

ICS 93.040

P28

备案号: 37595-2013

DB32

江苏省地方标准

DB32/T 2315-2013

三塔两跨悬索桥设计指南

Guidelines for three-tower suspension bridge with two main-span

2013-05-15 发布

2013-06-15 实施

江苏省质量技术监督局 发布

目 次

前言..... II

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....错误！未定义书签。

3 术语、符号.....2

4 材料.....4

5 作用.....5

6 总体设计及总体计算.....8

7 桥塔.....9

8 主缆与鞍座间抗滑移验算.....错误！未定义书签。3

9 抗风设计.....14

10 抗震设计.....错误！未定义书签。

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则进行起草。

本标准由江苏省交通运输厅提出并归口。

本标准起草单位：江苏省长江公路大桥建设指挥部、同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司、交通运输部公路科学研究所、同济大学、江苏省交通规划设计院股份有限公司、中交公路规划设计院有限公司。

本标准主要起草人：冯兆祥，罗喜恒，吉林，张劲泉，李建中，马如进，韩大章，阮静，裴岷山，徐利平，杨昀，陈艾荣，彭天波，华新，黄李骥，李万恒，邓婷，王达磊，周彦锋，赵君黎，曲兆乐，谢雪峰，徐瑞丰，冯崑，胡美，宋建永，丁磊，李文杰，张静林。

三塔两跨悬索桥设计指南

1 范围

本标准规定了跨径在1200 m以下的三塔两跨公路悬索桥材料、作用、总体设计及总体计算、桥塔、缆索系统、抗风设计和抗震设计等方面的内容。

本标准适用于跨径在1200 m以下的三塔两跨公路悬索桥设计，其他多塔悬索桥或跨径在1200 m以上的三塔两跨悬索桥设计也可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 467 阴极铜
- GB/T 470 锌锭
- GB/T 699 优质碳素结构钢
- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 711 优质碳素结构钢热轧厚钢板和钢带
- GB 713 锅炉和压力容器用钢板
- GB/T 714 桥梁用结构钢
- GB/T 1228 钢结构用高强度大六角头螺栓
- GB/T 1229 钢结构用高强度大六角螺母
- GB/T 1230 钢结构用高强度垫圈
- GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件
- GB/T 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 3077 合金结构钢
- GB/T 3274 碳素结构钢和低合金钢热轧厚钢板和钢带
- GB/T 3632 钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副
- GB/T 5313 厚度方向性能钢板
- GB/T 7659 焊接结构用铸钢件
- GB 8918 重要用途钢丝绳
- GB/T 9945 热轧球扁钢
- GB/T 11352 一般工程用铸造碳钢件
- GB/T 17101 桥梁缆索用热镀锌钢丝
- GB/T 20067 粗直径钢丝绳
- GB/T 20118 一般用途钢丝绳
- GB/T 50283 公路工程结构可靠度设计统一标准
- JB/T 6402 大型低合金钢铸件
- JTG/T B02-01 公路桥梁抗震设计细则

JTG D60 公路桥涵设计通用规范
 JTG/T D60-01 公路桥梁抗风设计规范
 JTG D62 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
 JTG D63 公路桥涵地基与基础设计规范
 JTJ 025-86 公路桥涵钢结构及木结构设计规范
 JT/T 395 悬索桥预制主缆丝股技术条件
 JT/T 449 公路悬索桥吊索
 DB33/T 856-2012 特大跨径钢箱梁悬索桥设计指南

