

# コンクリート構造物の 品質検査方法に関する基礎的検討

(独)土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○吉田 行  
(独)土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム 田口 史雄

出来上がりコンクリートの品質を直接的に検査できる方法の確立およびコンクリートの品質に及ぼす施工の影響を把握するために、養生方法を変えたコンクリートに対して非破壊での検査が可能な超音波法と透気試験を実施し、その適用性に関する基礎的な検討を行った。その結果、超音波伝播速度や透気係数により、養生条件の違いによるコンクリートの品質の違いをある程度把握できる可能性があることが示唆された。

キーワード：竣工検査、非破壊試験、品質評価、養生条件

## 1. はじめに

コンクリート構造物の検査は、各施工段階における材料やコンクリートの検査と、受け取り時には、出来型や品質確認のための表面目視検査、強度試験等が行われているが、出来上がりコンクリートそのものの耐久性等の各種性能を直接的に検査する方法は確立されていない。一方、コンクリート構造物への要求性能の多様化に伴い、打込み、締固め、養生等の施工に起因したコンクリートの不具合に関する現場技術相談が多くなっている。このため、受け取り検査時の各種性能を担保した品質検査等の充実や性能規定に対応した多様なコンクリートへの施工標準（養生方法等）が社会的に強く求められている。

本研究では、竣工時における出来上がりコンクリートの品質を直接的に評価する方法の確立とコンクリートの品質に及ぼす施工の影響を把握するために、養生方法を変えたコンクリートに対して、非破壊での検査が可能な超音波法と透気試験を実施し、その適用性に関する基礎的な検討を行った。

## 2. 実験概要

### (1) 使用材料および配合

寒冷地における施工において特に留意が必要となる低温環境下での養生がコンクリートの品質に及ぼす影響を把握するために、セメントは、土木工事で一般的に用いられている、普通ポルトランドセメント（密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3,350\text{cm}^2/\text{g}$ 、以下、普通セメント（記号N）と記述）と高炉セメントB種（密度 $3.06\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $4,020\text{cm}^2/\text{g}$ 、以下、高炉セメント（記号B）と記述）の

2種類を用いた。細骨材は、苫小牧市樽前産の除塩された海砂（密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 $1.25\%$ 、粗粒率 $2.75$ ）を、粗骨材は、小樽市見晴産砕石（密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 $2.2\%$ 、粗骨材最大寸法 $25\text{mm}$ ）を用いた。また、空気量を調整するために、AE剤（樹脂酸塩系）を用いた。コンクリートの配合を表-1に示す。水セメント比は $50\%$ の1水準とし、目標スランプは $8\text{cm}\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5\pm 1.0\%$ とした。

### (2) 供試体の養生条件

表-2に養生条件と試験材齢の一覧を示す。養生条件として、養生温度は低温養生を想定した $5^\circ\text{C}$ と一般的な $20^\circ\text{C}$ の2水準、養生方法は水中、気中、封緘、湿布の4水準とした。なお、気中養生について、 $20^\circ\text{C}$ 養生では、温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60\pm 5\%$ に制御された実験室内に静置し、 $5^\circ\text{C}$ 養生では、温度のみが制御された実験室内に静置することにより行った。なお、 $5^\circ\text{C}$ に制御された室内の平均的な温度は $6.4\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $55\pm 5\%$ 程度であった。また、養生期間は、水中、気中、封緘養生については5、7、28日としたが、湿布養生については、土木学会コンクリート標準示方書施工編に示されている湿潤養生期間の標準<sup>1)</sup>を考慮して、セメントの種類と養生温度の組合せに応じて湿布養生期間を3、5、7、9、12日とし、湿布養生後、各温度条件で材齢28日まで気中養生した。供試体の脱型は、 $20^\circ\text{C}$ 養生ではセメントの種類によらず材齢1日で行ったが、 $5^\circ\text{C}$ 養生では凝結の遅延および脱型時の供試体の破損を考慮し、普通セメントで材齢2

表-1 コンクリートの配合

| 記号 | セメントの種類 | W/C (%) | 空気量 (%) | s/a (%) | コンクリート単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |     |     |      | AE剤 (C×%) |
|----|---------|---------|---------|---------|--------------------------------------|-----|-----|------|-----------|
|    |         |         |         |         | W                                    | C   | S   | G    |           |
| N  | N       | 50      | 4.5     | 44      | 145                                  | 290 | 853 | 1073 | 0.0050    |
| B  | B       |         |         |         |                                      |     | 851 | 1065 | 0.0088    |

