

初期欠陥を未然に防ぐコンクリート施工性能評価システム

坂井 吾郎・新藤 竹文・前川 宏一

高品質かつ高耐久なコンクリート構造物の構築には、その構造物の構造・施工条件に適した施工性能を有するコンクリートを選定し、施工に起因する初期欠陥の発生をできるだけ抑えることが重要である。著者らは、初期欠陥を未然に防ぐための方策として、構造・施工条件とコンクリートの施工性能の関係を明らかにし、初期欠陥の発生をリスクとして評価可能なコンクリート施工性能評価システムの構築に取り組んでいる。

本報文では、コンクリート施工における問題点を整理するとともに、それらを踏まえたコンクリート施工性能評価システムについて、その概要を報告する。

キーワード：コンクリート施工，ワーカビリティ，スランプ，初期欠陥，施工性能，リスク評価

1. はじめに

戦後の社会資本整備においてコンクリートは重要な役割を担い、多くの構造物がコンクリートによって構築されてきた。特に、昭和30年代後半からの高度経済成長期においては、低コストであり、強度特性に優れ、適用範囲の広いコンクリートがまさに打ってつけの材料であり、コンクリートポンプの普及といった施工方法の革新と相まって、様々なコンクリート構造物が生み出されていった。

近年になり、こうした高度成長期に構築されたコンクリート構造物の劣化が予想以上に進んでいることが明らかとなるとともに、今後の少子高齢化が確実視される中で新規構造物への投資額が減少せざるを得ない状況にあることが多くの人々の知るところとなり、コンクリート構造物の耐久性への社会的関心が高まっている。

「とにかく造ることが最優先」とされた時代から、「品質の良いものを造り、長く使う」時代へと移りつつあり、コストについても「いくらで造れるか」だけではなく、「供用期間中の維持管理を含めてトータルでいくら必要か」というライフサイクルコストの観点から議論されるようになってきている。

コンクリート構造物の耐久性を確保するための基本は、「所定の耐久性能を満足するよう配合設計されたコンクリートを密実に打込む」ことにあるが、近年の施工においては、この「密実に打込む」ことが難しくなっ

てきており、ジャンカやコールドジョイントなど施工に起因する初期欠陥が多発している。

現在の施工では、耐震基準の見直しによる高密度配筋化やコンクリートポンプによる長距離圧送化などにより、従来よりも施工そのものが難しくなっている一方で、特に土木構造物におけるコンクリートの仕様は、スランプ8cm程度の硬練りのコンクリートが指定される場合が多い。

本来、コンクリートには構造物の形状や施工条件ごとに適切な流動性と材料分離抵抗性が存在するが、このコンクリートの施工性能が適切に評価されないままに施工が行われているのが現状であり、この施工条件の難度上昇とコンクリートの施工性能の乖離が初期欠陥多発の一因であると考えられる。

本報文では、特に土木構造における現状のコンクリート施工の問題点を整理したうえで、初期欠陥を未然に防ぐための手法構築の一環として取り組んでいるコンクリート施工性能評価技術について解説する¹⁾。

2. コンクリート施工の問題点

(1) コンクリート施工を取巻く社会環境の変化

コンクリートの打設方法は、1950年以前はバケットによる施工が主流であり、硬練りのコンクリートを十分な手間と時間を掛けて入念に締固めて施工することを基本とした。多くの事例報告^{2),3)}にもあるように、耐久性の高いコンクリート構造物が構築されていた。

1950年代以降、コンクリートの急激な需要増加と

大規模で急速な施工計画に対応すべく、ポンプ施工がコンクリート工事の主流となった。ポンプ施工への移行は、合理的な施工を実現するうえで多くの恩恵をもたらしたが、一方で、圧送負荷の低減などから軟練りコンクリートが多く使用されるなど、コンクリート構造物の耐久性低下の一因ともなってきた。さらに、近年においては熟練作業員の不足や良質骨材の枯渇によるコンクリート品質の低下などが加わり、ジャンカやコールドジョイントなどの施工自体に起因する初期欠陥が顕在化するようになってきている。

