

钢 桥 设 计 论 文 选 译

顾发祥 强士中 译
钱冬生 校

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 8 6 年 • 北 京

译 者 的 话

约在1970年前后，几起箱形钢梁桥事故在欧洲、大洋洲发生后，重新引起世界上的桥梁设计工作者对承压构件（杆件和板件）屈曲问题的普遍重视，许多国家考虑修订桥梁设计规程中的有关部分，以适应客观的需要。英国新的桥梁设计规程 BS5400 就是在箱形梁桥事故发生后根据最新科研成果出版的一本规程，它反映了桥梁设计的当代水平。

在1980年3月于英国加的夫（Cardiff）召开的一次国际会议上，桥梁设计专家们讨论了BS5400中有关钢桥、结合梁桥设计的基本原理、规程的应用，并回顾了世界上一些国家有关桥梁设计技术水平、设计方法以及最新的研究信息。《The Design of Steel Bridges》一书是这次会议的论文集，其宗旨是阐述BS5400第3部分“钢桥设计规程”（Code of practice for design of steel bridges），第5部分“结合式桥设计实践规程”（Code of practice for design of composite bridges）的制定依据，是了解BS5400中钢桥及结合梁桥部分的重要参考资料。原书载有25篇论文，结合目前对箱形梁桥、板梁桥及结合梁桥的设计需要，中国铁道出版社方面及有关专家选择了其中第10~20篇论文，现译成本书*，供国内有关桥梁设计工作者参考。其内容围绕板梁、箱形梁介绍腹板及翼缘的加劲设计和隔板设计，此外还介绍了结合梁桥的设计与施工。

这本论文选集译文的出版，如果能对桥梁设计工作者，研究工作者，桥梁规范的制定者提供某些有益的参考信息，则译者将感到无上欣慰。

译 者

一九八五年一月

*本书各篇的译者：第1、2、3、7、9篇——强士中，第4、5、6、8、10、11篇——顾发祥。

内 容 简 介

本书介绍钢板梁、箱形梁的腹板、翼缘的加劲设计,箱形梁隔板设计;还介绍了结合梁桥的设计与施工。是了解英国桥梁设计新规程BS5400中钢桥和结合梁桥部分的重要参考资料。选译自英国加的夫大学的学院召开的国际学术会议专家论文集。

*(The Design of Steel Bridges, Edited by
K. C. Rockey and H. R. Evans, Granada
London Toronto Sydney New York 1981)*

读者对象:桥梁设计工作者,研究工作者,大专院校师生。

钢 桥 设 计 论 文 选 译

顾发祥 强士中 译

钱冬生 校

中国铁道出版社出版

责任编辑 王能远 封面设计 夏 云

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 850×1168毫米 $\frac{1}{16}$ 印张: 7.5 字数: 161 千

1986年12月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—1,500册 定价: 2.00元

目 录

第一篇	腹板设计的基本概念	1
1.	腹板设计的一般方法	1
2.	纵向应力从腹板向翼板的转嫁	3
3.	板块极限强度的交叉影响公式	9
4.	对于处理纵向应力重分布的实用办法——有约束和无约束的板块	18
5.	加劲肋的设计	20
第二篇	板梁和箱梁的腹板及加劲肋的设计	26
1.	腹板剪切强度的拉力场理论	28
2.	薄腹板的弯曲强度	31
3.	弯剪同时作用于不设纵向加劲肋的梁	32
4.	同有侧向支撑而无纵向水平肋的梁的实验作一比较	33
5.	有水平加劲肋的梁的腹板	33
6.	与板块实验的比较	38
7.	腹板边缘的短段荷载	38
8.	在加载方向承受变压力的板块	42
9.	腹板加劲肋	43
10.	致谢 (略)	50
第三篇	加劲腹板设计——它的当代水平	52
1.	曲后作用和极限荷载	54
2.	横向加劲肋的设计	60
3.	纵向加劲肋	64
4.	端横肋的设计	67
5.	短段荷载	70

