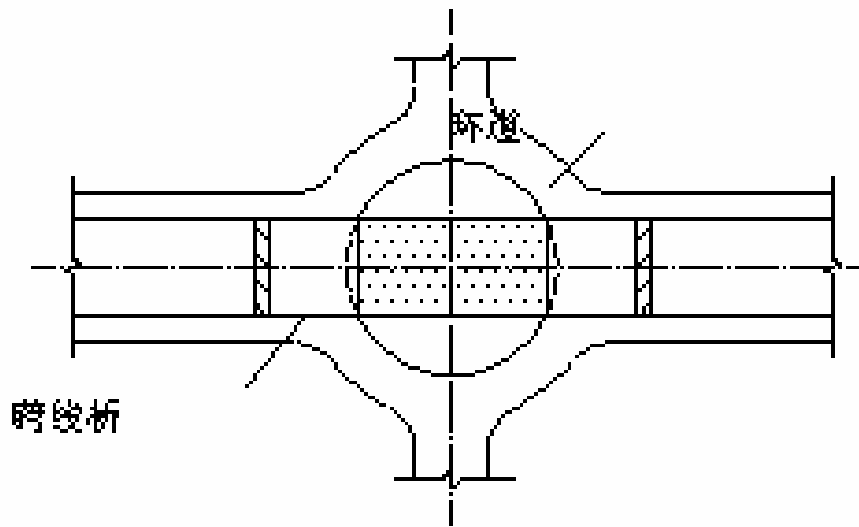
辐射布置



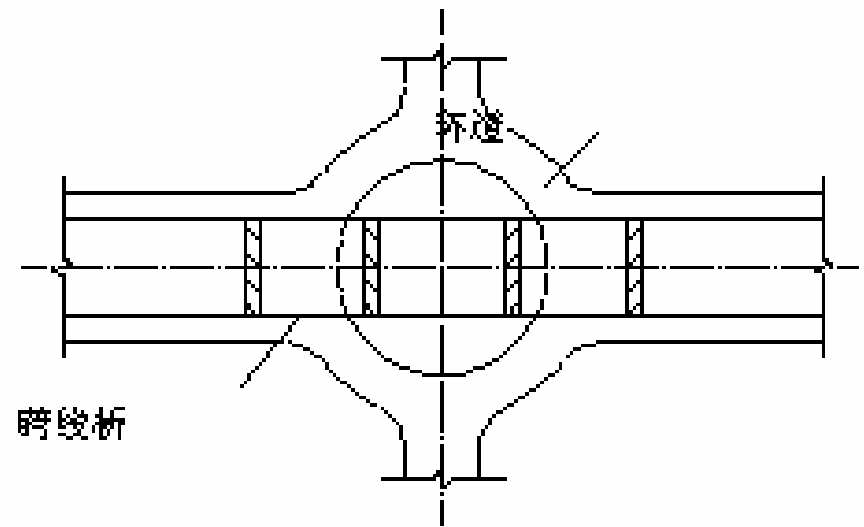
平行布置



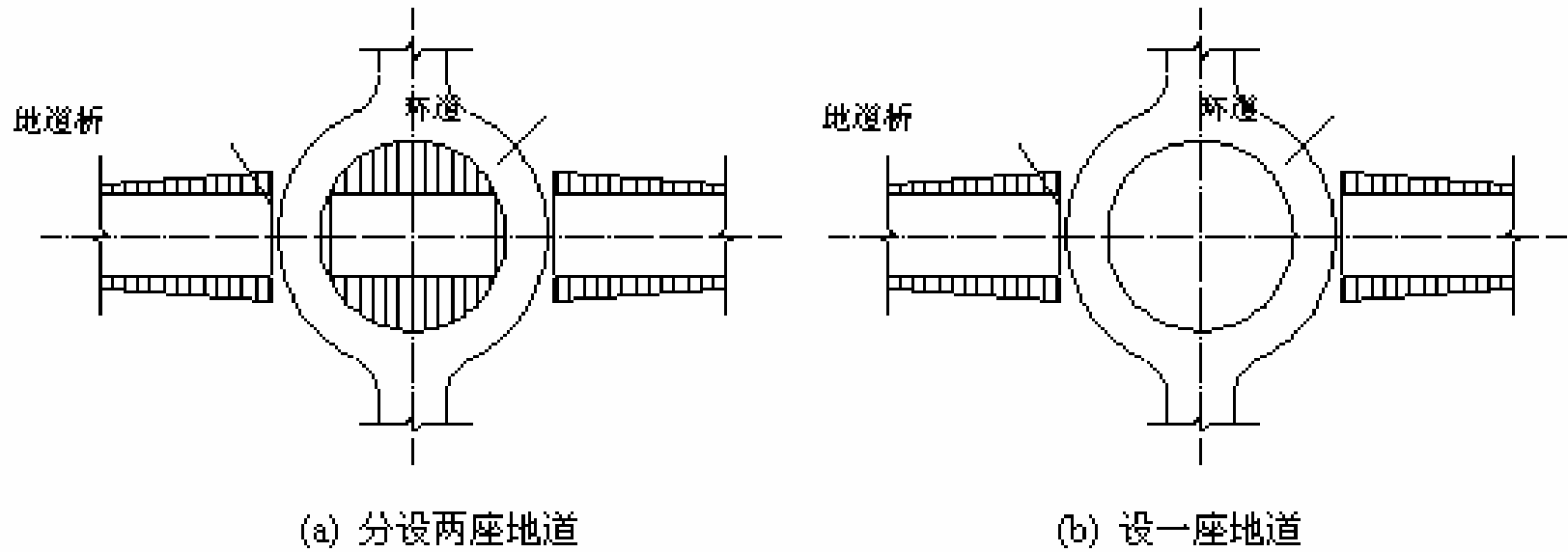
# 桥梁上跨环道



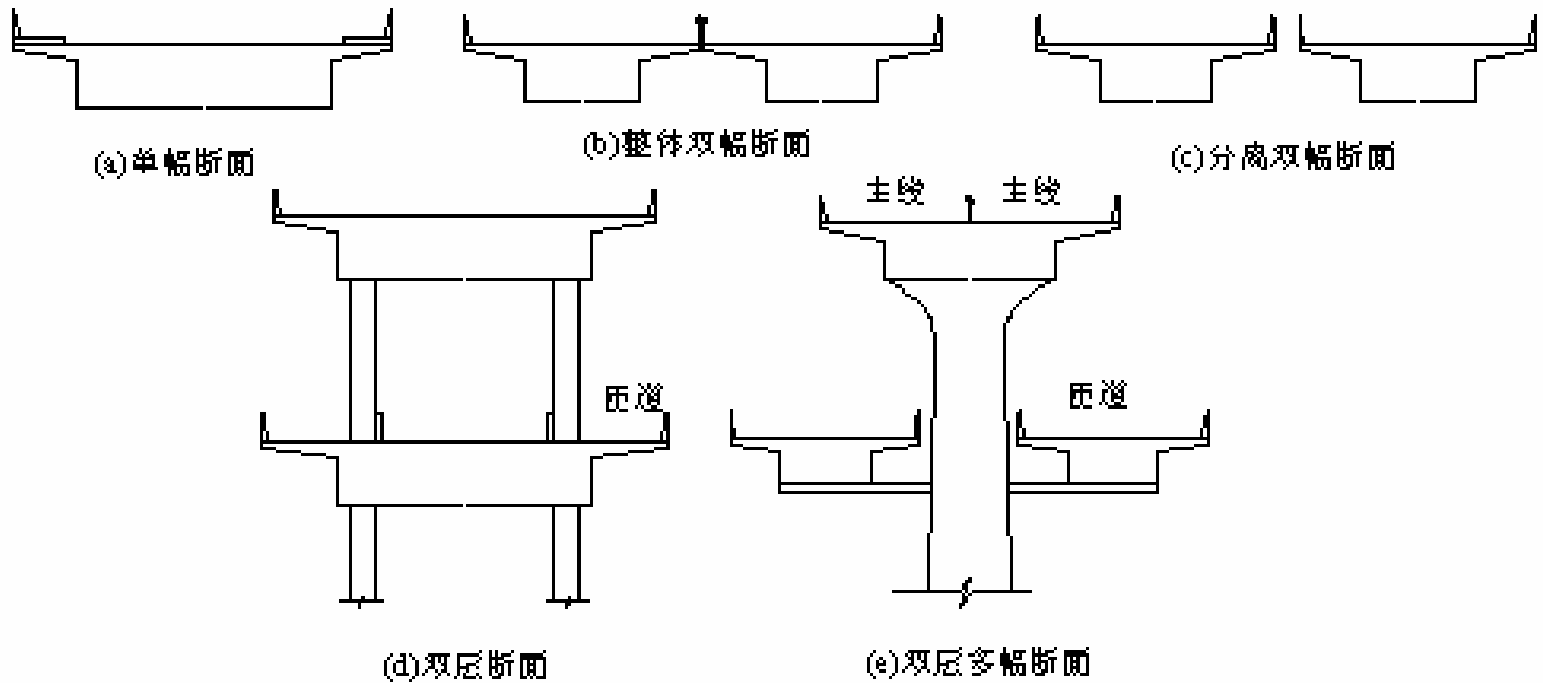
