

風作用を受けるコンクリートの水分逸散および 収縮特性に関する基礎研究

STUDY ON THE MOISTURE LOSS AND DRYING SHRINKAGE
OF CONCRETE DUE TO WIND ACTION

庄 谷 征 美*・徳 田 弘**
By Masami SHOYA and Hiroshi TOKUDA

1. まえがき

近年の土木技術の進歩に伴い、多種多様な構造物へのセメントコンクリートの利用が可能となりつつある。それに付随して、従来のコンクリートに関する知識、経験のみでは対処しきれない問題点も多数生じてきている。たとえば、LNG タンクあるいは原子炉格納容器などのような特殊用途の構造物の挙動や、海洋環境下でのコンクリートの耐久性、劣化の問題などがその例として指摘できる¹⁾。このような現状をふまえ、今後の技術的な一層の発展に資するには、古くからの問題点を再認識し、さらに理解を深める姿勢も重要と思われる。

コンクリート固有の性質のうち、古くから論議の対象とされてきた課題に乾燥収縮がある。これについては、Carlson、続いて Pickett らを先達として多数の報告がなされてきた。その内容は、収縮機構の理論および水分逸散の観点からの実験的検討^{2),3)}、コンクリート収縮の複合機構に関する研究^{4)~6)}、各種要因が収縮に及ぼす影響の検討^{7),8)}、さらには収縮応力の算定手法⁹⁾、およびひびわれ抵抗性の検討ならびにその改善法など^{5),10),11)}であって、収縮に関する問題の全貌がだいに明らかとなってきた。

コンクリートの乾燥収縮の主因は内部に保有される水分の逸散によるものであるが、この観点からすると、乾燥を助長、促進すると考えられる因子として風作用に視点をあて、この影響を明らかにすることは意義あることと考えられる。

風作用がコンクリートの収縮に及ぼす影響に関する既往の研究では、plastic shrinkage¹²⁾が論議の対象となってきたが、若材令下も含め硬化コンクリートのそれについての研究は数少なく、主要な論文としては Hansen¹³⁾

による報告がみられるにすぎない。彼は、風速 5m/s の条件下において乾燥収縮および曲げクリープ試験を実施し、その結果から風の影響は重要でないと結論している。しかし、彼の実験は試料数を含めてきわめて限定された範囲の条件下で実施されたものであって、著者らの得た結果^{14)~16)}とは傾向を異にし、風作用の効果を過小評価しているといわざるを得ない。

わが国の気象統計¹⁷⁾をもとに、風速の地域的分布を調べると、日平均風速で 3~4 m/s が大部分であるが、地域によっては日最大風速が 10 m/s を超える年間総日数が 50 日以上を示す場合もあり、太平洋および日本海沿岸地域で強風日が際立って多い。一方、中部、関東の内陸部でも、相当の日数、強風を受ける地域が存在している。これらより、強い空気の流れにさらされる海洋コンクリート構造物や、高所、高層の構造物においては、ひびわれおよび劣化などの問題と関連して上記作用をとらえる必要があろう。

本研究は風作用を受けるコンクリートの体積変化特性に関する研究の一環として実施したもので、特に日平均風速程度以上の比較的厳しい条件下的収縮挙動を明らかにすることを目的とした。本研究の範囲を示せば次のようにになる。ポルトランドセメントおよび混合セメント、各種骨材を組み合わせた配合総計 39 種のモルタル、コンクリートについて、試作送風機を用いた風作用条件下と無風条件下での収縮、重量変化試験を揚水後の湿潤供試体について実施した。これらの結果に基づき、風作用下の水分逸散特性およびその機構を調べ、それと収縮の関係を検討した。さらに、収縮性状を風速レベル、受風期間、使用材料、配合、湿潤養生期間、部材寸法、環境の湿度などの諸要因との関連において調べ、また、鉄筋により内部拘束を受けた場合についても検討を加えた。これらにより、風作用下の収縮発現に寄与する因子およびその影響度について考察した。最後に、重回帰分析法を適用し風作用下のコンクリートの収縮進行を評価し、

* 正会員 工修 秋田工業高等専門学校助教授 土木工学科
** 正会員 工博 秋田大学教授 鉱山学部土木工学科

予測することの可能性を吟味して、一予測手法の提示を試みた。

2. 実験および方法

(1) 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント (N) を主に用いたが、早強 (E) および中庸熟ポルトランドセメント (M)、高炉セメント B 種 (B) も一部使用した。

細骨材は川砂、陸砂と河口砂の混合砂および川砂と浜

砂の混合砂であって、人工軽量砂も一部使用した。混合砂については使用前に水洗いを入念に行い、不純物や粘土分の除去に努めた。粗骨材は 3 種の川砂利および陸砂利さらに非造粒型人工軽量粗骨材をそれぞれ使用した。表-1 に用いた細粗骨材の性質を示した。

試験に使用した配合数はモルタル 16 種、コンクリート 23 種であって、これらを実験計画に対応させて表-2 に示した。このように配合を定めた理由は、実際の施工に用いられる範囲で水セメント比を選定し、さらには骨材種類、セメント種別の影響や、骨材最大寸法およびスランプの変化などによる影響を広範囲にとらえること

を目的としたからである。

(2) 供試体作製および試験項目

練り混ぜにはモルタルミキサーおよび強制練りミキサーを使用し、コンクリートの締固めには内部振動機を用いた。早期に試験に供する場合を除き、供試体は材令 1 日で脱型、入念に表面のグリースを洗い落とした後 20°C 水中養生を実施

表-1 使用骨材の品質

	Symbol of Aggregate	Max. Size of Aggregate (mm)	Specific Weight	Water Absorption (%)	Fineness Modulus	Type of Aggregate
Fine Aggregate	Y	5	2.55	2.82	2.75	River sand
	Z	5	2.57	2.20	2.65	Mixed sand (land and estuary)
	R	5 (2.5)	2.55	5.82	2.74 (2.37)	Mixed sand (hill and beach)
	Ls	5	1.60*	10.5**	2.74	Artificial light-weight
Coarse Aggregate	A	25	2.58	1.98	7.03	Land gravel
	B	25 (15)	2.57	2.56	6.91 (6.24)	River gravel (1)
	C	15	2.54	2.80	6.37	River gravel (2)
	D	25	2.58	2.52	6.99	River gravel (3)
	L	15	1.28*	10.1**	6.45	Artificial light-weight (crushed and coated type)

* in oven dry condition **after 24 hours absorption in water

表-2 用いた配合および実験計画の概要

No. of mix	Symbol of Aggre. Max Size of Aggre.	W/C (%)	(Flow) or Slump	Type of Cement	Size of Specimen (cm)	Duration of Wet Curing	Wind Velocity (m/s)	Duration exposed to Wind (Drying Period) (day)	Influencing Factors to be clarified	Test Conditions
①, ②	Z-5	40, 60	(210±5)	N	10×10×20	8 hrs, 1, 7, 28 days	0, 9	0, 5, 50 (150)	Duration of wet curing	6 faces drying at 50%RH
③-⑤ ⑥-⑧ ⑨-⑪ ⑫-⑭	R-2.5	40, 55, 70	(191±5) (180±8) (200±3) (190±3)	N E M B	4×4×16 10×10×40	1, 7 days	0, 9	0, 50 (50)	Type of cement, Humidity condition	6 faces drying at 35, 50, 80%RH
⑯-⑯	Y-5	40, 60	(207±3)	N	1×1×16 4×4×16 10×10×20	1, 7 days	0, 8	0, 35 (150)	Size effect	1 face, 6 faces drying, 50%RH
⑯-⑯	Y-5	40, 60	(207±3)	N	10×10×40	7 days	0, 6	0, 50 (150)	Restraining test by reinforcements	6 faces drying at 50%RH
⑯	AZ-25	40	8±0.5	N	10×10×20	8, 15 hrs, 1, 3, 7, 28 days	0, 9	0, 80 (150)	Duration of wet curing	6 faces drying at 50%RH
⑯-⑯	BZ-25	40, 60	8±0.5	N	"	8 hrs, 1, 7, 28 days	0, 6, 9	0, 5, 50 (150)	"	6 faces drying at 50%RH
⑯-⑯	BZ-15	40, 55 60, 70	8.5±0.5	N	"	1, 7 days	0, 9	0, 5, 25 50 (150)	Water cement ratio, duration exposed to wind	"
⑯-⑯	CY-15	40, 60	8±0.5	N	"	7 days	0, 4, 9	0, 100	Size effect	1 face, 6 faces
⑯-⑯	DR-25	40 55 70	2.5±0.5 8±1 12±1.5	N	"	1 day	0, 8	0, 25 (150)	Change of slump	6 faces drying at 50%RH
⑯-⑯	LR-15 LLs-15	40 55, 70 40, 60	10±1 8±1	N	"	7 days 3 days	0, 8 0, 9	0, 100 (200) "	Light-weight concrete, water cement ratio	"

* In all cases, shrinkage and weight loss tests were performed. Test of neutralized area was done in some cases.

