

ASRを生じたコンクリートの動弾性係数および 超音波伝播速度に関する一考察

A VIEW ON THE ASSESSMENT OF DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY AND ULTRASONIC PULSE VELOCITY OF ASR AFFECTED CONCRETE

小林一輔*・森 弥広**

By Kazusuke KOBAYASHI and Yahiro MORI

On the basis of experimental results, the study shows that the use of dynamic modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocities is not valid for judging the quality of concrete in which alkali-silica reaction has occurred. As alkali-silica reaction progresses, the constitution of concrete gradually changes in respect to the proportions of crystalline and noncrystalline materials by the latter becoming greater. It implies that concrete become more viscous. Because of this, it is concluded that dynamic modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity are very insensitive indicator of the level of deterioration of ASR affected concrete.

Keywords: alkali-silica reaction, assessment of damaged concrete, ultrasonic pulse velocity method, dynamic modulus of elasticity

1. はしがき

アルカリ骨材反応を生じたコンクリートの共鳴振動法による動弾性係数測定値ならびに超音波伝播速度測定値のもつ意味について論じたものである。アルカリシリカ反応が生じると、コンクリート組織内部において結晶質に対する非晶質の占める割合が増大するために、これらの動的の方法によって求めた値は静弾性係数のような静的の方法によって求めた値に比べて見掛け上大きい値を示すことを指摘したものである。

2. 予備実験

アルカリシリカ反応によって膨張を生じたり、表面にゲルの浸出などが認められる供試体について、静弾性係数と動弾性係数の測定を並行して実施している過程において、著者らは両者の間に異常な差があることに気が付いた。以下に、これを予備的な検討としてここに示し、問題点の所在を明らかにしたうえで、次の章で系統的な実験を行った結果を報告することにする。

(1) 予備実験の方法

a) 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは、 Na_2O 等価アルカリ量(R_2O 量)が0.57% ($\text{Na}_2\text{O}=0.24\%$, $\text{K}_2\text{O}=0.50\%$)の普通ポルトランドセメントを用いた。

反応性骨材としては、表—1に示すような安山岩とチャートを用い、組骨材の最大寸法を15mmとした。また細骨材は一定の粒度となるように、それぞれの粗骨材を粉砕したものを使用した。偏光顕微鏡によって調べた結果、安山岩中の火山ガラスの体積占有率は約40%、チャート中の微小石英の体積占有率は約93%であった。

非反応性骨材としては、細粗骨材ともに砂岩を用いた。アルカリ強化剤としては、 NaOH と KOH (試薬特級)

表—1 反応性骨材の特徴

岩石名	産地	地質年代	主な構成物質	反応性鉱物
ガラス質 両輝石 安山岩	山形県	第三紀	斜長石・普通輝石・頑火輝石・ガラス	火山ガラス (40%)
チャート	岐阜県	古生代から 中生代	石英・ 微小石英	微小石英 (93%)

* 正会員 工博 千葉工業大学教授 土木工学科
(〒275 習志野市津田沼2-17-1)

** 正会員 工修 千葉工業大学助手 土木工学科(同上)

をそれぞれ原セメント中に含まれる Na と K の比で混入し、 $R_2O=1.64\%$ となるように調整した。骨材中に占める反応性骨材の割合（置換率）は、 $20 \cdot 60 \cdot 100\%$ とした。また、水セメント比と単位水量は、すべての配合を通じておのおの 40% および 226 kg/m^3 とした。

b) 供試体

供試体は、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ 角柱供試体を各配合について、3本ずつ作製した。これらには、長さ変化測定のために、両端面に長さ測定用プラグを埋め込んだ。

