

文章编号:1005-0523(1999)04-0014-06

混凝土集料界面与强度关系的界面理论分析

喻乐华

(华东交通大学 土木工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:应用界面理论分析混凝土强度与各类粗细集料界面之间的关系,着重讨论混凝土强度的最薄弱部位——粗集料界面区的影响因素,为提高混凝土强度的技术措施提供理论依据¹⁹。

关键词:混凝土;集料;界面;强度

中图分类号: TU 528.041

文献标识码: A

0 引言

随着混凝土向着高强高性能方向发展,人们越来越关注混凝土强度的最薄弱部位——集料界面区¹⁹。在混凝土中集料自身强度和水泥硬化体强度都较高,而集料周围的界面强度较弱,高强混凝土粗集料强度要求大于混凝土强度的30%且不低于 100MPa ^[1];水泥浆体与集料的界面粘接强度常低于硬化水泥浆体抗拉强度,前者与后者之比约为 $0.41\sim 0.91$ ^[2]¹⁹。混凝土在应力作用下最先出现裂纹的是粗集料界面处,并沿着集料边界扩展向水泥砂浆中延伸,使混凝土整体破坏¹⁹。

吴中伟^[3]根据中心质假说认为:未来的环保型高效水泥基材料理想组成结构是中心质—界面区—介质模型,即各级中心质(集料)以网络化的最佳状态构成水泥基材料的骨架,分散在各级强化网络骨架的介质中;在中心质与介质的界面两侧存在着界面过渡区,是渐变的非均质过渡结构;改善界面区结构是变弱为强的重要因素,也是高性能混凝土(HPC)研究的重点¹⁹。

据此,笔者把混凝土看成为以三级中心质即粗集料(石)、细集料(砂)和微集料(部分矿物掺合料)构成骨架分散在水泥浆体介质中的结构模型,应用固体界面理论,综合分析各级集料界面区的强度影响因素,着重讨论粗集料的界面区以探讨改善界面过渡区结构进而为提高混凝土强度的技术措施提供理论佐证¹⁹。

1 固体界面理论概述

界面是物质与物质之间的接触面¹⁹。界面科学是近二十年来发展起来的一门基础科学研究^[4],它采用现代微观分析的仪器设备和手段,分辨程度已达到原子尺寸水平,迄今研究较多的是固体与固体之间的界面¹⁹。

固体的表面层与内部结构不同¹⁹。表面层只有 $3\sim 5$ 个原子层,从原子尺度来观察固体表面

收稿日期:1999-07-20;修订日期:1999-08-30

作者简介:喻乐华(1962—),男,江西临川人,华东交通大学讲师,工学硕士。

是不规整的,在表面存在着平台、阶梯、扭折位、附加原子和空穴等,又由于表面存在“断键”,带电粒子缺失或剩余而产生剩余键力;所以在固体表面层形成活泼的化学行为领域,一般化学反应都从表面层开始¹⁹。

依据界面强度理论^[2],集料通过界面对其周围基材料传递应力,并显著影响基材应力场¹⁹。

2 粗集料性质与界面强度

集料本身性质对界面区形貌和强度影响突出的参数是几何形状、颗粒大小、力学性质以及表面与水泥浆化学反应的能力¹⁹。

2.1 粗集料岩石种类

各种岩石中石灰岩粗骨料对混凝土增强效果最佳,其原因是石灰岩表面矿物成分能与水泥浆形成较好的结合界面区所致¹⁹。

石灰岩矿物成分多为 CaCO_3 ,其离子键结合的化合物表面在水泥浆环境(碱性)条件下容易发生化学“断键”,与水泥浆中水化产物组成 CSH 、 CH 、 CaCO_3 等共存的界面过渡区,因而形成较牢固的化学过渡胶结层¹⁹。

