

柔性悬索桥设计细则

2024 - 08 - 14 发布

2024 - 11 - 14 实施

目 次

前言 III

引言 V

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 总则 2

5 材料 3

 5.1 一般要求 3

 5.2 钢丝绳 3

 5.3 结构用钢材 3

 5.4 焊接材料 3

 5.5 热铸锚头铸体材料 3

6 作用与作用效应组合 3

 6.1 一般规定 4

 6.2 作用分类及代表值 4

 6.3 作用效应组合 5

7 总体设计 6

 7.1 一般规定 6

 7.2 结构体系与形式 6

 7.3 计算理论及原则 6

 7.4 计算内容 6

 7.5 容许变形 7

8 索塔 7

 8.1 一般规定 7

 8.2 结构形式 7

 8.3 结构计算 8

 8.4 构造要求 8

9 锚碇 8

 9.1 一般规定 8

 9.2 结构形式 8

 9.3 结构计算 9

 9.4 构造要求 9

10 悬吊系统 10

 10.1 主索 10

 10.2 吊杆、吊索 12

10.3 索夹 14

10.4 索鞍 17

11 加劲梁 19

11.1 一般规定 19

11.2 结构形式 20

11.3 结构计算 20

11.4 构造要求 21

12 抗风索体系 22

12.1 一般规定 22

12.2 结构形式 22

12.3 结构计算 23

12.4 构造要求 23

13 其他结构 25

13.1 桥面系(桥面铺装、护轮带和栏杆) 25

13.2 支座及伸缩缝 26

13.3 结构防护 26

13.4 索结构防护 26

13.5 混凝土防护 26

14 养护 26

14.1 缆索系统 26

14.2 索夹及吊杆、吊索锚固系统 27

14.3 锚碇及锚碇室 27

14.4 索塔 27

14.6 交通运营管理 28

附录 A (资料性) 实桥实例——人马吊桥 29

A.1 工程概况 29

A.2 主要材料 29

A.3 设计要点 29

附录 B (资料性) 实桥实例——汽车吊桥 50

B.1 工程概况 50

B.2 主要材料 50

B.3 设计要点 50

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。

本文件由云南省交通运输厅提出。

本文件由云南省交通运输标准化技术委员会（YNTC13）归口。

本文件起草单位：云南省公路科学技术研究院、云南省交通规划设计研究院有限公司、怒江公路局。

本文件主要起草人：余晓江、余健、李韬文、王如刚、李东、房锐、赵剑、白洪涛、刘斌、谢海明、喻群、高兆光、张庆生、蒋毅涛、冯昕、杨会刚、苏家强、姜男、肖西、李懿、李太峰、李洪春。

引 言

2011年，党中央、国务院为加快改善西部贫困山区、边疆地区农村交通条件，启动了“溜索改桥”工程。此工程旨在将贫困山区和边疆地区人民传统的、危险性很大的过江方式——溜索改建为安全、可靠的过江桥梁，彻底改变两岸居民“日常出行不便，经济发展无路”的现状，为全面、快速地推进西部贫困山区、边疆地区的经济发展和提高人民生活水平有着极其重要的作用和地位。

国务院扶贫办和交通运输部于2014年—2015年在全国部署实施的“溜索改桥”工程中，位于贫困山区和边疆地区的30多座桥采用了柔性悬索桥，在缩短建设工期的同时合理的控制了投资规模，为实现党中央、国务院制定的脱贫攻坚方针发挥了重要的作用。

通过制定本文件，规范柔性悬索桥的设计与建设，对于加快推进“溜索改桥”的设计与建设，保障桥梁使用的安全性、可靠性和耐久性，全面、快速地推进我省贫困地区的经济发展、助力乡村振兴具有重要作用。

柔性悬索桥设计细则

1 范围

本文件规定了柔性悬索桥的材料、作用与作用效应组合、总体设计、索塔、锚碇、悬吊系统、加劲梁、抗风缆索体系、附属结构和养护等技术要求，并分别提供了人马吊桥及汽车吊桥的工程实例。

本文件适用于通行荷载受限的地锚式悬索桥设计。

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 7659 焊接结构用铸钢件
- GB 8918 重要用途钢丝绳
- 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 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头螺母
- 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 9945 造船球扁钢
- GB/T 11352 一般工程用铸造碳钢件
- GB/T 17101 桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝
- GB/T 25823 单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线
- GB/T 25835 缆索用环氧涂层钢丝
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG 3363 公路桥涵地基与基础设计规范
- JTG 5120 公路桥涵养护规范
- JTG B01 公路工程技术标准
- JTG B02 公路工程抗震规范
- 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 D81 公路交通安全设施设计规范
JTG/T D65-05 公路悬索桥设计规范
JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范
JTG/T 5122 公路缆索结构体系桥梁养护技术规范
YB/T 5295 密封钢丝绳

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

柔性悬索桥 flexible suspension bridge
加劲梁在竖向有一定量S形变形的地锚式悬索桥。

3.2

汽车吊桥 flexible suspension bridge for transit of automobile
通行荷载为单辆汽车的柔性悬索桥。

3.3

人马吊桥 flexible suspension bridge for transit of pedestrian and livestock
只能通行一定数量人和牲畜的柔性悬索桥。

3.4

主索 main cable
以索塔及支墩为支承、两端锚固于锚碇，并通过吊杆或吊索悬挂加劲梁的缆索，为主要的承力结构。

3.5

吊杆、吊索 hanger
连接主索与加劲梁的构件。

3.6

悬吊系统 suspension system
由主索、吊杆或吊索、索夹、索鞍等构件组成，为柔性悬索桥桥面提供直接支撑的结构。

3.7

抗风索体系 wind cable system
抵抗风荷载作用对柔性悬索桥影响的结构构造，主要包括抗风主索、抗风拉索和抗风锚碇。

4 总则

4.1 设计时应遵循安全、耐久、适用、环保、经济和兼顾美观的原则。

4.2 本文件采用极限状态设计方法，按分项系数表达式进行设计，给出的设计要求和参数，仅适用于通行荷载受限（以人和牲畜通行为主，或者允许单辆汽车通行）、设计速度小于 20 km/h、跨径在 200 m 以下的地锚式悬索桥设计。抗震设防类别按 C 类。

4.3 主体承力结构（主索、索塔、锚碇）设计使用年限不低于 50 年；可更换部件（吊杆、吊索、加劲梁、抗风缆和拉索）设计使用年限不低于 20 年；其他可更换部件（栏杆、伸缩装置及支座等）设计使用年限不低于 15 年。

5 材料

5.1 一般要求

5.1.1 用于柔性悬索桥各部分构件的混凝土，各项指标执行 JTG 3362 的规定。

5.1.2 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筋，其各项指标应执行 JTG 3362 的规定。

5.2 钢丝绳

5.2.1 主索和吊索宜采用热镀锌或环氧涂层的钢芯钢丝绳。

5.2.2 不同类型的钢丝绳应满足下列要求：

a) 热镀锌钢芯钢丝绳：

- 1) 热镀锌钢丝应符合 GB/T 17101 的要求；
- 2) 密封钢丝绳应符合 YB/T 5295 的要求；
- 3) 重要部位的钢丝绳应执行 GB 8918 的要求。

b) 环氧涂层钢芯钢丝绳：

- 1) 单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线应符合 GB/T 25823 的要求；
- 2) 缆索用环氧涂层钢丝应符合 GB/T 25835 的要求。

5.3 结构用钢材

5.3.1 加劲梁宜采用适用于桥梁结构的碳素结构钢，其技术条件应符合 GB/T 700 的规定，也可采用适用于桥梁结构的低合金钢，其技术条件应符合 GB/T 1591 的规定。

5.3.2 索鞍、索夹本体材料宜采用铸钢，其技术条件应符合 GB/T 11352 的规定；结构中包含有焊接部位的铸钢件，铸钢材料应符合 GB/T 7659 的规定。

5.3.3 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。

5.3.4 钢结构高强度螺栓连接副，其技术条件应符合 GB/T 1231 的规定，其中：

- a) 大六角头螺栓应符合 GB/T 1228 的规定；
- b) 六角头螺母应符合 GB/T 1229 的规定；
- c) 垫圈应符合 GB/T 1230 的规定。

5.3.5 锚头锚杯、销接式锚头耳板及销轴等宜采用优质碳素结构钢制造，其技术条件应符合 GB/T 699 的规定，也可采用合金钢，其技术条件应符合 GB/T 3077 的规定。

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

5.3.7 球扁钢的技术条件应符合 GB/T 9945 的规定。

5.3.8 吊杆采用圆钢，其技术条件应符合 GB/T 700 的规定。

5.4 焊接材料

焊接材料应与主体钢材技术条件相适应，应在完成焊接工艺评定后确定。

5.5 热铸锚头铸体材料

热铸锚头铸体材料选用低熔点锌铜合金，其中锌含量应符合 GB/T 470 的规定，铜含量应符合 GB/T 467 的规定。

6 作用与作用效应组合

6.1 一般规定

- 6.1.1 作用与作用效应组合计算，除本章有明确规定外，应符合 JTG D60 的要求。
- 6.1.2 结构重要性系数的取值为 1.0。
- 6.1.3 对钢结构无特殊要求的情况下可不进行抗疲劳设计。

6.2 作用分类及代表值

6.2.1 永久作用

对永久作用的计算执行JTG D60的规定：

- a) 基础变位作用包括索塔竖向变位、锚碇水平及竖向变位；
- b) 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。

6.2.2 汽车荷载

对于通行汽车的汽车吊桥，设计荷载分为单辆20 t汽车和单辆15 t农用车两个荷载等级。荷载图式如图1所示。



图 1 20 t 汽车、15 t 农用车荷载图示（尺寸单位：m；荷载单位：kN）

在整体和局部构件计算时，均应计入汽车荷载冲击力，冲击系数按式（1）计算：

$$\mu = \frac{50}{70+l} \dots\dots\dots (1)$$

式（1）中：

l——计算跨径(m)。

6.2.3 人马荷载

人马吊桥的设计荷载为人马总重4 t（20个人，每人以100 kg计和5匹马，每匹马以400 kg计）连续分布在6 m长范围内作用于桥梁，荷载图式如图2所示。

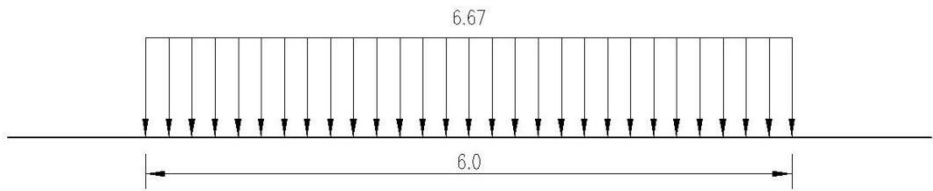


图 2 人马荷载图示（尺寸单位：m；荷载单位：kN/m）

6.2.4 风荷载

风荷载的取值执行JTG D60及JTG/T 3360-01的规定。

6.2.5 温度作用

温度作用计算应符合以下规定：

- a) 计算温度作用引起的结构效应中，结构的线膨胀系数、气温标准值、温度变化范围及结构竖向日照正温差应执行 JTG D60 的规定；
- b) 索塔两侧的日照温差可按照±5℃取值。

6.2.6 地震作用

地震作用的计算执行JTG B02的规定。

6.2.7 偶然作用

偶然作用按下列情形考虑：

- a) 汽车吊桥以一系列同重两辆车作为偶然作用，荷载图式间距为 2 m；
- b) 人马吊桥以 8 t 连续分布在 6 m 长的范围内作用于桥梁，作为偶然作用。

6.3 作用效应组合

6.3.1 结构设计按承载能力极限状态进行作用效应组合，对持久设计状况应采用作用的基本组合，对偶然设计状况应采用作用的偶然组合。

6.3.2 作用效应组合中，计算主索拉力时应将体系温度作用作为永久作用考虑。

6.3.3 作用基本组合的效应值可按下式计算：

$$S_{ud} = \gamma_0 S \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{G_i}, \gamma_{Q1} Q_{1k}, \psi_c \sum_{j=2}^n \gamma_{Q_j} Q_{jk} \right) \dots\dots\dots (1)$$

式（2）中：

- S_{ud} ——承载能力极限状态下作用基本组合的效应设计值；
- $S()$ ——作用组合的效应函数；
- γ_0 ——结构重要性系数；
- γ_{G_i} ——第*i*个永久作用的分项系数，应按JTG D60表4.1.5-2采用，温度作用作为永久作用考虑取 $\gamma_{G_i}=1.2$ ；
- G_{ik} ——第*i*个永久作用的标准值；
- γ_{Q1} ——汽车荷载（含汽车冲击力）或人马荷载的分项系数，取 $\gamma_{Q1}=1.4$ ，当某个可变作用其效应值超过汽车荷载效应值或人马荷载效应值，则该作用取代汽车荷载效或人马荷载，其分项系数与汽车荷载或人马荷载相同；
- Q_{1k} ——汽车荷载（含汽车冲击力）或人马荷载的标准值；
- γ_{Q_j} ——在作用组合中除汽车荷载（含汽车冲击力）或人马荷载外的其他第*j*个可变作用的分项系数，除风荷载的分项系数取 $\gamma_{Q_j}=1.1$ ，其余取 $\gamma_{Q_j}=1.4$ ；
- Q_{jk} ——在作用组合中除汽车荷载（含汽车冲击力）或人马荷载外的其他第*j*个可变作用的标准值，对于汽车吊桥，人马荷载应作为其他可变作用参与组合；
- ψ_c ——在作用组合中除汽车荷载（含汽车冲击力）或人马荷载外的其他可变作用的组合系数，取 $\psi_c=0.75$ 。

6.3.4 偶然组合仅考虑永久作用标准值与偶然作用标准值相组合，偶然组合的效应设计值可按下式计算：

$$S_{ad} = S \left(\sum_{i=1}^m G_{ik}, A_d \right) \dots\dots\dots (2)$$

式(3)中:

S_{ad} ——承载能力极限状态下作用偶然组合的效应设计值;

G_{ik} ——第*i*个永久作用的标准值;

A_d ——偶然作用的标准值。

7 总体设计

7.1 一般规定

7.1.1 总体结构分跨布置应根据桥址处地形、地质、水文、河势、通航等条件及结构受力合理性综合确定,同时兼顾桥梁美学设计及与环境的协调。

7.1.2 荷载等级选用应根据桥址处的交通发展规划和当地实际使用的需求情况确定。

7.1.3 跨径不大于 150 m,其设计洪水频率为 1/50,风缆连接点设计洪水频率为 1/25,跨径大于等于 150 m,其设计洪水频率为 1/100,风缆连接点设计洪水频率为 1/50,有通航要求时还应满足当地航道规划的规定。

7.2 结构体系与形式

7.2.1 主索垂跨比应考虑经济性及全桥结构变形的需要,垂跨比一般宜在 1/8~1/15 范围内选择。

7.2.2 宜采用单跨简支体系和对称的结构形式。

7.2.3 边索的夹角一般采用 $14^{\circ} \sim 24^{\circ}$ 。

7.2.4 吊杆(吊索)间距应综合考虑用材的经济性、加劲梁运输架设条件及运营中各种不利受力情况确定,宜在 2.0 m~3.0 m 范围内选择,桥跨内宜按偶数间隔对称布置。

7.2.5 桥梁全宽为两主索索之间的距离,桥面净宽为设置栏杆基座内侧边缘之间的距离,栏杆外侧边缘与吊索(吊杆)应保证不小于 15 cm 的距离,汽车吊桥的桥面净宽一般值为 4.0 m,人马吊桥的桥面净宽一般值采用 3.0 m,桥面全宽最小值不宜小于 2.5 m。

7.2.6 主索与加劲梁间的净距应能满足加劲梁安装时施工机具的要求,跨中处主索至桥面的距离不宜小于 1.5 m。

7.2.7 加劲梁应根据技术、经济、施工难易进行比选,宜采用全钢结构的加劲梁,跨径小于 170 m 的柔性悬索桥加劲梁宜采用纵横向型钢叠合梁结构,跨径大于或等于 170 m 的加劲梁应采用钢桁架梁结构。

7.2.8 宜采用空间编网形式的抗风缆索体系,提升桥梁的抗风稳定性和通行舒适性。

7.3 计算理论及原则

7.3.1 整体计算可按线弹性理论计算或采用有限位移理论进行分析,受力分析主要包括结构静力分析、关键部位的结构局部受力分析、主要承重构件的强度、变形分析,常规情况下可不进行结构动力分析。

7.3.2 结构静力分析可采用一定的简化平面结构图式进行结构计算,结构图式、几何特性、边界条件应基本反映实际结构状况和受力特征。

7.3.3 当桥梁净宽大于 3 m 时,应考虑横向分布对结构的影响。

7.3.4 柔性悬索桥的风致振动较小,只考虑横桥向和竖向(自上往下)静风荷载作用于桥梁进行静力抗风设计。对抗风无特殊要求的情况下,可不进行复杂的风致振动分析和动力抗风设计。

7.3.5 在抗震分析计算中,针对其结构特点,主要对索塔塔身、基础和锚碇结构进行相关的抗震设计。

7.3.6 吊杆(索)锚头、索夹及加劲梁进行承载力极限状态计算时,效应设计值应取基本组合和偶然组合中的较大值。

7.4 计算内容

- 7.4.1 应根据设计成桥的结构重力、内力等，计算出索股无应力长度、空索线形、索鞍预偏量、索股初始张力、索夹位置及倾角、吊杆（吊索）长度、抗风缆索长度、线形等。
- 7.4.2 全部的索单元和金属构件应进行强度验算。
- 7.4.3 通过各种作用效应组合下的结构内力及位移分析，对索塔塔身强度以及桥台和锚碇基础承载力、稳定性进行验算。

7.5 容许变形

- 7.5.1 加劲梁在荷载的基本组合下引起的最大竖向挠度值与跨径的比值不宜大于 1/150，最大横向位移与跨径的比值不宜大于 1/250。
- 7.5.2 在静阵风标准值作用下，加劲梁的最大竖向位移和横向位移都不宜大于跨径的 1/250。

8 索塔

8.1 一般规定

- 8.1.1 应根据地形、地质、水文条件确定基底持力层并选择合理的索塔基础型式。
- 8.1.2 索塔设计应满足施工、运营阶段对结构强度、刚度、稳定性等的力学要求，并充分考虑经济合理、便于施工和养护、造型美观及耐久性等要求。
- 8.1.3 索塔的高度应根据主索垂度、加劲梁高度及线形、通航净高及边跨主索限高等确定。桥面处索塔塔柱间净宽应满足本文件所规定的桥面宽度，安全防护距离不宜小于 0.5 m。
- 8.1.4 塔身的混凝土强度等级不应低于 C30。
- 8.1.5 索塔设计除应符合本文件规定外，还应执行 JTG 3363 和 JTG 3362 的相关规定。

8.2 结构形式

- 8.2.1 索塔宜采用钢筋混凝土，位于地震烈度较大区域时，应通过合理选择尺寸、配置钢筋等措施，增加钢筋混凝土构件的延性，确保索塔的延性能力大于延性需求。
- 8.2.2 索塔型式可为由两侧塔柱及横梁组成的门式框架结构。塔柱一般采用实心矩形截面，顺桥向尺寸一般为 1.0 m~2.2 m，横桥向尺寸 0.8 m~1.4 m。塔柱尺寸建议值见表 1。

表 1 塔柱尺寸建议值

通行荷载	跨径 (m)	塔柱尺寸	
		顺桥向 (m)	横桥向 (m)
人马（4 t）	$L < 130$	1.0~1.2	0.8
	$130 \leq L < 150$	1.5	1.0
	$150 \leq L < 170$	1.8	1.0
	$170 \leq L < 200$	2.0	1.2
汽车（20 t）	$L < 120$	1.2~1.5	0.8~1.0
	$120 \leq L < 140$	1.6	1.0

表 1 塔柱尺寸建议值（续）

通行荷载	跨径 (m)	塔柱尺寸	
		顺桥向 (m)	横桥向 (m)
汽车（20 t）	$140 \leq L < 160$	1.8	1.2
	$160 \leq L < 180$	2.0	1.2
	$180 \leq L < 200$	2.2	1.4
农用车（15 t）	$L < 120$	1.0~1.5	0.8~1.0
	$120 \leq L < 140$	1.6	1.0
	$140 \leq L < 160$	1.8	1.2
	$160 \leq L < 180$	2.0	1.2
	$180 \leq L < 200$	2.2	1.4

8.3 结构计算

- 8.3.1 索塔可采用平面图式进行计算分析，可不计入结构非线性效应。
- 8.3.2 混凝土索塔应分别进行控制截面纵、横向强度、裂缝宽度和变形验算。
- 8.3.3 索塔应验算施工阶段的稳定性。
- 8.3.4 温度作用可只计温度降低的影响。

8.4 构造要求

- 8.4.1 塔柱与横梁连接处可设置承托。
- 8.4.2 塔柱受力钢筋和普通箍筋应符合下列规定：
 - a) 竖向受力钢筋直径不应小于 20 mm；
 - b) 塔柱截面所含受力钢筋截面面积之和不小于混凝土截面面积的 1%；
 - c) 箍筋直径不应小于 12 mm，间距不应大于 200 mm；
 - d) 直径大于等于 12 mm 的钢筋均应采用带肋钢筋。
- 8.4.3 塔柱顶的平面尺寸应满足索鞍安装的最小要求。
- 8.4.4 为便于养护、维修，索塔顶应设置安全围栏和避雷装置，至少一个塔柱应安装带锁禁装置的爬梯。

9 锚碇

9.1 一般规定

- 9.1.1 锚碇设计应能安全可靠的承受主索拉力，并充分考虑经济合理、施工可行、维护方便、景观协调等要求。
- 9.1.2 锚体混凝土强度等级不应低于 C25。
- 9.1.3 锚碇设计除应符合本文件规定外，还应执行 JTG 3362、JTG 3363 和 JTG/T D65-05 的相关规定。

9.2 结构形式

- 9.2.1 柔性悬索桥的锚碇主要采用重力式锚碇，当岩石地质较好，地形陡峭时，可采用隧道式锚碇或岩锚锚碇。
- 9.2.2 重力式锚碇由锚块和锚固系统组成；隧道式锚碇由锚室、锚塞体和锚固系统组成；岩锚锚碇由锚室、锚体和锚固系统组成。

9.2.3 重力式锚碇基础设计应根据地形、地质条件确定基底持力层及选择合理的基础型式，顺桥向底面可设置一定的坡度或梯坎形式。

9.2.4 锚固系统宜采用型钢拉杆锚固系统，结构形式如图 3 所示。

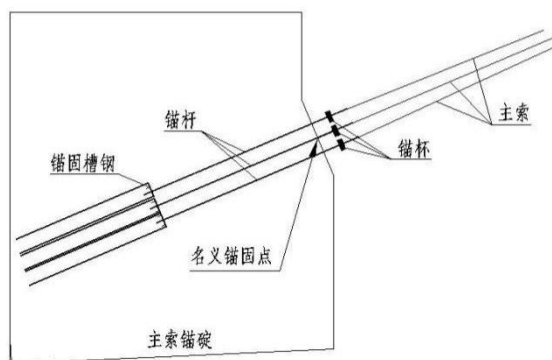


图 3 锚碇锚固系统结构形式

9.3 结构计算

9.3.1 锚碇结构整体稳定及基底应力验算除应执行 JTG 3363 的相关规定外，还应符合以下规定。

- 在施工阶段各种作用的标准效应组合下，锚碇抗倾覆稳定安全系数取 $K_0 \geq 1.5$ ，抗滑动稳定安全系数取 $K_c \geq 1.5$ ；使用阶段各种作用的标准效应组合下，锚碇抗倾覆稳定安全系数取 $K_0 \geq 2.0$ ，抗滑动稳定安全系数取 $K_c \geq 2.5$ ；仅考虑永久作用标准值与偶然作用标准值组合下，锚碇抗倾覆稳定安全系数取 $K_0 \geq 1.5$ ，抗滑动稳定安全系数取 $K_c \geq 1.5$ 。
- 锚碇基础应分别进行施工阶段、运营阶段的基底应力验算，应保证锚碇基底前后端（包括岩石地基的情况）不出现拉应力，即基底受压偏心距不得大于基底截面核心半径。
- 当岩石地质条件较好，经验算可采用植入锚杆或锚索反拉的形式减小锚碇尺寸。

9.3.2 隧道锚应进行空间结构受力分析，检算混凝土及洞壁的抗压强度及锚塞体的抗拔力，抗拔安全系数不应小于 2.0。

9.3.3 型钢锚固系统除应符合 JTG D64 的相关规定外，还应符合以下规定：

- 锚杆的强度验算应考虑索股方向与锚杆轴线的偏差及双束锚杆两侧拉力差的影响；
- 锚梁翼缘上直接承压的混凝土应进行局部承压应力验算；
- 拉杆强度验算时安全系数不应小于 2.0。

9.4 构造要求

9.4.1 为便于施工安装及养护维修，锚面应设置平台和上、下台阶，锚面上锚固点间距要考虑千斤顶布置及操作空间的需要。

9.4.2 锚体周围应布置有效的排水系统，锚杆处应设置可靠的遮雨防水及防腐防锈构造，并采取措施防止雨水顺主索进入锚体。

9.4.3 为保证索力可通过混凝土锚塞体传递到岩体上，隧道锚洞壁应设计成阶梯式或底口大上口小的形状。

9.4.4 锚塞体的截面尺寸应根据锚固系统类型和索股锚固面的布置确定。

9.4.5 锚塞体封顶混凝土可用微膨胀混凝土，以保证混凝土与岩面密贴。

9.4.6 型钢锚固系统中锚梁、锚杆、定位支架采用型钢或由钢板焊接、栓接而成，锚固槽钢与锚杆宜

采用螺栓连接。

9.4.7 主索锚头宜设置 T 形锚头与锚碇中的拉杆连接，并通过调节螺母可以实现对主索垂度进行一定量的调整。

9.4.8 与锚固系统连接的拉杆长度应考虑索股长度调整量和千斤顶张拉空间的需要。

10 悬吊系统

10.1 主索

10.1.1 一般要求

主索设计应满足下列要求：

- a) 根据结构总体布置、设计索力确定单股钢丝绳直径、股数和排列方式；
- b) 宜采用镀锌或环氧涂层高强钢芯钢丝绳，一般采用加工成品，宜在工厂定制；
- c) 在下料制造前，应根据实际空缆线形、加劲梁等实际重量及实测弹性模量，对主索的无应力长度进行修正；
- d) 在主索上设置照明设备及其他附属设施时，须就增加的荷载进行验算。

10.1.2 结构形式

结构形式设计要求如下：

- a) 加劲梁两侧各布置一根主索；
- b) 主索单股钢丝绳直径选用 32 mm~56 mm，钢丝绳公称抗拉强度不宜低于 1770 MPa。依据荷载和跨径，单股钢丝绳直径建议值见表 2，设计时根据实际荷载进行核算；

表 2 单股钢丝绳直径建议值

通行荷载	跨径	单根钢丝绳直径
人马（4 t）	$L < 100$	32~36
	$100 \leq L < 130$	40
	$130 \leq L < 150$	44
	$150 \leq L < 170$	48
	$170 \leq L < 200$	50
汽车（20 t）	$L < 120$	40~46
	$120 \leq L < 140$	48
	$140 \leq L < 160$	50
	$160 \leq L < 180$	52
	$180 \leq L < 200$	56
农用车（15 t）	$L < 120$	36~44
	$120 \leq L < 140$	46
	$140 \leq L < 160$	48
	$160 \leq L < 180$	50
	$180 \leq L < 200$	54

- c) 单股钢丝绳结构形式如图 4 中的分图 a) 所示，主索应采用 6 股束股排成两列的形式，结构形式如图 4 中的分图 b) 所示；
- d) 主索索股两端的锚头通过 T 形锚杯与锚碇中的拉杆连接，实现主索锚固，并利用调节螺母可以实现主索垂度的有限调整，T 形锚杯结构形式如图 5 所示。

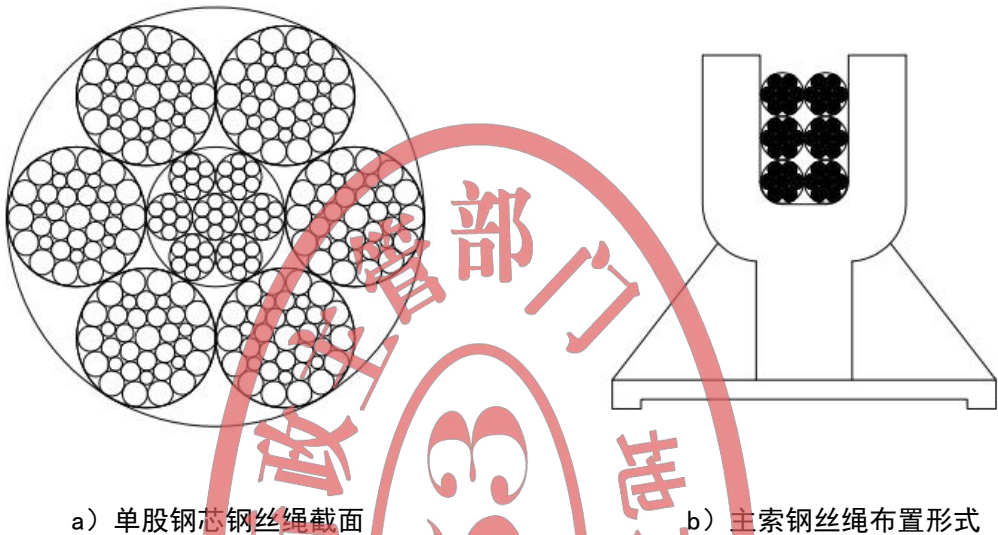


图 4 主索结构形式



图 5 T 形锚杯

10.1.3 主索计算

主索计算应符合以下规定。

- a) 构件强度验算时除本节有明确规定外，应执行 JTG D64 的相关规定。
- b) 主索用钢丝绳的弹性模量取值按照厂家提供的数值取用，以不小于 1.2×10^5 MPa 为宜。
- c) 主索线形及长度计算：
 - 1) 主索成桥线形和长度可采用抛物线方程计算，成桥主索曲线方程见式（4）；
 - 2) 主索预制索股制作长度应按主索实测钢丝弹性模量值进行计算，并考虑索鞍处的曲线修正及锚跨段索股空间角度修正；
 - 3) 主索预制索股制作长度应计入长度预留量，以满足主索索股制作、架设及计算等误差要求。

