

# 耐久設計指針(案)に基づく耐久性評価への遺伝的 アルゴリズム(GA)の適用の試みについて

小山 健<sup>1</sup>・長崎宏明<sup>2</sup>・中島孝満<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 信州大学教授 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野市若里 500)

<sup>2</sup>長野県諏訪建設事務所 (〒392-0021 諏訪市上川 1-1644-10)

<sup>3</sup>長野技研株式会社 設計部設計課 (〒390-1241 松本市新村 2326)

今回土木学会コンクリート委員会コンクリート標示方書改訂委員会耐久性・耐久設計部会により改訂された「コンクリート構造物の耐久設計指針(案)1995」<sup>1)</sup>に基づいた耐久設計を実行するに際して、耐久指数が環境指数を下回る場合には、何らかの耐久性向上対策が必要となる。その場合、どの耐久性小項目に関するポイントを獲得するかは、施工性あるいは経済性等の制約の中で適切に選択して行く必要が生じる。ここでは、耐久性向上対策によって耐久性ポイントを獲得する場合に必要な費用を設定し、費用が最小になりかつ必要となるポイントの確保をするためにはどの小項目に対してその向上対策を行うべきかを、離散的組み合わせ最適化問題として定式化し遺伝的アルゴリズムを適用し解を求めたものである。

**Key Words :** economic, durability design, concrete structure, JSCE subcommittee proposition

## 1. まえがき

土木学会コンクリート委員会コンクリート標示方書改訂委員会耐久性・耐久設計部会(以下、耐久設計部会とする)は、耐久性の確保・向上を考慮したコンクリート構造物の設計すなわち耐久設計の指針を作成し「コンクリート構造物の耐久設計指針(案)1995(以下指針案)<sup>1)</sup>」として公表している。これには、耐久設計の概念、耐久性に対する検討方法および環境指数・耐久指数ポイント等が明示されており、コンクリート構造物の耐久設計の検討と確保のガイドラインとしての性格を有している。構造物が満たすべき要件として、メンテナンスフリーな耐久性がますます重要になりつつある現況に、適切に対応できる設計指針として期待されるものである。

一方、わが国の公共投資を取り巻く環境は厳しい状況にあり、特に経済性の制約から経費の縮減が現実目標となり、今後さまざまな問題点と困難が予想される<sup>2),3)</sup>。したがって、一方では耐久的な構造物を目指すことが設計のひとつの目標としても、経済的な構造物であることも要求される。

本研究では、指針案で提案された耐久設計書式に基づき、耐久性小項目の各ポイントを確保するための費用を設定し、所定の耐久性ポイントを得るための総費用が最

小になるようにするためには、どの耐久性小項目を採用すべきかをGAを適用して求めようとするものである。

## 2. 耐久設計指針(案)による耐久性設計書式

### (1) 耐久性設計書式

耐久設計部会による設計書式によると、耐久指数と環境指数の大小により、部材各部において次式が成立する場合そのコンクリート構造物は耐久的であると判定される。

$$T_p \geq S_p \quad (1)$$

ここで、 $T_p$  = 耐久指数、 $S_p$  = 環境指数 である。耐久指数 $T_p$ は設計ひび割れ、コンクリート材料の品質、コンクリート工、鉄筋工・型枠工・支保工などの要因(以下、テクノロジーとする)ごとの耐久性への影響を定量的に評価した耐久性ポイント $T_{pi}$ より算定するもので、一般に次式で表される。

$$T_p = 30 + \sum_i T_{pi} \quad (2)$$

また、環境指数 $S_p$ は構造物が置かれる環境条件および要求されるメンテナンスフリーの期間を考慮して定め、一般に次式で表される。

$$S_p = S_0 + \sum (\Delta S_p) \quad (3)$$

ここで、 $S_0$  は標準的な環境条件における環境指数値を示し、50年間メンテナンスフリーを目標とする場合では一般に100であり、メンテナンスフリー期間を特に長くする場合あるいは逆に短くする場合には $S_p$ の値をそれぞれ増減するものとする。 $\Delta S_p$ は塩分や凍結融解作用の影響が激しい環境条件における環境指数の増分値である。耐久設計の目標は、式(1)が満足され得ない状況が生じた場合には、不足分のポイントに対して、いくつかのテクノロジー小項目に対して耐久性向上対策を施し、式を満足させることになる。

