

《地下铁道》课程中钢筋混凝土轴心受力构件正截面承载力计算的教学设计和实践

周晓军

西南交通大学土木工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年7月8日; 录用日期: 2026年8月21日; 发布日期: 2026年8月31日

摘 要

本文根据为本科学生而开设的《地下铁道》课程中钢筋混凝土轴心受力构件正截面承载力计算的教学内容, 分析和提出了易于学生理解和掌握的钢筋混凝土轴心受力构件中纵向钢筋计算和设计的推演方法, 并通过对混凝土轴心受力构件在受拉和受压状态下静力平衡关系的分析, 提出了混凝土轴心受力构件正截面承载力计算方法的教学设计。通过在《地下铁道》课程中的教学实践表明, 所提出的教学设计不仅有利于提高学生开展与地下铁道结构有关的混凝土轴心受力构件中钢筋的设计能力, 而且还有助于引导学生树立创新思维的意识, 以期实现预定的教学目标。

关键词

钢筋混凝土轴心受力构件, 配筋率, 稳定系数, 间接钢筋, 教学法设计

Instructional Planning and Its Practice for Calculating the Load Bearing Capacity of Normal Cross-Section of Concrete Members Subject to Aiaxial Froces in the Course Entitled *Metro*

Xiaojun Zhou

School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: July 8, 2026; accepted: August 21, 2026; published: August 31, 2026

Abstract

Drawing upon the instructional contents for calculating the load-bearing capacity of normal cross-section of reinforced concrete (RC) members subject to axial forces, as delivered in the course entitled “Metro” for undergraduates, a deductive methodology for calculating both the tension reinforcement in axially tensioned members and the compression reinforcement in axially compressed members are analyzed and presented to be easily comprehended and mastered by undergraduates in this paper. Furthermore, through a systematic investigation into the static equilibrium states of concrete members under axial tensile and compressive loading, a pedagogical scheme for calculating the load-bearing capacity of axially loaded RC members is developed. Practical application of this pedagogy in the course entitled “Metro” demonstrates that it not only effectively augments the capabilities of the undergraduates to design the reinforcement detailing of axially loaded RC members related to reinforced concrete structures used in metro rail system, but also help guide undergraduates to setting up awareness of making innovative thinking, as well as to achieve the teaching aims as planned.

Keywords

Reinforced Concrete Members Subject to Axial Forces, Ratio of Reinforcement, Stability Coefficient, Indirect Reinforcing Bars, Pedagogical Design

Copyright © 2026 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》是西南交通大学面向土木工程、城市地下空间工程 and 智能建造专业本科学生而开设的一门国家级一流课程，其与《山岭隧道》和《水下隧道》共同构成西南交通大学隧道和地下工程学科中面向本科生而开设的 3 门必修核心专业课程。其教学内容包括地铁发展历史及其组成、城市轨道交通路网规划、平面和纵断面线路设计、轨道工程、车站建筑与装修设计、车站主体和区间隧道结构设计、车站和区间隧道的施工方法等[1][2]。而钢筋混凝土结构设计和计算方法是《地下铁道》课程中涉及车站和区间隧道结构设计重点教学内容。学生通过对钢筋混凝土结构设计方法的系统学习，理解并掌握钢筋混凝土构件计算与设计的方法，并具备能够开展地铁和轻轨地面、高架和地下钢筋混凝土结构计算和设计的能力，并为学生的就业和进一步学术深造奠定坚实的基础。

钢筋混凝土结构的设计和计算具有内容多、公式多、参数多和构造规定多的“四多”特点，且教学内容前后逻辑紧密关联，并具有极强的工程实践特性[3]-[6]，因此合理地设计和组织教学内容是教师开展教学活动的前提，也是提高课程教学质量的重要保障，其目的就是使选修该课程的学生能够理解和掌握钢筋混凝土结构设计和计算的基本概念、基本原理和计算方法，并能灵活应用所学知识开展地铁结构的设计与创新实践，初步建立土木工程师所具有的计算、设计和工程制图的能力，达到工程教育的目的。

但在教学过程中发现，按照现行的教学参数书中组织的内容来讲解钢筋混凝土轴心受力构件正截面承载力的计算方法时，学生对教学内容的理解和掌握尚存在较大的困难。以螺旋箍筋柱为例，在分析螺旋箍筋柱的抗压强度时，国内现行的教学参考书中大多仅列出了相应的计算式，但未说明计算式具体的推导过程，也未能讲解体现单根螺旋式箍筋拉力和箍筋受核心混凝土均布压力之间函数关系的推演方法

[7]-[10]。学生只能被动地接收所列出的计算公式，并不能从原理上理解计算方法建立和推演的过程及其工程意义。因而学生对这部分知识点还不能够完全理解和掌握，课程的教学效果并不理想。本文根据钢筋混凝土轴心受力构件正截面承载力计算的教学内容，从便于学生理解和掌握的角度，基于 PBL 即 Problem-Based Learning 的教学理念，并遵循使学生理解基本概念、掌握推演过程、应用设计标准、开展工程设计和创新思维的教学思路，提出了计算混凝土轴心受力构件正截面承载力的推演过程，并设计和组织了相应的教学内容。经 4 年时间的教学实践表明，所提出的教学设计更易于学生的理解和掌握，符合学生接收专业知识所遵循的从简至繁的认知过程，有利于保障教学质量。

2. 教学内容和讲授思路

课程的教学内容和讲授思路安排如下：

(1) 矩形正截面钢筋混凝土受集中荷载作用下的承载和破坏模式，由此引入钢筋的作用和单筋矩形截面梁。(2) 单筋矩形截面梁的配筋率、梁截面受压区高度、相对受压区高度和相对界限受压区高度，讲解适筋梁、少筋梁和超筋梁的概念，并引入梁的配筋率、最小配筋率和最大配筋率的定义及其计算方法。(3) 混凝土轴心受拉构件的含义和正截面承载力的计算与配筋。(4) 混凝土轴心受压构件中短柱和长柱的划分及受压构件的稳定系数。(5) 轴心受压普通箍筋柱和螺旋箍筋柱以及间接钢筋的含义及其正截面承载力的计算和配筋。(6) 普通箍筋柱和螺旋箍筋柱正截面承载力计算与配筋的设计案例。(7) 以螺旋箍筋柱的间接钢筋拉力和截面换算面积为例讲解其表达式推演分析中的创新方法，引导学生逐步树立创新思维，同时结合教学内容安排课堂和课后的课程设计，促使学生通过课堂练习和课程设计巩固所学知识，逐步引导和培养学生树立工程师所具有的计算、设计和创新实践的工程素养。

3. 钢筋混凝土构件中的配筋率

为便于学生理解，首先需要讲解钢筋混凝土构件中配置受力钢筋的目的。以图 1 所示的矩形正截面受对称集中荷载 P 作用的简支梁为例。设简支梁受对称集中荷载 P 作用且保持 P 值不变，使简支梁发生弹性变形，见图 2 所示。

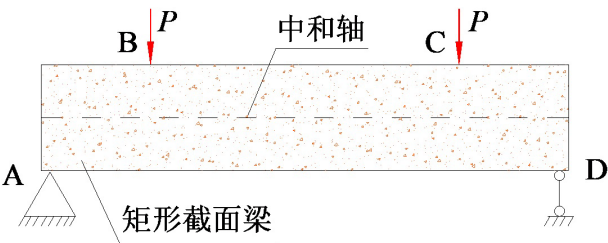


Figure 1. Simply supported beam under point load P
图 1. 受集中荷载 P 作用的简支梁

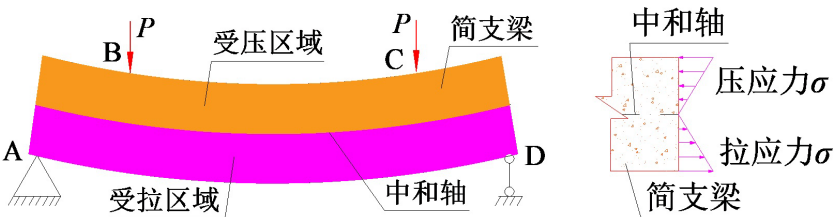


Figure 2. Elastic deformation of beam and its cross-sectional stresses
图 2. 梁的弹性变形及其正截面应力

