

[1141] アルカリ骨材反応に及ぼす乾湿繰返し作用の影響に関する研究

正会員 ○西林新蔵 (鳥取大学工学部)
 正会員 矢村 潔 (鳥取大学工学部)
 正会員 林 昭富 (鳥取大学工学部)
 今岡伸二 (鴻池組)

1. まえがき

アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の損傷は、反応によって生成した物質の膨張に起因するものであるが、実際に膨張が現われるまでにはかなりの時間を要し、しかも例え膨張が発生してもコンクリートにひびわれ損傷が生ずるか否かは、コンクリート構造物の強度やそれが置かれている環境などの各種の要因によって影響される¹⁾。

アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物のひびわれ損傷は、乾湿の繰返しを受ける部分、長時間日照を受ける部分、排水溝、ダムなどのマッシュな水理構造物等水が十分に供給され、かつその水分が蒸発しやすく、アルカリが濃縮される箇所に多く認められている。

本研究は、アルカリ骨材反応によって生ずるコンクリートのひびわれ損傷のうち、環境条件による影響を明らかにせんとする研究プロジェクトの一環として計画したものである。すなわち、反応性骨材を用いたコンクリート供試体を乾湿繰返し環境下に置いたとき、供試体がどのような挙動を示すかを実験的に検討し、その損傷の程度を評価するものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した骨材は、コンクリート構造物に使用され実際にひびわれ損傷の生じたことが報告されている反応性骨材

(T1)と非反応性骨材(NT)および細骨材として非反応性の河口砂と砂丘砂の混合砂である。なお、粗骨材の最大寸法はいずれも20mmである。これらの骨材の岩石名、産地、物理的性質を表-1に示し、また化学法による反応性試験の判定図を図-1に示す。使用セメントは普通ポルトランドセメントでアルカリ含有量はNa₂O等量で0.41%のものである。また、コンクリートの全アルカリ量調節用のアルカリ化合物としては、試薬1級のNaOHを選びこれを練混ぜ水に加えて使用した。

2.2 実験計画

本実験は、反応性骨材1種類および非反応性骨材1種類を粗骨材とするコンクリートについて、各種要因を変化させた乾湿繰返し作用を与えた場合の物性の変化を測

表-1 骨材の諸特性

骨材の種類	岩石名	産地	比重	吸水率	F.M.	
反応性粗骨材	T1	斜方輝石安山岩	鳥取県産	2.60	1.93	6.76
非反応性粗骨材	NT	砂岩	鳥取県産	2.70	0.65	6.64
非反応性細骨材	NS	混合砂(河口砂、丘砂)	鳥取県産	2.58	1.00	2.82

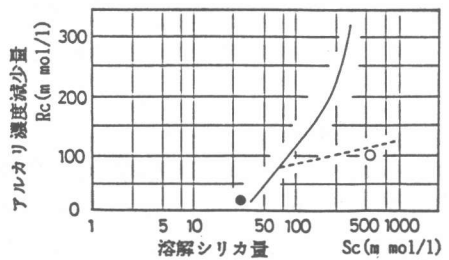


図-1 化学法の結果

表-2 実験計画

試験条件	骨材	反応性粗骨材	T1	セメントのアルカリ量(eq. Na ₂ O%)	0.41
		非反応性粗骨材	NT	添加アルカリ	NaOH
	細骨材	NS	全アルカリ量(eq. Na ₂ O%)	0.5, 1.5, 2.5	
配合条件	配合セメント量(kg/m ³)	450	反応性骨材混合割合(C)	0, 50, 100	
	スランプ(cm)	12~15	供試体寸法(cm)	10×10×40, φ10×20	
			浸漬水	水道水, 海水	
測定項目	長さ変化: 動弾性係数: ひびわれの発生および進展				

定することによって、コンクリートの劣化の進行およびその程度を把握せんとするものである。本実験における主な要因は、反応性骨材の混合割合、アルカリ量、乾燥温度、浸漬水である。これらの要因と水準を表-2に示す。コンクリートの配合については、単位セメント量 450kg/m^3 とし、非反応性骨材 (NT) を用い、アルカリの無添加の状態におけるスランプが12~15cmになるように試し練りによって決定した。なお、アルカリの添加によってこわばりが生ずるが、それによるスランプの変化に対する水量の補正は行っていない。コンクリートの示方配合を表-3に示す。

