

フライアッシュコンクリートの乾燥による収縮
ならびに水分の逸散に関する実験

正 員 徳 田 弘*

1. ま え が き

コンクリート構造物の施工のさい、せき板に接しない面が湿潤状態に保持されないとき、あるいは、型わく取りは
ずし後、その露出面が日光の直射、風に対して十分保護さ
れていないとき、コンクリート内部から水分が蒸発し、乾
燥によって長さの変化を生ずる。乾燥によって収縮しよう
とするコンクリート部材が拘束状態にある場合、応力が発
生し、この応力がコンクリートの引張り強さを越えると、
ひびわれが発生する。また、コンクリート部材に発生する
乾燥収縮応力が過大になると、温度応力その他の原因によ
って生ずる応力によるひびわれ発生を促進させる場合があ
る。このように、乾燥による収縮がひびわれ発生の一原因と
なることがあるから、乾燥にともなうコンクリートの諸性
質を明らかにすることは極めて重要であると考えられる。

この報告は、骨材の最大寸法、水セメント比、養生温度
などの相違、ならびに、フライアッシュの湿和がコンクリ

ートの乾燥による収縮および水分逸散に及ぼす影響を明
らかにするため行なった実験の結果をとりまとめたもので
ある。

2. コンクリートの乾燥収縮

2-1 コンクリートの材料および配合

実験に用いたセメントは、小野田セメント K.K.、藤原
工場製の中熱ポルトランドセメントで、その物理的性質
を表-1、化学分析結果を表-2に示す。フライアッシュは
中電産業 K.K.、宇部火力営業所の製品で、その諸性質を
表-3に示す。細粗骨材は、神奈川県相模川産の天然砂、砂
利で比重はそれぞれ 2.63、2.70、吸水量はそれぞれ 2.45%、
0.80%であった。

コンクリートの配合は、表-4に示す通りであって、骨材
の最大寸法 5、20、40 mm の 3 種、水セメント比 5 種、フ
ライアッシュ比 0.30% の 2 種であった。細粗骨材の粒度は
土木学会制定、無筋コンクリート標準示方書の推奨粒度範

表-1 セメントの物理的性質

比重	粉 末 度		凝 結			安定性 (浸水 法)	フロ ー値	強 さ (kg/cm ²)							
	ブ レ ン (cm ² /g)	88μ (%)	水量 (%)	始発 (時-分)	終結 (時-分)			曲 げ 強 さ				圧 縮 強 さ			
								3 日	7 日	28 日	91 日	3 日	7 日	28 日	91 日
3.20	3,150	1.4	25.7	3-06	4-32	良	251	29.0	41.4	63.3	81.0	109	167	328	508

表-2 セメントの化学分析結果

ig-loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total	H.M	C ₃ S	C ₃ A
0.8	0.4	23.4	4.3	3.8	63.9	1.5	1.5	99.6	2.00	44	5

表-3 フライアッシュの諸性質

物 理 的 性 質						化 学 成 分 (%)		
比 重	粉 末 度		単 水 量 位 比 (%)	圧縮強度比 (%)		シ リ カ	湿 分	強熱減量
	プレーン (cm ² /g)	44μ (%)		28日	91日			
2.11	3,030	5.8	95	77.1	93.5	58.9	0.1	0.6

