

生研公開講演

構造の整形と形成

Shape and Form of Structures

中 桐 滋*

Shigeru NAKAGIRI

ただいまご紹介いただきました第1部におります中桐です。「構造の整形と形成」と題する小論をお話しさせていただきます。

ただいま最新の設計云々というご紹介がありました、紹介をしようと思えますと、式をいろいろ書かなければなりませんので、その部分は割愛させていただきます。式は使わないで話をさせていただきます。今日の話は50分にわたりますが、その最初の三分の一ぐらいは、構造のいろいろな側面についてお話しいたします。それから構造の決め方がどうなっているかという話、最後に最適構造の一つの例をお話し申し上げます。

1. いろいろな構造

構造の話をするときに、壊れた構造をもってくるというのはいささか不謹慎であります、図1は本年1月17日におこった阪神大震災で崩れた、阪神高速道路のものであります。ここに、1台つぶれた自動車がありますので、亡くなった方もおられるかもしれませんが、したがって、その原因はこうだあだということを経々に論ずるのは不謹慎な気がいたしますが、あえてこれを最初に出させていただきました。

この阪神の高速道路といいますのは、おおむね東西に走ってます。ですからこちら方向が東西方向です。そのところに一本橋の橋脚がずらっと直線に並んでいたということでもあります。ちなみに兵庫県南部地震というのは、これは測定した位置にもよるかと思いますが、加速度は南北方向で818ガル、東西で617ガル、鉛直で312ガルという数値が出ております。要するに南北方向に強く揺れたということです。

この道路が東西に走っているわけです。東西に走る道路に対して南北、すなわち直角方向に力が加わっていることがうかがえる。したがって、もし東西方向、構造として長く延びている方向に強い振動を受けたとすれば、長い構造自

体が耐える能力を発揮して持ちこたえたのではないかと考えられます。いかんせんこの柱がずらっと1列で並んでいる、しかも一直線に並んでいる、そういうところに横から力が加わっておりますので、持ちこたえる力といひましようか、つかい棒が足りなかったという構造になっております。

これが構造であります、ふだん何でもなく、この高速道路を走っている方は、下がどうなっているかということをはほとんど気になさらないわけです。また、この下の、これは国道43号です。新聞によると8車線と書いてあるところもあるのですが、おそらく6車線ではないかという気がいたします。勿論、こういうふうに2本橋脚をつければいいということは構造力学上はわかっているのですが、43号線を走っている方は、橋脚なんかいい方がいい。あれがあるから1車線つぶれているんだ位のことを考えておられるわけです。したがって、構造というのは大体ふだん、なんでもなくにはなればいと思われていて、事故が起こったときにいろいろ批判をされるという苦しい立場にあるという一面があります。

図2は、本日皆様が通られたかもしれませんが、六本木交差点のところを通っている、通称六本木通りというものでして、この上を首都高速道路が走っております。ここは8車線の道路がありまして、ちゃんと橋脚が2本になっております。したがって、上からの重さを支えるというのであれば、先ほどの阪神の例であれば、この2本の柱を1本にまとめてそれでもっているのもよい。ただしつかい棒はないという感じになります。

日本では昔から、部屋のパーティションに屏風というものがあります。屏風というのはピンと張ってしまうと単なる一枚の板ですから、直角方向に押されますとぱたんと倒れますけれども、45度ぐらいのジグザグにしておく、すなわちつかい棒の役目を構造自体でさせていけば、かなりもつわけです。そういうような意味で、高架橋の場合に、こちら方向に揺すられるときに、橋脚一本であるというの

*東京大学生産技術研究所 第1部

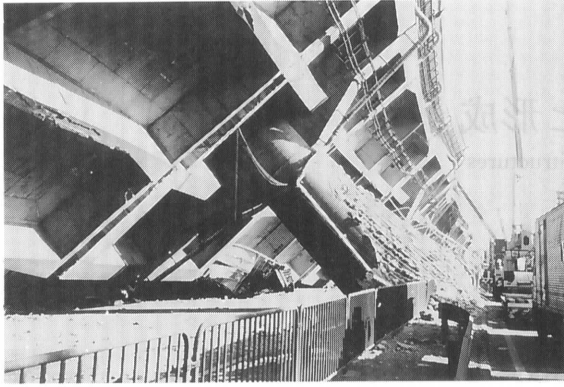


図 1



図 2



図 3



図 4

は、よく言うところのつかい棒がない構造になっているわけです。

阪神高速道路崩壊を見てから、私自身も首都高速道路の六本木の部分で橋脚が何本であったか思い出そうとしても、思い出せなかった。やはりふだんは見えていないのです。5月の中旬に写真を撮りに行きましたら、2本あったということで、ここは大丈夫かなという気もいたしますが、地震が来てみないとなんともいえません。

図3に長いコンクリート構造の高架の橋をお見せいたします。

これは三浦半島のつけ根にあります新杉田というところから金沢八景に行く海側線という一種の新交通システムであります。これが車体です。ここは、この車体が走る道路で、こちらが上り、こちらが下りです。この奥に見えているのは、首都湾岸道路がいま工事が始まりまして、その上り口になっております。この高架橋といえますか道床といえますか、これも基本的には1本の脚で支えられている構造です。

ところが、この図を御覧になるとおわかりになりますようにこれが割合グネグネしている。したがって一種の屏風型みたいになっているので構造自体として横に対する、曲げモーメントに対する抵抗力のある構造になっております。