2. 3 実験方法

乾湿繰返し試験方法については、図-2のフローチャートに示すように、コンクリート打設後、恒温室で24時間養生した後に脱形し、その後3日間水中養生し、4日目に初期測定を行ってから試験を開始する。まず、コンクリート供試体を乾燥炉 (60℃) あるいは気中 (20℃) に24時間置いて乾燥状態にし、次に各浸漬溶液中 (20℃) に24時間浸漬し湿潤状態にする。この操作を乾湿繰返し1サイクルとする。

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)			
					H	C	S	G
20	12~15	2	45	40	203	450	660	969

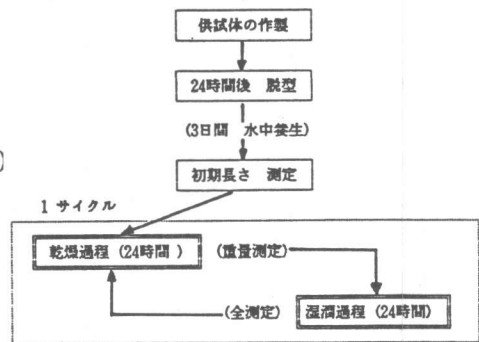


図-2 乾湿繰返し試験方法

なお、重量測定は乾燥後湿潤開始の直前に、全測定は湿潤後乾燥開始の直前に、2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50サイクルにおいて行った。ここで全測定とは、長さ変化、重量、動弾性係数、ひびわれ発生後はひびわれのスケッチ、写真撮影、トラバース法によるひびわれ特性の評価を行うことである。

また、供試体記号については、(反応性骨材の種類) - (混合割合) - (アルカリ含有量) - (乾燥方法) の順で示す。例えば、T1-100-1.5-Dは骨材T1、混合割合100%、アルカリ含有量 (Na₂O当量) 1.5%、炉乾燥 (Aは気中) である。また、湿潤過程における淡水浸漬はD-W、海水浸漬はD-Sで表わす。

3. 実験結果とその考察

3. 1 コンクリートの膨張率および動弾性係数

供試体T1-100-0.5-Dにおける諸物性の経時変化を図-3に示す。この供試体はアルカリ量が0.5%と低いため水中浸漬 (D-W)、海水中浸漬 (D-S) とともに膨張が生じておらず、動弾性係数は $3.7 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ の一定値をとっている。また、目視観察によってひびわれの発生は認められていない。従って、この供試体はアルカリ骨材反応によって損傷は全く受けていないことがわかる。

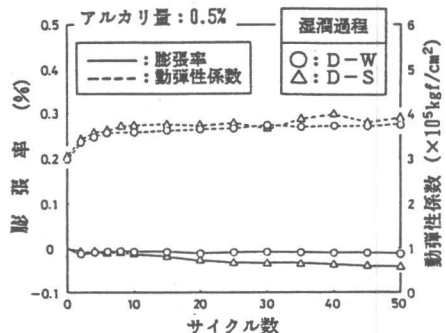


図-3 膨張率と動弾性係数の経時変化

次に、供試体T1-100-2.5-Dにおける諸物性の経時変化を図-4に示す。この供試体下においては、乾湿繰返し試験処理4サイクルから膨張が開始し、約20サイクル以降膨張率0.35%で収束している。動弾性係数は膨張が発生すると同時に低下し始め $2 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ で収束している。浸漬水の違いのD-W、D-Sとも全体的な傾向は類似している。外観上ではアルカリ骨材反応に

よるひびわれが発生している。これらより、この供試体においてはアルカリ骨材反応によってかなりの損傷を受けていることが予測される。このようにアルカリ量、浸漬水の違いによってアルカリ骨材反応の程度、さらにはコンクリートの諸物性がかなり異なることがわかる。