3 术语、符号

3.1 术语

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

悬索桥 suspension bridge

以通过桥塔悬垂并锚固于两岸锚碇（或桥两端）的主缆作为桥跨结构主要承重构件的桥梁。

3.1.2

多塔悬索桥 multi-tower suspension bridge

纵桥向具有3个或3个以上桥塔的悬索桥。

3.1.3

三塔两跨悬索桥 three-tower suspension bridge with two main-span

纵桥向设有3个桥塔、只在2个主跨设有加劲梁的多塔悬索桥。

3.1.4

桥塔 tower

用以支承主缆并将荷载通过基础传递给地基的结构，对三塔两跨悬索桥可分为边塔和中塔两种。

3.1.5

钢塔 steel tower

塔柱均为钢结构，钢塔柱在塔底与基础混凝土连接的桥塔。

3.1.6

钢-混凝土混合塔 hybrid tower composed of steel and concrete

塔柱的一部分为钢结构，另一部分为混凝土结构的桥塔。

3.2 符号

3.2.1 几何特征

3.2.1.1 长度

L —— 主跨跨度；

f —— 主跨主缆垂度；

l —— 中塔上塔柱高度。

3.2.1.2 角度

α_s —— 主缆在鞍槽上的包角。

3.2.1.3 截面特性

$\bar{I}$ ——中塔上塔柱纵桥向抗弯惯矩均值；

$\bar{I}_0$ ——中塔上塔柱纵桥向抗弯惯矩均值的下限估算值。

3.2.2 材料特性

E ——中塔上塔柱弹性模量。

3.2.3 力

W_l ——一个主跨内的汽车荷载重；

W_d ——一个主跨内的主缆和加劲梁总重；

F_{ct} ——主缆紧边拉力；

F_{cl} ——主缆松边拉力；

F_r ——径向夹紧力。

3.2.4 速度

U_d ——设计基准风速；

U_g ——静阵风速；

U_{cr} ——颤振临界风速；

U_{cg} ——驰振临界风速。

3.2.5 计算系数

k ——实际运营汽车荷载效应与JTG D60中的车道荷载效应的比值；

λ ——中塔上塔柱纵桥向抗弯惯矩均值的上限估算值与下限估算值之比；

μ ——主缆与鞍槽底和侧壁间的名义摩擦系数；

μ_s ——主缆与鞍槽底间的名义摩擦系数；

μ_p ——主缆与水平摩擦板上表面间的名义摩擦系数；

μ_f ——风速脉动修正系数；

G_v ——静阵风系数。

3.2.6 数量

n_u ——水平摩擦板以上主缆钢丝数；

n ——单根主缆钢丝总数。

4 材料

4.1 混凝土

4.1.1 用于悬索桥各部分构件的混凝土，其强度等级、标准值、设计值、弹性模量、剪变模量和泊松比应按 JTG D62 的规定取用。

4.1.2 悬索桥混凝土受力构件的混凝土强度等级应按下列规定采用：

- a) 混凝土桥塔不应低于 C50；
- b) 锚体不应低于 C30（60 天龄期），局部高应力区域不应低于 C40。

4.2 普通钢筋和预应力钢筋

钢筋混凝土及预应力混凝土构件所采用的普通钢筋和预应力钢筋，其钢筋种类、强度标准值、强度设计值和弹性模量应按 JTG D62 的规定取用。

4.3 高强钢丝及钢丝绳

4.3.1 主缆索股所用高强钢丝宜采用热镀锌线材。

4.3.2 吊索所用高强钢丝及钢丝绳宜采用热镀锌线材。

4.3.3 镀锌高强钢丝的技术条件应符合 GB/T 17101 的规定。

4.3.4 镀锌钢丝绳的技术条件应符合 GB 8918、GB/T 20118 或 GB/T 20067 的规定。

4.4 结构用钢材

4.4.1 钢桥塔、钢箱梁的钢材可采用 GB/T 714、GB/T 700、GB/T 1591 或其他适用于桥梁结构的碳素结构钢和低合金结构钢。当对钢板厚度方向性能有要求时，其材质应符合 GB/T 5313 的规定。

4.4.2 鞍座、缆套、索夹本体材料采用铸钢时，其技术条件应符合 GB/T 11352、GB/T 7659、JB/T 6402 的规定。

4.4.3 鞍座、索夹、锚固系统的拉杆宜采用合金结构钢，其技术条件应符合 GB/T 3077 的规定。

4.4.4 高强度螺栓、螺母、垫圈的技术条件应符合 GB/T 1231 或 GB/T 3632 的规定。

4.4.5 锚头锚杯、盖板、销接式锚头耳板及销轴等应选用优质钢材制造，其技术条件应符合 GB/T 11352、GB/T 699、GB/T 3077 的规定。

4.4.6 铸焊构件采用的结构用钢板技术条件应符合 GB/T 711、GB 713、GB/T 3274 的规定。

4.4.7 球扁钢的技术条件应符合 GB/T 9945 的规定。

4.5 其他

- 4.5.1 焊接材料应通过焊接工艺试验选定，并应保证焊缝与主体钢材技术条件相适应。
- 4.5.2 热铸锚头铸体材料应选用低熔点锌铜合金，技术条件宜符合 GB/T 470、GB/T 467 的规定。

5 作用

5.1 一般规定

- 5.1.1 设计中作用的计算，应按本指南的规定执行，本指南未作规定的，应符合 JTG D60 的要求。
- 5.1.2 设计中作用的分类与组合，应符合 JTG D60 的要求，并根据结构计算状态确定作用效应分项系数和频遇值、准永久值系数。
- 5.1.3 结构重要性系数的确定，应符合 JTG D60 的要求。

5.2 各类作用

5.2.1 永久作用

永久作用计算应按 JTG D60 的规定执行。其中基础变位作用包括桥塔竖向变位、锚碇水平及竖向变位。结构重力计算时，当钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土含筋率（含普通钢筋和预应力钢筋）大于 1%（体积比）时，其重度可按单位体积中扣除钢筋体积的混凝土的自重加所含钢筋的自重之和计算。

5.2.2 汽车荷载和人群荷载

5.2.2.1 设计汽车荷载包括车道荷载和车辆荷载。桥梁结构的整体计算采用车道荷载，桥梁结构的局部加载等的计算采用车辆荷载，车道荷载与车辆荷载的作用不得叠加。

5.2.2.2 大跨度悬索桥汽车荷载应采用 JTG D60 中规定的汽车荷载，有特殊需要时，也可在对桥位区域内汽车荷载进行专门研究的基础上确定。

5.2.2.3 当进行专门研究来确定汽车荷载时，应满足以下要求：

- 选取桥位区域内代表性路段利用动态称重系统进行全断面汽车荷载实测，实测持续时间应不小于 7 天；
- 利用实测数据进行车辆荷载统计分析，确定其概率分布后，进行设计基准期内最大值分布分析，综合分析后确定车辆荷载取值；
- 利用实测数据进行汽车荷载效应统计分析，分析以实测车队效应与 JTG D60 汽车荷载标准值效应之比为对象，确定其概率分布后，进行设计基准期内最大值分布分析，综合分析后确定车道荷载取值；
- 汽车荷载其他代表值按照 GB/T 50283 规定的方法确定。

5.2.2.4 当进行专门研究来确定汽车荷载时，车道荷载计算图式可见图 1。

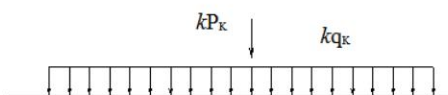


图1 车道荷载计算图式

其中 q_k 、 P_k 分别为 JTG D60 中对车道荷载的规定值。 k 为按第 5.2.2.3 条方法统计分析得出的实际运营汽车荷载效应与 JTG D60 中的车道荷载效应的比值。

5.2.2.5 当进行专门研究来确定汽车荷载时，车辆荷载模型应基于 5.2.2.3 条的统计分析结果，选取有代表性的车辆来确定。

5.2.2.6 汽车荷载冲击系数、横向折减系数、纵向折减系数和人群荷载按 JTG D60 取用。

5.2.3 风荷载

作用在桥上的风荷载应考虑顺桥向（X）、横桥向（Y）和竖桥向（Z）三个分量，各构件的风荷载宜通过专题研究确定或按本指南相应部分及JTG D60、JTG/T D60-01的规定计算，并考虑以下两种不同的情况分别计算风荷载：

