コンクリートの乾燥収縮の内部機構に関する一考察*

西 林 新 蔵** 阪 田 憲 次**

A Study on the Shrinkage Mechanism of Concrete

by

Shinzo NISHIBAYASHI and Kenji SAKATA

(Faculty of Engineering, Tottori University, Tottori)

Though various studies on the shrinkage of concrete have been made by many researchers, most of them have not dealt with its mechanism. In order to explain the shrinkage mechanism of concrete, the shrinkage test and water loss test were performed in this study on three different concretes (a crushed stone concrete and two lightweight aggregate concretes). From the test results, the relationship between shrinkage strain and water loss as well as the effect of ambient humidity on shrinkage and water loss were discussed.

The results of this study can be summarized as follows:

- (1) The water loss of concrete by drying increases with increasing water content in concrete and with decreasing relative humidity in the atmosphere.
- (2) When the ambient humidity is low, it is suggested that the mechanism of water loss may be divided into two processes.
- (3) The shrinkage strain decreases with increasing ambient humidity.
- (4) It is suggested that the shrinkage mechanism of concrete may be divided into two processes. In the first process, the water loss from the aggregate or capillary pore is so dominant that the shrinkage accompanied with the water loss increases slowly. In the second process, the water loss from the gel pore becomes significant and subsequently the shrinkage increases rapidly.
- (5) The shrinkage of concrete is roughly proportional to the water loss. However, the proportional constant varies depending upon the kind of concrete.

(Received Sep. 9, 1972)

1 緒 言

コンクリートの乾燥収縮は、クリープと同様にコンクリートが有する重要な性質の一つであり、従来より内外の多くの研究者によって種々の面より検討されてきた。とくに PC 構造物の設計においては、乾燥収縮やクリープによるプレストレスの減退が問題になる。さらに、最近の構造物の長大化、巨大化に伴い、構造物の軽量化が要請される結果、人工軽量骨材コンクリートと普通コンクリートおよび鋼の合成断面を有する構造物が登場し、この種の構造物においては打ち継ぎ部に発生する収縮差応力が設計上重要な問題となっている。また、収縮によるひびわれは鉄筋の錆化をもたらし、鉄筋コンクリートの海洋構造物への適用においては看過できない問題の一つでもある。このように、多種多様な形式のコンクリート構造物の出現と、その構造物が施工される環境範囲の拡大に伴い、この種の問題の重要性が改めて認識されるべき現状にあると思

われる。

コンクリートの乾燥収縮におよぼす諸要因の影響については、従来の研究においてもかなり詳しく検討されている。しかし、実際の構造物の設計に際しては、乾燥収縮の量を正しく予知することが必要となる。そのためには、種々の条件下における乾燥収縮のデータの蓄積ばかりでなく、コンクリートの乾燥収縮をその内部機構の面からも検討を加えることはきわめて重要な問題であると思われる。従来の研究によれば、コンクリートの乾燥収縮の内部機構は、供試体と環境との湿度こう配に起因するシーページ効果によって定性的に説明されているものが多く、それを定量的に明らかにしたもののはきわめて少ないようである。

本研究は、コンクリートの乾燥収縮を論じる場合の重要な要因の一つであるコンクリート中の水分の挙動に着目し、吸水量の異なる 2 種類の人工軽量骨材および天然骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮試験を実施し、逸散水量と収縮ひずみとの関係、ならびに乾燥収縮におよぼす環境の湿度条件の影響について検討し

* 原稿受理 昭和47年9月9日

** 正 会 員 鳥取大学工学部 鳥取市湖山町

たものである。さらに、これらの結果をもとにして乾燥収縮の内部機構について若干の考察を行なったものである。

2 実験概要

本実験に使用した骨材（天然骨材；*N*，ライオナイト；*L*および宇部軽骨；*U*）の物理的性質を Table I に示す。セメントは、大阪社製普通ポルトランドセメントを用いた。本実験に用いたコンクリートの配合を Table II に示す。本実験においては目標強度は考慮せず、セメント、水、細骨材および粗骨材の容積率がコンクリートの種類にかかわらず一定となるように考慮した。

Table I. The physical properties of aggregates used in this test.

	Kinds of aggregate	Specific gravity	Water absorption (%)	Weight of unit vol. (kg/m ³)	Fineness modulus F. M.
Coarse agg.	Crushed stone	2.70	1.21	1 530	7.29
	Lionite	1.34	2.30	800	6.65
	Ube-keikotsu	1.57	13.0	843	6.51
Fine agg.	River sand	2.56	1.23	1 420	2.98
	Lionite	1.37	4.00	1 100	2.62
	Ube-keikotsu	1.90	11.5	1 120	2.53

Table II. Mix proportions.