## (2) 最適化問題としての定式化

しかし、例えば不足分が20ポイントとし、その不足分を確保するのに、どのテクノロジー小項目に対して耐久性向上対策を施したら良いかを決めるには施工性・経済性等のさまざまな制約があるので、何が適切であるかはさまざまな考え方があるとしても、そこには何らかの適切さが要求されるであろう。

この場合どのテクノロジー小項目に耐久性向上対策を施すかは数多くの組み合わせが存在する。そこで本研究では、テクノロジー小項目のポイントを確保するための向上性対策費用を考慮することにする。すなわち向上対策を施す各テクノロジー小項目に費用を設定し、不足となるポイントを確保するのに費用が最小になるような向上対策が最善な対策であるとし、また、場合によっては費用はかかっても耐久性が改善され得ない場合も想定し、それを最悪な場合とし、2つのシナリオについて以下のように最適化問題として定式化する。

$$\begin{aligned} \text{最善な状態: } & \text{minimize } \sum \text{COST}(i, j) \\ & \text{subject to } \sum T_p(i, j) \geq S_p \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{最悪な状態: } & \text{maximize } \sum \text{COST}(i, j) \\ & \text{subject to } \sum T_p(i, j) \leq S_p \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\text{COST}(i, j)$ 、 $T_p(i, j)$ はそれぞれテクノロジー要因  $i$  の小項目  $j$  に要する費用およびポイントを表す。

耐久性に関する向上対策を施す要因を大別すると設計、材料および施工に関するものとなる。本研究では、指針案中の特に施工性に関する要因であるコンクリート工に関する耐久性ポイント  $T_p(6, j)$  と鉄筋工・型枠工・支保工  $T_p(7, j)$  に関して式(4)、式(5)を実行することにした。この理由として指針案【解説】とまたすでに指摘したように<sup>4),5)</sup>施工性が耐久設計におよぼす影響が他に比べて比較的大きいと考えたからである。

耐久性の小項目ポイントは与えられているものを用いるものとし、その確保に関する費用は表-1のように仮

定した<sup>6)-9)</sup>。ただし、これらは1日50立米を単位としてコンクリートを打設する場合にかかる費用とした。

費用の単価設定としてはコンクリート1立方メートル当たり約1)運搬・打込み・締固め4000円/ $\text{m}^3$ 、2)表面仕上げ・養生2,000円/ $\text{m}^3$ 、3)鉄筋加工・組立13,000円/ $\text{m}^3$ 、4)型枠工14,000円/ $\text{m}^3$ 、5)支保工10,000円/ $\text{m}^3$ と仮定した。なお、コンクリート工に関する耐久性ポイント  $T_p(6, j)$  のうち、ポイントが計算式から得られるものは除外しており、養生とその期間に関しては十分に実行されるものと仮定した。

これらの費用はもちろん確定したものではない。したがって費用に関する感度分析を実行し、全体的に向上対策としてどのような耐久設計になるのかの定性的な傾向を調べた。

以上よりこの問題はテクノロジー小項目と費用を離散変数として処理すると典型的な離散最適化問題としてのKP(Knapsack Problem)問題<sup>10)</sup>となっている。そこでこの問題の解法に遺伝的アルゴリズムを利用した<sup>11)-16)</sup>。

## 3. 計算例および考察

いま遺伝的アルゴリズムを適用するにあたり表-1の中にあるように、各小項目をストリングで表現するために、 $X_1$  から  $X_{31}$  として割り当てた。こうすることで、例えば施工主任技術者の項目  $X_1$  から  $X_4$  は合計4項目であるので2ビットで表現できる。いまこの2ビットに0または1の乱数を与え、かりにビット列が{00}と表現された場合には項目  $X_1$  を向上対策として採用し、ポイント25を得るために費用が64かかるということの意味するとした。またかりに{01}の場合は  $X_2$  を採用することになる。

