

論文

[1045] 乾燥を受ける無筋コンクリートの自己応力について

正会員 田澤栄一 (広島大学工学部)

正会員 ○宮沢伸吾 (広島大学工学部)

山本哲也 (住友建設)

斎藤幸治 (オリエンタルコンクリート)

1. まえがき

コンクリートに乾燥収縮が生じると、乾燥の進行の早い乾燥面付近の自由な収縮が内部に拘束されるため、乾燥面には引張応力が、内部では圧縮応力が生じる。このような自己応力は、ひずみの測定値に弾性係数を乗じて求めることが原理的に不可能なため、従来その測定は困難とされていた。

コンクリートの自己応力の実測値に基づいた研究としては、近年開発された応力計による乾燥収縮応力の実測例¹⁾があるが、本研究は、金属材料等の加工時残留応力の測定に用いられている逐次除去法²⁾を、乾燥収縮により生じるコンクリートの自己応力の測定に適用し、その測定結果を有限要素法による解析結果と比較し検討したものである。

2. 実験概要

2-1. 使用材料および配合

使用材料およびコンクリートの配合をそれぞれ表-1および2に示す。

表-1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント (比重: 3.14)
細骨材	風化花崗岩系山砂 (F.M.: 3.00, 比重: 2.59, 吸水率: 1.14%)
粗骨材	石灰岩質碎石 (最大寸法: 10mm, 比重: 2.71, 吸水率: 0.32%)
混和剤	リグニンスルホン酸塩系AE減水剤

2-2. 供試体

図-1は曲げ載荷試験用供試体、図-2は自己応力測定用供試体を示したものである。

表-2 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				add. ml/m ³
					W	C	S	G	
10	3±1	4±1	50	46	180	360	780	959	1260

いずれも相対する二面からの乾燥とし、両者の含水率分布が等しくなるように、水分移動方向の長さを同一とした。

2-3. 養生および乾燥条件

コンクリート打設後2日で脱型し、材令7日まで20℃で水中養生した。乾燥させる場合はその後20℃, 50% R.H.の恒温恒湿室内に28日間静置した。供試体の乾燥面以外は、エポキシ樹脂系接着剤でコーティングし、さらにその上に市販のビニールシートを貼付した。

2-4. 逐次除去法による自己応力の測定

図-2に示した供試体を、28日間の乾燥を経た後、乾燥面と平行な面で切断し、軸方向ひずみ分布の切断前後の変化量をコンタクト

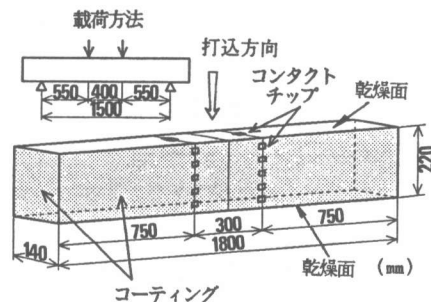


図-1 曲げ載荷用供試体

チップにより測定した。冷却水を使用せずダイヤモンドカッタにより切断を行なった場合は、切断に伴う温度上昇の影響が無視できなかった。そこで、切断直前に図-3に示すように供試体にノッチを設け圧縮力により割裂する方法を採用した。なお供試体割裂後に、絶乾重量（105℃炉乾燥）の測定から28日間乾燥後の脱水量分布の測定も行った。

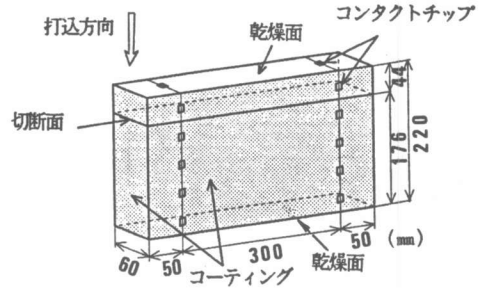


図-2 自己応力測定用供試体

3. 逐次除去法による自己応力の測定

部材内に生じている自己応力は断面内で釣合っているため、供試体の一部を切断すれば新たな釣合い条件を満足すべく弾性変形を生じる。この変形量の測定から自己応力分布を求める方法すなわち逐次除去法を、コンクリートの乾燥収縮により生じる自己応力測定に適用することを試みた。

