

文章编号: 0559-9342(2005)03-0033-04

水泥基材料体积稳定性对大坝 混凝土开裂的影响

高培伟¹, 吴胜兴¹, 林萍华¹, 吴中如¹, 唐明述²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京工业大学, 江苏 南京 210009)

关键词: 水泥基材料; 体积稳定性; 大坝混凝土; 混凝土裂缝; 化学收缩

摘要: 温度收缩、干缩和化学减缩等均能引起大坝混凝土的开裂。冷却和表面养护可以部分减少温度应力和干燥所引起的开裂, 但无法消除化学减缩所产生的开裂, 尤其是材料性能变化所产生的体积变形, 对混凝土坝开裂起着决定性作用。这也是解决混凝土坝开裂问题的关键。

Influence on the volume stability of cementitious materials on the cracking of dam concrete

Gao Pei-wei¹, Wu Sheng-xing¹, Lin Ping-hua¹, Wu Zhong-ru¹, Tang Ming-shu²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098;

2. Nanjing University of Technology, Nanjing Jiangsu 210009)

Key Words: cementitious materials; volume stability; dam concrete; cracks; chemical shrinkage

Abstract: There are many factors to make the large dam concrete cracking, such as temperature shrinkage, dry shrinkage and chemical shrinkage. It is possible to reduce the length and width of concrete cracks producing by temperature shrinkage and dry shrinkage with superficial cooling and insulation of concrete, but cannot diminish cracks causing by chemical shrinkage. It is suggested that the volume stability of cementitious materials play an importance role in preventing cracks in dam concrete and terminating the history of "no dam without cracks".

中图分类号: TV544.91

文献标识码: B

随着我国大坝数量、规模的增大, 大坝混凝土开裂问题也逐步增多, 尤其是三峡大坝混凝土裂缝被报道以后, 在国内外引起了巨大反响, 结束混凝土坝“无坝不裂”的历史已成为业内专家关注的焦点^[1]。

大坝混凝土属于大体积混凝土, 浇筑后, 水泥水化热通常导致混凝土内部温度比周围环境温度高 20~30℃, 由于热量不能快速散发, 使混凝土在冷缩时产生温度收缩应力, 再伴随着干燥收缩、化学减缩等收缩应力, 在混凝土内部会产生较大的收缩拉应力。如果拉应力超过了混凝土的抗拉强度, 就会导致混凝土产生裂纹, 严重的将出现基础贯穿性裂缝。裂缝不仅会降低大坝混凝土结构的刚度和整体性, 而且将加剧钢筋锈蚀, 降低使用寿命, 使大坝的安全运行受到严重威胁, 同时还会引起其他一系列病害的发生、发展, 如: 渗漏溶蚀、环境水侵蚀、冻融破坏的扩展及混凝土碳化等。这不仅降低了建筑物的耐久性, 还可能引起溃坝。

控制大坝混凝土开裂的方法目前仍沿用美国胡佛重力坝的经验, 主要有: 柱状法浇筑混凝土, 将坝体分层分块, 上下、左右相邻坝块间隔浇筑, 在混凝土中预埋水管通水冷却以及表

面养护, 选择低温季节施工, 加冰搅拌混凝土; 采用中热(或低热)水泥及掺加混合材, 降低水泥用量, 降低混凝土温升; 掺加引气剂和高效减水剂, 降低水泥用量, 改善混凝土的和易性, 提高混凝土浇筑质量和耐久性; 尽可能用粒径较大、形状好、多级配的粗集料; 采用成本低、发热量小、便于通仓浇筑和加快施工进度的碾压混凝土筑坝技术^[2]。但是, 这些理论与措施只能减少或者降低大坝混凝土的收缩, 而不能完全控制和解决混凝土坝的开裂, 更难以结束混凝土坝“无坝不裂”的历史。

