

## 論文 乾燥収縮ひび割れ発生に及ぼす拘束の形態, 乾燥面数の影響

大野俊夫\*<sup>1</sup>・魚本健人\*<sup>2</sup>

要旨：実構造物に近い状態における乾燥収縮ひび割れ発生性状を検討するため、拘束の形態を一軸拘束、底面拘束、4 周囲を囲んだ拘束とした試験体による実験及び部材断面の乾燥面数を変化させた一軸拘束実験を行った。その結果、①ひび割れ発生材齢は拘束の形態によって異なり、また、乾燥面数の減少によって遅くなる、②拘束の形態や乾燥面数が異なっても、ひび割れ発生時にひずみ変動する範囲より求めた引張伸び能力や収縮応力比によりひび割れ発生時期を予測できる、などを明らかにした。

キーワード：乾燥収縮、ひび割れ、拘束形態、乾燥面数、引張伸び能力、収縮応力

## 1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは耐久性や美観を低下させる原因となるため、耐久性を考慮した設計を行う場合には、ひび割れを抑制または制御する必要性が生じる。これまで、多くの研究者によってコンクリートのひび割れに関する研究がなされているものの、ひび割れ発生を予測することは難しいとされている<sup>1)</sup>。ひび割れ発生限界として収縮応力が引張強度の40～70%に達した時点などが報告されているが<sup>2) 3)</sup>、限られた条件下の試験結果より求めたものが多いことから、定説として位置づけられるまでに至っていないのが現状である。

筆者らはこれまで、JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(修正案)」<sup>4)</sup>の一軸拘束条件において、水セメント比や粗骨材量等の配合要因、拘束度、湿潤養生日数が、コンクリートのひび割れ発生やひび割れ発生限界に及ぼす影響に関する実験的検討を行ってきており、ひび割れ発生限界として引張伸び能力や収縮応力とひび割れ発生材齢との関係の適用性を

示している<sup>5)</sup>。

しかしながら、実構造物を考えた場合、拘束の形態が JIS 原案のように一軸状態である場合は少なく、また、水分が断面から均一に逸散する部材である場合も少ない。そこで、拘束の形態や乾燥面数が異なる部材による乾燥収縮実験を行い、これらがひび割れの発生やひび割れ発生限界に及ぼす影響を検討した。

