文章编号: 0451- 0712(2002)06- 0075- 06 中图分类号: U 448135 文献标识码: B

体内与体外混合体系预应力混凝土桥

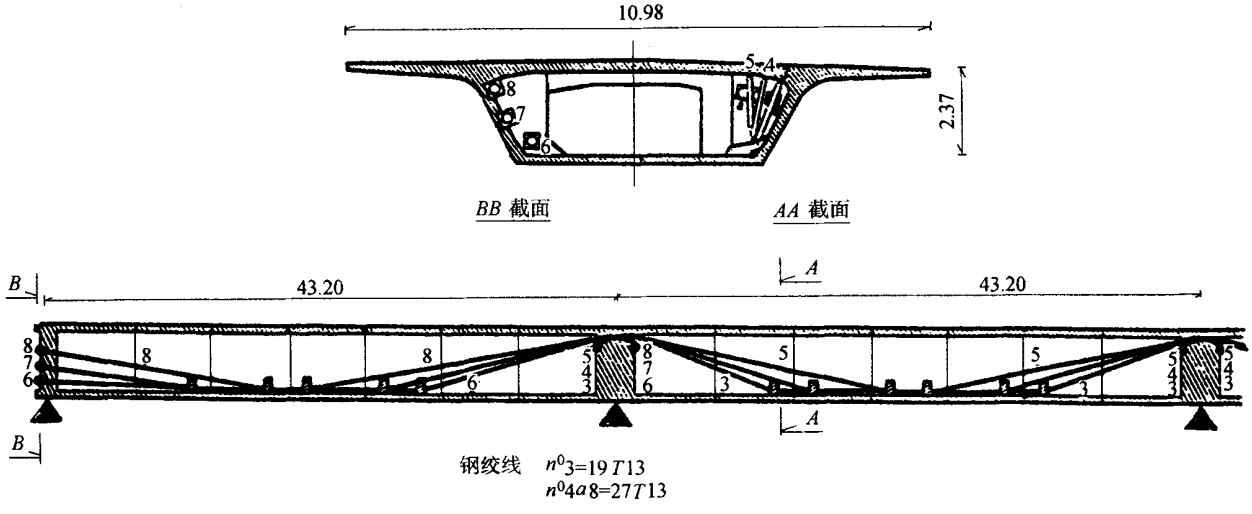
戴 竞
(中交公路规划设计院 北京市 100010)

摘 要: 论述体内体外混合体系预应力混凝土桥的设计, 预应力钢索的布置, 钢索防护, 专门技术问题与设计理论概要。

关键词: 体内与体外预应力; 混凝土; 箱梁; 悬臂施工; 顶推施工; 极限状态

0 引言

体外预应力混凝土桥由于工程质量高, 施工简易, 工程造价节省等因素, 世界各国广泛采用, 我国亦开始建造。体外预应力有 3 种类型: (1) 全部体外预应力, 各跨预应力钢索连续; (2) 全部体外预应力, 各跨预应力钢索不连续; (3) 体内预应力与体内预应力混合体系。中等跨径桥梁, 预应力索布置较简单, 一般采用全部体外预应力, 预应力索在跨内连续。例如美国 Seven M ile 桥总长 10 931 m, 共 264 孔, 标准跨径为 41115 m。其体外预应力索布置如图 1。



单位: m

图 1 美国 Scven M ile 桥体外预应力索布置

大跨径桥梁预应力钢索布置复杂, 根据结构受力情况和施工工艺需要, 一部分钢索置于混凝土体内, 另一部分钢索置于箱梁内, 以充分发挥预应力的作用。体内与体外预应力混合体系, 对施工采用平衡悬臂法与顶推法的桥梁更为适宜, 已广泛用于预应力混凝土桥梁工程中。

1 设计与预应力钢索布置

体内与体外预应力混合体系混凝土桥的设计与预应力钢索的布置, 现以平衡悬臂施工与顶推施工两类桥梁实例说明情况。

111 法国 Re 岛桥

法国 Re 岛桥是预应力混凝土连续梁桥, 于 1988 年建成。全桥共 29 孔, 其中主桥 19 孔, 跨径为 110 m。总长 2 92615 m。平面呈微弯, 半径为 4 000 m。上部箱梁为单箱单室, 桥面宽 1515 m。主桥梁的纵断面呈抛物线型, 跨中高 410 m, 桥墩处高 710 m。引桥梁为等截面, 高 410 m。箱梁预制, 标准节段长 318 m。施

