

摘要

钢筋细部设计涉及其形状、几何尺寸及其在钢筋混凝土中的用量等细则。这些细则能够考虑既往设计中被忽视的因素，便于简化设计并提高效率，且能满足正常使用状态与预期作用之外的性能需求，保证结构鲁棒性。近几十年来，钢筋混凝土结构的制造工艺不断更新（如钢筋弯起工艺自动化）、材料性能逐步提升（钢筋和混凝土强度提高）、相关理论日渐深化，然而设计规范中的大部分设计细则未能与之变化相适应。现有设计细则往往基于工程实践经验提出，虽然能够满足工程应用需要，但缺乏可靠理论基础，这也是导致不同国家、不同规范中钢筋细部设计准则差异显著的原因之一。其中一些准则在很多工况下偏于保守，尤其是在评估现有结构时，而另外一些准则可能忽视了一些重要效应的影响。钢筋细部设计准则对钢筋混凝土结构的经济性与安全性影响重大，然而近年来这一领域的研究十分有限。

目前，一些关键细部构造设计亟需开展进一步研究，以便验证其是否满足当前设计实践需求，符合技术变革需要。为此，本文针对三个重要的钢筋细部构造，开展了详尽研究，包括：钢筋弯曲细部构造及其弯曲直径、带末端弯钩抗剪钢筋的锚固以及抗剪钢筋的最小配筋率。本研究旨在利用数字图像相关与光纤传感测量等前沿测试技术，开展相关试验，深入了解结构力学响应。基于试验结果，建立相应的力学模型，提出简化设计公式以及细部设计准则。

钢筋末端弯钩一般通过将钢筋沿芯筒弯曲实现加工制作。规范规定了其最小弯曲直径以确保传力可靠并且避免发生劈裂与剥落等破坏模态。此类破坏模态有制约细部构造承载力的潜在风险。为避免局部混凝土剥落失效，本文针对钢筋弯曲细部构造及其弯曲直径开展了系统试验研究，提出了相应的力学模型与细部设计准则。鉴于既往钢筋弯曲构造需经由多种直径芯筒制造，提出了一套简化标准弯曲流程，通过单一直径芯筒可实现钢筋弯曲，便于实现弯筋制造自动化。

设置末端弯钩是实现钢筋可靠锚固的便捷构造措施，然而该细部构造对周围混凝土的开裂状态较为敏感。靠近结构表面钢筋的混凝土保护层可能发生剥落，导致抗剪钢筋脆性失效。为此，本文研究了末端弯钩锚固构造的力学响应与性能。在此基础上，建立了相应力学模型，提出了充分发挥梁内抗剪钢筋作用的实用构造要求，为修正当前设计细则提供理论依据。

混凝土梁与板中所需的最小抗剪配筋率对于确保新结构的经济性、安全性以及准确评估现有结构至关重要，关于这一问题业界已持续争论多年。本文试验研究结果表明，抗剪钢筋用量与钢筋屈服后响应即钢筋的延性等级显著影响钢筋混凝土的抗剪行为。

针对上述细部设计准则，进一步讨论了本研究成果在行业规范中的应用，着重阐述了与新近规范特别是新一代 Eurocode 2 规范变化的一致性。

关键词：钢筋混凝土结构，细部构造准则，弯曲直径，锚固，剥落，劈裂，粘结，末端弯钩，抗剪钢筋，最小抗剪配筋，光纤测量技术，数字图像相关技术。