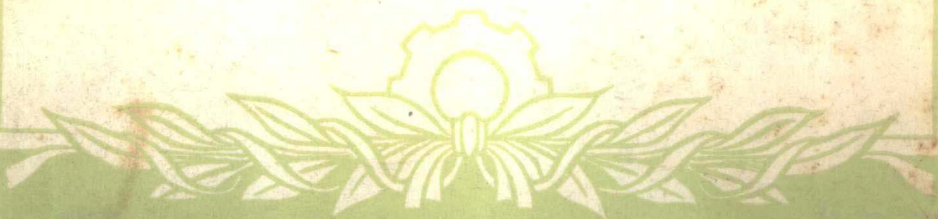


中等专业学校交流讲义

鋼結構及其制造

吉林水利水电学院編

只限学校内部使用



中国工业出版社

本书是水利电力部教育司組織編导的中等专业学校教材之一，它由吉林水利水电学院动力教研室集体編写而成。

全书除緒論外共分六章。其特点是：紧密地結合了水力动力装置专业，适当地增添了与本专业有关的内容。书中着重地闡述了鋼結構計算基础，各种連接方法，各种基本构件(梁、桁架、柱)的构造、設計、以及它們的制造方法。根据桁架設計的需要，书內还介绍了平面桁架內力的計算方法。

本书主要供給水力动力装置专业的教学使用，亦可供水工金属結構的設計和制造人員参考。

鋼結構及其制造

吉林水利水电学院編

*

中国工业出版社出版(北京佟麟閣路丙10号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印張11 $\frac{5}{8}$ ·字数274,000

1961年8月北京第一版·1961年8月北京第一次印刷

印数001—633·定价(9-4)1.10元

統一书号: 15165·614 (水电-86)

目

录

緒論	2
----	---

第一章 鋼結構的計算基础	5
--------------	---

§1-1 建筑鋼的标号	5
§1-2 軸心受拉杆件的强度計算	7
§1-3 受弯杆件的强度計算——对塑性 工作阶段的考虑	8
§1-4 軸心受压杆件的稳定性計算	11
§1-5 荷重及其荷重的組合	13
§1-6 鋼結構的計算方法	14
§1-7 建筑型鋼	18

第二章 鋼結構的連接方法	20
--------------	----

§2-1 焊接	20
§2-2 鉚接和螺栓連接	31

第三章 軋成梁及組成梁	47
-------------	----

§3-1 梁的种类	47
§3-2 板梁的高度	47
§3-3 軋成梁的計算	49
§3-4 組成梁的构造与計算	51
§3-5 梁的支座部分	76
§3-6 梁的連接	79

第四章 桁架	84
--------	----

§4-1 桁架的类型及其应用范围	84
§4-2 桁架的外形及腹杆的布置形式	85
§4-3 桁架基本尺寸的确定	86
§4-4 桁架的稳定及其支撐	88
§4-5 桁架的荷載及內力的計算	89

§4-6 桁架受压杆件的自由长度	96
§4-7 压杆及拉杆的极限长細比	97
§4-8 輕型桁架截面型式	98
§4-9 輕型桁架截面的选择	99
§4-10 輕型桁架的节点构造与計算	104
§4-11 桁架的繪图	112

第五章 实体柱与格构柱	114
-------------	-----

§5-1 柱的型式及其应用的范围	114
§5-2 柱的計算长度	116
§5-3 实体柱截面选择	116
§5-4 格构柱的稳定性計算	119
§5-5 軸心受压格构柱的截面选择	120
§5-6 綴条及綴板的构造与計算	121
§5-7 柱的底脚	126
§5-8 柱头及梁与柱的連接	134

第六章 鋼結構制造	137
-----------	-----

§6-1 鋼結構工厂的分类	137
§6-2 鋼結構工厂的組成	137
§6-3 鋼結構工厂的工艺过程	139
§6-4 鋼材准备車間	139
§6-5 放样間	141
§6-6 加工車間	143
§6-7 装配車間	151
§6-8 总装配車間	164
§6-9 油漆、装运車間	166

附录	169
----	-----

緒論

一、“鋼結構及其制造”課程內容介紹

鋼結構在工業及民用建築，橋梁及水工金屬結構等方面有着極其廣泛的應用。如工業及民用建築中的廠房及高樓的骨架、塔架和儲液庫；橋梁建築中用于公路及鐵路的各种型式的鋼橋；水工建築中用于水力樞紐、船閘及閘壩上的各种型式的鋼閘門，水電站廠房，壓力鋼管，攔污柵，以及提升鋼閘門所用的各种起門機械（如門式起重機）等。

鋼結構是由下列基本構件：梁、桁架、柱、薄殼等所組成，亦即由最堅固最勻質的材料——鋼制成的杆件和鋼板所組成。這些杆件及鋼板經過加工制造互相間用焊接、鉚接或螺栓連接成為整體的結構（如鋼閘門等），以適應建築物的要求。

因此，本課程的排列順序是：鋼結構計算基礎；各種連接方法；各種基本構件（梁、桁架、柱）；根據桁架設計的需要，本課程還將講解平面桁架內力的計算方法；最後敘述鋼結構的制造。

二、鋼結構的發展簡史

鋼結構的發展是與人類活動的歷史分不開的。大約在殷代中葉，公元前十四至十二世紀，我們的祖先便漸漸地結束了穴居生活，開始經營地面的建築。中國是世界上使用金屬結構最古老的國家。遠在秦始皇時（公元前246~210年），就已經用鐵做簡單的承重結構，而西方國家在十七世紀才開始使用金屬的承重結構。以後，在公元605年，我們祖先就智慧地用鐵鏈系舟造成了浮橋。到了宋代（公元906年~1279年）出現了鐵柱橋。公元七世紀時，開始使用鐵索懸橋。

我國金屬結構雖然用得很早，但由於過去長時期的封建統治和近百年來帝國主義列強的入侵與掠奪，使得我國的冶金工業和其它國民經濟部門一樣得不到發展；特別是在國民黨反動派統治時期，工農業生產所遭到的破壞尤為嚴重，故在1949年建國時，全國的鋼產量只有15.8萬噸。由於冶金工業的落后，這就使得我國的金屬結構事業也和其它事業一樣，不可能得到發展。