1 引起大坝混凝土开裂的因素

大坝混凝土裂缝是由多种因素引起的, 如: 荷载、温度、收

收稿日期: 2004-06-07

基金项目: 国家电力公司科学技术项目(SPKJ006-13-01-01), 国家自然科学基金资助项目(50278031)和江苏省博士后基金联合资助

作者简介: 高培伟(1963—), 男, 山东蓬莱人, 博士, 副教授, 主要从事混凝土耐久性方面的研究。

缩、地基变形或冻胀、钢筋锈蚀、化学腐蚀、碱骨料反应、混凝土质量、水泥水化热温升等。由于混凝土内部水分、化学反应和温度的变化常常引起体积变形,如浇筑初期的凝缩及硬化后的自生体积收缩,湿胀(膨胀),干缩,碳化收缩和由于温度变化而引起的体积收缩。

(1) 温度收缩是引起大坝混凝土裂缝的主要因素,危害也最大。水泥石是多孔凝胶体,温度上升,水泥石和内部的水就会产生膨胀,水泥石的热线胀系数波动范围在 $(11\sim 20)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,骨料的为 $(5\sim 13)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,混凝土的热线胀系数介于两者之间,而水的热线胀系数约为 $210\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,远远大于混凝土的热线胀系数^[3]。混凝土在水化初期,温度上升而发生膨胀,在降温期则发生收缩。如果混凝土处于约束条件下,温度收缩变形受到限制,当温度变形大于混凝土极限拉伸变形时,就有可能出现裂缝。温度收缩变形与混凝土的配合比和组成材料的性能、周围环境条件、混凝土的结构、施工及养护条件等因素有关。

(2) 干燥收缩是因环境湿度变化、混凝土失水而引起的体积收缩。对混凝土而言,干缩值在 $(200\sim 1\ 000)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 范围内,约是混凝土自生体积收缩的10倍左右,尽管大坝混凝土内部干缩问题不是主要的问题,但其表面的干燥收缩是一个不可忽视的问题,表面干燥收缩裂缝对以后裂缝的形成和扩展具有引导作用。它与水泥品种及混合材料、混凝土配比、集料的种类和含量、外加剂的种类和掺量、环境相对湿度、构件尺寸及养护条件等因素有关。

(3) 塑性收缩基本上发生在混凝土搅拌后3~12h以内,产生的主要原因是由于水泥水化反应出现泌水而使体积缩小。塑性收缩导致集料受压、水泥浆体受拉,可以使水泥浆体与集料紧密结合,同时使水泥石产生裂缝,大小为水泥绝对体积的1%。塑性收缩的大小与混凝土的原材料、成型方法及养护条件等因素有关。水灰比降低,收缩值降低,塑性收缩可能导致混凝土表面开裂,加强早期养护,控制表面干燥,一般不会造成表面开裂。

(4) 化学收缩(自收缩)是由于胶凝材料的水化作用而引起的体积收缩,与水泥品种、用量以及混合材料种类、掺量等因素有关。水泥用量少,化学收缩小,掺加粉煤灰可以降低收缩,有利于提高混凝土的抗裂性能。大坝混凝土化学收缩值的大小约为 $(20\sim 100)\times 10^{-6}$,足以使大坝混凝土产生收缩开裂。

(5) 湿胀是由于水泥凝胶体吸水引起的体积增加。吸水后一方面促使凝胶体颗粒进一步分离,产生膨胀压力;另一方面会降低凝胶体的表面张力,产生微小的膨胀。水泥净浆的湿胀量100d可达 $1\ 300\times 10^{-6}$;而混凝土的湿胀量约为 $(100\sim 150)\times 10^{-6}$,混凝土的湿胀变形比其在空气中的干燥收缩变形要小很多。

(6) 碳化收缩是由于大气中二氧化碳与水泥中的水化产物发生化学反应产生碳酸钙、硅胶和游离水等而引起的收缩。与其他的收缩不同,碳化收缩属于化学收缩,其值的大小与水化产物的碱度、结晶水以及所含的水份等因素有关。

引起混凝土体积变形的种类、因素很多,难以区分并精确测定其收缩值,也难以完全消除混凝土的收缩变形。水利建设部门对由温度应力引起的开裂非常重视,也做了大量的工作,取得了许多举世瞩目的科研成果,预冷技术、力学算法、仿

真算法等应用到实际工程中,取得了一定的实效^[4]。尤其是近几年提出的反演坝体混凝土的平均弹性模量和温度线膨胀系数方法,较好地反映了坝体的温度变形情况,在国际上也处于领先地位^[5],适用于因温度收缩和干燥收缩而引起的开裂计算,但对于化学收缩所引起的开裂则基本上不适宜。

