

コンクリート専門委員会報告
REPORT OF THE TECHNICAL COMMITTEE ON CONCRETE
F-54

寒冷地に暴露した AE コンクリートの耐凍害性
—材齢 20 年報告—

Resistance to Frost Damage of Air-entrained Concrete
Exposed to Cold Climates: Report after Exposure for 20 Years

2008 年 3 月

March 2008

社団法人セメント協会
JAPAN CEMENT ASSOCIATION

要旨

寒冷地に長期暴露した場合のコンクリートの耐凍害性を調査するため、凍害劣化度の異なる4地点、すなわち釧路（凍害を受け易い）、盛岡（同）、酒田（中庸）、東京（凍害を受け難い）を選定して、コンクリート供試体の長期暴露実験を行った。暴露5年以降は、一部の供試体について供試体下部10mmを常時水に浸漬し、含水率を高くし凍害劣化を起こし易い条件とした。暴露供試体は、水セメント比を50%と60%、目標スランプを土木配合として $8.0 \pm 1.5\text{cm}$ 、建築調合として $18.0 \pm 1.5\text{cm}$ 、全ての供試体で目標空気量を $4.5 \pm 0.5\%$ の計4配調合のAEコンクリートとした。

主な調査項目は、供試体の外観観察と相対動弾性係数および質量の経年変化であるが、中性化深さや細孔量・細孔径分布などの調査も実施した。

暴露期間20年までの結果によれば、すべての暴露地、配調合条件において、供試体にひび割れ、スケーリング、モルタルの欠損、また相対動弾性係数の低下など凍害劣化の兆候は認められず、所定の空気量を連行したAEコンクリートは十分な耐凍害性を有することが確認された。

また付随して実施した中性化深さの測定結果は、土木学会コンクリート標準示方書中の予測式に比べて小さく、これは入念に成形、養生を行った供試体による試験結果であることが一因と考えられる。なお暴露地が東京の場合は他の暴露地に比べてやや中性化深さが大きい傾向にあった。同じく付随して実施した細孔量の測定結果によれば、暴露期間10年では明確な差が見られないのに対して暴露期間20年では暴露地による差が認められ、東京に暴露した供試体では細孔量がやや大きく、配調合による差も東京の場合は拡大する傾向が見られるなど、暴露環境による影響が認められる結果となった。

ABSTRACT

Long-term exposure tests on concrete specimens were conducted to investigate the resistance to frost damage of concrete exposed to cold climates at four locations with different conditions in regard to frost damage: Kushiro (high risk), Morioka (high risk), Sakata (moderate risk), and Tokyo (low risk). After exposure for five years, the bottoms of some specimens were constantly immersed in water to a depth of 10 mm to make them more prone to frost damage by increasing their moisture content. The concretes under test were all proportioned to be air-entrained concrete with a target air content of $4.5 \pm 0.5\%$, with the water-cement ratio being at two levels of 50% and 60% and the slump at two levels of 8 ± 1.5 cm and 18 ± 1.5 cm.

While the primary test items included appearance observation, relative dynamic modulus, and mass change over time, the carbonation depth and the volume and size distribution of pores were also examined.

The results at the end of exposure for 20 years revealed that no sign of frost damage including cracking, scaling, mortar loss, or loss in the relative dynamic modulus was observed in the specimens, proving that air-entrained concrete having the required air entrainment is sufficiently resistant to frost damage.

The carbonation depth measurements were smaller than the prediction equation given in the JSCE Standard Specification for Concrete Structures, partly because of the careful molding and curing of the specimens. Note that the carbonation depth of specimens tested in Tokyo was slightly greater than those tested at other locations. According to the results of pore volume measurement, the values varied from one test site to another after 20 years of exposure, with the values at Tokyo being slightly larger than the other locations, though no marked difference was observed at the end of exposure for 10 years. The differences in the pore volume between different mixtures also tended to be greater at Tokyo than the other locations, suggesting the effects of the environment of exposure.

序

コンクリートの長期耐久性に対して、周囲の気象条件が大きく影響を及ぼすことは論を待たないところである。(社)セメント協会では、1984年から1988年にかけて、全国各地の気象条件、すなわち温度、湿度、また飛来塩分量などのデータをもとに、ひび割れ、塩害、凍害に対する影響を検討し、これらコンクリートの耐久性を阻害する要因に関する危険度を示すマップを作成・刊行した。

本研究は、この調査・検討を引き継ぎ、寒冷地に継続暴露したAEコンクリート供試体の耐凍害性について調査を実施したものであり、今般、材齢20年までの結果がまとまったので報告する。

2008年3月

社団法人 セメント協会 コンクリート専門委員会

(敬称略 順不同)

委員長	太平洋セメント株式会社	棚木 隆
委員	住友大阪セメント株式会社	草野 昌夫
	電気化学工業株式会社	川原 正秀
	株式会社トクヤマ	土井 宏行
	株式会社宇部三菱セメント研究所	大西 利勝
	新日鐵高炉セメント株式会社	伊代田 岳史
		兼安 真司 (2007年6月退任)
	株式会社宇部三菱セメント研究所	中山 英明
	社団法人セメント協会	村田 芳樹
		島崎 泰
		泉尾 英文

目次

1	緒言	1
2	調査の概要	2
2.1	暴露条件	2
2.1.1	暴露地	2
2.1.2	暴露状況	3
2.2	コンクリート供試体	6
2.2.1	使用材料	6
2.2.2	コンクリートの配調合	7
2.2.3	供試体の成形方法および養生方法	7
2.3	暴露期間および調査時期	8
2.4	調査項目および試験方法	8
2.4.1	調査項目の概要	8
2.4.2	各暴露地の凍結日数および凍結融解回数	9
2.4.3	気泡間隔係数	9
2.4.4	圧縮強度および静弾性係数	10
2.4.5	外観観察	10
2.4.6	一次共鳴振動数と質量	10
2.4.7	中性化深さ	10
2.4.8	細孔量	11
3	調査結果および考察	12
3.1	各暴露地の凍結日数および凍結融解回数	12
3.2	気泡間隔係数	13
3.3	相対動弾性係数の経年変化	14
3.4	質量の経年変化	16
3.5	圧縮強度および静弾性係数 (材齢 28 日、材齢 20 年)	17
3.6	外観の観察 (暴露開始時、材齢 10 年、材齢 20 年)	18
3.7	中性化深さ (暴露期間 10 年、暴露期間 20 年)	23
3.8	細孔量 (材齢 10 年、材齢 20 年)	26
4	結言	33
	資料	36

図目次

2.1	暴露地	2
2.2	水槽概要図	3
2.3	材齢 10 年時調査の試料採取箇所	9
2.4	材齢 20 年時調査の試料採取箇所	9
2.5	圧縮強度試験用供試体 (材齢 20 年)	10
2.6	細孔量の試料採取位置	11
3.1	相対動弾性係数の経年変化 (たわみ振動)	14
3.2	相対動弾性係数の経年変化 (縦振動)	15
3.3	質量の経年変化	16
3.4	材齢 28 日と材齢 20 年の圧縮強度	17
3.5	中性化深さ (側面)	24
3.6	土木学会式との比較 (W/C=50%)	25
3.7	土木学会式との比較 (W/C=60%)	25
3.8	水セメント比による細孔量の比較 (スランプ=18cm、材齢 10 年)	26
3.9	スランプによる細孔量の比較 (W/C=60%、材齢 10 年)	26
3.10	暴露地による細孔量の比較 (W/C=60% スランプ=8cm、材齢 10 年)	27
3.11	暴露地による細孔量の比較 (W/C=60% スランプ=18cm、材齢 10 年)	27
3.12	暴露地による積算細孔量の比較 (材齢 20 年)	28
3.13	配調合による積算細孔量の比較 (材齢 20 年)	29
3.14	供試体の外側と内側による積算細孔量の比較 (材齢 20 年、釧路, 盛岡)	30
3.15	供試体の外側と内側による積算細孔量の比較 (材齢 20 年、酒田, 東京)	31
3.16	供試体表層の細孔径分布 (材齢 10 年, 材齢 20 年)	32

表目次

2.1	暴露地の詳細	3
2.2	セメントの化学分析結果	6
2.3	セメントの物理試験結果	6
2.4	骨材の物理試験結果	7
2.5	コンクリートの配調合およびフレッシュ性状	7
2.6	調査時期	8
2.7	材齢 10 年と材齢 20 年の追加調査項目	9
3.1	凍結日数および凍結融解回数 (凍結温度-5℃)	12
3.2	凍結日数および凍結融解回数 (凍結温度-10℃)	12
3.3	気泡間隔係数	13

3.4	圧縮強度 (材齢 28 日、20 年) および静弾性係数 (材齢 28 日)	17
3.5	側面からの中性化深さ	23
3.6	打設面からの中性化深さ	23
3.7	底面からの中性化深さ	23
3.8	供試体表層の全細孔量 (材齢 10 年, 材齢 20 年)	32

1 緒言

コンクリートの長期耐久性を阻害する要因として、ひび割れ、塩害、凍害、中性化、温泉水害、硫酸塩などがある。このうち、ひび割れ、塩害、凍害は気象条件と大きく関連していることから、気象条件を考慮することがコンクリートの耐久性を検討するうえでも重要である。そこで、(社)セメント協会では1984年から1988年まで旧耐久性専門委員会において検討を重ね、委員会報告書『耐久性を阻害する要因マップ』¹⁾を刊行した。この報告書はD-1からD-3までの3刊にわたり、AMeDASや全国気象官署のデータをもとに気温(日最高気温、日最低気温、日較差)、日最低湿度、風速を全国的に調査、取りまとめ、各阻害要因の危険度を示す要因マップを報告し、その妥当性を報告書D-3において検討した。

報告書D-1、D-2の概要は以下のとおりである。

- ひび割れに関しては、乾燥程度と温度変化に着目し、最低湿度、気温の日較差の気象データをもとに、ひび割れの危険度マップを作成した。
- 塩害に関しては、風速と波高より算出する海塩粒子指数(海風比率×平均波高)に着目し、各地の飛来塩分量の大きさをもとに塩害の危険度マップを作成した。
- 凍害に関しては、日最高気温と日最低気温に着目し、各地の年間凍結融解回数をもとに凍害の危険度マップを作成した。

これら3つの要因マップの妥当性を検討するため、実地調査を行い報告書D-3を刊行した。

報告書D-3の概要は以下のとおりである。

- ひび割れに関しては、実地調査が困難であったため、これまでのデータに加え日射量や水分蒸発量との関連を検討し、各季節ごとに乾燥が著しいと想定される地域を抽出した。
- 塩害に関しては、塩害の危険度の異なる9箇所を選定し、1986年から1年間の実地調査を行った。調査の結果、1) 報告書D-2の海塩粒子指数マップは塩害の危険度を示すひとつの指標となる、2) 飛来塩分量が多いとコンクリート中への塩分の浸透量は多くなる、3) コンクリート表面が降雨にさらされると塩分の浸透は少なくなることが分かった。
- 凍害に関しては、凍害の危険度が異なる4箇所を選定し1986年より実地調査を開始した。報告書D-3を刊行した時には材齢1年が経過していたが、明確な差が見られなかったため調査の継続を行った。

コンクリート専門委員会は、報告書D-3の凍害に関する実地調査を引き継ぎ、2006年に材齢20年目の調査を終えた。本報告書は、これらの調査結果を報告するものである。

本調査の実施にあたり御協力を賜りました、旧耐久性専門委員会各位、釧路宇部コンクリート工業株式会社、釧路生コン株式会社、滝井生コンクリート株式会社、盛岡カイハツ生コンクリート株式会社、盛岡菱光株式会社に深く御礼申し上げます。

2 調査の概要

コンクリートの凍害劣化の実地調査のために、『耐久性を阻害する要因マップ』¹⁾より凍害危険度の異なる釧路、盛岡、酒田、東京を暴露地として選定し、同一の AE コンクリートを用いて暴露実験を行った。コンクリートの配調合は、水セメント比とスランプを変化させ、一般的な土木配合と建築調合の計 4 水準とした。劣化の程度を評価するにあたり、主に動弾性係数と質量の経年変化を調査した。また、材齢 10 年と材齢 20 年時には、中性化、細孔量、圧縮強度、気泡間隔係数など詳細な調査を併せて行った。

以下に、暴露地、暴露期間、供試体の使用材料や配調合、試験項目、試験時期の詳細を報告する。

2.1 暴露条件

2.1.1 暴露地

『耐久性を阻害する要因マップ』¹⁾のうち凍害に関する危険度マップをもとに、釧路、盛岡、酒田、東京の 4 箇所を暴露地として選定した。参考とした危険度マップは、AMeDAS や全国気象官署のデータより凍害日数を推定したもので、凍結を -5°C 未満、融解を 0°C 以上と仮定し、日最低気温が -5°C 未満、日最高気温が 0°C 以上となった日を調査した。それによると、図 2.1 に示すように各暴露地の年間凍害日数は、釧路が 40 日から 60 日、盛岡が 20 日から 40 日、酒田が 0 日から 10 日、東京が 0 日となっている。つまり、各暴露地の凍害危険度は、釧路、盛岡が凍害を受け易く、酒田が中庸、東京が受け難い地域である。なお、実際に暴露した期間 (1986 年 9 月～2006 年 6 月) の気象状況を改めて調査した結果を『3.1 各暴露地の凍結日数および凍結融解回数』に報告しているので参照されたい。

暴露地の詳細を表 2.1 に示す。釧路では材齢 15 年時に暴露場所を変更しているが、両箇所は 1km 以内の場所にあり暴露条件に差はないと考える。

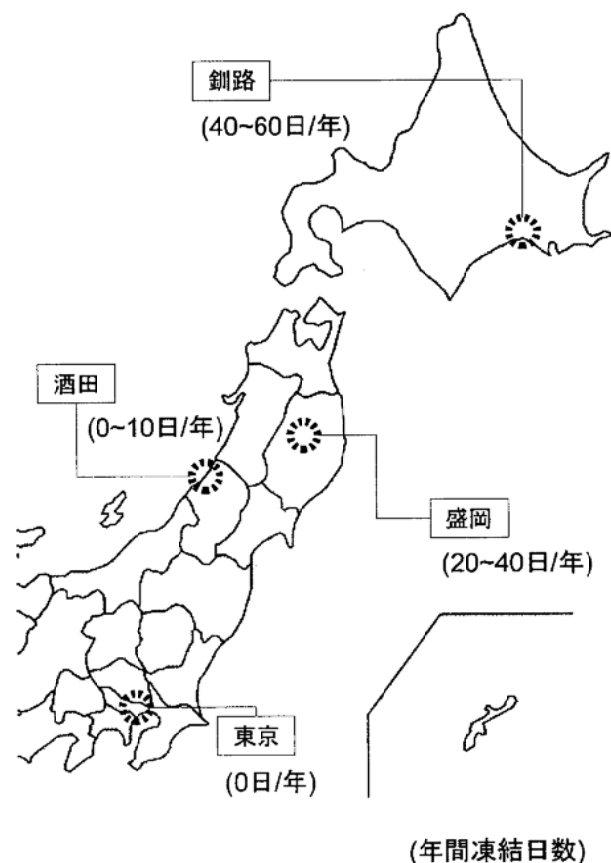


図 2.1 暴露地

表 2.1 暴露地の詳細

凍害の影響	暴露地	
受け易い	北海道 釧路	材齢 0～15年: 釧路宇部コンクリート工業株式会社 釧路市鳥取南5-1-24 材齢15～20年: 釧路生コン株式会社 釧路市星が浦南1-3-8
	岩手県 盛岡	盛岡カイハツ生コンクリート株式会社(旧盛岡菱光株式会社) 盛岡市上太田蔵戸32-5
中 庸	山形県 酒田	滝井生コンクリート株式会社 酒田市大字宮海字南砂畑2-37
受け難い	東京都 北区	社団法人 セメント協会 研究所 北区豊島4-17-33

2.1.2 暴露状況

暴露は、凍結後に融解しやすい日当たりのよい場所を選定し、また積雪期に供試体が雪に埋もれぬように木製の架台を設置し行った。写真 2. 1 がその状況であるが、材齢 5 年を経過しても測定結果に顕著な変化が現れなかったため、材齢 5 年以降は各配調合 1 本の供試体を写真 2. 2 のような水槽に入れ、水に浸漬させることでより厳しい暴露環境とした。写真 2. 3 が、材齢 5 年以降の暴露状況である。水槽は図 2.2 のように底面から 20mm の高さに供試体が設置されるようにガイドを取り付け、また側面に穴を設けることで降雨時に一定の水位まで雨が溜まる仕組みとした。この仕組みにより、供試体の一面が 10mm ほど水に浸かり、吸水しやすい環境となる。

各暴露地の状況と供試体の設置状況を、写真 2. 4 から写真 2. 13 に示す。



写真 2. 1 材齢 5 年までの暴露状況

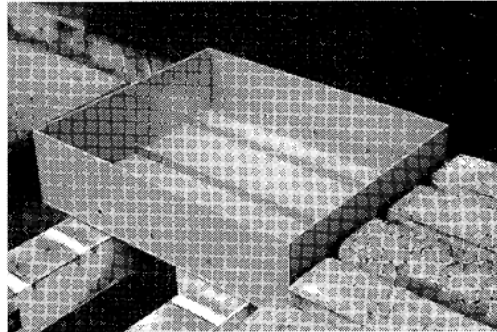


写真 2. 2 水槽

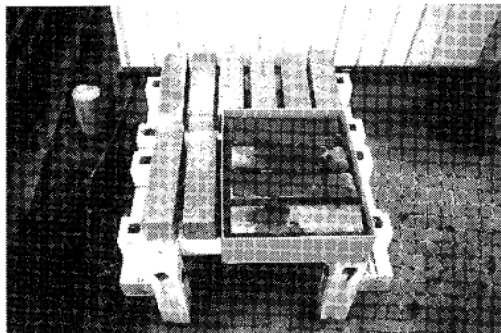


写真 2. 3 材齢 5 年以降の暴露状況

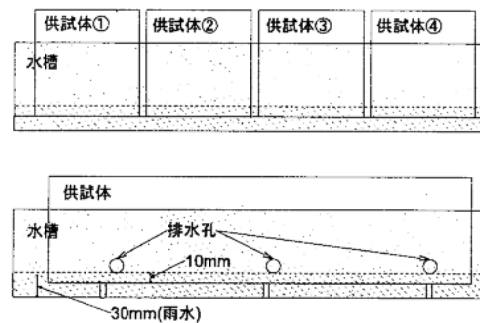


図 2.2 水槽概要図

1) 釧路



写真 2. 4 釧路の暴露場所 (～15 年)

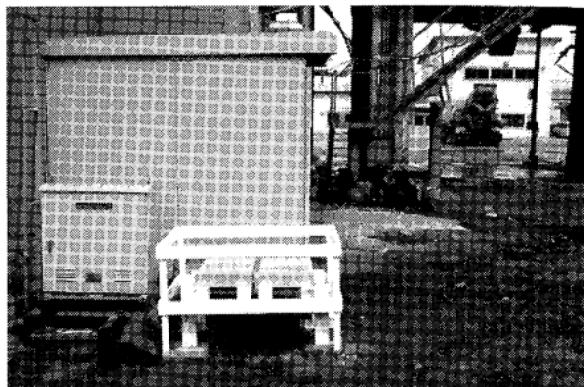


写真 2. 5 釧路の暴露状況 (～15 年)

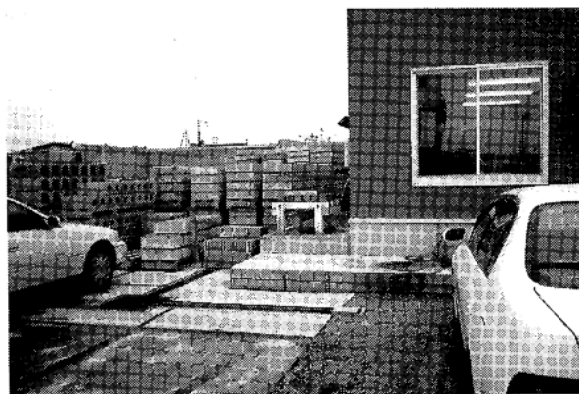


写真 2. 6 釧路の暴露場所 (15 年～)

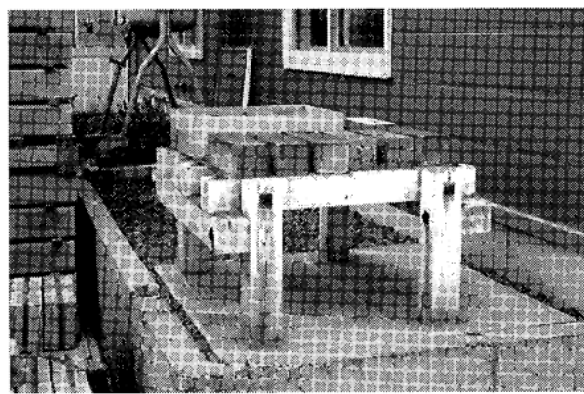


写真 2. 7 釧路の暴露状況 (15 年～)

2) 盛岡



写真 2. 8 盛岡の暴露場所

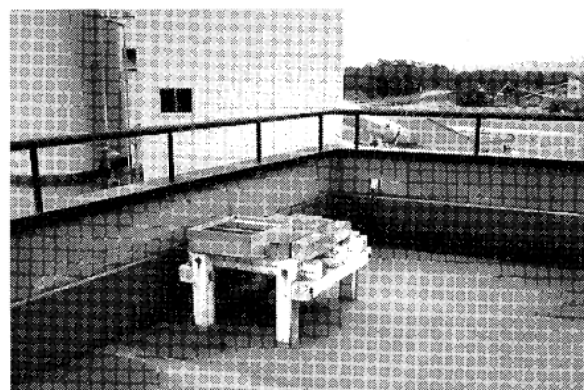


写真 2. 9 盛岡の暴露状況

3) 酒田



写真 2. 10 酒田の暴露場所

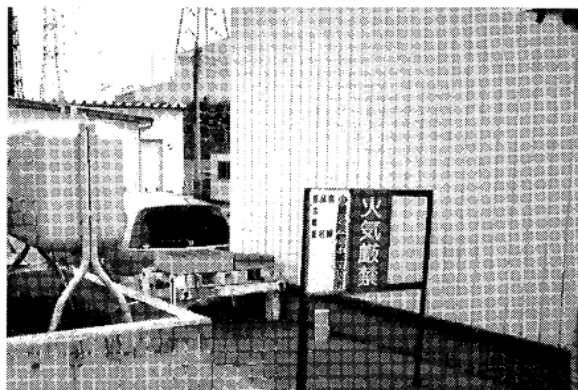


写真 2. 11 酒田の暴露状況

4) 東京



写真 2. 12 東京の暴露場所

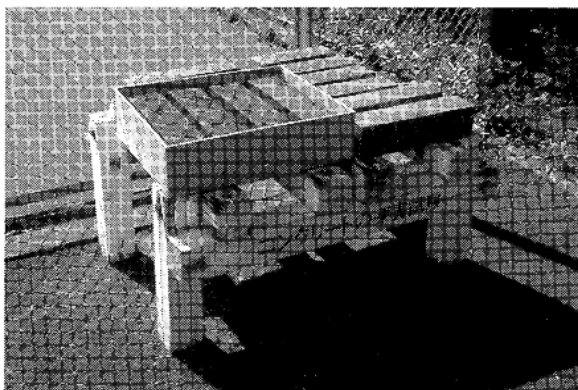


写真 2. 13 東京の暴露状況

2.2 コンクリート供試体

供試体は、同一バッチのコンクリートを使用して、暴露用に $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を各配調合 3 本ずつ、材齢 28 日の圧縮強度および静弾性係数の試験用に直径 10cm 高さ 20cm の円柱供試体を各配調合 3 本ずつ成形した。いずれも、28 日間の標準水中養生後に暴露および試験に供した。

