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*

庄 谷 征 美**

Drying Shrinkage of Concrete due to Wind Action

by

Masami SHOYA

(Akita Technical College, Akita)

In order to clarify the effects of wind velocity on the drying shrinkage and development of shrinkage stress of concrete members, the shrinkage tests were performed by using an experimental blower and the analysis was made based on the diffusion theory proposed by Pickett.

Mortar prisms having six kinds of mix proportions were used as the test specimens and three different wind velocities, 0, 5.6 and 9 m/sec, were examined. The results obtained are summarized as follows:

(1) At the early stage of drying, shrinkage was enhanced in a windy condition more rapidly than in a windless condition. Its rate of increase was nearly proportional to wind velocity. The final shrinkage value estimated from the hyperbolic experimental equation also increased with wind velocity.

(2) The loss of moisture was accelerated in the initial stage of drying as the wind velocity was increased. The younger the age of specimen tested, the more remarkable its tendency. It was confirmed that the mechanism of the increase in shrinkage due to wind action was closely related to that of moisture loss.

(3) Both the diffusivity of shrinkage and the surface factor in the diffusion equation increased due to wind action, but the rate of increase for the surface factor was much larger than that of the diffusivity.

(4) The shrinkage stress at the exposed surface of mortar evaluated by using the above factors showed the following trends. The maximum value of the shrinkage tensile stress became larger, the time to reach the maximum stress became shorter, and the stress fell more rapidly from the maximum in a windy condition than in a windless condition.

(5) Prolonged wet curing and lowering the paste content are recognized effective in order to prevent the increase in shrinkage and the development of shrinkage cracks by wind action.

(Received Feb. 20, 1978)

キー・ワード：風作用，乾燥収縮，収縮応力

1 緒 言

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート構造物にひび割れを発生させる原因のうち、特に重要なものとして古くから研究が進められてきた課題である。

収縮の機構については、物理、化学的面よりの検討が近藤¹⁾、Powers²⁾らにより詳細になされ、主に水分の逸散の観点からの実験的検討はHobbs³⁾ら、田沢⁴⁾らにより行われた。収縮の複合機構の面から、大野⁵⁾を先駆に、Pickett⁶⁾その他により収縮の複合式が与えられた。収縮に影響する配合⁷⁾、寸法、湿度等の内的、外的因子に関しては、Lyse⁸⁾らをはじめ多くの報告がある。

Rickett⁹⁾は収縮に拡散理論を適用し、収縮応力算定の手法を示し、我国では岡田⁹⁾、大浜¹⁰⁾らがこの種の問題を検討した。

このように多面にわたり、幾多の知見が得られているが、昨今のコンクリート構造物の多様性や、広範囲にわたる環境条件下での建設の必要性などを考慮すれば、この問題についてさらに検討を進める意義は大きいと思われる。

コンクリートの乾燥収縮を支配する要因のうち、特に環境条件の影響は顕著である。我国の気象条件のうち、風速は日平均で3~4 m/sec以上の所が多く、また、日最大風速は10 m/sec以上の日が通年で50日以上にも達しているようであり、¹¹⁾¹²⁾気象作用のうちでも、風は

* 原稿受理 昭和53年2月20日

** 正会員 秋田工業高等専門学校 秋田市飯島文京町

無視できないものの一つとして認識する必要があると判断される。

風作用は、¹³⁾ plastic shrinkage に関してその影響が論じられているが、硬化コンクリートについて、収縮に及ぼす影響を量的に評価しようとした例は少いように思われる。風は、コンクリートの乾燥を助長、促進する一要因であり、特に、海洋構造物などのように風作用を厳しく受けると考えられる場合、ひび割れ発生による機能低下に関連する問題として、この影響を考える必要があると思われる。

本論文は、以上の観点より、コンクリートの乾燥収縮に及ぼす風作用の影響を明らかにするために行った基礎的研究の結果を述べるものである。実験は、室内においてモルタルを試料として実施し、試作送風機を用いて三種の風速条件下における乾燥収縮性状、重量変化特性を調べた。さらに、Pickett により提唱された収縮拡散方程式中の拡散特性値を評価し、これらを用いて、収縮応力の傾向について若干の考察を試みた。

2 実験

2・1 使用材料および配合

試料としては、モルタルを用いた。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材としては、2.5 mm 以下の全量通過させた川砂（比重2.54、吸水率2.57%、粗粒率2.37）を使用した。

