

# 構造物の荷重係数設計

伊藤 学\*

## 1. 意義

従来の構造物の強度設計が応力度について安全率を考えているのに対し、荷重に対して安全率を考える行き方として、いわゆる荷重係数設計法なるものがある。これは、構造物のある規定された限界状態について、作用荷重を荷重係数倍したのに対して構造物の寸法を定める設計方法であって、荷重係数がいわゆる安全率に相当する。すなわち、設計規定は

$$\left( \begin{array}{l} \text{構造物のある限界状} \\ \text{態に対応する荷重} \end{array} \right) \geq (\text{荷重係数}) \times (\sum \text{設計荷重}) \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{または} \quad \geq \sum (\text{荷重係数}) \times (\text{設計荷重}) \quad \dots\dots(2)$$

の形で与えられ、式(2)の場合は、荷重の種別によって異なる荷重係数を採用することができる。上式における「荷重」は荷重そのものでなくとも、荷重によってもたらされる諸作用、たとえば断面力なり、それによる応力度でもよく、この場合には荷重係数設計も従来の許容応力度設計と実質的には変わらないかもしれない。

しかし、荷重係数設計の形をとることによって、許容応力度設計法に見られる矛盾や障害を次のように改善することができる。

① 滑動・転倒などを対象とした安定計算と同じ形の設計方式をとることができる。

② 終局強度設計、すなわち構造物の耐荷力をめやすとした設計方式への移行が容易である。

③ 非線形構造物あるいは合成構造物のように、段階に応じて荷重と応力度が比例しないような構造物にも比較的矛盾なく適用できる(このときには、荷重作用として応力度を用いるのはまずい)。

④ 荷重別・限界状態別に安全率を調整することが容易である。

⑤ したがって、部材間・構造物間で統一された安全性を確保させることが可能になろう。

もちろん実際に荷重係数設計を適用する場合、とくに設計規準の中にもりこむ場合には、豊かな経験的事実に

支えられてきた許容応力度設計法からの切替えに際して新たな問題に遭遇することは予想されるが、近年、荷重係数設計法的手法への関心は、とみに高まっている。従来もプレストレストコンクリート桁や合成桁の破壊に対する照査などには、この方式が用いられており、次節にあげる4つの例も、呼び名こそ異なるが、本格的な荷重係数設計法の形をとっているものである。

## 2. 設計規準の例

### (1) AASHO による鋼道路桁橋荷重係数設計法

アメリカ合衆国の道路橋示方書(AASHO-Specifications for Highway Bridges)は1971年に補追が行なわれ、その一つとして、合成桁を含む鋼桁橋に対する荷重係数設計法が新たに規定された。その要点は、死荷重  $D$  と活荷重  $L$ 、衝撃  $I$  の組合せを例にとれば表-1に示すようなものである。ここには3種類の荷重状態がある。まず、使用荷重(Service Loads)は特別の許可なしに道路を走行しうる通常車両が載っている状態の荷重で、従来の示方書に規定されている設計荷重、次に超過荷重(Overloads)は永久的損傷を構造物に与えることなく、特別の許可を得て走行することのできる頻度の小さい重車両を、将来予想される死荷重の増加と組み合わせた荷重状態で、示方書では  $\alpha=1$ ,  $\beta=5/3$  としている。さらに、最大設計荷重は構造物の所要最大強度に対応する仮定の荷重で、係数  $r$  は荷重作用の評価に関係する、すべての不確定要因を考慮して定める。

一方、表-1における係数  $\phi$  は部材の最大強度に関連する不確定要因を考慮した強度係数である。しかし、各種の不確定要因に基づく数値  $r/\phi$  を評価する方法はまだ確立されていないので、今回の規定ではスパン 12m 程

表-1 AASHO の鋼道路桁橋荷重係数設計法

検討項目		設計荷重	対象とする応答規範
使用性	使用荷重	$D+(L+I)$	① 疲労 ② 活荷重によるたわみ
	超過荷重	$\alpha D+\beta(L+I)$	永久変形
安全性	最大設計荷重	$r[\alpha D+\beta(L+I)]$	$\phi \times (\text{最大強度})$

\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

度のプレートガーダーで現行の許容応力度設計と同じ設計結果を与えるような数値として  $r/\phi=1.30$  を与えている。

以上3種の荷重状態に対応して照査すべき構造物の限界状態は表-1の最右欄に示されている。この中で、疲労およびたわみは現行と変わらないが、残留応力の影響その他による永久変形を避けるため、超過荷重のもとの応力度を降伏点応力の80%（非合成桁）なり95%（合成桁）に制限することとしている。安全性に関連する桁の最大曲げ強度については

