

钢筋混凝土偏心受拉构件正截面受力钢筋计算的教学设计与实践

周晓军

西南交通大学土木工程学院，四川 成都

收稿日期：2024年10月1日；录用日期：2024年10月28日；发布日期：2024年11月6日

摘要

基于为本科学生而开设的《地下铁道与轻轨》课程中钢筋混凝土偏心受拉构件正截面受力钢筋计算的教学内容，本文分析和提出了易于本科学理解掌握的钢筋混凝土小偏心和大偏心受拉构件中受力钢筋计算的推演方法，并通过对混凝土构件在受拉状态下静力和静力矩平衡关系的分析，提出了混凝土小偏心构件和基于荷载分解法的混凝土大偏心受拉构件中受力钢筋配置方法的教学设计。通过在《地下铁道与轻轨》课程中的教学实践表明，所采用的教学设计不仅有助于提高课程的教学质量，而且还有利于提高学生开展与地下铁道和轻轨结构相关的钢筋混凝土受拉构件中受力钢筋的设计能力与创新思维。

关键词

钢筋混凝土偏心受拉构件，偏心距，最小配筋率，荷载分解法，教学设计

Instructional Planning for Calculating the Reinforcing Steel Bars in the Normal Cross-Section of Eccentrically Tensile Reinforced Concrete Members

Xiaojun Zhou

School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Oct. 1st, 2024; accepted: Oct. 28th, 2024; published: Nov. 6th, 2024

Abstract

Based on the instructional contents on the method of calculating and designing the reinforcing steel bars in the normal cross-section of eccentrically tensile reinforced concrete members in the course

文章引用：周晓军. 钢筋混凝土偏心受拉构件正截面受力钢筋计算的教学设计与实践[J]. 教育进展, 2024, 14(11): 239-254. DOI: [10.12677/ae.2024.14112048](https://doi.org/10.12677/ae.2024.14112048)

entitled *Metro and Light Rail Transit* offered to undergraduates, the method for calculating the reinforcing steel bars in small and large eccentrically tensile reinforced concrete members is deduced and presented in this paper, which is easy for undergraduates to comprehend and master. Through the analysis of the static equilibrium relationship and static moment equilibrium relationship in reinforced concrete members that are subject to tension condition, the instructional planning on the method of designing reinforcing steel bars in small and large eccentrically tensile reinforced concrete members is also presented. In particular, load decomposition method is employed to analyze the reinforcement of large eccentrically tensile reinforced concrete members. The practice of using the instructional planning presented in this paper for teaching the undergraduates the course entitled *Metro and Light Rail Transit* shows that the instructional planning does not only help improve the teaching quality of the course, but enhance the undergraduates' ability and their innovative way of thinking to design the reinforcement of reinforced concrete tensile members related to subway and Light rail transit structures as well.

Keywords

Eccentrically Tensile Reinforced Concrete Members, Eccentricity, Minimal Reinforcement Ratio, Load Decomposition Method, Instructional Planning

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

《地下铁道与轻轨》是我校为智能建造、土木工程、城市地下空间工程等专业本科生而开设的一门核心专业课程。通过对《地下铁道与轻轨》课程的学习使学生能够了解和掌握地下铁道与轻轨的规划、设计、施工、运营、维护与管理的基本概念、计算原理和设计方法，为学生今后从事以地下铁道为代表的城市轨道交通的规划、设计、施工、运营、维护与管理等工作或专业深造奠定扎实的理论基础[1]-[4]。

《地下铁道与轻轨》也是一门理论紧密结合实践的专业课程，所涉及的教学内容较多，其中钢筋混凝土结构如地铁与轻轨的地下、地面和高架车站以及与之关联的结构如地下区间隧道和区间高架桥梁等的设计是课程教学的重要内容之一[1]-[4]。而钢筋混凝土结构中构件受偏心荷载作用下正截面的承载能力和配筋设计是课程教学中的重点内容之一，也是要求选修此课程的学生和工程技术人员必须要理解和掌握的一个重要知识点与技能。尽管目前国内现行的教学参考书中对钢筋混凝土构件在偏心受拉荷载作用下正截面承载力和配筋方法进行了讲解，但未对混凝土构件正截面承载力和受力钢筋分析的技术路线和计算方法进行梳理与总结，尤其是未明确大偏心受拉构件正截面拉力以等效荷载和弯矩进行分解的方法，也未对混凝土构件在大偏心受拉时正截面受压区高度出现负值的物理意义和处理方法给出说明[5]-[9]。经多年对《地下铁道与轻轨》课程教学实践发现，由于这部分教学内容涉及到较多的理论推演，当学生或阅读者仅按照教学参考书中列出的计算公式和图例进行学习时尚存在较大的困难，还不能从基本概念和原理上理解具体的分析思路与计算过程，更不能加深学生对混凝土构件在偏心受拉荷载作用下钢筋配置方法的理解与掌握，因而课程的教学效果和学生学习的质量均不佳。为便于学生能够容易理解和掌握钢筋混凝土偏心受拉构件正截面承载力和钢筋配置的计算与设计方法，启发和引导学生树立创新思维的意识，本文依据《地下铁道与轻轨》课程中钢筋混凝土矩形截面构件在受拉状态下的承载力计算和受力钢筋设计的教学内容，对偏心受拉构件正截面受力钢筋设计和计算方法的推演过程以及相应的教学设计进行研究与总结，以期实现课程的教学目标，进而提高学生运用所学知识开展地铁和轻轨结构中钢筋混

凝土偏心受拉构件设计的能力，并引导和培养学生逐步树立混凝土结构创新设计的思维。

2. 钢筋混凝土偏心受力构件的承载模型

根据《地下铁道与轻轨》课程的教学大纲，与混凝土结构设计相关的钢筋混凝土偏心受力构件正截面配筋设计的教学内容包括构件上的荷载及其偏心距、小偏心受拉构件和大偏心受拉构件的概念以及构件正截面承载力计算和配筋设计的方法。因此，此部分课程教学内容的组织和讲解的思路安排如下：(1)首先应讲解钢筋混凝土构件所承受的荷载及其类型以及荷载偏心距的概念；(2)以钢筋混凝土矩形正截面构件为例，分析矩形正截面构件在偏心拉力作用下的小偏心受拉和大偏心受拉的状况，建立两种偏心受拉状况下的承载模型，利用构件中静力和静力矩平衡条件、荷载转换以及弯矩和截面积分解的原理推演得出正截面上的承载力和钢筋横截面面积的计算与钢筋配置方法；(3)分析钢筋混凝土小偏心和大偏心受拉构件采用对称和非对称配筋的模式及其使用场合。