同様に  $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  をそれぞれ1ビットで表現しそれぞれのビットが1であればその項目を採用し、0であれば採用しないとした。 $X_8$  から  $X_{11}$  は2ビット、 $X_{12}$  から  $X_{15}$  も2ビット、 $X_{16}$  は1ビット、 $X_{17}$  から  $X_{19}$  は2ビット、 $X_{20}$  から  $X_{24}$  までの各項目はそれぞれ1ビット、 $X_{25}$  から  $X_{27}$  は2ビット、 $X_{28}$  は1ビット、 $X_{29}$  から  $X_{31}$  は2ビットで表現した。したがって、ストリングの全長は22ビット列で表現されることになる。

ここで問題となるのは例えば『受入れ』小項目  $X_5$  および『運搬・打込み・締固め』小項目  $X_7$  のような場合である。これらはそれぞれ1ビットが与えられているので、ビットは{0}または{1}を必ずとらねばならない。ビットが{1}となる場合には元請技術者非常駐、工事指揮者非常駐となり、その場合のポイントは-5で与えられており、その時の費用は0と考えても良いが、ビットが{0}の場合はどちらも常駐ということになり、この場合のポイントは0となるが費用は仮定しなければならない。ここではそれらの費用を正確に評価するのは困難であるが、

表-1(a) Tp(6,j)とその費用 (単位:千円)

	小項目	Tp(6,j)	COST
『施工主任技術者』			
X <sub>1</sub>	特 A	25	64
X <sub>2</sub>	A	15	47
X <sub>3</sub>	B	5	38
X <sub>4</sub>	C	-10	31
『受入れ』			
X <sub>5</sub>	受入れ場所にて元請け技術者を常駐させない場合	-5	0
X <sub>6</sub>	製造工場における各バッチの材料の計量印字記録によって配合を現場到着時点で直ちに確認する場合	5	62
『運搬・打込み・締固め』			
X <sub>7</sub>	工事指揮者が打込み場所に常駐しない場合	-5	0
X <sub>8</sub>	工場で型枠振動機による締固めを行う場合	10	100
X <sub>9</sub>	現場で型枠振動機と内部振動機を併用する場合	5	65
X <sub>10</sub>	内部振動機により通常の締固めを行う場合	0	35
X <sub>11</sub>	内部振動機による締固めを行わない場合	-25	0
『表面仕上げ・養生』			
X <sub>12</sub>	被膜養生剤を使用する場合	5	50
X <sub>13</sub>	通常の表面仕上げを行う場合	0	40
X <sub>14</sub>	はり、柱等でタンピングを行わない場合	-5	0
X <sub>15</sub>	表面積の大きいスラブ部材でタルシコを行わない場合	-15	0

表-1(b) Tp(7,j)とその費用 (単位:千円)

	小項目	Tp(7,j)	COST
『鉄筋の加工』			
X <sub>16</sub>	加工形状を確認する原寸の定規を用いる場合	5	46
『鉄筋の組立』			
スぺーサの種類:			
X <sub>17</sub>	モルタル, セラミックスぺーサ等	0	215
X <sub>18</sub>	プラスチックぺーサ	-5	77
X <sub>19</sub>	鋼製ぺーサ	-10	108
スぺーサの数:			
X <sub>20</sub>	水平鉄筋に4個/㎡以上使用しない場合	-10	--
X <sub>21</sub>	鉛直鉄筋に2個/㎡以上使用しない場合	-10	--
結束線:			
X <sub>22</sub>	防錆した結束線を用いる場合	5	100
X <sub>23</sub>	すべての結束線をかぶりより内側へ折り曲げる場合	5	0
『型枠工』			
X <sub>24</sub>	型枠締付け材の金属部分がかぶりコンクリート内に残っている場合	-10	0
コーン穴後埋め材の種類:			
X <sub>25</sub>	プラスチック材	-5	80
X <sub>26</sub>	モルタル	0	170
X <sub>27</sub>	無収縮剤別, 別製プレキャストコン	5	240
X <sub>28</sub>	防錆したインサートを使用する場合	5	180
『支保工』			
X <sub>29</sub>	工場または製作ヤードで繰り返し使用する支保工	5	198
X <sub>30</sub>	上記以外の鋼製支保工	0	170
X <sub>31</sub>	木製支保工	-5	142

