

コンクリートの耐海水性に関する研究

II. 非破壊試験による強度変化の推定

加来 研・国武 昌人*・吉田 勲・田渕 博文

(農業構造学教室)

昭和51年9月30日 受理

Studies on the Durability of Concrete in Sea Water

II. Estimation of strength of concrete by non-destructive test

Ken KAKU, Masato KUNITAKE, Isao YOSHIDA
and Hirofumi TABUCHI

(Laboratory of Construction Engineering)

Received September 30, 1976

Summary

This report describes an experimental study of the durability of concrete in contact with sea water.

Many test-pieces of concrete were prepared for laboratory and field tests by changing the classification of cement, the weight of cement per unit volume, the air content, and by keeping the water-cement ratio and sand percentage constant. A half of test-pieces were soaked in a sodium sulphate (saturated solution) in laboratory tests, and the others were soaked in sea water in field tests.

The changes of dynamic young's modulus, which have a close relationship to the compressive strength of concrete, were measured at some intervals of time by non-destructive tests (sonic tests).

The durability of concrete under the action of sodium sulphate depends on the classification of cement, and on this point Portland blast-furnace cement was better than Normal portland cement.

In the poor mixed concrete of Normal portland cement (the weight of cement per unit volume, 290 kg/m³), the durability of concrete increased with increasing content of entrained air. The air content has no effect on durability in rich mixed concrete of Normal portland cement (the weight of cement per unit volume, 380 kg/m³), and also in rich and poor mixed concrete of Portland blast-furnace cement. In these cases, the dynamic young's modulus of concrete decreased with the increase of entrained air content.

I. ま え が き

有明海沿岸に点在する多数の干拓堤防は、海水の作用によって年々劣化されてきており、コンクリートの耐海水性が、最近重要な問題となっている。また、さらに国の重要施策である海洋開

* 宮崎大学農学部

発に伴ない、干拓堤防のみならず、各種の港湾施設、海底トンネル等の材料として、耐海水性コンクリートの開発が要求されている。

海水の化学作用によるコンクリートの浸食は、主として、海水中の硫酸塩がセメント鉱物中の C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) と反応して、セメントバチルス ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) を生成し、これが異常な体積膨脹を起すことに起因すると言われている⁴⁾。

海水中のコンクリートは、これに加えて、波の作用、砂による摩耗、浮遊物による打撃、凍害、深海では水の圧力などの物理的浸食作用を受けているわけである⁵⁾。

本研究では、空気量、単位セメント量、セメントの種類などの各種要因を組み合わせたテストピースを製作し、コンクリートの耐海水性に関する室内実験と現場実験を行った。室内実験では、テストピースを、硫酸ナトリウム飽和溶液中に、また、現場実験では、実際に有明海にテストピースを浸漬し、これらが材令の経過につれて、どのような劣化の過程をたどるかについて検討した。材料の劣化の目安として、前報では、圧縮試験によって強度を測定したが、強度の時間的変化を求めるためには、多数のテストピースが必要であり、また、材料むらもさけることができない。したがって、今回は、共鳴振動法による非破壊試験により、テストピースの強度変化を推定した。

II. 非破壊試験

2.1 弾性係数と強度との関係

弾性係数は線型材料の応力度とひずみ度との関係を表わす比例定数であるが、一般にコンクリートは非線型材料であるため、応力度の範囲によってその値が異なる。しかし、弾性係数を初期接線係数としてとると、その値は一定であり、コンクリートの力学特性を表わす指標であると考えてよい。一般に高強度のコンクリートの方が低強度のコンクリートよりも応力-ひずみ曲線の原点における立ち上りが急で、初期接線係数は大きい。

たとえば、初期接線係数 E_i と圧縮強度 σ_B の間には次のような関係のあることが知られている⁷⁾。

$$\text{Inge, Lyse 式 } E_i = 126,000 + 460\sigma_B \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{Walker 式 } \left. \begin{aligned} E_i &= 40,000\sigma_B^{0.6} \\ E_i &= 84,300\sigma_B^{5/8} \end{aligned} \right\} \text{ (psi)} \quad \dots\dots(2)$$

動弾性係数は静的載荷試験による弾性係数に対応して名付けられたもので静的試験による初期接線係数に相当する。この値も圧縮強度と何らかの関係があることが知られており、動弾性係数 E_D と圧縮強度 σ_c との関係式として、つぎのようなものが提案されている⁸⁾。

$$E_D = K_1 \sigma_c^{1/2} \quad \dots\dots(3)$$

$$E_D = \frac{K_2}{(1-\mu)} \sigma_c^{1/2} \quad \dots\dots(4)$$

$$E_D = (K_3(w/c + K_4)) \sigma_c^{1/2} \quad \dots\dots(5)$$

$$E_D = K_5 \sigma_c^{1/3}$$

$$\sigma_c = AE_D + BE_D^2 + CE_D^3 \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 $K_1 \cdots K_5$ および ABC は実験定数、 μ はポアソン比、 w/c は水セメント比

動弾性係数は後述の共鳴振動法により、非破壊的に測定することができるから、コンクリート強度の経時的変化を求める場合には非常に便利である。

2.2 共鳴振動法

この方法は、図.1に示すような装置を用いて、供試体に縦振動、たわみ振動あるいはねじり振動を与えて、それらの1次共振振動数を測定し、動弾性係数、動せん断弾性係数あるいはポアソン比を求める方法である^{11),12)}。この試験方法の利点は、供試体の経年変化あるいは物理的、化学的にコンクリートが劣化、浸食される性状を同一供試体で精度よく知りうることである。したがって凍結融解、硫酸塩浸食、アルカリ骨材反応等の実験室試験に適用される。

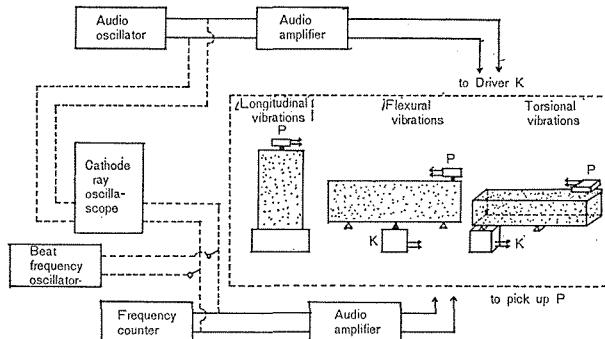


Fig. 1. Block diagrams of sonic equipment.

