

ICS 93.040

CCS P 28

T



团 体 标 准

T/CSPSTC XXX—202X

大跨径钢-混凝土混合梁桥设计规范

Code for design of large-span steel-concrete hybrid girder bridge

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国科技产业化促进会 发布

中国标准出版社 出版

目 次

前 言	III
引 言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义、符号	2
3.1 术语和定义	2
3.2 符号	2
4 材料	4
4.1 混凝土	4
4.2 普通钢筋	4
4.3 钢材	4
4.4 预应力筋	5
5 总体设计	5
5.1 一般规定	5
5.2 结构分类与桥型布置	5
5.3 总体布置	7
5.4 桥面布置及附属	7
6 总体计算	7
6.1 一般规定	8
6.2 混凝土梁段	9
6.3 钢梁段	9
6.4 其他计算	9
7 钢-混凝土结合段	9
7.1 一般规定	9
7.2 结构形式	10
7.3 设计流程	11
7.4 结构计算	15
8 构造要求	15
8.1 一般规定	15
8.2 混凝土梁段	18
8.3 钢梁段	19
8.4 钢-混凝土结合段	21
8.5 体外预应力	25
9 耐久性设计	25
9.1 一般规定	26
9.2 混凝土梁段耐久性设计	26
9.3 钢梁段耐久性设计	26
9.4 体外预应力束耐久性设计	27
9.5 钢-混凝土结合段耐久性设计	27
9.6 附属结构耐久性设计	27

10 施工和运维	27
10.1 混凝土梁段施工	27
10.2 钢梁段施工	27
10.3 钢-混凝土结合段施工	29
10.4 运营维护	31
条文说明	32

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。

本文件由林同棧国际工程咨询（中国）有限公司提出。

本文件由中国科技产业化促进会归口。

本文件起草单位：XXX、XXX、XXX。

本文件主要起草人：XXX、XXX、XXX。

引 言

近年来，随着公路、市政道路、轨道交通等领域对大跨度桥梁的工程需求越来越多，对混凝土梁桥的跨越能力提出了更高的要求。传统的混凝土梁桥受制于混凝土性能的约束，跨径的突破带来了变形过大，梁体开裂等诸多病害问题。

从工程技术发展来看，钢-混凝土混合梁的结构形式已应用于多个大跨径梁式桥梁，在解决上述问题的实践中，其结构优势逐渐被业界接受和认可，体现出了很好的应用价值。

目前针对大跨径钢-混凝土混合梁桥的设计指导，局限于对多种规范的相互借鉴和局部参考，缺乏统一的标准。为规范大跨径钢-混凝土混合梁桥的设计，特地制定本文件，以期提升工程质量。

大跨径钢-混凝土混合梁桥设计规范

1 范围

本文件规定了大跨径钢-混凝土混合梁桥的材料、总体设计、总体计算、钢-混凝土结合段、构造要求、耐久性设计及施工和运维的相关要求。

本文件适用于新建和改建公路、城市道路的大跨径钢-混凝土混合梁桥的设计，也适用于新建城市轨道交通的大跨径钢-混凝土混合梁桥的设计。大跨径钢-混凝土混合梁桥的设计除应符合本文件外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

本文件适用于主跨跨径不超过 400 m 的钢-混凝土混合梁桥。对于超过 400 m 的钢-混凝土混合梁桥，除应满足本文件要求外，尚应进行专门研究。

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 30827 体外预应力索技术条件
- GB 50111 铁路工程抗震设计规范
- GB/T 51234 城市轨道交通桥梁设计规范
- 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/T D64-01 公路钢混组合梁桥设计与施工规范
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范
- JTG/T 3310 公路工程混凝土结构耐久性设计规范
- JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范
- JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
- JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
- JT/T 1037 公路桥梁结构监测技术规范
- JTG/T J23 公路桥梁加固施工技术规范
- CJJ 11 城市桥梁设计规范
- CJJ 166 城市桥梁抗震设计规范
- CJJ/T 233 城市桥梁检测与评定技术规范
- CJJ/T 239 城市桥梁结构加固技术规程
- 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 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
- Q/CR-749 铁路桥梁钢结构及构件保护涂装与涂料
- Q/CR 9207 铁路混凝土工程施工技术规程
- Q/CR 9211 铁路钢桥制作规范

3 术语和定义、符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

钢-混凝土混合梁 steel-concrete hybrid beam

在顺桥向由钢梁与钢筋（预应力）混凝土梁通过结合段结合在一起共同受力的梁。

3.1.2

钢-混凝土混合梁桥 steel-concrete hybrid girder bridge

由钢-混凝土混合梁作为主梁的桥梁。

3.1.3

钢-混凝土混合梁梁桥 steel-concrete hybrid beam girder bridge

由钢-混凝土混合梁作为主梁的梁桥。

3.1.4

钢-混凝土结合段 steel-concrete connection section

使钢构件和混凝土构件相互结合、共同受力的部分。

3.1.5

连接件 connector

将钢与混凝土两种材料连接在一起，共同受力的构件。

3.1.6

体外预应力束 external tensile elements of tendon

位于梁体截面之外施加预应力，仅在锚固区和转向块处与梁体相连接的无粘结钢绞线预应力束，简称体外束。

3.1.7

转向器 deviator

设置于体外束转向点处、用于改变预应力束方向的装置。

3.1.8

减振装置 damper

改变预应力束自振频率，降低预应力束振动幅度的装置。

3.1.9

整体吊装法 integral lifting method

将钢梁整体制造并吊装到预定设计位置的施工方法。

3.1.10

节段吊装法 segmental lifting method

将钢梁逐段吊装到预定设计位置并拼装形成整体的施工方法。

3.1.11

顶推施工法 incremental launching method

将钢梁逐段拼装，在梁前端安装导梁，采用专用设备纵向顶推或牵引，使梁体到达预定设计位置的施工方法。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