* 函館高専助教授

表-4 コンクリートの配合

配合 種別	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	ス ラ ブ (cm)	単 位 水 量 (W) (kg)	単位セメント量 $C+F$		水セメ ント比 $\frac{W}{C+F}$ (%)	フライ アツシ ュ比 $\frac{F}{C+F}$ (%)	絶対細 骨材率 $\frac{s}{a}$ (%)	単 位 骨材量 A (kg)	単位細 骨材量 S (kg)	単位粗 骨材量 G (kg)
				C (kg)	F (kg)						
M	A	5	281	790	0	35.6	0	100.0	1,241	1,241	0
	B	5	277	614	0	45.1	0	100.0	1,395	1,395	0
	C	5	277	502	0	55.2	0	100.0	1,487	1,487	0
	D	5	277	429	0	64.6	0	100.0	1,550	1,550	0
	E	5	277	368	0	75.3	0	100.0	1,600	1,600	0
M	F	5	270	557	239	33.9	30	100.0	1,165	1,165	0
	G	5	257	439	188	41.0	30	100.0	1,360	1,360	0
	H	5	253	355	152	49.9	30	100.0	1,484	1,484	0
	I	5	259	301	129	60.2	30	100.0	1,540	1,540	0
	J	5	263	259	110	71.3	30	100.0	1,588	1,588	0
20	A	20	192	547	0	35.1	0	50.8	1,700	852	848
	B	20	190	423	0	44.9	0	53.8	1,808	960	848
	C	20	190	349	0	54.4	0	55.3	1,868	1,020	848
	D	20	190	294	0	64.7	0	56.3	1,913	1,065	848
	E	20	190	256	0	74.2	0	57.2	1,945	1,095	848
20	F	20	184	378	162	34.1	30	48.7	1,660	794	866
	G	20	175	297	127	41.3	30	52.6	1,794	928	866
	H	20	173	243	103	50.0	30	54.6	1,873	1,007	866
	I	20	176	205	89	59.8	30	55.5	1,915	1,049	866
	J	20	179	176	74	71.6	30	56.4	1,950	1,084	866
40	A	40	153	431	0	35.5	0	36.3	1,910	680	1,230
	B	40	151	335	0	45.1	0	39.0	1,993	763	1,230
	C	40	151	275	0	54.9	0	40.5	2,043	813	1,230
	D	40	151	232	0	65.2	0	41.5	2,077	847	1,230
	E	40	151	201	0	75.2	0	42.3	2,103	873	1,230

配合 種別	粗骨材 の最大 寸法	ス ラ ブ (cm)	単 位 水 量 (W) (kg)	単位セメント量 $C+F$		水セメ ント比 $\frac{W}{C+F}$ (%)	フライ アッシ ュ比 $\frac{F}{C+F}$ (%)	絶対細 骨材率 $\frac{s}{a}$ (%)	単 位 骨材量 A (kg)	単位細 骨材量 S (kg)	単位粗 骨材量 G (kg)
				C (kg)	F (kg)						
40	F	40	146	301	430 129	34.0	30	34.3	1,877	632	1,245
	G	40	139	237	338 101	41.1	30	37.9	1,982	737	1,245
	H	40	137	192	275 83	49.8	30	39.9	2,048	803	1,245
	I	40	140	163	233 70	60.2	30	40.9	2,079	834	1,245
	J	40	142	141	201 60	70.7	30	41.6	2,105	860	1,245

皿に含まれるものであった。

2-2 コンクリート供試体の製造および養生

コンクリートの練り混ぜには、可傾式 3 切ミキサを使用し、全材料投入後 3 分間練り混ぜた。

コンクリート供試体の寸法、形状は、10×10×40 cm 角柱であった。供試体の個数は、同一配合および養生条件について 3 個とした。

コンクリートを型わくの中へ 2 層に分けて詰め、各層を外部振動機によって締固めた。供試体の長手方向の乾燥収縮を測定するため、型わくの一方の内側面の中心線上にあらかじめ 2 枚の乳白ガラスを油粘土ではり付け、脱型したとき、供試体の所定の位置に埋め込まれるようにした。これらの乳白ガラスは供試体の有効長測定用標線を刻むため

のもので、刻線間の距離は約 34 cm となるように埋め込まれた。供試体を成型後、約 24 時間で脱型し、21℃ 水中において 6 日間養生した。その後、供試体を乾燥状態で保存するため、温度約 21℃、湿度約 50% の恒温恒湿室および温度約 40℃ の恒温室にそれぞれ放置した。

2-3 コンクリートの乾燥収縮の測定

供試体を乾燥状態におく直前に、乳白ガラスに刻線し、直ちに有効長を測定し、この有効長を基長とした。測定の方齢は、3 日 (あるいは 4 日)、1 週、2 週、4 週、8 週、3 月、6 月、9 月、1 年および 1 年半とした。ただし、この材齢は供試体の乾燥を開始した日を 0 日としたものである。測定方法は、JIS A 1125 に準じた。測定器は、1 目盛 1/1000 mm まで読みとることができる接眼マイクロメーターを備

表—5 コンクリートの乾燥収縮 ($\times 10^{-6}$) (養生温度: 21℃)

