

GAによるRC版耐衝撃設計支援システム の開発に関する研究

Development of Impact Resistance Design Support System for RC Slabs by using Genetic Algorithms

江本久雄*, 中村秀明**, 宮本文穂***

Hisao EMOTO, Hideaki NAKAMURA and Ayaho MIYAMOTO

*工学士 富士通サポートアンドサービス(株) (〒140-8567 東京都品川区南大井 6-26-1)

**博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

***工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

Failure behavior of RC slabs under impact loads is known to be much more complex than that under static loads due to the effects of propagating shock wave, inertia etc during impacts. In this study, in order to propose a practical impact-resistant design method for RC slab structures, genetic algorithms(GAs) is used as design optimization technique to develop impact resistance design support system for RC slabs combined with a dynamic layered FEM analysis. The results give that GAs can be applied to design of RC slabs effectively.

Key Words: soft impact load, reinforced concrete slab, design support system, impact analysis, impact resistance, dynamic layered FEM, genetic algorithm

1. はじめに

衝撃荷重を受けるRC版の破壊挙動は、応力波、慣性力などの影響で非常に複雑となり、局所的で瞬時的な経路を経て破壊に至る。そのため、耐衝撃性に優れたRC版の設計は、耐衝撃性を評価する指標の設定が困難で、期待通りの耐衝撃性がなかなか得られにくく、設計者の経験に頼る部分が多いのが現状である。近年では、コンピュータ技術の著しい進展や数値解析技術の発達により、精度の良い数値解析手法に基づいた設計がある程度可能となってきた。しかしながら、耐衝撃性に優れたRC版の設計では、適切な耐衝撃評価指標のもとでRC版に用いるコンクリートの種類や厚さ、鉄筋の材料や本数などの設計パラメータを適切に組合せる必要があり、一般には、膨大な数の組合せ数となる。これら全ての組合せに対して衝撃破壊挙動解析を行うことは現実的には不可能で、そのため、現在の計算機性能をもってしても、実用的な最適解が現実的な時間内に得られない場合が多い。近年このような組合せ最適化問題の解法として遺伝的アルゴリズム(GA:Genetic Algorithm)が盛んに用いられている¹⁾。GAはアルゴリズムが単純であり、パラメータの設定次第で準最適解を高速に求めることができる。

そこで本研究では、このようなRC版の耐衝撃設計問題を組合せ最適化問題として捉え、確率論的に探索を行

うGAを用いて、耐衝撃性に優れたRC版の設計を支援できるシステムの構築を行った。RC版の衝撃破壊挙動解析には、本研究室で従来から研究されてきた解析手法である積層化非線形有限要素解析法²⁾を用いた。また、耐衝撃性評価には、5つの耐衝撃性評価指標³⁾(破壊時衝撃荷重、破壊時変位、全エネルギー、たわみ体積、局部変形指数)のうち破壊時衝撃荷重と局部変形指数を組合せた指標を試行的ではあるが用いた。

2. RC版の耐衝撃設計支援システム

2.1 設計支援システムの概要

耐衝撃性に優れたRC版を設計するには、RC版を構成する鉄筋の本数や種類、太さなどの他にコンクリートの種類、厚さなどを適切に組合せる必要がある。計算機性能の向上や、数値解析技術の進展により高度なシミュレーションが可能となったことから、種々の設計パラメータについて衝撃破壊挙動解析を行えば、ある程度耐衝撃性評価を行うことができる。一般に、このような組合せ最適化問題では、考慮すべき組合せ数が問題の規模に応じて指数関数的に増加するため、実用的な最適解が現実的な時間内に得られない場合が多い。近年、このような組合せ最適化問題の解法として遺伝的アルゴリズム

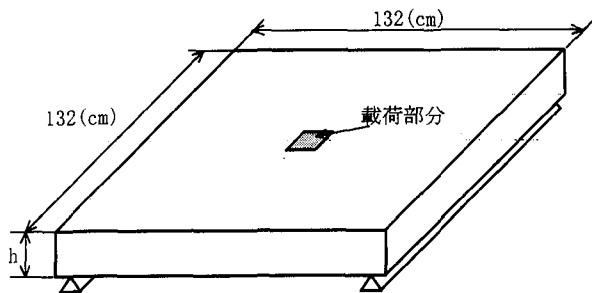


図-1 設計の対象としたRC版の概略図

(GA) ^{4), 5), 6)} が盛んに用いられている。GAは、生物の遺伝と進化のメカニズムを工学的にモデル化したものであり、生物の進化過程における遺伝的操作、すなわち、個体の遺伝子の選択、交叉、突然変異を模倣した最適化手法であり、複数の探索点が相互協力的に解を探索していくため、比較的短時間で準最適解を得ることが可能である。本研究では、積層化非線形有限要素解析とGAを用いて設計支援システムの構築を試みた。

2.2 設計対象RC版

本研究で設計の対象としたRC版を図-1に示す。このRC版は、縦横それぞれ132cmの正方形の複鉄筋RC版で、厚さは任意に設定可能である。今回設計の対象としているのは、このRC版がスパン長120cmで2辺単純支持され、その中央部に図-2に示される三角形近似された衝撃荷重が作用した場合を想定している。版上部および版下部には、それぞれ主筋層と配力筋層がそれぞれ1層ずつ配置され、その配置高さは、コンクリートのかぶり厚さにより定まる。コンクリートとしては、普通コンクリート、高強度コンクリート、鋼繊維混入コンクリートの3種類を対象としており、また、補強筋には、普通鉄筋、高強度鉄筋、連続繊維補強筋（以下FRP筋）Type AとType Bの計4種類を対象とし、これらの組合せによりRC版は構成されるものとした。コンクリートと補強筋の材料特性をそれぞれ表-1および表-2に示す。今回の設計問題では、補強筋の太さは、D6～D29とし、補強筋の本数は、各補強筋層について最小本数を6本、最大本数を20本とした。

2.3 積層化非線形有限要素解析²⁾

積層化非線形有限要素解析法は、コンクリート版を版厚方向に層状に分割して各層に薄板の有限要素法⁷⁾を適用し、積層化手法を用いることにより弾塑性解析を可能にした手法である。

積層化有限要素法で用いる積層化モデルでは、各層は平面応力状態にあるものとし、図-3に示すコンクリート要素には、各節点が5自由度 ($u, v, w, \theta_x, \theta_y$) を有する長

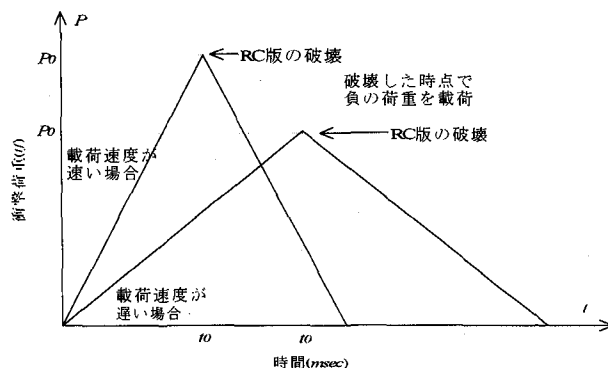


図-2 三角形近似衝撃荷重

表-1 コンクリートの材料特性

コンクリートの種類	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
普通コンクリート	32.5	2.4
高強度コンクリート	101.2	3.8
鋼繊維混入コンクリート	44.1	11.3