6.	结 束 语	75
7.	致谢 (略)	75
第四篇	梁与板梁的设计——关于总体屈曲与翼缘局部屈曲	
	局部屈曲	79
1.	侧扭屈曲概述	81
2.	基本的设计曲线	82
3.	关于弯矩分布图形影响的规定	90
4.	关于横向支承条件——有效长度的规定	92
5.	与英国标准BS153的主要不同	93
	附录——算例	95
第五篇	板梁翼缘设计的当代水平	99
1.	极限状态	101
2.	均匀同质非结合式直线板梁的设计准则	103
3.	混合梁	104
4.	水平弯曲的 I 形梁	105
5.	归纳与结论	105
	附录 A 北美板梁翼缘设计准则	107
	附录 B 对曲梁翼缘的设计要求	111
第六篇	箱形梁与板梁中加劲受压翼缘的设计	116
1.	问题的性质	119
2.	加劲肋的非线性性态	119
3.	翼板的荷载—压缩性态	121
4.	正交异性加劲板段的屈曲	125
5.	纵向加劲肋在越过横肋处的连续性	128
6.	弯矩梯度的影响	132
7.	加劲肋伸出肢的扭曲	132
8.	加劲压力翼缘的横肋	137
9.	致谢 (略)	140
第七篇	规程关于宽的受压钢翼缘的设计方法	141
1.	前 言	142

2.	无加劲肋的翼缘的设计	145
3.	加劲翼板的设计	146
4.	对规程所列方法的讨论	148
5.	设计例题	155
6.	结 束 语	158
第八篇	新规程对于箱形梁隔板分析的简化	162
1.	范 围	163
2.	荷载效应	163
3.	对部件形状的限制	164
4.	孔 洞	164
5.	有效截面	165
6.	应力分析	167
7.	无加劲隔板的屈曲	169
8.	加劲隔板的强度	174
9.	结 束 语	176
第九篇	板在复杂荷载作用下的分析	178
1.	承受偏心荷载的板	180
2.	承受剪力和压力的板	184
3.	承受局部荷载的板	193
4.	研究板件屈曲的塑性机构法	195
5.	结 束 语	196
第十篇	结合式桥的极限状态设计	199
1.	英国标准BS5400第5部分结合式桥的背景	202
2.	规程草案(第3部分)同第5部分的合并使用	203
3.	设计原则	203
4.	整体分析	206
5.	受压翼缘的侧向约束	208
6.	弯曲与剪切合并作用下的截面强度	210
7.	结合梁中的竖直剪力	212
8.	结合式横截面的弹性特性	213

9. 条文的适用范围	215
10. 结 束 语	215
第十一篇 欧洲结合梁的设计与施工方法	217
1. 设计概念的对比	217
2. 结合梁预施应力方法	219
3. 结合梁桥的施工实例	222
4. 结合式结构的特殊应用	228
5. 趋 势	230

第一篇 腹板设计的基本概念

霍恩 (M·R·Horne)

曼彻斯特大学 西蒙 (Simon) 工程实验室

• 提要 • 本文叙述使用交叉影响公式对腹板在组合应力下作强度校核的依据, 并论证规程对于内力重分布的处理。对于横肋和纵肋的设计依据, 包括腹板薄膜力的败稳作用的概念, 在此也进行了描述。

1. 腹板设计的一般方法

以弹塑性极限性态为基础的腹板设计方法的推导, 当是梅里逊 (Merrison) 法则中最困难的问题。之所以困难, 在于如下事实:

(1) 所遇到的荷载条件很多, 包括在腹板面内有受弯、受剪和受纵向应力的不同组合。

(2) 板块的曲后强度同边界的强度和刚度有关, 特别是同翼缘性质有关, 致使腹板和翼板的设计需要考虑它们之间的交叉影响。

(3) 当梁接近极限条件时, 腹板和翼缘之间的纵向应力分配图发生变化, 致使腹板的纵向弯曲应力部分地转嫁到翼板。

(4) 加劲肋的荷载条件也是变化多端的。

腹板设计曾经使用过一些简化的原则。对于具有厚实翼缘和厚实腹板的梁, 其极限强度当由完全塑化来决定, 这不会有什么困难。对于用薄腹板的梁, 最常见的方法就是采用一阶弹性屈曲理论, 再以适当的系数进行修正, 借以考虑曲后强度和塑性。因

