

(8) 遺伝的アルゴリズムによる連続桁RC床版の打設順序決定

DETERMINATION OF THE LAYING SEQUENCE
FOR A CONTINUOUS GIRDER REINFORCED CONCRETE FLOOR SYSTEM GENETIC ALGORITHMS

夏秋義広*、 向台茂**、 保田敬一***、 古田均****

Yoshihiro NATSUAKI, Shigeru MUKANDAI, Keiichi YASUDA and Hitoshi FURUTA

*工博 片山ストラテック 製造一部 (〒551 大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

** 片山ストラテック 橋梁設計部 (〒551 大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

*** ニュージェック 土木第2部 (〒542 大阪市中央区島之内 1-20-19)

****工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569 高槻市霊仙寺町 2-1-1)

Previously the sequence for site laying a continuous steel girder reinforced concrete Floor system has been determined in a trial-and-error method by an experienced person. This is because determining an optimal laying plan requires a great deal of structural Analysis and its evaluation, so it is difficult to check all possible combination. In recent year Genetic Algorithms(GA) have attracted attention as a technique for solving combinatorial optimization problem with discrete design variables and a discontinuous objective function, and this research is an application of these GA to the problem of determining the laying sequence for a continuous girder RC floor system. The purpose of this problem is to minimize a function which is a linear combination of the number of working days, number of seams and the deflection error. The design variable is the laying day for each panel. After presenting the problem in the form of GA operation, numerical results are presented to 3-span continuous box girder having 33 slab panels.

Key Words: Genetic Algorithms, Combinatorial Optimization, Discrete Design Variable

1. まえがき

現場打ちコンクリート床版の打設順序決定は、これまで「床版工事設計施工の手引き¹⁾」などを参考に、経験者により試行錯誤的に求められていた。これは、最適な打設計画を決定するには多大の構造解析とその評価を要求されるため、実際問題として可能な組合せ全てについてチェックすることが不可能に近いためである。そこで、本研究では、組合せ最適化問題の一解法として遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm、以下GAという) を、連続桁RC床版の打設順序決定問題に適用することを試みたものである。

本報告は、連続桁RC床版の打設順序決定プロセス概説の後、本問題の離散的組合せ最適化問題への定式化およびGAプログラミングの内容について述べ、実際に施工された3径間連続桁を対象にGAを用いて数値計算を行った結果について報告するものである。

2. 連続桁RC床版の打設順序決定プロセス

鉄筋コンクリート床版を有する橋梁の床版コンクリート打設計画は一般に、橋梁形式、床版構造、1日当りのコンクリート打設可能量等を考慮して決定される。

連続桁RC床版の打設計画に際しては、図-1に示すように、たわみの大きい径間の中央部より打設し、負の曲げモーメントの生ずる中間支点付近はコンクリートに生ずる引張応力度を考慮して、できるだけ後の方で打設するのが一般的である。このとき、各施工段階のコンクリート打設日は、先行打設されたコンクリートに発生する引張応力度が許容値以下となるように設定される。

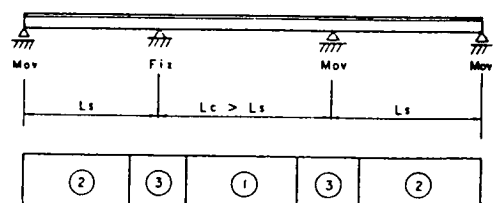


図-1 3径間連続桁の打設順序例

コンクリートの許容引張応力度は材令が大きいほど高いため、単純に考えると十分に間を置いた打設計画とすれば問題のないところである。しかしながら、打設日の間隔を大きくするとコンクリートの合成効果が増すため、最終たわみが計画たわみと異なり許容誤差の範囲を超える恐れが生ずる。また、工費の面から施工日数はできるだけ小さいのが望ましい。従って、実際の打設計画では、床版コンクリートの許容引張応力度を満足できる範囲で最終打設日が最も早くなるように各施工段階のコンクリート打設日が決定される。

