

スラブ湿潤養生システムの開発

ースラブ乾湿自動評価システムと散水設備との連携による省力化ー

Development of Moist Curing System for Concrete Slab

- Integration of an Evaluation System for Wet Conditions on Slab and Watering Facilities for Labor Savings -

増田貴之* 中村裕介**

要 旨

スラブコンクリートの施工において、コンクリート打設後にスラブ表面の湿潤状態を適切に維持することは品質管理上大変重要である。しかしながら、湿潤状態の評価は管理者の目視による定性的な管理が通例となっており、定量的な管理手法が確立されていない課題があった。加えて、同状態を適切に維持するために、散水養生をはじめとする作業面においても多くの労務が発生している。そこで、光学センサとそれを搭載する自律走行式ロボットを用い、スラブ表面の乾湿状態を定量的に評価し、その結果を散水設備へ連携できるシステム一式の構築を行った。また、システムの有効性を確認するために現場適用を試み、現場実装への可能性を確認した。

キーワード：スラブ、自律走行式ロボット、自動散水、省力化、省資源化

1. まえがき

近年、EC サイトなどの増加を受け、大量の配送物を保管できる物流施設が増加している。物流施設のスラブはコンクリートの直床仕上げの場合が多く、表面が露出した状態となるため、打設後の湿潤養生は大変重要な作業である。コンクリートには普通ポルトランドセメントを用いることが多く、概ね5日以上の湿潤養生期間が求められている。

これまで所要の高品質を得るべく、適切な湿潤状態を維持するために散水後のスラブ表面を養生マットで覆うなどして管理が行われてきた。しかし、人的管理が主流であるため、一定のスキルを有する人材の確保や管理コストの負担が増えるといった課題があった。現在、養生管理の負担を軽減するために、スラブと養生マットの間に湿潤状態を検知するセンサを配置して、湿潤養生を管理する技術が提案されているが、スラブ面積が大きい場合、多くのセンサを設置する必要があり、人材確保および管理コストの負担が発生している。

このような負担を軽減するために、スラブ表面の湿潤状態を自動的に管理できる技術の開発が強く望まれている。そこで、筆者らはスラブ表面の湿潤状態を定量的に評価できる光学センサと、それを搭載した自律走行式ロボット(写真-1)により、ロボットがスラブ上を走行しながら乾湿状態を評価し、同状態をカラーマップ上に

視覚化できるシステム一式(以下、「スラブ乾湿自動評価システム」)を開発した。その結果、スラブ表面の高品質化に寄与できること、労務を一定数省力化できることを確認したり。

一方で、湿潤状態を適切に維持するためには、人による散水養生作業がやはり必要であることから、同作業への省力化がさらに求められた。そこで、散水設備をスラブ周囲に設置し、スラブ乾湿自動評価システムから得られた結果と連携することで、散水養生を自動化することを試みた。本報では、同システムと散水設備を実現現場において連携し、散水養生を自動化した現場適用実験について報告する。



写真-1 センサ搭載型自律走行式ロボット

* 土木本部土木工務部 ** ICT統括センターイノベーション部

2. スラブ乾湿自動評価システム

スラブ乾湿自動評価システムは、スラブ表面の乾湿状態を近赤外光で評価する光学センサとそれを搭載した自律走行式ロボット、そして評価結果をカラーマップ上に視覚化表示するシステムから構成される。

光学センサには、水の吸光特性が認められる波長域である $\lambda=1,450\text{nm}$ の光源を採用した。この光源から円偏光をスラブ表面に照射することで、スラブの乾湿状態を定量的に評価することが可能と考え、湿潤状態では反射光がほぼすべて帰還し、乾燥状態では帰還する光量が大きく減少すると仮定した(図-1)。これを実証し、センサとしての有効性を確認するため、コンクリート供試体に散水し、湿潤から乾燥における反射光量の測定実験を行った。測定結果を図-2に示す。