为曲后强度储备将视荷载类型和板所具有的边界条件而异，在这一方法中就得依靠经验，因此，在梅里逊临时设计准则中已经抛弃了这后一方法。

在不采用带修正系数的一阶弹性屈曲准则的情况下，那就要用极限强度、塑性拉力场理论；对此，巴斯勒（Basler），罗基（Rockey）和奥斯塔彭科（Ostapenko）各有不同的见解。罗基，埃文斯（Evans）和波特（Porter）业已有一较好的总结*这里不再详举。他们所用的破坏模式都包括一先发生的剪切变形阶段，并在翼缘出现塑性铰后形成破坏机构。对于不致较早地出现局部失稳（板的失稳）、且有厚翼板的梁来说，依此评价其极限强度是恰当的。已有的许多试验资料使得只有竖向加劲肋的梁能够用罗基的解来做腹板设计，这一做法见查特吉（Chatterjee）所写的论文**。对于有水平肋的梁，用塑性拉力场求解所需的资料现还不能认为足够完备。特别是在形成弹塑性拉力场的状态下，水平加劲肋将如何设计更需研究。但在时机成熟时将这个理论推广到有水平肋的梁也是合宜的。

因此，对于有纵向肋的梁，其腹板设计现在必须以塑性拉力场机构形成以前的腹板工作性能为基础。在梅里逊法则中，设计腹板所用的方法是以板段在单轴压应力作用状态下的一个较为保守的极限承载力为基础，推广到组合应力状态。其算式的推导相当复杂，所导出的最终结果则以众多的交叉影响图线给出。由于使用的图线太多，荷载条件变化很大，虽然所给图线不少，进行补插仍感不便。

因此，为了处理腹板在面内任意荷载之下的情况，乃决定研究使用某种形式的交叉影响公式。并对这些交叉影响公式提出下列需要满足的准则：

（1）为了能同有加劲肋的翼板设计假定相配合，交叉影响

*指《The design of steel bridges》一书的第12篇，即本书的第3篇——译者注。

**即《The design of steel bridges》一书的第11篇，本书的第2篇——译者注。

公式所对应的腹板弹塑性屈曲表现虽然应该尽可能接近于极限状态，但不能使腹板发生过大的总变形。

(2) 对于薄膜应力在某种程度上的重分布应该计及；这包括：不充分的拉力场作用，腹板纵向应力向翼缘的转嫁。

(3) 应计及面内约束对板块强度的影响。

按梅里逊报告进行工作的结果，从用动力松弛法进行的数值研究中（哈丁Harding等人的〔1〕，〔2〕），得到了板块在各种载荷条件下的数据。这些数据就是证实最终采用的交叉影响公式可以用的基础。

关于纵向应力重分布的假定，这在腹板设计中是一个很重要的问题。今将其涉及物理依据的理论推演论述如下。

2. 纵向应力从腹板向翼板的转嫁

先研究高厚比 d/t_w 相当小的腹板所显示的纵向应力重分布现象是具有启发性的。于此，屈曲毋需考虑。

假设有一对称的工字形截面杆（图1(a)），其每一翼缘的面积是 A_f ，腹板面积为 $A_w = \mu A_f$ 。假定这截面按承受一极限设计力矩 M_D 和一同时作用的极限剪力 F_D 来设计；设计采用简单的方法，将 M_D 全由翼缘承担。因此，为了经济，以下二式成立： $M_D = A_f d \sigma_y$ ，及 $F_D = A_w \tau_y$ ；式中， d 是两翼板中心线之间的高， σ_y 是屈服应力， $\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3} =$ 剪切屈服应力（密赛斯准则 Von Mises criterion）。

现在假定，截面所承受的力矩 M 和剪力 F 成比例地单调增加，且 $M/M_D = F/F_D = \lambda$ 。图1(d)表示随着腹板剪切应变 γ 的增加， λ （即增大倍数）， σ_f （翼缘平均应力）， τ_{wm} （腹板平均剪应力）和 σ_{wb} （腹板最大法向应力）的变化（均为近似值）。剪应变以其和屈服剪应变 $\gamma_y = \tau_y / G$ 的比值标在水平轴上；所有其它变量都标在竖轴上。应该注意，在翼板仍在弹性工作阶段，弯曲应变 ϵ_b （即翼板平均应变，正或负）正比于翼板平均应力 σ_f ；且 ϵ_b 也可用其与屈服应变 $\epsilon_y = \sigma_y / E$ 的比值来表示。

