

平成 26 年度修士論文

細孔構造に着目した蒸気養生コンクリートの
中性化特性ならびに塩化物イオン浸透性の評価

首都大学東京 都市環境科学研究科

都市基盤環境学域

学修番号 13885414 佐々木優衣

指導教員 宇治 公隆

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.1.1 蒸気養生	4
1.1.2 蒸気養生	4
1.1.3 プレキャストコンクリート製品の要求性能と照査方法	4
1.2 研究の目的	5
1.3 論文の構成	6
参考文献	8

第2章 既往の研究

2.1 蒸気養生したコンクリートの諸物性	9
2.1.1 蒸気養生（一次養生）条件によるコンクリートの物性の相違	9
2.1.2 蒸気養生後の二次養生によるコンクリートの物性の相違	11
(1) 二次養生で水分供給されにくい環境の場合	11
(2) 二次養生で水分供給される、あるいは乾燥しにくい環境の場合	11
2.2 乾燥がコンクリートの物性に及ぼす影響	12
2.2.1 水和反応の停滞	12
2.2.2 細孔構造の不均質化	12
2.3 中性化および塩害によるコンクリートの劣化	13
2.3.1 中性化進行速度の支配要因	13
(1) コンクリートの内部組織構造と二酸化炭素の拡散	13
(2) 中性化速度に対する細孔構造の影響	13
2.3.2 コンクリートの塩害劣化	14
(1) 塩化物イオン量と見掛けの拡散係数	14
(2) 塩化物イオンの浸透に対する組織構造の影響	14
参考文献	15

第3章 水セメント比と二次養生条件が耐久性に及ぼす影響の比較

3.1 概要	17
3.2 配合	18
3.2.1 使用材料	18

3.2.2 コンクリートの配合	19
3.3 養生条件	20
3.3.1 検討要因	20
3.3.2 蒸気養生条件	22
3.4 試験項目	24
3.4.1 フレッシュ性状試験	24
3.4.2 圧縮強度試験	25
3.4.3 細孔径分布測定試験	26
3.4.4 促進中性化試験	28
3.5 コンクリートの打設時の情報	30
3.5.1 コンクリートの練上り温度と初期養生温度の調整	30
3.5.2 コンクリートのフレッシュ試験結果	30
3.5.3 温度データの測定	31
3.6 細孔径分布試験結果の傾向	34
3.6.1 材齢 28 日の細孔量	34
3.6.2 深さ方向の細孔直径別差分圧入量	35
(1) s45-d の深さ方向の細孔直径別差分圧入量	35
(2) n55-5rd の深さ方向の細孔直径別差分圧入量	37
(3) n55 の深さ方向の細孔直径別差分圧入量	38
3.7 細孔径分布試験結果の比較	39
3.7.1 様々な水セメント比の蒸気養生コンクリートの細孔量	39
(1) 材齢進行に伴う総細孔量の変化	39
(2) 細孔直径別差分圧入量	39
(3) s40-d と s45-14w の材齢 14 日と材齢 28 日の比較	41
(4) s45-d と s55-14w の材齢 14 日と材齢 28 日の比較	42
(5) 二回蒸気を除く蒸気養生コンクリートの材齢 28 日の深さ方向の細孔径分布の比較	43
3.7.2 実際に施工される水セメント比の供試体の細孔量	45
(1) 材齢進行に伴う総細孔量の変化	45
(2) 細孔直径別差分圧入量	45
(3) s45-s2 と s45-14w の材齢 14 日と材齢 28 日の比較	47
3.7.3 現場打ち模擬コンクリートと標準養生コンクリートの細孔量	49
(1) 材齢進行に伴う総細孔量の変化	49
(2) 細孔直径別差分圧入量	49
(3) n45-5rd と n55-5rd と n55 の材齢 5 日と材齢 28 日の比較	51
(4) n55-5rd の表層部の細孔量	52

3.8 圧縮強度試験結果	53
3.8.1 圧縮強度試験結果	53
3.8.2 圧縮強度と総細孔量の相関関係	55
3.9 中性化試験結果	56
3.9.1 二次養生条件による中性化深さの相違	57
3.9.2 中性化速度係数と細孔構造の関係	60
3.10 開放面から 0-10mm 部分の表層部の影響	62
3.10.1 細孔径分布の深さ方向の変化に対する考察	62
3.10.2 40nm 以上の細孔量との相関性	62
3.11 まとめ	64
(1) 材齢進行に伴う総細孔量の変化	64
(2) 深さ方向の細孔直径別差分圧入量	64
(3) 材齢別の深さ方向の細孔径分布	64
(4) 圧縮強度試験結果	65
(5) 促進中性化試験結果	65
参考文献	66

第4章 供試体の耐久性が同等となりうる水セメント比と二次養生条件

4.1 概要	67
4.2 蒸気養生コンクリート同士の比較	68
4.2.1 水セメント比に着目した検討	68
(1) 材齢 28 日の細孔量の相違	68
(2) 促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数の検討	68
4.2.2 蒸気養生コンクリートの二次養生条件が耐久性に与える影響	70
(1) 材齢 28 日の細孔量の相違	70
(2) 促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数の検討	70
4.3 現場打ち模擬コンクリートや標準養生コンクリートと同等の耐久性を持つ蒸気養生コンクリート	72
4.3.1 水セメント比が 55% の標準養生コンクリートとの比較	72
(1) 材齢 28 日の細孔量の相違	72
(2) 促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数の検討	72
4.3.2 水セメント比が 55% の現場打ち模擬コンクリートとの比較	74
(1) 材齢 28 日の細孔量の相違	74

(2) 促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数の検討	74
(3) 圧縮強度	74
(4) 材齢 28 日における細孔径分布の傾向	75
4.3.3 水セメント比が 45%の現場打ち模擬コンクリートとの比較	77
(1) 材齢 28 日の細孔量の相違	77
(2) 促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数の検討	77
(3) 材齢 28 日における細孔径分布の傾向	77
4.4 まとめ	79
(1) 40nm 以上の細孔量	79
(2) 中性化速度係数	79

第 5 章 蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの塩化

物イオン透過性状

5.1 概要	81
5.2.1 使用材料	82
(1) 暴露材齢 5 年のコンクリート c1 の使用材料	82
(2) 暴露材齢 2 年のコンクリート c2 の使用材料	83
5.2.2 コンクリートの配合	83
5.3 養生条件	84
5.3.1 養生条件および養生期間	84
5.3.2 蒸気養生条件	86
5.4 試験項目	87
5.4.1 フレッシュ試験	87
5.4.2 細孔径分布測定試験	87
5.5 コンクリートのフレッシュ性状	92
5.6 コンクリートの細孔構造の比較	93
5.7 c1 の塩化物イオン透過性状	94
5.7.1 全塩化物イオン量の分布	94
5.7.2 塩化物イオンの見掛けの拡散係数	96
(1) 供試体毎の拡散係数の比較	97
(2) 実験結果と水セメント比による回帰分析結果の比較	99
(3) 暴露材齢の進行に伴う拡散係数の変化	100
5.7.3 塩化物イオンの見掛けの拡散係数と細孔構造の関係	101
5.7.4 塩化物イオン透過性状の予測	102

5.8 c2 の塩化物イオン透過性状	105
5.8.1 全塩化物イオン量の分布	105
5.8.2 既往の研究結果と c2(再) の全塩化物イオン量の分布の比較	107
5.8.3 塩化物イオンの見掛けの拡散係数	108
5.9 今後の検討項目	110
5.10 まとめ	111
(1) 全塩化物イオン量の分布	111
(2) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数	111
(3) 実験結果と水セメント比による回帰分析結果の比較	111
(4) 暴露材齢の進行に伴う拡散係数の変化	111
(5) c2(再) の全塩化物イオン量の分布と見掛けの拡散係数	111
参考文献	112

第6章 結論

6.1 蒸気養生を実施したコンクリートの二次養生条件の違いによる影響について	111
(1) 材齢進行に伴う総細孔量の変化	111
(2) 深さ方向の細孔直径別差分圧入量	111
(3) 材齢別の深さ方向の細孔径分布	111
(4) 圧縮強度試験結果	111
(5) 促進中性化試験結果	111
6.2 供試体の耐久性が同等となりうる水セメント比と二次養生条件	112
(1) 40nm 以上の細孔量	112
(2) 中性化速度係数	112
6.3 蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの塩化物イオン透過性状	112
(1) 全塩化物イオン量の分布	112
(2) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数	112
(3) 実験結果と水セメント比による回帰分析結果の比較	112
(4) 暴露材齢の進行に伴う拡散係数の変化	113
(5) c2(再) の全塩化物イオン量の分布と見掛けの拡散係数	113

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

1.1.1 プレキャストコンクリートの現状¹⁾

プレキャストコンクリートとは、日本工業規格 JIS A 0203 において、工場又は工事現場内の製造設備によって、あらかじめ製造されたコンクリート部材又は製品²⁾と記述されている。

プレキャストコンクリートの製造における最大の特徴は、一般に蒸気養生を行うことである。本研究ではプレキャストコンクリート製品を模擬して蒸気養生を行った、蒸気養生コンクリートについて検討する。

また、わが国で製造されるプレキャストコンクリートの大部分は、JIS マーク表示認定工場で製造されている。コンクリート工場製品では、わが国のセメント消費量の約 15% が使用されており、その比率は 1975 年と比較してほとんど変化していない。しかし、プレキャストコンクリートを有効活用することは、工期短縮や施工性の便利さからプレキャストコンクリートの使用量は増えると考えられる。

(1) プレキャストコンクリート製品の種類

プレキャストコンクリート製品の種類を、表-1.1 に示す。JIS の構造別製品群規格では、無筋コンクリート製品（URC 製品）、鉄筋コンクリート製品（RC 製品）およびプレストレストコンクリート製品（PC 製品）に分類されており、それぞれ、構造形式ごとに共通事項を規定した本体規格と、用途別製品群規格としての付属書から構成されている。

その中でも、大規模かつ取り換え不可である RC 構造物には特に耐久性が求められる。そのため、大規模な RC 構造物は、部材の厚みや設置後に降雨を受けない部位を考えると、蒸気養生後に湿潤養生を行うことが望ましい。大規模な RC 構造物としては、プレストレストコンクリート橋が挙げられる。一般的な寸法が 30t 以下、長さは 25m 以下、最小寸法 3.4m 以下であり、伊勢湾岸自動車道揖斐川橋と木曽川橋の最大寸法は長さ 33m、最大重量 440t となっている。

フレッシュコンクリートの品質として、コンクリートの水セメント比または水結合材比を、無筋製品で 65%以下、RC 製品で 55%以下および PC 製品で 45%以下と規定³⁾している。一方、製品としては水セメント比 45%程度のものが多い。また、ボックスカルバート製品では、水セメント比 35%のコンクリートも使用されている。本研究においては水セメント比 45%の蒸気養生コンクリートを中心に検討した。

表-1.1 プレキャストコンクリート製品の構造種類⁴⁾

構造の種類	特徴	製品例
無筋コンクリート(URC)	鋼材などで補強されていない。	<ul style="list-style-type: none"> — 平板 — 境界ブロック — インターロッキングブロック — 積みブロック など
鉄筋コンクリート(RC)	コンクリートが鉄筋で補強されている。コンクリート鋼管複合構造及びコンクリート鋼板合成構造を含む。	<ul style="list-style-type: none"> — 鉄筋コンクリートくい(RCくい) — 鉄筋コンクリートボックスカルバート(RCボックスカルバート) — U形側溝 — L形擁壁 など
プレストレストコンクリート(PC)	PC鋼材によってプレストレスが与えられている。PC構造及びPRC構造を含む。	<ul style="list-style-type: none"> — 道路橋用橋げた — 合成床版用プレキャスト板 — プレストレスト鉄筋コンクリートボックスカルバート(PRCボックスカルバート) — プレストレストコンクリート管 など

(2) プレキャストコンクリート製品の特徴

プレキャストコンクリート製品は、現場打ちコンクリートと製造時の環境や設備が異なる。プレキャストコンクリート製品の有効活用にあたり、その長所および短所を把握することは非常に重要である。

<長所>

- ・ 工期を短縮することができ、付随するメリットがきわめて大きい。
- ・ 機械化により、安全性の向上、省力化、効率化、急速施工を図ることができる。
- ・ 管理された専用のヤードまたは工場で、熟練者が継続して作業を行うので、品質が安定している。製品の品質・性能を、載荷試験によって容易に確認することができる。
- ・ 高性能のコンクリート製造設備・機器を備えることができ、強力で特殊な締固め方法や養生方法を採用する。
- ・ 気象作用の影響をほとんど受けない作業体制を採りやすく、寒冷地の施工において特に有利である。

<短所>

- ・ 継手が弱点となりやすい。
- ・ 大寸法のものを運搬する場合、道路や運搬機械などにおいて制約を受ける。

<他の特徴>

- ・ 一般に薄い断面のものが多く、粗骨材の最大寸法は 20mm 以下のものが多い。
- ・ 早期に脱型して型枠の回転を高め製品を短い材齢で出荷するため、常圧蒸気養生や高圧蒸気養生（オートクレーブ養生）などの促進養生が行われる。

1.1.2 蒸気養生

養生は、養生中の温度および圧力により、常温 - 常圧、高温 - 常圧、高温 - 高圧の 3 つに大別される。このうち、高温 - 常圧、高温 - 高圧の、材齢初期のコンクリートに熱エネルギーを与える養生が促進養生に分類される。

一般に、プレキャストコンクリートを製造する工場では、早期脱型のため、高温 - 常圧タイプの蒸気養生を行っている。その実施目的は、生産性の向上にあるといえる。すなわち、材齢初期におけるコンクリートの強度発現を促進し、脱型に要する強度を早期に得て脱型時期を早めることにより型枠の稼働率を向上させ、それによって生産性を高める。しかし、同一配合で比較すると、蒸気養生を行ったコンクリートは、標準養生を行ったコンクリートより長期強度、耐久性が低下する傾向にある⁵⁾。

蒸気養生はいくつかのプロセスによって構成されている。具体的には、前置き（前養生）工程、温度上昇（昇温）工程、最高温度保持工程、および温度降下（降温）工程がある。また、これらの工程は、いずれも、その温度および時間によって管理されている。

蒸気養生の条件は、対象となるプレキャストコンクリート製品によって異なり、製品の大きさや部材厚等を考慮して設定されているのが一般的である。

1.1.3 プレキャストコンクリート製品の要求性能と照査方法

一般に、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比 50% 以下のコンクリートを入念に施工し、かぶりが 30mm 以上の場合は中性化に関する照査を行わなくてもよいとされている⁶⁾。しかし、混合セメントを用いた場合は、中性化に関する照査は行わなければならない。

プレキャストコンクリート製品の主な照査方法、および耐久性能に関しては、“想定される劣化作用に対して、供用期間において所要の耐久性能があることを信頼性のある照査方法で照査する、又は仕様を実績で照査する”⁷⁾とされており、ここでいう仕様とは、水セメント比、かぶりなどが相当する。

1.2 研究の目的

プレキャストコンクリート製品は、一般に工場において蒸気養生が行われており、早期強度が高く工期短縮に貢献する。一方で、蒸気養生を実施したコンクリートは、同一配合の標準養生を実施したコンクリートと比較して、細孔構造が粗大になることと、強度や耐久性が低下することが明らかとなっている⁵⁾。

その原因は、養生不足である。プレキャストコンクリート製品は、蒸気養生により積算温度を高めることで、水和反応を促進させる。しかし、早期に出荷する為、蒸気養生後の養生条件が適切でない場合、乾燥による細孔構造の不均質化が起こり、蒸気養生コンクリートであっても耐久性が低下すると考えられる。

一般に蒸気養生を実施したコンクリートは、脱型後は気中にて保管される場合が多い。コンクリート構造物が気中に曝されると、表面付近の相対湿度が低下し、深さ方向に細孔構造の不均質化が起こる。乾燥を受けた部分のコンクリートは、水和反応の停滞と、乾燥収縮によるマイクロクラックの発生により、疎な組織となる。その結果、細孔構造の緻密化が阻害され疎になると、中性化の進行や塩害など、コンクリートの耐久性を損なうため、蒸気養生後の二次養生条件を考慮したコンクリートの性状を把握することは重要である。蒸気養生と耐久性に関するデータは、未だ他大学や研究所で調べつくされたとは言えず、東京セメント株式会社との共同研究として、関⁸⁾らの研究から継続して、蒸気養生コンクリートの研究を行っている。

本研究では、二次養生条件ならびに水セメント比が蒸気養生コンクリートの細孔構造や中性化特性に及ぼす影響の検討と、暴露実験による塩化物イオン拡散係数の把握を目的とした。コンクリートの中性化特性に関しては、蒸気養生、現場打ち模擬、標準養生の3種類において、耐久性が同等となりうる水セメント比および二次養生条件を比較検討した。耐久性の指標は細孔構造、圧縮強度特性、中性化性状とした。蒸気養生コンクリートの塩化物イオン拡散係数の把握に関しては、5年間海岸環境に暴露した供試体を用いて、塩化物イオン分布の把握と拡散係数の算出を行い、塩化物イオンの透過性状を検討した。

1.3 論文の構成

本論文は、全 6 章で構成されている。

第 1 章は、本研究の背景および目的を示している。

第 2 章は、既往の研究をとりまとめたものである。

第 3 章【水セメント比と二次養生条件が耐久性に及ぼす影響の比較】では、水セメント比と二次養生条件がコンクリートの耐久性に及ぼす影響として、細孔径分布試験と圧縮強度試験および促進中性化試験についてとりまとめたものである。供試体は、水セメント比 40, 45, 50%で蒸気養生後に気中保管したコンクリート(s40-d, s45-d, s50-d)、水セメント比 45%で蒸気養生後に再度蒸気養生を行ったコンクリート(s45-s1, s45-s2)、水セメント比 45, 55%で蒸気養生後に材齢 14 日まで水中養生したコンクリート(s45-14w, s55-14w)、水セメント比 45,55%で封かん養生を 5 日間実施したコンクリート(n45-5rd, n55-5rd)、水セメント比 55%で標準養生と呼ばれる脱型後材齢 28 日までの水中養生を行った(n55)の 10 種類とした。

なお、本検討では一般的な養生方法の他に、14 日水中養生の出荷日数を短くする代替案として、蒸気養生を二回施工した供試体 s45-s1, s45-s2 を新たに加え、その特性を把握した。一回目の蒸気養生条件は、実際の製品工場において一般に採用されているものを採用し、二回目の蒸気養生条件は、最高温度保持時間を 4 時間設けた s45-s1 と、11.5 時間設けた s45-s2 とした。

実験より、材齢進行に伴う総細孔量の変化と材齢 28 日の細孔直径別差分圧入量において、s40-d と s45-14w、s45-d と s55-14w、s45-s2 と s45-14w が同等であった。s45-d と s55-14w と n55、s45-s1 と s45-s2 の中性化速度係数が同等であった。s45-d と n55 を除くと、表層部のマクロポアと中性化速度係数の間に相関が認められ、圧縮強度と総細孔量の間に相関が認められた。

第 4 章【供試体の耐久性が同等となりうる水セメント比と二次養生条件】では、第 3 章で検討した試験結果の中でも、材齢 28 日の細孔量と促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数についてとりまとめたものである。このことにより、二次養生条件ならびに水セメント比が、コンクリートの細孔構造や中性化特性に及ぼす影響の検討を行った。また、並行して、蒸気養生、現場打ち模擬、標準養生の 3 種類において、耐久性が同等となりうる水セメント比および二次養生条件の検討を行った。

実験より、蒸気養生後に気中保管したコンクリート s45-d は、材齢 14 日までの水中養生を行うことで、40nm 以上の細孔量が約 15%減少し、中性化速度係数が約 60%減少したため、蒸気養生後の水中養生によって、組織の緻密化と中性化抵抗性の向上が認められた。また、s45-d に、二回蒸気養生を行うことで、40nm

以上の細孔量が約 10%減少し、中性化速度係数が約 20%減少した。

第 5 章【塩化物イオン拡散係数の把握】では、塩化物イオン透過性状についてとりまとめたものである。実際の海洋環境下での塩化物イオン濃度分布を測定するため、水セメント比 40, 50%のプレキャストコンクリート(蒸気養生後に気中保管)、および水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリート(材齢 5 日まで封かん養生後に気中保管)を静岡県伊東市の海岸に暴露した。

暴露材齢 5 年における塩化物イオン濃度分布を測定し、回帰分析により塩化物イオンの拡散係数を求め、暴露材齢 1 年、2 年のデータと合わせてプレキャストコンクリートの塩分浸透抵抗性を調べたところ、蒸気養生コンクリートは現場打ち模擬コンクリートより、塩化物イオンの拡散係数が大きい、材齢進行に伴い蒸気養生コンクリートの塩化物イオン見掛けの拡散係数が減少し、暴露材齢 5 年には両者ともほぼ同等となることを明らかにした。

第 6 章は、本研究で得られた知見をとりまとめたものである。

参考文献

- 1) 村田二郎ほか：わかり易い土木講座 10 コンクリート工学（I）施工、pp.254-258
- 2) 日本工業規格：JIS A 0203-2006 コンクリート用語
- 3) 日本工業規格：JIS A 5364-2010 プレキャストコンクリート製品－材料及び製造方法の通則
- 4) 日本工業規格：JIS A 5361-2010 プレキャストコンクリート製品
- 5) 住吉 宏、窪山 潔、今橋太一、塩谷 勝：コンクリートの組織や物性によぼす蒸気養生の影響、セメント技術年報、Vol.35、pp.290-293、1981.12
- 6) 村田二郎ほか：わかり易い土木講座 10 コンクリート工学（I）施工、p.143
- 7) 日本工業規格：JIS A 5362-2004 プレキャストコンクリート製品-要求性能とその照査方法
- 8) 関 健吾、宇治 公隆、上野 敦、原 洋介：蒸気養生を実施したコンクリートの細孔構造および中性化性状、土木学会第 65 回年次学術講演会、pp.605-606、2010.9

第 2 章

既往の研究

2.1 蒸気養生したコンクリートの諸物性

2.1.1 蒸気養生（一次養生）条件によるコンクリートの物性の相違

プレキャストコンクリート製品において、蒸気養生を実施する主な目的は型枠の利用効率の向上と、それに付随する生産性の向上にあるといえる。しかし、同一配合で比較すると、蒸気養生を行ったコンクリートは、標準養生を行ったコンクリートよりも長期強度、耐久性が低下する傾向にあるといわれる。

一方で、温度上昇速度や最高温度が過度に苛酷な条件となると、コンクリートの組織構造が疎となり、コンクリートの耐久性に悪影響をもたらすことが知られている。そこで、コンクリート標準示方書では、コンクリートの耐久性を損なわない範囲での、いくつかの標準的な温度制御が示されている。

(1) 練上がり温度

蒸気養生において、コンクリートの練上がり温度および前置き時間は非常に重要であることが知られている。すなわち、蒸気養生を開始するまでに形成される組織構造が、最終的なコンクリートの品質に大きな影響を及ぼす。一般に、水セメント比が低く、練上がり温度が高いものほど、最終的なコンクリートの品質は高いとされており、既往の研究においても、水セメント比の低いコンクリートの細孔構造が緻密化することを示している¹⁾。

(2) 前置き（前養生）時間

コンクリート標準示方書【施工編】において、練混ぜ後から蒸気を通気するまでの標準的な時間を、2～3時間としている²⁾。これは、蒸気養生を行う場合、成形後ただちに蒸気を与えることで、コンクリートの細孔構造が粗なものとなりやすく、コンクリートの品質を損なう恐れがあるためである。

既往の研究¹⁾においても、前置き時間に関する研究例は多く、概ね、前置き時間を長く取ることで、コンクリートの強度および耐久性を向上できることがわかっている。

(3) 温度上昇（昇温）

蒸気養生槽内の温度を均等に上昇させ、その温度上昇速度は1時間につき20℃以下とすることが、コンクリート標準示方書において標準とされている。これは、蒸気養生槽内の温度を上昇させる際に、急速な温度の上昇や、槽内で極端な温度分布が形成されると、コンクリートの物性に悪影響を与えるためである。

(4) 最高温度およびその保持時間

最高温度に関しては、コンクリート標準示方書において標準的な値として 65℃が記載されている²⁾。蒸気養生において、最高温度が高くなると、材齢初期におけるコンクリートの強度発現は著しいが、一方で、長期材齢におけるコンクリートの強度発現は停滞しやすくなる傾向が確認されている³⁾。

最高温度の保持時間については、特別な記載はないが、一般に、最高温度の保持時間が長くなれば、マチュリティー（積算温度）もそれに付随して大きくなるため、脱型時における圧縮強度も高くなることが知られている。マチュリティーとは時間とコンクリート温度の積で求められるもので、積算温度が一定であれば、温度の履歴に関わらず、同程度の強度が得られるといわれている。

(5) 温度降下（降温）

コンクリート標準示方書では、外気との温度差が大差無くなるまで徐々に蒸気養生槽内の温度を下げることを標準としている。最高温度の保持過程において、コンクリートは高温状態にある。このときコンクリートを蒸気養生槽内から取り出すと、外気にさらされて急冷され、コンクリートの表面に急激な温度変化に伴うひび割れが発生する恐れがある。阿波ら⁴⁾の研究では、温度降下速度勾配を急激にした場合、コンクリート表面部と内部とのひずみ差が増大すると報告している。対応策として、冬季における蒸気養生後の急激な乾燥を防止する目的として、蒸気養生後の脱型直後に 30 分間の温水浸漬⁵⁾を行った後に気中保管するという工程が行われ、夏季冬季ともに温水浸漬の効果はあまりみられなかった⁶⁾。

2.1.2 蒸気養生後の二次養生によるコンクリートの物性の相違

蒸気養生を実施した後に続けて行う養生を、二次養生という。二次養生がコンクリートの物性に大きな影響を及ぼすことが、これまで多く報告されている。

(1) 二次養生で水分供給されにくい環境の場合

蒸気養生を実施したコンクリートを気中環境に保管すると、細孔構造の形成が進行せず、強度増進が停滞することが知られている⁷⁾。これらは、蒸気養生後に気中環境にて保管しているため、乾燥の影響を受けてコンクリート内部の水分が失われ、水和反応が停滞したことが原因と考えられる。

(2) 二次養生で水分供給される、あるいは乾燥しにくい環境の場合

蒸気養生を実施した後も、水中養生等、水分が十分に供給される湿潤環境において養生することで、結合材の水和反応は継続され、細孔構造は緻密になるとする研究報告^{2), 7)}、がある。

コンクリート標準示方書【施工編】では、蒸気養生を行った後にも、湿潤養生を行うことが望ましいとしている⁸⁾。これは、蒸気養生を実施した後にも、コンクリート中には未水和のセメント粒子が多く残っており、続けて湿潤養生を行うことによってこれらの水和が進み、強度、水密性、耐久性等が向上するためである。

2.2 乾燥がコンクリートの物性に及ぼす影響

2.2.1 水和反応の停滞

水和過程において乾燥を受けたコンクリートは、乾燥を受けないものに比べ強度や耐久性が著しく低下する。この理由として、内部水分の逸散による水和反応の停止が挙げられ、乾燥の開始時期が早ければ早いほど、水和率は下がり、細孔構造は乾燥開始時点で骨格作られるとの報告がある⁹⁾。また、初期養生時に乾燥環境下におかれた場合、水セメント比が高いほど水分の蒸発速度が早く、組織が疎になると考えられている¹⁰⁾。

2.2.2 細孔構造の不均質化

コンクリートは、脱型時期が早く若材齢であるほど、表面からの乾燥の影響が大きく、表層部と内部の細孔量に大きな差がみられる。郭らの研究¹¹⁾によると、乾燥による細孔構造の変化は、コンクリート表層部(0～10 mm)で顕著であり、深さ方向での細孔構造の不均質化は、内部の未乾燥領域における水和と表面からの乾燥が、同時に進行することによって生じると考えられる。また、湯浅らの研究¹²⁾では、乾燥開始材齢が早いほど、また水セメント比が大きいほど、深さ方向での細孔構造の相違が顕著であることが確認されている。さらに、乾燥環境下では、半径 560 Å 以上の細孔は材齢に伴う細孔量の減少がみられないことから、水セメント比 60% のコンクリートの場合、半径 560 Å 以上の細孔が少なくなる材齢 7 日まで湿潤養生することが望ましいとされている。

2.3 中性化および塩害によるコンクリートの劣化

コンクリート構造物は時間の経過とともに様々な作用により劣化する。中でも、大きな問題となるのは鉄筋の腐食である。鉄筋はコンクリートなどのアルカリ環境下においては腐食しないが、外部から侵入してくる塩化物や二酸化炭素などの影響を受け腐食する。このため、中性化性状や塩化物浸透性状の把握はコンクリート構造物の耐久性を照査する上で重要である。

2.3.1 中性化進行速度の支配要因

中性化とは、炭酸化ともいわれ、コンクリート中の水酸化カルシウムが浸透した二酸化炭素と反応して非活性の炭酸カルシウムに変わることをいい、鉄筋コンクリートにおいては鉄筋腐食の進行の原因にもなるため、コンクリートの耐久性に大きな影響を及ぼす¹³⁾。

(1) コンクリートの内部組織構造と二酸化炭素の拡散

大気中の二酸化炭素はコンクリートの空隙内に拡散することによって侵入する。したがって、その拡散速度は、セメント硬化体や骨材の空隙量および空隙構造に依存する。空隙構造は、材料、配合および結合材の水和度の影響を受ける。すなわち、水セメント比が低いほど、またセメントや混和材などの結合材の水和度が高いほど細孔量は減少し、細孔径分布は径の小さい方にシフトするため、気体の拡散速度は小さくなる¹⁴⁾。

(2) 中性化速度に対する細孔構造の影響

郭らの研究によると、結合材が同一の場合、中性化進行に支配的な影響を及ぼすのは、40nm以上の細孔量であるとされている。また、中性化速度係数が40nm以上の細孔量に支配されるのは、この径よりも小さい空隙中では、試験環境下において、水分が吸着されており、炭酸ガスの拡散が抑制されているものと考察している¹⁵⁾。

さらに、関らの研究より、蒸気養生を実施したコンクリートにおいても40nm以上の細孔量と中性化速度係数には、相関関係が認められることが報告されている。したがって、配合や養生条件によらず、40nm以上の細孔量を制御することで中性化速度係数の制御が可能であると考えられる¹⁶⁾。

2.3.2 コンクリートの塩害劣化

コンクリート構造物の塩害とは、コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れやはく離を引き起こす現象であり、また、鋼材の断面減少などを伴うことにより、構造物の性能が低下し構造物が所定の機能を果たせなくなる現象である。このような劣化を促進する塩化物イオンは、海水や凍結防止剤のように構造物の外部環境から供給される場合と、コンクリート製造時に材料から供給される場合とがある¹⁷⁾。

(1) 塩化物イオン量と見掛けの拡散係数

見掛けの拡散係数とは、塩化物イオンがコンクリート内の細孔溶液中で固定化をとめないながら濃度勾配を駆動力として移動するとみなしたとき、すべての塩化物イオンを対象として拡散の速さを規定する係数のことである¹⁸⁾。

金谷らの研究によると、塩化物イオンの拡散係数は経過時間とともに減少するとされる¹⁹⁾。また、コンクリート表層部の塩化物イオン量は、経過時間とともに収斂値を有して指数増分的に変化し、その変化は、飛来塩分量の影響を受けることを実験的に示している。さらに、部位によって拡散係数の値が異なる原因として、含水率が影響していると考察している。

(2) 塩化物イオンの浸透に対する組織構造の影響

塩化物イオンは、コンクリートの微細空隙を水と共に移動する。したがって、塩化物イオンの浸透性について、相関関係を示す細孔径の範囲が存在すると考えられる。総細孔量との関係について検討を行う場合も多い²⁰⁾。また、毛細管空隙全体(細孔直径=50nm~2 μ m)の吸水量と塩化物イオン拡散係数の間には高い相関があるとの報告もある²¹⁾。