材 齢		4 D	1 W	2 W	4 W	8 W	3 M	6 M	9 M	1 Y	1.5 Y
配合種別											
M	A	244	305	397	597	905	1,192	1,500	1,668	1,730	1,747
	B	176	259	374	618	1,000	1,287	1,603	1,721	1,768	1,791
	C	179	262	430	759	1,160	1,437	1,688	1,793	1,840	1,880
	D	150	240	450	827	1,206	1,453	1,704	1,847	1,877	1,900
	E	135	253	533	947	1,280	1,491	1,751	1,842	1,880	1,903
M	F	159	223	388	653	829	1,112	1,350	1,369	1,390	1,402
	G	132	209	394	683	907	1,112	1,293	1,318	1,342	1,341
	H	118	191	409	721	927	1,121	1,288	1,311	1,320	1,338
	I	106	197	433	788	1,040	1,133	1,279	1,283	1,290	1,297
	J	97	174	453	812	988	1,147	1,243	1,260	1,274	1,281
20	A	179	234	282	432	665	871	1,017	1,121	1,150	1,176
	B	138	220	288	453	703	897	1,059	1,147	1,166	1,203
	C	112	204	312	494	770	947	1,108	1,177	1,210	1,229
	D	91	180	309	558	786	958	1,108	1,171	1,215	1,218
	E	82	178	329	527	795	956	1,108	1,177	1,210	1,229

材齢 配合種別		4 D	1 W	2 W	4 W	8 W	3 M	6 M	9 M	1 Y	1.5 Y
20	F	121	176	289	440	638	750	900	929	941	960
	G	100	170	285	433	530	686	823	866	900	907
	H	69	150	297	459	559	692	809	830	841	852
	I	65	121	324	494	597	694	783	802	809	821
	J	50	138	320	518	644	715	800	805	805	815
40	A	155	206	245	344	482	650	772	815	860	888
	B	118	180	242	353	529	694	801	879	919	944
	C	100	171	235	391	573	712	837	885	930	956
	D	82	141	243	435	600	733	839	874	1,005	1,032
	E	79	141	250	417	600	744	843	877	940	994
40	F	112	156	235	362	447	538	659	680	701	720
	G	75	154	255	370	462	538	629	662	671	688
	H	50	137	250	385	521	557	576	630	649	680
	I	53	120	271	418	529	559	609	621	650	677
	J	40	120	265	421	550	559	615	620	625	665

表—6 コンクリートの乾燥収縮 ($\times 10^{-6}$) (養生温度: 40°C)

材齢 配合種別		3 D	1 W	2 W	4 W	8 W	3 M	6 M	9 M	1 Y	1.5 Y
M	A	291	433	638	1,000	1,298	1,436	1,580	1,629	1,661	1,680
	C	168	415	763	1,052	1,230	1,300	1,399	1,440	1,452	1,472
	E	159	507	909	1,080	1,120	1,158	1,259	1,300	1,320	1,340
M	F	224	435	751	1,008	1,214	1,306	1,380	1,401	1,420	1,431
	H	118	465	792	963	1,023	1,065	1,140	1,155	1,170	1,188
	J	171	550	818	951	977	1,021	1,085	1,110	1,131	1,142
20	A	191	277	424	677	818	897	980	1,000	1,018	1,033
	C	138	277	509	745	803	841	902	922	934	935
	E	115	335	594	731	750	779	800	819	830	842
20	F	147	259	485	673	785	821	870	901	914	933
	H	106	277	523	665	740	770	782	800	812	816
	J	91	309	538	612	640	651	682	705	711	710

えた顕微鏡および基準とする標線を常に固定するためのクロスヘアを有する顕微鏡を付属したコンパレータであった。

各材齢における供試体の乾燥収縮を表-5, 6に示す。これらの表から、材齢1年以降の乾燥収縮の増加は、非常に小さいことが認められるので、最終測定材齢である1年半における乾燥収縮を究極値と仮定する。

図-1, 2は、養生温度21°Cにおけるフライアッシュ比0および30%のコンクリートの初期材齢における乾燥収縮

を示すものであって、究極乾燥収縮が併記してある。これらの図から、材齢1~2週までは水セメント比の小さいコンクリートほどその乾燥収縮は大きく、それ以降は水セメント比の大きいコンクリートほど大きいことが、フライアッシュ比および骨材の最大寸法が等しいコンクリートについて認められる。しかし、究極的には、フライアッシュ比0%の場合、水セメント比が大きいほどその乾燥収縮は大きく、フライアッシュ比30%の場合、反対に、水セメント比が大きいほど収縮は小さいことが認められる。

