

コンクリートの硫酸溶液中における侵食に関する基礎的研究

Ⅲ. 表面凹凸の変動解析について

服部九二雄*

昭和52年8月31日受付

Fundamental Studies on the Corrosion of Concrete in a Sulfuric Acid Solution

Ⅲ. Periodic Characteristics of the Variation of Roughness on a Concrete Surface

Kunio HATTORI*

Concrete has a pH of about 13, and therefore is attacked easily by acids, which have pH values less than 7. Therefore, the corrosion of a 5% sulfuric acid solution on concrete is severe and five to six weeks later the durability of concrete will decrease considerably.

Experiments on the influences of the corrosion of a 5% sulfuric acid solution on concrete were carried out, and the following factors were measured and analyzed respectively every week over a twenty week period.

- a. Volume and weight
- b. Bending and compressive strengths
- c. Dynamic modulus of elasticity
- d. Carbonization of concrete
- e. Variation of a 5% sulfuric acid solution
- f. Periodic characteristics of roughness on concrete surfaces

New apparatus was manufactured for the measure of roughness on concrete surfaces, and new attempts were also adopted for measuring the dynamic modulus of elasticity. In summary, the results were as follows.

1. The rates of decrease of weight and volume were increased parabolically.
2. The first resonance frequency during the measuring of the dynamic modulus of elasticity could be obtained easily by the smoothing of the concrete surfaces.
3. The predominant wave length of the roughness on concrete surfaces ranged two to eight millimetres.

ま え が き

多くの農業土木構造物は、その大半がコンクリート材料で作られており、その役割を果してきているが、それらを囲む自然及び人工的環境は多種多様である。そして

コンクリート構造物は余程の施工不良などがない限りかなりの寿命を有し半永久的構造物といえる場合が多い。しかし、このようなコンクリート構造物に悪影響を及ぼす因子も、産業活動とか人々の生活々動の活発化に伴う大気汚染、河川、湖沼の汚濁などのため一層多様なもの

* 鳥取大学農学部農業工学科農業造構学研究室

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University

となってきた。そして、コンクリートの果す役割も重要なものとなると共に、特にその耐久性が昨今重要な課題となってきた。そこで、筆者は前報^{1, 2)}においてコンクリートの耐久性のうち化学抵抗性に注目し、コンクリートの5%硫酸溶液による侵食特性及び強度と、侵食に伴う表面アラサの変化について若干の研究を進めてきた。本研究は、これらの継続として、従来と同一の実験条件を考へて、中性化量より厳密な測定方法、表面アラサの読み取り間隔の短縮とその変動特性の解析及び動弾性係数測定時の供試体表面の平滑処理などの改良、改善に主眼をおき実験を進めてきた。

実験方法

1. 使用材料と供試体の作製・養生方法

使用材料の物理的性質を第1表、配合を第2表に示す。ただし、骨材は河砂・河砂利でセメントは普通ポルトランドを用いた。供試体は、10×10×40cmの型枠で作製し成形後一日で脱型し、約1時間水中養生後、初期の供試体の重量と体積を測定した。

第1表 使用材料の物理的性質

材 料	比重	吸水率 (%)	有効吸水率 (%)	粗粒率	スリヘリ減量 (%)
セメント	3.15	—	—	—	—
細 骨 材	2.55	2.0	0.3	3.22	—
粗 骨 材	2.63	1.3	0.2	7.50*	14.4

* 人為的粒度調整による値

第2表 配 合 例

最大骨材寸法 (mm)	スラック (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
25	7±2	1.4	65	43.8	178	273.85	877.59 1074.84
25	7±2	—	65.6	43.8	7.18	10.95	35.10 42.98