Specimen	W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S/a (%)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Pozz. No. 8
Crushed stone	45	360	162	45	823	1 045	C×0.25%
Lionite	"	"	"	"	548	518	"
Ube-keikotsu	"	"	"	"	601	607	"

乾燥収縮および逸散水量測定用の供試体は、すべて $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱供試体である。

コンクリートの練り混ぜは、4 切可傾式ミキサーで行ない、供試体の締固めは棒突き法によった。供試体は打設後24時間実験室中（室温）に放置した後脱型し、脱型後は材令28日目まで標準水中養生を施した。

乾燥収縮ひずみおよび逸散水量の測定は材令28日から開始し、約100日間測定を継続した。ひずみの測定はフーゲンベルガー型ひずみ計（検長10インチ）、逸散水量の測定は卓上台秤（秤量10 kg，感量1 g）を用いて行なった。

Table III にその他の実験条件を示す。Table 中の *S* は、供試体の表面を防水性のビニール塗料で被覆したもの、*US* は被覆しないものを意味し、水中の供試体については *US* のみとした。なお、水中に保存した供試体においては、水分の逸散はないものと仮定して、逸散水量の測定は行なわなかった。

Table III. Designations of curing conditions.

Specimen	Temperature	Relative humidity	Surface treatment
Crushed stone	20°C	50% (<i>L</i>)	Sealed (<i>S</i>)
Lionite		80% (<i>H</i>)	Unsealed (<i>US</i>)
Ube-keikotsu		100% (<i>W</i>) (in water)	

3 実験結果と考察

乾燥収縮ひずみおよび逸散水量の測定結果を Table IV に示す。なお乾燥収縮および逸散水量は、いずれも試験開始後100日目の測定値 (S_{100} , W_{100}) である。Fig. 1 は表面を塗料で被覆しない供試体の乾燥収縮と時間の関係を示したものである。

従来の研究によれば、軽量コンクリートの乾燥収縮は普通コンクリートのそれと同程度か、あるいは若干大きくなるものが多い。しかしながら本実験の結果によれば、ライオナイトを用いたコンクリートの乾燥収縮は普通コンクリートのそれと大差はないが、吸水量の大きい宇部軽骨を用いたコンクリートの乾燥収縮は、普通コンクリートのそれに比較してかなり小さい。これは骨材中の遊離水がセメントペースト部へ補給され、その結果セメントペーストの収縮が妨げら

Table IV. Test results.

Specimen	Shrinkage $S_{100} (\times 10^{-5})$	Moisture loss $W_{100} (g)$
Crushed stone	<i>W</i>	6.3
	<i>H-S</i>	28.9
	<i>H-US</i>	39.6
	<i>L-S</i>	57.8
	<i>L-US</i>	65.0
Lionite	<i>W</i>	4.8
	<i>H-S</i>	28.1
	<i>H-US</i>	42.7
	<i>L-S</i>	44.2
	<i>L-US</i>	57.2
Ube-keikotsu	<i>W</i>	1.8
	<i>H-S</i>	11.2
	<i>H-US</i>	21.5
	<i>L-S</i>	16.3
	<i>L-US</i>	39.0

W_{100} : Moisture loss during 100 days

S_{100} : Shrinkage strain during 100 days

Fig. 1. Shrinkage vs. drying time curves.

れるためであると予想される。

一方, Table IV によれば, 一般に表面を被覆した供試体の乾燥収縮は, 被覆しない供試体のそれよりも小さい。これは, 表面を被覆することによって供試体中の水分が外部へ逸散するのが妨げられるため, その乾燥収縮が小さくなったものと考えられる。さらに Fig. 1 によれば, 環境の湿度が高いほどその乾燥収縮は小さくなる。これは, 環境の湿度が高くなれば供試体中の水分の逸散は緩慢となり, その結果乾燥収縮が小さくなるためである。Fig. 2 に環境の湿度と乾燥収縮の関係を一括して示した。これによれば, コンクリートの種類にかかわらず, 環境の湿度が高いほどその乾燥収縮が小さく, さらに表面を被覆して水分の逸散を少なくしたもののほど, その乾燥収縮が小さくなることが明確にわかる。

Fig. 2. Influence of ambient humidity on shrinkage.

以上述べたように, コンクリートの乾燥収縮は供試体中の水分の外部への逸散に起因するところが大きく, 供試体中の水分の多寡, 環境の湿度条件および表面の被覆の有無などの要因が支配的であると考えられる。したがって, コンクリートの乾燥収縮の内部機構を論じる際には, コンクリート中の水分の挙動に着目すべきであることには異論がないものと思われる。

Fig. 3 は表面を被覆しない供試体の水分の逸散と時間の関係を示したものである。Fig. 3 によれば, 供試体中の水分が多くなるにしたがって, さらに環境の湿度が低いほど, その逸散水量は多くなる。

Fig. 3. Moisture loss vs. drying time curves.

