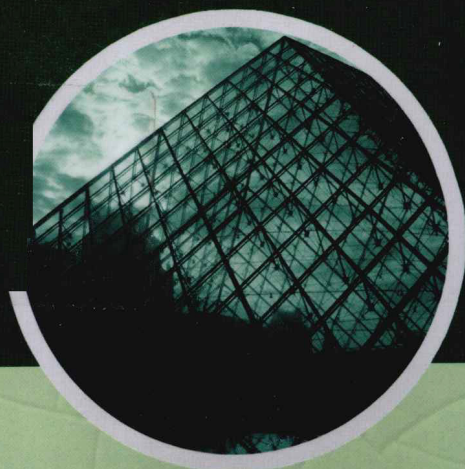
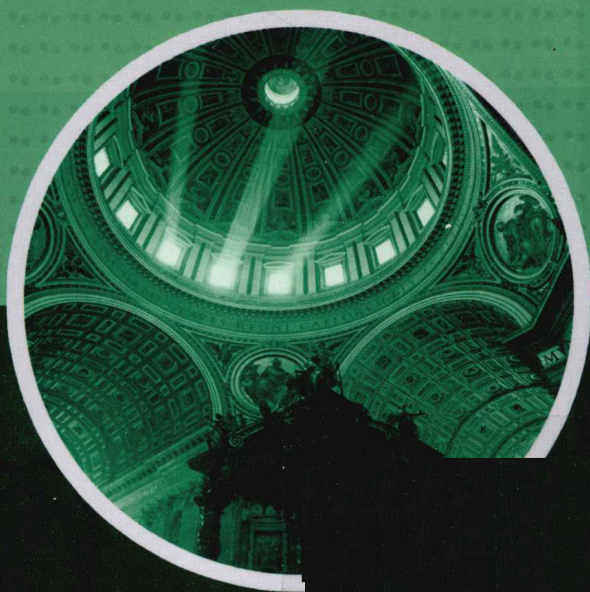


混凝土结构裂缝 预防与修复

徐至钧 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

混凝土结构裂缝预防与修复

徐至钧 等编著



机械工业出版社

前 言

混凝土在工程中是量大面广的材料，每年耗用量达 100 多亿 t，它经历了从钢筋混凝土到预应力混凝土直至现今的高性能高强混凝土约 180 年的发展历程，当代混凝土正向着高强、高流动性、高耐久性的方向发展。

然而，就在混凝土取得巨大进展的同时，混凝土结构的耐久性却出现了一些新问题。在 20 世纪 30 年代刚开始大力兴建混凝土结构时，人们普遍认为混凝土结构设计使用的寿命在 40~50 年，且基本无需维修。直到 20 世纪 70 年代，混凝土过早劣化的现象仍被看做是例外，认为是由于规范存在问题或者材料与施工不当所引起的。但美国国家材料顾问委员会提交的一份关于混凝土耐久性问题的报告在美国引起了轰动。该报告指出在大约 25.3 万座混凝土桥梁的桥面板中，有些仅使用不到 20 年就已经不同程度地损坏，且每年还有 3.5 万座的桥梁桥面板损坏。

由于 20 世纪 70 年代美国混凝土桥面板普遍出现开裂，因此人们转向使用更高强度的混凝土，但却无济于事。根据美国国家公路合作研究计划的检查结果表明，有 10 万座混凝土桥面板是在混凝土浇筑后不到一个月内就出现了贯穿性裂缝。

所以近年来，高强混凝土已被证明是对早期开裂非常敏感的材料，这不仅是由于产生水化热、自干燥作用产生的自身收缩和硫酸盐相产生化学反应的结果，可能还有其他一些重要原因。

混凝土结构出现开裂是土木工程中的主要质量通病之一，而且是常见病，为了攻克这一工程质量的顽疾，本书作者特收集了工程中的大量实例进行分析研究，在此基础上编写了本书。全书共分九章，主要结合一批工程实例介绍了大体积混凝土、薄壁超长混凝土、混凝土结构受热辐射的影响、防裂混凝土的材料选择、防裂混凝土的设计措施、防裂混凝土的施工措施、纤维混凝土的防裂技术及混凝土裂缝的修复。总之，混凝土结构只要预防措施得当，混凝土裂缝是可以解决的。

本书选用的实例系从《工业建筑》、《建筑技术》、《建筑结构》、《建筑施工》、《特种结构》等刊物自 2000 年以来刊载的有关文章及其他各专业会议上出版的论文集进行筛选、加工而成。力求做到典型真实、实用性强、适用面广，且编写形式统一、内容完整，便于比较应用。但由于时间短，加之编者水平所限，本书仍有缺点和疏漏之处，在此热诚期望广大读者批评指正。本书在编写过程中还得到了许多同志的通力合作和各编辑出版部门的大力支持，在此谨表衷心的感谢。

本书由徐至钧主编，在编写过程中，还有杨瑞清、李景、陈月妮、付细泉、张勇、徐卓、宋宏伟、罗利君、张亦农、李智宇、温文、全科政、陈静、林婷等同志参加了部分编写和校对工作。

编 者

2010 年 5 月于深圳

· III ·

目 录

前言

第一章 绪论	1
一、从混凝土的发展看控制裂缝的方向.....	1
二、混凝土的收缩、开裂与结构物的耐久性.....	7
三、混凝土裂缝原因分析	13
四、钢筋混凝土结构裂缝控制指南	17
第二章 大体积混凝土	28
一、大体积混凝土裂缝控制	28
二、大体积混凝土温度应力的计算	33
三、大体积混凝土控制温度裂缝的技术措施	34
四、计算各龄期混凝土收缩变形	38
五、计算混凝土的收缩当量温差	39
六、计算各龄期混凝土的弹性模量	39
七、计算混凝土的温度收缩应力	39
八、混凝土浇筑后裂缝控制施工计算	40
【工程实例 1】 中央电视台新台址工程大体积混凝土施工	46
【工程实例 2】 厚大体积设备基础施工与裂缝控制	49
【工程实例 3】 射线探伤机房大体积混凝土防护墙、板的施工及质量控制	52
【工程实例 4】 国贸三期基础底板大体积混凝土裂缝控制	55
第三章 薄壁超长混凝土	59
一、混凝土的裂缝	59
二、对薄壁超长混凝土水池的分析	64
三、防止薄壁超长混凝土冷缩、干缩裂缝的措施	67
【工程实例 1】 “Ⅱ”型楼钢筋混凝土楼面及墙面裂缝原因分析及处理	70
【工程实例 2】 通过改善施工技术来防止现浇混凝土楼板裂缝	74
【工程实例 3】 钢筋混凝土圆形水池裂缝分析与处理	76
【工程实例 4】 给水排水建筑物裂缝的成因及控制	80
【工程实例 5】 大型调节池裂缝原因分析	84
【工程实例 6】 某地下室工程底板裂缝分析	88
第四章 混凝土结构受热辐射的影响	92
一、混凝土结构热辐射的影响	92
二、热辐射产生混凝土裂缝的原因分析	98
三、防热辐射的隔热降温措施.....	100

