

团 体 标 准

T/SDHTS 00020—2026

钢管混凝土拱桥强健性设计要求

Design requirements for robustness of concrete-filled steel
tube arch bridges

此文本仅供个人学习、研究之用，未经授权，禁止复
制、发行、汇编、翻译或网络传播等，侵权必究

2026-09-01 发布

2026-11-01 实施

山东公路学会 发 布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本规定 2

5 材料 2

 5.1 钢材 2

 5.2 混凝土 3

 5.3 钢管混凝土 4

 5.4 吊索和系杆索 5

 5.5 其他材料 5

6 强健性设计 6

 6.1 一般规定 6

 6.2 计算模型 6

 6.3 计算作用与作用组合 6

 6.4 加劲纵梁内力计算 9

 6.5 加劲纵梁截面承载力验算 11

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。

本文件由山东高速建设管理集团有限公司提出。

本文件由山东公路学会归口。

本文件起草单位：山东高速建设管理集团有限公司、山东省交通规划设计院集团有限公司、福州大学、山东省公路桥梁建设集团有限公司。

本文件主要起草人：尹永胜、徐召、吴庆雄、徐常泽、王宏博、马亚、黄卿维、管锡琨、赵洪蛟、李莹炜、侯亚辉、范飞飞、李岩、王渠、刁荣亭、黄育凡。

钢管混凝土拱桥强健性设计要求

1 范围

本文件规定了钢管混凝土拱桥材料和强健性设计的技术要求。

本文件适用于钢管为圆形截面的中、下承式公路钢管混凝土拱桥的设计。

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 700 碳素结构钢

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB 50923 钢管混凝土拱桥技术规范

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 D65-06 公路钢管混凝土拱桥设计规范

JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范

JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范

GB/T 3077 合金结构钢

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

钢管混凝土拱肋 concrete-filled steel tube arch rib

在钢管内灌注混凝土，并由钢管和混凝土共同受力的拱肋构件。

3.2

钢管混凝土拱桥 concrete-filled steel tube arch bridge

主拱为钢管混凝土拱肋的拱桥。

3.3

强健性设计 robustness design

为使钢管混凝土拱桥结构在遭遇撞击、爆炸或其他破坏作用导致关键吊杆构件失效时，能够控制破坏范围，避免发生连续或整体倒塌的设计。

3.4

悬吊桥面系 suspended deck system

由吊杆、横梁、加劲纵梁等构成，具备安全冗余的整体性桥面结构系统。

4 基本规定

4.1 钢管混凝土拱桥的设计应符合 GB 50923 的规定，并根据地形、地质、水文条件和使用要求，合理选择结构体系和构造尺寸。

4.2 钢管混凝土拱桥的防水、排水和其他结构的耐久性要求，应符合 GB 50923 的规定。

4.3 钢管混凝土拱桥的荷载分类与计算，应符合 JTG D60 和 GB 50923 的规定。

4.4 钢管混凝土拱桥应进行强度、刚度和稳定性验算，按照 GB 50923 的相关规定进行。

4.5 钢管混凝土拱桥抗震设计应符合 JTG/T 2231-01 的规定。

5 材料

5.1 钢材

5.1.1 拱肋钢管应符合 GB/T 1591 的规定，宜选用 B 级及以上的碳素结构钢或低合金高强度结构钢，其质量要求应分别符合 GB/T 700 或 GB/T 1591 的规定。

5.1.2 钢材强度应符合表 1 的要求。

表 1 钢材强度要求

钢材		设计值/MPa		标准值 f_y /MPa
钢号	厚度/mm	抗拉、抗压和抗弯 f_{sd}	抗剪 f_{vd}	
Q235	≤ 16	190	110	235
	$>16\sim 40$	180	105	225
	$>40\sim 100$	170	100	215
Q355	≤ 16	275	160	355
	$>16\sim 40$	270	155	345
	$>40\sim 63$	260	150	335
	$>63\sim 80$	250	145	325
	$>80\sim 100$	245	140	315
Q390	≤ 16	310	180	390
	$>16\sim 40$	295	170	380
	$>40\sim 63$	280	160	360
	$>63\sim 100$	265	150	340
Q420	≤ 16	335	195	420
	$>16\sim 40$	320	185	410
	$>40\sim 63$	305	175	390
	$>63\sim 100$	290	165	370

