

## 論文 養生が異なるコンクリートの材齢 1 年後の諸物性の変化

喜多 雄士\*1・西 博貴\*2・皆川 浩\*3・久田 真\*4

**要旨：**本研究では、不十分な養生を行ったコンクリートを実環境に暴露し、材齢 1 年後のコンクリートの諸物性値の変化について検討した。実験の結果、普通ポルトランドを用いたコンクリートの場合、再水和によりコンクリートの圧縮強度が増加していることが確認された。再水和は、外部環境からの水の供給が多い表層部で特に活発であった。また、表層部の再水和によって物質遮蔽性も改善していることが確認された。一方、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、圧縮強度と物質遮蔽性の増加は小さく、材齢 1 年後であっても初期養生の影響を大きく受けることが確認された。

**キーワード：**養生，暴露試験，強度，物質透過性，再水和，表層部

## 1. 本研究の目的

コンクリート構造物の早期劣化が社会問題になって以降、コンクリートはメンテナンスフリーではないと認識されるようになり、コンクリートの耐久性向上のための研究が盛んに行われるようになった。

コンクリート構造物の耐久性を向上させる方法の一つは、適切な養生を一定期間行うことである。近年、養生に関する研究が活発に行われており、養生方法が良いほど、強度、耐久性共に向上することが報告されている。しかし、不適切な養生が施されたコンクリートの諸性能が材齢の進行と共に、どの程度回復するかについて検討した論文は少ない。

コンクリートの諸性能は、水和反応と密接に関わっている。水和反応は、セメントと水が化学反応を起こすため、水の存在と温度の影響を強く受ける。したがって、養生期間中の乾燥によるコンクリートからの水の逸散は、セメントの水和反応を阻害し、初期性能を低下させる。伊予田<sup>1)</sup>らは、セメントペースト供試体を用い、材齢初期の乾燥によってセメントの水和反応が停止した場合でも、水の再供給によって再水和が発生し、水和率は湿潤養生供試体と同程度まで回復するとしている。

本研究では、セメント種類と水粉体比の異なる三種類のコンクリート供試体に対して 3 種類の養生を施した後、それらを全国 5 箇所で屋外暴露し、実環境におけるセメントの再水和現象について検討した。また、再水和により、圧縮強度や物質遮蔽性がどの程度向上するのかについても検討した。なお、実験に使用した供試体の暴露期間は 1 年間である。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料と配合

表-1 に実験に用いたコンクリートの配合、表-2 に使用材料の詳細を示す。セメント種類は普通ポルトランドセメント(OPC)と普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末で 50 %重量置換したもの(BFS) の 2 種類を用いた。混和剤として、AE 剤を用いた。

## 2.2 供試体作製方法・養生方法

供試体の作製は、宮城県仙台市で 2009 年の 9 月に行った。供試体は、 $\phi 100 \times 200$  mm の円柱供試体と  $100 \times 100 \times 400$  mm の角柱供試体を作製した。表面成型後、脱型

表-1 示方配合

| 供試体名  | W/B  | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |
|-------|------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
|       |      | W                        | C   | B   | S   | G   |
| OPC40 | 0.40 | 165                      | 413 | 0   | 821 | 971 |
| OPC55 | 0.55 | 165                      | 300 | 0   | 915 | 971 |
| BFS55 | 0.55 | 165                      | 150 | 150 | 903 | 971 |

表-2 使用材料

| 材料種類     | 銘柄, 品質                                                                     |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|
| 水 (W)    | 水道水                                                                        |
| セメント (C) | 普通ポルトランドセメント<br>密度: 3.15 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3340 cm <sup>2</sup> /g |
| 混和材 (B)  | 高炉スラグ微粉末<br>密度: 2.88 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4290 cm <sup>2</sup> /g      |
| 細骨材 (S)  | 宮城県黒川郡大和町鶴巣<br>表乾密度: 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.76 %<br>粗粒率: 2.69     |
| 粗骨材 (G)  | 宮城県丸森町砕石<br>表乾密度: 2.85 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.98 %<br>粗粒率: 7.01        |
| 混和剤      | AE 剤: アニオン系界面活性剤                                                           |

