

連載：第1回

コンクリートの養生と表層品質

養生の本質的な理解

伊代田 岳史

1. はじめに

コンクリート構造物における養生は、コンクリートを製造し、型に流し込んでから環境に曝されるまでの間、適切な温度や湿度でコンクリートを保護して、コンクリートの性能を成長させる、非常に重要な役割を果たす。この作業を怠れば、竣工されたコンクリート構造物は初期欠陥などを伴う恐れがあり、安全性を担保できない可能性もある。そのため、いずれのプレイヤー（発注者、設計者、施工者など）においてもその重要度を理解し、的確に検討・計画していくことが重要である。ここでは、3回の連載にて、（1）養生の本質的な理解、（2）養生がコンクリートの品質に与える影響、（3）各種養生技術と養生判定技術、を紹介しよりよいコンクリート構造物を建設するための共通認識を得たい。

2. 養生とは

コンクリート標準示方書¹⁾には「コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性、水密性、鋼材を保護する性能などの所要の品質を確保するため、打込み後の一定期間を硬化に必要な温度および湿度に保ち、有害な作用の影響を受けないように保護する作業」と定義されている。つまり養生には、①水分を与える（給水）、②水分逸散を防ぐ（保水）、③温度制御、④有害作用からの保護、が望まれている。このことは、硬化

過程のコンクリートにおいては、水分が重要であり、また急激な温度変化や有害な作用を防ぐことが必要となることを意味している。コンクリート中の水分保持・供給の必要性において、コンクリート中に含まれる水分が乾燥などにより逸散・減少すれば、所定の品質を保有するコンクリートを得られない恐れがある。また、温度においては、温度が低ければコンクリートの硬化が遅延し、高ければ異常膨張などの恐れが存在する。当然、硬化過程に有害作用が働けば、硬化に障害をきたす。このように、養生はコンクリートを適切に育て所要の強度・耐久性を保有・発揮するためには必要不可欠となる。

2.1 湿潤養生期間

コンクリート標準示方書¹⁾ならびに日本建築学会建築工事標準仕様書JASS5²⁾においては、表-1に示すようにセメントの種類と日平均気温あるいは構造物の設計耐用年数に応じて、湿潤養生期間が定められている。この期間中は、コンクリートを湿潤状態に保つことが必要と規定されている。そもそも、コンクリートを湿潤状態に保つことで水和反応に必要な水分をコンクリート中に閉じ込めておく必要がある。これにより水和反応が持続し、所要の強度や耐久性を発揮するのである。そのために水和反応が異なるセメント種類と水和反応に大きな影響を与える温度により場合分けされていると考えられる。

2.2 示方書における養生の記述の変遷

表-2に示方書における養生の記述の変遷をまとめた。昭和15年制定のコンクリート標準示方書において、

筆者：（いよだ・たけし）芝浦工業大学工学部 准教授

表-1 養生に関する規定

養生日数（湿潤養生期間）の規準

●土木学会，コンクリート標準示方書（2012年度版）

日平均気温	普通ポルトランドセメント	混合セメントB種	早強ポルトランドセメント
15℃以上	5日	7日	3日
10℃以上	7日	9日	4日
5℃以上	9日	12日	5日

●日本建築学会_JASS5（2009）

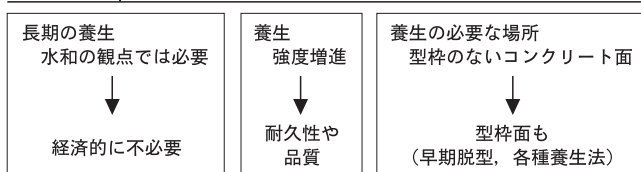
	短期および標準	長期および超長期
早強ポルトランドセメント	3日以上	5日以上
普通ポルトランドセメント	5日以上	7日以上
M, L, BB, FB	7日以上	10日以上