5.1.3 钢材的物理性能应符合表 2 的要求。

表 2 钢材物理性能要求

弹性模量 E_s /MPa	剪切模量 G_s /MPa	线膨胀系数 α_s / $^{\circ}\text{C}^{-1}$	密度 ρ_s / (kg/m^3)
2.06×10^5	7.90×10^4	1.20×10^{-5}	7.85×10^3

5.2 混凝土

5.2.1 钢管混凝土拱肋的管内混凝土应采用自密实补偿收缩混凝土，宜选用 C30~C80 的强度等级。

5.2.2 混凝土强度和弹性模量应符合表 3 的要求，剪切模量 G_c 可按表 3 中弹性模量 E_c 的 40%取用，泊松比 μ_c 可取 0.2。线膨胀系数取 $1.0\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

表 3 混凝土强度和弹性模量

混凝土强度等级	轴心抗压强度/MPa		轴心抗拉强度/MPa		弹性模量 E_c /GPa
	标准值 f_{ck}	设计值 f_{cd}	标准值 f_{tk}	设计值 f_{td}	
C30	20.10	13.80	2.01	1.39	30.0
C35	23.40	16.10	2.20	1.52	31.5
C40	26.80	18.40	2.40	1.65	32.5
C45	29.60	20.50	2.51	1.74	33.5

表 3 混凝土强度和弹性模量（续）

混凝土强度等级	轴心抗压强度/MPa		轴心抗拉强度/MPa		弹性模量 E_c /GPa
	标准值 f_{ck}	设计值 f_{cd}	标准值 f_{tk}	设计值 f_{td}	
C50	32.40	22.40	2.65	1.83	34.5
C55	35.50	24.40	2.74	1.89	35.5
C60	38.50	26.50	2.85	1.96	36.0
C65	41.50	28.50	2.93	2.02	36.5
C70	44.50	30.50	3.00	2.07	37.0
C75	47.40	32.40	3.05	2.10	37.5
C80	50.20	34.60	3.10	2.14	38.0

5.2.3 自密实补偿收缩混凝土工作性能指标和外加剂的选取应符合 JTJ/T D65-06 的规定，密闭环境下混凝土自由膨胀率应控制在 $0.5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-4}$ ，稳定收敛期应小于 60 d。

5.3 钢管混凝土

5.3.1 钢管和管内混凝土的匹配组合宜按照表 4 选用。

表 4 钢管和混凝土强度等级匹配组合

混凝土强度等级	钢管钢材强度等级			
	Q235	Q355	Q390	Q420
C30	✓	□	□	□
C35	✓	□	□	□
C40	✓	✓	□	□
C45	□	✓	□	□
C50	□	✓	□	□
C55	□	✓	□	□
C60	□	✓	✓	✓
C65	□	□	✓	✓
C70	□	□	✓	✓
C75	□	□	✓	✓
C80	□	□	✓	✓

注：“✓”表示钢管钢材与混凝土强度等级匹配，“□”表示钢管钢材与混凝土强度等级不匹配。

5.3.2 钢管混凝土拱肋的钢管壁厚不应小于 10 mm。钢管的外直径 d 与壁厚 t 之比宜满足式（1）的要求。

$$35 \times \frac{235}{f_y} \leq \frac{d}{t} \leq 100 \times \frac{235}{f_y} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

f_y ——钢管强度标准值，单位为兆帕（MPa）；

d ——钢管外直径，单位为毫米（mm）；

t ——钢管壁厚，单位为毫米（mm）。

5.3.3 钢管混凝土约束效应系数设计值 ξ_0 应按式（2）计算，不宜小于 0.60。

$$\xi_0 = \frac{A_s f_s}{A_c f_{cd}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

ξ_0 ——钢管混凝土约束效应系数设计值；

A_s ——钢管的截面面积，单位为平方毫米（mm²）；

f_s ——钢板（材）抗拉、抗压和抗弯强度设计值，单位为兆帕（MPa）；

A_c ——钢管内混凝土的截面面积，单位为平方毫米（mm²）；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值，单位为兆帕（MPa）。