2 温度应力计算的缺陷

DL/T5057—96《水工混凝土结构设计规范》提出了根据混凝土材料组成及设计参数估算水工大体积混凝土绝热温升、导热系数、导温系数、徐变及应力松弛系数、弹性模量、极限拉应变等的计算公式都是早期提出的,这些参数的选取大多数属于标准状态下,没有考虑温度变化的影响。现在混凝土组成材料的性能(水泥等)发生了很大的改变,用其计算温度应力、控制大坝混凝土开裂,就存在一定的缺陷,不能很好地反映现代水工混凝土的特性。

各个参数的选取存在很大的波动范围,这些参数理应由试验确定,但大多数工程都参考类似工程按常规取值,难以与实际情况相符,计算的变形与实际有一定的误差。此外,这些理论计算与测定对温度变形有一定的准确性,但对于干燥收缩、化学减缩等所引起的应力就难以测定,结果是理论计算应力小于大坝混凝土的实际应力,误差有时高达40%,大坝混凝土开裂得不到有效的控制。

大坝混凝土的热学、力学参数与水泥、混合材、减水剂和膨胀剂的品种和用量、浇筑温度和时间、水胶比等因素有关,水泥基材料的体积稳定性是确保正确分析与控制大坝混凝土裂缝形成与发展的基础。

3 水泥对大坝混凝土开裂的影响

3.1 水泥组成对大坝混凝土开裂的影响

近几年来,生产厂家通过提高 C_3S 和 C_3A 含量、掺加早强剂和提高水泥的比表面积,来达到新标准要求 and 满足混凝土搅拌站的早强、高强要求。1930年前,7d早期强度为17.6MPa,现在提高到34.5MPa,几乎增加了1倍(见表1)。这导致了在施工中出现水泥凝结时间过快、水灰比无法降低以及水泥不易与减水剂相适应等问题;再加上水泥用量的增加,混凝土干缩开裂就可能增加,造成很坏的影响。Neville等人建议,在标准中应有限制 C_3S 含量和细度的条款^[6]。

表1 水泥细度和 C_3S 的含量

时段	C_3S 含量/%	比表面积 (m^2/kg)	7d 抗压 强度/MPa
1930年以前	<30	198	17.6
1930~1950年		300	21.1
1950~1980年(低)	50	300	
1950~1980年(中)	56	375	21.1~28.1
1950~1980年(高)	76	>400	
1980年~现在	$\text{C}_3\text{S}+\text{C}_3\text{A}=72$	390	34.5

由于水泥中4个矿物组成的水化速率各不相同,其含量的多少也决定了水泥水化的快慢和放热量的大小。水化速率快,混凝土散热慢,温升一般就高,产生的裂纹就可能多且大。由于片面追求施工高速度,力求发展早期强度高水泥,使近代大坝混凝土开裂破坏事例增多。

3.2 体积稳定性对大坝混凝土开裂的影响

水泥水化产物主要为 C-S-H 凝胶、钙矾石和氢氧化钙。钙矾石(简称 AFt, 分子式为 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)是水泥水化硬化过程中所形成的主要产物,为柱状晶体,在混凝土中起骨架作用,通常约占水泥水化产物的 7%,在膨胀水泥中可达 25%。AFt 含有大量结晶水,固相体积增加较大,是一种相对不稳定的产物,它的形成和稳定与水泥石中孔隙液相碱度、相关离子浓度以及所处的环境等条件密切相关,在 50~144 °C 就开始脱水,在 74 °C 下脱水相当强烈^[7]。该温度范围恰好处于大坝混凝土温升范围之内,在此范围内,AFt 的形成比较困难,钙矾石的膨胀作用很难发挥,后期温度下降后会再形成 AFt,对于含有较多的 AFt 的混凝土,后期有产生更大收缩而开裂或分解后的 AFt 重新结晶导致膨胀开裂的危险性。