3.2.1 几何参数相关符号

y_a ——钢混结合段单位宽度计算区域形心距截面形心间距；
 I ——混凝土梁截面抗弯惯性矩；
 A_{cb} ——混凝土梁截面积；
 t_c ——混凝土梁顶（底）板厚度；
 k_s ——抗剪连接件抗剪刚度；
 k_{ss} ——焊钉抗剪连接件抗剪刚度；
 k_{ps} ——开孔板抗剪连接件抗剪刚度；
 l_s ——抗剪连接件纵向间距；
 L ——剪力传递长度；
 A_{sc} ——单位宽度钢梁顶（底）板截面面积，取为顶（底）板度；
 A_{ce} ——单位宽度混凝土梁截面面积；
 d_{ss} ——焊钉连接件杆部的直径；
 d ——开孔板连接件的圆孔直径；
 d_s ——孔中贯通钢筋直径；
 s_{max} ——正常使用极限状态下结合面的最大滑移值；
 s_{lim} ——正常使用极限状态下结合面的滑移限值；
 A_s ——焊钉连接件杆部截面面积；
 R ——预应力钢束的平弯半径；
 h ——箱梁顶板（底板）厚度；
 d_p ——预应力管道外直径；
 s ——竖向预应力顺桥向最大间距；
 A_{sp} ——单位长度的防崩钢筋面积；
 l ——体外预应力钢束段的长度；
 R_d ——转向器的弯曲半径；
 b_d ——转向器与混凝土之间承压面的计算宽度；
 R_s ——预应力钢绞线中钢丝的最大直径；
 ΔR ——转向器弯曲半径的增量；

3.2.2 材料性能相关符号

E_c ——混凝土弹性模量；
 E ——钢材弹性模量；
 γ_0 ——结构重要性系数；
 f_d ——钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值；
 f_{ck} ——混凝土抗压强度标准值；
 f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值；
 f_{su} ——焊钉材料的抗拉强度最小值；
 f_{sd} ——钢筋抗拉强度设计值；
 f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值；
 $\sigma_{cc,d}$ ——转向器与混凝土之间承压面混凝土的容许压应力；
 E_p ——预应力钢绞线中钢丝的弹性模量；
 $\Delta f_{p,e}^f$ ——预应力钢绞线的疲劳应力幅限值。

3.2.3 作用与作用效应相关符号

M ——钢混结合段承压板钢梁侧截面承担的弯矩；
 N ——钢混结合段承压板钢梁侧截面承担的轴力；

N_{eff}	——结合部截面钢梁顶、底板区域的单位宽度等效轴力；
F_c	——承压板与混凝土接触面位置混凝土结构所承担作用效应；
F_s	——承压板与混凝土接触面位置钢结构所承担作用效应；
F_{s0} 、 F_{s1}	——承压板与混凝土接触面位置钢格室顶、底板所承担作用效应；
V_{eq}	——抗剪连接件等效剪力；
σ	——钢混结合段各项计算应力；
V_d	——承载能力极限状态下连接件剪力设计值；
V_u	——承载能力极限状态下连接件抗剪承载力设计值；
V_{sud}	——承载能力极限状态下焊钉连接件抗剪承载力设计值；
V_{pud}	——承载能力极限状态下开孔板连接件抗剪承载力设计值；
V_{sd}	——正常使用极限状态下的连接件剪力设计值；
N_p	——一束预应力钢束的张拉控制力；
T	——体外预应力钢束段的拉力；
W	——体外预应力钢束及其护套的单位重力；
$F_{\text{p,e}}$	——体外预应力钢束的计算拉力；
$\Delta\sigma_{\text{p,e}}^f$	——体外预应力钢绞线的应力幅。

3.2.4 计算系数及其他符号

ϕ	——作用力分配系数；
C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5	——剪力分配系数；
m	——计算剪力分配系数的中间系数；
n_{ss}	——焊钉连接件总数量；
n_{ps}	——开孔板连接件总数量；
n	——钢梁顶（底）板抗剪连接件纵向数量。

4 材料

4.1 混凝土

4.1.1 混凝土主梁应采用预应力混凝土构件，混凝土强度等级不宜低于 C50。

4.1.2 采用的混凝土的设计指标应符合以下规定：

- 公路或城市道路桥梁采用的混凝土的设计指标应符合 JTG 3362 的相关规定；
- 城市轨道交通桥梁采用的混凝土的设计指标应符合 GB/T 51234 的相关规定。

4.2 普通钢筋

采用的普通钢筋的设计指标应符合以下规定：

- 公路或城市道路桥梁采用的普通钢筋的设计指标应符合 JTG 3362 的相关规定；
- 城市轨道交通桥梁采用的普通钢筋的设计指标应符合 GB/T 51234 的相关规定。

4.3 钢材

采用的结构用钢材、螺栓、焊钉、焊接材料等的设计指标应符合以下规定：

- 公路或城市道路桥梁采用的结构用钢材、螺栓、焊钉、焊接材料等的设计指标应符合 JTG D64 的相关规定。
- 城市轨道交通桥梁采用的结构用钢材、螺栓、焊钉、焊接材料等的设计指标应符合 GB/T 51234 的相关规定。

4.4 预应力筋

- a) 采用的体内预应力钢绞线、精轧螺纹钢等材料的设计指标应符合 JTG 3362 的规定。
- b) 体外预应力应采用无粘结预应力钢绞线，设计指标应符合 JG/T 161、JT/T 853 的规定。