- a) 与汽车荷载组合时，按照桥面高度风速 25m/s 计算，若实际桥面高度设计风速小于 25m/s，需按实桥处风速高度梯度计算风荷载；
- b) 不与汽车荷载组合时，按照百年一遇设计风速计算成桥状态风荷载，按照 30 年一遇设计风速计算施工状态风荷载。

5.2.4 温度作用

5.2.4.1 考虑温度作用时，应根据当地的具体情况，结构物使用的材料所处的环境和施工条件等因素计算由温度引起的结构效应。

5.2.4.2 计算体系温差时，钢结构可按当地极端最高和最低气温确定；混凝土结构可按当地日平均最高和最低气温确定。气温变化值应自结构合拢时的温度起算。

5.2.4.3 加劲梁、主塔局部温差应按 JTG D60 的规定执行，混凝土桥塔两侧的日照温差值及内外温差值可取 5℃。

5.2.5 支座摩阻力

支座摩阻力应按现行JTG D60的规定计算。

5.2.6 地震作用

5.2.6.1 地震作用采用 E1 和 E2 两级进行抗震设防，相应的地震超越概率分别为 100 年 10%（重现期为 950 年）和 100 年 4%（重现期为 2450 年）。

5.2.6.2 E1 和 E2 地震作用采用设计加速度反应谱和设计地震动加速度时程表征，应根据专门的工程场地地震安全性评价确定桥址 E1 和 E2 地震作用。工程场地地震安全性评价应满足以下要求：

- a) E1 和 E2 地震作用应考虑长周期效应，给出的设计加速度反应谱和设计地震加速度时程的周期范围应包含悬索桥结构的基本周期；
- b) 桥址存在地质不连续或地形特征可能造成各桥墩的地震动参数显著不同，以及锚锭间长度超过 1500m 时，应考虑地震动参数的空间变化；
- c) 桥址距有发生 6.5 级以上地震潜在危险的地震活断层 30km 以内时，近断裂效应应包括上盘效应、破裂的方向性效应，以保证设计加速度反应谱长周期段的可靠性。

5.2.6.3 地震作用宜通过专题研究确定。

5.2.7 撞击作用

需要考虑船舶撞击作用时，撞击作用应按照JTG D60的规定计算，并宜通过专题研究确定。

5.2.8 施工荷载

进行施工计算时，必须计入施工中可能出现的施工荷载，包括架设机具和材料、施工人群、桥面堆载、临时配重以及风荷载等，以保证所设计结构的施工安全性。

5.3 作用效应组合

5.3.1 在进行作用效应组合时，主缆计算拉力应将体系温度作用作为永久作用计入，其余应符合 JTG D60 中有关作用效应组合的规定。

5.3.2 抗震设计时的作用效应组合按 10.1.7 的要求进行。

5.4 疲劳荷载

5.4.1 疲劳荷载包括疲劳单车荷载模型和疲劳车辆荷载谱。

5.4.2 疲劳荷载宜在桥位区域内汽车荷载的专门研究基础上确定。当没有专门研究时，可采用 5.4.4 和 5.4.5 中疲劳荷载的有关规定。

5.4.3 当进行专门研究来确定疲劳荷载时，应满足以下要求：

- a) 选取桥位区域内代表性路段利用动态称重系统进行全断面汽车荷载实测，实测持续时间应不小于 7 天；
- b) 利用实测数据，选取一系列有代表性的车型，通过等效损伤原则，进行数理统计分析，综合分析确定疲劳车辆荷载谱；
- c) 利用实测数据，选取 1 个代表车型，通过等效损伤原则，综合分析确定疲劳单车荷载模型。

5.4.4 疲劳单车荷载模型见图 2。利用疲劳单车荷载模型进行抗疲劳设计设计时，应满足以下要求：

- a) 按单车道单车加载；
- b) 疲劳荷载应力幅按单车道加载后的最大应力和最小应力的差值计算；
- c) 一般情况下，等效等幅应力的循环次数可采用 2×10^6 次。

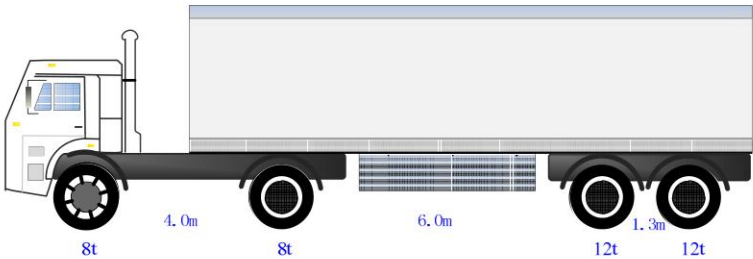


图2 疲劳单车荷载模型

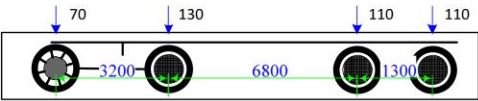
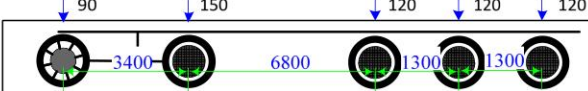
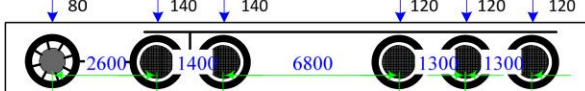
5.4.5 疲劳车辆荷载谱由一系列车辆荷载模型组合，见表 1。利用疲劳荷载谱进行抗疲劳设计时应满足以下要求：

