

钢结构塑性设计指南

日本建筑学会

李和华 周耀坤 奚毓堃 译校

中国建筑工业出版社

钢结构塑性设计指南

日本建筑学会

李和华 周耀坤 奚毓盈 译校

中国建筑工业出版社

本书叙述钢结构塑性设计的基本知识、适用范围和计算方法。叙述中避免采用复杂的计算理论,而以相应的例题加以说明,最后以单层和多层钢框架的设计,对钢结构塑性设计的内力分析和计算步骤进行具体介绍。为便于使用,书中还列有供设计应用的数据和图表。

本书可供钢结构设计人员和高等院校的有关专业师生参考。

鋼構造塑性設計指針

日本建築学会

1976年

* * *

钢结构塑性设计指南

李和华 周耀坤 奚毓堃 译校

*

中国建筑工程出版社出版(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

河北省固安县印刷厂印刷

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 11³/₄ 插页: 3 字数: 316 千字

1981年11月第一版 1981年11月第一次印刷

印数: 1—8,100册 定价: 1.20元

统一书号: 15040·4020

序

目前，日本所采用的钢结构设计方法属于容许应力的设计体系，但在最近许多国家已开始采用塑性设计法，这是属于以结构物的破坏荷载为依据的设计体系。日本结构标准委员会钢结构分会基于塑性设计比容许应力设计更为合理这一认识的基础上，于1970年5月公布了《钢结构塑性设计规范草案及其说明》。

上述的规范草案，由于涉及法规的关系，一直停留在草案上。1972年3月钢结构分会提出有必要对草案作进一步研究，然后以学会规范的形式发表的建议，并将这项研究任务委托给钢结构塑性设计小组会来承担。该小组会根据多方面分析研究的结果，一致认为，当前最迫切的工作是使一般结构设计技术人员掌握有关塑性设计的知识，而且比制定规范条文更为重要，于是，本着这一宗旨，就着手编辑一本为避开费解理论并包括大量例题的设计指南，经过三年的努力终于在现在出版了这本《钢结构塑性设计指南》。

书中用方框围起来的内容相当于规范的条文，它是根据《钢结构塑性设计规范草案》公布以后所得的新的研究成果，针对上述草案，做了充实和修订后写成的，将来拟作为《钢结构塑性设计规范》的正式条文。

关于本指南的内容，尽管小组会做了最大的努力，但一定还会存在许多不足之处。为了进一步充实本书内容，望读者不客气地将意见寄给小组会，以使本指南对钢结构塑性设计的普及和实用化有所补益。

日本建筑学会

1975年11月

目 录

第 1 章 总则	1
1-1 绪论	1
1-2 弯矩和曲率的关系	3
1-3 破坏	4
1-4 分析上的假定和塑性设计的适用范围	8
1-5 材质和板厚限制	9
1-6 屈服应力	10
1-7 工作荷载和荷载系数	12
第 2 章 塑性分析	17
2-1 破坏的成立条件	17
2-2 塑性分析定理	19
2-3 承受均布荷载的梁	23
2-4 单层单跨门式框架例题	25
2-5 双层单跨框架例题	28
2-6 双坡框架例题	31
2-7 平衡法	35
2-8 单层双跨框架例题	37
2-9 变形计算	40
2-10 梁的挠度	41
2-11 门式框架的变形	47
第 3 章 全塑性弯矩	51
3-1 截面塑性抵抗矩	51
3-2 各种截面的截面塑性抵抗矩	53
3-3 轴向力的影响	56
3-4 承受双向弯矩的情况	65
3-5 剪力的影响	74
第 4 章 板件的宽厚比	85
4-1 板件的压屈和压屈后的性状	85

