

橋梁構造物の設計における 安全率設定の影響の解析と評価

AN INFLUENCE ANALYSIS OF THE FACTORS OF SAFETY ON THE DESIGN OF BRIDGE STRUCTURES

佐藤尚次* 池田豊人** 長谷川彰夫*** 西野文雄****

By Naotsugu SATO, Toyohito IKEDA, Akio HASEGAWA and Fumio NISHINO

Suitability of the Design Specifications for structures have been discussed in recent years from various standpoint. Studies on factor of safety have been carried out in this trend so far. However, comparing with another field of structural engineering, amount of studies are still inadequate. Examinations on factor of safety are apt to done utilizing method of reliability design, then, are rather infamiliar for practical engineers.

Competitive relationship exists between resistance and dead load effect according to increment (or decrement) of main structure cross sectional area. This competitive relation dominates the design sensitivity by which design cost change under various factor of safety.

In this study this competitive relation is analytically manipulated to examine the design sensitivity. Comparisons between steel and reinforced concrete structures, flexural and tensile members are tested to illustrate the validity of this study.

1. はじめに

施工、および供用環境に不確定要因の多い土木構造物の設計の現状において、安全性の確保に安全率を用いることは避けられない設計慣行である¹⁾。ところで、構造設計に関連する分野としてこれまで構造物の外力応答(response)、耐荷力(capacity)あるいは荷重値の評価の研究とならんで、安全率についても様々な角度から検討が行われてきた^{2)~8)}が、他の研究対象に比べると量的に見劣りがすることは否めない。建設コストに対する安全率の影響の大きさを考えると、こうした研究の発展状況は均衡を欠くものといわざるを得ない。例えば計算機の発達は、手計算の時代には不可能であった有限変位、あるいは非弾性解析をも設計の場で可能にしている。にもかかわらずそれが安全率の低減、コストダウンに結びついていかないのは、安全率に対する検討がなお不十分で、初等的な構造計算のもつ誤差を安全率がどの程度カバーしているかという分析がないことにも一つの原因があろう。

* 工博、関東学院大学講師、工学部土木工学科（神奈川県横浜市金沢区六浦町4834）。

** 工修、長崎県庁（長崎県長崎市）。〔建設省九州地建より出向、研究当時東京大学大学院生〕。

*** 工博、アジア工科大学助教授（タイ国バンコック市）。〔東京大学より海外派遣〕。

**** Ph.D.、東京大学教授、工学部土木工学科（東京都文京区）。

安全率に関する研究の多くは、確率論をベースに、荷重や強度とは別の、いわゆるグロスエラーの影響をも考慮して行なわれている。しかし、実験や観測によってデータの得られる強度や荷重と異なり、事故統計、個別の事故解析等にはデータのよりどころを求めることができないため、処理が難しく、研究の遂行には困難が多い。また、仮にグロスエラー等を組み込んだ信頼性モデルとして完璧に近いものがつくられ、破壊確率と安全率の関係を結びつける理論ができたとしても、破壊確率のレベルをどの程度に保つかを定めるのに何らかの人為的判断が必要である以上、その役割には自ずと一定の限界がある。既往の安全率は、もとより、多年の経験の集積によって定まっているものでもあり⁹⁾、「学問的に正しい」安全率より「社会的に容認される」安全率の方が実務上は意味があるといえる。

ところで、近年、土木構造物の多様化、あるいは構造物を取り巻く環境の変化に伴い、安全率を含めて既往の設計基準を見直す必要があるのではないかという議論が盛んになってきた。例えば、従来は道路橋示方書（以下道示と略す）の適用範囲内の橋梁が土木構造物の主流な地位を占めてきたが、本四架橋のような長大橋や橋梁以外の構造物が建設される機会が最近相対的に増えてきて、これらの構造物の設計すべてが道示に準じて行われるのは合理的ではないと考えられつつある¹⁰⁾。また一方、道路橋において、大型車の通行が増加しつつある現在、既往の道示の活荷重規定では、十分な安全性が確保されていないのではないかという議論もある。

公共事業費の伸び悩みに加えて、青函トンネル以降、公共事業に対する社会の見方は厳しさを増しており、構造技術者もこれまで以上にコスト意識を高めざるを得ない状況にある。またモータリゼーションは進展の一途をたどり、大型車の通行に対する需要は高まる一方であって、構造物の機能への要求は更に厳しくなるものと思われる。

このように、設計基準再検討の必要性は広がってきている。しかし、安全率の理論体系が薄弱である現在、設計基準の改訂に安全率を含めることは、ある種のリスクを伴う。このリスクはある程度経験的に、ある程度は信頼性理論により評価はできる。他方、敢てそのリスクを負うのには、効用に対するそれなりの期待度が必要である。橋梁設計を例にとって概念的に述べると、例えば、ある橋梁について、安全率 γ と総重量 W が図-1のような関係にあるとし、現在A点で設計が行われているとする（通常、設計においては複数の限界状態が照査されているから、ある照査の安全率を低くしても、他の限界状態（疲労等）の条件に抵触して、図-1のようになることは考えられることである）。この場合、同じだけ安全率を上下させても、上げた際の総重量の増加は、下げた際の減少量に比べて相当大きい。このことから、この橋梁については、安全率を下げた時の効用が小さく、危険を冒してまで安