## 2. 実験方法

## 2.1 試験体の種類

実験は拘束の形態が乾燥収縮ひび割れに及ぼす影響を検討するシリーズIと、乾燥面の数の影響を検討するシリーズIIから構成される。

表—1 に実験の対象とした試験体の種類を、

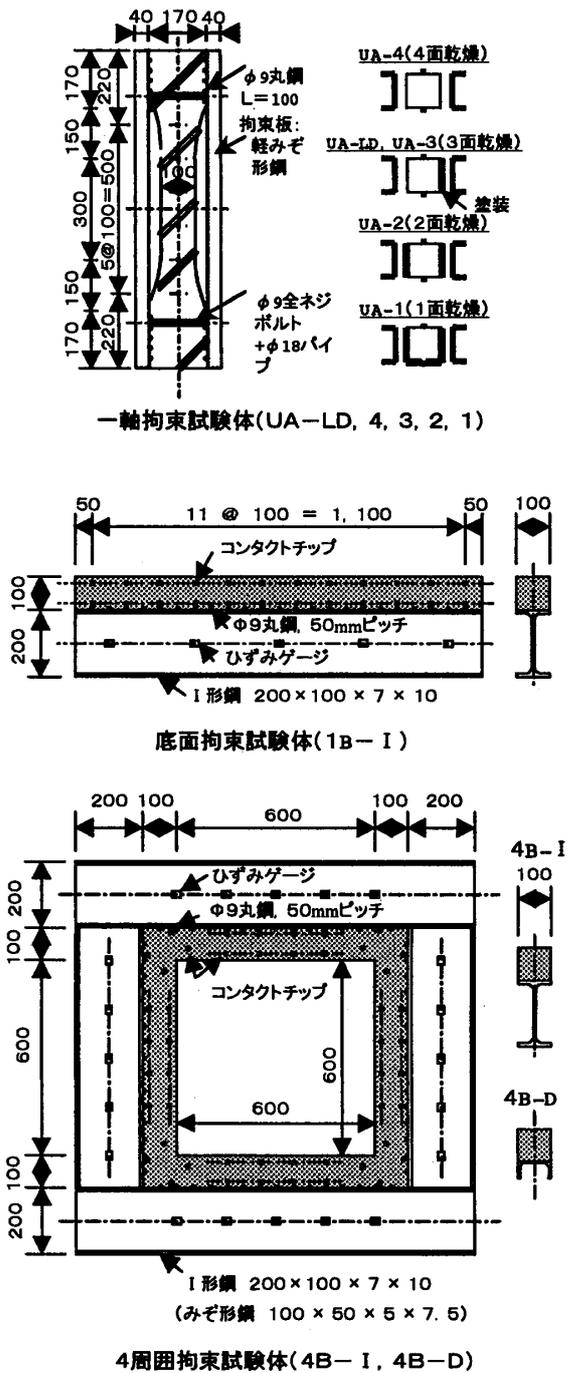
表—1 試験体の種類

シリーズ	記号	拘束の形態	乾燥面数	拘束板の種類	拘束板の断面積 (mm <sup>2</sup> )	試験体数
I	UA-LD	一軸	3	軽みぞ形鋼	1030	3
	1B-I	底面	"	I 形鋼	3238	2
	4B-I	4周囲	"	"	3024	"
	4B-D	"	"	みぞ形鋼	1120	"
II	UA-4	一軸	4	軽みぞ形鋼	697	5
	UA-3	"	3	"	702	"
	UA-2	"	2	"	703	"
	UA-1	"	1	"	701	"

UA:一軸拘束, 1B:底面拘束, 4B:4周囲拘束, LD:軽みぞ形鋼, I:I形鋼, D:みぞ形鋼を, UA-4:一軸拘束で4面乾燥を意味する  
拘束板断面積:各試験条件ごとの実測値の平均

\* 1 鹿島技術研究所 第二研究部主任研究員 (正会員)

\* 2 東京大学教授 生産技術研究所 第5部, 工博 (正会員)



図—1 試験体の形状寸法

図—1 に各種試験体の形状寸法を示す。試験体は JIS 原案の一軸拘束試験体のほか、壁状構造物などのように底面で拘束を受ける底面拘束試験体、開口部などを想定して 4 周囲を拘束鋼材で囲んだ 4 周囲拘束試験体を対象とした。すべての試験体においてコンクリートと拘束板とのずれを防止するため、拘束板に丸鋼（φ9 mm、L=100mm）を 50mm 間隔で溶接した。なお、シリーズIIではコンクリート表面からの

表—2 配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位置 (Kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	Ad.
30	37.6	167	557	604	1030	2.785

C: 普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm<sup>3</sup>、比表面積3.270cm<sup>2</sup>/g)  
 S: 富士川産川砂(比重2.63、吸水率2.01%、粗粒率2.75)  
 G: 両神産砂岩砕石(比重2.70、最大寸法20mm、粗粒率6.66)  
 Ad: ポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤

逸散水量を変化させるため、脱型後、図—1 に示すように 100×100mm の部材表面の 1, 2, 3 面にシールを施した。

2.2 配合

表—2 にコンクリートの配合および使用材料を示す。コンクリートのひび割れは水セメント比が小さい方が早く発生することが報告されており<sup>5) 6)</sup>、ここでは試験期間の関係から水セメント比 30%のコンクリートを対象とした。