4-2	宽厚比的限制值	90
第 5 章	梁	102
5-1	梁的强度	102
5-2	侧向支承杆的间距	109
5-3	支承杆的强度和刚度	117
5-4	腹板的加劲	128
第 6 章	柱	129
6-1	柱构件的长细比和轴向压力的限制	129
6-2	中心受压柱的强度	136
6-3	柱顶水平位移受约束柱的强度	140
6-4	柱顶水平位移不受约束柱的强度	154
6-5	柱的计算长度	159
第 7 章	连接及连接节点	166
7-1	容许应力和容许承载能力	166
7-2	塑性铰部位的连接	167
7-3	梁、柱连接节点	180
第 8 章	柱脚	197
8-1	柱脚设计的基本假定与注意事项	197
8-2	柱脚的设计	198
8-3	对固定度的注意事项	208
第 9 章	矩形框架实用设计法	211
9-1	一般要求	211
9-2	地震荷载作用时的设计	215
9-3	超载时的设计	232
第 10 章	设计例题1—工厂	235
10-1	设计资料	235
10-2	荷载	237
10-3	塑性分析	240
10-4	截面计算	247
10-5	其他部分的设计	256
第 11 章	设计例题2—办公楼	259
11-1	设计资料	259
11-2	荷载	268

11-3	地震荷载时的设计	272
11-4	超载时的设计	300
11-5	连接节点和柱脚的设计	303
11-6	变形的计算	324
附录		326
附录 1	热轧H型钢的截面塑性抵抗矩 (根据 1971年JIS G3192)	326
附录 2	热轧H型钢的形状、尺寸和截面承载能力 (根据1971年 JIS G3192)	328
附录 3	热轧H型钢截面性能的降低(根据1971年JIS G3192)	334
附录 4	一般结构用碳素钢钢管的截面尺寸和性能 (根据1974 年JIS G3444)	340
附录 5	中心受压柱的压屈强度和欧拉压屈强度与屈服轴向力之比 [根据式 (6-12) ~ 式 (6-14)]	344
附录 6	各种钢材的容许应力和板件的宽厚比	347
附录 7	铆钉、高强螺栓和锚栓的容许承载能力	355
附录 8	柱脚部分的设计图表	358
附录 9	铆钉、螺栓和高强螺栓的孔距和线距的标准	366
汉文、日文译名对照		368

第 1 章 总 则

1-1 绪论

设计结构物的要求，大体上有以下三点。

- (1) 必须满足使用功能的要求；
- (2) 必须安全地支承荷载和外力；
- (3) 应该是经济的。

在这些要求中，第 2 点可大致区分为两种情况：对极少发生的荷载状态必须保证结构的强度；对经常发生的荷载状态不能产生过大的变形和振动危害等。对于其中结构强度的保证，现在采用的方法称为容许应力设计法。这个方法首先是求出设计荷载作用下的弹性内力分布，再使其应力的最大值不超过容许应力来决定构件的尺寸。容许应力设计法以材料的安全系数来决定容许应力，但实际上，即使荷载值稍许超过安全系数的限度，构件也不会破坏。因为钢结构的钢材具有韧性，可以进行应力重分布，所以按照容许应力设计的钢结构所具有的安全系数一般比公称的安全系数大。但是，按容许应力设计的结构物，能够承受多大的荷载并不明确；随着结构形式的不同，实际的安全系数必然是不一样的。此外，如果直接知道结构物破坏荷载的数值（破坏荷载），就可以计算出考虑了荷载安全系数（叫做荷载系数）的极限荷载，从而可以采用在极限荷载作用下结构物恰好破坏的设计法。假如采用这样的设计法，其安全系数必然比按容许应力设计的安全系数明确。这样的设计法称为极限荷载设计法。

但是，分析结构物的真实强度是不容易的，经常只好采用容

许应力法进行设计。随着研究工作的进展，目前正在逐步向按极限荷载设计的方向改进。

结构物的破坏，有各种各样的形式，例如：由于材料的破坏和压屈、由于产生不稳定的现象、或由于在结构物的许多局部产生塑性区域形成破坏机构等（关于机构参照第1-3节）。其中关于破坏机构所造成的破坏，已能够比较准确地分析出引起破坏的荷载（破坏荷载）。