从图 2 中简支梁的弹性变形和横截面上的应力状态可以看出, 简支梁中和轴以下的混凝土处于受拉状态而中和轴以上的混凝土处于受压状态, 此时若将集中荷载卸去则简支梁会恢复到原先未受荷载的状态, 将此变形称为简支梁的弹性变形。再次施加集中荷载 P , 使荷载 P 逐渐增加, 梁的变形会从弹性变形过渡到塑性变形。由于混凝土的抗拉强度远低于其抗压强度, 则中和轴以下受拉区的混凝土首先达到塑性变形而开裂, 致使梁发生脆性破坏, 并且破坏无明显的预兆, 这是工程中应当避免的。为提高混凝土梁的承载能力, 可在梁的中和轴下部区域配置合理的受力钢筋。当梁受到集中荷载 P 作用下中和轴下部的混凝土一旦发生开裂, 则因荷载 P 引起的拉应力全部由受拉的钢筋承担, 梁并不突然开裂。此时梁中和轴上部的混凝土仍处于受压状态, 直至荷载 P 不断增加使钢筋发生拉伸屈服且受压区的混凝土被压碎时梁才发生破坏, 这种梁在破坏前具有一定的延性和预兆, 是工程中所希望和要求的。因此为提高混凝土简支梁的承载能力, 需要在梁中和轴以下的受拉部位配置合理的受拉钢筋, 以充分发挥和利用钢筋具有较高的抗拉强度和混凝土具有较高的抗压强度的力学性能。

对图 1 中受集中荷载 P 作用的简支梁进行内力分析, 梁中 AB 段和 CD 段受弯矩和剪力的共同作用, 而 BC 段则无剪力仅承受弯矩, 因此 BC 段属于纯弯段。此段梁的正截面上仅承受弯矩 M 的作用。为防止简支梁发生过大大变形和出现裂缝而发生脆性破坏, 在其中的中和轴的下部配置合理的受拉钢筋, 而中和轴上部则依靠混凝土本身来提供抗压能力, 因此将此种梁被称为单筋矩形截面梁。若选取梁中 BC 段进行受力分析, 则其承载模式见图 3 所示。

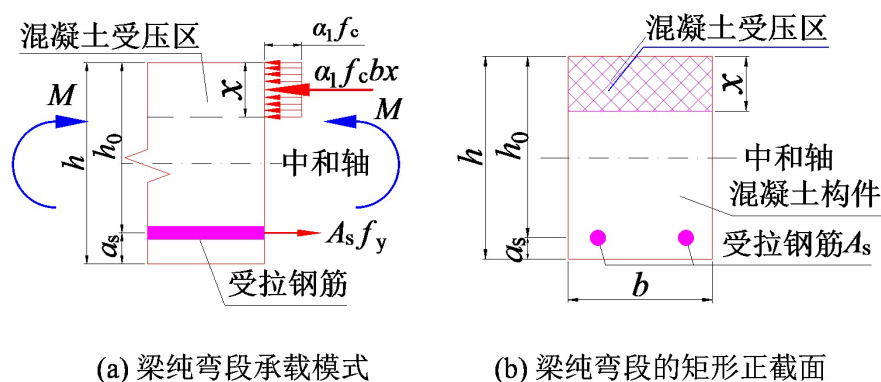


Figure 3. Compression zone and tensile reinforcement of singly reinforced beam with rectangular cross-section
图 3. 单筋矩形截面梁受压区和受拉钢筋

图 3(a)为简支梁中一小段的承载模式, 图 3(b)为梁的正截面。设图 3(b)中受弯矩作用的混凝土矩形正截面的宽度为 b , 高度为 h , a_s 为纵向受拉钢筋的合力作用点至构件截面受拉边缘的距离, 上述几何尺寸单位均以 mm 计。在图 3 中并设全部纵向受拉钢筋的横截面面积为 A_s , 混凝土梁矩形正截面的有效面积为 A_0 , 两者均以 mm^2 计。为便于分析, 将 A_s 同时也代表全部的受拉钢筋。则钢筋混凝土梁的配筋率 ρ 就是混凝土梁中全部受拉钢筋的横截面面积 A_s 与梁矩形正横截面有效面积 A_0 的比值, 即

$$\rho = \frac{A_s}{A_0} = \frac{A_s}{bh_0} \quad (1)$$

式中 h_0 为矩形梁正截面的有效高度, $h_0 = h - a_s$, mm。梁的配筋率 ρ 通常以 % 表示。

在讲解混凝土梁配筋率 ρ 的基础上, 进一步讲解混凝土构件中最小配筋率 $\rho_{\min}$ 和最大配筋率 $\rho_{\max}$ 的概念。在图 3 中, 设梁中和轴上部混凝土受压区的高度为 x , 混凝土的轴心抗压强度设计值为 f_c , 梁中和轴下部配置的全部受拉钢筋的横截面面积为 A_s , 钢筋的抗拉极限强度设计值为 f_y 。 α_1 为梁中和轴上部受

压区混凝土等效矩形应力图形的系数[3]-[10]。当混凝土立方体抗压强度等级小于 C50 时取 $\alpha_1 = 1$ ，当混凝土立方体抗压强度等级大于 C80 时取 $\alpha_1 = 0.94$ [11] [12]。

结合图 1~图 3 所示的受荷载 P 作用下单筋矩形正截面梁从加载至破坏的过程，其破坏模式与配置的钢筋强度等级以及配筋率 ρ 有关。根据配筋率 ρ 的大小将其破坏模式划分为少筋梁破坏、超筋梁破坏和适筋梁破坏。

所谓的少筋梁破坏，就是指梁的配筋率过低。当梁在荷载 P 作用下，受拉区混凝土发生开裂后受拉钢筋随即进入屈服阶段，构件出现较宽的裂缝，其挠度也很大，梁随即发生破坏。此时梁中和轴上部受压区混凝土抗压强度较高的性能并未得到充分利用。梁发生脆性破坏，延性较低，在工程设计中应加以避免。

而超筋梁是指混凝土梁受拉区配置的钢筋过多，即配筋率过大。当梁在集中荷载 P 作用下受压区的混凝土被压碎时，受拉区钢筋的拉应力却并未达到其抗拉屈服强度。梁发生破坏时的挠度不大，没有明显的预兆，梁内配置的受拉钢筋具有较高抗拉强度的力学特性并未得到充分发挥，这种超筋梁也是在工程设计中需要避免的。

所谓适筋梁就是指梁在集中荷载作用下发生破坏时，受拉区的钢筋首先发生拉伸屈服，并维持其屈服应力不变，梁发生显著的塑性变形，直至受压区混凝土达到极限抗压强度而发生破坏。此种梁破坏前梁内的裂缝和变形均较为明显，有破坏预兆，属于延性破坏，并且梁内受拉钢筋具有较高抗拉强度和受压区混凝土具有较高抗压强度的力学特性均得到有效利用，是工程设计中所需要的。

正是由于混凝土构件中配筋率 ρ 的不同，导致梁受集中荷载作用下破坏形式的变化，因此在设计钢筋混凝土构件时需要确定其最小配筋率 $\rho_{\min}$ 和最大配筋率 $\rho_{\max}$ 。

根据钢筋混凝土构件中配筋率 ρ 的定义，结合国内外的工程实践，我国《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010) (2024 版)中给出的最小配筋率 $\rho_{\min}$ 的计算公式为[11]

$$\rho_{\min} = \frac{A_{s,\min}}{A_c} = \frac{A_{s,\min}}{bh} \quad (2)$$

式中 $A_{s,\min}$ 为混凝土构件中全部受力钢筋的最小横截面面积， mm^2 ； A_c 为混凝土构件的正截面面积， mm^2 。其余符号含义同前。此外，《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010) (2024 版)中还规定了混凝土构件一侧受力钢筋的最小配筋率 $\rho_{\min}$ 为[11]

$$\rho_{\min} = \frac{A_{s,\min}}{bh} \geq \max \left\{ \frac{0.2}{100}, \frac{45}{100} \times \frac{f_t}{f_y} \right\} \quad (3)$$