2.2.1 縦振動

細長い棒が縦振動をする場合(8)式が成り立つ。

$$V_l = 2f_1 L = \sqrt{\frac{E_D \cdot g}{\rho}} \quad \dots\dots(8)$$

ここに、 V_l : 供試体内を伝播する縦波の速度 (cm/s), f_1 : 縦振動における1次共振周波数 (c/s), L : 供試体長さ (cm), E_D : 動弾性係数 (kg/cm²), g : 重力の加速度 (cm/s²), ρ : 密度 (kg/cm³)

一方太く短い棒の場合はポアソン比 μ の影響を受け、(9)式が成り立つ。

$$V_l = 2f_1 L = \sqrt{\frac{E_D \cdot g}{\rho \left(1 + \frac{\pi^2 r^2 \mu^2}{L^2}\right)}} \quad \dots\dots(9)$$

ここに、 r : 棒の断面の回転半径

一般に、コンクリートの μ は0.1~0.25と小さいから、供試体が太く短い場合、 r と μ が V_l に及ぼす影響は、無視できる程度である。したがって、実用的には(8)式を用いて E_D を計算する。

$$\left. \begin{aligned} E_D &= C_1 W f_1^2 \\ C_1 &= 408 \times 10^{-5} L/A (\text{sec}^2/\text{cm}^2) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(10)$$

ここに、 E_D : 動弾性係数 (kg/cm²), W : 供試体重量 (kg), f_1 : 縦振動の1次共振周波数 (c/sec), L : 供試体の長さ (cm), A : 供試体の断面積 (cm²)

2.2.2 たわみ振動

たわみ振動は、図.1に示すように2点支持とし、支持点は両端自由な棒が1次のたわみ振動をするときの振動の節と一致する点、すなわち端からそれぞれ $0.244L$ のところとする。実際の供試体は太く短いから、せん断力及び回転慣性の影響があつて、 $\mu=1/6$ としたときの修正値 T は

$$T=1+81.79(k/L)^2-\frac{1314(k/L)^4}{1+81.09(k/L)^2}-125(k/L)^4 \quad \dots\dots(11)$$

となる¹⁾。したがつて、

$$\left. \begin{array}{l} E_D=C_2 W f_2^2 \\ \text{ただし} \quad C_2=164 \times 10^{-5} \times \frac{L^3 T}{d^4} (\text{sec/cm}^2) \text{ (円柱供試体)} \\ \quad \quad C_2=966 \times 10^{-6} \times \frac{L^3 T}{b t^3} (\text{sec/cm}^2) \text{ (角柱供試体)} \end{array} \right\} \quad \dots\dots(12)$$

ここに、 E_D : 動弾性係数 (kg/cm^2)、 W : 供試体重量 (kg)、 f_2 : たわみ振動の1次共振周波数 (c/sec)、 L : 供試体長さ (cm)、 d : 円柱供試体の直径 (cm)、 b, t : 角柱供試体の断面寸法 (cm)、ただし t は振動の方向の辺、 T : 回転半径 k (角柱供試体に対しては $t/3.464$ 、円柱供試体に対しては $d/4$) と長さ L および動ポアソン比 μ_D によってきまる補正係数

なお、飽水したコンクリートのポアソンは $1/6$ より大きい。 $\mu_D=1/6$ 以外のときの修正係数 T' は次式から求める。

$$T'=T \left[\frac{1+(0.26\mu_D+3.22\mu_D^2)k/L}{1+0.1328k/L} \right] \quad \dots\dots(13)$$

2.2.3 ねじり振動

支点は供試体の中央にとり、ねじりの1次振動の節と一致させる。駆動点は角柱供試体のときは隅でよいが、円柱供試体のときは適当なリングを一端にはめて、これを介して振動を与える工夫を要する。もちろんこの場合ピックアップは振動面で働くよう供試体に接触させる。動せん断弾性係数 G_D (kg/cm^2) はねじり振動の1次共振周波数 f_3 からつぎのように計算する。1次共振では供試体の中央が節で両端が腹となる。

$$\left. \begin{array}{l} G_D=C_3 W f_3^2 \\ \text{ただし} \quad C_3=\frac{4LR}{gA}=408 \times 10^{-5} LR/A (\text{sec/cm}^2) \end{array} \right\} \quad \dots\dots(14)$$

ここに、 W : 供試体重量 (kg)、 L : 供試体長さ (cm)、 R : 形状係数で円柱供試体に対しては $R=1$ 、正方形断面の角柱供試体に対しては $R=1.183$ 長方形断面 $b>a$ では

$$R=\frac{(a/b)+(b/a)}{4(a/b)-2.52(a/b)^2+0.21(a/b)^6}$$

g : 重力の加速度 (980cm/sec^2)、 A : 供試体の断面積 (cm^2)

なお動ポアソン比 μ_D はつぎのように計算する。

$$\mu_D=\frac{E_D}{2G_D}-1 \quad \dots\dots(15)$$

III. 使用材料及び試験概要

3.1 使用材料

セメントは市販の普通ポルトランドセメント，高炉セメント B 種，高炉セメント C 種を使用した。その物理試験結果及び化学成分は表.1，表.2のようになっている。骨材の物理試験結果は表.3及び図.2のようになった。AE 剤としては，ビンソル・レジソ 20% 中和溶液を使用した。

Table 1. Physical properties of cements.

Classification of cement	Specific gravity	Finess		Setting		
		Specific surface area (cm ² /gr)	88 μ remains (%)	The quantity of water (%)	Initial setting (h-m)	Final setting (h-m)
N	3.17	3160	1.3	27.4	2-35	3-33
B	3.02	3850	0.9	29.6	3-32	4-49
C	2.99	3930	0.9	29.8	4-33	5-51

Classification of cement	Stability	Strength (kg/cm ²)					
		Bending			Compression		
		3 days	7 days	28 days	3 days	7 days	28 days
N	good	34.1	51.3	70.9	145.0	249.0	418.0
B	good	27.6	41.8	71.1	102.0	183.0	401.0
C	good	21.6	38.5	62.6	81.0	173.0	383.0

N: Normal portland cement

B: Portland blast-furnace cement B

C: Portland blast-furnace cement C

Table 2. Chemical components of cements.

Classification of cement	Ig. loss (%)	Insol. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Total (%)
N	0.5	0.5	21.7	5.2	3.3		65.1	1.3	1.3	99.4
B	0.8	0.3	26.8	10.4	1.9	0.8	53.6	3.0	2.1	99.7
C	0.8	0.4	28.6	12.2	1.5	0.8	49.4	3.8	2.0	99.5

N: Normal portland cement

B: Portland blast-furnace cement B

C: Portland blast-furnace cement C

Table 3. Physical properties of aggregates.

