

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.095



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



PC 箱梁时变行为水化-热-湿-力多场耦合 分析方法研究进展

杨灯, 杨永清, 谢明志, 黄胜前
(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:大跨度悬浇 PC 箱梁桥应用广泛,但普遍面临早龄期开裂和长期超下挠的问题,其核心原因在于 PC 箱梁时变行为的分析方法不准确。结合混凝土材料的多尺度特征,从混凝土水化-热-湿-力多场耦合模型、多场耦合模型数值求解方法、多场耦合分析方法在 PC 箱梁时变行为分析中的应用 3 个方面梳理既有研究成果发现,基于宏观尺度的现象学模型已发展到可以区分气-液独立传输、考虑温-湿度梯度影响、吸附滞后效应和力场对温-湿度场的影响,此类模型更适用于大型混凝土结构;从微观尺度出发的力学模型最为先进,考虑了材料热、湿、力学特性随时间演化,且各参数具有明确的物理意义,但参数校准困难且计算成本昂贵;交错求解策略在多场耦合模型求解中更实用;多场耦合分析方法在 PC 箱梁时变行为分析中已有一定应用,后续可进一步优化水泥水化动力学模型、考虑混凝土吸附滞后效应、气-液独立传输、混凝土循环徐变与预应力筋动力松弛等影响,以提升大跨度混凝土梁桥早龄期裂缝控制能力和长期服役性能评估能力。

关键词:PC 箱梁;时变行为;多场耦合;水化;温度;相对湿度

中图分类号:U443.35;U448.35 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-14

Research progress on multi-field coupling analysis methods for time-dependent behavior of hydration-thermo-hygro- mechanical in PC box girders

YANG Deng, YANG Yongqing, XIE Mingzhi, HUANG Shengqian

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Large-span cast-in-place PC box-girder bridges are widely applied, but universally face problems of early-age cracking and long-term over-deflection, its core reason lies in existing analysis methods for PC box girders' time-dependent behavior being inaccurate. Combining concrete materials' multi-scale characteristics, existing research achievements are reviewed from three aspects: concrete hydration-thermo-hygro-mechanical coupled models, multi-field coupling models' numerical solution methods, and multi-field coupling analysis

收稿日期:2025-07-10

基金项目:国家自然科学基金(52322811);四川省科技计划(2020YJ0081)

作者简介:杨灯(1994-),男,博士,主要从事桥梁时变力学行为研究,E-mail:yangdeng1214@163.com。

谢明志(通信作者),男,博士,副教授,E-mail:mzxie@home.swjtu.edu.cn。

Received: 2025-07-10

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52322811); Sichuan Science and Technology Program (No.2020YJ0081)

Author brief: YANG Deng (1994-), PhD, main research interest: time varying mechanical behavior of bridges, E-mail: yangdeng1214@163.com.

XIE Mingzhi(corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: mzxie@home.swjtu.edu.cn.

methods' application in PC box girders' time-dependent behavior analysis. Comprehensive review discovers that: macroscopic scale-based phenomenological models have developed to distinguishing gas-liquid independent transport, considering temperature-humidity gradient influences, adsorption hysteresis effects and force field's impacts on thermal-humidity fields, such models better suit large concrete structures; microscopic scale-originated mechanical models are most advanced, considering material thermal, moisture, mechanical properties' time-evolution, and each parameter having clear physical meaning, but parameter calibration being difficult and computational costs being high; staggered solution strategies being more practical in multi-field coupling models' solving; multi-field coupling analysis methods having gained certain applications in PC box girders' time-dependent behavior analysis, subsequent work may further optimize cement hydration kinetics models, consider concrete adsorption hysteresis effects, gas-liquid independent transport, concrete cyclic creep and prestressing tendon dynamic relaxation influences, to enhance the early crack control capability and long-term service performance evaluation ability of long-span concrete girder bridges.

Keywords: PC box girder; time-varying behavior; multi-field coupling; hydration; temperature; relative humidity

悬浇预应力混凝土(PC)箱梁因其卓越的抗弯与抗扭刚度、突出的经济性和广泛的环境适应性,在大跨度桥梁结构中具有广泛应用^[1-3]。PC箱梁时变行为主要包括其收缩徐变行为、水化动力学行为、传热行为和传湿行为等。作为大跨度混凝土梁桥的核心受力构件,PC箱梁的时变行为对桥梁结构整体的长期服役性能(如线形稳定性和耐久性等)具有决定性影响。研究发现,大跨度PC箱梁桥从施工到长期使用过程中普遍面临腹板开裂、跨中下挠超限等典型病害,严重威胁了结构寿命与使用安全。相关研究则表明^[2-4],上述问题的根源在于传统单一场分析方法难以准确分析PC箱梁在水泥水化反应、环境温-湿度变化、外部荷载等动态耦合作用下的复杂响应。

事实上,PC箱梁从浇筑开始就处于多场(包含水化程度场、热场(或温度场)、相对湿度场(或湿度场)和力场,简称为“水化-热-湿-力场”)动态耦合环境中^[2, 5]。在早期水化阶段,水泥水化放热将使PC箱梁内部温度快速升高,并导致构件截面中心与外表面之间形成温度梯度,从而引起热应力;水泥水化耗水将导致PC箱梁截面相对湿度(RH)变化和形成相对湿度梯度,从而引发自收缩和收缩应力;同时,混凝土传热行为与传湿行为间也存在明显的耦合作用^[6];另外,水泥水化、内外温度场与相对湿度的变化将显著改变PC箱梁混凝土的热、湿、力学特性,如热传导系数、比热容、渗透系数、弹性模量和强度等;不仅如此,力学应力场的重构又会反向调控热、湿传输路径^[7]。在后期服役过程中,PC箱梁与环境进行热、湿交换,仍将承受环境温度、环境相对湿度以及外部荷载的耦合作用^[2, 8]。在上述化学、物理场动态耦合作用下,若混凝土承受的应力

值超过其材料强度值,将导致PC箱梁产生裂缝等损伤;进一步,裂缝的扩展将加速水分渗透通道的形成,加剧钢筋锈蚀,影响结构完整性、耐久性与安全性^[7, 9-13]。由此可见,对于PC箱梁的早期裂缝控制及长期性能评估等,迫切需要从考虑混凝土多场耦合作用出发,建立PC箱梁时变行为的水化-热-湿-力多场耦合分析方法。近年来,与混凝土多场耦合分析相关的研究已逐渐成为研究热点^[14];但是,其在PC箱梁时变行为分析中的应用和未来发展方向仍有待进一步总结。

发展PC箱梁时变行为水化-热-湿-力多场耦合分析方法对于突破传统理论局限和提升工程实践水平具有双重价值。在理论层面,能够揭示多场交互作用的内在机理,为建立普适性耦合分析框架提供科学支撑,推动计算力学与材料科学的交叉融合。在工程应用层面,通过耦合分析预测PC箱梁关键部位(如腹板与顶板交界处)的温度-应力演化规律,可优化配筋率与预应力施加时机;结合实时监测数据动态修正模型参数,可实现PC箱梁混凝土浇筑的智能化温控,避免温度裂缝的产生^[15];定量评估环境作用与荷载共同作用下的结构耐久性,为PC箱梁养护维修提供依据;精准预测PC箱梁收缩变形可减少过度依赖膨胀剂等外加剂的使用,降低材料成本与碳排放。

笔者从剖析混凝土材料多尺度特征入手,回顾混凝土水化-热-湿-力多场耦合理论模型与数值求解方法,以及水化-热-湿-力多场耦合分析方法在PC箱梁中的应用。此外,还指出了PC箱梁时变行为水化-热-湿-力耦合分析方法的进一步研究方向,旨在促进多场耦合分析方法在大跨度PC箱梁桥中的应用,为提升复杂环境下大跨度PC箱梁桥的长期

服役性能评估,实现基础设施智能建造与长效运维提供思路。

1 混凝土的多尺度特征

混凝土硬化过程中,受水泥水化反应及环境因素等影响,其自身温度、相对湿度、微观结构和热、湿、力学特性等将发生显著变化。因此,混凝土自拌和以后将历经一系列复杂的化学与物理过程,主要包括:1)化学过程(主要是指水泥的水化反应);2)热传递过程;3)湿(可蒸发水)传递过程;4)受力过程。上述化学与物理过程发生于混凝土不同长度尺度的组分中,且相互之间存在一定的耦合作用^[7,16]。因此,在梳理PC箱梁时变行为的水化-热-湿-力耦合分析方法之前,有必要首先把握混凝土的多尺度特征。