この図をつくづく見ていて気付きましたのは、この線路は、上から見たときに左右にグネグネと川のようにうねっておりますが、わりあい上下にもうねっていることです。この上下が、とくに下の地面、ここの下の地面というのは、要するに三浦半島の海岸段丘の下でありますから、埋立地に近いところで、昔の地形として上下にうねったものではありません。したがって地形の上下に合わせて路面の上下を決めたものではないようですが、こういう上下は、設計者がどういう意図で決めているのか、不思議に思うところであります。

またまた古い写真(図4)をお見せして恐縮です。橋の脚がどうなっているかということに興味を持ちまして。これは多摩川です。東横線が多摩川を渡るところでありまして、ここにあるのは、昔の丸子橋の橋脚です。現在は全部橋床を撤去しまして、そのちょっと下流のところ新しい橋が架けられております。旧丸子橋が何年ぐらい前に造られたのか知りません。これは新しいものであります。明らかに昔は、コンクリート造りで、どっしりしたものをつくってます。そしてこちらのほうは5本の柱でつくっている構造になっています。いずれにしても、川は下流へと流れますから、この構造物、橋脚を川の流れる方向に直交させて造ることはありません。そういうことをしますと川の流れを阻害します。橋脚も同じように、川の流れに



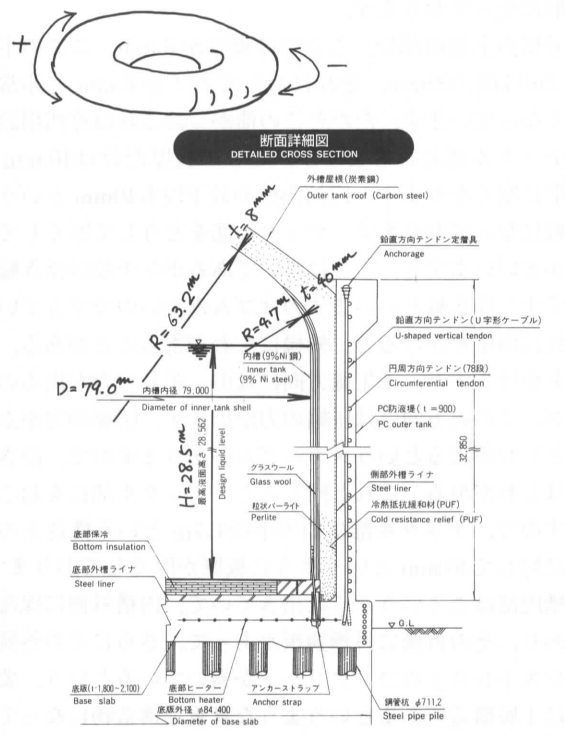
図 5

沿っています。川の流れに対して大体橋は直角になりますから、これもちゃんと5本脚で、横にかかる力を踏ん張る構造になっています。こういうふうに見ると、ほとんど同じ場所で造るのですから、元と同じ形で造ってもよろしいわけですが、設計者というのは新しいものをちゃんと造っているのです。この図を見ても、少なくとも材料は新しい橋脚のほうが少ない。昔はたっぷり材料を使って丈夫で長持ちするものを造っていたということがよくわかります。

図5も土木建造物の一つであります。皆様方が、世の中にあるということをご認識されていても、普段はあまり御覧にならないものをお見せいたします。

これはプレストレストコンクリート LNG 貯槽というものであります。LNG というのは液化天然ガスです。天然ガスというとガスですが、液化天然ガスは液体です。比重は約0.44ぐらいで、常温においては -160°C という非常に冷たいものであります。これを気化して皆様が都市ガスとして使っています。これは内容量が14万klですから、もし水で云えば14万トンですが、LNG の比重が0.44ぐらいですから、それほど重量はありません。14万klというのは、水でいえば、14万トンということになります。

この横にポンチ絵でかいてありますのは石油タンクです。液化天然ガスと似た用途のものにガソリン、重油、石油というものがあります。石油タンクは横から見るとこういうふうになり、上から見ると単なる円という恰好になります。これも横から見たときに、三角屋根が付いているものと、上が平たいものがあります。平頭のタンクは、これは大体鉢巻がありまして、あれが石油タンクだとわかる恰好になっています。この平頭タンクは、外からは見えませんが、中にポンツーンという隔膜がありまして、天から降ってきた雨が石油と混ざらないようになっています。ただし、このポンツーンは、石油の上に浮いていて、ガスがあまり貯らないという利点がありますが、油面が



大阪ガス 泉北製造所 1995. 生産技術センター

図 6

ぐっと下がりますと、上部がふわふわになる構造です。したがって、風が吹いたときに、ぐしゃっと崩れないように強めの輪が鉢巻として付いているのです。

こちらの構造、本来はこちらであります。これは大阪ガス泉北製作所の LNG 貯槽であります。今この製造所に新しい貯槽が造られつつあります。

これは先ほど申しましたように、蓄えている LNG が -160°C という非常に低温なものですから、それに耐える 9% ニッケル鋼というあまりそこらでは使われていない材料で内壁が造られています。それに対して、万一内壁が破れても大丈夫なようにというので、プレストレストコンクリートで外側を囲っているという、非常に安全性を重視した構造になっています。

図6は横から見た絵でありまして、貯槽構造の断面のある程度の詳細が示されています。これは外側のプレストレストコンクリートの擁壁です。中に LNG が入っている。その容量が14万klといいますが、直径は79mであります。最高の液面高さは28.5m、屋根の曲率半径は63.2mという大きな半径になっています。どうしてそうなっているかという、 -160°C という LNG が内部にあって、外側が大体 30°C ぐらいの気温ということになりますと、わずかずでも熱が入ってきますから、中でガスが少々気化してきます。そのガス圧に対応できる構造ということで上面が

