

コンクリートの耐硫酸塩性促進試験に関する研究

A STUDY ON THE ACCELERATED TEST FOR DURABILITY
OF CONCRETE UNDER ACTION OF SULPHATE西 林 新 蔵*・阪 田 憲 次**
By Shinzo Nishibayashi and Kenji Sakata

1. 緒 言

最近、わが国においても海洋開発に対する関心が急速に高まり、国の重要施策の一つとしてこれを強力に推進せんとしている。海洋開発における材料の果たす役割を考えてみると、陸上構造物ないしは港湾・海岸構造物における土木材料のそれ以上に重要な役割を果たすことが容易に推察でき、さらに海洋開発の伸展に伴って、海洋環境条件や海洋構造物の機能に適合した新材料の開発も活発に行なわれるものと考えられる。しかし、将来出現するであろう海洋構造物においても、鋼材やコンクリートは主要構造材料としての地位を占めるものと考えられるが、そのためには、これらの主要材料が海洋開発の目的にかなひ、かつその機能を十分に発揮しうるものであることを確認しておかなければならない。コンクリートに関する問題点としては、海水の作用に対する耐久性と深海における施工法とをあげることができよう。

一方、新材料として開発された人工軽量骨材と、それを用いたコンクリートの諸性質が解明されるとともに、その利用範囲はしだいに広くなりつつある。しかし、人工軽量骨材の歴史はきわめて浅く、かつ実用化が先行したきらいがあって、その特性の中にはいまだに解明されていない点もかなり残されている。これら未解決の問題の一つに耐久性をあげることができよう。

著者らは、軽量コンクリートの耐久性の一つである耐硫酸塩性を検討するため、骨材およびセメントの種類、コンクリートの配合、溶液浸漬時材令などの実験条件を互いに組合わせた実験を実施したり、供試体を硫酸塩溶液 ($\text{Na}_2\text{SO}_4(20\% \text{ sol.}) + \text{MgSO}_4(20\% \text{ sol.})$) の中に 18 か月間浸漬して、その間の動弾性係数の低下率ならびに強度低下を測定した結果、軽量コンクリートの耐硫酸塩

性は使用した骨材の種類やコンクリートの配合などによってやや異なるが、相対動弾性係数が 80% 以下にならなければ外観的にはほとんど損傷が見られず、さらに総合的には、軽量コンクリートは普通コンクリートに対して何らの遜色も認められないと判定した。

一般に、コンクリートを同一濃度の硫酸塩溶液中に長期間浸漬すると、セメントペースト中の C_3A と CaSO_4 とが反応してセメントパチルスを生成し、その異常膨張によってコンクリートはしだいに劣化し、最終的には崩壊に至る。コンクリートの耐硫酸塩性は、このような物性的変化と崩壊に至る過程を観察して判定している。この種試験においては、耐久性の良否を判定するまでにかなり長期間にわたって測定を継続しなければならないし、さらに溶液の濃度や温度のコントロールに十分な注意を払わなければならない。このような試験実施上の問題点を考えると、耐硫酸塩性試験においても、凍結融解試験のように、物理的な影響を考慮した促進試験法の確立が望まれる。

いま、物理的作用の一例として、コンクリートに乾燥と湿潤の繰返しを与えた場合について考えてみる。コンクリートが乾燥と湿潤の繰返しを受けたとき、その長さ変化は、最初から乾燥あるいは湿潤状態におかれた場合と著しく異なることが認められている。しかも、ある条件の乾燥と湿潤の繰返しによっては、コンクリートは異常な膨張を起こし崩壊することもある²⁾。大浜ら³⁾は、モルタル供試体に加温乾燥 (50°C , R.H.: 35%) と気中冷却 (21°C , R.H.: 80%) の繰返しを与えると、繰返し回数 7~20 回で、室温気中乾燥を 1 年間継続した場合とほぼ等しい長さ変化が生じたことを明らかにしている。一方、コンクリート・ポリマーの材料特性に関する一連の研究の中で、溶液浸漬 ($\text{Na}_2\text{SO}_4: 2.1\%$, 22°C , 16 時間) と乾燥 (54°C , 8 時間) とを繰返し、供試体が 0.2% の膨張を生じたときに破壊したと判定する方法によって、ポリマーの耐硫酸塩性を検討している⁴⁾。

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部土木工学教室

本研究は、コンクリートの耐久性のうち、とくに海岸や海洋構造物にコンクリートを利用するに当たって、あらかじめ検討しておかなければならない重要な項目の一つである耐硫酸塩性を採り上げ、さらにコンクリートの耐硫酸塩性を検討する過程において、その性質が十分究明されていない人工軽量骨材コンクリートを研究対象に含めた。すなわち、本研究は、上述した長期耐久性試験の結果と、乾・湿の繰返しによるコンクリートの挙動を考慮に入れ、コンクリートが硫酸塩溶液中の浸漬と乾燥との繰返しによってどのような劣化の過程を経るか、また、この試験法が促進試験として利用できないものかどうか、さらには耐硫酸塩性の判定にどのような特性値を採ったらよいかなどを検討したものである。

2. 使用材料および試験概要

(1) 使用材料

a) セメント

試験に供したセメントは、市販の普通ポルトランドセメントで、その物理的試験結果およびメーカーが提示した化学分析試験結果を表-1に示す。

b) 骨材

使用した骨材は、河川産の普通骨材（記号：N）、および造粒型人工軽量骨材（記号：L）、非造粒型人工軽量骨材（記号：M）を選んだ。これら骨材の物理的性質およびふるい分け試験の結果を表-2に示す。

表-1 使用セメントの性質

(1) 物理的性質

比重	粉末度 比表面積 ブレンジ (cm ² /gr)	凝 結 88 n 残分 (%)	結			安定性	強 さ (kg/cm ²)					
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		曲 げ			圧 縮		
							3日	7日	28日	3日	7日	28日
3.15	3110	2.0	27.1	3-00	4-12	良	35.5	51.7	73.6	141	229	418

