

酸性水中におけるコンクリートの性状変化

V. フライアッシュ・耐硫酸塩セメントの耐酸性

服部九二雄*・森井俊廣*

Influences of Acidic Water on the Deterioration of Concrete

V. Resistance of Concrete Made of Fly Ash Cement and Sulfate-Resisting Cement to Acidic Water

Kunio HATTORI* and Toshihiro MORII*

From 1989, we have carried out the experiments which investigate the resistance of fly ash cement and sulfate-resisting cement to acidic water. The experiments are composed of the following three tests;

- ① short term test in the laboratory to investigate the development of strength within a year.
- ② long term test in the laboratory to investigate the development of strength for five years.
- ③ long term test in the field to investigate the resistance of concrete to acidic water with a pH value of about 4 for five years.

In this paper, the result of the short term test in the laboratory is mainly reported because the other two long term tests are not finished. In the short term test, density, pulse velocity, dynamic modulus of elasticity and compressive strength were measured by using the cylindrical test piece with 10cm diameter and 20cm height. From this test, it was shown that the fly ash cement concrete has higher strength than that of the sulfate-resisting cement concrete because of the pozzolanic reaction and the ball-bearing effect of fly ash.

ま え が き

高度成長期の企業努力により品質の安定したセメント生産が可能になったが、良質のコンクリートを作る上で

最も重要な材料である骨材の品質低下が叫ばれている。また、品質の良い河川産骨材の大量使用の規制から、低品質の海砂などが使用されるようになり、これらの除塩不足のため鉄筋発錆の問題が顕在化し、さらに、碎石使

* 鳥取大学農学部農林総合科学科生産環境工学講座

* Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University

用量の増加に伴い、従来では見られなかったアルカリ骨材反応も解決せねばならない問題となってきた。

このような状況に加えて、鉄筋コンクリートおよびコンクリート構造物を取り巻く環境もますます劣悪化し、特に農業水利構造物、土木構造物の建設現場もコンクリート構造物として適切でない環境が多くなってきている。また、酸性雨による環境破壊、コンクリート構造物の劣化問題などは世界的な規模となりつつある。

筆者らは、過去昭和48年より鳥取市近郊にある旧銅山廃鉱から湧出する酸性水によるコンクリートの侵食問題に取り組み、結果を逐次報告してきている^{4,5,6,7)}。

この湧出水が流下する小さな谷川には大小3つの砂防ダムがある。試験場所としてはやや狭小で、一度に多数のコンクリート供試体を浸漬できないなどの難点はあるが、過去の実験結果より、最も重要なものの1つである実験期間は5年程度が適切であることが分かってきている。この実験期間をベースとして、当研究開始年にコンクリート供試体を現地に浸漬し現在に至っている。本論文に掲載できる現地実験は、3日目までの結果しか報告できないので、ここでは室内で遂行した1年間にわたるフライアッシュセメント（FACと略す）と耐硫酸塩セメント（SRCと略す）からなる標準養生したコンクリート供試体の実験結果を中心に述べる。

当研究の目的は、次の点を重点的に考えた。

- ① 角柱形供試体と円柱形供試体との侵食形態の違い
- ② FACとSRCの耐酸性の比較
- ③ 超音波法の実構造物への適用性

ただし、本研究ではAE剤のような混和剤は、コンクリートの耐酸性に特に効果的であるとはいえないので⁷⁾、AE剤の使用は考えなかった。なお、昭和48年より

継続して行っている室内・屋外の耐酸性実験を第1表に示す。

実験方法

(1) 実験の種類

先ず、現地の供試体浸漬箇所の面積、実験室内の恒温水槽の容量を考え、供試体は、 $\phi 10 \times 20$ cmの円柱形供試体を使用することにし、実験は、次のような短期のものと長期のものと考えた。

- ① 1年間の強度発現の観察（室内短期実験）
- ② 5年間の現地浸漬実験（現地長期実験）
- ③ 5年間の恒温水槽内実験（室内長期実験）

室内短期実験は、材令3, 7, 14, 28, 56, 91, 140, 180, 210, 365日（測定日と一部異なる）について諸項目を測定し、現地および室内長期実験では、1年ごとに供試体を引揚げ諸測定を実施した。