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 具有固定的化学组成,为层状结构,层内为离子键,结合较强,层与层之间是分子键,层间联系较弱,是一种亚稳态化合物。氢氧化钙在 3~4 d 就生成并立即趋于稳定,固相体积增加 97.9%,弥补了混凝土早期体积收缩,同时也略微提高了混凝土早期强度,并产生一定的膨胀应力,可以抵消水泥混凝土早期水化所产生的部分自收缩和干缩;另一方面,由于水泥中含有一定量的 CaSO_4 和混合材, CaSO_4 与熟料及混合材中的铝酸盐相作用,在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 存在下,可生成具有膨胀组分的钙矾石,使水泥混凝土产生微量膨胀。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶于水,随水的流动而损失,在混凝土内部形成空洞,产生裂纹,降低混凝土的强度和耐久性能。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 能与空气中的 CO_2 反应,生成 CaCO_3 和 H_2O ,水分蒸发,导致混凝土的体积收缩开裂。

水泥由无水状态变成水化产物,总的体积减少了 5.31% (反应前总体积为 253.54 cm^3 ,反应后为 240.09 cm^3 ,体积减少 13.45 cm^3) ,这主要是由于水化前后反应物和生成物的平均密度不同,一般硅酸盐水泥每 100g 水泥的减缩总量约为 7~9 mL,占混凝土体积的 2%,如果 1 m^3 混凝土中水泥用量为 100 kg,则减缩量达 $(7\sim9) \times 10^3 \text{ mL/m}^3$ 左右。

4 减水剂对大坝混凝土的减缩效果

在大坝混凝土中掺入适量的减水剂,可以减少单位用水量和水泥用量,降低收缩值。但在实际应用中,不同品种的减水剂,由于质量参差不齐和不同批次之间的质量差异,以及水泥等材料的变化,对混凝土收缩变形可能产生不同的影响,或减少混凝土的收缩,或增加混凝土的收缩。

减水剂对混凝土收缩率的影响,在标准中作了特别的规定,在 GB8076—87《混凝土外加剂》中规定:掺减水剂的混凝土与基准混凝土的 90 d 收缩率比不大于 120%;修改后的 GB8076—97《混凝土外加剂》中又规定:掺减水剂的混凝土与基准混凝土 28 d 收缩率比不大于 135%。当基准混凝土在基本配比不变时,掺减水剂后,在坍落度不变的情况下,混凝土 28 d 收缩率可以比基准混凝土的大 35%。

一般讲,减水后的大坝混凝土收缩率无疑应该减少,但依据上述标准的规定推断,28 d 及 90 d 后,其收缩率仍然有增加的可能,这恰恰说明了掺减水剂使混凝土收缩值增加的可能性较大。

判断减水剂的质量,常用的基本方法是从减水率、强度增长率、坍落度损失等几项指标分析,对于收缩率比这一关系到掺外加剂混凝土体积稳定性的质量指标,国标中没有考虑。对于大坝混凝土,收缩率比值过大,掺减水剂后产生收缩裂缝的可能性就大。

1998 年,深圳市建筑科学研究所建材质检站检测了以萘系为主的减水剂后混凝土的收缩率比值,并进行了统计与分析对比,结果如下^[8]:

(1) 在 37 个收缩率比检验数据中,大于 100% 的数据有 17 个,占总数据量的 46%。这说明,掺加以萘系为主的减水剂,有增加混凝土收缩的负面作用。

(2) 缓凝高效减水剂虽然均是以萘系高效减水剂为主要成分配制而成的,但由于生产厂家不同、同一厂家生产时间不同,其收缩率比值各不相同。

(3) 缓凝高效减水剂对混凝土收缩值的影响还与其掺量有关。如广东某厂生产的 F-20 减水剂,掺量为 12% 时,其收缩率比值为 88%,掺量为 15% 时,其收缩率比值为 103%。另一厂家的减水剂,掺量为 20%~25% 时,其收缩率比值一般大于 100%;而掺量为 10% 时,其收缩率比值为 88%。

在确定大坝混凝土中减水剂的掺量时,不仅要考虑减水率、强度、坍落度损失及保持时间等因素,也要考虑对大坝混凝土体积稳定性的影响,尤其是在裂缝控制严格的大坝混凝土中。按照国标规定,90 d 的收缩率比基准混凝土的大 35% 即为合格品,那么,由减水剂所产生的收缩裂缝将远远大于温度应力所产生的裂缝。