蒸気養生を実施したコンクリートの表面には、蒸気養生過程の各段階で、非常に微細なひび割れが発生している²²⁾。この微細なひび割れが、初期乾燥の影響を受けて進展し、ひび割れがある大きさを超えると見掛けの拡散係数が急激に増加する²³⁾。

参考文献

- 1) 丸山晃平、宇治公隆、上野 敦、大野健太郎：蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.2、pp.571-576、2011.6
- 2) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【施工編】、pp.429-431
- 3) 篠沢和久：蒸気養生コンクリートの圧縮強度に関する研究、セメント技術年報 22、pp.311-314、1968.
- 4) 阿波稔、大塚浩司、諸橋克敏：蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひびわれ、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.567-572、1993.
- 5) 寺川麻美、宇治公隆、上野敦、大野健太郎：プレキャストコンクリート製品の細孔構造に及ぼす養生条件の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.2、pp.469-474、2012.
- 6) 朱小燕：断続的な水分供給がコンクリート表層部の細孔構造の緻密化に及ぼす影響、修士論文、p.85、2014.
- 7) たとえば、大森淑孝、河野俊夫：蒸気養生コンクリートの耐久性におよぼす諸要因の影響、セメント技術年報 40、pp.431-434、1986.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編：施工標準】 p.127、2007.
- 9) 高羅信彦：乾燥が自由水量の変化と細孔構造の形成に与える影響、土木学会第 55 回年次学術講演会、V-257、pp.514-515、2000.
- 10) 伊代田岳史、高羅信彦、魚本健人：初期養生時に乾燥を受けるセメント系硬化体の水和反応と水分逸散特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22、No.2、pp.703-708、2000.6
- 11) 郭度連ほか：乾燥によるコンクリート組織の不均質化、コンクリート工学年次論文集 Vol.24、No.1、pp.711-716、2002.
- 12) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率、細孔構造の不均質性、日本建築学会構造系論文集 No.509、pp.9-16、1998.7
- 13) 村田二郎：わかり易い土木講座 10 コンクリート工学 (1) 施工、pp.134
- 14) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'11 基礎編、p.35、2011.2
- 15) 郭度連、宇治公隆、國府勝郎、上野 敦：養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価、土木学会論文集、Vol.57、No.718、pp.59-68、2002.11
- 16) 関 健吾、宇治公隆、上野 敦、原 洋介：蒸気養生を実施したコンクリートの細孔構造および中性化性状、土木学会第 65 回年次学術講演会、pp.605-606、

2010.9

- 17) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'11 基礎編、p.194、2011.2
- 18) 土木学会：コンクリート標準示方書【規準編】土木学会規準および関連規準、p.324、2010.
- 19) 金谷光秀、榊田佳寛、阿部道彦、西山直洋：海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.747-752、1996.
- 20) たとえば、竹田宣典、十河茂幸：凍害あるいは中性化を受けたコンクリートの塩化物イオン浸透性、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.797-802、2003.
- 21) 桜田良治、丸山久一：コンクリート中の塩化物イオンの拡散浸透と細孔空隙の関係、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.2、pp.829-834、1999.
- 22) 阿波稔、大塚浩司、諸橋克敏：蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひびわれ、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.692-693、1993.
- 23) 大塚浩司、庄谷征美、阿波稔：蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響、土木学会論文集、No.585、V-38、pp.97-111、1998.2

第 3 章

水セメント比と二次養生条件が
耐久性に及ぼす影響の比較

3.1 概要

第 3 章では、水セメント比と二次養生条件がコンクリートの耐久性に及ぼす影響として、細孔径分布試験と圧縮強度試験および促進中性化試験の検討を行った。細孔径分布試験結果としては、材齢進行に伴う総細孔量の変化と、材齢 28 日の細孔直径別差分圧入量の検討と、材齢 28 日の細孔径分布試験結果の比較を行った。

プレキャストコンクリートは、工場の生産性向上のために蒸気養生を行い、早期に強度を発現させているが、一方で、通常の間打ちコンクリートと同様に、所要の耐久性能が求められる。そのため、前述のとおり、コンクリート標準示方書では、蒸気養生を行った後に二次養生として湿潤養生を行うことが推奨されている¹⁾。また、水セメント比によって、二次養生の効果や蒸気養生コンクリートおよび間打ち模擬コンクリートの特徴が異なる。そのため、水セメント比と二次養生条件が耐久性に及ぼす影響について検討した。

3.2 配合

3.2.1 使用材料

コンクリートの使用材料を表-3.1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント(3.16g/cm^3)を、細骨材に砕砂(表乾密度 2.63g/cm^3)、粗骨材に碎石(表乾密度 2.66g/cm^3)を使用した。また、混和剤には、AE 減水剤に BASF ポゾリス社製のポリヒード 2000 (主成分:ポリカルボン酸エーテル系) を、AE 剤に BASF ポゾリス社製のマイクロエア 101 (主成分:アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤) を用いた。

表-3.1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm^3
細骨材	砕砂，表乾密度 2.62 g/cm^3 ，吸水率 0.98%，F.M.3.00%
粗骨材	碎石，表乾密度 2.66 g/cm^3 ，吸水率 0.81%，F.M.6.63%
混和剤	AE 減水剤:ポリカルボン酸エーテル系
	AE 剤:アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

3.2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-3.2に示す。水セメント比は、40%、45%、50%、55%とし、単位水量は 170kg/m^3 一定とした。配合は、実際のプレキャストコンクリート製品に用いられるものを参考に決定した。試験室と粗骨材と練混ぜ水を冷却し 0°C に保ち、試験室コンクリートミキサーによって練り混ぜを行った(写真-3.1)。なお、円柱供試体の型枠には $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ のモールド缶を、角柱供試体の型枠には $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の鋼製型枠を用いた。

表-3.2 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメン ト比 W/C(%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE	AE剤
					W	C	S	G	減水剤	
20	8 ± 2.5	4.5 ± 1.5	40	44	170	425	750	970	3.20	0.86
			45	46	170	378	801	955	2.66	1.14
			50	47	170	340	834	954	2.03	1.03
			55	48	170	309	864	950	1.54	0.91



写真-3.1 試験
室コンクリート
ミキサー

3.3 養生条件

3.3.1 検討要因

図-3.1 に検討要因および養生条件を、表-3.3 に供試体諸元を示す。

本研究では、水セメント比と養生条件を変化させ 10 種類の供試体を作製した。蒸気養生コンクリートは 7 種類あり、水セメント比 40, 45, 50% で蒸気養生後に気中保管したコンクリート(s40-d, s45-d, s50-d)、水セメント比 45% で蒸気養生後に再度蒸気養生を行ったコンクリート(s45-s1, s45-s2)、水セメント比 45, 55% で蒸気養生後に材齢 14 日まで水中養生したコンクリート(s45-14w, s55-14w)である。

現場打ち模擬コンクリートは 3 種類あり、水セメント比 45, 55% で封かん養生を 5 日間実施したコンクリート(n45-5rd, n55-5rd)、水セメント比 55% で標準養生と呼ばれる脱型後材齢 28 日までの水中養生を行ったコンクリート(n55)である。現場打ち模擬コンクリートは打設後に蒸気養生を行わず、常温常圧で二次養生を行った。

また、本検討では一般的な養生方法の他に、蒸気養生を二回施工した供試体(s45-s1, s45-s2)を新たに加え、その特性を把握した。コンクリート標準示方書では蒸気養生コンクリートに湿潤養生を行うことを推奨しているが、耐久性を向上させるための水中養生は、出荷日数と設備費用の関係上省略されることが多い。現在施工現場に納品する際には、コストがかかる二次養生はせずに気中保管に留められている。耐久性をさらに上げることよりも、色むらをなくし美観を損ねないことを優先されているためである。

そのため出荷日数を短くする代替案として、新たに蒸気養生後に再度蒸気養生を行うことを考え二次養生条件を変えた、水セメント比 45% の二種類のコンクリート(s45-s1, s45-s2)を実験に供した。なお、二回蒸気養生を行う手法は、実際の工場では行われていない。本検討では、二次養生を行うことによって水和反応が続き、細孔構造が緻密になることを期待し、10%水セメント比を低減せるといった手段を使わずに、耐久性を上げることができると考えた。

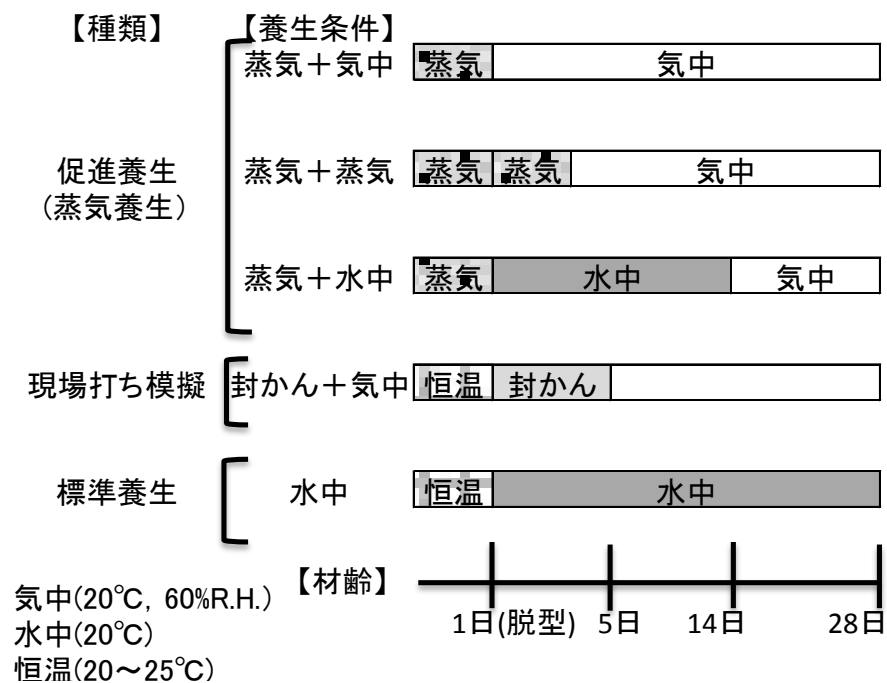


図-3.1 検討要因および養生条件

表-3.3 供試体諸元

種類	養生条件		W/C(%)	記号
	一次養生	二次養生		
促進養生	蒸気養生 (s)	気中 (d)	40	s40-d
			45	s45-d
			50	s50-d
		蒸気養生 (s)	45	s45-s1
			45	s45-s2
		水中(14日まで) (w)	45	s45-14w
			55	s55-14w
現場打ち模擬(n)	封緘(5日間)→気中 (rd)	45	n45-5rd	
		55	n55-5rd	
標準養生 (n)	水中(28日まで)		55	n55

蒸気養生(前置3h、昇温20℃/h)

3.3.2 蒸気養生条件

一回目の蒸気養生における温度履歴は、**図-3.2**に示すように、比較的大型のプレキャストコンクリート製品に適用される1日1サイクルの条件とした。**写真-3.2**, **写真-3.3**に示す蒸気養生槽で、練上がり温度25℃、前置き時間3時間、昇温速度20℃/h、最高温度65℃、最高温度保持時間3時間、降温速度5℃/hの温度履歴を与えた²⁾。

また、蒸気養生を二回行った養生条件は、**図-3.2**の蒸気養生後に脱型し、脱型した供試体に**図-3.3**に示す二回目の蒸気養生を行った。**図-3.3**に示す通り、s45-s1の最高温度保持時間を4時間設け、s45-s2の最高温度保持時間を11.5時間設けた。

最高温度保持時間は、**表-3.4**に示した、積算温度算出表より計算した。

一回目の蒸気養生によって、コンクリートに720[℃・h]の積算温度が与えられる。s45-s1は、20℃で3日間養生された場合の積算温度1440[℃・h]と同等の積算温度を与えるため、二回目の蒸気養生で最高温度保持時間を4時間設けることにより、不足分の720[℃・h]を補った。また、s45-s2は、20℃で4日間養生された場合の積算温度1920[℃・h]と同等の積算温度を与えるため、二回目の蒸気養生で最高温度保持時間を11.5時間設けることにより、不足分の1200[℃・h]を補った。なお、20℃で5日間養生された場合には積算温度2400[℃・h]が必要となり、最高温度保持時間を19時間設ける必要が出てくるが、二日間の業務時間内で作業工程が収まらないため、養生条件として採用しなかった。



写真-3.2 蒸気養生槽外観



写真-3.3 蒸気養生槽内部

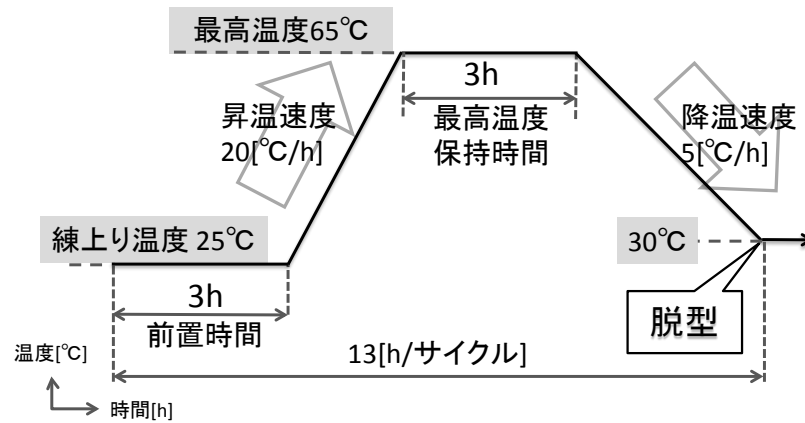


図-3.2 一回目の蒸気養生条件

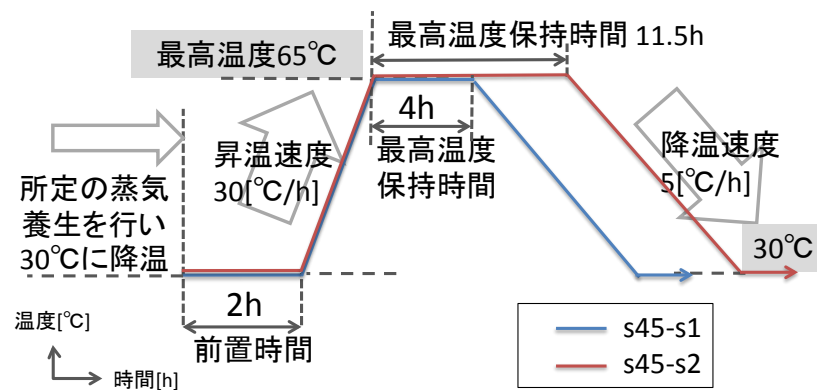


図-3.3 二回目の蒸気養生条件

表-3.4 積算温度算出表

	諸定数						積算温度					蒸気養生 所要時間	通気時間	20°C換算 養生時間
	外気温	前置時間	昇温勾配	最高温度	保持時間	降温勾配	前置き	昇温	保持	降温勾配	合計			
打設後	25	3	20	65	3	5	75	90	195	360	720	16	8	36
	30	2	30	65	4.0	5	60	55.42	260.00	332.50	707.92	14.17	7.17	35.40
	30	2	30	65	11.5	5	60	55.42	747.50	332.50	1195.42	21.67	14.67	59.77

3.4 試験項目

3.4.1 フレッシュ性状試験

蒸気養生を実施する際、前置き時間中の環境温度だけでなく、コンクリートの練上がり温度も、硬化体の物性に影響を及ぼすと考えられる。そこで、コンクリートのフレッシュ性状の把握のため、JIS A 1101、JIS A 1128、JIS A 1156に従ってスランプ試験、空気量試験、練上がり温度測定を実施した。(写真-3.4, 写真-3.5)



写真-3.4 スランプ試験



写真-3.5 空気量試験

3.4.2 圧縮強度試験

蒸気養生コンクリートの強度発現特性を把握するため、圧縮強度試験を行った。試験は、JIS A 1108 に準拠し、供試体は $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体各 3 体とした。蒸気養生したコンクリートは、脱型時である材齢 1 日と、14 日、28 日および 91 日において試験を実施した。現場打ち模擬コンクリートは、気中保管開始時点における強度を把握するため、封かん養生の型枠を脱型した材齢 5 日においても試験を行っている。(写真-3.6, 写真-3.7)



写真-3.6 研磨機



写真-3.7 圧縮試験機

3.4.3 細孔径分布測定試験

細孔径分布試験用に、100×100×400mmの角柱供試体を作製した。供試体は図-3.4、写真-3.8に示すように、気中保管開始時点において、型枠側面のみを開放面とし、エポキシ樹脂にて5面シールした。その後、材齢14日において2分割し、所定の材齢まで養生を継続した。

コンクリート表層部(0~10mm)における細孔構造が内部に比べ、乾燥の影響により変化が顕著である³⁾ことを考慮するため、湿式コンクリートカッター(写真-3.9)を使用して開放面から30mmの深さまで、5mmごとにスライスして、深さごとに試料を採取した。

その際、コンクリートカッターの刃によって削られる厚さを考慮し、開放面から0~5mm、10~15mm、20~25mmの部分を選択するものと、開放面から5~10mm、15~20mm、25~30mmの部分を選択するものに、供試体をあらかじめ2分割した。乾燥の影響とは、乾燥期間が材齢14日、28日および91日の、コンクリート表層部(0~10mm)の細孔構造が、内部に比べて顕著に変化することとして、これを考慮したものである。得られた結果をもとに、開放面から30mmの深さにおける、0~10mmの表層部と20~30mmの内部の細孔構造の違いを主に比較した。

スライスしたコンクリートの、エポキシを塗布した面から、誤差の大きい外周10mmの部分を除いたものをニップにより細分化し、2.5mm以上5mm以下の粒子を24時間以上アセトンに浸漬して水和を停止させた。その後、真空状態で7日間以上乾燥させ、モルタル部分の粒子を選定して試料とした。試験には、水銀圧入式ポロシメーター(測定範囲:5nm~400μm)(写真-3.10)を用い、細孔直径および細孔容量を測定した。

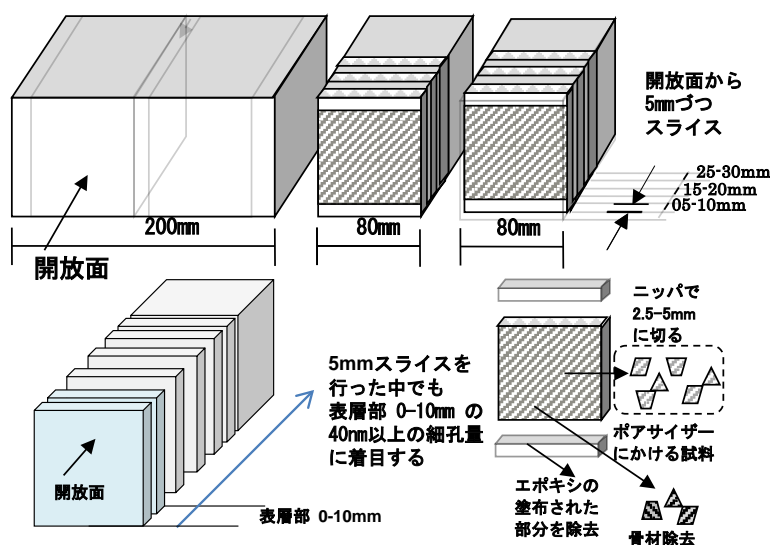


図-3.4 細孔径分布試験用試料作製



写真-3.8 細孔径分布用供試体




写真-3.9 湿式コンクリートカッター



写真-3.10 水銀圧入式ポロシメーター

3.4.4 促進中性化試験

蒸気養生コンクリートの中性化性状を把握するため、JIS A 1152 および JIS A 1153 に準拠し、促進中性化試験を実施した。供試体は、100×100×400mm の角柱供試体を作製し、材齢 28 日まで所定の養生を行った後、20℃、60%R.H.の恒温恒湿室にて材齢 56 日まで保管し、材齢 7～8 週の時点で、図-3.5 に示すように、打設時の側面を除く 5 面をエポキシ樹脂(またはシリコン)でシールした。その後、供試体を、二酸化炭素 5%、温度 20℃、相対湿度 60%の促進中性化槽内に移動し、促進中性化試験を行った。

中性化深さの測定は促進材齢 4、9、16 週で行った。所定の促進期間に達した時点において、供試体の端部から 60mm の位置で長手方向と直角に供試体を割裂(写真-3.11)し、割裂面にフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧した後、開放面である 1 辺を 11 等分した 10 箇所の測定を行った。また、測定を継続する供試体は、促進中性化槽内に戻して試験を継続した。

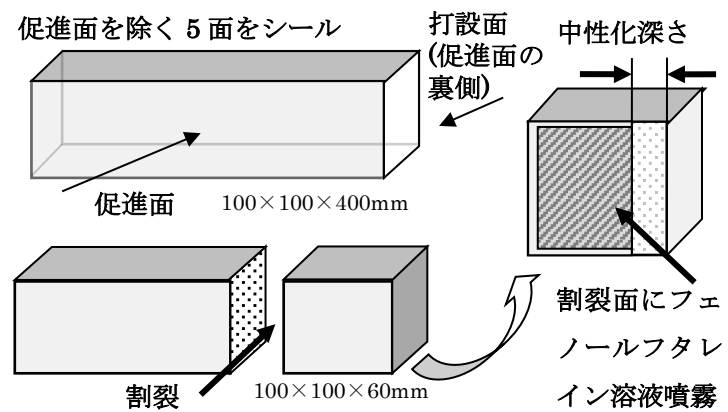


図-3.5 促進中性化試験用供試体



写真-3.11 割裂試験機

3.5 コンクリートの打設時の情報

3.5.1 コンクリートの練上り温度と初期養生温度の調整

練上り温度上昇を抑制するため、60Lのクーラーボックスと氷を用意し、練り混ぜ水の温度を調整した。また、骨材の温度上昇抑制のため、2日前より骨材を試験室内でストックし、表乾状態とした。打設前に試験室(写真-3.12)屋根および周囲(写真-3.13)への打ち水を実施した。



写真-3.12 試験室



写真-3.13 試験室の周囲

3.5.2 コンクリートのフレッシュ試験結果

コンクリートのフレッシュ試験結果を表-3.5に示す。スランプは8～14.5cm、空気量は3.6～5.0%であった。打設時期が7月上旬であったことから、練上がり温度は28℃に近い値となった。

表-3.5 フレッシュ試験結果

W/C(%)	練上がり温度	スランプ	空気量
40	28.3℃	14.5cm	5.0%
45	28.8℃	12.0cm	4.5%
50	27.6℃	9.0cm	4.6%
55	28.9℃	8.0cm	3.6%

3.5.3 温度データの測定

現場打ち模擬コンクリートの初期養生と、蒸気養生コンクリートの脱型までの養生温度の調整のため、供試体は打設終了後から搬出時まで、20℃に保った室内で温度データを測定しながら保管した。(写真-3.14, 写真-3.15)

供試体の前置き時間は、打設終了から昇温開始まで、3時間以上確保した。これは前置き時間が3時間を下回ると、昇温が早すぎた際に体積膨張が生じるためである。

8月5日に打設した水セメント比50, 55%のコンクリートの蒸気養生時の養生温度データを図-3.6に、8月6日に打設した水セメント比40, 45%のコンクリートの蒸気養生時の養生温度データを図-3.7に示す。

打設直後の現場打ち模擬コンクリートを打設から脱型まで保管していた際の周辺の温度は30℃前後と高い温度であった。また、蒸気養生槽内や保管環境の温度が測定されているが、供試体の内部温度は測定を行っていないため、3.9において内部温度を取り扱った研究について考察を行う。



写真-3.14 温度センサー設置位置



写真-3.15 温度センサー

3.6 細孔径分布試験結果の傾向

細孔径分布試験結果として、材齢 28 日における深さ方向の細孔径分布結果と、材齢 28 日における深さ方向の細孔直径別差分圧入量を検討する。本項目により、細孔径のおおまかな傾向を把握する。なお、実際に耐久性が求められるのは、現場打ちのコンクリートでは材齢 5 日時点であり、蒸気養生コンクリートでは出荷時の材齢 14 日ではあるが、比較する条件を一定にするために、すべての二次養生の終了した材齢 28 日の細孔径分布に着目した。

3.6.1 材齢 28 日の細孔量

図-3.8 に材齢 28 日の細孔量を示す。0-30mm の総細孔量を比較すると s50-d と n55-5rd の総細孔量が多く、s40-d と s45-14w と n45-5rd の総細孔量が少なかった。また、マクロポアである 40nm 以上の細孔量を 0-30mm と 0-10mm において比較したところ、s45-d と n55-5rd の差が大きかった。

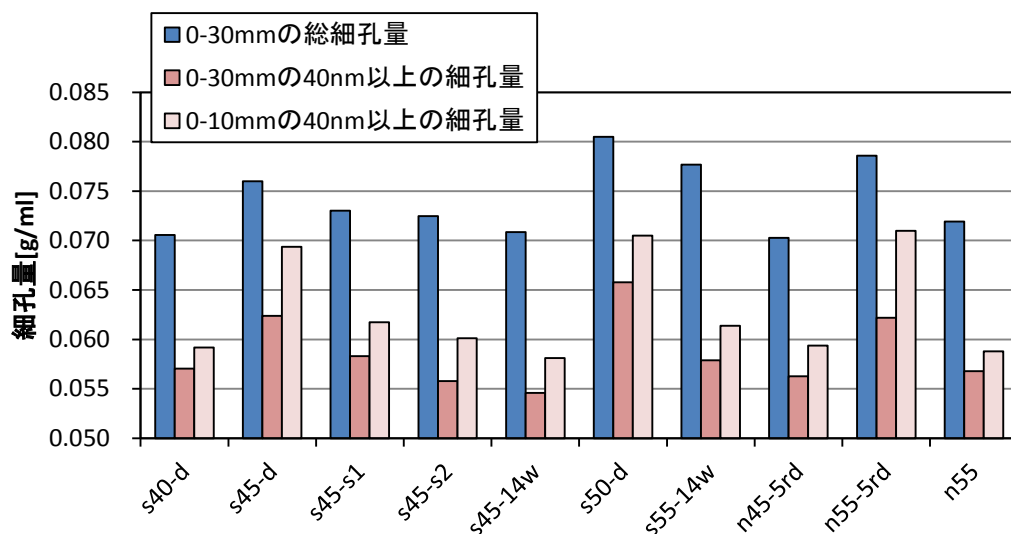


図-3.8 材齢 28 日の細孔量

3.6.2 深さ方向の細孔直径別差分圧入量

前項目で s45-d と n55-5rd と n55 の材齢 28 日の細孔量に着目した。本項目ではさらにそれらの供試体の、材齢 28 日の細孔直径別差分圧入量と深さ方向の細孔径分布に着目し、細孔構造の特性を把握する。

(1) s45-d の深さ方向の細孔直径別差分圧入量

図-3.9 に材齢 28 日における s45-d の深さ方向の細孔径分布を示す。図-3.8 の値を踏まえて図-3.9 に着目すると、30mm と 0-10mm で疎な細孔量の差が大きかった s45-d は、0-10mm 部分の細孔量が多く、深さ方向の細孔径分布にばらつきが見られた。また、0-5mm 部分の細孔量が特に多く、10-15mm と 20-25mm 部分の細孔量が少なかった。

図-3.10 に材齢 28 日における s45-d の深さ方向の細孔直径別差分圧入量を示す。まず、非常に大きな空隙である 10-500 μ m に着目すると、20-25mm 部分における差分圧入量が他より大きく、疎な細孔構造であると推測できる。しかし、細孔径分布においては、20-25mm の総細孔量は少なく、矛盾している。差分圧入量の表を比較した際に、10-500 μ m の値は深さ方向の細孔径分布と関連性がないと考えられるため、差分圧入量のデータのうち 10-500 μ m の部位を除いた 5nm-10 μ m 部分に着目することとした。

そこで、図-3.10 の 5nm-10 μ m 部分に着目すると、20-25mm 部分の細孔量が少なく、直径 200nm など 0-5mm 部分の細孔量が多かった。

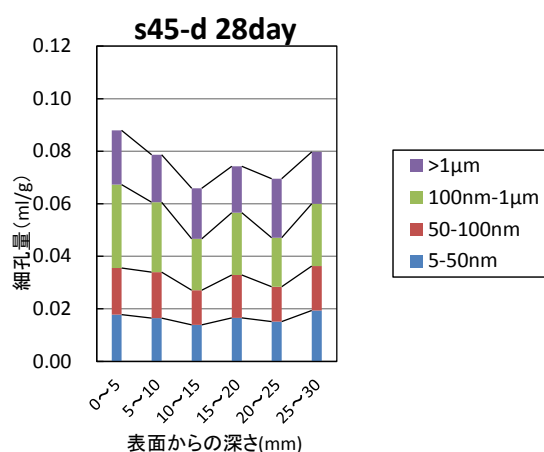
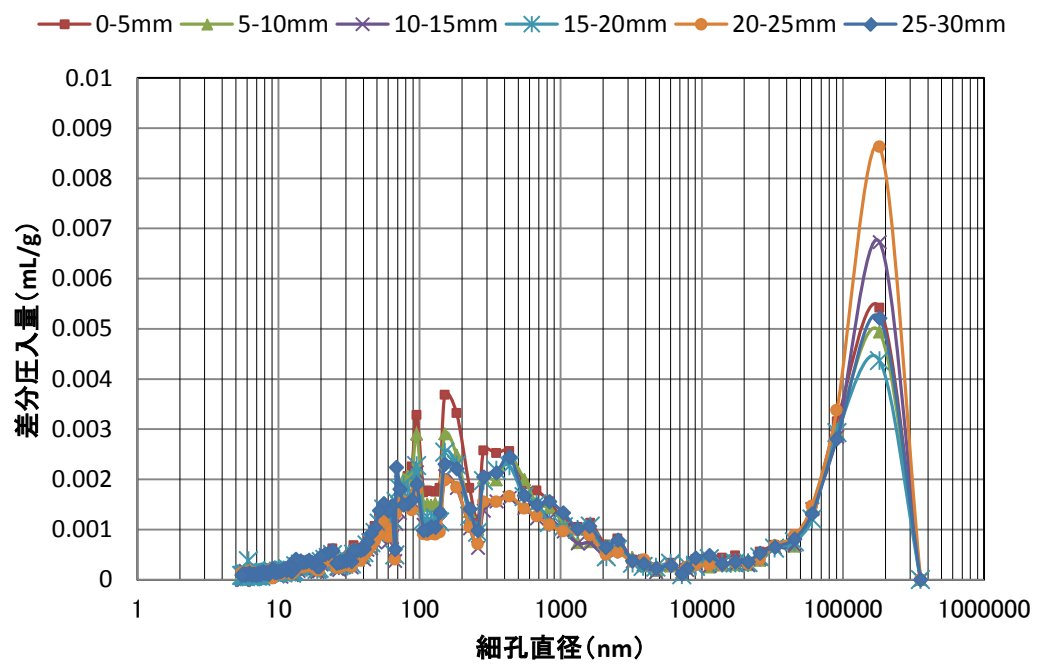


