

工程结构裂缝控制

“抗与放”的设计原则及其在“跳仓法”施工中的应用

CONTROL OF CRACKING IN ENGINEERING STRUCTURE

PRINCIPLE OF “RESIST AND RELEASE” FOR
ALTERNATIVE BAY CONSTRUCTION METHOD CRACKING
CONTROL OF SUPER LONG MASS CONCRETE

王铁梦 著
WANG TIE-MENG

中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

工程结构裂缝控制

CONTROL OF CRACKING IN ENGINEERING STRUCTURE

“抗与放”的设计原则及其在“跳仓法”施工中的应用

PRINCIPLE OF “RESIST AND RELEASE” FOR ALTERNATIVE
BAY CONSTRUCTION METHOD CRACKING CONTROL OF
SUPER LONG MASS CONCRETE

王铁梦 著

WANG TIE-MENG



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程结构裂缝控制 “抗与放”的设计原则及其在“跳仓法”施工中的应用/王铁梦著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2006

ISBN 978-7-112-08693-1

I. 工... II. 王... III. 工程结构-裂缝-修缮加固
IV. TU746.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 129957 号

本书是根据工程实践中裂缝控制的经验, 应用“抗与放”的设计原则, 探索永久性变形缝法, 后浇带法及跳仓法施工的技术特点及其推广应用条件, 重点是近年来解决超长大面积钢筋混凝土结构裂缝控制, 取代永久性变形缝和后浇带的跳仓法的应用技术。本书共有两部分, 第一部分为“抗与放”的基本概念, 共有 4 章分别是: 大体积钢筋混凝土结构的裂缝, 混凝土的抗拉能力, 温度应力理论, 大体积混凝土结构裂缝控制。第二部分为“跳仓法”施工工艺, 共有 3 章分别是: “跳仓法”施工工艺, “跳仓法”施工实践, “跳仓法”工程经验。

本书可供土建工程广大技术人员、科研工作者和大专院校师生参考。

责任编辑: 王 跃 刘平平

责任设计: 赵 力

责任校对: 邵鸣军 王雪竹

工程结构裂缝控制

Control of Cracking in Engineering Structure

“抗与放”的设计原则及其在“跳仓法”施工中的应用

Principle of “Resist and Release” for Alternative Bay Construction

Method Cracking Control of Super Long Mass Concrete

王铁梦 著

WANG TIE-MENG

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京密云红光制版公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 12 字数: 243 千字

2007 年 1 月第一版 2007 年 1 月第一次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-08693-1

(15357)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

- 自然界除了运动的物质，什么都没有。
- 自然界一切物质都处于永恒的运动与变化之中，它们的变化必然服从热力学第一定律——能量守恒定律。
- 由专门知识得到的结果与真正观察到的现象之间存在着明显的差别。
- 广博丰富的建筑工程实践，是认识和解决裂缝这个古老而又新颖的课题的基础。力学是手段，解决问题是目的。
- 只有实践才是检验自然界一切因果关系的证明，实践是检验一切理论的唯一标准，实践是我们最好的老师。
- 在高度信息化的时代，人们接触实践的机会越来越少了，但是土木建筑工作者应当更多地走到实践中去，汲取生生不息的营养，实践是我们创作灵感的沃土，过分相信计算机程序会犯错误的。
- 当技术尚不成熟的时候，过早地制定规范，会阻碍科学技术的进步和创新，并可能引起规范之间的矛盾，给建设带来困难。
- 市场经济条件下，值得注意的是商业行为往往压倒技术行为，感情认识压倒科学认识。

前 言

近代钢筋混凝土的规模日趋增大，结构形式日趋复杂，结构材料日趋高强度，超长超宽超厚的工程大量涌现，设计上按照规范和常规每隔一定距离必须设置变形缝，藉以释放变形效应引起的能量，达到避免裂缝的目的。早在 20 世纪 50 年代，作者根据工程实践中的反常现象，开始了探索变形缝设置的依据问题，国内外的有关规范大同小异，都是凭经验编制的，各国执行的情况也出入较大，研究资料及应用软件尚不成熟，由于建设的急需，在这方面，工程实践走在理论研究和规范的前面。

