

膨張コンクリートの凍結融解抵抗性 に関する基礎研究

FUNDAMENTAL STUDIES ON FREEZE-THAW DURABILITY OF EXPANSIVE CONCRETE

國 府 勝 郎*

By Katsuro KOKUBU

1. 序 論

わが国における膨張コンクリートは昭和 40 年頃より施工実績があり、乾燥収縮ひびわれの発生を低減する収縮補償コンクリートとしての利用が、主として場所打ちコンクリートの分野で、外力に対するひびわれ耐力の増大を目的とするケミカルプレストレストコンクリートが、工場製品の分野で顕著な発展を遂げてきた^{1),2)}。さらに、水圧鉄管の敷設に適用された充てんコンクリートにおいては、著しい設計施工の合理化が達成されている³⁾。膨張コンクリートはポルトランドセメントの弱点、すなわち乾燥収縮および低引張強度を補う新材料であるばかりでなく利用の方法によっては施工の合理化の可能性もあり、今後もその利用が推進されてゆくと思われる。

膨張コンクリートの膨張収縮性状や力学的諸性質などについては、これまでの多くの研究によってよく解明されている。しかし、耐久性に関する研究は数少なく、十分な知見が得られているとはいえない。これに関する既往の研究には、実験室における凍結融解試験および寒冷地における暴露試験の報告がある。小林⁴⁾はカルシウムサルホアルミネート系の膨張材を用いたコンクリートの凍結融解試験を行い、試験中の拘束状態の保持が結果に与える影響が大であること、拘束鉄筋比が大きいほど劣化が少ないこと、AE 剤の使用が凍結融解抵抗性の増大に効果があることなどを示した。洪らの一連の研究^{5)~8)}は、材令 10 年にわたる寒冷地の暴露供試体を中心に凍結融解抵抗性を検討した。これらによれば、水中養生を行った膨張コンクリートの凍結融解抵抗性は、普通コンクリートより劣る傾向にあること、凍結融解抵抗性に対する乾湿繰返しの影響が重要であり、そのような場合に膨張コンクリートが有利となる傾向があることを指摘した。M. Polivka ら⁹⁾は膨張セメントの主要水和生成物

であるエトリンガイト ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$) が多量の結合水を有することに着目し、これが氷点下において安定であることを確認した。

上述の既往の研究によって膨張コンクリートの凍結融解抵抗性の概略は理解できるが、凍結融解抵抗性を支配する要因の検討がいまだ不十分と思われる。耐久的な膨張コンクリート構造物を造るために、支配要因の基礎的な解明がきわめて重要であると思われる。本研究は膨張コンクリートの体積変化に伴う内部組織の変化と凍結融解抵抗性との関係に着目して行った室内試験結果を述べたものである。膨張コンクリートにおける単位膨張材量、拘束養生の有無、材令の経過などによる細孔構造の変化を試験し、これらが凍結融解作用の繰返しによる劣化に与える影響を検討している。そして、膨張コンクリートの凍結融解抵抗性の向上には、拘束養生が重要であるとともに、適切な空気連行性状を得ることがきわめて大切であることを指摘した。なお、拘束養生供試体には鋼製端板を有するものを使用しており、このような供試体による凍結融解試験方法についても検討を行っている。

2. 実験の概要

実験は大別して 3 シリーズに分けて行った。シリーズ (I) は膨張コンクリートの凍結融解作用による劣化の把握および試験方法の検討を目的としている。したがって、膨張材量と拘束方法が試験要因となっている。シリーズ (II) は収縮補償コンクリートの範囲に限定し、膨張材量および拘束養生の有無が細孔構造に与える影響を試験するとともに、凍結融解抵抗性との関連を検討したものである。シリーズ (III) は使用する混和剤をレジン系 AE 剤とし、膨張材の種類として石灰系およびカルシウムサルホアルミネート系の 2 種について試験し、試験材令、養生条件を変えることによって細孔構造を変化

* 正会員 工修 (社)セメント協会研究所主任研究員

させ、連行空気による凍結融解抵抗性の向上を検討している。

(1) 使用材料

膨張材は主として石灰系膨張材 Ex を用い、一部にカルシウムサルホアルミネート系 Cs を用いた場合についても試験し、膨張材の種類が変わった場合の影響についても検討した。セメントは市販の普通ポルトランドセメントを使用した。骨材は細・粗骨材ともに富士川産であり、凍結融解の繰返しに対して十分に堅硬で破砕されることはほとんどないものである。なお、粗骨材の最大寸法は 25 mm とした。表-1 に骨材の物理試験結果を示す。混和剤はリグニンスルホン酸塩系の AE 減水剤 L およびレジン系の AE 剤 R を用いた。

(2) 配合

実験に用いたコンクリートはすべて AE コンクリートであって、水結合材比は 50% を基本とし、一部に 45 および 40% のものが含まれている。スランプは約 7~13 cm で、空気量は約 3.5~5.5% の範囲にある。表-2 に用いたコンクリートの配合および練り上り時のスランプ、空気量などを示す。

(3) 試験方法

a) 凍結融解試験

凍結融解試験は水中凍結水中融解方法で、ASTM C 666 に準じ、+5~-18°C で温度制御を行い、1 サイク

表-1 使用した骨材の物理試験結果

項目 区分	比重	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	実積率 (%)	粗粒率
富士川産砂利	2.66	1.07	1720	65.4	6.96
富士川産砂	2.62	2.13	1780	69.4	2.96