5.3.4 钢管混凝土截面含钢率 ρ_s 应按式（3）计算，宜为 0.04~0.20。

$$\rho_s = \frac{A_s}{A_c} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

ρ_s ——钢管混凝土截面含钢率。

5.4 吊索和系杆索

5.4.1 吊索和系杆索的高强钢丝和钢绞线的选取应符合 GB 50923 的规定。

5.4.2 吊索和系杆索的锚具及连接件钢材性能要求应符合 GB/T 3077 和 GB/T 1591 的规定，宜选用优质合金结构钢。

5.5 其他材料

5.5.1 焊接材料应与结构钢材的性能相匹配。对两种不同强度等级的钢材进行焊接时，应采用与强度较低钢材相适应的焊接材料。

5.5.2 用于钢管混凝土拱肋或钢构件连接的紧固件，应符合 JTG D64 的相关规定。

6 强健性设计

6.1 一般规定

6.1.1 钢管混凝土拱桥应对悬吊桥面系进行强健性设计，确保吊杆断裂后，作为悬吊桥面系主要受力部件的加劲纵梁应具有足够的承载能力，能安全承担永久作用、可变作用与吊杆断裂产生冲击力荷载的组合效应。

6.1.2 强健性设计宜考虑一对吊杆发生断裂的单一偶然事件。

6.1.3 强健性设计宜按照图 1 所示的流程进行。

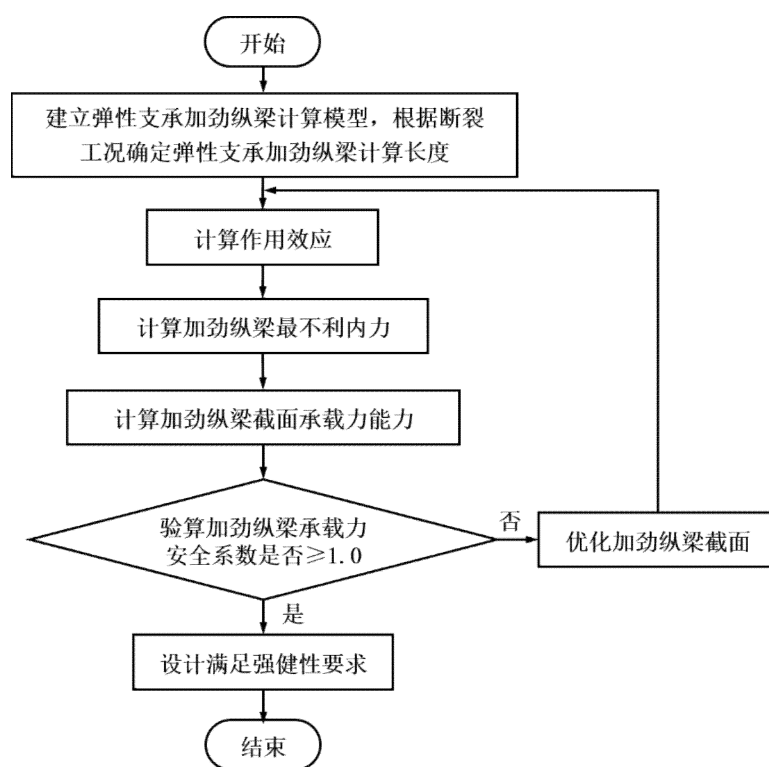


图 1 钢管混凝土拱桥悬吊桥面系强健性设计计算流程

6.1.4 短吊杆锚具宜选用允许大转角变形的锚具。

6.2 计算模型

6.2.1 拱桥吊杆断裂后的等效静力计算，宜考虑图 2 所示的反向冲击力荷载 N_D 。通过弹性支承模拟加劲纵梁吊点处对应吊杆与拱肋对加劲纵梁的支承作用，将悬吊桥面系简化为图 3 所示的弹性支承连续梁，且在图 4 所示的简化连续梁上施加永久作用、可变作用和冲击力荷载，再进行吊杆断裂状态下悬

