

DB32

江 苏 省 地 方 标 准

DB32/T 4600—2023

千米级公铁两用斜拉桥设计规范

Specifications for design of thousand-meter
scale road-cum-railway cable stayed
bridges

2023-12-01 发布

2024-01-01 实施

江苏省市场监督管理局

发 布
出 版

目 次

前言III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 总体要求 3

5 材料 4

6 设计荷载 5

7 结构计算 6

8 施工控制..... 10

9 健康监测..... 11

10 养护维修及防护 13

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏省交通运输厅提出并归口。

本文件起草单位：江苏省交通工程建设局、中铁大桥勘测设计院集团有限公司、中铁桥隧技术有限公司。

本文件主要起草人：蒋振雄、郑清刚、黄健、苑仁安、李镇、王强、夏鹏飞、张锐、李海峰、郁海琛、孙建立、沈孔健、陈斌、沈波、徐伟、尹东亚、傅战工、陆荣伟、陆勤丰、梁志雯、谭国宏、张金涛、周子明、牛传同、张皓清。

千米级公铁两用斜拉桥设计规范

1 范围

本文件规定了千米级公铁两用斜拉桥（以下简称“斜拉桥”）在材料、设计荷载、结构计算、施工控制、健康监测、养护维修及防护等方面的要求。

本文件适用于新建跨径 800 m~1 300 m 的公铁两用斜拉桥的设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 699 优质碳素结构钢
GB/T 714 桥梁用结构钢
GB/T 3077 合金结构钢
GB/T 4334 金属和合金的腐蚀 奥氏体及铁素体-奥氏体（双相）不锈钢晶间腐蚀试验方法
GB/T 8165 不锈钢复合钢板和钢带
GB/T 17101 桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝
GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求
GB/T 35156 结构用纤维增强复合材料拉索
GB 50111 铁路工程抗震设计规范（2009 年版）
GB 50982 建筑与桥梁结构监测技术规范
CJ/T 297 桥梁缆索用高密度聚乙烯护套料
CJJ 11 城市桥梁设计规范
JT/T 775 大跨度斜拉桥平行钢丝拉索
JTG B01 公路工程技术标准
JTG D60 公路桥涵设计通用规范
JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范
JTG/T 3360-02 公路桥梁抗撞设计规范
JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
JTG/T 3365-01 公路斜拉桥设计规范
Q/CR 749.1 铁路桥梁钢结构及构件保护涂装与涂料 第 1 部分：钢梁
Q/CR 757 铁路桥梁运营状态监测技术条件
TB/T 3466 铁路列车荷载图式
TB 10002 铁路桥涵设计规范
TB 10005 铁路混凝土结构耐久性设计规范
TB 10015 铁路无缝线路设计规范
TB 10089 铁路照明设计规范

- TB 10091 铁路桥梁钢结构设计规范
- TB 10092 铁路桥涵混凝土结构设计规范
- TB 10093 铁路桥涵地基和基础设计规范
- TB 10095 铁路斜拉桥设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

公铁两用斜拉桥 rail-cum-road cable-stayed bridge 同时具有公路（城市道路）和铁路交通功能的斜拉桥。

3.2

斜拉索 stay cable
承受拉力并将主梁荷载传递到索塔的索体构件。

3.3

断索工况 cable breaking condition
任意一根斜拉索退出工作时的状态。

3.4

温度自适应塔梁纵向约束体系 temperature-adapting tower-girder restraint system
在半漂浮体系基础上，利用温度变形不敏感的水平索连接主梁温度不动点与索塔横梁，约束主梁纵向位移，并自动适应结构温度变形的结构体系。

3.5

成桥恒载索力 cable force subjected to dead load as bridge completed
斜拉桥桥面系施工完成后恒载作用下的斜拉索索力。

3.6

E1地震（设计地震） E1 ground motion earthquake
50年超越概率10%，相当于地震重现期475年的地震作用。

3.7

E2地震（罕遇地震） E2 ground motion earthquake
50年超越概率2%，相当于地震重现期2475年的地震作用。

3.8

列车摇摆力 lateral sway force of train
列车运行时对钢轨顶面产生的左右摇摆力。

3.9

列车离心力 centrifugal force of train
列车运行在曲线上产生的倾向曲线外侧的水平力。

3.10

钢轨伸缩力 force due to the thermal expansion of the deck
因温度变化，引起桥梁与长钢轨纵向相对位移而产生的纵向力。

3.11

断轨力 force acting on the bridge due to the breaking of rail
因长钢轨折断，引起桥梁与长钢轨纵向相对位移而产生的纵向力。

3.12

车桥耦合振动 vehicle bridge coupling vibration

车辆在桥梁上运动时由于轨道不平顺和桥梁变形引起的车辆和桥梁的振动。

4 总体要求

4.1 一般规定

4.1.1 斜拉桥设计应遵循安全可靠、技术先进、经济适用、外形美观、保护环境的原则。

4.1.2 斜拉桥应合理选择跨径布置、横断面布置、结构体系和施工方法。

4.1.3 主梁、斜拉索、索塔和基础等主要结构应选择合适的材料、合理的结构类型和构造，满足斜拉桥结构的强度、刚度、稳定性和耐久性的要求。主体结构设计使用年限应不小于 100 年。