- d) 采用式(5)对主索进行应力验算,安全系数 K_c^c 不应小于2.5。
- e) 锚头验算:
- 1) 锚头锚杯内钢丝锚固长度应满足锚固强度的要求,热铸锚可按式(6)计算;
 - 2) 锚头验算还应包括锚杯、拉杆和螺帽的强度验算,安全系数 $K \geq 2.5$ 。

$$y = \frac{4fx(l-x)}{l^2} \dots\dots\dots (1)$$

式(4)中:

l ——计算跨径(m);

f ——计算矢高(m)。

$$K_c^c = \frac{n \cdot N_s}{T_s} \dots\dots\dots (2)$$

式(5)中:

n ——股数;

N_s ——单股钢丝绳标准拉力(kN);

T_s ——作用效应组合下,跨径内或边索的索拉力最大值(kN)。

$$l_{sae} \geq \frac{K\sigma_b}{4\nu} d_w \dots\dots\dots (3)$$

式(6)中:

l_{sae} ——主索钢丝在锚杯内的锚固长度(mm);

d_w ——主索钢丝直径(mm);

σ_b ——主索钢丝公称抗拉强度(MPa);

K ——钢丝锚固安全系数,取 $K = 2.5$;

ν ——单根钢丝与合金在单位面积上的附着力,无试验资料时,铸体材料为热铸料可取 $\nu = 25 \text{ MPa}$ 。

10.1.4 构造要求

主索构造应满足下列要求:

- a) 主索安装前应进行预拉,以消除非弹性变形,预拉力为设计恒载的0.8倍,持续时间不宜少于15 min;
- b) 主索空缆线形应考虑温度影响,并按规定进行调整,组成主索的各钢丝绳空间线形调整要求在温度稳定的时段进行,调整后的钢丝绳不可在鞍槽内相对移动;
- c) 主索锚头内灌锌铜合金,应严格遵照 JTG/T 3650 的规定执行,并逐件进行超声波探伤检验;
- d) 锚头由主索生产厂家根据主索长度和强度要求定制加工,锚头表面热浸锌铜合金处理;合金层厚度不小于100 μm 。锌铜合金中:
 - 1) 锌含量为 $(98 \pm 0.2)\%$,应符合 GB/T 470 的规定;
 - 2) 铜含量为 $(2 \pm 0.2)\%$;铜应符合 GB/T 467 的规定。
- e) 锚杯螺纹深度不应小于5 mm。

10.2 吊杆、吊索

10.2.1 一般要求

吊杆和吊索应满足以下规定:

- a) 吊杆用材料符合 5.3 的要求；吊索用材料应符合 5.2 的要求，一般采用加工成品；
- b) 一般情况下，人马吊桥宜采用吊杆，汽车吊桥宜采用吊索，吊杆、吊索直径建议值见表 3，设计时根据实际荷载进行核算；
- c) 应根据施工中主索的实际空缆线形、加劲梁等实际恒载重量及实测弹性模量对吊杆、吊索设计长度进行修正；
- d) 吊杆、吊索设计应考虑便于更换。

表 3 吊杆、吊索直径建议值

通行荷载	跨径 (m)	吊杆、吊索直径 (mm)
人马（4 t）	$L < 130$	30
	$130 \leq L < 150$	32
	$150 \leq L < 170$	34
	$170 \leq L < 200$	36
汽车（20 t）	$L < 120$	32
	$120 \leq L < 160$	36
	$160 \leq L < 200$	40
农用车（15 t）	$L < 120$	30
	$120 \leq L < 160$	32
	$160 \leq L < 200$	36

10.2.2 结构形式

吊杆和吊索的结构应符合下列要求：

- a) 吊杆、吊索的布置宜采用竖直布置形式；
- b) 吊杆、吊索与加劲梁的连接宜选择传力简单、方便检修和不易积水锈蚀的承压式。对于吊索先通过锚头与下锚杆连接再和加劲梁栓接，如图 6 中的分图 a) 所示，对于吊杆可与加劲梁直接栓接，如图 6 中的分图 b) 所示；
- c) 吊索的下锚杆和吊杆端部设置螺纹，可以实现一定量的上下调整，方便加劲梁调形。

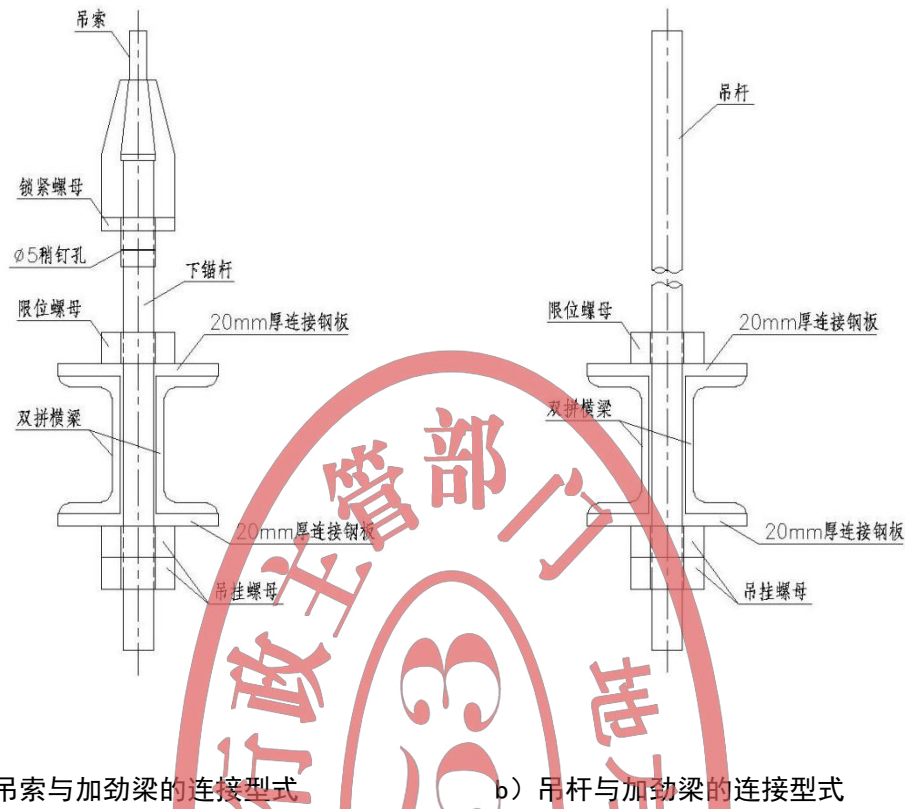


图6 吊索、吊杆与加劲梁的连接方式

10.2.3 结构计算

结构计算应符合以下规定：

- a) 构件强度验算除本节有明确规定外，应执行 JTG D64 的相关规定；
- b) 镀锌钢丝绳吊索弹性模量设计取值不宜小于 1.2×10^5 Mpa；
- c) 强度验算中，销接式吊索的安全系数应不小于 3，可按下式（7）计算；
- d) 吊索锚头的验算可参照本标准 10.1.3 的规定。

$$K_c^d = \frac{N_d}{T_d} \geq 3 \dots\dots\dots (1)$$

式（7）中：

N_d ——吊索标准拉力（kN）；

T_d ——吊索拉力设计值（kN）。

10.2.4 构造要求

吊杆、吊索构造应满足下列要求：

- a) 除本文件有明确规定外，应执行 JTG/T D65-05 和 JTG D64 的规定；
- b) 吊杆、吊索锚头、锚口处极易产生疲劳，设计时应采取措施改善该处应力状况。

10.3 索夹

10.3.1 一般要求

索夹应满足下列规定：

- a) 索夹的基本型式宜采用销接式；
- b) 索夹长度可统一尺寸，倾角变化以超过 2 度进行划分；
- c) 索夹材料可选用铸钢或低合金铸钢的加工成品。

10.3.2 结构形式

索夹的结构形式要求如下：

- a) 吊杆和吊索用索夹基本采用相同的形式，仅在索夹与吊杆或吊索连接处采用的接套形式有所区别：
 - 1) 吊索索夹结构形式与图 7 所示相符；
 - 2) 吊杆索夹结构形式与图 8 所示相符。
- b) 按主索的排列形式，索夹结构宜设计成左右对合型。

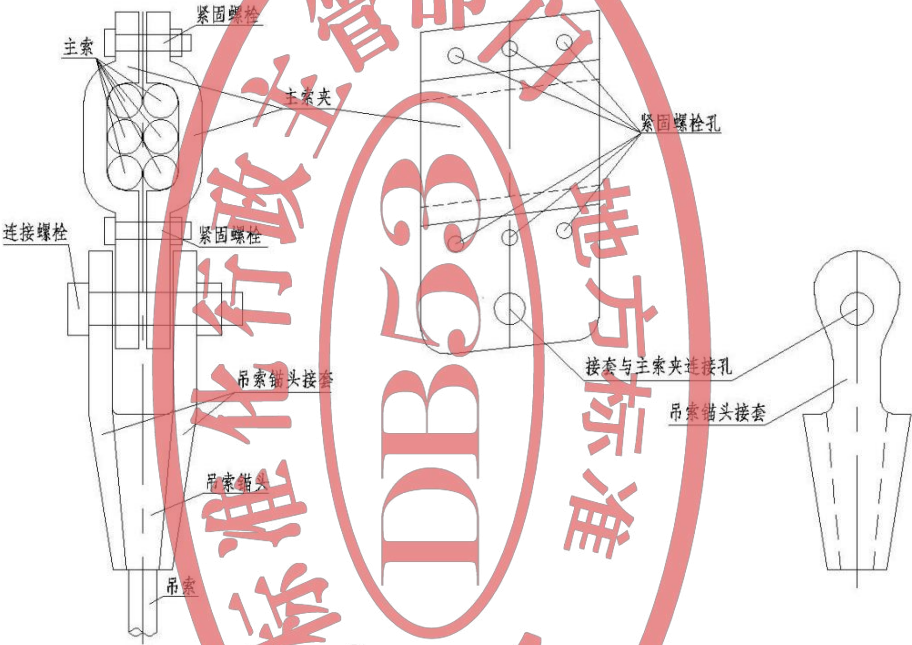


图 7 吊索索夹结构形式

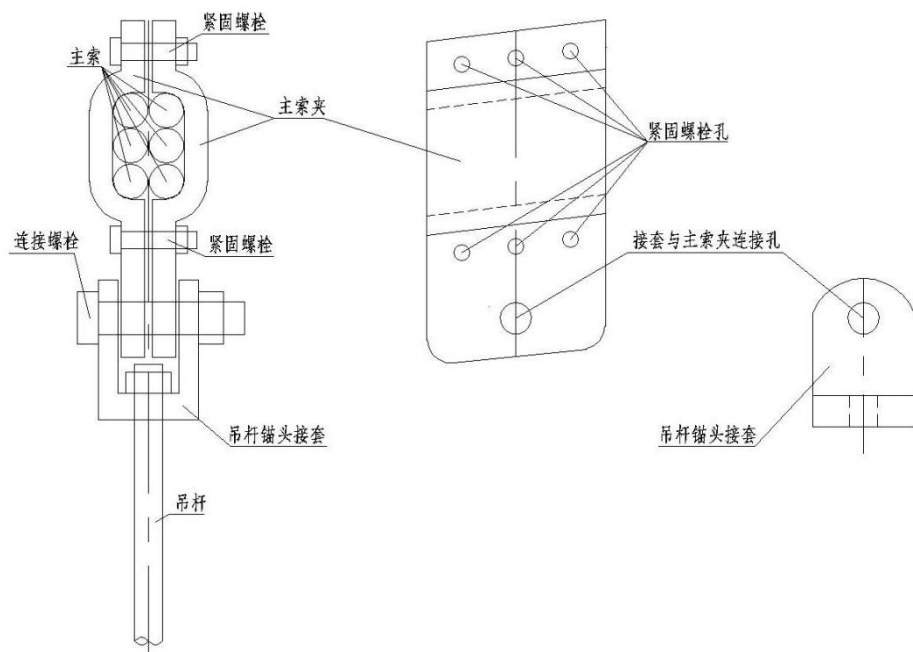


图 8 吊杆索夹结构形式

10.3.3 结构计算

10.3.3.1 索夹紧固验算（抗滑设计验算），其抗滑安全系数，用式（8）计算：

$$K_{fc} = \frac{F_{fc}}{N_c} \geq 3 \dots\dots\dots (1)$$

$$N_c = N_h \sin \varphi \dots\dots\dots (2)$$

式（8）中：

- N_c ——主索上索夹的下滑力（kN）用式（9）计算；
- N_h ——吊杆或吊索拉力（kN），按作用效应设计值计算；
- φ ——索夹在主索上的安装倾角（°），按同类索夹中的最大值计算；
- F_{fc} ——索夹抗滑摩阻力（kN），用式（10）计算：

$$F_{fc} = k \mu P_{tot} \dots\dots\dots (3)$$

式（10）中：

- k ——紧固及压力分布不均匀系数，取2.8；
- μ ——摩擦系数，设计时取0.15；
- P_{tot} ——索夹上螺杆总的设计夹紧力（kN），用式（11）计算：

$$P_{tot} = n_{cb} P_b^c \dots\dots\dots (4)$$

式（11）中：

- P_b^c ——索夹上单根螺杆设计夹紧力（kN）；
- n_{cb} ——索夹上安装的螺杆总根数。

10.3.3.2 索夹首次安装时，索夹上单根螺杆夹紧力（kN）：

$$P_b = \frac{P_b^c}{0.7} \dots\dots\dots (5)$$

10.3.3.3 索夹强度应满足下列要求:

$$\sigma = \frac{P_{tot}}{2t_c\lambda_c}, \text{ 且 } \frac{\sigma_{yc}}{\sigma} = K \geq 3 \dots\dots\dots (6)$$

式 (13) 中:
 λ_c ——索夹长度 (m);
 σ_{yc} ——索夹材料的屈服强度 (MPa);
 K ——索夹壁厚设计安全系数。

10.3.4 构造要求

索夹构造应满足下列要求:

- a) 索夹的对合面预留 10 mm 的间隙, 内孔直接按两排主索的直径进行设计, 不预留间隙;
- b) 紧固前可用一层锌片包裹主索, 扭紧螺栓, 防止索夹滑动;
- c) 钢材厚度不宜小于 30 mm, 紧固螺栓孔间距宜采用 70 mm;
- d) 安装前应确定主索的空缆线形, 在温度稳定的情况下放样定出索夹的位置并编号, 紧固同一索夹螺栓时, 应保证各螺栓受力均匀;
- e) 桥面系安装完毕后还应对索夹进行一次补紧固, 索夹纵向位置误差不应大于 10 mm。

10.4 索鞍

10.4.1 一般要求

索鞍应满足下列要求:

- a) 设计根据悬索桥的总体构造选择索鞍形式, 充分体现经济合理、制作简单、施工方便等要求;
- b) 索鞍的结构具有足够的强度、稳定性, 以满足传力要求;
- c) 按主索的布局形式, 一般只设置索塔顶的主索鞍, 不单独设置散索鞍或散索套, 主索出索鞍后按 1° 的角度直接分离成散索至锚体连接处;
- d) 索鞍在安装时应向边跨侧设置经计算确定的预偏量, 预偏值的大小根据全桥总体受力分析确定。

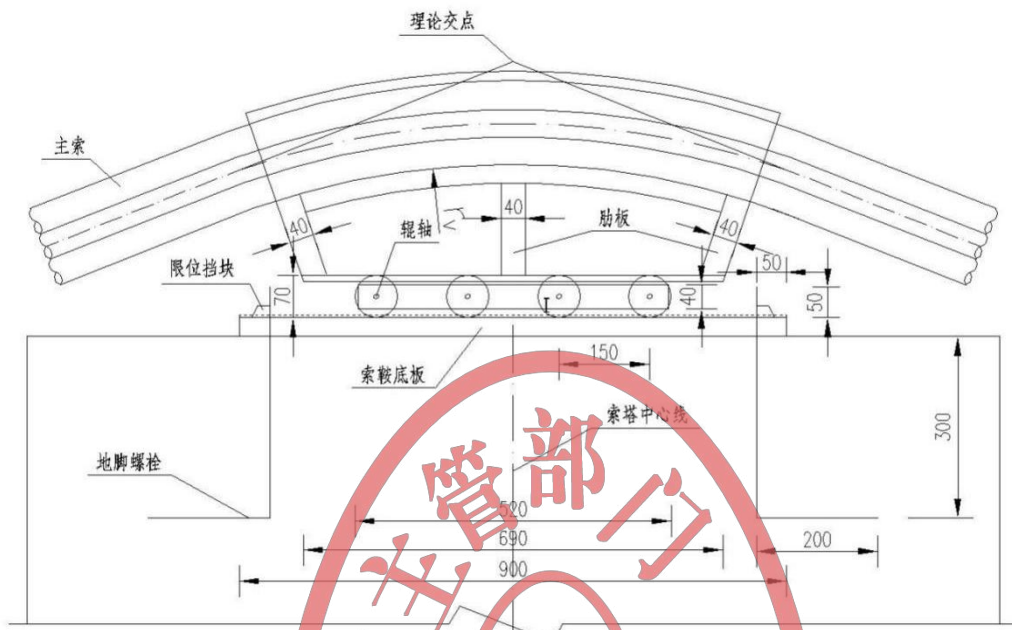


图 9 索鞍构造立面图（尺寸单位：mm）

10.4.2 结构形式

索鞍构造立面如图 9 所示：

- a) 宜采用全铸式、按肋传力结构进行设计；
- b) 索鞍的底板下应设置钢辊轴运动装置和限位装置，便于调整预偏量。

10.4.3 结构设计

索鞍结构设计符合以下规定：

- a) 承索槽立面的线形应与全部恒载条件下的主索线型相吻合；
- b) 承索槽底部立面圆弧半径可按边索与跨内主索的夹角经计算确定；
- c) 应验算主索与索鞍间滑移稳定性。

10.4.4 结构计算

槽路、鞍槽尺寸示意如图 10 所示：

- a) 图 10 中，槽路宽度 b ，用式（14）计算；
- b) 图 10 中，槽路高度 h ，用式（15）计算；
- c) 鞍槽内主索抗滑安全系数 K ，用式（16）计算。

$$b = n_{wt}(d_w + \Delta_{wr}) + 4 \text{（毫米取整）} \dots\dots\dots (1)$$

式（14）中：

- n_{wt} ——钢绳排数；
- Δ_{wr} ——主索钢绳直径的允许正偏差；
- d_w ——每根索股的钢丝绳直径（mm）。

$$h = 3d_w + 18 \dots\dots\dots (2)$$

式（15）中：
 d_w ——每根索股的钢丝绳直径（mm）。

$$K = \frac{\mu\alpha_s}{\ln\left(\frac{T_t}{T_l}\right)} \dots\dots\dots (3)$$

式（16）中：
 μ ——主索与鞍槽的摩擦系数，宜取0.15；
 α_s ——主索在鞍槽上的包角（rad）；
 T_t ——主索跨径内拉力（kN），按作用效应设计值计算；
 T_l ——主索边跨拉力（kN），按作用效应设计值计算。

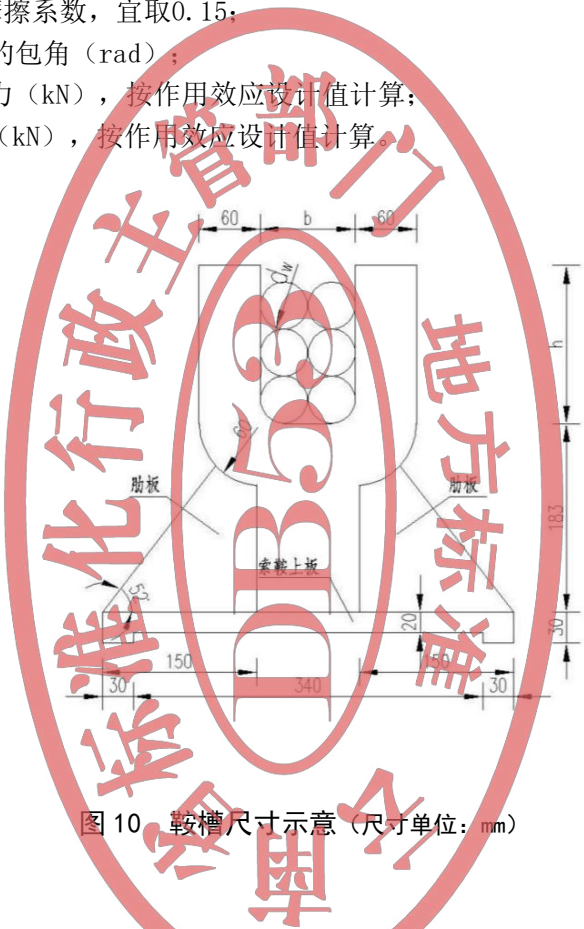


图 10 鞍槽尺寸示意（尺寸单位：mm）

10.4.5 构造要求

- 索鞍构造应满足下列要求：
- a) 索鞍宜采用铸钢和钢板焊接结合的形式，下设 45 号钢辊轴；
 - b) 应尽量采用工厂焊接，减少现场组焊的工序，以保证焊接质量；
 - c) 调形后的主索不得在索鞍槽路内相对滑移；
 - d) 辊轴安装后要能保持在限位装置内自由滚动；
 - e) 索鞍是悬索桥的永久性构件，应设置耐久、且防护效果好的防护罩，减少雨水和灰尘的侵蚀。

11 加劲梁

11.1 一般规定

11.1.1 架设方法根据桥位建设条件、施工安全、结构受力、质量保证和经济性等因素确定。

- 11.1.2 在吊装前进行预拼，复核螺栓连接孔位的准确性，使成桥后符合设定恒载作用下的设计线形。
- 11.1.3 纵、横梁采用分开架设的方式，横梁全部安装完毕后，纵梁架设宜采用从桥跨中向两端同时对称进行，也可采用两端向跨中安装的方式，但必须注意安装精度，确保跨中段顺利合拢。
- 11.1.4 加劲梁可不设置横向坡度，但应设置纵向预拱度，一般预拱高的建议值为 0.5 m~1.25 m，跨径小或荷载低取小值，跨径大或荷载高取大值，设计时可根据实际进行核算。
- 11.1.5 加劲梁的设计除应符合本文件规定外，还应执行 JTG D64 的有关规定。

11.2 结构形式

- 11.2.1 采用横梁在下纵梁在上的叠合梁形式，如图 11 所示。
- 11.2.2 横梁通过螺栓与吊杆或吊索连接，并与吊杆或吊索一一对应。
- 11.3.3 纵梁采用工字钢，平铺于横梁之上，与横梁采用螺栓连接。

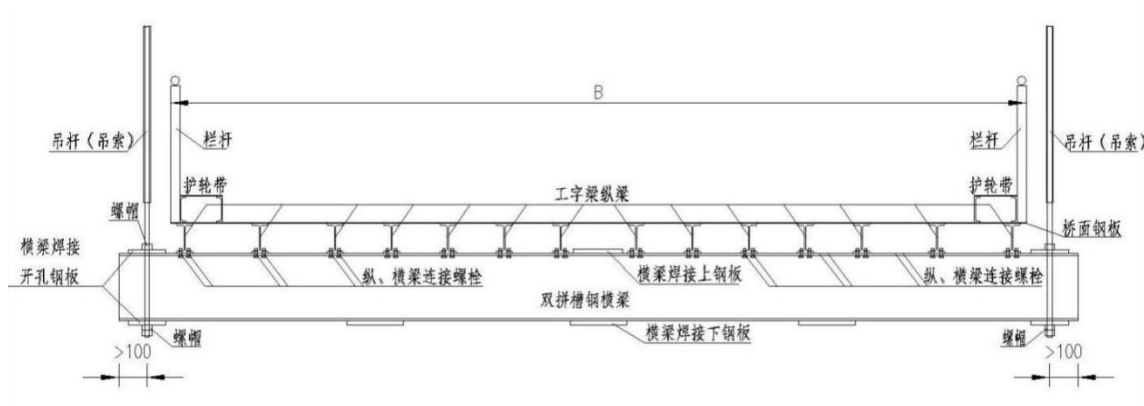
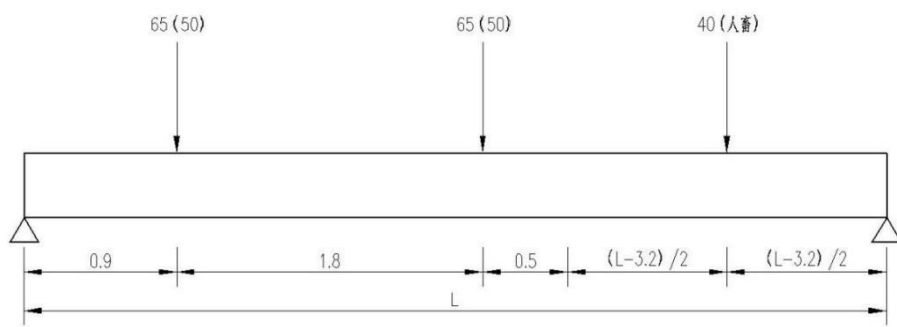


图 11 纵横向型钢叠合梁结构形式 (尺寸单位: mm)

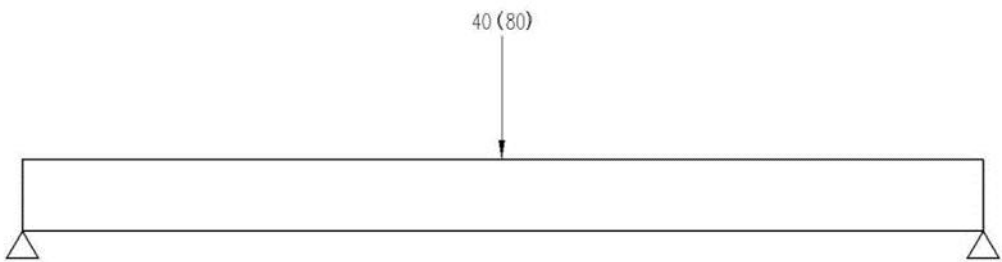
11.3 结构计算

- 11.3.1 除本文件规定外，结构强度验算还应执行 JTG D64 的相关规定。
- 11.3.2 连接构造和支承结构应进行局部强度验算，所受作用按局部布载工况计算，对于连续设置的纵梁，还应考虑总体计算应力效应的强度验算。
- 11.3.3 横梁的计算可简化为简支梁，计算跨径为吊杆或吊索的横向间距：
- a) 对于汽车吊桥，最不利可变荷载为汽车偏载重轴作用于单根横梁上，人马荷载按 40 kN 集中力作用于汽车偏载反向中间处，计算如图 12 所示；
 - b) 对于人马吊桥，按 40 kN 集中力形式作用于横梁跨中进行加载，计算如图 13 所示。



注：括号内数值为农用车，L 为桥梁全宽。

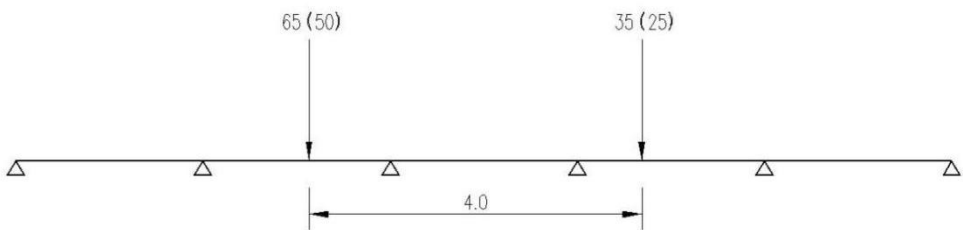
图 12 横梁汽车、农用车荷载布载图 (尺寸单位: m; 荷载单位: kN)



注：括号内数值为偶然作用。

图 13 横梁人马荷载布载图（荷载单位：kN）

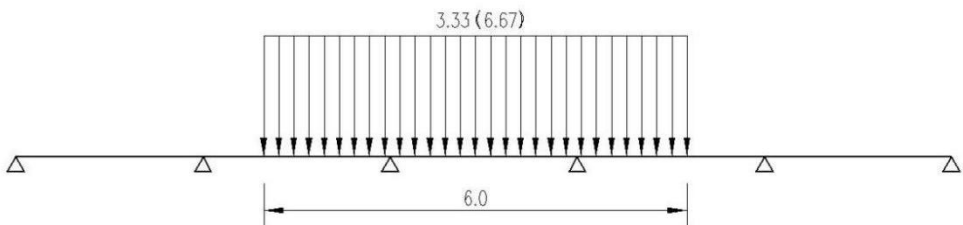
11.3.4 对任一纵梁，汽车吊桥最不利荷载为汽车重轴一车轮作用于纵梁跨中处，如图 14 所示。



注：括号内数值为农用车。

图 14 纵梁汽车、农用车荷载布载图（尺寸单位：m；荷载单位：kN）

11.3.5 人马吊桥最不利荷载为人马荷载的一半满布载纵梁跨内，如图 15 所示。



注：括号内数值为偶然作用。

图 15 纵梁人马荷载布载图（尺寸单位：m；荷载单位：kN/m）

11.3.6 在进行纵梁基本组合承载力极限状态计算时，人马荷载的分项系数取 $\gamma_{Q1} = 2.5$ 。

11.4 构造要求

11.4.1 对分段制作、拼装和架设的纵横向型钢叠合梁，节段的划分应考虑便于吊装和安装，并保证在架设过程中，节段及节段间的内力处于较小的水平。

11.4.2 纵横向型钢叠合梁顺序安装时应设置临时连接构造，临时连接构造必须能抵抗梁段架设过程中的结构受力，并能够满足架设过程中梁段变形要求及施工阶段抗风稳定性要求，且同一断面内的纵梁连接接头不得超过 50%。

