

論文 初期欠陥発生危険度によるコンクリート施工計画照査システムの開発

川西 貴士^{*1}・近松 竜一^{*2}・入矢 桂史郎^{*3}・十河 茂幸^{*4}

要旨：コンクリート工事の施工は、経験に基づいて慣例的に計画が立案されることが多く、突発的なトラブルだけでなく施工計画の不備によって不具合を生じる場合もある。そこで、施工時の不具合を事前に回避し、コンクリート構造物として所要の品質を確保するために、初期欠陥発生危険度を指標とする施工計画の照査システムを開発した。このシステムにより各構造物の施工計画を照査し、ジャンカやコールドジョイントの発生危険度を検証した結果、計画の良否による初期欠陥の発生危険度を定量的に評価できること、各施工項目の影響度を考慮することで合理的に計画を修正できることが明らかとなった。

キーワード：施工計画, 照査, 初期欠陥, 発生危険度, ジャンカ, コールドジョイント

1. はじめに

最近の建設工事では、狭隘な部材に多くの鉄筋が配置され、コンクリートの充てんが難しい場合が多い。一方で、建設業をとりまく労働環境の変化により建設技術の継承が重要な課題となっている。このような状況のもとで、コンクリート工事においては、ジャンカや未充てんななどの初期欠陥が発生する事例が増加している。これらの不具合は主に施工中の機械の故障や突発的なトラブルが直接的な要因であるが、施工計画の段階で不具合のリスクが内在している場合も多い。初期欠陥の発生を回避するには、施工計画を事前に照査し、不具合のリスクを認識し適切な施工計画を立案することが重要である。

著者らは、従来の経験則や技術のノウハウをもとに、初期欠陥の発生危険度を指標として施工計画の良否を照査する手法¹⁾や遺伝的アルゴリズムを用い最適な施工計画を算出する手法²⁾の研究を進めてきた。本文は、前者の手法を組み込んだ施工計画照査システムを開発し、各種構造物の施工計画に適用し、評価の妥当性について検証した結果をまとめたものである。

2. 施工計画照査システムの概要

2.1 照査システムのフローおよび評価方法

施工計画どおりに施工が行われた場合に予測される初期欠陥の発生危険度を、施工計画上の数多くの項目を入力値とし、「初期欠陥指数」を指標として算出する方法を考案した。

照査システムのフローの概要を図-1に示す。本システムでは、まずスランプや鉄筋量など、各種の施工要因を「施工項目」として入力する。ジャンカやコールドジョイントなどそれぞれの初期欠陥に関与する施工項目を抽出し、その影響度を関連付けることで初期欠陥指数を計算し、初期欠陥の発生危険度として出力される。

施工項目は、次式のとおり、出現頻度が正規分布するものを累積頻度で表したシグモイド関数を用いて初期欠陥への影響度を関連付け、その指標として「危険ポイント」を設定した。危険ポイントは0~1の範囲で0.5を平均とした。

$$P = \frac{1}{1 + e^{a \times (x - b)}} \quad (1)$$

ここで、 P は危険ポイント、 a , b は関数の形状を決定する係数である。

*1 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 材料施工グループ 主任 工修 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 材料施工グループ長 工修 (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 室長 工博 (正会員)

*4 (株)大林組 技術研究所 副所長 工博 (正会員)

