

招待論文

コンクリートの非破壊試験に関する研究

STUDIES ON NONDESTRUCTIVE TESTINGS OF CONCRETE

明石外世樹*

By Toyoki AKASHI

1. はじめに

コンクリートの非破壊試験方法に関する研究は、過去50年にわたり、多種多様に行われており、1984年にはカナダのオタワ市で「コンクリートの現場試験および非破壊試験」に関する国際会議が開催され、発表論文62編のうち39編がACIのSP-82¹⁾に収録されている。その内容は、試験装置の較正法、データ評価法、試験方法の標準化に関するもののほか、研究・開発を必要とする試験方法も含まれている。強度推定に関する試験方法には、反発硬度法、貫入抵抗法、引抜き法、超音波法、ブレイク・オフ法、併用法、マチュリティー法などがあり、強度以外の物性評価のための試験方法には電磁誘導法、放射線法、音波エコー法、AE法、赤外線写真法、レーザ透過法等が含まれている。なお1975年から1983年にわたるコンクリートの非破壊試験方法の文献名およびシノプシスが216編紹介されている。

コンクリートの非破壊試験方法を規格化の面で展望するとき、わが国では共鳴法がJIS A 1127となっているのみで、反発硬度法が日本材料学会の「シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法指針(案)」および日本建築学会の「コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル」に超音波法およびこれと反発硬度法との併用(複合)法が規定されているにすぎない。

一方国外では、超音波法(ASTM C 597, BS 1881: Part 203)および反発硬度法(ASTM C 805, DIN 1048,

BS 1881: Part 202, RILEM, など)の規格あるいは指針が制定されている。複合法(ルーマニアの研究をもとにしたRILEM)もある。その他ASTMには貫入抵抗法(C 803), 引抜き法(C 900)も規格化されている。またBS 1881: Part 1には、各種の非破壊試験方法が述べられており、その種類は24にも及ぶ。

本稿では、まだJIS化されていない反発硬度法、超音波法および両方法の併用法、さらに最近注目されている超音波スペクトロスコピー法について述べる。

2. N型シュミットハンマーに関する研究

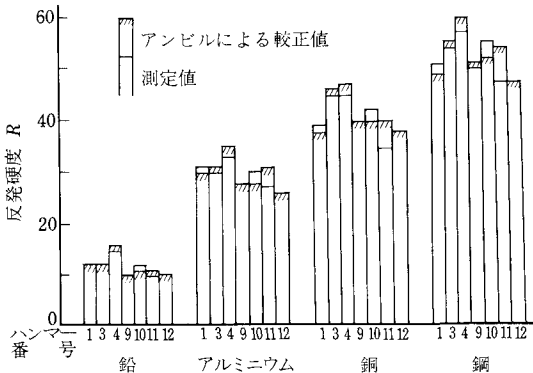
(1) 概要

シュミットハンマー試験は反発硬度: R からコンクリート強度を推定することが主目的ではあるが、各国によって考え方が異なる。ASTM C 805では現場コンクリートの均一性の評価、脱型時期の決定に適用すべきもので、コンクリートの強度決定に代わるものではないとしている。一方、BS 1881: Part 202では強度決定が主目的とされ、さらにDIN 1048はコンクリート強度クラスに対応する R の値、さらには強度と R との検定曲線の求め方まで明示している。

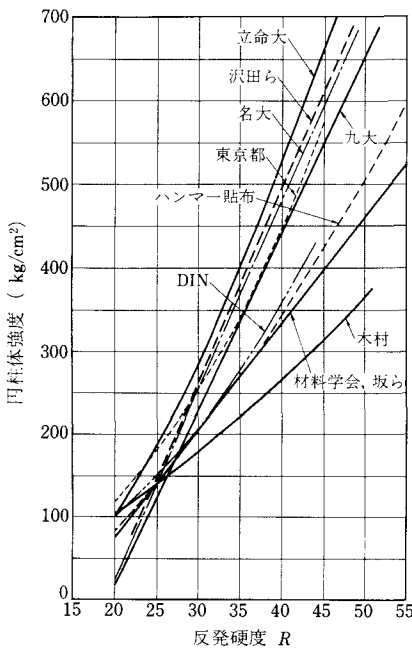
シュミットハンマーに関する理論的かつ実験的研究は、1960年GaedeとSchmidt²⁾によって詳細に行われている。一般的な研究は、検定曲線作成に関するものがほとんどで、これに影響する因子は多様である。すなわち、コンクリートの強度の面からは、セメントの種類、セメント量、骨材の種類、養生方法および材令、締固めの各因子がある。さらにコンクリートの表面状態、コンクリートの種類、表面の乾湿、中性化、供試体の圧定、打撃方向、温度などである。

* 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科
(〒603 京都市北区等持院北町56-1)

Keywords: Schmidt Hammer, ultrasonic pulse, attenuation coefficient, combined nondestructive testing, ultrasonic spectroscopy



図一 各種金属板による比較測定



図二 反発硬度と強度との関係

特に注目されていなくて重要な問題は、ハンマー各個誤差とハンマーの型 (N_I , N_{II} , N_{II2} , N) によってはね定数がやや異なることである⁵⁾。各個誤差はアンビル試験によって補正できるとはいえ、かつて調査した結果を図一に示す⁶⁾。取扱い説明書どおりハンマーの機構を調整し、アンビル補正を行っても、各個誤差が相当あることが認められた。

近年の検定曲線は、図二に示すように材料学会の指針案の式： $f_c = -184 + 13.0 R$ より勾配が強い。この式は1950年代後半のハンマーから求められたものであることに注意すべきで、DINではRに掛ける係数をほぼ20にしている。

(2) コンクリートの強度以外でRに影響する因子

(a) 打撃方向：GaedeとSchmidtの詳細な理論的かつ実験的研究が報告されている⁴⁾。結論的には取扱い説明書(1977年版)に示されている値が適当であろう。ASTM, BSなどでは実験に求めるよう推奨している。

(b) 圧定応力：供試体を試験機で圧定してRを測定するとき、その圧定力によってRが変わる。日本材料学会の指針案⁷⁾によれば、7.5 kgf/cm²を基準とし、それ以上25 kgf/cm²まで曲線的に変化させ、25 kgf/cm²でRを-5補正するよう示している。一方、小坂ら⁸⁾は10 kgf/cm²以上の応力では、補正值 ΔR は

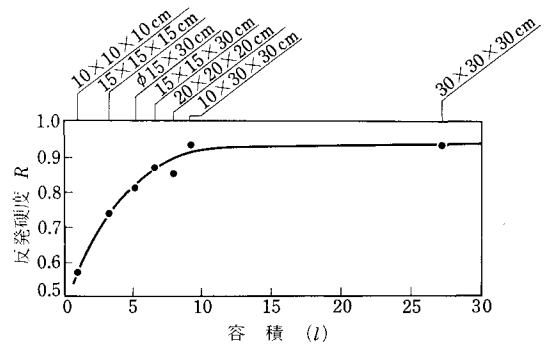
$$\Delta R = 26.5 - 22.5 \cdot \sigma^{0.021} \dots \dots \dots (2)$$

としており、指針案よりかなり小さい補正值となる。また松下ら⁹⁾も7.5 kgf/cm²以上の圧定応力では補正が必要なしと報告している。ちなみにBSでは強度とRとの関係曲線を求める場合、15 cm立方体で打撃エネルギー約2.2 N·m (N型)の下では7.0~10 N/mm²の応力で圧定するよう指示している。

(c) 供試体寸法：供試体を圧定せずに強固なコンクリート床などに置いて下向打撃するとき、供試体の容積によってRが変わる。図三は林ら¹⁰⁾の結果で、10 lを越えるとRは一定となり、また松下ら⁹⁾は10~25 cm立方体を7.5 kgf/cm²で圧定したとき、Rは20 cm以上で一定となったとしている。

(d) 測定面の状態：Rの測定は型枠に接していた平滑な面で行うのが原則である。BSでは従来よりRの異状値がでてでも全部の値で平均Rをとっているが、打撃箇所のすぐ内部に粗骨材や空隙があるときは、打撃音から判断して、その箇所の値を棄却しなければならない。材料学会の指針案では、その偏差が平均値の±20%以上になる値、ASTMでは10個の平均値から7以上はずれた値は棄却することになっている。

型枠が鋼製であったか、木製であったかによってRが変化するとGreene¹¹⁾が指摘し、金ゴテ仕上げまたは鋼製の型枠に接していた面は、木製型枠に接していた面よりもRが10~25%大であったとし、特に強度の大



図三 供試体の容積と反発硬度比の関係

なるものほどその差は大きかったとしている。近田ら¹²⁾も同様な傾向になることを確認し、それは平面度の差異によるものとしている。著者ら¹³⁾も両者が同様な平滑さであり、木製型枠に十分油を塗れば検定曲線に差が現われなかったことを確認している。

(e) 部材厚：部材厚が小さくなると R は小さくなる¹⁴⁾。材料学会の指針案および ASTM では 10 cm, DIN では 12 cm 以下の薄い部材には適用しないことになっている。

(f) 乾湿：コンクリートは気乾状態であって一時的に湿潤状態になると強度も R も低下するので、このことは検定曲線に及ぼす影響はないとされていた¹⁵⁾。一方、同一強度に対し乾燥した場合 R がおよそ 5 大きくなるとする検定曲線もある¹⁶⁾。

著者ら¹³⁾は、以上のことを確かめるため、ハンマー試験によって生ずるくぼみ体積を硬度と考え、強度とくぼみ体積、 R とくぼみ体積の関係を求めた。対象にしたコンクリートは、水セメント比 70~25.5%，スランプ 7.5 cm を目標とし、粗骨材は最大寸法 25 mm の川砂利と 20 mm の碎石を用いた。 R およびくぼみ測定は 20 cm 立方体により、圧縮強度は 10×20 cm 円柱体によっている。養生は標準水中と空中 (20±3°C, 95±5% RH) である。

なお、くぼみの体積 V (mm³)、深さ y (mm)、半径 r (mm) とすれば

$$y = -7.31 \times 10^{-3} r + 1.83 \times 10^{-2} r^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$V = \pi y (0.245 + 6.92y + 62.7y^2 - 52.5y^3 + 11.3y^4) \dots\dots\dots (4)$$

くぼみ体積と圧縮強度との関係は図-4 に示すように、乾湿によって異なる傾向がみられ、300 kgf/cm² 程度までは同じ強度でも湿潤コンクリートはくぼみ体積が

大きい。また 500 kgf/cm² 以上の強度の場合、くぼみ体積に変化が非常に少なく、この点からシュミットハンマー N 型のばね定数で 500 kgf/cm² 以上のコンクリートに適用して強度を推定してよいものかどうか疑問を与えているように思う。

図-5 はくぼみ体積と R との関係で、この場合はコンクリートの乾湿にほとんど影響をされない。

圧縮強度 f'_c と R との検定曲線は、直線回帰で示すか、曲線回帰で示すかという問題はあるが、ハンマーの動作機構からして曲線回帰とすれば図-6 となるが、乾燥コンクリートは高強度域で R が小さく現われる傾向にある。この現象に関し、近田ら¹²⁾は低強度コンクリート ($W/C=75\%$) と高強度 ($W/C=45\%$) コンクリートの細孔分布と細孔容量を測定し、前者は標準水中養生と気乾養生 (20±3°C, 85±5% RH) ととも供試体表面部と中心部とで細孔分布の傾向および全細孔容量にほとん

