

論文 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

高橋 敏樹^{*1}・近松 竜一^{*1}入矢 桂史郎^{*2}・十河 茂幸^{*3}

要旨：コンクリート工事の施工では、経験に基づく慣例的な計画決定が行われることが多く、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、耐久性の不具合に繋がることもある。これを回避するために、施工計画から予測される初期欠陥の発生危険度という指標を用いて施工計画の照査を行い、適切な施工計画を立案する手法の検討を行った。実施工に適用した結果、コンクリートの材料や配合、締固め方法などの施工計画から、初期欠陥の発生危険度を予測することが可能であることが明らかとなった。

キーワード：コンクリート工事，施工計画，照査，初期欠陥，発生危険度

1. はじめに

コンクリート工事の施工計画は、品質、安全、環境等の工事要件を満足した上で、工事が早くかつ経済的になるよう適切に作成しなければならない。一方、近年の建設工事では、構造物が高度化、複雑化するにつれ、ジャンカやコールドジョイントといった初期欠陥が発生し、問題となる場合が生じている。この問題を回避するためには様々なアプローチが考えられるが、ここでは施工計画を立案する段階の重要性に着目した。2002年制定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て、施工計画が十分な余裕を持つことを確認することにより、施工計画の照査を行うこととしているが¹⁾、その手法は各事業者任せにされており、施工計画の立案は経験に基づいた判断によるところが大きい。そこで本研究では、施工計画から推定される各種初期欠陥の発生危険度という指標を用いて不具合の発生を定量的に予測するシステムの検討を行った。この評価結果を施工計画にフィードバックすることにより、初期欠陥の発生を抑えるような適切な施工計画の立案を行うことができると考えられる。

2. 初期欠陥の発生要因

コンクリート工事を簡略化して考えると、図-1に示すような各段階に分類できるが、施工計画の立案が上流に位置し、これに従って鉄筋・型枠工や、コンクリート打設工といった作業が行われる。突発的な事故や機械類の故障など、不測の事態が発生した場合などは、この実作業が直接的な初期欠陥の発生要因とも考えられるが、施工計画が不適切で、リスクへの対応が取られていないなど、初期欠陥の発生がすでに決定付けられている場合が多いと考えられる。そのため、施工計画の照査を事前に行い、修正を加えて適切な施工計画とすることが、初期欠陥の回避に効果的であると考えられる。

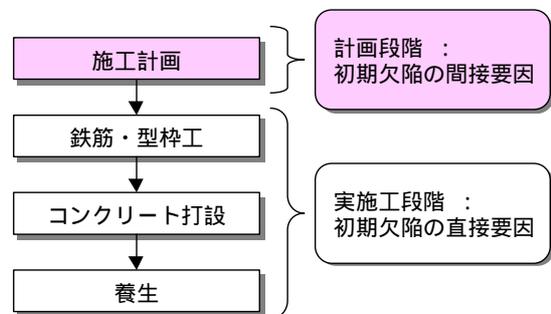


図-1 コンクリート工事の各段階

*1 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 工修 (正会員)

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

*3 (株)大林組 技術研究所 副所長 工博 (正会員)

3. 施工計画の照査手法

3.1 施工計画の評価指標

施工計画の照査を、その計画に従って施工した場合に予測される初期欠陥の発生危険度の指標を用いて行うことを考えた。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。照査の単位は1日の打設作業を行うブロックとし、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。

3.2 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を図-2に示す。これは材料分離によるジャンカ指数の例であるが、中間評価項目は、各初期欠陥毎に、その初期欠陥の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」からなる。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の値とし、0.5が平均的な点数で、指数が大きいほど初期欠陥が発生しにくい、つまり優れた施工方法であるとした。係数は0～2の値とし、1が平均的な点数、係数が大きいほど優れた施工方法とした。中間評価項目の指数や係数を複数設定している場合には、指数では小さい方の値を上位の指数とした。係数は重み付けを行い、項目毎に影響の大きさ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} はある初期欠陥に関して、

入力項目*i*の入力値が*x*であった場合の、中間評価項目*j*に対する指数あるいは係数を表す。 a_{ij}, b_{ij} はシグモイド関数の形状を決める係数で、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これまでの施工実績やコンクリート標準示方書等の知見から考慮してそれぞれ決定した。

