

報告 膨張コンクリートの膨張性に関する長期測定結果

片平 博*¹・渡辺博志*²

要旨：膨張材を添加したコンクリートの膨張性を長期に渡って測定した。室内試験では、水セメント比を30,40,55%として、膨張材無し、有りの拘束供試体（JIS A 6202 B 法）を作製し、7日間養生後、20℃、相対湿度 60%の環境で供試体の長さ変化を1年間測定した。膨張材無し、有りの長さ変化率の差を膨張材の効果とした場合、初期材齢での膨張効果が小さい供試体ほど、長期の膨張効果が大きくなった。また、水セメント比を 55、40%とし、拘束有り、無しの条件で膨張材を添加した供試体を屋外に暴露した。この結果、拘束有りの供試体に限り、約2年間にわたって膨張ひずみが増加していく測定結果が得られた。

キーワード：膨張材、暴露試験、拘束膨張ひずみ

1. はじめに

近年、コンクリートの乾燥収縮に関する関心が高まっている。コンクリートの乾燥収縮を低減する手法の一つに膨張材の使用が挙げられる。膨張材は、既に JIS A 6202 として品質規格が定められていて、一定の品質をもつものが市場に流通している。JIS A 6202 では、定められた配合条件、温度条件、養生条件のもとで膨張材を用いたモルタル供試体を作り、その供試体の材齢7日および28日時点の長さ変化率や圧縮強度が一定の範囲を満足していることを求めている。しかし、実構造物ではコンクリートの温度条件や養生条件も様々であり、このような場合の膨張ひずみ量や、長期材齢における膨張コンクリートの挙動が十分に把握されているとは言い難い。そこで、これらの影響を検討するための実験を行っている¹⁾²⁾。

長期材齢における膨張コンクリートの挙動としては、W/C が 20%以下の極低水セメント比の領域において、いわゆる「遅れ膨張」の発生が報告されている³⁾⁴⁾。これは、低水セメント比では、凝結時において反応に必要な水が少ないことから未反応の膨張材が残り、それが、ある程度材齢が経過した後に、外部から供給される水と反応して膨張すると考えられている。

今回の我々の室内試験の結果では、膨張材を標準量添加した拘束供試体において、W/C や養生条件等によって膨

張ひずみの発現性が異なり¹⁾²⁾、初期材齢での膨張ひずみ量が小さいもののほど、長期材齢（20℃、RH60%の乾燥条件）での膨張材の効果が大きくなる傾向が認められた。また、暴露試験では、膨張材を標準添加量の1.5倍添加した W/C40%および W/C55%の拘束供試体が2年間にわたって徐々に膨張する測定結果が得られた。

原因の究明には更なる検討が必要であるが、膨張材の反応メカニズムを解明するうえで参考となる測定結果であると考え、ここに報告することとした。

2. 室内試験

2.1 供試体の作製条件

試験ケースは表－1に示す36水準であり、以下に詳述する。

コンクリートの配合は表－2に示すように、W/C（Cには膨張材量を含む）を55,40,30%の3水準とし、膨張材は無添加と20kg/m³添加の2水準とした。膨張材は石灰系の低添加型（標準添加量20kg/m³）を使用し、セメントに普通ポルトランドセメント、粗骨材に硬質砂岩、細骨材に川砂、化学混和剤としては W/C55%と40%の配合には AE 減水剤を、W/C30%の配合には高性能 AE 減水剤を使用した。

これらの配合でコンクリートを練混ぜ、JIS A 6202 附

表－1 室内実験の水準

配合条件	材齢7日までの養生条件	
	温度条件	水分条件
W/C : 55,40,30% 膨張材: 有、無	(1) 10℃	(1)水中7日
	(2) 20℃	(2)封蔵7日
	(3) 50℃ (図-2参照)	
計6配合 (表－2 参照)	材齢7日以降の養生条件	
	20℃, RH60%	

表－2 コンクリートの配合

	W/C※1 (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (%)※2	
		水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	Ad1	Ad2
55N	55	172	313	0	809	976	0.31	0
40N	40	172	430	0	732	956	0.31	0
30N	30	172	573	0	649	1000	0	1
55NE	55	172	293	20	809	976	0.31	0
40NE	40	172	410	20	732	956	0.31	0
30NE	30	172	553	20	649	1000	0	1

