

コンクリート施工の高品質化、省力化への取り組み

藤倉裕介

概 要

近年、特に公共工事ではコンクリート構造物の高品質化、長寿命化に関する提案型発注が増加している。また、性能照査型設計への移行、環境負荷低減の観点から、各種の混和材料を組み合わせるケースも増加している。このように使用材料の多様化が進む中、施工者は適切な材料選定を行うとともに、コンクリートの施工性、強度発現性および長期耐久性といった時間軸で要求される性能を満足することを計画段階で把握することが必要である。

本報では、養生方法に関する昨年度の報告に引き続き、コンクリート施工の高品質化、合理化へ向けた取り組みについて、低コストで高品質なコンクリートの配合例、コンクリートの打ち込み状況のリアルタイムビジュアル化を実現したセンサーの開発内容とその適用事例を紹介する。

Application of low-cost, high-performance concrete and visualization of construction situation for the purpose of affordable, high-quality concrete construction

Abstract

The ongoing shift to performance-oriented design has allowed more freedom of material selection and proportioning according to the performance requirements of structures. In addition, the use of industrial byproducts as supplementary cementing materials has been increasing as waste disposal and reduction of CO2 emissions become increasingly important. Amid such changes in the environment for cementitious materials, contractors are required to select appropriate materials, and understand their effect on the performance of the concrete over time, including workability, strength development, and long-term durability.

This report examines application of low cost high-performance concrete and visualization of construction situation for the purpose of affordable, high-quality concrete construction

キーワード: コンクリート施工 高品質
コンクリート 合理化施工

§1. はじめに

近年、特に公共工事ではコンクリート構造物の高品質化、長寿命化に関しての提案型発注が増加している。また、性能照査型設計への移行、環境負荷低減の観点から、各種の混和材料を組み合わせ使用する場合も増加¹⁾している。このように使用材料の多様化が進む中、施工者は適切な材料選定を行うとともに、コンクリートの施工性、強度発現性および長期耐久性といった時間軸で要求される性能を満足することを計画段階で把握することが必要である。また、実際のコンクリート施工は現場で打ち込み、締め固めを行うため、その品質は作業員の経験や熟練度、施工者の管理方法に大きく影響される。施工時に初期欠陥を生じた場合にはコンクリート構造物が早期に劣化する事例も多く指摘されている。このようなコンクリート打ち込み時の作業員の熟練度の影響を軽減する対策としては、自己充填型(高流動)コンクリートを採用することもその解決へ向けた一手段である。近年、高機能な混和剤が開発され、安定したフレッシュ性状を有する高流動コンクリートを手軽に使用できる環境が整いつつある。これは化学分野の進歩、開発の恩恵ともいえよう。同様に他分野に目を向ければ、ICT 技術の進歩、高度化は目まぐるしく、これらの技術を応用することで施工時の不具合を防ぐとともに、作業員の熟練度の影響を低減できるものと考えられる。

そこで、本報告では昨年度の養生方法に関する報告²⁾に引き続き、コンクリート施工の高品質化、合理化へ向けた取り組みについて、コンクリートの配合および打ち込みについての実施例、開発事例を紹介する。

§2. 高品質・低コスト高流動コンクリートの適用

2.1 施工性能および材料分離抵抗性を有するコンクリート配合選定の重要性

近年、耐震基準の改定による高密度配筋化、構造物の要求性能の多様化や複雑な形状の採用により、従来の一般土木構造物で用いられてきたスランブ 8cm のコンクリートでは十分な締め固めが困難なケースも多々ある。写真 1 には高密度配筋の事例を示す。また、写真 2 には PC 橋のシース管周辺の状況を示す。これらの構造物では、設計段階のコンクリートスランブは 8cm または 12cm が採用されており、充填が困難であることが容易に想定されるが、施工性能を考慮した配合設計がなされていないのが現状である。将来的には設計段階で施工性能を考慮したコンクリート配合の選定手法が確立され設計に盛り込まれることが望ましいが、実際に施工を請負う施工者が材料を



写真 1 高密度配筋の事例



写真 2 PC 橋のシース管周辺の状況

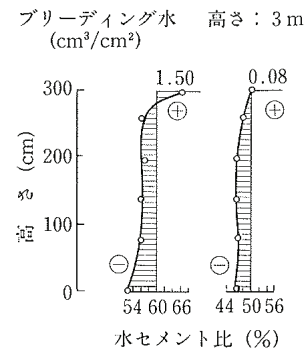


図 1 柱の高さ全域の水セメント比の分布⁴⁾

選択し、発注機関と協議することも必要であると考える。高品質なコンクリート構造物を造る情熱、施工会社としての専門知識と経験を駆使し、施工時の不具合が生じないような施工計画を立案することは、施工者の責務であるとも考えられる。