このような状況の中で岡村⁴⁾は、コンクリート構造物の信頼性向上を実現する締め固め不要のコンクリートの開発を提起した。1988年に具現化された自己充てんコンクリートは、作業員の熟練度に依存せずに高度の品質保証ができる革新的なものであり、現代の社会システムに最も適合したコンクリートといえるが、我が国のコスト構造、入札制度、品質に対する責任体制などが普及を阻んでおり、これら制度上の障壁の少ない欧州を中心に、世界的な展開が進んでいる。

また、現在では、高性能な混和剤の開発によって、耐久性や強度などの品質を低下させずに、スランプなどに代表されるコンクリートの施工性能を向上させることも技術的に十分に可能である。しかし、このような材料配合の改善による正攻法の対策は、高流動コンクリートと同様にコストの観点から採用されることが少ないのが現状である。

(2) コンクリート施工に関わる問題点の整理

コンクリート施工の現状を以下に整理する。

第一に製造時におけるスランプの変動因子として、骨材の表面水率しか考慮されていない点が挙げられる。

細骨材の粗粒率やコンクリート温度が変化すると、それに応じてスランプが変化する⁵⁾ことは良く知られている(図-1)。

本来は、これら各種要因の変動に応じて配合修正を行うことが必要と考えられるが、現状では、骨材の表

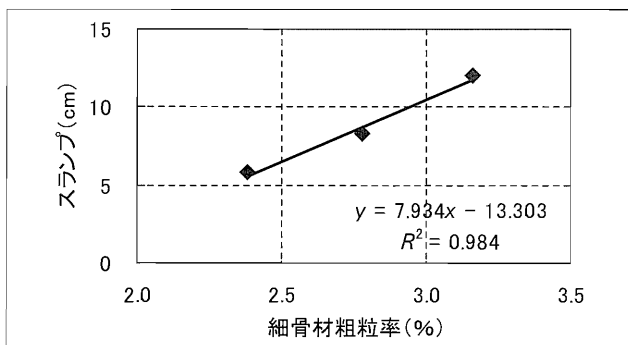


図-1 細骨材粗粒率とスランプの関係 (室内実験によるデータ)

面水率の補正のみしか行われておらず、その他の要因に対する補正は考慮されていないのが実状である。

第二に、試験練り時のスランプ設定に運搬・施工時のスランプロスが考慮されていない点が挙げられる。

フレッシュコンクリートの性状は、工場で製造されてから現場に到着して、さらに打設されるまでの間に変化し、その変化の程度は運搬時間や環境温度、ポンプ圧送条件などに大きく影響される(図-2)。

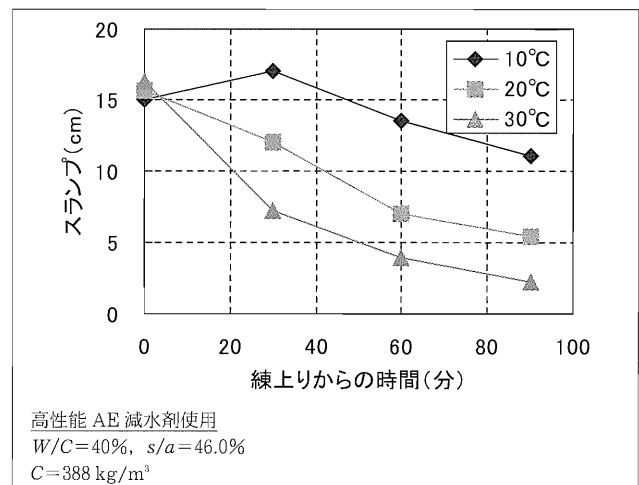


図-2 スランプの経時変化 (室内実験によるデータ)

したがって、強度と同様に、製造から打込みに至るまでのスランプの変化を事前に評価して配合を定めるべきであるが、現状の試験練りにおける目標スランプは実施工における荷降ろし時のスランプと同一として取扱われていることがほとんどであり、こうした運搬中のスランプの変化については考慮されていない。このため、工場では様々な手法によりスランプの調整を行っているのが実状であり、中には「骨材の表面水率の調整」という名のもとに一種の加水行為が行われる場合もある。