図-4および5は、二面乾燥を受けたコンクリート供試体を乾燥面に平行な面で2つに切断し、部材軸方向ひずみの切断にともなう変化を示したものである。図中の直線は、測定値を直線回帰したものであるが、測定値はほぼ直線分布を示しており、切断に伴う弾性変形に対しては、平面保持が成立していることが認められる。

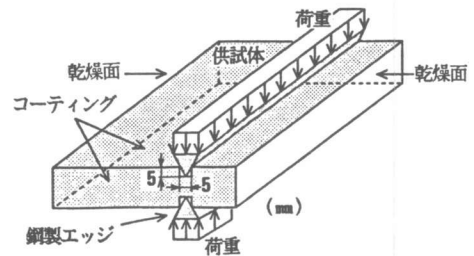


図-3 供試体の切断方法

図-6に示すように、切断に伴ないA部に生じるひずみ変化量 (ϵ) は、B部に生じていた自己応力が切断前の相対的位置でA部に外力として作用した場合の弾性変形に相当すると考えられる。軸力と曲げの成分に分離して考えると、次式が成立する。

図-6に示すように、切断に伴ないA部に生じるひずみ変化量 (ϵ) は、B部に生じていた自己応力が切断前の相対的位置でA部に外力として作用した場合の弾性変形に相当すると考えられる。軸力と曲げの成分に分離して考えると、次式が成立する。

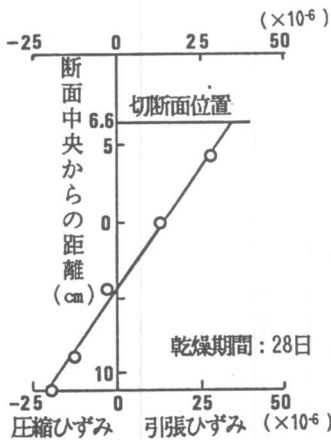


図-4 供試体切断により生じるひずみ分布 (供試体I)

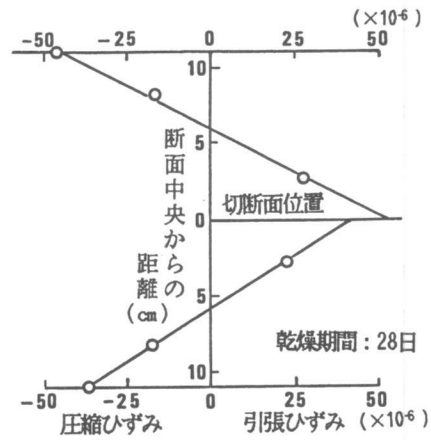


図-5 供試体切断により生じるひずみ分布 (供試体II)

$$E_c \times \epsilon = \frac{P}{A} + \frac{M}{I} \left(x + \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

ただし、

$$P = \int_{h/2-a}^{h/2} b \cdot \sigma_{self} dx \quad (2)$$

$$M = \int_{h/2-a}^{h/2} b \cdot \sigma_{self} (x + a/2) dx \quad (3)$$

A : A部の断面積

I : A部の断面二次モーメント

E_c : コンクリートの静弾性係数 (3.0×10^5 kgf/cm² と仮定)

とし、他の記号は図-6に定義する。

2面乾燥を受けたコンクリートに生じる自己応力を二次曲線で近似できるとすると、乾燥条件の対称性および断面内の垂直応力の釣合いを考慮することにより、引張応力を正として次式で表わすことができる。なお次式は、モーメントの釣合いも満足している。