\*1 東北大学工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 東北大学工学研究科土木工学専攻

\*3 東北大学工学研究科土木工学専攻 准教授 博(工) (正会員)

\*4 東北大学工学研究科土木工学専攻 教授 博(工) (正会員)

| 名称           | 1日 | 5日 | 28日                              | 1年 |                              |
|--------------|----|----|----------------------------------|----|------------------------------|
| ■1日脱型気中(1DA) | →  | →  | →                                | →  | 最も養生が不足<br>示方書に準拠<br>十分な湿潤養生 |
| ■5日脱型気中(5DA) | →  | →  | →                                | →  |                              |
| ■1日脱型水中(1DW) | →  | →  | →                                | →  |                              |
|              |    |    | 屋外暴露<br>(全国5箇所)<br>封緘<br>(20℃一定) |    |                              |

図-1 供試体の養生法と暴露について

表-3 暴露ならびに封緘の条件

| 略称  | 住所            | 平均気温<br>(℃) | 総降水量<br>(mm) |
|-----|---------------|-------------|--------------|
| 北海道 | 北海道河東群上士幌町    | 6.3         | 993          |
| 宮城  | 宮城県仙台市青葉区荒巻   | 13.1        | 1427         |
| 神奈川 | 神奈川県茅ヶ崎市      | 16.3        | 1866         |
| 福岡  | 福岡県北九州市若松区柳崎町 | 16.9        | 1770         |
| 沖縄  | 沖縄県うるま市石川赤崎   | 22.8        | 2496         |
| 封緘  | 宮城県仙台市青葉区荒巻   | 20.0        | —            |



図-2 福岡(飛沫なし)での暴露の様子

するまでの間に打設面から水分が逸散しないように、ガラス板と濡れウエスにて打設面を保護した。

図-1に養生方法について示す。暴露開始までの養生期間は材齢28日とし、養生方法は3水準とした。養生が不足する水準として、1日脱型後、材齢28日まで20℃、R.H.60~80%の恒温室内に静置する1DA(1日脱型気中)、土木学会コンクリート標準示方書に準拠した一般的な養生として、材齢5日に脱型をし、材齢28日まで20℃、R.H.60~80%の恒温室内に静置する5DA(5日脱型気中)、養生が十分に行われる水準として、1日脱型後、材齢28日まで水中養生を行う1DW(1日脱型水中)とした。

## 2.3 暴露方法

供試体の暴露は、材齢28日目から開始し、2009年10月から2010年10月まで1年間行った。表-3に、全国5箇所の暴露地点の諸情報を示す。表-3で示した気象情報は暴露期間中の平均気温ならび総降水量をAmedasデータから得た。図-2は福岡(飛沫なし)地点での暴露の様子を示す。暴露方法は、角柱供試体はアングルを用いて地面に触れないように打設面を下にして、一定間隔で設置した。円柱供試体は、横向きにした供試体数個をアングルで固定することで、風や波による転倒や紛失を防止した。屋外暴露5地点の他に、気象環境作用の影響を受けない供試体を作製するために、供試体を封緘して20℃一定の恒温室内に保管した。なお、福岡地点については暴露箇所の確保等のため、水準を絞って行った。

## 2.4 測定方法

### (1) 圧縮強度

圧縮強度試験のための供試体は、 $\phi 100 \times 200$  mmの円柱供試体を用いた。打設面を研磨した後、材齢28日と1年の暴露後に、JIS A 1108に準拠して試験を行った。