球形になっております。

屋根の上部の部分、ここでは板厚が8mm、ここの半径63.2mは63,000mm、それに対してわずか8mmと非常に薄くなっています。ただしこの曲がり部これは専門用語ではナックル部と称しますが、ここの板厚だけは40mmと非常に厚くなります。円筒内壁の最下段も40mmという厚い板になっております。ナックル部をどうして厚くしているかといいますと、ここに書いてあるポンチ絵は浮き輪の例です。浮き輪といいますのはゴムみたいのでできていて、それに内圧をかけると、外縁にしわが寄ることがある。内圧をかけますと、子午線方向には引っ張りの力が出ますが、この周方向には圧縮の力が出ます。圧縮の力がかかるとしわが出るというメカニズムがありますので、浮き輪にはしわが出る。これと同じことがナックル部にも起こりますので、ナックル部は曲率半径4.7mという構造上の寸法に対して40mmというように板厚が厚くしております。貯槽内部はこういうふうに出きていて、内槽外側に保冷材があり、その外側に外槽鋼板があって、さらにその外側をプレストレストのコンクリートが巻いているという、要するに4層構造であるというような貴重な構造物になっております。この形も、後ほど触れますような根拠で決まっているわけでありまして。

2. 構造の決め方

いままでは、地上にある構造物であります。ここからは航空機の写真を1枚と概念図、図7をお見せします。図7の航空機の飛ぶ方向は右向きです。この写真は1985年に初飛行しました前進翼を持っている航空機でありまして、垂直尾翼にX-29Aと書いてあります。これはアメリカの航空宇宙局(NASA)の試験機であります。製作会社はグラマンです。

前進翼はということかと申しますと、飛行機が速く飛ぶためには、音の壁に対する抵抗を破らなければならない。そうしますと、翼が機体の軸に対して直角になっていると

まずい。角度をつけるには一つは後退角、これはジャンボジェット等にありますが、多くの場合は後退角をつけているわけです。

ところが、後退角をつけると、翼端失速という現象が起こります。翼端失速というのは、翼の端で流れがはがれて失速を起こす、要するに空力的な性能が落ちることです。翼端失速を避けるためには、翼の角度を前に付けても良いということです。ところが前進翼にすると、どういことが起こるかといいますと、下から風を受けたときに、翼が振れますとますます振れが進行するということになります。これまた空力性能を悪くすることでありまして、前進翼にするか、後退翼にするかというのは、飛行機の速度が音速に近づいた頃からの論争であるわけです。

図7は実際に飛んでいる飛行機ではなくて概念図であります。これは1962年に刊行された本に出ている1945年に作られたドイツのJu287という試験機であります。ただ、試験機として何を試験したかということ、翼を前進翼にして大丈夫かということだけを調べたものでありまして、あとの機材は、当時ドイツで作られていたいろいろな機材、ただしジェットエンジンだけは当時の最新鋭です、車輪などは落ちてきたアメリカの爆撃機から回収して使ったという寄せ集めの機材で前進翼という飛行機の実験の実際のチェックをしております。

このときの材料はジュラルミンであります。ジュラルミンで作りますと、先ほどのような振り剛性、振られたときの振りに対する変形を小さくするという剛性をあまり強く出せない。それに対して40年経てきれいなつくりますと、X-29Aができるということでありまして。

このX-29Aのセールスポイントといいますのは、前進翼をFRPでつくっているということです。新聞に書いてあったことで、専門雑誌で見たのではありませんから真偽のほどはわかりませんが、このFRPを159層、いろいろ積み重ねているようであります。それで、振りに対してとくに強い翼をつくれたと書いてあります。これは要するに、新しい材料で造りますと、前進翼というものも可能になるということを示す例かと思えます。

いままで述べましたように、たとえば橋、たとえばタンク、たとえば飛行機、こうしたいろいろな構造があります。それもそれぞれいろいろな設計で決まっているわけですので、次は構造設計というものがどういうものかを、これから先は字の話でします。

構造といいますのは、本来は構造の企画がまずありまして、次いで設計するという作業があり、さらに製作するという過程がある。その後は使用する。実際には保守をするということになります。ところが企画と保守は、いわゆる力学の及ぶところではございませんので、そこは飛ばして、設計と製作ということだけを図8に書いてございます。

Junkers Ju 287 V1 (1945年)

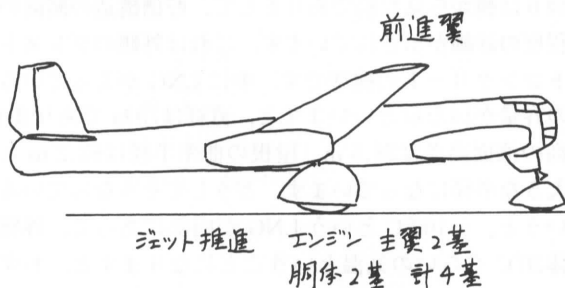


図7

構造 設計と製作

- 機能・・・機能適合
- 安全・・・人畜無害
- 経済・・・実現可能

構造最適化 Optimization

- 目的関数の最適化・・・重量最小
 - ・・・安全性最大
 - ・・・価格最低
- 制約条件
 - ・・・重量/強度
 - ・・・安全性/経済性
 - ・・・価格/品質