11.4.3 横梁由两槽钢背向双拼组成，槽钢型号依据设计荷载和跨径在[20a~[40a 之间选择，连接方式采用缀板接焊，通常上缀板设 3 块，下缀板设 5 块，横梁两端的开孔缀板厚度不小于 20 mm，其他缀板厚度不小于 16 mm。

11.4.4 纵梁采用工字钢 I16~I25a，纵梁之间横向无联系，纵梁与横梁宜用螺栓连接的方式，单列纵梁接头对齐采用两侧搭接钢板螺栓连接，钢板厚度不小于 10 mm，连接螺栓应采用普通螺栓，如图 16 所示。

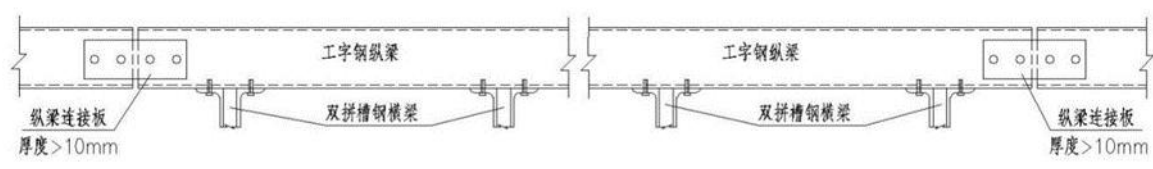


图 16 纵梁连接钢板示意图

11.4.5 槽钢型号和工字钢型号建议采用值见表 4，设计时根据实际荷载进行核算。

表 4 纵梁数量、槽钢型号和工字钢型号建议采用值

通行荷载	纵梁数量 (片)	跨径 (m)	钢型号	
			槽钢	工字钢
人马 (4 t)	6	$L < 150$	20a~25a	16
	8	$150 \leq L < 170$	36a	20a
汽车 (20 t)	14	$L < 120$	25a~36a	20a
	14~16	$120 \leq L < 150$	36a	20b
		$150 \leq L < 170$	40a	25a
农用车 (15 t)	14	$L < 150$	25a~36a	20a
		$150 \leq L < 170$	40a	25a

11.4.6 横梁连接钢板定位尽量精准，以减小焊接残余应力，降低端部安装吊杆或吊索处的应力集中。

11.4.7 横梁端部腹板处需预留抗风拉索孔。

11.4.8 所有焊接应执行 JTG D64 的相关规定。

12 抗风索体系

12.1 一般规定

12.1.1 抗风设计按照安全可靠、技术先进、经济合理的原则。

12.1.2 抗风索体系主要由 2 股主索、4 根拉索、4 个锚碇和连接吊环组成，宜采用编网方式的空间结构形式。

12.1.3 抗风锚碇设计应能安全可靠地承受横向风引起的索拉力，且应考虑洪水频率和经济合理等要求。

12.2 结构形式

12.2.1 两根抗风主索不直接与横梁连接，而是通过四根拉索按三角形编网形式与每间隔一根横梁进行连接，连接点左右对称。

12.2.2 抗风主索线形在平面和立面上都采用二次抛物线，形成空间体系，抗风缆形式如图 17、18 所示。

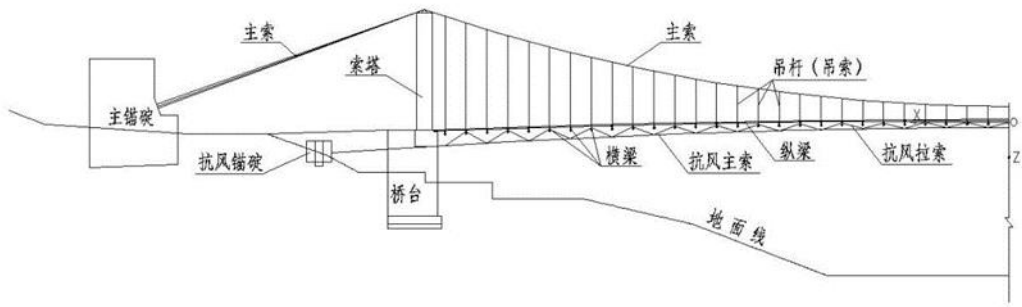


图 17 抗风缆索立面示意图（半桥）

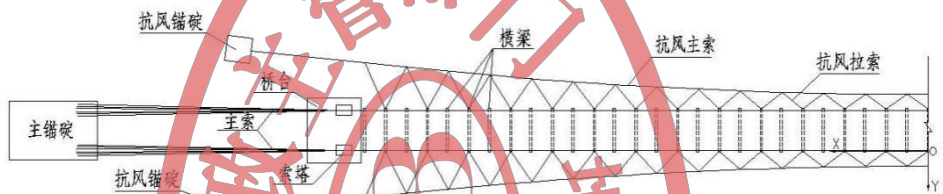


图 18 抗风缆索平面示意图（半桥）

12.3 结构计算

12.3.1 风荷载作用于桥梁时，横桥向风荷载引起抗风主索的内力和变形最大，应对抗风主索和拉索所受的内力进行强度验算。

12.3.2 抗风主索的设计长度指成桥后在设计温度下，仅承受恒载作用时的长度。

12.3.3 线形计算：抗风主索在主跨范围内线形为二次抛物线，原点位于跨中横梁预留孔中心， x 为桥梁轴线方向， y 为桥梁水平方向， z 为垂直方向，如图 17、18 所示。

平面方程：

$$y = \frac{\sqrt{3}x^2}{2070} + \sqrt{3} \dots\dots\dots (1)$$

立面方程：

$$z = \frac{x^2}{2070} + 1 \dots\dots\dots (2)$$

12.3.4 抗风锚碇整体抗倾覆稳定安全系数取 $K_0 \geq 2.5$ ，抗滑动稳定安全系数取 $K_c \geq 1.5$ 。

12.3.5 抗风锚碇的结构计算可参照本文件第 9 章的相关规定执行。

12.4 构造要求

12.4.1 主索直径宜采用 36 mm，拉索直径宜采用 12 mm。

12.4.2 抗风主索与抗风锚碇的连接可采用钢丝绳折返后用夹片固定的方式，绳夹公称直径与主索一致，锚碇拉杆可采用直径 25 mm 的光圆钢筋加工制作，并焊接到厚度不小于 30 mm 的后锚钢板上，锚梁采用 C25 钢筋混凝土，按常规的构造进行配筋，浇注混凝土前应保证拉杆倾角与主索的方向一致，其余锚体可采用 C20 普通混凝土，抗风锚碇结构图如图 19 所示。

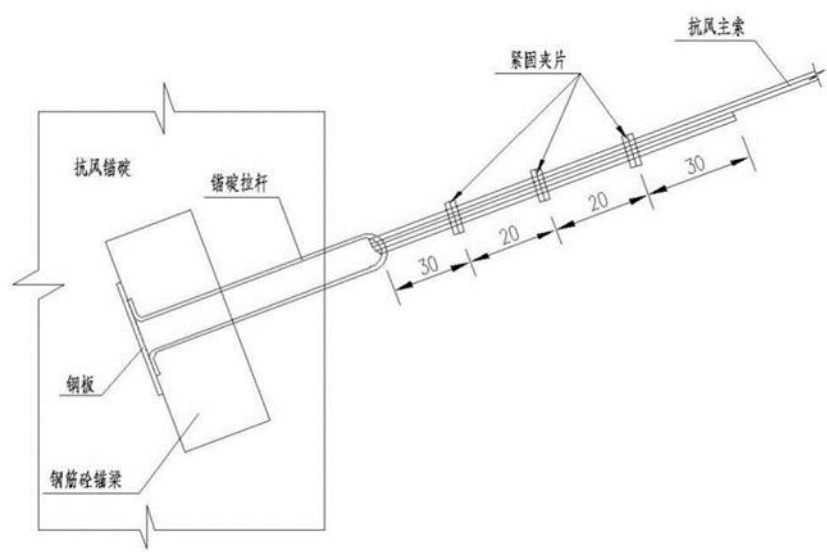


图 19 抗风锚碇结构图（尺寸单位：cm）

12.4.3 拉索与横梁的连接吊环采用直径 20 mm 光圆钢筋制作，外径 20 cm，如图 20 所示；主索与拉索的连接吊环采用直径 20 mm 光圆钢筋制作，外径 10 cm，如图 21 所示；拉索端头与主索连接处设置调节拉杆（花兰螺丝），便于调整拉索张力，其余处的拉索与横梁、主索的连接采用吊环+滑轮（D150）的方式，通过滑轮使每个连接点受力均匀，如图 22 所示。

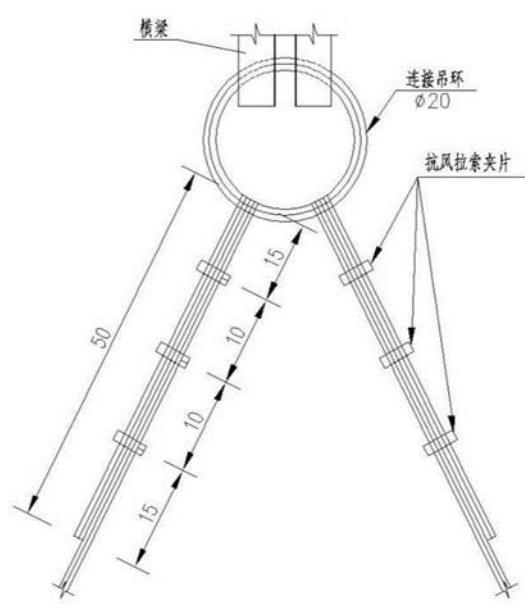


图 20 跨中横梁拉索连接构造（尺寸单位：cm）

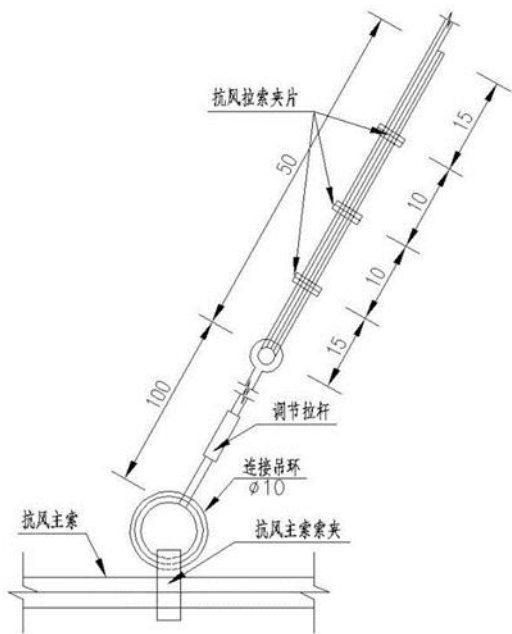


图 21 主索与拉索端头连接构造（尺寸单位：cm）

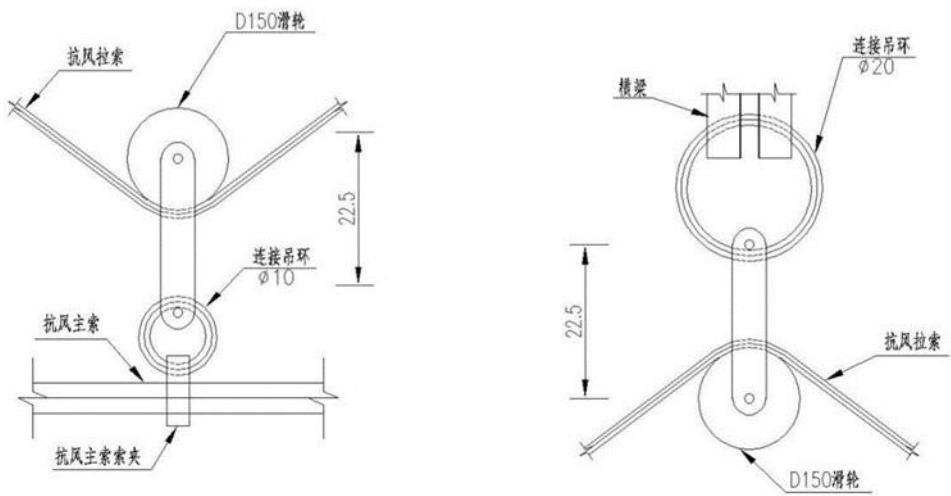


图 22 滑轮连接构造（尺寸单位：cm）

- 12.4.4 钢丝绳施工前应进行预拉，以消除非弹性变形。
- 12.4.5 抗风主索和拉索收紧时相对应的风索用力一致，并随时精确观测，保证桥轴线不偏斜，同时校核抗风主索的空间线形。

13 附属结构

13.1 桥面系(桥面铺装、护轮带和栏杆)

- 13.1.1 桥面铺装宜采用划痕或花纹防滑钢板，厚度一般情况采用 8 mm~10 mm，风速较大的地区也可采

用倒扣槽钢桥面，增加透风率。

13.1.2 钢板横桥向宽度依据桥宽宜采用整幅，纵向宽可根据施工条件和工艺确定，宜采用横梁间距整数倍，每5块~6块钢板为一联，每联之内的钢板用坡口焊接工艺连接成整体，每联之间留15 mm~20 mm的横缝，便于通风、排水。

13.1.3 桥面钢板与纵梁的连接以螺栓连接为主焊接为辅，每块钢板与纵梁的螺栓连接宜不少于两排，焊接宜不少于一排，螺栓采用8.8级高强螺栓和弹簧垫片，焊缝长度和质量按现行JTG D64的相关规定执行。

13.1.4 采用倒扣小槽钢条铺装时，宜全部采用螺栓连接的方式，并在槽钢端部各增加一条钢板压条，槽钢宽度50 mm~80 mm为宜，铺装间距10 mm~15 mm。

13.1.5 汽车吊桥宜在车行道两侧设置护轮带。

13.1.6 栏杆采用金属栏杆，为适应桥面变形，栏杆分联与桥面钢板一致。

13.1.7 作用在栏杆立柱顶上的水平推力标准值应采用0.75 kN/m，作用在栏杆扶手上的竖向力标准值应采用1.0 kN/m。

13.1.8 栏杆设计应执行JTG D81的相关规定。

13.2 支座及伸缩缝

13.2.1 桥头宜设置支座和伸缩缝，以减缓荷载上桥时的冲击力。

13.2.2 支座与纵梁一一对应，构造上能有效限制住纵梁的横向水平位移。

13.2.3 伸缩缝预留宽度100 mm~200 mm，可采用与桥面铺装相同材质的钢板，与桥面钢板上下搭接，搭接长度不小于400 mm，顺桥向两侧加工成坡口的形状，靠桥台侧采用预埋螺栓固定。

13.2.4 支座和伸缩缝均应满足加劲梁纵向水平位移、竖直平面转角及横向水平面转角的变形要求。

13.2.5 支座、伸缩缝的设计标高应考虑混凝土索塔塔柱弹性压缩及砼收缩徐变的影响。

13.3 结构防护

13.3.1 结构防护措施应满足设计要求的安全使用保护年限。

13.3.2 对一些容易锈蚀的关键特殊部位加强防护防锈措施。

13.3.3 为满足柔性悬索桥钢结构的耐久性，应对索夹、索鞍、吊杆、加劲梁、桥面板及栏杆等构件表面进行防腐、防锈处理。

13.4 索结构防护

13.4.1 主索和吊索采用了镀锌钢丝绳材质，本身具备了一定防腐和抗锈蚀的功能，施工过程中应加强保护，避免对镀锌或环氧涂层的敲击和磨损；

13.4.2 成桥后对所有索结构表面涂抹一层黄油进行防护。

13.5 混凝土防护

混凝土应通过试验选择合理的配比（水灰比、水泥及外掺剂用量等）、控制碱含量及氯离子含量，以确保混凝土本身的耐久性。

14 养护

14.1 缆索系统

14.1.1 主索系统防腐涂层应经常性做一般性检查，对发现的可疑损伤和劣化，可划定区域进行重点检

查。

14.1.2 自桥梁投入运营开始，需在寿命期内按计划对缆索系统进行全面定期检查。

14.1.3 桥梁建成最初1年，应于最高气温月份、最低气温月份及年平均温度时对主索进行线形检测，在以后每年可进行一次线形检测。

14.1.4 涂膜寿命在10年~17年以上，一般5年以下不需要维修，在5年~10年以内只需局部维修，10年~17年以上可采用大范围维修或重涂。日常检查中：

- a) 发现涂装层已经破坏且失去主要防护能力，应及时修复；
- b) 涂装层的维护性修补应采用原涂装工艺进行。

14.1.5 钢丝绳有断丝或鼓丝，应及时拼接或更换。

14.1.6 自桥梁投入运营开始，需在寿命期内按计划对主索索股两端的锚杯（锚头）进行全面定期检查。

14.1.7 定期重点检查锚杯（锚头）有无机械破损，主索有无明显拔出锚头的迹象，锚碇外露锚固系统连接是否存在锈蚀、变形和松动，及时评估进行维护。

14.1.8 其他可参照 JTG/T 5122 执行。

14.2 索夹及吊杆、吊索锚固系统

14.2.1 自桥梁投入运营开始，需在寿命期内按计划对索夹及吊杆、吊索锚固系统的防腐涂层、索夹螺杆内力、吊杆（索）内力、吊索断丝及连接件裂纹进行全面定期检查。

14.2.2 涂层的维护性修补应采用原涂装工艺进行。

14.2.3 吊索丝股严重锈蚀已削弱截面达5%以上、断丝率已超过5%，吊索有明显拔出锚头的迹象、耳板及相连部位有裂纹扩展时，应及时更换吊索；吊杆锈蚀严重及有裂纹扩展时，应及时更换吊杆。

14.2.4 索夹松动、滑移应及时采取措施复位、紧固，已严重锈蚀、夹壁开裂，耳板开裂则应及时更换索夹。

14.2.5 其他可参照 JTG/T 5122 执行。

14.3 锚碇及锚碇室

14.3.1 自桥梁投入运营开始，需在寿命期内对锚碇和锚碇室进行经常性检查、定期检查和特殊检查。

14.3.2 锚碇及锚碇室出现排水沟断裂、边坡破坏、淘空，锚碇顶盖开裂、四壁开裂渗漏等状况时，需及时养护维修。

14.3.3 其他可参照 JTG 5120 执行。

14.4 索塔

14.4.1 索塔应进行经常性保养和维护。

14.4.2 主塔混凝土结构应无裂纹，发现裂纹时应详细记录裂纹部位、走向、宽度及深度，分析裂纹产生的原因，及时按相关规定进行维护。

14.4.3 主塔沉降及倾斜检测，应在2年~3年进行一次，并制成曲线图，与竣工时、高温和低温时测试数据比较，以判断是否在正常范围之内。

14.4.4 索鞍偏离竣工位置时，应进行线形检测，并应进行结构验算。

14.4.5 主鞍座及构件，如发现裂纹应在评估后进行规范处置，不应随意补焊；如需补焊须在焊接工艺评定后进行。

14.4.6 发现塔身、承台混凝土劣化、保护层脱落等缺陷时，应及时处理。

14.4.7 其他可参照 JTG 5120 执行。

14.5 加劲梁和桥面系

14.5.1 加劲梁和桥面系应进行经常性保养和维护。

14.5.2 应定期对连接螺栓和连接钢板的焊缝进行检查，发现螺栓松动、变形或缺失应及时紧固、更换或补充。

14.5.3 桥面钢板直接承受活载的振动，钢板与纵梁的连接螺栓易松动或遗失，应重点定期进行养护维修。

14.5.4 其他可参照 JTG 5120 执行。

14.6 交通运营管理

14.6.1 为避免两辆以上的汽车荷载同时上桥，应在桥头醒目位置设置限载、限速标志以及桥头索塔外增设停车让行区。

14.6.2 限载值、限速值不应大于设计值，并应以明显标志禁止人群荷载上桥后同步以整齐步伐行进性提示。

14.6.3 禁止汽车或农用车驶入人马吊桥。

14.6.4 根据交通运营管理需求，可设置限高架和限宽墩。

14.6.5 交通安全设施的设置应符合现行相关的公路工程规范或规定。

附录 A (资料性) 实桥实例——人马吊桥

A.1 工程概况

工程概况包括但不限于下列信息：

- a) 桥址：某人马吊桥横跨怒江，东岸连接省道，西岸连接着鹿马登乡。
- b) 桥型：柔性悬索桥，矢高 8.133 m，矢跨比 1/15，跨中设 0.6 m 拱度，纵向形成 0.984% 的双向纵坡。
- c) 桥面宽度：净 2.5 m+2×0.25 m。
- d) 跨径：1-22 m 悬索桥。
- e) 荷载标准：限载 4 t（20 人和 5 匹驮马同时通行）。
- f) 地震烈度：Ⅶ。
- g) 计算风速根据规范 $P=1/50$ 取值，贡山风速为 24 m/s，风压 0.30 kN/m²。

A.2 主要材料

主要材料的规格和技术要求如下：

- a) 主缆、吊杆及抗风缆：主缆采用 6Φ40 镀锌钢芯钢绳强度 1770 Mpa，单根破断拉力 1210 kN；吊杆采用 Φ30 镀锌钢棒；抗风缆主索采用 2Φ36 镀锌钢芯钢绳。
- b) 钢材型号：
 - 1) 横梁：[25a；
 - 2) 纵梁：I16；
 - 3) 索夹、套筒、索鞍：ZG45 铸钢；
 - 4) 主钢筋：HRB335；
 - 5) 吊杆：Φ30，HRB335
- c) 套筒灌注合金：地锚连接锚头采用 Zn93-AL6-Cu1 合金；
- d) 桥面系：采用 8mm 厚花纹钢板。
- e) 混凝土：
 - 1) 桥台基础：C20 片石混凝土；
 - 2) 桥台台身：C25 混凝土；
 - 3) 地锚：C25 混凝土；
 - 4) 索塔：C30 混凝土。

A.3 设计要点

A.3.1 结构体系和总体布置

此桥梁为柔性悬索桥，矢跨比为 1/15；桥道系采用横梁+纵梁+桥面板的结构形式，桥塔采用钢筋混凝土门式结构。

A.3.2 主索及锚固

桥梁横向共设 2 个索面，每根主索采用 6 根带热铸头的成品钢丝绳组成圆形，主索成桥线形方程为： $y=4fx(1-x)/12$ ，方程坐标原点位于塔顶索鞍中心。

主索在通过索塔索鞍后散开，其中每根钢丝绳端头设置T形锚头与锚碇中的拉杆连接，实现主索锚固。通过调节螺母可以实现主索长度的调整。

A.3.3 吊杆

吊杆上端设有吊环，下端设有螺杆，吊杆上端通过销轴与索夹吊耳连接，下端与桥道系横梁连接，吊杆间距为2.0m，通过调节螺母实现吊杆长度调整。

A.3.4 桥道系（纵横叠合梁+钢板）

A.3.4.1 横梁采用[25a 两根槽钢背向组成，净距 30 毫米，上下设缀板。横梁腹板留孔供桥道系下的横向抗风钢丝绳穿过。横梁中心间距 2.0 米，与吊索对应。

A.3.4.2 纵梁采用 I16 工字钢，横向设 6 根。纵梁与横梁采用螺接。纵梁槽钢标准长度 6 米，纵向采用搭接钢板螺栓连接。纵梁接头在横桥向错开排列，每根横梁上的接头数量不多于 3 个。

A.3.4.3 桥面板采用 8mm 厚的花纹钢板，每个节间桥面钢板由两块构成，钢板之间采用坡口焊连接成整体，钢板与纵梁之间采用螺杆连接，桥面两侧设槽钢护轮带。

A.3.5 索塔

桥塔均为双柱门式桥塔，塔顶设上横梁，塔底设下横梁或直接与桥台固结。

A.3.6 索鞍

鞍槽、支承板、鞍座上板采用铸钢，然后用钢板作为加劲肋，在工厂完成焊接；鞍座下板也采用铸钢，索鞍下设45号钢辊轴。

A.3.7 抗风索

抗风索在主跨范围内线形为二次抛物线，主跨范围外为直线，抗风主索、抗风拉索钢丝绳按GB 8918 选用。

- 抗风主索直径为 36 mm，规格为 6X26SW+IWR 型，公称抗拉强度为 1770MPa，AB 类镀锌，一根抗风主索选用 1 根钢丝绳。
- 抗风拉索直径为 12 mm，规格为 6X19W+IWR 型，公称抗拉强度为 1770 MPa，AB 类镀锌，一根抗风拉索选用 1 根钢丝绳。
- 相关设计图见图 A-1~A-19。