表-2 補強筋の材料特性

補強筋	降伏強度 (N/mm ²)	破断ひずみ (μ)	ヤング係数 (N/mm ²)
普通鉄筋	343	50000	2.06×10^5
高強度鉄筋	686	45000	2.06×10^5
FRP筋 Type A	-	7020	1.30×10^5
FRP筋 Type B	-	17000	0.99×10^5

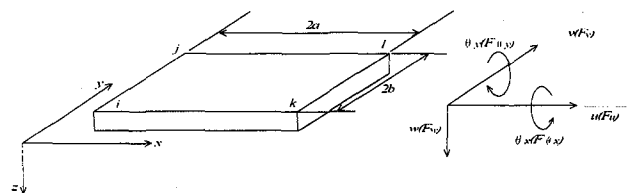


図-3 薄板の曲げ要素

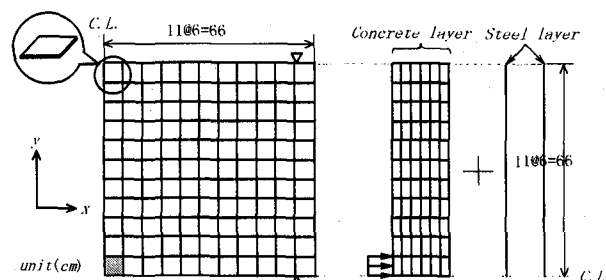


図-4 積層化有限要素モデル

方形平板要素モデルを用いる。また、版上部と下部のコンクリート層間にそれぞれ主筋方向および配力筋方向の補強筋を考慮した補強筋層を挿入する。コンクリート層間に挿入される補強筋層は非常に薄いため、コンクリート層と重なることによる影響はないものと考えられ、そ

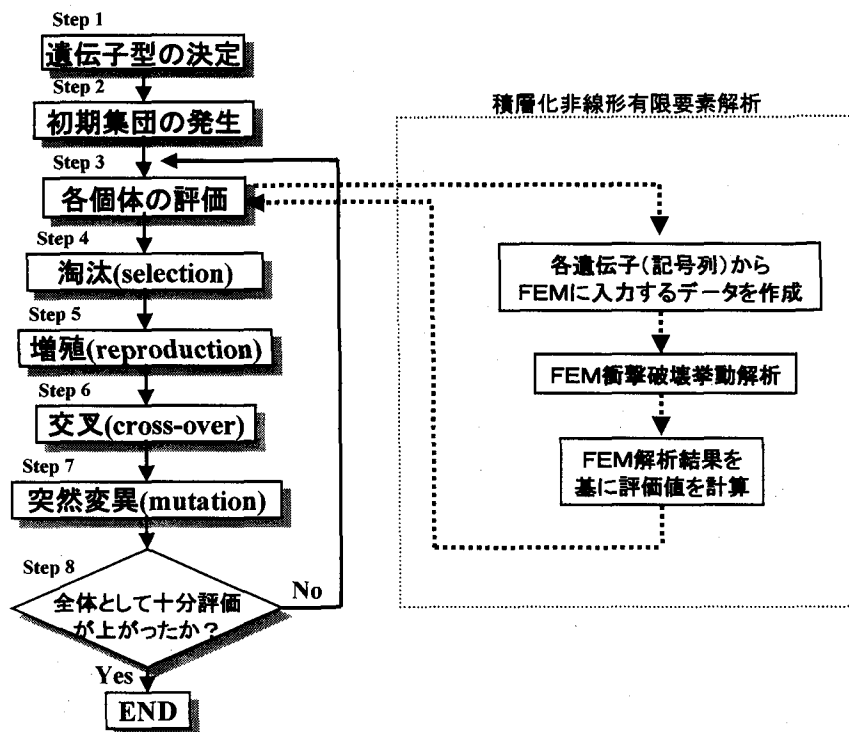


図-5 GAによる処理手順の概要

れにより補強筋層の位置を自由に設定することが可能となる。

本解析では、コンクリートの破壊条件には Ottosen により提案された4パラメータ破壊曲線モデルを用い⁸⁾、動的平衡方程式の解法には Newmark- β 法で、 $\beta=1/4$ とした一定加速度法を用いる。また、解析では対象とするRC版を図-4に示すように版厚方向に層状に6分割、主筋および配筋筋方向に11分割し、そのコンクリート層間に主筋要素と配筋筋要素からなる補強筋層を2層挿入してモデル化を行った。衝撃荷重は版中央部分の斜線部分に等分布荷重としてかかるものとしているため、対称性を考慮してコンクリート版の1/4部分のみの解析を行う。

2.4 GAによる設計支援システム

GAは、生物の遺伝と進化のメカニズムを工学的にモデル化したものであり、生物の進化過程における遺伝的操作、すなわち、個体の遺伝子の選択、交叉、突然変異を模倣した最適化手法である。GAの詳細については、種々の文献^{4), 5), 6)}に述べられているので、ここでは、概略のみ示す。図-5には、本研究で用いたシステムの処理手順を示す。本研究で用いたGAは単純GAであり、淘汰方式は、ルーレット方式とエリート保存方式を組合せた方式を用い、交叉は一点交叉を用いた。

2.5 RC版の制約条件

RC版を設計する際、実際に設計が可能となるように、制約条件を設ける必要がある。また、各材料のパラメー

タを細かく設定すると、施工が困難な設計案が得られる可能性がある。そのため、より実用的な設計案を得るため、本設計支援システムでは、制約条件を以下のように設定した。これらの制約条件は、GAのコーディングの際に、プログラム中で自動的に満たされる。

- ① 積層化非線形有限要素解析法では、補強筋は層として扱って解析を行うため、補強筋の量が重要となり、施工性を考慮して補強筋の配置は等間隔に配置する。
- ② 補強筋層は設定したかぶりコンクリートの中、またはそれを超えてコンクリート版の外側に配置されない。
- ③ 各補強筋層に用いる鉄筋の直径の合計の長さは、かぶりコンクリート分を除いたコンクリート版の厚さより小さい。
- ④ 異なる補強筋層が同時に同じ高さに配置されることはない。
- ⑤ 各補強筋層において、鉄筋の直径×鉄筋の本数に加え鉄筋のあきを考慮するとコンクリート版の幅より小さい。なお、鉄筋のあきは、20mm以上、粗骨材の最大寸法の4/3倍以上、鉄筋の直径以上である⁹⁾。
- ⑥ 補強筋層の方向は、版上部から主筋—配筋筋—配筋筋—主筋とする。
- ⑦ 各補強筋層の主筋・配筋筋ともに同じ種類および同じ形状の補強筋を用いる。
- ⑧ RC版の使用目的により、コンクリート版の厚さの上限と下限を設ける。なお、版上部と下部の補強筋の間にコンクリートを流し込むので粗骨材を考慮にいれ、粗骨材の最大寸法を20mmとする⁹⁾。

表-3 RC版の特性コード一覧表

要素名	パラメータ要素	コード
版厚	11.05(cm)	00
	11.70(cm)	01
	12.35(cm)	10
	13.00(cm)	11
コンクリートの種類	普通コンクリート	00
	高強度コンクリート	01
	鋼繊維混入コンクリート	10
補強筋の種類	普通鉄筋	00
	高強度鉄筋	01
	連続繊維補強筋(TypeA)	10
	連続繊維補強筋(TypeB)	11
補強筋の形状	D6	000
	D10	001
	D13	010
	D16	011
	D19	100
	D22	101
	D25	110
	D29	111
補強筋の本数 (RC版の1/4部分)	3(本)	000
	4(本)	001
	5(本)	010
	6(本)	011
	7(本)	100
	8(本)	101
	9(本)	110
	10(本)	111

