

钢结构的实验研究

苏联中央工业建筑科学研究所编



建筑工程出版社

鋼結構的實驗研究

周 裕 綜 譯

建筑工程出版社出版

• 1956 •

內容提要 本書彙集了四篇論文，敘述按結構極限狀態的計算法；進行鋼結構受壓與受壓-受彎構件及工字型截面梁的承載能力的科學研究；研究 HJ-2 (OXJ-2) 號鋼焊接連接的振動強度和分析結構在彈性或彈性-塑性階段的工作；並對這些問題作出了有效的解決。

本書中論文是由蘇聯中央工業建築科學研究所金屬結構實驗室所著。

本書供工程設計人員和科學研究工作參考用。

原本說明

書 名 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
編 著 者 Центральный научно-исследовательский ин-
ститут промышленных сооружений
出 版 者 Государственное издательство строите-
льной литературы
出版地点
与 日 期 Москва—1956—Ленинград

鋼結構的實驗研究

周 裕 綜 譯

*

建築工程出版社出版（北京市阜成門外南禮士路）

（北京市書刊出版業營業許可証出字第 052 號）

建築工程出版社印刷廠印刷·新華書店發行

書号417 字數139千字 787×1092 $\frac{1}{32}$ 印張 6 $\frac{3}{4}$

1956年12月第1版 1956年12月第1次印刷

印數：1—5,000冊 定價（10）1.10元

目 錄

緒 言.....	4
一、鋼結構受压和受压-受弯構件的承載能力.....	6
二、工字型截面梁的承載能力.....	67
三、用切斷的工字鋼把梁固定在柱子上的 框架式体系的节点工作研究.....	95
四、HЛ-2(CXЛ-2)号鋼焊接連接的振動強度.....	146
參考書籍.....	214

緒 言

本論文集刊載了中央工業建築科學研究所金屬結構實驗室在1949年所完成的著作。

轉向用蘇聯科學家們所提出的和擬制的極限狀態方法來進行結構計算，引起了必須深入地分析結構無論在彈性或彈性-塑性階段的工作，以便明確規定其極限狀態。

杆件體系中的拉杆在極限狀態時的承載能力按塑性工作階段確定，而對於壓杆，臨界力是計算參變數，在達到臨界力之後，這些杆件認為完全失去了工作（像脆性破壞一樣）。

這一前提對於靜不定體系中的拉杆是完全可容許的，但對於壓杆則不適合。這是因為壓杆在壓縮變形大大超過它失去穩定時的變形時，還可能承受更大的荷載，忽略了這一點會產生明顯的錯誤。所以中央工業建築科學研究所特別注意壓杆工作的研究。技術科學副博士 A.B. 蓋梅爾利格的論文“鋼結構受壓和受壓-受彎杆件的承載能力”提供了一些可以分析靜不定體系的受壓-受彎杆件工作的資料。

轉向用極限狀態方法來進行結構計算，就有必要確定結構構件的承載能力並考慮到它們在構築物中實際工作的情況，就是構件的可能非直線性、荷載的真實位置，以及考慮到改善構件工作的因素（用樓板加固梁等等）。

蓋梅爾利格的著作“工字型截面梁的承載能力”對這問題有所貢獻，該著作考慮到在梁與樓板的加固和偏心荷載作用的影響下梁的實際工作情況，提供了對梁的近似解法。此外，

本集刊載有中央工業建築科學研究所金屬結構實驗室對我國當前的建築實際中的迫切問題有所貢獻的著作，就是：高聳房屋的建築和 重型結構中 採用高強度 的鋼以減少 鋼材的消耗等。

高聳房屋鋼骨架的鉚接節點工作的研究引自工程師 T.H. 莫拉契夫斯基的論文，而採用高強度鋼 問題的研究引自工程師 П.С. 柯爾杜諾夫的論文。

本集所刊載的上述各著作的內容特點，證明在蘇聯科學面前實際存在的問題是極其多式多樣的，同時 也證明這些問題都得到了有效的解決。

中央工業建築科學研究所管理處

一、鋼結構受壓和受壓-受彎構 件的承載能力

A.B. 蓋梅爾利格

序 言

為了確定金屬結構受壓和受壓-受彎構件的承載能力，無論在理論上或實驗上已作了極大量的工作；但儘管如此，這一問題直到現在沒有得到解決，其原因在於對受壓和受壓-受彎構件的承載能力發生影響的因素太多。

