

# 報告 生コンクリートの各種要因が乾燥収縮に及ぼす影響について

橋本 和己\*1・林 憲之\*2・川原 隆\*3・島 弘\*4

**要旨：**生コンクリートの各種要因を変化させ乾燥収縮に及ぼす影響を調査した。基準とするコンクリートと各種要因を変化させたコンクリートで作製した供試体を、同じ環境条件で保存し、一人の測定者が同じ測定器を用いて長さ及び質量を測定して変化率を比較した。実験は3回に分けて実施することとし、実験1では単位水量、単位メント量及び細骨材率を変化させ配合の影響を調査した。実験2では、セメント及び粗骨材の種類に加えて混和剤使用の影響を調査した。実験3では、空気量、収縮低減型混和剤等の使用及び打込みまでの経過時間の影響を調査した。

**キーワード：**乾燥収縮、収縮ひずみ、質量減少率、配合条件、余剰水量、表面張力

## 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を確保するためには、密実で有害なひび割れが発生しないコンクリートが求められる。しかし、セメントの水和反応に伴う自己収縮や水分の蒸発・逸散による乾燥に伴う収縮ひび割れの発生を防ぐことは非常に困難である。JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」には、要求品質として乾燥収縮に関する項目はないが、生コンクリート工場（以下、生コン工場という。）においても製造するコンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす要因を調査し、その影響の大小を把握するとともに低減策を検討することは有益なことと考える。

コンクリートの長さ変化を測定する方法としては、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法—第1～3部」が制定されている。この試験方法では、供試体を保存する温度及び湿度は、特に定めないときは、温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $60 \pm 5\%$  と規定されている。しかし、このような設備・機器は生コン工場においては備えていないのが現状と思われる。

そこで、徳島県生コンクリート工業組合技術委員会では、温度や湿度が変化しても同時に作製した供試体と同じ環境条件で保存すれば長さ及び質量の変化率の大小を比較することは可能と考え、生コンクリートの配合や材料等を変化させた供試体を作製して、その長さ及び質量の変化率を比較することとした。

## 2. 実験計画

### 2.1 基準コンクリート

実験は、基準とするコンクリート（以下、基準コンクリートという。）と長さ及び質量の変化率を比較した。基

準コンクリートの配合は、呼び方「普通 30 18 20 N」とし、標準配合及び使用する材料の種類等の概要を表-1に示す。実験は、3回に分けて行うこととし、基準コンクリートと各種の要因を変化させたコンクリートで供試体を作製した。そして、同じ環境条件で保存し、一人の測定者が同じ測定器を用いて長さ及び質量を測定した。なお、一般的な配合設計では一つの要因を変化させたとき、連動して他の単位量や細骨材率が変化することになるが、今回は単純に注目する一つの要因を変化させることにした。

表-1 基準コンクリートの配合等

	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
セメント	396	普通ポルトランド	3.16
水	183	上水道水	1.00
細骨材	239	海砂	2.57
	558	砕砂*	2.56
粗骨材	346	砕石 1505*	2.56
	519	砕石 2010*	2.57
混和剤	5.11	AE 減水剤	1.06
水セメント比 (%)	46.2	細骨材率 (%)	47.9

\*砕石・砕砂の原石の岩種は硬質砂岩である。

### 2.2 コンクリート及び供試体の作り方

供試体作製のコンクリートの作り方は、JIS A 1138「試験室におけるコンクリートの作り方」によった。練混ぜは、2軸強制型ミキサとし、練混ぜ量は、原則として 30L とした。フレッシュコンクリートの品質試験は、スランプ、空気量、コンクリート温度とした。

\*1 (有) 松尾建材 (正会員)

\*2 阿南生コンクリート工業 (株)

\*3 三好コンクリートサービス (株)

\*4 高知工科大学 工学部社会システム工学科 教授 (工博) (正会員)