第三に、現場到着時の受入検査で品質管理の範囲内にあるものは、規格上、施工性能が同じであるとして扱われている点が挙げられる。

コンクリートの製造時には前述したような各種要因の変動によるスランプの変化が生じるため、品質管理のうえではスランプにばらつきが考慮されている。例えば目標スランプが8 cmのコンクリートでは、±2.5 cmの許容範囲が設けられており、この範囲内であれば、品質管理上は同一のコンクリートとして見なされる。

しかし、スランプが5.5 cmのコンクリートと8 cmのコンクリートでは明らかに施工性能は異なり、実際の施工段階ではスランプ8 cmでは施工可能であっても、スランプ5.5 cmでは施工困難となる場合が多々

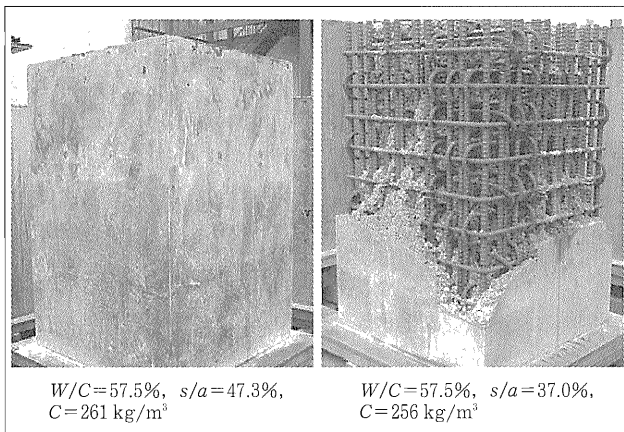
ある。そのため、施工者は自衛手段として最低でもスランプ 8 cm を確保するよう、いわゆる「上限発注」を行う場合がある。

この行為は、スランプの平均値を 10 cm 程度に設定することと等価であり、また、多くの場合は、この調整が単位水量のみによって行われるため、このように製造されたコンクリートが本来の材料分離抵抗性や耐久性を有していないことは言うまでもない。

よって、このような現状を回避するためには、強度設計と同様に、施工面でのばらつきも考慮したスランプの管理値を設定したうえで、それに応じた配合選定を行うことが必要である。

第四に、品質管理として汎用されているスランプ試験が、コンクリートの施工性能を的確に表現する指標として不完全である点が挙げられる。

同一スランプ値のコンクリートは、同一の施工性を有するものとして取扱われているが、スランプ値自体は施工性の一部を代表しているにすぎない。写真一1は、スランプ値が 8 cm と同一であり、粗骨材量が異なる 2 種類の配合条件のコンクリートを高密度に配筋された大型試験体に打設した時の状況を示したものであるが、同一スランプ値であっても配合条件によってコンクリートの充てん性には著しい違いのあることが確認される。



写真一1 大型試験体打設状況

熟練した技術者であれば、スランプ試験からスランプ値以外にも多くの情報を読み取り、それを配合選定に反映させることができるが、それらスランプ値以外の情報については数値化できておらず、コンクリートの施工性能を的確に表現するには至っていない。

第五に、施工性には寸法効果が存在する点が挙げられる。

室内試験における供試体や小規模の部材では、作業の労力や環境を整えやすいことから、施工性能の良否

によらず十分に締固めて密実な品質のコンクリートとすることが可能である。しかし、実構造レベルでは施工性能に適合しない施工性能のコンクリートを打設した場合、材料分離やジャンカやコールドジョイントなどの初期欠陥の発生リスクが拡大する。

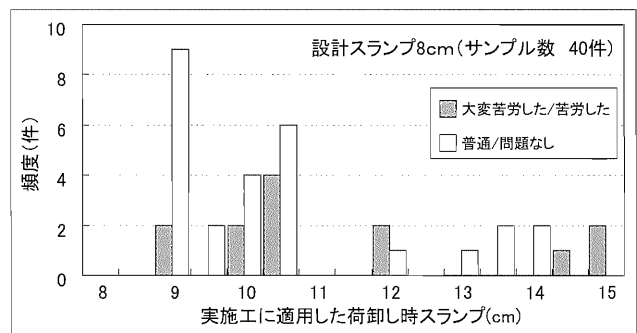
すなわち、実際の施工では、施工結果の良否におけるコンクリートの施工性能のウェイトが大きく、このことを考慮した配合選定が必要であるということである。