近年、土木学会より発刊された指針³⁾では、施工条件や施工方法に応じて、コンクリートのスランブを選定できる手法が提案されており、これに基づいて施工者はシステムチックにスランブの選定を行うことができるようになってきている。しかし、一方でコンクリート配合を適切に選定しフレッシュ性状を見極める技術も必要である。土木構造物では施工者が JIS 規格外の配合を提案する場合もあり、材料や配合設計に関する知識も必要とされる。

このように施工性能に応じてスランブを選定して、より高スランブのコンクリート配合を選定すると、流動性や充填性は向上する一方でブリーディングや締め固めによる骨材の沈下など、部材内のコンクリートの不均一性が生じやすくなるものと考えられる。図 1 には、ブリーディングによ

て部材上部のコンクリートの含水量が多くなり、下方のコンクリートよりも品質が悪くなる例を水セメント比で示したものである。スランブ 8cm から 18cm のコンクリートでは、スランブ試験時のコンクリートの崩れ方や形状を目視確認する程度であり、一般にはブリーディング対策がきちんとなされていない。一方、近年コンクリート構造物のより一層の高品質化が求められており、高スランブ化することで生じやすいブリーディングや材料分離への対策も重要であると考えられる。

2.2 高品質・低コスト高流動コンクリートの配合例

このようにコンクリートの施工性能のみならず、打ち込み後に生じるブリーディングによる柱部材の不均一性を低減するための対策を考慮すると中流動コンクリートや高流動コンクリートを用いることが望ましいと考えられる。これら高流動コンクリートでは流動性を有しつつも材料分離抵抗性を保持するために、粉体量(セメントなどの粉体)を確保するか、増粘材等の添加により粘性を向上させるような工夫を行っており、ブリーディングについても極めて少ないコンクリートとなる。つまり、流動性を有していても材料分離抵抗性が低ければポンプ圧送性に影響し閉塞の原因となるし、コンクリートの性状確認として実施されるフロー試験時に水分が浮いたり、骨材とペーストの分離が生じれば分離抵抗性を有しないものと判定され改善策が検討される。これは、言い換えれば配合設計段階で材料分離やブリーディングの対策を十分に検討していることとなる。しかしながら、高流動コンクリートは設計基準強度に対してハイスpekな強度を有する結果となり、またコスト面においても非常に高価となるような問題もあり、一般土木構造物では採用されにくい傾向にある。そのような背景から、高スランブの JIS 配合をベースにして流動性を増加させることで、決してハイスpekにならずに安価に中流動、高流動コンクリートを適用した例を以下に紹介する。

表 1 に 3 つの現場ケースにおけるコンクリートの配合を示す。各ケースともに上段に当初の設計配合を示し、下段に高流動コンクリートの配合を示す。また、各ケースともに設計配合はスランブ 10cm、12cm であり高密度配筋の部位、コンクリート打ち込み時の締め固め状況の目視確認が困難な場合あるいは振動締め固め機によるコンクリートの確実な充填が困難であることを想定して高流動コンクリートの適用を検討したものである。高流動コンクリートの配合設計にあたってのコンセプトは以下のようである。

- ① ハイスpekな配合として扱わないよう、高スランブ JIS 配合に基づいて流動性を増加させる。
- ② ベース配合とセメントの種類、W/C は同一とする。
- ③ 単位水量の上限値(175kg/m³)以下とする。

表 1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	混和剤	
						①	②
ケース1 (RC巻き立て耐震補強工事の例) ベース配合:30-12-20N 高流動配合:30-550-20N							
50	45.3	169	338	836	1007	2.03	—
50	49.3	175	350	886	917	**3.85	微量
ケース2 (PC桁の例) ベース配合:40-12-25H 高流動配合:40-600-25H							
37.0	38.0	151	409	658	1089	**4.09	—
37.0	50.0	160	433	846	856	**6.93	—
ケース3 (橋脚フーチング部の高密度配筋箇所の例) ベース配合:27-10-20BB 高流動配合:27-500-20BB							
53.8	46.5	164	305	840	996	3.05	—
53.8	51.4	175	325	903	883	**4.55	—
備考)W:水、C:セメント、S:細骨材、G:粗骨材、混和剤①:AE減水剤、**高性能AE減水剤、混和剤②:不分離性混和材							