2.2.1 使用材料

コンクリートに使用したセメント、粗骨材、細骨材、混和剤、練混ぜ水の詳細を以下に示す。

1) セメント

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。化学分析および物験試験結果を表 2.2、表 2.3 に示す。

表 2.2 セメントの化学分析結果

化学成分(%)													
ig.loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl
1.1	0.6	21.4	5.2	2.8	63.3	1.9	1.9	0.36	0.50	0.38	0.18	0.24	0.005

表 2.3 セメントの物理試験結果

密度	比表面積	凝 結			安定性	70-値	強さ (N/mm ²)					
		水量	始発	終結			圧縮			曲げ		
							(g/cm ³)	(cm ² /g)	(%)	(h-m)	(h-m)	(mm)
3.14	3320	27.8	2-45	3-49	良	248	15.3	27.0	43.8	3.5	5.3	7.9

表 2.3 に示した圧縮強さの試験方法は、JIS R 5201:1981 に準拠したもので現在の試験方法とは大きく異なっている。現在の試験方法による圧縮強さに換算²⁾すると、3 日が 21.7N/mm^2 、7 日が 38.3N/mm^2 、28 日が 62.2N/mm^2 となり、最近のセメントの圧縮強さ³⁾とほぼ同等である。

2) 骨材

粗骨材は、硬質砂岩碎石 2005(東京都西多摩郡瑞穂町産)、細骨材は、陸砂(静岡県御前崎市産)を使用した。骨材の物理試験結果を表 2.4 に示す。

骨材の品質は、関係する品質規格を満足する良質なものである。

表 2.4 骨材の物理試験結果

骨材	ふるい通過量 (%)										粗粒率	密度 (g/cm³)	単位容積質量 (kg/m³)	実積率 (%)	吸水率 (%)
	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15					
粗骨材(硬質砂岩碎石)	100	94	76	36	1	0	—	—	—	—	6.70	2.65	1576	59.8	0.51
細骨材(陸砂)	—	—	—	100	99	86	57	37	21	7	2.93	2.62	1668	64.6	1.48

3) 混和剤

混和剤は、AE 減水剤 (ポゾリス No.70 : 現 (株)BASF ポゾリス社製) および AE 剤 (マイクロエア 303A : 現 (株)BASF ポゾリス社製) を使用した。

4) 練混ぜ水

練混ぜ水は、上水道水を使用した。

2.2.2 コンクリートの配調合

配調合は、水セメント比を 50% と 60%、目標スランブを土木配合として $8.0 \pm 1.5\text{cm}$ 、建築調合として $18.0 \pm 1.5\text{cm}$ 、全ての供試体で目標空気量を $4.5 \pm 0.5\%$ の計 4 配調合とした。

配調合およびフレッシュ時の性状を表 2.5 に示す。以降、本報告書内では 4 つの配調合を、水セメント比、スランブの順で wc50s8 (水セメント比 50%、スランブ 8cm の場合) のように表記する。

表 2.5 コンクリートの配調合およびフレッシュ性状

配調合	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量						フレッシュ性状		
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤	練上り温度	スランブ	空気量
					(kg/m ³)				(g/m ³)		(°C)	(cm)	(%)
wc50s8	8.0 ± 1.5	4.5 ± 0.5	50	44	161	322	800	1039	1006	8	21.0	8.5	4.5
wc60s8	8.0 ± 1.5	4.5 ± 0.5	60	46	160	267	853	1034	835	6	21.0	7.5	4.8
wc50s18	18.0 ± 1.5	4.5 ± 0.5	50	44	180	360	761	996	1125	7	21.0	17.5	4.6
wc60s18	18.0 ± 1.5	4.5 ± 0.5	60	46	179	298	819	992	931	7	21.0	18.0	4.3

なお、スランブは JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」、空気量は JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法－空気室圧力方法」に準拠して計測を行った。

2.2.3 供試体の成形方法および養生方法

成形および養生は、JIS A 1138「試験室におけるコンクリートの作り方」および JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準じて行った。

練混ぜは容量 100 リットルの強制練りパン型ミキサを用い、同一バッチのコンクリートより $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を各暴露地に各配調合 3 本ずつ、直径 10cm 高さ 20cm の円柱供試体を各配調合 3 本ずつ成形した。成形の翌日に脱型を行い、材齢 28 日まで標準水中養生を行った。

2.3 暴露期間および調査時期

暴露は、1986 年 9 月に開始した。調査は、材齢 5 年までは半年おきに、材齢 5 年から 10 年までは 1 年おき、それ以降は材齢 12 年、15 年、20 年に行った。材齢 5 年までの調査を行う時期は、凍害の生じやすくなる冬期前の 10 月と冬期後の 4 月とした。しかし、10 月と 4 月の調査で顕著な差が認められなかったため、材齢 6 年以降は毎年 6 月頃の調査のみとした。表 2.6 に調査時期を示す。

表 2.6 調査時期

暴露期間	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
年	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1998	2001	2006
月	9	4	10	4	10	4	10	4	10	5	6	7	6	6

2.4 調査項目および試験方法

2.4.1 調査項目の概要

1) 暴露開始前 (標準水中養生材齢 28 日)

暴露供試体の初期値として一次共鳴振動数、質量、圧縮強度、静弾性係数の測定および外観観察を行った。

2) 暴露開始から材齢 20 年まで

凍害による経時的な劣化を評価するために、表 2.6 の調査時期に一次共鳴振動数および質量の計測を行った。また、材齢 10 年と材齢 20 年時には、下記の調査項目を追加し調査を行った。なお追加の調査項目には、水に浸漬させていない供試体 (2.1.2 参照) を用いて試験を行った。

3) 材齢 10 年時の追加調査項目

水に浸漬していない供試体から $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ の試料をコンクリートカッターで採取し、中性化深さ、細孔量の調査を行った。試料の採取箇所を図 2.3 に示す。試料を採取した後、残った $10 \times 10 \times 30\text{cm}$ の供試体は再びもとの場所で暴露を行った。

4) 材齢 20 年時の追加調査項目

材齢 10 年時の調査に使用した $10 \times 10 \times 30\text{cm}$ の供試体を使用し、圧縮強度 ($10 \times 10 \times 10\text{cm}$ の立方供試体)、中性化深さ、気泡間隔係数、細孔量の調査を行った。

試料の採取箇所を図 2.4 に示す。

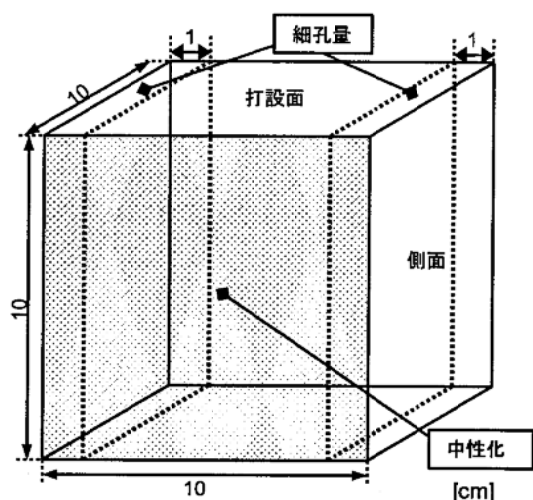


図 2.3 材齢 10 年時調査の試料採取箇所

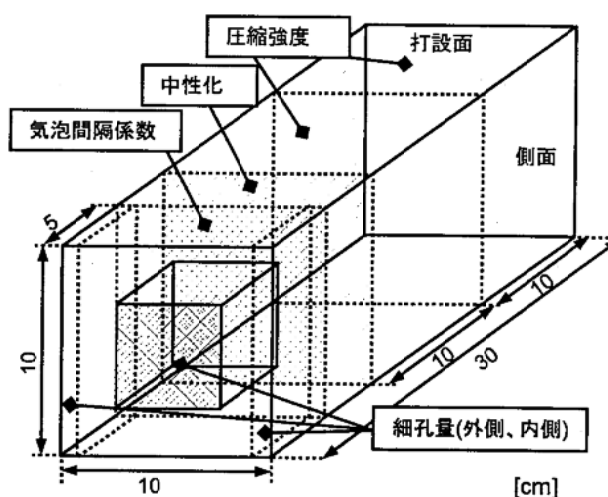


図 2.4 材齢 20 年時調査の試料採取箇所

材齢 10 年、20 年時の追加調査項目を表 2.7 にまとめて示す。

表 2.7 材齢 10 年と材齢 20 年の追加調査項目

追加調査項目	材齢28日	材齢10年	材齢20年
気泡間隔係数			○
圧縮強度	○		○
静弾性係数	○		
中性化深さ		○	○
細孔量		○	○

以下に、各調査項目の詳細を報告する。

2.4.2 各暴露地の凍結日数および凍結融解回数

気象庁気象統計情報⁴⁾より 1986 年から 2006 年までの各暴露地の気象データを抽出し、暴露供試体が実際にさらされた気象環境を調査した。調査は『耐久性を阻害する要因マップ』¹⁾を参考とし、凍結温度を -5°C 以下または -10°C 以下、融解温度を 0°C 以上と設定して行った。そして、日最低気温が凍結温度以下となる日数を凍結日数とし、凍結後に日最高気温が融解温度以上になる回数を凍結融解回数としてカウントした。なお、 -5°C はコンクリートが凍る最低限の凍結温度として設定し、 -10°C は氷の結晶が急激に成長する温度として設定している。

2.4.3 気泡間隔係数

気泡間隔係数は、ASTM C 457-06「Standard Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete PROCEDURE B - MODIFIED POINT-COUNT METHOD」に準拠して修正ポイントカウント法により行った。

また材齢 10 年の際に、画像解析装置により気泡表面間距離の計測を行った。規格化されている

方法ではないが、全ての供試体を調査していることから参考までに資料編1)に掲載する。なお、気泡表面間距離と気泡間隔係数には線形の比例関係があると報告⁵⁾⁶⁾されている。

2.4.4 圧縮強度および静弾性係数

材齢 28 日の圧縮強度試験は、標準水中養生後に JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行い、静弾性係数は、圧縮強度の試験の際にコンプレッソメータを用いて、応力-ひずみ曲線を計測（現 JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」）し、最大荷重の 1/3 における応力とひずみより割線弾性係数を求めた。

材齢 20 年の圧縮強度試験は、図 2.5 に示すように $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ の立方体を 2 本作製し試験に供した。供試体の寸法以外は JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠して行った。載荷方向は、切断し研磨した面を載荷面としたため、打設方向に対して垂直方向となる。また、角柱供試体と円柱供試体による試験結果の差は小さい⁷⁾ため、供試体の高さとの比による補正係数のみを乗じて圧縮強度とした。

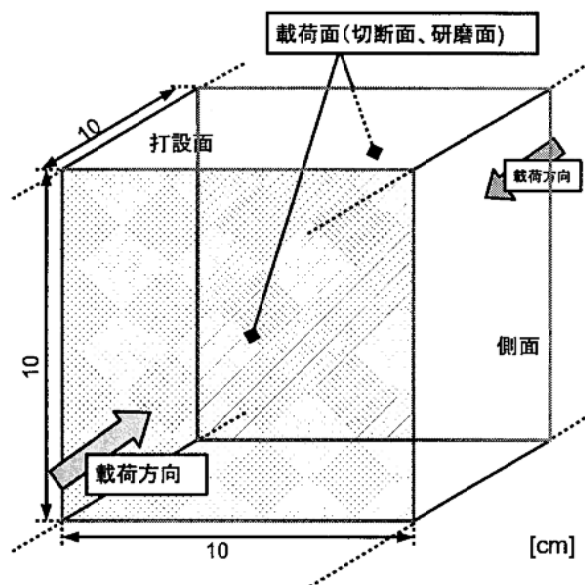


図 2.5 圧縮強度試験用供試体（材齢 20 年）

2.4.5 外観観察

目視および写真撮影により、凍害によるひび割れおよびスケーリングなどの有無を観察した。

2.4.6 一次共鳴振動数と質量

JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」に準拠して、たわみ振動および縦振動による一次共鳴振動数と質量を測定した。なお、供試体の含水状態による影響を小さくするために、測定をする 2、3 日前にシートで覆い含水状態を安定させた。

2.4.7 中性化深さ

JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して行った。測定箇所は、切断面の各 4 辺、つまり打設面、底面および左右側面からの中性化深さをそれぞれ測定し、計測点数は各辺 5 箇所とした。なお、材齢 10 年の際はまだ試験方法が規格化されていなかったが、現試験方法と同等の試験で行っている。

2.4.8 細孔量

試験は、まず粗粉碎した試料を $2.5\sim 5.0\text{mm}$ の粒径にふるい分け、アセトンに浸漬し試料中の水和を停止した後、D 乾燥を行い試料調整⁸⁾を行った。調整後の試料を用いて、水銀圧入法により細孔量の計測を行った（装置：材齢 10 年調査「MICROMERITICS 社製 PORESIZER9310」、材齢 20 年調査「THERMO ELECTRON CORPORATION 社製 PASCAL」）。

材齢 10 年の調査では、釧路と東京に暴露した供試体のうち 3 配調合 (wc60s8,wc50s18,wc60s18) を対象に、図 2.6 のように表層から 1cm までの領域を左右側面から採取し試料とした。材齢 20 年の調査では、各暴露地、各配調合を対象とし全ての供試体を調査した。また、供試体の表層と内部の細孔量を比較するために、図 2.6 のように供試体外側に加えて内側の試料も採取した。その際、外側は表層から 0.5cm までの領域を左右側面から採取し、内側は外側と同じ体積となるように中心部より採取し試料とした。

計測結果の報告にあたり、材齢 10 年の調査では単位質量当りの細孔量 (mm^3/g) を、材齢 20 年の調査では材齢 10 年の表記に加え、より直接的に細孔量を示すために単位体積当りの細孔量 (mm^3/cm^3) で示す。なお、細孔量の算出にあたり、水銀と試料との接触角を 130° として式 (1) の圧入圧と細孔径の関係式を使用した。

$$d = -4\gamma \cos \theta / P \quad (1)$$

d : 細孔直径 (μm)

γ : 水銀の表面張力 $0.483(\text{N/m})$

θ : 水銀と試料との接触角 $130(^\circ)$

P : 圧入圧 (MPa)

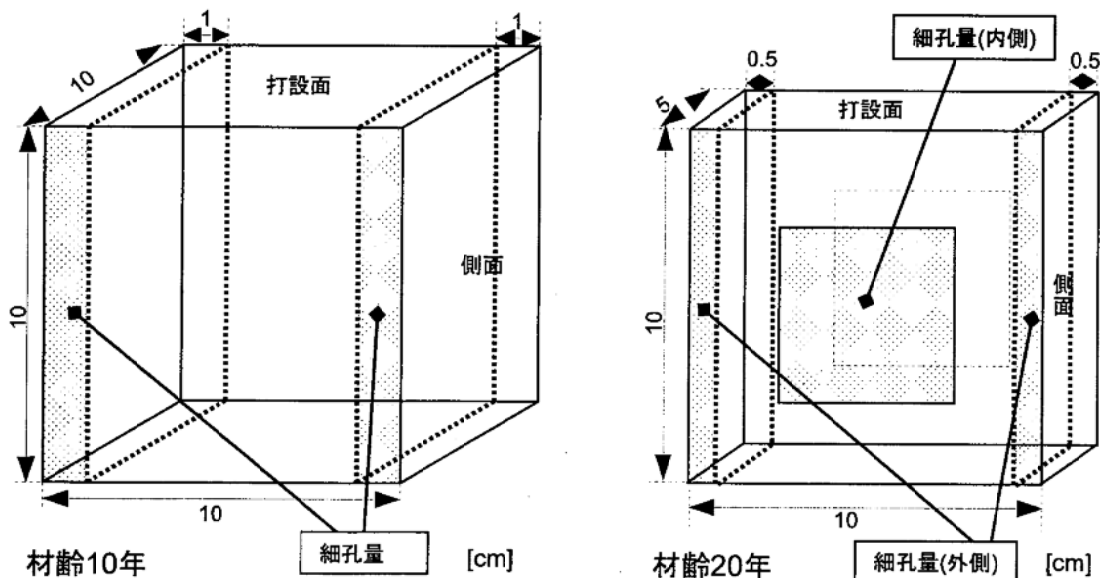


図 2.6 細孔量の試料採取位置

3 調査結果および考察

3.1 各暴露地の凍結日数および凍結融解回数

気象統計情報より推定した、暴露試験期間中(1986年9月～2006年6月)の各暴露地の凍結日数と凍結融解回数を表3.1、表3.2に示す。

凍結温度を-5℃以下と設定した場合、凍害危険度は釧路＞盛岡＞酒田＞東京であり、報告書D-1,2¹⁾と同様の結果であった。また、凍結温度を-10℃以下と設定した場合でも、釧路で400回程度、盛岡では50回程度の凍結融解が記録されている。本調査により、釧路、盛岡、酒田に暴露した供試体は、凍害劣化の起こり得る気象環境にさらされたことが確認された。

表 3.1 凍結日数および凍結融解回数 (凍結温度-5℃)

暴露地			1986年※	1987年	1988年	1988年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年※	合計
釧路	凍結日数	日	30	99	95	68	69	79	89	70	81	80	91	87	95	97	109	103	84	93	82	89	54	1744
	凍結融解	回	21	43	38	50	39	50	53	46	40	41	52	58	45	58	51	35	44	50	50	41	20	925
盛岡	凍結日数	日	6	51	55	29	30	37	29	24	42	46	44	32	48	46	43	56	40	41	46	63	37	845
	凍結融解	回	5	35	36	27	18	35	29	24	32	38	32	31	32	39	37	36	35	36	37	39	19	652
酒田	凍結日数	日	0	2	4	0	8	2	0	0	2	3	2	1	1	3	1	2	1	2	0	0	7	41
	凍結融解	回	0	2	4	0	5	2	0	0	2	3	1	1	1	3	1	1	1	2	0	0	7	36
東京	凍結日数	日	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	凍結融解	回	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

※ 1986年は9月から12月まで、2006年は1月から6月まで。

表 3.2 凍結日数および凍結融解回数 (凍結温度-10℃)

暴露地			1986年※	1987年	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年※	合計
釧路	凍結日数	日	9	52	51	31	35	37	45	25	39	46	39	34	52	47	65	65	43	49	34	43	28	869
	凍結融解	回	6	19	17	27	11	26	28	17	15	21	17	24	23	28	26	20	18	21	21	15	7	407
盛岡	凍結日数	日	0	4	8	2	12	1	0	1	2	8	4	0	4	2	4	14	6	6	0	2	9	89
	凍結融解	回	0	3	4	2	3	1	0	1	2	6	4	0	2	2	4	4	5	4	0	2	5	54
酒田	凍結日数	日	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	凍結融解	回	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
東京	凍結日数	日	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	凍結融解	回	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

※ 1986年は9月から12月まで、2006年は1月から6月まで。

3.2 気泡間隔係数

材齢 20 年調査で求めた気泡間隔係数を表 3.3 に示す。フレッシュ時に同等の空気量を入れたものの、硬化後の気泡組織は異なることが分かった。本調査で暴露した供試体の気泡間隔係数は約 $230\mu\text{m}$ ~ $300\mu\text{m}$ であった。水セメント比またはスランプが小さいほど気泡間隔係数は小さく耐凍害性が高いと言える。一般的に耐凍害性を得るためには $250\mu\text{m}$ 以下の気泡間隔係数が必要である⁹⁾ といわれており、本暴露供試体のうちスランプ 18cm の wc50s18、wc60s18 は $250\mu\text{m}$ を上回っていた。

表 3.3 気泡間隔係数

配調合	全トラバース長	気泡総数	気泡上停止数	ペースト上停止数	気泡間隔係数
	(mm)	(個)	(回)	(回)	(μm)
wc50s8	2454	548	129	508	232
wc60s8	2475	547	147	538	246
wc50s18	2427	544	146	621	285
wc60s18	2433	456	127	557	304

3.3 相対動弾性係数の経年変化

たわみ振動および縦振動による一次共鳴振動数から算出した相対動弾性係数の経年変化を図 3.1、図 3.2 に示した。各暴露地ごとに、全ての配調合と水に浸漬させた供試体 (2.1.2 参照) のデータを併せて図示しており、浸漬させた供試体の結果は黒塗り (■) で、浸漬させずに気中暴露した供試体は白抜き (□) で示した。