(注) 下欄は供試体10本の必要量

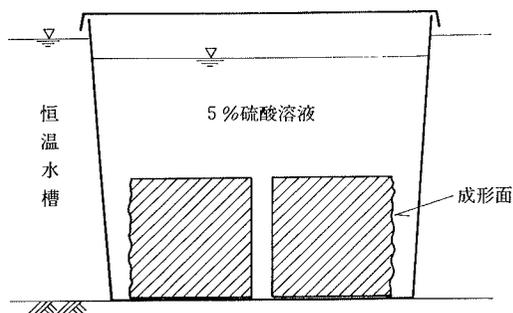
コンクリートの練混ぜと打込みは、2週間分(8本)を一度に行い、各週ごとに水中養生(標準)供試体2本と硫酸溶液養生(浸漬)供試体2本とし、後者は第1図で示す方法で5%硫酸溶液中に浸漬した。標準及び浸漬供試体とも所要の養生期間中、恒温水槽内(20±2°C)で養生した。実験期間は20週間とし、逐次必要な供試体を引き揚げ測定に供した。

2. 測定項目と測定方法

2-1. 測定項目

測定項目は、従来の実験と同様に以下のものを考へた。

a. 重量と体積



第1図 浸漬方法

- b. 曲げ及び圧縮強度
- c. 動弾性係数
- d. 溶液のpH値
- e. 中性化量
- f. 表面アラサ

次に、上記項目の内、特にb, c, e, fについて、それらの実験及び測定方法を述べる。

2-2. 曲げ及び圧縮強度

曲げ及び圧縮強度試験は、前報までは、圧縮強度試験についてのみ載荷面に硫黄キャッピングを施して試験に供したが、キャッピング有無の効果を比較検討するために、キャッピングをしない場合の圧縮実験を行った。当然のことながら、キャッピングしない場合には、侵食された供試体表面には凹凸があり、圧縮時にこの凹凸周辺に応力集中が生じ、キャッピングをした場合に比較してかなり低い圧縮荷重で破壊してしまう。したがって、一般には凹凸のある供試体については、硫黄キャッピングなどを施して圧縮荷重及び曲げ荷重が作用する面をかなり厳密に平面処理して曲げ及び圧縮試験を行うように定められている。³⁾この点を前報の結果と比較して考察を加えた。

2-3. 動弾性係数

硫酸溶液中に所要の期間浸漬されていた供試体は、侵食のため表面は凹凸が著しく、経日するにつれ、動弾性係数を測定する際、起振部とピックアップ部分の密着が十分でなく、満足のいく第一次共振振動数を測定することが困難となった。この点を改良するため、前述の2箇所を金剛砥石で研磨して十分な密着が得られるように平面処理を行い、研磨しない場合との比較を試みた。

2-4. 中性化量

コンクリートの中性化とは、水の存在下で一般に空気中の炭酸ガスと硬化したコンクリート中に生成されたセ

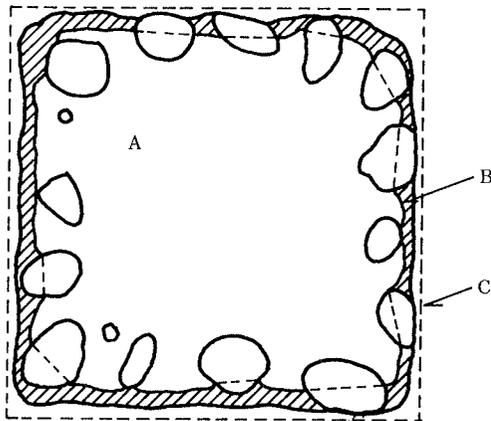
メントペースト中の水酸化カルシウムとの反応;



によりセメントペーストつまりコンクリートは中性化される。このようなセメントペーストにおける炭酸化反応は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ に限らず各種の水和生成物や未水和物においてもおこるが、中性化に関しては、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の炭酸化の影響が最も大きい。炭酸化したコンクリートは収縮して表面に微細なヒビ割れを生じ、この収縮ヒビ割れは、空気と水の通路となり深部まで中性化が進行し、コンクリート寿命を縮める結果となる。このような中性化に関する研究は内外に多くみられるが、⁷⁻⁹⁾ この中性化の考え方が本研究における硫酸による侵食にも適用できるとし、主として硫酸と水酸化カルシウムとの反応;