- ⑨ かぶりコンクリートの厚さをあらかじめ設定する。
 ⑩ コンクリートの種類は、版上半分と下半分ごとに決定する。
 ⑪ 鉄筋の体積の合計を鉄筋量とし、この鉄筋量を設定する。

2.6 RC版の特性のコーディング

RC版の衝撃解析手法をGAに適用するためには、RC版の特性を2進数にコーディングする必要がある。ここで、RC版の特性とは構成する要素のことで、例えば、鉄筋の種類、本数そして太さやコンクリートの種類、厚さなどのことを示す。なお、各パラメータ要素の要素数は、2進数でコーディングしているため、できるだけ2の累乗になるように設定した。2の累乗にならないパラメータ要素については、残りのコードはすべて致死遺伝子として扱った。RC版の特性のコーディングを表-3に、遺伝子のコーディングの例を図-6に示す。

2.7 RC版の破壊条件の定義¹¹⁾

衝撃荷重の作用下などの動的な場合では、一般的に静的荷重の作用下におけるコンクリート構造物のように破壊基準及び破壊発生時を明確に判断することが困難な場合が多く、構造的な破壊基準に対する明確な定義付けがなされていない現状にある。しかし、コンクリート構造物の耐衝撃性を解析的に評価するためには、解析上で版構造の破壊条件を定義しておく必要がある。

そこで、本解析においては、次のような2つの破壊基

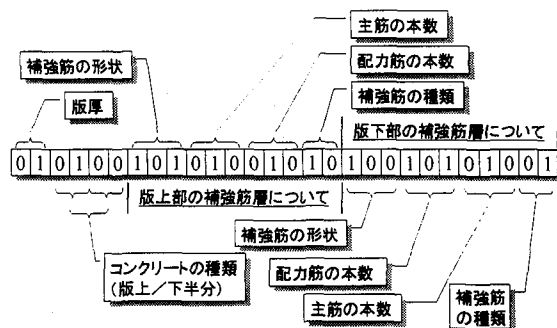


図-6 RC版のコーディング例

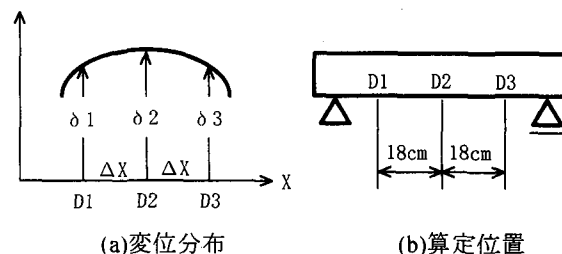


図-7 コンクリート版の破壊時曲率の算定方法

準を設けた。まず第一に、コンクリート要素の圧縮破壊発生時($\epsilon_{cu}=3500\mu$)をコンクリート版の破壊とした。第二に補強鉄筋要素の主ひずみが、破断ひずみ($\epsilon_{su}=45000\mu$)を越えたときの補強筋の破断をコンクリート版の構造的な破壊とした。これは、部材がいずれかの状態に至るとコンクリート版の剛性は著しく低下し、それ以上衝撃作用に対する耐荷力は期待できないと考えられるためである。

2.8 設計支援システムに用いる耐衝撃性の評価指標³⁾

衝撃荷重を受けるRC版は、静的荷重を受ける場合と比べると、慣性力や応力波などの影響により、載荷部分付近に変形や応力が集中するといった複雑な破壊挙動を示す。したがって、RC版の耐衝撃性を評価するためには、局所的な破壊が進展しやすい衝撃荷重下特有の複雑な挙動を評価する評価法が必要となる。そこで、この局所的な破壊性状を定量的に評価するため、本研究では(1)耐荷力の向上効果、(2)変形能低下の抑制効果、(3)局部変形および局部破壊の抑制効果、の3つの目的をもとに、次のように定義される耐衝撃性評価指標を用いて検討を行った。

- ①破壊時衝撃荷重・・・RC版の耐荷力を評価する指標である。衝撃荷重の作用時間が等しい場合には、破壊時衝撃荷重が大きいほど耐衝撃性に優れている。
 ②破壊時変位・・・RC版の破壊時の版中央変位を示す。RC版の変形能を評価する。RC版は小さい変形で破壊に至るよりも、大きく変形した後に破壊に至る方がエネルギーを吸収するという観点から耐衝撃性に優れていると考える。

表-4 R C版モデルの一覧

モデル	版厚 (cm)	R C版上部					R C版下部				
		コンクリートの 種類	補強筋 形状	補強筋本数		補強筋 種類	コンクリートの 種類	補強筋 形状	補強筋本数		補強筋 種類
				主筋	配力				主筋	配力	
RC1	13.00	普通	D-13	14	10	普通	普通	D-13	15	20	普通
RC2	13.00	普通	D-13	3	3	普通	普通	D-13	15	20	普通
RC3	13.00	普通	D-13	14	10	普通	普通	D-13	3	3	普通
RC4	13.00	普通	D-13	14	3	普通	普通	D-13	3	20	普通
RC5	13.00	普通	D-13	3	10	普通	普通	D-13	15	3	普通
RC6	11.05	普通	D-13	14	10	普通	普通	D-13	15	20	普通
RC7	11.70	普通	D-13	14	10	普通	普通	D-13	15	20	普通
RC8	12.35	普通	D-13	14	10	普通	普通	D-13	15	20	普通
RC9	13.00	高強度	D-13	14	10	普通	高強度	D-13	15	20	普通
RC10	13.00	鋼繊維混入	D-13	14	10	普通	鋼繊維混入	D-13	15	20	普通
RC11	13.00	普通	D-13	14	10	高強度	普通	D-13	15	20	高強度
RC12	13.00	普通	D-13	14	10	連続繊維A	普通	D-13	15	20	連続繊維A
RC13	13.00	普通	D-13	14	10	連続繊維B	普通	D-13	15	20	連続繊維B

③全エネルギー・・・破壊の起こる時点までの衝撃荷重～版中央変位関係の曲線で囲まれる面積で求められる。これは、衝撃荷重と版中央変位の両方を考慮した評価指標となる。破壊時までコンクリート構造物が吸収したエネルギーと考えられる。

④たわみ体積・・・無載荷の状態を基準面とし、破壊時におけるRC版の全体のたわみ分布を積分した値(体積)である。RC版の破壊形式が曲げ破壊であれば、版全体が大きくなだらかに変形しているためにたわみ体積は大きくなり、一方、押し抜きせん断破壊の場合は、変形が局部に集中するためにたわみ体積は小さくなると考えられる。

⑤局部変形指数・・・衝撃荷重作用下においては、RC版は局部的に変形した状態で破壊しやすくなる。これを定量的に評価する。図-7に示すように、版中央および版中央から偏心距離 Δx での変位を用いて式(1)によって破壊時曲率($1/R$)を求める。破壊時曲率に含まれる破壊時変位の大小の影響を取り除くために式(2)に示すように破壊時曲率を破壊時変位で除した値を局部変形指数(I_L)と定義する。