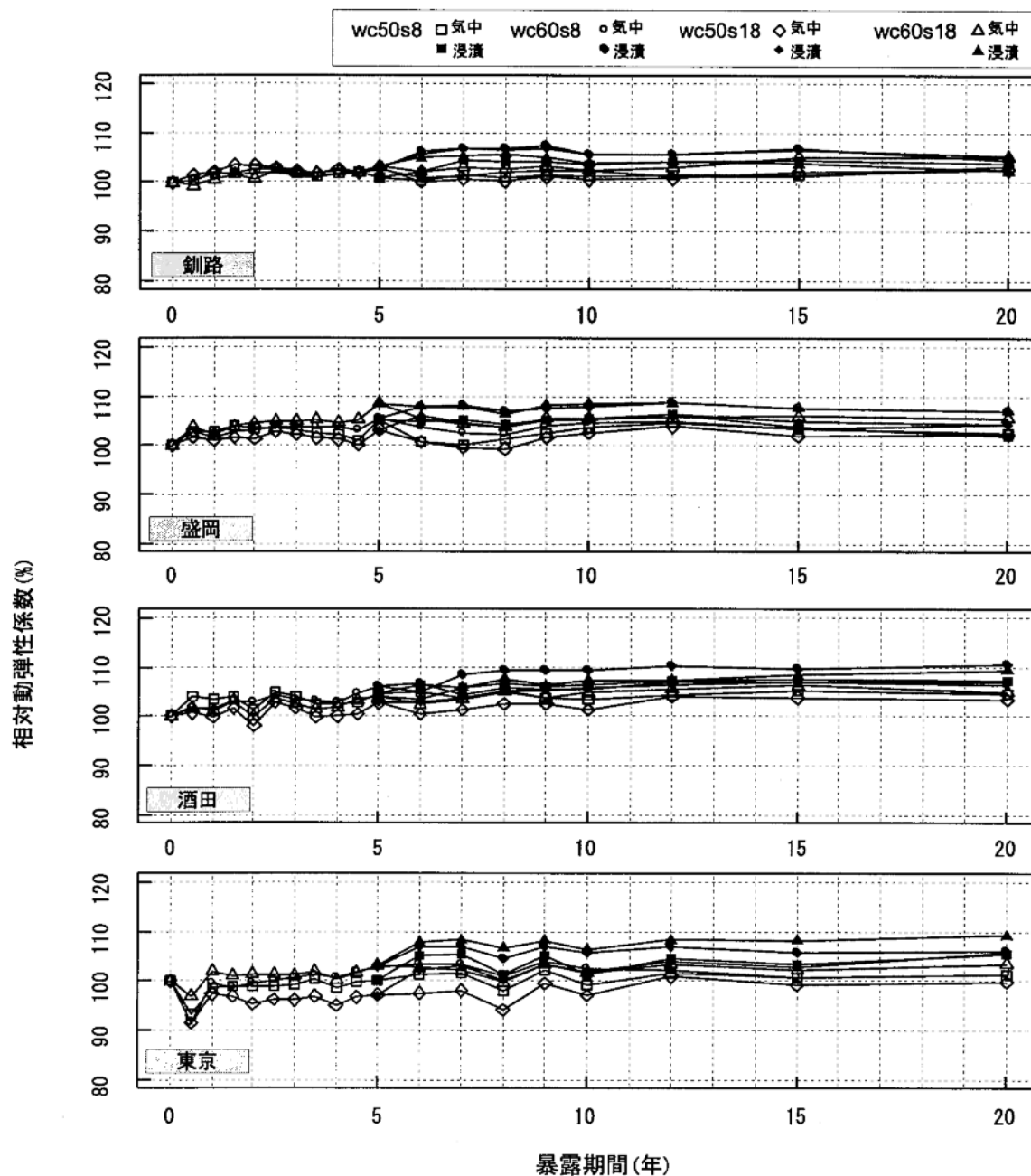


図 3.1 相対動弾性係数の経年変化 (たわみ振動)

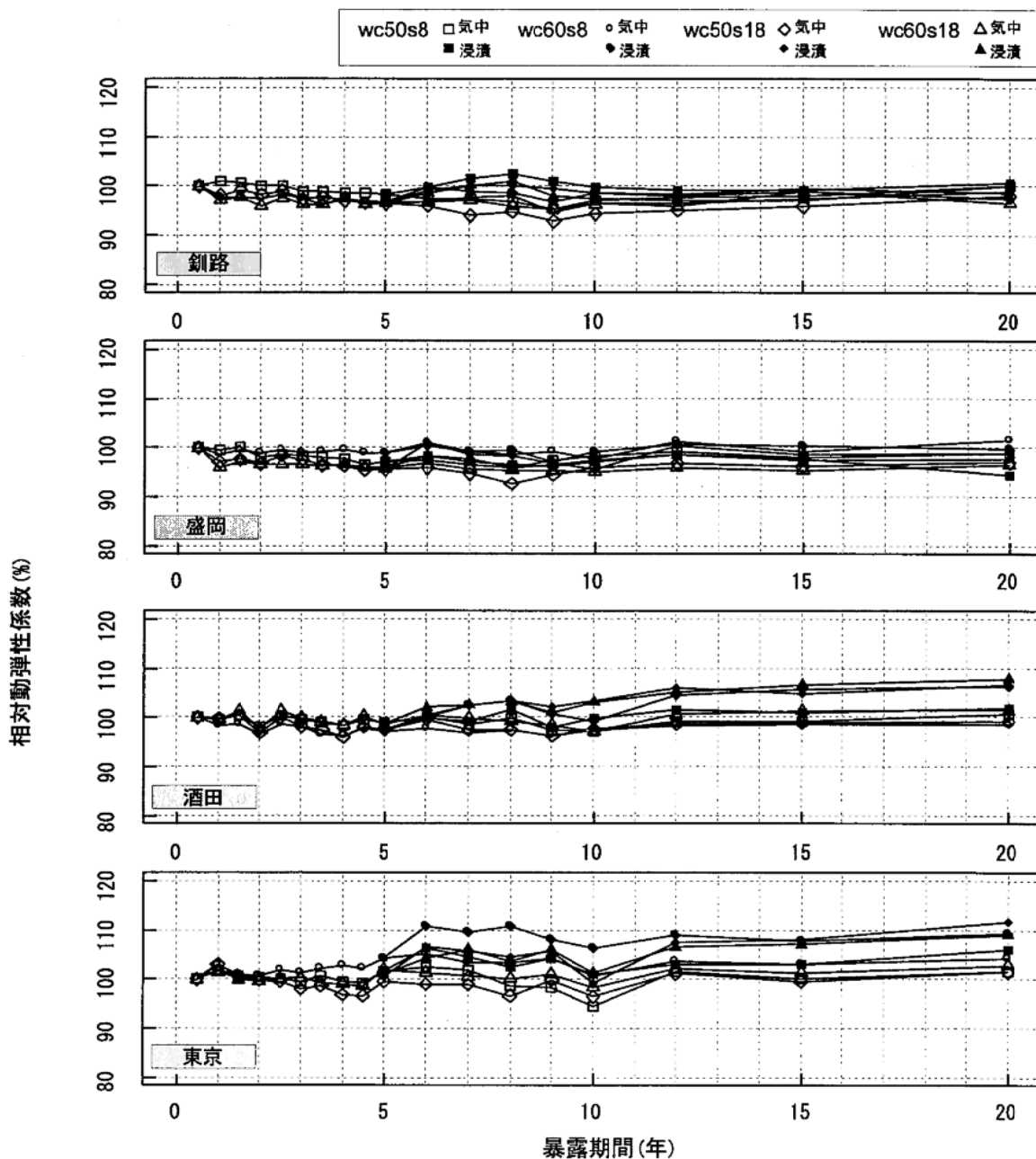


図 3.2 相対動弾性係数の経年変化 (縦振動)

すべての暴露地、配調合で、たわみ振動および縦振動による相対動弾性係数の低下は認められず、凍結融解による劣化の兆候は確認されなかった。また、表層の状態をより評価できるたわみ振動¹⁰⁾による結果において、縦振動による結果と同様に相対動弾性係数の低下が認められないことから、供試体の表層も内部と同等に健全であると考えられる。また、水に浸漬させた供試体(2.1.2 参照)も相対動弾性係数の低下は認められず劣化の兆候は確認されなかった。なお、浸漬後にたわみ振動による一次共鳴振動数、縦振動による一次共鳴振動数ともに若干増加しており、浸漬による供試体への影響が確認された。

3.4 質量の経年変化

質量の経年変化を図 3.3 に示す。何れの供試体も、暴露開始初期は乾燥により大きく質量減少するが、その後は長期にわたり緩やかに減少している。長期にわたる質量減少ではペースト分の剥離などが影響していると考えられるが、極端な質量の減少は生じておらずスケーリングなどによる凍害劣化の兆候は確認されなかった。また、水に浸漬させた供試体 (2.1.2 参照) は、浸漬後に質量が増加し高い含水状態で暴露された事が分かる。しかし、その後の暴露において極端な質量減少は生じておらず、また相対動弾性係数の低下も確認されなかった (3.3 参照) ことから、水に浸漬させた厳しい環境で暴露した供試体でも凍害劣化の兆候は確認されなかった。

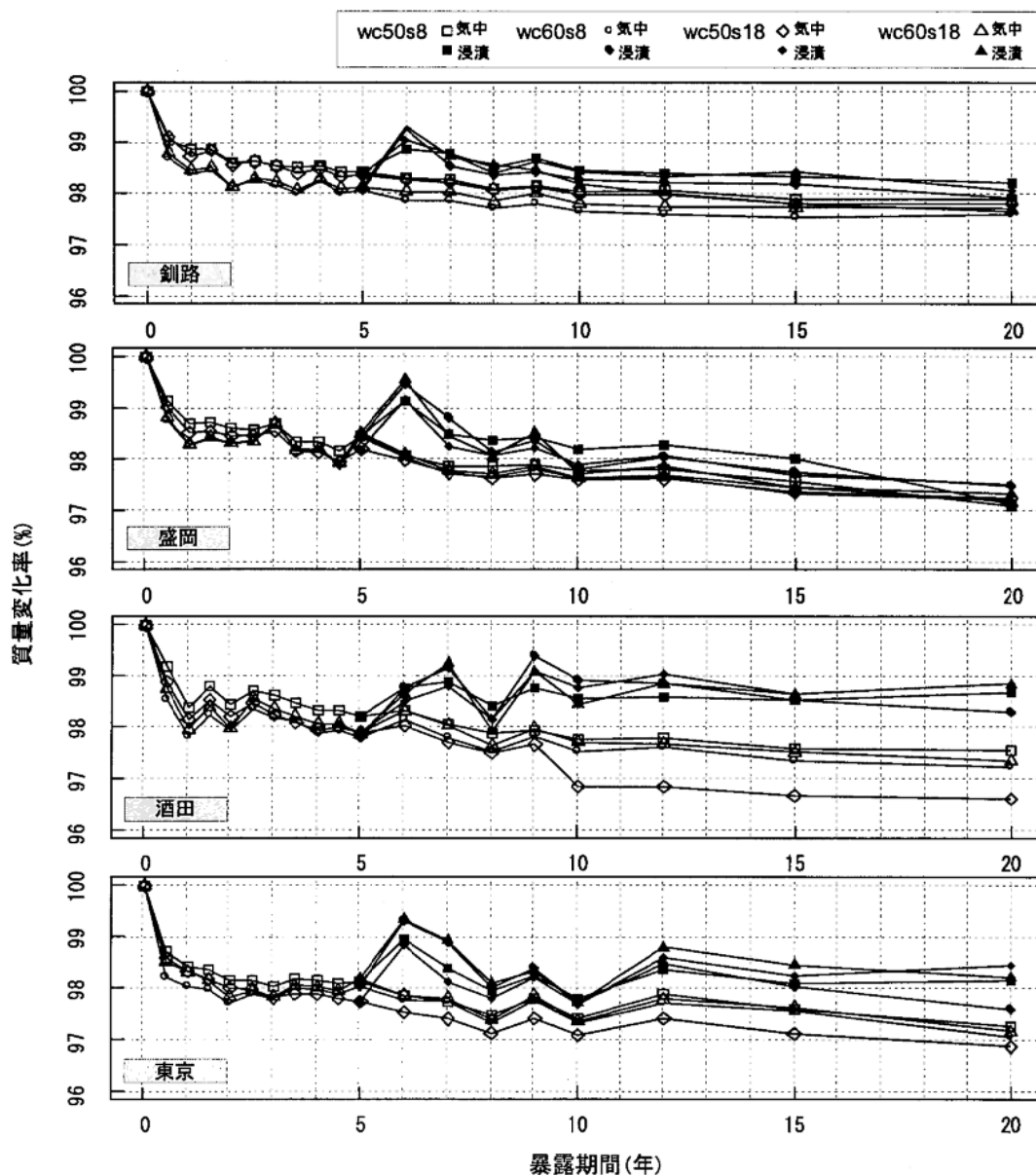


図 3.3 質量の経年変化

3.5 圧縮強度および静弾性係数 (材齢 28 日、材齢 20 年)

材齢 28 日の圧縮強度および静弾性係数と、各暴露地において 20 年間暴露した供試体の圧縮強度を表 3.4、図 3.4 に示す。

表 3.4 圧縮強度 (材齢 28 日、20 年) および静弾性係数 (材齢 28 日)

配調合	水セメント比 (%)	目標スランプ (cm)	材齢28日		材齢20年 (N/mm ²)			
			静弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度			
					釧路	盛岡	酒田	東京
wc50s8	50	8.0	31.7	43.2	63.8	60.6	60.2	61.2
wc60s8	60	8.0	28.8	31.9	52.5	53.8	52.4	44.5
wc50s18	50	18.0	31.1	42.0	64.6	60.4	57.7	53.7
wc60s18	60	18.0	27.8	30.8	53.4	56.6	56.0	47.5

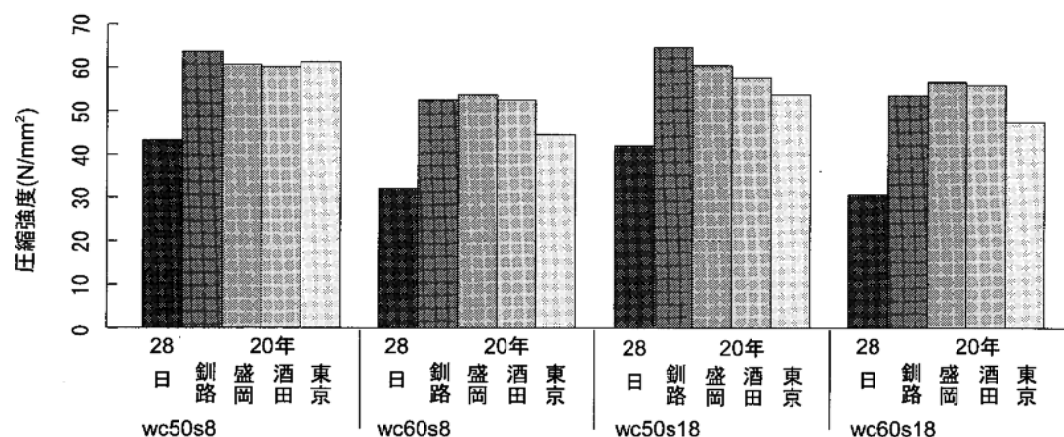


図 3.4 材齢 28 日と材齢 20 年の圧縮強度

すべての暴露地、すべての配調合で圧縮強度は増進しており、供試体の形状・寸法が異なる (2.4.4 参照) ため正確な比較は困難であるが、材齢 28 日に対する材齢 20 年の強度増進比は約 1.3 ~1.8 となった。圧縮強度の結果からも、凍害による劣化の兆候は確認されなかった。

3.6 外観の観察 (暴露開始時、材齢 10 年、材齢 20 年)

暴露開始時および材齢 10 年と材齢 20 年経過した供試体の外観を掲載する。写真は、釧路、盛岡、酒田および東京の暴露地ごとに、それぞれ写真 3. 1、写真 3. 2、写真 3. 3、写真 3. 4 に示す。また、浸漬させた供試体と浸漬させていない供試体 (2.1.2 参照) を併せて掲載する。

全ての供試体でペーストの剥離は見られたが、ひび割れやモルタルの欠損は生じなかった。ペーストの剥離の程度は、浸漬した供試体または水セメント比 60%、スランプ 8cm の供試体でやや激しい傾向にあった。ただし、暴露地による差は明確には認められなかった。

