

論文 水の作用がコンクリートの圧縮強度および塩分浸透抵抗性に与える影響

忽那 惇^{*1}・大塚 邦朗^{*2}・岩波 光保^{*3}・網野 貴彦^{*4}

要旨:本研究では、水の作用がコンクリートの圧縮強度および塩分浸透抵抗性に与える影響を把握するため、種々の環境に材齢6ヵ月および22ヵ月暴露した試験体の圧縮強度試験および電気泳動試験を実施した。その結果、湿潤養生期間を十分に設けた場合、高湿度の室内環境（相対湿度95%）または水の作用を受ける環境に暴露した試験体の圧縮強度は、材齢28日の標準養生試験体よりも大きくなったが、水の作用のない相対湿度60%の室内環境に暴露した場合には小さくなった。また、乾湿繰返し作用を与えた試験体では実効拡散係数が大きくなり、特に普通ポルトランドセメントを使用した場合にその傾向が顕著であった。

キーワード: 圧縮強度, 塩分浸透抵抗性, 実効拡散係数, 湿潤養生期間, 乾湿繰返し, セメント種類

1. はじめに

2012年制定コンクリート標準示方書【施工編】(以下、示方書)によれば、コンクリートに要求される品質として、「均質性」、「ワーカビリティ」、「強度」、「耐久性」、「水密性」、「ひび割れ抵抗性」が挙げられている¹⁾。このうち、「均質性」や「ワーカビリティ」は製造および打込み時に、「ひび割れ抵抗性」は施工段階に要求される品質であり、「水密性」は適切な水セメント比と単位水量の配合とした上で上記3つの品質が適切であれば確保できるとされている。すなわち、長期的に変化する主な品質としては「強度」と「耐久性」が考えられる。

長期的な品質変化に影響する要因としては、使用材料や配合条件に加え、環境条件による影響も大きいと考えられる。2013年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】では「水掛かり」の章が新設され、コンクリート構造物の維持管理において水の作用に着目することの重要性が述べられている²⁾。

上記の背景から、著者らは、セメント種類および水セメント比を変えたコンクリート試験体を種々の環境に暴露し、コンクリートの圧縮強度および物質移動抵抗性に影響を与える要因を明らかにすることを目的とした実験を実施している。本稿では、特に水の作用に着目して、湿潤養生期間や養生後の暴露環境の違いが材齢6ヵ月および22ヵ月(約2年)におけるコンクリートの強度特性(圧縮強度)や物質移動抵抗性の変化に及ぼす影響について確認した結果を報告する。なお、物質移動抵抗性は様々な物質が対象となるが、本実験では塩分浸透抵抗性を対象として、電気泳動試験により塩化物イオンの実効拡散係数を測定した。

2. 実験概要

2.1 検討シリーズ

本実験では、次の4シリーズを設定した。

- ・シリーズ1: セメント種類・水セメント比の影響
- ・シリーズ2: 湿潤養生期間の影響
- ・シリーズ3: 乾湿繰返しの影響
- ・シリーズ4: 湿度・室内外の影響

本研究での実験ケースを表-1に、使用した材料、配合を表-2に示す。以下に各シリーズの概要を説明する。

(1) シリーズ1 (セメント種類・水セメント比)

シリーズ1では、セメント種類および水セメント比(以下、W/C)を変化させた。セメントは普通ポルトランドセメント(以下、N)および高炉セメントB種(以下、BB)を使用し、NについてはW/C=0.4, 0.5, 0.6の3配合、BBについてはW/C=0.5の1配合を検討した。コンクリートの打込みは全てのケース・シリーズで20℃・60%RHの室内で行い、材齢2日までそのまま封緘養生を行った。その後型枠を取り外し、Nに対しては3日間、BBでは5日間の水中養生(20℃)を行い、大気中の環境を想定して恒温恒湿室内(20±1℃, 60±3%RH)に暴露した。なお、本稿では型枠を存置した2日間(封緘養生)と水中(水温20℃)での養生期間を合わせて湿潤養生期間と定義する。