3. 2 乾燥および湿潤方法の影響

乾湿繰返し試験は、乾燥過程と湿潤過程の繰返しであり、本研究では乾燥過程は炉乾燥（60℃）と気中乾燥（20℃）の2つの方法で、湿潤過程は淡水浸漬（D-W）と海水浸漬（D-S）の2つの方法で試験を行った。そこで本節では、これらの各過程における乾燥、湿潤方法の違いによる影響について検討する。

まず、乾燥過程についてみる。乾燥温度を60℃に決定したのは、真夏のコンクリートの表面温度がほぼこのぐらいに達することがあることと、この温度以上になるとコンクリート中の遊離水、間隙水の逸散が激しくなり、結合水にまでも影響を与え、コンクリート中の組織構造そのものにかなりの影響を与える恐れ

があるからである。炉乾燥（T1-100-1.5-D）と気中（T1-100-1.5-A）の2つの方法における諸物性の経時変化を図-5に示す。なお、湿潤過程は両者とも水中浸漬である。これより、供試体の気中での挙動は、長さ変化（膨張）は生ぜず、動弾性係数は $3.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 前後でほぼ一定であることが分かる。一方、炉乾燥の供試体は膨張率は徐々に増加し、50サイクルでは気中のものよりも約0.05%大きく、動弾性係数は徐々に低下し、50サイクルで約 $0.7 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 小さくなる。従って、炉乾燥の供試体においては気中のものよりもアルカリ骨材反応による損傷の程度がやや著しいことがわかる。これは、炉乾燥によってコンクリート中に含まれる水分がかなり蒸発しそのためアルカリが濃縮されてアルカリ骨材反応が促進され、膨張率は増加するとともにアルカリ骨材反応によるコンクリート内部の組織劣化によって動弾性係数は低下したのと考えられる。

次に、浸漬水の影響を考察するために、両者の膨張率の差（D-W）-（D-S）の経時変化（図-6）と動弾性係数の比

（D-W）/（D-S）の経時変化（図-7）を考察することにする。図-6より膨張率は供試体T1-100-2.5-Dを除く全ての供試体においてD-Wの方がD-Sよりも大きく、T1-100-2.5-D