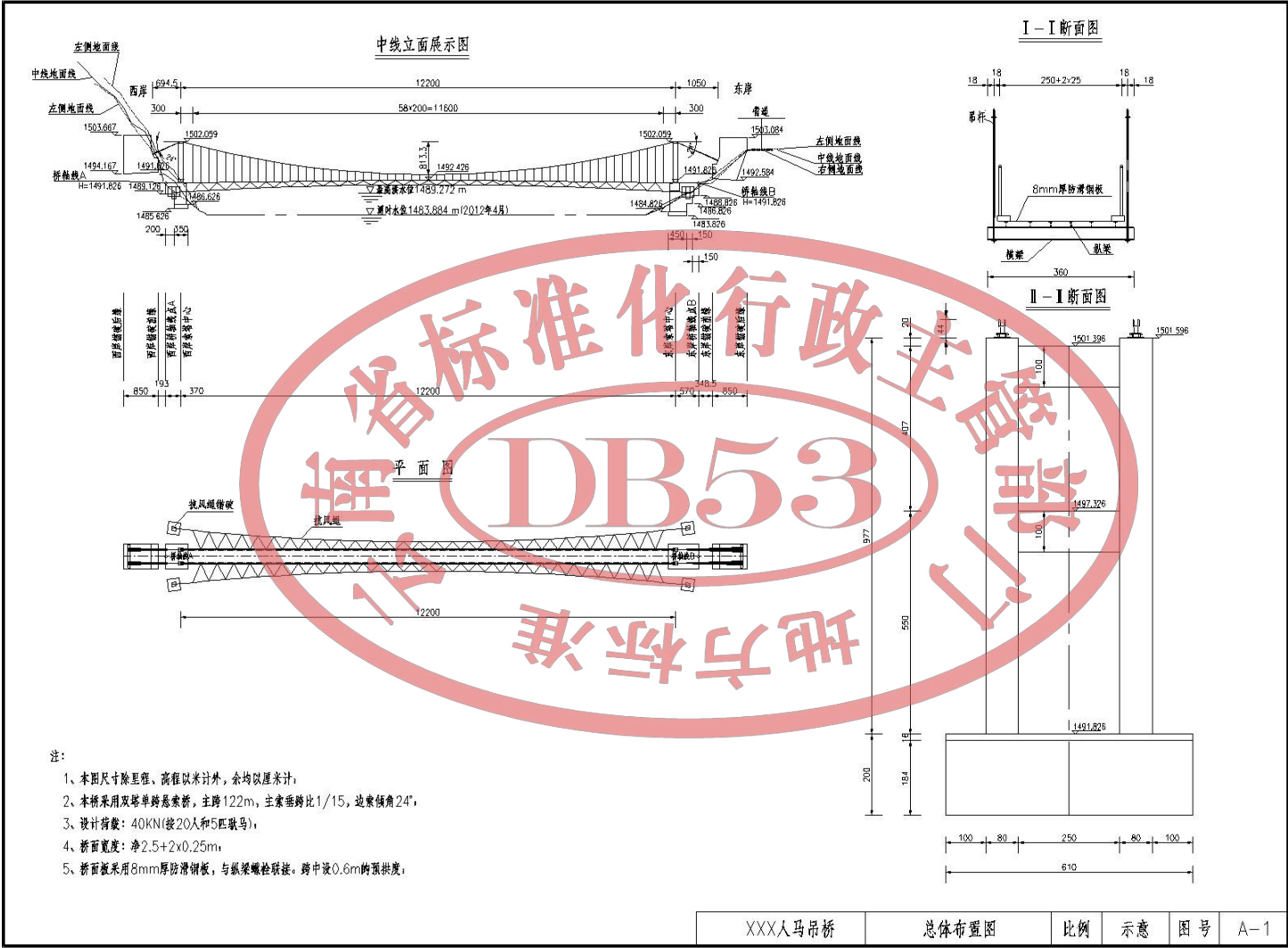


图 A.1 总体布置图

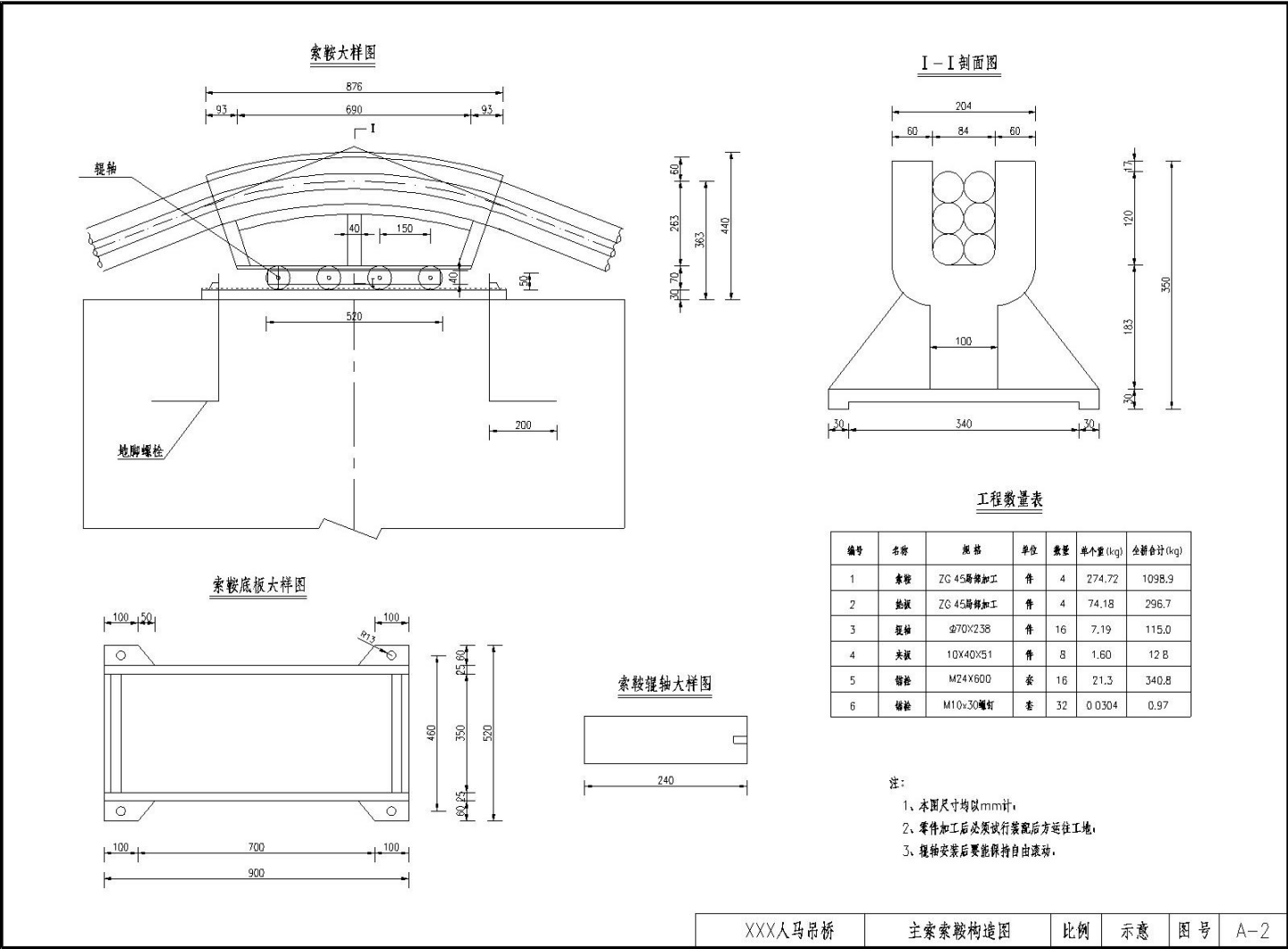


图 A.2 主索索鞍构造图

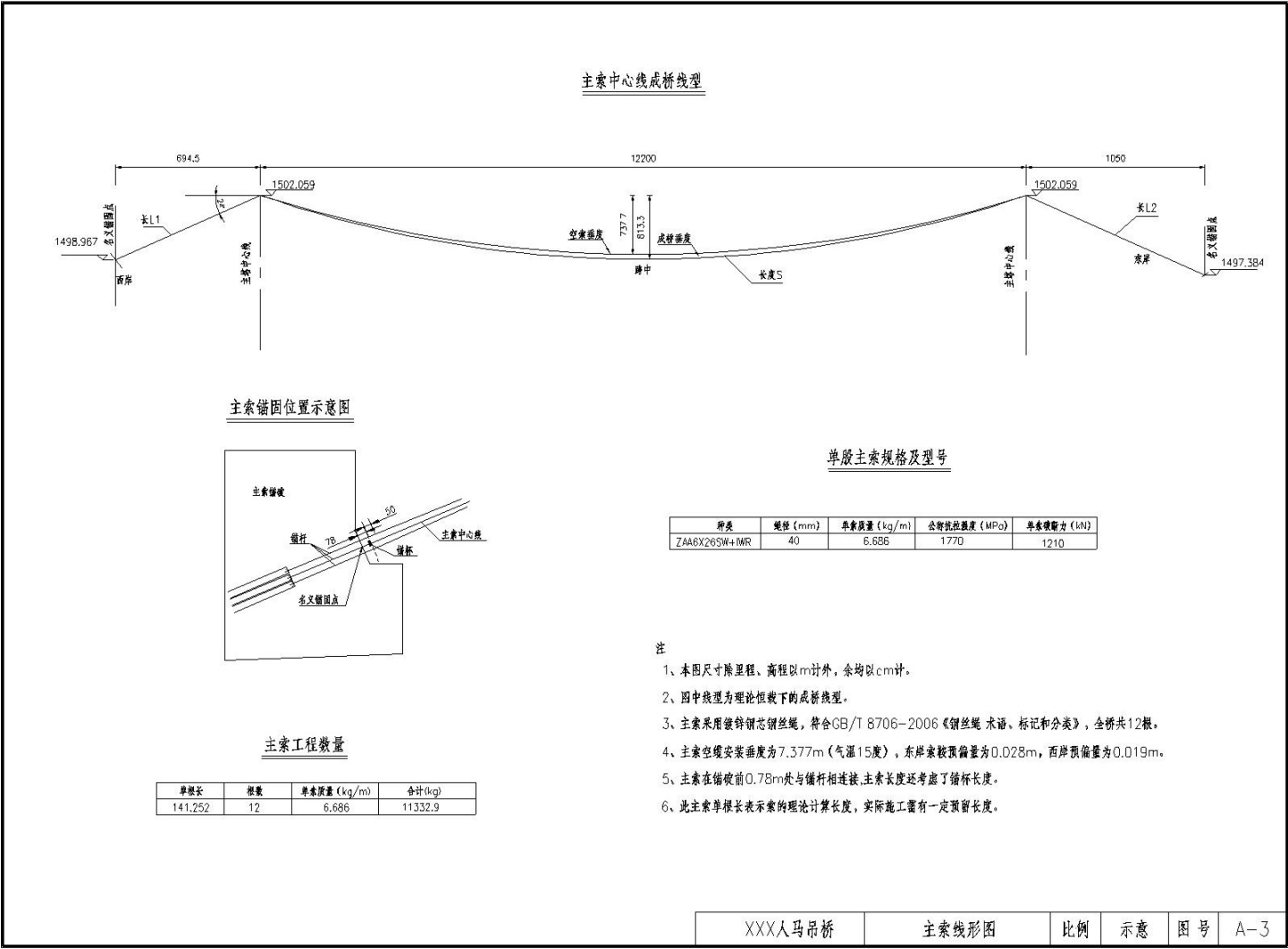


图 A. 3 主索线形图

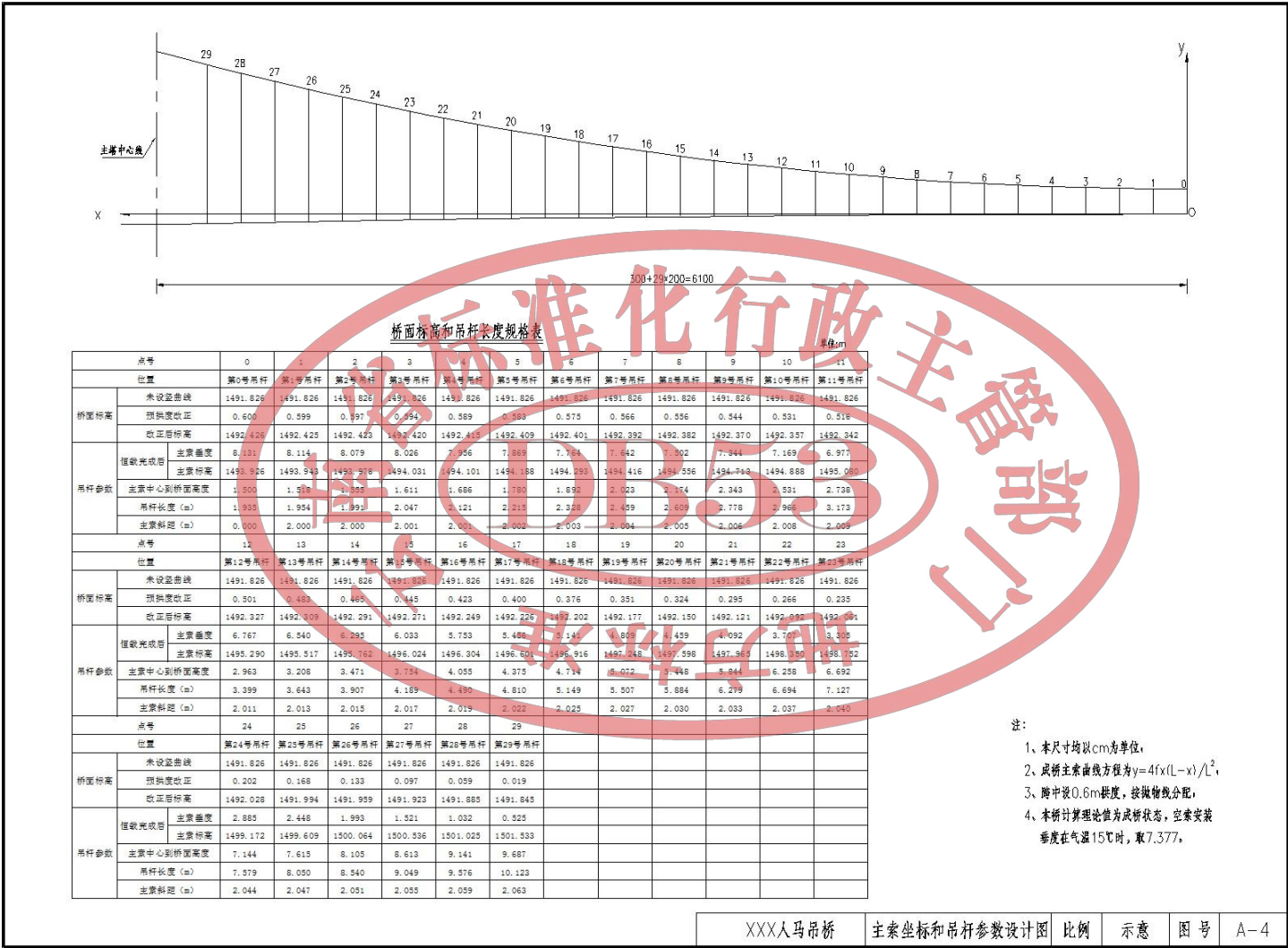


图 A. 4 主索坐标和吊杆参数设计图

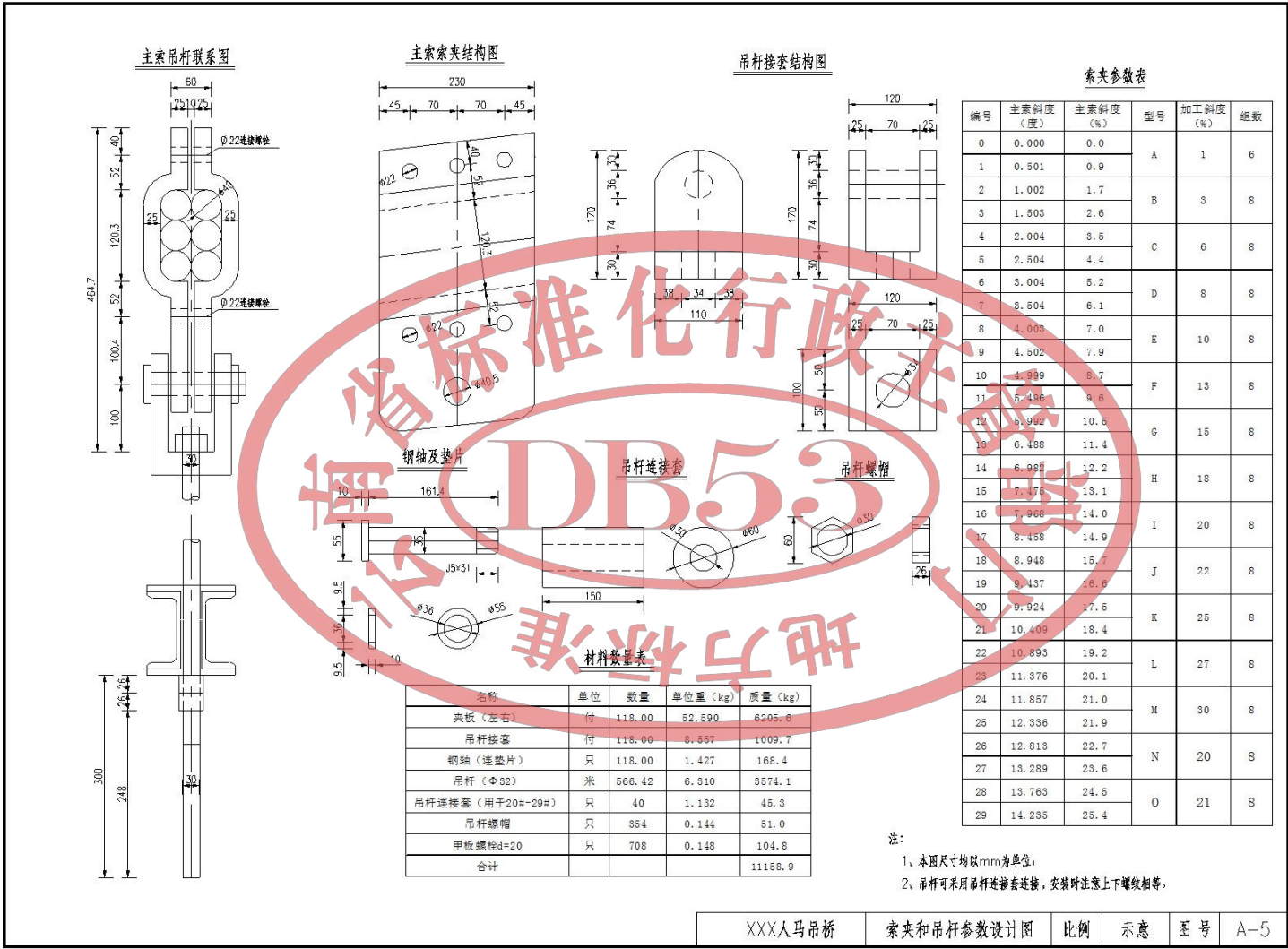


图 A.5 索夹和吊杆参数设计图

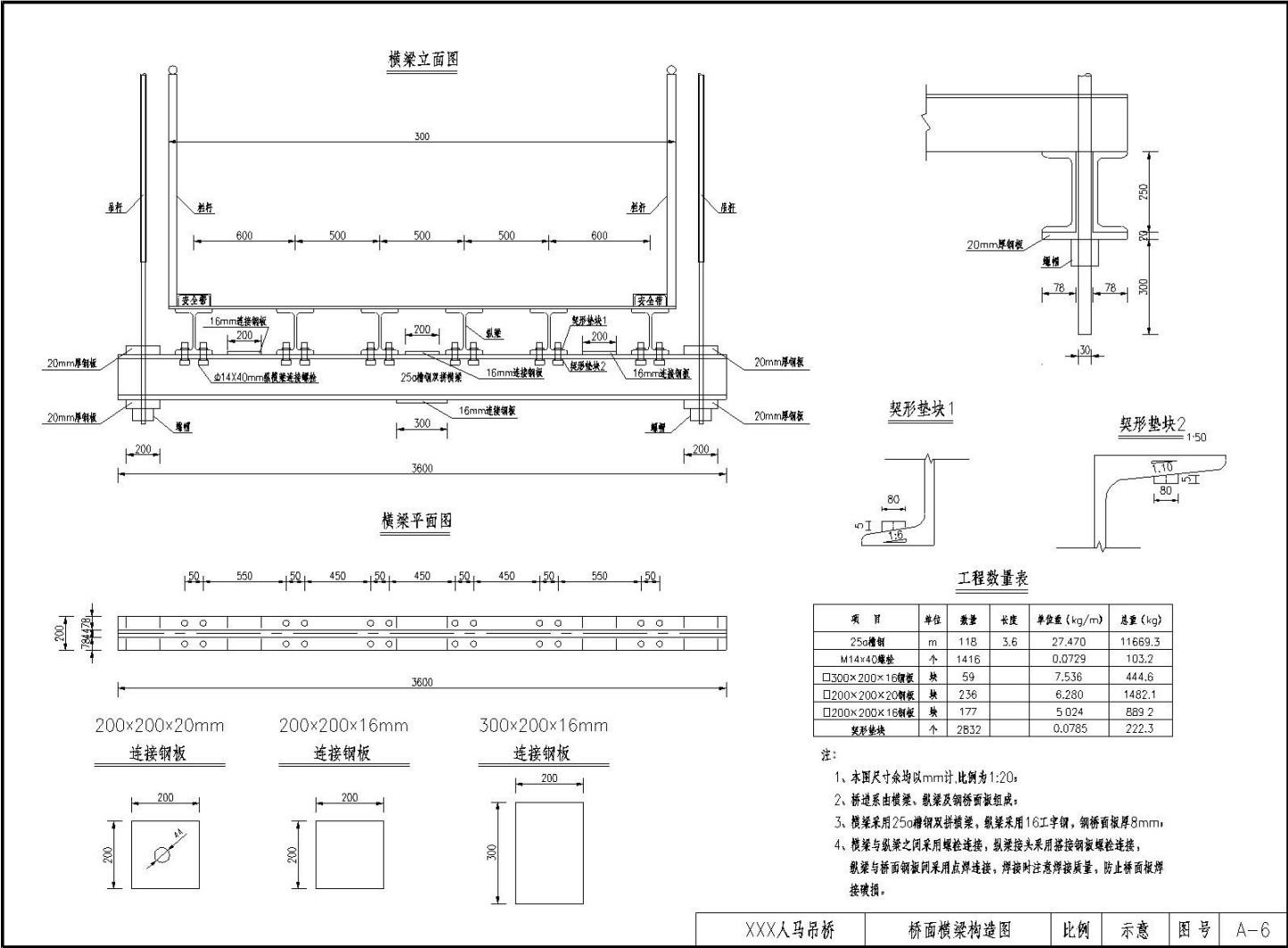


图 A. 6 桥面横梁构造图

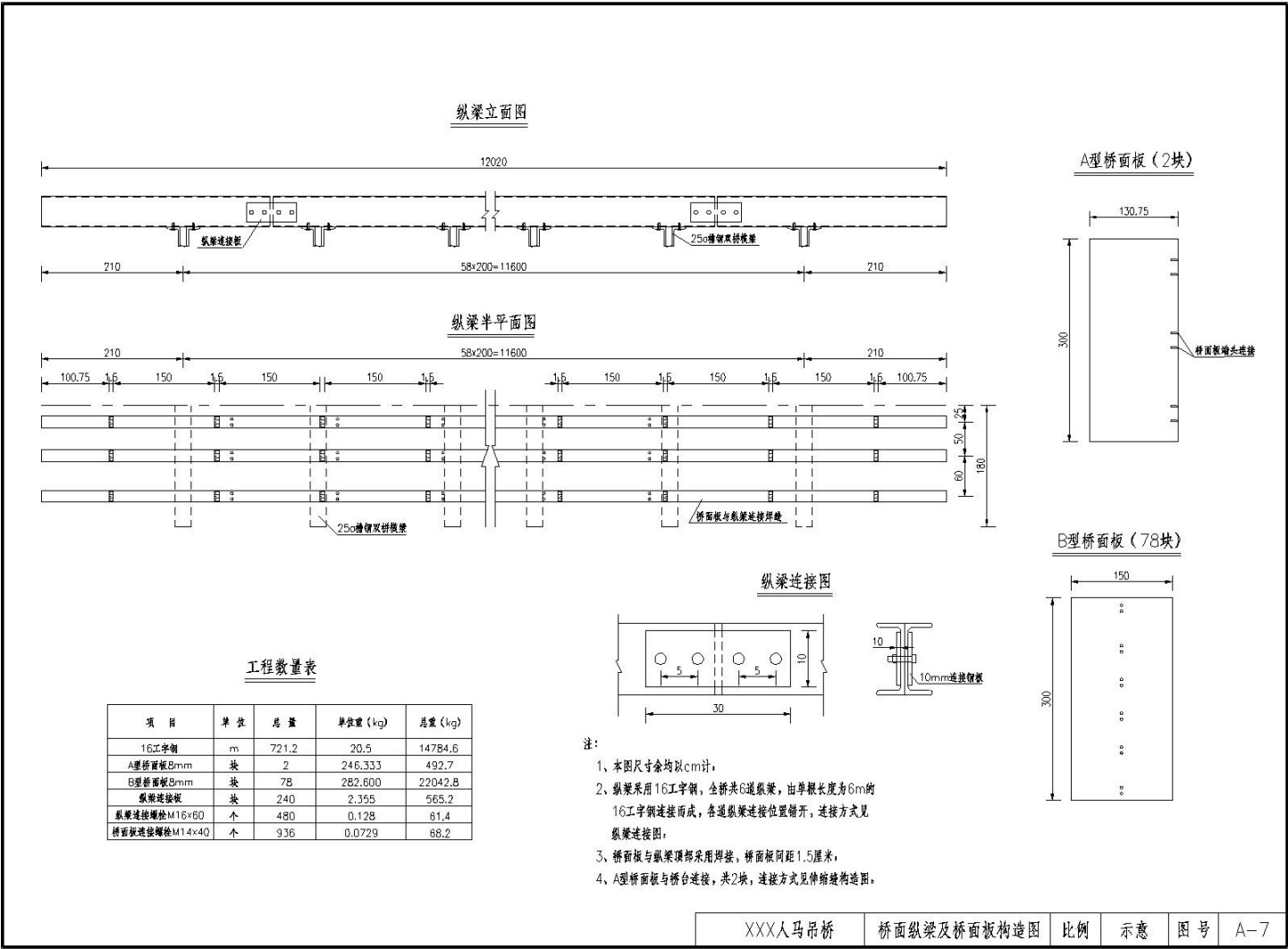


图 A. 7 桥面纵梁及桥面板构造图

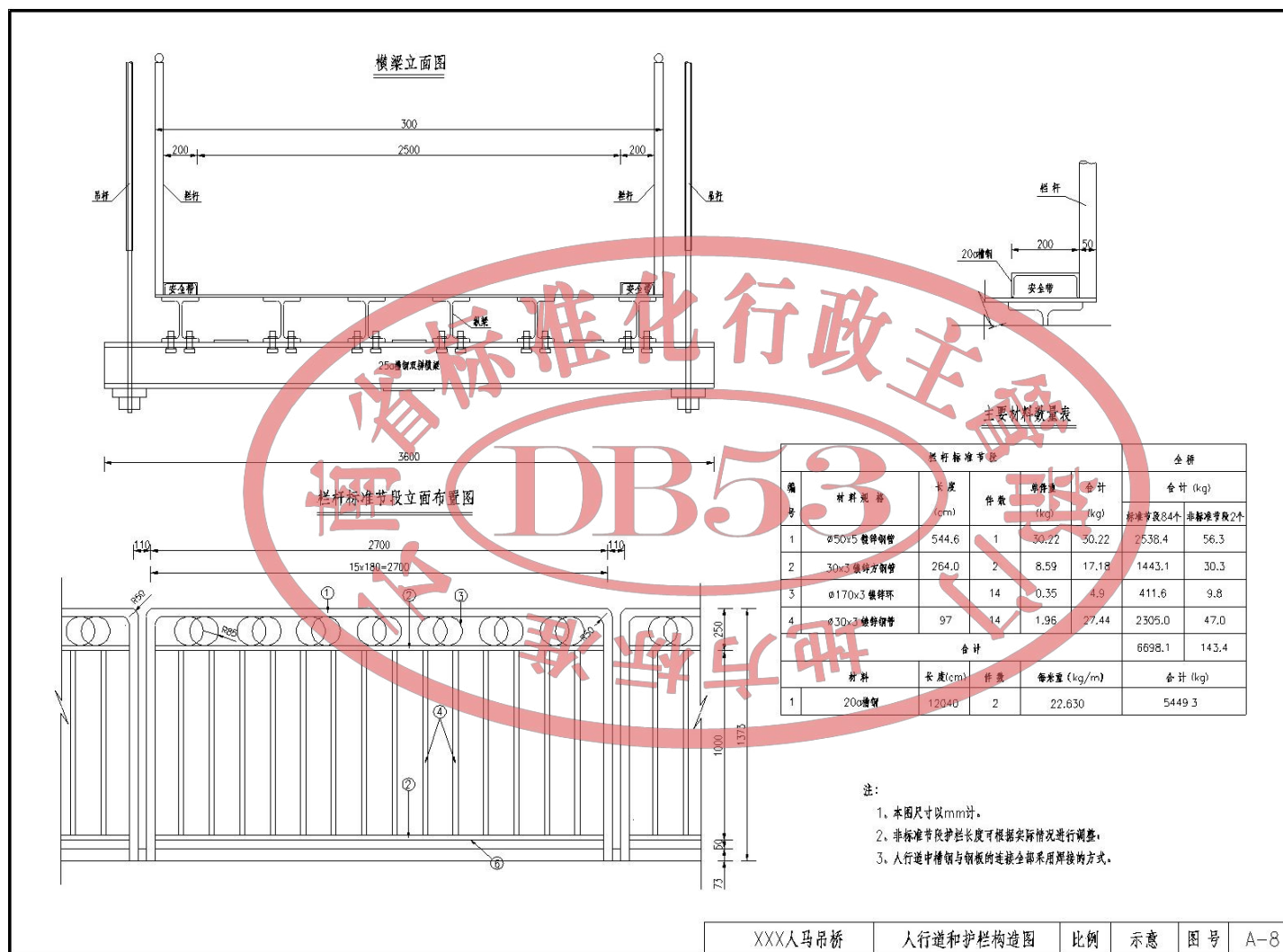


图 A.8 人行道和护栏构造图

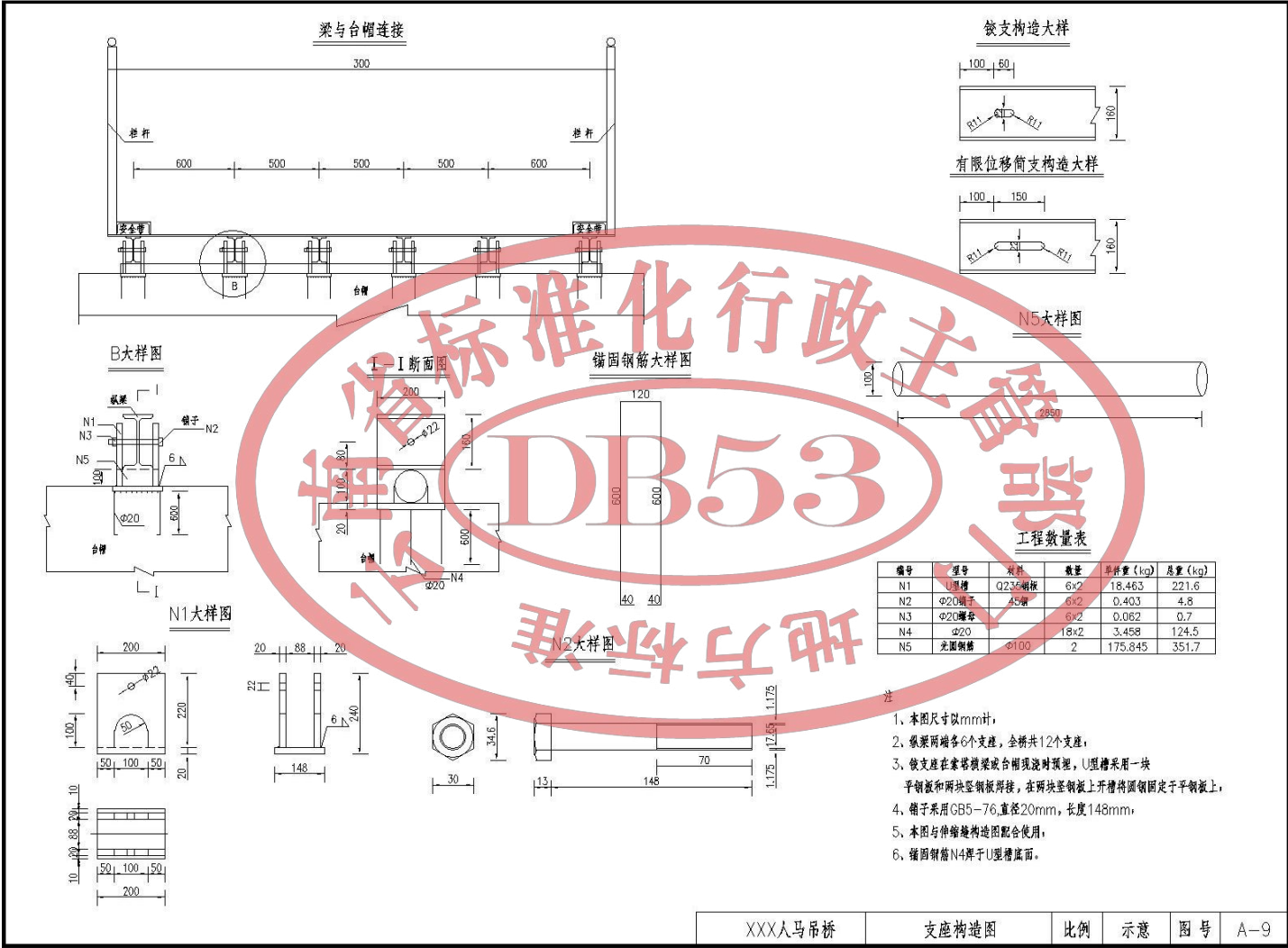


图 A.9 支座构造图