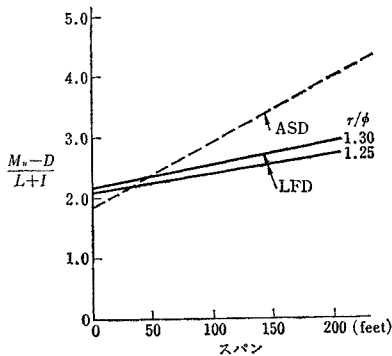
- ㊸ 横座屈に対し十分補剛された厚肉断面
- ㊹ 横座屈に対し十分補剛された薄肉断面
- ㊺ 横方向の支持が十分でない断面

に分類し、㊸ に対しては全塑性モーメント、㊹ に対しては降伏モーメント、㊺ に対しては横座屈強度を最大強度とし、㊸ の断面を連続桁に用いるときのみ塑性解析に基づくモーメント再分配を認めている。さらに、表-1の強度係数  $\phi$  は部材や継手の形式、荷重の形式によっては低減係数を準備している。

このように、設計照査対象によって限界状態を適宜選り、限界状態の種類および構造部分の性質によって荷重係数の値を相対的に変化させるなどの配慮を払った。いくつかの計算例も公にされているが、次のような結果が得られている。

① 支間長が長くなると、この荷重係数設計法は従来の許容応力度設計法によるよりも経済的な設計をもたらす。たとえば、支間長が30mを越えると鋼重は10%以上減ずる。これは、死荷重作用と活荷重作用との比はほぼ支間長に比例して増すためである。すなわち、荷重係数設計は橋の形式・支間長にほとんど関係なく、活荷重に対して統一のとれた安全性を確保することが可能である（図-1）。

② このAASHOの規定によれば、薄肉断面の桁のほとんどは安全性に対する要求（最大強度としての降伏



(Hansell & Viest による)

図-1 荷重係数設計法における活荷重の余裕度

モーメント）から断面が決まり、厚肉断面の非合成桁では超過荷重のもとの降伏（永久変形）によって設計が支配される。

## (2) 鋼構造物の塑性設計法

許容応力度設計法では考慮しにくい、不静定鋼構造物の余剰耐荷力を有効に利用しようとする塑性設計法は、すでにかなり長い歴史をもち、その原理は広く構造工学者の間に浸透している。しかし、実用化にあたっては、まだいくつかの制約があり、とくに動荷重を受ける橋など土木構造物には適用されるに至っていない。

塑性設計が規準として発効しているのは、ある種の建築鋼構造物に対してであって、アメリカ合衆国におけるAISC Specifications for Buildings, Part 2 や日本建築学会の鋼構造塑性設計規準案（1970年）はその例である。

塑性設計法は鋼構造の塑性崩壊荷重を限界荷重と考えるがゆえに、形式上は荷重係数設計法の形をとる。死荷重と活荷重の組合せに対して、前記のアメリカ合衆国の規準では

$$U=1.70(D+L)$$

日本建築学会の規準では、 $L$  に積雪荷重も含んで

$$U=1.2D+2.1L \text{ または } U=1.4(D+L) \text{ のうち不利なるもの、} \dots\dots\dots(3)$$

と規定している。

いずれも、単純桁を設計した場合、従来の許容応力度設計法におけるとほぼ同じ安全率を与えるように荷重係数を定めたもので、日本の場合は死荷重係数が活荷重係数より小さいのは合理的ではあるが、死荷重応力が占める割合が大きいつき、全体としての安全率が下がりすぎないように、1.4という下限を設けたものである。

## (3) ACI による鉄筋コンクリート部材の終局強度設計法

ACI 318-63の規準では、鉄筋コンクリート部材の終局強度設計法を規定している。たとえば、引張鉄筋のみをもつ長方形断面桁の終局設計抵抗曲げモーメントは、 $A_s$  を鉄筋断面積、 $\sigma_Y$  を鉄筋の降伏点、 $\sigma_c'$  をコンクリートの圧縮強度、 $b$  を幅幅、 $d$  を桁の有効高さとして

$$M_u = \phi A_s \sigma_Y d \left( 1 - \frac{A_s \sigma_Y}{1.7 \sigma_c' b d} \right) \dots\dots\dots(4)$$

で与えられている。 $\phi$  は部材強度のばらつきなどを考慮した一種の強度低減係数で、曲げに対しては0.90をとることとしている。

このような抵抗曲げモーメントは、死荷重・活荷重・衝撃の組合せの場合、次の設計荷重  $U$  による曲げモーメントを下回ってはならない。

$$U=1.4 D+1.7(L+I) \dots\dots\dots (5)$$

強度計算のほかに構造物としての使用性を確保するため、作用荷重  $D+L$  による、たわみ および ひびわれについて別に制限を設けている。

#### (4) CEB/FIP の限界状態設計法

ヨーロッパコンクリート委員会 (CEB) が数年前から検討していた鉄筋およびプレストレストコンクリート構造の限界状態設計法は、1970 年プレストレストコンクリート国際機構 (FIP) が加わって国際的な設計施工指針として提案された。一方、このアプローチは ISO でも採択されて、コンクリート構造のみならず構造物全般の今後の設計手法に影響を及ぼすものと考えられる。