『施工主任技術者』小項目を参考にして1万円と2万円の2種類を考慮した。

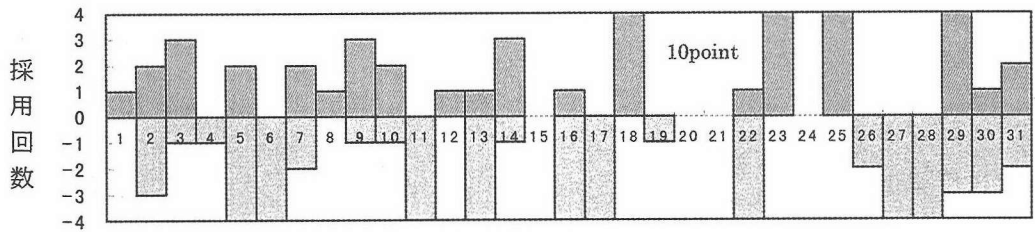
いま、一世代の個体数を72とし、交叉・選択・突然変異を繰り返すことで進化させ、30世代までの目的関数 $\sum COST(i, j)$ の収束状況から解を求め、その解を一応の最善な場合および最悪な場合の最適解と見なした。

コンクリート工 Tp(6, j)および鉄筋工・型枠工・支保工 Tp(7, j)について向上対策を行い、それぞれ10-50ポイントを確保するために、解が得られた段階での、各小項目が採用された回数を、図-1(a)から(e)に載せた。2つのシナリオの解を区別するため、図中プラス側には最善な状態で採用された回数を、マイナス側には最悪な状態で採用された回数をそれぞれプロットした。

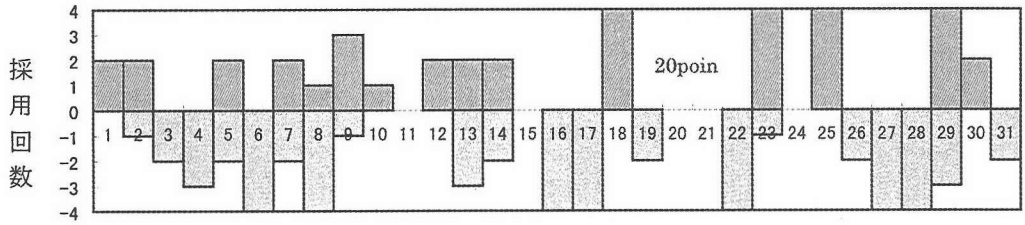
これらの図は、各小項目の費用がここで仮定したものとかげ離れている可能性も考慮して、ある注目するひと

つの小項目以外の費用は仮定値とし、注目している小項目の費用を0.5倍、1.0倍(=仮定値)、1.5倍、2.0倍の4種類の範囲で変動させ、それを小項目のすべての組み合わせについて実行した場合の各小項目が採用された回数を表している。したがって採用回数が4の場合には、その小項目は費用の変動に限らず常に採用されたということを表わしている。そのような小項目が、プラス側にある場合には、向上対策を実行する場合の重要度が高い項目と考えられるが、マイナス側の場合には、そのような小項目はなるべく採用しないほうが有利であると考えられるのである。

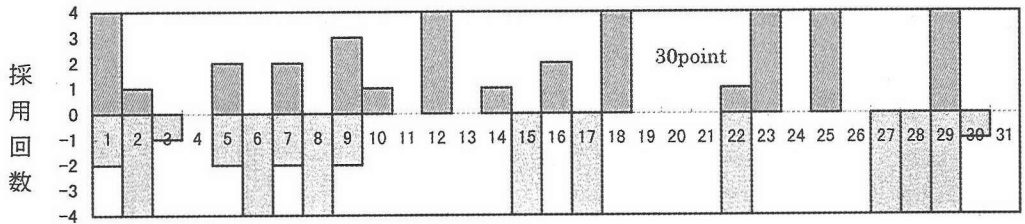
なお表-1中—は、スぺーサの種類を準備する上でX<sub>20</sub>, X<sub>21</sub>を確保するのに十分な費用をX<sub>17</sub>からX<sub>19</sub>の部分で評価することで、これらの条件をクリアできるものと考えたことにした。