により侵食された部分を中性化部分とし、第2図のようにして中性化平均深さをプランメータで算定した。



- A: 中性化しない部分
(プランメータで測定)
B: 中性化した部分
C: 初期断面の大きさ
(10×10cm)

第2図 中性化量の測定

2-5. 表面状態

表面アラサを表現する方法としては、

A. 視覚で判断する方法 (写真方法)

1. 供試体表面を直接写真撮影する方法
2. 石膏などに表面を複写し、このサンプルに斜めより光を投射してその陰影を写真撮影する方法

B. 定量的な方法

1. 供試体表面の凹凸を標準砂などで埋めて平面にするのに必要な砂量で表す方法⁴⁾

2. 基準面に対する最高点と最低点との差などで表す方法⁵⁾

C. 定性的な方法

1. 表面の凹凸を1つの連続した波(一直線上に沿って)と考えて、これをデジタル化し、スペクトル解析する方法⁶⁾

などが考えられる。本研究ではAとCの方法を併用して表面状態の変化を追跡した。

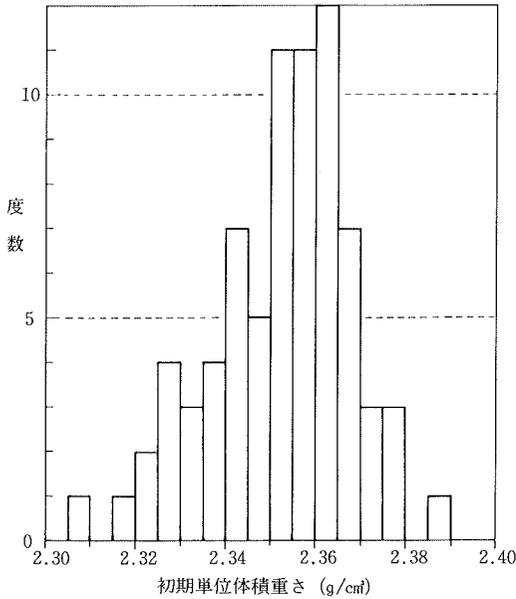
表面アラサをデジタル化する場合、特に問題となるのは表面凹凸(アナログ量)をデジタル量として読み取る場合の読み取り間隔である。前報までは、この間隔を2mm, 0.5mmとしてデジタル化を試みてきた。同一の表面凹凸をデジタル化したデータについて読み取り間隔を変えてスペクトル解析などの結果を比較する必要もあるが、今回は新しく当研究室でマルイ製作所に依頼作製した、読み取り間隔0.2mm、全測定長さ200mm可能な「表面アラサ測定装置」を利用して、石膏に複写された表面凹凸を(1/100)mmのダイヤルゲージでデジタル化した。このようにして得られた表面凹凸値の自己相関々数、フーリエスペクトル及びパワースペクトルを波長に関して表わし、それらに含まれる波長成分より表面凹凸の特性を考察した。

結果と考察

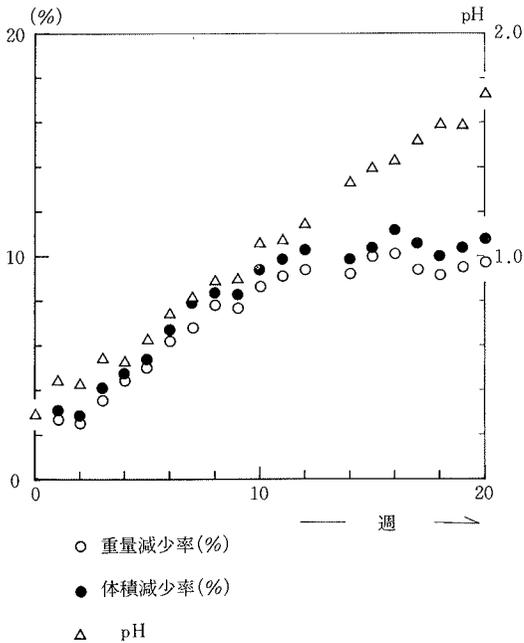
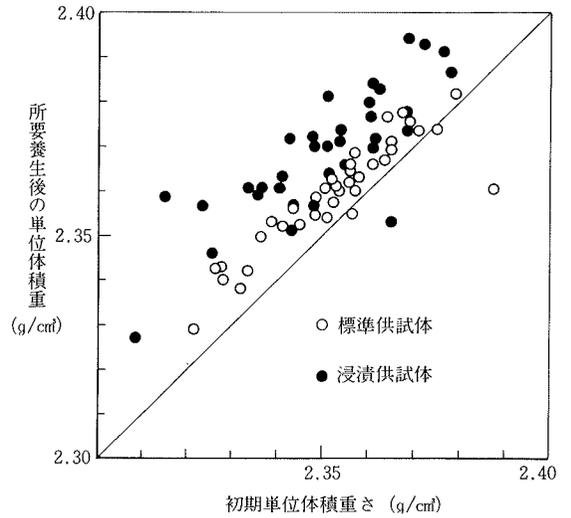
1. 重量、体積とpH値の変化

