

建筑物的裂缝控制

王铁梦 著



上海科学技术出版社

建筑物的裂缝控制

王铁梦 著

上海科学技术出版社

内 容 简 介

本书作者在大量工程实践和理论分析的基础上,对建筑物的裂缝控制作了系统的论述,并提出了许多新的论点。其中包括:裂缝的基本概念、裂缝的形成机理、材料的物理力学性质;建筑物的变形变化特点、约束概念;以及对构件、排架、框架、地基上长墙、箱形基础、大块设备基础、地下隧道、民用建筑等常见裂缝的分析。书中推导了裂缝间距及开展宽度的计算公式,系统地提出了对裂缝控制的有效设计和施工措施,并把变形变化及荷载变化引起的裂缝区别开来作了论述。

本书在总结处理工程裂缝实践经验的基础上,还提出了取消伸缩缝的理论与实践依据,以及“抗”与“放”的原则和在许多重点工程中已获得应用的经验。

本书可作为工业与民用建筑、特种结构、矿建、水利以及道路桥梁专业设计、施工、教学和科研人员的参考书。

责任编辑 孔繁祉

建 筑 物 的 裂 缝 控 制

王 铁 焚 著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

商务印书馆上海发行所发行 商务印书馆上海印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张27 插页4 字数643,000

1987年12月第1版 1987年12月第1次印刷

印数: 1—11,700

统一书号: 15118·549 定价: 9.90元

目 录

第一章 结构物裂缝的基本概念	1
1-1 裂缝的基本概念	2
1-2 混凝土的微观裂缝与宏观裂缝	3
1-3 裂缝产生的主要原因与广义荷载	5
1-4 裂缝的形式与质量控制	6
1-5 混凝土的裂缝与防水	7
1-6 结构物的抗裂和断裂韧性问题	8
第二章 混凝土的某些基本物理力学性质	12
2-1 混凝土的收缩	12
2-2 混凝土的收缩变形与徐变变形的实用算法	13
2-3 标准极限收缩与标准极限徐变度	17
2-4 任意时间收缩计算公式	17
2-5 外加剂对混凝土收缩的影响	18
2-6 混凝土和钢筋混凝土的极限拉伸	18
2-7 配筋对混凝土极限拉伸的影响	20
2-8 钢筋混凝土结构中钢筋对混凝土收缩应力的影响	20
2-9 混凝土硬化过程中的早期沉缩裂缝	22
2-10 龄期对混凝土的弹性模量、抗拉强度和极限拉伸的影响	23
第三章 混凝土的应力松弛与裂缝的若干特点	26
3-1 混凝土的徐变和应力松弛	27
3-2 应力异常现象	29
3-3 裂缝运动的稳定性	34
3-4 变形变化中的“声发射”	42
3-5 关于裂缝宽度的限制问题	43
3-6 裂缝的“模箍作用”	50
第四章 温度应力理论的若干问题	52
4-1 约束的概念	52
4-2 温度应力的基本概念	54
4-3 温度应力与变形的关系	55
4-4 “抗”与“放”的裂缝控制原则	57
4-5 弹性应力平衡基本方程	59
4-6 无应力温度场	61
4-7 变形应力解答的“等效荷载法”或“杜哈梅(Duhamel)相似”	63
4-8 简支梁式结构的温度应力	65

4-9	厚壁梁及墙式结构由于表面冷却及收缩引起的自约束应力	66
4-10	简支梁的变位与外约束应力	69
4-11	矩形水池池壁内外温差应力计算	71
4-12	热弹理论的应力函数法与位移函数法	72
4-13	烟囱、水池、容器、贮仓的温度应力及边缘效应	75
4-14	厚壁圆管的温度应力	77
4-15	厚壁圆环及薄壁圆环的温度应力	80
4-16	高层建筑及高耸构筑物的热变形	82
第五章	钢筋混凝土预制构件的裂缝	88
5-1	预应力大型屋面板	88
5-2	预应力钢筋混凝土梁	93
5-3	板式构件	97
5-4	梁式预制构件的变位与内力	98
5-5	高温车间的屋面板	99
5-6	屋面板受热后的状态	100
5-7	预制构件的裂缝处理	106
第六章	框架结构的温度应力与温度伸缩缝	108
6-1	单层工业厂房的温度伸缩缝间距	108
6-2	钢筋混凝土排架结构温度收缩应力分析方法	116
6-3	钢结构单层工业厂房温度应力计算	121
6-4	结构物的长度问题	132
6-5	框架结构温度应力近似计算法	139
6-6	多层框架	142
6-7	排架结构温度应力计算法(精确法)	144
6-8	以“抗”为主纵向排架的温度应力(精确法)	145
6-9	框架结构(包括排架)各跨温差不均匀时的变形计算法	147
6-10	多层钢筋混凝土框架的温度收缩应力	150
6-11	单柱伸缩缝的构造	157
6-12	工程裂缝调查统计表及分析	160
第七章	连续式现浇钢筋混凝土结构物的裂缝	174
7-1	概况	174
7-2	承受连续式约束的现浇钢筋混凝土裂缝控制	176
7-3	关于地基水平阻力系数 C_0	178
7-4	结构中的温度场	180
7-5	长墙及地基板的温度收缩应力	184
7-6	桩基对结构的附加约束	194
7-7	地基上大块式设备基础的自约束应力	195
7-8	不稳定热传导的“滞后现象”	197
7-9	宝钢转炉基础大体积混凝土的裂缝控制	199