※1 C=セメント量+膨張材量

※2 Ad1:AE減水剤、Ad2:高性能AE減水剤、添加量は(C+Ex)に対する質量%

*1 独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム 主任研究員（正会員）

*2 独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム 上席研究員（正会員）

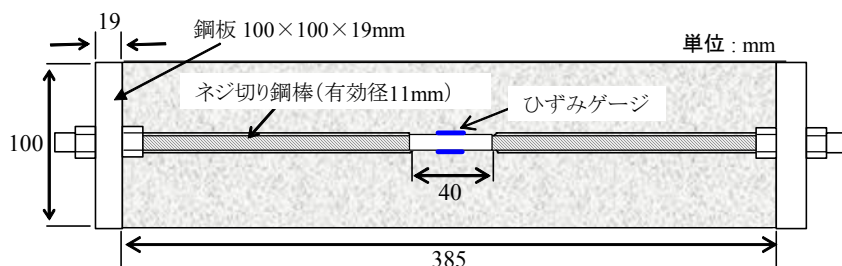


図-1 供試体の形状・寸法

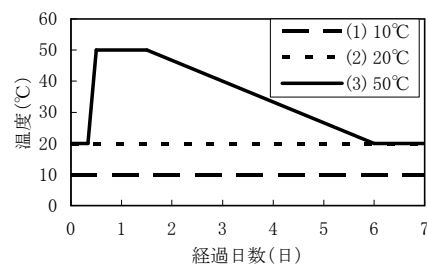


図-2 打設および養生時の温度設定

属書 2「膨張コンクリートの拘束膨張および収縮試験方法」の B 法に準拠して、コンクリート供試体を作製した。供試体には図-1 に示すように拘束治具を配置し、ねじ切り鋼材の中央部のねじ山を切削してひずみゲージを貼り付けた。ひずみゲージは保護テープで防水処理しているため、コンクリートとは一体化していない。型枠底面にはフィルムを敷き、また、拘束治具は型枠との間に僅かに隙間を設け、拘束されない状態とした。

2.2 打設および養生条件

打設から材齢 7 日までの養生条件としては、温度条件を 3 水準、水分条件を 2 水準設定した。

温度条件としては、図-2 に示すように(1)打設・養生とも 10°C 一定、(2)打設・養生とも 20°C 一定、(3)打設は 20°C でその後はマスコンクリートとしての温度上昇を想定して 50°C までの昇降温を与える条件の 3 水準とした。(3)の温度上昇のタイミングとしては、供試体の温度測定値が上昇し始める時点(打設から 8～9 時間後、プロクター貫入抵抗値で 20N/mm² 程度)から昇温を開始し、4 時間後に 50°C とし、その後 24 時間、50°C を維持した。

打設および養生中の供試体の水分状態としては、打設直後に封緘状態とし、50°C のケースでは昇温を開始する時間から、10°C および 20°C のケースでは打設の翌日から(a)水中養生または(b)封緘養生の 2 水準の水分条件とし、材齢 7 日まで養生した。

材齢 7 日以降は 20°C、相対湿度 60% の乾燥条件として供試体の長さ変化を測定した。供試体本数は各条件ごとに 2 本とした。

2.3 測定方法

長さ変化の測定方法は、コンクリートの打込みを完了した時点初期値とし、材齢 28 日までは鋼材に貼り付けたひずみゲージによるひずみ測定によって行い、28 日以降は JIS A 1129-3 ダイアルゲージ法によって行った。

ここで、図-1 に示すように、ひずみゲージはねじ切り鋼棒を切削して貼り付けていることから、切削部分で測定されるひずみは切削しない部分よりも大きくなり、測定値の補正が必要となる。厳密には、切削の有無によって供試体全体の変形量が僅かに変化するが、鋼材の断面積がコンクリートの約 1% と小さく、鋼材の存在が供

