

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

大野俊夫¹・魚本健人²

¹正会員 鹿島建設株式会社技術研究所土木技術研究部 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

²フェロー会員 工博 東京大学国際・産学共同研究センター教授(〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1)

コンクリートのひび割れ発生時期を予測する研究の一環として、一軸拘束試験体を用いてコンクリートの収縮によりひび割れを発生させ、各種の要因がひび割れ発生時期に及ぼす影響、ひび割れ発生点近傍のひずみの挙動、引張伸び能力や収縮応力強度比のひび割れ発生限界点としての適用性などについて検討し、さらに、逐次解析を行い実験値と解析値の比較を行った。その結果、コンクリートの収縮ひずみが部材内で均一でないことがひび割れ発生時期をばらつかせる原因であること、ひび割れ発生に影響を与えている範囲から算定した引張伸び能力や、強度発現条件を考慮した収縮応力強度比は、ひび割れ発生時期を予測する限界点として実用上適用できることなどを示した。

Key Words : *drying shrinkage, autogeneous shrinkage, time of cracking, critical limit, tensile strain capacity, shrinkage stress, restraint specimen*

1. はじめに

コンクリートのひび割れは美観・外観を損なうばかりでなく、漏水や有害物質の進入経路、水和生成物の滲出経路となり、コンクリート構造物の機能、耐久性を脅かす原因となり得るものである。

コンクリートのひび割れは体積収縮や体積膨張が何らかによって拘束された場合に発生することが多いが、その原因としては乾燥収縮、温度応力、急激な温度や湿度変化に起因するものが多い。また、近年では粉体を多く使用する高強度コンクリートや高流動コンクリートの自己収縮もその一因となり得るとされている。実構造物においてはこれらの一つの要因だけによりひび割れが発生することは少なく、複数の要因が複雑に絡み合って発生していると考えられる。

このように種々の要因が関与することや、コンクリートの物性値が経時的に変化すること、雰囲気湿度や風が刻々と変化することから、コンクリートに作用するひずみ、応力を推定することが難しく、実構造物においてひび割れの発生を予測できていないのが現状である¹⁾。

コンクリートにひび割れが発生する限界点として、温度応力では引張応力が試験体の引張強度の約80%を超えた点²⁾、乾燥収縮を対象とした研究においては、収縮応力が引張強度の60~70%に達した点などの報告がある^{3), 4), 5)}。

筆者らは、これまでJIS原案に示された一軸拘束試験体を用いて、各種要因が収縮ひび割れの発生に及ぼす影響や、引張伸び能力や収縮応力強度比のひび割れ発生限界点としての適用性について検討を行ってきた^{6), 7)}。本報告は、これらの検討をさらに進めるとともに、収縮応力の逐次解析結果と実験結果の対比を行い、ひび割れ発生予測手法の妥当性について検討したものである。

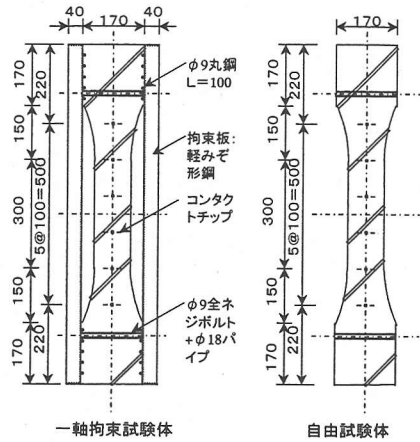
2. 実験方法

(1) 実験要因と水準

収縮ひび割れの発生に影響する要因としては、セメント、混和材料、粗骨材の種類などの材料要因、単位水量、ペースト量、水セメント比などの配合要因、温湿度などの環境要因、部材の形状寸法、拘束

表-1 実験要因と水準の組合せ

No.	水セメント比 (%)	乾燥開始材齢 (日)	拘束板の断面積 (mm ²)	粗骨材量 (kg/m ³)	
1	30	7	697	1,030	
2	45				
3	7				
4	60	1	1,019		
5		7	697		
6		7	496		
7		28	697		
8		7	496		
9	7	7	1,019		515
10			697		
11			496		



の形態，拘束度や乾燥を開始する時期などの設計・施工要因が挙げられるが，本実験ではこれらの要因の中から，独立要因と考えられ，かつ，収縮ひび割れの発生に大きく影響すると考えられる水セメント比，粗骨材量（モルタル量），乾燥開始材齢，拘束度（拘束板の断面積）を実験要因として取上げた．表-1に実験の要因と水準及びその組合せを示す．

(2) 試験項目

a) 拘束ひび割れ試験

コンクリート試験体に収縮ひび割れを発生させる方法は種々の方法が提案されているが⁸⁾，ここではJIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」⁸⁾，⁹⁾に準拠し，コンクリートの体積収縮を軽みぞ形鋼で拘束する一軸拘束試験体による方法を採用した．試験体の形状・寸法は図-1に示すとおりであり，直線区間を300mmとし，最小断面を100×100mmとした試験体である．写真-1に実験状況を示す．

コンクリートのひずみは脱枠直後に図-1に示すように打設面，底面の両表面の500mm間に100mm間隔でコンタクトチップを貼り，乾燥開始から部材を貫通するひび割れが発生まで1~2日おきにコンタクトストレインゲージ（精度0.001mm）で測定した．なお，測点の記号はコンクリートの打設面の上部からF-1，F-2，…F-5とし，底面側をB-1…B-5とした．一軸拘束試験体は5体作製した．

拘束板のひずみは軽みぞ形鋼の高さ中央で断面の重心位置にワイヤストレインゲージ（ゲージ長：3mm）を貼り（4点/1試験体），コンクリートの凝結始発からひび割れが発生するまで3時間毎に自動計測した．ひび割れ発生材齢は，拘束板のひずみが零付近まで戻った材齢とした．

また，一軸拘束試験体と同一形状で拘束板のない自由試験体を同時に3体作製し，一軸拘束試験体と

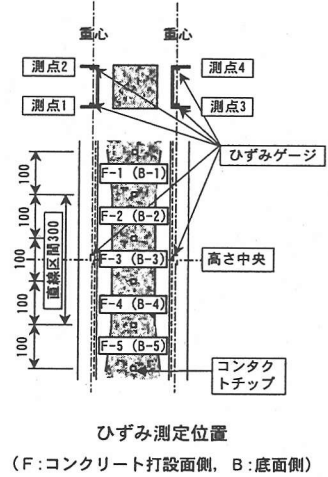


図-1 試験体の形状・寸法（単位：mm）

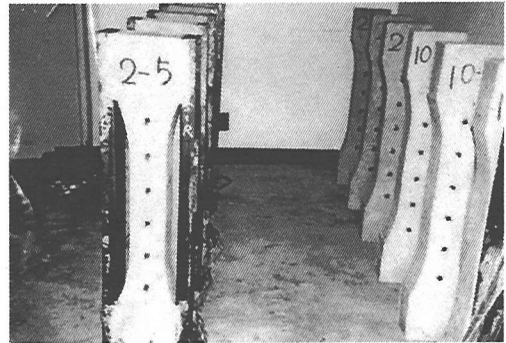


写真-1 実験状況

同様にコンクリートのひずみを測定した．

乾燥を開始する前の湿潤養生中に作用するコンクリートのひずみ量を測定するため，日本コンクリート工学協会 自己収縮研究委員会報告「セメントペースト・モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」¹⁰⁾に準拠して自己収縮

表-2 配合表

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	混和剤
C30	30	37.6	167	557	604	1,030	2.785
C45	45	43.1		371	759		0.742
C60		45.5		278	837		0.556
CM60	60	69	223	371	1,114	515	0.742
M60		100	292	486	1,458	0	0

表-3 物性試験結果

実験 No.	配合記号	フレッシュ				乾燥開始材齢 (湿潤養生)				材齢28日 (水中養生)	
		スランブ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)	始発時間 (h - m)	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
1	C30	14.5	4.4	24.2	5 - 52	7	56.4	3.30	4.10	56.5	3.71
2	C45	10.0	4.6	21.2	5 - 25	7	33.6	2.93	2.78	43.0	3.40
3	C60	8.5	4.8	20.0	6 - 44	1	6.35	1.26	0.70	36.8	2.89
4		9.0	4.2	22.4	6 - 12	7	22.9	2.45	2.39	32.5	2.95
5		6.0	5.3	22.5	5 - 34	7	26.3	2.57	2.31	35.7	3.18
6		9.5	4.8	21.3	6 - 14	7	19.9	2.45	2.31	32.5	2.95
7		8.0	4.7	20.5	6 - 55	(7)	24.7	2.64	2.84	37.1	3.09
8	CM60	21.0	5.5	21.0	6 - 26	7	23.6	2.13	2.06	32.4	2.40
9	M60	22.0	2.1	21.1	6 - 57	7	26.6	1.93	2.02	40.1	2.30
10		23.0	1.9	19.8	7 - 52	7	24.6	1.96	2.05	39.8	2.29
11		21.5	1.7	20.0	7 - 40	7	24.0	1.90	1.86	40.2	2.34

