

[43] アルカリ骨材反応性の早期判定法に関する研究

正会員 佐治泰次 (九州大学工学部)

正会員 ○ 松藤泰典 (九州大学工学部)

立野謙吾 (近畿大学工学部)

1. 序

近年、国内においてもアルカリ骨材反応によるコンクリートの被害例が報告され、これまで余り問題視されなかつた、コンクリート用骨材の膨張反応に対する検討が再び¹⁾緊急な課題として取上げられるようになった。

アルカリ骨材反応には、①アルカリ・シリカ反応、②アルカリ炭酸塩反応、③アルカリ・珪酸塩反応の3つの型があるといわれている²⁾。最近、問題になつてきているのは、主として、アルカリ・シリカ反応で、 α -クリストバライト等の不安定シリカ鉱物がコンクリート中のアルカリと反応して膨張性のゲル状物質を生成し、骨材周辺に膨張圧が作用してコンクリートにひび割れが発生するものである。

本研究では、著者等が収集した細骨材を中心に、モルタルバー法によつてアルカリ骨材反応性を検討し、更に、骨材の吸水膨張試験法をアルカリ骨材反応性の早期判定法として提案した。

2. 骨材の物理的性質

海砂、川砂、山砂、砕砂などの細骨材30種類、その他3種類、計33種類について物理試験を行なつた結果を表-1に示す。

絶乾比重、吸水率に関して JASS5・細骨材 I 級に該当するもの22種類、約73%、II 級に該当するものはなく、III 級骨材に該当するもの6種類、20%である。III 級骨材の品質を満足しないものが2種類あつた。なお、表-1の区分について、砂丘砂等の浜砂は海砂に、陸砂は山砂に含めている。

3. モルタルバー法による反応性骨材の判定

アルカリ骨材反応に関する試験で、最もよく行われる方法は、ASTM・C-227 セメント骨材の潜在アルカリ反応試験方法(モルタルバー法)である。国内では、JASS5N に同様の試験規格があるが、ここでは、C-227-71 に準じて行なつた。

割合は重量比 C : S : W = 1 : 2.25 : 0.50とした。

試験体は各試料につき $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ 直方体試験体2個とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。セメント中のアルカリ濃度は、NaOHを添加してNa₂O換算2%とした。

試験体は、打設の翌日脱型し、材令2日で基長測定後、温度38 $\pm$ 1℃の湿気箱に貯蔵し、1週間毎に長さ変化を測定した。

試験体は、多くの場合、材令4週間後まで収縮傾向を示し、以後は収縮傾向を停止するか、あるいは膨張傾向に転じた。これら試験結果から、顕著な膨張を示さないもの(Ia)、膨張を示し、その最大膨張率が 2×10^{-4} 以下のもの(Ib)、 5×10^{-4} 以下のもの(II)、同 5×10^{-4} を越えるもの(III)及び測定開始以後、連続して収縮し -5×10^{-4} を越えるもの(IV)に区分して表-2に示した。

表-1 細骨材の物理試験結果

試料 No.	区分	産地	表乾比重	絶乾比重	吸水率 (%)
1	海砂	福岡 A	2.58	2.56	0.60
2		福岡 B	2.55	2.52	1.37
3		福岡 C	2.51	2.46	2.15
4		大分 A	2.53	2.51	0.91
5		大分 B	2.67	2.65	0.91
6		熊本 A	2.50	2.43	2.94
7		鹿児島 A	2.45	2.37	3.31
8		鳥取 A	2.58	2.56	0.65
9	川砂	福岡 D	2.54	2.50	1.47
10		佐賀 A	2.54	2.48	2.56
11		大分 C	2.49	2.45	1.83
12		熊本 B	2.59	2.53	2.25
13		熊本 C	2.56	2.52	1.68
14		熊本 D	2.65	2.62	1.27
15		宮崎 A	2.50	2.45	1.84
16	山砂	福岡 E	2.55	2.53	0.86
17		福岡 F	2.58	2.57	0.50
18		福岡 G	2.62	2.61	0.35
19		福岡 H	2.58	2.53	1.84
20		佐賀 B	2.56	2.54	0.91
21		熊本 E	2.94	2.90	1.52
22		熊本 F	2.39	2.25	6.16
23		宮崎 B	2.56	2.50	2.51
24		鹿児島 B	2.58	2.54	1.42
25	砕砂	福岡 I	2.80	2.76	1.32
26		佐賀 C	2.52	2.52	0.02
27		熊本 G	2.81	2.77	1.32
28		熊本 H	2.51	2.48	1.16
29		鹿児島 C	2.65	2.61	1.47
30		大阪 A	2.63	2.59	1.40
31	標準砂	山口・豊浦	2.61	2.60	0.50
32	白土	大分・別府	2.30	-	-
33	オパール	大分・南島	1.95	1.72	13.58

