

钢－混凝土组合梁时变分析研究进展

杭振园

浙江交通职业技术学院 路桥学院, 浙江 杭州 311112

DOI: 10.61369/SSSD.2026090040

摘 要： 钢－混凝土组合梁在桥梁和建筑结构中应用广泛，混凝土板的收缩和徐变引起的时变效应对结构长期服役性能有显著影响。该文从混凝土收缩徐变基本理论、组合梁时变分析方法、试验研究进展、时变性能影响因素以及再生混凝土组合构件研究现状五个方面，对钢－混凝土组合梁时变分析领域的研究进展进行了系统梳理。回顾了龄期调整有效模量法、逐步计算法和率型模型等方法的发展脉络，总结了从解析解到有限元数值模拟的技术演进路径，归纳了简支梁、连续梁及特殊形式组合梁的长期性能试验成果。在此基础上，指出了非线性徐变理论、界面滑移时变行为和多场耦合分析等方面存在的不足，并对再生混凝土组合构件时变性能等未来研究方向进行了展望。

关 键 词： 钢－混凝土组合梁；时变分析；徐变；收缩；再生混凝土

Research Progress on Time-dependent Analysis of Steel-Concrete Composite Beams

Hang Zhenyuan

School of Road and Bridge Engineering, Zhejiang Institute of Communications, Hangzhou, Zhejiang 311112

Abstract： Steel-concrete composite beams are widely used in bridge and building structures. The time-dependent effects caused by shrinkage and creep of the concrete slab significantly affect the long-term service performance of the structure. This paper systematically reviews the research progress in time-dependent analysis of steel-concrete composite beams from five aspects: fundamental theories of concrete shrinkage and creep, analytical and numerical methods, experimental investigations, influencing factors, and research status of recycled aggregate concrete composite members. The existing research gaps in nonlinear creep theory, time-dependent interface slip behavior, and multi-field coupling analysis are identified, and future research directions are discussed.

Keywords： steel-concrete composite beam; time-dependent analysis; creep; shrinkage; recycled aggregate concrete

引言

钢－混凝土组合梁利用钢与混凝土的力学互补特性，在桥梁和建筑结构中得到广泛应用。长期服役中，混凝土板的收缩和徐变引起截面内力重分布、挠度持续增大以及界面滑移的逐步演化。已有研究表明，约50%的徐变变形发生在加载后三个月内，这一缓慢时变过程深刻影响着组合结构的长期工作性能。大跨径组合梁桥和超高层建筑的不断涌现，使时变效应在结构全寿命周期内的累积日益受到关注。混凝土时变变形不仅导致使用性退化，还可能改变剪力连接件的受力状态，进而波及结构整体安全储备。当前国内外主要设计规范对组合梁长期性能的规定多基于简化假设，对界面滑移时变行为和非线性徐变效应缺乏系统考量。该领域的研究可追溯至20世纪70年代对差异收缩和徐变效应的早期探讨。此后，龄期调整有效模量法(AEMM)的提出将积分型本构方程转化为代数形式，使其成为徐变分析中应用最广的近似方法。近十年间，有限元方法和增量递归算法的引入推动组合梁时变分析从完全剪切假定走向部分相互作用模型，从线性分析拓展至非线性领域。围绕钢－混凝土组合梁的时变性能，以下从混凝土收缩徐变基本理论、分析方法演进、试验研究进展、时变性能影响因素以及再生混凝土组合构件研究现状五个方面展开梳理，并讨论现有研究的不足与可深入的方向。

一、混凝土收缩徐变基本理论

混凝土在持续荷载作用下产生的随时间增长的变形称为徐变，其微观机理涉及毛细孔水分迁移、凝胶体粘性流动和微裂缝

发展等多个物理过程。当应力水平低于0.4~0.5倍轴心抗压强度时，徐变应变与应力近似呈线性关系，称为线性徐变；超过该阈值后，微裂缝加速扩展使徐变速率远超应力增长，进入非线性徐变阶段^[1]。