供試体は、打設後1日で脱型し、材令1週において長さ変化の基準の測定を行った後、温度 40°C ・湿度 100% の恒温恒湿槽内に保存し、促進養生試験を開始した。

c) 膨張量の測定と圧縮荷重試験

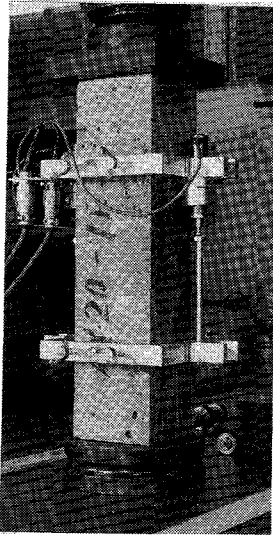
所定の材令で、コンパレータによる自由膨張量とたわみ振動による動弾性係数の測定を行った。供試体は、測

定前日に恒温恒湿槽から取り出し、温度 20°C の室内に1日静置した後、測定に供した。この場合、恒温恒湿槽から取り出した供試体は直ちに湿布を2重に巻き付けたのち、さらに湿った麻袋によって被覆して乾燥を防止した。圧縮荷重試験は、この膨張測定に用いた3本の供試体のうち1本をそのまま用いて行った。圧縮荷重は膨張ひずみがそれぞれ 0.1% 、 0.2% および 0.3% に達したときに行い、荷重の方法はいずれの場合も圧縮ひずみが 0.03% 、 0.06% および 0.10% に達するごとに除荷して、再び荷重する繰り返し漸増荷重である。

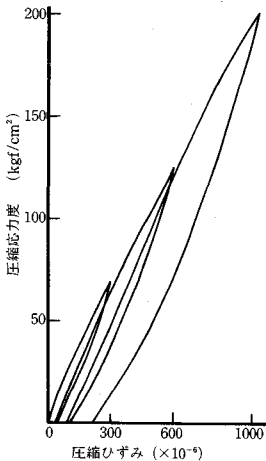
なお、写真—1は荷重試験の状況を示したものである。

(2) 予備実験の結果と考察

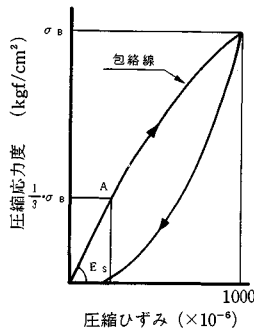
図—1はガラス質安山岩を 100% 使用し、膨張量が 0.2% に達した時点において圧縮荷重を行った結果を示したものである。静弾性係数は図—2に示すように、繰り返し荷重試験の包絡線における圧縮ひずみが 0.1% の場合の圧縮応力度の $1/3$ に相当する応力度を表わすA点と原点とを結ぶ直線の傾きとして求めた。図—3は、それぞれ静弾性係数とこれに対応する動弾性係数の値をプロットしたものである。コンクリートの動弾性係数 (E_d) と静弾性係数 (E_s) との比 (E_d/E_s) については、坂¹⁾が水セメント比を $50 \sim 70\%$ に変えた6種類の配合のコンクリートについて実験を行い、 $1.04 \sim 1.37$ という値を示している。しかし、著者らが予備実験において用いたコンクリートは水セメント比が 40% という富配合であるので、坂のデータにおいて極端に水セメント比の大きい配合を除き、水セメント比が 50 、 55 および 60% の配合のコンクリートによる値の平均値を取ると、