4.1.4 斜拉桥线路纵断面宜设为“人”字坡，变坡点宜设置在主跨跨中。主梁利用制造构形补偿恒载挠度，不设活载预拱度。

4.1.5 斜拉桥设计应考虑斜拉索可更换，更换年限应不小于 20 年。斜拉索构件应便于加工、运输、安装、检查及养护。

4.1.6 斜拉桥设计文件应明确制造和施工过程中的临时结构的安拆、调索、吊机走行、边中跨合龙等关键控制工况要求，明确结构体系转换的顺序及应采取的相应措施要求。

4.1.7 斜拉桥设计文件应明确施工期施工控制以及运营期养护维修的要求。

4.1.8 桥梁构件应具备良好的耐久性，钢结构应根据设计使用年限和使用环境选择合适的材质及涂装体系，涂装要求应符合 Q/CR 749.1 的规定。混凝土结构的耐久性设计应符合 TB 10005 的规定。

4.1.9 基础设置应避开活动断层、滑坡，宜避开挤压破碎带、石灰岩溶洞、人为坑洞等不良地质。

4.1.10 宜采用具有综合技术优势的新材料、新结构、新工艺、新装备，提升工程品质。

4.1.11 未尽事宜应符合国家和行业现行有关标准、规范的要求。

4.2 孔跨及结构设计

4.2.1 斜拉桥的孔跨布置应考虑通航、防洪要求，宜采用双塔、多塔结构型式，边跨应设置辅助墩。

4.2.2 斜拉桥宜按照恒载平衡的设计原则确定边中跨跨径比例。

4.2.3 应根据桥梁结构纵向、竖向和横向的静、动力特性，选择主梁的材料、截面形式和梁高。中跨主梁宜采用钢梁，边跨主梁可采用钢梁、钢-混凝土结合梁、混凝土梁等。

4.2.4 对于整体节段焊接钢桁梁结构，应依据主梁的制造线形，通过几何放样确定每个杆件长度及杆件之间夹角。

4.2.5 根据索塔受力和景观等要求，可采用混凝土索塔、钢索塔、钢-混凝土组合索塔或钢-混凝土混合索塔。宜采用倒 Y 形索塔结构型式或 A 形索塔结构型式，对应斜拉索空间索面布置，提高结构的抗风性能。

4.2.6 钢筋混凝土索塔塔肢水平单向尺寸宜控制在 20 m 以内。

4.2.7 对于恒载横向不对称设计的超大跨度公铁两用斜拉桥，上、下游斜拉索采用不同强度等级的材料适应偏载受力；通过钢桁梁杆件工厂制造长度的调整和施工控制措施保证桥梁的设计线形。

4.2.8 斜拉索宜采用双索面或三索面布置。

4.2.9 主梁采用钢主梁或结合梁时，斜拉索标准间距宜采用 8 m~15 m；采用混凝土梁时斜拉索标准间距宜采用 6 m~10 m；塔上斜拉索标准间距宜采用 2 m~3 m。

4.3 刚度

4.3.1 斜拉桥在列车静活载作用下主梁的竖向挠度不宜大于 $L/500$ 。

4.3.2 在列车偏载、横向摇摆力、离心力、风荷载和温度的作用下，主梁的水平变位不宜大于 $L/1200$ 。风荷载（有车）与温度荷载组合时，可按 0.75 倍的风荷载与 0.6 倍的温度荷载进行组合。

4.3.3 斜拉桥在公路车辆和列车竖向静活载作用下，梁端竖向转角应符合 TB 10002 的规定。

4.3.4 斜拉桥应开展车桥耦合振动响应评价，具体指标应符合 TB 10002 的规定。

4.4 约束体系

4.4.1 斜拉桥的约束体系可采用漂浮体系、半漂浮体系或温度自适应塔梁纵向约束体系，推荐采用温度自适应塔梁纵向约束体系。

4.4.2 地震响应控制结构设计时，桥梁纵向可设置阻尼器、横向可设置摩擦摆支座等减、隔震措施。

4.4.3 斜拉桥的竖向支座不允许出现拉力。

5 材料

5.1 混凝土

5.1.1 斜拉桥主梁、索塔预应力混凝土构件的混凝土强度等级应不低于 C50；钢筋混凝土索塔的混凝土强度等级宜不低于 C50。

5.1.2 混凝土抗压强度标准值应采用标准方法制作试件，养护至 28 d 龄期，以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度。