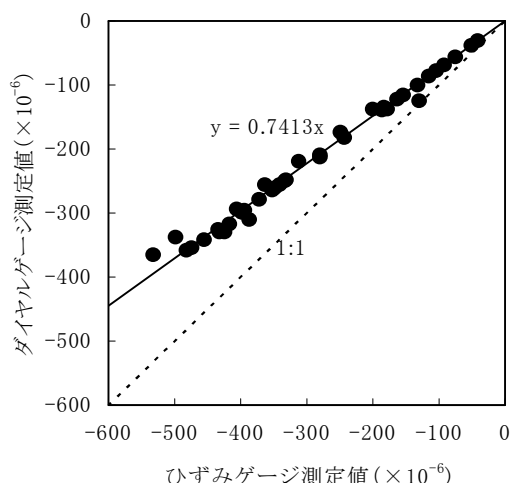


図-3 ひずみゲージ法とダイアルゲージ法の比較 (材齢 28 日の測定データ)

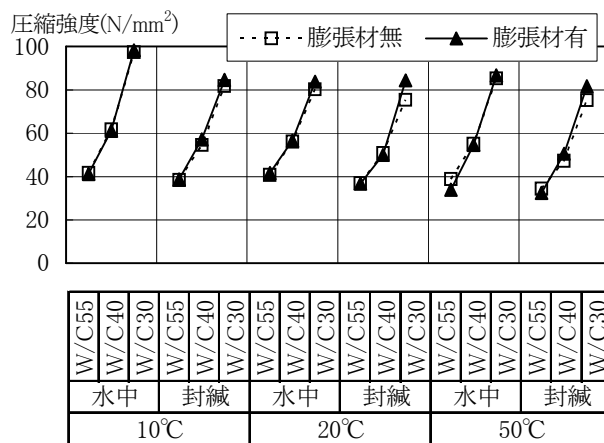
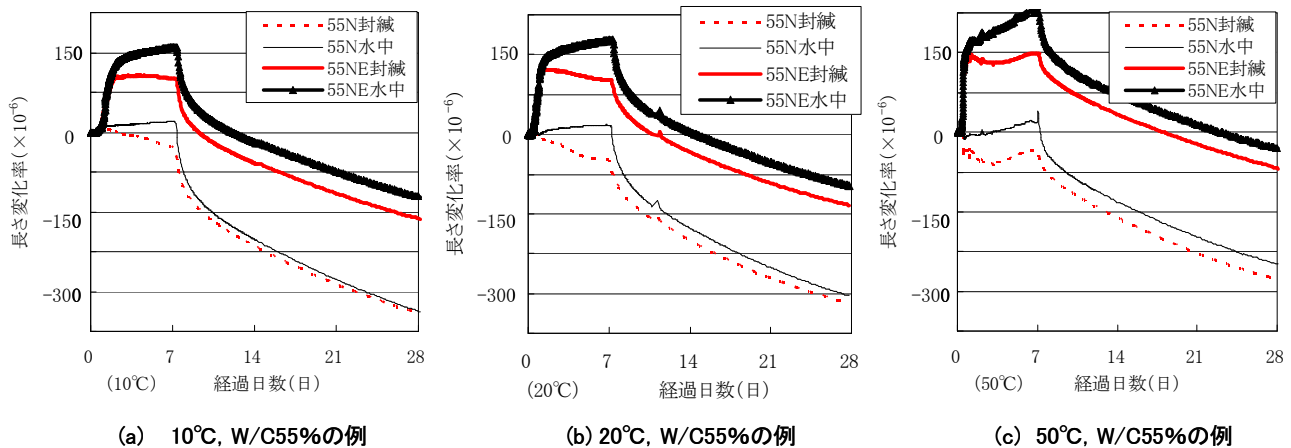


図-4 材齢 28 日の圧縮強度試験結果

試体の変形性に与える影響が小さいこと、また、切削部分の範囲が狭いことから、この影響は無視することとし、鋼材での力の釣り合いのみを考えた。すなわち、ひずみゲージ貼付け位置の鋼棒の断面積は切削前の約 75% であることから、切削しない部分の鋼棒のひずみ量は測定値の 0.75 倍と想定した。これを裏付けるように、供試体 36 本の材齢 28 日時点の長さ変化について、ダイアルゲージの値とひずみゲージの値を比較すると図-3 に示すように概ね 0.75 倍であった。このため、ひずみゲージの測定値は全て 0.75 倍した値を供試体の長さ変化率として採用した。また、温度変化に伴う長さ変化量も補正した。