7-10	686m 长无伸缩缝基础的裂缝	221
7-11	某大型设备基础裂缝的分析和处理	233
7-12	宝钢中央水处理吸水池混凝土池壁裂缝	236
7-13	某轧钢厂铁皮沉淀池侧墙的裂缝	239
7-14	某半地下油泵房的裂缝	240
7-15	钢筋混凝土地下隧道的裂缝	240
7-16	露天钢筋混凝土薄壁结构物的裂缝	251
7-17	“后浇缝”的设计与施工	256
7-18	混凝土面层的受压失稳破坏	260
7-19	裂缝控制措施	262
第八章	特殊构筑物的裂缝	269
8-1	梁板结构的裂缝	269
8-2	钢筋混凝土采矿立井环状裂缝的形成机理	273
8-3	沉井的裂缝问题	284
8-4	某厂引水泵房矩形沉井的裂缝控制	291
8-5	钢筋混凝土烟囱的裂缝	294
8-6	受热设备基础的裂缝与防水	298
8-7	控制自约束应力裂缝与提高炉龄	300
8-8	无缝地面的裂缝控制途径	307
8-9	由产生热源引起的钢筋混凝土大梁的裂缝	308
8-10	圆环基础的温度收缩应力与裂缝	312
第九章	冬季混凝土工程的裂缝控制	315
9-1	一般概念	315
9-2	较低温条件下混凝土施工的裂缝控制	316
9-3	低温(0~-45℃)对混凝土变形的影响	322
9-4	现浇钢筋混凝土露天墙式结构冬季施工的防冻与防裂经验	325
9-5	地基低温变形引起基础的破裂	330
第十章	民用建筑物的裂缝	335
10-1	民用建筑物的裂缝概况	335
10-2	混合结构温度收缩应力与裂缝分析	336
10-3	地基动态变形引起墙体的开裂	344
10-4	地基变形引起结构物的裂缝	346
10-5	地基差异沉降引起的墙体剪力裂缝	348
10-6	地基差异沉降引起的整体弯曲裂缝	351
10-7	地基处理的“抗”与“放”问题	359
10-8	变形速率和允许变形	361
第十一章	关于荷载变化引起结构物裂缝的探索	362
11-1	概述	362
11-2	钢筋混凝土中心受拉的应力状态	363

11-3	中心受拉构件的裂缝间距	365
11-4	中心受拉构件裂缝开展宽度	365
11-5	受弯结构的应力状态	366
11-6	弯矩作用下的裂缝间距	369
11-7	受弯构件的裂缝开展宽度	370
11-8	工字形截面钢筋混凝土受弯构件	371
11-9	桁架式屋盖结构的裂缝问题	377
11-10	上海某影剧院 24m 普通钢筋混凝土桥式屋架下弦裂缝问题	378
11-11	工程实例(某工程矩形梁的裂缝)	378
11-12	12m 工字形屋面梁的裂缝验算与试验对比	388
11-13	上海某影剧院工程楼座大梁裂缝	391
11-14	相似模型的试验结果及本理论的缺陷	395
第十二章	结构物裂缝的修补	397
12-1	地下构筑物的防渗堵漏	397
12-2	某热轧厂箱形基础化学灌浆实例	402
12-3	采用甲凝修补大体积混凝土裂缝的经验	407
12-4	氯化铁防水技术	411
12-5	地上结构物裂缝的一般修补方法	413
12-6	可延性堵漏构造	416
12-7	从材料的角度看控制裂缝的发展方向	417
	参考文献	419

第一章 结构物裂缝的基本概念

结构物裂缝是一个带普遍性的技术问题。虽然结构设计是建立在强度的极限承载力基础上的,但大多数工程的使用标准却是由裂缝控制的。

结构的破坏和倒塌也都是从裂缝的扩展开始的,如强烈地震后震区的建筑物上布满了各种各样的裂缝,荷载试验的钢筋混凝土梁上出现大量裂缝等等。所以人们对裂缝往往产生一种破坏前兆的恐惧感。的确,从近代固体强度理论的发展中可以看到,裂缝的扩展是结构物破坏的初始阶段;相对的某些裂缝,其承载力也可能受到一定威胁。同时,结构物裂缝可以引起渗漏,引起持久强度的降低,如保护层剥落、钢筋腐蚀、混凝土碳化等。所以,习惯的概念,甚至某些验收规范和某些工程现场都是不允许结构物上出现裂缝的,例如某引进工程的一位外国专家即要求混凝土不得出现裂缝。

但是,近代科学关于混凝土强度的亚微观研究以及大量工程实践所提供的经验都说明,结构物的裂缝是不可避免的,裂缝是一种人们可以接受的材料特征,如对建筑物抗裂要求过严,必将付出巨大的经济代价;科学的要求应是将其有害程度控制在允许范围内。这些关于裂缝的预测、预防和处理工作,统称之为“建筑物的裂缝控制”,这方面的科学研究工作具有重要的现实意义和技术经济意义。但迄今国际上尚无系统研究成果发表,一些有关的研究论文和技术报告都只是零散地发表在期刊杂志上,并且专题性问题讨论较多,综合性资料及论著则很少。

从国内外有关规范及一些重大工程的实际设计可看出,对待建筑结构的裂缝问题,客观上存在着两类学派:

第一类,设计规范规定得很灵活,没有验算裂缝的明确规定,设计方法留给设计人员自由处理。对伸缩缝的设置,没有严格规定,有许多工程不留伸缩缝,基本上采取“裂了就堵,堵不住就排(有防排水要求的工程)”的实际处理手法。一些有关的裂缝计算则只作为参考资料而不作为规定(包括荷载引起的裂缝)。

第二类,设计规范有明确规定,对于荷载裂缝有计算公式并有严格的允许宽度限制。对于变形引起的裂缝没有计算规定,只要按规范每隔一定距离留一条伸缩缝,就认为问题不复存在了,即留缝就不裂的设计原则。