し、養生終了後ただちに標点用チップの貼り付け等を行い、試験に供した。用いた供試体の形状、寸法はモルタル $1 \times 1 \times 16$ cm, $4 \times 4 \times 16$ cm, モルタル、コンクリートで $10 \times 10 \times 20$ cm および $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱状であった。一部については形状、寸法比の影響を明らかにする目的で、パラフィンでシールした一面乾燥供試体も用いた。

表-2 に示されているように、試験項目として乾燥収縮量と逸散水量の測定を行ったが、一部中性化深さの測定も実施した。

(3) 実験方法

収縮量の測定には 1/1 000 mm 読みのコンタクト型ストレインゲージを用いた。検長は供試体長手方向の長さが 20 cm およびそれ以下では 100 mm, 40 cm の場合で 200 mm とした。標点用ゲージとして貼り付け型チップを主に用い、収縮は表面ひずみとして求めた。測定に用いた供試体数は同一試験条件に対し 2~4 本であった。

実験は、20°C に設定された恒温恒湿室 2 室を用いて行ったが、1 室は相対湿度 50% に保ち、1 室は湿度可変として 35%, 50%, 80% の 3 水準に湿度を変化させた。風は、同室に設置した風洞部を有する試作の送風装置 3 台を用い発生させた。送風装置の略図を 図-1 に示した。これは、風洞内に工業用プロペラを配したものであり、下部モーターの回転をプロペラのシャフトに伝達し、回転数を可変として風速を変化できる構造となっている。供試体は、風洞内に垂直に保持されたシャフトに固定された 2 枚の円盤上に置かれ、この円盤の回転によりまんべんなく全供試体が風を受けるように配慮されている。風速は、風作用方向に直角なる面で円盤の中心部を通る直径方向断面部の風速を熱線型風速計を用いて 5 × 5 cm メッシュ間隔で測定し、平均風速を算出した。

重量測定には、0.1 mg 感量 100 g 種量の化学天秤、
0.5 g および 1 g 感量、5 kg および 10 kg 種量の 2 台
の台秤をそれぞれ供試体の大きさに対応させて使い分け
た。

中性化深さは、 $10 \times 10 \times 20$ cm の収縮試験終了供試体

について、端面より 5 cm の部分をカッターで切断し、切断面にフェノールフタレイン 1% アルコール溶液を吹き付け、赤色に着色した部分の面積 A をプラニメーターを用いて測定した。平均中性化深さ d_{av} は A_0 を試料の原断面積として、次式により算定した¹⁸⁾。

$$d_{av} = 1/2 \cdot (\sqrt{A_0} - \sqrt{A}) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

(4) 乾燥収縮実験値の整理および最終収縮量の評価

各風速条件下で得られた収縮データを整理するにあたり、収縮の進行を良好にとらえ得るといわれている次の双曲線型実験式、いわゆる Ross 式の適用⁽⁵⁾を試みた。収縮ひずみを S 、乾燥日数を t とすると、

$$S = \frac{t}{a - bt} = \frac{t}{N + t} \cdot S_\infty \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

上式で a および b は実験定数であって、 $1/b$ は収縮ひずみの最終推定値 S_∞ を与え、 a/b はひずみが $S_\infty/2$ に達する日数 N_s を表わす。定数決定に最小二乗法を適用したが、相関係数はほとんどの場合 0.98 程度以上であった。

なお、上式は逸散水量の最終値推定にも準用した。この理由は、水分逸散の進行も上式で比較的良好にとらえ得ることや、最終値の推定が容易に行える点を重視したためである。

3. 風作用下におけるモルタル、コンクリートの水分逸散性状およびこれと収縮の関連性について

(1) 風作用下の水分逸散特性およびその機構について

風作用を受けるモルタル、コンクリートの重量変化の様相を明らかにすることは、同条件下的収縮発現特性を探るうえからも重要である。本節では水分逸散の特性とその機構について検討する。

a) 風作用下の逸散水量に及ぼす各種要因の影響

風作用が逸散水量に及ぼす影響ならびにその特性を調べるため、先の式(2)を準用して最終逸散水量を推定した。図-2は配合⑦コンクリートの湿潤養生期間 $\tau=8$ 時間および28日の $V=0$ および9m/sの場合を例として、Ross式の適合性を調べたもので、風作用下で N_w 値が減少し、 W_{∞}' は増加する様相も明瞭であって、水分逸散に関する上式の適用が有用であることを示している。次に、図-3(a)から(i)までは、風速レベル、受風期間など逸散水量に影響する要因別に最終逸散量 W_{∞}' を検討したものであって、これらの特性を列挙すれば次のようである。

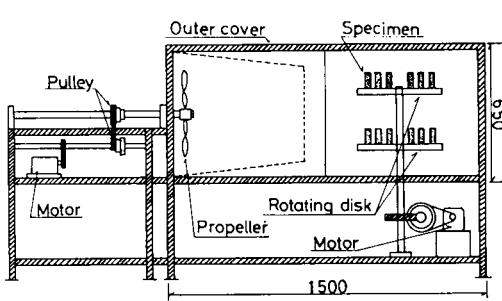


図-1 送風装置の略図

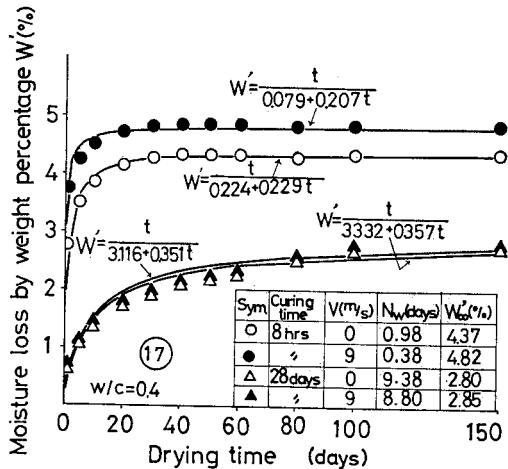


図-2 水分逸散に対する Ross 式の適用とその適合性の検討例

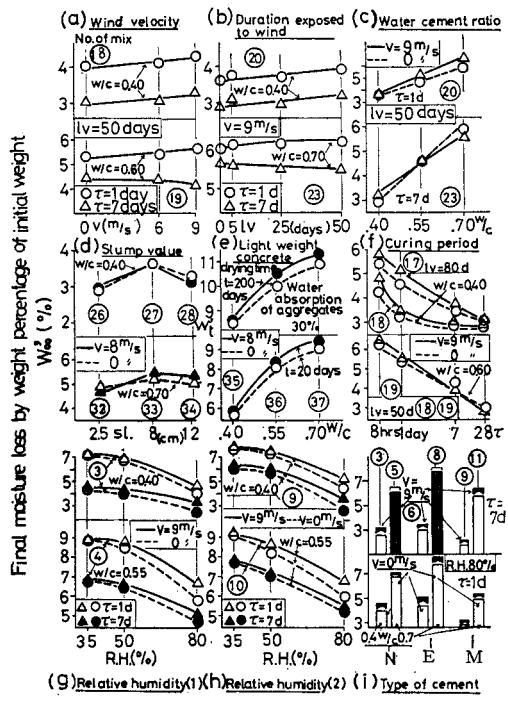


図-3 風作用下における最終逸散水量 W_{∞}' に及ぼす各種要因の影響

同図(a), (b) の上図から、水セメント比 W/C が 40% 程度と小なる場合は、風速 v および受風期間 l_v の增加に比例的に最終逸散水量 W_{∞}' が増加することが認められる。しかし、両図の下図のように水セメント比 60% 程度以上の場合、水中養生期間が 7 日程度になると v, l_v が増加しても逸散水量は無風下を下回る傾向が認められる。この理由として、風乾燥条件が厳しい場合には、試料のポロシティ特性とも関連して、内部隙間中の水分の表面への移動が表面蒸発に追いつかず、キャビ

ラリーの通導が切れるなどの様相が急速に生じ、またある程度乾燥が進行した後は表面組織に変化をきたすなどの理由で、結果的に水分逸散が抑制されたものと推測される。無風下に対する風作用下の W_{∞}' の増減の程度は、風速 1 m/s 当たりそれぞれ最大 0.6% および 0.4% 程度であり、 $v=9 \text{ m/s}$ 下で受風日数 10 日当たりそれぞれ最大 1.2% および 0.8% 程度と見積られた。次に同図(c)より、水セメント比の増加に伴い、養生期間 $\tau=1$ 日の場合では風作用下の W_{∞}' は無風下に比し増加傾向、それが 7 日程度では W/C 55% 程度を境にしてそれ以上の水セメント比では減少傾向が明瞭に認められる。図(d)はスランプ値 sl の変化の影響を検討したものであるが、上図より、水セメント比が小なる場合は sl が小であるほど、下図より、逆に前者が大なる場合は sl が大であるほど、風作用下の W_{∞}' は増加傾向が強いことが示されている。軽量コンクリートでは $t=20$ 日および 200 日の実測値で示したが同図(e)の例に示されるように、風作用下の逸散水量は無風下のそれより増加し、水セメント比が大なるにつれその程度は大きく現われている。図(f)は養生期間 τ の影響を検討した一例で、 τ が短期間であるほど、風による W_{∞}' の増加は著しくなる傾向にあって、たとえば配合(1)コンクリートでは、 $\tau=28$ 日の場合 $v=9 \text{ m/s}$ 下で無風下より 1.7% 程度の増加に対し $\tau=8$ 時間では 7% 強の増加となっている。次に、同図(g), (h) は、風作用を受ける場合、周囲の相対湿度 R.H. が大なるに従い無風下よりの増加割合が大きくなる傾向を示している。これは高湿度下で風の水分乾燥効果が著しくなることに帰因すると思われる。セメント種別による差は、相対湿度が 35% と低湿時では明瞭でないが、図(g), (h) および(i)より、80% R.H. 程度の高湿度領域でのこの差は大きく、無風下に対する風作用下の W_{∞}' の増加程度を同一材令において順序づければ、中庸熟(※高炉B種) > 普通 > 早強の順となっていることが認められる。

