

(1) 構造設計と最適化

OPTIMIZATION IN STRUCTURAL DESIGN

山田善一
Yoshikazu YAMADA

As an introduction of this paper, history of structural optimization techniques including operations researches are investigated. Development of the methods in Japan including the achievement in JSCE are given. Several topics in structural optimization, aseismic design of suspension bridges, optimum design of cable stayed bridges, and optimum aseismic design level of structures are discussed. Future trends of structural optimization are investigated. Importance of redundancy in structural design is supplemented as conclusion.

Key Words : Structural optimization, Operations research, Suspension bridges, Cable stayed bridges, Aseismic design level

1. まえがき

設計とは、思いついたあるものに、具体的な形を与え、その着想の正しさを確認することと定義されている。⁽¹⁾ 我々の対象とするあるものとは、主に土木構造物であり、構造物にその目的にそった具体的な形を与え、与えられた形が、どの程度の正しさを持っているかを確認する必要がある。この正しさの度合いが、最適性と呼ばれるのであろう。設計といえば、我々はすぐ、形の与えられたものに構造解析をし、安全性と経済性を確かめ、必要があれば形を変えていく一連のプロセスを想定するが、この程度のことは現在では計算機が瞬時にしてやってくれることであり、これからの設計は、いかに優れたものを正しく造っていくかという点に重点が置かれる必要がある。^{(2) (3) (4)}

構造物の設計が、科学的、数値的根拠にもとづく力学的手法によりなされるようになったのは、ガリレオ・ガリレイ(1564-1642)以降であるが、それ以前でも、もちろんすばらしい構造物が造られてきた。^{(5) (6)} 構造物の設計には、機能的面と精神的面がある。後者は主に造形美、景観美といった問題で、非常に重要な課題である。

構造解析が構造物の設計に取り入れられてから、設計に対する精度が著しく向上したが、設計という作業は最終的にはものの形や材料の種類を決めることであり、解析はそのプロセスの一部に過ぎない。構造設計

* 京都大学教授 工学部土木工学科 (兼) 京都大学情報処理教育センター長

における意志決定の作業を、科学的に行うには、科学的な手法が必要とされる。計画、設計、管理、運用、などのための科学的手法として、最も広く用いられるのは、オペレーションズ・リサーチ（OR）の手法である。ORはレーダーとともに、第2次世界大戦中に開発された手法で、数値計画法、線形計画法、動的計画法、シミュレーションなどを含んでいる。^{(7) (8)} ORを含めて、複雑な計算には、電子計算機は不可欠であるが、これもまた戦争の副産物である。1960年代から70年代にかけては、ORを中心とした、最適化の一般論の研究が盛んに行われた時代で、多くの参考書も出版されている。⁽⁹⁾

最適設計という言葉は、OR以前から用いられており、Structural Optimizationの最近の発展と応用について述べた報告の中にも、Maxwell(1869)、Cilley(1900)、Michel(1904)などの論文が紹介されている。

⁽⁹⁾ 特に Cilley の論文の題目として、Exact Design という用語が使われているのは興味深い。ORの手法（線形計画法、LP）が設計の中で初めて用いられたのは、塑性設計における最適設計の問題であり、1950年代の初めである。Heyman, Foulkes, Livesley, Pragerなどの論文があり⁽¹⁰⁾、塑性解析の教科書にも載せられている。^{(11) (12)} 1950年の初めは、電子計算機が出始めたところで、まだ実用にはならず、塑性解析の面では、1930年代の半ばから進められた研究が、その成熟期を迎えた時代である。

最適設計が、その新しい進路を見いだしたのは、1960年に発表されたSchmitの論文である。⁽¹³⁾ これは米国土木学会電子計算に関する第2回会議(New York)においてであり、同じ会議で Clough によって有限要素法（この頃はまだ有限要素という用語は使われていない）が発表されているのは興味深い。その後の最適設計の発展の歴史については、土木学会構造工学委員会、構造物最適性研究小委員会（委員長 山田善一）編集の「構造システムの最適化」～理論と応用～(1988)⁽¹⁴⁾に詳しく述べられている。わが国で最適設計の普及に大きい役割を果たしたのは、日一米セミナー（東京1969）での Schmit の報告である。⁽¹⁰⁾

土木学会では、土木工学ハンドブックを、昭和29年から4回にわたり出版している。（昭和29年、昭和38年、昭和49年、平成元年）最初の2版には、最適設計に関する項は全く無いが、昭和49年版では、第11編 構造設計法、平成元年版では、第22編 構造設計論の一部として取り上げている。

