

# コンクリート工事の施工ナビゲーションシステムの開発

## 初期欠陥発生危険度を用いたコンクリート施工計画の照査

近松 竜一

川西 貴士

入矢 桂史郎

高橋 敏樹

(本社ハノイハイウェイ工事事務所)

## Development of Evaluation System for Concrete Construction

### Evaluation of Concrete Construction Plan using Risk of Initial Defects

Ryuichi Chikamatsu

Takashi Kawanishi

Keishiro Iriya

Toshiki Takahashi

### Abstract

This paper describes the concept of a support system for making an optimal construction plan for concrete work. A construction plan is important for preventing initial defects like rock pockets causing cracks. In this system, risk of initial defects is used to check the construction plan. Intermediate risk points are calculated from input data, and then risk of initial defects is calculated from intermediate risk points. In estimating risk of initial defects from a construction plan, the influence of construction methods on initial defects and tacit rules of construction plans are important. Furthermore, we examined the optimization of a concrete construction plan using a Genetic Algorithm and developed a support system of making better concrete construction plans for less experienced engineers.

### 概要

コンクリート工事は一般には経験則に基づいて慣例的に計画されることが多い。また、ジャンカやコールドジョイントなどの初期欠陥は、施工計画が十分に照査されておらず、施工計画段階に既に発生原因が存在している場合も多い。そこで、立案した施工計画から初期欠陥の発生危険度を予測し、その結果をもとに施工計画を修正する照査システムを開発した。また、現場での施工状況を調査し、上記システムの適用性についてケーススタディーを実施した。さらに、初期欠陥の発生危険度とコストを考慮し、遺伝的アルゴリズムを用いて最適な施工計画を立案できる施工支援システムを構築した。

#### 1. はじめに

コンクリート工事の施工においては、一般には経験の蓄積にもとづいて慣例的な施工計画が立案されている。また、施工方法が不適切な場合には、ジャンカやコールドジョイントといった初期欠陥が生じ、耐久性を低下させる不具合に繋がることもある。このような不具合は、補修による経済的損失のみならず信用の失墜を招くことになり、当社にとっても非常に憂慮すべき問題である。

初期欠陥の発生要因としては、コンクリート打込み時の突発的な事故や機械類の故障など、不測の事態が直接的な原因であると考えられる。しかし、適切でない施工方法が行われていたり、事前に想定されるリスクについて十分な対応が取られていないなど、施工計画自体に欠陥を発生させる原因が内在している場合もある。したがって、立案した施工計画を施工前に照査し、リスクを予測しつつ修正を加え適切な施工計画とすることが初期欠陥の回避するためには必要であると考えられる。

2002年制定のコンクリート標準示方書[施工編]では、工事において予想される変動に対し、施工計画が充分な余裕を持つことを確認するよう施工計画の照査を行うこととしている<sup>1)</sup>が、その具体的な手法については示されていない。また、体系的な施工計画の照査手法に関する知見も少ないのが現状である。

そこで、本論文では、立案された施工計画から初期欠陥の発生危険度を予測し、その予測結果にもとづいて施工計画を修正する照査システムを作成した。具体的な施工計画の照査方法としては、施工計画の各項目を入力値とし、中間の評価項目を計算して、最終的に初期欠陥発生危険度を指標として評価する手法を提案した。また、現場での施工状況を調査し、上記システムの適用性を検討した。さらに、初期欠陥発生危険度とコストの両者を考慮した最適な施工計画を、遺伝的アルゴリズムを用いて算出する手法についても検討し、コンクリート工事の経験が少ない技術者でも合理的な施工計画を立案できる施工支援システムを構築した。