実験 No.	配合記号	材齢28日 (気中)		ひび割れ発生開始材齢 (試験体1体目, 気中)				ひび割れ発生終了材齢 (試験体5体目, 気中)			
		圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
1	C30	52.8	3.37	17	61.6	3.40	4.27	20	63.0	3.43	4.19
2	C45	47.9	3.01	18	42.6	2.96	3.08	24	45.1	2.96	3.06
3	C60	22.3	2.35	14	22.9	2.21	1.85	18	22.8	2.30	1.67
4		32.7	2.77	16	26.8	2.77	2.39	32	32.1	2.64	2.49
5		37.3	2.91	21	33.8	2.63	2.59	45	35.9	2.73	2.95
6		33.0	2.72	47	35.3	2.78	2.60	81	33.9	2.58	3.15
7		35.7	2.82	46	41.8	2.87	3.15	57	41.4	2.70	3.16
8	CM60	34.0	2.20	23	32.1	2.23	2.03	27	33.0	2.19	2.04
9	M60	43.1	2.19	10	31.0	1.99	2.30	14	34.6	2.12	2.18
10		39.9	2.09	15	34.6	2.05	2.66	19	37.3	2.10	2.07
11		40.7	2.13	16	34.9	2.08	2.25	20	36.8	2.13	2.22

試験体 (100×100×400mm) を作製し、凝結始発から乾燥開始材齢までの長さ変化を測定した。また、乾燥開始材齢においてアルミテープを剥がし、乾燥条件下に曝し、自由試験体と同様に自由ひずみを測定した。

b) 物性試験

フレッシュコンクリートの物性試験として、スランブ、空気量及びモルタルの凝結硬化速度試験 (JIS A 6202) を実施した。

また、圧縮強度 (JIS A 1108, φ100×h200), 静弾性係数 (JSCE-G502, φ100×h200), 引張強度 (JIS A 1113, φ150×h200) を乾燥開始材齢, 材齢 28 日 (引張強度は不実施), 及び一軸拘束試験体の 1 体目にひび割れが発生した材齢, 5 試験体全てにひび割れが発生した材齢の 4 材齢において実施した。供試体は乾燥材齢まで湿潤養生した後、水中養生を除いて全て一軸拘束試験体など同一の乾燥条件下で養生した。

(3) 配合

表-2 にコンクリート及びモルタルの配合を示す。水セメント比 30, 45, 60% のコンクリートの配合 (C30, C45, C60) は、単位水量 (167kg/m³) と単位粗骨材量 (1,030kg/m³) を一定として配合設計した。配合 CM60, M60 は、水セメント比, 砂セメント比一定のもとで、コンクリート配合 (C60) の粗骨材量を 50%, 0% とした配合である。なお, M60 は、ポンプ施工の先送りモルタルとして一般的に使用されている配合とほぼ同じである。

使用材料は、セメントは N 社製の普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm³, 比表面積 3,260cm²/g), 細骨材は富士川産川砂 (比重 2.63, 吸水率 2.01%, 粗粒率 2.75), 粗骨材は両神産砂岩砕石 (比重 2.70, 最大寸法 20mm, 吸水率 0.51%, 粗粒率 6.66) である。混和剤は水セメント比 45%, 60% では F 社製のオキシカルボン酸塩系の AE 減水剤, 水セメント比 30% ではポリカルボン酸塩系の高性能 AE 減水剤とした。

(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、0.1m³を2回連続して練り混ぜ、混合した後フレッシュコンクリートに関する試験を行い、各種試験体を作製した。湿潤養生が可能となる材齢 10 時間程度以後乾燥開始材齢まで湿潤のむしろ中で養生し、一軸拘束試験体と自由試験体は乾燥開始材齢においてコンタクトチップを貼った後に恒温恒湿室に移動した。実験期間中の恒温恒湿室の温度は 20.5±1.5℃、湿度は 62±5R.H.%の範囲にあった。

3. 実験結果及び考察

(1) 基礎物性

表-3 に各ケースごとに試験した基本物性試験の結果を示す。

コンクリート配合のスランプは 8±2.5cm を目標としたが、高性能 AE 減水剤を使用した水セメント比 30%の配合では大きな値となり、また、粗骨材量を減少させた配合で大きい結果であった。

モルタル配合 (M60) では AE 減水剤を使用しなかったため、空気量は 2.0%前後の小さい値であったが、その他は 4.5±1%の範囲の空気量であった。モルタルの圧縮強度は空気量が少ないため、同一水セメント比のコンクリートに比べて大きくなっているが、静弾性係数、引張強度は同一の圧縮強度のコンクリートに比べて小さい傾向を示している。

図-2、図-3 に、乾燥開始材齢、ひび割れ発生材齢に実施した引張強度、静弾性係数試験の結果を示す。なお、養生条件は、乾燥開始材齢まで湿潤養生、以後気中養生である。

両図から、引張強度、静弾性係数は、各配合ごとに異なり、また、材齢 7 日以後の発現はわずかであることが分かる。図-3 中の静弾性係数を配合ごとに材齢との関係で示すと表-4 の通りとなる。

(2) ひび割れ発生材齢

全ての一軸拘束試験体には材齢 9.4~80.4 日(乾燥材齢 2.4~73.4 日)の間に、部材断面を貫通するひび割れが確認された。表-5 に全試験体に関する拘束ひび割れ試験結果を示す。

図-4 に貫通ひび割れが発生した材齢を示す。概して、ひび割れ発生材齢が長くなると同一実験条件においてもひび割れ発生材齢のばらつきが大きくなる傾向を示している。各要因ごとにひび割れ発生材

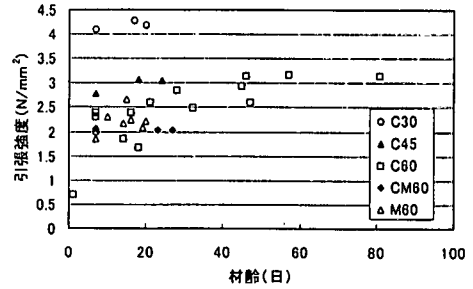


図-2 引張強度の試験結果

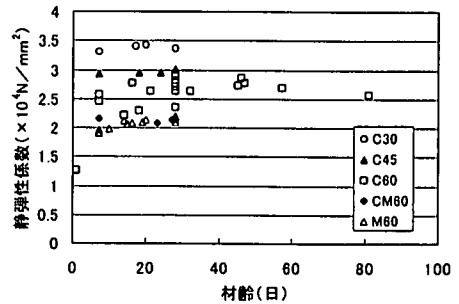


図-3 静弾性係数の試験結果

表-4 静弾性係数の実験式

$$E=10000*x/(a+b*x)$$

	a	b
C30	0.0842	0.290
C45	0.0782	0.331
C60	0.401	0.361
CM60	0.264	0.463
M60	0.479	0.450

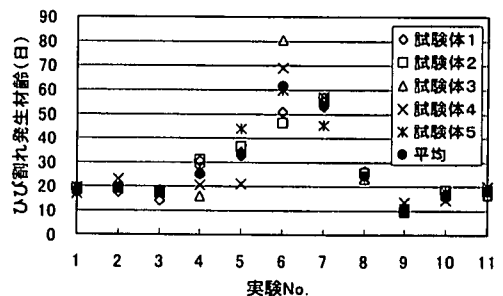


図-4 ひび割れ発生材齢

齢について考察すると以下のとおりである。

水セメント比 30, 45, 60%(実験 No.1, 2, 5)の 5 試験体の平均ひび割れ発生材齢は、18.2, 19.6, 33.7 日であり、水セメント比が小さいほど貫通ひび割れが早く発生する傾向が見られた。