供試体の寸法は、100×100×400mm とし、同一試料について 3 個作製した。コンクリートの詰め方は、1 層詰めとし、内部（棒状）振動機によって締固めた。供試体は成形の翌日に脱型し、材齢 7 日まで 20±2℃ の水中養生とした。その後、室内の気中に保存した。

### 2.3 測定方法

長さの測定は、JIS A 1129-2「第 2 部：コンタクトゲージ方法」に準拠し、基準標尺との差をデジタル表示(13～0.002mm)する機器を用いて行った。標点間の距離として 250mm を基長 ( $L_0$ ) とした。水中養生終了後、瞬間接着剤を用いて供試体側面の中心線上に計測用チップを取り付けた。その間隔 ( $L_i$ ) は、基長程度の 250±2mm とした。

測長方法は、測定器のポイントを基準標尺の 250mm に正確に押し当て、ダイヤルゲージの値を 0 に設定 (写真-1) する。測定器の左右を逆にして同様の操作を行いダイヤルゲージの値が±0.002 以下であることを確認する。次に、供試体の計測用チップの鋼球に測定器の凹型ポイントを隙間のないように押し当て、ダイヤルゲージのデジタル表示の値を読み取る。このとき表示値は、( $L_0-L_i$ ) が表示される。測定器の左右を逆にして同様の操作を行い、この 2 回の平均値を測定値とし、同じ試料で作製した 3 個の供試体の平均値を測定値 ( $X_i$ ) とする。また、測長時に供試体の質量を測定する。使用するばかりは、目量が 1g のものとする。なお、計測時の室温は、20±2℃ とする。

### 2.4 変化率の計算

測定は、材齢 7 日（水中養生終了時）を起点とし、以後は保存期間 1, 4, 8, 13, 26 週とする。保存期間  $n$  週の起点からの長さ及び質量の変化率を、それぞれ収縮ひずみ ( $\varepsilon_n$ ) と質量減少率 ( $T_n$ ) とすると、次式となる。

$$\varepsilon_n = \frac{X_n - X_0}{L_0} \times 10^6 \quad (\times 10^{-6}) \quad (1)$$

$$T_n = \frac{M_0 - M_n}{M_0} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

ここに、

$L_0$  : 基長

$X_0$  : 起点の長さ測定値

$X_n$  :  $n$  週後の長さ測定値

$M_0$  : 起点の質量測定値

$M_n$  :  $n$  週後の質量測定値

## 3. 実験要因

実験要因の設定及びフレッシュコンクリートの性状を表-2 に示す。実験 1 では、配合要因の影響を調査することとし、単位水量、単位セメント量及び細骨材率のう



写真-1 基準標尺による 0 設定

表-2 実験要因及びフレッシュコンクリートの性状

		設定	スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	供 試 体 No
実 験 1	基準		18.0	4.8	11
	単位水量 (kg)	- 15	9.5	4.2	12
		+ 15	22.0	3.9	13
	セメント 量 (kg)	- 45	21.5	4.3	14
		+ 45	15.0	4.0	15
	20*	細骨材率 (%)	- 5.0	19.5	5.0
+ 5.0			17.0	4.8	17
実 験 2	基準		18.5	4.6	21
	セメント の種類	BB	19.0	5.0	22
		H	17.0	4.9	23
	粗骨材の 種類	石灰石	18.5	5.0	24
		川砂利	20.5	4.0	25
	20*	フライア ッシュ	S 置換	17.0	5.0
C 置換			20.5	5.2	27
実 験 3	基準		18.5	4.7	31
	目標空気 量 (%)	2	15.5	1.8	32
		8	19.5	8.5	33
	混和剤	低減型	20.0	5.2	34
		展着剤	19.0	5.0	35
	21*	打込みま での時間	1.5	16.0	4.4
2.5			12.0	3.9	37