5.1.3 斜拉桥各构件中混凝土的强度等级、极限强度、容许应力、弹性模量和耐久性设计要求等，应符合 TB 10092 的规定。

5.2 钢材

5.2.1 斜拉桥各构件中普通钢筋和预应力钢筋类别、抗拉强度标准值、计算强度、弹性模量、容许应力和容许疲劳应力幅等，应符合 TB 10092 的规定。

5.2.2 斜拉桥所采用的钢板、型钢、高强螺栓、普通螺栓、焊缝等的技术要求、物理性能指标、耐久性设计要求，应符合 TB 10091 的规定。

5.2.3 斜拉桥所采用复合钢板的物理力学性能和工艺性能应符合 GB/T 8165 和 GB/T 714 的规定，复合钢板成品的不锈钢复层应按照 GB/T 4334 的规定进行晶间腐蚀检验，经过 180°弯曲试验后应无裂纹和晶间腐蚀现象。

5.3 斜拉索

5.3.1 斜拉索宜采用 $\phi 7$ mm 的镀锌钢丝或镀锌铝合金钢丝，其标准强度应不低于 $\phi 1770$ MPa，性能应符合 GB/T 17101 的规定。

5.3.2 在疲劳寿命 $N=2 \times 10^6$ 时成品索的疲劳应力幅应不小于 250 MPa。

5.3.3 斜拉索锚具钢材应选取高强度合金结构钢，其性能应符合 GB/T 3077 的规定。

5.3.4 斜拉索外防护材料可采用高密度聚乙烯护套料，材料性能应满足 CJ/T 297 的要求。

5.4 结构体系水平索

水平索宜采用碳纤维增强复合材料（CFRP）平行丝成品索，筋材宜采用 $\phi 5$ mm~ $\phi 7$ mm，弹性模量

不宜低于 165 GPa，轴向线膨胀系数在 $0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \sim 0.75 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以内，其他性能应符合 GB/T 35156 的规定。

6 设计荷载

6.1 一般规定

斜拉桥设计荷载计算和组合，除本节有明确规定外，其余应符合 TB 10002、TB 10095、JTG B01、JTG D60、JTG/T 3365-01 或 CJJ 11 的规定。

6.2 荷载种类

6.2.1 斜拉索的张拉力和调整力应作为主力进行计算，并参与荷载组合。

6.2.2 斜拉桥同时承受铁路和公路活载，铁路活载按 TB 10002 的规定计算。公路活载应按下列规定计算：

- a) 跨度大于列车活载加载长度的双线斜拉桥，公路（城市道路）活载按 JTG B01、CJJ 11 规定计算的全部活载的 90% 计算；
- b) 跨度大于列车活载加载长度的四线斜拉桥，公路（城市道路）活载按 JTG B01、CJJ 11 规定计算的全部活载的 85% 计算；
- c) 对仅承受公路（城市道路）活载的构件，应按公路（城市道路）的全部活载计算。

6.2.3 计算汽车冲击力时，结构的基频应取主梁竖向弯曲基频。

6.2.4 斜拉桥的列车制动力或牵引力应按 TB 10002 的规定计算。汽车荷载的制动力应按 JTG D60 的规定计算，当计算得到的汽车荷载制动力大于 900 kN 时，应按 900 kN 取用。列车制动力、汽车制动力叠加时，汽车制动力折减系数应按 6.2.2 取值。

6.2.5 斜拉桥的钢轨伸缩力和断轨力应按 TB 10015 的规定计算，并应符合 TB 10002 的规定。

6.2.6 斜拉桥进行钢构件疲劳检算时，应符合铁路相关规范规定，对仅承受公路荷载的构件按公路规定检算。

6.2.7 作用在桥梁结构或构件上的风荷载，需考虑静力风荷载和动力风荷载。

6.2.8 斜拉桥的风荷载可按 JTG/T 3360-01 的规定计算，同时需考虑脉动风的影响。应开展抗风专题研究确定风荷载参数取值，验证桥梁的抗风稳定性。

6.2.9 斜拉桥的温度荷载按 TB 10002 的规定计算，应根据斜拉桥的结构特点，计算桥梁的构件温差、体系温差和日照温差。

6.2.10 桥梁的构件温差、体系温差和日照温差宜通过实测确定，当无实测资料时，可按下列规定取值：

- a) 体系温差应按 TB 10002 的规定执行；
- b) 斜拉索与混凝土主梁、斜拉索与混凝土索塔间的温差可采用 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ ；
- c) 斜拉索与钢主梁、斜拉索与钢索塔间的温差可采用 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

6.2.11 斜拉桥采用 E1 地震作用（设计地震）和 E2 地震作用（罕遇地震）两级抗震设防，E1 和 E2 的地震动参数应依据地震安全性评价专题成果确定。

6.2.12 墩台考虑船舶或汽车撞击作用时，撞击力应符合 TB 10002 和 JTG/T 3360-02 的规定。特殊防撞要求的桥梁可开展相关专题论证确定撞击力。