打設回数は、1日当りのコンクリート打設量、すなわち一回に打設できるパネル数により制限される。橋梁の規模が大きく、一日当りのコンクリート打設量が相対的に小さい場合、必然的に打設回数が多くなるため最適な打設計画を決定することはかなり煩雑な作業となる。また、最終たわみに及ぼす影響を考慮すると左右対称に打設するのが望ましいが、1回の打設を分割すると打ち継目数が増加するという問題がある。

このように、連続桁RC床版の打設計画に際しては、相反する複数の価値基準を満足しながら最適な打設計画（打設回数、打設順序および打設間隔）を決定する必要がある。しかしながら、ある1ケースの打設計画を計算する場合でも各打設段階における構造解析とその評価を要求されるため、可能な組合せの全てをチェックすることは実際問題として困難である。このような場合、ある限られた解析回数で工学的に有意な解が得られれば、実用的であると思われる。従って、本研究では、多点探索法の一つであるGAを連続桁RC床版の打設順序決定問題に適用することを試みたものである。

3. 離散的組合せ最適化問題への定式化

線形結合したものを考える。制約条件には、コンクリート床版の引張応力度、格点たわみ値および1日当りコンクリート打設量を考慮した。設計変数は各パネルの打設日（離散数値）である。

本研究の離散的組合せ最適化問題は、従って以下のように定式化される。

$$\text{目的関数: } \text{OBJ}(i) = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3 \rightarrow \min i \quad (1)$$

$$\text{制約条件: } g_1(i) = \sigma_j - \sigma_a \leq 0 \quad (j=1 \sim J) \quad (2)$$

$$g_2(i) = \delta_j - \delta_a \leq 0 \quad (j=1 \sim J) \quad (3)$$

$$g_3(i) = V_k - V_a \leq 0 \quad (j=1 \sim J) \quad (4)$$

$$\text{設計変数: } 1 \leq D_1 \leq 16 \text{ day} \quad (l=1 \sim L) \quad (5)$$

ここに、 i : 設計番号、 f_1 : 最終打設日、 f_2 : 打ち継目数、 f_3 : たわみ誤差、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: 重み、 σ_j : 格点 j のコンクリート引張応力度、 σ_a : コンクリート許容引張応力度、 δ_j : 格点 j の最終たわみと計画たわみとの差、 δ_a : キャンバーの許容誤差、 V_k : 第 k 回目のコンクリート打設量、 V_a : 1日当りのコンクリート打設可能量、 D_1 : パネル l の打設日、 J : 格点数、 K : 打設回数、 L : パネル数。

数値計算に際しては、式(1)の目的関数中の f_1, f_2, f_3 のスケールを揃えるために、各々の中央値で除した値を用いる。また、打設完了後に計画高より低い出来高（逆キャンバー状態）となるのは好ましくないため、たわみ誤差 f_3 に関しては、許容値以内であっても最終たわみが計画たわみより大きい場合には誤差の値を3倍する。