Items	Fine aggregate	Coarse aggregate
Specific gravity	2.50	2.90
Absorption (%)	3.40	3.23
Finess modulus	2.52	6.88

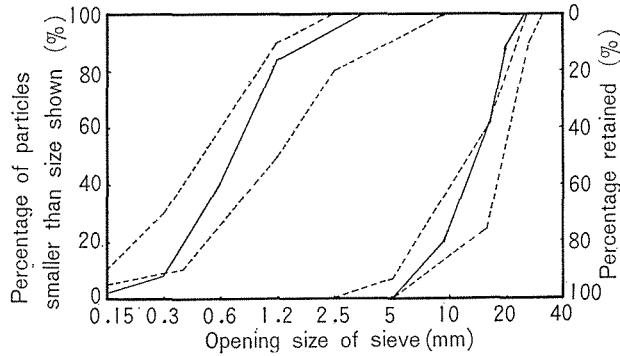


Fig. 2. Sieve analysis curves of aggregates.

3.2 試験概要

表.4に示すような因子と水準を採用して、三元配置法によりわりつけし²⁾、実験条件 (表.5) とコンクリートの配合 (表.6) を決定した。

Table 4. Factors and levels of experiment.

Factor	Mark	Level 1	Mark	Level 2	Mark	Level 3	Mark
Weight of cement per unit volume	(A)	290 kg/m ³	(A ₁)	380 kg/m ³	(A ₂)		
Air content	(B)	1.5±1 (%)	(B ₁)	4.0±1 (%)	(B ₂)	6.0±1 (%)	(B ₃)
Classification of cement	(D)	N	(D ₁)	B	(D ₂)	C	(D ₃)

N: Normal portland cement

B: Portland blast-furnace cement B

C: Portland blast-furnace cement C

Table 5. Experimental conditions.

Mix number	Water-cement ratio (%)	Air content (%)	Sand percentage (%)	Weight of water per unit volume (kg/m ³)	Classification of cement
1	50	1.5±1	43	290	N
2	50	1.5±1	43	380	N
3	50	4.0±1	43	290	N
4	50	4.0±1	43	380	N
5	50	6.0±1	43	290	N
6	50	6.0±1	43	380	N
7	50	1.5±1	43	290	B
8	50	1.5±1	43	380	B
9	50	4.0±1	43	290	B
10	50	4.0±1	43	380	B
11	50	6.0±1	43	290	B
12	50	6.0±1	43	380	B
13	50	1.5±1	43	290	C
14	50	1.5±1	43	380	C
15	50	4.0±1	43	290	C
16	50	4.0±1	43	380	C
17	50	6.0±1	43	290	C
18	50	6.0±1	43	380	C

N: Normal portland cement

B: Portland blast-furnace cement B

C: Portland blast-furnace cement C

Table 6. Mixes of concrete.

Order of experiment	Mix number	Classification of cement	Weight per unit volume				Air entraining agent (cc/m ³)
			Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Fine aggregate (kg/m ³)	Coarse aggregate (kg/m ³)	
2	1	N	290	145	805	1237	0
1	2	N	380	190	726	1116	0
5	3	N	290	145	778	1196	101.5
13	4	N	380	190	699	1075	133.0
16	5	N	290	145	756	1163	150.8
14	6	N	380	190	677	1042	197.6
4	7	B	290	145	800	1230	0
6	8	B	380	190	719	1106	0
15	9	B	290	145	773	1188	101.5
8	10	B	380	190	692	1065	133.0
12	11	B	290	145	751	1155	150.8
17	12	B	380	190	671	1032	197.6
10	13	C	290	145	799	1228	0
3	14	C	380	190	718	1104	0
18	15	C	290	145	772	1187	101.5
7	16	C	380	190	691	1063	133.0
9	17	C	290	145	750	1154	150.8
11	18	C	380	190	670	1030	197.6

N: Normal portland cement

B: Portland blast-furnace cement B

C: Portland blast-furnace cement C

材料の混合には、強制攪拌練りミキサーを使用した。また締め固めは、JIS-A1132（つき棒による場合）に従って行い、円柱供試体（ $\phi 10 \times 20$ cm, 108本）及び角柱供試体（ $10 \times 10 \times 40$ cm, 36本）を作製した。作製1日後に脱枠し、28日間水中養生した後、室内実験として、円柱供試体54本と角柱供試体18本を硫酸ナトリウム飽和溶液（ $21^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ ）に浸漬し、現場実験として、他の半分の供試体を有明海に浸漬した。硫酸ナトリウム飽和溶液に浸漬した供試体は、16時間後に取り出し室内（ $2 \sim 30^\circ\text{C}$ ）で8時間乾燥させ、これを毎日繰り返した。材令28日、35日、56日、77日、126日、210日、270日、365日、403日、433日、477日、527日、563日で縦振動数、たわみ振動数、ねじり振動数を測定した。海水中に浸漬した供試体は1日2回づつ干満により乾燥、浸漬が繰り返されるが、材令28日、77日、107日、140日、270日、330日、365日、403日、433日、477日、527日、563日、で縦振動数、たわみ振動数、ねじり振動数を測定した。

IV. 実験結果

室内実験によって得られた縦、たわみ、ねじり振動数の測定値を用い、(10)式～(15)式によって動弾性係数、動セン断弾性係数を計算し、セメントの種類別にこれらを示すと図.3～図.8のようになる。

円柱供試体の動弾性係数および、角柱供試体の動弾性係数、および動セン断弾性係数について、材令ごとに分散分析を行なった。円柱供試体の材令56日および270日についての分散分析表を示

すと表.7, 表.8のようになる. ここで有意と判断された要因について推定を行えば, 図.9, 図.10のようになる.

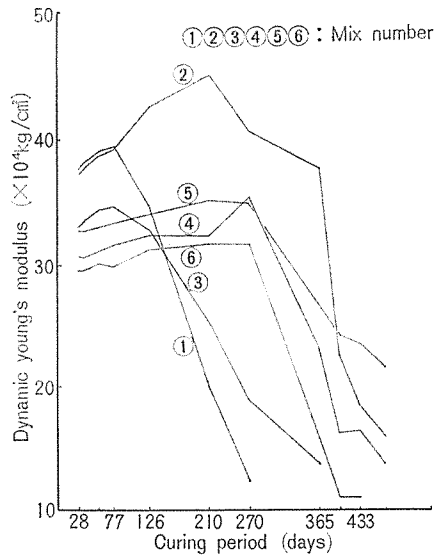


Fig. 3. Change of dynamic young's modulus of cylinders made of Normal Portland cement with curing period (laboratory test).

