

論文

[1023] 乾燥収縮時における鉄筋のひび割れ幅制御効果に関する実験的研究

正会員○大岡督尚（東急建設技術研究所）

正会員 山本俊彦（東急建設技術研究所）

1. はじめに

構造体コンクリートにおいて、壁や床のように部材が薄く、かつ周囲の拘束が大きい場合、コンクリートの乾燥収縮によってひび割れが発生する。このひび割れ幅が大きくなると漏水などの問題が起きるため、一般に鉄筋によってこのひび割れ幅を制御している。

今回の実験は、鉄筋によるひび割れ幅制御効果を調べるため、拘束試験体に鉄筋を埋め込んで、コンクリートの乾燥収縮によって生じる各ひずみ、およびひび割れ幅を測定した。本報告は、その実験結果について述べるものである。

2. 実験概要

(1) 実験シリーズ

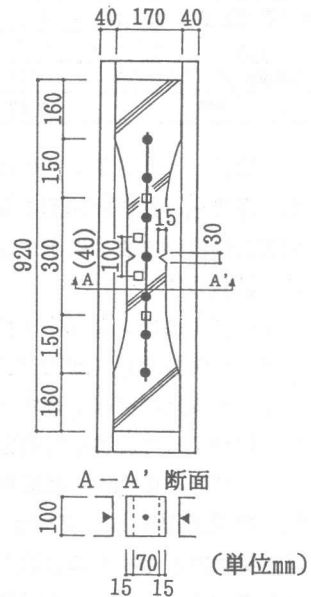
実験はD6（鉄筋比0.32%）とD10（鉄筋比0.71%）の比較を行ったシリーズ1と、D10（鉄筋比0.71%）とD13（鉄筋比1.27%）の比較を行ったシリーズ2の2実験である。

(2) 試験体形状寸法

試験体¹⁾はシリーズ1、2ともに図1に示す形状寸法で、各試験体にD10鉄筋および、D6鉄筋またはD13鉄筋を埋め込んだものと無筋のものを作製した。試験体数はシリーズ1が各3体、シリーズ2が各2体である。各試験体には、中央部にひび割れが発生するようにノッチを設け、最小断面積を70cm²とした。また、自由収縮測定用に10×10×40cm供試体を3本、および圧縮クリープ用として、載荷用と乾燥収縮量測定用にφ10×20cm供試体3本ずつを作製した。

(3) 使用材料

使用したコンクリートの調合は表1に示すように、シリーズ1が水セメント比60%，スランプ15cm，シリーズ2は水セ



□コンタクトチップ
 ▴ひずみゲージ（拘束鋼材）
 ●ひずみゲージ（鉄筋）
 拘束鋼材：軽みぞ形鋼 1173
 断面積3.966×2cm²

図1 試験体形状寸法

表1 コンクリート調合 (kg/m³)

シ-ズ	W/C %	スランプ cm	セメント	水	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
1	60.0	15	270	162	887	997	2.70
2	59.1	15	276	163	892	997	2.87

表2 鉄筋引張試験結果 (SD30)

シ-ズ	種類	公称断面積 mm ²	降伏点 kgf/mm ²	引張強度 kgf/mm ²	伸び %
1	D6	32.0	—	52.6	16.0
	D10	71.3	36.6	57.6	20.3
2	D10	71.3	36.7	53.2	19.3
	D13	127	35.9	52.6	19.6

表3 コンクリートの特性

		シリーズ1 (恒温室)					シリーズ2 (恒温室)				シリーズ2 (実験室)			
材令 (日)		7	14	28	91	240	7	14	28	91	7	14	28	91
圧縮強度 kgf/cm ²	水中	192	223	237	309	333	250	—	314	—	269	—	—	—
	気中	—	251	264	291	297	—	300	339	367	—	330	361	392
引張強度 kgf/cm ²	水中	17.6	20.9	20.8	25.0	26.4	26.3	—	35.1	—	28.0	—	—	—
	気中	—	24.2	24.1	21.7	20.8	—	32.6	33.5	32.6	—	34.1	32.9	32.4
静弾性係数 x10 ⁵ kgf/cm ²	水中	2.41	2.39	2.64	2.83	2.90	2.44	—	2.50	—	2.53	—	—	—
	気中	—	2.42	2.62	2.11	2.20	—	2.52	2.48	2.57	—	2.51	2.56	2.71
単位容積重量 g/cm ³	水中	2.30	2.29	2.30	2.31	2.31	2.37	—	2.33	—	2.37	—	—	—
	気中	—	2.27	2.25	2.22	2.22	—	2.31	2.28	2.26	—	2.30	2.29	2.27
乾燥収縮量 x10 ⁻⁶		—	162	323	563	681	—	133	268	442	—	124	229	345
クリープ係数		—	0.82	1.40	2.48	3.21	—	0.85	1.39	2.28	—	—	—	—