4. GAによるプログラミング

原問題は制約条件付きの最小値問題であるため、GAの適用に際し外点ペナルティ法を用いて無制約問題に変換する²⁾。

$$\Phi(i) = \text{OBJ}(i) + \gamma \sum_{m=1}^3 \max[g_m, 0] \quad (6)$$

ここに、 γ : ペナルティ係数、 m : 制約条件式の種類数。

GAでは適応関数が要求される。適応関数としては種々考えられるが、プログラミングが簡単な次式を用いる。

$$\text{FIT}(i) = 1/\Phi(i) \quad (7)$$

ここで、 $\text{FIT}(i)$ 、 $\Phi(i)$ はそれぞれ設計番号 i の適応関

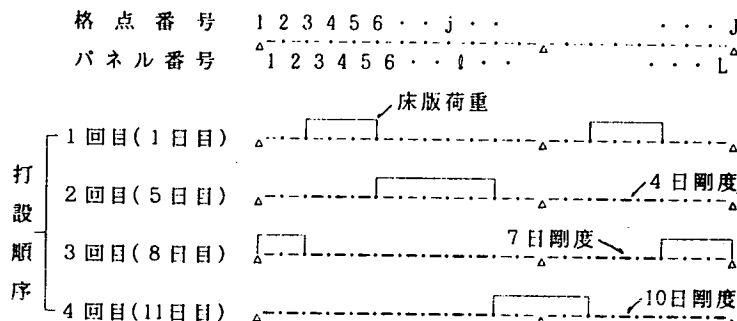


図-2 打設順序決定問題の例

数および外点ペナルティ関数である。

図-2および式(6)で与えられた問題をGAで解く場合、設計変数をどのようにストリングで表現するかを決めなければならない。本研究では、図-3に示すように各パネルの打設日を2進数表現して1組としたストリングを用いる。打設日は通常の連続桁では16日を上限としておけば適応上十分である。この場合、1パネルの打設日を2進数表現するには4ビットが必要となる。1ストリングは、従って4Lビットで表される。この1ストリングが1ケースの設計(打設方法)を表すことになる。

設計変数 = D₁, D₂, D₃, D₄, D₅, D₆, D₇, D₈, D₉, D₁₀, D₁₁, D₁₂, D₁₃, D₁₄, D₁₅, D₁₆ ... D_L ... 1個
 打設日 = 8, 8, 1, 1, 1, 5 ... 8 ... 1個
 ストリング = (1000-1000-0001-0001-0001-0101 ... 1000) ... 4Lビット

図-3 打設日のストリング表現

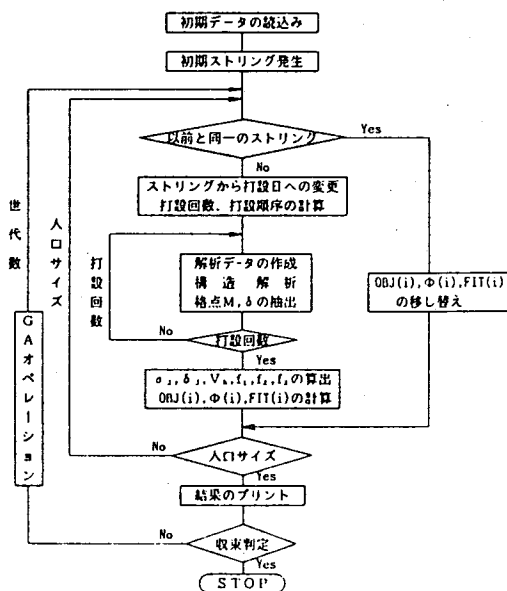


図-4 GAの計算フロー

構造解析には平面骨組み問題として変形法のプログラムを用いる。従って、1ケースの設計に対し、例えば図-2の例では4回の構造解析が要求されることになる。この時、部材剛度および断面係数の値は、既に床版コンクリートの打設されている部材では材令に応じた合成効果を考慮する必要がある。例えば、第3回目(8日目)

の解析においては、パネル3、6はそれぞれ7日目、3日目のN値を算出しなければならない。また、これらの部材のコンクリートの許容引張応力度も同様に、材令の影響を考慮して、それぞれ7日強度、3日強度の値を用いる必要がある。

GAオペレーターには淘汰、交叉、突然変異を用いる。淘汰はルーレットの戦略を、交叉は1点交叉を、突然変異は1ビットの0, 1を置換する、いわゆる単純GA³⁾を手始めとして解析を行うこととした。

GAによる計算フローを図-4に示す。単純GAでは、交叉や突然変異を受けず親の遺伝子が次世代にそのまま引き継がれる個体も少なくない。本問題の場合、解析部分の計算負荷が大きいため、同一のストリングの場合には解析を省略して、演算時間の短縮を図るようにしている。

5. 数値解析例

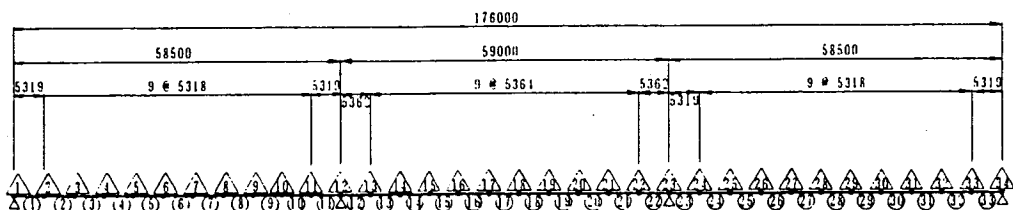
5.1 解析モデル

数値解析例として、図-5に示す3径間連続箱桁のRC床版打設順序決定問題を取り上げる。本橋の断面図を図-6に、構造諸元を表-1に示す。また、箱桁の断面構成を表-2に、打設日に応じた床版コンクリートの鋼への換算ヤング係数比N値と許容引張応力度を表-3に示す。

