

混凝土现代技术丛书

混凝土的收缩

黄国兴 惠荣炎 编著



中国铁道出版社

1990年·北京

前 言

混凝土收缩是混凝土一项重要的变形性能，国内外有关专家、学者进行了大量研究，也取得了不少成果。但是，至今国内外还没有一本混凝土收缩的专著，一般都是把混凝土收缩与徐变放在一起论述，如Z.P. Bazant和F.H. Wittmann合写的《混凝土结构的徐变与收缩》中，就没有对混凝土收缩作系统的论述。为此，我们特编写了《混凝土的收缩》这本书。

我们在从事混凝土变形性能试验研究工作中，除进行了大量的混凝土徐变试验、极限拉伸变形试验、自生体积变形试验研究以外，还进行了大量混凝土干缩试验，并对混凝土干缩变形量测仪器进行了改进，积累了一些研究成果。本书就是以上述研究成果为基础，参考国内外有关文献资料，加以取舍、补充、系统整理而成的。希望本书能为我国混凝土工程建设和试验研究起到一定作用。

本书共分六章：第一章介绍混凝土收缩的基本概念、收缩变形的种类等；第二章叙述影响混凝土收缩的因素，如水泥品种、混合材、骨料、混凝土配合比、外加剂、周围介质条件、养护方法、龄期、结构特征及碳化等；第三章简单介绍水泥浆体的结构、干燥收缩与化学收缩机理等；第四章介绍干燥收缩、自生收缩及凝缩等量测仪器及试验方法；第五章介绍混凝土收缩表达式、估算收缩及从短期收缩试验资料推断长期收缩变形的方法等；第六章叙述减小干燥收缩与温度收缩的措施。

内 容 提 要

本书系统论述混凝土收缩问题,包括基本概念、收缩的分类、影响收缩的因素、收缩机理、试验设备与试验方法、估算收缩的方法及减小收缩的措施等。

书中阐述了作者的多年研究成果,同时也介绍了国内外其他学者的有关研究成果。本书可供土建工程技术人员和从事混凝土试验研究人员参考。

混凝土现代技术丛书

混凝土的收缩

黄国兴 惠荣炎 编著

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 安鸿逵 封面设计 刘景山

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 4.75 字数: 100 千

1990年8月 第1版 第1次印刷

印数: 1—12000 册

ISBN7-113-00722-8/TU·164

定价: 2.55元

序

自从波特兰水泥问世以来，混凝土与钢筋混凝土很快就成为主要的建筑材料，广泛地应用于各种建筑工程中。第二次世界大战以后，水泥混凝土的用量迅速增加。目前世界混凝土年产量已达60亿吨左右，不仅是用量最多的建筑材料，而且也是当代最大量的人造材料。对这样的大宗材料进行有效的研究开发工作，致力于增加品种、改进工艺、提高性能、降低成本、节约能耗，不断扩大其应用范围，充分发挥其社会效益与经济效益，已成为混凝土科技工作者的光荣职责。

我们正处于新的技术革命的伟大时代，各项技术都在互相渗透、互相促进、形成日新月异之势。混凝土技术也不例外，新技术新成就不断涌现。本丛书为了加速混凝土科学技术水平的提高，使混凝土这种主要材料在我国经济建设中发挥更大作用，对于实用意义较大的混凝土现代技术，分期分批出版专册（著）。近期内将陆续出版的有：

1. 新品种与特种混凝土方面

《膨胀混凝土》，《流态混凝土》，《三向应力混凝土》，《沸石岩为气体载体的多孔混凝土》，《粉煤灰混凝土》，《碾压混凝土》，《轻骨料混凝土》，《聚合物浸渍混凝土》，《高强度混凝土》，《防腐蚀混凝土》，《大体积混凝土》等。

2. 新工艺、新设备方面

《混凝土养护节能技术》，《混凝土真空脱水密实新工

艺》，《混凝土修补新技术》，《混凝土中钢筋腐蚀与防护》，《混凝土冬季施工》，《混凝土快速硬化》等。

3. 性能与测试技术方面

《混凝土力学性能测定》，《混凝土质量非破损检验技术》等。

4. 应用理论方面

《混凝土材料科学》，《数理统计在混凝土试验中的应用》，《混凝土的徐变》，《混凝土的收缩》，《混凝土的耐久性》，《混凝土力学》等。

本丛书除了传播新知识以外，还将发挥宣传教育的作用。解放以来，我国混凝土科学技术进行很快，混凝土工程数量庞大，混凝土构件与各种水泥制品品种繁多，满足了基本建设与国民经济发展的需要，成绩是巨大的。但也不能否认，混凝土新技术的开发和普及工作还不能令人满意。至今我国高中标号混凝土用得不多，外加剂使用得还很少，商品混凝土还刚刚起步，而混凝土工程质量问题，尤其是耐久性问题，还亟待唤起重视。总的来说，当前我国混凝土技术水平还落后于发达的工业国家，因此，必须加速信息的传播，加强宣传教育工作，尽快赶上国际先进水平，保证我国高速度的建设事业对混凝土的需要。

