

钢筋混凝土结构

裂缝与变形的验算

[德]F·莱昂哈特著

胡贤章 程积高译

水利电力出版社

钢筋混凝土结构 裂缝与变形的验算

[德]F·莱昂哈特著
胡贤章 程积高译

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统而全面地论述了钢筋混凝土承重结构(由于弯曲、剪切和扭转引起的弹性范围和塑性范围)的变形计算,并提出了钢筋混凝土裂缝宽度的新的计算原理。

本书可供钢筋混凝土结构设计、科研和施工的工程技术人员及高等院校有关师生参考。

2R05/30

F. Leonhardt

Nachweis der Gebrauchsfähigkeit
Rissebeschränkung, Formänderungen,
Momentenumlagerung und
Bruchlinientheorie im Stahlbetonbau
Springer-Verlag 1978

钢筋混凝土结构裂缝与变形的验算

[德]F·莱昂哈特著

胡贤章 程积高译

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 7.625印张 199千字

1983年4月第一版 1983年4月北京第一次印刷

印数 00001—16610册 定价 0.95元

书号 15143·5067

译 者 的 话

本书作者系德意志联邦共和国斯图加特大学大体积结构研究所的荣誉教授、工程博士，长期从事钢筋混凝土结构的教学和科研，著有《钢筋混凝土结构》共六册。本书是其中的第四册，专门论述钢筋混凝土结构的裂缝和变形，内容丰富，理论新颖，颇有参考价值。现将全文译出，供从事钢筋混凝土研究、设计和施工的工程技术人员参考。

本书在译校过程中曾得到戴立本总工程师、何蓬江、涂传林、陈鸿年工程师等的帮助和支持，在此一并致谢。

由于译者水平有限，书中难免有错误和不妥，恳请读者指正。

胡贤章 程积高

前 言

根据最近十年中钢筋混凝土建筑的经验，我们有必要对承重结构在使用状态下（静荷载和活荷载作用下）的性能进行更多的研究。在工程师们充分利用建材和设计越来越大胆的情况下，单是按规定的安全系数来计算结构的承载能力，是不够的。还必须保证在使用状态下的完好性。为此，计算时假定在混凝土中存在裂缝，是很重要的。因为对外行来讲，每一条可见的裂缝都给人以一种正在开始破坏或危险的感觉。因此，钢筋必须这样计算和配置，即把裂缝宽度限制到看不见的程度。挠度往往也会导致结构破坏，或者对结构的使用能力产生有害的影响。为此，本书的主旨，是提供可用性验算的科学依据。

虽然已有许多研究论文论及混凝土裂缝宽度的计算原理，但尚未达到令人满意的程度。

本书阐述的有关限制裂缝的一些新见解，是作者在过去讲学中未尝披露的。因此，作者认为，这些新见解有助于推动这方面研究工作，作者亦希望他的新见解不久将为进一步的研究工作所验证。在未被验证之前，从事实际工作的工程师在需要时完全可据本书进行计算，而且算出的结果无论如何比用以前的方法算出的更适用。限制裂缝的配筋计算，将来无疑应当采用简便的曲线图表，本书提出了这种图表的模式。

均质的各向同性的建筑材料，是按众所周知的变形规律变形的，人们早就掌握了用这种材料作成的承重结构的变形计算。对于复合材料的钢筋混凝土，我们亦能足够精确地算出相当于状态Ⅰ的变形（即混凝土出现裂缝之前的变形）。计算状态Ⅱ的变形（混凝土受拉区出现裂缝），迄今常用的方法，是算出横截面值，而不考虑受拉力作用的混凝土面积；受拉区混凝土的作用，则用一个经验系数来考虑。在实践中，很快就发现用这种方法算

出的状态II的变形（例如挠度）大都显得太大，因而常常造成托梁和楼板的尺寸过大而受到批评。人们通过试验早已知道，裂缝是在很大的荷载范围内形成的，而在静荷载或活荷载作用下，仅出现部分裂缝，因此，此时的变形要比完全发展成状态II的变形小得多，就是对这种裂缝形成范围也有必要采用新的方法来计算钢筋混凝土承重结构在使用范围内产生的实际变形。本书亦列有这方面的内容，作者同样也希望得到进一步的验证。

本书详细论述了钢筋混凝土承重结构由于弯曲、剪切和扭转引起的状态I和“纯”状态II的变形计算，并引用B·图尔曼和P·吕辛格方法来计算弯曲、剪切和扭转同时出现而引起的变形。此外，还对裂缝形成的范围提出了适用的规定。