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

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図-3に示す。ここでは、コンクリートのスランプ8cmから、指数0.5を出力している。シグモイド関数が左右にシフトした場合や、傾きが異なる場合には出力される指数が変化するため、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により、施工項目が持つ初期欠陥への影響を的確に表現できる。

3.3 各初期欠陥指数の計算手法

本研究で検討対象とするのは、ジャンカ、コールドジョイント、かぶり不足の各初期欠陥とした。各初期欠陥ごとの計算方法と施工項目、中間評価項目を以下に示す。

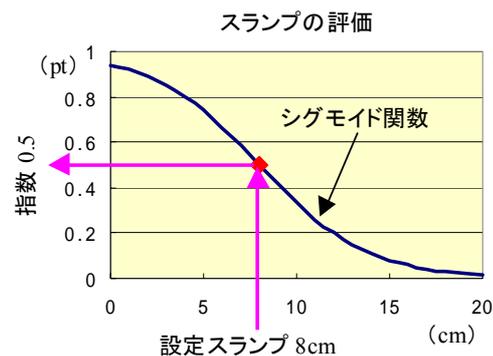


図-3 施工項目と指数、係数の関連付け

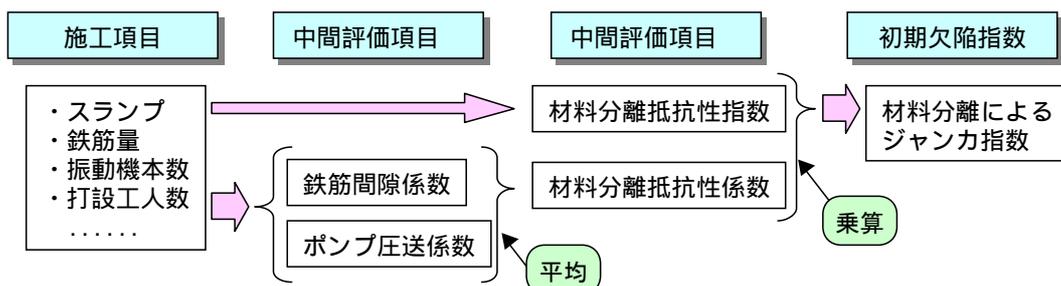


図-2 初期欠陥指数の計算手法

(1) ジャンカ

ジャンカの発生危険度を表す指数の計算に用いる施工項目，中間評価項目を図-4に示す。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した部分が生じる現象と，締固め不足等でコンクリートが充填されない現象を考え，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の指数を設けた。

材料分離抵抗性指数は，スランプや水セメント比などのコンクリート材料と配合から決まる材料的な性質である「コンクリートの材料分離抵抗性指数」と，施工によって誘発される材料分離の程度を表す「施工時の材料分離抵抗性係数」に分割して考えた。材料としての分離抵抗性を決定する施工計画の項目は，粗骨材最大寸法，スランプ，水セメント比が大きいと材料分離が発生しやすく，細骨材率が大きいと材料分離を生じにくいとした。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の平均として求めることとした。鉄筋間隙通過係数は，コンクリートが型枠に打ち込まれ，鉄筋間隙を通過

する際の材料分離の程度を表し，ポンプ筒先からの落下高さ，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なるため分離を生じやすいとした。ポンプ圧送では，筒先方向が下向き，圧送距離が長い，圧送方向が下向き，の場合には材料分離が生じやすいとした。

充填性指数は，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，締固め作業によりどの程度確実に充填されるかを表す「施工時の締固め係数」から計算することとした。コンクリート材料は，スランプ，水セメント比が大きいと変形しやすく，単位粗骨材量，粗骨材最大寸法が大きいと変形しにくいとした。高流動コンクリートの場合は自己充填性を有しているため，普通コンクリートよりも変形しやすいとした。施工時の締固めに関しては，バイブレータによる締固め作業の確実性を評価するため，バイブレータ1本あたり，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，バイブレータの性能を評価項目とした。配筋の状況も締固めの確実性に影響があり，鉄筋のあき，鉄筋量，部材の種類を評価項目とした。部材の種類は，厚さの小さい壁や柱梁接合部などで締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) コールドジョイント