四、混凝土结构受热辐射的抗热计算·····	102
【计算实例】 薄壁储液池温度内力计算 ·····	111
第五章 防裂混凝土的材料选择·····	118
一、水泥·····	125
二、骨料·····	133
三、外加剂·····	138
四、掺合料·····	149
五、利用粉煤灰开发高性能混凝土若干问题的探讨·····	155
【工程实例】 C30 粉煤灰超量替代水泥在大体积混凝土工程中的应用 ·····	160
第六章 防裂混凝土的设计措施·····	163
一、从设计方面分析现浇混凝土结构发生裂缝的原因·····	163
二、控制混凝土结构裂缝的设计措施·····	167
【工程实例】 现浇钢筋混凝土楼板裂缝的处理 ·····	175
三、混凝土结构连接缝的设计·····	177
第七章 防裂混凝土的施工措施·····	185
一、防裂混凝土的施工质量管理·····	185
二、防裂混凝土的原材料选择·····	188
三、严格控制混凝土配合比·····	189
四、大体积混凝土的施工措施·····	191
五、炎热季节混凝土的施工·····	192
六、重视混凝土后期的自然养护·····	194
七、做好混凝土施工中的检测·····	196
八、混凝土后浇带施工·····	197
九、混凝土的养护措施与合理抹压及振捣·····	198
十、施工构造措施·····	200
【工程实例 1】 东方城市花园抗裂混凝土的应用·····	201
【工程实例 2】 大华 B1 地块地下车库抗裂混凝土施工 ·····	202
【工程实例 3】 混凝土结构无缝施工技术在首都机场的应用·····	203
【工程实例 4】 青藏高原多年冻土区耐久混凝土施工技术·····	207
第八章 纤维混凝土的防裂技术·····	212
一、对纤维产品的要求·····	212
二、纤维混凝土在高层建筑中的应用·····	214
三、关于聚丙烯纤维对混凝土性能的影响·····	216
四、聚丙烯纤维在混凝土中的阻裂作用·····	219
五、纤维混凝土的配合比和施工操作要点·····	222
【工程实例 1】 露天架空游泳池采用聚丙烯纤维混凝土·····	233
【工程实例 2】 石化工程焦炭塔框架大厚板采用杜拉纤维·····	237
【工程实例 3】 聚丙烯纤维混凝土在以色列驻华大使馆工程中的应用·····	239
【工程实例 4】 宁波白溪水库二期面板聚丙烯纤维混凝土试验研究与工程应用·····	241

【工程实例 5】 某工程超大体积混凝土结构采用纤维混凝土	245
第九章 混凝土裂缝的修复	249
一、混凝土裂缝与钢筋锈蚀	249
二、混凝土裂缝修复前的调查分析	253
三、混凝土裂缝的修复技术	260
四、注浆修补混凝土结构裂缝	265
【工程实例 1】 高层混凝土结构温度收缩裂缝的特点、原因及修复	269
【工程实例 2】 某高层住宅地下室底板裂缝处理	271
【工程实例 3】 储罐环墙基础的裂缝分析与处理	276
【工程实例 4】 某炼油厂水池裂缝修补实例	282
编后语	287
一、混凝土结构的耐久性	287
二、现浇混凝土裂缝的可防、可治	291
参考文献	302

第一章 绪 论

混凝土是土木建筑工程最重要的材料。自 1824 年水泥问世及随之诞生的混凝土与钢筋混凝土以来,至今已有 180 多年的历史。混凝土工程技术总是伴随着工程建设的需要和科学技术的发展而进步。在开始阶段,人们使用高流动性混凝土,而获得的强度却很低。后来,配制成塑性和流动性混凝土,强度和使用都有所改善。到 20 世纪中期,水泥混凝土技术的进步和设备的进一步改进,使混凝土又向干硬性或半干硬性方向转变,配制的强度更高,施工难度也随之增加。由于外加剂技术的进步,混凝土拌合物向塑性和流动性方向发展。混凝土强度和流动度得以兼顾,工程质量和施工速度同时得到提高。10 多年来,人们又把耐久性作为混凝土追求的主要目标,并引入超细活性掺合料作为混凝土的重要组分,从而发展了具有高耐久性、高流动性和体积稳定性,并且有一定强度的混凝土,即高性能混凝土。高性能混凝土是 21 世纪混凝土技术发展的重点和方向。

但混凝土的固有弱点是因脆性而容易产生裂缝。高强混凝土的抗拉强度与抗压强度之比仅为 6% (当混凝土的强度等级超过 C45 时),脆性显著,塑性明显下降,因为脆性破坏会随时产生,高强混凝土结构的跨度不能增幅太大。当结构受弯时,荷载等于破坏荷载的 15%~20% 时就开始产生裂缝(这时钢筋的应力远小于屈服强度),随着裂缝扩展会造成结构物抗渗性能等的降低,以致使用寿命缩短;在结构设计时因裂缝宽度的限制,高强建筑材料的优越性得不到充分应用,因此提高混凝土的性能就显得十分重要。

其实,现代混凝土除了要达到高抗压、高抗拉等要求外,还要容易施工,并能长期保持高强、高韧性、高抗渗性等性能,这就促使了高性能混凝土的出现。

一、从混凝土的发展看控制裂缝的方向

1. 高性能混凝土技术的进展引起了一些新问题的出现

20 世纪以来,以混凝土为建筑材料的工程结构物得到飞速发展,混凝土已成为桥梁、大坝、公路等现代化建筑的首选材料。据统计,当今每年消耗的混凝土量约 100 多亿吨,而且可望在 21 世纪继续稳定地增长。

受工业化、城市化和人口增长对工程建设的需要所驱使,一种又一种的新型混凝土涌现出来,如高强混凝土、高性能混凝土、自密实混凝土、碾压混凝土、水下不分散混凝土和纤维混凝土等。20 世纪 90 年代初出现的高性能混凝土,正如 1990 年 5 月在美国马里兰州 Gaithersburg 城召开的第一次国际高性能混凝土研讨会上提出的定义所说,是一种具备所要求的性能与匀质性的混凝土,这种混凝土靠采用传统的组分、普通的拌和、浇筑与养护方式是不可能制备的。近 10 年来,高性能混凝土已经获得了很大的发展,如出现了以应变硬化为特征的高性能纤维增强混凝土;抗压强度比普通钢材还要高,断裂能力可与钢材、铝材相媲美的活性粉末混凝土等。