このように、風による水分逸散助長、促進の効果は一樣なものではなく、周囲条件やコンクリートの組成、内部構造に強く関連したものであることが理解できる。

b) 風作用下の水分逸散形態について

風作用下の水分逸散の経時的变化を調べ、風の作用形態を少しき探ってみる。図-4 は、乾燥早期の水分逸散特性を明らかにするためのものであって、最終逸散水量 W_{∞}' に対する相対水分逸散率 W'/W_{∞}' を求め、それと乾燥時間との関係を上図に、下図には、風作用の有無による水分逸散の進行度の違いを調べる目的で、両条件下におけるその差、 $W'_v/W_{\infty}' - W'_0/W_{\infty}'$ を求め、それと時間との関係を示した。これより、養生期間、水セメント比および風速の程度にかかわらず、乾燥後 0.06

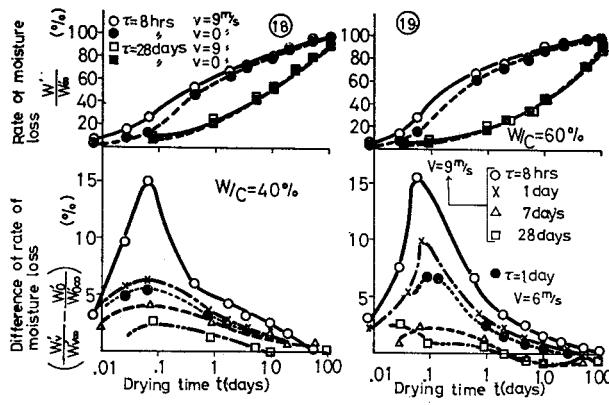
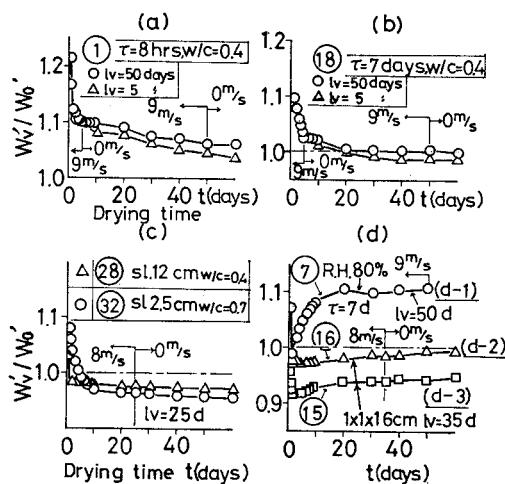


図-4 水分逸散進行度に及ぼす風の作用形態

~0.1日（およそ1.7~2.4時間）付近で風作用下と無風下の相対水分逸散率の差が最大値をとり、このピークを過ぎると時間の経過に伴い漸減してゆく様相が明瞭に認められる。これは換言すると、風の水分逸散促進作用が乾燥後2時間前後で最も著しくなることを示唆していると考えられる。しかし、この逸散率の差は相当期間正値をとり、養生が短期で風速の大きい場合ほどそれが長期間保持されているのであって、Hansenら¹³⁾のように単に乾燥のごく初期のみに風の影響を限定し考えることは不合理であり、その後の様相を十分調べる必要があると判断される。

次に、上記の考え方をもとに、風作用下の水分逸散の経時変化を角度を変えさらに検討した。図-5は無風下の逸散水量 W_0' に対する風作用下のそれ W_v' の比率 W_v'/W_0' を風逸散比として、(a)～(d) 図にその経時変化のすべての形態を網羅する実例6パターンを示した。同図において、(a) は風逸散比が初期に1を大きく超えその後単調に減少しても最終的には1以上の値に收れんする場合、(b) は最終値が1近くに收れんする場合、

図-5 風逸散比 W_v'/W_0' の経時変化的特性

(c) は最終的には1を下回る値になる場合であつて、(d) は初期に1を超えるがその後急速に減少し最小値に達した後、時間の経過につれ回復する形態で最終値が1を超える場合(d-1), 1近くに回復する場合(d-2)および回復しても1を下回る場合(d-3)に区分できる。これら形態を全体的な要因別に考察したところ次のようになった。すなわち、(a)の形態は湿潤養生期間が1~3日程度未満の若材令試料や軽量コンクリートに共通してみられ、(b)の形態は低湿度条件下や水セメント比55%程度以下の比較的低水セメント比で養生期間が3日程度以上の場合、さらには水セメント比がそれ以上では1日程度のものに認められる。(c)の形態は受風日数が短く比較的長期養生の場合や、低水セメント比高スランプ、逆に高水セメント比低スランプコンクリートなどで認められる。(d-1)は高湿度下早強セメント使用時や低湿度下で短期養生高水セメント比の場合などに認められ、(d-2), (d-3)は水セメント比60%程度以上で養生期間が7日程度以上と長い場合や、小寸法試料に多く認められる形態であった。なお、乾燥開始後10分前後のごく早期では、風速9m/s下養生期間8時間の場合の風逸散比は3~5程度の値となり、恒率乾燥に近い時点での水分蒸発速度が風作用によりきわめて大きくなる事実が確認された。

以上のように、風逸散比の形態はかなり複雑であるが、これら結果と先の W_{∞}' の特性をふまえて、無風下の相対水分逸散率 W_0'/W_{∞}' に対する風作用下のそれ W_v'/W_{∞}' の比を求めパターン化した模式図が図-6である。これより、風作用下の水分逸散進行の形態は大きく分けて2つの異なるパターンとしてとらえ得るのであって、図中のパターンAは先 図-5の(a)～(c)の形態に対応し、パターンBは(d-1)～(d-3)に対応していることが理解される。

c) 風作用下の水分逸散の機構について

風作用下の水分逸散機構を探るため、水分逸散速度について検討を加えた。ここでは Hobbs ら³⁾の無風下の水分逸散に関する説明を参考に考察を進めた。

図-7は水分逸散速度 dW'/dt と逸散水量 W' の関係を検討した一例であって、上図には毛管からの水分

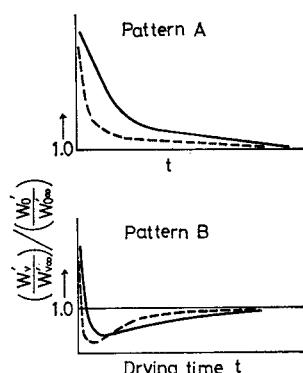


図-6 風作用下における水分逸散形態のパターン

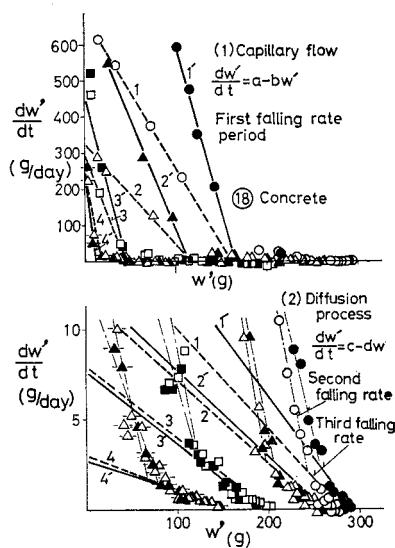


図-7 風作用下における水分逸散速度 dW'/dt と逸散水量 W' の関係

逸散が卓越すると思われる段階（以後毛管期とよぶ）における上記関係を、下図には拡散による逸散が卓越すると思われる段階（拡散期とよぶ）でのその関係を示した。この分類は、Hobbs らが毛管期を first falling rate period、拡散期を third falling rate period に対応させ、逸散速度 dW'/dt が総逸散可能水量の 1%/day（本例では約 4.5 g/day 程度に相当する）を境にそれより以下の速度に third falling rate period を対応させていることによった。上下両図において上記の $dW'/dt \sim W'$ 関係が直線的であるとして、最小二乗法で整理し毛管期の切片 a 、勾配 b および拡散期の切片 c 、勾配 d を求め、湿潤養生期間 τ との関係で ⑯、⑰ コンクリートについて示したのが図-8 である。これより、風作用下では毛管期における勾配 b が養生期間の短い試料ほど大となり、この段階の水分蒸発、逸散がきわめて活発であることが認められる。拡散期における勾配 d は風作用により増加する傾向が短期養生の場合で著しい。養生期間が 7 日程度以上の場合は逆に無風下のそれより低下する傾向にあり、水セメント比の高いほどこの様相が強い。拡散理論によると、四面乾燥体では W_e' を拡散による水分逸散が終了する時点の逸散水量 (c/d で略算される) として、 $dW'/dt \propto k (W' - W_e')$ の関係にあり³⁾、これより勾配 d と拡散係数の間には比例関係が成立する。本例の六面乾燥体についても前者を後者の尺度として取扱い可能と仮定すれば、拡散係数の傾向は勾配 d のそれと同様であると考えてよいことになると思われる。