先ず、第3図に一時間水中養生した供試体について得られた初期の重量と体積より求める供試体の単位体積重さのヒストグラムを示す。この図より、76本の供試体の内半数以上が、 $2.35 \sim 2.37 \text{ g/cm}^3$ の範囲の単位体積重さに含まれることがわかる。さらに、第4図に所要の養生期間後の単位体積重さの経日変化と初期単位体積重さとの関係を示す。この図より浸漬供試体は、水中供試体に比較して、その上昇率が大きいことがわかる。これは、タワシ洗いにより侵食された部分が除去され、より密実な骨材が露出された結果と考えられる。この点は、後述の動弾性係数の変化にも反映している。

第5図に重量、体積とpHの経日変化を示す。重量及び体積減少率ともコンクリートと硫酸との反応に伴い溶液のpHの上昇と共に、放物線状に増大している。しかし12週以降、その減少率がかなりゆるやかになり、侵食速度の鈍化がうかがえる。これは、侵食に伴って生ずる難溶性の硫酸カルシウムを主とする反応生成物が保護層的役割を果たすと共に溶液の侵食能力の低下も影響しているからである。また、12週以降重量と体積の減少率が

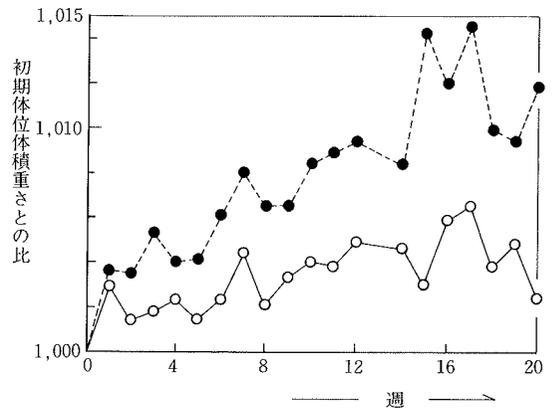


第3図 初期単位体積重さの分布



第5図 重量、体積とpHの変化

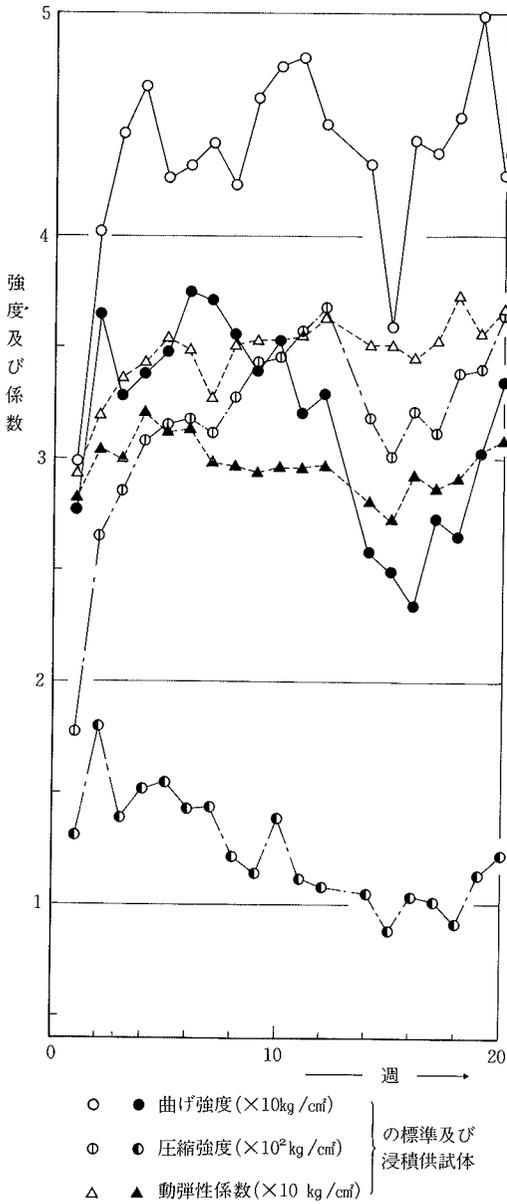
