

不同养护制度对C50混凝土早期强度发展影响的试验研究

韩晶

(西安交通工程学院 陕西 西安 710300)

摘要:为明确养护制度对C50混凝土早期强度发展的影响,选取标准养护、蒸汽养护、自然养护和缺水养护4种制度进行对比试验。结果表明,养护制度对混凝土早期强度发展的影响显著。在3d龄期时,蒸汽养护组的抗压强度最高达52.4 MPa,比标准养护组、自然养护组分别高出28.7%、46.4%;缺水养护组强度发展滞后,28d龄期强度为标准养护组的84%。蒸汽养护组与标准养护组28d龄期强度相近,自然养护组为标准养护组的97%。蒸汽养护制度可显著提高混凝土的早期强度,且不影响后期强度发展;在自然养护制度下,混凝土的早期强度较低,且缺水会导致强度出现不可逆的损失。建议预制构件优先采用蒸汽养护制度,现场浇筑结构需持续进行保湿养护并严禁中断。

关键词: C50混凝土;养护制度;早期强度;抗压强度;蒸汽养护

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0393-05

Experimental Study on Effect of Different Curing Regimes on Early Strength Development of C50 Concrete

HAN Jing

(Xi'an Traffic Engineering University, Xi'an 710300, China)

Abstract: To clarify the influence of curing regimes on the early strength development of C50 concrete, four curing regimes of standard curing, steam curing, natural curing and water shortage curing are selected for comparative tests. The results show that the curing regimes have a significant impact on early strength development of concrete. At the 3-day age, the compressive strength of the steam curing group reaches a maximum of 52.4 MPa, which is 28.7% and 46.4% higher than that of the standard curing group and the natural curing group, respectively. The strength development of the water shortage curing group lags behind, and the strength at 28 d of age is 84% of that of the standard curing group. The strength at 28 days of age in the steam curing group is similar to that in the standard curing group, while that in the natural curing group is 97% of that in the standard curing group. The steam curing regime can significantly enhance the early strength of concrete without affecting its later strength development. Under the natural curing regime, the early strength of concrete is relatively low, and the water shortage can lead to irreversible loss of strength. It is recommended that the prefabricated components give priority to the steam curing regime. For on-site cast structures, the continuous moisturizing curing is required and interruption is strictly prohibited.

Keywords: C50 concrete; curing regime; early strength; compressive strength; steam curing

0 引言

混凝土是当前土木工程中运用较为广泛的材料之一,其性能的好坏直接关系到工程结构的安全性、耐久性和经济性。在混凝土的各项性能指标中,早期强度的发展状态是影响施工进度(拆模时间、预应力张拉、结构加载等)及预判混凝土潜在工作性和后

期耐久性的关键因素。特别是C50及以上等级的混凝土,由于胶凝材料用量多,水胶比较低,混凝土内的孔隙率也较低,在养护过程中水分和温度的影响较大,因此需对早期强度进行合理调控。

养护制度是保障水泥能否持续水化、混凝土强度能否按计划正常发展的关键因素。从理论上讲,标准养护(即恒温、恒湿)制度可为混凝土强度发展提供最有利的环境。但在实际生活中,由于一些客观原因,如施工条件、工期费用、环境条件等,许多工程无法采用标准养护制度,因此出现其他养护制度,

收稿日期: 2026-02-11

作者简介: 韩晶(1992—),女,硕士,工程师,从事土木工程类相关教学工作。

如蒸汽养护(常见于预制构件)、自然养护(一般用于现场浇筑结构)、缺水养护等。

不同的养护环境,会使水泥在水化速率、水化产物形态及分布、孔隙结构演变等微观过程上存在显著差异,进而导致宏观力学性能也不一样。虽然目前学界已有许多关于混凝土配合比设计、外加剂种类和掺量对混凝土强度影响的相关研究成果,但这些研究均缺乏在比较明确的前提下,对C50混凝土在不同养护制度下的早期强度发展规律、强度增益机理、长期性能响应特征等的系统性试验与对比^[1]。若将该试验结果作为前期研究的连接点,则可以在以C50混凝土为代表的试验室理想状态与现场复杂工程状态之间建立有效联系,从而实现混凝土从材料设计到施工工艺,再到养护控制的协调统一。为此,本文选取工程中常用的C50混凝土,采用4种养护制度进行对比试验。4种养护制度分别是标准养护(ST)、蒸汽养护(SC)、自然养护(NC)和缺水养护(DC)。