吊桥面系加劲纵梁的内力计算。

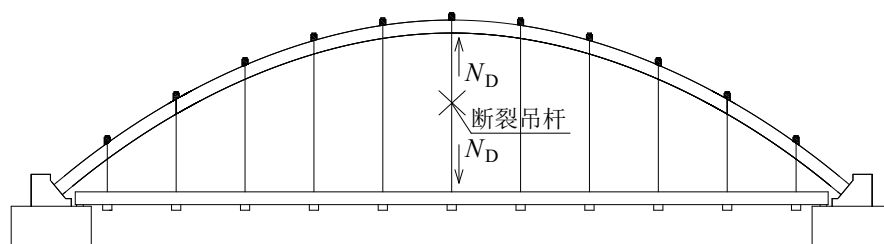
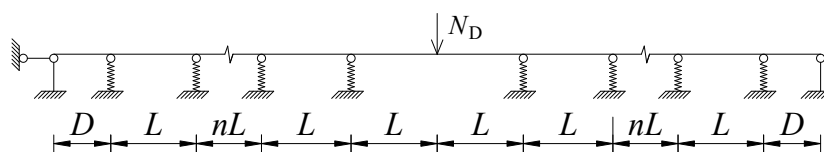


图2 吊杆断裂时拱桥等效静力计算示意图



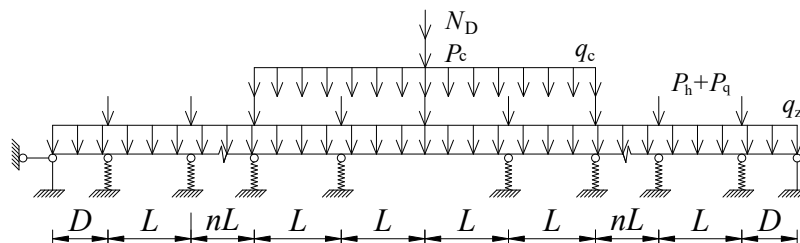
标引符号说明：

D ——边吊杆和加劲纵梁端点之间的距离；

L ——两个吊杆之间的间隔距离；

nL —— n 个吊杆之间的间隔距离。

图3 弹性支承连续梁计算模型



标引符号说明：

P_c ——车道集中荷载；

q_c ——车道均布荷载；

P_h ——横梁结构自重；

P_q ——桥面结构自重；

q_z ——加劲纵梁结构自重。

图4 施加荷载的弹性支承连续梁计算模型

6.2.2 弹性支座的柔度系数可取相应位置吊杆的柔度系数 c_n ，按式（4）进行计算。

$$c_n = \frac{l_D}{E_D A_D} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

c_n —— n 号吊杆的柔度系数，单位为米每牛（m/N）；

l_D ——吊杆长度，单位为米（m）；

E_D ——吊杆弹性模量，单位为帕（Pa）；

A_D ——吊杆截面积，单位为平方米（m²）。

6.2.3 根据断裂吊杆的位置，断裂工况可分为短吊杆断裂工况、次短吊杆断裂工况和长吊杆断裂工况，三种断裂工况的简化计算模型分别如图 5、图 6 和图 7 所示，加劲纵梁计算长度可按表 5 进行取值。

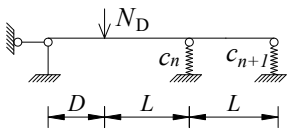


图 5 短吊杆断裂加劲纵梁简化计算模型

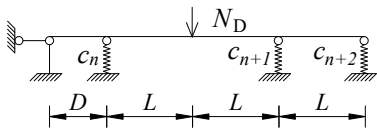


图 6 次短吊杆断裂加劲纵梁简化计算模型

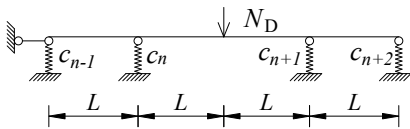


图 7 长吊杆断裂加劲纵梁简化计算模型

表 5 加劲纵梁计算长度

吊杆断裂工况	短吊杆断裂	次短吊杆断裂	长吊杆断裂
计算长度	$D + 2L$	$D + 3L$	$4L$

6.3 计算作用与作用组合

6.3.1 强健性设计计算应考虑永久作用、可变作用和吊杆断裂产生的冲击力荷载，其中永久作用包括结构自重、桥面铺装、附属设施等恒载，可变作用包括车道荷载与人群荷载。

6.3.2 永久作用和可变作用的取值应符合 JTG D60 的规定。

6.3.3 可变作用的汽车荷载在横桥向多车道布置时，应考虑汽车荷载的折减，其横向车道布载系数宜

符合表 6 的规定。

表 6 强健性设计横向车道布载系数

横向布载车道数量/条	1	2	3	4	5	6	7	8
横向车道布载系数	1.0	0.75	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52