なりゆるやかになることは、この種の室内侵食促進実験が12~14週の実験期間で、その概略的傾向をつかむことができると考えられる。



第4図 単位体積重さの変化

2. 曲げ、圧縮強度と動弾性係数

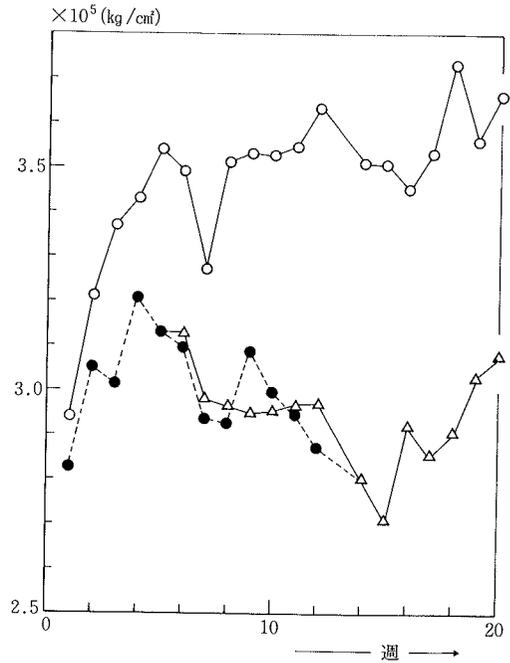
第6図に、曲げおよび圧縮強度と動弾性係数の経日変化を示す。浸漬供試体の強度および係数が標準供試体のそれらに比較して相対的に低い値を示しているが、圧縮強度の相対差が特に著しい。これは、前述のように侵食のため生じた表面凹凸が影響して、キャッピングをしない場合、圧縮時に凹凸周辺に応力集中が発生し低い圧縮荷重で破壊した結果である。また、動弾性係数の相対差が他の2つに比較して小さいが、これは硫酸による侵食後の供試体の単位体積重さが上昇している点から、侵食そのものが表層的で十分内部まで達していないからである。さらに、動弾性係数そのものが、使用材料の種類、配合、供試体の乾湿の程度とか内部構造の欠陥(空隙、



第6図 曲げ・圧縮強度と動弾性係数の変化

亀裂など)に大きく左右されるため、単位体積重さの上昇からも両者にそれ程大きな差が生じなかったと考えられる。

第7図に、動弾性係数測定時の起振部とピックアップ接触部分2個所の金剛砥石による研磨の効果を示す。この図より研磨による表面の平滑処理によりピックアップ



- 標準供試体
- △ 浸漬供試体 (平面処理)
- 浸漬供試体 (平面処理無)