図-3.9 s45-d の材齢 28 日の深さ方向の細孔径分布

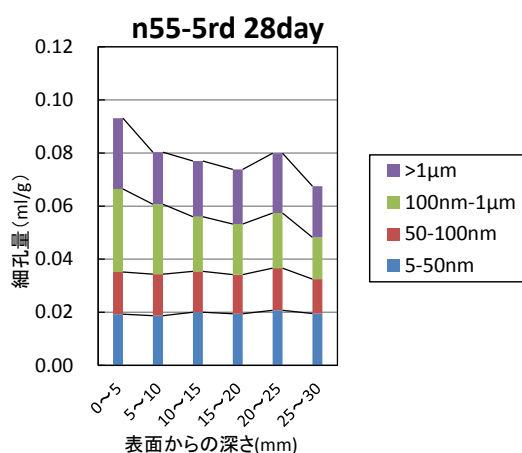


図一3.10 s45-d の材齢 28 日の深さ方向の細孔直径別差分圧入量

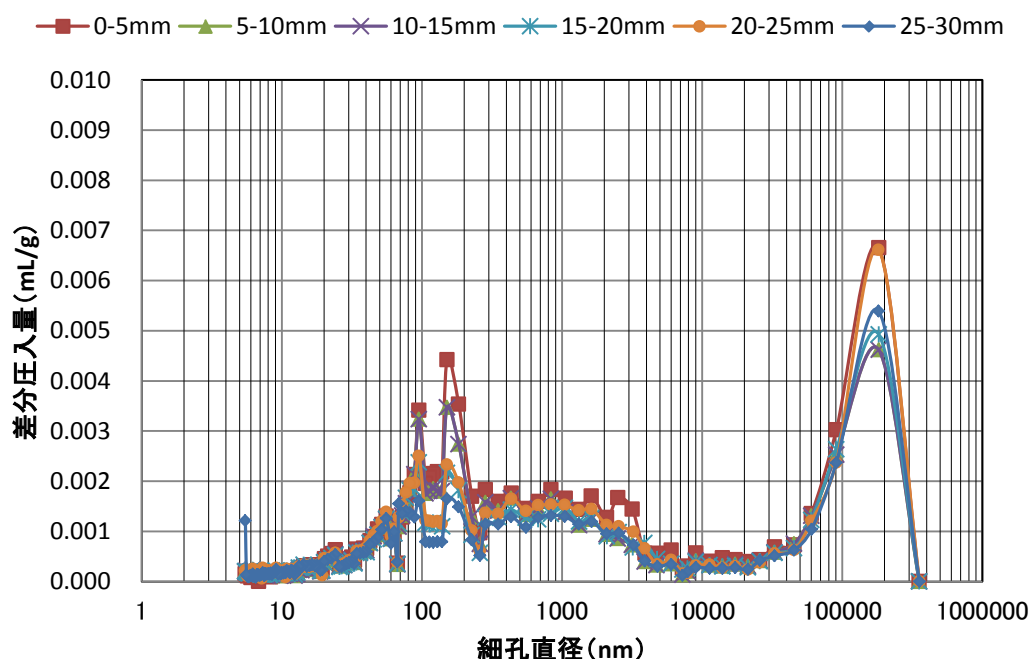
(2) n55-5rd の深さ方向の細孔直径別差分圧入量

図-3.11 に材齢 28 日における n55-5rd の深さ方向の細孔径分布を示す。図-3.8 の値を踏まえて図-3.11 に着目すると、30mm と 0-10mm で疎な細孔量の差が大きかった n55-5rd は、深さ方向に各細孔径の細孔量が減少していた。

そこで、図-3.12 の材齢 28 日における n55-5rd の深さ方向の細孔直径別の差分圧入量のうち 5nm-10 μ m 部分、特に 200nm 部分に着目すると、0-5mm、5-10mm、10-15mm、20-25mm の順に細孔量が減少していた。そのため、細孔径分布の差異は差分圧入量の 5nm-10 μ m 部分、特に 200nm 部分に現れるといえる。



図一3.11 n55-5rd の材齢 28 日の深さ方向の細孔径分布



図一3.12 n55-5rd の材齢 28 日の深さ方向の細孔直径別差分圧入量

(3) n55 の深さ方向の細孔直径別差分圧入量

図-3.13 に材齢 28 日における n55 の深さ方向の細孔径分布を示す。図-3.8 の値を踏まえて図-3.11 に着目すると、30mm と 0-10mm で疎な細孔量の差が小さかった n55 は、0-5mm のみ細孔量が多いが、深さ方向に細孔径分布に大きな変化がなかった。

そこで、図-3.14 の材齢 28 日における n55 の深さ方向の細孔直径別の差分圧入量のうち 5nm-10 μ m 部分、特に 200nm 部分に着目すると、0-5mm は直径 300nm-1 μ m の細孔量が多く、他の細孔径においては、ほぼすべての深さで同一の挙動を示した。

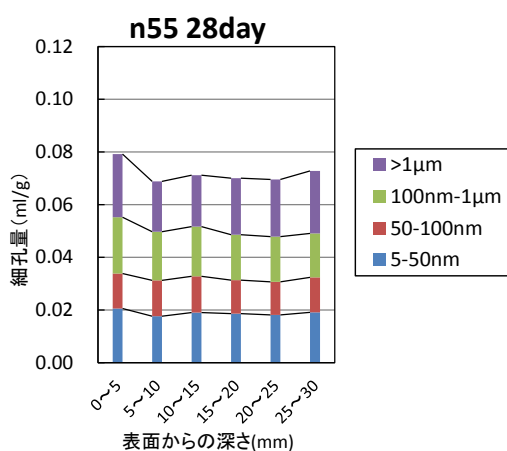


図-3.13 n55 の材齢 28 日の深さ方向の細孔径分布

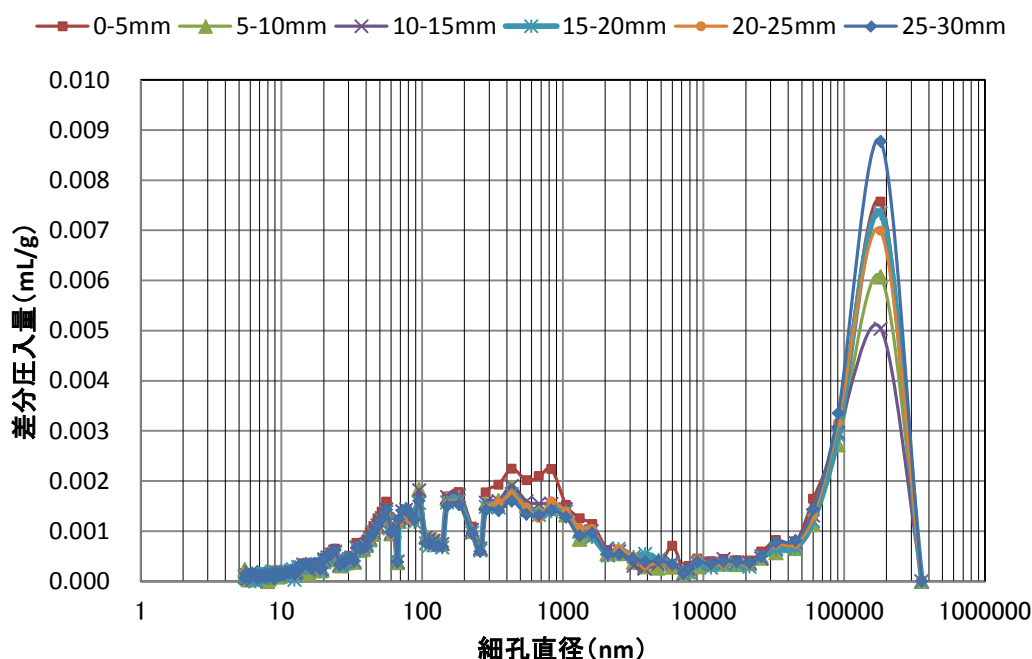


図-3.14 n55 の材齢 28 日の深さ方向の細孔直径別差分圧入量

3.7 細孔径分布試験結果の比較

材齢進行に伴う総細孔量および 40nm 以上の細孔量の変化と、関連した表について比較する。なお、3.7.1 は 4.2.1 と、3.7.2 は 4.2.2 と、3.7.3 は 4.3.1 と共通の養生条件の供試体を比較することで、供試体の相互の細孔構造の特性および中性化特性の関連性を検討する。なお、40nm 以上の細孔量は、0-30mm 部分の供試体を使用した。

3.7.1 様々な水セメント比の蒸気養生コンクリートの細孔量

(1) 材齢進行に伴う総細孔量の変化

材齢進行に伴う供試体の 0-30mm 部分における総細孔量の変化を図-3.15 に示す。図から、材齢進行とともに総細孔量が減少し、水セメント比の低い供試体は総細孔量が少ない。水中養生した s45-14w および s55-14w の減少量が大きい。総細孔量の推移は、水セメント比 40% で気中保管した s40-d と、水セメント比 45% で水中養生した s45-14w が同等となった。また、水セメント比 50% で気中保管した s50-d は多くの材齢で細孔量が多かった。水セメント比 45% で気中保管した s45-d と、水セメント比 55% で水中養生した s55-14w も、近い値で総細孔量が推移した。

材齢進行に伴う供試体の 0-30mm 部分における 40nm 以上の細孔量の変化を図-3.16 に示す。s45-d を除いた供試体において材齢 14 日以降に大きな細孔量の減少が見られなかった。そのため、蒸気養生コンクリートは、材齢 14 日以降、細孔構造の緻密化および疎な細孔構造の減少が停滞すると推測される。

(2) 細孔直径別差分圧入量

s40-d, s45-d, s45-14w, s50-d, s55-14w の、材齢 28 日における細孔直径別の差分圧入量を図-3.17 に示す。なお、差分圧入量の値は、コンクリートの開放面から深さ 0-30mm までの細孔量を平均した値を用いた。図より、s40-d と s45-14w の挙動が近く細孔量が少ない。また s45-d と s55-14w の挙動も類似する傾向にある。また、s50-d において細孔直径が 250 nm -10 μ m の径の細孔量が他と比べて多かった。つまり、材齢進行に伴う総細孔量の変化で述べた傾向は、細孔直径別差分圧入量にも当てはまるといえ、特に細孔直径が 250 nm -10 μ m の径の細孔量に違いが生じている。

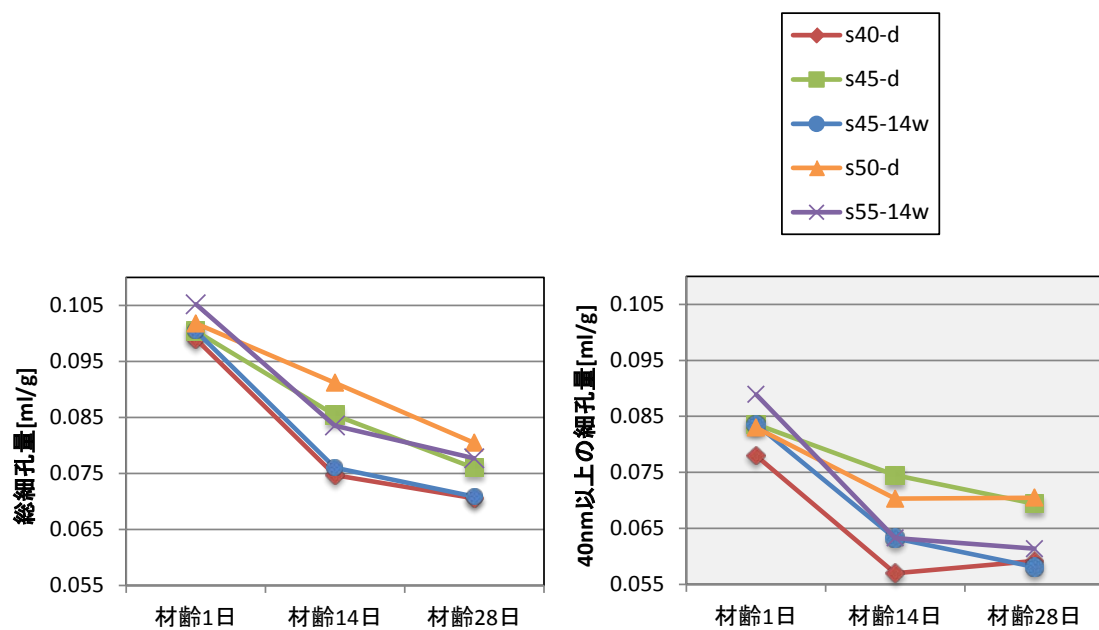


図-3.15 水セメント比に着目した材齢進行に伴う総細孔量の変化

図-3.16 水セメント比に着目した材齢進行に伴う40nm以上の細孔量の変化

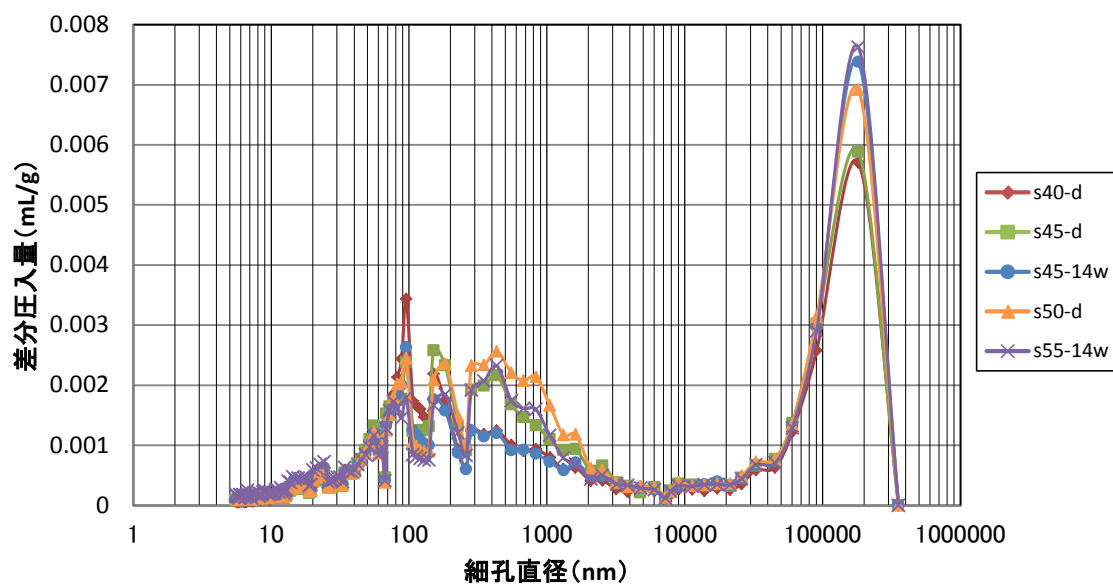
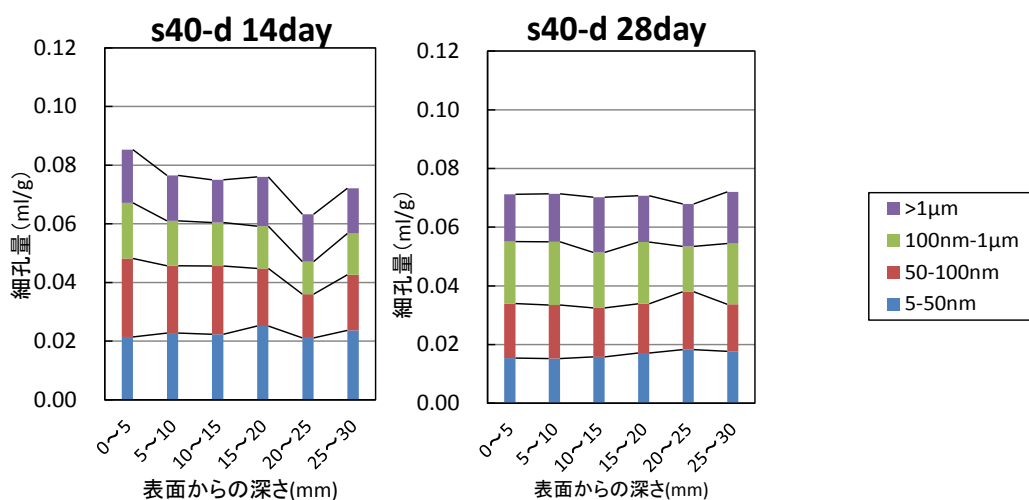


図-3.17 深さ 0-30mm 部分の材齢 28 日における様々な水セメント比の蒸気養生コンクリートの細孔直径別差分圧入力

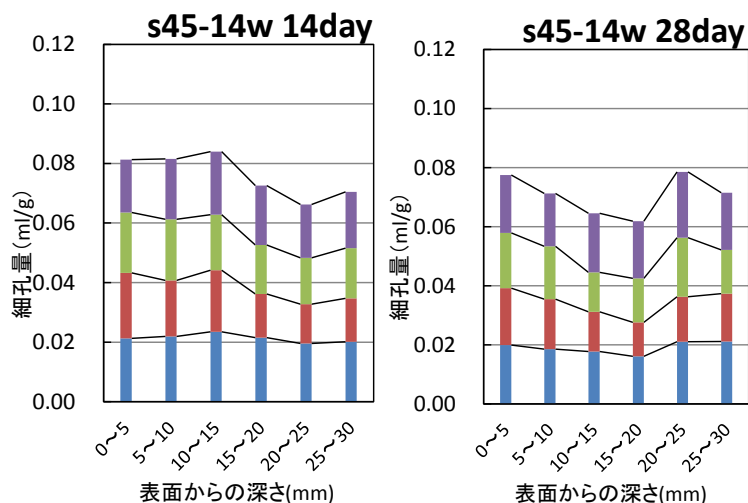
(3) s40-d と s45-14w の材齢 14 日と材齢 28 日の比較

材齢 14 日と 28 日における深さ方向の細孔径分布を図-3.18 に示す。s40-d は材齢 14 日から材齢 28 日への材齢進行に伴い、50-100nm の細孔量の減少と 100nm-1 μ m の細孔量の増加が起こり、深さ方向の細孔径分布が均一になった。また、s45-14w は材齢 14 日から材齢 28 日への材齢進行に伴い、100nm-1 μ m の細孔量が減少した。両供試体の材齢 28 日における細孔構造を比較すると、深さ方向における総細孔量の平均は近いが s45-14w には深さ方向のばらつきがあり、異なる細孔構造の特性となった。



(a) 材齢 14 日の s40-d

(b) 材齢 28 日の s40-d



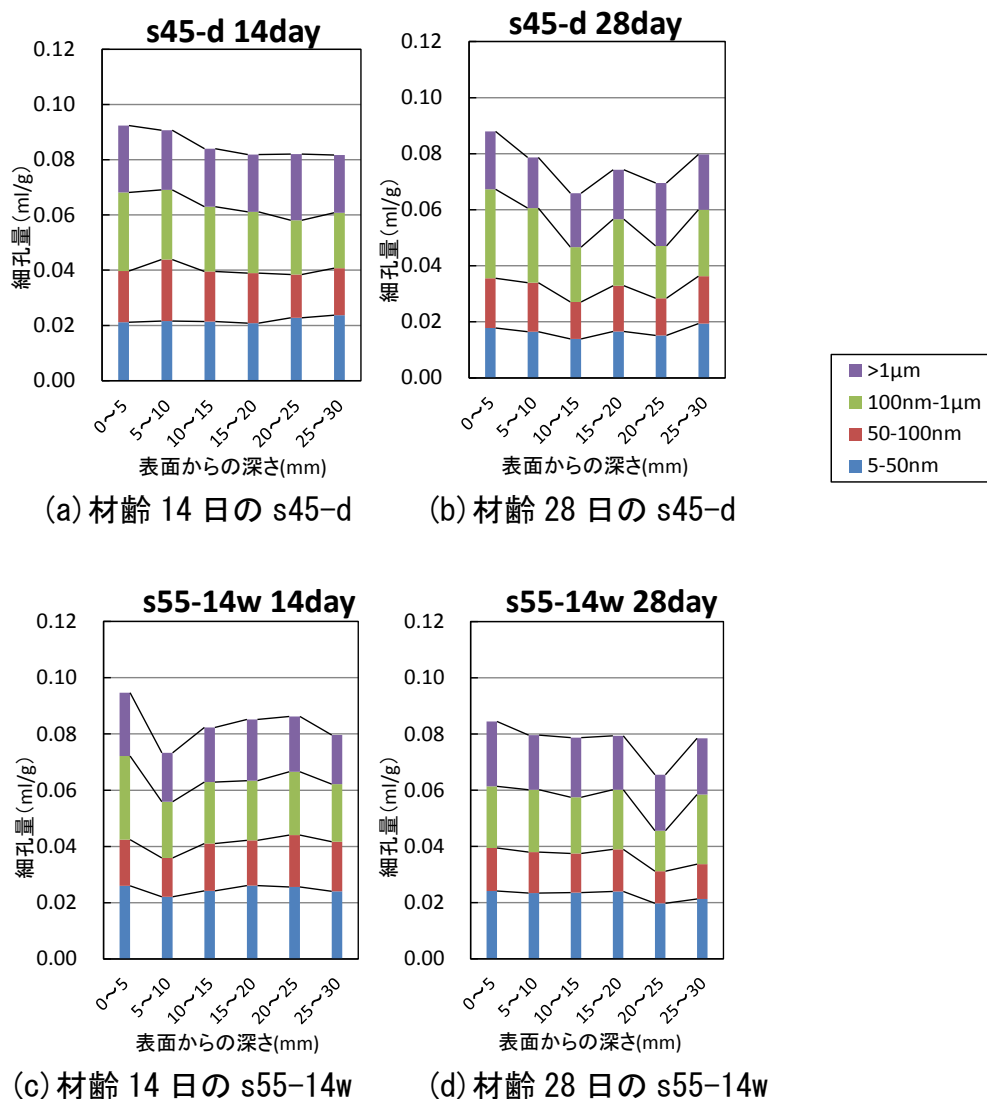
(c) 材齢 14 日の s45-14w

(d) 材齢 28 日の s45-14w

図-3.18 s40-d と s45-14w の深さ方向の細孔径分布

(4) s45-d と s55-14w の材齢 14 日と材齢 28 日の比較

材齢 14 日と 28 日における深さ方向の細孔径分布を図—3. 19 に示す。s45-d は材齢 14 日から材齢 28 日への材齢進行に伴い、総細孔量は減少したものの 100nm-1 μ m の細孔量の増加が起こり、深さ方向の細孔径分布にばらつきが生じた。これは、気中保管による乾燥の影響の少ない供試体内部の水和反応は進行し、50nm 以上の細孔構造に大きな変化はなく、5-50nm の細孔量が減少した。これは、水和反応の進行により、疎な細孔構造は緻密化されなかったが、5-50nm の細孔量が 5nm 以下の細孔量に変化したためであると考えられる。また、s55-14w は材齢進行に伴って、総細孔量と 5-50nm の細孔量がわずかに減少したものの、大きな細孔構造の変化は見られなかった。



図—3. 19 s45-d と s55-14w の深さ方向の細孔径分布

(5) 二回蒸気を除く蒸気養生コンクリートの材齢 28 日の深さ方向の細孔径分布の比較

二回蒸気養生を行ったコンクリートを除く蒸気養生コンクリートの、材齢 28 日における深さ方向の細孔径分布を図-3. 20 に示す。気中保管した蒸気養生コンクリートである図-3. 20 の (a) ~ (c) を比較すると、水セメント比が低い供試体ほど、100nm-1 μ m の細孔量と 1 μ m 以上の細孔量といった疎な細孔量が少なく、総細孔量も少ないため、密な細孔構造が形成されているといえる。しかし、水セメント比の低減と疎な細孔量の減少量に比例関係はなく、s45-d と s50-d の細孔径分布の特徴が開放面から 0-10mm において類似していた。

また、水中養生した蒸気養生コンクリートである図-3. 20 の (d), (e) を比較すると、水セメント比が低い供試体ほど、疎な細孔である 100nm-1 μ m の細孔量が少なく、総細孔量も少ないため、密な細孔構造が形成されているといえる。

次に、水セメント比 45% の供試体である図-3. 20 の (b), (d) を比較すると、水中養生を行った s45-14w は、疎な細孔である 100nm-1 μ m の細孔量が少なく、総細孔量も少ないため、密な細孔構造が形成されていた。また、s45-14w と s40-d は、ともに疎な細孔量が少なかったが、深さ方向の細孔径分布の増減の傾向は異なっていた。

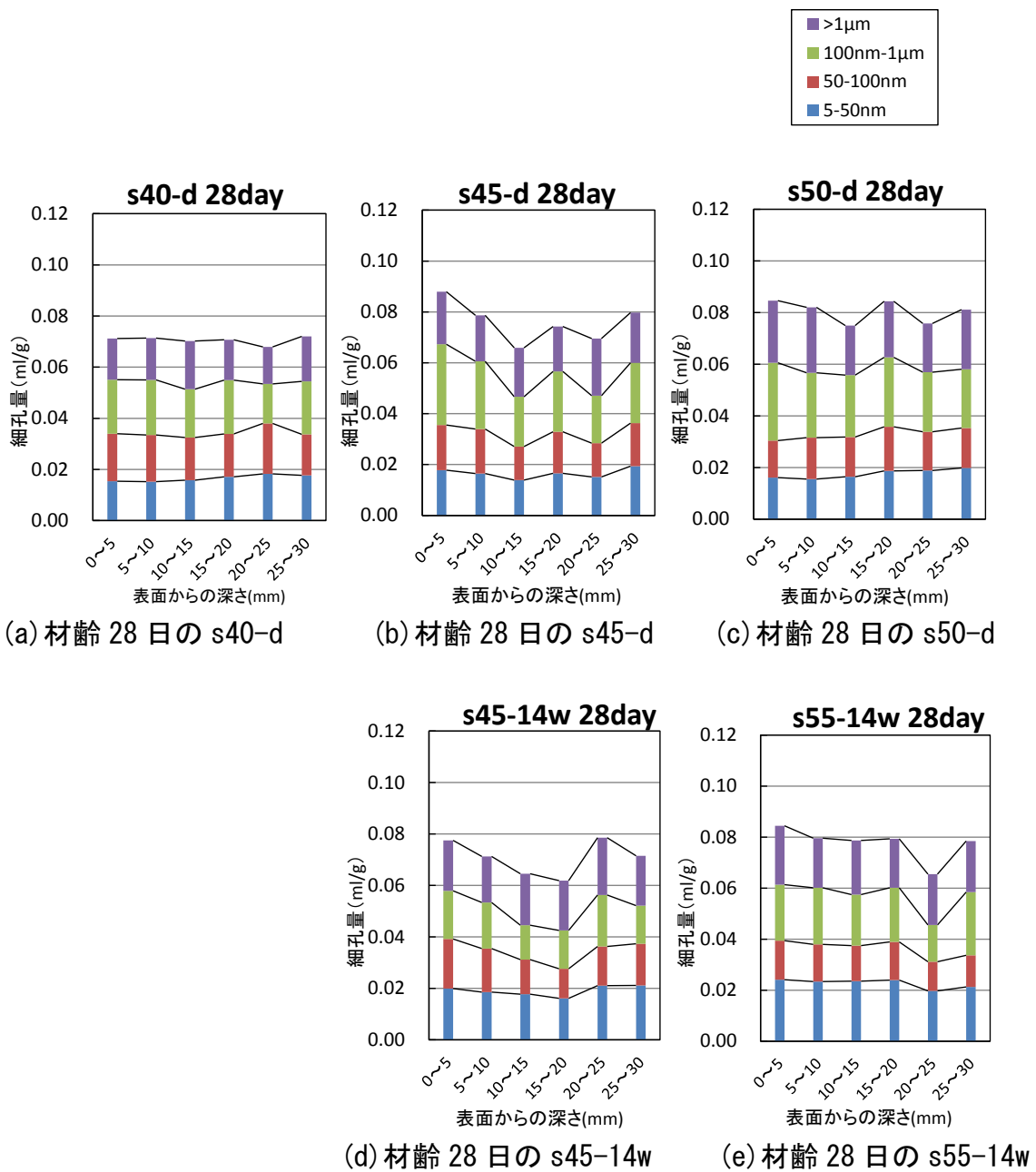


図-3.20 二回蒸気を除く蒸気養生コンクリートの
材齢 28 日の深さ方向の細孔径分布

3.7.2 実際に施工される水セメント比の供試体の細孔量

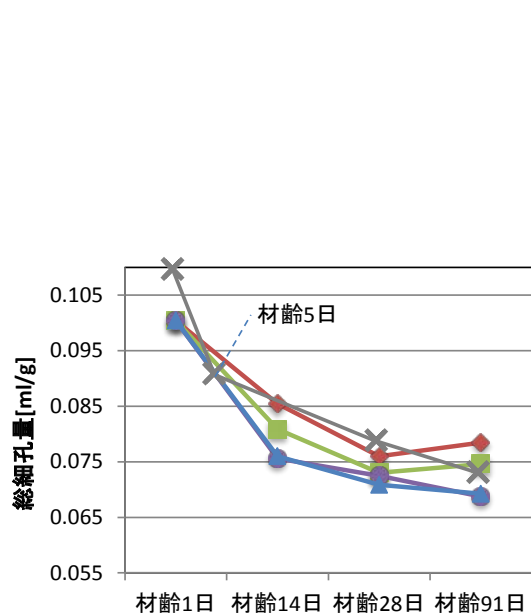
(1) 材齢進行に伴う総細孔量の変化

材齢 1, 14, 28, 91 日における供試体の総細孔量を図-3.21 に示す。材齢の進行とともに、現場打ち模擬コンクリートである n55-5rd は継続して総細孔量が減少しているが、それ以外の蒸気養生を行ったコンクリートは、材齢 14 日以降の細孔量の変化が小さく、水和反応が緩慢になっているといえる。また、材齢 91 日時点で、現場打ちを模した水セメント比 55% の n55-5rd が、蒸気養生後気中保管した s45-d の総細孔量を下回った。一方、二回蒸気養生した s45-s2 と、水中養生した s45-14w は、近い値で総細孔量が推移した。

材齢進行に伴う供試体の 0-30mm 部分における 40nm 以上の細孔量の変化を図-3.22 に示す。s45-d, s45-s2, n55-5rd においては、材齢進行に伴い総細孔量が減少しているが、s45-s1 と s45-14w においては材齢 91 日に再度疎な細孔量が増加した。

(2) 細孔直径別差分圧入量

s45-d, s45-s1, s45-s2, s45-14w, n55-5rd の、材齢 28 日における細孔直径別の差分圧入量を図-3.23 に示す。なお、差分圧入量の値は、コンクリートの開放面から深さ 0-30mm までの細孔量を平均した値を用いた。差分圧入量のデータのうち非常に大きな空隙である 10-500 μ m は供試体の疎密との関連性が見られないため、5nm-10 μ m 部分を中心に比較した。図から、s45-s2 は 10-50nm の細孔量が多く密な細孔構造であること、s45-14w と s45-s2 は 100-1000 nm の細孔量が少なく密な細孔構造であることがわかる。このように、(1) の材齢進行に伴う総細孔量の変化で述べた傾向は、細孔直径別差分圧入量におおよそ当てはまるが、n55-5rd は 1-10 μ m の細孔量が多く、蒸気養生コンクリートと異なった細孔特性を示していた。



