

橋梁設計の原則と問題点

総括執筆者 伊 藤 学*
 話題提供者 多 田 安 夫**
 同 猪 股 俊 司***
 同 菊 池 洋 一****

1. ま え が き

第二次大戦後、コンクリート構造、鋼構造を問わず、材料の強度、品質両面における向上、解析理論、計算手段の進歩、そして製作、施工方法の発達によって、先進諸国における橋梁技術は、着実にそのレベルを高めてきた。しかし、このような工学、技術の発展に伴う新たな問題が生じ、かつ根底的な「何か」が取残されているのも事実である。たとえば、最近ヨーロッパ系の技術者が関与した鋼箱桁形式の橋梁で架設中の事故があい次ぎ、英本土ではこの種の道路橋を、供用中のもも含めて再点検を行なったという。また、構造解析計算手法、製作技術のめざましい進歩に比較して、安全性の概念はこのままでよいのか、美観をなおざりにした橋は社会に一種の精神的公害をまき散らしているのではないか、というような疑念も持たざるを得ない。

研究者の関心も主として事実の解釈や解析的側面に向けられているように思われ、このような傾向は最近の学会年次学術講演会（第I部門）でも感じられる。とくに研究者のもたらす成果と、その実際面への反映との間には著しい断層があるように思われる。これは工学という分野の性格からして再考すべき問題であろう。研究者は成果の発表をもって終りとすることなく、現実にも物をつくる技術者に、ある時は批判を加えつつ、協力につとめることが工学の本来の姿と考える。

このたびの研究討論会で「橋梁設計の問題点」というテーマを取り上げた理由は以上述べたようなことによるものである。これは、橋梁という一対象に限る性質のもの

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 本州四国連絡橋公団 設計第一部長
 *** 正会員 工博 (株)日本構造橋梁研究所 副社長
 **** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

のではない。橋梁がほとんどあらゆる種類の外力を相手とし、すこぶる多様な構造形式を包含するがゆえに、その成果はかなり広範な構造物にもあてはまる。この研究討論会で話題提供をお願いしたのは次の3氏である。

- ① 構造物の安全度を検討するための一般原則
猪股俊司（(株)日本構造橋梁研究所）
- ② 鋼橋の二、三の問題点
菊池洋一（名古屋大学）
- ③ 橋梁設計の問題点
多田安夫（本州四国連絡橋公団）

猪股博士は、現在土木学会で審議中のプレストレストコンクリート構造物設計規準を中心に、新しい安全度基準としての確率論的アプローチと、その問題点を紹介され、菊池教授は鋼橋特有の問題点として高強度鋼などにおける疲労および高力ボルト継手に対する最近の研究成果を示された。また、発注者側機関に属され、しかも道路橋設計示方書作成のまとめ役をされている多田氏からは、橋梁設計における問題点を総合的に述べられた。ともかく、橋梁設計の問題点といえはあまりにその範囲が広く、限られた時間に対するテーマ設定としては適切でなかったことを、企画者側として話題提供者の方々にお詫びする次第である。時間の都合上討議は主として設計の基本概念に限ったが、幸い参会者からの活発な討議が得られ興味深かった。これらの方々にも厚く感謝したい。以下は、当日の話題と討議を中心に、筆者がこの問題に対する総括を行なったものである。個人的見解でかなりゆがめられた内容になることをおそれるが、この点お許しいただきたい。

2. 設計の目的と要件

一般に土木構造物の特色は次の点にあるといえよう。

- ① 公共的性格をもつこと
- ② 自然環境とのかかわりが大きいこと、
- ③ 規模が概して大きいこと、
- ④ 寿命が比較的長いこと、
- ⑤ 大量生産的でなく、多様であること。

したがって、土木構造物は社会に対する影響が大きいかつ建設にあたって考慮すべき要因には不確定要素が多く含まれる。

以上の観点から、土木構造物には次の条件が要求される。

- ① 安全性：想定した耐用年数の間、種々の外力に対して十分な強度、剛度と耐久性を有し、かつ安定であること。
- ② 使用性：合目的的であり、予定される機能を十分発揮できるとともに、不安や不快感を与えないものであること。
- ③ 経済性：施工管理の難易も含めた建設費のみならず、維持補修費、危険負担費もあわせて、公共事業である以上、当然課せられるべき条件である。
- ④ 美観：多くの人の目にふれ、自然の中に定置される物であること、寿命が長く、場合によっては文化的遺産として後世に残る物であることのために備わらなければならない。

このような土木構造物は、計画 → 設計 → 施工 → 維持管理という過程をたどって完成し、使用に供される。ここに設計とは、狭義には、構造物の材料、形式を選定し、各部の寸法を決定する作業をいう。もちろん、設計は単独にあるものではなく、上記の一連の過程は互いにあい関連したものである。設計の作業はさらに図-1のような流れで行なわれる。このさい設計のめざすところは、前述の4条件をバランスよく満足せしめるところにある。しかしながら、これら4条件は残念ながら互いに相反するところがないとはいえない。とくに、経済性と他の3条件の間のかねあいは、なかなかむずかしい。構造物の安全性、機能に影響するすべての変量が確実にわかっているならば、実際には