中華人民共和國的成立，标志着帝國主義、封建主義和官僚資本主義在中國統治的結束。中國人民解放後，在中國共產黨和毛主席的正確領導下，在短短的三年內（1950~1952年）就使國民經濟得到恢復，1952年鋼的年產量由建國時的15.8萬噸增加到135萬噸，而1960年，我國鋼產量已達1,845萬噸，躍居世界第六位。

與鋼鐵工業相適應的，我國的鋼結構事業和建橋技術也得到了空前的發展。

長江是亞洲的第一條大河，它使橫穿南北的京漢鐵路和粵漢鐵路不能銜接。唐代詩人李白說過：“白浪如山那可渡，狂風愁煞峭帆人”。可是在1957年10月15日，長江大橋正式通車了，狂風巨浪再也擋不住運輸車輛的南來北往。

武漢長江大橋是我國第一個五年計劃的重點建設工程之一，它不僅規模宏大，而且技術複雜。這一偉大工程是在蘇聯專家的幫助和指導下，由中國工程師和工人設計、制造和施工的。這說明我國鋼結構事業和建橋技術的飛躍發展，在短短的幾年內就取得了驚人的成績。

随着我国工农业生产的迅速发展，我国的水利水电事业也取得了辉煌的成就。其中水工鋼閘門方面的发展無論是数量上，尺寸上还是設計、制造和安装技术上都远远地超过了解放以前。解放后我国修建的成千上万項水利水电工程中，采用了很多不同形式、不同尺寸的水工金属結構物。今后在宏偉的社会主义和共产主义建設中，还会有更大規模的水庫和水电站建筑。这些建筑无疑的会应用大量的鋼結構，并推动着水工金属結構快速地向发展。

三、对鋼結構的要求

对鋼結構如同对其它种类的結構一样，有下列主要要求：

1. 結構要有足够的强度，保証安全，其变形应在允許的範圍內。
2. 所設計的鋼結構必須滿足結構本身的功用及使用上的要求，并須有耐久性。
3. 要千方百計地節約鋼材用量。其具体措施如下：1) 采用新的合理的設計方法——按极限状态的計算方法；2) 严格遵守節約鋼材的指示；3) 正确地規定安全系数；4) 要具有合理的結構型式，正确地规划其結構物的布置及其細部；5) 广泛地采用焊接；6) 加强鋼結構的檢查及維護，如周期性的油漆等；7) 在比較严重的侵蝕性环境下，尽量不采用鋼結構。
4. 安装架設方便迅速，以縮短工期（如起重能力在可能的条件下，使最重的部件的重量等于最大起重重量）。
5. 結構要便于制造，以有利于生产效率的提高（省工省时），并便于运输。
6. 要求美观；在首先滿足經濟适用的条件下，要求結構的外形尽量美观。

为了达到上述要求，其具体的措施是：1) 制造与架設的工业化；2) 电焊特别是自动电焊的广泛采用；3) 鋼結構物及其构件的規格化，标准化及統一化；4) 广泛地采用实腹結構，便于自动电焊，但并不降低其良好的重量指标；5) 拼接与架設連接的簡化；6) 支撑系的发展，增加其稳定性和增加結構空間勁度的剛性系統。

这几項措施对滿足上述要求和降低造价來說都是最有效、最进步、又最有发展前途的。特别是构件的标准化，最符合生产制造及装配的要求，能促进制造与架設的工业化，节省鋼材，降低生产成本，提高生产效率。例如在同一結構中，应尽可能地采用同一种直径的鉚釘，在同一个建筑物中，鉚釘直径最好不多于两种或三种。

四、鋼結構的优缺点(与其它結構的相对比較)

1. 优点：

(1) 鋼結構是最可靠的結構：由于鋼本身結晶构造的均匀性，并有很大的彈性模量，符合各向同性物体的概念，而这种概念正是我們的計算基础。因此，鋼結構可以得到准确的計算。因而鋼結構是最安全最可靠的結構，很多重要的結構物都采用鋼結構。

(2) 鋼結構是最輕的結構：鋼材具有很高的机械性能，在鋼結構中可以承受很高的应力，尺寸也相应地較小，因而鋼結構与其它各种建筑結構相比較是最輕的結構，从而便于运输及架設。

(3) 鋼結構是工业化程度最高的結構，因为鋼材的机械性能很高，制造是在近代技术基础上，在設備完善、生产率很高的特种工厂中进行的。

(4) 鋼結構在架設时是最容易装配的結構：架設时运送单元和架設单元可以用有相当研究和实践了的螺栓，鉚釘和焊缝連接起来。

(5) 鋼結構及其构件可以更換。

(6) 鋼結構在制造及架設時最為簡便，可以進行快速流水作業。

(7) 鋼結構能使我們最好地利用建築容積（因為柱的截面最小，建築高度最小，梁的高度最小）。能建造高度最高及跨度最大的建築物及結構。

(8) 鋼結構可以做成封閉不漏水、不透氣的結構。

2. 缺點：

(1) 鋼結構很容易銹蝕，而逐漸地喪失承載能力。鋼的銹蝕是一種複雜的電化學過程，能在不同的情況下按不同的次序發生，但一定要有電位差。能在帶電的水蒸氣、液體及氣體中發生。如在鋼上有一層灰層及其他吸附水分的覆蓋物，它們便能促使銹蝕的發展。鋼銹或氫氧化合物是銹蝕的最後產物之一，它具有海綿狀的結構物易於吸收水分。因此不能作為防止銹蝕的保護層，相反的，銹蝕的存在正促進了銹蝕作用的急劇發展。對鋼鐵最有害的是各種硫化物、氯化物及硝酸的淡溶液。鋼的銹蝕在最不利的條件下發展是非常快的。

由此可見，銹蝕是鋼結構的一個缺點，特別是对水工鋼結構，需要嚴格地加以保護以防止鋼的銹蝕。

防止銹蝕的辦法是加保護層，如漆油、塗料或電鍍，應用不銹鋼，採用特種的結構型式，使結構物沒有縫隙凹槽等。因為這些地方最易因藏垢存水而銹蝕，經常的清掃，檢查和定期油漆等都是防止銹蝕的好辦法。這樣一來，鋼結構的養護費用就要比其它結構貴的多，經常與水接觸的水工鋼結構如閘門等，更應該注意油漆防銹問題。在水位漲落頻繁并有漂浮物的水庫或河道中，鋼閘門的油漆除了必須用紅丹塗第一道外，還必須採用防水的油漆塗第二道。如果缺乏這種防水的油漆，也可以在紅丹外加塗柏油。柏油對於水及酸的抗力都很強。