5 膨胀剂的作用

在混凝土中添加不同剂量的膨胀剂,可以配制补偿收缩混凝土和自应力混凝土,由于可以利用限制膨胀抵消或部分抵消限制收缩,从根本上消除混凝土的开裂问题,达到解决混凝土开裂的目的;同时,由于其具有独特的抗裂、抗渗的优点,也可用于地下防水、路面、屋面、楼板、墙板、高层建筑以及水利工程和海水工程等,已逐步受到各国工程界的高度重视。

国标中规定,有三种混凝土膨胀剂可以被应用,即:硫铝酸钙类,氧化钙类,硫铝酸钙-氧化钙类。这三种膨胀剂的水化反应对水化温度和物化性能比较敏感,而且均属于放热、早强型,是否适合大坝混凝土尚有待进一步研究,钙矾石类膨胀剂占有较大的市场份额。

近几年的研究发现,AFt 在 70 °C 以上时已不再是稳定相,AFt 与 AFm 的相平衡关系将发生变化,AFt 转化为 AFm 成为可能。Taylor 等人把 DEF 定义为在水泥基材料硬化以后,钙矾石充分、完全的生成过程,在该过程中没有来自水泥浆体以外的硫酸盐参与。关于 AFt 的分解温度虽然尚有分歧,但补偿收缩混凝土中延迟钙矾石的生成是一个普遍现象。有人认为 AFt 在 80 °C 湿热条件下是稳定的,也有人认为 66 °C 是开始分解的温度。欧洲已将混凝土制品的蒸养温度限制在 60 °C 以下,欧洲最新的混凝土规范 ENV13670-1:1999 中规定,混凝土结构中的最高温度一般不得超过 65 °C。

大坝混凝土内部温升有时达到 70~80 °C,AFt 生成一分

解一再生成的过程是客观存在的。在混凝土硬化以后,AFt继续适量生成是产生膨胀应力、补偿混凝土内部温度下降期间体积收缩的必要条件。钙矾石延迟生成的数量和形貌受多种因素的影响和制约,延迟钙矾石生成的最重要的先决条件是需要充足的水分。大体积混凝土结构内部常处于绝湿的状态,在水分供应不充足的条件下,钙矾石重新生成的量是有限的,补偿收缩效果存在差异,也就难以控制裂缝。

近十年补偿收缩混凝土得到了迅猛发展,膨胀剂产品的更新换代也在加快。在使用的过程中,有的混凝土膨胀剂对水泥品种的适应性较差,有的混凝土膨胀剂对水泥品种适应性较好,影响了膨胀剂的使用。例如,膨胀剂在普通水泥与矿渣水泥中的膨胀量就不同(见图1)。

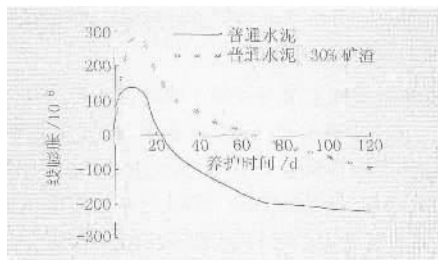


图1 水泥品种对膨胀剂膨胀效应的影响

掺到混凝土中的膨胀剂,水化反应后生成较多的水化产物钙矾石,在养护过程中,有足够的水分时,混凝土可以产生较大的膨胀,否则就小。这是因为在不同的养护条件下,膨胀剂的膨胀效应不同(见图2)。

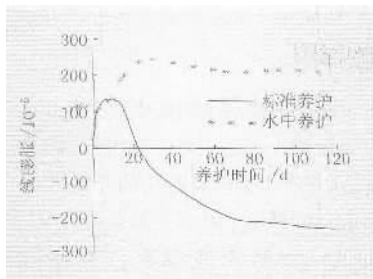


图2 养护条件对膨胀剂膨胀效应的影响

6 骨料的影响

理想骨料应该是耐久、坚固、抗碱、不透水、尺寸稳定的,应尽可能采用大粒径骨料,但必须符合最佳粒径分布。较大粒径的骨料相连,较小的骨料填充较大骨料之间的空隙,水泥浆体填充它们之间所剩下的间隙,较大的骨料提供稳定、坚实的骨架,一方面减少水泥浆体收缩,另一方面可阻挡裂缝扩展。

