

論文 異なるセメントおよび混和材料を用いたコンクリートの収縮挙動に及ぼす環境条件の影響

市川 裕規*1・兵頭 彦次*2・梶尾 聡*2

要旨：本研究は、セメントに普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を、混和材料に膨張材および収縮低減剤を用いたコンクリートの収縮挙動に及ぼす環境条件の影響について評価した。供試体は、恒温恒湿の室内、温湿度の影響を受ける屋内および日射・風雨の影響を受ける屋外に設置した。屋外の収縮挙動は、普通ポルトランドセメントを用いた場合、水分浸透速度係数と相関があることが明らかとなった。膨張材および収縮低減剤の収縮抑制効果は、環境条件によらずほぼ同程度の効果が見込めることを確認した。湿度が変化する環境下での収縮ひび割れ試験結果は、湿度一定環境下と異なる場合がある可能性が示された。

キーワード：環境条件、水分浸透速度係数、乾燥収縮、収縮ひび割れ、膨張材、収縮低減剤

1. はじめに

コンクリートの収縮は、鉄筋等によって拘束されることで断面内に引張応力を生じさせる。引張応力が大きくなると構造物にひび割れが発生し、美観や水密性、鉄筋の腐食ともなう耐久性の低下に繋がる。また、コンクリートの収縮は構造性能にも影響を及ぼす。代表的なものとして、変形、プレストレスロス、不静定力などがある。コンクリートの収縮は、一般に恒温恒湿環境下の室内における実験結果が材料特性値として用いられる。一方、構造物や部材の置かれる環境では、通常、温湿度が変化し、さらに日射や降雨に曝される場合がある。これまでも、屋外環境のコンクリートの収縮挙動には降雨の影響が大きいこと等が報告¹⁾されている。コンクリートの収縮が構造物の挙動に及ぼす影響を適切に評価するためには、これら環境条件の影響を考慮していく必要がある。

本研究では、セメント種類や収縮低減剤、膨張材を用いたコンクリートの収縮挙動および収縮ひび割れに及ぼす環境の影響について評価した。これら材料がコンクリートの収縮に及ぼす影響については、すでに室内データの蓄積がある。一方、環境条件が変化する場合のデータは限られており、要素レベルの供試体を用いてこれを明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

表-1 に、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および高炉セメント B 種を用いた。細骨材には山砂を、粗骨材には硬質砂岩の砕石 2005 を用いた。混和材料には低添加型の石灰系膨張材、収縮低減剤(主成分：ポリオキシエチレンアルキルエーテル)を用いた。表-2 に、コンクリートの配(調)合を示す。コンクリートの種類によらず、水結合材比を 55%、単位水量を 163kg/m³一定とし、AE 減水剤および AE 剤を用いて、スランプ 12±2.5cm、空気量 4.5±1.5%となるように調整した。膨張材はセメントの一部、収縮低減剤は単位水量の一部として使用した。

表-3 に、環境条件を示す。環境条件は、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の室内、温湿度が変化する屋内、日射・風雨および温湿度の変化の影響を受ける屋外とした。供試体作製は 9 月上旬から下旬に行った。

表-4 に、試験項目を示す。寸法φ100×200mm の円柱供試体を用いて、圧縮強度および割裂引張強度試験を行った。水中養生する供試体および材齢 7 日まで封緘養生し、以後、屋内と屋外に暴露する供試体を用意した。水分浸透速度係数試験は、屋外に 46 日間暴露した後、JSCE-

表-1 コンクリートの使用材料

材料名	記号	種類
水	W	上水道水
セメント	N	普通ポルトランドセメント
	BB	高炉セメント B 種
細骨材	S	山砂/静岡県掛川市産
粗骨材	G	砕石 2005/茨城県桜川市産
混和材	EX	膨張材
化学混和剤	AD	AE 減水剤
	AE	AE 剤
	SR	収縮低減剤

表-2 コンクリートの配(調)合

記号	セメント種類	W/(C+EX) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AD (C×%)	
				W	C	EX	S	G		SR
N	N	55.0	46.0	163	296	—	825	999	—	0.7
EX					276	20			3	
SR				296	—	—				
SE				276	20	—				
BB	BB	—	—	163	296	—	—	—	—	