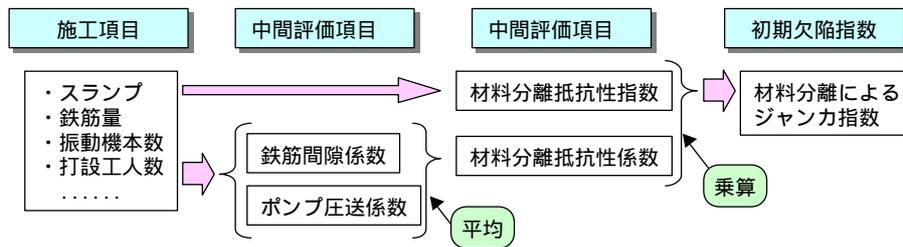


Fig. 1 初期欠陥指数の計算手法  
Calculation Method of Initial Defects (An Example of Honey-comb)

## 2. 施工計画の照査手法

### 2.1 概要

優れた施工計画とは、その計画にもとづいて施工した場合に初期欠陥が発生しない施工計画であると定義し、施工計画から初期欠陥の発生危険度を予測し、施工計画を照査することにした。また、初期欠陥の発生危険度は、初期欠陥指数を指標として表すこととした。施工計画の項目を入力値とし、各初期欠陥の発生危険度を初期欠陥指数として算出する計算手法を考案した。照査は1回の打設ブロック単位とし、そのブロック内で初期欠陥が発生する危険度を施工計画から予測することとした。

### 2.2 施工計画と初期欠陥指数の計算

入力値である施工計画の各項目から初期欠陥指数を計算する手法の概要についてFig. 1に示す。この図は材料分離によるジャンカ指数の例である。

中間評価項目は、初期欠陥毎にその初期欠陥の影響要因となる項目をあらかじめ設定したものであり、コンクリート材料の特性から定まる「指数」と、施工方法から定まる「係数」から構成される。これらの乗算により最終的な初期欠陥指数を算出した。

指数は0～1の範囲とし、0.5が平均的な点数で、この指数が大きいほど初期欠陥が発生しにくい、つまり優れた計画とした。係数は0～2の範囲とし、1が平均的な点数で、係数が大きいほど優れた計画とした。なお、中間評価項目の指数や係数を複数設定している場合、指数は小さい方の値を上位の指数とした。また、係数については重み付けをしてそれぞれの項目毎に影響度の大小を考慮することもできるが、ここでは平均を上位の係数とした。

施工項目から中間評価項目の指数、係数への関連付けには、式(1)で表されるシグモイド関数を用いた。

$$P_{ij} = \frac{1}{1 + e^{a_{ij} \times (x - b_{ij})}} \quad (1)$$

$P_{ij}$ は、ある初期欠陥に関して入力項目  $i$  の入力値  $x$  の場合の中間評価項目  $j$  に対する指数または係数を表す。また、 $a_{ij}$  および  $b_{ij}$  はシグモイド関数の形状を決める係

スラブの評価

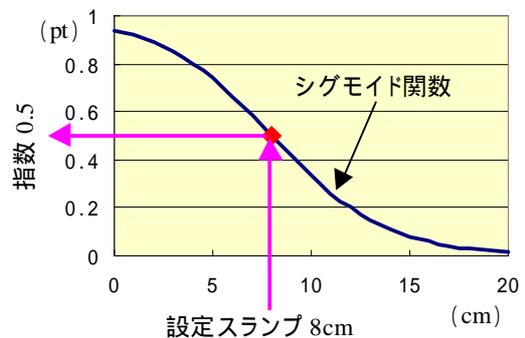


Fig. 2 施工項目と指数、係数の関連付け  
Relevancy between Execution items and Index of Initial Defect

数であり、既往の施工実績やコンクリート標準示方書等の知見をもとに、各施工項目が中間評価項目の指数および係数に及ぼす影響を考慮してそれぞれ決定した。

シグモイド関数により、施工項目から指数を算出する例をFig. 2に示す。この図では、コンクリートの設定スラブ8cmに対し指数0.5を出力することを示している。シグモイド関数がx軸方向を左右にシフトした場合や関数の傾きが異なる場合には、出力される指数が変化することになり、シグモイド関数の形状、つまり係数を適切に設定することでそれぞれの施工項目の初期欠陥への影響を的確に表現することができる。