図 8

構造というものには、なぜ構造をつくるかという目的機能というものがまずありますので、機能に適合することが構造には要求されます。もちろん機能さえ発揮していればいい、というわけではありません。ギゼーのピラミッドがどういう機能を持っているかについてはいろいろ批評のあるところではありますが、あれもお墓であるとか、何かであるとか、いろいろと言われております。したがって、機能というものがまずありますが、機能を発揮するためには安全でなければならない。少なくとも人畜無害でなければならないということが昔から言われているわけであり、ですから構造が壊れたというと、とたんに批判を受けるわけです。ところが最近、これを安全に含めるのかどうかとは別といたしまして、ただ単純に人畜無害ということだけではなくて環境にも安全というような、環境を汚染しないとか、そういうことも要求されるような時代になっております。

それから、安全と対比するは悪いことかもしれませんが、経済性ということがございます。要するに経済的にも実現可能でなければならないわけでありまして、ものすごく安全で、ものすごくいいものだけ高いので結局つくれないというのでは、物を造るという点では処置なしということになります。構造というのは機能と安全と経済ということを考えて造られますが、造るときに、誰方も悪いものを造ろうとはしません。したがって、必ず最適化

(Optimization) というものがなんらかの意味で考えられております。

最適化をたとえば力学、設計論ではどのように式の形に持ち込むかといいますと、まず目的関数というものを設定いたします。その目的関数を最適化するというわけです。ところがその最適というのとはどういうことかが問題なのです。オプティマムとは何かということですが、たとえば目的関数として重量をとります。構造は大体軽いほうがいいということで、重量を最小化します。この場合には、最適設計は重量最小設計になります。

これまでの設計の多くの場合は、最小重量をもってよしとする考え方でありました。しかしながら、最近の構造安全性・信頼性工学においては、もちろん重量を最小にしたうえで、なおかつ長持ちするとか丈夫であるとかを狙い、安全性を上げるということがあります。そうしますと一定の与えられた重量のなかで安全性を最大にするのが目的となります。安全性最大には何を目的関数とすればいいかというように、設計でとる目的関数等も徐々に変わってきます。もちろん経済性のことを考えますと、この価格は何で量るのか、材料費でいうのか、原価でいうのか、工数でいうのか、納期でいうのか、いろいろありましようが、価格というものであれば、その目的関数は最低ということになります。これが目的関数の最適化の内容であります。

ただしこの目的関数の最適化というのは、必ず制約条件が付いています。と申しますのも、たとえば重量を最小にすると、重量をどんどん軽くしていけば、どこかで構造は破綻を来すからです。構造の機能を果たせないとか、安全を守れないとか、そういう意味で制約条件があるからその範囲で構造を最適化せざるを得ないということも逆説的にいえるのです。

その制約条件というのは、どういうものであるかというところ、ここにありますような重量と強度。これは大体肉をつける、業界用語で“肉をつける”というのですが、板厚の厚いようなものを作れば、大体は強度というものが上がります。全体的な。材料の強度ではありませんが、構造としての強度というものは上げることはできます。ただし、それで重量は増えてきます。重量を減らそうとすると、強度も下がる。強度を保って重量をどういふふうにするか、このところはトレードオフの問題になります。

安全性と経済性の問題も同じであります。安全で、かなり壊れないものを作ろうとすれば、それはできるかもしれないが、経済的には引き合わない。図 1 は先ほどお見せしました阪神大震災の写真ですが、震災後にも、安全性と経済性の相剋といいたましようか、トレードオフの問題はいろいろな新聞でもいろいろな識者が論じていたところであり、要するに 100 年に一回しか来ないものに対して毎日毎日そのコストを払っていいかという問題です。

それから価格と品質。これも安かろう悪かろうという言葉が昔はありました、最近は安かろう良かろうというものもあるということで、価格と品質は必ずしも相反する概念でなくなりつつあるのかもしれませんが。目的と制約、たとえば重量を下げようとする、強度が制約条件になりますし、安全性を上げようと思えば経済性が制約条件になりますし、品質をよくしようとする、価格は制約条件になる。要するに制約条件のなかで何かを最適化するのでして、制約があることは人生一般にあてはまることでありまして、構造の最適設計だけではありません。制約付き最適化という言い方は多くの場合に通用するかもしれません。

3. 最適設計

それでは最適化の手段としてどういうものがあるかということですが、いま申しましたように、何か構造物をつくらうということになって、目的関数も設定されました、制約条件もよくわかりました、この段階でさて最適化をしようとする、その手段として専門用語では「設計変数」という表現を使います。設計変数にはどういうものがあるか、まず材料というものがあります。どういう材料で造るかということ。

この材料というのは、銅と錫の合金を青銅といいます、合金は存在しても中途半端な材料はないですね。たとえば鉄は鉄であってアルミではない。ジュラルミンはジュラルミンであって超超ジュラルミンではない。そういう意味では中途半端な材料というのはありませんから材料を設計変数にとるということは離散的なものであります。要するに飛び飛びにするということ。

寸法というもの、これはたとえば先ほどお見せした橋脚の直径とか、設計者がある程度任意に連続的にとれるものですから連続的な変数です。形、これもわりあい連続的に変えられます。それから、今日最後の例でお話しするのは位相の問題でありまして、この位相は離散的なものであります。位相という言葉はいろいろな分野で種々使われています。振動の場合には位相は2つの波の始点がずれている場合に、そのずれを位相ということもございます。ただし幾何学でいう位相とは、英語ではトポロジーといいます、平たくいえば個数といって差し支えないかと思えます。たとえば先ほどお見せしました、新しい丸子橋の橋脚は5本ある。4本ではない、3本でもない、6本でもない、5本だということ。それから X-29A という NASA の試験機の FRP の積層の数を申しましたが、あれは159層、160層でもない、2層でもない、何層という個数というのが大体位相と考えていただいでよろしいかと思えます。