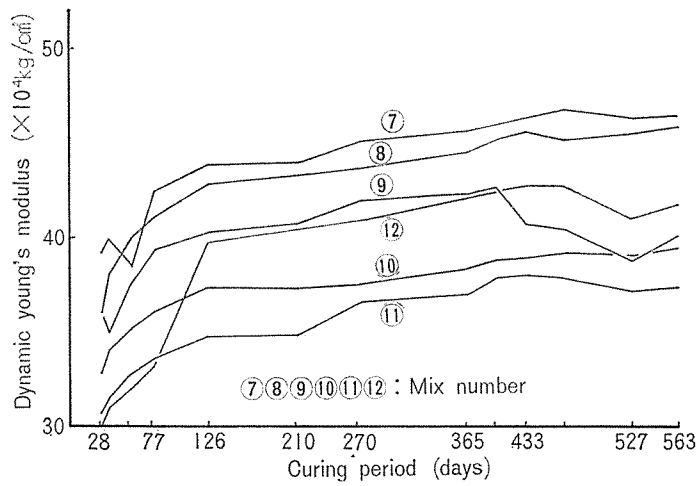


Fig. 4. Change of dynamic young's modulus of cylinders made of Portland blast-furnace cement B with curing period (laboratory test).

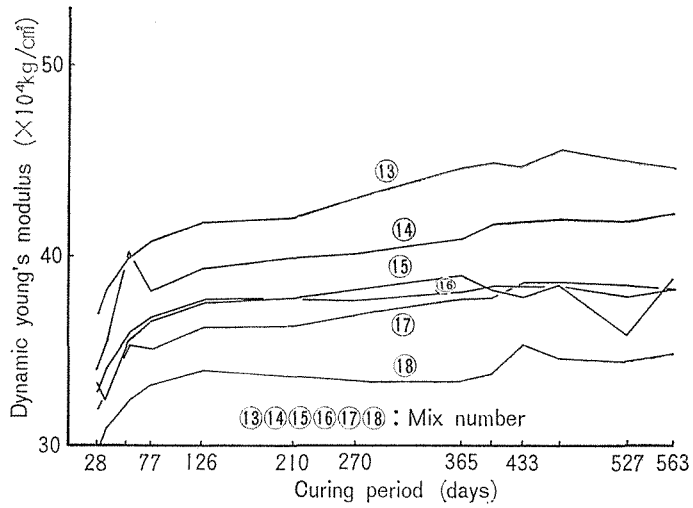


Fig. 5. Change of dynamic young's modulus of cylinders made Portland blast-furnace cement C with curing period (laboratory test).

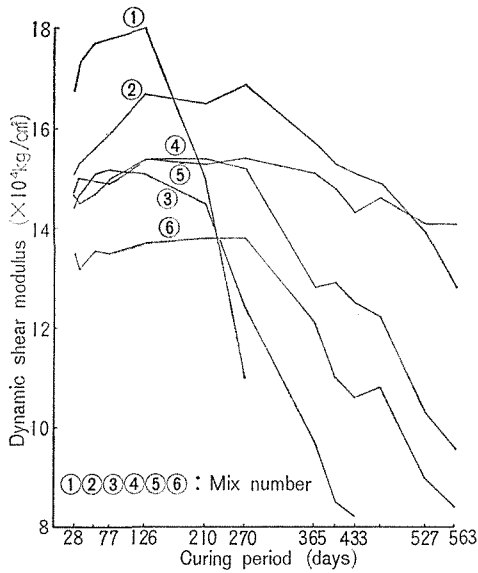


Fig. 6. Change of dynamic shear modulus of prisms made of Normal portland cement with curing period (laboratory test).

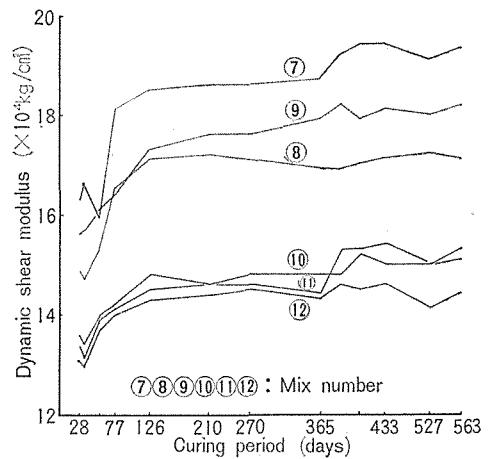


Fig. 7. Change of dynamic shear modulus of prisms made of Portland blast-furnace cement B with curing period (laboratory test).

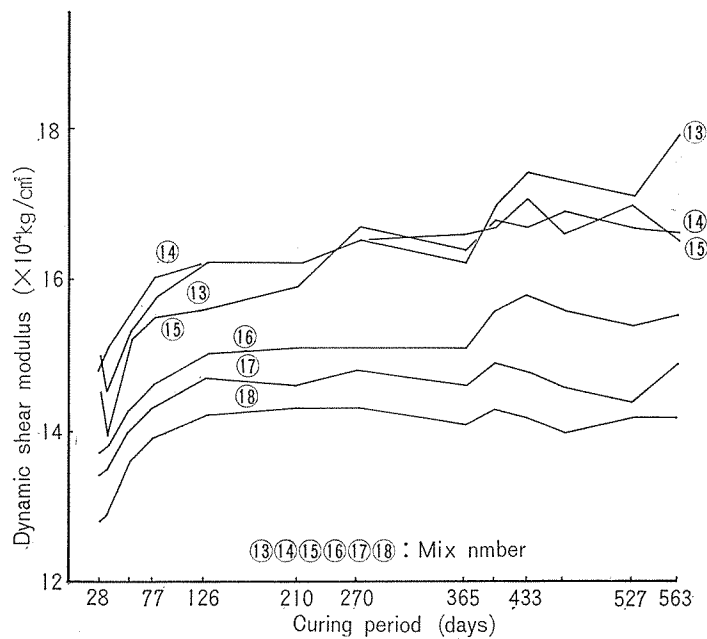


Fig. 8. Change of dynamic shear modulus of prisms made of Portland blast-furnace cement C with curing period (laboratory test).

Table 7. Analysis of variance on dynamic young's modulus of cylinders at 56 days (laboratory test).

