

中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会
混凝土质量委员会组织编写

混凝土工程裂缝预防与控制

富文权 韩素芳 编著

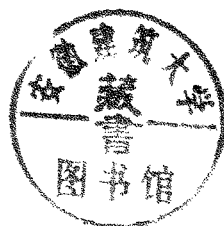
中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

TU755. 7/4

2007

混凝土工程裂缝预防与控制

富文权 韩素芳 编著



中国铁道出版社

2007年·北京

内 容 简 介

本书在广泛参考国内外(主要是国外)试验研究成果和工程实践经验的基础上,对混凝土工程裂缝问题,特别是对由于湿度、温度变化引起的收缩变形裂缝和由于钢筋锈蚀、碱骨料反应引起的化学反应裂缝,以及对混凝土工程裂缝的防控手段等问题,做了比较系统、深入地阐述。

书中选编了大量技术资料,研究了开裂机制,讨论了裂缝实例,阐释了防控手段,既探索理论基础,亦联系工程实际。期望能有助于扩展知识和启迪思维,也期望能有助于分析现实工程裂缝问题和防控新建工程出现裂缝,为混凝土工程设计、施工人员及其他有关人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土工程裂缝预防与控制/富文权编著. —北京:中国铁道出版社,2007.5

ISBN 978-7-133-07812-6

I. 混… II. 富… III. 混凝土施工-裂缝-控制 IV. TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 036389 号

书 名:混凝土工程裂缝预防与控制

著作责任者:富文权 韩素芳

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:许士杰 编辑部电话:路(021)73065,市(010)51873065

封面设计:冯龙彬

印 刷:北京市兴顺印刷厂

开 本:850 mm×1168 mm 1/32 印张:7.5 字数:196 千

版 本:2007年5月第1版 2007年5月第1次印刷

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN-978-7-113-07812-6/TU·872

定 价:18.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

发行部电话:路(021)73169,市(010)63545969

再版附言

本书第一版《混凝土工程裂缝分析与控制》一书于2002年出版。对于由该书主要资料缩编成的“混凝土工程裂缝预防与控制”一文,《混凝土》杂志(2003年第5期)编者按语曾评说:“所有关心混凝土裂缝问题的科技人员,都可能从中得到启迪。”此次再版对原书中的某些内容做了修改、调整。增加了变形约束开裂机制,“致裂温度”指标的防裂应用,修改完善了裂因—裂防(控)脉络图,也着重叙述了“温因致裂”和“裂缝预防”的内容。再版新书比之原版书有了很大改变,因而书名也改为《混凝土工程裂缝预防与控制》。

笔者希望通过这本书把历年来经查阅、筛选、编辑出的“可贵”资料和经咀嚼、消化、吸收到的“有益”知识,奉献给为着我们祖国现代化工程建设的共同目的而在不同岗位用心学习中的同志们、“同学们”,是将其作为交流技术资料、交换讨论意见和汇报研习心得以提供启示参考的,也期望能对同志们、“同学们”的具体工作有所帮助。

深深感谢组织上、领导上和各方面有关同志们的关怀和帮助;没有这些,书是难以写成、难以问世的。向完成本书所曾学习、参考过的书刊文献的作者们表示深深的敬意。技术进步要靠一代又一代人的辛勤耕耘和智慧积累。

编著者

2006年11月

第一版前言

混凝土工程裂缝是个从来未曾间断的老的质量通病,颇受各方关注,有的也具有很重大的技术经济意义。有关工程技术人员很少不曾遇到,有时甚至为此相当困惑。

有很多的裂缝只是“表面性”的,对工程结构的承载能力或使用功能无何影响,但有时可损害观瞻,甚至引起对工程质量的疑虑;有的裂缝实具有“结构性”的意义,表明结构的力学性能或使用功能或工程整体性受到某种损害,个别情况甚至是示警将要发生破坏事故。还有的裂缝可导致工程结构渗水、溶蚀或诱发钢筋锈蚀,从而损害结构的使用功能或工程的耐久性。在某些特定条件下,混凝土内部的某种化学反应膨胀也能引起工程表面开裂,情节严重的甚至可使工程结构的使用功能或耐久性受到损害。混凝土裂缝的表现形态多种多样,工程意义各有不同。按裂缝起因看,主要的可概括为如下几种:一是混凝土收缩变形约束裂缝——混凝土干缩、温缩变形因为受到约束作用所引起的约束拉伸开裂;二是混凝土结构受力裂缝——混凝土结构在设计荷载或其他外力作用下所引起的裂缝;三是混凝土化学反应胀裂——混凝土内部某种化学反应物的膨胀力在工程外表所引发的裂缝;四是混凝土的塑态裂缝——混凝土在浇筑后呈塑性状态时因收缩或沉降等所引发的开裂。