- ① 供用年数（ふつう橋の場合おおむね 50～75 年とされる）の期間中に作用する外力、とくに自然的外力や

車両荷重のようなものは変動があり、正確な評価がしにくい。

- ② 材料強度のばらつき、断面寸法の誤差、および材料試験結果の実構造物への適用の中に含まれる不確実さによる、部材、構造物の強度のばらつきは、避けられない。

- ③ 施工精度は均一ではない。

- ④ 設計計算にさいして解析上の仮定が多かれ少なかれ存在し、断面強度算定の精度にも、ばらつきや不確かさがある。

などの不確定要素があるため、いわゆる安全率なるものを取り入れざるを得ない。安全率は「構造使用上の限界と作用（使用）状態の比」として定義するが、一面では無知係数と称することがあるのも上述の事情からうなずけるところである。安全性を高めるために安全率を十分大きくとればよいかといえば、それは不当に経済性を無視したものになりかねないし、場合によっては、設計が不可能になることさえあるのも周知のとおりである。社会的環境の変化によっては、その構造物が不要となる場合のあることも念頭におかなければならない。

結局、構造物の設計とは「耐用期間の間、許容しうる危険確率の限界内で安全性および使用性を満足する構造物を経済的につくりだすこと」にあるといわざるを得ない。ともかくも、構造設計は、未知のパラメーターを含む対象にある決定をくだす創造的行為で、一種の art であるといわれるゆえんも、この点にある。

3. 安全度の評価

(1) 設計概念の分類

安全度の確保が構造設計の第一条件であり、その観点から設計理念を次のように分類することができる。

a) 安全率の対象によって

- ① 許容応力度設計法：従来から構造物のほとんどすべての部分に用いられている設計法で、設計荷重作用時の構造各部の計算応力度が、あらかじめ設定された許容値を越えないように構造物の寸法を定める方法。設計荷重としては作用荷重の最大値に相当するものを考え、許容応力度は鋼では降伏点、コンクリートなどでは破壊強度を、ある安全率で割った値とするが、この安全率の値は鋼材などでは陽には規定されていないことが多い。

結局、許容応力度設計法における設計条件は直応力度 σ を例にとると

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_a \text{ (許容応力度)} \dots\dots\dots(1)$$

となる。弾性理論に基づき、弾性挙動のみを問題にするので、弾性設計と呼ばれることもある。

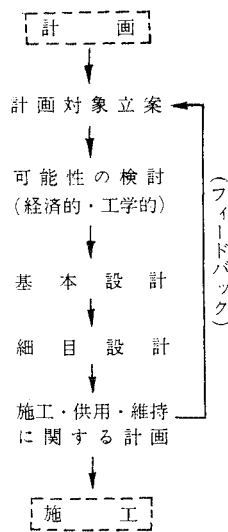


図-1 設計の流れ

② 荷重係数設計法：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方法。荷重係数がいわゆる安全率に相当する。

たとえば、死荷重 D および活荷重 L を対象とするとき、荷重係数設計では限界状態に対応する荷重を U 、荷重係数を F として

$$U \geq F(D+L) \text{ または } U \geq F_D D + F_L L \dots\dots\dots(2)$$

の形で設計条件が規定される。

部材断面の最大強度（鋼桁では全塑性モーメントまたは曲げ座屈強度）を基準にして断面の寸法を定める終局強度設計あるいは極限設計も形の上では荷重係数設計法であることが多い。ただし、限界状態が必ずしも破壊をさすものでないことは後に述べるとおりである。

b) 安全率の評価方法によって

① 決定論的アプローチ：考慮すべき設計荷重、材料強度などの基本的パラメーターには不確かさが含まれないとし、それでも種々の不確定要因が残ることを考えて既往の経験的事実と設計規準作成の任にあたる者の主観によって安全率を定める。

② 確率論的アプローチ：荷重作用、部材強度などのばらつきを考慮して、限界状態を越える確率を許容限度内に収めようとする観点から安全率を定める。

(2) 限界状態

安全率は構造物のなんらかの限界状態に対して設定される。この限界状態とは、構造物がある目的を果たすために要求された状態を厳密に満足していて、荷重作用が増加した場合にはこれが満足できなくなるような、構造物のある特別の状態をいう。

