

論 文

[1066] 含水率分布にもとづいた乾燥収縮応力の評価

正会員○秋田 宏（東北工業大学土木工学科）

正会員 藤原忠司（岩手大学土木工学科）

正会員 尾坂芳夫（東北大学土木工学科）

1. まえがき

乾燥により生ずる収縮応力は、収縮ひび割れの原因になり、曲げ強度の低下も引き起こすため、乾燥の各段階でそれを評価することは重要である。しかしながら、現状では、乾燥収縮による表面の引張応力がどの程度であるのか、またどの段階でひびわれが生じるのかなど不明な点が多い。

これまでに、乾燥収縮応力を含水率分布と関連づけることにより評価した研究は多々あるが、得られた表面の最大応力は滝口ら〔1〕の0.8MPaから永松ら〔2〕の12MPaまでの広範囲なものである。このように、収縮応力の推定値に大きな差があるのは、対象とした材料の違い（普通コンクリート、若材令コンクリート、軽量コンクリート等）ばかりでなく、以下の2つの要因が重なっているものと思われる。

(1) 含水率分布の計算に於て、あるものは線形解析、あるものは非線形解析を用いており、物理定数の大きさ、計算モデル分割の大きさにも差がある。

(2) 応力解析においても、あるものは弾性解析、あるものは非線形解析を行っており、計算モデル分割の大きさにも差がある。

また、実験的に収縮応力の大きさを調べた例として、田沢ら〔3〕は切込法により貴重なデータを得ているが、応力分布を断面内で放物線分布すると仮定したこと、含水率分布は線形解析によったこと等のため、十分なものとはいいがたい。

本稿では、前報〔4〕で述べた水分移動解析で得られた相対含水率分布をもとに、乾燥過程で生じる収縮応力を計算と実験により調べその評価を行う。

2. 含水率と収縮ひずみの関係

2. 1 実験

乾燥により生ずる収縮応力を解析するためには、乾燥の程度と収縮ひずみの関係を知る必要がある。実験によりこの関係を求めるには、質量変化と長さ変化を長期にわたり、同時に測定すれば良い。表-1に示す配合を対象とし、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体により長さ変化を測定し、長手方向の平均的なひずみを求めた。供試体は28日間水中養生した後、気温20°C、相対湿度60%の雰囲気で乾燥させ、質量減少量から平均的な相対含水率を求めた。

実験による長手方向の収縮ひずみと相対含水率の関係を表わしたのが図-1である。収縮ひずみ ε と相対含水率 R の関係を簡単な式で表わすために、双曲線関数を用い、

$$\varepsilon = 0.0006 \{ \tanh(0.04R - 1.4) + 0.885 \} \dots \dots \dots (1)$$

で近似する。ここで、相対含水率は一般に表面から内部にかけて差がある状態での平均値であるため、(1)式は見かけ上の関係を表わしているに過ぎない。本来、収縮ひずみと含水率の関係は、供試体内の含水率が一様な状態で測定されなければならないが、そのような状態を実現する

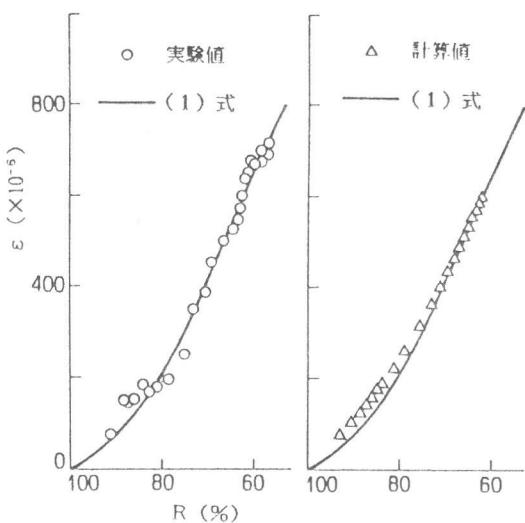


図-1 相対含水率と収縮ひずみの関係

ことはきわめて長期間を要し容易ではない。したがって、本実験結果から以下のようにして、本来の収縮ひずみと相対含水率の関係を推定する。

2.2 本来の含水率-収縮ひずみの関係

まず、(1)式で表わされる両者の関係が正しいと仮定したときに、含水率が一様でないために、見かけ上どの様な両者の関係が得られるのかを計算で求めてみる。含水率は、前報で述べたように非線形拡散方程式を解くことにより、個々の節点に対して得られた相対含水率分布から、長手方向中央断面内に着目しその平均値を求める。収縮ひずみは、その断面内における個々の節点の相対含水率に対し、(1)式で定まる収縮ひずみを求め断面内で平均する。この平均ひずみは、両端近傍で若干異なることを無視すれば、一軸応力状態で変形が弾塑的に起こると仮定した場合に長さ方向の変化として観測されるひずみに相当する。この両者の関係を乾燥開始1日から98日までを適当な時間間隔で示せば、図-1となる。乾燥の初期では計算値が(1)式からずれているが、2週以後(相対含水率で80%を切る頃から)は良く一致している。しかし、実験値も計算値と同程度ずれていることから、(1)式は補正をせずにそのまま本来の含水率-収縮ひずみの関係と見なして良いと思われる。