コンクリート供試体100×100×400 mm

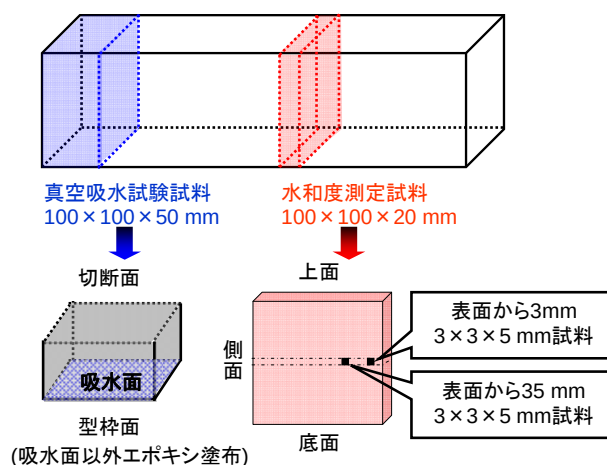


図-3 供試体試料の作製方法

### (2) 水和度

水和度の測定は、反射電子像観察から得られた画像を画像解析することで測定した。

図-3に示すように、100×100×400 mmの角柱供試体から乾式カッター及び精密カッターを用いて、粗骨材を含まないように3×3×5 mmの角柱試料を表層部と中心部より切り出した。表層部は、供試体表面から3 mmの箇所から、中心部は表面から35 mmの箇所から取り出した。試料は、アセトンに浸漬して水和を停止させた後、研磨バフ#600、#1200、#2000を用いて研磨した。

研磨後、観察面に対して炭素蒸着を行い反射電子像観察試料とした。そして、電界放射型走査型電子顕微鏡を使用して、反射電子像画像を取り込んだ。加速電圧は25 kV、倍率は500倍に設定した。また、測定箇所は試料の測定対象面から無作為に15箇所を選択した。

画像を取り込んだ後、画像処理ソフトを用いて、未水和セメントと細骨材の観察画像に対する面積率を求めた。五十嵐らは、観察画像の組織の構成物が等方性、均質、ランダムである場合は、面積率は体積率に等しいとするステレオロジーの基本原理を利用し、セメントペーストマトリックス単位体積当たりの未水和セメントの体積を計算することで、水和度を算出している。本研究では、五十嵐ら<sup>2)</sup>の式(1)を参考にし、細骨材の影響を除外してセメントペーストマトリックスの単位面積当たりの未水和セメントの面積率に換算する式(2)を用いて水和度を求めた。

$$\alpha = 1 - \frac{UH_1}{UH_0} \quad (1)$$

$$\alpha = 1 - \frac{1}{UH_0} \times UH_1 \times \frac{100}{100 - r} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ は水和度、 $UH_1$ は未水和セメントの面積率、 $UH_0$ は未水和セメントの初期の面積率、 $r$ は細骨材の面積率である。

### (3) 真空吸水試験

伊与田<sup>3)</sup>らの研究を参考にして、供試体の真空吸水試験を行った。実験には、図-3で示すように100×100×400 mmの角柱供試体から100×100×50 mmの寸法に切り出した角柱状の試料を用いた。試験の前処理として、試料を40℃、相対湿度40%の恒温恒湿槽で5日間乾燥させた。その後、100×100 mmの型枠面以外の五面をエポキシで被覆し、エポキシ硬化後に再度1日間恒温恒湿槽で乾燥させた。

試験は、デシケーターに水を張り、供試体を全浸漬した状態で真空ポンプを用いて0.1 MPaで三時間連続吸引した。その後、供試体を割裂し、供試体断面を三等分したうちの中心部分において水の存在が目視で確認でき

