

論文 コンクリート構造物の養生計画立案手法に関する研究

大島 美穂^{*1}・福留 和人^{*2}・齋藤 淳^{*3}

要旨：養生による効果を定量的に評価し、養生期間等を合理的に選定するため水と解析による養生計画立案手法を提案する。養生計画立案手法では、解析で得られた水と率とコンクリートの性能を確保するために必要な目標水と率を比較することによって養生の適否を照査する。さらに、養生計画を効率的に行うために必要養生期間の簡易推定ノモグラムを作成した。ノモグラムは、環境温度と相対湿度から必要養生期間を容易に判断できるものである。コンクリートの配合条件や環境条件に対応したノモグラムを提案することで、養生計画を合理的に提案できることが示唆された。

キーワード：養生、水と率、施工、耐久性、給水養生、水分逸散抑制

1. はじめに

コンクリート構造物が所要の強度・耐久性等の性能を有するために、養生は極めて重要な作業である。セメントの水と反応は、その周辺の環境条件や水分によって左右されるため、養生でセメントの水とが十分に進展するような環境を維持する必要がある。養生の目的は、一定期間、コンクリートからの水分の逸散を防止すること、必要な場合には水分を供給すること、コンクリート内部の温度を適切に維持すること、さらに有害な外力の作用を避け、ひび割れ等耐久性に影響する欠陥を生じさせないようにすることである。土木学会コンクリート標準示方書¹⁾(以下、標準示方書)では、「養生方法の選定にあたっては、その効果を確かめ、適切に湿潤養生期間を定めなければならない。」と明記されているが、湿潤養生期間の標準が示されており、一般的に広く用いられている。しかしながら、セメントの反応過程や温湿度、水分等の条件など様々な要因がある中で一様に設定することは現状にそぐわないのではないかと考えられる。また、近年は養生材料や養生工法の開発が進み、適切に用いれば十分な養生効果を得ることが可能な状況である。そこで、養生による影響を定量的に評価し、養生材料や養生工法、実施期間等を合理的に選定することが重要であると考え、水と解析による養生計画立案手法の提案を試みた。

本研究では解析プログラムの適応検討を行い、必要養生期間の簡易推定ノモグラムを作成した。

2. 養生計画立案手法

養生で達成されるセメントの水と率を解析的に予測し、目標の水と率が得られるように養生計画を立案する手法(図-1)を提案する^{2),3)}。これは、構造物中の水分分布履歴を水分供給・逸散解析により予測し、その結果を基

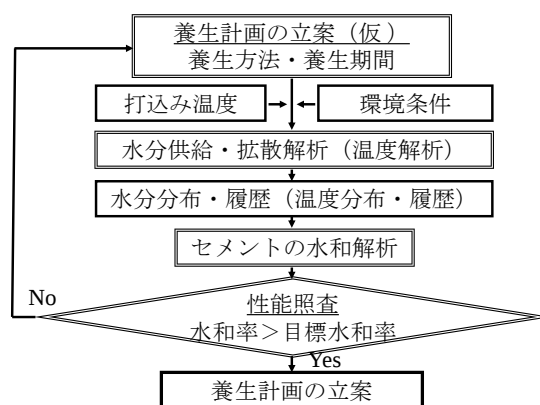


図-1 養生計画立案手法

に水と解析を行いセメントの水と率を算定する。解析で得られた構造物中のセメント水と率とコンクリートの性能を確保するために必要なセメントの目標水と率を比較することによって養生の適否を照査し、適切な養生計画を立案する手段を確立するものである。

3. 解析概要

3.1 解析プログラム

解析にはコンクリート材料性能プログラム DuCOM for Structural Design⁴⁾を用いた。DuCOM はコンピュータ上の仮想空間にバーチャルコンクリート構造を製造・建設する総合シミュレーション技術である。任意の配合と粉体・環境条件のもと、コンクリート構造物/部材レベルの特性を時間軸上で算定する。