図－5 材齢28日までの長さ変化率の測定例

なお、上記と同一の配合、温度、養生条件でφ100×200mm 円柱供試体を2本ずつ作製し、材齢28日で圧縮強度試験を実施した。

2.4 圧縮強度試験結果

図－4に材齢28日の圧縮強度試験結果を示す。膨張材（標準添加量）が材齢28日時点の圧縮強度に与える影響は認められなかった。また、材齢7日までの養生が水中と封緘とでは水中養生のほうが僅かに高い強度を示した。

2.5 膨張材の効果の考え方

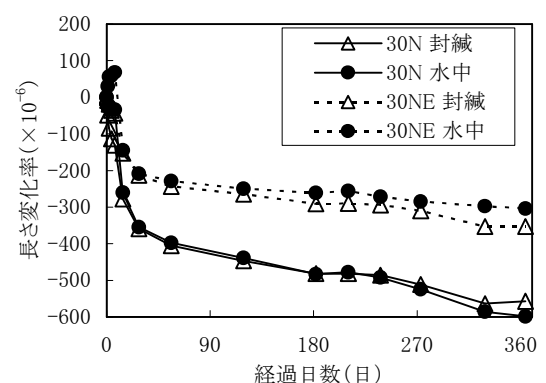
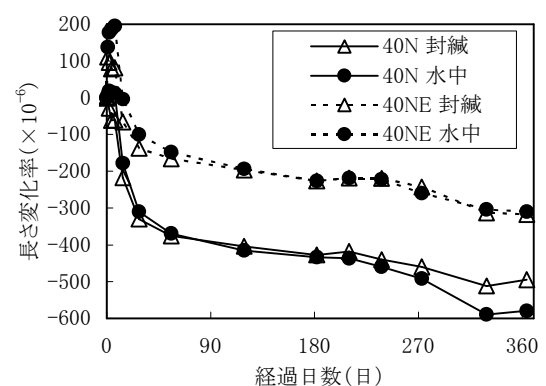
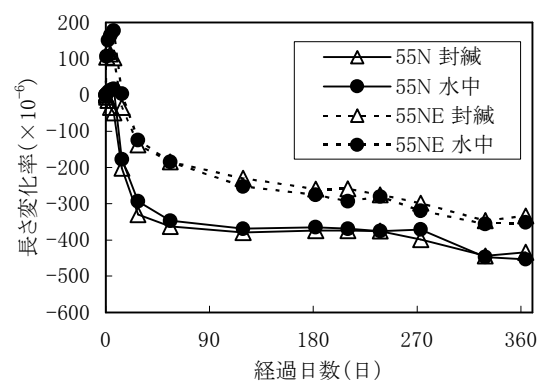
図－5に10°C、20°Cおよび50°CにおけるW/C55%の材齢28日までの長さ変化率の履歴を示す。(b)20°Cを例としてみると、膨張材有りの配合(55NE)のうち、水中養生のケースでは材齢7日まで膨張が継続し、 180×10^{-6} 程度まで膨張しているが、封緘養生のケースでは、膨張は1日程度で停止し、膨張量も 120×10^{-6} 程度に留まった。しかしながら、膨張材無しのケース(55N)でも、水中養生と封緘養生とでは養生期間中の長さ変化率に違いが認められた。すなわち、膨張材の効果膨張材有りとなしとの差で捉えれば、水中養生と封緘養生とで、大きくは変わらないようである。

10°C、20°C、50°Cで比較すると、温度が高いものほど初期の膨張量が大きくなる傾向はあるものの、上記の関係は同様であった。

そこで、膨張材の効果は、膨張材有りとなしとの長さ変化率の差で評価することとした。

2.6 水セメント比と膨張材の効果の関係

長さ変化の履歴を材齢1年まで測定した。20°Cのケースの測定結果を図－6に示す。材齢7日以降は20°C、RH60%の乾燥条件としているために、長さ変化率は収縮側に転じ、材齢の経過とともにひずみ量は収束していく傾向を示している。しかしながら、膨張材有り（点線）と無し（実線）とのグラフの開き（膨張材の効果）を時系列的にみると水セメント比によって違いが見ら



