文章编号: 1005-0523(2007)05-0013-04

混凝土的自收缩机理及抑制措施

周双喜

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:评述了有关混凝土自收缩性能的研究现状,重点分析混凝土自收缩的起因、影响因素及测定方法,并总结关于减小混凝土自收缩的途径,提出了今后研究中亟待解决的问题.

关键词:混凝土;自收缩;抑制措施

中图分类号: TU528.01

文献标识码: A

混凝土的自收缩现象早在 60 多年前就由 Davis^[1]和 Lyman^[2]提出的,当时发现混凝土自身能够收缩,同时质量和温度没有任何变化.近年来,随着混凝土科学的发展,尤其是高效减水剂和矿物掺合料在混凝土中的广泛应用,混凝土的水胶比大大降低^[3].这种低水灰比的混凝土(水灰比不大于 0.4)有很高的强度和很低的渗透性,在不发生裂缝的前提下是十分耐久的.但在低水胶比的情况下,强烈的水化会促使混凝土中毛细管弯月面快速向内推进和相对温度的很快下降,在混凝土中出现自干燥现象.混凝土的自干燥必将引起混凝土宏观体积的减小,这种现象称为混凝土的自收缩.在低水胶比的情况下,混凝土在硬化的早期就会产生很大的自收缩^[4-6].在实际的混凝土工程中,混凝土又不可避免地受到约束的作用.在约束存在的情况下,这种高自收缩的混凝土发生开裂的可能性大大增加.由于混凝土的自收缩与混凝土的早期开裂现象关系紧密^[7-8],因此有必要对混凝土的自收缩加以研究.

1 混凝土的自收缩及作用机理

1.1 自收缩及其产生的原因

混凝土的自收缩是指混凝土硬化阶段性(终凝以后),在恒温、与外界无水分交换的条件下混凝土

宏观体积的减小.自收缩与干缩不同,它在混凝土体内相当均匀地发生,而不仅仅在混凝土表面发生.

一般认为,混凝土自收缩是混凝土中水泥水化形成的混凝土内部空隙产生的毛细管张力造成的.其具体过程如下:水泥和水发生作用时,所形成的水化产物的体积小于水泥和水的总体积,在混凝土具有较大流动性时,混凝土通过宏观体积的减小来补偿水泥水化产生的体积变化,随着水泥水化的进行,混凝土的流动性逐渐降低,混凝土不能完全靠宏观体积的减小来补偿水泥水化产生的体积变化,这时混凝土通过形成内部空隙和宏观体积减小两种形式补偿水泥水化产生的体积变化.随着水泥水化的进一步发展,混凝土产生一定的强度,这时混凝土主要通过形成内部空隙来补偿水泥水化产生的体积变化.在混凝土终凝以后,虽然水泥水化产生的体积变化主要通过形成内部空隙补偿,但由于内部空隙的形成而产生的毛细管张力将使混凝土的宏观体积收缩.在水灰比较高的情况下,混凝土内部的毛细管较粗,由于内部空隙的形成而产生的毛细管张力很小,混凝土的自收缩也很小.但水灰比很低的情况下混凝土中的毛细管很细,由于内部空隙的形成而产生的毛细管张力很大,混凝土的自收缩值也将很大.在早期混凝土强度较低时,混凝土自收缩的发展速度将很大.

收稿日期: 2007-08-14

1.2 自收缩的作用机理

自收缩作用机理可以通过混凝土的自干燥现象得到很好的解释.随着水泥水化的进行,在硬化水泥石中形成大量微细孔,自由水量逐渐降低,水的饱和蒸气压也随之降低,即水泥石内部相对湿度降低,但同时水泥石质量没有任何损失,这种现象称为自干燥.许多试验结果都证实了混凝土内部能够产生自干燥现象.产生自干燥现象的结果是使毛细孔中的水由饱和状态变为不饱和状态,于是在毛细孔水中产生弯月面,造成硬化水泥石受负压的作用而产生收缩.自收缩作用机理类似于干缩机理,都是靠毛细管应力来说明问题,但自收缩与干缩在相对湿度降低的机理上不同.造成干缩的原因是由于水分扩散到外部环境中.因此可以通过浆体密实化或者阻止水分向外扩散的方法来降低干缩,而自收缩是由于内部水分被水化反应所消耗而形成的,因此通过阻止水分扩散到外部环境中的方法来降低自收缩并不见效.然而在一点上它们是相同的:都造成了硬化水泥浆体内部相对湿度的降低.因此适用于干缩的一些机理,比如毛细管理论也同样适用于自收缩.

2 自收缩的测定方法

混凝土的自收缩测定不仅需要精确的量测方法,而且需要从初凝即开始测定,另外还需要保证被测试体系(试件)与外界无水分交换,因此给测试工作带来了很大的难度.目前常用的自收缩测定方法大致可分为埋入应变计法和千分表法.