在以前,工程中应用的混凝土,其 28d 抗压强度最高只有 30MPa 左右。由于混凝土技

术的进展, 我们已经知道如何制得 150MPa 的混凝土。在这一强度水平, 粗骨料已成为混凝土中最薄弱的环节, 要再提高抗压强度, 就需要剔除粗骨料, 以获得强度达 200MPa 的高性能、高强度混凝土; 只要将混凝土浇筑在薄壁钢管里, 使其受限, 则抗压强度就能继续提高到 375MPa; 而当细砂被金属粉末所替代, 混凝土强度还能进一步提高到 800MPa。更重要的是, 这种混凝土没有停留在实验室里, 抗压强度约 250MPa 的混凝土在法国 Cattenom 核电站已被预制成 2000 多根预应力梁, 用于翻修冷却塔外围支架; 抗压强度为 350MPa 的混凝土在加拿大 Sherbrooke 市已被用于修建跨度为 60m 的人行桥。截至 2008 年, 世界上最高的建筑物是一座用混凝土建造的楼房, 即 1998 年在马来西亚建成的 Petronas 双塔楼; 世界上最深的钻井平台也是混凝土的, 即 1998 年建成的比著名的埃菲尔铁塔还高的挪威 Troll 钻井平台。

然而, 就在混凝土取得巨大进展的同时, 混凝土结构物的耐久性却出现了一些新问题。在 20 世纪 30 年代刚开始大力兴建混凝土结构时, 人们普遍认为混凝土结构物设计使用寿命为 40~50 年, 且基本无需维护。直到 20 世纪 70 年代, 混凝土过早劣化的现象, 仍被看做是例外, 认为是由于规范存在问题或者材料与施工不当所引起的。但 1987 年美国国家材料顾问委员会提交的一份关于混凝土耐久性问题的报告在美国引起了轰动。该报告指出在大约 25.3 万座混凝土桥梁的桥面板中, 有些仅使用不到 20 年就已经不同程度地损坏, 且每年还有 3.5 万座桥梁的桥面板损坏。

由于 20 世纪 70 年代美国混凝土桥面板普遍出现开裂, 因此人们转向使用更高强度的混凝土, 但却无济于事。根据美国国家公路合作研究计划的检查结果表明, 有 10 万座混凝土桥面板是在混凝土浇筑后不到一个月内就出现了间隔 1~3m 的贯穿性裂缝。

近年来, 高强混凝土已被证明是对早期开裂非常敏感的材料。结构混凝土或大体积混凝土出现开裂, 不能总是归因于现场工程师缺乏经验, 这不仅是由于产生水化热、自干燥作用产生的自身收缩和硫酸盐相产生的化学反应的结果, 可能还有其他一些重要原因。在混凝土领域里还有许多问题尚需进一步研究。

在硬化混凝土收缩受约束的条件下, 收缩应变将导致弹性拉应力, 拉应力可被近似地看做是弹性模量与应变的乘积; 当拉应力超过混凝土的抗拉强度时, 材料出现开裂。但是由于混凝土的粘弹性(徐变), 部分应力释放, 残余应力(徐变产生的应力松弛后)才是决定混凝土是否开裂的关键。

收缩受约束产生的拉应力和由于徐变释放的应力之间的相互影响, 是硬化混凝土出现早期开裂的核心(图 1-1)。从图 1-1 可以清楚地知道, 可因下列因素而减小混凝土由于收缩受约束而形成的开裂: 抗拉强度高、收缩应变小、弹性模量低、徐变应变高。这些因素与混凝土强度—耐久性之间的关系有关。

与其相反, 采用大量高活性水泥和低水灰比配制的高早强混凝土, 虽然抗拉强度随抗压强度的提高而提高, 但相对幅度较小, 而弹性模量迅速增大, 徐变松弛作用则很快减小, 因此由于自身收缩产生的拉应力超过其抗拉强度时会迅速出现开裂。

此外, 引起混凝土早期开裂的因素还很多: 德国的 Springen schmid 教授根据在开裂试验架进行的大量试验结果, 对不同因素降低混凝土开裂温度 ΔT_c 作用进行了比较:

- (1) 降低新拌混凝土的温度($25^{\circ}\text{C} \rightarrow 12^{\circ}\text{C}$), ΔT_c 为 15~18K。
- (2) 采用优质水泥, ΔT_c 可达 20K。
- (3) 石子最大粒径用 32mm, 不用 8mm, ΔT_c 为 5~10K。

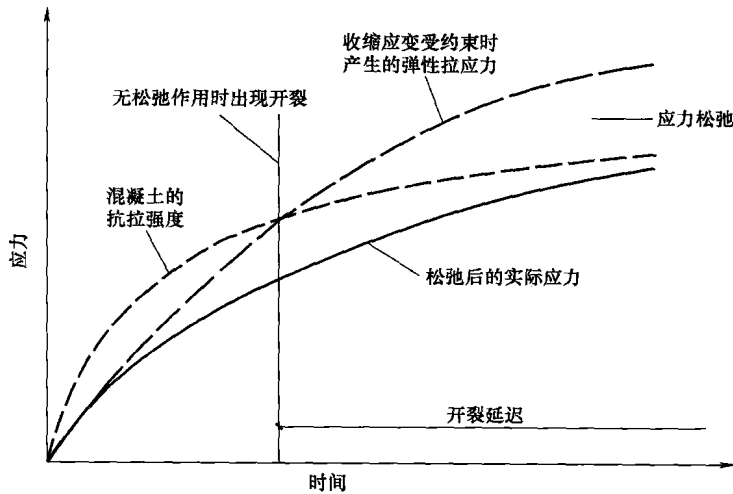


图 1-1 收缩和徐变对混凝土开裂的影响

(4) 骨料线胀系数低, ΔT_c 可达 10K。

(5) 掺引气剂(含气量 3%~6%), ΔT_c 为 3~5K。

(6) 用碎石代替卵石, ΔT_c 为 3~5K。

(7) 水泥用量改 $340\text{kg}/\text{m}^3$ 为 $280\text{kg}/\text{m}^3$ (差额以粉煤灰等量代替), ΔT_c 为 3~5K。

由上述结果可以看出, 水泥品质对混凝土的影响十分显著。当混凝土发生劣化时, 通常归因于养护操作, 所用骨料、拌合物或者质量控制不当, 而水泥却很少被考虑。这可能是因为同一类型的水泥, 只要通过标准的检验, 就认为是一样的。然而不同厂家生产的同类水泥, 延伸性的差异可能很悬殊。什么样的水泥较好呢? 结论是含碱(Na_2O 、 K_2O)量低、含硫酸盐量(相对于铝酸盐而言)高、粉末细度较小的水泥抗裂性能较好。

