

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26420445

研究課題名（和文）セメントの水和解析に基づくコンクリート構造物の養生計画立案手法の開発

研究課題名（英文）Development of a decision method of curing plan of concrete structure based on hydration analysis of cement

研究代表者

福留 和人（FUKUDOME, Kazuto）

石川工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：60517548

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、セメントの水和率が所要レベルに達するように合理的に養生計画を立案する手法を開発することを目的とする。養生条件がセメントの水和反応に及ぼす影響を解析的に予測する手法を開発するために、養生条件の影響に関する基礎データの取得および各種養生工法の養生効果を評価する実験を実施した。得られた結果を用いて、解析プログラムによる水和解析の検討を行い、養生条件がセメントの水和に及ぼす影響の評価手法を確立した。これらの結果の取りまとめを行い、「セメントの水和解析に基づくコンクリート構造物の養生計画の立案手法」の提案を行った。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aimed to develop a method to determine curing plan so that hydration rate of cement can reach the target rate.

First, under various conditions, basic data on the effect of curing conditions on compressive strength development was acquired. Using the obtained data, hydration analysis was carried out and evaluated the influence of the curing condition on the hydration reaction of cement. As a result, we established a method for analytically predicting the influence of curing conditions on the hydration reaction of cement. Next, we have grasped the moisture condition at the time of performing various curing methods by experiments and established a method for predicting and predicting water supply and dissipation behavior during curing and after curing. Based on the above results, we proposed "a planning method for curing concrete structures based on cement hydration analysis". We also conducted case studies and verified the applicability of the proposed method.

研究分野：土木工学，土木材料，施工，コンクリート工学

キーワード：養生 養生計画 水和解析 水分移動解析 社会実装 ノモグラム

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の性能を確保する上で養生は重要な作業工程であり、施工に先立ち養生計画を適切に立案する必要がある。計画立案にあたっては、採用する養生工法の効果、施工時の環境条件等を考慮し、コンクリート構造物が所要の性能に達できるように養生工法を選定し、実施期間を定めることが重要である。土木学会コンクリート標準示方書では、全てのコンクリート工事において個々に養生期間を試験等により確認するのは難しいとして、一般的なコンクリート工事における標準的な湿潤養生期間を示している。しかしながら、示されている養生期間の設定根拠は不明であり、コンクリートの性能を確保する上で十分な養生期間であるかどうか不確かである。そのため、様々な条件下において養生の効果を定量的に評価し、合理的に養生計画を立案する手法の確率が望まれている。

2. 研究の目的

コンクリートの使用材料および配合は、コンクリートが所要の性能を確保するように選定されるが、セメントの水和が所要のレベルにまで達成されていることが前提となる。したがって、養生の実施にあたっては、セメントの水和が所要のレベルに達するまで湿潤状態を保持することが肝要となる。このような基本的な考え方にに基づき、本研究では、養生で達成されるセメントの水和率を解析的に予測し、目標の水和率が得られるように合理的に養生計画を立案する手法を開発することを目的とする。図1に養生計画立案フローを示す。

本研究では、提案する養生計画手法を確立するために、以下の検討を行う。

(1) 水和解析による養生条件の影響評価手法確立

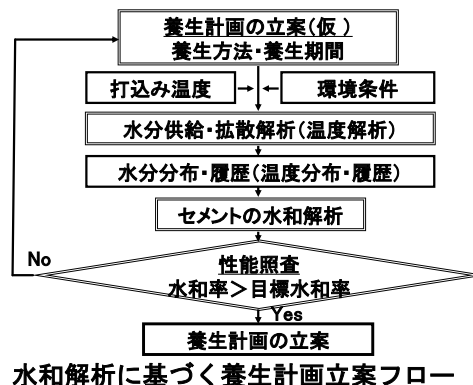
養生条件がセメントの水和反応に及ぼす影響を解析的に予測する手法を確立することを目的とする。まず、種々条件下において、養生条件が圧縮強度発現に及ぼす影響に関する基礎データの取得を行う。次に、得られたデータを用いて、水和解析を行い、養生条件がセメントの水和反応に及ぼす影響の評価を試みる。