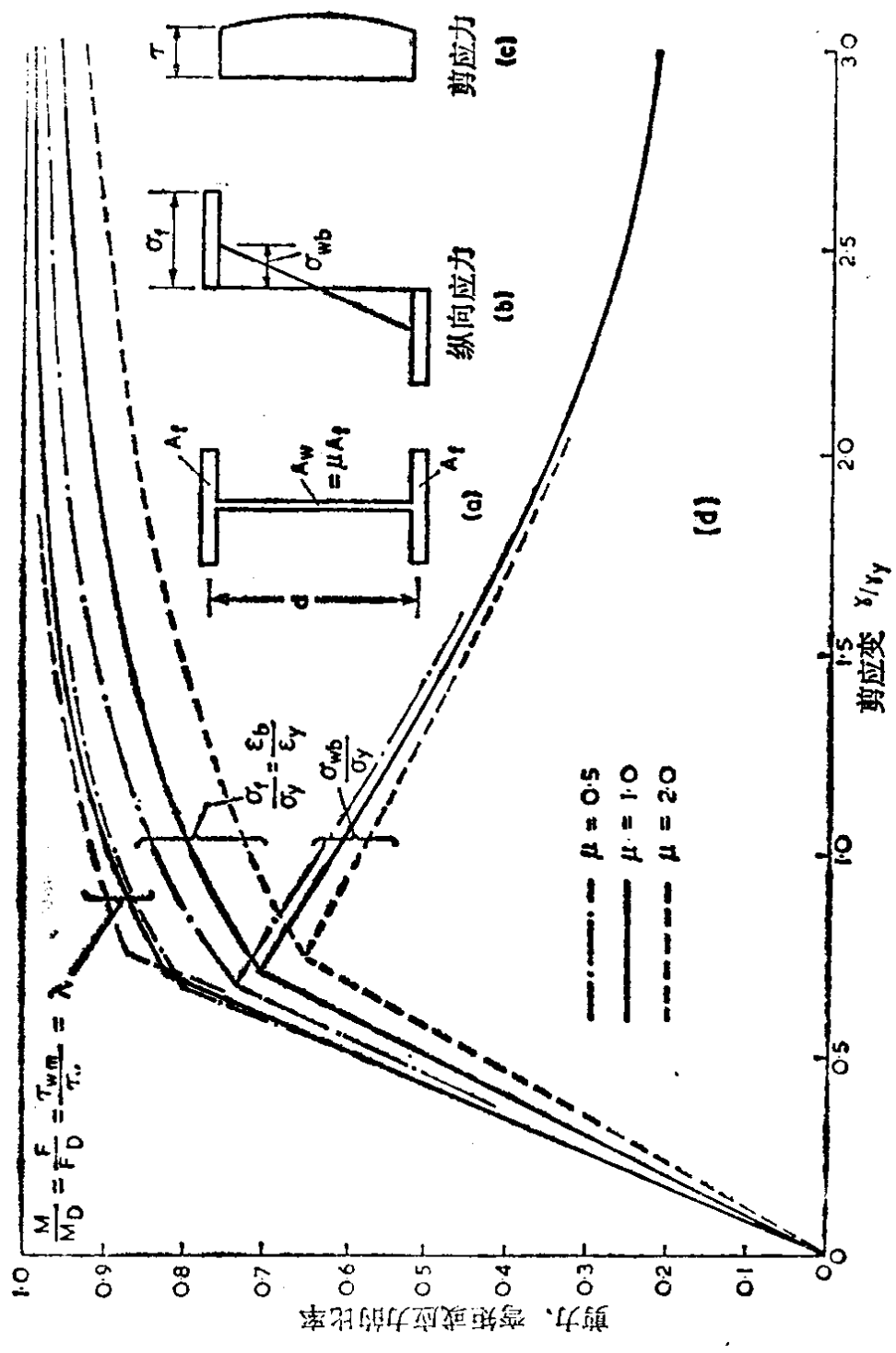


图1 在弯曲荷载和剪力联合作用下梁的腹板上纵向应力的重分配 (理论分析)