混凝土开裂与耐久性存在着密切的关系, 特别是当其暴露在侵蚀性环境中工作的时候。Metha 提出的混凝土受外界环境作用而劣化的整体模型如图 1-2 所示。根据这个模型, 任何

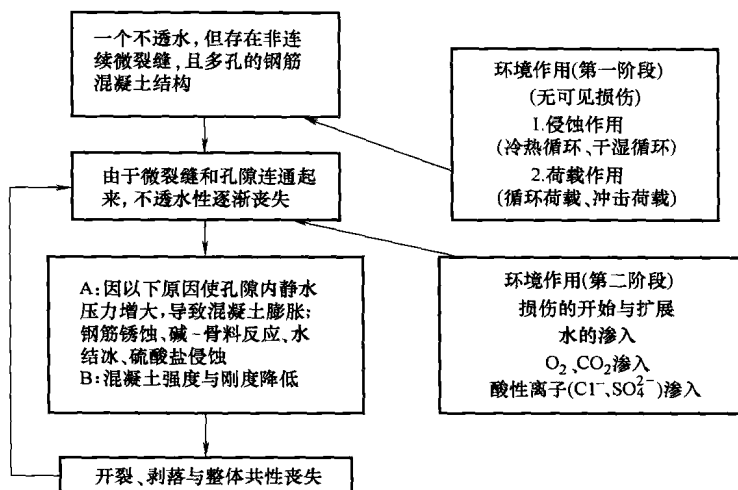


图 1-2 混凝土受外界环境作用而劣化的整体模型

一组经适宜捣固与养护良好的混凝土，直到内部的微裂缝与孔隙形成的网络通道到达混凝土表面之前，基本上都不会透水。当结构承载和在外界环境的侵蚀性作用下，例如结构暴露于冷热循环、干湿循环中时，原存在于水泥砂浆与骨料间过渡区的微细裂缝就会扩展。这发生在“环境作用”的第一阶段。

一旦混凝土失去水密性，混凝土体内达到饱水后，对混凝土劣化起决定影响的水和各种离子就很容易侵入，这意味着“环境作用”的第二阶段开始。这时的混凝土由于膨胀、开裂、失重和渗透性增大而产生劣化。

以上说明：一方面，混凝土技术在 20 世纪取得了巨大的进展；另一方面，混凝土技术在 21 世纪里仍然存在大量的问题有待解决。

2. 商品混凝土工程早期裂缝的分析

泵送商品混凝土工程出现早期裂缝有日益增加的趋势，这类问题不是我国特有的技术问题，而是国际上混凝土工程的共性难题，混凝土技术进步了，但混凝土开裂的现象反而越来越多，这首先要从混凝土材料本身去寻找原因。混凝土的裂缝是不可避免的，但其有害程度是可以控制的，至于有害与无害的界限，则应由混凝土结构的使用功能来决定。

(1) 问题提出。所谓早期裂缝，主要是指混凝土结构在还未施加使用荷载以前就出现的裂缝。它既出现在房屋建筑工程的地上和地下部位，也出现在桥梁结构工程；既出现在大体积混凝土结构，也出现在截面只有几十厘米的梁、板结构。裂缝宽度既有 0.1 ~ 1.0mm 的，也有宽达 10mm 的贯穿粗大裂缝。

(2) 基本概念。固体材料的裂缝是材料的某种缺陷，也是材料的某种固有性质，裂缝是固体材料的某种不连续的现象。由于材料中微观裂缝的形成以及建筑物上宏观裂缝的出现，都包含着极其复杂的因素。不可否认，混凝土是一种很容易开裂的材料，从近代混凝土强度亚微观研究以及多年来大量的工程实践表明，混凝土有裂缝是绝对的，无裂缝是相对的，只是把裂缝宽度控制在一定的范围内而已。

在尚未受力的混凝土结构中，存在有肉眼看不见的微观裂缝，它主要有三种表现形式：

- 1) 粘着裂缝：骨料与水泥石的粘接面上的裂缝，主要沿骨料周围出现。
- 2) 水泥石裂缝：水泥浆中的裂缝，在骨料与骨料之间。
- 3) 骨料裂缝：骨料本身的裂缝。

混凝土的微观裂缝，主要是指粘着裂缝和水泥石裂缝，至于骨料裂缝则很少见（华北等重碱地区例外）。

肉眼可看见的微观裂缝范围，一般以 0.05mm 为界限，大于 0.05mm 的裂缝称为宏观裂缝。宏观裂缝是微观裂缝扩展的结果，在一般的工业与民用建筑中，宽度小于 0.05mm 的裂缝，对建筑物的使用（包括防水、防腐、承重）不会构成危险。

(3) 裂缝形成。混凝土结构早期裂缝按其形状分为表面、贯穿、纵向、横向、上宽下窄、下宽上窄、枣核形、对角线形、斜向、外宽内窄和纵深（深度达结构的 1/2 厚度）等。

一般裂缝的方向与结构应力方向垂直，但在混凝土砌块结构和结构物的变截面处，剪力可能与裂缝平行。

裂缝的宽度是不均匀的，一般在该裂缝长度的 10%~20% 范围内，确定该裂缝的最大宽度。同样也可在裂缝长度的 10%~20% 较窄范围内，取其平均宽度为最小裂缝宽度。

裂缝又可分为愈合、闭合、运动、稳定和不稳定等形式。地下防水工程或其他防水结

构,在水压不高(水位 10m)的情况下,水通过裂缝同水泥结合,形成氢氧化钙 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ 和硫铝酸钙 $(3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4)$,生成胶凝物质胶合了裂缝,使原裂缝被封闭。虽然裂缝仍能存在,但渗漏停止,这种现象称为裂缝的自愈现象,这种裂缝不影响结构的持久,是稳定的。

结构上出现的初始裂缝,在后期荷载作用时,有可能在压应力作用下闭合,尽管裂缝仍旧存在,但这是稳定的。

结构上的任何裂缝及变形缝,在周期性的温差和周期性的反复荷载作用下,产生周期性的扩展和闭合,这称为裂缝的运动,但这是稳定的运动。至于有些裂缝产生不稳定性的扩展时,那就要看其扩展部位,考虑加固。

(4) 裂缝成因。混凝土结构的早期裂缝,主要是由沉缩和干缩引起的。从裂缝形成的时间来看,往往发生在初凝到终凝这段时间内,但其宽度、深度、长度还会因施工养护的条件变化而变化。从施工季节来看,春、秋两季是混凝土裂缝的多发季节,裂缝多而宽。