特别是用钢材构成的实腹式钢框架结构和连续梁，只要注意局部设计，就可以按由机构引起破坏来进行设计；所以对这种框架结构和连续梁，按照破坏机构的极限荷载设计是可能的。这种按照破坏机构的设计称为塑性设计。从广义上来说，考虑结构物塑性性状的设计法，虽然都称为塑性设计，但本指南所说的塑性设计，是指采用现在容许应力设计的设计荷载（以后，把这种荷载称为工作荷载）乘以荷载系数（安全系数）作为给定极限荷载的，在进行构件设计和局部设计时，应该使极限荷载的大小等于结构的主要骨架因变成机构而破坏的荷载（破坏荷载），或小于破坏荷载。

结构物除按强度设计外，为了避免由于挠度和振动所产生的危害等，还必须具有适当的刚度；然而关于工作荷载下的挠度和振动，仍可以采用现行的设计规范和算法。

按塑性设计的第一个建筑物，是1914年在匈牙利建成的公寓；第一个把塑性设计引进设计规范的是1948年的英国规范 BSS499。英国在1952年，加拿大在1956年，美国在1957年建成按塑性设计的第一个建筑物；而后，以英国和美国为中心，迅速地开始普及塑性设计^①。

现已公认，塑性设计简单、合理，而且能够节约钢材，所以英国和荷兰的低层建筑物几乎全部采用塑性设计，美国和加拿大的大部分建筑物也应用塑性设计。

① Beedle, L.S.: On the Applications of Plastic Design, Plasticity, Pergamon Press, 1960

1-2 弯矩和曲率的关系

塑性设计就是充分利用钢材所具有的韧性；钢材的延性由钢材的拉伸试验清楚地表现出来。

图1-1 (a)是通过拉伸试验得到的应力—应变曲线，应力 σ 达到屈服应力 σ_Y 之后就产生塑性流，其应力保持不变而应变 ε 继续增大，但不久将出现应变硬化现象，应力再缓慢地开始上升。

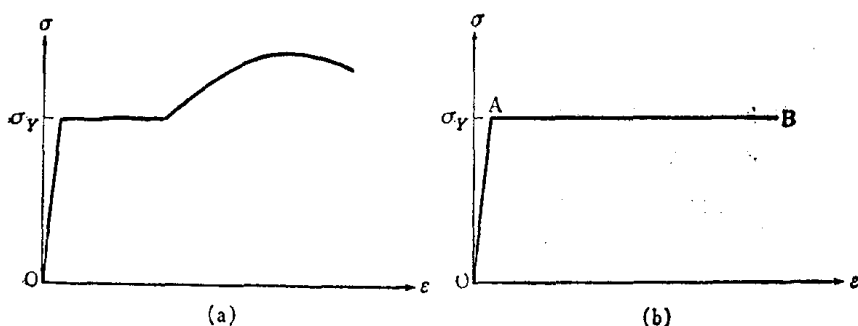


图 1-1

在塑性设计中，为了使分析简化而忽视应变硬化部分，假定应力—应变曲线如图1-1 (b)所示，由弹性部分 OA 和水平的塑性流部分 AB 所构成。根据这个假定，研究作用在构件上的弯矩 M 和曲率 k 的关系如下。

当弯矩很小时，如图1-2 (a)所示应力呈三角形分布，弯矩 M 和曲率 k 的关系如图1-3的OA部分为直线关系。这种关系一直继续到边缘应力达到屈服极限 σ_Y 为止。也就是说，图1-2 (b) 的应力状态是弯矩和曲率成直线关系的界限，所以这个时候的弯矩的大小 M_Y 称为屈服弯矩。若弯矩超过 M_Y ，应力就象图1-2 (c) 所示呈梯形分布，塑性区域从边缘向内扩展，弯矩和曲率的关系如图1-3所示成曲线BCD，且逐渐接近于线ED。如果考虑这种状态的极限，弯矩-曲率曲线便与线ED相一致，应力如图1-2 (d)