限界状態は、

① 終局限界状態：構造物の耐荷力の最大値に対応する状態。

② 使用限界状態：正常な使用または耐久性の基準に関係する状態。

の2種に大別され、具体的には次のような種類がある。

④ 弾性限界(降伏限界)：降伏点をめやすとする現在の鋼構造物の許容応力度設計法の限界状態がこれに相当する。

⑤ 塑性限界：材料の塑性域における挙動まで考慮して定めた限界状態。それ以上の荷重の増加なしに構造物が塑性的に変形しうるだけ十分な数の降伏域が形成された状態。

⑥ 座屈限界(弾性安定限界)：座屈や2次的不安定効果によって支配される、構造物が支持しうる最高荷重。

④ 剛体的安定限界：剛体と考えたとき、構造物の全

体または、一部が平衡を失う限界。転倒、滑動、沈下など。

⑦ 疲労限界：繰返し応力状態に起因する破壊あるいは劣化の限界。

⑧ ひびわれ限界；コンクリート構造物において過早または過大（ひびわれ幅で定義）なひびわれを発生する限界。

⑨ 終局強度；構造物の部材断面の最大強度。引張りを受ける部材では破断強度、厚肉で横方向に十分支持された鋼桁では全塑性モーメントがこれにあたる。

⑩ 変形限界；終局限界としては構造物のとりかえを必要とするような塑性またはクリープによる変形、使用限界としては作用荷重のもとで構造物の正常な使用をさまたげるような過大な弾性変形。

⑪ 振動限界；動的外力によって有害な振動を生ずる限界。

以上のような各種の限界状態を、構造物の特性に応じて適確に把握することが、安全で信頼性ある構造物を設計するために必要である。例として、鋼構造の限界状態の二、三について論じてみよう。

a) 弾性限界、塑性限界、座屈限界と終局強度

材料の性質が図-2に示すような完全弾塑性体であるならば、図-3(1)の単純ばりと同図(2)のように、最大曲げモーメントを生ずるスパン中央部が完全に降伏域となったとき不安定な構造となって崩壊する。これが塑性限界であり、このときの最大曲げモーメントが全塑性モーメント M_p である。曲げモーメントと曲率の関係

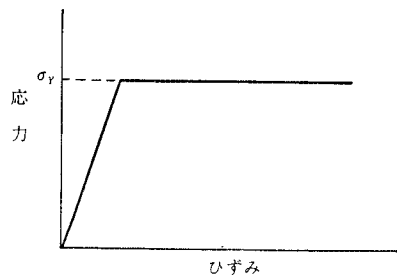


図-2 完全弾塑性体

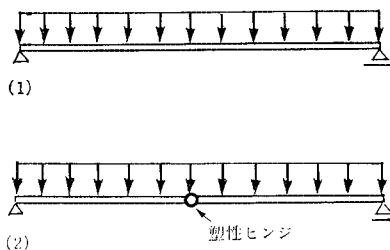


図-3 単純ばりの塑性崩壊

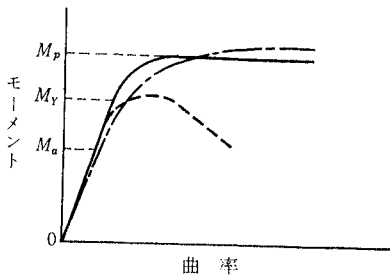


図-4 はりの耐荷性状

は図-4の実線のようになる。しかし、鋼桁がI形断面であるような場合、板厚が薄く局部座屈を生じたり、あるいは横方向支持が十分でなく横倒れ座屈を起こすときは、 M_p に達する前に図-4の破線のような経過をたどって耐荷力を失うことがある。また、同図に示す M_Y は桁の最大縁応力度が材料の降伏点に達したときの降伏モーメントで、これが降伏限界である。桁を許容応力度設計法で設計するときは、この M_Y を安全率で割った M_a が設計作用荷重に対する許容モーメントとなる。

ところが実際の鋼桁では、圧延形鋼にせよ溶接集成桁にせよ、加工あるいは製作のさいに発生する残留ひずみの影響でかなり早くから曲げモーメント・曲率曲線の直線性がくずれ¹⁾、他方、材料のひずみ硬化の影響で M_p を上まわる耐荷力を期待しうることがある。図-3の鎖線で示したのは、このような挙動に対応する。

b) 疲労限界

鋼構造では鋼板を溶接集成し、補剛材をとりつけたり切欠部が存在するなどのため、特に繰返し荷重を受ける橋梁では疲労強度がその耐荷力を支配することが多い。形鋼でも前述の残留ひずみが疲労強度にも関係し、高強度鋼の場合、残留応力の降伏点応力に対する割合は軟鋼より小さいので、静的耐荷力に及ぼす影響は小さいが、残留応力の絶対値は高くなっているので、疲労強度に及ぼす影響は大きいといわれる²⁾。さらに、高強度鋼になると溶接部切欠の疲労強度に対する影響も顕著となり、菊池洋一らが行った 80 kg/mm^2 鋼補剛材取付部の疲労試験結果を示す図-5によると、片振れ200万回引張強度が母材に比して、仕上げなしの場合1/3以下に減じている。