型枠および支保工の取り外しに必要な圧縮強度が早期に得られた場合でも養生期間中は湿潤状態を保つ必要がある。

養生に関して明記されている。“養生作業の中で、硬化中に十分湿気を与えることが最も大切”とうたわれており、吉田徳次郎先生が指摘されている養生の考え方が反映されたものと思われる。その後、昭和24年の示方書では、“水和の観点から、理想は少なくとも6カ月間湿潤状態に保つ必要がある”とされ、当時は養生による水分保持が著しく重要視されていたことが伺える。当然、現在のような工事の工程管理では困難なことではあるが、少なからず、養生による水分保持の重要性が見られる一文である。その後、昭和49年制定の示方書から、次第に内容の趣旨に変化が見られるようになる。“水和作用の観点から湿潤養生期間は長い方が良いが、長期間の養生は不経済である。（中略）湿潤養生の効果は初期の養生期に得られ、長期の養生は利益が少ない”とされ、経済的な概念が考慮され始める。昭和61年の改訂では、“強度増進のためには、できるだけ長い方が良いが、初期の硬化増進が著しく、長期の養生は不経済である”と書かれており、長期的に養生を行うことに対する、経済的なコメントが生まれ始める。そして、平成3年の改訂で、“強度、耐久性、水密性等の品質を高めるために、長い方がよい。（中略）湿潤養生の効果の大部分は初期の養生期に限られる”とされ、強度のみならず耐久性という文字が書かれ、コンクリートの品質確保に向けた記載となってくる。平成8年の改訂で、本文に“型枠で保護されていないすべてのコンクリート面に対して養生を施す”

表-2 示方書における養生記述の変遷

制定年	解説への記載（気になること）
S15(1940)	養生作業の中で、硬化中に十分湿気を与えることが最も大切
S24(1949)	水和の観点から、理想は少なくとも6カ月間湿潤状態に保つ必要
S49(1974)	水和作用の観点から、湿潤養生期間は長い方が良いが、長期間の養生は 不経済 。…湿潤養生の効果は初期の養生期に得られ、 長期の養生は、利益少ない
S61(1986)	強度増進のためには、できるだけ長い方が良いが、初期の硬化増進が著しく、 長期の養生は不経済 である
H3(1991)	強度、 耐久性、水密性等の品質 を高めるために、長い方がよい。…湿潤養生の効果の大部分は初期の養生期に限られる
H8(1996)	「 型枠で保護されていないすべてのコンクリート面に対して… 」



との記載があり、ここまでは養生を施すコンクリートは型枠面以外のコンクリート面と考えられていた。しかしながら耐久性や品質確保の観点ならびに、型枠の転用による早期脱型を考慮して型枠面においても養生が必要であることが考えられ始めた。現在においては、コンクリートは型枠を外してから何がしの方法で養生を施すことが必要であることが定説となってきた。しかしながら、非常に難しく、例えば、垂直面への養生などはなかなか簡単ではない。そのため、様々な養生手法が研究開発され、提案・実績を積んでいるのが現状である。

2.3 JASS5

JASS5においては、養生について次のように表記されている。所要の圧縮強度が確認できれば、養生期間の終了以前でも湿潤養生を打ち切ることができる。その期間は、構造物の種類として、耐用期間が短期および標準の場合には、10N/mm²以上、長期および超長期の場合には15N/mm²以上と設定されている。これは、表層のコンクリートが強度を発現できれば、初期凍害の防止ならびに中性化等の進行速度を抑制できることが示されているためである。

2.4 養生日数の根拠とは

そもそも、この湿潤養生期間はどのように定められ

ているのか？実は、この期間の設定は、現状では明確なことがわからないでいる。コンクリート標準示方書の付属資料³⁾では、コンクリートが初期凍害を受けなくなるとみなされる圧縮強度（初期凍害を防ぐための圧縮強度の標準）を得るまでは、凍結させないために養生を施すとの設定がある。これはこれまでの示方書では特殊コンクリートに位置付けられていた寒中コンクリートの養生の節に書かれている。当時のセメントは、現在の物と比較するとセメント強さがそこまで高くなく、特に初期強度は発現が緩やかであった。さらにセメントの水和が温度に大きく依存することは既知の通りであるため、低温環境での初期強度発現は著しく遅延すると思われた。万が一、強度が不足した状態で寒気に曝されれば、コンクリートは初期凍害を受けかねない。初期凍害が、コンクリートに与えるダメージは大きく、のちの回復ができないともされる。そこで、初期凍害を防ぐために必要な強度を養生により担保する必要があったと推測される。そのため低温下での養生日数が決められたとの記述は解説文にも記載がある。おそらくそれと同等の強度を発現するために、通常期温度においても設定されている表-1の湿潤養生期間があるようだが、初期凍害の恐れがない温度帯での設定は疑問が残る。一方、JASS5にも同じような日数の記述がなされている。特に建築構造物においては、型枠の転用が工期のカギを握ると推測されるため、所定の圧縮強度が確認できれば湿潤養生を打ち切ることができる。その一方で湿潤養生期間が定められているのは、こちらも明確な根拠が見つけられずにいる。強度発現に加え中性化進行に関する検討結果も提示されており、詳細な検討は進んでいるものの、現時点においては不明な点が多く存在する。