埋入应变计法可较好地解决密封问题,但在早期,混凝土尚无足够的强度时(初凝至终凝),应变计与混凝土不能同步变形,因此无法精确测定早期自收缩,可见该方法不适用于高性能混凝土.我国水工混凝土自收缩测试方法与日本的森本博昭提出的自收缩测定方法^[9]均属此列.

千分表法不存在应变计法的缺点,但是在试件的密封上比较困难.我国建筑工程混凝土自收缩测定方法与日本自收缩研究委员会提出的自收缩测定方法^[10]均属千分表法.按试验方法的规定我国的方法只能测定3d以后的自收缩,显然不适用于高性能混凝土;而日本的方法则可在早期(初凝至1d)带模(密封试模)测定自收缩,精确测出其早期自收缩值,但因1d后试件需要拆模并再用铝箔与环氧密封,因此受密封材料的约束作用,用该法测定的试件自收缩值偏小,由此可见,目前尚无理想的测定方法,建

立一套科学而实用的混凝土自收缩测定方法是非常必要的.

3 影响自收缩的因素

3.1 水泥对自收缩的影响

根据 Tazawa E 等人^[11]的实验结果,不同种水泥净浆的自收缩能力是不同的.铝酸盐水泥和早强水泥的自收缩较大(21d龄期时的自收缩大于普通水泥的自收缩值).使用高C₂S和低C₃A或C₄AF的硅酸盐水泥能够降低混凝土的自收缩.用中热或低热硅酸盐水泥制备的混凝土的自收缩值比普通硅酸盐水泥混凝土低得多.另外,水泥的细度对自收缩值也有影响,较细的水泥在早期表现出较大的自收缩速度.

3.2 外加剂对自收缩的影响

掺加高效减水剂来增大流动度时,高效减水剂可稍微降低自收缩值,但不同类型、不同掺加量的高效减水剂对自收缩的作用差别很小.干缩减少剂可减小自收缩的50%,这可能与干缩减少剂可减小毛细水的表面张力有关.膨胀剂对自收缩的作用取决于它的种类,某些氧化钙型的膨胀剂可以减小自收缩;而其他类型的膨胀剂虽在早期有膨胀,但随后的收缩速度与空白相同.引气剂对混凝土的自收缩没有影响.

3.3 矿物掺合料对自收缩的影响

在水泥中加入比表面积在400 m²/kg以上的矿渣时,其120d的自收缩随矿渣的掺量(不大于70%)增大而增大;而在水泥中加入比表面积为338 m²/kg的矿渣时,其120d的自收缩值不随矿渣的掺量(不大于70%)改变而增大^[12].在水泥中掺加硅灰将使混凝土的自收缩值增大;硅灰的掺量越大,水泥浆自收缩值越大.混凝土的自收缩随粉煤灰掺量的增大而降低,特别是早期自收缩值降低得非常明显.3d龄期后掺加粉煤灰混凝土的自收缩增长速度高于空白混凝土.粉煤灰掺量超过20%后,减小自收缩的效果并不显著.在水泥中加入偏高岭土,在偏高岭土(比表面积为400 m²/kg)含量为10%时,水泥浆(水胶比为0.55)的自收缩值最大.在水泥中加入经过防水处理的粉末,可以减少自收缩.经过防水处理的偏高岭土对自收缩的减小作用在后期消失了;而经过防水处理的硅质粉末对自收缩的减小作用能保持很长时间,其取代量为10%时就对自收缩有明显的减小作用.

3.4 其他因素对自收缩的影响

温度对水泥浆体的自收缩影响很大,在 15~40℃范围内,水泥浆体的自收缩值和自收缩速度随温度的增加而增加^[13]。水灰比对自收缩值的影响比较大,随水灰比减小,混凝土的自收缩值和自收缩速度增大。随养护龄期的增加,自收缩逐渐增大,早期自收缩增加得非常快,以后发展比较缓慢。混凝土中骨料的含量对混凝土自收缩的影响很大,随着骨料的含量增加,混凝土的自收缩值减小。骨料的种类对混凝土的自收缩也有影响,人工轻骨料混凝土的自收缩值比普通混凝土小,且轻骨料混凝土的自收缩值随着轻骨料的含湿量和干密度的增加而减小,在混凝土中掺加 6% 体积分量的钢纤维,可以降低自收缩值 20% 左右。

4 抑制自收缩的方法

综上所述,混凝土的自收缩是在混凝土硬化阶段中由于水泥水化产生的毛细管张力作用的结果,自收缩的大小受到原材料的种类、配合比以及外界条件的影响。综合水泥、矿物掺合料对自收缩的影响,可将其影响分为材料的活性的材料的细度两个方面。

在材料活性相近的情况下,同样龄期较细的材料引进的自收缩值较大,正如较细的水泥或矿渣产生较大的自收缩。这是由于(1)较细的材料水化较快,产生较大的水的消耗;(2)较细的材料使毛细管理细化,较细的毛细管失水时产生较大的张力。

在材料细度相近的情况下,在同样龄期时,活性较高的材料引起较大的自收缩。就不同品种水泥而言,铝酸盐水泥和早强水泥的活性较普通硅酸盐水泥大,其自收缩值也较大;中热、低热水泥的活性较普通硅酸盐水泥小,其自收缩值也较小。