混凝土随温度、湿度变化要伴生胀缩变形,而收缩变形受到约束(抑制,阻碍)作用则伴生拉应变和拉应力,拉应变或拉应力超过混凝土的承耐力时即产生裂缝。混凝土工程结构在施工期中及而后在使用期中,其温度、湿度出现升降变化并由此引发收缩变形的情况是常有的,而收缩变形受到来自外部、内部的约束作用常亦难免,但混凝土抗拉伸能力却又很弱,所以,混凝土工程结构是比较容易出现收缩裂缝的,现实问题亦比较多,本书着重研讨这方面的问题。

混凝土结构构件在设计荷载(受弯、受拉荷载)作用下,其受拉区出现裂缝是难免的,因为混凝土抗拉伸能力太弱,不足以防止裂

缝发生,RC(Reinforced Concrete,钢筋混凝土)结构构件是依靠配置钢筋控制裂缝开展宽度,使其不宽到有害程度或不宽过可容许程度,本书在第2.2节里,专题讲述这个问题。至于因结构设计中的考虑欠周、计算失误或因结构使用中的加载过大或意外受力等所引起的各种裂缝,以及由混凝土材料、配比或施工中的缺欠、差错所招致的各种裂缝,事故的性质各不相同,致裂原因亦各相异,对具体问题只能作具体分析,但典型的经验教训应引以为戒。

混凝土化学反应胀裂主要是指由于混凝土内部某种化学反应物的体积膨胀所引发的外观裂缝,如钢筋锈胀裂缝或碱骨料反应裂缝。这类工程病害各有其特定起因,总的看,数量或许不算多,但影响甚恶劣,工程意义亦重要。上个世纪80年代初期,日本一些混凝土工程的化学反应胀裂病害问题(大多数起因于钢筋锈蚀,有的也起因于碱骨料反应)经媒体报导“渲染”后曾引起过社会舆论的强烈指责,当局也组织过颇大力量开展调研和制定对策。美国为了冬季行车防滑从上个世纪60年代初期开始在公路上撒盐融冰,盐液渗进桥面板混凝土中,没过几年就引发了钢筋锈蚀和混凝土胀裂问题,在技术上、经济上酿成巨大损失,教训沉重。国内在上个世纪50、60年代因掺用氯盐促硬剂而引发的RC裂缝问题也为数不少,这些年来对于碱骨料反应的胀裂问题亦给予了广泛关注。对此,本书精辟3、4两章分别深入阐述。

关于混凝土浇灌后出现的塑缩、塑沉裂缝将在2.1.3施工技术项下酌予阐述。

有些裂缝是较难于仅从外观病象上判明病因的,国外国内都曾有判断失误情况,如将钢筋锈胀的沿筋裂缝误判为由外力作用所引起,将碱骨料反应的网状裂缝误判为由混凝土收缩变形导致;相反的误判情况也有。有时,两种工程裂缝的表现形态虽甚相似,但裂因却可能是迥然不同;而有些裂缝的病因又不止一种。在现实工程中,由于裂因判断失误而导致的修了还裂,再修再裂,花了钱而不见效的事例,国外国内都曾有过。还有过这样的例子,某种构件裂缝最初被疑为由于热养护工艺不适所引起(温度变形裂

缝),后经试验又疑为由于水泥中 MgO 含量偏高导致(化学反应物胀裂),再后又疑为碱骨料反应物的胀裂。类似情况虽经反复调研,但仍长期找不准确切裂因,拿不出有效对策的事例,国外国内也都曾有。就是说,对于某些较为复杂的裂缝问题或由诸多因素复合诱发的裂缝问题,分析好其主要矛盾所在,查清楚其主要致裂因素,还不是很容易的;而诊查不准确的施治处方则难收预期效果。某些工程结构因受设计构造条件或其他客观条件所限,原已潜存下相应的致裂因素,但一见裂缝未经合理调研分析就首先指摘施工责任的有欠公允的例子也曾有过。