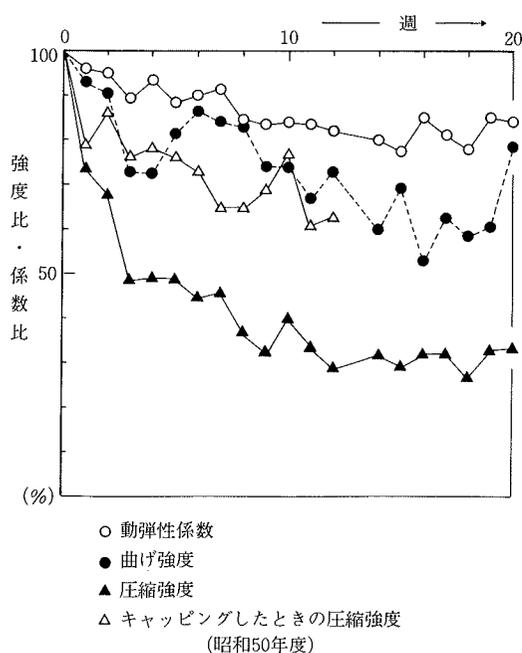
第7図 動弾性係数における表面処理の効果

などの密着が十分となり、バラツキの少ない安定した係数が得られると共に、第一次共振振動数を測定するのは、平滑処理をしない場合に比較して、はっきりしたピーク値が得られることがわかった。

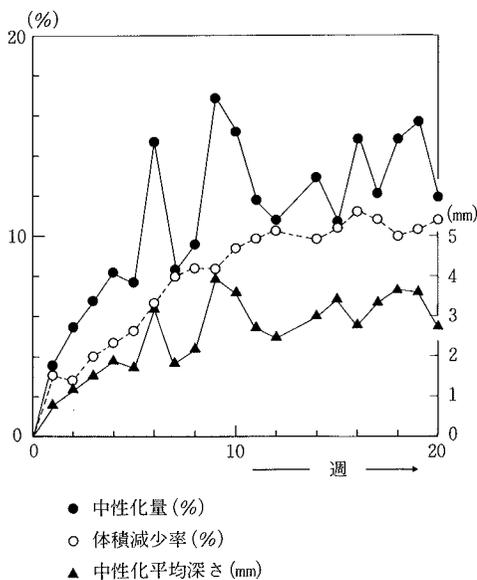
第8図は、標準供試体と浸漬供試体との強度および係数の比を百分率で表わしたものである。この図より、圧縮強度の相対差が極めて大きいことが一層はっきりする。しかし、その相対差が10週以降変化の小さいほぼ一定化した傾向がうかがえる。さらに、圧縮時のキャッピングの影響を見ると、キャッピングをしない場合は、3週以降標準供試体の強度の50%以下となり、12週以降に至っては30%の強度であるのに対し、キャッピングを施すことにより、30~40%程度しか低下しないことがわかる。

3. 中性化量

第9図に中性化量と中性化平均深さの経日変化を示す。この図より、バラツキも目立つが体積減少率と同じように放物線状に増大する傾向を呈している。そして、中性化量つまり実際に硫酸により侵食された部分が、供試体



第8図 標準供試体と浸漬供試体との強度比および係数比



第9図 中性化量の変化

体積の15%程度になる場合もある。さらに、体積減少率との差がいわゆるタワシ洗いで除去できなかった付着侵食量であることから、タワシ洗いのみでは侵食量の実体を十分把握することはできないといえる。ただし、本方法で求めた中性化量は、中性化平均深さを基礎に計算上推定しているため、中性化平均深さを算定するための中性化されていない部分の面積測定をする際の供試体断面接写が極めて重要な意味を持つ。つまり、写真を原寸大に引き延ばす場合の誤差、フェノールフタレイン溶液による変色部分とそうでない部分との境界線を追跡する際の測定者の個人誤差など、誤差の入り易い要因が多い。これらを一層改善するためには、先ずコンクリートカッターで切断して供試体断面を十分に平滑にする。変色部分と変色しない部分との境界線の判定及びプランメータによる測定を2人以上で行う。このような試みをすればある程度バラツキの少ない結果を得られると思われる。