図－6 20°Cの長さ変化率測定結果

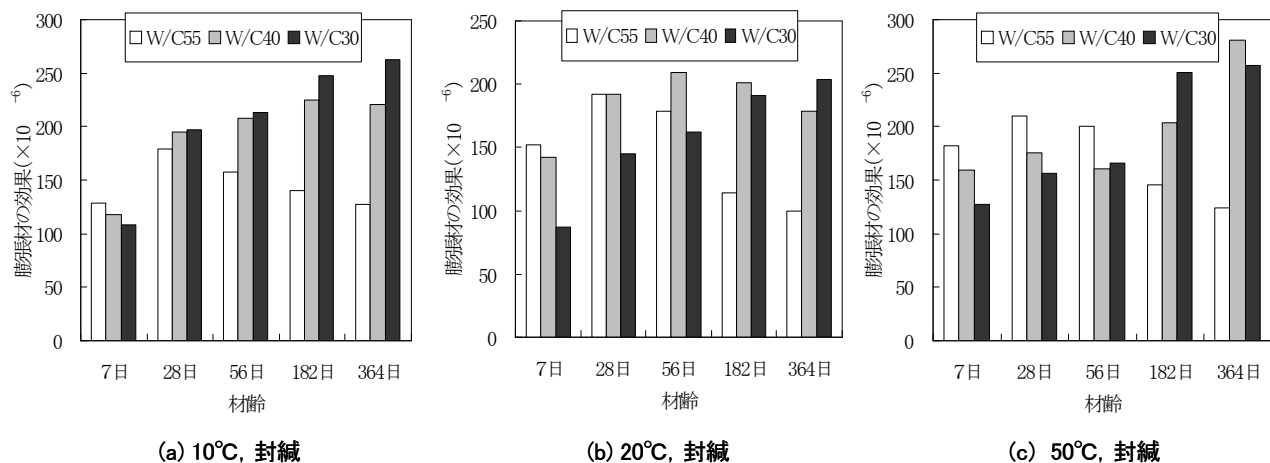


図-7 材齢ごとの膨張材の効果

表-3 コンクリートの配合

	W/C※1 (%)	単位量 (kg/m ³)						AE減水剤 (C×%)
		水	セメント	膨張材A	膨張材B	細骨材	粗骨材	
40N	40	172	430	-	-	732	956	0.31
55N	55	172	313	-	-	809	975	0.31
40NE(A)	40	172	400	30	-	732	956	0.31
55NE(A)	55	172	283	30	-	809	975	0.31
40NE(B)	40	172	400	-	30	732	956	0.31

※1 C=セメント量+膨張材量

表-4 供試体の種類と数

拘束条件	自由	拘束
40N	1	
55N	1	
40NE(A)	1	1
55NE(A)	1	1
40NE(B)	1	1

れた。すなわち、W/C55%では材齢の経過に伴ってグラフの開きが小さくなっていくのに対して、W/C30%では逆に大きくなっていく傾向であった。

この測定結果をもとに膨張材の効果を材齢ごとに整理すると図-7のようになる。これによるといずれの温度条件でも、W/C55%のケースでは、材齢28日において膨張材の効果は最大となり、その後は緩やかに低下する傾向を示した。これに対してW/Cが低くなるほど初期材齢での膨張材の効果は小さくなるものの、その反面、長期材齢での膨張材の効果は大きくなる傾向を示した。W/C30%のケースでは材齢1年程度まで膨張材の効果が増加する結果が得られた。

3. 暴露試験

3.1 供試体の作製と暴露方法

暴露試験を実施したコンクリートの配合を表-3に示す。W/C (Cには膨張材量を含む) を55および40%の2水準とし、膨張材は無添加と30kg/m³添加の2水準と

した。膨張材にはA材(エトリンサイト系)とB材(石灰系)の低添加型を使用した。これらの膨張材の標準添加量は20kg/m³であるが、膨張材の影響をより顕著に捉えることを目的に添加量を1.5倍の30kg/m³とした。セメントに普通ポルトランドセメント、粗骨材に硬質砂岩、細骨材に川砂、化学混和剤にはAE減水剤を使用して空気量4.5%程度を確保した。

