

硬化コンクリートの耐久性に与える養生の定量化とその管理手法

伊代田 岳 史*

1. コンクリートにおける養生とは

コンクリートは、まだ固まらない状態から硬化が進んでいく過程で生じる水和反応は、周囲の環境の影響を大きく受けることが知られている。この反応が化学反応であることから周囲の温度によりその反応速度が変化することは容易に想像できる。その一方で、水分状態にも影響を受けることが従来から知られており、そのために湿潤養生期間を設けることが定められている。図-1は、セメントペーストを用いて異なる湿度環境下における水和の進行を捉えるために強熱減量を計測した結果¹⁾である。これより、周囲湿度が低い環境の場合には、初期の段階

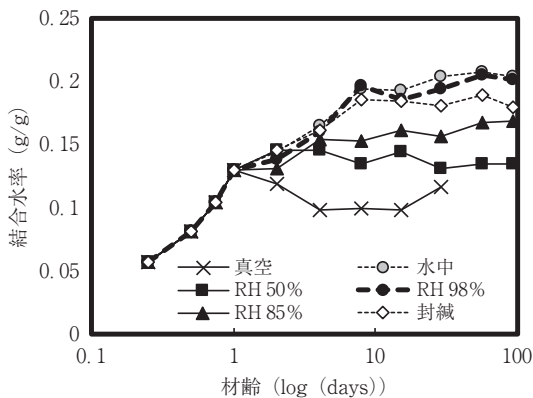


図-1 養生条件の異なるセメントペーストの水和進行¹⁾

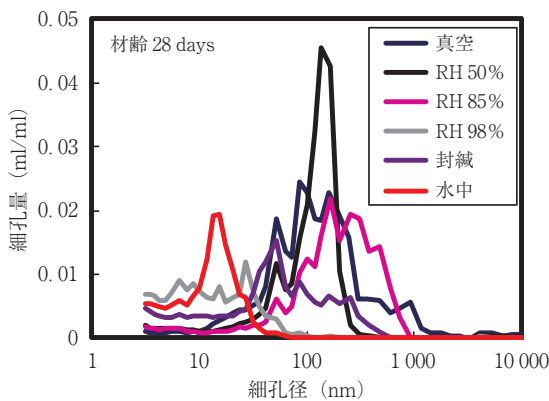


図-2 養生条件の違いが空隙構造に与える影響¹⁾

で水和が停止していることがわかる。つまりコンクリートが湿潤養生を必要とする理由は、この水和反応を妨げないことであるといえる。また形成された空隙構造も、養生条件の影響を大きく受ける。図-2は、各種養生を施したセメントペーストを用いた材齢28日の空隙構造を水銀圧入法により計測した結果¹⁾である。乾燥環境で水和が停止すると、空隙構造も変化せず、大きな空隙が残存していることがわかる。このことがコンクリートの強度発現や物質移動抵抗性に影響を及ぼしていることは容易に想像できる。

そこでここでは、このような養生期間中の水分状態の違いがセメント硬化体に与える影響を実験データから整理したものを報告する。また、養生の影響範囲がコンクリート表層からどの程度であるかを評価する。加えて養生の影響の評価は試験方法に大きく依存することを紹介する。最後に実構造物を考慮して、養生を経たコンクリートがどの程度の性能を発揮できるのか(育つのか)を非破壊にて調査する手法の一つを紹介したい。

2. 湿潤養生がコンクリート硬化体に与える影響の整理

2.1 圧縮強度に与える影響

図-3に養生条件を水中養生と養生無し(脱枠後気中乾燥養生)を施したコンクリートの圧縮強度の違いを OPC および BA, BB, BC を用いたコンクリートで計測した結果²⁾を示す。脱枠から乾燥状態に曝した場合、水分の

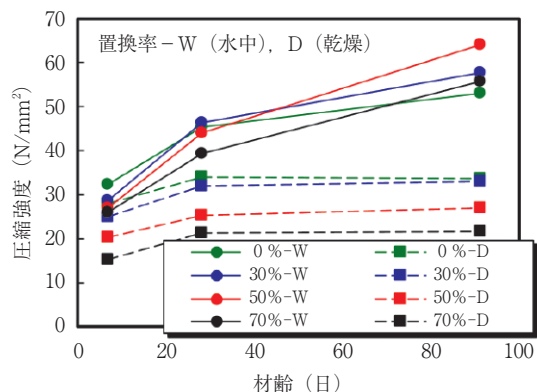


図-3 水中養生と養生無しによる圧縮強度発現の相違²⁾

* いよだ・たけし／芝浦工業大学 教授 (正会員)