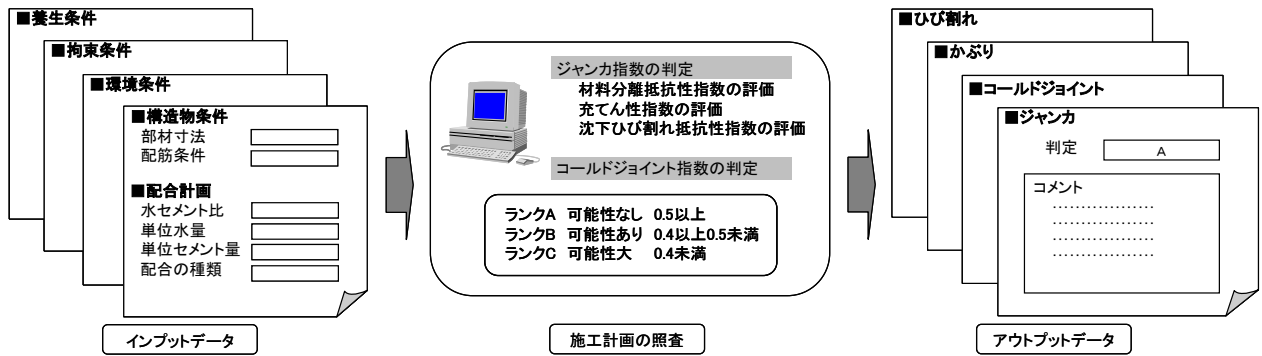


図-1 施工計画照査システムのフロー

シグモイド関数による施工項目の危険ポイント算出例を図-2に示す。この図では、スラブ8cmから危険ポイント0.5を出力している。それぞれの施工項目による初期欠陥への影響をこの関数の形状によって適切に設定している。

本システムでは初期欠陥が発生する危険度が小さいほど優れた施工計画とし、初期欠陥指数を指標として定量的に評価している。

初期欠陥指数は、図-3に示すように、コンクリートの材料特性から定まるポテンシャルを「指数」、施工方法から定まる初期欠陥回避能力を「係数」で表現し、両者を乗算して「欠陥指数」を算定する。指数および係数は、それぞれの施工項目からシグモイド関数により出力した危険ポイントと関連付けて設定し、指数は0～1の値で0.5を平均とし、係数は0～2の値で1.0を平均とした。初期欠陥指数は0～1の値で評価し、初期欠陥の発生危険度をその可能性に応じてA～Cの3段階で判定している。照査システムの詳細は、文献1)に示すとおりとする。

2.2 初期欠陥発生危険度の評価

本システムでは初期欠陥指数として、ジャンカ、コールドジョイント、かぶり不足、乾燥収縮ひび割れ、温度ひび割れを評価した。これらのうち、本論文ではジャンカおよびコールドジョイントを取り上げることとする。

ジャンカは、コンクリートを高所から落下させたり、ポンプ圧送における不適切な取扱いによりコンクリートに材料分離が生じ、部材内で粗骨材が集積し未充てん部が生じる場合や、締め管理の不備やバイブレータの能力が不足し、

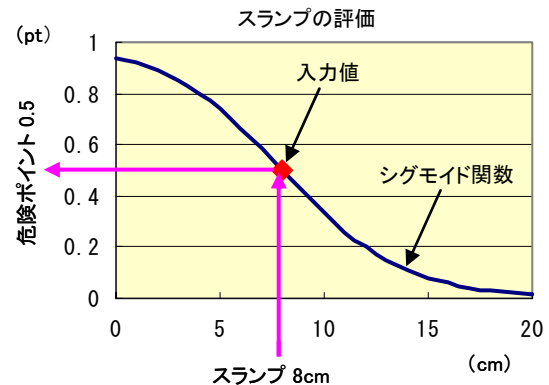


図-2 施工項目と危険ポイントの関連付け

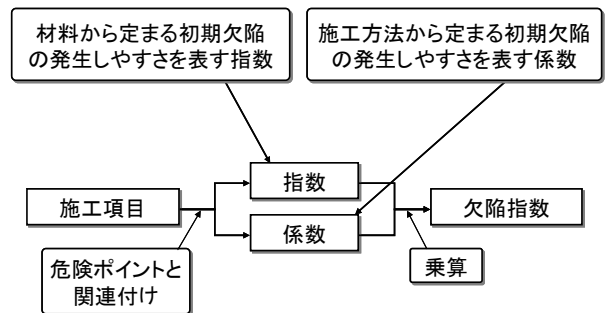


図-3 欠陥指数に関する考え方

コンクリートが完全に充てんされない場合に発生する。また、ブリーディングに伴ってモルタルが沈降してひび割れが生じる場合も考えられ、本システムでは広義の意味でジャンカの一部として取り扱った。以上のことから、ジャンカ指数は、それぞれの発生要因毎に材料分離抵抗性指数、充てん性指数および沈下ひび割れ抵抗性指数の3つの欠陥指数に分けて評価し、これらのうち最小の結果を用いて評価することとした。