\*コンクリート温度 °C

ち一つを増減した。実験 2 では、基準コンクリートのセメントを高炉セメント B 種 (BB) と早強ポルトランドセメント (H) に置換した配合、粗骨材を石灰石砕石及び川砂利に置換した配合、そして、混和材としてフライアッシュ (II 種) 60kg を細骨材に置換 (S 置換) 及びセメントに置換 (C 置換) した配合で供試体を作製した。実験 3 では、空気量、混和剤及び打込みまでの時間の影響を調査することにした。収縮低減型の混和剤として、高性能 AE 減水剤収縮低減タイプを使用した。また、乾

乾燥収縮は、コンクリート硬化体内部の微細な連続空間を水分が移動する際、毛細管張力によって水分が管壁を内側に引き寄せる力によって発生するとの説があり、この力は、液体の表面張力が大きいほど大きくなるりとされている。展着剤は、液体農薬の付着性をよくするもので、表面張力を下げて液体が植物表面からはじかれなくにするものである。よって、展着剤を用いれば収縮低減の効果が期待できると考え、2000倍溶液を練混ぜ水として使用した。供試体の保存状況を写真-2に示す。保存期間中の温湿度の範囲は、6~33℃、30~90%であった。

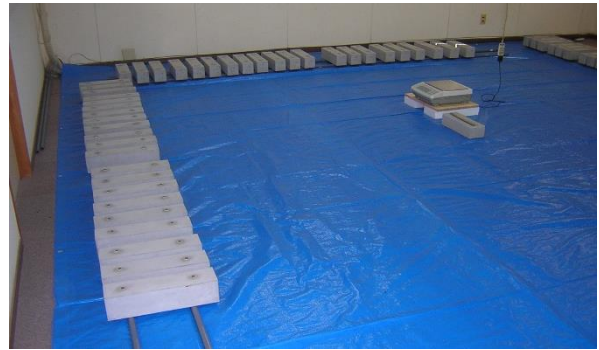


写真-2 供試体の保存

#### 4. 収縮ひずみの測定結果

基準コンクリートの収縮ひずみの測定結果を図-1に示す。若干の変動はあるが、3回の基準コンクリート(供試体 No.11, No.21 及び No.31)の収縮ひずみと保存期間との関係は、ほぼ同一の曲線とみなすことができる。

##### 4.1 実験 1

配合による収縮ひずみへの影響については、既往の研究では単位水量の多い(スランブの大きい)配合は収縮ひずみが大きく、単位セメント量及び水セメント比はあまり影響しないと報告された事例<sup>2),3)</sup>がある。単位水量及び単位セメント量を変化させたときの基準コンクリートに対する収縮ひずみの比を図-2に示す。既往の研究のとおり、単位水量の多い供試体(No.13)は収縮ひずみが大きく、単位水量の少ない供試体(No.12)は小さくなったが、保存期間が長くなるに従いその影響は小さくなった。単位セメント量を増減した供試体(No.14 及び No.15)は、単位水量とは逆に保存期間1週では基準コンクリートとほとんど差はなかったが、長期の保存期間では、単位水量より大きな影響を及ぼす結果となった。

基準コンクリートに対する収縮ひずみの比と単位水量及び単位セメント量の増減に伴う水セメント比の関係を図-3に示す。黒は保存期間1週を、赤は26週を、そして実線は、単位水量及び単位セメント量の少ない配合(No.12 及び No.14)を結んだもの、破線は、逆にそれぞれの多い配合(No.13 及び No.15)を結んだものである。実線はスランブが小さく、破線はスランブが大きくなることになる。この図から水セメント比が小さいときは収縮ひずみも小さくなること分かる。また、保存期間1週と26週では実線と破線の関係が逆になっている。すなわち、同じ水セメント比の場合、保存期間1週ではスランブの小さい配合の収縮ひずみが小さいが、保存期間が26週では、逆にスランブの大きい配合の収縮ひずみが小さいことを示している。このことから今回の実験では、水セメント比が40~55%の同じ水セメント比(同一強度)の配合では、短期の保存期間ではスランブの小さいコンクリートの収縮ひずみが小さくなるが、保存期間が13週以上