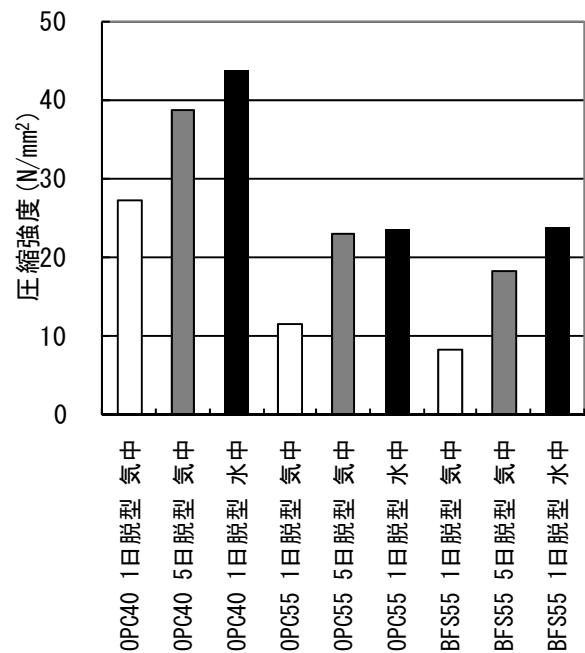


図-4 材齢28日年の圧縮強度

る部分の面積を画像解析ソフトで算出し、その面積を供試体断面の底辺の長さで除し、水分浸透深さを算出した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 圧縮強度

#### 3.1.1 材齢28日の結果

図-4は、各種養生を行った材齢28日における圧縮強度を示している。セメント種類や水セメント比に関わらず、湿潤な養生を行った場合ほど圧縮強度は大きい傾向にあった。なお、本試験は養生直後に行っており、水中養生供試体は、他の養生方法に比べて含水率が高い状態で試験を行っている。そのため、吸着水によるセメントゲルの膨張が起こり、圧縮強度は見かけ上低く測定され