(2) 使用材料および配合

使用セメントは、市販の比重2.91のFACと3.22のSRCである。骨材は、鳥取県千代川産の川砂と川砂利で、それらの物理的性質を第2表に示す。

本研究に使用したコンクリートの配合は、5年間の実

第2表 使用骨材の物理的性質

骨材	比重	吸水率 (%)	有効吸水率 (%)	粗粒率
川砂	2.59	2.67	1.64	2.75
川砂利	2.60	1.81	1.30	6.54*

* 人為的に粒度調整した値

◎ 有効吸水率=表乾状態-室内気乾状態

第1表 耐酸性実験の内容

実験名	期間	年数	使用セメント	セメント量	備考
シリーズ1	S. 48. 1 ~ 51. 7	3.5	NPC	250, 300	完了
シリーズ2	S. 51. 11 ~ 56. 11	5.0	NPC	200, 400	完了
シリーズ3	S. 55. 11 ~ 60. 11	5.0	BFSC	350, 400	完了
シリーズ4	S. 56. 11 ~ 61. 11	5.0	NPC (AE)	288	完了
シリーズ5	H. 1. 11 ~ 6. 11	5.0	SRC, FAC	298, 300	進行中

- (注) NPC : 普通ポルトランドセメント
 BFSC : 高炉セメントB種
 NPC (AE) : AE剤混入普通ポルトランドセメント
 SRC : 耐硫酸塩セメント
 FAC : フライアッシュセメント
 単位セメント量: (kg/m³)

第3表 実験に使用した示方配合

種類	最大骨材寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
						水	セメント	細骨材	粗骨材
ブレーン	20	12±2	2±1	55	45.0	174	316	824	1,009
F A C	20	7±2	2±1	55	45.0	165	300	829	1,019
S R C	20	7±2	2±1	55	45.0	164	298	842	1,035

ブレーン：普通ポルトランドセメント，川砂，川砂利を使用

F A C：フライアッシュセメントB種，川砂，川砂利を使用

S R C：耐硫酸塩セメント，川砂，川砂利を使用

験期間を考慮して極端に耐酸性が低くなるような配合にならないように、スランブ7cm，水セメント比0.55，最大骨材寸法20mmという条件で配合計算を行い、数度の試し練り後第3表の示方配合を決定した。

(3) 供試体作製および実験の手順

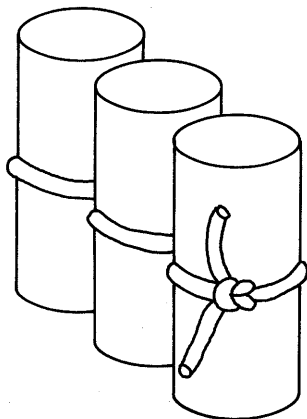
供試体は、JIS A 1132¹⁾に従って作製し、空気量はローリング法²⁾によって求めた。コンクリートは、1バッチ60ℓ練り、φ10×20cmの円柱形供試体35本を一度に作製した。

(4) 供試体の現地浸漬方法

現地谷川は、2つの砂防ダムに挟まれた河床勾配も比較的緩やかな小さい谷川である。梅雨時と台風シーズンにはかなりの流量となり周辺の枯木・土砂が流下し供試体が流失する可能性があったので、第1図のように3本づつクレモナロープで結束して現地に浸漬した。

(5) 測定項目および測定方法

コンクリート供試体の測定項目を以下に示す。



第1図 クレモナロープによる供試体の結束
(現地浸漬用)

① 空中・水中重量

② ワイヤブラシによる洗浄前後の写真撮影

③ 超音波伝播時間 (超音波伝播速度)

④ 動弾性係数

⑤ 圧縮強度

①より供試体個々の密度、重量減少率と体積減少率が求まる。非破壊試験方法で求まる③と④を測定することで酸によるコンクリートの劣化状態を評価できる。上記測定項目でコンクリートの耐酸性を定量的に算定した。

空中・水中重量は粗骨材の比重測定装置を、超音波伝播時間はウルトラソニックテスター (マルイ製)を用いて求めた。動弾性係数は、円柱形供試体の縦振動より求めた。ワイヤブラシ洗浄後の圧縮強度試験は、キャッピングを施さずに実施した。

室内短期実験の実験結果と考察

本実験は、FACとSRCの一年間の強度発現を観察すると、材令28日の基準値を得る目的で実施した。測定項目は、密度、超音波伝播速度、動弾性係数、圧縮強度で、以下、それぞれの結果について考察を加える。