DuCOM-SD は構造物/部材表面から内部方向へ向かう1次元場における物質移動や温度変化を考慮し、水と進展・空隙構造を連成して解析するものであり、部位ごとの水と率が追跡可能である。DuCOM-SD では水と率をセメントクリンカー鉱物と混和材のそれぞれの水と率か

*1 石川工業高等専門学校 専攻科環境建設工学専攻 (学生会員)

*2 石川工業高等専門学校 環境都市工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 株式会社 安藤・間 技術研究所 博士(工学) (正会員)

表－1 使用材料一覧

材料		記号	種類	仕様
セメント		C	普通ポルトランドセメント	密度 3.15 g/cm ² , ブレーン比表面積 3250 cm ² /g
高炉セメント			高炉セメント	密度 3.05 g/cm ² , ブレーン比表面積 375 0cm ² /g 高炉スラグ混合率 40～45%
混和材		FA	フライアッシュ	密度 2.26 g/cm ² , ブレーン比表面積 4740 cm ² /g
細骨材	細	S1	能登産 山砂	密度 2.51 g/cm ² , 吸水率 3.12%
	粗	S2	能登産 安山岩砕砂	密度 2.57 g/cm ² , 吸水率 2.65%
粗骨材		G	能登産 安山岩砕砂	密度 2.61 g/cm ² , 吸水率 2.07%

ら以下の式で平均水和率と定義し、算定している。

平均水和率

$$= \sum \frac{\text{鉱物 i の積算発熱量}}{\text{鉱物 i の最終発熱量}} \times \text{鉱物 i の組成比率} \quad (1)$$

また、養生過程の含水状態の予測および、含水状態が水和進展に及ぼす影響を評価可能であるため、本研究で対象としている湿潤養生の影響を評価可能と考えた。

3.2 解析条件

(1)解析プログラムの適応検討

テストピースによる圧縮強度比の実測値と解析値の比較をし、DuCOM-SD で養生による影響が評価可能であるかを検討した。解析における使用材料およびコンクリートの配合、養生条件は実験²⁾と同様である。使用材料を表－1、セメントの鉱物組成を表－2、コンクリートの配合を表－3 に示す。セメントの種類は、普通ポルトランドセメント（以下 N）と環境負荷低減を考慮し、混和材としてフライアッシュを使用した場合（以下 FA）や高炉セメント（以下 BB）も対象とした。FA の混合率は 15% とした。BB の高炉スラグ微粉末の混合率は平均値をとり 42.5% とした。高炉スラグ微粉末の密度とブレーン比表面積は混合率から推定し、密度は 2.91g/cm³, ブレーン比表面積は 4400cm²/g とした。BB のポルトランドセメント成分の鉱物組成は N と同様とし、表－2 を用いた。

テストピースの養生条件は以下のとおりである。

- ・環境温度：10℃, 20℃, 30℃
 - ・養生方法：封緘養生 7 日（封 7 日）
水中養生 7 日（水 7 日）
水中養生 14 日（水 14 日）
 - ・相対湿度：60%（養生終了後）
- 境界条件は以下のとおりである。
- ・水中養生：境界の相対湿度は 100%。つまり境界では空隙が常に水で満たされた状態である。セメントの水和進展によって内部の水が消費されると、内部に向かって水分移動が生じることになる
 - ・封緘養生：境界において水の出入りがない
 - ・気中暴露：境界の相対湿度は 60%

表－2 セメントの鉱物組成

エーライト	C ₃ S	55%
ビーライト	C ₂ S	19%
アルミネート	C ₃ A	12%
フェライト	C ₄ AF	8%

表－3 コンクリートの配合

セメント の種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	FA	S1	S2	G
N	40	177	443	0	495	165	981
	50		354		543	181	992
	60		295		584	195	981
FA	40	177	377	66	490	163	968
	50		301	53	537	179	981
	60		251	44	581	193	975
BB	40	180	450	0	488	162	966
	50		360		537	179	976
	60		300		579	193	971

