

# 刚架系杆拱桥钢-混凝土接头传力行为研究

彭帆<sup>1</sup>, 巢万里<sup>1,2</sup>

(1. 湖南省交通科学研究院, 湖南长沙 410015; 2. 中南大学, 湖南长沙 410075)

**[摘要]** 对于钢-混凝土组合结构而言, 其两者的有效结合和共同受力是关键。以某座刚架系杆拱桥钢-混凝土接头为对象进行了研究, 作为整个桥梁的关键构造, 其计算理论是否符合实际及合理显得尤为重要。文章采用解析的方法, 考虑了基于三角形反力分布和矩形反力分布两种埋入式接头模式, 并在矩形反力分布模式中考虑了钢-混凝土粘结力的影响。将两种计算模式的结果及是否考虑钢-混凝土粘结力计算的结果进行了比较。结果表明: 具有类似工程背景的混合拱桥钢-混凝土接头可以采用设结合段的埋入式接头理论进行设计与分析, 是否考虑钢-混凝土粘结力对计算结果有较大的影响。

**[关键词]** 钢-混凝土接头; 传力行为; 埋入式; 粘结力

**[中图分类号]** U 448.22\*5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1674-0610(2011)02-0072-04

## Research on the Force Transmission Behavior at the Steel-concrete Joint of a Frame Tied-arch Bridge

PENG Fan<sup>1</sup>, CHAO Wanli<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Communication Research Institute, Changsha, Hunan 410015, China; 2. Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

**[Abstract]** For the steel-concrete composite structure, its effective combination and co stressing is the key. A steel-concrete joint of a rigid frame tied arch bridge was studied for the object, as the key to the entire bridge structure, it's very important that the theory of computation is whether realistic and reasonable. The analytical methods was used to consider anti-force distribution that based on triangular and rectangular distribution of reaction patterns of embedded joints, and anti-stress distribution in the rectangular model considers the steel-concrete bond force. The results of the two kinds of calculation mode and whether to consider steel-concrete bond force are compared. The results showed that: a mixture of similar engineering background arch steel-concrete joint section can be used with embedded design theory design, and whether to consider steel-concrete bond force on the calculation results have a greater impact.

**[Key words]** steel-concrete joint; force transmission behavior; embedded bolt type; bond force

### 1 引言

近年来,我国经济建设快速发展,随着钢产量、种类不断增多及科研、实践能力的不断提升,钢-混凝土混合结构在我国得到了越来越广泛的运用,应用的范围也涉及到桥梁、结构加固及高耸结构等领域<sup>[1]</sup>。在桥梁结构中,钢混结构主要包括混合拱、混合梁及混合桥塔等结构体系。钢结构的自重相对于混凝土结构来说小,对结构的受力及施工时有利的,此种类型的桥梁有日本多多罗大桥、法国诺曼底大桥、我国重庆石板坡长江大桥等。在混合桥中采

用混凝土拱脚与钢箱梁拱肋组合,通过节段吊装再拼装成整桥不仅能够有效地减小大跨度拱桥的施工难度,同时还能够满足拱桥的造型要求及受力要求<sup>[2]</sup>。由于混凝土截面和钢箱截面刚度相差较大,为保证受力能够有效、连续的传递,需在混凝土与钢箱接触处设钢混过渡段,也就是本文中的钢-混凝土接头。此接头在施工过程中或是成桥后都承受很大的内力,是混合拱桥的关键构造<sup>[3]</sup>。因此,钢-混凝土接头设计的合理性直接影响到桥梁的施工质量和运营安全,有必要对其受力性能及传力行为进行研究。

## 2 埋入式钢-混凝土接头受力性能分析

埋入式钢-混凝土接头即将钢箱拱肋插入混凝土拱座中,并在钢箱拱肋底部设承压板、锚栓和剪力连接件,其一般构造如图 1 所示。埋入式接头钢箱侧面、底面与混凝土之间的传力关系比较复杂,因而它们之间的反力分布模式不确定。一般可分为两种情况:当接头承受的外荷载较小、处于弹性范围内时可认为反力按三角形分布;极限状态下可认为反力按矩形分布,如图 2、图 3 所示。