2.3 試験項目

a. 拘束収縮, 自由収縮

各種拘束試験体の収縮ひずみの測定は脱型時(材齢 7 日)にコンクリート表面にコンタクトチップを検長 100mm で貼り、以後、1~2日おきにコンタクトストレインゲージ(精度: 0.001mm)により測定した。

拘束板のひずみは軽みぞ形鋼、みぞ形鋼、I形鋼ともに部材の重心位置にひずみゲージを貼り、コンクリートの始発以後、コンクリートに貫通ひび割れが発生するまで、3時間ごとに自動計測した。

自由収縮は 100×100×400mm の試験体を用い、材齢 7 日までの湿潤養生期間は「自己収縮研究委員会報告」<sup>7)</sup>に準拠して測定し、乾燥開始後は JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に準拠して測定した。なお、シリーズIIでは拘束試験体と同様に、乾燥面数に応じて柔軟型エポキシ樹脂を塗布した。

b. 強度試験

圧縮強度、静弾性係数試験 (φ 100 ×

200mm), 割裂引張強度試験 (φ150×200mm) は材齢 7 日 (乾燥開始材齢), 拘束試験体の最初の試験体と最後の試験体に貫通ひび割れが確認された材齢において実施した。なお, 供試体は拘束試験体, 自由試験体と同一の養生条件下に静置した。

### 2.4 試験体の作製方法

各実験ケースにおけるコンクリートは水平強制練りミキサにより練混ぜ, フレッシュコンクリートに関する試験を行った後, 各種試験体を作製した。試験体作製後, 乾燥開始までの期間, 湿潤状態のむしろの中に静置し, 乾燥開始材齢にて温度 21.0±1.5°C, 湿度 62±5R.H.%の養生室に移動して, 乾燥条件下に曝した。

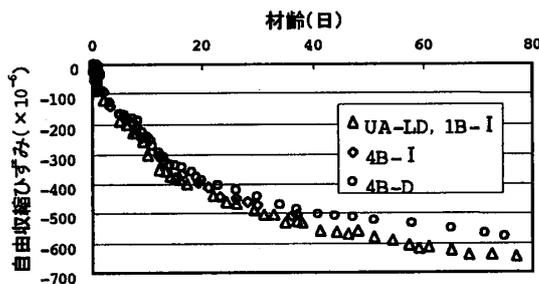
## 3. 拘束形態の影響

### 3.1 物性試験結果

表—3 に物性試験の結果を, 図—2 にシリーズ I における自由収縮ひずみの履歴を示す。フレッシュ時の試験値は実験ケース間で若干差が見られ, また自由収縮ひずみは材齢 60 日で最大  $70 \times 10^{-6}$  の差が生じていることが分かる。本来, 同一配合, 同一養生条件であり, 同一のフレッシュ性状, 自由収縮ひずみとなるはずで

表—3 物性試験結果

シリーズ	記号	スラブ (cm)	フレッシュ			材齢28日(水中養生)	
			空気量 (%)	温度 (°C)	始発時間 (h-m)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
I	UA-LD	14.0	4.4	22.7	4-55	70.8	3.73
	1B-I	14.0	4.4	22.7	4-55	70.8	3.73
	4B-I	14.5	5.2	20.4	6-08	68.9	3.85
	4B-D	12.5	5.1	19.7	5-37	66.4	3.67
II	UA-4	14.5	4.4	24.2	5-52	56.5	3.71
	UA-3	17.0	4.2	18.5	6-16	74.0	3.83
	UA-2	11.0	3.4	21.2	5-05	69.4	3.71
	UA-1	14.0	5.3	20.3	5-31	64.5	3.58



