

論文 自己収縮による応力履歴がコンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性に及ぼす影響

青木 優介^{*1}・下村 匠^{*2}

要旨：養生期間中に導入される自己収縮応力履歴が、一軸引張条件下にあるコンクリートの応力-ひずみ関係、ひび割れ発生条件に及ぼす影響について検討した。養生期間中の拘束条件を変化させた一軸拘束収縮試験を行った。自己収縮による拘束応力の履歴により乾燥開始以降のコンクリートの有効弾性係数およびひび割れ応力が低下すること、両者の低下の割合は自己収縮応力履歴に依存することを明らかにした。

キーワード：自己収縮、応力履歴、応力-ひずみ関係、ひび割れ応力、一軸拘束収縮試験

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮ひび割れ抵抗性を試験する一軸拘束収縮試験を用いた既往の研究によると、自己収縮が大きいコンクリートの場合、ひび割れの原因には、乾燥開始以降の収縮だけでなく、乾燥開始以前の自己収縮が拘束されることによる応力が含まれていることが明らかにされている¹⁾。これは、合理的な実験事実である。しかし、乾燥開始以前の自己収縮が拘束されることは、導入される応力が単純に加算されるのみなのか、コンクリートの特性（ここでは応力-ひずみ関係とひび割れ応力）にも影響するのか、詳細は不明である。既往の多くの実験は、乾燥収縮と自己収縮が複合する条件下で行われており、それぞれの影響を個別に定量化することが困難だからである。

一方、著者らは、乾燥収縮ひび割れに関する研究において、系統的な一軸引張試験を行い、100×100mmの断面のコンクリートに関して、応力-ひずみ関係およびひび割れ応力に及ぼす乾燥と乾燥収縮応力履歴の影響を実験的に抽出した²⁾。その結果、乾燥開始以前の自己収縮の影響を排除した一軸拘束収縮試験体については、収縮応力導入過程およびひび割れ応力が、一軸引張試験の結果をもとに予測可能であることを確認した。

そこで本論文では、乾燥開始材齢および養生期間中の拘束条件を変化させた一軸拘束試験を行い、乾燥開始以前に自己収縮が拘束されることにより持続的に導入される応力が、乾燥開始以降の引張応力-ひずみ関係とひび割れ応力に及ぼす影響について検討する。

2. 養生期間中の拘束条件を変化させたコンクリートの一軸拘束収縮試験

2.1 実験概要

(1) 一軸拘束収縮試験

乾燥開始材齢および養生期間中の拘束条件を3種類に変化させた一軸拘束収縮試験を行った。各供試体の実験条件を表-1に示す。

NR 供試体は、乾燥開始以前に自己収縮が拘束されることによる応力の導入を避けた供試体である(図-1)²⁾。通常の一軸拘束収縮試験と異なり、拘束鋼材を定着させずにコンクリートの打設と養生を行い、材齢14日に拘束鋼材をスポット溶接し乾燥を開始した。よって、乾燥開始以降の収縮のみが外部拘束応力の原因となる。

表-1 各一軸拘束収縮試験体の実験条件

供試体名	形状・寸法	拘束開始材齢	乾燥開始材齢
NR	JIS原案 に準拠	14日	14日
R14		打設時	14日
R7		打設時	7日

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科材料工学専攻 工修 (正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 工博 (正会員)

R14 供試体と R7 供試体は、コンクリート打設時から拘束鋼材を定着させる一般的な一軸拘束収縮試験体である。乾燥開始前後を問わず、打設以降のコンクリートの収縮がすべて外部拘束応力の原因となる。R14 供試体は乾燥開始材齢を 14 日、R7 供試体は 7 日とした。

本研究における一軸拘束収縮試験体は、試験区間のコンクリートの左右両側面のみを乾燥させている。これは、今後の研究のために、部材断面内部の水分、ひずみ、応力の分布を、理論の検証に適した一次元分布にすることを意図したためである。ただし、4 面乾燥の場合よりも乾燥が遅くなるので、ひび割れの発生までに時間がかかることを懸念し、拘束鋼材の合計断面積を通常の約 2.7 倍の 1923.3mm^2 としている。

拘束鋼材の中心に軸方向に貼り付けた基長 5mm のひずみゲージにより、拘束鋼材のひずみをコンクリート打設後 24 時間から (NR 供試体は乾燥開始から) 測定した。