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{\Delta x^2} (\delta_1 + \delta_3 - 2\delta_2) \quad (1)$$

$$\text{局部変形指数}(I_L) = \frac{\text{破壊時曲率}(1/R)}{\text{破壊時変位}} \quad (2)$$

これらの指標は、RC版の耐衝撃性の評価に有効であると思われるが、1つの指標のみで耐衝撃性を評価したのでは破壊時におけるコンクリート版の状態を一面的にしかとらえることができず、複雑な破壊挙動を明確に評価することは困難であると考えられる。したがって、これらの指標の中で、重要と思われるいくつかの指標を組合せて耐衝撃性を評価する必要がある。

2.9 耐衝撃性評価関数の検討

本研究では、耐衝撃性評価関数を検討するために、種々の材料条件を変更したRC版モデルに対して解析を行い耐衝撃性の評価を行う。RC1は評価関数の検討における基準として一般的と思われる材料や鉄筋の本数などを設定する。RC2～RC5は、RC1と同じ材料で鉄筋の本数をRC版の上部、下部の配力筋、あるいは主筋を少なくしたモデルをそれぞれ設定する。RC6～RC8は、RC1の版厚をそれぞれ11.05cmと11.7cmと12.35cmと変更したモデルである。RC9～RC13は、RC1をもとにコンクリートの種類を変えたものと、補強筋の種類を変更したものである。表-4に上述RC版モデルRC1～RC15までの特性をまとめて示す。

各モデルに対して、載荷速度を10tf/msecから100tf/msecまでの10tf/msec刻みで設定し、破壊時衝撃荷重、全エネルギー、破壊時版中央変位、たわみ体積、局部変形指数の各指標を求める。図-8～図-12にRC1～RC5に対して得られた各評価指標をそれぞれ示す。また、RC1とRC9～RC13について得られた各評価指標を図-13～図-17に示す。

図-8に示すように、破壊時衝撃荷重は載荷速度が速くなるとともに大きくなっている。これは、載荷速度が速くなるにつれて慣性力の影響が大きくなるためと考えられる。中でも、載荷速度が速くなるにつれて、版下部の鉄筋の本数が多いRC1とRC2の破壊時衝撃荷重は高い値を示している。

また、図-9に示すように全エネルギーは、載荷速度が比較的遅いときには主筋の本数が少ないRC5とRC版下部の補強筋の本数が少ないRC3が高い値を示しているが、載荷速度が40tf/msecよりも速い載荷速度では、版下部の主筋の本数が多いRC1とRC2、RC4が比較的高い値を示している。これは、破壊モードが、曲げ破壊からせん断破壊へと変化するためと考えられる。同様の傾向が、図-10と図-11の破壊時版中央変位とたわみ体積にもみられる。この3つの指標について、各載荷速度ごとに破壊時衝撃荷重と比較すると、同様の傾向を示している。