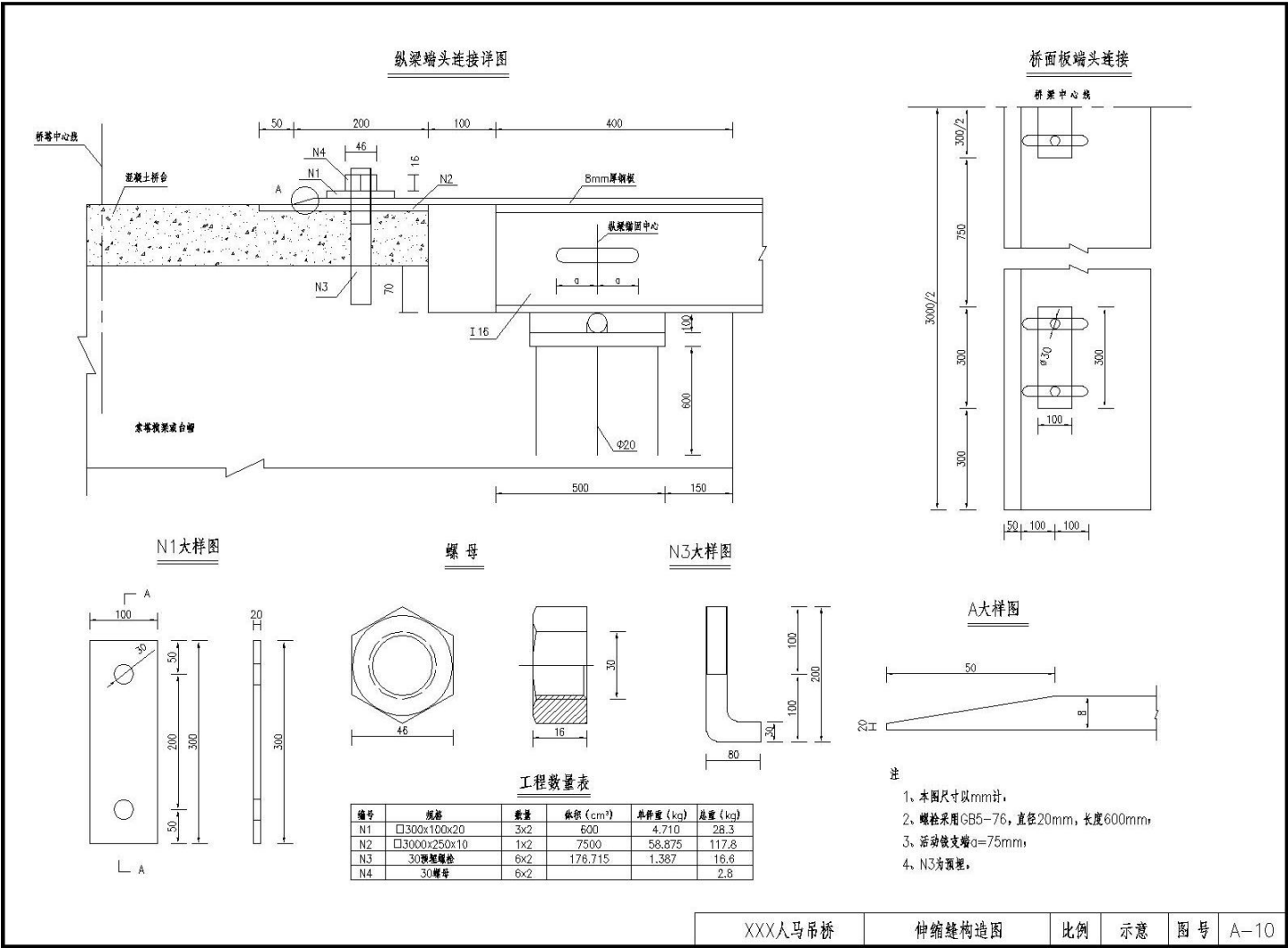


图 A. 10 伸缩缝构造图

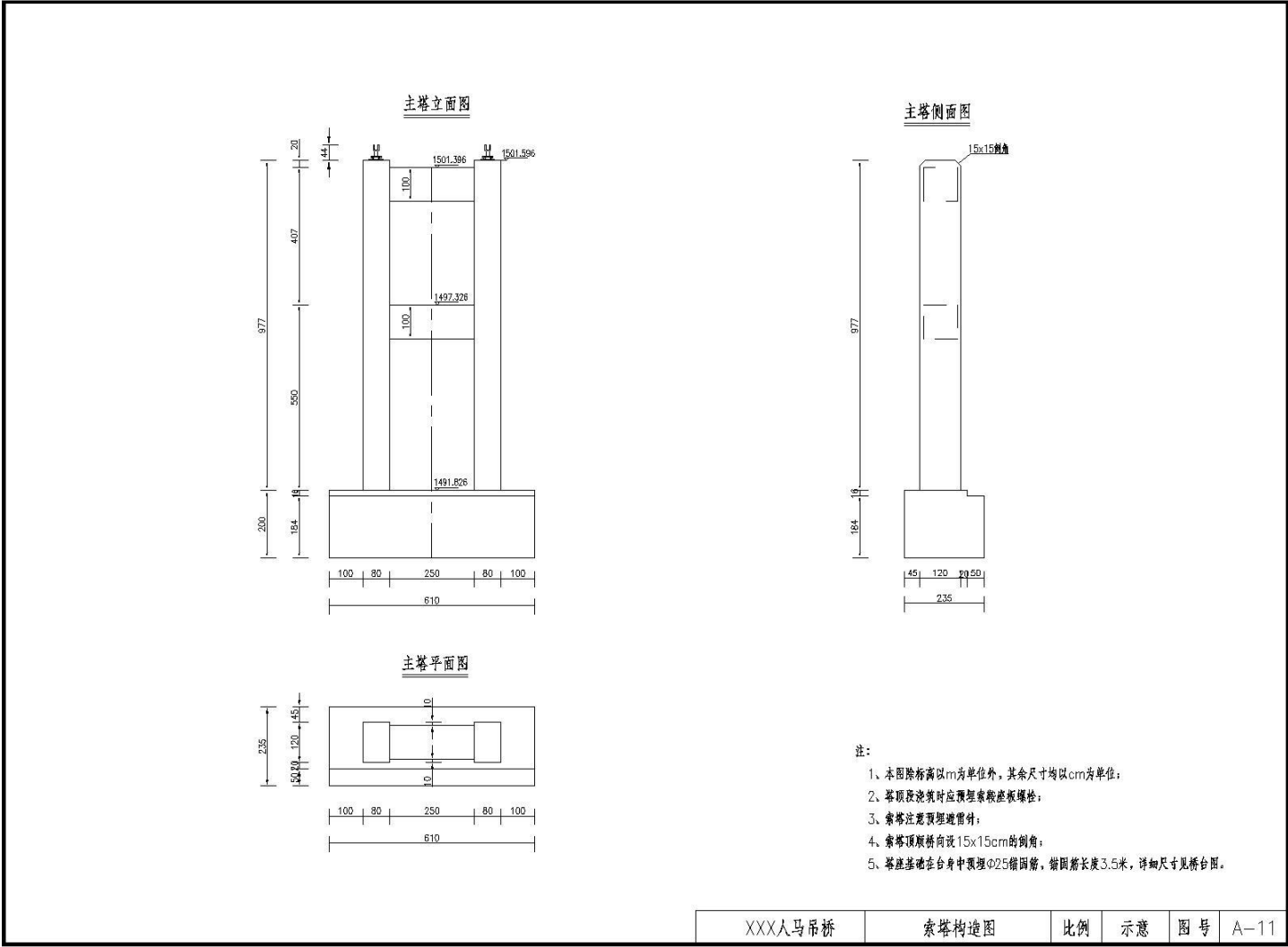


图 A.11 索塔构造图

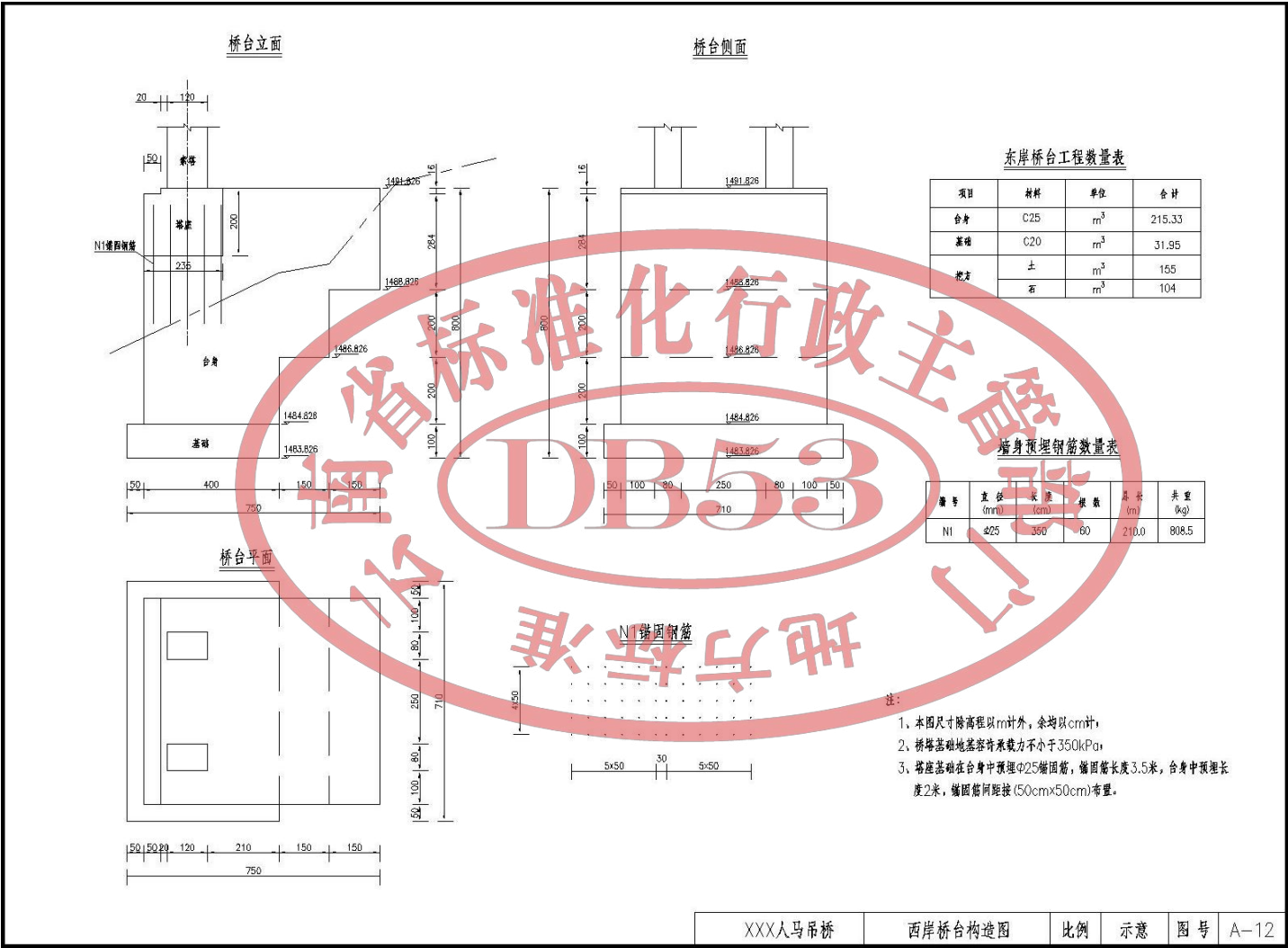


图 A. 12 西岸桥台构造图

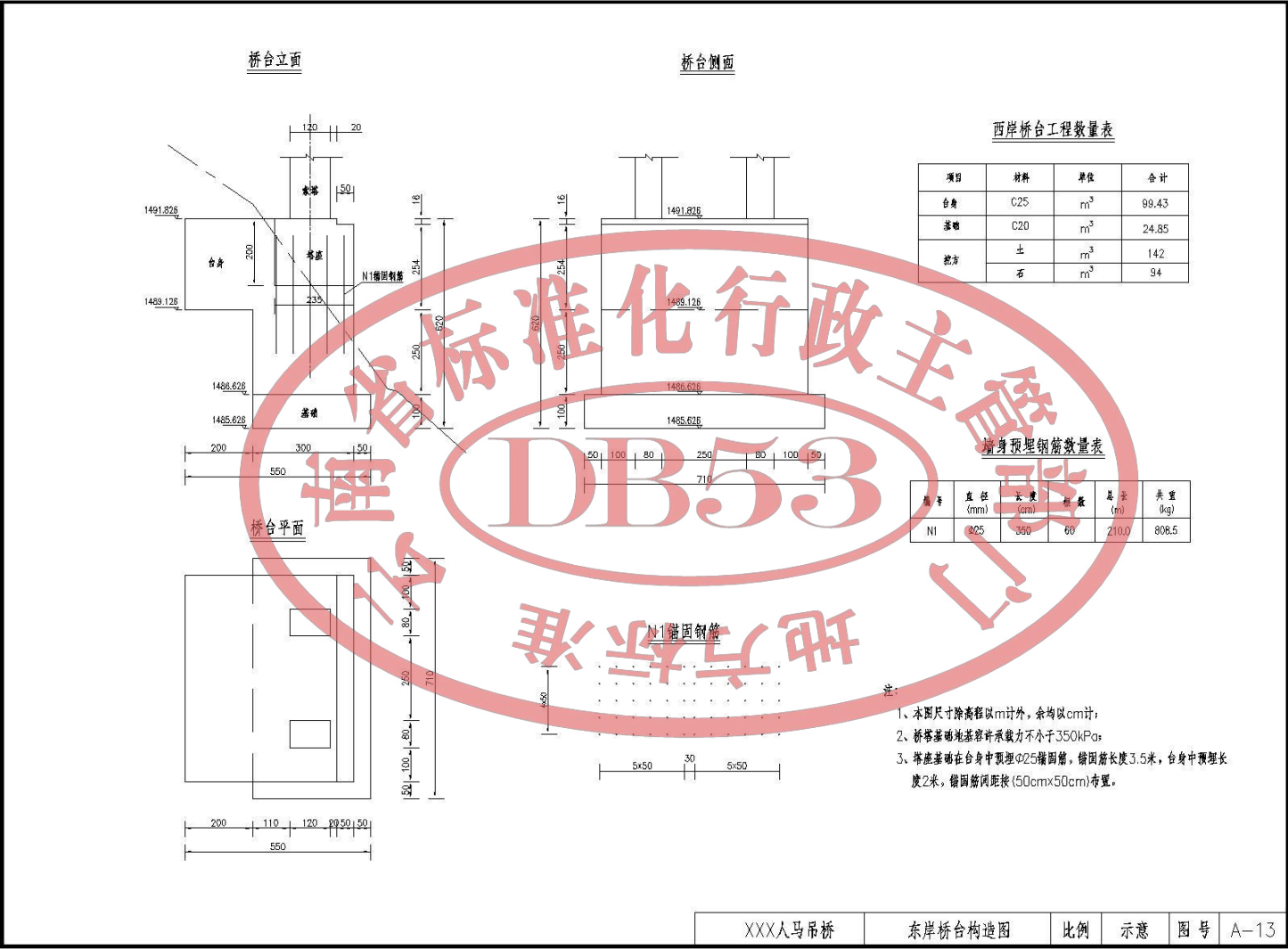


图 A. 13 东岸桥台构造图

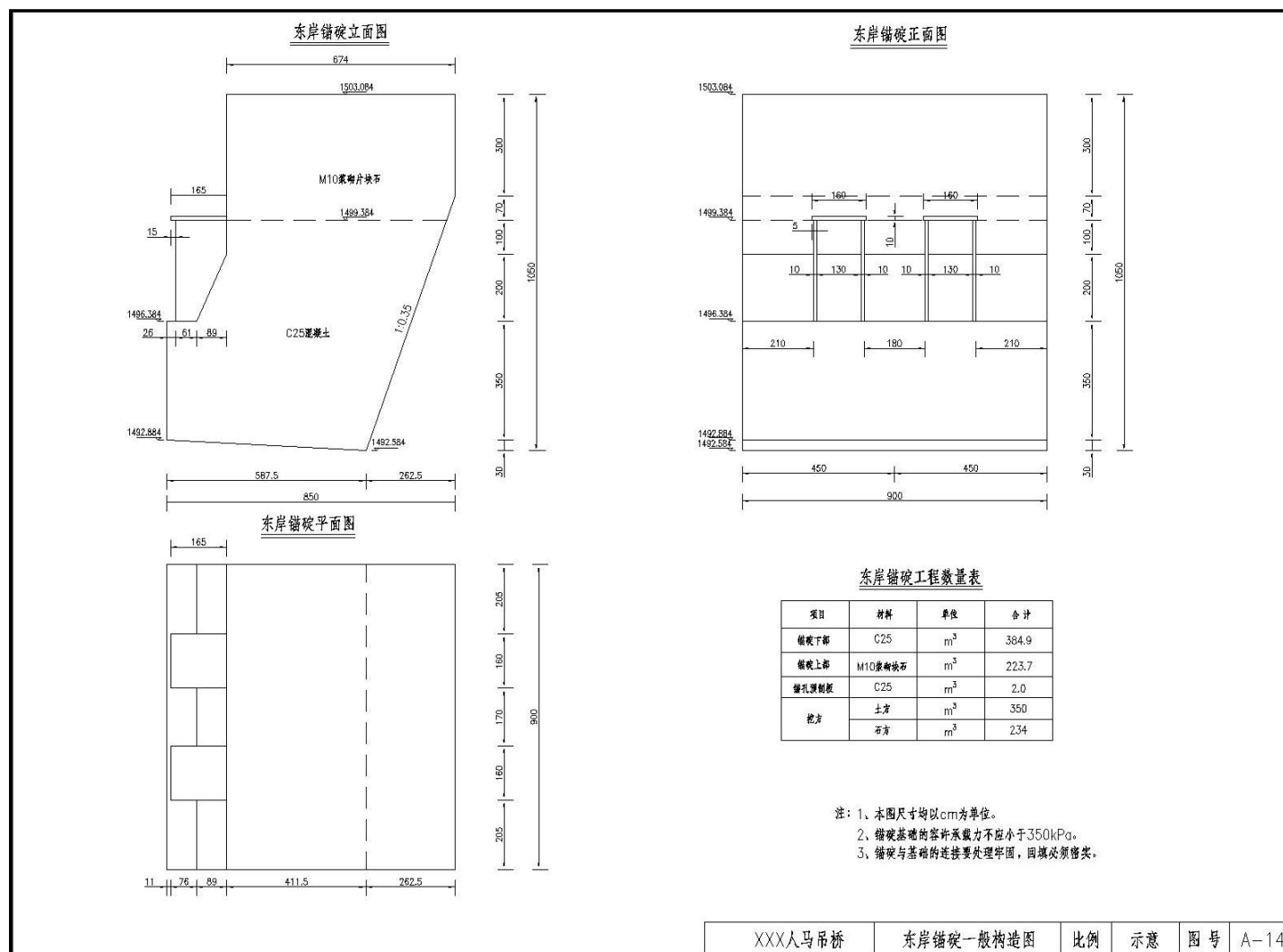


图 A.14 东岸锚碇一般构造图

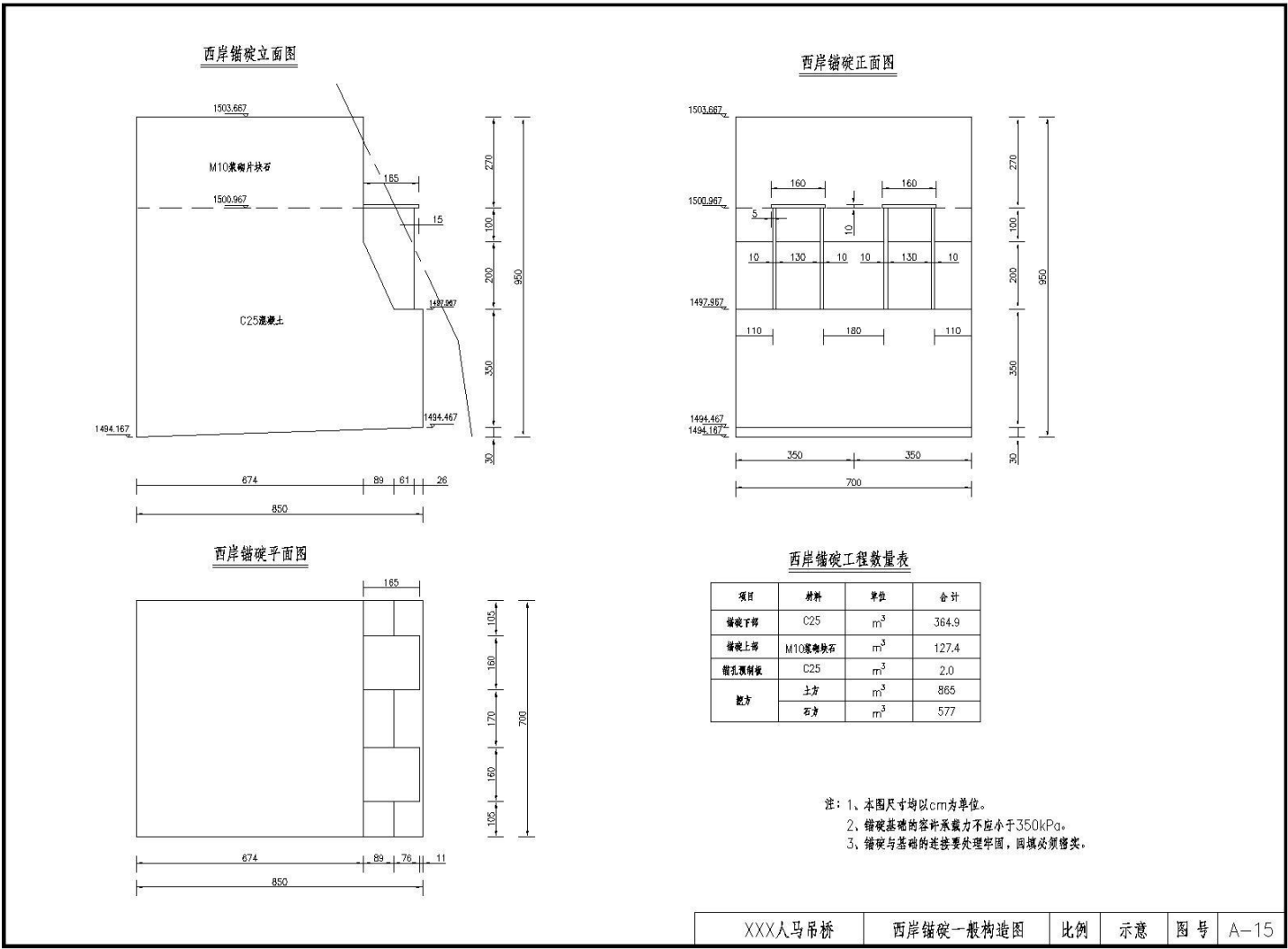


图 A. 15 西岸锚碇一般构造图

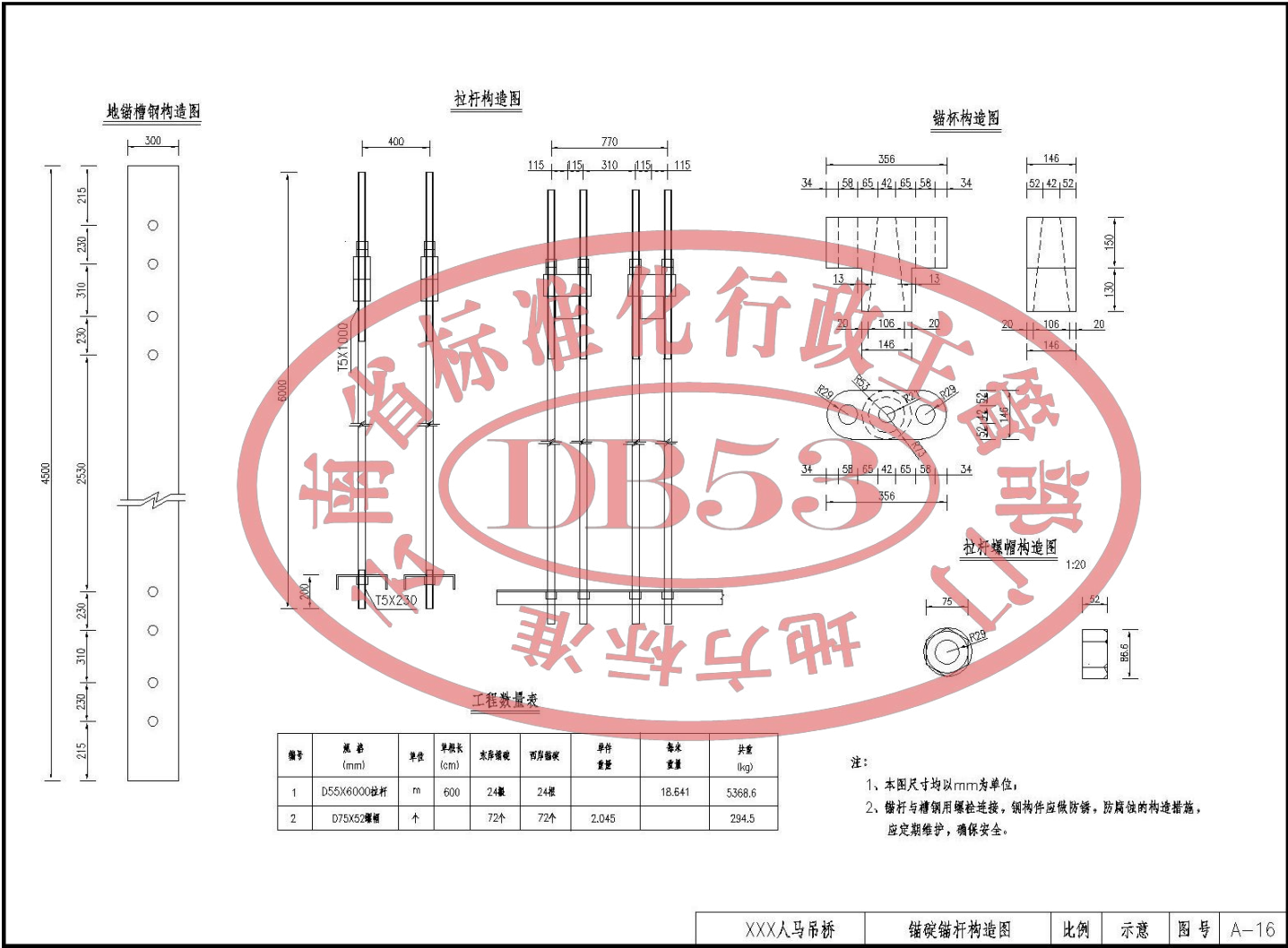


图 A. 16 锚碇锚杆构造图

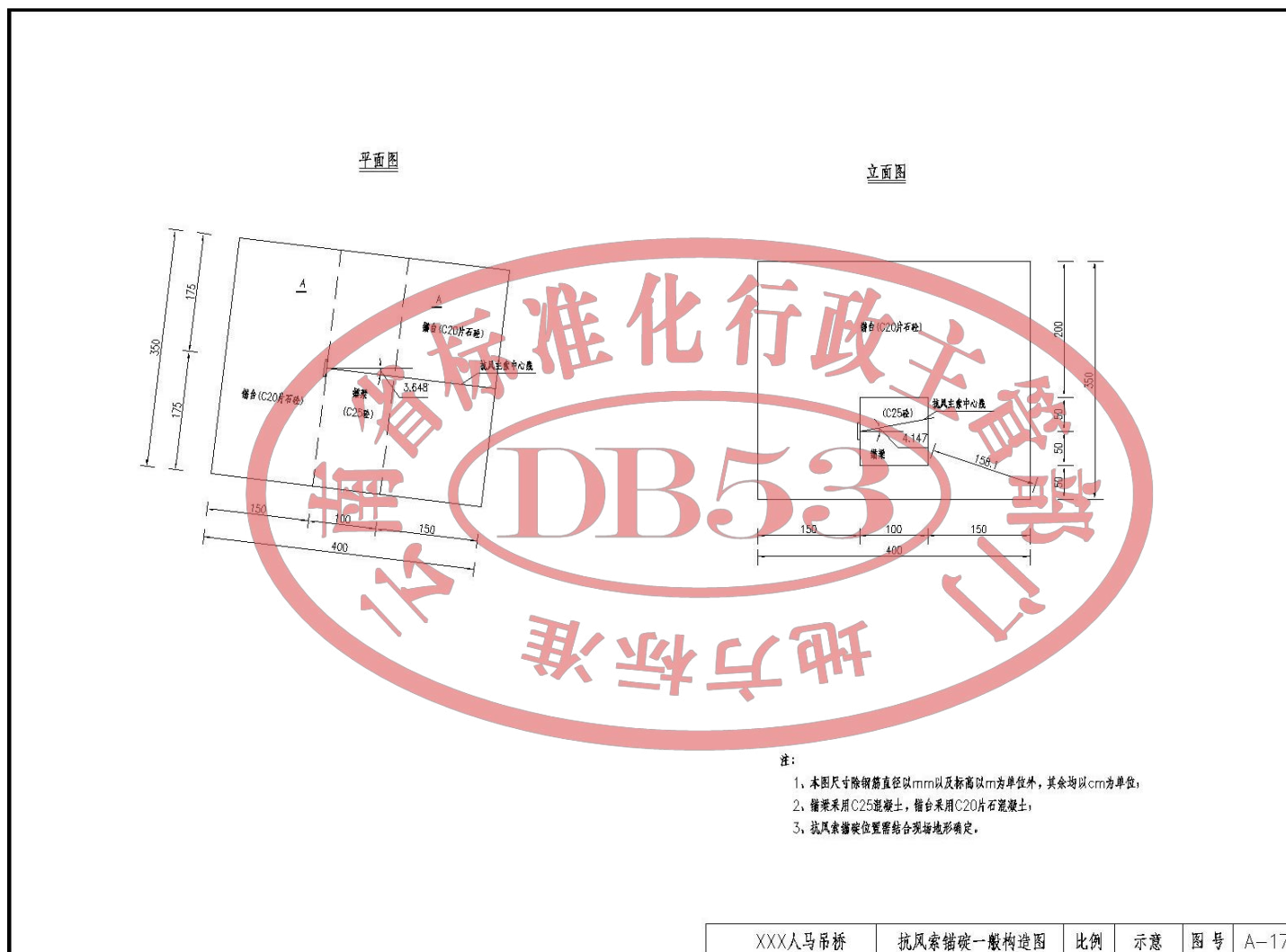


图 A. 17 抗风索锚碇一般构造图

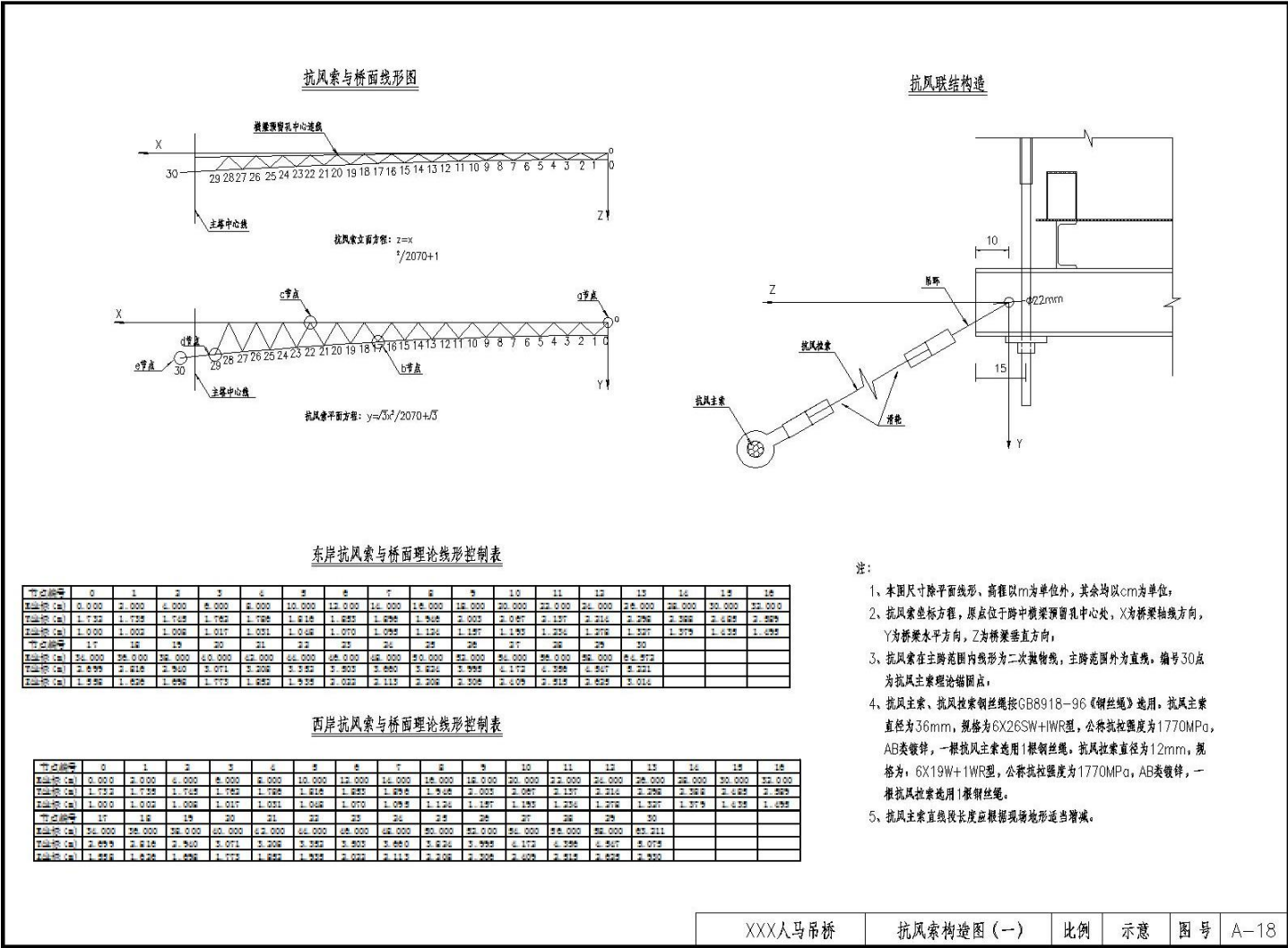


图 A. 18 抗风索构造图 (一)