国内外混凝土工程结构多种多样,不同情况下的裂缝问题又多各有特点。在科学技术不断发展、人们认识不断深化的过程中,在不同时期、不同条件下出现一些不同的分析判断意见或不同的诊治处理结果是难免的,可理解的;但许多情况也在提示:我们大家都还需要持续不断地学习再学习。看来,更系统更深入地研究各种工程裂缝的发生发展机制并探讨各种裂缝的共通性与特殊性很有必要;而传播裂缝基础知识、交流工程经验和交换讨论意见,将也有助于预防、控制裂缝和诊治现实工程裂缝。工程实践需要有科学理论基础;而技术知识、工程经验只有经过更广泛地交流和切磋,才能得到更好地应用和发展。

混凝土质量委员会就是基于这种认识组织编写了这本书稿,在参考国内外(主要是国外)科研试验成果和工程实践经验的基础上,阐述了有关混凝土裂缝的基本理论、技术知识和工作经验,并就一些问题进行了分析探讨或提出了评论意见。

本书编写工作得到丰台桥梁工厂的协作支持,特表示感谢。但限于编写人员的水平、能力,书中难免有不妥之处,希望通过更广范围的交流研讨、切磋琢磨,共同推动技术进步。

中国土木工程学会混凝土及预应力
混凝土分会混凝土质量委员会

2001年10月

目 录

1 混凝土收缩裂缝分析	1
1.1 混凝土的干燥收缩变形	1
1.1.1 水泥石的干缩机制	3
1.1.2 混凝土材料与配比	5
1.1.3 混凝土结构与施工	9
1.1.4 环境气象条件	10
1.1.5 混凝土干缩应变估算	13
1.1.6 混凝土脱水的表里差异	17
1.2 混凝土的温度升降变形	18
1.2.1 混凝土的热胀系数	18
1.2.2 混凝土的绝热温升	19
1.2.3 混凝土的散热降温	22
1.3 混凝土的抗拉伸性	32
1.3.1 混凝土受拉中的应力与应变	32
1.3.2 混凝土的抗拉强度与极限拉伸	33
1.3.3 混凝土的拉伸徐变与有效弹模	37
1.3.4 混凝土拉强、弹模与徐变的估算	39
1.4 混凝土变形的约束开裂	45
1.4.1 温降收缩与外部约束	46
1.4.2 表里温差与内部约束	55
1.4.3 控温防裂与致裂温度	61
1.4.4 混凝土干缩的约束开裂	68
1.4.5 两点补充	76
1.4.6 混凝土工程收缩裂缝例	78

2 混凝土裂缝防控措施	87
2.1 混凝土工程裂缝预防	88
2.1.1 低温低热混凝土	88
2.1.2 混凝土材料选配	91
2.1.3 混凝土施工技术	95
2.1.4 混凝土分段设缝	103
2.2 混凝土工程配筋控裂	115
2.2.1 概 述	115
2.2.2 裂宽限值	117
2.2.3 开裂机制	121
2.2.4 裂宽估算	125
2.2.5 配筋规定	129
2.2.6 缩裂配筋	137
2.2.7 讨 论	140
2.3 混凝土工程裂缝的裂因—裂防(控)脉络	142
3 混凝土的钢筋锈胀裂缝	147
3.1 钢筋的锈蚀机制及其受制因素	147
3.1.1 钢筋锈蚀机制	147
3.1.2 钢筋锈蚀受制因素	149
3.2 氯盐的危害作用	155
3.2.1 掺用氯盐	156
3.2.2 渗入氯盐	158
3.2.3 海砂氯盐	160
3.2.4 海水氯盐	162
3.2.5 海风氯盐	163
3.3 RC工程的防护措施	167
3.3.1 控制混凝土中含氯量	167
3.3.2 增强免疫力	170