3. 解析モデル

収縮ひずみおよび収縮応力の解析では、含水率分布や応力状態が両端近傍を除いては長手方向に一様で、横断面内でのみ変化すると考え、長手方向中央面の厚さ1cmの部分をモデル化した。相対含水率の計算値を使用するために、図-2のように断面内では前報の水分移動解析とまったく同じ分割を用いた。ただし、ここで用いているのは4節点長方形要素であるが3方向の変位成分を考え、長手方向には全節点が同一変位をとるものとして、すなわち平面保持を仮定した。計算による相対含水率から、(1)式で定まるひずみを、3方向に同一の初期ひずみとして与えることにより、収縮量・収縮応力の時間的・空間的な変化を求めることができる。計算上の物理定数にはそれぞれ表-2を用い、文献[5]と同様に弾性解析、リラクセーションを考慮した解析(以下リラクセーション解析と呼ぶ)、リラクセーションに加えヤンク率の非線形性を考慮した解析(以下非線形解析と略称する)の3種類を行った。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	骨材容積率 V _a (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)
20	70.0	50.0	46.0

単位量 (kg/m³)			
セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G
355	177	945	1115

表-2 コンクリートの物理定数

ヤング率 (×10⁴ MPa)	ポアソン比 (1)	引張強度 (MPa)
3.84	0.21	3.23

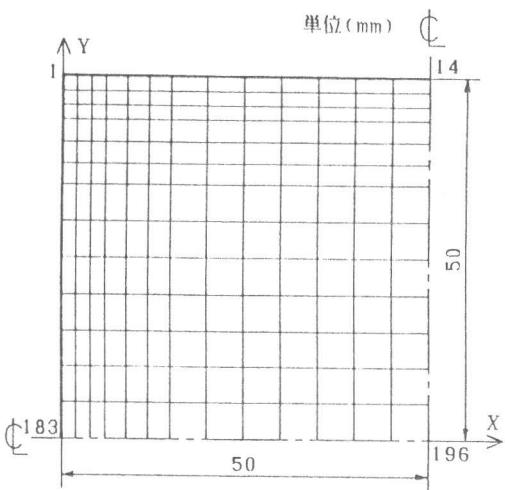


図-2 計算モデル

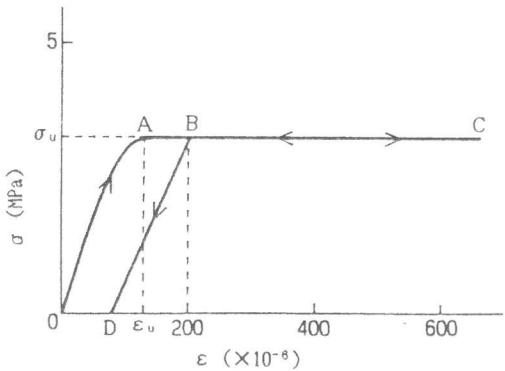


図-3 応力-ひずみ関係

後に知られるように、弾性理論により算出した乾燥表面の引張応力は引張強度より極端に大きく、リラクセーションを考慮してもまだ十分ではない。そこで、引張過程におけるヤング率低下を考慮するために、既往の研究をもとにして文献〔5〕と同様に、

$$\sigma = \sigma_u \sin\left(\frac{\pi \varepsilon}{2 \varepsilon_u}\right) \dots \dots \dots \quad (2)$$

と仮定する。ここで、 σ_u ：引張強度、 ε_u ：引張強度に対応するひずみであり、ヤング率Eは(2)式の微分係数として定まる。ただし、図-3に示したように(2)式で σ が σ_u に達した後は $E=0$ として、引張塑性を考慮するものとする。

非線形解析では、ヤング率は応力の大きさにより変化するが、後に示されるように、表面近傍の応力は要素内でも極端に差があり、要素内を同一のヤング率とする要素では処理できない。そこで、ヤング率が節点ごとに異なるものとし、要素内の変化を座標や変位と同じ補間関数で表現した。

