

最適設計技術

杉本 博之*

1. まえがき

技術者は、同じ時間が与えられればできるだけ良質の設計を求めるし、同質の設計が得られるのならできるだけ短時間でそれを達成するよう努力するものである。にもかかわらず、従来、解析・照査のための理論に比べて設計法に対する評価が相対的に低いのは、極めて奇異なことと思っている。解析・照査のみのプロセスを相変わらず設計法という習慣は治らないし、計算機が発達しているのだから計算機をバンバン回して設計を楽しめばよい、というような意見まで公式に出てくる。解析法が格段に発達したのが20世紀の工学であるし、一方で相変わらず試行錯誤的な設計法（と自称するもの）がまかり通ったのも20世紀の日本の土木工学である。

土木工学における構造設計の基本は一本柱設計で、要するに静定構造物へのモデル化による設計が基本的な理念であった。この概念が一般的には安全側の設計を保証し、設計作業を簡略化している効果は否定されないが、それが厳密な意味で正当化されるのは、静定構造物でかつ断面力しか照査の対象にならない場合のみである。静定構造物でも、変形、あるいは動的な挙動が照査に求められれば、応答値は設計パラメーターに依存し、まして不静定構造物になれば、一般的にすべての応答値は設計パラメーターに依存する。このような構造物の設計において、試行錯誤的な設計法で良質な設計が得られるのは、かなりの経験の積重ねによる賜物か偶然であると言わざるを得ない。

解析・照査技術が格段に難しくなった耐震設計等に見られるように、今後の構造設計はますます難しくなると予想される。良質な設計環境を提供する意味でも、今、最適設計技術を見直すことは必要なことのように思われる。

以下、日本の土木学会における最適設計技術の歴史と現状、最適設計技術の世界の動向、今後の最適設計技術、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithms) の概要、荷重方向と反対方向に変形するトラス構造物の設計、およびRC橋脚の耐震最適設計について順に説明する。



* Hiroyuki SUGIMOTO

北海道大学
工学部土木工学科 教授

2. 土木学会と最適設計技術

日本における最適設計技術の応用に関して、当初指導的な役割を果たしたのは、1985年に土木学会構造工学委員会の下に設けられた「構造物最適性研究小委員会」であった。この委員会は、機械工学、建築工学、および造船工学の多くの関係者もその構成メンバーとし、最適設計法の研究と普及に努めた。この委員会の一つの大きな成果は、1988年9月に出版された、「構造工学シリーズ1 構造システムの最適化～理論と応用～」¹⁾である。全286ページに及び、第I編 構造設計と最適設計法、第II編 最適化理論、第III編 応用から構成された。第I編では、構造最適設計法の歴史、構造設計の基本的な概念、第II編では、種々の数理計画法、双対法、多目的数理計画法、およびファジィ数理計画法などが説明されている。第III編では土木工学のみならず、機械、建築、造船の分野における具体的な応用例が説明された。たとえば、斜張橋のケーブル張力調整の問題、信頼性理論を用いる構造物の最適設計、限界状態設計法を用いるRC構造物の最適設計、構造物の最適制御問題、一般貨物船の最適設計などである。

しかし、その後、最適設計技術の研究の主流は、土木学会の手を離れ、機械学会に移った。理由は、いくつか考えられるが、一つは、最適設計技術の研究を支えた研究者、実務者の多くは橋梁工学を専門とする者であったが、実務における小規模橋梁は、最適設計技術を必要としなく、一方、大規模橋梁に適用するには、設計変数、制約条件の数が多すぎたことによる。また、目的関数が重量最小のように単純でなく、その定式化が複雑であり、当時の最適設計技術が主に対象とした連続変数、連続関数という制約の中では定式化が困難であったことなどによる。企業間の関係が、他の工学分野のように発展的競争状態とは言い難く、協調的共存状態であることも最適設計法の普及を妨げた大きな理由の一つである。構造設計の分野以外での応用も模索されたが、やはり大きな壁は、連続変数、連続関数の枠組みであり、その中では目的関数の実用的な設定は難しく、多くの実務の設計者に失望を与えたことは否めない。