(1) 密 度

第2図には、FACとSRCの材令28日の密度のヒストグラムを示す。SRCの方が若干密度が大きいことと、両者ともバラツキの少ない状態で作製されている。

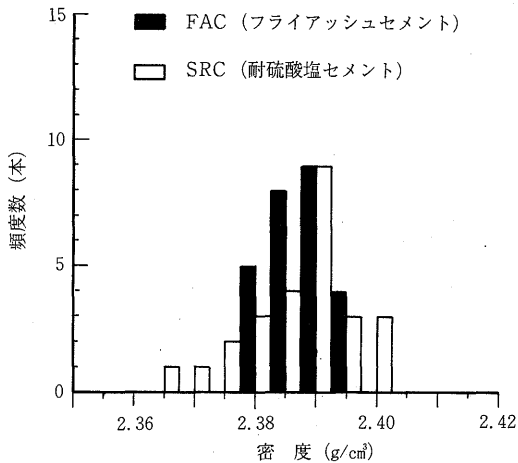
第3図には、両コンクリートの密度および密度比の材令1年までの経日変化を示す。なお、密度比は、材令2日の値で規準化してある。両コンクリートとも順調に密度増加をしているが、密度そのものは、材令91日以降ほとんど増加していない。注目すべき点は、FACの密度が材令140日を越えるとSRCの密度より大きくなり、材令1年ではかなりの違いを示している。これは、フライアッシュのポズラン反応により緻密な組織ができ、ポルトランドセメント系のSRCに比べ、長期材令でより大きい密

度になったものといえる。

(2) 超音波伝播速度、動弾性係数および圧縮強度

第4と5図には、超音波伝播速度と動弾性係数の経日変化を示す。これら2つの図より、両コンクリートの超

音波伝播速度および動弾性係数とも材令56日までの増加割合は大きい、材令91日以降急激に小さくなっている。また、密度の場合と同様に、材令180日以降では、FACの方が大きい値を示している。