20 世纪 50 年代末期，从北京人民大会堂主体结构 132m 取消永久性伸缩缝采用后浇带方法（包括温度后浇带及沉降后浇带），逐步推广应用，日趋成熟，已经成为广泛应用的方法。但在施工中后浇带填充时间较长，后浇带中垃圾清理比较麻烦，有时难以保证后浇带的质量。

从 60 年代中期开始，在冶金建筑领域引进的超长大面积混凝土工程中，采用“跳仓法”施工，在其他领域也有过应用，该法仅仅是作为一种先分段后连成整体的不得已的施工方法，是与温度收缩裂缝控制无关的方法，变形缝及后浇带的设置按规范照留，与“跳仓法”无关。

作者经过对多年来的施工经验以及观测资料的总结，发现“跳仓法”是一种有效的裂缝控制的新方法。本书作者把两个无关的独立事件用“抗与放”的设计原则联系在一起，作为一种控制工程裂缝的设计和施工措施，取代永久性伸缩缝、沉降缝和后浇带，从而达到超长大面积混凝土控制裂缝的目的。这一方法的实践走在理论和设计规范的前面，它必将给工程建设带来巨大的实用价值和社会效益，有广阔的应用前景。

目 录

前言	4
----	---

第 1 部分 “抗与放”的基本理念

第 1 章 大体积钢筋混凝土结构的裂缝	2
第 1 节 混凝土构件变形效应基本概念	2
第 2 节 裂缝的分类	4
第 3 节 近年结构裂缝增多的原因	5
第 4 节 变形作用	6
第 5 节 混凝土的收缩变形	8
第 6 节 裂缝有害与无害的界限	13
第 2 章 混凝土的抗拉能力	18
第 1 节 混凝土抗拉试验的方法	18
第 2 节 水泥质量及骨料对抗拉性能的影响	20
第 3 节 混凝土的龄期关系与环境养护条件的影响	22
第 4 节 拉压比的意义	23
第 5 节 混凝土的均质性及配筋影响	23
第 6 节 混凝土抗拉性能全应力—应变曲线及 最大极限拉伸及“裂而不断”现象	24
第 7 节 初步结论	27
第 3 章 温度应力理论及“抗与放”的概念	28
第 1 节 集中式约束厂房框排架温度收缩应力的应用	28
第 2 节 约束的概念, 连续式约束	36
第 3 节 地基水平阻力系数 C_x	40
第 4 节 混凝土的徐变和应力松弛	41
第 5 节 温度应力与变形的关系	45

第 6 节	结构中的温度场	47
第 7 节	长墙及地基板的温度收缩应力简化计算法	58
第 8 节	桩基对结构的附加约束	76
第 4 章	大体积混凝土结构裂缝控制	80
第 1 节	控制裂缝的基本理念	80
第 2 节	“抗与放”的裂缝控制原则	81
第 3 节	结构性裂缝控制（荷载作用下的裂缝）	86
第 4 节	预应力混凝土超静定结构的裂缝及注意事项	91
第 5 节	控制早期塑性收缩裂缝措施	92
第 6 节	结构裂缝控制的综合方法	93

第 2 部分 “跳仓法” 施工工艺

第 5 章	“跳仓法” 施工工艺	104
第 1 节	永久变形缝法及混合施工法	104
第 2 节	关于抗震缝是否也可以取消的问题	106
第 3 节	“后浇带”法	107
第 4 节	关于有条件地取消后浇带	111
第 5 节	“跳仓法”设计施工特征及历史背景	115
第 6 节	“跳仓法”的施工缝构造设计	122
第 6 章	“跳仓法” 施工实践	127
第 1 节	较早的“跳仓法”施工实例，裂缝控制的现场研究 ——武钢一米七热轧带钢厂箱基	127
第 2 节	宝钢大型 300t 氧气顶吹转炉基础大体积混凝土的裂缝控制	133
第 3 节	上钢一厂 428m 超长大型地下箱形基础“跳仓法” 混凝土裂缝控制实践	147
第 4 节	中京艺苑工程取消后浇带“跳仓法”施工	156
第 5 节	大连城市广场“跳仓法”施工裂缝控制技术	160
第 6 节	“跳仓法”在隧道工程中的应用	162
第 7 章	“跳仓法” 工程经验	164
第 1 节	工程经验典型实例	164
第 2 节	我国目前混凝土结构的裂缝状况	180
编后记	182
参考文献	183