コールドジョイントに関しては、材料特性から定まる凝結時間と施工時の実際の打重ね時間間隔の両者の影響を考慮し、コールドジョイント指数として評価した。

3. 各種構造物の施工計画における照査システムによる初期欠陥発生危険度の試算と評価

初期欠陥発生危険度を指標とする本システムを用いて実際の施工計画の照査した場合に危険度が適切に評価できることを検証するために、3種類の代表的な構造物の施工計画を取り上げ、本システムを適用し、初期欠陥発生危険度を試算した。

3.1 底版施工時のコールドジョイントの評価

(1) 構造物の概要および打込み計画

底版スラブの概要を図-4に、施工計画の概要を表-1に示す。平面25m×25mで厚さ1.5mの底版を、ポンプ4台で打ち込み、パイプレータを1班当たり3本配置し締め固める計画とした。底版スラブは、打込み面積が広く、打込み順序によっては、打重ね時間間隔が長くなり、コールドジョイントの発生が懸念される。そこで、コンクリートの材料特性として、凝結時間の影響を確認するために、打込み時期を夏期および春期の2水準とし、遅延剤の使用についても検討した。また、施工による打重ね時間間隔の違いを確認するために、1層の打込み面積を広くした場合と、リフト割を細かくし、1リフトに打ち込むコンクリート量を減少した場合を考慮し、打ち重ね時間間隔を150、60および30分の3水準に変化させた。施工方法の組合せを表-2に、打込み方法を図-5に示す。

(2) 照査結果および考察

コールドジョイントの発生危険度の判定を表-3に示す。ケース1の発生危険度はC判定で、欠陥が発生する可能性が大きいと判定された。25℃以上の打重ね時間間隔は120分以内とされており³⁾、標準的な範囲を超えた場合の判断基準が考慮されている。ケース2~4については、発生危険度はいずれもA判定となった。打込み方法を検討することで、コンクリートの凝結が開始する前に打ち重ねられていること、遅延剤の使用によって凝結時間を長くする対策の効果が反映される結果となっている。

以上のように、打込み面積の広い底版スラブ

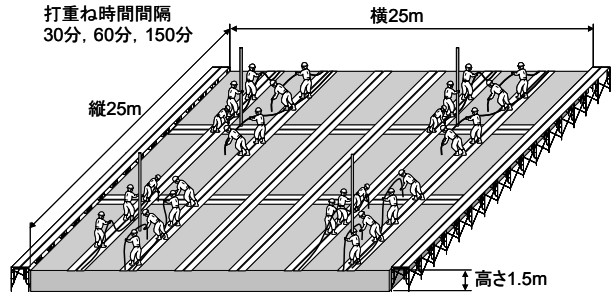


図-4 底版スラブの概要

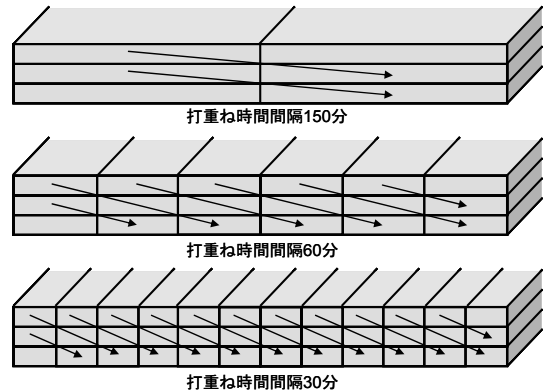


図-5 打込み方法

表-1 施工計画の概要

構造物条件	部材の種類	底版スラブ
	部材寸法	縦25m, 横25m, 厚さ1.5m
コンクリート	鉄筋量(kg/m ³)	150
	鋼材の最小あき(cm)	10
	呼び強度(N/mm ²)	24
	スランブ(cm)	8
	水セメント比(%)	50.0
環境条件	打込み時期	夏期
	打込み時期	夏期
ポンプ圧送	台数(台)	4
	圧送方法	ブーム+フレキシブルホース
	配管径(inch)	5
打込み計画	パイプレータの本数(本)	3
	打設要員(人)	6
	コンクリート打込み量(m ³)	938

表-2 施工方法の組合せ

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
打込み時期	夏期		春期	
打重ね時間間隔 (分)	150	30	60	30
遅延剤の有無	無	有	有	無

表-3 コールドジョイント発生危険度の判定

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
コールドジョイント指数	0.30	0.51	0.54	0.52
コールドジョイント発生危険度の判定	C	A	A	A