基金项目：浙江交通职业技术学院高层次人才引进专项项目：钢－混凝土组合梁时变分析模型研究（2025rcxm05）。

作者简介：杭振园（1987—），男，浙江杭州人，博士，副教授，研究方向为钢－混凝土组合结构。

工程中常用的徐变预测模型有 ACI 209、CEB-FIP 和 B3 等。ACI 209 模型形式简洁但参数涵盖范围较窄；CEB-FIP 模型纳入环境湿度、构件理论厚度和加载龄期等因素，在欧洲规范体系中应用广泛；B3 模型基于固结理论建立，对早期加载混凝土的预测精度有所改善。实际工程中应根据混凝土配合比和环境条件选择适宜的模型^[1]。

龄期调整有效模量法 (AEMM) 通过引入老化系数将积分方程简化为代数方程，计算效率高，适用于工程设计和初步分析。逐步计算法通过将时间域划分为若干步逐段求解，精度较高但需存储各时间步的应力历史。率型徐变模型以有限个内部变量替代应力历史存储，显著提升了计算效率^[4]。陈永春^[5]发展了中值系数法，以多系数形式实现一步近似求解，思路与 AEMM 法相通但表达形式有所不同。

上述线性徐变理论在常规应力水平下具有良好的适用性，但在高应力状态下其预测能力明显不足。黄海东等^[6]指出，当混凝土应力超过抗压强度 50% 时线性理论不再适用，并提出了非线性徐变计算方法。李兆霞等^[7]从连续介质损伤力学角度出发，建立了描述高应力作用下混凝土徐变损伤演变的本构方程，为非线性徐变分析开辟了另一条理论路径。

二、组合梁时变分析方法

（一）基于 AEMM 的解析方法

龄期调整有效模量法 (AEMM) 将积分型时变本构方程转化为代数形式，为组合梁长期性能分析提供了高效的解析路径。国外学者较早将该思路引入组合梁领域，采用打靶法求解考虑部分相互作用的长期变形控制方程，揭示了长期挠度与连接件布置密度之间的显著相关性——连接件密度越低，长期挠度增幅越大。后续研究将方法推广至等跨度和不等跨度连续梁，使连续组合梁的 AEMM 分析框架趋于完整。基于 AEMM 的解析方法计算效率高、物理概念清晰，但其线性近似特性限制了在高应力状态或大跨度结构中的适用性^[2]。

（二）逐步计算法与增量法

逐步计算法通过将荷载历史划分为多个时间步逐段求解，理论上可逼近任意精度的徐变响应，但存储量和计算量随时间步数呈二次增长，在大型结构或长持荷期分析中受到制约。为克服这一缺陷，增量分析方法将完整应力历史信息压缩至有限数量的状态变量，避免了对庞大应力历史的依赖。粘弹性 Wiechert 模型的引入使增量递归公式仅需前一步状态信息即可计算当前响应，在保持精度的同时显著降低了计算和存储代价^[4]。

（三）有限元方法

有限元方法能够处理复杂边界条件和非均匀材料属性。梁-壳-连接单元的混合建模策略分别以梁单元模拟钢梁、壳单元模拟混凝土板、非线性弹簧单元模拟剪力连接件，可研究长期荷载下混凝土板有效宽度的变化规律。分层法沿截面高度分层赋予各层不同的本构关系，实现了负弯矩区开裂后截面刚度退化的模拟^[2]。

（四）非线性时变分析方法

实际组合梁在长期服役中往往同时经历开裂、徐变和界面滑移等多重非线性过程。将黏弹性徐变模型与连续体塑性模型结合，可在有限元框架内实现收缩徐变与开裂的耦合分析。针对开裂组合梁建立的非线性部分剪切相互作用模型，揭示了开裂与滑移耦合对长期变形的放大作用。上述非线性方法代表了当前时变分析的前沿水平^[3]。