逸散により水分不足となり強度発現が遅ることがわかる。その影響は、水和の進行が遅く水和に水分が多く必要な置換率の大きな高炉セメントほど大きいことがわかる。

2.2 物性値に与える影響

図-4 に養生期間の異なるコンクリートの透気係数の変化²⁾を示した。なおセメントは普通ポルトランドセメント (N) と高炉セメント B 種 (BB) を用いている。ここで記号の D は材齢 1 日で脱枠, CD は養生期間が湿布養生, WD は養生期間が水中養生, S は封緘 (脱枠しない) 養生を表しており, 養生期間は 3, 5, 7, 28 日とした。またそれぞれ養生終了後には乾燥環境 (RH 60%) にて試験日である材齢 28 日まで保管したことを表している。なお, すべての養生で温度は 20℃ 一定とした。セメント硬化体は養生期間を長くすることで透気係数は小さくなり, 緻密な構造を形成していることがわかる。次に中性化速度係数の比較²⁾を図-5 に示す。これより同様に養生の継続により中性化抵抗性は向上していることが確認できる。また, 同様に透水試験の結果においても, 養生を施さないと著しく低下するが, 養生を施すことで向上していることを確認した。

2.3 圧縮強度と耐久性の関係

養生により強度・物質移動抵抗性が向上するのは, 水和反応の進行による骨格形成と空隙の緻密化によるもの

であり, 養生の重要性が理解できる。

一方で, 図-6 は 2.2 の結果に加え W/C の異なる OPC および BB を用い, 養生の異なるコンクリートの圧縮強度と透気, 透水, 中性化速度係数の関係を示した²⁾ものである。圧縮強度とそれぞれの物性値にはある程度の相関性は認められるものの, 圧縮強度により特性値が一義的に決定するとはいいがたい。これは, 圧縮強度試験は試験体全体で荷重を受け持っているのに対し, 物質透過性を表す物性値は表層からの物質の移動現象を計測している。そのため, 養生により水分が逸散する領域が存在すると物質移動抵抗性は低下することが考えられる。この養生の影響範囲には限りがあり, 水和が抑制され空隙が粗大化している部分も表層から限られた領域であると想定できる。

2.4 養生の影響範囲

前述の通り, 養生を怠ることは, コンクリート中の水分が表層から逸散することによりセメントの水和に必要な水が不足し, 水和を抑制することで性能を発揮できないことにある。ここで, 水分の逸散は, コンクリート表面からしか生じないことを考慮すると, 養生による水分不足に陥る領域は表層から限られた部分となると想像できる。そこで, その領域を推測するために, コンクリート内部の異なった深さ位置における湿度を計測した結果³⁾,