上記の著書の出版に続く土木学会からの貢献としては、1992年7月に土木学会論文集に掲載された委員会報告「構造システムの最適化の現状と将来」²⁾である。この中ですでに、離散変数、不連続関数から構成される最適設計問題の有力な解法として遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms, 以下GA) について言及されている。GAが日本の土木学会において研究されはじめたのは、およそ1990年前後である。当初は、骨組構造物の設計が主たる対象として研究されたが、土木工学における種々の

設計問題が内包している離散的な要素に適合したため、多くの研究、応用例が発表された。この傾向は今でも続いている。このGA、およびニューラルネットワークの応用研究に多くの関係者の関心が移ったためもあるが、応答曲面法、種々の応答値の感度解析など、構造最適設計の主流とも言える分野においては、土木学会は機械学会に大きな遅れをとった。

土木学会における構造設計関係者の関心が再び最適設計技術に戻ったのは、1995年1月に阪神地区を襲った阪神淡路大震災によるところが大きいと考えられる。

この地震はマグニチュード7.2の直下型地震で、多くの死傷者を出し、また多くの構造物が倒壊した。地震の被害が明らかになるにつれ、従来の地震荷重よりはるかに大きなエネルギーの地震が作用したことが判明した。この地震の後、耐震設計に関する示方書類が大幅に改訂され、設計に用いる地震荷重が以前のものよりはるかに大きくなった。また、この地震荷重の増加とともに、構造物の弾塑性解析が同時に要求されることになった。その結果、既存構造物の耐震補強と新設構造物の耐震設計において、新しい知見が要求されるようになった。従来、種々の構造物の設計において、最適設計技術が必要とされなかった理由の一つに、それらの設計においては過去の蓄積が十分にあり、それらを引用し多少の変更を加えることにより受け入れ得る最適な設計が得られることも指摘される。しかし、地震荷重の大幅な改訂により、少なくとも耐震設計が支配的となる構造物においては、過去のデータは役に立たず、最適設計技術のような科学的な意思決定手法が必要とされるようになった。現在、コンクリート構造物、鋼構造物の耐震設計において、最適設計技術の応用の試みが始められている。もう一つの課題は、既存構造物の耐震補強である。既存の構造物もまた新しい耐震設計基準を満足する必要がある。これらは、すでに建設され供用されているので、その耐震補強設計には多くの制約があり、新設設計とは異なる課題を提供する。RC橋脚、鋼製橋脚、斜張橋のタワー、あるいは大規模なトラス橋において、最適設計技術の種々の応用研究が試みられている。

3. 最適設計技術の世界の動向

世界的な動向としては、車、航空機の分野での実際的な適用を代表とする多くの工学分野での実際的な応用がまず指摘される。また、それに伴う汎用ソフトの開発も盛んで、NASTRANをはじめ世界的に普及している有限要素法のプログラムは、ほとんど最適化の機能をもっている。またそれらとは別に、最初から最適化手法との結合を目的として有限要素法のプログラムを開発し、それらと結合した構造最適設計のプログラムも多数ある。一言で構造解析と言っても多種多様な内容が含まれるが、主なものは静的解析、モード解析、熱伝播、動的解析等である。これらに対する最適断面寸法、形状、およびトポロジーなどが得られことになる。最適化の計算には、多数回の構造解析が要求される。実用的な構造最適