作为一种典型的多尺度材料,混凝土组分(如

水化水泥浆体、骨料等)的特征长度从 10^{-9} m 到 10^{-1} m 不等^[16,20]。如图1和图2所示,混凝土的组分信息可以在纳米尺度、微观尺度、细观尺度及宏观尺度上进行描述^[16,20]。在宏观尺度上(大于 10^{-1} m,如图1(a)所示),混凝土通常被视为单相均质材料,或骨料颗粒随机分散在水泥浆基体之中的两相材料;在细观尺度上(10^{-4} ~ 10^{-1} m,如图1(b)所示),混凝土被视为由水化水泥浆基体、骨料及界面过渡区组成;在微观尺度上(10^{-6} ~ 10^{-4} m,如图1(c)和图2(a)所示),水泥浆基体则可进行细分,其内部包括毛细孔、毛细水、未水化水泥颗粒、水化硅酸钙(C-S-H)凝胶、氢氧化钙及其他水化产物等;在纳米尺度上(10^{-9} ~ 10^{-6} m,如图1(d)和图2(b)、(c)所示),水化硅酸钙(C-S-H)凝胶则可以进一步细化,由C-S-H颗粒组成,其内部还存在C-S-H小凝胶孔(1~3 nm)、C-S-H大凝胶孔(3~12 nm)、毛细水、吸附水、C-S-H层间水、化学结合水等^[20]。

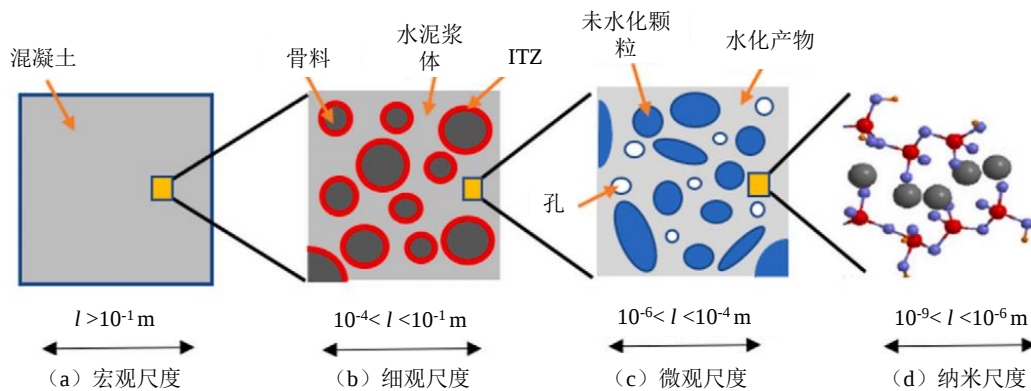


图1 混凝土多尺度描述示意图^[16]

Fig.1 Schematic diagram of multi-scale description of concrete

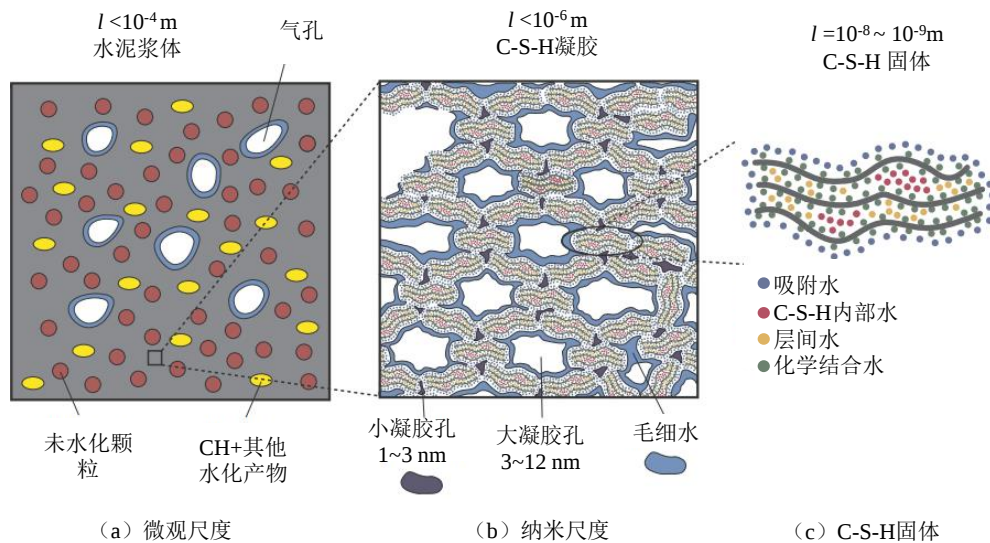


图2 微-纳米尺度下的水泥浆基体^[20]

Fig.2 Schematic diagram of cement slurry matrix at micro nano scale

2 混凝土水化-热-湿-力多场耦合模型

2.1 模型分类

由于混凝土材料的多尺度特征,混凝土水化-热-湿-力多场耦合系统的描述方法也具有多样性。具体而言,可以从微观、细观或宏观层面出发,采用现象学方法或多孔多相介质力学方法描述混凝土水化过程、热传递过程、湿传递过程、力学过程,以及各过程间的相互影响^[4, 16-17]。

基于混凝土的多尺度组分信息,水化-热-湿-力耦合模型中通常将混凝土视为多孔多相介质,并由固体相、填充孔隙的液体相(毛细水及吸附水)及气体相(干燥空气和水蒸气)组成(如图3所示)^[21]。通

过在不同尺度上对混凝土化学和物理过程进行描述,学者们提出了多孔多相介质现象学模型和多孔多相介质力学模型。不同类型多场耦合模型的对比如图4所示。在多场耦合模型中,“水化”代表混凝土中水泥的水化反应,通常对应含未知水化程度的水化动力学方程;“热”代表混凝土的热传递,通常对应含未知温度的热量平衡方程;“湿”代表混凝土中可蒸发水的传递,通常对应含未知相对湿度的水分质量平衡方程;“力”则代表力学过程,通常对应含未知位移的静力平衡方程。因此,混凝土化学、物理过程中的多场耦合关系可以在水化动力学方程、热量平衡方程、水分质量平衡方程、静力平衡方程及相关本构关系中得到体现。

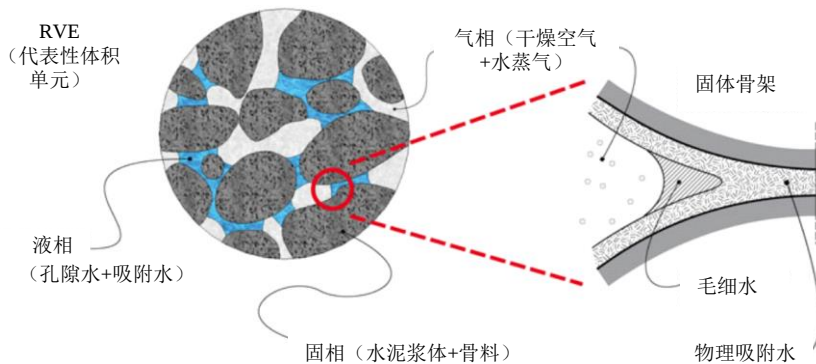


图3 混凝土作为多孔多相介质的示意图^[21]

Fig.3 Schematic diagram of concrete as a porous multiphase medium

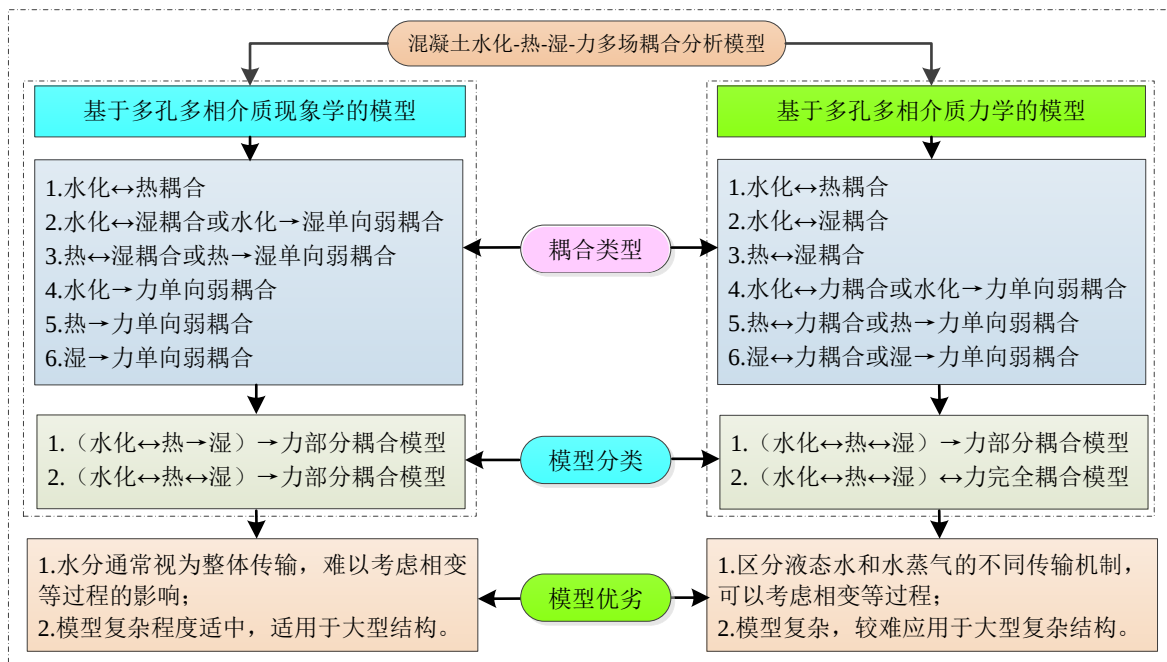


图4 混凝土水化-热-湿-力多场耦合分析模型对比

Fig. 4 Comparison of concrete hydration-thermo-hygro-mechanical multi-field coupling analysis models