に本システムを適用した結果、懸念されている凝結時間や打重ね時間間隔が、コールドジョイントの発生に及ぼす影響について、適切に評価されていることが明らかとなった。

3.2 壁施工時におけるジャンカの評価

(1) 構造物の概要および打込み計画

壁状構造物の概要を図-6に、施工計画の概要を表-4に示す。厚さ0.8m、高さ6mの壁構造物をポンプ1台で打ち込み、バイブレータ2本で締め固める計画とした。

壁状構造物は、一般に高さがあり、バイブレータの上下移動を頻繁に行う必要があり重労働なうえに、狭隘で十分に目視ができない状態で挿入する場合も多く、締め固め不足によるジャンカが発生する可能性が高い(写真-1参照)。

そこで、壁状構造物におけるジャンカの影響要因を確認するために、ポンプのホースを壁に挿入しないで天端から落下させる場合を想定し、落下高さを1.5mおよび6mの2水準変化させた。また、施工時間を短縮するために、生コンの出荷ペースを速めた場合を想定し、打込み速度を15m³/hおよび45m³/hの2水準に変化させるとともに、打込み速度の増大に対応してスランブを18cmに増加させた場合も検討した。施工方法の組合せを表-5に示す。これらのうち、ケース1については、コンクリート標準示方書に示されている標準的な施工方法を設定した。

(2) 照査結果および考察

ジャンカの発生危険度の判定を表-6に示す。

ケース1のジャンカ発生危険度はA判定であり、既往の施工実績をもとにした標準的な施工方法を用いた場合は、ジャンカが発生する可能性は小さいと判定された。

一方、落下高さを大きくしたケース2は、材料分離抵抗性指数がB判定となった。コンクリートが鉄筋やセパレータに衝突し、材料分離が生じる懸念があることを示すものと考えられる。

打込み速度を3倍に高めたケース3では充てん性指数がB評価となった。バイブレータ1本当たりの締め固め量の増加により締め固め不足になる懸念が示されていると考えられる。

ケース4では充てん性指数はA判定と改善されたが、材料分離抵抗性指数が逆にB判定となった。これは、スランブを大きくすると充てん

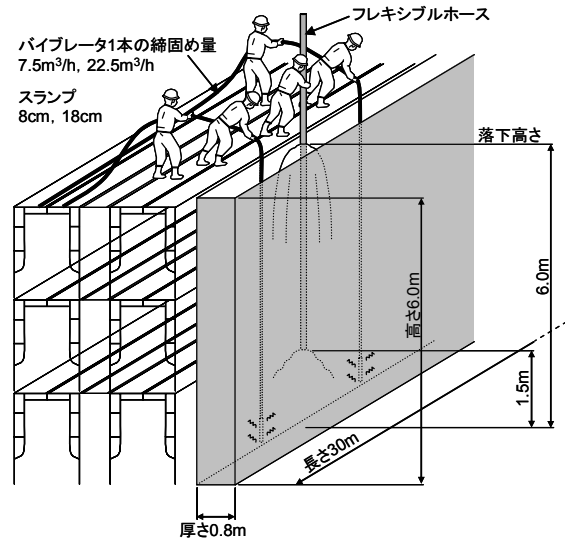


図-6 壁状構造物の概要



写真-1 側壁部における締め固め不足によるジャンカの例

表-4 施工計画の概要

構造物条件	部材の種類	壁状構造物
	部材寸法	厚さ0.8m、長さ30m、高さ6m
コンクリート	鉄筋量(kg/m ³)	200
	鋼材の最小あき(cm)	10
	呼び強度(N/mm ²)	24
	水セメント比(%)	52.0
環境条件	単位水量(kg/m ³)	160
	単位セメント量(kg/m ³)	308
ポンプ圧送	打込み時期	夏期
	台数(台)	1
	圧送方法	ブーム+フレキシブルホース
打込み計画	配管径(inch)	5
	バイブレータの本数(本)	2
	打込み要員(人)	4
	コンクリート打込み量(m ³)	144

表-5 施工方法の組合せ

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
落下高さ (m)	1.5	6.0		1.5
打込み速度 (m ³ /h)		15.0		45.0
スランブ (cm)			8	18