設計の論文が発表されて以来、いかにして構造解析の回数を減らすかが一つの大きな課題であった。構造解析における近似の概念³⁾の導入もまさに構造解析の回数を減らすことが目的であった。この考え方の延長上に応答曲面法の研究がある。応答曲面法が注目されるようになってきた背景には、構造解析の内容が弾性、線形の範囲から、弾塑性、非線形の範囲まで要求されるようになってきたことがある。その結果、一つの解析に多くの計算時間が必要となり、構造解析の回数を減らしたいという要求も、以前よりも強くなる。車両の衝撃問題等が代表的な問題である。応答曲面法とは、設計に要求される種々の応答値を、多項式等で現在の設計の周辺で近似する手法のことをいう。最適化の対象が厳密な構造解析から多項式の計算に代わるので、計算時間を大幅に縮減することができる。この研究の課題は、いかにして少ない回数の厳密な構造解析の情報から、いかにして近似度の高い応答曲面を得るかにある⁴⁾。

計算機に関わる開発も一つの研究テーマになっており、並列処理、分散処理等が研究されている。同じ回数の計算をするのであれば、直列的にするよりは、並列的に処理する方が早いのは明らかだからである。

米国土木学会から発表された構造最適設計に関するレポート^{5), 6)}を参考文献で紹介している。

4. 今後の最適設計技術

実務の設計のプロセスでは、どの条件を満足しなければならないかということは強く意識され、それらの制約条件を満足する設計を得ることが主たる目的となって、設計の評価に関わる工学的な価値基準の意識が欠落していることが意外と多いことに気がつく。

少し古くなるが、A. B. Templeman は彼の著書で、以下のような分析を試みることを提案している。

- ① どのような決定がなされなければならないか？
- ② この問題はどのような相関関係があり、またどのような外的な要因がそれを制約するか？
- ③ どのような規準により、その決定の良し悪しが評価されるか？
- ④ 最良の決定はどのようにしてなされるのか？

これらの質問が検討されることにより、設計問題は数学的なモデルで表現することができる。それらは次のようになる。

- ① 変数を割り当てる。
- ② 変数間の関係を導く。
- ③ 規準を選び、それを変数の関数で表現する。
- ④ 問題を解く手法を選択し、それにより問題を解く。

これらの手続きは当然のようであるが、明確に意識されることは実務において意外と少ないように思われる。

最適化手法の理論的な発展は、今後あまりないように思われる。つまり応用に必要な技術は十分にそろっているということである。今後数年間、さらに発展が期待できる部分は計算機の高速度化、低廉化、大衆化である。最適化技術の汎用プログラムの開発提供は、まだまだなされると思わ

れる。残された課題は、上記のように当面の設計問題のシステム工学的な分析であり、最適化技術の応用が必要な設計問題であれば、積極的に利用する姿勢だと思われる。

また、最適設計技術あるいは設計論の講義が大学でほとんど行われていない。この点は改良されるべきではないかと考える。

5. 遺伝的アルゴリズム (GA) の概要

GA は、ダーウィンの進化論を基礎に、その骨格を数理モデル化した手法である。従来の数理計画法が、連続変数、連続関数のみから構成される設計問題に 응용が限定されたのに対し、離散変数、非連続関数まで応用の可能性を広げた。理論も簡単であり、基本的なプログラムであれば簡単に作成できるのも特徴の一つである。

GA は、組合せ最適化問題とスケジューリング問題双方にほぼ同一の理論で対応可能であるが、ここでは、組合せ最適化問題に限定して考え方を説明する^{7)~9)}。

GA の基本的なオペレーターは、「繁殖・淘汰」、「交叉」、および「突然変異」の3つである。これらの説明の前に、設計パラメーターをどのように GA のための線列に変換するかというコーディングについて説明する。

5.1 コーディング

まず各設計変数が取り得る値の候補値を設定し、それをランクづけする。このランクを2進数に変換し、それを用いて表現した各設計変数の値の組合せが線列となる。簡単な例で説明する。