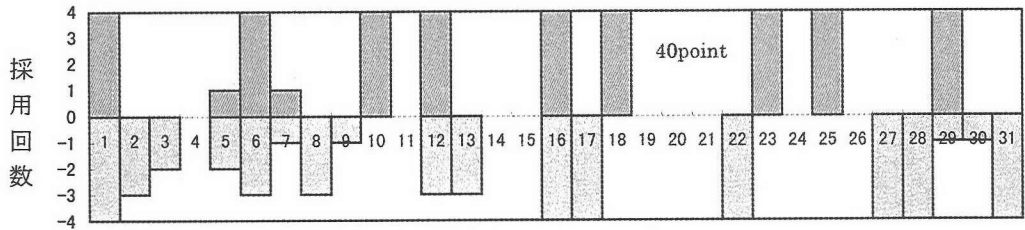
(a)



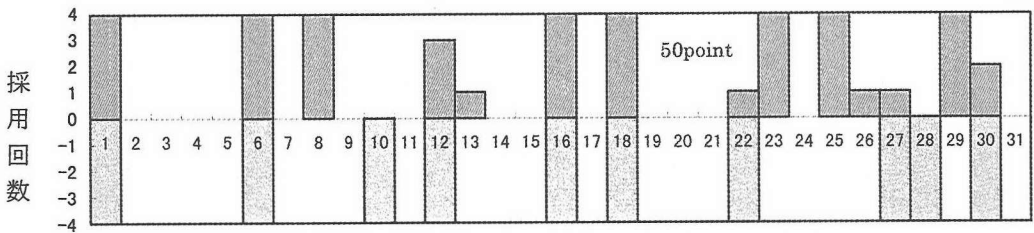
(b)



(c)



(d)



(e)

図-1 向上対策に必要なポイント確保のためのテクノロジー項目とその採用回数

解の例として、20 ポイントの向上対策を実行した場合の最善状態でのビット列とその時のポイントを示す。

ビット→{0 0}0{0}0{1}0{1}0{1}0{0}1{0}0  
 ポイント→ 25 0 0 -5 5 -5 0 -5 0 0  
                   {0}{1}{0}{0}0{0}0{0}0  
                   0 5 0 -5 0 5

これから、『施工主任技術者』には特Aを採用し、『受入れ』では元請技術者常駐で配合の確認はせず、『運搬・打込み・締固め』では工事指揮者非常駐で型枠振動機と内部振動機を併用し、『表面仕上げ・養生』では被膜養生剤を使用し、『鉄筋の加工』では原寸定規を使用せず、『鉄筋の組立』にはプラスチックスペーサを用い、スペーサの数は水平・鉛直鉄筋ともに十分用い、防錆した結束線は用いずまた結束線のすべりはかぶりより内側へ折り曲げ、型枠締付け金属部分はかぶり内に残さず、コーン穴後埋め材にはプラスチック材を用い、防錆したインサートは使用せず、工場または製作ヤードで繰り返し使用する支保工以外の支保工を用いる、ということで20ポイントを獲得することが費用的に見て最善策だということを表わしている。

この例は、『施工主任技術者』特Aを注目する小項目として費用の変動を考慮した場合の解のものであり、このようなことをすべての小項目を対象として、その採用回数を表わした図-1(a)から図-1(e)を参考にして、不足ポイントを得る場合の最善および最悪策に対して、どのような向上対策を採用すべきかまたは避けるべきかをまとめると以下ようになる。

a)10ポイントを確保する場合

『施工主任技術者』は $X_2, X_3$ , 『受入れ』は $X_5$ , 『運搬・打込み・締固め』は $X_7, X_9, X_{10}$ , 『表面仕上げ・養生』は $X_{12}, X_{14}$ , 『鉄筋の組立』は $X_{18}, X_{23}$ , 『型枠工』は $X_{25}$ , 『支保工』は $X_{29}, X_{30}, X_{31}$ , となる。

