

控制裂紋技術

· 钢筋混凝土部份 ·



本文系顏耀同志通过学习有关方面资料，结合自己施工实践中的认识体会归纳整理写出。他曾在我院基建处参加过我院第一期建校工作，现在成都市建二公司工作，今年适逢我院建校二十五周年纪念之际，提供此文作为纪念。经我处研究认为有一定交流施工经验的价值，故印出敬献给“四化”建设中有关施工技术人员工作中参考。

控 制 裂 紋 技 术

鋼筋混凝土部份

主編、發行單位： 成都電訊工程學院基建處
印 刷 單 位： 成都電訊工程學院印刷廠
編 著： 顏 耀

1981年10月第一版 1981年10月第一次印刷

前 言

为了适应“四化”建设需要，不断提高我们的施工技术水平，探讨性地写出此小册子，贡献给祖国的社会主义建设事业。

本文主要在学习我国裂纹研究专家王铁梦同志的有关论著的基础上，也参考了其它有关资料，并结合自己在施工实践中的认识体会写出。

在混凝土及钢筋混凝土结构裂纹方面，国内外已有很多的研究、试验资料。我国以王铁梦为代表的，已取得了极其卓越的成果，如：宝钢 6,000 多 M^3 的大型设备基础，取消了施工缝的习惯作法，一次浇筑成功。这说明施工中控制裂纹的出现是可能的，并正逐渐地形成一门新的施工技术，即称之为“控制裂纹技术”。我认为我们施工人员对此值得进一步地去研讨它、完善它，使之更系统化、科学化，为祖国的建筑施工事业服务。

为此目的，为了进一步学习与交流经验，本人仅针对工业与民用房屋建筑工程方面，混凝土及钢筋混凝土工程中，常在施工阶段出现不应有的早期裂纹问题，进行一些初浅的分析探讨，进而研究其控制裂纹的施工技术问题。但由于水平所限，不免错误很多，恳请读者批评指正。

颜 耀

1981年 7 月

註：1) 书中公式註有()^{*}者，系王铁梦同志推荐的公式。

2) 书中公式註有()^{**}者，系作者推荐的公式。

目 录

一、控制裂纹技术的概念	(1)
二、混凝土的收缩变形特性	(4)
(1) 《Бетон и Железобетон》(1972. №5. 35—37页) 提出经王铁梦说明补充的方法: (摘要)	(4)
(2) 有关经验公式	(7)
(3) 推荐早期混凝土收缩公式	(8)
三、混凝土的温差变形特性及温差计算	(10)
(1) 混凝土早期水化热量的计算	(11)
(2) 混凝土升温、散热及温差计算	(12)
四、混凝土和钢筋混凝土的极限拉伸	(16)
五、预制构件裂纹控制	(17)
(1) 大型槽板类裂纹	(17)
(2) 加温养护的构件类裂纹	(18)
(3) 空心板板面的纵向裂纹	(19)
(4) 预制柱顺主筋纵裂	(20)
(5) 预制构件内部放射性爆裂	(23)
(6) 预应力梁端梭形裂纹	(25)
(7) 预应力屋架端节点裂纹	(26)
六、构件吊装裂纹控制	(30)
(1) 柱子吊点的选择	(30)
(2) 抗裂验算及其处理	(35)
(3) 柱子控制吊装裂纹计算实例	(35)

七、现浇混凝土及钢筋混凝土筏式、

板式基础裂纹控制.....(40)

(1) 这类结构出现裂纹的典型情况.....(40)

(2) 这类结构的特点.....(41)

(3) 半理论分析的基本假定.....(42)

(4) 半理论分析的推导.....(43)

(5) 讨论控制裂纹的主要措施.....(49)

八、现浇钢筋混凝土箱形结构裂纹控制.....(51)

(1) 矩形隧道温差收缩计算.....(51)

(2) 箱形结构当底板浇筑后再浇墙体时的温度收缩
计算.....(51)

(3) 箱形结构当底板浇筑后再整体浇筑墙与顶板时
的温度收缩计算.....(52)

(4) 箱形结构当底板与墙皆浇筑后再浇顶板时的温
度收缩计算.....(53)

九、现浇钢筋混凝土长墙结构裂纹控制.....(54)

(1) 结构特点与基本假定.....(54)