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 第 2 研究部 修士(工学) (正会員)

*2 太平洋セメント (株) 中央研究所 第 2 研究部 博士(工学) (正会員)

表-3 環境条件

環境名	影響要因		
	日射	風雨	温湿度の変動
室内	×	×	×
屋内	×	×	○
屋外	○	○	○

表-4 試験項目

測定内容	供試体形状 (mm)	養生方法	備考
圧縮強度	Φ100×200	室内： 水中養生 屋内，屋外：	JIS A 1108
割裂引張強度	Φ100×200	7日湿潤養生後暴露	JIS A 1113
水分浸透速度係数		7日湿潤養生後 46日屋外暴露	JSCE-G 582-2018
収縮ひずみ	100×100×400	室内： 7日水中養生 屋内，屋外： 7日封緘養生	室内：JIS A 1129-2
拘束応力	100×100×1000	屋内，屋外： 7日封緘養生	—



写真-1 屋内暴露状況 写真-2 屋外暴露状況

G 582-2018に基づき、温度 40℃・30%R.H.で 28 日間乾燥させた円柱供試体を用いた。乾燥収縮試験には寸法 100×100×400mm の角柱供試体を用いた。室内試験は JIS A 1129-2 に準拠した。屋内および屋外の供試体は、材齢 7 日まで封緘養生を行った後、各環境に暴露した。ひずみの測定には埋込型ひずみ計を用いた。熱電対で供試体中心部の温度を測定し、計測された全ひずみから温度ひずみを差引くことで、収縮・膨張ひずみを求めた。コンクリートの線膨張係数は、土木学会コンクリート標準示方書²⁾を参考に、普通ポルトランドセメントを用いた場合(N, EX, SR, SE)は $10 \mu / ^\circ C$ 、高炉セメント B 種を用いた場合(BB)は $12 \mu / ^\circ C$ とした。収縮ひび割れ試験には、100×100×1000mm の角柱供試体の断面中央に、長手中央 300mm 区間のリブとふしを切削して円形に加工した異型鉄筋(呼び名：D32)を配置した。材齢 7 日まで封緘養生を行った後、屋内・外に供試体を暴露した。鉄筋ひずみの測定にはひずみゲージを用いた。

写真-1 および写真-2 に、供試体の暴露状況を示す。乾燥収縮試験および収縮ひび割れ試験の供試体数は 2 本とした。屋外に暴露した供試体は、地上から約 1m の位置に設置した。

図-1 に、試験期間中の日平均温湿度の推移を、図-2 に日合計降水量および日平均風速の推移を示す。なお、これらは気象庁データに基づくものであり、温度、降水量および風速は千葉県佐倉市の、相対湿度は千葉県千葉市におけるデータを用いた。試験期間中の平均温湿度は、気温 13.7℃、相対湿度 67.7%であった。

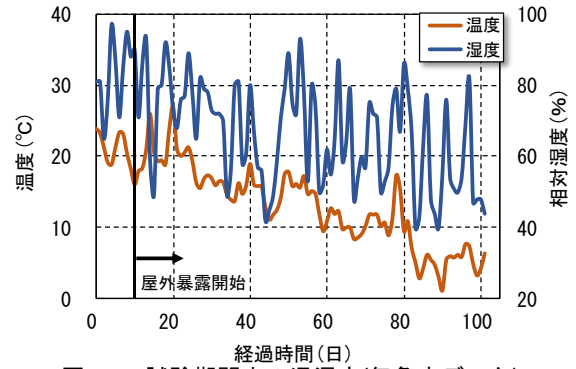


図-1 試験期間中の温湿度(気象庁データ)

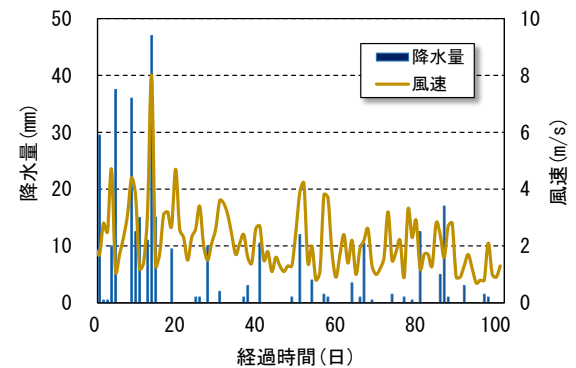


図-2 試験期間中の降水量・風速(気象庁データ)

