

構造物の設計基準

スチールの場合

高田 孝信

1. まえがき

構造物を設計する場合には一般につきの二つの条件をもとにして行なっている。

第一は外的条件としての荷重

第二は内的条件としての材料および構造法

である。荷重条件は人為的な社会条件や構造物に誘導された力学条件と、地震や風のような自然条件により誘発されるものがあり、その取り方についてはいずれの場合にもある程度推定によらざるをえない。

第二の条件である内的条件としての材料や構造法は構造物の要求される機能によりその種類、形態が決まられ、設計に際し比較的合理的に決められるものである。

一般に土木構造物のような公共性の強いものでは、その社会的要求や安全性を確保することがきわめて重要なことで、したがってその設計に対してはできるだけそれらを満足せしめるように荷重、使用材料、応力状態に対する基準を与えねばならぬ。本文ではまず鋼構造物（土木では橋梁がその代表的なものであるが）の設計に対する基準となる荷重条件や許容応力の取り方、きめ方について述べ、さらに構造物の安全性確保に対してそれらがいかに定められているかについて概述したいと思う。

2. 許容応力および許容変位について

構造物を設計する際最初に考えねばならないことは、構造物の機能を発揮させるための構造規模と構造形式であるが、これらをまとめあげるには、考慮すべき荷重条件、使用材料の強度、構造物各部における許容応力と変形をきめる必要がある。

鋼構造物では

一般構造部材の引張、圧縮、曲げおよびせん断力に対する許容応力

特殊構造要素——圧縮添接材、リベット、ボルト、ピン、ローラーなど——および局部応力、接合部応力などに対する許容応力

のきめ方を示す必要があるが、道路橋では一般構造部材に対するきめ方に重点をおき、建築物では局部応力や接合部応力、そのほか特殊構造部分に対するきめ方を詳細に示している。これは許容応力の取り方や安全率の取り方の相違によって起こるもので、建築物のように許容応力を大きく取っている（例えば鋼道路橋設計示方書および建築学会鋼構造計算規準同解説によれば

鋼材種類	道路橋	建築物	単位 kg/cm ²
SS 41	1 400	1 600	
SS 50	1 700	2 000	
SM 50	1 900	2 200	

となっている）ものでは応力計算もそれだけ詳細に行なわねばならないからである。

許容変形については橋梁の場合、支点間中央におけるたわみに対する規定が存在するに過ぎない。しかし、振動変位や地震時における支点の相対ずれのごときは今後規定すべき問題点である。

3. 荷重条件について

設計に対する第一の基準である荷重条件は構造物の種類により変化するが、鋼構造物の代表として橋梁を考えたも道路、鉄道によりそれぞれ特色を有しているが、いずれも社会環境としての交通事情から来る車両の大小、交通量の増大などに大きく左右されるが、鉄道橋では荷重の規制が比較的容易なのに対して道路橋ではその規制は困難である。荷重としては常時荷重としての死荷重、活荷重およびこれにともなう衝撃荷重と異常時荷重としての地震、風荷重および温度変化にともない発生する荷重などである。これらは道路橋、鉄道橋についてそれぞれの設計示方書に明示されているが、両者の差異は活荷重において端的に表われている。

(1) 道路橋の活荷重の取り方

活荷重は各部構造設計に対して最も大きな要素となり、床組構造の設計には一台の車両重量が強く影響するので、20 tトラックを橋幅方向に配列した T 荷重を考え、主桁構造に対しては荷重系列としての総荷重が大きく影響するので、20 tトラックとともに、同時に橋面全体に等分布する荷重、L 荷重を規定している。これは床組設計に用いる大重量のトラックが同時に何台も橋面上にすき間なく載荷されるということが考えられないから

で、橋軸方向には一台、橋幅方向には台数の制限を加えず、橋面上のほかの部分には換算した等分布荷重を考えたものである。

支間が大きくなると橋軸上に車両がすき間なくつまるということは少なく、また大重量の車両のみが集まるという確率も小さいから通常設計荷重を低下させることにしている。また幅員が広くなれば同じように橋面上を車両が全部おおう確率も小さい。わが国の示方書は、幅員 5.5 m を越える場合には荷重の低減率を考えている。