2.2 多孔多相介质现象学模型

在多孔多相介质现象学模型中,主要是单流体多相多场耦合模型,典型的如 Azenha 等^[22]、Li 等^[23]、

Zhang 等^[24]、Wang 等^[25]、Ma 等^[26]、Xu 等^[27]、Ding 等^[28]和 Cibelli 等^[29-30]为不同混凝土结构开发的水化-热-湿-力多场耦合模型,属于部分耦合分析模型。这类

模型的主要特点是:1)水分质量平衡方程、热量平衡方程、静力平衡方程及传热、传湿等本构方程都直接在混凝土宏观层面建立;2)不区分液态水和水蒸气的各自传输机理,而是将两者统一考虑为单一流体。

在单流体多相多场耦合模型的一般形式中,存在的相互作用关系主要包括:1)水化 $\leftrightarrow$ 热耦合作用,即水泥水化受温度影响,水化引起混凝土微观结构演化,并改变其传热特性(如热导率、比热等),而热特性的改变及水化放热又反过来影响混凝土温度场;2)水化 $\leftrightarrow$ 湿耦合作用或水化 $\rightarrow$ 湿单向弱耦合作用,即水化改变传湿特性(如固有渗透率、相对渗透率等),而湿特性的改变及水化耗水则直接影响混凝土相对湿度场,相对湿度对水化过程的影响被选择性考虑;3)水化 $\rightarrow$ 力学单向弱耦合,即混凝土力学特性(如弹性模量、抗拉强度、泊松比等)随水化过程而演化,同时水化过程引起混凝土自收缩变形,而力学过程对水化过程的影响通常被认为可以忽略;4)热 $\leftrightarrow$ 湿耦合或热 $\rightarrow$ 湿单向弱耦合作用,即考虑湿、热传输的相互影响,或仅考虑热传输对湿传输的影响;5)热 $\rightarrow$ 力单向弱耦合,即温度变化引起混凝土热应变与力学特性的改变,而力学过程对混凝土热传输的影响忽略不计;6)湿 $\rightarrow$ 力单向弱耦合,即相对湿度变化引起混凝土干燥收缩与力学特性的改变,而力学过程对混凝土湿传输的影响通常忽略不计。

目前,单流体多相多场耦合模型主要包括:1)(水化 $\leftrightarrow$ 热 $\rightarrow$ 湿) $\rightarrow$ 力部分耦合模型,如 Azenha 等^[22]、Jendele 等^[31]和 Di 等^[32]的模型;2)(水化 $\leftrightarrow$ 热 $\leftrightarrow$ 湿) $\rightarrow$ 力部分耦合模型,如 Klemczak 等^[33-34]、Li 等^[23]和 Zhou 等^[35]的模型。除 Jendele 等^[31]的模型区分混凝土内水分的气、液独立传输外,其余模型都将水分视为单一流体。对此,Di 等^[36]认为,将水分的所有传输机制组合在一个单一的现象学宏观模型中是可以接受的;同时,这类模型更加适用于大型混凝土结构从早期到长期的时变行为分析。

在既有模型基础上,Zhao 等^[37]进一步区分了混凝土饱和与非饱和阶段,考虑了水分相变对温度场的影响以及轴向简单力场对湿度场的影响;吴建营等^[7]通过考虑混凝土裂缝演化对其传热、传湿行为的影响,并结合相场理论建立了早龄期混凝土多场完全耦合的相场内聚裂缝模型,以预测早龄期混凝土结构的裂缝演化;余思臻等^[5]则通过改进吸附等温线模型的方式,实现了对早龄期混凝土内部相对湿度多阶段演变及收缩变形的准确模拟;Pal 等^[18]从

细观尺度出发建立多场耦合模型;Ding 等^[10]在宏观尺度结合相场法对多场耦合作用下早龄期混凝土的断裂行为进行了研究,其模型中考虑的多场耦合过程如图5所示。

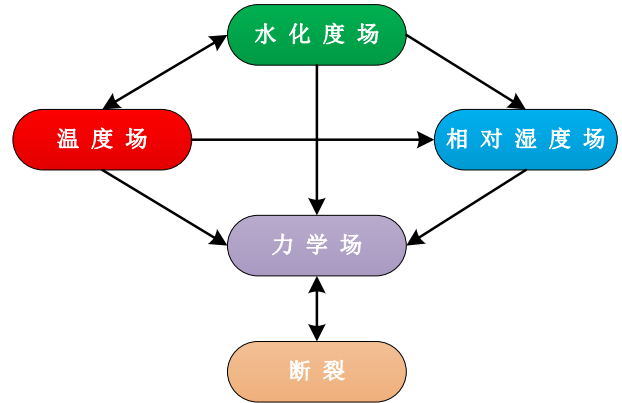


图5 早龄期混凝土多场耦合理论图解^[10]

Fig.5 Illustration of multi-field coupling theory in early-age concrete

近年来,多场耦合现象学模型的水化-热-湿耦合部分有了进一步发展,Wang 等^[38]、Benmahiddine 等^[39]、Lu 等^[40]和 Fang 等^[41]深入考虑了温度梯度和湿度梯度对热、湿传输的影响;Alioua 等^[42]、Maaroufi 等^[43]、Zou 等^[44]和 Benmahiddine 等^[39]深入考虑了材料的吸附滞后效应的影响和气-液独立传输,提升了模型对热、湿传输行为的预测能力;Fang 等^[41]的模型中还考虑了与相变有关的水蒸气扩散传热。如图6和图7所示^[39],当模型中考虑混凝土材料的吸附滞后效应后,其对内部温度和相对湿度的预测更加准确。

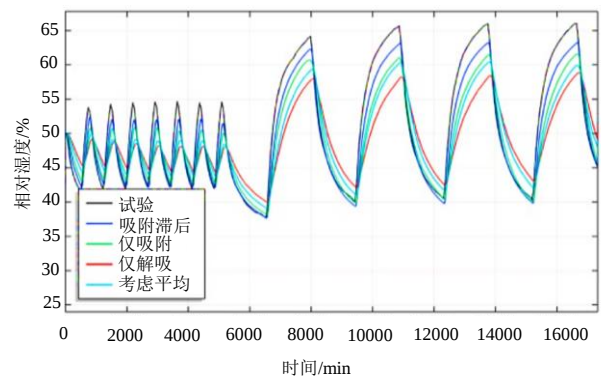


图6 测点处的相对湿度演化^[2, 39, 45]

Fig.6 Evolution of relative humidity at the measuring point

综上所述,学者们已对混凝土多场耦合现象学模型进行了广泛且深入的研究。如图8所示,随着时间的推移,多孔多相介质现象学模型正逐渐完善。然而,如表1所示,各代表性模型考虑的因素或侧重点具有较大差别,故适用场景也显著不同。

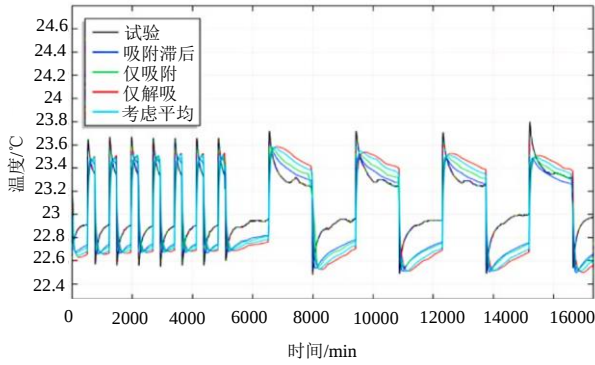
图7 测点处的温度演化^[39]

Fig.7 Evolution of temperature at the measuring point

2.3 多孔多相介质力学模型

对于混凝土结构早期及长期时变行为的模拟,基于多孔多相介质力学的多场耦合模型被认为是最先进的模型^[46]。在这方面,典型的如Gawin等^[47-48]建立的(水化 $\leftrightarrow$ 热 $\leftrightarrow$ 湿) $\leftrightarrow$ 力学完全耦合模型,以及Gasch等^[49]和Sciumè等^[9]的(水化 $\leftrightarrow$ 热 $\leftrightarrow$ 湿) $\rightarrow$ 力部分耦合模型。多孔多相介质力学模型通过假定局部热、湿、力学平衡状态,从微观层面出发,引入相和界面的平衡方程,然后采用复合混合物理论或热力学约束平均理论等得到宏观层面的质量、热量及静力平衡方程^[17, 50]。在完全耦合模型中,力场对温、湿度场的影响一般通过在热量平衡方程和质量平衡方程中引入骨架变形来考虑。

