

92175/80

035054

补偿收缩混凝土

吴 中 伟



中国建筑工业出版社

补 偿 收 缩 混 凝 土

(不裂或少裂混凝土)

吴 中 伟

中 国 建 筑 工 业 出 版 社

本书对补偿收缩混凝土的材料、性能、设计、施工作了全面的介绍。在补偿作用方面,除了详细论述补偿干缩之外,还提出了补偿冷缩的新观点。在补偿收缩原理方面,根据不同的限制程度,提出了正确的模式图型。

本书可供从事混凝土工程科研、设计、施工的工程技术人员以及混凝土构件工厂的技术人员参考。

补偿收缩混凝土

(不裂或少裂混凝土)

吴 中 伟

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米1/32 印张: 2 13/16字数: 63千字

1979年8月第一版 1979年8月第一次印刷

印数: 1—37,120册 定价: 0.31元

统一书号: 15040·3662

前 言

膨胀水泥已有四十多年的历史。早期主要用于灌填接缝与零星修补工程。二十年前开始用来制造自应力混凝土压力管。后来用作补偿收缩，目的在于减少甚至避免建筑物的干缩裂缝。从试验研究到大量推广使用，不过十多年时间，但效果显著。就作者所知，至今还没有一本论述补偿收缩混凝土的专著。

这种新型混凝土还具有良好的防裂抗渗性能与较高的强度，因此是一种优良的防渗结构材料。我国用于防水屋面、地下建筑、毛主席纪念堂结构后浇缝，取得了成功的经验。此外，限制下的微量膨胀能够进一步提高混凝土强度，国内外研究者曾预见到在各种混凝土中掺加膨胀剂或膨胀水泥的可能性。补偿收缩混凝土将发展成为补偿收缩-自应力混凝土、微膨胀高强混凝土以及补偿收缩轻骨料混凝土、补偿收缩加气混凝土等。所以，补偿收缩混凝土是一种具有很大发展前途的新品种混凝土。

但是，由于使用补偿收缩混凝土的历史短，对其原理的认识还不够深入，其试验技术、设计及施工方法也都还不很成熟。这本书除了全面介绍这个新品种混凝土，以便引起广泛注意、正确推广使用之外，希望我国建筑、建材部门进行更多的研究，积累更多的实践经验，使之早日完善。

在林彪“四人帮”的严重摧残下，补偿收缩混凝土的科研工作无法进行，明矾石水泥与明矾石补偿收缩混凝土的小

量生产与试用曾几度中断。本书提出的一些新概念与有关图型，例如对于冷缩的补偿等，还缺少定量资料，只能指示趋向，亟待大量的科学实验来充实提高。

本书原稿中关于补偿收缩混凝土的膨胀机理以及各种膨胀水泥与膨胀剂的详细介绍，因为建筑材料科学研究院水泥研究所已在编写这方面的专著，为了节省篇幅，予以删节。

由于补偿收缩混凝土的历史尚短，资料较少；更由于作者水平所限，缺漏与不当之处，请读者指正。

作 者

1978年10月

常 用 符 号

D	最终变形	Δ	收缩率
S	干缩率	S_1	自由干缩率
S_2	限制干缩率	S_p	塑性收缩率
S_e	弹性收缩率	S_c	徐变收缩率
S_T	冷缩率	e	膨胀率
e_1	自由膨胀率	e_2	限制膨胀率
e_{2m}	设计限制膨胀率	e_p	塑性伸长率
e_e	弹性伸长率	N_f	自由膨胀能
n_f	单位体积的自由膨胀能	N_e	有效膨胀能
n_e	单位体积的有效膨胀能	F	阻抗
f	单位面积的阻抗	c	徐变
R	混凝土抗压强度	A_c	混凝土截面积
A_s	钢筋截面积	σ_c	混凝土中压应力 (自应力)
σ_s	钢筋中拉应力	P	钢筋中拉力
μ	配筋率	E	弹性模量
E_s	钢筋弹性模量	E_c	混凝土弹性模量
E_A	骨料弹性模量	t	龄期
ν	混凝土泊桑比		