另一类用作骨料较多的岩石是花岗岩等深成火成岩,主要由铝硅酸盐类矿物长石、石英等组成,它们主要是由共价键结合的化合物,其共价键 $\text{Si}-\text{O}$ $\text{Al}-\text{O}$ 之间键力强而牢固,在水泥浆介质条件下不易发生化学“断键”,因而其表面与水泥浆体不能形成化学成分上连续过渡的界面区,而是物理性质的相界面粘结,结合力较弱¹⁹。

2.2 粗骨料类型

粗骨料分碎石和卵石两类¹⁹。碎石经过破碎加工,其表面有新鲜的缺陷、扭折和错位以及由于“断键”而存在表面剩余键力,具有活泼的化学反学表面,有利于与水泥浆体进行化学反应形成强粘结的界面¹⁹。卵石是挤压成碎块后经自然搬运研磨而成光滑表面,其表面较“古老”而少有空穴、扭折、错位以及“断键”的剩余键力,呈现为相对惰性的表面;水泥浆离析的水份沿此类表面积蓄于粗骨料下表面,使骨料周围水泥浆水灰比局部增大,结晶出 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体定向排列集中,晶体之间具有多孔结构,孔隙率随着离骨料表面的距离增大而降低^[5],形成这种不均匀的界面过渡层对混凝土强度和耐久性都不利¹⁹。

2.3 粗骨料大小

较小粒径($<20\text{ mm}$)的粗骨料不仅有较大的有效表面积与水泥浆体胶结,而且更接近于中心质(骨料)网络化均匀分散在水泥基介质中的理想结构模式,也即可以较均匀地分散混凝土所承受的应力;更为重要的是可以避免混凝土在大骨料下表面塑性收缩和(或)水泥浆体泌水过于集中导致骨料下表面与水泥石之间的空隙和(或)水泥石微裂隙的形成¹⁹。目前施工应用强度最高纪录的美国西雅图 Two Union Square 大厦结构混凝土设计强度 98 MPa ,施工实际强度 134 MPa ,使用的粗骨料最大粒径为 10 mm ¹⁹。

3 细骨料性质与界面强度

细骨料是次级中心质(集料),其主要作用是充填粗骨料之间空隙的次级骨架,但它可通过

对水泥浆数量的制约和它自身界面强度来影响混凝土强度¹⁹.

3.1 细骨料类型和岩石种类

通常用铝硅酸盐矿物为主的浑圆状河砂作细骨料¹⁹.与粗骨料性质对混凝土强度影响的原因类似,为了增强水泥浆与细骨料的粘结力,在一些高强混凝土中适当配用机械破碎的石灰岩或矿渣等人工细骨料以提高强度¹⁹.

3.2 细度模数和砂率

在保障填充粗骨料空隙前提下,采用细度模数偏大的中粗砂($M > 2.6$)和较小的砂率,可以相对减少细骨料表面积尽量,减少水泥浆包裹细骨料的用量,使较多的水泥浆用来增加粗骨料的胶结¹⁹.