(2) 自由収縮試験

並行して自由収縮試験を行った。供試体は、断面 $100\times 100\text{mm}$ 、長さ 300mm の角柱であり、長軸方向の左右両側面のみ乾燥させる。乾燥開始材齢は、各一軸拘束収縮試験に対応させた。供試体のひずみは、中央部に埋設した埋込型ひずみゲージにより、打設後 24 時間から測定した。

(3) コンクリートの配合、養生・乾燥条件

実験に用いたコンクリートの配合・使用材料を表-2 に示す。打設後、供試体はポリエチレンシートを用いて乾燥を防ぎ、室温 20°C の室内に 24 時間静置した。その後脱枠し、供試体全面をアルミテープでシールして、再び同室内に乾燥開始まで静置した。乾燥開始時に所定の処置を施し、湿度を 60% とした同室内で乾燥させた。

2.2 実験結果

各供試体のひずみの経時変化を図-2 に示す。図中には、材齢 0 日から 14 日までの結果を拡大した小図も付記している。小図より、R14,R7 供試体では、乾燥開始材齢 14,7 日までに拘束鋼材に圧縮ひずみが導入されており、養生期間中に

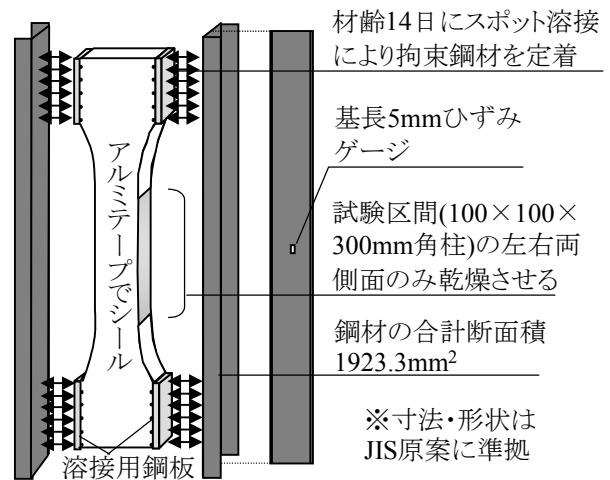


図-1 NR供試体の概要

表-2 コンクリートの配合および使用材料

スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)					
		W	C	S	G	Ad1	Ad2
20	5.5	180	360	776	967	1.12	1.08

W:水道水
C:普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)
S:信濃川産川砂(密度 $2.63\text{g}/\text{cm}^3$)
G:石灰岩碎石(密度 $2.68\text{g}/\text{cm}^3$, 最大寸法 20mm)
Ad1 :AE減水剤
Ad2 :AE助剤

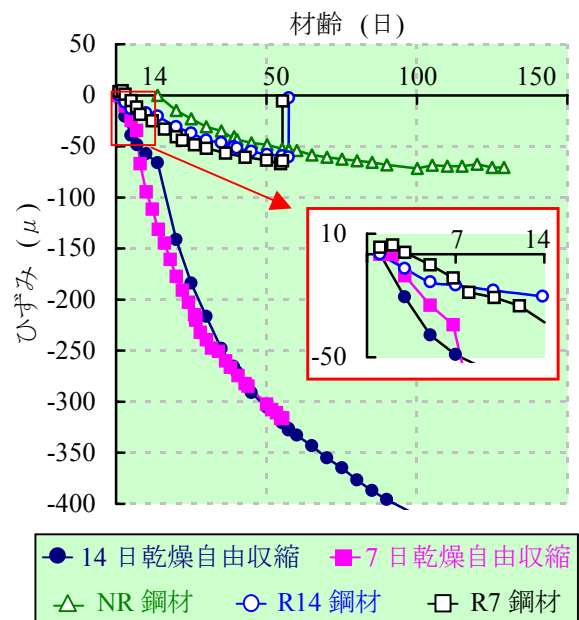


図-2 各供試体のひずみの経時変化

自己収縮応力が生じていたことがわかる。

R14,R7 供試体では、それぞれ材齢 57,55 日において貫通ひび割れが発生している。しかし、NR 供試体では、材齢 100 日以降応力が頭打ち

となり、貫通ひび割れは発生しなかった。この理由は明らかではないが、別方法で養生期間中の拘束を除去している上田³⁾の一軸拘束収縮試験においても、同様の結果が多数認められる。