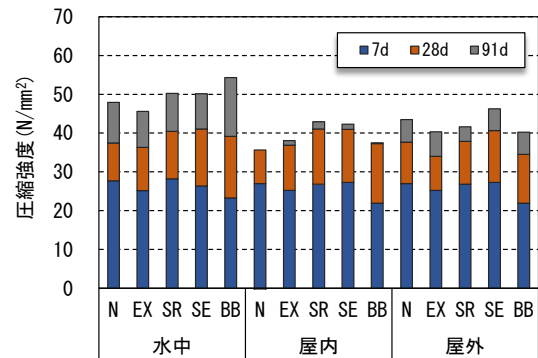


図-3 圧縮強度試験結果

3. 実験結果

3.1 強度特性

図-3 に、材齢 7 日、28 日および 91 日の圧縮強度試験結果を示す。材齢 28 日の圧縮強度は、 $34.0 \sim 41.1 \text{ N/mm}^2$ であった。養生条件によらず、SR および SE の圧縮強度がやや高い傾向が認められた。一方、材齢 28 日から材齢 91 日にかけて、屋内・外で養生したものは、水中養生したもの比べて強度発現性が明確に低下した。特に、屋内で養生したものの強度発現性が小さくなった。屋外で養生したものは、雨水による水分供給によって屋内のものよりも強度発現性の低下が小さかったと考えられる。なお、コンクリートの種類、環境条件の違いによる引張強度の発現性は、圧縮強度とほぼ同様の傾向であった。

3.2 水分浸透速度係数試験結果

図-4 に、屋外で暴露した供試体の水分浸透速度係数

を示す。N に比べて混和材料あるいは BB を用いた場合のほうが、水分浸透速度係数が小さくなった。水分浸透速度係数の大小関係は、必ずしも圧縮強度の大小とは一致しなかった。既往の文献³⁾によれば、BB の水分浸透は、封緘養生した場合 N と同程度、湿潤養生した場合小さくなることが報告されている。後掲する質量変化率の結果によれば、屋外環境では比較的多くの水分供給があったと推察され、このことが BB の水分浸透速度係数を相対的に小さくしたものと思われる。一方、EX については、鉄筋で拘束された条件において、屋外暴露試験体の水分吸水量が小さくなることが確認されている⁴⁾。本検討は、無筋コンクリートの評価であるが同様の傾向が確認された。SR、SE については、水分浸透に関する知見は見当たらないが、N に比べて圧縮強度が大きかったことに加え、収縮低減剤を使用することによって水和物表面と水分子との引力が小さくなることが報告されており⁵⁾、これらのことが水の浸透を抑制した可能性が考えられる。

3.3 乾燥収縮試験結果

(1) 環境の影響

図-5 に、室内、屋内および屋外における N の乾燥収縮ひずみを、図-6 に質量変化率を示す。室内の乾燥収縮ひずみが最も大きく、次いで屋内、屋外の順に小さくなった。屋内の平均湿度は室内よりもやや高かったことから、収縮ひずみが抑制されたと考えられる。一方、屋外の乾燥収縮ひずみは、室内、屋内と比べて著しく小さくなった。質量変化率についても同様に小さく、測定時期によっては暴露開始時点よりも質量の増加が認められた。質量変化率の増減と収縮ひずみの増減の挙動は概ね一致している。このことから、屋外では日射や風による水分逸散の促進よりもむしろ、雨水による水分供給の影響がひずみ挙動に支配的な因子であることが考えられ、これは既往の知見¹⁾と同様の傾向であった。