表-5 拘束ひび割れ試験結果

試験体	ひび割れ発生材齢(日)	ひび割れ発生部位	破壊部位・パターン	ひび割れ発生直前			ひび割れ発生時				
				測定材齢(日)	自由収縮ひずみ($\times 10^{-5}$)	拘束収縮ひずみ($\times 10^{-5}$)	拘束引張ひずみ($\times 10^{-5}$)	収縮応力(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	収縮応力強度比	
No.1	1	17.3	5	最小収縮部位	16.2	-403	-193	210	2.54	4.26	0.60
	2	18.9	3	最小収縮部位	18.0	-443	-215	228	2.65	4.21	0.63
	3	18.3	3	最小収縮部位	18.0	-443	-198	245	2.52	4.23	0.60
	4	19.7	5	最小収縮部位	18.0	-443	-200	243	2.61	4.19	0.62
	5	16.9	3	直前膨張部位	16.2	-403	-183	220	2.56	4.27	0.60
	平均	18.2						229			0.61
No.2	1	17.6	1	最小収縮部位	17.2	-335	-144	191	1.87	3.08	0.61
	2	19.1	4	最小収縮部位	18.0	-341	-143	198	1.87	3.07	0.61
	3	19.3	2	最小収縮部位	18.0	-341	-151	190	1.60	3.07	0.52
	4	23.2	4	最小収縮部位	22.3	-379	-172	207	2.05	3.06	0.67
	5	18.8	2	最小収縮部位	18.0	-341	-131	210	1.88	3.08	0.61
	平均	19.6						199			0.60
No.3	1	14.2	4	最小収縮部位	12.0	-248	-92	156	1.11	1.85	0.60
	2	18.1	1	前兆なし	17.0	-297	-129	168	1.69	1.69	1.00
	3	18.7	4	前兆なし	17.0	-297	-118	179	1.73	1.67	1.04
	4	17.7	1	最小収縮部位	17.0	-297	-102	195	1.49	1.71	0.87
	5	17.8	3	最小収縮部位	17.0	-297	-111	186	1.36	1.70	0.80
	平均	17.3						177			0.86
No.4	1	30.5	2	最小収縮部位	30.0	-387	-136	251	2.17	2.49	0.87
	2	30.8	4	最小収縮部位	30.0	-387	-147	240	2.20	2.49	0.88
	3	16.0	2	最小収縮部位	16.0	-242	-82	160	1.50	2.39	0.63
	4	20.3	4	最小収縮部位	20.3	-291	-89	202	1.69	2.42	0.70
	5	26.3	4	最小収縮部位	25.3	-334	-97	237	2.05	2.46	0.83
	平均	24.6						218			0.78
No.5	1	32.4	4	直前膨張部位	31.0	-399	-210	189	2.23	2.77	0.80
	2	36.7	2	前兆なし	35.1	-435	-190	245	2.43	2.84	0.86
	3	34.4	2	最小収縮部位	33.2	-418	-182	236	2.28	2.80	0.81
	4	20.8	2	最小収縮部位	19.2	-283	-118	165	1.84	2.59	0.71
	5	44.1	3	最小収縮部位	42.2	-467	-219	248	2.53	2.95	0.86
	平均	33.7						217			0.81
No.6	1	51.0	2	最小収縮部位	50.0	-502	-282	220	2.27	2.68	0.85
	2	46.3	4	前兆なし	45.0	-482	-283	199	2.27	2.60	0.87
	3	80.4	4	最小収縮部位	80.0	-585	-273	312	2.70	3.15	0.86
	4	69.1	1	最小収縮部位	66.2	-569	-315	254	2.50	2.97	0.84
	5	59.8	2	最小収縮部位	59.0	-543	-260	283	2.48	2.82	0.88
	平均	61.3						254			0.86
No.7	1	52.9	4	直前膨張部位	51.0	-403	-185	218	2.31	3.15	0.73
	2	56.3	4	最小収縮部位	55.3	-453	-190	263	2.35	3.15	0.75
	3	56.9	3	前兆なし	55.3	-453	-196	257	2.50	3.15	0.79
	4	57.0	2	最小収縮部位	55.3	-453	-180	273	2.53	3.16	0.80
	5	45.5	2	前兆なし	44.0	-374	-179	195	1.98	3.15	0.63
	平均	53.7						241			0.74
No.8	1	26.3	5	最小収縮部位	25.1	-407	-174	233	1.69	2.04	0.83
	2	25.6	2	最小収縮部位	25.1	-407	-182	225	1.73	2.04	0.85
	3	23.1	5	最小収縮部位	23.0	-356	-130	226	1.38	2.03	0.68
	4	23.3	5	最小収縮部位	23.0	-356	-165	191	1.77	2.03	0.87
	5	23.9	2	最小収縮部位	23.0	-356	-140	216	1.79	2.03	0.88
	平均	24.4						218			0.82
No.9	1	10.3	2	前兆なし	10.0	-141	-55	86	1.35	2.28	0.59
	2	10.0	2	最小収縮部位	9.1	-119	-53	66	0.63	2.28	0.28
	3	9.4	4	最小収縮部位	9.1	-119	-40	79	1.09	2.30	0.48
	4	13.7	2	前兆なし	13.3	-228	-55	173	1.85	2.18	0.85
	5	10.8	4	最小収縮部位	8.0	-69	-32	37	0.70	2.26	0.31
	平均	10.8						88			0.50
No.10	1	15.3	1	最小収縮部位	15.2	-283	-114	169	1.71	2.56	0.67
	2	18.4	4	最小収縮部位	18.2	-322	-105	217	1.99	2.07	0.96
	3	16.5	4	最小収縮部位	16.0	-286	-126	160	1.72	2.37	0.73
	4	14.6	4	最小収縮部位	14.2	-267	-94	173	1.56	2.66	0.59
	5	18.2	3	最小収縮部位	18.2	-322	-122	200	1.83	2.10	0.87
	平均	16.6						184			0.78
No.11	1	16.1	4	最小収縮部位	16.1	-319	-149	170	1.58	2.25	0.70
	2	17.9	3	最小収縮部位	17.2	-346	-185	161	1.59	2.24	0.71
	3	16.6	3	最小収縮部位	16.1	-319	-155	164	1.56	2.25	0.69
	4	19.9	2	直前膨張部位	19.2	-379	-217	162	1.85	2.22	0.83
	5	18.6	3	直前膨張部位	18.0	-348	-195	153	1.74	2.23	0.78
	平均	17.8						162			0.74

牧角らの水セメント比 40~60%の範囲の研究¹¹⁾や、ひび割れ研究会の水セメント比 50~70%の範囲の研究¹²⁾では、水セメント比に関わらずほぼ同一のひび割れ発生日数であるとしている一方、飛坂らの水セメント比 25~60%の研究¹³⁾や、安田らの水セメント比 27~60%の研究¹⁴⁾では、水セメント比が小さいほどひび割れが早期に発生するとしている。本実験の結果を加味して考察すると、水セメント比 45%以下ではひび割れ発生材齢が急激に早くなる傾向があると考えられる。一般に、この傾向は湿潤養生過程の自由収縮ひずみ(自己収縮ひずみ)が大

きく、クリープによる応力緩和が少ないことによると推察されている^{14), 15)}。

乾燥開始材齢 1, 7, 28 日(実験 No. 3, 5, 7)の平均ひび割れ発生材齢は、17.3, 33.7, 53.7(乾燥材齢で 16.3, 26.7, 25.7 日)であり、湿潤養生期間が極端に短い場合に貫通ひび割れが早く発生する傾向が認められた。

牧角らの乾燥開始材齢 2, 3, 7, 14, 28 日の研究¹¹⁾や、ひび割れ研究会の 2, 3, 7 日の研究¹⁵⁾では、養生日数とひび割れ発生材齢の明確な関係は認められていないとしているが、養生日数が 2 日の場合に

はひび割れが他に比べ早期に発生していることが伺える。したがって、本実験の結果を考慮すると、湿潤養生日数が2日より短い場合にひび割れが早期に発生する傾向にあると考えられる。

拘束板の断面積が 1,019, 697, 496mm² (実験 No. 4, 5, 6) の平均ひび割れ発生材齢は, 24.8, 33.7, 61.3 日であり, 拘束板の断面積が大きいほど, 貫通ひび割れが早く発生する傾向が認められた。この傾向は, 牧角らの研究¹¹⁾ や鈴木らの研究¹⁶⁾ と同一の傾向であった。

モルタル配合で拘束板の断面積を変化させた場合においても(実験 No.9, 10, 11), 拘束板の断面積が大きいほどひび割れが早く発生する傾向が認められたが, コンクリート配合に比べて全体的に早期にひび割れが発生し, 拘束板断面積による差は小さかった。

また, 粗骨材量が 1,030, 515, 0kg/m³(実験 No. 6, 8, 11) の平均ひび割れ発生材齢は, 平均ひび割れ材齢は 61.3, 24.4, 17.8 日であり, 粗骨材量の減少, すなわちモルタル量の増加に伴ってひび割れ発生材齢が早くなった。

(3) ひび割れ発生部位

貫通ひび割れが発生した部位は全てコンクリートひずみの測定範囲(中央 500mm)であったが, その部位をコンクリートひずみの測定区間(上から 1~5)として整理すると, 図-5 のとおりである。