日、高炉セメントで材齢4日とした。したがって、表-2に示した各湿布養生期間には、厳密には型枠内に封緘状態で静置されていた期間を含んでいる。

### (3) 実験項目と試験方法

#### a) 圧縮強度試験

物性試験として、JIS A 1108に準拠し圧縮強度試験を行った。供試体はφ10×20cm円柱供試体を用いた。

#### b) 超音波伝播速度と表面水分率の測定

養生条件の違いによるコンクリート表層の品質を非破壊で把握することを目的として、超音波伝播速度を測定した。また、超音波伝播速度はコンクリートの含水状態の影響を受けると考えられることから、コンクリート表面の水分率を併せて測定した。

超音波伝播速度は、圧縮強度との関係を調べる試験として、円柱供試体の打設面（上面）および底面の中心に超音波測定器のセンサーをあて、供試体の高さ方向に対して透過法により測定した超音波伝播時間と、ノギスを用いて測定した供試体の高さを超音波伝播距離として、伝播距離／伝播時間により求め評価した。また、コンクリート表層の品質を調べる試験として、ASTM C672スクレーリング試験用の角柱供試体（22×22×10cm）を用いて、打設面（22×22cm面）における表面走査法と、供試体側面での透過法の2通りの方法で測定した。測定は、供試体の含水状態の影響を考慮し、材齢28日とその後40℃で3週間程度乾燥させた時点の2回行った。なお、透過法は、打設面から型枠底面方向へ1cm間隔で測定した。

表面水分率の測定は、高周波容量式（20MHz）の接触型コンクリート・モルタル水分計を用いて行い、円柱供試体では、打設面と底面で各3回計測した計6個の測定値の平均値で評価した。また、角柱供試体では、打設面と型枠底面で、超音波伝播速度と併せて測定した。

#### c) 透気係数測定

コンクリート表層の透気性を評価するために、二重チャンバー方式の表面透気試験器を用いて透気係数<sup>2) 3)</sup>を測定した。なお、供試体には、22×22×10cmの角柱供試体を使用した。測定は、表-2に示した15ケースについて、供試体の含水状態の影響を考慮し、超音波伝播速度と同様に養生終了直後の材齢28日とその後40℃で3週間程度乾燥させた時点の2回行った。なお、透気係数の測定は、供試体の打設面と型枠底面の両方で実施した。

## 3. 試験結果および考察

### (1) 圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

図-1に水中、封緘および気中養生を行った供試体の圧縮強度と材齢の関係を示す。なお、凡例の記号は表-2と対応している。材齢28日までの範囲内においては、何れの養生温度および材齢においても、普通セメントの方が高炉セメントより圧縮強度は大きかった。また、養生の

表-2 養生条件と試験材齢

| 記号     | セメント | 養生温度 | 養生条件        | 試験項目と試験材齢(日)                         |                                    |
|--------|------|------|-------------|--------------------------------------|------------------------------------|
|        |      |      |             | 圧縮強度<br>超音波伝播速度<br>(強度との関係)<br>表面水分率 | 透気係数<br>超音波伝播速度<br>(表層品質)<br>表面水分率 |
| N20W   | N    | 20℃  | 水中          | 3,528                                | 28                                 |
| N20S3  |      |      | 湿布3日+気中25日  | 28                                   | 28                                 |
| N20S5  |      |      | 湿布5日+気中23日  | 28                                   | 28                                 |
| N20K   |      |      | 気中          | 3,528                                |                                    |
| N20F   |      |      | 封緘          | 3,528                                |                                    |
| N5W    |      | 5℃   | 水中          | 5,79,28                              | 28                                 |
| N5S5   |      |      | 湿布5日+気中23日  | 28                                   | 28                                 |
| N5S7   |      |      | 湿布7日+気中21日  | 28                                   | 28                                 |
| N5S9   |      |      | 湿布9日+気中19日  | 28                                   | 28                                 |
| N5K    |      |      | 気中          | 5,7,9,28                             |                                    |
| N5F    | 封緘   |      | 5,7,9,28    |                                      |                                    |
| B20W   | B    | 20℃  | 水中          | 5,7,28                               | 28                                 |
| B20S5  |      |      | 湿布5日+気中23日  | 28                                   | 28                                 |
| B20S7  |      |      | 湿布7日+気中21日  | 28                                   | 28                                 |
| B20S9  |      |      | 湿布9日+気中19日  | 28                                   | 28                                 |
| B20S12 |      |      | 湿布12日+気中16日 | 28                                   | 28                                 |
| B20K   |      | 気中   | 5,7,28      |                                      |                                    |
| B20F   |      | 封緘   | 5,7,28      |                                      |                                    |
| B5W    |      | 5℃   | 水中          | 5,7,9,12,28                          | 28                                 |
| B5S5   |      |      | 湿布5日+気中23日  | 28                                   | 28                                 |
| B5S7   |      |      | 湿布7日+気中21日  | 28                                   | 28                                 |
| B5S9   |      |      | 湿布9日+気中19日  | 28                                   | 28                                 |
| B5S12  |      |      | 湿布12日+気中16日 | 28                                   | 28                                 |
| B5K    |      |      | 気中          | 5,7,9,12,28                          |                                    |
| B5F    |      |      | 封緘          | 5,7,9,12,28                          |                                    |