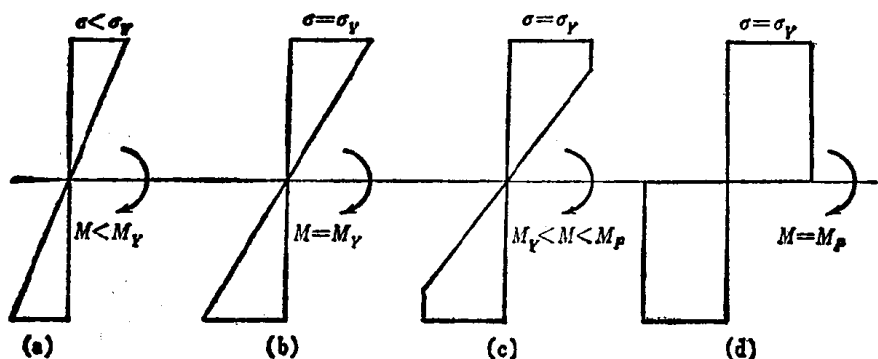


图 1-2

所示呈矩形分布，弯矩的大小为一定值 M_P 。把弯矩 M_P 叫做全塑性弯矩。图1-3的曲线BCD的形状随截面的形式而不同，但弯矩总是急剧地接近于表示全塑性弯矩的线ED的。弯矩急剧地接近于全塑性弯矩 M_P 的性质表示：

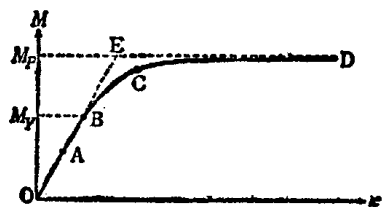


图 1-3

截面上的塑性区域超过某种程度，就可以认为弯矩等于 M_P ，而且随着曲率的增加，弯矩的增加是极微小的，故可认为，弯矩是不变的，而曲率是能够自由地增加的。这种性质是使结构骨架分析能够简单化的关键。

1-3 破坏

选取图1-4 (a)所示两端固定的梁为简单的例题。

集中荷载 P 是从0开始逐次增加的渐增荷载，梁的全塑性弯矩无论在全长的任何位置都为 M_P 。为了简单起见，假定弯矩 M 和曲率 k 的关系如图1-3所示的OED的两根直线。如果荷载 P 从0增加到 $6.75M_P/l$ 时，图1-4 (b)中梁的固定端A的弯矩恰好

为 M_P 。如果 P 再增大，在 A 点的弯矩 M_P 保持不变而只是曲率增加，所以如图 1-4 (c) 所示把 A 点用铰来置换，并在 A 点增加弯矩 M_P 以保持与原来状态相同。这样的铰称为塑性铰。如果再增加荷载，当达到 $8.68M_P/l$ 时，B 点的弯矩达到 M_P ，在 B 点也产生塑性铰。如果 P 再增加到 $9M_P/l$ ，C 点也形成塑性铰，这根梁就变为不稳定状态。这时如图 1-4 (e) 所示，荷载 P 仍保持 $9M_P/l$ 而只是

