

(20) GAによる曲げ変形性能に着目した
RC梁断面の最適設計について

AN OPTIMAL DESIGN PROCEDURE WITH GENETIC ALGORITHM OF
RC BEAM SECTION TO IMPROVE FLEXURAL DEFORMABILITY

佐藤 紘志* 園田佳巨** 臼井 徹***

By Hiroshi SATO, Yoshimi SONODA and Toru USUI

ABSTRACT

To improve the flexural deformability and to maximize the energy absorption capacity of double-reinforced concrete beams, an optimal design procedure with the genetic algorithm(G.A.) of RC beam section is presented in this study. In the first step, an optimal design of a section of single-reinforced concrete beam was carried out to be maximized the flexural strength of a beam, and the applicability of the G.A. to this design procedure was examined by comparing the exact solution. Secondary, the optimal design to maximize the flexural deformability of double-reinforced concrete beams was executed. We confirmed from the results obtained in this study that it can be useful to employ the G.A. in the optimization procedure for a design of RC beam section and it may be possible to develop the optimization procedure with the G.A. for the design of reinforced concrete structures in the limit states.

Key Words:Energy Absorption Capacity, Genetic Algorithm, Reinforced Concrete

1. まえがき

一般に鉄筋コンクリート(RC)構造物を対象にした最適設計の問題には、構造物全体の最適化と部材断面の最適化がある。これまでの研究から部材断面の最適化は必ずしも構造全体の最適化につながらないと言われているが、実用的な観点からは部材断面の最適化にもそれなりの意味があると考えられる。

本研究では、落石覆工等のエネルギー吸収能を考慮した設計が望ましい¹⁾と考えられる構造物を想定し、材料のひずみ速度効果などの動的性質を考慮したRC梁断面の曲げ変形性能に着目した最適化問題を取り上げる。最適化の手法として、ここでは工学における離散的最適化問題に対して最近用いられるようになってきた遺伝的アルゴリズム(GA)²⁾を用いている。

数値計算例としては、まずはじめに、①曲げ耐力を最大にするような単鉄筋コンクリート断面の決定にGAを適用して、その妥当性を確認した上で、②材料の動的性質を考慮するとともに、複鉄筋RC梁断面の曲げ変形性能に着目した断面の最適化について検討した。

2. RC梁断面の曲げ変形性能の評価

RC梁断面の曲げ変形性能の評価には種々の方法が考えられるが、ここでは断面レベルで評価することとし、梁断面の抵抗曲げモーメントと曲率の2つの観点に着目した。すなわち、曲げモーメント(M)～曲率(ϕ)関係を求め、そのM～ ϕ 曲線によって囲まれる面積を曲げ変形性能と定義した。

RC梁断面のM～ ϕ 関係を求めるフローチャートを示せば、図-1のようになる。この手順に従って算定法を示せば、以下のようにになる。

* 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239 横須賀市走水1-10-20)

** 工修 防衛大学校助手 土木工学科 (同 上)

*** 防衛大学校学生 土木工学科 (同 上)

(1) 梁断面内のひずみ・ひずみ速度の計算

断面を図-2に示すようにN個の水平な層に分割することにより、各層毎にコンクリート・鉄筋のひずみが計算される。すなわち、平面保持の仮定のもとに中立軸を与えれば、i層内のひずみは次式により計算される。

$$\epsilon_i = \left\{ (i-0.5) \cdot \frac{H}{N} - x_0 \right\} \cdot \phi \quad (1)$$

ただし、H：はり断面の高さ、N：断面の分割数

ここで、断面内の曲率速度を仮定することにより、i層内のひずみ速度は次式によって求められる。

$$\dot{\epsilon}_i = \left\{ (i-0.5) \cdot \frac{H}{N} - x_0 \right\} \cdot \dot{\phi} \quad (2)$$

(2) ひずみ速度効果を考慮した材料の応力-ひずみ関係

鉄筋やコンクリート等の構造材料は、一般に衝撃的な荷重を受けるとき降伏応力が上昇する特性があることが知られており、過去に数多くの研究がなされている。落石覆工等の衝撃荷重を対象とする構造物は、本来、ひずみ速度効果を考慮した材料の応力-ひずみ関係を用いた設計が望ましいものと考えられる。