6.2.13 墩台的水流力应符合 TB 10002 的规定，海洋环境条件下墩台设计需考虑波浪力。特殊波流环境下的桥梁可开展相关专题论证确定墩台波流。

6.2.14 支座摩阻力对结构产生不利影响时，需考虑摩阻力的作用。支座摩阻力可按式（1）计算：

$$F = \mu W \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

F ——支座摩阻力，单位为千牛（kN）；

μ ——支座活动面的摩擦系数，宜采用实测数据，无实测数据时可按 TB 10002 取用；

W ——上部结构恒载产生的活动支座上的竖向力，单位为千牛（kN）。

6.2.15 斜拉桥应考虑基础变位对结构的影响。

6.3 荷载组合

6.3.1 斜拉桥结构设计按 TB 10002 和 JTG D60 规定的荷载，就其可能的最不利组合进行计算。

6.3.2 斜拉桥设计计算时，应仅考虑主力与一个方向（纵向或横向）的附加力进行组合。组合内容见表 1。

表 1 主力+附加力组合

序号	内容
组合 1	恒载+活载+沉降+制动力+纵向运营风+温度组合
组合 2	恒载+活载+沉降+制动力+横向运营风+温度组合
组合 3	恒载+支座沉降+纵向极限风+温度组合
组合 4	恒载+支座沉降+横向极限风+温度组合
组合 5	恒载+地震
注：组合 5 中，对于地震多发地区桥梁宜考虑叠加单线列车运营活载效应。	

6.3.3 斜拉桥设计应根据不同的荷载组合，将材料基本容许应力和地基容许承载力乘以相应的组合提高系数。

6.3.4 风荷载与温度荷载组合时，可根据桥址风、温度实测参数，开展风-温联合概率专题论证，进行相应折减。

7 结构计算

7.1 一般规定

7.1.1 斜拉桥总体静力分析、局部静力分析、稳定分析和动力分析宜采用空间结构计算模型，同时考虑斜拉索的几何非线性影响，考虑索塔的二阶效应和主梁的大变形效应。

7.1.2 索塔二阶效应引起的偏心增大系数可按式（2）计算：

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha w}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

η ——偏心增大系数；

α ——初始偏心对偏心增大系数的影响值，按 TB 10092 的规定计算；

w ——索塔检算部位的在最不利轴力作用下的屈曲稳定系数。

7.1.3 在斜拉桥结构计算中，应确保任意一根斜拉索退出工作后，仍能保证结构安全及公路和单线铁路通行安全。

7.1.4 斜拉桥应考虑温度荷载、活载、制动力、风荷载、地震等荷载引起的梁端位移。不同荷载进行组合

时，可开展相应专题确定荷载组合系数。

7.1.5 斜拉桥动力计算应进行抗风、抗震及车桥耦合等分析，计算模型应反映桥梁结构的刚度和质量的实际分布及边界条件。

7.1.6 斜拉桥中的混凝土构件应考虑收缩、徐变的影响。

7.2 静力计算

7.2.1 斜拉桥强度计算应符合下列规定。

- a) 各构件的强度计算应符合 TB 10091、TB 10092 及 TB 10093 的规定。
- b) 强度计算时列车荷载的加载图式及加载长度应符合 TB /T 3466、TB 10002 的规定。结构动力系数的取值按 TB 10002 的规定计算。汽车荷载加载及冲击系数应符合 JTG D60 的规定。
- c) 斜拉索应按索单元进行计算。
- d) 主梁、索塔等结构采用组合结构时，应考虑混凝土材料的时变效应、初始应力对结构内力分配的影响。
- e) 混凝土结构的收缩、徐变计算可根据 JTG 3362 的规定计算。

7.2.2 斜拉桥的构件疲劳计算应符合下列规定。

- a) 构件的疲劳计算应按照 TB 10002、TB 10091 及 TB 10092 的规定执行。对以承受公路（城市道路）活载为主的构件，其疲劳计算应按照 JTG 3362 及 JTG D64 的规定执行。
- b) 疲劳检算时，铁路活载应采用运营活载。钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土构件疲劳计算时，列车运营动力系数取 1.15。钢结构构件和斜拉索疲劳计算时，列车运营动力系数按 TB 10091 的规定计算。
- c) 斜拉索进行疲劳计算时，疲劳加载可采用与桥梁钢结构疲劳计算相同的加载规定。

7.2.3 斜拉桥稳定计算应符合下列规定。

- a) 斜拉桥应根据不同的结构形式和工况状态，计算结构的整体稳定和局部稳定，并应满足 TB 10002、TB 10091、TB 10092 及 TB 10093 的相关要求。
- b) 斜拉桥稳定计算应计入斜拉索垂度的影响；稳定计算应涵盖典型的施工状态以及运营期的主要荷载组合工况。
- c) 斜拉桥结构整体稳定计算应满足：第一类稳定即弹性屈曲的结构稳定安全系数应不小于 4；第二类稳定即计入几何非线性和材料非线性影响的弹塑性强度稳定的安全系数，混在主力作用下混凝土桥塔不宜小于 2.5，钢桥塔不宜小于 1.7；在主力+附加力作用下混凝土桥塔不宜小于 2.0，钢桥塔不宜小于 1.4。