1) 混凝土的配合比。水灰比是影响混凝土收缩的主要因素,用水量越大,混凝土干缩越大。片面追求混凝土高强,导致水泥用量增加,容易引起混凝土在早期和后期都产生开裂。各类外加剂、掺合料只有强度指标,缺少对水化热及收缩变形影响的长期实验资料,且有些试验数据也不严谨。

2) 混凝土结构设计。混凝土结构规模日趋庞大,结构形式日趋复杂,超长、超厚及超静定结构成为经常采用的混凝土结构,且都采用泵送混凝土施工。这种结构对于各种变形会引起较大的约束应力,但在结构设计中都忽略了构造钢筋的重要性,从而使混凝土结构经常出现构造性裂缝。

3) 施工环境与条件。施工采用的养护方法,基本是沿用过去的简单养护方法,远不能适应泵送混凝土有较大温度收缩变形的要求。施工时的气象条件是影响混凝土楼地面工程裂缝的重要因素,在气候干燥和大风时期,商品混凝土浇筑后如不立即覆盖养护就会产生开裂,因此表面积较大的现浇混凝土楼地面,往往会产生上下贯通裂缝,其特征是板上面比板下面的裂缝要多。

4) 水泥材性的影响。泵送混凝土工程,一般都采用新法烧制的水泥,比表面大,早期水化很快,水泥用量又大,再加上保水性较好的萘系(C_{10}H_8 类似于生活用的卫生球)减水剂,因此采用这种水泥的混凝土,其早期性能的特征是水化快、水化热发展快、拌合物保水性强、泌水性小,混凝土表面水分的蒸发速率大于泌水速率,但水分得不到补充,因此早在混凝土表面覆盖、喷水养护前就已产生表面裂缝甚至贯穿裂缝,一经拆模,就会更明显。

(5) 预防措施

1) 进行混凝土配合比设计时,要控制用水量和水泥用量。 C40 混凝土的水泥用量在 $400\text{kg}/\text{m}^3$ 以下时,一般不会出现开裂;当水泥用量在 $400 \sim 500\text{kg}/\text{m}^3$ 时,就会有开裂的危险。

2) 认识湿养护的重要性。现代泵送混凝土不同于过去的传统施工,养护方法不当是混凝土产生裂缝的重要原因之一,必须在混凝土浇筑后尽早覆盖喷水养护,以防止早期开裂,并延长养护时间,严格检查养护工作。

3) 选择合适的结构形式。降低结构约束程度,对水平类梁、板、墙等结构,尽可能采用中、低强度等级的混凝土,加强构造钢筋的配置。如板顶部的受压区采用连续配筋,板的

阳角和阴角配置放射钢筋，以及增加梁的箍筋等。

4) 发展纤维混凝土。在普通混凝土中掺入 $0.8 \sim 1.2\text{kg/m}^3$ 的聚丙烯短纤维(10~19mm 长)，可以明显减少混凝土的早期开裂。

5) 任何材料都不是万能的，都有其合适的应用场合和范围。在混凝土原材料方面，容易引起混凝土产生裂缝的首先是水泥。现行水泥新标准的 3d 强度已比旧标准规定有所提高，而不少水泥的 3d 强度又都超过新标准很多。早强水泥很容易产生早期裂缝，早强水泥适用于某些紧急工程，它不是一种到处都适用的优良水泥。对一般工程的泵送混凝土，一般以采用旋窑生产、质量稳定的普通水泥为宜。

(6) 当前存在的主要问题

1) 技术创新与务实。对水泥混凝土的新技术研究和开发，较多的是在试验室里进行的，缺乏量大面广和持久的工程实践考验。长期以来，科研工作的思想习惯于正向思维，即强调某项技术的正面效益，而较少从反面提出问题或指出某项技术的缺点和存在的问题，不指出该项技术的适用范围和不适应场合。

2) 质量技术监督部门面对我国加入 WTO 的新形势，已重点清理废止了不少的过时技术标准。我国混凝土行业的技术标准一是不全，二是陈旧，至今仍沿用 20 世纪 80 年代和 20 世纪 90 年代初修订的标准，其中仍有前苏联标准影响的痕迹。

不了解国外行业技术标准，硬套国标。

3) 处理问题要调查属实。钢筋混凝土结构的允许裂缝宽度，主要是为了保证钢筋不致产生锈蚀，各国规范对裂缝宽度的限制虽不完全一致，但也大致相同。在正常的空气环境中为 0.3mm，在较微腐蚀介质中为 0.2mm，在严重腐蚀介质中为 0.1mm 等。但同一构件按不同国家规范计算裂缝的结果，相差达 2~3 倍，如果与实际工程裂缝宽度相比较，其差别更达数倍甚至数十倍之多。

我国 8 个国家级科研机构对 9 个地区 48 项带有裂缝的混凝土工程进行了调查：处于正常空气的室内环境和潮湿环境中，裂缝宽度为 0.13~9mm；而一批室内工程如贵阳、武汉，裂缝宽度为 1~9mm 的结构中，钢筋没有锈蚀。

调查的结论是：一般室内结构，横向裂缝不会导致钢筋锈蚀，潮湿环境中的裂缝也只能引起局部锈蚀，锈蚀程度不大，只有在氯化物含量较高的环境中，裂缝才会引起较大的锈蚀，控制裂缝宽度为 0.2mm。混凝土构件纵向裂缝引起的锈蚀会引起保护层剥落，影响耐久性，值得注意。

在调查的统计资料中，没有因钢筋锈蚀而影响承载力和正常使用的记录，这是最关键的问题，也是处理事故的重要依据。

日本铁道协会对混凝土裂缝进行了 20 多年的工地现场试验，试验目的是探索钢筋混凝土电缆支架在产生裂缝后的耐久性问题，并要求解决两个具体问题：一是钢筋混凝土产生裂缝后，在长期反复冻融作用下的裂缝扩展如何(采取自然置于冬天 $-15 \sim -10^\circ\text{C}$ ，夏天 $16 \sim 38^\circ\text{C}$ 的环境中长期观测)；二是裂缝宽度与钢筋锈蚀的关系，包括不同裂缝宽度的钢筋锈蚀深度、面积，钢筋锈蚀后的抗拉强度等。

试验结论：

① 混凝土表面碳化 0~1cm。

② 有 0.1mm 裂缝的钢筋混凝土，钢筋几乎不锈蚀。

- ③ 有 0.2mm 以上裂缝的钢筋混凝土, 钢筋锈蚀有发展, 但并不严重。
- ④ 锈蚀后的钢筋抗拉试验证明, 其极限承载力几乎不受影响。
- ⑤ 预应力离心管桩结构, 在干湿及冻融反复作用 20 多年的情况下, 未发现内部钢筋锈蚀。