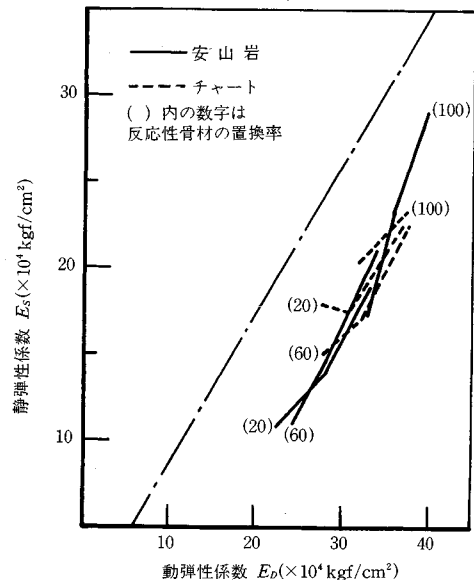
写真—1 圧縮荷重試験状況



図—1 繰り返し荷重による圧縮応力-ひずみ曲線



図—2 弾性係数の定義



図—3 静弾性係数と動弾性係数の関係

材令4週の場合1.20, 材令6か月の場合1.10となる。これらの値の平均値をとって E_d/E_s の値を1.15として描いたものが図中の一点鎖線である。しかし、この図は、実測値が以上の関係から遠くはずれており、動弾性係数の値は、静弾性係数が $30 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には約30%増、 $20 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には約70%増、 $10 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には約120%増になっている。

すなわち、この図は、アルカリシリカ反応によって劣化したコンクリートは健全なコンクリートに比べて静弾性係数と動弾性係数との差が大きくなることを示している。

このような結果が得られた理由については以下のように考えることができる。コンクリートのような粘弾性材料における応力-ひずみ関係は外力が加わる速度の影響を大きく受ける。すなわち、外力の作用する速度が大きくなるほど、粘性の影響が小さく現われ、見掛け上弾性的な挙動を示す。動弾性係数の測定原理はコンクリート供試体に縦振動を与えて、その一次共鳴周波数を測定して次の関係を用いて弾性係数を求めるものである。この方法は供試体に作用する外力の大きさはたかだか $1 \sim 2 \text{ kgf/cm}^2$ 程度であってきわめて小さいが、その速度は $500 \sim 10000 \text{ Hz}$ という高い周波数によって示されるような載荷条件となり、静的載荷の場合に比べて荷重の加わる速度は著しく大きい。

$$V = 2fL = \sqrt{E_d/\rho}$$

ここに、 V :弾性波速度、 f :一次共鳴周波数、

L :供試体の長さ、 E_d :動弾性係数、 ρ :密度

コンクリートは、アルカリシリカ反応を生じると、骨材中の反応物質である微小石英または火山ガラスなどが細孔溶液中のアルカリと反応してアルカリシリカゲルを生成する。このシリカゲルは非晶質であるために、アルカリシリカ反応の進行に伴い、コンクリートは健全なものに比べて組織中に占める非晶質の部分が相対的に増大する。このようにして生成した非晶質物質が粘性的な挙動を示し、この傾向は水を含んでいる場合に顕著であることはよく知られている。このような非晶質を多く含んでいるアルカリシリカ反応が進行したコンクリートにおいては、外力の作用する速度が小さい場合には組織の構成を忠実に反映して粘性の影響が現われるはずであるが、速度が大きい場合、すなわち、共振法によって求める動弾性係数の場合には粘性の影響はほとんど現われることがなく、見掛け上弾性的に挙動するので、動弾性係数の値と静弾性係数の値の差が大きくなるものと考えられる。図-3の結果は以上のような観点から説明することができる。

3. ASRを生じたコンクリートの動弾性係数、超音波伝播速度に関する検討

2.において予備的に確認した結果を系統的な実験を通じて検証する目的で以下のような実験を行った。なお、この場合、共振法による動弾性係数のほかにコンクリート構造物の劣化度調査においてしばしば適用される超音波伝播速度に関しても検討を行った。

(1) 実験方法

反応性骨材としては予備実験と同じガラス質安山岩とチャートを使用し、水セメント比が40%、セメントの R_2O を1.0、1.2および1.5%に変化させたコンクリートについて促進膨張試験を行い、静弾性係数、共振法による動弾性係数ならびに超音波伝播速度の測定を実施した。

a) 使用材料とコンクリートの配合

使用した反応性骨材は表-1に示したのと同じである。また、非反応性骨材として閃緑岩（主要な構成鉱物：斜長石および角閃石）を用いた。粗骨材の最大寸法は安山岩および閃緑岩の場合は20mm、チャートの場合は15mmとした。また、細骨材は予備実験の場合と同様、一定の粒度となるように、それぞれの粗骨材をクラッシャーによって粉砕したものを使用した。アルカリ強化の方法は予備実験の場合と同様である。コンクリートの配合条件を表-2に示す。

b) 供試体および測定方法

供試体は $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ 角柱体を各配合について2本ずつ作製した。これらの供試体は打設後1日で脱型し湿布を2重に巻き付けさらにポリ袋へ封入したのち、 40°C 、100%RHの恒温恒湿槽に保存して促進膨張試験を行った。静弾性係数の測定はコンプレッションメータを用いて行った。