※表中の日数は、試験を実施した材齢

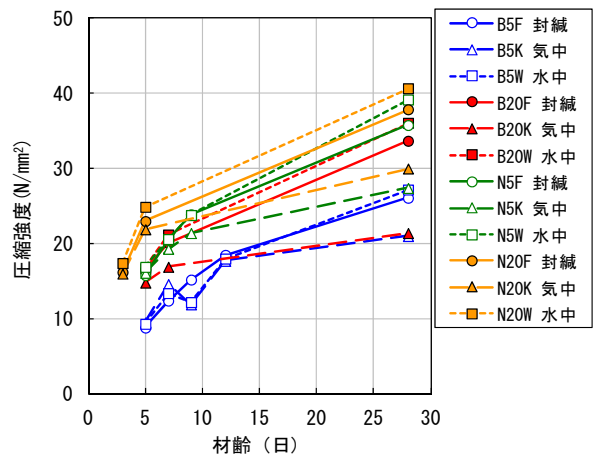


図-1 圧縮強度と材齢の関係（水中、封緘、気中）

影響としては、水中養生が最も強度は増加し、以下、封緘養生、気中養生の順となり、水中と封緘養生は強度の増加割合が同程度だったが、気中養生の場合、強度の増加割合が小さくなる傾向が確認された。

図-2に湿潤養生日数と材齢28日における圧縮強度の関係を示す。横軸の湿潤養生日数とは、型枠存置期間も含めた湿布養生日数を示しており、湿潤養生以降は、材齢28日まで各養生温・湿度環境で気中養生を行っている。なお、右端の28日は、各温度で水中養生を28日実施した場合の圧縮強度である。

高炉セメントの5℃養生における水中養生材齢28日が若干小さいのを除くと、全体として、湿潤養生期間が長いほど強度が大きくなることが示され、強度発現における湿潤養生期間の重要性が確認された。

(2) 超音波伝播速度と表面水分率

a) 圧縮強度と超音波伝播速度の関係

図-3に円柱供試体の高さ軸方向に透過法で測定した超音波伝播速度と圧縮強度の関係を示す。

多少のばらつきはみられるものの、超音波伝播速度と圧縮強度には概ね良い相関がみられた。超音波伝播速度による圧縮強度の推定は既に提案されており<sup>6)</sup>、セメントの種類や養生条件が異なる場合でも、超音波を用いた非破壊試験による圧縮強度の推定は可能であると判断される。なお、コンクリート中の超音波伝播速度は、コンクリートの含水状態に影響され、含水が高いほど伝播速度は速くなる。本研究では、養生条件を種々変えており、コンクリートの含水状態がそれぞれ異なることから、表面水分計により測定したコンクリート表層の水分率と超音波伝播速度の関係を調べた。

図-4に超音波伝播速度と水分率の関係を示す。図から両者には殆ど相関がみられない。表面水分計による測定値は、コンクリート表層から4cm程度の深さまでの水分率であり、超音波を測定した供試体全体の水分率と異なるため相関がみられなかったことが考えられる。

一方、コンクリート表層の水分率は、スケーリング抵抗性などの凍結融解抵抗性に大きく影響すると考えられる。特に、コンクリート構造物を冬期に施工した場合、給熱養生等が終了した時点におけるコンクリート表層の水分率は、凍結融解抵抗性に直接的に関与すると考えられ、養生終了時の表面水分率は重要となる。

