戦略-22-1 性能規定に対応したコンクリート構造物の施工品質管理・検査に関する研究

研究予算:運営費交付金 研究期間:平22~平26 担当チーム:耐寒材料チーム 研究担当者:馬場 道隆、内藤 勲、吉田 行、遠藤 裕丈

【要旨】

本研究は、各種性能を長期に亘り保持する品質を受け取り時に評価する検査方法と、性能規定に対応した適切 な施工マニュアルを確立し、それらの活用により現場での新技術の導入促進、および構造物の品質向上を図り、 ライフサイクルコストの縮減を図るものである。平成 22 年度は、寒冷地における施工において特に留意が必要 となる、養生温度、型枠存置期間および養生期間がコンクリートの強度や耐久性に及ぼす影響について、基礎的 実験を行った。その結果、セメントの種類や養生条件によりコンクリートの強度や耐久性が異なること、および 超音波伝播速度などの非破壊試験により、表層と内部の品質差を把握できる可能性があることが示唆された。 キーワード:性能規定、施工、品質管理、検査、養生

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、表面の目視検査や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非常に多い。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、初期欠陥を防止するための施工性、施 工方法、養生方法等に関する施工マニュアルを提案す るとともに、竣工時における出来上がりコンクリート の品質を適切に検査できる検査方法の提案を目的とし ている。平成22年度は、養生温度、型枠存置期間お よび養生期間がコンクリートの強度や耐久性に及ぼす 影響に関する基礎的実験を行った。

2. 研究概要

2.1 使用材料および配合

低温環境下での養生がコンクリートの物性および 耐久性に及ぼす影響に関する基礎的データの取得を目 的として、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 3.16g/cm³、 比表面積 3,350cm²/g、以下、普通セメント(N)と記述) と高炉セメント B 種 (密度 3.06g/cm³、比表面積 4,020cm²/g、以下、高炉セメント(B)と記述)の2種類 を用いた。細骨材は、苫小牧樽前産の除塩された海砂 (密度 2.70g/cm³、吸水率 1.25%、粗粒率 2.75)を、 粗骨材は、小樽見晴産砕石(密度 2.66g/cm³、吸水率 2.2%、粗骨材最大寸法 25mm)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 8cm±2.5cm、目標空 気量を4.5±1.0%として、配合試験を実施して決定し た。

2.2 供試体の養生条件

表-2 に養生条件と試験開始材齢の一覧を示す。養生 条件として、養生温度は低温養生を想定した 5℃と一 般的な 20℃の 2 水準、養生方法は水中、気中、封緘の 3 水準とした。なお、気中養生について、20℃養生で は、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%に制御された実験 室内に静置し、5℃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℃に制御 された室内の平均的な温度は 6.4±2℃、相対湿度 55 ±5%程度だった。また、養生期間の標準は材齢 28 日 としたが、コンクリート標準示方書施工編に示されて

表-1 コンクリートの配合

헕문	セメント	W/C	空気量	s/a	コング	AE剤				
10.4	の種類	(%)	(%)	(%)	W	С	S	G	(C×%)	
N	Ν	EO	4.5	44	145	290	853	1073	0.0050	
В	В	50					851	1065	0.0088	