目 录

前 言

第一章 概述	1
第二章 混凝土的变形与开裂	4
第一节 混凝土的变形-膨胀与收缩	5
第二节 混凝土的干缩与冷缩	8
第三节 有害裂缝与无害裂缝	23
第三章 膨胀水泥与膨胀剂	25
第一节 硫铝酸钙类膨胀水泥与膨胀剂	25
第二节 氧化钙类膨胀剂	32
第三节 其它类型的膨胀剂	33
第四章 补偿收缩的原理	35
第一节 传统的补偿收缩模式	35
第二节 正确的补偿收缩模式	38
第五章 补偿收缩混凝土的设计问题	48
第一节 膨胀能与有效膨胀能	48
第二节 设计限制膨胀率 e_{2m} 的选定	55
第三节 补偿收缩混凝土的膨胀率测定方法	59
第四节 影响补偿收缩混凝土的主要性能的因素	62
第六章 如何正确使用补偿收缩混凝土	69
第一节 配制补偿收缩混凝土的注意事项	69
第二节 补偿收缩混凝土的构造注意事项	71
第三节 补偿收缩混凝土的施工注意事项	72
第四节 填缝和修补时的注意事项	74
第七章 补偿收缩混凝土的建筑性能与应用实例	75
第一节 补偿收缩混凝土的建筑性能	75
第二节 补偿收缩混凝土的应用实例	77
第八章 补偿收缩混凝土的展望	82

第一章 概 述

混凝土与钢筋混凝土的开裂问题，是一百多年以来未能解决的难题。近十余年，国内外采用的补偿收缩混凝土能够避免或大大减轻混凝土的开裂（因此又可叫做不裂混凝土或少裂混凝土），因此，受到愈来愈多的重视。

补偿收缩混凝土是一种适度膨胀的混凝土。根据传统的也是比较粗略的概念，混凝土的开裂主要是由于收缩所引起，因此用膨胀来补偿收缩，亦即用膨胀来抵消全部或大部分收缩，就能够避免或大大减轻开裂。这一概念至今还被人们所习用。为了发展补偿收缩混凝土这一新材料，一个科学的、较为全面的新概念将在本书中提出。

现在采用的补偿收缩混凝土绝大多数是用膨胀水泥制成的。膨胀水泥已有四十年左右的历史，但是用作补偿收缩混凝土的研究工作和在工程中推广使用还不过十多年。为了使读者了解补偿收缩混凝土的发展过程，现将膨胀水泥与膨胀混凝土的发展史简述如下。

1890~1892年，凯特劳脱（C.Candlot）首先发现钙矾石（即水化硫铝酸钙）。接着米却利斯（W.Michaelis）提出：钙矾石的生成是波特兰水泥混凝土在硫酸盐介质中产生破坏性膨胀的主要原因，因此名之曰水泥杆菌。

1936年，法国亨利·洛西叶（H.Lossier）发明膨胀水泥，但未正式生产。

1955年前后，苏联试制成功不透水性膨胀水泥、硅酸盐

自应力水泥、石膏矾土膨胀水泥，其中以硅酸盐自应力水泥为主，并用来生产压力管。

1957年我国建筑材料科学研究院试制成功硅酸盐自应力水泥，1969年开始制作压力管，并大量生产。

1958年，美国试制成功 K型水泥，1963年开始用来配制补偿收缩混凝土。

1965年，我国试制成功明矾石膨胀水泥（Ⅰ型）用来配制补偿收缩混凝土。1967年又制成明矾石水泥（Ⅱ型），现在已推广使用。

1965年 日本试制成功 CSA 膨胀剂，已大量用来配制补偿收缩混凝土和自应力混凝土。

1968~1970年，美国生产 M型（按即硅酸盐自应力水泥）与 S型两种水泥，用来配制补偿收缩混凝土。

1972年，日本试制成功石灰型膨胀剂，用来配制补偿收缩混凝土与自应力混凝土。

除了我国和美、日、苏以外，其他如瑞典、英国、捷克、保加利亚、西德、新西兰等国也在从事补偿收缩混凝土的研究工作。

当前每年各国膨胀水泥的总产量约在 100 万吨左右，绝大部分用来制作补偿收缩混凝土，只有一小部分用作自应力混凝土。美国全部用作补偿收缩混凝土。日本是在制品工厂或工地上采用掺加膨胀剂的办，大部分用于配制补偿收缩混凝土，小部分用作承受外压力的下水管。苏联大部分用作自应力混凝土压力管。我国目前主要用作自应力混凝土压力管。