收稿日期: 2002- 04- 06

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

工采用缆索架桥机将预制节段平衡悬臂拼装, 接缝用环氧树脂胶结。

箱梁预应力钢索分为 3 类。

(1) 悬臂施工预应力索(*a*): 这类钢索是后张普通预应力索, 由 12- 016 钢绞线制成, 管道置于混凝土体内。每节段有 2 根索锚固在顶板, 节段拼装后即张拉预应力, 以支承其恒载。尚有 80% 的节段, 安装另一对悬臂索, 锚固在箱梁上角的锚块上。在拼装 4 个节段后再张拉预应力, 以防止超应力和底板接缝开口。

(2) 体外预应力索(*b*): 每索由 19- 016 钢绞线制成, 置于箱梁内, 锚固在桥墩顶节段的横隔梁内。采用弗氏专用锚具, 以便更换钢索。

(3) 连续预应力索(*c*): 每索由 12- 016 钢绞线制成, 置于混凝土体内。其作用是增加跨中的预应力, 并调整偏心距。部分连续索在跨中合拢几小时后张拉, 以调整温度变化影响。这些预应力索设置在顶板与底板内, 锚固在箱梁角的锚块上, 见图 2。

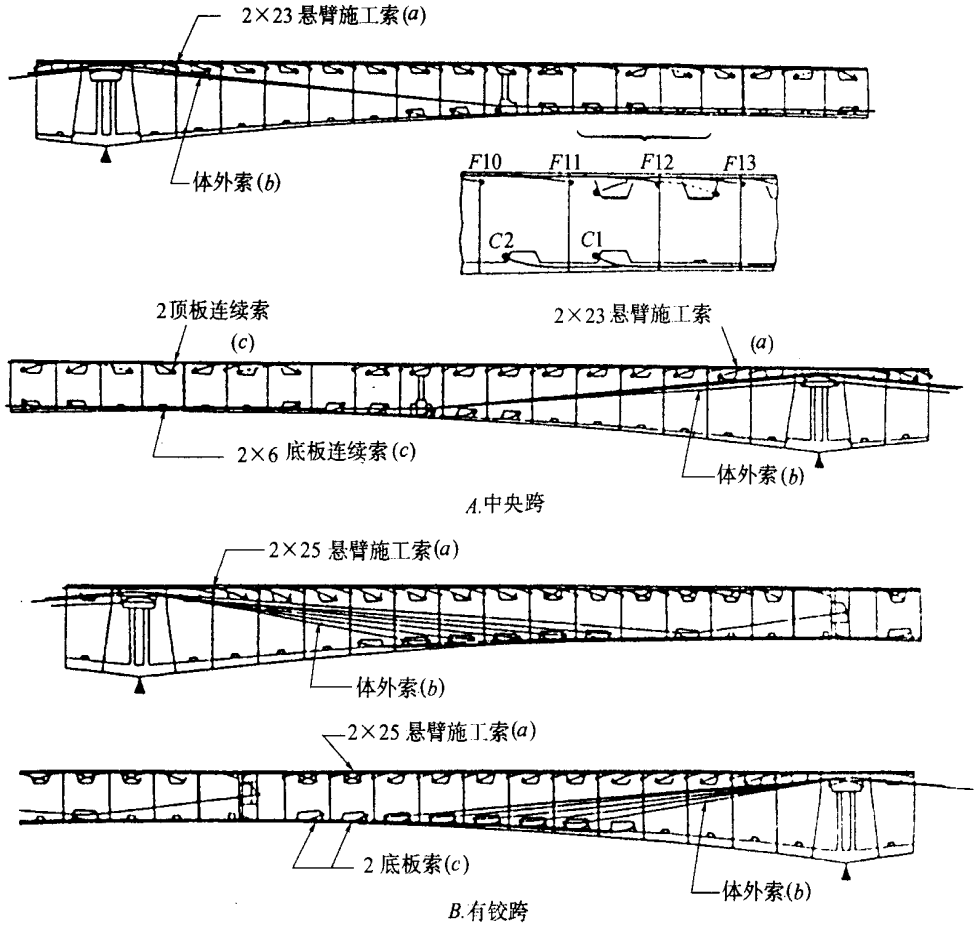


图 2　法国 Re 岛桥预应力索布置

112　法国 Poncin 桥

法国 Poncin 桥, 跨越 A in 河, 是预应力混凝土连续梁桥。跨径为 40 m + 70 m + 79 m + 117 m + 155 m + 105 m, 6 跨成一联, 总长 566 m。上部箱梁为单箱单室, 桥面宽 19180 m。施工采用顶推法, 在桥头浇筑箱梁, 向河中顶推前进, 见图 3。

钢索布置分施工顶推需要的预应力索和使用荷载需要的预应力索。顶推预应力索置于混凝土箱梁的顶板和底板混凝土体内, 为水平直线方向, 锚固在顶板与底板的节点上。大跨径桥梁, 另加几根临时顶