(2) 鋼結構所用的材料(鋼)產量有限，而鋼是國家一切經濟建設和國防建設的重要材料之一，所以只在不能以其它材料代替鋼的時候才能採用鋼的結構。

(3) 鋼結構由於成本高而限制了它的使用。並且在發生火災時不能耐久，因此需要有保護層，但对水工鋼結構這一點並不嚴重。

第一章 鋼結構的計算基礎

§1-1 建築鋼的標號

鋼料的生產，鋼的成分、結晶構造及其性能，在金屬工藝學中均有較詳細的講述，故本書從略。這裡只對建築鋼的標號予以說明，並簡單地介紹各標號的應用範圍，同時要結合專業來說明水工鋼結構（閘門和鋼管等）常用的鋼材標號。

製造鋼結構最常用的是熱軋碳素鋼，一般稱它為建築鋼。有時在結構中還會用到鑄鋼、鍛鋼及生鐵。所謂鑄鋼乃是将煉好的鋼直接鑄成各種結構零件（如支座等），如果再將某些鑄成的零件（如鉸、輥軸等）經過熱處理即成鍛鋼。

普通熱軋碳素鋼按照供應時所保證的性質特性分為A、B兩類。A類是按鋼的機械性能來分類，而B類則是按照化學成分來分類。

蘇聯出品的建築鋼的標號按A類分，可分為：Ст.0，Ст.2，Ст.3，Ст.4，Ст.5等標號，標號較大者，含碳量較多，強度較高。

目前，蘇聯所用的低合金鋼（高級建築鋼）有兩種標號：HЛ1及HЛ2。表1-1即為蘇聯各種標號建築鋼的規格。

表 1-1 蘇聯建築鋼的規格

標 號	機 械 性 能				化 學 成 分			制 造 方 法
	強度極限 σ_{Hk}	屈服極限 σ_r	伸 長 率 δ	沖 擊 韌 性 a	碳	硫	磷	
	公斤/毫米 ²	公斤/毫米 ²	%	公斤-米/厘米 ²	%	%	%	
			不 小 于			不 大 于		
Ст.0	32~47	19	18	—	≤0.23 ≤0.14	0.06 0.07	0.07 0.09	馬丁法 柏塞法
Ст.2	34~42	22	26	—	0.09~0.15	0.055	0.05	馬丁法
Ст.3	38~47	24	21	8① 10②	0.14~0.22 ≤0.12	0.055 0.065	0.05 0.085	馬丁法 柏塞法
Ст.4	42~52	26	19	—	0.18~0.27 0.12~0.20	0.055 0.065	0.05 0.085	馬丁法 柏塞法
Ст.5	50~62	28	15	—	0.28~0.37 0.17~0.30	0.055 0.065	0.05 0.085	馬丁法 柏塞法
HЛ1	≥42	30	20	8	≤0.15	0.045	0.04	馬丁法
HЛ2	48~63	34	18	6	0.12~0.18	0.045	0.04	馬丁法

①適用於鋼板。②適用於型鋼。

我國出品的建築鋼的標號按A類分，有與蘇聯標號相對應的標號：尤₀，尤₂，尤₃，尤₄，尤₅，等。表1-2為我國各種標號建築鋼的規格。

鋼結構中應用的黑色鑄造金屬可分為：1)碳素鑄鋼；2)灰鑄鐵；3)鑄鐵板（不成錠的鑄鐵塊）。

一般鋼結構所用的碳素鑄鋼，有以下三種標號：15-40 20，35-50 15和25-45 22。

鑄鋼的標號，由三組數字組成：第一組數字（15，35，25）表示平均含碳量的百分數（即0.15%，0.35%，0.25%）；第二組數字（40，50，45）表示拉力強度極限，單位為公

表 1-2 我国建筑鋼的規格(摘自1954建筑工程部鋼結構設計規範試行草案)

鋼 名	鋼 号	拉力极限強度 公斤/毫米 ²	延 伸 率 %		屈服极限 公斤/毫米 ²	元 素 含 量 极 限 %			制 造 方 法
			长 試 样 δ ₁₀	短 試 样 δ ₅		碳	硫	磷	
			不 得 小 于				不 得 超 过		
普 通 热 軋 碳 素 鋼	尤 ₀	32~47	18	22	19	0.23以內 0.14以內	0.060 0.070	0.070 0.090	平 炉 酸性轉炉
	尤 ₂	34~42	26	31	22	0.05~0.19	0.055	0.050	平 炉
	尤 ₃	38~47	23~21	27~25	24	0.14~0.22 0.12以內	0.055 0.065	0.050 0.085	平 炉 酸性轉炉
	尤 ₄	42~52	21~19	25~23	26	0.18~0.27 0.12~0.20	0.055 0.065	0.050 0.085	平 炉 酸性轉炉
	尤 ₅	50~62	17~15	21~19	28	0.28~0.37 0.17~0.30	0.055 0.065	0.050 0.085	平 炉 酸性轉炉
鉚釘 用 热 軋 碳 素 鋼	尤 ₂	34~42	26				0.050	0.050	平 炉
	尤 ₃	38~47	22				0.050	0.050	平 炉

表 1-3 各种标号的鋼或鑄鉄的应用范围

	鋼 或 鑄 鉄 的 应 用 范 围	所 用 标 号	
		主 要 的	許 可 的
1	工业与民用建筑及結構物的鋼結構(除下述2、3两种用途以外)	Cr.3 HJ1 HJ2	Cr.0 Cr.4 Cr.5
2	鋼板結構(薄壁容器, 管道等)	Cr.2 Cr.3 HJ1	Cr.0
3	用軋成鋼管作承重結構	Cr.2 Cr.4	—
4	铁路与公路桥梁的桥跨結構	Cr.3 HJ1 HJ2	—
5	重要鍛件	Cr.5 Cr.3	Cr.4 Cr.0
6	結構之軸心受力构件(柱, 支座, 矿井短管, 拱与拱冠的构件)及建筑零件(柵栏, 門, 格条, 柱头, 存雕等)。	鑄 鉄 Cq12-28 Cq15-32 Cq18-36 Cq21-40 Cq24-44 Cq28-48	
7	工业与民用建筑結構的支承部分	鑄 鋼 15—4020 25—5015	
8	铁路公路的支承部分	25—4522	