図-7 に、N の収縮ひずみ挙動と降雨の関係を示す。降水量は1日の合計量であり、ひずみは1日の平均値である。降雨が記録されると、収縮ひずみは減少する傾向を示した。ただし、降水量の多少と収縮ひずみの減少量には必ずしも明確な関係は確認されなかった。すなわち、1mm 程度の降水量でも収縮ひずみが大きく減少する場合と、多量あるいは連続して降雨を記録しても収縮ひずみの減少は限定的である場合があった。収縮の増加が継続したときほど降雨によるひずみの減少量が大きくなる傾向が認められ、降雨以前のコンクリートの含水状態が大きく影響したのと考えられる。

コンクリートの水分の浸透のしやすさと収縮ひずみの増加および減少に関係性があるかどうか、N 以外のコンクリートも含めて水分浸透速度係数と比較を行った。表-5 は、収縮ひずみの増加や減少が比較的明瞭に現れ

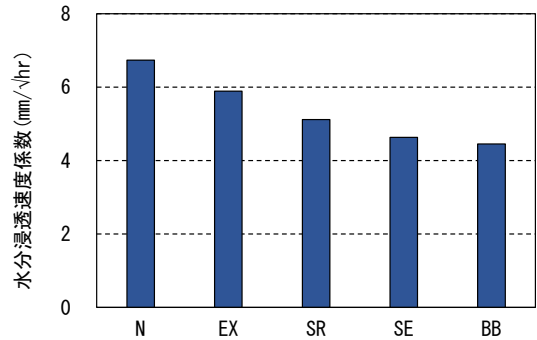


図-4 水分浸透速度係数

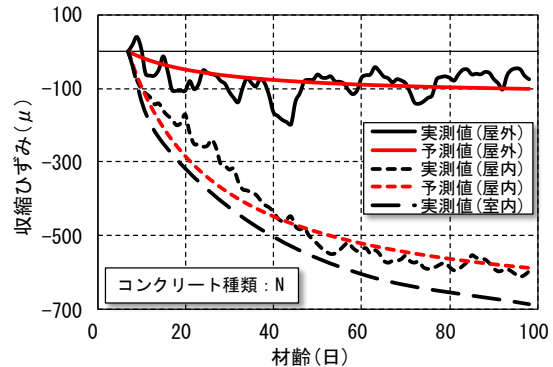


図-5 収縮ひずみの実測値と予測値

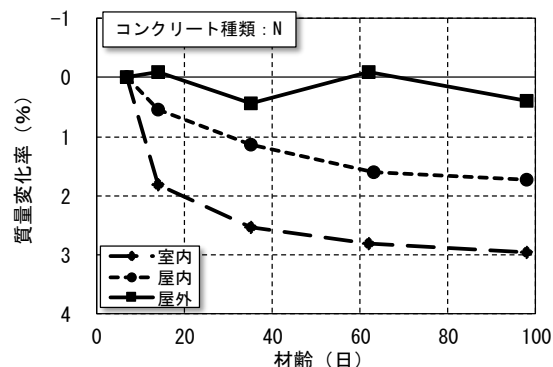


図-6 各環境下における質量変化率

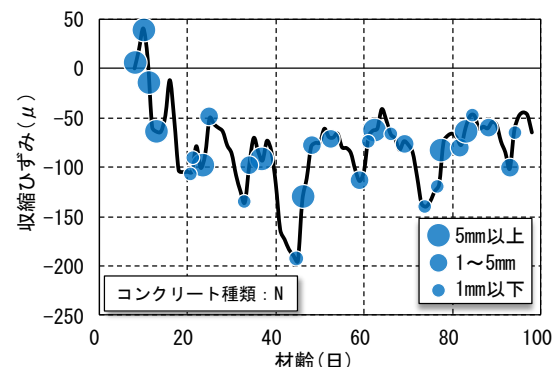


図-7 収縮ひずみ挙動と降水量の関係

ている期間のひずみを抽出し、その変動を示したものである。これによれば、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートは、水分浸透速度係数が大きいものほど収縮ひずみの増減が大きい傾向であった。このことは、表面のコンクリート品質が収縮の増減に影響を及ぼしていることを示唆すると考えられる。一方、BB は、水分浸

透速度係数が最も小さいにもかかわらず、必ずしも収縮ひずみの変動は小さくない。これについては、セメント種類が異なることによる水和生成物の違いや、空隙構造の違いが影響した可能性が考えられる。