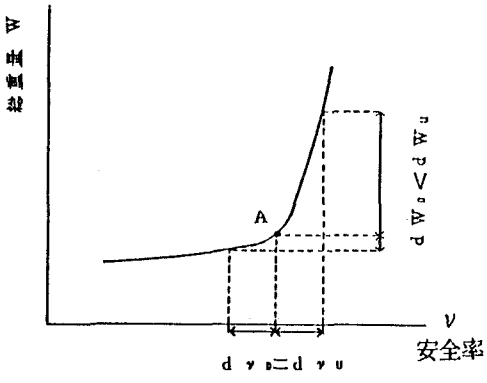


図-1 安全率の増減と総重量の増減

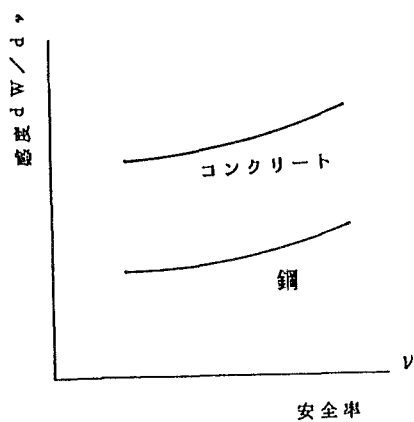


図-2 設計の安全率に対する感度

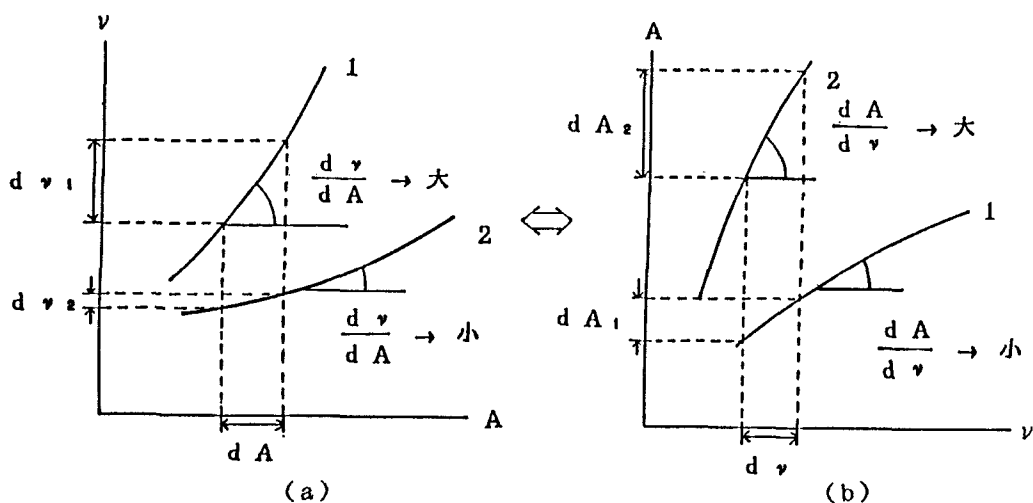


図-3 安全率と断面積の関係(模式図)

全率を低減する必然性には乏しいと判断できる。また、鋼の橋とコンクリートの橋で、安全率と、総重量の安全率に対する感度が図-2のように示されたとする。図-2の場合、感度の大きいコンクリートの方が、安全率を低減したときのコストの低減効果も大きいと判断できる。

そこで本研究では、主として図-2に示した状態に関心をしぼり、橋梁構造物において、安全率設定が設計に及ぼす効果について、定量的に解析することを試みた。橋梁構造物は、一般に断面積を増加させると、強度は増加するが、死荷重増加に伴って荷重効果も増加し、この両者の間に追いつけ合いが起こる。安全率は、概念的には強度が荷重効果に対してもつ余裕として次式で表わされる。

$$v(A) = \frac{R(A)}{S(A)} \quad (1)$$

式(1)のように、安全率を断面積の関数とみると、この関数の特性は強度と荷重効果の追いつけ合いに支配される。具体的に述べると、安全率と断面積が図-3(a)に示される関係にある2橋梁(1および2)が存在するとする。この図は、断面積を増加させた時、安全率、すなわち強度余裕が急に増加する橋梁1とあまり増加しない橋梁2があることを示す。これを軸を反対にして表わしたのが同図(b)であるが、逆関数で考えると、安全率を増加させた時に、橋梁1では断面積があまり増加せず、橋梁2では急に増加することになる。これは、安全率設定が設計に及ぼす影響の定量的特性に他ならない。本研究はこの点に着目し、強度と荷重効果の追いつけ合いを表わす定式化を試みた。

そして、この解析方法を、材料(鋼、コンクリート)、機能(曲げ、引張)等の異なる様々な橋梁に適用して、比較検討した。また、この解析手法を適用して、吊橋において、補剛桁の大小が、設計の安全率に対する感度に及ぼす影響について検討した。さらに、解析結果を用いて、建設単価を考慮した橋梁間の経済的比較検討の手法の一つの案を考えた。

2. 定式化

実際の設計は、与えられた安全率の条件のもと、仮定した断面に対して、次の限界状態の照査を行う。

$$v \frac{S(A)}{R(A)} \leq 1 \quad (2)$$

ここで、 ν ：安全率、 S ：荷重効果、 R ：強度、 A ：断面積である。実際には、照査すべき限界状態は複数個存在し、また考慮すべき荷重の組合せも複数であるが、ここでは最も代表的で、断面の決定を支配することの多い限界状態・荷重のみに注目することにする（単一の限界状態のみを考えるため、図-1のような状態の表現のためには適切な仮定になっていない意味はある）。例えば、プレートガーダーやコンクリートT桁ばりの主桁では断面の曲げ、吊橋のケーブルでは引張を考える。荷重としては、死活荷重のみを考えることにする。横構、対傾構、あるいは橋脚等で、風や地震、温度等に断面が支配される例もあるが¹¹⁾、ここで関心の対象としている構造物とは離れるし、ここでの議論が、設計の中で果たす死荷重の役割に相当関係するものだけに、対比を簡単にする意味からも、活荷重のみを考える。それゆえ、 A としては、桁、ケーブル等主構造の断面積を考える。