(2) 化学成分 (%)

Ig. loss	Insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total
0.6	0.3	22.4	5.2	3.1	64.4	1.4	1.8	99.2

表-2 使用骨材の性質

骨材の種類	フルイ通過率 (%)									F. M.	比 重		吸水率 (%)
	20mm	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		絶 乾 O. D.	表 乾 S. S. D.	
N	細骨材			100	92	69	54	18	3	2.64	2.54	2.57	1.20
	粗骨材	100	85	58	2	0				6.40	2.58	2.61	1.09
L	細骨材			100	90	60	34	22	11	2.83	1.69	1.83	8.29
	粗骨材	100	99	51	0					6.49	1.33	1.37	3.00
M	細骨材			100	96	62	38	22	8	2.74	1.59	1.83	15.10
	粗骨材	100	97	54	2					6.44	1.25	1.35	8.00

c) 混 和 剤

耐久的なコンクリートを作るためには、単位水量を少なくし、水セメント比の小さい配合としなければならぬ。本試験においては、標準型減水剤をコンクリートに混和し、減水と水セメント比の減少を図った。

d) コンクリートの配合

人工軽量骨材 L, M は、表乾状態 (S.S.D.) と絶乾状態 (O.D.) に調整し、それぞれの含水状態の骨材に対し、スランパ (9~12 cm)、空気量 (5±1%)、2種類の水セメント比 (45%, 55%) を配合条件として選んで、合計8種類の配合を試し練りによって決定した。なお、普通骨材の含水状態は S.S.D. のみで、配合条件は軽量骨材の場合と同様である。これらコンクリートの配合および練り上りの性状を表-3に示す。なお、絶乾状態の人工骨材を用いた場合の補正水量は、それぞれの骨材の瞬間吸水量と12時間の置換吸水量を考慮して決定した⁵⁾。

(2) 試験概要

a) 実験計画

上述した使用材料および配合条件に基づいて、表-4に一括して示すような実験計画と試験条件を立てた。

b) 硫酸塩溶液

本試験においては、硫酸塩溶液の中でもとくにコンクリートに対する浸食作用が著しいとされている Na₂SO₄ の10%溶液を用いた。骨材の安定性試験においては飽和溶液が用いられ、また前述した長期耐硫酸塩性試験⁴⁾では、MgSO₄ と Na₂SO₄ の混合液 (20%) を用いたが、20%溶液にすると、溶液濃度のコントロールにかなりの手間を要すること、10%以下の Na₂SO₄ 濃度ではコンクリートにおよぼす影響が小さいこと、乾燥時における結晶圧の影響をできるだけ除くこと、さらには過去に行なわれた長期試験で採用された溶液濃度などを考慮して、本試験では比較的濃度の低い硫酸塩溶液を用いることにした。なお、試験槽中の Na₂SO₄ 溶液濃度は、原則として1週間に一度の割合でチェックした。

c) 乾燥と湿潤の繰返しサイクル

実際の屋外構造物は、常に湿潤と乾燥の繰返しを受けている。米国開拓局は、コンクリートの乾・潤の繰返し

に対する抵抗性を検討するため、次のような試験法を規定している²⁾。乾・湿のサイクルは1日1回で、55°C±1 deg. の強制通風下で8時間乾燥、次に21°Cの水中(淡水)で16時間飽水させる。試験は一定サイクルごとに重量、動弾性

表-3 コンクリートの配合

コンクリートの種類	骨材含水状態	水セメント比 W/C (%)	細骨材骨率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					フレッシュコンクリートの性質	
				セメント C	水 W	補正水量 ΔW	細骨材 S	粗骨材 G	スランプ cm	空気量 (%)
N-45	S.S.D.	45	43.5	359	162		753	998	11.4	4.4
N-55	S.S.D.	55	44.5	299	165		789	1000	10.8	4.5
L-45-D	O.D.	45	43.5	375	169	35	463	474	10.0	4.7
L-45-S	S.S.D.	45	43.5	375	169		526	511	10.7	4.2
L-55-D	O.D.	55	46.5	290	160	37	518	469	11.2	4.7
L-55-S	S.S.D.	55	46.5	290	160		595	513	10.2	4.8
M-45-D	O.D.	45	44.0	378	172	88	399	400	11.0	5.0
M-45-S	S.S.D.	45	44.0	378	172		532	499	11.5	5.3
M-55-D	O.D.	55	46.5	296	163	80	444	401	10.6	5.8
M-55-S	S.S.D.	55	46.5	296	163		587	489	11.8	5.8

表-4 実験条件

要 因	水 準
(1) 骨材種類	普通骨材: N 人工軽量骨材: L, M
(2) 骨材含水状態	表乾: S.S.D. 絶乾: O.D.
(3) 水セメント比 (%)	45, 55
(4) 湿潤(硫酸塩溶液浸漬)と乾燥(炉乾燥)のサイクル	N-55: 1日, 2日, 3日 N-45, L, M: 2日
(5) ブランクテスト(水中浸漬と炉乾燥の繰返し)	各骨材とも W/C=55%, 2日1サイクル
(6) 測定項目	動弾性係数 (7×7×30 cm) 長さ変化 (" ") 圧縮強度 (φ10×20 cm)
(7) 測定条件	湿潤状態(浸漬終了, 乾燥開始直前) 乾燥状態(乾燥終了, 浸漬開始直前)

係数, 長さ変化を測定し, 長さ変化において, 310 サイクル以下で 0.07% 以上の膨張を示すものは, 耐久性が消滅したと判定する。この試験法を参考にして, 80°C の炉乾燥と 20°C の Na₂SO₄ 10% 溶液浸漬(湿潤)の繰返しによって, コンクリートの耐硫酸塩性促進試験を試みた。なお, 乾燥温度を 80°C に選んだのは, 100°C 以上で乾燥するとセメントペーストゲル中のキャピラリー水が逸散し, コンクリートの組成そのものが変化するおそれのあることを考慮して決定した。本試験で採用したサイクル数は, 以下に示すとおりである。