本文对4种养护制度下C50混凝土分别在3 d、7 d和28 d龄期的抗压强度发育规律进行系统性对比分析,定量探究在不同温湿度条件下C50混凝土的早期强度发展速率和最终强度差异,并对其背后的机理——水化机理和结构形成功效展开深入分析,以期为预制构件厂改进蒸汽养护工艺参数、制定施工养护方案、控制养护过程质量等提供直接的试验数据支持及理论参考依据。本次试验不仅对提升混凝土结构工程质量、提高施工现场精细化管理水平具有重要的现实指导作用,还有助于制定并完善养护相关标准、规范。

1 试验目的

本次试验旨在探讨不同养护制度对C50混凝土早期强度发展的影响情况。

(1)为便于对比,本文设计4种典型养护制度,分别为标准养护、蒸汽养护、自然养护和缺水养护,在这4种养护制度下展开相同的试验。

(2)对采用不同养护制度的C50混凝土在3 d、7 d、28 d等关键龄期的抗压强度值进行量化测试并分析。

(3)比较不同养护制度对混凝土早期强度增长速度以及28 d龄期时最终强度的影响,并比较不同养护制度的优点、缺点和使用范围。

(4)运用水泥水化理论展开分析,探讨不同养护

制度下影响混凝土强度发展的因素。

(5)根据试验结果,为预养、湿养及喷雾养护方法的优化提供建议,并在工程实践中加以推广使用。

2 试验过程

2.1 试验准备

2.1.1 原材料

所有试验材料均采用符合我国国家现行有关标准的材料,其主要性能指标如表1所示。

(1)水泥

试验选用P·O 42.5级普通硅酸盐水泥,其物理力学性能满足《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2023)的相关规定。其中,水泥的比表面积为350 m²/kg,初凝时间为165 min,终凝时间为245 min,3 d龄期时的抗压强度为22.5 MPa,28 d龄期时的抗压强度为48.0 MPa。

(2)骨料

细骨料采用天然河砂(中砂),细度模数为2.7,表观密度为2 650 kg/m³,堆积密度为1 520 kg/m³,含泥量为1.2%,级配良好。

粗骨料选用5~25 mm连续级配碎石,压碎值指标为8.5%,针片状、片状颗粒含量为5%,表观密度为2 700 kg/m³,堆积密度为1 550 kg/m³。

(3)拌合水

拌合水采用清洁的市政自来水,满足《混凝土用水标准》(JGJ 63—2006)的要求。

(4)外加剂

外加剂为聚羧酸系高效减水剂(固含量20%),减水率为25%。

2.1.2 配合比设计

为满足C50混凝土的强度要求,试验依据其强度值所对应的配合比,取平均值作为基准。如表1所示,水胶比为0.38,砂率为39%,可满足工作性要求,将坍落度控制在(180±20)mm范围内,同时达到设计强度要求。

表1 C50混凝土基准配合比 单位:kg/m³

材料	水泥	砂	碎石	水	减水剂
用量	440	685	1 085	165	5.28

2.1.3 试件制作与分组

试验采用60 L强制式单卧轴搅拌机拌合,投料顺序是先向搅拌筒内加入砂、石、水泥干拌30 s,再加入水和减水剂搅拌150 s,直至混凝土拌合物均匀为止。

首先将搅拌好的混凝土拌合物分2层置于边长为150 mm的立方体试模中并插捣密实;然后将试模放在振动台上进行振动密实并抹平表面。本次试验共成型72个试件。

将已成型的试件置于(20±5)℃下养护24 h后脱模。将脱模后的所有试件随机分成4大组,每组有18个试件,分别标注标准养护、蒸汽养护、自然养护和缺水养护4种养护方式;每一大组再随机分成3个小组,每个小组有6个试件,用于开展3 d、7 d、28 d龄期的抗压强度测试。

在规定龄期进行强度测试时,需对每个小组的6个试件进行抗压试验。依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)的规定,先对测试数据进行处理:计算6个试件强度的最大值、最小值分别与中间值的差值。若2个差值均不超过中间值的15%,则取6个试件的算术平均值作为该组试件的强度代表值;若其中1个差值超过中间值的15%,则取中间值的4倍作为该组试件的强度代表值;若2个差值均超过中间值的15%,则该组数据无效,需重做试验。