そこで、図-5に各養生終了時のコンクリート表面水分率を示す。養生方法の違いによりコンクリート表面の水分率は異なり、封緘および水中養生は同程度だが、気中養生は乾燥の影響を受けるため低い。他方、養生方法により傾きは異なるものの、養生期間が長いほど、何れの養生方法においてもコンクリート表面の水分率は減少する傾向がみられた。気中養生については、コンクリート中の水分逸散の影響と考えることができるが、封緘および水中養生した場合でも、養生期間が長いほど表面の水分率は減少していた。これについて、本研究で用いた表面水分計は、コンクリート中の毛細管に存在する水分との相関が高いものである。コンクリート中の毛細管水は、材齢の経過に伴う水和反応と組織構造の緻密化により

徐々に減少する。このため、養生期間が長いほど表面水分率は減少したと考えられ、気中養生においても材齢の経過とともに圧縮強度は増加していたことから、細孔構

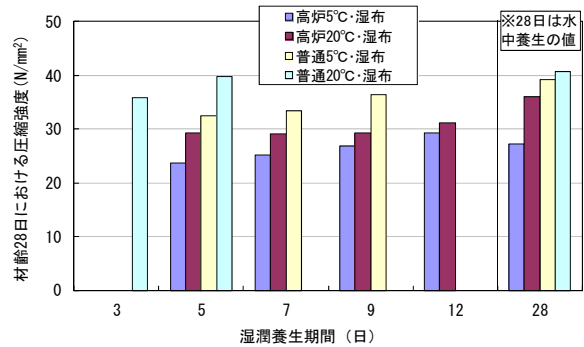


図-2 湿潤養生日数と圧縮強度

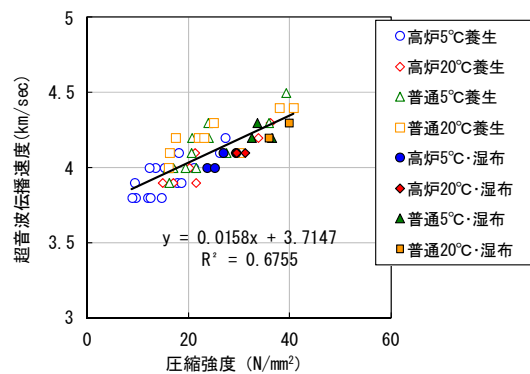


図-3 超音波伝播速度と圧縮強度の関係

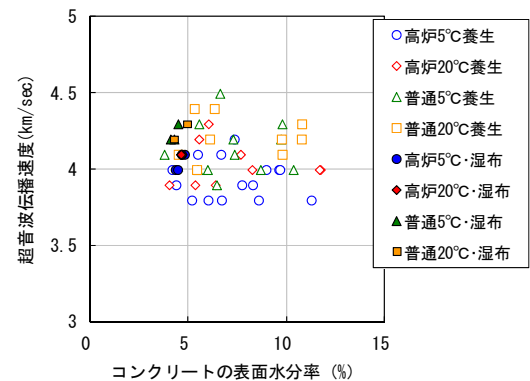


図-4 超音波伝播速度と表面水分率の関係

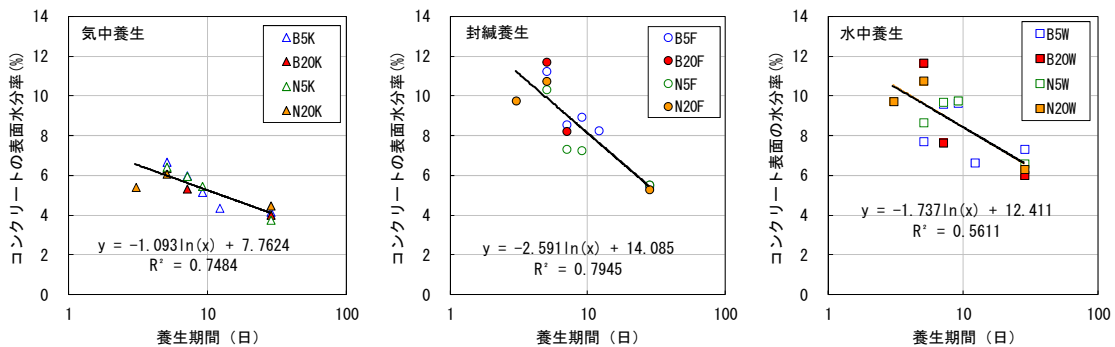


図-5 養生方法の違いによる表面水分率（材齢 28 日）の経時変化

造の変化の影響も含まれていると考えられる。

図-6に湿潤養生期間と材齢28日における表面水分率を示す。湿潤養生期間28日は水中養生供試体の値であり、これを除くと、いずれも湿潤養生終了後に気中養生を行っているため、28日に比べて表面水分率は低いが、全体としては湿潤養生期間の違いによる表面含水率の明確な傾向はみられなかった。