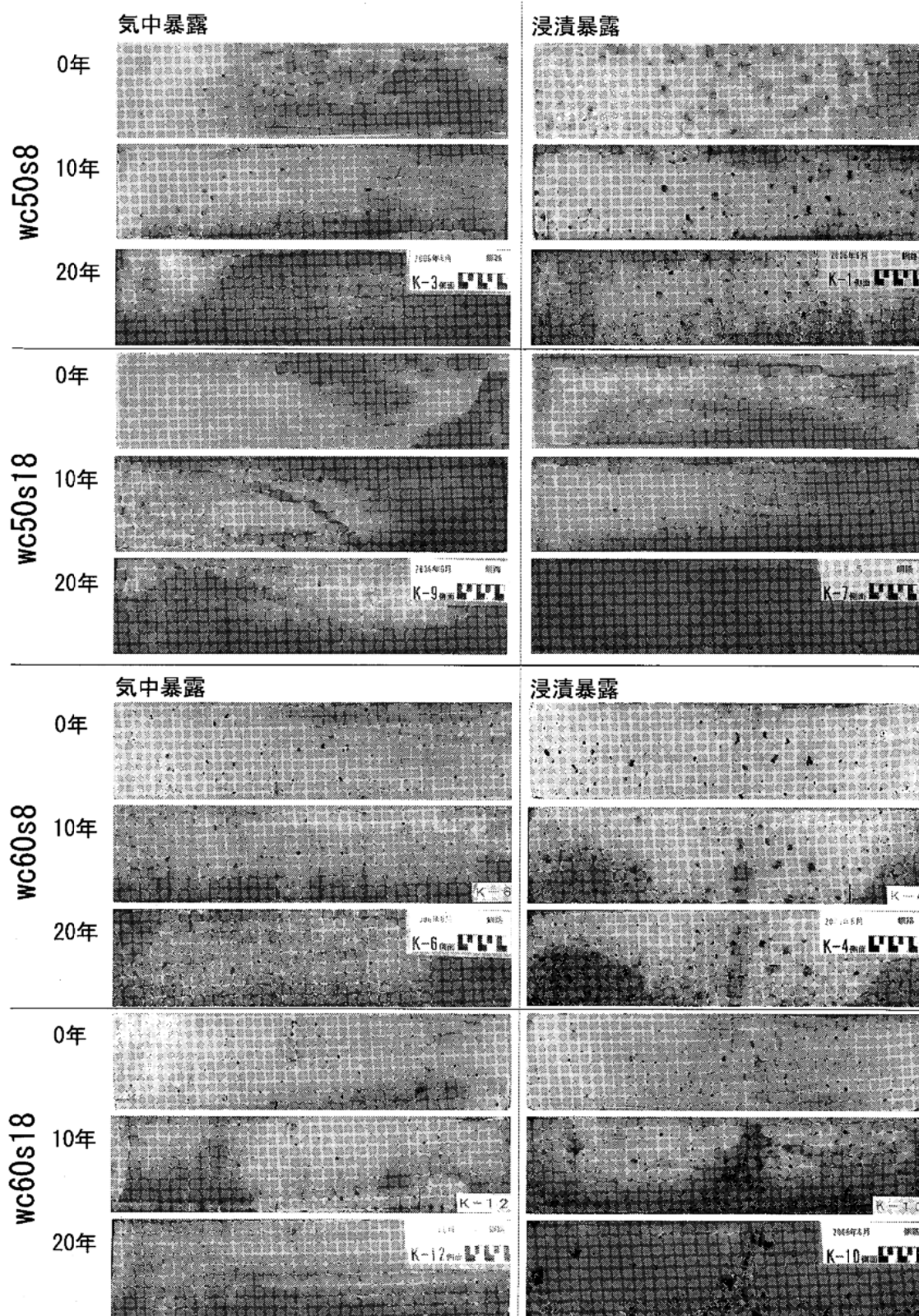


写真 3. 1 釧路に暴露した供試体の外観変化

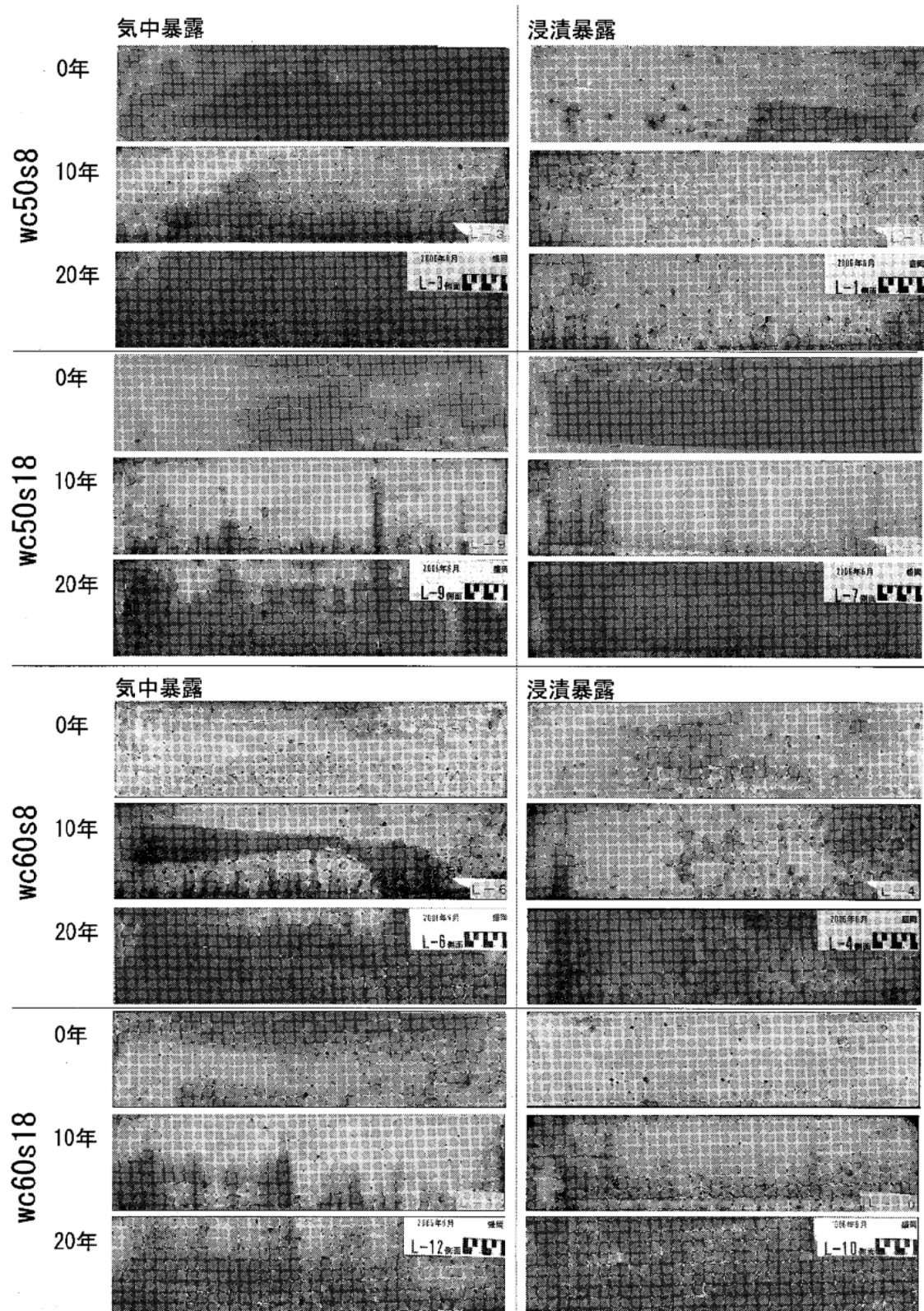


写真 3. 2 盛岡に暴露した供試体の外観変化

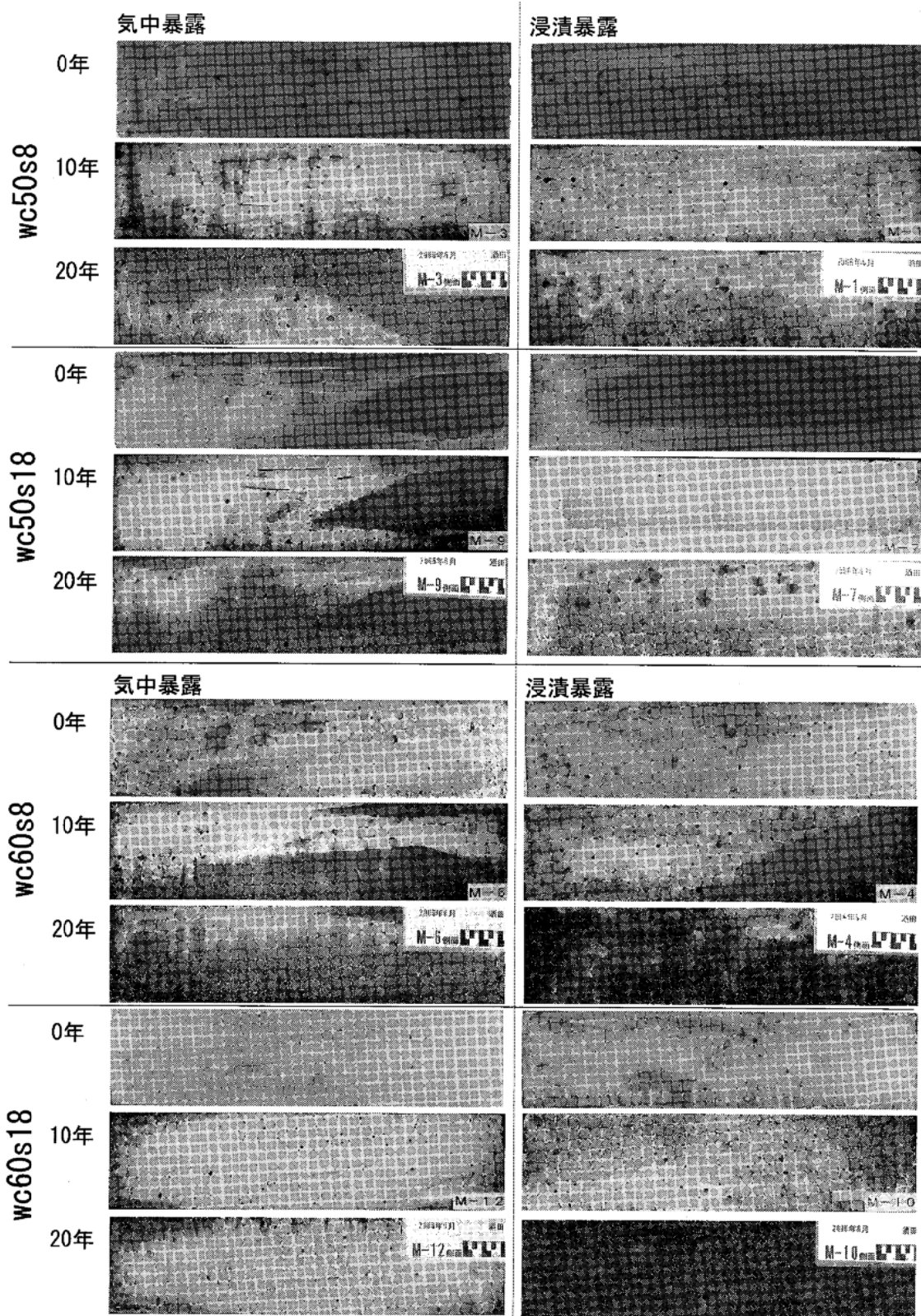


写真 3. 3 酒田に暴露した供試体の外観変化

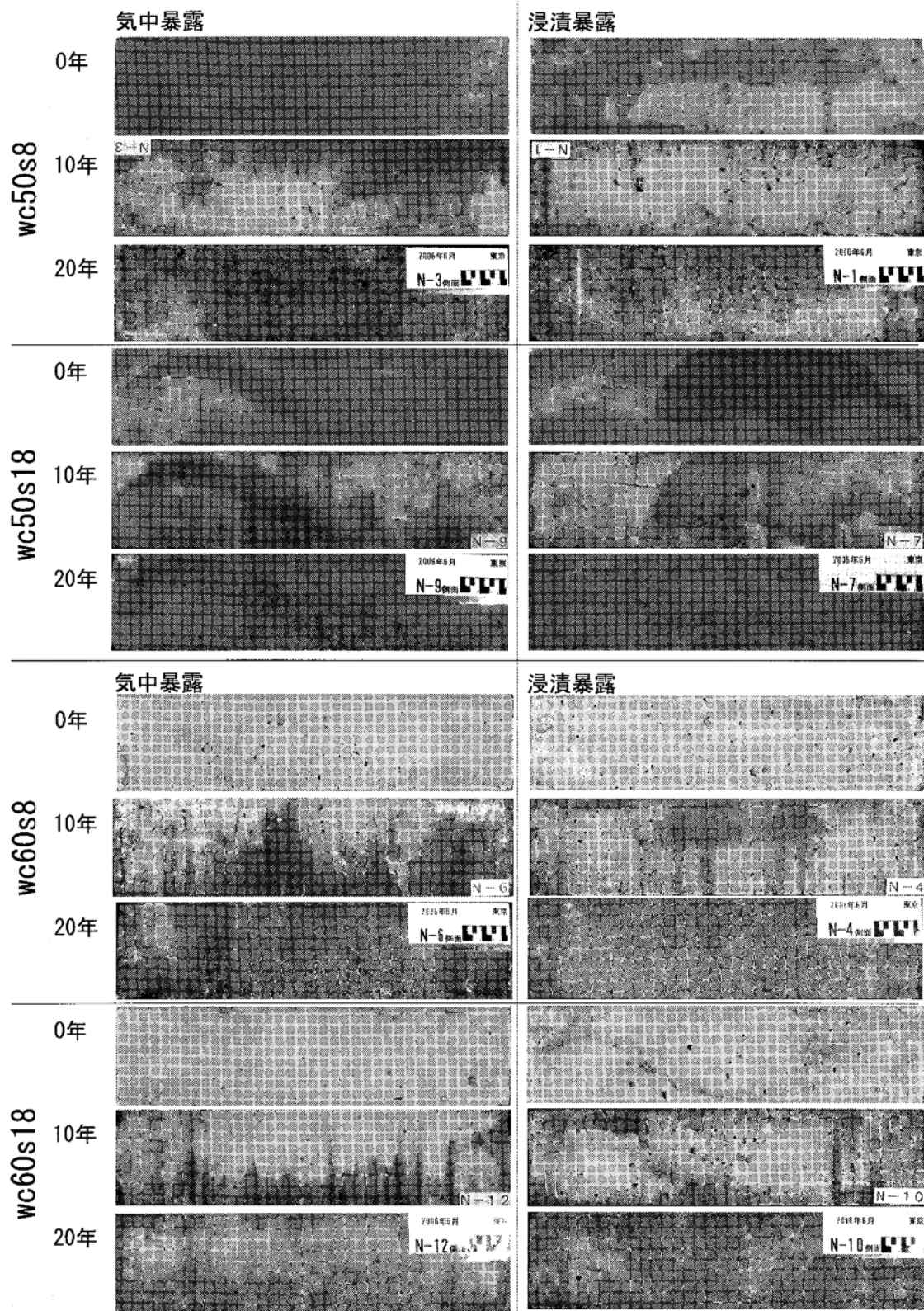


写真 3. 4 東京に暴露した供試体の外観変化

3.7 中性化深さ (暴露期間 10 年、暴露期間 20 年)

材齢 10 年と材齢 20 年における平均中性化深さと最大中性化深さを、供試体の側面、打設面、底面にわけて、それぞれ表 3.5、表 3.6、表 3.7 に示す。測定箇所に着目すると、中性化深さは打設面 > 側面 > 底面の順に大きかった。供試体の側面 (表 3.5) に着目すると、材齢 10 年で 0.0~2.3mm 程度、材齢 20 年を経ても 0.6~4.1mm 程度と非常に小さいことが分かった。また、中性化は一様には生じておらず局所的に大きく生じている箇所や全く生じていない箇所があり、測定値はこれらを含む平均値である。フェノールフタレイン噴霧後の状況を、写真 3. 5、写真 3. 6 に掲載する。何れも中性化深さが比較的大きな wc60s8 の供試体である。

表 3.5 側面からの中性化深さ

配調合	中性化深さ (mm)															
	平均								最大値							
	釧路		盛岡		酒田		東京		釧路		盛岡		酒田		東京	
	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年
wc50s8	0.3	1.4	0.4	2.0	0.1	1.4	0.7	3.1	1.0	2.7	1.5	4.0	1.0	2.6	2.0	5.9
wc60s8	1.6	3.1	1.6	2.3	1.5	2.5	2.3	4.1	3.5	4.8	3.0	4.1	2.5	4.2	4.0	10.3
wc50s18	0.0	0.6	0.0	1.2	0.1	1.6	0.8	1.7	0.0	1.5	0.0	2.7	1.0	2.6	2.0	2.7
wc60s18	1.5	1.9	1.1	2.2	0.5	1.7	1.3	2.6	2.5	3.5	2.5	3.7	1.5	4.2	2.0	3.6

表 3.6 打設面からの中性化深さ

配調合	中性化深さ (mm)															
	平均								最大値							
	釧路		盛岡		酒田		東京		釧路		盛岡		酒田		東京	
	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年
wc50s8	0.2	1.6	0.4	1.7	0.3	1.8	0.3	3.3	1.0	2.1	1.5	2.7	1.5	2.8	0.5	7.2
wc60s8	1.2	2.3	2.3	2.3	0.3	2.7	2.0	4.2	2.0	4.3	2.5	3.7	1.5	4.4	2.5	9.4
wc50s18	0.2	1.8	0.3	1.6	0.4	2.3	0.9	2.5	0.5	4.3	0.5	2.7	1.0	3.9	2.0	4.0
wc60s18	1.8	3.0	1.2	2.2	1.0	2.1	0.9	2.5	3.0	6.0	2.0	5.0	2.0	8.9	1.0	5.5

表 3.7 底面からの中性化深さ

配調合	中性化深さ (mm)															
	平均								最大値							
	釧路		盛岡		酒田		東京		釧路		盛岡		酒田		東京	
	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年	10年	20年
wc50s8	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	4.1
wc60s8	0.0	0.2	0.0	1.3	0.0	0.4	0.3	2.0	0.0	1.8	0.0	4.5	0.0	2.2	0.5	5.1
wc50s18	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0
wc60s18	0.0	0.5	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	1.8	0.0	4.4	0.0	0.0	0.0	2.0

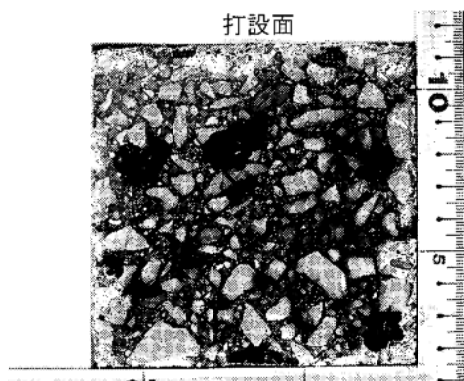


写真 3. 5 中性化深さ (東京,wc60s8,20 年)

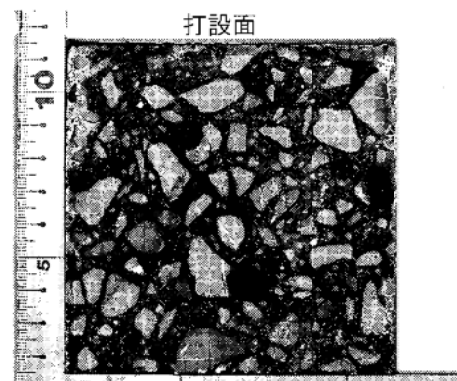


写真 3. 6 中性化深さ (釧路,wc60s8,20 年)

供試体の側面からの中性化深さを図 3.5 に図示した。配調合で比較すると、水セメントを小さくまたはスランプを大きくした供試体で中性化深さが小さかった。

スランプの影響は、ペースト量による影響と思われる。暴露地で比較すると、東京がもっとも大きく、その他寒冷地での明確な傾向は認められなかった。東京の中性化深さは、気温、湿度が大きく影響していると思われる。

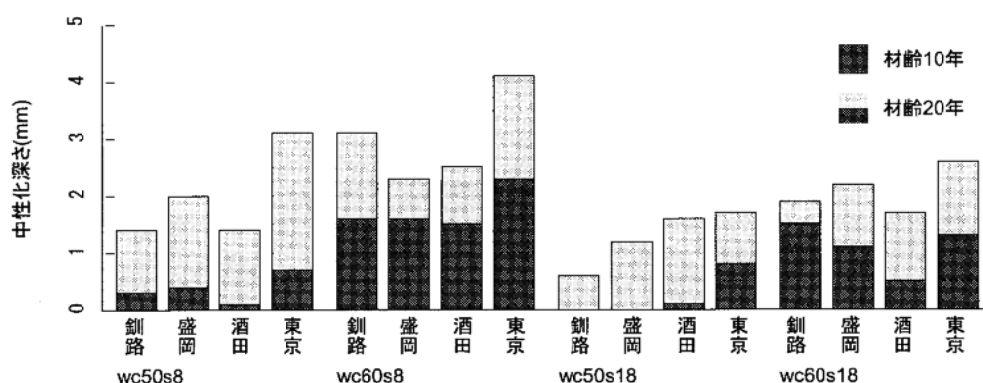


図 3.5 中性化深さ (側面)

これら調査結果を土木学会コンクリート標準示方書設計編【2007年制度】¹¹⁾による中性化の予測式と比較すると、図3.6、図3.7のようにいずれも土木学会式よりも小さな中性化深さであった。これは、暴露した供試体が、試験室において入念に成形・養生を行ったコンクリートであることが一因と考えられる。

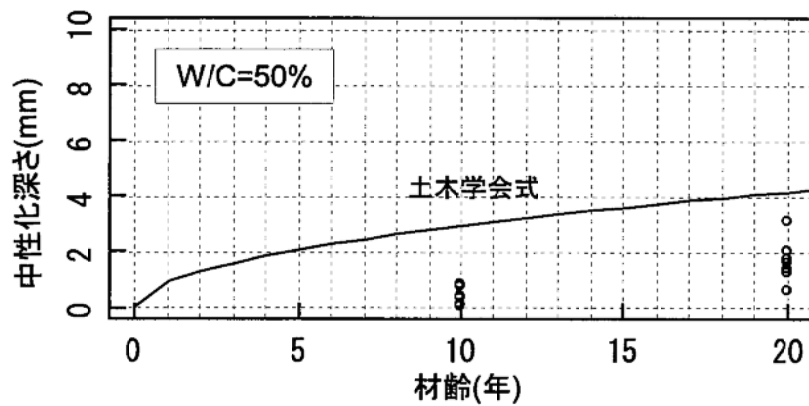


図 3.6 土木学会式との比較 (W/C=50%)

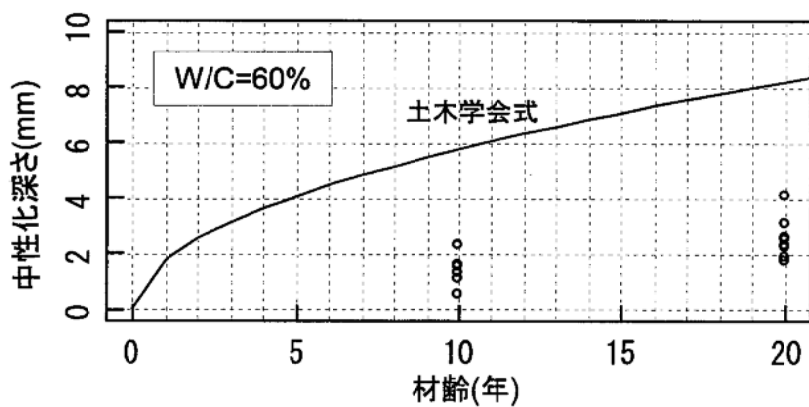


図 3.7 土木学会式との比較 (W/C=60%)

3.8 細孔量 (材齢 10 年、材齢 20 年)

1) 材齢 10 年の調査結果

材齢 10 年時における細孔量について、水セメント比で比較したものを図 3.8 に、スランプで比較したものを図 3.9 に示す。

細孔量は水セメント比により差があり、水セメント比が 50% において細孔量が少なく、その差は細孔直径が $0.5\mu\text{m}$ 付近より明確となっている。スランプでは、細孔直径が $1.0\mu\text{m}$ より大きな範囲で若干差が見られるが、ほぼ同等の細孔量であった。

なお、材齢 10 年時の調査では供試体の側面から 1cm 付近までの領域を試料として採取し試験を行った (2.4.8 参照)。

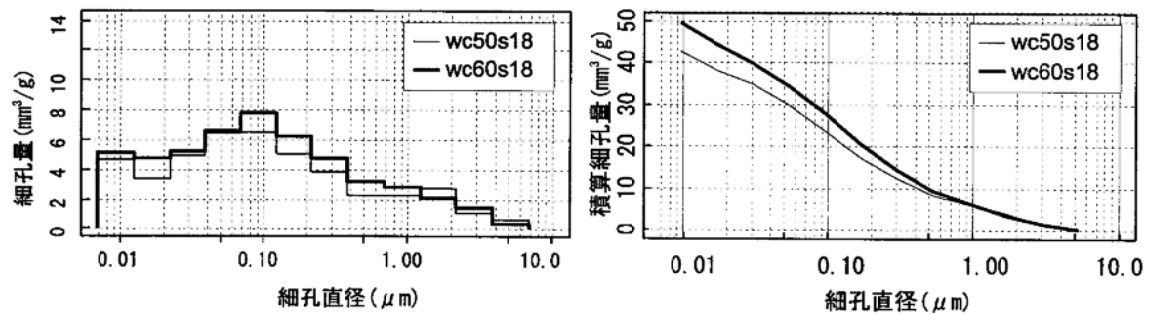


図 3.8 水セメント比による細孔量の比較 (スランプ=18cm、材齢 10 年)

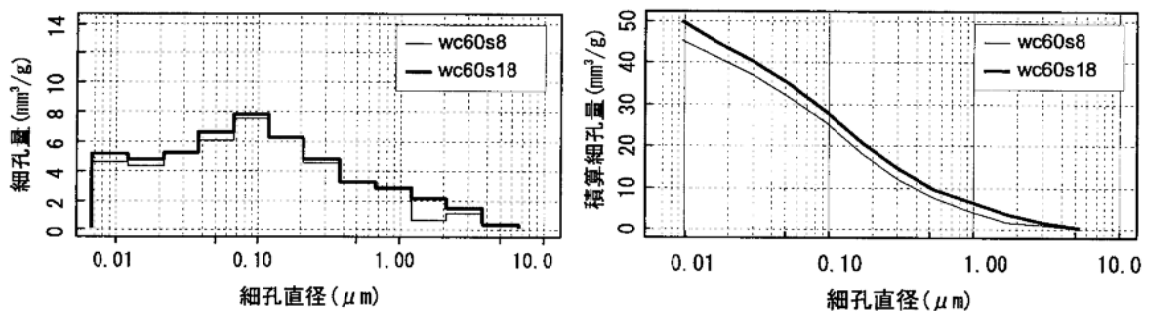


図 3.9 スランプによる細孔量の比較 (W/C=60%、材齢 10 年)

材齢 10 年時における細孔量を暴露地で比較し、wc60s8 に関して図 3.10 に、wc60s18 に関して図 3.11 に示す。

いずれもほぼ同等の細孔量であり、暴露環境の違いによる細孔量の差は材齢 10 年の時点で生じていないことが分かった。

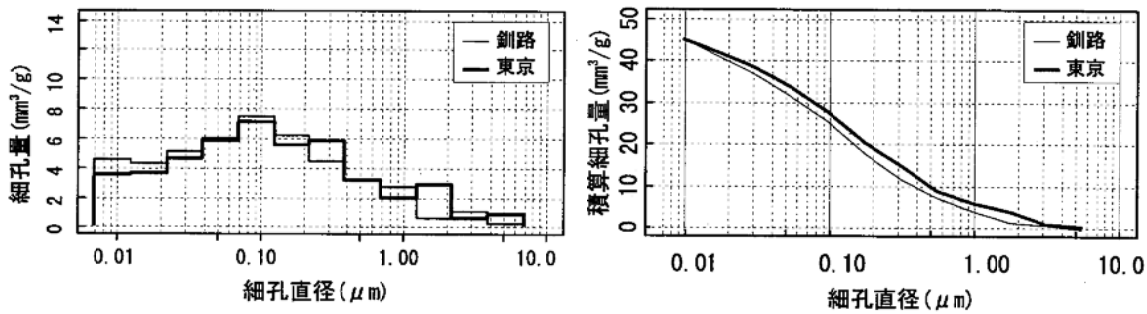


図 3.10 暴露地による細孔量の比較 (W/C=60% スランプ=8cm、材齢 10 年)

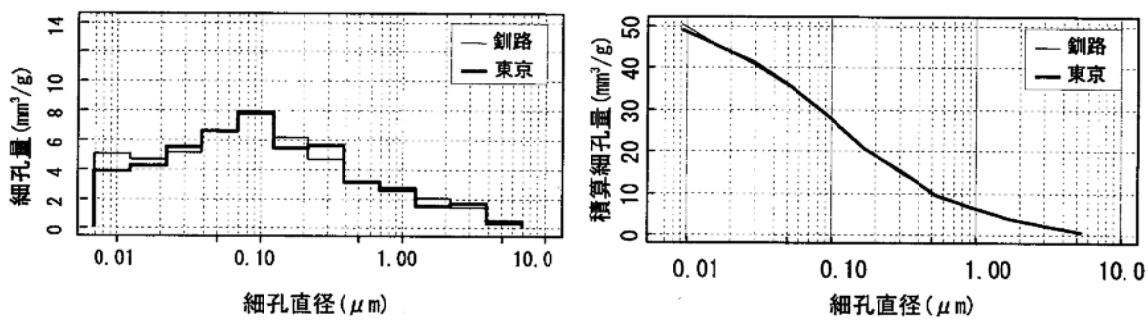


図 3.11 暴露地による細孔量の比較 (W/C=60% スランプ=18cm、材齢 10 年)