(a) 分设两座桥



(b) 一座多跨连续梁



## 下穿环道的地道

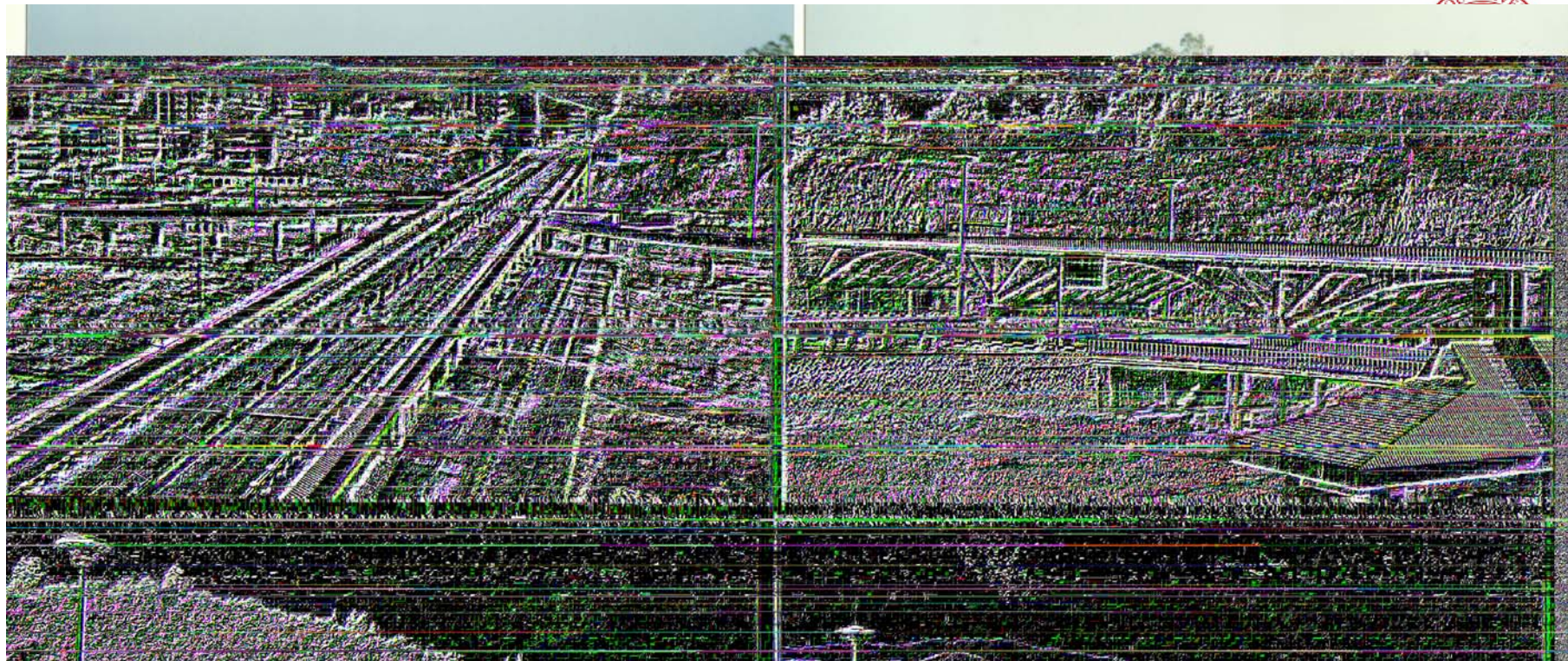


## 断面布置形式



## 2. 跨线桥

- 跨线桥线形
- 跨线桥布孔和跨径
- 跨线桥不应影响驾驶员的视觉
- 结构安全、防护设施
- 跨线桥结构形式
- 跨线桥应重视美学