ルを約 4 時間とした。所定の繰返し回数において、たわみ振動による一次共鳴振動数および供試体重量を計測した。なお、一部の供試体については 5°C における供試体の長さ変化をホイットモアゲージまたは拘束膨張測定器 (JIS A 6202 コンクリート用膨張材 参考 1) によって測定し凍結残留膨張量を求めた。これらの試験による劣化の程度の評価については、4. (1) および (2) において検討を行っている。凍結融解試験を開始した材令は、シリーズ (I) 材令 28 日、シリーズ (II) は実験実施の都合から材令 21 日とし、シリーズ (III) は材令 14, 28 および 370 日とした。供試体は 10×10×40 cm とし、膨張材の JIS 規格に規定する A 法拘束供試体 (記号 B, $p=0.93\%$) および無拘束供試体 (記号 A, $p=0\%$) を用いた。なお、試験方法を検討した部分においては、端部にフックを有する $\phi 5$ mm の鉄線 4 本を配筋した供試体 (記号 C, $p=0.79\%$) およびさらにスターラップを用いて三軸的に拘束した供試体 (記号 D, $p=0.79\%$, スターラップ比 $p'=0.71\%$) も試験した。

b) 細孔径分布試験

凍結融解試験開始時のコンクリートの細孔径分布をシリーズ (II) および (III) の場合に測定した。試料は凍結融解試験供試体と同一養生条件の供試体 1 体をコンク

表-2 実験に用いたコンクリートの配合

シリーズ	配合記号	使用材料		粗骨材寸法の法 (mm)	水結合材比 W/C+E (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						練りませ時の測定値			備考
		膨張材	混和剤				水 W	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	
I	P	なし	L	25	50	39	142	284	0	739	1174	0.710	9.0	3.9	18.8	試験材令 28 日 養生条件 20°C 水中 E2 は助剤により 空気量大
	E1	Ex		25	50	39	142	253	31	739	1174	0.710	9.0	3.5	18.8	
	E2			25	50	39	142	253	31	724	1150	0.710	13.2	5.4	19.2	
	E3			25	50	39	142	244	40	739	1174	0.710	12.4	3.7	21.2	
	E4			25	50	39	142	237	47	739	1174	0.710	11.2	3.9	19.7	
II	B1	なし	L	25	50	39	145	290	0	739	1174	0.725	7.0	4.2	23.8	試験材令 21 日 養生条件 20°C 水中
	B2	Ex		25	50	39	145	270	20	739	1174	0.725	9.6	4.5	24.1	
	B3			25	50	39	145	260	30	739	1174	0.725	9.6	4.7	24.1	
	B4			25	50	39	145	255	35	739	1174	0.725	9.8	4.8	23.9	
	C2			25	45	39	145	292	30	729	1157	0.805	8.2	4.8	23.7	
	C3			25	40	39	145	332	30	716	1136	0.905	6.3	4.0	23.6	
III	N	なし	R	25	50	39	149	298	0	727	1155	0.894	7.2	4.9	24.5	試験材令 28 日 以外に 14 日, 1 年を含む 養生条件 20°C 水中の他 一部に湿・乾を 含む
	X30	Ex		25	50	39	149	268	30	727	1155	0.685	11.5	4.6	25.2	
	X40			25	40	37	159	358	40	650	1123	1.193	8.5	4.7	25.0	
	S30	Cs		25	50	39	149	268	30	727	1155	0.685	11.5	4.6	24.0	
	S40			25	40	37	159	358	40	650	1123	0.914	7.1	4.2	24.2	

リートハンマーで粗砕した後、タガネによってモルタル部分の小塊をはつり取り、おおよその寸法 3~5 mm のものを所定量準備した。これを試薬特級のアセトンに約 24 時間浸漬した後、真空乾燥器によって常温で脱気乾燥した。アセトンに浸漬したのは、水和を停止するとともに試料内部の水分の蒸発を容易にするためである。真空乾燥器中に 7 日以上保存した試料を順次取り出して細孔径分布試験を行った。測定は水銀圧入方式のポロシメータ¹⁾を使用し、1 回の試験に用いる試料は 5 g 程度とした。細孔径の計測は、水銀圧力 98 MPa に相当する 75 Å までとした。したがって、本文に述べる全細孔容積 (TPV) は細孔径 75~75 000 Å までの空隙を指している。

c) 内部ひびわれの観察

凍結融解試験終了後のコンクリートの劣化性状を確認するため、一辺の長さ約 10 cm の立方体を切り出し、図-1 に示す装置によって内部ひびわれを染色した。その方法は真空ポンプによって約 30 分脱気し

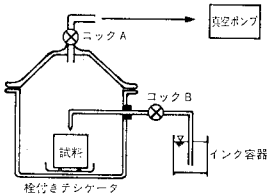


図-1 インク注入装置

後、試料に赤インク（市販の油性インク）を噴射し、インクが乾いてから厚さ 1 cm 程度に再び切断すれば、肉眼によって内部ひびわれが観察できる。

d) その他

養生中の試験供試体は JIS に準拠して膨張収縮性状を試験した。無拘束供試体の場合には、脱型時材令 1 日を基長とした長さ変化をホイットモアゲージによって測定した。本文中に示す膨張率はすべて JIS に規定する A 法による材令 14 日の値である。コンクリートの圧縮強度は φ10×20 cm の供試体で、シリーズごとの目的によって、型枠による拘束と無拘束養生の供試体の両方またはいずれかを試験している。