直線区間(2~4)に貫通ひび割れが発生した試験体は全体の 82%であり, 残り 18%は曲線区間(1, 5)にひび割れが発生した。

(4) 各ひずみの関係

図-6 に, 自由試験体の自由ひずみ, 一軸拘束試験体の拘束収縮ひずみの関係を示す。また, 拘束板から作用する力によってコンクリート内に発生する弾性ひずみ, クリープひずみの関係を式(1)~(4)に示す。ここで, ひずみはマイナスが収縮, プラスが膨張になるようにしている。

$$\varepsilon_f = (L_f - L_0) / L_0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = (L_r - L_0) / L_0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_e + \varepsilon_c = (L_r - L_f) / L_0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_e + \varepsilon_c + \varepsilon_f \quad (4)$$

$$K = -(\varepsilon_e + \varepsilon_c) / \varepsilon_f \quad (5)$$

ここで, ε_f : 自由収縮ひずみ

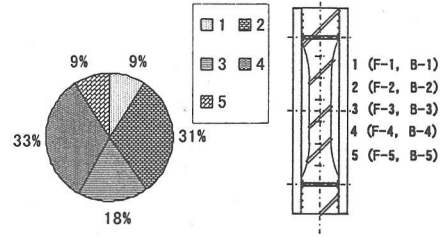


図-5 ひび割れ発生区間

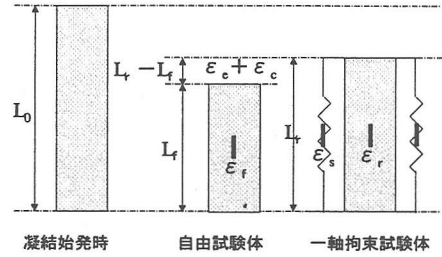


図-6 各ひずみの関係

ε_r : 拘束収縮ひずみ

$\varepsilon_e + \varepsilon_c$: 拘束引張りひずみ

ε_e : 弾性ひずみ

ε_c : クリープひずみ

K : 実拘束率

また, 一軸拘束試験体における拘束板とコンクリートの力の釣合い条件, ひずみの適合条件から求められる関係を式(6), (7)に示す。

両式より式(8)が得られ, 時間間隔 Δt に生じる応力増分が Δt の中間で生じ, この応力によって弾性ひずみ, クリープひずみが生じると仮定することにより, 式(4)を逐次的に式(9)に変換することができる。さらに, 式(8), (9)から式(10)が得られ, 収縮応力を逐次解析により求めることができる^{11), 17)}。なお, 引張応力がプラスとなる。

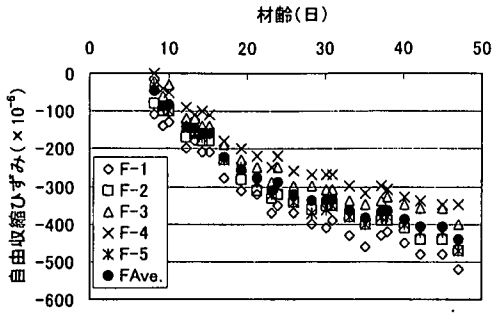
$$\varepsilon_s = -\varepsilon_e E_c A_c / E_s A_s \quad (6)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_r \quad (7)$$

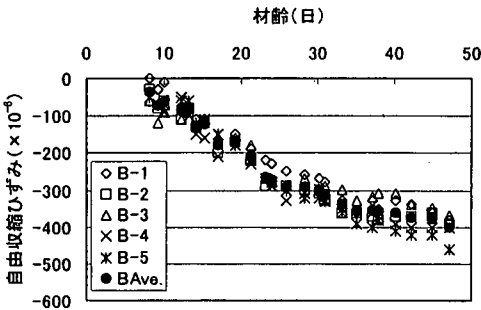
$$\varepsilon_{r,i} = -\sigma_{c,i} A_c / E_s A_s \quad (8)$$

$$\varepsilon_{r,i} = \sum_{j=1}^i \left\{ (\sigma_{c,j} - \sigma_{c,j-1}) (1 + \phi_{i,j-0.5}) / E_{c,j-0.5} \right\} + \varepsilon_{f,i} \quad (9)$$

$$\sigma_{c,i} = -1 / (A_c / E_s A_s + (1 + \phi_{i,i-0.5}) / E_{c,i-0.5})$$



(a) 打設面



(b) 底面

図-7 各測点の自由収縮ひずみの履歴例
(実験 No.5, 試験体 2)

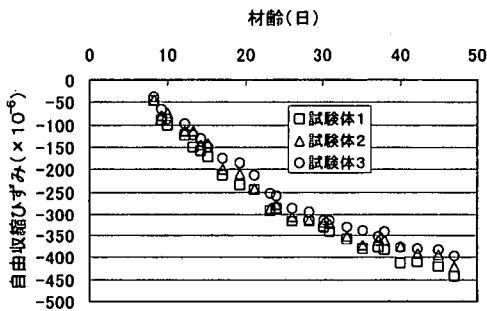


図-8 自由収縮ひずみの履歴例 (実験 No.5)

$$\left\{ \sum_{j=1}^{i-1} \left\{ (\sigma_{c,j} - \sigma_{c,j-1}) (1 + \phi_{i,j-0.5}) / E_{c,j-0.5} \right\} - \sigma_{c,i-1} (1 + \phi_{i,i-0.5}) / E_{c,i-0.5} + \varepsilon_{f,i} \right\} \quad (10)$$

ここで, ε_s : 拘束板ひずみ

E_s, A_s : 拘束板の弾性係数, 断面積

E_c, A_c : コンクリートの弾性係数,

断面積

$\sigma_{c,i}$: 材齢 i における収縮応力

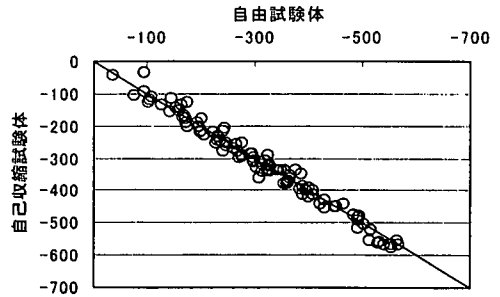


図-9 自由収縮ひずみの試験体間の差

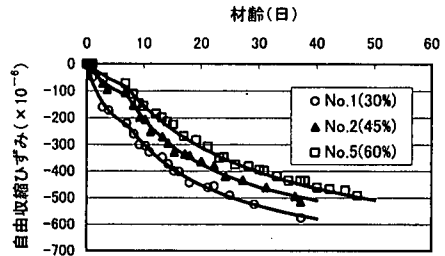


図-10 自由収縮ひずみの履歴例 (W/C)

$\phi_{i,j}$: 材齢 j において載荷された材齢 i でのクリープ係数 ($\varepsilon_c / \varepsilon_e$)

(5) 自由収縮ひずみ

図-7 に自由試験体における各測点の乾燥開始後のコンクリートひずみ(自由収縮ひずみ)の履歴例を示す。同図中の(a)図は打設面を100mm間隔で5測点測定した結果であり(上からF-1~F-5), (b)図は底面(B-1~B-5)の5測点の測定結果である。なお, 実験 No.5 は本実験で基本的な水準の組合せに位置付けられることから, 以下, このケースの実験結果を中心に示す。同図から, 打設面の収縮量が底面に比べて総じて大きいこと, 各測点間にばらつきは認められるものの, 全ての測点でほぼ一様に収縮傾向を示していることが分かる。

図-8 は打設面, 底面の全10測点のひずみの平均値を, 3体の自由試験体について整理した一例である。同図から, 試験体間のばらつきが小さいことが分かり, 10測点のひずみを平均化した試験体の平均ひずみには, 前述のような測定位置によるばらつきはあまり表面化しないことが分かる。

図-9 に, 乾燥後の自由試験体と自己収縮試験体の自由収縮ひずみを比較して示す。両試験体は測定区間が500と300mmと差があり, 試験体端部の形状が異なるものの, 同図から, 両者のひずみはほぼ

表-6 自由収縮ひずみの実験式

No.	$y=-x/(a+b*x)$		$y=c-(x-t)/(d+e*(x-t))$			
	a	b	t	c	d	e
1	11697	2764	7.05	-0.000221	32840	1812
2	31179	4206	6.76	-0.000105	27623	1648
3	37359	1133	-	-	-	-
4	66697	5914	6.94	-6.28E-05	31541	1841
5	60886	3234	6.83	-8.05E-05	38083	1461
6	102254	3975	6.88	-5.33E-05	41707	1271
7	58770	5613	28.2	-0.000118	28145	2060
8	3581094	448216	7.45	-3.06E-05	32909	898
9	66341	6665	7.40	-5.72E-05	29890	825
10	854417	58027	7.26	-1.44E-05	21018	1070
11	71300	10419	7.30	-5.11E-05	25721	884

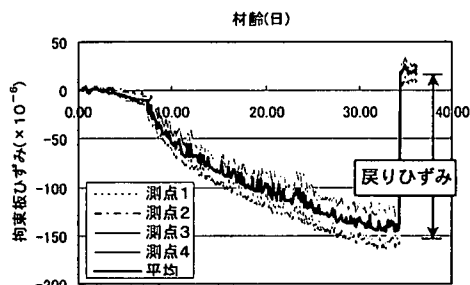


図-11 測点ごとの拘束板ひずみの履歴例 (実験 No.5, 試験体 3)

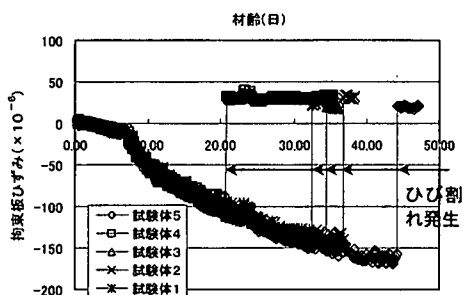


図-12 平均拘束板ひずみの履歴 (実験 No.5)