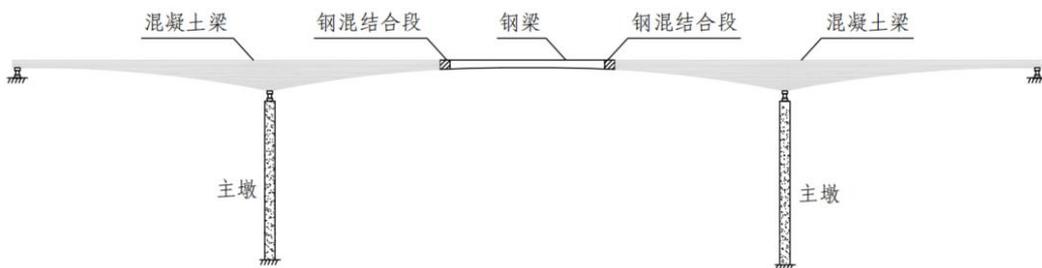
5 总体设计

5.1 一般规定

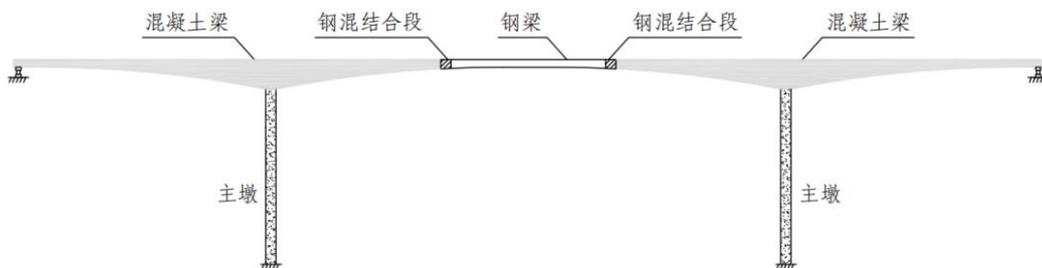
- 5.1.1 桥梁主体结构设计使用年限宜不少于 100 年。
- 5.1.2 桥梁应根据使用功能、技术经济、建设条件、景观和环保等要求进行总体设计，总体设计应对跨径布置、横断面布置、结构体系、施工方案、钢梁尺寸和钢-混凝土结合段尺寸等进行综合比选。
- 5.1.3 桥梁应根据其所处环境条件和使用年限要求进行耐久性设计。
- 5.1.4 桥梁的设计应贯彻全寿命设计理念，统筹考虑施工、运营管理与养护的要求。
- 5.1.5 当钢-混凝土混合梁梁桥的钢梁部分采用整体吊装施工时，最大跨径不宜超过 400 m；当采用节段吊装施工时，最大跨径不宜超过 360 m。

5.2 结构分类与桥型布置

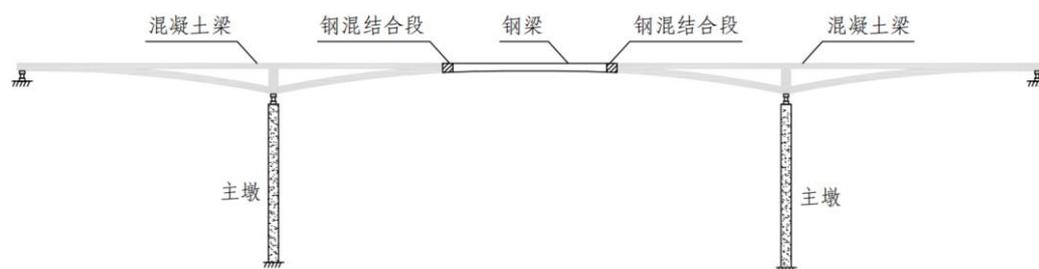
- 5.2.1 根据结构形式的不同，钢-混凝土混合梁梁桥可主要划分为混合梁连续梁桥、混合梁连续刚构桥、混合梁空腹式连续梁桥、混合梁空腹式连续刚构桥，如图 1 所示。



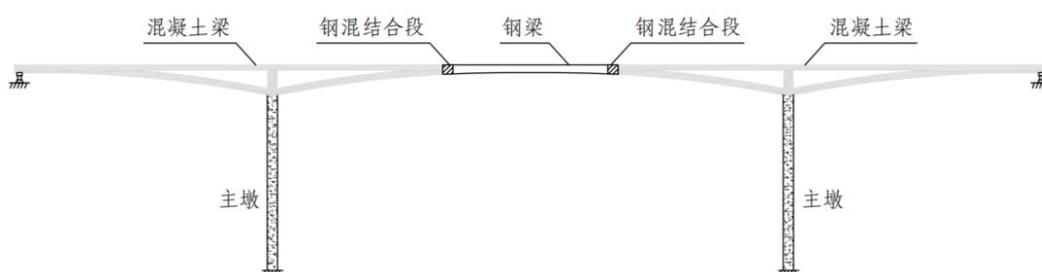
a) 混合梁连续梁桥



b) 混合梁连续刚构桥



c) 混合梁空腹式连续梁桥



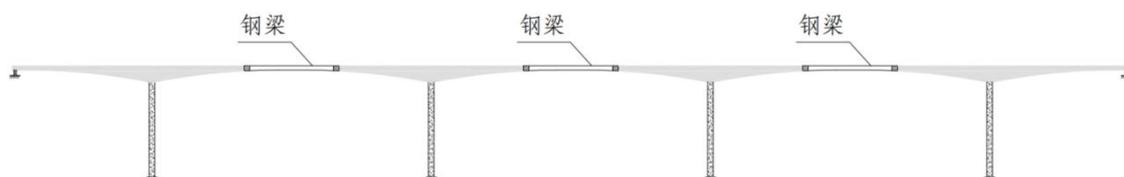
d) 混合梁空腹式连续刚构桥

图 1 钢-混凝土混合梁梁桥结构形式示意

5.2.2 根据钢梁的孔跨布置的不同，钢-混凝土混合梁梁桥可主要划分为单主跨混合梁桥和多主跨混合梁桥，如图 2 所示。



a) 单主跨混合梁桥



b) 多主跨混合梁桥

图 2 钢-混凝土混合梁梁桥孔跨布置示意

5.2.3 混合梁的结合段根据钢梁结构形式可采用钢箱梁结合段和钢桁梁结合段，如图 3 所示。

条文说明

1

大跨径钢-混凝土混合梁桥由大跨径混凝土刚构桥发展而来。由于大跨径混凝土刚构桥自重效应占比大，限制了其跨度进一步发展；混凝土的收缩徐变导致跨中下挠及开裂的问题突出。大跨径钢-混凝土混合梁桥通过在跨中部分采用钢梁，有效减轻自重，提升了梁桥的最大跨径；通过采用体外预应力的主动控制方式，有效解决了跨中下挠及开裂的问题。

5.1.4

桥梁全寿命设计是针对规划、设计、施工、运营、管养、拆除或回收再利用的全过程，实现桥梁总体性能最优的设计。设计需要考虑施工的可行性和合理性，还要注重运营养护的便利性，以实现桥梁结构“可视、可达、可检、可修”。也包括环境保护设计、耐久性设计、景观设计、风险评估等专项设计，还包括设计中需考虑的节能减排，设计对施工及监控、运营期安全监测等要求。

5.1.6

根据重庆石板坡长江大桥复线桥的研究成果，总结出以下两个跨度估算公式。式（1）适用于采用整体吊装施工的钢-混凝土混合梁梁桥的跨度估算，式（2）适用于采用节段吊装施工的钢-混凝土混合梁梁桥的跨度估算。

$$L_{\text{换算}} = \sqrt{\gamma (L - L_1)^2 + 2KL_1(L - L_1)} \quad (1)$$

$$L_{\text{换算}} = \sqrt{\gamma (L - L_1)^2 + K[2L_1(L - L_1) + L_1^2]} \quad (2)$$