表-6 ジャンカ発生危険度の判定

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
材料分離抵抗性指数	0.52	0.48	0.52	0.42
充てん性指数	0.51	0.51	0.48	0.52
沈下ひび割れ抵抗性指数	0.50	0.50	0.38	0.37
ジャンカ指数	0.50	0.48	0.38	0.37
ジャンカ発生危険度の判定	A	B	C	C

性は改善されるが、材料分離が生じやすくなり、ジャンカが発生する危険性を指摘している。

打込み速度を増加させたケース 3 およびケース 4 については、沈下ひび割れ抵抗性指数が C 判定となった。打上げ速度が増加することにより、ブリーディングが発生し、沈下ひび割れが生じやすいことを指摘している。

以上の結果より、ただスランプを増大させれば構造物の充てん不良がなくなるわけではないことが明らかとなった。また、ジャンカの発生は、不適切な施工方法によって材料分離が生じる場合、締固め管理や能力が不足する場合および沈下ひび割れを生じる場合などがあり、本システムによれば、これらの影響を照査できること、また発生要因を特定することで施工計画を修正する上で有用な判断資料として活用できることが確認された。

3.3 高架橋スラブ施工におけるジャンカの評価

(1) 構造物の概要および打込み計画

高架橋上部スラブの概要を図-7に、施工計画の概要を表-7に示す。幅 10m×長さ 40m で厚さ 0.5m のスラブをポンプ 2 台で打ち込み、バイブレータを 1 班あたり 2 本配置して締め固める計画とした。

高架橋上部スラブは、柱との接合部において鉄筋量が多くなる場合が多く、コンクリートの未充てんが発生する可能性が高くなる（写真-2 参照）。また、スラブ上にコンクリートの圧送配管を設置する場合が多く、運搬時間や配管距離によってはスランプロスが生じ、ポンプが閉塞する可能性が高くなる。そこで、これらの要因がジャンカの発生に及ぼす影響を評価するために、過密配筋の部位を含めた検討対象とし、鉄筋量を 150kg/m³ および 400kg/m³ の 2 水準、鋼材の最小あきを 100mm および 30mm の 2 水準に変化させた。さらに、運搬時間（プラント出荷から打込み終了までの時間）を 60 分および 120 分の 2 水準、配管距離を 100m および 300m の 2 水準に変化させた。また、標準的なスランプは 8cm とし、充てん性を改善するために、18cm に増加

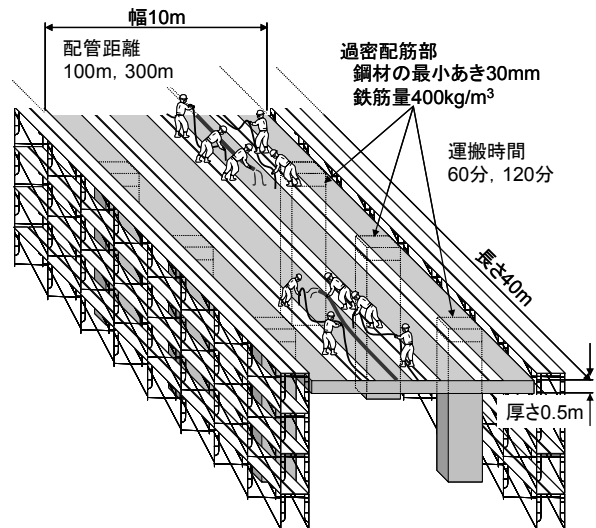


図-7 構造物の概要



写真-2 過密配筋の状況

表-7 施工計画の概要

構造物条件	部材の種類	高架橋上部スラブ
	部材寸法	長さ40m、幅10m、厚さ0.5m
コンクリート	呼び強度(N/mm ²)	24
	水セメント比(%)	50.0
	単位水量(kg/m ³)	165
	単位セメント量(kg/m ³)	330
環境条件	打込み時期	夏期
ポンプ圧送	台数(台)	2
	圧送方法	ブーム+フレキシブルホース
	配管径(inch)	5
打込み計画	バイブレータの本数(本)	2
	打込み要員(人)	4
	コンクリート打込み量(m ³)	200