7.2.4 基础静力计算应按 TB 10093 的规定执行。

7.3 斜拉索、水平索及锚具的安全系数

7.3.1 运营状态主力组合作用下斜拉索的容许应力按式（3）计算；主力和附加力组合作用下斜拉索的容许应力按式（4）计算。

$$[\sigma_z] \leq f_{pk}/2.5 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$[\sigma_{zf}] \leq f_{pk}/2.0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$[\sigma_z]$ ——主力组合作用下斜拉索的容许应力，单位为兆帕（MPa）；

$[\sigma_{zf}]$ ——主力和附加力组合作用下斜拉索的容许应力，单位为兆帕（MPa）；

f_{pk} ——斜拉索的标准抗拉强度，单位为兆帕（MPa）。

7.3.2 施工过程中在结构自重、临时荷载及风荷载等共同作用下斜拉索的容许应力按式（5）计算。

$$[\sigma_{az}] \leq f_{pk}/2.0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$[\sigma_{az}]$ ——施工期斜拉索的容许应力，单位为兆帕（MPa）；

f_{pk} ——斜拉索的标准抗拉强度，单位为兆帕（MPa）。

7.3.3 断索工况采用最不利荷载组合时，斜拉桥预应力构件的强度安全系数可取 1.6，钢结构及钢筋混凝土结构可按容许应力法检算，容许应力提高系数可采用 1.5。

7.3.4 水平索强度检算时主力组合安全系数应不小于 2.5，主力+附加力组合安全系数应不小于 2.0。

7.3.5 斜拉索和水平索设计检算时最大疲劳容许应力幅采用 190MPa。

7.3.6 锚具的安全系数应不小于索体的安全系数。

7.4 动力计算

7.4.1 斜拉桥抗风计算应满足下列规定。

- a) 抗风设计应使结构满足相关规范规定的强度、刚度和稳定性等要求。
- b) 对于断面复杂的墩、塔、梁可通过风洞试验方法确定体形系数。
- c) 风荷载与活载组合时，未采用风屏障措施的桥面平均风速不宜超过 25 m/s。
- d) 施工期应注意临时设备、临时荷载对抗风性能的影响。
- e) 运营期应注意护栏、电缆管箱、检查车轨道等附属设施对结构抗风性能的影响，必要时主梁、索塔应采取抑振措施。
- f) 斜拉索应采取必要的抑振措施。
- g) 在有车设计风速范围内竖弯涡振振幅应满足式（6）的要求。

$$h_v < [h_v] \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

h_v ——竖向涡振振幅，单位为米（m）。

$[h_v]$ ——竖向涡振的振幅容许值， $[h_v] = \frac{0.01}{f_v^2 + \gamma_n(v/L)^2}$ ；

f_v ——竖向振动频率，单位为赫兹（Hz）。

γ_n ——涡振振型系数，一阶对称振型取为 0.5；一阶反对称振型取为 1.0；二阶对称振型取为 2.25；二阶反对称振型取为 4.0。

v ——列车运行速度，单位为米每秒（m/s）。

L ——主跨长度，单位为米（m）。

- h) 在有车设计风速范围内扭转涡振振幅应满足式（7）的要求：

$$\theta_t < [\theta_t] \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

θ_t ——扭转涡振振幅(°)；

$[\theta_t]$ ——扭转涡振的振幅容许值， $[\theta_t] = \frac{1.14}{f_t^2 + \gamma_n(v/L)^2} \frac{1}{B_t}$ ；

f_t ——扭转振动频率，单位为赫兹（Hz）；

B_t ——桥面最外侧轨道间距，单位为米（m）。

7.4.2 斜拉桥抗震计算应满足下列规定。

- a) 地震响应分析时，结构抗震性能目标应符合表 2 的规定。有特殊要求时应进行专题研究。

表 2 斜拉桥抗震设防标准及防护目标

抗震设防水准	构件		设防目标		
	分类	名称	损伤状态	受力状态	功能目标
E1 地震作用 (设计地震) 50 年超越概率 10%	重要构件	斜拉索、索塔柱、主梁、基础	无损伤	弹性工作状态	不影响列车通行
	次重要构件	桥墩、索塔横梁	无损伤	弹性工作状态	
	连接构件	支座	无损伤	弹性工作状态	
E2 地震作用 (罕遇地震) 50 年超越概率 2%	重要构件	斜拉索	无损伤	弹性工作状态	经修复可继续使用
		索塔柱、主梁	轻微损伤	基本弹性工作状态	
		基础	轻微损伤	基本弹性工作状态	
	次重要构件	桥墩、索塔横梁	可修复性损伤	弹塑性状态	
	连接构件	支座	允许发生损伤	允许破坏	

b) 检算抗震性能时，E1 地震作用下的墩、基础结构物及构件强度应符合表 2 的规定；E2 地震作用下，索塔和桩基础的截面弯矩应小于截面的等效屈服弯矩，需验算桥墩的抗剪强度、塑性铰区变形和支座损伤变形状态等。

c) 抗震措施应符合 GB 50111 相关规定。E1 地震的结构重要性系数取 1.0。

7.4.3 斜拉桥车桥振动响应计算可采用车桥耦合动力仿真分析，应注意环境风的影响，车辆和桥梁的动力响应指标可参照 TB 10002 的相关规定确定。

7.5 施工阶段计算

7.5.1 斜拉桥施工阶段应计算各控制工况结构的应力及变形，且应注意结构的几何非线性效应的影响。

7.5.2 施工阶段构件检算应按照 TB 10092、TB 10091 和 TB 10093 的规定执行。

7.5.3 斜拉桥施工过程中下列阶段应进行体系转换计算：

- 施工过程中的临时支座（墩）安装和拆除；
- 悬臂施工塔梁临时固结解除；
- 合龙临时固定设施的安装和拆除；
- 主梁采用满堂支架施工完成后张拉斜拉索；
- 主梁边跨合龙、中跨合龙。