式中：

$L_{\text{换算}}$ ——等效混凝土刚构梁桥主跨跨度，单位为米（m）。

L ——钢-混凝土混合梁桥主跨跨度，单位为米（m）。

L_1 ——钢箱梁长度，单位为米（m）。

K ——单位面积上钢箱梁重量与等梁高混凝土梁重量的比值，可取 0.25~0.35。

γ ——等效跨度纯混凝土单位长度重量修正系数，可取 1.18~1.34。

5.2.1

经统计，国内部分已建（在建）大跨径钢-混凝土混合梁梁桥的结构形式如附表 1 所示。

附表 1 钢-混凝土混合梁梁桥结构形式统计

桥名	跨径布置（m）	结构形式
重庆石板坡复线桥	87.75+4×138+330+133.75	混合梁连续刚构
中山小榄水道	98+220+98	混合梁连续刚构
援马尔代夫中马友谊大桥	100+2×180+140+100+60	混合梁梁拱组合体系连续刚构
福建马尾桥	71+83+123.5+240+123.5+83+71	混合梁梁拱组合体系连续梁
重庆嘉华轨道专用桥	28+39+48+138+252+110	混合梁连续刚构
宁波舟山港主通道北通航孔桥	125+260+125	混合梁连续刚构
滨州黄河大桥	80+5×190+80	混合梁连续梁

安海湾特大桥	135+300+135	混合梁连续刚构
重庆广阳湾大桥	55+110+255+100	混合梁连续刚构
套尔河特大桥	128+338+128	混合梁连续刚构

5.2.2

大跨径钢-混凝土混合梁桥若按钢梁的孔跨分类，可分为单主跨和多主跨。例如重庆石板坡长江大桥复线桥和套尔河特大桥为单主跨，援马尔代夫中马友谊大桥和滨州黄河大桥为多主跨。

5.2.3

钢箱梁结合段一般用于钢梁为箱梁的混合梁桥；钢桁梁结合段一般用于钢梁为桁梁的斜拉桥或者悬索桥。

5.3.1

混凝土连续梁边跨跨径一般为中跨跨径的 0.55 倍~0.6 倍，混凝土连续刚构桥边中跨之比一般为 0.54~0.58，钢-混凝土混合梁桥由于中跨采用了自重较轻的钢梁，边跨采用了自重较大的混凝土梁，对自重较轻的钢结构中跨具有一定的压重作用，所以钢-混凝土混合梁桥的边中跨比可采用比一般的梁桥更小的比值。部分已建（在建）钢-混凝土混合梁桥边中跨比统计情况如附表 2 所示。

附表 2 钢-混凝土混合梁桥统计表

桥名	钢梁长(m)	边跨/主跨(λ)	钢梁长/主跨 (μ)	竣工时间
重庆石板坡复线桥	108	0.405	0.327	2006.08
中山小榄水道	87	0.445	0.4	2014.07
援马尔代夫中马友谊大桥	58+58+30	0.556	0.414、0.214	2018.08
福建马尾桥	96	0.515	0.4	2019.01
重庆嘉华轨道专用桥	92	0.44	0.365	2021.03
宁波舟山港主通道北通航孔桥	85	0.481	0.327	2021.12
滨州黄河大桥	5×60	0.421	0.316	2023.12
安海湾特大桥	108	0.45	0.36	施工中
重庆广阳湾大桥	108	0.39	0.424	施工中
套尔河特大桥	186	0.38	0.55	施工中

5.3.2

从减小主梁墩顶负弯矩和后期下挠的角度来讲，中跨钢箱梁的长度越长越好，钢梁长度过短，则对墩顶负弯矩和后期下挠改善不明显。但钢梁长度过长，一方面钢比混凝土造价高，会使造价增加，另一方面从施工角度来讲，中跨钢梁过长造成混凝土梁比较短，不利于混凝土梁的对称悬臂施工。同时钢梁长度过长，钢混接头必然要位于弯矩和剪力比较大的区域，钢混接头受力过大，不利于钢混接头的设计。因此从功能、施工、造价及钢混接头受力等方面考虑，中跨钢箱梁应该有一个合理的长度，达到功能、施工、造价、受力各方面的平衡。

5.3.3

对于公路和城市道路的大跨径混凝土连续梁桥，支点截面高跨比一般取 1/15~1/18，跨中截面高跨比一般取 1/30~1/50；对于公路和城市道路的大跨径混凝土连续刚构桥，支点

截面高跨比一般取 $1/16\sim 1/18$ ，跨中截面高跨比一般取 $1/40\sim 1/50$ 。对于城市轨道交通的大跨径混凝土连续梁或连续刚构桥，由于活载更大以及对结构刚度的要求更严格，支点截面高跨比和跨中截面高跨比相对公路桥梁更大。大跨径钢-混凝土混合梁桥梁由于中跨部分采用钢梁，主梁墩顶负弯矩和后期徐变变形有较大的减小，因此主梁的高跨比可比一般的混凝土梁更小。从附表 2 可看出，部分已建钢-混凝土混合梁桥梁支点截面高跨比处于 $1/20\sim 1/21$ 之间，跨中截面高跨比处于 $1/61\sim 1/74$ 之间。

5.3.4

通过在钢-混凝土混合梁桥梁的中跨布置体外预应力钢束，以增加梁体预应力度、优化梁体受力。在施工阶段，当钢箱梁完成体系转换后，通过张拉体外预应力主动地控制梁体的内力和下挠。在运营阶段，当梁体下挠到一定程度时，通过再次张拉体外预应力主动地予以平衡，抑制梁体可能产生的过度下挠。

6.1.1

本条要求公路及城市道路桥梁的设计方法与现行 JTG D60、JTG 3362、JTG D64 保持一致。城市轨道交通桥梁的设计方法与 TB 10002、TB 10091、TB 10092、GB/T 51234 保持一致。

6.1.9

本条参照 TB 10092 的规定。箱形梁横向构成了带有悬臂的箱形框架，横向内力原则上应通过分析这个箱形框架来求得。当为双室或多室箱梁时，一般在梁端每个腹板下设置支座，并设有端隔板，可按变形相等的原则依腹板厚度分配剪力。设计荷载作用时可将按箱形框架计算的主梁（腹板）所需钢筋的一半作箍筋使用，这是出于箍筋乃破坏荷载作用下所必需的钢筋数量，在设计荷载作用下，仍处于混凝土容许主拉应力范围以内，而主应力的最大值产生于腹板高度的中央附近，作为箱形框架的弯曲拉应力，则产生于腹板和上翼缘连接部分附近，所以即使考虑到破坏的安全度方面也可认为是十分安全的。