等しいことが分かり、自己収縮試験体の自由収縮ひずみにより自由試験体の自由収縮ひずみを代用できると考えられた。

図-10に、水セメント比によって整理した打設直後からの自由収縮ひずみの履歴例を示す。ここで、自由収縮ひずみは、前述のように試験体形状が異なっても断面寸法が同じであれば、ひずみに差が現れないことから、自己収縮試験体で測定した湿潤養生中の自由収縮ひずみと、自由試験体で測定した乾燥開始後の自由収縮ひずみの和で表わしている。いずれも3試験体の平均値であり、同図中にも近似曲線を示したが、表-6に、乾燥前の主に自己収縮からなる自由収縮ひずみを $y = -x/(a+b*x)$ の形の式に、乾燥後を $y = c - (x-t)/(d+e*(x-t))$ の形に回帰した時の各定数を示す。

水セメント比 30% の自由収縮ひずみの履歴

(No.1) は、45%や60%に比べて材齢7日までの自由収縮ひずみが大きく、材齢7日以後の収縮量が他とほぼ同様であることから、全体としてひずみ量が大きくなっていることが分かる。

(6) 拘束板ひずみ

図-11に、一軸拘束試験体の拘束板のひずみ履歴例を4カ所のひずみゲージの貼付位置ごとに整理して示す。同図から、材齢7日までの湿潤養生期間に 15×10^{-6} 程度の収縮ひずみが見られた後、乾燥に伴ってような収縮傾向が見られること、ひずみゲージの4カ所の位置によりひずみ履歴にばらつきがあることが分かる。

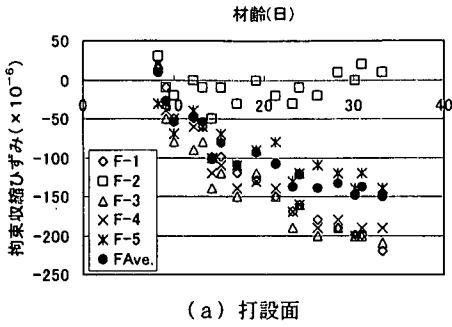
図-12に、同一条件の5試験体における拘束板の平均ひずみ(4ひずみゲージの平均)の履歴を示す。同図から、平均ひずみとして算定すると、5試験体間のひずみ履歴のばらつきが測定部位ごと(図-11)のばらつきに比べて小さくなっていることが分かり、また、5試験体はいずれも同様な収縮履歴を経過するにもかかわらず、ひび割れ発生材齢に約21~44日と大きな差が生じている状況が分かる。コンクリート断面内や軸方向のひずみ分布、内部欠陥の存在などの違いにより、ひび割れ発生材齢に差が生じるものと考えられる。

また、同図は凝結始発以後ほとんど膨張ひずみを示していないにも拘わらず、貫通ひび割れ発生時に拘束板ひずみが膨張側に移行することを示している。この傾向は量の程度はあるものの全てのケースで認められている。水セメント比24%のコンクリートを用いた鉄筋埋込み試験体に関する実験例¹⁷⁾において、コンクリートの自己収縮は凝結始発直後(9時間)から生じているにも拘わらず、鉄筋に収縮ひずみが生じ始めるのは14時間以後であり、ひずみの発生に比べて応力の発生が遅れることが報告されている。今回の一軸拘束試験体においても凝結始発以後、コンクリートが湿潤養生や水和熱によって膨張した時点でコンクリートと拘束板の一体化が図られ、この膨張量がひび割れ発生時に拘束板の戻りひずみに加算されて表れたものとも考えられた。したがって、材齢初期においては厳密な意味でひずみの適合性が成立していないと推察された。

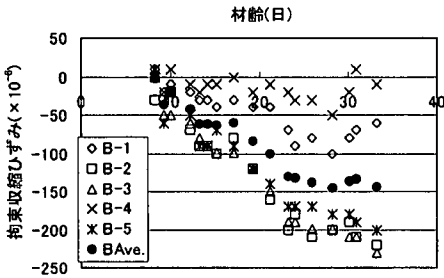
(7) 拘束収縮ひずみ

図-13に一軸拘束試験体の全10測点のコンクリートひずみ(拘束収縮ひずみ)の履歴例を示す。

同図から、各測点のひずみ履歴は一律に収縮傾向を示す測点、乾燥初期からほとんど収縮傾向を示さない測点、途中から収縮が進行しなくなる測点など



(a) 打設面



(b) 底面

図-13 各測点の拘束収縮ひずみ
(実験 No.5, 試験体 3)

様々であり、測点によるばらつきが大きいことが分かる。測点によりひずみがばらつく傾向は、ほとんど全ての試験体で見られ、拘束板により拘束を受けた場合、コンクリートが一様に収縮できない傾向が強くなる事が分かる。

本試験体の貫通ひび割れ発生部位は、上から2番目の測点間であったが、同図に示すように打設面がほとんど収縮を示さず (F-2)、底面が一様に収縮傾向 (B-2) を示す部位であった。このように、早期から膨張傾向を示す、または、最も収縮していない測点間 (表-5 中の最小収縮部位) で貫通ひび割れが発生した試験体は全体の76%であり、周囲の収縮が勝り、収縮できずに引張を受けている測点にひび割れが発生するケースが多く見られた。この他は、ひび割れ発生直前に膨張傾向が見られた後に発生した試験体 (表-5 中の直前膨張部位) が9%、膨張傾向も見られず一様に収縮した後にひび割れが突然発生した試験体 (表-5 中の前兆なし) が15%であった。ただし、コンクリートひずみの測定は1~2日おきであり、ひび割れ発生直前の測定からひび割れ発生までに若干の時間差があることに留意する必要がある。

一軸拘束試験体に貫通ひび割れが発生した場合、発生した測点間のひずみは大きく膨張側へ移行し、その周囲の測点間のひずみは収縮側へ移行した。ひ

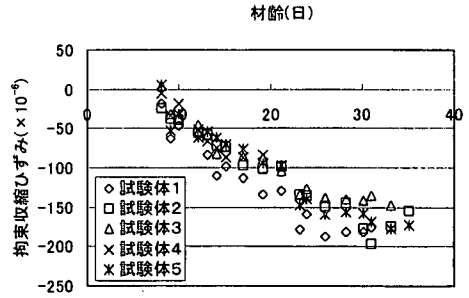


図-14 拘束収縮ひずみの履歴例 (実験 No.5)

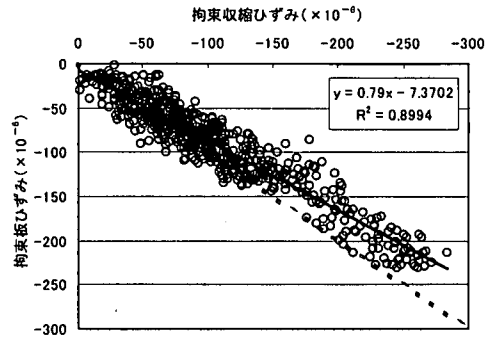


図-15 拘束収縮ひずみと拘束板ひずみの関係

ずみが収縮側へ移行した範囲は測定範囲全域であり、全測点間においてひび割れ発生に伴ってひずみが開放されたものと推察された。換言すると、ひずみが開放された範囲がひび割れ発生に影響を与えていたと考えられる。

また、図-13に示す試験体と同様に全ての試験体において、乾燥日数が増加するに伴って、一様に収縮傾向を示す測点と収縮傾向を示さない測点とのひずみ差が大きくなる傾向が認められた。

既往の研究²⁰⁾において、直方体コンクリートに一軸引張を作用させた場合、ひび割れ発生点においては引張ひずみが急増した後にひび割れが発生するのに対し、その隣接点は引張ひずみが緩和される傾向にあることが示されているが、本実験においては前述のようにひび割れ発生点が、全測点の中で最も収縮傾向を示さない測点、ひび割れ発生直前に膨張傾向を示す測点、あるいは一様に収縮傾向を示す測点と、ひび割れ発生測点のひずみ履歴に様な傾向がないことが分かった。

図-14に各試験体の全10測点の平均ひずみの履歴例 (No.5) を整理して示す。全体的な傾向としては収縮傾向が認められるものの、自由収縮ひずみに比べ試験体間のばらつきが大きく、拘束板ひずみよ

りもばらつきが表れやすいことが分かり、図-13に表れているような測点間のひずみのばらつきが、試験体間の拘束収縮ひずみのばらつきに表われていると考えられる。また、この拘束収縮ひずみの値が試験体間で異なることが、同一条件においてもひび割れ発生材齢を異にする原因になっていると考えられる。

図-15に、同一測定日時における拘束収縮ひずみと拘束板ひずみの関係を示す。同図から、拘束収縮ひずみに対し拘束板ひずみが小さく測定されていることが分かる。

拘束板やコンクリートのひずみを種々の測定方法で測定した場合のひずみ差に関する研究報告¹⁵⁾によると、ひずみゲージとコンタクトゲージの場合、ひずみが 50×10^{-6} 程度以降においてはコンタクトゲージによる測定値がひずみゲージによる測定値より大きくなり、ひずみゲージはコンタクトゲージによるひずみの約70~75%であることを示している。