この図から、反射光量の計測値(電圧値)がコンクリート表面の水位、すなわち表面の湿潤状態の変化に伴い変動すること、そして計測値は測定環境の気温に影響を受けるものの、一定の範囲に収まることを確認した。次に、スラブ表面の乾湿状態と計測値の関係について考察した。スラブ表面に存在する凹凸が水面に露出していない状態を「湿潤状態」、スラブ表面の一部の凹凸が水面より露出した状態を「半乾燥状態」、スラブ表面の多くの凹凸が水面より露出した状態を「乾燥状態」と分類した。さらに、複数の実験結果により「湿潤状態」は計測値が1,200mV以上、「半乾燥状態」は100mV~1,200mV、「乾燥状態」は100mV以下の範囲に収まることを確認できたので、スラブ表面の乾湿状態の定量的把握において、計測値による基準を設定することが工学的に可能であると分かった。

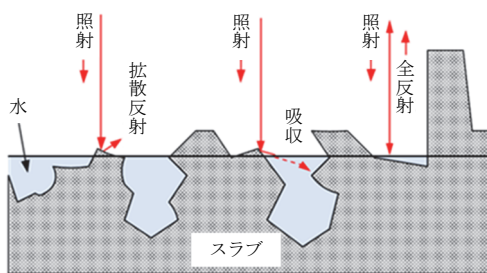


図-1 スラブ表面模式図

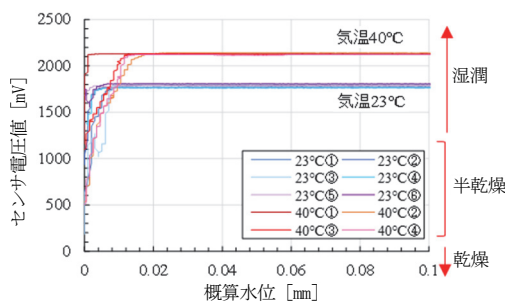


図-2 表面水位と反射光量(電圧値)の関係

次に、上記の光学センサを搭載した自律走行式ロボットが移動しながらスラブ表面の乾湿状態を評価し、結果をカラーマッピング表示する、スラブ乾湿自動評価システムの開発を行った。ロボットには光学センサの他に、ロボ駆動をはじめとした各種操作を制御するパソコンなどの制御部、ロボットの周囲環境を計測する2D LiDARを実装した。また、ロボットの自律走行方式には、2次元SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)方式を採用した。ロボットの諸元として、サイズは全長1,400mm、全幅750mm、全高780mm、質量は85kg、最高走行速度は時速2.0km、最小回転半径は2.0mである。

開発したスラブ乾湿自動評価システムの実用性を確認するために、約860m²のスラブ面積を有する建設現場での適用実験を行った。対象とするスラブに対して一様に散水し、その後の湿潤養生の経時変化を1時間ごと、計3回にわたって評価した。1回あたりの評価に要した時間は約20分であった。評価結果を図-3に示す。なお、システム上では評価結果と目視結果を比較しやすいように、「湿潤状態」を青色、「半乾燥状態」を黄色、「乾燥状態」を赤色で表現した。

その結果により、時間経過とともに、「乾燥状態」は増加し、「湿潤状態」は低下していることから、評価結果に矛盾が生じていないことを確認できた。また、湿潤状態を定量的に評価するために、「湿潤割合」という指標を設けた。「湿潤割合」とは、評価可能点全てに対し、「湿潤状態」として評価する点の割合と定義した。「湿潤割合」が時間経過とともに一律的に低下していくことが確認できたため、徐々に乾燥していく過程を定量的に評価することが可能となった。

以上のように、開発したスラブ乾湿自動評価システムの有効性を実証し、さらに実現場への適用性を確認できた。これにより、湿潤養生作業における湿潤状態の監視作業について、品質管理の高度化と省力化に寄与する技術を提案するに至った。また、実現場への適用性を高めるために、ロボットをはじめとする、スラブ乾湿自動評価システムの量産化体制を整えた。