図-3は、養生温度21°Cにおけるフライアッシュ比30%のコンクリートとフライアッシュ比0%のコンクリートとの乾燥収縮の比を各材齢について示すものである。図からこの比は、材齢4日で50~70%、2~8週で90~110%、究極的には65~80%程度であることが認められる。

図-4は、養生温度40°Cと21°Cにおける乾燥収縮を前

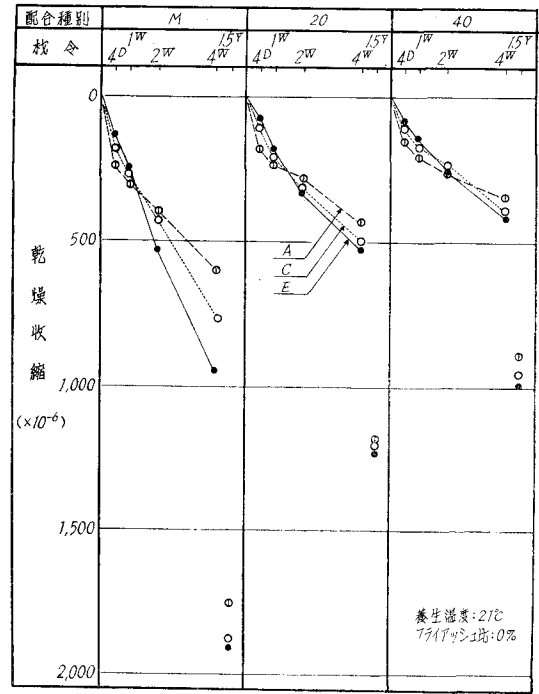


図-1 コンクリートの初期材齢における乾燥収縮
養生温度: 21°C フライアッシュ比: 0%

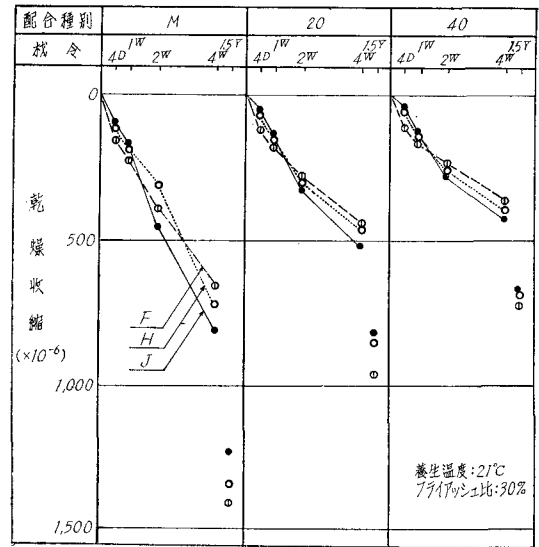


図-2 コンクリートの初期材齢における乾燥収縮
養生温度: 21°C フライアッシュ比: 30%

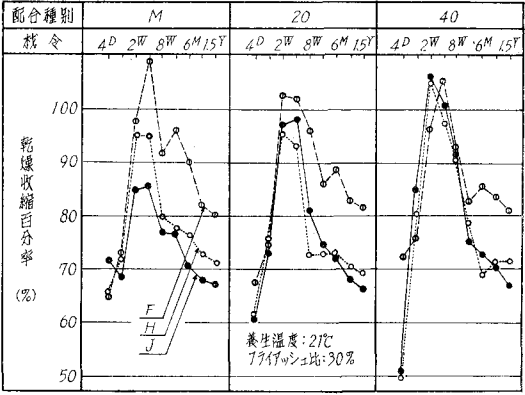


図-3 フライアッシュコンクリートとプレーンコンクリートとの乾燥収縮の比
養生温度: 21°C フライアッシュ比: 30%

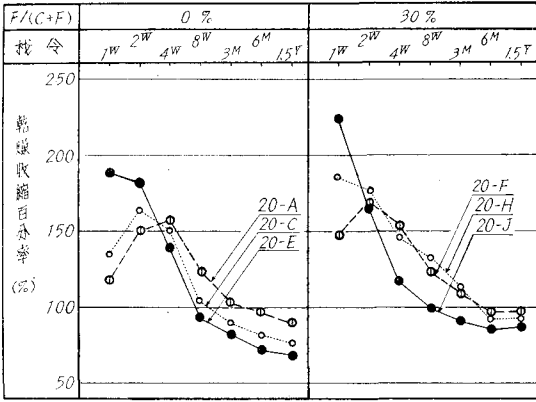


図-4 養生温度40°Cと21°Cにおける
コンクリートの乾燥収縮の比

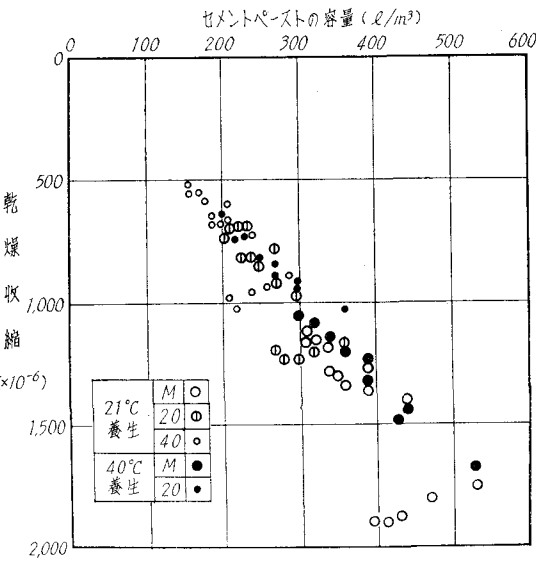


図-5 コンクリート 1 m³ 中のセメントペースト量
とそのコンクリートの究極乾燥収縮との関係

者と後者の比で示したものである。図から、この比は、材齢とともに減少し、究極的には、70～100% 程度になることがわかる。

図-5は、コンクリート1m³中に含まれるセメントペーストの容積とそのコンクリートの究極乾燥収縮との関係を示すものである。図から、コンクリート中のセメントペーストの量が多いほどそのコンクリートの究極乾燥収縮は大きくなる傾向があると判断される。これは、図-1, 2において認められるように、骨材の最大寸法が大きいほど同一材齢における乾燥収縮は小さいという結果と一致する。

3. コンクリートの乾燥による水分逸散