3.3.3 其 他·····	172
4 混凝土的碱骨料反应裂缝 ·····	177
4.1 混凝土 ASR 机制及其受制因素 ·····	177
4.1.1 ASR 机制 ·····	177
4.1.2 ASR 的受制因素 ·····	181
4.2 混凝土工程的 ASR 裂缝“病害” ·····	188
4.2.1 混凝土工程的外观裂缝、变形 ·····	188
4.2.2 混凝土工程的内部质量问题 ·····	189
4.2.3 RC 结构中的 ASR 特点 ·····	192
4.2.4 混凝土工程 ASR 调研例 ·····	200
4.3 混凝土工程的 ASR“病害”预防 ·····	215
4.3.1 几项预防措施 ·····	215
4.3.2 骨料活性问题 ·····	217
参考文献(资料出处) ·····	224

1 混凝土收缩裂缝分析

混凝土收缩裂缝是由于混凝土收缩变形^①受到约束所引起。设有一根混凝土杆件如图 1.28 所示,杆长(l)因温降或气干而缩短,若杆之两端不受约束可以自由缩短(Δl),杆身不会开裂。若两端受到约束(如被固定),不能缩短,这就等于在两端施加有拉力 N 而强行将杆件拉伸出 Δl 并引发拉应变($\epsilon_t = \Delta l/l$)和拉应力($\sigma_t = E_t \epsilon_t$),若拉应力大过混凝土的抗拉强度($\sigma_t > f_{ct}$),杆件就要断裂。可见,制约混凝土裂缝发生发展的几个基本要素是:混凝土收缩变形大小,混凝土抗拉性能高低及混凝土变形的约束条件(程度)。从图 1.28 可见,开裂机制虽比较简单,但这几项致裂要素却都甚为复杂,影响因素多,变化亦很大,所组合成的裂缝问题多种多样,有的又很难分析清楚。下面先分别阐述混凝土的干缩变形、温度变形及混凝土的抗拉伸性,而后再结合混凝土结构的约束条件研讨混凝土开裂机制问题。

1.1 混凝土的干燥收缩变形

混凝土干燥收缩主要起因于水泥石的脱水收缩;砂石不仅多不收缩,而且还可抑制水泥石收缩从而减小混凝土收缩(图 1.1, 图 1.7(b)),所以,凡是能影响水泥石脱水收缩和能影响骨料约束效应的种种因素,就也都会影响混凝土的干缩变形。

水泥石气干收缩在内部主要受制于其中的细孔含量和孔径分布,而这又受制于加水量(水灰比)和水化度(水化材龄)(图 1.2);在外部主要受制于环境湿度。而混凝土工程的气干

^①混凝土收缩变形理论上三维的体积变化。但现实工程结构的裂缝问题大多是某个方向的变形在起着主导作用。为了简化问题分析,本书着重研讨混凝土在某单一方向的线性胀缩变形问题。

收缩则除受制于混凝土含水量、水灰比、水化度、环境湿度以及骨料的特性与含量等外,还要受到工程结构的裸露程度(形状尺寸)所影响。

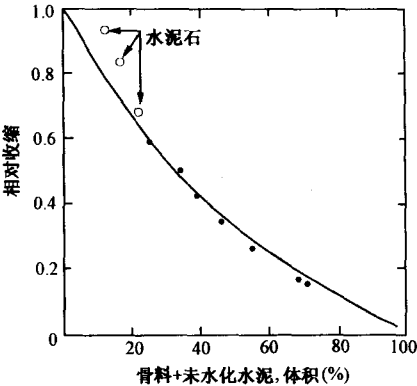


图 1.1 混凝土收缩受骨料含量的影响^[1.15]