また通常、構造物の断面決定の自由度は大きく、複数の断面について照査が行われる。式(2)は一つの断面についての照査式に過ぎないから、以下の議論は一断面、あるいは一部材単位での影響評価に関するものでしかないことになる。しかし、一定断面の桁、もしくは吊橋のケーブル等のような構造物を考えれば、一つの断面積が構造全体の重量、ひいてはコストを支配することになる。ここでもパラメータ A は構造物重量 W 、あるいはコストを表わしうる量として用いることとする。 R を A の、 S を W の関数とする方が、理解のためには素直な表現といえるが、論理展開のために A で統一した。

さて、経済設計の立場からいえば、式(2)の不等号はかなり等号に近いところで設計されていると考えられるから、式(2)を、与えられた ν に対して、次の設計式を満足する最小の A を決定することであると近似的に理解する。

$$\nu \frac{S(A)}{R(A)} = 1 \quad (3)$$

式(3)を式(1)に変形すると、式(1)はある A を与えた時に達成し得る強度の余裕と解釈でき、 ν を A の関数 $\nu = \nu(A)$ とみることが出来る。設計行為はこの関数の逆関数を追うことであり、与えられた ν を満足する A を求めると理解できる。式(1)の両辺を A で微分して逆数をとると次式を得る。

$$\frac{dA}{d\nu} = S \left(\frac{dR}{dA} - \nu \frac{dS}{dA} \right)^{-1} \quad (4)$$

この右辺の $(dA/d\nu)$ の値が断面積の安全率に対する感度であり、『仮に安全率を変更したら、断面積がどのくらい変化するか』を定量的に議論しようとする際に指標となる量と考えることができる。

ところで、式(4)によって $(dA/d\nu)$ を検討するためには取り上げた限界状態に対応する強度 R と荷重効果 S の関数形 $R = R(A)$ 、 $S = S(A)$ を知る必要がある。そこで R と S が基準となる安全率に対して求められた設計値近傍で次のような関数形をとるものと仮定する。

$$\begin{aligned} R &= \alpha_R (A - A_{*R})^{\beta_R} + R_* \\ S &= \alpha_S (A - A_{*S})^{\beta_S} + S_* \end{aligned} \quad (5-a, b)$$

ここに、 $\alpha_R, \alpha_S, \beta_R, \beta_S, A_{*R}, A_{*S}, R_*, S_*$ はすべて関数の特性を表わす定数である。強度 R に関しては、ある断面積を与えた時、設計条件を満たしつつ最大の強度を発現するような断面配分（最大荷重設計）を考えて A と R の関数形を推定する。式(5)の関数形は陽な形で求まる時はそれを採用し、それ以外是对数変換による直線回帰式によって推定する。

3. 設計モデルおよび解析結果

本研究では主に次の3つの橋梁について設計モデルを考えて解析した。

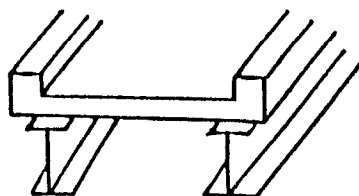
- 1) プレートガーダー 鋼部材で主に曲げ材として機能するものの代表的構造物として図-4 (a) のようなプレートガーダー主桁にコンクリート床版の載った橋梁。
- 2) RC-T桁ばり 鉄筋コンクリート部材で主に曲げ材として機能するものの代表的構造物として図-4 (b) のような床版と4本の主桁からなるRC-T桁ばりの橋梁。
- 3) 吊橋(ケーブル) 鋼部材で主に引張材として機能するものの代表的構造物として図-4 (c) のような吊橋におけるケーブル。

1)、2)については、ほぼ道示に沿って⁽¹²⁻¹⁴⁾、また3)については、鋼橋(Ⅲ)⁽¹⁵⁾の設計例に準じて吊橋の撓度理論を用いて設計を行い、各々強度、荷重効果を断面積の関数で表わした。ただし2)でR(A)としては破壊抵抗曲げモーメントを採用しているが、鋼との対比のため、荷重組合せは1.7(D+L)のみを用いている。したがってこの場合、鋼と同様 $\nu=1.7$ と解釈する。

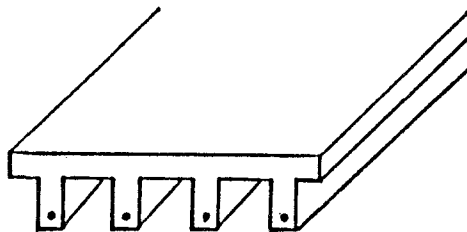
表-1に試算結果を示す。ただし、プレートガーダーにおいては鉄筋コンクリート床版は幅11m、厚さ25cmとし、また表中 C_1, C_2 は腹板の幅厚比制限である。RC-T桁ばりでは同じく床版を幅11mとし、主桁断面が床版を兼ねるものとして、 $\nu=1.7$ のときの断面を基準にして、Aを変えたときに、鉄筋比一定(試算1)、鉄筋量一定(試算2)とする2つのケースを考えて断面を決めた。吊橋については、サグ $f=73m$ 、補剛桁自重 $9.596t/m$ を仮定した。