- a) 每种车辆按单车道和单辆加载；
- b) 按雨流计数法计算结构通过单个车辆时的应力幅和相应循环次数。

表1 疲劳车辆荷载谱

货车参数	公路类型		
	国道	高速公路	乡村公路
轴距/mm，轴重/kN	货车/%	货车/%	货车/%
	66	54	47
	14	10	7

表 1 疲劳车辆荷载谱（续）

货车参数	公路类型		
	国道	高速公路	乡村公路
轴距/mm，轴重/kN	货车/%	货车/%	货车/%
	8	20	38
	6	8	7
	6	8	1

6 总体设计及总体计算

6.1 一般规定

- 6.1.1 总体设计应根据桥址处的地形、地质、气象、水文、通航、防洪等建设条件，结合结构受力合理性以及景观要求，对跨径布置、桥塔及锚碇设置、结构体系、支承体系、主缆及吊索布置、加劲梁型式、桥塔型式、桥面布置等进行综合考虑，合理设计。
- 6.1.2 总体设计时，应对其桥塔、缆索系统、加劲梁和基础等主要组成构件的类型及其组合，进行论证比选后确定设计方案。
- 6.1.3 总体设计应考虑抗风、抗震的要求，并进行抗风、抗震专题研究。
- 6.1.4 全桥整体竖向刚度主要由中塔刚度、支承体系、主缆垂跨比、加劲梁重量等参数决定，应根据具体情况通过技术经济综合比选确定。
- 6.1.5 中塔塔型和材料应考虑主缆与鞍座间抗滑移稳定、全桥整体竖向刚度和中塔受力情况等因素，根据计算分析综合确定。
- 6.1.6 主缆垂跨比一般宜在 1/8~1/11 的范围内选用。
- 6.1.7 主缆边中跨比一般可取为 0.25~0.45。
- 6.1.8 吊索间距应考虑材料用量、加劲梁运输架设条件以及吊索的受力情况确定。跨中短吊索的长度应考虑加劲梁架设设备的要求，主缆中心到加劲梁侧吊索锚点之间的距离不宜小于 3.5m。
- 6.1.9 加劲梁宜在中塔处结构连续，也可考虑加劲梁与中塔固接或加劲梁在中塔处简支的方式。
- 6.1.10 加劲梁的宽度除应满足技术标准外，还应考虑吊索锚固构造、检修道设置及抗风稳定性的要求；加劲梁的高度除满足受力、刚度要求外，还应满足抗风稳定性的要求；加劲梁的外形应通过气动选型确定并满足抗风要求。
- 6.1.11 整体竖向刚度的控制标准应考虑如下要求：
- a) 在各种工况下，结构各部分不得侵入通航净空；
 - b) 避免产生加劲梁下垂的视觉效果；
 - c) 变形不应导致桥面排水不畅；
 - d) 由汽车荷载（不计入冲击系数）引起的加劲梁最大竖向挠度值宜小于跨径的 1/250、梁端竖向转角宜小于 0.02 rad，否则应进行专项论证。

6.1.12 加劲梁在强风（桥面无车）作用下，最大横向位移宜小于跨径的 $1/150$ 。

6.1.13 避雷系统、航空障碍系统、防船撞设施、导航、助航设施应根据相关要求进行专项设计。

6.2 支承体系

6.2.1 支承体系应根据中塔刚度、主缆垂跨比、加劲梁与中塔间及加劲梁与主缆间的连接方式等参数综合研究确定。

6.2.2 加劲梁与中塔间的连接方式可选择：塔梁分离、塔梁固接等。采用塔梁分离方式时，加劲梁在中塔处宜结构连续或采用简支方式。

6.2.3 采用塔梁分离方式且结构连续时，中塔处加劲梁的竖向连接方式可选择：无约束、弹性约束、刚性约束等。

6.2.4 采用塔梁分离方式时，如加劲梁结构连续，中塔处加劲梁的纵向连接方式可选择：弹性约束、刚性约束、无约束等；如加劲梁采用简支方式时，加劲梁在中塔处宜设纵向刚性约束。

6.2.5 采用塔梁分离方式且结构连续时，可在中塔处设置加劲梁扭转限位装置。

6.2.6 采用塔梁分离方式时，加劲梁与桥塔间的横向约束方式，一般设置抗风支座。

6.2.7 为提高结构的整体刚度和主缆与鞍座间抗滑移稳定，可在两主跨跨中处设置柔性中央扣或刚性中央扣。

6.3 总体计算

6.3.1 总体计算应采用有限位移理论，结构计算图式、几何特性、边界条件应反映实际结构状况和受力特征。

6.3.2 在结构总体受力分析中，主体结构可不计汽车荷载冲击力的影响，但支座及局部构件应计入汽车荷载冲击力。

6.3.3 计算各种作用效应组合下的结构内力及位移，提出结构设计所需要的主缆及吊索的控制拉力、加劲梁及桥塔（墩）身各截面的内力和控制截面的竖向挠度及水平变位、支座反力、梁端转角（面内、面外）及纵向位移。

6.3.4 根据设计成桥控制参数计算主缆成桥线形，得出索股无应力长度及吊索无应力长度，并推算出空缆线形、鞍座预偏量、索股初始张力及索夹安装位置等。

6.3.5 应进行施工过程计算，根据桥塔的强度和应力、主缆与鞍座间抗滑移稳定、吊索索力和主缆线形等因素，确定合理的加劲梁架设顺序、鞍座顶推时间和相应的顶推量。

7 桥塔

7.1 一般规定

7.1.1 三塔两跨悬索桥桥塔分为边塔和中塔两种，可根据水文、地质条件等因素选用桩基础、沉井或扩大基础作为桥塔基础，并根据结构的受力要求选择适宜的持力土层。

7.1.2 中塔可根据受力需要选用钢塔、混凝土塔或钢—混凝土混合塔，边塔一般宜采用混凝土塔。地震作用影响较大时，宜优先选用变形能力较强的结构型式。

7.1.3 桥塔的高度应根据主缆垂度、加劲梁高度及线形、通航净高及航空限高等确定，中塔的塔顶高程可适当高于边塔的塔顶高程。

7.1.4 中塔与加劲梁的连接方式，根据总体分析确定的全桥支承体系，可采用塔梁分离或塔梁固结方式。对于边塔或采用塔梁分离方式的中塔，塔柱横向与加劲梁间应留有适当的宽度以满足加劲梁横向温度变形的需要。