* 符号は養生期間中の養生方法を以下のように表す。
D は乾燥, CD は湿布, WD は水中, S は封緘

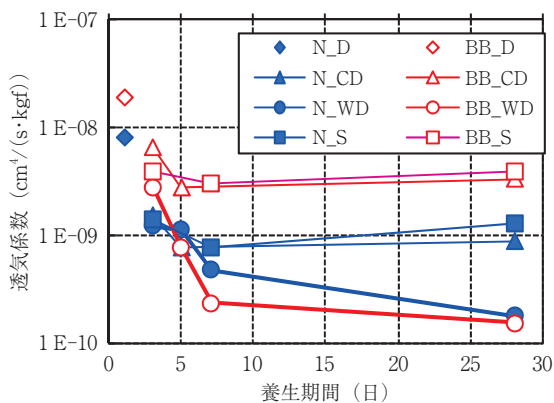


図-4 養生条件の違いが透気係数に与える影響²⁾

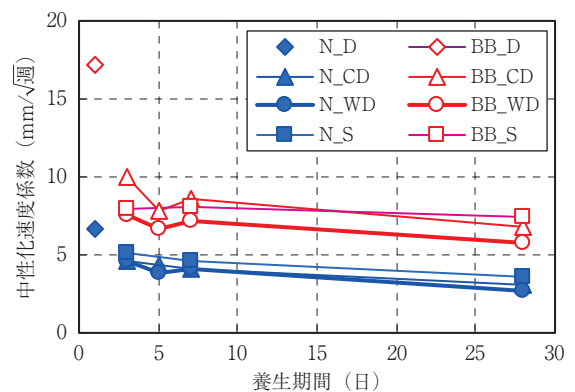


図-5 養生条件の違いが中性化進行に与える影響²⁾

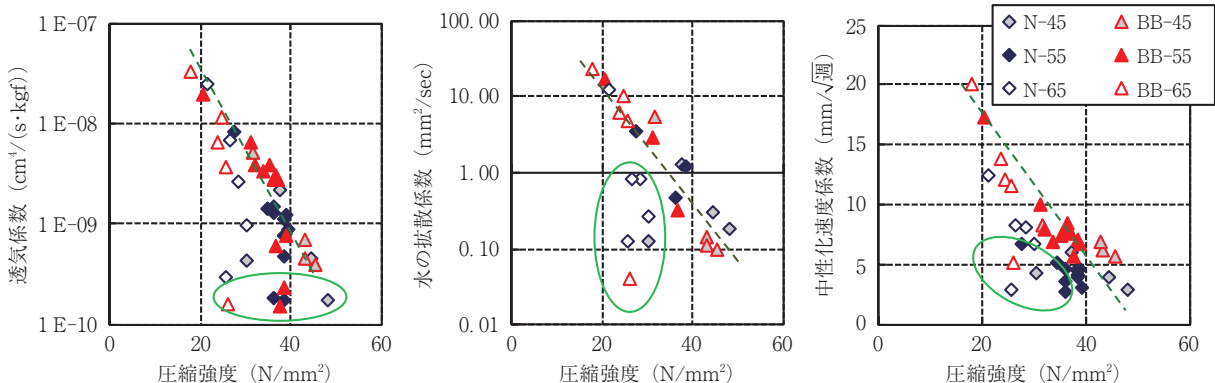


図-6 異なる養生条件における圧縮強度と物理特性との関係性²⁾

図-7のように大きく影響を受けるのは、表層から30mm程度であった。同様に養生期間を変化させたコンクリートの内部の空隙状況を把握するために、真空状態による水分吸い上げ試験⁴⁾を実施したところ、図-8のようにセメントの種類に依存はするが、概ね表層から2~3cmの領域が粗な状況であることがわかった。もちろん、BBやLPCのように水和進行の遅いセメントにおける材齢1日での養生終了が、著しく深い位置まで乾燥の影響があり、粗大な空隙を残存していることも考慮する必要がある。

このように養生は、表層から数cmの領域の水分状態を変化させ、水和反応の停滞により粗い空隙構造とし、強度や耐久性に影響を与えることが明らかとなった。しかしながら、土木の構造物などのかぶりを大きく設定できる場合には、養生が影響を与える範囲より以深