2.2 试验方法

2.2.1 养护制度设定

(1)标准养护组

试验组试件在拆除模板后应立即移入标准养护室,养护室的温度控制在(20±2)℃,相对湿度≥95%。将试件养护至规定龄期,作为1组基准对照样。

(2)蒸汽养护组

试验组采用预制构件生产中常用的蒸汽养护工艺,即拆模后先于室温下静停2 h,然后进行蒸汽养护。整个蒸汽养护过程严格遵循相关规范的规定,升温速度控制在≤10℃/h,缓慢升温至(60±2)℃,并作为恒温温度。在恒温温度下养护6 h;恒温养护结束后,以≤10℃/h的速度,缓慢降温至室温。蒸汽养护结束后,所有试件转入标准养护室养护至规定龄期。整体蒸汽养护时间约为10 h。

(3)自然养护组

试验组模仿工地现场覆盖面水养护情况,将试件放置于室内通风处,表面覆盖浸湿的棉麻布,安排专人每天早晚各浇水1次,以保证覆盖物始终处于潮湿状态。试验采用温湿度自动记录仪,对养护环境进行连续监测。监测数据显示:自然养护环境日均温度为21.6℃,温度波动范围为16.2~28.5℃,日均相对湿度为63%,湿度波动范围为48%~72%。整

体环境条件基本符合预设范围,但昼夜温差及天气变化仍导致一定范围的温湿度波动。

(4)缺水养护组

试验组模拟养护不善或养护初期失水过多的情景,将试件置于试验室通风处(与自然养护组相同),仅在拆模后第一天对试件进行1次洒水湿润,在其上覆盖纸板后不再淋水保湿,任其自然风干。

2.2.2 抗压强度测试

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)的规定,抗压强度测试分别将试件的龄期控制为3 d、7 d、28 d进行试验。

采用微机控制电液伺服万能试验机开展强度测试,在试件脱模后,立即用湿布擦拭干净表面,首先检查试件外观,测量尺寸;然后将试件放置在试验机下压板中央,试验加载速度为0.5 MPa/s,连续均匀加载,直至试件被破坏,记录最大破坏荷载;最后在每种龄期组取3个试件开展测试,并取3个试件的算术平均值,作为同组、同龄期抗压强度值。

2.3 试验流程

试验整体流程为“原材料检验—配合比设计与试配—试件批量制作与分组—实施不同养护制度—按龄期进行强度测试—数据记录与分析”。试验应保证过程受控、数据可对比。

2.4 结果分析

2.4.1 抗压强度试验结果

表2展示了C50混凝土在不同养护制度下、在不同龄期对应的抗压强度测试平均值。为更直观地表达混凝土的抗压强度发展规律,本文绘制了早期强度发展曲线示意图(见图1)。

表2 不同养护制度下C50混凝土抗压强度试验结果

养护制度	3 d强度/ MPa	7 d强度/ MPa	28 d强度/ MPa	28 d相对值/ %
标准养护(ST)	40.7	47.9	57.8	100
蒸汽养护(SC)	52.4	55.3	58.9	102
自然养护(NC)	35.8	45.1	56.0	97
缺水养护(DC)	28.2	36.7	48.7	84

2.4.2 结果分析

分析表2和图1,可得出以下结论。

(1)早期强度发展差异巨大

养护制度对混凝土早期(3 d)强度发展具有很大影响。在3 d龄期时,蒸汽养护组抗压强度达到52.4 MPa,分别比标准养护组与自然养护组高出28.7%和46.4%。而在同一龄期,缺水养护组的抗压

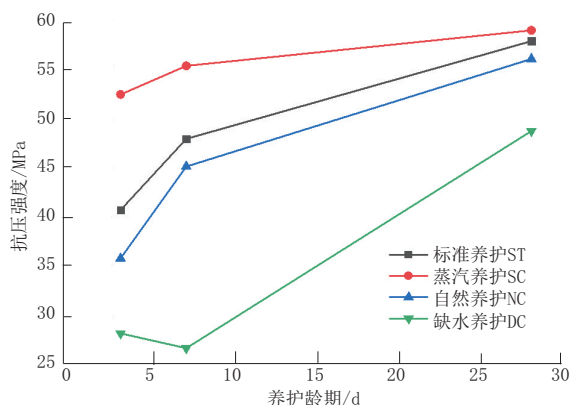


图1 不同养护制度下C50混凝土早期强度发展曲线示意图

强度仅达到28.2 MPa,强度增长速度非常缓慢。由以上试验可知:若在水泥混凝土刚浇筑完成时便做好保温、保湿工作,则水泥的水化速度将加快。

(2) 强度发展速率对比

由强度发展曲线斜率可知,蒸汽养护组斜率最大,说明蒸汽养护制度是促进混凝土早期强度发展的最有力措施;标准养护组次之,说明在此制度下,混凝土早期强度发展平稳;自然养护组由于受到温湿度的影响,其强度增长速度小于标准养护组;缺水养护组的曲线最为平缓,说明混凝土早期内部缺水会严重抑制水泥的水化反应。