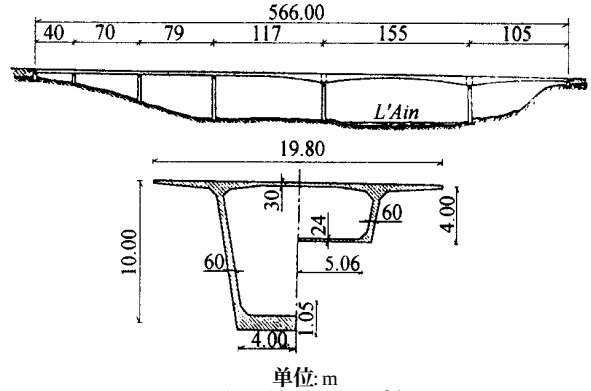


图 3　法国 Poncin 桥

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

推索, 置于混凝土体外, 以减少混凝土体内的顶推索数量。在顶推施工完成后, 设置体外预应力索在箱梁内, 以承受作用荷载(图 4)。

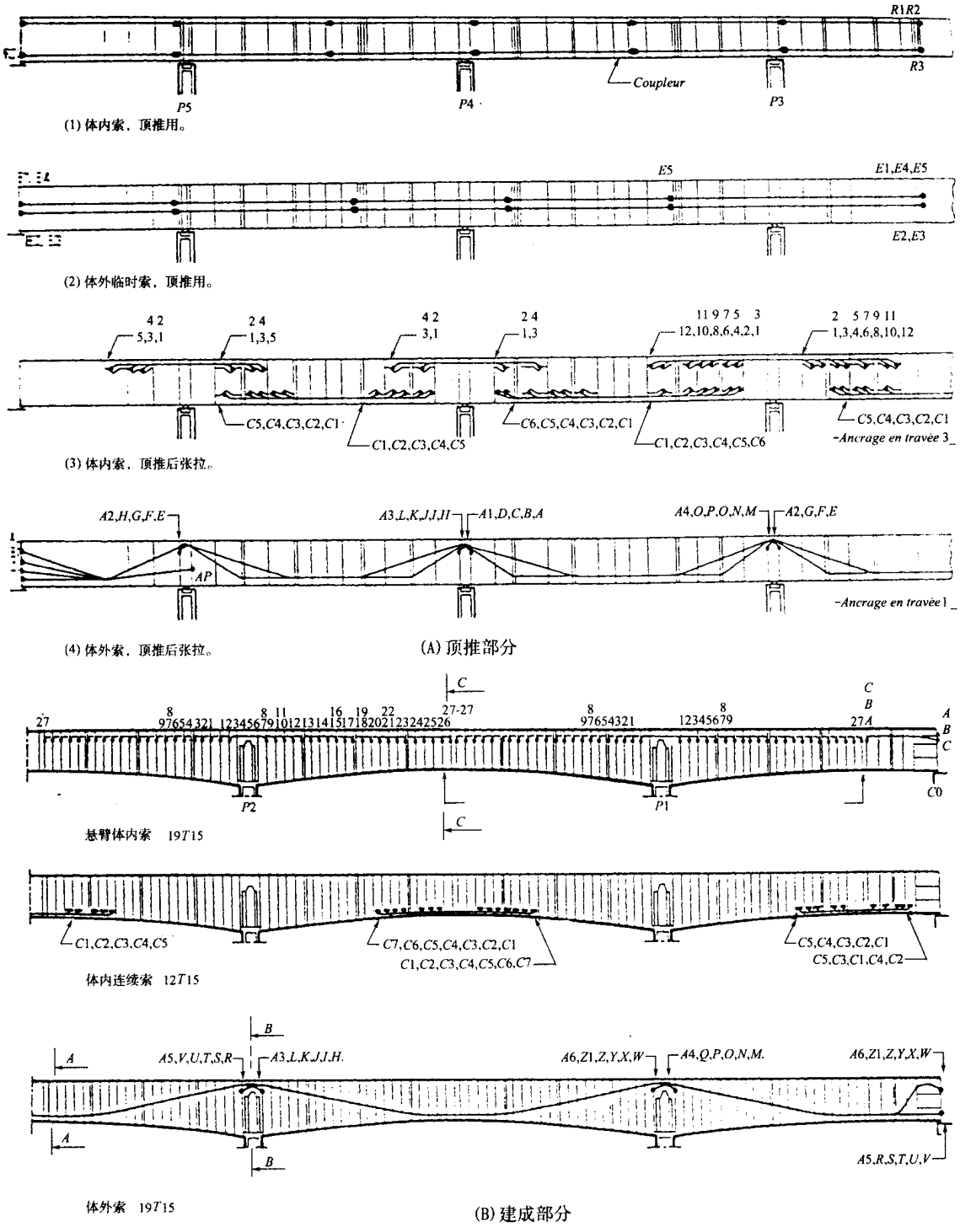


图 4　法国 Poncin 桥预应力索布置

2　体外预应力钢索的防护

体外预应力索防护的重要性, 与斜拉桥的斜拉索相同, 因其关系到桥梁的使用寿命。防护的措施, 主要有以下几种。

(1) 预应力索置于高密度聚乙稀塑料管内, 用普通水泥浆灌注。为了钢索能更换, 采取以下措施: ①钢索进入混凝土体内时, 其行径应是直线或圆弧线, 使钢索易于取出; ②在混凝土体内的一段钢索应套

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