メント比59.1%, スランプ15cmである。

また、埋め込み鉄筋はSD30を使用し、その鉄筋の引張試験結果を表2に示す。

(4) 試験方法

シリーズ1はコンクリート打設・養生・試験はすべて恒温恒湿室(20°C±1°C, 60%±10%)で行った。養生期間中は、散水・シートがけ養生とし、材令7日で脱型して測定を開始した。

シリーズ2の場合は、試験場所はシリーズ1と同じ恒温恒湿室と空調を行っていない実験室(以下実験室と略す)の2箇所とした。その他の試験方法はシリーズ1と同様である。

圧縮クリープ試験は恒温恒湿室で材令7日から、圧縮強度の3分の1の応力を載荷した。

(5) ひずみ測定

シリーズ1の各ひずみ測定位置は図1に示す位置で、コンクリートひずみは、検長30cmのコンタクトストレインゲージで測定し、ひび割れ幅は、検長10cmのコンタクトストレインゲージで測定した。また、拘束鋼材ひずみおよび鉄筋ひずみは、ひずみゲージを使用した。シリーズ2では、すべてひずみゲージを使用した。ひび割れ幅は検長4cmのコンタクトストレインゲージで測定した。

(6) コンクリート特性

コンクリートの特性を表3に示す。図2～図4にコンクリートの乾燥収縮量と圧縮クリープ量の経時変化を示す。なお、実験室のコンクリートについては、圧縮クリープ試験は行っていない。

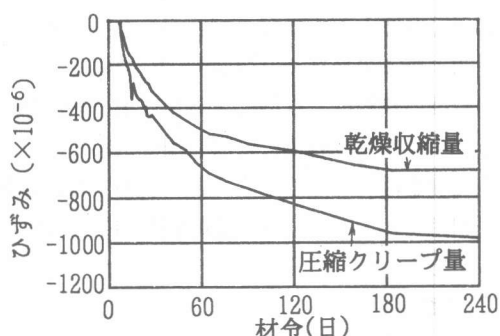


図2 乾燥収縮量と圧縮クリープ量
(シリーズ1・恒温室)

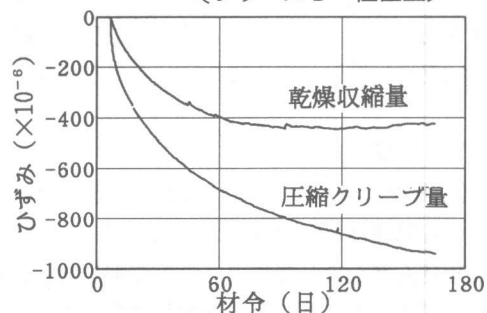


図3 乾燥収縮量と圧縮クリープ量
(シリーズ2・恒温室)

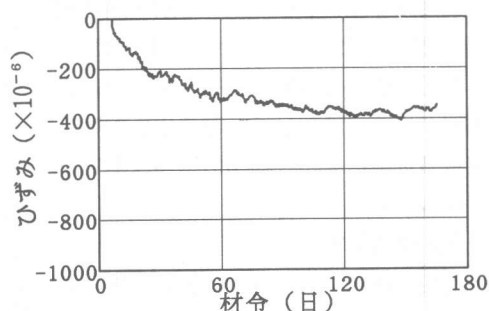


図4 乾燥収縮量
(シリーズ2・実験室)