2) 材齢 20 年の調査結果

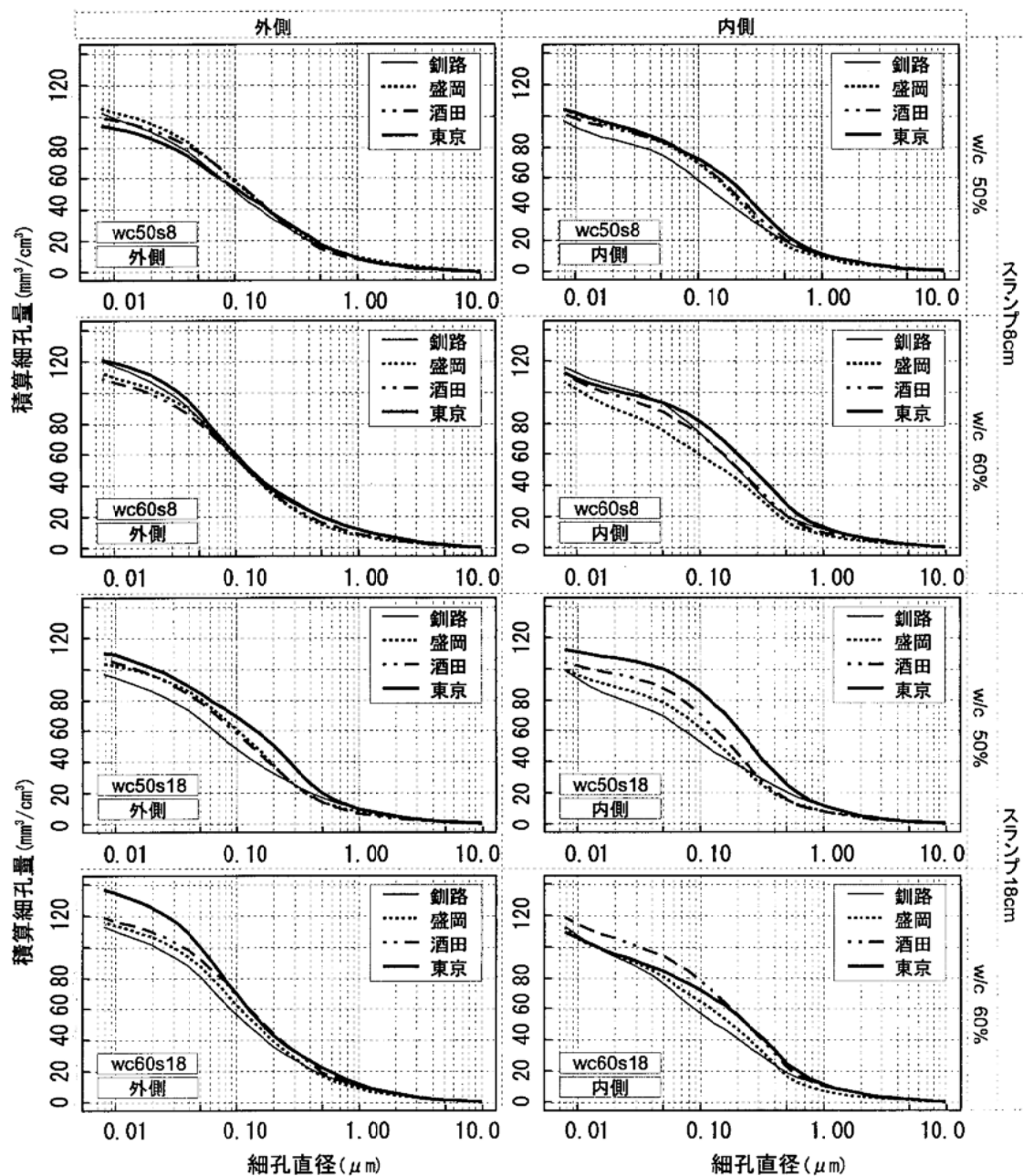


図 3.12 暴露地による積算細孔量の比較 (材齢 20 年)

材齢 20 年時における積算細孔量を暴露地で比較したものを図 3.12 に示す。

暴露地による積算細孔量の差に明確な傾向は確認できなかったが、東京がやや大きい傾向にあった。この暴露地による細孔量差は材齢 10 年の調査において確認されていないことから、この差は材齢 10 年以降に生じたものと考えられる。配調合で見えていくと、wc50s8 の供試体は総細孔量が少なく、供試体の外側と内側の差も小さいことから、他の配調合と比べて暴露環境による影響を受けにくい傾向にあった。

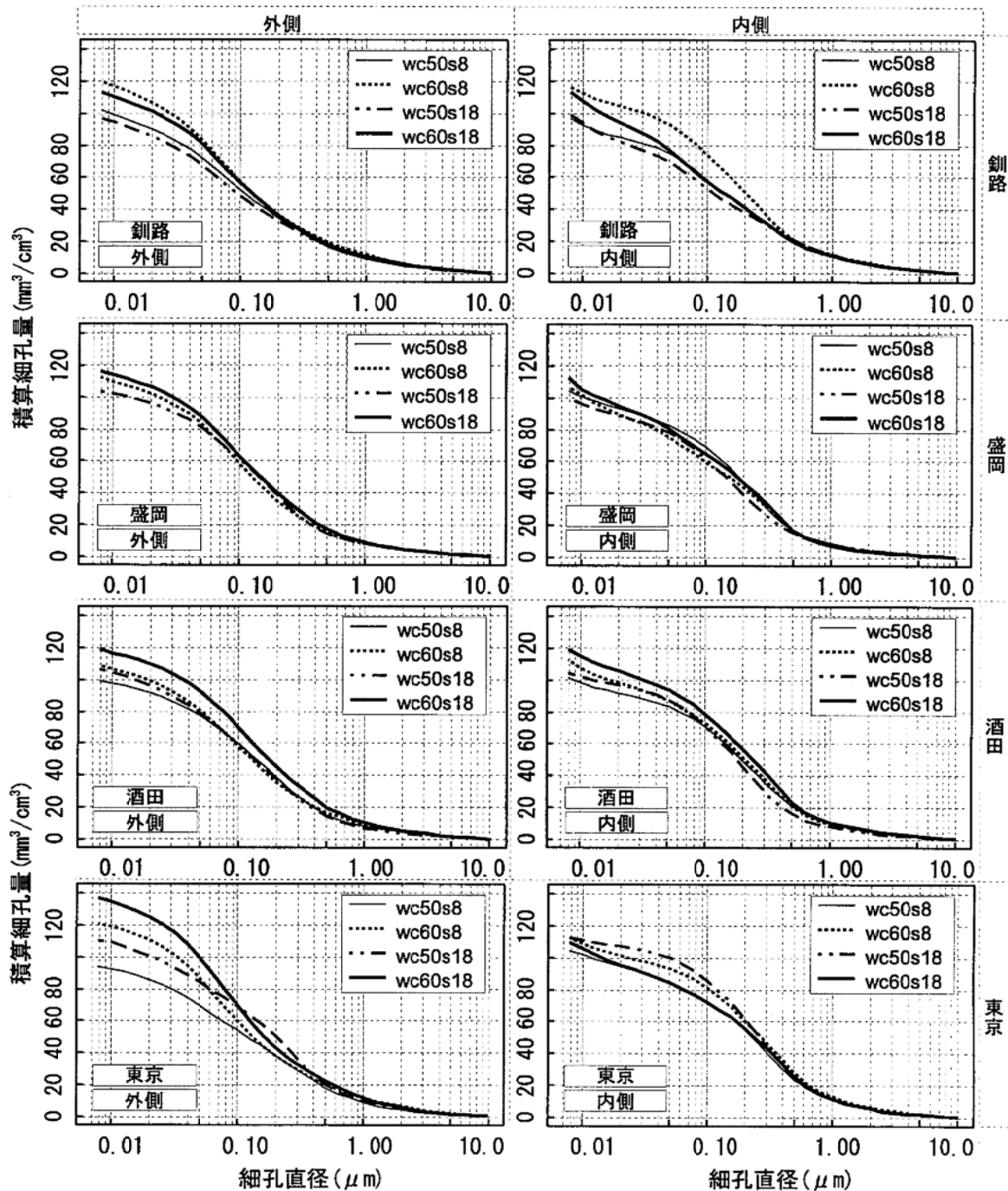


図 3.13 配調合による積算細孔量の比較 (材齢 20 年)

材齢 20 年時における積算細孔量を配調合で比較したものを図 3.13 に示す。

供試体外側の細孔量を見ると、水セメント比 50% の供試体で細孔量が少ない傾向にあるが、その他に明確な傾向は認められなかった。暴露地でみると、東京では配調合によって大きく細孔量の差が生じている一方で盛岡ではほとんど差がないなど、暴露環境によって配調合が細孔量に与える影響の度合いが異なることが分かった。

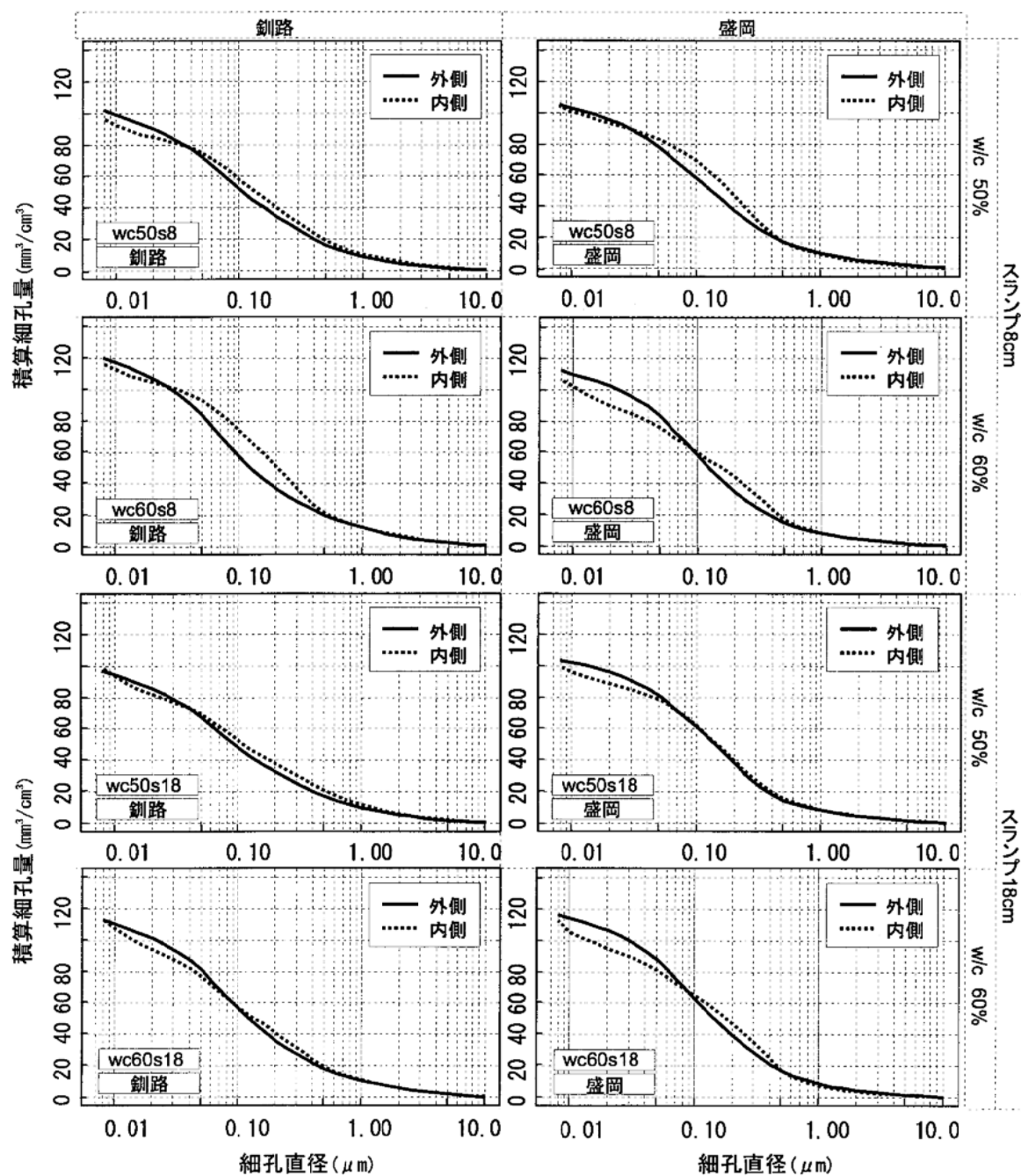


図 3.14 供試体の外側と内側による積算細孔量の比較 (材齢 20 年、釧路、盛岡)

材齢 20 年時における積算細孔量を供試体の外側と内側で比較し、釧路と盛岡を図 3.14 に、酒田と東京を図 3.15 に示す。

釧路、盛岡および酒田に暴露した供試体の外側と内側の細孔量を比較すると、細孔直径が $0.03 \sim 0.10 \mu\text{m}$ より大きな範囲では内側の細孔量が多く、径が小さくなるにつれ外側の細孔量が多くなり、総細孔量は外側と内側でほぼ同じ結果であった。

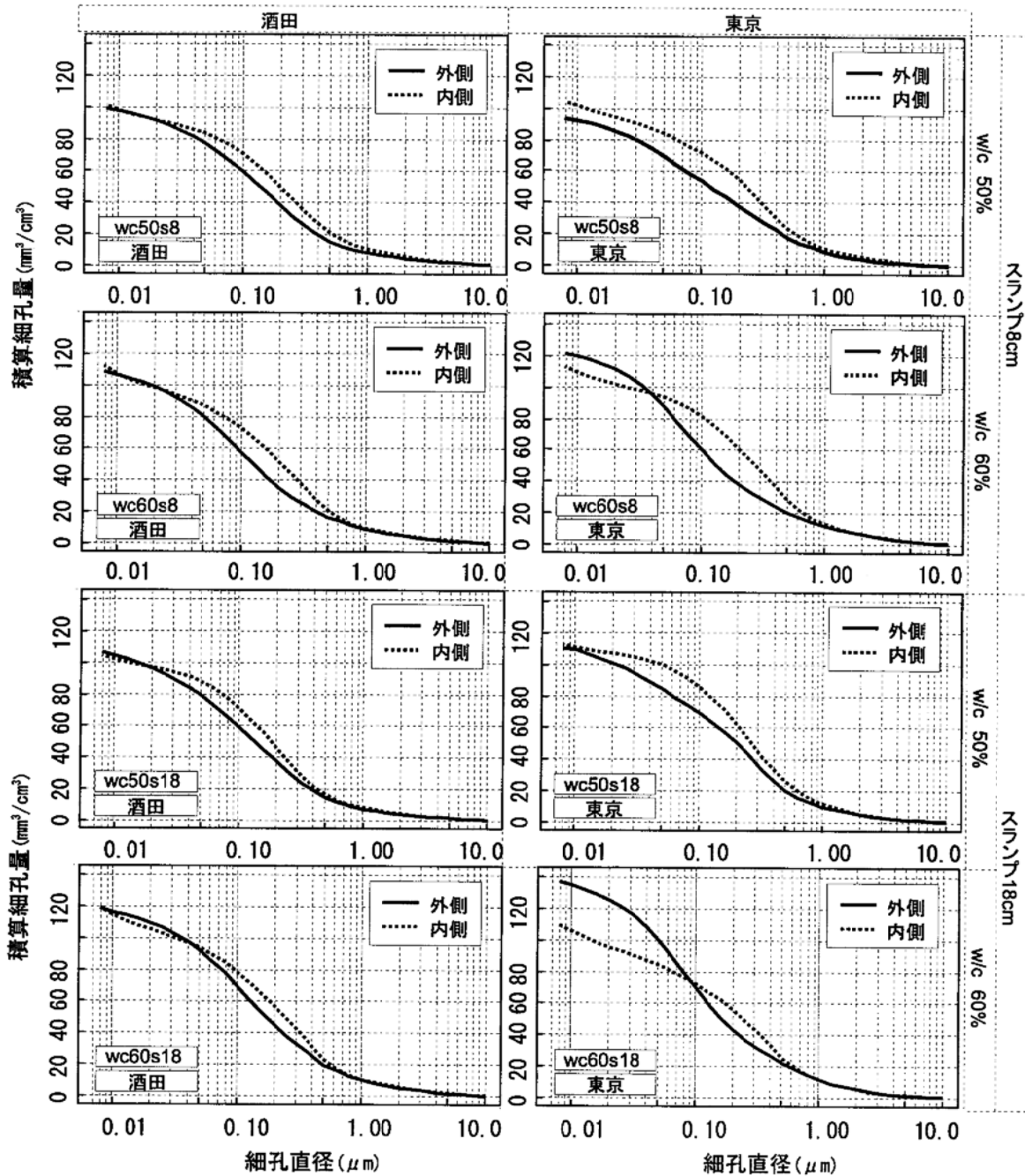


図 3.15 供試体の外側と内側による積算細孔量の比較 (材齢 20 年、酒田、東京)

東京に暴露した供試体では、wc60s18 のように他の暴露地では認められなかった外側と内側の大きな細孔量差が確認された。この供試体も、釧路、盛岡および酒田と同様に、外側と内側の積算細孔量が細孔径の大小によって逆転しているが、水セメント比 50% のように常に外側の細孔量が内側より小さく、径が小さくなるにつれその差が小さくなるような異なる傾向も認められた。供試体の外側と内側の細孔量の関係には 2 つの傾向があったが、いずれの供試体も外側に径の小さな細孔が多いことが分かった。

3) 材齢 10 年と 20 年の比較

表 3.8 に全細孔量を、図 3.16 に細孔径分布を示す。全ての供試体で全細孔量が増加していることがわかった。ただし、全ての細孔直径で一様に増加しているのではなく、細孔直径が $0.2\mu\text{m}$ 付近より大きな範囲では細孔量はほとんど変化せず、細孔直径が $0.2\mu\text{m}$ 付近より小さな範囲では細孔量が増加していることがわかった。その増加の程度は、釧路より東京、水セメント比 50% より 60% で大きい傾向にあった。

表 3.8 供試体表層の全細孔量 (材齢 10 年, 材齢 20 年)

配調合	全細孔量 ($6.9\text{nm} \sim 6.9\mu\text{m}$)					
	釧路		東京		盛岡	酒田
	10年	20年	10年	20年	20年	20年
	(mm ³ /g)					
wc50s8	-	50.8	-	46.9	58.1	56.3
wc60s8	45.4	65.8	45.4	65.9	60.7	59.2
wc50s18	43.1	52.4	48.6	58.3	56.9	60.8
wc60s18	49.8	62.8	48.7	76.3	62.3	64.2

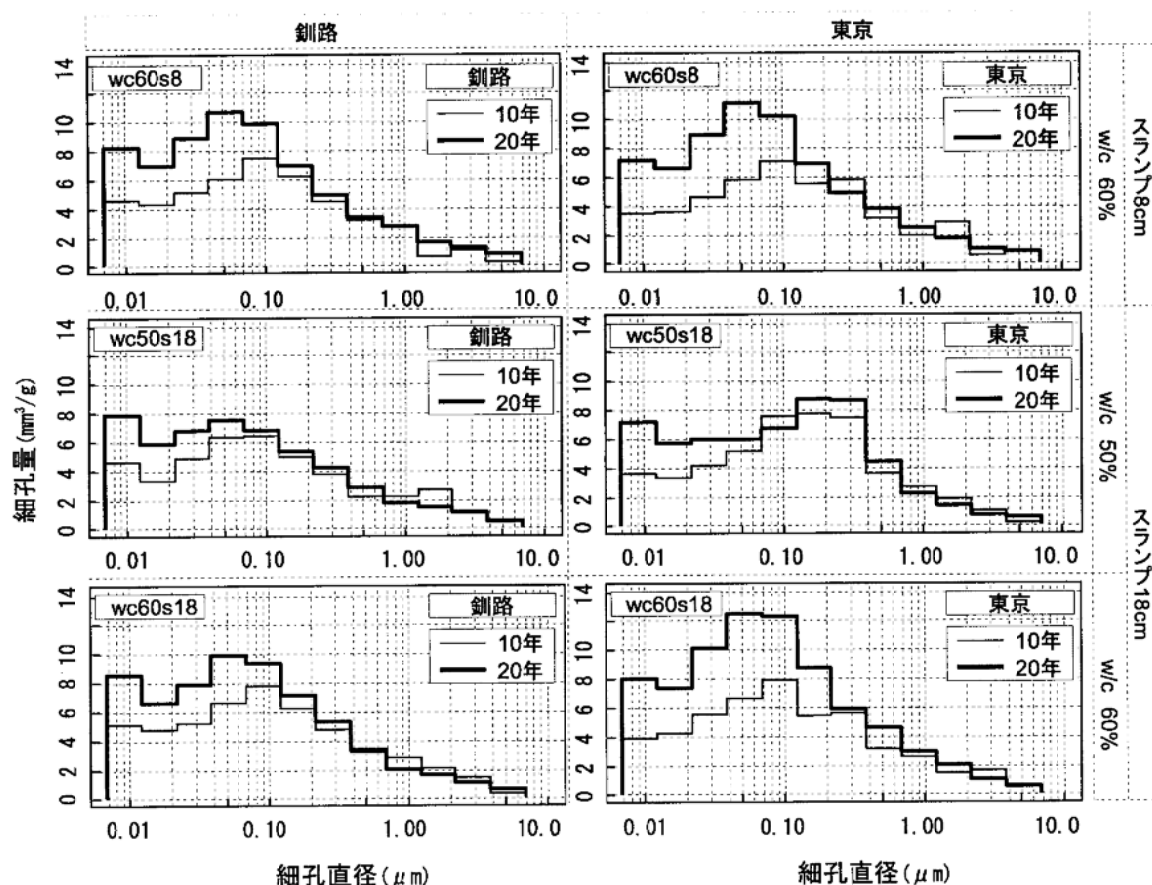


図 3.16 供試体表層の細孔径分布 (材齢 10 年, 材齢 20 年)

4 結言

寒冷地に長期暴露した場合のコンクリートの耐凍害性を調査するため、セメント協会旧耐久性専門委員会が1984年から1988年にかけて作成・刊行した『耐久性を阻害する要因マップ』に基づき、凍害劣化度の異なる4地点、すなわち釧路（凍害を受け易い）、盛岡（同）、酒田（中庸）、東京（凍害を受け難い）を選定して、コンクリート供試体の長期暴露実験を行った。なお暴露5年以降は、一部の供試体について、供試体下部10mmを常時水に浸漬し、含水率が高く凍害劣化を起こし易い条件としている。暴露試験に供したコンクリートは、水セメント比を50%と60%、目標スランプを土木配合として $8.0 \pm 1.5\text{cm}$ 、建築調合として $18.0 \pm 1.5\text{cm}$ 、全ての供試体で目標空気量を $4.5 \pm 0.5\%$ の計4配調合とした。

主な調査項目は、供試体の外観観察と相対動弾性係数および質量の経年変化であるが、中性化深さや細孔量などの調査も実施した。

暴露期間20年（1986年～2006年）までの結果をまとめると、以下のとおりである

(1) 暴露期間20年までの凍害危険度

気象統計情報より、暴露期間20年における凍害危険度は、釧路>盛岡>酒田>東京の順であり、想定したとおりの結果であった。コンクリートの凍結温度を -5°C 以下と設定した場合の凍結融解回数は、釧路で920回、盛岡で650回、酒田で30回程度、凍結温度を -10°C 以下と設定した場合での凍結融解回数は、釧路で400回、盛岡で50回程度であり、これらの地点に暴露された供試体は、凍害劣化の起こり得る気象条件にさらされたことが確認された。