配合は、単位水量を 280 kg/m^3 と一定にし、水セメント比を40, 50, 60および70%と変化させた場合、および水セメント比50%において単位水量240 および 320 kg/m^3 の2種を加え、計6種とした。なお、モルタルの流動性は単位水量により変化した。単位水量 280 kg/m^3 の場合、フロー値で $180 \pm 10 \text{ mm}$ 程度であった。

2・2 供試体および試験項目

供試体の形状、寸法は、 $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ の三連型枠を使用した角柱供試体である。練りまぜにはモルタルミキサーを使用し、供試体は材令1日で脱型、以後供試材令まで標準水中養生を行った。

実験項目は、シールなしの全面乾燥供試体については、乾燥収縮量、重量変化の測定であり、五面シールの一面乾燥体については、 $y=b/2$ 地点の平均ひずみの測定、および四面乾燥体では、一部について曲げ強度の測定を行った。シールはパラフィンを用いて行い、その防湿性を予備実験より確認した。

2・3 実験方法の概要

収縮量の測定には、 $1/1000 \text{ mm}$ 読みのコンタクト型ストレインゲージを用い、検長は 100 mm とした。標点用として、張り付け型および埋め込み型の2種の真鍮製チップを使用した。測定に用いた供試体数は、同一配合、同一試験条件に対し3本を原則とした。

乾燥収縮試験は、相対湿度50%、温度20℃に保たれた恒温恒湿室内で実施した。風は、同室に設置した風洞部を有する試作の送風装置により発生させた。この略図を Fig.1 に示す。本実験では0, 5.6 および 9.0 m/sec の3種の風速を実験条件として選定したが、風速は断面の平均風速を代表値とした。

重量測定は 0.5 g 感量、 5 kg 秤量の台ばかりによった。

Fig. 1. Sketch of the blower used in test.

2・4 実験値の整理

得られた各風速下の収縮データを整理するため、日本建築学会等で使用されている双曲線型実験式¹⁴⁾を採用した。Sを収縮ひずみ、tを乾燥日数とすると

$$S = \frac{t}{a + bt} \quad (1)$$

が成立する。a, bは実験定数であり、 $1/b$ は収縮ひずみの最終値 S_∞ を与え、 a/b はひずみが $S_\infty/2$ に達する日数Nを表す。定数決定は最小二乗法によった。

3 実験結果

3・1 乾燥収縮性状に及ぼす風の影響

測定された収縮データは(1)式により整理された。この一例として、Fig.2 には、水セメント比40%、供試材令7日の全面乾燥供試体について得られた結果を示す。これより、実測値と(1)式の適合の良いことが確認できる。

風作用を受けた場合、図中で風速の大きな場合ほど

Fig. 2. Shrinkage-time relation of the specimens having water cement ratio 40% and the experimental hyperbolic equation.

日数 N が減少していることから理解されるように、乾燥初期において収縮のちがいが速やかで大きくなる傾向が認められる。これは、張り付け型の標点、すなわち表面ひずみに関して著しく、風速の大きさにほぼ比例して収縮ひずみが増大する様相を示す。しかしながら、乾燥が進行すれば、無風時との収縮ひずみの差は漸減する傾向となる。この関係を調べるため、Fig. 3 には、無風時の収縮量に対する風作用時の収縮量の割合と、乾燥日数の関係を示した。これより、風速 9 m/sec の条件下では、乾燥10日で最大45%、30日で35%および50日では20%も収縮が増加する場合の有ることが認められる。(1)式より評価された S_{∞} 推定値では、最大15%程度大きくなる例もみられた。これらの傾向は、水セメント比が小さく、単位水量の多い配合ほど著しくなった。水セメント比が70%程度と大きな場合には、乾燥の進行につれて、風作用時の収縮量が無風時より小さくなる傾向にある。この原因を推測すれば、激しい水分逸散作用の持続により、ペースト自体の強度に関連した表面部の微細ひび割れ発生もその一つとして考えられる。全般的には、風作用は環

Fig. 3. Ratio of shrinkage of specimen in the windy condition to that in the windless condition.

境湿度の低下と同様の影響を及ぼすものと判断される。

張り付け型および埋め込み型標点を用いた供試体について、供試材令の変化に伴う収縮量～時間曲線および S_{∞} 値の傾向を検討した。その結果、乾燥を開始する材令が長いほど、収縮に及ぼす風作用の影響が少くなる傾向にあることが認められた。これは、水和程度、すなわちコンクリート組織の緻密さに帰因するものと考えられる。

Fig. 4 は、配合条件による二つの

Fig. 4. Relationship between shrinkage and the volume of paste in the windy and windless condition.

