

橋梁における安全率の考え方

鈴木俊男*

1. まえがき

橋梁のいわゆる安全率の問題を上・下部構造を含めて考える場合、まず橋梁は空間を渡る上部構造(橋桁)が独立形式をなす個々の下部構造によって集中的に支えられ、上・下部構造は一般に支承を境にして明確に区分されるという構造的特徴を有することを理解してかかる必要がある。それは、橋梁は本来、上・下部構造が一体となって機能を発揮するものであるから、その安全性については、橋梁全体として考えるべきであるにもかかわらず、上述のような構造的特徴とか、あるいは上・下部構造の設計や施工が専門知識の相違から通常別々の人によって行なわれるとかなどのために、安全性の論議も橋梁全体としての一貫性を欠いたままになされてきたきらいがあったからである。また、橋梁の安全性と経済性とは相関関係があり、その面での議論は昔から多いところであって、今日的にはどうい論じつくすことのできない課題であるが、最近における上部構造の著しい進歩と設計や施工の分業化の進行とをあわせ考えるとき、その構造全体としての安全性のチェックは、ゆるがせにできない重要なポイントになってきたように思われる。

橋梁が交通路の一部としての役割を果たすうえにおいて最も重要な機能は、常時と異常時とを問わず交通物を安全に渡すことであり、それには交通物そのものによる荷重に対してはもちろん、そのほかの自然現象に起因する荷重に対しても安全でなければならないことはいうまでもない。橋梁を設計するときに考慮しなければならない荷重には種々あるが、それらの荷重は、① 死荷重・活荷重・衝撃のように、人為的に定めることのできるもの、② 土圧・水圧・風圧・地震・地盤変動による荷重のように自然現象に由来するもの、③ コンクリートのクリープおよび乾燥収縮・温度変化による荷重のように使用材料の性質に起因するもの、に大別することができる。そして橋梁の設計示方書では、これらの荷重は、主荷重・従荷重・特殊荷重に区分され、それによって許容応力度および許容支持力の適用方法を区別するように示方されている。すなわち、現行の設計法では明示された

荷重を適宜組合せて載荷し、それぞれの場合について、部材応力や地盤反力を適当な設計計算法を適用して算出し、それらが材料や地盤の性質から定められ、あるいは推定された許容応力度や許容支持力の範囲内であれば安全であるとする、いわゆる許容応力度方式が採用されている。このような設計方式は、橋梁に限らず一般の土木構造物においても、設計上の便宜から長年にわたって慣用されてきているが、安全性をチェックする方法としては現状ではともかく、将来は改新されるべきであろう。

2. 上部構造

上部構造の設計では、下部構造が不動のときは主荷重である死荷重、活荷重および衝撃が支配的影響をおよぼし、そして従荷重を同時に考慮するときは許容応力度の割増しをすることができるようになっているので、一般的には主荷重に対する安全性をチェックすることによって、おおよその断面構造を決定することができる。つまり、上部構造では適用した設計計算法が妥当であれば、PC橋や連続合成桁橋などにおけるように使用材料の性質に起因する荷重(この場合はプレストレスされたコンクリートのクリープや乾燥収縮の影響)が主荷重として取扱われ、断面決定にかなりの影響を及ぼすとき以外は通常主として人為的に定められる荷重に対して、安全性をチェックすればよいことになる。

現在、鋼橋および通常の鉄筋コンクリート橋の設計には、一般に弾性設計法が適用されており、部材の設計に用いられる許容応力度は、鋼材の場合は降伏点を、コンクリートの場合は28日圧縮強度を基準にし、それぞれの材料に適応した安全率(一般的には鋼材のとき1.7、コンクリートのとき3.0と考えてよい)で除して定められている。そして応力とひずみとは直線比例すると仮定し、破壊時の構造物としての安全度は材料の許容応力度と降伏点応力度または破壊強度との比によって確保される。すなわち、構造物の安全度はすべて材料の許容応力度を定めたときに採用された安全率でカバーされているとしている。PC橋の場合も、設計計算法は原則として許容応力度方式によることにしているが、PC構造の場合にはプレストレスされているため荷重の増加とコンク

* 正会員 工博 東京都建設局 道路管理部長

リートおよび、P C鋼材に起こる応力とが比例しないので、破壊時の安全度は上述の方法のみでは保証されないとして、さらに限界状態設計法を適用して破壊に対する安全度を照査しようとしている。