そのほか、鋼構造で最近大幅に用いられる高力ボルトでも、高強度の場合になると遅れ破壊現象の解明、摩擦係数の評価など研究すべき問題が残されている。

(3) 安全度の定量化

不確実な変量を含むからには、安全度の定量化は本質的に統計確率論的アプローチによらなければならない。いわゆる信頼性理論の応用である。

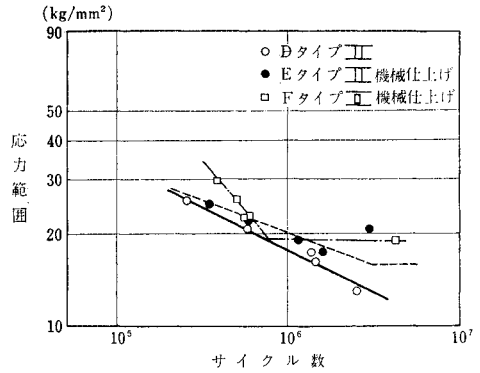


図-5 補剛材取付部疲労試験(菊池洋一)

ある限界状態(ここでは破壊で代表させよう)について、構造物または部材の耐力(以下強度という)を R 、荷重作用を S とするとき、安全性の条件は次式による。

$$\text{安全率 } \nu = \frac{R}{S} \geq 1 \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{または、安全の余裕 } r = R - S \geq 0 \dots\dots\dots (4)$$

しかし、 R, S はともに不確実さを有するパラメーターの関数であるから、この安全度は次の確率によって定量的に評価され、これを信頼性という。

$$p_L = \Pr\{R - S \geq 0\} = \Pr\{\nu \geq 1\} \dots\dots\dots (5)$$

その余事象が破壊の確率であって

$$p_F = \Pr\{\nu < 1\} = 1 - p_L \dots\dots\dots (6)$$

破壊の確率は R, S の分布の形(正規分布、ワイブル分布など); 平均値(期待値) \bar{R}, \bar{S} ; 分散 V_R, V_S (変動係数または偏差の形でよい)が与えられれば計算は可能である³⁾。確率 p_F は図-6のように限界状態の種類によって異なるが、いわゆる破壊を対象とするときは、 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ というようなオーダーで問題となる。

実際の設計にあたっては、強度についてはその最低保証値とみなされる R_p 、荷重作用については耐用期間中に生ずる最大値と考えられる S_q という値を「特性値」と称して用いる。もちろんこれらを下まわり、あるいは上まわる可能性はあるわけで、その確率は次のように十分小さいものとする。

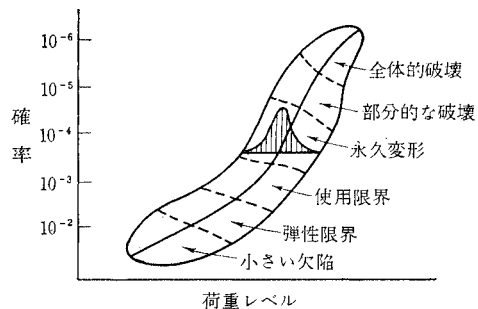


図-6 荷重レベルと諸現象発生確率の関係例

$$p = \Pr\{R < R_p\} \ll 1, q = \Pr\{S > S_q\} \ll 1 \dots (7)$$

われわれは設計に便利を形として安全率を考えたので、いわゆる慣用の安全率は

$$\bar{\nu} = \frac{R_p}{S_q} \dots \dots \dots (8)$$

と定義され、これは R, S の分布および p, q の値が設定されれば、破壊確率 p_F と関係づけることができる。この間の事情はおおよそ 図-7 のようになる。

構造物が複数部材の組合せより成る場合、荷重が繰返し作用する場合、時間の要因を考慮する場合などについても、信頼性理論の基礎的な拡張はなされている⁴⁾。

一方、確率 p_F または安全率 $\bar{\nu}$ の設計値は経済的評価からの最適化をめやすにして定めるのが一つの方法である。すなわち、総工費 C_T は当初建設費を C_I 、耐用期間中投資される維持費を C_E 、建設中および使用中に限界状態を越えることによる物的・人的な損害に対する保険料、その他心理的・社会的な配慮に対する費用を C_F として

$$C_T = C_I + C_E + p_F C_F \dots \dots \dots (9)$$

で表わされる。 C_T は 図-8 のようになるから、 C_T を最小にする安全率なり確率 p_F を最適値とする。

当然のことながら、安全率は前項に述べた限界状態に応じて考慮されるべきである。これは許容応力度設計法においてもいえることで、設計荷重のみ、あるいは安全

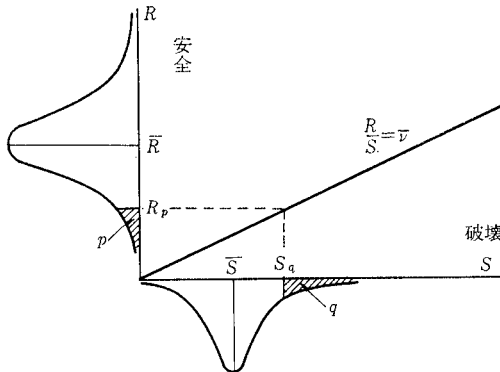


図-7 安全性の範囲

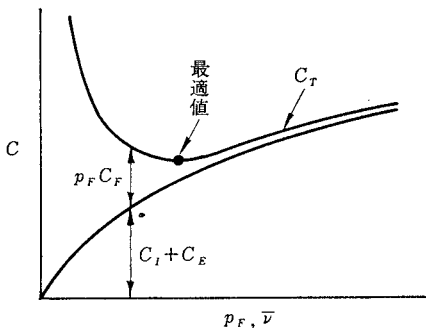


図-8 安全率と費用の関係

率のみを個々に取りあげて比較することはできない。道路橋活荷重を例にとれば、わが国の T-20 に対し、DIN では 60 t トラックを用いているが、わが国に比べてドイツでは通行車両の重量制限は確実に守られている。これに対して、鋼材の引張許容応力度の安全率は、わが国では約 1.7、ドイツでは 1.5 である。