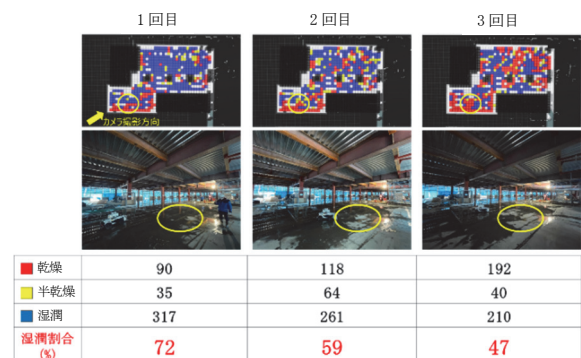


図-3 湿潤評価結果と目視結果の比較

3. 散水養生作業における自動化への検討

3.1 開発前の有意性調査

スラブ乾湿自動評価システムは、2023年4月24日に開発した旨を公表し、同年5月24日から26日に開催された「第5回 建設・測量生産性向上展（CSPI-EXPO 2023、写真-2）」へ出展した。同展示会は建設業界に携わる有識者が全国から参加する国内有数の大規模展示会であり、スラブ乾湿自動評価システムへの出展に対しては3日間で90社、140名の来客より問合せがあった。問合せ業者は、ゼネコンをはじめとした元請会社のみならず、専門工事会社や建機建材リース会社など多岐にわたり、また問合せの多くは、「散水養生作業も自動化されるのであれば利用したい」という要望であったため、同システムの一定数のニーズと散水養生作業の自動化が強く求められていることを確認できた。

上記の背景により、散水養生作業の自動化について検討を開始した。まずは、開発したスラブ乾湿自動評価システムと散水設備を連携することで省力化できる作業工数を試算し、従来の管理手法の工数と比較して、省力化の可能性を検討した。試算する前提条件として、対象とするスラブを800m²規模、湿潤養生に掛かる所定日数を5日間と仮定した。また、各作業の歩掛は、2章で実験を行った建設現場の実績値を採用した。

比較結果を表-1に示す。スラブ乾湿自動評価システムによる状態監視に掛かる工数は一切不要となることに加え、散水養生を自動化した場合には養生シートの設置も不要となる。一方で、システムの準備や保守が発生するものの、工数は全体で4.25人日から1.5人日まで低減し、約65%の省力化が達成できると見込まれる。また、養生シートを削減できることや必要十分量の散水になることから、省資源化へ寄与することも考えられる。以上のように、開発したスラブ乾湿自動評価システムを散水設備に連携することは有意であると判断した。

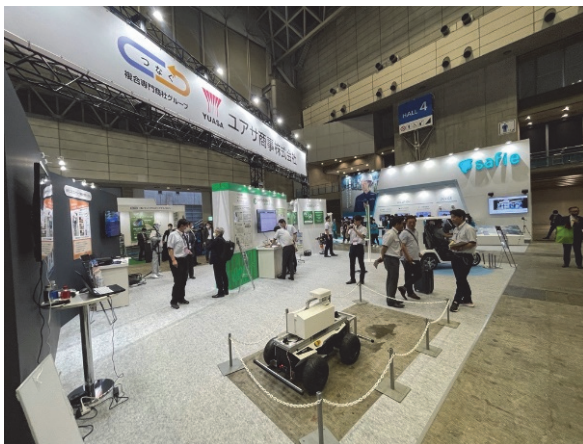


写真-2 CSPI-EXPO 2023 での出展状況

表-1 湿潤養生に掛かる作業工数
(上)従来の湿潤養生管理の場合
(下)散水設備をシステムと連携した場合

各作業	人員数	時間	頻度	合計(人日)
散水実施	2	1	5	1.25
養生シート設置	4	4	1	2
状態監視	1	0.5	15	1
全体工数	-	-	-	4.25

各作業	人員数	時間	頻度	合計(人日)
散水実施	2	1	1	0.25
養生シート設置	0	0	0	0
状態監視	0	0	0	0
システム準備	1	4	1	0.5
システム保守	1	1	6	0.75
全体工数	-	-	-	1.5