(3) 后期强度发展及最终强度

随着龄期增大,各组试件的抗压强度增长速率逐渐相近,到28 d龄期时,蒸汽养护组(58.9 MPa)与标准养护组(57.8 MPa)的抗压强度逐渐接近。可见,蒸汽养护措施并未对混凝土的最终强度造成不良影响。自然养护组28 d龄期强度达到标准养护组的97%,说明即使模拟良好的自然养护条件,混凝土后期的水化作用并不能完全弥补前期养护不足所造成的强度差异。缺水养护组28 d龄期强度仅为标准养护组的84%,强度损失达16%,该强度平均值(48.7 MPa)已显著低于C50混凝土的预期配制强度,表明其实际强度难以满足规范对C50混凝土的设计等级要求。这说明前期严重失水造成的强度损失不可逆,失水会对混凝土性能造成永久性损伤。

3 试验讨论

本文结合试验数据与水泥混凝土材料学理论,对不同养护制度的作用机理展开分析。

3.1 加速无损蒸汽养护机理

蒸汽养护是在稳定的高温(60℃)、高湿条件下对混凝土进行养护。这种养护方式通过提高水泥颗

粒的活性,使水泥在短时期内迅速、充分地发生水化反应。在此过程中,大量C-S-H凝胶等水化物快速形成并迅速搭接,构建出高强度的早期微结构,从而使水泥获得很高的早期强度。因此,采用“静停—平缓升温—适度恒温—平缓降温”的养护制度,可保证蒸汽养护过程中混凝土内外温差不大,同时蒸汽养护所耗时间不长^[2-3]。这样既可以避免混凝土内外温差过大、体积变形不均造成的微裂纹,又能避免恒温养护温度过高(如>80℃)造成的水化产物粗化、分布不均匀等问题。综上所述,科学、合理的蒸汽养护是一种“以时间换空间”的养护方式,特别适用于追求早期脱模、加快台座周转的预制构件生产。

3.2 标准养护的定义与意义

标准养护是一种理论上理想化的养护方法,其强度表征在理想的温湿度条件下混凝土强度随时间发展的“本征”,它是判断其他养护方式性能优劣的标准。标准养护组的各强度发展曲线均较为平滑、稳定,说明其内部水化进程处于持续且均衡的发展状态。

3.3 自然养护的不确定性分析

自然养护组虽然模仿“加强养护”的施工场地条件,但其实测温湿度仍存在昼夜温差和天气变化导致的波动^[4],温湿度波动会影响水化反应速率。此外,自然养护组虽然每日洒水,但在间歇期间,混凝土表面仍可能出现微弱失水现象,这会造成2方面的问题:其一,表层混凝土因失水而不能获得良好的水化效果,其强度会低于深层强度;其二,由于混凝土内部存在毛细管负压,在塑性阶段、早期强度不足的状态下易生成肉眼不可见的微裂纹,这也是自然养护组各龄期强度普遍略低于标准养护组的重要原因之一。因此,现场自然养护很难达到实验室养护的效果,养护存在“强度折减”的风险。

3.4 缺水养护的破坏性机理

缺水养护的效果最差。早期缺水会破坏水泥的水化介质,导致水化过程突然减速或停止,使水化产物明显不足。而大量水份的快速蒸发,会在混凝土内部引发干缩应力。同时,由于混凝土本身的抗拉强度较低,随着混凝土强度的快速发展,干缩应力会在混凝土内部引发大量裂纹,进而形成网状分布的微裂纹,逐步破损伤“浆体—骨料”界面过渡区(ITZ),最终降低混凝土微观结构的完整性。混凝土早期缺水造成的强度损失不可逆^[5],后续补水对强度的提升效果十分有限。因此,早期保湿条件在很大程度上影响着混凝土的最终强度,表现在试验

中,即缺水养护组28 d龄期的强度损失达到16%。该组试验充分且直观地说明了早期保湿养护的重要性。

3.5 影响结果

总结养护制度对混凝土长期性能和耐久性的潜在影响:养护不足会导致混凝土微裂纹增多、界面结构松散、孔隙率增大(连通孔多),降低混凝土的抗渗性、抗冻性、抗碳化能力,以及对钢筋的保护作用,进而降低整体的耐久性^[6]。因此,优化养护制度是提高混凝土长期强度性能的有效方法。