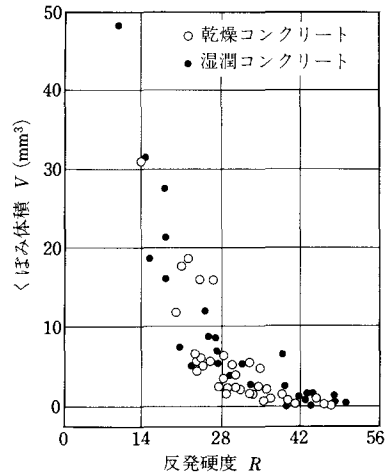


図-5 くぼみ体積と反発硬度の関係

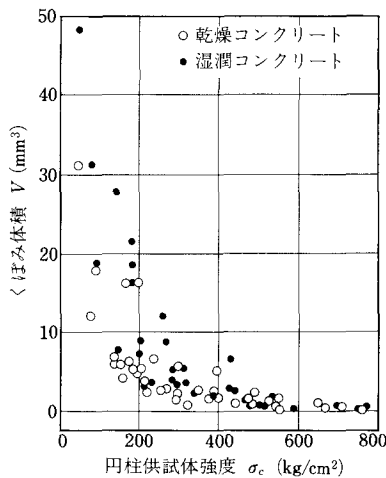


図-4 くぼみ体積と円柱供試体強度の関係

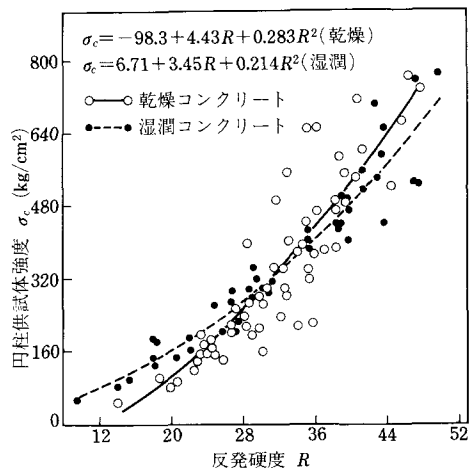


図-6 円柱供試体強度と反発硬度との関係

ど差異が認められなかったのに対し、後者は水分補給が十分でない場合、表面部は中心部に比較し大きい細孔径の分布が多く、全細孔容量も2倍に達していると報告している。このことが強度の割に反発硬度が追従できない1原因ではないかと推察される。

以上のことから、気乾コンクリートで高強度の場合、あたかも強度— C/W の関係のようにある R の値から別の線で相関づけることがよいように思う。

図—6は、このような点を考慮せず、2本の曲線で示しているが、指針案の式とかなり相違する。しかしPC用コンクリートを対象にした沢田ら¹⁷⁾の検定曲線

$$f_c = -441 + 23.4R \dots\dots\dots (5)$$

また同じく松下ら⁹⁾の検定曲線

$$f_c = -408 + 21.4R \dots\dots\dots (6)$$

森田ら⁸⁰⁾の検定曲線

$$f_c = -289 + 19.9R \dots\dots\dots (7)$$

と似た傾向にある。

(g) 長期材令：乾燥状態に保たれ、年数を経過したコンクリートは、炭酸化のため硬度がかなり大きくなっており、硬度と強度とは比例せず、強度を過大に推定するおそれがある。

かつて Gaede と Schmidt⁴⁾は材令による補正係数を求めようと5つの実験例について整理したが明確なことがわからなかった。補正係数はその構造物コンクリートの養生条件さらにその後の湿度などの環境条件によって異なるので材令のみで決定することはできず、国際的にも未解決の問題である。

したがって、長年月を経過した構造物コンクリートの強度を知るためには、コア強度と R との検定式を求め、これから強度を推定するしかない。

ちなみに ASTM では6か月以上の材令のコンクリートは5mm 研磨して R を求めることを推奨している。

(3) 検定曲線に影響するコンクリートの成分材料

(a) セメントの種類：坂ら¹⁵⁾は普通および早強ポルトランドセメント、高炉セメントの3種につき、また Klieger¹⁸⁾はⅠ～ⅣおよびⅡA、ⅢA型の6種のセメントについては、検定曲線には実用上差異を認めなかった。近田ら¹²⁾は気乾養生をし乾燥状態で試験したコンクリートでは普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を用いたとき差異はなかったが、標準養生をし湿潤状態で試験した場合、高炉セメントの方が R が大きい領域で高くなるとしている。

(b) セメント量：セメント量によって±10%以上の推定誤差を与えることはほとんどない。しかし高セメント量は、推定強度より低い強度を、逆に低セメント量では高い強度を与える傾向にある。

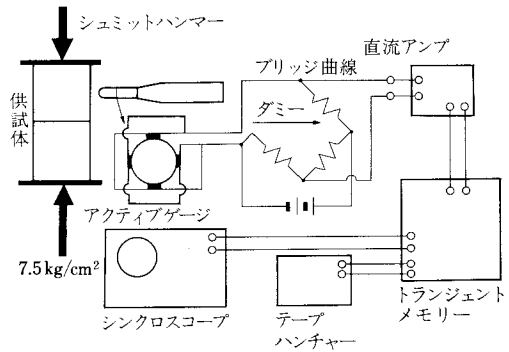
(c) 骨材の種類：一般的な天然産骨材を使用すると

きは、その品質によって影響を与えない¹⁹⁾。最近の Nasser ら²⁰⁾の研究によれば、240 kg/cm² 程度までの強度であれば天然骨材も人工軽骨も差異が実用上なかったとしている。しかし特殊な骨材の場合は検定曲線を作製することが必要である。

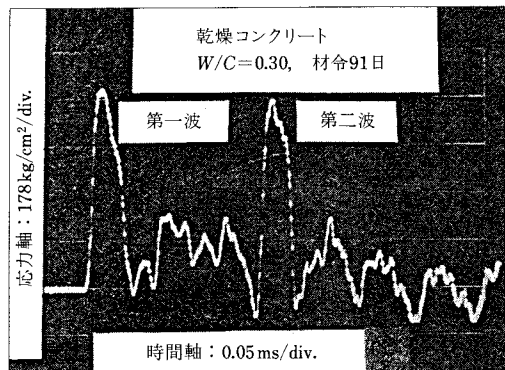
(4) ブランジャーに発生する衝撃応力波

Gaede ら⁴⁾はブランジャーに重錘が衝突するときの継続時間： t_1 と反発するときの継続時間： t_2 とし、 t_1 は反発硬度の関数となり、 t_2 は一定時間の84 μ s となると理論的に求めている。

著者ら^{21), 22)}も正規の長さの約2倍の180.6 mmのブランジャーを試作し、その中央に半導体ゲージを直角4方向に4枚貼り、直並列結線をして平均ひずみが得られるようにした。実験装置の概要は図—7に示すとおりで、図—8はモニター波形であり、図—9は観測応力波形を計算機で処理し、材令別に示した一例である。いずれも重錘の衝突による圧縮波の第1波が現われ、これがブランジャーおよび重錘を往復しているうちにくぼみをコンクリートに生じ、あたかも先端が固定端になったように第2波が生ずる。第2波はくぼみを生ぜさせるための必要時間とエネルギー消費のため低強度コンクリートでは発生が遅れまた波高も小さい。図—10はくぼみ深さと



図—7 ブランジャーの応力測定の概要



図—8 ブランジャーに発生するひずみ波形

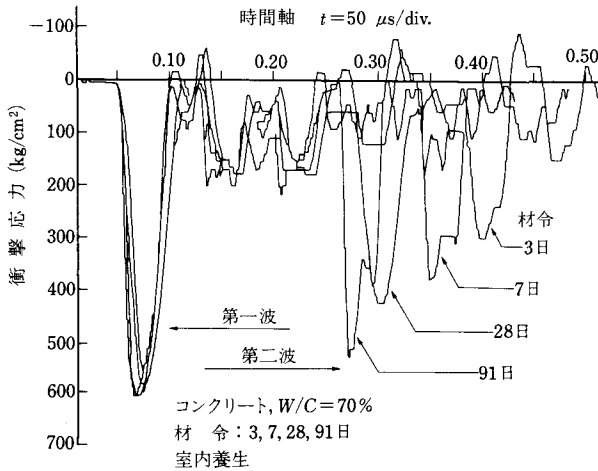


図-9 衝撃応力波の材令別の関係

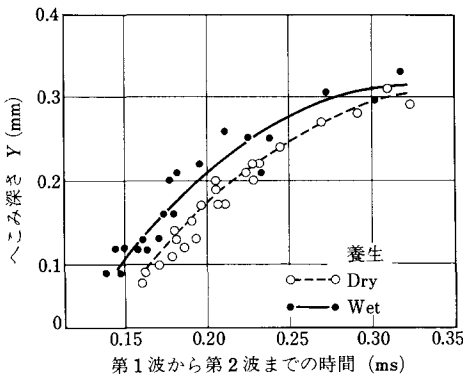


図-10 第1波から第2波までの時間とへこみ深さの関係

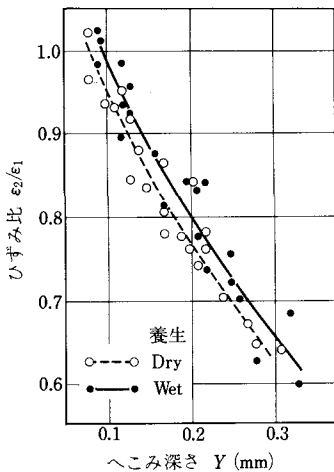


図-11 へこみ深さとひずみ比の関係

第1波から第2波までの時間との関係で乾湿の影響がよく現われている。

第1波および第2波のひずみ波高を ϵ_1 、 ϵ_2 とし、 R

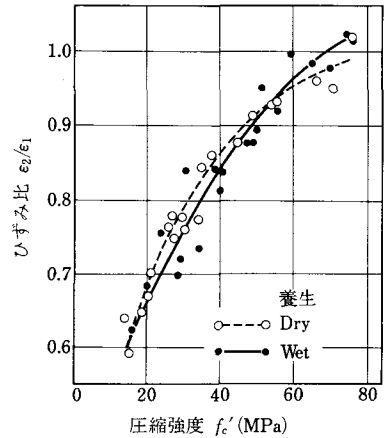


図-12 ひずみ比と圧縮強度の関係

と ϵ_2/ϵ_1 を示せば図-11となる。また圧縮強度との関係は図-12となった。

プランジャーの内部空洞などのためもあり、第1波から第2波が発生する過程は複雑であるが、第1波のひずみ波高値を一定硬度を有する材料で求め理論値と比較すれば、シュミットハンマーの較正の1手段となろう²³⁾。

また反発硬度から強度を推定する根本は、コンクリートの表面硬度と強度との相関の問題に帰せられよう。

3. 超音波法に関する研究

(1) 概 説

超音波パルスがコンクリートに適用されたのは、1950年前後で、Leslie, Cheesman²⁴⁾の Soniscope によるダムの調査は画期的なものである。また Jones²⁵⁾は Ultrasonic concrete tester による基礎的研究を行っている。その後1970年代に携帯型の Pundit が開発され、世界的に普及している。

一方、透過超音波パルスの周波数成分に着目した材料評価法は「超音波スペクトロスコピー」とよばれ、近年、コンクリートへの適用の研究がなされている²⁶⁾。これについては後述する。