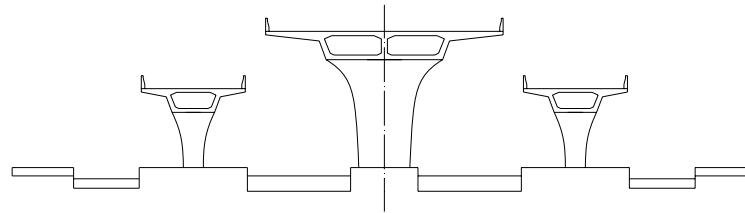


Fuzhou University -  
College of Civil Engineering

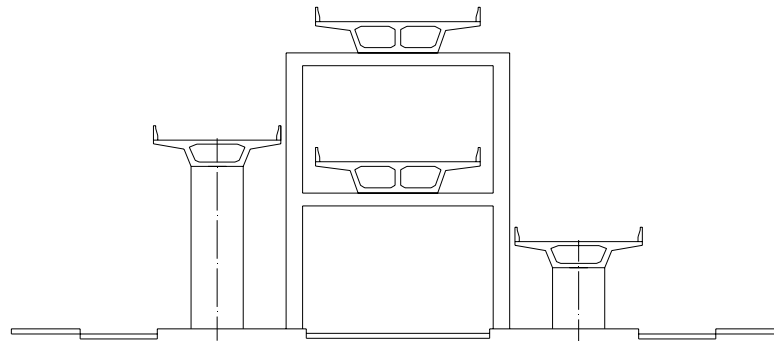




### 3. 高架桥

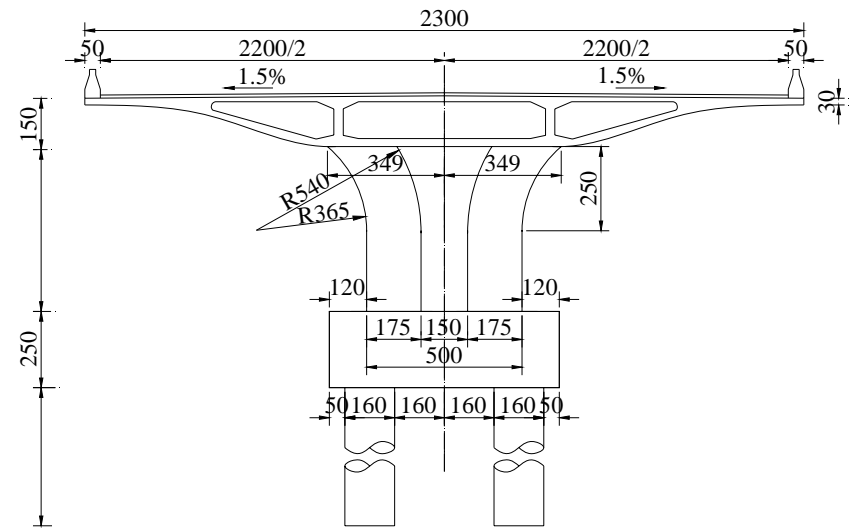