ケースに分けて、各風速下の収縮量とペースト量の関係を検討した結果を示したものである。これによると、同一水セメント比では単位水量の増加に、同一単位水量では水セメント比の低下により、すなわち、ペースト量の増加によって、風作用時と無作用時の収縮量の差が増大する傾向にあることが理解できる。

3・2 風作用下における重量変化特性と収縮性状の関係

風作用の影響を考察するうえで、重量変化特性の把握およびこれと収縮性状の関連性を調べることは、重要であろうと考えられる。

本実験での重量変化の様相は、次のごとくであった。すなわち、風作用により、乾燥の初期においては水分の逸散が促進され、逸散水量は無風時に比べ増加する傾向を示す。乾燥が進行してくると最終的には炭酸化によると思われる重量増加現象が認められたが、風作用はこの程度に影響を及ぼす傾向がみられた。

これらをもとに、Fig. 5 には、水分逸散量 W' と収縮量 S の関係を示した。Hobbs らによれば、無風下の重量変化と収縮の関係は、Fig. 5 中に実線で例示し

Fig. 5. Relationship between moisture loss and shrinkage.

ような5段階の区分がなされ、第Ⅰ段階はキャピラリーからの水分逸散が、第Ⅲ段階は拡散による水分逸散が、また第Ⅴ段階は炭酸化による重量増加がそれぞれ卓越する期間であり、第Ⅱおよび第Ⅳ段階は遷移期に相当する期間である。これを参考に本実験を検討すれば、無風時においてこの5段階による区分が妥当であることが確認できる。また、風速 9 m/sec 条件下においても、このHobbs らの段階による区分ができるようである。これを詳細にみると、風速条件下では第Ⅰ～第Ⅱ段階にあたる区間の $W' \sim S$ 関係は無風下と差は認められないが、より速やかに次の第Ⅲ段階に移行する傾向にある。この拡散による水分逸散が卓越する段階以降では、無風下と風速下における $W' \sim S$ 関係は分離する傾向を示し、風速下では無風下と同一逸散水量に対応する収縮量が小さくなるような傾向になる。つぎにⅣ段階の遷移期を経て、第Ⅴ段階に移行するが、風速下では、この移行時の水分逸散量、収縮量ともに無風下より増大する傾向にある。第Ⅴ段階における重量増加の程度は無風下の方が大きく、風速下では見掛け上重量増加が抑制されているような様相を示している。重量変化および上述の傾向は、高水セメント比、および湿潤養生期間の減少に伴い顕著になるようである。

これをさらに検討するため、Fig.6 には、水分逸散速度 dW'/dt 、収縮速度 dS/dt を平均水分逸散量 $\bar{W}'$ に関連させ示した。乾燥の初期段階では、風速下における水分逸散速度と収縮速度はともに無風下より増大し、両者の増加が良く対応すること、乾燥が進み先の第Ⅲ段階の後期からⅣ段階以降では収縮速度が無風下よりいくぶん大きくなる傾向もあり、さらに長期養生を行った場合、風の及ぼす影響は乾燥のごく初期だけに限

られてくることなどが認められる。

以上のように、配合および養生期間などの条件の相違により風の影響に差が生じるが、風作用下では拡散期に対応する段階以降でその水分逸散形態が無風下のそれと相違してくることが考えられ、これと収縮機構の関係のさらに充分なる検討を含め、今後の課題として検討を進めていきたい。

4 風作用下における収縮拡散特性値の評価と収縮応力の解析

4.1 解析手法

風作用がコンクリートの収縮に及ぼす影響を理論的に考察しようとする場合、Pickett の提唱した収縮拡散理論によるアプローチが有効であろうと思われる。乾燥条件および座標系を Fig.7 の (a), (b) のようにした場合、Pickett は x 方向の自由ひずみ S に関する拡散方程式の解を一面乾燥状態に対して(2)式で、四面乾燥状態に対しては(3)式で与えている。

Fig. 7. Illustration of the conditions treated.