こういうように位相、形状、寸法、材料を使って最適化するわけですが、この最適化の手法には、力学、数学、また最近ではコンピュータを使ったいろんな手法がござい

最適化の手段 設計変数

- 材料・・・離散的
- 寸法・・・連続的
- 形状・・・連続的
- 位相・・・離散的 (幾何学, 個数)

最適化の手法 CAE

- 線形計画法・・・因果関係
- 遺伝的アルゴリズム・・・酔歩探索

図9

す。図9に示すように、1950年代の線形計画法から、最近の1990年以降に出現した遺伝的アルゴリズムというものまで、各種いろいろな方法がございます。皆様方が本屋さんに行かれまして専門書の棚を御覧になりますと、最適化の本が、日本語の本でも横に並べて1m50cm くらいはあります。もっともコンピュータのマニュアル類のところは、床面積で少なくとも6m² くらいの例もありますから、売られている本の種類からいえば最適化の数理的な本はコンピュータ関連より少ないと言えます。

本の話はともかくといたしまして、線形計画法はどういうものかといいますと、原因と結果の関係を重視して、なるべく数理的に調べる、そういう方法であります。遺伝的アルゴリズムといいますのは、単なるランダムサーチでありまして、酔歩探索と書いてありますが、平たく言いますと、闇夜の鉄砲多く打ってれば、どこかで最適的に当たるだろう、そういうシミュレーションの方法であります。

ただそのときに、ただ闇雲にシミュレーションといいますが、ふらふら歩いて探しますと探しきれないということで、生物学上で使われている遺伝という概念を利用いたしまして、生物学の用語を適宜取捨選択して使い、また適者生存という考え方を使得って調べるという方法になっております。

最適化の手法の中身をご説明いたしますと、また式を使わなければなりません、式は省略して、絵解きをいたしますと、大体こういうことかと思えます。因果律、原因と

結果の関係に注目して数理計画法とか共役勾配法とか、いろいろございますが、数理的な探索法といいますのは、設計変数が連続の場合に大体有効なのであります。

この図10の縦軸、これに目的関数、先ほど申しましたたとえば重量というような目的関数を縦軸にとります。横軸に、たとえば寸法というような設計変数をとります。初めに、誰かがスケッチでもいいから、初めこう置いてみようと思ったとか、ちょうどこの位置だとか、の設定があります。その設定では重量がこのあたりであるとしします。それは幾何学的に計算したら重量はこうなるといことです。それから、この重量は重すぎるから、では下げましょうということで最適化を行う、こういうことになるわけです。この青い線で書いてありますが、実際に一つの設計変数を動かしたときに、たとえば重量が実際にこう動くということを示すとしします。これは厳密なものだといします。ただし厳密なものというのは、実際に変数を動かしてみないとわからないものですから、この線がどうなるかというのは設計者には不明です。とくに設計変数が原設計から大きく離れますと、その効果はよくわからなくなります。それを、たとえば原設計において設計変数を変えたら重量がどれくらい変わるだろうかという変化を直線で近似します。これは専門用語では「一次近似をする」といことですが、設計変数の多項式で見たときの一次までしか取っていない設計変数の直線近似。または放物線で近似する。これには二次多項式が出て来ます。直線近似というのは数学の言葉

数理的な探索法

設計変数: 連続

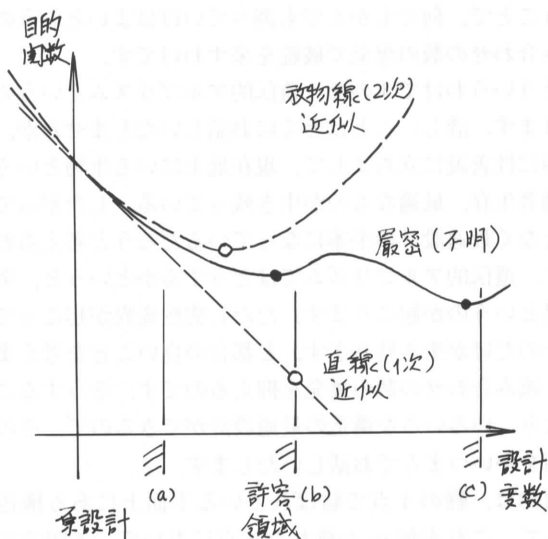


図10

でいいますと一階微分までを考えることで、二次近似まで取るというのは二階微分まで考えるということに対応いたします。

それで、制約条件が何もなければ、ざっと設計変数を変えてしまえばいいということです。しかし、制約条件が仮にここにあったとします。許容領域は、こちらのほうまでは使ってよろしい、こっちは使っていけないということで定められます。一次近似の場合は、図のこの白丸点を探してしまいます。二次近似の場合は、この白丸点を探してしまいます。実際の解は黒丸点にあるかもしれません。このように近似解というのは厳密解とは違うわけです。また許容領域がこの領域(c)と広い場合を考えます。この二つの黒丸、左の星丸もまた低いわけですが、右側の黒丸の方が左側より目的関数が小さい。したがって本来右側の方を探さなくてはいけないうきに、一次近似ですと、相も変わらず直線上の白丸を探してしまうという、そういう問題点がござります。こういう複雑な点が先ほど申しました、最適設計の本がたくさん出版されている、手法が多い、という原因であります。要するに、数理的な探索法といえども、それぞれ設計者の方々が考えている問題について、これさえあれば何でもいいう決定的な方法は仲々無いということであります。数が多いというのは、決定的なものがいかに少ないかということを表しているかもしれません。