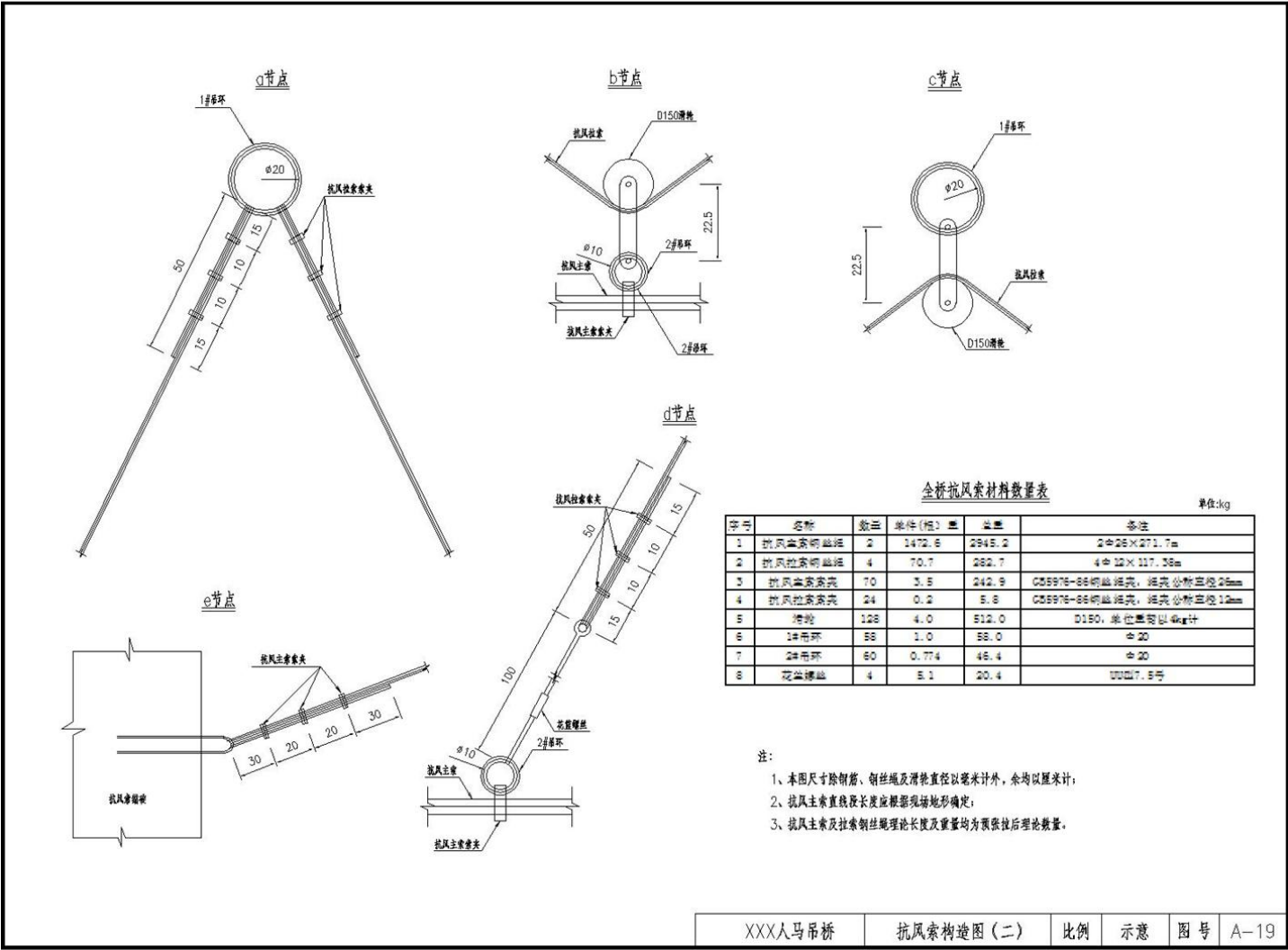


图 A.19 抗风索构造图(二)

附录 B
(资料性)

实桥实例——汽车吊桥

B.1 工程概况

工程概况如下：

- a) 桥址：某汽车吊桥位于怒江州泸水县秤杆乡，西岸接省道，对岸接秤杆乡农村基本级公路。
- b) 桥型：柔性悬索桥，矢高 11.667 m，矢跨比 1/12，跨中设 1.25 m 拱度，纵向形成 1.786% 的双向纵坡。
- c) 桥面宽度：净 4.0 m+2×0.25 m。
- d) 跨径：1-140 m 悬索桥。
- e) 荷载标准：单辆汽车 20 t（单车通行）。
- f) 车辆限速：5 km/h。
- g) 地震烈度：Ⅶ。
- h) 计算风速根据规范 $P=1/50$ 取值，风速为 24 m/s，风压 0.30 kN/m²。
- i) 桥位地质：据工程地质调查及钻孔揭露，桥位处地层岩性主要有第四系（Q4m1）素填土、冲洪积层（Q4al+pl）、残破积层（Q4el+d1）和元古界高黎贡山群上亚群（Ptgl2）。

B.2 主要材料

主要材料如下：

- a) 主索、吊杆及抗风缆：主索采用 6Φ50 镀锌钢芯钢绳强度 1770 Mpa，单根破断拉力 1670 kN；吊杆采用 Φ36 镀锌钢芯钢绳；抗风缆主索采用 2Φ36 镀锌钢芯钢绳。
- b) 钢材型号：
 - 1) 横梁：[36a；
 - 2) 纵梁：I20a；
 - 3) 索夹、套筒、索鞍：ZG45 铸钢；
 - 4) 主钢筋：HRB335；
 - 5) 吊索：Φ36，镀锌钢丝绳。
- c) 套筒灌注合金：地锚连接锚头采用 Zn93-AL6-Cu1 合金。
- d) 桥面系：采用 10mm 厚花纹钢板。
- e) 混凝土：
 - 1) 桥台基础：C20 混凝土；
 - 2) 桥台台身：C25 混凝土；
 - 3) 地锚：C25 混凝土；
 - 4) 索塔：C30 混凝土。

B.3 设计要点

B.3.1 结构体系和总体布置

此桥梁为柔性悬索桥，矢跨比为 1/12；桥道系采用横梁+纵梁+桥面板的结构形式，索塔采用钢筋混凝土门式结构。

B.3.2 主索及锚固

桥梁横向共设2个索面，每根主索采用6根带热铸头的成品钢丝绳组成圆形，主索成桥线形方程为： $y=4fx(1-x)/12$ ，方程坐标原点位于塔顶索鞍中心。

主索在通过索塔索鞍后散开，其中每根钢丝绳端头设置T形锚头与锚碇中的拉杆连接，实现主索锚固。通过调节螺母可以实现主索长度的调整。

B.3.3 吊索

吊索上端设有吊环，下端设有螺杆，吊索上端通过销轴与索夹吊耳连接，下端通过螺杆与桥道系横梁连接，吊索间距为2.5 m，通过调节螺母实现吊索长度调整。

B.3.4 桥道系（纵横叠合梁+钢板）

横梁采用[36a两根槽钢背向组成，净距55 mm，上下设缀板。横梁腹板留孔供桥道系下的横向抗风钢丝绳穿过。横梁中心间距2.5 m，与吊索对应。

纵梁采用I20a工字钢，横向设14根。纵梁与横梁采用螺接。纵梁槽钢标准长度6米，纵向采用搭接钢板螺栓连接。纵梁接头在横桥向错开排列，每根横梁上的接头数量不多于5个。

桥面板采用10 mm厚的花纹钢板，每个节间桥面板由两块构成，钢板之间采用坡口焊连接成整体。钢板与纵梁之间采用焊接。桥面两侧设槽钢+钢板组合式人行道。

桥道系作防锈涂漆处理。

B.3.5 索塔

索塔均为双柱门式索塔，塔顶设上横梁，塔底设下横梁或直接与桥台固结。

B.3.6 索鞍

鞍槽、支承板、鞍座上板采用铸钢，然后用钢板作为加劲肋，在工厂完成焊接，鞍座下板也采用铸钢，索鞍下设45号钢辊轴。

B.3.7 抗风索

抗风索在主跨范围内线形为二次抛物线，主跨范围外为直线，抗风主索、抗风拉索钢丝绳按GB 8918选用。

- a) 抗风主索直径为 36 mm，规格为 6X26SW+1WR 型，公称抗拉强度为 1770MPa，AB 类镀锌，一根抗风主索选用 1 根钢丝绳。
- b) 抗风拉索直径为 12 mm，规格为 6X19W+1WR 型，公称抗拉强度为 1770 MPa，AB 类镀锌，一根抗风拉索选用 1 根钢丝绳。
- c) 相关设计图见图 B-1~B-20。