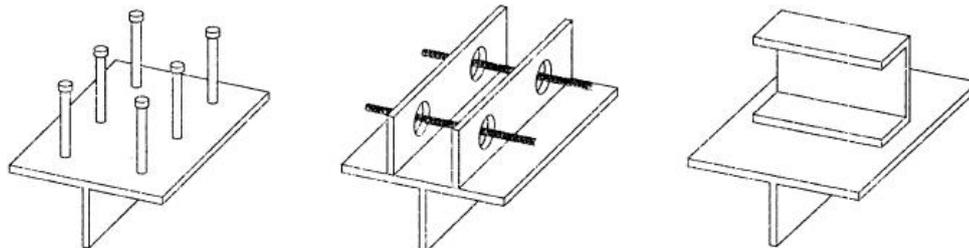
6.2.1

本条以 JTG 3362 规范的 4.1.6 作为参考。由于大跨径钢-混凝土混合梁桥的跨径普遍较大，同时考虑到结构的耐久性，本文件规定混凝土梁应按全预应力构件进行设计。

7.1.4

钢与混凝土组合结构的力学性能不仅受到两种材料各自材质的影响，而且与结合面的连接形式有较大关系。选择连接形式时，要考虑结构性能、施工条件以及结合面的受力特点。

连接件最初主要用于承担钢梁与混凝土桥面板结合面的剪力作用，故通常称为剪力钉、剪力键、剪力器等。随着组合结构桥梁的发展，连接件不仅承受钢与混凝土结合面的剪力作用，在一定情况下还承受拉拔力作用。为此，本文件把用于异种材料间结合的部件通称为连接件。如附图 1 所示，常用连接件形式可分为焊钉连接件、开孔板连接件和型钢连接件设计时需根据组合结构桥梁的受力特点，在保证其安全性和可靠性的前提下，选用适当的连接件形式。



a) 焊钉连接件

b) 开孔板连接件

c) 型钢连接件

附图 1 常用连接件形式

焊钉连接件通过杆身根部受压承担结合面的剪力作用，并依靠圆柱头的锚固作用承担结合面的拉拔力。

开孔板连接件是指沿着受力方向布置，并在侧面设有开孔的钢板，利用钢板孔中混凝土及孔中贯通钢筋的销栓作用，承担结合面的剪力及拉拔力。

型钢连接件是指焊接到受力钢构件上的槽钢、角钢等短小节段的型钢块体，依据型钢板面受压承担结合面的剪力作用。型钢块体上可焊接钢筋，以承担拉拔力并提高变形能力。

7.1.6

当桥梁的跨度大于 200 m 时，应开展钢混结合段的模型试验研究。

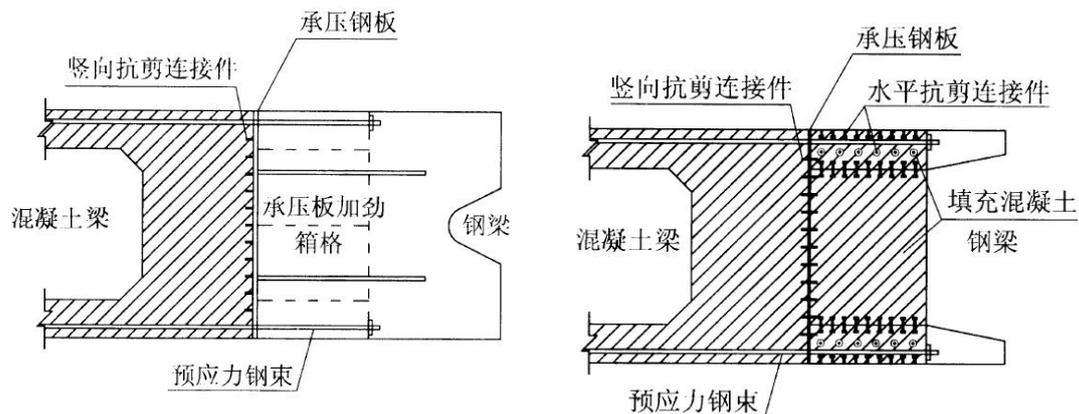
7.2.1

全截面连接完全承压式（附图 2 a）：完全依靠承压钢板以承压方式传递梁的轴力，在承压钢板的钢梁侧设置箱格结构的加劲，使承压钢板全断面承压。竖向剪力由连接于承压钢板的竖向抗剪连接件传递。该方式连接处应力较小，但构造复杂。

全截面连接承压传剪式（附图 2 b）：依靠承压钢板以承压的方式和水平抗剪连接件以水平剪力的方式共同传递梁的轴力。在钢梁侧整个箱梁断面范围内填充混凝土，承压钢板厚度较小。由于钢梁的部分轴力通过水平抗剪连接件传至填充混凝土，使承压钢板的应力分布更加均匀。竖向剪力由连接于承压钢板的竖向抗剪连接件传递。该方式构造较复杂，施工操作困难。德国弗来埃桥采用该方式。

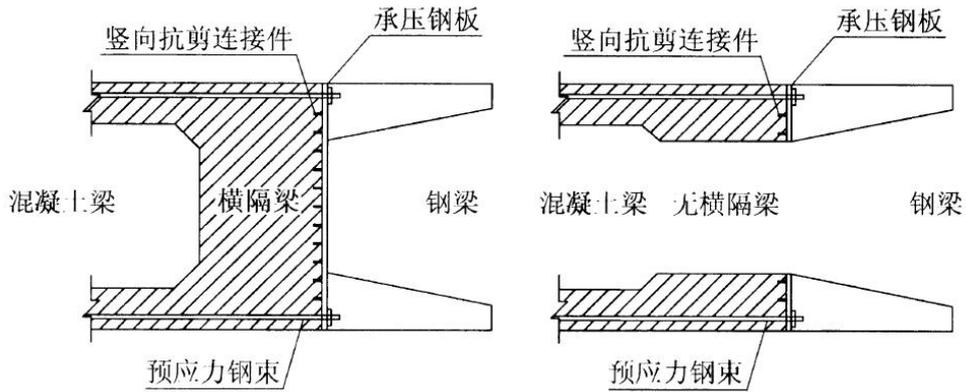
部分截面连接完全承压式（附图 2 c）：完全依靠承压钢板以承压的方式传递梁的轴力，以对应混凝土梁的顶板、底板、腹板断面范围的承压板传递轴力为主。竖向剪力由连接于承压钢板的竖向抗剪连接件传递。该方式应力传递直接，但需要较厚的承压钢板，截面的刚度变化比较剧烈。德国库尔特-舒马赫桥，中国汕头岩石大桥、舟山桃天门大桥采用该方式。