上部構造の主要材料である鋼材やコンクリートの強度および均質性は、品質管理を厳格に行なうことによって人為的に確保することが可能であり、また座屈破壊とか疲労破壊、あるいは応力集中による破壊や、脆性破壊のような構造細部の設計が適当でないために生ずる局部的な破壊に対しては、それらの研究が長足に進歩している今日では、設計的に避けることも不可能ではない。

したがって、上部構造では荷重も材料も人為的にコントロール可能な面が多いので、上述の設計計算法の範囲内であるならば、コンピューターを駆使して経済的設計を追求することも可能であろう。だが、このようにして設計されてきた橋梁は長年の間安全であったとはいうものの、一面において多くの研究から明らかなように、設計に用いられた材料の安全率が、ただちに構造物の終局強度に対する安全率を示すものではないことを忘れてはならない。また、最近では経済性を考慮し、上部構造の設計において下部構造の変位を見込むものが多くなってきたが、それには下部構造の特質を十分に理解することが重要である。

3. 下部構造

下部構造の設計においても、死荷重と活荷重とが断面構造の決定に大きく影響することは上部構造のときと同じであるが、著しく相違する点は自然現象に由来する荷重の影響がきわめて大きいことである。とくに基礎の設計は地盤の状況に左右されるところが多く、また地震に対する安全性によって支配されることも少なくない。それは、橋梁を構成する材料と同様な構造要素として取り扱われる基礎地盤は、自然に成層されたもので今日の技術ではごく表層の場合以外は、人為的にその力学的性質を改良することはほとんど不可能であり、その性質の一部を推定することができるだけだからである。したがって、下部構造では人為的にコントロール可能な、換言すれば大きさや載荷条件が明確な荷重に対してばかりでなく、土圧や地盤変動による荷重とか、あるいは地震による荷重とかのような、まだその実態が十分に、把握されているとはいえない荷重をも対象にして設計しなければならぬ。極論すれば、わが国のような地震国において橋梁をあまり地盤の良好でない地点に架設するときは、上部構造と下部構造とでは、性質の異なる荷重に対して安全性をチェックしなければならないことになるのである。

それで、下部構造の場合は安全性と経済性との均衡をどのようにしてとるかが問題になるわけだが、基礎の施工の不確かさは別とし、荷重だけについてみても問題はそう簡単ではない。たとえば、土圧を求めることは支持力を推定するのと同値の問題であり、地盤中における水圧や浮力を推定することは実際には容易でないからである。そのため、設計者は不安になって荷重そのものにも安全を見込むことがあるが、それでは安全性と経済性との均衡の追求は設計者だけの手前味噌になってしまって意義を失う。また地震となると、地震時における橋梁の破壊は、ほとんど下部構造の破損に起因しているだけに、もっとやっかいである。軟弱地盤での基礎の設計は耐震計算結果に左右されるので、とかく設計者は地震の性質の把握が十分でないのに、各種の地盤係数を計算の都合のよいように適当に仮定しがちである。それではコンピューターを使用して精密計算を行なっても、しょせん数字上の遊びに終わってしまうことになる。そこが基礎の設計において土質調査試験法の選択の適否と、その結果の精度および解釈とがきわめて重要なゆえんなのである。

さらに、地震に対する安全性であるが、経済性を考えるならば、その橋梁が想定した大地震ののちに、どのような性能を残存していればよいかも問題である。もし幹線で大地震直後においても交通物の円滑なる走行を確保する必要があるならば、橋梁部分だけではなく、取付部分の安全性をも十分に検討すべきであり、避難のための歩行者が渡れるように、落橋さえしなければよいとするならば、橋桁の連続性と下部構造の変位量に、もっと注意すべきであろう。

現在、橋梁の基礎の設計において採用されている静力学的設計法は、地盤を剛塑性体と仮定して求めた極限支持力（水平支持のときは受働土圧）を適当な安全率（一般的には常時 3.0、地震時 2.0 と考えてよい）で除して許容支持力を定め、荷重による地盤反力が、その範囲内におさまればよいとする、いわゆる許容支持力方式である。この方法では地盤を剛塑性体と考えているので、荷重による反力が許容支持力とつり合うときの基礎の変位量は求めることができない。しかし、一方において下部構造の設計では上部構造との関連から変位量の制限が設計を左右することも少なくない。そこで、ケーソン基礎に鉛直荷重と水平荷重およびモーメントとが同時に作用するときの地盤反力度とか、変位量（圧密によるものを除く）を求める計算法、および杭の軸直角方向許容支持力とか、変位量を求める計算法では、地盤の荷重——変位曲線の割線勾配で示される地盤反力係数