### b) 角柱供試体による試験結果

角柱供試体を用いた超音波伝播速度の測定は、養生終了直後と、供試体の含水の影響を除去するために40°Cで3週間程度乾燥させた後の2回行った。その結果、養生終了直後に測定した場合には、養生条件の違いによる超音波伝播時間の明確な変化は見られなかったが、乾燥後の測定結果は、いずれの供試体においても、発・受信子間距離と超音波伝播時間の関係に変化が見られた。そこで、40°C乾燥後の供試体の測定結果として、図-7に普通セメントを用いたコンクリートの表面走査法による発・受信子間の距離と超音波伝播時間の関係を示す。なお、高炉セメントの場合の図は省略したが、普通セメントと同様の傾向が確認されている。

図中には各測定データの回帰直線も示しているが、いずれもその傾きは変化し、バイリニアの関係がみられる。表面走査法は、超音波を利用してコンクリート表層部の

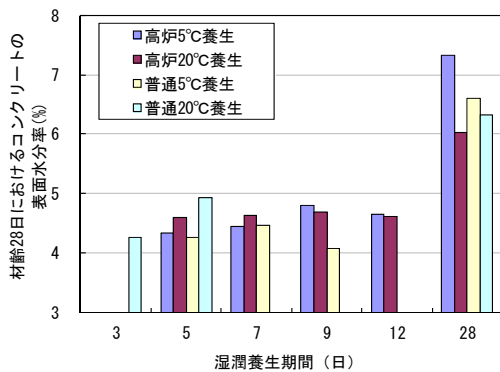


図-6 湿潤養生期間と材齢 28 日における表面水分率

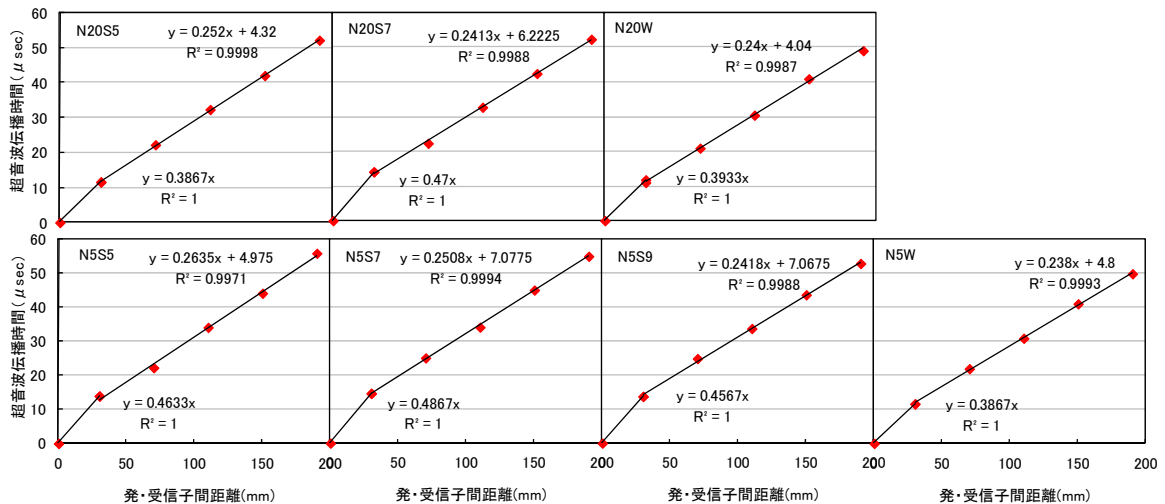


図-7 表面走査法による発・受信子間距離と超音波伝播時間の関係 (普通セメント)