7.1.5 桥塔设计除应满足结构强度、刚度、稳定性等的要求外，还应考虑经济合理、方便施工、造型美观及耐久性要求。

7.2 结构形式

7.2.1 桥塔的横向形式一般采用塔柱及横梁组成的门式框架结构。

7.2.2 中塔纵向形式对中塔刚度影响较大，应结合全桥总体分析综合确定，可采用倒Y形、A形及单柱式等结构形式。边塔的纵向形式一般采用单柱式。

7.2.3 对采用倒Y形中塔且采用塔梁分离方式的三塔两跨悬索桥（图3），可按式(1)确定中塔上塔柱的纵桥向抗弯惯矩的取值范围。

$$\bar{I}_0 \leq \bar{I} \leq \lambda \bar{I}_0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{I}_0 = (K_1 W_l + K_2 W_d) \frac{l^2}{E} \dots\dots\dots (2)$$

$$K_1 = \frac{2000 - 0.7L}{f} \dots\dots\dots (3)$$

$$K_2 = \frac{200}{L} + 0.1 \dots\dots\dots (4)$$

$$\lambda = \frac{2}{55} \left(\frac{L}{f} \right)^{1.5} \text{ch} \left(\frac{L - 600}{500} \right) \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$\bar{I}$ ——中塔上塔柱纵桥向抗弯惯矩均值(m^4)；

$\bar{I}_0$ ——中塔上塔柱纵桥向抗弯惯矩均值的下限估算值(m^4)；

λ ——中塔上塔柱纵桥向抗弯惯矩均值的上限估算值与下限估算值之比；

W_l ——一个主跨内的汽车荷载重(kN)，可只计均布荷载部分，即 $W_l = qL$ ；

q ——桥面全宽的车道荷载(kN/m)， $= q_K \times \text{车道数} \times \text{横向折减系数} \times \text{纵向折减系数}$ ， q_K 为车道荷载的均布荷载标准值，按本指南5.2.2节取值；