本书不仅论述了弹性范围（状态I和状态II）的变形，而且也论述了塑性范围（状态III）的变形；此外，还描述了由于不同的刚度引起的或设计造成的力矩重分配与变形的关系。同时，特别强调即使在使用荷载下对弹性范围（状态II）内进行力矩重分配的验算，亦往往会带来结构上和经济上的好处。

最后一章是E·默尼希教授撰写的破裂线理论，了解这种理论也是必要的，因为，我们有些邻国乐于用这种理论。

本书的许多章节，是特别为钢筋混凝土结构专家着想的，主要目的是使他们熟练掌握钢筋混凝土结构可用性的精确计算和设计。

综上所述，本书对钢筋混凝土结构的发展定将起到积极的推动作用。

F·莱昂哈特

1976年8月于斯图加特

再 版 序 言

1977年2月对本书作若干勘误后翻印了一次，翻印本也很快销售一空。此外，为了适应国际规程的需要，将第二章（裂缝限制和裂缝宽度的限制）征求了欧洲国际混凝土委员会的意见，并重新审编了第二章。由于这一原因，需要有第二版来把第二章的修改考虑进去。

F·莱昂哈特

1977年12月于斯图加特

符 号

下面为DIN1080规定的钢筋混凝土结构中所用的符号；此外，还列出了一些补充符号。

脚标		载	
表示原因：		o	$t = 0$ 时的数值， 初值
K	徐变	上标：	
S	收缩		
t	时间、寿命		
T	温度	I	状态 I（未开裂状态）
表示类型：		II	状态 II（已开裂状态）
B	弯曲	II ₀	纯状态 II
D	压力	III	状态 III（塑性状态）
S	剪力、冲切		
T	扭力		
Z	拉力		
Z_w	约束力		
表示方向、地点：		主要符号	
b	混凝土	横截面特征值：	
e	钢筋	b	矩形截面的宽度
o	上部	b_0	T 形梁的梁腹宽度
u	下部	b_m	T 形梁的有效宽度
L	纵向配筋	d	直径、板的厚度、 梁的高、墙的厚度
$B\bar{u}$	钢箍	d_0	T 形梁的总高度
s	螺旋钢筋或剪力配筋	d_w	F_{bw} 有效受拉区的高度
其它：		d_z	弯曲时受拉区的高度
i	表示换算值	e	钢筋间距； $e = M/N$
n	净的		N = 纵向力的偏
U	极限荷载或破坏荷		

	心距		$2(b_m + d_m) =$ 扭转时核心面积的周长
$e_{\bar{B}\bar{u}}$	垂直钢筋的间距	$\bar{u}$	混凝土保护层
F	横截面积	W	截面模量
F_b	混凝土横截面积 (毛)	μ	配筋率 $= F_e / b \cdot h$, 用%表示: $\mu[\%] = \frac{100F_e}{b \cdot h}$
F_{bw}	配筋的有效受拉区面积	μ_0	$= F_e / b \cdot d$ 指全部混凝土断面的配筋率
F_{bz}	混凝土受拉区面积	μ_z	$= F_e / F_{bz}$ 混凝土受拉区的配筋率
F_n	混凝土横截面积 (净)	μ_{zw}	$= F_e / F_{bw}$ 配筋的有效受拉区的配筋率
F_m	$= b_m \cdot d_m =$ 扭转时的核心面积	μ_{zz}	$= (2600 / \sigma_{ew}) \times \sqrt{\mu_z[\%]} =$ 无量纲的配筋率
F_e	受拉钢筋的横截面积		
$F_{e,s}$	剪切配筋的横截面积		
$F_{e,z}$	纵向配筋的横截面积		
f_e	单位长度的钢筋横截面积		
F_{ew}	螺旋筋的横截面积	材料特性值:	
h	受压边缘至受拉钢筋重心的距离, 有效高度 (深度、厚度)	E	弹性模量
h'	受压边缘至受压钢筋重心的距离, 有效高度	E_b	混凝土的弹性模量
i	$= \sqrt{J/F} =$ 回转半径	E_e	钢材的弹性模量
J	惯性矩	f_R	变形钢筋的肋纹面积
K	刚度	t_s	收缩系数
u	钢筋的周长或 $u =$	φ	徐变系数
		G	剪切模量
		$n = E_e / E_b$	= 弹模的比值
		R	混凝土硬化程度
		μ	横向变形系数 = $\frac{\text{横向变形}}{\text{纵向变形}}$, 泊桑比

