

軽量コンクリートの乾燥収縮応力について

DRYING SHRINKAGE STRESS IN LIGHTWEIGHT CONCRETE

後藤 幸正*・藤原 忠司**

By Yukimasa GOTO and Tadashi FUJIWARA

1. 緒 論

乾燥過程において軽量コンクリートの引張および曲げ強度が著しく低下する現象に着目した既往の研究は数多く存在し、それらのほとんどが低下の起因を乾燥収縮応力に求めている。しかし、その根拠は実証性に乏しく、また構造物設計の際に問題となる収縮応力の定量的把握について、その方法に対する検討が十分になされていないなど、いまなお解明すべき点が残されているように思われる。

この強度低下の現象は軽量コンクリートの適用範囲の拡大にとってひとつの隘路となるものであり、その対応にあたっては上記収縮応力に関する未解明の問題点の決着が前提となるのはいうまでもない。本研究の目的はこの点に関する一資料を供することにある。

2. 問題の所在

はじめに、既往の研究の中から問題点を整理し、本研究の課題を提示しておくことにしよう。

(1) 強度低下の起因

上述のように、諸強度低下の起因としては乾燥に伴うコンクリート内部の非線形含水量分布を初応力源とする収縮応力を指摘している例が多い。しかしこれとはまったく立場を異にする見解も存在する。それはいわゆる軽量骨材の乾燥膨張説¹⁾であり、この説に従えば、強度低下のみならず、軽量コンクリートの乾燥収縮値が予想外に小さい現象の原因も合理的に説明可能となり、しかも、骨材単独で得た膨張現象をコンクリート中に埋設した骨材でも確認している研究例^{2),3)}が存在することから、こ

の説の成立の可否は十分検討に値すると考えられる。

この見解に対し、たとえば川砂モルタルが同様に強度の低下をきたす事実などをとり挙げ、この成立を疑問視している研究例⁴⁾が見受けられるが、軽量コンクリートの場合には骨材の乾燥膨張と収縮応力とが並存する可能性も残されており、収縮応力を支持する立場からのこの見解に対する検討は十分とはいえない。

本研究ではこの乾燥膨張現象も含め、骨材の容積変化特性の強度低下への関連を検討してみることにする。

(2) 収縮応力を強度低下の起因とする根拠

収縮応力が強度低下を招くとの観点に立つならば、その存在を実験的に確認する必要があると思われるが、知り得た既往の研究の範囲内ではその例はほとんどないといってよい。たとえば、感覚的に収縮応力の存在を推定しているに過ぎない例^{5)~9)}は論外としても、乾燥後期における強度の回復、骨材の初期含水量（コンクリート打設前の骨材に含まれる水量）や供試体寸法の強度への関連およびコンクリート表面部と底面との収縮の差などにその根拠を求めている例^{1),10)~13)}は収縮応力の存在をうかがわせるに十分であるものの、依然として状況証拠にとどまっている感を拭えない。

本研究ではこれらの根拠を追試し、さらに次に述べる収縮応力の実験的解析過程の中から、その答を得ることにしたい。

(3) 収縮応力の実験的解析

ここでは、Fig. 1 のように、外的にはなんら拘束を受けない一面乾燥のコンクリート試験体を解析の対象とする。

このような試験体において、収縮応力は次のような過程で発生する。乾燥が一方であるため、乾燥過程で水分の流れ方向に含水量の勾配が形成され、それに対応して、コンクリート内部の各要素は固有の収縮ひずみをも

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 岩手大学助手 工学部土木工学科

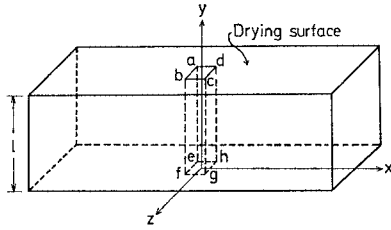


Fig. 1 Analytic model

つ.ところが、コンクリートは連続体であるため、内部の各要素は互いに拘束し合い、それぞれの固有の収縮ひずみを任意に具現できない。その結果、各要素の互いの拘束に応じ、初応力が発生することになる。いま、乾燥面近傍に着目すると、この部分は他に先行して乾燥し、最も大きな固有収縮ひずみを有することになるが、隣接する内部の拘束のため、そのすべてを具現することはできない。その結果、この部分に引張の初応力が発生し、強度低下が誘発されると推定される。したがって、収縮応力が強度低下を招くとの観点に立つなら、この引張の初応力の存在を確認することがその前提となる。

この確認を実験的に行うには、次のような因子を抽出する必要があるように思われる。いま、固有収縮ひずみを $S(y, t)$ とすると、これは一般に非線形の分布となり、また以下のように分割される¹³⁾。

$$S = S_{av} + \epsilon_w + \epsilon_i \dots\dots\dots (1)$$

S_{av} : 平均乾燥収縮ひずみ

ϵ_w : そりによるひずみ

ϵ_i : 初応力によるひずみ

S_{av} および ϵ_w は S により表示可能である。

$$S_{av} = (1/l) \int_0^l S dy \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_w = \frac{12(l/2-y)}{l^3} \int_0^l S \left(\frac{l}{2} - y \right) dy \dots\dots\dots (3)$$

一方、連続体でのひずみ（表面的に測定可能な変形） $e(y, t)$ は次の適合条件を満たす必要がある。

$$\partial^2 e / \partial y^2 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

これは e の分布が線形であることを意味する。また、この e は S との間に次の関係をもつ。まず、軸力の平衡条件より、

$$\int_0^l (S - e) dy = 0 \dots\dots\dots (5)$$

次に、曲げモーメントの平衡条件より、

$$\int_0^l (S - e) y dy = 0 \dots\dots\dots (6)$$

それゆえ、

$$S_{av} = (1/l) \int_0^l S dy = (1/l) \int_0^l e dy = e_{av} \dots\dots (7)$$

$$\epsilon_w = \frac{12(l/2-y)}{l^3} \int_0^l S \left(\frac{l}{2} - y \right) dy$$

$$= \frac{12(l/2-y)}{l^3} \int_0^l e \left(\frac{l}{2} - y \right) dy = e_w \dots\dots (8)$$

$e = e_{av} + e_w$ であるから、

$$\begin{aligned} \epsilon_i &= S - (S_{av} + \epsilon_w) = S - (e_{av} + e_w) \\ &= S - e \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

したがって、初応力によるひずみは固有収縮ひずみと連続体でのひずみとの差に相当することになり、この抽出がここでの課題となる。

乾燥収縮応力は熱応力と同様に一種の残留応力であると考えられ、もしこの応力の解放が可能であれば、上記の初応力によるひずみ ϵ_i は直接的に求まることになろう。しかし、おもに金属を対象として開発されてきた残留応力解放の手法をコンクリートに適用するには難しい点が多く、その例はほとんどみられない。Fig. 2 および Fig. 3 はあえてこの解放を試みた測定例^{(14), (15)}である。

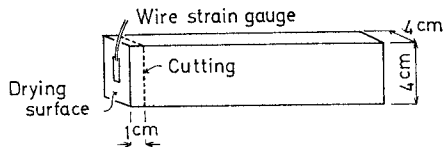
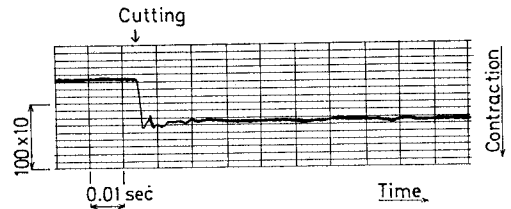


Fig. 2 Release of initial stress

動的ひずみ計を用いた Fig. 2 で解放ひずみが検出され、しかも Fig. 3 に示される解放ひずみの経時変化が後述する曲げ強度の経時変化の傾向と良く符合することから、これらの結果からも初応力の存在を確認できる。