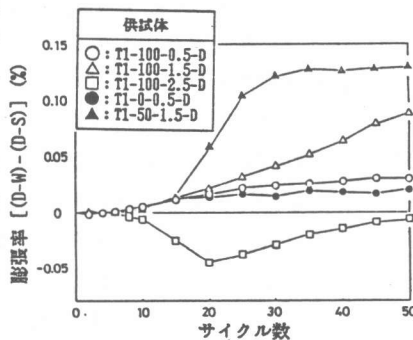


図-6 浸漬水の影響（膨張率）

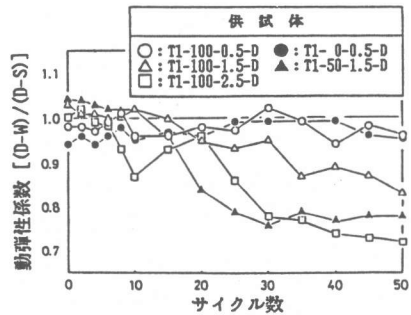


図-7 浸漬水の影響（動弾性係数）

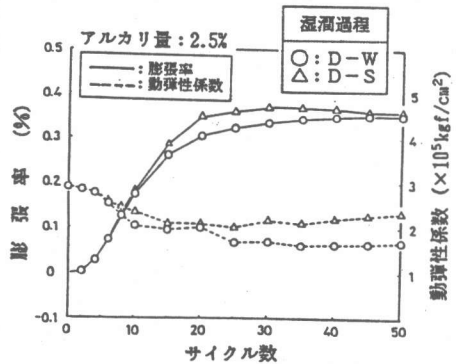


図-4 膨張率と動弾性係数の経時変化

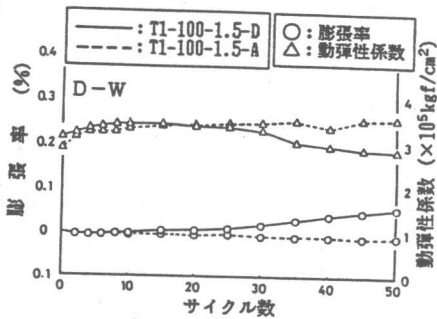


図-5 乾燥方法の影響

においても
20サイクル
ぐらいまでは
D-Sの方が
膨張率は大き
いが、50
サイクルでは
ほぼ同じにな
る。また図-

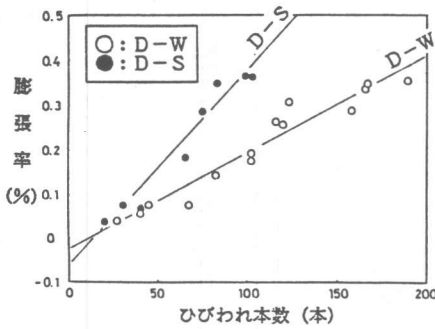


図-8 浸漬水の影響 (ひびわれ本数)

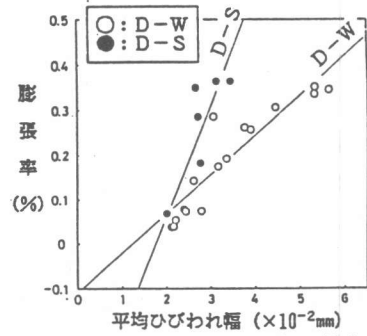


図-9 浸漬水の影響 (平均ひびわれ幅)

7より、動弾性係数については全ての供試体が(D-W)/(D-S)の値が1以下になり、D-Wの方がD-Sより小さくなっていることがわかる。ここでひびわれ特性について見てみる。膨張率とひびわれ本数の関係を図-8に、また膨張率と平均ひびわれ幅の関係を図-9に示す。これより、膨張率が增大すればひびわれ本数および平均ひびわれ幅は大きくなり、正の相関があることがわかる。また同じ膨張率でもD-WのほうがD-Sよりひびわれ本数、平均ひびわれ幅はとも大きい。これらのことより、50サイクル程度の乾湿の繰返し処理においては、水中浸漬の方が海水中浸漬よりもアルカリ骨材反応による損傷が大きいといえる。この結果について、乾湿繰返し試験で用いた供試体と同配合の供試体を20℃水中あるいは20℃海水中に浸漬した長期試験においては、海水中浸漬の供試体の方が水中浸漬のそれよりもアルカリ骨材反応による損傷が著しく、乾湿繰返し試験とは逆の結果が得られた。これらについては、乾燥過程における高温の影響や海水中の塩類とセメント成分との化学反応によって生成した水酸化マグネシウムの影響、さらには乾湿繰返しサイクルが短いこと等種々の原因が考えられるので、反応生成物を同定したり、長サイクルの乾湿繰返し試験を行ってこの原因を究明すべく計画を立てている。

3. 3 劣化程度の評価

凍結融解繰返し作用におけるコンクリートの耐久性評価方法を参考にして、乾湿繰返し作用を受けたコンクリートの劣化の程度を評価することを試みる。まず、乾湿繰返し試験における膨張率と動弾性係数の関係について見てみる。ここで、動弾性係数については、コンクリートの水和反応と強度がほぼ一定に達した状態における動弾性係数に対する相対動弾性係数を考え、乾湿繰返し試験