次に、数値的な探索法の話をしします。この場合、設計変数が離散的で、たとえばここまでは材料が鉄ですよ、アルミですよ、ジュラルミンですよ、銅ですよというものでいいですし、それから斜張橋、斜めにケーブルを張って橋の重量を支えている斜張橋の例でいいますと、斜めに張ってあるケーブルの本数等でもいいかと思ひます。この例では、たとえば1本、2本、3本、4本、5本という値がありえます。しかし1.5本という中途の値はないわけであります。図11の例ではそれぞれの黒丸が厳密値であって、それは離散的な値をとる。これも、いちいち調べてみなければわからない値です。原設計を見てもわからないというわけです。このような問題のときには、かりに二つの黒丸がわかっていたとして、ではこっちの方向に変わるなと思ひても、その先どうなるかというのわからないのです。数学でいいますと、微係数が1点でユニークでない、2つの値をとってしまうというようなものであります。このような問題は、先ほどの数理的な方法ではうまくいかないのです。

そういうときには、シミュレーションでやってみればいいではないか。最近ではコンピュータが発達してますから、計算機は延々と計算をやってくれますので、何でもかんでも計算して調べてみればいいう考え方が普及してます。そういうときでも離散的な場合には組み合わせの数の爆発という問題があります。そして、その例として、図12

数値的探索法

設計変数: 離散的

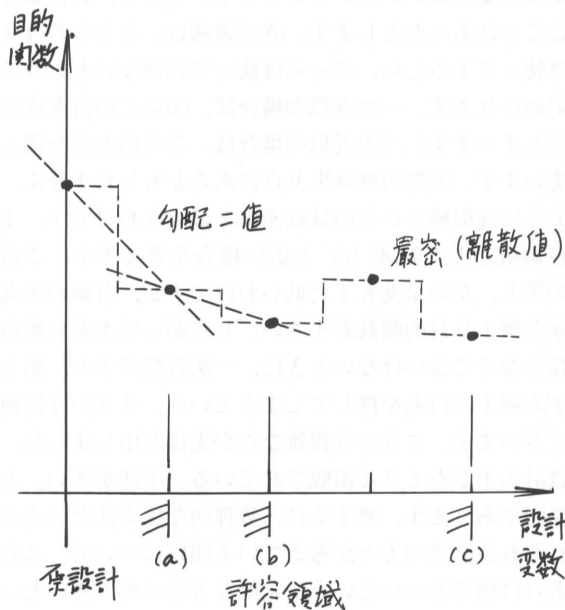


図11

は鉄道橋によく在った形であります。この2点間を結ぶ橋であると思ってください。この橋は13部材でつくっています。また、最小重量設計をしよういたします。この点線部は部材がないとします。実線は部材があるとします。部材があるかないかということだけで、部材配置という位相を最適化しよういたします。そうしますと、あるかないかを全部調べれば良いことになります。一本の部材がある、ないで2通り。二本の部材のある、ないでは 2×2 で4通り。ここにもあるかもしれないとやりますと部材3本で 2^3 、8通りになります。ということで13部材がありますと、2の13乗ありますから、その場合の数は8,192で、これを全て調べればいい、ということになります。8,192の候補から制約条件を満す最小重量の構造を深すのです。

この橋がちょっと長い場合を考えます。図12の下部の構造として2スパン分だけ長くすると、部材の数が21になります。21の部材がある、ないというのを調べるには、 2^{21} 通りを調べればいいということになります。 2^{21} 通りというのは2,097,152通りのことです。上部の構造では約8,000回計算を繰り返せばいいということですが、下部の構造では約200万回計算を繰り返さなくてはならない、こういうことになります。

これまではあるか、ないかだけの例です。ないというので1通り、それからアルミニウムで造るか鉄で造るかで2

組合せ数の爆発

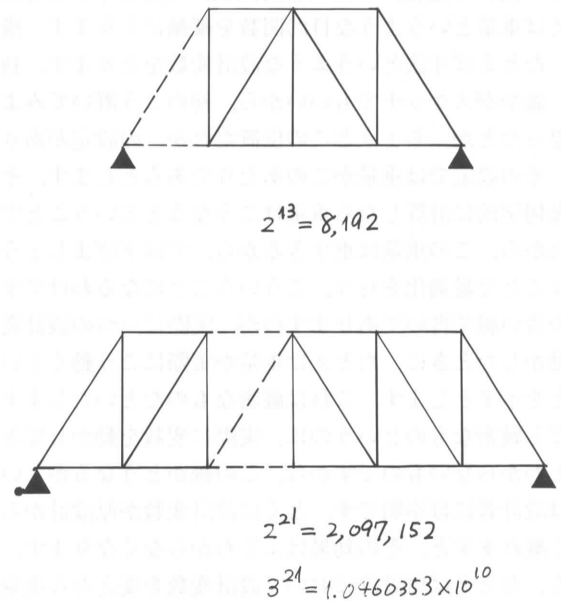


図12

通り、材料種別を考え合わせて合計3通りの選択が可能といたします。すると各部材があるか、アルミニウムか、鉄かの3通りとなりますので、21部材について調べなければならない組み合わせの数は 3^{21} という計算になります。 3^{21} というのは、 1.0460353×10^{10} ということでありまして、これはふつうの日本語でいいいますと104億6千40万、こういう嵩です。これは1円玉で約104億円数えるという手間をお考えになればおわかりのように、これはもう禁律的というか、プロフィビティブに多い計算になります。そういうことで、何でもかんでも調べていけばよいというのは、組み合わせの数の爆発で破綻を来すわけです。