(2)必要養生期間の簡易推定ノモグラム

使用材料とセメントの鉱物組成、コンクリートの配合は解析プログラムの適応検討と同様にした。

養生条件は次のとおりである。ここで、養生方法は標準準方書に基づき、湿潤状態に保つ養生として給水養生と水分逸散抑制（型枠存置）を対象とした。

- ・環境温度：10℃, 20℃, 30℃
 - ・養生方法：給水養生
型枠存置
 - ・相対湿度：30%, 60%, 80%（養生終了後）
- 境界条件は以下のとおりである。
- ・給水養生：境界の相対湿度は 100%
 - ・型枠存置：境界において水の出入りがない
 - ・気中暴露：境界の相対湿度は養生条件の相対湿度に合わせた

4. 解析プログラムの適応検討結果

圧縮強度は骨材の品質等の影響を受けるため絶対値で

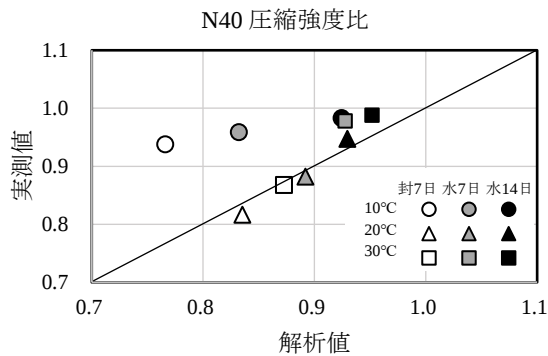


図-2 N40 圧縮強度比

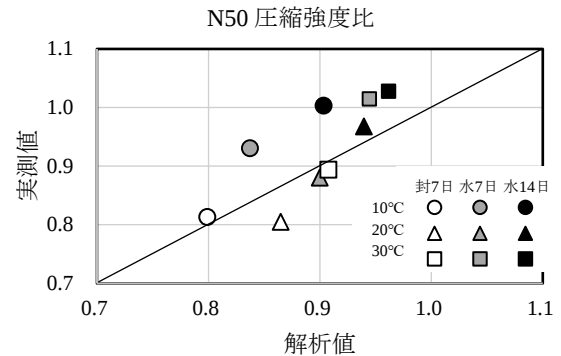


図-3 N50 圧縮強度比

の評価は難しい。そのため、圧縮強度比（全期間水中養生に対する比）で評価した。長期的な性能評価のため、材齢は 91 日とした。

実測値、解析値の圧縮強度比と各種コンクリートの養生条件の関係を図-2～図-6 に示す。養生温度が低くなると養生による影響が大きいことがわかる。また、水セメント比が大きくなると圧縮強度比が高くなる。これは、水セメント比が大きいと水合に必要な水が十分あり、短い養生期間でも強度が発現したためであると考えられる。FA では養生による影響が見られるが、BB では養生による影響が小さいことがわかる。養生温度が 10°C の場合は精度が高くないが、20°C や 30°C の場合は解析値と実測値の整合性が高く、養生条件が圧縮強度に及ぼす影響の傾向を捉えることができた。したがって、DuCOM-SD は養生計画立案手法で使用可能であると考えられる。

5. 必要養生期間の簡易推定ノモグラム

5.1 目標水和率、達成材齢の設定

図-1 の養生計画立案手法では、性能照査における目標水和率の設定が重要である。さらに、いつまでに目標水和率を達成するか（以下達成材齢）を決定する必要がある。また、コンクリート構造物が十分な性能を有するためには、表層部における耐久性が重要であると考え、表層から深さ 5cm の水和率の平均で性能照査をした。

設計で設定した特性値が構造物中で達成されるように養生条件を設定する必要がある。目標水和率は、特性値を設定する際の供試体の養生条件を考慮することが原則となり、圧縮強度の特性値は 20°C 水中養生と定められている。一方で表層品質に関係する特性値として塩化物イオン拡散係数や凍結融解抵抗性などがあるが、養生条件は明確にはされていない。本研究では目標水和率を環境温度 20°C の水中 28 日養生と水中 14 日養生の水和率とした。その設定根拠は、水中 28 日養生の場合は、コンクリート標準示方書に示されているコンクリート強度の特性