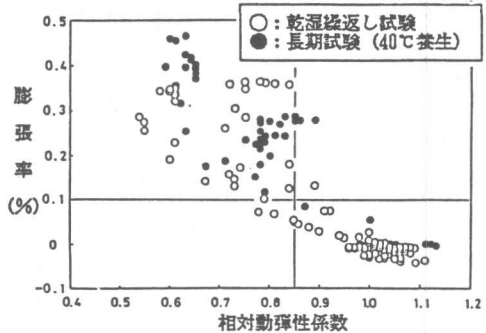


図-10 膨張率と相対動弾性係数の関係

においては4サイクルの動弾性係数を基準に採った。膨張率と相対動弾性係数の関係を図-10の○で示す。これより、膨張率が增大すれば相対動弾性係数は低下し、両者の間には負の相関があることがわかる。これらのプロット点を、膨張率0.1%と相対動弾性係数0.85で区切ってみると、膨張率0.1%以下、相対動弾性係数0.85以上で囲まれる領域と、膨張率0.1%以上、相対動弾性係数0.85以下で囲まれる領域に膨張率と相対動弾性係数の関係は大別される。すなわち、相対動弾性係数が0.85以下であれば膨張率0.1%以上であるものがほとんどであり、この領域のものではひびわれが発生している。これより、膨張率が0.1%以上、相対動弾性係数が0.85以下に低下したときに、コンクリートはアルカリ骨材反応によってかなり劣化が進行しているものと考えられる。

ここで、耐久性指数 (DF) を参考にして、乾湿繰返し劣化指数 (DW-DF) を考える。DW-DF は次式によって表わされる。

$$DW-DF = \frac{P_a \cdot N}{M} \times 100$$

P_a : N サイクルにおける相対動弾性係数
 N : 相対動弾性係数が 0.85 に低下した時のサイクル数
 ただし、0.85 に達しないものについては最終サイクル数
 M : 試験処理回数 ($M = 50$ サイクル)

ここで、この指数 (DW-DF) がどのような指標であるかを考えるために、各供試体の最終膨張率と DW-DF の関係を求めこれを図-11 に示す。これより、最終膨張率と DW-DF

の間には負の相関が高いことがわかる。膨張率が大きくなればひびわれ本数、ひびわれ幅は大きくなり、アルカリ骨材反応による劣化が進んでいることが確認されている。従って DW-DF の値が小さいほどコンクリートのアルカリ骨材反応による劣化が進んでいると考えられる。

3. 4 長期試験と乾湿繰返し試験との関係

コンクリート供試体を使用した反応性の評価方法としては現在 $10 \times 10 \times 40$ cm のコンクリート供試体を 40°C R. H. 100% で保存し、その供試体の挙動を調べ検討している。今回行った乾湿繰返し試験の結果が長期試験の結果と対応し、明確な関連性があれば、より短期間にコンクリートの反応性の評価が可能になる。そこで本節では、長期試験結果と乾湿繰返し試験結果を比較しその関連性について検討する。

長期試験における膨張率と相対動弾性係数の関係を図-10 の●で示す。これは乾湿繰返し試験に使用した供試体と同配合の供試体を 40°C R. H. 100% で養生した長期試験の結果を示したものである。また相対動弾性係数は材令 1 か月における動弾性係数を基準に採った。これより、○で示す乾湿繰返し試験と同じように、膨張率が增大すれば相対動弾性係数は低下し負の相関が高いことがわかる。また、膨張率と相対動弾性係数の関係は、膨張率 0.1% 以下、相対動弾性係数 0.85 以上で囲まれる領域と、膨張率 0.1% 以上、相対動弾性係数 0.85 以下で囲まれる領域に大別される。従って、長期試験と乾湿繰返し試験の両者の試験において、膨張率が 0.1% 以上、相対動弾性係数が 0.85 以下に低下したときにアルカリ骨材反応による劣化がかなり進行していると考えられる。

またここで、乾湿繰返し試験で最も膨張を示した供試体 T1-100-2.5 について長期試験結果および乾湿繰返し試験結果を次の 5 項目について比較する。

1. 膨張率が増加傾向を呈するまでの時間
2. 動弾性係数が低下傾向を呈するまでの時間
3. 膨張率が 0.1% に達するまでの時間
4. 相対動弾性係数が 0.85 に達するまでの時間
5. ひびわれが発生するまでの時間

その結果を表-4 に示す。これより乾湿繰返し処理 1 サイクルに相当する日数は、平均すると 0.25 (か月) = 7 日となる。そこで 1 サイクルを 7 日と仮定し両試験を比較する。図-12 に示す膨張率、動弾性係数、相対動弾性係数の経時変化から、両者には若干の差はあるものの全体的な傾向はほとんど同じであることがわかる。