コールドジョイントの発生危険度を表す指数の計算に用いる施工項目，中間評価項目を図-5に示す。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と，施工時の実際の打重ね時間との関係ととらえ，コンクリートの凝結時間などから決まる材料としての許容打重ね時間指数と，施工による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。

材料から定まる許容打重ね時間には，コンクリート種類，セメント種類，混和剤種類，水セメント比，スランプ，コンクリート温度の各項目を考慮した。高流動コンクリートや混合

材料分離抵抗性指数	
コンクリートの材料分離抵抗性指数	粗骨材最大寸法 スランプ 水セメント比 細骨材率 コンクリートの種類
施工時の材料分離抵抗性係数	
鉄筋間隙係数	落下高さ 鉄筋量 配筋段数 かぶり厚さ
ポンプ圧送係数	筒先の方向 圧送距離 圧送方向
充填性指数	
コンクリートの変形性指数	スランプ 水セメント比 単位粗骨材量 粗骨材最大寸法 コンクリートの種類
施工時の締固め係数	
締固め能力係数	バイブ1本の締固め量 バイブ1本の打設工人数 バイブレータの性能
鉄筋間隙係数	鉄筋のあき 鉄筋量 部材の種類
施工環境係数	作業時間 外気温 作業環境 部材の種類 施工管理者の資格

図-4 ジャンカ指数に影響する施工項目

セメントを用いた場合、水セメント比やスランプが大きい場合、遅延剤を用いた場合には許容打重ね時間が長くなり、早強セメントを用いた場合、コンクリート温度が高い場合に短くなるとした。施工時の実際の打重ね時間は、打設計画の打重ね時間、ポンプ閉塞のリスク、気象状況などに影響を受けることを考慮した。当初の打設計画の打重ね時間自体が長い場合、若干の工事遅延でもコールドジョイントが発生するリスクは大きくなる。ポンプの閉塞は、コンクリートの配合とポンプ圧送方法に影響を受けると考えた²⁾。貧配合のコンクリートで圧送距離が長い場合などはポンプ閉塞の可能性が高くなり、打設作業の遅延によりコールドジョイントが発生する。その他の施工環境としては、日射、風速が強く、気温が高い場合にはコンクリートの始発時間が早く、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の供給が遅れる場合が懸念され、コールドジョイントのリスクは大きくなる。

(3) かぶり不足

かぶり不足指数に影響を及ぼす施工項目を図-6に示す。かぶり不足は、スペーサが適切に用いられているかを表す「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。かぶり不足はスペーサが適切に用いられていれば発生する危険性は低いと考えられるため、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。施工時の影響としては、鉄筋上での作業や、ポンプ配管等の振動・衝撃が鉄筋に伝わることによるかぶりの乱れを評価した。

4. 現場施工のケーススタディー

施工計画照査手法の出力値を検証するために、実施工現場におけるコンクリート工事のケーススタディーを行った。施工計画から、本照査手法により各初期欠陥の発生危険度を評価し、施工計画修正案の策定を行った。

4.1 照査対象と施工計画

検討対象としたのは、柱、梁を有するスラブ状構造物で、梁、スラブ部分の工事を検討した。打設部位の構造物条件、打設日の環境条件、施工計画を表-1、表-2に示す。表-1の周辺環境は施工当日の推定値として、気温がやや高いが曇りでコンクリート打設に適した気象条件を設定値とした。配合は普通コンクリートだが、鉄筋量の多い梁部の打設に対応するため、単位水量を180kg/m³、スランプを18cmと大きくした配合となっている。また、鉄筋量は最も鉄筋が密に配置されている柱梁接合部の550kg/m³として、照査を厳しい条件

コンクリートの許容打重ね時間指数	コンクリートの種類 セメントの種類 混和剤の種類 水セメント比 スランプ コンクリート温度
施工時の打重ね時間係数	
施工時間係数	計画打重ね時間
ポンプ閉塞係数	単位セメント量 スランプ 配管長 配管径 圧送方向 ポンプ出力
施工環境係数	日射 風速 外気温 部材の種類 工場からの運搬時間 施工管理者の資格