最近、風や地震その他の動的な外力にたいする構造物の免振あるいは制振制御の問題が大きく取り上げられている。特にアクティブコントロールにおける最適制御の問題は、新しい最適設計の分野としてその発展が期待されている。⁽¹⁵⁾

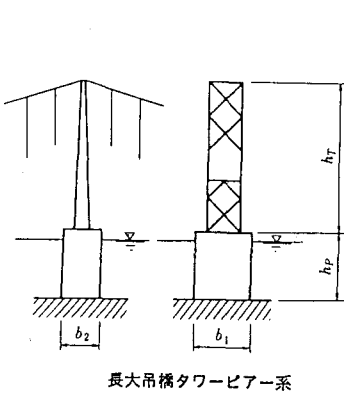
筆者が最適設計に興味を持ったのは、1969年 Schmit の報告を読んでからであり、同年京都大学に新設された土木設計学講座を担当するようになったのと期を同じくしている。（現在は、耐震工学講座担任）特に当時は設計に対する理論の重要性和必要性を認識していた時代である。その後いくつかの最適設計に関する研究を行ったが、次節以降にその概要を報告する。論文の詳しい内容については、それぞれの論文を参照して頂く事とし、ここでは研究の動機や目的を主体として述べる。

2. つり橋の耐震設計

かつてある委員会の問題として、一定の深さ（高さ）を持ったつり橋の橋脚の幅の決め方について検討されたことがあった。橋軸に直角方向の幅は、機能上必要な幅で決められるが、橋軸方向の幅は耐震設計で決まることが多い。この場合、橋脚の地盤反力のみを問題にすると、（最適設計の言葉でアクティブな制約条件）外力に相当する応答スペクトルの関係から、幅が決まらないことになり困ったことがある。筆者が最適設計に興味を持った動機のひとつである。

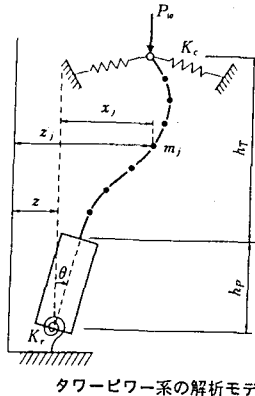
1960年第2回世界地震工学会議が東京、京都で行われた。そのさいつり橋の地震応答解析について報告したが⁽¹⁶⁾、つり橋では塔の耐震設計がとくに重要であることがわかり、その後の研究は、主として地盤—橋脚—塔をふくむ系について行ってきた（図-1、2）。つり橋の塔は、巨大なつり橋の自重のすべてを支える構造であり、静力学的にも厳しい条件に置かれているが、地震時にはこれに地震の影響が累加される。ま

た地盤と橋脚を含めた系では、複雑な固有振動数の変化をし、最適設計の上からも、興味ある多くの問題を含んでいる。この場合用いた設計変数は図-3である。解析の詳細については、文献(17)～(20)などを参照されたい。



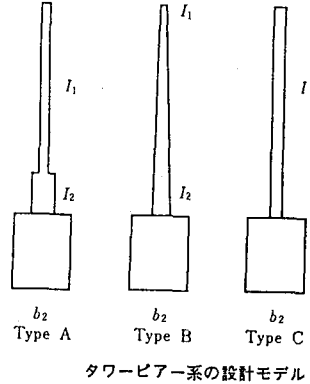
長大吊橋タワービアー系

図-1



タワービワー系の解析モデル

図-2



タワービワー系の設計モデル

図-3

3. 斜張橋の最適設計

斜張橋はつり橋につぐ長大橋にたいする合理的な形式として、また美観上も優れた形式として近年広く用いられるようになった。最近では、多くのケーブルを配して、荷重のほとんどをケーブルでもたせる、マルチケーブル方式がより経済的な構造として採用されることが多いが、初期の斜張橋では、ケーブルと桁とで荷重を支える構造が用いられた。この場合、二つに分かれた耐荷構造に、それぞれどの程度の荷重を負担させ得るのが最も経済的な設計になるかは、最適設計の問題として、興味ふかい。斜張橋の最適設計にかかわる研究の最初のものとして、図-4に示すようなモデルに対する考察が行われた⁽²¹⁾⁽²²⁾。この場合最適設計に特に影響の大きいパラメータとして