上双层管, 或在管道外加设备, 使钢索易于抽出; ③锚具放置在直线上, 用双层管道, 使锚具能从后面取出; ④不能传给分散块过大应力, 使切断钢索时不致发生危险。

(2) 在管道内灌注黄油以保护体外索。在常温下黄油稠粘度大, 灌注时应根据黄油性质和预应力索长度, 加热至 50～100 ℃, 在高温下灌注, 管道采用耐热金属管。但管道接缝处需防止渗水, 在接近混凝土的金属管, 采用焊接技术很困难。近年来用高密度塑料管, 黄油加温至 50 ℃, 操作较为简易。

(3) 采用镀锌钢索, 可以不加防护。但在短间距内, 应设固定钢索的装置, 以防止钢索受损或折断。

(4) 单根钢绞线面层涂黄油, 用聚乙稀塑料包紧。钢索置于刚性塑料管内, 并用定位器使其固定。钢索在锚固处, 应采用特别保护措施。

3　技术专题

311　预应力索转向体

体外预应力索在一区域内需要转变方向, 在转向处设置转向体, 通常有 3 种形式: (1) 横隔板转向体, 设在箱梁内, 占全截面, 中间开孔, 作为通道; (2) 肋板转向体, 在箱梁内仅占部分截面; (3) 鞍座式转向块, 置于底板与腹板接缝处; 体积较小, 受力较大而复杂, 需设置钢筋与梁体混凝土联结。