Factor	Sum of squares (S)	Degree of freedom (ϕ)	Unbiased estimate of population variance (V)	Variance ratio (F_0)
A	8.242	1	8.2422	6.78*
B	135.395	2	67.6973	55.68***
D	15.582	2	7.7910	6.41*
A × B	7.539	2	3.7695	3.10
A × D	2.559	2	1.2793	1.05
B × D	7.967	4	1.9922	1.64
Error	4.863	4	1.2158	

***: Significant at one percent

**: Significant at five percent

*: Significant at ten percent

Table 8. Analysis of variance on dynamic young's modulus of cylinders at 270 days (laboratory test).

Factor	Sum of Squares (S)	Degree of freedom (ϕ)	Unbiased estimate of population variance (V)	Variance ratio (F_0)
A	71.277	1	71.2773	1.52
B	20.844	2	10.4219	0.22
C	482.031	2	241.0156	5.13*
A × B	48.441	2	24.2207	0.52
A × D	258.566	2	129.2832	2.75
B × D	110.137	4	27.5347	0.59
Error	187.984	4	46.9961	

*: Significant at ten percent

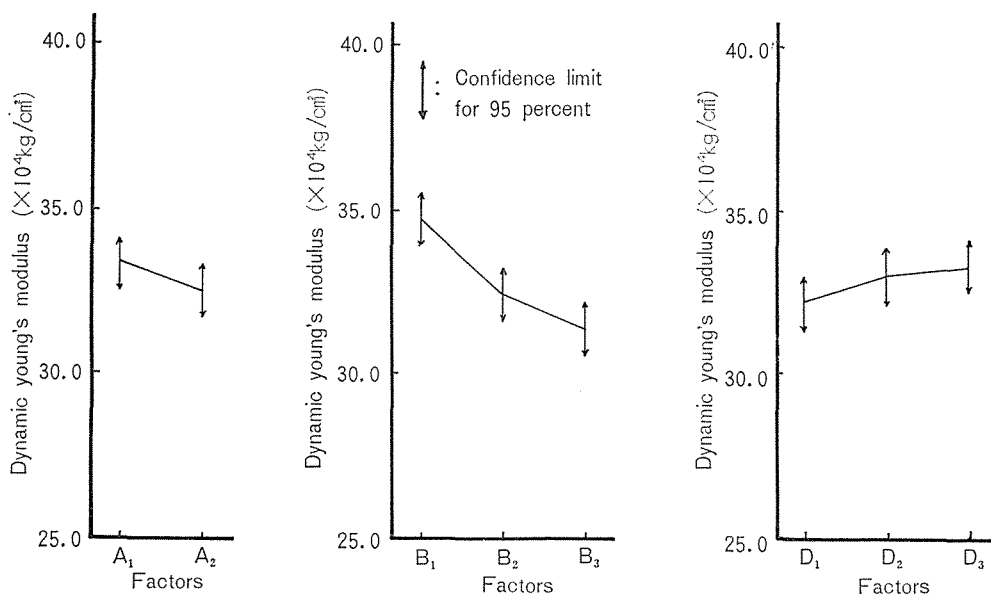


Fig. 9. Influence of factors on dynamic young's modulus of cylinders at 56 days (laboratory test).

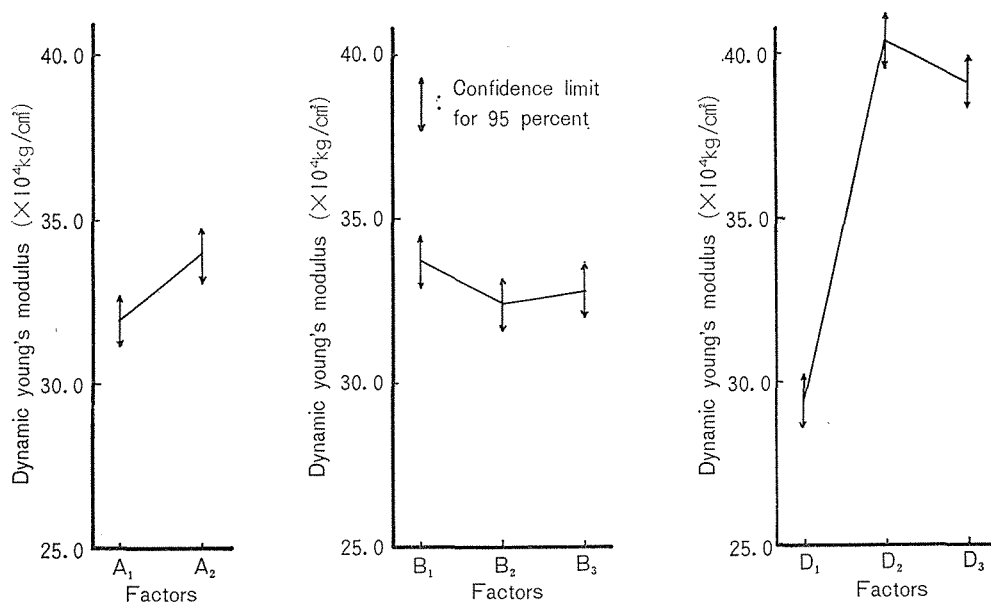


Fig. 10. Influence of factors on dynamic young's modulus of cylinders at 270 days (laboratory test).

現地実験によって得られた、縦、たわみ、ねじり振動数の測定値を用いて、動弾性係数、動セン断弾性係数を計算すると、表.9～表.11のようになる。

また、円柱供試体の動弾性係数、角柱供試体の動弾性係数および動セン断弾性係数について、各材令ごとに分散分析を行なった。材令77日、403日での分散分析を示すと、表.12、表.13のようになる。また、各要因別における円柱供試体の動弾性係数の平均値を各材令ごとに図.11～図.13に示す。

Table 9. Dynamic young's modulus of cylinders (field test) ($\times 10^4$ kg/cm²).