そもそも養生の影響は、周囲温度とセメント種類、設計耐用年数が大きな要因であると想像できるが、それ以外にもコンクリートの配（調）合の要である水セメント比は、強度や耐久性に大きな影響を与える。当然、単位水量や骨材の最大寸法、スランプや空気量に代表されるコンクリートのフレッシュ性状も大きな要因となり得ると想像できる。湿潤養生期間の設定は、

今後も議論が必要になると考えられる。

3. 養生による水和反応の継続と停止

ここでは、養生時の温度や養生時の水分による水和反応への影響を実験のデータを用いて紹介を行う。直接的に計測した水和度（結合水率）に加え、形成される空隙構造を元に、養生と水和の関係性を紹介する。その上で養生の必要性について理解を深める。

3.1 養生温度による影響

コンクリートの養生温度による水和への影響はこれまで多く報告されている。高温で養生を施すことで、水和反応が促進されることは知られており、初期材齢において水和増進が見られる。しかしながら長期においては、水和反応が停滞することが知られており、長期的な強度増進は見られない。初期における高温養生では、生成する水和物の密度が異なるとの報告もなされている。また、それに伴い空隙組織が変化することをも指摘されている。さらに蒸気養生などの高温高湿環境での養生においては注意が必要となる。特に、セメントの種類によっては、鉱物組成の変化に伴い水和反応速度が異なることも考えられる。普通ポルトランドセメントと低熱ポルトランドセメントの反応速度の相違や混合セメントによる水和反応の違いが大きく影響を与えることがあるため、注意が必要となる。

一方、低温時の水和反応への影響は、さらに注意を要する。水和反応が化学反応であることから、周囲の温度状況により大きく影響を受ける。初期の低温環境は水和を著しく遅延させることが知られており、強度発現の遅延が指摘されている。その影響は、水和反応が遅い、低熱ポルトランドセメントや混合セメントで大きな影響があるといわれており、強度発現への影響が大きい。冬季や寒中コンクリートの施工においては、注意が必要である。また、初期凍害への影響も注意する必要がある。しかしながら、水和反応がゆっくり進行することで、密度の高い水和物を生成するとの報告もあり、長期強度が増進することも知られている。

3.2 養生時水分による影響

養生時に潤沢に水分がある場合（水中養生）、もし

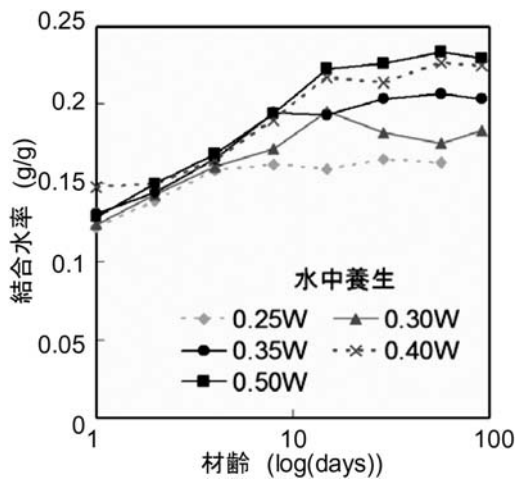


図-1 水中養生下での水和挙動 (W/C違い)

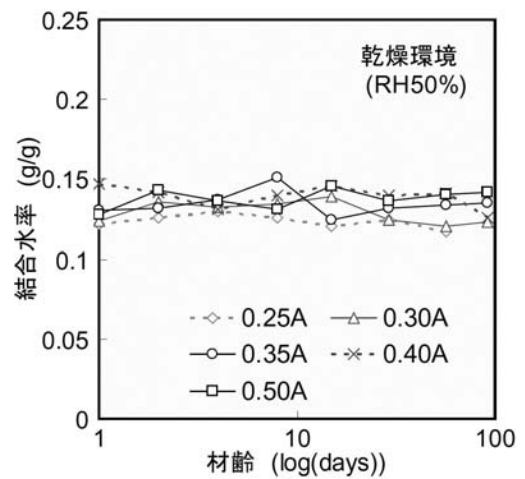


図-2 乾燥環境下での水和挙動 (W/C違い)