3-1 コンクリートの材料および配合

実験に用いた材料は、2-1 コンクリートの材料および配合において述べたものと同一であった。コンクリートの配合は、表-4に示した骨材の最大寸法 20 mm、フライアッシュ比 0 および 30% の中の配合種別 20-A, C, E, 20-F, H, J の 6 種類であった。

3-2 コンクリート供試体の製造および養生

コンクリートの練り混ぜには、可傾式 3 切ミキサを使用し、全材料投入後 3 分間練り混ぜた。

コンクリート供試体はφ15×30 cm であって、供試体の製造方法は JIS A 1108 に準じた。供試体を成型後、約 24 時間で脱型し、21℃ 水中において 6 日間養生した。その後供試体を乾燥状態にて保存するため、前節コンクリートの乾燥収縮において述べたと同一条件、すなわち、温度約 21℃、湿度約 50% の恒温恒湿室および温度約 40℃ の恒温室にそれぞれ保存した。同一条件に対するコンクリート供試体の個数は 3 個であった。

3-3 コンクリートの水分拡散係数の測定

コンクリート供試体を 21℃ 水中において養生中、適当な時期に水中からとり出し、供試体の上下端面をタールエポキシ塗料で被覆し、塗料の硬化後、再び水中に入れて、所定の材齢まで養生した。コンクリートの水分拡散係数を求めるため、供試体の乾燥による重量減を測定した。乾燥状態におく直前の重量を測定し、これを基準として、以後 3 日、1 週、2 週、4 週、8 週、3 月、6 月、9 月、1 年および 1 年半の各材齢において重量を測定し、重量減を求めた。この材齢は、供試体の乾燥を開始した日を 0 日としたものである。供試体の重量の測定には、秤量 50 kg、感量 0.5 g のはかりを使用した。

表-7 は、材齢 0 日における供試体重量を 100 としたときの各材齢における供試体重量の百分率であって、材齢 1 年半における重量百分率は 90～95% 程度の範囲にあり、水セメント比が大きいほど小さいという傾向が認められる。