随着科学技术的进步与我国在混凝土科研与生产经验的积累，本丛书的选题范围将继续扩大；希望同行专家与广大读者，给予支持，共同为加速混凝土新技术的发展贡献力量。

吴中伟 姚明初

一九八七年元月

《混凝土现代技术丛书》编委会名单

顾 问：黄蕴元

主任委员：吴中伟

副主任委员：姚明初

编委会委员（以姓氏笔划为序）

冯乃谦 吴中伟 沈旦申

洪定海 姚明初 龚洛书

蒋家奋 甄永严 蔡正咏

通过本书的讨论，希望读者不但从中能了解有关混凝土收缩的系统知识，而且还能掌握解决实际问题的方法。

由于我们理论知识和实践经验的限制，书中会存在不少缺点与错误，诚恳希望读者给予指正。

书中有很多资料引自许多单位的研究成果或个人的论文著作。这些单位有：中国建筑科学研究院、国家建筑材料研究院、铁道部科学研究院、南京水利科学研究院、长江科学院、交通部公路研究所、交通部第一航务局科研所、水电部东北勘测设计院科研所、安徽省水利科学研究所等。在此，谨向有关单位及个人表示衷心感谢。

本书由黄国兴执笔，惠荣炎修改、补充。在编写本书过程中，曾得到水利水电科学研究院结构材料所领导及同志们热情支持与帮助，关英俊高级工程师对书稿作了详细审阅并提出了不少宝贵意见，在此一并致谢。

作 者 1989年元月于北京

目 录

第一章 概 述.....	1
第一节 基本概念.....	1
第二节 收缩变形的种类.....	2
第三节 湿胀变形.....	14
第二章 影响混凝土收缩的因素.....	17
第一节 水泥品种的影响.....	17
第二节 混合材种类及掺量的影响.....	21
第三节 骨料品种及含量的影响.....	28
第四节 混凝土配合比的影响.....	32
第五节 外加剂种类和掺量的影响.....	35
第六节 周围介质条件的影响.....	47
第七节 养护条件的影响.....	51
第八节 混凝土龄期的影响.....	52
第九节 结构特征的影响.....	53
第十节 碳化作用的影响.....	56
第三章 收缩机理.....	62
第一节 水泥浆体的结构.....	62
第二节 干燥收缩机理.....	67
第三节 化学收缩机理.....	72
第四节 水泥石的收缩过程.....	75
第四章 试验设备与试验方法.....	80
第一节 干缩试验室及基准值.....	80
第二节 干缩量测仪器及试验方法.....	81

第三节	自生收缩量测仪器与试验方法·····	90
第四节	凝缩量测仪器及试验方法·····	93
第五章	估算收缩的方法·····	95
第一节	收缩表达式·····	95
第二节	估算收缩的方法·····	97
第三节	从短期收缩试验资料推断长期 收缩变形 ·····	111
第六章	减小收缩的措施 ·····	119
第一节	减小干燥收缩的措施 ·····	119
第二节	减小温度收缩的措施 ·····	130

第一章 概 述

第一节 基 本 概 念

由于混凝土中所含水分的变化、化学反应及温度降低等因素引起的体积缩小，均称为混凝土的收缩。

当混凝土处于自由状态，混凝土因某种原因引起收缩不会导致什么不良后果，但实际上混凝土结构由于基础、钢筋或相邻部份的牵制而处于不同程度的约束状态，混凝土收缩因受到约束会引起拉应力，况且混凝土的抗拉强度不高，因而混凝土收缩容易引起混凝土开裂。对于承重混凝土结构，裂缝可能会影响承载能力、建筑物安全以及使用寿命；对于挡水建筑物，裂缝可能引起渗漏、影响结构应力状态，水分通过裂缝侵入混凝土中，容易引起钢筋锈蚀和可溶性侵蚀以及加速冻融破坏，甚至危及建筑物的安全，引起一系列危害。