对于 $\mu = A_w / A_f$ 的三个值给出了结果。在荷载使腹板屈服以前, 工作表现是弹性的。一个很好的近似假定是屈服同时在腹板的全高发生, 所进行的分析就是以这一假定为基础。当腹板屈服时, 腹板内某点 p_1 的纵向应变和剪应变随后的改变量将由弹性分量 A_1B_1 和塑性分量 B_1C_1 组成(图2)。在腹板内的 p_1 点, 其应变改变量的弹性分量 A_1B_1 和应力改变量相对应, 应力必定是在屈服圆: $(\sigma/\sigma_y)^2 + (\tau/\tau_y)^2 = 1$ 的边界上变化。应变改变量的塑性分量 B_1C_1 必须垂直于屈服圆边界。总的应变增量 A_1C_1 由纵向应变增量 A_1D_1 和剪应变增量 D_1C_1 组成。

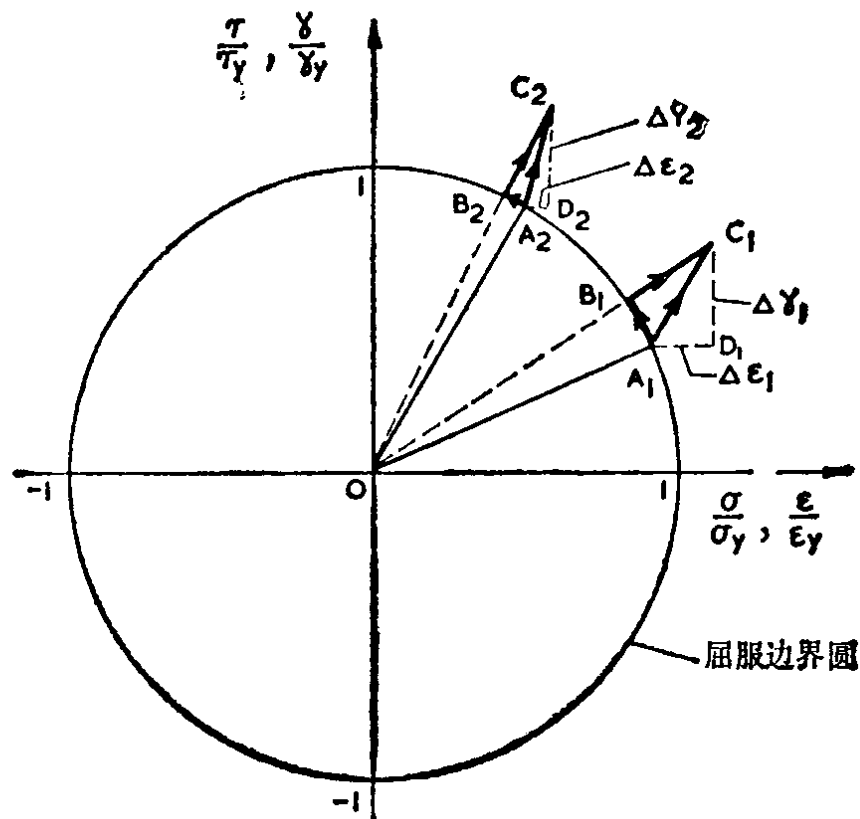


图2 在图1所示梁的腹板上法向应变和剪应变的增量

在截面中心轴线附近, 腹板上另一点 p_2 处, 应力的初始状态用点 A_2 表示。其剪应变总的改变量 D_2C_2 和 p_1 点的(用 D_1C_1 给出)近似相等, 但是纵向应变的改变量 A_2D_2 将比 p_1 点的(A_1D_1)小。随着载荷增加, 屈服圆边界上的应力点向 τ 轴移动, 纵向应力将减小而相应的剪应力当增加。纵向应变的增量始终是小的,

这是由于受到翼板的约束，而在翼板应变小于 ε_y 时，后者当仍处于弹性阶段。与此相反，当应力点向 τ 轴移动时，剪应变可以包括较大的塑性应变分量。因此，总的剪应变可以超过其弹性屈服应变 γ_y 相当多。

图 1 表示：在荷载倍数 λ 和剪应变 γ 增加时，腹板纵向应力减小的程度。起初，随着剪应变的增加，纵向应力下降率相当大，但随着剪应力的增加，这一下降率减小。若要将腹板纵向应力全部转嫁出去，在理论上当要求腹板发生无穷大的剪应变。

上面论及，由于对翼板所采用的设计假定，不容许腹板发生很大变形。在这些例子中，在应变 $\gamma = 2\gamma_y$ 处，腹板最大纵向应力大约减到 $0.35\sigma_y$ ，此时，荷载倍数大约是塑性极限值的98%。因此从设计的角度来看，没有什么理由要使纵向应力重分配超出50~60%的水平，而这一水平是在剪应变约为 $2\gamma_y$ 时达到的。