(2) 简化计算办法.....(55)

十、现浇钢筋混凝土框架结构裂纹控制.....(57)

(1) 梁下柱顶水平裂纹.....(57)

(2) 联系梁上的竖向裂纹.....(59)

(3) 二次浇灌的框架大梁靠柱边处的上部竖向
裂纹.....(60)

附录一 混凝土早期相对收缩变形值.....(64)

附录二 混凝土温差(ΔT)的计算图表.....(66)

附录三 现浇结构温差收缩计算实例.....(73)

一、控制裂紋技术的概念

从微观的意义上说，任何物质的内部分子结构间都存在有空隙，或者说这些空隙的连通而形成缝隙，或者说有裂缝存在，混凝土的内部结构也是如此，因而从微观的意义来讲，混凝土的裂紋是不可避免的。然而从宏观的意义上说，混凝土的裂紋是可以控制的，从人们实践中认识到，从肉眼看到一些混凝土或钢筋混凝土结构没有裂紋，一些地方又有裂紋的现象，有些结构很久不出现裂紋，而有些结构在施工期间还没有交工就出现了裂紋，或者还没有承受设计荷载以前就裂了，甚至裂紋很严重等现象。这是什么原因？又有什么规律呢？很久以来人们在探索着这个问题，从现在人们研究的结果说明，从宏观来讲，混凝土的裂紋是可以控制的。控制的含意就是人们正在认识并掌握其规律，控制在某种条件下不出现裂紋或控制其裂紋的开展宽度。我们要探讨的控制裂紋技术，就是指在宏观范畴内，肉眼能见到的裂紋而言。

从结构承受荷载直至破坏的阶段来看，混凝土和钢筋是两种物理、力学性能完全不同的材料，混凝土的抗压能力较强而抗拉能力却很弱，钢材的抗拉和抗压能力都很强，两种材料结合在一起工作，多数情况是使混凝土主要承受压力，而使钢筋主要承受拉力，起到取长补短的作用。以一般受弯构件为例，在逐渐加荷后，受拉区钢筋承受一定拉力后变形拉长，由于钢筋与混凝土之间的粘结力保证其共同工作，由于钢筋的拉长变形而使混凝土也受拉，但由于混凝土的抗拉强度很低故逐渐出现受拉区裂紋，随着裂紋的延长，混凝土受

压区的不断减小，混凝土则承受更大的压应力，出现可能的两种破坏情况，一是钢筋被拉断而破坏，一是混凝土受压区被压碎而破坏。因可以说说裂纹的出现直接影响构件的受力性能。同时又说明在一般使用荷载阶段，结构的某种程度的裂纹是必然的，也是允许的。但由于使用条件的要求不同，设计规范（TJ10—74）第26~28条对裂纹作了明确的规定。对使用中不允许出现裂纹的结构，应进行抗裂验算，其 $K_f \geq 1.25$ 。对于使用中允许出现裂纹的结构，处于正常条件下的构件，一般其裂纹宽度 $\delta_{fmax} \leq 0.3mm$ 。这说明结构承荷以后，在使用阶段有两种情况，一是不允许裂纹，一是允许一定程度范围的裂纹。总之：这个阶段主要是设计工作者研究的范畴，本文暂不去探讨它。

然而客观事实并不完全像以上所说的那样，混凝土或钢筋混凝土结构在承受荷载以后才逐渐出现允许的那种裂纹。不少的工程实践证明，在混凝土浇筑后不久，或在施工阶段就出现了与前述裂纹位置、程度范围以及性质完全不同的，或称之不应有的裂纹，这类裂纹我们称之为“早期裂纹”，这种裂纹有的并不影响结构的承载能力与使用效果，但是也有不少的这类裂纹严重影响其承载能力或使用效果，因而不允许的。这就给我们施工人员提出一个问题，如何认识这类“早期裂纹”的产生原因、规律及其控制技术，本文所要探讨的就是专门指的这类裂纹的控制技术问题。

国内外对这类裂纹的研究资料也很多，但较为零星分散，由于钢筋混凝土结构的广泛应用，这个问题逐渐引起重视。施工阶段的客观条件情况十分复杂，千变万化各不相同，根据王铁梦同志归纳认为：“控制结构裂缝的主要因素有七个：温差或收缩、线膨胀系数、弹性模量、板厚或墙