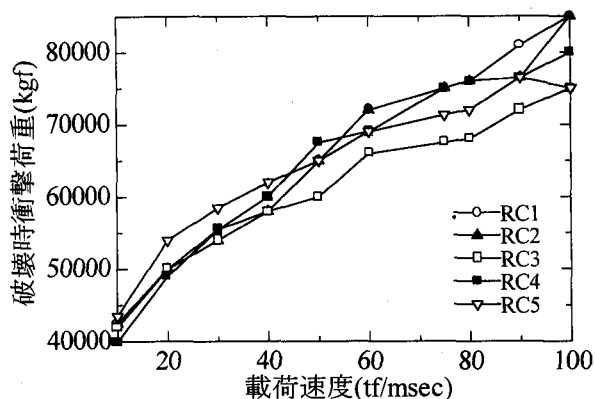


図-8 破壊時衝撃荷重（補強筋の本数変更）

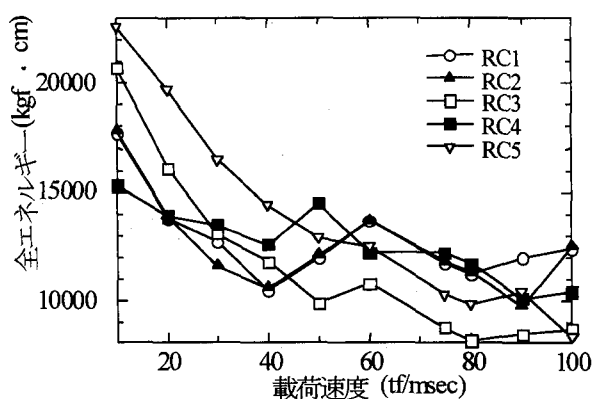


図-9 全エネルギー（補強筋の本数変更）

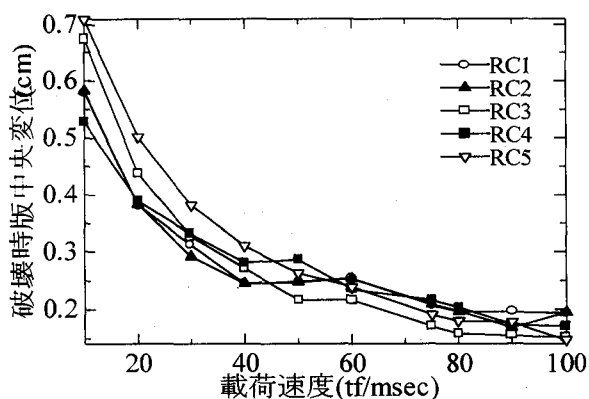


図-10 破壊時版中央変位（補強筋の本数変更）

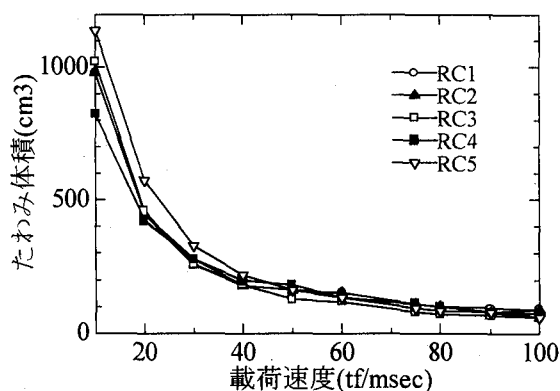


図-11 たわみ体積（補強筋の本数変更）

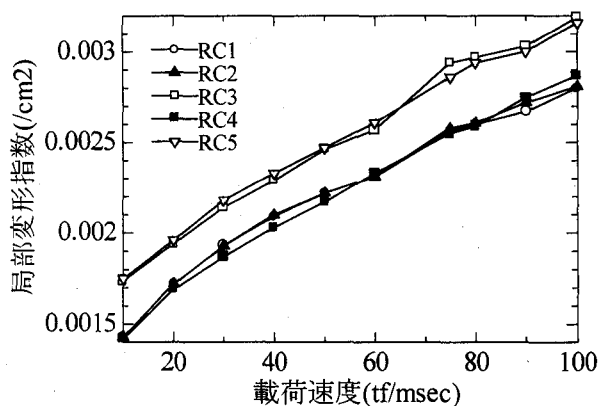


図-12 局部変形指数（補強筋の本数変更）

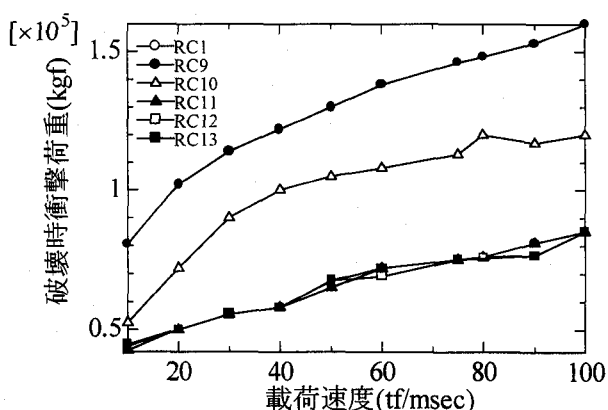


図-13 破壊時衝撃荷重（材料を変更）

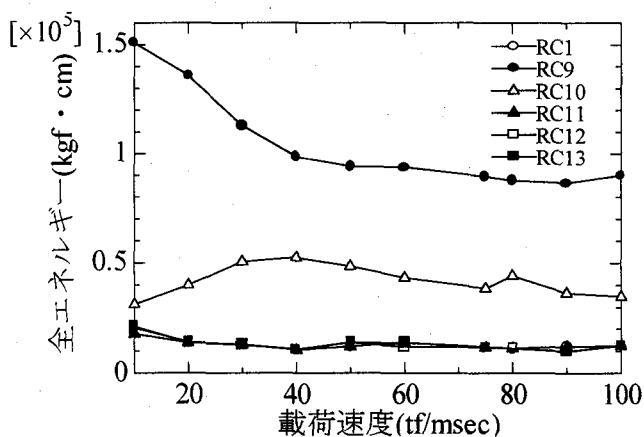


図-14 全エネルギー（材料を変更）

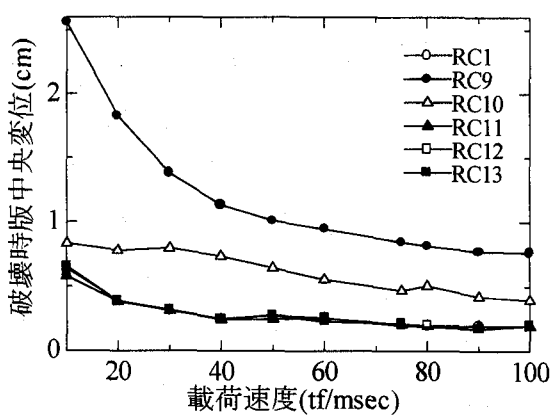


図-15 破壊時版中央変位（材料を変更）

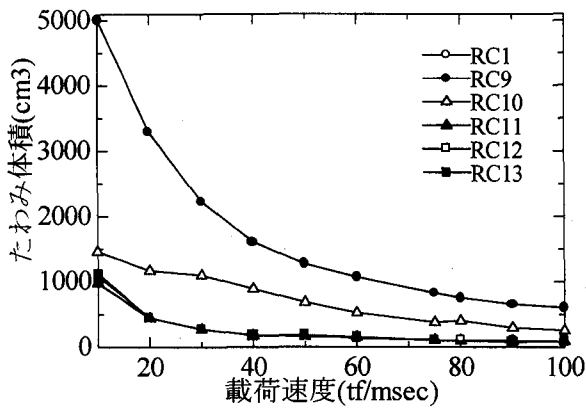


図-16 たわみ体積 (材料を変更)

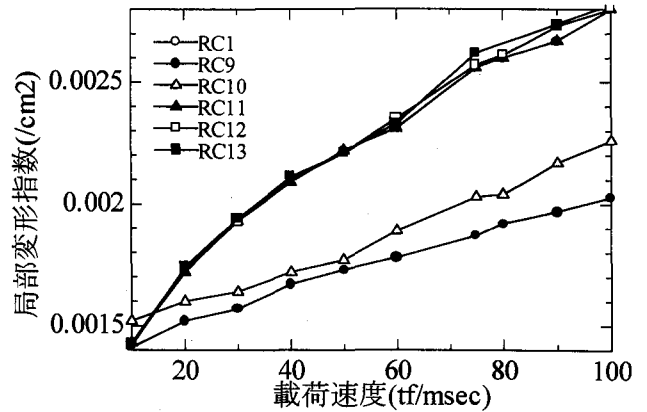


図-17 局部変形指数 (材料を変更)

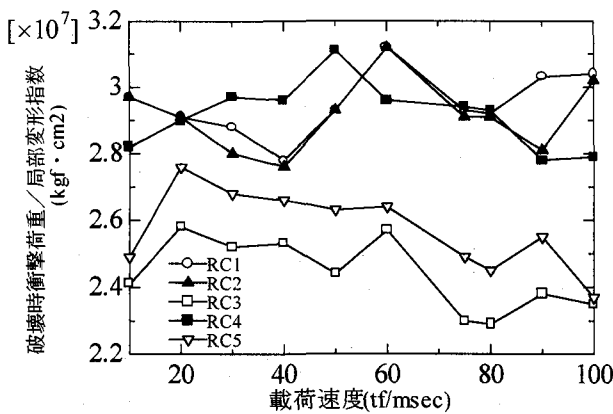


図-18 耐衝撃性評価指標 (補強筋の本数変更)

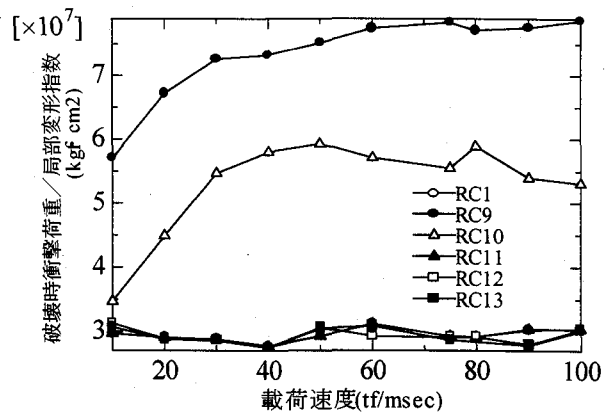


図-19 耐衝撃性評価指標 (材料を変更)

ことが分かる。一方、図-12 に示すように局部変形指数では、版下部の主筋の本数が多いRC1、RC2とRC4は、版下部の主筋の本数の少ないRC3とRC5よりも各载荷速度において低い値を示している。これは、版下部の主筋により、局部変形の進行を抑える効果があることがわかる。図-13 からわかるように、コンクリートの材料を引張強度、圧縮強度とも強いコンクリートに変更したRC9とRC10では破壊時衝撃荷重は高い値を示しており、コンクリート材料を変更した効果が顕著に現れていることが分かる。また、図-14～図-16 に示すように、他の指標においても同様の傾向が現れていることが分かる。図-17 には、コンクリート材料を変更することにより局部変形が抑えられている効果が示されている。

一般的に、RC版は衝撃荷重下で押し抜きせん断破壊モードよりも曲げ破壊モードで破壊した方が望ましいと考えられている。そこで、本設計支援システムでは、RC版の耐衝撃性評価指標として局部的な変形状を評価する局部変形指数とRC版の耐荷性を評価する破壊時衝撃荷重を用いる。この2つの指標を用いて以下に示すような評価関数を提案する。

$$\text{耐衝撃性評価関数} = \frac{\text{破壊時衝撃荷重}}{\text{局部変形指数}} \quad (3)$$

表-5 設計シミュレーション条件の一覧

	目的関数	制約条件
シミュレーション 1	局部変形指数が0.0020で破壊するRC版を設計する。	RC版の重量は、540kgf までとする。
シミュレーション 2	耐衝撃性に優れたRC版を設計する。(式(3))	RC版の最大重量は1000kgf とする。 コンクリート版に挿入される最大鉄筋量は10000cm³とする。