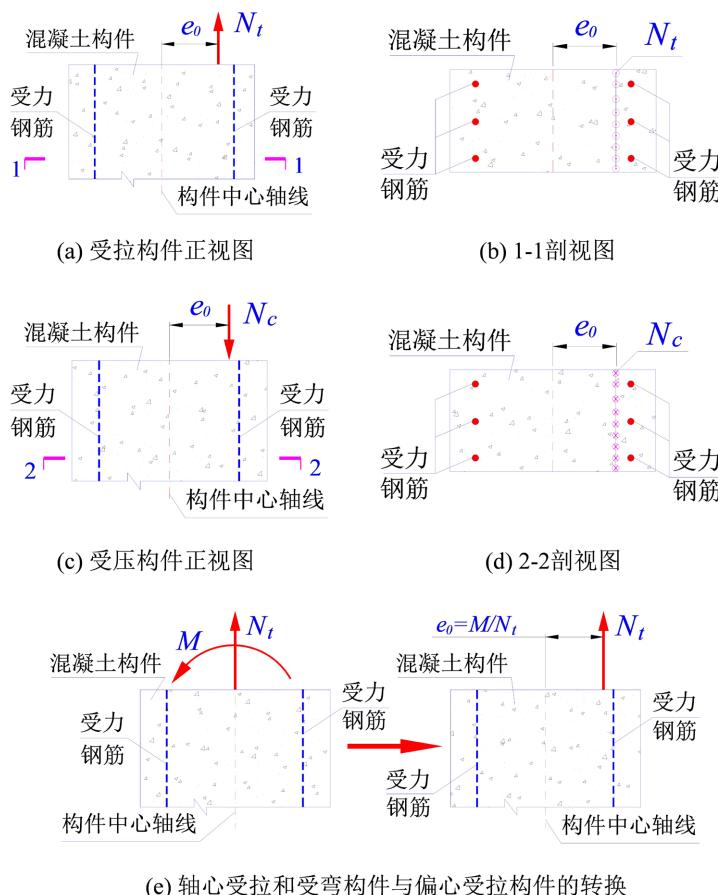


Figure 1. Eccentrically loaded concrete member with rectangular normal cross-section
图 1. 钢筋混凝土矩形正截面偏心受力构件

为便于学生理解和掌握钢筋混凝土构件在偏心拉力作用下的承载特性，首先需要明确钢筋混凝土构件上的荷载及其偏心距。所谓荷载就是指作用在混凝土构件上并使混凝土构件产生内力、变形和裂缝等的永久荷载或者可变荷载。本文中仅考虑永久荷载，即指作用在混凝土构件上不随时间而发生变化的荷载，或者指尽管荷载的数值有变化但与其平均值相比这种变化可以忽略不计的荷载。而荷载的偏心距就是指拉、压荷载作用的方向与混凝土构件的中心轴线相互平行且在两者之间保持一定的间距。常用字母

e_0 表示荷载的偏心距，单位以 mm 计。用字母 N_c 、 N_t 和 M 分别表示作用在钢筋混凝土结构或构件上的压力、拉力和弯矩，其单位分别为 kN、kN 和 kN·m。为便于学生理解，现以矩形正截面的钢筋混凝土构件为例，建立图 1 所示的钢筋混凝土矩形正截面构件分别承受轴向拉力 N_t 、轴向压力 N_c 和顶部正截面内受弯矩 M 的承载模型。

图 1 分别示出了钢筋混凝土矩形正截面构件受力的承载状况。图 1(b)中横截面上的“ \odot ”代表构件顶部正截面所承受的轴向拉力 N_t , 图 1(d)中横截面上的“ \oplus ”则代表构件顶部正截面所承受的轴向压力 N_c 。图 1(e)则示出了构件顶部正截面既承受轴向拉力 N_t 又承受弯矩 M 的承载模型及将其转换为偏心受拉的承载模型。

以图1(e)中钢筋混凝土构件正截面上承受的弯矩 M 和轴向拉力 N_t 为例, 可将其承载状态等效转换为承受偏心拉力 N_t 的构件, 此时构件顶部正截面上的拉力 N_t 与其中心轴线之间便存在有偏心距 e_0 , 其值可由式(1)计算。

$$e_0 = \frac{M}{N_t} \quad (1)$$

式中偏心距 e_0 的单位以 mm 计。

3. 钢筋混凝土小偏心受拉构件正截面的承载力

在讲解钢筋混凝土构件荷载的偏心距和所承受荷载类型的基础之上，可分析钢筋混凝土小偏心受拉构件正截面承载力的计算方法。为便于课程教学，建立如图 2 所示的钢筋混凝土小偏心受拉构件的承载模型。

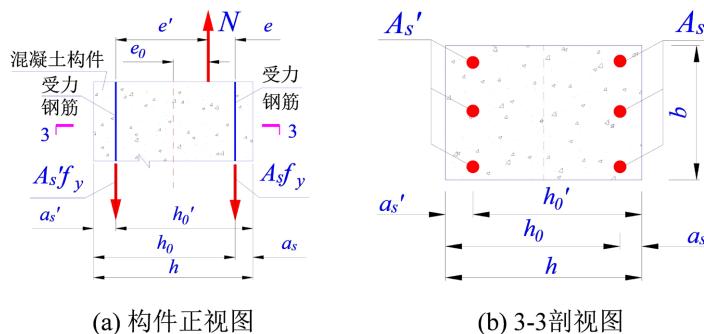


Figure 2. Model of small eccentrically tensile reinforced concrete member
图 2. 钢筋混凝土小偏心受拉构件模型

在图 2(a)中，钢筋混凝土构件的左、右两侧均配置有全部横截面面积分别为 A_s 和 A'_s 的受拉普通钢筋，两者的单位均以 mm^2 计。为便于分析，本文中以横截面面积 A_s 和 A'_s 分别代表混凝土构件中所配置的全部受拉的普通钢筋。当钢筋混凝土构件正截面上承受偏心拉力 N 的作用，其单位以 kN 计，则其偏心距为 e_0 。由此可定义钢筋混凝土小偏心受拉构件，即当钢筋混凝土构件所承受的拉力 N 作用于受拉钢筋 A_s 和钢筋 A'_s 的合力作用点之间时，则称此构件为混凝土小偏心受压构件。为便于分析，令钢筋混凝土构件中配置的普通钢筋的抗拉屈服强度设计值为 f_y ，其单位以 MPa 计。钢筋混凝土构件的正截面为矩形，见图 2(b)所示，其长边的长度为 h ，短边的长度为 b ，两者的尺寸单位均以 mm 计。图 2 中 h_0 和 h'_0 分别为构件横截面的有效高度， a_s 和 a'_s 分别为普通钢筋受力的合力作用点至构件受拉或受压边缘的距离， e 和 e' 分别为偏心拉力 N 至两侧受力钢筋横截面上的合力作用点之间的距离。其中， $h_0 = h - a_s$ ， $h'_0 = h - a'_s$ ，上述各个几何尺寸的单位均以 mm 计。此处的合力作用点实际就是指钢筋横截面的中心点。若

钢筋混凝土构件在偏心拉力 N 的作用下发生正截面破坏，此时混凝土因其抗拉强度较低而退出工作，则构件正截面所承受的拉力仅由配置在构件两侧的普通钢筋 A_s 和 A'_s 来承担，并且两侧普通钢筋 A_s 和 A'_s 达到其抗拉屈服强度 f_y ，其单位以 MPa 计。

首先分析构件的静力学平衡条件。从图 2(a)可得，当混凝土构件正截面承受小偏心拉力 N 作用处于屈服极限时，构件中的钢筋则处于受拉即拉应力状态。并且当混凝土正截面发生开裂时正截面上的拉力 N 和两侧配置的钢筋 A_s 和 A'_s 正处于受拉的极限平衡状态，此时钢筋仍处于弹性和塑性屈服的极限状态。从而根据图 2 中混凝土构件处于静力平衡极限状态可得到构件内沿轴向的静力平衡关系式为：

$$\sum F_N = 0 \Rightarrow N = A_s f_y + A'_s f_y \quad (2)$$

再根据图 2(a)中混凝土构件正截面上的拉力 N 分别对受拉钢筋合力作用点进行静力距分析，从而得到拉力 N 对两侧受拉钢筋 A_s 和 A'_s 合力作用点的静力矩平衡关系式为：

$$\sum M = 0 \Rightarrow \begin{cases} Ne = A'_s f_y (h_0 - a'_s) \\ Ne' = A_s f_y (h'_0 - a_s) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $e = h/2 - a_s - e_0$, $e' = h/2 - a'_s + e_0$, 式中各个参数的含义同前。