(2) 供試体の外観

すべての供試体で表層のペースト部分の剥離は見られたが、ひび割れ、モルタルの欠損などは生じなかった。また暴露地による差は明確には認められなかった。

(3) 相対動弾性係数の経年変化

すべての暴露地、配調合で、コンクリート供試体の相対動弾性係数の低下は認められず、供試体の表層、内部ともに健全な状態を保っているものと考えられる。

(4) 供試体質量の経年変化

いずれの供試体も、暴露直後の乾燥による急激な質量減少の後、表層ペーストの剥離に起因すると思われるわずかな質量減少が継続しているものの、極端な減少を示した供試体は見られず、外観観察の結果と対応していた。

(5) 中性化深さ

供試体側面の中性化深さは、暴露期間20年でも $0.6\sim 4\text{mm}$ 程度であり、土木学会コンクリート標準示方書の予測式と比べて非常に小さい。この理由は、試験室で入念に成形・養生を行った供試

体による結果であることが一因と考えられる。暴露地で比較すると東京での中性化深さが大きく、気温、湿度の影響によるものと考えられる。

(6) 細孔量

暴露期間 10 年では、暴露地の違いによる明確な傾向は確認できなかったが、暴露期間 20 年では東京に暴露した供試体の細孔量がやや大きい傾向が見られ、また配調合による差が拡大している傾向にあるなど、暴露環境の違いによる影響が認められる結果となった。また暴露期間 10 年と 20 年との比較では、すべての供試体で細孔量は増加していた。細孔直径 $0.2\mu\text{m}$ 付近より大きな範囲ではほとんど変化が無く、この付近より小さな範囲での増加が認められた。

以上より、凍害を受け易い環境下においても、所定の空気量を連行した AE コンクリートは十分な耐凍害性を有することが 20 年間の長期暴露実験結果により確認された。

なお、今後も本暴露試験は継続し、最終材齢（30 年を予定）にて再度調査結果の報告を実施する予定である。

参考文献

- 1) (社) セメント協会 耐久性専門委員会/委員会報告書 D-1,2,3「耐久性を阻害する要因」,1985-1988.
- 2) (社) セメント協会規格専門委員会/平成 9 年に改正になるセメント規格, セメント・コンクリート No.592,1996.
- 3) (社) セメント協会/セメント産業を取り巻く状況－環境問題、耐久性問題とセメントの品質について－.
- 4) 気象庁/気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/>.
- 5) 原田 克己, 地頭園 博, 仁木 孟伯/画像解析装置を用いた硬化コンクリート中の気泡組織測定方法, セメント技術年報 No.39,pp.142-145,1986
- 6) 仁木 孟伯, 原田 克己, 地頭園 博/画像解析装置を用いた硬化コンクリート中の気泡組織測定方法, セメント・コンクリート No.471,pp.22-28,1986.
- 7) (社) 日本非破壊検査協会/NDIS 3424:2005「ボス供試体の作製方法及び圧縮強度試験方法」,2005.
- 8) (社) セメント協会 セメント硬化体研究委員会/セメント硬化体研究委員会報告書, 2001.
- 9) 三浦 尚 訳 A.M.Neville 著/ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版,p.679,2004.
- 10) 樋口 芳郎/コンクリートの動弾性係数の利用方法, 土木学会誌 vol.43,1958.
- 11) (社) 土木学会/コンクリート標準示方書 [設計編]【2007 年制定】 ,2007.

資料

- 1) 気泡表面間距離
- 2) 圧縮強度および静弾性係数
- 3) 供試体の寸法
- 4) たわみ振動による一次共鳴振動数の経年変化
- 5) 縦振動による一次共鳴振動数の経年変化
- 6) 供試体質量の経年変化
- 7) 細孔量 (材齢 10 年)
- 8) 細孔量 (材齢 20 年)
- 9) 耐久性を阻害する要因マップ【凍害日数】

1) 気泡表面間距離

気泡表面間距離の結果を示す。

気泡表面間距離とは、まず測定した面積を気泡総数で除して気泡一個が存在する面積を求め、その領域を円形と考え直径を算出する。その直径から気泡の平均径を差し引いて、気泡表面間距離⁵⁾⁶⁾とする。

暴露地	配調合	気泡の個数	平均気泡直径	気泡1個の存在円の直径	空気量	気泡表面間距離
		(個)	(μm)	(μm)	(%)	(μm)
釧路	wc50s8	1562	84	722	2.7	638
	wc60s8	3205	67	504	3.2	438
	wc50s18	1349	103	777	3.6	674
	wc60s18	1804	90	672	3.4	582
盛岡	wc50s8	1753	100	681	4.2	582
	wc60s8	1882	94	658	3.6	564
	wc50s18	1596	82	714	2.7	633
	wc60s18	2695	80	550	4	470
酒田	wc50s8	2253	80	601	3.4	522
	wc60s8	1416	92	759	2.7	666
	wc50s18	3601	70	476	4.5	405
	wc60s18	1349	97	777	3	680
東京	wc50s8	2348	71	589	2.8	518
	wc60s8	2749	65	544	2.6	479
	wc50s18	2508	83	570	4.3	487
	wc60s18	1600	88	714	2.9	625

2) 圧縮強度および静弾性係数

材齢		配調合		番号	供試体寸法	供試体質量 (kg)	最大荷重 (kN)	補正係数	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
		スラブ (cm)	水セメント比 (%)							
28日	標準 水中養生	8	50	1	円柱供試体 直径100mm × 高さ200mm	3.720	338	1.00	43.1	32.0
				2		3.731	335	1.00	42.7	31.1
				3		3.731	348	1.00	44.3	31.9
			60	1		3.714	250	1.00	31.8	28.0
				2		3.710	247	1.00	31.5	29.5
				3		3.699	256	1.00	32.6	28.9
		18	50	1		3.703	336	1.00	42.8	30.6
				2		3.708	322	1.00	41.0	30.1
				3		3.704	332	1.00	42.3	32.7
			60	1		3.680	243	1.00	31.0	28.1
				2		3.705	243	1.00	31.0	27.7
				3		3.664	242	1.00	30.8	27.6
20年	釧路	8	50	1	立方供試体 高さ100mm × 幅100mm × 奥行100mm	2.267	735.5	0.88	64.7	-
				2		2.368	722.5	0.87	62.9	-
			60	1		2.331	605.5	0.87	52.7	-
				2		2.359	608.0	0.86	52.3	-
		18	50	1		2.365	749.0	0.87	65.2	-
				2		2.348	734.5	0.87	63.9	-
			60	1		2.331	612.5	0.87	53.3	-
				2		2.366	621.0	0.86	53.4	-
	盛岡	8	50	1		2.361	704.5	0.87	61.3	-
				2		2.358	689.0	0.87	59.9	-
			60	1		2.315	639.5	0.87	55.6	-
				2		2.352	597.0	0.87	51.9	-
		18	50	1		2.323	736.5	0.87	64.1	-
				2		2.322	650.0	0.87	56.6	-
			60	1		2.320	664.0	0.87	57.8	-
				2		2.298	636.0	0.87	55.3	-
	酒田	8	50	1		2.387	753.0	0.87	65.5	-
				2		2.360	630.0	0.87	54.8	-
			60	1		2.327	576.5	0.87	50.2	-
				2		2.365	627.0	0.87	54.5	-
		18	50	1		2.296	687.0	0.87	59.8	-
				2		2.316	638.0	0.87	55.5	-
			60	1		2.349	638.0	0.87	55.5	-
				2		2.334	649.5	0.87	56.5	-
	東京	8	50	1		2.331	696.5	0.87	60.6	-
				2		2.200	693.5	0.89	61.7	-
			60	1		2.325	584.5	0.87	50.9	-
				2		2.383	443.0	0.86	38.1	-
		18	50	1		2.346	665.0	0.86	57.2	-
				2		2.232	570.0	0.88	50.2	-
			60	1		2.298	479.0	0.87	41.7	-
				2		2.295	612.5	0.87	53.3	-

3) 供試体の寸法

暴露地	配割合		材齢 (年)	0～10年			10～20年*		
	スラブ (cm)	水セメント比 (%)	番号	高さ	幅	長さ	高さ	幅	長さ
				(mm)					
釧路	8	50	K-1	100.3	101.0	400.0	-	-	-
			K-2	100.2	101.4	400.0	100.2	101.4	301.0
			K-3	100.8	101.0	400.0	-	-	-
		60	K-4	100.4	101.2	401.0	-	-	-
			K-5	99.8	100.8	400.0	99.8	100.8	302.0
			K-6	100.2	100.4	399.0	-	-	-
	18	50	K-7	100.2	101.0	401.0	-	-	-
			K-8	100.5	101.2	400.0	100.5	101.2	303.5
			K-9	100.2	101.6	400.0	-	-	-
		60	K-10	100.2	100.6	399.0	-	-	-
			K-11	100.2	101.2	400.0	100.2	101.2	304.5
			K-12	100.3	101.2	394.0	-	-	-
盛岡	8	50	L-1	100.4	100.8	397.0	-	-	-
			L-2	100.3	101.4	399.0	100.3	101.4	300.0
			L-3	100.2	101.4	400.0	-	-	-
		60	L-4	100.5	100.7	395.0	-	-	-
			L-5	100.3	100.7	381.0	100.3	100.7	302.3
			L-6	98.5	100.8	400.0	-	-	-
	18	50	L-7	100.3	101.4	399.0	-	-	-
			L-8	100.2	101.1	401.0	100.2	101.1	299.0
			L-9	100.4	101.2	400.0	-	-	-
		60	L-10	100.3	100.8	398.0	-	-	-
			L-11	100.4	101.2	400.0	100.4	101.2	300.0
			L-12	100.2	100.6	400.0	-	-	-
酒田	8	50	M-1	100.7	101.2	400.0	-	-	-
			M-2	100.4	101.6	400.0	100.4	101.6	304.0
			M-3	100.3	101.0	389.0	-	-	-
		60	M-4	100.3	101.5	391.0	-	-	-
			M-5	100.8	101.7	396.0	100.8	101.7	301.5
			M-6	100.6	101.6	400.0	-	-	-
	18	50	M-7	100.2	100.9	400.0	-	-	-
			M-8	100.3	101.2	400.0	100.3	101.2	306.0
			M-9	100.3	101.4	400.0	-	-	-
		60	M-10	100.3	101.5	400.0	-	-	-
			M-11	100.3	101.1	400.0	100.3	101.1	304.0
			M-12	100.2	100.5	399.0	-	-	-
東京	8	50	N-1	100.8	101.5	400.0	-	-	-
			N-2	100.2	100.9	400.0	100.2	100.9	300.0
			N-3	100.5	100.8	400.0	-	-	-
		60	N-4	100.6	101.6	395.0	-	-	-
			N-5	100.9	100.8	400.0	100.9	100.8	300.6
			N-6	100.5	101.8	400.0	-	-	-
	18	50	N-7	100.4	101.3	400.0	-	-	-
			N-8	100.4	101.8	400.0	100.4	101.8	304.5
			N-9	100.3	101.2	401.0	-	-	-
		60	N-10	100.4	100.8	400.0	-	-	-
			N-11	100.6	100.6	400.0	100.6	100.6	303.0
			N-12	100.3	101.0	399.0	-	-	-

※材齢 10 年時調査にあたり供試体を切断

4) たわみ振動による一次共鳴振動数の経年変化

暴露地	配調合		測定	年	1986	1987	1987	1988	1988	1989	1989	1990	1990	1991	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1996	1998	2001	2006
	スラブ (cm)	水セメント比 (%)	材齢 (年)	月	9	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	5	5	6	6	6	6	6	6	6
				番号	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	7	8	9	10	10*	12	15	20
				一次共鳴振動数(たわみ振動)(Hz)																				
釧路	8	50	K-1	2224	2248	2269	2261	2263	2269	2254	2239	2252	2262	2254	2260	2287	2289	2287	2283	-	2289	2295	2289	
			K-2	2222	2224	2237	2243	2267	2262	2257	2262	2260	2260	2227	2240	2260	2250	2258	2258	3602	3643	3623	3650	
			K-3	2226	2245	2266	2271	2278	2281	2270	2267	2268	2279	2268	2257	2262	2265	2270	2264	-	2267	2282	2293	
		60	K-4	2172	2216	2239	2228	2231	2234	2222	2221	2222	2222	2238	2249	2262	2265	2270	2253	-	2254	2267	2244	
			K-5	2180	2199	2210	2204	2208	2211	2203	2207	2214	2212	2217	2204	2214	2225	2226	2226	3544	3550	3543	3588	
			K-6	2182	2179	2205	2204	2220	2218	2213	2208	2221	2231	2230	2227	2225	2236	2239	2241	-	2234	2244	2257	
	18	50	K-7	2172	2210	2210	2228	2228	2229	2220	2218	2229	2219	2232	2246	2261	2262	2262	2252	-	2253	2260	2253	
			K-8	2173	2220	2240	2239	2249	2241	2234	2219	2227	2222	2235	2200	2216	2212	2218	2213	3536	3547	3559	3584	
			K-9	2213	2213	2218	2245	2242	2234	2233	2237	2240	2240	2250	2226	2227	2223	2237	2231	-	2226	2251	2246	
		60	K-10	2158	2168	2184	2187	2173	2198	2183	2189	2196	2191	2205	2220	2229	2237	2229	2222	-	2226	2224	2210	
			K-11	2136	2145	2144	2170	2157	2179	2177	2176	2178	2177	2196	2174	2181	2177	2187	2177	3451	3453	-	-	
			K-12	2195	2200	2231	2237	2243	2250	2249	2248	2250	2252	2257	2247	2263	2264	2261	2258	-	2266	2278	2278	
盛岡	8	50	L-1	2236	2288	2300	2298	2302	2300	2297	2297	2287	2285	2310	2300	2312	2301	2310	2318	-	2327	2300	2289	
			L-2	2210	2248	2250	2257	2254	2256	2258	2251	2251	2242	2287	2246	2243	2256	2264	2284	3655	3690	3673	3659	
			L-3	2216	2245	2253	2280	2262	2272	2259	2252	2251	2236	2285	2240	2236	2248	2268	2271	-	2289	2278	2281	
		60	L-4	2204	2277	2267	2286	2299	2281	2272	2271	2268	2257	2300	2295	2307	2301	2304	2314	-	2320	2311	2308	
			L-5	2382	2428	2418	2428	2425	2442	2442	2452	2458	2460	2462	2446	2441	2429	2452	2465	3605	3625	3602	3625	
			L-6	2126	2146	2144	2151	2145	2173	2166	2172	2175	2174	2191	2188	2178	2179	2194	2202	-	2214	2204	2207	
	18	50	L-7	2180	2199	2204	2213	2204	2229	2221	2214	2208	2208	2238	2253	2249	2241	2256	2261	-	2271	2258	2254	
			L-8	2180	2222	2208	2222	2229	2234	2224	2227	2221	2213	2260	2225	2213	2205	2231	2240	3649	3701	3656	3650	
			L-9	2182	2205	2212	2211	2206	2224	2218	2212	2214	2193	2207	2200	2190	2196	2217	2230	-	2243	2236	2248	
		60	L-10	2128	2176	2187	2184	2202	2202	2191	2201	2197	2204	2239	2216	2227	2217	2229	2242	-	2242	2235	2231	
			L-11	2118	2182	2147	2190	2193	2193	2188	2198	2192	2198	2223	2201	2189	2192	2207	2215	3578	3585	3608	3612	
			L-12	2145	2192	2187	2192	2193	2204	2208	2217	2207	2223	2244	2221	2214	2202	2221	2219	-	2219	2216	2212	
酒田	8	50	M-1	2230	2288	2302	2294	2249	2296	2291	2277	2276	2295	2307	2315	2307	2321	2312	2315	-	2327	2330	2326	
			M-2	2227	2297	2298	2295	2276	2307	2299	2285	2289	2279	2306	2311	2291	2304	2302	2297	3644	3653	3687	3664	
			M-3	2313	2351	2342	2353	2341	2370	2360	2341	2346	2350	2372	2377	2374	2403	2369	2370	-	2383	2384	2389	
		60	M-4	2243	2273	2302	2297	2316	2310	2303	2306	2304	2313	2328	2312	2346	2367	2351	2359	-	2367	2367	2377	
			M-5	2210	2245	2239	2259	2257	2274	2266	2259	2255	2284	2295	2304	2281	2302	2294	2296	3635	3654	3666	3641	
			M-6	2148	2181	2185	2210	2191	2214	2201	2199	2206	2225	2248	2238	2220	2239	2230	2234	-	2249	2242	2250	
	18	50	M-7	2194	2203	2198	2227	2182	2235	2228	2211	2219	2235	2244	2240	2248	2270	2259	2271	-	2275	2284	2281	
			M-8	2173	2191	2199	2202	2188	2225	2213	2193	2202	2202	2223	2217	2211	2224	2224	2221	3545	3555	3540	3516	
			M-9	2168	2198	2195	2207	2166	2219	2206	2191	2183	2180	2225	2175	2209	2226	2222	2220	-	2225	2234	2241	
		60	M-10	2133	2162	2144	2178	2135	2179	2176	2164	2176	2190	2195	2185	2203	2236	2209	2226	-	2223	2235	2243	
			M-11	2158	2193	2206	2214	2184	2213	2202	2193	2191	2208	2215	2201	2212	2230	2219	2226	3519	3538	3573	3542	
			M-12	2142	2177	2180	2192	2175	2202	2192	2175	2186	2205	2217	2188	2206	2226	2208	2226	-	2238	2236	2230	
東京	8	50	N-1	2210	2147	2203	2216	2229	2228	2228	2238	2216	2229	2221	2279	2289	2249	2285	2251	-	2279	2268	2290	
			N-2	2235	2162	2237	2234	2231	2231	2244	2251	2239	2253	2260	2269	2274	2238	2279	2260	3643	3667	3674	3689	
			N-3	2226	2180	2238	2239	2238	2242	2243	2254	2237	2251	2262	2268	2275	2235	2282	2245	-	2283	2264	2277	
		60	N-4	2204	2122	2220	2213	2221	2233	2236	2240	2229	2250	2252	2288	2293	2276	2299	2294	-	2297	2288	2299	
			N-5	2187	2120	2210	2198	2213	2208	2220	2224	2213	2228	2239	2247	2251	2228	2258	2240	3527	3567	3536	3547	
			N-6	2196	2123	2208	2204	2217	2217	2230	2236	2231	2243	2253	2259	2257	2236	2262	2259	-	2266	2256	2274	
	18	50	N-7	2207	2121	2194	2182	2176	2182	2191	2196	2177	2185	2199	2246	2262	2233	2265	2253	-	2268	2257	2289	
			N-8	2169	2090	2166	2174	2162	2164	2155	2169	2145	2183	2171	2174	2185	2147	2204	2178	3412	3518	3493	3493	
			N-9	2197	2126	2183	2178	2147	2170	2172	2178	2155	2171	2189	2194	2199	2155	2208	2190	-	2217	2205	2225	
		60	N-10	2133	2125	2177	2165	2166	2170	2173	2177	2158	2174	2191	2222	2232	2224	2238	2226	-	2233	2236	2249	
			N-11	2131	2117	2176	2173	2169	2173	2167	2171	2152	2173	2187	2187	2176	2159	2193	2173	3435	3503	3485	3510	
			N-12	2170	2142	2200	2188	2210	2201	2203	2210	2197	2206	2218	2218	2218	2195	2231	2222	-	2230	2223	2241	