Table V. Moisture loss during 100 days after the start of the drying test.

Specimen		W_T (g)	W_{100}/W_T (%)
Crushed stone	H-S	407.9	17.2
	H-US		23.0
	L-S		31.6
	L-US		43.4
Lionite	H-S	452.2	22.1
	H-US		36.7
	L-S		43.1
	L-US		59.7
Ube-keikotsu	H-S	908.9	19.8
	H-US		44.6
	L-S		32.0
	L-US		59.6

W_T : Total amount of water contents

W_{100} : Moisture loss during 100 days

一方, 供試体の乾燥に伴って逸散し得る水量は, 供試体の有する全水量より結合水を引いたものと考えられる。いま, 結合水をセメント重量の23%と仮定して逸散し得る水量(W_T)を求めると, 普通コンクリートで 407.9 g, ライオナイトで 452.2 g, 宇部軽骨で 908.9 g となる。さらに, W_T に対する W_{100} の割合を求めると Table V のようになり, 軽量コンクリートに比較して普通コンクリートのそれは若干小さいようである。

Fig. 4, 5 は, 表面を被覆しない供試体の逸散水量と単位時間(日)当たりの逸散水量(逸散速度)との関係を示したものである。Fig. 4 によれば, 環境の湿度が低い場合には, いずれのコンクリートにおいても両者の関係は折線で表わされ, 逸散水量がある値を越えると逸散速度は急激に低下する。このことより, コ

Fig. 4. Relationship between moisture loss and rate of moisture loss (at 50% R.H.).

Fig. 5. Relationship between moisture loss and rate of moisture loss (at 80% R.H.).

ンクリート中の水分の逸散の機構は一樣なものではなく、ある時間を境にして何らかの相違のあることが想像される。Fig. 5は環境の湿度が高い場合について示したものであるが、こて場合も Fig. 4と同様の傾向が認められる。しかしながら、一般に逸散速度は環境の湿度が低い場合よりも小さく、逸散の機構の変化もそれほど顕著なものではない。

Fig. 6, 7は表面を被覆しない供試体の乾燥収縮ひずみと逸散水量の関係を示したものである。Fig. 6より明かなように、環境の湿度が低い場合には、コンクリートの種類にかかわらず乾燥収縮ひずみは逸散水量の増大に伴って直線的に増加し、ある値を過ぎるとその直線のこう配は大きくなる。すなわち、両者の関係は一つの折線で表わされる。また、直線のこう配は

Fig. 6. Relationship between shrinkage and moisture loss (at 50% R.H.).

Fig. 7. Relationship between shrinkage and moisture loss (at 80% R.H.).

コンクリート中の水量が多くなるにしたがって小さくなっている。

一方、コンクリート中の水はその存在形態によって化学的結合水、セメントゲル中のゲル水、毛細管空げき中のキャピラリー水および骨材中の水の4種類に分類される。これらのうち化学的結合水は先にも述べたように、乾燥に伴って供試体外へ逸散することはないと考えられる。また、キャピラリー水や骨材中の水は乾燥収縮にそれほど多大な影響を及ぼさないと思われる。したがって、乾燥収縮の原因はセメントゲル中に拘束されて存在するゲル水の逸散によるところが大であると考えられる。

Hobbs と Mears³⁾は、コンクリートの内部機構と水分の逸散との関係について次のように述べている。すなわち、コンクリートは互いに連絡された種々の大きさの空げきを有し、このようなコンクリートが乾燥されると、メニスカスを形成している大きな毛細管空げき中の水は表面から蒸発し、水分は徐々に外部へ逸散する。水分の蒸発によってメニスカスの曲率が増大し、それに伴って生じた張力によって、骨材中やセメントペースト中の大きな空げき中の自由水が、水分を失った毛細管空げきへ移動する。このような過程を繰返しつつ乾燥が進行すると、コンクリートの表面に近い内部の湿度は充分に低くなり、その結果すでに水分を失った比較的大きな空げきの壁面やメニスカスが表面から後退することによって、露出してきたゲル空げきなどからも水分が失われるようになる。さらに乾燥が進行すると、比較的大きな毛細管空げきのメニスカスは失われ、水分の逸散はコンクリート表面と内部との湿度こう配にのみ起因するようになる。さらに乾燥が進行すると、コンクリート中の湿度はさらに低くなり、炭酸化による重量増大が認められるようになる。