第 1 部分

“抗与放”的基本理念

第 1 章 大体积钢筋混凝土结构的裂缝

第 1 节 混凝土构件变形效应基本概念

近代工民建领域的混凝土都具有不同程度的大体积混凝土性质。任意结构在外界的作用下产生内力，把外界的作用分为三种：第一，荷载效应；第二，变形效应；第三，混合效应。关于荷载效应，已经有相当成熟的研究资料、规范和程序，但有关变形效应的研究工作较少，我们用下例说明变形效应的特点。假定有 AB 梁，如图 1-1 所示，梁的两端受到嵌固的完全约束，也就是不能产生任何位移，该梁承受一均匀的温差 T ，试问梁内产生多大应力？将这个问题分解为图 1-1 所示的 (1) ~ (7) 的分段解释说明。我们首先把 B 端的全约束解脱掉，则 AB 梁成为完全自由的悬臂梁，承受升温温差 T 后，产生自由膨胀变形，由 B 到 C ，等于 αTL ，此状态下温度收缩应力等于 0，不存在裂缝问题，其长度可 $L \rightarrow \infty$ ，这就是“放”的概念。我们再恢复原来的约束，等于在外边施加一个压力，将 C 点压回到原位 B ，恢复到原来的状态，则 AB 梁承受均匀的压应力为：

$$\sigma_{\max} = - E\alpha T$$

(当升温时， T 取“+”，应力为负值，压应力；当降温时， T 取“-”，应力为正值，拉应力)。当梁降温时，梁将产生冷缩，自由冷缩由 B 到 O ，为了恢复原状，必须施加一个拉力，将梁拉回原状，由 O 到 B ，则梁内产生一个均匀的拉应力：

$$\sigma_{\max} = - E\alpha T$$

由于 T 取“-”，所以应力是正号，拉应力。此状态温度等于常数。如果混凝土的抗拉强度 $f_t \geq \sigma_{\max}$ 或者极限拉伸应变 $\epsilon_t \geq \alpha T$ ，则 $L \rightarrow \infty$ 。用最大的抗拉强度超过约束应力 σ_{\max} ，这就是“抗”的概念。

如图 1-1 所示当 B 端设有弹簧，(6) 的 B 端不能自由收缩到 O ，受到弹簧的拉扯作用，最后稳定在 (7) 中 D 的位置。则总的自由变形 αTL 分解为实际变形 U_1 和约束变形 U_2 ，梁的实际变形以代数之和的形式表示：