采取第一类设计原则的如日本、英、美等国家;采取第二类设计原则的如苏联、联邦德国、东欧一些国家和我国。

大量的工程实践证明,留缝与否,并不是决定结构变形开裂与否的唯一条件,留缝不一定不裂,不留缝不一定裂,是否开裂与许多因素有关。

至于把工程建设的安全和防水要求寄托在补裂和堵漏上也是靠不住的,因为并不是任何裂缝都能顺利堵住。有些开裂经过长时期、多次反复堵漏也不成功,其影响生产和造成的经济损失往往超过土建投资若干倍。例如,某工程施工工期仅一年半,堵漏数次却花了三年的时间;有的设备基础长期漏水,影响加热温度,降低了产品质量。

有些裂缝虽然没有达到使建筑物倒塌的危险程度,但由于精神作用以及建筑装饰及美

观方面的原因,也常常影响到建筑物的使用。

我们认为:控制裂缝应该防患于未然,首先尽量预防有害裂缝,防不住的就堵,堵不住再排(有防排水要求的工程),重点在防。实践证明,只要设计与施工紧密配合,这是完全可以做到的。过去许多工程,凡是采取了控制措施的,一般都取得了良好效果。

本书是作者根据其工程结构实际裂缝处理和预防方面的点滴经验,结合运用一些有关的建筑力学基础理论,并同时参考不同专业的某些资料和论文,提出的有关结构物裂缝控制的若干方法和技术措施的专著,可供读者在设计、施工、科研及生产实践中参考。

1-1 裂缝的基本概念

裂缝是固体材料中的某种不连续现象,在学术上属于结构材料强度理论范畴。混凝土的强度理论大致可以分为四种:唯象理论、统计理论、构造理论、分子理论等。

唯象理论是建立在简单的基本试验基础上的,它归纳分析了大量试验数据,以提出基本假定,建立计算模型,并在均质、弹性、连续假定前提下推导出材料强度的各种计算公式,从而形成材料力学中的一些强度理论,如最大主应力理论、最大变形理论、最大剪应力理论、八面体强度理论等。后期又在弹性假定基础上引进了塑性理论。在设计中,它考虑了混凝土和钢筋混凝土的弹-塑性质,并发展了极限状态的强度理论,包括极限强度、极限变形和极限裂缝开展三种极限状态。这些理论直至今天,国际上仍在继续发展。外荷载作用下建筑材料强度问题,应用唯象理论研究得相当充分,解决了大量工程实际问题。

但是很早就发现过一些与唯象理论相悖的现象,波恩(Born)于1932年用微观力学方法计算物质的原子间作用力时,按连续假定求得材料的理论强度比实际强度大10至100余倍。又如格里菲斯(Griffith)于1921年所作的玻璃丝的强度试验,直径由1.02mm减少到0.0033mm,其强度却猛增,由175MPa增至3460MPa。后来证实,玻璃丝存在的“初始缺陷”,即匀质材料中的不连续现象——“微观裂缝”,在较粗的玻璃丝中,比高压成型的细纤维中为多,所以导致巨大差异。这是最早提出的固体材料中存在“微观裂缝”的概念,并为后来许多试验和工程实践所证实。又如在金属结构方面,第二次世界大战期间,美国近5000艘货船共发生1000多次破坏事故,其中238艘完全报废;1938~1942年,世界上共有40多座桥梁先后倒塌;1954年英国两架喷气式飞机在地中海上空失事;很多国家多次发生高压锅炉、石油及化工压力容器和管道的爆炸或损坏事故等。早在本世纪之初,同类性质的事故已时有发生,但当时人们并不理解,因为,破坏时的荷载远小于设计荷载,按照常用的固体力学的强度理论和设计方法去推理,是不应该出现这种破坏现象的。后来的研究把这种屈服极限以内的破坏,称为“低应力脆性断裂”,认为是由于材料内部的初始缺陷微裂扩展引起的。因之就产生了断裂力学,当时主要是针对金属结构的。近年来断裂力学的某些原理正在向混凝土领域渗透和发展。但混凝土结构裂缝并不是“低应力脆性断裂”问题,特别是钢筋混凝土更不是“低应力脆性断裂”问题。由于混凝土和钢筋混凝土的复杂组成和物理性质的变化,无规则的应力集中可引起大量微裂,但是裂缝的扩展又受到各种孔隙、骨料及钢筋的阻抗,裂缝的断裂分析比均质材料复杂得多,因此,断裂力学在钢筋混凝土及砖混结构中远未达到实用阶段,还有待于深入研究。

唯象理论忽略了混凝土内部的构造组成,如混凝土内部固相、气相、液相的相互作用,导

热过程、水分转移、蒸发过程以及各种孔隙、缺陷、内部微裂等不连续现象, 计算结果与实际相差较大。后来又发展了统计强度理论, 虽仍把材料当作连续的固体, 但视其内部存在的缺陷及微裂、裂纹等的分布服从统计规律, 从而使强度理论计算结果能接近于实际。

构造理论进一步考虑材料的内部构造, 考虑到混凝土是由不同材料组成的非均质体, 内部存在着固、液、气体, 当温度和湿度变化, 而且在外荷载作用下, 混凝土内部产生了复杂的物理现象, 引起了内部“初始应力”、“初始微裂”、内部扩散及质量转移等随时间变化的现象, 从而具体补充了唯象理论所不能解释的现象, 如相同组分材料的不同施工及养护工艺条件下抗裂强度可差数倍之多, 以及内部微裂对宏观强度之显著影响等。如前所述, 可概括地说, 唯象理论以及近代发展的极限强度理论的最大缺点是忽略了“时间”参数, 只知道最终状态而不了解中间全过程。

最后, 关于材料的分子强度理论, 它是应用物理力学方法研究分子间的作用力, 求出材料的宏观强度, 从而可以按人的意志设计超高强度建筑材料的理论。分子强度理论尚处于探索阶段, 远不到工程应用阶段。