$$\frac{S}{S_{\infty}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} e^{-T \beta_n^2} \cdot \frac{2B}{B^2 + B + \beta_n^2} \cdot \frac{\cos \beta_n \frac{y}{b}}{\cos \beta_n} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{S}{S_{\infty}} = & 1 - \left(\sum_{n=1}^{\infty} e^{-T \beta_n^2} \cdot \frac{2B}{B^2 + B + \beta_n^2} \right. \\ & \cdot \frac{\cos \beta_n \frac{y}{b}}{\cos \beta_n} \left. \left(\sum_{m=1}^{\infty} e^{-T \beta_m^2} \right. \right. \\ & \cdot \frac{2B_m}{B_m^2 + B_m + \beta_m^2} \cdot \frac{\cos \beta_m \frac{z}{c}}{\cos \beta_m} \left. \right) \end{aligned} \quad (3)$$

上式で S_{∞} は最終の収縮ひずみを表し、 K は拡散係数、 f は表面係数および t は時間であり、 $T = K \cdot t / b^2$ 、 $T_c = K \cdot t / c^2$ および $B = f \cdot b / K$ 、 $B_c = f \cdot c / K$ で、 β_n 、 β_m は $\beta \tan \beta = B$ および $\beta \tan \beta = B_c$ の n 番目、 m 番目の根を表すことになる。平均ひずみ S_{av} は(2)、(3)式をそれぞれ平均化することにより得られる。

つぎに、(2)、(3)式を用い自由ひずみ S

Fig. 6. Relationship between rate of moisture loss, rate of shrinkage and mean moisture loss.

の分布を求めるには、拡散特性値である拡散係数 K および表面係数 f を定める必要がある。このため、一面乾燥の場合についての S に関する誤差関数解を展開して得た $X=f\sqrt{K}$ に関する四次式から、岡田らが誘導した⁹⁾次式の解を用いた。

$$\begin{aligned} & \frac{8}{15\sqrt{\pi}}(S_2 \cdot t_1^2\sqrt{t_1} - S_1 t_2^2\sqrt{t_2})X^3 \\ & + \frac{1}{2}(S_1 t_2^2 - S_2 t_1^2)X^2 \\ & + \frac{4}{3\sqrt{\pi}}(S_2 t_1\sqrt{t_1} - S_1 t_2\sqrt{t_2})X \\ & + S_1 t_2 - S_2 t_1 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

上式で $S_1 = S_{av1}/S_{\infty}$, $S_2 = S_{av2}/S_{\infty}$ であり, S_{av1} は t_1 時間における平均ひずみ, S_{av2} は t_2 時間における平均ひずみを表す。

自由ひずみ S の分布が求まり, 収縮応力の算定にあたって, Pickett が表した弾性係数⁸⁾より, 一面乾燥条件で乾燥面 $y=b$ 点での収縮応力は次式で表される。

$$\sigma_x = E \left\{ S + 2S_{av} - 6S_{\infty} \left[\frac{1}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} e^{-T\beta_n^2} \cdot \left(1 + \frac{1}{B} - \frac{1}{B \cos \beta_n} \right) \cdot H_n \right] \right\} \quad (5)$$

ここで $H_n = 2B^2/\beta_n^2(B^2 + B + \beta_n^2)$ である。

四角乾燥条件で $y=b$, $z=0$ 点の応力は, この問題を平面ひずみ問題として考え $\sigma_y=0$, $\sigma_x=\sigma_z$ であることを考慮し, ν をポアソン比として次式で近似的に表されるとしてよい。

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu}(S - S_{av}) \quad (6)$$

4・2 風作用下における拡散特性値の算定

(4)式で示した岡田らの方法によれば, 収縮拡散係数 K および表面係数 f は, 一面乾燥体の平均ひずみ S_{av} が実測した $y=b/2$ 地点のひずみに等しいとして算定できる。本解析では, 供試材令7日の試料について, S_{av1} として乾燥日数1日での実測ひずみ, S_{av2} として3日, あるいは4日における値を用いて(4)式より X を求め, これを前述の4次式に再代入して K および f の

値を計算した。なお, S_{∞} 値は(1)式より求めた推定値を用いた。

このようにして得られた結果を Table I に示す。中西らが引用している Pickett の無風時の算定値¹⁵⁾ $K=0.23 \text{ cm}^2/\text{day}$, $f=0.18 \text{ cm}/\text{day}$ (50% R. H., 24.4℃, $S_{\infty}=28 \times 10^{-4}$) と, 本研究の無風下のモルタルについての算定 K , f 値は比較的近い値を示しているが, 本算定値は配合要因などによる特定の傾向は明確でない。表より, 風作用を受ける場合に K , f 値はともに無風時より増大する。この増加割合は配合別に一定はしていないが, 平均的には f の増加割合が K のそれより大きく, 風速 9 m/sec 下では K で約30%, f で45%程度である。この理由を考察すれば, 表面係数 f の増加は空気の流動性に依存する状態係数としての性質¹⁵⁾から理解され, 拡散係数 K のそれは風速が環境湿度の低下と類似した作用を及ぼすと考えれば, いくぶん説明がつくと思われる。