以上の考えを参考にして本実験の結果を考察すると次のようになる。すなわち、Fig. 6に示した本実験の結果のみからは、Hobbs と Mears が述べるように、乾燥収縮の内部機構を微視的に、厳密に区別することは困難ではあるが、コンクリートの乾燥収縮は二つの違った機構によることがわかる。それはFig. 6において折線で表わされているように、最初の段階においては骨材中の水や毛細管空げき中の水の逸散が支配的であり、水分の逸散が多いにもかかわらず乾燥収縮ひずみはそれほど増大しない。次の段階になればゲル空げき中の水の逸散が支配的となり、乾燥収縮ひずみの増加の割合は大となる。したがって、骨材中に有する水量の多い字部軽骨を用いたコンクリートにおいては、逸散水量が多いにもかかわらず、その乾燥収縮は小さくなっている。

Fig. 6 に乾燥収縮の内部機構が変化する点における逸散水量の値を示したが、これはFig. 4 に示した水分逸散の機構が変化する点の逸散水量の値とほぼ一致する。このことからコンクリートの乾燥収縮の内部機構がコンクリート中の種々の形態の水の逸散の機構と密接に関係することが明らかである。また、乾燥収縮の内部機構が変化する点の逸散水量は、コンクリートが有する結合水以外の水量の約30~40%である。さらにこの点に達するのに要する日数は、環境の湿度が50%の場合においては、普通コンクリート、ライオナイトおよび宇部軽骨で、それぞれ30日、28日および23日となり、ほぼ20~30日程度である。

Fig. 7 には環境の湿度が高い場合について示したが、湿度が高く水分の逸散が妨げられた結果、逸散水量も少なく、内部機構の変化をみるに至らず、乾燥収縮ひずみと逸散水量との間にはほぼ直線的な関係がみられた。また、コンクリートが有する水量が多くなるにしたがって直線のこう配が小さくなることはFig. 6 の場合と同様である。なお、表面を被覆した供試体の結果については、紙面の関係上割愛するが、表面を被覆しない供試体の場合とはほぼ同様の傾向がみられた。

Fig. 8 は測定開始後 100 日目における乾燥収縮と逸散水量の関係を示したものであるが、コンクリートの種類にかかわらず両者の関係はほぼ直線で近似することができる。すなわち、コンクリートの乾燥収縮は、巨視的にみれば、供試体中の水分の逸散水量と比例するといえる。また、その直線のこう配は、コンクリー

トが有する水分の量と密接な関係があり、水分の量が多いほどゆるやかになる。

4 結 言

本研究の結果明らかになったことを列挙して結論とする。

(1) コンクリートの乾燥に伴う水分の逸散は、コンクリートが有する水量、環境の湿度条件および表面の被覆の有無などと密接な関係を有する。すなわち、コンクリートが有する水量が多いほど、環境の湿度が低いほど、さらに表面を被覆しないものの方が逸散水量は大となる。

(2) 環境の湿度が低い場合、コンクリート中の水分の逸散は二つ異なった機構からなると思われる。

(3) コンクリートの乾燥収縮におよぼす環境の湿度条件の影響は大きく、湿度が高くなれば乾燥収縮は小さくなる。また、表面を被覆したコンクリートの乾燥収縮は、被覆しないもののそれよりも小さい。

(4) コンクリートの乾燥収縮の内部機構は、二つの異なった機構からなると考えられる。すなわち、骨材中の水分や毛細管空けき中の水の逸散が支配的であるため、水分の逸散に伴う乾燥収縮ひずみの増加が比較的ゆるやかな段階が先行し、次にゲル空けき中の水の逸散が支配的となって、水分の逸散に伴う乾燥収縮ひずみの増加が急になる段階が続く。

(5) コンクリートの乾燥収縮を巨視的にみれば、乾燥収縮は逸散水量とほぼ比例する。また、それはコンクリートが有する水量と密接な関係がある。

本研究を遂行するに当たり、多大の労を煩わした斎藤邦雄（空港コンサルタントK.K.）、手嶋良三（愛知県）の両氏に対し、心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Neville, A.M., Properties of Concrete, Sir Isaac Pitman & Sons Ltd. (1968).
- 2) 岡田 清, コンクリートのクリープ, コンクリートパンフレット第29号, 日本セメント技術協会.
- 3) Hobbs, D.W., and A.R. Mears, The Influence of Specimen Geometry upon Weight Change and Shrinkage of Air-Dried Mortar Specimen, Magazine of Concrete Research, 23, No. 75~76, June-September, (1971).

Fig. 8. Relationship between shrinkage S_{100} and moisture loss W_{10} .