### 2.3 各初期欠陥指数の計算手法

初期欠陥として、ジャンカ、コールドジョイント、かぶり不足の3つを対象とした。これらの初期欠陥の発生危険度を表す指数の計算に用いる施工項目、中間評価項目をまとめてFig. 3に示す。

2.3.1 ジャンカ ジャンカの発生原因として材料分離により粗骨材のみが集積する現象と、締め固めが不十分でコンクリートが充填されない現象を想定し、それぞれ材料分離抵抗性指数、充填性指数という中間評価項目を設けた。

材料分離抵抗性指数

スランブや水セメント比など使用材料や配合から決定される「コンクリートの材料分離抵抗性指数」と、施工時に誘発される材料分離を表す「施工時の材料分離抵抗性係数」に分けて考えた。

材料としての分離抵抗性は、粗骨材最大寸法、スランブ、水セメント比が大きいと分離が生じやすいとした。また、施工から定まる係数は、鉄筋間隙の通過、ポンプ圧送の影響などを考慮した各係数を平均して求めた。前者の鉄筋間隙通過係数は、コンクリートが鉄筋間隙を通過する際の材料分離抵抗性を表し、落下高さ、鉄筋量、配筋段数が大きいと材料分離が誘発され、かぶりは小さいほど粗骨材が回り込みにくく分離を生じやすいとした。ポンプ圧送は、圧送距離が長い、鉛直下方に圧送する、筒先を下向きにする場合に材料分離が生じやすいとした。

充填性指数

コンクリートの変形しやすさを表す「コンクリートの変形性指数」と、締め作業でどの程度充填されるかを表す「施工時の締め係数」から計算することとした。

コンクリートは、スランブ、水セメント比が大きいと変形しやすしいとした。高流動コンクリートは自己充填性を有し、普通コンクリートより変形性が大きいとした。

施工時の締めに関して、締め作業の確実性を評価するため、パイプレータ1本、時間あたりに締め固めるコンクリートの数量、打設工の人数、パイプレータの性能を評価項目とした。配筋条件も締め固めの確実性に影響を及ぼすと考え、鉄筋あき、鉄筋量、部材の種類を評価項目とした。部材別には壁厚が小さい場合や柱梁接合部などで締め固めが困難になるとした。また、その他の施工環境を考え、打設作業での疲労、施工管理者のレベルなどを項目として加えた。

2.3.2 コールドジョイント コールドジョイントが生じる要因は、材料特性から定まる許容打重ね時間指数と実際の打重ね時間の変動を表す施工時の打重ね時間係数を中間評価項目とした。

許容打重ね時間指数は、セメントや混和剤の種類、水セメント比、スランブ、温度などの項目について考慮し、低熱セメントや遅延剤を用いた場合は打重ねの許容時間が長く、温度が高い場合は短くなるよう設定した。

施工時の打重ね時間係数は、計画上の打重ね時間をもとにポンプ閉塞のリスクや気象条件などの影響を考慮して設定した。計画打重ね時間が長いと若干の作業の遅れでもコールドジョイントが生じるリスクは高まる。また、ポンプ閉塞のリスクは、配合や圧送方法の影響について考慮した<sup>2)</sup>。貧配合のコンクリートを長距離圧送する場合はポンプ閉塞の可能性が高く、それに伴う作業の中断によりコールドジョイントが発生する可能性が高まる。

その他の施工環境として、日射、風速が強く、気温が高い場合にはコンクリートの凝結が早まり、許容打重ね時間が短くなるとした。生コン工場からの運搬時間が長い場合にもコンクリート供給が遅れる懸念があり、コールドジョイントのリスクは大きくなる。

2.3.3 かぶり不足 かぶり不足は、スペーサが適切に使用されているかを表す「設計かぶり指数」と、施工時に配筋が乱されてかぶり不足となる可能性を表す「施工時のかぶり係数」で評価した。