(2) 各種養生工法の養生効果評価手法の確立

養生計画手法立案のためには、養生工法の養生効果を適切に評価する必要があることから、各種養生工法の養生効果の評価手法を確立することを目的に検討を加える。養生効果の評価には、養生時のコンクリート中の水分保持状態を把握することが必要である。本研究では、各種養生工法実施時の水分状態を実験により把握するとともに、養生中および養生終了後の水分供給・逸散挙動の解析による評価を試みる。

(3) 養生計画立案手法の提案および社会実装

(1)、(2) で得られた成果の取りまとめを行い、「セメントの水和解析に基づくコンクリート構造物の養生計画の立案手法」の提案を行うとともに、実構造物を想定したケーススタディーを行い、提案した養生計画立案手法の適用性を検証する。さらに、提案する養生計画立案手法の社会実装のために、湿潤養生期間を簡単に把握することのできるノモグラムの作成を試みる。



水和解析に基づく養生計画立案フロー

図1 養生計画立案フロー

3. 研究の方法

(1) 養生条件の影響に関する基礎データ取得

湿潤養生条件がセメントの水和に及ぼす影響を評価するために、各種セメントを用いたコンクリートの各種養生条件下における圧縮強度発現特性に関する基礎データの取得を行った。圧縮強度試験は、JIS A 1108に従い、養生中の含水状態を把握するために、供試体作製時、養生終了後および圧縮強度試験時に供試体質量を測定した。表1に実験要因および水準を示す。すなわち、3水準の水結合材比(55、40、30%)および温度条件下(10、20、30℃)において、養生条件(水中、封緘、水中+気中、型枠存置+気中、等)が圧縮強度発現に及ぼす影響を把握した。その結果、コンクリートの圧縮強度に及ぼす養生条件の影響への養生温度・配合条件の依存性を把握した。

表1 実験要因および水準

実験要因	水準
セメント種類	①普通②フライッシュ③高炉 B
水セメント比	①60%, ②50%, ③40%
養生温度	①10℃, ②20℃, ③30℃
湿潤養生条件 *) 気中: 20℃, RH60%	①水中養生 ②封緘養生 7日+気中 ③水中 7日+気中 ④水中 14日+気中

(2) 水と解析による養生条件の影響評価手法の検討

(1)で取得したデータを用いて、供試体レベルの水と解析を行い、解析パラメータの同定、解析条件の設定方法等の検討を行う。使用する解析プログラムは、コンクリート材料性能解析プログラム DuCOM-SD である。

(3) 各種養生工法の効果の確認および解析による評価

養生の効果を解析的に予測するためには、各種養生工法を適用した時の水分保持、水分供給挙動を適切に評価する必要がある。本研究では、水分センサーを埋め込んだ小型供試体の一面を種々の方法で養生し、深さ方向の水分量の分布および経時変化を把握することで養生効果を評価する。得られた実験データを用いて、(1)と同様のプログラムにより、各種養生工法の養生効果の解析による評価を試みる。

(4) 養生計画立案手法の提案および社会実装

(1), (2) これらの結果の取りまとめを行い、「セメントの水と解析に基づくコンクリート構造物の養生計画の立案手法」の提案を行う。また、実構造物を想定したケーススタディーを行い、提案した養生計画立案手法の適用性を検証する。さらに、提案する養生計画立案手法の社会実装のために、湿潤養生期間を簡単に把握することのできるノモグラムの作成する。

4. 研究成果

(1) 基礎データの取得および水と解析による養生条件の影響評価手法の検討

各種条件が圧縮強度発現に及ぼす影響に関する基礎データの水と解析による評価を行った。圧縮強度は、JIS の試験方法に従って、円柱供試体を用いた。厳密には、円柱供試体の形状を考慮した3次元解析を行う必要があるが、ここでは、簡単のために1次元の解析で評価した。そこで、まず質量変化挙動（水分吸水、逸散挙動）の実測値と解析値が合致するように、境界条件・部材寸法等のパラメータの検討を行った。次に、得られた条件で水と解析を行い、圧縮強度の予測の検討を行った。