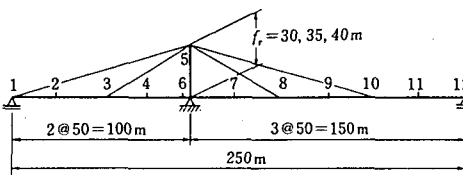
$$K_E = \frac{E_g I_g}{E_c A_c H_g^2}$$

ここに、 I_g 桁の断面2次モーメント H_g 桁高

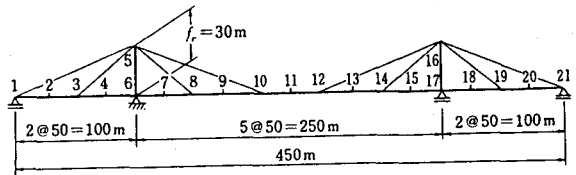
A_c ケーブルの断面積 E_c, E_g ヤング係数

が用いられ、このパラメータとコストとの関係が論じられた。

斜張橋ではまた初期に与えるケーブルの張力もまた最適設計の問題として扱われている⁽²¹⁾⁽²³⁾。



(a) 2径間モデル



(b) 3径間モデル

図-4

4. 耐震設計における設計震度

耐震設計でどの程度の地震に対して設計をするかは、非常に重要な課題であるが、はっきりした基準がない。福井地震の後で、1956年道路橋示方書が改定されたおり、最大0.35の設計震度が与えられたことが

ある。同時代の鉄道橋でも同じ程度の設計震度が用いられたが、経済的理由から、その後0.2を基準とするようになった。一方米国では、サンフェルナンド地震の後、1973年暫定示方書ができるまで、設計震度としては、最大0.065であり、ロマブリエタ地震での被害の一因ともなっている。このように、震度の問題は、単に強度の問題であるだけでなく、国民性や社会的条件とも関係する複雑な問題である。最適問題としては、極めて興味ある課題であるが、その取り入れ方は難しい。

ひとつの考察として、ある一つの公共施設の、初期建設費及び地震動による直接的な物的被害、さらには機能障害から波及する社会的損失との総和の期待値に着目し最適設計法を検討した。構造物の耐震強度のバラツキと最適設計震度の関係について考察した⁽²⁴⁾。施設の強度の変動係数をパラメータとし設計震度と総損失コストとの関係を求めると図-5のようになる。図で(a)(b)はそれぞれ、間接被害を考慮しない場合、かなり大きい間接被害を考慮した場合である。仮定に問題があるとはいえ、ほぼ0.15から0.2で最小値があることは興味深い。

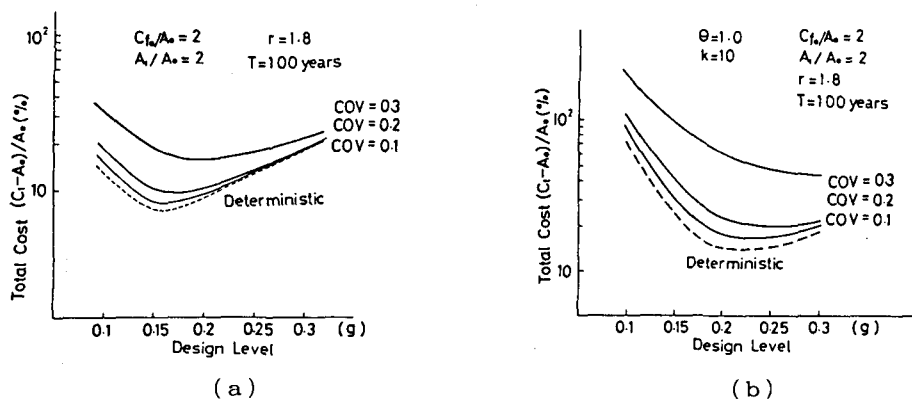


図-5

5. 結び

以上の他、動的計画法による桁橋の最適設計⁽²⁵⁾、最適弾塑性耐震設計⁽²⁶⁾、骨組構造物の最適設計⁽²⁷⁾、SUMTの例題解析⁽²⁸⁾、などについても幾らかの研究をおこなってきた。最近には前にも述べたように、構造物制御の問題に関する研究も盛んである⁽²⁹⁾。

計算機の世界は、スーパーコンピュータによる大規模高速計算、ワークステーションを結ぶオープンシステム、グラフィクスを中心としたCADなど、新しい環境が次々と生まれている。最適設計もこれらの環境に即応して、その実用性を高めていく必要がある。