3. 細孔径分布試験結果および考察

(1) 細孔容積に対する膨張材量および拘束の影響

図-2 は普通コンクリートおよび膨張コンクリートの材令 21 日および 1 年における細孔径分布試験結果の一例である。この図には普通および膨張コンクリートの拘

注 1) 近藤連一編著：多孔材料, pp. 55~57 参照。

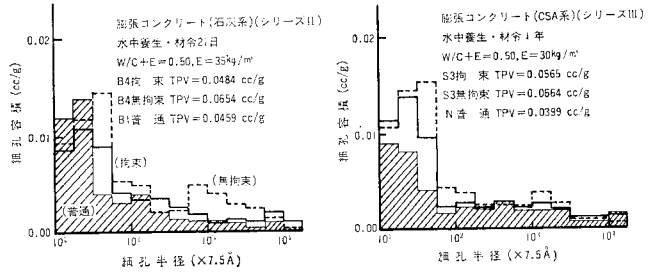


図-2 普通および膨張コンクリートの細孔径分布

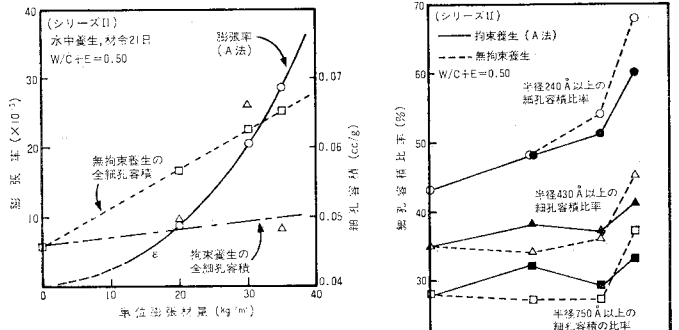


図-3 膨張コンクリートの品質と細孔容積との関係

図-4 膨張コンクリートの細孔構成に対する単位膨張材量の影響

束および無拘束養生の場合が示されている。

膨張コンクリートは拘束養生を行った場合であっても、一般にその細孔容積は普通コンクリートよりも大なる傾向を示し、また細孔径の大きい側に分布する傾向が認められる。このような傾向は戸川らの研究¹⁰⁾とも一致している。

図-3 は単位膨張材量と膨張率および細孔容積との関係を示したものである。水中養生を行った場合、無拘束の膨張コンクリートの細孔容積は、単位膨張材量 35 kg/m³ 以下の範囲において、単位量に比例して増大していることがわかる。しかし、拘束養生を行えば無拘束養生の場合より全細孔容積が著しく減少し、拘束養生の収縮補償コンクリート（一般に単位膨張材量は 30 kg/m³ 程度）の全細孔容積は普通コンクリートよりわずかに大きい傾向を示している。単位膨張材量 30 kg/m³ で拘束養生の図示のデータは、全体の傾向から判断して測定上のミスと思われる。

図-4 は単位膨張材量および拘束養生の有無が細孔径分布に及ぼす影響を、細孔径の構成比率によって表示したものである。膨張材量が増大するに従って 240 Å 以上の細孔が増大する傾向が認められるとともに、膨張材を 35 kg/m³ 使用して膨張率が大きくなると、細孔径 750 Å 以上の比較的粗大な細孔の占める割合も増大することがわかる。また、単位膨張材量が約 30 kg/m³ 以下

においては、拘束養生の有無が細孔径分布に与える影響は明瞭でなく、一方、膨張材量がたとえ 240~430 Å 程度の細孔の占める割合が拘束養生によって減少することが認められる。これは 図-2 に示すような細孔径分布のピークが、拘束養生によって無拘束の場合より微細な孔径の側に移行することを示している。

本実験の配合および養生条件の範囲から、膨張コンクリートの細孔容積は拘束および無拘束養生にかかわらず一般に普通コンクリートよりも多く、また細孔径分布はより大きい側にある。拘束養生を行った膨張コンクリートは、無拘束養生の場合より細孔容積が減少するとともに、その分布は微細化する傾向にあるといえる。

(2) 材令の経過に伴う細孔の変化

図-5 は水結合材比 50% の膨張および普通コンクリートの材令 14, 28 日および 1 年における細孔径分布を示したものである。材令 14 日においては両者とも 240~430 Å の細孔が卓越しており、その後 28 日までの間に 240~750 Å の細孔が減少する反面、75~240 Å の細孔が増大して水和反応による空隙の微細化が進行する。その後材令 1 年に至るまでの間に 750 Å 以下の細孔が顕著な減少を示している。図-6 はこのような全細孔容積の材令の進行による減少を示したものである。普通および膨張コンクリートの全細孔容積は、対数表示した材令に対して直線的に減少し、その減少の割合は同等と思われる。膨張コンクリートの膨張は一般に 1 週間程度でほとんど一定値に達することから類推すれば、膨張材の水和反応はこの期間にほとんど終了しているものと考えられる。したがって、ポルトランドセメントの水和反応だけが長期的に継続するので、普通および膨張コンクリートの細孔容積の減少割合は同等であり、初期材令における膨張コンクリートの細孔容積の増大分は長期的に残存するといえる。

(3) 細孔径分布に対する水結合材比の影響

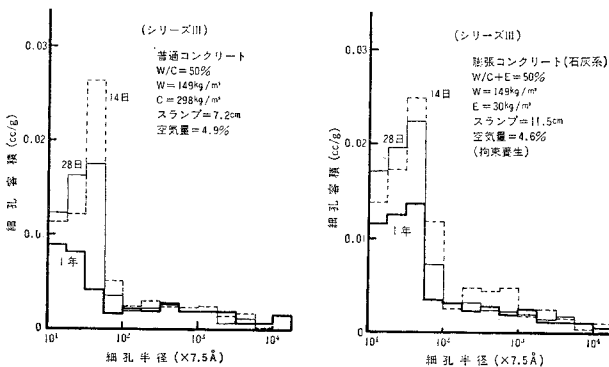


図-5 材令の経過に伴う細孔径分布の変化

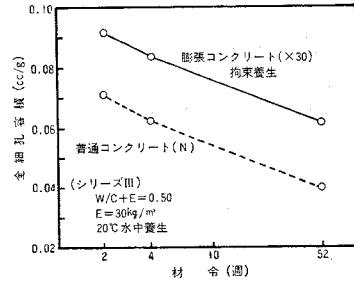


図-6 材令の進行に伴う全細孔容積の変化

図-7 は単位膨張材量 30 kg/m³、水結合材比 50, 45 および 40% とした膨張コンクリートの材令 21 日における細孔径分布を整理して表示したものである。水結合材比を変化した場合、750 Å 以上の細孔容積はほとんど変化が認められず、240 Å 以上に着目すれば細孔容積が水結合材比の低下に伴って減少し、全細孔容積も小さくなるがわかる。