活荷重に対しては必然的に衝撃荷重をともなうものである。この問題は現在まで多くの理論解が出されているが、これらを設計に取り入れるまでには至っていない。というのは衝撃荷重を生ずる原因には多くの要素がふくまれているからである。橋梁自体としては支間、自重、桁の曲げ剛性などのような比較的設計の際に考えられるものと、橋面の粗滑のように設計では規制困難な問題、車両から来るものとしては走行速度や車両のばねの性状などの影響がある。一般に振動周期の短いものは衝撃作用が大きく、支間が大きく重量の大きい橋梁では衝撃荷重は小さくなる。また最近高張力鋼の使用時のように橋梁の軽量化の傾向があるが、これは走行速度の増大とともに衝撃荷重の増加を来すおそれがある。

(2) 鉄道橋の活荷重

鉄道橋では、走行車両の寸法や重量が正確に算出しやすいので規定された荷重がそのまま載荷される確率が道路橋の場合よりもはるかに大きい。

鉄道橋の活荷重の特色はその複雑な軸荷重にある。この点道路橋の活荷重とはきわめて異なった性質を示し、特に支間の短い橋梁では部材の設計がせん断力できめられることが多い。また最大曲げモーメントを生ずる位置は必ずしも支間中央に来るとは限らない。衝撃荷重については道路橋の場合よりさらに苛酷の状態となる。それは蒸気機関車のおい打作用によるもので、これは走行速度とともに増大するが、列車の電車化とともにその影響は緩和される傾向にある。しかし反面走行速度の増大は、なおその効果を打消す方向にある。

4. 使用材料の許容応力

鋼構造物使用材料の許容応力はその形状および負荷される荷重状態により異なって来る。しかしその基準となるのは JIS 規格に対する引張強度であり、構造物との関連で考える場合には作用部材の形状、寸法に対する許容応力をどれくらいに取るかという問題となり、その大きさは安全率と裏表の関係にある。

構造部材でも引張に対しては形状寸法の影響を受けることがほとんどなく、ほぼ素材の強度と同じであると見なされ、道路橋、鉄道橋ともその場合につき基準的なもの

として許容応力をそれぞれ示方書に示している。いま道路橋の場合につき引張に対する許容応力を示せば表一のとおりである。なお、鉄道橋では SS 41 に対する許容応力は 1 300 kg/cm² を取っている。これは活荷重の項で述べたように载荷の度合が道路橋の場合よりも大きいからであると思われる。なお参考までに建築物の計算規準を表二に示すこととする。

表一

鋼種	降伏点	許容応力	降伏点/許容応力	備考 (単位 kg/cm ²)
SS 41	2 300以上	1 400	1.64	抗張力 4 100~5 000 * 参考資料
SS 50	2 800	1 700	1.64	
SM 50 A	3 200	1 900	1.68	
60 キロ	4 600	2 600	1.77	

表二 建築用構造材料の許容応力 (kg/cm²)
(建築学会：鋼構造計算規準より)

種類	長期						短期
	引張	圧縮	曲げ	せん断	側圧	接触	
普通鋼材	1 400	1 400	1 400	800	2 000	4 000	長期応力に 対する値の 1.5 倍
SS 41, SM 41	1 600	1 600	1 600	900	3 000	4 600	
SS 50	2 000	2 000	2 000	1 200	3 800	5 800	
SM 50	2 200	2 200	2 200	1 300	4 100	6 300	
SV 34, 41	1 600			1 200			

溶接部の強度については鉄道橋では溶接の信頼性(工場溶接か現場溶接か、突合せかすみ肉かの外にどれだけの精密検査を行なったか)により細かく分類して許容応力を規定しているが、道路橋では検査による差異をつけていない。すなわち、道路橋では溶接部の許容応力度を母材と同じにとっているのに対して、鉄道橋では溶接の検査程度により許容応力を表三のようにわけている。

表三

			SM 41	SM 50
	引張	圧縮		
放射線検査を行なった場合	引張	張	1 300	1 800
	圧縮	縮	1 300	1 800
放射線検査を行なわなかった場合	引張	張	1 040	1 440
	圧縮	縮	1 170	1 620