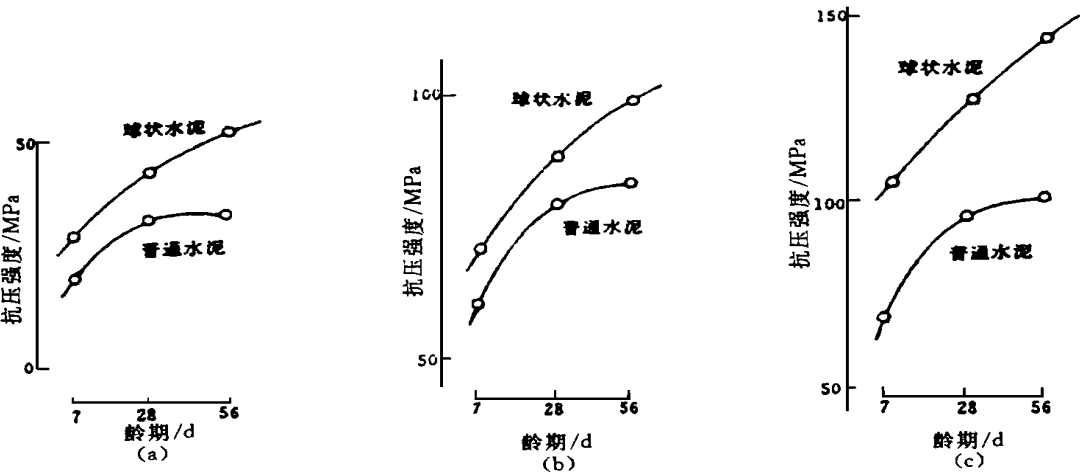
4 水泥性质与界面强度

4.1 水泥细度

常用的硅酸盐水泥熟料颗粒大于 $90\ \mu\text{m}$,几乎接近惰性,只有尺寸 $< 40\ \mu\text{m}$ 的水泥熟料颗粒才有较高的活性¹⁹.高标号水泥一般颗粒粒径较小,比表面积较大($> 330\ \text{m}^2/\text{kg}$),具有较高的化学活性,能够充分进行水化反应,与骨料界面胶结良好¹⁹.

4.2 球状水泥

为提高混凝土强度可用球状水泥¹⁹.球状水泥是水泥熟料通过高速气流粉碎及特殊处理而得,其粒子呈圆形(常用水泥为棱角的不规则形态),微粉增多,分散状态好,大多是 $3\sim 40\ \mu\text{m}$ 的颗粒,比表面积增大,强化了表面活性,用它制备的混凝土要比普通水泥混凝土强度的约高 $10\%^{[6]}$,见图 1 所示¹⁹.



(a) 为球状水泥($W/C=49\%$)、普通水泥($W/C=54\%$)、普通混凝土、塌落度 180mm ;
(b) 为球状水泥($W/C=27\%$)、普通水泥($W/C=32\%$)、高强混凝土、塌落度 210mm ;
(c) 为球状水泥($W/C=14\%$)、普通水泥($W/C=20\%$)、超高强混凝土、塌落度 210mm ;

图 1 球状水泥混凝土强度与普通水泥混凝土强度比较

4.3 高效减水剂的影响

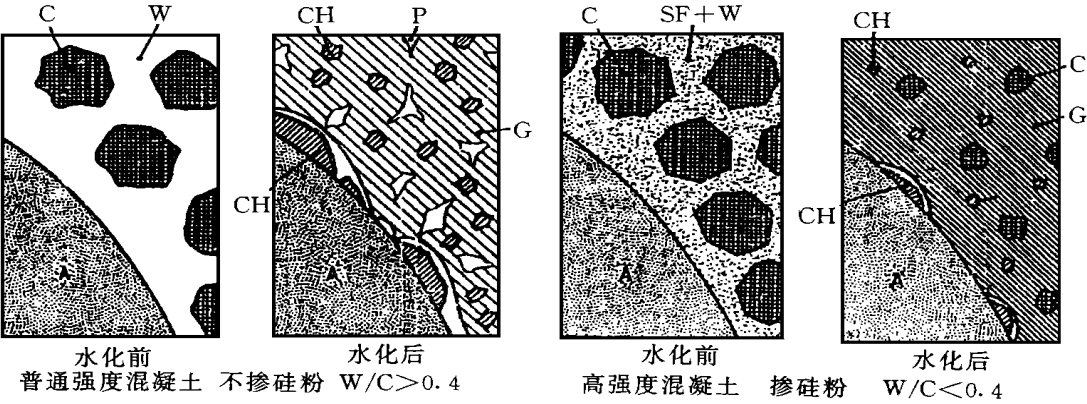
高效减水剂是大分子阴离子表面活性剂,在降低水灰比增强混凝土密实性的同时,其很长的碳氢链上含大量极性基,可在水泥颗粒周围形成扩散双电层使水泥颗粒相互排斥而高度分散,有效表面积增大进一步激发其活性,促进水泥的水化胶结¹⁹.