静弾性係数の値は、破壊強度の1/3の応力度に相当する荷重まで予備載荷を行った後、再び載荷し、応力-ひずみ曲線における上記の応力度に相当する点と原点を結

表-2 コンクリートの配合条件

No	W/C (%)	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	R_2O 量 (%)	総アルカリ量 (kg/m^3)
1	40	160	400	1.5	6.0
2	40	200	500	1.0	5.0
3	40	200	500	1.2	6.0
4	40	200	500	1.5	7.5
5	40	240	600	1.0	6.0

ぶ割線係数として求めた。動弾性係数および対数減衰率の測定は、それぞれの材令において、静弾性係数の測定に先立って行った。なお、動弾性係数の値は縦振動の計測値を用いて求めた。また、対数減衰率は次式によって求めた。

$$\delta = \pi \cdot (f_2 - f_1) / f_0$$

ここに、 δ ：対数減衰率、 f_0 ：共振周波数

f_1, f_2 ：共振周波数の両側において、 f_0 の振幅に対する $1/\sqrt{2}$ 振幅時の周波数

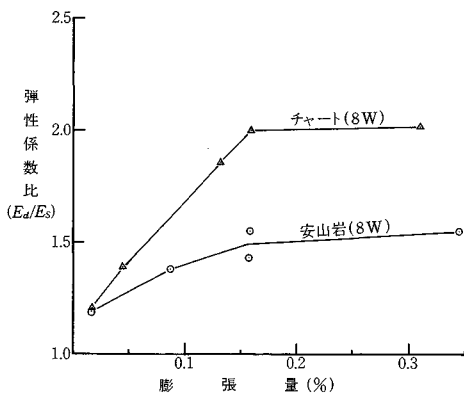
膨張量の測定は $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱供試体を用いて、コンプレータ方法によって行った。この供試体は上記の供試体と同時に作製したものである。

(2) 実験結果と考察

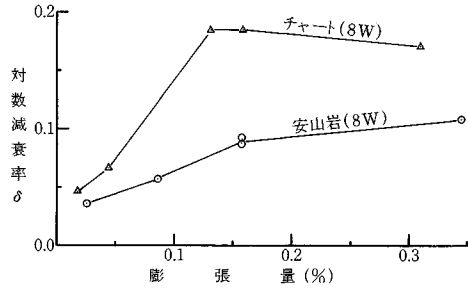
a) 動弾性係数に対する検討

図一4 は、促進膨張期間 8 週における静弾性係数と動弾性係数との比 (E_d/E_s) と膨張量との関係を示したものである。

この図から明らかなことは、いずれの反応性骨材を用いた場合にも、ある一定の膨張量(本実験の場合には、0.15~0.16%)を生じるまで、 E_d/E_s の値は膨張量にほぼ比例して増大しており、この限界の膨張時における E_d/E_s の値は、安山岩を用いた場合には約 1.5、チャートを用いた場合には約 2.0 となった。すなわち、予備実験の結果が再確認されたのである。これらの図はさらに、この限界の膨張量を越えて膨張を生じても E_d/E_s の値はほとんど変化せず一定の値をとることを示している。さて、このような結果が生じる原因が、前章においても述べたように、アルカリシリカ反応の進行に伴ってコンクリート組織中に占める非晶質部分が增大するためではないかという推論を確かめるために、膨張に伴う対数減衰率の変化を示したものが図一5である。一般にコンクリートのような非金属材料が振動を受けると、次の2つの原因によって弾性エネルギーが熱として消散するために、振動の減衰を生ずる。その原因の1つは、供試体が