注: 1. Cr.0不是标准的, 按其本质来說是Cr.3的廢品, 只能用于第一項所指鋼結構中可不必計算的构件。

2. Cr.2有較大的伸长率, 冶炼較难, 也較貴, 只用于要求具有顯性受拉的地方, 如鋼板結構及其鉚釘。

3. HJ1与HJ2为低合金鋼(高級建筑鋼), 可用于各种荷重的鉚接重型結構中, 但对于焊接結構只能用于不直接受动荷重的焊接輕型結構中(如屋頂及柱的构件), 而且焊接的构件厚度不超过30毫米。

4. 标号Cr.0, Cr.2, Cr.3, Cr.4, HJ1, HJ2等鋼用于焊接桥梁与桥式吊車时, 应做可焊性試驗。

5. 在有特殊必要时HJ1与HJ2可用Cr.5来代替, 但只能代替鉚接結構。

斤/毫米²；第三組数字(20, 15, 22)表示对标距为5d試件的伸长率，以百分数計。

一般鋼結構所用的灰鑄鐵，其标号有五种：CЧ-12-28, CЧ-15-32, CЧ-21-40, CЧ-24-44和CЧ-28-48。

灰鑄鐵的标号也是由三个部分組成：前面的俄文字母是灰鑄鐵的代号，第一組数字(12, 15……)是受拉力时的最小强度极限，单位为公斤/毫米²；后面的一組数字(28, 32, ……)是受撓曲时的最小强度极限，单位为公斤/毫米²。

鑄鐵制件的优点是价格低廉，抗腐蝕能力較好；其缺点是鑄鐵制件比鋼制件重，有少許变形就会发生裂縫，脆，有断裂的危險。

为保証建筑鋼有足够的韌性，含碳量不能太大，按規定不得大于0.3%。在普通建筑鋼中，含碳量在0.09%—0.22%之間。对影响鋼变脆的有害杂质磷(P)和硫(S)也有限制，按規定磷的含量一般小于0.05%，硫的含量一般小于0.055%。

我国常用的建筑鋼为 γ_2 和 γ_3 ，最常用的还是 γ_3 。

在水工鋼結構中，目前，鋼閘門用的主要材料是普通质量热轧碳素馬丁鋼 CT.3 其强度极限为38公斤/毫米²，屈服极限不低于23公斤/毫米²，长試样的相对伸长率不小于21%，鋼的含碳量为0.12~0.22%。滿足要求的CT.3桥梁鋼也可应用。如果有特殊論据时，也准許用标号为HЛ2和其他低合金鋼。用之于压力鋼管的外壳和鋼管外面需要計算的全部构件的鋼，其标号均为CT.3的脫氧熔炼的馬丁鋼。机械零件和支撑零件用 CT.3, CT.4, CT.5；鉚釘用CT.2, CT.3，但在用HЛ2的鋼結構設計中鉚釘应采用 HЛ1。水工鋼結構中鑄鋼制件所用的鑄鋼标号与一般鋼結構中所用者不尽相同，其标号为15-40 22, 15-40 28和35-50 15。用这几种标号的碳素鑄鋼制成的鑄件，在鑄成后須进行烟火处理。

据苏联标准，制造水工金属結構中的閘門和其他結構的最好材料，是桥梁制造业中的热轧碳素鋼：焊接閘門用M16C号鋼，鉚接用CT.3_{нот}号鋼。但是这种鋼最貴，因此，只有在必要的情况下，才用它来制造运用条件极坏的结构。

§1-2 軸心受拉杆件的强度計算

当杆件受軸向力作用时，截面上的应力是假定平均分布的。但在截面改变处，如孔缺、裂縫以及其他不平整的地方，应力分布的均匀性就被破坏了：在靠近孔缺的点上形成应力高峰，而在另一些点上应力减低，这种应力不均匀的現象称为应力集中。这些点的实际应力与平均应力(基本应力)之差称为局部超应力。

图1-1所示为一块具有圆孔的鋼板，两端受軸向拉力 N 的作用时，在彈性范围内的应力分布情形；靠近孔边是主应力綫拥挤和弯曲利害的地方，应力提高也愈大。最大高峰应力較平均应力一般可大2~3倍。

在靜載作用下，当高峰应力达到屈服极限时，邻近应力較低的点能阻止应力高峰点的塑性变形，使高峰应力保持在屈服极限上，而截面其他各点的应力还可繼續增长而赶上停止增长的高峰应力。如鋼的屈服期較大，則截面上的应力漸趋平均，直到全部截面的应力达到屈服极限为止。

由于鋼料具有这种塑性工作的优越性能，所以在計算軸心受拉杆件时可采取淨截面上的平均应力，不考虑应力集中的影响。

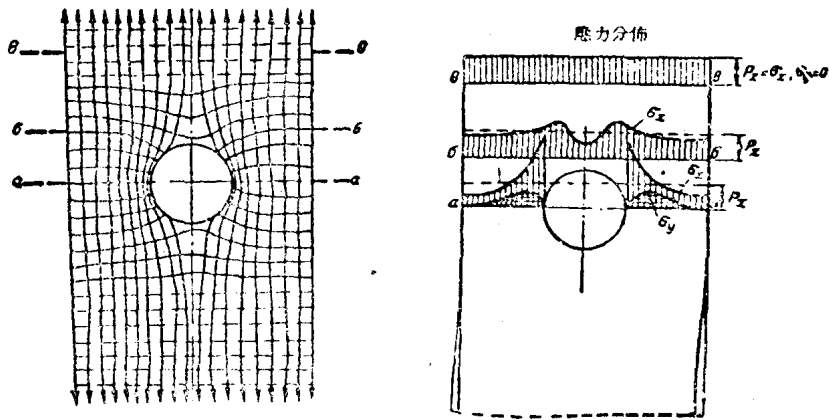


图 1-1 靠近圆孔处的主应力线图及应力分布图

但由于靠近应力高峰处塑性变形的发展被阻止，因而促使钢料转入脆性状态，这种情形在一般计算中不考虑，因一般应力集中的范围甚小，影响不大。但在当杆件的截面形状有突然变化时，例如，当杆件的截面有尖锐的缺口或横向裂缝时，则高峰应力特别大，常导致脆性断裂的可能，因此在构件上应避免截面形状有突然的变化。