就使用的矿物掺合料而言,硅灰和偏高岭土均属于特细的材料,其中硅灰更细一些,若二者的活性相近,硅灰的自收缩值应更大一些。但由于偏高岭土中含有大量铝的氧化物,其活性远高于硅灰。因此在 10% 偏高岭土取代量的情况下,普通硅酸盐水泥的水化和偏高岭土的火山灰反应能达到匹配,达到最大的自收缩;而掺加硅灰的自收缩值则随其掺量的增加而增大。

就比表面积相近的矿渣和粉煤灰矿物掺合料而言,矿渣的活性要大于粉煤灰,因而掺加粉煤灰可以减少自收缩而掺加矿渣则不能减少自收缩。而由于

矿渣水泥中矿渣的颗粒很粗,加入经防水处理的粉末能减小自收缩值,其原因可能有两点:(1)这种憎水性物质的活性很低,就相当于加入了惰性材料,减少了活性材料;(2)这各物质加入使毛细管理的管径变粗。能过以上分析,从原材料的种类、配合比来考虑控制混凝土的自收缩的方法,减少混凝土自收缩的途径大致可分为以下几点:

- (1) 使用高 C₂S 和低 C₃A 或 C₄AF 的硅酸盐水泥
- (2) 尽量避免使用高细度的水泥和矿渣。
- (3) 硅灰和矿渣的掺量不要太大;使用偏高岭土做矿物掺合料时,避免使用 10% 的取代量。
- (4) 在混凝土中掺加一定量的粉煤灰作为矿物掺合料。
- (5) 考虑使用干缩减少剂或经防水处理的硅质粉末。
- (6) 考虑使用有吸水性的人工或天然骨料,并在使用前吸足水分。
- (7) 在情况许可的情况下,适当加大骨料的含量以及水胶比。

5 展望

对混凝土自收缩的研究虽然已经取得了丰富的成果,但也存在着许多亟待解决的问题。例如,对于零坍落度的混凝土,虽然这种混凝土的水灰比很低,但其单位体积中水泥的浆体的用量也很低,所以它们的自收缩率的高低与否还有待进一步研究。目前混凝土中的含气量对自收缩的影响情况还没有弄清,膨胀剂水化产生的自收缩机理和膨胀剂对自收缩的影响情况也有待研究。预测自收缩应变和应力的公式的适用性并不广泛和全面,还有许多影响因素尚未考虑进去。比如温度和矿物掺合料类型及掺量对收缩应变率及最终自收缩值的影响还未搞清楚。

参考文献:

- [1] Davis H E. Autogenous volume change of concrete [A]. Proceeding of 43th Annual American Society for Testing Materials [C]. Atlantic city: ASTM, 1940. 1103—1113
- [2] Lyman C G. Growth and movement in Portland cement concrete [M]. London: Oxford University Press, 1934.
- [3] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土 [M]. 北京: 中国铁道出版社.

- [4] Pietro Lura, Ole Mejlhede Jensen and Klaas van Breugel. Auto-genous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms. *Cement and Concrete Research*. 2003, 33(2): 223-232.
- [5] Zhangwu Jiang, Zhenping Sun and Peiming Wang. Autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2005, 35(8): 1539-1545.
- [6] Laurent Barcelo, Micheline Moranville and Bernard Clavaud. Autogenous shrinkage of concrete: a balance between autogenous swelling and self-desiccation. *Cement and Concrete Research*. 2005, 35(1): 177-183.
- [7] 杨全兵. 高性能混凝土的自收缩机理研究[J]. 硅酸盐学报, 2000, (28): 72-75.
- [8] 安明喆, 朱全铨, 覃维祖. 高性能混凝土的自收缩问题[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(2): 159-166.
- [9] 森本博昭, 高井茂信, 棚桥和夫, 等. 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの自己収縮[J]. セメント・コンクリート 论文集, 1995, (49): 600-603
- [10] 自己収縮研究委員会. セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨脹試験方法(案)[A]. 田澤栄一. 自己収縮研究委員会報告集[C]. 東京: 日本コンクリート工学協会, 1996: 195-198.
- [11] Tazawa E, Miyazawa S. Influence of constituent and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1997, 49(178): 15-22.
- [12] 张树青, 杨全兵. 矿粉混凝土的自收缩性能[J]. 低温建筑技术, 2004, (3): 1-3
- [13] Pietro Lura, Klaas van Breugel and Ippei Maruyama. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 2001, 31(12): 1867-1872.

Autogenous Shrinkage of Concrete and its Restraining Measures

ZHOU Shuang-xi

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This study situation of autogenous shrinkage of concrete is review in this paper. Producing cause, mechanisms of autogenous shrinkage, factors influencing autogenous shrinkage, measure methods and methods for autogenous shrinkage reduction are specially discussed. Based on these analyses, the urgent problems to be solved have been put forward.

Key words: concrete; autogenous shrinkage; restraining measures