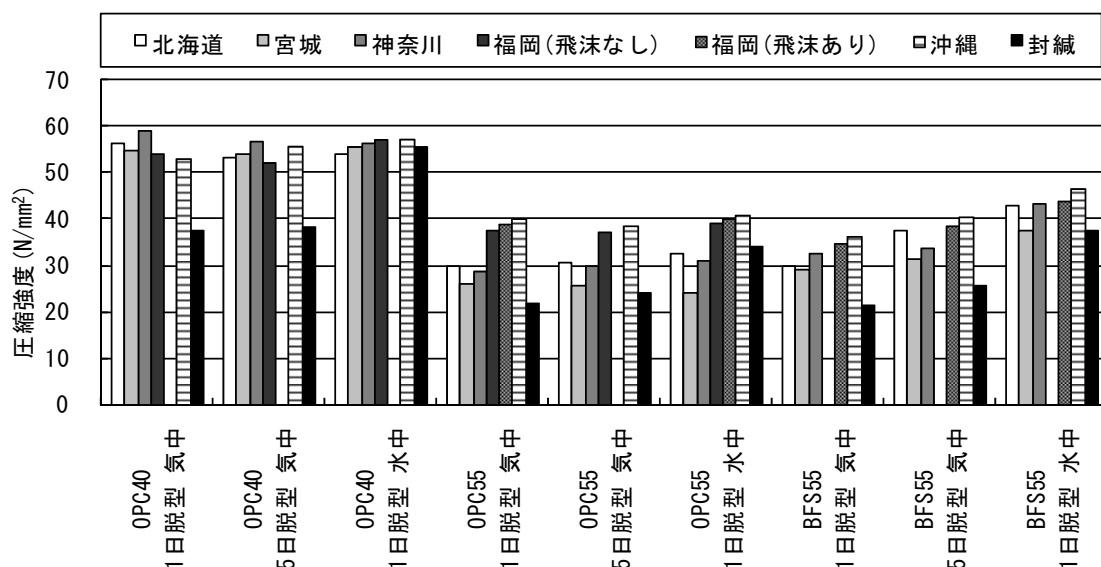


図-5 材齢1年の圧縮強度

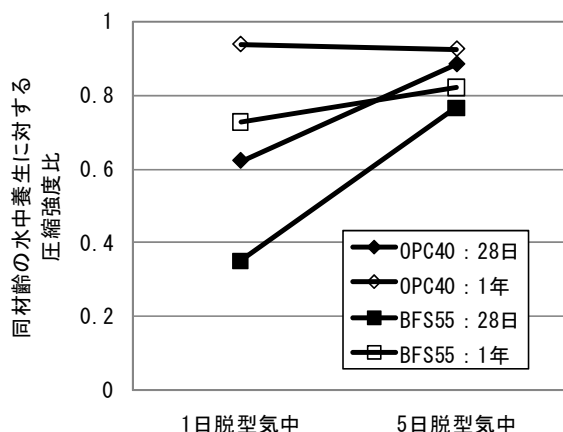


図-6 同材齢の水中養生に対する圧縮強度比の推移

ていると考えられる。そのため、OPC55の5DAと1DWの強度差は小さく見えるが、供試体の含水率を同等に調整した場合の強度差はこれよりも大きいと考えられる。

### 3.1.2 屋外暴露した供試体の圧縮強度(材齢1年)

図-5に、封緘を含めた1年暴露後の圧縮強度の試験結果を示している。なお、福岡地点の暴露試験は、暴露スペースに制限があったため、水準を絞って行っている。

これによれば、OPC供試体の場合、どの暴露地点でも養生方法に関わらず圧縮強度はほぼ一定の値であることが分かる。これより、養生の差異により確認された材齢28日の圧縮強度の差異が暴露1年後にはなくなっていると言える。ただし、水セメント比によって、気象環境の影響感度は異なっている。水セメント比40%の場合は、暴露地点に関わらず圧縮強度は大きく変化せず、ほぼ一定値を示している。しかし、水セメント比55%の場合は、地点によって圧縮強度の差が見られた。圧縮強度は、沖縄>福岡>神奈川>北海道>宮城の順に大きくなっており、概ね年間平均気温が高い地点ほど圧縮強度は大きくなった。これは、年間平均気温が高いほど、暴露開始以降の水和反応が活発になり、空隙構造が緻密化されたことが考えられる。

一方、BFS供試体の場合は、材齢1年後の圧縮強度は湿潤に養生したものほど大きくなる傾向を示した。

図-6に、同材齢の水中養生の圧縮強度に対する各養生方法の圧縮強度比の推移を示す。図-6より、高炉スラグ微粉末を添加した供試体の圧縮強度比は、1年の暴露で大きくなったものの、水中養生の同等の圧縮強度までは増加しなかった。BFS供試体は潜在水硬性のためOPC供試体と比較して、水和反応が緩やかに進行する。したがって、今後圧縮強度が水中養生と同等まで増加し、圧縮強度比が1に近づく可能性はある。また、BFS供試体では、OPC55の場合と同様に、平均気温が高い地点で暴露した場合の圧縮強度が大きいという傾向が見られ、気象環境の影響を受けやすいことが示唆される。

### 3.1.3 20℃一定で封緘保管した供試体(材齢1年)

図-5より、所定の養生を終了したのちに封緘保管した供試体と比較すると、セメント種類に関わらず湿潤養生を行うほど材齢1年の圧縮強度は大きくなることから、しかし、気中養生後に封緘保管した供試体は気中養生後に屋外暴露した供試体よりも圧縮強度が小さくなる傾向が見られた。

気中養生した後に封緘保管される供試体は、養生期間中の水分の逸散により、内部含水率が低い状態で封緘保管される。この供試体は外部からの水分供給がないため、水和反応に必要な水が十分に確保できず、屋外暴露供試体で見られたような強度の増加が見られなかったと考えられる。その一方で、水中養生後に封緘保管した供試体は、養生期間中に水分が逸散することなく、内部含水率が高い状態で保管が開始される。そのため、水和反応に必要な水分が存在し、屋外暴露供試体と同程度の圧縮強度が得られたと考えられる。

このように、封緘保管された供試体と屋外暴露された供試体の圧縮強度から、水分の供給条件は圧縮強度発現に大きく影響すると考えられる。

## 3.2 水和度試験結果

3.1の圧縮強度試験結果より、OPC供試体の場合では1年暴露後、初期養生不足である1日脱型気中の圧縮強度が湿潤養生を行った1日脱型水中と同程度になった。これは、水分の再供給による再水和の影響と考えられる。そこで、気象環境の影響感度が小さく、高温多湿で水和反応が活発に起こると考えられる、沖縄に暴露した水セメント比40%の供試体の水和度を測定した。