さらに、本シリーズでは、暴露環境が海水中である影響も検討するため、上記の湿潤養生期間終了後に、20℃一定の3%NaCl水溶液中に浸漬させたケースも設定した。

(2) シリーズ2 (湿潤養生期間)

シリーズ2では、表-1に示すように、W/C=0.5の条件でN、BBに対して湿潤養生期間を変化させた。湿潤

*1 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター新材料・リニューアル技術グループ (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (学生会員)

*3 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 博士(工学) (正会員)

*4 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター新材料・リニューアル技術グループ リーダー 博士(工学) (正会員)

表-1 実験ケース

シリーズ	配合名称 (表-2 参照)	検討条件			暴露条件			
		セメント 種類	W/C	湿潤養生 期間(日)	室内・室外		乾湿繰返し(室内)	
					温度(°C)	湿度(%)	浸漬時間-乾燥時間(浸漬率)	
1	N40	N	0.4	5	20	60	—	
1						—	常時浸漬 (100%)	
1~4						60	常時室内 (0%)	
4						95	—	
3	N50	N	0.5	5	20	—	0.5h-5.5h (8%)	
3						—	1.5h-4.5h (25%)	
3						—	3.0h-3.0h (50%)	
1, 3						—	常時浸漬 (100%)	
4						室外		—
2						—	—	
2	N60	N	0.6	5	20	60	—	
1						—	—	
1						—	常時浸漬 (100%)	
1~4	BB50	BB	0.5	7	20	60	常時室内 (0%)	
3						—	0.5h-5.5h (8%)	
3						—	1.5h-4.5h (25%)	
3						—	3.0h-3.0h (50%)	
1						—	常時浸漬 (100%)	
2						—	—	
2	BB50	BB	0.5	11	20	60	—	
2				2		—		

表-2 コンクリート配合

配合 名称	配合条件					単位量 (kg/m ³)					
	セメン ト種類	W/C	s/a (%)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	W	C	S	G	Ad1	Ad2
N40	N	0.4	41	8.0 (±2.5cm)	4.5 (±1.5%)	169	423	698	1,039	2.54	2.54
N50		0.5	43			157	314	784	1,075	1.88	1.88
N60		0.6	45			155	258	844	1,067	1.55	1.55
BB50	BB	0.5	42	153	306	769	1,098	1.84	2.45		

※N：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³），BB：高炉セメント B 種（スラグ混入率 40~45%，密度 3.04 g/cm³），
S：君津産山砂（表乾密度 2.61 g/cm³），G：北海道上磯郡嵯峨町産砕石 2005（表乾密度 2.70 g/cm³），Ad1：AE 剤（1種），
Ad2：AE 減水剤標準形（1種）

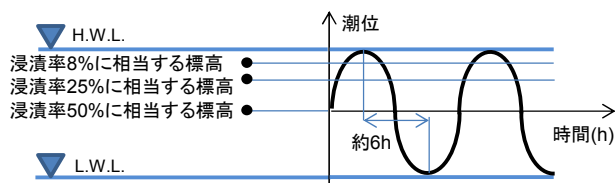


図-1 乾湿繰返しの概念（シリーズ2）

養生期間は、示方書¹⁾を参考に、Nについては5日間（型枠存置2日+水中養生3日）を中心に、2日間（型枠存置2日+水中養生0日）、9日間（型枠存置2日+水中養生7日）を設定した。一方、BBについては、7日間（型枠存置2日+水中養生5日）を中心に、2日間（型枠存置2日+水中養生0日）、11日間（型枠存置2日+水中養生9日）を設定した。湿潤養生終了後は大気中の環境を想定し恒温恒湿室内（20±1°C，60±3%RH）に暴露した。