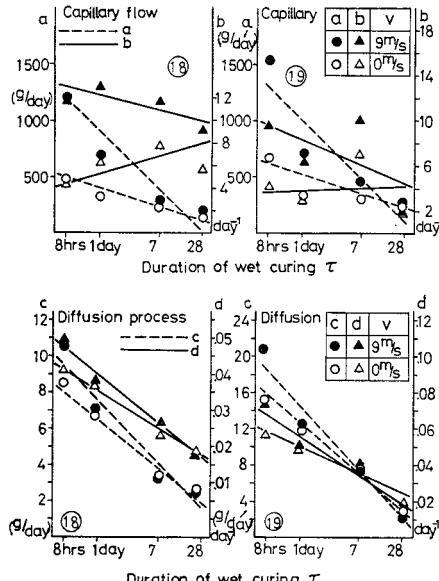


図-8 $dW'/dt \sim W'$ 関係の直線式表示における
勾配と切片に及ぼす養生時間の影響

次に、図-7 に描かれた各直線と $dW'/dt = 0$ との交点を、上図では毛管からの水分逸散が終わる時点の逸散量 W_c' (a/b で示される)、下図では前述の W_e' と仮定して、毛管期以降で失われる水量 W_a' ($= W_e' - W_c'$)、毛管期が終了する時間 t_c 、さらには second falling rate period の直線注¹⁾と拡散期における直線の交点として求めた拡散期への遷移時間 t_e などを推算し、これらを表-3 に示してある。風作用下では、 t_c 、 t_e はともに減少し、逆に W_c' 、 W_e' および W_a' は増加傾向にあって、養生時間が短いほど本傾向は顕著に認められる。

以上のように、風作用下では拡散係数の養生程度による変化傾向が推察され、また、初期の逸散速度増大の様

表-3 毛管期の逸散水量 W_c' および終了時間 t_c 、拡散期への遷移時間 t_e および拡散終了時の逸散水量 W_e' 、などの変化に及ぼす風の影響

No.	τ	V (m/s)	W_c' (g)	t_c (day)	W_e' (g)	$W_e' - W_c'$ (g)	t_e (day)
1	8 hrs.	0	158.8	0.84	276.1	117.3	9.5
	8	9	161.7	0.56	287.1	125.4	7.6
2	1 day	0	115.7	0.89	254.1	138.4	7.8
	1	9	114.4	0.67	257.1	142.7	7.1
3	7 days	0	43.3	0.55	198.4	155.1	8.8
	7	9	44.5	0.52	191.8	147.3	7.8
4	28 days	0	19.9	0.51	152.8	132.9	8.5
	28	9	16.5	0.44	154.2	137.7	9.2

W_c' denotes the amount of moisture loss from capillary.

W_e' denotes the amount of moisture loss when diffusion ceases.

t_c does the time when moisture loss from capillary ceases.

t_e does the time when moisture loss by diffusion begins.

注 1) 風作用下では、この時点における勾配が無風下より一般に小さく現われている。

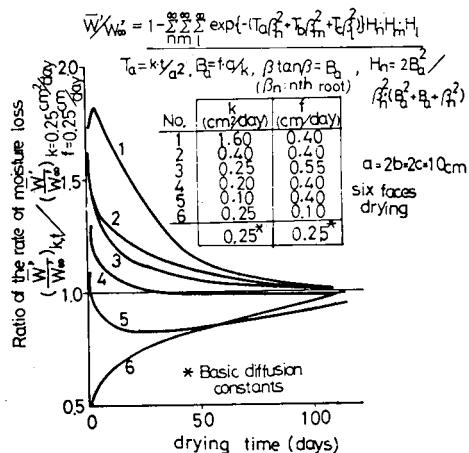


図-9 拡散特性値の変化が平均水分逸散率に及ぼす影響

相から水分の伝達率の増大が予期される。そこで、上記拡散係数の変化を考慮して、図-6 に示された逸散パターンの理論的吟味を試みた。Pickett らによりすでに与えられた六面乾燥体に関する拡散方程式の解^{9),10)}を用い、拡散係数 k と境界条件をニュートンの冷却則に準じて定める際の表面係数 f を実際に近い範囲で変化させ、 $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ 全面乾燥体の相対水分逸散率 W'/W_∞' を求め^{注2)}、拡散特性値が $k=0.25 \text{ cm}^2/\text{day}$, $f=0.25 \text{ cm/day}$ の場合の W'/W_∞' を基準値として、各特性値の組合せごとに求めた W'/W_∞' との比を評価した。この結果を図-9 に示したが、先の図-6 のパターン A は図-9 の (2), (3) のケースにはほぼ該当し、表面係数 f が増大し拡散係数 k は一定もしくはいくぶん増加する場合に相当する。パターン B は図-9 (4), (5) のケース、すなわち、表面係数 f は増大しても拡散係数 k はいくぶん減少する場合におおむね適合すると判断された。

以上のように、風作用下の水分逸散の形態は、ニュートンの冷却則に準じた境界条件を考慮することにより、ほぼ拡散理論により説明可能であることが理解される。

最後に、風作用が水分逸散に及ぼす影響を総括してみよう。まず、風作用は恒率乾燥時の水分逸散速度を無風下の数倍にも高め、その後表面部近傍の比較的大な間隙からの逸散が開始されるに伴い風はこれを助長し、乾燥後 2 時間程度でその促進効果が最も顕著に現われる様相となる。しかし、風作用下では表面部はもちろんのこと、比較的内部の間隙水も急速に脱水されるのでその結果、さらに内部の小間隙中の水分の表面部への移動は一

注2) 非定常拡散解により平均水分逸散量 \bar{W}' と最終逸散水量 W_∞' の比として求めている。境界条件はたとえば x 方向の厚さ $2a$ として $x=\pm a$ で $k \cdot \partial W' / \partial x = \pm f(W_\infty' - W')$ 等と表わされる。

時的に妨げられ、いわゆる second falling rate period における逸散の遅れが生じると考えられる。このように乾燥が進行して表面部近くが十分に乾燥されると、内部と表面部の湿度勾配の形成に帰因して事実上拡散により支配される逸散段階に入る。風作用は全般にこの移行を速め、その時点の逸散水量を増加させるが、これは養生期間の短いほど顕著である。この段階では、拡散係数は無風下に比べ養生期間が 7 日程度を境にしてそれ未満の場合は増加、それ以上の場合に減少の傾向にあって、残留水分は拡散過程に従い逸散することになる。このように、全般的には風作用による逸散の促進、逸散水量増加の傾向は強いが、水セメント比や養生期間によってはその程度および様相に相違を生じ、かえって無風下を下回る結果を生ずる場合もあるのである。

(2) 水分逸散と収縮の関連性について

a) 風作用下の逸散水量と収縮の関係

図-10 は、逸散水量 W' と収縮量 S の関係をおもな要因別に検討した結果を示したものである。図-11 は、この $S \sim W'$ 関係で観察されるパターンを 3 つに大別し示したもので、参考のため同図 (d) には Hobbs らの示した無風下の分類も併記した。図-10 より、基本的には風作用下でも、Hobbs らの分類が妥当であることが認められる。図-11 のパターンの現われる条件を図-10 を参照して述べると、(a-1) は低スランプ、長期養生下で相対湿度の低い場合、(a-2) は寸法が小さく乾燥表面積・体積比 A/V が大きな場合にわずかに対応し、(b) の形態は水セメント比が小さく養生期間が比較

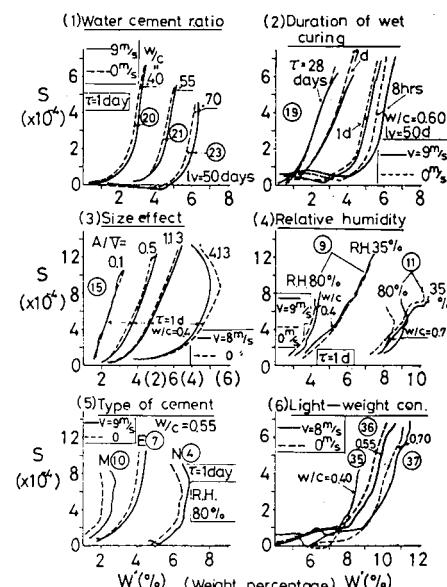


図-10 風作用下における逸散水量 W' と収縮量 S の関係に及ぼす各種要因の影響

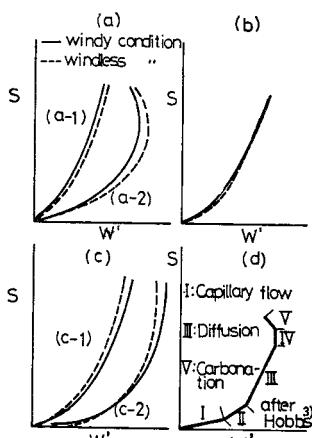


図-11 風作用下における $S \sim W'$ 関係のパターン

が大きいほど著しくなるのであって、セメント種別では中庸熱セメント使用時で顕著であった。これは、同一収縮量を生ずるに必要な水量が多い、炉乾燥状態で発現する $S \sim W'$ 関係に類似した様相であることが理解される。

次に、 $S \sim W'$ 関係の相違の要因を探ってみる。まず、表面部収縮を表面部における実際の逸散水量との関係でとらえていないためではないかとの懸念が生ずるが、埋め込みチップを用いた小型供試体での実験においてもこの相違は明瞭に認められる^{14), 15)}ことから、本質的な要因とは考えにくい。次に、炭酸化の程度により影響されていることが考えられる。これについては炭酸化が風作用により抑制されるのではないかとの判断¹⁵⁾が示されているが、これをさらに検討した。炭酸化の尺度として中性化深さを収縮試験終了後の $10 \times 10 \times 20$ cm 供試体について測定し、その結果を 図-12 に示した。これによ

る長い場合等で認められる。(c) のパターンは無風下と風作用下での $S \sim W'$ 関係が (a) のパターンと逆に相違、分離する形態であって、風作用下で最も一般的に認められたパターンである。この相違の程度は、養生が短期であるほど、水セメント比大なるほど、相対湿度が高いほど、さらには風速