これらの配合でコンクリートを練混ぜ、100×100×400mmの角柱供試体を作製した。ここで、膨張材を添加しない供試体は型枠内にそのままコンクリートを打ち込んだが、膨張材を添加した配合に関しては、図-1に示す拘束治具を配置した拘束供試体と、型枠の拘束を極力排除した自由膨張供試体を作製した。作製した供試体の種類と数量を表-4に示す。

作製した供試体は翌日に脱枠し、材齢28日まで水中養生した。その後、北海道千歳市の屋外暴露場に暴露し、質量変化、相対動弾性係数および供試体の長さ変化を半年に1回の頻度で2年間測定した。長さ変化はダイヤル

表-3 コンクリートの配合

	W/C※1 (%)	単位量 (kg/m ³)						AE減水剤 (C×%)
		水	セメント	膨張材A	膨張材B	細骨材	粗骨材	
40N	40	172	430	-	-	732	956	0.31
55N	55	172	313	-	-	809	975	0.31
40NE(A)	40	172	400	30	-	732	956	0.31
55NE(A)	55	172	283	30	-	809	975	0.31
40NE(B)	40	172	400	-	30	732	956	0.31

※1 C=セメント量+膨張材量

表-4 供試体の種類と数

拘束条件	自由	拘束
40N	2	
55N	2	
40NE(A)	2	2
55NE(A)	2	2
40NE(B)	2	2

ゲージ法によって測定した。

3.2 膨張コンクリートの基本性状

表－3に示す各配合でφ100×200mmの円柱供試体を3本ずつ作製し、28日の水中養生後に圧縮試験を行った。この結果を図－8に示す。この図には膨張材の添加量が標準添加量である20kg/m³の試験結果も合わせて示した。今回の暴露試験の条件では膨張材の添加量を標準添加量の1.5倍に当たる30kg/m³としたことで、圧縮強度は膨張材無添加の条件に比較して2割程度低下した。

膨張材を添加した供試体の材齢7日の膨張量を図－9に示す。自由膨張、拘束膨張ともに、膨張材を30kg/m³添加した場合の膨張量は、標準添加量である20kg/m³の値の約2倍となった。

3.3 暴露試験結果

測定時の環境条件を表－5に示す。また、暴露開始時点初期値とした測定結果を図－10に示す。

図－10(a)より、質量変化率（拘束治具の質量は含まず）が若干変動しているが、外観観察の結果ではスケーリング等の変状は認められなかった。また、図－10(b)より、相

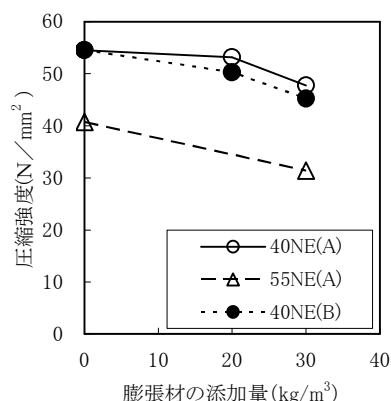
対動弾性係数の低下もみられないことから、凍結融解等による劣化はほとんど無いと考えられる。

長さ変化率の測定結果は図－10(c)である。暴露試験では、外気温の変化によっても供試体の長さが変化するため、供試体の線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して温度による長さ変化量を補正して示している。

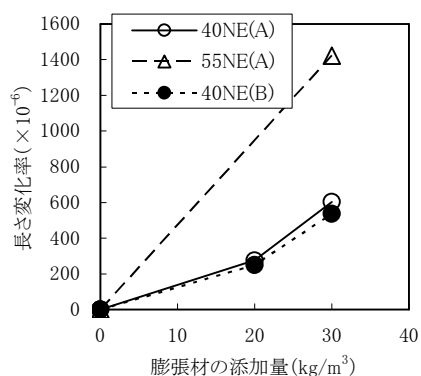
暴露試験は28日間の水中養生を終了した後に開始している。一般的な知見からすると膨張材の膨張作用はほとんど収束していると考えられるが、拘束供試体では2年間で 300×10^{-6} の膨張量が測定された。ただし、この長期におよぶ膨張現象には拘束の有無が大きな影響を与えている