与现象学模型相比,多孔多相介质力学模型中通常考虑了力学场变化对混凝土温度和湿度变化的影响,水的相变等重要特征;同时,这类模型还区分了液态水和水蒸气各自的传输机理,以及相应的不同驱动力。因此,这类模型可以更准确地描述水

泥硬化的复杂过程及微观结构的发展。

近年来,许多学者对这类模型开展了进一步的研究。对于完全耦合模型,Gawin等^[51]、Pal等^[19]和Zhang等^[52]考虑了脱水过程和材料热化学降解等影响,将其应用范围推广到受高温的混凝土结构;Gamnitzer等^[53]在多相模型中考虑了混凝土解吸等温线对孔隙度的依赖性,并建立了基于混合应力的收缩徐变耦合模型;Gasch等^[20]对混凝土多相系统进行了重新描述,认为混凝土固相的演化依赖于水泥的水化过程,改进了多相模型中固相的质量平衡方程,考虑了液态水饱和度对水化程度的影响;在Du等^[54]提出的饱和度方程基础上,You等^[55-56]建立了早期混凝土两阶段相对湿度计算模型,可以较为准确地预测早龄期混凝土饱和阶段与非饱和阶段的内部相对湿度场;Brugger等^[46]在湿本构层面上附加考虑了荷载的影响,建立了考虑水泥水化及荷载影响的解吸等温线,进而改进了现有水化 $\leftrightarrow$ 热 $\leftrightarrow$ 湿 $\leftrightarrow$ 力完全耦合模型,获得的模拟结果与试验结果吻合较好。

对于部分耦合模型,Sciumè等^[9]将Gawin等^[47-48]的完全耦合模型进行弱化,忽略力场对水化、热、湿现象的影响,但进一步考虑了混凝土解吸等温线对水化程度的依赖性;类似的,Gasch等^[49]在完全耦合模型中忽略力场对水化、热、湿现象的影响,使其计算效率提升了5倍,且计算结果没有明显差异,适用于大型混凝土结构;Biswal等^[57]使用部分耦合的多孔多相介质力学模型来模拟混凝土结构中蠕变和收缩相关的物理现象,以减少预应力长期估算的不确定性。最近,Davie等^[58]和Wang等^[59]在湿、热控

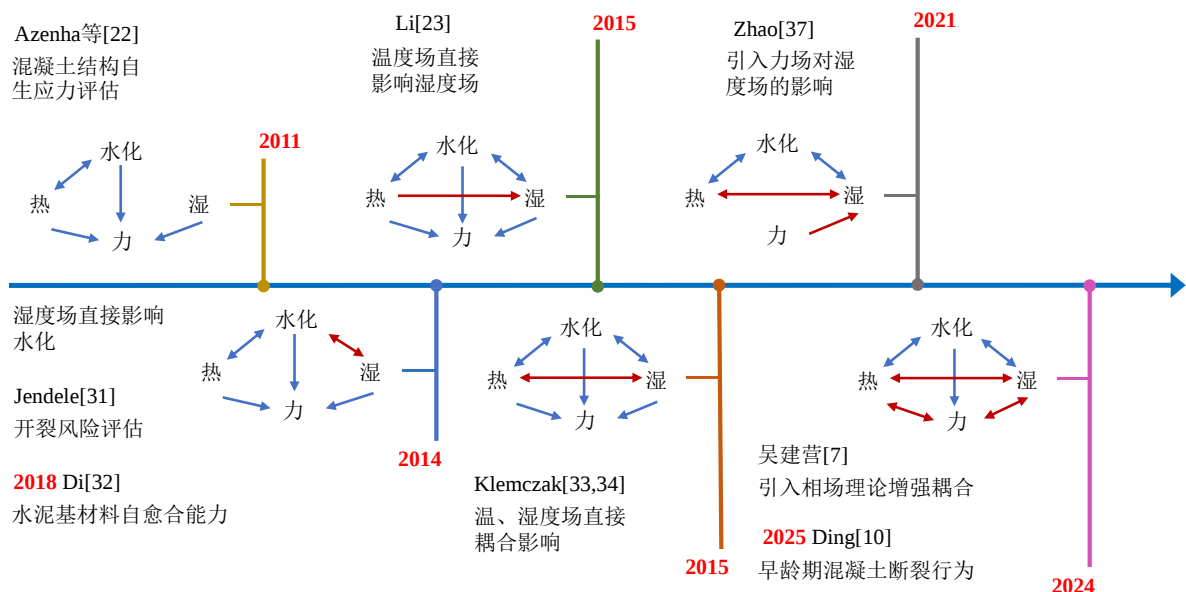


图8 混凝土的现象学多场耦合模型演化

Fig.8 Evolution of the phenomenological multi-field coupling model for concrete

表 1 代表性现象学多场耦合分析模型对比

Table 1 Comparison of representative phenomenological multi-field coupling analysis models

子模型	影响因素	Azenha 等 ^[22]	Jendele 等 ^[31]	Li 等 ^[23]	Klemczak 等 ^[33-34]	Zhao 等 ^[37]	吴建营等 ^[7]
水化模型	温度影响	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	RH 影响	×	✓	✓	✓	✓	✓
传热模型	水化放热	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	传热方式	热传导	热传导	热传导	热传导	热传导、相变	热传导
	RH 影响	×	水化间接影响	水化间接影响	湿度梯度	湿度梯度	均匀湿度变化
	力场影响	×	×	×	×	×	✓
	热特性演化	×	比热、导热系数	×	×	比热、导热系数	×
传湿模型	水化耗湿	×	✓	✓	✓	✓	✓
	传湿方式	整体水分扩散	气、液独立扩散	整体水分扩散	整体水分扩散	整体水分扩散	整体水分扩散
	温度影响	×	水化间接影响	影响透湿性	温度梯度	均匀温度变化、 温度梯度	均匀温度变化
	力场影响	×	×	×	×	✓	✓
	湿特性演化	×	温度、相对湿度间接 影响	温度、相对湿 度间接影响	×	温度、相对湿度 间接影响	温度、力场、相对湿 度间接影响
力学模型	温度影响	✓	✓	✓	✓		✓
	RH 影响	✓	✓	✓	✓		✓
	力学特性	弹性模量、徐 变柔量	弹性模型、抗压和抗 拉强度、徐变柔量	弹性模型、抗 拉强度	弹性模型、抗压和抗 拉强度、徐变柔量		弹性模量、断裂能 和抗拉强度
	演化						

制方程中忽略了力场影响,通过考虑脱水过程等将其适用范围扩展至高温作用下的混凝土结构;Cheng 等^[60]结合相场法对高温下混凝土热剥落行为进行了研究。

综上所述,学者们已对基于多孔多相介质力学的混凝土多场耦合模型进行了深入研究,且取得了丰硕成果。图 9 展示了该类模型的演化过程。可以发现,为了平衡模型的计算效率和计算结果的准确性,部分学者已开始对全耦合模型进行解耦处理,即忽略力学过程对传热、传湿过程的影响。

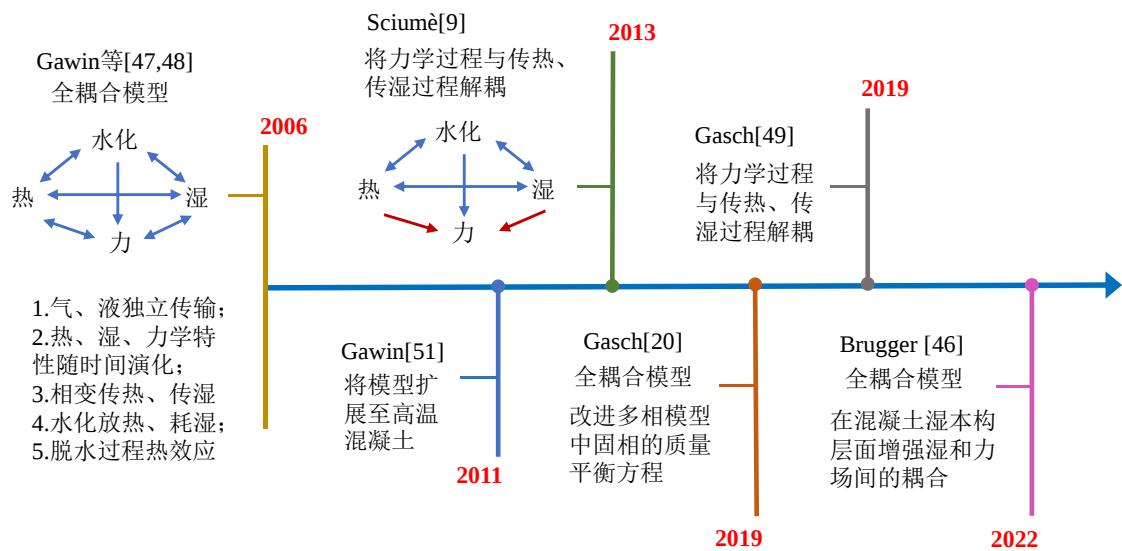


图 9 基于多孔多相介质力学的混凝土多场耦合模型演化

Fig.9 Evolution of concrete multi-field coupling model based on porous multiphase medium mechanics