Mix number	Curing period (days)											
	28	77	107	140	270	330	365	403	433	477	527	563
1	37.7	38.0	38.5	38.6	38.7	38.3	38.7	38.7	39.1	39.2	39.1	39.0
2	37.2	38.7	39.5	39.6	41.8	43.3	43.4	43.5	43.8	43.8	44.1	43.6
3	33.0	33.5	34.1	34.2	34.2	34.1	34.8	34.4	37.9	37.1	35.3	35.2
4	30.7	32.2	32.7	32.7	33.0	32.8	33.2	33.2	33.4	33.3	33.8	33.1
5	32.8	32.7	33.3	33.4	33.5	33.4	33.6	33.9	33.9	33.9	34.7	33.7
6	27.5	30.5	31.1	31.0	31.3	31.3	31.4	31.5	31.7	31.7	31.5	31.4
7	39.1	41.8	42.6	42.7	43.7	45.4	43.5	44.5	43.1	44.2	44.3	44.5
8	36.0	39.6	40.5	40.8	41.9	42.8	43.1	43.6	42.7	43.2	43.0	43.1
9	36.0	38.8	38.7	39.9	40.8	41.5	41.9	42.5	41.9	42.3	42.2	42.2
10	32.7	35.7	35.5	35.8	36.7	37.3	37.6	38.3	37.6	37.8	38.1	38.3
11	30.6	33.8	34.5	34.6	35.4	36.1	36.4	36.9	36.5	36.7	36.9	36.6
12	29.9	32.2	33.0	33.3	34.3	37.5	36.5	38.5	38.0	38.1	40.6	40.2
13	37.0	39.2	39.7	39.9	40.6	41.4	41.6	42.6	41.9	41.7	41.7	41.6
14	34.1	37.6	38.2	38.4	39.2	39.9	40.4	41.1	40.1	40.8	41.2	41.0
15	33.2	36.9	37.5	37.7	38.5	39.2	38.8	40.1	38.3	39.5	38.0	39.7
16	32.9	36.0	36.5	36.7	37.4	38.1	38.5	39.1	38.1	39.0	38.1	38.3
17	31.8	34.5	35.0	35.2	35.8	36.5	37.1	37.8	37.3	37.3	38.2	38.3
18	29.7	31.9	32.4	32.6	33.1	33.8	34.1	34.6	33.8	34.2	33.5	33.3

Table 10. Dynamic young's modulus of prisms (field test) ($\times 10^4$ kg/cm²).

Mix number	Curing period (days)											
	28	77	107	140	270	330	365	403	433	477	527	563
1	41.6	45.1	44.3	44.3	44.3	44.5	43.1	44.1	44.5	43.9	44.3	44.2
2	37.2	37.3	37.8	38.0	38.7	39.1	38.2	38.9	39.0	39.2	39.2	39.7
3	34.0	36.1	36.5	36.8	36.4	36.3	35.3	35.5	35.8	35.9	35.7	35.6
4	35.2	35.5	36.1	36.5	36.4	36.1	35.7	36.0	35.9	35.8	35.7	35.4
5	35.2	35.0	35.3	35.1	36.0	35.4	34.6	35.5	34.6	34.8	35.5	35.3
6	30.8	33.1	33.3	33.4	33.4	33.5	32.4	33.0	32.9	30.7	33.0	32.8
7	40.6	41.8	42.6	42.7	43.7	45.4	43.5	44.5	43.1	44.2	44.3	44.5
8	36.0	39.6	39.9	40.7	40.0	41.9	40.4	42.1	41.3	41.5	41.9	41.9
9	37.7	39.1	41.9	40.3	42.6	43.7	40.0	41.7	43.1	41.0	43.9	40.7
10	31.5	35.3	36.0	35.9	37.2	37.8	35.3	37.7	36.9	37.2	37.0	38.3
11	31.0	34.5	35.1	35.0	35.9	36.8	35.2	37.2	36.5	36.7	36.9	36.6
12	29.7	34.8	35.4	35.9	36.6	37.5	35.4	37.6	35.9	36.5	36.1	36.4
13	35.6	38.5	40.5	41.1	39.7	40.4	39.8	41.9	41.2	41.3	42.1	39.1
14	34.8	37.6	37.1	38.6	38.5	39.6	38.0	40.4	37.3	39.7	38.4	38.3
15	33.5	37.9	39.5	39.8	40.6	40.2	38.5	39.9	38.8	40.3	41.2	39.0
16	32.1	36.3	36.6	37.7	38.0	38.6	37.7	38.4	37.1	38.4	38.3	38.6
17	31.1	34.3	34.9	35.0	35.5	35.9	33.4	35.5	37.3	37.3	38.2	38.3
18	29.9	28.5	31.5	31.8	32.8	33.5	32.2	33.4	31.1	32.5	30.8	31.6

Table 11. Dynamic shean modulus of prisms (field test) ($\times 10^4$ kg/cm²).

Mix number	Curing period (days)										
	28	77	107	140	270	330	365	403	433	477	527
1	16.8	18.3	17.6	18.1	18.0	18.0	17.9	17.5	18.0	17.7	18.1
2	15.1	15.0	15.2	15.3	15.5	15.7	15.5	15.7	15.9	15.4	15.8
3	14.4	14.8	14.9	15.0	15.0	14.9	14.3	14.3	14.4	14.3	14.1
4	14.7	14.6	14.7	14.8	14.9	14.8	14.7	14.3	14.4	14.3	14.6
5	14.7	14.4	14.5	14.5	14.7	14.6	14.2	14.5	14.5	14.7	14.7
6	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	13.8	13.5	13.6	12.7	12.7	12.9
7	16.3	16.9	17.3	17.4	18.0	18.5	18.0	18.9	18.0	18.0	18.4
8	14.9	15.8	16.3	16.6	16.5	17.2	17.1	17.5	16.6	16.8	16.8
9	15.6	15.8	17.0	16.6	17.4	17.9	16.6	17.3	17.2	16.6	17.2
10	13.6	14.3	14.6	14.6	14.9	15.1	14.4	15.5	15.1	15.3	15.3
11	13.4	14.2	14.3	14.4	14.7	14.9	14.4	14.8			
12	13.1	14.3	14.5	14.7	14.8	15.2	14.5	15.2	14.7	14.8	14.6
13	15.0	15.6	16.1	16.5	16.0	16.1	15.9	17.1	16.4	17.1	16.9
14	14.8	15.3	15.6	15.6	15.6	16.1	15.5	16.4	15.7	16.1	16.3
15	14.5	15.3	15.7	15.8	16.5	16.3	15.5	16.3	15.7	16.3	16.5
16	13.7	14.7	14.8	15.0	15.2	15.4	15.0	15.2	14.7	15.3	15.1
17	13.4	14.1	14.2	14.3	14.5	14.6	13.9	15.1			
18	12.8	12.3	13.2	13.4	13.7	13.9	13.6	13.6	13.3	13.3	13.4

Table 12. Analysis of variance on dynamic young's modulus of cylinders at 77 days (field test).

Factor	Sum of squares (S)	Degree of freedom (ϕ)	Unbiased estimate of population variance (V)	Variance ratio (F_0)
A	12.336	1	12.3359	20.18**
B	129.180	2	64.5898	105.65***
D	22.500	2	11.2500	18.40**
A×B	1.027	2	0.5137	0.84
A×D	1.457	2	0.7285	1.19
B×D	9.512	4	2.3779	3.89
Error	2.445	4	0.6113	

***: Significant at one percent

** : Significant at five percent

Table 13. Analysis of variance on dynamic young's modulus of cylinders at 403 days (field test).