根据式(3)可得，在钢筋混凝土小偏心受拉构件中两侧配置的全部普通受拉钢筋的横截面积 A_s 和 A'_s 分别为：

$$\begin{cases} A'_s = \frac{Ne}{f_y (h_0 - a'_s)} \\ A_s = \frac{Ne'}{f_y (h'_0 - a_s)} \end{cases} \quad (4)$$

当已知图 2 中的基本设计参数后就可以用式(4)计算得到钢筋混凝土构件中单侧需要配置的受拉钢筋的横截面面积 A_s 和 A'_s 。根据国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)中的规定，计算所得到的构件中所需要配置的单侧受拉钢筋均应满足最小配筋率 ρ_{min} 的要求[10]。

至此，利用式(2)和式(4)就可以分别计算得到钢筋混凝土小偏心受拉构件正截面的承载力 N 和构件两侧需要配置的普通受拉钢筋的横截面面积 A_s 和 A'_s 。

4. 混凝土大偏心受拉构件正截面的承载力

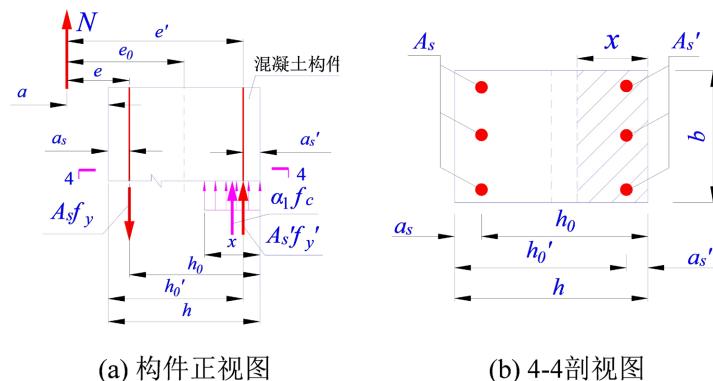


Figure 3. Model of reinforced concrete member subject to large eccentric tension
图 3. 混凝土大偏心受拉构件

在地铁和轻轨的钢筋混凝土结构中的构件除了承受小偏心荷载以外，还可能会承受大偏心荷载的作

用，即形成钢筋混凝土大偏心受拉构件。所谓的混凝土大偏心受拉构件就是指混凝土构件的正截面上的拉力 N 未作用在其两侧普通钢筋 A_s 和 A'_s 的合力作用点之间，而是作用在两侧普通钢筋 A_s 和 A'_s 合力作用点之外。为便于学生理解此概念，建立如图 3 所示的钢筋混凝土大偏心受拉构件的承载模型。

在图 3(a)中，钢筋混凝土构件正截面上承受偏心拉力 N 的偏心距为 $e_0 = h/2 + a$ ， a 为偏心拉力 N 的作用轴线与混凝土构件外边缘之间的水平距离，单位为 mm，因此当混凝土构件上的偏心拉力 N 的偏心距 $e_0 > h/2$ 时即可将该构件视为大偏心受拉构件。

根据图 3(a)分析，混凝土构件受到大偏心拉力 N 作用后，靠近拉力 N 一侧的钢筋 A_s 受拉，而远离拉力 N 一侧的钢筋 A'_s 则处于受压状态，同时在该侧的部分混凝土也处于受压状态。令构件正截面上混凝土受压区的高度为 x ，单位为 mm；混凝土轴心抗压强度设计值为 f_c ，单位为 MPa；混凝土构件正截面受压区的等效矩形应力图形的系数为 α_1 。当混凝土强度等级不超过 C50 时取 $\alpha_1 = 1.00$ ，当混凝土强度等级为 C80 时取 $\alpha_1 = 0.9$ [5]-[11]。图 3 中其余符号含义见图 2 中的说明。根据图 3 中构件与钢筋承受的荷载，可得到静力平衡的关系式。当混凝土构件处于受拉的极限平衡状态时，构件正截面上的拉力 N 与构件中所配置的钢筋本身受到的压力和拉力以及部分混凝土所受到的压力均处于极限平衡状态，因而沿构件的轴向可有式(5)所示的静力平衡关系：

$$\sum F_N = 0 \Rightarrow N = A_s f_y - A'_s f'_y - \alpha_1 f_c b x \quad (5)$$

根据图 3 中钢筋混凝土构件正截面上的作用拉力 N 对受拉钢筋 A_s 与受压钢筋 A'_s 的合力作用点建立静力矩平衡关系可得：

$$\sum M = 0 \Rightarrow \begin{cases} Ne = f'_y A'_s (h_0 - a'_s) + \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \\ Ne' = A_s f_y (h_0 - a'_s) - \alpha_1 f_c b x \left(\frac{x}{2} - a'_s \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $e = e_0 - h/2 + a_s$ ， $e' = e_0 + h/2 - a'_s$ ，同时 $a = e_0 - h/2$ ，单位均为 mm。

根据图 3(b)所示的混凝土受压区高度值 x ，为使混凝土截面处于受压区以及式(6)成立，则混凝土受压区的高度 x 应满足[5]-[11]。

$$2a'_s \leq x \leq x_b = \xi_b h_0 \quad (7)$$

式(7)中的 x_b 是混凝土构件正截面界限受压区高度，单位为 mm， ξ_b 是相对界限受压区高度，其无单位； h_0 为混凝土构件正截面长边的有效长度，单位以 mm 计。

分析式(5)和式(6)可得，3 个方程式中有 3 个未知数，即 A_s 、 A'_s 和 x 。从数学方程式的求解原理分析，3 个未知数对应有 3 个方程式时，因而可以解出这 3 个未知数的值。但式(5)中包含有 A_s 和 A'_s 共 2 个未知数，且相互嵌套，因此无法从这 3 个方程中求解出 A_s 、 A'_s 和 x 这 3 个未知数。但对混凝土构件正截面受压区高度 x 而言，可考虑利用混凝土构件的受压特性，先求出受压区高度 x 值。

根据钢筋混凝土构件中混凝土正截面受压区高度 x 和对混凝土中钢筋最小配筋率 ρ_{min} 的要求，可以采用 3 种方法来求解式(5)和式(6)中的 A_s 、 A'_s 和 x 这 3 个未知数。求解的具体思路现分析如下。

4.1. 借助界限受压区高度来求解

根据钢筋混凝土结构设计规范和工程经验，钢筋混凝土构件内配置的钢筋需要满足适筋和超筋的界限状态[5]-[11]，如此可利用混凝土构件中相对界限受压区高度 ξ_b 来计算钢筋的横截面面积 A_s 和 A'_s 。为便于学生理解，讲述时首先需要引导学生回顾之前已学习过的钢筋混凝土构件中的相对界限受压区高度 ξ_b 的含义及其计算方法。钢筋混凝土构件的相对界限受压区高度 ξ_b 是指混凝土构件在弯矩或拉力等永久