この設計法の主眼は次の 2 点にあるといえよう。

① 設計の基準を構造物の限界状態におき、これを構造物の耐荷力の最大状態に対応する終局限界状態と、正常な使用または耐久性の基準に関係する使用限界状態とに分けている。

② 従来の安全率が経験的・主観的要素に頼ってきたのに対し、設計に用いる部材強度や荷重作用の評価に確率論的アプローチを加味しようとした。

もちろん、現時点では、すべての不確定要因を確率論的に処理することは不可能であるから、まず材料強度・荷重作用それぞれにばらつきを考慮して「特性値」を定め、これに他の不確定要因に基づく決定論的な係数を乗じて「設計用値」を求める。この係数はいくつかの要因に起因する係数の積の形となるので、それら個々の数値を部分安全率ということがある。結果として、設計用値は荷重係数を含む表現となる。たとえば、死活荷重の組

合せを例にとれば、終局限界状態について設計用荷重値は

$$S^*=1.4 D+1.6 L \dots\dots\dots (6)$$

というようなくあいである。最後に、設計用値を用いて計算された荷重作用が、考えている限界状態における部材の計算強度を上回らないことを確かめて、安全性あるいは使用性の照査が行なわれる。

イギリスの建設工業研究・情報協会 (CIRIA) の構造安全性委員会では、上記の概念を鋼構造をも含めた、一般的な規準作成に適用することを検討、提案し、道路橋に対しては、表-2 のような部分荷重係数値を示している。

### 3. 適用と今後の展望

前節で紹介した設計規準は、いずれもここ 10 年ほどの間に制定され、あるいは提案されたもので、それぞれのニュアンスこそ違え、いずれもなんらかの限界状態を基準にしていること、荷重係数の形で安全率を考えていることの 2 点で、共通の性格をもっている。その中で AASHO の荷重係数設計法、AISC の塑性設計法、ACI の終局強度設計法はまず Part 2 という形で従来の許容応力度設計法と並行した alternative としての規定とし新しい方法へのなじみを深めながら改善につとめ、しだいに新しい考え方へ移行しようとしている。これは新しい設計概念を実用化へ定着せしめる、一つの行き方であろう。荷重係数の値そのものは従来設計してきたものと同等の安全率を確保させようという観点から定められたものが多く、部分的に確率論的アプローチから安全率の定量化への試みが見られるにすぎない (詳細は学会誌第 57 巻 4 号 (臨時増刊) の筆者の報文を参照のこと)。

構造物の設計手法がしだいに荷重係数設計的な方向に移行することは十分予想されるが今後なお次のような点が問題となろう。

① 限界状態、すなわち終局強度で代表される終局限界状態、変形・振動・局部損傷などの使用限界状態を適確に把握すること。

② 安全率、すなわち荷重係数の定量的評価を、安全性・使用性・経済性の三者のバランスを考えて行なうこと。

③ 規準としての荷重係数設計法の体系化。

さしあたりは現在試みられているように、現行設計法の荷重係数方式への等価置換、次に荷重係数の部分安全率的な評価という順序で改革が進められることになろう。

表-2 限界状態と道路橋の荷重係数 (CIRIA)

限界状態		種別	記号	範囲	鉄筋コンクリート橋	鋼橋
終局限界	崩壊	荷重の特性値からの予期しないばらつきおよび異常な組合せ	$r_1$	1.2~1.8	1.2 $D$ 1.7 $HAL$ 1.5 $HBL$ 1.25 $W$	1.2 $D$ 1.7 $HAL$ 1.5 $HBL$ 1.25 $W$
		強度の特性値からの予期しない、または異常なばらつき	$r_2$	1.1~1.6	1.4 コンクリート 1.1 鋼	1.1
		崩壊の影響の重大さ	$r_3$	0.9~1.4	1.0~1.2	1.0 塑性崩壊 1.1~1.2 座屈など
使用限界	局部損傷	常時荷重の性質 (静的、動的、頻度)	$r_4$	1.0~1.2	1.0	1.0
		損傷の性質と程度	$r_5$	1.0~1.4	1.25 コンクリート 1.0 鋼	1.0
	過大なたわみ	荷重の性質 (期間、変動)	$r_6$	0.2~1.0	—	—
		たわみの性質と程度	$r_7$	1.0~1.2	—	—

注:  $D$ : 死荷重,  $HAL$ : 標準車線荷重,  $HBL$ : 重トラック荷重,  $W$ : 風荷重。