6.3.4 吊杆断裂产生的冲击力荷载 N_D 应按式 (5) 计算。

$$N_D = \mu_D N_{D0} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

N_D ——吊杆断裂产生的冲击力荷载，单位为牛（N）；

μ_D ——吊杆断裂产生的动力系数，宜取 1.8；

N_{D0} ——吊杆断裂时永久作用与可变作用标准值组合下的吊杆轴力，单位为牛（N）。

6.3.5 吊杆断裂状态下作用基本组合的效应设计值应按式 (6) 计算。

$$S = \gamma_0 (\gamma_G S_{Gk} + \gamma_Q S_{Qk} + N_D) \dots\dots\dots (6)$$

式中：

S ——吊杆断裂状态下作用基本组合的效应设计值；

γ_0 ——结构重要性系数，设计安全等级为一级、二级和三级时，宜分别取 1.1、1.0 和 0.9；

γ_G ——永久作用分项系数，宜取 1.2；

S_{Gk} ——永久作用的标准值；

γ_Q ——可变作用分项系数，宜取 0.9；

S_{Qk} ——可变作用的标准值。

6.4 加劲纵梁内力计算

6.4.1 短吊杆断裂工况可通过式 (7) 求出 n 号吊杆处加劲纵梁的弯矩 M_n ，从而计算出加劲纵梁任意截面的内力、位移与支承反力等，进而得到加劲纵梁的最不利内力。

$$M_n = \frac{A_{n,p}}{\delta_{n,n}} \dots\dots\dots (7)$$

$$\delta_{n,n} = \frac{D+2L}{3E_z I_z} + c_n \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L+D} \right)^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$A_{n,p} = \frac{1}{E_z I_z} \left[\frac{N_D D L [2D^2 + L(3D+L)]}{6(L+D)^2} \right] - c_n R_n \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L+D} \right) \dots\dots\dots (9)$$

式中：

M_n —— n 号吊杆处加劲纵梁弯矩，单位为牛米（N·m）；

$\delta_{n,n}$ ——力法基本结构中 n 号吊杆作用 $M_n=1$ 引起的 n 号吊杆处两侧加劲纵梁的相对转角，单位为弧度（rad）；

E_z ——加劲纵梁的弹性模量，单位为帕（Pa）；

I_z ——加劲纵梁的截面惯性矩，单位为四次方米（m⁴）；

$A_{n,p}$ ——力法基本结构中由外荷载作用引起的 n 号吊杆处两侧加劲纵梁的相对转角，单位为弧度（rad）；

R_n ——外荷载作用在基本结构上引起的 n 号吊杆处对应的支承反力，单位为牛（N）。

6.4.2 次短吊杆断裂工况可通过式（10）的弯矩方程求出 n 号吊杆处加劲纵梁的弯矩 M_n 和 $n+1$ 号吊杆处加劲纵梁的弯矩 M_{n+1} ，从而计算出加劲纵梁任意截面的内力、位移与支承反力等，进而得到加劲纵梁的最不利内力。

$$\begin{pmatrix} \delta_{n,n} & \delta_{n,n+1} \\ \delta_{n+1,n} & \delta_{n+1,n+1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_n \\ M_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{n,p} \\ A_{n+1,p} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$\delta_{n,n} = \frac{D+2L}{3E_z I_z} + c_n \left(\frac{1}{2L} + \frac{1}{D} \right)^2 + c_{n+1} \left(\frac{1}{2L} \right)^2 \dots\dots\dots (11)$$

$$\delta_{n+1,n} = \delta_{n,n+1} = \frac{L}{3E_z I_z} - \frac{c_n}{2L} \left(\frac{1}{2L} + \frac{1}{D} \right) - \frac{3c_{n+1}}{4L^2} \dots\dots\dots (12)$$

$$\delta_{n+1,n+1} = \frac{L}{E_z I_z} + \frac{c_n}{4L^2} + \frac{9c_{n+1}}{4L^2} + \frac{c_{n+2}}{L^2} \dots\dots\dots (13)$$

$$A_{n,p} = \frac{N_D L^2}{4E_z I_z} - c_n R_n \left(\frac{1}{2L} + \frac{1}{D} \right) + \frac{c_{n+1} R_{n+1}}{2L} \dots\dots\dots (14)$$

$$A_{n+1,p} = \frac{N_D L^2}{4E_z I_z} + \frac{c_n R_n}{2L} - \frac{3c_{n+1} R_{n+1}}{2L} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