※現場打ち模擬コンクリートは材齢5日で試験を行った

図-3.21 水セメント比
45%の供試体などの材齢進
行に伴う総細孔量の変化

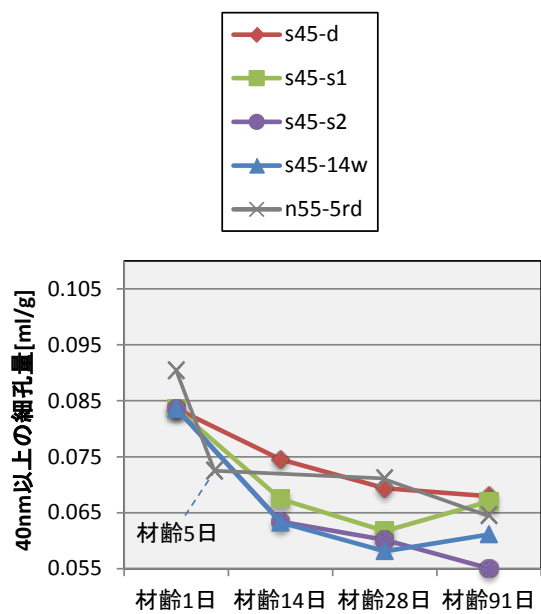


図-3.22 水セメント比 45%の
供試体などの材齢進行に伴う
40nm 以上の細孔量の変化

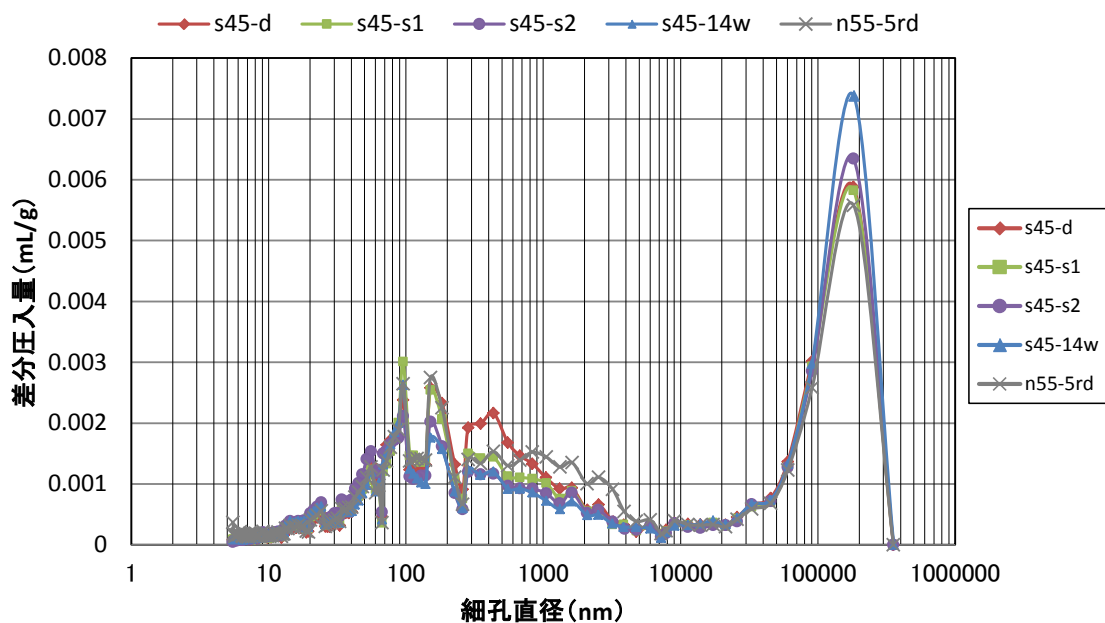


図-3.23 深さ 0-30mm 部分の材齢 28 日における
水セメント比 45%の供試体などの
細孔直径別差分圧入力

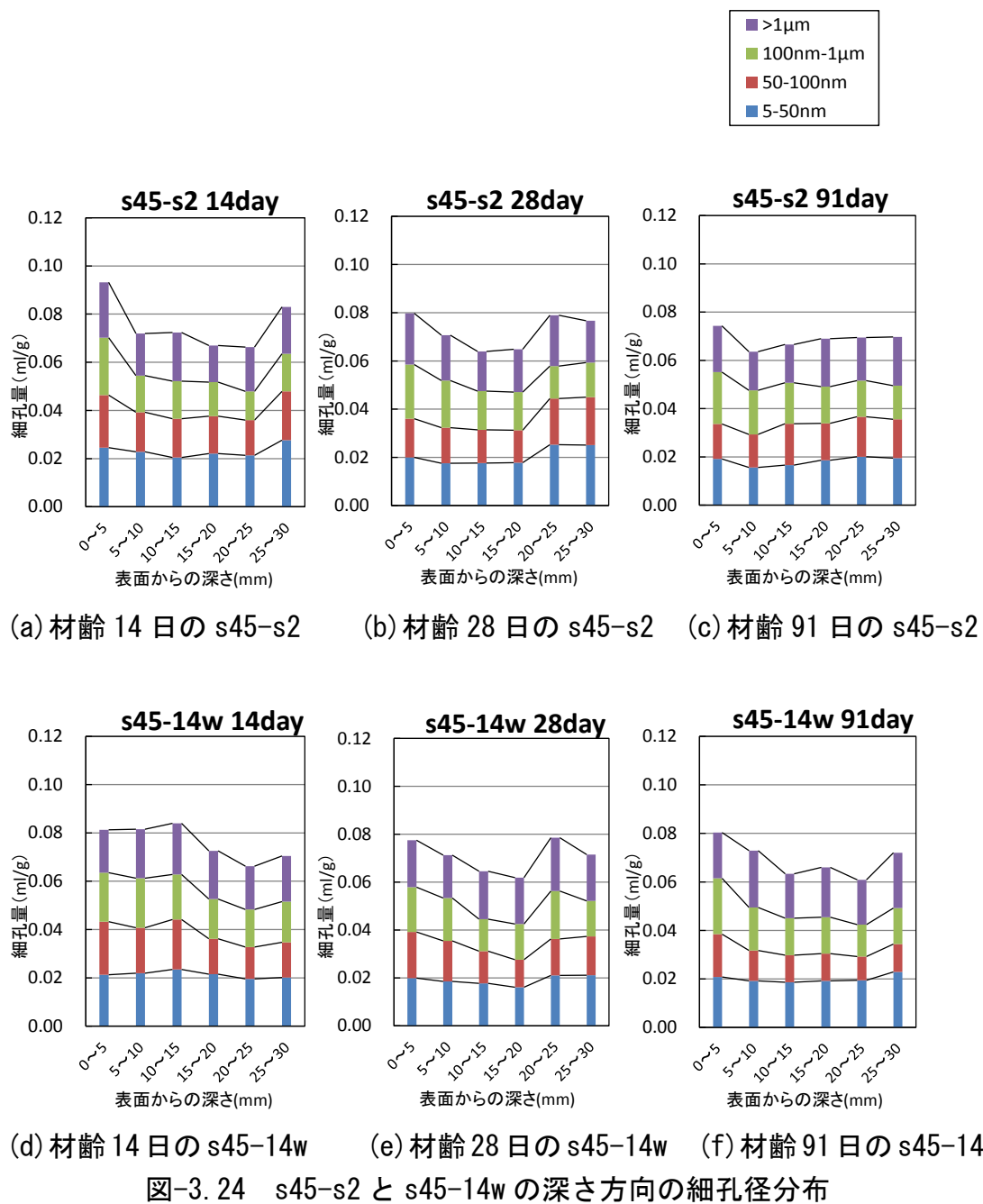
(3) s45-s2 と s45-14w の材齢 14 日と材齢 28 日の比較

材齢別の深さ方向の細孔径分布を図-3. 24 に示す。s45-s2 は材齢進行とともに 50nm 以上の細孔量のばらつきがなくなり、深さ方向に一定になる傾向があった。なお、s45-14w は材齢進行とともに、50nm 以上の細孔量が減少しているため、細孔構造の緻密化が伺える。

次に図-3. 24 (b), (e) の材齢 28 日における細孔構造を比較する。材齢 28 日の傾向は類似しているが、s45-s2 の方が 100nm-1 μ m の細孔量が多く、疎な細孔構造といえる。

s45-s2 は二回蒸気養生を行うことによって、水和反応の促進が継続した状態となり、二日間という短い期間に細孔構造の形成が進行したと考えられる。しかし、材齢 14 日まで水中養生を行う s45-14w と比べると、二回蒸気養生は、その後の乾燥による影響が大きく、水分供給量として不足していると言える。

また、深さ方向の細孔径分布は、開放面から離れるほど乾燥せず、水和反応の継続によって緻密な細孔構造が得られる、深部ほど細孔量の少ない、というケースが多いが、材齢 28 日における s45-s2 と s45-14 の深さ方向の細孔径分布は、v の字を書くように 20-30mm の供試体内部の細孔量が増加している。同一供試体において 2 回の測定を行った際にも細孔径分布結果は同等であったため、理由は断定できないものの、供試体に作用する影響が考えられる。蒸気養生で与える熱の効果が 20mm までしか届かない、などとも考えられるため、3. 10 に、表面からの温度分布を熱電対で調べた研究への検討を記載した。



3.7.3 現場打ち模擬コンクリートと標準養生コンクリートの細孔量

(1) 材齢進行に伴う総細孔量の変化

材齢 1, 5, 28 日における供試体の総細孔量を図-3.25 に示す。図から、材齢進行に伴って総細孔量が減少することがわかる。蒸気養生コンクリートと同様に、水セメント比の低い供試体は総細孔量が少なかった。また、材齢 28 日まで水中養生を行った標準養生コンクリート n55 は、水中養生による細孔構造の緻密化によって、材齢 28 日には水セメント比 45%の現場打ち模擬コンクリート n45-5rd と同等の総細孔量となったと推測される。

材齢進行に伴う供試体の 0-30mm 部分における 40nm 以上の細孔量の変化を図-3.26 に示す。n55-5rd の細孔量の減少は緩やかなものの、すべての現場打ち模擬コンクリートは、材齢 28 日においても 40nm 以上の細孔量が減少していた。これは現場打ち模擬コンクリートに促進養生が行われていないため、材齢 14 日を過ぎた際にも水和反応が緩慢に継続し、結果として材齢 28 日の細孔径分布試験結果において疎な細孔量が減少したと考えられる。

(2) 細孔直径別差分圧入量

n45-5rd, n55-5rd, n55 の材齢 28 日における細孔直径別の差分圧入量を図-3.27 に示す。なお、差分圧入量の値は、コンクリートの開放面から深さ 0-30mm までの細孔量を平均した値を用いた。図より、差分圧入量のデータのうち非常に大きな空隙である 10-500 μ m において、n55 の差分圧入量が、n45-5rd と n55-5rd より大きく、予想と反した値となった。

また、現場打ち模擬コンクリート n45-5rd と n55-5rd の比較を行った。直径 100-200nm で n55-5rd に見られた最頻径は、水セメント比が低減されることで、小径側へと移行した。また、最頻径の細孔量も減少していた。このことから、水セメント比が低減されることで、細孔構造が緻密になったことが伺われる。

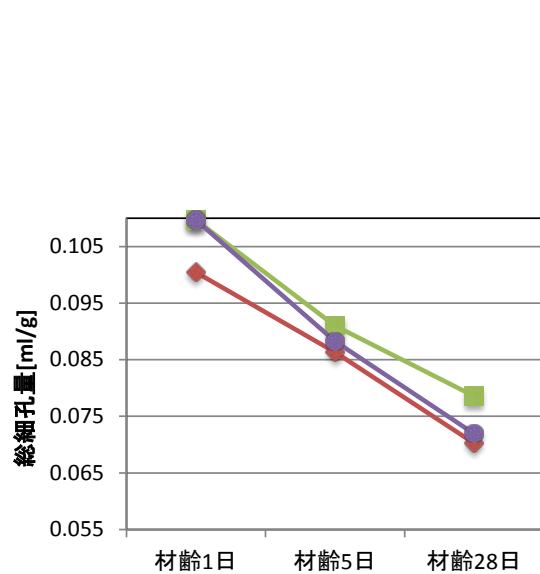


図-3.25 現場打ち模擬コンクリートと標準養生コンクリートの材齢進行に伴う総細孔量の変化

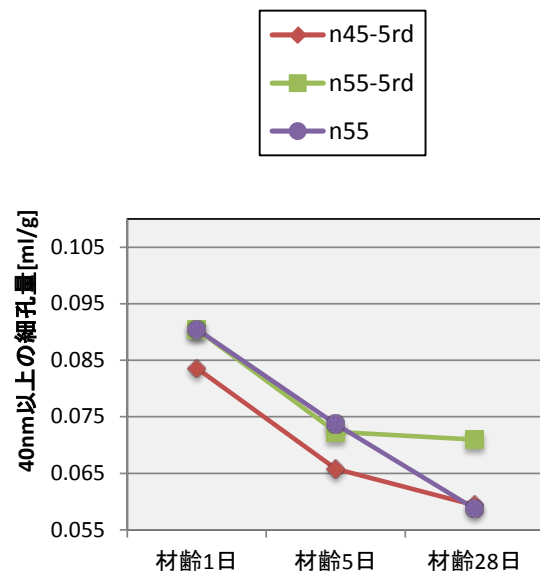


図-3.26 現場打ち模擬コンクリートと標準養生コンクリートの材齢進行に伴う 40nm 以上の細孔量の変化

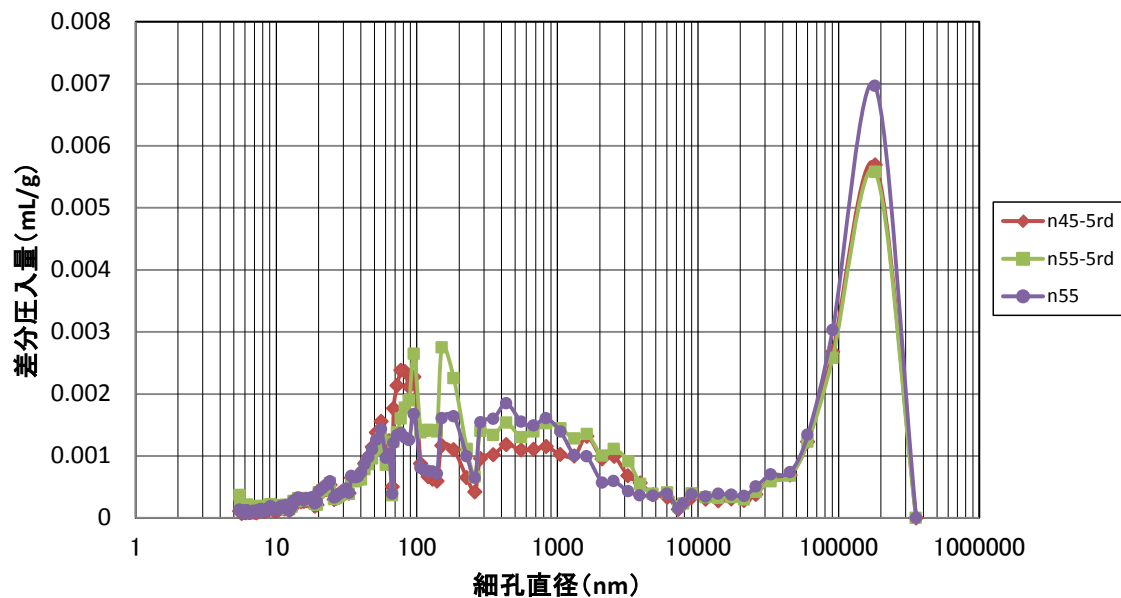
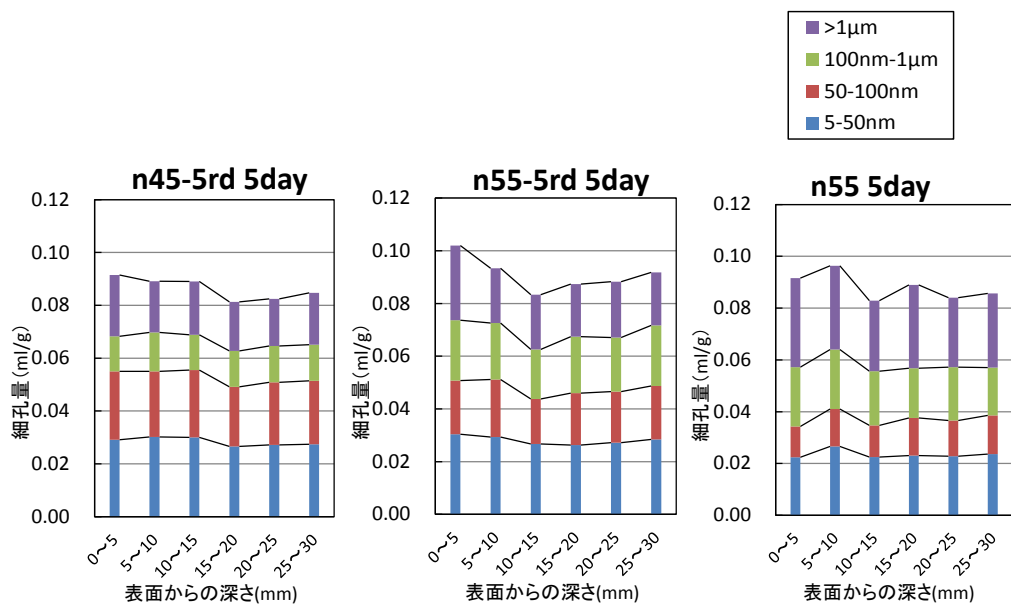


図-3.27 深さ 0-30mm 部分の材齢 28 日における現場打ち模擬コンクリートと標準養生コンクリートの細孔直径別差分圧入量

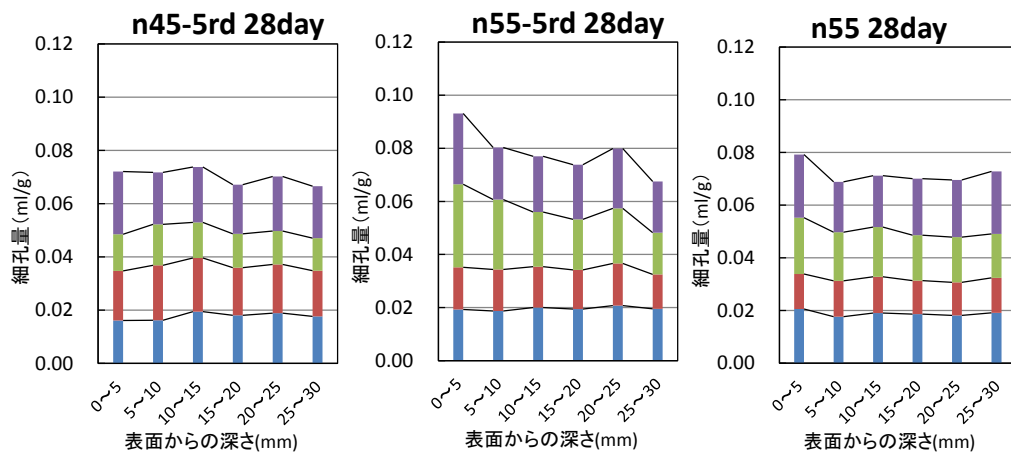
(3)n45-5rd と n55-5rd と n55 の材齢 5 日と材齢 28 日の比較

材齢 5 日と 28 日における深さ方向の細孔径分布を図-3. 28 に示す。材齢進行に伴って、いずれの供試体も 5-50nm の細孔量が減少していることがわかる。また、材齢進行に伴って、n45-5rd は 50-100nm の細孔量が減少し、n55 は 1 μ m 以上の細孔量が減少した。

しかし、水セメント比が高く水中養生の行われていない n55-5rd においては、50nm 以上の疎な細孔量の減少は微々たるものであった。また n55-5rd は 0-10nm の細孔量が多いという特徴があった。



(a) 材齢 14 日の n45-5rd (b) 材齢 14 日の n55-5rd (c) 材齢 14 日の n55



(d) 材齢 28 日の n45-5rd (e) 材齢 28 日の n55-5rd (f) 材齢 28 日の n55

図-3. 28 蒸気養生コンクリートの深さ方向の細孔径分布

(4)n55-5rd の表層部の細孔量

図-3.28(e)において、0-10nm の細孔量が多いことが示されていたため、比較対象として、材齢 28 日における n55-5rd の細孔直径別差分圧入量を図-3.29 に示す。なお、差分圧入量の値は、コンクリートの開放面から深さ 0-30mm までの細孔量を平均した値を用いた。図より、0-10mm の供試体は、100nm と 200nm の細孔量が特に多く、100-200nm 以外ではおおむね同じ挙動を示すことが伺われる。

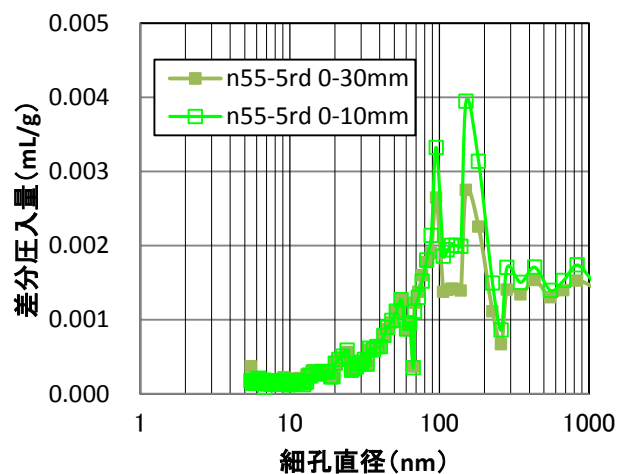


図-3.29 深さ
0-30mm 部分の材齢 28 日における
n55-5rd の細孔直径別差分圧入量

3.8 圧縮強度試験結果

3.8.1 圧縮強度試験結果

材齢 1, 5, 14, 28 日の材齢別の圧縮強度試験結果を図-3.30 に示す。

蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの圧縮強度は材齢 1 日において大きな差があったが、材齢進行とともにほぼ同等となった。

次に、蒸気養生後気中保管をした水セメント比 40% のコンクリート s40-d は、s50-d 比較して圧縮強度が約 1.5 倍高いため、既往の研究の、蒸気養生コンクリートの水セメント比が 10% ずつ低減されるごとに、圧縮強度は約 1.5 倍となる⁴⁾という傾向と試験結果は一致していた。

しかし、材齢 28 日の圧縮強度は、同一水セメント比においてほぼ同等であり、水セメント比 45% において、気中保管した蒸気養生コンクリート s45-d と水中養生した蒸気養生コンクリート s45-14w との強度発現性の差に違いがみられなかった。そのため、水中養生した蒸気養生コンクリートは、材齢 28 日において他より 10～20% 高い強度発現を示す⁵⁾という傾向とは一致しなかった。

また、水セメント比 50% で蒸気養生後気中保管した s50-d と、水セメント比 55% で材齢 28 日までの水中養生を行った標準養生コンクリート n55 は、近いものの同等ではない。そのため、圧縮強度に関して、蒸気養生したコンクリートの水セメント比を 5% 程度低減することで、標準養生したコンクリートと同等の圧縮強度となる⁴⁾という傾向と一致しなかった。

また、材齢 91 日の圧縮強度試験結果を図-3.31 に示す。材齢 14 日まで水中養生を行った s45-14w には圧縮強度の増加が見られなかった。また、材齢 28 日まで水中養生を行った n55 には圧縮強度の増加が見られた。

なお、現場打ち模擬コンクリートの圧縮強度が、既往の研究や一般的に施工されているものと比べて、低い値となった印象を受ける。原因としては、練り上がり温度が 28℃ の暑中コンクリートであったことや、水セメント比 55% の供試体が非常に疎な細孔構造であることなどが推察されるが、推定の域は超えていない。再度研究によって水中養生による圧縮強度の差を明確にすることが課題として挙げられる。

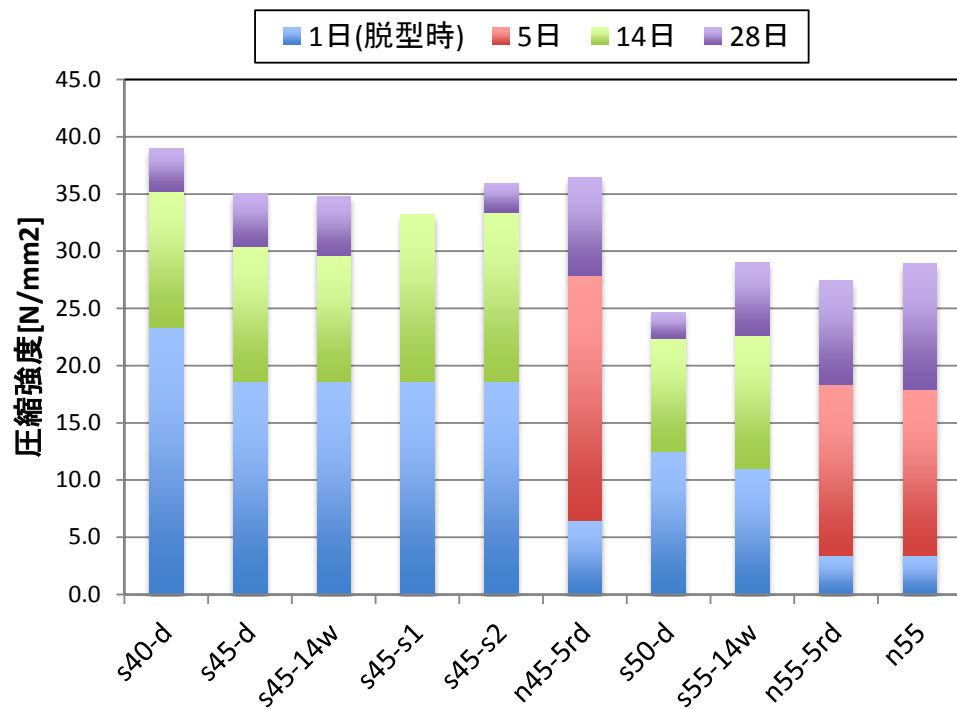


図-3.30 材齢別の圧縮強度試験結果

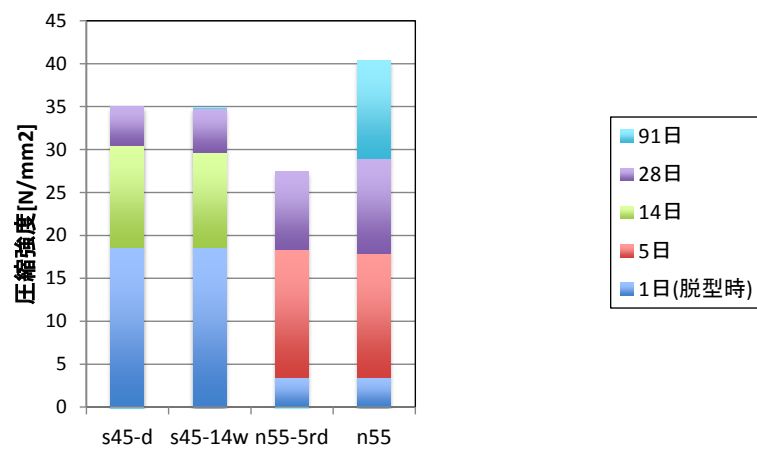


図-3.31 水中養生の有無と材齢
91日の圧縮強度試験結果

3.8.2 圧縮強度と総細孔量の相関関係

材齢 28 日の圧縮強度と 0-30mm における総細孔量の関係を図-3.32 に示す。すべての点での決定係数 R^2 は 0.630 となった。なお、s45-d と n55 を除いた点での材齢 28 日の圧縮強度と 0-30mm における総細孔量の関係を図-3.33 に示したところ、決定係数 R^2 は 0.917 となった。そのため、圧縮強度と総細孔量の間にある程度の相関性が見られるといえる。

ここで、決定係数 R^2 から外れた値である s45-d と n55 について検討する。s45-d は二次養生条件が同じ s40-d および s50-d と比較した際にも、圧縮強度が極端に高い印象をうける値であった。逆に、n55 は総細孔量が少ないことと、十分な水中養生があったことを考えると、圧縮強度が想定より低い値として出た印象を受ける。そのため、供試体の相互の耐久性の比較の際には、細孔量を中心に比較検討を行うものとする。

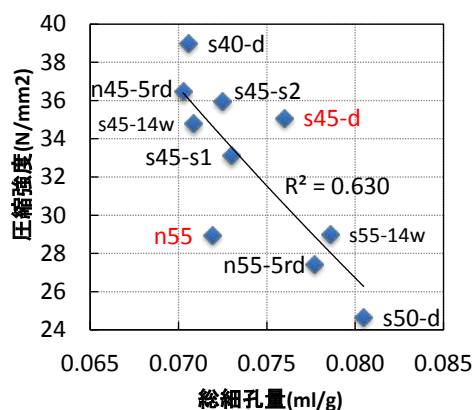


図-3.32 圧縮強度と 0-30mm における総細孔量の関係

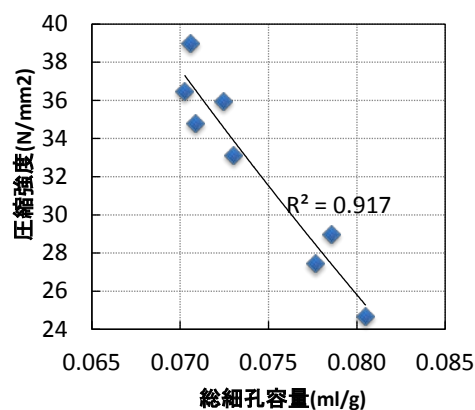


図-3.33 s45-d と n55 を除いた点での圧縮強度と 0-30mm における総細孔量の関係

3.9 中性化試験結果

コンクリート中の水酸化カルシウムが、浸透した二酸化炭素と反応して非活性の炭酸カルシウムに変わることが炭酸化または中性化といい、鉄筋コンクリートにおいては鉄筋腐食の進行の原因にもなるため、コンクリートの耐久性に大きな影響を及ぼす⁶⁾。本節では、コンクリートの二次養生条件と水セメント比が中性化性状に及ぼす影響について検討する。

図-3.34 に全供試体の中性化深さを示す。中性化深さを促進材齢 4, 9, 16 週において測定したところ、s50-d, s55-14w, n55-5rd, n55 の中性化深さが深さ 15mm より大きくなった際に、急激に中性化深さが深くなった。

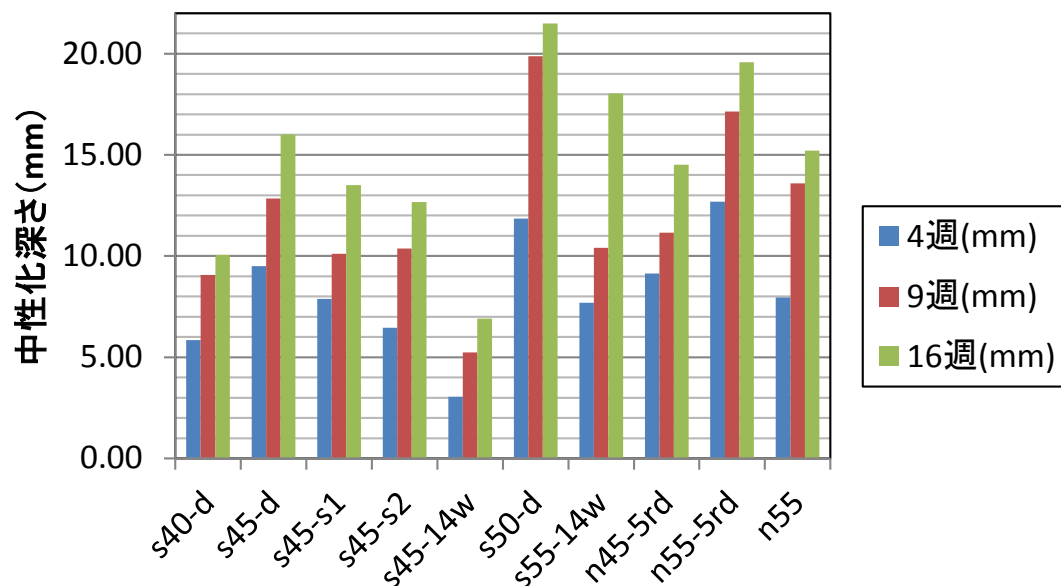


図-3.34 全供試体の中性化深さ

3.9.1 二次養生条件による中性化深さの相違

蒸気養生コンクリートの二次養生条件の違いがコンクリートの中性化性状に及ぼす影響について比較する。

一般に、コンクリートの中性化深さと中性化材齢との関係は、式 3-1 に示すような \sqrt{t} 則に従うとされている。ここでの、中性化速度係数とは中性化に対する抵抗性を表す指標であり、この値が大きいほど、中性化が進行しやすく、抵抗性が低いこととなる。

$$y = \alpha \sqrt{t} \quad \text{式 3-1}$$

y : 中性化深さ(mm)

α : 中性化速度係数

t : 促進(暴露)期間(週)

蒸気養生コンクリートの中性化深さと促進材齢の関係を図-3.35, 図-3.37, 図-3.39 に示す。また、中性化深さの線形近似直線の傾きから求めた中性化速度係数の値を図-3.36, 図-3.38, 図-3.40 に示す。

図-3.36 より、水セメント比が低い供試体と水中養生を行った供試体の中性化速度係数は総じて小さいことがわかる。また、s45-d と s55-14w の中性化速度係数は同等となった。図-3.38 より、s45-s1 と s45-s2 の中性化速度係数は同等となった。図-3.40 より、s45-d と、s55-14w と n55 の中性化速度係数が同等であり、n45-5rd も近い値であった。また、n45-5rd は s45-d よりわずかに中性化速度係数が小さい。

