

# 論文 乾燥を伴うコンクリートはりの初期応力分布と曲げ強度

日高重徳\*1・二羽淳一郎\*2・田辺忠顕\*3

要旨：コンクリートが乾燥した際に、コンクリート内部に発生する応力分布を実験的に測定し、さらに同じ環境下の力学的材料特性とはりの曲げ強度を調べ、初期応力分布形状と材料特性値が曲げ強度に与える影響について検討した。その結果、破壊力学に基づく解析により曲げ強度の変化を説明できることが示された。

キーワード：乾燥収縮、初期応力分布、曲げ強度、破壊力学、材料特性

## 1. はじめに

コンクリートが乾燥により収縮すると、内部には圧縮応力、表面付近に引張応力が生じる。この収縮応力は、材齢、供試体寸法、養生条件等により様々であると考えられる。いずれにしても、コンクリートの乾燥収縮は、ひび割れの主要な原因となりうるため、これがコンクリートの強度に大きな影響を及ぼすことは明らかである。とりわけ、ひび割れの進展に支配されるコンクリートはりの曲げ強度が、この様な応力により低下することが知られている。すなわち、コンクリートの曲げ強度には寸法効果が存在するのであるが、乾燥収縮による初期応力の存在も寸法効果の一因として考えられるのである。

初期応力が作用した際のコンクリートはりの曲げ強度の低下を評価する場合に必要なのは、その時の供試体の材料特性値と、作用している応力の分布形である。

コンクリート内部の応力分布について、田澤ら [1] は逐次除去法により測定し、これを2次曲線で近似している。一方、秋田ら [2] は、引張応力が生じるのは乾燥表面の1cm程度であると含水率分布からの解析により示している。初期応力の分布がどの様であるかは、その条件により異なるが、これによりコンクリートの曲げ強度の変化の度合が大きく左右されると考えられる。したがって本研究においては、田澤らによる実験と類似の方法により、コンクリート内部の初期応力を実験的に調べ、分布形を求めることを試みた。

なお、コンクリートはりが乾燥した場合に、供試体内の水分の蒸発による乾燥収縮の他、自己収縮が生じると言われている。本研究では、乾燥収縮と自己収縮による応力を包含したものを初期応力として扱うことにする。

## 2. コンクリート断面内の応力分布測定

### 2.1 測定理論

矩形断面を有するコンクリートはり断面内に、この面に垂直に応力が作用している際、このはりを図-1のように層状に削り取ることにより、この応力分布を求めることができる。

はりは単位幅とし、はり軸方向にのみ応力が存在し、この応力ははりの高さに沿ってのみ変化するとする。高さ  $h$  のはり表面から深さ  $z$  の位置における応力  $\sigma$  は、次式で表すことができる [3]。

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)  
 \*2 名古屋大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)  
 \*3 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

$$\sigma = \sigma_a - \sigma_b - \sigma_c \quad (1)$$

$\sigma_a$ は、層除去されて残った部分の表面層に存在する応力で、深さ  $z$  のところでさらに微小高さ  $dz$  を除去する事により失われる応力である。 $\sigma_b$ と $\sigma_c$ は層除去により、この層で解放される応力で、 $\sigma_b$ は一様な伸びのために深さ  $z$  のところで増加した応力、 $\sigma_c$ は深さ  $z$  までの除去による中立軸の曲率変化により深さ  $z$  の位置で増加した応力である。