式中 f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值， $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ， f_y 为受拉普通钢筋的抗拉强度设计值， $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。

除了验算钢筋混凝土构件中一侧的最小配筋率以外，还需要验算混凝土构件中的最大配筋率 $\rho_{\max}$ ，避免混凝土构件出现超筋现象。为使学生明确混凝土构件中最大配筋率 $\rho_{\max}$ 的概念，需要讲解钢筋混凝土受弯构件中的混凝土受压区高度 x 、相对受压区高度 ξ 以及相对界限受压区高度 ξ_b 的概念。仍以图 3 所示的矩形正截面梁为例，混凝土梁正截面的相对受压区高度 ξ 就是指混凝土构件正截面等效矩形应力图形的受压区高度 x 与其正截面有效高度 h_0 的比值，即

$$\xi = \frac{x}{h_0} \quad (4)$$

当混凝土构件在集中荷载 P 作用下达达到承载能力极限状态时，受拉区的钢筋达到拉伸屈服，同时中和轴上部的混凝土也到达抗压强度，此时混凝土构件就处于适筋和超筋的界限破坏状态，并将此时的等

效矩形应力图形中混凝土受压区高度 x 称为界限受压区高度 x_b ，将其与梁正截面有效高度 h_0 的比值被称为相对界限受压区高度，用 ξ_b 表示，既有

$$\xi_b = \frac{x_b}{h_0} \quad (5)$$

此时受压区混凝土所承担的压力为 $\alpha_1 f_c b x_b$ ，而受拉区钢筋所承担的拉力为 $A_s f_y$ ，且两者处于极限平衡状态，既有

$$\alpha_1 f_c b x_b = A_s f_y \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)，并将其化简得

$$\xi_b = \frac{x_b}{h_0} = \frac{A_s}{b h_0} \frac{f_y}{\alpha_1 f_c} \quad (7)$$

式中的 $A_s / b h_0$ 就被称为是混凝土构件发生界限破坏时的最大配筋率 $\rho_{\max}$ ，从而有

$$\rho_{\max} = \frac{A_s}{b h_0} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)可得到混凝土构件的最大配筋率 $\rho_{\max}$ 的表达式

$$\rho_{\max} = \frac{A_s}{b h_0} = \xi_b \frac{\alpha_1 f_c}{f_y} \quad (9)$$

式中各物理量的含义同前。

式(9)就是判断混凝土受弯构件中配筋率是否超筋的表达式。当混凝土构件中的实际配筋率 $\rho > \rho_{\max}$ 时，受弯构件发生破坏时的等效矩形应力图形的受压区高度 $x > x_b$ ，即 $\xi > \xi_b$ ，则构件中受拉区钢筋的应力值小于其屈服强度，构件属于超筋破坏。而当混凝土受弯构件中的实际配筋率 $\rho < \rho_{\max}$ 时，受弯构件发生破坏时其等效矩形应力图形的受压区高度 $x < x_b$ ，即 $\xi < \xi_b$ ，则受拉区钢筋的应力值大于其屈服强度，混凝土受弯构件属于适筋破坏。因此相对界限受压区高度 ξ_b 就是用来判断混凝土受弯构件是否发生超筋的依据。相对界限受压区高度 ξ_b 的数值可根据《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010) (2024 版)中规定取值[11]。因此在设计钢筋混凝土构件时，当混凝土受弯构件中等效矩形应力图形的受压区高度 x 和相对受压区高度 x_b 以及实际配筋率 ρ 满足以下条件时，可以判断所设计的钢筋混凝土受弯构件为适筋梁，即

$$\begin{cases} x \leq x_b = \xi_b h_0 \\ \xi \leq \xi_b \\ \rho \leq \rho_{\max} = \frac{A_s}{b h_0} = \xi_b \frac{\alpha_1 f_c}{f_y} \end{cases} \quad (10)$$

式中各符号含义同前。

除了单筋矩形截面梁以外，工程中还可采用双筋矩形截面梁。所谓双筋截面梁就是在单筋截面梁的受压区也配置合理的受压钢筋的梁。双筋截面梁受弯矩 M 和压力 F 共同作用的承载模型见图 4 所示。

图 4(a)为钢筋混凝土梁承受弯矩 M 和压力 F 作用的模型，图 4(b)为混凝土梁的正截面及其几何参数，图 4(b)中的 a'_s 为纵向受压钢筋的合力作用点至构件截面受压边缘的距离，单位为 mm，且 $h'_0 = h - a'_s$ 。而 A'_s 为全部受压钢筋的横截面面积，单位为 mm^2 ，其余参数同前。当 $a_s = a'_s$ 、 $h_0 = h'_0$ 且 $A_s = A'_s$ 时就称为对称配筋，否则为非对称配筋。在图 4 中分别示出了沿混凝土构件纵向上配置的受拉和受压的普通钢筋，而垂直于纵向受力钢筋所配置的箍筋则是用于维持纵向受力钢筋的位置、防止纵向受力钢筋发生压曲、

约束混凝土发生横向变形并间接地提升混凝土抗压性能。在讲解以上内容的基础上可讲解钢筋混凝土轴心受拉和受压构件的正截面承载力计算和配筋设计方法。

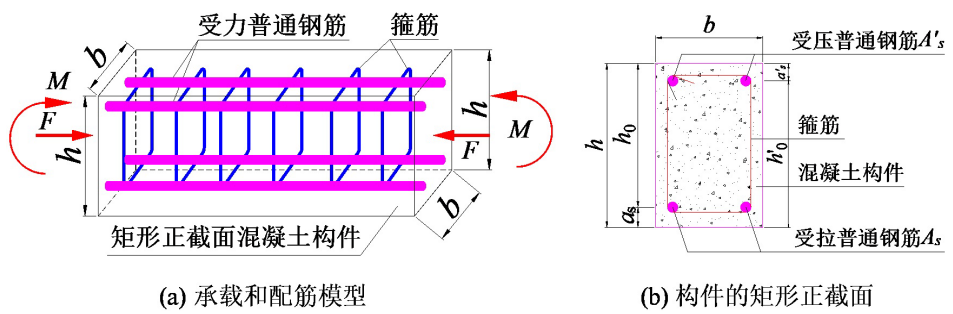


Figure 4. Doubly reinforced rectangular beam and its load bearing model
图 4. 双筋矩形截面梁及其承载模型

4. 钢筋混凝土轴心受拉构件

当混凝土构件受轴心拉力作用的初期，混凝土和钢筋均处于弹性阶段，两者的弹性变形相互协调，但随着轴心拉力的增大，混凝土内部裂缝逐步扩展而发生塑性变形，并且由于混凝土的抗拉强度较低，在不断增加的轴心拉力作用下混凝土发生开裂，且开裂面垂直于拉力作用的方向，此时开裂部位的混凝土便会失去承载能力，拉力则完全由受拉钢筋承担，因此混凝土轴心受拉构件的正截面承载力由全部的受拉钢筋承担，当钢筋受拉达到其抗拉屈服强度时，混凝土构件发生受拉破坏，由此混凝土构件正截面拉力的设计值 N_u 应不超过构件中配置的全部受拉钢筋的抗拉屈服强度 f_y 和全部受拉钢筋横截面面积 A_s 的乘积，其表达式为

$$N_u \leq A_s f_y \quad (11)$$

式中各符号含义同前。

当计算得到受拉钢筋的横截面面积 A_s 后，便可以选配受拉钢筋，并确定箍筋。结合工程设计和实践经验，箍筋的直径宜为 4~6 mm，其间距不大于 200 mm。对于屋架中腹杆的箍筋间距不宜大于 150 mm。

在课堂讲解时，为便于学生理解，可结合图 5 所示的矩形正截面的屋架下弦为例，讲解计算其正截面承载力的方法和配筋的步骤。设某屋架下弦的正截面为矩形，尺寸见图 5 所示，图 5 中几何尺寸单位均以 mm 计。