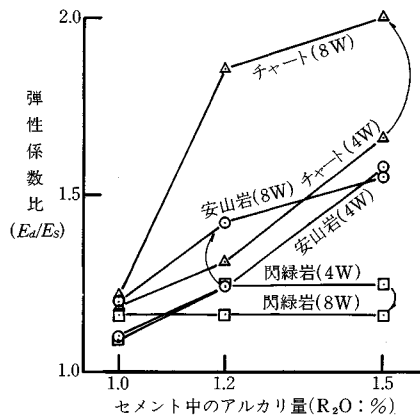
図一4 弾性係数比と膨張量の関係



図一5 対数減衰率と膨張量の関係

完全に戻る応力の1周期におけるヒステリシス損失に起因するものであり、コンクリートの場合、この損失はセメント硬化体中の空隙やひびわれなどの内部欠陥、あるいは骨材とセメント硬化体との不完全な付着などにかかわっていると考えられている²⁾。振動の減衰を生ずるもう1つの原因は振動中における速度勾配の発生によって生ずる粘性損失に帰されており、一般のコンクリートではこの影響は比較的少ないとされているが、歴青材料のような粘塑性材料の減衰には非常に大きく寄与するといわれている。このような減衰の程度を表わす指標として用いられるのが対数減衰率である。

図一5 から明らかなように、膨張量と対数減衰率との関係は図一4 とほぼ同様の傾向を示している。すなわち、対数減衰率の値は膨張量の増加とともに大きくなっているが、膨張量がある一定の値に達すると、対数減衰率はこれ以上膨張量が増加してもほとんど変化しない。このような限界の膨張量は図一4 の場合とほぼ同じ値の 0.13~0.16% である。以上の結果は、アルカリシリカ反応の進行に伴う E_d/E_s の値の増大が、膨張に伴ってコンクリート組織中における粘性部分が増加することによるものであることを裏付けている。図一6 および図一7 はアルカリシリカ反応の進行に伴う E_d/E_s や対数減衰率の値の変化の程度が、セメント中のアルカリ量や反応性



図一6 弾性係数比とアルカリ量の関係

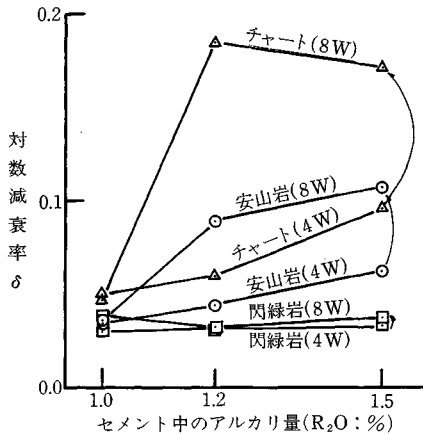


図-7 対数減衰率とアルカリ量の関係

骨材の種類によってかなり異なることを示したものであって、チャートの場合に反応の進行に伴う変化が急激であることがわかる。これに対して非反応性骨材である閃緑岩を用いた場合には弾性係数比および対数減衰率のいずれもセメント中のアルカリ量や材令の経過とは無関係に一定の値を示しており、この値は反応性骨材を用いた場合におけるセメント中のアルカリ量が1.0%の場合の値、すなわち、ASRによる膨張が比較的軽微である場合の値に近い。

b) 超音波伝播速度に関する検討

図-8および図-9は、それぞれ促進膨張期間8週における反応性骨材を用いた供試体の超音波伝播速度の非反応性骨材を用いた供試体の値に対する比 (V_R/V_{nonR}) と膨張量との関係、反応性骨材を用いた供試体の静弾性係数の非反応性骨材を用いた供試体の値の比 ($E_{SR}/E_{SR, nonR}$) と膨張量との関係を比較して示したものである。これらの図から明らかなことは、いずれの反応性骨材を用いた供試体においても、膨張量の増大に伴う静弾性係数の低下の割合に比べて、超音波伝播速度の低下の割合が小さいことである。チャートの場合を例にとると、