これらの拡散特性値を用いて(2)式をもとに計算した S_{av}/S_{∞} と実測のそれとの適合性を検討したところ, 乾燥後20から30日程度までは全般的に適合性が良いと思われ, 収縮応力の計算に上記特性値を使用しても大きな誤りは生じないであろうと判断された。

4・3 風作用下における収縮応力発現特性

収縮拡散係数 K , 表面係数 f の変化が収縮応力に及ぼす影響を調べるため, $K=0.25 \text{ cm}^2/\text{day}$ と一定とし $f=0.15, 0.20, 0.30 \text{ cm}/\text{day}$ と変化させた場合, $f=0.25 \text{ cm}/\text{day}$ 一定とし, $K=0.15, 0.25, 0.35 \text{ cm}^2/\text{day}$ と変化させた場合の実際に近い K , f 値計6種の組み合わせについて(5)式より乾燥面の収縮応力の計算を行った。この結果をもとに, f が一定で K が増加した場合, K が一定で f が増加した場合, K , f 値ともに増加するが K の増加率が f のそれより大きい場合, 反対に f の増加率が K のそれより大きい場合の4ケースに分けて収縮応力の発現状態を基本となる K , f 値に対するそれと対比させ示したものが Fig.8 で, 図の(a), (b), (c)-1, (c)-2 中の破線の応力状態がそれぞ

Table I. Results of approximate estimation of diffusivity K and surface factor f .

		1	2	3	4	5	6	Number of mix
Diffusion coefficients	Wind speed (m/sec)	280	280	280	280	240	320	Unit water content (kg/m ³)
		40	50	60	70	50	50	Water cement ratio W/C (%)
Diffusivity K (cm ² /day)	9	0.33	0.28	0.27	0.23	0.24	0.26	* All the specimens used were cured in water for 7days before drying.
	5.6	0.26	—	—	0.16	—	0.22	
	0	0.25	0.26	0.20	0.17	0.17	0.18	
Surface factor f (cm/day)	9	0.31	0.25	0.21	0.21	0.19	0.19	
	5.6	0.26	—	—	0.19	—	0.18	
	0	0.22	0.17	0.10	0.17	0.15	0.14

Fig. 8. Trends of shrinkage stress accompanied by the variation in diffusivity K and surface factor f .

れ上記の4ケースに対応している。図中、実線は基本となる応力状態を示す。

これより、本研究での拡散特性値の変化に対応する応力状態は図の(c)項で示され、風速による f の増大は収縮応力のピーク発現を速めることが理解できる。配合別による応力状態の特性は必ずしも明りょうでないが、 $W/C=40\% \sim 60\%$ で単位水量 280 kg/m^3 の配合1～3までは(c)-2の応力状態に対応し、その他の4～6の配合では(c)-1の状態に対応することになる。平均的な K 、 f 値の風速による増加で考えると(c)-2の応力状態に適合する。すなわち、風作用を受ける場合、収縮応力のピークが早期に現れ、応力の絶対値もいくぶん大きくなるが、その後時間の経過とともに急速に減少してゆく様相となる。

つぎに、部材寸法の影響を調べるため、実際に評価された拡散特性値を用いて(5)式より一面乾燥体乾燥面の収縮応力を部材厚さ b を変化させ計算した。その一例として $W/C=60\%$ の配合3について示したのがFig.9である。これより、部材厚さが大きくなるにつれて、計算上は、先の風作用時における応力特性の傾向が著しく現れてくることが理解できる。

Fig.10は、 $W/C=40\%$ および 60% の配合1および3について、四面乾燥体の表面部の収縮応力を(6)式より算定した結果と、同材令における水中養生強度からの低下量で表した供試材令7日の供試体の曲げ強度差 $\sigma_w - \sigma_d$ とを、経時的に対比し示したものである。これより、収縮応力発現傾向と、風作用下の曲げ強度の低下、回復の傾向は比較的良く対応していることが理解できる。対象とした曲げ供試体の寸法が小さいため、曲げ強度低下のピークが必ずしも明りょうでないが、全体

Fig. 9. An example of calculated shrinkage stresses in beam specimens having various values of depth b dried from one face in the windy and windless condition.