今、門型ラーメン橋脚の柱の設計を例にとる。柱は正方形断面で幅と鉄筋量を設計変数とする。幅の候補値は、80 cm から 230 cm まで 10 cm 間隔の16種類とする。これをランクづけしてランクを2進数に変換すると、たとえば80 cm は 0000 となり、150 cm は 0111、および 230 cm は 1111 となる。鉄筋量は、径が定められているとすると変数は本数になり、その候補値を8本から15本の8つとする。幅と同じく2進数表示すると、たとえば8本は 000、15本は 111 と表現される。左右の柱が異なる断面とし、左の柱が、150 cm、10本、右の柱が 230 cm、12本とすると、この設計に対応する線列は、

$$[0111 \cdot 010 \cdot 1111 \cdot 100]$$

となる。逆に、このような線列が与えられると、左 (150 cm、10本)、右 (230 cm、12本) の設計が得られることになる。この逆方向の過程をデコーディングという。GA はこのような線列を初期にランダムに多数生成させ、3つの基本的なオペレーターを繰り返し適用することで準最適解を得ようとするものである。

5.2 繁殖・淘汰

多数の線列は、上記のようにそれぞれの設計に対応する。それらのパフォーマンスは、設計が要求する工学的価値規準 (目的関数) と制約条件の関係で何らかの定量化がなされる。それらの値の相対的な関係により、良い設計は次世代に多数残し、悪い設計を排除する過程を繁殖・淘汰という。良い設計を必ず残すエリート戦略とか、確率的に選択するルーレット戦略とかが提案されて

いる。選ばれた線列が格納される場所を、概念的に交配プールと呼ぶ。

5.3 交 叉

2つの設計の間で情報を交換することを交叉と呼ぶ。種々の方法が提案されているが、1点交叉について説明する。

まず、交配プールから2つの線列を任意に抽出する。上の例を参考にして、次の2つが選ばれたとする。

線列-A : [01110101111100]

線列-B : [10010110101001]

この例では、ビット数は14あるので、1~13の間の任意の数字を選択し、切断箇所とする。6が選ばれたとする。左から6番目と7番目のビットの間を切断し、それぞれの線列の後半部分を交換する。次の子線列が得られる。

子線列-a : [011101 | 10101001]

子線列-b : [100101 | 01111100]

これらが新しい設計であり、左 (150 cm、11本)、右 (130 cm、9本) の設計と、左 (170 cm、10本)、右 (230 cm、12本) の設計が得られた。

5.4 突然変異

突然変異は、自然界の突然変異に対応するオペレーターで、低い確率で線列の内部を任意に変更することをいう。たとえば、あらかじめ定められた確率 (たとえば1%) で任意に線列を選択し、内部の1ビットをやはり任意に選択し、それが0であれば1に、1であれば0に変更する手続きのことである。

以上の過程を、所定の終了条件が満足されるまで繰り返すのが、単純 GA と呼ばれている方法である。

GA は、上記の組合せ問題のほかに、スケジューリング問題¹⁰⁾、あるいは組合せ問題とスケジューリング問題の混合問題^{11)、12)}にも、ほぼ同一の論理で適用可能となる。汎用プログラムも公開されている¹³⁾。従来の数理計画法が要求していた関数の微分なども必要でなく、簡単な論理で幅広い応用が可能であるので、種々の応用が試みられている最適設計技術の一つである。以下に説明する2つの例題も GA で解かれている。