本実験では同図に示すように、拘束板ひずみ（ひずみゲージ法）が拘束収縮ひずみ（コンタクトゲージ法）の測定値の約80%であり、両者のひずみ測定方法による差を考慮すれば、コンクリートと拘束板はほぼ同様に収縮しており、乾燥開始材齢以後のひずみの適合性は成立していると考えられた。

(8) 拘束引張ひずみ

図-16(a)~(e)に実験要因ごとに整理した拘束引張ひずみの履歴を示す。なお、同図中には自由収縮ひずみと同様に近似曲線を実線で示している。拘束引張ひずみ（自由収縮ひずみと拘束収縮ひずみとの差）は、拘束板の存在によりコンクリートに作用している引張力によって生じたひずみであり、同図は一軸拘束試験体5体の全測点の平均ひずみで示している。一軸拘束試験体のひずみ測定は乾燥開始以後に行っているが、ここでは、湿潤養生中に受けた拘束引張ひずみを、湿潤養生過程と乾燥過程の拘束率とが同一であるという仮定のもとで、式(11)により算定している。

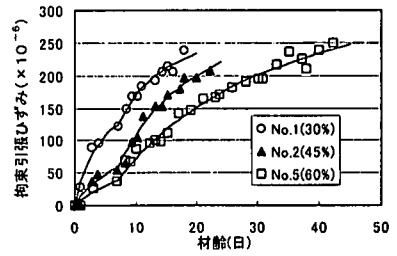
$$\varepsilon_e + \varepsilon_c = -K \times \varepsilon_{f, wet} + (\varepsilon_e + \varepsilon_c)_{dry} \quad (11)$$

ここで、

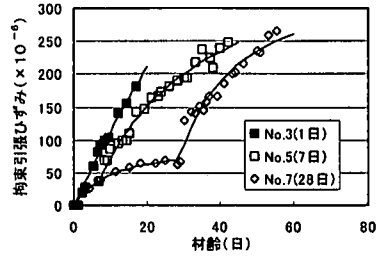
$\varepsilon_{f, wet}$: 湿潤養生期間の自由収縮ひずみ

$(\varepsilon_e + \varepsilon_c)_{dry}$: 乾燥期間の拘束引張ひずみ

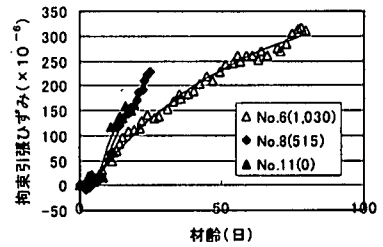
(a)図は拘束引張ひずみに対する水セメント比の影響、(b)図は乾燥開始材齢、(c)図は粗骨材量、(d)図は



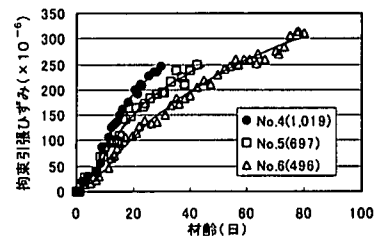
(a)水セメント比の影響



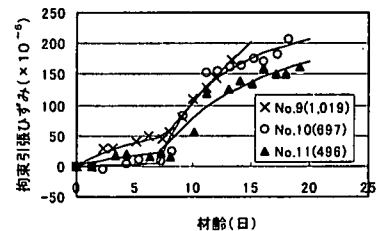
(b)乾燥開始材齢の影響



(c)粗骨材量の影響



(d)拘束板断面積の影響(C 配合)



(e)拘束板断面積の影響(M 配合)

図-16 拘束引張ひずみの履歴

図は拘束板断面積の影響について整理した図である。また、表-5中に貫通ひび割れ発生直前に測定した自由収縮ひずみ、拘束収縮ひずみから算定した拘束引張ひずみを示している。

水セメント比が小さいほど、乾燥開始材齢が早いほど、粗骨材量が少ない配合ほど、拘束板の断面積が大きいほど、同一材齢における拘束引張ひずみが大きく、図中で拘束引張ひずみ履歴が上に位置していることが分かる。前述のひび割れ発生材齢との関係で考えると、拘束引張ひずみの大きい実験条件の方がひび割れ発生が早い傾向にあることが分かり、拘束引張ひずみにより、各要因のひび割れ発生に与える影響度を判断できると考えられる。

4. ひび割れ発生限界

コンクリートにひび割れが発生するかどうかの限界点は、作用するひずみや収縮応力が引張伸び能力（ひび割れ発生時の拘束引張ひずみ）や引張強度を超える点などと考えられており、これらのひび割れ発生限界点の適用性について検討を行った。

(1) 引張伸び能力

図-17に、既往の研究データ及び今回の実験結果を、貫通ひび割れ発生までの乾燥日数と引張伸び能力の関係で整理して示す。ここで、既往のデータは拘束方法が今回の実験と同様なデータを対象とし、これらと比較するため、今回の実験結果の引張伸び能力も乾燥開始後の値としている。なお、既往のデータは検長が200~300mm、今回は500mm（全測点の平均値）である。

同図から、今回の実験値は既往の研究データと同様な位置に図示されていることが分かり、また、ひび割れ発生までの乾燥日数が長くなるほど引張伸び能力の値が大きくなる傾向にあることが分かる。これまで、引張伸び能力がひび割れ発生日数の増加に伴って大きくなる関係にあるとの報告は少ないが¹²⁾、過去の研究成果を重ね合わせた同図からも、引張伸び能力がひび割れ発生日数に伴って大きくなる関係があると判断できる。

図-18(a)(b)に、今回の実験結果のみについて凝結開始後のひずみを対象に、ひび割れが発生した測点の引張伸び能力（1点：測点距離100mm、片面）と、全測点（10点）の平均引張伸び能力をひび割れ発生材齢との関係で整理して示す。

(a)図からはひび割れ発生点においてひび割れ発生材齢と引張伸び能力との間に明らかな相関性は認

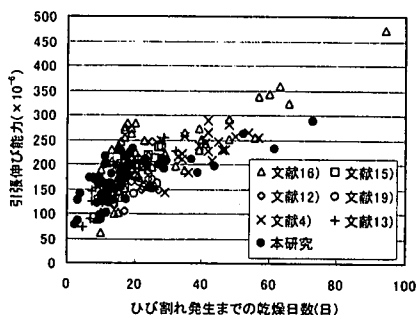
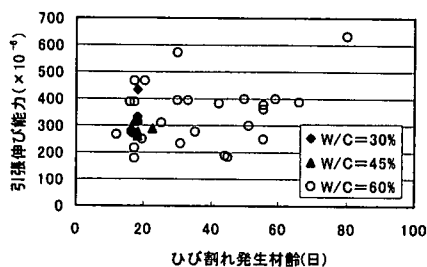
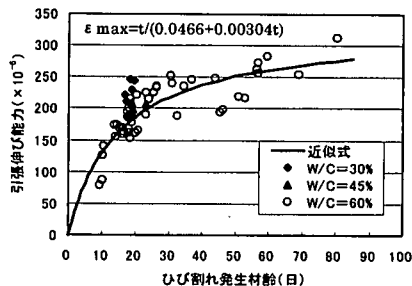


図-17 ひび割れ発生日数と引張伸び能力



(a) ひび割れ発生測点のみから算定した引張伸び能力 (L=100mm, 片面)

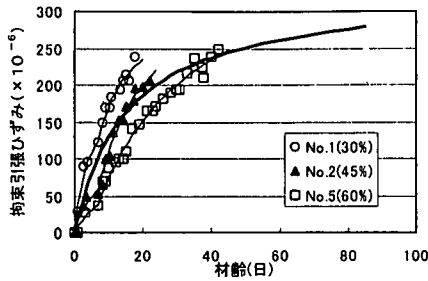


(b) 全測点の平均から算定した引張伸び能力 (L=500mm, 両面)

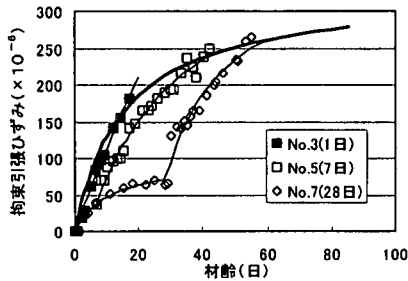
図-18 ひび割れ発生材齢と引張伸び能力

められないのに対し、全測点を対象とした(b)図からはばらつきはあるものの、両者の間にひび割れ発生材齢が遅くなるほど、引張伸び能力が大きくなる関係があることが分かる。

引張伸び能力がひび割れ発生材齢とともに大きくなる現象は、収縮応力の伸びに対して静弾性係数の伸びが小さいことから弾性ひずみ分が大きくなることと、収縮応力による微細ひび割れの発生に伴うクリープひずみ分が大きくなることによると考えられる。また、初期材齢においては収縮応力の作用によってモルタルと骨材の近傍などに発生した微細ひび