7.5.4 斜拉桥悬臂施工过程应进行下列不平衡荷载计算：

- 主梁中跨、边跨侧悬臂不对称产生的不平衡重力；
- 主梁悬臂施工中跨、边跨侧不相等的临时施工荷载；
- 主梁因施工工序产生的不平衡荷载；
- 两侧起重机移动不同步产生的不平衡荷载，按一个起重机占位距离差进行计算；
- 其他需要考虑不平衡荷载的工况。

7.5.5 施工阶段应注意起重机走行及起吊对桥梁结构构件的影响。

7.5.6 斜拉桥施工阶段抗风计算满足下列要求：

- 应根据地表以上结构的施工工期确定施工阶段的设计风速，并进行最大双悬臂状态和最大单悬臂状态的风荷载受力分析；
- 在风荷载作用时，桥梁结构在各施工阶段均应满足相关规范的要求；
- 双悬臂施工时，应检算两侧悬臂结构承受对称横向风荷载和不对称横向风荷载时的桥梁结构及

构件的强度，不对称横向风荷载加载时主梁风荷载一端宜取另一端的 0.5 倍；

- d) 对裸塔、最大双悬臂和最大单悬臂状态均应进行抗风稳定分析和风洞试验，并考虑塔吊等临时设备的影响；
- e) 主梁施工到最大双悬臂和最大单悬臂状态时，应考虑受横桥向风力作用索塔两侧主梁底面产生不同的升力对结构抗风稳定性的影响。

7.5.7 沉井下沉应满足下列要求。

- a) 沉井取土下沉时，下沉系数应按公式 (8) 计算：

$$k = \frac{G_k - F_k}{T_f + R} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

- G_k ——沉井自重标准值，单位为千牛 (kN)；
- F_k ——下沉过程中地下水浮力标准值，单位为千牛 (kN)；
- T_f ——沉井井壁与土的总摩阻力标准值，单位为千牛 (kN)；
- R ——与土接触且支撑沉井重量的刃角、隔墙下地基土极限承载力之和，单位为千牛 (kN)，按照式 (8) 计算；
- k ——下沉系数，一般取值范围宜在 1.05~1.25，特殊复杂情况适当调整取值。

- b) 当沉井接高时，下沉系数宜控制在 0.8~0.9。

- c) 沉井刃角、隔墙下地基土极限承载力标准值，可按式 (9) 计算：

$$R = A p_u \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$p_u = 0.5 \gamma b N_\gamma + c N_c + q N_q \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

- p_u ——太沙基地基极限承载力，单位为千帕 (kPa)；
- c ——土层粘聚力，单位为千帕 (kPa)；
- q ——基础两侧超载，单位为千帕 (kPa)；
- γ ——地基土重度，单位为千牛每立方米 (kN/m³)；
- b ——与土接触且支撑沉井重量的井壁或隔墙宽度，单位为米 (m)；
- A ——与土接触且支撑沉井重量的沉井刃角、隔墙面积之和，单位为平方米 (m²)；
- N_γ 、 N_c 、 N_q ——太沙基地基承载力系数，取决于土的内摩擦角 ϕ 。

- d) 井壁与土的总摩阻力标准值可按式 (11) 计算：

$$T_f = \sum U_i f_{ki} H_i \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- T_f ——侧壁与土的总摩阻力标准值，单位为千牛 (kN)；
- U_i ——第 i 层土中侧壁外围周长，单位为米 (m)；
- f_{ki} ——第 i 层土的单位摩阻力标准值，单位为千帕 (kPa)，应根据工程地质条件，通过试验或对比工程的经验资料确定，当无试验或可靠资料时，可按照 TB 10093 取值；
- H_i ——第 i 层土的厚度，单位为米 (m)。

8 施工控制

8.1 一般规定

8.1.1 应进行施工监测与施工控制。施工控制应以设计文件明确的内容为基础，根据结构特点和要求，做好施工过程控制，满足成桥线形、内力的设计要求。

8.1.2 应对上部结构、下部结构明确施工控制方法的相关要求，施工控制方法需根据结构特点、施工方案和施工环境等因素选择确定。

8.1.3 应对主梁、斜拉索、索塔、基础（沉井）等构件提出监测、监控相关要求，并进行环境温度场、结构温度场、风场测试，掌握温度及风变化规律，有效修正温度的影响。

8.1.4 应明确钢结构、斜拉索等构件的设计基准温度，构件下料时应按考虑环境温度与基准温度不同对虚拟无应力构形的影响量。应明确钢结构线形测点在工厂内制作，并进行保护的要求。