6. 荷重方向と反対方向に変形するトラス構造物の設計

最適設計技術の応用例として、図-1に示すトラス構造

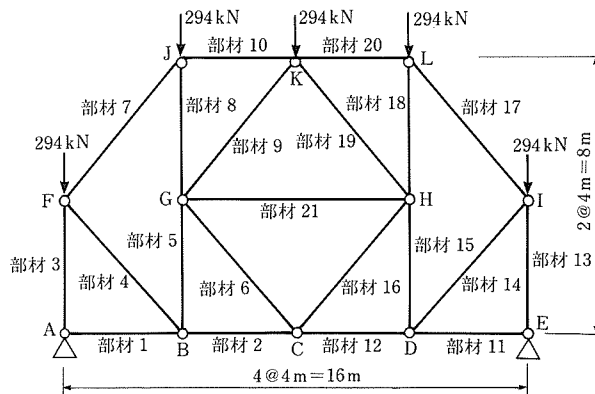


図-1 垂直荷重を受けるトラス構造物

物の最適設計を紹介する。コンクリート構造物としては、あまり例がない構造系であるが、最適設計技術の可能性を示す示唆的な例題として取り上げる。

荷重は、上部のすべての節点に下向きに294 kN載荷されている。部材断面積はすべて220 cm²である。応力などの制約条件は一切課していない。つまり無制約の最適化問題となる。設計変数は、各部材（左右対称に設定）のヤング係数である。すべての部材のヤング係数が20万 N/mm²の場合、変位図は図-2のようになる。当然、全節点は下方に変位する。ところが、節点Cの鉛直変位に注目し、目的関数をその最小化と設定すると、各部材のヤング係数は表-1（左半分のみ表示）のように選択され、このときの変位図は、図-3のようになる。つまり、上から下向きに押ししているにもかかわらず、逆方向に変形することになる。

この種の問題はあまり公開されていないが、最適設計技術が最も得意とする分野である。

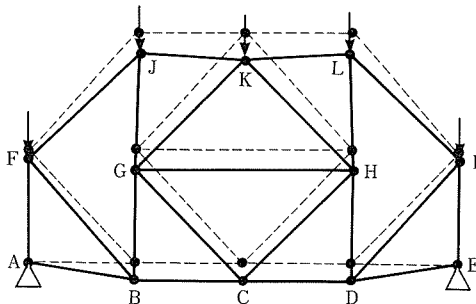


図-2 全部材同一ヤング係数の場合の変位図

表-1 C点のたわみ最小とした場合の各部材のヤング係数

部 材	ヤング係数 (N/mm ²)
1	310 000
2	200 000
3	330 000
4	330 000
5	320 000
6	230 000
7	310 000
8	20 000
9	150 000
10	160 000
21	10 000

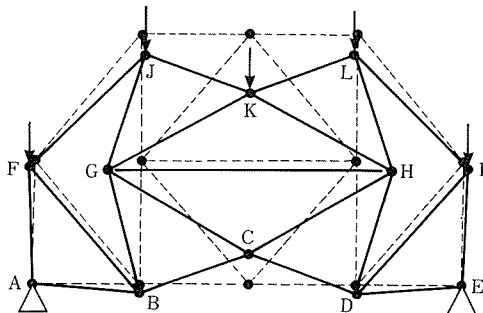


図-3 最適化されたヤング係数の場合の変位図

7. RC橋脚の最適耐震設計^{14), 15)}

最適設計技術をRC構造物の設計に応用した例として、RC橋脚の最適耐震設計の例を紹介する。目的関数は鉄筋の総容積およびコンクリートの総容積の線形和で表される多目的とする。制約条件には、発生頻度は低いが大規模な2つの地震動に対する耐震性、各部材のせん断破壊、および部材の損傷度に関する条件を考慮している。ここでは、耐震性の照査等の説明は最小限にして、設計変数とGAの応用におけるコーディングに重点を置いて説明する。

7.1 目的関数

目的関数としては、総コストを表す量として、式(1)の鉄筋の総容積とコンクリートの総容積の線形和をとった。

$$OBJ = V_c + \alpha \cdot V_s \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 V_c はコンクリートの総容積、 V_s は鉄筋の総容積である。 α は鉄筋とコンクリートのコスト比で、実際の経費の構成を考慮し50とした。