$$K = \frac{P}{\delta} \text{ (kg/cm}^3\text{)}$$

なる概念を導入し、非弾性体である地盤を弾性体であると仮定している。だが、これらの計算法では K の値が

表-1

おもなる設計対象荷重		設計計算法		問題点
		計算法	材料・地盤の性質の仮定	
上部構造	① 人為的荷重（死・活荷重など）	鋼構造および鉄筋コンクリート構造の断面応力計算	弾性体	構造物としての破壊安全度は許容応力度の中に含まれるとしている
	② 材質的荷重（コンクリートのクリープ・乾燥収縮など）	PC構造の破壊に対する安全度の計算	弾塑性体	断面の破壊安全度は求められるが、疲労と自然現象的荷重に対する安全度については検討を要する
下部構造	① 人為的荷重	地盤の支持力および杭の支持力の計算	剛塑性体	許容支持力の安全度は求められるが、そのときの基礎の変位量は求められない
	② 材質的荷重		弾性体	
	③ 自然現象的荷重（土圧・水圧・地震など）	地盤反力度・変位量および杭の軸直角方向許容支持力の計算		

荷重の大きさ、載荷幅・変位量などによって変化するので、その値をどのように推定するかが実は問題であり、またそのときの基礎としての安全度は、この計算法からは直接的には求めることができない。

4. あとがき

橋梁の上・下部構造を含めた安全性の問題は、上述のような設計の面だけでなく、施工の面についても検討しなければならないことが多く残されているが、2. および 3. において指摘した、設計上の問題をまとめて示すと、表-1 のようになる。

表-1 からわかるように、橋梁は上・下部構造一体の構造体であるとはいうものの、設計の面だけから眺めても上部構造と下部構造とでは、それらの設計が性質も明確さも異なる別々の荷重に大きく影響されることがあり、また、必ずしも同じ計算方式によっているわけではないのが現状である。したがって、上・下部構造一体としての経済設計を論議する場合には、それぞれの荷重に対する安全度の意義を、もっと突っ込んで検討する必要がある。それは、すでに指摘したように上部構造では弾性域の範囲に限れば現行の安全率を基準にして経済設計することも可能であろうが、下部構造の場合には

① 土圧による荷重のように、基礎の許容支持力を求めるのと同じ手法で求めなければならない荷重があること、言葉を裏返すと、土質調査のやり方やその結果の解

釈のしよによっては、設計者に都合のよいように推定できる荷重と許容値とがあること。

② 軟弱地盤では上部構造のときは性質の異なる荷重を対象として、安全度を論じなければならないことのあること。

③ 安全度の基準となる許容支持力の計算法が、上部構造の安全度を示す断面応力の計算法と、まったく異なった理論によっていること。

④ 安全度を支配する許容支持力と変位量とが、別々の計算法によってしか求められないこと、などのために、容易ではないからである。

こう考えてくると、弾塑性論による限界状態設計法はこの方法によれば終局限界状態や一定の使用限界状態を基準として、構造物の安全率を示すことができるばかりでなく、不静定構造物の設計を合理的に行なうこともできる利点があるので、将来、鋼橋やコンクリート橋一般の上部構造の設計にも、また基礎の静力学的手法による設計にも、統一的に採用すべきであるかも知れない。しかし、それには構造物の終局強度や使用限界の定義の中に、構造物の耐久性を決定する大きな要素である材料の疲労の問題と、自然現象的荷重に対する安全度の問題とをどう取り入れていくかが課題であり、そのためには、さしあたり荷重係数設計方式へ移行していくのも一方法であると考えられるので、早急に荷重体系と安全率との関係を、統計確率論的な手法を用いて検討する必要があるのではなからうか。

下水汚泥の処理・処分および利用に関する研究報告書（昭和 45 年度）

建設省をはじめ自治体より委託研究をうけ下水汚泥の処分方法に関する研究小委員会が編集した標記の報告書の余部がありますので、ご希望の方はお申込み下さい。

1. 体裁：B5判 194 ページ・タイプオフセット印刷

2. 内容：1. 結論、2. 下水汚泥の農業利用に関する調査、3. 下水汚泥の海洋処分に関する調査、4. 下水汚泥の脱水等に関する調査、5. 結論

3. 頒価：1500 円（〒140 円）

4. 申込方法：頒価に送料をつけ土木学会刊行物係までお申込み下さい。

なお、43 年度報告書 1200 円（〒140 円）、44 年度報告書 1300 円（〒140 円）も、いまならば全部そろいます。