すなわち、破壊時衝撃荷重は大きいもの程良好で、局部変形指数の値は曲げ破壊に近いものほど小さくなる。そのため、耐衝撃評価関数の値は大きいものほど耐衝撃性に優れていることを示すことになる。図-18 および図-19 に、各モデルに対して式(3)の評価関数により得られた値を示す。図-19 において、コンクリートの種類を変えたRC9とRC10では、载荷速度が30tf/msec以上ときには、ほぼ一定の値を示したが、载荷速度が30tf/msecより遅くなると値が小さくなっている。これは、载荷速度が遅くなることで、静的な破壊に近づいているため各材料の特性がよく現れているものと思われる。各RC版モデルの差がこの評価関数に充分現れているので、式(3)により耐衝撃性を評価できると思われる。

表-6 シミュレーション1に対する全通りの解析結果

シミュレーション1	順位	版厚 (cm)	コンクリートの種類	版上部の補強筋			版下部の補強筋			指標値 ($\times 10^{-2}/\text{cm}^2$)
				形状	本数 (本)	種類	形状	本数 (本)	種類	
	1	11.70	鋼繊維混入 コンクリート	D22	8	連続繊維補強筋 TypeB	D16	12	連続繊維補強筋 TypeB	20000249
	2	11.05	高強度 コンクリート	D29	8	連続繊維補強筋 TypeB	D16	8	連続繊維補強筋 TypeB	20001036
	3	12.35	鋼繊維混入 コンクリート	D22	8	連続繊維補強筋 TypeB	D16	8	連続繊維補強筋 TypeB	19998684
	4	11.70	鋼繊維混入 コンクリート	D16	12	連続繊維補強筋 TypeB	D16	12	連続繊維補強筋 TypeA	19998426
	5	11.05	高強度 コンクリート	D13	8	連続繊維補強筋 TypeA	D13	8	連続繊維補強筋 TypeB	19998352
	6	12.35	鋼繊維混入 コンクリート	D19	12	連続繊維補強筋 TypeB	D16	8	連続繊維補強筋 TypeA	20001993
	7	11.70	鋼繊維混入 コンクリート	D13	20	連続繊維補強筋 TypeA	D16	12	連続繊維補強筋 TypeB	1999782
	8	12.35	鋼繊維混入 コンクリート	D19	8	連続繊維補強筋 TypeB	D19	8	連続繊維補強筋 TypeB	19997757
	9	11.05	高強度 コンクリート	D16	16	連続繊維補強筋 TypeB	D13	8	普通鉄筋	1999738
	10	12.35	鋼繊維混入 コンクリート	D16	20	連続繊維補強筋 TypeB	D13	12	連続繊維補強筋 TypeB	20003328

※網掛けは、本設計支援システムにより提示された設計案

表-7 シミュレーション2に対する全通りの解析結果

シミュレーション2	順位	版厚 (cm)	コンクリートの種類	版上部の補強筋			版下部の補強筋			指標値 ($\times 10^{-2}/\text{cm}^2$)
				形状	本数 (本)	種類	形状	本数(本)	種類	
	1	13.00	高強度 コンクリート	D13	12	連続繊維補強筋 TypeB	D16	12	高強度鉄筋	8.358209E+07
	2	13.00	高強度 コンクリート	D13	20	連続繊維補強筋 TypeB	D13	16	連続繊維補強筋 TypeB	8.318479E+07
	3	13.00	高強度 コンクリート	D16	8	普通鉄筋	D16	12	連続繊維補強筋 TypeB	8.308605E+07
	4	13.00	高強度 コンクリート	D16	8	高強度鉄筋	D16	12	連続繊維補強筋 TypeB	8.308605E+07
	5	13.00	高強度 コンクリート	D16	8	連続繊維補強筋 TypeA	D16	12	連続繊維補強筋 TypeB	8.308605E+07
	⋮									
	15	13.00	高強度 コンクリート	D13	8	普通鉄筋	D16	20	連続繊維補強筋 TypeA	8.114856E+07
	16	13.00	高強度 コンクリート	D13	8	高強度鉄筋	D16	20	連続繊維補強筋 TypeA	8.114856E+07
	17	13.00	高強度 コンクリート	D13	12	連続繊維補強筋 TypeB	D16	8	高強度鉄筋	8.106543E+07
	18	13.00	高強度 コンクリート	D16	12	連続繊維補強筋 TypeB	D19	8	普通鉄筋	8.097166E+07
	19	13.00	高強度 コンクリート	D13	8	連続繊維補強筋 TypeA	D16	20	連続繊維補強筋 TypeB	8.089608E+07

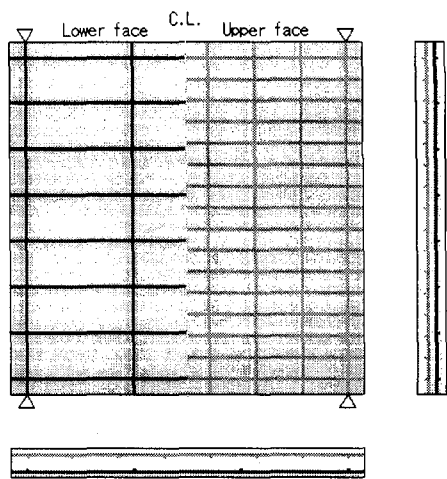
※網掛けは、本設計支援システムにより提示された設計案

3 設計支援システムの検証

3.1 設計支援システムの精度の検証

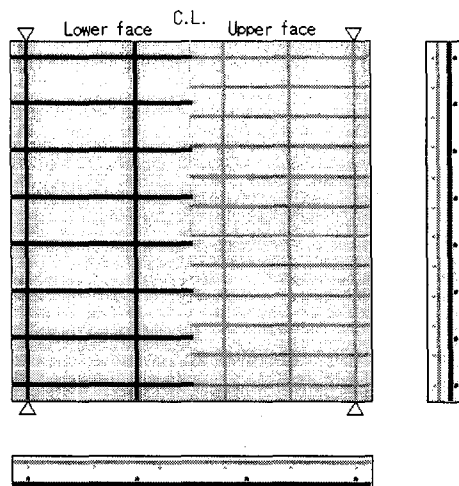
GAを用いた設計支援システムの精度を検証するために、ある制約条件下でRC版モデルに対する解析および設計シミュレーションを行った。全通りの組合せについてRC版の衝撃破壊挙動解析を行うには、膨大な計算量を必要とし、時間的に困難である。そこで、版上部と版下部のコンクリートの材料を統一し、補強筋の形状であ

るD6とD10を致死遺伝子として取り扱うことにより組合せ数を減らしてシミュレーションを行った。また、配力筋の本数は主筋の本数の半分とし、版1/4部分における主筋の本数の選択範囲は、4本、6本、8本、10本とする。このときの組合せは、110592(=4×3×6×4×4×6×4×4)通りとなり、時間的にも充分計算可能である。この110592通りの組合せに対し、衝撃破壊挙動解析を行い、その結果を評価値順に並べたものと、GAによる結果とを比較した。設計シミュレーションにおける目的関数と



版厚 : 11.05cm
 コンクリートの種類 : 高強度コンクリート
 版上部 : D16, 主筋 16 本, 配力筋 8 本
 連続繊維補強筋 TypeB
 版下部 : D13, 主筋 8 本, 配力筋 4 本
 普通鉄筋

図-20 シミュレーション 1 により得られた設計案
(突然変異率 1%)