7.2 制約条件式

制約条件としては、構造物の耐震性、構造を構成する各部材のせん断破壊、および同じく各部材の損傷度を考慮した。

耐震性の照査は、地震時保有水平耐力法¹⁶⁾あるいは非線形スペクトル¹⁷⁾に基づき、海洋型地震（タイプI¹⁶⁾、スペクトルI¹⁷⁾と内陸型地震（タイプII¹⁶⁾、スペクトルII¹⁷⁾それぞれに対して計算し、制約条件とした。

7.3 設計変数

設計変数は、各柱部材あるいは梁部材の断面幅 B 、断面高さ H 、軸方向鉄筋本数 N 、軸方向鉄筋段数 J 、せん断補強鉄筋径 D_w 、1段あたりのせん断補強鉄筋組数 N_w 、せん断補強鉄筋配置間隔 S_v である。これらの値はすべて離散量として設定されGAを用いて最適化される。

各断面構成および各設計変数の候補値は以下のとおりである。

柱断面および梁断面をそれぞれ図-4に、関係する設計変数の候補値を表-2に示した。柱断面は正方形とし、梁断面は矩形とする。断面の幅 B （柱の場合は高さも）は、600 mm～1 300 mmの範囲の100 mm間隔の値が候補値となる。高さ H の候補値は、表-2に示すように断面の幅に応じて範囲は変わる（間隔は100 mm）ように設定される。軸方向鉄筋の径は32 mmの固定値とし、本数 N は断面幅に依存

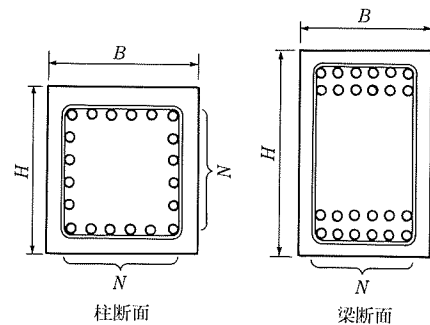


図-4 設計断面詳細図

表-2 梁部材断面データ

B (mm)	H (mm)		N (本)	J (段)
	柱	梁		
600	600	800~1 500	6	1 or 2
700	700	900~1 600	8	
800	800	1 000~1 700	9	
900	900	1 100~1 800	10	
1 000	1 000	1 200~1 900	11	
1 100	1 100	1 300~2 000	11	
1 200	1 200	1 400~2 100	12	
1 300	1 300	1 500~2 200	13	

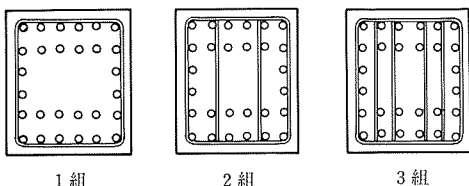


図-5 せん断補強鉄筋断面詳細図

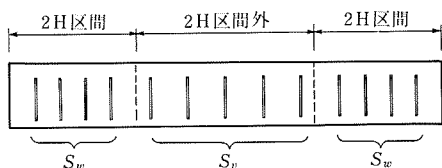


図-6 せん断補強鉄筋配置間隔

表-3 せん断補強鉄筋データ

部材	D _w (mm)	N _w (組)	S _w (mm)	S _v (mm)
柱	16	1~3	100	100 or 200
	19	1~3		
	22	3		
	25	3		
梁	16	1~3	150	150 or 200
	19	1~3		
	22	3		
	25	3		

し、表-2のような関係を設定している。たとえば、Bが800 mmの場合、柱部材であればHは800 mm、梁部材であればHは1 000 mm~1 700 mmから選ばれることになる。そのときの軸方向鉄筋本数は9本となる。側方鉄筋は柱部材にのみ配置するものとする。そのほか、軸方向鉄筋段数Jは1段配置あるいは2段配置とした。図-4の柱部材は1段配置、梁部材は2段配置の例を示している。