はりの高さが  $h$  から  $h-z$  まで除去されると、残った部分の応力は断面内で一様に

$$\sigma_b = \frac{1}{h-z} \int_0^z \sigma dz \quad (2)$$

だけ増加する。また、層除去の前後で中立軸の曲率の変化量を  $1/\rho (= 1/\rho_1 - 1/\rho_0)$  とすると、深さ  $z$  まで除去した後の除去表面では、さらに  $\sigma_c$  だけ増加する。この  $\sigma_c$  は、曲げによる曲率とひずみの関係から

$$\frac{\sigma_c I}{(h-z)/2} = \frac{EI}{\rho} \quad (3)$$

であり、したがって

$$\sigma_c = E \frac{1}{\rho} \frac{h-z}{2} \quad (4)$$

となる。

次に、深さ  $z$  のところからさらに厚さ  $dz$  を除去することによる、はりの曲率の変化量  $d(1/\rho)$  が

$$d\left(\frac{1}{\rho}\right) = d\left(\frac{M}{EI}\right) = \frac{6\sigma_a dz}{E(h-z)^2} \quad (5)$$

で与えられる。したがって

$$\sigma_a = \frac{E(h-z)^2}{6} \frac{d(1/\rho)}{dz} \quad (6)$$

となる。

以上から、式(1)は

$$\sigma = \frac{E(h-z)^2}{6} \frac{d(1/\rho)}{dz} - \frac{E(h-z)}{2} \frac{1}{\rho} - \frac{1}{h-z} \int_0^z \sigma dz \quad (7)$$

となる。ここで、応力  $\sigma$  を曲率  $\rho$  の関数として表すと式(8)のように表される [4]。

$$\sigma = E \left\{ \frac{(h-z)^2}{6} \frac{d(1/\rho)}{dz} - \frac{2(h-z)}{3} \frac{1}{\rho} + \frac{1}{3} \int_0^z \frac{1}{\rho} dz \right\} \quad (8)$$

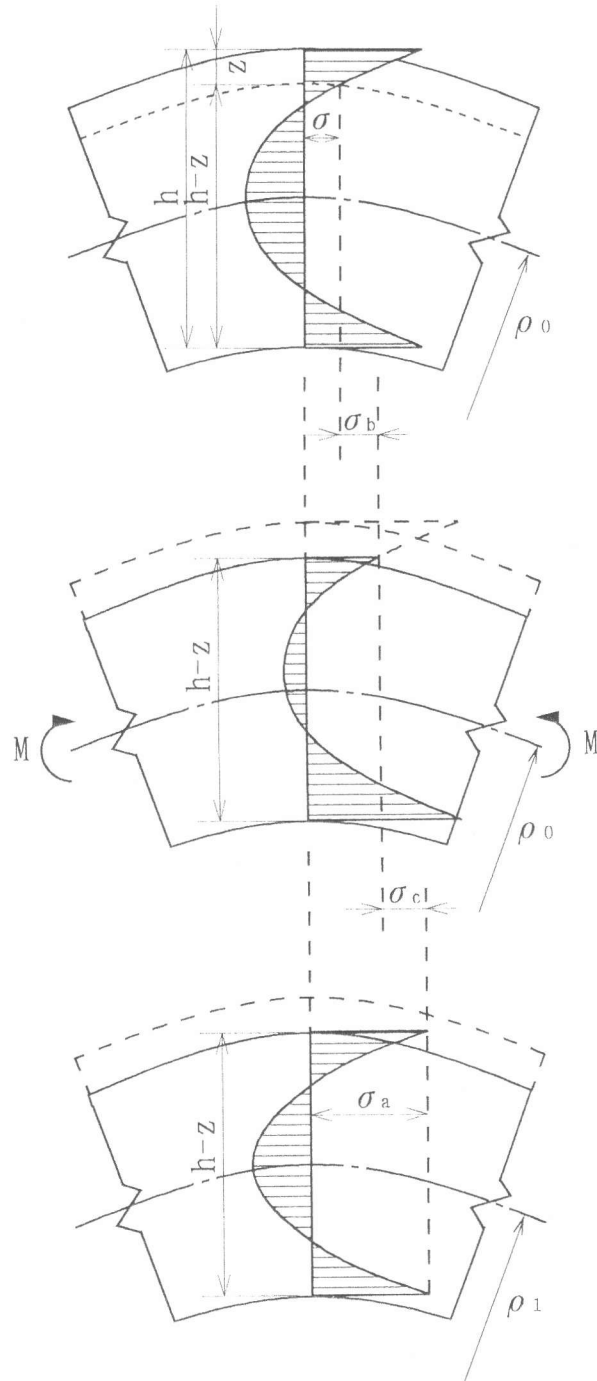


図-1 断面内応力の概念図

したがって、層除去した際の曲率を測定すれば、その点における応力を算出することができる。なお、本研究においては、両面からの応力分布が対称形になると仮定し、上式によりコンクリートの被乾燥面から中心部までの応力分布を求めた。