なお、現場溶接に対しては鉄道橋、道路橋ともに工場溶接の場合の 90 % を取ることにしている。ただし鉄道橋の場合には引張に対しては 80 % に落としている。鋼構造物の使用材料は最近における溶接用低合金高張力鋼の開発と実用化を控えて大きく変動せんとしている。構造用鋼材としてのこの高張力鋼は大量の鋼材を有効に溶接構造とする利点がある。というのは一般に降伏点を増すのに従来は主として炭素量の増大に依存していたが、この方法では溶接性を低下させることになる。しかし、前記の低合金高張力鋼は構造用として溶接性を低下させないために炭素量はある一定の限度におさえ、少量の添加物を加えて熱処理の方法により降伏点を高めたものである。しかしこの鋼材は価格の点以外に強度に対する信頼性の上にもなお検討の余地があり、目下各種の試験と検

討が行なわれている。

5. 部材の許容応力について

以上は作用部材の形状や寸法により耐力が影響を受けない場合であるが、圧縮、曲げ、せん断力などを負荷される場合には一般に形状、寸法の影響を受けることが大きく、各示方書はそれらに対して詳細な規定を設けて許容応力を示している。その代表的なものは圧縮力に対する座屈応力の問題である。

圧縮部材の強度はオイラーによりその性状が明らかにされ、圧縮材の座屈応力は一般にはその部材の細長比 l/r (l : 圧縮部材の座屈長, r : 部材断面の二次半径で $r^2 = I/A$, ただし I は圧縮部材断面の最小断面二次率, A は断面積) の自乗に逆比例する。すなわち l/r が小さくなるにつれて座屈応力は増大するわけであるが、その関係は圧縮応力が大きくなるにつれてくずれてくる。したがって、降伏点を中心として道路橋では圧縮部材に対する許容応力に対して表-4のような規定を設けている。

表-4 単位 (kg/cm²)

軸方向引張 応力度	SS 41	SS 50	SM 50 A
	1 400	1 700	1 900
軸方向圧縮 応力度	$0 < l/r \leq 110$ に対して $1\,300 - 0.06(l/r)^2$ $l/r > 110$ に対しては $7\,200\,000/(l/r)^2$	$0 < l/r \leq 100$ に対して $1\,600 - 0.09(l/r)^2$ $l/r > 100$ に対しては $7\,200\,000/(l/r)^2$	$0 < l/r \leq 90$ に対して $1\,800 - 0.11(l/r)^2$ $l/r > 90$ に対しては $7\,200\,000/(l/r)^2$

鉄道橋の場合には SS 41 に対して

軸方向引張応力度 1 300 kg/cm²

に対して

軸方向圧縮応力度は

$0 < l/r \leq 110$ に対して $1\,200 - 0.05(l/r)^2$

$l/r > 110$ に対して $7\,200\,000/(l/r)^2$

を示している。

以上の圧縮許容応力をきめる場合に問題となるのは、圧縮長(または座屈長) l をいかに取るかということである。一般に圧縮部材の座屈荷重は同一長さの部材に対しても両端の支持条件により異なり、両端ピンの場合には座屈応力 σ_{cri} は

$$\sigma_{cri} = \pi^2 E \left(\frac{I}{r} \right)^2 \approx 21\,000\,000 \left(\frac{l}{r} \right)^2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

のように表わされ、座屈長 l は部材長に一致するが、両端固定の場合には座屈長 l はピンの場合の半分となり、座屈応力は4倍となる。しかしこのような支持条件は実際の構造部材ではありえないことで、大抵の場合には両者の中間にあるが、オイラーの式では理想的な部材に偏心のない負荷を行なった場合で、実際の部材では偏心のほかさらに部材の元わん曲や材料の不均質性などの影響も現われてくる。したがって道路橋では実験式をもと

にして許容応力をきめるほかに座屈長の取り方についても示方書でその基準を示し、また細長比も主要圧縮部材では $l/r \leq 120$ 、二次部材でも $l/r \leq 150$ に押えるようにきめており、