普通、超音波パルス速度(音速)という場合、縦波速度を指し、横波、表面波は判別しにくいこともあって対象にされることは少ない。音速あるいはエコーを測定するのに、図-13のような発受振子の配置がある。図-13(A)は最大の感度と伝播距離が正確に決定できる。(B)の(b)はマスコンクリートの品質、隅角のひびわれ深さの測定に用いられ、(B)の(a)は表面退化部の深さ測定に用いられる。Breunigら²⁷⁾によれば図-14のように打点部分が退化しておれば平均音速に差が生ずる。図-15は桁の音速試験の一例である。床版やコンクリートタンクなどは(C)の表面伝播法で測定できる

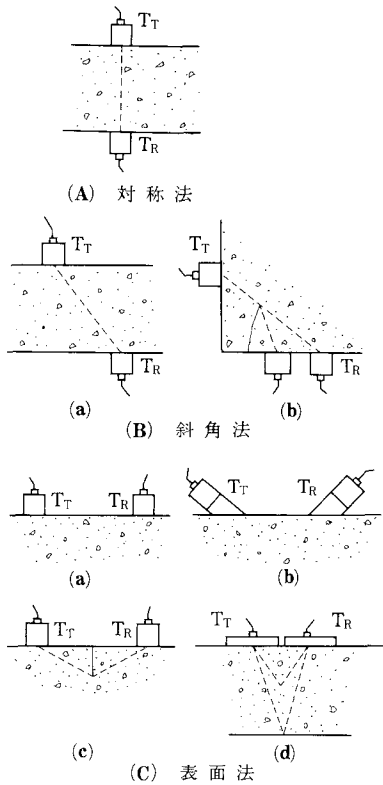


図-13 発受振子の配置

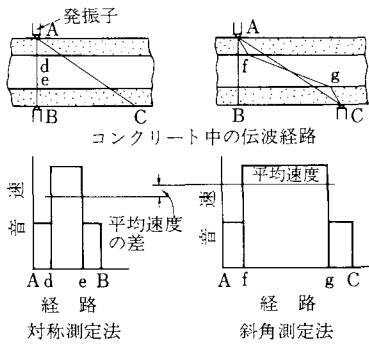


図-14 対称測定と斜角測定の音速の差

が、伝播エネルギーは対称法の2~3%に過ぎない。(C)の(a)の場合、伝播距離を発受振子の中心間とすべきか、内側間とすべきかの問題は図-16のように受振子を移動させ走時曲線を求めれば解決できる。また(b)のようにクサビを付加すると伝播波の立上りが良くなり、伝播距離もクサビ面の中心間でよい。(c)はひびわれ深さの測定、(d)は底面あるいは内部欠陥部からのエコーの検出に用いられる。

ちなみにBS 1881 : Part 203 : 1986では、伝播時間の測定精度は、伝播距離が100 mmから3 mの範囲では

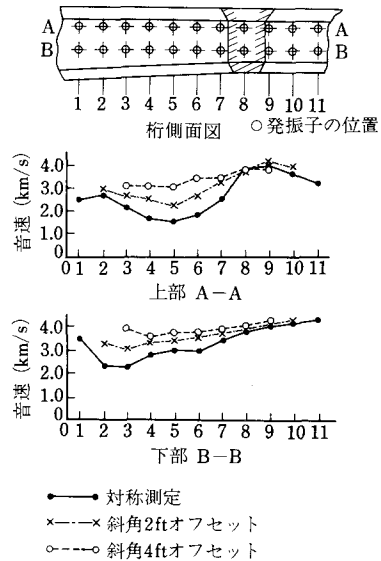
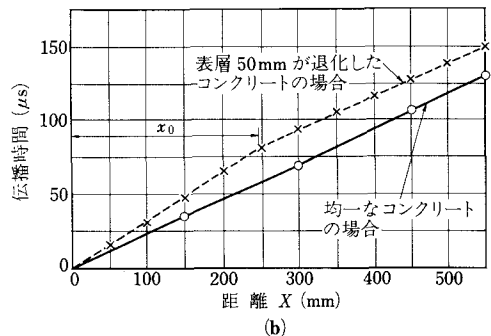
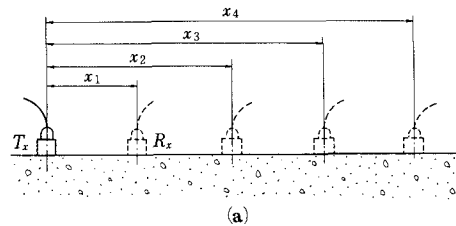


図-15 対称測定、斜角測定による退化部の発見



退化部の厚さ t は $V_s = \text{健全全部音速}$
 $V_d = \text{退化部音速}$

$$t = \frac{x_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}}$$

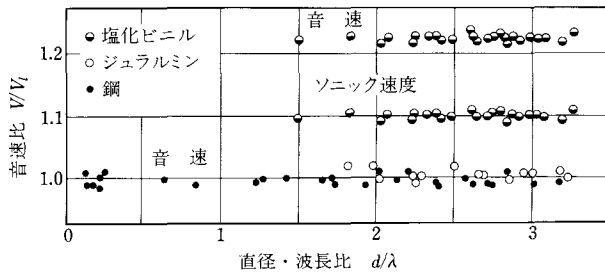
図-16 表面方法によるパルス速度測定方法

±1%を要求している。また伝播距離の測定精度も±1%以上を要求している。

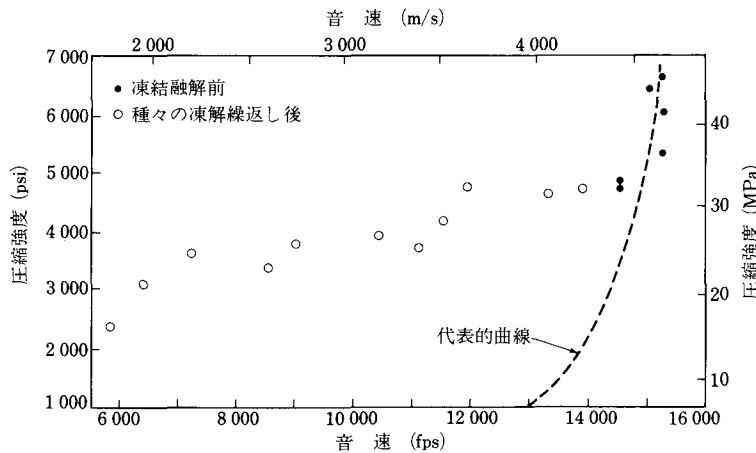
音速は、(a) 発振子側の要因、(b) コンクリートの特性に関する要因、(c) 受振子側の要因に影響を受け、各要因には表-1に示すものがある²⁸⁾。測定装置の性能に関する要因の(a)と(c)のうち、ケーブル長さおよび結合材の影響は、所定の結合材により発受振子を密着

表一 音速に及ぼす影響要因

(a) 発振子側	(b) コンクリート	(c) 受振子側
1. パルス振幅 (充電電圧)	6. 伝播距離	9. 音響学的結合
2. 同上の立上り (放電時間)	7. 分散の有無： 形状・寸法	1) コンクリートの 表面状態
3. ケーブル長さ	8. コンクリートの特性	2) 結合材
4. 振動子の共振振動数	1) 組成	10. ケーブル長さ
5. 音響学的結合	2) マチュリティー	11. 増幅器の性能
1) 結合材	3) 含水量	
2) コンクリートの表面状態	4) 密度	



図一七 均質材料の音速と直径・波長比の関係



図一八 凍結融解作用を受けたコンクリートの音速と強度

させゼロ補正をすればよく、また Pundit などのようなデジタル表示の場合は伝播時間既知の較正棒を用いて行えばよい。

発振パルス振幅は、充電電圧に比例するので、電圧が低いと透過波の立上りが鈍くなり、伝播時間が遅く計測される。Soniscope 用の 45°メカトロッシュル塩では、500~1000 V で十分であるといわれ、PZT でも 800~1200 V が一般である。

パルスの立上り、すなわちスイッチングの時間が長くと受振波の立上りが鈍くなる。一般にサイリスタより水素封入サイラトロンは放電時間が短い。

振動子の共振周波数、換言すれば波長によって音速が変わるかどうか、BS では供試体の横寸法が波長より小さいか、あるいは斜角配置の場合、伝播モードが変わるとし、音速も変化するだろうとしている。したがって寸法の異なるコンクリートエレメントの比較では特に重要であるとし、供試体の最小横寸法は波長以上たるべしとしている。

一方、尼崎⁵⁾は図一七の結果を得ており、鋼の場合であるが d/λ が 1 以下でも音速 V に変化がないとしている。ここでソニック速度 V_L とは、ソニック試験による動弾性係数および動ポアソン比から半無限弾性体として計算した。

発受振子はコンクリート面に、たとえば、グリースなどの粘性結合材を介して押付ければ音響的な良好な結合が得られる。しかしコンクリート面が平滑でないときは、測定箇所を研磨、急結性のエポキシ樹脂あるいはプラスターで仕上げればよい。仕上材は薄くすることが望ましいが、厚い場合は音速の計算に考慮しなければならない。その他直径 6 mm の突起を配列した振動子、半球状の突起をもつ受振子も良い結果を示したという²⁹⁾。

増幅器の性能については、周波数の高い領域の特性が劣るときは透過波の立上りが鈍くなる。ASTM C 597 では 5 kHz から受振子の共振周波数の 10 倍までフラットなことを要求している。BS 1881 では伝播時間の測定精度 1% を確保するには S/N 比を 1 以上にするとよいとしている。ちなみに Pundit のデジタルタイマーをトリガーするには 0.25

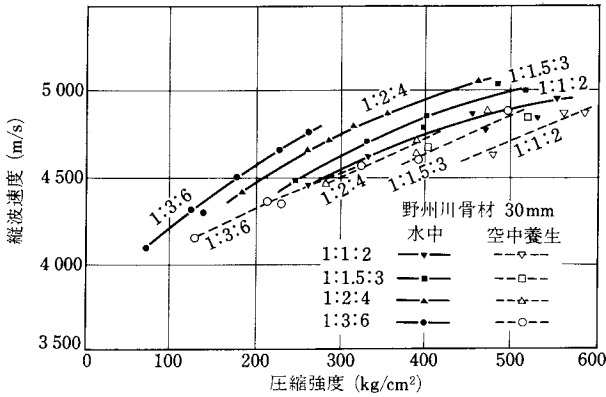
mV 以上の入力が必要である、とされている。

(2) 音速に影響する因子

(a) 温度：コンクリートの温度が高くなると、自由水の蒸発と内部ひびわれのため音速は低下する。コンクリートが凍結すると音速は上昇する。表一2には温度による補正値を示す²⁹⁾。

(b) 乾湿：コンクリートが吸水すると音速はわずかに増大する。その割合は質の悪いコンクリートで 1.9%、良いコンクリートで 1.3% くらいである。しかし音速と強度との関係には乾湿が大きく影響する。

コンクリートの圧縮強度 f'_c (MPa) と音速 V



図一十九 縦波速度と圧縮強度

表一三 k 値

コンクリートの種類	立方体強度 (MPa)	セメント量 (kg/m³)	k
10 mm 川砂利	13~55	250~400	0.022
10 mm 川砂利	35~75	520	0.016
20 mm 川砂利	20~45	350~400	0.019
20 mm 花崗岩	20~45	350~400	0.022
20 mm 石灰岩	20~45	350~400	0.015
14 mm 軽量骨材(a)	15~50	250~350	0.027
14 mm 軽量骨材(b)	35~70	450~500	0.019

(km/s) との関係式の表示には種々あるが³²⁾, Swamy ら³³⁾は, その1つの表示である

$$f'_c = ae^{bv} \dots \dots \dots (8)$$

とし, 標準水中養生のものにサフィックス1, 湿度50~65% RHの空中養生のものに2を付ければ

$$\ln \frac{f_1}{f_2} = b(V_1 - V_2) = kf_1(V_1 - V_2) \dots \dots \dots (9)$$

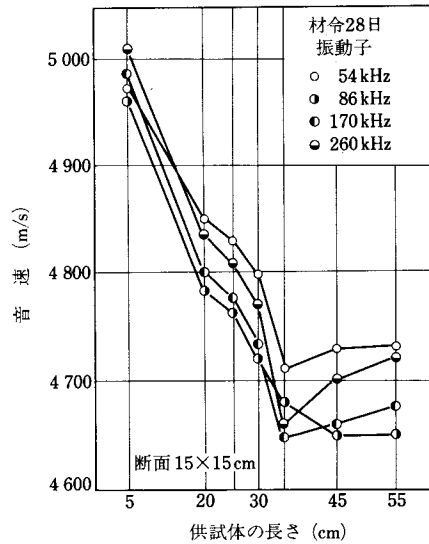
の関係で k は締めめ, 含水量, 配合および部材の型式と寸法に関する定数であるとし, 表一三を示し, 適合する k を用いれば現場コンクリートの強度を ±10% で推定できたと報告している.