関ら⁴⁾の研究より、n40-5rd は s40-d よりわずかに中性化深さが大きく、s50-d は n50-5rd よりわずかに中性化深さが大きいとされるため、水セメント比 45% の中性化速度係数は水セメント比 40% の傾向に近いことがわかる。

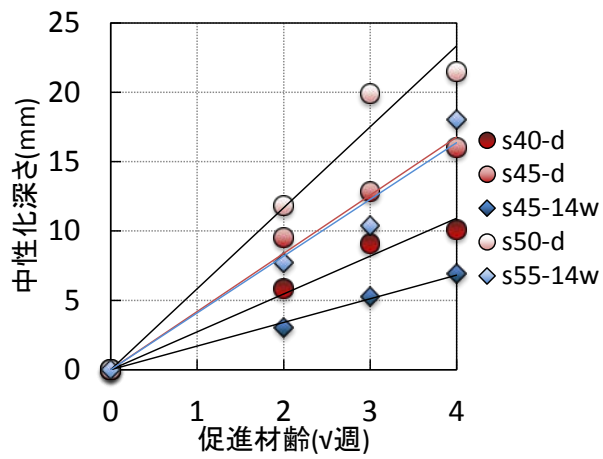


図-3.35 水セメント比に着目した中性化深さの相違

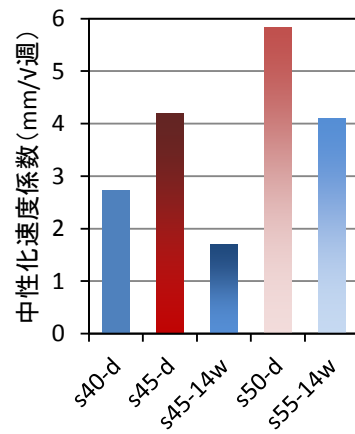


図-3.36 水セメント比に着目した中性化速度係数

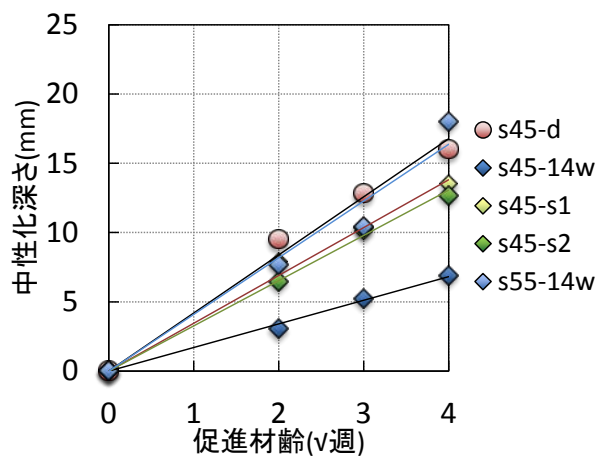


図-3.37 蒸気養生コンクリートの二次養生条件が耐久性に与える中性化深さの相違

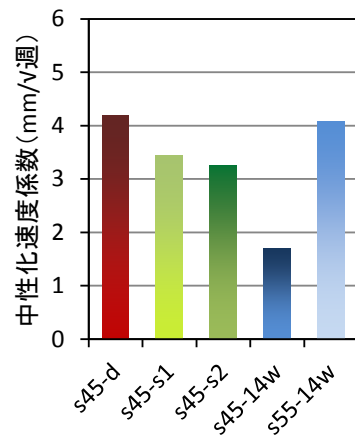


図-3.38 蒸気養生コンクリートの二次養生条件が耐久性に与える中性化速度係数

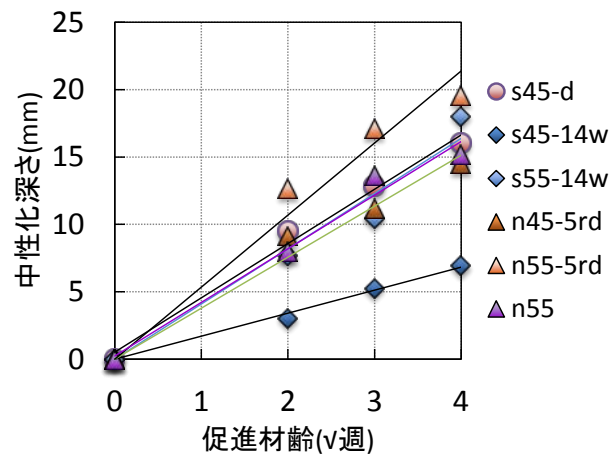


図-3.39 蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの中性化深さの相違

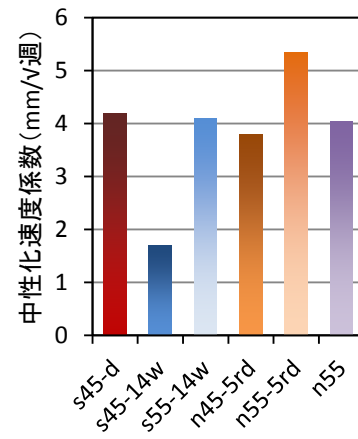


図-3.40 蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの中性化速度係数

3.9.2 中性化速度係数と細孔構造の関係

コンクリートの圧縮強度と細孔構造との関係と同じように、コンクリートの中性化速度係数と細孔構造との間には密接な関係がある。

既往の研究より、結合材が同一の場合、中性化速度係数とある径以上の細孔量とは相関があるとされており、特に 40nm 以上の細孔量と良好な相関関係にあることが認められている⁷⁾⁸⁾。その中で、20℃、60%R.H.での気中環境は、40nm よりも小さな径を持つ細孔空隙中には、湿分が保持されており、不溶性の炭酸ガスの拡散が抑制されたことによると考察されている。

そこで、本研究における蒸気養生コンクリートの中性化速度係数と 40nm 以上の細孔量の関係について比較する。

図-3.41 に促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数と表層部 0-30mm における 40nm 以上の細孔量の関係を示す。図より明確な相関関係は認められない。理由としては、本研究において作成した供試体の養生条件の差が小さかったためと考えられる。そこで、促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数と表層部の 0-10mm における 40nm 以上の細孔量関係を図-3.42 に示す。図の 0-10mm における 40nm 以上の細孔量と中性化速度係数を比較すると、決定係数 R^2 は 0.654 となり、ある程度の相関性が見られた。しかし、0-10mm 部分においても、s45-d と n55 だけが相関から外れているため、s45-d と n55 を除いた点での促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数と表層部の 0-10mm における 40nm 以上の細孔量関係を図-3.43 に示したところ、決定係数 R^2 は 0.821 となった。そのため、s45-d と n55 を除いた中性化速度係数と表層部の 40nm 以上の細孔量の間にある程度の相関性が見られるといえる。

現場打ち模擬コンクリートは、細孔構造の傾向と比較しても、中性化速度係数が大きくなり、圧縮強度が出る傾向にあったといえる。これは既往の研究においても同じ傾向であった。本研究は現場打ち模擬コンクリートを評価する際、耐久性の中でも細孔径の等しいものに注目し、水中養生や水セメント比の低減の推奨を行うものとする。

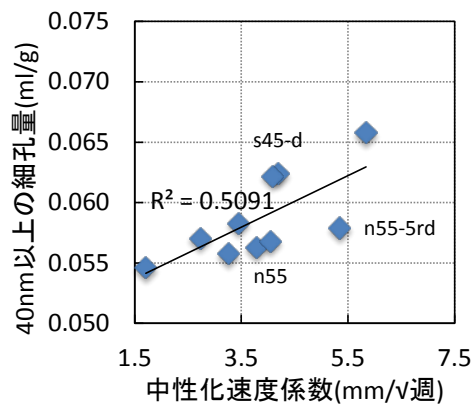


図-3.41 中性化速度係数と 0-30mm
における 40nm 以上の細孔量の関係

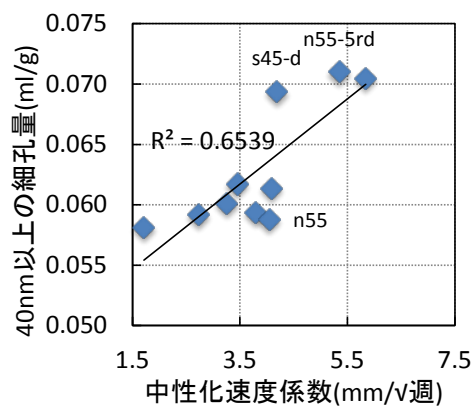


図-3.42 中性化速度係数と 0-10mm
における 40nm 以上の細孔量の関係

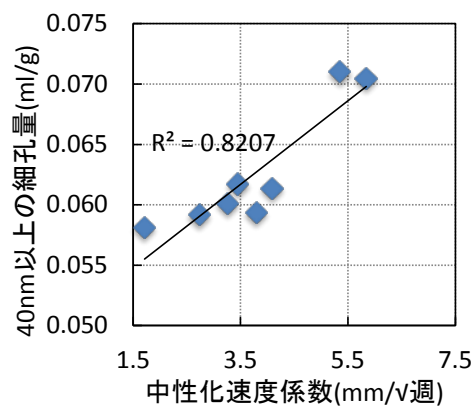


図-3.43 s45-d と n55 を除いた
中性化速度係数と 0-10mm におけ
る 40nm 以上の細孔量の関係

3.10 開放面から 0-10mm 部分の表層部の影響

3.10.1 細孔径分布の深さ方向の変化に対する考察

開放面から 0-10mm 部分を表層部と定義した理由を、表層の湿度分布と表面からの温度分布の観点から検討する。

佐藤ら⁹⁾は、図-3.44 に示すように、普通コンクリートの湿度分布について、水セメント比に関わらず表層から 50mm までは湿度が低下し、概ね深さ 20mm まで乾燥の影響が大きいとしている。また齋藤ら¹⁰⁾は、図-3.45 に示すように、相対湿度と表面からの温度について検討し、表面では相対湿度 75%、10mm 位置では 90%、30mm 位置では 98-100%と高い相対湿度を維持し、内部温度は 50℃の養生槽内で 40-45℃という低い値であったとしている。

これらを参考にし、二次養生を行った供試体は、開放面から深さ 0-20mm 部分までが乾燥を受けるものの、開放面から深さ 10-20mm 程度は温度と湿度が適当に確保され、水和反応が進行したものと考えた。また、表層部からの乾燥と表層部からの水分供給の影響が小さくなるのは、表層部から 10mm 以深と考えられる。以上のことから、中性化深さと比較する際の表層部を、開放面から深さ 0-20mm ではなく、0-10mm と定義した。そのため、中性化深さと相関関係にある 40nm 以上の細孔量を比較する際においても、開放面から 0-10mm の表層部の値を使用した。

また、材齢 28 日における s45-s2 と s45-14w の深さ方向の細孔径分布は、v の字を書くように 20-30mm の供試体内部の細孔量が増加していた。その原因は、二次養生を行った供試体は、開放面から深さ 0-20mm 部分までが乾燥を受けるものの、開放面から深さ 10-20mm 程度は温度と湿度が適当に確保され、水和反応が進行したためと考えた。

3.10.2 40nm 以上の細孔量との相関性

他の部位が表層部分に適さなかった理由はいくつかある。まず、開放面から 0-5mm については、確実に中性化が進行している部位ではあるが、供試体の乾燥と水分供給を直に受ける部分であり、供試体ごとに大きくばらつきがあった。

次に、開放面から中性化している部分までの共通点を考えた。例えば s50-d は促進材齢 9 週において 19mm まで中性化したため、0-20mm の試料における 40nm の細孔量に着目する。15-20mm の部位のみに着目した場合は、相関性は得られない、といった手順である。しかし、中性化の進行した部位の細孔径を中性化深さと比較した際の相関性は低かった。開放面から中性化している部分の深さまでの細孔構造を調べて平均を取ると、開放面からの深さの細孔構造に大きな差があることから、値にばらつきがでるためと考えられる。

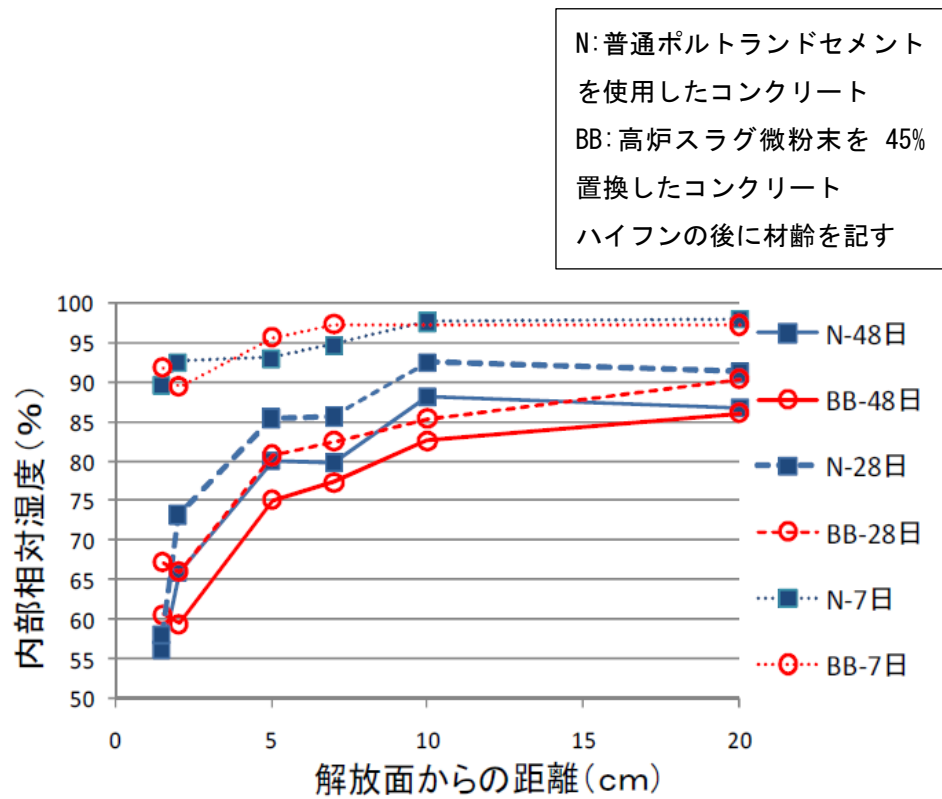


図-3.44 深さ方向と内部相対湿度の関係

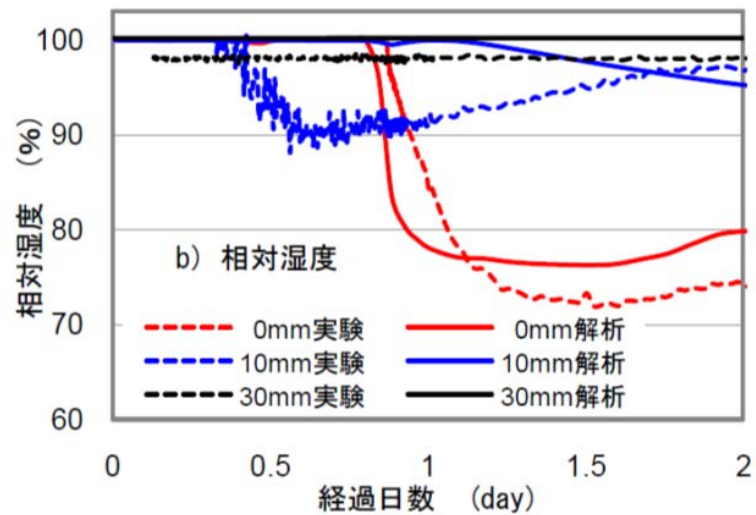


図-3.45 実験結果と解析結果の比較

3.11 まとめ

第 3 章において、細孔径分布試験と圧縮強度試験および促進中性化試験の検討を行ったところ、以下のことが明らかとなった。

(1) 材齢進行に伴う総細孔量の変化

材齢進行に伴う総細孔量の変化と材齢 28 日の細孔直径別差分圧入量において、s40-d と s45-14w、s45-d と s55-14w、s45-s2 と s45-14w がほぼ同等であった。

蒸気養生コンクリートは、材齢 14 日以降、細孔構造の緻密化および疎な細孔構造の減少が停滞すると推測される。

現場打ち模擬コンクリートである n55-5rd は継続して総細孔量が減少しているが、それ以外の蒸気養生を行ったコンクリートは、材齢 14 日以降の細孔量の変化が小さく、水和反応が緩慢になっているといえる。

水セメント比の低い供試体は総細孔量が少なかった。また、材齢 28 日に、水中養生を行った標準養生コンクリート n55 と、水セメント比 45% の現場打ち模擬コンクリート n45-5rd の、総細孔量が近い値となった。

(2) 深さ方向の細孔直径別差分圧入量

材齢 28 日の 40nm 以上の細孔量を、0-30mm と 0-10mm で比較すると、s45-d と n55-5rd の差が大きかった。

深さ方向の細孔径分布との関連性は、差分圧入量の 5nm-10 μ m 部分、特に 200nm 部分に現れた。30mm と 0-10mm で疎な細孔量の差が大きかった n55-5rd は、深さ方向に各細孔径の細孔量が減少していた。また、30mm と 0-10mm で疎な細孔量の差が小さかった n55 は、0-5mm のみ直径 300nm-1 μ m の細孔量が多かったが、他はほぼすべての深さで同一の挙動を示した。

(3) 材齢別の深さ方向の細孔径分布

蒸気養生コンクリートは、水セメント比が低い供試体や、水中養生を行った供試ほど、疎な細孔である 100nm-1 μ m の細孔量が少なく、総細孔量も少ないため、密な細孔構造が形成されているといえる。なお、s45-14w と s40-d は、ともに疎な細孔量が少なかったが、深さ方向の細孔径分布の増減の傾向は異なっていた。

s45-s2 は材齢進行とともに 50nm 以上の細孔量のばらつきがなくなり、深さ方向に一定になる傾向があった。なお、s45-14w は材齢進行とともに、50nm 以上の細孔量が減少しているため、細孔構造の緻密化が伺える。

水セメント比が高く水中養生の行われていない n55-5rd においては、50nm 以

上の疎な細孔量の減少は微々たるものであった。

(4) 圧縮強度試験結果

蒸気養生コンクリートの水セメント比が 10% ずつ低減されると、圧縮強度は約 1.5 倍となった。しかし、気中保管した蒸気養生コンクリートと水中養生した蒸気養生コンクリートとの強度発現性の差に違いがみられなかった。

材齢 28 日の圧縮強度と 0-30mm における総細孔量の間にある程度の相関性が見られた。

(5) 促進中性化試験結果

s45-d と s55-14w と n55、s45-s1 と s45-s2 の中性化速度係数が同等であった。また、n45-5rd は s45-d よりわずかに中性化速度係数が大きかった。

0-10mm における 40nm 以上の細孔量と中性化速度係数の間にある程度の相関性が見られた。しかし、s45-d と n55 は相関から外れた値であった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編：施工標準】 p.127、2007.
- 2) 丸山晃平、宇治公隆、上野 敦、大野健太郎：蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.2、pp.571-576、2011.6
- 3) 郭度連、宇治公隆、國府勝郎、上野 敦：乾燥によるコンクリート組織の不均質化、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.711-716、2002.6
- 4) 関 健吾：蒸気養生を実施したコンクリートの細孔構造および耐久性に関する研究、首都大学東京大学院修士論文、p.27、50、53、2011.
- 5) 寺川麻美：プレキャストコンクリート製品の細孔構造に及ぼす養生条件の影響、首都大学東京大学院修士論文、p.43、2013.
- 6) 村田二郎、國府勝郎ほか：わかり易い土木講座 10 コンクリート工学（Ⅰ）施工、p.134
- 7) 郭度連、宇治公隆、國府勝郎、上野 敦：養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価、土木学会論文集、Vol.57、No.718、pp.59-68、2002.11
- 8) 関 健吾、宇治公隆、上野 敦、原 洋介：蒸気養生を実施したコンクリートの細孔構造および中性化性状、土木学会第 65 回年次学術講演会、pp.605-606、2010.9
- 9) 佐藤 健太郎、伊代田 岳史：養生方法やセメントの相違がコンクリートの内部湿度・乾燥収縮に与える影響、第 37 回土木学会関東支部技術研究発表会 No. 05、pp. V-1、2010.
- 10) 齋藤 寛泰、小澤 満津雄、阪口 裕紀、森本 博昭：蒸気養生を行ったプレキャストコンクリート部材の初期応力に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.1、pp.443-448、2011.

第 4 章

供試体の耐久性が同等となりうる
水セメント比と二次養生条件

4.1 概要

第4章では、第3章で検討した試験結果の中でも、材齢28日の細孔量と促進材齢16週時点で算出された中性化速度係数の比較を行う。このことにより、二次養生条件ならびに水セメント比が、コンクリートの細孔構造や中性化特性に及ぼす影響の検討を行った。また、並行して、蒸気養生、現場打ち模擬、標準養生の3種類において、耐久性が同等となりうる水セメント比および二次養生条件の検討を行う。

特に、水セメント比45%で蒸気養生後気中保管したコンクリート s45-d と、水セメント比55%で現場打ち模擬として封かん養生を行ったコンクリート n55-5rd を基準として比較した。

なお細孔量のグラフについて、総細孔量は、コンクリートの開放面から深さ0-30mmまでの細孔量を平均した値とし、40nm以上の細孔量は、コンクリートの開放面から深さ0-10mmまでの細孔量を平均した値として定義した。

4.2 蒸気養生コンクリート同士の比較

4.2.1 水セメント比に着目した検討

比較する供試体は、水セメント比 40, 45, 50% で蒸気養生後に気中保管したコンクリート s40-d, s45-d, s50-d と、水セメント比 45, 55% で材齢 14 日まで水中養生を行った蒸気養生コンクリート s45-14w および s55-14w とする。また、本研究においては作製していないが、s45-14w と s55-14w の平均の値から予測した s50-14w の値も合わせて比較を行う。

(1) 材齢 28 日の細孔量の相違

開放面から 0-10mm 部分における 40nm 以上の細孔量を図-4.1 に示す。

水セメント比 45% で蒸気養生後気中保管したコンクリート s45-d と比較して、水セメント比を 5% 増加させた s50-d は 40nm 以上の細孔量が近い値であり、水セメント比を 5% 低減させた s40-d の 40nm 以上の細孔量が約 15% 減少した。また、蒸気養生後気中保管したコンクリート s45-d と比較して、水中養生した s45-14w においても、40nm 以上の細孔量が 15% 以上減少した。

なお、水中養生を行った s45-14w と s55-14w は、40nm 以上の細孔量の値が近かったが、s45-14w と s55-14w の平均の値から予測した s50-14w の値を参考にとると、s40-d よりも s50-14w はわずかに 40nm 以上の細孔量が多いと予想される。

以上のことから、s40-d と s45-14w の 40nm 以上の細孔量が等しく、s45-d と s50-d の 40nm 以上の細孔量が近い値であった。水セメント比 45% で蒸気養生後気中保管したコンクリート s45-d に対して、水セメント比の 5% 低減もしくは、水中養生を行うと、40nm 以上の細孔量が約 15% 減少するといえた。

(2) 促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数の検討

s40-d, s45-d, s50-d, s45-14w, s55-14w の促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数と、s50-14w の予測した中性化速度係数を図-4.2 に示す。

s45-d と s55-14w の中性化速度係数が同等であった。気中保管した s40-d, s45-d, s50-d を比較すると、水セメント比を 5% 低減することで、中性化速度係数が約 30% 低減した。また、水中養生した s45-14w, s55-14w を比較したところ、水セメント比を 10% 低減すると、中性化速度係数が 60% 減少した。

なお、水中養生した s45-14w と s55-14w の平均の値から予測した s50-14w の値を参考にとると、s40-d と s50-14w の中性化速度係数が同等と推測される。そのため、s40-d と s50-14w は 40nm 以上の細孔量と中性化速度係数がともに同等と推測されるともいえる。

以上のことから、蒸気養生コンクリートは、水セメント比を 5% 低減するたびに、中性化速度係数が約 30% 減少した。

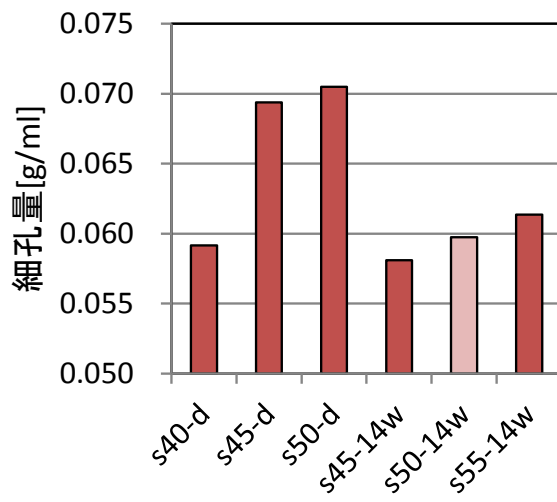


図-4.1 水セメント比の異なる蒸気養生コンクリートの細孔量

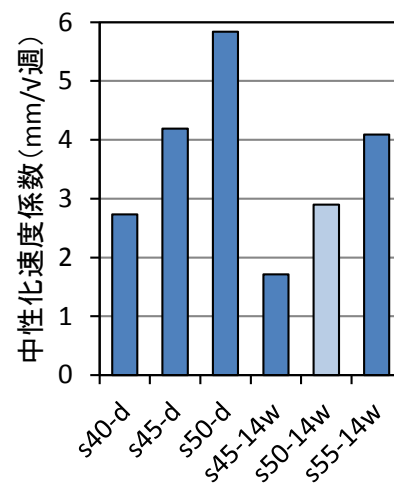


図-4.2 水セメント比の異なる蒸気養生コンクリートの中性化速度係数

4.2.2 蒸気養生コンクリートの二次養生条件が耐久性に与える影響

二回蒸気養生を行ったコンクリートの耐久性を考察するため、水セメント比 45%の蒸気養生コンクリートを中心として比較を行った。

比較する供試体は、水セメント比 45%で蒸気養生後に気中保管したコンクリート s45-d と、二回蒸気養生を行ったコンクリート s45-s1 および s45-s2 と、水セメント比 45, 55%で材齢 14 日まで水中養生を行い最も水分供給を受けた蒸気養生コンクリート s45-14w および s55-14w とする。

(1) 材齢 28 日の細孔量の相違

開放面から 0-10mm 部分における 40nm 以上の細孔量を図-4.3 に示す。

水セメント比 45%の蒸気養生コンクリート s45-d は、二回目の蒸気養生を行うことによって 40nm 以上の細孔量が約 10%減少し、材齢 14 日までの水中養生を行うことによって 40nm 以上の細孔量が約 15%減少した。

また、水セメント比 45%で気中保管した蒸気養生コンクリート s45-d より、水セメント比 55%で水中養生した蒸気養生コンクリート s55-14w の、40nm 以上の細孔量が少ないことから、水中養生が 40nm 以上の細孔量に与える影響の大きさが伺える。

すなわち、s45-s1 と s55-14w の 40nm 以上の細孔量が等しかった。水セメント比 45%の蒸気養生コンクリートは、二回目の蒸気養生によって約 10%細孔量が減少し、水中養生によって約 15%細孔量が減少するといえた。

(2) 促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数の検討

s45-d, s45-s1, s45-s2, s45-14w, s55-14w の促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数を図-4.4 に示す。

水セメント比 45%の蒸気養生コンクリート s45-d は、二回目の蒸気養生を行うことによって中性化速度係数が約 20%減少し、材齢 14 日までの水中養生を行うことによって中性化速度係数が約 60%減少した。

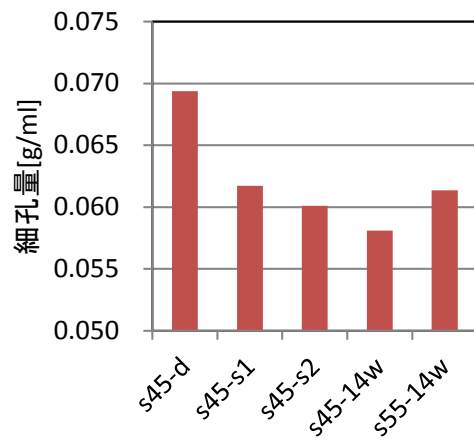


図-4.3 二回蒸気養生したコンクリートの細孔量

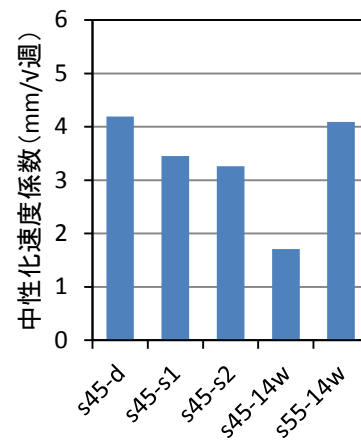


図-4.4 二回蒸気養生したコンクリートの中性化速度係数

4.3 現場打ち模擬コンクリートや標準養生コンクリートと同等の耐久性を持つ蒸気養生コンクリート

4.3.1 水セメント比が 55%の標準養生コンクリートとの比較

水セメント比 45, 55%のコンクリートについて、蒸気養生、現場打ち模擬、標準養生の 3 種類のコンクリートを比較した。また、水セメント比が 55%で材齢 28 日まで水中養生を行った、標準養生コンクリート n55 と、同等の耐久性を持つコンクリートを検討する。

比較する供試体は、水セメント比 45%で気中保管した蒸気養生コンクリート s45-d と、水セメント比 45, 55%で水中養生を行った蒸気養生コンクリート s45-14w, s55-14w と、水セメント比 45, 55%の現場打ち模擬コンクリート n45-5rd および n55-5rd とする。

(1) 材齢 28 日の細孔量の相違

開放面から 0-10mm 部分における 40nm 以上の細孔量を図-4.5 に示す。水セメント比 45%の水中養生を行った蒸気養生コンクリート s45-14w と、水セメント比 45%の現場打ち模擬コンクリート n45-5rd と、水セメント比 55%の標準養生コンクリート n55 は、総細孔量および 40nm 以上の細孔量がほぼ同等となった。

そのため、s45-14w と n45-5rd と n55 の 40nm 以上の細孔量が等しいといえた。そのため、水セメント比 55%の標準養生コンクリートの表層部と類似した細孔構造を、蒸気養生コンクリートに持たせるには、水セメント比を 10%低減させた上で水中養生を行う必要がある。

(2) 促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数の検討

促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数を図-4.6 に示す。水セメント比 45%の蒸気養生 s45-d と、水セメント比 55%で水中養生した蒸気養生 s55-14w と、水セメント比 55%の標準養生 n55 は中性化速度係数が同等であり、水セメント比 45%の現場打ち模擬コンクリート n45-5rd も近い値であった。

すなわち、水セメント比 55%の標準養生コンクリートと同等の中性化抵抗性を得るには、蒸気養生後材齢 14 日まで水中養生を行えばよい。なお、水中養生が行えない環境の場合は、水セメント比を 10%低減させる必要がある。

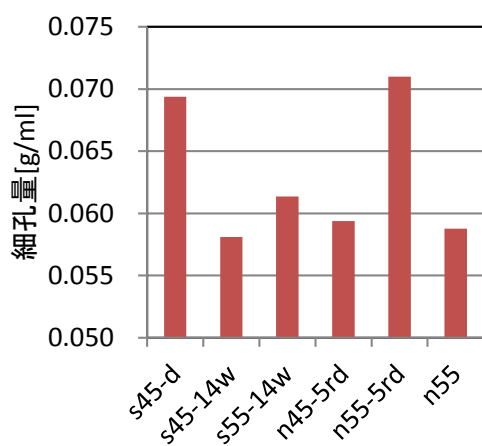


図-4.5 蒸気養生と現場打ち模擬と標準養生コンクリートの細孔量

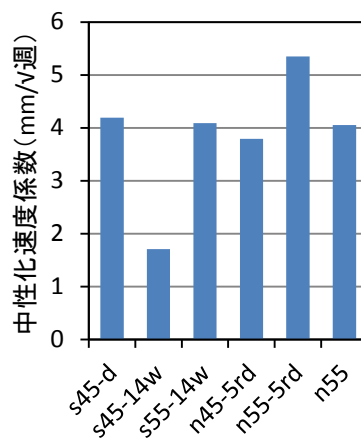


図-4.6 蒸気養生と現場打ち模擬と標準養生コンクリートの中性化速度係数

4.3.2 水セメント比が 55%の現場打ち模擬コンクリートとの比較

実際に現場で打設されるコンクリートは、水セメント比が 55%に近い値で作製されることが多いため、水セメント比が 55%の封かん養生を行った現場打ち模擬 n55-5rd と、同等の耐久性を持つ蒸気養生コンクリートを検討する。