4. 解析結果

図-4は、表面（たとえば図-2の節点14）および2mm内側（同節点28）の収縮応力 σ_z の時間的な変化を示したものである。弾性計算では乾燥開始後まもなく表面の σ_z が最大値33MPaに達し、引張強度の10倍にもなることから、実際の現象を表わし得るものとは思われない。また、10日以前では表面部分のわずか2mmの間で引張応力に大きな差が生じる結果となっている。このように、既往の研究に比べてはるかに大きな応力値と極端な応力分布が得られたが、さらに他の角度からも検討してみる必要がある。図には、リラクセーションを考慮した結果も示してあるが、表面の最大引っ張り応力が29MPaとなり、弾性計算と同様に非現実的な結果を与えており、一方、非線形解析では乾燥開始後まもなく引張強度に達し、50日までの範囲では引張強度を取り続ける。

図-5は、乾燥初期の部分を詳しくみるために、乾燥開始後の12時間について示したものである。弾性計算では、最初の2時間で表面の σ_z がほぼ最大値近くまで上昇し、6時間後に最大値をとり、図には示していないが1日までは微々たる減少にとどまり、その後除荷による減少に

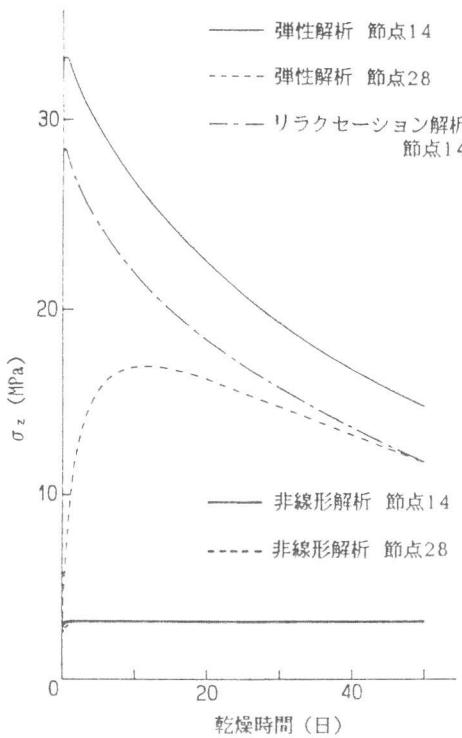


図-4 表面近傍の応力変化

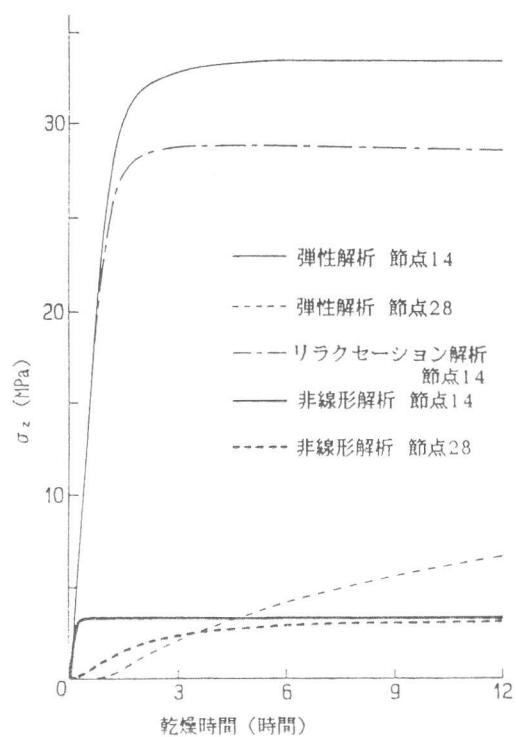


図-5 表面近傍の応力変化（乾燥初期）

移る。リラクセーションのみを考慮した解析では、弾性解析よりも全体的に15%程度低い値を与えるだけであり、時間的な変化は弾性解析と同様である。非線形解析では、30分程度で引っ張り強度に達し、以後同一の値を取り続ける。弾性計算における最大引張応力33MPaに対応するひずみは 640×10^{-6} である。コンクリートの伸び能力は 200×10^{-6} 程度であると思われるが、本解析で拘束収縮ひずみが 200×10^{-6} に達するのは乾燥開始後2時間であり、その時点から微細なひびわれが発生しているものと思われる。