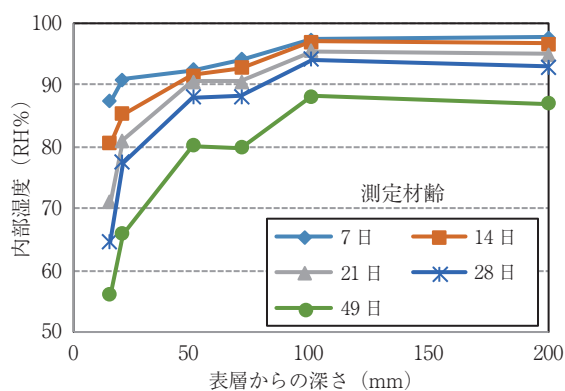


図-7 養生による影響を受ける領域の特定³⁾

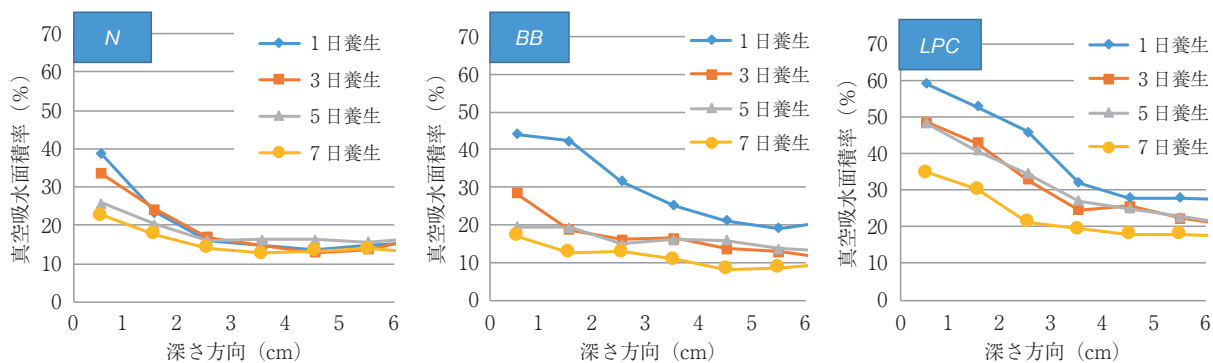


図-8 養生により影響を受ける領域のセメント種類ごとの比較⁴⁾

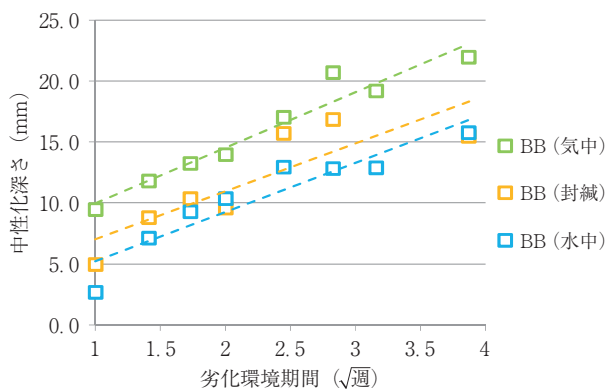


図-9 養生の相違が中性化深さに与える影響⁵⁾

のコンクリートの性能は確保することが可能であり、養生による影響は大きくない可能性もある。一方で、強度不足などの原因により表層コンクリートのひび割れ発生や剥離剥落などへの影響も否定できない。また、その領域での物質移動抵抗性は、かなり小さくなることも考慮して、適切な養生を施すことが重要であるといえる。

3. 養生の影響を評価する試験方法

3.1 中性化の試験

一般的に促進中性化試験は、乾燥環境下で行われる。湿潤養生が不足している場合には、内部の水分が逸散して水和反応ができない状況に置かれている。そのため、養生条件を変えた中性化試験の結果⁵⁾は、図-9に示したように養生の影響が顕著に表れ、養生が短いほど中性化の進行が早くなる。このように促進中性化を行うことで、養生の重要性も認識できる。

ただし、一般の環境においては養生後においても水分や湿分が供給されることが想定され、その際には水和反応も再水和を起こすことも想定される。また、水分状態によって中性化の進行は著しく抑制されることから、一般環境において、養生の影響を明確に評価することは困難になることも想定される。促進試験によるコンクリート構造物の耐久性の判断は十分に議論が必要であるといえる。