鉄道橋では主圧縮材に対して $l/r \leq 100$

副圧縮材に対して $l/r \leq 120$

に押えている。これは鉄道橋の方が変形、振動などに対してきびしく要求しているからである。

圧縮に対する許容応力はオイラーの式よりはるかに小さくしてある理由についてはすでに述べたが、これらを数字的に表わすまでには Tetmajer など数多くの人々の実験がなされた。それらの実験者はそれぞれ各自の実験式を示しているが、設計では利用に便利のように既述のような式で許容応力としてまとめあげたものである。

座屈の影響は当然組立部材にも現われる。結構に対する Moisseiff の実験によると組立部材の長さの 75% が座屈長に相当することを示している。

なお、建築では l/r の大小により長期および短期の負荷にわけてつぎのようにきめてある。

長期荷重に対して

$$l/r < 30 \quad 30 \leq \frac{l}{r} \leq 100 \quad l/r > 2100$$

普通鋼材	1 400	1 400—440	$\left(\frac{l/r}{100} \right)^2$
SS 41, SM 41	1 600	1 600—640	$\left(\frac{l/r}{100} \right)^2$
SS 50	2 000	2 000—1 040	$\left(\frac{l/r}{100} \right)^2$
SM 50	2 200	2 200—1 240	$\left(\frac{l/r}{100} \right)^2$

短期荷重に対して

普通鋼材	2 100	2 100—600	$\left(\frac{l/r}{100} \right)^2$
SS 41, SM 41	2 400	2 400—960	$\left(\frac{l/r}{100} \right)^2$
SS 50	3 000	3 000—1 560	$\left(\frac{l/r}{100} \right)^2$
SM 50	3 300	3 300—1 860	$\left(\frac{l/r}{100} \right)^2$

主桁のように大きな横荷重を受けるものは一般に曲げとせん断力の結合された荷重を受けるので、構造形式によってはかなり複雑な応力状態となり、簡単な規定により基準を示すことは困難なことが多く、許容応力を判定するにはできるだけ詳細な理論計算を行なうのが望ましい。曲げ部材は曲げにより当然引張と圧縮を受け、引張りに際してはフランジの幅が広くなるにつれてせん断おくれの現象が現われるので、連続箱型桁では支点付近の縁材応力についてはこの点に対する十分な検討が必要でそのせん断おくれ防止には強固な肋材の配置が望まし

い。また曲げ部材の圧縮側には当然座屈に対する配慮が必要である。曲げ部材はスパンが長くなるにつれて曲げ荷重に対して全体として横座屈(またはねじれ座屈)を生じやすくなるが、その原因は桁材のねじれ剛性不足と見られるので、箱型桁ではそのような現象は見られない。横座屈の原因はまた、フランジの横方向の曲げ剛性不足のためで、フランジの板厚は圧縮に対する局部座屈を起こさないのみならず、上記の側方座屈を起こさないためにフランジの幅 b と座屈長 l に対して圧縮に対する許容応力として鋼鉄道橋では引張許容応力(純断面積に対して)が 1300 kg/cm^2 (材料は SS 41) のものに対して

$$l/b \leq 30 \text{ の場合 } 1200 - 0.5(l/b)^2 \text{ kg/cm}^2$$

ただし、圧縮側にバックルプレートなどを連結してその座屈に抵抗できる場合またはダブルウェブ断面の場合には

$$1200 - 0.2(l/b)^2 \text{ kg/cm}^2$$

とし、鋼道路橋の場合には新しい示方書では $l/b \leq 30$ に対して

	SS 41	SS 50	SM 50
桁の引張縁	1400	1700	1900
桁の圧縮縁	$1300 - 0.6(l/b)^2$	$1600 - 0.9(l/b)^2$	$1800 - 1.1(l/b)^2$

を取っている。なお、 $l/b > 30$ の場合には圧縮フランジの $l/r(r^2 = b^2/12)$ の値がほぼ長柱の範囲になるので、この式は適用されなくなる。しかし一般には $l/b < 20$ となる。なお桁に腹板を用いるか広幅の縁材を用いるときにはそれらの板の圧縮抵抗を十分調べる必要がある。板はせん断力および引張には一般に有効に作用するが、圧縮に対してはきわめて弱く座屈を起こしやすい。この座屈はせん断力に対する弾性座屈のような場合にはあまり問題ではないが、圧縮側縁材の座屈は弾性座屈でもその後桁の強度低下を来たすおそれがあるので望ましくない。