高、地基对结构的约束程度、结构的长度和材料的极限拉伸等”。因而要研究控制裂纹技术，则牵连的学科知识较为广泛，王铁梦归纳性的提到：“……越来越认识到，混凝土结构的裂纹问题不是单纯的结构理论问题，而是由构造设计、结构近似计算、材质组成和物理力学性质、施工工艺及化学灌浆等多专业组成的综合性课题”。由此可见控制裂纹技术，逐渐形成一种具备综合技术知识的一种专门技术，又为施工技术人员必须进一步探讨和掌握的一门施工技术，这就是我们谈的控制裂纹技术的概念。由于影响因素颇多，任何一种纯理论的计算控制方法是不可能的，因而我们主要的任务是探求一些通过试验、实践，或忽略一些次要因素后的半理论经验计算方法。

二、混凝土的收缩变形特性

混凝土在一般条件下的结硬过程中，产生收缩这是它的基本特性之一。其收缩程度随着不同的客观条件因素及时间的变化而变化，影响其收缩的因素很多，主要的如：

1. 混凝土的材质组成：水泥品种及骨料类别。
2. 水泥用量：每 1M^3 混凝土水泥用量越大，一般收缩也越大。
3. 初期养护周围介质湿度：养护时间越长、湿度越大，一般收缩越小。
4. 施工工艺：施工方法的正确与否，也直接影响其收缩程度。
5. 掺合剂、早强、防水剂等：这些外加剂，凡起促凝早强作用者，一般都会加速其收缩程度。
6. 配筋量：一般相同混凝土而言，配筋率越大，其收缩减小。

对于混凝土收缩值的试验研究资料很多，提出了考虑不同主要因素的近似算法，现分述几种如下：

(1) 《Бетон и Железобетон》(1972. №5. 35~37頁)

提出經王鉄梦說明补充的方法：(摘要)

该资料是对有关国家近二十年间的 1220 次试验数据进行了整理后提出的，现經王鉄梦說明补充。我们为仅研讨早期阶段，未考虑摘录后期最大徐变影响，仅就有关早期收缩部份的计算摘要如下：

该法的基础是找出标准状态下最大收缩(相对变形)值,而对于任意状态下的最大收缩值,则用各种不同系数加以修正。

标准状态:系指 300 号普通水泥;标准磨细度;骨料为花岗岩碎石;水灰比为 0.4;水泥浆含量为 20%;混凝土振动捣实;自然硬化;试件截面 20×20 厘米(截面水力半径的倒数 $\bar{r} = 0.2$);测定收缩前湿养护 7 天;空气相对湿度 50%。

标准状态下最终收缩量,即极限收缩,相对变形(对任何标号的混凝土):

$$\varepsilon_y^0(\infty) = 3.24 \times 10^{-4} \quad (1)$$

对于任意状态下的最大收缩量:

$$\varepsilon_y(\infty) = \varepsilon_y^0(\infty) \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot \dots \cdot M_n \quad (2)$$

式中 $M_1 \dots M_n$ 为在不同条件情况下的修正系数,主要的如下表(1)~表(2)。

表中符号说明:

τ_w ——混凝土浇后养护时间(天)。

$W\%$ ——环境相对湿度。

$\bar{r}$ ——水力半径的倒数(厘米⁻¹)。

为构件截面的周长(L)与截面积(F)之比,

$$\bar{r} = \frac{L}{F}。$$

E_a, F_a ——钢筋的弹性模量与面积。

E_c, F_c ——混凝土的弹性模量与面积。

(表 1)

混凝土材料組成影响修正系数

水泥品种	M_1	水泥细度	M_2	骨 料	M_3	水/灰	M_4	水泥浆量 %	M_5
普通水泥	1.0	1500	0.9	花岗岩	1.0	0.2	0.65	15	0.9
矿渣水泥	1.25	2000	0.93	玄武岩	1.0	0.3	0.85	20	1.0
快硬水泥	1.12	3000	1.0	石灰岩	1.0	0.4	1.0	25	1.2
低热水泥	1.10	4000	1.13	砾 砂	1.0	0.5	1.21	30	1.45
石灰矿渣 水 泥	1.0	5000	1.35	无粗骨料	1.0	0.6	1.42	35	1.75
火山灰 水 泥	1.0	6000	1.68	石英岩	0.8	0.7	1.62	40	2.1
抗硫酸盐 水 泥	0.78	7000	2.05	白云岩	0.95	0.8	1.8	45	2.55
矾土水泥	0.52	8000	2.42	砂 岩	1.9	—	—	50	3.03