3.2 塩分浸透の試験

塩分浸透の試験には、一般的には塩水浸漬試験などが行われる。ここで、図-10は養生を違えて作製したコン

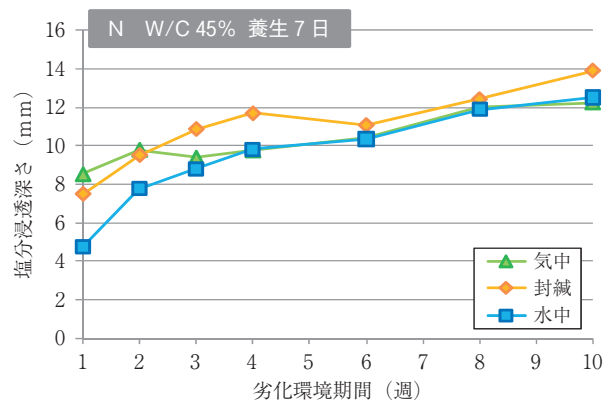


図-10 養生の相違が塩分浸透深さに与える影響⁶⁾

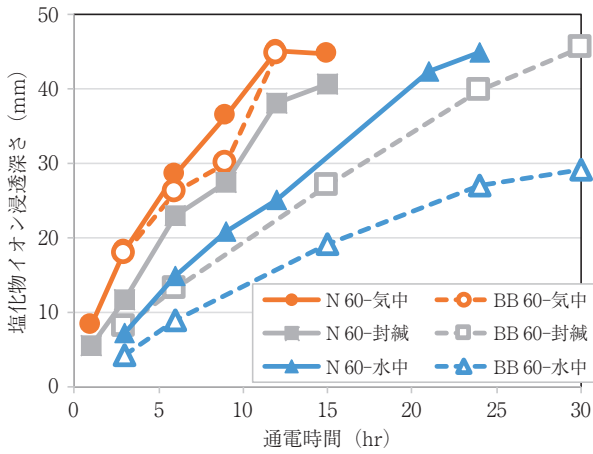


図-11 養生の相違が非定常電気泳動試験による塩分浸透深さに与える影響⁷⁾

クリートの塩水浸漬試験結果⁶⁾である。これより明らかなように、測定当初は養生が不足している気中養生の試験体ほど塩分が浸透していることがわかるが、長期間の暴露を経ると、養生していないものも塩分浸透量が停滞し、養生の差がほとんど見られなくなる。これは、塩水に浸漬することでセメントの再水和が生じ、空隙の緻密化や塩化物イオンの固定化などが行われるものが原因と想定される。このような状況では養生の違いは判断しにくい。そこで、図-11は異なった養生条件で作製したコンクリートに非定常電気泳動試験⁷⁾を実施したものであるが、これを見ると、養生の違いが明確に表れている。ここで、非定常電気泳動試験は陽極側から塩化物イオンの検出がされる前までの早期に試験を実施するために、再水和などの影響を排除することができ、養生の影響を評価できる方法であると考えられる。一方で、実構造物においては、この養生の影響をどの程度見込むかは議論が必要である。

4. 電気抵抗を用いた養生評価—コンクリートの特性値の推測—

養生はコンクリート表面からの水分逸散を防ぐことで、水和の進行を妨げないことが必要であり、その影響は表層から2～3cmであるといえる。ここでこの範囲の表層コンクリートにどの程度の養生を施せば、コンクリートが性能を発揮し、将来的に問題がないかを確認できる手法があれば、実構造物においても養生によるコンクリート性能の向上につながる。さらには、養生終了タイミングなどの推測が可能となれば、工期短縮や施工の合理化にもつながる可能性がある。そこで、ここではコンクリート中の水分量と電気抵抗に着目して、養生の評価を試みた事例を紹介する。

図-12は開発した四電極法による電気抵抗測定システム⁸⁾を示している。型枠にあらかじめ埋め込んだ電極(針金4本)は、型枠からの特定の深さ位置のみを計測できるように、測定したい位置のみを解放し、それ以外はシールしている。外側2本の電極に電圧をかけ、内側2本の電