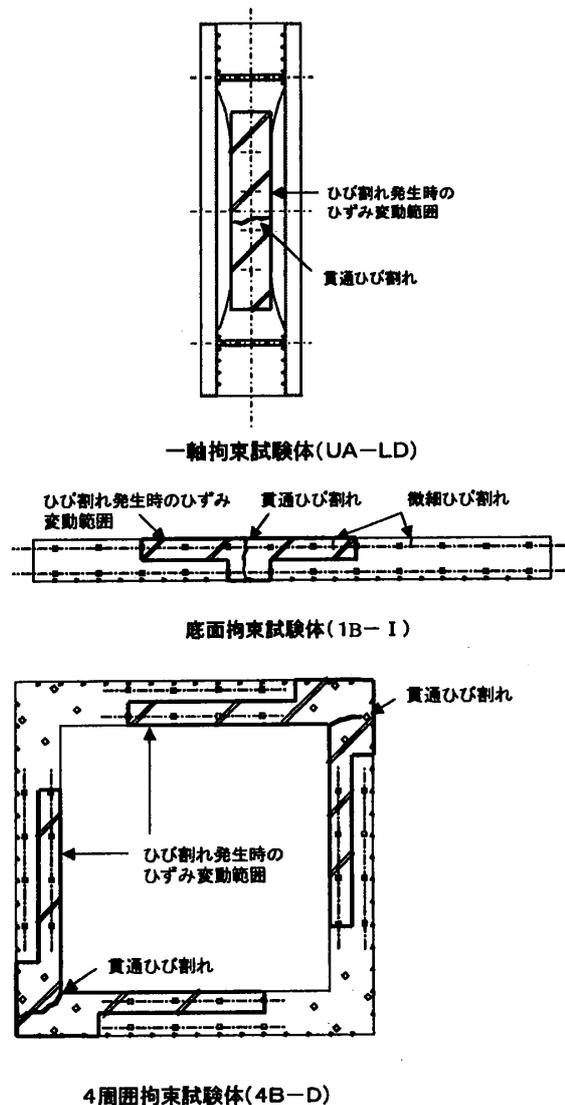
図—2 自由収縮ひずみの履歴(シリーズ I)

あるが, この程度のばらつきが認められる。

### 3.2 ひび割れ発生状況

図—3 に各拘束試験体に生じたひび割れ状況の一例を示す。一軸及び底面拘束試験体では部材の軸直角方向にひび割れが発生し, 4 周囲拘束試験体では隅角部に斜めにひび割れが発生している。

一軸拘束は微細ひび割れが目視観察されることなく貫通ひび割れが発生したが, 底面拘束では上部の 3~4 個所に微細ひび割れが確認された十数日後, そのうちの一本が貫通ひび割れに進展した。4 周囲拘束試験体のうち, 4B-D は対角の隅角部に微細ひび割れが確認された後, 2~3 日で貫通ひび割れが発生したのに対し,



図—3 ひび割れ発生状況, ひずみ変動範囲

剛性の大きな 4B-I は 4 隅角部に発生した微細ひび割れが徐々に進展したが、明確な貫通ひび割れの発生点は確認でなかつた。

同図には、貫通ひび割れが発生したことに伴ってひずみが大きく変動した範囲を併せて示している。このひずみの変動範囲はひび割れの発生によってひずみエネルギーが解放された範囲であり、また、ひび割れ発生部の変形に影響を与えていた範囲とも考えられる。この変動範囲は、一軸拘束では全長であるが、底面拘束試験体は上部で貫通ひび割れ部の前後 20cm、下部でひび割れ部であり、また、4 周囲拘束試験体ではひび割れが発生した隅角部のほか、隣接する 2 辺の上部の範囲であることが分かった。

### 3.3 ひび割れ発生材齢

図-4 に貫通ひび割れの発生材齢を示す。ほぼ同一の拘束板の断面積である一軸拘束(UA-LD)と 4 周囲拘束(4B-D)試験体の平均ひび割れ発生材齢は 13.1 及び 12.1 日であり、ほぼ同一時期に貫通ひび割れが発生しており、両者はほぼ同様な拘束の程度であることが分かる。これに対し、底面拘束試験体(1B-I)のひび割れ発生材齢は平均 52.0 日であり、鋼材比の小さな一軸や 4 周囲拘束試験体に比べてひび割れ発