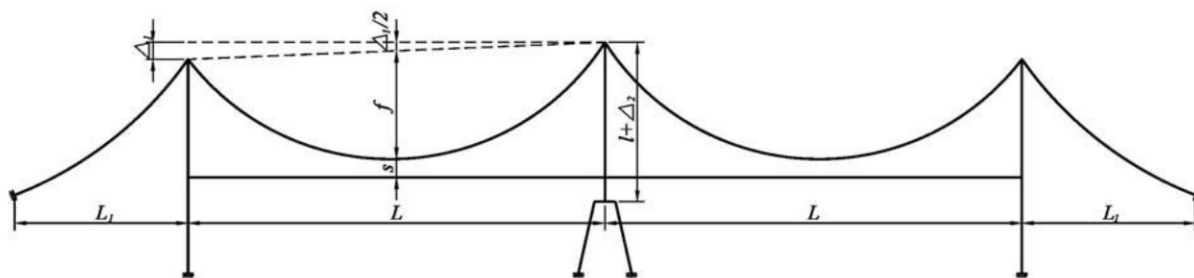
W_d ——全桥的主缆和加劲梁总重(kN)；

L ——主跨跨度(m)；

f ——主跨主缆垂度(m)；

l ——中塔上塔柱高度(m)；

E ——中塔上塔柱弹性模量(kPa)。



注1：图中符号说明： Δ_1 —中、边塔主缆IP点高差； Δ_2 —中塔主缆IP点到中塔塔顶的高差。

图3 三塔两跨悬索桥简图

7.2.4 混凝土塔柱及横梁一般采用空心箱形截面型式；钢塔柱及横梁可采用单室或多室箱形、十字形、T形截面型式，具体形状宜通过风洞试验确定。

7.2.5 桥塔横梁的数量、位置和造型可根据受力要求及景观要求确定。

7.3 结构计算

7.3.1 桥塔计算可结合总体计算进行，并宜考虑加劲梁架设顺序对桥塔受力的影响。桥塔宜采用空间图式进行整体分析，并计入结构几何非线性效应。

7.3.2 混凝土桥塔应进行截面承载力验算和裂缝宽度验算；钢桥塔应进行截面应力验算和构件局部稳定验算；桥塔应进行横桥向及顺桥向的压曲稳定验算。

7.3.3 混凝土塔柱及横梁的截面验算及配筋应符合 JTG D62 的规定；钢塔柱及横梁的截面验算应符合 JTJ 025 的规定。

7.3.4 当验算横梁受扭的不利工况或混凝土横梁顺桥向尺寸大于横桥向跨径的 1/5 时，横梁宜按空间结构图式进行分析并对混凝土横梁进行合理配筋。

7.4 构造要求

7.4.1 混凝土塔

7.4.1.1 空心塔柱顶端应设置一定厚度的实体段，塔顶面宜设置钢格栅，其尺寸应与塔顶鞍座相匹配；塔柱根部与基础连接处宜设置扩散应力的塔座。

7.4.1.2 空心塔柱与横梁连接处的塔柱壁宜局部加厚，其厚度应保证横向预应力束布置的需要，同时不影响塔柱内电梯运行所需空间。

7.4.1.3 空心横梁内宜设置横隔板，横隔板可布置在上部结构、施工支架及吊装设备的支承处，一般不宜少于两道。

7.4.1.4 塔柱底部、桥面高度处及与横梁连接处的塔柱侧壁上，空心横梁的顶板及横隔板上均应设置出入人孔。

7.4.1.5 地震作用影响较大时，应加强塔柱间的横向联结。对混凝土横梁应结合抗震分析结果配置预应力筋及普通钢筋。

7.4.1.6 塔柱和横梁应设置通风孔，间距宜为 10 m~15 m。

7.4.1.7 混凝土塔宜根据施工需要在桥塔内配置型钢作为劲性骨架。

7.4.1.8 横梁预应力筋宜锚固于塔柱外侧。当锚头埋于塔柱壁内时，应对被切断的竖向受力钢筋采取有效加强措施。

7.4.1.9 上部结构的支座预埋螺栓位置应避开桥塔横梁预应力筋管道的位置。

7.4.1.10 混凝土桥塔的构造要求除本节有明确规定外，应符合 JTG D62 的规定。

7.4.2 钢塔及钢-混凝土混合塔

7.4.2.1 塔柱的节段划分应综合考虑塔柱刚度、加工设备的加工能力、吊装设备的吊装能力、安装效率和景观效果，宜采用大节段划分，以尽可能地减少拼接头和拼接板。

7.4.2.2 钢塔宜设计成矩形空心箱截面形式，箱壁各主壁板上应布置竖向加劲肋，箱室内应设置水平横隔板。

7.4.2.3 外壁板和竖向隔板的厚度根据受力确定，但外壁板及主要受力隔板的厚度不宜小于 20 mm。

7.4.2.4 箱室内应设置水平横隔板，其间距不宜大于 3000 mm。

7.4.2.5 塔柱中受压构件的加劲肋，其宽厚比一般不宜大于 $13\sqrt{235/f_y}$ ，其中 f_y 为钢材牌号所对应的屈服点。

7.4.2.6 塔柱节段连接宜采用金属接触与高强度螺栓结合的方式。设计应合理确定节段间壁板、腹板和肋板等不同板材的金属接触率，金属接触率一般宜大于 50%。

7.4.2.7 除通过风洞试验优化断面外形外，还可考虑安装质量调谐阻尼器或晃动调谐阻尼器以达到减振目的。

7.4.2.8 钢塔柱与混凝土结合部位置及形式应依据结构受力特点、施工方法等因素综合确定。

7.4.2.9 全钢塔柱与基础混凝土的连接应符合下列规定：

- a) 钢塔柱与混凝土结合部除应考虑正常的温度效应外，还应考虑由于两种材料不同的线膨胀系数引起的效应；
- b) 钢塔柱底部与混凝土的连接一般采用螺栓锚固方式、埋入式或螺栓锚固与埋入结合式。一般宜采用螺栓锚固方式（图 4），使塔底轴力在钢混结合面处尽量多地通过厚钢板传递给混凝土基础。

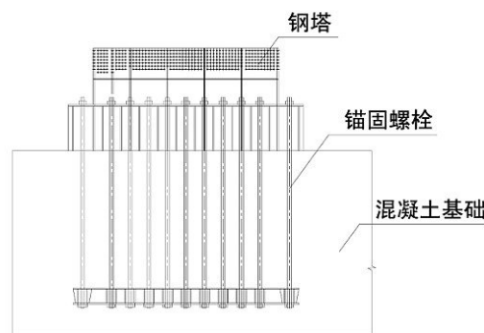


图4 钢塔柱与基础混凝土的连接

7.4.2.10 钢-混凝土混合塔柱连接部位应符合下列规定：

- a) 钢塔柱与混凝土结合部除应考虑正常的温度效应外，还应考虑由于两种材料不同的线膨胀系数引起的效应；
- b) 钢塔柱与混凝土塔柱结合部连接形式有完全承压式和承压传剪式（图 5）；

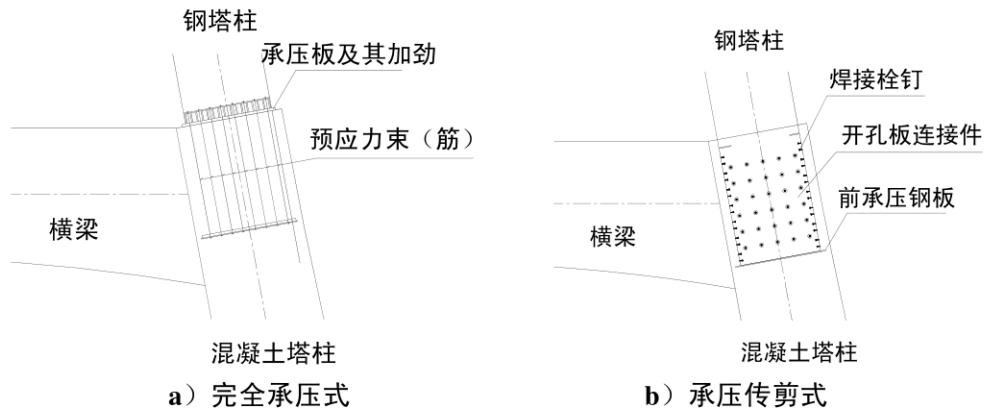


图5 钢塔柱与混凝土塔柱结合部连接形式

- c) 混凝土塔柱与钢塔柱的抗剪连接件可采用焊接连接件和开孔板连接件；
- d) 结合部连接构造设计应确保具有较好的混凝土抗裂性和耐久性；
- e) 采用焊接剪力钉连接件时，焊接剪力钉应设置于钢塔柱壁板、腹板及其加劲板上。焊接剪力钉在其面内纵、横向间距宜为其直径的 10~15 倍，距侧面钢板的净距宜为其直径的 5~10 倍；
- f) 开孔板连接件的板厚、孔径、孔距、钢筋直径、混凝土强度应相匹配。一般情况下，开孔板厚度可取 25~50 mm，孔中心距可取 220~250 mm，孔径可取 60~80 mm，孔距钢板边缘的净距宜不小于孔中心距的一半；
- g) 开孔板中钢筋宜采用 HRB335 及以上强度级别的钢筋，直径一般采用 20~25 mm；钢筋长度应大于两倍的锚固长度，也可沿孔洞方向通长布置；
- h) 完全承压式连接的承压钢板厚度一般采用 60~80 mm；承压传剪式连接的承压钢板厚度一般采用 20~30 mm；
- i) 完全承压式连接的混凝土结合面应磨光，或采用端部注浆的方式，以满足承压计算要求。