本书仍然以唯象理论为基础, 考虑材料的某些构造、结构形式、施工特点及时间关系, 提出结构物裂缝的分析方法。

1-2 混凝土的微观裂缝与宏观裂缝

多年来, 特别是六十年代, 因有关混凝土的现代试验研究设备的出现(如各种实体显微镜、X光照像设备、超声仪器、渗透观测仪等), 完全证实了在尚未受荷的混凝土和钢筋混凝土结构中存在肉眼不可见的微观裂缝(简称“微裂”)。据此, 有些学者考虑了混凝土的实际结构, 建立了构造模型, 如骨料和水泥石组成的“层构模型”、“壳-核模型”和“组合盘体模型”等, 并通过弹性理论计算, 从理论上证明变形约束应力可以引起微裂。图 1-1 所示为混凝土的微裂及三种计算模型。微裂主要有三种:

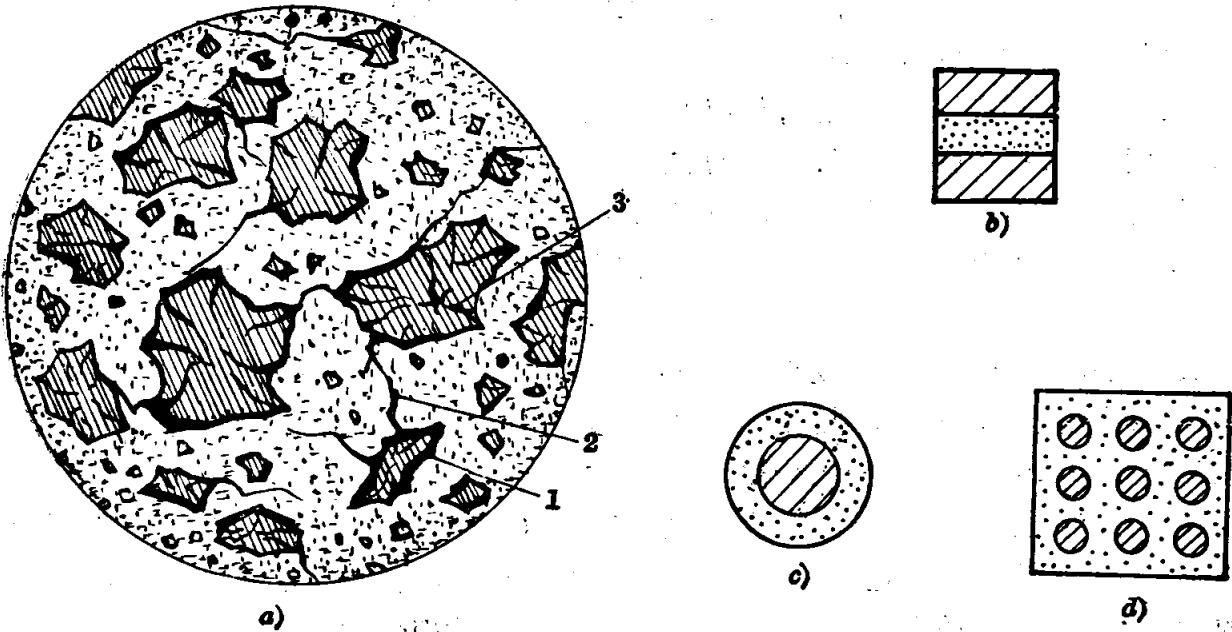


图 1-1 微裂计算模型示意图

a) 微裂; 1—粘着裂缝; 2—水泥石裂缝; 3—骨料裂缝
b) 层构模型; c) 壳-核模型; d) 组合盘体模型

- (1) 粘着裂缝是指骨料与水泥石的粘接面上的裂缝, 主要沿骨料周围出现;
- (2) 水泥石裂缝是指水泥浆中的裂缝, 出现在骨料与骨料之间;
- (3) 骨料裂缝是指骨料本身的裂缝。

在这三种裂缝中, 前两种较多, 骨料裂缝较少。混凝土的微裂主要指粘着裂缝和水泥石裂缝。混凝土中微裂的存在, 对于混凝土的基本物理力学性质: 如弹塑性、徐变、各种强度、变形、泊松比、结构刚度、化学反应等有重要影响。

荷载试验表明, 当混凝土受压, 荷载在 30% 极限强度以下时, 微裂几乎不变动; 到 30~70% 荷载时, 微裂开始扩展并增加; 到 70~90% 荷载时, 微裂显著地扩展并迅速增多, 且微裂之间相互串连起来, 直至完全破坏。

由于微裂的分布是不规则的, 沿截面是非贯穿的, 故具有微裂的混凝土是可以承受拉力的。但是, 在结构的某些受拉力较大的薄弱环节, 微裂在拉力作用下很容易扩展并串连全截面, 从而较早地导致断裂。另外, 混凝土材料的非均匀性对混凝土抗拉甚为敏感, 故抗拉强度的离散程度远较抗压为大。实际工程结构的裂缝, 绝大多数由抗拉强度和抗拉变形(极限拉伸)不足而引起。但以往的科研和技术工作, 在这方面大都只是围绕抗压强度方面进行研究(人们关心抗压标号), 在抗拉方面研究工作却很少, 这使得在目前条件下很难找到准确的计算理论。

在混凝土抗剪, 微裂扩展串连之前, 混凝土截面有良好的抗剪能力, 即使微裂扩展并串连横贯全截面, 仍可靠摩擦力及交错面的咬合而维持工作。但进一步扩展将会失去抗剪能力, 这时欲维持其继续工作必须配置钢筋。结构物纯剪破坏是很少的, 而剪拉破坏(主拉应力)则是常见的。

微裂的原因可按混凝土的构造理论加以解释, 即视混凝土为骨料、水泥石、气体、水分等所组成的非均质材料, 在温度、湿度变化条件下, 混凝土逐步硬化, 同时产生体积变形。这种变形是不均匀的: 水泥石收缩较大, 骨料收缩很小; 水泥石的热膨胀系数大, 骨料较小。它们之间的变形不是自由的, 产生相互约束应力。在构造理论中一种极为简单的计算模型, 是假定圆形骨料不变形且均匀地分布于均质弹性水泥石中, 当水泥石产生收缩时引起内应力, 这种应力可引起粘着微裂和水泥石变裂。