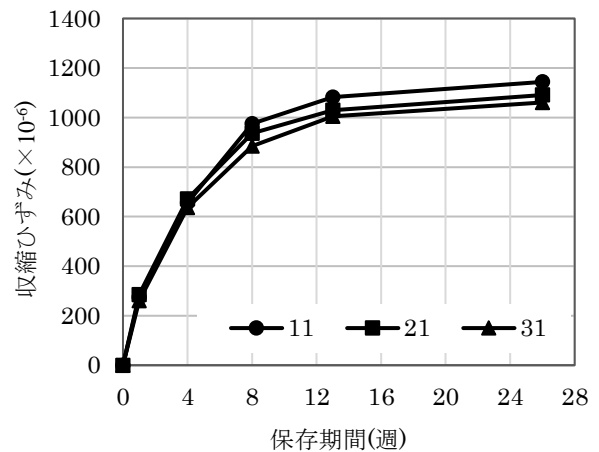


図-1 基準コンクリートの収縮ひずみと保存期間

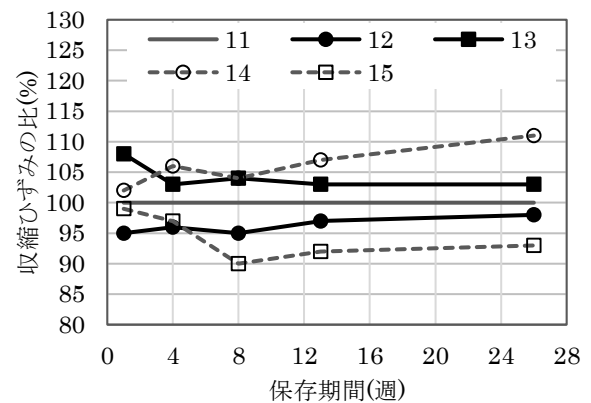


図-2 収縮ひずみの比と保存期間

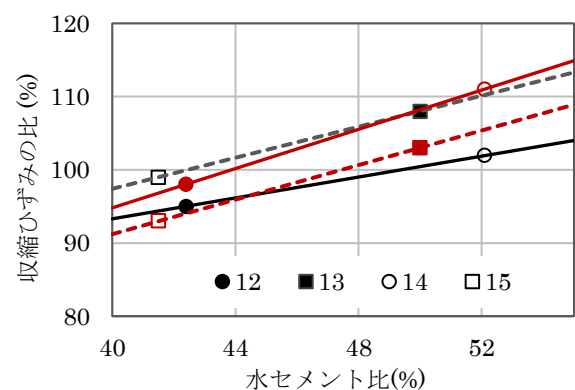


図-3 収縮ひずみの比と水セメント比

になるとスランブの大きいコンクリートの収縮ひずみが小さくなる結果となった。

細骨材率の影響について示したのが図-4 である。保存期間 1 週では、増減したどちらも基準コンクリートより 10%程度大きくなったが保存期間が長くなると同程度になり、明確な傾向は認められなかった。

#### 4.2 実験 2

セメントの種類による影響を図-5 に示す。マーカー付き折れ線は、基準コンクリートに対する収縮ひずみの比（左目盛り）を、縦棒は、基準コンクリートとの収縮ひずみの差（右目盛り）を示している。高炉セメント B 種 (No.22) は普通ポルトランドセメントの基準コンクリートよりも各保存期間で収縮ひずみが  $80\sim 150\times 10^{-6}$  大きくなった。これを基準コンクリートに対する比で見ると、保存期間 1 週, 4 週ではそれぞれ 140%, 118% になった。この値は長期になると小さくなる傾向を示し 13 週では基準コンクリートの 108% となったが、26 週では 114% と再び大きくなった。高炉セメント B 種を使用する際には、普通ポルトランドセメントより収縮ひずみが大きくなることを構造物によっては考慮する必要があると考える。早強ポルトランドセメント (No.23) については、普通ポルトランドセメントと比較して大きくなったとの報告<sup>3)</sup>もあるが、今回の実験では、普通ポルトランドセメントの 90%程度で推移した。