また解析結果の一例として、吊橋のケーブルについて、安全率 ν と断面積Aの関係を図-5 (a)に、また安全率と断面積の安全率に対する感度 $(dA/d\nu)$ の関係を図-5 (b)に示す。これらの図から、安全率と断面積は設計値周辺では、ほぼ直線的な増加関係にあり、感度が急激に変わるような点は存在していないことがわかり、図-1の状態はこのモデルでは表現されないという予測を裏付けている。また、支間長が大きいほど感度も大きいことが示されている。

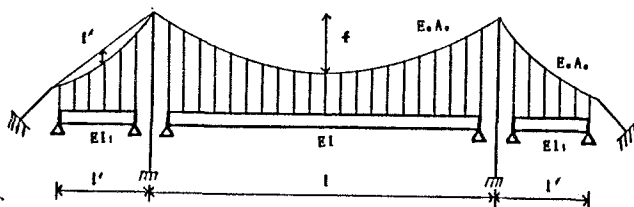
次に橋梁間の比較を考える。安全率を変化させた時の設計への影響の大きさの絶対量は感度 $(dA/d\nu)$ に全長1を乗じた量で効いてくる。ここで各橋梁の支間長の適用範囲の代表値として、プレートガーダーとRC-T桁ばりで $l=20m$ 、吊橋で $l=800m$ を採用した。この $l \cdot (dA/d\nu)$ を各橋梁間で比較したものを図-6 (a)に示す(ただしRC-T桁ばりは試算1と2の平均を用いた。以下も同様。)。この



(a) 鋼プレートガーダー



(b) RC-T桁ばり



(c) 吊橋

図-4 設計モデル

図は、（当然ながら）スパン長が大きな吊橋では設計への影響が大きいことを示している。しかし、橋梁間の構造特性に支配される差異を比較するには、スパン長、基準となる断面積、および基準となる安全率等を統一した上で比較すべきであるとも考えられる。そこで、 $(\nu/A_0) \cdot (dA/d\nu)$ なる無次元量で橋梁間の比較を行ったものが図-6 (b) である。この結果を、構造特性を加味してさらに詳しく考察してみる。

式 (4) を変形して次式を得る。

$$\left. \frac{\nu}{A_0} \cdot \frac{dA}{d\nu} \right|_{A_0} = \left(\left. \frac{A_0}{R_0} \cdot \frac{dR}{dA} \right|_{A_0} - \frac{A_0}{S_0} \cdot \frac{dS}{dA} \right|_{A_0} \right)^{-1} \quad (6)$$

ここで $\nu=1.7$ --プレートガーダー、RC-T桁ばり

3.0 --吊橋

この式の右边が「強度と荷重の追いかけ合い」の式表現であるといえる。式 (6) の右边は $(A_0/R_0) \cdot (dR/dA)$ が小なほど、また $(A_0/S_0) \cdot (dS/dA)$ が大なほど大きくなる。表-2に各構造の $(A_0/R_0) \cdot (dR/dA)$ および $(A_0/S_0) \cdot (dS/dA)$ を示す。これらの項がどのような量に支配されるかを、表-1の関数形を参考にしつつ考えてみる。まず前者の強度変化率であるが、プレートガーダー、吊橋のように $R(A)$ がほぼ原点を通る曲線で表わされているときには、この項は式 (5-a, b) の β_R に一致する。プレートガーダーのような、腹板を可能な限り薄くした曲げ材では、フランジの降伏から決まる終局曲げモーメントが A の 1.5 乗に比例することはよく知られている¹⁶⁾。また引張材であるケーブルの強度が A にほぼ比例するのは明らかである。

これに対し、コンクリートの場合、鉄筋を入れるためのかぶり厚等、強度を発現するための最小限の断面積が必要であり、

表-1 $R(A)$, $S(A)$ の関数形

($A : m^2$)

(a) プレートガーダー

R(A)	SS41		SM58	
	c_1	$R(A) (t \cdot m)$	c_2	$R(A) (t \cdot m)$
	152	$69740A^{1.5}$	110	$108800A^{1.5}$
	70	$47330A^{1.5}$	70	$73330A^{1.5}$
S(A)	$a_1 L^2 A + (a_2 + a_3) L^2 + a_4 L \quad (t \cdot m)$ $L : \text{Span (m)} \quad a_1=0.9813 \quad a_2=0.4297$ $a_3=0.2105 \quad a_4=6.016$			

(b) RC-T桁ばり

R(A)		Span(m)	$R(A) (t \cdot m)$
	試算1	10	$708.8(A - 3.05)^{1.146} + 279.4$
		15~25	$732.3(A - 3.05)^{1.146} + 288.7$
	試算2	10	$278.0(A - 2.50)^{1.8} + 144.2$
		15~25	$278.0(A - 2.50)^{1.8} + 145.2$
S(A)	$a_1 L^2 A + a_2 L^2 + a_3 L$ $L : \text{Span (m)} \quad a_1=0.07813 \quad a_2=0.1323$ $a_3=3.781$		

(c) 吊橋

R(A)	$170000A \quad (t)$	
S(A)	Span(m)	$S(A) (t)$
	500	$3181(A - 0.01)^{0.8232} + 4535$
	800	$8698(A - 0.01)^{0.7895} + 10770$
	1000	$14090(A - 0.01)^{0.7881} + 16210$