ると思われる。図-11(a) パターンを示す小寸法供試体では、この影響が早期より大きく現われたのではないかと考えられる。しかし、この影響は乾燥が相当に進行した後に重要となるのが一般であることから、結局、(c) パターンの発現は、内部の間隙の分布とも関連するが、風作用により内部の比較的粗大な間隙からの水分移動が速まり、収縮にあまり大きな関連をもたない逸散水分が増加し、拡散期遷移時の逸散水量が高水セメント比、若材令になるほど大きくなることから、本質的な相違が生じたためと考えられる。この後、拡散期での水分逸散速度の傾向、炭酸化の過程あるいは微細ひびわれ発生などの様相と関連して、個々のパターンが定まるものと考えられる。

b) 風作用下の収縮発現に関する一考察

a) および前節での検討に基づき、風作用下での収縮発現の状態を若干考察してみたい。まず、水セメント比が 40% 程度と小さな場合、水分逸散は全般に風速に応じて増加、促進されるが、収縮 $S \sim$ 逸散水量 W' 関係は無風下とそれほど相違せず、拡散期にすみやかに移行するので、乾燥初期の収縮増加が顕著となることが予想される。が、温潤養生期間が長くなるにつれこの傾向は弱まることが推測できる。水セメント比が 60% 程度以上では、養生が短期の場合、風速の有無による $S \sim W'$ 関係の相違の程度は著しいので、逸散水量の風による初期増加により収縮はいくぶんすみやかに進行したとしても、その後の逸散水增加の傾向の鈍化に対応して収縮の進行も鈍ることが考えられる。これに対し、比較的長期養生の場合、風による逸散水增加の傾向は乾燥の初期のみに限定され、乾燥の進行に伴い水分逸散が無風下より低下する傾向が強いため、収縮も同様低下する傾向が強くなるのではないかと予想される。さらに、逸散水量が無風下より相当に多いのに収縮は逆に減少する場合も考え得るのであって、この場合はコンクリート表面に微細ひびわれなど、表面組織の変化がおもに関連すると判断できる。

以上の論議は、風作用下の収縮性状についての基本的な考え方を示したものであって、次章では具体的に個々のケースを取り上げその検討結果を述べる。

4. 風作用下におけるモルタル、コンクリートの収縮性状と各種要因との関連について

(1) 風作用下における非拘束供試体の乾燥収縮特性

先章では、水分逸散の特性を調べ乾燥収縮性状についての基本的な推察の結果を述べた。本節では、風作用下の収縮に及ぼす諸要因の影響を検討する。いま、時間 t

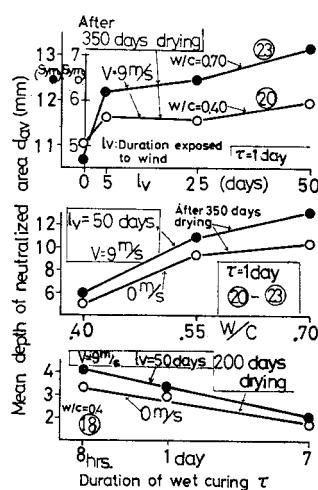


図-12 風作用下における中性化深さ d_n と各種要因の関係

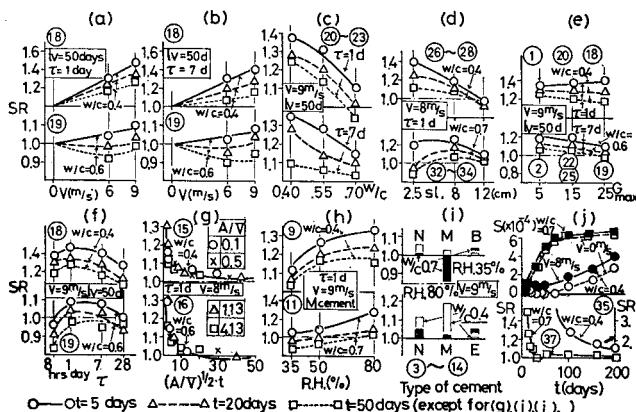


図-13 風収縮比 SR の経時変化に及ぼす各種要因の影響

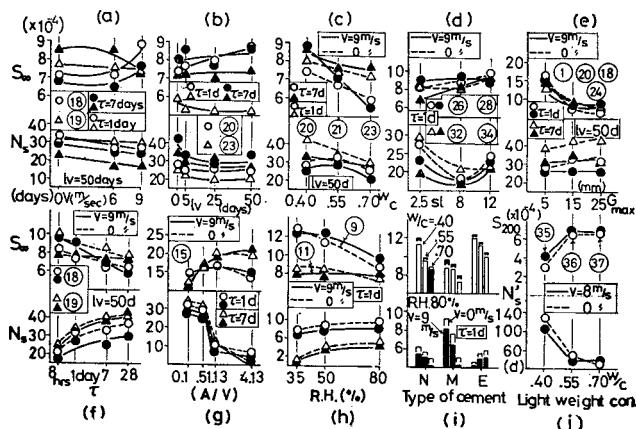


図-14 風作用下における Ross 式定数の変化に及ぼす各種要因の影響

における無風下の収縮量に対する風作用下のそれの比率を風収縮比 SR と定義する。図-13 は風収縮比の経時的变化を各種影響要因との関係で示し、図-14 は Ross 式より定めた最終収縮量 S_∞ および N_s の変化を上記要因との関係で示した例である。以下、両図結果を用いて各要因ごとに考察を行った。

a) 風速および風作用期間の影響

図-13(a), (b) の上図にみられるように、風速 v が増加するにつれ、乾燥初期の収縮進行はすみやかとなり、水セメント比 W/C が 40% 程度と小なる場合、収縮は風速にほぼ比例的に増加する傾向がある。これに対し、 W/C が 60% 程度以上では両図の下図のように、乾燥早期を除けば単なる線形関係はみられず、収縮は無風下より減少する様相を示している。ちなみに、風速 1 m/s の増加により乾燥 5 日の風収縮比 SR は最大 5% 強、乾燥 20 日では 4% 弱程度の増加であって、コンクリート収縮量に換算して、前者で $0.5 \sim 0.8 \times 10^{-5}$ 、後者で $0.8 \sim 1.2 \times 10^{-5}$ 程度となる。図-14(a) から、最終収縮量 S_∞ は風速の増加とともに W/C 40% の場合に

増加、60% では減少の傾向にあって、先の SR の結果と同様である。 N_s 値はとともに風速に逆比例的に減少している。

図-14(b)には、風作用期間 l_v と S_∞ , N_s 値の関係例を示したが、 l_v が増せば S_∞ は W/C 40% の場合で全般に増加傾向、60% では逆に低下傾向を示し、養生期間が短いほどこの傾向は明瞭となる。一方 N_s 値は指指数関数的な減少傾向にあることがわかる。

以上のように、風速が収縮に及ぼす影響は風速レベルおよび風作用期間の2要因の効果でとらえる必要が感じられるが、たとえば風速レベルと風作用期間の積としてこの影響を表わすことも一方法と考えられる。

b) 配合要因の影響

ここでは、水セメント比、スランプ値および骨材の最大寸法の影響を調べた。図-13(c)より風収縮比 SR は水セメント比が小さいほど大きく、この傾向は養生期間の短いほど顕著であるが、各乾燥日数ごとにほぼ負の直線関係が水セメント比との間に成立している。W/C 40% 程度と小なる場合、乾燥 5 日の SR は 1.4、20 日で 1.3 程度であるに対し、W/C 70% では乾燥 5 日で 1.1、20 日で 1 程度となり 50 日では 0.9 強と無風下より減少する様相が認められる。また、図-14(c) より最終収縮量 SR と水セメント比の関係も基本的には SR のそれと同様であることが知られる。

図-13(d) の例より、W/C 70% 低スランプの場合を除き、全般にスランプの増加により SR は減少し、値が 1 を下回るケースも存在することが認められる。図-14(d) の S_∞ 値の傾向も同様である。

骨材最大寸法の影響は、図-13(e)、図-14(e)の例より、水セメント比、養生期間により必ずしも一様でないが、モルタルからコンクリートへ移ると風作用下の収縮進行は無風下に比し速まる傾向にあることが、 N_s 値の変化から推察できる。

以上を考察すると、水セメント比の相違による SR の変化傾向は逸散水の挙動により説明可能であり、低水セメント比高スランプ、高水セメント比低スランプで SR が 1 を下回る結果も、同条件下での逸散水量が無風下より低下していることから本質的に理解される。この条件下での逸散水量の低下は、同一 W/C であってもスランプの変化によりポロシティ特性が変化し、高水セメント比長期養生下の傾向と同様になったためと推察される。しかし、全般にコンクリートの SR はモルタルのそれより変化が著しい傾向にあって、これには粗骨材自身の乾