かぶりはスペーサが適切に用いられていれば不具合が生じる危険性は低く、スペーサの種類と密度から設計かぶり指数を求めることとした。一方、施工時の影響としては、鉄筋上の作業や、圧送配管等の振動・衝撃が鉄筋に伝わることによるかぶりの変動を評価した。



Fig. 3 ジャッカ、コールドジョイント、かぶりに影響する施工項目  
Execution Items which affects to Honey Comb, Cold Joint, Concrete Cover

### 3. 現場施工におけるケーススタディー

#### 3.1 照査対象と施工概要

前章で示した施工計画照査手法を検証するため、実際の現場を想定して実施した。本照査手法により当初施工計画から各初期欠陥の発生危険度を評価し、施工計画修正案を策定した。

選定した現場は柱および梁を有するスラブ状構造物で、梁とスラブの打設を照査対象とした。当初計画の概要をTable 1に示す。

施工環境は気温がやや高いが曇りの気象条件とした。梁部は鉄筋量が多く、特に柱との接合部は550kg/m<sup>3</sup>と密に配置されている。コンクリートの配合はスランプ18cm、単位水量180kg/m<sup>3</sup>である。生コン工場からの運搬時間は約30分、場内の運搬はポンプ車のブームによる圧送で、一部10m程度の配管を用いる。

#### 3.2 施工計画の照査結果および修正

上記の当初計画から初期欠陥発生危険度を予測し、欠陥の発生を回避するための計画修正案の策定を行った。当初計画に対する各初期欠陥指数と中間評価項目の計算値をFig. 4に示す。指数については0.5、係数については1.0を下回っている項目が標準的な点数以下で、初期欠陥発生の要因となる可能性があることを示す。

**3.2.1 ジャンカ指数** ジャンカ指数は0.51で、ほぼ標準的な点数となったが、鉄筋量が多いため鉄筋間隙係数が低くなっており、ジャンカの発生要因となっている。

ポンプ圧送時に筒先からの落下高さを極力小さくし、筒先も常に水平としておくこと、また型枠内でのコンクリートの側方流動を避け、こまめに筒先を移動しながら打設を行うよう徹底することが重要と考えられる。

充填性指数は施工時の締固め係数が小さい結果となっており、パイプレータの本数を8本に増やし、より締固め能力の大きい60mmの種類に変更することで、標準値の0.5とすることができる。

**3.2.2 コールドジョイント指数** 梁部の2層打設において打重ね時間が2時間で計画されており、施工時間係数が0.12と非常に小さく、計画通りに施工しても欠陥が生じる危険性が高いと予測される。これを片押し打設の計画に変更し、計画打重ね時間を1時間30分程度とすることで、施工時間係数を標準値とすることができる。

**3.2.3 かぶり指数** かぶり指数は0.26であった。スペーサの数が少なく、スラブ鉄筋上で打設するため、かぶりの確保が懸念される結果となっている。配管の振動が鉄筋に伝わらないように対策を講じ、スラブ下面のスペーサを4個/m<sup>2</sup>に、梁側面のスペーサを2個/m<sup>2</sup>に変更することで、かぶり指数を標準値とすることができる。

#### 3.3 施工計画の照査における課題

ジャンカの発生に影響を及ぼす施工項目は多く、一項目の大小のみで発生危険度が支配されるわけではない。

Table 1 施工計画の概要 (当初)  
Outline of Concrete Construction Plan (Original)