(4) 規準, 示方書

土木工学が対象とする構造物の種類は多いが、同じ目的の同種の構造物でも建設すべき数はかなり多量にのぼるのがふつうである。このような同じ性質の、しかも公共的な構造物の間で、設計者の判断が異なることによって耐荷力あるいは安全性に不均衡が生じ、経済性もまちまちであるようなことを防ぐために、いわゆる示方書または規準(以下示方書という)が制定されている。示方書の目的は、設計者が自己の設計の目的性を判断するめやすとなる基準を与えることにあり、性格的には設計者個々の基盤を統一するための最大公約数的なきまりである、といえよう。このため、示方書には次の条件が要求される。

- ① 技術者が安心して使用できる標準的なものであること。
- ② 疑義の生ずる余地のない、誤用のおそれのない、明快かつ合理的な体系で形成されること。
- ③ その時代の技術水準に適合した実用的なものであること。
- ④ 十分な根拠に基づいた新しいくふうと発展の余地を拘束しないものであること。

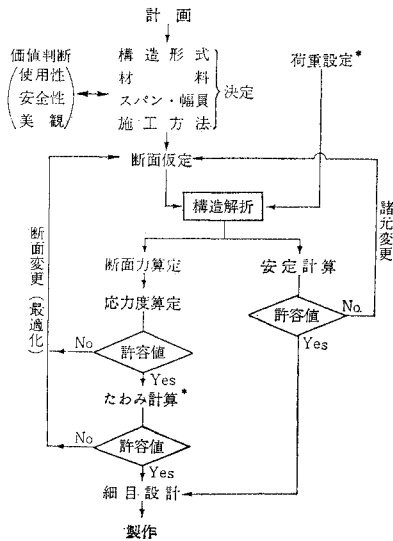
したがって、示方書はすべてを規定することは不可能であり、またある程度経験的なものを重視せざるを得ない。しかも、土木構造物の性格上、行政とのかかわり合いを避けてとおることができない。

4. 設計手法の比較

(1) 橋梁設計の現状

橋梁、建築物など構造物の設計に現在一般的に用いられている手法は、構成部材個々の断面寸法を許容応力度設計法により定めるもので、設計に用いる諸パラメータは決定論的に規定している。このさい限界状態は陽には与えていないことが多いが、鋼構造物では弾性限界を考えている。橋では別に変形限界を対象としたたわみ制限が設けられている。これらのプロセスを流れ図で示せば 図-9 のようになろう。

ところで、現行設計法でも剛体的安定限界に対する検討には荷重係数設計法概念が用いられている。たとえ



図一9 現行の橋梁設計のプロセス

ば、橋脚、橋台の滑動については、滑動面における摩擦抵抗力または、せん断抵抗力が地震などによる水平外力に対して1.2ないし1.5程度の安全率をもつことが要求される。

一方、後に述べるような許容応力度設計法への疑点を反映して、最近、荷重係数設計法あるいは確率論的アプローチの実用化が試みられつつある。

AASHTOは1971年に

Interim Specifications for Load Factor Design of Steel Highway Bridges

を発効し、鋼道路橋に対する荷重係数設計を正式に具体化した。これによれば、たとえば死荷重 D 、活荷重 L 、衝撃 I の組合せについては

$$U = 1.30 \left[D + \frac{5}{3} (L + I) \right] \dots\dots\dots (10)$$

に対して設計を行なうこととし、曲げに対する限界状態として次の断面最大強度を考えている。

a) 横座屈に対し十分補剛された厚肉断面

$$M_u = \sigma_Y Z \quad (Z: \text{塑性断面係数}) \dots\dots\dots (11)$$

かつ、連続ばりの場合10%のモーメント再分配を考慮する。

b) 横座屈に対し十分補剛された薄肉断面

$$M_u = \sigma_Y S \quad (S: \text{弾性断面係数}) \dots\dots\dots (12)$$

c) 横方向の支持が十分でない断面

$$M_u = \sigma_Y S \left[1 - \frac{3\sigma_Y}{4\pi^2 E} \left(\frac{L_b}{b} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (13)$$

(L_b : 横方向支持点間隔, b : フランジ幅)