(1) 材齢 28 日の細孔量の相違

開放面から 0-30mm 部分における総細孔量と、開放面から 0-10mm 部分における 40nm 以上の細孔量を図-4.7 に示す。

s45-d と s50-d と n55-5rd の 40nm 以上の細孔量が近い値であった。また、水セメント比 55%の現場打ち模擬コンクリート n55-5rd と近い細孔量の蒸気養生コンクリートは、水セメント比を 5%以上低減させた供試体であるが、細孔構造を更に緻密にするため、水中養生を行うことを推奨する。

(2) 促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数の検討

s45-d, s50-d, s55-14w, n55-5rd の促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数を図-4.8 に示す。水セメント比が 55%で封かん養生を行った現場打ち模擬コンクリート n55-5rd と比較すると、蒸気養生後に水中養生した s55-14w は中性化速度係数が低く、蒸気養生後に気中養生した s50-d は中性化速度係数が高かった。

水セメント比 55%の現場打ち模擬コンクリート n55-5rd より、水中養生をした蒸気養生コンクリート s55-14w の中性化速度係数が小さい。そのため、同一水セメント比で水中養生を行えば十分に中性化抵抗性が高くなると言える。なお、水中養生を行わずに同等の中性化速度係数をもたせるには、水セメント比を 6.5%以上低減させる必要があると推察される。

(3) 圧縮強度

s45-d, s50-d, s55-14w, n55-5rd の材齢 28 日の圧縮強度を図-4.9 に示す。蒸気養生後に気中保管したコンクリート s50-d と、蒸気養生後に水中養生したコンクリート s55-14w と、封かん養生を行った現場打ち模擬コンクリート n55-5rd の圧縮強度の値が近かった。また、蒸気養生後に気中保管したコンクリート s45-d の総細孔量が少ないことから、密な細孔構造であり、圧縮強度の増加に貢献していると言える。

以上のことから、水セメント比 55%の現場打ち模擬コンクリート n55-5rd と近い圧縮強度を持つ蒸気養生コンクリートは、同一水セメント比で水中養生を行うか、水セメント比を 5%以上低減させる必要があると推察される。

(4) 材齢 28 日における細孔径分布の傾向

材齢 28 日における深さ方向の細孔径分布を図-4.10 に示す。s45-d, s50-d, n55-5rd とともに、100nm-1 μ m の細孔量が多い。また、図-4.10(a)に示した、現場打ち模擬コンクリート n55-5rd は、表層部から内部に進むにつれて 100nm 以上の疎な細孔量が減少している。これは、水分の蒸発しない供試体内部において、水和反応が継続しているためと推察される。

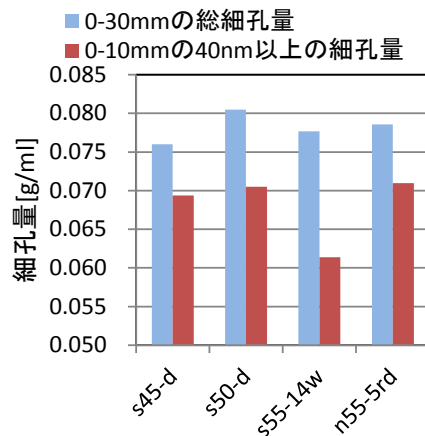


図-4.7 n55-5rd と近い耐久性を持つ供試体の細孔量

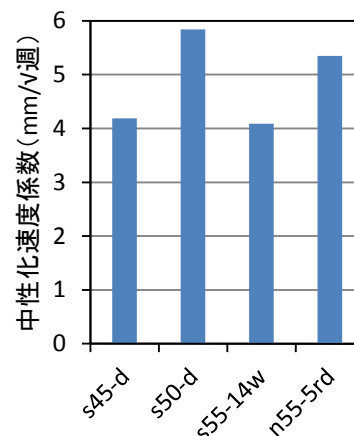


図-4.8 n55-5rd と近い耐久性を持つ供試体の中性化速度係数

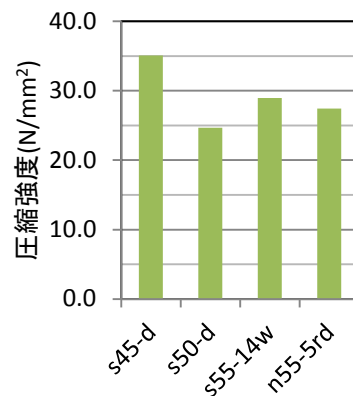
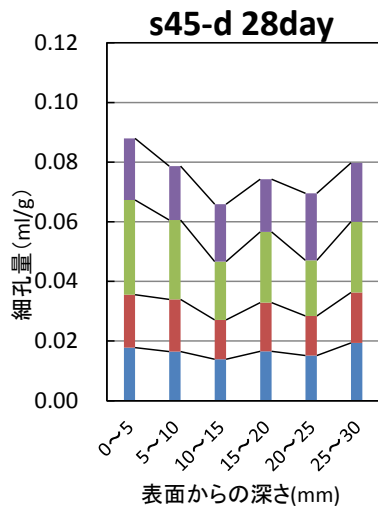
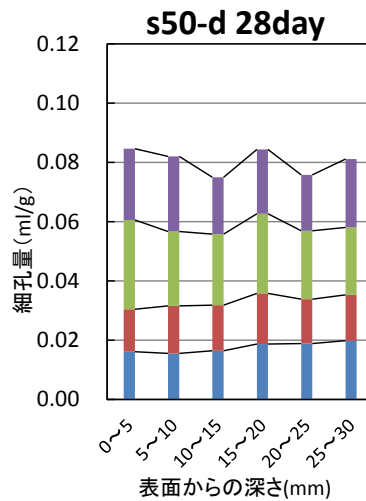


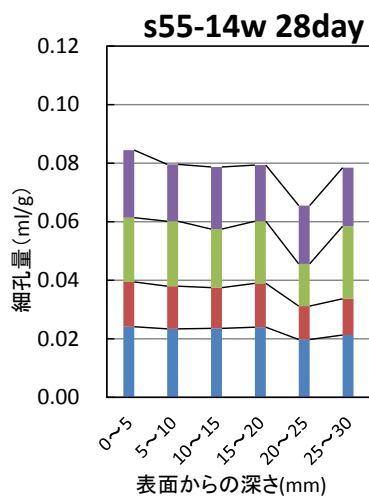
図-4.9 n55-5rd と近い耐久性を持つ供試体の圧縮強度



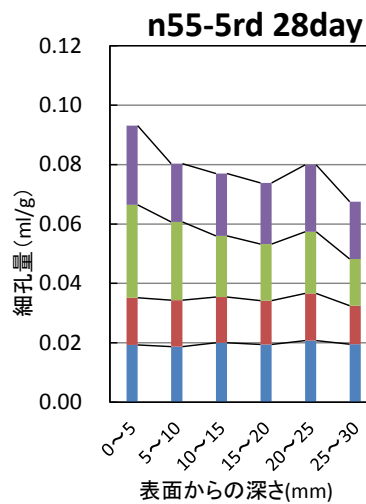
(a) 蒸気養生後に気中
保管したコンクリート (s45-d)



(b) 蒸気養生後に気中
保管したコンクリート (s50-d)



(c) 蒸気養生後に水中
養生したコンクリート (s55-14w)



(d) 封かん養生を行っ
た現場打ち模擬コン
クリート (n55-5rd)

図-4.10 n55-5rdに近い耐久性を持つ供試体の深さ方向の細孔径分布

4.3.3 水セメント比が45%の現場打ち模擬コンクリートとの比較

実際に現場で打設されるコンクリートは、水セメント比 55%に近い値で作製されることが多いが、水セメント比の変更の際に供試体の特性が変わる可能性が高い。そのため、水セメント比が 45%で封かん養生を行った現場打ち模擬コンクリート n45-5rd と、同等の耐久性を持つ蒸気養生コンクリートを検討する。

(1) 材齢 28 日の細孔量の相違

開放面から 0-10mm 部分における 40nm 以上の細孔量を図-4.11 に示す。水セメント比が 40%で蒸気養生後に気中保管した s40-d と、水セメント比が 45%で蒸気養生後に水中養生した s45-14w と、水セメント比が 45%の現場打ち模擬コンクリート n45-5rd は、細孔量が同等であった。水セメント比 45%の現場打ち模擬コンクリート n45-5rd と同等の細孔構造を、蒸気養生コンクリートにもたせるには、水中養生を行うか、水セメント比を 5%低減させるとよい。

(2) 促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数の検討

s40-d, s45-14w, s55-14w, n45-5rd の促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数を図-4.12 に示す。水セメント比 45%の現場打ち模擬コンクリート n45-5rd は、水セメント比が 55%で蒸気養生後に水中養生した s55-14w、よりやや小さい中性化速度係数であった。

(3) 材齢 28 日における細孔径分布の傾向

材齢 28 日における深さ方向の細孔径分布を図-4.13(a), (b), (c), (d) に示す。図-4.13(b)に示した s45-14w は、他の供試体と比較して 50nm 以上のいずれの径の細孔量が少ない。このため、緻密な細孔構造となり、中性化抵抗性が高いと言える。

また、図-4.13(a), (d)に示した s40-d および n45-5rd の細孔径分布は、両者とも深さ方向に均一であった。これらは水セメント比が低いため緻密な細孔構造が構成されたが、水分供給が少なかったため 10-30mm の内部の細孔量は減少せず、0-10mm の表層部と同等の細孔量となったためと考えられる。

図-4.13(b), (c)に示した s45-14w および s55-14w の細孔径分布は、表層部から内部に進むにつれて細孔量が減少している。これは、水分の蒸発しない 10-30mm の供試体内部において、水和反応が継続しているためと推察される。

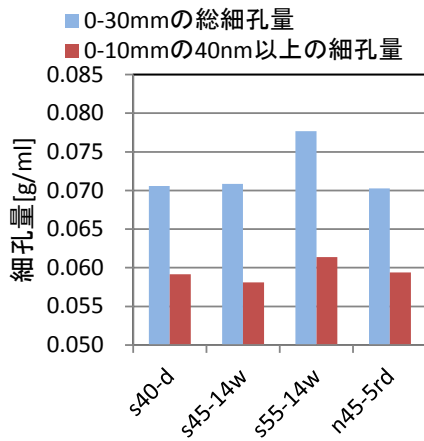


図-4.11 n45-5rd と近い耐久性を持つ供試体の細孔量

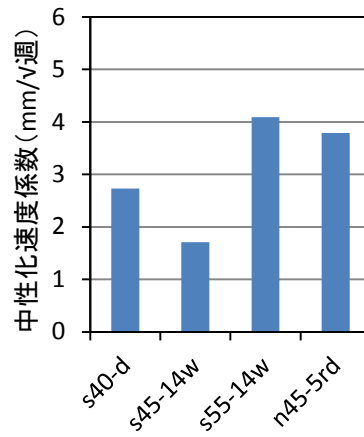
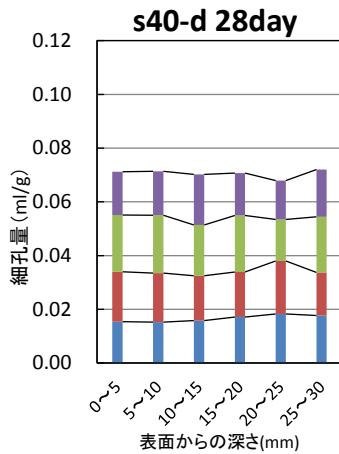
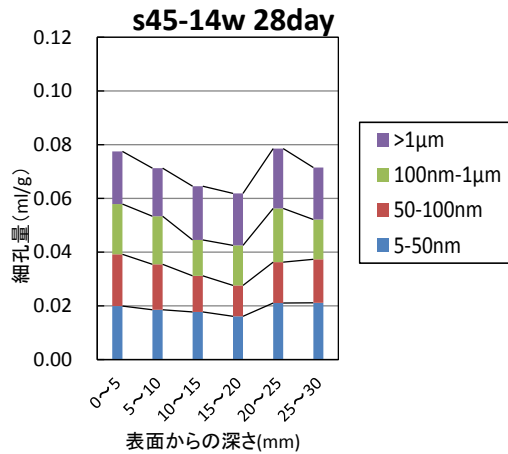


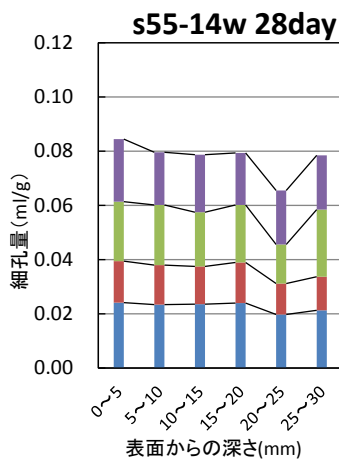
図-4.12 n45-5rd と近い耐久性を持つ供試体の中性化深さ



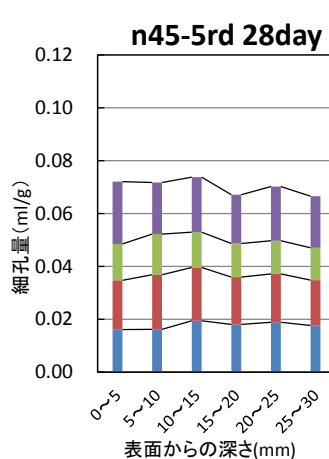
(a) s40-d



(b) s45-14w



(c) s55-14w



(d) n45-5rd

図-4.13 n55-5rd に近い耐久性を持つ供試体の深さ方向の細孔径分布

4.4 まとめ

第4章において、材齢28日の40nm以上の細孔量と材齢28日の細孔量と促進材齢16週時点で算出された中性化速度係数に注目して、蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートおよび標準養生コンクリートを比較検討したところ、以下のことが明らかとなった。

(1) 40nm以上の細孔量

s40-dとs45-14wの40nm以上の細孔量が等しく、s45-dとs50-dの40nm以上の細孔量が等しかった。水セメント比45%で蒸気養生後気中保管したコンクリートs45-dに対して、水セメント比の5%低減もしくは、水中養生を行うと、40nm以上の細孔量が約15%減少するといえた。

s45-s1とs55-14wの40nm以上の細孔量が等しかった。水セメント比45%の蒸気養生コンクリートは、二回目の蒸気養生によって約10%細孔量が減少し、水中養生によって約15%細孔量が減少した。

s45-14wとn45-5rdとn55の40nm以上の細孔量が等しいといえた。そのため、水セメント比55%の標準養生コンクリートの表層部と類似した細孔構造を、蒸気養生コンクリートに持たせるには、水セメント比を10%低減させた上で水中養生を行う必要がある。

s45-dとs50-dとn55-5rdの40nm以上の細孔量が近い値であった。水セメント比55%の現場打ち模擬コンクリートn55-5rdと近い細孔量の蒸気養生コンクリートは、水セメント比を5%以上低減させた供試体であるが、細孔構造を更に緻密にするため、水中養生を行うことを推奨する。

s40-dとs45-14wとn45-5rdの40nm以上の細孔量が等しいといえた。実際に現場で主に作製される水セメント比ではないが、水セメント比45%の現場打ち模擬コンクリートn45-5rdと近い細孔量の蒸気養生コンクリートとしては、同一水セメント比で水中養生を行えばよい。なお、水中養生が行えない環境の場合の代替案としては、水セメント比の5%低減が挙げられる。

(2) 中性化速度係数

蒸気養生コンクリートは、水セメント比を5%低減するたびに、中性化速度係数が約30%減少することがわかった。

水セメント比45%の蒸気養生コンクリートは、二回目の蒸気養生により中性化速度係数が約20%減少し、水中養生により中性化速度係数が約60%減少した。

s40-dとs50-14wは40nm以上の細孔量と中性化速度係数がともに同等と推測された。

水セメント比 55%の標準養生コンクリートと同等の中性化抵抗性を得るには、蒸気養生後材齢 14 日まで水中養生を行えばよい。なお、水中養生が行えない環境の場合は、水セメント比を 10%低減させる必要がある。

水セメント比 55%の現場打ち模擬コンクリート n55-5rd より、水中養生をした蒸気養生コンクリート s55-14w の中性化速度係数が小さい。そのため、同一水セメント比で水中養生を行えば十分に中性化抵抗性が高くなると言える。なお、水中養生を行わずに同等の中性化速度係数をもたせるには、水セメント比を 6.5%以上低減させる必要があると推察される。

第 5 章

蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬
コンクリートの塩化物イオン透過性状

5.1 概要

海洋環境下にある鉄筋コンクリート構造物では、コンクリート中に塩化物イオンが浸透し、鉄筋を腐食させ、耐久性の低下をもたらすことが懸念される。この塩害による耐久性の低下は、蒸気養生が実施されるプレキャストコンクリートにおいても例外ではない。コンクリート中への塩化物イオンの浸透性を定量化し、耐久設計に反映させることが重要である。そこで第 5 章では、蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの塩化物イオン分布を暴露試験によって把握し、塩化物イオンの拡散係数をもとに塩化物透過性状を検討する。

関ら¹⁾によって打設され 5 年間暴露された水セメント比 40%、50%の試験体（100mm×100mm×400mm の角柱供試体）計 3 体と、佐々木ら²⁾によって打設され 2 年間暴露された水セメント比 35%、45%の試験体（100mm×100mm×400mm の角柱供試体）計 4 体を測定した。なお、暴露環境は飛来塩分量が多い伊豆海洋公園内の暴露場とした。5 年間暴露された供試体は、水セメント比 40%、50%の試験体の暴露材齢 1 年、2 年における結果と合わせて比較検討を行う。

5.2 配合

関らによって打設され 5 年間暴露された供試体の名称を c1、佐々木らによって打設され 2 年間暴露された供試体を c2 とする。

5.2.1 使用材料

(1) 暴露材齢 5 年のコンクリート c1 の使用材料

表-5.1 に、暴露材齢 5 年のコンクリートの使用材料を示す。結合材には普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には砕砂（密度 2.62 g/cm^3 ）を、粗骨材には碎石 2005（密度 2.62 g/cm^3 ）を用いた。高性能減水剤には BASF ポゾリス社製レオビルド 8000ss、AE 助剤として BASF ポゾリス社製マイクロエア 202 を使用した。

表-5.1 暴露材齢 5 年のコンクリート c1 の使用材料

項目	品質
結合材	普通ポルトランドセメント,密度 3.16 g/cm^3
細骨材	砕砂、表乾密度 2.62 g/cm^3
粗骨材	碎石 2005、表乾密度 2.62 g/cm^3
混和剤	高性能減水剤(WR):ポリカルボン酸エーテル系
	AE 剤(AE):変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

(2) 暴露材齢 2 年のコンクリート c2 の使用材料

表-5.2 に、暴露材齢 2 年のコンクリートの使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメント(3.16g/cm^3)を、細骨材に砕砂(表乾密度 2.62g/cm^3)、粗骨材に碎石(表乾密度 2.66g/cm^3)を使用した。また、混和剤には、AE 減水剤に BASF ポゾリス社製のポリヒード 2000 (主成分:ポリカルボン酸エーテル系) を、AE 助剤に BASF ポゾリス社製のマイクロエア 101 (主成分:アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤) を用いた。

表-5.2 暴露材齢 2 年のコンクリート c2 の使用材料

項目	品質
セメント	普通ポルトランドセメント,密度 3.16g/cm^3
細骨材	砕砂、表乾密度 2.62g/cm^3
粗骨材	碎石、表乾密度 2.66g/cm^3
混和剤	AE 減水剤:ポリカルボン酸エーテル系
	AE 剤:アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

5.2.2 コンクリートの配合

暴露材齢 5 年のコンクリート c1 の配合を表-5.3 に、暴露材齢 2 年のコンクリート c2 の配合を表-5.4 に示す。

表-5.3 暴露材齢 5 年のコンクリート c1 の配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				高性能 減水剤 WR	AE剤 AE
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
40	43	170	425	733	971	1.70	0.02
50	44	170	340	781	994	1.36	0.02

表-5.4 暴露材齢 2 年のコンクリート c2 の配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				AE減水 剤	AE助剤
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
35	46	165	471	774	921	5.65	0.01
45			367	813	968	3.67	0.01

5.3 養生条件

5.3.1 養生条件および養生期間

図-5.1 に養生条件および養生期間を、表-5.5 に c1 の供試体諸元を、表-5.6 に c2 の供試体諸元を示す。所定の蒸気養生を行ったプレキャストコンクリートは、材齢約 24 時間の時点にて脱型し、20℃、60%R.H.の恒温恒湿室内にて、気中保管を行った。

現場打ち模擬コンクリートについては、コンクリート標準示方書【施工編】より、日平均 15℃以上で、普通ポルトランドセメントを用いた場合、5 日間の湿潤養生が標準日数とされている¹⁾ことを参考に、コンクリートの打設後、コンクリート内外において水分の移動が無いよう、養生を行った。

暴露材齢 5 年のコンクリート c1 は、防湿袋を用いて型枠上面を密閉し、20℃、60%R.H.の恒温恒湿室内にて封かん養生し、材齢 5 日の時点で脱型した。また、暴露材齢 2 年のコンクリート c2 は、脱型後、20℃の養生槽にて材齢 5 日まで水中養生を行った。脱型後は、蒸気養生を行ったプレキャストコンクリートと同様に、20℃、60%R.H.の恒温恒湿室内にて保管し、材齢 91 日の時点で屋外暴露を実施した。

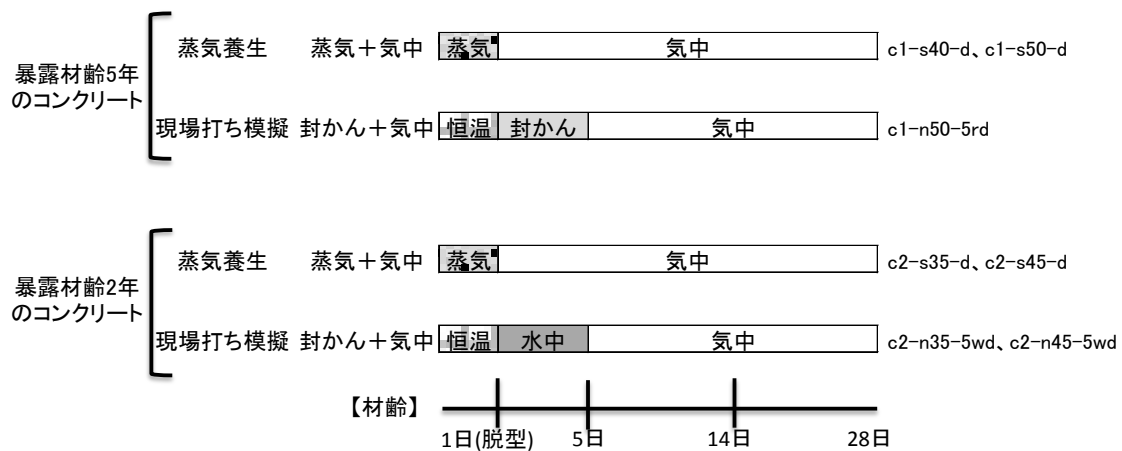


図-5.1 供試体の養生条件(Dcの把握)

表-5.5 c1の供試体諸元

種類	養生条件		W/C(%)	記号
	一次養生	二次養生		
促進養生	蒸気養生(s)	気中 (d)	40	c1-s40-d
			50	c1-s50-d
現場打ち模擬(n)	封緘(5日間)→気中 (rd)		50	c1-n50-5rd
蒸気養生(前置2h、昇温15℃/h)				

表-5.6 c2の供試体諸元

種類	養生条件		W/C(%)	記号
	一次養生	二次養生		
促進養生	蒸気養生 (s)	気中 (d)	35	c2-s35-d
			45	c2-s45-d
現場打ち模擬(n)	水中養生(5日間)→気中 (wd)		35	c2-n35-5wd
			45	c2-n45-5wd
蒸気養生(前置3h、昇温20℃/h)				

5.3.2 蒸気養生条件

c1 の蒸気養生条件は、図-5.2 に示すような 1 サイクル約 14 時間のパターンとした。温度履歴は、練上がり温度 30℃、前置き時間 2 時間、昇温速度 15℃/h、最高温度 65℃、最高温度保持時間 3 時間、温度降下 5℃/h の条件とした。

また、c2 の蒸気養生条件は、図-5.3 に示すような 1 サイクル約 13 時間のパターンとした。温度履歴は、練上がり温度 25℃、前置き時間 3 時間、昇温速度 20℃/h、最高温度 65℃、最高温度保持時間 3 時間、温度降下 5℃/h の条件とした。

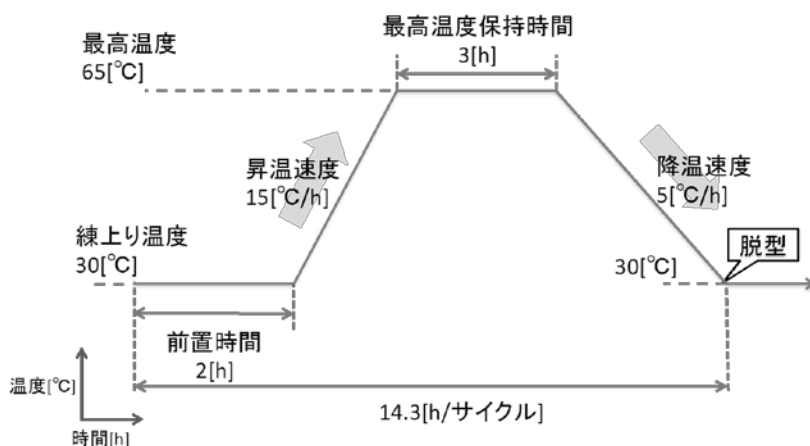


図-5.2 c1 の蒸気養生条件

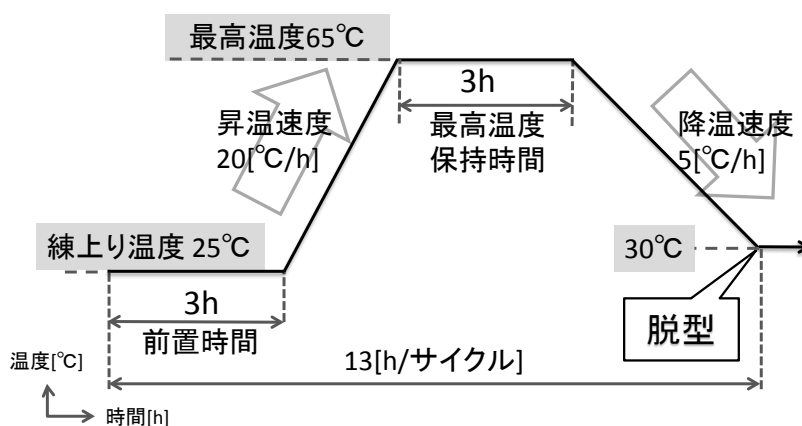


図-5.3 c2 の蒸気養生条件

5.4 試験項目

5.4.1 フレッシュ試験

練り上がったコンクリートに対して、JIS A 1101 もしくは JIS A 1150、JIS A 1128 および JIS A 1156 に従い、スランプ試験もしくはスランプフロー試験、空気量測定試験および練上がり温度の測定を行い、コンクリートのフレッシュ性状を把握した。

5.4.2 細孔径分布測定試験

塩化物イオンの浸透には、コンクリートの細孔構造が影響していると考えられることから、そこで、c1 に細孔径分布測定試験を行った。供試体は、細孔径分布測定試験用に、各養生条件に対して $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を 1 本用意し、所定の養生を行い、材齢 56 日における供試体から試料を採取した。

所定の材齢において、コンクリート円柱供試体の鉛直中央付近をコンクリートカッターで切断し、ニッパにより 2.5mm 以上 5mm 以下のモルタル粒子を採取し、24 時間以上アセトンに浸漬することで水和を停止させた。その後、真空状態で 7 日間以上乾燥させ、細骨材が含まれていない粒子を選定して試験試料とした。試験は、水銀圧入式ポロシメーター（SIMADZU 自動ポロシメーター）を用いて細孔直径および細孔容積を測定した。なお、この試験は、暴露開始前の 2009 年に関ら²⁾によって行われたものである。

5.4.3 塩化物イオン分布測定

塩化物イオン分布を測定するため、対象となるコンクリートの海洋環境への暴露を実施した。c1 の暴露にあたっては、打設側面を除く 5 面をエポキシ樹脂でコーティングし、一面からの浸透とすることで、より塩化物イオンの影響を把握しやすくした。また、供試体設置場所は静岡県伊東市の海岸にある伊豆海洋公園内の暴露場とした。供試体の暴露の状況を表-5.7、図-5.4～7 および写真-5.1～3 に示す。

c1 の供試体に対し、JIS A 1154 付属書 1 に従い、図-5.4 に示すように、φ60mm 程度のコンクリートコアを採取し、図-5.5 に示すように、乾式のコンクリートカッターを用いてスライスを行い、分析用の円盤型コンクリート試験片を切り出した。また、c2 の供試体に対し、図-5.6 に示すように、40×60mm のプリズムを採取し、図-5.7 に示すように、乾式のコンクリートカッターを用いてスライスを行い、分析用の直方体型コンクリート試験片を切り出した。スライスの間隔は、浸透面から 10mm ごとで 70mm までとし、そのうち、0～10mm、10～20mm、20～30mm、40～50mm および 60～70mm の 5 か所の試験片を用いることとした。この試験片を 0.15mm 以下に微粉碎し、調整したものを分析用試料とした。

JIS A 1154 の塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法に従い、全塩化物イオン分布を測定した。c1 の測定材齢は、暴露材齢 5 年であり、暴露材齢 1 年と 2 年においても測定を行っている。c2 の測定材齢は、暴露材齢 2 年である。

表-5.7 供試体の設置情報

供試体設置場所	伊豆海洋公園 (静岡県伊東市富戸841-1)	
供試体作成日	記載名	資料の採取法
2009/11/11設置 打設者関	c1-s40-d	図-5.4,5のφ60のコ ア抜き
	c1-s50-d	
	c1-n50-5rd	
2012/10/18打設 2012/12/12設置 打設者佐々木	c2-s35-d	図-5.6,7の40*60mm のプリズム
	c2-s45-d	
	c2-n35-5wd	
	c2-n45-5wd	