3. 応力-ひずみ関係とひび割れ応力に及ぼす自己収縮応力履歴の影響

3.1 検討方法

著者らは、既報²⁾において、乾燥条件と荷重速度を変化させたコンクリートの一軸引張試験結果から、乾燥と乾燥収縮応力履歴の影響を考慮した、100×100mm断面のコンクリートの一軸引張応力-ひずみ関係およびひび割れ応力に関する実験式(1)(2)を定式化している。

$$\frac{E_{ef}(S, t_d)}{E_{ef}(0, 0)} = 1 - \frac{S}{1.95 + 3.47S} - \frac{t_d}{0.93 + 8.09t_d} - 2.70 \frac{S}{1.95 + 3.47S} \frac{t_d}{0.93 + 8.09t_d} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_{cr}(t_d)}{\sigma_{cr}(0)} = 1 - \frac{t_d}{2.09 + 4.08t_d} \quad (2)$$

式中では、乾燥の影響を乾燥時間 t_d (日)により、応力履歴の影響を応力の時間積分値 S (MPa・日)により表現している。式(1)において、 $E_{ef}(S, t_d)$: 応力の時間積分値 S 、乾燥時間 t_d を受けたコンクリートの有効接線弾性係数(MPa)、 $E_{ef}(0, 0)$: 応力の時間積分値 S 、乾燥時間 t_d が0のコンクリートの有効弾性係数である。また、式(2)において、 $\sigma_{cr}(t_d)$: 乾燥時間 t_d を受けたコンクリートのひび割れ応力(MPa)、 $\sigma_{cr}(0)$: 乾燥時間 t_d が0のコンクリートのひび割れ応力である。これらを用いた解析により、NR 供試体(乾燥開始以前の収縮の影響を排除した一軸拘束収縮試験体)の収縮応力導入過程およびひび割れ応力が説明可能であることを確認している(図-3)²⁾。

ここでは、このNR 供試体の結果を予測できる解析手法を用いて、つまり養生期間中に導入される自己収縮応力履歴の影響を考慮せずに

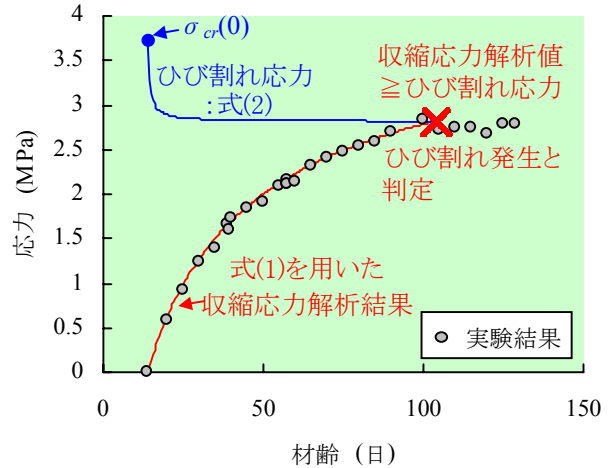


図-3 NR 供試体の収縮応力導入過程

R14,R7 供試体の収縮応力導入過程、ひび割れ応力の予測を行い、実験結果と解析結果を比較することにより、応力-ひずみ関係、ひび割れ応力に及ぼす自己収縮応力履歴の影響を検討する。

なお、本研究における収縮応力解析は、100×100mm断面のコンクリートを一要素として行うものである。また、不確実要因を排除するため、自由収縮ひずみは実験値を用いる。

3.2 自己収縮応力履歴を考慮しない解析

(1) R14 供試体

NR 供試体と同じ解析手法を用いて、R14 供試体の収縮応力導入過程、ひび割れ応力を計算した結果が、図-4の解析Aである。乾燥開始時点で導入されている自己収縮応力は実験値を与え、解析値の始点を実験値と一致させている。

解析Aより得た乾燥期間中の収縮応力、ひび割れ応力は、ともに実験結果を上回る結果となった。このことから、養生期間中の自己収縮が拘束されることによる応力は、単に乾燥開始以降の拘束応力に加算されるだけでなく、乾燥開始以降のコンクリートの応力-ひずみ関係、ひび割れ応力にも影響を与えることがわかる。

(2) R7 供試体

同じく養生期間中の自己収縮応力履歴の影響を考慮せずにR7 供試体の収縮応力導入過程、ひび割れ応力の計算を行った結果が、図-5に示す解析Aである。解析Aによる収縮応力とひび割れ応力は、やはり実験結果を上回っている。

なお、R7 供試体の解析では、材齢 7 日から 14 日の間において、水和の進行による静弾性係数と引張強度の増進を考慮している。材齢 14 日以降は、水和の進行による静弾性係数と引張強度の増進がほとんど無かったため、NR 供試体や R14 供試体では考慮していない。