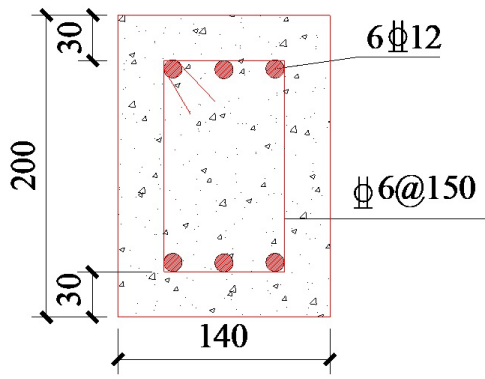


Figure 5. Normal cross-section of lower chord and its reinforcement in a roof truss
图 5. 屋架下弦的正截面及其配筋

设该屋架下弦所承受的永久荷载标准值产生的拉力 $N_{Gk} = 130 \text{ kN}$ ，可变荷载的标准值产生的轴向拉力为 $N_{Qk} = 47.66 \text{ kN}$ ，屋架结构的重要性系数为 $\gamma_0 = 1.0$ ，下弦的混凝土强度等级为 C35，纵向受力钢筋为 HRB400 级热轧钢，则需要按照承载力极限状态计算和设计下弦的受力钢筋，具体的计算步骤如下：

(1) 根据《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010) (2024 版) 可得[11]，C35 混凝土的轴心抗压强度设计值为 $f_c = 16.7 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ，其轴心抗拉强度设计值为 $f_t = 1.57 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。HRB400 级热轧钢筋的抗拉强度设计值为 $f_y = 360 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。并根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) 可得，永久荷载的分项系数 $\gamma_G = 1.2$ ，而可变荷载分项系数 $\gamma_Q = 1.5$ 。

(2) 按照混凝土构件承载力极限状态基本组合中永久荷载控制的屋架下弦所承受的轴向拉力设计值 N_u ，其表达式为

$$N_u = \gamma_0 (\gamma_G N_{Gk} + \gamma_Q N_{Qk}) \quad (12)$$

将各个参数代入式(12)得到下弦拉力的设计值为 $N_u = 227.49 \text{ kN}$ 。

(3) 将计算得到的拉力设计值 N_u 代入式(11)得到钢筋混凝土下弦中全部受拉钢筋的横截面积 A_s 为

$$A_s \geq \frac{N}{f_y} = \frac{227490}{360} = 631.91 (\text{mm}^2) \quad (13)$$

根据计算得到的 A_s 选取 6 根 $\Phi 12$ HRB400 级钢筋，则实际受力钢筋的横截面积 $A_s = 678 \text{ mm}^2$ 。

(4) 验算下弦中的实际配筋率 ρ 是否满足最小配筋率 $\rho_{\min} < \rho < \rho_{\max}$ 的要求，即判断是否为少筋和超筋。

下弦的实际配筋率 ρ 为

$$\rho = \frac{A_s}{bh} = \frac{678}{140 \times 200} = 2.42\% \quad (14)$$

下弦中的最大配筋率 $\rho_{\max}$ 为

$$\rho_{\max} = \frac{A_s}{bh_0} = \frac{678}{140 \times 170} = 2.85\% \quad (15)$$

(5) 因下弦中的实际配筋率 $\rho = 2.42\%$ 满足 $\rho_{\min} < \rho < \rho_{\max}$ 的要求，且构件中全部受拉钢筋的配筋率未超过 5%。故下弦中的受拉钢筋为非少筋也为非超筋。下弦中实际配置 6 根 $\Phi 12$ HRB400 级钢筋，箍筋选取 $\Phi 6$ HRB400 级钢筋，间距为 150 mm，主筋的混凝土保护层厚度为 30 mm。由此设计的下弦正截面的配筋图见图 5 所示，至此完成混凝土轴心受拉构件正截面承载力计算和配筋设计。

5. 钢筋混凝土轴心受压构件

钢筋混凝土轴心受压构件主要用于建筑结构中的支撑柱。针对钢筋混凝土轴心受压构件的内容可安排两个方面进行讲解，即普通箍筋柱和螺旋箍筋柱或称焊接环筋柱。

5.1. 普通箍筋柱

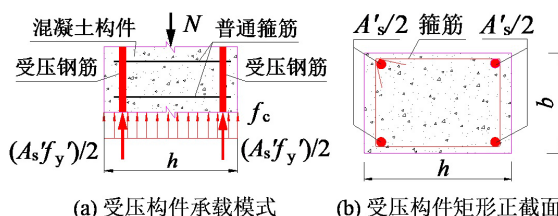


Figure 6. Bearing mode of column with common stirrups under axial compression
图 6. 轴心受压普通箍筋柱承载模式

为便于学生理解,建立如图6所示的轴心受压混凝土构件的承载模型,其箍筋采用普通箍筋。

对于轴心受压普通箍筋柱而言,其受轴向压力作用时的正截面承载力受混凝土立柱长细比的影响。混凝土普通箍筋柱的长细比是指混凝土构件的计算长度 l_0 和其截面的回转半径 i 的比值。回转半径 i 为

$$i = \sqrt{\frac{I}{A_c}} \quad (16)$$

式中 I 为混凝土构件的实际长度,mm; A_c 为混凝土构件的横截面面积,mm²。

矩形截面的轴心受压柱的长细比为 l_0/b , b 为矩形截面短边的长度,单位以mm计,而圆形截面的轴心受压立柱的长细比为 l_0/d , d 为圆形截面的直径,单位以mm计。

基于普通箍筋柱的长细比 l_0/b ,并根据长柱的承载能力 N_u^l 和短柱的承载能力 N_u^s ,我国国家标准中给出了立柱的稳定系数 φ ,即

$$\varphi = \frac{N_u^l}{N_u^s} \quad (17)$$

通过对混凝土长柱承载力 N_u^l 和短柱承载力 N_u^s 的测试并结合混凝土构件的长细比 l_0/i ,当混凝土构件长细比 $l_0/I \leq 28$ 时为短柱。即矩形截面混凝土受压柱的长细比 $l_0/b \leq 8$ 时,立柱的稳定系数 $\varphi = 1$,此时的混凝土柱为短柱, b 为矩形截面短边的长度,单位以mm计。当混凝土柱的长度增大时其稳定系数 φ 会降低。矩形截面受压构件的稳定系数 φ 与长细比 l_0/b 之间可按式(18)来计算

$$\varphi = \left[1 + 0.002 \left(\frac{l_0}{b} - 8 \right)^2 \right]^{-1} \quad (18)$$

混凝土轴心受压构件稳定系数 φ 可根据其长细比并查阅《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010)来确定。根据混凝土轴心受压构件的稳定系数 φ 并考虑其可靠度的调整系数0.9,即可得到其正截面的承载力。由于在普通箍筋柱中配置有受压钢筋,因此普通箍筋柱的正截面受压承载力取决于混凝土本身的抗压强度和受压钢筋的抗压强度。因此配置有普通箍筋的轴心受压混凝土构件的正截面承载力 N_u 的计算表达式为

$$N_u = 0.9\varphi(f_c A + f_y' A_s') \quad (19)$$

式中 A 为轴心受压混凝土构件的正截面面积,mm²; f_y' 为受压钢筋的抗压强度设计值,N·mm⁻²; A_s' 为全部受压钢筋的正截面面积,mm²。

在利用式(19)计算受压构件正截面承载力 N_u 时,当构件的纵向配筋率大于3%时,应采用 $(A - A_s')$ 来代替 A 。根据构件两端固定状况分别按以下方法来确定混凝土构件的计算长度 l_0 。即:(1)当混凝土受压构件的两端由铰支座支撑时取 $l_0 = l$ 。(2)当构件的两端固定时取 $l_0 = 0.5l$ 。(3)当构件的一段固定,而另一端采用铰支座时,取 $l_0 = 0.7l$ 。(4)当构件的一段固定,而另一端自由时取 $l_0 = 2l$ 。

为便于学生理解,可举一工程案例,以便说明计算立柱承载力和配筋的具体步骤。

[案例1]某地铁地下车站采用明挖法施工,现浇框架地下二层的立柱,立柱横截面尺寸 $h \times b$ 为500mm×500mm。经计算立柱的轴心压力设计值为 $N_u = 1205$ kN,立柱的高度为 $H = 6.2$ m。立柱的混凝土强度等级为C35,受力钢筋采用HRB400级普通箍筋。地铁车站设计的耐用年限为100年,车站的环境类别为一类。根据以上参数,计算普通箍筋柱的配筋。其分析步骤如下:

(1) 根据《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010)(2024版)可得C35混凝土轴心抗压强度设计值 $f_c = 16.7$ N·mm⁻², C35混凝土轴心抗拉强度设计值 $f_t = 1.57$ N·mm⁻²。HRB400级钢筋的抗压强度设计值 f_y'

$= 360 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。计算轴心受压柱的长细比, 取 $l_0 = H = 6.2 \text{ m}$, 则 $l_0/b = 6.2/0.5 = 12.4$, 则根据《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010)得立柱的稳定系数 $\varphi = 0.94$ [11]。

(2) 利用式(19)计算立柱中全部受压钢筋的横截面面积 A'_s , 即

$$A'_s = \frac{1}{f_y'} \left(\frac{N_u}{0.9\varphi} - f_c A \right) = \frac{1}{360} \left(\frac{1205000}{0.9 \times 1} - 16.7 \times 500 \times 500 \right) \text{ mm}^2 = -7640.7 \text{ mm}^2 < 0 \quad (20)$$

因全部受压钢筋的横截面面积 $A'_s < 0$, 故混凝土普通箍筋柱可不配受压钢筋, 但需要按照构造进行配筋。

(3) 根据式(3)所示的轴心受压构件的最小配筋率 $\rho_{\min}$ 来计算所需要的钢筋最小横截面面积 $A'_{s,\min}$, 即有

$$A'_{s,\min} = 0.4 \times 500 \times 500 \text{ mm}^2 \times 0.01 = 1000 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

$$A'_{s,\min} = 90 \times \frac{1.57}{360} \times 500 \times 500 \text{ mm}^2 \times 0.01 = 981.2 \text{ mm}^2 \quad (22)$$

将计算得到的两个数值相比, 选取较大值面积 1000 mm^2 作为立柱中全部受压钢筋的横截面面积。

(4) 选取受压钢筋的横截面面积为 $A'_{s,\min} = 1000 \text{ mm}^2$, 选配 4 根 $\Phi 18 \text{ HRB400}$ 级钢筋, 实际钢筋的截面积为 1017 mm^2 , 实际配筋率 ρ 为

$$\rho = \frac{A'_s}{bh} = \frac{1017}{500 \times 500} = 0.41\% \quad (23)$$

则得立柱的实际配筋率 $\rho = 0.41\%$, 满足国家标准中对混凝土受压构件纵筋配筋率不小于 0.40% 且不大于 5% 的要求。从上述案例的计算分析, 如果按照式(19)计算得到受压钢筋的截面积大于 0 , 则应当按照该计算值来配筋, 并根据实际配筋率验算其是否满足最小配筋率的要求。

5.2. 螺旋箍筋柱

在轴心受压构件中采用螺旋箍筋或焊接环筋时, 箍筋可以约束受压混凝土产生的横向变形, 从而可以间接地提高混凝土纵向的抗压承载能力。因此, 也将螺旋箍筋称为“间接钢筋”。螺旋箍筋外部的混凝土在箍筋受拉破坏前已发生破坏, 因此在计算混凝土的抗压承载力时此部分的混凝土不再予以考虑。为便于讲解, 建立如图 7 所示的轴心受压螺旋箍筋的混凝土构件承载模型。

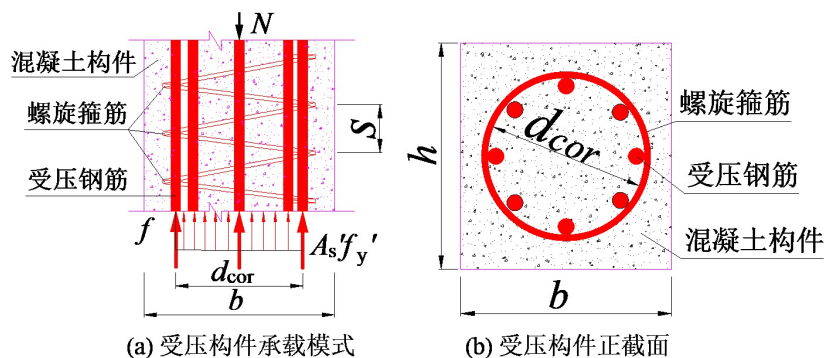


Figure 7. Bearing mode of axially compressed column with spiral stirrups
图 7. 轴心受压螺旋箍筋柱的承载模式

在图 7 中混凝土构件受轴心压力 N 逐步增大的过程中, 混凝土构件沿轴向被压缩, 而沿其横截面的

方向上发生扩张变形。由于构件中配置有螺旋式的箍筋,混凝土的横向扩张变形会受到螺旋箍筋的约束,致使螺旋箍筋内部产生拉力。当螺旋箍筋的拉力达到其抗拉强度时箍筋便会失去约束混凝土的作用,混凝土构件在轴心压力的作用下发生破坏,失去承载能力。因此,混凝土构件中螺旋箍筋所包围的核心混凝土的承载能力与箍筋的约束作用有关,并且受箍筋的约束而处于三维应力状态。这种配置有螺旋式箍筋的混凝土构件的轴心抗压强度受其单轴抗压强度和螺旋式箍筋约束力的影响。

为便于学生理解,拓宽学生的思维和培养创新意识,此处可引入岩石力学中岩石圆柱体试件在等围压下轴向抗压强度的计算方法。根据岩石力学中 Mohr-Coulumb 强度理论,岩石圆柱体试件受到不同围压 σ_3 约束时的轴心抗压强度 σ_1 与其无侧向约束的单轴抗压强度 σ_c 之间的关系式为[13]

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = \beta \sigma_3 + \sigma_c \quad (24)$$

式中 c 为岩石试件的粘聚力, kPa; φ 为岩石试件的内摩擦角, °; β 为围压对岩石强度的影响系数。

式(24)揭示了岩石在等围压 σ_3 的约束下,岩石试件的轴向抗压强度 σ_1 与岩石试件的单轴抗压强度 σ_c 和围压 σ_3 之间的内在规律。实际上,此规律也同时适用于混凝土立方体试件在等围压下的抗压强度[7]-[10]。对于配置有螺旋箍筋的混凝土轴心受压构件而言,其承载模式与等围压下岩石试件的承载模式相同,因此可以将式(24)引入到轴心受压螺旋箍筋柱的轴向承载能力计算中,即有

$$f = \beta \sigma_r + f_c \quad (25)$$

式中 f 为螺旋箍筋柱的轴心抗压强度设计值, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; β 为箍筋对混凝土约束的影响系数; σ_r 为箍筋对其所包裹的核心混凝土的约束压力, kPa; f_c 为混凝土单轴轴心抗压强度设计值, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

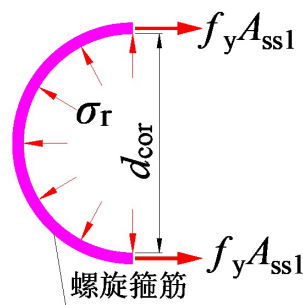


Figure 8. Bearing model of spiral stirrup
图 8. 螺旋箍筋的承载模型

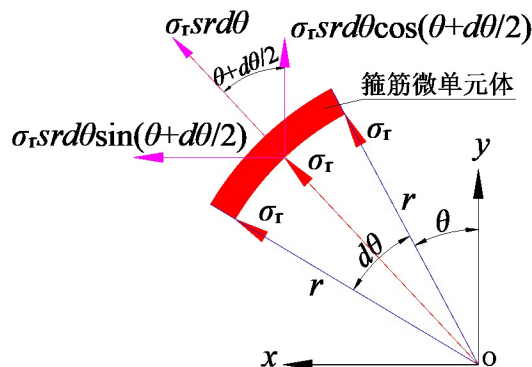


Figure 9. Bearing model of micro element of a stirrup
图 9. 箍筋微单元体的承载模型

根据螺旋箍筋柱中螺旋箍筋的配置方式, 设螺旋箍筋沿混凝土柱轴线方向上的间距为 s , 单根箍筋的横截面面积为 A_{ss1} , 其抗拉强度设计值为 f_y , 混凝土柱受轴心压力 N 作用时箍筋受到其所包围的核心混凝土施加的均布压力为 σ_r 。选取一根箍筋的一半建立其承载的力学模型, 见图 8 所示。在图 8 中由螺旋箍筋所包围的核心混凝土的直径为 d_{cor} 。为建立均布压应力 σ_r 与箍筋拉力 $f_y A_{ss1}$ 之间的函数关系, 从图 8 所示的箍筋中选取一个微单元体, 分析微单元体的承载模型, 其承载模型见图 9 所示。