4. 凍結融解試験結果および考察

(1) 相対動弾性係数に関する検討

膨張コンクリートの品質は、一般に拘束条件の相違によって著しい影響を受けるので、凍結融解試験も拘束条件下において行う必要がある。ASTM に準じて凍結融解試験を行う場合、たわみ振動による動弾性係数測定の際に A 法拘束供試体の端部定着板の影響が問題となる。はり状供試体の両端に質量が集中する場合のたわみ振動の節位置を検討した。供試体のコンクリート部分に相当する等分布荷重 w および端板に相当する集中荷重 P を受けるはりを考え、このはりのひずみエネルギーが最小となる張出しばりの支承位置 a 、すなわち節の位置を求めた。ひずみエネルギー U は図-8 から、

$$U = 2 \int_0^l M^2 / EI dx \dots \dots \dots (1)$$

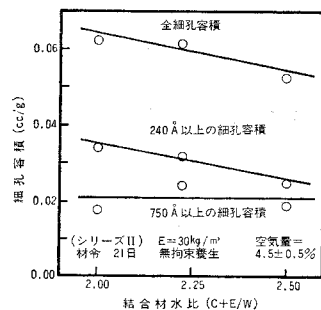
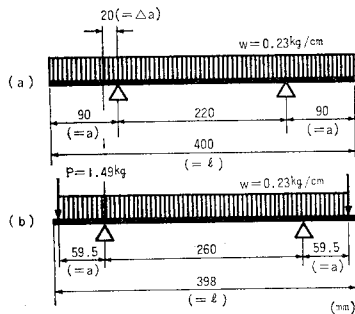


図-7 結合材水比の相違による細孔容積の変化

$$\begin{aligned} \partial U / \partial a &= 0 \\ &= -\frac{w^2}{12} l^4 + \frac{w^2}{2} l^3 a - \frac{w^2}{2} l^2 a^2 - \frac{w^2}{3} l a^3 \\ &\quad - \frac{Pw}{6} l^3 + 2(wl + P) Pl a \\ &\quad - (3wl + 4P) Pa^2 - \frac{2}{3} Pwa^3 \dots\dots(2) \end{aligned}$$

一般の場合は、 $P=0$ を代入することによって $a=0.224l$ となり、JIS A 1127 に示す値と一致する。A 法拘束供試体の場合は、所定の寸法、等分布荷重 (w) 0.23 kg/cm および端部集中荷重 (P) 1.49 kg を代入すると、 a は 5.95 cm となる。すなわち、長さ 40 cm の一般の供試体の支承位置は中央より 11.0 cm、A 法拘束供試体の場合 13.0 cm となり、両者で 2 cm の差が計算される。

試験に先だって、理論計算値および通常の場合の支承位置において A 法拘束供試体の計測を行った。支承は一般に用いられている測定器に付属のもので厚さ約 2 mm、幅約 20 mm のフェルト布を用いた。いずれの支承位置としてもリサーチの位相変化位置に明瞭な相違



図—8 たわみ共鳴振動数測定における支承位置の計算値

表—3 拘束方法の相違による共鳴振動数および相対動弾性係数

コンクリート	拘束方法	凍結融解開始前のたわみ共鳴振動数 (f_0)	凍結融解の繰返しによる相対動弾性係数 (f_n/f_0) ²					
			サイクル 13	サイクル 31	サイクル 59	サイクル 124	サイクル 248	サイクル 343
普通 (P)	無拘束 (A)	2 245	97	97	96	94	88	79
	A法拘束 (B)	1 854	96	95	94	93	88	84
	内的拘束 (C)	2 265	97	96	94	93	88	85
	内的拘束 (D)	2 239	97	96	95	91	87	84
	平均	—	97	96	95	93	88	83
膨張 (E1)	無拘束 (A)	2 256	94	83	54	—	—	—
	A法拘束 (B)	1 870	95	90	82	61	36	24
	内的拘束 (C)	2 269	94	88	76	56	35	26
	内的拘束 (D)	2 301	95	89	80	59	39	31

注) A法拘束 (B); 端板を有する一軸拘束
 内的拘束 (C); フックを有する軸筋による一軸拘束
 内的拘束 (D); フックを有する軸筋およびスターラップによる三軸拘束

は認められず、共鳴振動数も支承位置によって著しい差異が認められなかった。この理由は支承による振動の拘束が比較的小さいことによるものと思われる。たわみ振動数の測定に対する支承位置の影響が小さいこと、測定は拘束および無拘束の供試体を同時に行う必要があることなどのため、支承位置は JIS に示す位置に統一して試験した。

表—3 は凍結融解試験開始前のたわみ一次共鳴振動数 f_0 および凍結融解の所定の繰返し回数 (n) における相対動弾性係数 (f_n/f_0)² を示したものである。A 法拘束供試体の f_0 は他の供試体の値に比較して小さい値を示している。これは供試体の両端部に質量集中があるため、駆動振動に共鳴しやすいことによると考えられる。

劣化の指標として一般に用いられている相対動弾性係数の変化は、普通コンクリートの場合には拘束方法の異なるいずれの供試体でも同等の値を示し、良好な結果を示している。しかし、膨張コンクリートの場合には無拘束の場合に劣化が著しく、拘束鉄筋比が同等で方法の異なる 3 種類の供試体と大きな差異を生じている。A 法拘束供試体の端板がたわみ振動の測定に影響することを考慮して、質量集中のない拘束供試体を作製したのであるが、このように初期振動数の異なる供試体であっても軸方向鉄筋比が同等であれば、相対動弾性係数の相違はほとんど認められず、またスターラップによる横方向拘束の影響も小さいことがわかった。一方、膨張コンクリートの拘束の有無によって、硬化コンクリートの品質に差違を生じた場合の劣化の差は明瞭に現われることがわかった。すでに規格化されている A 法拘束器具は、鉄筋比が 0.93% であり、一般的な膨張コンクリートの拘束程度でもあり、この拘束条件で養生を行ったものを膨張コンクリートの凍結融解抵抗性の評価に用いるのがよいと思われる。