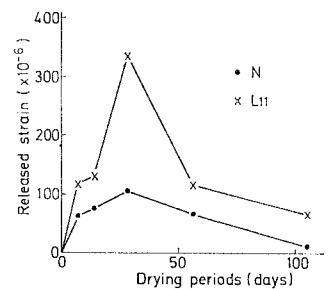


Fig. 3 Change of released strain

しかし、この実験では乾燥面からの切断距離を有限とせざるを得ないこと、および検出された解放ひずみにそりによるひずみ ϵ_w が含まれることなど、上記初応力によるひずみを測定するうえで適合しない面があり、定量的検討には耐え難いと思われる。

直接的方法が適用できない以上、初応力によるひずみは式 (9) の関係を利用して、間接的に推定せざるを得ない。この関係から、初応力の解析を行うには Fig. 4

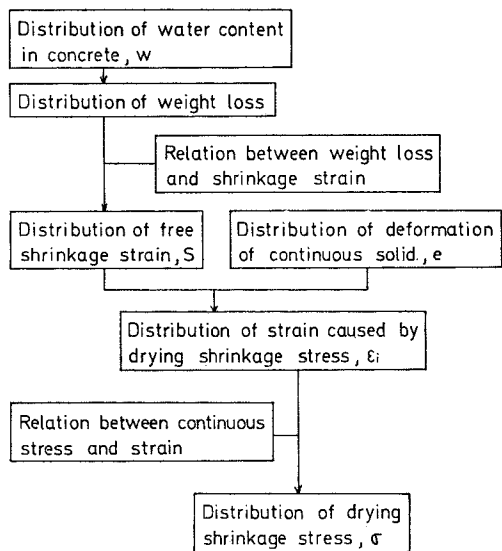


Fig. 4 Process of analysis of drying shrinkage stress

に示す手順を要するようになる。

この解析過程で必要な諸因子のうち、固有収縮ひずみは実験的に直接抽出することが不可能であり、コンクリート内部の含水量状態の変化に対応させて、間接的に推定せざるを得ない。そのため、解析はこの含水量分布を知ることから出発する。なお、初応力は持続応力としての性格も有すると考えられ、初応力によるひずみを初応力に換算するには塑性変形を考慮に入れる必要があり、そのため持続応力とひずみの関係が解析過程に加わる。

前述のように、収縮応力が強度低下の起因であることを立証するには、この一連の解析過程に従って収縮応力の存在を実験的に確認し、強度低下の傾向と対照して検討する必要がある。ところが、軽量コンクリートを対象としたこの種の解析がまったく見当らず、わずかにソイルセメント¹⁶⁾およびエアームタル¹⁷⁾を対象とした例

が見受けられるのみである。しかし、前者は固有収縮ひずみを理論的に推定しており、また後者は固有収縮ひずみを初応力源として収縮応力の理論的解析に進んでいることを勘案すると、いずれの解析も実験的に完結しているとはいえない。

ここでは、Fig. 4 に示される一連の過程を実験的に具体化し、上記の考察を行うとともに、収縮応力の定量的把握について、ひとつの道標を記してみたい。

(4) 収縮応力の理論的解析

収縮応力の理論的解析に関しては平面応力¹⁷⁾および平面ひずみ¹⁸⁾の問題としてこれを処理している例が見受けられるが、この解析では Pickett¹⁹⁾ が先駆的役割を果たしている。Pickett の理論は Carlson²⁰⁾ の考えを発展させたものであり、Fig. 4 の過程を理論表示したものと考えてよい。また、この理論は収縮予知の手段として用いられる^{21), 22)}など広く引用されている。

ここでは、実験的解析過程が Pickett 式と対応していることから、得られた実験結果をもとに、この式の適用可能性を検討してみることにした。なお、初応力源と考えられるコンクリート内部の含水量分布の推定式についても検討を行う。これらの検討は解析過程を実験的に具現することによって、はじめて可能となるものであろう。

3. 強度低下の起因

収縮応力解析の前段として、強度低下の起因、特に軽量骨材の容積変化特性のかかわり合いについて、若干の実験的考察を加えておくことにする。

Table 1 の諸条件のもとに作製したコンクリートの乾燥および屋外放置過程での強度の経時変化を Fig. 5 ~ 7 に示す。

また、Fig. 8 および 9 は上の実験の標準的でない点

Table 1 Kinds of specimen

No.	Kinds of concrete	Quantity of material per unit volume	W/C				s/a	Kinds of aggregate		Initial water content of coarse agg. %	Curing periods in water days
			W kg/m ³	C kg/m ³	S kg/m ³	G l/m ³		Coarse	Fine		
1	Normal	N	183	366	723	382	50	43	Gravel	4	28
2	Lightweight	L ₀	"	"	"	"	"	"	Artificial lightweight aggregate	0	"
3	"	L ₁₁ *	"	"	"	"	"	"		11	"
4	"	L ₂₇	"	"	"	"	"	"		27	"
5	"	L ₄₀	"	458	675	372	40	42		11	"
6	"	L ₆₀	"	305	778	379	60	54		"	"
7	"	L ₇	"	366	723	382	50	43		"	7

Maximum size of coarse aggregate : 15 mm
Drying condition : in constant temperature (30°C) room or at outdoor

Size of specimen : 4×4×16 cm
* L₁₁=L₅₀=L₂₈

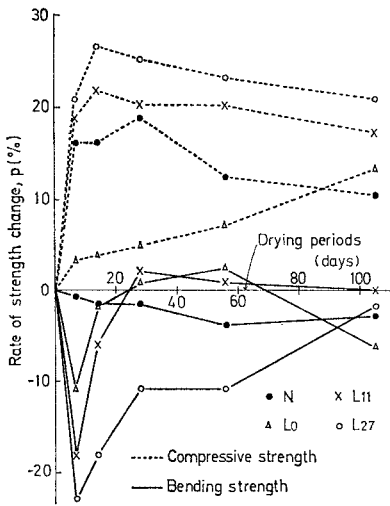


Fig. 5 Strength change of concrete due to drying (in constant temperature room)

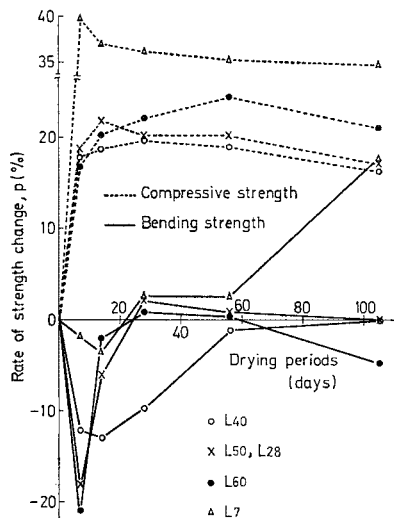


Fig. 6 Strength change of concrete due to drying (in constant temperature room)

および不足している点を補うために行った実験（供試体寸法：10×10×40 cm）の結果である。

これらの諸結果から、強度低下の起因を示唆する傾向を探るならば、以下のような点が指摘されよう。

① 曲げ強度の低下は普通コンクリートにも見受けられる。したがって、軽量骨材粒の容積変化特性のみですべてを説明することはできない⁴⁾。

② 恒常乾燥の場合、曲げ強度の低下は一時的現象であり、乾燥が長期にわたると強度は回復する。軽量骨材

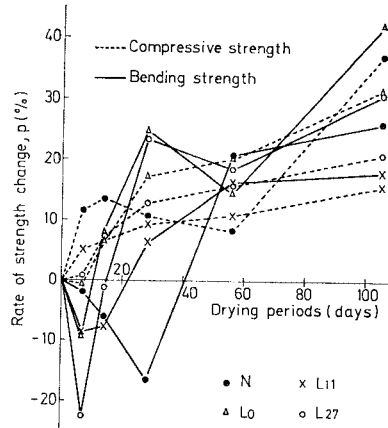


Fig. 7 Strength change of concrete at outdoor

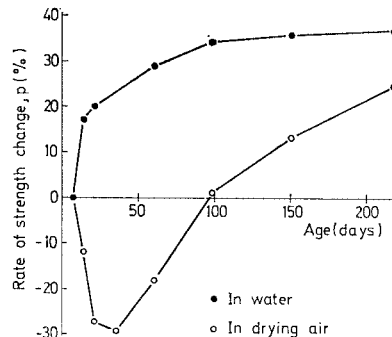


Fig. 8 Bending strength change of lightweight concrete

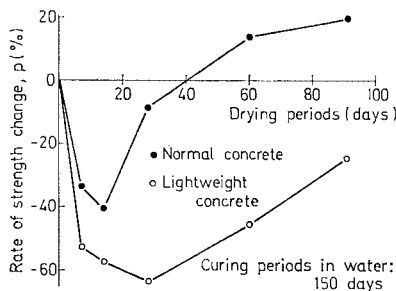


Fig. 9 Bending strength change of concrete due to drying (in constant temperature and humidity room)