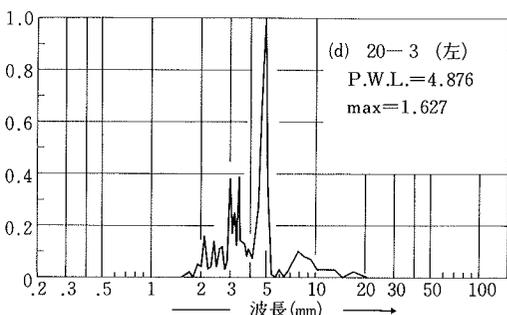
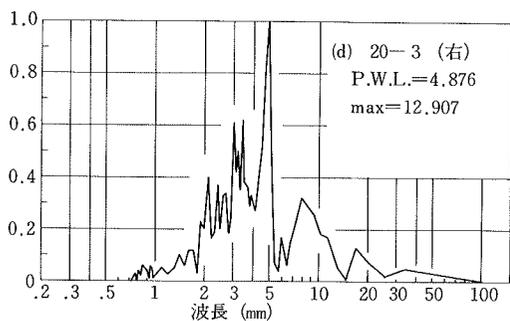
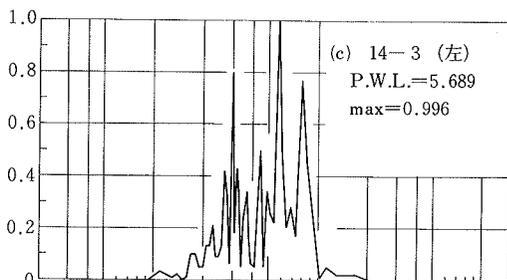
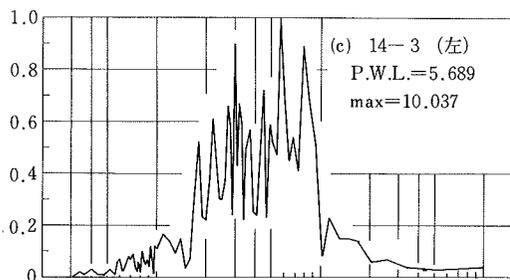
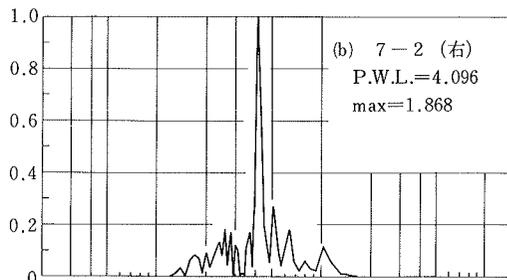
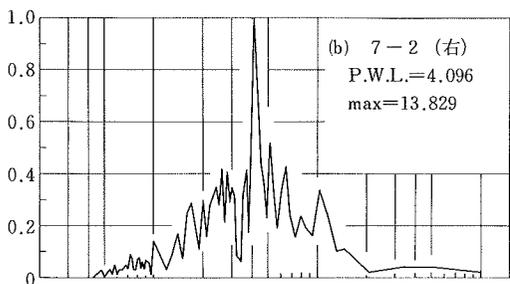
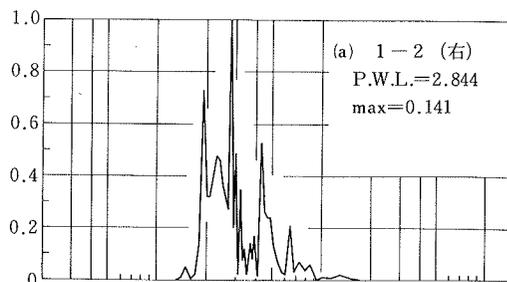
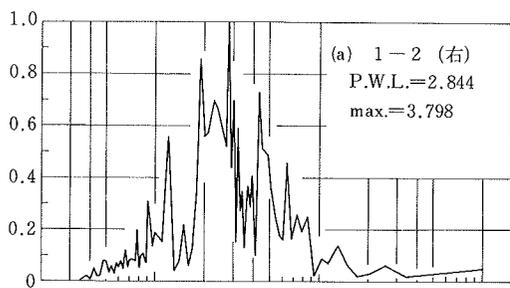
4. 表面アラサ