写真3 フレッシュ試験の状況

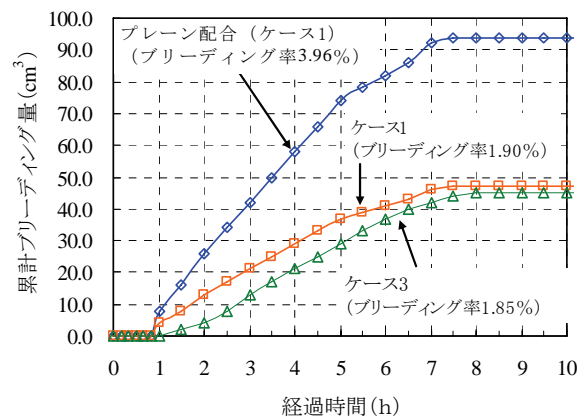


図2 ブリーディング試験結果

以上に基づき、試験練りを行って配合を決定する。実際に製造する生コンプラントや生コン組合の理解と協力が不可欠であるが、ベース配合の価格に対して10~15%程度のコストアップでの実現が可能である。ケース 1 につ

いては、材料分離抵抗性を向上させる目的で非常に微量の不分離性混和材を添加している。プラント添加を行っているが、微量であるため他の出荷への影響は無いことを確認している。なお、写真 3 にはケース 3 において実施したフロー試験、U 型充填試験の状況を示す。また、図 2 にはケース 1 における設計配合およびケース 1、ケース 3 における高流動コンクリートのブリーディング試験結果を示す。高流動コンクリートのブリーディング量が少ないことが分かる。

§3. コンクリート打ち込み状況のビジュアル化

3.1 開発の背景と目的

コンクリート構造物の品質向上のためには、まだ軟らかいフレッシュコンクリートを隔々に充填させ均一に締め固めることが重要であるが、コンクリートの充填状況の目視確認が困難な箇所も多く、このような部位には圧力センサーや温度センサーを補助的に設置することでコンクリートの充填状況の確認を行っている。しかし、これらのセンサーではセンサーを設置した位置の点情報しか得られず、コンクリートの充填状況を線的あるいは面的に、しかも連続的に把握できるものではない。このような現状から、型枠内に打ち込まれるコンクリートの充填状況を連続的に把握しビジュアル化することで品質管理を行う手法を新たに開発した。本項では本手法の原理および方法について示すとともに耐震補強工事の現場に適用した事例について示す。

3.2 本手法の原理と方法

本手法は、計測センサーケーブルを型枠内に設置し、型枠内に打ち込まれるコンクリートの充填に伴って変化する静電容量を連続的に計測することによりコンクリートの打ち込み高さを把握する。計測原理の概要を図 3 に示す。図 3(a) は円筒に計測ケーブルを鉛直に設置した状況を示す。計測センサーケーブルは一定の間隔を持った 2 本の線により構成されており、この間には静電容量が存在する。一般の空気中では比誘電率は小さく、計測センサーケーブル全体の静電容量は少ない。コンクリートの打ち込まれていない円筒の場合、静電容量の合計値は 14 である。一方、水などの液体をはじめフレッシュコンクリートでは一般に比誘電率が大きくなり(本例では空気の 80 倍)、図 3(b) に示すように約半分までコンクリートが打ち込まれると、その合計値は 646 となる。すなわち、コンクリートの打ち込み高さと静電容量の関係を事前に調べておくことにより、コンクリートの打ち込み高さを連続的に検知できるわけである。