粒の乾燥膨張は機構的に乾燥後期に発生するはずであるから、この回復現象とはまったく矛盾する⁴⁾。また強度回復は水和を十分進行させた供試体 (Fig. 9) でも生じており回復が固有強度の増進によるものではないことを示している。このことは、強度に影響を及ぼす因子としての乾燥がこの場合には固有強度を変動させるいわゆる第2類因子²³⁾ではなく、見かけ上の変化をもたらす第1類因子であることを意味しているが、乾燥に伴って発生し、強度の低下を招くと考えられる初応力はあくまで実在のものであり他の第1類因子と同一視するわけにはいかない。なお、屋外放置の場合は曲げ強度の低下が一時的現象にとどまらず、気象作用によっては常に低下の危険が存在することには注意を要する。

③ 乾燥過程の特に初期において、曲げ強度が低下するのに対し、圧縮強度は逆に増加し、両者は比例的な対応を示さない。圧縮強度の増加はこれまでも指摘されている^{24), 25)}現象であるが、固有強度の増進によるとは考えにくく、乾燥に伴う初応力の発生がその主たる原因となるものであろう。このように、初応力は圧縮強度に対しては正の、曲げ強度に対しては逆に

負の作用を果たすことから、問題となるのは乾燥面近傍における引張の初応力であり、その実体は収縮応力であろうことをうかがわせている。

④ 曲げ強度低下の程度は骨材の初期含水量や供試体寸法により大きな影響を受け、また配合や水中養生期間にも少なからず関連する。これらの要因はコンクリート内部の乾湿の状態に大きくかわると予想され、収縮応力がこの乾湿の状態に帰因することを考え併せると、この傾向は収縮応力の発生を示唆しているといえる^{12), 13)}。

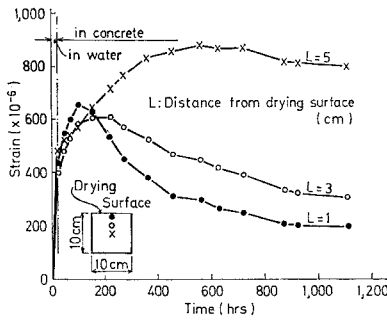


Fig. 10 Volumetric change of lightweight aggregate in concrete

以上の諸結果は乾燥膨張説の成立を疑問視し、収縮応力の存在を示唆してはいるが、依然として傍証の感をまぬがれない。このうち、収縮応力存在の確認は次章に譲ることとし、軽量骨材の容積変化特性のかかわり合いをさらに吟味してみよう。

筆者らは先に、軽量骨材の乾燥膨張現象発生の可能性を検討するには骨材自体の特性に着目するのが必須であると考え、その乾湿に伴う長さ変化挙動をとらえてみた²⁶⁾。その結果、測定範囲内ではこの現象を確認できず、出発点においてこの現象を支持する見解とは相反する立場をとらざるを得ないことが判明した。ところが、この実験では適当な含水量を保有した軽量骨材の高湿空中における膨張という、一見これに類似した現象を記録している。そして、この現象はコンクリート中においても具現する。Fig. 10 は軽量骨材粒の円周上に抵抗線ゲージを貼付し、それを軽量コンクリート供試体の内部に図のように埋設して、コンクリートの乾燥に伴う骨材自体の長さ変化を測定した結果である²⁶⁾。

また、Table 2 は打設 24 時間後脱型してただちに全面をシールし、その後の長さ変化をコンパレータで測定したコンクリートについての結果を示している¹⁹⁾。

Table 2 Length change of concrete

Age (days)	No.	N × 10 ⁻⁶	L ₀ × 10 ⁻⁶	L ₁₁ × 10 ⁻⁶	L ₁₈ × 10 ⁻⁶
1	0	0	0	0	0
3	+33	+25	+58	+42	
5	+8	+33	+67	+42	
7	-8	+25	+67	+33	
10	-50	+8	+58	+33	
13	-50	+8	+67	+42	
18	-75	0	+67	+42	
25	-63	-17	+100	+50	
30	-75	-17	+108	+75	
40	-120	-54	+95	+45	
120	-228	-225	+75	0	

+swelling, -contraction
Subscript of No. : initial water content of coarse aggregate

Fig. 10 にみられるように、乾燥の初期において、軽量骨材は埋設位置にかかわらず膨張し、特に中心部の骨材はその膨張を長期間継続する。そしてこの傾向は Table 2 にも見受けられる。すなわち、特に供試体 L₁₁ はかなりの期間膨張して

おり、この理由としては実験条件から判断して骨材そのものが膨張したこと以外に考えられない。したがって、ある適度な含水量を保有してコンクリート中に埋設された軽量骨材はその後も膨張する可能性を有していることになる。この膨張現象の機構は軽量骨材の細孔構造および骨材内部での水分の移動過程によって説明可能であり、いわゆる乾燥膨張とは性質を異にすると考えられる²⁶⁾。また、乾燥膨張をコンクリート表面部に埋設した骨材によって確認したとしている研究例^{2), 3)}は Fig. 10 に示される表面部の骨材の膨張と同一の現象を抽出した可能性が強いと憶測される。

本実験によって確認されたこの膨張現象は軽量コンクリートの強度低下に関連する。まず表面部における骨材の膨張はいわゆる乾燥膨張説と現象的に類似しており、この膨張がペーストあるいはモルタル部分にひびわれを発生させ、それが低下を招くとの主張³⁾がそのまま成立する可能性がある。また、内部における膨張は表面部を引張してそこに引張の初応力を発生させ、強度低下の起因となる可能性が強い。

このように、軽量骨材のこの膨張現象は強度低下の観点から決して無視できるものではないと考えられるが、この現象は上述のように骨材の特定の含水状態のみ発生するものであり、この現象ですべてを説明することはできない。たとえば普通コンクリートの強度低下はこの現象とは無関係であると思われるし、Table 2 で初期含水量の大きい骨材を用いた軽量コンクリートの膨張が比較的小さいのに対し、強度低下は著しい (Fig. 5) 現象なども説明困難である。したがって、ある特定の条件下にある軽量コンクリートの強度低下を促進する一因として、上記膨張現象をとり挙げるのにとどめるのが妥当といえよう。

4. 乾燥収縮応力の実験的解析

軽量骨材の容積変化特性が強度低下の本質的起因となり得ないことが判明したいま、続いて Fig. 4 の手順に従い、収縮応力の存在を実験的に確認してみたい。

(1) 実験条件

Fig. 1 に示す試験体の寸法は 15×15×53 cm とした。試験体の種類は Table 1 の N, L₁₁ および L₂₇ の 3 種類である。

(2) コンクリート内部の含水量の分布

コンクリート内部の平均的な含水量は全体の重量測定により簡単に求まる。一方、乾燥面から内部へかけての含水量の分布を求めるのはそれほど容易ではない。この

分布を求めるために用いられる一般的な方法は測定物理量を相対湿度とするものであり、試験体の側面に小孔を設け、その小孔中の湿度を測定してコンクリート内部の湿度分布を求めている^{17), 27)~29)}。この方法の場合、多くの利点を有するが、過飽和な状態での湿度変化を捉えることができない³⁰⁾など、本問題を解析するうえで適合しない面もあり、理想的には含水量を測定物理量とするのが望ましいと考えられる。