混凝土微裂的存在、扩展、增加, 使应力-应变曲线向水平线倾斜, 应力滞后于应变, 泊松比增加, 刚度下降, 持久强度降低, 徐变增加。

混凝土微裂是肉眼不可见的。肉眼可见裂缝范围一般以 0.05 mm 为界(实际最佳视力可见 0.02 mm)。大于等于 0.05 mm 的裂缝称为“宏观裂缝”。宏观裂缝是微观裂缝扩展的结果。

一般工业及民用建筑中, 宽度小于 0.05 mm 的裂缝对使用(防水、防腐、承重)都无危险性, 故假定具有小于 0.05 mm 裂缝的结构为无裂缝结构, 所谓不允许裂缝设计, 也只能是相对的无大于 0.05 mm 初始裂缝的结构,

可以认为, 混凝土有裂缝是绝对的, 无裂缝是相对的, 所谓结构的抗裂质量只是把裂缝控制在一定的范围内而已。近代混凝土亚微观的研究认为: 微裂的扩展程度就是材料破损程度的标志, 同时, 微裂的存在也是材料本身固有的一种物理性质。

随着混凝土预制工艺的不断改进(如高温高压成型、真空脱水、新型压轧板工艺、掺入各种外加剂等), 会使微裂逐步减少, 从而获得高强和超高强的构件。

热拌混凝土的新工艺可使混凝土在硬化前的塑性状态时沿全截面受热,促进水化。混凝土各组分产生不均匀热膨胀几乎处于自由状态,从而减少了内部初始应力,具有减少微裂的优点,这是发展热拌的最早理论基础。蒸养的混凝土承受初凝后的剧烈温差,硬化过程中的不均匀热膨胀受到显著的约束,所以含有较多的微裂。处于长期潮湿状态下养护的混凝土初始内应力较小,因为收缩差别较轻,收缩速率较低,故微裂亦较轻。

1-3 裂缝产生的主要原因与广义荷载

结构物在实际使用过程中承受两大类荷载,有各种外荷载和变形荷载(温度、收缩、不均匀沉陷),统称为广义荷载。其中静荷载、动荷载和其他荷载,称为第一类荷载;而变形荷载,称为第二类荷载。裂缝的主要成因不外乎以下三种:

(1) 由外荷载(如静、动荷载)的直接应力,即按常规计算的主要应力引起的裂缝。

(2) 由外荷载作用,结构次应力引起的裂缝。因为许多结构物的实际工作状态同常规计算模型有出入,例如壳体计算常用薄膜理论假定,相对壳面误差不大,相对边缘区域误差较大,于是该区域常因弯矩和切力引起裂缝;而弯矩和切力相对薄膜理论的直接应力来说,称之为次应力。又如屋架按铰接节点计算,但实际混凝土屋架节点却有显著的弯矩和切力,它们时常引起节点裂缝,此处的弯矩和切力称为次应力。还有些常规不计算的外荷载应力,但实际却引起结构裂缝。

(3) 由变形变化引起的裂缝(第二类荷载)。结构由温度、收缩和膨胀、不均匀沉降等因素而引起的裂缝。应特别注意这种裂缝起因是结构首先要求变形,当变形得不到满足才引起应力,而且应力尚与结构的刚度大小有关,只有当应力超过一定数值才引起裂缝;裂缝出现后变形得到满足或部分满足,应力就发生松弛。某些结构,虽然材料强度不高,但有良好的韧性,也可适应变形要求,抗裂性能较高。这是区别于荷载裂缝的主要特点。

其次,按普通外荷载的计算原则,从外荷载的作用、结构内力的形成,直至裂缝的出现与扩展,似乎都是在同一时间瞬时发生并一次完成的,是个“一次过程”。但是变形荷载的作用,从环境的变化,变形的产生,到约束应力的形成,裂缝的出现与扩展等都不是在同一时间瞬时完成的,它有一个“时间过程”,称之为“传递过程”,是一个多次产生和发展的过程,这是区别于外荷载裂缝的第二个特点。

建筑物的裂缝也可能由于特殊的变形变化引起,如地震引起的裂缝可看作地基的“动态变形变化”;滑坡、地基水平位移引起建筑物裂缝也是由于地基变形引起的,可能是缓慢地徐变变形,也可能是突然失稳变形。

次应力引起的裂缝也是由荷载引起,只是按常规一般不计算,但应该看到,随着设计技术的不断发展,所谓的“常规”也在不断改进,计算逐渐做到全面合理,故可归到第一类,即荷载引起的裂缝中去。这样,裂缝就分为两大类:荷载引起的裂缝及变形变化引起的裂缝。

一个令人感兴趣的问题是,引起裂缝的上述两大类原因中,哪一种是主要的?

根据笔者的经验和国内外的调查资料,工程实践中结构物的裂缝原因,属于由变形变化(温度、收缩、不均匀沉陷)引起的约占80%;属于由荷载引起的约占20%。前述80%的裂缝中也包括变形变化与荷载共同作用,但以变形变化为主所引起的裂缝;同时,在20%的裂缝中也包括变形变化与荷载共同作用,但以荷载为主所引起的裂缝。

1-4 裂缝的形式与质量控制

裂缝按其形状分为表面的、贯穿的、纵向的、横向的、上宽下窄、下宽上窄、枣核形、对角线式、斜向的、外宽内窄的和纵深的(深度达 $\frac{1}{2}$ 厚度)等等。裂缝形状与结构受力状态有直接关系。一般裂缝的方向同主拉应力方向垂直,但在砌块结构中和结构物的变截面处,剪应力可能同裂缝平行(纯剪裂缝)。