版厚 : 13.00cm
 コンクリートの種類 : 高強度コンクリート
 版上部 : D16, 主筋 12 本, 配力筋 6 本
 連続繊維補強筋
 版下部 : D19, 主筋 8 本, 配力筋 4 本
 普通鉄筋

図-21 シミュレーション 2 により得られた設計案
(突然変異率 1%)

表-8 GAの計算を複数回行うことにより得られた設計案の全通りでの順位

突然変異率 \ 回数	1 回目	2 回目	3 回目
1%	18 番目	5 番目	94 番目
3%	2 番目	5 番目	2 番目
5%	2 番目	11 番目	34 番目

制約条件を表-5に示す。なお、本設計シミュレーションでは、衝撃荷重の載荷速度を 50tf/msec とし、GA の計算に用いる各パラメータは何回かの試行を行い、経験的に良い値がでたパラメータを採用し、世代数を 100 世代、個体数を 30 個、交叉確率を 100%、突然変異率を 1% とした。シミュレーション 1, 2 に対して、全通りから得られた上位の解析結果をそれぞれ表-6 および表-7 に示す。また、本設計支援システムによりシミュレーション 1 で得られた設計案を図-20 に、シミュレーション 2 で得られた設計案を図-21 に示す。

本設計支援システムによりシミュレーション 1 で得られた設計案は、図-20 に示すような RC 版であり、表-6 の網掛け部分で示すように全 RC 版の中で 9 番目に良い RC 版であった。全通りの組合せ数に対して 9 番目というのは比較的良好な値を示しているといえ、シミュレーション 1 に対して GA は有効であるといえる。次に、シミュレーション 2 では図-21 に示す RC 版が得られ、18 番目により RC 版であり比較的良好な結果が得られている。

GA は確率に基づいて機能している手法であるため、突然変異率を変更したり、1 回だけでなく、GA の計算を複数回計算することにより、精度を上げることができると思われる。問題に適した突然変異率の決定方法は、現在のところ試行錯誤的に求める以外に方法はなく、そ

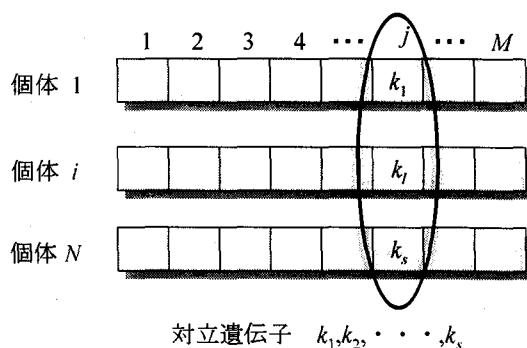


図-22 多様度の概念

こで、シミュレーション 2 に対し、突然変異率を 1%、3%、5% と設定し、それぞれ 3 回ずつシミュレーションを行い、突然変異率の検討を行った。得られた RC 版設計案の順位を表-8 に示す。また、このシミュレーションでの初期収束の様子を表現するために図-22 に示す多様度¹⁰⁾を導入する。

図-22 に示すように、M 個の遺伝子をもつ N 個の個体から構成されている世代があり、個体のとりうる記号、すなわち対立遺伝子が S 個存在するものとする。このとき、個体の遺伝子座 j の情報エントロピー $H_j(N)$ は、式(4)で示される。

$$H_j(N) = - \sum_{i=1}^S (p_{ij} \log p_{ij}) \quad (4)$$

ここでは、 p_{ij} は i 番目の記号が遺伝子座 j に出現する確率であり、次式で表される。

$$p_{ij} = \frac{\text{遺伝子座 } j \text{ に出現した } i \text{ 番目の記号の総数}}{N} \quad (5)$$

表-9 各設計問題における最大鉄筋量と載荷速度の一覧

設計問題	最大鉄筋量(cm ³)	載荷速度(tf/msec)
1	30000	25
2	30000	50
3	30000	75
4	10000	25
5	10000	50
6	10000	75
7	2500	25
8	2500	50
9	2500	75

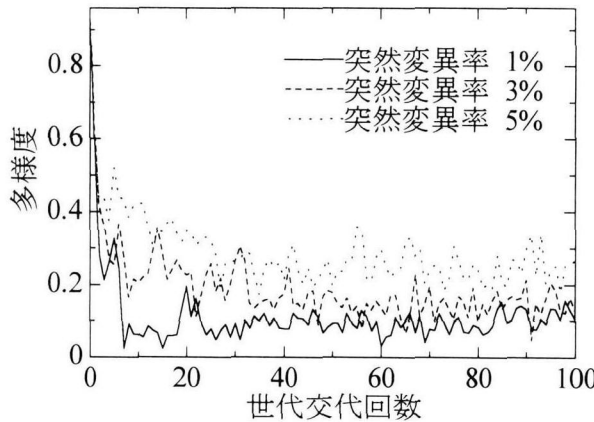


図-23 多様度の推移 (シミュレーション 2)

以上のことから、多様性の平均情報エントロピー $H(N)$ は次式で表される。

$$H(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(N) \quad (6)$$

したがって、式(6)を用いて多様性を計測する。表-8に示すように、突然変異率が 3% のときでは 1% と 5% のときに比べ、比較的良好設計案が求まっている。突然変異率が 1% のときは、3 回目のシミュレーションでは 94 番目となり、1 回目、2 回目と比べ、悪い結果となった。これは、図-23 に示すように、突然変異率が 1% のとき、多様度は 10 世代より早い世代のうちにすでに 0.1 以下となっている。そのため、最初の収束（初期収束）で精度の良い解が得られなかった場合は、精度の高い解が得られにくいと思われる。それに対して、突然変異率が 5% のときは 50 世代あたりまでは 0.2~0.4 の多様度を維持しており、一方、50 世代以降では 0.25 程度の多様度を示しており、ある程度の多様度を維持していることから精度の良い設計案を得られると思われるが、表-8 から分かるように得られた設計案は、順位がかなり異なっており解が不安定と思われる。それに比べ、突然変異率が 3% のときは 3 回の計算の中で得られた設計案の順位は高く、しかもほぼ同等であり、安定的に解が得られていることが分かる。また、多様度は 10 世代より早い世代で初期