燥による体積変化挙動や、粗骨材とモルタルの界面のひびわれなどの可能性により、SR が 1 を大きく下回る場合も考えうるのである。これより、配合要因の中で上記各項はそれぞれに風収縮比に対し影響することが知られたが、とりわけ、水セメント比の影響が卓越していることが理解できる。

c) 養生期間の影響

湿潤養生期間 t が SR に及ぼす影響は、図-13(f) の例にみられるように、水セメント比に無関係に 8 時間から 1 日養生の間に最大の SR を与える養生期間が存在するようである。また、図-14(f) での S_∞ 値の傾向にも同様の様相が認められる。これは、水和程度が低いほど自由水の量が増し、風の水分逸散促進の効果が大きいことが主たる原因と考えられる。

d) 部材寸法比の影響

寸法の異なる場合の収縮は、乾燥面積 A 、体積 V および乾燥期間 t として $(A/V)^n \cdot t$ の関数形で表示できるといわれている。Hansen らのデータ⁸⁾によれば $n=2$ 、L'Hermite らによれば $n=1.3 \sim 1.5$ 、さらに Hobbs らによれば $n=1$ が最も適合がよい²⁰⁾とされており各研究者ごとに異なる値となっている。本研究では $A/V = 0.1 \sim 4.125$ の 4 種モルタルで実験を行ったが、図-13(g) の例に示されるように、風収縮比 SR も同様に $(A/V)^n \cdot t$ の関数として表現でき、 $n \approx 0.5$ 程度で統一的に表示可能である。したがって、風作用下の収縮進行を論じる場合、寸法比の影響を十分に考慮すべきであり、 A/V の小さな場合ほど風の影響が長期持続されることになる。これは、乾燥が表面部より進行することを想起すれば理解し得ることと思われる。

e) 相対湿度の影響

図-13(h)、14(h) などより、風収縮比 SR は低湿度から高湿度条件に移るにつれ増加の様相が顕著となり、R.H. 50% での SR を 1 とすると、R.H. 80% および 35% の SR 値は約 1 割弱それぞれ増加、減少することになる。風速 9 m/s R.H. 35% 下で W/C 70% の場合、

逸散水量は無風下に比し多少増加するが、収縮は逆に 15% 程度も低下する結果も認められる。これは、低湿度の厳しい乾燥条件と風速の効果が相乗し、試料強度と関連した微細ひびわれの発生をみたのではないかとの推察が可能である。R.H. 80% 下では風による水分乾燥効果が大きく、収縮を促進させたと考えられる。 S_∞ 値にも同様の傾向が明瞭にみられ、 N_s 値は湿度の増加につれて風作用下での減少が顕著となった。

f) セメント種別の影響

セメント種類を変え、風作用下のモルタルの収縮性状の違いを調べた結果の一例を図-13(i)、14(i) に示した。同一養生期間で比べた場合、風作用の影響が最も大きいのは中庸熱セメントを用いた場合であって、e) で述べた低湿度下高水セメント比で SR が 1 を相当に下回る様相、逆に高湿度下での増加が顕著である。早強セメントでは、水セメント比の影響は普通セメント使用時の傾向と逆の様相がみられた。これら風収縮比の大きさに順位をつければ、R.H. 35% 下では普通≈高炉 B 種>中庸熱の順となり、R.H. 80% 下では中庸熱>普通≥早強の順となる。これには、強度発現の遅速および内部組織の緻密さなどが深くかかわっているように思われる。表-4 は普通セメント使用時の $t=5$ 日、10 日、50 日の風収縮比を単位値 1 として、他種セメント使用時のそれらを割合で示したもので、セメント種別の影響度の判定に利用できる。

g) 軽量コンクリートの収縮特性

図-13(j) および 14(j) に、第一種軽量コンクリートについて得られた風収縮比および $t=200$ 日の収縮量 S_{200} および $S_{200}/2$ に達する日数 N_s' を示した。これより、軽量コンクリートの収縮は、風作用下で比較的すみやかに進行する様相にあり、その程度は水セメント比の小なるほど顕著で、風の影響が長期持続する傾向がみられるに対し、水セメント比が大きくなると普通コンクリートと同様、乾燥の初期のみに風の影響が限定されるようになる。これは、第二種軽量コンクリートでも同じ傾

表-4 各種セメント使用における風収縮比への影響度

Relative Humidity (%)	Normal P.C. (N)	High-Early-Strength P.C. (E)			Moderate Heat P.C. (M)			Blast-Furnace Slag C. (B)			Drying Time (days)
		W/C 0.40	0.55	0.70	W/C 0.40	0.55	0.70	W/C 0.40	0.55	0.70	
35	1.0	—	—	—	1.02	1.00	0.95	0.98	1.01	1.03	5
	1.0	—	—	—	1.00	0.98	0.94	0.96	0.98	1.05	10
	1.0	—	—	—	1.01	0.99	0.93	0.97	1.00	1.01	50
50	1.0	1.04	0.99	0.96	1.09	1.09	1.08	—	—	—	5
	1.0	1.06	1.01	1.01	1.07	1.08	1.06	—	—	—	10
	1.0	1.00	1.04	1.05	1.06	1.06	1.05	—	—	—	50
80	1.0	0.92	1.04	0.99	1.11	1.09	1.15	—	—	—	5
	1.0	0.93	1.04	0.98	1.08	1.07	1.12	—	—	—	10
	1.0	0.96	1.02	1.02	1.02	1.04	1.05	—	—	—	50

向を示している。この原因を考察すれば、水セメント比大なる場合、ペースト組織は比較的ポーラスであって、乾燥初期の水分逸散速度は風により増大するものの、これはおもに内部骨材中の含水分の損失によりまかなわれるため、収縮に及ぼす影響は重要でないであろう。一方、水セメント比が小なる場合では、ペースト組織は密実であって、乾燥に伴い骨材中の水分はペースト部へ徐々に補給されるため収縮の進行は遅れることになる。しかし風作用は表面部の湿度低下を速め、内部水分の表面への移動を促進するため、内部へ乾燥が進行してゆくとペースト部の収縮は助長され、コンクリート自体の収縮が促進されることになると考えられる。これには軽量骨材自身の体積変化特性も少なからず関与している²¹⁾ことが推察される。なお、収縮が急速に進行を開始する時期は、骨材中に保有された水分量に匹敵する水が失われる時点にほぼ対応することも明らかとなった。

以上のように、軽量コンクリートでは骨材中の水分の
果たす役割は大きく、普通コンクリートと同一視できない
面が存在するが、風の影響は特に水セメント比の小なる
場合に重要であることが理解できる。

(2) 風作用下の収縮に及ぼす鉄筋の拘束効果について

一般に RC 部材の収縮を考えた場合、コンクリートと鉄筋間の付着力に依存して収縮の程度が定まるといわれる。そこで、普通丸鋼および異形棒鋼を用い鉄筋比 0.57~2.88% の範囲で $W/C=40\%$ および 60% モルタルについて風速 6 m/s の条件下での収縮性状を調べた。非拘束収縮量を S_p 、鉄筋拘束下の収縮量を S_r として、収縮拘束率 ξ は

$$\xi = 1 - S_r/S_p \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

と表現される。図-15 には ξ と乾燥時間 t との関係を示したが、これより、無風下に比べて風作用下の ξ は増加傾向にあって、その増加率は最大 4 割程度にも達し

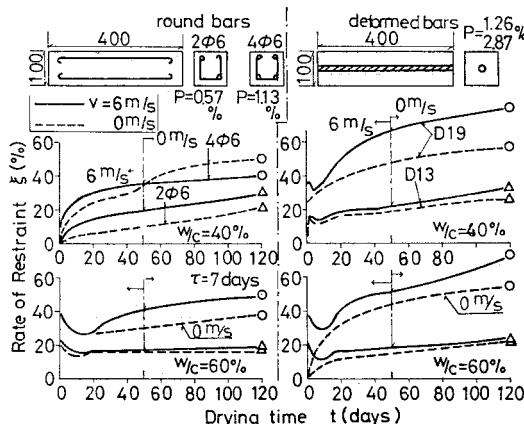


図-15 内部鉄筋の収縮拘束効果に及ぼす風の影響

ていることがわかる。鉄筋比が 1% を超す場合では、ひびわれ発生が観察されたが、その概要を以下に記す。風速 6 m/s 下の表面ひびわれは $W/C=40\%$ の場合、 $\phi 6 \text{ mm}$ 丸鋼 4 本使用で 6 日、D 19 mm 異形使用で 5 日で生じ、貫通ひびわれは前者で 40~45 日、後者で 30~35 日程度で生じたのに対し、無風下では前者丸鋼の場合の表面ひびわれ 9 日、後者異形で 8 日、貫通ひびわれはそれぞれ 50~55 日、および 40 日程度と、風作用下で相当に発生の時期が速まる傾向にある。さらに、 $W/C = 40\%$ と 60% を比較すると、水セメント比の大きい後者の場合に発生日数が遅くなっている。なお、本実験での貫通ひびわれ発生時の拘束ひずみ量を求めるとき、風作用下では $3.9 \sim 4.9 \times 10^{-4}$ 程度であって、無風下の $3.5 \sim 4.4 \times 10^{-4}$ より多少大きく評価された。

次に、鉄筋比 P および収縮拘束率 ξ を用い、コンクリートおよび鉄筋に働く力のつり合いからヤング係数比 n の変化傾向を貫通ひびわれ発生前の $t=20\sim30$ 日で計算より求めた。この結果から、同一乾燥日数での n の値は同一鉄筋比レベルでは、細丸鋼を数本用いた方が異形鋼を 1 本埋め込む場合より大きく算出された。これは付着拘束のため同一鉄筋比でも分散配置した方が拘束が着実に行われるためで、 ξ の値からもこの傾向はうかがえる。さらに、無風下の n に対する風作用下のそれの比率は、平均して丸鋼使用で 1.3、異形使用で 1.6 程度と見積られた。これは、風作用下では無風下に比し弾性係数が低下する¹⁶⁾、あるいはクリープの増加¹³⁾が理由として推察されるが、異形鋼使用の場合には付着機構の変化も関連しているように思われる。このように、風作用下では見掛け上伸び能力が増加する様相を示す反面、鉄筋による収縮拘束がすみやかで大きいことを示しており、これら結果は RC 部材のひびわれに関して風作用を無視できず、設計、施工の際の留意点としてとらえる必要性を示唆している。