单层式高架桥（有匝道）



双层式高架桥（有匝道）

- ( 1 ) 横断面设计
- 桥面横坡宜采用直线坡度。路拱设计坡度采用 2%。严寒积雪地区路拱设计坡度可采用 1.5%。
- ( 2 ) 平、纵线形设计
- 纵断面设计关键在于桥梁标高和纵坡及坡长问题。
- ( 3 ) 桥梁结构形式
- 1) 上部结构
- 2) 下部结构





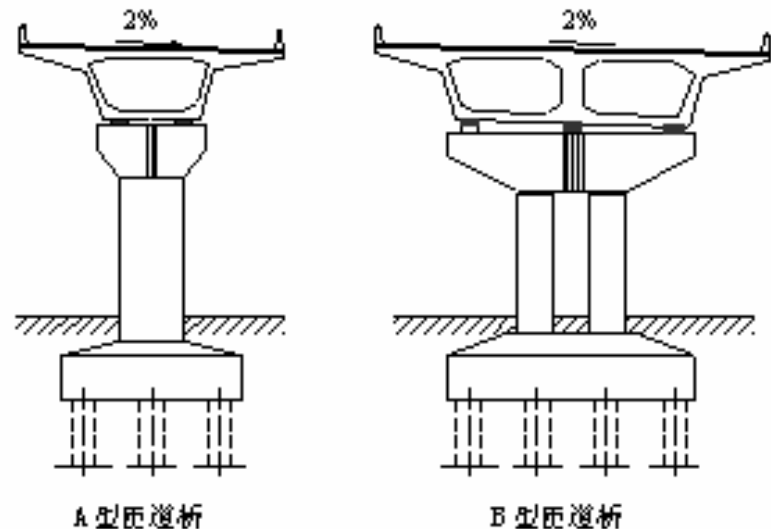


# 沪闵高架路二期工程



## 4. 匝道桥

- 匝道桥（**ramp bridge**）是指匝道与主线或被交路相交而设的桥梁，但在很多情况下，整条匝道均采用高架桥形式。
- 匝道的一般要求
- 横断面布置
- 匝道平面线形
- 匝道纵面线形
- 匝道桥结构设计