表-8 施工方法の組合せ

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
鋼材の最小あき (mm)	100		30	
鉄筋量 (m ³ /h)	150		400	
運搬時間※ (分)	60			
配管距離 (m)	100			
コンクリートの種類	普通			高流動
スランプおよびスランプフロー (cm)	8		18	65
混和剤の種類	AE減水剤		高性能AE減水剤	
	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8
鋼材の最小あき (mm)		100		
鉄筋量 (m ³ /h)	150			
運搬時間※ (分)	120		60	
配管距離 (m)	100		300	
コンクリートの種類	普通			
スランプ (cm)	8	18	8	18
混和剤の種類	AE減水剤	高性能AE減水剤	AE減水剤	高性能AE減水剤

※練り混ぜはじめてから打ち終わるまでの時間

した場合、一部についてはスランプフロー65cmの高流動コンクリートとした場合についても検討した。スランプ 8cm の場合は AE 減水剤、スランプ 18cm および高流動コンクリートは高性能 AE 減水剤を用いることとした。表-8 に施工方法の組合せを示す。

(2) 照査結果および考察

ジャンカの発生危険度の判定を表-9 に示す。

スラブの標準部において、ケース 1 の発生危険度は A 判定で、ジャンカが発生する可能性は小さいと判定された。一方、過密配筋部は充てん性指数が B 判定となり、鉄筋量の増加に伴い、締固め能力が不足することが指摘されている。さらに、ケース 3 およびケース 4 については、締固め能力不足を補うために、コンクリートのスランプを増加することで、充てん性指数も順に改善された。高流動コンクリートを使用したケース 4 では A 判定となった。沈下ひび割れについては、スラブ厚さが小さいため打込み高さが小さく、欠陥が発生しにくいものと考えられる。

鉄筋量が多く狭隘な部材ではスランプを大きくして充てん性を確保する必要があることが示されている³⁾。本照査システムによれば、過密配筋部について、鉄筋量および鋼材のあきが、充てん性の低下に及ぼす影響についても反映されているものと考えられる。

次に、運搬時間と配管距離を変化させた場合に着目すると、前述したようにケース 1 のジャンカ発生危険度は A 判定であり、ジャンカが発生する可能性は小さいと判定されている。一方、運搬時間および配管距離を増加させたケース 5 およびケース 7 においては B 判定となり、スランプロスにより締固め不足を生じる可能性が指摘されている。逆に、ケース 6 およびケース 8 は A 判定であり、運搬時間と配管距離の増大によるスランプロスの悪影響が、スランプを増加することで補償され、充てん性が改善されることが反映されているものと考えられる。

表-9 ジャンカ発生危険度の判定

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
材料分離抵抗性指数	0.76	0.71	0.58	0.50
充てん性指数	0.52	0.45	0.49	0.56
沈下ひび割れ抵抗性指数	0.69	0.69	0.67	0.60
ジャンカ指数	0.52	0.45	0.49	0.50
ジャンカ発生危険度の判定	A	B	B	A
	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8
材料分離抵抗性指数	0.76	0.63	0.69	0.57
充てん性指数	0.48	0.53	0.46	0.51
沈下ひび割れ抵抗性指数	0.69	0.67	0.69	0.67
ジャンカ指数	0.48	0.53	0.46	0.51
ジャンカ発生危険度の判定	B	A	B	A

4. まとめ

コンクリート施工計画照査システムを開発し、実際にいくつかの現場に適用した。本システムにより事前に施工計画を修正した影響もあり、適用した現場では不具合の発生は認められなかった。したがって、現時点では、不具合を予測したものに不具合が発生するかどうかの検証は十分ではないが、以下の諸点に関して実用的であると考えられる。

- (1) ジャンカ、コールドジョイントなどの施工時の初期欠陥が発生する可能性を定量的に評価することができる。
- (2) 各施工項目の影響度を定量的に考慮しながら合理的に計画を修正することができる。

今後、さらに数多くの現場にこのシステムを適用して実際に発生する不具合との検証を行いながら、シグモイド関数や評価項目を見直し、施工計画をさらに的確に照査できるシステムを構築する予定である。

参考文献

- 1) 高橋敏樹ほか：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に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.717-722，2004.6
- 2) 高橋敏樹ほか：遺伝的アルゴリズムを用いたコンクリート施工計画の最適化に関する研究，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，部門 V，pp.1251-1252，2004.9
- 3) 土木学会：2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料，pp.94-103，2002.3