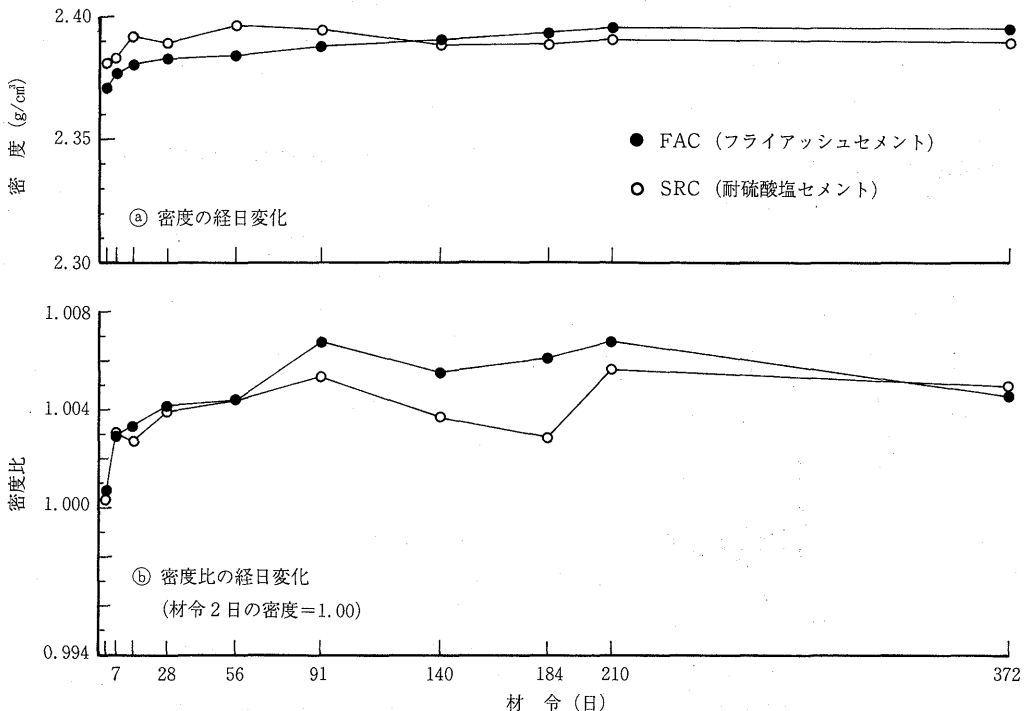
第2図 密度のヒストグラム

第6図には、圧縮強度の経日変化を示す。この場合も初期材令での強度増加の割合は大きい、材令140日以降は緩やかになっている。ポルトランドセメント系のSRCは、混合セメント系のFACに比べて、初期材令における強度増加の割合が大きい、一方、FACは、材令1年後でもゆっくりと増加傾向を示している。密度とか超音波伝播速度の場合のように両者の逆転現象はない、両者の圧縮強度の差が小さいものになってきている。フライアッシュのポゾラン反応の効果が徐々に表われているものと考えられる。

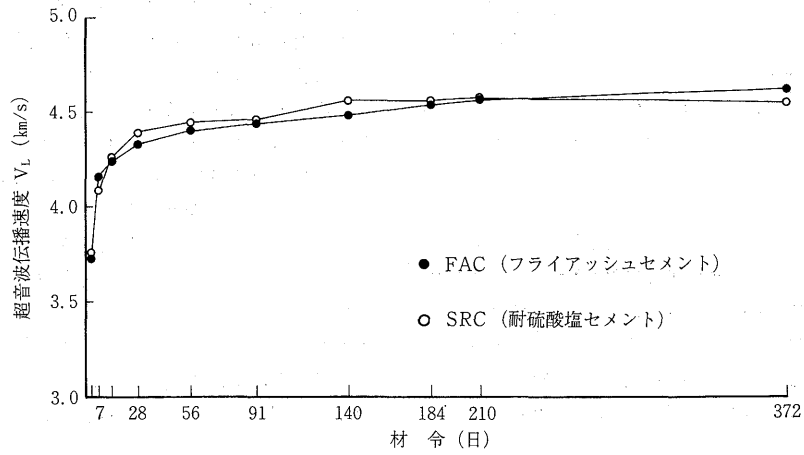
(3) 密度と超音波伝播速度、動弾性係数および圧縮強度との関係

過去の研究からも、密度が大きければ、超音波伝播速度、動弾性係数および圧縮強度も大きいとされている。これらの相関性を見るために、室内短期実験で用いたコンクリート供試体について検討を加えてみた。