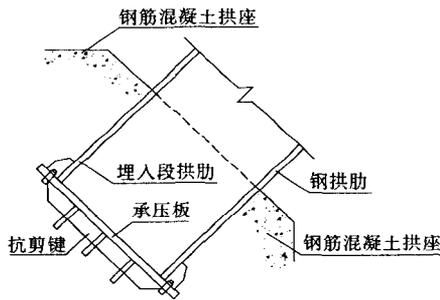


图 1 埋入式接头构造图

Figure 1 structural map for embedding type joint

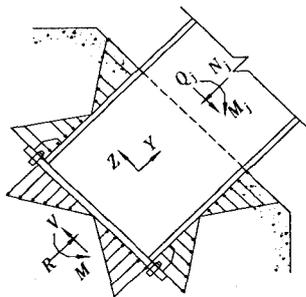


图 2 三角形反力分布模式

Figure 2 the model of triangle distribution reaction

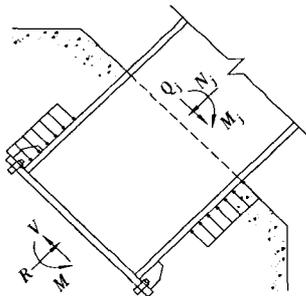


图 3 矩形反力分布模式

Figure 3 the model of rectangular distribution reaction

### 2.1 三角形反力分布模式下的力学分析

#### 2.1.1 基本假定

以三角形反力分布模式为基础,作以下基本假定,其受力分析见图 4~图 6。

① 接头材料在线弹性范围内工作,平截面假定、小变形及叠加原理成立。

② 不考虑埋入段钢箱的自身变形,其在力的作用之下发生刚体位移和转动;其与混凝土接触的侧面、底面反力为三角形分布。

③ 钢箱和混凝土的界面压力与变形满足:  $\sigma = kx$ 。其中:  $\sigma$  为界面压力;  $k$  为变形系数;  $x$  为变形。

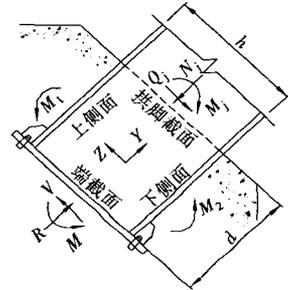


图 4 三角形反力分布接头受力图

Figure 4 joint force diagram under triangle distribution reaction

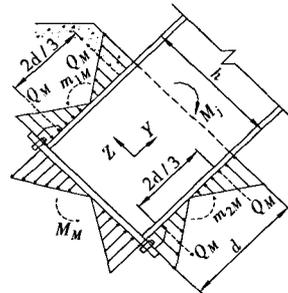


图 5 弯矩单独作用下接头受力图

Figure 5 joint force diagram under single moment action

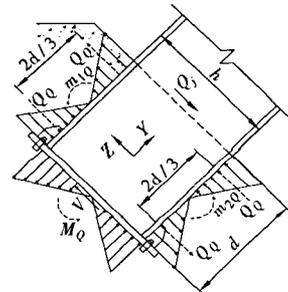


图 6 剪力单独作用下接头受力图

Figure 6 joint force diagram under single shearing action

#### 2.1.2 截面抗力计算

接头的受力分析模型如图 4 所示。通过全桥施工阶段及成桥运营阶段仿真计算,得到混凝土拱座顶部截面的已知内力荷载  $N_j$ 、 $Q_j$ 、 $M_j$ 。接头埋入段高度为  $h$ ,埋入段深度为  $d$ 。处于三角形反力分布作用下的截面抗力可以从以下几个方面来进行分析:端面抗力、侧面抗力与端面抗力的关系、侧面抗力。