	記号 セメ ジント ジント	養生 温度	養生条件	試験項目と試験材齢(日)										
記号				圧縮 強度	静弾性	超音波 伝播速度	表面水分 率測定	CDF試験	スケーリン グ試験 (ASTM)	凍結 融解	促進 中性化	細孔径 分布	気泡 分布	透気 係数 測定
N20W			水中	3,5,28	3,5,28	3,5,28	3,5,28	28	28	28		28	28	28
N20S3			湿布3日+気中25日	28	28	28	28	28	28	28		28		28
N20S5		20°C	湿布5日+気中23日	28	28	28	28	28	28	28		28		28
N20K			気中28日	3,5,28	3,5,28	3,5,28	3,5,28							
N20F	1		封緘28日	3,5,28	3,5,28	3,5,28	3,5,28							
N5W	Ν		水中28日	5,7,9,28	5,7,9,28	5,7,9,28	5,7,9,28	5,7,9,28	5,7,9,28	5,7,9,28		5,7,9,28		28
N5S5			湿布5日+気中23日	28	28	28	28	28	28	28		28		28
N5S7		500	湿布7日+気中21日	28	28	28	28	28	28	28	28	28		28
N5S9		50	湿布9日+気中19日	28	28	28	28	28	28	28		28		28
N5K			気中28日	5,7,9,28	5,7,9,28	5,7,9,28	5,7,9,28							
N5F			封緘28日	5,7,9,28	5,7,9,28	5,7,9,28	5,7,9,28							
B20W			水中28日	5,7,28	5,7,28	5,7,28	5,7,28	28	28	28		28	28	28
B20S5			湿布5日+気中23日	28	28	28	28	28	28	28		28		28
B20S7			湿布7日+気中21日	28	28	28	28	28	28	28	28	28		28
BS20S9		20°C	湿布9日+気中19日	28	28	28	28							
BS20S12			湿布12日+気中16日	28	28	28	28							
B20K			気中28日	5,7,28	5,7,28	5,7,28	5,7,28							
B20F			封緘28日	5,7,28	5,7,28	5,7,28	5,7,28							
B5W	5°C		水中28日	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28		5,7,9,12,28		28
B5S5			湿布5日+気中23日	28	28	28	28	28	28	28		28		28
B5S7			湿布7日+気中21日	28	28	28	28	28	28	28	28	28		28
B5S9		湿布9日+気中19日	28	28	28	28	28	28	28		28		28	
B5S12			湿布12日+気中16日	28	28	28	28	28	28	28	28	28		28
B5K			気中28日	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28							
B5F			封緘28日	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28	5,7,9,12,28							

表-2 養生条件と試験開始材齢

いる湿潤養生期間の標準を考慮して、セメントの種類 と養生温度の組合せに応じて湿潤養生期間¹⁾を3、5、 7、9、12日としたケースや、湿潤養生後、各温度条件 で材齢28日まで気中養生したケースについても検討 した。供試体の脱型は、20℃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℃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。

2.3 検討項目と試験方法

(1) 圧縮強度および静弾性係数試験

圧縮強度試験は、φ10×20cm 円柱供試体を用い、JIS A 1108 に準拠して実施した。併せて、JIS A 1149 に準 拠して、コンプレッソメータを用いて静弾性係数を測 定した。

(2) 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、超音波伝播速度と コンクリート表面の水分率を測定した。

超音波伝播速度は、圧縮強度との関係を調べる試験 では、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、供試体の長さ方向 に対して透過法により測定した超音波伝播時間と、ノ ※表中の日数は、各種試験を開始した材齢

ギスを用いて測定した供試体長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ために、後述するス ケーリング試験(ASTM法)用の角柱供試体と同じ供試 体を用いて、打設面における表面走査法と、打設面か ら型枠底面方向への深さ方向における透過法の2通り の方法で測定した。

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それぞれ測定した。

(3) 透気係数測定

コンクリート表面の透気性については、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を測定し た^{2)、3)}。なお、供試体には、22×22×10cmの角柱供試 体を使用した。試験は、**表-2**に示した15ケースにつ いて、養生終了直後の材齢28日に実施し、供試体の打 設面と型枠底面の両方で測定した。また、供試体の含 水状態の違いを考慮し、透気係数測定後の供試体を 40℃で3週間程度乾燥した後、再び全ケースについて 透気係数を測定した。

(4) 凍結融解試験

凍結融解抵抗性は、水中凍結融解試験と、一面凍結 融解試験によるスケーリング試験により評価した。水 中凍結融解試験は、JISA 1148のA法に準拠して各養 生終了後より試験を開始し、相対動弾性係数と質量変 化により評価を行った。

スケーリング試験はASTM C672 並びに RILEM CDF 法 に準拠した試験をそれぞれ行い評価した。

ASTM法では、各種養生後、220×220×100mmの角柱 供試体に-18℃を16時間、23℃を8時間の1日1サイ クルで凍結融解作用を与えた。試験面は打設面(220 ×220mm)とし、試験面以外をエポキシ樹脂コーティ ングした後、試験面には土手を設けて試験溶液を湛水 し凍結融解作用を与えた。なお、水中養生供試体につ いては、湿潤面にエポキシ樹脂コーティングは施せな いため、試験開始材齢の朝に水中から取り出して室内 で静置後、夕方に試験面に土手を接着し、翌朝、試験 面以外をエポキシ樹脂でコーティングし、エポキシ樹 脂の硬化を確認した後、夕方から試験を開始した。な お、土手接着およびコーティング作業時には、作業面 以外を湿布養生して供試体内の水分をできるだけ保持 するように対応した。試験溶液には、塩害との複合劣 化を想定して、3%NaC1 水溶液を使用した。