(c) 伝播距離: BS 1881 では粗骨材の最大寸法による音速の不均一性を除くため, 20 mm では伝播距離 100 mm 以上, 20~40 mm では 150 mm の伝播距離が必要であるとしている. また音速は, 一般的には伝播距離に影響されない性質のものではあるが, 伝播距離が長くなると低下する傾向にあるとしている. これは伝播距離が長くなるとパルスの高周波成分が低周波成分より大きく減衰し, 立上りが鈍くなり, 立上りの位置を正確に決定できないこと, さらには立上りの定義にも起因する.

尼崎⁵⁾は図一20の結果を示しており, 伝播距離 30 cm 程度まで音速は急激に低下し, それより大ならばほぼ一定値となった. このことは, 30 cm 程度までは側面から

表一四 温度による音速の補正

温度 (°C)	補正値 (%)	
	乾燥コンクリート	湿潤コンクリート
+60	+5.0	+4.0
+50	+3.5	+2.8
+40	+2.0	+1.7
+20	0	0
0	-0.5	-1.0
-4 以下	-1.5	-7.5



図一20 供試体の伝播距離による音速の変化

の反射波の影響がなく, 高周波成分の減衰による低下も少なく, また約 30 cm より長くなると, 受振第1波が側面反射波の重畳のため振幅が大となり, 音速の変化が少なくなるのであろうと論じている.

(d) 配合: コンクリートの性状が音速に影響する因子は, 強度に及ぼす因子と同様に多いが, 劣化などを受けていないコンクリートの強度-音速関係に主として影響する因子は, 骨材セメント比 (容積), 骨材の種類, 粗骨材の最大寸法, さきに述べた含水率などであろう. したがってコンクリートの成分材料, 配合が一定ならば, セメントの水和による強度-音速の良い相関が得られる. しかしコンクリートの音速変化はベスト部分の変化を測定するものであるから, 本質的に構造鈍感性はまめがられない.

配合別の関係の図一19は, 粗骨材の最大寸法 30 mm, スランプ 25 cm と 15 cm の種々の配合について求めたものである³²⁾. なお, Jones²⁵⁾は水和進展との関係を直線で示しているが, 図のようにやや曲線的になるのが本当である. 成分材料, 配合要因の差異による影響につい

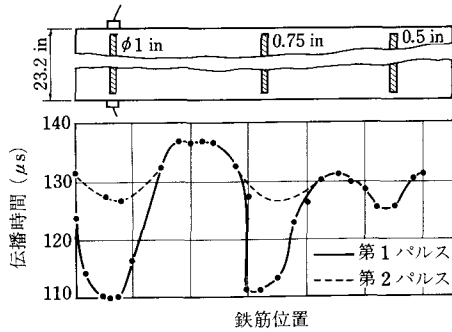


図-21 鉄筋径と伝播時間 (R. Jones による)

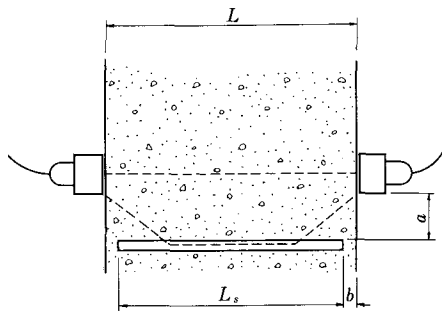


図-22 鉄筋の位置関係

ては, Sturup ら³⁰⁾の最近の発表がある。

超音波法は構造物コンクリートの品質評価に適した方法であり³⁴⁾, Chung³⁵⁾は部材の均質性評価のために等速度線図を作製し, 1部材の音速分布のうち $V-2\sigma$ (V : 平均値, σ : 標準偏差) 以下の音速は内部に欠陥が存在する可能性があるとしており, CCA でも等速度線図の作製を勧めている。

(e) 鉄筋: RC 部材, SRC 部材の音速を測定するとき, 鋼中を超音波パルスが伝播し, その影響があるかどうかが問題となる。鋼の縦波速度は 5.81 km/s であるが, 鉄筋径が小さくなると音速が小となり, 直径が 6.3 mm では 5.18 km/s まで低下するという³⁶⁾。

鉄筋の軸方向に超音波パルスが伝播する様子を 1953 年 R. Jones³⁷⁾が直径 2.5 cm, 200 kHz の水晶を振動子として図-21 を発表している。振動子の直径に比し, 鉄筋が細い場合は, 鉄筋を伝播してきた第 1 パルスが検出しにくくなる。

さて超音波パルスの伝播方向, すなわち発受振子に平行に鉄筋が図-22 のようにあるとし

$$\frac{a}{L} < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_c}{V_s + V_c}} \dots\dots\dots (10)$$

ならば, コンクリートの音速 V_c (km/s) は式 (11) で与えられる。

$$V_c = \frac{2aV_s}{\sqrt{4a^2 + (TV_s - L)^2}} \dots\dots\dots (11)$$

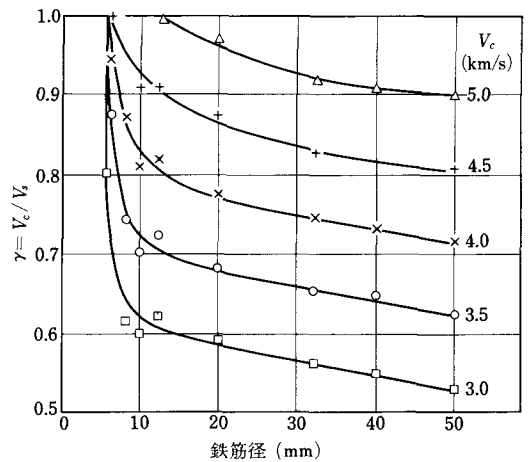


図-23 縦方向筋に対する鉄筋径と γ との関係

ここに, V_s : 鉄筋の音速 (km/s), a : オフセット (mm), (図-22 参考), T_i : 伝播時間 (μs), L : 振動子間の距離 (mm)

鉄筋前面のかぶりを c (mm) として, オフセットが小で鉄筋の全長 L_s (mm) を伝播するときは, 式 (12) となる。

$$V_c = \frac{2V_s \sqrt{a^2 + c^2}}{(TV_s - L_s)} \dots\dots\dots (12)$$

式 (11) と式 (12) のいずれを適用するかは, コンクリート表面から x なる距離で鉄筋にパルスが入り, それが最短時間を示すものとすれば, ほぼ

$$x = \frac{\gamma}{\sqrt{1 + \gamma^2}} a \dots\dots\dots (13)$$

で示される。ここに $\gamma = V_c/V_s$ である。 $x \geq c$ で, $a/c > 2.0$ ならば式 (11), $a/c < 1.4$ ならば式 (12) となる。

いま, 鉄筋中も伝播するとして, そのときの見掛けの音速を V_m とすれば

$$V_c = kV_m \dots\dots\dots (14)$$

とおけば, V_s と a/c は一般の場合変化し式 (14) の場合

$$k = \gamma + 2 \left(\frac{a}{L} \right) \sqrt{1 - \gamma^2} \dots\dots\dots (15)$$

a/c が小さいときは

$$k = \gamma + 2 \left(\frac{\sqrt{a^2 + c^2} - \gamma c}{L} \right) \dots\dots\dots (16)$$

$a=0$ ならば

$$k = 1 - \frac{L_s}{L} (1 - \gamma) \dots\dots\dots (17)$$

以上が理論的な場合である。鉄筋径が小さい場合, 鉄筋を伝播したパルスは, 受振側で検出しにくくなる。

Bungey は, V_c と鉄筋径を変化させて実験的に γ を求め図-23 を示している。この測定は Pundit で 54

kHzの振動子を用いたものであるが、BS 1881に採用されている。Chung³⁶⁾も同様な結果を示している(図-24)が、測定方法の差異によるものと思われる。

波形観測による場合は、増幅器のゲインを変えて測定すれば鉄筋の影響が判定できる³⁹⁾。たとえば図-25 (a)はゲインを0.5 mV/div、オフセット3 cmにD 25があ

る場合で、鉄筋を伝播している波が最初に現われているが、波頭が鉄筋を伝播しているかどうか定かではない。

(b)は10 mV/divにゲインを1/20に落とした場合で、確かに鉄筋を伝播していることがわかる。図-26は鉄筋の影響が現われないオフセットを大きくとった場合で、(a)は0.5 mV/divでも(b)の10 mV/divでも同様な波形となる。ちなみに、図-25 (b)の第2波の立上りはコンクリート部分を透過したもので、図-26の立上り時間と一致している。場合によって第2波が明確に検出できないこともある。

(f) 超音波パルス速度と性状変化

ASTM C 597にもいうように、音速はコンクリートの性状の相対的相異を知るうえで有力な手段である。古くは1949年のLeslieら²⁴⁾によるダムの性状変化の測定、同年Jones²⁵⁾による立方体供試体の上下方向の分離状態の測定、また凍結融解による供試体各部の損傷程度の測定などが発表されている。著者の研究室で行った比較的最近の適用例の2~3^{40)~42)}を示す。

コンクリートの繰返し衝撃による疲労過程を音速比で

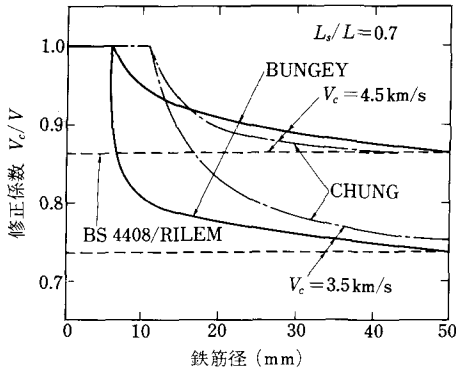
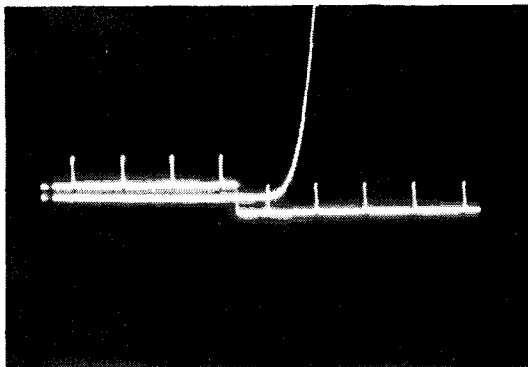
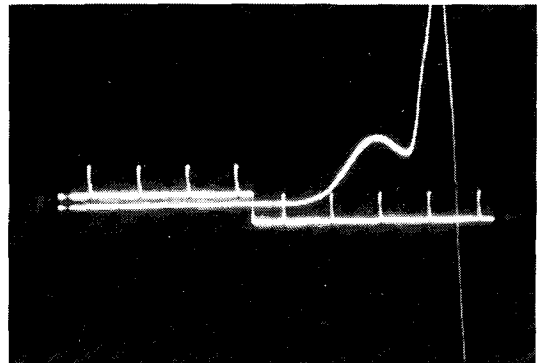