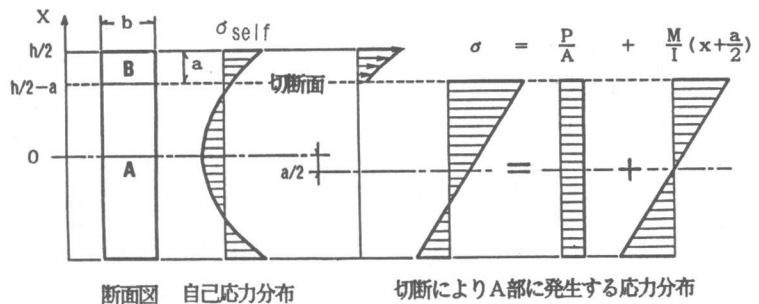


図-6 供試体切断により生じる応力分布

$$\sigma_{self} = \alpha \left(x^2 - \frac{h^2}{12} \right) \quad (4)$$

図-4および5に示した直線回帰式から定まる ϵ を、式(1)に代入し式(4)を用いることにより α を以下のように算出することができる。

供試体Ⅰ(図-4)について

軸力成分の検討から $\alpha = 0.201$

曲げ成分の検討から $\alpha = 0.212$

供試体Ⅱ(図-5)について

曲げ成分の検討から $\alpha = 0.243$ (供試体の下1/2)

曲げ成分の検討から $\alpha = 0.196$ (供試体の上1/2)

供試体Ⅱにおける α の差異は打込み方向の影響と考えられることを考慮すると、上記4つの α はほぼ同一の値となり、逐次除去法によりコンクリートの自己応力を実測することが可能であることが明らかとなった。 α の平均値をとり自己応力分布は次式で与えられる。

$$\sigma_{self} = 0.213 (x^2 - 40.3) \quad (6 \times 22 \times 40 \text{ cm 供試体}) \quad (5)$$

4. 有限要素法による自己応力の解析

乾燥に伴うコンクリート中の水分の移動が拡散方程式に従うと仮定し、有限要素法を用いた一次元線形非定常解析を行なった。さらに有限要素法による自己応力の弾性解析を行ない、逐次

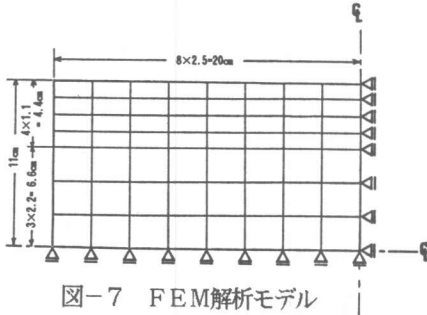


図-7 FEM解析モデル
(供試体長さ: 40cm)

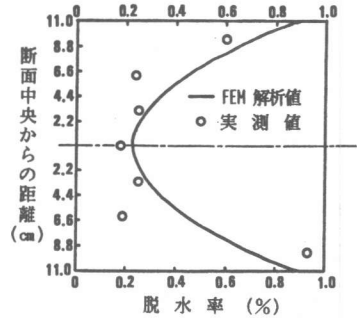


図-8 脱水率分布

除去法による実測値と比較した。図-7は、本解析モデルを示したものである。

位置 y 、時刻 t における脱水率を w (コンクリート質量に対する比) とすると次式が成立するとした。

$$k \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{\partial w}{\partial t}$$

ここで、 k : 拡散係数

供試体の乾燥面における境界条件は、熱伝導における対流熱伝達境界と類似であると考えると、次式で与えられる。

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{f}{k} (w_{\max} - w)$$

ここで、 f : 表面係数 w_{\max} : 最終脱水率

k 、 f および w_{\max} は、脱水率分布の解析値と実測値が乾燥期間 28 日において概ね一致するように次のように設定した (図-8)。

$$k = 0.83 \text{ cm}^2/\text{day}$$

$$f = 0.03 \text{ cm}/\text{day}$$

$$w_{\max} = 4.0\%$$

図-8の理論曲線の形状が実測値とかなり異なるのは、今回 k を含水率によらず一定としたことによると考えられる。

以上のように決定した条件を用いて、コンクリート内部の応力分布を有限要素法による二次元弾性解析により求めた。なお、コンクリートのクリープについては、2面乾燥を受ける $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ 供試体を用いた引張クリープ試験から求めた値 (有効弾性係数 E_e) をそのまま代用することにより考慮した。また、非拘束自由収縮ひずみ (ϵ_0) は脱水率に比例すると仮定し、自己応力の解析値と逐次除去法による実測値が乾燥面において一致するように次のように定めた。

$$E_e = 1.3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\epsilon_0 / w = -450 \times 10^{-6} / (1\%)$$