CDF 試験では、+20℃から-20℃まで 10K/h の定速で 4時間冷却し、-20℃を3時間保持後、同じ定速で20℃ まで4時間加熱した後、+20℃を1時間保持する、12 時間1サイクルで凍結融解作用を与えた。供試体は、 100×100×400mm の角柱供試体を半分に切断して 100 ×100×200mm としたものを用い、試験面は ASTM 法と 同様に打設面とした。供試体は各種養生後、試験面以 外をエポキシ樹脂でコーティングして試験を開始した。 なお、水中養生供試体については、湿潤面にエポキシ 樹脂コーティングが施せないため、試験開始材齢の前 日に水中から取り出し、室内で試験面以外を2~3時間 乾燥後、試験面以外の面に対してエポキシ樹脂コーテ ィングを施し、試験開始まで室内にて保管した。ただ し、水中から取り出した後、試験開始まで、試験面は 乾燥しないよう湿布養生した。試験水にはASTM 法と同 様、3%NaC1 水溶液を用いた。

(5) 促進中性化試験

促進中性化試験は、10cm×10cm×40cm供試体を用い、 JISA 1153 に準拠して行い、促進材齢1、4、8、13 週 で中性化深さの測定を行った。なお、試験は各養生終 了後すぐに開始した。 (6) 細孔径分布測定

各種養生終了後(試験開始材齢)、コンクリートの細 孔構造を調べるため、水銀圧入法により細孔径分布を 測定した。細孔測定用試料は、粗骨材界面を含むよう に 5mm 立方体にコンクリートカッターで切断し、アセ トン中で洗浄した後、D-dry (5×10⁻⁴mmHg) で 7 日間 乾燥させて測定を行った。測定は、水銀圧入式ポロシ メーターを用いた(圧入圧 0.01~410MPa,測定細孔直 径 3nm~120 μ m)。細孔容積は、試料体積から骨材体積 を除いた硬化セメントペースト体積当たりの空隙率で 表記した。なお、骨材体積は、細孔測定と同様に採 取した試料から得た不溶解残分質量率(セメント協会 法 F-18⁴⁾ に準拠)に試料質量を乗じこれを骨材密度で 除して求めた。

3. 結果および考察

3.1 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に圧縮強度と積算温度の関係を示す。なお、積 算温度は**式-1**より算出した⁵。

 $M = \sum (\theta + A) \cdot \Delta t$ (式-1) ここに、M:積算温度 (°D·D)、 θ :時間 Δt におけ るコンクリート温度、A:定数 (一般に 10°C)



図-1 圧縮強度と材齢の関係(水中、封緘、気中)

図のように、セメントの種類により強度増加の傾き は異なるが、いずれも水中養生および封緘養生は同一 直線上となり、気中養生の場合には、強度の増加が小 さい傾向であることがわかる。

以上から、圧縮強度発現はセメントの種類、養生方 法、養生温度により異なるが、養生温度の影響につい ては、セメントの種類および養生方法を考慮すること により、積算温度による予測が可能であることが明ら かとなった。

図-3 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、いずれも脱 型後に行った湿布養生日数を示しており、湿潤養生以 降は、材齢 28 日まで各養生温度で相対湿度 60%程度 の環境下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。

3.2 静弾性係数に及ぼす養生条件の影響

図-4 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。なお、 凡例は、セメントの種類、養生温度を示しており、「養 生」と付記されているものは、「水中、気中、封緘養生」 のいずれも含んでおり、「湿布」と付記されているもの は、所定の期間湿布養生を行った後、材齢28日まで気 中養生を行ったものを示している。

圧縮強度の増加に伴い、静弾性係数は増加傾向にあ り、セメントの種類や養生条件によらず、土木学会の コンクリート標準示方書に示されている圧縮強度に対 する静弾性係数の標準値と概ね対応していることが確 認された。

3.3 超音波伝播速度と表面水分率

(1) 圧縮強度と超音波伝播速度の関係

図-5 に円柱供試体の長さ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⁶、 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



図-2 圧縮強度と積算温度の関係



図-3 湿潤養生日数と圧縮強度



図-4 静弾性係数と圧縮強度の関係



れ異なると考えられることから、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-6 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、各養生終了時のコンクリート表面水分率を 図-7に示す。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

戦略 22-1 性能規定に対応したコンクリート構造物の 施工品質管理・検査に関する研究

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、材齢の経過に伴いコンクリー トの組織構造が緻密になるため、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、細孔構造の変化の影 響も含まれていると考えられる。