※材齢 10 年時調査にあたり供試体を切斷

5) 縦振動による一次共鳴振動数の経年変化

暴露地	配調合		測定	年	1986	1987	1987	1988	1988	1989	1989	1990	1990	1991	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1996	1998	2001	2006	
	スラブ	水セメント比	月	9	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4	5	5	6	6	6	6	6	6	6	
			材齢 (年)	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	7	8	9	10	10*	12	15	20		
(cm) (%)		番号	一次共鳴振動数(縦振動)(Hz)																						
釧路	8	50	K-1	-	5217	5241	5249	5237	5220	5204	5216	5201	5196	5204	5220	5267	5299	5251	5227	-	5213	5214	5259		
			K-2	-	5197	5213	5211	5210	5200	5196	5180	5163	5153	5147	5127	5150	5129	5089	5109	6835	6864	6849	6926		
			K-3	-	5203	5254	5222	5212	5228	5190	5185	5180	5208	5183	5184	5163	5156	5114	5194	-	5168	5212	5261		
		60	K-4	-	5180	5143	5170	5151	5154	5154	5104	5127	5102	5137	5164	5163	5156	5114	5165	-	5150	5174	5142		
			K-5	-	5169	5119	5106	5124	5146	5093	5094	5111	5118	5097	5104	5120	5116	5040	5095	6703	6739	6738	6809		
			K-6	-	5160	5091	5080	5078	5106	5100	5081	5102	5089	5083	5097	5135	5155	5054	5109	-	5130	5176	5189		
	18	50	K-7	-	5181	5142	5191	5170	5218	5121	5147	5113	5092	5123	5166	5196	5208	5181	5164	-	5163	5191	5179		
			K-8	-	5202	5137	5170	5165	5173	5155	5149	5135	5109	5116	5101	5035	5078	5028	5071	6645	6710	6672	6790		
			K-9	-	5185	5174	5184	5151	5146	5137	5149	5142	5158	5114	5124	5084	5087	5030	5078	-	5102	5173	5208		
		60	K-10	-	5140	5084	5086	5043	5046	5039	5057	5074	5048	5066	5095	5146	5176	5096	5093	-	5088	5097	5174		
			K-11	-	5130	5045	5056	5015	5098	5016	5021	5079	5038	5044	5037	5033	5010	5025	5041	6564	6595	-	-		
			K-12	-	5152	5103	5132	5111	5135	5118	5123	5127	5111	5109	5128	5149	5114	5059	5109	-	5114	5151	5094		
盛岡	8	50	L-1	-	5330	5282	5295	5251	5274	5270	5291	5246	5241	5248	5293	5278	5265	5252	5287	-	5323	5302	5242		
			L-2	-	5211	5228	5238	5199	5207	5200	5218	5203	5178	5166	5181	5152	5128	5183	5215	6926	6935	6902	6938		
			L-3	-	5201	5224	5236	5183	5209	5171	5151	5173	5137	5162	5148	5136	5142	5153	5184	-	5236	5208	5244		
		60	L-4	-	5231	5172	5204	5168	5173	5141	5154	5161	5159	5150	5223	5213	5236	5164	5235	-	5266	5271	5258		
			L-5	-	5403	5368	5390	5399	5419	5375	5422	5428	5432	5407	5419	5400	5353	5403	5341	6783	6819	6768	6891		
			L-6	-	5111	5139	5138	5127	5155	5144	5160	5163	5148	5137	5181	5133	5155	5132	5115	-	5236	5184	5223		
	18	50	L-7	-	5178	5114	5138	5096	5141	5133	5094	5097	5092	5091	5200	5164	5156	5118	5097	-	5215	5179	5188		
			L-8	-	5183	5088	5113	5098	5133	5118	5117	5102	5074	5069	5091	5069	4995	4998	5103	6824	6853	6842	6864		
			L-9	-	5171	5142	5140	5133	5167	5125	5109	5111	5098	5086	5102	5074	5053	5144	5116	-	5160	5146	5185		
		60	L-10	-	5153	5026	5117	5026	5055	5027	5035	5065	5046	5034	5091	5104	5068	5070	5111	-	5140	5120	5133		
			L-11	-	5137	5063	5070	5106	5081	5058	5067	5050	5041	5037	5053	5023	5015	5066	5041	6702	6770	6735	6781		
			L-12	-	5142	5080	5062	5071	5068	5090	5100	5106	5110	5066	5099	5088	5087	5030	5043	-	5053	5062	5099		
酒田	8	50	M-1	-	5276	5285	5320	5239	5272	5270	5236	5235	5280	5265	5282	5270	5344	5242	5292	-	5338	5327	5343		
			M-2	-	5280	5233	5228	5190	5249	5218	5236	5198	5230	5218	5252	5209	5244	5184	5220	6842	6850	6862	6896		
			M-3	-	5296	5359	5361	5333	5408	5381	5349	5357	5377	5367	5380	5349	5396	5324	5287	-	5405	5406	5429		
		60	M-4	-	5240	5221	5224	5219	5289	5258	5200	5197	5224	5230	5237	5287	5340	5239	5212	-	5349	5388	5415		
			M-5	-	5210	5208	5157	5127	5174	5161	5121	5117	5177	5164	5191	5163	5175	5160	5186	6826	6834	6858	6875		
			M-6	-	5143	5085	5128	5030	5031	5045	5028	5029	5065	5044	5073	5070	5097	5039	5086	-	5120	5118	5122		
	18	50	M-7	-	5107	5107	5139	5035	5106	5089	5082	5073	5112	5089	5132	5172	5211	5160	5201	-	5255	5238	5277		
			M-8	-	5103	5145	5080	5043	5128	5091	5047	5020	5081	5058	5114	5075	5091	5045	5106	6669	6699	6691	6724		
			M-9	-	5113	5121	5156	5058	5124	5057	5067	5002	5051	5064	5117	5074	5067	5048	5094	-	5101	5135	5132		
		60	M-10	-	4986	4975	5014	4910	5015	4981	4999	4963	5032	4982	5037	5034	5084	4997	5068	-	5106	5147	5170		
			M-11	-	5081	5097	5117	5032	5102	5072	5056	5026	5058	5020	5068	5073	5060	5041	4958	6672	6671	6704	6736		
			M-12	-	5002	5037	5070	5015	5073	5037	4992	5010	5049	5024	5061	5047	5056	5007	5037	-	5101	5121	5115		
東京	8	50	N-1	-	5100	5175	5149	5132	5130	5110	5130	5094	5093	5131	5260	5231	5189	5222	5156	-	5195	5198	5270		
			N-2	-	5127	5167	5149	5135	5131	5130	5168	5139	5136	5196	5209	5225	5153	5137	5046	6792	6937	6886	6951		
			N-3	-	5106	5162	5107	5137	5131	5124	5132	5107	5087	5176	5186	5157	5079	5056	4961	-	5163	5125	5183		
		60	N-4	-	5036	5103	5048	5054	5061	5068	5086	5114	5095	5131	5271	5255	5304	5234	5209	-	5252	5233	5282		
			N-5	-	5029	5125	5064	5038	5083	5047	5072	5059	5070	5121	5139	5105	5127	5124	5038	6559	6686	6675	6722		
			N-6	-	4971	5033	5020	5044	5065	5058	5053	5078	5067	5119	5139	5094	5095	5116	5038	-	5130	5124	5174		
	18	50	N-7	-	5001	5093	5012	5014	4984	4981	4998	4914	4946	5009	5159	5157	5133	5156	5009	-	5186	5211	5290		
			N-8	-	5022	5077	5072	5045	5038	5017	5012	4977	4944	5051	5025	5040	4974	5071	4996	6527	6664	6629	6695		
			N-9	-	5038	5134	5047	5028	5055	4981	4996	4984	4980	5046	5044	5031	4992	5037	4961	-	5106	5069	5126		
		60	N-10	-	5011	5044	4992	4986	5032	5026	5003	4975	4965	5057	5097	5149	5110	5166	5063	-	5164	5186	5239		
			N-11	-	4965	5005	4986	5000	5002	4972	4953	4962	4959	5021	5010	4983	4996	5011	4953	6466	6598	6590	6693		
			N-12	-	5013	5068	5039	5031	5016	5064	5016	5011	5012	5087	5067	5064	5050	5054	5011	-	5125	5104	5118		

※材齢 10 年時調査にあたり供試体を切断

6) 供試体質量の経年変化

暴露地	配調合		測定 材齢 (年)	年	1986	1987	1988	1988	1989	1989	1990	1990	1991	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1996	1998	2001	2006	
	スラブ	水セメント比		月	9	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	5	5	6	6	6	6	6	6	
	(cm)	(%)	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	7	8	9	10	10*	12	15	20		
	番号	質量(kg)																						
釧路	8	50	K-1	9.563	9.474	9.465	9.462	9.434	9.442	9.430	9.442	9.431	9.421	9.424	9.456	9.448	9.420	9.438	9.417	-	9.411	9.405	9.393	
			K-2	9.572	9.481	9.460	9.459	9.433	9.438	9.431	9.423	9.431	9.418	9.415	9.409	9.410	9.394	9.398	9.389	7.061	7.072	7.054	7.050	
			K-3	9.638	9.547	9.524	9.526	9.507	9.504	9.496	9.485	9.496	9.484	9.479	9.474	9.469	9.452	9.458	9.447	-	9.437	9.429	9.429	
		60	K-4	9.609	9.502	9.475	9.479	9.444	9.454	9.447	9.431	9.450	9.429	9.453	9.539	9.469	9.452	9.458	9.444	-	9.439	9.436	9.410	
			K-5	9.549	9.417	9.388	9.402	9.364	9.375	9.366	9.351	9.370	9.354	9.350	9.344	9.342	9.329	9.333	9.321	7.018	7.019	7.014	7.000	
			K-6	9.470	9.337	9.307	9.310	9.287	9.306	9.290	9.275	9.305	9.279	9.276	9.272	9.270	9.255	9.269	9.253	-	9.242	9.237	9.264	
	18	50	K-7	9.550	9.472	9.410	9.443	9.414	9.420	9.410	9.399	9.409	9.392	9.402	9.458	9.434	9.397	9.420	9.401	-	9.392	9.399	9.366	
			K-8	9.548	9.476	9.450	9.450	9.425	9.430	9.421	9.407	9.415	9.401	9.401	9.395	9.389	9.374	9.378	9.365	7.102	7.107	7.087	7.095	
			K-9	9.603	9.498	9.477	9.477	9.451	9.456	9.449	9.439	9.446	9.433	9.433	9.426	9.422	9.410	9.414	9.402	-	9.393	9.385	9.374	
		60	K-10	9.403	9.292	9.258	9.262	9.227	9.241	9.236	9.221	9.241	9.217	9.238	9.338	9.284	9.268	9.258	9.232	-	9.217	9.196	9.184	
			K-11	9.501	9.383	9.349	9.357	9.319	9.335	9.327	9.313	9.330	9.313	9.315	9.310	9.308	9.290	9.305	9.286	7.069	7.071	-	-	
			K-12	9.304	9.194	9.168	9.171	9.137	9.152	9.148	9.130	9.151	9.142	9.131	9.128	9.130	9.112	9.126	9.108	-	9.096	9.093	9.088	
盛岡	8	50	L-1	9.486	9.418	9.375	9.378	9.366	9.366	9.375	9.347	9.341	9.325	9.350	9.405	9.342	9.332	9.338	9.314	-	9.324	9.298	9.213	
			L-2	9.600	9.513	9.474	9.474	9.459	9.460	9.470	9.436	9.437	9.418	9.448	9.419	9.399	9.400	9.401	9.391	7.051	7.055	7.035	7.028	
			L-3	9.628	9.534	9.492	9.497	9.489	9.483	9.494	9.457	9.458	9.440	9.469	9.437	9.420	9.417	9.424	9.412	-	9.412	9.389	9.312	
		60	L-4	9.358	9.242	9.201	9.215	9.199	9.199	9.231	9.177	9.183	9.155	9.200	9.309	9.247	9.182	9.206	9.154	-	9.174	9.147	9.122	
			L-5	9.085	8.985	8.933	8.947	8.935	8.942	8.975	8.942	8.923	8.898	8.957	8.905	8.879	8.871	8.884	8.870	7.028	7.030	7.004	7.002	
			L-6	9.223	9.095	9.059	9.063	9.064	9.063	9.098	9.050	9.052	9.030	9.077	9.044	9.013	9.010	9.022	9.005	-	9.007	8.980	8.959	
	18	50	L-7	9.492	9.393	9.346	9.351	9.339	9.341	9.352	9.314	9.312	9.296	9.300	9.413	9.326	9.308	9.323	9.291	-	9.309	9.273	9.257	
			L-8	9.520	9.433	9.385	9.391	9.385	9.380	9.388	9.354	9.352	9.333	9.372	9.338	9.314	9.304	9.308	9.300	6.917	6.920	6.904	6.893	
			L-9	9.522	9.427	9.379	9.378	9.372	9.372	9.383	9.343	9.337	9.319	9.349	9.320	9.297	9.289	9.297	9.284	-	9.284	9.257	9.249	
		60	L-10	9.348	9.232	9.180	9.197	9.179	9.179	9.186	9.217	9.168	9.169	9.143	9.201	9.307	9.205	9.167	9.210	9.136	-	9.149	9.110	9.100
			L-11	9.500	9.388	9.343	9.356	9.338	9.343	9.378	9.323	9.329	9.298	9.361	9.310	9.277	9.276	9.290	9.269	6.962	6.967	6.950	6.932	
			L-12	9.459	9.350	9.301	9.308	9.315	9.315	9.346	9.302	9.301	9.282	9.322	9.288	9.260	9.251	9.265	9.242	-	9.244	9.221	9.196	
酒田	8	50	M-1	9.660	9.591	9.523	9.561	9.519	9.545	9.535	9.529	9.510	9.519	9.507	9.542	9.554	9.508	9.542	9.523	-	9.525	9.519	9.533	
			M-2	9.700	9.628	9.548	9.583	9.548	9.584	9.574	9.556	9.545	9.537	9.524	9.554	9.520	9.501	9.510	9.492	7.222	7.223	7.209	7.207	
			M-3	9.348	9.260	9.182	9.225	9.197	9.214	9.208	9.193	9.179	9.175	9.164	9.180	9.164	9.146	9.151	9.135	-	9.135	9.117	9.114	
		60	M-4	9.371	9.238	9.169	9.210	9.184	9.224	9.196	9.177	9.163	9.162	9.157	9.258	9.294	9.198	9.316	9.271	-	9.265	9.235	9.212	
			M-5	9.497	9.351	9.290	9.332	9.310	9.330	9.340	9.328	9.310	9.312	9.302	9.341	9.294	9.268	9.306	9.268	7.059	7.064	7.057	7.042	
			M-6	9.613	9.475	9.404	9.442	9.405	9.460	9.427	9.444	9.409	9.425	9.398	9.415	9.399	9.371	9.390	9.372	-	9.380	9.342	9.336	
	18	50	M-7	9.479	9.380	9.308	9.352	9.318	9.342	9.330	9.308	9.300	9.301	9.292	9.339	9.366	9.305	9.394	9.364	-	9.388	9.353	9.372	
			M-8	9.482	9.371	9.304	9.334	9.298	9.330	9.308	9.291	9.277	9.284	9.268	9.286	9.254	9.239	9.256	9.118	7.032	7.035	7.021	7.019	
			M-9	9.505	9.401	9.331	9.367	9.341	9.380	9.331	9.327	9.310	9.314	9.310	9.331	9.299	9.278	9.290	9.272	-	9.270	9.253	9.247	
		60	M-10	9.510	9.373	9.295	9.335	9.292	9.368	9.336	9.323	9.321	9.320	9.307	9.382	9.439	9.314	9.424	9.363	-	9.402	9.362	9.402	
			M-11	9.537	9.422	9.355	9.399	9.345	9.398	9.388	9.364	9.343	9.349	9.329	9.375	9.343	9.307	9.332	9.311	7.084	7.083	7.068	7.065	
			M-12	9.430	9.333	9.250	9.293	9.267	9.307	9.288	9.284	9.268	9.260	9.240	9.276	9.255	9.217	9.254	9.224	-	9.221	9.210	9.181	
東京	8	50	N-1	9.606	9.496	9.461	9.456	9.436	9.436	9.424	9.437	9.436	9.430	9.430	9.506	9.452	9.410	9.437	9.394	-	9.449	9.424	9.429	
			N-2	9.660	9.539	9.511	9.503	9.483	9.486	9.474	9.486	9.485	9.480	9.483	9.461	9.450	9.424	9.454	9.421	7.057	7.091	7.069	7.052	
			N-3	9.598	9.459	9.441	9.433	9.412	9.415	9.403	9.415	9.413	9.407	9.408	9.388	9.376	9.349	9.380	9.343	-	9.383	9.361	9.317	
		60	N-4	9.471	9.299	9.282	9.281	9.256	9.272	9.264	9.283	9.282	9.277	9.286	9.405	9.367	9.284	9.319	9.254	-	9.327	9.286	9.244	
			N-5	9.629	9.468	9.447	9.439	9.408	9.424	9.414	9.435	9.436	9.424	9.436	9.412	9.409	9.370	9.412	9.368	7.182	7.212	7.199	7.165	
			N-6	9.718	9.538	9.524	9.521	9.496	9.512	9.504	9.524	9.521	9.514	9.529	9.506	9.502	9.462	9.503	9.461	-	9.499	9.486	9.437	
	18	50	N-7	9.550	9.421	9.395	9.382	9.364	9.362	9.347	9.354	9.352	9.344	9.342	9.439	9.371	9.342	9.380	9.329	-	9.416	9.382	9.403	
			N-8	9.569	9.424	9.406	9.394	9.372	9.371	9.357	9.363	9.364	9.355	9.346	9.331	9.319	9.294	9.323	9.292	7.076	7.101	7.083	7.054	
			N-9	9.533	9.405	9.376	9.360	9.347	9.344	9.325	9.332	9.333	9.325	9.320	9.300	9.288	9.262	9.288	9.256	-	9.284	9.257	9.243	
		60	N-10	9.531	9.381	9.367	9.355	9.327	9.337	9.325	9.346	9.344	9.334	9.355	9.469	9.429	9.350	9.373	9.314	-	9.417	9.384	9.362	
			N-11	9.440	9.295	9.288	9.265	9.236	9.242	9.227	9.250	9.251	9.243	9.258	9.234	9.225	9.187	9.232	9.180	6.955	6.988	6.979	6.950	
			N-12	9.426	9.304	9.268	9.255	9.223	9.240	9.230	9.251	9.245	9.241	9.259	9.231	9.228	9.189	9.231	9.191	-	9.226	9.209	9.161	

※材齢 10 年時調査にあたり供試体を切断

7) 細孔量 (材齢 10 年)

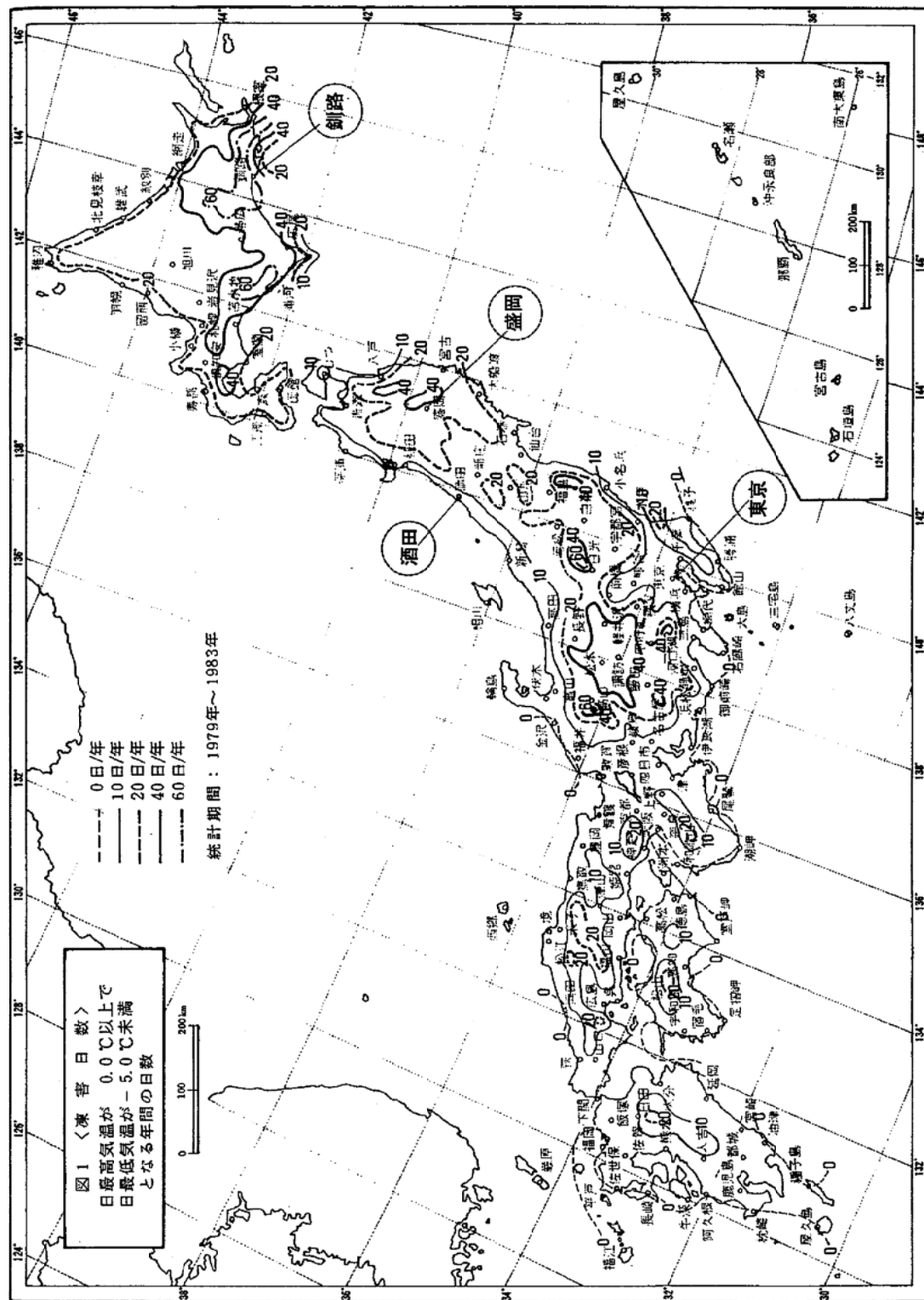
スランブ (cm)		8			18			
水セメント比 (%)		60			50		60	
暴露地		釧路		東京	釧路	東京	釧路	東京
番号		K-5		N-5	K-8	N-8	K-11	N-11
細孔量 (mm ³ /g)	細孔直径範囲 (μm)	1	2	1	1	1	1	1
	12.2 ~ 6.85	0.03	0.00	0.00	0.00	0.38	0.63	1.05
	6.85 ~ 3.85	0.23	0.46	0.84	0.55	0.28	0.31	0.48
	3.85 ~ 2.17	1.00	1.45	0.58	1.04	1.07	1.44	1.71
	2.17 ~ 1.22	0.55	1.28	2.87	2.65	1.88	2.06	1.49
	1.22 ~ 0.686	2.65	3.03	1.95	2.25	2.72	2.77	2.56
	0.686 ~ 0.386	3.16	2.96	3.15	2.20	3.59	3.11	3.20
	0.386 ~ 0.216	4.44	4.79	5.85	3.83	7.46	4.74	5.65
	0.216 ~ 0.122	6.14	6.28	5.56	4.97	7.70	6.20	5.43
	0.122 ~ 0.0680	7.44	7.68	7.13	6.41	7.54	7.70	7.90
	0.0680 ~ 0.0380	5.99	7.30	5.83	6.36	5.20	6.51	6.63
	0.0380 ~ 0.0220	5.06	5.13	4.57	4.92	4.20	5.18	5.55
	0.0220 ~ 0.0120	4.26	4.39	3.58	3.31	3.35	4.70	4.21
	0.0120 ~ 0.00600	4.52	5.30	3.51	4.59	3.62	5.11	3.92

8) 細孔量 (材齢 20 年)