ここでは Fig. 1 の試験体中の要素 abcd-efgh を想定した Fig. 11 のような供試体を作製し、この供試体の含水量の分布を測定することにより、試験体中の分布を推定することにした。

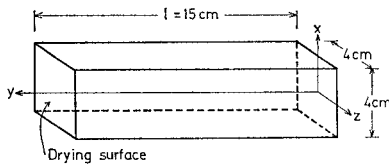


Fig. 11 Specimen for measurement of water content distribution in concrete

この供試体内の含水量分布は次のようにして求めた。水中養生終了後、ただちに1面(4×4 cm)を残し、他の面をすべてシールする。このような処理を施した供試体を Fig. 1 の試験体の近傍において同じ条件で乾燥させる。所定の乾燥日数でこの供試体を表面から順次厚さ 1 cm の薄片に割裂し、割裂直後とそれを絶乾にしたときの重量を測定して含水率 $w(y, t)$ を決定する。湿度

を測定する方法とは異なり、この方法では一度実験に供した試料を再び使用することは不可能であるため、条件がまったく同一な供試体を多数測定しておくことにより、その経時変化を知るようにした。

Fig. 12 に測定結果を示す。

実験方法に厳密でない点も存在するため、結果の精度が懸念されたが、図のように特に軽量コンクリートは滑らかな曲線を示しており、感覚的にいえば本実験方法でも所期の目的を十分達成できると考えられる。

各供試体の比較より導かれる最も著しい特徴は、軽量コンクリートの含水量曲線の乾燥面近くにおける勾配が急激なことであり、ここに初応力源として含水量の分布をとり挙げることの妥当性が予見される。

(3) 固有収縮ひずみの分布

Fig. 13 は含水量分布を求める際の微小要素に対応させて作製した試料(4×4×1 cm)の乾燥に伴う重量減少率と収縮ひずみとの関係を示している。

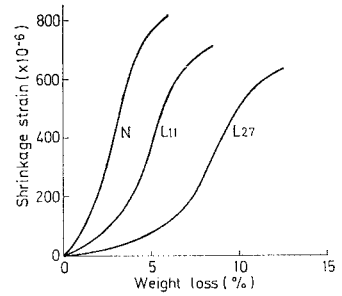


Fig. 13 Relation between weight loss and shrinkage strain

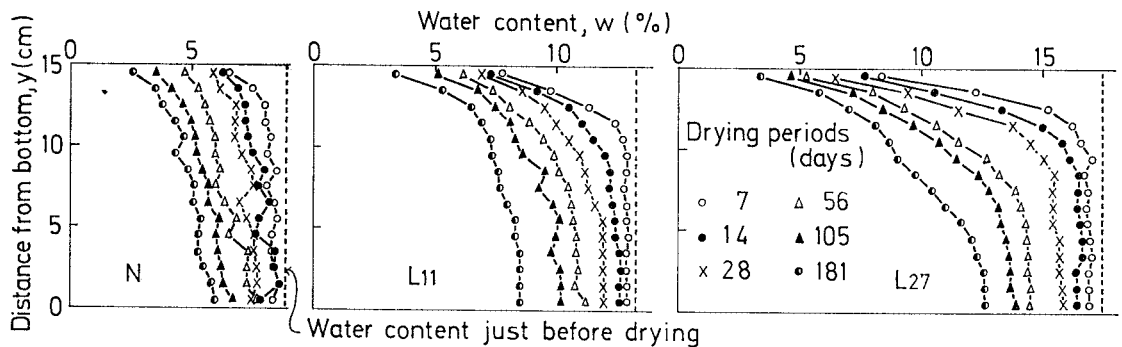


Fig. 12 Distribution of water content in concrete

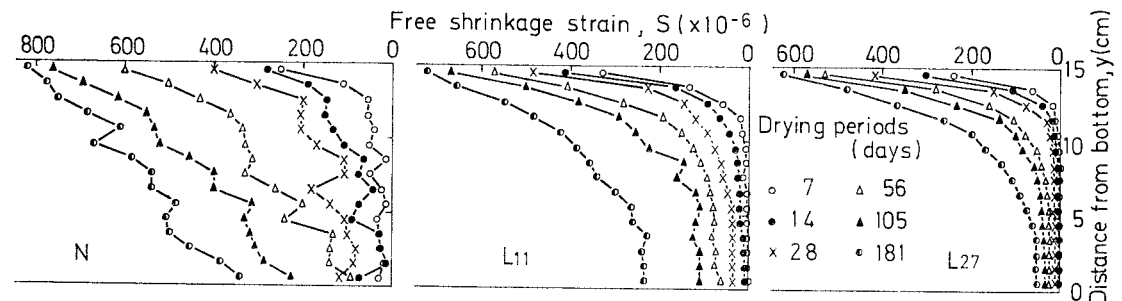


Fig. 14 Distribution of free shrinkage strain

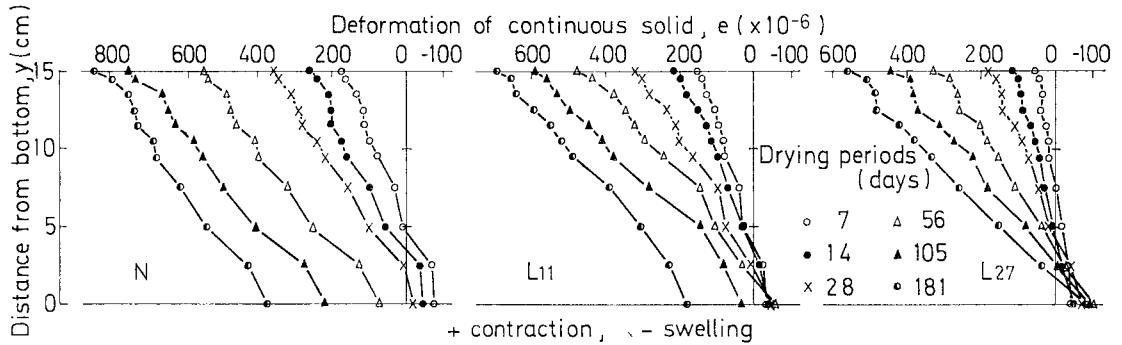


Fig. 15 Distribution of deformation of continuous solid

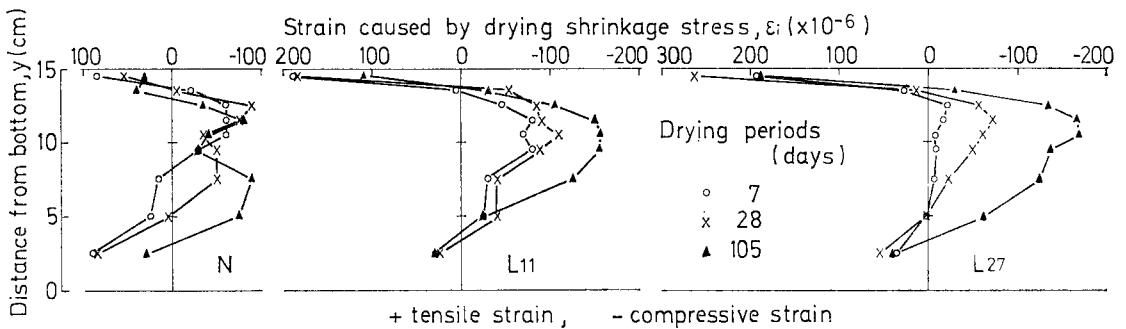


Fig. 16 Distribution of strain caused by drying shrinkage stress

前掲の含水量分布を重量減少率の分布に換算した結果とこの図とから、固有収縮ひずみの分布は Fig. 14 のように求まる。

(4) 連続体でのひずみの分布

Fig. 1 の試験体の乾燥に伴う変形をコンタクトゲージを用いて測定した。その結果を Fig. 15 に示す。

前述の式 (4) より、連続体でのひずみは適合条件を満たすため、線形になるはずである。実測値は図のようによくぶんのばらつきが見受けられるが、ほぼこの条件を満たしているように思われる。