したがって、本研究の設計計算には高橋ら³⁾によって提案された図-3に示すような応力-ひずみ関係式を用いる。

(3) 曲げモーメント-曲率関係の計算

RC梁断面の抵抗曲げモーメントを求める手順として、

①まず(1)で得られたひずみ分布と(2)で示した応力-ひずみ関係を用いて各層内の応力を計算する。

②次に、各層の応力から梁断面全体の圧縮合力および引張合力を求め、力のつり合いがとれているか確認する。

③力のつり合いがとれない場合には中立軸の位置の修正を行い、(1)のステップに戻り、正確な中立軸が得られるまで黄金分割法を用いた繰り返し計算を行う。

④正確な中立軸が得られたら、再度、各層のひずみ分布および応力分布を計算したうえで、断面全体の圧縮合力および引張合力とその作用位置を求め抵抗曲げモーメントが算定される。

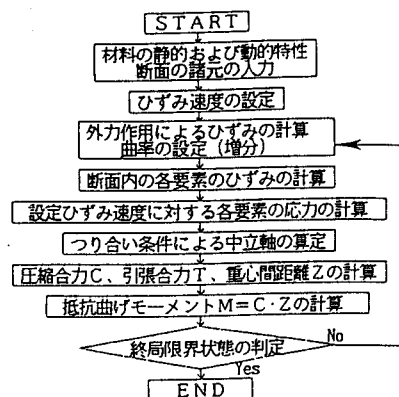


図-1 断面分割法の手順

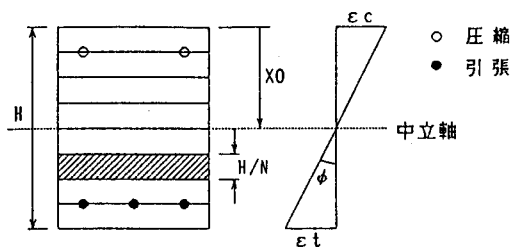
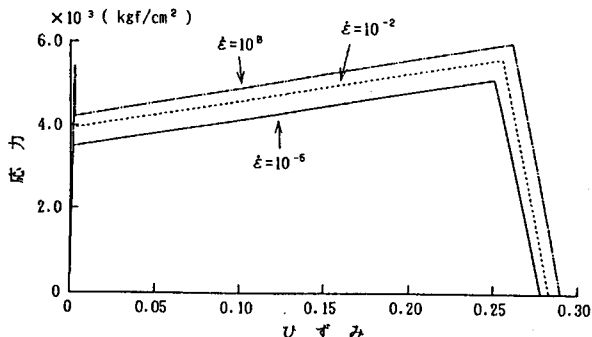
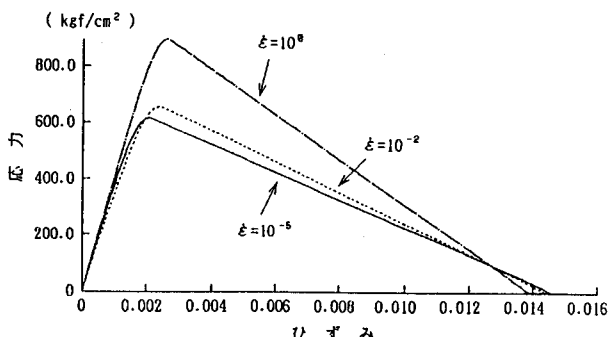


図-2 RCはり断面内のひずみ分布



(a) 鉄筋の応力-ひずみ関係式



(b) コンクリートの応力-ひずみ関係式

図-3 ひずみ速度を考慮した材料の応力-ひずみ関係式

以上の操作を逐次曲率を増加させながら行うことにより、RC梁の曲げモーメント～曲率関係を求める。なお、③の過程において力のつり合いをとることが不可能な場合、RC梁断面の破壊が生じたものと考え、そのときの曲率を終局曲率と定義した。

