

超高性能混凝土早期变形性能及调控技术研究

王占刚

上海海科工程咨询有限公司

摘要：随着我国综合社会发展水平的显著提高，土木工程建设频率和建设规模明显增大，混凝土作为重要材料之一，应用水平不断拓展。超高性能混凝土在力学性能和耐久性能方面有独特优势，作为水泥复合材料能够应用于结构规模更大、更复杂的土木工程建设项目中。但是超高性能混凝土应用过程中极易发生早期变形问题，基于此，文章针对超高性能混凝土早期变形性能及调控技术进行专项研究，并结合具体施工案例探讨超高性能混凝土材料的应用。

关键词：超高性能混凝土；早期；变形性能；调控技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.11.030

引言：在我国工程建设领域，工程材料始终是重要的物质基础之一，现如今多种工程材料的研发和应用水平不断加强，对于混凝土材料的专项研究越发深入，1994年超高性能混凝土应运而生，并在土木工程领域广泛应用，文章针对超高性能混凝土早期变形性能及调控技术进行案例分析与研究有重要的实践意义和工程应用价值。

一、超高性能混凝土的材料特点与应用分析

超高性能混凝土概念于1994年提出，象征着混凝土的应用逐渐转向超高性能时代，从20世纪末期至今，超高性能混凝土在桥梁工程、房屋建筑工程和重要防护工程领域中广泛应用，取得了重大应用效果。超高性能混凝土具有混凝土的共性，为多孔不均匀材料，其孔隙结构直接影响了混凝土的力学性能和耐久效果，与其他普通类型混凝土相比，超高性能混凝土内部孔隙结构均布超细致密体系，不同组分实现有效填充，水胶比相对较低，从而进一步降低了混凝土内部孔隙率和孔隙的具体尺寸，混凝土掺入的硅灰和其他类型矿物掺合料能够与氢氧化钙开展反应，实现水泥机体与骨料的有效过渡，打造更为致密的内部结构；同时，超高性能混凝土会应用钢纤维等体量短细的纤维，着重改善超高性能混凝土材料的强度和变形效果，超高性能混凝土在抗压强度、弹性模量、耐久效果等方面有其独特优势^[1]。也正因如此，很多大型土木工程建设工作中会应用超高性能混凝土，以进一步保证经济优势和工程质量。

二、超高性能混凝土早期变形性能

超高性能混凝土发生的收缩变形情况主要可以概括为化学收缩、自收缩、干燥收缩和塑性收缩、温度收缩、碳化收缩等多种情况。以超高性能混凝土的自收缩为例，自收缩主要指混凝土浇筑完成初凝之后，受到混凝土自身水泥水化情况所引发的混凝土宏观体积收缩问题，在具体研究中不考虑混凝土浇灌技术、外界环境温度和其他约束条件影响，受到超高性能混凝土水胶比较低的影响，在应用过程中需要加入矿物掺合料和外加剂，虽然在一定程度上，此类掺合料和外加剂能够着重改善超高性能混凝土的应用特性，但是也为其早期变形和开裂埋下了深深的隐患。很多超高性能混凝土在应用过程中受到高效减水剂和外加剂影响，加速了混凝土固结过程中的水化反应，导致超高性能混凝土的水灰比降低，水化速率过快，混凝土内外温差过大而导致高性能混凝土出现早期开裂情况。另一方面，超高性能混凝土在初凝过程中会受到干燥收缩效果影响，如果外界环境温度和养护条件不适宜，很容易导致超高性能混凝土干燥收缩影响更大并引发早期裂缝情况^[2]。

对于超高性能混凝土早期变形性能情况而言，混凝土的自收缩情况占比更大，影响最多，因此可以着重探讨超高性能混凝土自收缩性能调控技术，旨在为其他早期变形情况提供重要参考和借鉴。

三、超高性能混凝土早期变形性能调控技术

（一）外养护技术

在超高性能混凝土的应用过程中，对其早期变形性能开展调控，外养护法经济效果更好，养护作用效果最为明显，主要通过延缓或隔绝混凝土表面的水分丧失情况而减少超高性能混凝土所发生的干裂问题、自收缩和塑性收缩情况。在常规类型混凝土养护工作中，往往需要对其进行蓄水洒水、蒸汽养护，或通过覆盖稻草、塑料薄膜等材料进行密封养护，但是随着土木工程建设水平的提高，此类混凝土养护形式效率更低，所消耗的资源和本成本过多，养护质量无法充分保障，难以充分适应，大型工程和特殊工程的实际需求。