3.2 散水設備との連携

散水養生作業を自動化するために、スラブ乾湿自動評価システムで用いる自律走行式ロボットに一定量注水したポリタンクを積載し、システム評価による乾湿状態に応じてロボットから自動散水する運用方法について検討した。しかし、注水した状態のロボット重量は200kgを超えることとなり、金鍍仕上げ後のスラブ表面を走行することは大変不利な状況となることが予想された。そのため、金鍍仕上げ後から数時間程度経ったスラブに、実際にロボットを走行させることで、タイヤ走行痕などスラブ表面の美観に影響を与える損傷が発生しないか確認した。金鍍仕上げ後から2時間後と4時間後での走行痕を写真-3に示す。目視できる程度の走行痕が確認されたため、本運用方法は困難であると判断した。



写真-3 金鍍仕上げ後の走行痕確認状況

したがって、上記の結果により、運用方法の見直しを行った。見直しにあたり、コンクリート打設後一定時間はスラブ上に乗らないようにした。そこで、金罫仕上げ翌日の朝に人による散水作業を実施し、その湿潤状態をスラブ乾湿自動評価システムにより適切に維持できるような運用方法を検討した。金罫仕上げ翌日であれば、従来の管理手法でも人がスラブ上に乗って散水作業をすることができ、スラブ表面に歩行痕などが確認される事例も少ない。ロボットの接地圧は約 $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ である一方、体重 70kg 、靴のサイズ 27.0cm といった一般的な成人男性による接地圧も約 $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ であるため、スラブ表面へ歩行痕が残る可能性は低いと考えた。

そこで、対象とするスラブの周囲に散水設備を設置し、スラブ乾湿自動評価システムでの評価結果をそれに連携させることで散水養生作業を自動化する運用方法を考えた。特殊な設備などを用いると、現場への適用性が下がると判断したため、建設現場で一般に用いられている散水栓とビニールホースを用いるような簡易な設備を選定した。

次に、散水設備の設置数量を試算するために、実現場での散水栓とビニールホースを用いて散水可能な範囲を検証した。散水可能範囲の検証概況を図-4に示す。約 200m^2 のスラブに対して効率的に散水を行うために、ビニールホースに 1m ごとにドリッパーノズルを取り付けて、それらから水が出るようにした。そして、写真-4に示す通り、散水を開始して 30 分程度で、 200m^2 のスラブ表面がまんべんなく湿潤状態となったことを確認できた。