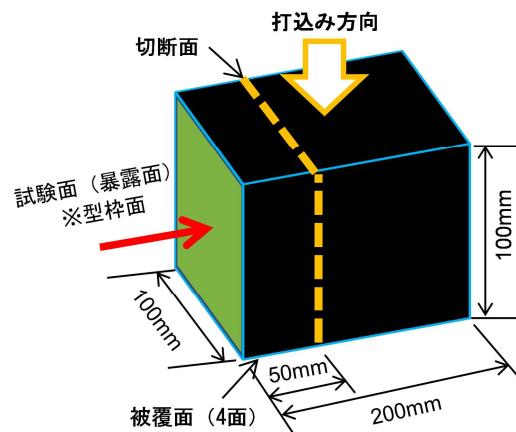


図-2 試験体概要（全シリーズ共通）

(3) シリーズ3（乾湿繰返し）

シリーズ3では、W/C=0.5のNおよびBBに対して、乾燥時間と浸漬時間を変化させて乾湿繰返しの影響を検討した。本シリーズでは、東京湾における潮位変動（1日に2回の頻度で干潮と満潮を迎える）を想定し、図-

1に示すように、浸漬時間を6時間で除した値を浸漬率と定義して、浸漬率8, 25, 50%の3ケースを設定した。そして、乾燥時は室内(温度20℃)に、浸漬時は3%NaCl水溶液中(水温20℃)に暴露した。また、表-1のうち、浸漬率0%とした室内(20±1℃, 60±3%RH)および浸漬率100%とした3%NaCl水溶液中(室内:水温20℃)のケースも比較対象とした。

(4) シリーズ4(湿度・室内外)

シリーズ4はW/C=0.5のNに対して行い、室内における相対湿度の違い、室外における雨掛かりや気温変化を受けるケースについて検討した。室内における相対湿度の比較は、温度20℃, 相対湿度95%のケースと相対湿度60%のケースを比較した。また、室外に暴露した試験体は、風雨や気温変化を受ける建物(東京都目黒区緑が丘)の屋上に暴露し、室内に暴露した試験体の結果と比較した。

2.2 試験体および試験項目

(1) 圧縮強度

圧縮強度用試験体は、直径100×高さ200mmの円柱試験体とし、各ケースに対して3体作製した。また、表-1の配合、セメント種類、W/Cごとにそれぞれ材齢28日まで水中養生(水温20℃)を行った標準養生試験体も3体ずつ作製した。

圧縮試験は、材齢28日で標準養生試験体の圧縮強度試験(JIS A 1108)を行い、次いで材齢6ヶ月および22ヶ月が経過した時点で試験体を回収し、圧縮試験を行った。以降の圧縮強度に関しては、材齢6ヶ月と22ヶ月における圧縮強度 σ_t (t:材齢6ヶ月または22ヶ月)を標準養生試験体の圧縮強度 σ_{28} (材齢28日)で除した値(圧縮強度比)で整理する。

(2) 塩化物イオンの実効拡散係数

塩分浸透抵抗性試験用の試験体を図-2に示すが、すべてのシリーズで寸法を100×100×200mmと統一し、コンクリート打込み方向に対して側面の型枠面2面を試験面(暴露面)とした。なお、試験体は表-1に示す各

ケースに対して2体ずつ作製した。また、型枠取外し後に、試験面以外の4面をエポキシ樹脂にて被覆した。圧縮強度試験と同様、材齢6ヶ月および22ヶ月で試験体を回収し、図-2に示すように、暴露面から50mmの位置で切断した50mmの試験片を用いて、電気泳動試験(JSCE-G 571-2013)を行い、塩化物イオンの実効拡散係数を求めた。なお、以降に示す実効拡散係数は各ケース2体の平均値で示している。

3. 実験結果

3.1 シリーズ1(セメント種類・水セメント比)

図-3に、セメント種類および水セメント比を検討したケースの圧縮強度比を示す。相対湿度60%の環境では、セメント種類によらず材齢6ヶ月および22ヶ月の圧縮強度比は1.0以下か同等であり、標準養生試験体の圧縮強度よりも小さくなった。また、材齢6ヶ月から22ヶ月にかけて圧縮強度が低下する傾向も見られた。一方、3%NaCl水溶液に浸漬させたケースでは、いずれのケースも圧縮強度比は1.0以上であり、材齢6ヶ月から22ヶ月にかけて圧縮強度の増加が見られた。

