

土木構造物の設計とは何か

村 上 永 一*

1. 被災は設計を反省させる

1940年11月7日、当時世界第3位の長大橋であったタコマ・ナロウズ橋（スパン長 853 m）は開通4か月、強風とはいえわずかに 19 m/sec の風によって落橋した。現代吊橋の理論と実際の粋を集め、巨匠モイセイフによって設計された長大吊橋の落橋は各方面に大きな衝撃を与え、これにより長大吊橋の設計に対する反省と空気動力学的検証が吊橋の対風安定設計に欠くべからざるものとなった。

吊橋のスパンの長大化への武器とされていた、たわみ度理論を利用していくと、吊橋の補剛桁はますます細くすることができたが、風に対してはケーブルと補剛桁が協同し、抵抗する静力学的の解析でよしとした設計のかけには、空気力学的な振動による危険性がしのびよっていた。

この事故は高価な損失であったが、長大吊橋の設計に貴重な警鐘となり教訓となった。

土木構造物はその使用目的である荷重を支え、これをとりにくく流水・波浪・地震などの自然現象や、風・雨・温度などの気象作用に耐え、これらを応力と変形の形で基礎おおく大地に伝え、いわば自然の重圧に抗して自立する構造物であって、自然から常に脅威を受けているといつてよい。とくにわが国は、しばしば強い地震に見舞われ、そのつど、土木構造物は大きな被害を受け、その安定は地震時にきまるといってよい。地震時に構造物がどのように挙動するかを究明し、その影響を把握するためには、構造物の減衰性状、土の動的物理性状、支持力の低下現象など、なお究明すべきものが多く、総合的な実物実験ともいえる地震被害の調査は、耐震設計の合理性を高める有力な武器となっている。

2. 土木構造物の性格と設計のあり方

土木構造物には鉄道・道路・港湾・発電水力・治水などの施設計画の一環として計画され、築造される橋・トンネル・防波堤・岸壁・擁壁・水門などがあって、その

* 正会員 工博 本州四国連絡橋公団 理事

共通する特徴をあげれば次のごとくである。

① 目的とする荷重や外力を受けて応力と変位という形で基礎地盤、すなわち大地に伝え、野外に自立する構造物であって、流水・波・潮流・土圧・湧水・地震などの自然現象に抗し、雨・風・雪・気温・日射などの気象作用に耐えるものである。

② 国民生活・経済活動に直接つながる基本的施設の一環としてつくられ、公共性が高い。

③ 大規模な施設の一環としてつくられ、それ自体大規模なものが多い。

④ 使用期間が長い。

⑤ 則地性が強く、その設置される箇所の固有の地形地質・土質・気候などの環境条件、住民や他の施設などの社会条件は、構造物の設計施工に大きく影響し、設計に多様性があるが標準化しにくい。

⑥ 全体の施設計画の一環として、自然の障害を突き破り（橋・トンネルなど）、自然の脅威を防ぎ（防波堤・擁壁など）、自然を改造して利用度を高める（ダムなど）構造物で、ことさらに大自然にたちむかう性格をもっている。

⑦ 一方、都市での用地の取得難や施設の集中化のため、複雑な立体構造や地下構造など、複雑化・集約化がいられている。

このように考えると土木構造物とは、ことさらに自然にたちむかってつくられた構造物であって、大自然はこの人間の挑戦に応じ、いつ襲いかかるかもしれない。そこで人間が経済活動を発展させるに応じて、土木構造物はあえて危険をおかして、より困難な箇所で自然にいどみ、巨大化への道を進んでいる。そして、土木技術はそのつど、より高度の要求を満たしてきた。

このような土木構造物を設計するにあたって考慮しなければならない因子を要約すれば次のごとくである。

- ① 合目的性
- ② 安全性
- ③ 施工性
- ④ 経済性
- ⑤ 環境との調和

第一の合目的性は、その構造物をつくる目的に合致することであり、使う立場にならば使用性ともいえる。設

計する構造物の目的を十分に理解し、完成後これを使用するにいやしくも支障があってはならない。その使用にあたっては、快適性が要求される。また、維持修理が使用性をさまたげるような箇所の耐久性については、とくに配慮する必要がある。これは、次の安全性と並んで必ず満足しなければならない課題であるが、交通が高速化し、自然条件がきびしくなり、社会環境が複雑化するとこの条件を完全に満たすことは必ずしも容易ではない。