土木学会コンクリート標準示方書²⁾では、構造物の収縮ひずみを予測する場合、下式(1)によって求めることができる。また、降雨等の環境の影響を考慮する場合は、相対湿度の項 RH に、見掛けの相対湿度を適用してもよいとされている。そこで、本研究で得られた屋内、屋外環境下における実験データと式(1)を比較し、見掛けの相対湿度を算出した。なお、乾燥収縮ひずみの最終値 $\epsilon_{sh,inf}$ および経時変化を表す係数 β は、室内データを最小二乗回帰することによって求めた。

$$\epsilon'_{ds}(t,t_0) = \frac{\frac{1-RH/100}{1-60/100} \cdot \epsilon'_{sh,inf} \cdot (t-t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot \beta + (t-t_0)} \quad (1)$$

ここに $\epsilon'_{ds}(t, t_0)$ ：部材の乾燥収縮ひずみ、 t, t_0 ：コンクリートの材齢および乾燥開始材齢(日)、RH：構造物の置かれる環境の平均相対湿度(%), d ：有効部材厚(mm), $\epsilon_{sh,inf}$ ：乾燥収縮ひずみの最終値、 β ：乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数

実測値と乾燥収縮予測式のひずみ挙動の比較を図-5に示す。見掛けの相対湿度は屋内が 65.4%，屋外が 94.0% となった。屋内の見掛けの相対湿度は、ほぼ気象庁データの平均値と一致していたが、屋外は大きく乖離し、前述したように降雨の影響が大きいことを裏付ける結果であった。ただし、既往の文献⁶⁾によれば、屋外環境下では見掛けの相対湿度は 85~90%程度であることが報告されており、本検討はこれに対してやや大きい結果となった。これについては、実験期間や実験の開始時期・季節等の影響が考えられるため検討を継続し考察する必要があると考える。

(2) セメント種類および混和材料の影響

図-8 に、室内における各コンクリートの材齢 7 日以降の収縮ひずみを示す。収縮ひずみは、N が最も大きく、EX, SR, SE の順に小さくなった。BB はほぼ EX と同程度であった。図-9 および図-10 に、屋内および屋外の収縮ひずみを示す。なお、封緘養生期間のひずみ挙動も含めて示している。EX および SE は、封緘養生期間に 400 μ 程度の膨張ひずみを生じた。暴露開始以後のひずみ挙動に限定すると、BB を除くコンクリートの屋内・外の収縮ひずみの大小関係は、室内の収縮ひずみの結果と一致した。

環境条件が、膨張材または収縮低減剤の収縮抑制効果に及ぼす影響について検討した。図-11 に、N に対する EX, SE のひずみ差を示す。同図より、EX の収縮抑制効

表-5 収縮ひずみの変動量

材齢(日)	収縮ひずみ(μ)	N	EX	SR	SE	BB
15-24	増加	93	86	62	55	83
	減少	-54	-62	-34	-37	-65
37-47	増加	122	111	88	72	100
	減少	-116	-108	-77	-67	-101
68-79	増加	66	49	54	34	59
	減少	-74	-63	-50	-37	-85
平均	増加	94	82	68	54	80
	減少	-82	-78	-53	-47	-84

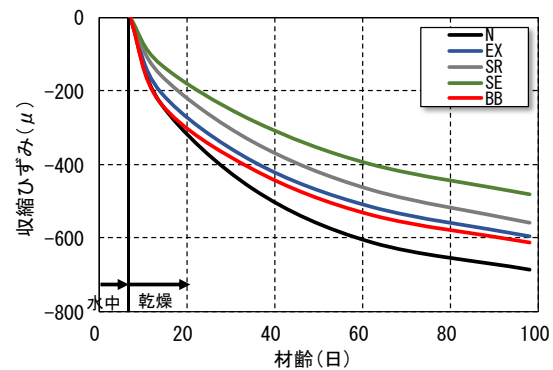


図-8 収縮ひずみ(室内)