(2) 長さ変化による劣化の指標に関する検討

鎌田および大和の研究^{11),12)} などにある 凍害劣化の指標としての長さ変化は、相対動弾性係数と同様に有力な評価方法の一つである。したがって、本実験においてもこの方法の適用を試みた。測定は凍結融解サイクルの融解時に、供試体温度を 5°C に保持して行ったものである。

図—9 は融解時の長さ変化率と相対動弾性係数との関係を示したものである。任意の相対動弾性係数に対する長さ変化率は、無拘束 (A)、内的拘束 (D)、A 法拘束 (B) 供試体の順に小さく、拘束条件によって変化していることがわかる。無拘束供試体の場合、相対動弾性係数 60% に対応する長さ変化率は 10×10^{-4} であり、普通コンクリートによる既往の報告と一致している。A 法拘束

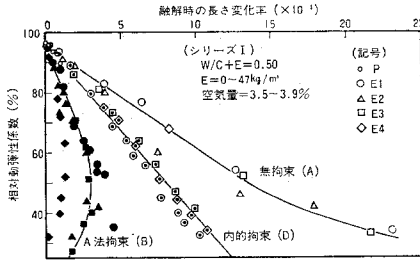
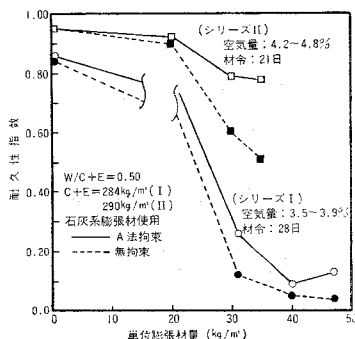


図9 融解時の長さ変化率と相対動弾性係数との関係

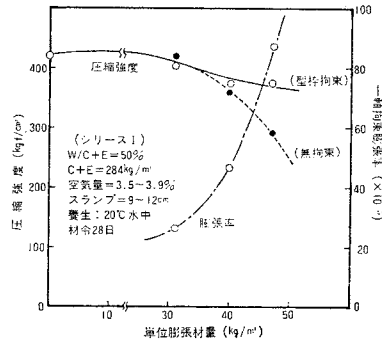
供試体の場合、相対動弾性係数が低下しても長さ変化率が小さく、しかも劣化が著しくなった場合に負側に移行する傾向があるなど挙動が単純でない。これはケミカルプレストレスによるPC鋼棒の拘束ひずみが、コンクリートの内部ひびわれ等の発生によって減少し、最終的にはひずみが解放され膨張率に相当する分だけ負側に移行すると考えられる。このような長さ変化の性状はコンクリートの配合条件によって種々に変化するものであるため、融解時における長さ変化率による凍害劣化の指標は膨張コンクリートの場合適用が困難と思われる。

(3) 膨張材量および拘束養生の影響

図一10は膨張コンクリートの耐久性指数に対する単位膨張材量の影響を示したものである。シリーズ(I)は水結合材比50%、空気量3.5~3.9%であって、膨張材量は0, 31, 40および47kg/m³に変化させたものである。膨張材を用いたものの試験開始時における膨張率は、それぞれ26.5, 46.5および87.0×10⁻⁵であった。普通コンクリートの耐久性指数は拘束の有無にかかわらず0.86と良好であるのに対し、膨張コンクリートの場合には0.30以下で著しい劣化を示している。拘束養生のものは無拘束養生の場合よりわずかに大きな値となっている。収縮補償コンクリートの範囲に着目したシリーズ(II)は、空気量を4.5%程度とし、膨張材量を0, 20, 30および35kg/m³としたものである。これらの膨張コ



図一10 膨張コンクリートの耐久性指数



図一11 単位膨張材量と強度および膨張率との関係

ンクリートの膨張率は、それぞれ8.9, 20.6および28.8×10⁻⁵であった。膨張材を20kg/m³用いた場合の凍結融解抵抗性は普通コンクリートと同等であるが、30kg/m³程度の単位膨張材量とすると無拘束養生の場合に劣化が顕著となっている。しかし、拘束養生とすれば凍結融解の繰返しによる劣化を著しく低減できることを示している。一般に膨張率が25×10⁻⁵程度の収縮補償コンクリートの圧縮強度は、図一11に示すように養生中の拘束の有無にかかわらず同等とみなすことができるのであるが、凍結融解抵抗性は拘束養生の有無によって著しい相違を生じることが示されたのである。シリーズ(II)の試験結果がシリーズ(I)に比べて試験材令が若いにもかかわらず良好な性状を示しているのは、空気量が約1%大きいことによるものと思われる。

(4) 凍結融解抵抗性と細孔径分布

凍結融解作用によるコンクリートの劣化は、細孔中の水分に起因するものである。したがって、膨張コンクリートの細孔径分布と凍結融解抵抗性との関係を検討することはきわめて重要である。鎌田らの報告^{(13),(14)}によれば、毛細管凝縮液の氷点降下を示す樋口式(3)は実験結果を良好に近似し、本実験の最低温度条件-18°Cでは70Å程度の細孔中の水が凍結することとなる。

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{2\sigma_L M}{r\rho_L \Delta H_{SL}} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 ΔT ：過冷却温度 (deg)

T_0 ：水の氷点 (=273 deg)

ρ_L ：水の密度 (=1 g/cm³)

σ_L ：表面張力 (=76 dyne/cm)

M ：分子量 (=18 g/mol)