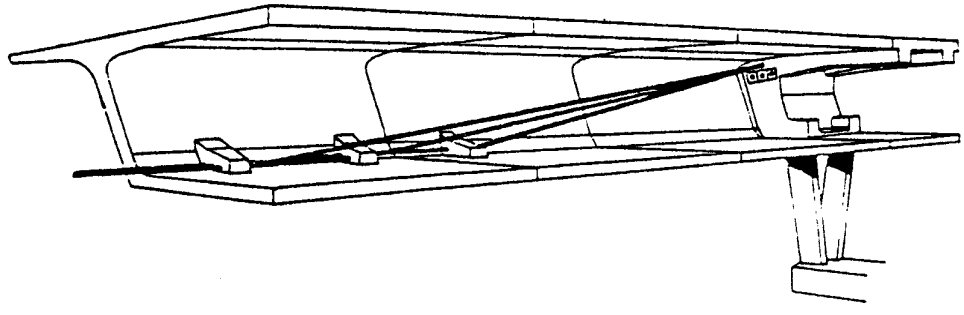


图 5　预应力索转变方向

312　预应力索锚固

体外索的锚固较一般体内预应力索困难。体内索在锚固处预应力进入混凝土内, 而体外索预应力与腹板平行, 且偏心, 产生很大的剪应力与正应力 (图 6)。体外索的拉力全部由锚具传递至箱梁混凝土, 在锚固处的构造细节与钢筋布置应特加注意。因体外索需要更换, 钢索张拉后, 锚具后面不能用混凝土封闭。并留有空间, 能放置千斤顶, 及便于钢索切断操作, 见图 7。

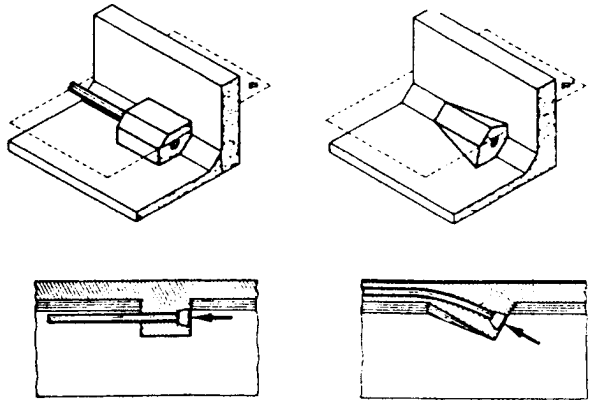


图 6　体外索与体内索锚固受力比较

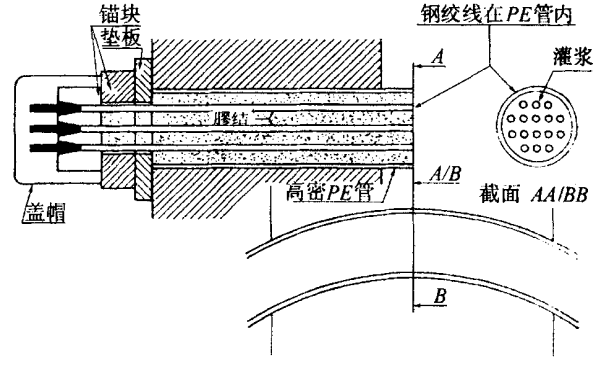


图 7　体外预应力索锚具

313　预应力索的振动

体外预应力钢索在动荷载作用下, 常发生振动, 其固有振动周期为:

$$T = \frac{2L}{n}\sqrt{\frac{m}{F}}$$

式中: L 为钢索长度, F 为钢索拉力, m 为单位长度的质量, n 为振动次数。

钢索振动的固有周期如不超过 0110～0115 s, 则不致与扭曲周期相接近而发生过大振动, 也可避免与桥结构发生破坏性共振。采取的措施是对钢索

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

每 10 m 间距设固定位置的定位块。

314　锚固应力扩散

体外索施加预应力很集中, 引起比体内索严重的应力扩散问题。钢索锚在箱内混凝土块体时, 锚块体积应加大, 并布设较多钢筋。钢索伸入混凝土块时, 应经过一段曲线距离, 从另一端伸出。体外索锚于桥墩顶节段时, 梁的顶板应加横向预应力, 并验算板的稳定性。

4　设计理论

体外预应力混凝土桥按照极限状态理论设计。图 8 表示梁的挠度与弯矩关系曲线, 图中曲线分为 5 段: AB 代表线性弹性未开裂阶段, BC 代表裂缝开始出现阶段, CD 代表线性弹性开裂阶段, DE 代表非线性开裂阶段, E 点代表极限抗力, F 点代表破坏点。