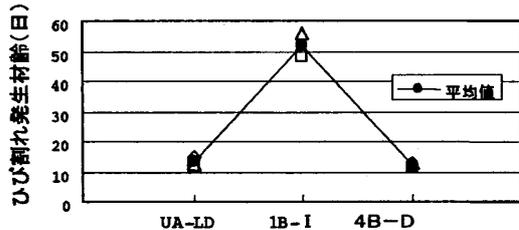


図-4 貫通ひび割れ発生材齢

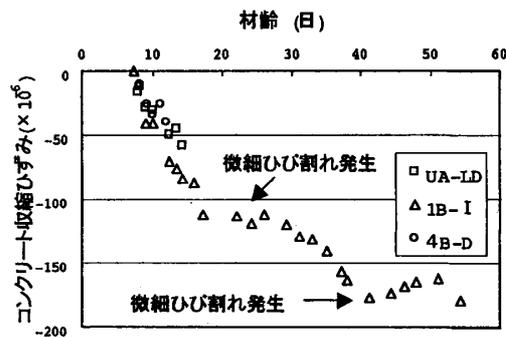


図-5 コンクリートひずみの履歴

生が遅くなっており、実質上の拘束率が小さくなっていると考えられる。

### 3.4 コンクリートひずみ

図-5 に各拘束試験体のコンクリートひずみの履歴例を示す。ここで、コンクリートひずみは図-3 に示すひずみが増加した範囲のひずみの平均値を示している。なお、4 周囲拘束試験体では、変動範囲の全ひずみをひび割れに直角な成分に分解して求めている。同図から、一軸拘束(UA-LD)と 4 周囲拘束試験体(4B-D)はほぼ同様なコンクリートひずみの履歴であるのに対し、底面拘束試験体(1B-I)はこれらより少し大きな収縮ひずみであること、また、微細ひび割れの発生と思われる収縮ひずみが+側に戻る点を確認できる。

## 4. 乾燥面数の影響

### 4.1 物性試験結果

図-6 にシリーズIIにおける自由収縮ひずみ

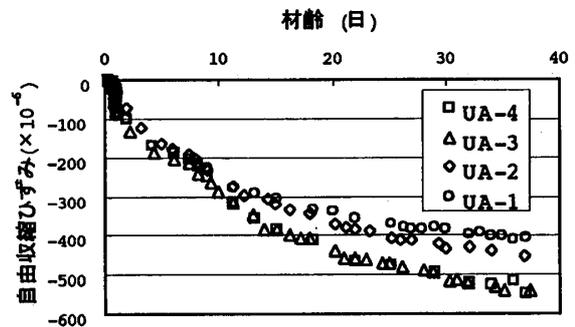


図-6 自由収縮ひずみの履歴 (シリーズII)

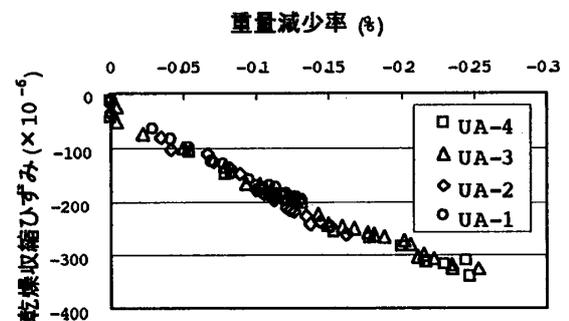


図-7 重量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

の履歴を示す。同図から、材齢 7 日までの湿潤養生期間の自己収縮ひずみは実験ケース間で差が認められないが、乾燥過程では乾燥面数が多いほどに自由収縮ひずみが大きくなっていることが分かる。