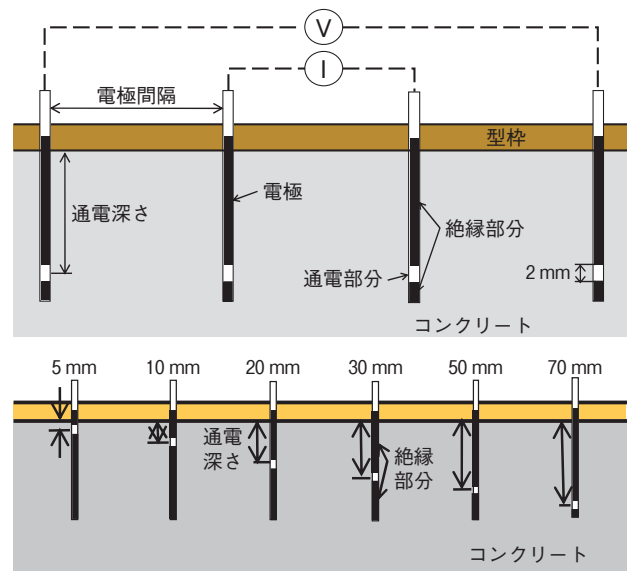


図-12 四電極法による電気抵抗測定システム

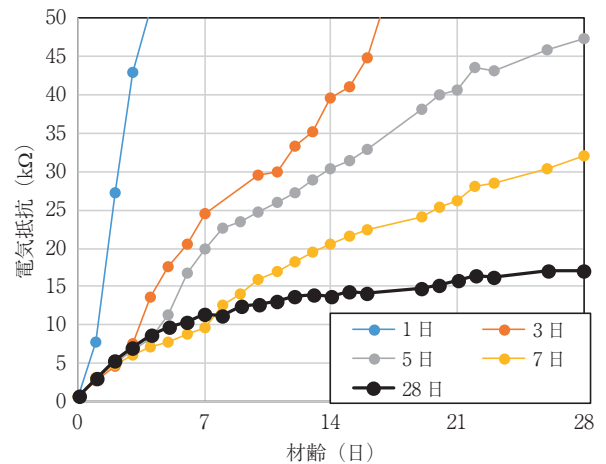


図-13 型枠存置期間の相違による表面から5mm位置の電気抵抗比較⁹⁾

極で電流を計測し抵抗値を測定する仕組みである。図-13は型枠の存置期間を違えた表面から5mmの位置での抵抗の経時変化⁹⁾を示している。この結果より、型枠存置期間を長くするほど、水分が保たれることで抵抗値が小さくなることを確認できる。これは水和の進行により、コンクリート中の水分が減少していることとともに空隙が緻密化していることを示している。脱枠すると、水分逸散により抵抗値は上昇するが、型枠存置期間が長くなるとその影響も小さくなることがわかる。次に図-14は測定位置を表層から5, 10, 20, 30, 50, 70mmと違えた条件での測定結果⁹⁾を示している。これより、型枠を外した5日より、表層部での抵抗は著しく上昇するのに対し、20～30mmおよび50mm以深では、抵抗値が徐々に上昇する程度にとどまっている。抵抗値は水和の進行により水分量が減少することで上昇することから、この深さ位置での抵抗値の上昇は、主に水和に使用される水分の減少を示しているが、表層部での著しい抵抗値の上昇は水分逸散を示しているものと考えられる。次に、深