荷载作用下受压区的混凝土达到其轴心抗压强度设计值 f_c , 而受拉区的钢筋则达到其受拉屈服强度设计值 f_y , 此时构件就处于超筋和适筋的界限状态, 并将该界限状态时的相对混凝土受压区高度称为相对界限受压区高度 ξ_b [5]-[11], 其计算公式见式(7)。如此可将混凝土构件中的受压区高度 x 用界限受压区高度 x_b 来替换, 这样计算得到的钢筋横截面面积为最小值。将式(7)中的界限受压区高度的表达式 $x_b = \xi_b h_0$ 代入式(5)和式(6)即可得到钢筋混凝土大偏心受拉构件中受拉和受压普通钢筋的横截面面积 A_s 和 A'_s , 两者的计算表达式为:

$$\begin{cases} A'_s = \frac{N e - \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi_b (1 - 0.5 \xi_b)}{f'_y (h_0 - a'_s)} \\ A_s = \frac{N + A'_s f'_y + \alpha_1 f_c \xi_b b h_0}{f_y} \\ A_s = \frac{N e' + \alpha_1 f_c \xi_b b h_0 (0.5 \xi_b h_0 - a'_s)}{f_y (h_0 - a'_s)} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中的相对界限受压区高度 ξ_b 的取值受混凝土强度等级和钢筋强度等级的影响, 其值可根据《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)中建议选取[10]。利用式(8)即可计算得到钢筋混凝土大偏心受拉构件正截面的承载力 N 和配置的全部普通钢筋的横截面面积 A_s 和 A'_s 。根据式(8)可知, 其中计算 A_s 值的表达式有 2 个, 鉴于 A_s 为受拉钢筋, 建议从所得的结果中选取较大者作为 A_s 值, 以确保结构安全。

4.2. 借助最小配筋率来求解

根据钢筋混凝土构件中受力钢筋配置的要求, 可根据最小配筋率 ρ_{min} 来确定钢筋混凝土大偏心受拉构件正截面的承载力 N 和配置的普通钢筋横截面面积 A_s 和 A'_s 。以钢筋混凝土矩形正截面的构件而言, 其受拉或受压一侧配置钢筋时的最小配筋率 ρ_{min} 为[5]-[10]。

$$\rho_{min} = \frac{A'_{s,min}}{bh} \quad (9)$$

若将受压一侧钢筋按最小配筋率 ρ_{min} 进行设计, 则混凝土构件中受压一侧的全部钢筋的横截面面积 A'_s 为:

$$A'_s = A'_{s,min} = \rho_{min} bh \quad (10)$$

根据混凝土结构设计规范, 式(10)中构件受压一侧钢筋的最小配筋率 ρ_{min} 不应小于 0.2% 和 $(45f_t/f_y)\%$ [10], 此处 f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值, 其单位为 MPa, 而 f_y 为钢筋抗拉屈服强度设计值, 其单位以 MPa 计。将式(10)代入式(5)和式(6)后并对两式进行化简可得:

$$\begin{cases} \rho_{min} b h f'_y = A_s f_y - N - \alpha_1 f_c b x \\ \rho_{min} f'_y b h (h_0 - a'_s) = N e - \alpha_1 f_c b x (h_0 - 0.5 x) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中仅有 A_s 和 x 两个未知数, 因而是可以求解的。但从式(11)中的第 2 式分析, 该式中含有 x^2 项, 因此需要求解关于受压区高度 x 的一元二次方程式。将式(11)中的第 2 式进行求解, 得到关于受压区高度 x 的值为:

$$\begin{cases} x_{1,2} = h_0 \pm \sqrt{h_0^2 - \frac{2\eta}{\alpha_1 f_c b}} \\ \eta = N e - f'_y \rho_{min} b h (h_0 - a'_s) \end{cases} \quad (12)$$

从式(12)可知, 其计算过程较为繁琐。但需要注意的是取式(12)中计算得到的较合理的正值作为混凝

土的受压区高度值。当以上两种方法均无法求解时，可采用荷载等效转换与分解法。

4.3. 利用荷载等效与分解法求解

利用荷载等效分解法的思路就是将作用在钢筋混凝土构件上的拉力和弯矩等荷载进行等效移动和分解，即将复杂的承载模型转换或分解成较容易计算的承载模型，并且使转换和分解后的承载模型与原模型的承载效应一致。

以图3所示的钢筋混凝土大偏心受拉构件承载状况为例，可将构件承受的大偏心拉力N等效转换成正截面上承受的弯矩M和拉力N的承载模型，其等效转换后承载模型见图4所示。

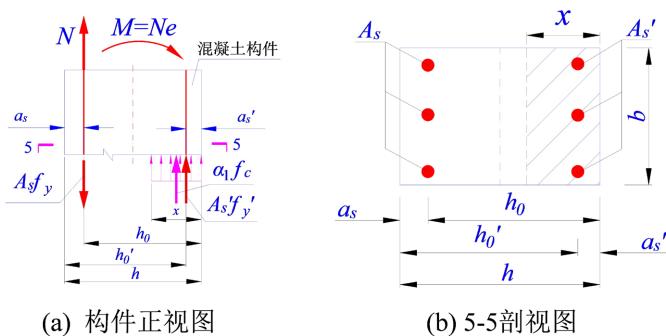


Figure 4. Model of large eccentrically tensile reinforced concrete member with equivalent load
图4. 荷载等效的大偏心受拉和受弯构件模型

对混凝土构件荷载等效转换和分解的具体做法是：将图3(a)中大偏心的拉力N移动至图4(a)构件中受拉钢筋 A_s 的轴线上，并在图4(a)构件中的顶部正截面上施加数值为 $M=Ne$ 的弯矩，则图4(a)构件的承载模式就等效于图3(a)所示的构件承载模式。如此将图3所示的大偏心受拉构件转换成图4所示的受拉和受弯承载模型。对比图3(a)和图4(a)所示混凝土构件承载模型，虽然构件上拉力作用的位置发生了变动，但两者受荷载作用的效应是一致的。在课程讲授时需要向学生特别强调这个转换法，引导学生理解和掌握这个转换法。现分析此时混凝土构件的承载状态，在混凝土构件中，与拉力N同一轴线上的钢筋 A_s 则处于受拉状态，而远离拉力N的另一侧钢筋 A'_s 和该处的部分混凝土则处于受压状态，令混凝土受压区的高度为x。此时便将图3的承载模式转换为图4所示的承载模式。由于图4所示的混凝土构件承载状况仍然较复杂，不便于采用静力学平衡的方法求解构件正截面的承载力和配置的受力钢筋。此处可再次利用荷载等效分解法将图4所示的承载模式进行荷载的分解，将构件的承载状况分解为3种可叠加的承载模式，具体见图5，图5中各个剖切面的对应剖视图见图6。

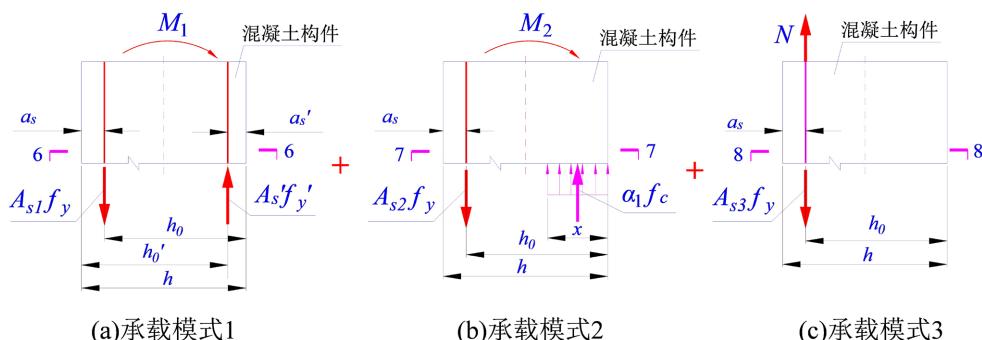


Figure 5. Decomposition model of equivalent load for large eccentrically tensile member
图5. 大偏心受拉构件等效荷载的分解模式