2.4 模型讨论

现象学模型一般建立在宏观尺度,通常不区分水的不同相,故难以考虑相变的影响。水分运输一般在宏观水平上采用非线性扩散型微分方程描述,其非线性系数和相关参数通常采用拟合法来确定,即根据实测结果,采用最小二乘法等求得。对于与

校准模型参数类似的现象,通常可以给出较准确的预测;然而,对于不同材料和不同构造形式等情况,此类模型无法获得给出预测^[61]。简言之,现象学模型适合插值,而非外推;同时,其方程系数的强非线性特点,导致需要开展大量和耗时的实验测试加以确定;此外,模型将各种物理现象集中在一起统筹

考虑,导致模型参数缺乏明确的物理解释。

相反,对于多孔多相介质力学模型,其形式虽更为复杂,但其系数具有明确的物理意义,且通常与经典的材料参数有关,例如孔隙度、本征渗透率等。当确定了材料参数与输运性质的某种关系(例如水的饱和度对水流相对渗透率的影响)时,通常对其余类似材料均有效。同时,模型中通常能够考虑水的相变以及相关的质量、能量源等;此外,一些额外的耦合,如材料损伤对本征渗透率的影响,或气相、液相压力对骨架应力的影响,也可以通过一致的方式加以考虑^[61]。

尽管基于多孔介质力学的多相模型充分精细,但其代价是引入了大量控制水化、刚度和强度、收缩、徐变以及热和水分的储存、运输的模型参数,且材料性质的年龄依赖性以及过程之间的潜在耦合引入了进一步的困难^[46]。由于模型方程的高度复杂性,众多参数校准的挑战性,以及耦合多物理系统大规模模拟的数值脆弱性等潜在问题,其实际适用性非常有限,计算成本高昂,难以应用于大型混凝土结构的时变行为分析^[46, 51]。因此,目前被广泛应用的多相模型仍是基于现象学方法的单流体多相多场耦合模型。

目前,关于混凝土水化-热-湿-力多场耦合模型的研究,仍存在以下关键不足:1)未考虑实际环境中干燥-湿润循环过程对混凝土结构力学行为的影响;2)未对既有多场耦合模型的计算准确性和计算效率开展综合评价研究;3)未系统和全面地开展多场耦合模型中各因素对传热、传湿和力学行为的影响性研究。

3 水化-热-湿-力多场耦合模型的数值求解方法

水化-热-湿-力学多场耦合模型涉及多个控制方程,每个子模型内都包含相应的待解状态变量,且可能依赖于其他状态变量。因此,多场耦合模型通常为大方程组,整体公式要求所有未知数都在一个方程组中求解。对此,解析方法通常难以实现。目前,有限单元法是求解混凝土水化-热-湿-力学多场耦合模型的最常用数值方法,而 COMSOL Multiphysics 则是最常用的多物理仿真分析平台。

在求解策略方面,多场耦合模型可以作为一个完全耦合的方程组进行整体求解,如 Gasch 等^[20]和 You 等^[55]。这种解法在迭代过程中同时求解所有方程,并更新所有状态变量。这种方法不仅在处理强非线性时保证了系统的最优收敛性,而且保证了耦合项的更精细的计算,但缺点是计算成本高昂。

另外,也可以交错求解策略进行求解,如 Gawin 等^[47]对热-湿-力方程组采用完全耦合的求解方式,而对水泥水化程度则独立求解;Gasch 等^[49]对水化-热-湿方程组采用完全耦合式求解,而对静力平衡方程则采用独立求解;Sciumè 等^[9]对热-湿模型进行整体求解,随后求解水化动力学方程和静力学平衡方程。

实际应用中,基于顺序式求解方程的交错求解策略更为常用,如崔激等^[62]、李世伟^[2]、Veselý 等^[63]、Cheng 等^[60]和 Xu 等^[27],即采用单向耦合的方式,将一个子模型的输出传递给另一个子模型,分别求解子模型的方程集。具体而言,由于混凝土内部湿度的响应速率远慢于温度的响应速率;因此,可首先计算热传输子模型中的温度场;然后,通过水分传输子模型计算与温度有关的相对湿度场;接着,可进一步计算与温度和相对湿度有关的混凝土水化程度;最后,将温度场、相对湿度场和混凝土水化程度进一步传递到随时间变化的力学子模型求解位移场。典型的,基于 ABAQUS 通用仿真分析平台,采用交错求解策略求解混凝土桥梁结构水化-热-湿-力部分耦合模型的流程如图 10 所示^[2]。

综合而言,交错求解策略比完全耦合的求解策略需要更少的内存,但作为交换,变量之间的耦合更弱;另外,如果需要引入连续的场,交错求解过程比整体求解过程更加灵活^[61]。

4 水化-热-湿-力多场耦合分析方法在 PC 箱梁时变行为分析中的应用

以往,PC 箱梁的时变行为分析通常基于梁单元或板壳单元模型,属于一维或二维分析方法^[64]。然而,这类分析方法不能反映 PC 箱梁温、湿度场以及收缩徐变的三维特征,无法满足全寿命周期复杂多变环境下 PC 箱梁时变行为的精细化分析要求,难以保证大跨度混凝土梁桥的健康运营及可持续发展^[2]。近年来,得益于混凝土材料本构模型、数值计算方法以及计算机软硬件的飞速发展,PC 箱梁时变行为的多场耦合三维分析方法有了巨大发展。

PC 箱梁时变行为的多场耦合分析方法可基于弹性力学理论、弹塑性力学理论、损伤力学理论等,并结合有限单元法来建立。近年来,Do 等^[65]、Zeng 等^[66]、Sheng 等^[67]、Abid 等^[68]和 Zeng 等^[69]为分析 PC 箱梁早龄期传热行为时,建立了水化-热耦合控制方程,但未考虑混凝土内部相对湿度场的影响。Bazant 等和 Yu 等^[70-72]采用三维实体单元对 Koror-Babeldaob 桥的 PC 箱梁进行建模,在分析其时变力学行为时考虑了混凝土温度、相对湿度和裂缝的影

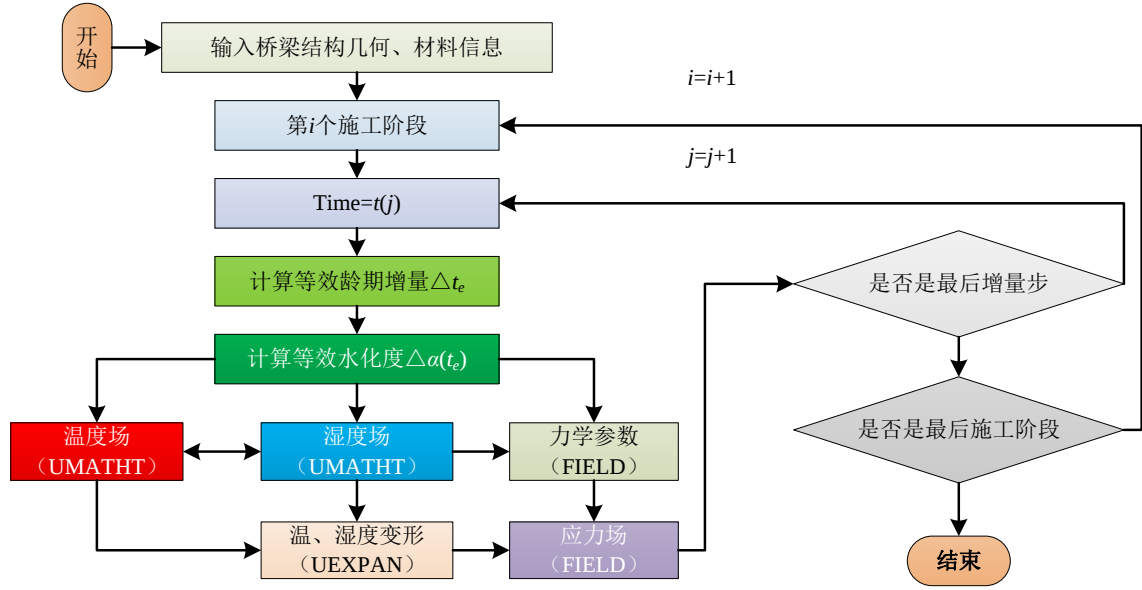
图 10 水化-热-湿-力多场模型的交错求解策略^[2]

Fig.10 Interlocking solution strategy for hydration heat moisture force multi field model

响,通过在静力徐变上进行时间加速或增加附加变形的方式考虑了交通循环荷载引起的混凝土循环徐变,以及变应变作用下的预应力筋松弛的影响。为了更加准确地考虑车辆循环荷载作用下PC箱梁混凝土的循环徐变,Bažant^[73]基于断裂力学建立了服务应力水平下循环徐变的微观力学模型,并通过试验室数据进行了验证和校准。