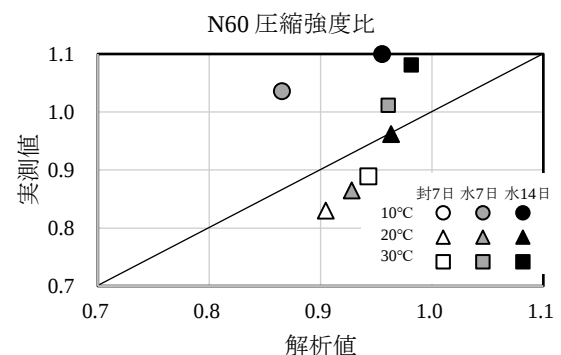


図-4 N60 圧縮強度比

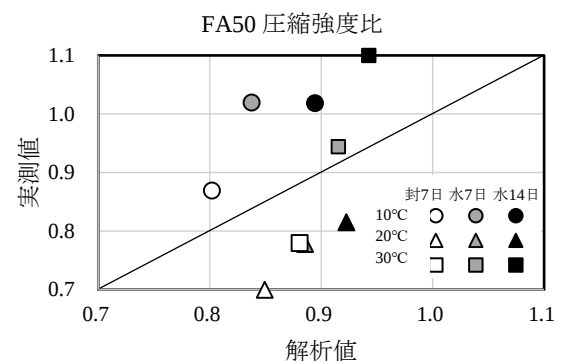


図-5 FA50 圧縮強度比

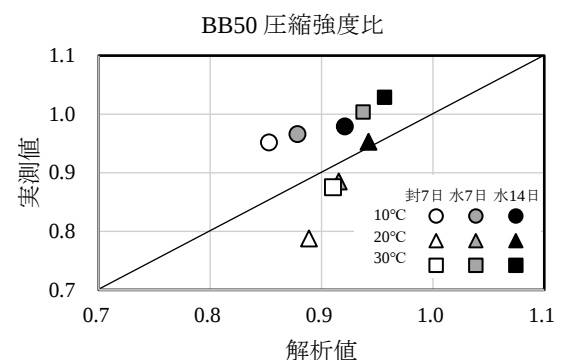


図-6 BB50 圧縮強度比

値を評価する材齢から設定した。また、水中 14 日養生の場合は、経済性や工期を考慮し、現場で実施可能な湿潤養生日数が 14 日と考えたからである。N の水和率の解析結果を図-7 に示す。グラフの材齢 14 日、材齢 28 日の水和率が目標水和率になる。FA と BB も配合を変化させて同様の解析をし、目標水和率をまとめた結果を表-4 に示す。FA と BB は混和材を含む平均水和率である。水セメント比が低いと未水和のセメントが残りやすくなるため目標水和率は低くなるのではないかと考えられる。

達成材齢は、目標水和率が水中 28 日養生の場合は 91 日とし、目標水和率が水中 14 日の場合は 28 日と 91 日とした。つまり、目標水和率と達成材齢の組み合わせによって必要養生期間の算定方法は 3 通りある。

5.2 必要養生期間の算定方法

必要養生期間の算定方法について、目標水和率を水中 28 日養生、達成材齢を 91 日の場合を例に、図-8 を用いて説明する。全期間水中養生での水和率を黒色の実線とする。目標水和率は水中 28 日養生での水和率であり、破線で示した。一定期間湿潤養生したときの水和率を灰色の実線とし、このときの水和率が達成材齢である 91 日までに目標水和率を超えられるように必要養生期間を求めるという方法である。このように、目標水和率と達成材齢の 2 つを決定すれば、必要養生期間が明らかになる。