(7) 小结。混凝土早期开裂, 是水泥和混凝土技术发展带来的新问题, 它涉及水泥的性能、混凝土配合比、施工环境、气象条件以及设计等诸多因素。在当前裂缝控制技术还不很完善的条件下, 对混凝土工程的裂缝提出过严的要求是没有现实意义的, 允许裂缝的宽度越小, 控制的难度就越大, 而由此付出的工程造价也越高。从目前实际出发, 凡在施工期间出现的混凝土早期裂缝, 只要经修补后能满足使用要求, 大家就不必再去争得面红耳赤, 以减少工程建设过程中许多不必要的矛盾。

二、混凝土的收缩、开裂与结构物的耐久性

清华大学覃维祖教授提出以下看法:

1. 概述

自 20 世纪初起, 人们就已经认识到大体积水工混凝土会因为水泥水化时的放热散发缓慢而产生明显的温升, 并在随后的降温过程中因体积收缩受约束而出现开裂。为了减小水化放热产生的影响, 开始采用掺火山灰的办法, 20 世纪 30 年代又开发出低热水泥, 以后还用加大粗骨料粒径、压低水泥用量、预冷拌合物原材料、限制浇筑层高和管道冷却等措施, 进一步获得降低水化温峰(水化热温度曲线的温度极大值, 简称温峰)、抑制温度裂缝的效果。

另一类混凝土结构物, 如地面、机场跑道、桥面板等, 由于暴露面积比较大, 又会在失水产生的干燥收缩显著时开裂, 人们逐渐开发出浇水、喷雾以及喷洒成膜化合物(在我国称养护剂)等解决办法。

几十年来, 基础、桥梁、隧道衬砌以及其他构件尺寸并不大的结构混凝土开裂的现象增多, 同时发现干燥收缩在这里并不重要了。水化热以及温度变化已经成为引起素混凝土与钢筋混凝土约束力和开裂的主导原因。在此就现今混凝土结构存在开裂现象普遍的主要原因, 以及目前国内外对收缩与开裂问题的研究与应用的进展作一介绍, 同时结合所做工作对改善措施谈一些看法。

2. 混凝土技术的进展及其影响

受混凝土早期强度发展快而可以给业主和承包商带来明显利益所驱使, 水泥生产商将水泥产品中的硅酸三钙(C_3S)含量不断提高、粉磨细度不断加大。Mehta 曾说: 20 世纪 30 年代前, 美国普通硅酸盐水泥的 C_3S 在 30% 以下, 美国材料试验学会标准 (ASTM) 允许 22% 的颗粒大于 $75\mu m$ 。自 20 世纪 50 年代开始, C_3S 含量超过了 50%, 而且基本上没有大于 $75\mu m$ 的颗粒。

Mehta 还指出: 西方工业国家于 20 世纪 40 ~ 70 年代曾因为早期强度很高的水泥问世, 而当时结构的设计强度尚不高, 于是出现将混凝土以大水灰比、低水泥用量的方式进行配比, 在满足强度要求的前提下易于施工操作, 然而这给混凝土结构的耐久性带来隐患, 尤其是暴露于侵蚀性环境条件下工作的时候。根据英国 Wischers 的报道: 在 1960 年配制 30 ~ 35MPa 混凝土时, 用水泥 $350kg/m^3$, 水灰比 0.45。在 1985 年, 同样的混凝土只需 $250kg/m^3$ 水泥, 0.6 的水灰比。对于进行结构计算的设计者而言, 两种混凝土是一样的。然而, 从微

结构的角度来看,两种混凝土的孔隙率和渗透性就大不相同了。水灰比 0.6 的混凝土的碳化要比水灰比 0.45 的混凝土迅速,对海水、冻融与化冰盐的耐久性也不如后者。

国内的情况与西方国家有些差异,但混凝土拌合物的工作度由小变大的趋势是有目共睹的。作者在 20 世纪 60 年代末刚参加工作时在工地浇筑混凝土,就目睹了拌合物从干硬性向塑性转化的过程。那时不掺用任何外加剂,拌合物运到现场时通常十分干涩,要振捣密实比较困难。

在水泥的生产与供应方面,20 世纪 80 年代后从过去的指令性生产向市场经济转化。为加快施工速度、缩短工期并加快模板周转, C_3S 含量高、粉磨细度大、混合材料掺量少的高早强水泥备受市场欢迎;散装水泥在简化工地操作、降低售价、均化产品方面的优势使其迅速得到推广,但是水泥温度居高不下,已成为影响拌合物浇筑温度高、水化快、坍落度损失大的重要原因。与此同时,混凝土设计等级也在不断提高,促使混凝土单位水泥用量迅速增长,高强混凝土(主要是高早期强度)的推广应用,进一步加剧了上述趋势。

在外加剂应用方面。我国虽然比一些国家要晚很多,但由于基础设施建设大发展的需要,在生产与使用量和复配技术方面,比起包括美国在内的大多数国家来说差距并不大。尤其是高效减水剂的应用,已成为我国混凝土技术发展的一个重要里程碑,应用它可以配制水灰比(水胶比)低、流动性满足需要,且强度发展很快的高强混凝土,以及可以自行流动成型密实的自密实混凝土等。

但是随着低水灰比(或水胶比)高早强混凝土的应用,结构物早期开裂的现象日益突出,引起了人们的关注。实践证明,高强混凝土是对早期开裂非常敏感的材料,这不仅是水化热的结果,由于自干燥作用产生的自生收缩和硫酸盐相的化学反应,可能也是重要原因。结构混凝土或大体积混凝土意外地出现开裂,不能总是归因于现场工程师缺乏经验,而是该领域里许多问题人们尚缺乏了解,激发全世界许多人去进一步开展研究。

3. 收缩与开裂

人们对收缩给予了很大的关注,但引人关注的并不是收缩本身,而是由于它会引起开裂。混凝土的收缩现象有好几种,比较熟悉的是干燥收缩和温度收缩,本文着重介绍的是自生收缩。自生收缩与干缩一样,是由于水的迁移而引起,但它不是由于水向外蒸发散失,而是因为水泥水化时消耗水分造成凝胶孔的液面下降,形成弯月面,产生所谓的自干燥作用,混凝土的相对湿度降低,体积减小。水灰比的变化对于干燥收缩和自生收缩的影响相反,当水灰比降低时混凝土的干燥收缩减小,而自生收缩增大。如当水灰比大于 0.5 时,其自生收缩与干缩相比小得可以忽略不计;但是当水灰比小于 0.35 时,混凝土内相对湿度很快会降到 80% 以下,自生收缩与干缩则接近各占 1/2;当水灰比低至 0.17 时,则自生收缩要占 100%,而干缩为 0(意味着即使在很干燥的环境中也没有水分向外蒸发)。当然上述比例只是给出一个大致的概念,忽略了尺寸效应、环境条件等的影响。