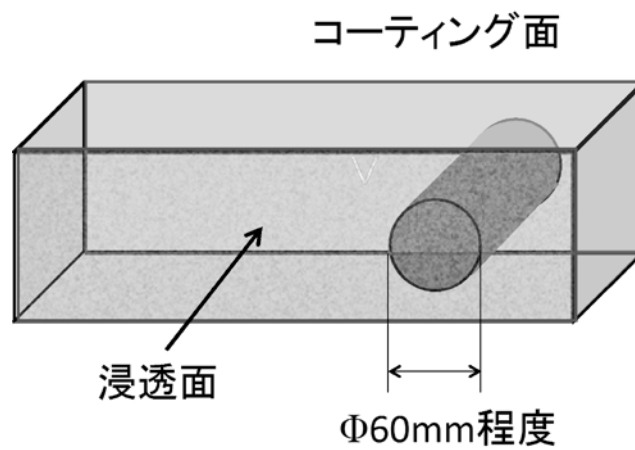


図-5.4 コンクリートコアの採取

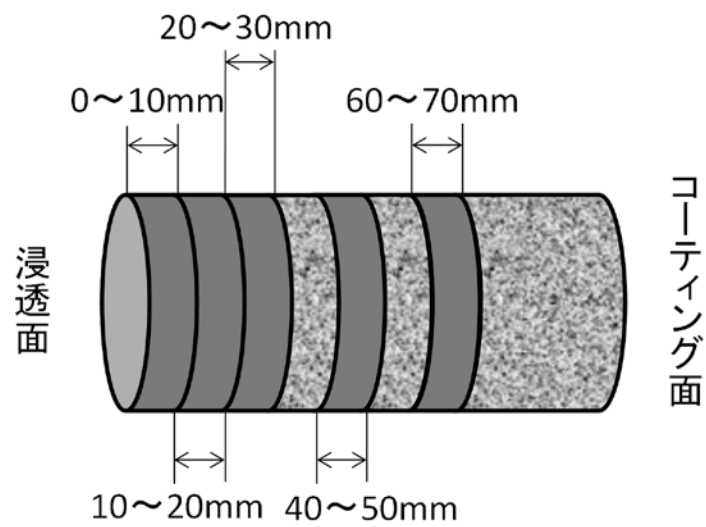


図-5.5 スライス箇所と塩分測定位置

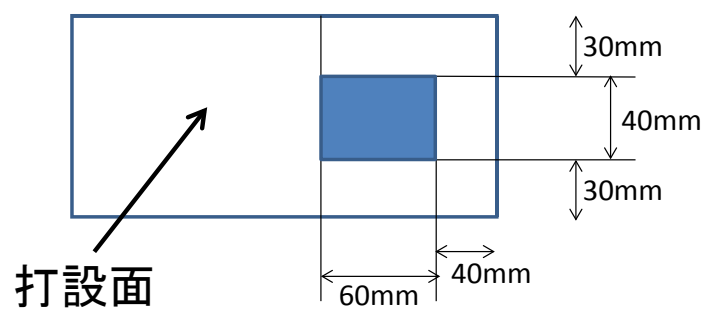


図-5.6 プリズムの採取

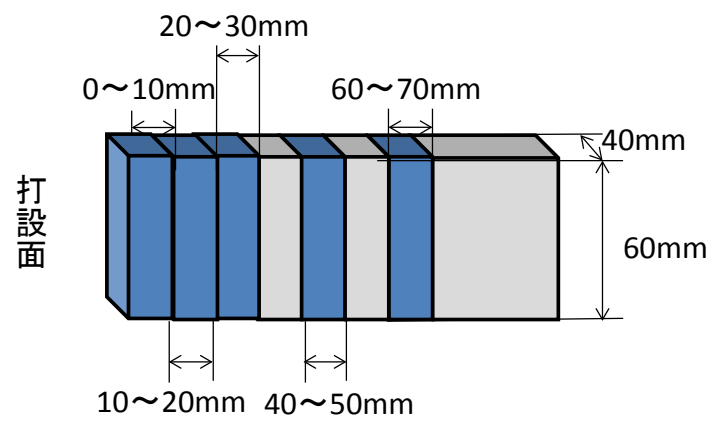


図-5.7 c2のスライス箇所と塩分測定位置



写真-5.1 供試体設置状況 01



写真-5.2 供試体設置状況 02

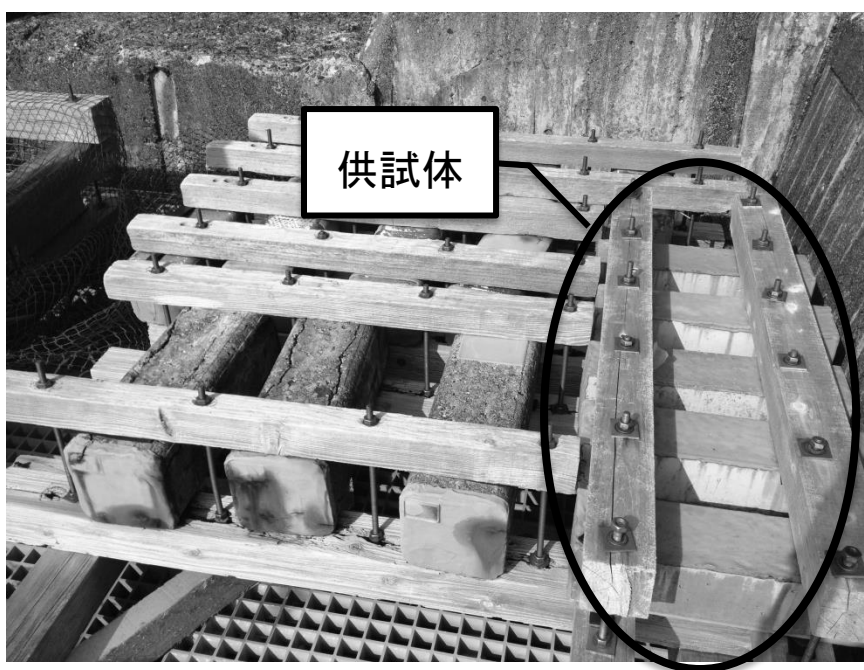


写真-5.3 供試体設置状況 03

5.5 コンクリートのフレッシュ性状

フレッシュコンクリートのスランプもしくはスランプフロー試験、空気量試験、および練上がり温度の測定結果を表-5.5に示す。OPC-30%は高流動コンクリートであり、スランプフローによって管理している。

表-5.5 c1 のフレッシュ性状

W/C(%)	練上がり温度	スランプ	空気量
40	29.1℃	10.5cm	4.7%
50	27.3℃	9.5cm	4.4%

表-5.5 c2 のフレッシュ性状

W/C(%)	練上がり温度	スランプ	空気量
35	21.5℃	9.0cm	3.6%
45	21.0℃	9.0cm	5.3%

5.6 コンクリートの細孔構造の比較

細孔径分布測定による、c1 の材齢 56 日の各養生条件の細孔構造を図-5.9 に示す。蒸気養生コンクリートに着目すると、水セメント比が大きくなるにしたがって、細孔量が多く、細孔量に対して大きい径の細孔が占める割合が大きくなっており、疎な組織構造であることがわかる。

養生条件による細孔構造の相違に関して考察する。水セメント比 40%の蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートに着目すると、細孔構造は現場打ち模擬コンクリートのほうが疎な構造であることがわかる。本論文の第 4 章より、同一水セメント比である水セメント比 45%の蒸気養生後気中保管した s45-d と封緘養生した現場打ち模擬コンクリート n45-5rd の組織構造は、現場打ち模擬コンクリートの細孔量が少なく密であることが示され、これに矛盾している。一方、水セメント比 50%の蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートについては、水セメント比 40%の場合とは異なり、蒸気養生コンクリートの総細孔量が多く、疎な組織構造であることがわかる。

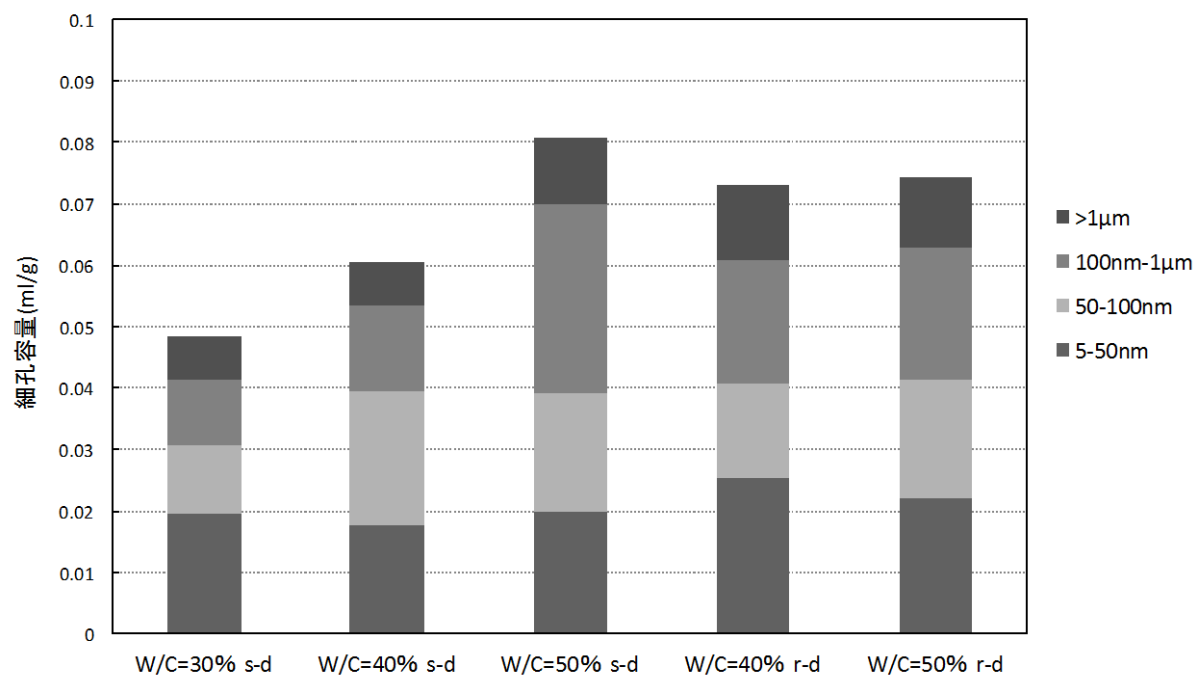


図-5.9 細孔構造の比較

5.7 c1 の塩化物イオン透過性状

5.7.1 全塩化物イオン量の分布

供試体 c1 に暴露材齢 1 年、2 年、5 年時において、塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法を行った。得られた c1 の全塩化物イオン量を浸透面からの深さごとに表-5.6 に示す。

表-5.6 c1 の塩化物イオン量分布

		材齢1年		
		c1-s40-d	c1-s50-d	c1-n50-5rd
全塩化物イオン量 (kg/m ³)	0～10mm	6.460	5.748	7.655
	10～20mm	1.862	2.322	1.897
	20～30mm	0.161	0.299	0.023
	40～50mm	0.046	0.207	0.069
	60～70mm	0.046	0.046	0.046
		材齢2年		
		c1-s40-d	c1-s50-d	c1-n50-5rd
全塩化物イオン量 (kg/m ³)	0～10mm	5.035	5.347	5.073
	10～20mm	1.195	3.062	2.194
	20～30mm	0.230	0.823	0.663
	40～50mm	0.184	0.183	0.160
	60～70mm	0.253	0.206	0.160
今年度測定		材齢5年		
		c1-s40-d	c1-s50-d	c1-n50-5rd
全塩化物イオン量 (kg/m ³)	0～10mm	7.541	4.821	5.667
	10～20mm	3.035	3.359	3.405
	20～30mm	0.345	1.919	1.897
	40～50mm	0.115	0.388	0.160
	60～70mm	0.069	0.343	0.114

c1 の材齢 5 年の塩化物イオン分布を図-5.10 に示す。

図より、水セメント 40% の蒸気養生コンクリート c1-s40-d の塩化物イオン量は、コンクリート表層部の 0～10mm の範囲において、c1-s50-d より約 50% 塩化物イオン量の値が多く、10～20mm の範囲において、c1-s50-d と塩化物イオン量の値が同等であり、20～30mm の範囲は塩化物イオン量が $0.16(\text{kg}/\text{m}^3)$ と微量ながら検出された。水セメント比が低くなると、コンクリート内部にかけての塩化物イオン量の下がり幅が大きく、浸透しにくいことがわかる。

水セメント比 50% の蒸気養生コンクリート c1-s50-d と、現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd の、塩化物イオン量の差は少なかった。なお、コンクリート表層部の 40～50mm と 60～70mm の範囲において、水セメント比 50% の蒸気養生コンクリート c1-s50-d は、現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd より、わずかに塩化物イオン量の値が多かった。また、現場打ち模擬コンクリートは、蒸気養生コンクリートより、コンクリート表層部の 0～10mm の範囲において、コンクリート内部にかけての塩化物イオン量の下がり幅が大きかった。

寺川ら³⁾の暴露材齢 2 年の試験結果においては、水セメント比によって、現場打ち模擬コンクリートと蒸気養生コンクリートの塩化物イオン量の値に多少の差があったが、暴露材齢 5 年の本研究では、水セメント比 50% の現場打ち模擬コンクリートと蒸気養生コンクリートの塩化物イオン量の傾向はほぼ同等となった。

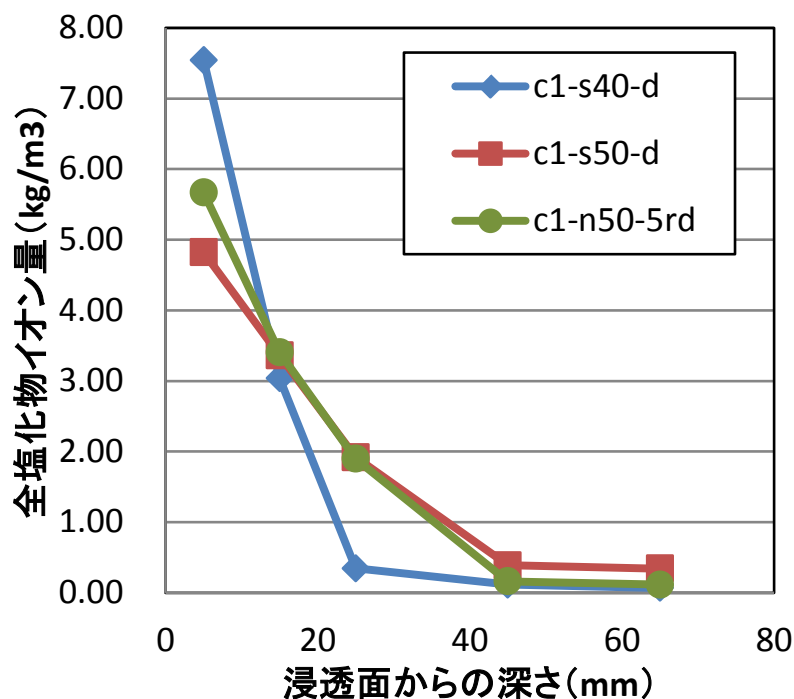


図-5.10 c1 の材齢 5 年の塩化物イオン量分布

5.7.2 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

材齢進行に伴い蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数に変化が見られたため、見掛けの拡散係数と予測値に着目する。

本項目では、得られた全塩化物イオン分布から、式 5-1 に示すフィックの第 2 法則に基づく拡散方程式の解を用い、回帰分析により、見掛けの拡散係数を算出する⁴⁾。式 5-1 に基づく、独立行政法人土木研究所が公開する【コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート】を使用し、分析を行った。また、次項目では、配合から拡散係数を予測する。

ここで表記されている、見掛けの拡散係数とは、塩化物イオンがコンクリート内の細孔溶液中で固定化をとめないながら濃度勾配を駆動力として移動すると見なしたとき、すべての塩化物イオンを対象として拡散の速さを規定する係数⁵⁾のことである。

表面塩化物イオン量とは、構造物のごく表層部に位置するコンクリートに含まれている塩化物イオンの濃度を表す係数である。この値が小さいと、外部からの塩分の供給が少なくなるので、コンクリート内部の塩化物イオン量が全体的に低下する。

また、初期塩化物イオン量とは、コンクリート中に当初から(フレッシュコンクリートの時から)含まれていたと考えられる塩化物イオンの量であり、暴露材齢 1 年における測定結果⁶⁾から、初期塩化物イオン量は 0.05kg/m^3 とみなせる。

$$C(x,t) - C_i = C_{0s} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{aps} \cdot t}} \right) \right\} \quad \text{式 5-1}$$

ここに、 x : 暴露面から塩化物イオン量を測定した箇所までの距離(cm)

t : 供用(暴露)期間(年)

$C(x,t)$: 距離 x (cm)、供用期間 t (年)において測定された塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_{0s} : 表面塩化物イオン量(kg/m^3)

C_i : 初期塩化物イオン量(kg/m^3)

D_{aps} : 見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

erf : 誤差関数

$$\text{ただし、} \operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$$

(1) 供試体毎の拡散係数の比較

回帰分析による、見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン量の結果一覧を表-5.7に、各養生条件の見掛けの拡散係数を図-5.11に示す。

図より、水セメント比の低下に伴って、見掛けの拡散係数が小さくなっており、塩化物イオンが浸透しにくいことがわかる。水セメント比の違いによる見掛けの拡散係数の相違について着目すると、水セメント比 50%の拡散係数は、蒸気養生コンクリートにおいては水セメント比 40%の約 5 倍の値を示している。また、水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリートは、蒸気養生コンクリートより、見掛けの拡散係数の値がやや小さく、コンクリートの塩化物イオンの耐浸透性が高いといえる。

プレキャストコンクリート製品は、部材として必要とされる強度のほか、脱型時の強度にも注意が払われる。プレキャストコンクリート製品は、脱型時強度を適切に確保するため、一般に、現場打ち模擬コンクリートよりも水セメント比が小さくなる傾向にある。水セメント比 40%の蒸気養生コンクリート c1-s40-d と、水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd の見掛けの拡散係数を比較すると、水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリートの拡散係数は、水セメント比 40%の蒸気養生コンクリートの約 4.5 倍の値となっている。

表-5.7 より、水セメント比 40%の蒸気養生コンクリート c1-s40-d の表面塩化物イオン量の値は大きいですが、見掛けの拡散係数の値は小さいため、塩化物イオンの耐浸透性は、水セメント比 40%の蒸気養生コンクリートのほうが、水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリートより高いことが示された。このことから、蒸気養生コンクリートの水セメント比を 10%程度低減させることで、塩化物イオンの耐透過性が現場打ち模擬コンクリートより高くなることが明らかとなった。

表-5.7 c1 の回帰分析結果

材 齢	記 号	見掛けの 拡散係数 $D_c(\text{cm}^2/\text{年})$	表面塩化物 イオン量 $C_o(\text{kg}/\text{m}^3)$	初期塩化物 イオン量 $C_i(\text{kg}/\text{m}^3)$
1年	cl-s40-d	0.61	9.72	0.05
	cl-s50-d	1.5	7.92	0.05
	cl-n50-5rd	0.52	11.97	0.05
2年	cl-s40-d	0.28	7.72	0.05
	cl-s50-d	0.81	6.35	0.05
	cl-n50-5rd	0.53	6.81	0.05
5年	cl-s40-d	0.11	11.5	0.07
	cl-s50-d	0.55	5.5	0.3
	cl-n50-5rd	0.5	6.8	0.09

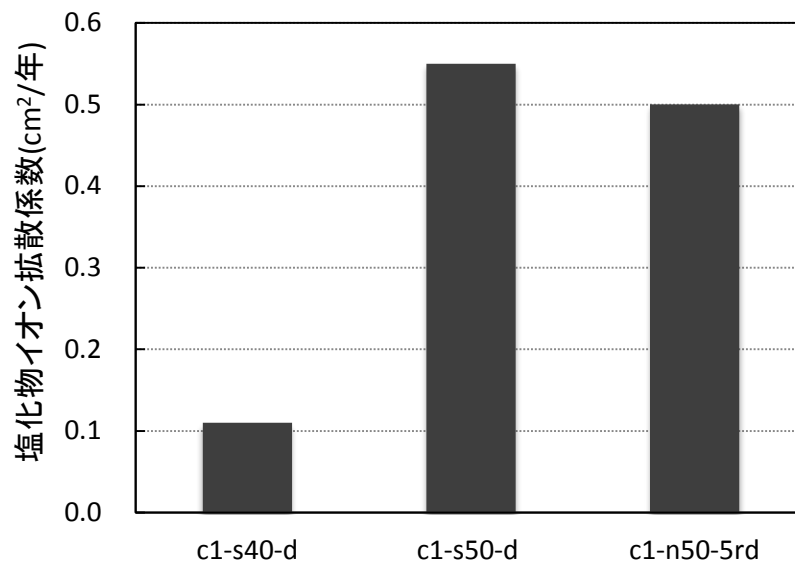


図-5.11 見掛けの拡散係数の比較(暴露材齢 5 年)

(2) 実験結果と水セメント比による回帰分析結果の比較

コンクリート標準示方書には、コンクリートの使用材料、配合により拡散係数を予測する式の一例として、式 5-2 の回帰式が示されている⁷⁾。なお、式 5-2 は水セメント比による、普通ポルトランドセメントを使用した場合の回帰式である。

$$\log_{10} D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad \text{式 5-2}$$

ここに、

D_p : 見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

図-5.12 に、実験より得た各養生条件の見掛けの拡散係数と式 5-2 により算出した塩化物イオン拡散係数の予測値を示す。図より、いずれの条件においても、実験から得た見掛けの拡散係数の値は、水セメント比による予測値を大きく下回っており、予測値の 20～30% の値となった。

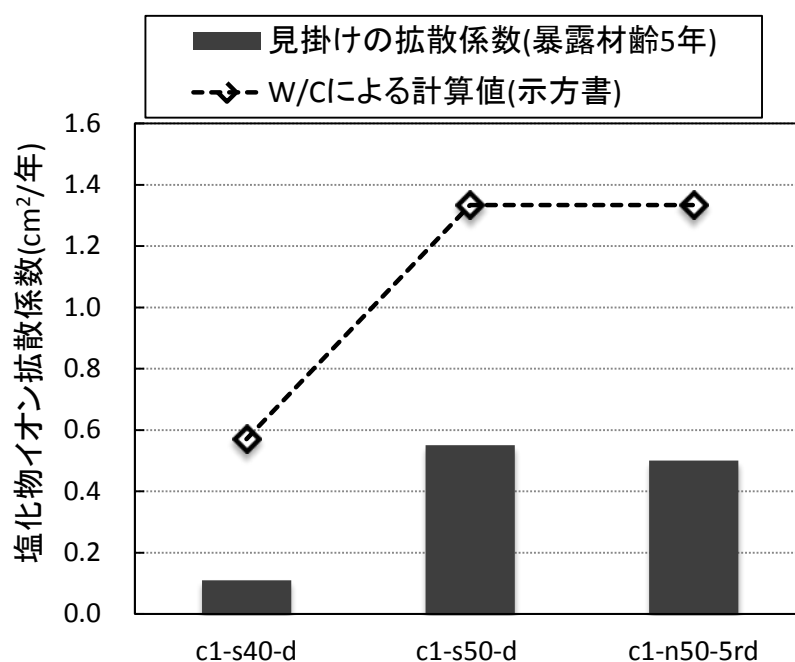


図-5.12 示方書による c1 の拡散係数の計算値と実測値の比較

(3) 暴露材齢の進行に伴う拡散係数の変化

図-5.13 に、暴露材齢 1 年⁶⁾および 2 年³⁾における各条件の塩化物イオンの拡散係数を示す。水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd の見掛けの拡散係数は材齢進行に関わらず一定だが、蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数は暴露材齢の進行に伴い減少している。これは、既往の研究⁸⁾における傾向と一致している。

暴露材齢 1 年および 2 年において、水セメント比 50%の蒸気養生コンクリート c1-s50-d は、水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd より、拡散係数の値が大きかったが、暴露材齢の進行に伴い拡散係数が減少した結果、暴露材齢 5 年における見掛けの拡散係数は、両者ともほぼ同等となった。

すなわち、蒸気養生コンクリートは現場打ち模擬コンクリートより塩化物イオンの拡散係数が大きかったが、材齢進行に伴い蒸気養生コンクリートの塩化物イオン見掛けの拡散係数が減少することが伺われた。材齢 1 年と材齢 5 年の塩化物イオン拡散係数を比較すると、15～35%に減少していることが分かる。また、材齢進行に伴い減少した水セメント比 50%の蒸気養生コンクリート c1-s50-d の見掛けの拡散係数は、水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd の見掛けの拡散係数に近い値となった。

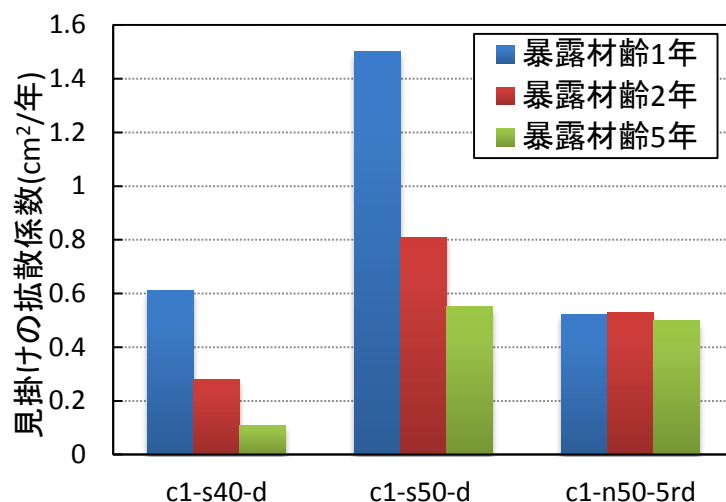


図-5.13 暴露材齢の進行に伴う拡散係数の変化

5.7.3 塩化物イオンの見掛けの拡散係数と細孔構造の関係

塩化物イオンの浸透には、コンクリートの細孔構造が影響していると考えられる。既往の研究⁹⁾より、50nm～2 μ mの細孔量と塩化物イオン拡散係数との間には相関性があると考えられることから、図-5.14に見掛けの拡散係数と細孔径分布測定試験によって得られた細孔量との関係を示す。寺川ら³⁾の研究においては、見掛けの拡散係数と細孔量との間に概ね相関性があるといわれていたが、本研究の図からは相関性があるとはいえなかった。なお、総細孔量その他、50nm以上の細孔量と40nm以上の細孔量においても調べたが、結果は同じであった。

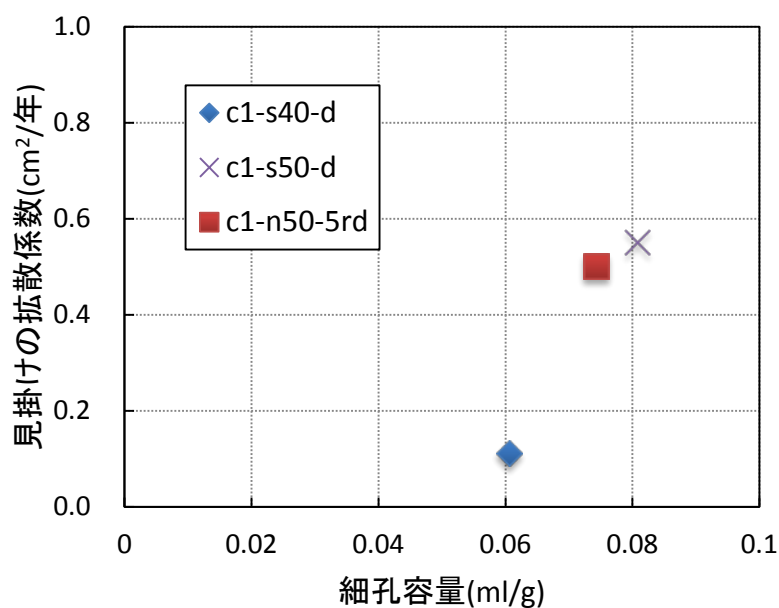


図-5.14 見掛けの拡散係数と総細孔量の関係

5.7.4 塩化物イオン透過性状の予測

本節では、前節において算出した、暴露材齢 2 年と 5 年の表面塩化物イオン量および見掛けの拡散係数の値（表-5.7）を、再びフィックの第 2 法則に基づく拡散方程式（式 5-1）に代入し、塩化物イオンの透過性状が予測した結果について検討する。また、材齢 2 年における拡散係数から算出した材齢 5 年の塩化物イオン量分布予測結果は、図-5.10 の材齢 5 年の c1 の塩化物イオン量分布と比較する。

暴露材齢 2 年における拡散係数から算出した材齢 5 年、10 年の塩化物イオン量分布予測を図-5.15, 16 に示す。また、暴露材齢 5 年における拡散係数から算出した材齢 10 年の塩化物イオン量分布予測を図-5.17 に示す。

図-5.15, 16 に示す、暴露材齢 2 年における拡散係数から算出した塩化物イオン量分布予測においては、コンクリート表層部の 10～100mm の範囲において、水セメント比 50%の蒸気養生コンクリート c1-s50-d より、現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd の塩化物イオン量の値が少なかった。また、コンクリート表層部の 0～10mm の範囲における塩化物イオン量の値は、すべての供試体においてほぼ同等の値を示すと予測されていた。

しかし、図-5.10 に示す、暴露材齢 5 年の拡散係数の値より、コンクリート表層部の 10～100mm の範囲において、水セメント比 50%の蒸気養生コンクリート c1-s50-d と、現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd の塩化物イオン量の値は、ほぼ同等の値と判明した。そして、図-5.17 に示す、暴露材齢 5 年における拡散係数から算出した塩化物イオン量分布予測では、コンクリート表層部の 10～100mm の範囲において、水セメント比 40%の蒸気養生コンクリート c1-s40-d と、水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd の、塩化物イオン量の値は、ほぼ同等の値となると予測された。しかし、図-5.10 と図-5.17 を比較すると、5 年後の予測にも関わらず c1-n50-5rd の塩化物イオン量が減少している為、予測としては不適であると考えられる。

なお、材齢の進行にともない蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数の値が小さくなることと、予測結果の傾向が一致しないことから、本節における傾向と予測は、あくまで暴露材齢 5 年の結果によるものであり、必ずしも蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの、塩化物イオン濃度拡散係数が一致すると断定はできないことを追記しておく。