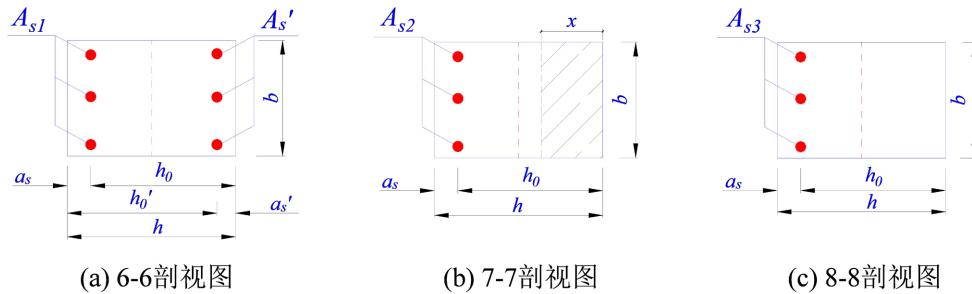


Figure 6. Sectional view of equivalent load decomposition mode of large eccentrically tensile member
图 6. 大偏心受拉构件等效荷载分解模式的剖视图

将图4(a)所示的大偏心受拉构件等效分解成图5所示的受拉和受弯承载模式。根据图5中所示的等效荷载承载模式，则图4中大偏心受拉构件所承受的弯矩M可等效分解为M₁和M₂，即：

$$M = Ne = M_1 + M_2 \quad (13)$$

式(13)中M₁为作用于图5(a)构件上的弯矩，M₂则为作用于图5(b)构件上的弯矩，两者的单位均为kN·m，两者的叠加即可等效为图4(a)中构件所承受的弯矩M。

此外根据图5中各承载模式下的钢筋设置方式可得，图4(a)中大偏心受拉构件中受拉一侧的钢筋的面积A_s也可以分解为A_{s1}、A_{s2}、A_{s3}三者之和，即：

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} + A_{s3} \quad (14)$$

式(14)中的A_{s1}、A_{s2}、A_{s3}分别代表了图5和图6各个承载模式中分解的钢筋横截面面积，单位为mm²。现将图5中大偏心受拉构件3个承载模式的工程意义说明如下：在图5(a)所示的承载模式1中，构件承受的弯矩为M₁，其受拉钢筋的横截面面积为A_{s1}，受压钢筋的横截面面积为A'_s，构件中无混凝土受压区。在图5(b)所示的承载模式2中，构件承受的弯矩为M₂，与此对应的受拉钢筋的横截面面积为A_{s2}，构件中存在有混凝土受压区，受压区的高度为x。在图5(c)所示的承载模式3中，构件承受的拉力为N，并且受拉钢筋的横截面面积为A_{s3}，构件中无混凝土受压区。

上述的将偏心拉力N和弯矩M以及受力钢筋的横截面面积A_s分别进行转换和分解的做法具有新颖性，如此分解可使难以计算的未知量A_s转化和分解成三个容易求解的未知量，即A_{s1}、A_{s2}、A_{s3}。这个做法在讲授时需要向学生特别予以说明，不仅便于学生理解和掌握，还有利于引导和启发学生树立创新思维。

现分别对3个分解后的承载模型中构件的静力学平衡关系进行分析。根据图5(a)中构件正截面上弯矩M₁对受拉钢筋A_{s1}和受压钢筋A'_s合力作用点的静力矩平衡关系可得：

$$\begin{cases} M_1 = A_{s1} f_y (h_0 - a'_s) \\ M_1 = A'_s f'_y (h'_0 - a_s) \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15)可得：

$$A_{s1} = A'_s \frac{f'_y (h'_0 - a_s)}{f_y (h_0 - a'_s)} \quad (16)$$

式(16)即为图5(a)和图6(a)中混凝土构件在承担分解的弯矩M₁时受拉钢筋A_{s1}的横截面面积，单位为mm²。

根据图5(b)中混凝土构件正截面上弯矩M₂分别对受拉钢筋A_{s2}的合力作用点和受压区混凝土压力a_ff_cb_x作用点的静力矩平衡关系可得：

$$\begin{cases} M_2 = \alpha_1 f_c b x (h_0 - 0.5x) \\ M_2 = A_{s2} f_y (h_0 - 0.5x) \end{cases} \quad (17)$$

将由式(13)得到的 M_2 代入式(17)可得:

$$\begin{cases} M - M_1 = \alpha_1 f_c b x (h_0 - 0.5x) \\ M - M_1 = A_{s2} f_y (h_0 - 0.5x) \end{cases} \quad (18)$$

为便于分析, 此处可将混凝土构件中相对受压区高度 $\xi = x/h_0$ 所体现的受压区高度 x 代入式(18)则得到:

$$\begin{cases} M - M_1 = \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi (1 - 0.5\xi) \\ M - M_1 = A_{s2} f_y h_0 (1 - 0.5\xi) \end{cases} \quad (19)$$

令

$$\begin{cases} \alpha_s = \xi (1 - 0.5\xi) \\ \gamma_s = (1 - 0.5\xi) \end{cases} \quad (20)$$

式中 α_s 为混凝土构件的截面抵抗矩系数, γ_s 为内力臂系数, 两者均为相对受压区高度 ξ 的函数, 其无量纲, 其具体的数值可查阅混凝土结构设计规范或相关手册选取[10] [11]。

将式(20)进行化简后可得:

$$\gamma_s = \frac{1 + \sqrt{1 - 2\alpha_s}}{2} \quad (21)$$

同时将式(20)代入式(19)可得:

$$\begin{cases} \alpha_s = \frac{M - M_1}{\alpha_1 f_c b h_0^2} \\ A_{s2} = \frac{M - M_1}{f_y h_0 \gamma_s} \end{cases} \quad (22)$$

从式(22)可以看出, 若已知钢筋混凝土大偏心受拉构件正截面上的弯矩 M 和等效承载模式中的弯矩 M_1 即可求得构件截面的抵抗矩 α_s , 并由式(21)求得截面的内力臂系数 γ_s , 再将弯矩 M 和 M_1 以及 γ_s 代入式(22)求出图 5(b)和图 6(b)中混凝土大偏心构件承载模式下受拉钢筋的横截面面积 A_{s2} 。

此外, 根据图 5(c)中构件正截面上的拉力 N 和钢筋 A_{s3} 内承受的拉力之间的平衡关系可得:

$$N = A_{s3} f_y \quad (23)$$

由式(23)便得到图 5(c)中构件正截面上受拉钢筋的横截面积 A_{s3} , 即:

$$A_{s3} = \frac{N}{f_y} \quad (24)$$

将式(16)、式(22)和式(24)代入式(14)就得到了所要设计的钢筋混凝土大偏心受拉构件中全部受拉钢筋的横截面面积 A_s , 即:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} + A_{s3} = A'_s \frac{f'_y (h'_0 - a_s)}{f_y (h_0 - a'_s)} + \frac{M - M_1}{f_y h_0 \gamma_s} + \frac{N}{f_y} \quad (25)$$

式(25)即为按照钢筋混凝土大偏心受拉构件在偏心力 N 作用下受拉一侧需要配置的全部普通钢筋的横截面面积 A_s , 根据该面积就可以确定钢筋混凝土大偏心受拉构件中受拉钢筋的强度等级和根数。

以上讲解了钢筋混凝土大偏心受拉构件中受力钢筋横截面面积的三种分析和计算方法。因此, 在实

际工程中计算和设计钢筋混凝土偏心受拉构件时同时需要采用三种方法进行分析，并得到对应的三个计算结果，需要从中选取横截面面积较小的值作为混凝土大偏心受拉构件中的受力钢筋。