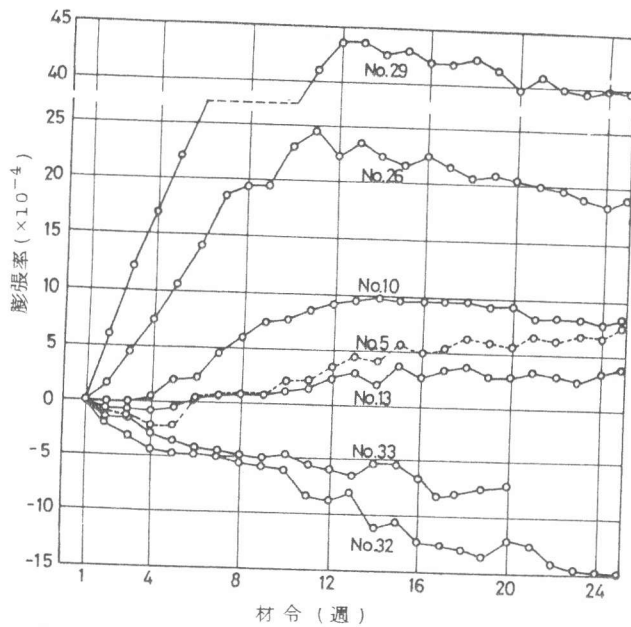


図-1 モルタルバー試験による膨張率の経時変化

なお、X線回折分析試験で α -クリストバライトの存在が確認されたものについて(+)、確認されなかつたものを(-)として表-2中に示した。膨張率の経時変化を、区分Ⅲ、Ⅳの試験体について図-1に示す。最大膨張率は、材令15週間前後に現われている。

膨張ひび割れは、試験体No.26が材令10週で、同No.29が15週で、No.10が16週で観察された。

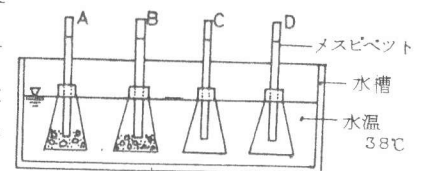
モルタルバー法では、材令6カ月で 10×10^{-4} 以上の膨張を示した場合、有害な反応を起こす可能性があると判断する。また、3カ月で 5×10^{-4} 以上の膨張を示した場合には、有害な反応を起こす潜在能力があると判断する。セメント中のアルカリ濃度が Na_2O 換算2%という市販セメントの2倍以上の高濃度雰囲気中の結果であるから、この試験結果から直ちにこれらの骨材を使用したコンクリートについて、被害発生の可能性を論ずることはできないが、5種類の骨材が 5×10^{-4} 以上の膨張を示した。

4. 骨材の吸水膨張試験

岩石の吸水吸湿による体積膨張には、吸水膨張現象と膨潤現象とがあり、それぞれ異なつた膨張機構が考えられている。³⁾ 吸水膨張現象は空隙に吸水が行われることによつて生ずるもので、有効空隙が水で飽和された時点で膨張は終了する。一方、膨潤現象はさらに実質部分の構成鉱物が水を取り込んで体積増大を示すもので、Na-モンモリロナイトなどはこの最も著しい例として原容積の7~10倍に膨潤することが知られている。岩石や骨材の吸水膨張あるいは膨潤現象を測定するための規格化された試験方法は未だ示されていない。試験方法としては付加圧力、含水状態、温度等が標準化されなければならない。著者等が行なつた試験方法の説明図を図-2に示す。試験方法の手順は以下の通りである。容量500 mlの三角フラスコに1/3程度まで水あるいは試験溶液を入れ、次いで絶乾状態の試料500 gを入れる。三角フラスコの口元まで水あるいは試験溶液を満し、口元を押えてよく振つて気泡を追い出した後、メスピベットを差し込んだゴム栓をする。ゴム栓を押し込むことによつて、