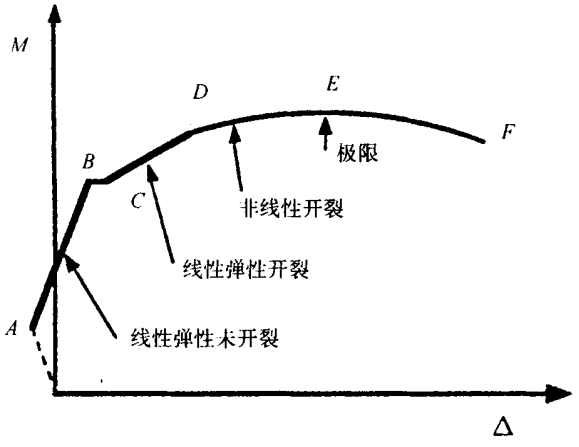


图 8　体外预应力梁挠度与弯矩关系曲线

411　线性弹性未开裂状态应力分析

按照 A. E. Naaman 方法, 在此阶段(AB 段), 体外预应力梁的应力分析, 假定预应力 F 为常数, 梁截面的应力与应变, 和体内索梁相同。但在精确分析时, 体外索受荷载作用它的预应力变化应加以考虑。即先计算体内索预应力的变化, 乘以应变折减系数 8。8 值与体外索的纵断面布置和作用荷载形式有关(图 9)。

设梁的设计临界截面在跨中, 此处偏心距最大。当作用的弯矩(M)大于恒载弯矩(M_D), 小于开裂弯矩(M_{cr}), 钢索的应力变化计算如下式:

当 $M = M_D$,

$$f_{ps} = f_{pe} \tag{1}$$

和　$$F_e = A_{ps} f_{pe} \tag{2}$$

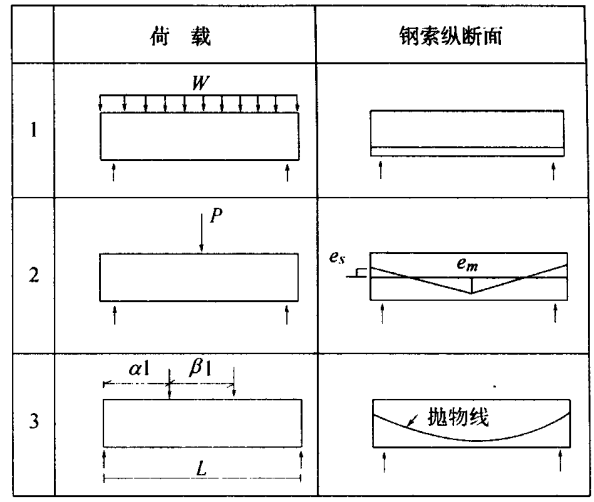


图 9　荷载形式与预应力索纵断面

式中: f_{ps} 为预应力钢索应力, f_{pe} 为预应力钢索有效应力, F_e 为有效预应力, A_{ps} 为钢索截面面积。

当 $M_D < M < M_{cr}$

$$f_{ps} = f_{pe} + \$f_{ps} \tag{3}$$

式中: $\$f_{ps}$ 为钢索应力的变化, 其余符号同前。

对于粘结的预应力索, 应力变化为:

$$(\$f_{ps})_{粘结} = E_{ps}(\$E_{ps})_{粘结} \tag{4}$$

式中: $\$E_{ps}$ 为计算截面增加弯矩 $\$M = (M - M_D)$ 时, 预应力钢索的应变变化, 即:

$$(\$E_{ps})_{粘结} = (\$E_{aps})_{粘结} \tag{5}$$

式中: $\$E_{aps}$ 为在计算截面与钢索同一水准平面混凝土的应变变化。

最大弯矩截面, 应在跨中。$\$E_{aps}$ 在跨中设计临界截面, 以 $(\$E_{aps})_m$ 表示。

体外预应力索的应力变化为:

$$(\$E_{ps})_{无粘结} = (\$E_{ps})_{平均} \tag{6}$$

式中: $(\$E_{ps})_{平均}$ 为钢索全长的平均应变变化。

应变折减系数的定义:

$$8 = \frac{(\$E_{ps})_{m无粘结}}{(\$E_{ps})_{m粘结}} = \frac{(\$E_{ps})_{平均}}{(\$E_{aps})_{m粘结}} \tag{7}$$

m 指跨中或最大弯矩截面。

粘结预应力索 8 = 1。无粘结预应力索 8 值按下式计算:

$$8 = \frac{2}{M_{max1}(e_0)_{max}} \int_0^{1.62} M(x) e_0(x) \mathrm{d}x \tag{8}$$