なお、最も効率的なテクノロジー項目の選択モデルは、 $X_2, X_5, X_9, X_{13}, X_{18}, X_{23}, X_{25}, X_{29}$ と考えられる。ここで、 $X_9$ より $X_2$ を、 $X_{14}$ より $X_{13}$ を選択するのは主にポイントの確保と施工性を考慮したためである。

逆に、たとえ10ポイントは確保できても経済的にみて $X_2, X_5, X_8, X_{11}, X_{13}, X_{16}, X_{17}, X_{22}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}$ の各項目は採用すると総合的にみて不利になるものと考えられる項目である。同様に、

b)20ポイントを確保する場合

『施工主任技術者』は $X_1, X_2$ , 『受入れ』は $X_5$ , 『運搬・打込み・締固め』は $X_7, X_9$ , 『表面仕上げ・養生』は $X_{12}, X_{13}, X_{14}$ , 『鉄筋の組立』は $X_{18}, X_{23}$ , 『型枠工』は $X_{25}$ , 『支保工』は $X_{30}, X_{31}$ となる。この場合の最も効率的なテクノロジー項目の選択モデルは、 $X_1, X_5, X_7, X_9, X_{13}, X_{18}, X_{23}, X_{25}, X_{29}$ と考えられる。項目 $X_4, X_6, X_8, X_{16}, X_{17}, X_{22}, X_{27},$

$X_{28}, X_{29}$ の各項目は経済的に見て不利な選択となる。30~50ポイントについても同様である。

以上より、確保すべき耐久性ポイントが40ポイントを超えるあたりから、選択すべきテクノロジー項目が限られてくるとともに、経済的にも費用の増加が見込まれる。したがって、表-(1a), (1b)に関するテクノロジー項目からのみ40ポイントを超えるような向上対策は、できることなら避けるようにすることが、得策と考えられる。

4. 耐久設計事例

本研究での具体的適応例として、文献1)付録-2「コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)と指針(案)による耐久指数の計算例(以下指針計算例)」にある、ケース3 RCボックスカルバート側壁中央の例をとりあげて、向上対策例とした。

1)ケース3 RCボックスカルバート側壁中央の例

指針計算例の表-5から表-9によると、このケースの $Tp(6, j)$ と $Tp(7, j)$ 以外のテクノロジー項目で確保できる耐久指数は63ポイントである。環境指数は100ポイントであるから、何らかの向上対策を含めて確保しなければならないポイントは、37ポイントとなる。このうち $Tp(6, j)$ の小項目「最大打込み速度」で10ポイントが確保されているので、必要となるポイントは27ポイントとなる。したがって、 $Tp(6, j)$ と $Tp(7, j)$ の2つのテクノロジー項目で確保するポイントを30ポイントとする。これより、図-1(c)を参考にして、まとまりの項目ごとに、以下のようなテクノロジー小項目を採用することが、経済的に有利なポイント確保の方法と考えられる。

まず『施工主任技術者』は特Aを採用し(+25point), 『受入れ』は非常駐(-5 point)で非確認(0 point), 『運搬・打込み・締固め』は工事指揮者常駐(0 point), 現場で型枠振動機と内部振動機を併用し(5 point), 『表面仕上げ・養生』では被膜養生剤を用い(5 point), 『鉄筋の加工』には原寸定規を用いず(0 point), 『鉄筋の組立』のスペーサの種類としてプラスチックスペーサを用い(-5 point), その数は水平、鉛直とも十分に使用し(0 point), 結束線はすべての結束線をかぶりより内側へ折り曲げ(+5 point), 『型枠工』は締付け材の金属部分をかぶりコンクリート内に残さず(0 point), コーン穴後埋め材にはプラスチック材を用い(-5 point), 防錆したインサートは使用せず(0 point), 『支保工』には繰り返し使用する支保工を使用する(+5 point)ということで30ポイントを確保することになる。