$$U_1 = U_2 + \alpha TL$$

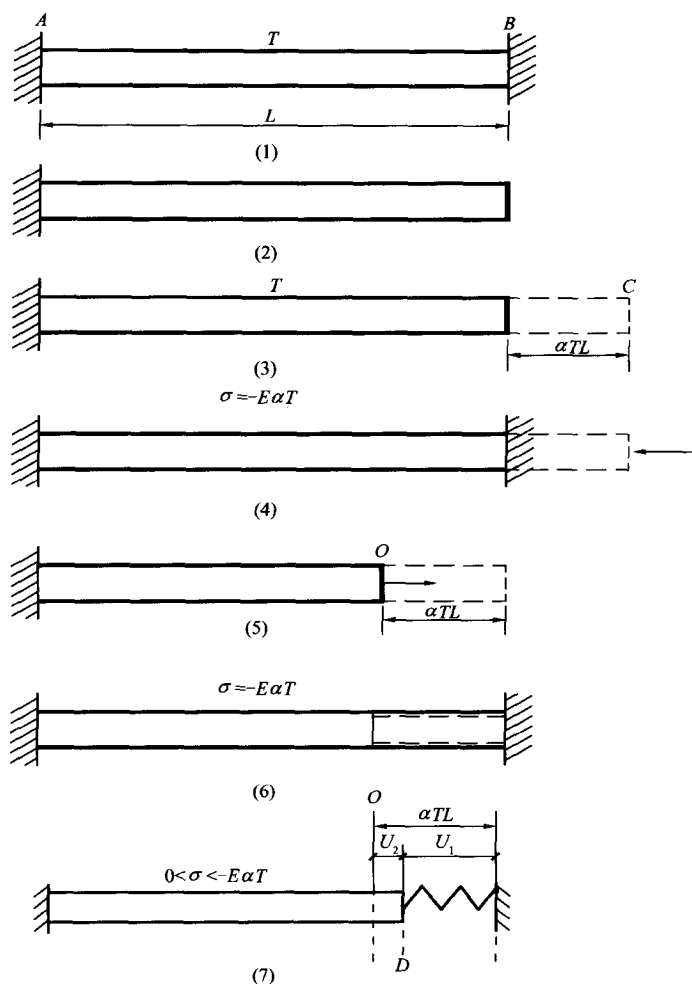


图 1-1

式中 U_1 为构件的实际变形，即弹簧从 B 被拉至 D ， U_2 为构件的约束变形，即构件被拉至 D 位置的变形， αTL 为自由变形。构件承受的约束轴力 $N = C_X U_1$ ，相对弹簧为正，相对构件为负，即相对原位 B 点，产生缩短 U_1 ，但构件承受拉力作用。这就是抗放兼施的概念。也就是笔者最早对水平弹簧刚度 C_X 如何定量的设想。

变形效应与荷载效应最大的不同之处，就是变形的速率与时间有关，在变形过程中，同时产生约束，约束作用在不断发展的过程中又产生徐变、塑性及微裂缝，它们都能协助构件不断满足变形的要求，从而使应力得到很大的松弛。根据这个基本的特

征，我们在探索弹性应力计算的同时必须考虑徐变以及微裂的影响。这就解释了仅仅用弹性理论计算温度收缩应力，反映受力的瞬时效应，远远超过工程结构实测结果。这也就是施工过程中特别的强调良好的保温保湿养护，充分发挥徐变带来的松弛效应，在材料选择方面强调材料的韧性。

从大量的工程裂缝处理和调查的结果，混凝土结构特别是超长大体积混凝土结构，80%~90%的裂缝都是由于混凝土降温拉应力超过了混凝土的抗拉强度引起的，更确切地说是混凝土内部的约束拉应变超过了混凝土的极限拉伸而引起的。作用效应和结构抗力问题是一个高度综合的问题，但是其中，如果能设法提高混凝土的极限拉伸，它们的变形效应需要就能得到满足，从而不产生拉应力破坏，所以极限拉伸在所有引起裂缝的综合因素中是一个“瓶颈”问题。

第2节 裂缝的分类

一、按产生原因分类

- (1) 荷载作用下的裂缝（结构性裂缝约10%）；
- (2) 变形作用下的裂缝（非结构性裂缝约80%）；
- (3) 混合作用（荷载与变形共同作用）下的裂缝（约5%~10%）；
- (4) 碱骨料反应（AAR、ASR 碱硅酸反应、碱碳酸盐反应，超量CaO，MgO膨胀应力引起的裂缝小于1%）；
- (5) 质量力（惯性力）引起的裂缝。

二、按裂缝有害程度（宽度对使用功能及耐久性要求）分类

- (1) 有害裂缝（轻度，按宽度略超规定20%；中度，超规定50%；重度，超规定100%）。指贯穿性纵深及浅层裂缝（到达受力钢筋部位），对有抗渗、防腐、防辐射有特殊要求的有害裂缝宽度应根据生产要求有专门规定，应当联系裂缝深度评估。
- (2) 无害裂缝。微观裂缝，表面裂缝，一定程度宏观裂缝。对表面裂缝超过允许宽度，长度较短，断断续续，对使用功能有影响者，仍按轻度有害裂缝处理。