当板由其宽厚比所决定的屈曲破坏是发生在弹塑性范围时，其因剪切变形所能出现的纵向应力重分布程度主要取决于当时所作用着的纵向应变图形。哈丁等人〔1〕〔2〕主要研究了正方形板，其边界 $x = 0$ 和 $x = a$ 保持顺直，但施加以不同的位移而推算其效应（图 3(a)）。所加的位移是下列各种情况的组合：匀布压缩（图 3(b)），弯曲（c），三角形压缩（d），三角形拉伸（e）和剪应变（f）。在边界 $y = 0$ 和 $y = b$ ，或是“无约束”，或是“有约束”。对于无约束的情况，边界在 y 向无应力（ $N_y = 0$ ，图 3(g)）；对于有约束的情况，这一对边界或者保持顺直（对于荷载条件（b）和（f），见图 3(h)），或者发生均匀弯曲圆曲线（对于荷载（c）、（d）和（e），见图 3(i)）。在有约束的情况下，边界 $y = 0$ ， $y = b$ 的 y 向合力（即 $\int_0^a N_y dx$ ）为零。

所研究的加载组合是以 γ 和各种纵向应变相组合，比率 γ/ε （这里 ε 是在每一种情况下的最大纵向应变）取为常数，其值由零到无穷大。按这样的比值所加的边缘位移所生的荷载不完全和腹板实际情况相对应。在梁部， ε 将因翼缘的弹性状态（假定其

为弹性) 而受控制, γ/ε 可以随加载进程而增加。在塑性工作阶段, 边界位移加载的次序对纵向压力的分布有重要影响; 而在弹性阶段, 那是没有影响的 (不论是否有大挠度屈曲); 对于弹塑性屈曲破坏, 则有一些影响。在哈丁等人所作的研究中, 最为有关的加载条件在目前感兴趣的范围内是 $\gamma/\gamma_v = 2\varepsilon/\varepsilon_v$ 。就 $\gamma = 2\gamma_v$ 以下的加载情况而言, 这些结果对梁中所发生的纵向应力重分配有点低估, 但误差不会很大。