粗骨材の種類及び混和材使用による影響を図-6 に示す。石灰石砕石 (No.24) の場合は、基準コンクリートに対し 75~77%で推移し、川砂利 (No.25) は、80~83%で推移した。既往の研究でも粗骨材に石灰石砕石を使用した場合、乾燥収縮量が 20%程度小さくなる<sup>7)</sup>としており、同様の結果となった。

フライアッシュについては、同一スランブや同一強度等の条件を付けず置換した場合には、フライアッシュによる収縮ひずみの低減効果は、今回は確認できなかった。保存期間 1 週では、S 置換 (No.26) と C 置換 (No.27) で差があったが 4 週以上の保存期間では、どちらも基準コンクリートに対して 10%程度大きくなった。

#### 4.3 実験 3

空気量及び混和剤による収縮ひずみへの影響を図-7 に示す。AE 減水剤を使用しないで空気量が基準コンクリートの 4.7%より 3%程度少ない供試体 (No.32) は、基準コンクリートの 84~92%となり、4%程度多い供試体 (No.33) は、早期には 6%程度大きな値を示したが 26 週では基準コンクリートと同程度となった。

混和剤の影響については、収縮低減型の高性能 AE 減水剤を使用した供試体 (No.34) は、基準コンクリートの 86~90%となり、展着剤を使用した供試体 (No.35) は 80%程度で推移した。どちらも収縮ひずみの低減に有効