三、按裂缝深度（ h ）与截面厚度（ H ）关系分类

- (1) 表面裂缝 $h \leq 0.1H$
- (2) 浅层裂缝 $h < 0.5H$

(3) 深层裂缝 $H > h \geq 0.5H$

(4) 贯穿裂缝 $h = H$

裂缝深度检测方法有超声法、钻芯法及水迹渗透法。

四、按裂缝出现时间分类

(1) 早期 (0~3d, 其中0~12h初龄塑性收缩裂缝时期, 早期最终达28天);

(2) 中期 (28~180d);

(3) 后期 (180~360d、720d, 根据混凝土配合比及环境收缩应力潜伏期最终20年);

(4) 裂缝随时间扩展过程:

微裂→初裂 (断断续续) →通裂→增扩→稳定与不稳定

五、按裂缝形状分类

楼板、剪力墙、梁、大截面柱、坝面、砌体结构等。

(1) 横向直裂缝 (垂直于板长度方向);

(2) 纵向直裂缝 (平行于板长度方向, 水平缝);

(3) 斜裂缝;

(4) 竖向直裂缝 (垂直于长墙及梁方向, 个别水平沉缩裂缝);

(5) 枣核形裂缝 (中宽两端细状);

(6) 龟裂缝, 亦称均裂 (无方向性, 有表面龟裂和高密度贯穿龟裂, 强约束, 碱骨料反应 AAR、ASR, 超量 CaO, MgO 膨胀应力引起水平及龟裂);

(7) 45°切角斜裂缝 (沿板角部或沿板对角线);

(8) 八字斜裂缝 (墙上或梁上对称或非对称位置);

(9) 鱼鳞式裂缝 (弯沉变形多层 G 形裂缝, 公路及桥梁);

(10) 连续梁正反 U 形裂缝 (自重及荷载作用), 隧道的门形裂缝;

(11) 反射裂缝 (基层裂缝影响结构层开裂);

(12) 顺筋裂缝 (沿钢筋腐蚀裂缝, 收缩裂缝);

(13) 冲切裂缝。

第 3 节 近年结构裂缝增多的原因

1978 年混凝土技术重大进展: 泵送现浇商品混凝土, 高均质性、高效率、自动化、环境保护好, 直接影响到设计施工, 但是裂缝控制技术难度大大增加了, 其综合

原因是：

一、混凝土由干硬性、预制化转向泵送流动性商品混凝土整体现浇施工（现浇量增加，预制量减少）；水泥用量、水用量都增加，水泥活性增加，比表面积加大，水灰比加大，骨料粒径减少，砂率提高，坍落度加大等，导致水化热及收缩变形显著增加（收缩由 $(2\sim 3) \times 10^{-4}$ ~ $(6\sim 8) \times 10^{-4}$ ），体积稳定性下降了。

二、混凝土及水泥向高强度化发展、水泥强度不断提高、用量不断增加，抗压强度显著提高而抗拉强度提高滞后于抗压强度，拉压比降低，弹性模量 E 增长迅速。随胶凝材料增多，体积稳定性成比例地下降（温度收缩变形显著增加）。用高强度钢筋代替中低强度钢筋导致钢筋配筋率减少，使用应力显著增加，与裂缝宽度成正比。

三、现浇混凝土结构，砖混结构刚度增加，抗震烈度提高，结构约束比过去显著增大，约束应力增加，特别是近代超长、超厚、超静定结构已经成为常用结构形式。

四、结构设计中只重视承载力极限状态忽略正常使用极限状态，忽略构造设计及构造配筋的作用，忽略变形效应及约束作用。

五、施工工艺缺乏对温度收缩变形较大的混凝土养护方法，经常采用传统一般方法，养护时间不足与工期要求有矛盾。养护质量对于裂缝控制及耐久性都很重要。

六、外加剂及掺合料在近代混凝土发展中极为重要，被称为第五、第六组分。但种类繁多，对抗压强度试验较多，对体积稳定性缺乏研究，甚至降低体积稳定性和耐久性。

七、对高强高性能混凝土研究较多，但对量大面广的中低强度高性能混凝土几乎没有研究。高强混凝土水化热及收缩偏大，徐变偏小，应力松弛效应偏小。从控制裂缝角度，混凝土强度的门槛值是 C40。