## 2.2 実験概要

本実験で用いたコンクリートの配合は表-1の通りである。

表-1 配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
13	50	48.5	191	382	796	886	0.43

ここで用いたセメントは、比重 3.14 の早強セメントである。粗骨材は春日井産砕石で最大寸法は 13mm であり、比重は 2.62、吸水率 0.858%、F.M.=6.62。細骨材は豊田産山砂で、比重は 2.51、吸水率 1.469%、F.M.=2.80 である。また、スランプは  $8 \pm 1$  (cm)、空気量は  $3 \pm 1$ % であった。混和剤には、高性能 AE 減水剤を用いた。

供試体の寸法を図-2に示す。これは曲げ試験用のコンクリートはり (3 等分点载荷) の中央の部分を想定し、 $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 10\text{cm}$  及び  $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 10\text{cm}$  とし、側面 ( $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ ,  $50\text{cm} \times 50\text{cm}$  の面) には 2.5cm 間隔で、三角形 (一辺 1cm) の切欠きをつけてある。これは打設時に、型枠に木片を取り付けることにより作ることとした。乾燥を防ぐため、型枠の内側には厚くグリースを塗り、打設直後に表面をポリ塩化ビニリデンシートで覆い、材齢 24 時間での脱型後、材齢 7 日まで

水中養生した。その後、上下 2 面を除く 4 面を覆い、3 日、7 日、28 日、91 日間室内 ( $25 \pm 3^\circ\text{C}$   $70 \pm 5\%$  R.H.) で気中養生することにより、2 面のみ乾燥させた。このとき非乾燥面は、厚さ 0.55mm のゴム系の粘着テープ、ポリ塩化ビニリデンシート、布製粘着テープの順に貼り付け、塩ビシーの継目部はポリエステル系テープでふさいだ。

試験は、Cap. = 200tf の油圧式万能試験機による割裂により、乾燥面から厚さ 2.5cm ずつ層除去し、供試体のひずみ分布を読みとることにより各層除去後の供試体の曲率を求め、前述の計算法により断面内の応力を計算した。なお、打設時に設けた切欠き部に、直径 16mm、長さ 50cm の丸錐をあてがい、切欠き部で確実に割裂、層除去できるようにした。

## 2.3 実験結果

2.2 に示した方法により、 $h = 20\text{cm}$  と  $h = 50\text{cm}$  の供試体について 7 日、28 日、91 日間の乾燥

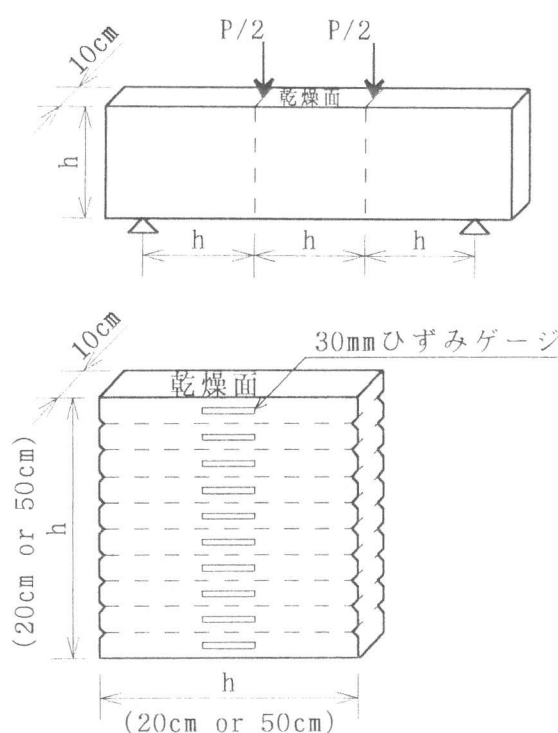


図-2 供試体寸法

後の応力分布をまとめたものが図-3と図-4である。ただし、これらは比較のため供試体寸法に対する乾燥面からの距離で表してある。また、図中には2次曲線を破線で示した。