1) サイクル間隔が耐硫酸塩性におよぼす影響を検討するため, 普通骨材を用い, 水セメント比 55% のコンクリートに対し次の3種類のサイクルを採用した。

- 1日サイクル(8時間乾燥, 16時間溶液浸漬)
- 2日サイクル(24時間乾燥, 24時間溶液浸漬)
- 3日サイクル(24時間乾燥, 48時間溶液浸漬)

2) 1)の実験結果を参考にして, 供試コンクリート全部に対し2日サイクルの乾・湿の繰返しを与え, コンクリートの物性の変化を基にして, 骨材の種類, 含水状態, w/c などと耐硫酸塩性との関係について検討を加えた。

3) ブランクテスト w/c 55% の全コンクリートについて, 淡水中浸漬・24時間と乾燥・24時間のサイクルを繰返した場合の供試体の物性の変化を測定した。

d) その他

供試体寸法は, 浸漬用: 7×7×30 cm, 圧縮強度用: φ10×20 cm で, いずれの供試体も成型後1日で脱枠し, 所定の材令まで標準養生を施した。浸漬は材令7日から開始し, 原則として1~2サイクルごとに湿潤状態(浸漬終了, 乾燥開始直前), ならびに乾燥状態(乾燥終了, 浸漬開始直前)における供試体重量, たわみ振動による動弾性係数, ホイットモアー型ひずみ計による長さ変化の測定を, 供試体が崩壊あるいは大きなひびわれが発生するまで継続した。供試体数は, それぞれのコンクリート配合について3個ずつで, 結果はその平均値で表わし, さらに3個の供試体のうち少なくとも1個が測定不能となったときを崩壊と見なし, 残りの供試体による測定値を崩壊時の特性値とした。

3. 実験結果および考察

3. 実験結果および考察

2. (1) で述べた配合条件に基づくコンクリートの圧縮強度および単位容積重量を表-5に, さらに硫酸塩溶液中あるいは水中浸漬と乾燥の繰返しによる供試体の物性変化を図-1~図-15に示す。また, 20サイクルにおける供試体の外観の一例を写真-1~3に示す。測定は乾燥状態と湿潤状態のそれぞれにおいて行なったが, これら測定値の間にはほとんど差がなく, また乾燥状態における値は供試体間のばらつきがかなり大きいことなどを考慮して, 図中には湿潤状態の値のみを示し, かつこの値に対して以下の考察を加えることにする。

(1) サイクル間隔が耐硫酸塩性におよぼす影響について

N-55に, 1日, 2日, 3日サイクルの乾・湿の繰返しを与えた場合のコンクリートの物性変化を図-1~3に示す。供試体が崩壊したサイクル数は, 16~25サイクルであるが, これを処理日数で表わすと1日サイクルで25日, 2日サイクルで46日, 3日サイクルで58日となりサイクル間隔の短いものほど崩壊に達する時間が短い。しかし, 崩壊時の物性変化は, 2日サイクルの場合に最も顕著である。この結果を参考にして, 他のすべてのコンクリートに対する乾・湿の繰返しを2日サイクルに選び, さらに結果の考察に際しては, サイクル数をパラメーターに採用することにした。

表-5 コンクリートの単位容積重量，圧縮強度および動弾性係数

コンクリートの種別	材 令 7 日						材 令 28 日	
	骨材 W/C 種類 (%)	骨材含水状態	単位容積重量 (kg/m ³)	圧縮強度 (kg/cm ²)	動弾性係数 (×10 ⁴ kg/cm ²)		単位容積重量 (kg/m ³)	圧縮強度 (kg/cm ²)
					湿潤	乾燥		
N	45	S.S.D.	2360	307	37.3	32.2(0.86)	2340	418
			2350	229	35.7	30.3(0.85)	2340	347
L	45	O.D.	1650	322	18.8	16.6(0.88)	1660	451
		S.S.D.	1660	277 (0.86)	18.6	15.9(0.86)	1660	409 (0.91)
L	55	O.D.	1620	202	18.4	16.5(0.80)	1600	333
		S.S.D.	1640	185 (0.91)	17.0	15.5(0.91)	1650	297 (0.89)
M	45	O.D.	1640	261	16.2	14.8(0.91)	1660	392
		S.S.D.	1690	234 (0.90)	16.0	14.7(0.92)	1660	352 (0.90)
M	55	O.D.	1590	243	15.1	14.1(0.93)	1600	313
		S.S.D.	1650	174 (0.72)	14.1	13.5(0.95)	1670	296 (0.94)

() : 骨材含水状態による強度比. [] : 乾湿条件による動弾性係数比

(2) 重量の変化 (図-4~7)

乾・湿の繰返しによる供試体重量の変化は，水中浸漬と溶液中浸漬とで，その傾向はかなり異なる。水中浸漬の場合には，いずれのコンクリートにおいても重量減を呈し，30サイクルにおいて N で約10%，L で4~5%，M で約9%の減となり，人工骨材においては吸水率の大きい骨材を用いた場合ほど重量減が大きくなる傾向が見られた。溶液中に浸漬した場合は，骨材の種類や含水状態によって重量減の様相はかなり異なる。すなわち，