随着损伤力学理论的发展,弹塑性损伤模型在描述混凝土宏观力学行为方面表现出显著优势。Tong等^[74]为分析大跨度PC箱梁桥的长期变形及损伤演化,开发了混凝土收缩、静力徐变、循环徐变和弹塑性损伤相结合的统一时变本构模型,其混凝土应变组成及一维图解分别如式(1)和图11所示。在静力徐变方面,Tong等^[74]基于开尔文链流变模型、连续谱法及指数算法,建立了三维速率型徐变公式,提升了模型的计算效率;在循环徐变方面,采用了Bažant等^[73]基于断裂力学的混凝土循环徐变模型;在材料损伤方面,采用了考虑拉、压损伤的弹塑性双标量损伤模型。然而,该多场耦合分析模型忽略了日照作用对PC箱梁温度场的影响,未考虑环境温度和相对湿度的时变特征;同时,其分析模型假定PC箱梁混凝土为成熟状态,未考虑其热、湿、力学特性随时间的演化。

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^c + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^{cc} + \epsilon_{ij}^{sh} \quad (1)$$

式中: ϵ_{ij} 、 ϵ_{ij}^e 、 ϵ_{ij}^c 、 ϵ_{ij}^p 、 ϵ_{ij}^{cc} 、 ϵ_{ij}^{sh} 分别代表混凝土总应变、弹性应变、静力徐变应变、塑性应变、循环徐变应变及收缩应变。

Meng等^[75]侧重于研究车辆循环荷载作用对大跨度PC箱梁桥长期变形和开裂的影响,建立了随机车辆模型,考虑了具有交通流统计特征的混凝土

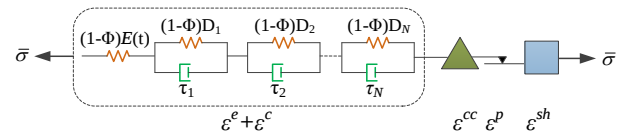


图 11 混凝土应变场一维图解

Fig.11 One dimensional diagram of concrete strain field

疲劳损伤及循环徐变,其混凝土应变场及一维图解分别如式(2)及图12所示。其研究表明,考虑疲劳损伤及循环徐变可以使大跨度混凝土梁桥长期变形等时变行为的预测更加准确。

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^c + \epsilon_{ij}^{cc} + \epsilon_{ij}^{sh} + \epsilon_{ij}^d + \epsilon_{ij}^{cd} \quad (2)$$

式中: ϵ_{ij}^d 为静力损伤引起的应变; ϵ_{ij}^{cd} 为疲劳损伤引起的应变;其余符号的含义与式(1)相同。

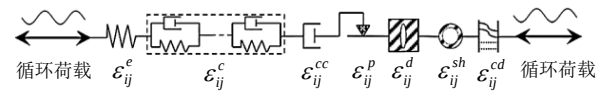


图 12 混凝土应变场的一维图解

Fig.12 One dimensional diagram of concrete strain field

为了进一步精细化大跨度混凝土梁桥PC箱梁的时变行为分析,孟庆领^[3]通过考虑日照作用、结构表面对流换热、封闭空间内部空气换热等建立了PC箱梁的三维不均匀温度场数值分析方法;并基于插值方法,通过考虑天气随机性变化等建立了长期环境温度作用的等效分析方法;基于车辆随机性特征,提出了随机车流模型及车辆荷载等效方法,以优化混凝土疲劳徐变模型;最后,结合混凝土弹塑性损伤理论,考虑了混凝土的拉、压损伤,提出了基于B3和B4收缩徐变模型的PC箱梁时变力学行为分析方法。然而,该分析方法未考虑混凝土龄期效应等带来的影响;同时,忽略了环境相对湿度的影

响。实际上,在一些大体积混凝土结构的早龄期力学分析中,混凝土内部相对湿度被认为基本恒定,其影响可忽略不计^[76-79];然而,PC箱梁属于空间薄壁结构,故其在早龄期内的相对湿度变化可能较为显著^[28]。近年来,Maekawa等^[80]则基于混凝土多尺度时变本构模型,建立了考虑混凝土水化、温-湿度变化等影响的PC箱梁多尺度(水化 $\leftrightarrow$ 热 $\leftrightarrow$ 湿) $\rightarrow$ 力部分耦合三维分析模型,其研究结果表明了考虑多场耦合作用的重要性,如图13所示;李世伟等^[2, 81-82]基于B4模型和不同主应力方向上的徐变泊松比,建立了三维非线性徐变模型;随后,基于温度、湿度传导理论,通过考虑混凝土热、湿、力学特性的龄期效应,发展了PC箱梁的(水化 $\leftrightarrow$ 热 $\leftrightarrow$ 湿) $\rightarrow$ 力部分耦合三维分析方法。

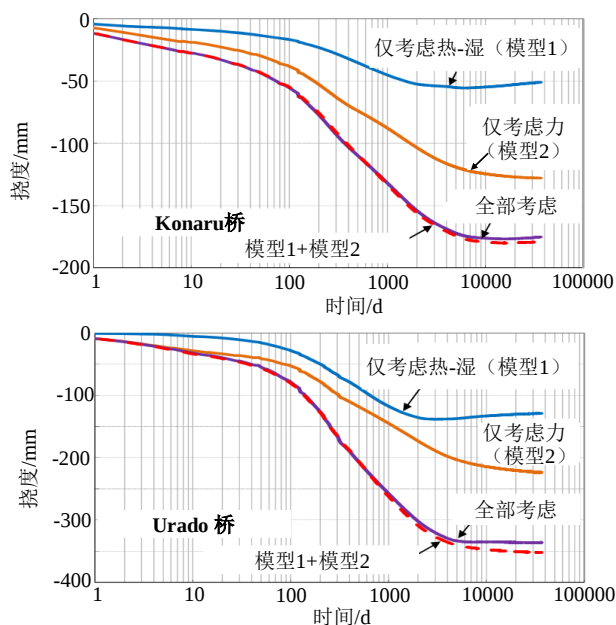


图13 热-湿和力学徐变对表观挠度的重要性^[80]

Fig.13 Importance of thermo-hygro and mechanistic creeps to apparent deflection

综上所述,为建立更完善的PC箱梁时变行为多场耦合分析方法,学者们已经进行了多方面努力,包括:1)采用三维分析方法;2)发展更先进的混凝土收缩徐变模型;3)更充分地考虑主要影响因素以及因素的时变特征等(如考虑混凝土时变热、湿、力学特性,日照作用,车辆循环荷载,环境温、湿度时变特性等);4)充分考虑因素间的耦合特性(如混凝土温、湿度场的耦合作用)和效应间的耦合特性(如混凝土损伤及徐变的耦合);5)发展更先进的数值求解方法,如大跨度PC箱梁桥徐变的高效数值求解方法等。通过上述几方面的努力,PC箱梁时变行为的多场耦合分析方法正逐步完善。

5 结论与展望

详细介绍了混凝土水化-热-湿-力多场耦合模型及数值求解方法,并对PC箱梁已开展的相关研究及应用进行了总结和评述,以促进PC箱梁时变行为分析方法的进一步完善。PC箱梁时变行为受水泥水化作用、环境温度、环境相对湿度、自重和外部荷载等多因素耦合影响,对大跨度混凝土梁桥的早龄期裂缝控制和长期服役性能具有重要影响。目前,水化-热-湿-力多场耦合分析方法已广泛应用于各种不同复杂程度的混凝土结构,但在PC箱梁结构中的应用还较少。目前,对于PC箱梁时变行为的多场耦合分析方法,还可以从以下几方面开展进一步研究工作:

1)建立综合混凝土材料热、湿、力学特性随时间演化,区分气-液独立传输,与相变有关的水蒸气扩散等影响的PC箱梁时变行为多场耦合现象学模型。上述因素对混凝土时变行为而言已被普遍证明是重要的,但目前PC箱梁时变行为多场耦合分析方法中尚未将其完整纳入,可能是导致大跨PC箱梁桥长期变形等计算结果不准确的原因之一。事实上,现象学模型通常更加适用于大型混凝土结构,但模型通常较为简化,考虑的影响因素及因素间的耦合作用较为粗糙。因此,若在现象学模型的基础上更加完善地考虑各类作用及作用间的耦合影响,或许能够实现模型计算效率与计算结果准确性间的平衡。

2)基于概念、经验或物理吸附滞后模型,考虑干燥、湿润交替环境对PC箱梁混凝土传热、传湿及力学行为的影响。既有研究表明,在相同相对湿度条件下,混凝土在湿润时的含水量低于干燥时,即表现为吸附滞后现象。另外,广泛的研究显示,考虑吸附滞后效应后,对混凝土材料瞬态的传湿行为模拟更接近实际。因此,若在PC箱梁水化-热-湿-力多场耦合模型中考虑这种现象,可能更真实地模拟混凝土传湿行为,进而提升PC箱梁截面不均匀收缩变形计算结果的准确性。