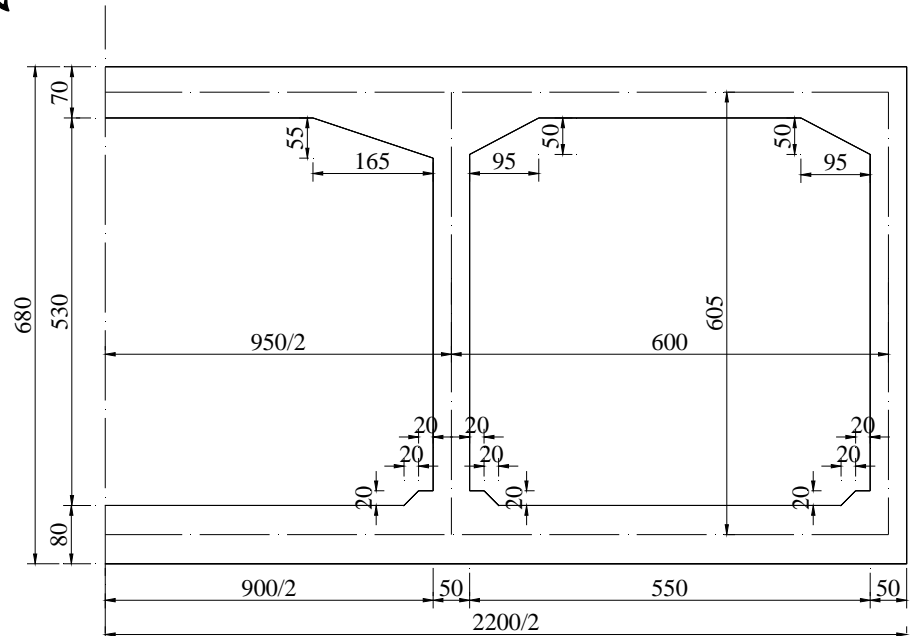


上海南北高架桥匝道标准横断面

## 5. 地道桥（箱涵）

- 当新建道路与既有线交叉时，常常需要采用地道桥（**underpass bridge**）。
- （1）地道桥的结构形式

单孔  
双孔  
三孔  
四孔



三孔式地道桥 结构构造图



- (2) 引道
- 1) 地道引道的平面线形
- 道路与铁路的交叉，应尽可能争取正交或接近正交；斜交时，其斜交角度也不要小于 $45^\circ$ 。地道的引道平面应尽量设计成直线。
- 2) 地道引道的纵坡度
- 在机动车与非机动车分道情况下，机动车道的纵坡以 $3\% \sim 4\%$ 为宜；非机动车道的纵坡不宜大于 $3\%$ ，而一般应尽可能使其不大于 $2.5\%$ 。
- 3) 在车流量较大特别是非机动车较多的路段，地道洞体和引道应尽可能采用四幅路或三幅路断面。在车流量较小特别是非机动车较少的路段上，地道洞体和引道才可以采用双幅路或单幅路断面。



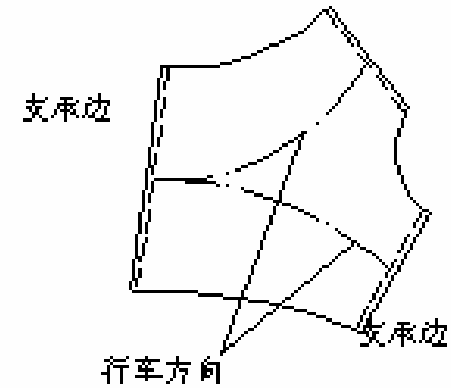
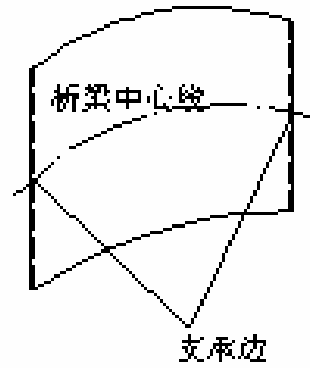
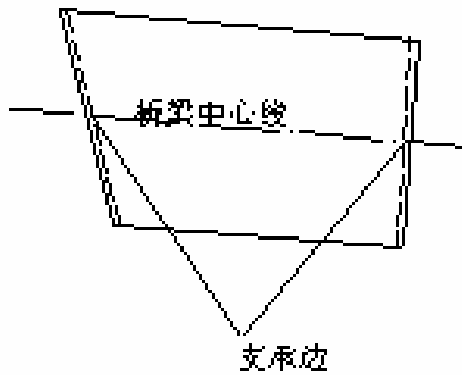
## 6. 通道

- 通道净空应符合以下规定：
- 净高：通行拖拉机、畜力车时应 $\geq 2.70\text{m}$ ；通行农用汽车时应 $\geq 3.20\text{m}$ 。
- 净宽：根据交通量和通行农业机械类型选用，应 $\leq 6.00\text{m}$ ；通道过长或敷设排水渠时，宜视情况增宽。



## 7. 异形桥梁的构造特点和设计原则

- (1) 在结构布置设计中，尽量使异形结构部分相对独立，使其复杂的受力行为对规则结构影响较小；
- (2) 通过计算或试验分析使结构的主梁或主筋布置方向尽量与主弯矩方向一致；
- (3) 在支承边应设置与支承线方向平行的横梁或横隔板；
- (4) 异形桥梁的支承反力在同一支承边不均匀，支座的布置应充分考虑可能出现的支承反力不均匀性，避免出现支座超载或脱空现象。



## 常见的异形桥梁