以上のような問題点を抱えながら、実際の現場では多大な労力と時間をかけて施工が行われている。最近では、コンクリート構造物の品質確保を目的に単位水量検査が実施されるようになってきたが、これも適切な施工性能を有する示方配合が選定されることを前提として実施されるべきものであろう。

3. コンクリート施工性能の定量評価

現在、コンクリートのワーカビリティはスランプ値のみで評価されているが、スランプ値のみではコンクリートの施工性能を的確に表現することができないことは前述のとおりである。前章で述べたコンクリート施工に関わる問題点の適正化を図るためには、対象構造物の構造・施工条件に適したコンクリートの施工性能を定量的な評価指標を持って示すことが必要であると考えられる。

図一3に、一般構造物の施工現場を対象にコンクリート施工に関するヒアリング調査を実施した結果¹⁾を示す。



図一3 コンクリート施工に関するヒアリング調査結果

図一3は、設計スランプ値である 8 cm では施工が困難であるため、仕様変更などを行って施工された事例の実際のスランプ値を示したものであり、中には設計より 5 cm 以上大きいスランプ値のコンクリートを打設している場合もあることが確認される。このような事態は、構造物の構造・施工条件とコンクリート施

工性能の関係が明確化され、定量的な評価指標が提示されていれば、設計の段階において回避できるものと考えられる。

構造物の構造・施工条件に対する適切なコンクリートの施工性能を定量的に評価するための取組みとして、図-4に示すような加振装置を設置した試験器を用いて、加振時におけるコンクリートの変形挙動を評価する手法が検討されている⁶⁾。

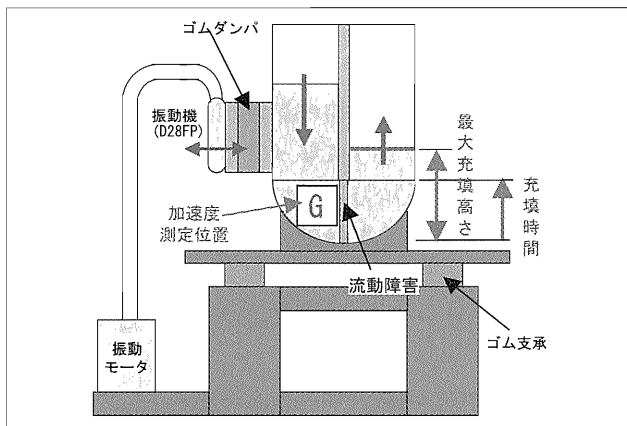


図-4 加振試験装置の概要図

図-5はその実験結果の一例であり、スランプ値を8cmと同一にして、配合および使用材料を変化させたコンクリートに振動を加え、コンクリートが一定の高さまで充てんするのに要した時間を示したものである。

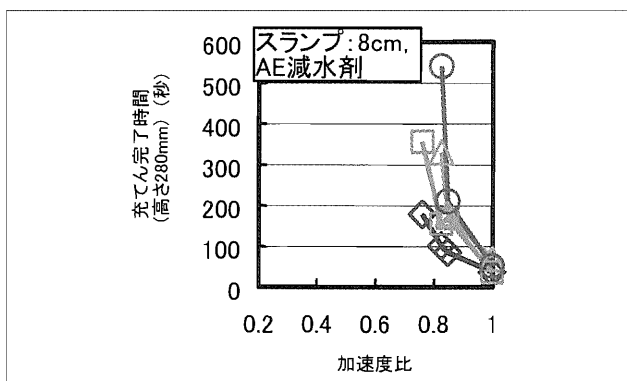


図-5 加速度比と充てん完了時間の関係

これによると、加速度比が小さい場合には同一スランプ値、材料であってもコンクリートの充てんが完了するまでの時間が大きく異なる結果となっている。このことは、加速度比の小さい場合、すなわち実際の施工でのバイブレータの挿入位置から離れた「かぶり部分」などにおけるコンクリートの挙動に違いがあり、配合によって材料分離やジャンカなどの初期欠陥の発生リスクが異なることを示すものであると考えられる。