α_T	温度膨胀系数	M_T	扭矩
β	材料强度	N	纵向力
β_Z	抗拉强度	Q	剪力
β_w	混凝土立方体抗压强度	位移参数:	
		f	挠度
β_{bz}	混凝土抗拉强度 (也简化为 β_Z)	ϵ	应变
β_{BZ}	弯曲抗拉强度	ϵ_{em}	钢筋的平均应变
β_R	混凝土抗压强度的特征值	ϵ_{bD}	受压区混凝土的应变
β_s	钢筋的屈服强度	应力:	
$\beta_{0.2}$	钢筋在应变为 0.2%时的屈服强度	σ	应力
		+	表示拉应力
		-	表示压应力
β_{r1}	钢筋和混凝土之间的 粘结强度	σ_e	受拉钢筋的应力
荷载参数: (大写相 当于集中荷载, 小写指单位长度 或单位面积上的 荷载)		σ'_e	受压钢筋的应力
		σ_e^I	状态 I 时的钢筋应力
g, G	永久荷载(静荷载)	σ_{eR}	第一条裂缝出现时的 钢筋应力
p, P	活荷载, 有效荷载	$\Delta\sigma_{eR}$	$= \sigma_{eR} - \sigma_e^I$ 开裂时钢筋中的应力突变
q	总荷载	σ_e^{II}	状态 II 时在裂缝横 截面处的钢筋应力
w, W	风荷载	σ_{ew}	裂缝之间混凝土共 同作用的有效钢筋应力
H	集中荷载的水平分量	σ_{eB_u}	钢箍应力
V	集中荷载的垂直分量	σ_b	混凝土压应力
内力:		σ_{bz}	混凝土拉应力
M	力矩	σ_1, σ_{11}	主应力
M_B	弯曲力矩	τ	剪应力
		τ_0	钢筋混凝土梁的计

	算剪应力		坏长度
τ_1	混凝土和钢筋之间的 粘结应力	ν	安全系数
其他:		W	裂缝宽度
a	裂缝间距	ψ	荷载系数
K	一般系数	Ψ_F	法克勒的裂缝间距 系数
K_1	混凝土保护层对裂 缝间距和裂缝宽 度的影响的修正 系数	φ	挠曲变形角
K_2	β_{sz} 与 τ_{1m} 平均值的 比值	κ	挠曲曲率
K_3	F_{bw} 有效区应力图 的形状系数	θ	扭转角
K_4	相当于平均裂缝宽 度 W_m 的保证率 为95%的裂缝宽 度(W_{95})的系数	θ	塑性转角
K_5	重复荷载和长期荷 载的系数	量度单位:	
K_6	裂缝之间混凝土的 共同作用系数	1 Kg	质量单位
K_a	配筋方向与应力方 向的误差系数	1 KP	$= 9.81 \text{ Kg m/S}^2$ 力 的单位 = 质量乘 重力加速度 ($\approx$ 1公斤)
K_z, K_B	状态 II 与状态 I 的 刚度比值系数	1 MP	$= 1000 \text{ KP} \approx 1$ 吨
K_s	收缩曲率系数	1 N	(牛 顿) $= 1 \text{ Kg m}$ $/\text{S}^2 \approx 0.1 \text{ KP}$
K_v	徐变曲率系数	1 KN	(千牛 顿) ≈ 100 KP ; 1 MN (百 万牛 顿) ≈ 100 MP
l_0	法克勒(Falkner) 的假定长度	缩写:	
t_R	裂缝深度	BSt	混凝土用钢 筋
V	M/Z线的位移	Bn	混凝土 (新 的 DIN 1045, 72 年元月)
V_0	在裂缝处的粘结破	Z	水泥
		NB	普通混凝土
		LB	轻质混凝土
		el	弹性的
		Pl	塑性的