構造物の概要		
コンクリートの打設部位	梁,スラブ	
部材寸法	縦(m)	1.1
	横(m)	8.0
	高さ(m)	1.1
配筋条件	鉄筋量(kg/m <sup>3</sup> )	550
	水平方向最小鉄筋あき(cm)	6.2
	鉛直方向最小鉄筋あき(cm)	3.8
	純かぶり(cm)	5.9
	底面スペーサ密度(個/m <sup>2</sup> )	4.0
	側面スペーサ密度(個/m <sup>2</sup> )	0.5
コンクリートの配合計画		
配合	配合の種類	27-18-20-N (普通コン)
	スランプ(cm)	18
	水セメント比(%)	54.0
	細骨材比(%)	47.4
	単位水量(kg/m <sup>3</sup> )	180
	単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> )	334
	混和剤の種類	AE減水剤
コンクリートの打設計画		
環境条件	外気温(°C)	25.0
	コンクリート温度(°C)	25.0
	コンクリート打設量(m <sup>3</sup> )	600
ポンプ圧送	運搬時間(分)	30
	台数(台)	2
	圧送方法	ポンプ圧送
打込み計画	水平換算距離(m)	10
	打設グループ(班)	2
	打設要員(人/班)	6
	パイプレータ(本/班)	3
	打込み速度(m <sup>3</sup> /h・班)	45.0
	打込み高さ(cm/層)	110
	打上り速度(cm/h)	50
	打重ね時間間隔(分)	120
指揮者の資格	1級土木施工管理技士	
鉄筋の養生	鉄筋上で作業	

	ポイント
<b>ジャンカ指数</b>	<b>0.51</b>
材料分離抵抗性指数	0.64
コンクリートの材料分離抵抗性指数	0.57
施工時の材料分離抵抗性係数	1.13
打込み係数	1.00
鉄筋間隙係数	0.76
ポンプ圧送係数	1.63
<b>充填性指数</b>	<b>0.51</b>
コンクリートの変形性指数	0.60
施工時の締固め係数	0.84
締固め能力係数	1.11
鉄筋間隙係数	0.56
施工環境係数	0.85
<b>コールドジョイント指数</b>	<b>0.45</b>
コンクリートの許容打ち重ね指数	0.55
施工時の打ち重ね係数	0.82
施工時間係数	0.12
ポンプ閉塞係数	1.31
施工環境係数	1.02
<b>かぶり指数</b>	<b>0.26</b>
設計かぶり指数	0.38
施工時のかぶり係数	0.67

Fig. 4 初期欠陥指数と中間評価項目の計算値  
Calculation Result of Each Initial Defect Index

また、締め固めを入念にするか否かといった作業の確実性による影響度も大きく、定量的な予測が難しい。

コールドジョイントは、計画段階で発生危険度がある程度推定できるが、部材形状が特殊な部位や浮き型枠部などでは実際には予想外に打重ね時間が長くなる場合もあり慎重な検討が必要である。

かぶり不足はスパーサの影響が支配的で、その破損や脱落によりかぶりが確保されない場合が懸念される。

これらの初期欠陥指数は、計算に用いる施工項目の選択と、この施工項目と中間評価項目を関連付けるシグモイド関数の係数から決定される。施工項目と初期欠陥の因果関係をより詳細に把握し計算に組み込む必要がある。また、土木構造物はその多くが複雑または特殊な形状部を有しており、初期欠陥の発生危険度を精度良く予測するには部位別の検討が必要になると考えられる。

#### 4. 施工計画の最適化手法

##### 4.1 概要

前章までの初期欠陥指数による施工計画照査手法では、照査結果を反映した計画修正は担当職員に任されている。経験豊富な技術者であれば、当初の施工計画の照査結果をもとに適切に計画を修正できるが、経験が浅い技術者では修正に手間取り、再度照査を繰り返すことになる。そこで、照査結果を反映した形で優れた施工計画を計算により求める施工計画の最適化計算についても検討した。施工計画の最適化においては、初期欠陥指数を制約条件としてコストを最小化する計画を算出することとした。最適化計算の手法には、組合せ最適化問題に適している遺伝的アルゴリズムを適用した。

##### 4.2 遺伝的アルゴリズムによる最適化計算手法

施工計画の最適化を考える際、まず施工計画の優劣を決める評価基準が必要となる。初期欠陥指数が大きい、つまり初期欠陥が生じにくい施工計画は優れているが、初期欠陥指数を単純に最大化するよう計算するとコストを度外視した過剰な施工方法が選択されることになる。そこで、施工項目毎にコストを設定し、初期欠陥指数に下限値を設け、初期欠陥指数が下限値を下回らないような施工計画のうち、コストが最小となる施工計画を最も優れた施工計画とすることとした。