三、组合梁时变性能试验研究

（一）简支组合梁长期试验

国外学者对简支钢-混凝土组合梁开展了多组长期静载试验，通过改变栓钉连接件布置密度，获得了不同剪力连接度下组合梁的长期挠度、界面滑移及截面应变随时间的变化规律。结果显示约 50% 的附加挠度发生在加载后前 3 个月内，连接件密度较高的试件长期挠度增量相对较小，表明连接件布置密度与长期挠度之间存在显著相关性。足尺简支组合梁长期试验首次报道了栓钉连接件在持续荷载下的长期滑移响应，发现栓钉的等效剪切刚度随时间明显降低，忽略这一刚度退化效应将高估组合作用，导致长期挠度预测偏小。盲螺栓连接件组合梁的试验表明，不同类型连接件的长期刚度退化规律存在差异，在时变分析中应区别对待^[2]。

（二）正负弯矩区及预应力组合梁试验

聂建国等^[8]开展了组合梁正负弯矩区长期性能对比试验。正弯矩区混凝土板受压，收缩徐变引起板内压缩变形增大、组合梁挠度增加和截面内力重分布；负弯矩区混凝土板受拉，收缩变形加剧开裂趋势，开裂后混凝土退出工作使截面有效面积减小，内力重分布更为复杂。试验结果表明负弯矩区组合梁的时变响应特征与正弯矩区存在本质区别，据此建立了正负弯矩作用下组合梁长期性能的解析模型。预应力与非预应力组合梁的对比试验发现，预应力梁虽然长期挠度绝对值较小，但长期变形相对于初始变形的比值反而更大，预应力改变了混凝土板的应力分布和内力重分布路径。近年来对接近实际工程尺度的组合梁桥构件进行的长期行为试验表明，徐变收缩、连接件变形和负弯矩区开裂之间存在复杂耦合效应^[2]。

（三）特殊形式组合梁试验

学者们还将时变性能研究拓展至空间弯曲组合梁和预制装配式组合梁等特殊形式。弯曲组合梁在长期荷载下不仅表现出挠度增长和界面滑移演化，还伴随扭矩的时变重分布。后浇带改变了混凝土板的收缩变形分布和约束条件，为预制装配式组合梁的时变性能评估提供了参考。不同浇筑顺序使各区域混凝土加载龄期不同，在连续梁中引起额外的内力重分布^[2]。

上述试验为理论模型验证提供了基准数据，但现有试验仍有局限：试件数量偏少，持荷时间多在 1 年以内，试验环境多为室内恒温恒湿条件。足尺试验和实际桥梁长期监测数据的匮乏，制约了理论模型向工程应用的转化。

四、再生混凝土组合构件时变性能研究

（一）再生混凝土徐变收缩特性

再生骨料取代率是影响再生混凝土 (RAC) 徐变和收缩行为的核心参数。随取代率提高, RAC 的徐变系数和收缩应变均呈增大趋势, 与普通混凝土相比增幅通常在 20%~80% 之间。肖建庄等^[10]开展了长达 3045 天的超长期加载试验, 揭示了 RAC 梁长期变形的滞后效应, 该现象与 RAC 徐变收缩更强的龄期依赖性密切相关。足尺 RAC 梁长期加载试验发现, 100% 替代率下梁的长期挠度增大 30%, 且再生细骨料对时变行为的影响更为突出。在高应力水平下, RAC 的非线性徐变行为更为显著, 非线性徐变可使徐变系数增加 52%~115%。目前 ACI 209、CEB-FIP 等规范预测模型均基于普通混凝土数据标定, 其对 RAC 的适用性仍存在较大争议^[3]。

（二）再生混凝土组合梁 / 板时变研究现状

相较于 RAC 材料层面的研究, RAC 组合构件的时变性能研究极为有限。非线性热力学有限元模型表明 100% 再生骨料组合板跨中挠度增加 45.5%, 非均匀收缩梯度对连续组合板时变行为具有关键影响。钢-RAC 组合梁的研究量化了混凝土开裂、收缩、徐变和剪切连接程度的综合影响, 发现采用均匀收缩模型会高估 4.5%~10.3% 的挠度^[3]。

上述研究为 RAC 组合构件的时变分析奠定了初步基础, 但若干关键问题仍待解决: 适用于不同取代率的 RAC 徐变收缩本构模型尚未建立; 再生骨料对钢混界面滑移时变行为的影响机制尚不清楚; RAC 组合梁的合理设计方法仍需完善。温成前^[3]在其博士论文展望中也指出, 再生混凝土连接件的时变性能亟需进一步评估, 该方向是推动 RAC 在组合结构中工程应用的前提条件。