(7) 実験室試験体温度

実験室の試験体温度（コンクリート部分）は図5に示すとおりである。また、実験室の相対湿度は約40%～80%の間で変動し、平均すると約65%程度であった。

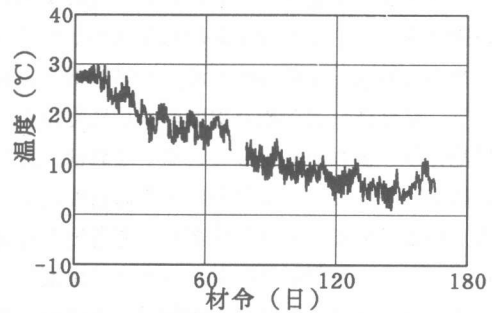


図5 試験体温度と材令（実験室）

3. 実験結果と考察

(1) ひび割れ発生時の応力

表4、表5に拘束試験体による乾燥収縮ひび割れ試験結果を、また図6～9に拘束鋼材ひずみと材令の関係を示す。これらの表によると、

表4 乾燥収縮ひび割れ試験結果（シリーズ1）

試験体種類		D10鉄筋埋込み				D6鉄筋埋込み				無筋			
		No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均
ひび割れ発生時	発生材令 (日)	17	17	22	19	24	14	21	20	16	15	15	16
	乾燥時間 (時間)	246	245	372	288	410	170	338	306	220	191	194	202
	拘束鋼材ひずみ $\epsilon_s (\times 10^{-6})$	-104	-104	-114	-107	-116	-81	-108	-102	-102	-95	-96	-98
	自由収縮ひずみ $\epsilon_f (\times 10^{-6})^*$	-206	-206	-267	-226	-286	-157	-257	-233	-192	-175	-175	-181
	弾性係数 $E_c (\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$	2.42	2.42	2.52	2.45	2.55	2.42	2.52	2.50	2.42	2.42	2.42	2.42
	引 100cm ² σ_{ct} (kgf/cm ²)**	16.4	16.4	18.1	17.0	18.9	13.2	17.6	16.6	17.0	15.8	16.0	16.3
	張 70cm ² σ_{ct70} (kgf/cm ²)**	22.9	22.9	25.3	23.7	26.7	18.6	24.9	23.4	24.3	22.6	22.8	23.2
	応 コンクリート強度 F_t (kgf/cm ²)	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2
	力 σ_{ct70} / F_t	0.95	0.95	1.05	0.98	1.10	0.77	1.03	0.97	1.00	0.93	0.94	0.96
	実拘束度 (%)	53	53	56	54	60	47	56	54	44	45	45	45
最終時	拘束鋼材残留歪 ($\times 10^{-6}$)	-54	-60	-63	-59	-29	-32	-25	-29	10	9	0	6
	鉄筋負担応力 (kgf/cm ²)	1260	1401	1471	1377	1509	1666	1300	1492	—	—	—	—
	中央部鉄筋応力 (kgf/cm ²)	1444	1534	1159	1379	1283	1543	1593	1473	—	—	—	—
	ひび割れ幅 W (mm)	.176	.189	.160	.175	.309	.298	.315	.307	.416	.425	.399	.413
	ひび割れ拘束率 R_{cw} (%)	57.4	54.2	61.3	57.6	25.2	27.8	23.7	25.6	—	—	—	—