表-2 モルタルバー試験結果

区分	試料 No.	膨張開始 材令 (週)	最大膨張 材令 (週)	膨張率 ($\times 10^{-4}$)	α -クリ ストバ ライト
Ia	21	3	16	1.3	
	6	5	16	1.5	
	25	4	16	1.6	
	16	3	14	1.6	
	19	6	16	1.6	
	18	6	16	1.8	
Ib	1	7	13	1.8	
	9	1	15	1.5	
	2	5	16	1.6	-
	3	3	14	1.6	
	27	4	13	1.8	
	28	4	15	1.8	
	20	4	15	1.9	-
	17	3	16	2.0	-
	12	5	16	2.0	
	30	2	7	2.0	+
II	31	4	12	2.2	
	15	4	15	2.4	
	4	4	16	2.4	-
	8	4	15	2.6	
	22	4	13	2.6	
	14	5	15	2.7	
	7	4	14	2.8	
	11	4	11	3.0	-
	24	4	15	3.1	
III	23	4	15	3.5	
	13	4	15	5.0	+
	5	5	23	9.0	-
	10	3	14	9.9	+
	26	1	11	24.8	+
IV	29	1	13	41.8	+
	33	1	9	-5.0	+
	32	1	19	-12.9	+



- A : 試験溶液 + 試料
- B : 精製水 + 試料
- C : ダミー (試験溶液)
- D : ダミー (精製水)

図-2 吸水膨張試験説明図

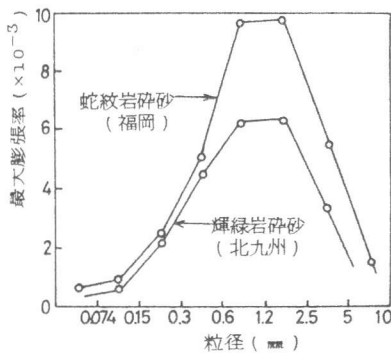


図-3 骨材粒径と最大膨張率

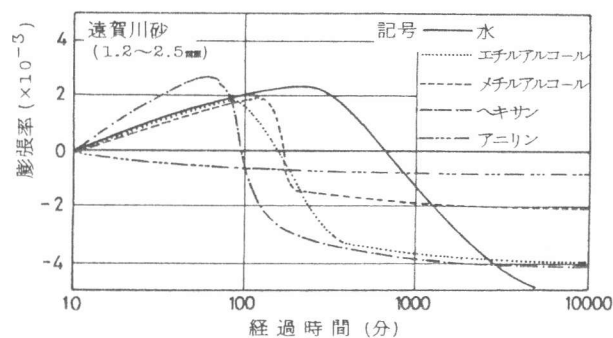


図-4 浸漬液による膨張曲線の差異

ビベットの水位が上昇するので、吸い取るなどの方法で基準の水位に調整した後、ビベットの基準水位からの水位の変化を測定する。試料の膨張率は、水位の上昇分の容積を試料の絶対容積で除して求める。液浸漬開始10分後を基準とするが、試料温度を水温に近づけておく方が安定が早い。

細骨材の吸水膨張は粒径によつて異なる。骨材粒径と最大膨張率との関係を図-3に示す。粒径1.2mm前後の吸水膨張現象が活発で、それより粒径が大きくなつても小さくなつても膨張現象は低下する。0.15mm以下の微粒分ではほとんど吸水膨張を示していない。これより、細骨材の吸水膨張の機構が粒子状態での表面性状に依存していることがうかがえる。