式(10)の荷重係数値は決定論的に定めたものではあるが、このように死荷重、活荷重に異なる荷重係数を用いることにより、スパンの差による橋全体としての安全率

がバランスのとれたものになる利点が生ずる。また、結果として比較的スパンの長い桁では従来の許容応力度設計によるものより鋼材が節減されると報告されている⁹⁾。

鉄筋およびプレストレストコンクリート構造物に対してはCEB/FIPが準確率論的アプローチともいべき限界状態設計法⁶⁾を提案し、かなり急速に普及する動きを見せている。その手法は

① 材料強度、荷重作用の両者に対し「特性値」を定める。これらの値は実際の値がこれより小さかったり、大きかったりする確率を、あらかじめ定めることによって求める(式(7))。

② 他の不確定要素は、特性値にある係数を乗じて、「設計用値」とすることでカバーする。設計用材料強度は強度特性値に $1/r_m$ ($r_m \geq 1$)、設計用荷重作用は荷重特性値に r_s ($r_s \geq 1$) を乗ずることによって求める。これらの係数は、考える限界状態の結果の重要性、構造物の挙動、荷重組合せの可能性を考慮に入れて定められるもので、具体的には r_m, r_s も、またいくつかの要因に基づく係数の積の形となる。すなわち、部分安全率の手法を用いる。

③ 計算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いて、その構造物によって耐えられる値を越えないことを確かめる。

すなわち、現時点ではすべての不確定要因を確率論的に扱うことができないので、適宜決定論的扱いを加味しながら理想像に近づこうとするものである。

(2) 各設計手法の得失

a) 許容応力度設計法

まず思いつくいくつかの疑点、矛盾点をあげれば

① 材料のトータルとしての応力度のみを問題にしているために、同じ構造物でも部材ごとに実質的な安全率が異なる。たとえば、影響線基線長の大きい部材と小さい部材とでは、死荷重応力と変動の大きい活荷重応力との比率は異なるのに、それが考慮できないし、断面形状による、あるいは静定、不静定の別による余剰耐荷力の相違を考慮するのもむずかしい。

② 材料別、限界状態別に一応安全率の値は変えているが、その数値的根拠は明らかでない。

③ 同じ構造物、たとえば橋脚で、駆体の強度は許容応力度設計法により、安定計算は一種の荷重係数設計法によっている。

④ 不静定構造物では、補強すると許容荷重が低下するというような妙な結果がもたらされる。

⑤ 弾性設計といいながら、たとえば、リベット継手などでは暗に最終状態における応力再分配を念頭において、平均応力を対象に設計を行なっている。

⑥ 非線形挙動を示す構造物では、許容応力度設計法は合論理的ではない。使用荷重のもとでは許容応力度範囲内にあっても、荷重を少し増加させるだけで構造部材の破損をひき起こすようになることは、しばしば見られる。現在用いられている鋼構造物においてさえも、非線形性が存在することは、すでに述べたとおりである。

⑦ 最近のように構造解析理論が進歩し、従来、計算できなかった局所的応力まで求められるようになった場合、どのような処置をとるか。2次応力として無視するか、断面をふやすか。安全率が明確でないために、既知の2次応力の処理も含めて納得のいく論理が得にくい。

それに対し、現在の許容応力度設計法を弁護する立場からは、

⑧ プロセスがきわめて解析的、機械的で、示方書でも扱いやすい実用的手法である。

⑨ 長年にわたる経験的事実の蓄積のうえに確立された手法でこれまでにもさしたる破たんを示していない。

⑩ 作用荷重を対象とするので、使用限界状態と終局限界状態の両方をにらんで設計が複雑でなく、運用者の判断を誤らせる機会が少ない。

⑪ 現行の許容応力度設計でも決して現象に対する忠実さを欠いているわけではない。現に座屈や継手強度に対しては終局耐力を念頭において許容応力度を設定しているし、必要とあれば荷重係数的な考慮も払っている。と主張される。

b) 荷重係数設計法

前項の許容応力度設計法の矛盾点の多くが解決できるので、荷重係数設計法は概念的には許容応力度設計法より合理的である。しかし、次のような問題点が残る。

① 使用限界状態に対する照査をどういう形で行うか。作用荷重のもとにおける応力、変形の照査がやはり必要となるのではないか。

② そうなると、現行より設計を複雑なものにして、運用者の判断を誤らせる機会が多くなるか。

③ 終局限界状態を本当に適確に把握できるか。たとえば、構造物としての終局耐荷力、崩壊機構、疲労限界などが十分に解明できているだろうか。

結局、大勢の意見としては、荷重係数設計法への漸進的な移行が妥当なところであろう。とくに、鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート、合成桁、ハイブリッド鋼桁のように異種材料から成る構造物や、非線形挙動を示す構造物では、必然的に荷重係数設計法をめざさざるを得ない。現にプレストレストコンクリート桁や合成桁では、現行設計法でも、許容応力度に基づいた断面決定を行なったうえで、荷重係数方式の限界荷重に対する安全度の照査を課している。