5. 钢筋混凝土偏心受拉构件中钢筋的配置方式

根据前文推演得到的用于计算钢筋混凝土小、大偏心受拉构件中受力钢筋横截面积的方法，就可以用来配置该构件中的受力钢筋。在混凝土中配置受力钢筋的方式包括对称配筋和非对称配筋的两种。所谓对称配筋就是指在混凝土构件中配置相同强度等级和相同横截面面积的受拉和受压钢筋，即使 $A_s = A'_s$, $f_y = f_y'$ 且使 $a_s = a'_s$ 。而非对称配筋就是使混凝土构件中配置的受拉和受压钢筋的横截面面积不相等，即钢筋的强度等级也不相同，必有 $A_s \neq A'_s$, $f_y \neq f_y'$ ，且 $a_s \neq a'_s$ 。现分别对此予以分析。

5.1. 钢筋混凝土小偏心受拉构件

钢筋混凝土小偏心受拉构件的配筋可以按照对称配筋和非对称配筋的模式进行设计，具体计算方法如下：

1) 对称配筋

当钢筋混凝土构件处于小偏心受拉状态时，即图 2 中所示的混凝土构件，其在静力平衡状态下受拉和受压的钢筋横截面面积应由式(4)来计算。由于采用了对称配筋的方式，则必有 $A_s = A'_s$ 、 $f_y = f_y'$ 和 $a_s = a'_s$ 。此状态中钢筋混凝土构件在拉力 N 作用下发生破坏时，构件中远离拉力 N 一侧的钢筋 A'_s 往往达不到其抗拉屈服强度。为使设计的混凝土结构偏于安全，将远离拉力 N 一侧的钢筋 A'_s 用靠近拉力 N 一侧的受拉钢筋进行配置，即将 $A'_s = A_s$ 、 $f_y = f_y'$ 和 $a_s = a'_s$ ，如此设置可使混凝土大偏心构件偏于安全。将 $A'_s = A_s$ 、 $f_y = f_y'$ 和 $a_s = a'_s$ 代入式(4)即可得到两侧对称配筋时钢筋混凝土小偏心受拉构件中全部受拉钢筋的横截面面积为：

$$A'_s = A_s = \frac{Ne'}{f_y(h'_0 - a_s)} \quad (26)$$

2) 非对称配筋

若要对钢筋混凝土构件采用非对称的配筋方式，则必有 $A_s \neq A'_s$, $f_y \neq f_y'$ ，且 $a_s \neq a'_s$ 。此时混凝土小偏心受拉构件中全部受拉钢筋的横截面面积均应采用式(4)分别加以计算。

5.2. 钢筋混凝土大偏心受拉构件

钢筋混凝土大偏心受拉构件中的配筋也可以按照对称和非对称的模式进行设计，具体计算方法如下：

1) 对称配筋

若钢筋混凝土构件处于大偏心受拉状态时，其承载模式见图 3。混凝土大偏心受拉构件在静力平衡状态下受拉和受压钢筋的横截面面积应采用式(5)来计算。由于采用对称配筋的模式，则必有 $A_s = A'_s$, $f_y = f_y'$ 且 $a_s = a'_s$ ，将三者代入式(5)便得到混凝土构件中正截面上混凝土受压区高度 x 的计算式为：

$$x = -\frac{N}{\alpha_1 f_c b} < 0 \quad (27)$$

式(27)表明钢筋混凝土构件中的混凝土受压区高度 x 呈现为负值，此表明混凝土构件中的受压区实际是处于受拉状态，且属于 $x < 2a'_s$ 。因此受压钢筋的横截面面积 A'_s 则需要按照受拉一侧钢筋的横截面面积 A_s 来计算。根据式(6)可得到受拉钢筋的横截面面积 A_s 为：

$$A_s = \frac{Ne' + \alpha_1 f_c b x \left(\frac{x}{2} - a'_s \right)}{f_y(h_0 - a'_s)} \quad (28)$$

由于受压区高度 $x < 0$ 时，则取 $x = 0$ 代入式(28)即可得到混凝土大偏心受拉构件中受压一侧钢筋的横截面面积 A'_s ，并使其与受拉一侧的钢筋横截面面积 A_s 相等，则有：

$$A'_s = A_s = \frac{Ne'}{f_y(h_0 - a'_s)} \quad (29)$$

此外，当计算得到钢筋混凝土构件中的受压区高度 $x < 0$ 时也可以按照构造进行配筋，此时可根据最小配筋率 ρ_{min} 来计算混凝土大偏心构件受压区的钢筋横截面面积 A'_s ，即利用式(10)来计算 A'_s ，此时计算得到的最小配筋率 ρ_{min} 还需要满足不小于 0.2% 和 $(45f/f_y)\%$ 的要求[5]-[11]。并将根据式(29)计算得到的结果与按照构造配筋计算的结果进行对比，从中选取较小值作为受压区的受力钢筋。

2) 非对称配筋

当采用非对称配筋的方式时，则有 $A_s \neq A'_s$ 、 $f_y \neq f_y'$ 且 $a_s \neq a'_s$ 。此时钢筋混凝土大偏心受拉构件中受拉一侧钢筋的横截面面积 A_s 应采用式(25)进行计算，而受压一侧的钢筋横截面面积 A'_s 则用式(15)中的第 2 式来计算，然后选取相应强度等级的钢筋及其根数，完成钢筋混凝土大偏心构件的非对称配筋模式。

对于钢筋混凝土偏心受拉构件而言，其中的受力钢筋即可以用对称配筋的模式，也可以采用非对称配筋的模式。相对而言，采用对称配筋的模式时，由于受拉和受压均采用强度等级相同的受力钢筋，则有利于降低现场安装和焊接钢筋的劳动强度，并避免放错钢筋，有利于提高施工效率和节省工期。而采用非对称配筋的模式中，受拉和受压采用不同强度等级的普通钢筋，虽然有利于降低工程造价，但会增加现场安装和焊接钢筋的劳动强度，同时还会增大放错钢筋的现象，不利于提高施工效率。对于地铁和轻轨线路中的车站结构和区间高架桥梁与隧道而言，在进行偏心受拉构件设计时多采用对称配筋的方式来设置其内部的受力钢筋，也可以根据工程需要采用非对称配筋。

6. 工程案例设计

结合工程案例进行讲解会使学生加深理解和掌握相应的计算和设计方法。为此，以某地铁采用明挖法建造的地下两层矩形横断面框架结构车站为例，就其钢筋混凝土框架结构中边墙的配筋进行设计。通过对该车站框架结构在地层土压力和地下水压力等永久荷载组合作用下的内力计算，得到了车站各构件中的内力即弯矩和轴力的分布图，具体见图 7。

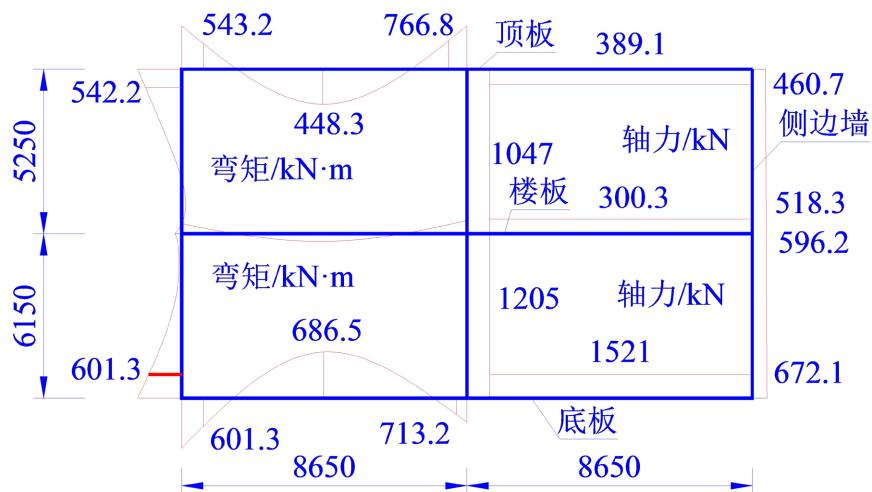


Figure 7. Diagram of internal forces in frame structure of a subway station (Unit: mm)
图 7. 某地铁车站框架结构的内力图(单位: mm)