长期以来，如何减小混凝土收缩，提高混凝土的抗裂性，已成为混凝土工程技术中的一项重大课题，对此以往已进行了大量研究，并取得了可喜的进展。例如，为了补偿混凝土收缩，日本于1963年就开始了混凝土膨胀剂的研究。随后，美国、苏联、西德等国都先后开始了膨胀剂的研制和应用技术研究，膨胀剂在工程上的应用越来越多。我国在1975年开始研究膨胀剂，国家建材总局建筑材料研究院首先研制成功CSA膨胀剂；1978年冶金建筑研究总院研制成功脂膜石灰膨胀剂，同年中国建筑一公司科研所研制成功铁屑膨胀剂；1979年江苏省建筑科学研究所将石膏-矾土水泥混合成

膨胀剂，用于刚性屋面混凝土获得成功；安徽省建筑科学研究所、国家建筑材料研究院研制成功的明矾石膨胀水泥基础上，研制了明矾石膨胀剂；1980年长江科学院研制了大坝水泥膨胀剂；1985年国家建筑材料研究院研制成功石灰系为主的复合膨胀剂和钙矾石系膨胀剂（U型膨胀剂）。以上几种膨胀剂已被广泛应用于实际工程中，对补偿混凝土收缩、防止混凝土开裂起了很大作用。

众所周知，大体积混凝土容易发生温度裂缝。尽管在大坝施工中以数百万大卡冷冻能力投入降温防裂控制，但我国大坝混凝土仍然不断出现裂缝。因此提高大体积混凝土的抗裂能力，更具有重要的技术意义。为此，70年代长江科学院、浙江大学、国家建筑材料研究院，华新水泥厂和富春江水泥厂等五单位联合研制成功低热微膨胀水泥，用此种水泥来拌制水工补偿收缩混凝土，先后在浙江长诏水库大坝，福建池潭水电站大坝及浙江紧水滩水电站拱围堰上进行了三次现场筑坝试验，取得良好效果。

第二节 收缩变形的种类

混凝土的收缩变形主要有浇筑初期（终凝前）的凝缩变形、硬化混凝土的干燥收缩变形、自生收缩变形、温度下降引起的冷缩变形以及因碳化引起的碳化收缩变形等五种。

一、塑性收缩（凝缩）

混凝土拌制后一段时间内，水泥的水化反应激烈，分子链逐渐形成，出现泌水和体积缩小现象，这种体积缩小称为塑性收缩（凝缩）。塑性收缩都发生在混凝土拌和后约3～12小时以内，即在终凝前比较明显。因为这种凝缩发生时混

凝土仍处于塑性状态，因此把这种凝缩称为塑性收缩。混凝土凝缩导致骨料受压、水泥胶结体受拉，故其既可使水泥石与骨料结合紧密，又可能使水泥石产生裂缝。凝缩的大小约为水泥绝对体积的 1 %〔1—1〕。

凝缩与混凝土本身的材料组成有关，也与成型振捣条件、温度等因素有关。干硬性混凝土拌合物的凝缩比塑性混凝土的小，而流态混凝土拌合物的凝缩最大。混凝土拌合物的凝缩随用水量及水泥用量的减小以及采用能保水的磨细掺合料（硅藻岩等）和能保证混凝土拌合物具有刚性骨架的粗骨料量的增加而减小。水灰比、用水量、掺合料对普通混凝土拌合物凝缩的影响如表 1—1 所示〔1—2〕。

混凝土的凝缩(%)

表 1—1

胶凝材料	水泥用量 (kg/m ³)	用 水 量 (kg/m ³)		
		150	180	210
硅酸盐水泥	310	0.15	0.82	1.64
掺20%硅藻岩	310	0.01	0.11	0.42

从表 1—1 可以看出，混凝土拌合物的凝缩变形随水灰比的降低而减小，随用水量的增大而加大。掺20%硅藻岩可明显减小凝缩变形。

用高频振捣器振捣，凝缩小；温度低凝缩大且凝缩延续时间长。另外，混凝土表面因蒸发失水或因基底干混凝土吸水引起的失水均能增加混凝土的凝缩，并且可能导致混凝土表面开裂。