図-7は、沖縄に暴露したOPC40供試体の中心部における水和度の推移を示している。材齢28日において、1日脱型水中の水和度は1日脱型気中と比較して12%ほど大きく、湿潤環境下で養生した供試体の方が水和は進行していた。暴露1年後においては、1日脱型気中の圧縮強度を封緘保管したものと沖縄に暴露したものとで比較すると水和度は同程度であった。これらの水和度と沖縄1日脱型水中との差は材齢28日の時と比較して小さくなっており、5.4%となっている。

図-8は、OPC40供試体の表層部における水和度の推移を示している。材齢28日での、1日脱型水中と1日脱型気中の水和度の差は、20.9%であり、中心部における水和度の差よりも大きい。しかし、暴露1年後では、1日脱型水中および1日脱型気中の供試体の水和度の差は1.5%ほどで、ほとんど違いがなかった。その一方で、封緘保管した供試体の1日脱型気中と沖縄の1日脱型気中との水和度の差は、10.4%であった。

初期養生の水和度の結果より、不十分な養生を施すことは表層部では水和反応が阻害され、深部ほど水和度が

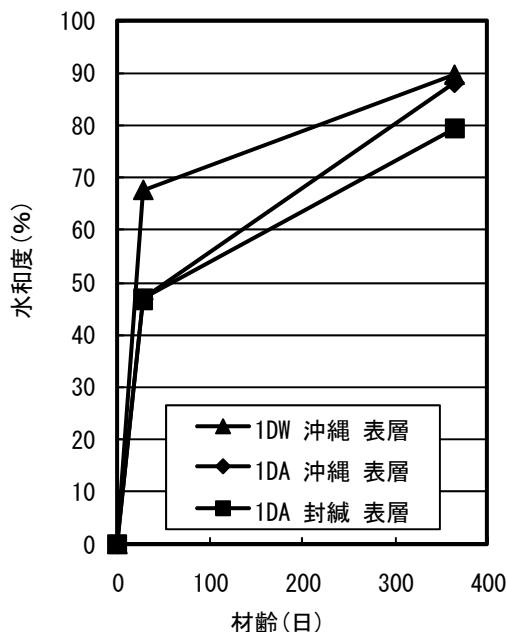


図-7 OPC40 の中心部の水和度の推移

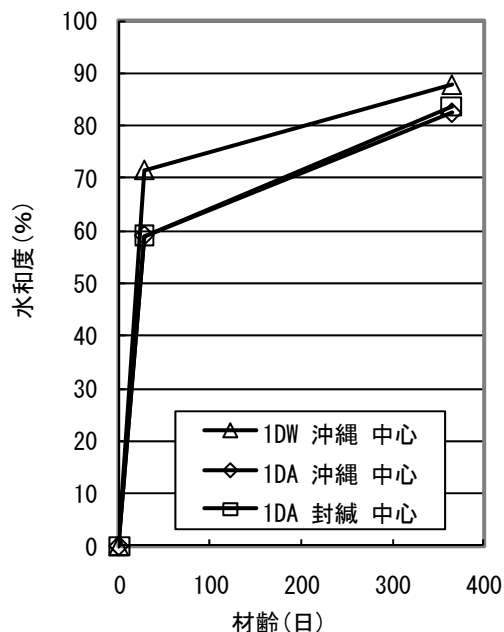


図-8 OPC40 の表層部の水和度の推移

高くなっていることが考えられる。材齢 1 年の試験結果では、20℃一定の封緘の場合、初期の養生不足の影響（1 日脱型気中）が残り、中心部と比較して表層部の水和度が低かった。しかし、沖縄での屋外での暴露 1 年後の結果では、その傾向は逆になり、中心部よりも表層部の方の水和度が大きくなっていた。