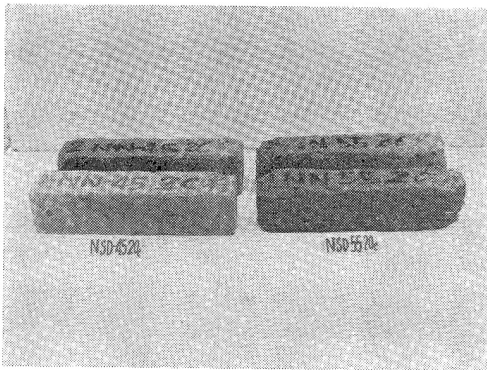


写真-1 骨材：N

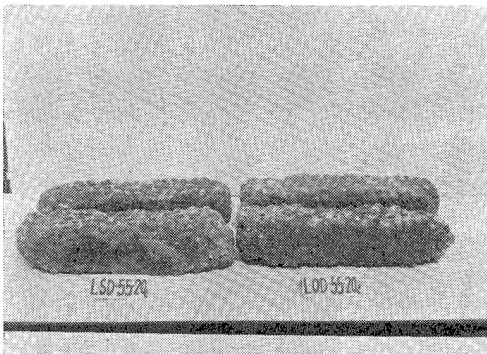


写真-2 骨材：L

Nではサイクル初期から重量増を示すが，供試体の劣化が進むにつれて重量減に移行し，W/Cの大きいN-55では崩壊時に約13%の重量減となる。Lは最初の数サイクルでわずかに重量減を呈するが，サイクルが進むにしたがって重量増に移行してある極度に達し，その後の傾向はNと同様に，供試体の劣化に伴って重量は減少する。さらに，崩壊時の重量変化は，骨材の含水状態によってやや異なり，O.D.で約5%の増，S.S.D.ではほぼ元の供試体重量と等しくなる。Mでは，最初の数サイクルの間は重量減を呈するが，その後は連続的に重量が増加し，崩壊時には10~15%の重量増となる。なお，水中浸漬の場合と溶液

中浸漬の場合との重量の差が硫酸塩溶液による影響と考えると，その影響の程度はNで最小，Mで最大となる。

溶液浸漬の場合に供試体重量が増加するのは，骨材の吸水以外に，エアードシステムの変化やペースト組織の劣化などによって，その間げきに水が浸透するためと考えられる。なお，骨材に乾・湿の繰返しを与えると，連続吸水の場合よりも吸水率がかなり大きくなるとの実験結果もあるので，今後この点をも考慮に入れて供試体の重量変化の現象を解明して行きたいと考えている。

供試体重量の変化は，実験条件や使用骨材によってあまり差がなく，コンクリートの耐硫酸塩性促進試験の特性値に採用することにはやや問題があると考えられる。

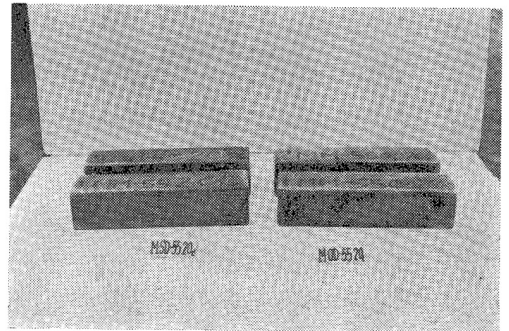


写真-3 骨材：M

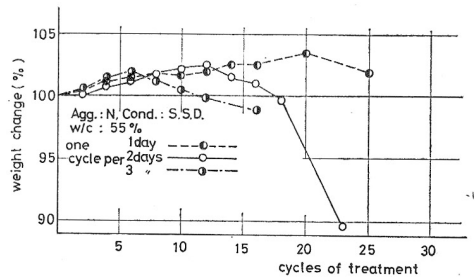


図-1 供試体重量の変化とサイクル数との関係 (サイクル間隔の影響)

(3) 相対動弾性係数 (図-8~11)

ブランクテストにおける動弾性係数の低下率は、30サイクルで、Nは5%以下(相対動弾性係数:95%以上)、L、Mは約10%(同約90%)とごくわずかである。したがって、30サイクル前後の水中浸漬と乾燥の繰返しでは、コンクリートはほとんど損傷を受けないものと判定できる。

硫酸塩溶液中浸漬と乾燥の繰返しにおける動弾性係数の低下率について考えてみる。Nの動弾性係数は、サイ

クル初期から連続的に低下し、崩壊時にその低下率が急激に大きくなるのに対して、L、Mの動弾性係数は、初期数サイクルの間はほとんど変化せず、その後はNの場合とほぼ同様の傾向を示して崩壊に至る。また、水セメント比が異なっても崩壊に至るサイクル数は変わらないが、 w/c が大きいものほど相対動弾性係数は小さく現われる。さらに、同一水セメント比において、骨材の含水状態の影響を考察すると、S.S.D.のほうが相対動弾性係数が小さく現われ、LではS.S.D.とO.D.の差は約5%とごくわずかであるのに対して、吸

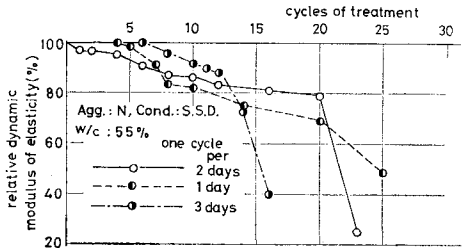


図-2 相対動弾性係数とサイクル数との関係 (サイクル間隔の影響)

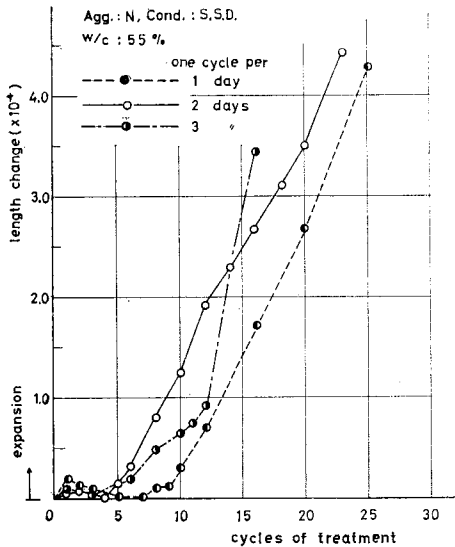


図-3 長さ変化とサイクル数との関係 (サイクル間隔の影響)

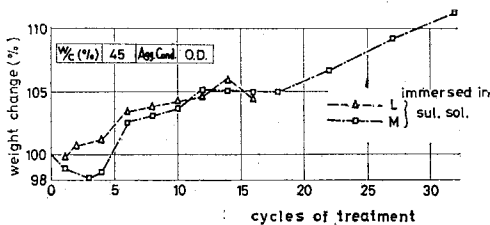


図-4 供試体重量の変化とサイクル数との関係 (w/c : 45%, 骨材含水状態: 絶乾)