板の圧縮強度は板周辺の拘束条件により変化する。鋼道路橋では圧縮材を有効に作用させるため、拘束条件が十分な場合には板厚をつぎに示す以上であることを規定している。すなわち

鋼板	SS 41	SS 50	SM 50
板厚 t	$b/40$	$b/36$	$b/34$

拘束が不十分な場合には板厚 t を 25% 増し以上であることを要求している。なお、道路橋では腹板のような高さ方向に曲げによる圧縮応力の分布を来たすものでは周辺拘束十分のものに対して板厚をつぎのように規定している。

鋼板	SS 41	SS 50	SM 50
t	$b/(20\varphi^2 + 25\varphi + 40)$	$b/(18\varphi^2 + 23\varphi + 36)$	$b/(17\varphi^2 + 21\varphi + 34)$

ただし

$$\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1}, 0 \leq \varphi \leq 2$$

σ_1 : 曲げにより腹板に作用する大きい側の圧縮応力度, 圧縮に対して (-)

σ_2 : 曲げにより腹板に引張が生ずる側の応力, ただし圧縮 (-), 引張 (+)

なお、建築の場合には腹板にできるだけ薄板を用いることをすすめている。そして腹板はせん断力に対して弾性座屈のみならず塑性範囲の適用を考慮に入れている。

また長方形腹板の座屈に対しては許容の圧縮応力度を規定し、

$$\text{曲げ材に対しては } t/b > \frac{1}{80}$$

$$\text{柱材に対しては } t/b > \frac{1}{30}$$

の場合には座屈に対する検討を要しないとし、また、座屈安全率 μ をつぎのように長期と短期の両負荷に対してきめている。すなわち

$$\text{長期負荷の場合 } \mu = 2.25 - \frac{3\alpha}{8}$$

$$\text{短期負荷の場合 } \mu = 1.5 - \frac{\alpha}{4}$$

ただし

$$\alpha = 1 - \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \text{圧縮応力度分布係数}$$

6. 許容応力の割増しについて

既述のように設計に際して考慮すべき荷重には常時荷重と異常時荷重の二種に大別することができる。異常時荷重は構造物の存在中まれに生ずるものか、きわめて短期間作用するもので、この両者に対して許容応力を同一に取ることはきわめて不経済かつ不合理である。したがって、異常時荷重に対しては常時荷重の許容応力を割増して取るべきである。その割増し量を数値的にはっきり打出すことは安全率(後述)の場合と同様きわめて困難であるから、いろいろの事情を考慮して道路橋、鉄道橋ともつぎのような荷重状態に分けてその割増し量を示方書に示している。建築では一般に既述のように長期荷重

表-5 各種荷重状態に対する道路橋の許容応力に対する割増率

荷 重 状 態	割増率 %
主荷重と温度変化の影響	15
主荷重と風荷重	25
主荷重と制動荷重	25
主荷重と温度変化の影響と風荷重	35
風荷重だけ	20
制動荷重だけ	20
地震荷重または死荷重と地震荷重	
鋼材に対して	70
コンクリートおよび鉄筋コンクリートに対して	50
主荷重と衝突荷重	
鋼材に対して	70
コンクリートおよび鉄筋コンクリートに対して	50
架設荷重	25

表一6 各種荷重状態における鉄道橋の許容応力に対する割増率（昭和31年鋼鉄道橋設計示方書）

荷 重 状 態	割増率 %
主荷重と風荷重および横荷重	25
主荷重と制動荷重または始動荷重	25
主荷重と風荷重と制動荷重または始動荷重	40
風荷重と制動荷重または始動荷重	25
主荷重と地震荷重	75
地震荷重	75
架設荷重	70

と短期荷重に分け、後者は前者の5割増しというように簡単にわけている。ただし、座屈をとまなうような圧縮部材に対しては既述のように細かく規定している。

7. 安全率に対する考え方と取り方

構造物の設計を行なう場合、荷重条件が与えられると構造形式や寸法をきめることになるが、その際その荷重条件に対して部材応力をいかに押えるか、つまり安全率をどの程度にすべきかという問題にぶつかる。しかしこの安全率は構造物が複雑になるにつれ、また社会的に重要性を持つにつれてその決定には多くの要素を考慮しなければならない。それらの要素にはつぎのようなものが考えられる。