そういうわけですので、遺伝的アルゴリズムというのがあります。詳しいことはとくにお話しいたしません。基本的に性善説に立ちまして、現在地上にいる生物というのは適者生存、最適なものが生き残っている、したがってなんとなく最適設計の手本になっているだろうと考えるわけです。遺伝的アルゴリズムではどうするかというと、突然変異というのが起こります。ただし突然変異が起こってもいいのだけが生き残ります、と都合の良いことを考えまして、組み合わせの数の爆発を抑えるのです。そうすることにより、いろいろな構造の最適設計ができるので、その2、3例をかいつまんでお話しいたします。

図13は、緑の4点で結ばれている平面上にある構造があって、これが何mか離れた4点において、矢印で示される力によりぎゅっと振られたとします。そのときに、こ

Numerical Examples

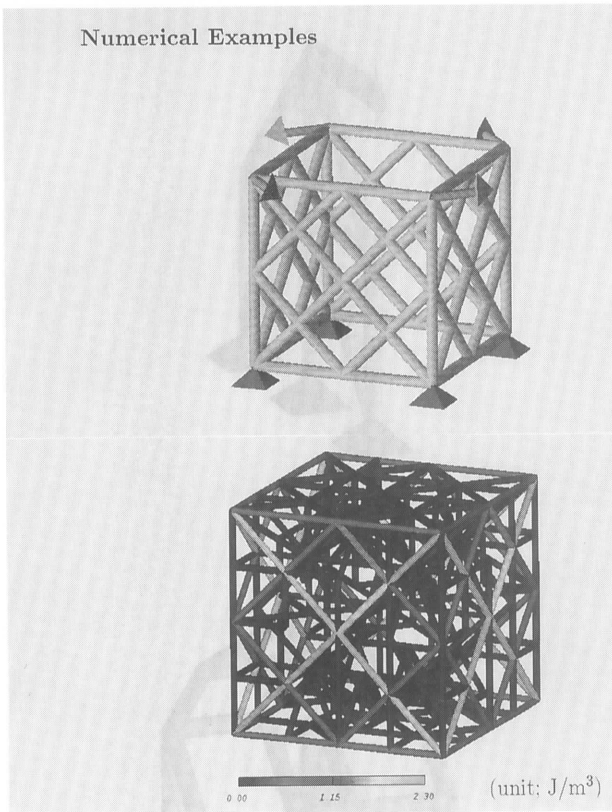


図13

の振りにより起こる変位をいちばん小さくする、これは剛性最大の設計といい、力が加わったときに発生する変位をなるべく小さくする設計で、目的関数を変位が小さいということに設定する構造を探します。ただそのときに重量を、ドカドカと材料を一杯に付ければ、変位は小さくなるのですが、重量を最小にしながら変位を小さくするのがこの問題です。

図13の上側に描いてあるのは結果として得られた構造であります。最初に設定したのはどんな構造かといいますと、図13の下側の構造です。全部の部材が出ております。それから突然変異を加味した世代交代により、先ほど申しました遺伝的アルゴリズムを用いて、ここに部材が「あります」「ありません」というのを判定しまして、より変形が小さいか、重量が小さくなっているか、そういう目的に合わせて部材を取捨選択をしてきます。

大雑把にいきますと、これはスパンが4。こちらに4通り、こちらに4通り、こちらに4通りですから、大体64部材あります。また、内部にも部材が入っておりますから、先ほどの部材数でいきますと、二百何十かそれぐらいのものですね。先ほど申しましたように 2^{21} というのは約100万ケースです。3通りでいきますと、3の21乗というのは約100億ということですから、二百何本も部材がありますと、その組み合わせの数はまた禁律的な数になります。た

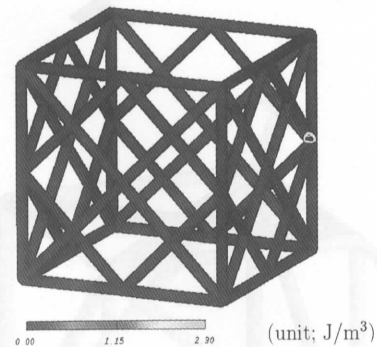
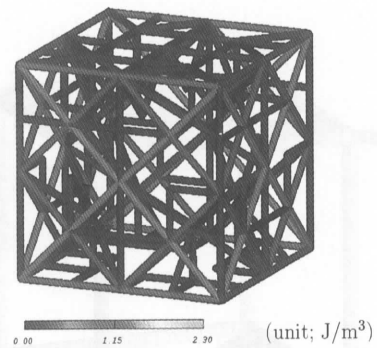


図14

だしその選択を、先ほど言いましたように、目的関数を小さくする、制約条件を生かすようにする遺伝的アルゴリズムによりますと、それほど計算量はかかりません、図14に示すように何世代か、遺伝的アルゴリズムでは常に生物学の用語がよく使われますが、何世代か経ってくると、だんだん部材が少なくなって、なおかつ変位も小さくなって来ます。図19の下側は最後にできた構造で、先ほどお見せした図13の上側の構造と全く同じです。

似たように平面上に構造があってという例では、図15の上側はどういうケースかといいますと、上面で四方に同じ力で引っ張るといふ例であります。この引っ張られたときの4点の変形を小さくしようとすれば、どうすればいいか。この上面に部材配置すればいいという結果が得られます。これは、定性的に材料力学という知識を使いますとそうなるということが判るわけではありますが、その通りの構造が得られております。