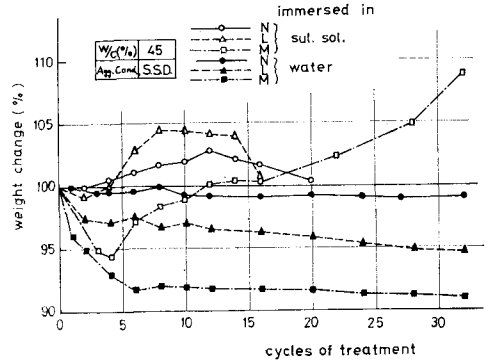


図-5 供試体重量の変化とサイクル数との関係 (w/c : 45%, 骨材含水状態: 表乾)

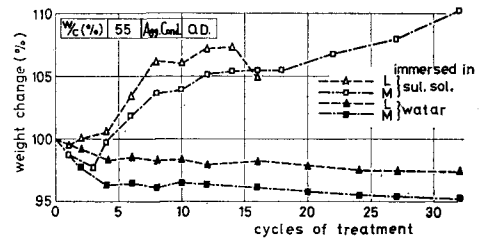


図-6 供試体重量の変化とサイクル数との関係 (w/c : 55%, 骨材含水状態: 絶乾)

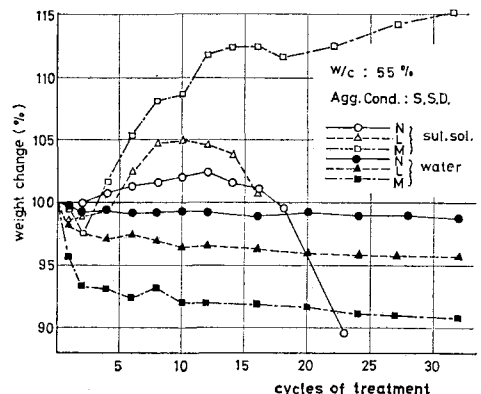


図-7 供試体重量の変化とサイクル数との関係 (w/c : 55%, 骨材含水状態: 表乾)

水率の大きいMではこの傾向が顕著に現われ、崩壊時に20~30%の差となる。

表-6 に示した水中浸漬の相対動弾性係数と崩壊時のそれとの比を見ると、Nで約30%，L，Mで約70%となり、軽量コンクリートのほうが相対的に硫酸塩による物性の変化は小さいとみなせる。しかし、別の観点から考えると、軽量コンクリートにおいては、物性の変化が小さくても崩壊に至ることがあるのに対して、普通コンクリートでは、かなりの物性変化が現われるまで崩壊に至らないとの判断を下すこともできる。

(4) 長さ変化 (図-12~15)

乾・湿の繰返しによるコンクリートの長さ変化は、水中浸漬と硫酸塩溶液浸漬によって、その様相はかなり異なる。

水中浸漬と乾燥を約30サイクル繰返した場合、Nでは全期間を通じて収縮を呈し、最大の収縮量は6~7サイクルで現われ、それ以降では収縮量は徐々に減少する。L，Mにおいては、初期サイクルで収縮を呈し、最大の収縮量は5サイクル近傍で、また、収縮から膨張への転移は10~15サイクルで現われ、以後のサイクルでは膨張を呈する。さらに、吸水率の大きい骨材Mを用いたコンクリートのほうが膨張への転移がやや早く現われ、かつ長期サイクルにおける膨張量もLの場合よりもやや大

表-6 供試体の崩壊時における測定値

コンクリートの種別			1サイクルのH数		供試体崩壊時*			相対動弾性係数(%)**			長さ変化(膨張)×10 ⁻⁴ **			重量変化(+増,-減)(%)**		
骨材種類	W/C	骨材含水状態	サイクル数	日数	サイクル数	日数	溶液浸漬	水中浸漬	両者の比	溶液浸漬	水中浸漬	両者の差	溶液浸漬	水中浸漬	両者の差	
N	45	S.S.D.	2	24	48	30(43)	98	30.6	4.6(4.8)	-0.2	4.8	0.4	-0.8	1.2		
			1	25	25	49(40)				4.3(8.1)			2.0			
			3	16	58	40(68)				3.4(5.2)			-1.0			
L	45	O.D.	2	16	32	72(74)				2.3(2.1)			4.8			
				16	32	71(73)	95	74.7	2.4(2.6)	0	2.4	1.0	-3.6	4.6		
			2	16	32	70(74)	99	70.7	3.5(3.1)	-0.2	3.7	5.0	-1.0	6.0		
			16	32	68(75)	92	74.0	2.9(3.0)	0	2.9	0.7	-3.7	4.4			
M	45	O.D.	2	32	64	75(59)				2.1(2.2)			11.2			
				32	64	67(70)	89	75.2	3.1(3.8)	0.1	3.0	8.8	-8.9	17.7		
			2	32	64	73(64)	89	82.0	2.4(2.3)	0	2.4	10.3	-4.7	15.0		
			32	64	48(57)	85	56.5	4.2(4.3)	0.2	4.0	15.2	-9.2	24.4			

* 供試体3個のうち少なくとも、1個が測定不能もしくは崩壊したとき
 ** () は乾燥終了時、その他は浸漬終了時の測定値を示す

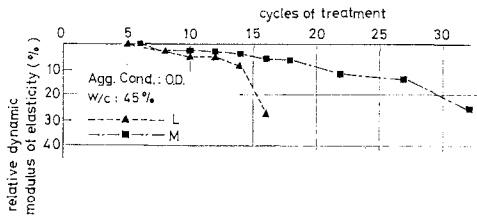


図-8 相対動弾性係数とサイクル数との関係 (w/c: 45%, 骨材含水状態: 絶乾)