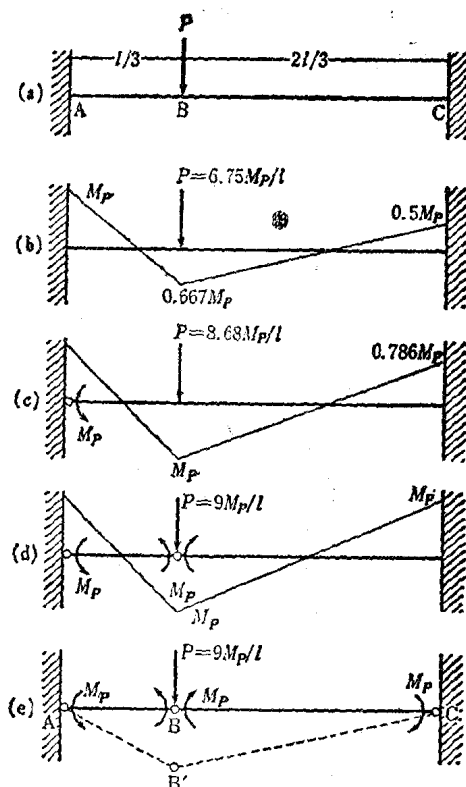


图 1-4

变形急剧地扩展。把这种状态叫做梁的破坏。B 点的位移 δ 和 P 的关系如图 1-5 所示。

图 1-4 (b)、(c) 的状态中，即使在梁的一部分产生了塑性铰，这根梁仍然是稳定的，还具有支承荷载的能力。但是，如果成了图 1-4 (d) 的状态，梁将失去支承超过 $9M_P/l$ 荷载的能力。在塑性设计中的所谓破坏，就是指在一定荷载作用下由于变形得以充分的发展而产生足够数量的塑性铰，这种状态称为不稳定状态，把图 1-4 (e) 所示的运动形式称为机构。因而，塑性设计是以机构破坏为对象，把引起破坏的荷载称为破坏荷载。

在这个例子中，破坏荷载为屈服开始时荷载的 1.33 倍，一般

的超静定结构也是从构件的一部分开始出现屈服的，所以具有提高支承荷载的能力。

下面给出按塑性铰和全塑性弯矩的假定的分析和实验结果的比较。

图1-6是表示在H形钢简支梁作用两个荷载时，其弯矩和中

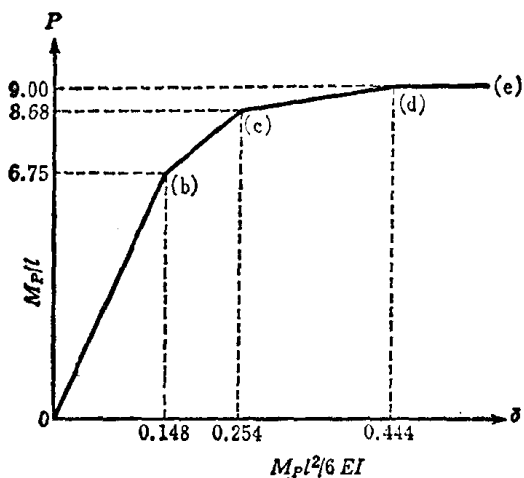


图 1-5

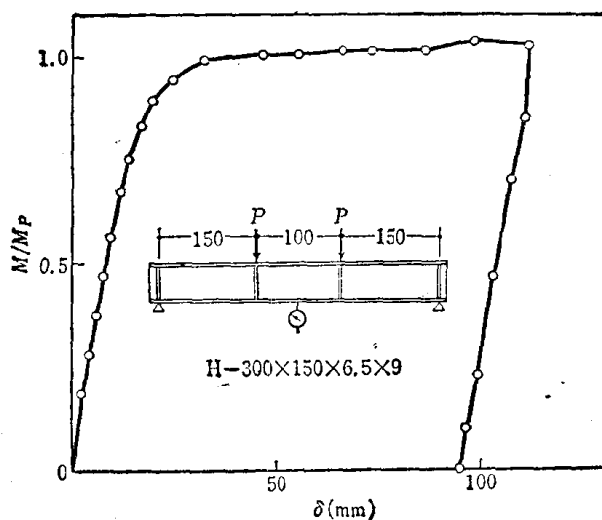


图 1-6

央挠度的关系。由图可知，如果弯矩一接近于全塑性弯矩 M_p ，则弯矩几乎保持不变，而挠度继续增大。又，图1-7是连续梁的实验结果，其中虚线是和前面已说明的例子用同样的假定而计算的理论值^①。