常规类型的外养护技术主要有石蜡乳液或无机硅酸盐类乳液等等，其中石蜡乳液应用更为安全，养护综合效率水平相对较高，具体作用机理中需要通过石蜡乳液

的水分蒸发让混凝土表面剩余的乳胶颗粒形成保护膜，减少外界因素对混凝土造成的影响，但是此类石蜡乳液养护剂在应用过程中稳定性更差，如果温度变化过大则很容易失效。无机硅酸盐乳液对于混凝土的后续工序影响相对较小，但是综合应用效果不佳，需要进行重点喷涂和着重养护。很多工程项目中会应用有机和无机复合类养护剂，充分发挥二者的优势，但养护成本更高。当前市场环境下对于超高性能混凝土外养护剂的应用与专项研究越发深入，但是受到不同类型工程项目特点的影响，直接应用外养护剂技术要求更高，需要进行应用方面的着重探讨。另外当前市场对于外养护剂的综合应用效果缺少系统化的评价标准，外养护剂在应用过程中更加倾向于隔绝混凝土表面与外界自然环境接触，阻止混凝土内部水分蒸发，但是此种操作形式会导致混凝土凝固过程中无法及时补充水分，很容易受到超高性能混凝土自收缩效果影响，造成混凝土出现更为严重的裂缝问题，因此，单一应用外养护剂的养护方法无法充分调节超高性能混凝土早期变形性能，需要配合其他操作手段和养护方法进行应用^[3]。

（二）内养护技术

超高性能混凝土的水胶比越低，强度逐渐提高，但是其自收缩效果也相应加大，应用外养护技术进行混凝土早期变形性能调控时，需要在混凝土内部涂抹养护剂，让养护剂预吸收的水分能够持续不断的向混凝土内部输送，让其始终保持平均的湿度水平，既促进了超高性能混凝土内部持续水化效果，也能有效提高混凝土的强度。内养护技术可以应用膨润土、高吸水树脂和其他多孔吸水材料进行实现。内养护技术已经发展多年，逐渐暴露出了角度应用问题，例如个别类型的内养护剂无法充分满足超高性能混凝土的性能需求，在应用过程中会导致超高性能混凝土的抗压程度、力学效果、耐久效果持续下降；另外很多工程中会应用预吸水陶粒和树脂等作为内养护材料，受到自身比重影响，此类轻骨料在混凝土浇筑和振捣过程中容易出现上浮，无法充分保障超高性能混凝土的均质效果。

（三）减缩剂方法

超高性能混凝土的毛细孔负压情况直接影响其综合水平，而对于毛细孔负压而言，往往会受到液体张力和水蒸气湿度的影响。在超高性能混凝土其他早期变形控制技术中都所应用的外养护和内养护技术都是减少混凝土内部湿度下降和水蒸气蒸发，对变形情况进行调控，而应用减缩剂则是直接应用减小孔隙液体表面张力的情况进行控制。减缩剂主要由表面活性剂组成，存

在较多疏水和亲水集团，让二者有效吸附和降低孔细液表面张力^[4]。在超高性能混凝土早期变形性能调控技术中应用减缩剂的调控效果相对较好，但是仍旧存在较多问题，例如会对超高性能混凝土的凝结时间造成延缓影响，同时也会减少混凝土原有的力学性能，极大地影响了减缩剂在超高性能混凝土领域中的应用。值得注意的是，减缩剂往往存在较大挥发性和毒性，因此在现代施工技术绿色环保的建设目标影响之下需要进行谨慎应用。

（四）膨胀补偿技术

为了有效缓解超高性能混凝土的早期变形情况和裂缝情况，可以应用膨胀补偿法，同样也是调整混凝土内部毛细孔水负压力而实现。应用混凝土膨胀剂要按照不同的膨胀率和超高性能混凝土组分需求进行把控，例如硫酸铝钙、氧化钙、氧化镁和复合类水化产业等多种类型膨化剂，在添加量和微观应用水平等方面存在较大差异。膨胀剂应用过程中逐渐显露出较多问题，例如受超高性能混凝土水胶比影响较多，超高性能混凝土的水胶比相对较低，会在一定程度上降低混凝土膨胀剂的膨胀效率水平。另外膨胀剂与外加剂的相溶性，受外界环境温度影响性和矿物掺合料的添加量等，都或多或少对混凝土膨胀剂产生抑制作用，导致膨胀剂对于超高性能混凝土早期变形性能的调控效果逐渐降低^[5]。

（五）模板技术

模板技术主要通过是在超高性能混凝土外部设置永久模板，以减少混凝土表面水分的过度蒸发，此种施工形式能够有效减少和调控超高性能混凝土的早期收缩和变形问题。虽然当前很多工程项目中并没有广泛普及永久模板施工技术，但是相关研究逐渐深入，例如钢丝网模板、玻化微珠保温板和聚苯乙烯泡沫塑料墙板等都是永久模板技术的代表。除此之外应用永久模板剂提高超高性能混凝土水化，耐久性更高，施工工艺水平逐渐简化，工作效率更高，施工周期更短，建筑工程的综合费用也能随之减少。对于不同类型混凝土而言，应用永久模板最大优势在于减少混凝土水分传输和扩散，因此直接应用挤压成型的低收缩高延性水泥复合材料更具优势。总体而言，不同类型的永久模板在超高性能混凝土早期变形效果和收缩速率控制方面综合效率不一，调控系数不同，无法为混凝土内部提供充足的水分，需要配合多种类型的养护手段和措施进行同步操作；另外应用永久模板的施工方法，难以全面覆盖超高性能混凝土所有干燥面，容易引发混凝土结构问题。