部分截面连接承压传剪式（附图 2 d）：依靠承压钢板以承压的方式和水平抗剪连接件以水平剪力的方式共同传递梁的轴力。仅在钢梁侧对应混凝土梁的顶板、底板、腹板断面范围的箱格内填充混凝土。竖向剪力由混凝土断面和连接于承压钢板的竖向抗剪连接件传递。该方式刚度过渡均匀，应力扩散好。日本生口桥、多多罗桥，中国鄂东长江大桥、荆岳长江大桥采用该方式。

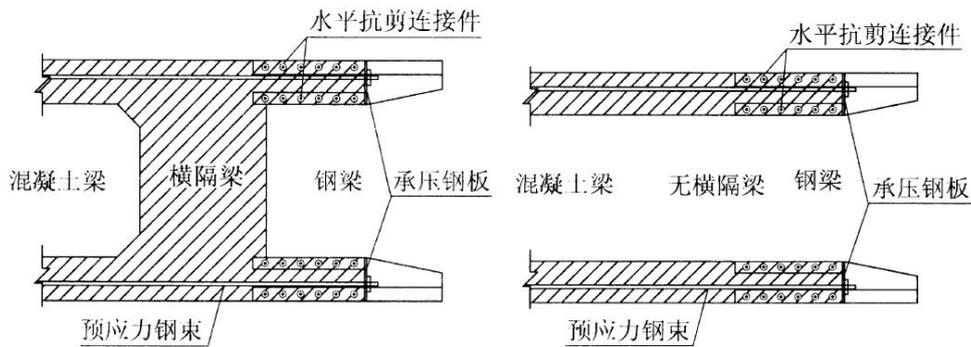


a) 全截面连接完全承压式

b) 全截面连接承压传剪式



c) 部分截面连接完全承压式



d) 部分截面连接承压传剪式

附图 2 混合梁钢-混凝土连接形式

7.2.2

大跨径钢-混凝土混合梁桥的钢-混凝土结合段的受力主要为弯矩，而轴力相对较小。部分截面连接承压传剪式内力传递主要通过承压板、PBL 剪力板以及钢壁面与混凝土之间粘结摩阻三种途径来进行。钢壁面与混凝土之间粘结摩阻由于有较大的不定因素而难于掌握，因此只把它当作强度的安全余量来看待。内力的传递主要由承压板和 PBL 剪力板来完成。

依靠承压板以承压的方式和水平抗剪连接件以水平剪力的方式共同传递梁的轴力。仅在钢梁侧对应混凝土梁的顶板、底板、腹板断面范围的箱格室内填充混凝土。竖向剪力由混凝土断面和连接于承压钢板的竖向抗剪连接件传递。该方式刚度过渡均匀，应力扩散好。

7.2.4

在弯矩和轴力的共同作用下，钢-混凝土结合段可能会出现上缘或下缘受拉，结合部设置一定的预应力来保证顶板、底板、腹板截面均受压，使接头不会出现裂缝。在使用极限状态下，接头部位的预应力设计应充分保证截面顶板、底板都有 2 MPa~3 MPa 的压应力储备。

7.2.5

对同一受力构件，结合面两侧的钢、混凝土截面的重心位置设置一致，以避免因结合部截面重心位置突变而引起较大的附加弯矩。

7.3.1

本条中的计算公式引用用于 JTG/T D64-01 的 8.4.1。

7.3.2

由于结合部构造和受力的复杂性，应建立空间模型，进行结合部节段和局部受力计算分析。空间模型节段计算用以分析结合部总体在各种荷载组合作用下的传力机理、应力分布及大小，为局部计算提取荷载及边界条件。空间模型局部计算用以分析结合部各部构件的承载分担比例、应力分布及大小，以合理设计承压板和连接件。

7.3.4

本条规定的目的是消除模拟节段边界条件对计算结果的影响。一般情况下，混合梁的计算节段模型在钢构件侧和混凝土构件侧的长度范围分别不小于截面高度的4倍或结合部长度的8倍。

7.3.8

钢与混凝土组合后，连接件主要通过剪力传递结构重力、汽车荷载、预应力、收缩、徐变以及钢与混凝土的升、降温差等作用。但是，各种作用在连接件上产生的剪力方向并不一致，按照不同的剪力方向分别进行作用组合。譬如，组合梁连接件作用组合可考虑以下两种情况：

- a) 组合后结构重力+汽车荷载+混凝土桥面板升温；
- b) 收缩变形+混凝土桥面板降温。

7.3.9

连接件抗剪刚度的研究成果较少，且试验数据比较离散。本条文基于试验结果进行抗剪刚度计算公式的拟合，在无具体试验结果的情况下可采用该计算式估算。

7.3.10

本条文的结合面滑移验算仅限用于正常使用极限状态。滑移限值一般可考虑环境类别给出，在没有相关规定的情况下可取0.2 mm。

7.3.11 c)

现行美国 AASHTO 规范、欧洲规范 4 等设计标准均采用与焊钉连接件的截面积、混凝土弹性模量和混凝土抗压强度相关的计算公式，并认为焊钉连接件的抗剪承载力并不是随着混凝土强度的增加而无限提高，存在一个与焊钉连接件材料抗拉强度有关的上限值。

开孔板连接件抗剪承载力的计算式是基于国内外 168 个模型试验结果给出的该式包含孔中混凝土作用和孔中贯通钢筋及其对混凝土的约束作用两部分，可适用于有、无孔中贯通钢筋的开孔板连接件

型钢连接件依据焊接的型钢块体不同，抗剪性能也相差很大，需要对不同形式的型钢连接件进行计算。

8.2.3 a)

为了保证箱梁结构不过扁，限制箱梁的长边与短边之比不宜大于4，从而减少箱梁的畸变应力，减低箱梁横向各位置产生过大的受力不均匀现象。

8.2.3 b)