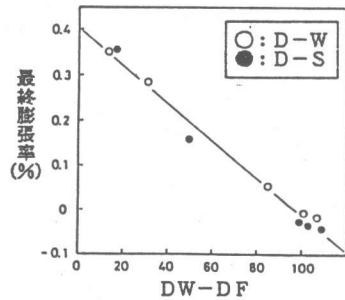


図-11 最終膨張率と DW-DF の関係

表-4 長期試験と乾湿繰返し試験結果

	長期試験 (ヶ月)	乾湿繰返し試験 (cycle)	
		D-W	D-S
1 膨張率 増大しはじめ	0.5	2 (0.25)	2 (0.25)
2 動弾性係数 低下しはじめ	0.5	2 (0.25)	4 (0.13)
3 $Exp=0.1\%$	2	8 (0.25)	8 (0.25)
4 $RE_0=0.85$	2	8 (0.25)	10 (0.20)
5 ひびわれ発生	2	6 (0.33)	6 (0.33)

() 内は 1 サイクルに相当する月数

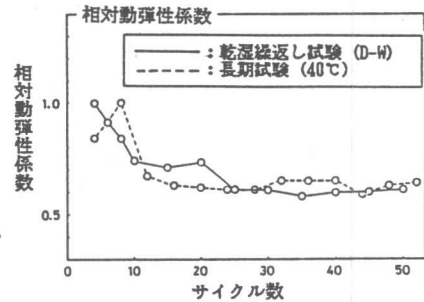
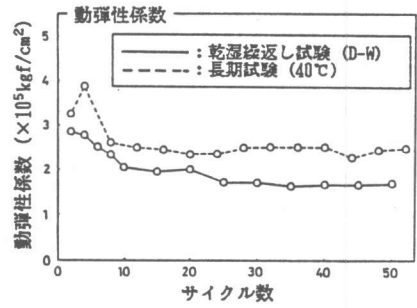
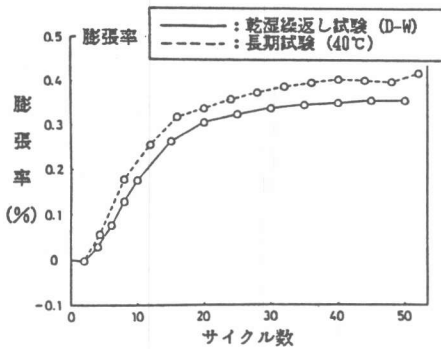


図-12 長期試験と乾湿繰返し試験の関係

4. まとめ

本研究は、反応性骨材を使用したコンクリート供試体を乾湿繰返し環境下に置いたときその諸物性の挙動について検討したものである。以下本研究の結論とする。

(1) 乾湿繰返し環境下におけるコンクリート供試体の諸物性の挙動は、反応性骨材の混合割合、アルカリ含有量によって大きく異なる。

(2) 乾燥過程においては温度の影響がかなりあり、炉乾燥中 (60°C) の供試体は気中 (20°C) のものよりもアルカリ骨材反応による劣化が顕著である。

(3) 湿潤過程における浸漬水の影響は、本試験で採用した乾湿サイクル数 (1サイクル: 乾燥1日、湿潤1日、合計50サイクル) においては、水中浸漬の方が海水中浸漬よりも反応による劣化が著しい。

(4) 乾湿繰返し環境下でのコンクリートの劣化の程度は劣化指数 (DW-DF) を用いることによってある程度評価できる。

(5) 乾湿繰返し処理1サイクルに相当する日数は7日となる。

なお、今後、サイクル数、乾燥温度、湿潤方法を種々変えて試験を行うことによって、乾湿繰返し環境下におけるアルカリ骨材反応の全観が把握できるとともにこれを応用した促進試験方法の開発に発展させていきたいと考えている。

最後に本実験を遂行するにあたって多大の協力を賜った鳥取大学工学部土木工学科材料研究室の諸氏に感謝の意を表する次第である。また、本研究は文部省科学研究費補助金によって行ったものの一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 森永 繁: コンクリート工学, Vol.24, No. 11, 昭和61年11月, pp 29~32