*10×10×40供試体における乾燥収縮量

**鉄筋を考慮した等価断面積によって計算

表5 乾燥収縮ひび割れ試験結果（シリーズ2）

試験体種類		D13鉄筋 恒温室			D10鉄筋 恒温室			無筋 恒温室			D10鉄筋 実験室		
		No.1	No.2	平均	No.1	No.2	平均	No.1	No.2	平均	No.1	No.2	平均
ひび割れ発生時	発生材令 (日)	24	30	27	31	21	26	24	27	31	14	14	14
	乾燥時間 (時間)	429	549	489	579	331	455	414	480	654	355	358	357
	拘束鋼材ひずみ $\epsilon_s (\times 10^{-6})$	-96	-98	-97	-115	-83	-99	-97	-108	-103	-77	-85	-81
	自由収縮ひずみ $\epsilon_f (\times 10^{-6})^*$	-240	-273	-257	-283	-201	-242	-235	-256	-246	-201	-200	-201
	弾性係数 $E_c (\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$	2.49	2.48	2.49	2.48	2.50	2.49	2.49	2.48	2.49	2.51	2.51	2.51
	引 100cm ² σ_{ct} (kgf/cm ²)**	15.0	15.4	15.2	17.8	12.9	15.4	17.7	18.7	18.2	12.0	13.4	12.7
	張 70cm ² σ_{ct70} (kgf/cm ²)**	20.7	21.1	20.9	24.8	18.1	21.5	25.3	26.7	26.0	16.9	18.7	17.8
	応 コンクリート強度 F_t (kgf/cm ²)	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	34.1	34.1	34.1
	力 σ_{ct70} / F_t	0.62	0.63	0.63	0.74	0.54	0.64	0.76	0.80	0.78	0.50	0.55	0.53
	実拘束度 (%)	60	64	62	59	59	59	59	58	59	62	58	60
最終時	拘束鋼材残留歪 ($\times 10^{-6}$)	-87	-74	-81	-68	-59	-64	-12	-2	-7	-17	-16	-17
	鉄筋負担応力 (kgf/cm ²)	1169	1002	1086	1555	1351	1453	—	—	—	277	233	255
	中央部鉄筋応力 (kgf/cm ²)	1012	1238	1125	1362	1177	1270	—	—	—	1276	836	1056
	ひび割れ幅 W (mm)	.148	.145	.147	.148	.176	.162	.296	.287	.292	.125	.138	.132
	ひび割れ拘束率 R_{cw} (%)	49.3	50.3	49.8	49.3	39.7	44.5	—	—	—	57.2	52.7	55.0

*10×10×40供試体における乾燥収縮量

**鉄筋を考慮した等価断面積によって計算

シリーズ1, 2ともに鉄筋の有無や径によるひび割れ発生材令の顕著な差はなかった。シリーズ2の実験室の試験体は恒温室の試験体と比較して、試験体付近の相対湿度が高いにも拘らず、早期にひび割れが発生している。これは、図8, 9に示すように、拘束鋼材ひずみの日変動は、大きいときで20~30 μ 程度あり、温湿度の変動に伴って、拘束鋼材とコンクリートの温度差が生じ、コンクリートに乾燥収縮以外の応力が生じたことが原因のひとつと考えられる。

シリーズ1においては、ほとんどの試験体がコンクリートの引張強度付近でひび割れが発生したが、シリーズ2においては、コンクリート引張強度の0.5倍~0.8倍の応力時点でひび割れが発生した。この差はコンクリートの特性の違い(乾燥収縮量・引張強度等)が大きな原因と考えられる。

(2) ひび割れ幅

図10~12にひび割れ幅と材令の関係を示す。材令の進行に伴い、乾燥収縮によるひび割れ幅は増加するが、増加量が少なくなるのは、シリーズ1では、材令約180日からであり、シリーズ2では、材令約140日からである。そこで、シリーズ1では材令240日を、シリーズ2では材令165日を最終時と仮定して、ひび割れ幅を比較すると、表4, 表5に示すとおりとなる。埋め込み鉄筋の径が太い方がひび割れ幅は小さく、シリーズ1では平均値で、D10試験体が0.175mm, D6試験体が0.307mmで、D10はD6の0.57倍である。シリーズ2においては、D13試験体が0.147mm, D10試験体が0.162mmで、D13はD10の0.91倍であった。

また、恒温恒湿室の試験体と実験室の試験体のひび割れ幅を比較した場合、恒温室のD10平均値が0.162mm, 実験室は0.132mmであり、実験室は恒温室の0.815倍のひび割れ幅である。図3, 図4に示したように自由収縮量の最大値は恒温室が 447×10^{-6} , 実験室は 400×10^{-6} であり、実験室は恒温室の0.895倍であり、収縮量の割には

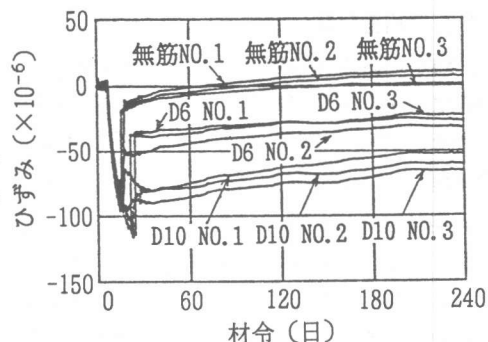


図6 拘束鋼材ひずみと材令の関係 (シリーズ1・恒温室)