せん断補強鉄筋の断面配置図を図-5に、側面図を図-6に、また値の候補値を表-3に示した。せん断補強鉄筋径D_wは16 mm~25 mmの4種類、せん断補強鉄筋組数N_wは、1組~3組とした。せん断補強鉄筋配置間隔は、部材両端からの2H区間における配置間隔S_wは、柱部材では100 mm、梁部材では150 mmの固定値として、2H区間外における配置間隔S_vを設計変数とした。柱部材においては100 mmあるいは200 mm、梁部材においては150 mmあるいは200 mmとしている。

これらの設計変数の組合せにより、部材の断面構成が決定される。1部材につき、柱部材に対する組合せ総数は

256、梁部材に対する組合せ総数は2 048となる。

これらのコーディング例を図-7に示した。梁部材の例である。図は、B=700 mm、H=1 200 mm、軸方向鉄筋段数1、せん断補強鉄筋径19 mm、その組数3および配置間隔200 mmの例である。図のように、

[0001001101100]

となる。これを、すべての設計対象部材に関して並べて一つの線列となる。

なお、D_w、N_wに対応するビット数が、それぞれ1、2で表-3の内容に対応できる理由は、D_w、N_wの値の組合せが2進数で0・11のとき、22 mm、3本、1・11のときは、25 mm、3本と設定しているからである。

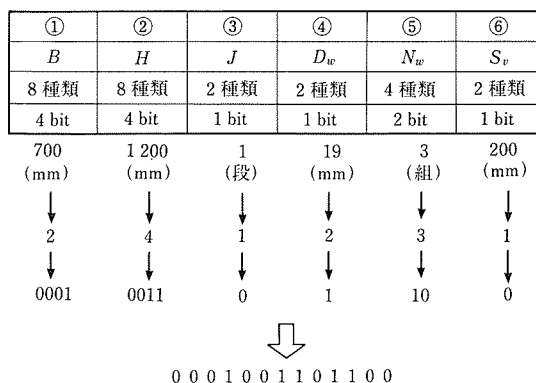


図-7 梁部材の断面コーディング例

7.4 数値計算結果

図-8に示すRCラーメン高架橋を例にとり、耐震性の照査は「道路橋示方書」の地震時保有水平耐力法により行い、2種地盤の場合の数値計算結果を図-9に示した。図には、各柱、梁部材ごとに、断面寸法、鉄筋量、および鉄筋配置を示している。それぞれの断面の下の数字は、せん断補強鉄筋の径と間隔である。

8. あとがき

最適設計技術というと、既往の解析・実験の蓄積をつまみ食いの援用し、苦勞をせず答えを求めている、と誤解されることも多いように思われる。しかし、実際は、本文中にも触れたように、まず設計問題の分析から始まり、4つの質問に対する検討は必ず行う。その結果、当然最適設計技術を使う必要のない問題は他の設計手法を探ることになる。また、多くのパイロット的な解析・照査は必ず行い、当初取り上げた設計変数の目的関数あるいは制約条件に対する感度、あるいは定式化された設計問題そのものは必ず検討され、設計空間の修正と大まかな把握も必ず行われる。このような過程を伴わないで、直接最適設計技術を用いても、ろくな設計は得られない。また、最適設計技術により得られた設計の考察から、解析・照査法へのフィードバックも必ずあるものである。