## ① 端面抗力计算。

对图4可列如下平衡方程:

$$\sum y = 0: -N_j + R = 0 \quad (1)$$

$$\sum z = 0: -Q_j + V = 0 \quad (2)$$

$$\sum m = 0: M_j - M - (M_1 + M_2) + (Q_j + V) \cdot d/2 = 0 \quad (3)$$

式(3)中的 $M$ 、 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $V$ 均为未知量,如图4所示。根据假定一,计算 $N_j$ 、 $Q_j$ 、 $M_j$ 各单独分量作用下端截面的抗力,而后再将各自单独作用下的抗力根据叠加原理进行叠加,可以得到式(4)~式(6)。

$$R = N_j \quad (4)$$

$$V = Q_j \quad (5)$$

$$M = (M_j + Q_j d) - (Q_M + Q_Q) \times 4d/3 \quad (6)$$

式(6)中 $Q_M$ 、 $Q_Q$ 分别为 $M_j$ 、 $Q_j$ 单独作用下在侧面产生的抗力,如图5、图6所示。

在 $M_j$ 单独作用下,由图5根据 $\sum m = 0$ 可以得到:

$$M_j - M_M - (m_{1M} + m_{2M}) = 0 \quad (7)$$

式中:  $m_{1M} = m_{2M} = 2/3 Q_M d$ ,

$$\text{令 } m_{1M} + m_{2M} = m_M = 4/3 Q_M d \quad (8)$$

将式(8)带入式(9)则得:

$$M_M = M_j - 4/3 Q_M d \quad (9)$$

②  $M_j$ 作用下侧面抗力与端面抗力的关系。

接头埋入段的宽度为 $B$ ,转动角位移为 $\theta$ ,则 $x$ 为埋入段端面任一点 $z$ 的轴向压缩位移时,有如下关系: $x = \theta z$ ,由假定三可以得到: $\sigma = kx = k\theta z$ 。 $M_M$ 、 $m_{1M}$ 、 $m_{2M}$ 为在 $M_j$ 单独作用之下的端面、侧面抗力矩,如图5所示,其计算表达式为:

$$M_M = 2B \int_0^{\frac{h}{2}} k\theta z^2 dz = k\theta \frac{Bh^3}{12},$$

$$\text{同理: } m_{1M} = m_{2M} = k\theta \frac{Bd^3}{12} \quad (10)$$

$$\text{由式(7)可得: } \frac{M_M}{m_M} = \frac{1}{2} \left( \frac{h}{d} \right)^3 \quad (11)$$

## ③ 侧面抗力计算。

由式(11)可得:  $M_M = \frac{m_M}{2} \left( \frac{h}{d} \right)^3$ ,将式(8)带入,

$$\text{可得: } M_M = Q_M \frac{2h^3}{3d^2} \quad (12)$$

将式(12)带入式(9),可解出:

$$Q_M \circ Q_M = M_j / \left( \frac{2h^3}{3d^2} + \frac{4d}{3} \right) \quad (13)$$

作用于接头上部截面的内力 $Q_j$ ,可等效为接头埋入段端面 $Q_j$ 及 $Q_j d$ 的共同作用。而由式(2)可

知, $Q_j$ 已被平衡,则只需考虑 $Q_j d$ 的作用,此部分内力可等效的认为与 $M_j$ 的作用类似。

因而可以参照式(13)得出:

$$Q_Q = Q_j d / \left( \frac{2h^3}{3d^2} + \frac{4d}{3} \right) \quad (14)$$

## ④ 埋入段端面、侧面抗力计算。

将式(13)、(14)带入式(6),可计算端面、侧面抗力如下:

$$M = (M_j + Q_j d) \left( \frac{2h^3}{2h^3 + 4d^3} \right), R = N_j, V = Q_j,$$

$$m = (M_j + Q_j d) \left( \frac{4d^3}{2h^3 + 4d^3} \right) \quad (15)$$

在使用式(15)尚应注意:若按此公式计算出的混凝土拉应力大于其自身的容许拉应力,则不能使用此模式计算埋入式接头。原因在于公式的推导是基于混凝土的拉应力等于压应力,而实际混凝土的受拉能力极为有限。