由于混凝土浇筑后不久，从凝胶体中析出的晶体不多，所以凝胶体粒子间主要是物理性接触，塑性变形能力较大。因此，只要加强早期养护，不使混凝土表面干燥，一般不会开裂。

二、自生收缩（自缩）

混凝土在恒温绝湿条件下，由胶凝材料的水化作用引起的体积变形称为自生体积变形，而自生体积变形为收缩的称自生收缩（自缩），这种收缩是由化学作用引起的。因此，自缩是化学收缩之一。

混凝土自缩与水泥品种、水泥用量及掺用混合材种类有关。水泥用量少时，自缩值小。普通硅酸盐水泥、纯大坝水泥混凝土的自生体积变形一般是收缩，而矿渣水泥混凝土的自生体积变形早期是膨胀（图 1—1）〔1—4〕。掺用粉煤灰可以减小自生收缩值，粉煤灰掺量对混凝土自缩的影响如图 1—2 所示〔1—5〕。从图 1—2 可以看出，混凝土自缩随粉煤灰掺量的增加而减小。显然，这对提高混凝土抗裂性是有利的。

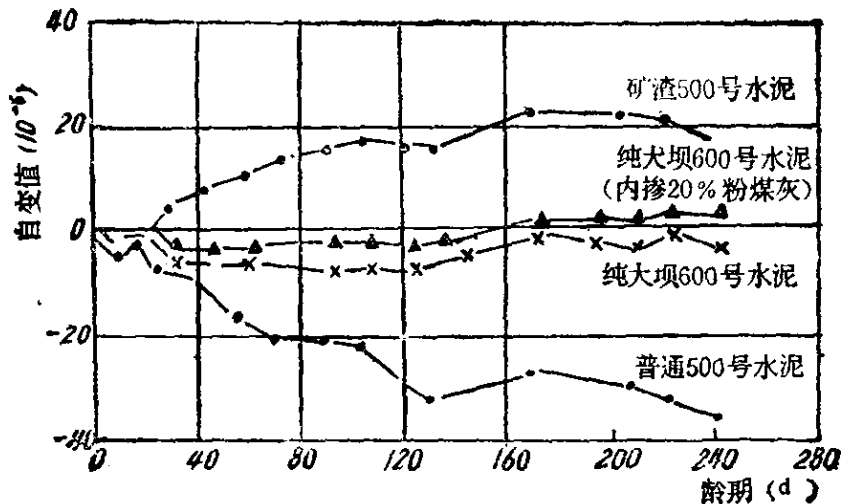


图 1—1 不同水泥混凝土的自生体积变形

混凝土的自缩值，一般在 $(40 \sim 100) \times 10^{-6}$ 范围。如果以混凝土线膨胀系数为 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 计，相当于温降 $4 \sim$

10°C所引起的温度变形，这充分说明混凝土的自缩对抗裂问题有着不容忽视的影响。近几年来，随着膨胀水泥混凝土的研究与应用，逐渐认识到若有意识地控制和利用混凝土的自生体积膨胀变形，将有可能大大改善某些混凝土的抗裂性。例如，长江科学院等单位研制了低热微膨胀水泥，用该水泥配制的混凝土，14~31天的膨胀率为 $(130\sim147)\times10^{-6}$ ，相应自应力约为0.3MPa；118天剩余膨胀率为 30×10^{-6} ，自应力值为0.07MPa〔1-6〕，这能起补偿收缩作用，以提高大体积混凝土的抗裂性。另外，抚顺矿渣大坝水泥也有微膨胀性，其自生体积变形是持续膨胀，没有自缩变形，7年自生膨胀变形达 102×10^{-6} 。