劣化部分の厚さを非破壊で推定する方法であり<sup>7)</sup>、原点から直線の傾きが変わる変曲点までの発・受信子間距離を  $X_0$ 、劣化層と健全部縁端面の超音波伝播速度をそれぞれ  $V_d$ 、 $V_s$  ( $V_0$  と  $V_s$  はグラフの傾きの逆数) とすると、劣化層の厚さ  $t$  は式 (1) で表される<sup>7)</sup>。

$$t = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad (1)$$

ここでは、これらの関係を利用して、劣化深さ  $t$  をコンクリート表層部の脆弱層の厚さと考えた。

図-8に健全部と脆弱層における超音波伝播速度 ( $V_d$  と  $V_s$ ) および脆弱層の厚さ  $t$  を示す。

脆弱層の伝播速度  $V_d$  は、セメントの種類によらず、健全部の伝播速度  $V_s$  の1/2程度であったが、養生条件の違いによる明確な傾向はみられなかった。また、推定される脆弱層の厚さは、概ねコンクリート表層6~9mmであり、高炉セメントの5°C養生において、湿潤養生期間が長いほど脆弱層の厚さは低下する傾向がみられたものの、5°Cの水中養生の場合には、逆に脆弱層が大きく、全体としては、養生条件による明確な傾向はみられなかった。

図-9に、普通セメントを用いた供試体の透過法による超音波伝播速度の測定結果から動弾性係数を算出し、供試体中央部 (深さ50mm) の動弾性係数を基準として求めた相対動弾性係数と、コンクリート表面からの深さの関係を示す (深さ0cmは供試体打設面を、深さ100mmは供試体の型枠底面を意味する)。なお、動弾性係数は、既往の研究で提案されている式 (2) により算出し<sup>8)</sup>、相対動弾性係数は式 (3) により算出した。

$$E_n = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \quad (2)$$

$$RE = \frac{E_n}{E_{50}} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $E_n$  : 深さ  $n$  における動弾性係数 (GPa)

$V_n$  : 深さ  $n$  における超音波伝播速度 (km/s)