(a)水セメント比の影響



(b)乾燥材齢の影響

図-19 引張伸び能力曲線

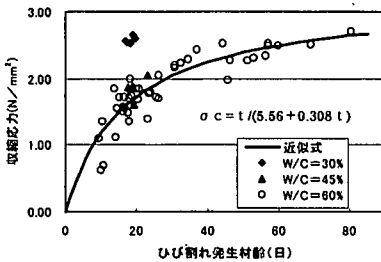


図-20 ひび割れ発生材齢と収縮応力

割れは、モルタルと骨材の付着強度も十分ではなく、微細ひび割れが直ちに貫通ひび割れに進展する可能性が高いのに対し、材齢が長くなればモルタルと骨材の付着強度が十分発現され、微細ひび割れの発生が直ちに貫通ひび割れに進展せず、コンクリート内に蓄積できるひずみ量が大きくなるものと推察される。

前述のようにひび割れ発生点を含んだ測点のひずみは隣接するコンクリートのひずみの影響を受け、複雑な履歴となることや、ひび割れ発生点が測点間の中央か端部かによってもひずみ履歴が異なることが想定されることから、ひび割れ発生測点のみの引

張伸び能力は、ひび割れ発生を支配するひずみとして取り扱えないと判断された。これに対して、引張伸び能力をひび割れ発生に影響を与えていると考えられるひび割れ発生点周辺の範囲も含めたひずみとして算定した場合には、ひび割れ発生点近傍のひずみのバランスを全て包含しているため、ひび割れ発生を予測可能な限界ひずみとして捉えることができると考えられた。

参考として図-19に、図-18(b)に示すひび割れ発生材齢と引張伸び能力の関係（以下、引張伸び能力曲線と称す、図中の太実線）と、図-16に示す拘束引張ひずみの実験結果の履歴を重ねて示す。

引張伸び能力曲線は実験値に基づくものであり、当然の結果ではあるが、拘束引張ひずみが引張伸び能力曲線の近傍に達するとひび割れが発生する状況になっている。ただし、水セメント比30%の実験ケース（No.1）は、他の実験ケースと本来異なる引張伸び能力曲線を持つものなのか、材齢10日程度までの同曲線の近似式に問題があるのか分からないが、材齢初期から拘束引張ひずみが引張伸び能力曲線を上回る結果であった。

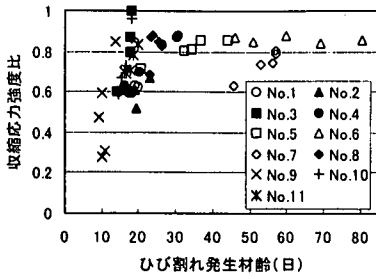
(2) 収縮応力強度比

図-20にひび割れ発生材齢とひび割れ発生時の収縮応力の関係を示す。ここで、収縮応力は式(8)により算定したが、ひずみの値は材齢初期のコンクリートと拘束板のひずみの適合性を考慮すると、ひび割れ発生前後の拘束板ひずみの差（戻りひずみ：ひび割れ発生に伴って戻った拘束板のひずみ量、図-11参照）を用いた方が、ひび割れ発生時点に作用しているひずみを的確に捉えていると判断し、凝結始発からのひずみ量に代って採用したものである。

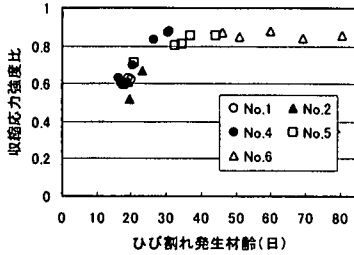
同図から、ほぼ全てのケースにおいてひび割れ発生材齢が遅くなると収縮応力が大きくなる傾向が見られた。同図から、水セメント比30%のケースは他の実験条件と比較して、同一材齢に対する収縮応力が大きくなっていることが分かる。

図-21(a)に、全試験体を対象とし、収縮応力と引張強度との比（収縮応力強度比）をひび割れ発生材齢との関係で整理して示す。ここで、引張強度は表-5に示す各実験条件ごとに最初の試験体にひび割れが発生した材齢と、5試験体全てにひび割れが発生した材齢において実施した引張強度試験の結果を直線補完することによって求めている（表-5参照）。

同図から、乾燥開始材齢が1日（No.3）やモルタル配合の場合（No.8~11）には同一ひび割れ発生材齢における収縮応力強度比が他の実験ケースに比べて大きくなった時点で、また、乾燥開始材齢が28



(a)全ケースの試験体



(b)コンクリート配合の試験体
(乾燥開始材齢: 7 日)

図-21 ひび割れ発生材齢と収縮応力強度比

日 (No.7) の場合には収縮応力強度比が小さい時点でひび割れが発生していることが分かる。材齢初期の自由収縮が大きい配合や、乾燥開始材齢が早く引張強度の発現が十分でない場合は、引張強度に対する応力比が他に比べて大きい時点でひび割れが発生し、逆に、十分な強度発現後に乾燥を受けた場合には、収縮応力強度比が小さい時点でひび割れが発生しているものと考えられる。

(b)図は(a)図から、強度発現が異なるケース (No.3, No.7~11) を除き、乾燥開始材齢7日のコンクリート配合のみを抽出した図であるが、材齢40日までにはひび割れ発生材齢の増加に伴って収縮応力強度比が大きくなり、材齢40日以降では引張強度の85%程度の収縮応力強度比に達しないとひび割れが発生していないのが分かる。

一軸拘束試験体における貫通ひび割れの発生は、長期間にわたって漸増する収縮応力 (引張応力) を載荷した後に破壊が生じるクリープ破壊現象と考えられる。一般に、十分硬化した後のコンクリートについてはあるが、応力強度比が高い場合にはクリープ破壊が短い期間に生じ、応力強度比が低い場合には長期載荷の後に生じるとされ、また、クリープ限度は75~85%程度であり、応力強度比が75%

以下ではクリープ破壊が生じないとされている²¹⁾。

今回の結果は漸増応力下ではあるが、材齢20日程度ではクリープ限度が50~60%であるのに対し、材齢40日以後ではクリープ限度が85%であると考えられる。ひび割れ発生材齢が短い場合にクリープ限度が小さくなる理由としては、細孔組織の形成やモルタルと骨材との付着が不十分な材齢初期に、収縮応力強度比50~60%の応力を受けると、微細ひび割れの発生が直ちに貫通ひび割れに進展する可能性が高いためと思われた。これに対しひび割れ発生材齢が長い場合には、材齢初期において作用する収縮応力強度比は20~30%程度であり、この時点での微細ひび割れの進展はなく、モルタルと骨材との付着強度も増加していくため、微細ひび割れが貫通ひび割れに進展する収縮応力強度比が大きくなるものと推察された。

5. 解析的検討

式(10)により収縮応力を逐次的に求め、式(8)、(4)の関係から拘束引張りずみを求め、その履歴を図-22に示す (解析値; 実線, 実験値; マーク)。ここで、自由収縮ひずみ (表-6)、静弾性係数 (表-4)、コンクリート及び拘束板の断面積は実測値を用い、クリープ係数はCEB-FIPの1990年のモデルコード²²⁾に示されている式(12)~(17)により算定した。なお、解析の時間ステップは過去の研究成果¹⁸⁾において時間ステップが2~10日で大差ないとの報告があったが、解析精度の向上を目指して1日とした。また、収縮応力の算定に当たっては、上記のモデルコードが材齢28日の静弾性係数を基準としているため、着目材齢の静弾性係数に変換した。

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (12)$$

ここで、 $\phi(t, t_0)$: クリープ係数

t : 着目材齢(日)

t_0 : 載荷材齢(日)

ϕ_0 : 理論(終局)クリープ係数

$\beta_c(t - t_0)$: 時間に依存するクリープの進行を表わす係数

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (13)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH / RH_0}{0.46(h/h_0)^3} \quad (14)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{(f_{cm} / f_{cm0})^{0.5}} \quad (15)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0 / t_1)^{0.2}} \quad (16)$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0) / t_1}{\beta_H + (t - t_0) / t_1} \right]^{0.3} \quad (17)$$

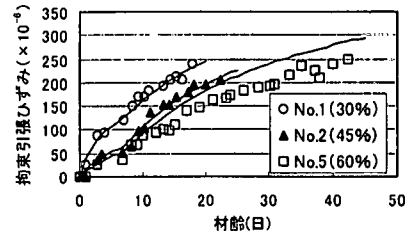
個々の定数などの設定方法については上記モデルコードを参照されたい。

同図から、実験値と解析値との一致の程度の劣るケース(No.5, No.6)も認められるが、他のケースでは両者が比較的良く一致する傾向が認められる。両者が一致しないケースは材齢 20 日以前から一致せず、初期の差が長期にわたって継続する傾向である。したがって、自己収縮と乾燥収縮ひずみを受け、収縮応力強度比が 0.4 を越えるような高応力下の条件ではあるが、牧角らの研究¹¹⁾と同様に、クリープひずみが弾性ひずみに比例するとするクリープ係数(上記モデルコードでは応力強度比 0.4 までを対象)を用いても実用上問題とならない精度で収縮応力や拘束引張ひずみを推定することができると考えられる。