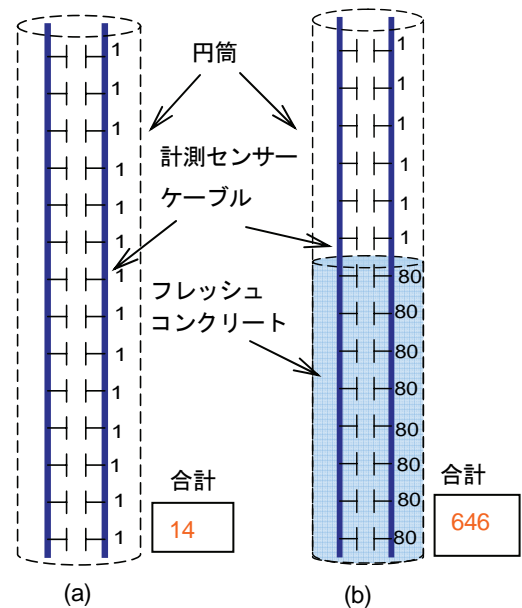


図 3 計測原理の概要

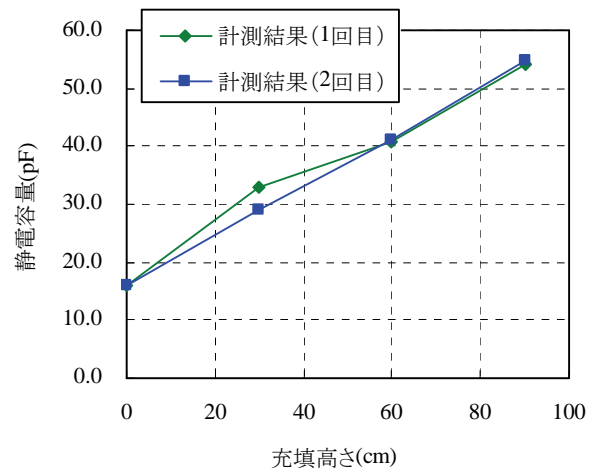


図 4 充填高さ と 静電容量 の 関係

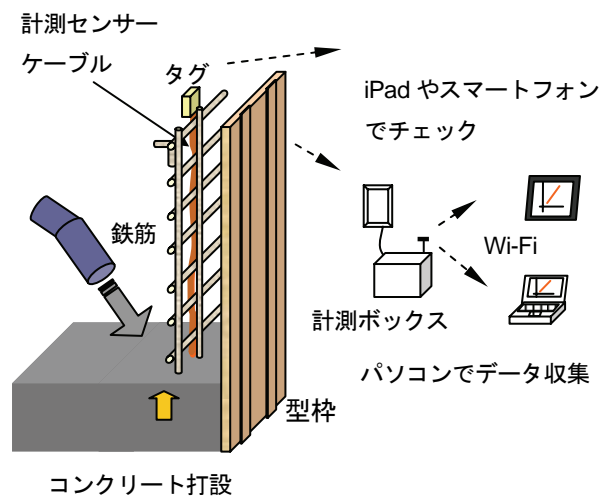


図 5 システムの概要

次に、図4に円筒容器にコンクリートを充填して計測した結果の例を示す。図4に示すように、コンクリートの充填高さの上昇に伴って静電容量はほぼ線形的に増加することが分かる。コンクリートの充填高さとの関係を事前に把握しておくことにより、静電容量の計測結果を充填高さに換算して示すことができる。

次に本手法を実際の建設現場のコンクリート打ち込み施工時において適用する場合のシステムの概要を図5に示す。図4に示すように計測センサーケーブルを型枠内に鉛直に設置する。計測センサーケーブルの設置方法としては、型枠内の鉄筋あるいは別途用意した鉄筋に沿わせて設置する。

写真4に計測センサーケーブルを示す。計測センサーケーブルはコンクリート中に埋め込むケーブル部分と計測結果の値を計測ボックスに無線で転送するタグとで構成されている。ケーブル部分は打ち込み高さ9.0m程度までに対応可能な長さとしている。タグ部分については、厚さ1cmで4cm×4cm程度の大きさでケーブル部分に接続できるコネクタが付いており、コンクリートの所定打ち込み高さよりも上面に出しておき計測終了後に回収する。また、タグ部分は内蔵電池により数年間転用して使用可能である。

図5に示すように計測ボックスで回収したデータは直ちに解析され、打ち込み高さを示すグラフや打ち込み状況をビジュアル化して表示する。また、計測結果の情報は、Wi-Fi機能を使ってパソコンやスマートフォンなどの各種端末へ無線で転送することが可能であり、コンクリート打ち込み箇所から離れた場所でも計測状況を把握することが可能である。

本システムを用いてコンクリート打ち込み時の品質管理を行う上での特徴として、以下が挙げられる。

- ① 一つの計測センサーケーブルで充填状況を線的にしかも連続的に検知が可能である。
- ② 本手法では無線を介して計測データを取得できるシステムを組み合わせているため、施工現場から離れた場所において施工状況の確認が可能である。
- ③ コンクリートの充填状況をリアルタイムでビジュアルに把握するとともに、コンクリート打設速度や打設量の把握が可能である。
- ④ 打ち込み後からの時間を表示または色分けすることが可能であり、コールドジョイントといった施工時に生じる不具合を未然に防ぐことができる。