Factor	Sum of squares (S)	Degree of freedom (ϕ)	Unbiased estimate of population variance (V)	Variance ratio (F_0)
A	3.578	1	3.5781	0.80
B	142.305	2	71.1523	15.99**
D	73.129	2	36.5645	8.22**
A×B	6.953	2	3.4766	0.78
A×D	4.234	2	2.1172	0.48
B×D	13.641	4	3.4102	0.77
Error	17.801	4	4.4502	

** : Significant at five percent

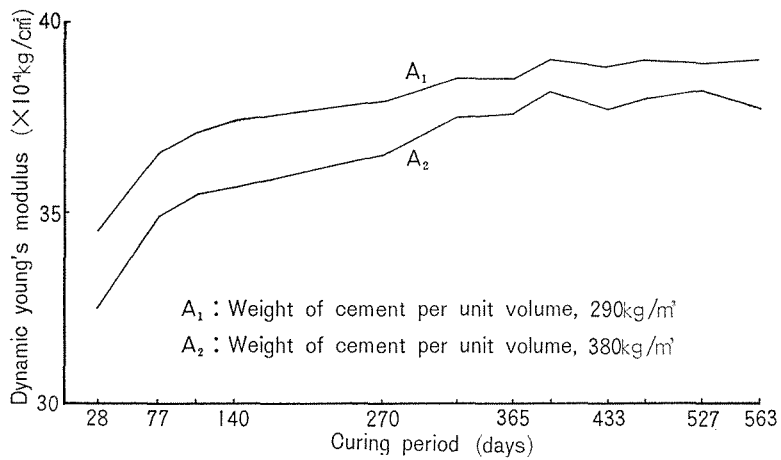


Fig. 11. Change of dynamic young's modulus of cylinders with curing period (field test).

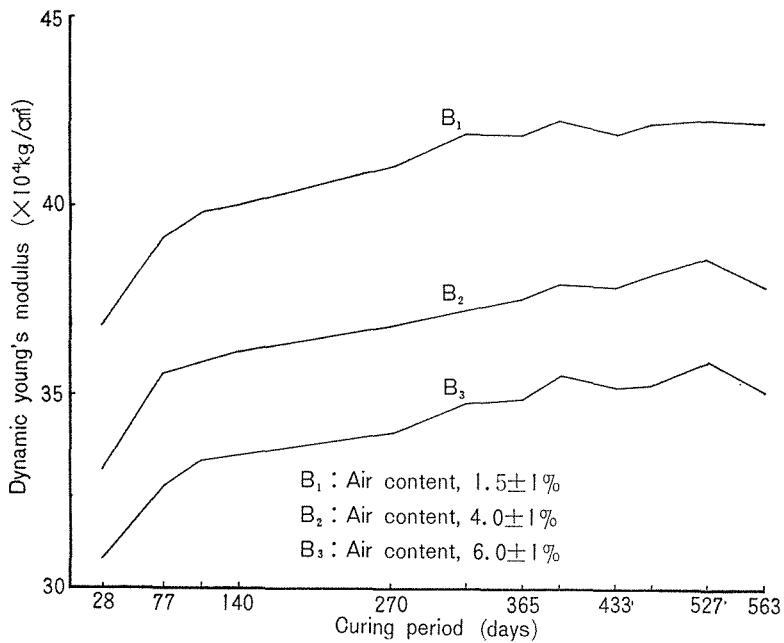


Fig. 12. Change of dynamic young's modulus of cylinders with curing period (field test).

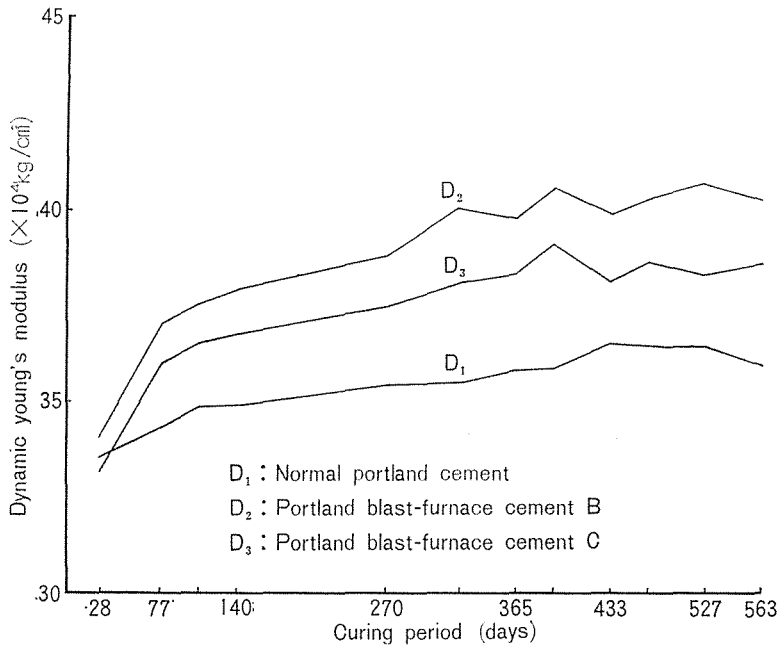


Fig. 13. Change of dynamic young's modulus of cylinders with curing period (field test).

VI. 考 察

5.1 室内実験

図.3~図.5から初期段階(材令77日位まで)においては、各種要因間には差が認められ、単位セメント量については 290kg/m^3 (A_1)のものが優れており、空気量については、1.5%(B_1)、4%(B_2)、6%(B_3)、の順に優れている。セメントの種類については、高炉セメントC種(D_3)、高炉セメントB種(D_2)、普通ポルトランドセメント(D_1)の順に優れているが、高炉セメントB種、C種間には、それ程の差はなく、むしろ高炉セメントが普通ポルトランドセメントより優れているといえる。しかし、材令の経過につれて、表.8、図.3~図.5、図.10で示されるように、セメントの種類間に著しい差が現われる。一般的傾向として、高炉セメントは普通ポルトランドセメントより優れていた。普通ポルトランドセメントにおいては、配合番号1と3の供試体は、材令77日位で崩壊が進み、動弾性係数は急激に低下している。これらの配合は共に単位セメント量が 290kg/m^3 の貧配合であり、単位セメント量が影響していると考えられる。他の配合では、材令270日位から次第に動弾性係数が低下している。1および3と同じ貧配合の配合番号5については、終局的には劣化されるもののその速度が遅い。空気量については、 $1.5\pm 1\%$ (B_1)、 $4\pm 1\%$ (B_2)の供試体では富配合ほど耐硫酸塩性に優れ、 $6\pm 1\%$ (B_3)では逆に貧配合(配合番号5)の方がより耐硫酸塩性に優れていた。