重量減の測定結果から、材齢 1 年以後における供試体内部からの水分の逸散量は非常に小さく、ほとんど無視しう

表—7 乾燥によるコンクリートの重量変化 (%)
(粗骨材の最大寸法：20 mm)

養生温度	配合種別	材 齢					
		3 D	1 W	2 W	8 W	6 M	1.5 Y
21℃	A	99.4	99.2	98.9	98.3	97.3	96.4
	C	98.4	97.2	97.5	96.5	95.3	94.3
	E	97.4	96.7	96.2	95.3	94.1	93.2
40℃	A	98.8	98.3	97.9	96.7	95.1	93.5
	C	97.6	96.7	96.2	94.8	92.9	91.2
	E	96.5	95.5	94.9	93.7	91.9	90.7
21℃	F	98.8	98.4	98.0	97.1	95.9	94.8
	H	97.9	97.2	96.7	95.8	94.3	93.3
	J	97.2	96.4	95.7	94.8	93.5	92.6
40℃	F	98.2	97.7	97.2	96.3	94.9	93.8
	H	97.0	96.3	95.7	94.6	93.1	92.1
	J	96.0	95.2	94.6	93.4	92.0	90.9

る程度であると判断されるから、便宜上、材齢 1 年半におけるコンクリート供試体からの水分逸散量を究極値と仮定する。

表-8 は、コンクリートの水分拡散係数を次式から求めた結果である。

$$a=4.41\left(\frac{Q}{W_0}\right)^2\frac{R^2}{t}$$

ここに、a はコンクリートの水分拡散係数 (cm²/day), R はコンクリート供試体の半径 (cm), t は材齢 (day), Q はある材齢において、供試体の単位高さから逸散した水量 (g/cm), W₀ は供試体の単位高さから逸散した水量の究極値 (g/cm) である。表-8 から、コンクリートの水分拡散係数は、材齢の初期において大きく、長期になるほど小さくなる傾向があることが認められる。コンクリートにおける乾燥収縮応力によって生ずるひびわれの問題は、比較的早期材齢において起きることが多いから、3 日、1 週、2 週などの早期材齢における水分拡散係数をみると、0.1～1.0 cm²/day 程度であることがわかる。また、この係数は、各材齢において、水セメント比の大きいコンクリートほど大であること、養生温度および水セメント比が近似したコンクリートに関して、フライアッシュを混和したコンクリートの方が混和しないものよりこの係数は大きいことなどが認められる。

4. コンクリートにおける水分の逸散と乾燥収縮との関係

供試体の養生温度 21℃ および 40℃ における、コンクリートの各材齢の重量減と究極重量減との比を横軸に、各材齢における乾燥収縮と究極乾燥収縮との比を縦軸にとり、

表—8 コンクリートの水分拡散係数 (cm²/day) (粗骨材の最大寸法: 20 mm)

養生温度	配合種別	材					齡				
		3 D	1 W	2 W	4 W	8 W	3 M	6 M	9 M	1 Y	1.5 Y
21°C	A	0.121	0.100	0.081	0.065	0.051	0.047	0.038	0.034	0.032	0.023
	C	0.335	0.249	0.178	0.123	0.082	0.068	0.049	0.039	0.034	0.023
	E	0.609	0.417	0.276	0.172	0.104	0.080	0.053	0.041	0.034	0.023
40°C	A	0.129	0.107	0.093	0.075	0.055	0.050	0.041	0.036	0.033	0.023
	C	0.323	0.221	0.170	0.121	0.079	0.065	0.045	0.037	0.033	0.023
	E	0.582	0.384	0.266	0.172	0.103	0.081	0.052	0.041	0.035	0.023
21°C	F	0.221	0.167	0.129	0.093	0.069	0.057	0.043	0.037	0.033	0.023
	H	0.416	0.313	0.216	0.143	0.092	0.074	0.050	0.040	0.034	0.023
	J	0.620	0.462	0.308	0.188	0.110	0.084	0.054	0.042	0.035	0.023
40°C	F	0.352	0.254	0.186	0.126	0.087	0.069	0.048	0.039	0.034	0.023
	H	0.639	0.420	0.270	0.171	0.112	0.083	0.053	0.041	0.035	0.023
	J	0.828	0.504	0.327	0.196	0.122	0.088	0.055	0.042	0.035	0.023