## 2.2 矩形反力分布模式下的力学分析

## 2.2.1 基本假定

假定一:混凝土的压反力达到混凝土的容许压应力。

假定二:混凝土不能承受拉力,反力分布形状为矩形,且压反力在横向均匀分布。

## 2.2.2 分界埋深计算

由式(11)可知:随着接头埋深 $d$ 的不断增大,端面弯矩抗力所占总抗力的比值也不断减小。若接头埋深到一定程度,则端面弯矩抗力可以忽略。因此,引入深埋接头和浅埋接头的概念。其中,假定深埋接头中剪力和弯矩全部由钢箱顶、底面与混凝土之间的反力来平衡。其受力图如图7、图8所示,钢箱埋入深度为 $d$ ,钢箱的抗剪承压高度为 $d_v$ 、 $N_j$ 、 $M_j$ 、 $Q_j$ 意义与前相同。对于深埋接头,其 $d_v$ 可由式(16)确定。

$$d_v = \frac{Q_j}{[\sigma_b] B} \quad (16)$$

式中:  $[\sigma_b]$ 为混凝土的容许压应力。在钢箱拱肋中设置了大量的加劲肋,其有效承压宽度取全截面 $B$ 。当钢箱埋入深度 $d > d_v$ 时,根据图8,由弯矩平衡可得式(17)。

$$M_j - M + \frac{Q_j d}{2} - \frac{B[\sigma_b]}{4} (d^2 - d_v^2) = 0 \quad (17)$$

当接头端部弯矩 $M = 0$ 且 $M_j$ 等于钢箱拱肋的抗弯承载力 $M_g$ 时,联立式(16)、式(17)求解,可以得到分界埋置深度为:

$$d_{de} = \frac{Q_j}{B[\sigma_b]} + \sqrt{2\left(\frac{Q_j}{B[\sigma_b]}\right)^2 + \frac{4M_g}{B[\sigma_b]}} \quad (18)$$

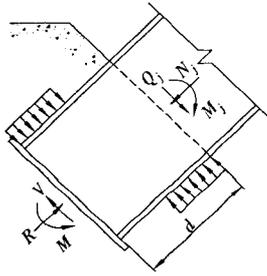


图 7 矩形反力分布浅埋接头受力图

Figure 7 shallow-embedded joint force diagram under rectangular distribution reaction

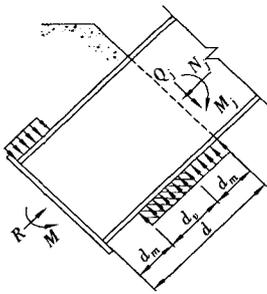


图 8 矩形反力分布深埋接头受力图

Figure 8 deep-embedded joint force diagram under rectangular distribution reaction

2.2.3 截面抗力计算

① 浅埋接头截面抗力计算。

图 7 为浅埋接头的受力示意图,当  $d_v < d < d_{de}$  时,假设接头端部的剪力完全被侧面反力所平衡,而还有一定的弯矩反力。其接头端部承压板上的反力可按式(19)计算。

$$R = N_j, V = 0, M = M_j + \frac{Q_j d}{2} - \frac{B[\sigma_b]}{4} \times \left[ d^2 - \left( \frac{Q_j}{B[\sigma_b]} \right)^2 \right] \quad (19)$$

当  $d \leq d_v$  时,其接头端部承压板上的反力可按式(20)计算。

$$R = N_j, V = Q_j, M = M_j + Q_j d - \frac{B[\sigma_b]}{4} d^2 \quad (20)$$

② 深埋接头截面抗力计算。

由深埋接头的定义可知,其弯矩和剪力全部由侧面混凝土的反力相平衡,接头端部承压板的弯矩和剪力均为零。其轴力的传递和计算可参照 2.1 节的计算进行,在此不赘述。

计算出端面接头的反力后,则可按相关方法对接头端面进行深一步的分析。

3 考虑钢混粘结作用对接头受力的影响

本文第 2 节中所述,不管是反力按三角形分布还是按矩形分布,都没有考虑钢与混凝土的粘结作用。而实际上载钢-混凝土组合结构中两者的粘结力是保证其正常工作的重要基础,钢-混凝土组合结构承受外荷载的前提。