八、混凝土的抗拉性能、温度、收缩、徐变、疲劳、冻融等长期性能试验研究较少。高强混凝土徐变偏小，应力松弛较小。

九、构件拉压区固定不变，结构设计不考虑混凝土承受拉力。

十、现代建筑速度与质量的矛盾（开工前速度服从质量，开工后质量服从速度），房屋建筑缺乏质量标准（特别是变形效应）。

结论：裂缝原因：设计、施工、材料、环境及管理等等综合性问题。

第 4 节 变 形 作 用

一、变形作用

(1) 水化热、生产热、气温、太阳辐射。

(2) 收缩变形 (自生收缩、塑性收缩、碳化收缩、干燥收缩)。

(3) 膨胀变形 (温度膨胀、化学腐蚀膨胀、湿度膨胀、结冰膨胀、碱骨料反应膨胀、不均匀膨胀)。

(4) 地基变形、路基变形、桥基变形 (差异沉降及差异膨胀)。

变形作用引起的裂缝没有详细技术规范 and 程序进行约束, 裂缝频频出现是大规模工程建设过程中 (特别是超长大面积混凝土工程) 发生的新问题。在工业民用建筑领域, 一般简单的用永久性变形缝设计方法解决变形效应问题。变形效应软件尚不成熟。

二、变形作用的时间特征

多相复合材料 (不同线膨胀, 不同收缩, 差异沉降) 内部潜伏着随时间变化的残余应力, 在自发和诱发因素作用下引起内部及外部裂缝。

变形作用都具有时间特征, 被称为“时变结构”。结构鉴定尚须时间的考验。变形效应引起的裂缝, 必须研究裂缝历史, 这是与荷载效应不同的特点。

结构理论与实践的反差, 往往来自水文地质与气象温、湿度的随时间变化, 它们使建筑物并非是“凝固的艺术”, 而是无时无刻都在“呼吸”的动态结构。因此所谓“活裂缝”、“死裂缝”是相对的, 变形是绝对的。

建筑物在呼吸, 无时无刻不在变形和运动, 应特别注意变形效应与结构抗力都是随时间变化的随机函数。结构的变形缝 (温度缝、沉降缝及防震缝) 都在随着环境温度、湿度而产生较大的变形, 容易引起渗漏, 而且不易修复。

自然界的一切物质处于不停息运动与转化之中, 他们的转化服从热力学第一定律—能量守恒定律, 产生“抗与放”理论。

掌握裂缝的出现与扩展过程是鉴定裂缝性质和处理方法的最主要因素, 注意工程鉴定不宜过早对裂缝控制水平下结论, 鉴定工作宜在裂缝稳定后再作结论, 竣工后约 6~12 个月。

一般情况下, 变形随着温度和应力呈稳定性变化是正常的。我们的任务是要控制非稳定性变形, 如 1979 年 6 月上海吴淞大桥已经过 30 年的使用, 全桥出现了 90 余条裂缝, 裂缝都在 0.2~0.3mm, 个别部位达 3~5mm, 为了鉴定裂缝的稳定性, 曾经采用贴石膏饼的办法, 由于车流量及载重量都很大, 石膏饼很快出现裂缝, 但经过鉴定, 裂缝是稳定性地扩展与闭合, 经过计算分析, 在超载 30% 的条件下, 安全系数大于 1.8, 通过了从西德引进的 5 台 300t 坦克吊车, 解决了宝钢施工现场的燃眉之急, 减少了压船罚款。因此, 裂缝的运动和变化是必然的, 但是, 控制裂缝的稳定性

变化是处理工程问题的关键。

其后，人们一直担心该桥在频繁的车流量很大的使用条件下，桥梁的耐久性是否受到损伤，经过 8 年的使用，由于交通运输的需要，重建新桥时将老桥的桥梁拆除吊至现场时，在拆桥单位的配合下重新检查了桥梁的裂缝，发现所有裂缝都恢复到 0.15mm 左右，有许多裂缝已经闭合至肉眼不可见程度，说明经过 40 年使用的混凝土桥仍然处于弹性工作阶段，超载通行带有 90 余条裂缝的桥并未受到损伤。