数値計算に際し、目的関数、制約条件、GAパラメータに用いる諸定数などは表-4のように設定した。

また、本例題のパネル数が多いため、初期ストリングをランダムに発生させると、全てのパネルで打設日がばらばらとなり、GAオペレーターでも遅々として改善されないことが予想される。従って、以下の手順により同一打設日が連続するパネル(ブロック)を有する初期ストリングを人為的に発生させる。

- ①同一打設日が連続するパネル数(N)を設定する。
 - ②ランダム関数により1~Nまでの数字を1つ選ぶ。
 - ③その個数の連続パネルを同一打設日とし、ランダム関数にて打設日を決める。
 - ④全パネル数(=33)となるまで、②~③を繰り返す。
 - ⑤全人口数(=100)となるまで、②~④を繰り返す。
- ここでは、Nの値を5および7として解析を行った。



注記: △=格点番号、○=部材(パネル)番号

図-5 数値計算の対象構造(3径間連続箱桁)

表-1 構造諸元

橋	長	176.0m
支	間	割
格	点	数
部材数(パネル数)		33
桁高×桁幅		2.5×2.2m
床版有効幅×厚		472.5×23cm
ハ	ン	チ
床版荷重強度		3.1t/m

表-2 断面構成

断面	断面長(m)	材質	to	E.Rib	tl	L.Rib	tw
1	6.500	SS41	11	5-150*12	10	2-150*12	10
2	7.500	SW50Y	13	5-150*14	11	2-150*14	11
3	20.000	SW50Y	15	5-150*14	15	2-150*14	11
4	8.600	SW50Y	13	5-150*14	11	2-150*14	11
5	8.200	SS41	10	5-150*12	10	5-150*12	11
6	5.200	SW50Y	14	2-150*14	15	5-150*14	11
7	5.000	SW50Y	21	2-150*14	19	5-150*14	11
8	5.400	SW50Y	15	2-150*14	15	5-150*14	11
9	8.600	SW50Y	12	5-150*12	12	5-150*12	11
10	26.000	SS41	10	5-150*12	10	2-150*12	10
11	8.600	SW50Y	12	5-150*12	12	5-150*12	11
12	5.400	SW50Y	16	2-150*14	15	5-150*14	11
13	4.800	SW50Y	21	2-150*14	19	5-150*14	11
14	5.400	SW50Y	15	2-150*14	15	5-150*14	11
15	8.000	SS41	11	5-150*12	10	5-150*12	11
16	9.300	SW50Y	13	5-150*14	11	2-150*14	11
17	20.500	SW50Y	15	5-150*14	15	2-150*14	11
18	6.100	SW50Y	13	5-150*14	10	2-150*14	11
19	6.900	SS41	11	5-150*12	10	2-150*12	10

表-4 数値計算上の諸定数

目的関数	中 央 値	f_1	10日
		f_2	6ヶ所
		f_3	7mm
	重み係数	α_1	0.1
		α_2	0.8
α_3		0.1	
制 約 条 件		σ_a	表-3
		δ_a	-5-15mm
		V_a	100m ²
ペナルティ係数		γ	10 ²
GA パラメータ	人口数(個体数)		100
	ストリング長		132
	交 叉 確 率		0.5
	突 然 変 異 確 率		0.1

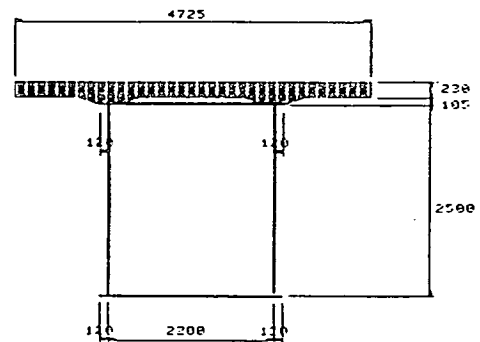


図-6 断面図

表-3 床版コンクリート強度

間隔 (日)	N値	引張応力 (kg/m ²)
1	24	2.7
2	18	4.7
3	15	6.6
4	14	7.7
5	13	9.0
6	12	10.0
7	11	11.0
8	11	11.0
9	11	12.4
10	10	13.0
11	10	13.7
12	10	14.5
13	9	15.2
14	9	15.8
15	9	16.5