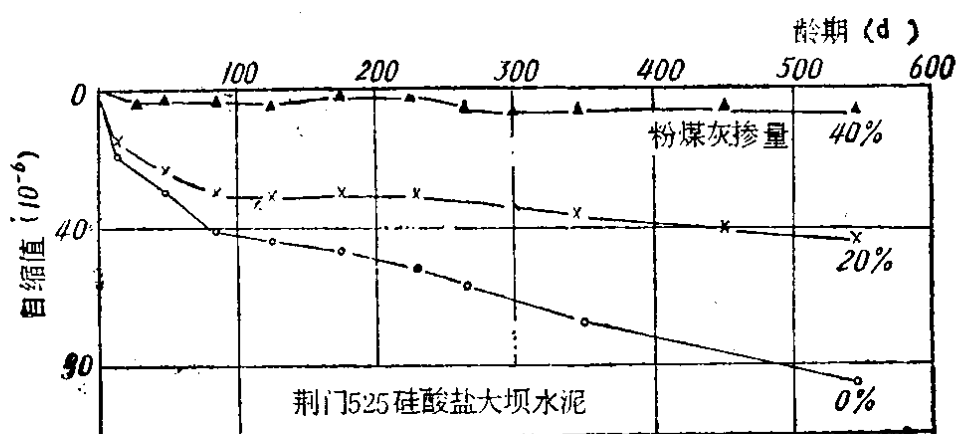


图 1—2 粉煤灰掺量对混凝土自缩的影响

在几种水泥矿物中，理论上 C_3A 水化减缩最大 (-24.25%)，根据实测资料，其收缩也是比较大的。 C_3S 在水泥中数量较多，它水化后体积减缩 5.26% 。水化后生成托勃莫来石凝胶在很大程度上决定了水泥石的收缩。水泥石的收缩有 $2/3$ 是由托勃莫来石凝胶造成的，有 $1/3$ 是 C_3A 水化物造成的。在成熟度高（龄期长）的水泥浆体中，托勃莫来石的影响还会超过 $2/3$ 〔1-7〕。

C_2S 水化缓慢、含量又低，所以它对水泥浆体的收缩影

响很小， C_4AF 也如此。石膏、游离 CaO 和 MgO 由于吸收水分，其绝对体积膨胀，并生成稳定的结晶构造，对补偿收缩有良好作用。有的水泥 MgO 含量较高（不超过水泥国家标准允许值5%），使用该水泥拌制的混凝土表现出自生体积膨胀，而不是收缩。

三、温度收缩（冷缩）

混凝土随温度下降而发生的收缩变形称为温度收缩，简称冷缩。对大体积混凝土，裂缝主要是由温度变化引起的。因此，如何尽量减小其温度变形是一个极其重要的问题。

众所周知，水泥石是多孔质的胶凝体。当温度上升时，除凝胶颗粒热膨胀外，还有水泥石中水的热膨胀。而水的膨胀率约为 $210 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ，大大高于水泥凝胶的膨胀率，所以凝胶水发生膨胀比其所占空隙还大，而使凝胶膨胀。凝胶水膨胀后，一部分沿毛细管空隙移动。另外，温度上升时，毛细管水的表面张力要减小，使作用在水泥石内部的一部分收缩力释放，水泥石就膨胀。毛细管水张力的影响因含水状态而异，水泥石在饱水或干燥状态下，因没有弯液面，故热膨胀率小。水泥石的热膨胀率是湿度的函数，当相对湿度为100%和0%时最小，在70%左右时最大〔1—8〕。

当温度下降（ $0^{\circ}C$ 以上）时，混凝土会产生温度收缩变形（冷缩）。当混凝土受冻时，其孔隙水和毛细管水的结冰将明显影响其变形。一般情况下，当混凝土温度降至 $0^{\circ}C$ 以下时，混凝土不仅不收缩，反而会因结冰产生的压力而引起膨胀变形。

在无约束条件下，混凝土温差 ΔT 所引起的温度收缩变形是 ΔT 与混凝土热膨胀系数 α 的乘积（ $\alpha \Delta T$ ）。混凝土的热膨胀系数一般为 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ，而水泥浆体的热膨胀系数

为 $13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。混凝土热膨胀系数 α 与骨料品种有关，石灰岩骨料混凝土的 α 值为 $(6 \sim 7) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，砂岩骨料混凝土的 α 值高达 $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。因此，混凝土的 α 值受骨料品种影响很大，最低与最高几乎差1倍之多。国内几个水利水电工程大坝混凝土的热膨胀系数列于表1—2。

国内10个水电工程大坝混凝土的热膨胀系数 表1—2

工程	$\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	骨料	工程	$\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	骨料
大化	5.4~5.6	石灰岩	潘家口	8.8~9.4	变质石英岩 砂岩、石英砂岩
乌江渡	5~6	石灰岩	柘溪	9.6~10.2	
岩滩	7~8	石灰岩	安康	9.75	
凤滩	8~9		龙羊峡	9.5~10.4	
龚嘴	8.4~9.1		东江	10.5~11.0	

混凝土在硬化过程中，水泥水化产生水化热，并通过边界把部分热量向四周传递（散热）。硬化初期，水泥水化速度快，放出的热量大于散热量，使混凝土升温，特别是大体积混凝土，水化热温升较高。水泥水化速度随时间减慢，当发热量小于散热量时，混凝土温度便开始下降。混凝土在升温期发生膨胀，在降温期发生收缩，如果混凝土处于约束状态下，则温度收缩变形受到限制，就转变为温度收缩应力，很可能导致温度收缩裂缝。混凝土温度收缩裂缝发生的因果关系如图1—3所示〔1—9〕。图1—3表明，混凝土配比及性能、环境条件、结构、施工及养护条件等五方面都可能导致混凝土产生温度收缩裂缝。