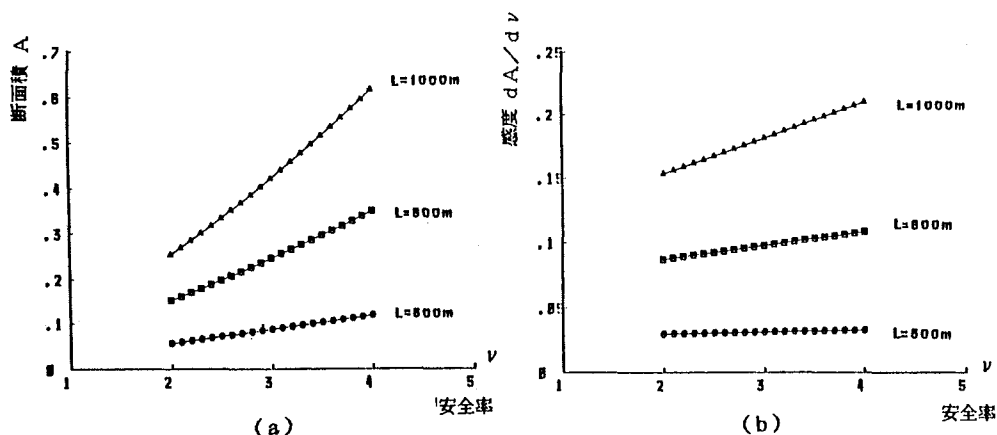


図-5 吊橋ケーブルの試算断面における安全率と断面積およびその感度

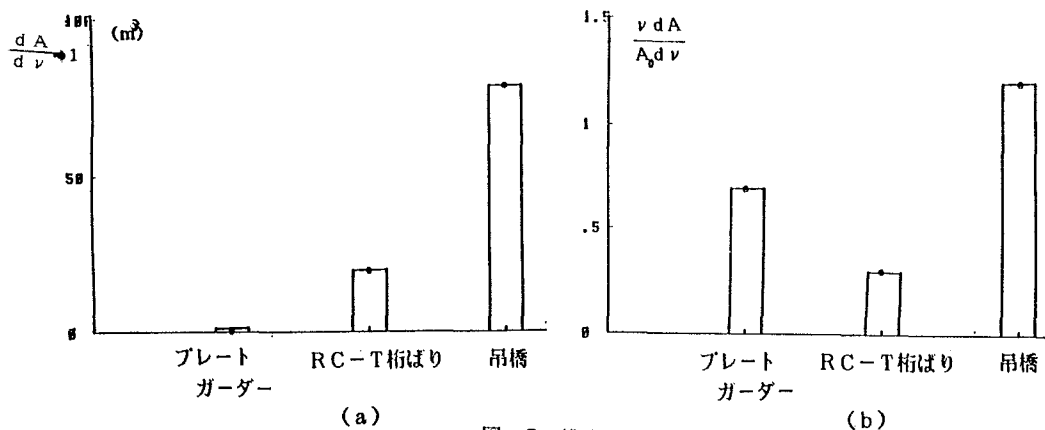


図-6 構造間の比較

Rを増加させるのはそこからのAの増加分である。しかもその増加分は相対的に大きくない。したがってこの対比の場合、無次元化のための基準となる A_0 が大きくなってしまい、このために第1項が大きく、右辺全体として小さくなってしまう。より長い支間で比較した場合には「最低必要なA」の比率が小さくなり、第1項が β_R に近づくと思われるが、この検討の範囲では、安全率を下げてもRCの断面積は率としてそう下らないことになる。

つぎに後者である。荷重効果Sは、断面積の関数となる部分とならない部分に、 $S=S_1(A)+S_2$ のように分けて考えることができるが、 $S_1(A)$ がAに比例する形で与えられているプレートガーダーとRC-T桁ばりではこの第2項は S_1/S に一致する。つまり桁自重が全荷重効果に占める割合である。

これまで、この種の問題に関する議論は、主に第2

表-2 強度と荷重の変化率

	$\frac{A_0 dR}{R_0 dA}$	$\frac{A_0 dS}{S_0 dA}$
プレート ガーダー	1.5	0.044
RC-T桁 ばり	3.89	0.45
吊橋	1.0	0.164

項の寄与を論ずることに多くの関心が集まっていたと思われるが、ここで見る限り、第1項の影響の構造物間の差異は、第2項以上に大きいと思われる。

4. 安全率と建設費の関係

ここまでは断面積Aを経済性を表わすパラメータと考えてきたが、実際の工事契約は総重量Wに単位重量当りの単価を乗じた量で行われるから、安全率と建設費の関係を現実的に即して検討するには、Wをパラメータにした形にとる方が理解しやすい。総重量は $W = \rho l A + W$ (ρ :比重、 l :スパン長、 W :主構造以外の部分の重量、例えばプレートガーダーにおけるコンクリート床版)なる形で表わされ、 ρ 、 l 、 W は定数とみなせるので、ここまでの解析結果を総重量をパラメータにした形に書き直すことはさほど困難ではない。

橋梁間の経済的比較検討の一方法を以下に示す。鋼と鉄筋コンクリートの橋梁の選択について、現状の比較・意志決定が次式で行われるとする。

$$\alpha \frac{\gamma_1 \cdot W_1(\nu)}{\gamma_2 \cdot W_2(\nu)} < 1 \quad (7)$$

ここに、 $W_1 = W_1(\nu)$:鋼橋の総重量

$W_2 = W_2(\nu)$:鉄筋コンクリート橋の総重量

γ_1 :鋼橋の単価(単位重量当り価格)

γ_2 :鉄筋コンクリート橋の単価

α :その他の要因(工期、工事時期、工事地域、材料調達の容易さ等)を表わす係数

式(7)が成立するときには、鋼橋が経済的には優位であるとする。今、安全率を鋼、コンクリートともに $d\nu$ だけ変化させた時、

$$\alpha \frac{\gamma_1 \cdot W_1 + \left(\frac{dW_1}{d\nu} \Big|_{\nu=1.7} \right) \cdot d\nu}{\gamma_2 \cdot W_2 + \left(\frac{dW_2}{d\nu} \Big|_{\nu=1.7} \right) \cdot d\nu} > 1 \quad (8)$$