図-4に、セメント種類および水セメント比を検討したケースの塩化物イオンの実効拡散係数を示す。これによると、相対湿度60%の室内、3%NaCl水溶液中のいずれもW/Cが大きいほど実効拡散係数は大きくなっているが、W/C=0.4とW/C=0.6の実効拡散係数の差は3%NaCl水溶液中のほうが大きくなった。また、材齢6ヶ月から22ヶ月にかけての実効拡散係数の変化に着目すると、W/C=0.6以外のケースでは材齢とともに実効拡散係数が小さくなる傾向を示したが、W/C=0.6のケースでは、相対湿度60%の室内および3%NaCl水溶液中とも実効拡散係数が大きくなり、W/Cによって材齢による品質の変化傾向に違いが見られた。一般的には、コンクリートは材齢とともに組織の緻密化が進むと考えられるため、実効拡散係数は材齢6ヶ月から22ヶ月にかけて減少するものと考えられる。しかしながら、W/C=0.6のように水密性

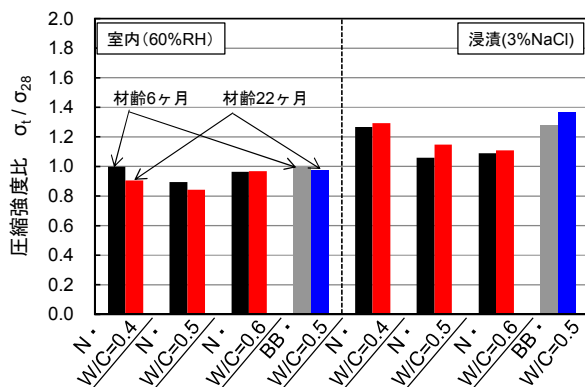


図-3 圧縮強度比(シリーズ1)

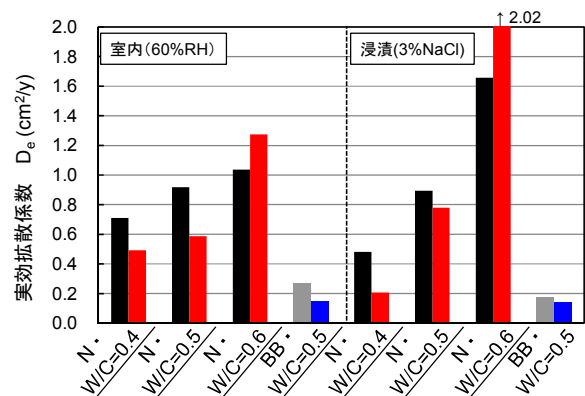


図-4 塩化物イオンの実効拡散係数(シリーズ1)

に劣り水が供給されない条件下では、拡散係数に影響し得るコンクリート表層部の乾燥の影響が卓越し、表層部の水和反応が十分に進行しなかったことが考えられる。一方で、常時3%NaCl水溶液に浸漬させた場合も、原因は定かではないが、水密性に劣るコンクリートでこのような現象が起きる可能性が確認されたため、今後も検討が必要であると考えられた。

3.2 シリーズ2 (湿潤養生期間)

湿潤養生期間の違いを検討したケースの圧縮強度比および実効拡散係数を、それぞれ図-5、図-6に示す。

図-5によれば、セメント種類によらず湿潤養生期間が長くなるほど圧縮強度比は増加したが、Nでは標準として設定した湿潤養生期間5日においても1.0を下回った。また、材齢6ヵ月から22ヵ月にかけての圧縮強度の変化に着目すると、Nの湿潤養生期間9日のケースでは強度増加が見られたが、その他のケースでは減少した。このことは、長期的に乾燥環境に置かれる構造物(部材)に対してNを使用する場合には、標準の湿潤養生期間よりも長くすることが有効であると考えられる。

一方、BBでは水中養生を行わなかった湿潤養生2日間のケースにおいて圧縮強度比1.0を下回ったが、標準の湿潤養生期間7日以上の場合では圧縮強度比1.0を概ね確保できていた。しかし、Nの湿潤養生期間9日のケースと異なり、養生期間11日としたBBでは材齢6ヵ

月から22ヵ月にかけての強度増加は見られなかった。長期的に乾燥環境下にある構造物に対してBBを使用し、長期強度の増加を期待する場合には、湿潤養生期間をさらに延長することを検討する必要があると思われる。