これらの図から次のことがわかる。供試体寸法が20cmと50cmともに乾燥期間が長くなるほど、応力が引張から圧縮に変わる点が供試体内部へ移動する。また、乾燥期間が長くなるほど供試体内部の圧縮応力が大きくなる。そして、供試体寸法の小さなもので乾燥期間が91日程度になると2次曲線に近い形状となる。しかし、大きな供試体はさらに乾燥期間を経なければ2次曲線にはならない。また、これらの分布形状で特徴的なことは、特に供試体寸法の大きなもので乾燥期間が短いものほど乾燥面付近で応力が大きく変化し、供試体内部の圧縮応力は僅かしか生じないことである。したがって、20cmと50cmの供試体で、同じ乾燥期間のものを比較すると、乾燥面での引張応力はほぼ同じようであるが、供試体内部の圧縮応力は供試体寸法の大きなものほど小

さくなる傾向にある。また、応力が引張から圧縮に変わる点は、寸法の小さい方が内側にあることがわかる。これらの結果は、寸法の小さな供試体ほど早く乾燥が進行し、寸法の大きなものは内部まで影響を受けにくいことから妥当な結果であると考えられる。

### 3. 乾燥による材料特性値の変化

本研究では、コンクリート断面内の応力分布の他、圧縮強度、割裂引張強度、弾性係数、破壊エネルギー、無筋コンクリートはりの曲げ強度も同時に求めた。これらの試験に用いた供試体は、全て材齢7日までは水中養生したが、その後は乾燥させたものとそのまま水中に静置したものに分かれる。

圧縮強度、割裂引張強度、弾性係数は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体から求め、弾性係数は応力ひずみ関係の1/3割線係数から求めた。これらはいずれも同一バッチで3体以上、3バッチ以上を平均して求めた。破壊エネルギーはRILEMの推奨法に基づき、 $84\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の切欠きはり3点曲げ試験による荷重-変位曲線から求めた。なお、無筋コンクリートはりの曲げ強度は、 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ (スパン30cm)、高さ $20\text{cm} \times$ 幅 $10\text{cm} \times 70\text{cm}$ (スパン60cm)及び、高さ $50\text{cm} \times$ 幅 $10\text{cm} \times 180\text{cm}$ (スパン150cm)の3等分点载荷による材齢7日及び35日の曲げ強度と、材齢7日まで水中養生した後、上下2面を除く4面を覆い、3日、7日、28日、91日間室内( $25 \pm 3^\circ\text{C}$ 、