遺伝的アルゴリズムの適用に関しては、施工計画を遺伝子として表現した。その施工に必要なコストを各遺伝子の適応度とし、制約条件は初期欠陥指数の下限値を設けた。初期欠陥指数が設定値を下回る場合には制約条件を満たさないため、その施工計画のコストを高く設定し、その遺伝子が淘汰されるよう処理した。

計算フローをFig. 5に示す。遺伝操作は、初期遺伝子の生成後、適応度計算と交叉・突然変異の繰返しとなる。

ここで考慮する初期欠陥はジャンカ、コールドジョイント、かぶり不足の3種類とし、それぞれに初期欠陥指

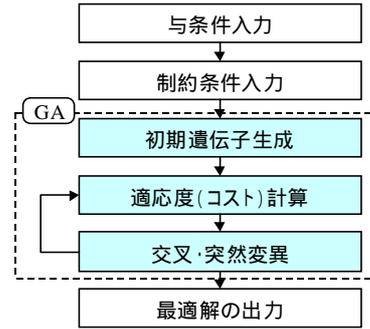


Fig. 5 遺伝的アルゴリズムの計算フロー  
Calculation Procedure of Genetic Algorithm

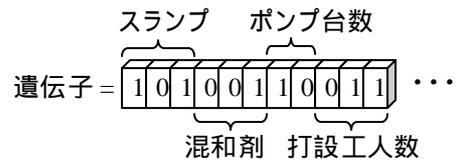


Fig. 6 施工計画の遺伝子表現  
Genetic Description of Concrete Construction Plan

Table 2 遺伝的アルゴリズムの計算条件  
Calculation Condition of Genetic Algorithm

項目	設定値
個体数	50
世代数	2000
選択方法	ルーレット+エリート保存
交叉方法	一点交叉
突然変異確率	5%

数の下限値を設けた。また、施工項目中、選択余地のない環境条件や構造物条件は最適化する項目には含めずと条件として入力することとした。

施工計画はFig. 6のように各項目を2進数で表し、これらを繋いで一施工計画を一つの遺伝子として表現した。

最適化計算に用いる遺伝的アルゴリズムの計算条件をTable 2に示す。選択方法と交叉方法はプログラムに内挿されており変更できないが、個体数、世代数、突然変異確率は計算開始時に任意に変更可能とした。

##### 4.3 最適化計算のケーススタディー

施工計画の最適化計算のケーススタディーを実施した。ケーススタディーの対象は壁状のコンクリート構造物とし、打設数量等の与条件は、Table 3のように設定した。コンクリートの配合については、本来は最適化すべき項目であるが、耐久性確保の観点から変更が困難なことも多いため、スランブ、混和剤の種類のみを最適化項目とし、その他については与条件とした。遺伝的アルゴリズムの計算条件はTable 2に示す値を使用し、初期欠陥指数0.5以上を制約条件として最適化計算を行った。1回の計

算世代数は2000世代とし、5回繰返し計算を行った。

最適解として出力された初期欠陥指数をTable 4、最適化項目と最適解の一覧をTable 5に示す。また、最適解出力時の世代数と適応度(コスト)の履歴をFig. 7に示す。

最適解として出力された施工計画における予想コストは655万円、初期欠陥指数はいずれも0.5以上で制約条件を満たした。最適化された項目を参照すると、コンクリートの打設量が500m<sup>3</sup>と多く、鉄筋が密に配置された壁構造物であることから、ポンプ打設による2班編成(パイプレータ2本/班、打設工8人/班)で、コンクリートの供給量が40m<sup>3</sup>/hと比較的ゆっくり打設してジャンカの発生を抑えるという計画になった。スランブを大きくしたり、1班体制で長い時間をかけて打ち込む計画はコストがかかるため最適化の過程で淘汰された。