図15の下側に示すように、この同じ四方に引っ張るといふところに上下方向の力を加えますと、とたんに最適と思われる形が違ってきます。当然のことながら上下方向にも、こういう斜材が入って、上下方向の変形も小さくするようになってきます。そういうのが得られるわけです。

これが最後の図16です。どういうものかと申しますと、この緑色のピラミッドに乗っかっている平面、上何 m か離

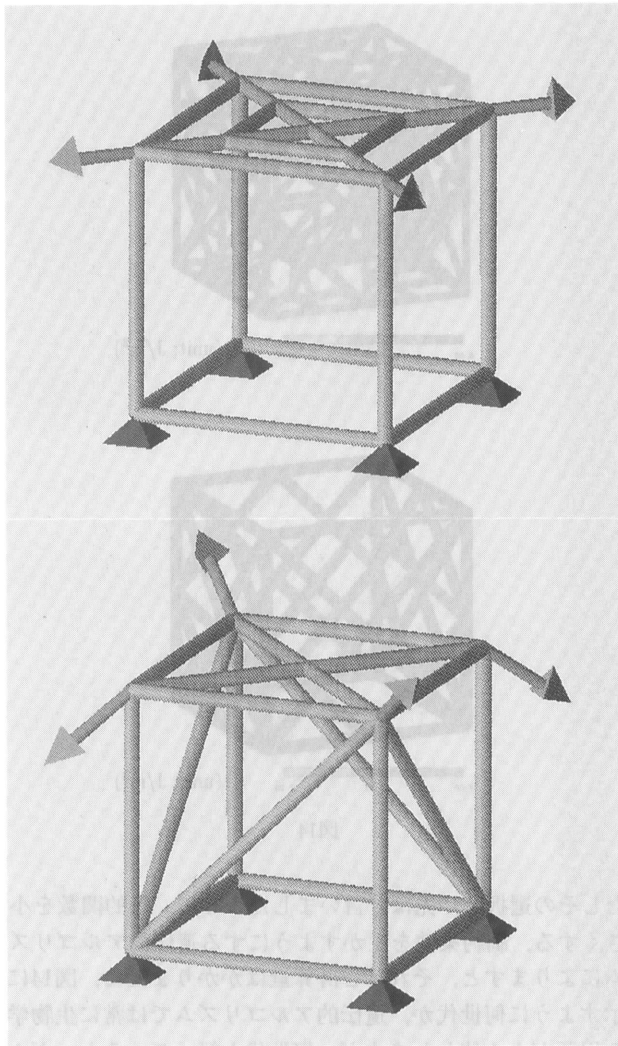


図15

れたところに力が加わりまして、その加わったときの変形量を小さくするには、部材をどういう風に配置すればいいか、という問題です。このとき、図16の上側に示す恰好の形が得られます。

次に、これと同じ問題に、真ん中に部材が一本あるけれども、同じ面には他の部材があってはいけないという制約を加えます。すると、ちゃんと図16の下側に示すように両脇に部材が出てくる恰好になります。

これは先ほど示しました阪神大震災の写真であります。真ん中にこういう柱がある、それが横に力を受けます、このときにどういう風に部材を配置すればいいかというのは、ちょうど図16の上側と本質的に同じであります。ここに一本柱が立っております、このところに横に力を加えまし

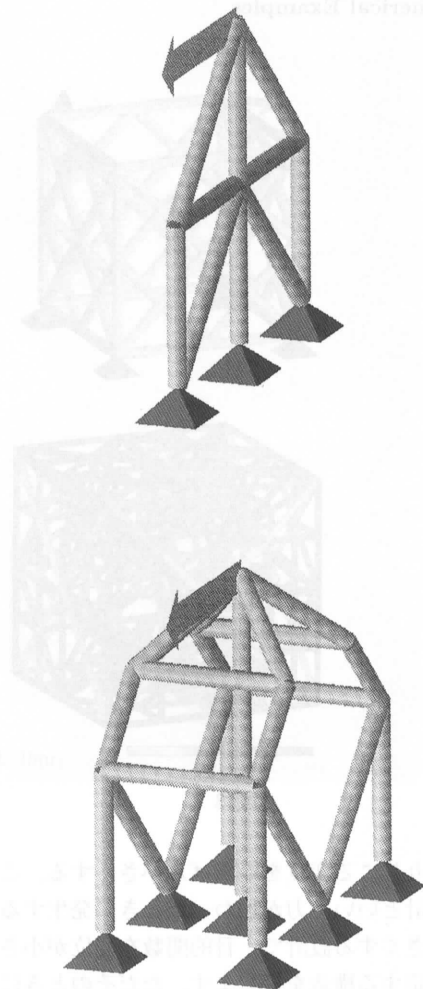


図16

た、そういうときにはどうすればいいか。やっぱりこういう風に力のかかる方向に踏張る部材を配置しておけばいいのです。ところがある種の交通事情とか、工数とか、工期とか、いろいろな制約がありますので、仕方なしに一本柱にしているのかも知れません。力学的に言えば、こういう風にするのがいいという例を計算上は出せます。ただし、その結果をどう活かすかは、いわゆる設計・施工者の見識ということになりますので、構造設計というのはなかなか一筋縄ではいきません。ただし、設計を支援するものとして、いろいろなコンピュータ、構造解析、アルゴリズムが現在発達しているということを結論としまして、私の小論をこれで終わらせていただきます。ご静聴ありがとうございます。(1995年6月8日講演分)