このように、コンクリートの施工性能を評価するためには、実際の施工と同様にコンクリートを加振して評価することが必要である。そのためには、上記のような方法によって、対象とする施工条件に対して適切かつ良好な施工性能を有するコンクリートを定量的な指標をもって提示できるものと考えられる。

4. 初期欠陥を未然に防ぐ施工性能評価システム

著者らは、前述したようにコンクリートの施工性能を定量的に評価したうえで、構造物の構造・施工条件に応じて適切なコンクリートの性能設定および配合設計が行えるような、コンクリート施工性能評価システムの構築を目指して検討を行っている。

(1) システムの概要

システムのフローを図-6に示す。

(a) 条件設定

本システムは、主に施工計画段階における適正配合の照査に用いることを前提としている。したがって、システムの利用にあたって入力が必要とする項目(条件設定)については、コンクリートに関する専門的な知識を必要とせず、かつ特別な検討を行わなくても入手可能な情報とし、できる限り簡易にすることを念頭に置いている。

①対象構造物の条件

対象構造物の条件は対象とする構造物の重要度と構造・施工条件に分けられる。

構造物の重要度とは、その構造物の果たすべき機能を考慮した品質のランクである。例えば、同じように未充てん部を生じて水理構造物と一般の構造物では構造物の機能に及ぼす影響が異なり、水理構造物ではより高い確率で未充てんが回避されなければならない。このように構造物の果たすべき機能によって異なる初期欠陥発生の影響度を評価の過程で考慮できることがリスク評価の意義であり、そのためには、あらかじめ構造物に求められる品質を明確にしておく必要がある。

また、構造・施工条件とは、工場から現場までの運搬時間およびポンプ圧送距離などのコンクリートの運搬に関わる条件と、構造物の形状や内部鋼材の配置状況およびそれによって決定される打込み位置箇所やバイブレータ挿入可能範囲などのコンクリートの打設に関わる条件である。