この原因としては、外部からの水分供給の有無が考えられる。古賀<sup>4)</sup>らは、屋外暴露したコンクリートの含水率のモニタリングを行ない、降雨による含水率の変化に関する研究を行っている。その研究結果によれば、気中養生を施した水セメント比 50 % のコンクリートの場合、表面から 30 mm の含水率の変化は、表面から 10 mm 以内の場合よりも小さいものの、まとまった雨が降ると水の浸透によって含水率が上昇することを報告している。

本研究では表層部の試料は、コンクリート表面から 3 mm の位置で採取しており、降雨などの水分が浸透した履歴を持つ。一方、中心部試料は表面から 35 mm で採取しており、表層部と比較して水分の浸透履歴が少ないと考えられる。このような表層と中心部の水分供給量の違いが、表層と中心部の再水和の程度に影響を及ぼしたと考えられる。

### 3.3 圧縮強度と水和度の関係

水和度と圧縮強度の相関の程度を把握するために、図-9 に圧縮強度と水和度の関係を示す。両者の相関係数は 0.99 であり強い相関関係が見られた。したがって、水和度の進行と圧縮強度発現は密接に関係しており、再水和によって圧縮強度が増加したと考えられる。

### 3.4 真空吸水試験

図-10 に封緘保管した供試体と沖縄に暴露した供試

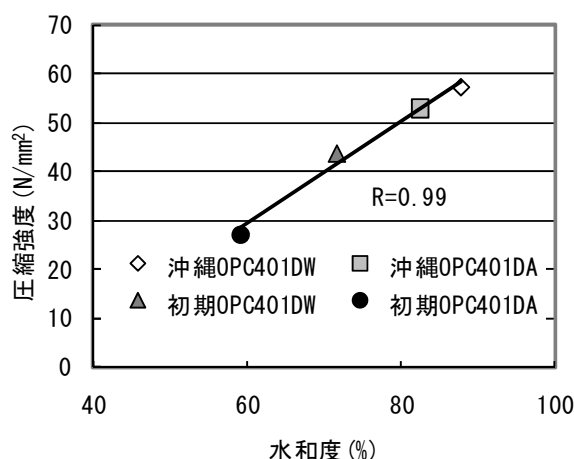


図-9 水和度と圧縮強度の関係

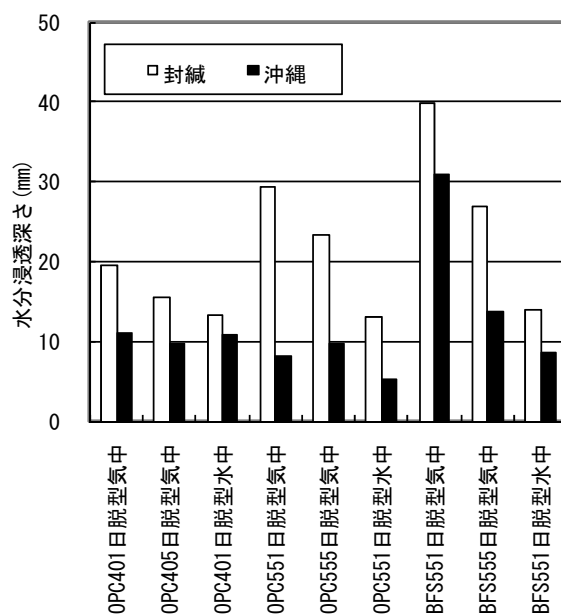


図-10 封緘保管と沖縄暴露の水分浸透深さ

体の材齢 1 年後での透水試験結果を示す。図-10 より、封緘保管した場合は、セメント種類や水セメント比に関わらず水分が逸散しにくい養生を施した場合ほど遮水性が高くなった。養生による遮水性の変化は高炉スラグ微粉末を混和した場合で顕著だった。

一方、沖縄に暴露した供試体において養生の影響の違いを比較すると、OPC 供試体の水分浸透深さはあまり養生の影響を受けておらずほぼ一定値となった。しかし、BFS 供試体は養生の影響が明確に認められ、養生期間中に水が逸散しやすいものほど水分浸透深さは大きくなった。