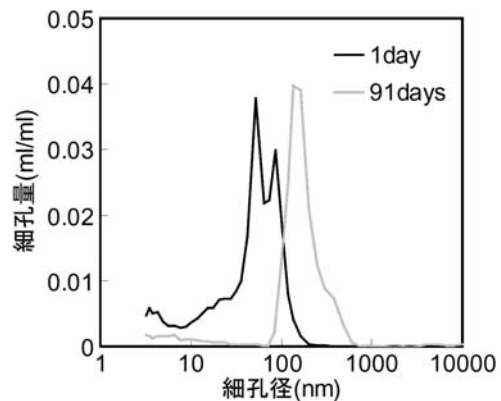
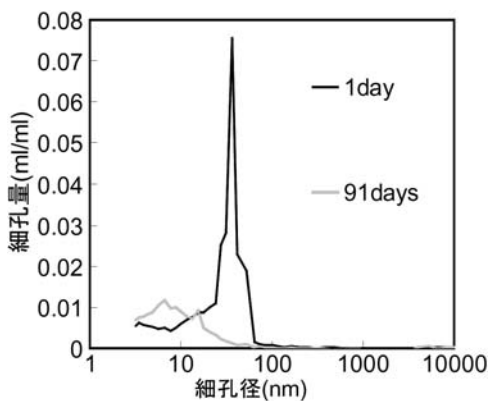


図-3 養生方法の異なる空隙構造形成の相違 (左:水中養生, 右:乾燥環境)

くは当初の水分が逸散しない場合(封緘養生)における水セメント比が異なる普通ポルトランドセメントを用いたセメントペーストの水和挙動を図-1に示す。結合水率は、水和物として取り込まれた水分量を示しており、水和の進行度と置き換えて考えることができる。高い水セメント比である0.50や0.40では、水和反応が阻害されずに継続しており、長期で安定する。セメントも潤沢な水と反応し高い水和度となる。一方で、水セメント比が低い0.35以下では途中の結合水率で伸び悩み、水和が停滞していることがわかる。これは水和反応に必要な水分が不足してしまうことで、水和反応が継続できないことを示している。

次に図-2は打込み後24時間にて脱枠した試料を20℃で相対湿度RH50%の環境に曝した水セメント比の異なるセメントペーストの水和反応を表している。前述の図と比べると明らかであるが、いずれの水セメント比の試料においても水和が停滞している。これは、水セメント比が高い場合は、水和に使われる前に自由

水が逸散してしまい、水和反応が継続できない状況であることがわかる。一方、水セメント比が低い場合には、同様に水分不足で水和停止しているが、前述の図と比較すると結合水率の差は大きくない。これは、水セメント比が低い場合には、養生が水和反応の継続性に与える影響が大きくないことを示していると思われる。

図-3は、前述の水分が逸散しない場合と乾燥した場合における、水セメント比0.50のセメントペーストの空隙構造をMIPにて継続的に計測した結果である。これより、水分が保持されている場合には、材齢とともにピークを示す空隙が小径化しており、またその総量も減少しており、緻密化している。一方、乾燥を伴い、水和が停滞している場合、ピークを示す空隙径が、材齢が経過してもほとんど変化せず、また総量も変化していない。つまり、長期の材齢となっても粗大な空隙が残存しており、強度への影響の恐れや物質移動抵抗性の低下が示唆される。