M_{n+1} —— $n+1$ 号吊杆处加劲纵梁弯矩，单位为牛米（ $\text{N} \cdot \text{m}$ ）；

$\delta_{n,n+1}$ ——力法基本结构中 $n+1$ 号吊杆作用 $M_{n+1}=1$ 引起的 n 号吊杆处两侧加劲纵梁的相对转角，单位为弧度（ rad ）；

$\delta_{n+1,n}$ ——力法基本结构中 n 号吊杆作用 $M_n=1$ 引起的 $n+1$ 号吊杆处两侧加劲纵梁的相对转角，单位为弧度（ rad ）；

$\delta_{n+1,n+1}$ ——力法基本结构中 $n+1$ 号吊杆作用 $M_{n+1}=1$ 引起的 $n+1$ 号吊杆处两侧加劲纵梁的相对转角，单位为弧度（ rad ）；

$A_{n+1,p}$ ——力法基本结构中由外荷载作用引起的 $n+1$ 号吊杆处两侧加劲纵梁的相对转角，单位为弧度（ rad ）；

c_{n+1} —— $n+1$ 号吊杆的柔度系数，单位为米每牛（ m/N ）；

c_{n+2} —— $n+2$ 号吊杆的柔度系数，单位为米每牛（ m/N ）；

R_{n+1} ——外荷载作用在基本结构上引起的 $n+1$ 号吊杆处对应的支承反力，单位为牛（ N ）。

6.4.3 长吊杆断裂工况可通过式（10）的弯矩方程求出 n 号吊杆处加劲纵梁的弯矩 M_n 和 $n+1$ 号吊杆处加劲纵梁的弯矩 M_{n+1} ，从而计算出加劲纵梁任意截面的内力、位移与支承反力等，进而得到加劲纵梁的最不利内力。

$$\delta_{n,n} = \frac{L}{E_z I_z} + \frac{4c_{n-1} + 9c_n + c_{n+1}}{4L^2} \dots\dots\dots (16)$$

$$\delta_{n+1,n} = \delta_{n,n+1} = \frac{L}{3E_z I_z} - \frac{3}{4L^2}(c_n + c_{n+1}) \dots\dots\dots (17)$$

$$\delta_{n+1,n+1} = \frac{L}{E_z I_z} + \frac{c_n + 9c_{n+1} + 4c_{n+2}}{4L^2} \dots\dots\dots (18)$$

$$A_{n,p} = \frac{N_D L^2}{4E_z I_z} - \frac{3c_n R_n - c_{n+1} R_{n+1}}{2L} \dots\dots\dots (19)$$

$$A_{n+1,p} = \frac{N_D L^2}{4E_z I_z} + \frac{c_n R_n - 3c_{n+1} R_{n+1}}{2L} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

c_{n-1} —— $n-1$ 号吊杆的柔度系数，单位为米每牛（ m/N ）。

6.5 加劲纵梁截面承载力验算

6.5.1 吊杆断裂状态下，悬吊桥面系加劲纵梁截面承载力计算应符合 JTG 3362 和 JTG D64 的规定。计算时，加劲纵梁的混凝土强度应采用标准值，钢材强度应采用屈服强度，并考虑各相应的强度增大系数。混凝土和钢材强度增大系数宜符合表 7 的规定。

表 7 材料强度增大系数

材料	混凝土	钢筋	钢材
强度增大系数	1.25	1.25	1.05

6.5.2 悬吊桥面系加劲纵梁截面承载力应满足式（21）和式（22）的要求。

$$M_u \geq M_d \cdots \cdots \cdots (21)$$

$$Q_u \geq Q_d \cdots \cdots \cdots (22)$$

式中：

M_u ——在吊杆断裂状态下加劲纵梁截面的抗弯承载力，单位为牛米（N·m）；

M_d ——在吊杆断裂状态下加劲纵梁截面的最大弯矩，单位为牛米（N·m）；

Q_u ——在吊杆断裂状态下加劲纵梁截面的抗剪承载力，单位为牛（N）；

Q_d ——在吊杆断裂状态下加劲纵梁截面的最大剪力，单位为牛（N）。

T/SDHTS 00020-2026