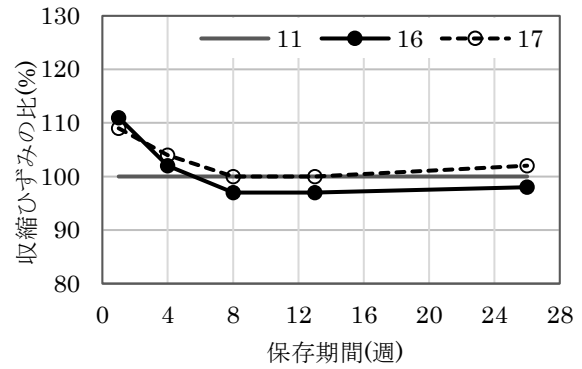


図-4 収縮ひずみの比と保存期間

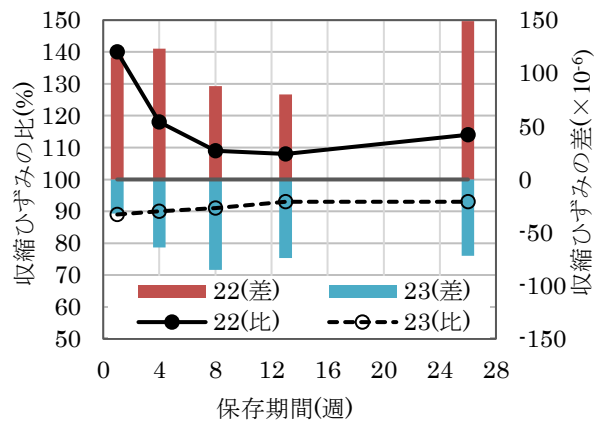


図-5 収縮ひずみと保存期間

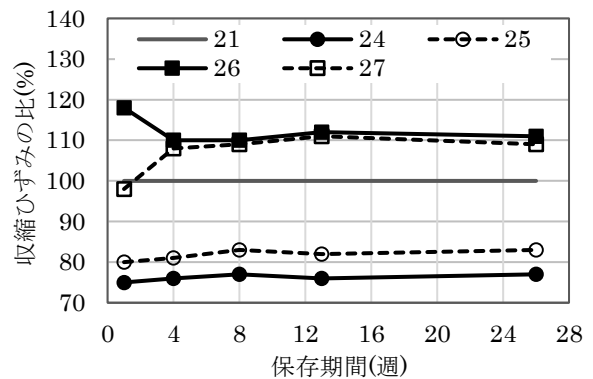


図-6 収縮ひずみの比と保存期間

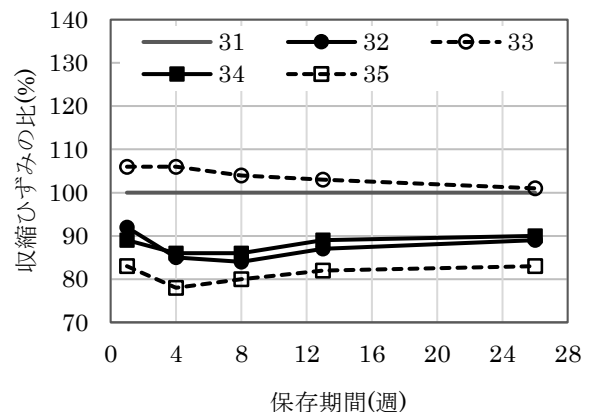


図-7 収縮ひずみの比と保存期間

と考えられる。展着剤の使用により収縮ひずみが低減されたことにより、先に述べた乾燥収縮の発生機構の一つである毛細管張力には水の表面張力が影響していることが確認できた。今回使用した展着剤の成分を表-3示す。

打込みまでの時間の影響を示したものが図-8である。保存期間が4週で基準コンクリートの60%程度と非常に小さい値となったが、その他の保存期間では90%程度で推移した。保存期間4週については何らかの異常かと考えたが、図-7に示すように同時に測定した他のデータに異常は認められず、また供試体3本の間には大きなばらつきも認められないことから測定の異常ではないと判断したが、その原因は不明である。

### 5. 質量減少率の測定結果

セメント硬化体中の水は、セメント等と水和反応した化学的結合水とそれ以外の余剰水とに分けられる。化学的結合水は、そのほとんどが非蒸発性であり乾燥の影響を受けないが、微細な空隙内にある余剰水は乾燥によって蒸発・逸散する。質量減少率は、この余剰水の量と密接な関係があり、余剰水量が多いと質量減少率も大きくなる。基準コンクリートの質量減少率を図-9に、保存期間1週及び26週における基準コンクリートに対する質量減少率の比を表-4示す。

実験1における単位水量の増減は、余剰水量の増減に直接影響することになり、単位セメント量の増減は水和に必要な化学的結合水の増減となり、どちらも余剰水量に影響することになる。単位水量を減じた供試体(No.12)及び単位セメント量を増やした供試体(No.15)は余剰水量が減少することになり質量減少率も小さくなった。逆に余剰水量が増加する供試体(No.13及びNo.14)は、基準コンクリートよりも質量減少率が大きくなった。

実験2では、高炉セメントB種を使用した供試体(No.22)は基準コンクリートと同程度の質量減少率であったが、早強セメントを使用した供試体(No.23)は、保存期間1週では基準コンクリートの82%、保存期間26週で93%となった。これは早強セメントの粉末度が高いため水和反応が早く進行し、早期に化学的結合水が多くなるためと考えられる。粗骨材の岩種では、硬質砂岩碎石(No.21) > 砂利(No.25) > 石灰石碎石(No.24)の順に質量減少率が小さくなった。これら粗骨材の吸水率は、それぞれ1.8, 0.8, 0.3%程度であり、骨材中の水分は余剰水の一部となることからこの吸水率の影響と考えられる。フライアッシュをセメントと置換した供試体(No.27)は、余剰水量が増えることから質量減少率は大きくなった。細骨材に置換した供試体(No.26)は、基準コンクリートと同程度か小さくなると考えたが若干大きくなった。