コンクリート打ち込み時の充填状況の目視確認が困難で、しかも鉄筋量が多い場合や振動締め固め機の使用が困難な部位の打ち込み状況の把握、品質管理に有効である。



写真4 計測用センサーケーブル

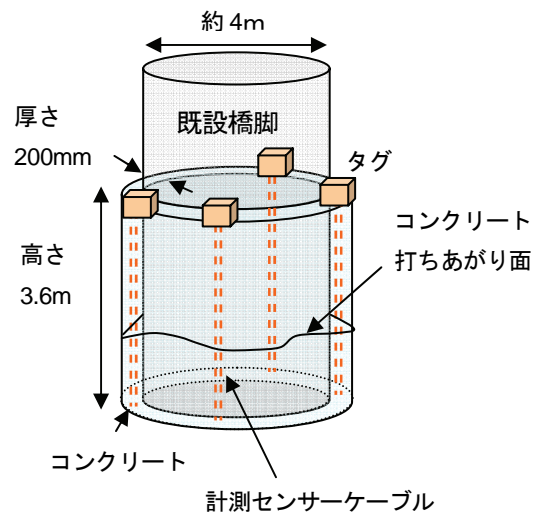


図6 既設橋脚の耐震補強工事への適用例

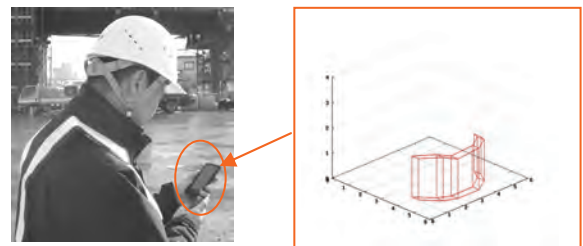


写真5 遠隔での確認状況

3.3 建設現場への適用事例

建設現場への適用事例として既設橋脚の耐震補強工事の事例を紹介する。この工事は、直径約 4mの円柱型の既設橋脚の周りに鉄筋コンクリートを巻き立てる耐震補強工事である。1 回の施工でのコンクリート打ち込み高さが 3.6m、厚さが 200mmと非常に薄い壁状の構造物であり、鉄筋も配置されていることから型枠内へのコンクリート打ち込み状況の目視確認が困難であり、本システムの適用を行ったものである。図 6 に本工事の概要と適用状況を示す。計測用センサーケーブルを型枠内に複数本設置し、計測結果を組み合わせてコンクリートの打ち込み状況をリアルタイムでビジュアルに表示した。写真 5 にはスマートフォンを用いて遠隔にて打ち込み状況を把握している状況を示す。打ち込み状況のビジュアル画面では円周状の施工部位の半円部分を表示している。このようにコンクリートの打設状況をビジュアルに把握できることで、工程の進捗状況を遠隔で確認できるとともに、予期せぬ施工上のトラブルへの対応、打設が中断された際に生じるコールドジョイントなどの不具合への対策にも状況を把握して対応できるものと考えられる。

§4. おわりに

実際のコンクリート施工は現場で打ち込み、締め固めを行うため、その品質は作業員の経験や熟練度、施工者の管理方法に大きく影響される。作業員の経験や熟練度に左右されず、コンクリート構造物の品質をより一層向上させる目的で、コンクリート配合および打ち込み時の取り組みについて紹介した。近年ではコンクリート材料を取り巻く環境が変化し、使用材料の多様化、高度化や環境負荷低減を考慮した材料開発も進められている。自己充填型コンクリート(高流動コンクリート)についても、高機能な混和材料の使用により低コストで適用可能なものとなりつつある。

一方、今回開発したセンサーケーブルの適用により、コンクリートの打ち込み状況を線的あるいは面的に、しかも連続的に把握でき、複数本の計測結果を合わせることで打ち込み状況をビジュアル的に表示させることも可能となった。

本報告の前半で紹介したような流動性が高く充填性に優れ、締め固めによる作業労力の少ないコンクリートと ICT 技術を用いた本システムを併用することにより、コンクリート施工の合理化、省力化を実現できるものと考えている。今後もコンクリートの配合や施工方法の工夫、改善方法を提案していくとともに、他分野で活用されている技術を建設分野で利用できるように改善し、コンクリートの高品質化に努めていきたいと考える。また、施工時に生じる初期欠陥

を未然に防ぎ、作業労力の少ないコンクリート施工により、トータルの施工コストの低減、省力化も実現できるものと考ええる。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート技術シリーズ 74、混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333 委員会)報告書、2007
- 2) 藤倉裕介:コンクリートの高品質化を目的とした材料・養生方法の現場適用と検証、フジタ技術研究報告、第 46 号、2010
- 3) 土木学会:施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)、コンクリートライブラリー126、2007
- 4) 社団法人コンクリート工学協会:コンクリート便覧[第二版]、p.218、1996

ひとこと

提案型発注をはじめ、コンクリート構造物の高耐久化、高品質化に対するニーズは高い。しかし、高コストな対策が望まれているわけではない。高機能な材料や ICT 技術などを応用しコンクリート施工に活用することで、低コストで高品質化が実現できるものと考ええる。



藤倉 裕介