8.1.5 施工过程中应根据计算结果对应力和线形两个指标实行双控，施工过程中索力、应力和线形的实际值与理论值的偏差超过允许偏差时，应进行调整。

8.1.6 对沉井接高、浮运、着床、下沉、清基和封底各个阶段进行控制。应尽量减少沉井着床时的初始偏差，平面偏差及垂直度的控制精度宜严于终沉标准。沉井下沉过程中，应进行井孔取土量的控制，不应井孔内超取土，不应水域沉井排水下沉。

8.1.7 应明确施工临时荷载的最大限值及相应的作用点或作用范围。

8.1.8 用临时结构调整索塔内力时，应明确临时结构设置的位置及施加、拆除时机，并预留连接条件。

8.2 控制精度

8.2.1 斜拉桥设计应明确主梁、索塔的成桥线形以及钢结构主梁、钢结构索塔、钢结构沉井的制造线形和精度要求，主梁、索塔的成桥线形宜考虑道砟容重离散性等影响。

8.2.2 桥梁成桥时的线形控制标准应符合设计规定。设计无规定时应满足下列精度要求。

- a) 主梁高程应控制在 $L/8\ 000$ 以内，且不大于 150 mm ， L 为跨径。主梁相邻节段高程误差应不大于节段长度的 $\pm 0.1\%$ 。
- b) 索塔轴线平面误差应控制在 $H/5\ 000$ 以内，且不大于 30 mm ， H 为承台以上塔高。
- c) 沉井下沉至设计高程时，底面中心（纵、横向）偏差不大于井高的 $1/200$ ，最大倾斜度（纵、横向）不应大于井高的 $1/150$ ，平面扭转角偏差不应大于 1° 。

8.2.3 斜拉索成桥索力与理论计算索力差值控制标准宜为 $\pm 5\%$ 。

8.2.4 宜对钢主梁节段进行称重，称重精度不宜大于 5% 。

8.2.5 每种规格型号的斜拉索至少有一根应测定其弹性模量，弹性模量测量应在预张拉后进行。测量方法满足 JT/T 775 的规定。

8.2.6 每一根斜拉索成品索出厂前需预张拉，预拉力为标准破断荷载的 0.55 倍，预张拉后冷铸锚中锚板的回缩值不应大于 6 mm ；吊索出厂前按照 $1.2\sim 1.4$ 倍的设计索力进行预张拉检验。

9 健康监测

9.1 一般规定

9.1.1 健康监测系统功能应满足结构安全预警评估、桥梁日常运营养护管理、应急管理需要，并综合考虑结构设计和建造的相关要求。

9.1.2 应采用稳定可靠、技术成熟、性能先进、表贴或非接触式监测设备，埋置式设备寿命不宜少于 20 年，外置式设备寿命不宜少于 8 年。影响铁路行车安全的监测内容，非天窗时段应具备 100% 的安全可用保障。

9.1.3 监测方案应满足公路（城市道路）、铁路运营工况条件、监测频次和精度要求，公路部分应符合 GB 50982 和 JT/T 1037 的规定，铁路部分应符合 Q/CR 757 和 Q/CR 9576 的规定。

9.1.4 铁路桥面的监测设备安装及防护应符合铁路建筑限界要求、轨旁设备安装及管理要求。

9.1.5 健康监测系统应与桥梁主体结构设计同步进行，与桥梁施工同步实施，提前规划好监控中心用地、

桥区供电、通信路由、预埋件安装等工程界面。

9.2 监测方案

9.2.1 应重点对桥址风场环境，主梁的位移、振动加速度、梁端转角、梁端位移，斜拉索的振动加速度、位移，桥墩基础范围河床冲刷等进行监测。

9.2.2 测点布设应结合结构受力特点、理论分析结果，并综合考虑监测设备的安装、测读、维护、更换以及线缆敷设。测点位置应考虑对主要钢结构疲劳性能的影响。

9.2.3 公路和铁路结构的监测测点应统筹考虑，统一布置于同一关键截面。

9.2.4 涉及铁路行车安全的测点数量应一对一冗余，满足预警、监测参数分析和结构状态评估需求。

9.2.5 主梁振动测点应结合桥梁结构模态分析，布设在结构主要振型的关键位置，斜拉索振动测点应结合拉索的长度和阻尼器的布设方式，选择易发生高频振动的中长索布设。

9.2.6 主梁线形宜结合轨道 CPIII点位置进行布设，测点间距宜小于 60 m，上、下游对称布置。

注：CPIII为基桩控制网。

9.2.7 钢轨伸缩调节器测点应根据设备类别和出厂参数进行布设，可考虑与梁端支座位移及梁端转角测点共用。

9.2.8 监测设备的选取应综合考虑量程、测量精度、分辨率、灵敏度、动态频响特性、抗干扰能力、使用年限等性能参数。工作量程宜控制在满量程的 30%~70%，分辨率宜控制在监测值的 1/15~1/8。