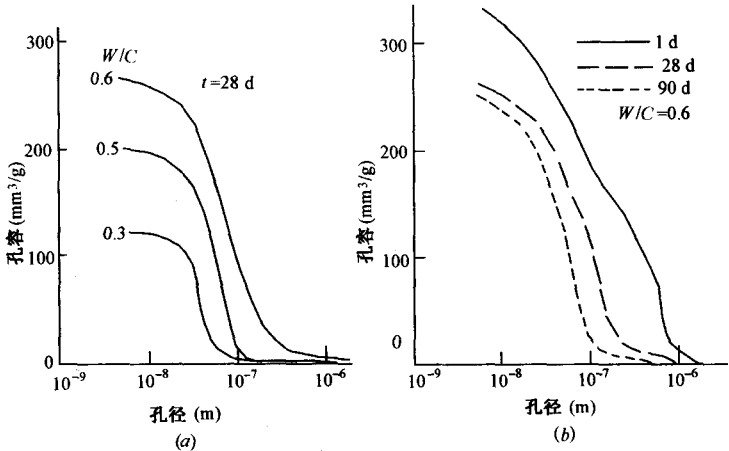


图 1.2 水泥石的 W/C 及水化龄对细孔分布的影响^[1.12]

(图(a)推想是按固定水泥量试验的,也反映了拌和水量的影响)

下面先简述水泥石的脱水收缩机制,然后再从几个方面阐释混凝土干缩问题。

1.1.1 水泥石的干缩机制

水泥石或混凝土的干燥过程是其所含水转变为蒸气的蒸发(气化)过程。水泥石内的可蒸发水存在于大孔洞、毛细孔及凝胶孔中。气干进行中,首先是大孔洞里的水蒸发,但这不至于引起收缩;随后是毛细孔水蒸发,由较粗孔到较细孔再到更细孔,脱水量依次减少而收缩量却依次增大;在强烈干燥下,凝胶孔里的吸附水也能解吸蒸发并引起收缩。下面简介文献[1.15]中关于水泥石脱水收缩机制的几种解释。

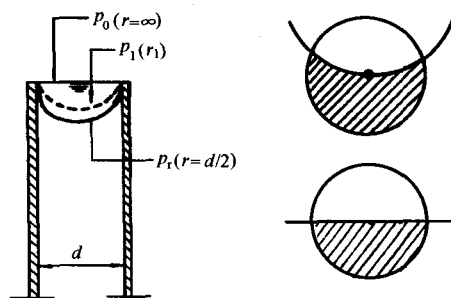


图 1.3 毛细管液面曲率与液面上蒸气压(p)的关系(左), 及其对蒸发的影响(右)

1. 毛细管张力

毛细孔水的水面是向内弯曲着的,孔径愈细,水面曲率愈大(图 1.3 左);在毛细孔水蒸发、曲面后退中,曲率也随着增大。毛细孔内的弯曲水面对其下边的水可产生牵引效应(由于表面张力作用),并使孔内产生负压和使孔壁靠紧,从而引起水泥石的收缩。处在弯曲水面上的水分子(图 1.3 右,黑点代表水分子)所受到的内部水分子(图中影线范围内的水分子)的引力比较大(与平面上的水分子相比较),所以较不容易蒸发。就是说,弯曲水面上的湿空气饱和蒸气压要比平面水上的为低,所以必须在比平面水时更低的蒸气压下,这才能引起曲面水的蒸发。毛细孔径愈细小,可引起蒸发的实际蒸气压(或湿空气的相对湿度)愈低,有一份对应资料如下:

毛细孔半径(μm): 1 0.1 0.01 0.001

可引起曲面水蒸

发的相对湿度(%): 99.9 99.0 89.9 34.8

这表明,较粗毛细孔里的水首先蒸发,失水量多,但因水面曲率较小,牵拉效应较小,水泥石收缩量亦较小;而后依次是较细、更细孔里的水蒸发,失水量依次减少,水面曲率依次增大,牵拉效应和收缩量亦依次增大。

2. 表面张力

在干燥进一步加剧之后,水泥凝胶孔($15^\circ \sim 30^\circ$)里的吸附水也能解吸蒸发并引起收缩。有解释是,物体颗粒的表面分子因表面张力作用可具有一定的内向压缩力,对于如水泥凝胶这样的微小粒子(150° 或 $15 \times 10^{-3} \mu\text{m}$)来说,此压应力可大到 250 N/mm^2 数量级,足以将胶粒体积压小;但在凝胶吸附水后,水分子的外向引力又可以抵消此压缩力,使胶粒体积复原。就是说,凝胶在脱水干燥中,体积将要缩小;而在吸水润湿中,体积又要增大;这种现象也只能发生于环境湿度较低的情况(RH 低于 $50\% \sim 40\%$)。