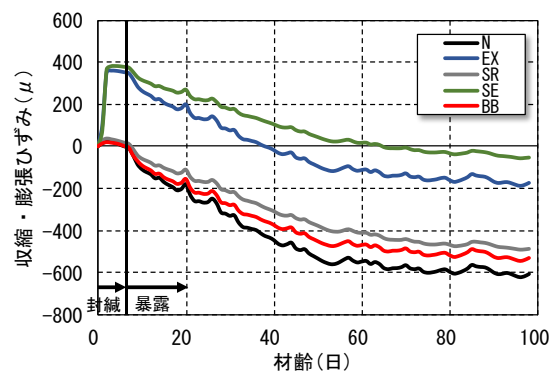


図-9 収縮・膨張ひずみ(屋内)

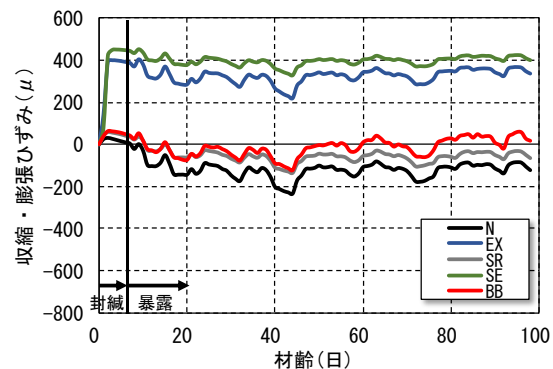


図-10 収縮・膨張ひずみ(屋外)

果であるひずみ差は、屋内・外によらず同程度であり、材齢初期に生じた 400 μ 程度の膨張ひずみが維持されていることがわかる。一方、SE については、暴露期間が長くなるほど屋外よりも屋内のほうが、ひずみ差が大きくなる傾向を示した。後述するように、収縮低減剤の使用による収縮低減割合は、屋内・外によらずほぼ同程度であるため、屋外よりも収縮ひずみの絶対量が大きい屋内のほうが、収縮ひずみの低減量も大きくなる。そのため、

両者のひずみ差に乖離が見られたと考えられる。

図-12に、Nの収縮ひずみに対するSRの収縮ひずみの比(収縮比)を、室内・屋内・屋外環境について示す。なお、材齢7日以降の期間を対象とした。室内および屋内の収縮比は、環境によらずほぼ一致し、70%程度から時間の経過とともに80%程度まで増加した。屋外の収縮比は、降雨等の影響と考えられる変動を示しながら、総じて室内・屋内と同様の挙動を示した。

3.4 収縮ひび割れ試験結果

表-6および図-13に、屋内における収縮ひび割れ試験結果を示す。膨張材や自己収縮の影響を考慮するため、封緘養生期間中の拘束応力を含めて示している。コンクリートの拘束応力は式(2)により求め、図中には、供試体2本のうちひび割れ発生材齢が遅いほうの結果を示した。なお、屋外の拘束応力は、ひずみと同様に屋内よりも小さく(材齢98日時点：-1.0~1.6N/mm²)、いずれのコンクリートにもひび割れは発生しなかったため、結果については省略する。

$$\alpha = -(E_s \cdot \varepsilon \cdot A_s) / A_c \quad (2)$$

ここに、 α ：コンクリートの拘束応力(N/mm²)、 E_s ：鋼材の弾性係数(N/mm²)、 ε ：鋼材のひずみ、 A_s ：鋼材の中央部断面積(mm²)、 A_c ：コンクリートの純断面積(mm²)

NおよびBBは、同一材齢(21日、32日)で目視観察できるひび割れが発生した。ひび割れ発生時の拘束応力は、ややBBが小さい傾向であった。その後、SR、EXの順にひび割れが発生した。SR、EXは、目視ではひび割れが観察されなかったため、無拘束の収縮ひずみと鉄筋ひずみを比較し、両者の関係が線形でなくなった時点をひび割れ発生材齢とした。SEは、ひび割れ発生が確認されなかった。

表-6および図-14にひび割れ発生時の引張強度と引張応力の比(応力強度比)を示す。なお、環境条件によっては、引張強度が材齢の経過とともに低下する場合があったため、材齢7、28、91日の試験結果を平滑線補完することによりひび割れ発生時の引張強度を求めた。ひび割れ発生時の応力強度比は、ひび割れ発生材齢が遅くなるほ