8 主缆与鞍座间抗滑移验算

8.1 主缆与鞍座间的抗滑移安全系数应满足式(6)的要求（图 6）：

$$K = \frac{\mu \alpha_s}{\ln(F_{ct}/F_{cl})} \geq 2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

μ ——主缆与鞍槽底和侧壁间的名义摩擦系数，一般取 $\mu=0.2$ ；

α_s ——主缆在鞍槽上的包角，rad；

F_{ct} ——主缆紧边拉力，kN；

F_{cl} ——主缆松边拉力，kN。

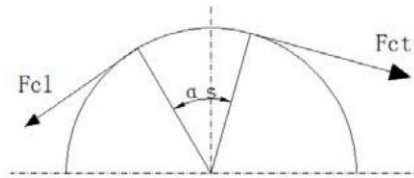


图6 主缆与鞍座间抗滑移验算图式

8.2 当主缆与鞍座间的抗滑移安全系数不满足 8.1 规定时,可采取如下措施:

- a) 在鞍槽内设置水平摩擦板;
- b) 在鞍槽顶施加径向夹紧力;
- c) 采取合适的结构措施,减小鞍座两侧的主缆缆力差。

8.3 鞍槽内设置水平摩擦板时,主缆与鞍座间的总体摩擦系数可按式(7)计算:

$$\mu = \mu_s + \mu_p \times \frac{n_u}{n} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

μ_s ——主缆与鞍槽底间的名义摩擦系数,可取 $\mu_s=0.2$;

μ_p ——主缆与水平摩擦板上表面间的名义摩擦系数,可取 $\mu_p=0.2$;

n_u ——水平摩擦板以上主缆钢丝数;

n ——单根主缆的钢丝总数。

8.4 在鞍槽顶施加径向夹紧力时,主缆与鞍座间的抗滑移安全系数应满足式(8)的要求。

$$K = \frac{\mu \alpha_s}{\ln \left[(F_{ct} - F_r \mu / 2) / F_{cl} \right]} \geq 2 \dots\dots\dots (8)$$

式中:

F_r ——径向夹紧力, kN;

其他符号的含义同8.1。

8.5 为提高主缆与鞍座间的抗滑移安全度,可在中塔鞍座的鞍槽内设置隔墙,隔墙厚度可取为 50 mm,隔墙端部宜设置厚度渐变段。

9 抗风设计

9.1 一般规定

9.1.1 抗风设计除本指南有明确规定外,应符合 JTG/T D60-01 的规定。

9.1.2 抗风设计应根据设计阶段分步进行,在不同设计阶段选择相应的抗风设计内容和设计方法。

9.2 风参数确定

9.2.1 现场风观测

- 9.2.1.1 对特大跨径三塔两跨悬索桥，应在初步设计之前进行桥位现场风环境观测。
 9.2.1.2 风环境观测周期不应少于两年，测站不宜少于 2 处，测站竖向测点不应少于 4 个。

9.2.2 风速参数

- 9.2.2.1 基本风速 U_b 的确定应根据现场风观测、结合周边气象站资料分析得到。
 9.2.2.2 设计基准风速 U_d 是指桥位风场条件下、构件高度处、100 年重现期、10 min 平均最大风速。
 9.2.2.3 施工期间按照重现期 30 年选择风速折减系数。

9.3 结构动力特性模型及阻尼比

- 9.3.1 单箱断面加劲梁宜采用单梁式模型模拟；分离式断面加劲梁宜应采用双梁式模型模拟，并准确模拟横梁的刚度。
 9.3.2 桥塔与桥墩可采用梁单元模拟，宜考虑桥塔塔柱与横梁之间的刚域效应。
 9.3.3 沉井基础可采用塔底、墩底固结的方式模拟；桩基础可采用六自由度弹簧模拟刚度，并考虑承台的质量与质量惯性矩。
 9.3.4 钢加劲梁的结构阻尼比可取 0.005。
 9.3.5 桥塔自立状态时的阻尼比，对混凝土塔可取 0.01，钢塔可取 0.003，钢-混凝土混合塔可取 0.007。

9.4 风荷载

- 9.4.1 静阵风速 U_g 为考虑构件长度、地表粗糙度等因素的风速参数，可按式 (9) 计算：

$$U_g = U_d \times G_v \dots \dots \dots (9)$$

式中：

G_v ——静阵风系数，可按表2取值，其中水平加载长度按照两主跨跨径之和确定。

表2 静阵风系数 G_v

场地类别	水平加载长度/m													
	20	60	100	200	300	400	500	650	800	1000	1200	1500	2000	2500
A	1.29	1.28	1.26	1.24	1.23	1.22	1.21	1.20	1.19	1.18	1.17	1.16	1.15	1.14
B	1.35	1.33	1.31	1.29	1.27	1.26	1.25	1.24	1.23	1.22	1.21	1.20	1.19	1.18
C	1.49	1.48	1.45	1.41	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31	1.30	1.29	1.28	1.27
D	1.56	1.54	1.51	1.47	1.44	1.42	1.41	1.39	1.37	1.35	1.34	1.32	1.31	1.3

- 9.4.2 加劲梁的静气动力系数宜通过风洞模型试验或数值风洞模拟方法确定。
 9.4.3 桥塔的静气动力系数宜通过风洞模型试验或数值风洞模拟方法确定，并考虑风偏角效应。
 9.4.4 主缆的阻力系数宜通过风洞模型试验或数值风洞模拟方法获得，也可取为 0.7。