式中: e_0 为钢索偏心距。

412　线性弹性开裂状态应力分析

如荷载弯矩超过开裂弯矩, 跨中将出现裂缝。如最大弯矩截面上仅有一条裂缝, 我们将梁分成 2 部分: 一部分为未裂开部分, 它的惯性矩为 I_g; 另一部

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

表 1 未开裂状态应变折减系数 8 值

荷载与钢索纵断面	8 值
均布荷载 直线型	$\frac{2}{3}$
均布荷载 单点下降型	$\frac{5}{12}+\frac{1}{4}\frac{e_s}{e_m}$
均布荷载 抛物线型	$\frac{8}{15}+\frac{2}{15}\frac{e_s}{e_m}$
跨中集中荷载 直线型	$\frac{1}{2}$
跨中集中荷载 单点下降型	$\frac{1}{3}+\frac{1}{6}\frac{e_s}{e_m}$
跨中集中荷载 抛物线型	$\frac{5}{12}+\frac{1}{12}\frac{e_s}{e_m}$
三分点荷载 直线型	$1-A=\frac{2}{3}$
三分点荷载 单点下降型	$\frac{23}{54}+\frac{13}{54}\frac{e_s}{e_m}$
三分点荷载 抛物线型	$\frac{44}{81}+\frac{10}{81}\frac{e_s}{e_m}$

分为开裂部分, 它的惯性矩为 I_{cr}。开裂部分长为 l_c, 未开裂部分长则为$(L - L_c)$。按照前法

$$8_c=\frac{(\$E_{ps})_{平均}}{(\$E_{ps})_{无粘结}}$$

$$8_c = 8\frac{I_{cr}}{I_g}+\frac{2}{L}\left(1-\frac{I_{cr}}{I_g}\right)\int_0^{L/2}\frac{M(x)e_0(x)\,dx}{M_{max}(e_0)_{max}} \tag{9}$$

8_c 值受$\frac{I_{cr}}{I_g}$比值影响甚大。在实际设计中, 可采用 $8_c=\frac{I_{cr}}{I_g}8$ 近似值, 可符合需要。

5 体外预应力的优点与缺点

511 体外预应力工艺的优点为

(1) 在设计上预应力索布置简单, 避免结构细节的复杂性。混凝土体内不设置或少设置预应力筋, 使普通钢筋布置容易, 因而使施工工艺简化, 提高工作效率, 并提高工程质量。

(2) 箱梁腹板内不设预应力索管道, 同时体外索预应力又能抵抗腹板的剪力, 因而腹板厚度可减小, 减少工程数量, 降低造价。

(3) 钢索管道灌浆的事故减少或不发生问题。既使发生问题, 亦容易解决。

(4) 在桥梁使用期间, 可经常用 X 射线和其它技术监测。

(5) 钢索易于更换。

512 体外预应力工艺的缺点

(1) 结构易受灾祸、破坏和火灾等伤害。

(2) 体外预应力钢索对抵抗破坏荷载和保证结构稳定性的功效减弱。

体外预应力工艺是新技术, 对结构概念性设计和施工方法, 尚需不断发展。在设计与施工过程中应特别注意: 预应力索转向区域的处置; 锚具与锚固区受力处理; 预应力钢索的防护; 混凝土结构应规定需要最少钢筋量。

在我国公路桥梁中, 预应力混凝土桥占有重要地位。因此, 发展体内与体外混合体系预应力技术, 以提高工程质量, 降低工程造价, 是目前桥梁建设的迫切任务。

Internal and External Mix Prestressed Concrete Bridge

DAI Jing

(China Highway Planning and Design Institute (HPDI) Consultants, INC., Beijing 100010, China)

Abstract: The design of internal & external mix prestressed concrete bridges is described briefly in this paper. Then the arrangement of prestressing tendons and their corrosion protection are detailed. The main techniques used or considered are pointed out and the theorey of design drawn to the problem of ultimate state method.

Key words: internal and external prestressing; concrete; box girder; contilever construction; launching construction; ultimate state

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.