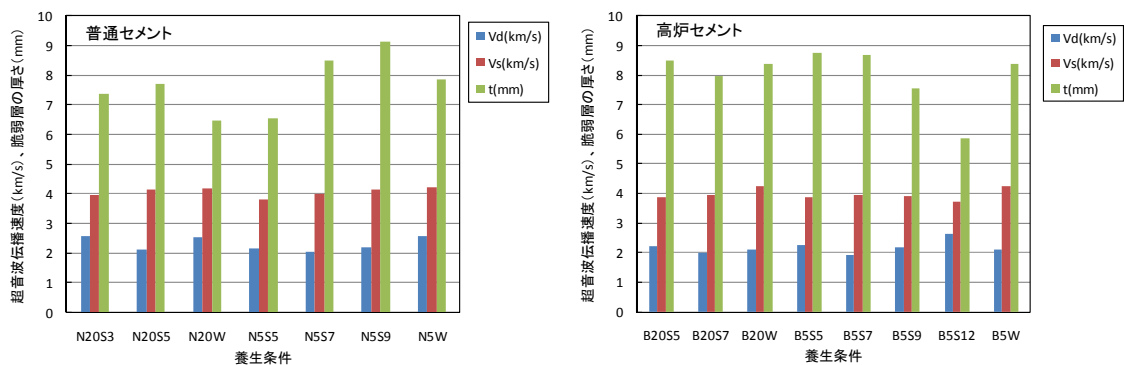


図-8 健全部と脆弱層における超音波伝播速度および脆弱層の厚さ

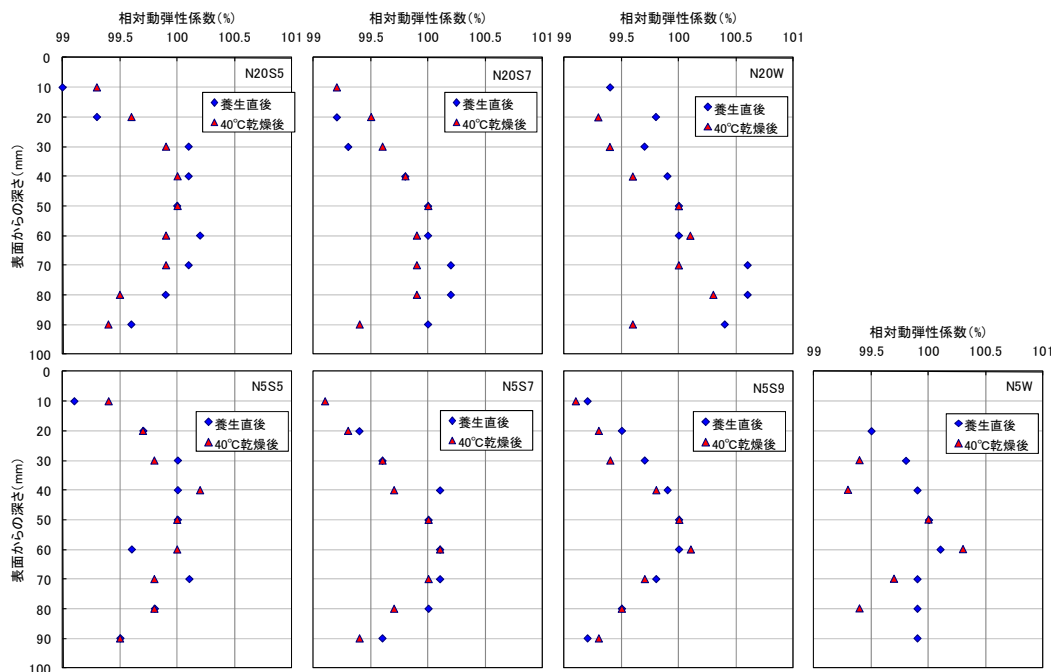


図-9 透過法データから算出した相対動弾性係数と表層からの深さの関係 (普通セメント)

$RE$  : 相対動弾性係数 (%)

$E_{50}$  : 深さ50mmにおける動弾性係数 (GPa)

表層部の相対動弾性係数の低下は僅かであるが表層部と内部で差がみられ、詳細には、打設面側の表層の方が型枠底面側の表層よりも相対動弾性係数の低下が大きい傾向がみられた。他方、図は省略したが、高炉セメントを用いたコンクリートでも同様の傾向であったが、表層と内部の差は普通コンクリートよりも小さい傾向であった。また、養生条件の違いによる明確な傾向は、いずれのセメントについてもみられなかった。なお、これらの算出値は内部に対する表層の相対値であるため、養生直後の含水の影響を含むデータと40°C乾燥後のデータに大きな違いは認められなかった。

一方、供試体の表面水分率は、養生直後の値で平均水分率は5.5~6.5%程度で、打設面よりも型枠底面の方が高く、養生過程で乾燥を与えたものは0.6%程度、乾燥を与えない水中養生供試体は1%程度の差がみられた。また、その傾向は、40°C乾燥後も同様であり、絶対値は

2%程度低下したが(平均水分率3.5~4.0%程度)、打設面と型枠面の差は養生直後と同様だった。このことから、実際には供試体内部でも水分の分布があり、図-9でみられた表層と内部の相対動弾性係数の差は、これら水分率が影響していることも考えられる。このため、今後、コンクリート内部に湿度センサーを埋め込むなど、水分率の影響を詳細に検討する必要がある。併せて、本試験における相対動弾性係数の差が小さいことから、試験法の測定誤差についても検討が必要である。

### (3) 透気係数に及ぼす養生条件の影響

図-10に各養生ケースにおけるコンクリート表層の透気係数を示す。なお、コンクリート中の含水が高い場合には、透気係数は小さい値となる。このため、図-10には、含水の影響を取り除く観点から、養生終了後に測定を終了した各供試体を40°Cで3週間程度乾燥させた後、再度透気係数を測定した結果も併記している。