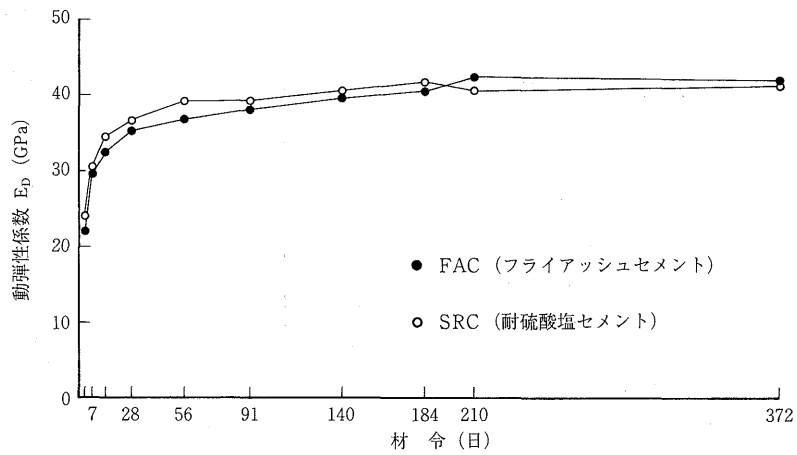
第7図には、密度と超音波伝播速度、動弾性係数、圧



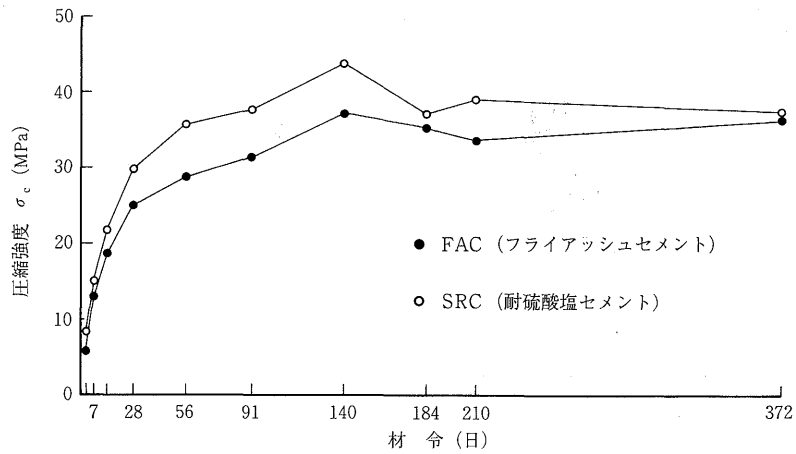
第3図 密度および密度比の経日変化



第4図 超音波伝播速度の経日変化



第5図 動弾性係数の経日変化



第6図 圧縮強度の経日変化

縮強度との関係を示す。この図より、前記の関係がほぼ成り立つ。ただし、材令に伴い諸強度は大きくなるが、それらのバラツキも大きくなり、そのバラツキもSRCの方が大きい。これは、FACがフライアッシュのボールベアリング効果でワーカビリチーがよくなり、バラツキの少ないコンクリートが得られたためと考えられる。これは混合セメントの特徴で、コンクリートが緻密な組織となるため、不透水性となり、化学抵抗性も高くなる。