图 1-2 所示为一铆接杆件的节点连接，其所受的轴心拉力为 N ，在验算强度时应考虑受力最大的断面 1-1 及减损最多的断面 2-2，验算拉杆的强度可用下式：

$$\sigma = \frac{N}{F_{nr}} \leq [\sigma]; \quad (1-1)$$

式中 F_{nr} ——拉杆的净截面积；
 $[\sigma]$ ——钢料的许用应力。

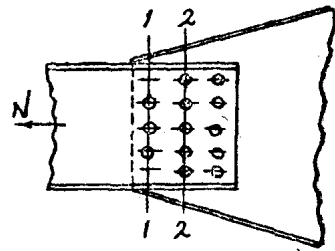


图 1-2 杆件受力最大的断面 1-1，杆件减损最多的断面 2-2

§1-3 受弯杆件的强度计算——对塑性工作阶段的考虑

钢杆件在受弯时的屈服极限和受轴向力时的屈服极限差别很小，通常都视作相等。

当受弯的钢杆件截面边缘纤维达到屈服极限时，并不表示承载能力的消失，因为邻近应力较小的纤维仍能受力，故荷重和弯矩仍能增加。若假定为理想塑性物体，则当截面上全部纤维的应力都达到屈服极限时，承载能力才消失。

这时弯曲应力图为两个矩形(图 1-3b)，其极限弯矩显然等于：

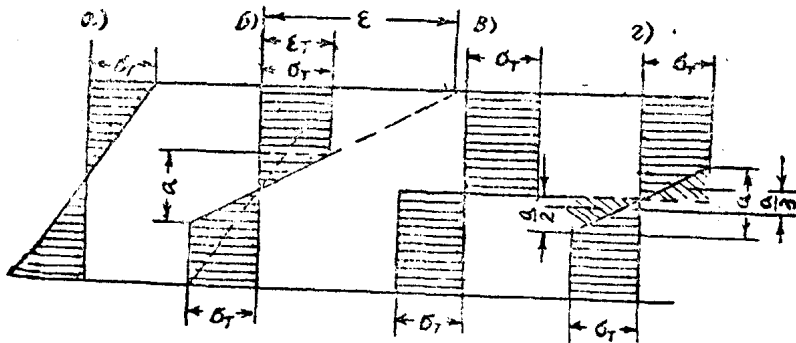


图 1-3 弯曲应力图

$$M_{np} = \sigma_r \int y dF = \sigma_r (S_1 + S_2); \quad (1-2)$$

式中 $S_1 + S_2$ ——上部截面与下部截面对中和轴静矩之和。

当截面上全部纤维都处于屈服极限阶段时，应力不增加而纤维长度可以改变，因此受弯杆件可绕该截面的中和轴旋转，称这种情况为塑性铰。塑性铰与普通铰的区别是：在普通铰中弯矩为零，而在塑性铰中作用着弯矩 M_{np} ；此外塑性铰只能在极限力矩的作用方向转动，当方向相反时使应力减小，部分纤维又重新变为弹性，塑性铰即被封閉。

为了得知当按塑性工作计算究竟比一般按弹性工作计算增大多少，从而进一步地明确承载能力，试比较二种极限弯矩：

$$M_{np} = \sigma_r (S_1 + S_2) \text{ 与 } M = \sigma_r W,$$

由此可见， $S_1 + S_2$ 的作用相当于截面抵抗矩 W ，因此称 $S_1 + S_2$ 为塑性抵抗矩，并以 W_{na} 来表示，即：

$$W_{na} = S_1 + S_2;$$

当对称截面时： $W_{na} = 2S$ ；

当矩形截面时： $W_{na} = \frac{bh^2}{4}$ ，

$$W = \frac{bh^2}{6};$$

故

$$\frac{W_{na}}{W} = \frac{bh^2/4}{bh^2/6} = 1.5.$$

对工字形截面： $\frac{W_{na}}{W} = \frac{2S}{W} = 1.17$ (平均值)。

剪应力的存在，大大地加速了塑性变形的伸展，此时塑流现象(屈服现象)不是当法向应力达到屈服极限时发生的，而是当折算应力(化算应力或比较应力) $\sigma_{np} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$ 达到屈服极限时就开始出现塑流了。因此当最外边纤维应力 $\sigma = \sigma_r$ 时，截面中的折算应力将大于法向应力，故三角形的法向应力图被凸弧形的折算应力图所代替(图1-4)。图中在中和轴处的应力为 $\tau\sqrt{3}$ 。显然在截面内各点折算应力比法向应力早达屈服极限 σ_r 。当有较大剪应力时塑流可以在中和轴附近出现；并迅速地传播于整个截面。在工字截面中塑流可能在腹板和翼缘连接处最先发生(图1-5)。

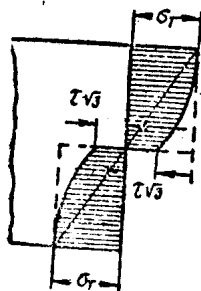


图 1-4 存在剪应力时的折算应力图

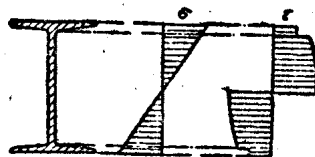


图 1-5 工字形的弯应力及剪应力图

当折算应力达到屈服极限时($\sigma_{np} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sigma_r$)， σ 和 τ 的变化只能彼此相反，即 σ 增加时 τ 应减小，或反之。显然，当荷重增加使截面绕中和轴转动增加时，所增加的

应力是 σ ，则在 $\sigma_{np} = \sigma_T$ 的区域内 τ 应减小，但因荷重增加时， τ 也随之增加，故所减小的 τ 应在截面的弹性区域内得到补偿，以求平衡(图1-6)。因此在截面中间部分 τ 剧烈增加，也很快地增加了该区域内的折算应力，使达屈服极限，而伸展塑性。

由于 W_{np} 和 W 相差很大，故考虑梁的塑性变形将能得到很大的经济效果，但采用这样的计算在苏联的设计规范上有很多限制：

- 1) 仅当剪应力很小时(即当弯矩最大处的剪应力 $\tau \leq 1.4[\sigma]$ 时)才考虑塑性变形。
- 2) 梁需固接，保证有足够的稳定性，因当翼缘达到塑流后，偶然有较小的侧向力作用，稳定性就成问题。
- 3) 仅适用于轧成梁及等截面的焊成梁。对轧成梁，若以主要荷重计算能保证总稳定性时，则应考虑由塑性变形之影响，将截面矩增大15%。对于跨度相同或不同而差别不大于20%的等截面连续梁(轧成或焊成)，以主要荷重计算能保证其稳性时，得考虑由于塑性变形的影响，其挠矩可按跨度相同的简支梁因相同荷重而生之最大挠矩的2/3计算。在此情况下，焊接梁之翼缘板每层厚度不得小于其宽度的1/20，并应以连续焊接联接于腹板。降低计算挠矩与增加截面抗矩不可同时进行。