从图7中车站各构件中的弯矩和轴力分布图可知，车站的顶板和底板均处于偏心受压状态，而边墙处于偏心受拉状态，且靠近底板的墙隅部位弯矩和轴力均较大。因此对图7中车站边墙墙隅处的正截面偏心受拉进行分析。该截面处的内力即弯矩 $M = 601.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 和轴力 $N = 672.1 \text{ kN}$ 。设明挖现浇地铁车站拟采用的混凝土强度等级为C30，其轴心抗压强度设计值为 $f_c = 14.3 \text{ N/mm}^2$ ，轴心抗拉强度设计值为 $f_t = 1.43 \text{ N/mm}^2$ ，受力钢筋为HRB400级，其抗拉和抗压强度的设计值 $f_y = f'_y = 360 \text{ N/mm}^2$ 。侧边墙的厚度为 $h = 700 \text{ mm}$ ，取沿车站纵向的长度为 $b = 1000 \text{ mm}$ 。则正截面的尺寸为 $b \times h = 1000 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ ，并取 $a_s = a'_s = 40 \text{ mm}$ 。首先需要计算出正截面上的偏心距 e_0 。根据式(1)可得 $e_0 = 894.3 \text{ mm}$ ，很显然车站的边墙底部截面上拉力的偏心距 $e_0 > h/2 = 300 \text{ mm}$ ，则此处的截面处于大偏心受拉状态。此时根据图3有：

$$\begin{cases} e = e_0 - \frac{h}{2} + a_s = 894.65 - \frac{700}{2} + 40 = 584.65(\text{mm}) \\ e' = e_0 + \frac{h}{2} - a'_s = 894.65 + \frac{700}{2} - 40 = 1204.65(\text{mm}) \end{cases} \quad (30)$$

首先采用相对界限受压区高度 ξ_b 来初步计算受拉和受压钢筋的横截面面积 A_s 和 A'_s 。对于HRB400级钢筋和C30混凝土的结构，查阅混凝土结构设计规范和设计手册[10][11]则有 $\xi_b = 0.518$ ，将所涉及的各个参数代入式(8)并经过计算得到：

$$\begin{cases} A'_s = \frac{Ne - \alpha_1 f_c b h_0^2 \xi_b (1 - 0.5 \xi_b)}{f'_y (h_0 - a'_s)} = -8951.65 \text{ mm}^2 < 0 \\ A_s = \frac{N + A'_s f'_y + \alpha_1 f_c \xi_b b h_0}{f_y} = 6495.52 \text{ mm}^2 \\ A_s = \frac{Ne' + \alpha_1 f_c \xi_b b h_0 (0.5 \xi_b h_0 - a'_s)}{f_y (h_0 - a'_s)} = 6495.52 \text{ mm}^2 \end{cases} \quad (31)$$

从式(31)可得，由于受压钢筋的截面面积 $A'_s < 0$ ，故式(31)中的计算值不能采用，也即表示不能用相对界限受压区高度 ξ_b 的方法来求解。此时，就需要采用构造配筋来确定受压钢筋的横截面面积 A'_s 。也就是以最小配筋率的方法来求解。根据受压钢筋的最小配筋率 ρ'_{min} 的定义可得受压钢筋的横截面面积 A'_s ：

$$A'_s = \max \left\{ \rho_{min} b h, 0.45 \frac{f_t}{f_y} b h \right\} = \max \left\{ 0.002 \times 1000 \times 700, 0.45 \times \frac{1.43}{360} \times 1000 \times 700 \right\} = 1400(\text{mm}^2) \quad (32)$$

则受压钢筋按照构造配筋时可以选取4根Φ22HRB400级钢筋，实际配筋的面积为 $A'_s = 1520 \text{ mm}^2$ 。考虑到 A'_s 是按照构造配筋确定的，因此混凝土中的受压区高度 x 就不再是界限受压区高度 x_b 。此时则需要利用等效荷载转换法来计算。

具体的计算过程简介如下：将 A_{s1} 用 A'_s 的值代入式(16)可得 $A_{s1} = A'_s = 1520 \text{ mm}^2$ ，从而由式(15)得 $M_1 = 629.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，将 M_1 代入式(13)可得 $M_2 = 53.59 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。将 M 和 M_1 或者 M_2 代入式(21)和式(22)即可求得 $A_{s2} = 226.55 \text{ mm}^2$ ，然后再利用式(24)确定 $A_{s3} = 1866.94 \text{ mm}^2$ ，并由式(25)得到混凝土大偏心受拉构件中全部受拉钢筋的横截面面积 $A_s = 3613.89 \text{ mm}^2$ 。对于大偏心受压构件而言，前文中已分析得出，当受压区高度为负值，则可以利用式(29)计算受压区的钢筋横截面面积 A'_s ，即将受拉和受压钢筋横截面面积取为一致，从而由式(29)得到受压钢筋的横截面面积：

$$A'_s = A_s = \frac{Ne'}{f_y (h_0 - a'_s)} = \frac{772100 \times 1204.65}{360 \times (660 - 40)} = 3627.46(\text{mm}^2) \quad (33)$$

根据上述的最小配筋率得到的受拉钢筋的横截面面积为 $A_s = 3613.89 \text{ mm}^2$ ，而对称配筋时的受拉钢筋

横截面面积为 $A_s = 3627.46 \text{ mm}^2$, 则选取较小的横截面面积作为对称配筋的横截面面积, 即取 $A_s = 3613.89 \text{ mm}^2$ 来配置受拉钢筋。可选取 6 根 $\Phi 28 \text{ mm}$ 的 HRB400 级钢筋, 实际配筋的截面面积为 $A_r = 3695 \text{ mm}^2$ 。按照以上计算结果初步确定的边墙部位配置的受力钢筋见图 8 所示。

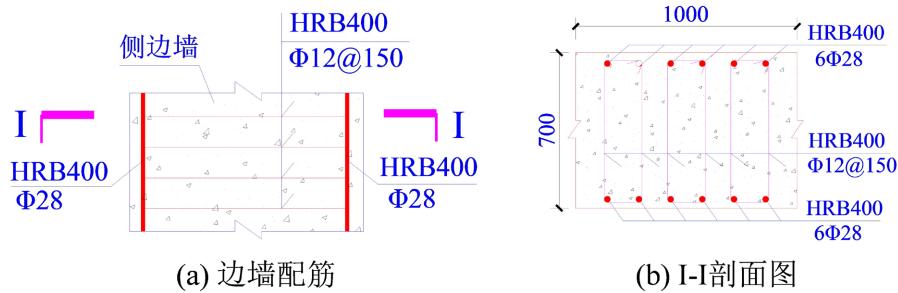


Figure 8. Reinforcement diagram for side-wall subject to large eccentric tension
图 8. 大偏心受拉边墙正截面配筋图(单位: mm)

按照实际配筋计算得到的边墙正截面的实际配筋率 ρ_r 为:

$$\rho_r = \frac{2A_r}{bh} = \frac{2 \times 3695}{1000 \times 700} = 1.06\% \quad (34)$$