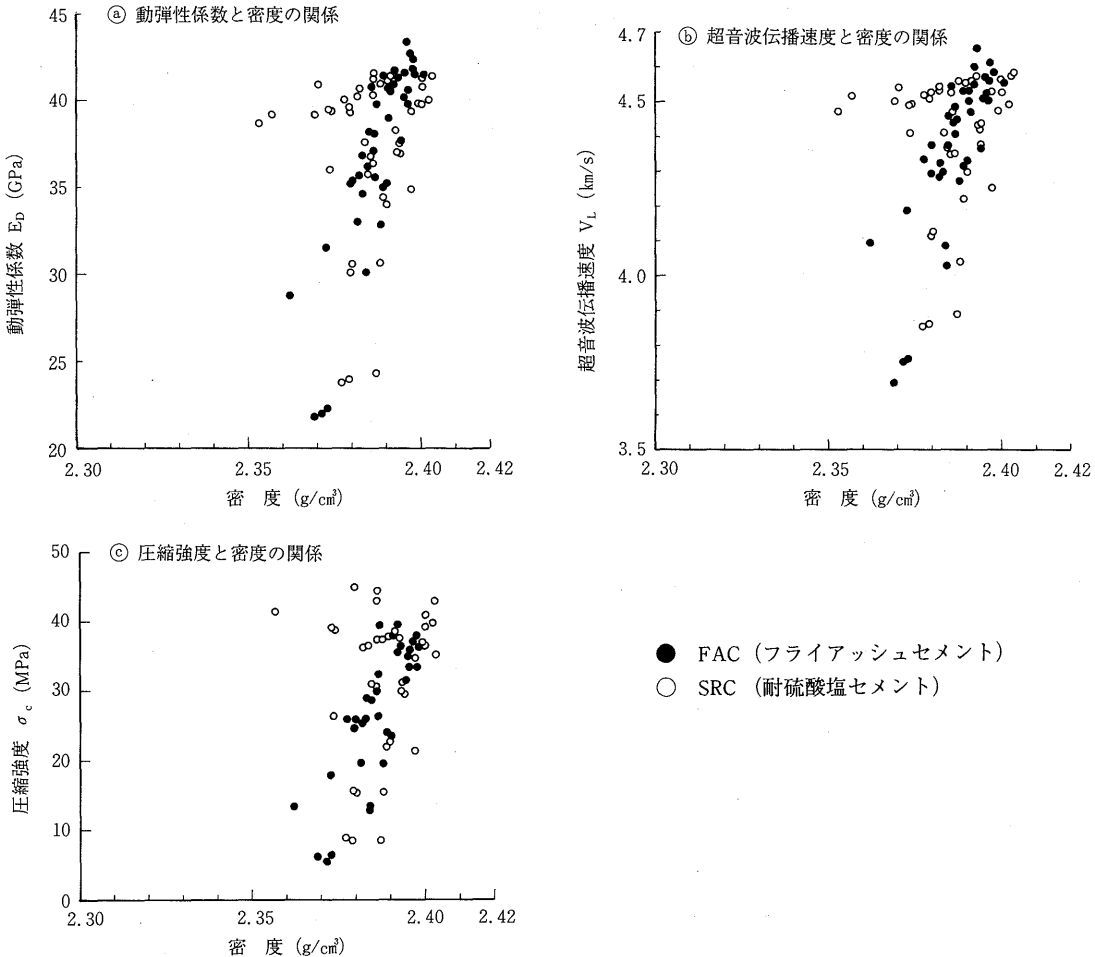
(4) 圧縮強度, 超音波伝播速度, 動弾性係数の相互の関係

動弾性係数と圧縮強度との間には、過去の研究結果よりかなり高い相関性があることが示されてきている³⁾。また、超音波伝播速度と動弾性係数とも、物体の内部状態を推定する手段で密度との関係が深いことから、両者

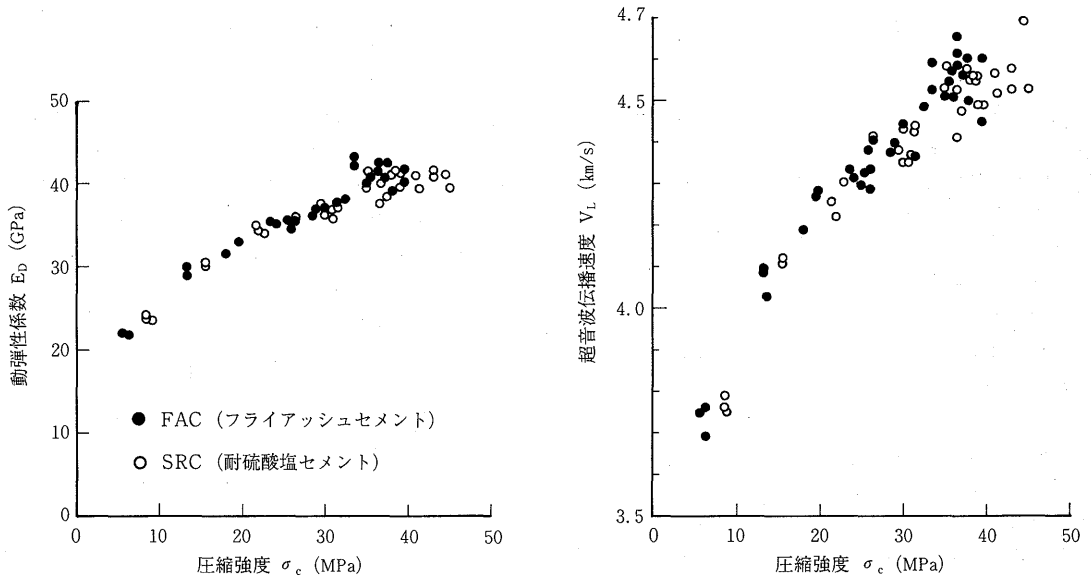
の間には相関性があることが予測できる。

動弾性係数とか超音波伝播速度は、いわゆる非破壊試験法で得られるもので、コンクリートの内部状態を推定するのに有効な方法である。例えば、酸性水などで侵食を受けたコンクリートの状態を追跡するには、表面の凹凸などで正確な強度が得られない圧縮強度試験などよりも、内部状態をかなり正確に追跡できるものである。

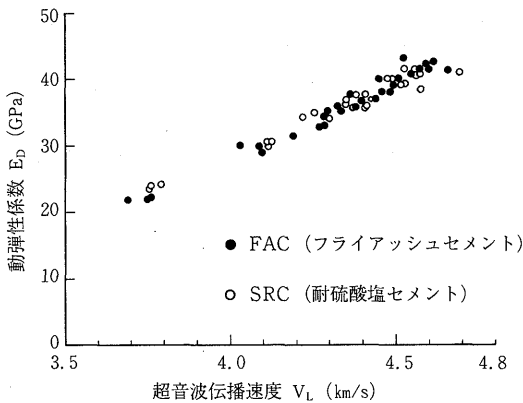
第8図には、圧縮強度と動弾性係数および超音波伝播速度との関係を、第9図には超音波伝播速度と動弾性係数との関係を示す。これらの図より、圧縮強度と動弾性係数および超音波伝播速度との間には、ほぼ2次曲線で表わされる関係があり、一方、動弾性係数と超音波伝播速度との間には、ほぼ直線的な関係がある。