図-8 に湿潤養生期間と材齢28日おける表面水分率 を示す。湿潤養生期間28日(水中養生)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 れず、値としては気中養生と同程度だった。



(2) 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℃で3週間程度乾燥した後の2回測定を行った。そ の結果、養生終了直後に測定した場合には、必ずしも 養生条件の違いによる超音波伝播時間の変化は見られ なかったが、乾燥後の測定結果では、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℃乾燥後の供試体の 測定結果として、図-9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、図-10 に高炉セメントを用いた

図中には、各測定データの回帰直線を示しているが、 いずれも回帰直線の傾きが変化していることがわかる。

戦略 22-1 性能規定に対応したコンクリート構造物の 施工品質管理・検査に関する研究

表面走査法は、超音波を利用してコンクリート表層部 の劣化部分の厚さを非破壊で推定する方法であり⁷⁷、 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 、劣化部と健全部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_d と V_s はグラフの傾きの 逆数)とすると、劣化部の厚さtは**式-2**で表される⁷⁷。

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

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-11 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_sは、セメントの種類によらず、 健全部の伝播速度 V_dの 1/2 程度であったが、養生条件







図-10 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(高炉セメント)



図-11 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-12 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)

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℃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℃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-12 および図-13 に、各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-3 による算出し⁸、相対動弾性係数は式-4により算出した。

$$E_n = 4.0387 V_n^2 - 14.438 V_n + 20.708 \qquad (\pm -3)$$

$$RE = \frac{E_n}{E_{50}} \times 100 \qquad (\pm-4)$$

*E*₅₀: 深さ 50mm における動弾性係数(GPa) 算出された表層部の相対動弾性係数の低下は僅かで あるが、特に普通セメントを用いたコンクリートで表



図-13 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(高炉セメント)

層部と内部に差がみられ、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。しかし、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℃乾燥後のデータに大きな違いは認め られなかった。

他方、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℃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率の分布が あるものと考えられ、図-12 および図-13 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、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。

3.4 透気係数に及ぼす養生条件の影響

図-14 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。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℃養生のケースでは、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。5℃養生のケースでは、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。

一方、高炉セメントを用いた場合、20℃養生のケー スでは、打設面の方が型枠底面よりも透気係数は大き かったものの、湿潤養生期間が長いほど透気係数は大 きかった。5℃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。一方、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。ただし、図-14 の値は各種養生終了 直後に測定したものであり、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、 含水の影響を取り除く観点から、測定を終了した各供 試体を40℃で3週間程度乾燥させた後、再度透気係数 を測定した。

図-15に40℃乾燥後の透気係数を示す。40℃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



図-14 各試験ケースにおけるコンクリート表層の透気係数



図-15 40℃乾燥後のコンクリート表層の透気係数



図-16 各養生ケースにおけるコンクリートの水中凍結融解試験結果

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、×10⁻¹⁶m²)の5段階に区分 されている²⁰。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 り大凡の品質を評価できる可能性が示された。

3.5 凍結融解抵抗性(水中凍結融解試験)

図-16 に各養生ケースにおけるコンクリートの水中 凍結融解試験結果を示す。横軸の記号は「セメントの 種類 (N、B)、養生温度 (5、20℃)、養生の種類 (水中 W、湿布 S)、養生日数 (5-28 日)」を意味しており、左 図は、水中養生終了直後から凍結融解試験を開始し、 右図は、所定材齢まで湿布養生後,材齢 28 日まで気中

戦略 22-1 性能規定に対応したコンクリート構造物の 施工品質管理・検査に関する研究







図-18 スケーリング抵抗性に及ぼす低温湿潤養生期間の影響(ASTM法、気中養生なし)

養生を行ったケースである。水中養生終了直後から凍 結融解試験を開始した場合(左図)、水中養生期間が長 く養生温度が高いほど質量減少率は低下し、普通セメ ントNは湿潤養生7日以下では耐久性指数が著しく低 下した。これに対して、高炉セメントBは、質量減少 率はNより若干多いものの耐久性指数はいずれも高か った。一方、湿布養生後に気中養生したものは、湿布 養生期間が短い場合でも耐久性指数の低下はみられず、 質量減少は低下した。このように、凍結融解抵抗性は セメントの種類や養生条件により異なり、特に質量変 化への影響が大きいことが明らかになった。

3.6 スケーリング抵抗性(ASTM法)