図-6によれば、材齢6ヵ月におけるNの実効拡散係数は、湿潤養生期間5日と9日のケースに比べて2日の場合に小さくなったが、材齢22ヵ月では湿潤養生期間によらず3ケースでの差が小さくなる様子が伺える。一方、BBでは、材齢6ヵ月、22ヵ月とも、湿潤養生期間による実効拡散係数の違いはほとんど見られない。このことは、実効拡散係数は湿潤養生期間の影響によって異なる値となるが、次第に暴露環境による影響が支配的となり、湿潤養生期間の違いによる影響は小さくなる可能性が推察される。

以上のことより、本稿で示した材齢22ヵ月までの結果では、湿潤養生期間を長くすることは、圧縮強度の増加において有効であることを確認できたが、塩分浸透抵抗性の向上に寄与する結果は得られなかった。

3.3 シリーズ3 (乾湿繰返し)

乾湿繰返しの影響を検討したケースの圧縮強度比および実効拡散係数を、それぞれ図-7、図-8に示す。

図-7によれば、Nの材齢6ヵ月における圧縮強度比は浸漬率0~50%ではほぼ同等であったのに対し、浸漬率100%のケースはそれよりも大きくなった。しかし、材齢

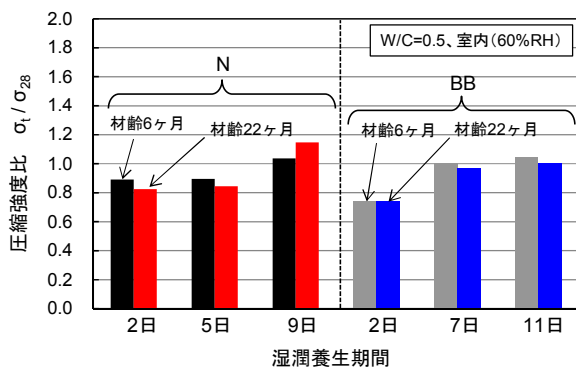


図-5 圧縮強度比 (シリーズ2)

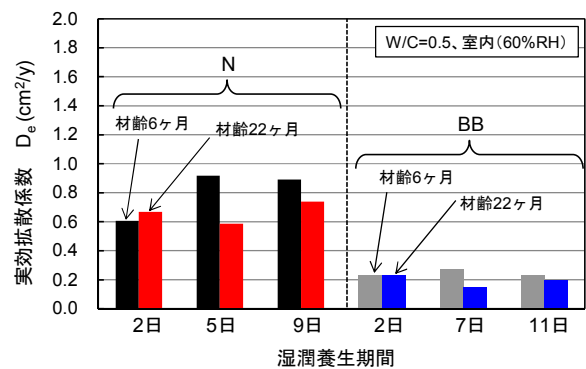


図-6 塩化物イオンの実効拡散係数 (シリーズ2)

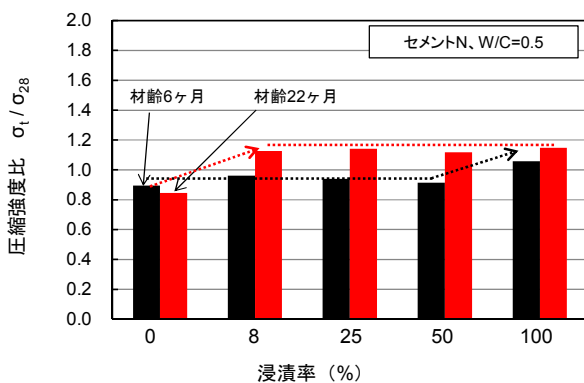
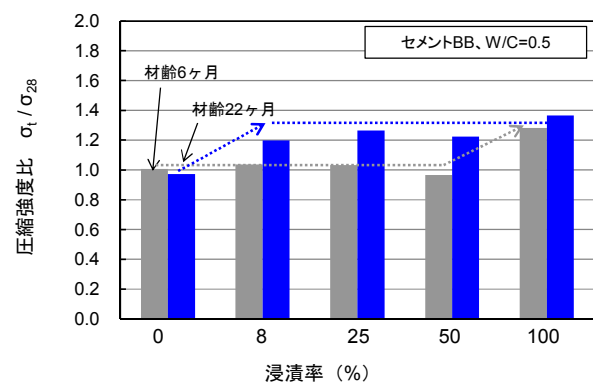