図-5 コールドジョイント指数に影響する施工項目

設計かぶり指数	底面のスペーサ密度 底面のスペーサ種類 側面のスペーサ密度 側面のスペーサ種類
施工時のかぶり係数	打設作業足場 運搬機械と配筋の干渉

図-6 かぶり不足指数に影響する施工項目

表-1 周辺環境および構造物条件

周辺環境等	
外気温	25°C
湿度	普通
風速	弱い
日射	曇りだが直射日光が当たる
施工管理者の資格	一級土木施工管理技士
構造物条件	
打設部位	梁、スラブ
梁の寸法	縦 1.1m 横 8m 高さ 1.1m
ひび割れ誘発、伸縮目地	なし
打設量	約600m ³

で行うこととした。この部分では配筋が2段と
なっており、鉄筋あきも小さいので、コンク
リートの充填が困難になると予測される。工
場からのコンクリートの運搬時間は約30分、
場内運搬はポンプ圧送だが、ほとんどの部位
がブーム打設で、一部10m程度の配管を用いる

表 - 2 配合, 配筋, 運搬, 打設条件

配合	
コンクリート種類	普通コンクリート
セメント種類	普通ポルトランドセメント
水セメント比	54%
細骨材率	47.4%
単位水量	180kg/m ³
単位セメント量	334kg/m ³
単位細骨材量	837kg/m ³
単位粗骨材量	950kg/m ³
空気量	4.5%
粗骨材最大寸法	20mm
細骨材種類	砕砂
混和剤種類	AE減水剤
呼び強度	27N/mm ²
スランブ	18cm
コンクリート打込み温度	25°C

配筋	
鉄筋量	550kg/m ³
配筋段数	2段
水平鉄筋最小鉄筋あき	6.2cm
鉛直鉄筋最小鉄筋あき	3.8cm
純かぶり	5.9cm
下部スペースの密度	4個/m ²
下部スペース種類	モルタルブロック
側部スペースの密度	0.5個/m ²
側部スペースの種類	モルタルブロック
段取り筋の使用	使用

運搬	
運搬時間	30分
場内運搬方法	ポンプ圧送
ポンプの場合の台数	2台
ポンプの場合の配管径	5インチ
ポンプの場合の配管長	10m
ポンプの場合の圧送方向	水平圧送
ポンプの場合の筒先方向	水平方向
ポンプの場合の配管の干渉	鉄筋上に配管する
ポンプ性能(出力)	中型

打設	
振動機種類	内部振動機φ50mm高周波
振動機本数	6本
打設工人数	12人
落下高さ	1m
打設ペース	90m ³ /h
予定作業時間	6時間
1層の打設高さ	50cm
打ち重ね層数	2層
打上げ速度	0.5cm/h
予定打重ね時間	2時間
作業足場	鉄筋上で作業
作業環境	良い

程度となっていた。これらの施工計画の項目
を用いて、各初期欠陥指数の予測を行った。

4.2 施工計画照査結果

各初期欠陥指数と中間評価項目の計算値を
図 - 7 に示す。係数は0 ~ 2の値であるが、こ
の図では比較のために中央値を0.5, 最高点を
1として整理した。値が0.5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。