(3) 決定論的アプローチと確率論的アプローチ

許容応力度設計法はもちろんのこと、荷重係数設計方式の場合でも、現行示方書の荷重や安全率は決定論的に定められている。もともと確定的な数値を予測しにくい強度や荷重を相手にする以上、本当は確率論的アプローチが望ましいのであるが、これには次の難点がある。

① 設計に考慮すべきすべての変量が確率的な不規則変動量ではないこと。

② 使用可能なデータ、情報が現状ではまだ不十分であって、正確な確率密度関数の形が得にくいこと。

③ 知識不足による不確実さ、既往の経験的事実を考慮に入れるには、主観的確率あるいは工学的判断を加えようの余地を残す必要がある。

④ 構造物はかなり長い間使用に供されるので、時間的変動を含む要因をどのように考慮するか。社会的、経済的要素も考慮しなければならない。

⑤ 示方書体系における簡潔な定式化の困難さ。

このため、実用化への段階に向けて種々の提案がなされ、前述の CEB/FIP の部分安全率方式による準確率論的アプローチはその一つである。またアメリカ合衆国の Benjamin, Cornell, Shah, Ang ら、カナダの Lind, Turkstra らは、この種の研究を精力的に行なっている。A.H. Ang⁷⁾ は主観的確率に基づく判断係数を導入して主観的要素を加味することを企てるとともに、古典的信頼性理論の一つの欠陥である確率密度関数の選び方による結果の敏感さを避け得たとしている。しかし、これに対しては本質的な問題は解決されていないという批判もある。C.A. Cornell, H.C. Shah は、それぞれ種々の不確定要因に対する部分安全率あるいは組合せ荷重の場合の荷重係数に裏づけを与える方向での研究を進めており、N.C. Lind は豊富な研究成果の積重ねのうえに立って、さらに code optimization⁸⁾ という新しい問題に取り組んでいる。

設計という作業には決定を必要とする段階が含まれるが、J.R. Benjamin, C.J. Turkstra は、それぞれ決定理論あるいはゲーム理論の設計手法への適用についての基礎研究を行なった。とくに Turkstra⁹⁾ は破壊確率を含めた設計の最適化を工費または効用関数に対して施すことを試みた。このようなゆき方は、さらに structural synthesis の概念とも結びつけられることになる。

6. 設計にかかわるその他の問題

(1) 設計にさいしての仮定について

a) 決定論的アプローチ、確率論的アプローチのいず

れにせよ、設計にさいしては各パラメーターにあらかじめなんらかの数値をあてはめる。ところが実際に構造物ができあがって使用に供されるとき、これらのパラメーターが設計計算に用いた数値とかけ離れていては、いくら精密な計算を行なってみても意味がない。T-20 荷重に対して許容応力度を 1 kg/cm^2 でも超過しないようにと計算を行なうと、さて橋ができあがってみると 30 t もの重車両がとおっているのでは、割りきれない気持ちにもなるであろう。また、古い時代に低い活荷重で設計された橋が現在の重交通に耐えているのを見て、工学者としては感心してばかりもいられまい。だから、安全率が適切であったという前に、もう少し納得のゆく処置はとれないであろうか。

b) 設計計算中の一過程としての構造解析においていくつかの仮定がある。実際には剛結に近いトラス格点をピンとみなして計算したり、連続体を多質点系にモデル化して振動の解析をしたりするのはその例である。新しい構造では、このさい設計者の適切な判断を必要とする部分が多い。そのとき設計者の判断にも幅はあろうが、これをどう処理するかが問題である。有限要素法などの解析手法が進歩したからといって、やたらに細かい計算をやってみても、安全率とのかねあいで、それをどう処置するかが問題である。現象に忠実な設計は望ましいが適確な工学的判断の介入がなければ混乱をもたらすばかりではない。解析と設計は深い関係はもつが、同じものではない。

(2) 設計計算について

電子計算機の利用は構造設計に大きな変革をもたらしたが、経験の浅い設計者は、構造物の本質を知ることなしに、また計算途中の経過を知ることなしに、結果だけを見て安心してしまっておそれがある。特にインプットの誤り、プログラムの適用範囲以外での使用などによる計算違い、プログラムの特性を知らないで使用した場合の誤りは致命的である。これを防ぐには、設計者が対象とする構造物の性質、プログラム化される前の解析手法について、よく習熟するとともに、なんらかの客観的なプログラム照査機関の設置が望まれる。それまでは、計算尺を用いてのめやす的な照査が必要ではなかろうか。

前項で指摘した設計上の種々の仮定やインプットの数値の精度を考えると、コンピューターの計算結果をそのままに、やたらに多くの有効数字を並べることは意味がないし、かえって数値のもつ意義に対する判断を狂わせることになる。このため、このたび改定された道路橋示方書では、有効数字のとり方についての規定を新たに設けている。

(3) 背後にある技術環境との関連について

新材料の出現、製法、架設法の進歩、それに社会状況の変化は当然設計面にも反映されなければならない。たとえば、最近のように工場が近代化され、検査設備が整備され、現場では架設機械の大型化と能率向上が進む一方、労賃の増大、人手不足が生じてくれば、可能なかぎり高強度材料を用いて大ブロック化をはかり、架設を迅速に行なう方策がとられる。工事積算の考え方もこのような背景を考えて、時代とともに変わってこなければならない。そうなれば、設計のほうもこのような技術環境の変化に応じたくふうがなされるべきであろう。