表－5 暴露試験における測定時の条件

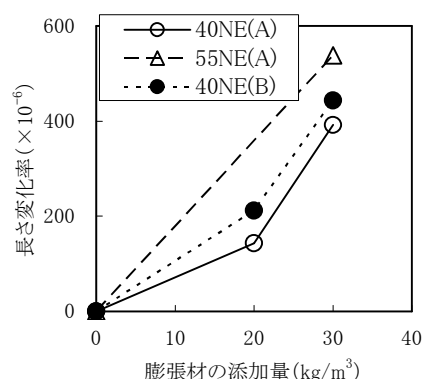
経過年数(年)	0	0.5	1	1.5	2
測定日	2009.11.17	2010.6.9	2010.11.18	2011.6.16	2011.11.17
測定日の天気	曇	曇	晴	晴	雪-晴
降雨日からの経過日数		5日	6日	2日	0.5日
測定時の温度	8℃	20℃	10℃	20℃	6℃



図－8 圧縮強度試験結果

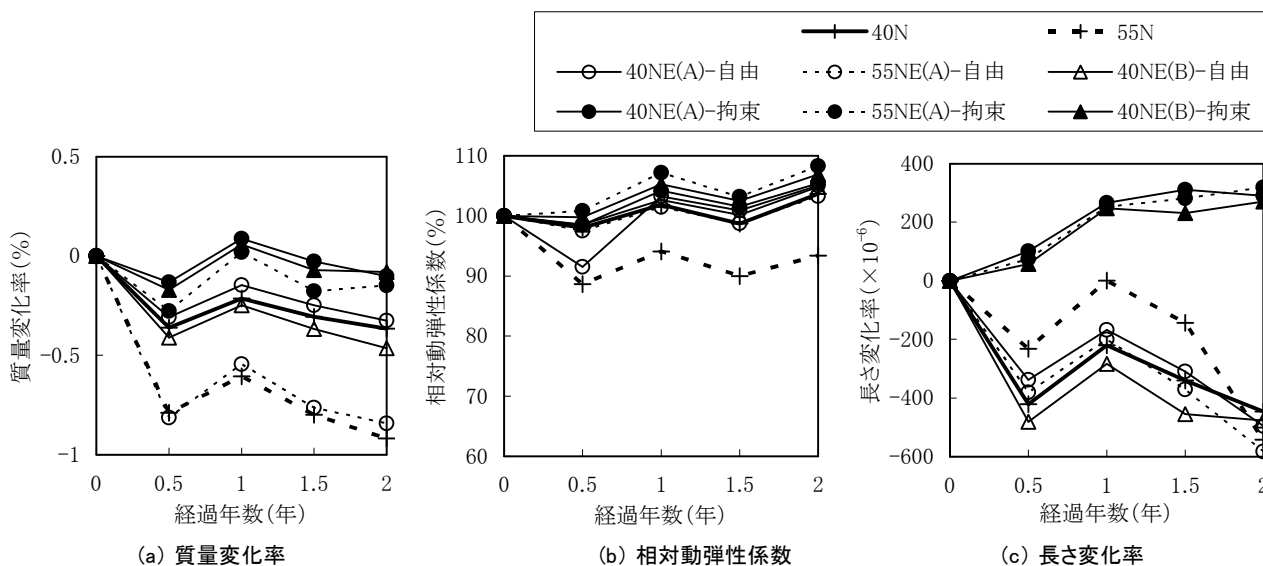


(a) 自由膨張



(b) 拘束膨張

図－9 材齢7日における膨張ひずみ



図－10 暴露試験結果

ようであり、自由膨張させた供試体では長期の膨張現象は測定されなかった。

膨張材の添加量が異なるので単純な比較はできないが、この拘束供試体の長期的な膨張現象を 2. の室内試験の結果である図-6 と比較すると、室内試験では膨張側に転じる挙動は示さなかったのに対して、暴露試験では膨張側の挙動を示しており、この違いには降雨等による外部からの水分供給が影響しているものと考えられる。

この外部からの水分供給の影響を確認することを目的に、2. の室内試験で 20℃、RH60%の乾燥条件で 1 年間の測定を終了した拘束供試体（膨張材 20kg/m³）を用いて、これを水中に浸せきして長さ変化を測定した。