实验值与理论值相比稍微有所降低，但是可以认为，全塑性

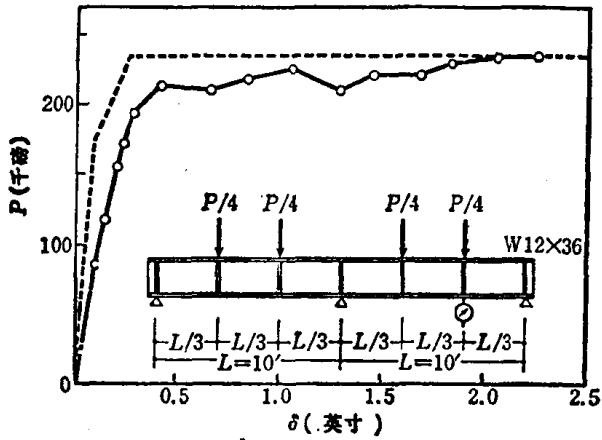


图 1-7

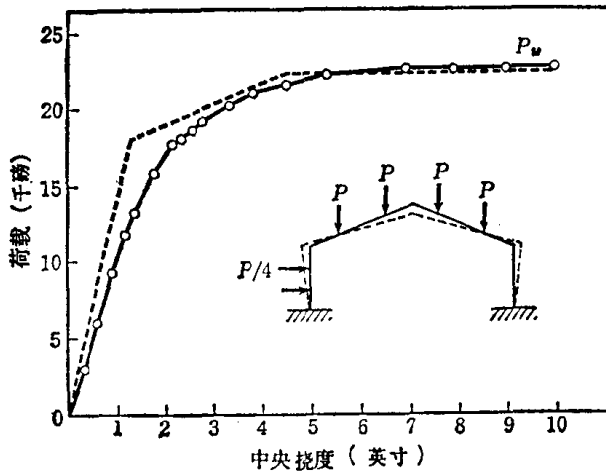


图 1-8

- Driscoll Jr., G.C., Beedle, L.S.; The Plastic Behavior of Structural Members and Frames, Welding Jour., 36 (6), June, 1957

弯矩和塑性铰的假定是成立的。

图1-8是双坡框架的实验结果, 极限荷载 P_u 的实验值和理论值(虚线)几乎一致^①。

1-4 分析上的假定和塑性设计的适用范围

如第1-3节说明的那样, 对连续梁或框架结构采用按全塑性弯矩和塑性铰的概念的分析方法进行极限荷载计算时, 为了分析的简单化应服从以下的假定:

(1) 构件的弯矩 M 和曲率 k 保持图1-9中OAB所示关系。也

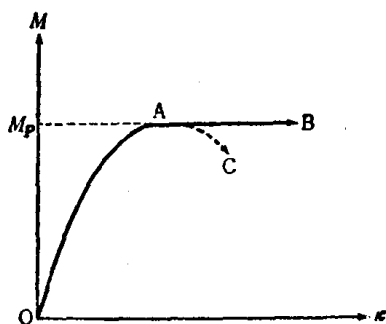


图 1-9

就是说, 在 AB 部分的弯矩等于全塑性弯矩 M_P , 并形成弯矩保持为定值 M_P 而曲率 k 可以自由地增大的塑性铰。

(2) 塑性铰发生在杆件轴线上的一点。也就是说, 不考虑塑性区域的扩展。

(3) 只考虑轴向力对塑性弯矩 M_P 降低的影响, 而忽略轴向力对塑性铰转动中心偏离

杆件轴线的影响。

(4) 不考虑剪力的影响。

(5) 按变形前的位置考虑力的平衡。

(6) 不考虑由于荷载的反复作用所引起承载能力的降低。

塑性分析是以上述假定为基础的, 采用塑性设计法设计结构物时, 必须经常验证是否符合上述假定。

对于假定(1), 材质必须具有足够的延性, 而且由于出现局部压屈和侧向压屈, 故必须规定构件的形状, 使其弯矩-曲率关系不致形成如图1-9所示的 AC 线。对于假定(3), 必须限制作