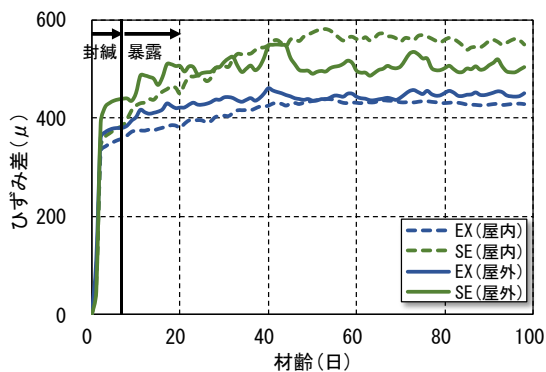


図-11 NとEX・SEのひずみ差

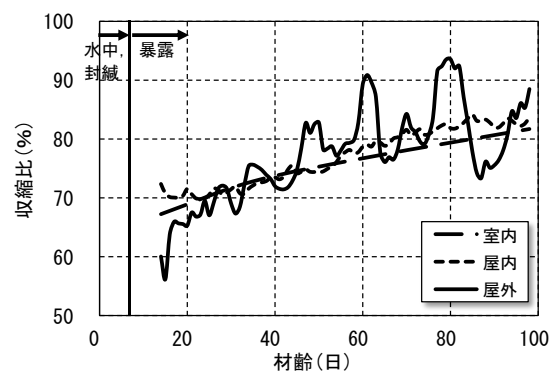


図-12 NとSRの収縮比

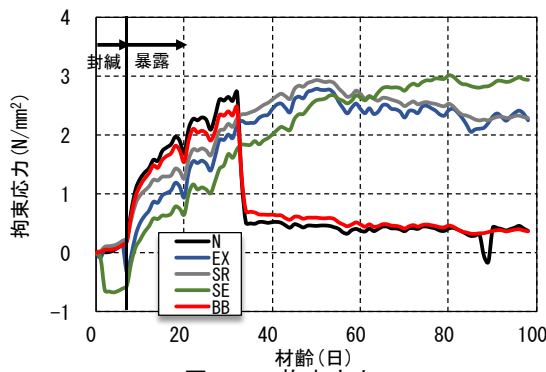


図-13 拘束応力

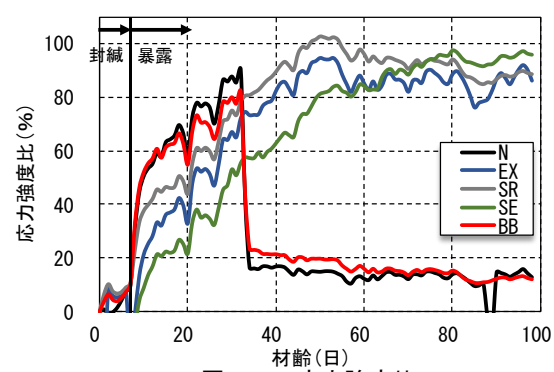


図-14 応力強度比

表-6 収縮ひび割れ試験結果

記号	乾燥開始時の拘束応力(N/mm ²)	ひび割れ発生材齢(日)	ひび割れ時の拘束応力(N/mm ²)	ひび割れ時の引張強度(N/mm ²)	ひび割れ時の引張強度(N/mm ²)	応力強度比(%)
N	0.51	21	2.23	2.89	77	84
	0.38	32	2.71	3.00	90	
EX	-0.51	53	2.60	2.92	89	92
	-0.33	53	2.76	2.92	95	
SR	0.29	39	2.47	2.91	82	92
	0.27	52	2.91	2.85	102	
SE	-0.56	—	—	—	—	—
	-0.43	—	—	—	—	
BB	0.34	21	1.94	2.86	68	75
	0.31	32	2.48	3.02	82	