对铆接梁塑性铰的出现问题尚不十分清楚，对变断面梁塑性铰出现的位置很难确定，故对此种梁不考虑塑性变形的影响。

- 4) 只适用受静载作用，因在动载作用下塑性来不及发展。

受静荷重的连续型钢梁(限制条件相同，且跨度大致相同，彼此相差不及20%时)，可以考虑塑性来计算。因为连续梁是静不定体系，只有它的静力连系出现数个塑性铰之后才可能破坏。

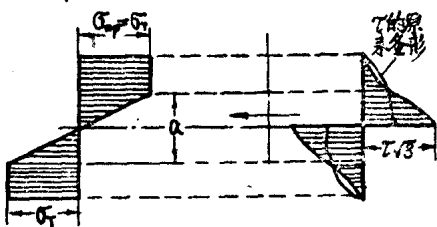


图 1-6 梁截面上塑性扩展时剪应力图的变化

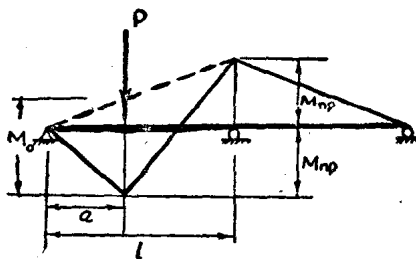


图 1-7 考虑塑性变形时连续梁的计算

图1-7是等截面三跨连续梁，端跨上作用荷重 P ，并将 P 放置得能使力矩图在跨内的坐标为最大。梁在此坐标截面处的断面中，力矩最先达到极限力矩(M_{np})，且停止发展，在此断面出现塑性铰。这时整个体系并不因此而失去承载能力，当荷重继续增加，在第一支座上的负力矩达到极限力矩 M_{np} ，即在該断面也出现了塑性铰，这时体系变成了几何可变体系(破坏)。

力矩图中表示得很清楚，在出现第二个塑性铰之后，极限力矩和简支梁跨中弯矩的关系如下：

$$M_{np} = M_0 - M_{np} \frac{a}{L}$$

若 $a = \frac{L}{2}$ 时(这是最常有的情况)，则：

$$M_{np} = M_0 - \frac{1}{2} M_{np},$$

或

$$\frac{3}{2} M_{np} = M_0, \quad M_{np} = \frac{2}{3} M_0;$$

式中 a ——由跨內的塑性鉸到零力矩支座的距离;

M_0 ——簡支梁跨中弯矩。

§1-4 軸心受压杆件的稳定性計算

軸心受压杆件強度的驗算和軸心受拉杆件相同:

$$\sigma = \frac{N}{F_{\mu t}} \leq [\sigma]. \quad (1-3)$$

对于細而长的軸心受压杆件仅仅驗算其强度是不够的, 而更重要的是必須驗算它的稳定性。因为很多的压杆破坏的經驗和試驗結果証明: 細长的杆件在軸心压力作用下, 往往在应力未达到屈服极限之前, 就会失去原来直綫稳定状态, 而发生纵向弯曲, 导致杆件的稳定性破坏。

一体系受任何外力作用, 当外力去除后, 这体系能恢复原来位置, 体系的这种状态称之为稳定状态。

細而长的軸心受压杆件有两种稳定状态: 1) 直綫稳定——杆軸保持直綫时, 2) 曲綫稳定——杆軸为曲綫时。

直綫形的軸心压杆如偶然受到小的側向力作用, 压杆即行弯曲, 当軸心压力小于一定值时, 則將外力去除后, 压杆即能恢复原来的直綫状态, 即压杆能保持直綫稳定。但当軸心压力超过这一定值时, 則側向力去除后不能恢复原状, 而变形繼續增加直至破坏。这一定值的压力即称为临界压力 (N_{kp})。临界压力 N_{kp} 的計算, 可用欧拉公式:

$$N_{kp} = \frac{\pi^2 EJ}{l_0^2}; \quad (1-4)$$

式中, l_0 为压杆的自由长度 (或称曲折长度, 或計算长度), 它根据压杆两端的支承情形而定 (图 1-8) 一般自由长度 l_0 均以压杆的实际长度 l 乘以长度系数 μ 即 $l_0 = \mu \cdot l$ (l_0 普通也可看做压杆弯曲綫上弯矩为零的轉折点間的距离)。

由上式即可求得临界应力 σ_{kp} 。

$$\sigma_{kp} = \frac{N_{kp}}{F} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (1-5)$$

式中, λ 为压杆的长細比。为压杆的自由长度 l_0 与截面的回轉半徑 r 之比, 即:

$$\lambda = \frac{l_0}{r}.$$

欧拉公式是根据材料为完全彈性体, 并服从虎克定律的彈性理論得出来的, 因此只适用于临界应力不超过比例极限 ($\sigma_{kp} \leq \sigma_n$) 的情况。普通建筑鋼 $\sigma_n = 2000$ 公斤/厘米², 此

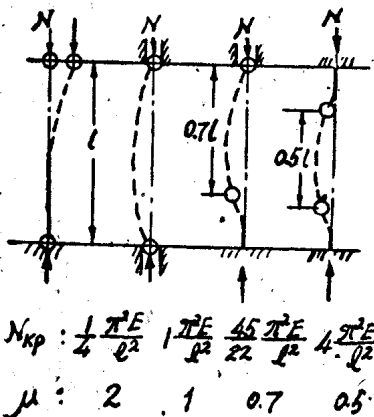


图 1-8 四种不同的支承情况下压杆的临界压力 N_{kp} 和自由长度 l_0 的系数 μ

值代入上式即得:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 2.1 \times 10^6}{2000}} \approx 100. \quad (1-6)$$

这就是說: 欧拉公式只有在 $\lambda > 100$ 时才能应用。对于高級建筑鋼 $\sigma_n = 3000$ 公斤/厘米², 則 $\lambda > 85$ 时才能应用, 故有时称欧拉公式为长柱公式。