図-24 縦方向鉄筋がある場合の修正方法の比較

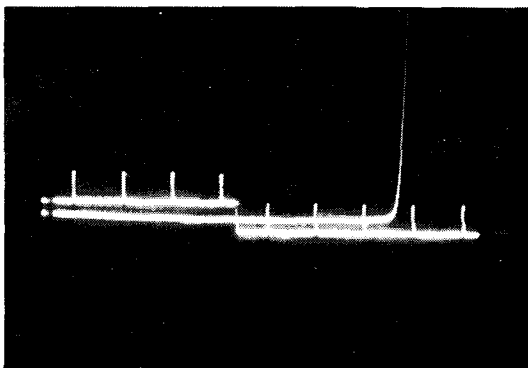


(a) ゲイン0.5 mV/div, D 25よりオフセット3 cm

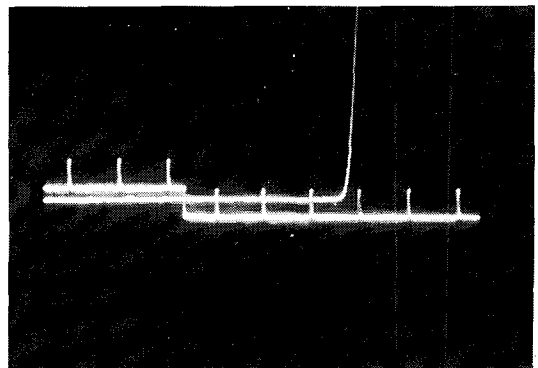


(b) ゲイン10 mV/div, D 25よりオフセット3 cm

図-25



(a) ゲイン0.5 mV/div, D 25よりオフセット12 cm



(b) ゲイン10 mV/div, D 25よりオフセット12 cm

図-26

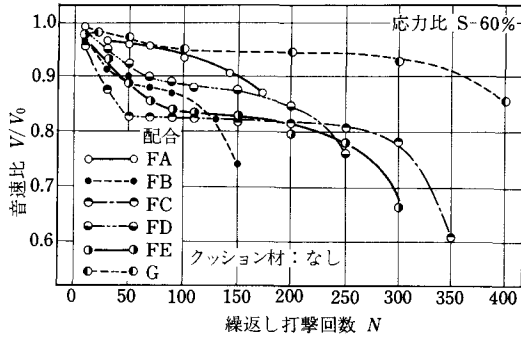


図-27 繰返し打撃による音速の変化 (SFRC)

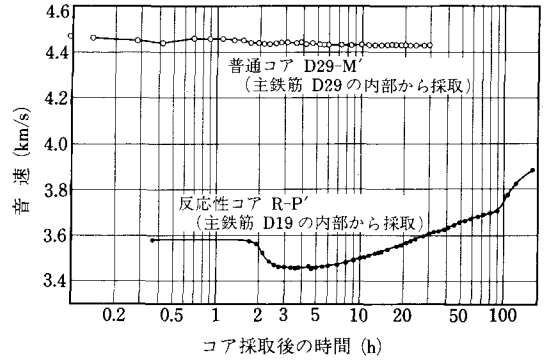


図-31 コンクリートコアの音速経時変化

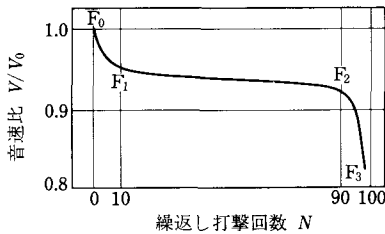


図-28 疲労度の定義

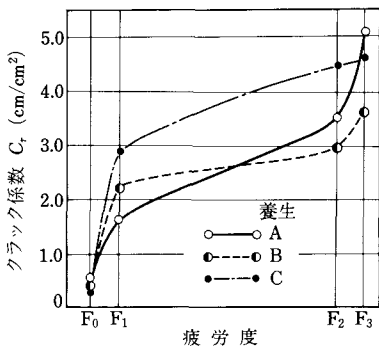


図-29 クラック係数と疲労度の関係 (コンクリートの乾湿の影響)

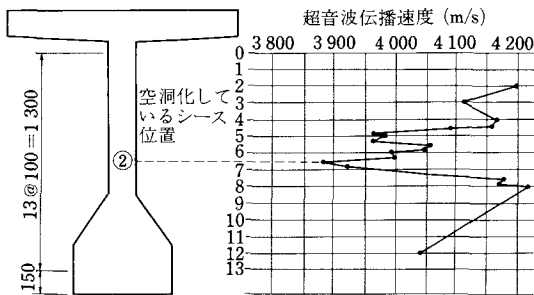


図-30 PC 桁内部の空隙による音速低下

求め (図-27), その変化点を図-28 のように定義し, 衝撃疲労過程は図-29 のようにクラック係数 (単位面

積中のひびわれ長さ) と対応していることが明らかになった。

次にポストテンション PC 桁から水漏れがあったが, そのグラウト不良シースを確定するため音速によりこれを行った (図-30)。

ASR によるひびわれ発生過程は, 音速の経時変化から敏感に劣化程度を推定することができる。ASR をおこしている供試体から材令 10 か月で採取したコアを $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 95 % RH のもとに保管したときの音速の経時変化を図-31 に示す。この測定は Pundit にプリンターを接続して 10 分ごとに続けたものである。このような測定は, ASR が生じているか否か判断できる有効な手段である。

(g) ひびわれ深さの測定

超音波法の初期の目的は Leslie ら²⁴⁾ による構造物コンクリートのひびわれ深さ測定である。彼らは図-13 (B) (b) の方法でひびわれ先端を回折するための伝播時間の増大から深さを測定した。Jones⁴³⁾ も表面ひびわれの深さ測定例をオシロスコープの波形で示している。

表面ひびわれ深さの測定は, 一般的には表面法が適用されている。BS 1881 : Part 203 : 1986 には表面に直角なひびわれおよび斜めひびわれの深さ測定法が示されている。その他 2, 3 の方法があるが^{43), 44)}, 以下著者らが行った実験^{45), 46)} をもとに問題点について述べる。

① 図-32 (a) に示すように, 発受振子をひびわれからそれぞれ等距離 a (mm) に配置したときの伝播時間 T_c (μs) とひびわれのない近傍表面での $2a$ 間の伝播時間 T_0 (μs) から深さ y (mm) は

$$y = a\sqrt{(T_c/T_0)^2 - 1} \dots\dots\dots (18)$$

この方法は, T_0 , T_c の測定で伝播距離を振動子の中心にとるのか, a をどれくらいにとるのか問題点がある。BS は振動子ケースの側面をとっており, RILEM は振動素子の端間をとっている。これらの解決にはホーン振動子またはくさび振動子を用いるとよい。

② 発振子を図-32 (b) に示すようにひびわれから

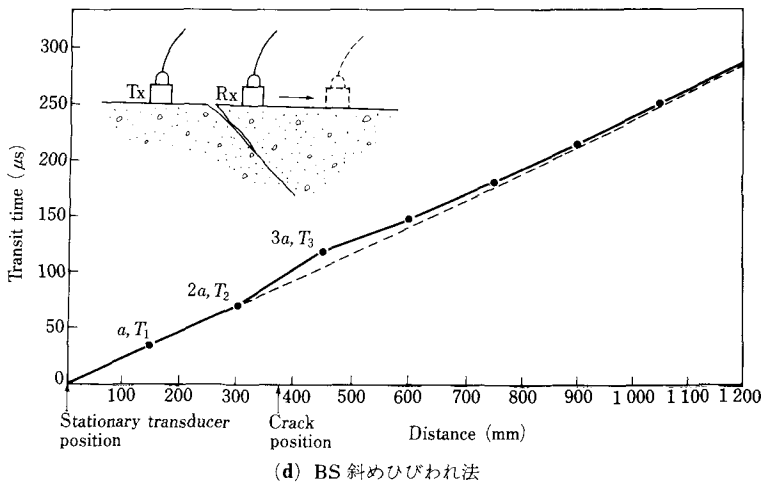
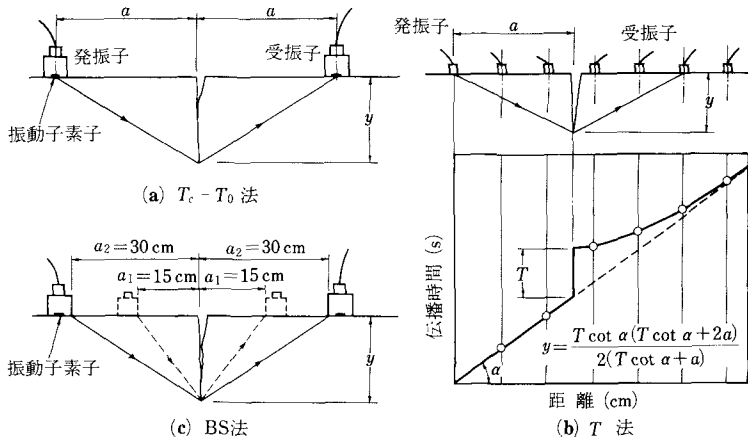


図-32 ひびわれの深さ測定方法

a なる距離に固定し、受振子を移動させて走時曲線を描く、深さ y は

$$y = \frac{T \cot \alpha (T \cot \alpha + 2a)}{2(T \cot \alpha + a)} \dots \dots \dots (19)$$

この方法では、ひびわれ位置での不連続時間 T を求める必要があるが、ひびわれ以降の走時曲線を正しく描くことが比較的困難であり、個人誤差を伴いやすい。また普通振動子を用いた場合、音速が伝播距離によって変化しやすい。

③ BS に推奨されている方法で、図-32 (c) に示すように a_1 をそれぞれ 150 mm, 300 mm にしたときの伝播時間 t_1 (μs) および t_2 (μs) とすれば

$$y = 150 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (\text{mm}) \dots \dots \dots (20)$$

この方法は T_0 を測定する必要はないが、 a_1 を 5~10 cm にすると受振電圧も大きく、測定精度が良くなる。これは振動子をひびわれから離していくと、最初は受振

電圧が大きくなるが、その後徐々に低下し、受振波の位相がついに逆転するからである。この点、波形観測しないデジタル式の装置では、注意が必要である。

④ 図-32 (d) に示すように、ひびわれが表面に対し直角でない場合で、同じく BS に推奨されている方法である。発振子 T_x をひびわれから $2.5a$ ($a=150$ mm) の位置に固定し、受振子 R_x を $a, 2a, 3a$ と移動させ走時曲線を描く、 $2a$ および $3a$ のときの伝播時間をそれぞれ T_2 (μs), T_3 (μs) とすれば

$$y = \frac{a}{2} \sqrt{\left(\frac{2T_2^2 + 3T_3^2}{T_3 \cdot T_2}\right)^2 - 25} \dots \dots \dots (21)$$