5. 2 単純GA

同一打設日が連続するパネル数 $N=5$ の場合の結果を図-7および図-8に示す。図-7を見てみると、適応関数の最大値は134世代に出現しており、その後500世代までこの値を超えることがない。また、平均値に関しても170世代付近からはほぼ横ばいとなっており、何らかの解に到達したように見受けられる。しかしながら、図-8を見てみると、最適解に到達したとは見なし難い。打設ブロックが思った以上に散らばっており、局所解に陥ったようである。

次に、 $N=7$ の場合を示すと、図-9および図-10のようである。早くも5世代目で $N=5$ の場合より適用関数値の大きい解が得られており、適用関数最大値は219世代目で出現している。また、図-10より、打設ブロックも比較的良好にまとまっており、 $N=5$ の場合より望ましい解であるといえる。しかしながら、端部2パネルを12日目に打設したり、最終打設日が16日と大きく、まだ実用解が得られたと言い難い。

このように、単純GAでは上手く解に到達しないことが分かった。

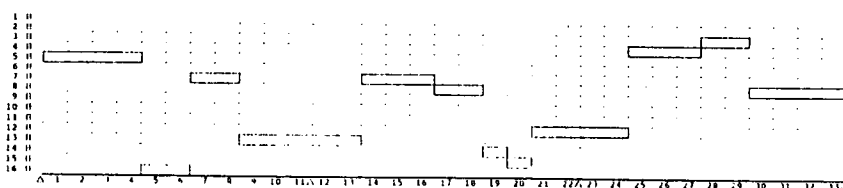


図-8 初期ストリングのブロック生成による解 (N=5)

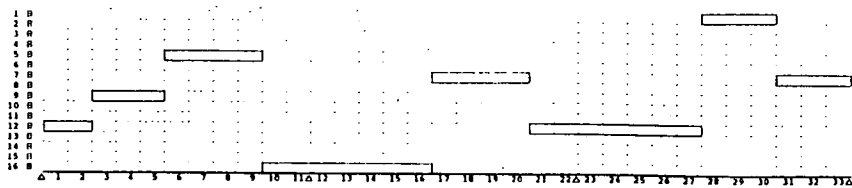


図-10 初期ストリングのブロック生成による解 (N = 7)

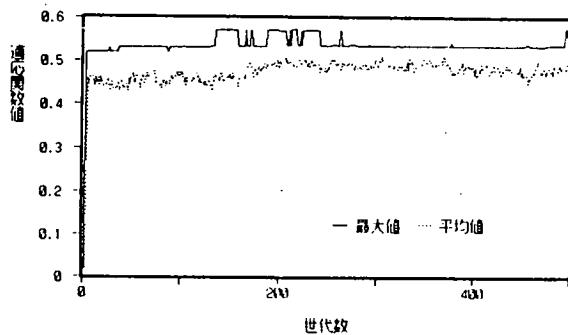


図-7 初期ストリングのブロック生成による収束状況 (N = 5)

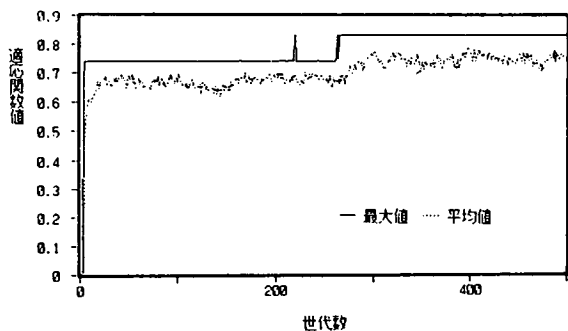


図-9 初期ストリングのブロック生成による収束状況 (N = 7)