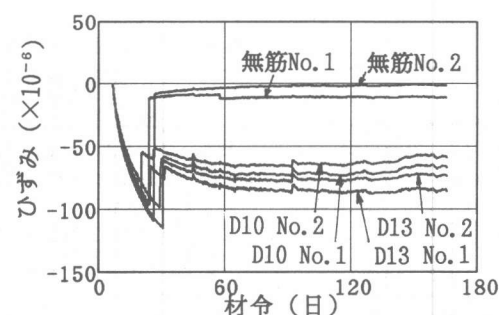


図7 拘束鋼材ひずみと材令の関係 (シリーズ2・恒温室)

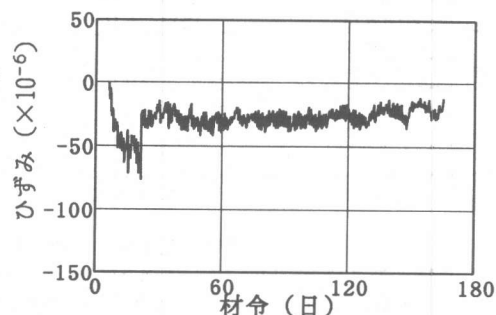


図8 拘束鋼材ひずみと材令の関係 (シリーズ2・実験室No.1)

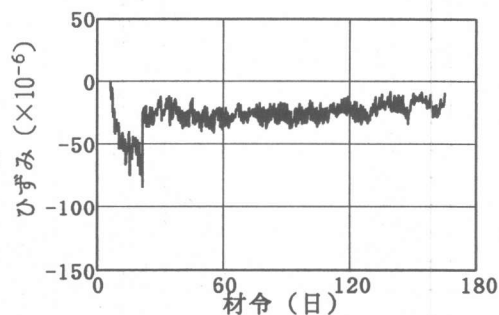


図9 拘束鋼材ひずみと材令の関係 (シリーズ2・実験室No.2)

実験室のひび割れ幅は小さかった。一般に早くひび割れが発生すると、遅い場合に比べて、コンクリートの引張クリープにより、ひび割れ幅が大きくなる。しかし、今回の実験で早くひび割れが発生した実験室の方が恒温室よりもひび割れ幅が小さかったのは、ひび割れ幅を比較した時点の実験室の温度は5℃前後で、ひび割れが発生した時の温度(20～25℃)よりも15～20℃低く、コンクリートと鋼材の線熱膨張率に多少の差があり、それがひび割れ幅に影響したものと考えられる。

(3) ひび割れ幅拘束率

埋め込み鉄筋のひび割れ幅制御効果を比較するため、ひび割れ幅拘束率(以下R_{cw}と略す)を下式のように定義する。

$$R_{cw}(\%) = (W_n - W_{rc}) / W_n \times 100$$

ここで、W_n: 無筋試験体ひび割れ幅(mm)

W_{rc}: 有筋試験体ひび割れ幅(mm)

シリーズ1の最終時のR_{cw}は、表4に示すように、D10試験体は、54.2～61.3%(平均57.6%)、D6試験体は、23.7～27.8%(平均25.6%)であり、D10はD6の2.25倍の拘束率となる。同様にシリーズ2の最終時のR_{cw}は平均値でD13が49.8%、D10が44.5%であり、D13はD10の1.12倍の拘束率である。D10の実験室のひび割れ幅拘束率は、恒温室の無筋試験体を基準とすると、55.0%となる。

図13に最終時のR_{cw}と鉄筋比の関係を示す。シリーズ1の場合は、無筋のR_{cw}を0、鉄筋比を0とすると、R_{cw}と鉄筋比の関係は、直線式で良い相関が得られた。シリーズ2の場合は鉄筋比とR_{cw}との関係は直線式とはならず、鉄筋比が大きくなると、ひび割れ幅制御効果の伸びは小さくなる。