この方法に対しては、実測経験がないので論じない。

⑤ ひびわれから a を順次大きくしていくと、受振波は位相が逆転することはすでに述べたが、最近、戸井田ら⁴⁷⁾は波動の回折理論から、コンクリートのポアソン比を 0.25 とすれば、ひびわれ先端への入射角が 45° で位相が逆転するので、このときの a を測定すれば $a=y$

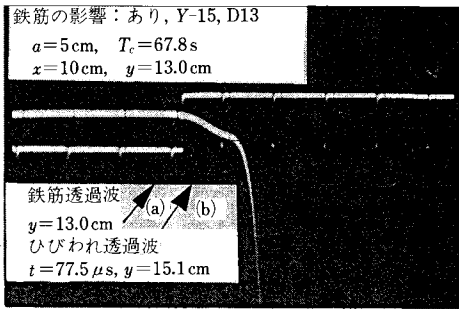


図-33 鉄筋の奥までひびわれが達しているとき

と簡単に求められると報告している。

⑥ ひびわれを鉄筋が貫通しているときは、鉄筋を伝播した波がひびわれ先端部を回った波より先に現われるので(図-33)波形をよく観察すれば判定できる。

4. 超音波パルスのコンクリート中での減衰

超音波パルスの平面波がコンクリート中を伝播するとき

$$T_x = I_0 e^{-\alpha x} \dots \dots \dots (22)$$

なる関係が成立すると考えられ、ここに α : 減衰定数, I_0 : 音源の音圧, x : コンクリート中の伝播距離, I_x : x の位置での音圧

減衰定数 α は

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \dots \dots \dots (23)$$

で示され、 α_1 : 粘性減衰定数, α_2 : 粗骨材による散乱減衰定数, α_3 : 気泡, 空隙による反射に起因する減衰定数。

$$\alpha_1 = \delta / \lambda \dots \dots \dots (24)$$

$$\alpha_2 D = H (\pi / \lambda)^n \dots \dots \dots (25)$$

ここに、 δ : 対数減衰率, λ : 縦波の波長, D : 粗骨材の平均粒径, H : 散乱因子でモルタルと粗骨材粒子の弾性係数から定まる値。

一方、 $\lambda > D/3$ ならば

$$\alpha_2 = 2\pi^3 p T (\Delta E / E)^2 \lambda^4 \dots \dots \dots (26)$$

が成立する^{48), 49)}。ここに T : 散乱を生じさせる音場中の骨材の平均容積, p : 散乱を生じさせる骨材の音場中の容積比, ΔE : モルタルマトリックスの弾性係数, $E + \Delta E$: 粗骨材の弾性係数。

減衰定数の測定は、コンクリートを対象にするとき、波長、指向性の点から多重反射法の適用は困難で⁵¹⁾、水浸置換法⁴⁸⁾あるいは厚さの差による方法⁵⁰⁾がある。

水浸置換法は水中の発受振子間に供試体を浸漬し、発受振子の共振周波数に一致する1~5波の正弦波パルスを印加する。供試体がないときの第1透過波の波高を P_1 、供試体を振動子間に入れたときの第1透過波を P_2 とすれば、減衰定数 α は

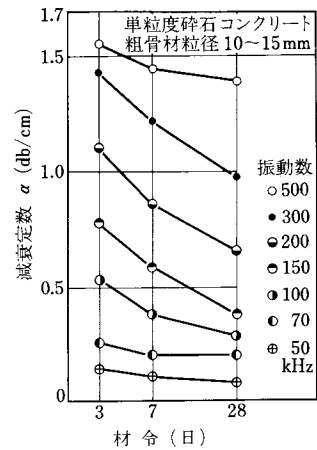


図-34 材令による減衰定数の変化

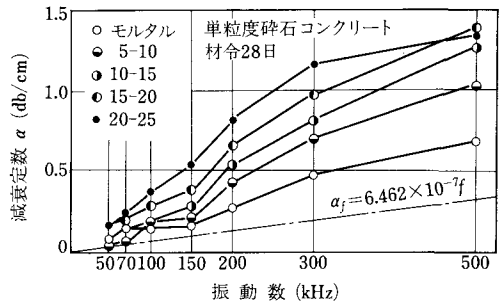


図-35 減衰定数の振動数による変化

$$\alpha = \frac{20}{x} \left[\log \frac{4Z_c \cdot Z_w}{(Z_c + Z_w)^2} - \log \frac{P_2}{P_1} \right] \text{ (db/cm)} \dots (27)$$

ここに、 Z_c , Z_w はコンクリートおよび水の音響インピーダンス, x : 供試体のパルス伝播方向の厚さ (cm). 図-37の α および式 (32), (33) の α は式 (27) から求めたものである。

Rothing⁵⁰⁾は超音波パルスの減衰に及ぼす因子を種々考慮した式を提案しており、伝播距離 x_1 , x_2 におけるパルス振幅を A_1 , A_2 とすれば

$$\alpha = \frac{\ln \frac{A_1 k_{02}}{A_2 k_{01}}}{x_2 - x_1} \text{ (neper/cm)} \dots \dots \dots (29)$$

ここに、 K_{01} , K_{02} は拡散補正係数で理論から求まる。しかし振動子を厚さの異なるコンクリート表面に両者一定状態で密着させる困難さを有する。

さて、著者の研究室で水浸置換法によって求めた減衰定数についての2, 3の研究結果を示す。図-34は単粒度砕石コンクリートについて材令および振動数の影響を示したもので、減衰定数は材令とともに小さくなる。図-35は振動数と粗骨材の粒径が減衰定数に及ぼす影響を調べたもので粗骨材量は一定である。図中の α_f の線

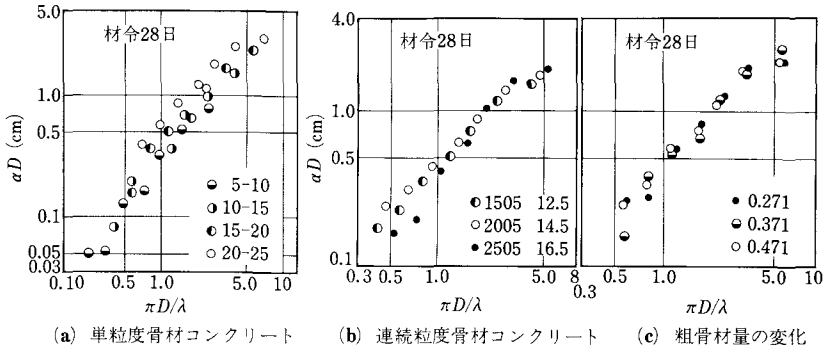


図-36 コンクリートの $\alpha D - \pi D / \lambda$ 関係

表-4 乱散因子 H および定数 n

	単粒度整形碎石 コンクリート			単粒度碎石 コンクリート		
	材令	H	n	材令	H	n
αd	3	0.70	1.9	3	0.70	1.8
	7	0.60	1.9	7	0.62	1.3
	28	0.50	1.6	28	0.40	1.2
	49	0.48	1.5			

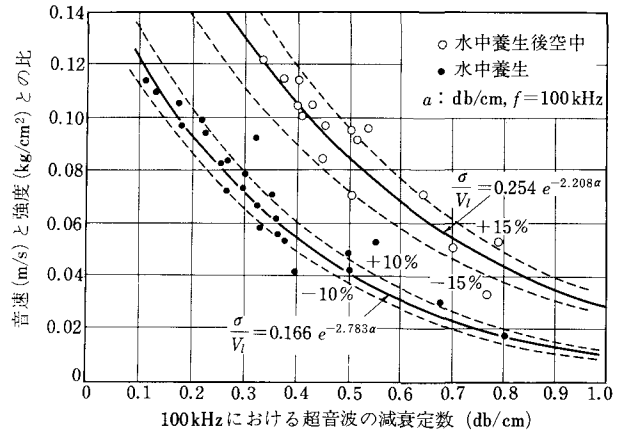


図-37 α と σ/V_i との関係

は式 (24) によるもので、振動数が大きくなるほど、粗骨材による散乱減衰定数が卓越することがわかる。

散乱減衰定数に及ぼす波長および粗骨材粒径の影響は、一般に式 (25) で表現できるが、 $\alpha D - \pi D / \lambda$ の関係を対数表示したものが図-36 である。単粒度碎石コンクリートのは平均粒径により異なる曲線となる傾向があり (図-36 (a))、連続粒度碎石コンクリートは $0.5 < \pi D / \lambda < 4$ の範囲内では直線関係となる (図-36 (b))。一方、粗骨材量が変化する場合も連続粒度と同じ関係となる (図-36 (c))。これらの関係から散乱因子 H および n の定数をまとめると表-4 となる。

5. 複合方法に関する研究

コンクリートの非破壊試験において、2 種以上の測定値を用いて強度を推定しようという研究は、1953 年の動弾性係数と対数減衰率を併用した Kesler, Higuchi⁵⁵⁾ の発表がある。その後、超音波パルスの減衰定数 α 、シュミットハンマーの反発硬度 R と音速 V との関係が発表されている³²⁾。

1958 年に著者は、図-19 に示す配合別の相関式を補

正する目的で、100 kHz における α (db/cm) を水浸法によって測定し図-37 の結果を発表している³¹⁾。

1978 年には碎石および川砂利コンクリートで圧縮強度 $50 \sim 600 \text{ kgf/cm}^2$ を対象にし、20 cm 立方体の R および V と $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 供試体による圧縮強度推定式として表-5 に示す結果を得ている¹³⁾。これらの相関係数は R を単独に用いた場合よりよくなっている。ちなみに、表-5 の式①を関数すれば図-38 となり、ルーマニヤカイトリーの関係図と似たものとなる³⁹⁾。

さらに 1984 年には、碎石 2505~1505 を用い、水セメント比 27.5~65 % に変化させたコンクリートについて 100 kHz における減衰定数 α (db/cm) も考慮した強度推定式は

$$\log \sigma_c = 0.290 + 0.393 V + 0.0143 R + 0.118 \log \alpha \dots\dots\dots (32)$$

$$\sigma_c = 0.0196 V^{4.43} R^{0.98} \alpha^{-0.119} \dots\dots\dots (33)$$

これら 2 式はいずれも重相関係数は 0.951 となった⁴⁹⁾。

ルーマニヤでは Facãoaru の実験⁵⁶⁾ に基づき、標準コンクリートすなわち、普通ポルトランドセメントを石英質川砂利 (最大粒径 30 mm) を使用し、単位セメント