5.3 必要養生期間の簡易推定ノモグラム

養生計画立案手法から必要養生期間を決定できることが明らかになったが、より効率的に養生計画を行うために、必要養生期間の簡易推定ノモグラムの作成を検討した。N50 で給水養生後、60% R.H. の環境下で気中暴露するという条件のもと、給水養生日数を変化させて解析し、達成材齢 91 日での水和率を図-9 に示す。目標水和率が水中 28 日養生の場合は目標水和率を破線で示し、グラフから目標水和率を超えるために給水養生が 8 日必要であることがわかる。また、目標水和率が水中 14 日養生の場合は一点鎖線で示し、給水養生が 0.8 日必要であることがわかる。このようにして養生方法と養生日数、環境条件等を変化させて必要養生期間を算定し、必要養生期間の簡易推定ノモグラムを作成した。

目標水和率を水中 28 日養生、達成材齢を 91 日とする場合の必要養生期間の簡易推定ノモグラムを図-10 示す。図-10-No.1 を例にノモグラムを説明する。ノモグラムは横軸が環境温度、縦軸が必要養生期間である。環境温度 10℃、80%R.H. の場合、給水養生で 15 日の養生が必要であるということがノモグラムから容易に判断できる。図-10-No.1～図-10-No.3 から水セメント比による評価をする。水セメント比が高くなると必要養生期間が長くなり、水セメント比が低くなると必要養生日数が短くなった。これは、水セメント比が低い場合は給水

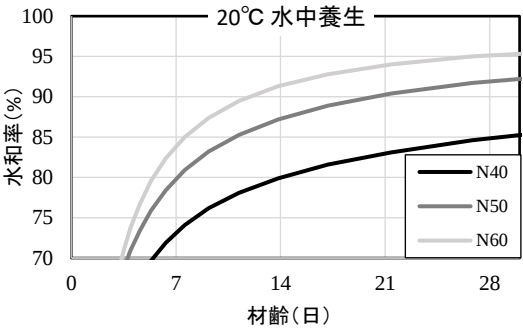


図-7 普通ポルトランドセメントの水和率

表-4 目標水和率

配合条件	目標水和率 (%)	
	水中 28 日養生	水中 14 日養生
N40	84.7	79.8
N50	91.7	87.3
N60	94.8	91.5
FA40	74.7	70.3
FA50	82.9	78.4
FA60	87.4	83.6
BB40	74.9	70.4
BB50	84.3	78.9
BB60	89.8	84.2