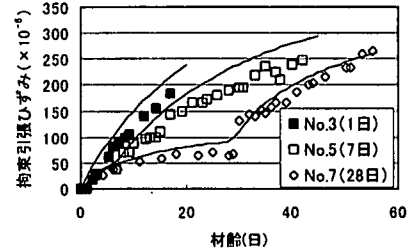
図-23 に、解析によって得られた拘束引張ひずみの履歴と、引張伸び能力曲線を重ね合わせて示す。なお、拘束ひずみの実測値が平均値より約 10% 程度ばらついていたため、同図には拘束引張ひずみの解析値を ±10% の変動させた履歴を併せて示してある。引張伸び能力をひび割れ発生限界とした場合、拘束引張ひずみが引張伸び能力曲線に達した際にひび割れが発生することを意味している。

(a)図に示す実験ケース(No.2)の場合、ひび割れ発生材齢は約 12~25 日になり、(b) 図に示す実験ケース(No.7)の場合、ひび割れ発生材齢は約 45~70 日になることが分かる。両ケースのひび割れ発生材齢の実測値はそれぞれ 17.6~23.2 日、45.5~57.0 日であり、解析から求められたひび割れ発生材齢の範囲に入っている結果であることが分かる。

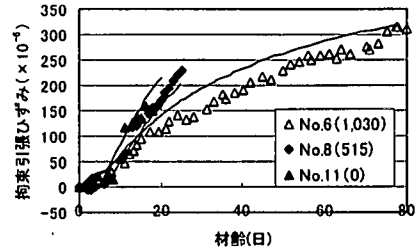
引張伸び能力曲線はひび割れ発生材齢が大きくなるとともにその増加率が小さくなり、かつ、拘束引張ひずみの増加率も小さくなるため、ひび割れ発生材齢が長くなるほどひび割れ発生材齢のばらつきが大きくなる現象を表わしている。ひび割れ発生材齢



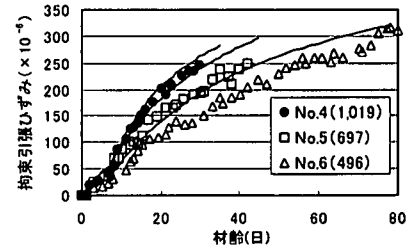
(a) 水セメント比の影響



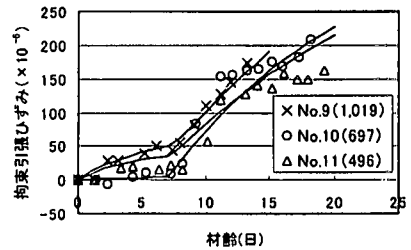
(b) 乾燥材齢の影響



(c) 粗骨材量の影響

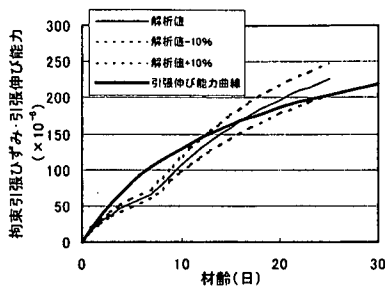


(d) 拘束板断面積の影響(C 配合)

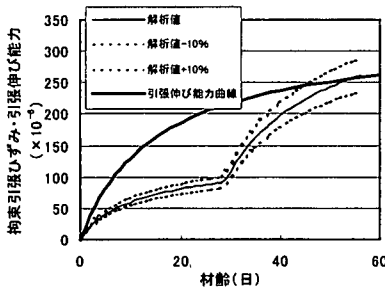


(e) 拘束板断面積の影響(M 配合)

図-22 拘束引張ひずみの解析値と実験値の比較



(a)実験ケース No.2 (W/C=45%)



(b)実験ケース No.7 (乾燥開始材齢 28 日)

図-23 ひび割れ発生予測の例

が遅い場合にはひび割れ発生材齢の予測精度が悪くなると考えられる。

引張伸び能力曲線の精度を向上すること、あるいは必要に応じて配合ごとの引張伸び能力曲線を取得することは言を待たないが、上記のことから、比較的实验の容易な自由収縮ひずみ、静弾性係数などの試験結果をもとに拘束引張ひずみを解析的に求め、引張伸び能力をひび割れ発生限界としてひび割れ発生材齢を予測することが可能と考えられる。

6. 結論

一軸拘束試験体を用いて各種の要因と水準を変化させてコンクリートを打設し、自己収縮や乾燥収縮によりひび割れを発生させた実験や解析的検討を通して得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 水セメント比が小さいほど、拘束板の断面積が大きいほど、粗骨材量の少ない配合ほど、乾燥開始材齢が 2 日より短い場合、ひび割れが早期に発生する。
- 2) 一軸拘束試験体の拘束収縮ひずみは、試験体間、部材内で均一ではなく、この拘束収縮ひずみの違いにより、同一実験条件であってもひび割れ発生

材齢に差が生じる。

- 3) ひび割れ発生に伴ってひずみが開放された部位は一軸拘束試験体の全測点であり、このひずみが開放された範囲がひび割れ発生に影響を与えていた範囲と考えられる。
- 4) ひび割れ発生に影響を与えている範囲から算定した引張伸び能力や、強度発現などを考慮した収縮応力強度比は、ひび割れ発生材齢の増加に伴って大きくなる傾向があり、この傾向を用いることにより、ひび割れ発生材齢を予測することが可能と考えられる。
- 5) 初期材齢に引張強度の 50~60% の収縮応力の持続荷重を受けた場合、細孔組織の形成やモルタルと骨材の付着強度が十分でないため、微細ひび割れの発生後比較的早く貫通ひび割れに進展するものと思われた。
- 6) 自己収縮と乾燥収縮ひずみを受け、応力比が 0.4 を越えるような高応力下の条件であっても、クリープひずみが弾性ひずみに比例するとの仮定であるクリープ係数を用いても実用上問題とならない精度で拘束引張ひずみを解析することができる。

謝辞：本研究における実験に当たり、当時芝浦工業大学 4 年生伊代田岳史君に甚大なる協力を頂戴した。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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 年 8 月。
- 2) 土木学会：平成 8 年制定 コンクリート標準示方書施工編，1996 年 3 月。
- 3) 牧角龍憲，徳光善治：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生条件に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.5，pp.185~188，1983 年。
- 4) 飛坂基夫，真野孝次，安田正雪，神田彰久：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法に関する検討，セメント技術年報，Vol.42，pp.419~422，1988 年。
- 5) 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，pp.261~266，1988 年。
- 6) 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，No.1，pp.733~738，1997
- 7) 大野俊夫，魚本健人：乾燥収縮ひび割れ発生に及ぼす粗骨材量の影響，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，pp.1056~1057，1997

- 8) JIS 原案：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案), コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.50~51, 1985年3月.
- 9) 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(案), セメント・コンクリート, No.536, pp.66-68, 1991年10月.
- 10) (社)日本コンクリート工学協会自己収縮研究委員会報告：セメントペースト, モルタルおよびコンクリートの自己収縮及び自己膨張試験方法(案), 1996年11月.
- 11) 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, 1987年2月.
- 12) 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3》, セメントコンクリート, No.534, pp.57~65, 1991年8月.
- 13) 飛坂基夫, 真野孝次, 榊田佳寛, 安田正雪, 神田彰久：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, セメント技術大会講演集, Vol.44, pp.782~787, 1990年.
- 14) 安田正雪, 阿部道彦, 笹原厚, 桃谷智樹：各種高流動コンクリートの収縮性状とひび割れに関する一実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, pp.147~152, 1996年.
- 15) 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2》, セメントコンクリート, No.533, pp.56~66, 1991年7月.
- 16) 鈴木計夫, 大野義照, 中川隆夫, 大田寛：コンクリートの収縮拘束ひび割れ試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.3, pp.25~28, 1981年.
- 17) 林田都芳, 大野義照, 中川隆夫：コンクリートの自己収縮応力試験における拘束鉄筋と試験体長の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.733~738, 1999年.
- 18) 徳光善治, 牧角龍憲：乾燥収縮ひび割れを予測する収縮応力解析方法, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.429~432, 1984年.
- 19) 真野孝次, 飛坂基夫, 川瀬清孝：コンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす使用骨材の影響, セメント技術年報, Vol.42, pp.423~426, 1988年. 20)
- 20) 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1》, セメントコンクリート, No.532, pp.49~56, 1991年6月.
- 21) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点 '94, 1994年
- 22) CEB-FIP : MODEL CODE 1990

(1999.10.18 受付)

PREDICTION OF OCCURRENCE OF CRACKS DUE TO AUTOGENEOUS SHRINKAGE AND DRYING SHRINKAGE

Toshio OHNO and Taketo UOMOTO

Experimental and analytical study on time of cracking due to autogeneous shrinkage and drying shrinkage were performed by using uni-axial specimen with light-weight-ditch steel for restraint of volume change. The effect of various factors for time of cracking, behavior of strain around the point of cracking, applicability of tensile strain capacity and shrinkage stress ratio for critical limit of concrete cracks were examined.

The results of this research showed that tensile strain capacity and shrinkage stress ratio are correlated with the age at the time of cracking, these value are applicable to critical limit of concrete cracks.