此外，這類構件在結構中因其用途（獨立的結構構件——柱子，桁架的杆件，飾面板的加強構件等等）、形式（重型構件，型鋼，薄壁截面等等）以及荷載圖等的極其多式多樣性，使得問題特別複雜化。

這一切使得有研究所有受壓和受壓-受彎構件特有的或其絕大多數特有的一般規律性的必要。

本文研究下列諸問題：

- 1) 確定受壓和受壓-受彎杆件或其組成部分的實際工作情况；
- 2) 研究工字型構件的翼緣穩定性的局部喪失及其對整個杆件的承載能力的影響。

本文不妄圖全面解決上述的問題，但是在本文中得出的一些結論具有十分普遍的意義，因此有其一定的價值。

對於所提兩個問題的充分完全的理論解答，只有根據平

板处在各种不同的負載和 加固情况下的实际 工作加以研究，才有可能，并且这个解答應該包含平板在彈性-塑性阶段的工作。

該种問題在这样总的提法上是十分复杂的，因此所有解决它的企图直到現在沒有成功。

此外，据我們的看法，在这种总的解决之先，應該进行所观察的現象的定性分析，此定性分析 應該揭露所提問題的主要方面。

按照这种观点，本文仅限于杆件的研究；而所得到的結論在平板中的推广，仅具有揭露現象的定性方面的性質。

因为这种定性分析的結果在本文 中已得到实验証明，可以说这种近似地解决所提問題的途徑是适当的。

(一) 實驗資料

为了揭露金屬結構受压和受压-受弯構件本来的工作規律性，首先要合理地进行这些構件的实验。

表 1 所提供的許多实验結果是本文作者在1939~1949年时期中直接进行的，或是随着設計苏維埃宮的鋼骨架与国立莫斯科大学的高聳房屋时所組織进行的以及其他 人等 完成的。这些实验是用各种不同标号的鋼材所制成的、具有各种不同橫截面型式和尺寸的構件来进行的，且包含极其广泛的