同一条裂缝上的裂缝宽度是不均匀的,控制裂缝宽度是指较宽区段的平均宽度。所谓较宽区段,指该裂缝长度的 10~15% 范围。这样确定的平均裂缝宽度为该裂缝的最大宽度,以 $\delta_{\max}$ 表示;同样可在裂缝长度的 10~15% 较窄区段内,确定平均宽度为最小的裂缝宽度,以 $\delta_{\min}$ 表示;在最大及最小之间有平均裂缝宽度,以 δ_f 表示(为最大与最小之平均值)。

在某一构件上的同一受力区存在有最大裂缝宽度(各条裂缝最大宽度的平均值),最小裂缝宽度(各条裂缝最小宽度的平均值)及最大与最小平均值的平均裂缝宽度。

同样方法可确定最大、最小及平均裂缝间距,以 $[L_{\max}]$ 、 $[L_{\min}]$ 及 $[L]$ 表示。

为了描绘某一工程,如一面墙、一段公路、一块地坪、一块楼板等结构物的裂缝程度,将裂缝条数除以结构物的长度(长条形结构物)或者除以结构物的面积(大面积结构),称为“裂缝密度”,也叫“裂缝率”, $e=N/M$ 。 e 为裂缝密度或裂缝率; N 为裂缝条数; M 为长度或面积。有时尚须表明具有不同裂缝长度、裂缝宽度及深度的裂缝率。

裂缝分为愈合、闭合、运动、稳定的及不稳定的等。地下防水工程或其他防水结构,在水压头不高(水位在 10m 以下)的情况下,产生 0.1~0.2mm 的裂缝时,开始有些渗漏,水通过裂缝同水泥结合,形成氢氧化钙,浓度不断增加,生成胶凝物质胶合了裂缝。此外,氢氧化钙与空气中水分带入的二氧化碳结合,发生碳化,形成白色碳酸钙结晶,使原裂缝被封闭,裂缝仍然存在,但渗漏停止,这种现象称为裂缝的自愈现象。这种裂缝不影响持久应用,是稳定的。

结构的初始裂缝,在后期荷载作用时,有可能在压应力作用下闭合,裂缝仍然存在,但是稳定的。

结构上的任何裂缝及变形缝,在周期性温差和周期性反复荷载作用下产生周期性的扩展和闭合,称为裂缝的运动,但这是稳定的运动。许多防水工程冬季渗漏,夏季停止就是这种道理。有些裂缝产生不稳定性的扩展,视其扩展部位,考虑加固措施。

根据国内外设计规范及有关试验资料,混凝土最大裂缝宽度的控制标准大致如下。

- (1) 无侵蚀介质,无防渗要求, 0.3mm;
- (2) 轻微侵蚀,无防渗要求, 0.2mm;
- (3) 严重侵蚀,有防渗要求, 0.1mm。

上述标准是设计上和检验上的控制范围,在工程实践中,有一些结构物带有数毫米宽的裂缝工作,但多年并无破坏危险。如冶金建筑中的各种受热结构、各种大型特种结构及设备基础等,一般均存在大量裂缝,欲完全控制裂缝不出现是不可能的,主要根据裂缝的部位,所处环境,配筋情况及结构形式,进行具体分析作出判断。笔者根据实际结构物的裂缝处理经

验,认为规范中限制的裂缝宽度应该放宽(具体分析及建议见本书 3-5 节)。

一般情况下,在由变形变化引起裂缝的工程中,超静定结构占多数,裂得较严重,如刚架、特构、组合结构等。但是,这类结构的承载能力方面具有较大的安全度,有良好的韧性,能适应较大的变形而不致出现倒塌性破坏,所以在处理质量问题时可根据裂缝出现后,应力衰减等的具体情况放宽控制范围。在基本建设工程中控制裂缝宽度的质量标准应加以改进,在目前阶段一般可采取既保证质量又保证效率的控制办法,按工程种类分为四级评定标准:

(1) 优良

结构物施工后,尚未承受使用荷载,其施工荷载(包括自重荷载)不超过抗裂荷载时,没有出现肉眼可见裂缝。当施工荷载(包括自重荷载)超过抗裂荷载时,允许出现小于规范规定之裂缝,但不影响使用要求。结构投入使用后,应满足设计使用荷载条件下裂缝宽度限制。

(2) 合格

结构物施工后,其施工荷载(包括自重荷载)不超过抗裂荷载时,出现了肉眼可见裂缝,但不影响使用要求。当施工荷载(包括自重荷载)超过抗裂荷载时,出现小于或等于规范规定之裂缝。结构投入使用后,应满足设计使用荷载条件下裂缝宽度限制。

(3) 较差

结构物出现了超过规范允许的裂缝,但据裂缝性质、部位、结构特点等分析,裂缝对承载力并无严重影响,从持久强度或美观等方面使用要求,须适当处理或略加封闭就可保证工程正常使用。

(4) 不合格

结构物的裂缝远超过规范规定(参考本书建议的控制宽度),同时经分析,已严重影响到结构的承载力或有失稳及脆性破坏可能性,必须采取相应加固措施后才能使用者。结构物报废或推倒重建者占极少数,从技术上,一般不宜轻易作出报废的结论。

除了上述一般标准,结构物出现了非允许裂缝后,还应多作具体分析。例如,大型设备基础保护层较厚,基础内力很低,表面虽出现很宽裂缝(甚至是贯穿性的),但经分析属变形变化引起的,则一般不影响承载力,只须灌缝(贯穿者)、封闭(表面性的)即可正常使用。如武钢一米七热轧设备基础底板曾出现 7~8mm 宽的裂缝,立墙上出现 2~3mm 的裂缝,经采用上述办法处理后,保证了基础的正常使用,无须作承载力方面加固。