4 结 语

4.1 主要结论

通过上述系统性试验与分析,本文得出以下主要结论。

(1)养护制度对C50混凝土的早期强度发展起到决定性作用。在试验条件下,在3 d龄期时,不同养护制度产生的强度差异最大为86%(蒸汽养护与缺水养护)。蒸汽养护制度可以显著提高混凝土早期强度的增长速度。

(2)采用科学的蒸汽养护制度(即静停、平缓升温 and 降温、60℃恒温),不但能够提升C50混凝土的早期强度,还不会对其28 d龄期的最终强度产生影响,是加快预制构件生产的一种有效方法^[7-8]。

(3)模拟现场的自然养护制度很难达到标准养护时的强度要求。即便在自然养护过程中加大洒水保湿力度,混凝土各龄期强度仍难以满足标准养护水平,在28 d龄期时,强度约为标准养护的97%。因此,这种养护制度存在强度发展不足的风险。

(4)早期缺水养护会严重影响混凝土强度的发展,造成水化反应停滞,引发微结构损伤,使混凝土产生不可逆的强度损失^[9]。试验过程中发现,在28 d龄期时,混凝土强度损失达到16%,已不满足规范规定的设计等级要求。

(5)混凝土强度随时间的发展,是水泥浆体微结构不断演变的宏观体现。养护制度会影响水泥的水化进程、水化产物组成,以及孔隙的形态与结构特征,从而决定混凝土宏观力学性质的发展变化。

4.2 建议

依据试验结果,本文提出如下工程建议。

(1)预制构件优先采用蒸汽养护制度。应结合原材料特点,通过试验,确定静停时间、升温与降温速率、恒温温度及时间等关键参数^[10],在保证质量的同时提高生产效率。

(2)对于现浇混凝土结构,有必要重视并落实早期持续保湿养护工作^[11],做好有关方案设计。对于水平结构如楼板、路面等的养护,可用湿麻袋或土工布进行覆盖,并经常性浇水;对于竖向结构如墙、柱的养护,可采取带模养护,或喷淋、涂刷养护剂的方式。养护时间一般不宜低于14 d,针对高性能混凝土,或对结构耐久性要求较高的工程场景,养护时间应延长。

(3)应将混凝土养护作为关键工序进行严格管控。技术交底应明确养护方法、时间及责任人,加强施工过程巡查,尤其需重视并落实混凝土浇筑后前3 d的保湿工作。积极推广塑料薄膜密封或自动喷淋等保湿技术^[12],严禁出现缺水养护类现象。

参考文献:

- [1] 张军,陈波,赵岩.不同养护条件下混凝土早期强度发展规律试验研究[J].建筑材料学报,2019,22(3):456-462.
- [2] 王栋,刘伟,李建国.高温蒸汽养护对高性能混凝土早期力学性能的影响[J].硅酸盐学报,2018,46(5):678-684.
- [3] 孙志刚,王建国.蒸汽养护混凝土的微观结构与强度发展关系研究[J].材料导报,2018,32(增刊1):415-418.
- [4] 刘宏伟,王磊.自然养护与喷雾养护在市政桥梁混凝土施工中的应用比较[J].城市道桥与防洪,2020(5):132-135.
- [5] 周伟,刘建国.缺水养护对混凝土强度损失的不可逆性试验分析[J].建筑科学,2020,36(6):113-117.
- [6] 周明,吴振华,孙志伟.养护制度对高强混凝土早期性能及耐久性的影响[J].混凝土,2020(6):89-92.
- [7] 黄涛,杨凯,刘志强.蒸汽养护工艺参数对预制混凝土构件性能的影响[J].土木工程学报,2021,54(7):112-119.
- [8] 陈建华,周涛.城市高架桥预制箱梁蒸汽养护工艺与控制要点[J].城市道桥与防洪,2019(8):145-148.
- [9] 赵建国,孙丽.混凝土早期保湿养护对市政道路面板开裂的影响[J].城市道桥与防洪,2021(3):120-123.
- [10] 徐斌,李娜.预制墩柱蒸汽养护工艺在快速化施工中的应用[J].城市道桥与防洪,2022(4):155-158.
- [11] 李强,赵晓光.自然养护条件下混凝土表面保湿方法的比较研究[J].施工技术,2019,48(14):82-85.
- [12] 陈建国,孙斌.混凝土早期养护的重要性及现场常见问题与对策[J].建筑工程技术与设计,2023(10):112-115.