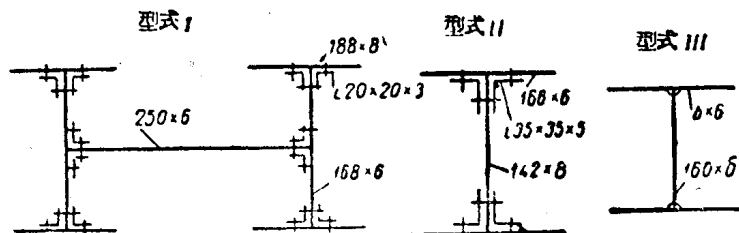


圖 1 試件的截面型式和尺寸

課題類別。杆件 1~13 的實驗是由烏克蘭蘇維埃社会主义共和国科学院建筑力学研究所完成的,而杆件 14~27 是由中央工业建筑科学研究所完成的。

中心和偏心受压以及受压-受弯杆件的實驗結果 表 1

構件 編號	杆件 符號	截面 型式	面積 F (平方 公分)	負 載 圖	λ	σ_T^0 (公斤/平 方公厘)	理論的極限力 (噸)		實驗的 極限力 N _{max} (噸)	$\alpha_1 =$	$\alpha_2 =$
							N _T	N _{T1}		$\frac{N_{max}}{N_T}$	$\frac{N_{max}}{N_{T1}}$
1	—	I	114.69	a	24.9	35.99	412.8	—	410	0.995	—
2	—	I	116.33	a	24.9	35.71	415.4	—	415	1.000	—
3	—	I	117.55	a	25.0	36.03	423.4	—	408	0.965	—
4	—	I	118.92	a	44.5	36.17	426.9	—	390.5	0.915	—
5	—	I	118.61	a	44.6	35.83	425.0	—	397.5	0.935	—
6	—	I	115.39	a	44.5	36.30	418.9	—	408.0	0.975	—
7	—	I	117.80	b	25.0	36.16	426.0	367.1	369	0.865	1.01
8	—	I	117.00	b	25.0	36.49	426.5	372.1	376	0.880	1.02
9	—	I	117.48	b	25.0	36.25	425.0	366.6	369	0.867	1.01
10	—	II	52.9	a	28.0	25.00	131.3	—	131.5	1.002	—
11	—	II	53.0	a	28.0	25.00	131.5	—	131.5	1.000	—
12	—	II	53.0	r	28.0	25.00	131.5	105.0	131.1	0.997	1.25
13	—	II	52.3	r	28.0	25.00	130.6	104.5	130.0	0.995	1.245
14	I—13	III	24.72	b	24.9	21.7	53.84	3.43	57.5	1.07	1.67
15	I—14	III	24.81	a	24.9	21.7	54.00	—	55.3	1.02	—
16	II—1	III	31.82	a	22.2	22.2	70.67	—	70.2	0.995	—
17	II—6	III	32.23	b	22.8	22.2	71.10	47.5	65.5	0.92	1.38
18	III—11	III	39.61	a	21.0	22.7	90.00	—	81.6	0.91	—
19	III—12	III	39.35	b	21.0	22.7	89.00	53.0	74.9	0.84	1.41
20	IV—9	III	46.60	b	20.5	22.2	103.80	69.0	74.5	0.715	1.08
21	IV—10	III	46.60	a	20.5	22.2	103.80	—	82.9	0.80	—
22	V—2	III	35.32	b	22.7	24.8	87.74	54.2	76.7	0.87	1.41
23	V—7	III	35.32	b	23.2	24.8	87.74	54.2	76.7	0.87	1.41
24	VI—4	III	38.80	b	24.8	26.4	102.00	87.0	92.3	0.905	1.06
25	VI—5	III	38.80	a	24.4	26.4	102.00	—	94.5	0.925	—
26	VII—3	III	42.24	b	24.7	22.5	95.10	63.3	87.8	0.925	1.38
27	VII—8	III	42.24	b	24.4	22.5	95.10	63.3	87.8	0.925	1.38

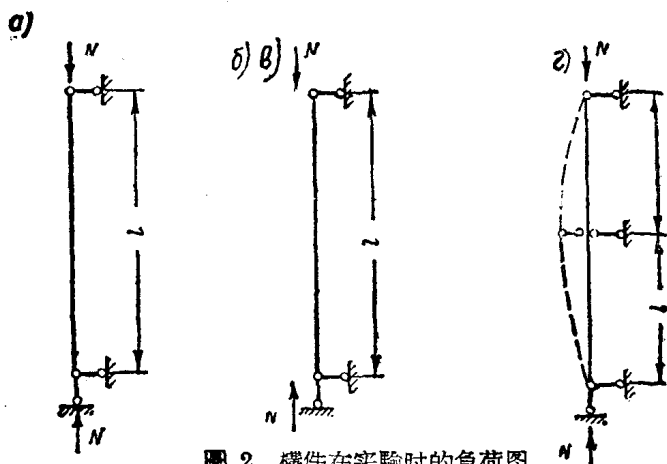


圖 2 構件在實驗時的負荷圖

表 1 的第二和第三欄列載了實驗構件的橫截面型式(其相應的尺寸參看圖1)和橫截面面積 F 。從圖 1 看出,構件型式 I 和 II 是鉚接的,而型式 III 是焊接的。

第四欄列載了構件的負荷圖,是以圖2中相應的編號來表示的。這裡圖2a 符合中心受壓,圖2b 和圖2c 分別符合力作用在腹板平面內具有偏心距的偏心受壓或作用在垂直於腹板平面內具有偏心距的偏心受壓,圖2c 符合在中間支座有限被迫位移時中心受壓負荷圖。