悬臂长度过大，当车轮荷载作用在悬臂的一些部位时，从横向看悬臂端下弯，顺桥向看在荷载作用的部位，悬臂下缘混凝土受拉，即为双向挠曲效应，因此悬臂下缘的横向钢筋直径不能过小，避免下缘拉应力过大，影响结构的安全。

8.2.4 d)

采用竖向预应力是降低主梁腹板内主拉应力最有效的方法之一。当竖向预应力没有关于腹板对称布置时，竖向预应力对于腹板会产生一定的偏心力矩。腹板上产生的弯矩与上述弯矩是同方向的，将加剧腹板内侧受拉。因此为了不增加箱梁腹板的横向抗弯负担，竖向预应力应根据腹板厚度进行调整，保证竖向预应力钢筋沿腹板中心对称布置或交错对称布置。

8.2.4 g)

从预应力作用的原理来看,预应力所提供的所有内力是通过预应力锚板对锚下混凝土施加压力来提供局部轴力,此轴力沿预应力走向不断通过梁体的纵向剪切扩散直至形成全断面的偏心受压状态。单侧扩散角度约为 26° 左右,由于箱梁构造复杂,以箱梁底板中心线处的钢束为例,预应力扩散是先扩散至全底板,再沿腹板向上,然后在顶板向两侧扩散。这样,布置于底板中心处的纵向预应力要从锚固断面延伸很长一段距离,方能达到全断面受力的效果。采用常规结构分析工具进行结构计算时,多数都采用了全断面受力的假定,则忽略了上述不利影响,从计算结果中无法真实地反映实际应力分布情况。同时,当底板纵向预应力布置在底板中心附近时,由于变截面箱梁底纵向曲线引起预应力的径向分力,也会导致箱梁底板横向弯矩增大。

将钢束布置在腹板附近是缩短预应力传递长度的有效方法,这样有效预应力能够沿腹板和底板双方向传递。同时由于钢束靠近腹板,预应力的径向分力对底板产生的弯曲效应也大大减小。

8.2.4 j)

早期混凝土弹性模量的增长滞后于强度的增长,混凝土虽达到规定强度要求,但混凝土弹性模量往往仅达到设计值的70%甚至还小些。因此在预应力弯矩不能完全抵消自重弯矩时,会使施工阶段弹性下挠值增大。而且此时加载,也会加大混凝土收缩、徐变对结构的影响。因此张拉预应力时,不仅要對混凝土的加载龄期提出要求,同时还应检测混凝土的弹性模量是否达到设计值,只有混凝土弹性模量和强度均达到设计要求,才能最大限度地减少混凝土收缩、徐变对结构的影响。

8.2.4 l)

根据相关资料跨度160 m以上的连续刚构桥,恒载比重占90%以上,达到200 m以上时,恒载比重会占95%以上。虽然有配置足够的预应力以完全平衡掉恒载弯矩效应的“零弯矩”理论,但由于梁体横截面限制,能够配置的预应力数量即预应力度有限,预应效应不能平衡恒载产生的弯曲效应,造成成桥状态时梁体的初始弯曲效应过大,成为促使梁体下挠的基本前提。因此有条件时,应尽可能提高梁体的预应力度,使预应力效应(含体外索)提供的弯曲效应,尽可能的平衡掉大部分恒载弯曲效应,使梁体受力尽可能逼近“零弯矩”的理想状态。

8.2.4 n)

箱梁的最大主拉应力出现在箱梁腹板中部,即腹板高度1/2的位置。为了保证施加的竖向预应力能够有效抵抗箱梁的最大主拉应力,腹板下弯束应超过腹板中心位置。

此公式中钢束的曲率半径有以下两种取法:

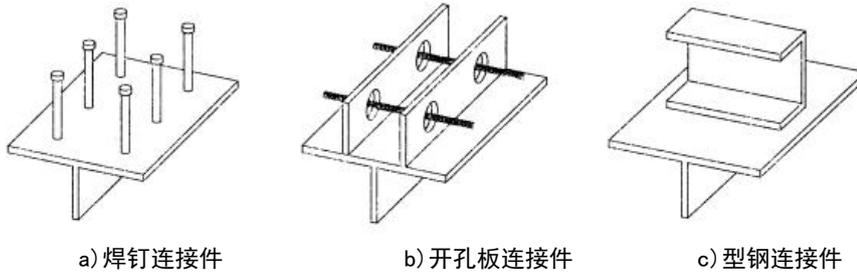
- a) 根据钢束管道的曲线方程,求出该点的曲率半径;
- b) 将该点与相邻两点连成圆弧线,该圆弧的半径即为该点的近似曲率半径。

8.4.3 a)

钢与混凝土组合结构的力学性能不仅受到两种材料各自材质的影响,而且与结合面的连接形式有较大关系。选择连接形式时,要考虑结构性能、施工条件以及结合面的受力特点。

8.4.3 b)

连接件最初主要用于承担钢梁与混凝土桥面板结合面的剪力作用,故通常称为剪力钉、剪力键、剪力器等。随着组合结构桥梁的发展,连接件不仅承受钢与混凝土结合面的剪力作用,在一定情况下还承受拉拔力作用。为此,本文件把用于异种材料间结合的部件通称为连接件如附图3所示,常用连接件形式可分为焊钉连接件、开孔板连接件和型钢连接件设计时需根据组合结构桥梁的受力特点,在保证其安全性和可靠性的前提下,选用适当的连接件形式。



附图 3 常用连接件形式

焊钉连接件通过杆身根部受压承担结合面的剪力作用，并依靠圆柱头的锚固作用承担结合面的拉拔力。

开孔板连接件是指沿着受力方向布置，并在侧面设有开孔的钢板，利用钢板孔中混凝土及孔中贯通钢筋的销栓作用，承担结合面的剪力及拉拔力。

型钢连接件是指焊接到受力钢构件上的槽钢、角钢等短小节段的型钢块体，依据型钢板面受压承担结合面的剪力作用。型钢块体上可焊接钢筋，以承担拉拔力并提高变形能力。但是，型钢连接件抗拉拔性能较弱，容易发生钢与混凝土的分离，一般不用于组合梁。

8.4.3 c)

钢与混凝土同一个结合面上的连接件所受剪力并不均匀，当连接件具有一定的变形能力时，作用剪力就会随着连接件刚度的变化而重新分配，可避免个别连接件受力过大，同时防止钢板与混凝土发生局部应力集中现象。