第二の安全性は、想定した耐用年限内に使用目的の荷重とその累積に対し安全な強度と剛度と耐久性をもち、そのほか環境条件より受ける外力・気象作用に耐えて安定であることが要求される。ただし、種々の外力または気象作用に、どの程度耐えるかについては、構造物の重要度を考慮するのが普通である。

第三の施工性は、設計したものが無理なくつくり上げること、施工上に無理のある設計は、でき上がり精度および品質が低下し、それが構造物の安全性や使用性に悪い影響となり、施工不能場合には絵にかいた餅ともなりかねない。とくに長大構造物では、施工しうる設計であることが要請される。

第四の経済性についていえば、使用材料と構造形式の選定は構造の合理性につながり、これは経済性に通ずるものである。単に材料費最少という考えでなく、仮設設備や施工の難易、工期を含めた建設費を考え、その後の補修や取替えの費用をも加えて、経済性を論ずべきである。

最後の環境との調和については、自然の中で、人間社会に接し、定着する構造物であるから、人の目にふれて美しくあることが好ましく、少なくとも周囲の景観に適合し、悪い影響を与えないよう心がけるべきである。

これらの因子のうち合目的性と安全性は土木構造物の生命とあってよく、設計の技術的可能性にもつながる問題であって、このいずれかが満足し得ない設計は失格を意味する。設計のめざすところは合目的性と安全性の与えられた条件を十分に満足させると同時に、経済性・施工性をバランスよく満足せしめ、あわせて環境との調和を保たせることである。これらの条件は、ときには相互に背反することもある。急速施工を要求して、その部分の構造物の経済性を犠牲にする設計も考えられる。

3. 安全性の追求

構造物の安全性の保証は、現代の科学技術を身につけた新しい一群の技術者が出現し、設計にその概念と、手法を取り入れたことによって始まった。それは、19世紀後半において新しい技術、新しい材料——鋼とコンクリート——の登場に伴うものである。

これ以降、構造物における力の配分と安定性が理論づけられ、構造物の空間的可能性の領域を拡大した。パリのエッフェル塔（1889年・高さ312mの塔）、スコットランドのフォース鉄道橋（1890年・521mの2径間を含む1630mのカンチレバートラス）、ニューヨーク市のブルックリン吊橋（1883年・中央スパン486mの吊橋）などは、この可能性を具体化した代表作であって80年以上たった今日でもなお使用に耐えている。

昔の木製トラスでは、大工は設計上の材料強度に対しては、彼らのカンにたより、応力に関しては、正確な知識を得るための科学的あるいは数学的方法は知らなかった。大工のつくる橋はすべて同じ寸法でつくられ、もし橋の架設中に一つの部材が壊れると、より大きな部材と取替えた。小さな模型がつくられたときは、部材に比例した荷重が載せられ、部材が壊れたときは、より大きい断面と取替えた。このような橋の多くは、非常に弱かったが、他の部材は必要以上に強くもあった。

最初にトラスの応力に関する報告は1847年のホイップルの論文で、トラスの応力解析が正確に行なわれた。1879年にはカスチリアノはひずみエネルギー一定を発表し、不静定構造の解析のための重要な理論となった。1880年にアンデレラは二次応力に関し、1888年メランは吊橋のたわみ理論に関し、それぞれ高度の科学的数学的論文を発表するなどして、弾性設計に必要な解析理論は19世紀後半に出そろった。

今日において構造物の安全性は、主として設計基準が示す許容応力度と仮定した荷重（限界状態に対応する荷重）によって照査されている。ここで許容応力度は、鋼では降伏点強度を1.46~1.48の安全率で割ったものをコンクリートなどでは破壊強度を2.0~4.0で割ったものをを用いている。また、仮定した荷重は主として限界状態に対応する荷重であって、荷重に荷重係数値を乗じたもので、傾向として活荷重と死荷重に異なった係数を用いるものが多く、橋桁ではスパン差による安全性のバランスをはかっている。このように安全率や荷重係数は作用する外力の評価、とくに自然現象から受ける外力の評価の不確かさ、材料強度のばらつき、施工精度の不均一性や誤差などに対する余裕、ないし安心感を確保するために設けられたものと考えてよい。

許容応力度による設計法は従前から長く用いられた方法で、解析的・機械的であって、わかりやすく取扱いやすい利点があって、今日までさしたる破たんもなく実用化されてきたが、同じ構造物でも、部材ごとに安全性が異なるとか、非線形挙動を示す構造物では論理的でないとかいろいろの欠点もあって、荷重係数設計法によって上記の欠点を補う方法が取られるようになった。とくに鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートのよ

うに異種材料からなる構造物などでは、この方法で行なわれる傾向にある。

合理的設計の基本原理解は簡単にいい表わすと、① 構造物の所要耐用年限内に破壊が起こらない確率を高めるよう、破壊を起こす荷重は作用荷重より十分に大きな荷重であること、② 所要耐用年限の期間を通じて、そこに作用する荷重がもたらす変形は、その構造物の安全性や効率を阻害するものでないこととなる。そして、新しい合理的な設計法としては、①の項目を次の方法によって満足させるものといつてよい。すなわち、④ できるだけ現実に起こりそうなことをもとにして決めた設計荷重、⑤ 材料の性質の違いによる構造物の破壊強度の変化を統計的に考慮した構造物の破壊強度の算定法、⑥ 構造物の破壊に対する危険の許容しうる程度である。

現在、実際の荷重状態を知るうに有益なデータは非常に少ない。そこで今日まで、破壊程度およびその可変性を求めるための多くの研究がなされたが、まだ十分とはいえない。とくに破壊に対する危険の許容しうる限度ということは、心理学的・社会学的のむずかしい問題が山積している。それゆえに、破壊を起こす確率をある規定以下に押えるというような設計法は、まだ実現できる段階でないとはいえよう。

第二の項目については、⑧ 変形量（またはクラックの幅）を十分正確に計算することが可能であり、⑨ 変形またはクラックの許容限度について規定することが可能であれば満足される。実際の変形を正確に算定する研究は続けられており、その許容限度を決めることについては国際的に広く研究がすすめられているが、これを科学的に行なうには、いまだしの現状である。

4. 快適性・経済性について

構造物の動的挙動については本文の頭書において、吊橋の強風の空気力学の振動による破壊、土木構造物の地震動による被害についてふれたが、これらは設計上重視せねばならない振動の問題といつてよい。最近の橋はよく揺れるので、設計上の欠陥のためでないか、とよく聞かれる。最近の橋は溶接構造で、かつ設計の合理化が進み軽くなった。振動も多少は大きくなったが危険はない。いまだき揺れないような重い橋は設計が悪いといつてよいと答えているが、この答は正しいのであろうか。

合理的な設計が進められ、経済性の向上を示す一例として、道路橋標準設計の使用鋼重量の軽減を示そう。スパン長 32 m・幅員 7.5 m の一等橋のプレートガーダーの鋼重は昭和 16 年の標準設計では 76 t であったが、昭和 38 年の標準設計では、自動車荷重は 13 t から 20 t に増加したにもかかわらず、33.1 t と 44% に減じて

いる。前者は普通鋼（許容応力 1200 kg/cm²）の鉚結構造であるのに対し、後者は高張力鋼 SM 50（許容応力 1900 kg/cm²）の溶接構造で、コンクリート床版と鋼桁とが協力する合成桁とし、製作単位を大きくして添接箇所を減ずるなど、20 年間の合理化の成果である。少しぐらゐ揺れるのは我慢すべきであるが、この揺れに対する非難は横断歩道橋でもしばしば聞く。それは歩行者に目まいを起こさせるまでに至っている。この振動は橋の安全にはさして害のないものか、害がなくても使用上の快適性を失ったとすると、設計はこれにどう対処したらよいか。快適性をそこなう振動の限度は、多分に心理学的・医学的な要素が多いが、設計者の対決しなければならない問題であろう。

イギリスのセバン橋（スパン長 988 m の吊橋）は、補剛桁を扁平箱形断面桁として、軽くて耐風安定性の高い新型の吊橋を出現させた。

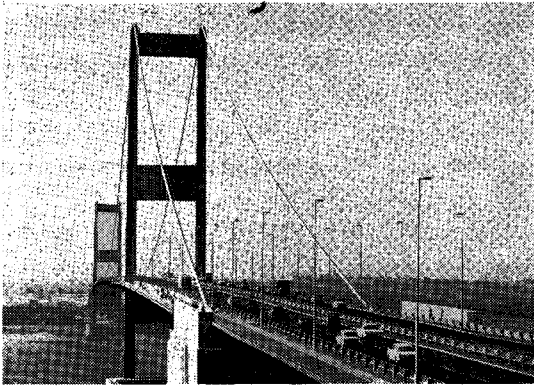
しかし、この型の補剛桁は、比較的低風速（15~30 m/sec）において限定振動を起こす傾向にある。この限定振動は吊橋を破壊に至らせる危険な振動でないことは確かめられているが、振幅が大きくなると自動車の走行が不安定になるので、交通安全上から交通止めすることになる。