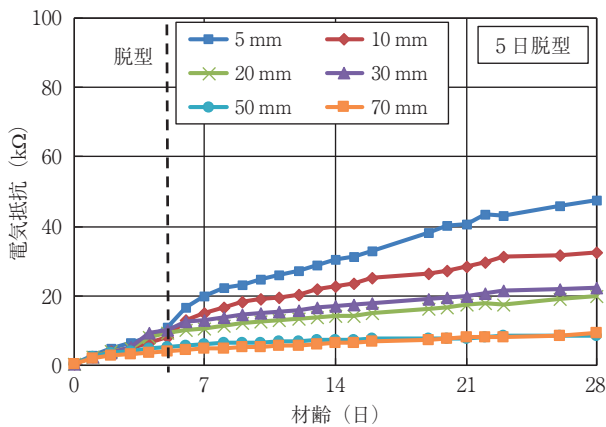


図-14 測定深さの違いによる電気抵抗の比較⁹⁾

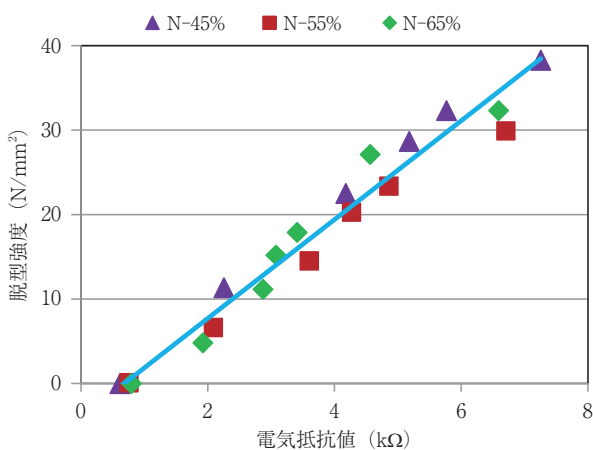


図-15 電気抵抗と脱型時強度の関係¹⁰⁾

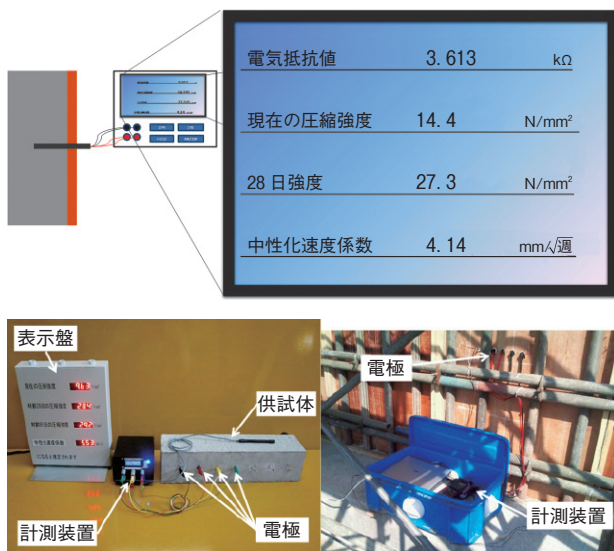


図-16 現場での養生終了判定システムのイメージ

さ 30 mm の位置に埋設した電極を用いて型枠を存置したまま封緘状態で電気抵抗を計測し、別途試験体を材齢 1, 3, 5, 7, 28 日で脱枠して圧縮強度を計測し、その時の電気抵抗との関係¹⁰⁾ を図-15 に示す。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートで、水セメント比が異なるが、その関係は一義的であることがわかる。このことから、電気抵抗を計測することで、型枠内のコンク

リートの圧縮強度が推測できるといえる。また脱型後に乾燥環境に曝した 28 日での圧縮強度および中性化速度係数とも相関が得られた。このことから、型枠存置期間が異なるコンクリートにおいて、その型枠内での圧縮強度と脱枠してからの 28 日強度や耐久性を脱枠時に推測できるシステム^{8), 10)} を構築できた。これを用いることで図-16 のように、現場にて養生を終了した時点でのコンクリートの性能をある程度推定でき、要求性能に応じた養生終了時期をリアルタイムに判断できるシステムが構築できることを示唆している。

5. おわりに

養生はコンクリートの成長を促し、強度や耐久性を発現させるために必要不可欠な行為である。その理由として、セメントの水和反応に必要な水の逸散を防ぎ、緻密な空隙構造を形成することが重要だからである。一方で、養生不良により逸散する水分は表層から 20~30 mm 程度である。物質移動特性を考えるとかぶり部分のコンクリートの品質を確保することは著しく重要である。しかしながら、過剰な養生日数の確保や水分供給は施工に要する工程やコストにおいても不具合を生じる可能性がある。使用材料や要求性能に応じた適切な養生期間を確保し、コンクリートの性能を向上させることが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 檀 康弘・伊代田岳史・大塚勇介・佐川康貴・濱田秀則：高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係，土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.431~441, 2009
- 3) 伊代田岳史・松崎晋一郎・井ノ口公寛・歌川紀之：養生とその後の環境による内部湿度の相違が乾燥収縮に与える影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.32, pp.111~116, 2010
- 4) 井ノ口公寛・豊村恵理・伊代田岳史：高炉コンクリートの養生相違が乾燥の影響範囲に与える影響，混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム 委員会活動概要・論文集, pp.69~74, 日本コンクリート工学会, 2011
- 5) 豊村恵理・伊代田岳史：養生条件が中性化速度に及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集, 第 11 巻, pp.401~406, 2011
- 6) 豊村恵理・青山和樹・伊代田岳史：塩分供給方法と養生条件の相違が塩分浸透に及ぼす影響，第 67 回土木学会年次学術講演会, V-090, 2012
- 7) 伊代田岳史・原沢蓉子・亀山敬宏：非定常電気泳動試験を用いた高炉コンクリートの養生影響評価，セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.275~282, 2014
- 8) Takeshi Iyoda, Maho Ota and Takehiro Misaka: PROPOSED CONSTRUCTION SUPPORT SYSTEM FOR ESTIMATION SETTING TIME AND CURING USING THE ELECTRICAL RESISTANCE ON CONSTRUCTION SITE, The Fifth International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, CONMAT' 15, 2015. 8
- 9) 豊村恵理・上原津葵・伊代田岳史：直流比抵抗を用いたコンクリートの養生終了タイミング判断手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1348~1353, 2012
- 10) 三坂岳広・原沢蓉子・伊代田岳史：直流四電極法による養生終了判定時期判定方法の確立および現場適用性の検討，コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1606~1611, 2014