実験3では、空気量が少ない供試体(No.32)は、質量

表-3 展着剤の成分表

成分	(%)
ソルビタン脂肪酸エステル	48.0
ポリオキシエチレン脂肪酸エステル	28.0
ポリナフチルメタンスルホン酸 ジアルキルジメチルアンモニウム	2.5
有機溶剤、水等	21.5

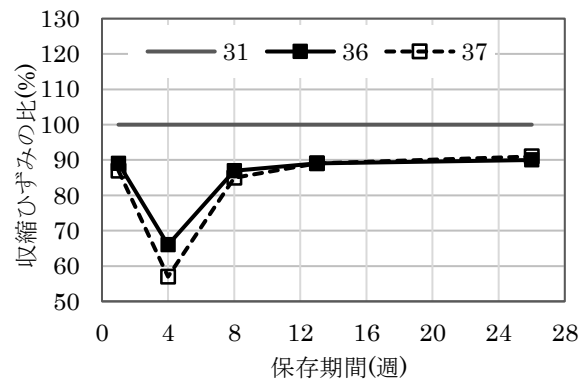


図-8 収縮ひずみの比と保存期間

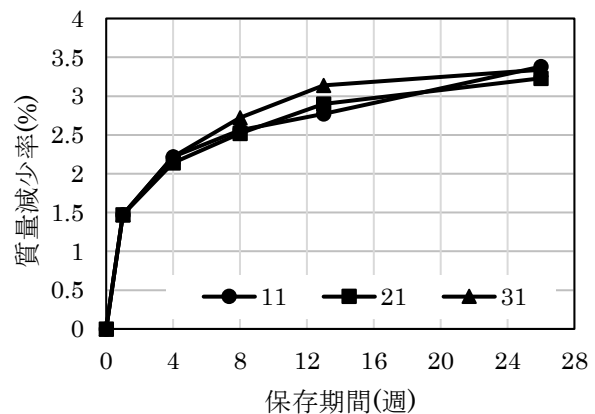


図-9 基準コンクリートの質量減少率と保存期間

表-4 基準コンクリートに対する質量減少率の比 (%)

実験	No	12	13	14	15	16	17
		1週	82	110	124	84	102
1	26週	86	109	116	81	101	103
	No	22	23	24	25	26	27
2	1週	100	82	90	92	107	129
	26週	98	93	87	91	106	117
3	No	32	33	34	35	36	37
	1週	95	112	109	97	90	88
	26週	98	108	105	98	93	92

減少率が若干小さくなり、空気量の多い供試体(No.33)は、10%程度大きくなった。高性能 AE 減水剤を使用した供試体(No.34)では、質量減少率も小さくなると予想

したが逆に大きくなった。打込みまでの経過時間については、経過時間に関わらず基準コンクリートの90%程度で推移した。打込みまでの間に水分が蒸発し余剰水量が減少したためと考えられる。

## 6. 収縮ひずみと余剰水の移動

全ての供試体の各保存期間における収縮ひずみと質量減少率の関係を図-10に示す。質量減少率と収縮ひずみの間には、図に示すように正の相関があり、質量の減少は乾燥による水分の蒸発・逸散の影響である。収縮ひずみについても、セメント硬化体の微細空隙中の水分の挙動と密接に関連している。図-10から質量減少率0.8%程度までは質量が減少しても収縮ひずみは生じていないか、わずかな収縮ひずみと考えられ、この間の水分の蒸発は収縮に影響しないことになる。これは供試体の表面からの水分の蒸発・逸散が生じたのち、内部の水分の移動が始まる時に収縮が始まることを示している。空隙が水分で満たされている場合には、この水は収縮に抵抗する働きをするが、水分の表面への移動によって空隙が水と空気になるとこの抵抗する力はなくなるとともに、先に述べた毛細管張力も作用することになり収縮が進行することになる。このことから、収縮ひずみは、蒸発・逸散する水分量、すなわち余剰水量及び内部の水分の移動の容易さが影響すると考えられる。