第10, 11図に1, 7, 14, 20週目についてのフーリエスペクトルおよびパワースペクトルの例を示す。ただし、スペクトル値はその最大値により規準化してある。これらは、前報において表面凹凸データ総数の1/20~1/40の移動平均項数が適切であるという結果を得ているので、これに従って解析したものである。新しい装置を利用して求めた表面凹凸のデータ総数は751個(全測定長は、150mm)であるので、移動平均項数は37と19程度を利用した。原系列(移動平均処理をしないものとの表面凹凸値)の例を、第20週目について、第12図に示す。両者を比較するとわかるように実際には含まれていない波長成分が卓越している。第10, 11図からわかるように、経日するにつれて、卓越波長が長くなり14及び20週目では5~8mmのものが目立つ。しかし、いずれにしても10mm以下の比較的短い波長成分が支配的になっていることがわかる。

総 括

過去3年間にわたり、ほぼ同一の配合条件下で行われてきた、5%硫酸溶液中におけるコンクリートの侵食特性を実験研究してきた。その間、測定方法に種々の改良を試み、それぞれの成果を得てきた。3年間の実験結果のまとめは別の機会に譲るとして、5%硫酸溶液のコンクリートに対する侵食は著しいものである。今回の研究結果を要約すれば、以下ようになる。

1. 体積および重量は放物線状に減少していき、14週以降はゆるやかな減少となる。
2. 圧縮強度試験におけるキャッピング有無の影響は著

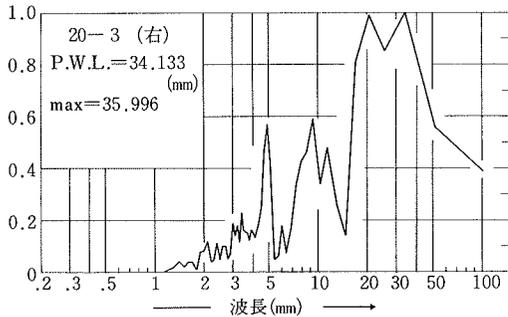


P.W.L.=卓越波長 (mm)
max=スペクトルの最大値

P.W.L.=卓越波長 (mm)
max=スペクトルの最大値

第10図 フーリエスペクトルの例

第11図 パワースペクトルの例



第12図 原系列(20週目)のフーリエスペクトルの例

しく、キャッピングをしないと3週以降で標準供試体の50%以下の強度となる。

3. 動弾性係数を測定する場合、表面の凹凸を金剛砥石で研磨し、ピックアップ部と起振部分と供試体との接触部分を平滑にすると満足のいく密着が得られ、極めて測定しやすくなる。

4. 表面アラサは、経日するにつれてその卓越波長は長くなるが、2~8mm程度の波長成分が主要をなす。以上のように要約できるが、今後同一の表面凹凸データを読み取り間隔を変えてスペクトル解析を行い、その結果を比較して、読み取り間隔間相互の関係を調べる必要

がある。

本実験を遂行するに当り、昭和50年度専攻生神谷澄夫立石卓彦両君の多大な援助に感謝する。なお、計算は、京都大学計算機センター FACOM-M190を利用した。

文 献

- (1) 浜島九二雄：鳥大農研報，28 101 (1976)
- (2) 服部九二雄：鳥大農研報，29 54 (1977)
- (3) 土木学会：コンクリート標準示方書(昭和52年版)，東京 (1977) pp.377~383
- (4) 市原 薫：路面の凹凸(第一版)，技術書院，東京 (1968) pp.20~21
- (5) 山本健太郎：表面アラサ(第6版)，コロナ社，東京 (1971) pp.14~28
- (6) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門(第1版)，鹿島出版会，東京 (1976) pp.12~16
- (7) 岸谷孝一：日本建築学会論文報告集，65 9(1960)
- (8) 左右田孝男・山崎寛治：セメント・コンクリート，138 2 (1958)
- (9) Smolzyk, H. G. : *Proc. 5th ISCC*, III, 369 (1968)
- (10) Hamada, M. : *Proc. 5th ISCC*, III, 343 (1968)