3.3 自己収縮応力履歴の影響に関する考察

図-4 の解析結果 B は、R14 供試体の実験結果に一致するように、収縮応力解析に用いるコンクリートの有効弾性係数の実験式(1)中の $E_{ef}(0,0)$ (乾燥開始時点における弾性係数)を 30%、ひび割れの判定に用いるコンクリートのひび割れ応力の実験式(2)中の $\sigma_{cr}(0)$ (乾燥開始時点における引張強度)を 15%低下させたものである。同様に、図-5 の解析結果 C は、R7 供試体の実験結果に一致するように、有効弾性係数の実験式(1)中の $E_{ef}(0,0)$ を 20%、ひび割れ応力の実験式(2)中の $\sigma_{cr}(0)$ を 5%低下させたものである。これらの操作における、弾性係数ならびに引張強度の低下割合は、養生期間中の自己収縮が拘束されることによる応力の履歴により、乾燥開始時のコンクリートに導入されている損傷の程度に関係していると考えられる。

乾燥開始時点において導入されている自己収縮応力の引張強度(材齢 28 日における一軸引張強度 3.73MPa に基づき推定式により算出)に対する比は、R14 供試体で約 22%、R7 供試体で約 14%である。乾燥開始までの養生期間も R14 供試体の方が 7 日間長い。したがって、R7 供試体よりも R14 供試体の方が、乾燥開始までに自己収縮応力履歴の影響を大きく受けていると考えるのが自然である。

森下ら⁴⁾は、自己収縮が完全に拘束され、引張強度に対して 20~30%の拘束応力を受け続けたコンクリートの材齢 7 日における引張弾性係数が、強度試験から求めた弾性係数の約 55%にまで低下すること、割裂引張強度が通常の 90%に低下することを報告している。条件に多少の違いがあるが、本研究の実験結果は、森下らの結果に符合する。

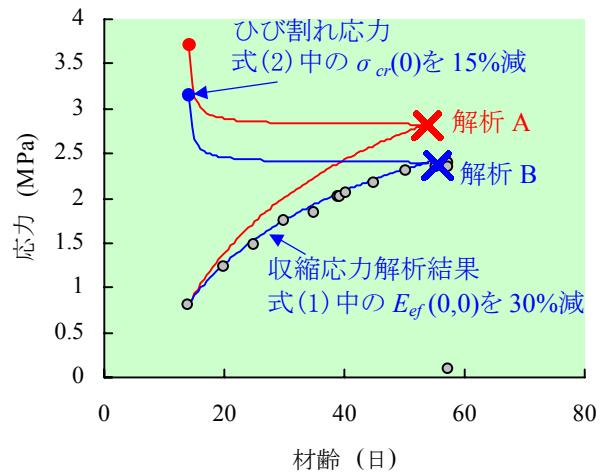


図-4 R14 供試体の収縮応力導入過程

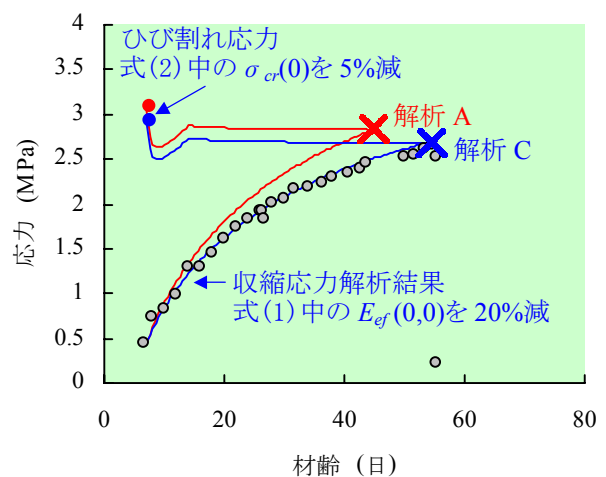


図-5 R7 供試体の収縮応力導入過程

4. 既往の実験結果による自己収縮応力履歴の影響の検証

4.1 検証の方法

(1) 概要

前章で試みた、養生期間中の自己収縮応力履歴がコンクリートの有効弾性係数とひび割れ応力に及ぼす影響を考慮する方法が、どれだけ一般性を持つのか、本章で検討する。既往の研究で報告されている、一軸拘束収縮試験結果の収縮応力導入過程、ひび割れ応力を前章の方法により計算し、方法の妥当性を検討する。