补偿收缩混凝土不仅能够避免或减少混凝土的开裂，并且还还具有抗渗性好、早期强度高等优点，因此已在防渗建

筑、地下建筑、液气贮罐、屋面、地板、楼板、路面、冰场、机场、接缝、接头、底座以至高层建筑物中推广使用。有些国家已提出了相当庞大的发展规划。不少学者认为，随着科研工作的进展和生产实践经验的积累，补偿收缩混凝土的使用范围将会迅速扩大，在许多方面取代普通混凝土。如在轻质混凝土、加气混凝土、后张法预应力混凝土以及装配整体式结构现浇部分等，也将得到进一步应用。

补偿收缩混凝土现在尚处于开始推广阶段，还有不少技术问题，例如膨胀机理、膨胀能的有效利用，标准测试方法、合理的设计与施工方法等还有待研究解决。

第二章 混凝土的变形与开裂

在混凝土的各种强度中，抗拉强度最低。一般，抗拉强度约为抗压强度的7~11%（低强度的轻混凝土的抗拉强度与抗压强度之比可能达到0.3），抗拉强度与抗弯强度之比约为0.5~0.6。因此，混凝土的开裂主要是由于混凝土中拉应力超过抗拉强度而引起。这是用应力来解释混凝土的开裂原因。此外，也可用应变来解释开裂的原因。应变是单位长度中的变形，其单位是厘米/厘米或毫米/毫米，也可用百分之几或万分之几（即 1×10^{-2} 或 1×10^{-4} ）来表示，还有用百万分之几即微应变（ 1×10^{-6} ）来表示。当混凝土中拉伸应变达到或超过极限变形值时混凝土就开裂，这个极限变形值叫做极限拉伸应变或极限延伸 S_k 。以上两种解释均可采用。

我们可以用应力来说明补偿收缩混凝土避免开裂的作用：当混凝土膨胀时，混凝土中的钢筋对混凝土的膨胀产生限制作用，钢筋本身也因与混凝土一起膨胀而产生拉应力，同时在混凝土中就产生相应的压应力。这种压应力能够抵消导致混凝土开裂的全部或大部分拉应力，因此避免或大大减轻了开裂。除了钢筋之外，还有其它限制物，例如基础对于上面的混凝土，孔洞或接缝周围的老混凝土对于填充的补偿收缩混凝土，甚至大体积混凝土中的内部混凝土对于外部混凝土也能产生限制作用。同样也可用应变来解释补偿收缩混凝土避免开裂的原因（本章第一节和第三章第二节）。本书

着重从应变的角度来研究补偿收缩。

总之，在补偿收缩混凝土中，不仅要研究变形（膨胀与收缩），还要研究对变形的限制。变形与限制这一对主要矛盾贯穿着补偿收缩的全部过程，是我们在研究补偿收缩混凝土时最应重视的。

第一节 混凝土的变形——膨胀与收缩

在补偿收缩混凝土中，最重要的变形是膨胀与收缩。这两种变形随着限制的有无，产生不同的结果。不受限制的收缩叫做自由收缩，自由收缩不会引起开裂；但受到限制的收缩叫做限制收缩，限制收缩达到某定值时就引起开裂。相反，自由膨胀会引起开裂，而限制膨胀则不发生开裂。举例说明如下：

（1）小尺寸的混凝土块、板、杆，当不配钢筋或只配少量细钢筋，又无其它限制时，收缩再大也不会开裂。

（2）配有较多粗钢筋的梁或大尺寸的板，基础嵌固很牢的路面或底板，大体积混凝土的表层，在干燥或剧烈降温时，产生较大的限制收缩，引起混凝土开裂。

（3）小尺寸的混凝土梁、板、块，还有钢筋混凝土的保护层部分，变形时不受其它限制。当受到某些膨胀因素的作用，例如，含有氧化镁或氧化钙晶体进行长期持续的水化，或因冰冻、化学腐蚀等作用造成体积增大时，甚至膨胀混凝土的小试件因配比不当产生过大的膨胀时，就会开裂或出现表面裂缝。