骨材の吸水膨張が有効空隙への水の浸透によつて生ずるとした場合、粘性や表面張力の異なる溶液中では浸透速度に差が生じ膨張性状に影響が現われる。浸漬液に水以外の試薬溶液を用いた場合の吸水膨張の経時変化を図-4に示す。粘性、表面張力ともに小さいヘキサンは浸透速度が速いと予想され、膨張率、膨張速度ともに大きく、同時に膨張減少も速い。これに対し、粘性が大きいアニリン中ではほとんど膨張しない。このように骨材の吸水膨張曲線は、浸漬液の種類によつて異なつた傾向を示すことが明らかである。

5. アルカリ溶液中の骨材の吸水膨張性状

Na_2O 換算2%のNaOH水溶液中の細骨材試料の膨張率の経時変化を図-5に実線で示す、図中、点線は精製水中の膨張曲線である。溶液の温度による容積変化の影響は溶液のみを満したダミー（図-2、C、D）の水位変化を測定して補正した。骨材試料はモルタルバー法に用いた試料と同一のものを使用した。精製水中の骨材試料は、吸水開始後100～300分程度で最大の膨張率を示した後、減少しはじめ、吸水開始後24時間程度で（-）に転ずる動きを示すのに対し、アルカリ溶液中での骨材の吸水膨張性状は骨材の種類によつて異なつた挙動を示す。大別すれば、僅かに膨張し、短時間で極大値に達した後、減少するもの（図-5中、試料No.20）、水中の膨張率より小さいが膨張側で定常状態となり継続するもの（同、No.10）、水中の膨張率より大きい膨張率を示すもので、水中の膨張曲線と類似の傾向を辿るもの（同、No.29）と膨張を継続するもの（同、No.31）の4つの型に分けることができる。試料の多くはNo.20の試料と同様の挙動を示している。これらの骨材はモルタルバー法で区分Ia～IIに含まれるものが多く、アルカリ骨材反応を示さない骨材の膨張率-時間曲線と見ることが出来る。他の3つの型はアルカリ溶液と何らかの反応があることを示していると思われる。

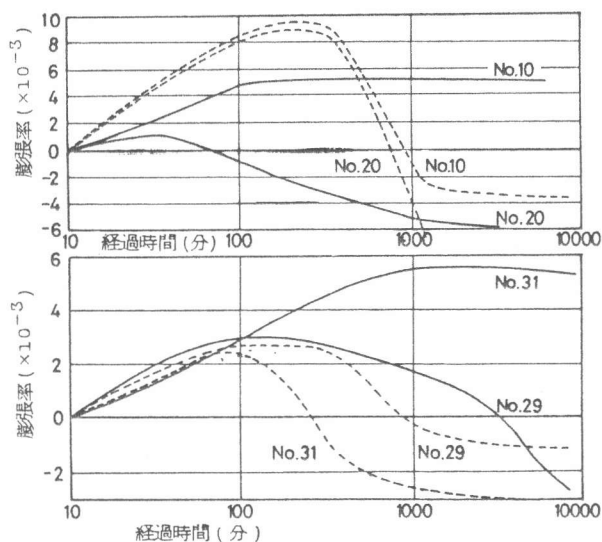


図-5 吸水膨張の経時変化

6. 吸水膨張試験とモルタルバー法との対応

最大膨張率とその到達時間の測定結果を表-3に示す。

精製水中の最大膨張率及び時間を基準として、アルカリ溶液中での最大膨張率及び時間との比を求め、両対数グラフ上にプロットすれば、図-6が得られる。

モルタルバー法で区分Ⅲに含まれた骨材試料及びX線回折分析でα-クリストバライトの存在が確認された骨材試料のいずれも、最大膨張率比あるいは最大膨張時間比のいずれか一方が1.0以上(ここでは実験誤差を考慮して0.9以上とした)の領域に分布している。

モルタルバー法と吸水膨張試験における最大膨張率比、最大膨張時間比のいずれかが1.0以上を示したものの潜在有害性の対応関係はよいようである。

吸水膨張試験は、24時間程度で結果が得られるので、早期判定法として有効であると思われる。

吸水膨張試験で潜在有害性を判定する場合、区分Ⅰ、Ⅱの試料が数例、潜在有害領域に入っており、無害であるにもかかわらず潜在有害の判定をする可能性がある。これは吸水膨張曲線の特性を2つの要素のみで表示したことによると考えられるので、この領域に含まれた場合、膨張曲線の特性を十分再検討する必要がある。