5. 風作用下におけるコンクリートの収縮進行の評価と予測について

前章での検討から、風の収縮進行に及ぼす影響は特にコンクリート試料で重要であることが知られたので、本章では風作用下のコンクリートの収縮特性の評価および予測の可能性について考察を進めた。

任意時間 t における風作用下の収縮量 S_v は、無風下のそれを S_0 、風収縮比 SR として以下のように表現できる。

あるいは

上式において、サフィックス 0 および \wedge はそれぞれ無風
および有風条件下の値であり、 \wedge 印は推定値であることを示す。式 (5), (6) から風収縮比の推定値 \hat{SR} は次の
ようにも表現できる。 $\varphi_{\infty} = S_{\text{pos}} / S_{\text{pos}}$ とおいて

$$\begin{aligned}\text{SR} &= (\hat{N}_{os} + t) / (\hat{N}_{vs} + t) \cdot \hat{S}_{v\infty} / \hat{S}_{0\infty} \\ &= (\hat{N}_{os} + t) / (\hat{N}_{vs} + t) \cdot \hat{\rho}_\infty \quad \dots \dots \dots (7)\end{aligned}$$

いま、湿度条件、セメント種別および寸法比の影響について前章の結果より別途考慮することとする。普通ポルトランドセメント使用、乾燥面積/体積比 $A/V = 0.5$ 、相対湿度 50% 下における統計 95 種類の普通コンクリート非拘束収縮データを用いて、重回帰分析法（ステップワイズ法）の適用を試みた。これは、風作用下の収縮に及ぼす各要因の影響を個別に定量化することは時間のファクターを考慮する必要等より複雑化し困難と判断されたためである。目的変量として、(1) 乾燥 5 日、10 日および 50 日における風収縮比 SR 、(2) 最終収縮量の推定値 S_∞ および $S_\infty/2$ に達する日数 N_s (Ross 式定数) の 2 ケースを選んだ。

説明変量として用いた要因は、風速 v (0~9 m/s), 総受風日数 l_v (0~100 日, Ross 式定数推定用) あるいは実受風日数 l_t (風収縮比の直接推定用), 湿潤養生期間 τ (0.33~28 日), 水セメント比 W/C (0.40~0.70), 単位ペースト量 V_p (0.253~0.359 m³/m³) および骨材最大寸法 G_{\max} (15~25 mm) であるが、実際には風の影響は $v \cdot l_v$ あるいは $v \cdot l_t$ の形, すなわち風速と受風日数の積の形を一要因として用いた。なお, l_t は乾燥開始より t 日までに受風した日数で、一試験条件の総受風日数と区別して用いた。さらに、上記で変量としてサンプル値を用いずペースト量を選んだのは、計算で容易に求め得る点や、収縮表示の一般性を考慮したためであ

る。

ステップワイズ法により最終的な回帰式を得る過程での説明変量の選択には、 F 検定法が用いられたが、この際、変量選択の幅をなるべく広くする方針から検定基準を $\alpha=10\%$ とした。次に、風収縮比を直接回帰より定める場合、データとして無風時 ($SR=1$) を含めた場合と有風時ののみの場合の2ケースに分けて解析を行い、Ross 式定数を回帰により定める場合は、 S_∞ 値の傾向が水セメント比により相違することを考慮して、 $W/C = 55\%$ を境にそれ以下の場合とそれより大なる場合に区分して解析を行った。なお、回帰式としては各説明変量のべき乗積の式形を選択した。

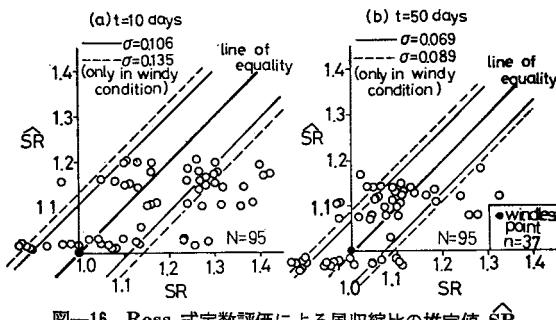
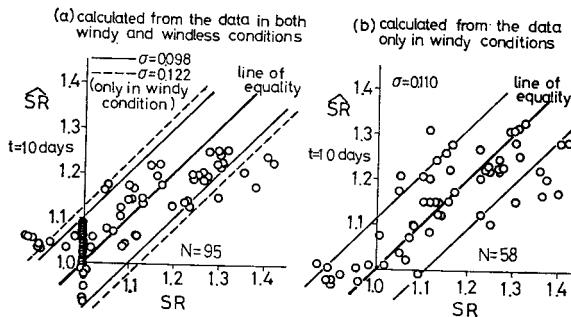
このようにして算定した結果を表-5に示したが、式(8)～(10)は無風時を含め直接評価されたSRを、式(11)～(13)は有風時のみのデータから定められたSRを示し、式(14)～(19)はRoss式定数の算定式を示す。同表には重相関係数も併記した。これより、 S_{∞} および N_s 値評価の寄与率は50%程度であり、SRのそれは乾燥日数5日で最大65%，50日で40%程度と変化している。

次に、これらを用いて実測の SR との対比を試みた。図-16 は Ross 式定数の評価式を先の式(7)へ代入し求めた $t=10$ 日および 50 日の \hat{SR} と実測の SR の関係を示し、図-17 は式(9)より推定した $t=10$ 日の \hat{SR} と実測 SR の関係を(a)に、式(12)より同様に定めた \hat{SR} について(b)に示してある。図-16 から、Ross 式定数より算定した \hat{SR} は実測値との適合は良好といえず、実測の SR が 1 を下回る場合および 1 より相当大なる場合の推定誤差は大きい。が反面、 $t=50$ 日と乾燥が進行した場合ではこの関係に改善が認められる。図-17 より、無風時を含めて評価した場合よりも、有

表-5 重回帰分析による SR および Ross 式定数の評価式

In case containing the data in windless condition	$SR_t=5\text{days}=0.517(v \cdot l_t + 1)^{0.0367} \cdot (W/C)^{-0.523} \cdot V_p^{-1.284} \cdot G_{\max}^{-0.381}$	$(R=0.755)$ $(\sigma=0.121^*)$	(8)
	$SR_t=10\text{days}=0.570(v \cdot l_t + 1)^{0.0506} \cdot (W/C)^{-0.198} \cdot V_p^{-0.920} \cdot G_{\max}^{-0.259}$	$(R=0.729)$ $(\sigma=0.122^*)$	(9)
	$SR_t=50\text{days}=0.687(v \cdot l_t + 1)^{0.0065} \cdot (W/C)^{-0.277} \cdot V_p^{-0.467} \cdot G_{\max}^{-0.115}$	$(R=0.570)$ $(\sigma=0.093^*)$	(10)
In case of the data only in the windy condition	$SR_t=5\text{days}=0.807(v \cdot l_t + 1)^{-0.197} \cdot (W/C)^{-0.654} \cdot V_p^{-2.142} \cdot G_{\max}^{-0.656}$	$(R=0.810)$ $(\sigma=0.105)$	(11)
	$SR_t=10\text{days}=0.315(v \cdot l_t + 1)^{0.0623} \cdot (W/C)^{-0.720} \cdot V_p^{-1.563} \cdot G_{\max}^{-0.414}$	$(R=0.740)$ $(\sigma=0.110)$	(12)
	$SR_t=50\text{days}=0.500(v \cdot l_t + 1)^{0.0199} \cdot (W/C)^{-0.451} \cdot V_p^{-0.789} \cdot G_{\max}^{-0.191}$	$(R=0.649)$ $(\sigma=0.089)$	(13)
$W/C \leq 55\%$	$\phi_{\infty} = (v \cdot l_v + 1)^{0.0128}$		(14)
	$N_{vs} = 618 \cdot (v \cdot l_v + 1)^{-0.0193} \cdot \tau^{0.101} \cdot (W/C)^{2.203} \cdot V_p^{3.854} \cdot G_{\max}^{0.986}$	$(R=0.727)$ $(\sigma=5.232)$	(15)
	$S_{v\infty} = 54.4(v \cdot l_v + 1)^{0.0128} \cdot \tau^{0.0296} \cdot (W/C)^{0.667} \cdot V_p^{3.066} \cdot G_{\max}^{0.691}$	$(R=0.723)$ $(\sigma=1.081)$	(16)
$W/C > 55\%$	$\phi_{\infty} = (v \cdot l_v + 1)^{-0.0123}$		(17)
	$N_{ys} = 23.6(v \cdot l_v + 1)^{-0.0231} \cdot \tau^{0.128}$	$(R=0.719)$ $(\sigma=5.071)$	(18)
	$S_{v\infty} = 36.7(v \cdot l_v + 1)^{-0.0123} \cdot \tau^{0.053} \cdot V_p^{1.000} \cdot G_{\max}^{-0.122}$	$(R=0.764)$ $(\sigma=1.149)$	(19)

* calculated only from the data in windy condition

図-16 Ross 式定数評価による風収縮比の推定値 \hat{SR} と実測 SR の関係図-17 風収縮比の直接推定値 \hat{SR} と実測 SR の関係

風時だけで評価した \hat{SR} の方が、実測 SR の傾向によく追従しており、精度的にも向上しているのが認められる。以上から、Ross 式定数による評価法は、任意時間の推定が容易である反面、精度的には劣る点が指摘され、風収縮比を重回帰表示した場合は、精度上および適

表-6 風作用下における収縮進行予測のための補正係数値

Type of Cement	Normal P.C. (N)	High-Early Strength P.C. (E)	Moderate Heat P.C. (M)	Blast-Furnace Slag C. B Type (B)
α_C	1.0	1.020	R.H. 35% 0.970 50% 1.060 80% 1.090	1.000
β_C	1.0	1.156 (1.128)	0.858 (0.843)	0.905 (0.920)
τ_C	1.0	1.040 (1.069)	1.266 (1.313)	0.908 (0.908)
Relative Humidity	35%	50%	80%	
α_R	0.920	1.0	1.085	
β_R	1.166 (1.181)	1.0	0.764 (0.726)	
τ_R	0.797 (0.833)	1.0	1.336 (1.320)	
Ratio of Drying Surface Area to Volume (A/V)	0.1	0.5	1.125	4.125
α_S	1.05	1.0	0.98	0.94
β_S	1.97	1.0	0.72	0.40
τ_S	0.95	1.0	1.02	1.07

The figure in parenthesis corresponds to windless condition.