8.4.3 e)

焊钉连接件抗剪性能不具有方向性，且抗拉拔性能良好。

8.4.3 f)

焊钉的力学性能不具有方向性，可承受面内任意方向的剪力。焊钉高度大于 4 倍直径后，对其抗剪承载力不再产生明显影响。考虑到焊钉承受面内任意方向剪力，按 45° 传力，认为受影响混凝土范围为 4 d 的圆环，故中心间距取 4 d+4 d+ d=9 d 时，相邻焊钉集中力作用混凝土区域恰好不重合，另外再考虑一定的富裕量，得到相关构造数据。

8.4.3 g)

梁桥主梁顶板、底板承受较大的轴向力，腹板主要承受竖向剪力，所以在顶板、底板处沿纵桥向布置，在腹板处宜沿竖向布置。

8.4.8

完全承压式连接的承压钢板厚度 t_{rep} 可按式 (3) 计算初步拟定，并结合结合部空间应力分析最终确定。

$$t_{\text{rep}} = \left(\frac{\sigma_a}{\tau_a} \right) t \quad (3)$$

式中：

τ_a ——承压板剪切强度设计值；

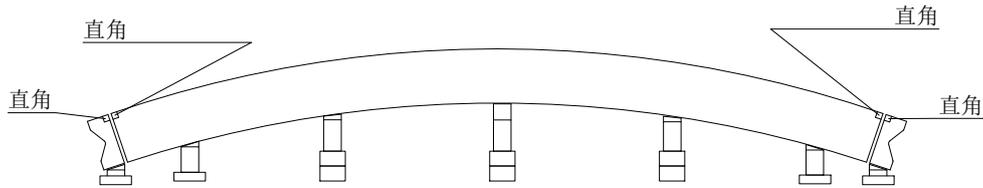
σ_a 、 t ——钢梁顶板、腹板或底板的抗拉强度设计值及板厚。

完全承压式连接构造承压钢板厚度实例：汕头学石大桥为 60 mm，舟山桃天门大桥为 80 mm。

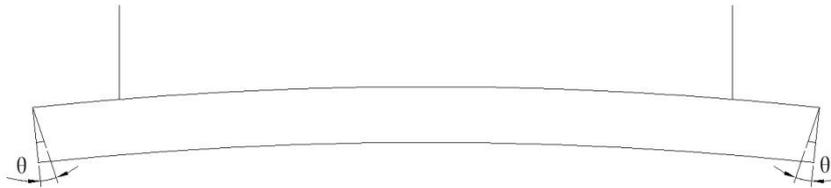
承压传剪式连接构造承压板厚度实例：鄂东长江大桥为 30 mm，荆岳长江大桥为 22 mm，重庆石板坡长江大桥为 25 mm，日本生口桥为 22 mm。

10.2.3 k) 1)

钢梁按制造拱度曲线，在工厂的整体总拼胎架上无应力状态下制造，两端头的腹板端面制造时与面板垂直（钢混接头同）。在吊装状况下，钢箱梁端部将比无应力状态时上仰角度 θ ，在合龙工况下钢箱梁端口与钢混接头端口应完全吻合，钢混接头端附加的 θ 度仰角宜在混凝土梁浇筑中完成。要求钢箱梁与钢混接头的连接以及钢混接头与混凝土梁的连接线型平直、顺畅，不应有折角。线形控制及此工况下钢混接头端空间位置计算要充分精确。钢箱梁无应力制造角度示意图见附图4。钢箱梁吊装状态角度示意图见附图5。



附图4 钢箱梁无应力制造角度示意图



附图5 钢箱梁吊装状态角度示意图

10.2.3 k) 2)

钢箱梁的整体吊装合龙是技术难度较高的工作，考虑到施工和制造中出现的几何尺寸上的精度误差及合龙时的温度影响，若采用钢箱梁一次制作成设计长度并合龙焊接存在一定风险。

10.2.4 b)

测量控制对于保证节段的预制精度有非常重要的作用，因此需要建立精密测量的控制网和控制点。

10.2.4 c)

节段预制拼装的桥梁，其成桥线形基本上是由预制节段的形状和尺寸决定的，拼装阶段只能作很小的调整。实际上，节段预制拼装桥梁的精度很大程度上取决于节段预制的精度，故节段预制时需要对其预制线形进行控制。

10.3.10

钢混结合段的混凝土配合比设计以提高混凝土抗裂性和体积稳定性为原则，综合考虑胶凝材料用量、砂率及用水胶比，同时考虑到结合部施工的质量和可操作性，配置流动性好、体积稳定性好的高性能混凝土，以实现混凝土的易密性和防止脱粘。可采用微膨胀钢纤维混凝土或聚丙烯纤维混凝土提高钢筋混凝土的抗裂性。掺加纤维后会使得流动性降低，宜通过试配和浇筑工艺试验进行验证。

10.3.12

在满足设计、混凝土耐久性和施工的前提下使用矿物掺合料，尽量减少水泥用量和用水量，以控制混凝土温升，避免混凝土开裂。

10.3.14

钢混结合处钢筋、剪力键密集，清理工作异常困难，需高度重视。

10.3.15

可采用劲性骨架和张拉临时预应力束等进行临时锁定。

10.4.5

应对大桥进行定期检测，并建立桥梁检测档案，密切注视桥梁的使用情况。考虑到大桥后期运营阶段，会受气候、氧化、腐蚀和老化等因素影响，在长期静载和活载的作用下会遭受损坏，其强度和刚度会随着时间的增加而降低，这不仅会影响安全行车，更会使桥梁的使用寿命缩短。因此应该建立和发展一个健康监测系统，利用现代化的诊断量测手段，通过对大桥关键部位的空间位置、力学性能及其变化的长期和定期监测、分析，长期积累数据，用来监测和评估大桥在运营期间其结构的承载能力、运营状态和耐久能力。应严格控制车辆的超速和超载，对大桥进行定期检测，并建立桥梁检测档案，密切注视桥梁的使用情况。除了用科学的量测手段外，定期对桥梁结构进行全面的维护检查也是检验桥梁结构是否健康运营的最直接的有效手段。

一座大型桥梁的健康与安全监测系统的构建应该是贯穿于桥梁设计、建设、运营全过程，通过总体设计、施工监控、质量监督检查与养护管理等一系列的工作，逐步实现大跨径桥梁结构健康与安全监测系统的数字化与自动化。