四、干燥收缩（干缩）

置于未饱和空气中的混凝土因水分散失而引起的体积缩小变形，称为干燥收缩变形，简称干缩。严格来说，干燥收

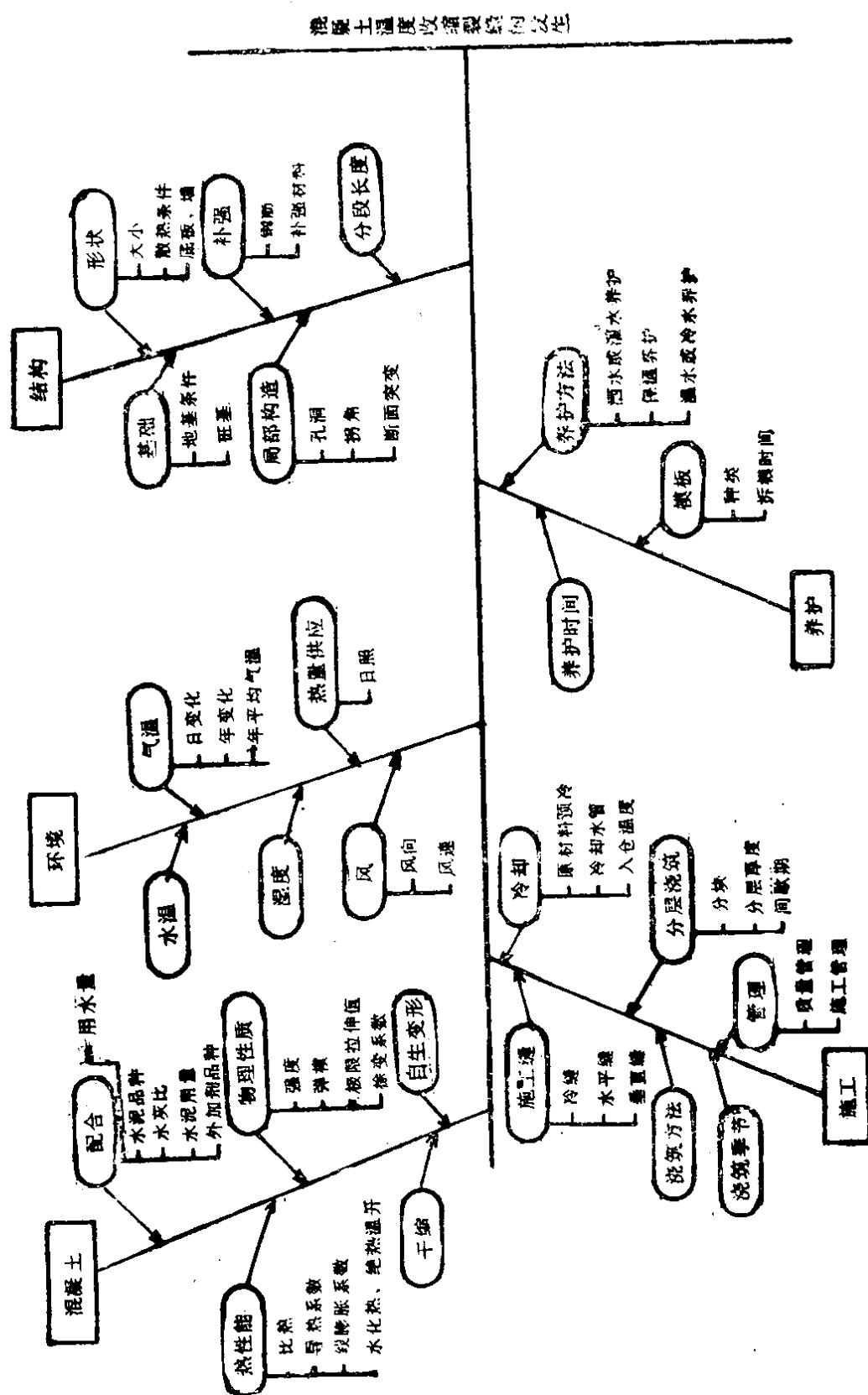


图 1—3 混凝土温度收缩裂缝发生的因果关系