一般研究认为:型钢与混凝土的粘结力主要由摩擦阻力、化学胶结力和机械咬合力三部分组成。关于两者之间的计算理论较多,但还未有完善的计算方法,各国学者一般采取实验分析的方法来寻找规律。有关的钢管混凝土结构设计规程就给出了钢管与混凝土之间粘结强度的计算方法。EC4(1994)规定钢结构和混凝土之间的粘结强度设计值为:  $\tau_b = 0.4 N(N/mm^2)$ 。赵鸿铁等认为型钢与混凝土之间的粘结力可以参照使用<sup>[1]</sup>。埋入式接头考虑钢与混凝土的粘结作用,可进行如下分析:

① 轴力作用。

钢与混凝土的粘结力可按式计算:  $F = A \cdot \tau_b = F_t + F_b + 2F_s = (2d \cdot b + 2d \cdot h) \cdot \tau_b$ 。其中,  $F_t$ 、 $F_b$ 、 $F_s$  分别表示埋入段钢箱顶板、底板及腹板与混凝土的粘结力。

若  $N_j < F$ , 则轴力全部由钢混粘结力承担,接头端部承压板不受力;若  $N_j > F$ , 则说明接头端部承压板受力,力的大小为:  $R_n = N_j - F = N_j - (2d \cdot b + 2d \cdot h) \cdot \tau_b$ 。

② 剪力作用。

对于剪力作用,可参照 2.2 节的计算方法,在此不赘述。

③ 弯矩作用。

考虑弯矩作用时,只计入  $F_t$ 、 $F_b$  的作用,不考虑腹板粘结力  $F_s$  的作用。则粘结力产生的弯矩为:  $M = F_b \times h = 2d \cdot b \cdot \tau_b \cdot h$ 。

若  $M_j < M$ , 则弯矩全部由钢混粘结力承担,接头端部承压板不受弯矩作用;若  $M_j > M$ , 则接头端部承受弯矩,弯矩的大小为:  $M_n = M_j - M = M_j - 2d \cdot b \cdot \tau_b \cdot h$ 。

4 背景工程的分析

某大桥是主跨为 128 m 的刚架系杆拱桥,其是拱墩固结、梁墩分离,以拱受力为主、梁仅承受节间荷载和提供桥面系的结构体系。钢箱拱通过承压板与混凝土拱座相连,形成钢-混凝土接头。承压板

用工具将其支撑牢固。双面板就位后,用拉杆和螺栓固定,检查模板安装的允许偏位。

⑥ 支模操作时,应提供可靠的立足点和临边安全防护措施。

## 5 结论

本文结合高速公路高箱梁桥现浇砼施工所设计的模板、支架满足刚度和强度要求,且地基承载力也满足要求,可为安全可靠、经济合理、优质高速地高箱梁施工提供理论依据和实践经验,为同类工程施工提供借鉴和参考作用。

(上接第 75 页)

的厚度为 50 mm,顺着钢箱拱的顶、底及腹板增设加劲肋,采用  $\Phi 32$  mm 的预应力螺纹钢施加预应力使钢箱拱肋和混凝土紧密相连。在承压板下方设预埋钢板,并在其上开孔,穿  $\Phi 25$  mm 普通钢筋形成 PBL 键。埋入的钢箱拱肋及其他部分均应密实的灌注混凝土。

通过全桥施工过程的模拟分析,可得:  $N_j = 7\ 895$  kN,  $Q_j = 2\ 342$  kN,  $M_j = 20\ 457$  kNgm,  $b = 2.3$  m,  $h = 3.7$  m,  $d = 1.2$  m,拱座混凝土为 C50,  $f_c = 33.5$  MPa,容许压应力  $[\sigma_b] = 16.8$  MPa,容许拉应力  $[\sigma_{tp-1}] = 2.79$  MPa。