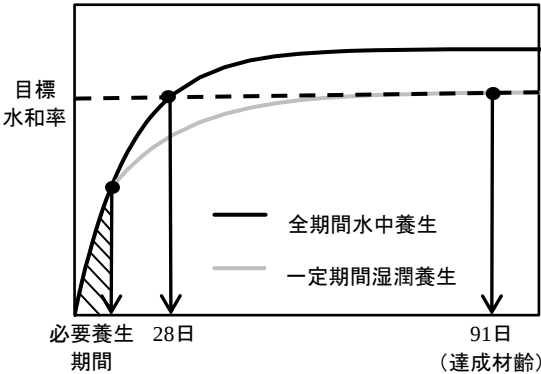


図-8 必要養生期間の算定方法

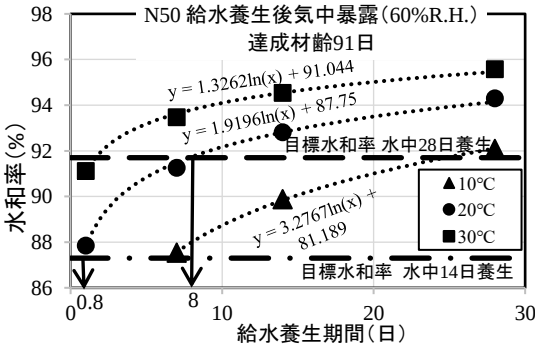
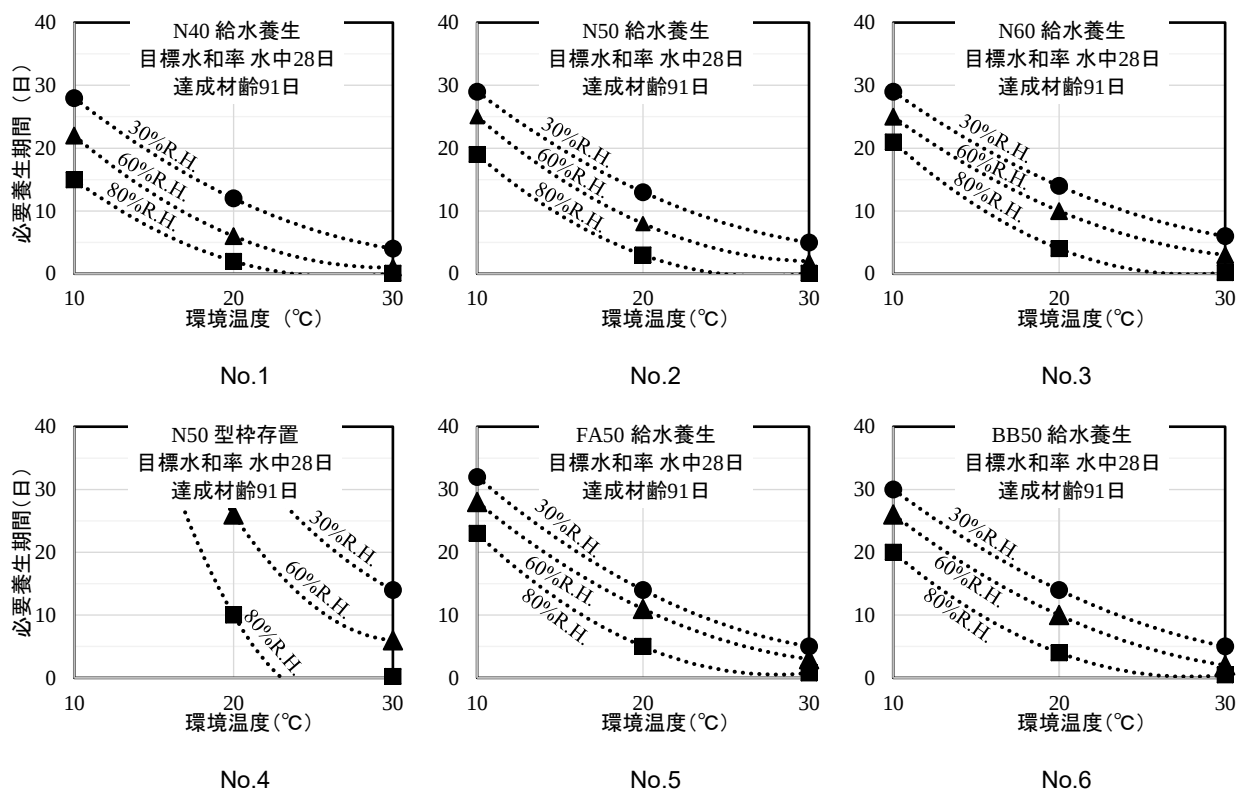
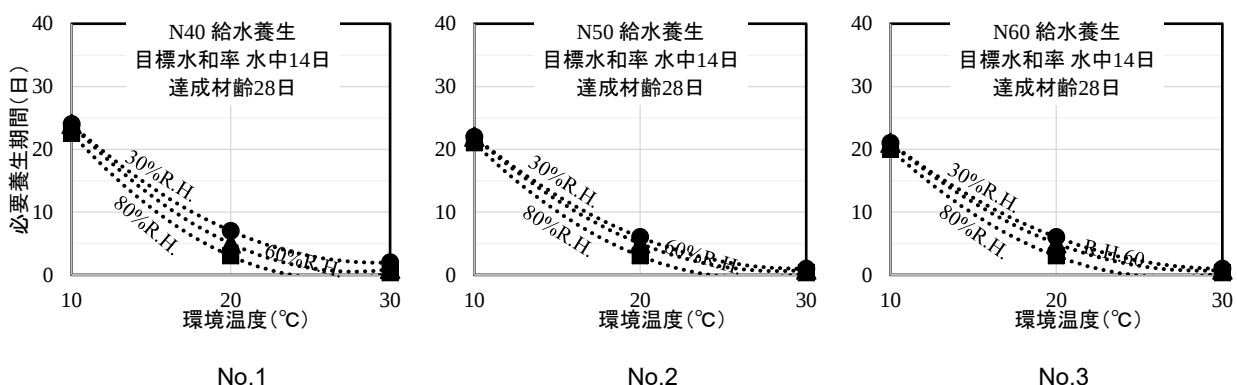