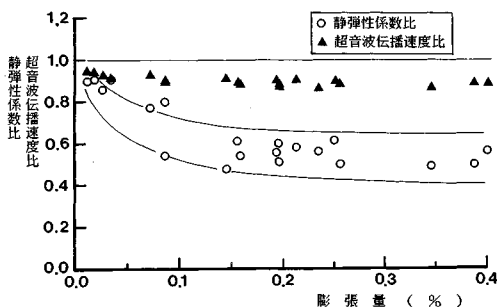


図-8 静弾性係数比・超音波伝播速度比と膨張量の関係 (安山岩)

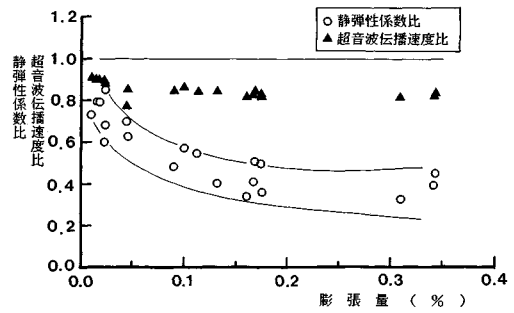


図-9 静弾性係数比・超音波伝播速度比と膨張量の関係 (チャート)

膨張量が0.2%程度の値における静弾性係数比は0.35~0.45となるが、超音波伝播速度比は0.85~0.90となり、静弾性係数の変化に対して鈍感であることがわかる。

この理由については、予備実験ならびに a) の動弾性係数に関する検討の部分において述べたとおりである。

Hobbs¹⁾は、①一般に超音波伝播速度の値が4 km/sであれば良い品質のコンクリートと判定され、3 km/s以下であれば劣る品質のコンクリートと判定されるが、アルカリシリカ反応によって著しく損傷を受けたコンクリートでも超音波伝播速度は4.7 km/s以上の値を示して高品質と判定されること、②0.5%程度までの膨張時における超音波伝播速度の低下は、0.15~0.45 km/sの範囲にあり、以上より超音波伝播速度はアルカリシリカ反応によるコンクリートの損傷に関しては鈍感な指標であると指摘している。著者らの測定結果をみても、最低値はチャートを用いたコンクリートにおいて、0.35%の膨張時における4.23 km/sであった。

超音波伝播速度は構造物の表層部分に発生しているひびわれの検出には有効であると考えられるが、アルカリシリカ反応によるコンクリート組織の変化を把握することは困難であると思われる。

4. 結 論

水セメント比の小さい比較的富配合のコンクリートを対象とした実験を通じて得られた結果を取りまとめると以下のようなものである。すなわち、共振法による動弾性係数またはパルス法によって測定した超音波伝播速度は、アルカリシリカ反応を生じたコンクリートの品質の変化に対して鈍感であり、これらをもってアルカリシリカ反応を生じたコンクリートの損傷度を判定する場合の指標とすることは適切でない。

謝 辞：本研究に使用したガラス質安山岩とチャートはそれぞれ地質鉱物エンジニアリング(株)の丸 章夫博士ならびに愛知工業大学の森野奎二教授のご好意に

より入手したものである。ここに記して深謝する次第である。

参 考 文 献

1) 坂 静雄：コンクリートの静弾性係数と動弾性係数，セメント技術年報Ⅷ，pp.322~325，1954.

- 2) Malhotra, V. M : Testing Hardened Concrete : Nondestructive Methods, The IOWA State University Press & A. C. I., pp. 69~70.
- 3) Hobbs, D. W. : Concrete Alkali-Aggregate Reaction, pp. 342~346, Noyes Publication, 1986.

(1990. 2. 27・受付)