5. 3 GAオペレータの改良

単純GAではうまく行かないため、本問題に合うようにGAオペレータを改良してみる。GAオペレータの改良の効果をみるため、初期ストリング作成時に各々のパネルの打設日はランダムに発生させる。

まず、淘汰をルーレット戦略からエリート戦略に変更する。すなわち、ルーレット戦略では適用関数値最大の個体が壊され、再び元のレベルまで戻るのに十数世代を経ている場合があり、計算効率が悪い。従って、各世代の適用関数値が最大値を示す個体は淘汰に拘わらず無条件に残し、交叉、突然変異に引き継ぐことにした。

次に、新しい突然変異の概念を導入する。本問題では、パネルの打設日がある程度まとまってきたら、1ビットを変更するだけでは打継目数が増えることになるため適応関数値が増加しない。このことが、局所解に陥る原因であると考えられる。従って、同一の打設日を一度に変更できるように、以下の手順で示される突然変異を導入する。

最小打設日

ST1 = 8, 8, 8, 4, 4, 11, 11, 11, ..., 4, 6, 6, 6, 6

↓ 全体に3日平行移動

ST2 = 5, 5, 5, 1, 1, 8, 8, 8, ..., 1, 3, 3, 3, 3

図-11 打設日全体の平行移動要領

- ① 2進数ストリングを10進数に戻す。
- ② 変更するパネルナンバーを乱数で決定する。
- ③ 変更打設日を乱数で決定する。
- ④ そのパネルの打設日と同一の打設日のパネル全てを変更打設日に変える。

この新しい突然変異を、今までの突然変異と合わせて用いることにする。

また、図-8をみてわかるように、必ずしも初日から打設をスタートしない場合がある。例えば、図-11に示すST1とST2のように打設間隔が同一であれば、式(1)の目的関数のうち、打ち継目数(f_2)およびたわみ誤差(f_3)が同一であるため、制約条件を満足しつつST1からST2へと途中数段階を経て解が改良されることは殆ど不可能である。これを改善するため、打設日全体を平行移動させるサブルーチンを作成した。

以上のGAオペレータの改良を行い、目的関数の重みおよびペナルティ係数が解に及ぼす影響を調査するためパラメータ解析を行った。解析結果を表-5および表-6に示す。表-5に示すパラメータ以外の諸定数値は、表-4と同一である。表中、CASE-1~CASE-3は単目的とみなせる程度に目的関数の重みを調整したものである。CASE-4~CASE-6はペナルティ係数の大きさを $10^1 \sim 10^3$ と変化させたもので、この時の目的関数の重みは線形結合された多目的の目的関数に及ぼす各目的関数値の影響がほぼ同一となるよう、CASE-1~CASE-3の結果に基づいて、式(8)~式(10)で求めた。

$$\alpha_1 = \text{OBJ}(1) / \text{OBJ}(1+2+3) \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \text{OBJ}(2) / \text{OBJ}(1+2+3) \quad (9)$$

$$\alpha_3 = \text{OBJ}(3) / \text{OBJ}(1+2+3) \quad (10)$$

ここに、OBJ(1)~OBJ(3)はそれぞれCASE-1~CASE-3の目的関数の値を示し、適用関数(FIT)の逆数として求めた。OBJ(1+2+3)はOBJ(1)~OBJ(3)の合計である。

本解析モデルは、実際に施工された橋梁を対象としているが、その際に経験者が解析・決定した打設計画では、

表-6 各ケースの打設順序

CASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
	第1経間											第2経間											第3経間										
1	4	4	4	4	5	5	3	3	3	5	5	6	6	6	4	3	2	2	5	5	2	6	6	2	2	2	1	4	4	1	1	1	1
2	5	5	5	5	5	2	2	8	8	8	8	8	8	2	2	2	7	7	7	7	7	7	7	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3
3	4	6	8	6	7	7	6	5	2	7	16	15	13	6	13	1	14	13	8	8	13	14	14	14	7	14	7	7	8	8	8	1	
4	8	8	5	5	5	2	2	2	8	8	8	7	7	2	2	6	6	7	7	7	7	8	7	1	1	1	6	6	4	6	6	6	
5	2	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3	3	3	5	5	2	2	2	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	1	1	1	1	
6	12	12	12	1	5	5	5	1	1	1	12	12	12	2	2	1	7	9	9	9	9	9	9	9	4	4	4	5	5	5	1	1	2