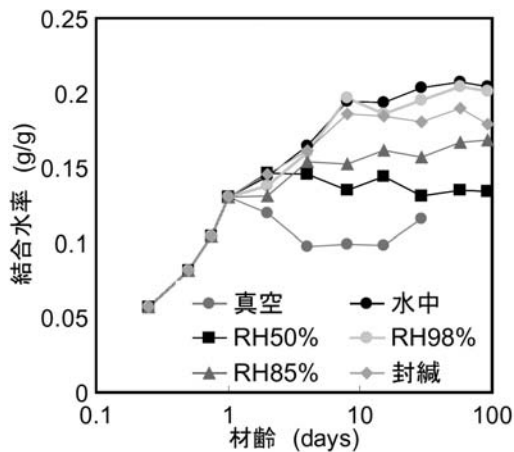


図-4 各種養生条件の相違が水和反応に与える影響

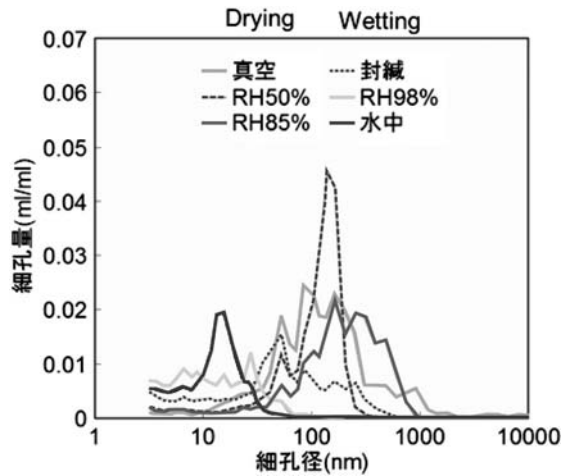


図-5 各種養生条件の違いが空隙構造に与える影響

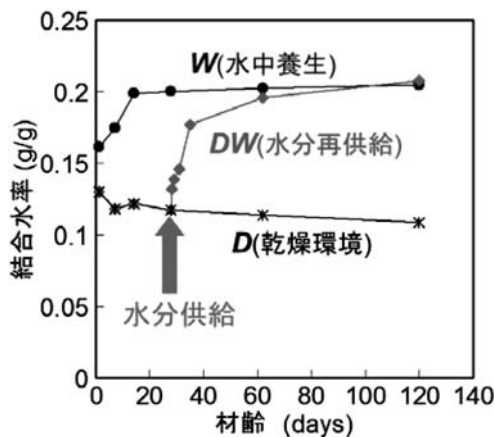


図-6 水分再供給による水和挙動

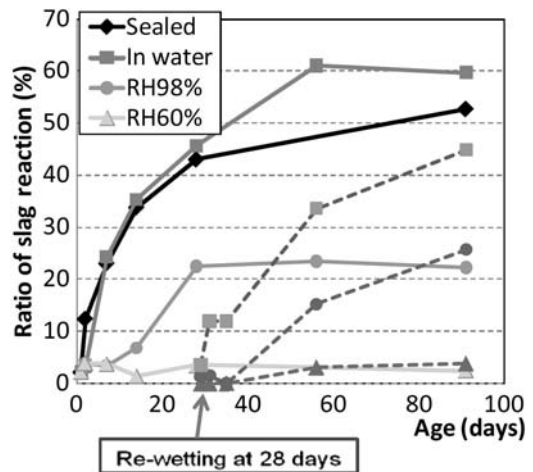


図-7 水分再供給によるスラグ反応率の挙動
(*破線の3本は材齢28日においてRH60%から水中、RH98%、RH80%環境に移動させ水分供給したものの)

次に様々な養生環境における水和進行を図-4に示す。水中養生や封緘養生では、前述の通り水和の進行が認められる。また、RH98%程度の湿気箱の中に静置した場合、水和反応は進行するも速度は緩やかであり、長期材齢でも水中養生や封緘養生と同程度となる。これはおそらく水和反応には液状水が必要であり、水蒸気では反応に限界があるものと推測でき、長期間では気液平衡に至るために水和に利用できることを意味していると考えられる。次に乾燥条件では、RH50%とRH85%では、ほとんど差が見られない。これは、水和に使われていない、自由水が乾燥により急激に逸散するため、その速度には差があるものの、水和反応に与える影響は小さいものと考えられる。つまり水分の状況により、水和の進行が決定づけられており、初期材齢における乾燥は、水和反応には著しく影響を及ぼすと

言える。水和反応が停滞すれば、図-5のように粗大空隙の残存により、強度や耐久性が低下することは前述の通りである。

3.3 水分再供給による影響

一度水和停止したセメントは、その後に水分が供給されると反応が再開するのか？そこで、図-6は様々な養生を施したセメントペーストが材齢28日を迎えたのちに、水分を再供給させた水和進行を示したものである。これより、乾燥により水和停止していたセメントに液状水としての水が供給されると、再水和して回復に向かっていることがわかる。再供給後、28日を経過したところで、水中養生を継続した試料と同程度の水和度まで回復している。このことは、セメントは水分が逸散したことで、水分不足に陥り一時的に反応が停止したことを意味していると考えられる。一方、図-