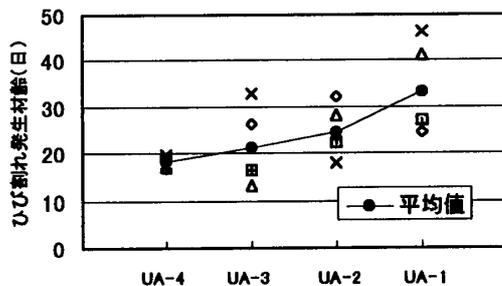
図一七に重量減少率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。同図から、重量減少率が同一であれば乾燥収縮ひずみはほぼ同一であることが分かり、乾燥面数の多少に伴う乾燥収縮ひずみの大小は重量減少率（逸散水量）の多少によると考えられる。

#### 4.2 ひび割れ発生材齢

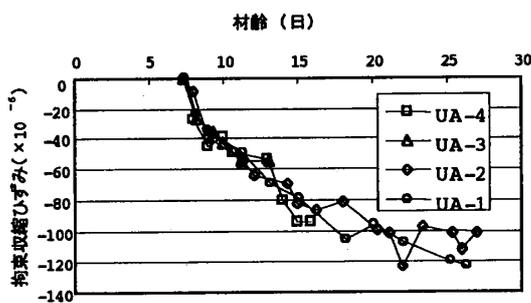
乾燥面数ごとに整理したひび割れ発生材齢は図一八に示すとおりであり、乾燥面数が多いほどひび割れが早く発生することが分かる。乾燥面数が 1～3 面の場合、貫通ひび割れが発生する数日(1～5日)前に、シールを施していない面に微細ひび割れが発生している試験体が多く認められた。

#### 4.3 コンクリートひずみ

図一九にコンタクトゲージによるコンクリートひずみの履歴を示す。同図から、乾燥面数に



図一八 貫通ひび割れ発生材齢



図一九 コンクリートの収縮ひずみの履歴

よらず拘束収縮ひずみはほぼ同一であることが分かる。自由収縮ひずみが乾燥面数によって差が表れたにもかかわらず、拘束収縮ひずみの履歴に差が表れない理由はよく分からない。

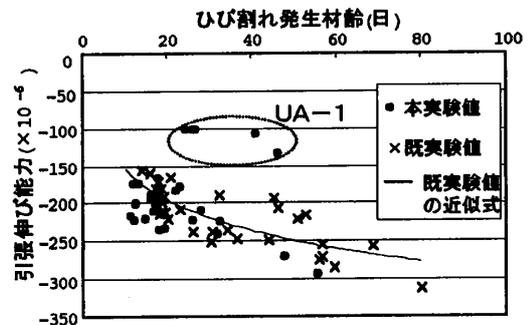
乾燥面数の減少に伴って自由収縮ひずみが小さくなるのに対し、拘束収縮ひずみがほぼ同一であることから、両者の差の拘束引張ひずみは小さくなる。拘束引張ひずみが小さいほど部材に作用する引張力は小さいと考えられ、この傾向は乾燥面が少ないほどひび割れ発生が遅くなる現象と一致していることが分かる。

### 5. ひび割れ発生限界

#### 5.1 引張伸び能力

図一十にシリーズ I と II におけるひび割れ発生材齢と引張伸び能力の関係を示す。引張伸び能力は貫通ひび割れ発生時のコンクリートの拘束引張ひずみ(自由収縮ひずみ-拘束収縮ひずみ)によって算出した。ここで、拘束収縮ひずみはひずみの変動範囲より求め、湿潤養生過程の拘束試験体の収縮ひずみは、自己収縮ひずみに乾燥後の自由収縮ひずみと拘束引張ひずみの比を乗じて求めている。

同図から、一軸拘束で 1 面乾燥した試験体 (UA-1) を除き、ひび割れ発生材齢が大きくなるに伴って引張伸び能力が大きくなっていることが分かる。UA-1 試験体は表面からの逸散水量の違いにより、ひずみが不均一になって曲げなどの別の力が作用したものと推察された。