(4) 公共的構造物における行政的配慮について

橋などの公共的土木構造物の最終的な責任は発注者である官公庁なり公団が負うことになる。そこで、設計、製作架設、管理の各段階で、これらの公的機関はコンサルタント、施工業者そして利用者に対して、いわゆる行政指導という形での接触が行なわれる。その間柄は、これが公共事業であるために、いま多くの問題で告発されている企業と行政のかかわりあいとは、いささか性格が異なる。われわれの分野で望まれるのは、発注者（管理者）、設計者（コンサルタントなど）、施工者（製作者）がそれぞれ当面する構造物のすべてに通じているという実力と見識を備え、その成果が直接人間、社会に影響を及ぼすのだという自覚をもち、その上に立って、互いに良い意味での信頼感を育てていくことではなかろうか。

7. む す び

近年、構造工学は材料、解析理論、計算手法、製作方法の各面において着実な進展をとげつつある。しかし、荷重の評価 → 構造解析 → 安全度の確認という順序で行なわれる構造設計は、中間の構造解析を除いて、さしたる変革は見られなかった。これは、土木構造物が公共的構造物であるがゆえに本質的に存在する保守性が一因であろう。しかし、同じ橋という対象をとってみても、設計理念に関するかぎり、多少の変化は見られたにせよ、わが国の現状は一般的には残念ながら消極さを認めざるを得ない。

構造物の設計は、その合目的性を考慮した全効用を最大にするようつとめるべきである。この観点から設計における将来の動向と解決すべき問題点をあげれば、

(1) 安全率の決定論的評価から確率論を加味した評価への移行。理念的には、合論理的な統一のとれた安全率の設定。

(2) 荷重係数設計法による設計手法の統一。具体的

には前項と同様、システムとして合論理的な調和のとれた設計への志向。

(3) 部材および構造物の限界状態の適確な把握。これには実際の挙動に合った解析なり評価が望まれ、特に構造物の耐荷性状、使用限界の定量的設定が問題となろう。

(4) 人間と計算機との相互関係を考えなおすこと。

(5) 人間、社会との関連における構造設計の見なおし。

最後に、筆者は、この討議の過程では話題にのぼらなかった橋梁設計の第四の条件「美観」に関して一言しておきたい。これは最近、ややその地位を回復してはきたが、定量的評価がむずかしいこと、主観的要素があまりに大きいとの理由でなおざりにされがちである。戦前に比べても、土木技術者でこの種の問題に一家言を吐く人が少ないように見えるのは寂しいかぎりである。技術の変革に伴って構造物の形態が変化し、人間社会と工学とのかかわりあいがある、あらためて問題になってきたいまこそ、新しい構造美学の論議がなされるべきではなかろうか。とくに耐震というハンディキャップを背負うわが国の構造物にとって、これは独自に考えられなければならない問題である。

ない問題である。

参考文献

- 1) 西野文雄・伊藤 学・星基正明：ハイブリッドはりおよび大型圧延H形鋼ばりの曲げ挙動，日本鋼構造協会誌，7巻71号，昭和46年11月
- 2) 山田健太郎・神谷周浩・菊池洋一：キャンパー加工された圧延H形鋼けたの疲労強度，土木学会論文報告集，第200号，昭和47年4月
- 3) たとえば伊藤 学：不規則な現象の解析（その2），土木技術者のための新数学講座，土木学会誌，55巻3号，昭和45年3月
- 4) A.M. Freudenthal, 篠塚正宣等の一連の研究，あるいはBolotin, V.V.：“Statistical Methods in Structural Mechanics”.（英訳），Holden-Day Inc. 1969年
- 5) Engineering News Record, April 29, p. 13, 1971年
- 6) プレストレスト コンクリート技術協会・日本コンクリート会議：コンクリート構造物設計施工国際指針（CEB/FIP 1970）（訳），鹿島出版会，1971
- 7) Ang, A.H.-S. and B.R. Ellingwood：Critical Analysis of Reliability Principles Relative to Design, Proc. Conf. on Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering, Univ. of Hong Kong, 1971
- 8) Lind, N.C. and M.K. Ravindra：Optimization of a Structural Code, Proc. ASCE, ST Div., 1971
- 9) Turkstra, C.J.：Theory of Structural Design Decisions, Study No. 2, Mech. Div., Univ. of Waterloo, Canada, 1970

土木技術のコンサルタント

土木設計調査と施工管理



株式 日本建設技術社

取締役社長 山 本 格

本 社：東京都新宿区西大久保2-303中央ビル 電話(03) 209-3435(代)
大阪事務所：大阪市北区梅ヶ枝町106寿美ビル 電話(06) 363-4075
九州事務所：熊本市七軒町84徳弘春美方 電話(0963)43-4057