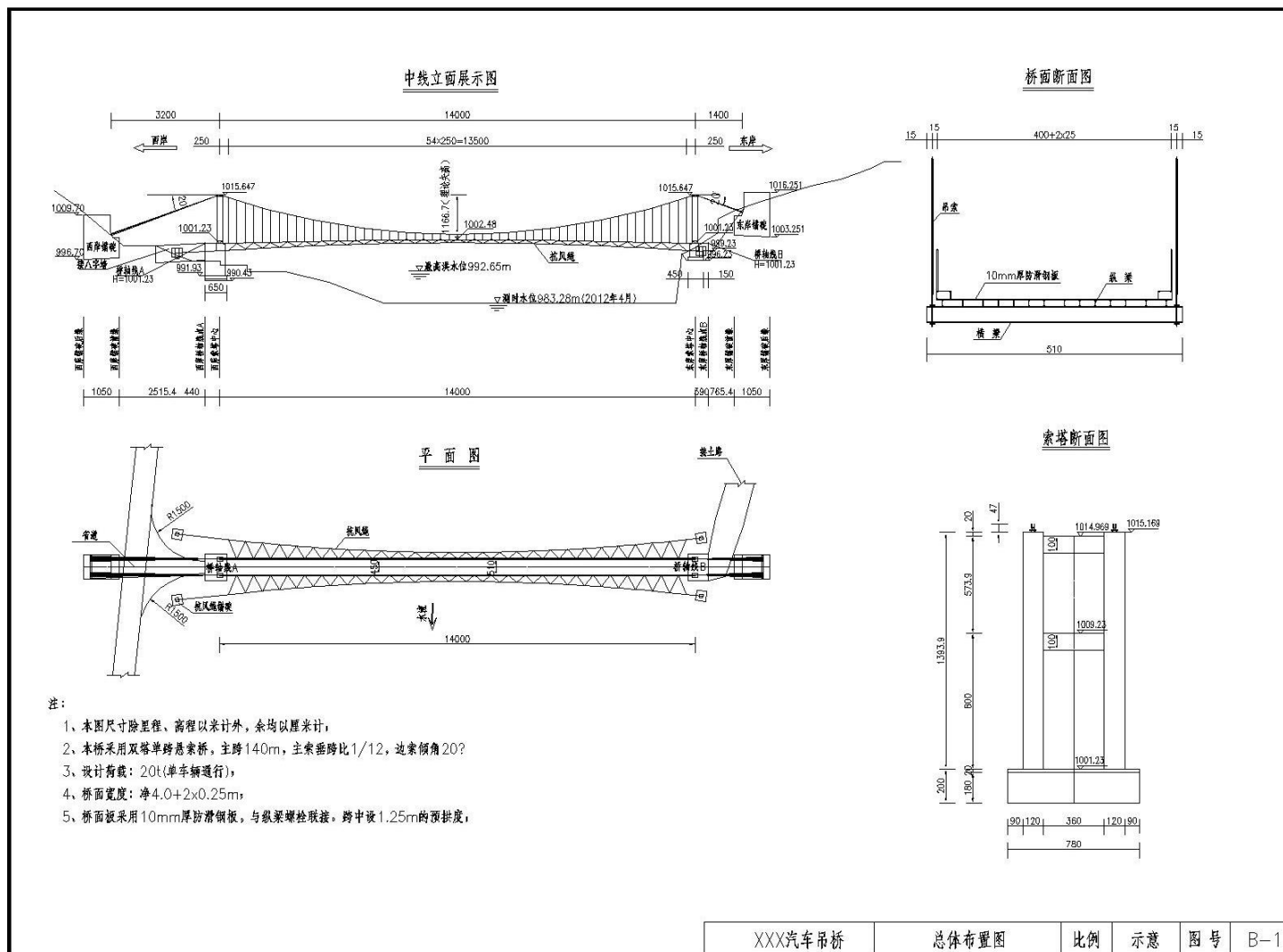


图 B.1 总体布置图

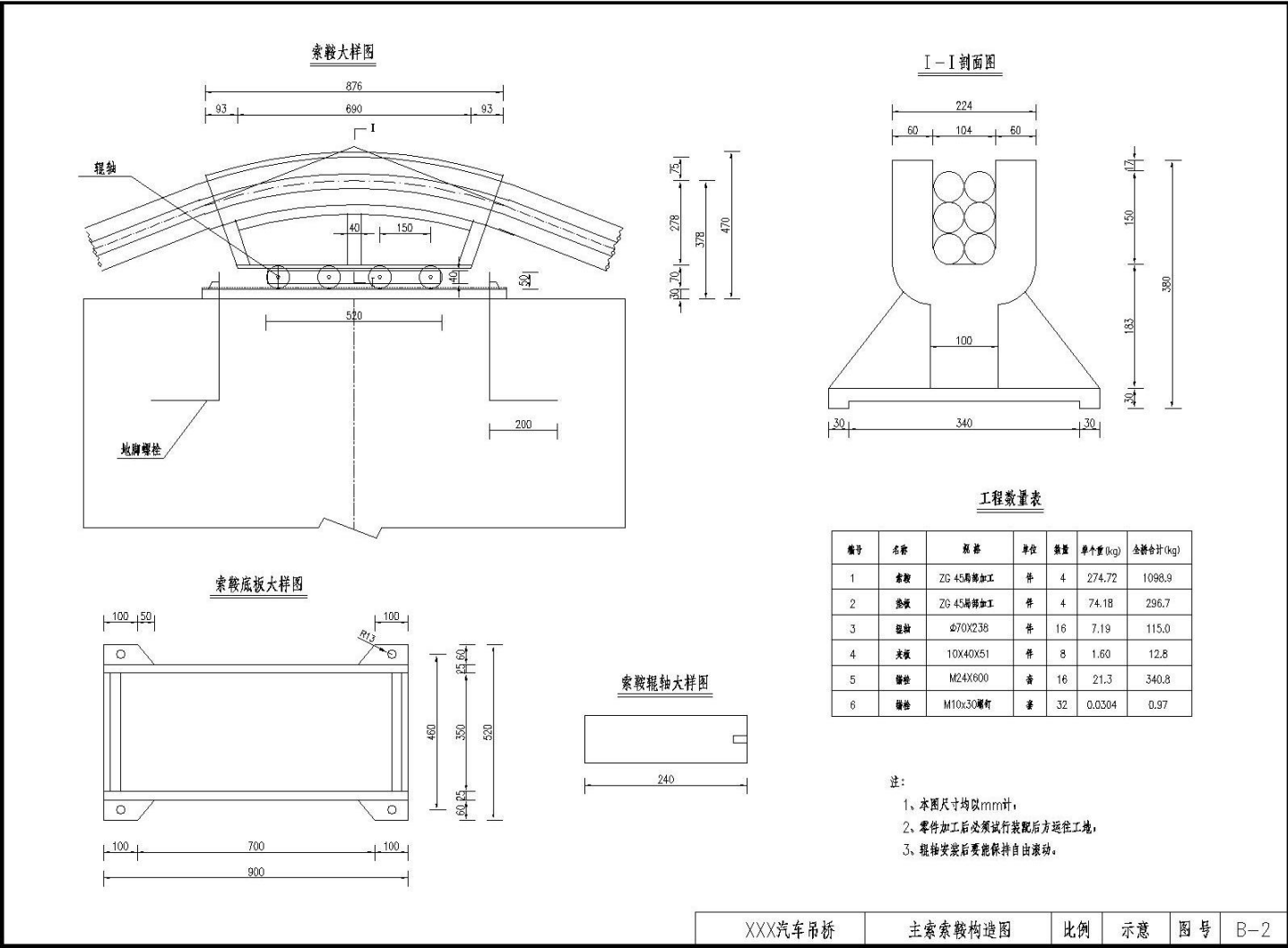


图 B.2 主索索鞍构造图

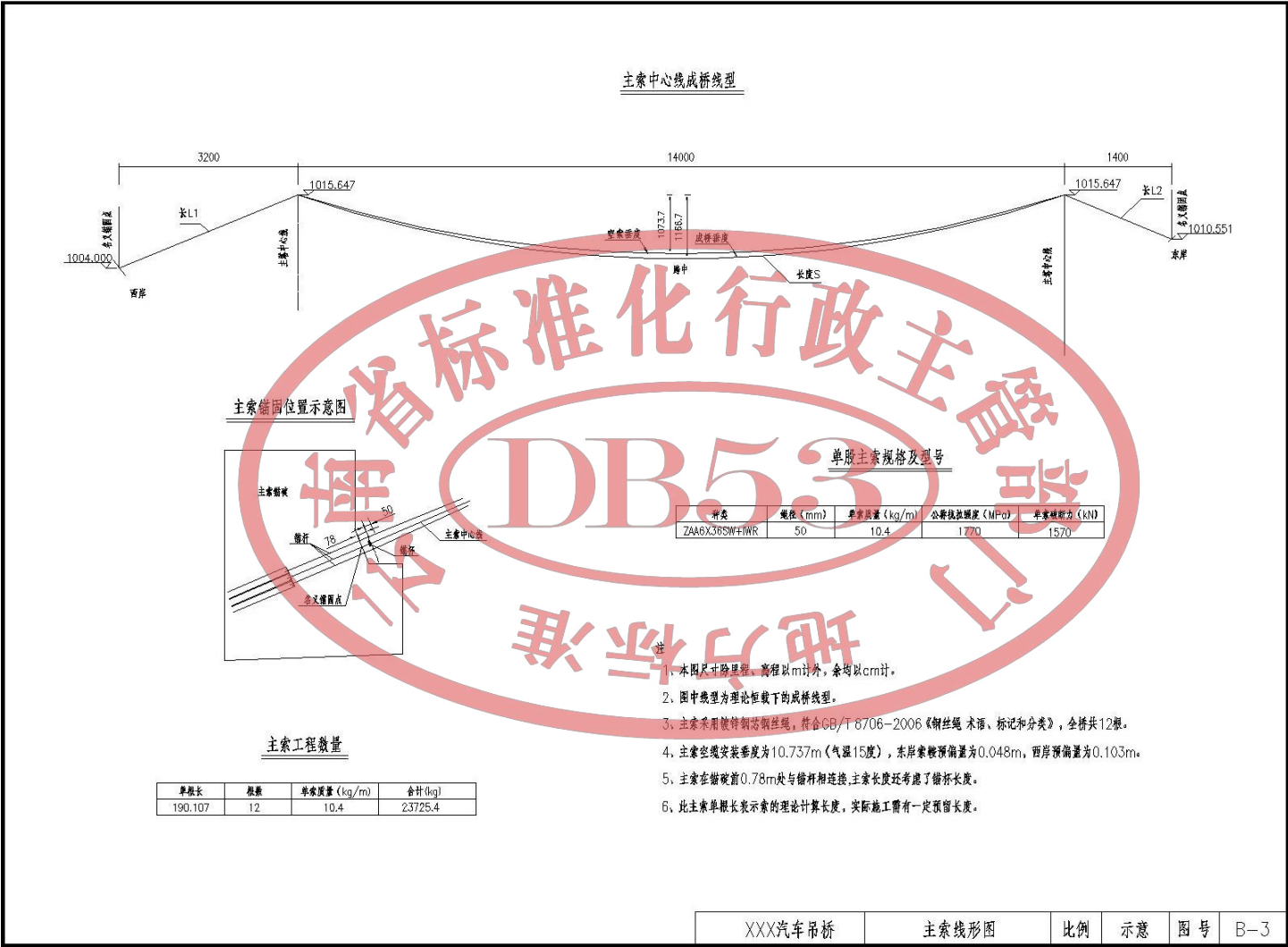


图 B. 3 主索线形图

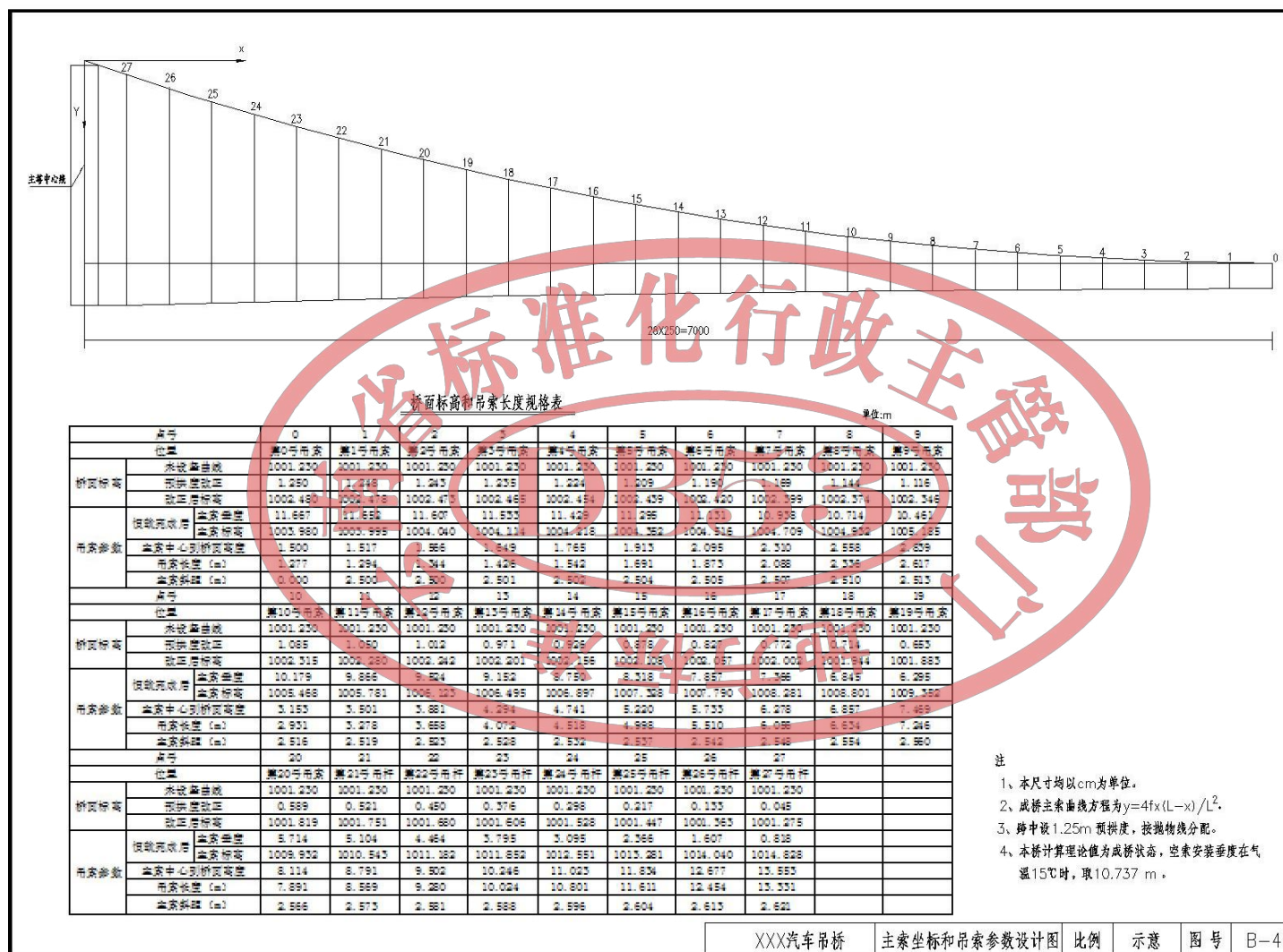


图 B. 4 主索坐标和吊索参数设计图

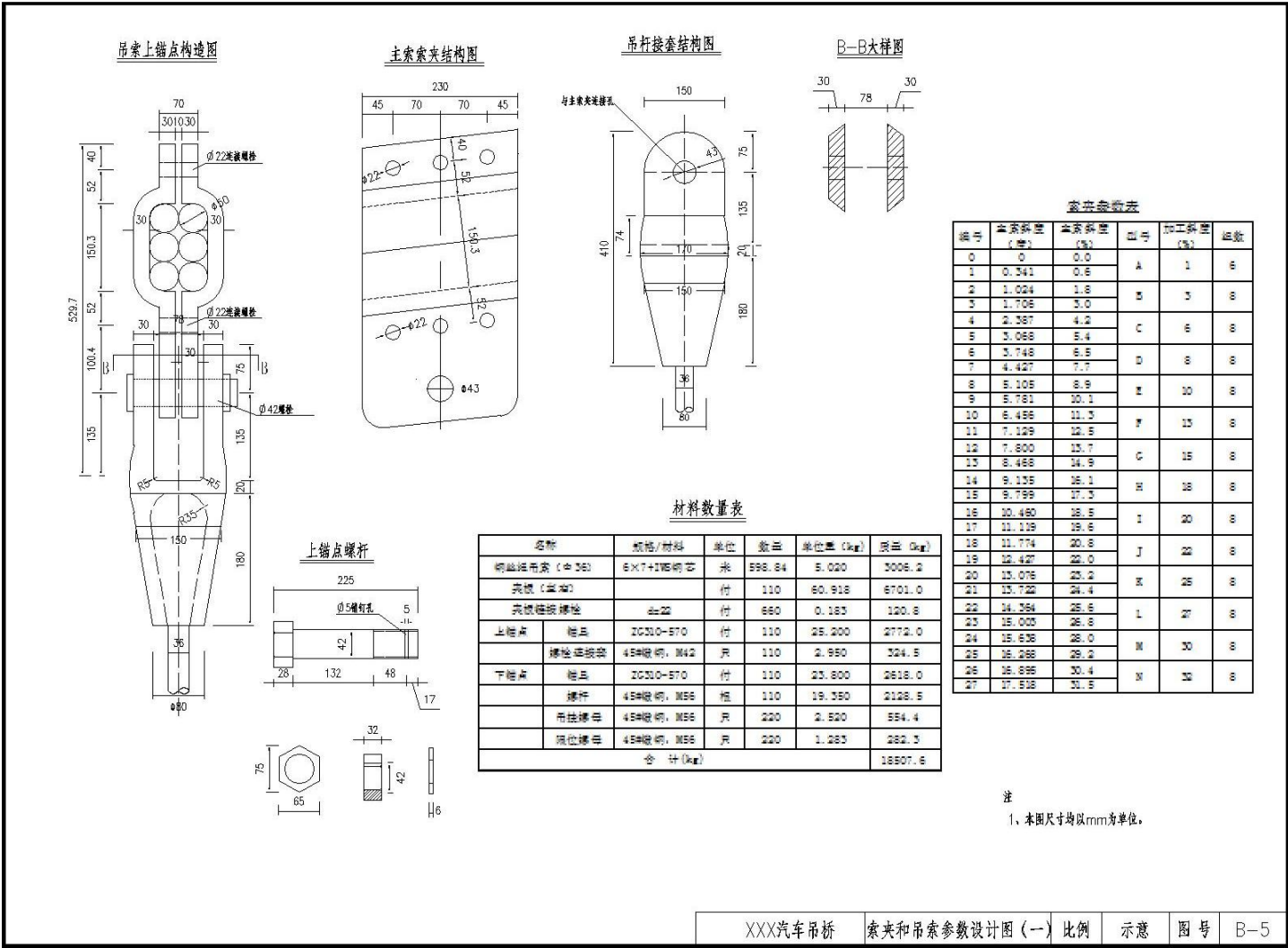


图 B.5 索夹和吊索参数设计图（一）

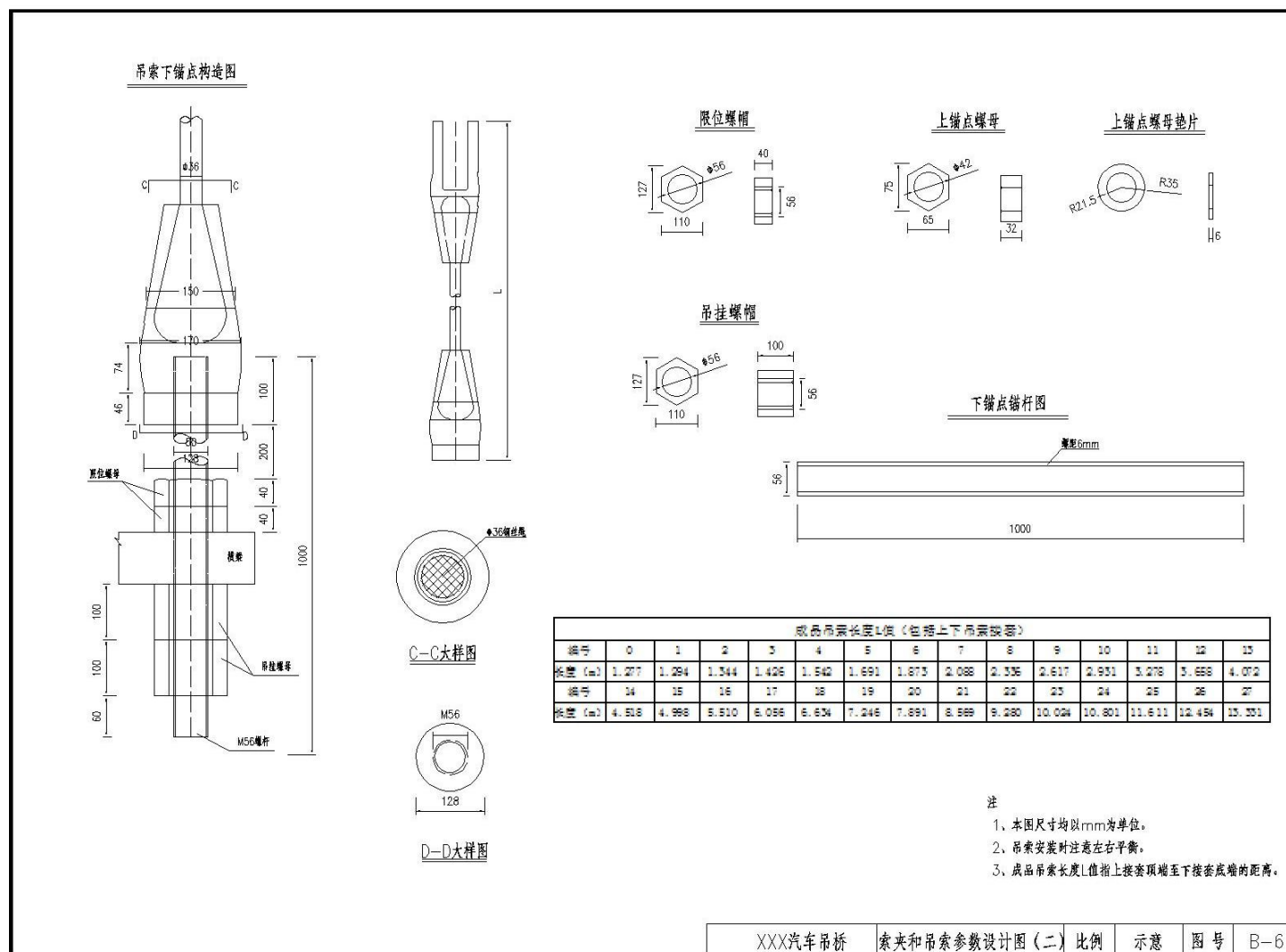


图 B.6 索夹和吊索参数设计图 (二)