(5) 収縮応力によるひずみの分布

式 (9) に従うと、初応力によるひずみは固有収縮ひずみと連続体でのひずみとの差に相当する。前掲の諸結果を利用し、このひずみを算出すると、Fig. 16 が得られる。

いずれの場合も乾燥面付近および底面付近で引張ひずみが、その中間では逆に圧縮ひずみが生じていることが認められる。乾燥に伴う曲げ強度低下の観点から問題となるのはこれらのうち乾燥面近傍における引張ひずみであろう。

Fig. 17 はこの大気に接する微小要素 (厚さ 1 cm) での初応力による引張ひずみの経時変化を示している。

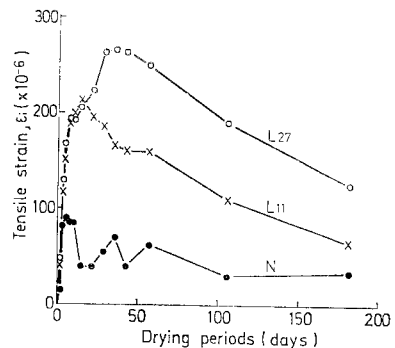


Fig. 17 Change of strain caused by drying shrinkage stress at near drying surface

図のように、このひずみは普通コンクリートに比し軽量コンクリートの方が大きく、また同じ軽量コンクリートでも骨材の初期含水量の大きいものほど著しい値を示している。そして、各種コンクリート間のこのひずみの相対的關係は前述した曲げ強度低下の割合の大小関係とよく対応している。さらに、このひずみの経時変化が極値をもつ傾向も曲げ強度の変化傾向とまったく符合する。

一連の過程から明らかなように、Fig. 17 は初応力源を含水量分布、初応力を乾燥収縮応力と仮定して導かれたものであり、ひずみが有意の値を示し、しかもそれが

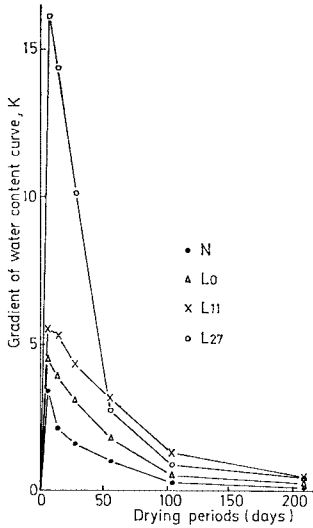


Fig. 18 Gradient of water content curve

当性がうかがわれる。したがって、この結果により収縮応力の存在が確認できたといえよう。

Fig. 13 のように、単位重量減少率あたりの収縮ひずみは軽量コンクリートが普通コンクリートに比し、小さい。また、軽量骨材粒自体の容積変化の特異性により、収縮可能値も軽量コンクリートの方が小さいと考えられる³¹⁾。軽量コンクリートのこれらの特性は式(9)の固有収縮ひずみに関連し、初応力によるひずみを相対的に小さくすると印象を抱かせる。しかしながら、実際には乾燥過程で軽量コンクリート内部に含水量の急激な勾配が形成され、これが固有収縮ひずみの場所的著しい差をもたらして初応力を大きくするため、初応力の観点から好ましいと思われる上記軽量コンクリートの収縮特性はこの含水状態の特性に打消され、その利点が生かされないと思われる。したがって、軽量コンクリートの強度低下に関してはその含水量特性に根源を求めるのが合理的であろう。

Fig. 18 は前掲の実験とは別途に行なって得たコンクリート内部の含水量曲線を放物型と仮定し、その勾配 K の経時変化を求めてみたものである³²⁾。この値が大きいほど、強度低下の危険性が大きいと考えられる。

図のように、各供試体間の相対的な関係および経時変化の性状が、この含水量勾配の場合も曲げ強度の変化傾向とよく対応しており、含水状態が初応力源となることがこの図からも確認できる。また、この図より特に注目すべき点は絶乾状態の骨材を用いた軽量コンクリート (L_0) においても普通コンクリートに比し勾配が大となることであろう。この結果からすれば、軽量コンクリートの強度低下が著しい傾向はいわば宿命的であるとさえ思われる。

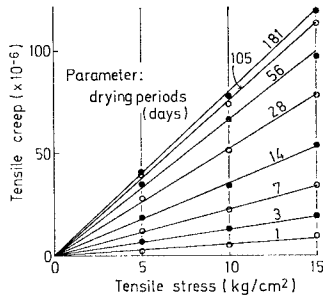


Fig. 19 Tensile creep of lightweight concrete (L_{27})

種々の条件下でとらえた強度低下の傾向とよく合致することから、この仮定の妥当性がうかがわれる。

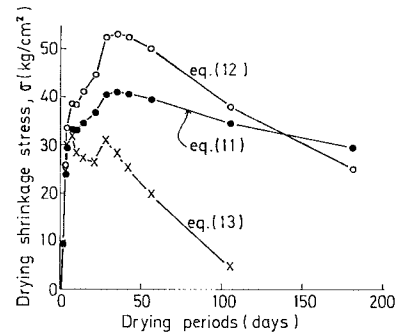


Fig. 20 Drying shrinkage stress of lightweight concrete (L_{27}) at near drying surface

以上の諸結果により、収縮応力の存在が確認できたと思われるが、この量的把握が次の課題となる。ここではこの応力が最も大きいと思われる軽量コンクリート L_{27} を例として、得られた初応力によるひずみを初応力に換算してみることにする。

(6) 収縮応力

Fig. 19 はこの原理を応用した引張定荷重装置を使用して得た引張クリープ ϵ_c の測定値である。

この結果を利用し、上の変換を岡田らの方法¹⁶⁾に準じて行ってみる。単位時間における初応力によるひずみ ϵ_i および初応力 σ の微小変化量をそれぞれ $d\epsilon_i$ および $d\sigma$ とすれば、時刻 $t=t_0$ で次の関係が成立する。

$$(d\sigma)_{t=t_0} = (df/d\sigma)_{t=t_0} \times (d\epsilon_i)_{t=t_0} \dots\dots\dots(10)$$

$$\epsilon_i = f(\sigma)$$

時刻 $t=t_0+t_1$ における応力は

$$\sigma_{t=t_0+t_1} = \sigma_{t=t_0} + (d\sigma)_{t=t_0} \dots\dots\dots(11)$$

$d\sigma/df$ が実験的に求まるので、上式よりひずみが応力に変換される。Fig. 20 にその結果を示す。

比較のため、同図中には ϵ_i をすべて弾性ひずみと仮定し、次式によって求めた初応力も示してある。

$$\sigma = E\epsilon_i \dots\dots\dots(12)$$

E : 弾性係数, $20 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ (実測値)

図のように、式(11)によって求めた応力の極値は弾性理論による値より緩和されてはいるが、乾燥長期にわたって応力がそれほど低減せず、残留値が弾性理論値を上回る点是不合理である。これは式(11)がクリープの影響を正しく評価していないためと考えられる。この点を確認するため、次のような方法で応力を概算してみた。