当 $\lambda < 100$ (或 $\lambda < 85$)时, 即当压杆具有中等或較小的长細比时, 其稳定性丧失的临界应力已超过了弹性限度而进入塑性阶段。这时弹性模量 E 不再保持常数, 因此, 欧拉公式已不适用。关于这种具有中等或較小长細比的压杆的临界应力的計算有很多經驗公式, 而在鋼結構方面比較适用的是与欧拉公式相似的恩格塞尔(Энгельс)公式:

$$\sigma_{kp} = \frac{\pi^2 T}{\lambda^2}; \quad (1-7)$$

式中 T ——纵向折曲的化引模量(或纵向曲折模量), 可用公式表示如下:

$$T = \frac{EJ_1 + E_{na}J_2}{J}; \quad (1-8)$$

式中 J_1 和 J_2 ——杆件截面受压与受拉两部分对中和軸的慣性矩;

E_{na} ——塑性变形模量, 是变化的。

对于 T 值的研究是和苏联雅辛斯基教授等分不开的, 故又称 T 为雅辛斯基-恩格塞尔-卡尔曼模量。图1-9所示为 T 值与长細比 λ 的关系曲线。

上述的压杆稳定性理論(欧拉公式及恩格塞尔公式)与許多压杆的試驗結果很相符合(图1-9), 因此这两个公式具有很宝贵的实用价值。从图中所示的 $\sigma_{kp} - \lambda$ 曲线可以看出下述結論:

1) 当 $\lambda > 100$ 时, 根据欧拉公式計算出的 σ_{kp} 仅与 λ 有关, 而与 σ_T 无关。

2) 当 $\lambda < 100$ 时, 据恩格塞尔公式計算出的 σ_{kp} 不但与 λ 有关, 而且和 σ_T 有密切的关系。

3) 不論 λ 之值如何, 压杆稳定性破坏的 σ_{kp} 总低于 σ_T , 因此在計算压杆稳定性时, 必須降低它的許用应力, 即:

$$\frac{N}{F_{\sigma p}} \leq \varphi[\sigma]; \quad (1-9)$$

式中 $F_{\sigma p}$ ——压杆毛截面积;

$\varphi = \varphi_1, \varphi_2$ ——軸心压杆計算稳定性时的折減系数;

其中 $\varphi_1 = \frac{\sigma_{kp}}{\sigma_T}$ ——考虑临界应力低于屈服极限所得的折減系数, σ_{kp} 随 λ 而变, 而 σ_T 与鋼料种类有关, 故可将建筑鋼的 φ_1 值当作 λ 的函数繪成 $\varphi_1 - \lambda$ 曲线。图1-10为普通建筑鋼Ст.3的 $\varphi_1 - \lambda$ 曲线;

$\varphi_2 = \frac{\sigma_{kp}^{BII}}{\sigma_{kp}^H}$ ——考虑压杆可能存在的各种偶然偏心影响的折減系数;

其中 σ_{kp}^{BII} ——計入偶然偏心的临界应力;

σ_{kp}^H ——軸心受压的临界应力。

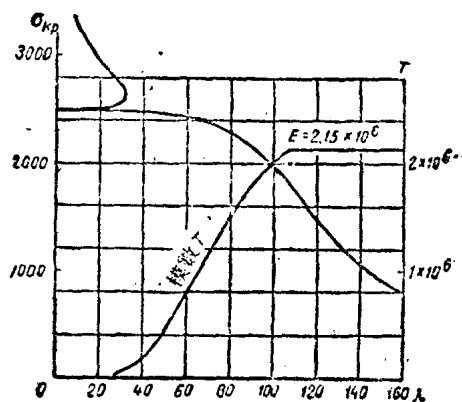


图 1-9 压杆稳定性的临界应力曲线及纵向屈折模量曲线

在实际结构中，偶然偏心往往是不可避免的，如材料的不均匀性、构件轻微的初曲率、构件的轴线与截面重心的不重合等(图1-11)，这些偶然偏心对不同长细比的轴心压杆的影响可用统计方法求得。兹将 $\varphi_2-\lambda$ 曲线也绘在图1-10中。

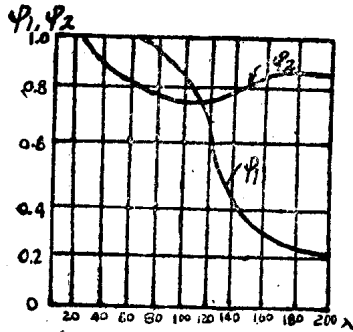


图 1-10 折减系数 φ_1 及 φ_2

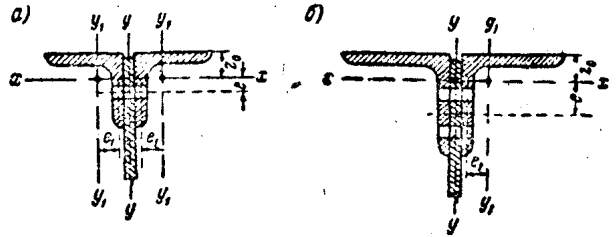


图 1-11 铆钉接合对于截面重心的偏心

兹将我国铁道部及建筑工程部规范中规定的 φ 与 λ 的函数值分别摘录于表 1-4 和 1-5 中，设计时可据 λ 值查 φ 值。

表 1-4 铁道部“铁路桥涵设计规程”规定的轴心压杆折减系数

构 造 钢		高 级 钢		钢 (πK鋼)	
λ	φ	λ	φ	λ	φ
0-40	0.900	120	0.442	0-40	0.900
50	0.860	130	0.396	50	0.880
60	0.794	140	0.358	60	0.810
70	0.734	150	0.320	70	0.730
80	0.670	160	0.285	80	0.595
90	0.610	170	0.260	90	0.493
100	0.550	180	0.235	100	0.410
110	0.495	190	0.215	110	0.350
120	0.442	200	0.200	120	0.310
				130	0.280
				140	0.250
				150	0.225
				160	0.200
				170	0.180
				180	0.165
				190	0.150
				200	0.140

表 1-5 轴心压杆的许可应力折减系数 φ (摘自建筑工程部“钢结构设计规范”)

λ	φ	λ	φ	λ	φ	λ	φ
10	0.99	60	0.86	110	0.52	160	0.29
20	0.96	70	0.81	120	0.45	170	0.26
30	0.94	80	0.75	130	0.40	180	0.23
40	0.92	90	0.69	140	0.36	190	0.21
50	0.89	100	0.60	150	0.32	200	0.19