五、存在的问题与展望

当前组合梁时变分析模型大多建立在线性徐变假设之上。黄海东等^[6]指出, 应力水平超过 0.5 倍抗压强度后线性理论预测偏差显著增大, 但非线性徐变本构模型尚不成熟。界面滑移的时变描述同样面临精度瓶颈——连接件长期刚度退化机制缺乏统一的力学解释。此外, 开裂、徐变、收缩与界面滑移之间的多场耦合效

应虽有学者开始关注, 但系统性理论框架尚未建立^[2]。

长期试验的匮乏是制约该领域发展的重要因素。大多数长期持荷试验的观测周期不超过 1 年, 与桥梁设计基准期相比差距悬殊。再生混凝土、超高性能混凝土等新型材料在组合构件中的长期性能试验几乎是空白^[3]。

针对上述不足, 未来研究可从以下方向展开: 建立考虑非线性徐变、开裂与界面滑移耦合的精细化分析模型; 依托实际桥梁工程开展足尺组合梁长期性能监测; 引入概率理论发展组合梁时变可靠度评估框架; 开展再生混凝土和超高性能混凝土组合构件时变性能的系统研究; 利用数字孪生和智能监测技术为组合梁长期性能管理提供新手段。

从上述研究现状来看, 钢-混凝土组合梁时变分析模型的精细化发展仍面临理论和试验双重挑战, 这也是“钢-混凝土组合梁时变分析模型研究”项目拟解决的核心问题——该项目计划建立考虑界面滑移时变效应的组合梁分析模型, 并通过试验验证其可靠性, 以为组合梁桥的长期性能评估提供理论支撑。

六、结论

混凝土徐变效应的计算方法在过去半个世纪经历了从积分方程直接求解到 AEMM 的简化, 再到率型模型的精细化求解这一演进过程。AEMM 法因计算效率高而成为主流选择; 率型模型在精细化分析中具有独特优势, 但计算代价较高^[4]。非线性徐变理论虽有初步探索^[6,7], 离工程应用仍有距离。

分析方法层面, 从完全剪切假设到部分相互作用模型, 从线性弹性到非线性粘弹性分析, 从解析解到有限元数值模拟, 方法体系已较为完备。多因素耦合模型代表了当前前沿水平, 但仍需更多试验数据支撑^[2]。

试验研究为理论模型校验提供了基准数据, 但现有试验在试件数量、持荷时间和构件类型方面的覆盖面尚不充分。参数敏感性分析表明混凝土徐变系数和剪力连接度对长期挠度的影响最为显著。

再生混凝土组合构件的时变性能是当前研究中最突出的空白领域, 已有研究初步揭示了再生骨料对长期变形的放大效应, 但距形成完善的设计理论尚有大量工作要做^[10]。

参考文献

- [1] 周厦, 陈永春. 收缩 徐变 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- [2] 温成前. 钢-混凝土组合梁时变分析模型研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2024.
- [3] 聂建国, 余志武. 钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用 [J]. 土木工程学报, 1999, 32(2): 3-8.
- [4] 陈永春. 混凝土徐变问题的中值系数法 [J]. 建筑科学, 1991(2): 3-8.
- [5] 孙宝俊. 混凝土徐变理论的有效模量法 [J]. 土木工程学报, 1993, 26(3): 66-68.
- [6] 黄海东, 向中富. 混凝土结构非线性徐变计算方法研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(2): 96-102.
- [7] 李兆霞. 损伤力学及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 聂建国, 樊健生. 组合梁在负弯矩作用下的刚度分析 [J]. 工程力学, 2003, 20(1): 4-8.
- [9] 杨永清, 李世伟, 蒲黔辉, 等. 大跨悬浇箱梁桥三维非线性收缩徐变效应 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2018, 48(6): 1036-1043.
- [10] 肖建庄, 潘玉珀, 王春晖, 等. 全再生混凝土大跨梁的变形性能与低碳评价 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(03): 129-141.