1-5 混凝土的裂缝与防水

既然变形变化引起的裂缝一般不影响承载力,那么它的防水防渗问题就值得研究了。根据调查资料,由裂缝引起的各种不利后果中,渗漏水占 60%。从物理概念上说,水分子的直径约 0.3 nm (0.3×10^{-6} mm),可穿过任何肉眼可见的裂缝,所以从理论上讲防水结构物是不允许裂缝的,但实际情况不是这样。

据试验资料,一个具有宽度为 0.12 mm 的裂缝,开始每小时漏水量 500 mL,一年后每小时漏水只有 4 mL。另一个试验,裂缝宽 0.25 mm,开始漏水量每小时 10000 mL,一年后每小时只有 10 mL。说明裂缝除有自愈现象外,还有自封现象,即 0.1~0.2 mm 的裂缝虽然不能完全胶合,但可逐渐自封。

据试验，当裂缝宽度超过自愈范围以后，裂缝漏水量和裂缝宽度成三次方比例（如图 1-2）^[91]。

石川（承压水）公式：

$$Q=\frac{La^3\rho H}{12\sigma\eta d}$$

(1-1)

松下（非承压水）公式：

$$Q=\frac{C\rho ga^3}{12\eta}\cdot L$$

(1-2)

式中： Q ——裂缝漏水量；
 η ——液体粘度；
 g ——重力加速度；
 a ——裂缝宽度；
 C ——经验常数；
 ρ ——液体密度；
 L ——裂缝长度；
 H ——水压头；
 σ ——经验系数；
 d ——壁厚。

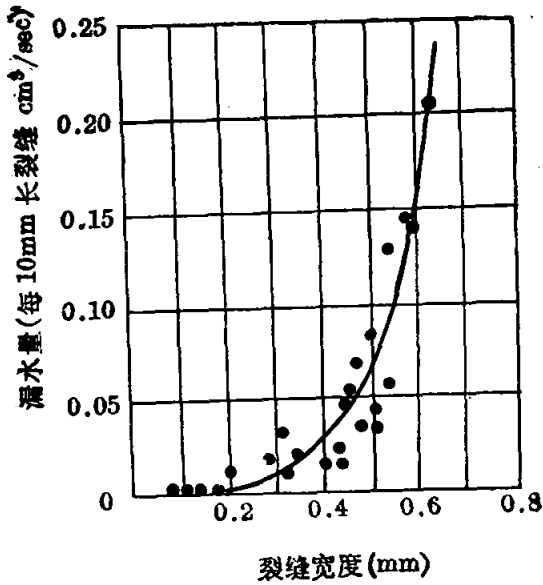


图 1-2 砂浆试块裂缝宽度与漏水量关系

缝分散为 m 条，则 m 条裂缝的总漏水量为：

$$Q=\frac{C\rho g(a/m)^3}{12\eta}\cdot L\cdot m=\frac{C\rho ga^3}{12\eta m^2}L$$

(1-3)

由上式可得出结论：漏水量与 m^2 成反比例。这是很重要的结论，据此可通过合理的配筋借以达到“分散裂缝”的目的，可大大地减少渗漏。事实上，应用上述公式计算渗漏量，一般都比实际和试验的渗漏量高。

分散裂缝的防水效果是肯定的。虽然有人提出这样的看法，认为在双向板中，由于某一方向裂缝的分散从而在垂直方向有可能增加沿钢筋纵向裂缝的长度，亦即增加了钢筋锈蚀的程度；但是，这种现象在工程实践中尚未发现，因为裂缝细微，不致引起锈蚀。

鉴于目前国内外在防水工程中大量使用泵送大流态混凝土，其含砂率由普通混凝土的 35~36% 增加到 42~45%，水灰比由 0.5 增加到 0.7，水泥用量也有所增加，多采用所谓的“富配比”；此外，由于规模不断扩大，结构物为适应新的现代化生产工艺和生活要求而不断大型化和复杂化，以及高速、高温、水下、防气、防射线等的特殊要求，城市交通量大幅度增加等原因，都使结构物的裂缝概率大为增加，控制裂缝的难度也比以往增大，所以，控制裂缝的技术研究与开发工作就显得更加必要了。

1-6 结构物的抗裂和断裂韧性问题

关于材料“韧性”的研究是五十年代金属物理研究方面的一项重要进步，是断裂力学中的一项基本课题。早在 1920 年格里菲斯就指出裂缝的传播是由于材料中弹性贮能的下降，并建立了材料断裂的格里菲斯条件。从 1948 年欧文(Irwin)到 1955 年奥温(Orwan)修正

了材料断裂的格里菲斯条件,断裂力学获得了迅速的发展。在较为均质的金属材料领域中,断裂力学获得有效的应用,那里“断裂韧性”有明确的定义,并且以若干定量的物理力学参数加以表达。

所谓“韧性”是指使材料达到破坏时单位体积所需要的功,也就是单位体积破坏必需的能量。亦有把韧性看作材料的“粘性强度”的,其含意是材料不仅须有足够的强度,而且还须有良好的变形能力,变形包括弹性和粘性(塑性和徐变)。能量概念和粘性强度概念都能用来表示材料的韧性,并可以用应力-应变关系予以定量化。所以,把材料应力-应变曲线(从加荷直至完全破坏的全过程)所包围的面积叫作材料的韧性,该面积表示材料到达破坏所需的功。如图 1-3 所示,某材料的应力-应变曲线包围的面积 Ω 即为材料韧性,公式表示如下:

$$\Omega = \int_0^{\epsilon_u} \sigma d\epsilon \left(\text{MPa} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right) \quad (1-4)$$