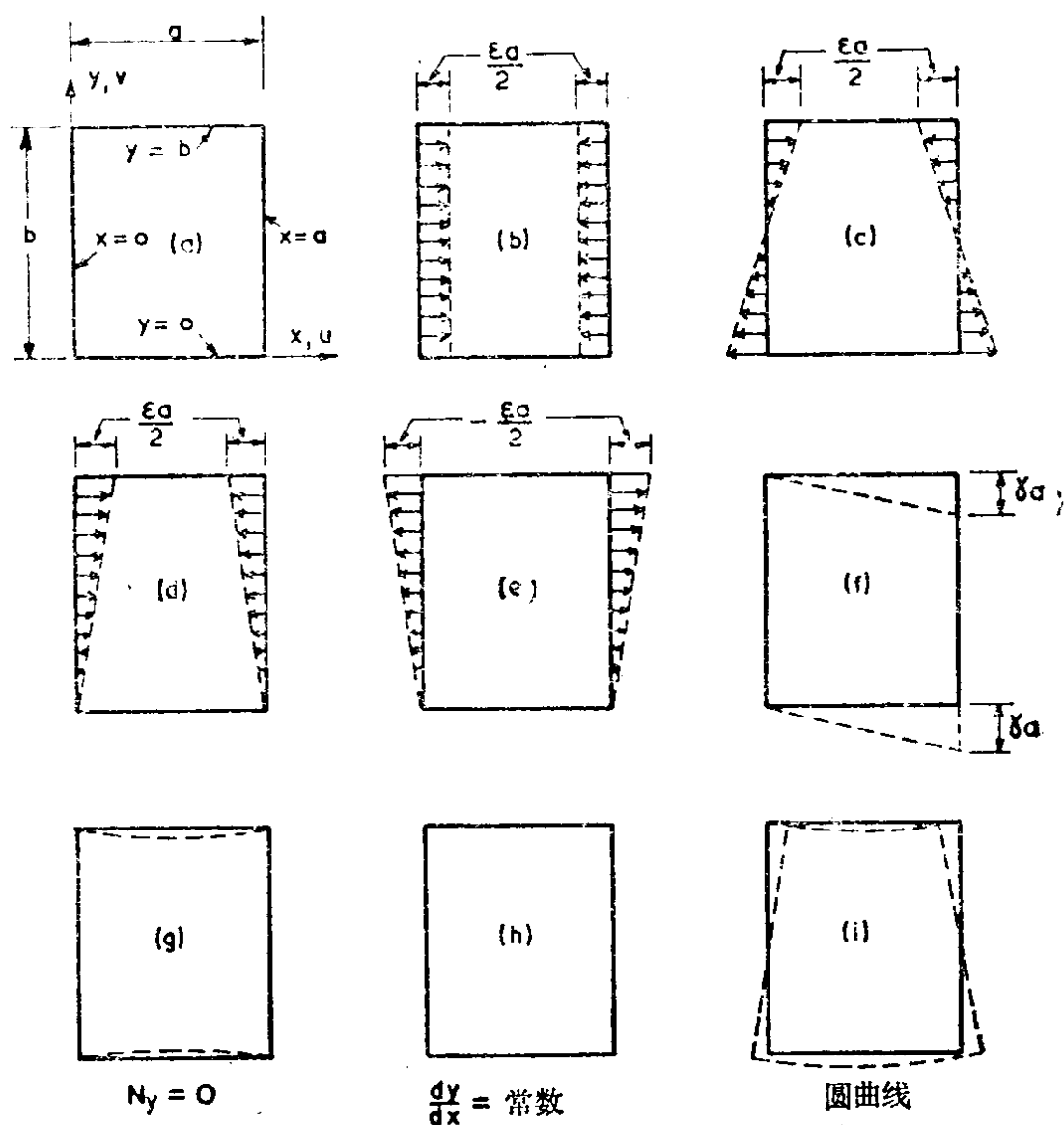


图3 哈丁等人所讨论的腹板加载情况 [1]