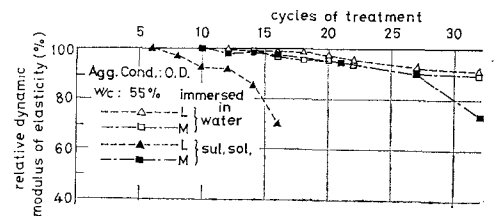


図-10 相対動弾性係数とサイクル数との関係 (w/c: 55%, 骨材含水状態: 絶乾)

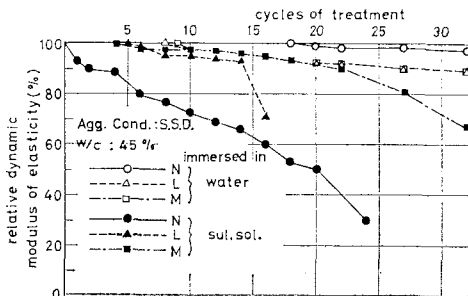


図-9 相対動弾性係数とサイクル数との関係 (w/c: 45%, 骨材含水状態: 表乾)

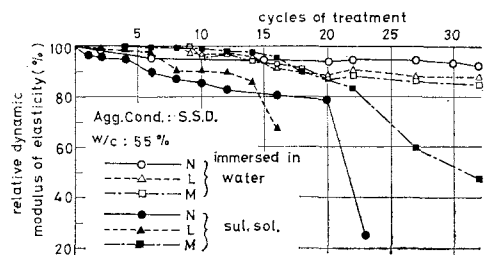


図-11 相対動弾性係数とサイクル数との関係 (w/c: 55%, 骨材含水状態: 表乾)

きい。しかし、水中浸漬と乾燥の繰返しにおいては、30 サイクル（約60日間）で供試体の破損はなんら認められない。

硫酸塩溶液中浸漬と乾燥とを繰返した場合には、いずれも膨張を呈するが、膨張量と崩壊時サイクル数との間には明確な関係は見出されない。すなわち、一般的に、N の乾・湿の繰返しによる長さ変化は、L あるいは M のそれよりもかなり大きく現われ、崩壊時近傍では 4.0×10^{-4} 以上に達する。L の場合は、膨張量は小さく $(2.0 \sim 3.0) \times 10^{-4}$ であるが、供試体の破損は比較的早く約 16 サイクルで起こる。一方、M では、膨張量は $(3.0 \sim 4.0) \times 10^{-4}$ と中位の値を示すが、崩壊時のサイクル数は長く、約 30 サイクルである。次に、同一水セメント比で骨材の含水状態が異なる場合の長さ変化について

考えてみる。崩壊時のサイクル数は、骨材の含水状態が異なってもほとんど変わらないが、膨張量は S.S.D. の場合のほうが大きく現われ、この傾向は骨材Mを用いたコンクリートの方が著しい。また、同一骨材、同一含水状態の場合には、水セメント比の大きいコンクリートほど乾・湿の繰返しによる長さ変化が大きく現われる。

4. 乾・湿の繰返しによる耐硫酸塩性指数について

前節では、水中ならびに硫酸塩溶液中浸漬と乾燥を繰

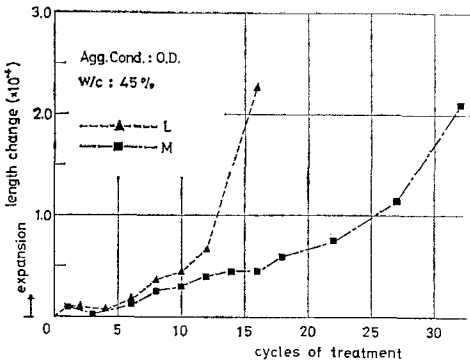


図-12 長さ変化とサイクル数との関係
(w/c : 45%, 骨材含水状態 : 絶乾)

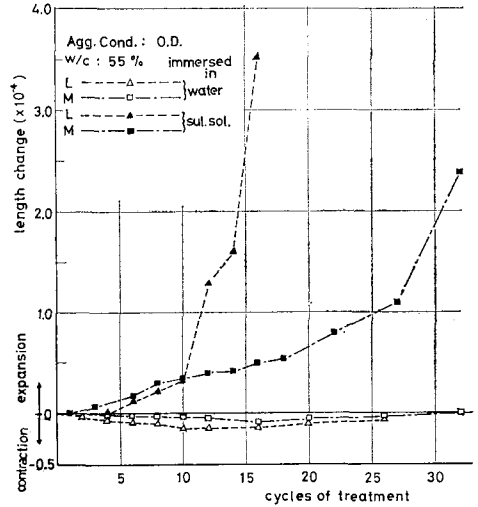


図-14 長さ変化とサイクル数との関係
(w/c : 55%, 骨材含水状態 : 絶乾)

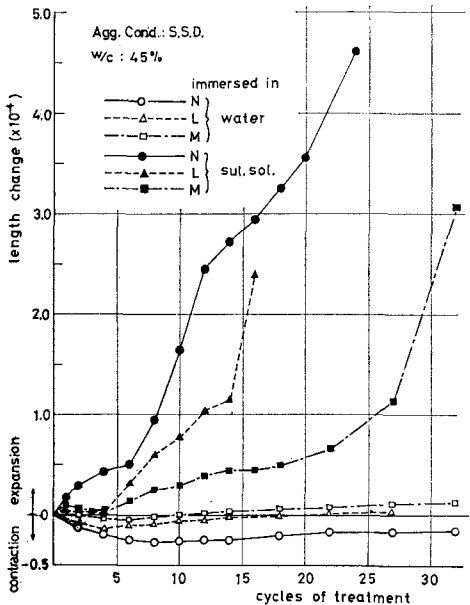


図-13 長さ変化とサイクル数との関係
(w/c : 45%, 骨材含水状態 : 表乾)