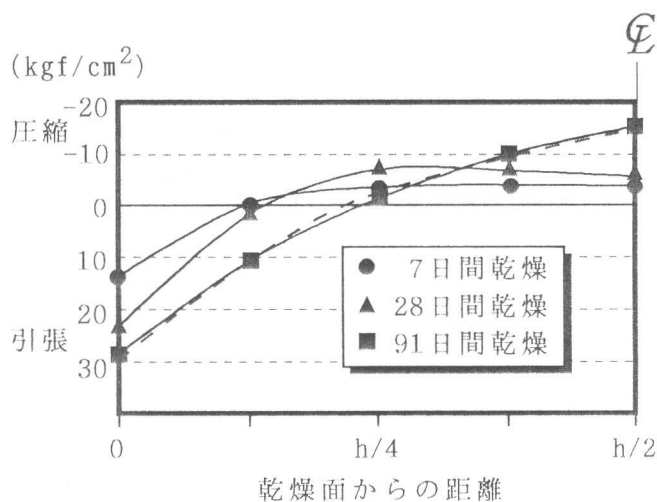


図-3  $h = 20\text{cm}$  の断面内応力分布

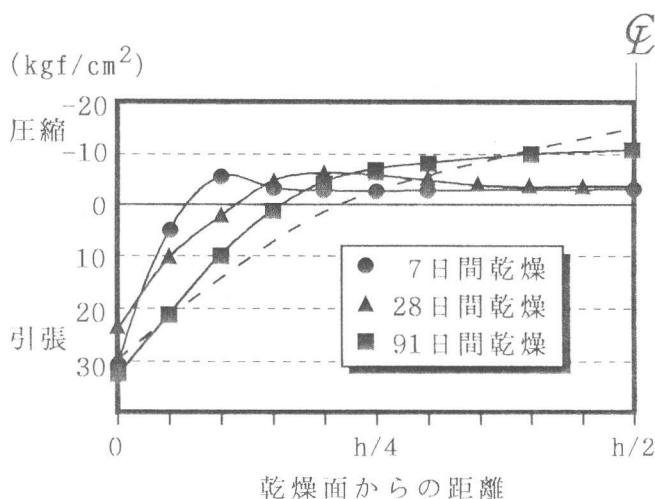


図-4  $h = 50\text{cm}$  の断面内応力分布

70±5% R.H.)で気中養生することにより、2面のみ乾燥したはり供試体の曲げ強度を測定した。このとき非乾燥面は、応力分布測定に用いた供試体と同様にシールした。

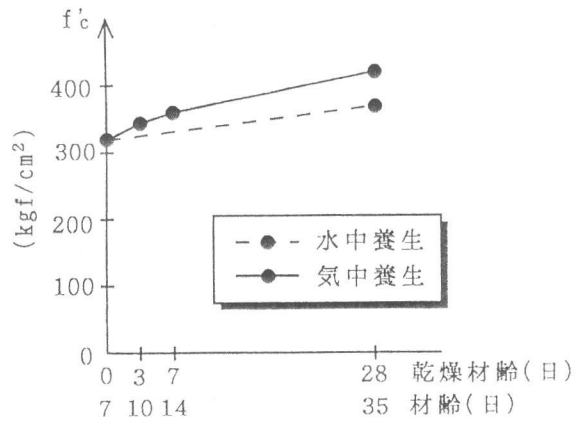
### 3.1 材料特性値の経時変化

圧縮強度、引張強度、弾性係数、破壊エネルギーの測定結果を図-5の(a)~(d)に示す。この結果から以下のことがいえる。圧縮強度は、乾燥するほど強度が若干高くなる。引張強度は乾燥開始後に急激な強度上昇がみられるが、その後徐々に強度が低下する。弾性係数は乾燥開始後急に低下するが、その後すぐに回復する。破壊エネルギーも、乾燥開始後に若干低下するが、その後すぐに回復し、水中養生したものと同等の値となった。