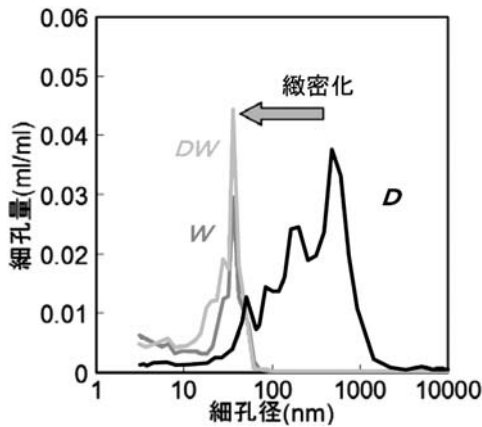


図-8 水分再供給による空隙構造

7に高炉セメント中の高炉スラグ微粉末の反応を示した。ここでは、液状水として水を供給した場合と、水蒸気で再供給した場合を示しているが、水蒸気で供給した場合には、水和の回復傾向は見られるが、計測した時間内では元の養生の水和度までは回復できていない。つまり水和には、液状水が必要不可欠であると考えられる。

水和回復により空隙の緻密化が起り、性能が回復できると考えられる。図-8は水分再供給による空隙構造を計測した結果である。図-9は水分再供給による圧縮強度の回復を示したものである。モルタルバーを用いた試験により、圧縮強度は、確実に回復傾向であり、長期材齢において水中養生を継続した場合と同程度となっている。しかしながら、図-10はモルタルバーによる曲げ試験を行った結果であるが、曲げ強度は水分を再供給しても強度が回復しているとは言えない。これは、初期に乾燥の影響を受けると、一軸の圧縮に対してはもともと耐力があることで回復するが、内部もしくは表層になんらかの欠陥を残すことで、曲げや引張に対しては回復できないものとする。このことは、初期における養生が著しく重要であることを示しており、のちの雨水等の水分供給に過大な期待をすることができないことを示していると考えられる。

本稿では規定における養生の取り扱いとその変遷、並びに水和反応に立脚した養生の重要性を紹介した。養生は形として見えにくいものであるが、怠ると構造物の将来に影響を及ぼしかねない。そのことを理解した上で養生計画を立てて構造物建設に当たることが必

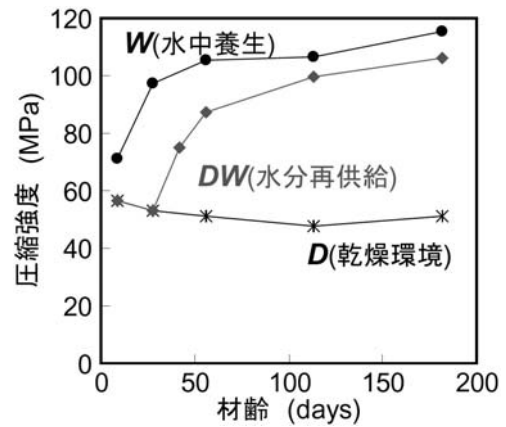


図-9 水分再供給による圧縮強度計測結果

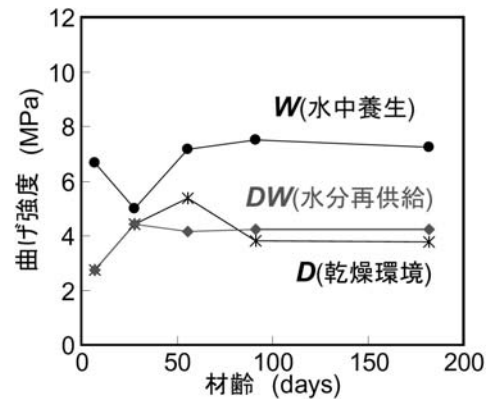


図-10 水分再供給による曲げ強度計測結果

要であると考えられる。次号では、養生とコンクリートの物理特性と耐久性について考える。

【参考文献】

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書施工編, 2012年制定版
- 2) 日本建築学会 建築工事標準仕様書JASS5 鉄筋コンクリート工事2009
- 3) 土木学会コンクリートライブラリー138 2012年制定コンクリート標準示方書改訂資料, 土木学会
- 4) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢における乾燥がセメント硬化体の内部組織構造に及ぼす影響, 土木学会論文集V-59, pp.17-26, 2003
- 5) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢時の水分履歴がセメント硬化体の内部組織構造形成と物理特性に及ぼす影響, コンクリート工学論文集Vol.15, No. 2, pp.25-34, 2004 (Issue 35)
- 6) Takeshi IYODA, Kimihiro INOKUCHI and Taketo UOMOTO: EFFECT ON SLAG HYDRATION OF BLAST-FURNACE SLAG CEMENT IN DIFFERENT CURING CONDITIONS, 13th International congress on the chemistry of cement, SPAIN 2011