暴露地	創路																	
	8								18									
	50								60									
	K-2				K-5				K-8					K-11				
	内		外		内		外		内		外			内		外		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
スランプ (cm)	8																	
水セメント比 (%)	50																	
番号	50																	
試料採取位置	50																	
細孔直径範囲(μm)	50																	
10.0 ~ 7.94	0.30	0.50	0.42	0.53	0.40	0.39	0.41	0.43	0.20	0.60	0.42	0.32	0.41	0.48	0.33	0.32	0.41	0.48
~ 6.31	0.73	1.03	0.94	0.92	0.82	0.84	0.86	0.90	0.59	1.05	0.84	0.82	0.82	0.98	0.82	0.76	0.82	0.98
~ 5.01	1.16	1.70	1.38	1.28	1.35	1.44	1.30	1.44	1.05	1.47	1.18	1.38	1.34	1.87	1.17	1.38	1.34	1.87
~ 3.98	1.68	2.26	1.76	1.74	2.12	2.01	1.83	2.05	1.63	2.09	1.73	1.73	1.88	2.25	1.72	2.28	1.88	2.25
~ 3.16	2.51	2.83	2.54	2.09	2.99	3.15	2.66	2.97	2.34	2.89	2.42	2.58	2.54	3.47	2.50	2.92	2.54	3.47
~ 2.51	3.52	3.78	3.35	2.77	3.98	4.06	3.44	4.00	3.05	3.77	3.47	3.11	3.21	4.16	3.30	3.60	3.21	4.16
~ 2.00	4.35	4.61	4.43	3.28	4.95	5.60	4.34	5.30	4.30	4.61	4.38	4.15	4.06	5.21	4.47	4.84	4.06	5.21
~ 1.58	6.11	5.51	5.44	3.98	6.35	7.14	5.50	6.52	6.17	5.88	5.65	5.42	5.58	6.58	5.85	5.91	5.58	6.58
~ 1.26	8.11	6.73	6.97	4.87	7.77	8.41	6.87	7.95	7.70	7.65	7.10	6.63	6.77	8.04	7.15	7.15	6.77	8.04
~ 1.00	9.37	7.99	8.66	6.12	9.66	10.34	8.79	10.13	10.14	9.74	8.41	8.18	8.39	9.74	8.64	8.60	8.39	9.74
~ 0.794	11.98	9.45	10.25	7.49	11.42	12.81	10.73	12.47	12.04	11.72	10.02	9.92	10.01	11.61	10.29	9.98	10.01	11.61
~ 0.631	14.05	11.23	12.45	9.28	13.71	15.00	13.02	14.89	14.57	13.98	11.59	11.89	12.10	14.34	12.12	12.45	12.10	14.34
~ 0.501	17.12	13.89	14.80	11.60	16.78	17.82	15.54	17.15	17.92	16.95	13.96	14.15	14.43	17.32	14.69	14.96	14.43	17.32
~ 0.398	21.57	17.24	17.57	14.64	20.52	21.80	18.42	20.40	20.86	20.45	16.72	16.78	17.66	21.12	17.90	18.15	17.66	21.12
~ 0.316	25.92	22.01	20.81	18.98	25.72	26.94	21.75	23.72	24.87	24.96	19.76	20.21	22.34	25.63	21.68	21.18	22.34	25.63
~ 0.251	30.73	27.62	24.78	24.25	32.65	34.16	25.39	28.45	29.02	29.29	23.57	24.16	27.51	31.49	26.09	25.51	27.51	31.49
~ 0.200	35.84	32.42	29.27	29.60	41.31	42.84	29.51	33.29	33.18	34.19	28.09	28.43	33.35	37.24	31.24	30.20	33.35	37.24
~ 0.158	41.75	38.34	34.07	34.90	50.17	51.46	34.40	38.67	37.62	38.46	32.20	33.01	38.66	43.40	36.92	35.27	38.66	43.40
~ 0.126	47.60	44.51	39.43	40.87	58.00	60.06	40.32	45.10	42.07	42.93	37.08	37.97	44.46	48.92	43.33	41.63	44.46	48.92
~ 0.100	53.61	50.39	44.86	46.53	65.36	67.04	46.36	52.29	46.42	47.73	41.98	42.93	49.24	54.10	49.91	47.65	49.24	54.10
~ 0.0794	59.85	56.42	51.08	53.24	72.97	74.65	53.79	60.79	52.19	53.19	47.67	48.93	54.69	59.58	57.51	55.37	54.69	59.58
~ 0.0631	66.50	62.39	57.77	60.03	79.99	81.83	61.60	69.86	57.74	59.28	53.87	55.25	60.79	65.77	65.55	62.99	60.79	65.77
~ 0.0501	71.93	67.95	64.14	66.92	86.26	87.91	69.89	78.92	63.24	65.12	60.37	61.65	67.21	72.33	73.90	70.86	67.21	72.33
~ 0.0398	76.29	72.27	70.37	73.15	91.39	93.05	77.83	87.71	68.06	69.75	66.66	67.61	73.49	78.69	81.94	78.22	73.49	78.69
~ 0.0316	79.98	75.69	75.91	79.01	95.55	97.07	84.98	95.84	71.98	73.98	72.46	73.24	79.19	84.47	89.08	84.73	79.19	84.47
~ 0.0251	83.00	78.26	80.60	83.74	98.69	100.30	91.24	102.83	75.38	77.16	77.53	78.04	84.11	88.96	94.93	90.03	84.11	88.96
~ 0.0200	85.26	80.55	84.83	87.99	101.31	102.83	96.33	108.37	78.19	80.02	81.73	82.31	87.89	92.99	99.68	94.62	87.89	92.99
~ 0.0159	87.25	82.33	88.43	91.63	103.38	105.23	100.71	112.77	80.78	82.48	85.48	85.88	91.36	96.40	103.64	98.22	91.36	96.40
~ 0.0126	89.18	84.12	91.51	94.86	105.48	107.07	104.43	116.49	83.90	85.39	88.61	88.72	94.97	99.85	107.20	101.36	94.97	99.85
~ 0.0100	91.84	86.16	94.21	97.88	108.20	109.44	107.74	119.61	87.97	89.11	91.31	91.52	99.45	104.31	110.45	103.96	99.45	104.31
~ 0.00794	95.82	89.42	97.04	101.01	111.65	112.54	110.95	122.54	92.47	95.75	94.26	94.66	104.91	109.90	113.63	107.08	104.91	109.90
~ 0.00631	99.62	93.69	99.23	104.47	115.64	116.12	113.90	126.08	97.14	100.84	96.82	97.39	111.29	115.75	116.84	110.28	111.29	115.75
暴露地	盛岡																	
	L-2								L-5									
	L-2								L-5									
	内		外		内		外		内		外			内		外		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	番号	L-2																
試料採取位置	L-2																	
細孔直径範囲(μm)	L-2																	
10.0 ~ 7.94	0.28	0.31	0.31	0.40	0.28	0.37	0.34	0.42	0.23	0.23	0.18	0.31	0.33	0.23	0.34	0.28	0.33	0.23
~ 6.31	0.65	0.64	0.75	0.69	0.82	0.79	0.66	0.69	0.65	0.63	0.56	0.65	0.84	0.61	0.65	0.70	0.84	0.61
~ 5.01	1.09	1.07	1.40	1.37	1.15	1.24	1.13	0.99	1.08	1.17	1.01	1.11	1.20	0.99	1.11	1.19	1.20	0.99
~ 3.98	1.59	1.53	2.10	2.01	1.73	1.72	1.64	1.28	1.54	1.51	1.55	1.44	1.66	1.40	1.62	1.57	1.66	1.40
~ 3.16	2.17	2.07	2.94	2.86	2.12	2.31	2.55	1.72	2.06	2.26	2.23	2.09	2.04	1.84	2.10	2.25	2.04	1.84
~ 2.51	2.87	2.75	3.82	3.37	2.65	2.85	3.51	2.18	2.54	3.18	2.73	2.57	2.46	2.47	2.65	2.80	2.46	2.47
~ 2.00	3.66	3.47	4.77	4.13	3.34	3.57	4.62	2.78	3.16	4.16	3.37	3.37	2.99	3.05	3.49	3.47	2.99	3.05
~ 1.58	4.63	4.27	5.96	5.00	3.89	4.41	5.56	3.54	3.92	5.01	4.41	4.15	3.65	3.88	4.25	4.38	3.65	3.88
~ 1.26	5.61	5.43	7.20	6.22	4.71	5.47	6.30	4.34	5.14	6.10	5.57	4.91	4.35	4.81	5.43	5.75	4.35	4.81
~ 1.00	7.05	7.22	8.79	7.67	5.95	6.76	7.75	5.55	6.34	7.49	7.12	5.83	5.44	5.87	6.69	7.36	5.44	5.87
~ 0.794	8.84	9.15	10.38	9.21	7.76	8.28	9.16	7.03	7.62	8.90	8.21	7.64	6.73	7.46	8.07	9.54	6.73	7.46
~ 0.631	10.80	11.27	12.20	11.36	10.05	10.06	11.18	8.73	9.45	10.65	9.78	9.35	9.16	9.48	10.17	11.66	9.16	9.48
~ 0.501	13.32	13.96	14.35	13.94	12.42	13.13	13.57	10.76	11.94	12.77	11.70	11.64	12.22	12.70	12.47	14.80	12.22	12.70
~ 0.398	17.34	17.57	17.12	17.29	16.73	17.00	16.31	13.43	15.14	16.06	14.01	14.44	17.23	17.63	15.37	18.16	17.23	17.63
~ 0.316	22.83	22.54	20.69	20.74	22.58	23.55	19.99	17.08	19.37	20.07	17.55	17.93	23.25	25.49	19.38	22.73	23.25	25.49
~ 0.251	29.63	29.49	25.33	25.17	29.78	30.53	24.19	21.65	24.85	26.39	22.50	23.40	31.50	33.37	24.20	28.77	31.50	33.37
~ 0.200	39.02	38.57	30.57	31.92	36.79	37.72	29.11	27.20	31.64	32.50	29.11	30.04	38.79	40.95	30.17	35.01	38.79	40.95
~ 0.158	47.52	46.52	36.45	38.42	43.40	44.26	34.95	33.10	38.93	39.47	37.55	38.44	46.55	47.79	37.18	41.98	46.55	47.79
~ 0.126	55.83	55.12	43.18	46.27	49.01	50.10	42.28	40.53	47.16	47.50	45.11	46.97	53.07	54.56	44.26	49.40	53.07	54.56
~ 0.100	62.84	62.36	49.50	52.86	53.53	54.94	49.57	48.77	54.87	54.50	52.17	54.82	58.69	60.35	51.24	57.08	58.69	60.35
~ 0.0794	69.59	68.79	56.48	60.11	58.97	60.58	58.30	58.39	62.02	61.96	59.68	62.65	63.76	65.65	60.22	65.62	63.76	65.65
~ 0.0631	75.35	73.92	63.44	66.86	64.26	66.07	66.41	67.18	68.48	68.22	66.53	69.62	69.07	70.95	68.91	73.94	69.07	70.95
~ 0.0501	79.74	78.06	69.58	73.72	69.15	71.37	73.88	75.73	73.89	73.79	73.19	76.02	74.27	76.27	77.39	81.95	74.27	76.27
~ 0.0398	83.17	81.69	75.58	79.81	73.82	76.43	81.53	83.59	78.23	78.03	79.22	81.63	79.02	81.36	84.88	88.94	79.02	81.36
~ 0.0316	86.54	85.11	80.92	85.60	78.00	81.06	87.94	90.40	81.33	81.36	84.29	86.47	83.74	86.00	91.48	95.16	83.74	86.00
~ 0.0251	89.25	87.78	85.50	90.35	81.47	84.87	92.47	95.52	84.08	83.85	88.69	90.39	87.43	89.74	96.81	100.05	87.43	89.74
~ 0.0200	91.84	90.47	89.59	94.68	84.71	88.38	96.69	100.18	86.59	86.43	92.32	93.92	90.59	92.91	101.16	104.31	90.59	92.91
~ 0.0159	94.13	92.63	92.94	98.21	87.56	91.49	100.22	103.83	88.80	88.65	95.36	96.79	93.50	95.89	104.59	107.76	93.50	95.89
~ 0.0126	96.22	94.81	95.72	101.29	90.70	95.01	103.36	106.73	91.17	90.88	97.82	99.17	96.73	99.16	107.52			

暴露地		酒田															
スランブ (cm)		8								18							
水セメント比 (%)		50				60				50				60			
番号		M-2				M-5				M-8				M-11			
試料採取位置		内		外		内		外		内		外		内		外	
細孔直径範囲(μm)		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
積算細孔量(mm ³ /cm ³)	10.0 ~ 7.94	0.43	0.43	0.52	0.35	0.38	0.53	0.26	0.27	0.24	0.18	0.23	0.21	0.33	0.50	0.31	0.34
	~ 6.31	0.96	0.77	1.32	0.81	0.89	0.87	0.82	0.79	0.58	0.62	0.52	0.62	0.77	0.96	0.72	0.75
	~ 5.01	1.77	1.33	1.82	1.00	1.41	1.43	0.99	1.36	1.10	1.02	0.80	1.17	1.42	1.49	1.09	1.34
	~ 3.98	2.36	1.84	2.40	1.50	1.88	2.02	1.35	1.91	1.47	1.62	1.14	1.66	1.99	2.36	1.75	1.93
	~ 3.16	3.28	2.55	3.19	1.97	2.42	2.80	2.11	2.68	1.84	2.11	1.68	2.06	2.70	3.11	2.41	2.74
	~ 2.51	4.33	3.31	4.04	2.42	3.10	3.44	2.55	3.55	2.29	2.69	2.41	2.56	3.43	4.10	3.04	3.79
	~ 2.00	5.33	4.17	4.88	2.99	3.88	4.58	3.32	4.38	2.96	3.26	3.29	3.17	4.10	5.53	3.64	4.92
	~ 1.58	6.63	5.21	6.02	3.54	5.06	5.63	4.16	5.66	4.55	4.01	4.01	3.73	5.05	6.84	4.54	6.04
	~ 1.26	7.88	6.47	7.10	4.11	6.35	6.63	5.13	6.98	5.63	5.40	4.78	4.49	6.34	8.03	5.49	7.30
	~ 1.00	9.41	7.74	8.50	4.98	7.50	8.28	6.50	8.68	6.95	6.86	6.39	5.31	7.92	9.55	6.72	9.24
	~ 0.794	11.28	9.50	9.90	6.18	9.38	9.99	8.02	10.11	8.34	8.37	7.78	6.18	9.70	11.37	8.64	12.05
	~ 0.631	13.70	12.01	11.65	7.66	11.70	12.40	10.23	12.13	10.01	9.77	9.70	8.11	12.38	13.93	10.86	14.93
	~ 0.501	16.96	15.27	14.11	9.71	15.53	15.69	12.94	14.65	11.83	12.34	11.72	10.22	15.82	18.11	13.71	18.71
	~ 0.398	21.56	19.93	17.11	13.08	20.75	20.56	15.71	17.57	16.19	16.01	14.93	13.37	22.63	24.00	16.83	22.45
	~ 0.316	27.28	26.88	21.05	17.32	27.88	27.02	19.47	20.83	21.12	20.84	19.59	17.51	31.14	31.44	21.29	28.66
	~ 0.251	33.93	33.76	25.89	22.85	36.59	35.42	24.12	24.61	27.67	27.61	24.49	22.36	39.36	41.09	27.71	34.10
	~ 0.200	40.81	41.91	31.64	29.54	44.60	43.11	29.01	29.77	36.18	36.44	30.08	29.14	48.22	48.74	34.28	40.68
	~ 0.158	48.59	50.38	38.07	38.05	52.53	50.77	34.92	35.13	45.36	45.27	36.25	37.67	55.76	56.87	41.36	48.27
	~ 0.126	56.39	58.32	44.96	46.31	61.14	58.18	42.07	41.97	54.41	55.43	42.52	45.89	63.13	64.43	48.83	55.73
	~ 0.100	63.10	65.26	51.48	53.21	68.10	64.78	48.82	50.26	62.26	63.58	48.51	53.88	70.68	71.62	57.26	63.64
	~ 0.0794	69.34	71.58	58.09	60.87	74.76	71.10	56.70	58.30	70.14	71.37	55.16	62.03	77.90	78.86	66.46	72.32
	~ 0.0631	74.37	76.82	64.04	66.97	80.34	78.27	64.22	66.63	76.91	78.12	61.52	69.38	83.97	85.09	75.12	80.54
	~ 0.0501	78.46	81.22	69.69	73.16	85.10	80.81	71.80	74.37	82.61	83.78	67.79	75.96	88.82	90.10	83.07	87.44
	~ 0.0398	81.59	84.79	74.62	78.91	89.27	84.45	78.41	81.64	86.87	87.98	73.89	81.84	92.88	94.18	90.12	93.50
	~ 0.0316	84.20	87.70	79.02	83.21	92.73	87.87	84.20	87.51	90.10	91.23	79.26	87.05	96.27	97.57	96.33	98.84
	~ 0.0251	86.24	89.98	82.77	87.10	95.62	90.56	89.08	92.85	92.58	93.57	84.32	91.65	99.19	100.57	101.38	103.05
~ 0.0200	88.16	92.04	86.19	90.70	98.41	93.27	93.42	97.27	94.71	95.55	89.00	96.03	102.11	103.55	105.61	107.02	
~ 0.0159	89.77	94.03	89.09	93.86	100.88	95.57	96.89	100.89	96.21	97.20	92.77	99.66	104.89	106.20	109.25	110.01	
~ 0.0126	91.46	95.90	91.61	96.45	103.36	97.87	99.62	103.90	97.82	98.84	96.13	102.68	107.54	108.74	112.16	112.73	
~ 0.0100	93.28	97.92	93.61	98.53	106.22	100.70	102.11	106.55	99.55	100.22	99.08	105.19	110.15	111.44	114.52	114.76	
~ 0.00794	95.83	100.42	95.51	100.14	109.61	104.49	104.50	108.71	101.43	102.24	101.05	107.33	113.74	115.10	116.40	116.57	
~ 0.00631	98.22	103.72	96.81	101.53	114.77	110.11	106.36	111.54	103.60	104.63	103.27	109.30	117.93	119.85	118.76	118.83	
細孔直径範囲(μm)		東京															
番号		N-2				N-5				N-8				N-11			
試料採取位置		内		外		内		外		内		外		内		外	
細孔直径範囲(μm)		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
積算細孔量(mm ³ /cm ³)	10.0 ~ 7.94	0.49	0.40	0.41	0.28	0.41	0.49	0.43	0.61	0.50	0.40	0.42	0.41	0.37	0.45	0.44	0.40
	~ 6.31	0.89	0.75	0.78	0.47	0.82	0.95	0.88	1.03	0.82	0.82	0.73	0.84	0.74	1.04	0.77	0.80
	~ 5.01	1.24	1.16	1.28	0.91	1.36	1.33	1.33	1.59	1.22	1.15	1.20	1.28	1.28	1.63	1.21	1.25
	~ 3.98	2.03	1.64	1.66	1.32	1.91	2.08	1.92	2.24	1.59	1.79	1.66	1.69	1.74	2.12	1.67	1.71
	~ 3.16	2.95	2.20	2.16	1.71	2.90	2.88	2.51	3.21	2.24	2.82	2.32	2.32	2.26	2.78	2.23	2.45
	~ 2.51	3.87	2.81	2.75	2.28	4.23	3.98	3.39	4.17	2.95	3.65	2.85	3.10	2.92	3.67	2.89	3.37
	~ 2.00	4.70	3.98	3.63	2.97	5.29	4.87	4.62	5.31	3.70	4.68	3.97	4.01	3.56	4.58	3.88	4.45
	~ 1.58	6.24	5.32	4.61	3.94	6.66	6.32	6.08	6.74	4.94	6.01	4.93	5.43	5.19	6.22	5.16	6.19
	~ 1.26	7.75	6.45	6.18	4.95	8.21	8.31	7.53	8.39	7.02	7.59	6.10	6.72	6.80	7.69	6.60	8.10
	~ 1.00	9.24	8.11	7.73	6.28	10.25	10.24	9.03	10.21	9.77	9.99	7.75	8.17	9.13	9.42	8.72	9.82
	~ 0.794	11.26	10.44	9.90	8.00	13.37	12.96	10.97	12.39	11.92	11.99	9.64	10.12	11.67	11.58	11.17	12.44
	~ 0.631	14.17	13.49	12.11	10.99	16.69	15.91	13.37	15.19	15.04	15.35	12.23	12.37	15.03	14.85	14.36	15.58
	~ 0.501	19.10	17.68	15.30	13.56	22.20	21.50	15.96	18.21	19.65	20.08	15.14	15.58	20.10	19.50	17.74	19.48
	~ 0.398	24.65	23.16	19.23	16.89	29.20	27.84	19.14	21.64	26.35	26.23	19.69	20.09	26.15	25.21	21.47	23.77
	~ 0.316	32.14	29.33	25.01	20.62	36.71	36.03	22.21	25.82	33.20	34.06	25.68	26.92	33.95	33.19	25.90	28.06
	~ 0.251	39.65	37.24	30.39	25.21	44.76	44.85	26.14	30.00	41.02	43.01	33.09	34.28	41.18	41.48	29.72	33.12
	~ 0.200	47.77	45.64	36.54	29.53	52.65	53.24	30.38	34.78	51.02	53.26	41.85	42.63	48.38	48.90	34.88	38.55
	~ 0.158	55.72	54.29	42.40	33.87	59.91	61.24	35.16	40.23	60.81	63.53	49.94	50.68	55.02	56.45	40.87	45.02
	~ 0.126	62.47	61.35	48.80	38.79	67.45	69.00	41.11	46.74	69.58	72.73	57.06	58.31	61.51	63.18	48.54	53.15
	~ 0.100	67.90	66.66	54.39	43.02	74.13	75.68	48.14	54.43	76.87	80.22	62.96	64.29	66.36	68.38	56.67	62.82
	~ 0.0794	72.72	71.96	60.43	47.63	80.31	82.32	56.60	63.49	83.79	87.14	68.44	69.88	71.14	73.35	66.43	73.10
	~ 0.0631	76.66	75.97	65.80	52.37	85.46	87.79	64.67	72.62	89.80	93.18	73.76	74.98	75.52	78.00	76.32	83.26
	~ 0.0501	80.63	79.89	71.11	57.43	89.11	91.67	73.09	82.17	94.57	97.83	78.68	79.82	79.51	82.02	85.76	93.77
	~ 0.0398	84.48	83.49	76.29	62.68	91.96	94.50	81.45	91.53	97.81	101.37	83.84	84.48	83.06	85.56	94.71	103.73
	~ 0.0316	87.72	86.80	81.00	67.58	94.24	96.86	88.98	100.11	100.54	104.05	88.69	89.18	86.22	88.77	102.82	112.83
	~ 0.0251	90.37	89.55	85.17	71.98	96.11	98.84	95.17	106.95	102.49	105.77	93.13	93.54	88.94	91.46	109.82	120.51
~ 0.0200	92.90	92.23	88.89	75.79	97.96	100.73	100.41	112.90	103.97	107.28	97.22	97.26	91.57	94.11	114.99	126.75	
~ 0.0159	95.14	94.31	92.01	78.97	99.80	102.55	104.39	117.12	105.35	108.54	100.84	100.47	94.21	96.91	119.27	131.47	
~ 0.0126	97.33	96.43	94.85	81.79	101.84	104.66	107.71	120.61	106.53	109.73	103.93	101.25	97.20	99.94	122.70	135.29	
~ 0.0100	99.53	98.85	97.14	84.05	104.26	107.50	110.48	123.28	108.12	111.10	106.31	106.46	100.45	103.27	125.65	138.47	
~ 0.00794	101.96	101.74	99.15	86.18	107.22	110.23	112.77	125.63	109.61	112.91	108.65	109.87	103.85	106.94	128.52	141.20	
~ 0.00631	104.04	104.54	100.64	87.53	110.35	113.87	114.28	127.05	110.94	114.39	109.98	109.87	108.05	111.44			

9) 耐久性を阻害する要因マップ【凍害日数】



ISBN 978-4-88175-094-0 C3358 ¥1500E

コンクリート専門委員会報告 F54

定価： 本体 1,500 円 + 税

平成 20 年 3 月 17 日 印刷 社団法人 セメント協会

平成 20 年 3 月 17 日 発行 東京都中央区八丁堀 4-5-4

ダヴィンチ桜橋 702 号

Tel 03(3523)2701(代)

発行所 社団法人 セメント協会 研究所

東京都北区豊島 4-17-33

Tel 03(3914)2691(代)

印刷所 有限会社 プリントニューライフ

東京都千代田区三崎町 2-12-5

Tel 03(3263)0633

JCA