第 5 节 混凝土的收缩变形

一、塑性收缩

早期塑性收缩（凝缩），终凝前的收缩，包括自生收缩，沉缩与水分蒸发收缩（2~12h），这是近年来发现大量工程现场早期开裂的原因，特别是高强、高性能混凝土，早期塑性收缩量很大，导致较宽的早期塑性开裂（1~3mm），包括：

- (1) 早期水化化学收缩（早期自生收缩试验）。
- (2) 骨料下沉，砂浆上浮。
- (3) 表面水蒸发（早期表面水分蒸发剧烈），水泥浮浆收缩很大。

纯水泥浆体的塑性收缩最大可达 1% (100×10^{-4})，砂浆可达 40×10^{-4} ，混凝土可达 20×10^{-4} 。

塑性收缩很大，不同养护条件及不同材料差别很大，表现为裂缝间距小，裂缝宽狭不一，波动较大，对于薄板甚至产生贯穿裂缝，不同养护条件差别极大。

不同环境、养护条件、水胶比及坍落度，掺合料及外加剂等对早期塑性收缩裂缝的影响显著。

二、自生收缩（自缩）

绝热绝湿条件下水泥水化时化学收缩，也可能为负值（膨胀）变形较小，约 $(0.4 \sim 3.0) \times 10^{-4}$ ， C_3A 及 C_3S 含量决定收缩的主要部分， C_2S 影响较小，游离 CaO 和 MgO 必须严格控制，遇水可膨胀变形引起膨胀应力，甚至引起粉化破坏（2004 年某高炉基础发生膨胀引起钢炉壳断裂事故）。高性能混凝土自生收缩偏大。

三、碳化收缩

大气中 CO_2 对混凝土水化物形成 $CaCO_3$ ，从表面向内部反应，在干燥中（50% ~

70%干湿交替, CO_2 浓度大于 1000ppm 更快), 不可逆 (面层硬脆, 进一步开裂加重钢筋锈蚀)。首都第一代十大工程改造中已发现这种裂缝, 经清理维修确保耐久性。

四、干燥收缩 (潮湿膨胀)

干燥收缩是主要的失水收缩, 最大收缩可达 8×10^{-4} 。

主要由混凝土水分蒸发引起的收缩变形。该收缩变形数量较大, 时间较长 (从浇灌后开始水分蒸发, 早期速度较快, 失水较多, 3 个月约达到 70%, 6~12 月完成 80%~90%, 有的延续 2~3 年完成 95%)。由于近代水泥及胶凝材料活性增加, 粒度变细, 收缩增加, 影响收缩因素很多, 只能统计运用各种特定条件下的实验结果进行归纳:

1) 双曲线函数法。

2) 指数函数法。笔者早期曾应用过双曲线函数法, 经过实践经验对比, 认为指数函数法较为接近实际, 便于应用。

五、混凝土干缩机理 (水分蒸发与泌水过程, 见图 1-2)

一般为了解决工程实际问题, 将收缩换算成当量温差, 即收缩变形相当于降低若干温度的简化方法。严格方法是: 列出湿度方程, 解湿度场再解应力场, 过程极为繁琐。这里我们为了解决工程实际问题采取温度和湿度应力一次解决的近似法, 采用收缩当量温差, 考虑收缩应力的影响, 使计算过程大为简化。

关于泵送商品混凝土的收缩, 国内外做了大量的试验, 出入较大, 与恒温恒湿条件有关, 只举例如下, 说明混凝土的收缩比一般试验增大许多。

日本京都大学工学部关于混凝土收缩试验结果 (Japan 1976)。

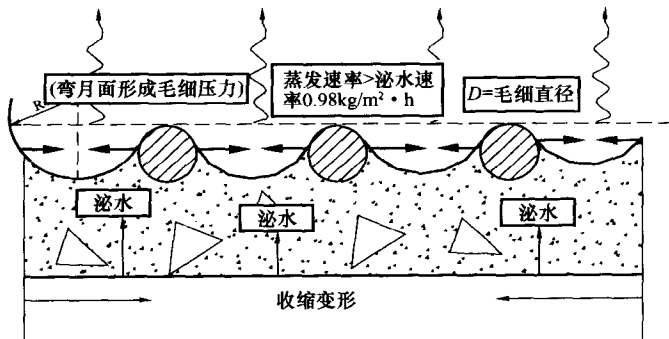


图 1-2 混凝土干缩机理

六、标准状态下最终干燥收缩(参考前苏联试验资料,参考文献 57, § 2.3 图 1-3, 图 1-4)