从图 9 所示的箍筋微单元体承载模型分析, 其受到核心混凝土均布压应力 σ_r 的压力为 $\sigma_r r s d\theta$, 该压力沿 x 轴方向上的分量与单根箍筋沿 x 轴方向受到的拉力 $A_{ss1} f_y$ 相平衡。由此得到静力平衡的关系式

$$\int_0^\pi \sigma_r r s \sin\left(\theta + \frac{d\theta}{2}\right) d\theta = 2 f_y A_{ss1} \quad (26)$$

由于 $d\theta$ 为微分量, 因此在式(26)中将 $(\theta + d\theta/2)$ 近似取为 θ , 然后再将式(26)进行定积分并化简后得到

$$\sigma_r = \frac{2 f_y A_{ss1}}{2 r s} \quad (27)$$

在式(27)中, 将箍筋所包围的核心混凝土的半径 r 替换为其直径 d_{cor} , 由此得到

$$\sigma_r = \frac{2 f_y A_{ss1}}{d_{cor} s} \quad (28)$$

为了在式(28)中引入间接钢筋的换算面积 A_{ss0} , 在式(28)的分子和分母上同时乘以 $\pi d_{cor}/4$, 即有

$$\sigma_r = \frac{2 f_y A_{ss1}}{s d_{cor}} = \frac{2 f_y A_{ss1}}{s d_{cor}} \times \frac{\frac{1}{4} \pi d_{cor}}{\frac{1}{4} \pi d_{cor}} = \frac{\frac{1}{2} f_y A_{ss1} \pi d_{cor}}{s \frac{1}{4} \pi d_{cor}^2} = \frac{f_y A_{ss1} \pi d_{cor}}{2 s A_{cor}} = \frac{f_y A_{ss0}}{2 A_{cor}} \quad (29)$$

式(29)中的 A_{cor} 为螺旋箍筋所包围的核心混凝土的横截面面积, mm^2 , 其表达式为

$$A_{cor} = \frac{\pi d_{cor}^2}{4} \quad (30)$$

而式(29)中的 A_{ss0} 为间接钢筋的换算截面面积, mm^2 , 其表达式为

$$A_{ss0} = \frac{\pi d_{cor} A_{ss1}}{s} \quad (31)$$

其余符号含义同前。

根据螺旋箍筋柱在轴向压力 N_u 作用下的静力极限平衡, 同时利用式(25)可得轴向压力 N_u 的计算式为

$$N_u = f A_{cor} + f'_y A'_s = (\beta \sigma_r + f_c) A_{cor} + f'_y A'_s \quad (32)$$

令 $2\alpha = \beta/2$, 并将其代入式(32)化简, 同时考虑可靠度的调整系数 0.9, 得到轴心受压螺旋箍筋柱正截面承载力 N_u 的计算式为

$$N_u = 0.9 (f_c A_{cor} + 2\alpha f_y A_{ss0} + f'_y A'_s) \quad (33)$$

式中 α 为螺旋箍筋对混凝土约束的折减系数, 当混凝土强度等级小于等于 C50 时取 $\alpha = 1.0$, 当混凝土强度等级大于或等于 C80 时取 $\alpha = 0.85$, 当混凝土强度等级大于 C50 而小于 C80 时采用线性内插法确定 α 值[11] [12]。

在设计时为使螺旋箍筋或焊接环筋外面的混凝土保护层能够抵抗箍筋的挤压而不发生脱落, 按照式

(33)计算得到的轴心受压混凝土构件的正截面承载力应不大于按照式(19)计算得到的普通箍筋柱正截面承载力的 1.5 倍。

此外,在设计轴心受压构件中存在以下状况时可不计入间接钢筋即螺旋箍筋或焊接环筋的影响而直接用式(19)来计算混凝土构件的正截面承载力:(1)当构件的长细比 $l_0/d > 12$; (2)按照式(33)计算得到的受压承载力小于按照式(19)计算得到的承载力;(3)当间接钢筋的换算面积 A_{ss0} 小于纵向钢筋全部面积的 25%。此外,根据设计经验和国家标准的要求,在混凝土轴心受压构件中配置间接钢筋如螺旋箍筋或焊接环筋时,间接钢筋的间距不宜大于 80 mm 和 $d_{cor}/5$,且不小于 40 mm。

为便于学生理解,同样需要结合以下案例对螺旋箍筋柱的正截面承载力计算和钢筋配置的步骤进行讲解。某地铁车站框架结构中的地下二层采用现浇钢筋混凝土立柱。根据车站在承载力极限状态的基本组合下得到的立柱轴心压力设计值为 $N_u = 5300$ kN。立柱的高度 $H = 5.1$ m。将立柱的混凝土强度等级设计为 C40,立柱采用圆形截面,其直径 $d = 500$ mm。立柱中纵筋为 HRB400 级钢筋,箍筋为 HRB400 级钢筋,据此设计和配置立柱中的受压纵筋和箍筋。在讲解时可分别按照普通箍筋柱和螺旋箍筋柱分别计算,先按照普通箍筋柱设计其受压钢筋。具体步骤如下:

(1) 根据《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010),确定 C40 混凝土轴心抗压强度设计值 $f_c = 19.1\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$,其轴心抗拉强度设计值 $f_t = 1.71\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$,HRB400 级钢筋的抗拉强度设计值为 $f_y = 360\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$,其抗压强度设计值为 $f'_y = 360\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。取立柱的计算长度 $l_0 = H = 5.1$ m,由此计算立柱的长细比 $l_0/d = 5100/500 = 10.2$,根据计算得到的长细比 l_0/d 结合《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010)得到立柱的稳定系数 $\varphi = 0.973$ [11][12]。

(2) 将圆形截面混凝土立柱承受的轴力设计值 $N_u = 5300$ kN 代入式(19)得到全部受压钢筋的横截面面积 A'_s , 即有

$$A'_s = \frac{1}{f'_y} \left(\frac{N_u}{0.9\varphi} - f_c A \right) = \frac{1}{360} \left(\frac{5300 \times 1000}{0.9 \times 0.973} - \frac{19.1 \times 3.14 \times 500 \times 500}{4} \right) \text{mm}^2 = 6394.51 \text{mm}^2 \quad (34)$$

由此得混凝土轴心受压立柱中全部受压钢筋的横截面面积为 $A'_s = 6394.51 \text{mm}^2$ 。

(3) 根据计算得到的纵向钢筋横截面面积 A'_s 计算所需要的配筋率 ρ , 即

$$\rho = \frac{A'_s}{A} = \frac{6394.51}{196349.5357} = 0.0326 \quad (35)$$

则配筋率 $\rho = 3.26\%$ 满足《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010)中对混凝土受压构件采用 HRB400 级钢筋时,混凝土中钢筋配筋率不小于 0.4% 且不大于 5% 的要求。

(4) 以计算得到的受压钢筋横截面面积 $A'_s = 6394.5 \text{mm}^2$ 可选取 18 根 $\Phi 22$ 的 HRB400 级钢筋,钢筋截面积为 6842mm^2 , 以此得到的实际配筋率 ρ' 为

$$\rho' = \frac{A'_s}{A} = \frac{6842}{196349.5357} = 0.0348 \quad (36)$$

则实际配筋率为 3.48%, 其仍然满足配筋率不小于 0.55% 且未超过 5% 的要求。

以上为普通箍筋的配筋设计方案,再按照螺旋箍筋柱即按间接钢筋的计算方法配置立柱中纵向受压钢筋和箍筋。从螺旋箍筋柱的正截面承载力计算表达式(33)可知,该表达式中包含了全部受压钢筋的横截面面积 A'_s 、螺旋箍筋的换算截面面积 A_{ss0} 以及螺旋箍筋沿立柱纵向的间距 s 三个未知数,无法直接利用式(33)进行求解。可按以下步骤进行求解:

(1) 根据《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010)中对混凝土受压构件采用 HRB400 级受压钢筋时其配筋率不小于 0.55% 且不大于 5% 的要求,可先假设轴心受压柱中全部纵向受压钢筋的配筋率 $\rho' = 2.5\%$,

由此计算所需要配置的全部受压钢筋的横截面面积 A'_s

$$A'_s = \rho' A = 0.025 \times 196349.5357 \text{ mm}^2 = 4908.73 \text{ mm}^2 \quad (37)$$

根据受压钢筋横截面面积 A'_s 选取 8 根 $\Phi 28$ HRB400 级钢筋, 则受压钢筋的横截面面积 $A'_s = 4926 \text{ mm}^2$ 。

(2) 选取受压钢筋的混凝土保护层厚度 $a_s = 35 \text{ mm}$, 则立柱中螺旋箍筋所包围的核心混凝土的直径 d_{cor} 为

$$d_{\text{cor}} = d - a_s = (500 - 35 \times 2) \text{ mm} = 430 \text{ mm} \quad (38)$$

由此计算得到螺旋箍筋所包围的核心混凝土的横截面面积 A_{cor} 为

$$A_{\text{cor}} = \frac{1}{4} \times \pi \times d_{\text{cor}}^2 = \frac{1}{4} \times 3.14 \times 430^2 \text{ mm}^2 = 145220.12 \text{ mm}^2 \quad (39)$$

(3) 利用式(33)计算螺旋箍筋的换算截面面积 A_{ss0} , 因立柱混凝土强度等级为 C40, 则间接钢筋对立柱核心混凝土约束的折减系数 $\alpha = 1$, 因此由式(33)得

$$A_{\text{ss0}} = \frac{\frac{N_u}{0.9} - f_c A_{\text{cor}} - f'_y A'_s}{2\alpha f_y} = \frac{\frac{5300 \times 1000}{0.9} - 19.1 \times 145220.12 - 360 \times 4926}{2 \times 1 \times 360} \text{ mm}^2 = 1863.65 \text{ mm}^2 \quad (40)$$

由于螺旋箍筋的换算截面面积 $A_{\text{ss0}} = 1863.65 \text{ mm}^2$, 而立柱中全部受压钢筋的横截面面积 $A'_s = 4926 \text{ mm}^2$ 。两者相比有 $A_{\text{ss0}} = 1863.65 \text{ mm}^2 > 25\% \times A'_s = 1231.5 \text{ mm}^2$, 因此箍筋的配置满足箍筋约束核心混凝土的构造要求。

(4) 计算螺旋箍筋的间距 s 。选取螺旋箍筋直径 $d_1 = 10 \text{ mm}$, 计算得到单根箍筋的横截面面积 A_{ss1} 有

$$A_{\text{ss1}} = \frac{1}{4} \times \pi \times d_1^2 = \frac{1}{4} \times 3.14 \times 10^2 \text{ mm}^2 = 78.53 \text{ mm}^2 \quad (41)$$

利用式(31)计算螺旋箍筋的间距 s

$$s = \frac{\pi d_{\text{cor}} A_{\text{ss1}}}{A_{\text{ss0}}} = \frac{3.14 \times 430 \times 78.53}{1863.65} \text{ mm} = 56.93 \text{ mm} \quad (42)$$

取 $s = 50 \text{ mm}$, 则箍筋的间距 s 满足不小于 40 mm 且不大于 80 mm 和 $0.2d_{\text{cor}} = 86 \text{ mm}$ 的构造要求。

(5) 根据所配置的螺旋箍筋 $d_1 = 10 \text{ mm}$ 和间距 $s = 50 \text{ mm}$ 重新计算螺旋箍筋的换算截面面积 A_{ss0} , 即

$$A_{\text{ss0}} = \frac{\pi d_{\text{cor}} A_{\text{ss1}}}{s} = \frac{3.14 \times 430 \times 78.53}{50} \text{ mm}^2 = 2121.96 \text{ mm}^2 \quad (43)$$

(6) 根据式(33)重新计算螺旋箍筋柱的正截面承载力设计值 N_u 为

$$\begin{aligned} N_u &= 0.9(f_c A_{\text{cor}} + 2\alpha f_y A_{\text{ss0}} + f'_y A'_s) \\ &= 0.9 \times (19.1 \times 145220.12 + 2 \times 1 \times 360 \times 2121.96 + 360 \times 4926) \text{ kN} \\ &= 4096.18 \text{ kN} \end{aligned} \quad (44)$$

而按照式(19)计算得到普通箍筋柱正截面承载力设计值为 N_u 为

$$N_u = 0.9\varphi(f_c A + f'_y A'_s) = 0.9 \times 0.973 \times (19.1 \times 196349.53 + 360 \times 4926) \text{ kN} = 4837.05 \text{ kN} \quad (45)$$

对比式(44)和式(45)的计算结果表明, 采用螺旋箍筋柱时立柱正截面承载力设计值 4096 kN 未超过以按照普通箍筋柱时立柱正截面承载力设计值的 1.5 倍即 7255.57 kN , 因此选用螺旋箍筋柱的配筋满足构造要求。

(7) 按照普通箍筋柱和螺旋箍筋柱完成的地铁地下车站立柱配筋图见图 10 所示, 图 10 中的几何尺寸单位以 mm 计。

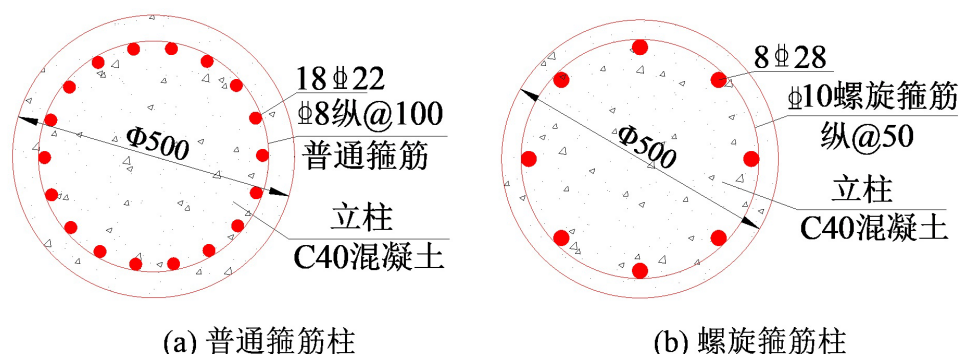


Figure 10. Reinforcement detailing of concrete column under axial compression
图 10. 轴心受压混凝土立柱配筋图

图 10(a)为普通箍筋柱的配筋, 图 10(b)为螺旋箍筋柱的配筋。两者相比, 虽然两者均满足正截面承载力的要求, 但从纵向受力钢筋的数量分析, 采用螺旋箍筋柱时受压钢筋直径较大, 但其数量可减少, 便于混凝土的浇筑和振捣, 节约造价, 可优先选用。

6. 讨论

以上讲解了混凝土轴心受力构件正截面承载力计算和配筋设计的方法。就教学内容分析, 其包括简支梁受集中荷载作用下弯矩和剪力的分布特点、破坏模式、正截面等效矩形应力图形的混凝土受压区高度、相对受压区高度以及相对界限受压区高度和配筋率的概念。通过对简支梁受对称集中荷载作用时纯弯段的变形、正截面应力分布和破坏模式的分析和讲解, 使学生能够理解在受集中荷载作用的简支梁内配置受拉钢筋的作用, 由此掌握混凝土简支梁纯弯段单筋正截面等效矩形应力图形的混凝土受压区高度、相对受压区高度以及相对界限受压区高度的含义, 并通过基于配筋率大小的适筋梁、少筋梁和超筋梁破坏模式的讲解, 使学生能够理解和掌握混凝土受弯构件中最小配筋率和最大配筋率计算方法, 可为进一步学习混凝土轴心受力构件中正截面承载力的计算和配筋的设计奠定基础。