- ① 設計理論と実物との挙動の相違：応力や変形計算では構造物を理想化して行なう。例えばトラス弦材の結合はピンと見なして計算を行なうが実際にはピンと剛との中間にあり、また地震時の挙動なども不明確である。
- ② 設計とでき上り構造物との差：これには使用材料の寸法、強度のバラつき、施工時導入の応力、接合部の良、不良、コンクリート床版のでき上り状況など……により生ずるもの。
- ③ 材料の経年変化：材料の疲労による強度低下、腐食による強度低下。
- ④ 荷重の変化、実荷重との相違：道路橋の場合、従来の経験では逐年増大しているが、これを設計時に安全率としており込むことは困難である。死荷重の場合にも一般に設計とは3%程度の誤差は生じている。
- ⑤ 破壊時の様相：降伏点をすぎたら急速に破壊に移行するかあるいはまだ余裕があるか、橋梁の場合一挙に落橋するかどうかとも考慮の対象となる。
- ⑥ 重要度：使用目的（例えば交通）におよぼす経済性からみた重要度、人命におよぼす影響など。
- ⑦ 維持、修繕、補強の難易
- ⑧ 不測の荷重に対する安全度

以上のような諸項目は安全率を決める時の要素には違いないが、これらを数的に取り上げ一つの関数として表現することはできない。しかしながら安全率をできるだけ合理的にきめようとする試みはこれまで Freudenthal その他の人々により研究されているのでそのきめ方は漸

次改善されるであろう。安全率を数的に表わすには条件を力学的条件にしなければ比較的容易である。それにも素材強度を基にしたものと部材強度を基にしてきめねばならぬ場合とがある。前者の場合には

$$\text{安全率 } \nu = \sigma_y / \sigma_a$$

ただし σ_y ：鋼の降伏点強度

σ_a ：鋼の設計応力度（または許容応力度）

この ν の値は現在いかに取られているかを現行の示方書について見れば、引張の場合

鋼鉄道橋設計示方書（30年度版）SS 41	1.8
高張力鋼鉄道橋設計示方書案 RS 32	1.8
鋼道路橋設計示方書 RS 36	1.8
SS 41	1.6
SS 50	1.6
SM 50 A	1.7

軸方向圧縮を受ける部材の場合には、道路橋の場合

$$l/r=0 \text{ の場合 } \nu=1.8$$

$$l/r>110 \text{ の場合 } r=3.0$$

鋼鉄道橋の場合には

$$l/r=0 \text{ の場合 } \nu=1.9$$

$$l/r>110 \text{ の場合 } \nu=2.9$$

を考えている。

以上は現在取られている安全率に対する目安ともいえるべき数字を示したもので、安全率をいかに取るべきかということとは別問題である。このことは今後に残された問題である。

また以上の安全率算定には構造物各部の応力は使用材料の降伏点以下にあることを前提とし、ただ異常的荷重載荷の場合のような短期負荷に対してのみその降伏点超過を念頭において許容応力の割増しを起こしている。この数字はほかの安全率同様技術的判断により割出されたものである。もし降伏点を耐力の限界と見ない場合、例えば極限設計法が発達し普及するようになれば、安全率はまた異なった数字を示さねばならないであろう。

8. む す び

以上でごく簡単に鋼構造物の設計基準を許容応力、安全率を中心にして略述したが、今後設計をさらに合理化するには使用材料、構造法の開発と設計理論の向上が必要であろう。設計理論の向上には構造部材、接合部に対する解析理論の合理化のみならず、今後構造物が大型化するにつれてますます重要性を増すと思われる動的挙動の設計への導入、全体としてのみならず溶接や鋲接などの接合部分の疲労強度の数量化と安全率さらには設計への導入法などが期待され、これらを基にしてさらに構造物の標準化が進められることを望むものである。

〔筆者：正員 工博 建設省土木研究所構造橋梁部長〕