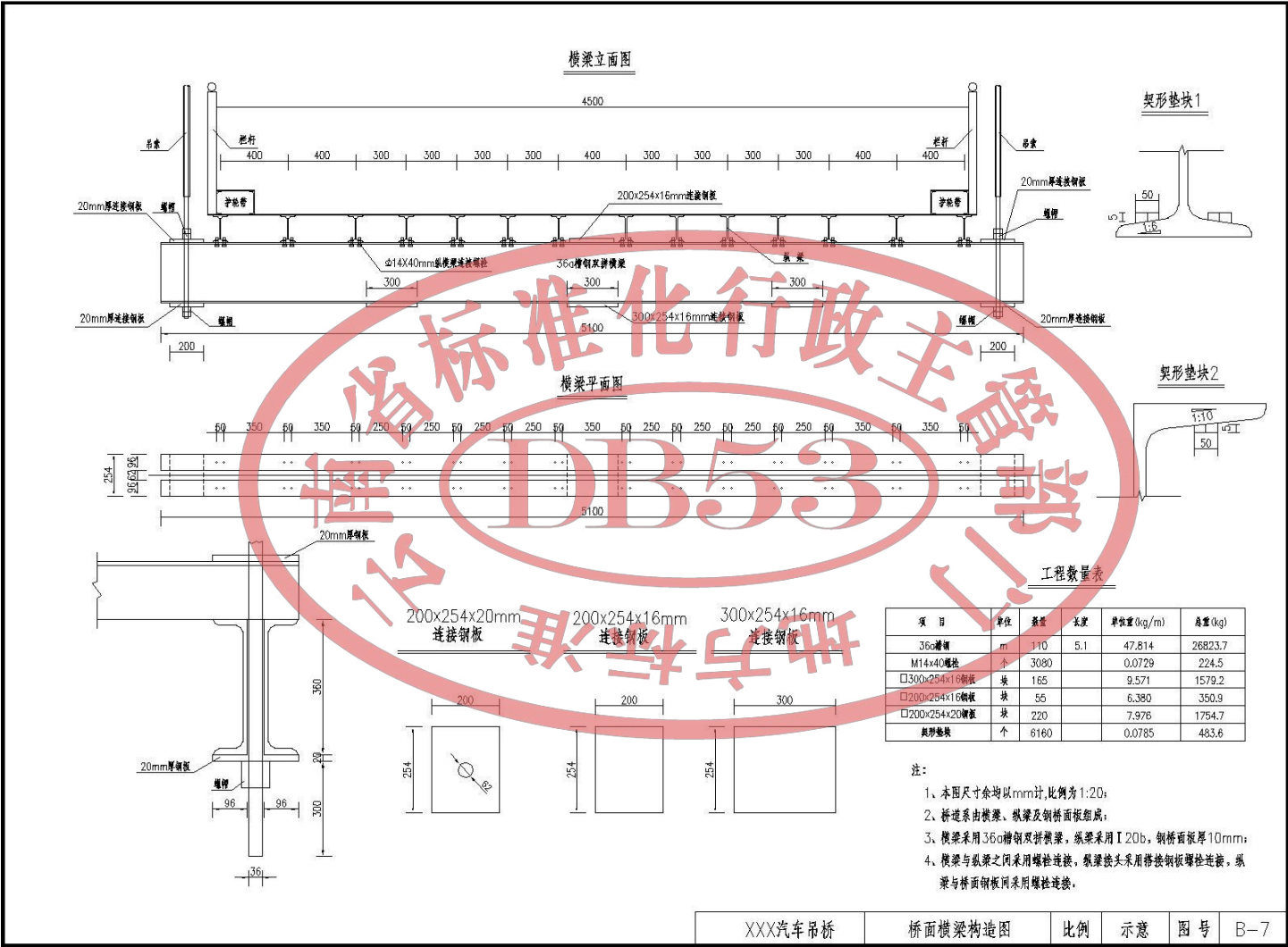


图 B.7 桥面横梁构造图

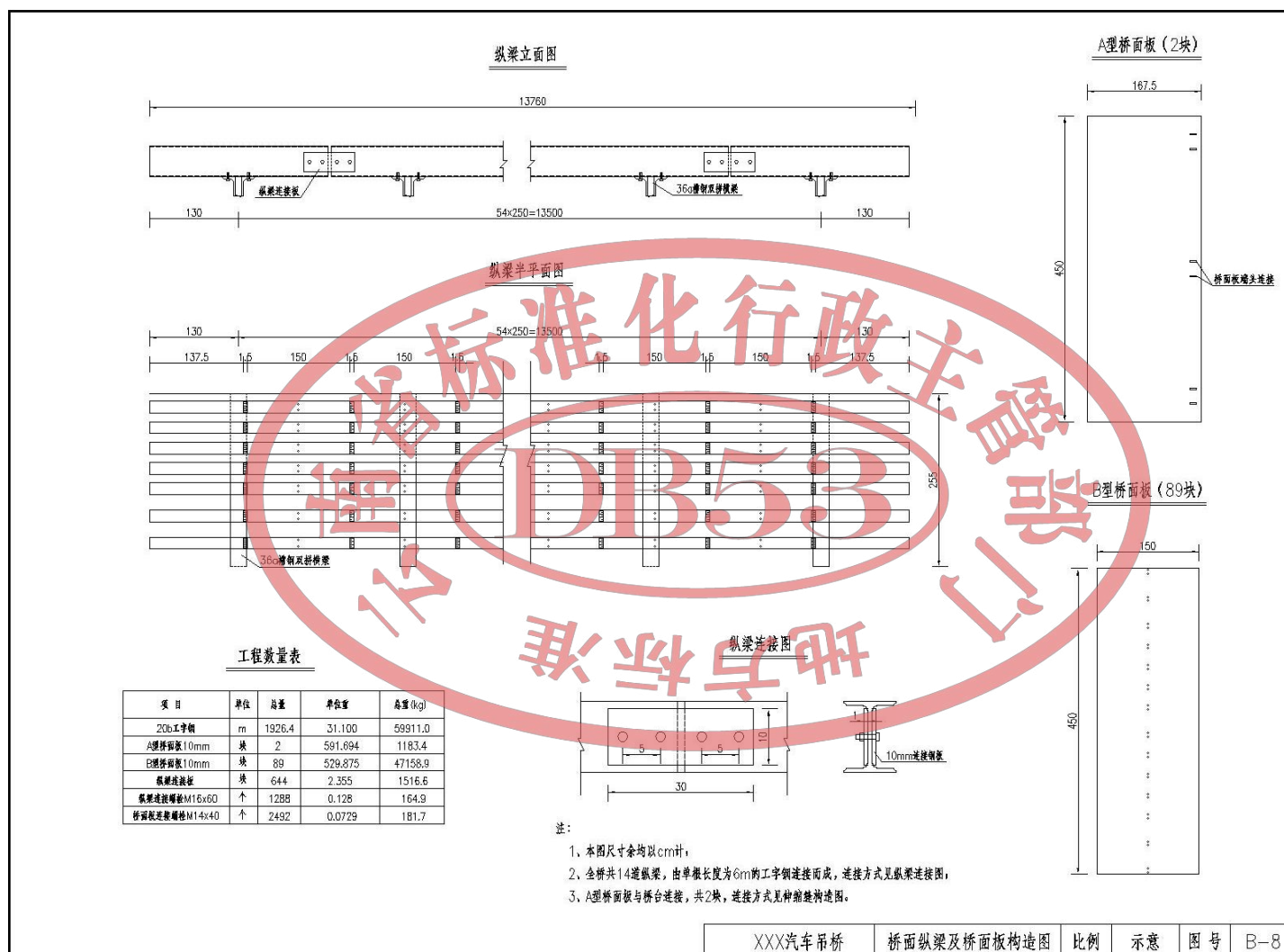


图 B.8 桥面纵梁及桥面板构造图

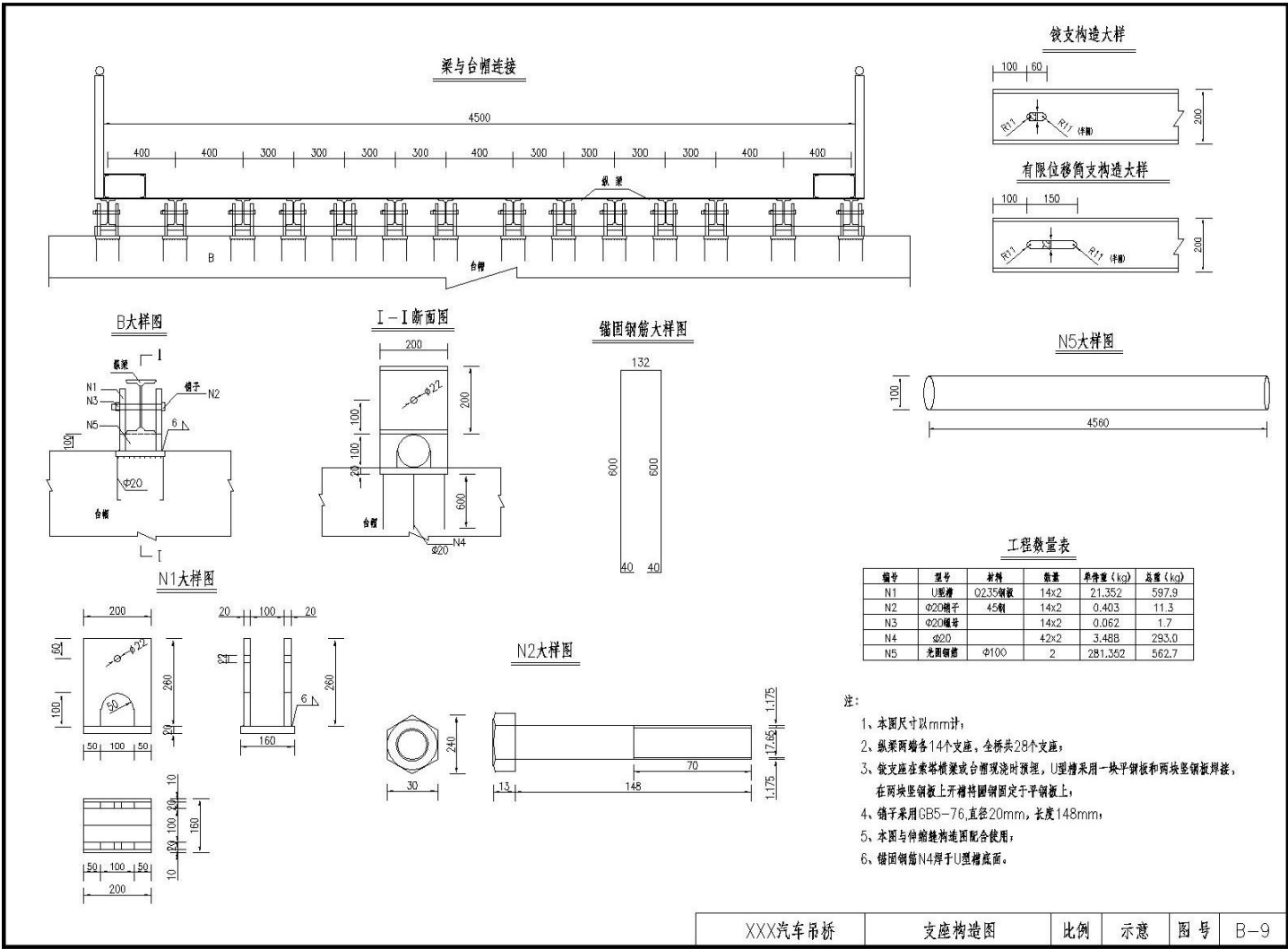


图 B.9 支座构造图

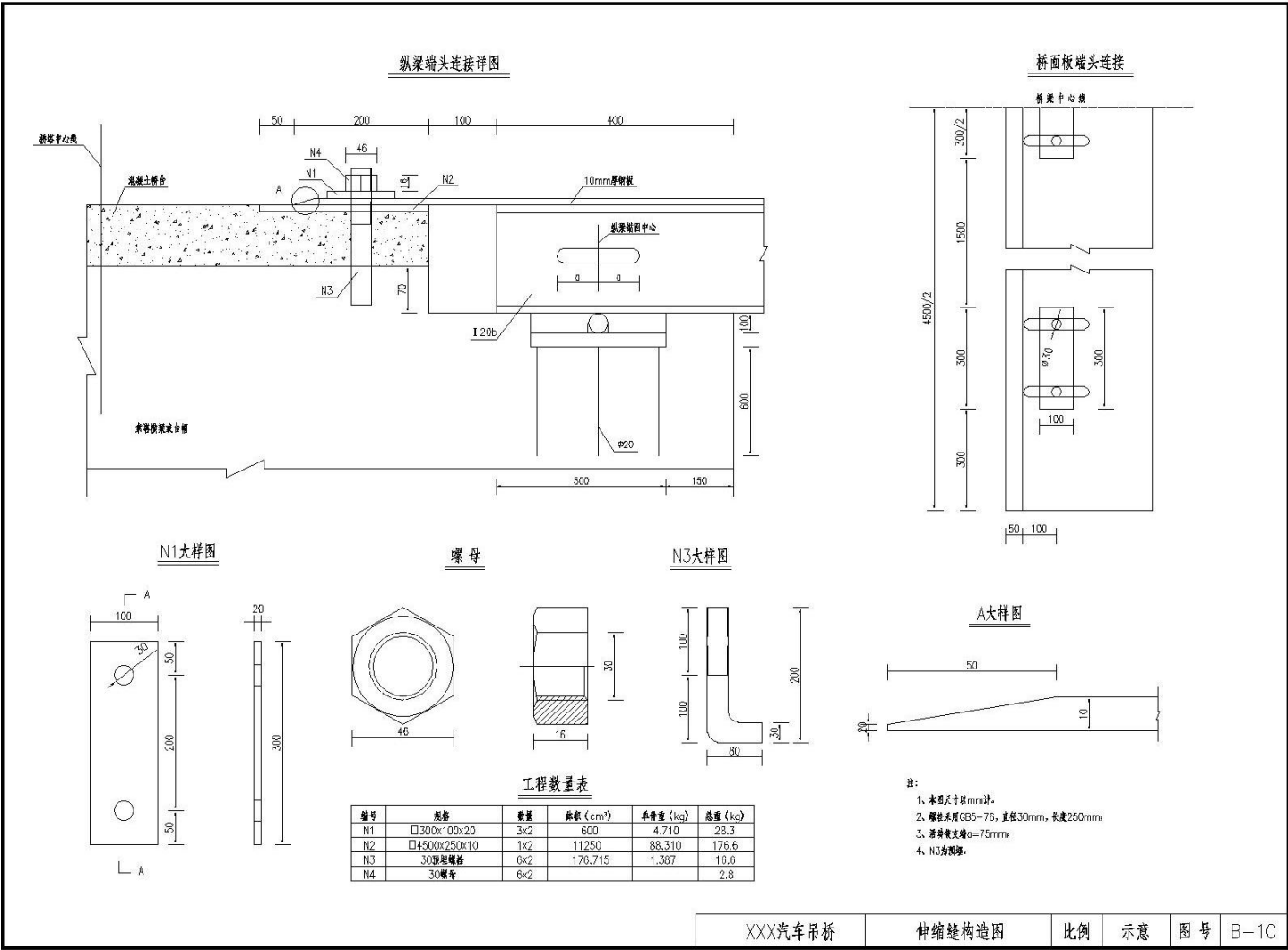


图 B. 10 伸缩缝构造图

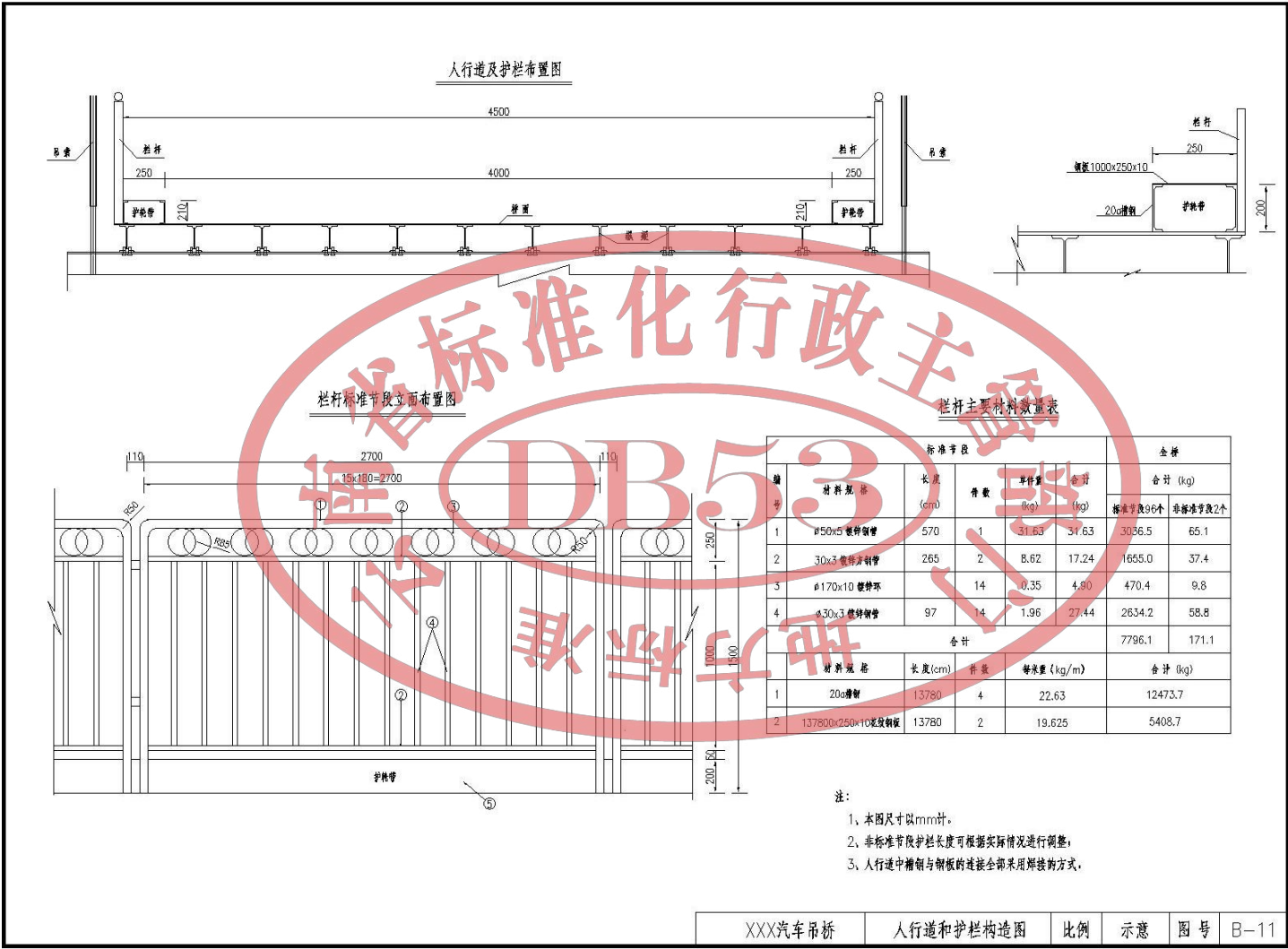


图 B.11 人行道和护栏构造图

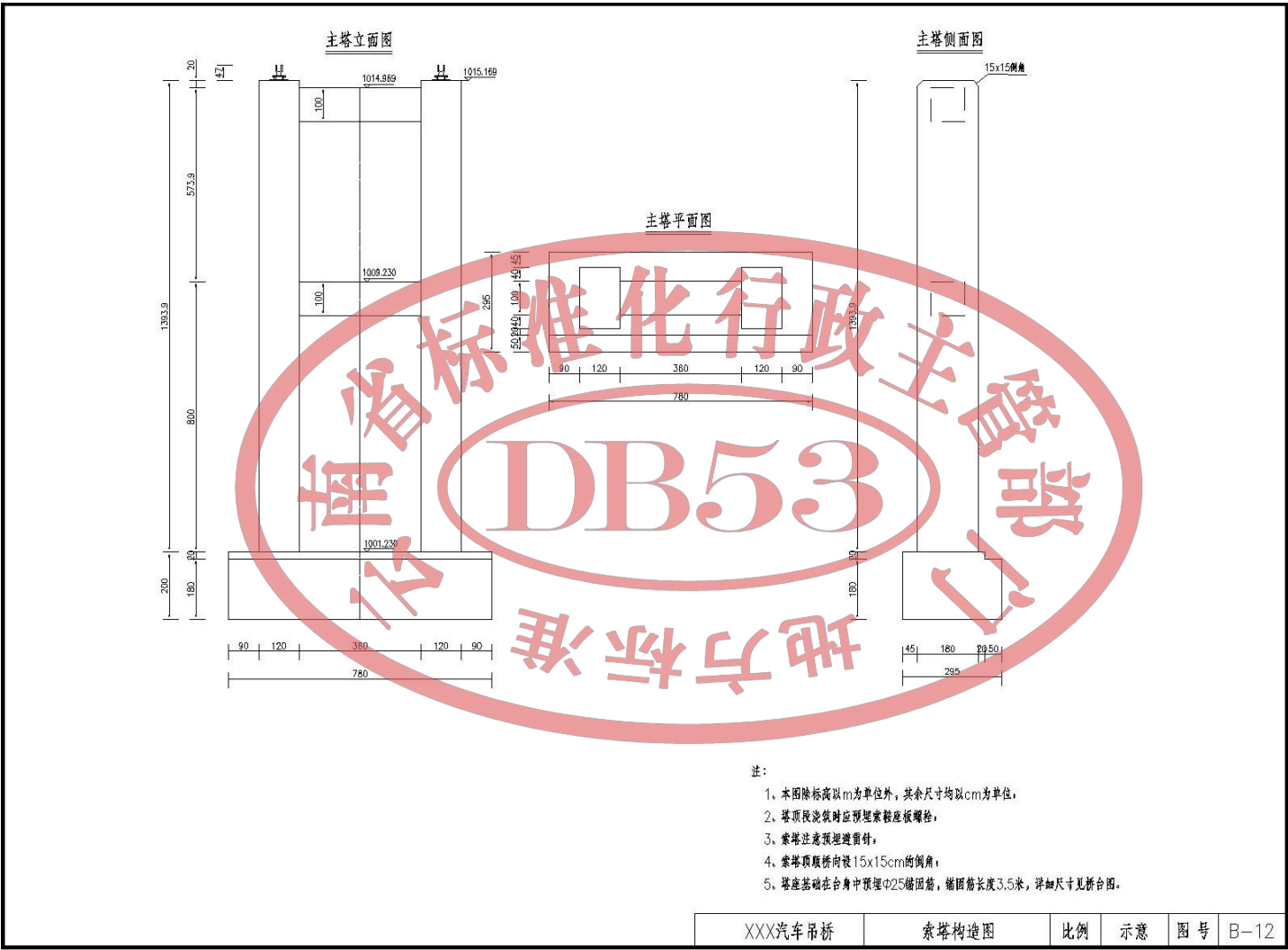


图 B.12 索塔构造图

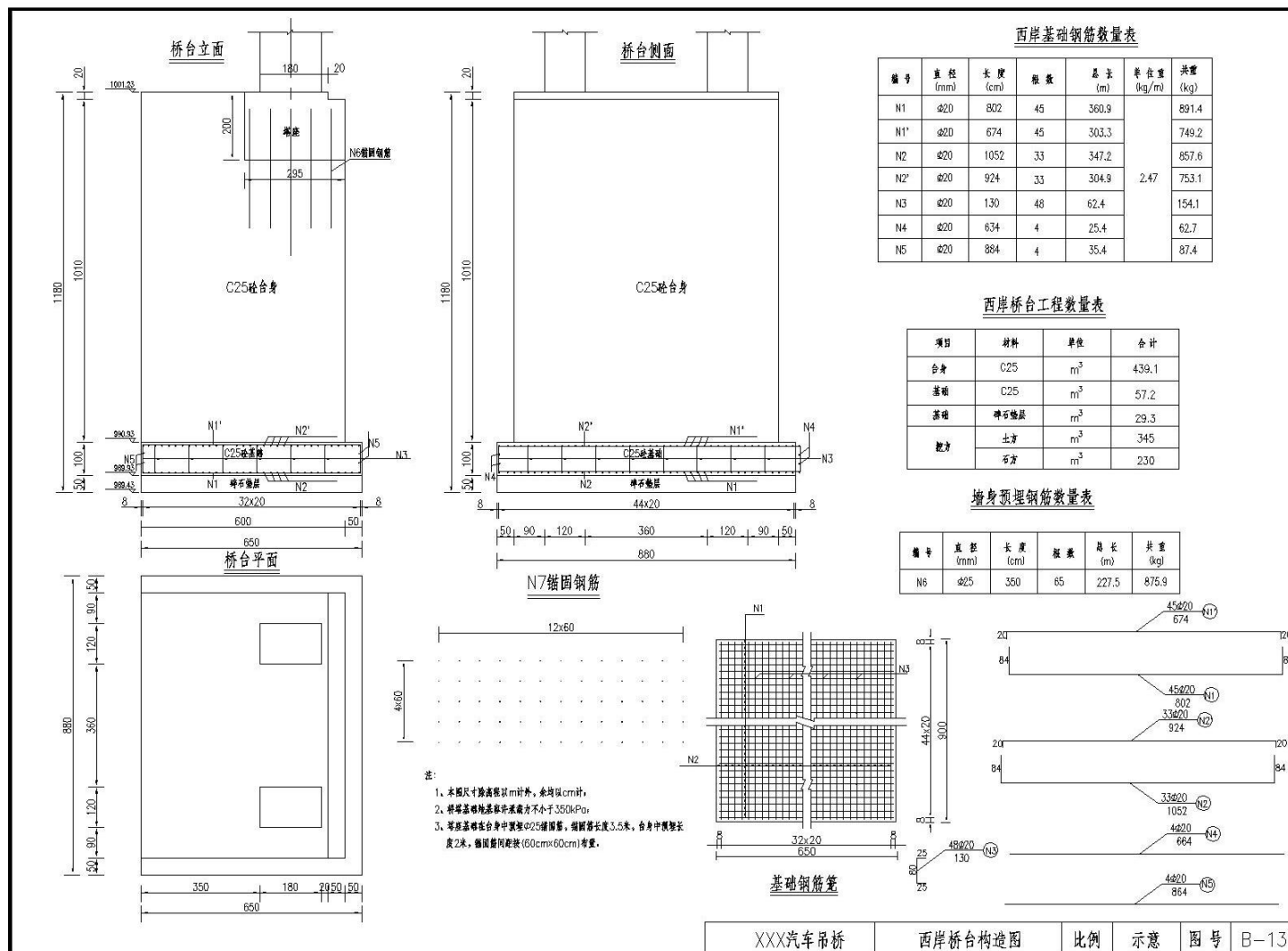


图 B.13 西岸桥台构造图

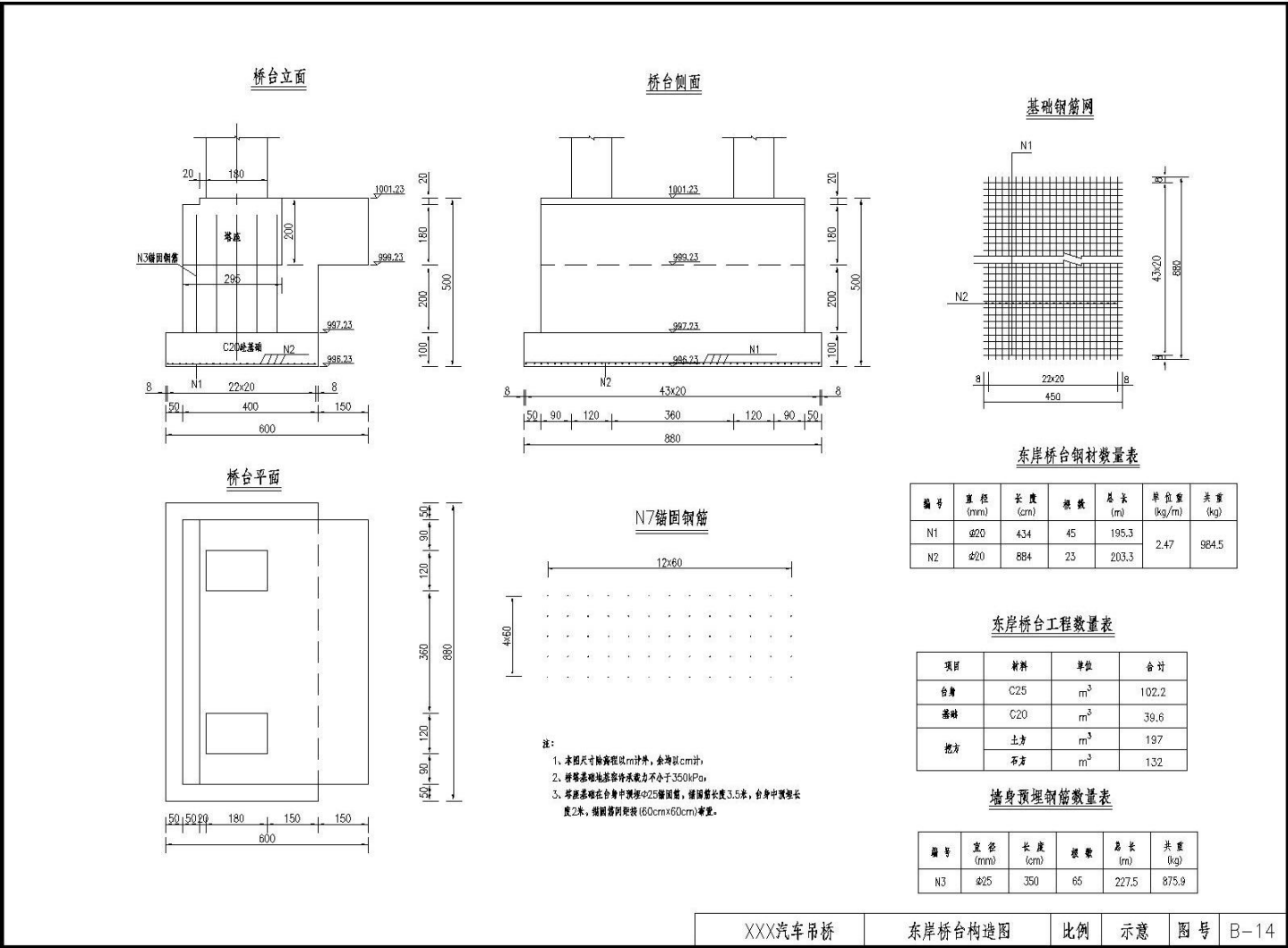


图 B. 14 东岸桥台构造图

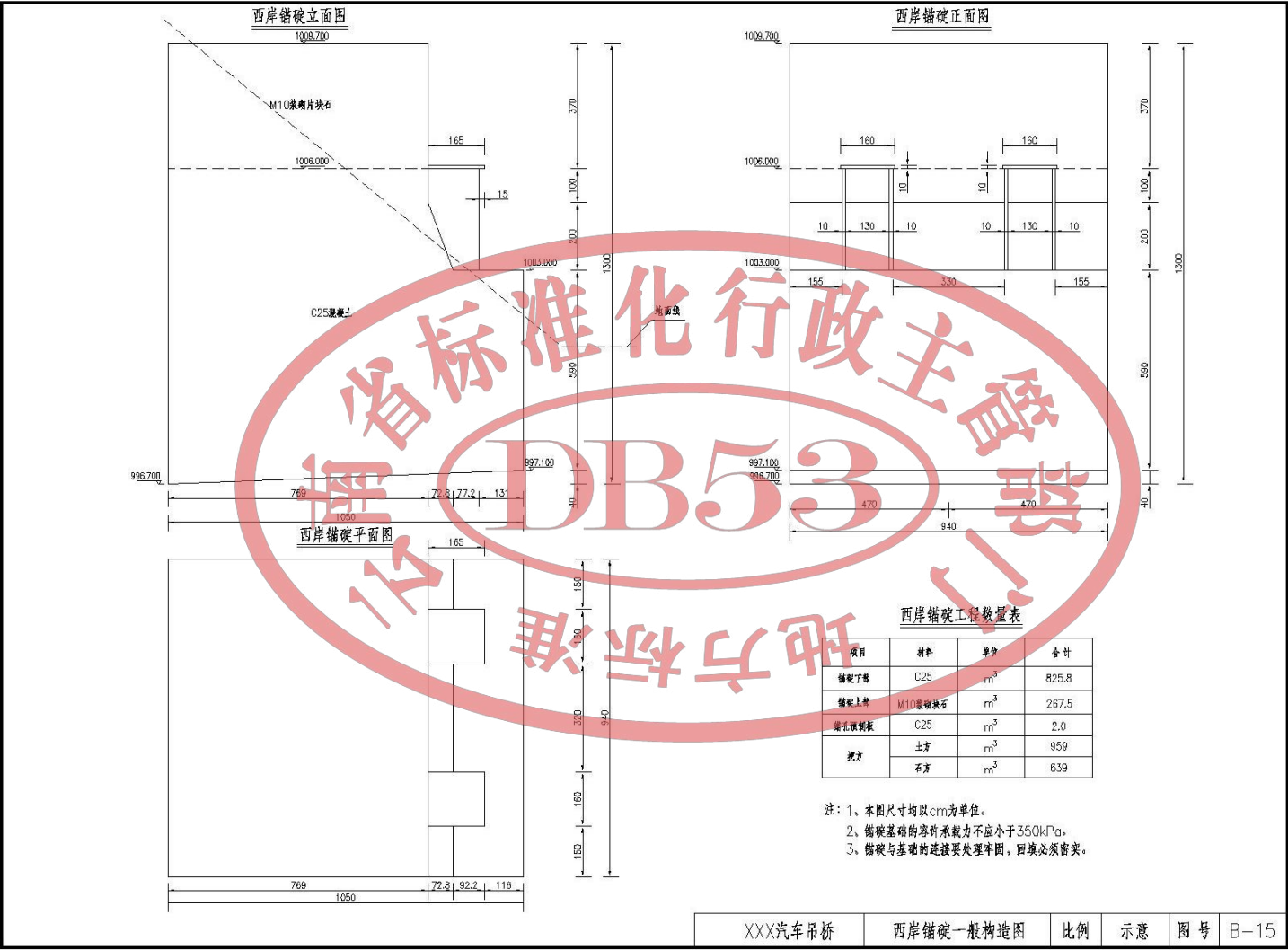


图 B. 15 西岸锚碇一般构造图

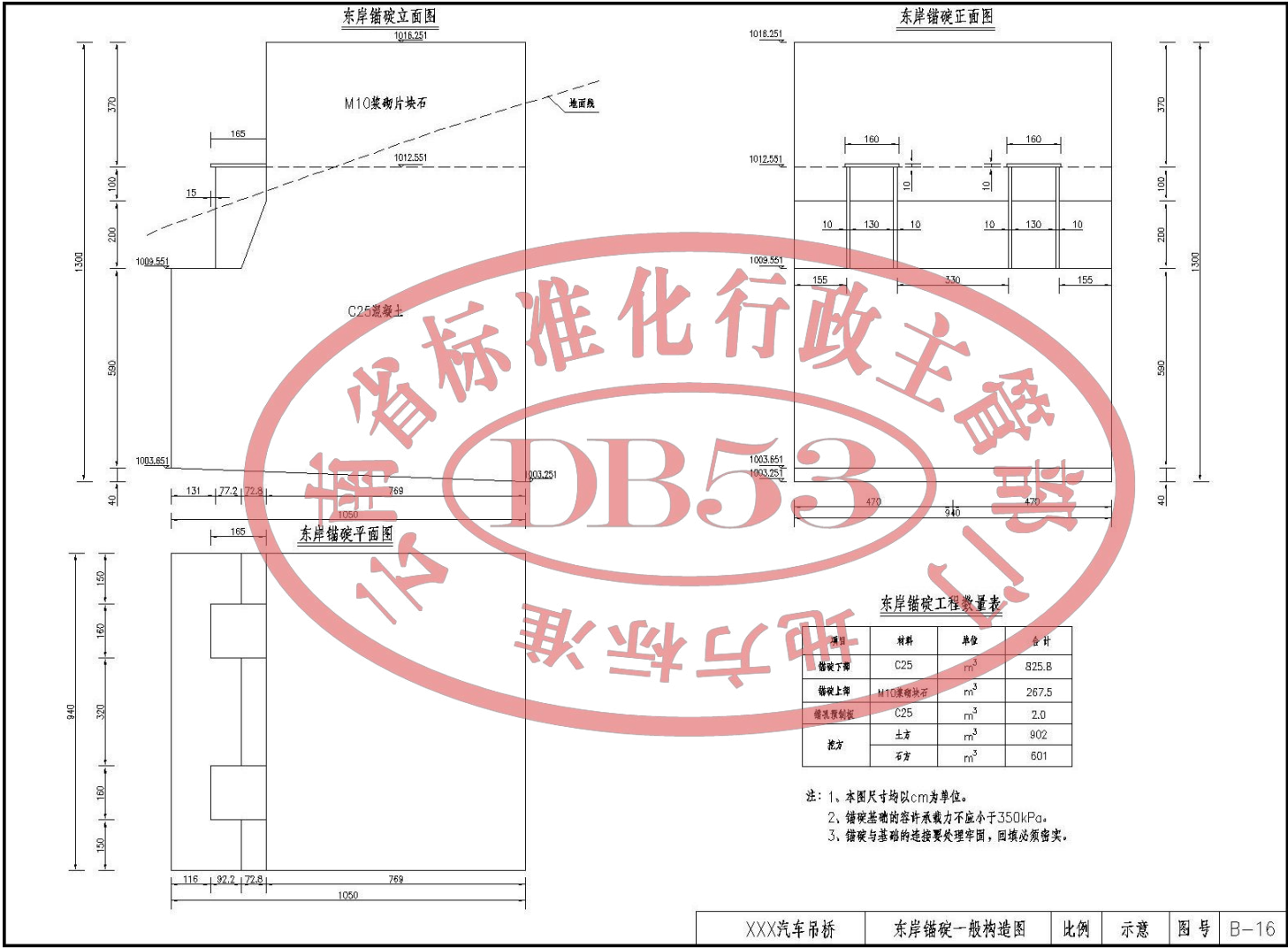


图 B. 16 东岸锚碇一般构造图

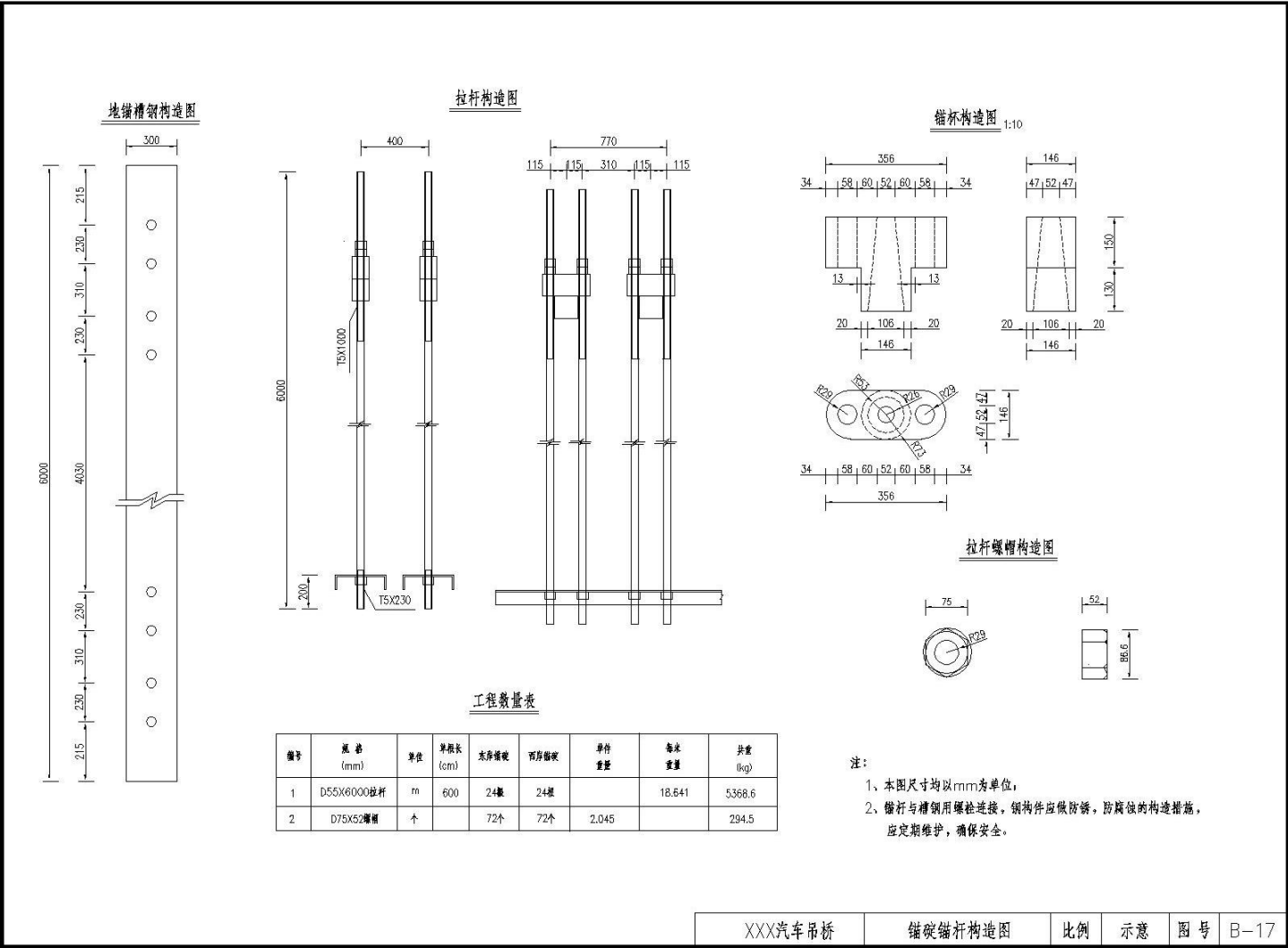


图 B. 17 锚碇锚杆构造图

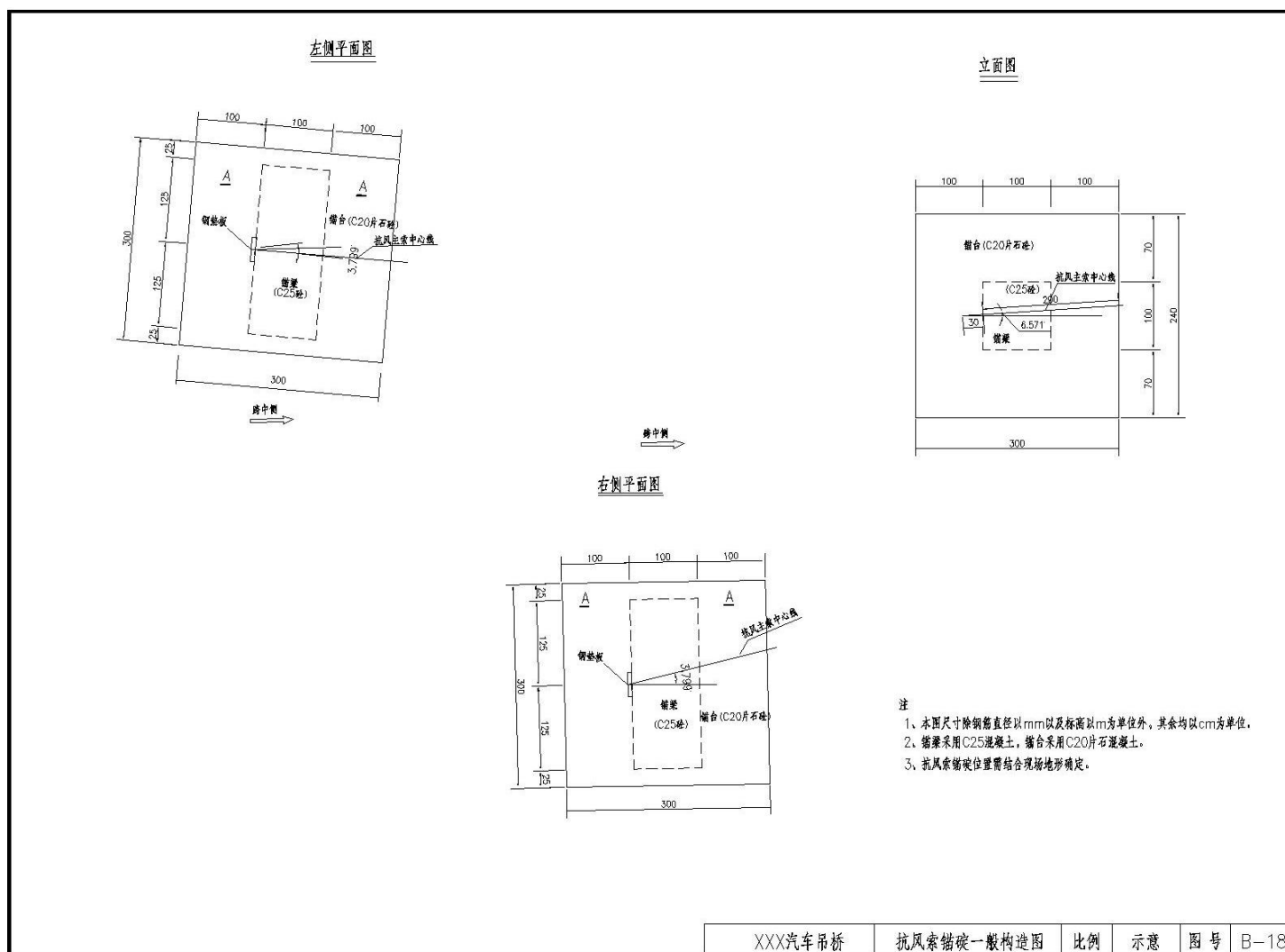


图 B.18 抗风索锚碇一般构造图

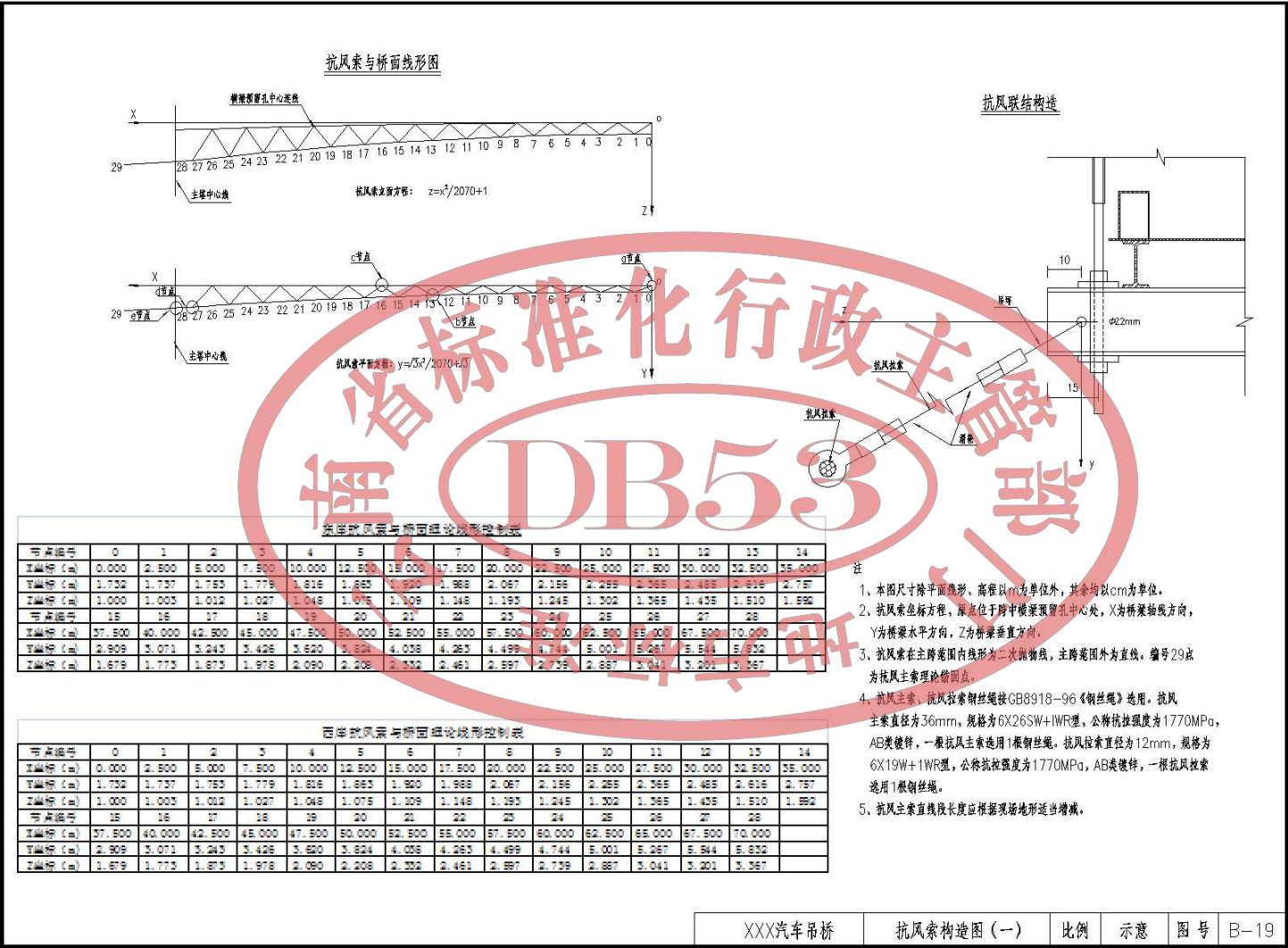


图 B.19 抗风索构造图(一)

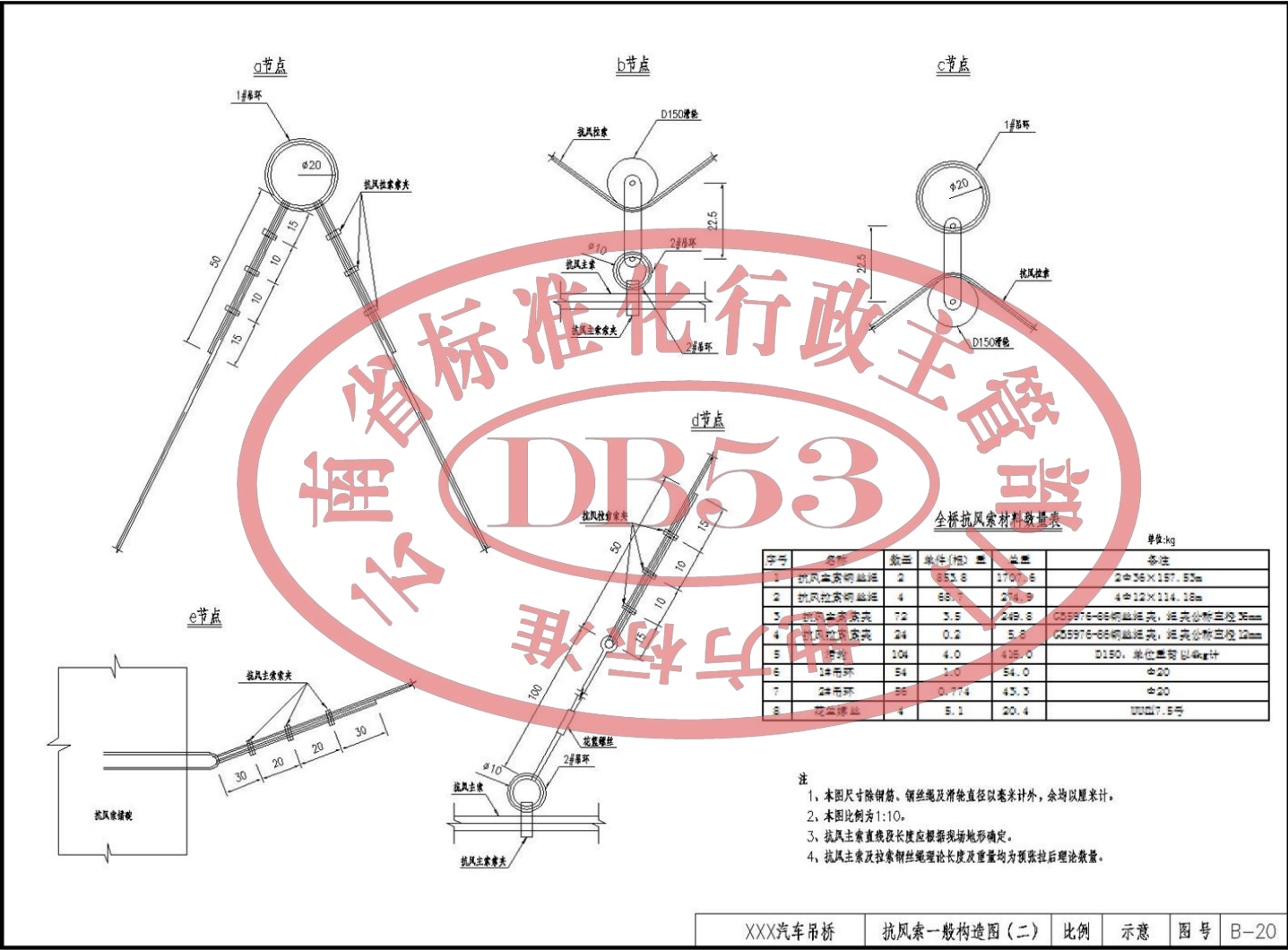


图 B. 20 抗风索构造图(二)

参 考 文 献

[1] JTG B01 公路工程技术标准