図-7 圧縮強度比 (シリーズ3)



22ヶ月になると、浸漬率8~50%の圧縮強度比が浸漬率100%のそれと同等になった。この傾向はBBでも確認された。浸漬率100%の場合、暴露期間中にコンクリート内部に十分な水が供給されて未水和セメントの反応が促進されたことで材齢6ヶ月までに強度が大幅に増加したのに対し、乾湿繰返しのケース（浸漬率8~50%）では、水分供給が間欠的であることから浸漬率100%のケースに比べて水和反応が遅く、材齢22ヶ月の時点で浸漬率100%とほぼ同等の強度が得られたものと考えられる。また、N、BBとも、浸漬率0%のみ、材齢6ヶ月から材齢22ヶ月にかけての圧縮強度比の増加が見られなかった。このことから、乾湿繰返しであっても水分が供給される環境である場合には、圧縮強度は増加していくものと考えられる。

次いで、図-8の実効拡散係数の結果より、N、BBいずれも乾湿繰返しを与えたケースの実効拡散係数は浸漬率0%および100%のそれよりも大きい値を示した。シリーズ1と同様、この原因を明らかにできていないが、様々な現象^{例えば3)}の発生が複合した可能性が考えられる。

以上のことから、乾湿繰返しにより間欠的にでも水が作用すれば、圧縮強度の増加を期待することができるが、塩分浸透抵抗性は低下する可能性があることがわかった。

3.4 シリーズ4（湿度・室内外）

図-9、図-10に、室内の相対湿度、室内外の影響を

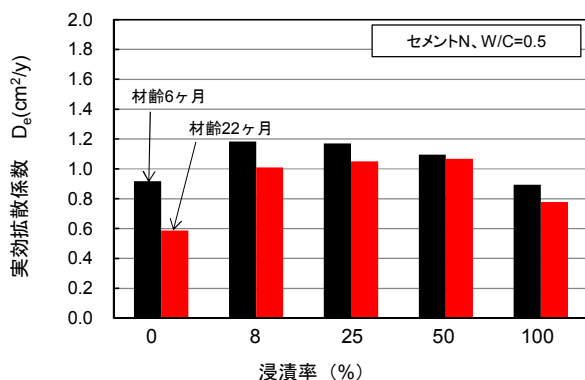


図-8 塩化物イオンの実効拡散係数 D_e (シリーズ3)

検討したケースの圧縮強度比および実効拡散係数を示す。

図-9によれば、相対湿度60%の圧縮強度比は1.0を下回ったのに対し、相対湿度95%の室内や室外では1.0以上であり、室外環境では材齢6ヶ月から22ヶ月までの強度増加も見られた。このことから、室外の湿度も強度増加に影響を与えており、時折作用する降雨の影響も強度増加に寄与していたものと考えられる。

一方、図-10によれば、材齢6ヶ月時点の実効拡散係数は各ケースで違いが見られないが、材齢22ヶ月では室外のケースでは他のケースよりも大きくなった。これは、室外は降雨や風の影響を受ける、すなわちシリーズ3の乾湿繰返しと同じような影響を受けたためと考えられる。

4. 水の作用が強度特性や塩分浸透抵抗性に及ぼす影響

図-11に、本研究で検討したすべてのケースにおける実験結果を用いて、圧縮強度比と実効拡散係数の関係を整理した。

横軸の圧縮強度比に着目すると、湿潤養生期間を標準として設定した期間より短くした場合、または養生後からの水の作用がなく相対湿度60%の室内に暴露した場合（図中、塗潰しの点）には、セメント種類によらず、材齢6ヶ月、22ヶ月とも圧縮強度比が1.0以下となり、標準養生試験体の圧縮強度よりも小さくなる傾向が明瞭に見られる。また、乾湿繰返しを与えたケースでは、材齢