第7図 動弾性係数、超音波伝播速度および圧縮強度と密度との関係



第8図 動弾性係数および超音波伝播速度と圧縮強度との関係



第9図 動弾性係数と超音波伝播速度との関係

長期室内実験および長期現地実験

これらの実験は、現在進行中で考察ができるほど十分なデータは得られていない。ここでは、長期室内および現地実験の経過を報告する。

現地谷川に浸漬した2種類のコンクリート供試体18本を1年ごとに平成4年11月までに引揚げ諸測定を実施した。ただし、平成2年11月に浸漬箇所を見たとき、供試体はその年の秋の豪雨で一部が下流へ3mほど流され、残りは上流から流下してきた栗石に埋もれたりしていた

ため、発見および掘り起しに時間がかかった。また、浸漬箇所周辺の斜面が地滑りで変形し、谷川そのものも狭くなっており、より安全で供試体流失の危険性のない別の浸漬箇所が必要となった。そこで、今後のことを考え、上流にある銅山麓近くにある湧出水処理場からの水路と谷川が合流する地点に移動させた。平成4年11月には、最も古い砂防ダム改修工事に必要な据付道路設置のため、この新しい浸漬箇所も手が加えられ、一部供試体が流失していた。

超音波法による現地構造物の調査について

超音波法の実構造物への適用性を試すため、現地にある3つの砂防ダムのうち上流から2つ目の右岸の天端部で超音波伝播速度の測定を平成2年11月に試みた。

砂防ダムの表面は、経年するにつれて粗骨材が露出していくわけであるが、この砂防ダムもかなり粗骨材が露出しており、天端幅約1mの両端に超音波の発信子と受信子を十分密着することが困難で、伝播時間のデジタル表示面は全く応答がなかった。従って、天端部の両端を研磨する必要があるが、ダムの堤高が10m程ありかなり危険であったため、下流にある3つ目の砂防ダムで新たに測定に適した天端部分を捜し試みる予定である。

総 括

ここでは、室内短期実験から得られた結果を中心に示す。十分なデータとは言い難いが、長期現地実験の結果より得られた結論も併記する。

- ① FACの初期材令における諸強度は、SRCに比べやや小さいが、長期材令（材令100～140日）になると、フライアッシュのポズラン反応によってSRCと同じかそれ以上の強度を示す。
- ② FACは、フライアッシュのボールベアリング効果で緻密な組織となるため、ポズラン反応とあいまって、動弾性係数とか超音波伝播速度および密度が、材令100日程度でSRCのそれらを上回る値を示す。
- ③ 密度が大きければ動弾性係数、超音波伝播速度および圧縮強度も大きくなる。
- ④ 圧縮強度と動弾性係数および圧縮強度と超音波伝播速度との間には、ほぼ2次曲線で表わされる密接な関係がある。また、動弾性係数と超音波伝播速度との間にはほぼ直線で表わされる関係がある。
- ⑤ ④より、超音波伝播速度も動弾性係数と同様に、コンクリートの耐酸性に逐次追跡の有効な手段として使用できる。
- ⑥ FACは、緻密な組織を持つため、その耐酸性は、3年の浸漬期間ではあるが、SRCよりも高い。

あ と が き

本実験は端緒についたばかりであるが、フライアッシュのポズラン反応による長期強度の増加、酸性水などで侵食を受けたコンクリートの測定には、非破壊試験の有効性、特に供試体の大きさとか表面の劣化に影響をさほど受けない超音波法がかなり効力を発揮することが分かった。末尾ながら、本実験を遂行するにあたり、当研究室の平成元～4年度の専攻生諸君の惜しめない助力に深甚なる謝意を表す。

引 用 文 献

- 1) 土木学会：土木学会規準（昭和61年版），pp.277-282
- 2) 土木学会：土木学会規準（昭和61年版），pp.265-269
- 3) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧（昭和51年初版2刷），技報堂（東京），pp.67-69
- 4) 服部九二雄・柘植巳一：農業土木学会論文集，84，pp.68-74（1979）
- 5) 服部九二雄・柘植巳一：農業土木学会論文集，99，pp.62-70（1982）
- 6) 服部九二雄・柘植巳一：農業土木学会論文集，131，pp.87-94（1987）
- 7) 服部九二雄・柘植巳一：農業土木学会論文集，134，pp.101-108（1988）