由式(34)可得边墙的实际配筋率 ρ_r 满足最小配筋率 $\rho'_{min} = 2 \times \rho_{min} = 0.4\%$ 的要求。同时还需要计算钢筋混凝土大偏心受拉构件正截面的最大配筋率 ρ_{max} , 其计算式为[4]-[10]。

$$\rho_{max} = \xi_b \frac{\alpha_1 f_c}{f_y} = 0.518 \times \frac{1 \times 14.3}{360} = 2.05\% \quad (35)$$

将实际配筋率 $\rho_r = 1.06\%$ 与式(34)计算得到的最大配筋率 $\rho_{max} = 2.05\%$ 相比, 前者未超过最大配筋率 2.05%, 满足混凝土大偏心构件未超筋的要求[5]-[11]。

此外, 利用最小配筋率 ρ_{min} 得出的式(12)可以计算出混凝土受压区高度 x 值, 将所涉及式(12)中的相关参数带入式(12)并计算得到该一元二次方程式的两个根, 结合实际选取其中较小的 $x = 8.58 \text{ mm}$ 作为受压区的高度, 则有 $x = 8.58 \text{ mm} < 2a'_s = 80 \text{ mm}$, 由此也表明钢筋混凝土构件中的混凝土受压区高度 x 呈现为负值, 此时就需要用式(29)来计算大偏心受拉构件中受压钢筋横截面面积 A'_s 。

7. 讨论

至此, 通过上述的理论推演分别给出了钢筋混凝土偏心受拉构件正截面承载力计算和受力钢筋配置的设计方法。实际上此过程也是组织和设计课程内容教学的基本思路, 即先讲解钢筋混凝土构件承受的偏心力及偏心距的概念, 然后以混凝土小偏心受拉构件为例, 分析混凝土小偏心受拉构件在拉力作用下的静力和静力矩平衡关系, 由此得出拉、压钢筋横截面面积的计算公式, 之后再将此方法引入到大偏心受拉构件正截面承载力和受力钢筋的计算与设计中。其中具有引导和启发学生进行创新思维的内容就是将承受大偏心受拉构件的承载模式等效转换和分解为同时承受偏心荷载和部分弯矩的 3 个承载模式。具体可结合图 4 和图 5 以及图 6 进行讲解。如此转换和分解的目的就是将复杂的静力学问题分解为可叠加的静力学模型, 不仅使构件承载模式和概念更加清晰, 而且还简化了计算方法。并将理论推演得出的公式通过案例进行讲解, 如此组织和设计的课堂教学内容, 使混凝土偏心受拉构件配筋设计的思路更加清晰, 有利于学生的理解和掌握。

以上研究和总结了钢筋混凝土偏心受拉构件正截面承载力和配筋计算理论的教学设计, 为提高课程

的教学质量，在教学过程中除了教师课堂讲授知识点和方法而外，还需要引导学生积极参与到教学活动中。如在讲授钢筋混凝土小偏心受拉构件和大偏心受拉构件的正截面承载力与钢筋横截面积计算方法时，在课堂上可随机抽点 2~3 名学生，让被抽到的学生在课堂上简述其所理解和掌握的技术路线与计算方法。并安排随堂测验或发放问卷调查，要求全体学生在下课前用 5~10 min 完成，以了解和考察学生对所讲授内容的理解与掌握程度。此外，针对混凝土偏心受拉构件配筋设计的教学内容，还布置相应的课程设计，其内容可涉及到地铁车站框架结构中的立柱、边墙、高架拱桥中的主拱、桥墩以及地下区间隧道中的衬砌等，使学生在课后结合教师课堂教学用的讲义、教学参考书以及在线网络资源如中国大学 MOOC 等的复习完成课程设计，其目的在于督促和加深学生对所学内容中基本概念和基本原理以及计算方法的理解和掌握。教师则根据学生在课堂上学生的参与程度和学生课后完成课程设计的状况，及时对教学内容和方式进行补充、调整和完善，在课堂向学生进行讲评，进而提高课程的教学质量，引导学生理解和掌握钢筋混凝土偏心受拉构件配筋设计的方法。

按照上述的教学设计和组织，在 2019 年~2024 学年间为我校土木工程和城市地下空间工程专业本科生而开设的《地下铁道与轻轨》课程中进行了教学实践，通过对选修该课程学生学习效果的考核，约 96% 以上的学生均能正确理解和掌握钢筋混凝土偏心受拉构件内受力钢筋配置的计算和设计方法，达到了课程教学大纲所要求的学生应掌握钢筋混凝土偏心受拉构件配筋设计能力要求的教学目标，表明教学效果良好。

8. 结论

钢筋混凝土偏心受拉构件正截面承载力和钢筋配置的计算和设计一直是《地下铁道与轻轨》课程中的重要教学内容，如何使学生理解和掌握此部分内容的理论推导过程与设计方法，是教师结合课程教学大纲进行教学内容组织、设计和讲授的主要教学工作。本文结合对钢筋混凝土偏心受拉构件受力钢筋设计和计算方法的教学实践，研究和总结了混凝土大、小偏心受拉构件中受力钢筋计算方法的推演过程，给出了教学实践的具体做法。现将课堂教学内容组织和讲解的思路总结如下：

- 1) 课程讲解中首先使学生明确钢筋混凝土构件承受的偏心荷载及其偏心距。
- 2) 讲解钢筋混凝土小偏心和大偏心受拉构件的概念，并以钢筋混凝土小偏心受拉构件为例，讲解其在偏心拉力作用下的静力和静力矩平衡关系式，由此得到受力钢筋的横截面面积。
- 3) 将小偏心受拉构件的计算方法引入到大偏心受拉构件的计算当中，重点讲解拉力等效转换、构件弯矩分解以及受力钢筋横截面面积分解的具体方法，同时结合混凝土结构设计规范、工程经验和案例来讲授大偏心受拉构件配筋设计的三种方法。
- 4) 教学过程中还需要积极引导学生参与教学活动，使学生完成课堂互动和课后的课程设计，并引导学生开展创新思维。

通过教学实践，上述的教学设计在课堂教学中能使学生更容易理解和掌握混凝土偏心受拉构件配筋设计的基本概念、基本原理与计算方法，也有利于达到预期的教学目标，进而培养和提高学生分析和解决工程问题的能力，更有利于引导学生逐步树立创新思维。

基金项目

本文的研究得到四川省 2021~2023 年高等教育人才培养质量和教学改革项目“服务交通强国，聚焦智能建造”(JG2021-258)的支持，并得到了西南交通大学课堂教学与改革项目的支持。

参考文献

- [1] 周晓军, 周佳媚. 城市地下铁道与轻轨交通[M]. 第 2 版. 成都: 西南交通大学出版社, 2016.

- [2] 周晓军. 混合式教学法在《地下铁道》课程中的应用与效果评价[J]. 教育教学论坛, 2019(48): 176-177.
- [3] 高波, 王英学. 地下铁道[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [4] 张庆贺, 朱合华, 庄荣. 地铁与轻轨[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [5] 秦力, 魏春明. 混凝土结构基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [6] 许成祥, 张皓. 混凝土结构基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [7] 沈浦生. 混凝土结构设计原理[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [8] 翟爱良, 郑晓燕. 钢筋混凝土结构计算与设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [9] 宋玉普, 王清湘. 钢筋混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [10] 中国建筑科学研究院. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [11] 李守巨. 混凝土结构常用公式与数据速查手册[M]. 北京: 知识产权出版社, 2015.