図-9 N50 給水養生の水和率



図－10 目標水和率 水中 28 日，達成材齢 91 日の簡易推定ノモグラム



図－11 目標水和率 水中 14 日，達成材齢 28 日の簡易推定ノモグラム

養生のように水の供給さえあれば容易に目標水和率を達成できるためであると考えられる。

図－10－No.2，図－10－No.4 から養生方法による評価をする。環境温度 20℃の場合，給水養生は型枠存置に比べて相対湿度の変化による必要養生日数の差が大きい。80% R.H.の場合も給水養生と型枠存置で必要養生日数に 7 日の差が生じるため，積極的に給水養生を行う必要があるといえる。標準示方書でも十分な給水養生を行った場合を対象に湿潤養生期間の標準を示しており，今回の水和解析でも給水養生が重要であることが確認できた。型枠存置では環境温度 20℃，80% R.H. でも 10 日の養生日数が必要となり，標準示方書で示されている養生期間では不十分であることが解析で明らかになった。図－10

－No.2，図－10－No.5，図－10－No.6 からセメントの種類による評価をする。全て水セメント比 50%，給水養生である。FA50 では全ての条件で N50 より必要養生期間が長くなった。BB50 でもその傾向にあり，混和材を用いると養生が長期的になることを表現できている。

次に，目標水和率を水中 14 日養生，達成材齢を 28 日とする場合の必要養生期間の簡易推定ノモグラムを図－11 に示す。図－10－No.1～図－10－No.3 と比べて目標水和率が低くなったため，必要養生期間は短くなった。また，水セメント比の変化が必要養生期間に及ぼす影響は小さいと言える。