初応力によるひずみを弾性および塑性部分に分割すると、初応力は次式のように表示される。

$$\sigma = E(\epsilon_i - \epsilon_c) \dots\dots\dots(13)$$

$t=1$ 日までの ϵ_i がすべて弾性ひずみであると仮定すれば、この時点における初応力は、

$$\sigma_{t=1\text{day}} = E\{(\epsilon_i)_{t=1\text{day}}\}$$

$t=1\sim 2$ 日までは上の応力が作用すると仮定すれば、この間の引張クリープ $(\epsilon_c)_{t=1\text{day}\sim 2\text{day}}$ は Fig. 19 により求まる。したがって、乾燥 2 日における初応力は

$$\sigma_{t=2\text{day}} = E\{(\epsilon_i)_{t=2\text{day}} - (\epsilon_c)_{t=1\text{day}\sim 2\text{day}}\}$$

同様の手順で逐次計算すると、初応力の経時変化が求まる。この方法で求めた結果も Fig. 20 に示してある。この方法による場合、応力の極値はさらに緩和され、しかも乾燥が長期になると応力がほとんど消滅し、曲げ強度が回復する現象とよく一致する。したがって、この方法に従うのがより合理的であるように思われる。

5. 乾燥収縮応力の理論的解析について

上述の段階で収縮応力の定量的把握に関するひとつの完結した手順を提示し得たと考えられるが、この一連の過程は実験的にきわめてやっかいであり、実用的とは思われない。そのため、この解析過程の理論表示が望まれよう。ここでは得られた実験結果をもとに、従来提示されてきた理論表示のなかから代表的と思われるものをとり挙げ、その適用可能性を検討してみることにする。

(1) コンクリート内部の含水量の分布

乾燥過程におけるコンクリート内部の含水量の分布を明らかにすることは、上記初応力源の考察に必要であるばかりでなく、収縮値の予測等、乾湿にかかわる種々の問題に適用でき、汎用性に富んでいると思われる。そこで、この理論表示の可能性をはじめに検討しておくことにしよう。

この含水量分布は乾燥を拡散過程と仮定し、次の拡散方程式を用いて推定するのが一般的である。Fig. 11 のように、水分の流れが一方方向である場合には、

$$\frac{\partial w}{\partial t} = k \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \dots\dots\dots(14)$$

k : 拡散係数 (m²/day)

拡散係数は厳密には空間および時間の関数であると考えられるが、数学的な煩雑さを避けるために、一般には定数として取り扱われており、ここでも上式のように定数と仮定した。上式は変数分離法や Laplace 変換等を用いて解くことができ³³⁾、一般には次のような諸条件のもとにその解を求めることが多い^{17), 29)}。

初期条件: $(w)_{t=0} = w_0 \dots\dots\dots(15)$

境界条件: $(w)_{y=\pm l} = w_\infty \dots\dots\dots(16)$

ここで、 w_0 は乾燥前および w_∞ は大気湿度に平衡したときのコンクリートの含水量である。したがって、コンクリートの乾燥面は乾燥開始と同時に平衡含水量に達すると仮定している。これらの諸条件のもとに式 (14)

の解として次式が得られる。

$$w = w_\infty - \frac{4}{\pi} (w_0 - w_\infty) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cdot e^{-k(2n+1)^2 \pi^2 t / 4l^2} \cos \frac{(2n+1)\pi y}{2l} \dots\dots\dots(17)$$

次に、乾燥面における含水量が経時的に平衡含水量に達すると考え、以下のような諸条件を設定してみる。

初期条件: $(w')_{t=0} = 0 \dots\dots\dots(18)$

境界条件: $(\partial w' / \partial y)_{y=l} = (f/k)(w_\infty' - w') \dots\dots\dots(19)$

$(\partial w' / \partial y)_{y=0} = 0 \dots\dots\dots(20)$

$w' = w_0 - w, w_\infty' = w_0 - w_\infty$

f : 表面係数 (m/day)

これらの諸条件を満たす Fourier 級数による解は、

$$\frac{w'}{w_\infty'} = 1 - \sum_1^{\infty} e^{-T\beta_n^2} F_n \frac{\cos \beta_n y / l}{\cos \beta_n} \dots\dots\dots(21)$$

$T = kt/l^2, B = fl/k, F_n = 2B/(B^2 + B + \beta_n^2)$

β_n : $\beta \tan \beta = B$ の n 次根

式 (20) の $y=0$ での境界条件の代わりに、半無限の固体表面からの Newton の輻射の法則を相似させると、境界条件は次のようになる。

$(w')_{y=-\infty} = 0 \dots\dots\dots(22)$

この条件のもとでは、拡散方程式の解が Gauss の誤差関数で表示できる。

$$\frac{w'}{w_\infty'} = \phi \left[\frac{1-y/l}{2\sqrt{T}} \right] - \phi \left[\frac{1-y/l}{2\sqrt{T}} + B\sqrt{T} \right] \cdot e^{B(1-y/l) + B^2 T} \dots\dots\dots(23)$$

$\phi(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx$: Gauss の誤差関数

以上、式 (14) の拡散方程式に対して三つの解法を列挙したが、実際の計算にあたっては拡散係数等の諸量を決定しておく必要がある。このうち、拡散係数については非定常状態下における供試体全体の重量減少率の測定から容易に算出できる次式を用いてみた³³⁾。

$k = 0.049 \times (2l)^2 / t_{1/2} \dots\dots\dots(24)$

ここで、 $t_{1/2}$ は重量減少率の半減時間 (day)、すなわちコンクリート内部の含水量が最終的に到達する平衡含水量の 1/2 になるまでに要する時間である。

表面係数は式 (19) を用いて含水量分布の実測値から算出し、平衡含水量はコンクリート乾燥面付近の含水量の経時変化から推定した。

Fig. 21 に計算例を示す。

図より、乾燥面の含水量が式 (19) に従い、経時的に平衡に近づくとする境界条件のもとに計算した場合の適合性が、拡散係数一定の仮定のもとにおいてもきわめて優れていることが認められる。これに対し、いままでとり挙げられることの多かった式 (16) を境界条件とした場合は、乾燥面付近における近似が悪いだけでなく、全