表-5 パラメータ解析結果

CASE	α_1	α_2	α_3	γ	FIT	OBJ	世代数
1	0.990	0.005	0.005	10^2	1.645	0.608	340
2	0.005	0.990	0.005	10^2	1.004	0.996	860
3	0.005	0.005	0.990	10^2	3.065	0.326	295
4	0.315	0.516	0.169	10^1	0.700	1.428	469
5	0.315	0.516	0.169	10^2	1.134	0.882	371
6	0.315	0.516	0.169	10^3	0.664	1.507	477

表-7 混合法による解析結果

CASE	α_1	α_2	α_3	N	FIT	OBJ	世代数
7	0.315	0.516	0.169	5	1.213	0.824	330
8	0.315	0.516	0.169	7	1.348	0.742	325
9	0.100	0.800	0.100	7	1.289	0.776	189

最終打設日は8日、打ち継ぎ目数は4ヶ所である。表-5および表-6より、CASE-1では、最終打設日が6日と最も小さい値が得られている。しかしながら、打ち継ぎ目数が14ヶ所と多い。CASE-2では、打ち継ぎ目数が6ヶ所と改善されており、最終打設日も8日と妥当な結果が得られている。ただし、CASE-2では解の収束状況が悪く、適用関数最大値を得るのに860世代を要した。

CASE-4~CASE-6の解析結果より、ペナルティ係数の大きさは本問題に関しては $\gamma=10^2$ 妥当であると思われる。CASE-5では、CASE-1とCASE-2を折衷したような解が371世代目で得られた。

改良GAオペレータに対し設定されたパラメータを用い、同一打設日が連続するパネルを有する初期ストリングを人為的に発生させて解析を行った。解析結果を表-7および表-8に示す。

表中、CASE-7とCASE-8はそれぞれ、CASE-5にN=5およびN=7で初期ストリングのブロック生成を行ったものである。CASE-8の結果より、適用関数および収束までの世代数ともにCASE-5より若干ではあるが改善されている。また、N=5よりN=7の結果の方が優れていると云える。CASE-9は打ち継ぎ目数に関する重みを大きくしたケースである。CASE-9（最終打設日=7

日、打ち継ぎ目数=5ヶ所）では、CASE-5あるいはCASE-8より最終打設日は1日多いものの打ち継ぎ目数が1ヶ所少なく、実際計画（最終打設日=8日、打ち継ぎ目数=4ヶ所）とほとんど同様の打設順序が得られている。すなわち、実際の打設順序は打ち継ぎ目数に重きを置いた計画であると云える。

6. あとがき

本研究は、連続桁RC床板の打設順序決定問題にGAの適用を試みたものである。GAは、離散変数からなる組合せ最適化問題への有効な手法として脚光を浴びているが、組合せ数が多い場合には単純GAでは上手く行かないことが多い。本問題の場合もGAオペレータに改良を加え、実用解を得ることができた。実際問題へのGA適用に際しては、問題に応じた適切なコーディングおよびGAオペレータの開発が必要である。

なお、本研究は土木学会関西支部平成5年度共同研究グループ「土木構造物の知識情報処理に関する調査研究」（代表者：三上市蔵）のGA4ワーキンググループでの研究⁴⁾に基づいたもので、二宮隆史（セントラルコンサルタント）、家村剛（NKK）の各氏の助力を得たことを付記する。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会編：床版工事設計施工の手引き、平成2年5月
- 2) 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, 1993.7
- 3) Goldberg, D. E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC., 1989.
- 4) (社)土木学会関西支部平成5年度共同研究グループ：土木構造物の知識情報処理に関する研究報告書, pp. 110-129, 1994.

表-8 混合法による打設順序

CASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
	第1経間											第2経間											第3経間										
7	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	9	9	9	9	9	9	6	6	6	8	8	8	8	8	8	
8	2	2	2	2	2	1	1	4	4	4	4	4	4	4	1	1	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	
9	1	1	1	1	1	1	4	7	7	7	7	7	7	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	