ΔH_{SL} ：分子融解熱 (=1440×4.2×10⁷ erg/mol)

r ：細孔半径 (cm)

また、水-氷の相変化は一定温度に対して、凍結過程では樋口式によるよりも大きい径の細孔に、融解過程では小さい径の細孔に生じると推論している。

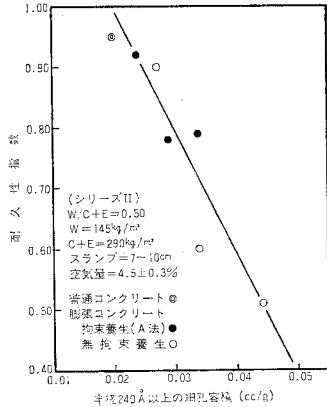


図-12 耐久性指数に対する細孔容積の影響

図-12 は耐久性指数と細孔容積との関係を示したものである。3. に述べた細孔径分布の特徴および毛細管凝縮液の水点降下などを考慮して、細孔径 240~75 000 Å の細孔容積に着目すれば、耐久性指数と細孔容積との間に良好な相関関係が得られた。すなわち、拘束および無拘束養生の相違にかかわらず、半径 240 Å 以上の細孔が増大するほど耐久性指数が低下しているのである。したがって、ここに得られた結果は劣化の媒体となる細孔中の水分が多いものほど劣化が著しいことを意味していると考えられるのである。以上のことから水中養生を行った膨張コンクリートの凍結融解抵抗性が同一条件の普通コンクリートより低下の傾向にあること、また拘束養生の膨張コンクリートが無拘束の場合より劣化を生じにくいことの理由の一つが細孔構造の面から説明できたと考えられる。

(5) 空気連行の影響

図-13 は水結合材比 50% のコンクリートで、膨張コンクリートは単位膨張材量 31 kg/m³、空気量 3.5 および 5.4%、普通コンクリートは空気量 3.9% のもので、拘束条件ごとに耐久性指数を比較したものである。普通コンクリートの耐久性指数はいずれの拘束条件において

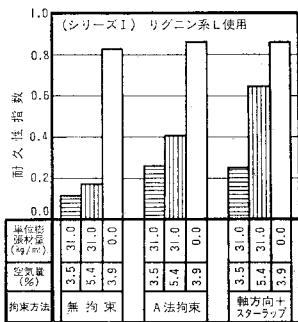


図-13 収縮補償コンクリートの耐久性指数に対する空気量および拘束の影響

も約 0.86 であるのに対し、空気量が 3.5% の収縮補償コンクリートは拘束養生を行った場合でも約 0.25 と著しく小さい。しかし、空気量を 5.4% とすれば無拘束、A 法拘束、三軸の拘束と拘束状態が良好となるに従って、耐久性指数が 0.17, 0.41 および 0.65 に向上している。この結果は膨張コンクリートの拘束養生による内部組織の緻密化ならびに連行空気量の重要性を示唆していると思われる。通常のコンクリートの場合、4~5% の空気連行によって凍結の際に拡散水の水压を緩和し、凍結融解抵抗性は著しく向上することがわかっている¹⁵⁾。空気量をこれ以上に連行しても強度低下の面から実用的でないと考えられるので、気泡の連行性状を向上させるのがよいと考えられる。

このような目的からレジン系の AE 剤 (R) を用い、膨張材には石灰系 (Ex) およびカルシウムサルホアルミネート系 (Cs) を用いたコンクリートの凍結融解試験を行った。前述の 240~75 000 Å の細孔容積を変化させるため、試験材令を 14 日、28 日および 1 年とし、拘束および無拘束養生の供試体を含んでいる。これらのコンクリートの耐久性指数と半径 240 Å 以上の細孔容積との関係を 図-14 に示す。この結果によれば若材令であっても、また無拘束養生などによって 240 Å 以上の細孔容積が著しく大きい場合においても、0.85 以上の耐久性指数を示し、連行空気の状態によって凍結融解抵抗性を向上させることができることがわかる。ASTM C 457 に規定する修正ポイントカウント法によって測定した AE 剤 (R) を用いた本実験のコンクリートの空気量は 4.3%、気泡間隔係数は 130 μm であった。

以上のことから、膨張コンクリートはその内部組織の特徴から凍結融解抵抗性が普通コンクリートより低下する要因を有しているが、気泡連行性状が良好に得られれば、4.5% 程度の空気連行によって十分に耐久的なコンクリートを造ることができると考えられる。

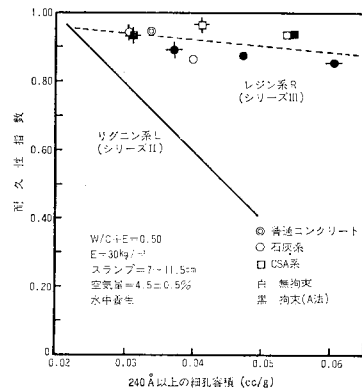


図-14 空気連行性状を向上させた収縮補償コンクリートの耐久性指数

(6) コンクリートの乾燥の影響

実用に供されるコンクリートは、一般に初期養生中は湿潤状態にあるが、水理構造物および地下構造物以外では乾湿の繰返しを受けるのが通常である。特に膨張コンクリートの用いられることの多い工場製品においては、施工されるまでの間に一時的な乾燥を受けることが考えられる。このような条件を考慮した実験上のモデルとして、材令 14 日まで水中養生とし、その後材令 25 日まで温度 20°C、湿度 65% の恒温室で乾燥した後、再び材令 28 日の試験時まで水中養生に戻してから凍結融解試験を行った。材令 14 日と 28 日における湿潤状態の供試体重量の相違はほとんど認められなかったが、試験時の膨張率は材令 14 日における値の 85~90% であった。