Fig. 10. Comparison between shrinkage stress estimated and the difference of bending strength of $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ specimens $\sigma_w - \sigma_d$ in case of drying from four faces, where σ_w is the bending strength under wet curing in water and σ_d is that under drying in the windy and windless condition.

的には、収縮応力の算定結果を首肯するものと考えられる。なお、上記計算にはクリープの影響は考慮されていない。この点に関しては、風作用下のクリープ試験等を含め今後の検討で明らかにしたい。

5 結 論

得られた結果を要約すると次のような結論を得る。

(1) 風作用は、コンクリートの乾燥初期の収縮を著しく促進させ、収縮量は風速にほぼ比例して増大する傾向にある。例えば、5.6および9.0 m/secの風速下におけるモルタル供試体表面部の収縮量は、無風時のそれより最大では乾燥10日で30%および45%、30日で20%および35%、最終推定値で10%および15%もそれ

ぞれ増大する結果を示した。この傾向は、水セメント比が減少し、単位水量が増加するほど顕著であった。

(2) 供試体からの水分逸散は、風作用により乾燥初期で著しくなり、したがって逸散水量も全体的に増加する傾向を示した。乾燥の後期には炭酸化によると思われる重量増加現象がみられたが、風作用はこれを抑制するような様相を示した。これら傾向は高水セメント比ほど、湿潤養生期間が短いほど著しくなった。風作用による収縮増大の機構と水分逸散機構は密接に関連していると思われ、今後さらに検討の必要がある。

(3) Pickett の提唱した収縮拡散方程式中の拡散係数 K 、表面係数 f の近似的算定の結果、風作用により両値ともに増大し、風速 9 m/sec 下においては無風時よりも平均的には f で45%、 K で30%程度の増加であり、 f の増加率が K のそれより大きくなった。水セメント比など配合要因の影響については本解析では明らかでなかった。

(4) 算定した K 、 f 値を用い、弾性理論より収縮応力を計算した。その結果、風作用により収縮応力のピークが早く発現し、全般的にはピーク時応力も増加する傾向にあることが認められた。例えば、風速 9 m/sec の条件下では部材表面の収縮応力がピーク時で2割程度も大きく現れる場合もあった。

(5) 以上より、厳しい風作用を受けると考えられる場合、第一には風を避けるような具体的な対策を講ずることが肝要であるが、これが不可能な場合には、風作用による収縮増加の影響および収縮ひび割れ発生の

傾向を抑制するため、ワーカビリティ、強度など所要の性質に支障を及ぼさない範囲で、単位水量を減少させ、ペースト量をおさえた配合とすること、湿潤養生を充分に行うことが重要であろうと考えられる。

終りに、本研究の遂行にあたり、終始ご指導を頂きました秋田大学徳田弘教授に感謝の意を表します。

(昭和52年10月16日 土木学会第32回年次学術講演会にて一部講演)

参 考 文 献

- 1) 近藤 実, セメント技術年報 XI (1957); XII (1958).
- 2) Powers, T. C., Journal of A. C. I., **18** (1947).
- 3) Hobbs, D. W., and A. R. Mears, Magazine of Concrete Research, **23**, No. 75~76 (1971).
- 4) Tazawa, E., Proceeding of J. S. C. E., No. 156 (1969).
- 5) 大野和男, 北大研究報告 9 号 (1953).
- 6) Pickett, G., Journal of A. C. I., **52**, No. 5 (1956).
- 7) Lyse, I., Magazine of Concrete Research, **11**, No. 33 (1959); Journal of A. C. I., **56** (1960).
- 8) Pickett, G., Journal of A. C. I., **17**, No. 3; No. 4 (1946).
- 9) 岡田 清, 川村満紀, 土木学会論文報告集, 142号(1967).
- 10) 大浜文彦, 森本博昭, 土木学会論文報告集, 228号(1974).
- 11) 正野重方, 吉武素二, 毛利圭太郎, 須田 建, 窪田正八, 気象ポケットブック (1969) 共立出版
- 12) 東京天文台編, 理科年表 (1976, 1977) 丸善
- 13) Lerch, W., Journal of A. C. I., **53** (1957).
- 14) 中西正俊, 清水建設研究所報, 14号 (1969).
- 15) 中西正俊, 日本建築学会論文報告集, 190号 (1971).