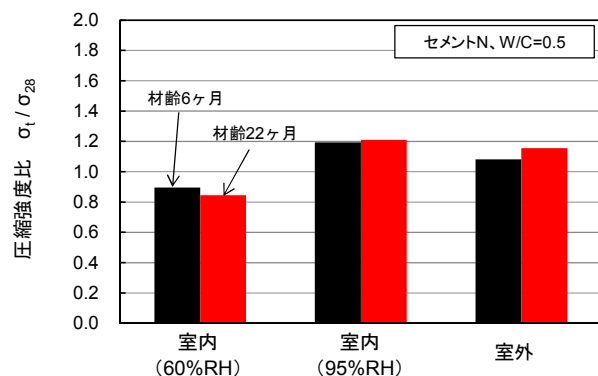
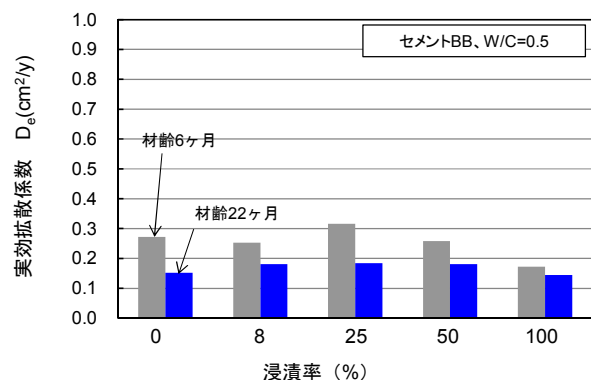


図-9 圧縮強度比 (シリーズ4)

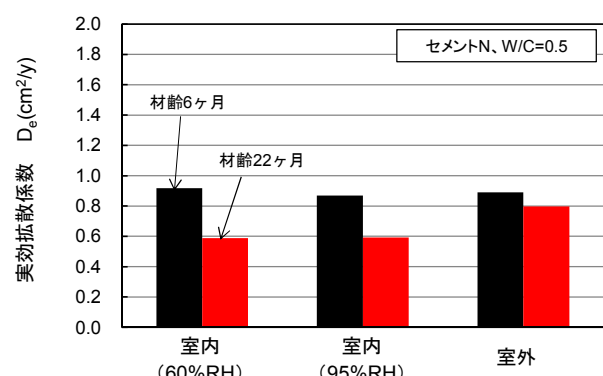


図-10 塩化物イオンの実効拡散係数 (シリーズ4)

6 ヶ月では圧縮強度比が 1.0 を下回るが材齢 22 ヶ月では 1.0 以上となり、材齢に伴う強度増加が確認できる。この傾向は、特に BB において顕著に見られている。

一方、縦軸の実効拡散係数に着目すると、セメント種類や W/C の違いによる影響が最も大きい。W/C=0.5 の条件の N で比較すると、乾湿繰返しのケースにおいて実効拡散係数が大きくなっている。一方、BB では実効拡散係数の値自体が小さいため、乾湿繰返しの影響は N ほど明瞭には見られない。また、材齢 6 ヶ月と 22 ヶ月の結果を比較すると、水分供給の少ない条件（相対湿度 60% の室内）では材齢 6 ヶ月から 22 ヶ月にかけての実効拡散係数の低下（塩分浸透抵抗性の向上）が顕著であるが、水分供給の多い条件（常時浸漬、乾湿繰返し、室外、相対湿度 95% の室内）では若干低下した程度であった。

以上のことから、本研究での範囲にはなるが、材齢 22 ヶ月における強度特性は湿潤養生期間や養生後の水の作用の有無に、塩分浸透抵抗性はセメント種類や W/C に加え乾湿繰返し作用に強く影響される可能性が確認できた。

本研究では、現在も試験体を暴露中であることから、今後さらにデータを収集し、湿潤養生期間の違いや乾湿繰返しの影響が圧縮強度や実効拡散係数に与える影響について確認する予定である。また、著者らは既報⁴⁾にて、水セメント比や W/C のみでなく、温度も塩分浸透抵抗性に与える影響が大きい可能性があることを示唆している。今後、高温履歴を与えた材齢 22 ヶ月の試験を行い、本稿で述べた水の作用の影響と併せて、温度の影響も整理していく予定である。