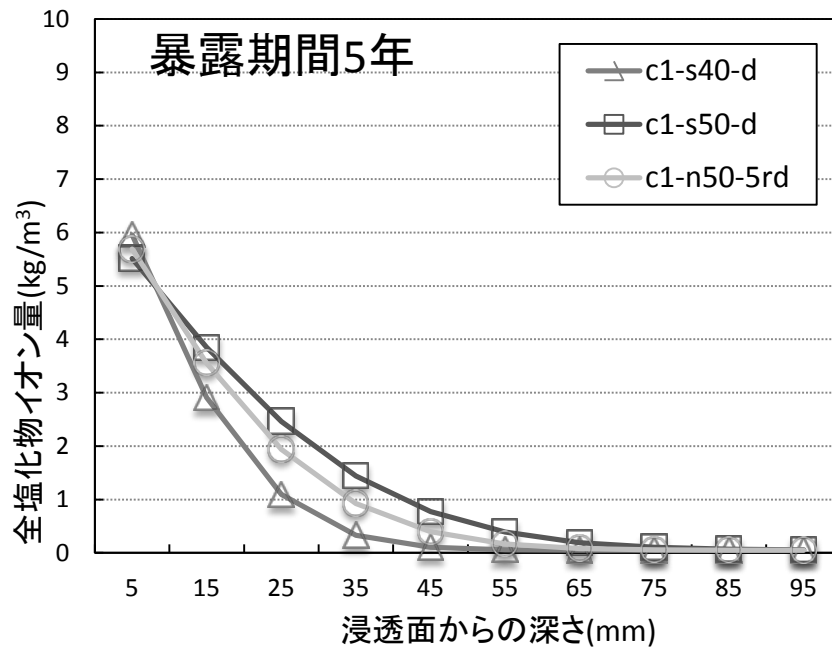


図-5.15 材齢 2 年の拡散係数から算出した
材齢 5 年の塩化物イオン量分布予測

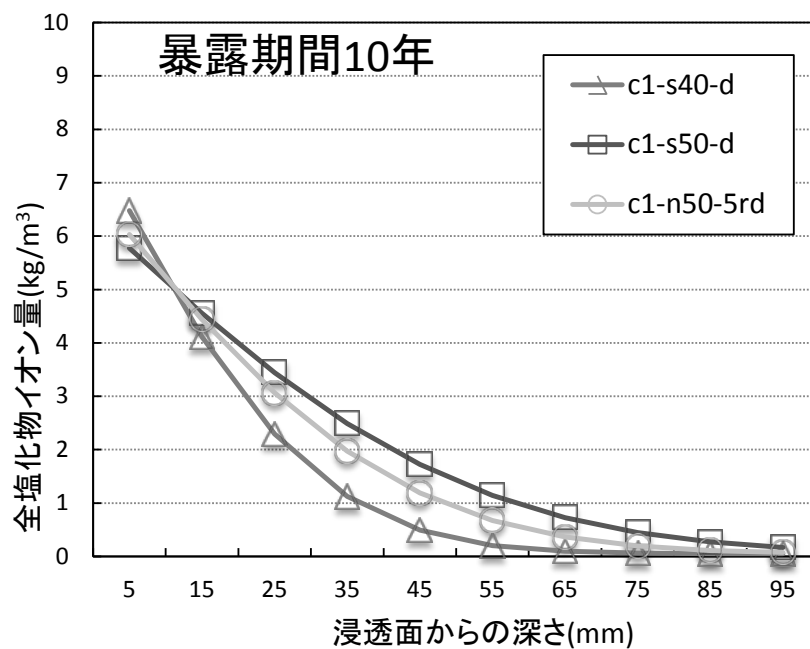


図-5.16 材齢 2 年の拡散係数から算出した
材齢 10 年の塩化物イオン量分布予測

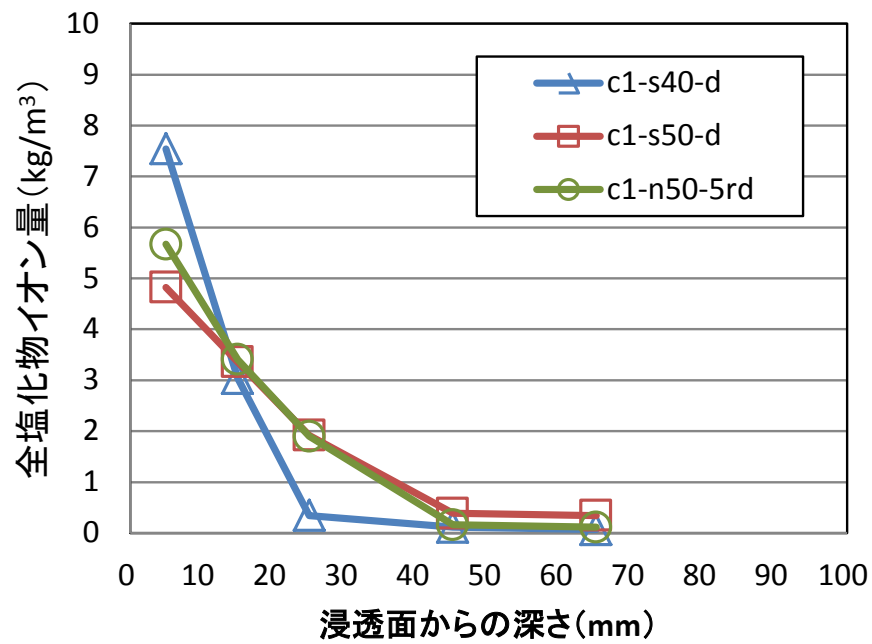


図-5. 10 の材齢 5 年の c1 の塩化物イオン量分布

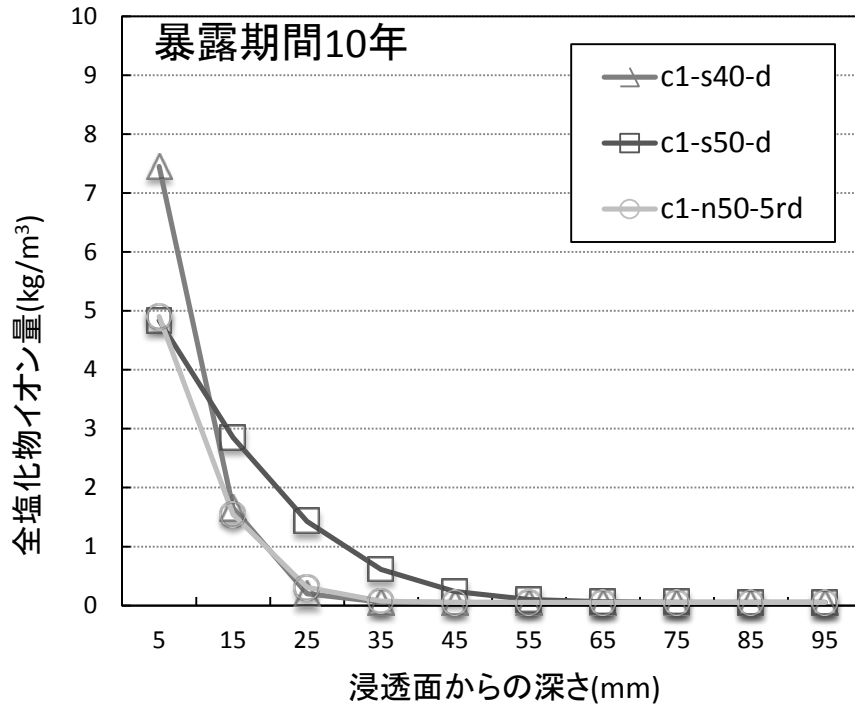


図-5. 17 材齢 5 年の拡散係数から算出した
材齢 10 年の塩化物イオン量分布予測

5.8 c2 の塩化物イオン透過性状

5.8.1 全塩化物イオン量の分布

佐々木ら²⁾によって打設され2年間暴露された供試体に、塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法を行い、得られた全塩化物イオン量を浸透面からの深さごとに表-5.8 および図-5.18 に示す。なお、c2 の塩化物イオン量を測定した供試体は、海岸暴露中の固定が甘く供試体が移動し、供試体同士が密着しており、c2 の 10-20mm 部分に含まれる塩化物イオン量が非常に少なかった。そのため、c2 は比較対象としては不適当と考えたため、測定面を供試体の打設面として再度、c2(再)として塩化物イオン量を測定した。

表-5.8 c2 と c2(再)の塩化物イオン量分布

今年度測定	全塩化物イオン量(kg/m ³)				
	0～10mm	10～20mm	20～30mm	40～50mm	60～70mm
c2-s35-d	5.058	0.210	0.117	0.093	0.093
c2-s45-d	3.770	0.925	0.116	0.069	0.093
c2-n35-5wd	4.126	0.210	0.117	0.070	0.093
c2-n45-5wd	4.372	0.740	0.069	0.069	0.046
c3-s35-d	4.615	0.186	0.070	0.023	0.070
c3-s45-d	4.580	2.290	0.208	0.023	0.023
c3-n35-5wd	10.466	0.396	0.070	0.023	0.070
c3-n45-5wd	8.951	3.192	0.439	0.069	0.069

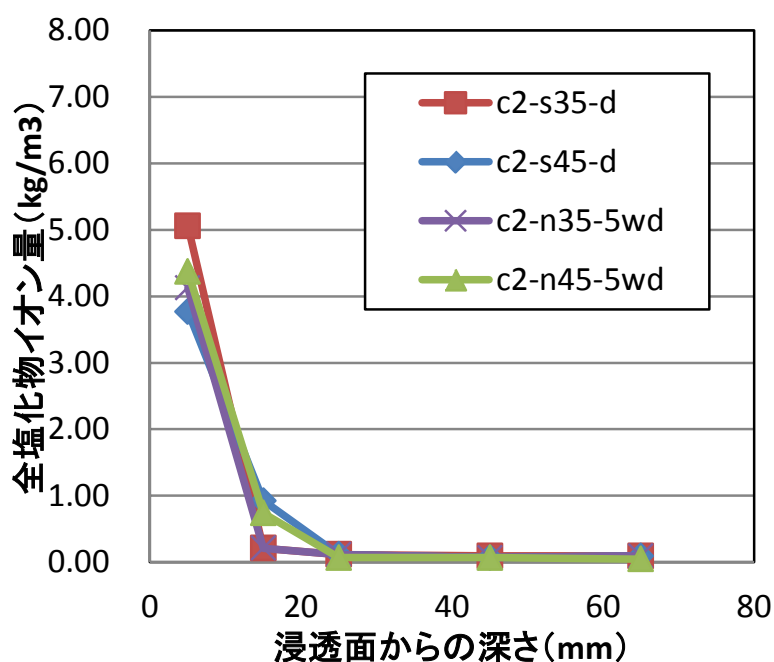


図-5.18 c2 の塩化物イオン量分布

c2(再)の材齢2年の塩化物イオン分布を図-5.19に示す。

図より、コンクリート表層部の0～10mmの範囲において、水セメント35、45%の現場打ち模擬コンクリート c2(再)-n35-5wd および c2(再)-n45-5wd の塩化物イオン量が、他の供試体より突出して多い値であった。塩化物イオンが内部に浸透していない供試体は、コンクリート表面の塩化物イオン量が高くなる事例はいくつか見られたが、突出した原因とは断定できない。

コンクリート表層部の20～80mmの範囲において、水セメント35%の蒸気養生コンクリート c2(再)-s35-d および現場打ち模擬コンクリート c2(再)-n35-5wd の、塩化物イオン量は0に近い値であった。寺川ら³⁾の研究の水セメント比40%の供試体は、コンクリート表層部の20～80mmの範囲において、塩化物イオン量は0に近い値であったため、同様の傾向であるといえる。

次に、コンクリート表層部の0～30mmの範囲において、水セメント45%の蒸気養生コンクリート c2(再)-s45-d は、現場打ち模擬コンクリート c2(再)-n45-5wd より、塩化物イオン量の値が小さく、塩化物イオンが浸透しにくい供試体と判断される。しかし、図-5.13においては、蒸気養生コンクリートは現場打ち模擬コンクリートより塩化物イオンの拡散係数が大きかったため、矛盾しているといえる。

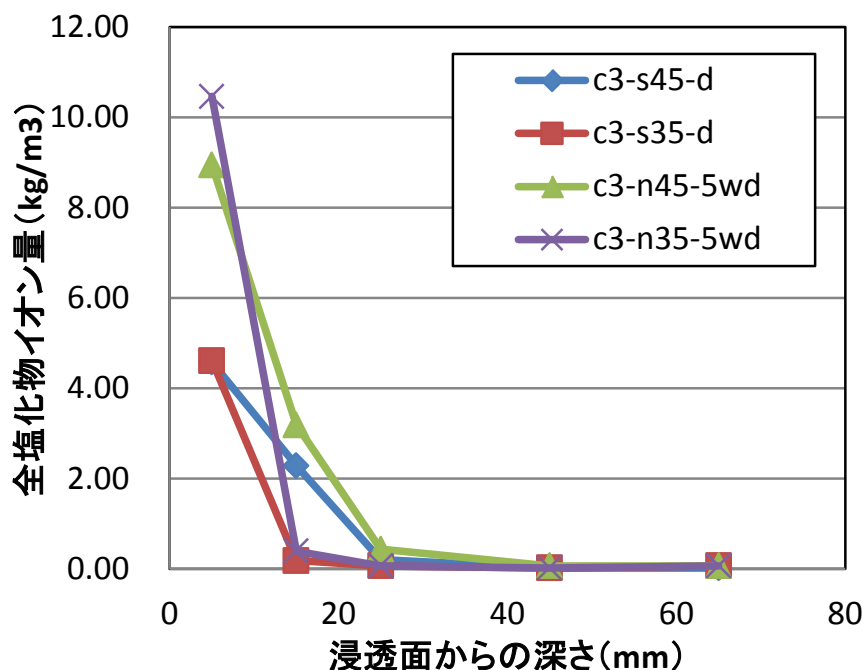


図-5.19 c2(再)の塩化物イオン量分布

5.8.2 既往の研究結果と c2(再) の全塩化物イオン量の分布の比較

表-5.6 に示した c1 の材齢 2 年の塩化物イオン分布と、表-5.8 に示した c2(再) の材齢 2 年の塩化物イオン分布を、蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートに分けて、図-5.20 と図-5.21 に示した。なお、c1 における現場打ち模擬コンクリートは 5 日間の封かん養生を行っており、c2(再)における現場打ち模擬コンクリートは 5 日間の水中養生を行っているため、二次養生条件が異なる供試体である。

図-5.20 に示すように、蒸気養生コンクリートの表層部の 10~20mm の範囲において、水セメント比が高い供試体ほど、検出された塩化物イオン量が多く、水セメント比 35、45%の測定値が、c1 の材齢 2 年の塩化物イオン分布の測定値の間に入った。

しかし、図-5.21 に示すように、現場打ち模擬コンクリート表層部の 0~20mm の範囲において、水セメント比 45%の現場打ち模擬コンクリート c2(再)-n45-5wd は、水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd より、塩化物イオン量の値が多かった。水セメント比が低いと密であり耐久性が高いと推測されたが、水セメント比 45%の供試体が水セメント比 50%より、塩化物イオンの浸透性が高く、疎な供試体であると判断できてしまうため、打設材料と打設年の異なる供試体である c1 と c2(再)を比較することは、一概には行えないと考えられる。

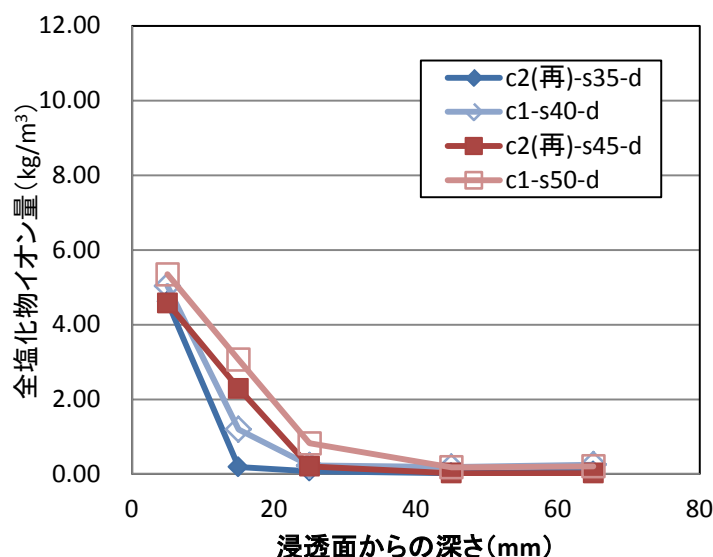


図-5.20 蒸気養生コンクリートの塩化物イオン量分布

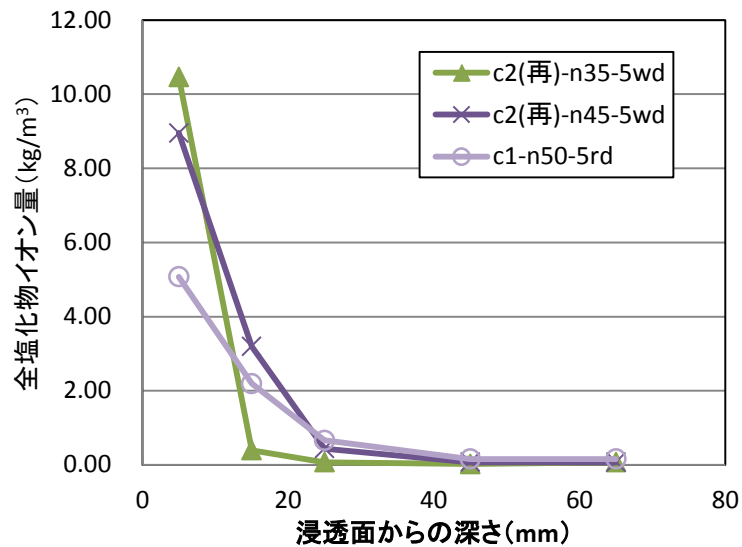


図-5.21 現場打ち模擬コンクリートの塩化物イオン量分布

5.8.3 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

5.7.2と同様に、得られた全塩化物イオン分布から、式 5-1 に示すフィックの第 2 法則に基づく拡散方程式の解を用い、回帰分析により、見掛けの拡散係数を算出した⁴⁾。回帰分析による、見掛けの拡散係数および表面塩化物イオン量の結果一覧を表-5.9 に、示方書による拡散係数の計算値と見掛けの拡散係数を図-5.22 に示す。表-5.9 に示した見掛けの拡散係数から、今年度測定したすべての供試体である c2(再)-s35-d, c2(再)-s45-d, c2(再)-n35-5wd, c2(再)-n45-5wd の拡散係数の値はおしなべて低かった。

図-5.22 から、水セメント 45%の蒸気養生コンクリート c2(再)-s45-d は、現場打ち模擬コンクリート c2(再)-n45-5wd より、塩化物イオン拡散係数が大きく、浸透しやすい値であった。また、水セメント 50%の蒸気養生コンクリート c1-s50-d は、現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd より、塩化物イオン拡散係数が大きく、浸透しやすい値であった。このことから、蒸気養生コンクリートは現場打ち模擬コンクリートより塩化物イオンの拡散係数が大きいといえる。実測値は示方書による拡散係数の計算値より小さいという傾向も当てはまる。

しかし、水セメント 40, 45%の蒸気養生コンクリート c1-s40-d と c2(再)-s45-d がほぼ同等の見掛けの拡散係数となったため、打設材料と打設年の異なる供試体である c1 と c2(再)を比較することは、一概には行えないと考えられる。そのため、今後異なる水セメント比の供試体を比較する際には、使用材料と打設日が同じ供試体を比較することが望ましい。

表-5.9 材齢 2 年の回帰分析結果

材齢2年	W/Cによる 計算値 ($\text{cm}^2/\text{年}$)	見掛けの 拡 散係数 $D_c(\text{cm}^2/\text{年})$	表面塩化物 イオン量 $\text{Co}(\text{kg}/\text{m}^3)$	初期塩化物 イオン量 $\text{Ci}(\text{kg}/\text{m}^3)$
c2(再)-s35-d	0.35	0.07	11.4	0.07
c1-s40-d	0.57	0.28	7.72	0.05
c2(再)-s45-d	0.89	0.29	7.00	0.02
c1-s50-d	1.33	0.81	6.35	0.05
c2(再)-n35-5wd	0.35	0.07	20.00	0.05
c2(再)-n45-5wd	0.89	0.15	7.94	0.05
c1-n50-5rd	1.33	0.53	6.81	0.05

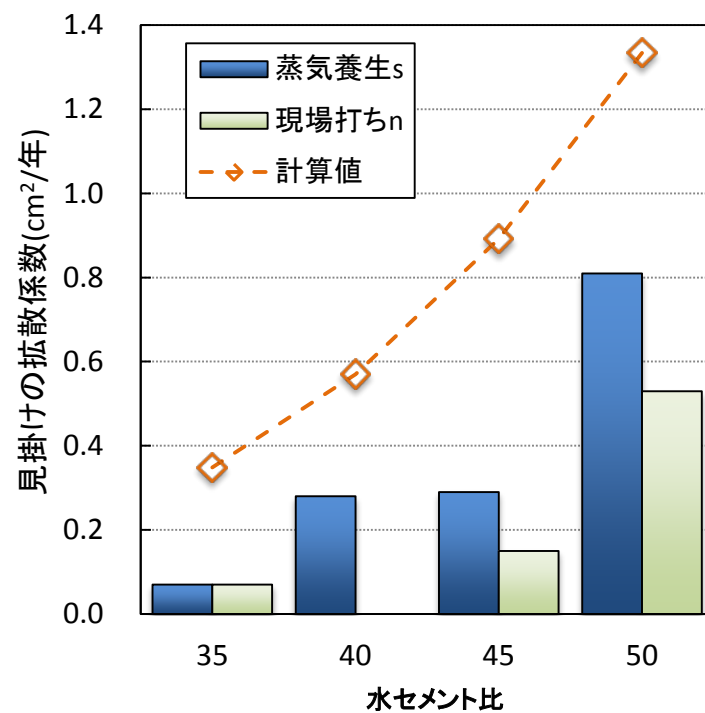


図-5.22 示方書による拡散係数の計算値と材齢 2 年の実測値の比較

5.9 今後の検討項目

見掛けの拡散係数と予測値に着目する理由としては、材齢進行に伴い蒸気養生コンクリートの見掛けの拡散係数に変化が見られたためである。蒸気養生コンクリートは現場打ち模擬コンクリートより、塩化物イオンの拡散係数が高いが、材齢進行に伴い蒸気養生コンクリートの塩化物イオン見掛けの拡散係数が減少し、暴露材齢5年には両者ともほぼ同等となった。また、拡散係数は、水セメント比で算出した予測値よりも大幅に小さい値であった。

本節における傾向と予測は、あくまで暴露材齢5年の結果によるものであり、必ずしも蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの、塩化物イオン濃度拡散係数が一致すると断定はできないことを追記しておく。また、打設材料と打設年の異なる供試体である c1 と c2(再)を比較することは、一概には行えないと考えられる。

今後の検討項目としては、塩化物イオン拡散係数の検討のため、供試体を海岸に暴露する場合は、圧縮強度試験と、細孔径分布試験に加え、促進中性化試験を行うことが推奨される。また、海岸暴露の場合、塩化物イオンの増加だけでなく、水によってコンクリートの水和反応が継続する可能性がある。そのため、海岸暴露以外には、凍結融解試験の除雪剤の溶解を想定した、塩化物イオンの拡散係数の検討も推奨される。

5.10 まとめ

(1) 全塩化物イオン量の分布

水セメント比が低くなると、コンクリート内部にかけての塩化物イオン量の下がり幅が大きく、浸透しにくいことがわかる。

水セメント比 50%の蒸気養生コンクリート c1-s50-d と、現場打ち模擬コンクリート c1-n50-5rd の、塩化物イオン量の差は少なかった。

(2) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

水セメント比 50%の現場打ち模擬コンクリートは、蒸気養生コンクリートより、見掛けの拡散係数の値がやや小さく、コンクリートの塩化物イオンの耐浸透性が高いといえる。

(3) 実験結果と水セメント比による回帰分析結果の比較

実験から得た見掛けの拡散係数の値は、水セメント比による予測値を大きく下回っており、予測値の 20～30%の値となった。

(4) 暴露材齢の進行に伴う拡散係数の変化

蒸気養生コンクリートは現場打ち模擬コンクリートより、塩化物イオンの拡散係数が高いが、材齢進行に伴い蒸気養生コンクリートの塩化物イオン見掛けの拡散係数が減少し、暴露材齢 5 年には両者ともほぼ同等となった。

(5) c2(再)の全塩化物イオン量の分布と見掛けの拡散係数

蒸気養生コンクリートの表層部の 10～20mm の範囲において、水セメント比が高い供試体ほど、検出された塩化物イオン量が多かった。

今年度測定したすべての供試体である c2(再)-s35-d, c2(再)-s45-d, c2(再)-n35-5wd, c2(再)-n45-5wd の拡散係数の値はおしなべて低かった。

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】、pp.127～128、2008.
- 2) 関 健吾、宇治公隆：蒸気養生を実施したコンクリートの細孔構造および耐久性に関する研究、首都大学東京大学院修士論文、pp.34～60、2010.
- 3) 寺川麻美：プレキャストコンクリート製品の細孔構造に及ぼす養生条件の影響、首都大学東京大学院修士論文、p.90、79、2013.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書【規準編】土木学会規準および関連規準、p.332、2010.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書【規準編】土木学会規準および関連規準、p.324、2010.
- 6) 丸山晃平、宇治公隆：蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究、首都大学東京大学院修士論文、pp.77～79、2011.
- 7) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】、p.55、2008.
- 8) 金谷光秀、梶田佳寛、阿部道彦、西山直洋：海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.747～752、1996.
- 9) 桜田良治、丸山久一：コンクリート中の塩化物イオンの拡散浸透と細孔空隙の関係、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.2、pp.829～834、1999.

第 6 章

結論

6.1 蒸気養生を実施したコンクリートの二次養生条件の違いによる影響について

蒸気養生を実施したコンクリートの二次養生の違いが、コンクリートの細孔構造、圧縮強度および中性化性状に及ぼす影響について比較検討を行った結果、以下の知見を得た。

(1) 材齢進行に伴う総細孔量の変化

材齢進行に伴う総細孔量の変化と材齢 28 日の細孔直径別差分圧入量は、s40-d と s45-14w、s45-d と s55-14w、s45-s2 と s45-14w がほぼ同等である。

蒸気養生コンクリートは、材齢 14 日以降、疎な細孔構造の減少が停滞する。現場打ち模擬コンクリートは、継続して総細孔量が減少する。

(2) 深さ方向の細孔直径別差分圧入量

深さ方向の細孔径分布との関連性は、差分圧入量の 5nm-10 μ m 部分と 200nm 部分に現れた。深さ方向の細孔構造は供試体ごとに異なっており、n55-5rd は、深さ方向に各細孔径の細孔量が減少した。n55 は、0-5mm のみ直径 300nm-1 μ m の細孔量が多かったが、他はほぼすべての深さで同一の挙動を示した。

(3) 材齢別の深さ方向の細孔径分布

水セメント比の低減や水中養生された蒸気養生コンクリートは、100nm-1 μ m の細孔量が少なかった。s45-14w と s40-d の、深さ方向の細孔径分布の増減の傾向は異なっていた。

材齢進行に伴い、50nm 以上の細孔量が、s45-s2 は深さ方向に一定に変化し、s45-14w は減少したが、n55-5rd には大きな変化がみられなかった。

(4) 圧縮強度試験結果

水セメント比を 10% 低減した蒸気養生コンクリートは、圧縮強度が 50% 増加した。水中養生の強度発現性はみられなかった。材齢 28 日の圧縮強度と 0-30mm における総細孔量は、s45-d と n55 を除けば相関関係にある。

(5) 促進中性化試験結果

s45-d と s55-14w と n55、s45-s1 と s45-s2 の中性化速度係数が同等である。n45-5rd は s45-d よりわずかに中性化深さが大きい。0-10mm における 40nm 以上の細孔量と中性化速度係数は、s45-d と n55 を除けば相関関係にある。

6.2 供試体の耐久性が同等となりうる水セメント比と二次養生条件

材齢 28 日の細孔量と促進材齢 16 週時点で算出された中性化速度係数に注目して、蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートおよび標準養生コンクリートを比較検討した結果、以下の知見を得た。

(1) 40nm 以上の細孔量

s45-d と s50-d と n55-5rd の細孔量が近い値である。s40-d と s45-14w と n45-5rd と n55 の細孔量が近い値であり、s45-d と比較して、s40-d と s45-14w は約 15% 細孔量が減少する。s45-s1 と s55-14w の細孔量が等しい。

n55 と類似した細孔量は s45-14w、n55-5rd と類似した細孔量は s50-d もしくは s50-14w、n45-5rd と類似した細孔量は s45-14w である。

(2) 中性化速度係数

蒸気養生コンクリートは、水セメント比を 5% 低減毎に、中性化速度係数が約 30% 減少する。s45-d と比較して、s45-s1 と s45-s2 は約 20%、s45-14w は約 60% 中性化速度係数が減少する。s40-d と s50-14w は 40nm 以上の細孔量と中性化速度係数、ともに同等と推測される。

n55 と類似した中性化速度係数は s55-14w である。

6.3 蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの塩化物イオン透過性状

蒸気養生コンクリートと現場打ち模擬コンクリートの塩化物イオン分布を暴露試験によって把握し、塩化物イオンの拡散係数をもとに塩化物透過性状を検討した結果、以下の知見を得た。

(1) 全塩化物イオン量の分布

c1-s40-d は c1-s50-d と比較して、塩化物イオンが内部まで浸透していない。c1-s50-d と c1-n50-5rd の塩化物イオン分布は同傾向である。

(2) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

現場打ち模擬コンクリートは、蒸気養生コンクリートより、見掛けの拡散係数の値がやや小さい。

(3) 実験結果と水セメント比による回帰分析結果の比較

実験から得た見掛けの拡散係数の値は、水セメント比による予測値を大きく下回る、20～30% の値となる。

(4) 暴露材齢の進行に伴う拡散係数の変化

蒸気養生コンクリートは現場打ち模擬コンクリートより、塩化物イオンの拡散係数が大きいですが、材齢進行に伴い蒸気養生コンクリートの塩化物イオン見掛けの拡散係数が減少し、暴露材齢 5 年には両者ともほぼ同等となる。

(5) c2(再)の全塩化物イオン量の分布と見掛けの拡散係数

すべての供試体の拡散係数が低い値である。

謝辞

本研究を作成するにあたり、三年間に渡って、ご多忙の中丁寧かつ熱心な御指導とご教授をして下さりました、首都大学東京大学都市環境学科都市基盤環境コース教授、宇治公隆先生に最大の感謝の気持ちを記させて頂き、心から御礼申し上げます。宇治先生のご指導の元で研究に携われまして光栄に思います。

本研究を進めるにあたり、水中養生が蒸気養生に与える影響についての比較検討方法の妥当性を議論して下さい、技術者の心構えを伝える一方で和やかな空気を作ってくださいました、首都大学東京大学都市環境学科都市基盤環境コース准教授、上野敦先生に感謝の気持ちとともに厚く御礼申し上げます。

本実験や本研究において、夜間や休日にも関わらず度重なる御指導と御援助をして下さり、本研究を推し進めて下さいました、首都大学東京大学都市環境学科都市基盤環境コース、大野健太郎助教授に感謝するとともに、深く御礼を申し上げたいと思います。大野助教授のご多忙中ご指導に熱心に力を入れる姿に、身が引き締まり研究に集中できました。

実験時に度重なる御援助と満面の笑顔でいつも迎えて下さる、青木薫主事に御礼を申し上げたいと思います。

本実験と本研究を行うにあたり、会社業務でご多忙の中、共同研究先の東京セメント工業株式会社の方々に、本研究の重要な部分を担って頂きました。特に原洋介様には、継続する蒸気養生の研究に最初から今まで携わり、供試体計画から打設、海岸暴露、進捗状況の打ち合わせと研究発表会へのご参加、そして研究の便宜を図っていただきました。相澤典男様には、実験計画の段階から研究に携わっていただきました。関高行様と齋藤一真様には、供試体の大規模な打設時や海岸暴露場の搬出作業に携わっていただきました。また星野様には三年間の供試体打設時に毎回、脱型直後の材齢試験に携わっていただきました。共同研究先の東京セメント工業株式会社の皆様に、この場をお借りして感謝の気持ちを述べさせて頂きたいと思います。

本研究の前任者であり、仕事でご多忙の中、研究発表会に参加して下さい、熱心に発表内容の討議をして下さった関健吾先輩に感謝の言葉を述べさせていただきます。

本研究の前任者である朱小燕先輩に、御礼を述べさせて頂きたいと思います。前任者であり後任者である身としては、供試体計画や研究内容など討議でき、次なる研究に生かすことができて光栄です。

本研究の後任者である小池悠介君に、深く感謝いたします。供試体計画時から共同研究先の東京セメント工業会社の皆様との打ち合わせ時や研究発表時まで、非常に多岐に渡って研究に携わりながら、修士一年の間から熱心に自身の研究にも取り組む、立派な後輩でした。

大学院の授業や自身の研究で忙しいにもかかわらず、全面的に実験に協力してくださった、M1の皆さん、長岡貴紀君、小池悠介君、間々田憲哉君、佐藤凜奈さん、飯塚亮太君、古川凌輔君、王亮さん、王梁さん、ズンさんに深く御礼を述べさせていただきます。

そして、今年度実験と研究を共に行えた、四年生の皆さんとの出会いもうれしく思っています。同室での威勢のいい言葉と非常に密度の濃い実験が印象的だった永山剛君を初めとして、内田早紀さん、坂東真輝君、小倉達也君、児玉文彦君に深く御礼を述べさせていただきます。

また自身の修士論文で忙しい中、精力的に研究に取り組み、研究を促してきてくれた同期の皆さん。彼らの研究の意識の高さと、面倒見の良さに、感謝の気持ちでいっぱいです。大野先生を誰よりも尊敬し、打設と解析お手の物、同室でお世話になった菊池亮君、賑やかな真ん中の部屋で気軽な話をする尾原弘樹君、パーリーと後輩を愛する新津祐樹君、自身の力で研究を完遂しながら毎回手伝ってくれる村田哲君、着実に研究を進め朝に会えるメンバー市川直樹君、論文の追い込みをともに頑張った李偉利君、個性あふれ食欲旺盛なメンバーに支えられ、研究発表や論文執筆に集中できました。

最後に、研究を進めるにあたって度重なる他愛ない話や気分転換や飲みにつき合ってくれたご友人の皆様、内定までの長い間の就職活動を支えて下さった方々、手作りご飯を度々せびりにいった部員の皆さん、学部生から修士の6年間私を支えてくれた家族に、心からの感謝をして謝辞の言葉とさせていただきます。

平成 27 年 02 月 17 日