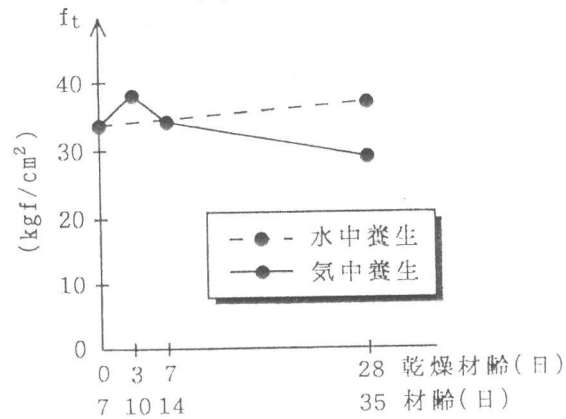
### 3.2 無筋コンクリートはりの曲げ強度の変化

次に、無筋コンクリートはりの曲げ強度を、図-6の(a)~(c)に示す。図中の●印が実験により得られた結果であり、 $h = 10\text{cm}$ と $h = 20\text{cm}$ の結果によれば乾燥開始後に一度急激な曲げ強度の低下を示し、その後水中養生したものと同等の強度にまで回復する現象が認められる。これに対し、3.1で得られた各時点での材料特性値(弾性係数、引張強度、破壊エネルギー)と、2.で求めた初期応力分布を用いて、ロッド要素[5]を用いた破壊力学に基づく有限要素解析を行った結果が、▲印である。この解析は、仮想ひび割れモデルを用いており、引張軟化曲線には1/4モデルを使用している。この解析からも、実験で得られたような曲げ強度の低下とその後の強度回復が再現されている。また、図-6中に△印で示したものは、3.1で求めた材料特性値と、初期応力分布を2次曲線とした場合の解析(乾燥面での引張応力を3.1の結果と合わせたもの)により得られた結果である。これらの比較により、初期応力分布の形状の相違による影響も非常に大きいといえる。

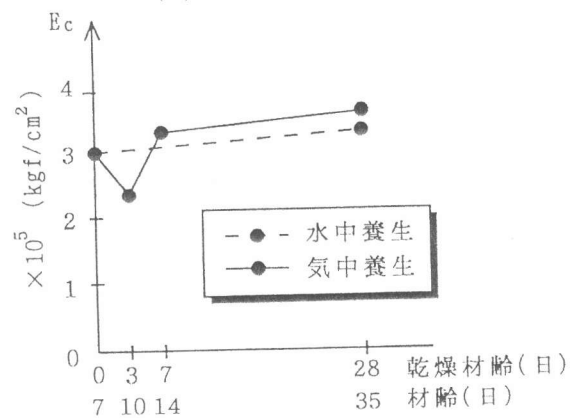
コンクリートはりの曲げ強度の乾燥による変化を初期応力分布と材料特性値の変化を考慮することにより、破壊力学により説明できることがわか