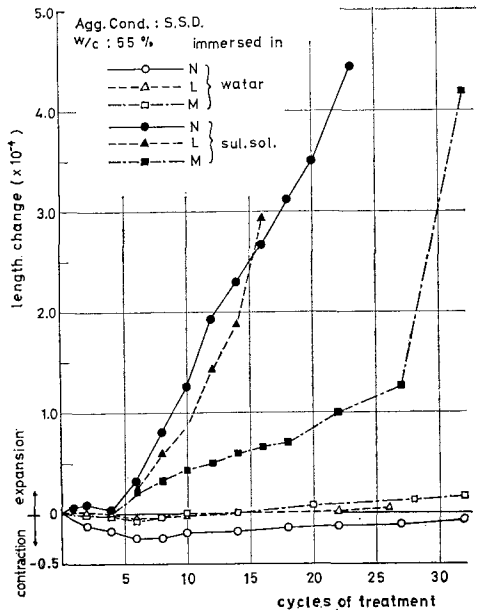


図-15 長さ変化とサイクル数との関係
(w/c : 55%, 骨材含水状態 : 表乾)

表一 基準長さ変化あるいは基準相対動弾性係数における特性値の比較

コンクリートの種別			長さ変化(膨張) 2×10^{-4}				相対動弾性係数 (80%)		
骨材種類	W/C	骨材含水状態	1 サイクルの日数 (日)		相対動弾性係数 (%)	重量増 (%)	長さ変化(膨張) $\times 10^{-4}$		
			サイクル数	相対動弾性係数 (%)			サイクル数	長さ変化(膨張) $\times 10^{-4}$	重量増 (%)
N	45	S.S.D.	2	11	71	2.5	6	0.5	1.1
			1	17	72	2.6	11	0.5	1.9
	55	S.S.D.	2	12	83	2.4	18	3.1	-0.3
			3	14	73	-0.7	13	1.5	-0.4
L	45	O.D.	2	15	83	5.4	15	1.9	5.4
		S.S.D.		15	83	2.5	15	1.8	2.5
	55	O.D.	2	14	85	6.3	15	2.5	6.3
		S.S.D.		14	86	3.9	15	2.3	2.3
M	45	O.D.	2	31	77	10.8	30	1.7	10.4
		S.S.D.		29	75	5.9	27	1.2	4.5
	55	O.D.	2	25	91	7.5	30	1.9	9.4
		S.S.D.		28	57	14.3	23	1.1	12.9

返した場合のコンクリートの物性変化を、供試体重量の変化、相対動弾性係数、長さ変化などによって検討した。これら測定値のうち、供試体の重量変化は実験条件あるいは使用骨材によってあまり差がなく、一般的な傾向が見出されなかったため、ここでは、相対動弾性係数と長さ変化について、これらの測定値が耐硫酸塩性を判定する際の特性値として採用しうるかどうかを検討してみよう。表一は、一定の長さ変化(膨張量: 2.0×10^{-4})に達する際のサイクル数と相対動弾性係数、および一定の相対動弾性係数(80%)におけるサイクル数と長さ変化を示したものである。これら一定の値をもつ特性値(以下、基準特性値と称する)は、測定結果より、崩壊の近傍と見なしうる値として選んだものである。まず、これら基準特性値における各測定値の全般的な傾向について考察を加えることにする。

長さ変化が 2.0×10^{-4} に達したときのサイクル数は、Nで11~17サイクル、Lで14~15サイクル、Mで25~31サイクルとなり、全般的にNが最も早く、Mが最も遅く基準に選んだ長さ変化に達する。一方、この時の相対動弾性係数は、NとMで約75%、Lで約84%となり、NとMはLよりも基準長さ変化における相対動弾性係数は小さい。

相対動弾性係数が80%になったときのサイクル数は、Nで6~18サイクル、Lで15サイクル、Mで23~30サイクル、この時の長さ変化は、Nで $(0.5 \sim 3.1) \times 10^{-4}$ 、Lで $(1.8 \sim 2.5) \times 10^{-4}$ 、Mで $(1.1 \sim 1.9) \times 10^{-4}$ となり、Nではばらつきがかなり大きく現われ、相対動弾性係数を基準に選んで他の特性値を検討することには、やや問題があると考えられる。

それぞれ別々に選んだ一つの基準特性値に対する他の特性値のばらつきを考えてみると、Lはいずれを選んでも、サイクル数、相対動弾性係数、長さ変化はほぼ一定

の値が得られるのに対して、NとMにおいては、ばらつきが大きく厳密な比較を行なうことはできない。そこで、2つあるいは3つの特性値を合成し、凍結融解試験における耐久性指数に相当する指数をもとにして考察を加えることにする。ここでは、これらの指数を耐硫酸塩性指数(S.D.F.)と仮称する。この際、サイクル数と相対動弾性係数を特性値に選んだ場合の耐硫酸塩性指数(1)は、次式から求めた。

$$SDF(1) = \frac{Pn}{m} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、SDF(1): 耐硫酸塩性指数(%)

P: 乾・湿の繰返し、n サイクルにおける相対動弾性係数(%)、

n: 供試体が崩壊したとき、あるいは一定の長さ変化に達したときの乾・湿繰返しサイクル数、

m: 所定のサイクル数。本試験では、最大サイクルを示したMを基準に選んで32サイクルとした。

また、耐久性は相対動弾性係数に比例し、長さ変化に逆比例するものと見なした場合の耐硫酸塩性指数(2)を式(2)から求めた。

$$SDF(2) = \frac{Pn}{ml} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、SDF(2): 長さ変化を考慮した場合の耐硫酸塩性指数、

l: 崩壊時あるいは一定値に達したときの長さ変化($\times 10^{-4}$)。

上式を用いて求めた耐硫酸塩性指数を表一に示す。

崩壊時の特性値を用いて計算した耐硫酸塩性指数(1)は、N=25%、L=35%、M=66%、耐硫酸塩性指数(2)は、N=6 $\times 10^2$ 、L=13 $\times 10^2$ 、M=25 $\times 10^2$ となる。一方長さ変化が 2×10^{-4} に達したときの耐硫酸塩性指数(1)は、N=31%、L=38%、M=66%となり、LとMは崩壊時の指数とほぼ同じ値を示すのに対して、Nではかなり大きい値となる。崩壊時の耐硫酸塩性指数(2)で比較すると、LはNの約2倍、MはNの約4倍の耐久性を示すことがわかる。同様に、長さ変化 2×10^{-4} における耐硫酸塩性指数(2)は、N=16 $\times 10^2$ 、L=19 $\times 10^2$ 、M=33 $\times 10^2$ となる。これら4つの指数を考えてみると、相対動弾性係数とサイクル数を特性値に選んだ場合よりも、それらに長さ変化を考慮したほうが、さらに崩壊時の特性値を採用したほうが、耐硫酸塩性指数の差が大きくなり、耐久性を比較するのに便利であることがわかる。