(4) 曲げ変形性能の評価

上述のようなフローによって得られる曲げモーメント～曲率関係の1例を示せば、図-4のようになる。

この図において、D点は先に定義した終局曲率を示しており、本解析ではD点までのM～ ϕ 曲線の面積を積分することにより曲げ変形性能の評価を行った。

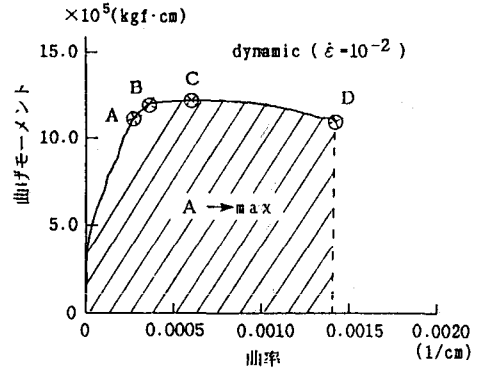


図-4 RC梁断面のM～ ϕ 関係の一例

3. GAを用いた最適断面の決定

一般に、鉄筋コンクリート梁断面の設計とは設計荷重に対して制約条件を満足するような有効高さ、鉄筋量を求めるものであるが、ここでは、与えられた断面寸法に対して断面の曲げ耐力や曲げ変形性能を最大にするような鉄筋の配置や本数を定めることを考える。本問題で未知数となる鉄筋の本数などは、離散的な量であることから、本来、離散量を扱うことが容易であると考えられるGAを適用する。そのフローは図-5のようになる。

①データ入力

乱数発生に関する情報、材料定数、分割数、繰り返し回数など計算情報を与える。

②初期化（初期集団の形成）

設計変数に関する初めの組み合わせを作る。初期世代としてN個の個体を生成し、各個体には本問題の設計変数（鉄筋の本数等）に、任意の値を遺伝子として与える。

③適応度評価

N人の個体の遺伝子情報から目的関数（曲げ変形性能）の値を計算し、この値をもって各個体の適応度の評価を行う。

④選択（淘汰）

各個体の適応度の大きさに応じて生存確率が大きくなるように考慮したうえで、乱数を用いて確率的に選択（淘汰）する。

⑤交叉（1点交叉）

次世代へ生き残った個体同士で、新しい染色体を生成する。

⑥突然変異

適当な割合である個体に対して突然変異（設計変数値の修正）を発生させ、遺伝子の一部を変化させる。

⑦次世代の形成

以上のようにして選ばれた各個体と新たに生成された個体とによ

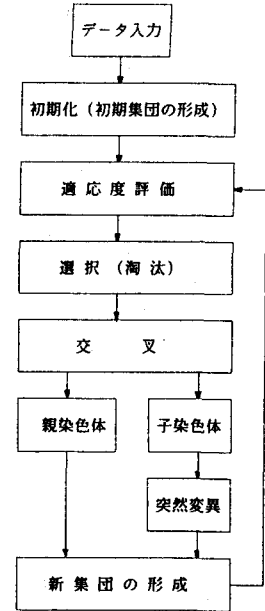
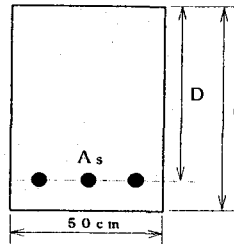


図-5 GAのフローチャート



未知数 D: 引張鉄筋の有効高さ、 A_s : 引張鉄筋量
制約条件 $D \leq 57 \text{ cm}$ 、 $A_s \leq 15^2 \text{ cm}$

図-6 単鉄筋RCはり断面

って新世代を形成する。以上の操作を数世代繰り返し、適応度最大の設計変数の組み合わせを選択することとした。

4. 数値計算例

(1) 曲げ耐力を考慮した単鉄筋RC梁の最適設計

GAの適用性を確認するために、図-6に示すような単鉄筋RC長方形断面において曲げ耐力が最大になるような鉄筋位置および鉄筋量の決定を試みた。なお、個体数は $N=20$ とし、材料の力学的性質および安全係数は以下の値を用いた。