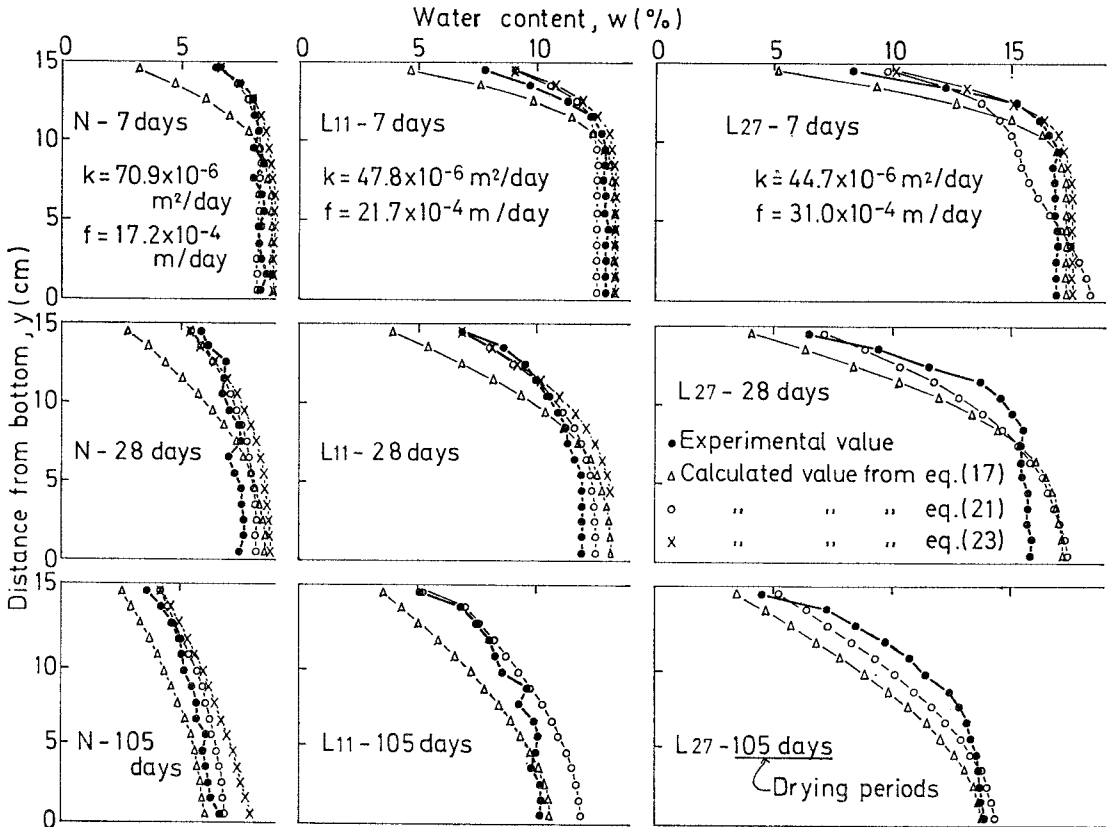


Fig. 21 Comparison of calculated water content with experimental one

体的な曲線の形も実測値と異なる。したがって、拡散係数に加えて表面係数等の値が種々の実験によって明らかにされ、蓄積されるならば、式 (19) を境界条件とする方が本現象を表示するうえで、より適切であり、有用であると考えられる。

(2) 固有収縮ひずみの分布

初応力源としてのコンクリート内部の含水量分布を上述のように理論表示できたとしても、この分布を固有収縮ひずみの分布に変換するには含水量の変化に対応した収縮ひずみの変化を知っておく必要がある。この関係は Fig. 13 のように、一般には非線形であり、コンクリート内部の細孔構造や内部での水分の移動過程等が現象を複雑にしていると予想され、これを理論表示するのはきわめて難しい。したがって、ここに実験に頼らざるを得ない因子が必然的に加わる。

Pickett はこの難点を克服するため、固有収縮ひずみを拡散する実質 (substance) と考え、拡散方程式からこの固有収縮ひずみを直接的に推定する方法を提唱している。この着想は卓抜しており、収縮応力の理論的解析に対して端緒となつてはいるが、しかしその実験的検証

は乏しいように思われる。そこで、この点の検討を行つてみることにしよう。

上述の含水量を固有収縮ひずみに置き換え、式 (18) の初期条件および式 (19), (22) の境界条件と同じ条件を設定すると、Gauss の誤差関数で表示される次式が得られる。

$$\frac{S}{S_{\infty}} = \phi \left[\frac{1-y/l}{2\sqrt{T}} \right] - \phi \left[\frac{1-y/l}{2\sqrt{T}} + B\sqrt{T} \right] \cdot e^{B(1-y/l) + B^2 T} \dots \dots \dots (25)$$

S_{∞} : S の終局値

式の計算に必要な諸量は岡田ら¹⁹⁾に従うと、次のようにして求まる。 T が小さいとき、固有収縮ひずみ S の平均値 S_{av} を示す式 (2) に上式を代入すると、

$$\frac{S_{av}}{S_{\infty}} = \frac{1}{B} \left[e^{B^2 T} \phi(B\sqrt{T}) - 1 + \frac{2B\sqrt{T}}{\pi} \right] \dots \dots \dots (26)$$

$B\sqrt{T}$ が小さいとき、上式を Maclaurin 展開すれば、

$$\frac{S_{av}}{S_{\infty}} = BT \left[1 - \frac{4}{3\sqrt{\pi}} B\sqrt{T} + \frac{1}{2} (B\sqrt{T})^2 - \frac{8}{15\sqrt{\pi}} (B\sqrt{T})^3 + \dots \dots \dots \right] \dots \dots \dots (27)$$

上式で、 $f/\sqrt{k} = x$ とおくと、次式が得られる。

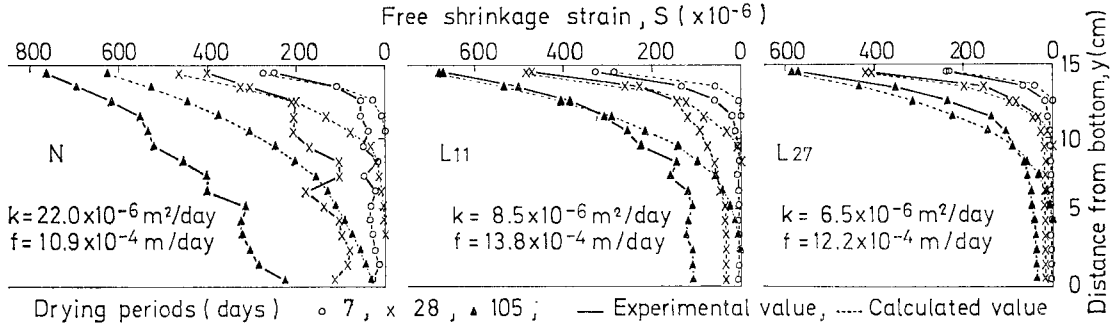


Fig. 22 Comparison of calculated free shrinkage strain with experimental one

$$\sqrt{k}xt(1-0.752\sqrt{tx}+0.500tx^2 - 0.301t\sqrt{tx^3})=lS_{av}/S_{\infty} \dots\dots\dots(28)$$

S_{av} は式 (7) より e_{av} に等しく、 e の分布が線形であれば e_{av} は $y/l=0.5$ での e の値に相当するので、結局、 S_{av} は連続体でのひずみの測定結果から求まる。また、 S_{∞} も乾燥面付近の固有収縮ひずみの経時変化から推定できる。したがって、相異なる時間に対して S_{av}/S_{∞} を与えると、上式により k, x に関する二元連立方程式が成立し、拡散係数および表面係数が求まることになる。

Fig. 22 はこのようにして算出した固有収縮ひずみの分布を示している。

図より、計算値の適合性は供試体の種類によって差があり、初期含水量の大きい粗骨材を用いた軽量コンクリート L_{27} が最も良好な近似を示していることが認められる。この L_{27} の含水量分布の計算値の適合性は Fig. 21 のように三者の中では比較的悪い方ではあるが、含水量の変化に対応するひずみの変化の非線形特性が関連し、結果的に固有収縮ひずみの適合性が良好になったと考えられよう。また、比較的相関のよくない N および L_{11} にしても、強度低下の観点から問題となる乾燥の比較的早期での乾燥面付近における固有ひずみはかなり近似しており、この点に限定すれば、理論の適用可能性は十分あるといえる。

(3) 収縮応力の分布

固有収縮ひずみの解析から出発した Pickett の理論は Fig. 4 の手順に従い、収縮応力に関して次式を誘導している。ただし、この式には塑性変形の影響が考慮されていない。

$$\sigma = E\{S - S_{av} + (6 - 12y/l) \frac{2lv_{max}}{3L^2} \dots\dots(29)$$

L : 供試体の長さ

v_{max} : そのの最大値

v_{max} は次式により求まる。

$$\frac{2lv_{max}}{3L^2S_{\infty}} = \left(\frac{1}{2B} + \frac{1}{B^2} \right) \left\{ e^{B^2T} \phi(B\sqrt{T}) - 1 + \frac{2B\sqrt{T}}{\pi} \right\} - T \dots\dots\dots(30)$$

式 (29) による収縮応力の計算値と前述の初応力によるひずみ (Fig. 16) に単に弾性係数を乗じた値との比較例を Fig. 23 に示す。

図のように、 L_{27} の場合は両者の相関がかなり良好であるが、 N および L_{11} の場合は形が似ていても絶対値的には相違が著しく、特に N の乾燥面近傍における応力が過大な計算値になっている。Fig. 22 より明らかに、乾燥 28 日における乾燥面近傍の固有収縮ひずみの計算値の適合性はどの供試体もほぼ良好であり、このことは式 (29) の右辺第 1 項に問題がないことを意味す