のようになったとすれば、経済的優位度は逆転して鉄筋コンクリートが優位になる。式(7)(8)中の $W_1(\nu)$ 、 $W_2(\nu)$ は主に構造特性に支配されるもので、ある程度不変なものとし、 γ_1 、 γ_2 、 α は各工事によって、かなり幅を持つ量と思われる。

そこで、式(7)から式(8)において、 $(d\nu)$ だけ安全率を変化させた時経済性が逆転するとして、それを無次元のパラメータ $\alpha(\gamma_1/\gamma_2)$ の関数で表わすことを考える。前節において計算したプレートガーダーとRC-T桁ばりについて、これを適用し試算を行った。結果を図-7に示す。ここで、横軸は式(7)の $\alpha(\gamma_1/\gamma_2)$ 、縦軸は安全率の変化量、图中斜めの境界線が式(8)で等号が成立する場合であり、その上側の領域Iはプレートガーダーが優位な領域で、下側の領域IIはコンクリートが優位な領域である。また、現状の安全率で設計を行った場合に $\alpha(\gamma_1/\gamma_2)$ によって優劣がどうなるかを示したのが直線Iであり、

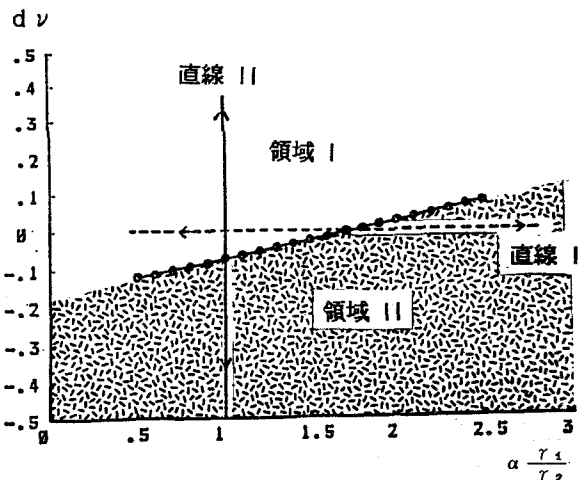


図-7 鋼とコンクリートの優劣比較

$\alpha (r_1 / r_2)$ が 1.7 より大の時はコンクリート優位、1.7 より小の時はプレートガーダー優位といえる。また例えば、 $\alpha (r_1 / r_2)$ が現在 1.0 であるとして、安全率を操作した場合どうなるかを考えるには直線 II 上をたどればよい。このとき現状の安全率ではプレートガーダーが優位であるが、安全率をともに約 0.08 以上下げると、逆にコンクリートの方が優位となる。以上のように、断面積と安全率の関係を定式化することで、単価の影響も含めて、安全率と建設費の関係を検討することが可能である。

5. ケーブル設計における補剛桁の影響

吊橋はケーブルと補剛桁によって支間を構成する橋梁であるが、極端に論ずれば、ケーブルで補剛桁を吊り下げた構造といえる。基本的には、補剛桁はハンガー間の荷重を確実に伝達さえすればよく、この機能を果たし得る範囲で、できるだけ軽量の方が有利といえる。

しかし、本四の児島・坂出ルート等の道路・鉄道併用橋では状況は若干異なり、補剛桁が一般の吊橋に比べて相当大となる。これは、道路と鉄道の 2 段構造ゆえに空間上必然的に大きくなること、鉄道車両の走行安全性確保のため、たわみ、ねじれ制限等が厳しいこと等によるものであるが、このように、重量および剛度の大きな補剛桁が要求される吊橋の場合、この重量、剛度がケーブルの設計に及ぼす影響が、通常の吊橋に比べ相対的に大きくなるので、補剛桁とケーブルの相互関係の検討が重要になる。

補剛トラスが大きくなることの効果は大きく分けて次の 2 つである。

- (1) 桁重量が増加することにより、主構造（ケーブル）以外の死荷重の割合が大きくなり、結果的にケーブル断面積の安全率に対する感度 ($dA/d\nu/A_0$) の値に影響してくる。
- (2) 桁剛度が増加することにより、ケーブルの活荷重分担率が変化し、その結果、荷重効果のうち、ケーブル断面積が関与している部分の占める割合が変わり、($dA/d\nu/A_0$) に影響する。

ここでは、(1) について検討し、その際桁剛度は一定と仮定した。図-4(c) に示す主径間 800m の吊橋について試算を行った。ここで、基準となる補剛桁重量を $W_0 = 9.596 \text{ t/m}$ と仮定し、補剛桁重量 W を $0.5 W_0$ から $1.5 W_0$ まで変化させた時の断面積の安全率に対する感度 ($dA/d\nu/A_0$) を検討する。ここで A_0 は $R(A_0)/S(A_0) = 3.0$ を満足するものである。試算結果を示した図-8を見ると、補剛桁重量が大きくなるに従い、感度 ($dA/d\nu/A_0$) は小さくなっている。これは定性的には 3 節の考察からも予想されることである。このことから、補剛桁が大きくなるに従って、安全率を変化させる効果は小さくなるのがわかる。