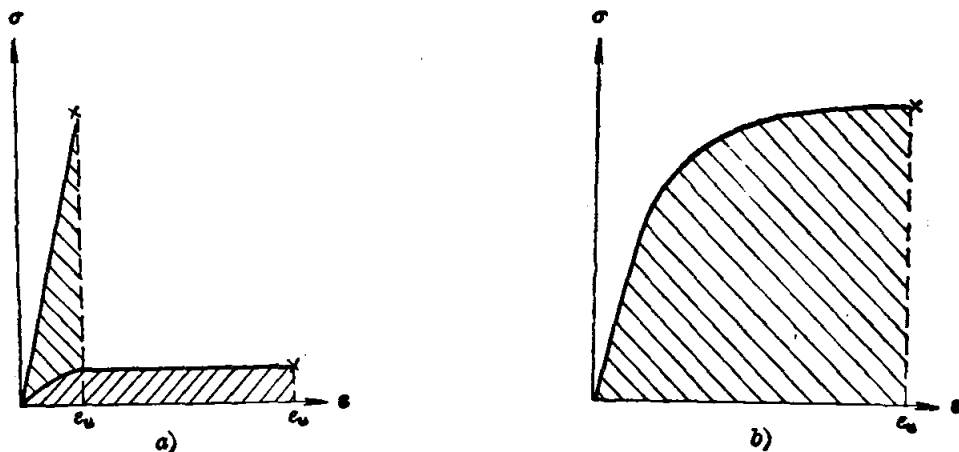


图 1-3 韧性示意图

a) 韧性不好; b) 韧性良好

由图可见,只有很高的强度,但变形很小的材料,韧性不好;或虽有很大的粘性变形但强度太低韧性也不好;只有二者兼备的材料韧性最好。

但是,在钢筋混凝土结构物中,如何表示材料的韧性参数,如何测量,如何定量计算等尚没有理想的结论。是否能直接地把金属断裂的定义和计算公式引用到混凝土及钢筋混凝土建筑结构中来,还值得研究。

断裂力学应用中,相对较均质的金属材料承受拉力作用的断裂韧性研究,在工程实用方面已获得进展。但混凝土是多相复杂组合体,它的抗拉强度只有抗压强度的十分之一,是不能单独作为承拉结构和受弯曲结构使用的。所以,对于钢筋混凝土是不存在由于混凝土内部裂缝传播发展导致低应力脆断的问题的。这是由钢筋混凝土本身的组合构造、弹塑性质及徐变性质对裂缝扩展的复杂影响所决定的。

因此,把混凝土自身破坏韧性与金属材料等同起来直接用于建筑结构的设计中是困难的。

即使是受压,由于混凝土内部大量无规则微裂的存在、不断扩展而且相互作用,最终导致的破坏是某种“系统破坏”,与金属断裂所研究的单一裂纹扩展的破坏有着很大的不同,所以直接地和定量地应用于结构物的受压区,也会遇到同样的困难。

但是,对断裂力学中材料韧性的基本概念,结合混凝土及钢筋混凝土结构的受力特点加

以引用却是十分必要的。抗震结构的研究为我们提供了良好的范例,他们用结构的延性比(韧性率)表示抗震结构物的韧性。所谓延性比(韧性率)是结构受力破坏过程中的极限变形与屈服变形的比值。变形可以是轴向变形、弯曲转角或挠度等,这样就把承重钢筋混凝土结构的抗震受力特性概括进去了。因为抗震结构设计原则中要求结构在地震力作用下,尽管瞬时内力可能超过结构物的屈服点,但距离极限承载力还有较长一段的变形过程,在此阶段内结构物通过较大的变形吸收了地震能量,从而保证结构物不出现倒塌性破坏,即所谓“裂而不倒”的状态。

这种反映结构韧性的方法是可取的。在变形变化引起结构物开裂研究中,与抗震结构物的研究有许多共同之处,如地基水平变形、建筑承受水平力作用、作用力与结构刚度有关等等。特别是控制变形开裂的关键性要求是结构有良好适应变形的能力,所以笔者认为延性比或韧性率的定义可以移植到结构物裂缝控制中来。按上述定义,

$$G = \text{结构的韧性率} = \frac{\text{极限破坏时变形}}{\text{屈服时的变形}} \quad (1-5)$$

例如:

$$G = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (\text{受弯结构}) \quad (1-6)$$

$$G = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} \quad (\text{轴向拉压结构}) \quad (1-7)$$

式中: ϕ_u ——极限转角;
 ϕ_y ——屈服转角;
 ε_u ——极限拉伸;
 ε_y ——屈服拉伸。

这种定义对外荷载及变形作用下的结构同样适用。结构具备足够的韧性率可以避免偶然超载引起的脆性破坏,可以在破坏前给人们以预兆并能适应约束应力状态对变形的要求。

我们在第二章里还将谈到材料的极限拉伸,这也是材料控制裂缝能力方面的重要评定指标,是材料韧性的一种参数。但是上述这些表达都不够完善,因为钢筋混凝土的破坏韧性尚不能完全反映结构物的抗裂及扩展韧性。结构物在变形变化作用下以及在荷载作用下的承拉或受拉区应该有三个阶段的变形特征:

- (1) 出现裂缝时的变形;
- (2) 钢筋到达屈服时的变形;
- (3) 钢筋到达极限强度时的变形。

因此,除了(3)、(2)表达韧性外,还有(2)、(1)及(3)、(1)的抗裂韧性特征。进一步考虑在一个结构构件上受压区、剪力区、混凝土及钢筋等的共同工作性能,问题就更加复杂了。关于这方面还有待今后大量的研究。

相对于大量变形变化引起的裂缝领域,如何评定(估计性评定)一项结构物的抗裂能力和裂缝扩展程度是一个有必要研究的问题。对此,建议采用极限拉伸与约束拉伸之比作为“结构物抗裂度因子” K_0 ,借以定量评比抗裂能力:

$$K_0 = \frac{\varepsilon_p}{(\alpha T + \varepsilon_y + \varepsilon_s) R} \quad (1-8)$$

式中: ε_p ——混凝土或钢筋混凝土主要部位(裂缝控制部位)的极限拉伸(mm/mm);