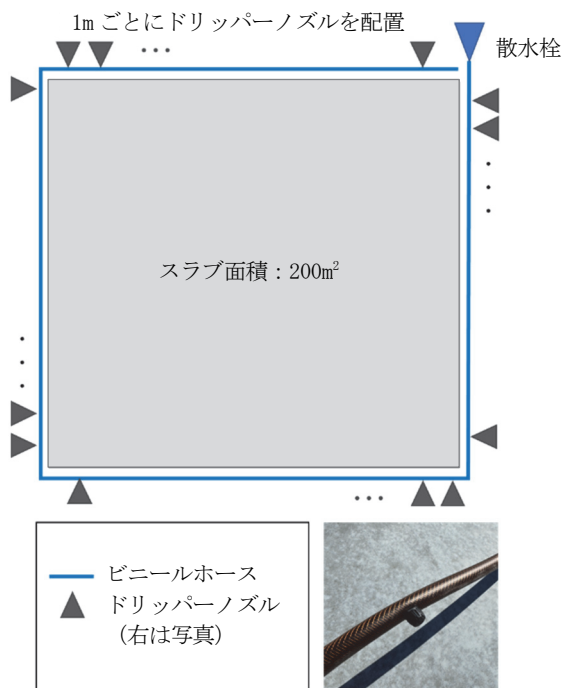


図-4 散水可能範囲の検証概況

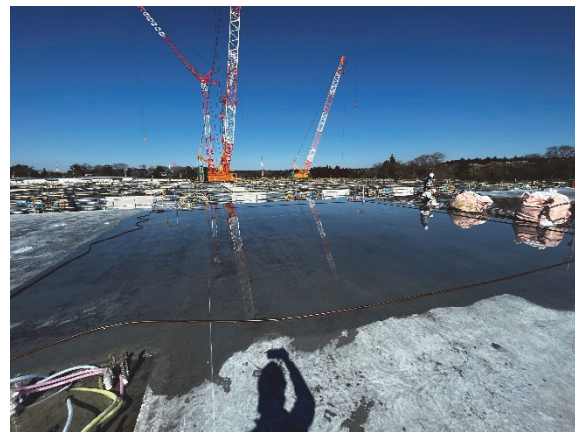


写真-4 スラブ面積 200m^2 に対する散水状況
(上) 散水開始時
(下) 開始から 30 分後

4. 現場適用実験

4.1 実験概要

スラブ乾湿自動評価システムと散水設備を連携させ、実現場での適用性を確認するために、 500m^2 程度のスラブ面積を有する建設現場での現場適用実験を行った。選定した建設現場の概要を図-5に示す。3.2節で示したように、まずは人による散水を実施することでスラブ表面を適切な湿潤状態として、その後同システムと散水設備によりその状態を維持することを目的とした。そこで、対象とするスラブ面積 500m^2 を四分割し、3.2節で検証した散水可能範囲である 200m^2 を下回るように計画した。また、それぞれに散水設備を設置する必要があるが、散水栓は1つであるため、電磁弁を経由することで、それぞれ別系統で散水を実施できる仕様とした。この際、電磁弁による制御のため、4つのエリアそれぞれの乾湿状況に応じて、散水を異なるタイミングで実施できる。なお、実験時期は2024年3月中旬で、天候は晴れ、気温は 16°C 、湿度は 62% の環境であり、検証時間は散水開始から3時間後までとした。3時間と設定したのは、散水作業は繰り返し作業であり、一定時間でそれが検証できれば、工学的に充分であると判断したためである。

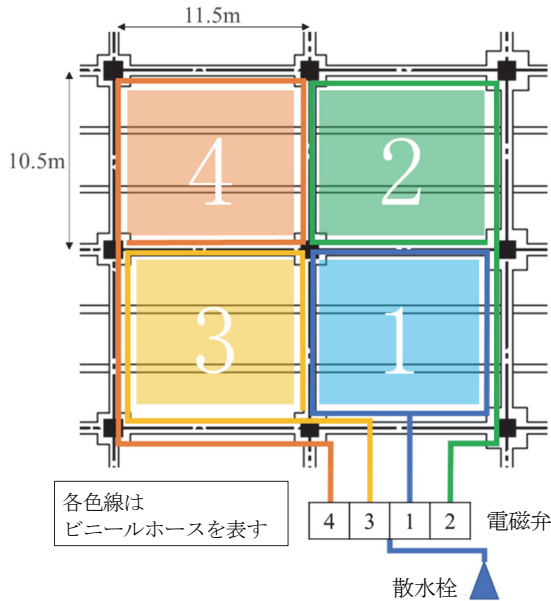


図-5 現場適用実験の概況
 (上) 対象スラブの全景写真
 (下) 対象スラブを四分割した時の模式図

次に、実験手順を説明する。まず、自律走行式ロボットを人による操作で対象スラブ上をなるべく隈なく走行させる。この時、自律走行式ロボットに搭載している2D LiDARにより周辺環境を点群として計測し、ロボットが走行する地図を作成する。次に、作成した地図を図-5と同様にシステム上で分割する。なお、当該現場条件に応じて今回は四分割としたが、十分割まで可能なシステム仕様としている。並行して、生成した地図情報とロボット情報を照合して、走行経路を算出する。そして、ロボットが走行を開始し、スラブ表面の乾湿状況を評価する。