②発注仕様

設計された強度や耐久性を確保するために発注者が

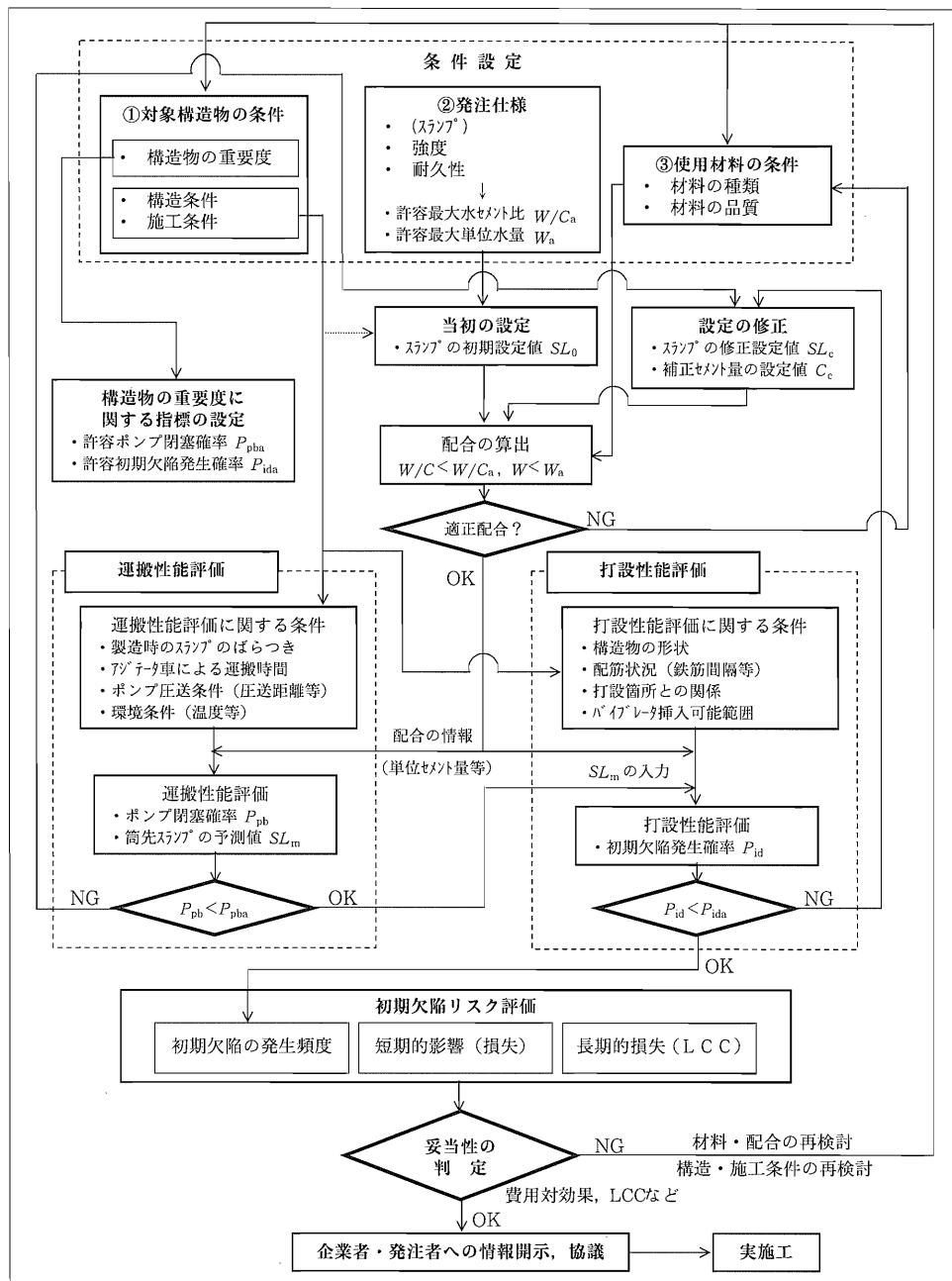


図-6 施工性能評価システムのフロー

定めたコンクリートの仕様であり、許容最大水セメント比や許容最大単位水量などである。

③使用材料の条件

セメント、骨材、混和材料などの使用材料の種類や品質に関する情報である。

本システムでは、②と③の条件に基づいて配合を算出し、その配合が有する施工性能と①の条件から初期欠陥発生リスクの評価を行う。

(b) 施工性能評価システム

施工性能の評価は、図-6に示すように運搬性能評価と打設性能評価に分けられる。

運搬性能評価はコンクリートの製造からポンプ圧送に至るまでの性能を評価するものである。打設性能評

価は圧送後から打込みが完了するまでの性能を評価するものである。評価の結果はいずれも不具合が生じる確率（前者はポンプの閉塞確率、後者は初期欠陥の発生確率）として出力される。

図-7に運搬性能評価の中核となるポンプ閉塞確率算定の基本概念を示す。本評価システムでは、コンクリートの性能は変形性と粘性（材料分離抵抗性）で表現されるという考え方にに基づき、それぞれの指標としてスランプとセメント量を用いている。ただし、ここでいうセメント量とは単に配合上の単位セメント量を示すものではなく、細骨材微粒分や水セメント比など、そのコンクリートの総合的な粘性を判定するにあたって不可欠と考えられる配合因子の影響を考慮して、単

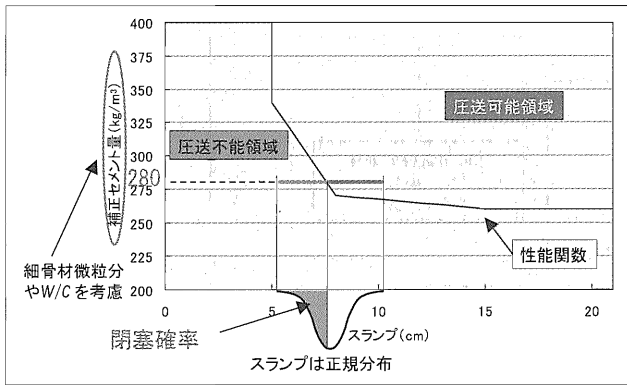


図-7 ポンプ閉塞確率算定の基本概念図

位セメント量に補正を加えた「補正セメント量」である。

コンクリートの施工性能は、この両者の関係において不具合（ここではポンプの閉塞）発生の有無を分ける境界線、すなわち図中の性能関数によって判定される。例えば、図-7において補正セメント量が280 kg/m³ のとき、スランプが10 cm であれば圧送が可能であり、5 cm では閉塞となる。この性能関数に対してスランプのばらつきを考慮すると不具合の生じる確率を求めることができる。