很少有人对骨料的活性、稳定性和膨胀性进行探讨,近几年,有关骨料与碱反应膨胀以及受力压碎开裂而引起混凝土开裂的报道增多,骨料的活性已经被人们重视。在长江三峡和北京等地相继发现骨料中含有活性组成,如长江三峡的花岗岩集料,其矿物组成主要包括石英、钾长石和斜长石等;次要矿物包括云母、角闪石、赤铁矿、绿泥石和辉石等,其化合物组成以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 和 Na_2O 等为主,经过侵蚀变化,长石很有可能释放出一部分碱(K_2O 和 Na_2O)和硅(SiO_2),从而加剧混凝土中集料发生碱硅酸反应破坏。

骨料的体积稳定性很少被人重视,主要靠压碎值来大概了解。笔者在进行大坝混凝土的研究中发现,混凝土强度在40~60 MPa时,骨料没有破碎,混凝土的开裂沿骨料与胶体界面进行;当混凝土的强度在80~100 MPa时,混凝土在被压碎后存在两种开裂,即骨料与胶体的界面和骨料内部开裂;当混凝土的强度在120 MPa以上时,骨料破碎,开裂完全沿着骨料内部进行,这主要是因为骨料的成因不同,稳定性不一致。

骨料的膨胀系数不同,所引起的大坝混凝土收缩变形也不同,在普通混凝土中,因混凝土的温升不高,骨料的膨胀系数对混凝土的收缩变形影响不大,但对于大坝混凝土结构,由于温度和巨大的压力,骨料的膨胀系数就不能不考虑了,在可能的情况下,应尽量选用膨胀系数低、强度高的集料。

7 结论

(1)引起大坝混凝土开裂的因素很多,主要有温度应力,但干缩、化学减缩等所引起的开裂也是不可忽视的。

(2)采用预冷技术和表面保温可以抑制或部分减少温度应力和干缩所引起的表面裂缝、深层裂缝和贯穿性裂缝,但难以抵消因化学减缩而引起的收缩开裂,完全消除大坝混凝土的裂缝尚有一定的难度。

(3)水泥的组成和水化产物的稳定性对大坝混凝土的体积变形有一定的影响,由于产物结构对温度的敏感性,使大坝混凝土产生膨胀开裂的危险性增加。

(4)由于大坝混凝土所使用的减水剂可使最高温升出现时间延迟,机口预冷技术效果受到质疑,国标规定的掺减水剂后混凝土收缩率变化,在实际工程中对大坝混凝土的收缩、开裂将产生巨大的影响。

(5)国标规定的三种膨胀剂主要是用于土木工程的,是否适合于大坝混凝土尚需要进一步探讨,膨胀剂品种、膨胀量大小的差异,增加了裂缝控制的难度。

(6)骨料的膨胀系数、活性不同,所引起的大坝混凝土收缩变形、碱骨料膨胀破坏也不同,使大坝混凝土的开裂存在很大的随机性。

参考文献:

- [1] 朱伯芳,许平.加强混凝土坝面保护 尽快结束“无坝不裂”的历史[J].水力发电,2004,30(3):25-28.
- [2] 沈崇刚.中国大坝建设现状及发展[J].中国电力,1999(12):12-19.
- [3] R. R. Clark. Mass concrete control in Detroit dam[J]. ACI Journal, 1958, 53(2):1956-1957.
- [4] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.
- [5] 吴中如,赵斌,顾冲时.混凝土坝变形监控指标的理论及其应用[J].大坝观测与土工测试,1997,21(3):1-4.
- [6] 唐明述.谈水泥基材料的体积稳定性[J].中国建材,2002(3):35-36.
- [7] H. F. W. Taylor. Delayed ettringite formation [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(3):683-693.
- [8] 王莹,郭延辉.深圳地区混凝土收缩裂缝控制与外加剂选择[J].混凝土,2001(10):46-48.