図-17にASTM法によるスケーリング抵抗性に及ぼす 湿潤養生期間の影響を示す。既往の研究でも明らかな ように⁹、普通セメントよりも高炉セメントを用いた 方がスケーリング量は多い傾向が確認された。また、 普通セメントの場合、5℃養生で気中養生期間を設けず に試験を開始したケースがスケーリング量は最も多か ったが、このケースを除くと、養生温度が高く、湿潤 養生期間が長いほどスケーリング量が抑制される傾向 が確認された。

一方、高炉セメントの場合、試験開始材齢まで湿潤 養生を行っていたケースでは、養生温度によらず凍結 融解初期のスケーリング量は小さかったが、25 サイク ル以降いずれも急激にスケーリング量が増大し、75 サ イクル以降で試験開始前に気中養生を行ったケースと 逆転した。これに対して、試験開始前に気中養生を行 ったケースは、凍結融解初期にスケーリングが増加し たが、10 サイクル以降は増加割合が急激に低下し、ほ ぼ横ばいの傾向を示した。詳細にみると、20℃養生の 場合、湿潤養生期間の差はみられないが、5℃養生では、 湿潤養生期間が長いほどスケーリングは抑制される傾 向がみられた。

図-18にASTM法によるスケーリング抵抗性に及ぼす 低温湿潤養生期間の影響を示す。なお、これらのケー スは、湿潤養生期間終了後に気中養生を行わずにスケ ーリング試験を開始したものである。普通セメントの 場合、材齢28日まで湿潤養生したものが最もスケーリ ング量は多かったが、それを除くと、湿潤養生期間が 長いほどスケーリングは減少する傾向がみられた。

一方、高炉セメントの場合、凍結融解 35 サイクル 程度までは、湿潤養生期間が短いほどスケーリングが 増加する傾向がみられたが、その後傾向は逆転し、100 サイクル時点では、湿潤養生期間が長いほどスケーリ ング量は増加する傾向がみられた。

以上から、ASTM 法によるスケーリング量は、セメントの種類により傾向が異なり、それぞれ養生条件の影響を受けることが確認されたが、さらに試験を継続し、長期的な視点で評価する必要がある。



図-19 スケーリング抵抗性に及ぼす湿潤養生期間の影響(CDF法、材齢28日試験開始)



3.7 スケーリング抵抗性(CDF法)

図-19 に CDF 法によるスケーリング抵抗性に及ぼす 湿潤養生期間の影響を示す。ASTM 法と同様、普通セメ ントよりも高炉セメントを用いた方がスケーリング量 は多い傾向が確認された。また、普通セメントの場合、 20℃で材齢 28 日まで養生したものはスケーリングが 最も少なかったが、他の養生条件をみると、ASTM 法で みられたような明確な傾向はみられず、20℃で湿潤養 生後に気中養生をしたものの方が、スケーリングは増 大する傾向がみられた。

一方、高炉セメントの場合、湿潤養生期間による明 確な傾向はみられず、凍結融解28サイクルにおけるス ケーリング量は、20℃で養生したケースの方がむしろ 多くなる傾向がみられた。

図-20 に CDF 法によるスケーリング抵抗性に及ぼす 低温湿潤養生期間の影響を示す。普通セメントの場合、 湿潤養生期間が長いほどスケーリング量が減少する傾 向が概ねみられた。一方、高炉セメントの場合、湿潤 養生期間によりスケーリング量は異なるものの、明確 な傾向はみられなかった。

以上から、CDF 法によるスケーリング量においても、 セメントの種類および養生条件により異なることが確 認されたが、湿潤養生期間による明確な傾向は確認で きなかった。なお、CDF 試験によるスケーリング量と して1500g/m²以下であればスケーリング抵抗性が高い と判定されるが¹⁰⁾、普通セメントではいずれの養生条 件においてもこの値を満足する結果だったが、高炉セ メントの場合、既定値を満足するケースはみられたも のの、その条件が明確ではないことから、水セメント 比を低減するなどの対策が必要である。

3.8 中性化抵抗性に及ぼす養生条件の影響

図-21 に促進中性化試験結果を示す。一般的には、 中性化深さは経過時間の平方根に比例するとされてい るため¹¹⁾、横軸は経過時間の平方根で示し、各値の回 帰直線も併記した。また、この回帰直線の傾きは中性 化速度係数を意味しており、その値を表-3に示す。