これらのことは、貧配合のコンクリートは空気混入により耐久性が増すという前回の試験結果³⁾、およびAEコンクリートは化学的抵抗性が大きく、このような効果は貧配合コンクリート程著しい⁹⁾といわれていることに矛盾する面があるが、これはコンクリートの耐硫酸塩性が、単位セメント量および空気混入量の相対的な量に関係していることを示しており、さらに研究が必要である。

高炉セメント *B* 種の動弾性係数は *C* 種のそれより大きく両者の時間的変化は、大体同じような経過をたどり、長期にわたりあまり低下しない (図.4, 図.5). これは、① 高炉セメント中のスラグが、クリンカー成分の水和作用中に生成する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の刺激によって硬化すること¹⁰⁾、② ポルトランドセメントが水和すれば、その重量の約20%に相当する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を遊離するのに対して、高炉セメントでは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量が少なく、そのうえスラグは、この $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と結合して、石灰けい酸塩の水和物を形成するので、より緻密な組織となることなどによるもの⁵⁾ と考えられる。

さらに高炉セメントでは、空気量、単位セメント量がともに少ないものほど、動弾性係数が大きかった。このことは、従来、空気混入によって耐硫酸塩性が増加するといわれてきた¹⁰⁾ ことに矛盾している。供試体を観察してみても、単位セメント量 $380\text{kg}/\text{m}^3$ の供試体は、表面が 3~5mm 程度の層状にはがれた状態を呈しているのに対して、貧配合 ($290\text{kg}/\text{m}^3$) のものは、それ程損傷はみられない。このことから今回の実験の範囲内では貧配合の方が耐硫酸塩性が優れているといえそうである。以上の傾向は角柱供試体についても同じようであった。

5.2 現場実験

表.12, 表.13, 図.11~図.13から各要因間には差が認められ、単位セメント量については $290\text{kg}/\text{m}^3 (A_1)$ のものが優れており、空気量については、 $1.5 \pm 1\% (B_1)$, $4 \pm 1\% (B_2)$, $6 \pm 1\% (B_3)$ の順に優れていた。セメントの種類については、高炉セメント *B* 種 (D_2)、高炉セメント *C* 種 (D_3)、普通ポルトランドセメント (D_1) の順に優れている。このことは、室内実験の結果と一致している。

海水によるコンクリートの浸食は相当長年月にわたって起るので、現在までの実験結果 (563日) 程度では、いまだコンクリートの劣化を生ずるに至っておらず、耐海水性に関する結論を得ることはできなかった。今後さらに時間をかけて実験を継続し、室内における耐硫酸塩性試験と対比しながら明確な結論を得たいと考える。

VI. 結 論

第1報でコンクリートの耐硫酸塩性には水セメント比が大きく寄与し、寄与率は73~81%に達すること、および、水セメント比を一定とすると耐硫酸塩性は、セメントの種類に影響され、高炉セメントは普通ポルトランドセメントよりはるかに優れている³⁾ ことを明らかにしたが、今回の実験からも、同様の結論が得られた。空気量、単位セメント量については、前報で富配合の普通ポルトランドセメントは空気量にあまり影響されないが、単位セメント量が $350\text{kg}/\text{m}^3$ 以下になると空気混入により耐硫酸塩性が増加したと述べたが、今回の実験では、一概にそうとは言えないことがわかった。

高炉セメント *B* 種と高炉セメント *C* 種では、空気量が $1.5 \pm 1\%$ (空気混入最小) で、単位セメント量が $290\text{kg}/\text{m}^3$ (貧配合) の供試体をもっとも大きな動弾性係数を示した。

現場実験からは、現在迄の実験期間では十分な結論を得るに至っていないが、今後更に実験を継続する予定である。

VII. 摘 要

本研究は、コンクリートの耐海水性につき、実験的研究を行ったものである。セメントの種類、単位セメント量、空気量などを要因として、水セメント比、細骨材率を一定にした多数の供試体を製作し、室内実験と現場実験を行った。室内実験では、これらの供試体の半数を硫酸ナトリウム溶液に浸漬し、現場実験では、残りの供試体を実際に海に浸漬し、供試体の強度の時間的変化を調べた。強度変化は、圧縮強度と密接な関係にある動弾性係数を非破壊試験（共振方法）により測定して検討した。セメントの種類が、耐硫酸塩性に大きな影響をもち、高炉セメントは普通ポルトランドセメントより明らかに優れていた。空気混入による耐食性の増加は、貧配合の普通ポルトランドセメント（単位セメント量 290kg/m^3 ）によるコンクリートの場合にのみみられた。富配合の普通ポルトランドセメント（単位セメント量 380kg/m^3 ）、富および貧配合の高炉セメントなどによるコンクリートでは、空気混入が増えるにつれて、動弾性係数は減少し、耐久性におよぼす影響は明らかではなかった。

参 考 文 献

- 1) G. Picket (1945) Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders, Proceedings, ASTM, 45, 846-863.
- 2) 磯部邦夫 (1967) 実験計画法入門, 解析の手順, 日刊工業新聞社, 東京, 213-214.
- 3) 加来, 国武, 吉田, 田淵 (1976) コンクリートの耐海水性に関する研究 I. 硫酸塩による促進試験, 佐賀大学誌, 41, 93-104.
- 4) 小林一輔 (1973) 耐海水コンクリート, コンクリートジャーナル, 11, 18-23.
- 5) ——— (1976) コンクリート工学, 森北出版, 東京, 14-16.
- 6) 近藤連一 (1972) 耐海水性セメント, コンクリートジャーナル, 10, 28-31.
- 7) 近藤泰夫, 坂 静雄監修 (1965) コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 東京, 346-348.
- 8) ——— (1965) 同 上, 朝倉書店, 東京, 391.
- 9) ——— (1965) 同 上, 朝倉書店, 東京, 459-460.
- 10) 大浜文彦 (1974) 土木材料学, 朝倉書店, 東京, 123-124.
- 11) S. Spinner and W. E. Tefft (1961) A Method for Determining Mechanical Resonance Frequencies and Calculating Elastic Moduli from These Frequencies, Proceedings, ASTM, 61, 1221-1238.
- 12) 高林利秋 (1973) こわさずにコンクリートを試験する方法, 理工図書, 東京, 11-13.