第五欄列有杆件的長細比,而計算長度在一切情況下採取了為兩支座中心間的实际長度。杆件12與13的計算長度採取了為端支座與中間支座的兩中心間的距离。

第六欄列有整個杆件的平均屈伏點 σ_T^0 , 此屈伏點是根據試件的拉伸試驗而確定的。

組合杆件的平均屈伏點按照下式計算:

$$\sigma_T^0 = \frac{\sum F'_i \sigma_{Ti}}{\sum F'_i},$$

式中 F_i 和 σ_{Ti} —— 分别为截面中个别鋼板的面积和屈伏点。

第七和第八欄列有理論的极限軸向力值，此值是 按照橫截面上即使有一点出現屈伏就是整个構件的 极限状态的 这一假設所計算出来的。

中心受压杆件的力 N_T 按下式計算：

$$N_T = F \sigma_T^0,$$

而偏心受压的力則按下式計算：

$$N_{T1} = F(\sigma_T^0 - \sigma_u),$$

式中 σ_u —— 弯矩所产生的应力。

杆件7~9的 σ_u 值为 $0.167\sigma_0$ (这里 σ_0 为压力所产生的应力)，杆件14、17、19、20、22~24、26、27等的 $\sigma_u = 0.333\sigma_0$ ，而杆件12与13由被迫位移所产生的弯曲应力为 500 公斤/平方公分。

第九欄列有由实验所得到的极限負載 的值 N_{max} 。

第十和十一欄載有比值：

$$\alpha_1 = \frac{N_{max}}{N_T} \quad \text{和} \quad \alpha_2 = \frac{N_{max}}{N_{T1}}.$$

从表 1 看出， α_1 值在所有情况下，除構件 1、2、3、6 外，远小于 1；由此得出結論，在中心受压構件中要得到杆件材料承載能力的充分利用，即使在它的小的長細比 情况下，也是很困难的。同时構件 1、2、3、6 的 α_1 值实际上已等于 1。这是由于这些構件的制造和試驗特別精确，因此各种各样的 弯曲和偏心距已縮減至最小。但一般情况所制造出的其他構件具有縱向边缘的弯曲、傾斜，以及由于焊接所产生的初应力等等。由于这些本身的原始缺陷，应力在截面內的分布是不均匀的：它們

在边缘处小些,在截面的中央部分大些。

在个别情况下,这差数是很大的并已达到15%,甚至还要大些。

由此,可以断定,通常在计算上没有考虑到的许多原因,对于中心受压构件的极限荷载值,发生极大的影响。

如果考虑到表1中所包括的只是一般所认为的重型实体构件,但在实际结构中经常会碰到具有极为扩散的截面的构件,以及较大的薄壁构件,那么显而易见,研究对于体系的个别构件效能的降低发生影响的因素是完全必要的。应注意到另外一件事实,就是偏心受压和受压-受弯构件的 α_1 值与中心受压构件的 α_1 值区别很小。由此可以推断,纵向压力的偏心作用或杆件的横向弯曲在很多情况下降低极限压力较少。

现在我们来看 α_2 值,它是偏心受压或受压-受弯的实际极限轴向力与按照边缘屈伏所计算出的理论极限轴向力的比值。

从表1的第十一栏可以看出,除杆件7~9外,凡具有偏心距的压力,作用在与组成构件截面的两个工字钢腹板相平行的平面内时, α_2 值远超过1。由此得出结论,偏心受压和受压-受弯构件的极限压力在许多情况下远超过按照边缘屈伏计算得来的极限压力。

因此,当屈伏还没有马上侵入到没有它截面就不能工作的那个截面的部分时,只有在屈伏扩展到很大深度之后,杆件的承载能力才会耗尽。

譬如,在腹板平面内弯曲的工字型构件,在屈伏扩展到整个翼缘厚度之后,马上失掉承载能力,因为失掉了一个翼缘的工字型构件不可能承受额外的荷载。由于工字钢的翼缘厚度与整个截面的高度比较,一般是很小的,所以边缘屈伏实

实际上差不多恰好与极限力相符合。可是当工字鋼在平行于翼緣的平面內弯曲时，屈伏侵入到翼緣的极 大部分是逐渐扩展的，这里当荷载增加时，发生構件的逐渐减弱，而在此情况下把边缘屈伏的出现当作为极限状态是没有根据的。对于十字形和矩形横截面的構件也是如此。