（4）当补偿收缩混凝土中配筋适度，或填孔嵌缝受到周围老混凝土的有效限制时，甚至有坚固的模板限制时，这

些限制下的膨胀变形非但不会引起开裂，还能得到质地致密、抗渗性好、强度较高的混凝土。

为了能够更清楚地说明在自由与限制两种不同的条件下，膨胀与收缩两种不同的变形产生不同的后果，提出“相向变形”与“背向变形”两个概念。先用表解的形式表示如下：

混凝土的主要变形	收缩	自由收缩——不会开裂，
		因为是相向变形。
	膨胀	限制收缩——会引起开裂，
		因为是背向变形。
		自由膨胀——会引起开裂，
		因为是背向变形。
		限制膨胀——不会开裂，
		因是相向变形。

所谓相向变形，是使混凝土质点的间距缩小的变形，而背向变形则使质点的间距加大。因此，自由收缩是相向变形，自由膨胀则是背向变形。自由收缩使混凝土组织更加密实，使混凝土与钢筋的粘结力提高；而自由膨胀则相反，它使混凝土组织变松，膨胀超过一定限度就会开裂。限制下的收缩变形和膨胀变形，同时包含着相向与背向两种变形。可将限制膨胀，分析为两个部分的变形：一是假定未受到限制，质点间距从原长 l_1 增加到不受限制时能够达到的长度 l_2 ，也就是自由膨胀的全部变形，这个部分是背向变形；另一是因为限制的作用，质点间距从上面达到的长度 l_2 减小到限制后实际达到的长度 l_3 ，这个部分是相向变形。当限制程度足够大的时候，这部分相向变形，非但使混凝土避免开裂，并且能够起到增强和密实的好作用。同样，限制收缩也可分析

为两个部分的变形：一是假定未受到限制，质点间距从原长 l_1 减小到不受限制时达到的长度 l_2 ，也就是自由收缩的全部变形，这个部分是相向变形；另一是因为限制的作用，质点间距从上面达到的长度 l_2 加大到限制后实际达到的长度 l_3 ，这个部分是背向变形。当限制程度很大的时候这部分背向变形就会引起开裂。兹用图解来说明相向变形与背向变形（图 1）。

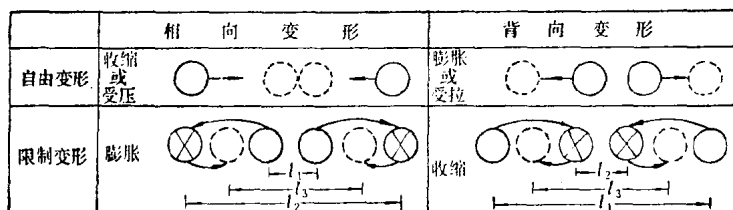


图 1 相向变形与背向变形

说明：○质点原来位置
 ⊗质点如果不受限制达到的位置
 ⊙质点最终位置

在实际工程中，从单一构件到尺寸较大的结构物，自由变形的情况几乎是不存在的，混凝土的变形，总是受到配筋、相邻部分、基础或结构物的整体性等的限制；同时，在混凝土的变形中最常见的是收缩变形，因此限制收缩是混凝土开裂的最常见也是最主要的原因，而限制膨胀这种有利的相向变形，恰好用来抵消有害的限制收缩，从而达到避免或大大减轻混凝土开裂的目的。这就是补偿收缩混凝土的理论依据。

第二节 混凝土的干缩与冷缩

混凝土的体积收缩，最主要和最常见的是干缩和冷缩。

前者是由于混凝土中水分的散失或湿度下降引起，后者是由于混凝土中热量的散失或温度下降引起。补偿收缩混凝土的目的就是通过对这两种收缩的补偿来避免或减轻开裂的。迄今为止，国外研究补偿收缩混凝土仅限于对干缩的补偿。

混凝土的其它体积收缩还有：①由于水泥水化产生的体积收缩，叫做减缩。膨胀水泥水化时，体积膨胀占主导地位，所以在补偿收缩混凝土中不必考虑减缩。②由于颗粒沉降产生的体积收缩，叫做沉缩。只是在骨料级配较差、加水量过多、厚度较大、硬化较慢以及捣实工作不足等情况下，混凝土才出现较显著的沉缩以致引起开裂。这种情况在补偿收缩混凝土中很少遇到，并且是可以避免的。③早期发生的塑性收缩。当混凝土尚处于塑性状态，由于水分蒸发过快，泌水率小于表面蒸发率，就引起表面失水过多而开裂，裂缝随时间向混凝土内部发展。塑性收缩可以通过早期保潮防止过快的蒸发来预防，补偿收缩混凝土泌水率小，应特别注意早期保潮。④碳化收缩，是空气中的二氧化碳在有水分存在时对水泥水化产物作用的结果。例如，二氧化碳将水化硅酸钙和水化铝酸钙分解成硅胶和铝胶，将氢氧化钙碳化成碳酸钙等，这些作用的综合结果引起体积收缩，碳化收缩仅限于表层，只能产生混凝土的表面裂纹。