(2) 検証に用いる実験データ

検証には、大野ら⁵⁾、飛坂ら⁶⁾によって行われた一軸拘束収縮試験の結果を用いる。実験条件の概要を表-3 に示す。これらの実験結果を選択した理由は、乾燥開始時点で導入されている自己収縮応力が評価可能であることである。

(3) 解析方法

一軸拘束収縮試験体の解析手順を以下に示す。

- 乾燥開始時点で導入されている自己収縮応力は実験値を用い、解析値の始点を実験値と一致させる。
- 乾燥開始時点で導入されている自己収縮応力と割裂引張強度の比が 20%以上となる供試体については、R14 供試体の検討結果に従い、乾燥開始時点におけるコンクリートの弾性係数を 30%、引張強度を 15%低下させる。自己収縮応力と割裂引張強度の比が 20%未満となる供試体については、R7 供試体の検討結果に従い、弾性係数を 20%、引張強度を 5%低下させる。
- 乾燥開始以降の自由収縮ひずみは、実験値を用いる。
- 乾燥開始以降の各時点における有効弾性係数とひび割れ応力は、実験式(1)(2)を用いて乾燥と応力履歴の影響を考慮する。

(4) 実験結果と解析結果の比較方法

有効弾性係数の妥当性を検証するには、同時点における収縮応力の実験値と解析値とを比較すればよい。今回は、図-6 に示すように、実験のひび割れ発生時点において両者を比較する。ひび割れ応力の妥当性は、ひび割れ発生時点における応力の実験値と、同時点におけるひび割れ応力の解析値との比較により検証する。

4.2 実験結果と解析結果の比較

(1) 有効弾性係数

実験のひび割れ発生時点における収縮応力の実験値と解析値の比較を図-7 に示す。図中の黒塗り点は、養生期間中に導入される自己収縮応力履歴の影響を 4.1(3)の b)に述べた方法により考慮した場合、白抜き点は考慮しない場合である。影響を考慮した解析結果の方が、実験結果と一致する傾向にあることがわかる。

(2) ひび割れ応力

ひび割れ発生時点における応力の実験値と、同時点におけるひび割れ応力の解析値との比較を図-8 に示す。図-7 の場合よりも、一致の程

表-3 大野ら, 飛坂らの実験条件

項目	大野ら	飛坂ら
供試体数(体)	45	8
水セメント比(%)	30,45,60	35,45,60
乾燥開始材齢(日)	7,28	7
拘束鋼材断面積(mm ²)	496,697,1019	826
粗骨材量(kg/m ³)	0,515,1030	990,999
乾燥面(面)	4	4
温度(°C)	20.5±1.5	20±2
相対湿度(%)	62±5	60±5

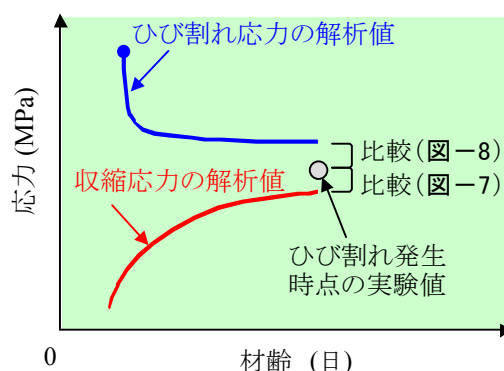


図-6 実験結果と解析結果の比較方法

度が比較し難い。そこで、全データについて実験値と解析値の比をとり、これらを全データで平均すると、自己収縮応力履歴の影響を考慮しない場合の値は 1.19、自己収縮応力履歴の影響を考慮した場合の値は 1.09 となった。このことから、影響を考慮した解析結果の方が、実験結果と一致する傾向にあると判断できる。

(3) 乾燥の影響に関する考察

図-7 における収縮応力、図-8 におけるひび割れ応力ともに、自己収縮応力履歴の影響を考慮した解析結果の方が、実験結果と一致する傾向にあることが明らかとなった。しかし、自己収縮応力履歴の影響を考慮したとしても、収縮応力、ひび割れ応力ともに、解析結果は、実験結果を若干上回る傾向にある。

この原因は、本解析で用いた有効弾性係数およびひび割れ応力では、乾燥の影響が過小に評価されているためであると考えている。用いたコンクリートの有効弾性係数およびひび割れ応力は、応力履歴と乾燥の影響を考慮して定式化した実験式であるが、100×100mm 断面の角柱