両者の関係を示すと 図-6 のようになる。図から、コンクリート供試体の重量減百分率が大きくなるにしたがって乾燥収縮百分率は大きくなるという傾向が認められる。ただし、供試体を乾燥状態においた初期では、重量減百分率がかなり大きい値であるにもかかわらず、収縮百分率はそれほど大きい値にならないことが認められるが、これは、乾燥初期において、コンクリート中の自由水が急速に逸散するためであろうと考えられる。

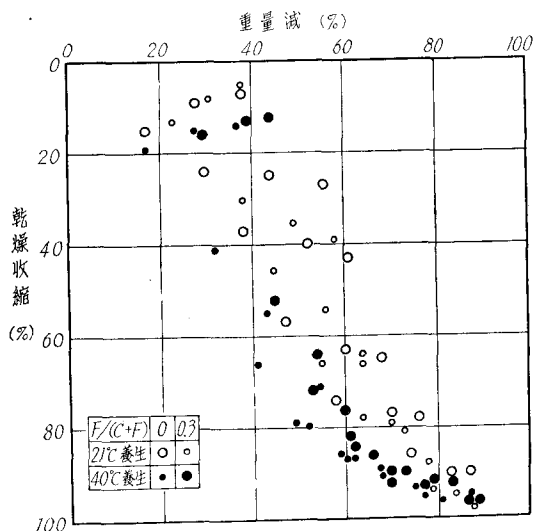


図-6 コンクリートの重量減百分率と乾燥収縮百分率との関係

以上の結果は、コンクリートの材料、配合、供試体の養生条件、供試体の形状および寸法などの諸条件を一定とした実験から得られた無拘束状態のコンクリートの乾燥収縮

および重量減であって、必ずしも実際のコンクリート構造物に対して適用できるものではない。しかし、次に述べる簡単な方法によって、構造物のコンクリートに生ずる乾燥収縮を近似的に推定できるのではなからうかと考えられる。すなわち、ある構造物に使用されたコンクリートによって、上下端面をシールした $\phi 15 \times 30$ cm 供試体を製造しこれをその構造物と同一条件で養生し、必要に応じてその重量を測定する。重量減百分率が求まれば、図-5, 6 から、その構造物に使用されたコンクリートが無拘束状態であるときの乾燥収縮を推定できるであろう。あるいは、さらに簡便な方法として、ある構造物のコンクリートの強度を判断するため、その構造物と同一条件でコンクリート供試体を養生し、強度試験を行なうことがしばしばあるが、この場合、現場に放置した $\phi 15 \times 30$ cm 圧縮強度試験用供試体の重量を測定することによって、構造物のコンクリートの乾燥収縮を推定することができるという可能性が認められた。

5. む す び

以上の実験結果を要約すれば次の通りである。

- 21°C 養生したブレンおよびフライアッシュコンクリートの乾燥収縮は、初期ではともに水セメント比が大きいほど小さいが、長期では水セメント比が大きいほど前者は大きく、後者は小さい。
- 21°C 養生したフライアッシュコンクリートの乾燥収縮は、ほとんど各材齢においてブレンコンクリートより小さく、究極的には、フライアッシュ比 30% の場合、65~80% 程度になる。
- 40°C と 21°C 養生したコンクリートの乾燥収縮を比

較すると、初期では、前者は後者の120~200%程度であって、フライアッシュコンクリートの方が大であり、究極的には両者はほとんど等しくなる。

4) コンクリートの究極収縮はコンクリート中のセメントペースト量が大きいほど大であるという傾向がある。

5) コンクリートの水分拡散係数は、初期では0.1~1.0 cm²/day程度であって、水セメント比が大きいほど大であり、また、フライアッシュを混和したものは混和しないも

のより大である。この係数は材齢の増加とともに小さくなる。

6) 乾燥収縮および重量減それぞれについて、各材齢における値と究極値との比を求め、両者の関係をみると、重量減百分率が大きくなるにしたがって収縮百分率も大きくなる傾向がある。この結果ならびに既述の諸結果から、ある構造物のコンクリートに生ずる乾燥収縮を簡単な測定によって推定する方法を提案し、これを本文中に示した。