目 录

译者的话	
前 言	
再版序言	
符 号	

1. 可用性的验算	1
1-1 在使用范围内对结构的功能要求	1
1-2 承重结构性能的极限值	2
2. 裂缝限制和裂缝宽度的限制	4
2-1 概述	4
2-1-1 裂缝形成和限制裂缝的目的	4
2-1-2 裂缝的类型	6
2-1-3 裂缝宽度 W 的定义及其极限值	9
2-2 裂缝形成的过程	10
2-2-1 出现第一条裂缝时钢筋的应力突变和粘结破坏	10
2-2-2 配筋受拉区的裂缝间距——裂缝形成的程度	13
2-2-3 受拉区与板的厚度的比值小时的裂缝间距	18
2-2-4 配筋的有效受拉区 F_{bw}	19
2-3 裂缝间距的实际计算	21
2-3-1 K 系数的引入 ^[10]	21
2-4 求裂缝宽度	24
2-4-1 初次荷载时裂缝宽度的变化	24
2-4-2 重复荷载和长期荷载的影响	29
2-4-3 临界裂缝宽度 $W_K = K_4 W_m$	29
2-4-4 临界裂缝宽度的公式	31
2-5 配筋方向与应力方向的偏差对裂缝宽度的影响	32
2-6 按DIN1045 (1972年版本) 限制裂缝宽度	32
2-6-1 公式的推导	33
2-6-2 对 $\mu_E \leq 0.3\%$ 不作裂缝验算是错误的	34
2-7 在受拉和受弯时限制裂缝知识的实际应用	34

2-7-1	由于约束应力或荷载应力而受拉时限制裂缝的计算图	35
2-7-2	受弯及受弯加纵向力(拉力或压力)的曲线图	38
2-7-3	收缩和温度对裂缝宽度的影响	39
2-7-4	有限、适量或部分预应力的预应力混凝土梁的裂缝限制	43
2-8	剪切裂缝宽度的限制	45
2-8-1	在梁的腹板中的剪切裂缝宽度	45
2-8-2	在板或厚梁腹中的剪切裂缝宽度	49
2-9	扭转裂缝宽度的限制	49
2-9-1	概述	49
2-9-2	有效的钢筋应力 σ_{sw}	50
2-9-3	($90^\circ + 0^\circ$)配筋受扭时的裂缝宽度计算	51
2-9-4	45° 配筋受扭时的裂缝宽度计算	53
2-10	由内应力引起的表面裂缝宽度的限制	54
2-11	无配筋时的裂缝宽度限制	54
2-12	应用实例	56
2-13	实际说明与验算范围	68
2-13-1	裂缝限制可不作验算的情况	68
2-13-2	钢筋间距	68
2-14	最小配筋率	70
3.	混凝土承重结构的变形	76
3-1	变形计算的目 的	76
3-1-1	可用性的安全度	76
3-1-2	承载能力的安全度	76
3-2	变形的原因、类型、计算值和离散性	76
3-2-1	原因和类型	76
3-2-2	刚度的计算值	77
3-2-2-1	材料特性常数 E_s 和 $E_b(77)$	3-2-2-2 横截面特征值(80)
3-2-3	刚度的离散性	81
3-2-4	收缩系数和徐变系数	81
3-3	裂缝间混凝土的共同作用	83
3-3-1	受力方式和受力程度对受拉构件平均应变的影响	83

3-3-2	裂缝间混凝土共同作用的计算假定	86
3-4	刚度离散范围的假定	88
3-5	考虑重复荷载的假定	90
4.	纵向力引起的变形、纵向刚度	91
4-1	在短期荷载和长期荷载下中心受压构件的缩短	91
4-2	中心受拉构件的伸长	95
4-2-1	短期荷载和长期荷载时的状态I	95
4-2-2	短期荷载和长期荷载时的状态II	96
5.	弯曲引起的变形、抗弯刚度(无剪切变形和纵向力)	101
5-1	基础知识	101
5-2	状态I时的抗弯刚度	104
5-3	裂缝形成区的抗弯刚度——只在 $\mu < 0.7\%$ 时 有意义	105
5-4	状态II时的抗弯刚度, 稳定裂缝的形成	107
5-5	纯状态II时的抗弯刚度	108
5-6	弯曲应力增大时抗弯刚度的变化	112
5-7	初次荷载和短期荷载时挠度 f_0 的计算	113
5-7-1	各种不同的关系	113
5-7-2	求初期挠度 f_0	114
5-7-3	求 f_0 的简化方法	115
5-7-4	通过受压边缘配筋以减小初期挠度 f_0 值	118
5-8	长期荷载时的挠度计算(徐变和收缩)	119
5-8-1	由于混凝土徐变引起的挠度和弯曲受压配筋的影响	119
5-8-2	在状态II时由混凝土收缩引起的挠度	123
5-9	对挠度的补充说明	124
5-9-1	受纵向力弯曲时和特殊截面时的挠度	124
5-9-2	不同静力系和不同荷载时计算挠度的一些辅助方法	124
5-10	预防钢筋混凝土承重结构挠度过大引起的破坏 和挠度的限制	127
5-10-1	常见的破坏形式和防止方法	127
5-10-2	用反拱防止破坏	130