供試体を2面乾燥した場合の実験結果²⁾に基づいている。大野ら、飛坂らの一軸拘束収縮試験では、試験区間も断面変化区間も4面乾燥としているために、同一乾燥期間における乾燥の程度は2面乾燥の場合よりも当然大きい。このため、乾燥の影響によるコンクリートの有効弾性係数およびひび割れ応力の低下が、2面乾燥の場合よりも大きくなると考えられる。

5. まとめ

乾燥開始以前のコンクリートの自己収縮による拘束応力が、乾燥開始以降の収縮応力導入過程およびひび割れの発生に及ぼす影響について、一軸拘束収縮試験により検討した。

- (1) 乾燥開始以前の自己収縮による拘束応力の影響により、コンクリートの有効弾性係数およびひび割れ応力が低下する。したがって、自己収縮の影響が無視できないコンクリートを用いた部材の収縮ひび割れ予測では、乾燥開始時に作用している自己収縮応力を考慮するだけではなく、自己収縮応力履歴による有効弾性係数、ひび割れ応力の低下を考慮しなければならない。
- (2) 自己収縮の拘束による弾性係数と引張強度の低下割合は、養生期間中に導入される自己収縮応力履歴の程度差に依存する。
- (3) 既往の一軸拘束収縮試験結果を用いた検証により、上記の(1)(2)の知見が妥当であることを確認した。

参考文献

- 1) 自己収縮研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、pp.151-163、1996.11
- 2) 青木優介、下村匠：一軸線拘束されたコンクリートの乾燥収縮応力の導入とひび割れ発生条件、コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム論文集、pp.325-332、2001.7
- 3) 上田賢司：コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れの予測に関する基礎的研究、

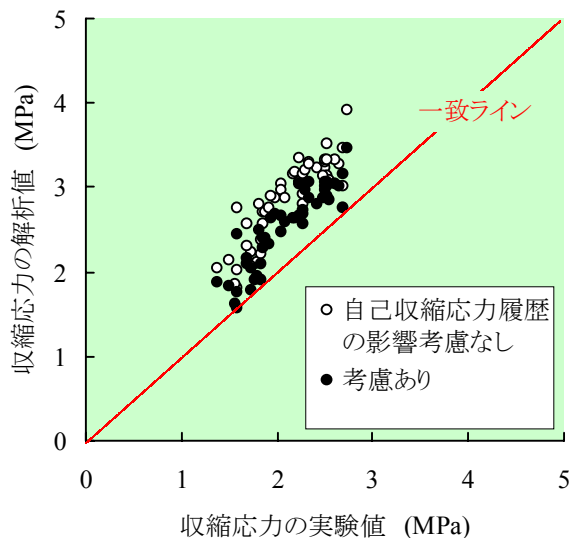


図-7 収縮応力の比較

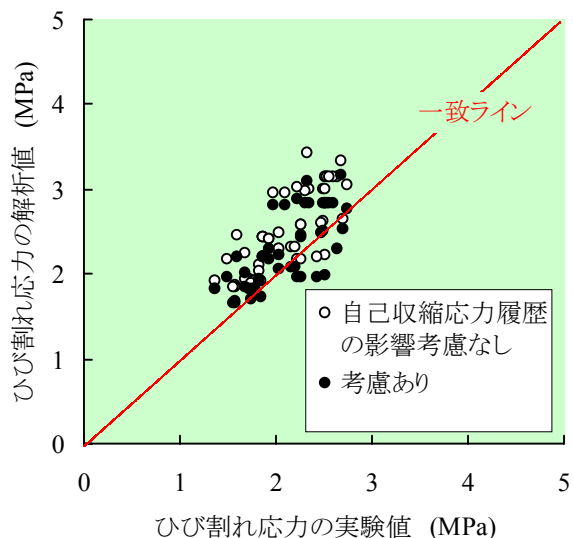


図-8 ひび割れ応力の比較

大分大学学位論文、pp.96-110、1999.3

- 4) 森下隆志、五十嵐心一、川村満紀：サーボ制御式一軸引張拘束収縮試験装置による自己収縮拘束特性の評価、土木学会第55回年次学術講演会 CD-ROM、V-281、1999
- 5) 大野俊夫、魚本健人：コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究、土木学会論文集、No.662/V-49、pp.29-44、2000.11
- 6) 飛坂基夫ほか：コンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす水セメント比の影響、セメント・コンクリート論文集、No.44、pp.678-683、1990