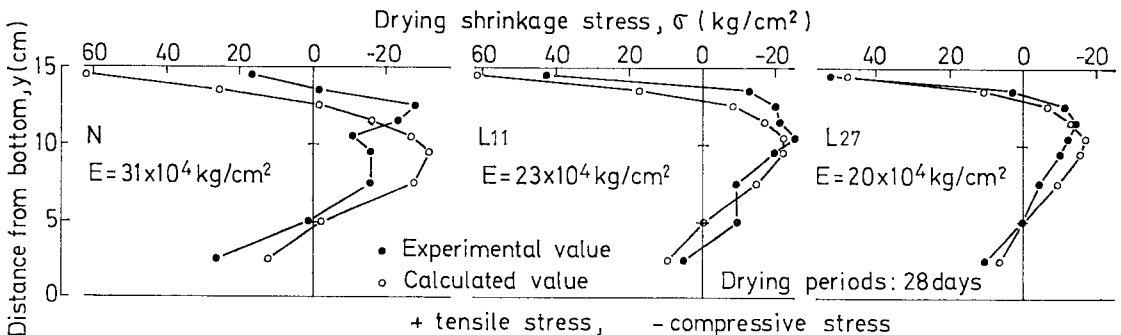


Fig. 23 Distribution of drying shrinkage stress

る。したがって、連続体でのひずみが関連する第2項以下の適合性に難点があるといえよう。これが本結果に特有であるか否かは定かでないが、もしこれを肯定するならば、実験的に抽出がやっかいな固有収縮ひずみを理論的に推定し、測定の容易な連続体でのひずみを実験的に求めれば、収縮応力を比較的容易に、かつ精度よく推定できると考えられる

6. 結 論

コンクリートの乾燥収縮応力に着目した研究は数多く存在し、伝統的課題のひとつとなっている。本研究もこの延長線上にあるものであり、特に乾燥過程における軽量コンクリートの引張・曲げ強度の著しい低下の現象との関連でこの収縮応力をとらえてみた。その結果、強度低下の主因が収縮応力の発生にあることを確認できたとともに、その量的把握についていくつかの知見を得ることができた。Fig. 20 のように条件によってはコンクリート表面部におけるこの収縮応力が 30 kg/cm^2 程度にも達すると推定され、問題の重大さがうかがわれる。この応力は収縮ひびわれさらには構造的欠陥をまで誘発すると考えられ、構造物設計にあたっては決して看過できない要因であることを指摘しておく。

終わりに、本研究遂行にご尽力いただいた当時岩手大学大学院生の飯泉 章氏（現：日本鋼鉄コンクリート）をはじめ東北大学ならびに岩手大学コンクリート研究室各位に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 近藤連一ほか：人工軽量骨材の細孔径分布と膨張収縮特性，セメント技術年報 XXI, pp. 485~492, 1967.
- 2) 小林一輔・伊藤利治：人工軽量骨材コンクリートの諸性質におよぼす乾燥の影響，コンクリートライブラリー第24号，pp. 40~44, 1969.
- 3) 村田二郎ほか：軽量骨材コンクリートの乾燥による強度低下に関する考察，土木学会第25回年次講演会，pp. 149~151, 1970.
- 4) 国分正胤ほか：軽量骨材コンクリートにおける問題点について，コンクリートライブラリー第24号，pp. 1~13, 1969.
- 5) ACI Committee 213 : Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, Jour. ACI, Vol. 64, No. 8, pp. 433~467, 1967.
- 6) Shideler, J.J. : Lightweight-Aggregate Concrete for Structural Use, Jour. ACI, Vol. 54, No. 10, pp. 299~328, 1957.
- 7) Hanson, J.A. : Tensile Strength and Diagonal Tension Resistance of Structural Lightweight Concrete, Jour. ACI, Vol. 58, No. 1, pp. 1~39, 1961.
- 8) 矢野光一：人工軽量骨材を用いたコンクリートの曲げ・引張り・圧縮強度の相互関係について，セメント技術年報 XXII, pp. 361~364, 1968.
- 9) 国分正胤：軽量骨材を用いるコンクリートにおける問題点，コンクリートライブラリー第10号，pp. 1~13, 1964.
- 10) 山崎 淳：軽量骨材コンクリートのひびわれ性状について，セメント技術年報 XXII, pp. 401~405, 1968.
- 11) 湯本徹男・片岡宏治：人工軽量コンクリートの曲げ強度に関する2, 3の考察，セメント技術年報 XXIII, pp. 469~474, 1969.
- 12) 西林新蔵・湯本徹男：人工軽量骨材の吸水特性とコンクリートの性質，コンクリートライブラリー第24号，pp. 24~29, 1969.
- 13) Nagataki, S. : Studies of Shrinkage in Concrete Pavements, 東京工業大学土木工学科研究報告, No. 7, pp. 29~58, 1969.
- 14) 藤原忠司：軽量コンクリートの乾燥にともなう引張・曲げ強度低下に関する実験，岩手大学工学部研究報告第25巻，pp. 77~82, 1973.
- 15) 藤原忠司：乾燥にともないコンクリート表面部に発生する応力について，土木学会第28回年次講演会，pp. 186~187, 1973.
- 16) 岡田 清・川村満紀：ソイルセメントの乾燥収縮応力に関する二, 三の考察，土木学会論文集第142号，pp. 37~45, 1967.
- 17) 大浜文彦・森本博昭：セメント硬化体，特にエアモルタルの収縮応力源とそれによる収縮応力の解析，土木学会論文報告集第228号，pp. 77~85, 1974.
- 18) 永松静也・河上嘉人：モルタル・コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびそれに起因する内部応力について，セメント技術年報 XXXI, pp. 293~297, 1977.
- 19) Pickett, G. : Shrinkage Stress in Concrete, Jour. ACI, Vol. 17, No. 3, pp. 165~195, No. 4, pp. 361~398, 1946.
- 20) Carlson, R.W. : Drying Shrinkage of Large Concrete Members, Jour. ACI, Proceedings Vol. 33, No. 3, pp. 327~336, 1937.
- 21) Becker, N.K. and C. Macinnis : A Theoretical Method for Predicting the Shrinkage of Concrete, Jour. ACI, Vol. 70, No. 9, pp. 652~657, 1973.
- 22) 松藤泰典ほか：セメントモルタルの収縮予測に関する一考察，セメント技術年報 XXIX, pp. 171~174, 1975.
- 23) 近藤泰夫・坂 静雄：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，p. 275.
- 24) 小林一輔・伊藤利治：人工軽量骨材コンクリートの乾燥状態における圧縮強度，セメントコンクリート，No. 227, pp. 11~13, 1969.
- 25) 渡辺嘉香ほか：乾燥によるコンクリートの強度変化，セメント技術年報 XIII, pp. 297~302, 1959.
- 26) 後藤幸正・藤原忠司：乾湿に伴う骨材の体積変化，土木学会論文報告集第24号，pp. 97~108, 1976.
- 27) Menzel, C.A. : A Method for Determining the Moisture Condition of Hardened Concrete in Terms of Relative Humidity, Proc. ASTM, Vol. 55, pp. 1085~1108, 1955.
- 28) 原田 有ほか：乾燥に伴うコンクリート部材の湿気こう配に関する研究，セメント技術年報 XXII, pp. 297~301, 1968.
- 29) 椎名国雄：コンクリートの内部温度と変形，コンクリートジャーナル，Vol. 7, No. 6, pp. 1~11, 1969.
- 30) 鎌田英治ほか：コンクリート内部の含水量の測定，セメント技術年報 XXX, pp. 288~292, 1976.
- 31) 藤原忠司：コンクリートの乾燥収縮におよぼす骨材の影響について，土木学会第32回年次講演会，p. 74, 1977.
- 32) 藤原忠司ほか：乾燥過程におけるコンクリート中での水の流れ，岩手大学工学部研究報告第28巻，pp. 107~118, 1975.
- 33) Crank, J. : The Mathematics of Diffusion, Oxford.