7. まとめ

著者等が収集した細骨材30種類について、先ずモルタルバー法によるアルカリ骨材反応性を検討した。その結果、5種類の骨材について有害な反応を起こす潜在能力を有することがわかった。また、X線回折分析結果、その内の4種類についてα-クリストバライトの存在が確認された。

モルタルバー法では、判定に3カ月以上の長時間を必要とするところから、早期判定法の開発が望まれるところである。この点に関して、骨材を精製水とアルカリ溶液に浸漬し、両者の吸水膨張曲線を求め、精製水に対するアルカリ溶液中の最大膨張率あるいは最大膨張時間の比が1.0以上の場合に、モルタルバー法で潜在有害性を有する骨材あるいはα-クリストバライトを含んだ骨材と対応することを指摘し、早期判定法として活用があることを示した。

〔参考文献〕

- 1)セメント技術協会：アルカリ骨材反応とコンクリートの過度膨張、セメント技術協会、パンフレット第3号、1952,1 P54~60
- 2)V.S.Ramachandran,R.F.Feldman,J.J.Beaudoin:Concrete Science,Heyden & Son Ltd.1981,P340~352
- 3)三木幸蔵：わかりやすい岩石と岩盤の知識、鹿島出版会、1979,Sept,P173~187
- 4)松藤泰典、立野謙吾：日本建築学会大会講演梗概集(北陸)、1983,Sept,P57~58

表-3 吸水試験(最大膨張率)

ラング	試料	精製水中		2% NaOH 溶液中	
		時間 (時:分)	膨張率 ($\times 10^{-3}$)	時間 (時:分)	膨張率 ($\times 10^{-3}$)
Ia	21	2:40	2.08	2:10	2.72
	6	1:30	4.49	0:40	1.26
	25	3:10	2.71	0:40	0.11
	16	1:00	1.27	0:10	0.12
	19	1:10	1.75	1:30	1.52
	18	1:00	0.52	0:10	0.13
Ib	1	1:20	1.41	8:00	1.02
	9	2:10	2.60	1:10	2.48
	2	1:20	1.95	0:30	0.63
	3	1:00	0.64	0:40	0.24
	27	2:40	1.86	1:00	1.44
	20	4:40	4.11	1:10	1.53
	17	5:10	4.94	0:40	1.03
	12	6:40	5.93	3:40	1.50
	30	1:20	2.53	30:40	5.69
	31	5:00	1.25	0:10	0.01
Ⅱ	15	5:50	5.61	0:50	1.08
	4	3:10	3.77	0:20	0.30
	8	1:20	2.65	1:20	2.00
	7	3:40	9.62	0:30	1.23
	11	2:40	5.14	0:20	0.30
	23	6:30	10.75	2:10	3.82
Ⅲ	13	6:00	11.59	21:15	8.95
	5	5:10	1.27	1:40	1.17
	10	4:10	9.43	4:10	5.45
	26	0:20	0.18	3:40	0.38
	29	4:00	2.70	2:40	2.86
Ⅳ	33	24:45	21.88	1:10	293.00
	32	6:00	56.59	26:00	39.56

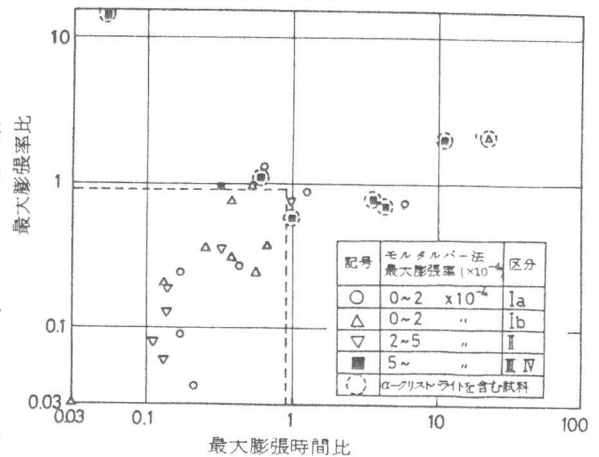


図-6 最大膨張率比と最大膨張時間比の関係