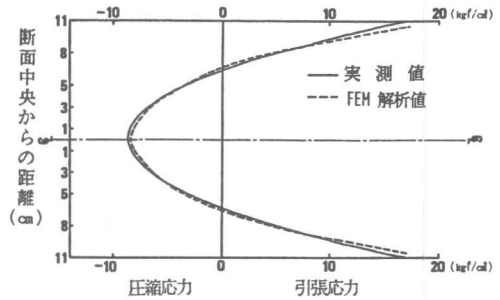


図-9 自己応力分布

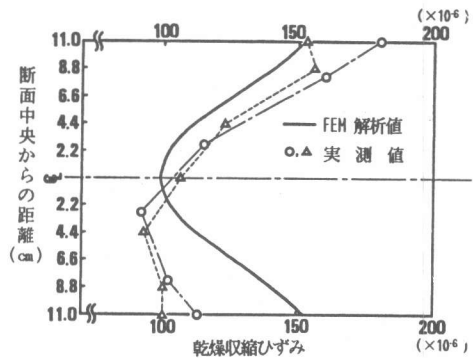


図-10 乾燥収縮ひずみ分布
(供試体長さ: 40cm)

図-9は、自己応力の解析結果を実測値と共に示したものであるが、分布形状および絶対値はいずれもよく一致している。また、図-10および11は、乾燥収縮ひずみについて示したものである。図-10において実測値が解析値と比較して上部で大きく下部で小さくなっておりブリージングの影響と考えられるが、この点を除外すればいずれも概ね一致している。従って、二面乾燥を受けるコンクリートの自己応力分布は、二次曲線で近似し逐次除去法を適用することによりほぼ実測が可能になるといえる。

なお、断面寸法に比べて軸方向長さが比較的短い供試体(図-2参照)では、乾燥収縮ひずみは内部より乾燥面でより大きくなっているが、供試体が高い場合(図-1参照)は断面内でほぼ均一に収縮している。以上の図は部材中央部の長さ30cm区間における平均値として示したものが図-12および13である。これらの図から、部材中央部のほうが端部より内部拘束の程度が大きいため、自己応力も部材中央部でより大きいことが認められる。

5. 自己応力の生じたコンクリートの曲げ破壊

逐次除去法による自己応力の測定に使用した供試体と乾燥条件の等しい供試体の曲げ強度試験を行い、自己応力を生じた無筋コンクリートの曲げ破壊について、応力を用いた従来の方法により検討を行なった。

表-3は、2面乾燥を受けた14×22×180cm供試体の破壊曲げモーメントを示したものである。乾燥面に生じた引張の自己応力によりみかけの曲げ強度は低下している。14×22×180cm供試体についての自己応力分布は、FEM解析結果を参考にし、供試体長さの影響を考慮して式(5)(6×22×40cm供試体についての逐次除去法による実測値)を補正すると次式で表わすことができる。従って乾燥面では、21.0kgf/cm²の引張応力となる。

$$\sigma_{self} = 0.260 (x^2 - 40.3) \quad (14 \times 22 \times 180 \text{ cm 供試体}) \quad (6)$$

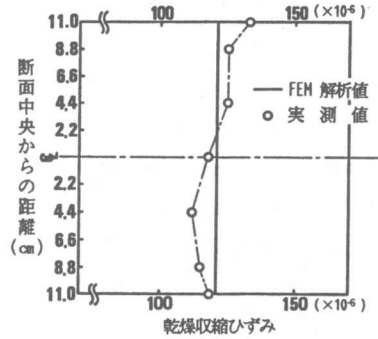


図-11 乾燥収縮ひずみ分布
(供試体長さ:180cm)

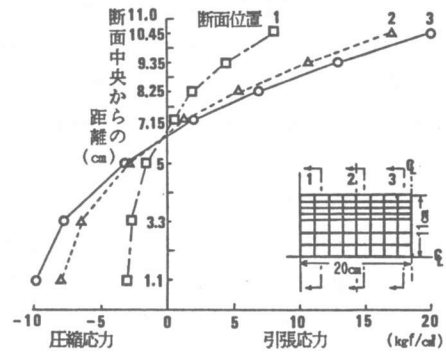


図-12 自己応力分布 (FEM)