今後の土木技術は、量から質の時代に移り、独創性が従来に増して要求される。試行錯誤的に計算機をバンバン回すような設計法でなく、科学的な意思決定手法を取り入れ

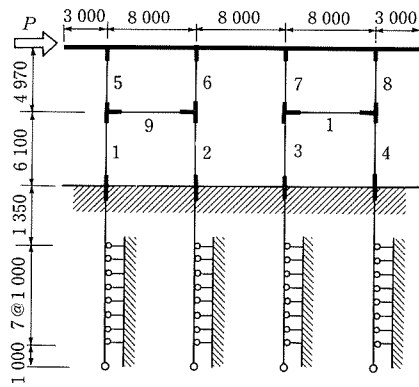


図-8 RCラーメン高架橋杭基礎構造

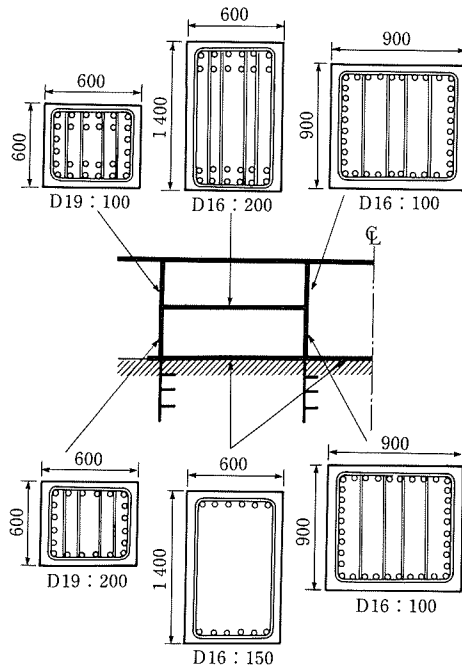


図-9 最適設計例(左半分表示)

ることにより、余裕のある設計環境を獲得する必要性はますます増すと思われる。

RCあるいはPC構造物の設計において、最適設計技術が応用されることは少ないようであるが、鋼構造物に比べて形

状の自由度は格段に高いので、応用の可能性は高いし、効果も期待できると考えている。

本文により、最適設計技術への理解が深まることを期待するし、また、今後の設計実務の参考になれば幸いである。

なお、20世紀の最適設計技術の集大成として、山川宏編著「最適設計ハンドブック—基礎・戦略・応用—」が2001年末に出版予定である。参考にされたい。

参考文献

- 1) 山田 編著：構造工学シリーズ1 構造システムの最適化～理論と応用～，土木学会，1988
- 2) 土木学会構造工学委員会構造物最適性研究小委員会：構造システムの最適化の現状と将来，土木学会論文集，No.450/I-20，pp.1～12，1992
- 3) 杉本：構造最適設計の数理計画法からの脱皮，構造工学論文集，Vol.35A，pp.339～345，1989
- 4) 柏村：統計的設計支援システムの開発とその応用，平成9年横浜国立大学博士学位論文，1997
- 5) Frangopol D. M. & Cheng F. Y. (ed.)：Advances in Structural Optimization，ASCE，1996
- 6) Arora J. S. (ed.)：Guide to Structural Optimization，ASCE，1997
- 7) 杉本：GAの工業設計への応用に向けて，数理科学，No.353，pp.45～50，1992
- 8) 杉本，鹿，山本：離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究，土木学会論文集，No.471/I-24，pp.67～76，1993
- 9) 杉本，山本，笹木，満尾：GAによる仮設鋼矢板土留工の設計最適化に関する研究，土木学会論文集，No.474/VI-20，pp.105～114，1993
- 10) 田村，杉本，上前：遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への適用，土木学会論文集，No.482/IV-22，pp.37～46，1994
- 11) 杉本，片桐，田村，鹿：GAによるライフライン系被災ネットワークの復旧プロセス支援に関する研究，構造工学論文集，Vol.43，pp.517～524，1997
- 12) 杉本，田村，有村，斎藤：復旧班の協力を考慮した被災ネットワーク復旧モデルの開発，土木学会論文集，No.625，pp.135～148，1999
- 13) 杉本，鹿：工業最適設計のための汎用GAプログラムについて，北海学園大学学園論集，第96・97号，pp.81～105，1998
- 14) 杉本，渡辺，満尾：弾塑性挙動を考慮するRCラーメン構造の補強最適化の試み，構造工学論文集，Vol.45A，pp.423～432，1999
- 15) 杉本，渡辺，斎藤：RCラーメン高架橋の耐震補強最適化に関する研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.385～394，2000
- 16) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，丸善，1997
- 17) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999

【2001年1月11日受付】