封緘保管と沖縄で暴露した供試体の結果を比較すると、配合や養生方法に関わらず、沖縄での屋外暴露の水分浸透深さは封緘保管の場合よりも小さくなった。これは、再水和によるコンクリートの緻密化によって、遮水性が高まったためであると考えられる。伊予田<sup>1)</sup>らは、初期材齢に乾燥の履歴を受けた硬化体に水分を再供給すると、内部構造はほぼ回復すると述べている。3.3 の水和度の試験結果によれば、封緘地点の水和度は表層部と内部共に沖縄での屋外暴露の供試体よりも低く、水和が十分に進行していなかった。このように、水和度の違いが硬化体の内部構造と密接に関係し、物質透過性に影響を与えたと考えられる。

### 3.5 初期養生の重要性について

本研究の範囲において、結合材として普通ポルトランドセメントを使用した場合、初期の養生が不足した場合であっても、水分が供試体に供給される暴露条件であると、圧縮強度および遮水性はともに増加し、その原因は水分の供給による再水和であることが示唆された。しかし、外部からの水分の供給量は深部ほど小さくなると予想されること、および、本研究で用いた供試体はその断面積と暴露条件を考慮すると非常に水分供給性の高い条件下で暴露されていたと判断されることから、全てのコンクリート構造物において本研究と同様の結果が得られるとは断定できず、初期養生の重要性を否定することはできない。しかし、外環境からの水の供給が十分にある場合には、少なくとも、構造物のかぶりの性能は向上すると考えられる。一方、結合材として高炉スラグ微粉末を普通ポルトランドセメントに混和した場合、コンクリートの性能は初期の養生に大きく依存する結果となり、あらためて初期養生の重要性が確認された。

## 4. まとめ

本研究では、養生を変化させた供試体の諸物性の変化に着目し、コンクリート供試体の 1 年間の暴露試験を行い、以下の知見を得た。

(1) 普通ポルトランドセメントで作製したコンクリー

トの圧縮強度は、材齢 28 日では養生方法による差異が確認されたが、暴露 1 年後ではその差異はほぼなくなった。一方、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混和して作製したコンクリートの圧縮強度は、暴露 1 年後においても湿潤な養生を行う場合ほど圧縮強度が大きくなり、初期の養生方法による差異が生じていた。

- (2) 乾燥環境下で養生されると水和反応が阻害され、圧縮強度や遮水性および水和度は増進の程度は小さい。また、この傾向は、暴露期間中の水分の供給がない封緘保管の場合で顕著であり、特に中心部よりも表層部で生じていた。
- (3) しかし、比較的水分供給量が多いと予想される屋外暴露においては、暴露 1 年後の表層部の水和度が深部よりも大きくなっており、暴露期間中のコンクリートへの水分供給により、表層部の水和反応が増進していた。
- (4) 普通ポルトランドセメントで作製したコンクリートにおいて、1 年間の屋外暴露の圧縮強度および遮水性の試験結果に養生方法の差異が明確に生じなかったのは、暴露期間中に供給される水分がセメントの水和反応を増進させたためであることが示唆された。

## 謝辞

暴露試験を行うにあたり、電源開発株式会社佐藤道生氏にご協力頂きました。また、各種試験の実施の際には、東北工業大学教授・小出英夫博士、同助教の志賀野吉雄氏にご協力頂きました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 伊予田岳史ら：初期材齢における乾燥履歴がセメント硬化体の水和反応と強度発現に与える影響，Cement Science and Concrete Technology, No.55, 2001
- 2) 井上豪ら：2, 3 の手法により求めたセメントの水和度の比較，コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.541-546, 2005
- 3) 松崎晋一郎ら：養生期間がコンクリート表層から深さ方向への吸水性に与える影響，土木学会第 65 回年次学術講演会，V-580, pp.1159-1160, 2010.9
- 4) 古賀裕久ら：屋外に暴露したコンクリートの含水率モニタリング結果，コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.641-646, 2006