コンクリートの設計基準強度： $\sigma_{ca}=270\text{kgf/cm}^2$ ，鉄筋の設計降伏強度： $\sigma_y=3000\text{kgf/cm}^2$ ，
コンクリートの材料係数： $\gamma_c=1.3$ ，鉄筋の材料係数： $\gamma_s=1.0$ ，部材係数： $\gamma_b=1.15$

制約条件としてかぶりは3.0cm

以上、最大鉄筋量は 15.0cm^2 とした。また、適応度は次式で示される曲げ耐力によって評価する。

$$M_{ud} = \frac{A_s \cdot f_{yd} (H - y_c)}{\gamma_b} \quad (3)$$

ただし、 y_c :圧縮合力の作用位置

図-7は、2種類の初期値を用いて得られた最大曲げ耐力と世代数との関係を示したものである。図中の点線は、曲げ耐力の算定式から得られる最大曲げ耐力を示している。この図より、GAによって求められた曲げ耐力は、計算値に対して約93%となっており、GAがこの種の問題へ適用可能であることが認められた。

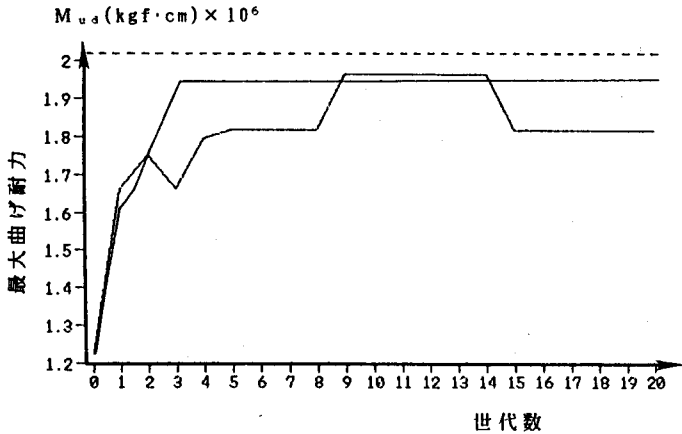
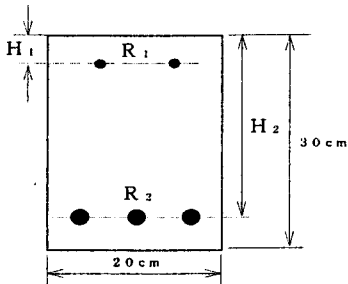


図-7 単鉄筋RC断面の最適設計結果

(2) 曲げ変形性能に着目した複鉄筋RC梁の断面最適化

次に、鉄筋およびコンクリートの動的な性質を考慮した上で、曲げ変形性能を最大にするような複鉄筋RC梁断面（図-8参照）の最適化を試みる。設計変数は、コンクリート断面の上縁から圧縮鉄筋および引張鉄筋までの距離、圧縮鉄筋および引張鉄筋の径、圧縮鉄筋および引張鉄筋の本数とした。また、圧縮鉄筋はD9、D13、D16、D19の4種類、引張鉄筋はD16、D19、D22、D25の4種類から選び、鉄筋の本数はそれぞれ1～3本とし、かぶりは3cm以上とする。その他の初期入力データは、世代変化数（15）、鉄筋のヤング係数（ $2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ ）、コンクリートのヤング係数（ $4.5 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ ）、



未知数 N_1 : 圧縮鉄筋本数、 N_2 : 引張鉄筋本数、
 R_1 : 圧縮鉄筋径、 R_2 : 引張鉄筋径
 H_1 : 圧縮鉄筋位置、 H_2 : 引張鉄筋位置
制約条件 $N_1, N_2 \leq 3$

図-8 複鉄筋RCはり断面

鉄筋の静的降伏点 (4000kgf/cm^2)、鉄筋の静的引張強度 (5000kgf/cm^2)、鉄筋の静的引張強度に対するひずみ (0.2)、コンクリートの静的圧縮強度 (693.0kgf/cm^2)、断面分割数 (100)、曲率変化数 (50)、ひずみ速度 (1.0×10^{-2}) である。適応度は、2. で示した曲げ変形性能 (最大曲げ吸収エネルギー) で評価する。図-9 に、最大曲げ吸収エネルギーと世代数との関係を示した。