3. 层间水

当将水泥凝胶描绘成为由 2~4 个分子层构成的卷曲片状结构物时,其存在于各片层之间的层间水,在强烈干燥中也可脱出,导致胶粒的片层靠紧并引起收缩;反过来,在吸水润湿中则胶粒膨胀;这种效应也只能在相当干燥的情况下(RH 低于 35%)发生。

上面几种解释虽然较为粗略,但对于进一步研究有关问题还是有助益的。可以推想,在不同情况下是可能有不同的机制在起着主

导作用,图 1.4 中水泥石干缩曲线在 RH 约 10% 处有个明显转折,就

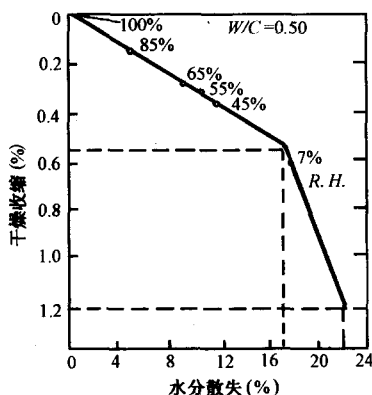


图 1.4 水分散失对水泥石收缩的影响^[1.15]

是因为干缩机制起了变化。

1.1.2 混凝土材料与配比

这方面可影响于混凝土干缩的重要因素是含水量(水灰比)和骨料,水泥、含砂率、坍落度等也可直接或间接地产生相应影响。

1. 含水量(水灰比)

含水量(W)、水灰比(W/C)既然对水泥石的毛细孔量和孔径分布有重要影响(图 1.2(a)),所以也对混凝土干缩有重要影响(图 1.5,图 1.6)。从图 1.5 可见,含水量的影响程度是显著大于水泥量和水灰比的。混凝土的拌和水量受制于混凝土的坍落度、含砂率、温度以及骨料的颗粒级配、清洁程度、石子粒径等项,这些因素也都可影响混凝土的干缩变形(图 1.7、图 1.8)。看来,结合具体工程条件,在确保混凝土浇筑均匀、振捣密实的前提下,采用较少些的拌和水量,较小的水灰比,较好的骨料级配以及较小些的坍落度,较低些的拌和温度等,都是有助于减低混凝土的干缩性的。

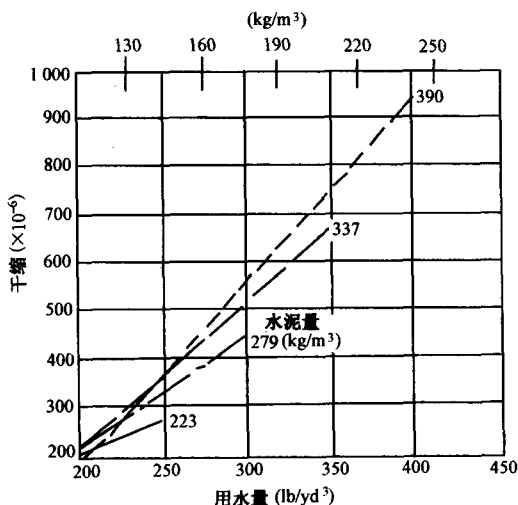


图 1.5 混凝土用水量对混凝土干缩收缩的影响^[1.14]
(水泥量和 W/C 的影响较小)

2. 骨 料

粗细骨料占混凝土体积很大部分,本身虽多不缩,但却可抑制水泥石收缩,从而可减少混凝土的干缩(ϵ_s),有一个经验式是 $\epsilon_s \approx \epsilon_{s0}(1 - V_s)^2$ (ϵ_{s0} 是水泥石的干缩; V_s 是骨料容积%)^[1.11]。图 1.1 和图 1.9 等资料都很好表明这个问题。在 RH 为 50% 环境中,水泥石干缩应变可达 $(1\ 500 \sim 6\ 000) \times 10^{-6}$,而混凝土的仅为 $(400 \sim 800) \times 10^{-6}$ ^[1.22]。增大骨料粒径尺寸不仅可影响拌和水量(从而影响收缩),在抑制水泥石收缩上也更为有效。