3)结合损伤力学理论和断裂力学理论,建立综合材料疲劳损伤和循环徐变的PC箱梁混凝土本构模型,以及综合变应变、变温度和材料疲劳损伤的预应力筋动力松弛模型。实际运营中,PC箱梁混凝土及其内部的预应力筋将承受循环荷载。目前,大跨度PC箱梁桥在使用寿命期间的长期变形计算仍采用考虑静载作用下的混凝土静力徐变模型,未考虑循环荷载引起的混凝土循环徐变,以及混凝土材料的疲劳损伤;同时,现有的预应力松弛计算方法中

均未考虑到循环荷载的影响,这可能导致预应力筋的长期预应力损失被低估。对此,若将混凝土疲劳损伤和循环徐变,以及预应力筋疲劳损伤和动力松弛纳入大跨度PC箱梁桥多场耦合分析框架,将有助于完善其时变行为的分析理论与方法,提升大跨桥梁长期变形等的分析预测能力。

参考文献

- [1] RINCON L F, VIVIESCAS A, OSORIO E, et al. Evaluation of time-dependent deflections on balanced cantilever bridges [J]. *Computers and Concrete*, 2021, 28 (5): 487-495.
- [2] 李世伟. 基于热-湿-力多场联合作用的大跨悬浇PC箱梁桥时变结构行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
LI S W. Study on time-varying structural behavior of long-span PC box girder bridge based on combined action of thermal-humidity-force [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [3] 孟庆领. 环境温度与车辆作用下预应力混凝土桥梁长期变形模拟与预测[D]. 天津: 天津大学, 2019.
MENG Q L. Simulation and prediction of long-term deformation of prestressed concrete bridges under environmental thermal and vehicle loads [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [4] BAŽANT Z P, JIRÁSEK M. Creep and hygrothermal effects in concrete structures [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2018.
- [5] 余思臻, 漆天奇, 王桥, 等. 混凝土热-水-化-干湿应变多场耦合模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2023, 57(8): 1585-1596.
YU S Z, QI T Q, WANG Q, et al. Thermo-hygro-chemical-dry-wet strain multi-field coupled model of concrete [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2023, 57(8): 1585-1596. (in Chinese)
- [6] WANG Y L, ZHU J S, SUN Y D. Multi-scale modeling and simulation of bidirectional coupled moisture and heat transfer in concrete [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 74: 106856.
- [7] 吴建营, 莫盛特, 周浩. 基于统一相场理论的早龄期混凝土损伤与破坏分析: 化-热-湿-力多场耦合与多重变形竞争[J]. *力学学报*, 2024, 56(12): 3521-3536.
WU J Y, MO S T, ZHOU H. Computational modeling of damage and failure in early-age concrete based on the unified phase-field theory: chemo-thermo-hygro-mechanical multi-physics coupling and multi-deformation competition [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(12): 3521-3536. (in Chinese)
- [8] 肖林, 蔡俊宇, 杨妍秋, 等. 桥梁温度作用与效应 2020 年度研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(增刊 1): 167-174.
- XIAO L, CAI J Y, YANG Y Q, et al. State-of-the-art review of bridge thermal action and effects in 2020 [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(Sup 1): 167-174.
- [9] SCIUMÈ G, BENBOUDJEMA F, SA C D, et al. A multiphysics model for concrete at early age applied to repairs problems [J]. *Engineering Structures*, 2013, 57: 374-387.
- [10] DING J, WANG X, CHEN Z Y, et al. Phase field fracture simulation of early-age concrete based on chemo-thermo-hygro-mechanical theoretical framework [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, 320: 111051.
- [11] 王晴, 任晓丹. 基于徐变损伤理论的早龄期大体积混凝土化学-热-力多场耦合模型研究[J]. *工程力学*, 2023, 40(3): 225-237.
WANG Q, REN X D. Chemo-thermo-mechanical model for massive concrete at early-age based on creep damage theory [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(3): 225-237. (in Chinese)
- [12] 占玉林, 斯睿哲, 臧亚美. 混凝土桥梁耐久性 2020 年度研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(增刊 1): 100-106.
ZHAN Y L, SI R Z, ZANG Y M. State-of-the-art review of the durability of concrete bridges in 2020 [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(Sup 1): 100-106.
- [13] 尤伟杰. 混凝土早龄期多场耦合特性及约束面抗裂措施研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
YOU W J. Study on multi-field coupling characteristics and crack resistance of constraint surface in early age of concrete [D]. Jinan: Shandong University, 2018. (in Chinese)
- [14] 任毅豪. 水泥混凝土的热-化-力多场耦合分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
REN Y H. Thermo-chemo-mechanically coupling analysis of cement concrete [J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2024. (in Chinese)
- [15] LI Y, ZHANG Y S, ZHANG Y, et al. Study on moisture and heat transfer in early-age retaining wall concrete based on a multi-field coupling model [J]. *Drying Technology*, 2025, 43(7): 1195-1211.
- [16] PAL B, RAMASWAMY A. A multi-physics-based approach to predict mechanical behavior of concrete element in a multi-scale framework [J]. *Mechanics of Materials*, 2023, 176: 104509.
- [17] FAIRBAIRN E M R, AZENHA M. Thermal cracking of massive concrete structures [M]. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [18] PAL B, RAMASWAMY A. A multi-scale approach to predict shrinkage and creep of cementitious composite in

- a hygro-thermo-chemo-mechanical framework-theoretical formulation and numerical validation [J]. *Mechanics of Materials*, 2024, 188: 104866.
- [19] PAL B, RAMASWAMY A. A Meso-scale study to predict high-temperature behavior of concrete structures in a hygral-thermal-chemical-mechanical framework [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 421: 135671.
- [20] GASCH T, ERIKSSON D, ANSELL A. On the behaviour of concrete at early-ages: A multiphase description of hygro-thermo-chemo-mechanical properties [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 116: 202-216.
- [21] TRAN N P, GUNASEKARA C, LAW D W, et al. A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 38: 102210.
- [22] AZENHA M, SOUSA C, FARIA R, et al. Thermo-hygro-mechanical modelling of self-induced stresses during the service life of RC structures [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(12): 3442-3453.
- [23] LI H, LIU J P, WANG Y J, et al. Deformation and cracking modeling for early-age sidewall concrete based on the multi-field coupling mechanism [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 88: 84-93.
- [24] ZHANG L Y, WANG L, MO D. A coupled hygro-thermo-mechanical fiber beam model for reinforced concrete structures [J]. *Structures*, 2022, 45: 1267-1278.
- [25] WANG L G, QIN Z B, WANG Y C, et al. Multi factor coupling model evaluation of the influence of different working conditions on concrete damage [J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 110: 113097.
- [26] MA W D, LI H T, CHEN X G, et al. Large-volume dam pier concrete hygro-thermo-mechanical model for crack cause analysis and active control [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2025, 2025(1): 6228726.
- [27] XU W, YANG R, ZHAO H T, et al. Shrinkage separation prediction of concrete-filled steel tube arch bridge: A coupling model concerning multiple factors [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 95: 110024.
- [28] DING J, WANG X, SUN Z, et al. Research on the cracking risk index of massive concrete based on Chemo-Thermo-Hygro-Mechanical multi-field coupling model [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 98: 111190.
- [29] CIBELLI A, FERRARA L, DI LUZIO G. Multiscale and multiphysics discrete model of self-healing of matrix and interfacial cracks in fibre reinforced cementitious composites: Formulation, implementation and preliminary results [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2024, 148: 105465.
- [30] CIBELLI A, PATHIRAGE M, CUSATIS G, et al. A discrete numerical model for the effects of crack healing on the behaviour of ordinary plain concrete: Implementation, calibration, and validation [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 263: 108266.
- [31] JENDELE L, ŠMILAUER V, ČERVENKA J. Multi-scale hydro-thermo-mechanical model for early-age and mature concrete structures [J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 72: 134-146.
- [32] DI LUZIO G, FERRARA L, KRELANI V. Numerical modeling of mechanical regain due to self-healing in cement based composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 86: 190-205.
- [33] KLEMCZAK B, KNOPPIK-WRÓBEL A. Reinforced concrete tank walls and bridge abutments: Early-age behaviour, analytic approaches and numerical models [J]. *Engineering Structures*, 2015, 84: 233-251.
- [34] KLEMCZAK B A. Modeling thermal-shrinkage stresses in early age massive concrete structures: Comparative study of basic models [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014, 14(4): 721-733.
- [35] ZHOU W, QI T Q, LIU X H, et al. A hygro-thermo-chemical analysis of concrete at an early age and beyond under dry-wet conditions based on a fixed model [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115: 488-499.
- [36] DI LUZIO G, CUSATIS G. Hygro-thermo-chemical modeling of high performance concrete. I: Theory [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(5): 301-308.
- [37] ZHAO H T, JIANG K D, HONG B, et al. Experimental and numerical analysis on coupled hygro-thermo-chemo-mechanical effect in early-age concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(5): 04021064.
- [38] WANG Y, XI Y P. The effect of temperature on moisture transport in concrete [J]. *Materials*, 2017, 10(8): 926.
- [39] BENMAHIDDINE F, BENNAI F, CHARAKA A, et al. Multi-scale analysis of the effects of hysteresis on the hydrothermal behaviour of bio-based materials: Application to hemp concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134107.
- [40] LU X C, CHEN B F, TIAN B, et al. A new method for hydraulic mass concrete temperature control: Design and experiment [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 302: 124167.
- [41] FANG A M, CHEN Y M, WU L. Transient simulation of coupled heat and moisture transfer through multi-layer walls exposed to future climate in the hot and humid Southern China area [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 52: 101812.