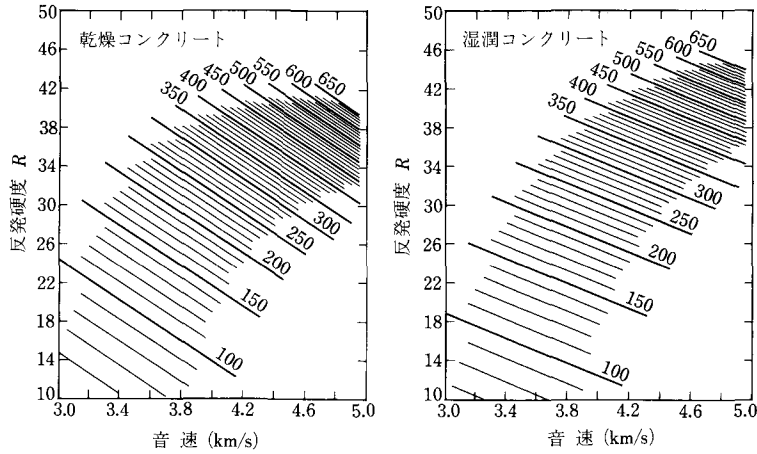


図-38 表-5の式①を図化したもの

表-5 圧縮強度・反発硬度、音速の回帰関係

	回帰係数および相関係数	乾燥コンクリート	湿潤コンクリート
$\log \sigma_c = a + bR + cR + cV_l$①	a	0.7183 ± 0.3918	1.172 ± 0.499
	b	0.02288 ± 0.0062	0.02155 ± 0.0032
	c	2.409 × 10 ⁻⁴ ± 1.264 × 10 ⁻⁴	1.401 × 10 ⁻⁴ ± 1.293 × 10 ⁻⁴
	r	0.929	0.963
$V_l/\sigma_c = a + bR + cR^2 + dR^3$②	a	195.1 ± 39.8	155.4 ± 18.6
	b	-13.2 ± 4.0	-11.3 ± 2.1
	c	0.316 ± 0.130	0.299 ± 0.073
	d	-2.57 × 10 ⁻³ ± 1.37 × 10 ⁻³	-2.68 × 10 ⁻³ ± 0.80 × 10 ⁻³
	r	0.936	0.972

r: 相関係数

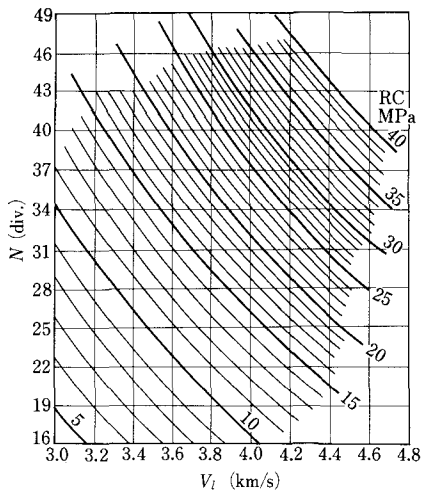


図-39 複合法による標準コンクリートの強度曲線 (Făcăoaru)

量を 300 kg/m³, 0~1 mm の細粒の混入率を 12% としたものの 20 cm 立方体強度: W_s と R, V との関係を図

-39 で示している。

標準コンクリートと条件が異なる場合の推定強度: W は、次の全補正係数 C_t を W_s に掛けて補正する。すなわち

$$W = W_s \cdot C_t \text{ (34)}$$

$$C_t = C_c \cdot C_a \cdot C_\phi \cdot C_r \text{ (35)}$$

C_c = セメントの型による補正係数, 0.90~1.09

C_a = セメント量による補正係数, 0.88~1.20

C_φ = 骨材の種類による補正係数, 実験的に決定

C_r = 骨材の最大寸法による補正, 0.96~1.09

C_r = 0~1 mm の細粒混合率による補正係数, 0.97~1.15

図-38 および補正係数の値は決定的なものではなく、1979年には Cianofrone ら⁵⁷⁾はイタリアの標準的コンクリートで類似の図を発表し、さらに混和剤による補正係数も示している。

RILEM でも以上の研究結果に基づく指針が出されている。

これらの基礎図表から強度を求め、全補正係数によ

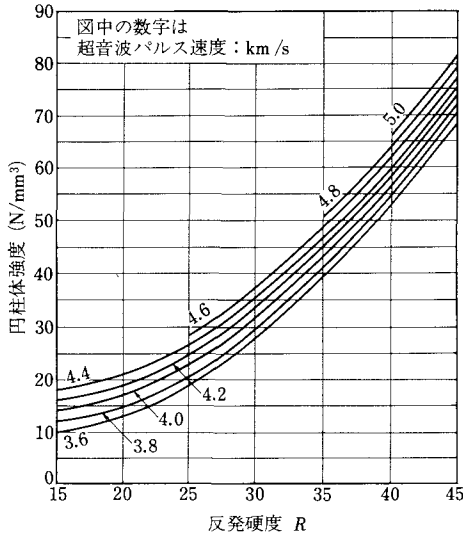


図-40 スウェーデン SS 13 72 52 にある図

て補正する場合、現場コンクリートと同一配合のコンクリートないしはコアがある場合の取扱い方についても基準方法が示されている。

スウェーデン規格 SS 13 75 52 に複合法が規定されていて、圧縮強度と R との関係性をパルス速度で級別している (図-40)。

日本建築学会のマニュアル⁵⁸⁾には

$$\text{普通コンクリート} : \sigma = 8.2R + 269V - 1094 \dots (36)$$

$$\text{軽量コンクリート} : \sigma = 4.1R + 344V - 1022 \dots (37)$$

が示されている。ただし、 V は km/s の単位である。

複合法には、前記以外の組合せも考えられるが、BS 1881 では V とコンクリートの密度との組合せは、よりよい結果を与えるものであり、構造物コンクリートの密度は、ガンマー線の減衰を測定して求めることができる。ただし密度と減衰との別の関係を求めておかなばならない。

ちなみに、1983年には中野ら⁵⁹⁾が各種コンクリートについて

$$\sigma = 3156 \frac{V^{2.36}}{\rho^{0.615} \cdot a^{0.225}} - 500 \dots (38)$$

を提案している。ここに ρ : コンクリートの密度 (kg/m³)、 a : 粗骨材の絶対容積比、 V : km/s で普通、軽量、繊維補強の各コンクリートに適用できると結論している。

6. 版厚および内部空洞の測定

コンクリート舗装の版厚、品質を非破壊的に測定しようという試みは、古くは Long ら⁶⁰⁾が示唆を与え、また Pickett⁶¹⁾は振動論的な解を与えている。これらは版の

たわみ波およびレーレー波を利用するものであるが、提案後 20 年で Jones ら⁶²⁾は初めて実床版での適用を報告している。著者もかつて RRL に Jones を訪問したとき、超音波パルスエコー法より、この連続波による方法が優れているとその当時言明し、装置を自動車にセットしてあるのを見学した。著者ら⁶³⁾も実験的に試みたこともあるが、その後この種の研究発表はないようで、レーダー法にとって代われようとしている。

超音波パルスのエコーを検出して版厚測定ないしは途中の空洞を探知しようという研究は、Howkins⁶⁴⁾、Bradfield⁶⁵⁾、Golis⁶⁶⁾らによって行われ、国内では加藤⁶⁷⁾、布施⁶⁸⁾、著者ら⁶⁹⁾の報告がある。最近 Carino ら⁷⁰⁾は、版上に小鋼球を落下させ、版中に作った人工空洞 (ポリウレタンの板) からのエコーを理論的なものと実験的な波形とを比較し、小球 (4 mm 直径) の場合両者がよく一致したと報告している。

(1) 反射波法

コンクリートは金属材料に比べ、音速は余り差がなく、一方、超音波の減衰が大きいため低い周波数の超音波を用いざるを得ず、指向性が悪く、普通振動子を表面に配置しても表面伝播縦波のため底面反射波あるいは内部空洞を探知できない。

著者ら⁶⁹⁾は共振振動数の高い圧電素子をモザイク状に配置した発受振子に 1~2 波のパルスを印加して強制振動させ反射波の検出にある程度成功をみている。図-41

(a) はひびわれのない場合の底面からの反射波であり、(b) は途中ひびわれがある場合である。図-13 (C) (b) のようにくさびを介して測定し図-42 (a), (b) を得ている。(b) のコンクリートでは底面からの反射波の前に粗骨材からの反射波がみられる⁷²⁾。

この反射波法もコンクリートの表面粗度ならびに粗骨材の最大寸法によって適用が困難な場合もある。

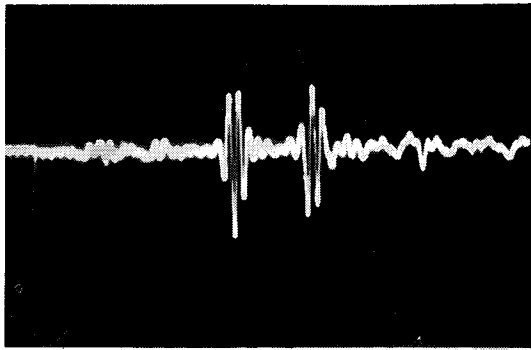
(2) 衝撃による方法

わが国では、近年、横波のうち SH 波を打撃によって発生させ、ひびわれ、鉄筋位置、巻厚などが反射波から測定できるとした研究報告がみられる⁷³⁾。SH 波は、P 波と SV 波と異なり、単独に存在でき、音響インピーダンスの異なる境界でもモード変換が生じないため、弾性体の品質判定に使用できる。しかし、SH 波の存在は平面波の伝播あるいは平板で可能であり、構造物コンクリートへの SH 波の適用には、理論的な考察が必要である。

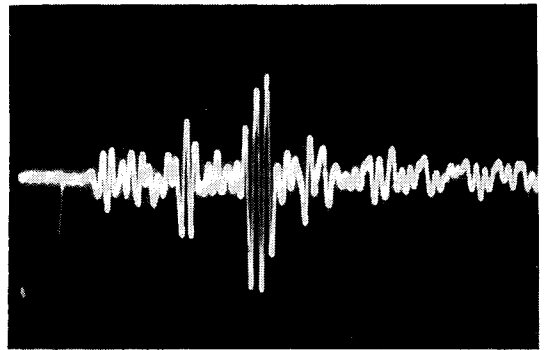
次に Carino ら^{70), 71)}は、さきに述べたように鋼球の半径 R (m)、落下高さ h (m) とすれば、コンクリートとの接触時間 T_c (s) は、

$$T_c = 0.00858R / (h)^{0.1} \dots (39)$$

となり、NBS で開発した AE 用の受振子を用い、P 波

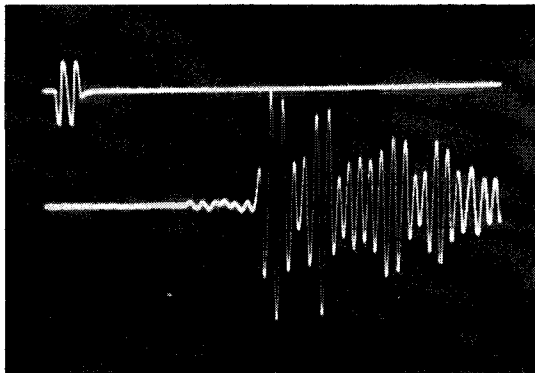


(a) 底部からの反射波、2波はモード変換したもの

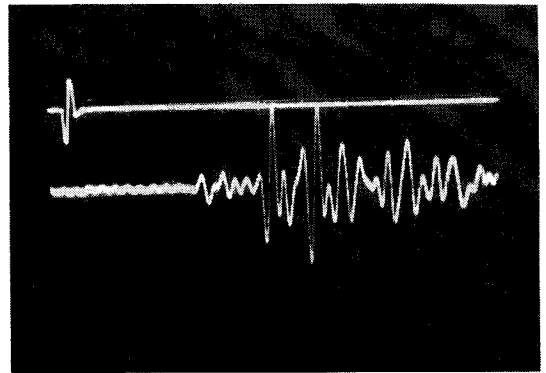


(b) 途中のひびわれからの反射波と底部からの反射波

図—41

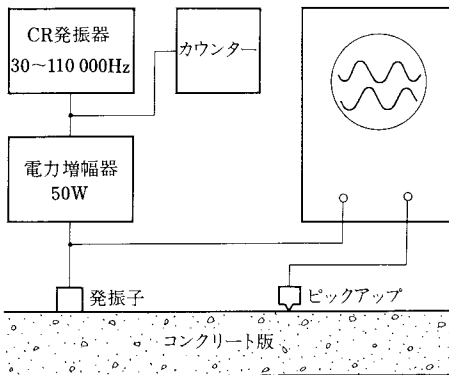


(a) くさびを介したときの底部からの反射波 (モルタル)