養生終了後に測定した透気係数(凡例のσ28)をみる

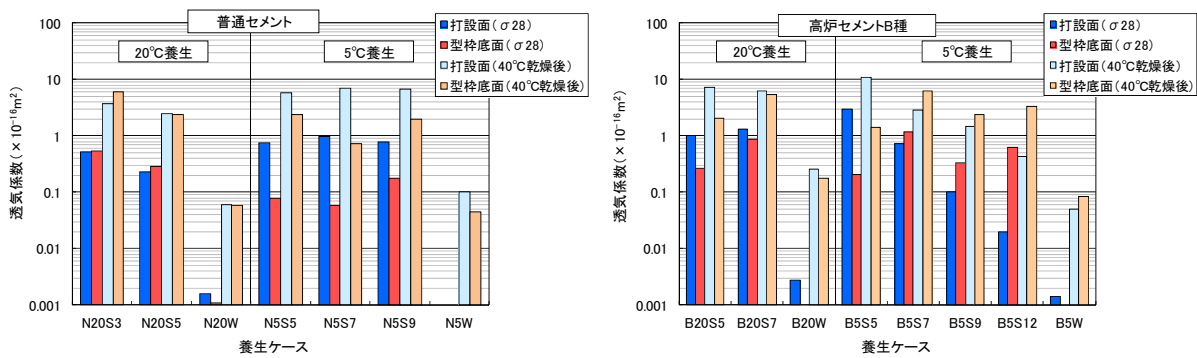


図-10 コンクリート表層の透気係数

と、セメントの種類および養生ケースにより透気係数は異なり、普通セメントを用いた場合、20°C養生では、打設面と型枠底面の値が同程度で差は無く、湿潤養生期間が長いほど透気係数は低下した。他方、5°C養生では、打設面の方が型枠底面よりも透気係数は大きかったが、湿潤養生期間の違いに明確な差はみられなかった。これに対して、高炉セメントを用いた場合、20°C養生では、打設面の方が型枠底面よりも透気係数は大きく、水中養生したB20Wは透気係数が小さかったが、湿布養生のB20S5とB20S7を比べると養生期間が長いほど透気係数は大きくなった。5°C養生のケースでは、湿潤養生期間が5日と最も短いものは打設面の方が型枠底面よりも透気係数が大きくなったが、湿潤養生期間をそれ以上としたものは打設面の方が型枠底面よりも透気係数は小さく、打設面の透気係数は湿潤養生期間が長いほど透気係数は低下した。他方、型枠底面では明確な傾向がみられなかった。なお、材齢28日まで水中養生したもの（記号W）については、透気係数の測定限界となり極めて小さかった。

一方、40°C乾燥後の透気係数は、乾燥により含水の影響が減少し、透気係数自体は大きくなった。しかし、全体の傾向は変わらず、セメントの種類や養生条件により、透気係数は異なることが明らかとなった。Torrentの提案<sup>2)</sup>では、コンクリートの透気性は対数表記の透気係数の値により、優 (0.001~0.01)、良 (0.01~0.1)、一般 (0.1~1)、劣 (1~10)、極劣 (10~100) (いずれも単位は、 $\times 10^{-16} \text{m}^2$ ) の5段階に区分されている。これによると、28日間水中養生を実施したものは、良から一般の評価であるが、水中養生期間が短いものは一般から劣評価であり、透気試験によりおおよその品質を評価できる可能性が示された。

#### 4. まとめ

本研究では、竣工時における出来上がりコンクリートの品質評価方法とコンクリートの品質に及ぼす施工の影響を把握するために、養生方法を変えたコンクリートに対して基礎的な検討を行った。これらの成果をまとめる

と以下のようになる。

- (1) 圧縮強度発現は、特に湿潤養生期間に大きく依存し、湿潤養生期間が長いほど強度発現は大きく、養生の重要性が再確認された。
- (2) 透過法による超音波伝播速度は圧縮強度と相関が高く、圧縮強度の推定は可能と考えられる。
- (3) 表面走査法による超音波伝播速度の測定により、コンクリート表層の脆弱層の深さを推定できる可能性がある。また、透過法による測定から、深さ方向の品質の違いを推定できる可能性はあるが、コンクリートの水分率の影響を受けるため、水分率を考慮した補正や測定誤差に関する検討が必要である。
- (4) 透気係数は、コンクリート表層の品質を評価できる可能性が示唆されたが、超音波と同様、コンクリートの水分率の影響に関する検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔施工編：施工標準〕、pp.126-129とpp.159-166、2008.3
- 2) Torrent,R. and Frenzer,G.: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the "covercrete", International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.985-992, Sept.1995
- 3) 今本啓一、下澤和幸、山崎順二、二村誠二：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状、コンクリート工学, Vol.44, No.2, pp.31-38, 2006.2
- 4) セメント協会：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告、コンクリート専門委員会報告、F-18、1967.9
- 5) 土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕、pp.166-167、1996.4
- 6) 森濱和正、山口順一郎、山口達夫、奥紀仁：超音波法を用いたコンクリート内部の音速分布測定による圧縮強度推定方法の提案、コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1917-1922、2004.7
- 7) 柏忠二、明石外世樹、小阪義夫：コンクリートの非破壊試験方法一日欧米の論文・規格・文献一、p.42、1980
- 8) 緒方英彦、野中資博、藤原貴央、高田龍一、服部九二雄：超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断、コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法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.63-70、2006.12