2章で述べたとおり、コンクリートのスランプは各種の要因の影響によって変化するため、連続的に製造されたコンクリートであってもある範囲のばらつきを有する。図-7に示すように、このスランプのばらつきが正規分布であると仮定すると、スランプがある値となる時の頻度とその値に対する不具合発生の有無が求まり、これを積算したものが不具合の発生確率となる。また、このときのスランプの中心値は配合設計における規格値ではなく、運搬や圧送によるロスを考慮したものとしており、より現実的な不具合の発生確率を求めることを可能としている。

図-8に打設性能評価の中核となる初期欠陥発生確率算定の基本概念を示す。

図-8から分かるとおり、基本的な考え方はポンプ

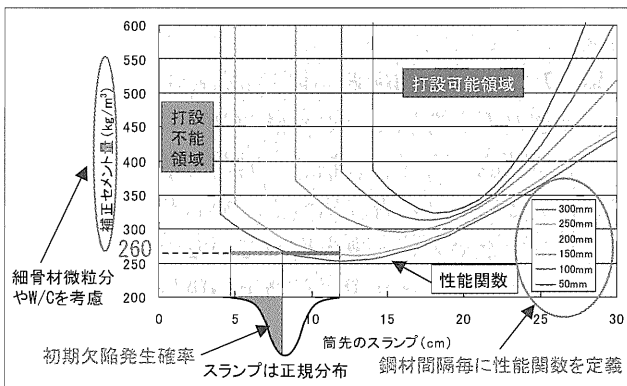


図-8 初期欠陥発生確率算定の基本概念図

閉塞確率算定と同じであるが、スランプが運搬性能評価の過程で別途得られる筒先における予測スランプである点と、未充てん部の発生に対して最も大きな影響因子であると考えられる鋼材の最小あき間隔毎に性能関数を規定している点が異なる。