其它条件因素影响修正系数

表(2)

τ_w	M_6	$W\%$	M_7	$\bar{r}$	M_8	操作方法	M_9	$\frac{E_a F_a}{E_0 F_0}$	M_{10}
1~2	1.11	25	1.25	0	0.54	机械振捣	1.0	0.0	1.0
3	1.09	30	1.18	0.1	0.76	手工捣固	1.1	0.05	0.86
4	1.07	40	1.1	0.2	1.0	蒸汽养护	0.85	0.1	0.76
5	1.04	50	1.0	0.3	1.03	高压釜处	0.54	0.15	0.68
7	1.0	60	0.88	0.4	1.2			0.2	0.61
10	0.96	70	0.77	0.5	1.31			0.25	0.55
14~28	0.93	80	0.7	0.6	1.4				
40~90	0.93	90	0.54	0.7	1.43				
≥ 180	0.93			0.8	1.44				

(2) 有关经验公式:

1> 按 Я. В. Столяров 等进行的数学描绘:

$$S_n(t) = S_0(1 - e^{-st}) \quad (3)$$

式中: $S_n(t)$ ——为某时间 t 的相对收缩变形。

S_0 ——最终相对收缩变形, 约为 $3 \times 10^{-4} \sim 4.5 \times 10^{-4}$ 。

s —— $0.085 \sim 0.01$ 。

2> 接 К. К. Якобсон 经验公式:

$$S_{na}(t) = \frac{6}{t^{-1} + 4} \times 10^{-4} \quad (4)$$

式中: $S_{na}(t)$ ——为某时间 t (年) 的相对收缩变形。

t ——时间(年)。

3> 按王铁梦推荐的公式:

① 在公式(4)形式的基础上结合实践认为只适用于较高配筋率及养护条件较为正常的环境, 并建议修改为如下:

$$\varepsilon_y(t) = \frac{9}{t^{-1} + 4} \times 10^{-4} \quad (5)^*$$

式中: $\varepsilon_y(t)$ ——为某时间 t (年) 的相对收缩变形。

② 关于素混凝土的收缩公式:

$$\varepsilon_y(t) = \varepsilon_y^0(\infty) \cdot M_1 \cdot M_2 \cdots M_n \cdot (1 - e^{-bt}) \quad (6)^*$$

式中: $\varepsilon_y(t)$ ——任意时间、状态下的相对收缩变形;

$\varepsilon_y^0(t)$ —— 3.24×10^{-4} , (标准状态下的极限收缩)。

$M_1 \cdots M_n$ ——修正系数, 查表(1)、(2)。

t ——时间(天)。

b ——经验系数, 可取 $b = 0.01$ 。

(3) 推荐早期混凝土收缩公式:

以上第(1)部份中提出的计算公式(2), 已经考虑了不少影响因素, 试验数据也比较全面、广泛。王铁梦在此基础上提出推荐公式(6)*, 更比较适用。对以上公式(3)、(4)并不适合于早期时运用。鉴于以上情况, 又考虑施工早期, 尤其是混凝土浇后 1~4 天, 有些影响收缩的因素可以忽略, 结合到自己的一些实践经验, 将公式进一步简化, 又能适用于早期, 故推荐如下公式:

$$\varepsilon_c = 350 \times 10^{-6} (1 - e^{-0.01n}) \quad (7)^**$$

式中: ε_0 ——混凝土早期(28天以内)相对收缩变形。

n ——混凝土期龄(天), 适用于 $n \leq 28$ 天。

注: 此公式适用于我国普通硅酸盐水泥, 以卵石为骨料制成的 200~300 号混凝土, 期龄在 28 天以内早期的混凝土相对收缩变形计算。

三、混凝土的温差变形特性 及温差计算

大多数物质具有热胀冷缩的特性规律，混凝土也不例外。加之混凝土具有在结硬过程中产生水化热的特性，因而在大多数情况下，混凝土浇后短期是一个升温过程，故而与周围介质产生温差，温度升至最高后由于外界低气温影响开始转为降温，这种降温时温差的作用和混凝土收缩一样，使混凝土在大多数情况下产生拉应力，导致裂纹。大量的实际观测说明，混凝土裂纹与最大温差及降温速度有关。