図から、いずれも中性化深さは経過時間とともに直 線的に増加する傾向がみられ、高炉セメントを用いた 場合、5℃養生において、湿潤養生期間が長いほど若干 中性化は抑制される傾向がみられた。しかし、養生温 度の違いをみると、20℃と5℃で殆ど同程度であり、 明確な傾向は確認されず、セメントの種類による影響 が大きいことがわかる。なお、いずれも直線回帰した 場合には切片を有するが、これは、気中養生期間にお ける中性化深さと考えることができ、水中養生期間が 短い(気中養生期間が長い)ものは、いずれも中性化 深さが 3.5mm 程度であり、気中養生期間に中性化が進行していることが明らかとなった。

3.9 細孔構造に及ぼす養生条件の影響

図-22 に各養生条件における普通セメントを用いた コンクリートの細孔径分布を示す。

左端図は、20℃養生下で湿潤養生期間を変化させた 場合の材齢28日における細孔径分布を示しているが、 湿潤期間が長いほど細孔径100nm以上の細孔容積が減 少し、細孔径のピークが小径側にシフトしているのが わかる。また、中央図は、5℃養生下で湿潤養生期間を 変えた場合の、材齢28日における細孔径分布を示して いるが、湿潤養生期間7日と9日の差は小さいものの、 20℃の場合と同様に、湿潤期間が長いほど細孔組織が 緻密になった。さらに、右端図は水中養生期間を変え た場合の、水中養生約了時の細孔径分布を示している が、明らかに水中養生期間が長いほど細孔組織は緻密 になることがわかる。なお、中央図と右端図を比べる と、中央図の方が細孔容積は少なく、湿布養生終了後 の気中養生下においてもセメントの水和が進行し、細 孔容積が減少していることが確認できた。

図-23 に各養生条件における高炉セメントを用いた コンクリートの細孔径分布を示す。全体の傾向として は、普通セメントと同様であり、湿潤養生期間が長い ほど、細孔容積は減少し、緻密化することが確認でき た。また、湿潤養生終了後の気中養生下においても細 孔組織が緻密になることが確認された。なお、本測定 結果はコンクリート内部から採取した試料の細孔径分 布であり、今後はコンクリート表層部分の細孔径分布 を測定し、表層品質との関係を検討する必要がある。



表-3 中性化速度係数

記号	中性化速度係数 (mm/ √週)	切片	相関係数		
N5S7	2.36	3.58	0.97		
B5S7	5.62	3.08	0.99		
B5S12	5.77	1.08	0.98		
B20S7	5.56	3.56	0.96		





図-23 各養生条件におけるコンクリートの細孔径分布(高炉セメント)

4. まとめ

養生温度、型枠存置期間および養生期間がコンクリートの強度や耐久性に及ぼす影響に関する基礎的実験 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 の重要性が確認できた。また、養生温度の影響は、 積算温度により整理可能であり、乾燥を受けた場 合にも適用できるが、湿潤養生の場合と強度発現 の傾向が異なることが確認できた。
- (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等が必要である。
- (4) 透気係数は、コンクリート表層の品質を評価できる 可能性があるが、超音波と同様、コンクリートの 水分率の影響を受ける。
- (5) セメントの種類や養生条件の違いにより、凍結融解 抵抗性およびスケーリング抵抗性が異なることに 加え、凍結融解の試験法の違いによりその傾向も 異なる。
- (6) 養生の違いにより中性化速度係数に差がみられた もののその差は小さく、表層品質の差が明確にな らなかった。
- (7) 細孔径分布は養生条件により異なり、今後、耐久性 との関係について詳細に検討する必要がある。

以上のように、養生条件の違いによりコンクリート の品質が異なり、それにより各種耐久性も異なること が明らかとなった。また、これらの品質を評価する方 法について、基礎的な確認をすることができた。今後 は、これら品質と耐久性の関係をより詳細に検討する とともに、品質評価試験との関係について検討を行う。

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
- 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
- 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
- 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-日欧米の論文・規格・文献-、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
- 9) 例えば、遠藤裕丈、熊谷守晃、嶋田久俊:長期凍結融解 による表面剥離に及ぼす凍結防止剤の影響、コンクリー ト工学年次論文集、Vol. 23、No. 2、pp. 613-618、2001.7
- Jochen Stark, Bernd Wichit (訳:太田利隆、下林清一、 佐伯昇): コンクリートの耐久性第2版、社団法人セメ ント協会、pp. 200-202、2003.8
- 11) 岸谷孝一, 西澤紀昭ほか編: コンクリート構造物の耐久 性シリーズ「中性化」, 技報堂出版, pp. 34-40, 1986