5 矿物掺合料与界面强度

掺入活性矿物掺合料的细粉(粉煤灰、磨细矿渣、硅粉、沸石粉、硅质页岩粉等)是当今制备高性能混凝土的主要技术措施之一,它们在水泥基材料中具有填充效应、火山灰效应和微集料效应,其中火山灰效应被看成是颗粒间界面的“粘合剂”,对于改善骨料界面结构提高混凝土强度起决定性作用¹⁹.

5.1 对骨料界面过渡区的影响

矿物掺合料可增强水泥浆基体—骨料界面区¹⁹这些火山灰材料能减少内泌水,在骨料表面密实地堆积多种水化产物(水泥和掺合料),并提供核化点防止CH 大晶体定向生长¹⁹与不掺活



C:水泥; W:水; A:骨料; SF:硅粉; P:毛细孔; G:CSH 凝胶; CH:氢氧化钙

图 2 普通强度和强混混凝土在水化开始前和结束后的微结构示意图

性矿物细粉的混凝土相比较,如图 2 所示,界面区晶体(CH、钙矾石等)数量和孔隙率均减少,孔隙率梯度几乎消失,结构主要组分是密实的 CSH 凝胶,界面区结构与基体密实度相同,界面区厚度也变小¹⁹. 上述因素保证了骨料与基体之间的有效粘结¹⁹.

5.2 对骨料界面区强度影响的对比实验^[7]

超细矿渣粉对水泥净浆与骨料界面粘结强度的对比可用界面劈拉强度来衡量,如图 3 所示,其结果如表 1,从中可知掺有超细粉的水泥净浆与骨料界面粘结强度无论是早期、中期还是晚期均高于基准(不掺矿渣粉的)约 50%¹⁹.

5.3 与水泥浆体的关系

矿物掺合料细粉因其玻璃质结构,呈热力学不稳定状态,加之暴露更多的结构缺陷,增大

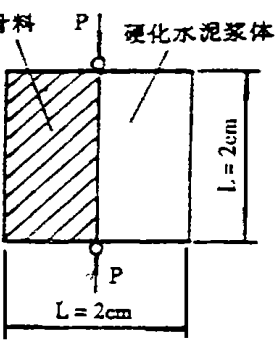


图 3 界面劈拉试验

矿物掺合料细粉因其玻璃质结构,呈热力学不稳定状态,加之暴露更多的结构缺陷,增大

表 1 超细矿渣对水泥净浆体强度及其界面粘接强度的影响

矿渣掺量	抗压强度(MPa) / 与基准值比(%)			粘接强度(MPa) / 与基准值比(%)		
	3d	7d	28d	3d	7d	28d
0	80.5/100	91.2/100	111/100	1.09/100	1.19/100	1.31/100
20	83.5/104	102/112	124/112	1.68/154	1.88/158	2.00/153

颗粒反应面积,提高反应活性和反应机会¹⁹当它们均匀分散在水泥浆时可在水泥水化过程中起到类似“晶核效应”作用,一方面减少CH总数量而形成CSH,即将强度较小的CH晶体转化为强度较大的CSH凝胶;另一方面使CH单晶体和凝胶细粒化,类似金属材料的合金元素晶粒细化,使水化产物在整个浆体内部分布趋于均匀¹⁹。以上两方面都使水泥浆体强度提高¹⁹。

研究多种矿物掺合料与硅酸盐水泥浆体界面形貌特征^[8]表明:掺合料细粉对水泥浆体结构形成的作用是局部化学反应产物在掺合料界面上形成并逐步向内部延伸¹⁹。水泥水化早期(1天)掺合料颗粒与水泥浆体界面结构有3种模型,即CH、CSH单膜层和CH-CSH双膜层,如图4所示;水化后期(28d)这类界面只有2种模型¹⁹。即CH壳和凝胶壳,如图5所示,但在靠近