ジャンカ指数はほぼ標準的な点数となっ
たが、鉄筋量が多いため、鉄筋間隙でのコンク
リートの閉塞や材料分離が懸念された。コー

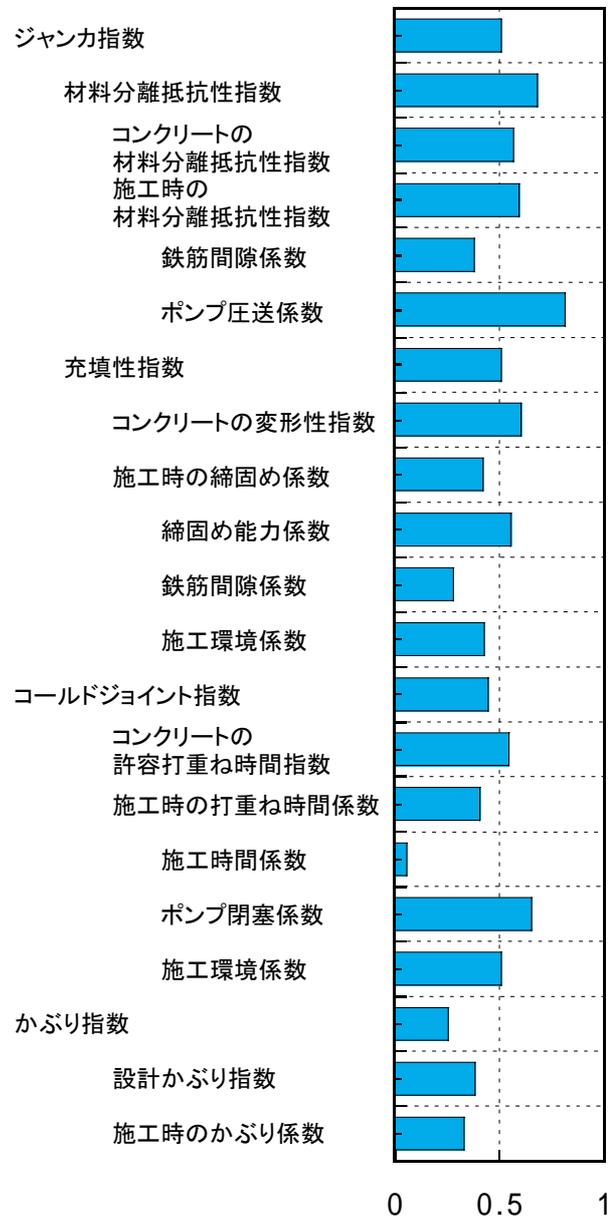


図 - 7 指数, 係数の計算結果

ルドジョイントに関しては、梁部分の2層打設の打ち回し計画において、打重ね時間が2時間となっており、計画通りの施工を行ってもコールドジョイントが発生する危険性が高いと予測された。かぶり不足に関しては、スペーサの数が少なく、打設がスラブ鉄筋上での作業となるため、かぶりの確保が懸念される結果となった。

4.3 施工計画の修正案

施工計画の照査結果に基づき、予想される初期欠陥の発生を回避するための施工計画修正案の策定を行った。

ジャンカ発生の要因として、鉄筋間隙でのコンクリートの閉塞や材料分離が懸念されるが、配筋の変更は難しく、鉄筋が密に配置された場所へのコンクリートの確実な充填を行うためには、ある程度大きなスランブのコンクリートが必要と考えられる。そのため、配筋や配合の変更は行わず、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。充填性指数では、施工時の締固め係数が0.5を下回っているが、バイブレータの本数を8本に、打設工人数を18人に、バイブレータの種類をより締固め能力の大きい

60mmのものに変更することにより、標準値の0.5とすることができる。

梁部分を2層打設としていることから計画打重ね時間が2時間であり、施工時間係数が0.12と非常に小さな値となっているため、コールドジョイントの発生危険度が高いと判断されている。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分程度とすることにより、施工時間係数を標準値とすることができる。

かぶり不足に関しては、配管の振動が鉄筋に伝わらないようにし、スラブ下面のスペーサを4個/m²に、梁側面のスペーサを2個/m²に変更することにより、かぶり指数を標準値とすることができる。

4.4 考察

ジャンカに影響を及ぼす施工項目は多く、一つの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。また、入念な締固めをするか否かと言った作業の確実性が持つ影響度も大きく、定量的な予測が難しい。コールドジョイントに関しては、施工計画の段階でその発生危険度がある程度推定しやすいが、部材の形状が特殊な部分や浮き型枠部分などでは予想外に打重ね時間が長くなってしまう場合があり、慎重な検討が必要である。かぶり不足はスペーサの影響が支配的であり、スペーサの数が少ない場合、破損や脱落によりかぶりが確保されないケースが懸念される。

計算により出力される初期欠陥指数は、各計算に使われ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ているシグモイド関数により支配される。そのため、施工項目と初期欠陥の因果関係をより詳細に把握し、計算に取り入れてゆく必要がある。また、土木構造物はその多くが特殊な形状の部分を持っているため、1日の打設作業であっても対象部位が複雑であり、初期欠陥の発生危険度を予測するには部位別の検討が必要になることが考察された。

5. まとめ

本論文より得られた知見を以下に示す。

- (1) 初期欠陥の発生危険度という指標を用いて施工計画の照査が可能である。
- (2) 初期欠陥の発生危険度を精度よく推定するためには、施工計画のコンクリート配合や打設計画と初期欠陥発生との因果関係を詳細に把握する必要がある。

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