在讲授混凝土轴心受力构件正截面承载力计算方法的教学内容中, 首先向学生讲授钢筋混凝土轴心受力构件的含义, 即混凝土构件受到通过其正截面形心的拉力或压力且在拉力和压力作用下构件处于极限应力平衡状态, 这是建立受拉和受压承载力的基本原理。对于混凝土轴心受拉构件, 其正截面承载力计算的工况就是构件在拉力作用下某一正截面混凝土发生全部开裂而不承担拉力, 所有拉力均由配置的纵向受拉钢筋来承担, 因此混凝土构件的正截面承载力就是用全部受拉钢筋的抗拉屈服强度 f_y 和全部受拉钢筋的横截面面积 A_s 的乘积来确定, 如此讲解时概念明确, 便于学生理解和记忆。

对于钢筋混凝土轴心受压构件而言, 着重讲解根据混凝土立柱长度和其横截面尺寸相比的长细比来划分长柱和短柱, 然后引入影响长柱承载力的稳定系数 φ 和可靠度调整系数 0.9, 并分别以普通箍筋柱和螺旋箍筋柱来讲解正截面承载力的计算方法。对于普通箍筋柱, 其正截面承载力仍然以受压立柱在通过其正截面形心的压力作用下, 全部受压混凝土和受压钢筋共同发生破坏时的极限状态来确定。在讲解螺旋箍筋柱时, 需要重点明确螺旋箍筋柱中螺旋式箍筋或焊接环筋的设置方式及其约束核心混凝土的作用。为便于学生理解和掌握螺旋式箍筋对立柱中核心混凝土的约束作用, 并拓宽和引导学生的树立创新思维, 可结合岩石力学课程中基于 Coulumb-Mohr 强度理论来分析圆柱体试件在等围压三轴压缩作用下其抗压

强度和围压以及岩石单轴抗压强度之间的函数关系，以此来说明螺旋箍筋柱中箍筋对其包围的核心混凝土所起的“间接钢筋”的作用。利用岩石三轴抗压强度的案例来讲解螺旋箍筋柱正截面承载力，并以图 11 所示的岩石试件受等围压 $\sigma_2 = \sigma_3$ 加载试验模型进行说明[13]，不仅使案例的讲解具有直观和生动的效果，而且更易于学生借助岩石等围压的抗压强度来理解混凝土轴心受压螺旋箍筋柱正截面承载力的计算方法。

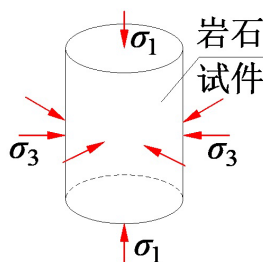


Figure 11. Loading model for triaxial compressive strength of rock specimen
图 11. 岩石试件三轴抗压强度加载模型

此外，为讲解螺旋箍筋柱箍筋拉力的确定方法，可结合螺旋箍筋柱中螺旋式箍筋约束由其所包围的核心混凝土的承载模型，从任意螺旋箍筋中选取一个微单元体，采用静力极限平衡的条件来分析该微单元体上箍筋拉力与箍筋承担核心混凝土均布压力之间的函数关系式，从而建立式(26)和式(27)所示的螺旋箍筋拉力 A_{ss1} 和核心混凝土对螺旋箍筋压力 σ_r 之间的函数关系。

另外，在讲解式(28)时应着重强调采用了逆向思维的方法，即采用了对一分数的分子和分母同时乘以或除以一个不为 0 的数时该分数的值保持不变的数学运算规则，其目的就是在建立该表达式的同时还通过启发式的推演方法来建立计算螺旋箍筋所包围的核心混凝土横截面面积的表达式(30)以及间接钢筋的换算截面面积的表达式(31)，如此推演和分析的方法有助于引导学生建立逆向思维和创新意识，并拓宽其知识面。

在讲授钢筋混凝土轴心受力构件正截面承载力计算方法和配筋设计的同时，结合案例的讲解，可以给出计算的具体步骤，以便学生能按照教师讲解的思维和步骤在课后进行复习和实践，有利于学生理解和掌握课程教学的知识点和内容与方法。在讲解混凝土轴心受力构件正截面承载力计算方法的同时，还需要介绍国家标准《混凝土结构设计标准》(GB/T50010-2010) (2024 版)和行业颁发的规范中针对混凝土构件设计所要求的相关规定，进而引导学生学会利用国家标准和行业规范开展工程设计，以培养和训练工科学生开展工程设计与计算的能力，逐步建立工程师所具有的职业技能和素养，同时也为学生今后的就业和学术深造打下良好的专业基础。

为提高课程的教学质量，除了教师按照课前所设计的教学内容组织和实施教学活动而外，在课堂讲授期间，教师还需要引导学生积极参与教学活动。具体的做法包括以下几个方面：(1) 在教学期间，教师需要事先向学生说明，结合课堂讲授的内容，教师要随机抽检 2~3 名学生，让被抽检的学生称述教师所讲授的内容。(2) 结合教师讲解的内容，教师事先要准备好问题，在课堂教学结束前 10~15 min 发放给学生，要求学生以书面方式完成课堂作业，作为学生的平时成绩，并将其纳入学生的总评成绩中。(3) 结合课程教学的内容，教师可通过不定期向学生发放问卷调查，进而了解学生对讲授内容的理解和掌握状况。(4) 为督促学生课后进行复习和巩固课堂所讲授的内容，教师需要向学生布置课程作业，使学生在课后根据教师的课件和教学参考书，并通过网路在线资源，例如百度、DeepSeek、豆包、千问等人工智能体完成与教学内容相关的课程设计。(5) 教师则根据学生完成课堂随堂测验、问卷调查和课程设计的质

通过采用上述的教学设计和组织模式,先后向我校 2023~2026 学年土木工程专业和城市地下工程专业本科生而开设的《地下铁道》课程中予以实践,教学效果良好。从选修本课程的学生人数和考试成绩分析,2023 学年选修的学生人数为 140 人,2024 年选修的人数为 135 人,2025 年选修的人数为 120 人,2026 年选修的人数为 90 人。通过测验和考试分析,4 学年每年能够掌握混凝土轴心受压构件承载力的计算和配筋设计的人数分别占选修总人数的比例为 93.12%、92.4%、95.3%和 96.3%。由此表明教学效果良好,达到预制的教学目标。

7. 结论

钢筋混凝土轴心受力构件正截面承载能力的计算是《地下铁道》课程中涉及地铁和轻轨等车站结构设计和计算的教学重点内容之一,也是开展钢筋混凝土结构设计的基础知识点和难点。目前国内主要的教学参考书中对此部分内容的讲解并不系统,学生在首次学习过程中难以理解和掌握教学的内容和知识点。尤其是学生对螺旋箍筋柱中箍筋拉力与核心混凝土均布压力之间函数关系的分析和理解存在较大的困难。本文结合课程教学内容,对混凝土轴心受力构件正截面承载能力计算方法进行教学设计,遵循学生学习和接受知识从简单到复杂的认知过程,并借鉴问题导向的教学模式即 Problem-Based Learning 提出了便于学生理解和掌握的钢筋混凝土轴心受力构件正截面承载能力计算方法的推演过程,在讲解推演过程的同时,结合工程案例讲解具体的计算步骤和设计内容,并在我校 2023~2026 学年期间针对土木工程专业和城市地下空间工程专业本科生开设的《地下铁道》课程中予以实践,取得了较为显著的效果。通过教学实践,上述教学设计的实施,在课堂教学中能使学生更容易理解和掌握钢筋混凝土轴心受力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,进而可培养和提高学生分析和解决工程问题的能力,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(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. 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.
- [2] 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.
- [3] 周晓军. 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算的教学设计和实践[J]. 创新教育研究, 2025, 13(2): 318-336.
- [4] 周晓军. 钢筋混凝土受扭构件扭曲截面承载力计算的教学设计和实践[J]. 创新教育研究, 2025, 13(5): 644-666.
- [5] 周晓军. 钢筋混凝土偏心受压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): 1427-1451.
- [6] 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.
- [7] 沈浦生, 梁兴文. 混凝土结构设计原理[M]. 第 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 中国建筑科学研究院. GB/T50010-2010 混凝土结构设计标准(2024 版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- [12] 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.
- [13] 周晓军. 基于 Coulomb-Mohr 强度理论的结构面对岩体稳定性影响的教学设计与实践[J]. 创新教育研究, 2024, 12(10): 406-421.