5-10-3 挠度和细长比 l/d 的限值	130
6. 剪力引起的变形、剪切变形、抗剪刚度	132
6-1 概述、实际意义	132
6-2 状态I时的剪切变形（实际可略去不计）	133
6-3 状态II时的剪切变形	135
6-3-1 重要说明	135
6-3-2 在纯状态II时用平行弦杆桁架模型推导的计算 抗剪刚度的基本理论公式	135
6-3-3 试验证明状态II时的基本公式符合广义桁架模型 的实际情况	139
6-4 在状态II时由混凝土徐变和收缩引起的 附加剪切变形	141
6-5 对抗剪刚度的一些数据的评价	142
6-5-1 状态II和状态I的抗剪刚度的比值	144
6-5-2 用剪力和弯矩引起的挠度比值来评价剪切变形的极限	145
7. 扭转引起的变形、抗扭刚度	147
7-1 概述，实际意义	147
7-2 状态I时的抗扭刚度	150
7-3 状态II时的抗扭刚度，包括裂缝形成的范围	152
7-3-1 裂缝形成范围的界限	152
7-3-2 “纯”状态II时抗扭刚度的基本公式	152
7-3-3 状态II时（在裂缝形成到允许 M_r 范围内）的 基本公式的适用性	157
7-4 状态II时由混凝土徐变和收缩引起的附加扭 转变形	160
7-5 抗扭刚度和抗弯刚度之间的关系	162
7-6 在受扭兼受弯及有剪力作用下的抗扭刚度和 抗弯刚度	163
7-6-1 概述	163
7-6-2 T 、 M 和 Q 间的相互影响	165
7-6-3 在 $T + M + Q$ 同时作用时推荐的变形计算方法	168

7-7 预应力对扭转变形的影响	169
8. 塑性范围内的变形 (状态III)	171
8-1 论述状态III的目的	171
8-2 状态III时的弯曲变形	171
8-3 塑性铰及其转角	177
8-4 受弯和纵向受压 (M 和 N) 时的旋转	185
8-5 静不定承重结构的力矩再分配	188
8-5-1 状态II时的力矩分配	188
8-5-2 状态III时的弯矩分配	191
8-5-3 弯矩再分配的简化线性方法	199
9. 平面结构 (特别对板适用) 的破裂线理论	
E·默尼希 (E.Mönnig)	202
9-1 概述	202
9-2 导论	203
9-3 破裂线	204
9-4 内力	205
9-5 板角的特殊情况	209
9-6 计算极限荷载——临界破裂弯矩	211
9-7 破裂线理论应用的限制	213
9-8 实例	214
参考文献	217

1. 可用性的验算

作者在《钢筋混凝土结构》的第一和第二册主要论述了承重结构的承载能力安全度的计算。这一册介绍保证可用性和耐久性计算校核的原理。如在文献[1]a的6·1·3所述, 钢筋混凝土构件的可用性由于下列原因而受到损害:

- 1) 裂缝过大;
- 2) 变形过大, 尤其是挠曲过大;
- 3) 骚扰的或不堪忍受的振动;
- 4) 水或者潮湿的入侵;
- 5) 混凝土或钢材的腐蚀;
- 6) 火。

为了保证可用性, 必须确定和保持承重结构可用性的极限值。可用性的某些损害是由于施工质量不良, 或者重大的设计错误引起的。本书要讨论的问题乃是对通过计算校核能够避免的设计错误加以限制。

1-1 在使用范围内对结构的功能要求

对可用性的验算, 过去多采用最大使用荷载 (自重 g + 最大有效荷载 P + 附加荷载), 在地面建筑中, 有时用 $g + 0.7P$ 。经验告诉我们: 就挠度和裂缝宽度而言, 建筑物良好性能的安全程度不是以最大荷载来衡量的, 而是以静荷载 g + 经常出现或长期作用的有效荷载来确定的。而这部分有效荷载常常远低于 $0.7P$ 。长期荷载或强烈振动的动荷载, 均可增大裂缝的宽度。除外部荷载外, 沉降、温度变化或者收缩等对变形所产生的约束力 (Zwangs-kraft) 也能引起裂缝。这些问题都将在书中讨论。

大气或工业腐蚀 (例如降雨、酸性气体、蒸汽……) 对确定