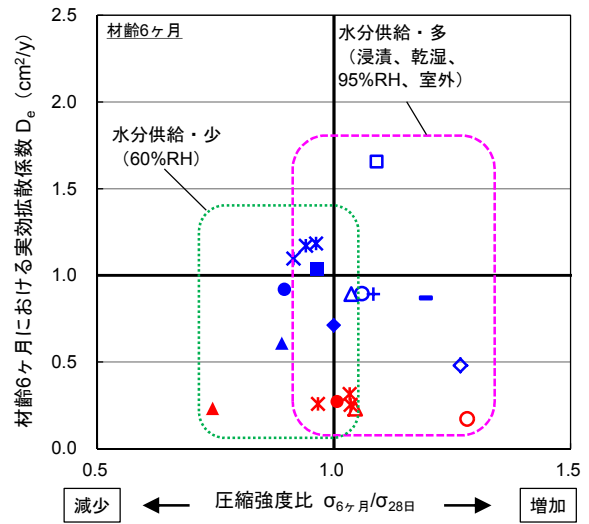
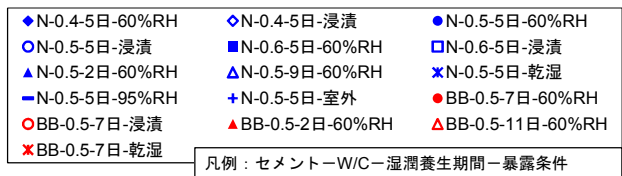
5. 結論

本研究では、種々の環境に暴露した試験体の材齢 6 ヶ月および 22 ヶ月における圧縮強度試験および電気泳動試験を実施し、水の作用がコンクリートの圧縮強度および塩分浸透抵抗性に与える影響を調査した。本研究により得られた結論を以下にまとめる。

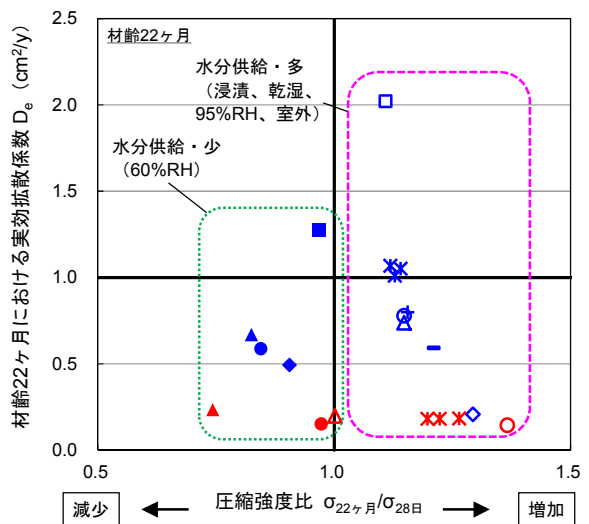
- (1) 湿潤養生期間を十分に設けた場合、高湿度の室内環境（相対湿度 95%）または水の作用を受ける環境に暴露した試験体の圧縮強度は、材齢 28 日間の標準養生試験体よりも大きくなった。しかし、水の作用のない相対湿度 60% の室内環境に暴露した場合には小さくなった。
- (2) 乾湿繰返し作用を与えたケースでは実効拡散係数が大きくなり、特に普通ポルトランドセメントを使用した場合にその傾向が顕著であった。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書施工編，2013.3



(a) 材齢 6 ヶ月データ



(b) 材齢 22 ヶ月データ

図一 11 実効拡散係数と圧縮強度比の関係

- 2) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書維持管理編，pp.114-118，2013.10
- 3) 丸屋 剛，Tangtermsirikul Somnuk，松岡康訓：コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化，土木学会論文集，No.585/V-38，pp.79-95，1998.2
- 4) 忽那 惇，大塚邦朗，岩波光保，網野貴彦：湿潤養生期間および温度履歴の違いがコンクリートの塩分浸透抵抗性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp. 825-830，2016