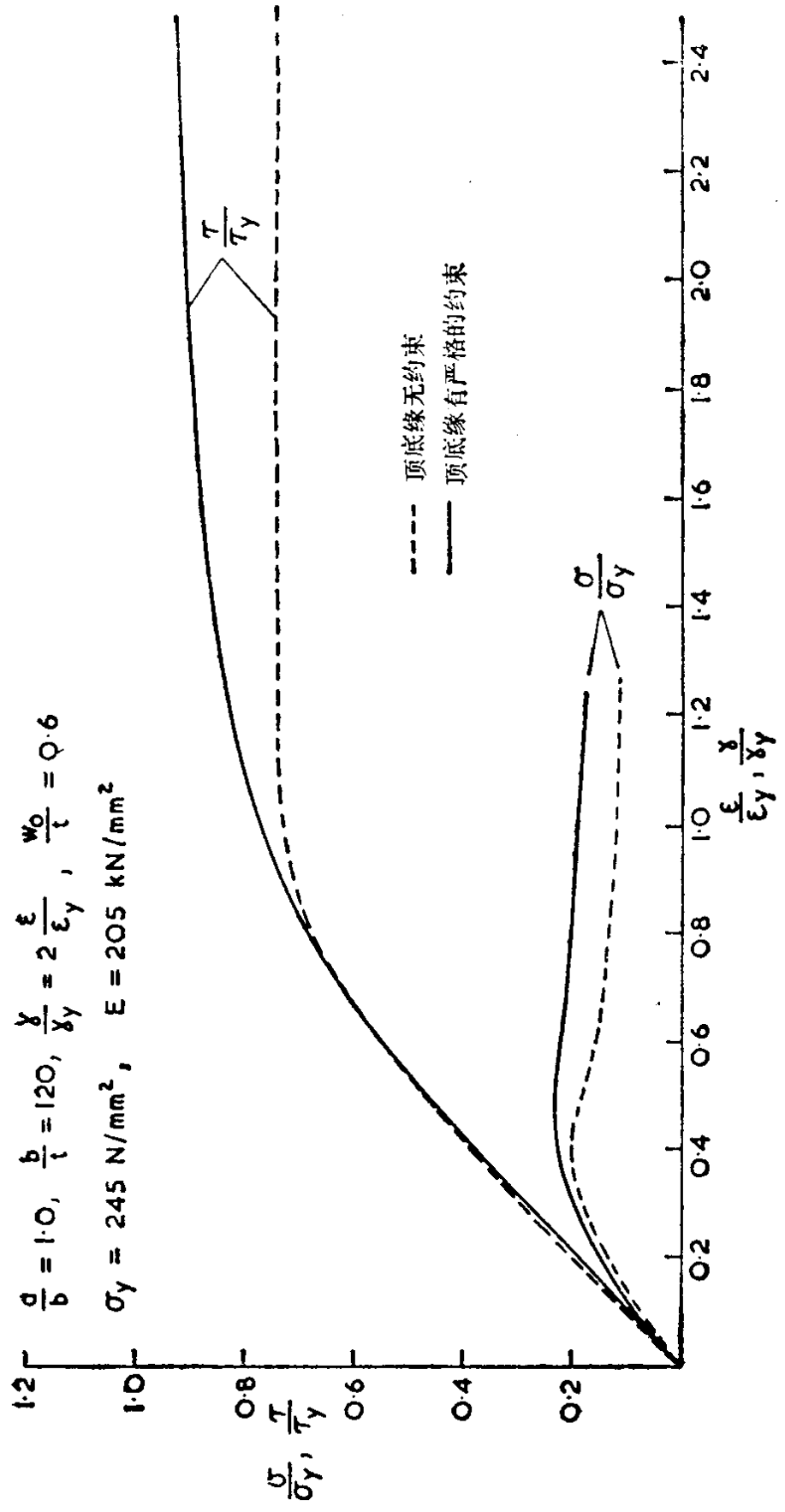


图 4 腹板在均匀纵向压应变和剪应变联合作用下的理论结果

长宽比 $a/b = 1$ ，宽厚比 $b/t = 120$ ， $\sigma_y = 245 \text{ N/mm}$ ， $E = 205 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ，初始缺陷 $W = W_0 \sin \pi x/a \sin \pi y/b$ ，其中 $W_0/t = 0.145 \left(\frac{b}{t} \right) \sqrt{\sigma_y/E} = 0.6$ （为规程所采用者）的板，在匀布压力和剪力共同作用下（图 3 的 (b) + (f)），其上下边缘有约束或无约束时的某些结果示于图 4。在 $\gamma = 2\gamma_y$ ， $\varepsilon = \varepsilon_y$ 处，对无约束的板和有约束的板纵向应力的重分布分别接近于 40% 和 30%，在其各自的峰值之下。

具有同样尺寸及初始缺陷的板，其承受弯曲变形和剪切（图 3 的 (c) + (f)）的联合作用，板不受约束时的结果示于图 5 (a)，受约束时的结果示于图 5 (b)。给出的纵向应力均值和剪应力分别属于板的上半边和下半边（即分别属于板各自承压和承拉的区域）。应变 ε 分别属于板的上、下边缘线处的压、拉纵向峰值应变。可以看出，平均压应力出现明显的下降，而平均拉应力却有显著的上升（后者是由于拉力场的作用）。

在上述正方形板中，在上下边缘线有约束和无约束，其工作性态没有多大差别。这是因为竖边 $x = 0$ 和 $x = a$ （图 3 (a)）由于有约束而保持顺直，拉力场能在此期间发生。哈丁等人的研究成果为长宽比 $a/b = 2$ 的板的性态提供了有限的资料；对于 $b/t = 120$ 的板，其研究结果示于图 6。其板块所受荷载是纯压和剪切的联合作用（图 3 的 (b) + (f)）。图 6 (a) 给出了无约束的板的纵向平均应力，图 6 (b) 是有约束的纵向平均应力，前提是 $\gamma/\gamma_y = 2\varepsilon/\varepsilon_y$ 。在每一种情况下，都以正方形板和 $a/b = 2$ 的矩形板的结果相对照。在后一种板中，假定初始缺陷在纵向形成半波两个，即： $W = W_0 \sin 2\pi x/a \cdot \sin \pi y/b$ 。可以看出，在有约束的板中，纵向应力有一点下降，在无约束的板中却没有下降。这种差别是由于无约束的板缺乏产生拉力场的能力；随着长宽比的增大，这一点显得更加突出。

3. 板块极限强度的交叉影响公式

假定沿着板的横向边缘施加一个线性变化的纵向应力（图 7