自生收缩在混凝土体内均匀发生,且混凝土不失重。此外,低水灰比混凝土的自生收缩集中发生在混凝土拌和后的早期,因为在这以后,由于混凝土内的自干燥作用,相对湿度降低,水化就基本上终止。换句话说,在模板尚未拆除之前,混凝土的自生收缩大部分已经发生,甚至已基本完成,而不像干燥收缩,即使处于干燥环境,只需覆盖表面就不会发生。

在大体积混凝土工程中,虽然一般水灰比不低,自生收缩值不大,但考虑它与温度收缩叠加,要进一步增大应力,所以在水工大坝施工时是将自生收缩值作为一项性能指标进行测定的。现今许多断面尺寸虽不很大,且水灰比也不算小的混凝土,但已达到必须解决水化热

及随之引起的体积变形问题,以最大限度减少开裂影响,因而也需要像大坝一样,考虑将温度收缩和自生收缩叠加的影响,况且在这些结构物中,两者的发展速率均比大坝混凝土中快得多,因此也激烈得多。简单地说,混凝土自生收缩大小的评价,与测定干缩不同之处主要有两点:①将试件与外界隔绝,避免水分交换,这一点做起来不难;②需要自混凝土初凝开始测定,这一点是评价其大小的难点。1987~1988年作者在法

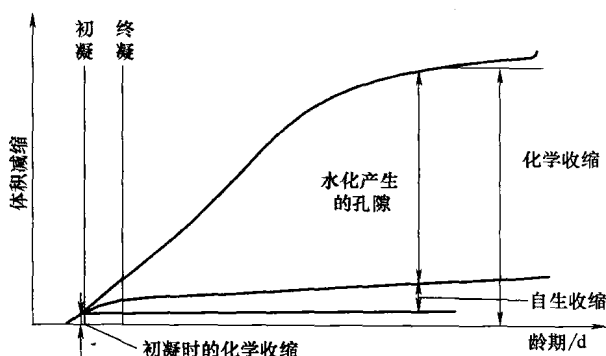


图 1-3 化学收缩与自生收缩之间关系的示意图

国路桥试验中心进修时曾使用该中心开发的装置测定混凝土的自生收缩,装置的特点是在浇筑混凝土或砂浆之前,在其两端内侧涂刷一层专用配方的环氧砂浆,使浇筑后的混凝土或砂浆初凝后发生的微小变形能够灵敏地反映到仪表和记录仪上,而无需等待其完全硬化,因为正如图 1-3 所示,自生收缩是初凝后发生化学收缩的一部分,若等到其终凝或硬化到某一阶段才开始测定其自生收缩,实际上就只是它的一部分了。

如上所述,现今混凝土(水灰比较低)一旦到达初凝就开始发生较大的自生收缩,同时因为初凝时间间隔很短,随之很快就开始形成具有抗力(强度)的弹性体,其弹性模量的增长比强度的增长更快,而粘性(徐变松弛作用)也相应迅速减小,因此混凝土体内就会迅速形成比较大的拉应力(可以近似看作自生收缩应变与弹性模量的乘积),当应力超过混凝土的抗拉强度(Shah 等人认为是它的断裂能,这更确切一些)时就发生开裂,形成宏观裂缝。

混凝土由于温度升高而在早期易于开裂的问题,在温度开始上升时混凝土的弹性模量也非常小,只有一小部分热膨胀转化为压应力,这一阶段还有很大的松弛能力,进一步使预压力减小,而随后的冷却过程中,弹性模量增大和松弛作用减小导致大得多的拉应力产生。

当然,在许多情况下,并未很快出现肉眼可见的宏观裂缝,只有在越过温峰后的降温阶段,混凝土发生的热收缩(国内通常称为温度收缩)或拆除模板后处于干燥环境而发生的干缩叠加时才出现。而最普遍发生,又容易被忽视,以致产生误导的情况,是在施工过程或者竣工不久结构并没有出现可见裂缝,这种情况通常被人们视为成功经验,而实际上只是混凝土体内的拉应力尚未到达临界点(即微裂纹扩展时放出的能量大于新增表面需要的能量),或者由于密集配筋的作用,将集中的可见裂缝分散为肉眼不可见的裂缝。正如 Mehta 所说:众所周知,配筋并不能消除或者减小混凝土里的收缩裂缝,而只能把少而宽的裂缝分散为大量的微细裂缝。正是那些看不见、检测不到的微细裂缝,可能最终成为离子在混凝土与钢筋表面之间迁移的必要通道。

4. 对收缩、开裂的评价方法

正确地检测与评价混凝土的收缩与开裂趋势,是采取措施有效地减少或避免开裂的前提。在积累浇筑大坝这类大体积结构混凝土经验的基础上建立的防止混凝土早期产生温度裂缝的检测与评价方法,是通过测定绝热温升、水泥水化热等参数以选择原材料、确定配合比,并采取预冷拌合物和埋设冷却水管等措施来控制混凝土的内外允许温差,总之是局限于尽量降低最大温升的办法来预防开裂。但实际上即使是水灰比不低的大坝混凝土,即主要由

于温度收缩而可能引起开裂的混凝土，也并不单纯是温度变化本身而造成开裂，如上所述，开裂是由于应力超过材料的强度(断裂能)所引起，因此除温度变化以外，所有影响应力和强度发展的因素，尤其是材料的弹性模量、热膨胀系数以及松弛能力，包括它们在初期的变化都必须考虑在内。

评价混凝土抗裂性能相关的试验方法有五种：水化热试验、绝热温升试验、收缩测定试验、环约束试验和轴向约束试验。前三种是间接评价法，后两种则为直接评价法。

间接评价法是通过检测影响混凝土开裂的单一因素来评价抗裂性能，由于混凝土对开裂的敏感度是由很多因素共同影响的，如只单独考虑其中一个因素而不考虑其他因素的影响，就得不到有实用价值的结果。混凝土的温升和收缩大小都影响开裂，但影响程度必须结合混凝土的弹性模量、热膨胀系数、抗拉强度，以及混凝土变形受到的约束程度、应力大小才能确定。

直接评价法则通过直接检测混凝土的开裂行为(如开裂时间、开裂温度、开裂应力等)来评价抗裂性能，是目前认为较有效的方法，因为它可以同时考虑多个关键因素，从而得到有参考价值的结果。