余剰水量の増減には、単位水量、単位セメント量そして骨材の吸水率等が、水分移動の容易さに関しては、温度や湿度の環境条件、供試体の体積に対する表面積の比そして水セメント比等による組織の緻密さが影響することになる。高炉セメントB種を使用した場合、早期に収縮ひずみが大きくなるが、質量減少率が基準コンクリートと同程度であることから水分量の影響ではないと考えられる。高炉スラグの潜在水硬性によって長期的には緻密となるが、短期では水分の移動が容易であって多くの空隙が早期に水と空気になったと推測する。また、粗骨材は収縮に抵抗するので弾性係数が大きく吸水率の小さい粗骨材が収縮ひずみの低減に効果があると考えられている。今回の実験でも石灰石砕石を使用した供試体の収縮ひずみが小さくなった。

高性能AE減水剤収縮低減型の使用では、スランブを一定にする等の条件の下で配合設計を行えば、その目的である単位水量が減少し、余剰水量も減少することになる。その結果、質量減少率も小さくなり低減型の使用による収縮ひずみの低減効果はさらに大きくなると考えられる。展着剤の使用では、質量減少率が基準コンクリートと同程度であることから水分量の影響ではなく、乾燥収縮の発生機構の一つである毛細管張力には水の表面張力が関与していることを示している。

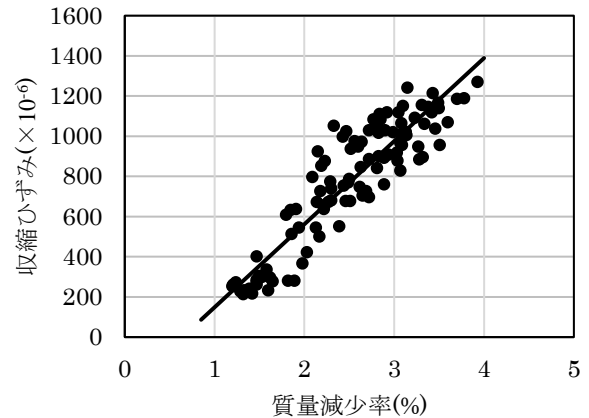


図-10 収縮ひずみと質量減少率

## 7. まとめ

本調査から得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 収縮ひずみは、水セメント比の小さい配合が小さくなった。水セメント比が同じ場合では、短期の保存期間ではスランブの小さい配合が、保存期間が13週以上ではスランブの大きい配合が収縮ひずみは小さくなった。
- (2) 高炉セメントB種を使用した場合、普通ポルトランドセメントに比べ大きな収縮ひずみとなった。特に短期の保存期間において収縮ひずみの比が大きくなった。粗骨材の岩種では、砂岩砕石>砂利>石灰石砕石の順に収縮ひずみ、質量減少率ともに小さくなった。
- (3) 収縮低減型の高性能AE減水剤の使用により収縮ひずみが小さくなったが、その目的である単位水量を減らせば収縮ひずみの低減効果はさらに大きくなる。水の表面張力を下げる展着剤の使用により収縮ひずみが低減されたことから、乾燥収縮の発生機構の一つである毛細管張力には水の表面張力が関与していることが分かった。

**謝辞：**本論文は、JCI 四国支部の「四国の生コン技術力活性化委員会【第4期】」の活動としてまとめたものである。徳島県生コンクリート工業組合の組合員工場並びに技術委員会委員の皆様には多大なご協力を頂きました。謹んで深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所：技術試料 コンクリートの乾燥収縮，pp.6-44，2011.1
- 2) (社)セメント協会 コンクリート専門委員会：委員会報告ダイジェスト版，pp.37-50，2019.4
- 3) 全国生コンクリート工業組合連合会 技術委員会：乾燥収縮に関する実態調査結果報告書，新技術開発報告 No.42，pp.45-65，2013.3