表-4 はこれらの供試体の耐久性指数を水中養生の場合と比較して示したものである。この実験にはレジン系の AE 剤 (R) を用いており、一般に耐久性指数はほとんど低下の認められないものであるが、一時的な乾燥を受けた供試体はさらに劣化が認められないことを示している。乾燥を受けたコンクリートの試験時における細孔径分布は、水中養生を継続した同一材令のものに比較して水和の程度が小さいため、240 Å 以上の細孔容積は大なる傾向が認められる。しかし、この場合には細孔中の水分の飽和度は著しく低下していると思われる。このような不飽和細孔の存在は、細孔中に残存する水分の凍結に

表-4 コンクリートの一時的乾燥が凍結融解抵抗性に与える影響 (シリーズ III)

膨張材の種類	配合記号	拘束の有無	水中養生		水中一乾燥—水中養生	
			240 Å 以上の細孔容積 (cc/g)	耐久性指数	240 Å 以上の細孔容積 (cc/g)	耐久性指数
Ex	X 30	無	0.040	0.86	0.052	0.91
	X 40	有	—	—	0.037	1.00
Cs	S 30	無	0.054	0.93	0.060	1.00
		有	0.055	0.93	0.042	0.98
	S 40	無	—	—	0.029	1.00

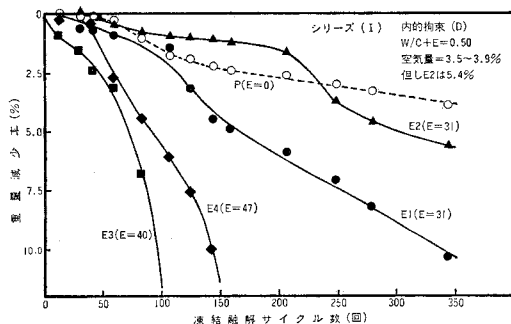


図-15 膨張コンクリートの凍結融解作用による重量減少率

伴う拡散水の水圧上昇を防ぐ効果が非常に大きいと思われる、凍結融解作用による劣化を生じないと考えることができるが、今後さらに検討する必要がある。

(7) 劣化の性状

凍結融解試験における膨張コンクリートの劣化は、図-15 に示すように普通コンクリートより重量減少率が大きなる傾向にある。図示のシリーズ (I) の場合、普通 (P) および膨張コンクリート (E1) の 300 サイクルにおける重量減少率は、それぞれ 3.5 および 9.0% である。このようなスケリングを生じやすいことは Polivka らの報告⁹⁾にも示されているが、空気量を約 5.5% とすれば (E2) 単位膨張材量が等しいもの (E1) よりも減少することが認められる。なお、単位膨張材量が多い E3 および E4 の劣化は供試体端部の角かけなどが著しいため、膨張材量の少ない E3 の重量減少率が E4 より大きい結果となっている。

凍結融解作用による供試体内部の劣化の状態を、試験終了後の供試体にインクを注入することによって観察した。普通コンクリート (B1) で耐久性指数が 0.95 の場合、赤インクによって着色された内部ひびわれは表層の一部にわずかに認められた。無拘束養生供試体の膨張材量の増大に伴う内部ひびわれの様子は、単位膨張材量 20 kg/m³ (B2) で耐久性指数 0.90 のとき表層の深さ約 1 cm、局所的に 2.5 cm 程度までひびわれの進行が認められた。30 kg/m³ 使用 (B3) で耐久性指数が 0.60 となると、ひびわれは全断面にわたって進行し、このひびわれのほとんどは粗骨材とモルタルとの境界に生じていることがわかった。拘束養生の有無による劣化の相違を膨張材を 35 kg/m³ 使用 (B4) の場合に比較すれば、拘束養生を行っても表層部の約 1 cm にわたってひびわれの発達が認められる (耐久性指数 0.78) が、無拘束養生の場合 (耐久性指数 0.51) に比べると著しくひびわれが少ないことが認められた。しかし、この拘束養生の場合にも一本の連続した骨材界面のひびわれが、表面より断面中心の拘束棒まで発達していた。このように膨張コンクリートの凍結融解作用による劣化は、骨材界面のひびわれによるものかどうかを判断するための追加試験を行った。水結合材比 30%、単位膨張材量を 0 および 60 kg/m³ とした Non-AE コンクリートで、鋼繊維を 0 および 1.5% 用いた供試体を作製し、拘束器具を用いずに水中養生を行った。この供試体の凍結融解試験結果を表-5 に示す。膨張コンクリートで鋼繊維を混入しない場合には耐久性指数 0.29 で著しい劣化を示したが、鋼繊維を 1.5% 混入することによって、普通コンクリートと同等の値 0.96 となり、著しい改善が認められた。この供試体の内部ひびわれを観察したが、染色さ

表—5 鋼繊維によって補強した膨張コンクリートの耐久性指数

No.	SF混入率 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位膨張材量 (kg/m ³)	スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	耐久性指数
1	0.0	30	36	480	0	18.5	1.5	0.97
2	1.5	30	50	633	0	14.5	4.2	0.98
3	0.0	30	36	420	60	14.5	2.1	0.29
4	1.5	30	50	573	60	14.5	4.9	0.96

ただし、Non-AE コンクリート、SF: 0.5×0.5×30 mm (せん断タイプ)

れた部分は表層部の 1 mm 以内の範囲であって、粗骨材近傍を鋼繊維が十分に拘束するために界面ひびわれが防止できたと考えられる。なお繊維混入およびこれに伴う細骨材率の増大のため、Non-AE コンクリートにもかかわらず空気量が 4.9% となっている。このコンクリートの硬化後の気泡間隔係数は 390 μm であった。

これらのことから、膨張コンクリートの凍結融解作用に伴う劣化は、コンクリート表層部の組織の弛緩のためにスケーリングを生じやすい傾向にあり、表層部から内部に向かってひびわれが進行してゆく。このような損傷を生じる程度は細孔容積と関係があると考えられる。また、コンクリート内部へ発達してゆくひびわれは骨材の境界面に生じやすい。コンクリートの拘束養生あるいは鋼繊維によって骨材近傍の膨張を十分に拘束すれば、膨張コンクリートの凍結融解抵抗性は増大すると思われる。