环约束试验是用钢制圆环同时给混凝土环形试验提供径向和切向的约束，使其不能自由收缩，并检测试验在不同温度和湿度等条件下的开裂行为。试验沿径向面力的分布是变化的，不能用某一应力值反映试件当前的受力状态。环试验可以通过开裂时间来反映硬化水泥浆体和混凝土的抗裂性能，详细内容可见美国混凝土学会专题文献《混凝土可见与不可见裂缝》。

轴向约束试验是通过约束混凝土条形试件的轴向变形和测量试件的应力来检测试件在不同条件下的开裂行为。了解了混凝土内部应力就可以直接得知开裂危险程度，从而可以较好地预测混凝土的抗裂性能。轴向约束试验于1942年在美国发明，1969年德国慕尼黑技术大学 Springenschmid 教授改进并开发出开裂试验架装置。该装置可以模拟混凝土在初龄期受约束条件下产生的应力，混凝土从半液半固态的粘塑性体开始转变为粘弹性体的过程中的弹性模量迅速增长、徐变松弛作用减小都可以得到综合反映。由于混凝土变形在很大程度上被刚性的构架所阻止，因此可以定量测得混凝土的开裂趋势和水泥的开裂敏感性，适用于为工程选择抗裂性能较好、开裂趋势较小的原材料和配合比，也可以用于预测已知结构参数、混凝土材料和浇筑温度等条件时开裂的可能性，因此能够采取必要的防范措施。20世纪80年代又进一步改进，研制出温度—应力试验机，并于20世纪90年代在世界范围内获得推广使用。对轴向约束试验的具体介绍可参见有关综述文章。笔者带领研究生利用虚拟仪器技术成功地设计加工了这种装置，并通过一系列试验初步建立了试验方法。

近年来，许多研究者致力于早期约束应力的计算，以确定出现开裂的危险性。依据材料的性质、水化热的发展、刚度的增大与松弛能力的减小、抗拉强度的增长、热膨胀系数与化学反应对变形的影响而建立了许多计算机程序。所有这些参数主要取决龄期、温度、水泥类型和混凝土拌合物的组成。实际上，只能大致估计这些参数的影响。然而，在建立近似材料性质的模型方面，已经有了很大进展。这样的模型需要假设现场的约束和温度条件。日本和法国开发出在现场测定约束应力的新方法，实验室与现场的试验结果和计算结果进行比较，使该领域获得了显著的进展。1989年，RILEM 创建了以 Springenschmid 教授为主席的“混凝土早期热裂缝” TC119 技术委员会。该委员会在1994年召开了一次国际研讨会，出版了论文集；Springenschmid 教授于1998年又出版了《避免混凝土早期热裂缝》一书，这些工作为评价和防范混凝土早期热裂缝提供了丰富的信息。

5. 混凝土结构的耐久性与开裂防治

已故的中国工程院院士吴中伟先生曾说：科学思想分为两大派系，整体(综合)论与还原(分解)论，过去整体论用得最普遍。近代科研手段精进，还原论用得更为普遍。即将科研对象还原或分解到可能达到的最小单位，进行具体的量化研究，还原论对当代自然科学与技术科学的发展已产生很大作用，但缺点是分得愈细，愈易脱离整体和实际，因此无法从整体来全面有效地解决问题或认识事物的本质。

几十年来，国内外投入了大量人力、财力对混凝土的耐久性问题进行研究，建立了大量的试验方法和相应的规程，试图在室内试验、室外暴露试验结果和实际混凝土结构的耐久性之间找到一些定量关系，从而为结构设计提供服务寿命预测的依据，为改善结构耐久性的技术措施进行验证。但是，由于绝大部分的试验研究都只考虑单一耐久性问题(如钢筋锈蚀、碱—骨料反应、冻融、硫酸盐侵蚀、耐冲磨等)，而且在进行试验时，如上所述，仅考虑变化混凝土原材料和配比，将耐久性看作只和它们有关的一种固有特性，而没有与工程的环境条件、结构设计、混凝土生产工艺过程紧密联系，因此获得的研究成果，以及相应建立的实验方法、标准和规程往往是脱离结构整体的，是难以反映工程实际的。尽管近些年来在荷载与侵蚀双重作用，或者是两种侵蚀组合作用叠加引起的耐久性问题的研究方面有了明显的进展，但是如上所说的基本状况依然没有改观。换句话说，要想真正改善混凝土结构的耐久性，首先要从整体上对产生耐久性问题的基本原因有明确的认识。

总体上来说，近三十年来国内混凝土工程建设中由于化学外加剂和矿物掺和料的应用，混凝土水胶比减小，混凝土拌合物生产与浇筑等设施的改进，有利于混凝土微结构的匀质性提高。但是同期混凝土拌合物从干硬性向塑性状态的转变，使其在运送、浇筑和振捣过程，以及刚浇筑完尚未凝固的阶段产生离析、泌水的现象明显加剧。此外，由于混凝土自生收缩、温度收缩增大，尤其是混凝土早期强度和弹性模量增长迅速，使早期由于变形受约束产生的弹性拉应力明显增大，因此在外界的荷载和因环境条件产生的干缩、温度收缩叠加作用下就容易出现开裂。这两方面的变化又使得混凝土的整体匀质性下降，是当今国内处于侵蚀性环境中的混凝土结构过早劣化现象的主因。尽管许多时候出现的裂缝尚在 0.2mm 以内，但是这种认为对结构承载力无害的裂缝，从耐久性角度来说，正是外界侵蚀性介质进入混凝土的通道，给结构的耐久性带来隐患。

从整体论角度出发，为改善混凝土结构的使用寿命，首先要针对不同工程所处环境的特点，如在西部大开发基础设施建设中，西北地区日夜温差大、干燥多风、冬季寒冷；西南地区多雨潮湿、气候垂直分布明显等特点，从结构设计、混凝土选材与配合比设计，到混凝土的生产与浇筑过程各个方面，尽量使建造的钢筋混凝土结构不透水、内应力小、抗裂性能良好，并且在以后运行过程中混凝土内微裂缝与孔隙相互连通的过程非常缓慢，长期保持水密性能良好。

不同水泥厂生产的同一品种水泥对开裂的敏感性可能差别很悬殊。

什么样的水泥较好呢？结论是：含碱(Na_2O 、 K_2O)量低、硫酸盐含量(相对于铝酸盐而言)高、颗粒细度较粗的水泥抗裂性能较好。国内市场上现在充斥着粉磨较细、 C_3S 矿物含量高的早强水泥，很多水泥产品的硫酸盐含量又不高(据了解，美国、法国等国的石膏用量掺量取决于其铝酸盐含量，即二者的比例限制在一定范围内。我国则固定石膏用量为 3%~5%)，这些问题，是导致混凝土开裂非常重要的原因。

针对温度收缩已成为引起当前结构混凝土开裂的主要原因的情况，下面着重谈谈通过掺粉