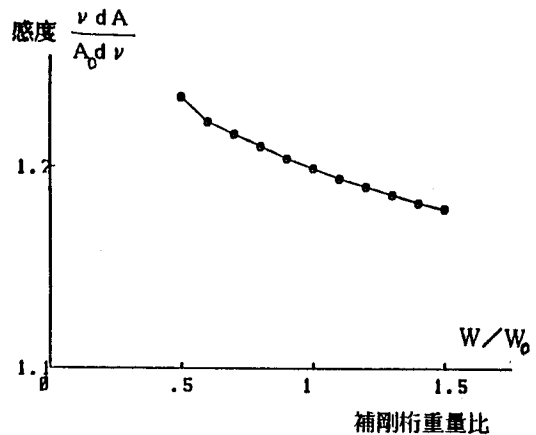


図-8 補剛桁重量と感度の関係

ところで、明石海峡大橋の場合には、計画当初道路鉄道併用橋の方針であったが、その後の社会情勢の変化により、道路単独橋の可能性が強くなってきた。これにより、明石海峡大橋は、児島・坂出ルートの橋梁より補剛桁が小さくなるものと予想される。本研究の解析結果を考え合わせると、安全率低減時の経済的效果が相対的に大きくなるものと思われる。

6. 結論および今後の課題

本研究は、安全率の変更にともなって設計に現われる影響を、定量的に解析する一方法を提案した。橋梁構造物における断面の増減にともなう強度と荷重の追いかけ合いの程度が、安全率すなわち強度余裕の増減を支配する。本研究はこの追いかけ合いをとらえるべく、構造物の断面積を経済性を表わすパラメータにとり、強度と荷重効果を別個に考えて、それぞれ断面積の関数で表わした。強度と荷重効果を安全率と結びつけ、最終的に安全率を断面積の関数で表わして、その逆関数の微係数を用いることにより、安全率変更時の設計への影響の定量的解析を行った。

この解析方法を、形式、材料等の違う様々な橋梁に適用し、比較検討した結果、考えた範囲では、この解析のように限界状態、荷重の組合わせをひとつにしぼる限り、条件の違いによって、安全率変更時の設計への影響は異なるが、安全率と断面積はほぼ直線的な増加関係にあり、図-1のA点のような、感度が急激に変化する点はみられなかった。また、橋梁形式間の差異を考察した結果、差異を支配する構造特性上の要因のとして強度の変化率と荷重効果の変化率とは同等の重要度をもち、しばしば議論される安全率低減時のコンクリートの優位度はこの検討では明らかにみられなかった。

経済性を扱う研究を実務に応用する上での困難さの原因の一つとして、式(7)中の α 、 r_1 、 r_2 の値が各工事で異なることが挙げられる。構造力学でとらえられる要因をいかに精密に評価しようとも、それ以外の要因の効き方が大きく、誤差に吸収されてしまうわけである。そこで本研究では、その要因を特定せず、無次元のパラメータとして扱って、橋梁間の経済的優位性を評価するひとつの方法を提案した。 α で表わされる、工事の性格等を定量化することにはなお難しさがあるが、一つの方向性は示し得たと思われる。

本研究では、単一断面の設計自由度に全体構造が支配される場合を前提としたため、議論の一般性に欠ける面があると思われる。骨組構造や変断面構造を扱うためには、Aに代えて設計変数ベクトルを導入する必要がある、現在この方向で検討を進めている。

上記の事項を別にしても、ここで行った試算例は、現実の設計に沿うことを念頭に置いたが、計算の簡素化のため、かなり簡略なモデルを設定したので、この結果から、橋梁間、材料間等の特性の相違を一般化することにはなお無理があろう。異なった支間・構造形式等を選べば、また異なった見解が得られることもありうると思われる。さらに検討の範囲を広げることが必要と考えられるが、一方、精密なモデルの設定、現実 に即したデータの入力等が可能になれば、本研究で提案した方法は大幅で実務レベルの問題に適用が可能と思われる。また、他方で、信頼性の面から安全率や、その他の設計条件を吟味する検討も行なわれてきているが、経済性に関するこの種の研究は、信頼性の学問と実務設計との橋渡しの役割を果たすものであると位置づけられよう。

ところで、本研究での議論は、現行の許容応力度法の、単一安全率を用いた安全性照査式を前提に展開してきたが、一方、近年、単一安全率による設計から部分安全係数による設計への移行が提案され、既に一部その書式が取入れられているものもある¹³⁾。新しい書式を取り入れることの必然性等、疑問の余地は多々あるが¹⁴⁾、それとは別に、本研究の手法は部分安全係数法導入による効果を評価する方法として位置づけることも可能である。

こうした新しい設計法への移行を考えるに際しては、現行の設計を基本として等価な形での新しい設計書式の設計係数の評価(コードキャリブレーション)等が行われているが、余りに新旧の等価性にこだわると、不合理な点の是正、コストダウンといった利点が出にくいことにもなろう。逆に考えると、部分安全係数法による設計でコストダウンが実現できた場合、実質的に安全率を下げていると理解することもできる。

この意味で、コードキャリブレーションをせずに部分安全係数による設計が実行された場合、設計上に及ぼす影響はどうか問題である。

ある部分安全係数を用いて設計したときに、その設計と等価な結果を与える単一安全率の値を

$$S(a_D D + a_L L) = S\{\nu(D + L)\} \quad (9)$$

という関係を用いて考える。ここで、 a_D ：死荷重に対する部分安全係数、 a_L ：活荷重に対する部分安全係数、 D ：死荷重の設計値（許容応力度法と同じ） L ：活荷重の設計値（同）である。本文に示したプレートガーダーとコンクリートT桁ばり両方について比較を行い、部分安全係数の導入がどのような橋梁に対して実質有利に働くかの一判断基準を与えることを考えた。ここでは、一つの例として、 $a_D = 1.3$ 、 $a_L = 2.0$ を用いて検討してみる。