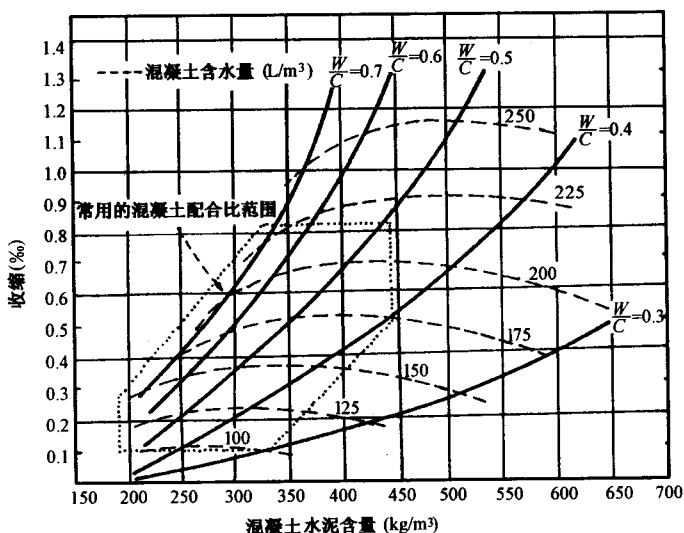


图 1.6 混凝土收缩依从于拌和水量、水泥含量和灰水比的关系^[1.13]

粗骨料的岩石种类和骨料品质(吸水率、比重)也对混凝土干缩性产生影响(表 1.1);低吸水性(低孔隙率、高比重)粗骨料混凝土的弹性模量比较高,而干缩性比较低。通常认为:石英岩、石灰岩、白云岩、花岗岩等骨料属低收缩型的,而砂岩、黏板岩、玄武岩等的骨料属高收缩性的;但有些岩石(如花岗石、石灰岩、白云岩)的可压缩性变化较大,影响到混凝土的干缩性也随着变化较大^[1.22]。骨料的清洁程度(洗与不洗)能影响混凝土拌和水量,所

以也能影响混凝土干缩性,可影响到 20%^[1.16]。看来,对于骨料问题也需予以重视,必要时通过试验研究选定。

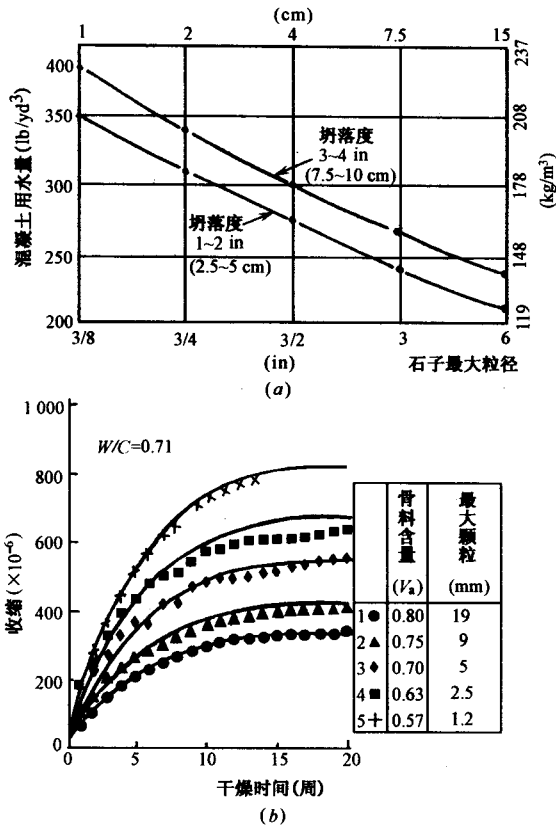


图 1.7

(a) 骨料粒径对混凝土拌和用水量^[1.22]; (b) 对混凝土收缩^[1.21]的影响。

表 1.1 混凝土干缩率受骨料岩种的影响^[1.22]

骨料岩种	比 重	吸水率 (%)	混凝土 1 年龄的干缩率 (%)
砂 岩	2.47	5.0	0.116
黏 板 岩	2.75	1.3	0.068
花 岗 岩	2.67	0.8	0.047
石 灰 岩	2.74	0.2	0.041
石 英 岩	2.66	0.3	0.032