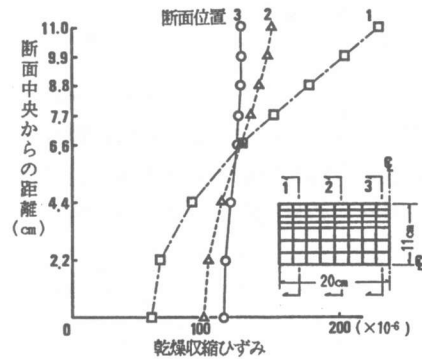


図-13 乾燥収縮ひずみ分布 (FEM)

乾燥を受けていない供試体の曲げ破壊時の断面内応力分布は、力およびモーメントの釣り合いから図-14のように仮定できる³⁾。乾燥を受けた供試体についても、外力による応力を同様な分布形状と仮定して曲げ破壊モーメントから見かけの引張強度を算出すると20.3kgf/cm²となる。この場合、自己応力と外力による応力を重ね合わせた引張縁応力が引張強度 (f_t) に達した時に破壊すると仮定すると、乾燥面における自己応力は $30.9 - 20.3 = 10.6\text{kgf/cm}^2$ と算出される。しかし、この値は式(6)による値 21.0kgf/cm^2 と比べて1/2程度と小さく、従って、曲げ強度のみかけの低下量から自己応力の大きさを直接求めることは不可能である。

図-15は、供試体引張縁近傍の塑性域では外力による応力と自己応力の合計はコンクリートの引張強度に等しいと仮定し、自己応力分布と曲げ破壊モーメントの実測値から外力による応力の分布を求めたものである。このように自己応力の分布形状を考慮して外力による応力分布を求める必要がある。

以上のことから、自己応力の生じたコンクリートの破壊を検討する場合は、着目点における自己応力の大きさのみでなく、その分布形状をも考慮する必要があると考えられる。

6. 結論

本研究で得られた結論を要約すると以下の通りである。

- (1) 梁状のコンクリート供試体を乾燥面に平行な面で切断し、切断前後での部材軸方向ひずみ変化の分布を測定する逐次除去法によりコンクリートの自己応力分布の実測が可能である。
- (2) 逐次除去法によるコンクリートの自己応力の実測値は、有限要素法による解析値とよく一致することから、本測定法の妥当性が確認された。
- (3) 自己応力を生じたコンクリートの破壊条件を求めるためには、自己応力の大きさのみならず断面内の分布形状を考慮する必要がある。

【参考文献】

- 1) 田澤栄一他：新型応力計について，第二回コンクリート工学年次講演会論文集，1980
- 2) 米谷茂：残留応力の発生と対策，養賢堂，1975
- 3) 神山一：鉄筋コンクリート，コロナ社，1968

表-3 曲げ破壊モーメント
($14 \times 22 \times 180\text{ cm}$)

乾燥 期間 (day)	供試 体 No.	引張強度 (割裂) (kgf/cm ²)	破壊曲げ モーメント (kg·cm)
0	1	28.6	60300
	2	35.5	64150
28	3	30.6	35550
	4	31.2	43800

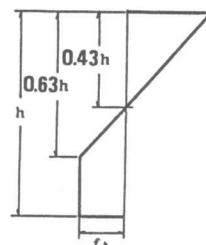


図-14 曲げ破壊時応力分布
(乾燥期間0日)

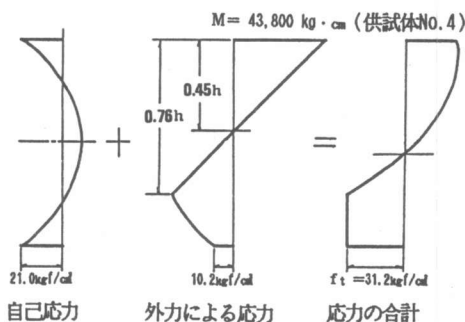


図-15 曲げ破壊時応力分布
(乾燥期間28日)