図2に質量変化率の経時変化の実測値と解析値の比較を示す。質量減少速度が実測値と解析値で若干異なるが、おおよそ、養生終了後の水分逸散挙動を評価可能である。水中養生時の水分供給挙動、すなわち、質量増加挙動は、解析条件（次元・寸法）の影響が小さいと考えられ、実測値にほぼ一致している。

図3に養生条件が圧縮強度に及ぼす影響の実測値と解析値の比較の一例を示す。圧縮強度の絶対値は、使用骨材等により影響を受けることから、水中養生に対する圧縮強度比で評価している。また、最終的に得られる強度で評価する観点から、材齢 91 日における圧

縮強度の比較を行った。

図3に示すように、実測値、解析値とも養生期間が良好となるほど、圧縮強度は高くなっており、解析による養生効果の評価が可能である。ただし、使用材料、環境条件等の条件によっては解析の方が圧縮強度に及ぼす養生の影響を若干過少評価しているケースもあり、解析プログラムの予測精度の向上が今後の課題となる。

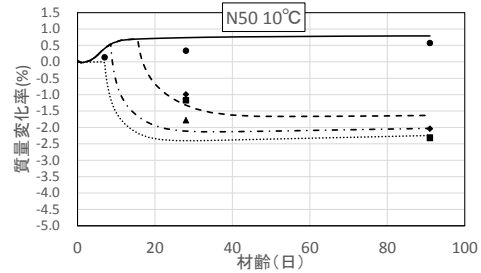


図2 材齢と質量変化率の関係

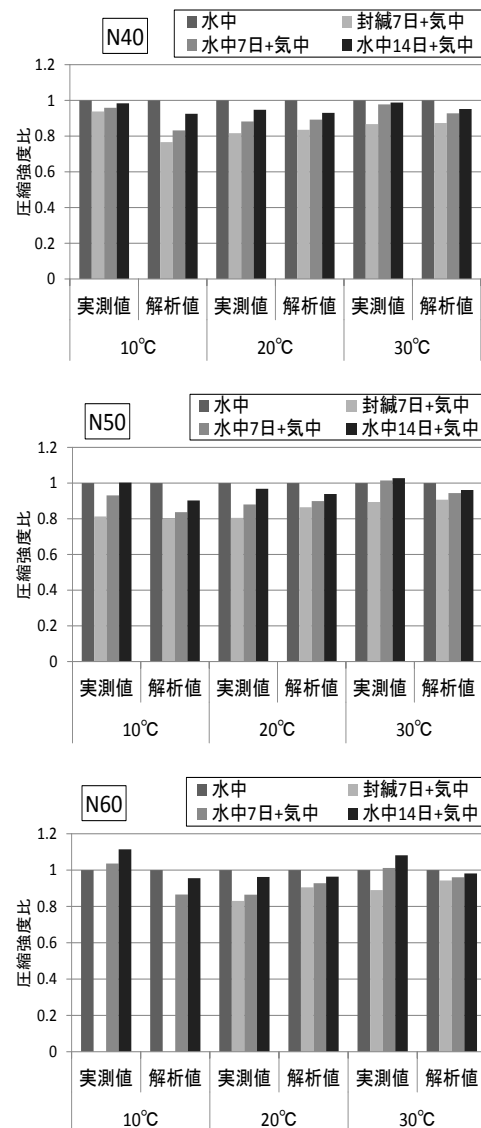


図3 養生条件の影響の実測値と解析地

(2) 各種養生方法の養生効果の確認および解析による養生効果評価手法の検討

水分センサーでは、コンクリート中の自由水の量が測定される。つまり、測定値には、水和による水の消費も含まれることになり、水分の供給・逸散挙動は、直接的に評価できない。ここでは、深さ5cm位置では、水分供給・逸散生じていないと仮定し、5cmに設置された水分センサーの測定値に対する相対値により、水分供給・逸散挙動を評価した。図4に測定結果を示す。これより、給水養生実施中の水分供給、養生終了後の水分逸散する状況が評価されている。また、水分の給水深さは、表面から3cm程度であることが分る。次に、解析による水分供給・逸散挙動の評価を試みた。図5に解析結果を示す。水分センサーによる測定が相対値であるため絶対値の比較はできないが、吸水養生中および養生終了後の水分供給・逸散挙動の評価可能であることが判明した。