因此，十分明显，轉移到按极限状态的結構計算，就需要修改在历史上形成的和牢固地列在金屬結構設計工程应用上的一些条例。必須詳細地研究对于金屬結構整体及其个别構件的实际承载能力发生巨大影响的一切因素，并給出設計时的正确計算方法。只有在这种情况下，可以說各种構件才有可能达到相等强度和节省用料。

因此，必須拟制出确定 在整个結構的极限状态发生以前的各种構件及其組成部分的效能的方法。在其他技术部門中，确定在整个結構的极限状态到达时的各种構件的效能，是根据經驗系数来进行的。这种方法不消說是不够完善的，但是就建筑結構來說，連这一种方法也沒有。因此 要更詳細地研究影响体系的各个構件效能的那些原因是适宜的。本文下面一章就談到了这个問題。

(二) 體系中壓杆的效能

1. 問題的提出

受压和受压 受弯構件在工程結構中經常会碰到，并且他們的型式是极其多式多样性的，例如个别的独立結構構件(柱子、桁架的弦杆或斜杆等)或附屬於某种体系的構件(如加强大型結構——具有寬的或高的腹板的梁，走廊，鉄塔等——的受压飾面板的型鋼)。

从造船和車輛制造方面可以举出許多类似这些構件的例子。

但是單独的構件其实也就是由不同部件所組成的复杂結構。譬如，工字型截面的柱子在翼緣与腹板的連接处具有剛性的和稳定的区域；但翼緣的边端随着它們的初弯曲而出現較大的变形，不能承受在面积上跟它們相等的腹板連接處附近区域所能承受的那种荷載。

本文研究由許多共同承受压力的構件所組成的体系。研究的目的是要确定影响体系的各个構件效能的那些原因，就广义而言是要了解構件。

体系中構件縮短的值，也就是兩端的近似值，是表示構件工作的主要参数。在任何的体系中各种構件的这些近似值是完全可以确定的，而它們的特点就是体系的所有構件的共同变形条件。

对于极其广泛的一类工程結構在横截面上的縱向变形是按平面定律分布的。当必須考虑到不符合这个定律的情况时，可用建筑力学方法来作出。

因此，可以根据体系的任意两个構件端点的近似比值可以确定的这一情况为出发点。

为了进行这种研究，必須有可以把所有其他構件与之相比的某一种标准；取“理想的”不会失掉稳定的中心受压直杆作为这种标准。因此，采取其材料具有最大可能的承载能力的構件作为标准。因而，与这种标准不符的一切差異將表明該構件或体系的材料承载性能的利用程度。

因为这种“理想的”構件的工作在任何荷載值下是完全一样的（壓縮图是直綫），所以把其他構件与之相比，將在两个杆件同样的縱向縮短情况下来进行。由此轉向截面縱向縮短改

变的任何其他规律一点也不困难。

2. 利用系数

假设一根无限刚性的梁(图3)由同一材料制成的和同样截面的三个杆件所支承。令杆件1为垂直的中心受压直杆;杆件2也是直杆,但是它的轴线与垂线成倾斜;杆件3具有初弯曲。

假设在 P 力作用下,上梁降低了 Δ 值,而在杆件中产生了轴向力 N_1 、 N_2 和 N_3 。

此时在杆件1和2中仅产生均匀压应力,但在杆件3中还出现由于额外弯曲所产生的弯曲应力。

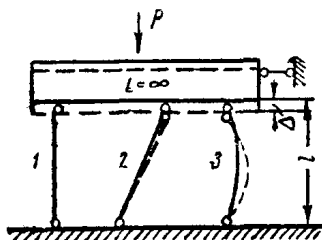


图3 具有三个不相同的支杆的体系

因此,所有三个杆件的顶端同样降低 Δ 值,这是随着不同的原因而产生的:杆件1仅是由于压缩变形 Δ_1 ;杆件2是由于压缩变形 Δ_2 和它对下部铰链的转动而产生的降低 Δ_a ;杆件3是由于压缩变形 Δ_3 和使顶端降低 Δ_u 值的弯曲。