（六）骨料调控技术

骨料调控技术主要通过对超高性能混凝土的掺和骨料进行调控, 让其对混凝土水泥浆液的收缩起到重要的约束作用。当石灰石粗骨料整体体积在0-50%的区间之内逐渐增大时, 超高性能混凝土的收缩变形效率也会逐渐降低, 内部湿度逐渐减小, 在实际应用过程中, 骨料调控技术受地域和材料特点影响较多, 很多大型施工项目和桥梁工程中, 无法及时调换混凝土骨料品种, 导致施工过程中运输成本增加, 可操作空间受影响。

四、超高性能混凝土的应用案例分析

为深入探究超高性能混凝土早期变形性能调控技术, 笔者以中山西部外环高速公路A段翠华路预制厂梁板预制项目为具体研究对象, 深入探讨超高性能混凝土

的应用案例。

该工程项目主体翠华路预制厂, 位于中山市大涌镇翠华路侧, 距离古神公路1.2km, 预制厂划分7个功能区。项目中结合弯折束先张法工字梁生产工艺要求和《公路桥涵施工技术规范》要求, 优选满足现场施工要求的高流态先张法C70预应力箱梁混凝土。它解决了钢绞线水平束密集, 间隙小而带来混凝土浇筑困难的问题, 提高混凝土施工效率, 保证梁体混凝土施工质量。

在应用C70混凝土超高性能混凝土进行施工时, 既要满足高流态自密实性能要求, 也要满足混凝土需满足40小时放张要求。针对此, 项目组应用三种减水剂进行对比实验(表1), 最终确定三瑞、苏博特比较符合预

表1 混凝土减水剂对比实验数据

品牌	强度等级	后场坍落度 (mm)	后场扩展度 (mm)	前场坍落度 (mm)	前场扩展度 (mm)	V漏斗	L型仪	T ₅₀₀
超利	C70	270	680	270	700	20s	0.21	5s
三瑞	C70	255	650	270	680	51s	0.21	7s
苏博特	C70	270	680	265	660	15s	0.64	5s

制梁的实际生产需求。

预制梁使用的C70混凝土使用天泵进行分三层浇筑, 为了减小浇筑过程中泵送混凝土的冲击力、降低混凝土对翼板的污染、避免溅射到翼板上的混凝土快速变干等影响预制梁外观质量现象的出现, 混凝土浇筑时采用特制的缓冲漏斗放置在天泵象鼻管的下方。此项目主要采取先张工艺施工办法, 着重缩减了模板的周转期限, 有利于进一步提升施工速度。为保障超高性能混凝土的应用水平, 采取蒸汽热模养生工艺方法, 当工字梁浇灌完成之后, 应用此种养生办法提高前期强度, 节省等强时间。此类蒸汽热模养生工艺需要建设养生系统, 其中主要涵盖了养生腔室、蒸汽锅炉和热力管道等多个部分, 主要应用特制空腔钢模板发挥作用, 在模板内设置蒸汽管道, 通过蒸汽在管道中的畅通实现对现有模板的加热, 并传达热量给混凝土, 提高混凝土的温度。应用蒸汽热模养生工艺时, 工字梁梁体表面温度要保持在45℃以下, 梁体内部温度要低于65℃, 如果出现温度超标的情况要将混凝土强度设计值提高20%。在移梁前继续采用喷漆养生的工艺对混凝土继续养护, 采用自动喷漆养生系统喷出的气雾状水对混凝土持续进行养护, 提高蒸养后的混凝土强度。

结论

综上所述, 超高性能混凝土以其耐久性和力学性能

被广泛应用于桥梁工程、建筑工程和多种类型的防护工程中, 混凝土结构自重更轻, 设计空间大, 符合生态环保和可持续发展特点。超高性能混凝土在应用过程中容易受到自身水胶比低特点的影响, 引发早期变形和裂缝情况。因此本文首先分析了超高性能混凝土的材料特点与应用, 其次分析了超高性能混凝土的早期变形性能, 最后针对超高性能混凝土早期调控技术进行专项论证, 并结合具体应用案例探讨超高性能混凝土的应用, 希望能够为我国超高性能混凝土的应用提供重要参考。

参考文献

[1] 黄维蓉, 杨玉柱, 崔通, 刘延杰. 含粗骨料超高性能混凝土收缩变形性能的研究[J]. 混凝土, 2021(08): 99-103.

[2] 丁小平, 韩宇栋, 张君, 林松涛, 李威. 混凝土收缩调控评述-单因素调控法[J]. 防护工程, 2021, 43(03): 1-12.

[3] 缪昌文, 穆松. 混凝土技术的发展与展望[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(01): 1-11.

[4] 吴林妹. 超高性能混凝土早期收缩性能与长期稳定性研究[D]. 湖南大学, 2019.

[5] 徐真才. 超高性能混凝土变形性能及调控技术[D]. 重庆大学, 2018.