出力された最適解は制約条件を全て満足しており、コストも最小と思われる。また、従来の経験的な判断と比較しても一般的な施工計画として実施工に適用できるものと考えられる。なお、振動機の本数に対して打設工の人数が多い点は通常の施工計画としては一見不自然のようであるが、これは充填性指数を左右する施工時の締固め能力係数に関して、代替要員の有無を考慮することでパイプレータの本数が同じでも打設工の人数が増えれば締固め能力係数は大きくなるよう設定していることによるものであり、施工時のリスクを考えた結果が反映されているものと評価することができる。

### 5. まとめ

施工計画から初期欠陥の発生危険度を予測し、その予測結果にもとづいて施工計画を修正する照査システムの検討を行った。また、実際の現場におけるコンクリートの施工状況を調査し、施工計画照査のケーススタディーを実施した。

さらに、初期欠陥の発生危険度とコストを考慮した最適な施工計画を、遺伝的アルゴリズムを用いて算出する手法について検討した。

本論文の範囲内で得られた知見を以下に示す。

1) 初期欠陥の発生危険度を初期欠陥指数という指標を用いてコンクリート工事の施工計画を照査することが可能である。ただし、実際の施工計画立案に反映させるには、様々な躯体形状や打設部位のバリエーションを考慮する必要がある。

2) 初期欠陥の発生危険度を精度良く推定するには、構造物条件、コンクリート配合や運搬、圧送る、打込み条件と初期欠陥発生の因果関係を詳細に把握する必要がある。

3) 遺伝的アルゴリズムを用いた最適化計算については、遺伝的アルゴリズムの手法そのものは実績も多く信頼性もあるが、最適解が施工計画として妥当なものであるか否かは初期欠陥指数とコストの算出方法によるところが大きく、各種工法および材料のコストを正確に入力する必要がある。

Table 3 最適化計算における与条件  
Input Condition used for optimized Calculation

分類	項目	単位	値
環境	外気温		20
	コンクリート種類	-	普通
配合	水セメント比	%	55
	細骨材率	%	46
	単位粗骨材量	kg/m <sup>3</sup>	1000
	粗骨材最大寸法	mm	20
配筋	鉄筋量	kg/m <sup>3</sup>	300
	最小鉄筋あき	mm	50
	純かぶり	mm	50
打設	打設量	m <sup>3</sup>	500
	圧送距離	m	50
	工場からの運搬時間	分	30
	予定打重ね時間	時間	1.5

Table 4 最適解の初期欠陥指数  
Initial Defect Index on Optimized Solutions

項目	値
ジャンカ指数	0.50
コールドジョイント指数	0.55
かぶり指数	0.62

Table 5 最適化項目および最適解  
Optimized Items and Solutions

分類	項目	単位	値
配合	スランブ	cm	10
	混和剤種類	-	AE減水剤
配筋	スペーサ密度	個/m <sup>2</sup>	2
	段取り筋	-	使用しない
打設	ポンプの台数	台	2
	ポンプの出力	-	小
	配管径	インチ	6
	振動機の種類	-	60内部振動機
	振動機の本数	本	4
	打設工の人数	人	16
	生コンの落下高さ	m	1
生コン供給量	m <sup>3</sup> /h	40	

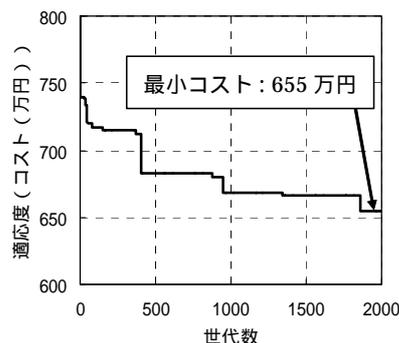


Fig. 7 世代数と最適解の適応度  
Appropriation of Optimized Solution

### 参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2002.3
- 2) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針，2000.2