9.5 抗风性能检验

9.5.1 颤振稳定性

- 9.5.1.1 三塔两跨悬索桥可选取两跨反对称（单跨正对称）扭转振型计算颤振稳定性。

9.5.1.2 结构的颤振稳定性可通过数值模拟、节段模型试验或全桥气弹模型试验综合确定，在 -3° 攻角至 $+3^\circ$ 攻角范围内，颤振临界风速 U_{cr} 应大于颤振检验风速 $[U_{cr}]$ ，即：

$$[U_{cr}] = 1.2 \times \mu_f \times U_d \dots\dots\dots (10)$$

式中：

μ_f ——风速脉动修正系数，按单主跨跨径根据JTG/T D60-01表6.3.8取值。

9.5.1.3 当不能满足 9.5.1.2 要求时，应采取气动措施、振动控制措施等手段提高结构的颤振稳定性。

9.5.2 静风稳定性

9.5.2.1 结构静风稳定性应通过三维非线性有限元分析方法或全桥气弹模型试验综合确定。

9.5.2.2 结构静风发散临界风速应大于 $2U_d$ 。

9.5.3 驰振稳定性

9.5.3.1 桥塔的驰振稳定性宜通过气弹模型试验确定，也可通过数值模拟或模型试验获得桥塔的驰振力系数并结合驰振分析确定。

9.5.3.2 桥塔的驰振临界风速 U_{cg} 应大于驰振检验风速 $[U_{cg}]$ ，即：

$$[U_{cg}] = 1.2 \times U_d \dots\dots\dots (11)$$

9.5.4 涡激振动

9.5.4.1 加劲梁的涡激振动应通过节段模型试验确定，并满足 JTG/T D60-01 的 7.2.6 的规定。

9.5.4.2 钢桥塔的涡激振动应通过气弹模型试验进行确定，在设计基准风速范围内涡激振动不应产生桥塔疲劳破坏和施工机具与人员舒适性问题，必要时应采取气动或机械减振措施加以控制。

9.5.5 抖振响应

应通过全桥气弹模型试验、抖振数值分析等手段综合确定桥梁的抖振响应，在设计基准风速范围内应满足结构疲劳、车辆及人员舒适性等要求，必要时应采取气动或机械减振措施加以控制。

9.5.6 尾流驰振

悬索桥的平行长吊杆可能会发生尾流驰振，应采取机械或气动措施加以控制。

10 抗震设计

10.1 一般规定

10.1.1 抗震设计除本指南有明确规定外，应符合 JTG/T B02-01 的规定。

10.1.2 宜采用对称的结构形式，上、下部结构之间的连接构造宜均匀对称。

10.1.3 主要承重结构（桥塔、桥墩）宜选择有利于提高延性变形能力的结构形式及材料，避免发生脆性破坏。

10.1.4 宜采用塔梁弹性约束装置和粘滞阻尼器等约束过大的梁端位移。

10.1.5 当采用反应谱法，考虑三个正交方向（顺桥向 X、横桥向 Y 和竖向 Z）的地震作用时，可分别单独计算 X 向地震作用在计算方向产生的最大效应 E_x 、Y 向地震作用在计算方向产生的最大效应 E_y 与 Z 向地震作用在计算方向产生的最大效应 E_z ，计算方向总的设计最大地震作用效应 E 按式 (12) 计算：

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \dots\dots\dots (12)$$

10.1.6 抗震设计应考虑以下作用：

- a) 永久作用，包括结构重力、预应力、水压力；
- b) 地震作用，包括地震动的作用和地震土压力、水压力等；
- c) 在进行抗震验算时，宜将桥面上汽车设计荷载的 0.2 倍作为水平向附加质量计入结构质量中。

10.1.7 抗震设计时的作用效应组合应包括 10.1.7 要求的各种作用之和，组合方式应包括各种作用效应的最不利组合。

10.2 抗震分析

10.2.1 地震作用下的内力与变形可采用表 3 所列方法进行分析。

表3 抗震分析方法

地震作用	分析方法
地震水准 I	反应谱法或线性动力时程法
地震水准 II	非线性动力时程法

10.2.2 反应谱法、线性或非线性动力时程法的分析应采用可靠的有限元通用软件或专用软件。

10.2.3 结构动力计算模型应正确反映桥梁上部结构、下部结构、支座和地基的刚度、质量分布及阻尼特性，一般情况下应满足下列要求：

- a) 采用三维空间有限元模型；
- b) 分析模型应包括主桥与相邻的引桥结构；
- c) 采用堆聚质量体系；
- d) 阻尼比可取为 0.02。

10.2.4 对采用桩基础的桥梁，计算模型应考虑桩土相互作用，桩土的相互作用可采用等代土弹簧模拟，等代土弹簧的刚度可通过采用表征土介质弹性值的 m 参数来计算。

10.2.5 对采用沉井基础的桥梁，计算模型应考虑沉井—土相互作用，可采用“p—y”曲线法模拟土体对沉井的非线性相互作用。

10.2.6 当进行多振型反应谱法分析时，应取足够多的振型阶数，以包含所有对结构地震响应影响较大的振型，振型组合应采用 CQC 法。

10.2.7 时程分析的最终结果，当采用 3 组地震加速度时程计算时，应取各组计算结果的最大值；当采用 7 组及以上地震加速度时程计算时，可取各组结果的平均值。

10.3 抗震验算

10.3.1 在 E1 和 E2 地震作用下，桥梁的抗震验算目标应满足表 4 的要求。

- a) 在 E1 地震作用下，结构不应发生损伤，保持在弹性范围内；

- b) 在 E2 地震作用下，主缆不应发生损伤，桥塔、基础、加劲梁等重要结构受力构件局部可发生可修复的损伤。

表4 抗震验算目标

E1 地震作用	震后使用要求	立即使用
	损伤状态	结构总体反应在弹性范围，基本无损伤
E2 地震作用	震后使用要求	不需修复或经简单修复可继续使用
	损伤状态	局部可发生可修复的损伤

10.3.2 顺桥向和横桥向 E1、E2 地震作用效按 10.1.8 的规定组合后，应按 JTG D62 和 JTG D63 的规定验算桥塔和基础等的强度。钢结构抗震安全验算可参照相应的规范进行。