9.2.9 应合理布设采集站，相邻采集站的间距不宜大于 500 m。

9.3 健康监测系统设计

9.3.1 系统应设计合理、稳定可靠、操作方便、便于维护及扩展升级。

9.3.2 应采用先进的硬件设备、先进的网络平台、先进的开发技术，保证系统具有一定的超前性。

9.3.3 应按照环境作用、汽车荷载、列车荷载、特殊荷载的特点，设计低、中、高、触发四类采集模式，低频采集不低于 1 次/10 min，中频采集不低于 1 Hz，高频采集不低于 50 Hz，触发采集不得漏采。

9.3.4 应采用专用网络进行数据传输，通信带宽应不小于 100 Mbit/s。

9.3.5 结构响应类监测数据应永久保存，热数据存储时间应不少于 1 年，不同类别的数据应保持时间同步性，满足数据融合、关联分析的需要。

9.3.6 数据库设计应遵循可靠性、先进性和可扩展性原则，应采用分布式数据库架构对信息进行分类存储管理，系统访问速率不因系统使用时间的增长而降低。

9.3.7 应实行公铁分离、管理分级、分权限的访问控制，与其他信息系统之间应采用防火墙和虚拟专网等技术实施隔离和保护，信息安全应符合 GB/T 22239 规定的二级安全通用要求。

9.4 预警体系

9.4.1 应对原始监测数据进行数据质量评估，并采用预处理方法消除异常数据，减少系统误报警。

9.4.2 应对结构各类监测参数建立明确的预警指标，并对其监测结果按照蓝色、黄色和红色三级预警。

9.4.3 预警阈值应根据设计值、竣工试验值、规范容许值以及历史监测结果等多种因素综合确定，预警阈值可按照表 3 进行选取。

表 3 预警阈值设置方法

预警等级	阈值	影响
蓝色预警 (通常值)	按实测数据统计值(以年度为周期),具有 97.5% 保证率的预警指标分位值;系统建设初期,不设置	异于日常数据正常水平,可能对结构使用性能产生不良影响

表 3 预警阈值设置方法（续）

预警等级	阈值	影响
黄色预警 (警戒值)	按红色预警值的 75% 或动静载试验和联调联试结果进行设置	接近设计荷载组合响应的最高水平，桥梁非主要受力构件可能出现损伤，影响结构主要受力构件耐久性
红色预警 (安全限值)	设计荷载组合最不利工况的响应值，或相关规范与规程规定的限值，或行车安全限值，或设计容许值	桥梁主要受力构件可能出现损伤，可能影响桥梁结构安全、行车安全

10 养护维修及防护

10.1 一般规定

- 10.1.1 斜拉桥的养护维修设施及防护设施应进行专门设计，并与主体结构相协调。提出运营期间结构养护维修的要点。
- 10.1.2 斜拉桥主要结构和部件在运营期内，应满足维护人员可到达、可检查、可维修的要求。
- 10.1.3 斜拉桥养护需求设置的结构或连接件，应设定养护工况，考虑养护设施及养护人员的荷载以及养护中结构重力的变化，进行养护工况验算，提出维修过程中的最大限制荷载。
- 10.1.4 应注意斜拉桥结构与部件养护或更换作业的工作空间。

10.2 养护维修设施

- 10.2.1 索塔内应设置楼梯、作业平台和升降梯，并配备照明及防火设备。
- 10.2.2 钢结构主梁应设置检修通道和检查车，方便主梁纵横向检查。
- 10.2.3 桥面检修走道和箱梁内宜设置电源和照明。桥梁养护照明应符合 TB 10089 的相关规定。
- 10.2.4 在封闭的钢梁或钢塔的箱室内部，应根据需要设置除湿系统。
- 10.2.5 索塔上应预留用于斜拉索检修、更换相应设施的预埋构件。
- 10.2.6 应设置防雷系统、导航灯标、航空障碍标志灯的检修通道和工作平台。
- 10.2.7 应设置支座、伸缩缝、阻尼器等可更换部件的检修通道及工作平台。
- 10.2.8 应在梁底和墩顶预留临时起顶条件，满足支座更换的需要。
- 10.2.9 检修通道及工作平台应设置安全护栏。

10.3 防护设施

- 10.3.1 索塔、桥墩等可能受到汽车或船舶撞击时宜设置防护设施。
- 10.3.2 通行危化品车辆较多的斜拉桥宜在斜拉索下端增设防火措施。
- 10.3.3 公铁合建桥梁在公铁交通分离处的防护应符合 TB 10002 的相关规定。
- 10.3.4 公路、铁路同层时，应设置防眩设施和防抛设施，并预留异物侵限、防落物报警设施的安装条件。
- 10.3.5 双层桥面结构斜拉桥，上层桥面排水应引至铁路范围以外。上层桥面的伸缩装置应有防漏防落隔离措施。
- 10.3.6 根据行车要求及风环境条件，在桥面设置风屏障。