これは、使用性を著しく制約するもので、経済性と使用性はここで完全に背反したといつてよい。

このセバン橋は、上部構造の鋼重 18700 t であるの



（世界の橋、から転載）
ベラザノナロウズ橋



(在日イギリス大使館提供)

セバン橋

に対し、ニューヨーク市のベラザノナロウズ橋（スパン長 1298 m）は、鋼重は 132 000 t で非常に重く、イギリスの設計が大胆になりすぎているのか、アメリカには value engineering が十分に考慮されていないのか、と疑問がなげかけられ、技術誌上で討論が続いた。

セバン橋はだれが見ても軽く繊細であるが、ベラザノナロウズ橋は重々しい。経済性はたしかにセバン橋にあることは間違いない。しかし、設計者の弁明を聞けば格段の差があるとはいきれない。ベラザノナロウズ橋に用いた I ビーム・コンクリート床版はニューヨーク市の重交通の実績からみて最も信頼性があり、補修なくして 30 年も使った経験がある。これに対しセバン流の鋼床版舗装では、アメリカは失敗のながい経験しかない。補剛桁は上層 6 車線・下層 6 車線・計 12 車線を収容するのでトラス型とし、下層 6 車線を入れるために横桁はフィレンディール形式として、横桁が重くなった。セバン型の箱桁では、12 車線の車道を収容する設計は不可能である。車道面積あたりでは前者の 0.81 t/m^2 に対し、後者は 1.44 t/m^2 で、スパンの差を考えれば、それほど鋼重が重いとはいえない。アメリカでは当時、製作工場は鉸結方式にアレンジされていて、セバン橋のような溶接構造ではかえって高くつく。アメリカの労務費はイギリスの 3 倍であるにもかかわらず、ナロウズ橋の単位面積あたりの工費はセバン橋の 1.43 倍にすぎない。このよ

うに使用性と規模によっては新形式も適用しにくい欠点も生れ、無修繕というサービス度は道路橋では大きな経済につながる。

かく考えると、経済性は使用性と計画の規模、その国の工業事情などを考えたうえで議論すべきである。科学には国境がなくとも、技術は国境があるといたい。

最後に構造物の美についてすこし述べよう。土木構造物は使用性が強調され、安全性を要求される力学的の構造物であって、美に専念するわけにはいかない。パリのエッフェル塔も新しい技術の可能性を具体化するためのもので、当時は技術面は別として、その形については怪物の醜悪さを示したともいわれた。それが時がたつにつれ人々の考え方は変わり、造形の美がみとめられたと聞く。構造の合理性が美となったのである。

これと同時代のフォース鉄道橋も普通の意味での美しい橋ではない。重々しくどっしりしていて、ぶかっこうだとみなされるかもしれない。しかし印象的で、どっしりした重量感には感銘を受けずにいられない。力と長さのこの壮嚴な印象には、それ自身に美的な本質がある。ここでは、トラス形式の単純さを実現するために、施工しやすい細かい部材を使わずに、直径 12 ft・長さ 300 ft という大型の部材を使って、素人にもわかる論理的の明解さを表現する方式をとっている。

橋を除けば土木構造物は自然を傷めることが多い。それは、計画の一環として設計されるもので、全体の使用性のために勝手な位置に勝手な形で、自分だけの考え方で都合よく設計するわけにはいかない。擁壁は交通施設が山肌を傷つけた跡のバンソウ膏とも考えられる。このような構造物を、環境に調和させ、美しくと要求するのは酷といえよう。道路の計画のありかたが、道路全体の環境への調和を決めることになる。スイスのレマン湖畔の木々の緑におおわれた山の斜面を、ところどころに橋脚をおいて橋で通り抜けている写真を見たが、そこには少しも自然の破壊もなく、コンクリートの構造はよく調和していた。多少の経済性は犠牲にしても自然の美は守りたい。全体の計画に、個々の設計に、この程度の心の余裕はもちたいものである。

日本鉄道建設公団・本州四国連絡橋公団編集

本州四国連絡鉄道吊橋技術調査報告書 ●A 4・576 6 500 円 (〒500)

本州四国連絡橋基礎調査実験報告書 ●A 4・968 10 000 円 (〒600)

両公団の特別な許可を得て限定部数再印刷したもので昭和 42 年に土木学会本州四国連絡橋技術調査委員会が、関係当局に提出した調査報告の趣旨をふまえて 45 年度までに実施した成果を詳細に述べたもの。残部僅少。