ど大きくなる傾向にあり、既往の文献⁷⁾と同様の傾向を示した。

N と BB を比較すると、ひび割れ発生時の応力強度比は BB の方が小さくなった。既往の文献⁸⁾によれば、BB は N よりもクリープ係数が小さく、早期にひび割れが発生するため、応力強度比が小さくなるとされている。一方、本検討では、ひび割れ発生材齢は N, BB とともに同一である。また、拘束応力・応力強度比ともに材齢 20 日ごろまで両者の挙動は一致している。しかしながら、材齢 20 日ごろに湿度変化に起因すると考えられる比較的大きな応力の変動が生じ、それ以後、BB の拘束応力・応力強度比は N よりも小さくなっている。このことから推察するに、BB には急激な湿度の変化によって微細な損傷が発生し、それが最終的なひび割れの発生に影響を及ぼした可能性が考えられる。

次に、EX, SR のひび割れ発生時の応力強度比を見ると 82~102%(平均値:92%)であった。また、SE の応力強度比が 100%近くになっているにもかかわらずひび割れが発生していない。ひび割れ発生時の応力強度比は、材齢に応じて 40~90%程度であるとされている⁹⁾のに対し、本検討結果はやや大きい傾向にある。これは、通常の試験が湿度一定であるのに対し、本検討は湿度が変化する条件であることが影響した可能性が考えられる。すなわち、湿度が一定の条件では、供試体断面の引張応力は漸増するため、最初に生じた微細ひび割れが拡大することによって最終的なひび割れに到達すると考えられる。一方、湿度が変化する環境においては、微細ひび割れが生じたとしても、湿度が上昇するとひび割れは閉合あるいは幅が小さくなる。ひび割れを介した乾燥が進まないことにより、次の湿度低下時には別の場所に微細ひび割れが生じる可能性がある。それによってひび割れが分散し、応力集中が回避され最終的な応力強度比が大きくなったことが考えられる。これは、SR, EX のひび割れが目視では確認されないという実験事実とも符合する。

前述した BB のひび割れが、急激な湿度低下による微細ひび割れに起因したものであるとする考察と、EX, SR に対する考察は、矛盾しているようにも思われるが、微細ひび割れが発生した材齢が早期か長期か、あるいはひび割れの損傷程度によっても影響は異なってくると思われる。いずれにしても、湿度が変化する場合、湿度一定の実験結果とは傾向が異なる場合がある可能性を示している。これについては、実験データの蓄積や実構造物での事例を踏まえて、検証する必要がある。

4. まとめ

セメントに普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を、混和材料に膨張材および収縮低減剤を用

いたコンクリートの収縮挙動に及ぼす環境条件の影響を検討した。室内・屋内・屋外に供試体を設置し、収縮挙動および収縮ひび割れ特性を材齢 98 日まで測定した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 混和材料あるいは BB を用いた場合、水分浸透速度係数は小さくなる。
- (2) 普通ポルトランドセメントを用いた場合、水分浸透速度係数と屋外の収縮挙動には相関があり、表面のコンクリート品質が収縮挙動に影響を及ぼすことが示唆された。
- (3) 膨張材および収縮低減剤を用いたコンクリートの収縮抑制効果は、環境条件によらずほぼ同程度であった。
- (4) 湿度が変化する環境下での収縮ひび割れ特性は、湿度一定環境下と異なる場合があることを示した。

参考文献

- 1) 浅本晋吾, 玉置一清, 大塚歩, 陸好宏史: 実環境作用に着目したコンクリートの収縮特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.681-686, 2007
- 2) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書設計編, 土木学会, pp.44 および pp.106-110, 2017
- 3) 鈴木浩明, 上田洋: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートへの水分浸透に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-511, pp.1021-1022, 2015.9
- 4) 長塩靖祐, 岸利治, 鎌田知久, 竹下永造: 屋外曝露を実施した膨張コンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.193-198, 2017
- 5) 丸山一平, 岸直哉: 収縮低減剤の作用機構, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 645 号, pp.1895-1903, 2009.11
- 6) 藁輪圭祐, 下村匠: 降雨を含む一般環境下におけるコンクリート部材の乾燥収縮予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.441-446, 2018
- 7) 大野俊夫, 魚本健人: コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.662, pp.29-44, 2000.11
- 8) 百瀬晴基, 閑田徹志, 今本啓一, 清原千鶴, 石関浩輔: 高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の定量評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 706 号, pp.1717-1727, 2014.12
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れメカニズムと対策技術の現状一, 日本建築学会, pp.57-132, 2003.