評価にあたって、作成した地図は任意の範囲でグリッド化でき、今回は1m四方をグリッド化した。また、目視化しやすいように各グリッドを色付けできるようにし、「湿潤状態」を青色、「半乾燥状態」を黄色、「乾燥状態」を赤色で表現した。なお、ロボットの走行経路が同じグリッド上で重複する場合など、一つのグリッドに対して複数回の計測が連続して発生する場合がある。その場合、計測値のうち小さいものを評価結果として採用した。こ

れは、計測値が小さいほど「乾燥状態」に近いことを表し、湿潤養生の管理上、安全側の判定とするためである。そして、「乾燥状態」が各エリア内で1グリッド以上検知されたら、そのエリアに応じた電磁弁が開き、散水が開始される。なお、散水が開始されて10分間は電磁弁が開き、散水が継続する仕様とした。

4.2 実験結果と考察

ロボットによる評価は3時間のうち4回実施し、1回目は人による散水作業が完了したタイミングで評価した。また、1回の評価に要した時間は約30分であった。時間経過に伴う表面状態変化の評価結果を図-6に示す。

「湿潤割合」に注目すると、経時変化に伴い一度減少傾向が確認されたものの、その後は一律的に増加することが確認できた。また、全ての評価を通して、乾燥状態が相対的に多かったエリア4番は、スラブ表面に不陸もしくは勾配が発生し、排水を促した可能性がある。そのため、評価1回目で湿潤割合が71%程度に留まったと考察した。

評価回数	評価1回目 (散水完了時)	評価2回目 (散水完了1時間後)
評価結果		
■ 乾燥	55	65
■ 半乾燥	42	47
■ 湿潤	244	232
湿潤割合(%)	71	67
初回比(%)	-	94

評価回数	評価3回目 (散水完了2時間後)	評価4回目 (散水完了3時間後)
評価結果		
■ 乾燥	37	27
■ 半乾燥	49	41
■ 湿潤	257	273
湿潤割合(%)	75	80
初回比(%)	105	113

図-6 金鍍仕上げ後の走行痕確認状況

次に、1 回目の「湿潤割合」は 71%であったため、これを基準とした各回における初回比も算出した。評価 2 回目時点では、初回を下回ったものの、3 回目以降は初回を上回り続けた。また、4 エリアごとの評価結果も、**図-6**に示すスラブ面積全体に対しての結果と同様であり、結果に矛盾がないことが確認できた。

以上の結果から、スラブ乾湿自動評価システムとそれに連携した散水設備により、人の手による初回の散水完了時以降は連続的に湿潤状態を維持できたため、建設現場への適用性を十分に確認できた。

5. まとめ

コンクリート表面を対象にした乾湿状態を定量的に評価できるスラブ乾湿自動評価システムとそれに連携する散水設備を提案した。そして、当該技術の有効性の確認を目的とした現場適用実験により、以下に示す事項を確認した。

- i. 近赤外光センサと自律走行式ロボットを含むシステム一式（スラブ乾湿自動評価システム）を用いて、スラブ面積 500m²のコンクリート表面の乾湿状況を約 30 分で定量的に評価できる
- ii. 同システムにより、スラブ面積 500m²に対して人による散水が最初に為されていれば、その湿潤状態を維持することが可能である
- iii. 従来の管理手法に比べ、約 65%の省力化に寄与することに加え、散水量や養生シートの削減にもつながることから省資源化も見込むことができる

6. あとがき

建設現場への適用性が確認できたため、実装適用を本格化させる。そのためには、システム利用に係る留意点などをまとめる必要がある。今回の検証で得られた結果をはじめとし、更なる検証を重ねて運用方法をまとめていくこととしたい。

また、本開発はユアサ商事株式会社と共同で実施しているものであり、2024 年度中にシステム利用開始ができるよう、体制を整備していく。

【参考文献】

- 1) 増田貴之、赤星博仁、「スラブ湿潤状態評価技術の開発（光学センサと自律走行式ロボットによる自動評価システムの構築）」、奥村組技術年報、No.49、pp.65-70、2023.9