設計に余裕があったために、建設後何年か経った後、有利になったという話を良く耳にする。例えば神戸市の六甲アイランドにかかる六甲大橋では、建設時は、スパンに対し少し贅沢と思われる斜張橋を採用し、美観上もいくらか硬い感じがあったが、最近これに新交通システムを添加して、スマートな橋に変わっている。最初の設計時にこのようなことは全く予想していなかったことで、最初の設計の余裕が役立った典型的な例である。また新幹線建設時の設計荷重の余裕が、後に騒音防止のための設備の添加に役立ったといわれている。ある高速道路では、橋の設計に最新の理論を用いた区域と、従来の慣用設計を行った区域で、前者の区域が、走行荷重の激増に耐え切れず、莫大な補修費を要しているという話がある。これらの話は、ある意味では、どちらかといえば最適設計に逆行するが、最適設計を今後実用していく上において、十分考慮する必要がある。

参考文献

- (1) 渡辺茂、設計論、1975、岩波
- (2) グレック、渡辺茂訳、設計の設計、1973、みみず書房
- (3) グレック、渡辺茂訳、設計の選択、1974、みみず書房
- (4) グレック、渡辺茂訳、設計の科学、1975、みみず書房
- (5) 山本宏、橋の歴史、1991、森北出版
- (6) ガリレオ・ガリレイ、今野武雄、日田節次訳、新科学対話(上)(下)、岩波文庫
- (7) 特集 オペレーションズ・リサーチと海軍、世界の艦船、1986年 7月号
- (8) 近藤次郎、オペレーションズ・リサーチ入門、1978、NHKブックス
- (9) Ed.O.E.Lev, STRUCTURAL OPTIMAZATION, Recent Developments and Application, 1981, ASCE
- (10) L.A.Schmit, Jr., Structural Synthesis, 1959-1969; A Decade of Progress, Recent Advances in Matrix Methods of Structural Analysis and Design. (Ed.R.H.Gallagher, Y.Yamada, and J.Y.Oden) U.A.Press, 1971
- (11) Hodge, P.G., Plastic Analysis of Structures, McGraw-Hill, 1959
- (12) Neal, B.G., The Plastic Methods of Structural Analysis, John Wiley, 1963
- (13) Schmit, L.A., Structural Design by Systematic Synthesis, Proc. of the 2nd Conference on Electronic Computaion, ASCE, N.Y., pp.105-122, 1960
- (14) 土木学会編、構造システムの最適化～理論と応用～、構造工学シリーズ1、1988
- (15) 山田善一、構造システムと電算機の応用、昭和63年度土木学会関西支部研修会テキスト、構造工学における電算機利用の先端技術、pp.1-11 (1988)
- (16) Konishi, I., and Y.Yamada, Earthquake Responses of a Long Span Suspension Bridge, Proc.of 2nd WCEE, Vol.2, pp.863-878, 1960
- (17) 上記 (14) の pp.213-217
- (18) Yamada, Y. and K.Furukawa, Earthquake-Resistant Design of the Tower and Pier System of Suspension Bridges, Preliminary Report of 10th Congress of IABSE, pp.183-188, 1976
- (19) 山田善一、古川浩平、最適化手法を用いた長大吊橋タワー・ピア系の耐震設計、土木学会論文報告集第281号、pp.17-27, 1979
- (20) Yamada, Y., K.Furukawa, and K.Kitajima, Studies of the Effect of Earthquake and Structural Uncertinties on Optimum Aseismic Design of Long Span Suspension Bridges, Proc. of 7th WCEE, 1980
- (21) 上記 (14) の pp.185-190, (斜張橋の最適設計)
- (22) 山田善一、大宮司尚、斜張橋の最適基準設計に関する研究、土木学会論文集、第253号、1976
- (23) 山田善一、古川浩平、江草拓、井上幸一、斜張橋ケーブルの最適プレストレス量に関する研究、土木学会論文集、No.366/13, 1985
- (24) Yamada, Y., Iemura, H., and Shinya, H., Optimum Aseismic Level of Structures, Final Report of 11th Congress of IABSE, Vienna, 1980
- (25) 日本鋼構造協会編、骨組構造物の最適設計・SUMTによる構造の最適設計、日本鋼構造協会、1972 pp.53-56
- (26) 山田善一、家村浩和、古川浩平、坂本幸三、目標塑性率に基づく最適弾塑性耐震設計法に関する研究 土木学会論文報告集、第341号、pp.87-95, 1984
- (27) 上記 (25) の pp.39-40
- (28) 上記 (25) の pp.21-27
- (29) 山田善一、家村浩和、伊津野和行、米山治夫、パッシブ、アクティブ、ハイブリッド手法による曲げ構造物の制振効果に関する研究、本講演論文集