（一）混凝土的干缩

混凝土中水分的散失引起了干缩。水分存在各种孔隙中，这些孔隙分布在水泥石中，骨料中以及骨料与水泥石、

钢筋与水泥石的交界处。孔隙分胶孔、毛细孔与气孔三种。气孔最大，直径在1毫米到0.01毫米之间。气孔中存在着自由水，这种水的增减不引起体积变化，故干缩与之无关。毛细孔的尺寸比气孔约小100倍，其中存在着受毛细管力作用的可蒸发水。气孔与毛细孔的数量决定于混凝土加水量与制作条件。胶孔比毛细孔又小1000倍，即约为 $10\sim 40\text{ \AA}$ （埃），约为水分子直径的5倍。胶孔约占凝胶体积的三分之一到四分之一。胶孔中经常充满着水，不易蒸发。毛细孔水与胶孔水与混凝土体积变化之间有密切关系。

美国柏惠尔斯（T.C.Powers）对于干缩机理提出下列假说：在凝胶的固体粒子之间存在着吸力（范德瓦耳斯力）；与此相反，在两个固体粒子的接点处存在着反作用力，以及由于凝胶结构本身的刚性引起的反弹力。当水分进入“乾燥”的凝胶结构时，水分子处于一种高度密集状态或称为“被吸附状态”，这种吸附水被均匀地分布到固体粒子的全部表面上。当环境相对湿度为50%时，固体粒子表面吸附水膜的平均厚度为两个水分子直径，因此两个固体粒子间至少需要4个水分子直径的间距来容纳吸附水。当湿度最大时，固体粒子表面吸附水层的厚度可达5个水分子直径，也就是在二个固体粒子间需要有10个水分子直径的间距。但是凝胶中胶孔的平均尺寸只约5个水分子直径，容纳不下10个水分子直径厚度的吸附水，因此产生吸附水对固体粒子的推力。此推力的大小随环境湿度而变。当相对湿度为100%或放在水中时，推力最大，于是体积就膨胀，即所谓湿胀现象。当湿度降低，推力就减小，毛细孔水也开始蒸发，在毛细孔中产生拉应力，相应地在周围固体结构中产生压应力。随着推力减小与压应力增加，体积就收缩。毛细孔含量愈多，周围

的压应力就愈大，收缩率也愈大。当环境湿度降低到相对湿度40%以下时，固体粒子表面吸附水膜的厚度不足两个水分子直径，胶孔中就不饱含水分，就不产生推力，体积收缩就更加剧烈。

法国列尔密脱 (R. L'Hermite) 通过试验与数学分析来探索水分蒸发量与体积收缩之间的量的关系。他认为水分从多孔体向外蒸发与散热一样服从富里叶定律：

$$\frac{dB}{dt} = \lambda \left[\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} \right]$$

式中 B ——蒸发水量；

x 、 y 、 z ——多孔体位置的直角坐标；

λ ——系数。

因上式不易积分求解，他采用了一个与上述理论式十分近似的函数式：

$$B = B_h (1 - e^{-\frac{k}{G} \sqrt{t}})$$

式中 B_h ——可以蒸发的全部水量；

G ——体积/表面积；

t ——放在一定环境湿度中的时间；

k ——扩散系数。

一般常用的蒸发公式为： $B = B_h(1 - \theta)\varphi(t)$ 亦即在相对湿度 θ 的环境中经过时间 t 后，蒸发出的水量应与 $(1 - \theta)$ 和时间函数 $\varphi(t)$ 成正比。列尔密特认为时间函数 $\varphi(t)$ 应该与相对湿度 θ 有一定关系，因此改变蒸发量公式为：

$$B = B_L \varphi_L(t) + B_0(1 - \theta)\varphi_0(t)$$

式中 B_L ——当相对湿度接近100%时的蒸发量。

如将时间函数 $\varphi_L(t)$ 与 $\varphi_0(t)$ 改用上述函数式的形式，又令 $\lambda = K/D$ ，最后得出蒸发量公式如下：