図-9 より、本計算例では14世代目に最大の曲げ吸収エネルギーを与えるRC梁断面が得られている。図-10 は、各世代における断面の変化を示したものである。これらの図で注目すべきことは、0世代～3世代においては圧縮鉄筋量と引張鉄筋量とが交互に増減を繰り返していることである。一般にRC断面は、引張鉄筋の降伏が先行することにより十分なじん性が得られるように設計されるが、本計算例でも2～3世代において引張鉄筋量が一時的に減少した原因は、引張鉄筋の降伏が先行するような破壊形態が選択されたためであると考えられる。最終的には、14世代において圧縮鉄筋および引張鉄筋ともに制約条件内で最大径の鉄筋を用いたうえで、引張鉄筋の降伏が先行するような断面が得られることが確認された。

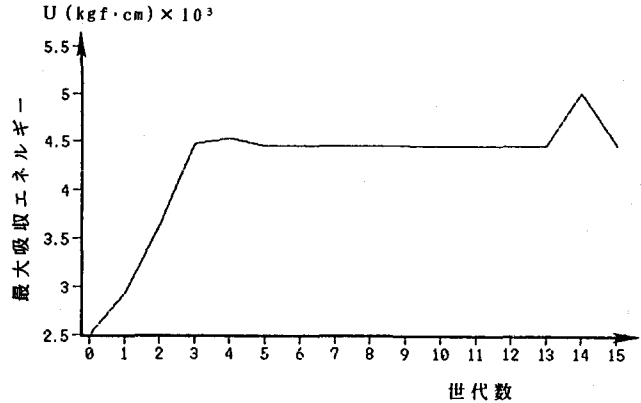


図-9 各世代における曲げ変形性能の変化

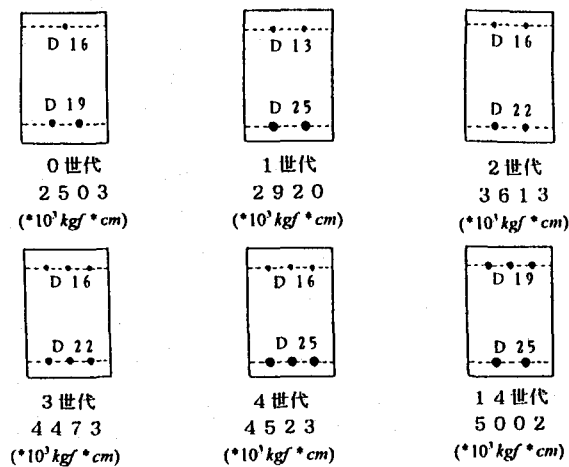


図-10 各世代におけるRC梁断面の変化

5. 結言

本研究では、鉄筋コンクリート構造物の動的設計への応用を念頭において、離散的最適化問題に最近用いられているGAを用いて断面の最適化について検討した。はじめに、単鉄筋コンクリート断面を対象に、曲げ耐力を最大にするような鉄筋量とその配置の決定を試みたが、初期値によって収束の過程に多少の違いはあってもほぼ妥当な値が得られた。つぎに、鉄筋およびコンクリートの動的性質を考慮した上で、曲

げ変形性能を最大にするような断面の最適化を試みた。その結果、GAを用いることにより引張鉄筋の降伏が先行するような破壊形態を示す変形性能に優れた断面が決定されたことが認められた。

参考文献

- 1) 園田佳巨・佐藤紘志・石川信隆：ひずみ速度効果を考慮したPCはり部材の動的曲げ耐力と変形性能，構造工学論文集Vol. 38A, pp. 1455-1465, 1992年3月
- 2) 杉本博之：GAの工業設計への応用にむけて、数理科学 No. 353, pp. 45-50, 1992. 11.
- 3) 高橋芳彦・大野友則・太田俊昭・日野伸一：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果，構造工学論文集Vol. 37A, pp. 1567-1580, 1991年3月