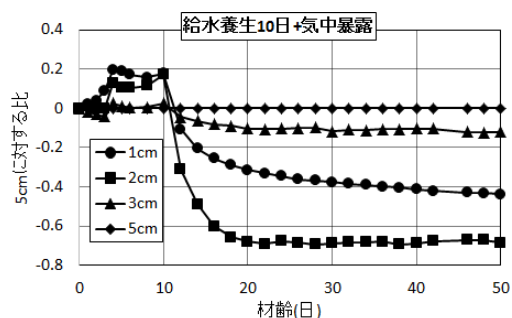


図4 材齢と質量変化率の関係

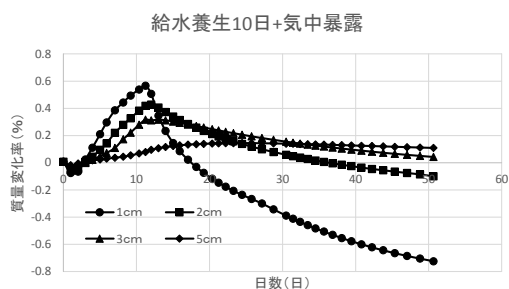


図5 材齢と質量変化率の関係

(3) 養生計画立案手法の提案および社会実装

(1)および(2)の検討結果から、コンクリート材料性能解析プログラム Ducom-SD により、解析パラメータ等の適切な設定により、各種養生条件下による養生効果（水分状態）の予測および水和反応に及ぼす影響の解析が可能であることが判明した。すなわち、任意の材料・配合条件、環境条件および養生条件において、達成されるセメントの水和レベルの予測が可能となり、所要の水和レベルに達するための養生条件として妥当であるかどうかの判定が可能となる。したがって、図1に

示したフローに従えば、合理的に養生計画を立案できると考えられる。そこで、以下に示す条件でケーススタディーを行い、目標水和率を達成するために必要な養生期間を算定した。ここで、使用材料および配合は、標準的な条件とし、養生温度は、10℃と低めに設定し、相対湿度は、60%とした。すなわち、養生終了後は、相対湿度60%におかれることになる。

目標水和率の設定は、今後検討が必要であるが、コンクリートの特性値を設定する際の養生条件および材齢が目安となると考えられる。圧縮強度の場合、20℃水中養生、材齢28日で設定されるため、20℃で水中養生を行った時の材齢28日における水和率が目標水和率となる。ここでは、表層部の耐久性確保を考慮して、圧縮強度より若干短い材齢の14日を目標水和率の材齢とした。ここで、水中養生14日の水和率は、水中養生の条件で実施した水和解析により決定した。今回の使用材料および配合条件では、87%であった。

目標水和率をいつまでに達成する必要があるか（以下、達成材齢）を設定する必要がある。決定方法は、今後検討が必要であるが、構造物の竣工するまでに達成される必要があること、また、養生終了後の水和の進行に期待するのは好ましくないという観点から、材齢28日を達成材齢に設定した。なお、表層部の耐久性確保を考慮して、水和率は、表層から0~5cmの平均水和率とした。

以下に養生計画を立案するにあたっての条件を取りまとめる。

- ①使用材料、配合条件および環境温度・湿度：普通セメント、水セメント比50%、10℃、湿度60%
- ②目標水和率：20℃水中養生における材齢14日の水和率（87%）
- ③達成材齢：材齢28日（いつまでに目標水和率に達成するか）
- ④水和率：表層0~5cmにおける平均水和率