天数	相对变形
t	$\epsilon(t)$
0	0.00000000
40	0.00010682
80	0.00017842
120	0.00022641
160	0.00025859
200	0.00028015
240	0.00029461
280	0.00030430
320	0.00031079
360	0.00031515
400	0.00031807
440	0.00032002
480	0.00032133
520	0.00032221
560	0.00032280
600	0.00032320
640	0.00032346
680	0.00032364
720	0.00032376
760	0.00032384
800	0.00032389

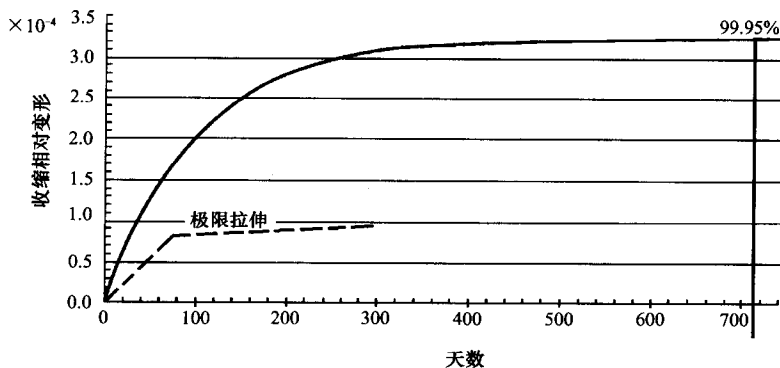
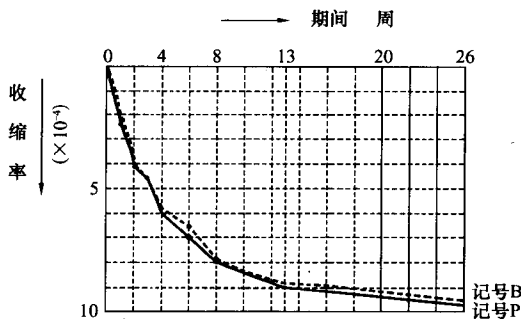


图 1-3 混凝土收缩曲线

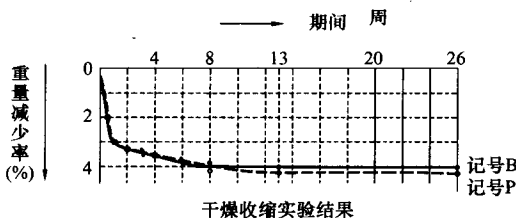
$$\epsilon(t) = 3.24 \times 10^{-4}(1 - e^{-0.01t})$$

标准状态: 275 号普硅水泥, 水泥用量 $324\text{kg}/\text{m}^3$, 标准磨细度 (比表面积 $2500 \sim 3500\text{cm}^2/\text{g}$); 用水量 $138\text{kg}/\text{m}^3$, 骨料为花岗岩碎石; 水灰比为 0.4; 水泥浆含量为 20%; 振动捣实; 构件截面 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ (截面水力半径倒数 $r = 0.2/\text{cm}$); 环境空气相对湿度 $50\% \pm 5\%$; 温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$; 浇灌后测定收缩前 3 ~ 7d 标准养护 (相对湿度 $> 95\%$, 温度 20°C)

$$\text{收缩当量温差 } T_s = -\frac{\epsilon(t)}{\alpha}$$



混凝土	番号	收缩率(26周) ($\times 10^{-4}$)
B	1	9.41
	2	9.62
	3	9.32
	平均	9.45
P	1	10.21
	2	10.00
	3	9.06
	平均	9.76



干燥收缩实验结果

图 1-4