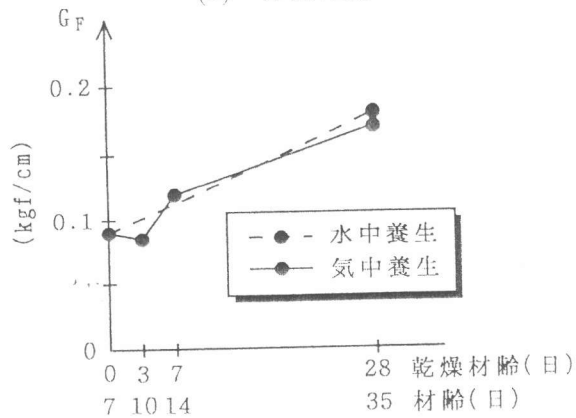
(a) 圧縮強度



(b) 割裂引張強度



(c) 弾性係数



(d) 破壊エネルギー

図-5 各種材料特性値の乾燥による変化

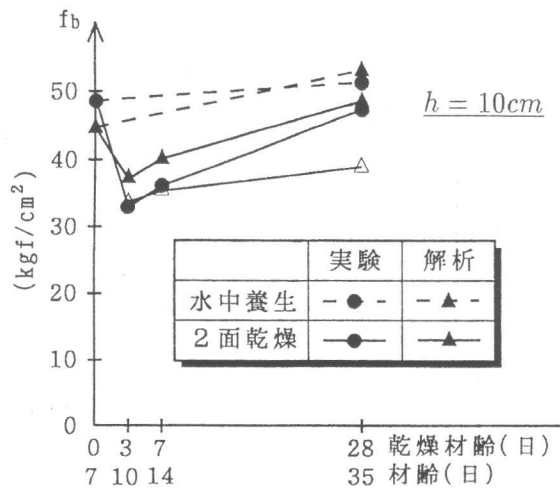


図-6(a) 10 × 10 × 40cm のはりの曲げ強度

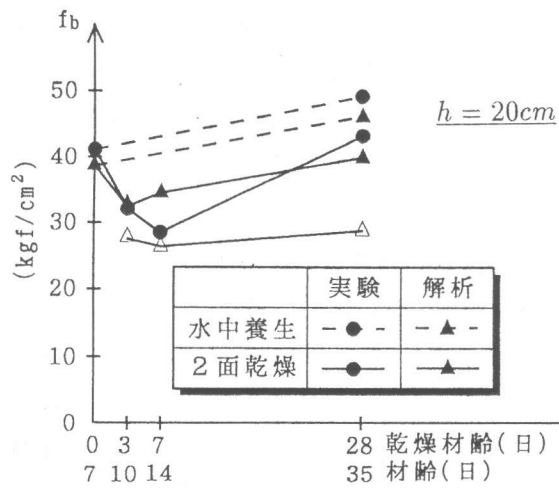


図-6(b) 20 × 10 × 70cm のはりの曲げ強度

る。ただし  $h = 50\text{cm}$  の供試体については、乾燥期間 28 日の曲げ強度が実験で低下し、解析で上昇するという逆の結果となった。これは、 $h = 10\text{cm}$  と  $h = 20\text{cm}$  の供試体はいずれも同一バッチから 2~3 体、2~3 バッチ以上について作製したが、 $h = 50\text{cm}$  の供試体は各 1 体のデータであり、ばらつきの影響が含まれていると考えられるため、さらなるデータの蓄積が必要であると思われる。

#### 4. まとめ

コンクリートが乾燥した際にコンクリート内部に生じる応力の分布を、供試体寸法と乾燥期間の違うものについてそれぞれ求めることができ、またその違いを確認できた。さらに、コンクリートが乾燥すると、圧縮強度、引張強度、弾性係数、破壊エネルギーのような材料特性値が大きく変化する様子も実験的に調べることができた。また、無筋コンクリートはりの曲げ強度は乾燥により低下し、その後再び上昇するという結果が実験的に得られたのであるが、コンクリート内部の初期応力分布と各種材料特性値の変化を考慮することにより、破壊力学に基づく解析で説明できることが示された。

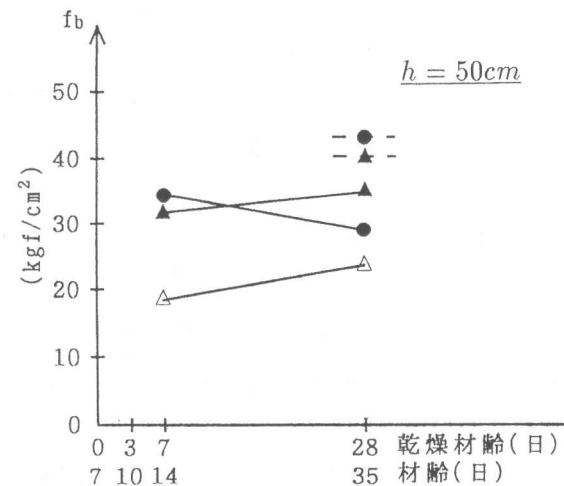


図-6(c) 50 × 10 × 180cm のはりの曲げ強度

#### 参考文献

- 1) 田澤栄一、宮沢伸吾、山本哲也、斉藤幸治：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、1988.6
- 2) 秋田宏、藤原忠司、尾坂芳夫：含水率分布にもとづいた乾燥収縮応力の評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.1, pp.403-408、1991.6
- 3) Donald, G. R. : A Study of Certain Mechanically-Induced Residual Stresses, Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis, Vol.3, No.1, pp.40-61, 1945
- 4) 川田雄一：残留応力とその測定、日本機械学会誌、第 55 巻、第 406 号、pp.720-725、1952.11
- 5) 二羽淳一郎：非線形ロッド要素を用いたコンクリートはりの曲げ強度寸法効果解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp.75-80、1993.6