図-9に運搬性能評価システムの入力画面例および出力画面例を示す。

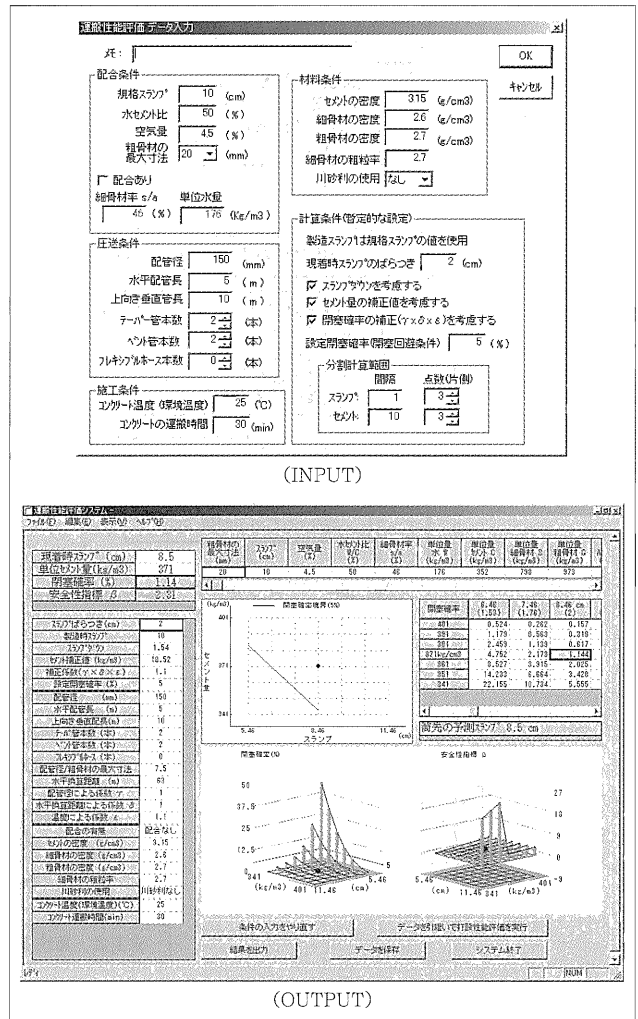


図-9 システムの入出力画面例

前述のとおり、入力が必要とする情報は施工計画の検討時に入手可能なもののみである。また、出力画面では現在の入力条件に対する不具合の発生確率とともに、スランプと補正セメント量および不具合の発生確率の関係が示されるため、どのように配合条件を見直せばよいかという点についての目安を容易に得ることができる。

(c) 初期欠陥リスク評価

一般にリスクはある事象の発生確率とその事象による影響度で表される。したがって、初期欠陥リスク評価では、各性能評価システムにおいて算出したポンプ閉塞確率および初期欠陥発生確率と、構造物の重要度

から求まる品質への影響度から初期欠陥リスクを算定する。また、リスクには初期欠陥発生に伴う補修費用などの短期的影響（損失）と、初期欠陥に起因するコンクリート構造物の耐久性低下に関わる維持管理・補修の費用などの長期的影響（LCC）を考慮することを考えており、具体的なリスクの算定方法を検討中である。

（２） システムの利用方法

本システムの全体概要については前項（a）～（c）で述べてきたとおりである。一連の流れを総合的に判断し、現実的でない結果が得られた場合には、対象構造物の条件、材料・配合条件を見直して再評価を行う。再評価の結果が現実的な計画に収束すれば、発注者に対してそのコンクリート仕様および配合を用いた場合のリスクとコストを開示・提案して、採否の判定を委ねることとなる。また、このような手順を経てスランプなどを設定しても初期欠陥の発生を完全に回避することはできないが、リスクを定量化していることにより発生した不具合に対するコスト損失についても協議が可能である。

5. おわりに

耐久性に優れたコンクリート構造物を構築することが、社会インフラの維持管理コストを軽減するうえでも重要かつ緊急を要する課題である。本報文では、現在の事業執行形態を前提としたうえで、そうした課題に対する一つの方策となるコンクリート施工性能評価技術について報告した。本報文で提案した施工性能評価技術がコンクリート構造物の施工を取巻く諸問題の解決と、高品質・高耐久な構造物の実現の一步になれ

ば幸いである。

J C M A

《参考文献》

- 1) 新藤竹文, 坂田 昇, 前川宏一: 初期欠陥を未然に防ぐコンクリート施工性能評価技術について, コンクリート工学, pp.27-34 (2005.2).
- 2) 横関康佑, 中曽根順一, 柿崎和男, 渡邊賢三: 100年以上経過した地下コンクリート構造物の耐久性について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.251-256 (1998).
- 3) 安田和弘, 渡邊賢三, 大野俊夫, 横関康佑: 約60年経過したダムコンクリートの溶出挙動評価, 土木学会第56回年次学術講演会論文集 V-285, pp.570-571 (2001).
- 4) 岡村 甫: 新しいコンクリート材料への期待, セメントコンクリート, No.475, pp.2-5 (1986).
- 5) 芦澤良一, 坂井吾郎, 新藤竹文, 坂田 昇: 各種要因がスランプへ及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1009-1014 (2005).
- 6) 府川 徹, 大友 健, 坂田 昇, 新藤竹文: 高周波振動を受けたコンクリートのワーカビリティに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1015-1020 (2005).

【筆者紹介】



坂井 吾郎 (さかい ごろう)
鹿島建設株式会社
技術研究所
土木構造・材料グループ
主任研究員



新藤 竹文 (しんどう たけふみ)
大成建設株式会社
技術センター
土木技術研究所
土木構工法研究室
土木材工チーム
チームリーダー



前川 宏一 (まえかわ こういち)
東京大学大学院工学研究科
社会基盤学専攻
教授
工博