合性も前者に比し良好と判断された。したがって、得られた式(8)～(13)中の回帰係数の時間変化を考慮すれば、 $v \cdot l_v < 1000(\text{m/s}) \cdot \text{day}$ 程度の受風条件下の任意時間の収縮推定が式(4)等を用いることにより可能と思われる。

最後に、セメント種類、相対湿度および寸法比の補正については、それぞれ C , R および S を対応するサフィックスとして、普通ポルトランドセメント使用、R.H. 50% さらに乾燥面積/体積比 $A/V = 0.5$ の場合をおののおのの単位値 1 として次のようにする。風収縮比の補正係数を α_C , α_R , α_S とし、Ross 式定数の S_{∞} および N_{∞} に対してはそれぞれ β_C , β_R , β_S および τ_C , τ_R , τ_S とし、無風時も含め考える。いま、基本条件における風収縮比の推定値を \hat{SR} 、異種のセメント、相対湿度および寸法比下のそれを \hat{SR}' とすれば、

$$\hat{SR}' = \alpha_C \cdot \alpha_R \cdot \alpha_S \cdot \hat{SR} \quad \dots \dots \dots (20)$$

のように表わすことができる。これら補正係数は前章での検討をもとに評価されたが、その結果を表-6 に示した。

以上から、基本条件の \hat{SR} および表値を適当に用いることにより、任意条件における風作用下の収縮予測が、ある範囲内の精度で可能であると判断される。

6. 結 語

以上の検討結果を総括すれば、次のようなになる。

(1) 風の水分逸散促進に及ぼす作用が最も顕著となるのは、乾燥後 2 時間程度経過した時点であったが、それ以降の逸散に及ぼす影響にも看過できない点があり、その程度は、配合その他多くの要因に関連して定められることが明らかとなった。

(2) 風作用下の水分逸散の形態は、ニュートンの冷却則に準じた境界条件を考慮することにより拡散理論でほぼ説明可能であり、風作用下では表面係数 f は無風下に比し相当に増大し、拡散係数 k は水セメント比により多少異なるが、ほぼ試験開始材令が 7 日程度を境にそれ以前の材令では増加、以降では減少する傾向にあった。これらより、風作用下では、初期の急激なる水分逸散と、拡散係数の上記変化傾向や、炭酸化などの影響がからみ合って、個々の逸散傾向が特徴づけられると考えられる。

(3) 風作用下の水分逸散～収縮の関係は、一般的な傾向として無風下のそれとは水分逸散が拡散により支配される時期近くから相違する様相にあり、同一収縮量を得るに必要な逸散水量が増加する傾向にある。これは湿潤養生が短期で水セメント比の大きな試料で顕著であつ

た。結局、3. で論議されたように、風作用下の収縮発現性状は、水分逸散の総量とこの関係の無風下との相違の大小の程度によりおおむね定められると判断できる。

(4) 風作用下の非拘束のモルタル、コンクリートの収縮性状は、水分逸散の様相と関連して多くの要因の影響を受け変化することが認められ、個々の要因の影響程度が検討された。この結果、特に風による収縮促進に強く関連する因子として、風速レベル、養生期間、水セメント比、湿度条件などが指摘された。風作用下では、これらの因子が交錯し合って個々の収縮性状が発現されるものと考えられる。

(5) 内部鉄筋で拘束を受ける場合の収縮性状に及ぼす風の影響が検討され、拘束度の増大、ひびわれ促進傾向が明らかとなった。

(6) 重回帰分析手法により、風作用下の収縮進行に関する一評価式を得た。また、これを用いてある範囲内で風作用下の収縮予測が可能と判断された。

(7) 以上より、構造物が厳しい風作用を持続して受けけると予想される場合には、できるだけ風を避ける対策を講ずる必要がある。これには、防湿性被膜による保護、シートによる被覆あるいは型枠存置期間の延長などが処置として望まれる。これが不可能な場合、なるべく早強性のセメントを用いることや、一般に水セメント比、骨材寸法は事前に決定されている場合が多いので、所要の強度、耐久性を損なわない範囲でセメント量を抑制し、高品質骨材の使用、極端に硬、軟のコンシステンシーを避け材料分離などを起こさぬ配慮が必要であり、これには混和剤の適切な使用も重要なと思われるが、十分なる温潤養生の実施と併せて、有効な対策となり得ると考えられる。

本研究を行うにあたり、ご支援いただきました北海道大学、藤田嘉夫教授に厚く御礼申し上げるとともに、実験装置の製作や実験、資料整理など、研究全般にわたり多大なご助力をいただいた秋田高専土木工学科科技官、米谷 裕氏に深く感謝の意を表します。

なお、本研究は、著者の一人に対し与えられた昭和 52 年度土木学会吉田研究奨励金および昭和 55 年度文部省科学研究費（奨励 A）により行われたものであることを付記する。

参考文献

- 1) 岡田 清：過酷環境下のコンクリート、コンクリート工学、No. 170, pp. 2~9, 1979.
- 2) Powers, T.C. : Mechanism of Shrinkage and Reversible Creep of Hardened Paste, Proc. of International Conference of Structure of Concrete, London, pp. 319

~343, 1965.

- 3) Hobbs, D.W. and A.R. Mears : The Influence of Specimen Geometry upon Weight Change and Shrinkage of Air-Dried Mortar Specimens, Magazine of Concrete Research, Vol. 23, No. 75~76, pp. 89~98, 1971.
- 4) Pickett, G. : Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and Hypothesis Concerning Shrinkage, Jour. of A.C.I., Vol. 52, No. 5, pp. 581~590, 1956.
- 5) 大野和男：モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究、北大工学部研究報告、No. 9, pp. 49 ~110, 1953.
- 6) 岸谷孝一・馬場明生：建築材料の乾燥収縮機構、セメントコンクリート、No. 346, pp. 30~40, 1975.
- 7) Carlson, R.W. : Drying Shrinkage of Concrete as Affected by Many Factors, Proc. of A.S.T.M., Part 2, Vol. 38, pp. 419~437, 1939.
- 8) Hansen, T.C. and A.H. Mattock : Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete, Jour. of A.C.I., Vol. 63, No. 2, pp. 267 ~290, 1966.
- 9) たとえば、Pickett, G. : Shrinkage Stress in Concrete, Jour. of A.C.I., Vol. 17, No. 3, pp. 165~195, No. 4, pp. 361~398, 1946.
- 10) 田中一彦：コンクリートの乾燥による自由収縮とキレツに関する研究、日本建築学会論文集 52 号, pp. 7~13, 1956.
- 11) 向井 翁：鉄筋で拘束されたコンクリートの乾燥収縮およびびれつに関する検討、コンクリートジャーナル, Vol. 8, No. 11, 1970.
- 12) Lerch, W. : Plastic Shrinkage, Jour. of A.C.I., Vol. 53, pp. 797~802, 1957.
- 13) Hansen, T.C. : Effect of Wind on Creep and Drying Shrinkage of Hardened Cement Mortar and Concrete, Material Research & Standards, pp. 16~19, 1966.
- 14) 庄谷征美：風作用を受けるコンクリートの乾燥収縮特性について、セメント技術年報 XXXI, pp. 297~301, 1977, 同 XXXII, pp. 361~364, 1978.
- 15) 庄谷征美：風作用下におけるコンクリートの収縮特性に関する基礎的研究、材料 28 卷, 305 号, pp. 132~138, 1979.
- 16) 庄谷征美・米谷 裕：風作用下におけるコンクリートの収縮特性について、土木学会第 36 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部, pp. 318~319, 1981.
- 17) 東京天文台編：理科年表 (1978, 1979, 1980), 丸善.
- 18) 林 昭富ほか：耐海水性コンクリートの耐久性に関する研究、土木学会第 34 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部, 1979.
- 19) Shoya, M. : Drying Shrinkage and Moisture Loss of Super Plasticizer Admixed Concrete of Low Water Cement Ratio, Trans. of J.C.I., pp. 103~110, 1979.
- 20) Hobbs, D.W. : Influence of Specimen Geometry upon Weight Change and Shrinkage of Air-Dried Concrete Specimens, Magazine of Concrete Research, Vol. 29, No. 99, pp. 70~80, 1977.
- 21) 後藤幸正・藤原忠司：乾燥に伴う骨材の体積変化、土木学会論文報告集、第 247 号, pp. 97~108, 1976.

(1982.1.14・受付)