図-6は、非線形解析による、対称軸に沿った、表面から内部にかけての収縮応力の分布であり、特徴的な3時点について示した。当初、表面付近では含水率の変化が急激であるため、かなり大きな引張ひずみとなるが、引張強度以上の応力にはなり得ないため、引張強度を取り続ける。表面近傍の引張領域は、大まかに見てほぼ1cmの範囲であり、時間とともに少しづつ内部へ拡大する傾向にある。このような応力分布は、永松らの結果と良く類似している。

5. 割裂による収縮ひずみの測定

5. 1 実験概要

供試体の寸法を $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 、 $6 \times 6 \times 24\text{cm}$ 、 $8 \times 8 \times 32\text{cm}$ 、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の4種類とした。割裂は、図-7に示すように供試体長手方向中心部6cmを切りはなし（割裂Iと呼ぶ）、次に断面内で両側面側を2cmの厚さに切りはなし（割裂IIと呼ぶ）。ただし、 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ の供試体だけは、割裂IIを行っても中心線上で2分することになり、無意味なので実施していない。同図に示したように、側面の中心線および底面側隅角部の計4点に、ゲージ長3cmのひずみゲージを接着し、割裂の前後におけるひずみの差を測定した。乾燥条件は、室温20°C、相対湿度60%とし、乾燥開始後1日で割裂した。

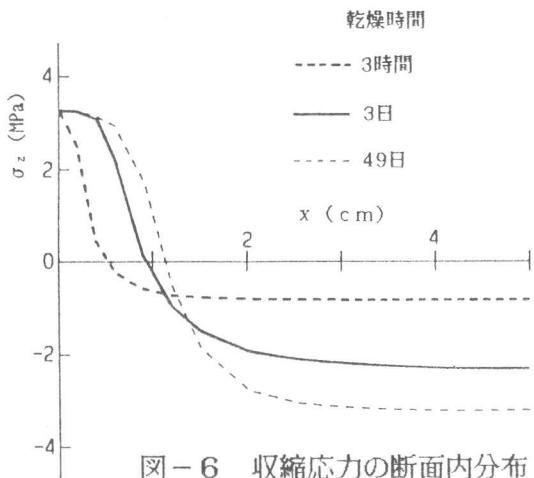


図-6 収縮応力の断面内分布

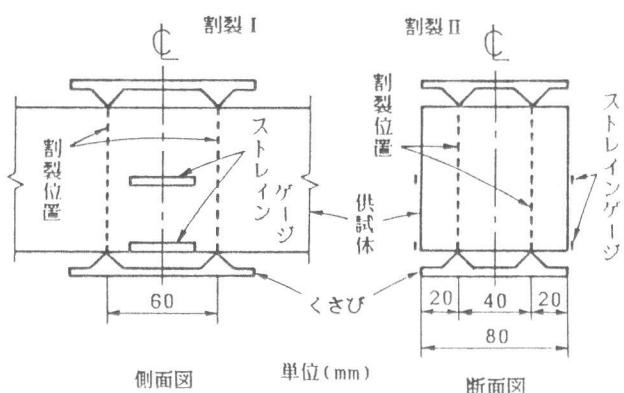


図-7 割裂状況 (8×8×32cmの場合)

5.2 計算モデル

乾燥により収縮応力が生じ、さらに割裂により応力が開放される過程は、定性的には次のように考えられる。割裂前の乾燥表面に着目すれば、自由収縮ひずみが拘束されて引張応力が生じているが、乾燥の進行にともない図-3のA点で引張強度に達し、さらにB点まで塑性変形し、B-C間は微細なひびわれが発生しているものと思われる。もし、Cの状態で割裂すれば、C-B間は微細なひびわれが閉じるだけで、ひずみは低下するが応力は変化せず、さらにB-Dの経路で除荷が進行する。

モデル分割は3次元の直方体要素を用い、割裂Iに対して断面内の分割は図-2と同一とし、長手方向には対称面から半分の3cmを3層に分割した。割裂IIに対しては、その内の表面に近い7層分を用いた。いずれも非線形解析により、まず乾燥1日目の状態を算出し、それを初期値として割裂Iの状態を算出し、さらに割裂Iの状態を初期値として、割裂IIの状態を算出した。