ただしこの解は、あくまでも費用の最小化という条件の下でのものであり、現場の施工性などを考慮したものではない。したがって運搬・打込み・締固め』のテクノロジー小項目の「現場で型枠振動機と内部振動機を併用

する」で5ポイント(費用65)を確保することは一般には困難と考えられる。したがってこの場合には、通常の現場で行われていると考えられる「内部振動機により通常の締め固め」を行い(0 point, 費用35), その代わり『鉄筋の加工』でテクノロジー小項目を「原寸定規を用いる」(+5 point, 費用46)にしたほうが費用は増加するが、より現実的な向上対策だと考えられる。

## 5. まとめ

本研究は、土木学会コンクリート委員会耐久性部会による「コンクリート構造物の耐久設計指針(案)」に基づいた耐久設計を実行する場合、向上対策で必要となるポイントごとにみてどのようなテクノロジー項目について耐久性向上対策を実施することが、有利または不利となるかを、テクノロジー項目の費用を大まかに与えることで評価した。向上対策で確保しなければならないポイントが多くなるほど、特定のテクノロジー項目が選択されることが多くなるので注意が必要となる。

ただしここで考えた費用は必ずしも確定したものではなくまた、ここで取り扱ったテクノロジー項目は、主として施工性に関係した項目のみであり、解は定性的な傾向を表わすに過ぎない。

## 参考文献

- 1) コンクリート委員会耐久性設計小委員会：コンクリート構造物の耐久設計指針(案)、コンクリート・ライブラリー第82号、土木学会、1995.11.
- 2) 例えば シリーズ 公共工事を支えるシステム考：土木学会誌、

- Vol.82,1997.2.から1997.11.まで.
- 3) 阿部賢一：公共事業費の削減について、土木学会建設マネジメント研究論文集, Vol.5, pp49-58, 1997.
- 4) 小山 健, 土屋宏信：部分安全係数を用いたコンクリート構造物の耐久性設計について、土木学会論文集 No.484/V-22, pp.87-96, 1994.2.
- 5) 花田潤治, 小山 健：コンクリート構造物の部分安全係数を用いた耐久性の確保について、土木学会中部支部研究発表会, V-61, 1997.3.
- 6) 建設省土木工事積算基準：土木工事積算研究会, 建設物価調査会, 建設行政出版センター, 1993.4.
- 7) 積算資料：建設物価調査会, 1996.9.
- 8) 土木工事の実行予算と施工計画改定3版：財団法人建設物価調査会, 1996.7.
- 9) 建設物価：建設物価調査会, 1996.9.
- 10) 例えば北野宏昭：編：遺伝的アルゴリズム, 産業図書, pp.135-140, 1993.6.
- 11) 特集遺伝的アルゴリズム：計測と制御, 第32巻, 第1号, pp.1-81, 1993.1.
- 12) 安居院猛, 長尾智晴：ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, 1995.3.
- 13) 米沢保雄：遺伝的アルゴリズム, 森北出版, 1993.10.
- 14) 萩原将文：ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1994.9.
- 15) John, H. Holland：Adaptation in Natural and Artificial Systems, A Bradford Book, The MIT press, 3rd edition, 1994.
- 16) David, E. Goldberg：Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesely Publishing Co., Inc, 1989.

(1998.3.25 受付)

## APPLICATION OF GA TO THE ESTIMATION OF DURABILITY BASED ON THE PROPOSED SPECIFICATION BY JSCE CONCRETE DURABILITY DESIGN RESEARCH WG

Ken KOYAMA, Hiroaki NAGASAKI and Takamitsu NAKAJIMA

Economic design scheme of durable concrete structures is proposed in this paper based on the publication in 1995 by JSCE research working group on durability design for concrete structures. According to the publication, the durability format is given that the durability index should be greater than the environmental index. The durability index is taken to be 100 in normal design condition. If the index is less than 100, some technology points are improved to ensure the index greater than or equal to 100. In order to improve that, the value evaluation is developed here. The scheme proposed here is modeled and solved as the combinatorial optimum design problem.