### ① 三角形反力模式。

带入上述已知的数据,由式(15)可以计算得到:端面抗力  $M_d = 21\ 778$  kNgm,  $V = 2\ 342$  kN,  $R = 7\ 895$  kN;侧面抗力  $M_c = 1\ 489.1$  kNgm。

### ② 矩形反力模式。

由式(16)计算可以得到  $d_v = 0.06$  m,  $d_{de} = 1.52$  m。接头实际埋深  $d_v < d < d_{de}$ ,按浅埋接头的第一类情况进行计算。

根据式(19),接头端面抗力可计算为:  $M_d = 7\ 987$  kNgm,  $V = 0$ ,  $R = 7\ 895$  kN。则接头端面抗力占  $M_j$  的比例为 39%。

### ③ 考虑粘结力作用的矩形反力模式。

通过第 3 节的论述,考虑在矩形反力分布模式下的钢混粘结作用对接头的受力影响。埋入式接头钢与混凝土粘结力产生的轴力  $F_n = 5\ 760$  kN  $< N_j$ ,则接头端面的抗力为  $R = 2\ 135$  kN。占  $N_j$  的 27%。粘结力产生的弯矩  $M_n = 8\ 170$  kNgm  $> M_d$ ,即在接头端面不产生弯矩抗力。

## 5 结论

通过对基于三角形、矩形反力分布模式及考虑

## [参考文献]

- [1] 郝英龙,孔祥平.满堂支架在混凝土现浇连续梁施工中的方案设计与应用[J].铁道工程学报,2001(3):64-68.
- [2] 杜荣军.脚手架结构的稳定承载能力[J].施工技术,2001(4):1-5.
- [3] 刘屹东.钢管扣件式高大模板支撑体系的技术与安全控制[J].四川建材,2008(4):167-168.
- [4] 陈正华.门式钢管脚手架在高支模中的应用及构造措施[J].施工技术,2008(增刊):371-373.
- [5] JGJ 130-2001,建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范[S].
- [6] 滕绍华.建筑施工技术手册[M].北京:金盾出版社,2005.

钢混粘结作用的埋入式钢-混凝土接头的传力行为分析,可以得到以下结论:

① 由于混凝土接头反力分布的不确定性,假设了 2 种不同反力分布模式:三角形反力分布模式和矩形反力分布模式。推导了基于 2 种模式下的接头端部、侧面抗力计算的解析表达式,同时也指出了使用该式的适用条件。

② 通过对三角形反力分布模式的分析可知:在外部荷载的作用下,端面抗力矩及侧面抗力矩的比值与其相应的抗力分布长度比值的三次方成正比。

③ 通过对矩形反力分布模式的分析,推导出分界埋深的计算式,提出将接头分为深埋接头与浅埋接头。其区别在于深埋接头端部不承受弯矩与剪力,而浅埋接头端部则承受一定的弯矩与剪力。

④ 通过对背景工程的计算分析可知:考虑钢-混凝土粘结作用,对接头的传力行为产生很大的影响,能大大减小接头端面抗力。

⑤ 对于埋入式钢-混凝土接头,尚应注意对混凝土保护层厚度及埋入段钢箱加劲肋构造的要求,确保传力的可靠性。

## [参考文献]

- [1] 赵鸿铁,杨勇,薛建阳,等.型钢混凝土粘结滑移力学性能研究及基本问题[J].力学进展,2003,02:74-86.
- [2] 王连广.钢与混凝土组合结构理论与计算[M].北京:科学技术出版社,2005.
- [3] 周端明.钢-混凝土混合拱桥接头受力性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.
- [4] 刘孝辉.重庆菜园坝长江大桥设计关键技术剖析[C]/茅以升科技教育基金会桥梁委员会 2005 年学术会议论文集.重庆:重庆大学出版社,2005.