① 见前页注。

用在构件上的轴向力；同样，对于假定（4），在剪力影响大的时候，应增加腹板厚度以减少其影响，或要求改变结构设计以减少剪力。

由于承受反复荷载而产生疲劳或塑性变形积累的结构物，假定（6）不成立，不能应用塑性设计。

根据上述假定条件，及已取得的足够的理论及实验研究结果，规定本指南的应用范围如下。

（1）骨架形式为框架结构。

（2）构件为H形或箱形等的实腹式截面杆件和钢管。

如上所述，塑性设计主要用于由实腹式截面杆件组成的框架结构，但设有交叉支撑的框架也可应用，不过有支撑的框架的极限承载能力，一般不象纯框架结构那样明确，在现阶段要规定对设有支撑框架的处理方法是有困难的。因而，对于长细比大的交叉支撑象习用的那样不作受压杆件分析，或只忽略压屈后承载能力的降低，对于长细比小的交叉支撑则把压屈强度当作受压屈服轴向力来分析等等。只能由工程技术人员根据判断来作适当的处理。因而，本指南对交叉支撑的处理不作叙述。

还有，本指南只研究静力设计法，不涉及对于动态有关的恢复力特性问题。当然，象我国这样的地震国家，建筑结构物的设计不考虑动力的作用是不可能的。因此，必须建立充分引进各种动态特性影响的设计法，可是现阶段还没有形成体系。但是，从抗震结构必须具有足够延性的意义来说，本指南中处处都提到确保延性的问题，可供按动态设计时参考。

1-5 材质和板厚限制

按本指南叙述的方法设计结构物的主要构件，亦即柱、梁及其连接节点，应采用符合JIS标准的下列钢材。

JIS G3101(一般结构用轧制钢材)的SS41

JIS G3106(焊接结构用轧制钢材)的SM41, SM50

JIS G3444(一般结构用碳素钢钢管)的STK41, STK50

在JIS规定的钢种中, 限定了采用上述钢材的理由是, 塑性设计的实验研究多数是针对这些钢种进行的。因此, 弄清这些钢种在塑性设计中的应用是可能的。至于其它钢种, 譬如强度更高的钢材, 则缺乏塑性设计的实验资料。

关于铆钉、螺栓、高强螺栓、焊条等, 可认为与日本建筑学会《钢结构设计规范》规定采用的相一致。钢材的形状、尺寸和弹性常数(弹性模量 $E=2100\text{t/cm}^2$, 剪切弹性模量 $G=810\text{t/cm}^2$, 泊松比 $\nu=0.3$)也和容许应力设计时一样。

即使采用上述钢种, 对于薄板和厚板还有如下的问题: 采用薄板时容易产生扭曲, 以及薄板特有的局部压屈和局部压坏等; 采用厚板时, 焊接和其它连接中都容易出现问题, 也可能产生脆性破断。目前, 从塑性设计角度看, 有关上述问题的资料是不充分的。因而, 除不考虑薄板和厚板之外, 根据JIS标准的屈服点、伸长率, 对适合采用本指南的板厚范围规定如下。

钢板厚度为5.0mm~40mm。

1-6 屈服应力

塑性设计所用的屈服应力, 采用按统计计算决定的平均值或众数是最合理的。对特定钢种屈服应力的统计研究较少, 但日本钢结构协会掌握有委托国内8个加工制造厂的公司进行调查的结果^①。其中包括调查所得钢材出厂产品证书上记载的屈服应力、

① 西村 昭: ミルシート値とチェックテスト値との関係について; JSSC, Vol.5, No.33, 1969

西村 昭: 鋼材の機械的性質のばらつきについて; JSSC, Vol.5, No.48, 1969