長期間硫酸塩溶液中に浸漬した試験においては、コンクリート供試体の損傷程度を、痩せ細り(軽量コンクリートに多い)と端部の脱落という抽象的な表現で説明し

表-8 耐硫酸塩性指数

コンクリートの種別			1 サイクルの日数 (日)	SDF(1) = Pn/m (%) ($m=32$)		SDF(2) = Pn/ml ($\times 10^6$) ($m=32$)	
骨材種類	W/C	骨材含水状態		崩壊時	長さ変化 2×10^{-4} のとき	崩壊時	長さ変化 2×10^{-4} のとき
N	45	S.S.D.	2	22.5	24.4	4.9	12.2
			1	38.3	38.2	8.9	19.1
	55	S.S.D.	2	17.9	31.1	5.3	15.6
			3	20.0(24.7)	32.0(31.4)	5.8 (6.2)	16.0(15.7)
L	45	O.D.	2	36.0	38.9	15.7	19.5
		S.S.D.		35.5	38.9	14.8	19.5
	55	O.D.	2	35.0	37.1	10.0	18.6
		S.S.D.		34.0(35.1)	37.7(38.2)	11.7(13.1)	18.9(19.1)
M	45	O.D.	2	75.0	74.5	35.7	37.3
		S.S.D.		67.0	68.0	21.6	34.0
	55	O.D.	2	73.0	71.0	30.4	35.5
		S.S.D.		48.0(66.0)	50.5(66.0)	11.4(24.8)	25.3(33.0)

() : 平均値を示す

たり。長期試験の結果と本促進試験の結果をあわせ考察すると、Nは長さ変化が小さいにもかかわらず相対動弾性係数の低下が著しく、これが急激な崩壊に繋がり、一方Mは長さ変化と相対動弾性係数の低下が比較的徐々に進行し、そのため痩せ細りの傾向が強く現われるものと考えられる。なお、Lの損傷の過程は、NとMのほぼ中間の様相を呈した。

5. 結 語

本研究は、将来のコンクリート、とくに海洋開発における主材料としてのコンクリートならびに人工軽量骨材の港湾・海岸構造物への積極的な利用という観点に立って、コンクリートの耐海水性のうち、とくにその影響が顕著であるといわれている硫酸塩に対する耐久性を短期間に評価しうる方法として、硫酸塩溶液中の浸漬と乾燥とを繰返した試験を提案し、この方法に基づいて行なった実験結果に対し若干の考察を加えたものである。その結果、硫酸塩溶液中に静置した場合には、6~8か月以上の長期においてはじめてコンクリートの物性に变化が現われるのに対して、硫酸塩溶液中に浸漬と乾燥とを繰返すと30サイクル程度(30~60日)で、供試体は損傷ないしは崩壊に至り、コンクリートの物性の变化が急激に現われるとともに、耐久性の評価をかなり明確に行ない得ることが明らかになった。さらに、耐久性の評価の方法としては、凍結融解試験における耐久性指数(DF)と同様に、サイクル数と相対動弾性係数を特性値に選んで、その指数から耐久性を評価することが可能であり、さら

に上記2つの特性値以外に長さ変化をも考慮すると、耐硫酸塩性をより明確に評価し得ることを示した。しかし凍結融解試験においては、最高と最低温度の選び方、およびその繰返しサイクル数と実際構造物の環境条件との関連性について議論の多いところで、現在ASTMで規定されている試験条件はきわめて苛酷な条件であって、コンクリートの耐久性の目安を決めるに過ぎないともいわれている。本研究においても、採用した試験条件と材料の耐久性、ないしは材料の寿命との関係は不明確のままである。さらに長時間硫酸塩溶液に浸漬した場合のコンクリート供試体の劣化の程度と促進試験の結果との相関性についても十分なる検討を加えることができなかった。

コンクリートの耐久性の評価に当たっては、材料の破壊に寄与する物理的・化学的作用と、その崩壊過程をさらに詳しく検討する必要があると考えられる。

本研究においては、乾燥と湿潤の物理的作用と、硫酸塩の化学的作用とが相乗すると、コンクリートは急激に劣化することを明らかにした。今後は、試験条件のみならず、コンクリートを構成する材料の特性との関連性、さらには長期試験結果との相関性をも詳しく検討するとともに、耐久性の評価の方法についても検討を加えていきたいと考えている。

本研究は、文部省科学研究費による成果の一部であることを付記するとともに、実験を実施するに際して多大の協力を得た人工軽量骨材メーカー、ならびに鳥取大学工学部土木工学科材料研究室の諸氏に対し、ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 西林新蔵・片岡宏治・清水昭：人工軽量コンクリートの耐硫酸塩性に関する二、三の考察、コンクリート・ライブラリー、第24号、1969年10月。
- 2) Bureau of Reclamation : Material Testing Procedures Manual Durability Test, Wetting and drying test.
- 3) 大浜文彦・坂村果：モルタルおよびコンクリートの乾燥湿潤のくりかえしによる残留変形について、セメント技術年報、X、1956。
- 4) BNL & USBR : Concrete-Polymer Materials, first topical report, Dec. 1968.
- 5) 西林新蔵・湯本徹男：人工軽量骨材の吸水特性とコンクリートの性質、コンクリート・ライブラリー、第24号、1969年10月。

(1972.4.24・受付)