若暂不考虑外约束力等影响因素的情况下，仅由于这种温度差作用下的理论计算温差变形：

$$\delta_t = \alpha \cdot L \cdot (T_n - t_0) \quad (8)$$

$$\therefore \Delta T_n = T_n - t_0, \quad \varepsilon_t = \frac{\delta_t}{L},$$

$$\therefore \varepsilon_t = \alpha \cdot \Delta T_n \quad (9)$$

式中： ε_t ——混凝土早期(28天以内)相对温差变形。

ΔT_n ——期龄为 n 天时的温差。

T_n ——期龄为 n 天时的混凝土温度。

t_0 ——期龄为 n 天时的室外气温(或混凝土周围介质的温度)。

α ——混凝土的线膨胀系数，一般卵石混凝土取

$$\alpha = 8.5 \times 10^{-6}.$$

但在实际工程中，由于具体条件的不同，应考虑外约束力影响，考虑其主要因素后，应作具体的分析，在以后的部

份将分别讨论。

但有一个共同的问题需要解决，即必需先解决温差的计算问题。温差的求得办法有二：一是通过仪表实测，二是通过近似计算。前者是将热敏电阻类测温片埋入混凝土的不同部位，并用细线引出接至测量仪器上，通过电阻的变化从而测得其混凝土内部各处的温度变化，这对大体积混凝土浇筑测量计算温差是可行的，也比较准确和适合现代化要求。但是由于设备仪器条件的限制，后者采取近似计算，虽然有一定程度的误差，尚欠十分正确，但亦有其现实意义。

为此目的，现就温差的近似计算，推荐一种按叠加原理进行的近似算法如下：

所谓温差是指混凝土该处的温度与室外气温（或周围介质、或者相邻另一处混凝土的温度）之差。但这个温差值是随时间、水化热、模板散热、室外气温等变量而变化的一个较复杂的函数关系。为求计算上的简化，采用分别计算后叠加。并以时间为横坐标，以一天或半天为时间间隔单位计算出温差，从而可绘出近似的早期混凝土的温差随时间变化的曲线（温差曲线），提供计算相对温差变形的需要。

（1）混凝土早期水化热量的计算

混凝土在结硬过程中的发热量，主要决定于水泥品种、标号以及每 1M^3 混凝土的水泥用量等因素，同时发热量与时间变化又不是线性关系，一般在前 10 天内较大，可达 28 天总发热量的 80% 左右。某一早期的发热量常以 28 天总发热量 Q_{28} 的百分比表示，而各类水泥每一公斤 28 天的总发热量 Q_{28} （千卡/公斤）如表(3)。

而前 10 天以内的相对发热量，是以混凝土结硬强度为变

量的函数，而混凝土结硬强度又是随期龄变化的函数关系。

每公斤水泥 28 天总发热量 (Q_{28})

表(3)

28天发热量 水泥标号 水泥类别	Q_{28} 发热量(千卡/公斤)				
	225	275	325	425	525
普通硅酸盐水泥	48	58	69	90	110
矿 渣 水 泥	45	49	59	80	

其函数关系表达式如：

$$a_n \% \cdot Q_{28} = f(R_n),$$

$$R_n = \varphi(t_n).$$

根据有关资料，加以简化推导后，推荐按以下公式
(10)** 计算：

$$a_n = 230 \frac{1 + R_n}{1 + 2R_n} (1 - e^{-R_n}) \quad (10)**$$

式中： a_n ——相应于 n 天期龄时，混凝土的相对发热量。为 Q_{28} 的百分数。例如：当 $R_n = 0.2$ 时， $a_n = 35.7$ ，即 $35.7\% \cdot Q_{28}$ 之意。

R_n —— n 天期龄时，混凝土达 R_{28} 强度的百分比值(以小数表示)。如： $20\% \cdot R_{28}$ ， $R_n = 0.2$ 计。

注：本公式最宜适用于混凝土期龄 $n \leq 10$ 天。

(2) 混凝土升温、散热及温差计算

根据比热的理论公式：