5.3 結果の比較

図-8, 9に結果を示した。ここで中心線上とは、図-2の計算モデルでは節点14あるいは183に対応し、隅角部とはひずみゲージの幅が5mm弱であることを考慮すると、節点2あるいは15に対応する。計算値は割裂Iの中心線上では良く実験値に一致し、隅角部では若干ずれ、割裂IIでは実験値の2倍近くになっている。すなわち、除荷によるひずみが大きくなるほど合わなくなることから、微細なひびわれが完全には閉じないため、除荷過程の変形量が小さくなるのも1つの原因と考えられる。計算値も実験値も、割裂IからIIにかけていずれも収縮ひずみが増大するが、これは応力開放の程度がさらに増加するためである。また、断面の寸法が大きくなるにつれ割裂によるひずみが大きくなっているが、本実験に用いた供試体寸法の範囲では、断面が大きくなるほど表面と内部の含水率の差が大きくなるためと思われる。中心線上と底部隅角部では、底部隅角部の方が割裂によって生じるひずみが大きい。これは、隅角部の方が含水率が低いため大きな引張応力が働いており、割裂による変形時に受ける拘束も小さいためと考えられる。

6.まとめ

水分移動解析の結果を利用した弾性解析・リラクセーション解析・リラクセーションに加えヤング率低下を考慮した解析を行った。これらの解析結果から、次のようなことが知られた。

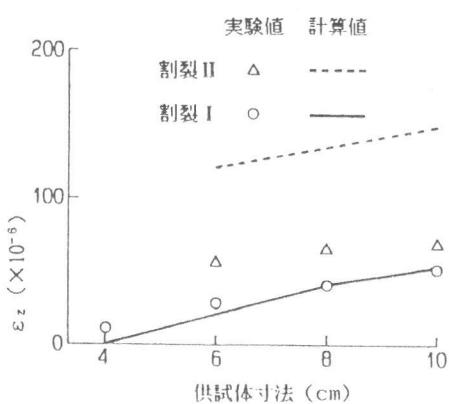


図-8 割裂によるひずみ変化（中心線上）

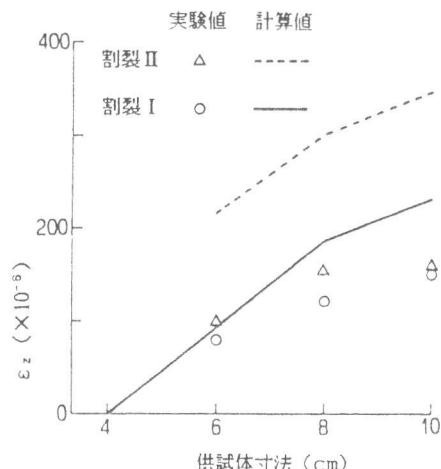


図-9 割裂によるひずみ変化（隅角部）

(1) 水分移動解析の結果に基づけば、乾燥の初期に表面近傍の含水率が急激に低下するため、弾性計算によつた場合は、表面の引張応力が引張強度の10倍となり、現実的な結果が得られなかつた。

(2) リラクセーションに加え、引張変形に対するヤング率低下、引張塑性を考慮した計算では、表面の引張応力の最大は引張強度であり、乾燥50日の範囲では引張強度を取り続ける。

また、乾燥収縮応力の程度を知るために、割裂時の応力開放で生じるひずみを実験および非線形解析で調べた結果、次のようなことが知られた。

(3) 断面の寸法が大きくなるにつれ割裂によるひずみが大きくなるが、本実験に用いた供試体寸法の範囲では、断面が大きくなるほど表面と内部の含水率の差が大きくなるためと思われる。

(4) 中心線上と底部隅角部では、底部隅角部の方が割裂によって生じるひずみが大きい。これは、隅角部の方が含水率が低いため大きな引張応力が働いており、割裂による変形時に受ける拘束も小さいためと考えられる。

(5) 割裂Iに対するひずみの計算値は実験値に良く一致し、割裂IIでは実験値の2倍に近い値が得られたが、除荷過程で微細なひびわれが完全には閉じないのも原因の1つと考えられる。

参考文献

- 1) 滝口克己・堀田久人・小板橋裕一：若材令コンクリートの熱及び乾燥による応力解析法、日本建築学会構造系論文報告集, No.396, pp.118-124, 1989.
- 2) 永松静也・佐藤嘉昭：コンクリートの乾燥収縮ひびわれ実験ならびに応力解析、セチ年報, Vol.37, pp.398-401, 1983.
- 3) 田澤栄一・宮沢伸吾・山本哲也・斎藤幸治：乾燥を受ける無筋コンクリートの自己応力について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.255-260, 1988.
- 4) 秋田宏・藤原忠司・小西俊之・尾坂芳夫：コンクリート中の水分移動における水分伝導率の評価、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.161-166, 1990.
- 5) 秋田宏・山信田正美・尾坂芳夫：内外に温度差を受けるコンクリート製円筒のひびわれ特性、土木学会論文集, No.420, pp.219-228, 1990.