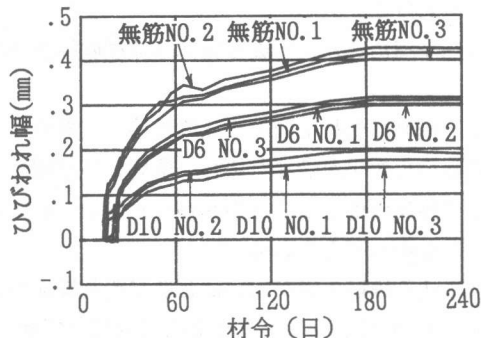


図10 ひび割れ幅と材令の関係
(シリーズ1・恒温室)

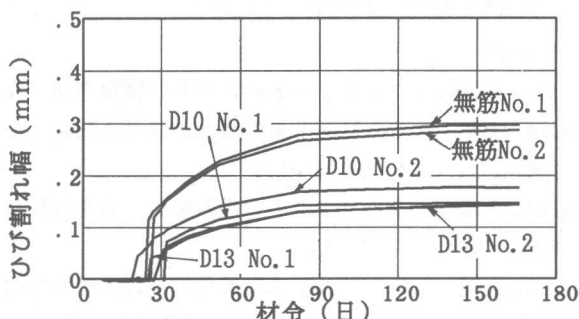


図11 ひび割れ幅と材令の関係
(シリーズ2・恒温室)

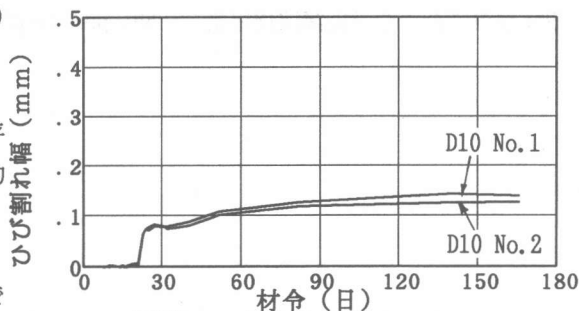


図12 ひび割れ幅と材令の関係
(シリーズ2・実験室)

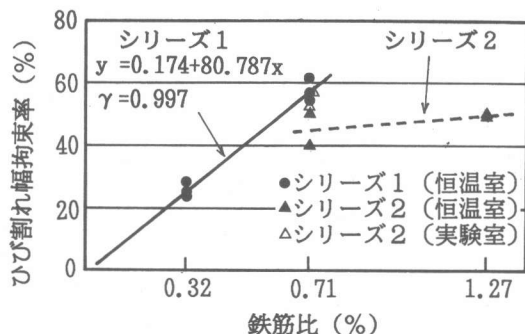


図13 ひび割れ幅拘束率と鉄筋比の関係

4. おわりに

鉄筋を埋め込んだ拘束試験体の乾燥収縮ひび割れ試験を行った結果、以下の事が明らかとなった。

- ①ひび割れ発生材令は埋め込み鉄筋の有無や径による顕著な差は見られない。
- ②温湿度の変化を受けた場合、早期にひび割れは発生する。今回の実験では、最大ひび割れ幅は恒温恒湿室の場合よりも小さかったが、これはコンクリートと拘束鋼材の線熱膨張率の差異が影響したものと考えられる。
- ③埋め込み鉄筋の径が太いほどひび割れ幅は小さくなった。シリーズ1ではD10が0.175mm、D6が0.307mmであり、シリーズ2ではD13が0.147mm、D10が0.162mmであった。
- ④ひび割れ幅拘束率と鉄筋比の関係は、0.71%まではほぼ直線式で表わされるが、それ以上ではひび割れ幅制御効果は頭打ちとなった。

参考文献

- 1) 仕入, 青柳他: コンクリートのひびわれ試験方法(案), コンクリート工学, 1985, 3, pp50~54
- 2) 山本, 大岡: コンクリートの乾燥収縮時のAE特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集10-3, 1988, pp139~144
- 3) 山本, 大岡: コンクリートの乾燥収縮時のAE特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987, pp403~404
- 4) 山本, 大岡: コンクリートの乾燥収縮時のAE特性に関する研究, (その2. 鉄筋引き抜け時のAE特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1988, pp615~616
- 5) 大岡, 山本: コンクリートの乾燥収縮ひびわれに関する実験的研究(鉄筋のひびわれ幅制御効果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989, pp601~602