図6に養生期間と水和率の関係を示す。この図から、目標水和率を達成するために必要な養生期間を算定することが可能となる。

ここで、提案した養生計画立案手法の社会実装を進めるためには、工事ごとに解析を行うのは、望ましくないことから、簡易に必要な養生期間を算定できるノモグラムの作成を検討した。そこで、養生方法および養生温度を変化させて解析を行い、条件毎に必要な養生期間を算定した。算定された必要養生期間から、図7に示すようなノモグラムを作成した。前述のとおり、目標水和率および達成材齢をどのように設定するのか今後の課題となるが、種々の条件（使用材料および配合、構造物のおかれる環境条件、構造物の形状寸法など）におけるノモグラムを提供できれば、容易に養生計画の立案が可能となる。

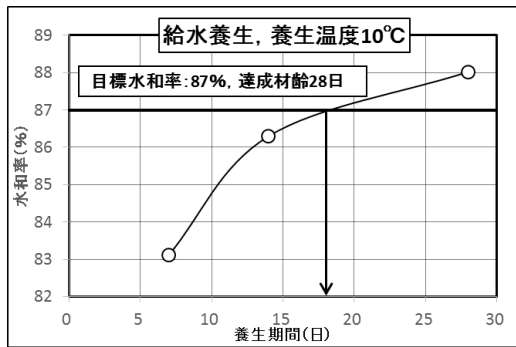


図6 養生期間と水和率の関係

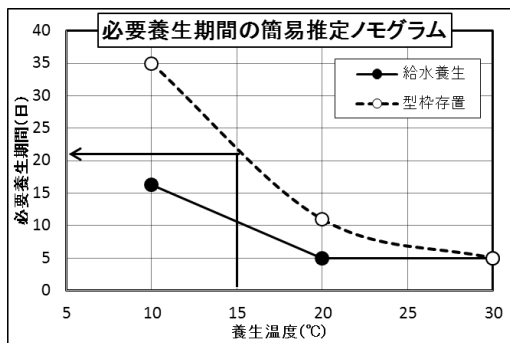


図7 養生温度と必要養生期間の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 齋藤淳, 大即信明, 西田孝弘, 福留和人, 施工時の湿潤養生条件がコンクリートの力学・耐久性能に及ぼす影響の屋内曝露試験に基づく評価, コンクリート工学年次論文報告集, 査読有, Vol. 37, No. 1, 2015, pp. 565-570
- ② Atsushi Saito, Nobuaki Otsuki, Takahiro Nishida and Kazuto Fukudome, Evaluation of the influence of wet curing condition during construction on mechanical and durability performance of the concrete based on indoor exposure test, 40th Conference on Our World in Concrete & Structures, 査読有, 2015, pp.263-274

[学会発表] (計 5 件)

- ① 富田充宏, 熱野皓紀, 福留和人, 湿潤養生条件の影響に及ぼす各種影響要因に関する研究, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015. 9, pp. 445-446
- ② 野間康孝, 岸亨祐, 福留和人, 水分供給・逸散および水和解析による養生条件の影響評価に関する研究, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015. 9, pp. 447-448

- ③ 熱野皓己, 福留和人, 大島美穂, 混合セメントを用いたコンクリートの強度発現に及ぼす湿潤養生条件の影響, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016. 9, pp. 683-684
- ④ 岸 亨祐, 福留和人, 熱野皓己, 給水養生工法の養生効果の評価に関する研究, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016. 9, pp. 685-686
- ⑤ 大島美穂, 福留和人, 岸 亨祐, 水分供給・逸散および水和解析による養生条件の影響評価に関する研究, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016. 9, pp. 687-688

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福留 和人 (FUKUDOME Kazuto)
石川工業高等専門学校・環境都市工学科・教授
研究者番号: 60517548

(2) 研究分担者

齋藤 淳 (SAITO Atsushi)
株式会社 安藤・間・技術研究所・主任研究員
研究者番号: 60724961

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()