根据所有顶端降低相等的条件,可以写出下式:

$$\Delta_1 = \Delta_2 + \Delta_a = \Delta_3 + \Delta_u = \Delta. \quad (1)$$

其相应的杆件压应力将为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 。

这些值

$$\varphi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} < 1 \text{ 和 } \varphi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} < 1 \quad (2)$$

就称为利用系数。往往叫它们是杆件2和3对于杆件1的减弱系数。

杆件 1 的压应力值可以由下式求出：

$$\sigma_1 = \frac{P}{F_1 + F_2 \varphi_2 + F_3 \varphi_3} \quad (3)$$

其余杆件的压应力将为：

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot \varphi_2 \text{ 和 } \sigma_3 = \sigma_1 \cdot \varphi_3 \quad (4)$$

按照上述可以归纳成一般的原理：凡由于本身的结果，使包含于静不定体系中的杆件长度改变的任何原因，或对于由轴向力作用所引起的纵向位移值发生影响的原因，将在某一面改变杆件的效能。

这里应该指出两类原因：第一类原因一定会使得假定为轴向受压作用的杆件变为受压-受弯杆件(杆件 3)；在第二类原因的影响下，杆件仍为直杆，并在体系中如中心受压杆件一样继续工作，但其效能改变了(杆件 2)。

第二类的原因可以考虑为彼此互不相干的，而它们共同的作用可以从分别考虑各个原因所得到的利用系数的连乘法来计算。

使杆件工作如受压-受弯一样的第一类原因应该考虑为协同的，因为在此情况下各别影响的互不相干的定律将是不正确的。

各别构件效能的降低不仅是由于各种不同原因对于它们的影响，而且还由于把构件或一组构件连接到总体系上的连杆的柔韧性，以及随着这种柔韧性整个截面的变形不符合于平面定律的影响。

这样的情况，举例来说，发生在组合构件以及具有极大扩散截面的结构中(图 4)。

因此，如果使用具有一定柔韧性的某种体系把一个或几个构件连接到结构物上，那么所有这些构件的工作效能将会

降低。为了把它们导入工作的计算截面成分内，所有这些构件的面积应该减小，并且利用系数 φ 值应该用下式来确定：

$$\varphi = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_n} = \frac{\sigma_i}{\sigma_n},$$

式中 ε_i 和 σ_i ——所研究的构件的相对压缩变形及其相应的轴向应力值，它们是考虑到联杆的柔韧性从体系的静力计算中求得的；

ε_n 和 σ_n ——同上值，它们是从假设截面的变形和应力的改变按平面定律而求得的。

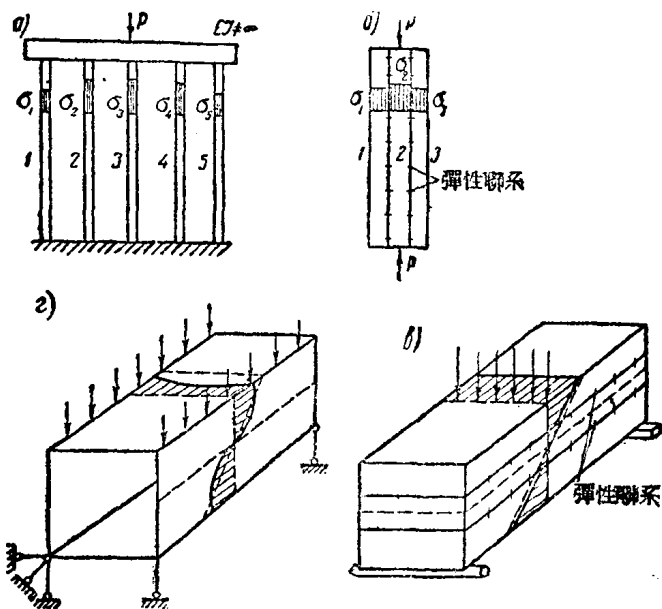


圖 4 具有不同于平面定律的受力状态的体系示例

а—有五個支杆的梁；由于上梁的弯曲变形使支杆的壓應力不同；б和в—由三個條材組成的杆件和梁；由于在連結的彈性聯杆中的剪變形，使應力不符合平面定律；г—空心梁；由於在腹版和翼緣中的剪變形，使應力不符合平面定律