- [42] ALIOUA T, AGOUDJIL B, CHENNOUF N, et al. Investigation on heat and moisture transfer in bio-based building wall with consideration of the hysteresis effect [J]. *Building and Environment*, 2019, 163: 106333.
- [43] MAAROUFI M, BENNAI F, BELARBI R, et al. Experimental and numerical highlighting of water vapor sorption hysteresis in the coupled heat and moisture transfers [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 40: 102321.
- [44] ZOU Y L, PROMIS G, GRONDIN F, et al. A dynamic hysteresis model of heat and mass transfer for hygrothermal bio-based materials [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 79: 107910.
- [45] ZHOU J Y, SUN Z, WEI B, et al. Deflection-based multilevel structural condition assessment of long-span prestressed concrete girder bridges using a connected pipe system [J]. *Measurement*, 2021, 169: 108352.
- [46] BRUGGER A, GAMNITZER P, HOFSTETTER G. Multiphase modeling of the effect of external loading on the shrinkage of concrete and its consequences for modeling tensile creep [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 130: 104499.
- [47] GAWIN D, PESAVENTO F, SCHREFLER B A. Hygro-thermo-chemo-mechanical modelling of concrete at early ages and beyond. Part I: Hydration and hygro-thermal phenomena [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 67(3): 299-331.
- [48] GAWIN D, PESAVENTO F, SCHREFLER B A. Hygro-thermo-chemo-mechanical modelling of concrete at early ages and beyond. Part II: Shrinkage and creep of concrete [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 67(3): 332-363.
- [49] GASCH T, MALM R, ANSELL A. Three-dimensional simulations of ageing concrete structures using a multiphase model formulation [J]. *Materials and Structures*, 2019, 52(4): 85.
- [50] 李智明. 基于复合混合物理论的冻土多场耦合研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- LI Z M. Research on coupling of multifield in frozen soil based on hybrid mixture theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [51] GAWIN D, PESAVENTO F, SCHREFLER B A. What physical phenomena can be neglected when modelling concrete at high temperature? A comparative study. Part 1: Physical phenomena and mathematical model [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(13): 1927-1944.
- [52] ZHANG J M, YU M, CHU X H, et al. A coupled hygro-thermo-mechanical Cosserat peridynamic modelling of fire-induced concrete fracture [J]. *Acta Mechanica*, 2024, 235(6): 3799-3829.
- [53] GAMNITZER P, BRUGGER A, DREXEL M, et al. Modelling of coupled shrinkage and creep in multiphase formulations for hardening concrete [J]. *Materials*, 2019, 12(11): 1745.
- [54] DU M Y, JIN X Y, YE H L, et al. A coupled hygro-thermal model of early-age concrete based on micro-pore structure evolution [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 111: 689-698.
- [55] YOU W J, ZHANG F P, HUANG Y, et al. A coupled hygro-thermo-mechanical model for the evolution of saturation in early-age concrete [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 156: 119817.
- [56] YOU W J, LIU X Y, SHANG H S, et al. Evolution of temperature, humidity and deformation in early-age cement-based materials based on a multi-field model [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 290: 123277.
- [57] BISWAL S, REDDY D H, RAMASWAMY A. Reducing uncertainties in estimating long-time prestress losses in concrete structures using a hygro-thermo-chemo-mechanical model for concrete [J]. *Computers & Structures*, 2019, 211: 1-13.
- [58] DAVIE C T, PEARCE C J, KUKLA K, et al. Modelling of transport processes in concrete exposed to elevated temperatures: An alternative formulation for sorption isotherms [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 106: 144-154.
- [59] WANG F, XIONG T G. A finite difference model for coupling thermo-hydro-vapor in the lining concrete exposed to high temperatures and its application [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2025, 211: 109696.
- [60] CHENG P P, ZHU H H, ZHANG Y M, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical-phase field modeling for fire-induced spalling in concrete [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 389: 114327.
- [61] PESAVENTO F, SCHREFLER B A, SCIUMÈ G. Multiphase flow in deforming porous media: A review [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017, 24(2): 423-448.
- [62] 崔激, 陈王, 王宁. 考虑性态变化的早期混凝土热湿力耦合分析及其应用 [J]. *土木工程学报*, 2015, 48(2): 44-53.
- CUI W, CHEN W, WANG N. Thermo-hydro-mechanical coupling analysis of early-age concrete with behavioral changes considered and its application [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(2): 44-53. (in Chinese)
- [63] VESELÝ J, ŠMILAUER V. Hygro-thermo-mechanical model for concrete pavement from an early age to a long-term performance [J]. *Construction and Building Materials*

- als, 2023, 403: 133068.
- [64] CANESTRO E, STRAUSS A, SOUSA H. Multi-scale modelling of the long-term performance of prestressed concrete structures: Case studies on T-girder beams [J]. *Engineering Structures*, 2021, 231: 111761.
- [65] DO T A, VERDUGO D, MANG T A, et al. Effect of volume-to-surface area ratio and heat of hydration on early-age thermal behavior of precast concrete segmental box girders [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 28: 101448.
- [66] ZENG H Y, LU C, ZHANG L, et al. Prediction of temperature distribution in concrete under variable environmental factors through a three-dimensional heat transfer model [J]. *Materials*, 2022, 15(4): 1510.
- [67] SHENG X W, ZHOU T M, HUANG S J, et al. Prediction of vertical temperature gradient on concrete box-girder considering different locations in China [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16: e01026.
- [68] ABID S R, XUE J Q, LIU J, et al. Temperatures and gradients in concrete Bridges: Experimental, finite element analysis and design [J]. *Structures*, 2022, 37: 960-976.
- [69] ZENG Y, ZENG Y T, JIANG D, et al. Curing parameters' influences of early-age temperature field in concrete continuous rigid frame bridge [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 313: 127571.
- [70] BAŽANT Z P, YU Q, LI G-H. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. I: Record-span bridge in Palau and other paradigms [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 138(6): 676-686.
- [71] YU Q, BAŽANT Z P, WENDNER R. Improved algorithm for efficient and realistic creep analysis of large creep-sensitive concrete structures [J]. *ACI Structural Journal*, 2012, 109(5): 665-675.
- [72] BAŽANT Z P, YU Q, LI G H. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. II: Numerical analysis and lessons learned [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 138(6): 687-696.
- [73] BAZANT Z P, HUBLER M H. Theory of cyclic creep of concrete based on Paris law for fatigue growth of subcritical microcracks [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2014, 63: 187-200.
- [74] TONG T, LIU Z, ZHANG J, et al. Long-term performance of prestressed concrete bridges under the intertwined effects of concrete damage, static creep and traffic-induced cyclic creep [J]. *Engineering Structures*, 2016, 127: 510-524.
- [75] MENG Q L, ZHU J S, WANG T L. Numerical prediction of long-term deformation for prestressed concrete bridges under random heavy traffic loads [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(11): 04019107.
- [76] CHEN H, LIU D H. Numerical simulations of multiple cracks in concrete face rockfill dams coupled multi-factor during construction [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, 22: e04609.
- [77] XU W N, ZHANG Y S, ZHANG Y, et al. Prediction of temperature distribution in manufactured sand concrete based on hydration-temperature coupling model [J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 101: 111961.
- [78] PENG Z Z, WANG Q, ZHOU W, et al. Phase-field model coupled with an improved hydration-thermal-mechanical model for fracture problem of early-age concrete [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2025, 323: 111223.
- [79] GHASABEH M, GÖKTEPE S. Phase-field modeling of thermal cracking in hardening mass concrete [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 289: 109398.
- [80] MAEKAWA K, CHIJIWA N, ISHIDA T. Long-term deformational simulation of PC bridges based on the thermo-hygro model of micro-pores in cementitious composites [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(12): 1310-1319.
- [81] 李世伟, 杨永清, 陈远久. 混凝土结构三维非线性徐变效应分析方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(3): 704-711.
- LI S W, YANG Y Q, CHEN Y J. 3D nonlinear creep analysis method for concrete structures [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(3): 704-711. (in Chinese)
- [82] LI S W, YANG Y Q, PU Q H, et al. Three-dimensional nonlinear creep and shrinkage effects of a long-span prestressed concrete box girder bridge [J]. *Structural Concrete*, 2019, 20(2): 638-649.