3章の設計条件でも述べたように、鋼、コンクリートともに現行設計では1.7程度の全体安全率が基本となっていると解釈しうる。右図に示された結果から、この例の係数では10～20mの支間ではほぼ現行の設計と等価になっているが、そこを超えると次第に実質安全率が低減している。また、試算した範囲では鋼とコンクリートに殆ど差が見られない。前章の検討で主構造自重の荷重効果に占める比率が重要な意味をもっていたのに対し、ここでは死荷重全体の比率が問題である。鋼の設計においても、床版等のウエイトが大きく、死活荷重比で鋼、コンクリートに大きな差がないことが、この図の結果

実質安全率

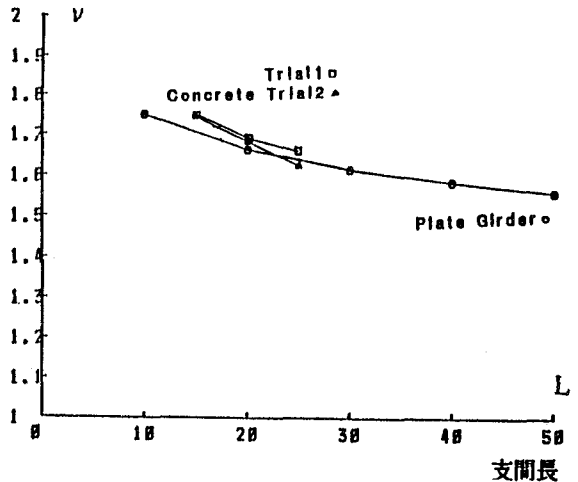


図-9 部分安全係数を用いたときの実質安全率

につながっている。ただし、前章において見た通り、数字の上で同じだけ安全率が下がっても、断面積の増減の度合いは両者で異なることに注意する必要があるであろう。

本研究は、経済的な検討を念頭においたため、材料は構造機能上最も有利になるように使用されるという、いわば最適設計の立場を仮定して、建設費と強度余裕の関係を定量的に解析してきた。それゆえ景観等の要因は考慮の外に置いてきたわけだが、現状において、建築構造物に比べて、土木構造物が美観に払う注意の量が少ないのは事実である。土木構造物と自然や人間生活との不調和の原因を、戦後の高度成長期の産業優先政策に帰する声も聞かれる。例えば、日本の道路は路側帯や路肩が狭く、車両通行の機能しか果たしていない道路が多いし、また、都市内の高速道路の橋脚も美しいとはいえない。昨今、都市景観を見直し、住民の心を豊かにするような景観づくりを行なおうとする動きがでてきつつあるが、土木構造物の美化は重要な位置を占めよう。構造技術者にも発想の転換が求められるところであるが、例えば、美観を高めるため、機能に直接プラスにならない部分に材料を投じた際、従来の設計に比べて強度余裕はどのくらい落ちるか、とか、反対に強度余裕が落ちないようにして美観を高めた際、建設費はどのくらい増加するか等、本研究で提案した手法の仮定を若干変えて定式化することで、こうした問題について検討する一つの方法に発展させることができるのではないかと考えている。

なお、文中の図表にはSI単位系での値も付記すべきであるが、力学問題と異なり、設計では依然重力単位系が用いられていること、表の複雑化を避けること等の理由により省略させて頂いた。表-1の値を

9.8 倍することにより、 t を kN に、 $t \cdot m$ を $kN \cdot m$ に変換できることを述べておく。

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、一部文部省科学研究費の補助を受けた。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 西野文雄、佐藤尚次、長谷川彰夫：許容応力度法の内容と問題点（上）、（下）、橋梁と基礎、第17巻第12号、第18巻第1号 1983-1984
- 2) 佐藤尚次、長谷川彰夫、西野文雄：人的過誤等の要因が安全率設定におよぼす影響に関する一考察 構造工学論文集 Vol.32 1986.3
- 3) 川北司郎、長尚、小山健：材料安全率の変遷と若干の考察、第39回土木学会年次学術講演会概要集 I-226, 1984.
- 4) 杉山俊幸、酒井利夫、藤野陽三、伊藤学：構造設計における信頼性レベル・安全率の設定に関する考察、土木学会論文報告集第327号、pp. 21-28, 1982.
- 5) 杉本雅一、白石成人、古田均：Gross Error の構造安全性への影響、第37回土木学会年次学術講演会概要集 I-41, 1982.
- 6) 長尚、小山健：土木構造物の安全性に影響を及ぼす要因に関する若干の考察、第37回土木学会年次学術講演会概要集 I-43, 1982.
- 7) Nowak, A.S. and R.L. Carr: Errors in Structural Models, Proc. of 4th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability, pp. 11-41-50, 1985.
- 8) Melchers, R.E. and M.G. Stewart: Data-Based Models for Human Error in Design, Proc. of 4th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability, pp. 11-51-60, 1985.
- 9) 倉西茂：安全率は小さくできるか—特集日本の風土と土木技術、土木学会誌第67巻11月号PP18-19 1982
- 10) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造物設計指針小委員会：鋼構造物設計指針（第5次案）、1986.
- 11) 日本道路協会橋梁委員会・限界状態設計法分科会：荷重検討班中間報告書（現行道路橋における各荷重の占める割合）、1986。（非公開）
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書 I 共通編 II 鋼橋編
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書 I 共通編 III コンクリート橋編
- 14) 西山啓伸：橋梁上部構造（III）—コンクリート橋—、新体系土木工学43 技報堂
- 15) 平井敦：鋼橋（III）、技報堂.
- 16) 倉西茂：鋼構造、pp.308-310, 技報堂.

（1986年10月17日受付）