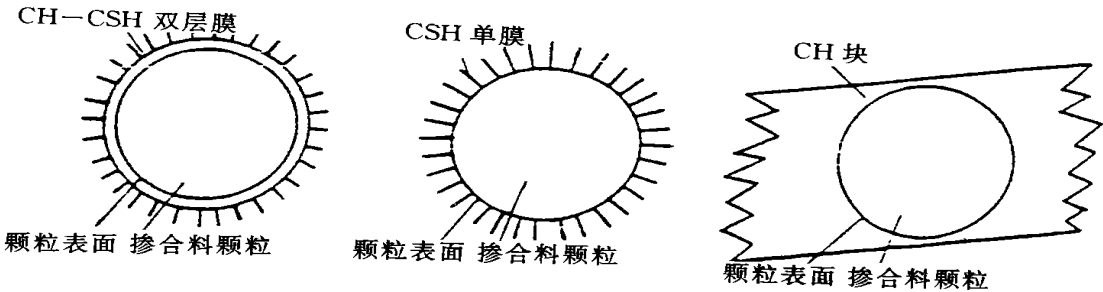


图 4 水化 1d 后水泥浆体中三种掺合料界面模型示意图

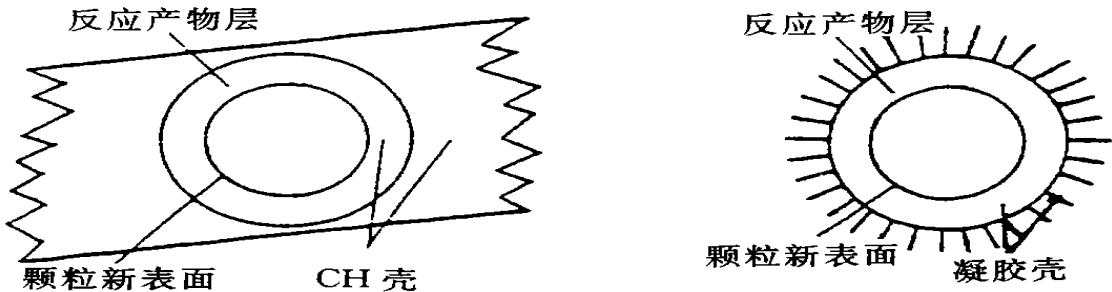


图 5 水化 28 d 后水泥浆体中二种掺合料界面模型示意图

掺合料颗粒周围有一层掺合料与水泥浆体的反应物,其厚度因掺合料活性大小而异¹⁹。

6 结束语

混凝土内部三级集料(粗集料、细集料和微集料)界面对混凝土强度均有影响,其中以粗集料界面结构的作用突出¹⁹组成混凝土的材料(石、砂、水泥、高效减水剂和矿物掺合料)都可直接或间接地制约各级集料界面,但矿物掺合料对于改善界面结构提高混凝土强度起决定性作用¹⁹。

[参 考 文 献]

[1] 陈肇元等编. 高强混凝土及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1992 19.
[2] 潘钢华等. 活性混合材微集料效应的理论和实验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1997,(6):23~25 19.
[3] 吴中伟. 环保型高效水泥基材料[J]. 混凝土, 1996,(4):3~6 19.
[4] 桂琳琳. 表面科学与化学[J]. 百科知识, 1988,(2):39~40 19.
[5] H 索默编, 冯乃谦等译. 高性能混凝土的耐久性[M]. 北京:科学出版社, 1998 19.
[6] 李铭臻编. 新编建筑工程材料[M]. 北京:中国建材工业出版社, 1998 19.
[7] 朱蓓蓉等. 超细矿渣掺合料对普通硅酸盐水泥性能的影响及其作用机理[J]. 混凝土与水泥制品, 1997,(6):20~22 19.
[8] 夏佩芬等. 混合材料与水泥浆体间界面的形貌特征[J]. 硅酸盐学报, 1997,(6):738~741 19.

Analyse Relation between Interfaces in Concrete and
Its Strength on the Interface Theory

YU Le-hua

(Civil Engineering College, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China)

Abstract: Based on the interface theory, this paper analyzes the relationship between various aggregate interfaces in concrete and its strength, especially disscusses affecting factors like interfacial zone of coarse aggregate, the weakest zone in concrete.

Key words: concrete; aggregate; interface; strength