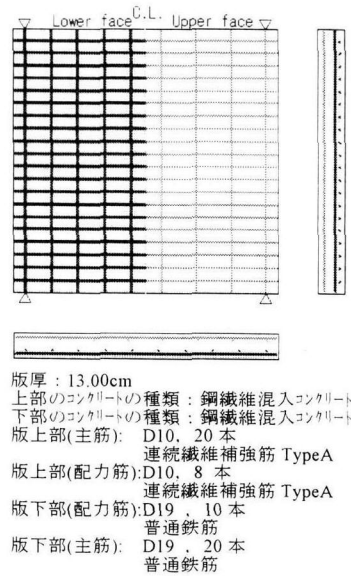


図-24 設計問題 3 に対する設計案

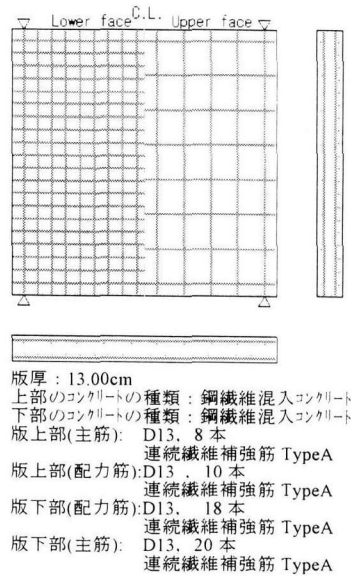


図-25 設計問題 6 に対する設計案

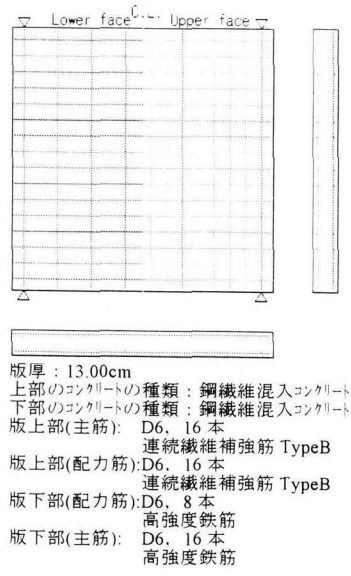


図-26 設計問題 9 に対する設計案

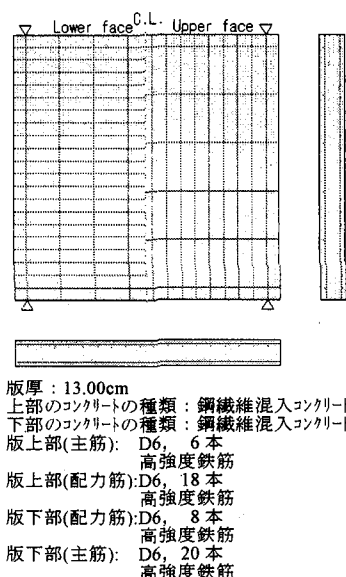


図-27 設計問題8に対する設計案

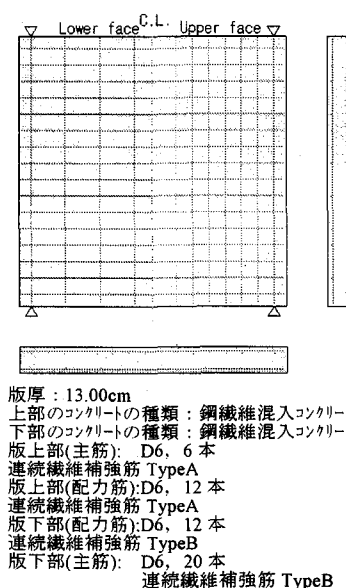


図-28 設計問題7に対する設計案

収束しているものの、40世代以降は0.1~0.2の間で安定している。そのため、1%の時より精度の良い設計案が得られたと思われる。

3.2 設計支援システムにより得られた設計案の検証

ここでは、本設計支援システムにより得られた設計案を検証するため、最大鉄筋量と載荷速度をそれぞれ変えた場合に本設計支援システムにより得られたRC版の設計案を提示する。RC版のコーディングには2.6節で設定したコーディングで行い、突然変異率は3%とした。また、耐衝撃性の評価には、本研究で提案した破壊時衝撃荷重を局部変形指数で除した評価関数を適用する。このときのRC版の最大重量は、1000kgfとし、各設計問題における最大の鉄筋量と載荷速度には表-9に示すも

のをを用いた。

まず、載荷速度が75tf/msecのとき、設計問題3, 6, 9に対して得られた設計案をそれぞれ図-24, 図-25, 図-26に示す。これらの設計問題に対して得られた設計案は、版下部の鉄筋量が版上部より多く、しかも配力筋より主筋の方が鉄筋の本数が多いという特徴を示している。これは、コンクリートは引張に弱い引張応力がかかる版下部に引張に強い鉄筋が多く配置されることにより補強されたものと思われる。また、一般的に配力筋よりも主筋の方が多く配置されるが、その特徴を示しているといえる。

次に、鉄筋量が2500cm³以下のときで載荷速度が異なるとき、つまり、設計問題9, 8, 7で得られた設計案をそれぞれ図-26, 図-27, 図-28に示す。これらの設計案では、版上部よりも版下部の方が鉄筋量が多くなっている。これも、先述の理由からコンクリートの性質上妥当な結果と思われる。また、設計問題7, 8で得られた設計案では、版上部の主筋と配力筋の本数を比較すると、主筋の方が少なくなっている。これは、載荷速度が75tf/msecのときは、主筋と配力筋の本数が等しくなっていることから、載荷速度の違いによる破壊モードの差が現れているためと考えられる。

以上のことから、本設計支援システムにより得られた設計案はほぼ妥当であるといえる。

4 まとめ

本研究では、RC版の耐衝撃設計問題を組合せ最適化問題として捉え、確率的に最適解の探索を行うGAを用いて耐衝撃性に優れたRC版の設計案を提示するシステムの構築を試みた。まず、RC版の耐衝撃性を評価するために、種々のモデルを用いて各評価指標について検討を行い評価関数を提案した。次に、GAを用いることによりRC版のコンクリートの厚さ、種類、鉄筋の本数、太さなどを効果的に組合せることにより得られたRC版の妥当性の検証を行った。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- ① RC版の耐衝撃性を評価するため種々のモデルの各評価指標について検討を行った。その結果、破壊時衝撃荷重を局部変形指数で除した耐衝撃性評価関数を提案し、それにより耐衝撃性を評価することができた。
- ② 種々の突然変異率でGAを複数回ほど計算した。その結果、RC版を対象とした本解析例ではGAの突然変異率を3%としたときに精度の安定した設計案が得られることがわかった。
- ③ GAは確率に基づいて機能しているために、既往の研究と同様に、複数回の計算を行い得られた最適解を比較することで、複数個の解候補の中から、より精度の高い解を得ることが確認できた。

- ④ GAとRC版の積層化非線形有限要素解析法を組合せることで、耐衝撃性に優れたRC版の設計案を得ることができ、設計問題に対してGAは有効であることが確認された。

最後に今後の課題としては、現実的な耐衝撃性に優れたRC版の設計案が得られるように耐衝撃性評価指標をいろいろな方向から検討し、評価関数の設定を行うとともに、制約条件やGAにおけるパラメータの設定などを詳細に検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 千々岩浩巳, 三原徹治, 太田俊昭: GAによる鋼管杭基礎構造の最適配置決定法に関する研究, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.97-105, 1996.10.
- 2) Miyamoto, A., King, W. M., Fujii, M.: Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, *ACI Structural Journal*, Vol.88, No.4, pp.411-419, 1991.
- 3) 宮本文穂, 石橋照久, 三戸雅文: コンクリート版構造の耐衝撃性評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1605-1618, 1994.3.
- 4) 荻原将人: ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1994.
- 5) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993.
- 6) 石田良平, 村瀬治比呂, 小山修平: 遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版社, 1997.
- 7) Zienkiewicz O.C.著, 吉識雅夫 監訳: マトリックス有限要素法, 培風館, 1984.
- 8) W.F.Chen, D.J.Han: *Plasticity for Structural Engineeris*, Springer-Verlag, New York, 1988.
- 9) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会(委員長 長瀧重義): 平成8年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 社団法人 土木学会, 1996.3.
- 10) 森一之, 築山誠, 福田豊生: 多様性をもつ免疫的アルゴリズムの提案と負荷割当問題への適用, 電気学会論文誌C, 113巻10号, 1993.
- 11) Miyamoto, A., King, W. M., Fujii, M.: Analysis of Failure Modes for Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Loads, *ACI Structural Journal*, Vol.88, No.5, pp.540-545, 1991.

(1998.9.18 受付)