§1-5 荷重及其荷重的组合

作用在建筑结构上最主要的荷重有：

(1) 呆荷重：结构的自重以及作用在结构上的一切经常不变的荷重称为呆荷重，也称为恒载。它的主要特点是它的大小不随时间而变化。呆荷重决定于结构的尺寸，而该

尺寸又是設計和計算的結果，所以在設計之后应对該荷重进行驗算。在初步設計時，結構的自重可以根据一般已成結構的經驗公式或单估的計算予以假設。

(2)活荷重：并不經常作用在結構上的荷重称为活荷重。它主要的特点是并非經常有的，在某些時間可能存在；而在另外一些時間又可能不存在；而且存在時在結構上可能占有不同的位置，在結構工作的各个时期內其数值也可能不同。这是因为該荷重根据結構的使用条件及外在条件而定，因此活荷重是随時間而改变的。

活荷重是結構物主要負担，它依結構的用途而定，如作用在閘門上的水压力；作用在樓板上的人重及貨物、設備等的重量；作用在厂房結構上的吊車以及作用在桥梁上人与車輛等的重量均属活荷重。

(3)大气荷重：包括风荷重及雪荷重。雪荷重根据地区以及結構物堆积条件而定。风荷重根据当地的风速求出风压力，并根据結構物的形状乘以空气动力系数而得风在結構物上的作用力。空气动力系数有些值是正的，但也有許多值是負的。空气动力系数是負值，表明了风对結構物产生了吸力作用，这是因为气流經過結構物形成渦流，使背风面空气压力降低的結果。如图1-12。

(4)温度作用：在超靜定結構中才考虑温度作用，它按温度的最大差額来計算。

(5)地震作用：地震作用在地震的区域內才加以考虑，其作用力的大小根据該区域地震等級而定。

(6)安装荷重：建筑物在安装时所承受的荷重称为安装荷重。这些結構物的构件尚未完全固定，或結構在安装时在結構上正运行着安装吊車，这类荷重待安装完后建筑物即不再承受。

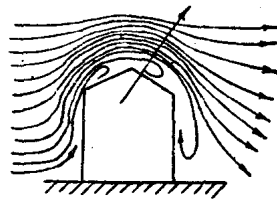


图 1-12 风的吸力作用

在规范中所規定各种荷重的大小是指結構物在正常使用过程中的最大荷重，这种規定的荷重数值称为标准荷重。

各种荷重并不是个别作用在結構上，而是彼此組合在一起成一定的形式作用在結構物上。荷重的組合可分为下列三种：

(1)主要組合：主要組合的荷重称为主要荷重，是結構物在工作時經常地而有規則地作用于結構上的各种主要荷重的組合。抵抗这些荷重，是結構物的承重任务。最简单的組合是呆荷重和活荷重的組合。由于在我国北方每年冬季都要降雪，所以主要荷載还包括雪載。

(2)附加組合：附加組合是指主要荷重和出現很少的附加荷重的組合。承受該荷重并不是結構物的承重目的。最普通的附加荷重是风荷重，有时安装荷重和温度作用也計算在附加荷重之內。

(3)特殊組合：特殊組合是指主要荷重与附加荷重以及极少出現的特殊荷重的組合。特殊荷重的作用常带有事故性质。典型的特殊荷重例如地震区的地震荷重。

§1-6 鋼結構的計算方法

一、結構物的极限状态及极限条件

結構物必須停止使用的状态称为极限状态。在設計中考虑下列三种极限状态。

第一种极限状态須按照承載能力(强度及稳定性)来决定。当达到这种极限状态时，

結構物喪失了抵抗外力作用的能力，使結構產生永久變形，不能繼續使用。

第二種極限狀態須按照由於荷載（靜載或動載）所發生的過大變形來決定。當達到此種極限狀態時，結構物仍保持其強度和穩定性，但所發生的過大變形和振動使結構不能再繼續使用。

第三種極限狀態須按着裂縫的擴張及局部的損壞來決定，在鋼筋混凝土結構中必須加以考慮。

每一種極限狀態都表示不同的極限條件，為了能使結構安全的使用，作用在結構物上的外力應小於能保證結構繼續使用的極限值。

計算鋼結構時的極限條件如下：

第一種極限狀態的極限條件：

$$N \leq \Phi; \quad (1-10)$$

式中 Φ ——該構件材料所能承受的極限內力；

N ——所計算杆件的內力。在設計時，為使結構保證在整個存在時期使用的可能性， N 應是建築物使用期間的最大可能內力，是該時期最大可能荷重的函數，

$$N = \sum P_i^H \alpha_i n_i; \quad (1-11)$$

式中 P_i^H ——標準荷重；

n_i ——荷重 P_i^H 的超荷係數，即在結構使用時最大可能荷重和標準荷重之比；

α_i ——該杆件對荷重 P_i^H 的影響值，也就是當 $P_i = 1$ 時的內力。

第二種極限狀態的極限條件：

$$\Delta \leq \Delta_{np}; \quad (1-12)$$

式中 Δ_{np} ——結構必須停止使用時的極限變形或變位

Δ ——結構由於外荷重作用所發生的變形或變位，可根據下式求得：

$$\Delta = \sum P_i^H \Delta_{1i}; \quad (1-13)$$

式中 Δ_{1i} ——由於單位荷重的作用，結構所產生的變形或變位。

第三種極限狀態的極限條件：

$$e \leq e_{np} \quad (1-14)$$

式中 e ——相當的裂縫開度。

裂縫的出現是在製造和安裝的過程中由於施工上的缺點而造成的缺陷，如焊接處發生的裂縫即屬於此種缺陷，它和作用力無關。因此，在設計鋼結構時，不必考慮第三種極限狀態。

二、按許可應力計算方法

為保證結構繼續使用的可能性，按第一種極限狀態計算時的基本要求：

$$N \leq \Phi;$$

式中 N ——杆件中的計算內力，在組合荷載作用下杆件中总的內力。

Φ ——杆件停止使用時的極限抗力，它決定杆件的承載能力，該值依構件的尺寸、材料的抗力和構件的工作條件而定，可用下式表示：

$$\Phi = F \sigma_m; \quad (1-15)$$

式中 F ——構件幾何因素（截面積、抵抗矩）。

σ ——材料的極限應力。