5. 結 論

本研究は膨張コンクリートの凍結融解抵抗性について、微視的な細孔構造の面から検討し、主として膨張材量の影響、拘束養生の効果、連行空気の影響、劣化の性状などについて実験的に検討した。また、拘束養生供試体の凍結融解試験方法についても若干の言及を試みた。本実験の範囲で次のことが明らかになったと思われる。

(1) 膨張コンクリートの全細孔容積は、一般に同一配合の普通コンクリートより大であって、単位膨張材量が 35 kg/m³ 程度の収縮補償コンクリートの範囲であっても、無拘束養生の場合にはこのような傾向が顕著である。拘束養生によって無拘束の場合より全細孔容積は減少するとともに細孔は微細化する傾向にある。水結合材比 50% 程度の膨張コンクリートの細孔径分布は、240~750 Å が卓越し、膨張材量の変化および拘束の有無は、この大きさの細孔に対して顕著な影響を及ぼす。

(2) 普通および膨張コンクリートともに、材令 14 日から 28 日程度の間には 240~750 Å の細孔が減少し、240 Å 以下の細孔が増大するという傾向を示し空隙の微

細化が進行する。材令 28 日以降ではこれらの細孔が全体的に減少する。膨張コンクリートの微細空隙は、普通コンクリートと同様に材令とともに減少するが、材令の初期における膨張材の水和によって生じた普通コンクリートからの増大分は、材令が進行しても減少することなく残存する。

(3) A法拘束供試体を用いて膨張コンクリートの凍結融解試験を行う場合、たわみ振動の節位置は計算上変化するが、通常の供試体と同様に端部から 0.224l に支承を設けて測定しても影響は小さく、相対動弾性係数によって劣化の指標とすることができる。

(4) 水中養生を行った膨張コンクリートの凍結融解抵抗性は、膨張材量の増大に伴って一般に低下する傾向を示す。しかし、空気量 4.5% 程度で良好な空気連行性状を得て拘束養生を行えば、無拘束養生の場合より顕著に劣化が低減される。

(5) 一定空気量の膨張コンクリートの耐久性指数は、拘束および無拘束養生にかかわらず 240~75 000 Å の細孔容積が小さいほど大きい傾向が認められる。

(6) 膨張コンクリートの凍結融解抵抗性を増大するためには、拘束養生を行うことが重要であるとともに、空気量を大きめにするとか、気泡間隔係数が小さい良好な空気連行性状を得ることがきわめて大切である。

(7) 膨張コンクリートの凍結融解作用による劣化は、供試体表面のスケーリングを生じやすい傾向にある。またコンクリート内部では、表層部の微細なひびわれに端を発し、これが粗骨材とモルタルとの付着界面のひびわれとなって内部の損傷が進行する。

謝 辞：本研究を行うにあたり、東京都立大学 村田二郎教授、およびセメント協会研究所 柳田力部長から貴重な助言とご指導を賜った。また、同研究所コンクリート研究開発グループの皆様には、実験の遂行に協力をいただいた。これらの皆様に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 長滝・辻：最近における膨張コンクリートの研究と実用例の動向，土木学会誌，60 巻 6 号，pp. 39~48，1975 年 6 月。
- 2) 樋口・長滝・三宅：膨張コンクリートの現況と問題点，土木学会誌，64 巻 Annual，pp. 10~19，1979 年 3 月。
- 3) 錦織達郎：水圧鉄管路における膨張コンクリートの施工，コンクリートジャーナル，Vol. 12，No. 7，pp. 35~50，1974 年 7 月。
- 4) 小林正几：膨張性セメント混和材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性について，土木学会コンクリートライブラリー，No. 39，pp. 69~73，1974 年 10 月。
- 5) 洪・後藤・鎌田・田畑：無収縮セメントを用いたコンクリートの長期性状に関する研究，セメントコンクリート，No. 313，pp. 16~21，1973 年 3 月。
- 6) 田畑・洪・鎌田・大楽：CSA セメントを使用したコンク

- リートの乾湿繰返し性状と耐凍害性，セメント技術年報，No. 29, pp. 262~266, 1975 年.
- 7) 田畑・鎌田・宮崎：コンクリートの耐凍害性におよぼす乾燥の影響，セメントコンクリート，No. 383, pp. 8~15, 1979 年 1 月.
 - 8) 田畑・洪：膨張材を用いたコンクリートの寒冷地における暴露試験，セメント技術年報，No. 33, pp. 310~313, 1979 年.
 - 9) Polivka, M., et al. : Freeze-Thaw Durability of Shrinkage-Compensating Cement Concrete, ACI SP-47, pp. 79~87, 1975 年.
 - 10) 戸川・中本：膨張コンクリートのクリープ特性に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No. 304, pp. 137~150, 1980 年 12 月.
 - 11) 鎌田・洪：耐凍害性指標としての長さ変化の適用性，セメント技術年報，No. 25, pp. 313~316, 1971 年.
 - 12) 大和竹史：凍結融解作用によるコンクリートの長さ変化，セメント技術年報，No. 30, pp. 299~301, 1976 年.
 - 13) 鎌田・洪：人工軽量骨材コンクリートの凍害機構に関する考察，セメント技術年報，No. 25, pp. 285~290, 1971 年.
 - 14) 鎌田・大内・吉野：硬化セメントペーストの凍害と細孔構造の役割について，セメント技術年報，No. 30, pp. 292~296, 1976 年.
 - 15) 洪・鎌田：コンクリートの凍害と初期凍害，コンクリート工学，Vol. 16, No. 5, pp. 1~11, 1978 年 5 月.

(1982.7.20・受付)