図一十 ひび割れ発生材齢と引張伸び能力

また、同図中に示した水セメント比、拘束度、養生日数を要因とした実験より得られた実験式<sup>5)</sup>と今回の実験結果はほぼ同様な傾向があり、拘束の形態や乾燥面数が異なっても、ひび割れ発生材齢とひずみの変動範囲を考慮した引張伸び能力の関係によって、ひび割れ発生時期が予測できる可能性があると考えられた。ただし、曲げなどの別の力が作用するような部材については今後データを増やし検討する必要がある。

## 5.2 収縮応力

図—11 にひび割れ発生材齢と収縮応力比(収縮応力/引張強度)との関係を示す。収縮応力は拘束板に作用する圧縮力とコンクリートに作用する引張力の釣り合い条件から求めた<sup>6)</sup>。ここで、拘束板のひずみはひずみの変動範囲内に位置するひずみゲージの平均値より求めた。

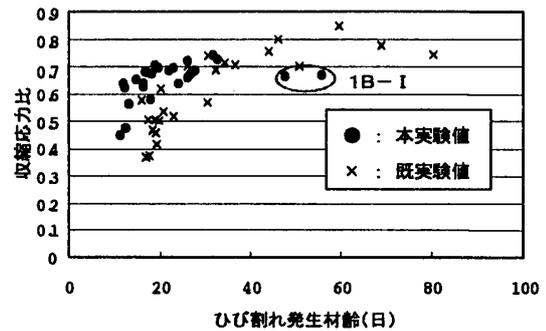
同図から、収縮応力比はひび割れ発生材齢の増加に伴って大きくなるのが分かり、水セメント比、拘束度、養生日数を要因とした実験より少し大きい値を示した。ただし、貫通ひび割れの発生時においても、当初の断面積として算定しているため、微細ひび割れが発生して十数日経過して貫通ひび割れが発生した底面拘束試験体では収縮応力比が小さい傾向にあった。

## 6. まとめ

本実験を通して得られた結論は以下のとおりである。

- (1) ひび割れ発生材齢は拘束の形態によって異なり、また、乾燥面数が減ることによって増加する。
- (2) 拘束の形態によってひび割れ発生前後のひずみの変動範囲が異なる。
- (3) 拘束の形態や乾燥面数が異なっても、ひび割れ発生時のひずみ変動範囲より求めた引張伸び能力や収縮応力比により、ひび割れ発生時期を予測できる可能性がある。

謝辞 本研究を実施するに当たり、芝浦工業大学卒論生小橋朋和君に多大なご助力を頂きました。



図—11 ひび割れ発生材齢と収縮応力比

ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 例えば、森永繁：ひび割れ制御技術の現状—対策と効果—、コンクリート工学，Vol.34，No.8，pp.13—20，1996.8
- 2) 牧角龍憲・太田俊昭：外的に線拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れに関する基礎的研究，土木学会論文集第378号，V-6，pp.137—146，1987.2
- 3) 鈴木計夫・大野義照・三浦義礼：コンクリートの一軸拘束ひび割れ試験と壁試験体の収縮拘束ひび割れ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10-2，pp.261—266，1988
- 4) ひび割れ研究会：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究(その4)，セメントコンクリート，No.536，pp.62—71，1991.10
- 5) 大野俊夫・魚本健人：乾燥収縮ひび割れ発生時の引張伸び能力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19-1，pp.733—738，1997
- 6) 例えば飛坂基夫ほか：コンクリートのひび割れ発生に及ぼす水セメント比の影響，第44回セメント技術大会講演集，pp.782—787，1990
- 7) (社)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，1996.11
- 8) 大野俊夫・魚本健人：底版により拘束を受ける部材の乾燥収縮ひび割れ性状，土木学会第53回年次学術講演会，1998.10(投稿中)