浸漬する直前の長さを基準として、浸せき 14 日経過後の長さ変化を図-11 に示す。乾燥条件にあった供試体が吸水するために膨張（膨潤）するのは当然であるが、その膨張量を膨張材無しと有りとで比較すると、膨張材有りの供試体の膨張量のほうが大きくなった。コンクリートの練混ぜから 1 年を経過した後であっても、外部からの水分の供給によって膨張材が膨張作用を発揮していることが考えられる。

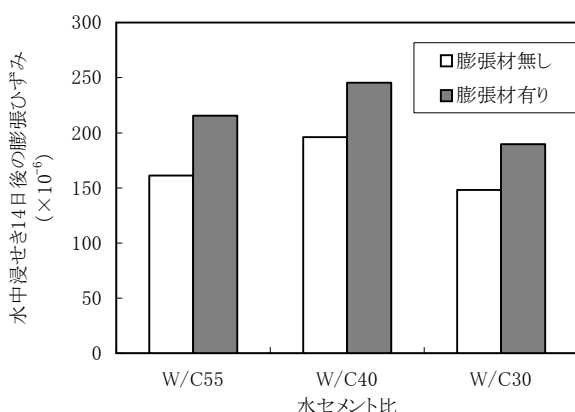


図-11 1 年間乾燥条件においた供試体を水中に浸せきした場合の膨張ひずみ

4. まとめ

膨張材を添加したコンクリート供試体の長期的な長さ変化を測定した。今回の試験条件の範囲では以下の結果が得られた。

- (1) 室内試験では 7 日間の湿潤養生の後、20℃、相対湿度 60%の乾燥条件において、長さ変化を 1 年間測定した。膨張材無しの配合に対する膨張材有りの長さ変化率の値を膨張材の効果とした場合、水セメント比が低いものほど、初期材齢の効果は小さいものの、長期材齢の効果は大きくなった。
- (2) 暴露試験では、2 年間にわたって長さ変化を測定した。この結果では、拘束治具を配置した供試体に限っ

て長期的な膨張挙動を示した。

- (3) (1)の試験で 1 年間の測定を終えた供試体を水中に浸せきしたところ、膨張材無しの供試体に比較して膨張材有りの供試体の膨張量が大きくなった。

上記の(1),(2)の結果に共通することは低水セメント比でコンクリートの硬度が高かったり、拘束治具を配置するなど、膨張を阻害する要因が強いものほど長期的な膨張材の効果が大きくなるというものであった。また、(2),(3)の結果からは、外部からの水分の供給があれば拘束された膨張コンクリートは長期的に膨張作用を発現するものと考えられる。

暴露環境で長期に膨張する現象は、文献 5)においても、本文中では触れられていないものの、同文献中の図-6 において同様の膨張現象が示されている。

長期的な膨張は、その膨張量が極端に大きければ有害な現象となるが、乾燥収縮を低減する程度の膨張量であればコンクリート構造物に対しては有益であるとも考えられる。膨張のメカニズムは十分に解明されておらず、今後とも研究が必要と考えられる。

なお、本研究では交流研究員として来所されていた松本健一氏（現：太平洋セメント(株)）および天谷公彦氏（現：(株)日本ピーエス）に多大な協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 松本健一，片平博，渡辺博志：膨張材によるコンクリートの収縮低減，土木技術資料，Vol.53，No.9，pp.36-39，2011.9
- 2) 片平博，松本健一，天谷公彦，渡辺博志：水セメント比，温度，養生条件が膨張材の効果に及ぼす影響，土木学会大 66 回年次学術講演会講演概要集，V-437，pp. 873-874，2011.9
- 3) 郭度連，谷村充，佐竹紳也，柴垣昌範：膨張材による超高強度コンクリートの収縮低減，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 1，pp. 471-476，2008.7
- 4) 栖原健太郎，吉野亮悦，庄司慎，平井吉彦：水結合材比の小さい膨張コンクリートの膨張特性，土木学会大 66 回年次学術講演会講演概要集，V-515，pp. 1029-1030，2011.9
- 5) 浜幸雄，田畑雅幸，洪悦郎，千歩修，金武漢：膨張材を使用したコンクリートの寒冷地における長期暴露性状，膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム論文集，pp. 85-90，2003.9