次に，目標水和率を水中 14 日養生，達成材齢を 91 日とする場合の必要養生期間の簡易推定ノモグラムを図－

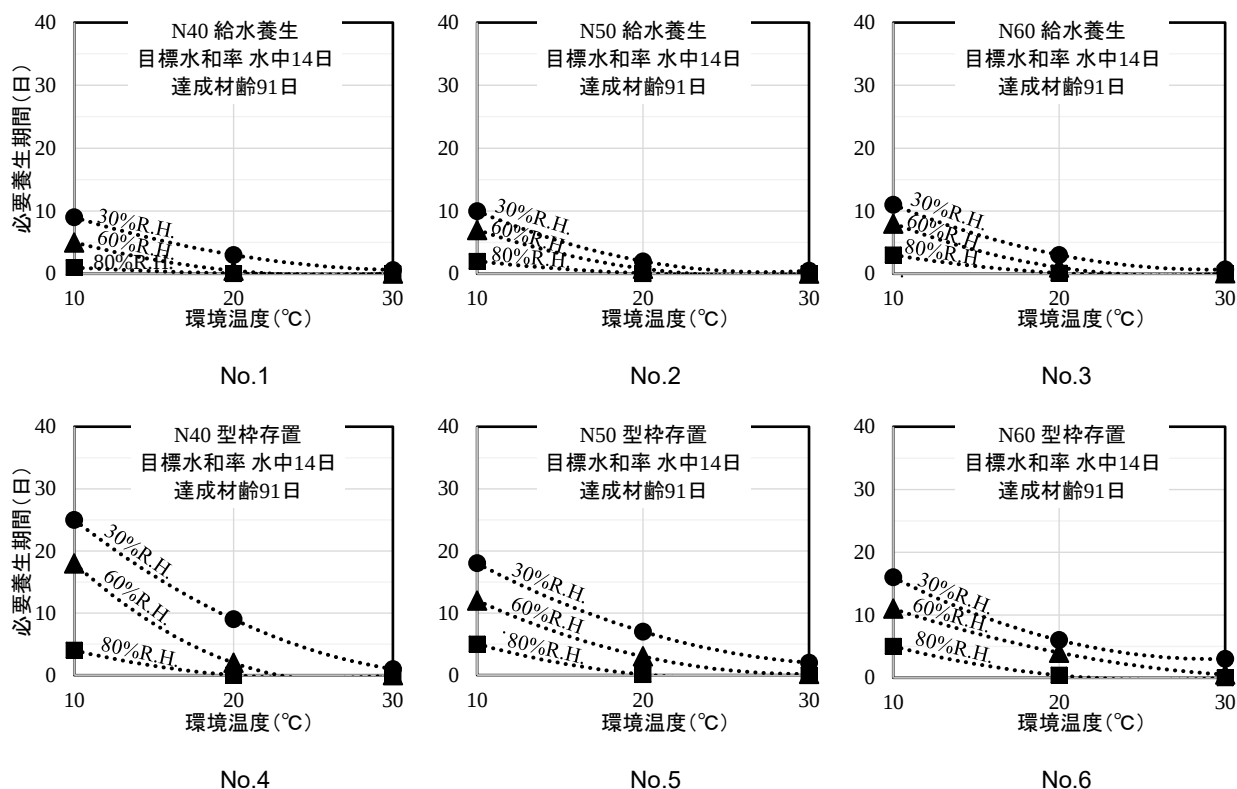


図-12 目標水和率 水中 14 日，達成材齢 91 日の簡易推定ノモグラム

12 に示す。目標水和率と達成材齢は 3 通りの中で最も易しい条件であるため、図-11 と比べてさらに必要養生期間が短くなった。養生方法による評価をすると、図-12-No.1～図-12-No.3 の給水養生では水セメント比が高くなると必要養生期間は長くなった。これは前述したように水セメント比が低い場合は給水養生のように水の供給さえあれば容易に目標水和率を達成できるためであると考えられる。図-12-No.4～図-12-No.6 の型枠存置では、環境温度 20℃の 60% R.H.，80% R.H.では水セメント比の低い方が必要養生期間は短くなるが、環境温度 10℃では 30% R.H.，60% R.H.では水セメント比の低い方が必要養生期間は長くなった。これは、環境温度 10℃の場合は水セメント比と相対湿度の低い方が、水和に必要な水が不足するため必要養生期間が長くなるが、環境温度 20℃の場合は温度と相対湿度の影響で水和進展が速くなり、必要養生期間が短くなると考えられる。

6. まとめ

水和解析による養生計画立案手法の提案により養生計画を合理的に立案できる可能性が示唆され、必要養生期間の簡易推定ノモグラムを作成することができた。また、型枠存置は標準示方書の養生期間では不十分であることが明らかになった。水和解析に基づくことで、給水と水分逸散抑制の養生効果の差異、配合条件、養生温度、湿

度条件等の影響を考慮した養生計画の立案に繋がることと期待される。ただし、同一水和率でも養生温度等によっては空隙構造、すなわち物質移動抵抗性等の性能が異なることも予想される。今後検討することが必要である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（C）, 26420445）によって実施致しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.121-125，2012
- 2) 大島美穂，福留和人，岸亨介，熱野皓己，齋藤淳：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，V-344，pp.687-688，2016.9
- 3) 大島美穂，福留和人，連亮也，齋藤淳：コンクリート構造物の養生計画立案手法に関する研究，土木学会第 72 回年次学術講演会，V-122，pp.243-244，2017.9
- 4) 前川宏一，岸利治，R.P.Chaube，石田哲也：セメントの水和発熱・水分移動・細孔組織形成の相互連関に関するシステムダイナミクス，セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.45-52，1996