(b) 底部からの反射波 (コンクリート)

図—42

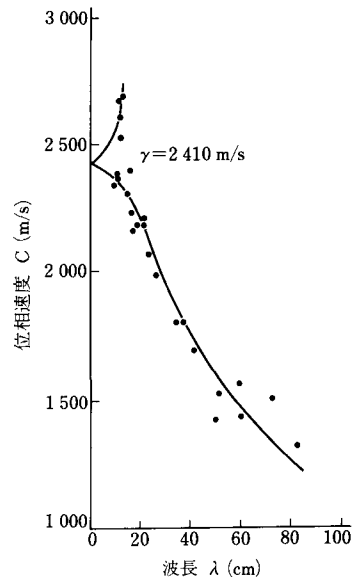


図—43 表面波法の測定概要

の空洞からの反射往復時間 T_{2p} とするとき T_c/T_{2p} がほぼ 0.25 であるときエコーパターンを解析するのが容易であるとし種々の実験結果を報告している。

(3) 連続表面波による方法

コンクリート舗装版のように下層の路盤より高い弾性係数を有する版に沿って伝播する波動には、縦振動とたわみ振動がある。後者は版の表面に直角な方向が最大変位となる。そして、その波長： λ 、版厚： H 、版のポア



図—44 位相速度と波長

ソン比： σ によって位相速度： C が異なってくる。

測定装置の概要は図—43のとおりで、位相が 360° ず

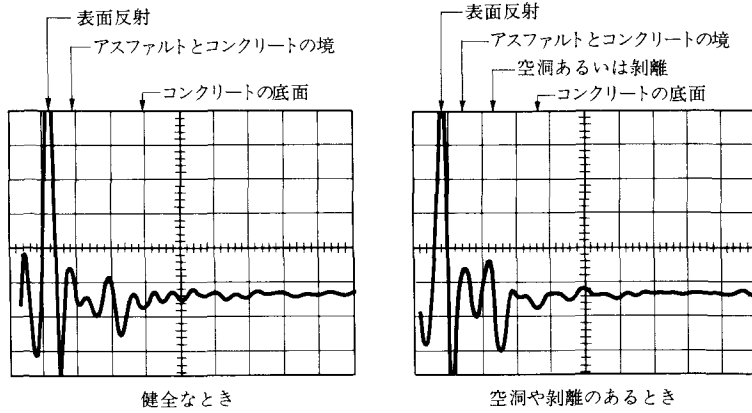


図-45 健全なコンクリートと空洞のあるコンクリートのレーダー反射波

れるピックアップの移動距離をもって λ とする。種々の周波数に対する λ と $C=\lambda f$ をプロットすると図-44が得られる⁷⁴⁾。図よりレーダー波速度 γ を求め、 C/γ のそれぞれの値に対する λ を図から読み取り、その λ とすでに与えられている理論的な λ/H の値から H を求める。 H の測定計算結果を表-6に示す。 H は $\pm 5\%$ 程度で測定できた。

(4) レーダーによる方法^{75),76)}

1 GHz 程度のマイクロ波パルスをコンクリート舗装版に入射させ、版厚、空洞、剝離、鉄筋、目地破損をその反射波から測定しようとするものである。媒質中のマイクロ波の位相速度 v は

$$v = C / \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r} \dots \dots \dots (40)$$

によって求められる。

ここに C ：光の速度、 ϵ_r ：比誘電率、 μ_r ：比透磁率である。

舗装版を形成しているアスファルト層、コンクリート層、鉄筋などは、 ϵ_r 、 μ_r などが異なり、反射波を解析することによって、これらを検出できる(図-45)。

自動車に装置を装備して5 km/h の速度で測定がで

表-6 版厚の計算結果

C/r	λ/H	C (m/s)	λ (cm)	H (cm)
0.9	1.425	2187	20.5	14.10
0.8	2.177	1944	30.5	13.45
0.7	2.999	1702	44.0	14.65
0.6	3.984	1459	62.0	15.50
0.5	5.256	1216	—	—
平均実際厚 15.27 cm			平均	14.43

き、波形の処理などを行い有望な方法である。

7. 超音波スペクトロスコピー

透過超音波パルスの周波数成分に着目した材料評価に関する研究は、1963年金属材料に Gericke が適用したのが最初といわれる。金属ではエコーのスペクトル解析により、内部欠陥、結晶粒子径の評価などに適用されている。

一方、コンクリートではエコー検出が困難であるので透過パルスあるいはその立上り半波長分のスペクトルを解析している。Hillger⁷⁷⁾は1983年ペーストの凝結過程

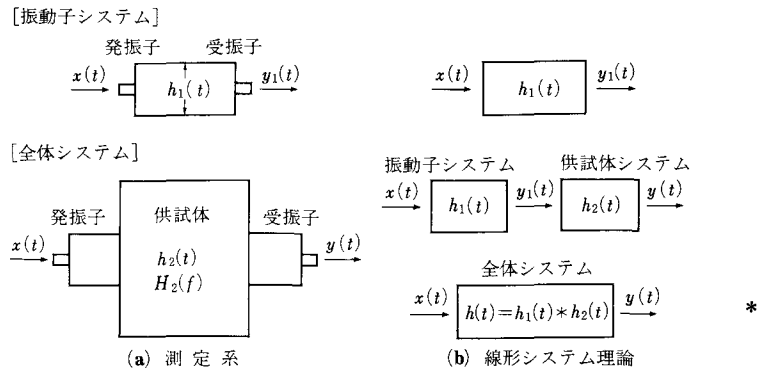


図-46 超音波スペクトロスコピーと線形システム

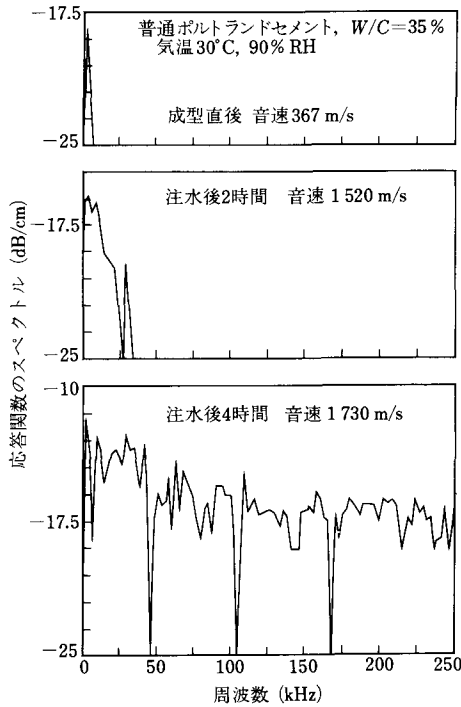


図-47 ベースの凝結・硬化による応答関数のスペクトル変化

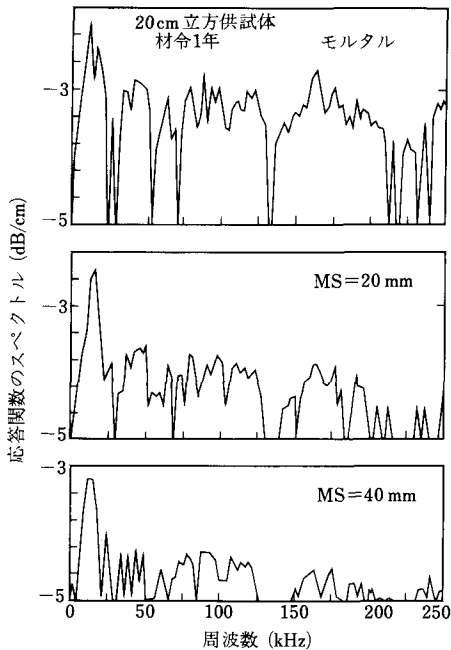


図-48 粗骨材最大寸法がスペクトルに及ぼす影響

に適用しており、著者らも1986年コンクリートに適用し有意義であることを認めた。

コンクリートの応答関数を求めるために線形システム

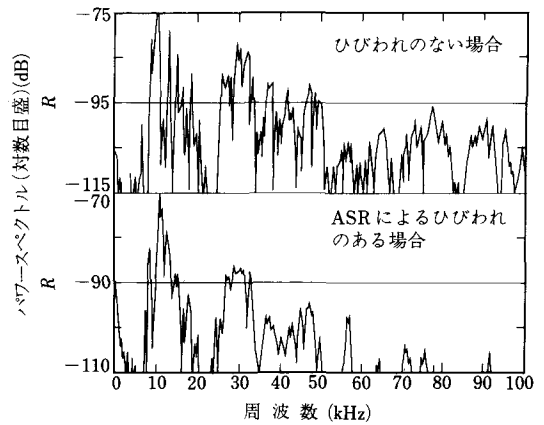


図-49 ひびわれによる透過パワースペクトルの変化

理論を適用すれば、図-46のように応答関数がそれぞれ $h_1(t)$ および $h_2(t)$ の振動子システムおよび供試体を入れた全体システムを考える。一定入力信号 $X(t)$ に対する出力をそれぞれ $y_1(t)$, $y(t)$ とし、それらのフーリエ変換を $Y_1(f)$, $Y(f)$ とすれば、供試体の伝達関数 $H_2(f)$ は

$$H_2(f) = Y(f) / Y_1(f) \dots\dots\dots (41)$$

一方、全体システムの応答関数 $h(t)$ とそのフーリエ変換は、それぞれ

$$h(t) = h_1(t) * h_2(t) \dots\dots\dots (42)$$

$$H(f) = H_1(f) \cdot H_2(f) \dots\dots\dots (43)$$

となり、供試体の伝達関数 $H_2(f)$ は、次の式で求まる。

$$H_2(f) = H(f) / H_1(f) \dots\dots\dots (44)$$

また応答関数 $h_2(t)$ は $H_2(f)$ の逆フーリエ変換で与えられる。

これまでに得られた研究結果の一部を示せば、図-47はセメントペーストの凝結過程を調べたもので、時間経過とともに周波数の高い成分が透過し弾性体へ移行していくのがわかる。図-48は粗骨材の最大寸法による変化でモルタルでは25 kHz以上の成分も-3 dB/cm程度で、一様に含まれているが、20 mm, 40 mmと最大寸法が大きくなるにつれ25 kHz以上の成分が少なくなる。

図-49はアルカリシリカ反応による影響を調べたもので、等価アルカリ量0.85%のものより2.0%のものは高い周波数領域での減衰が大きい。

この方法は研究の緒についたばかりで^{26), 78), 79)}、振動子システムの改良も必要であり、さらなる研究の発展がまたれる。

8. あとがき

はじめに述べたようにコンクリートの非破壊試験方法は、多岐にわたり種類も多い。その主目的とするところ

は構造物コンクリートの強度のみならず、鉄筋、内部欠陥、版厚、応力履歴、損傷度などを非破壊的に計測推定することにある。本論文でも、その点、実構造物に適用が困難な方法もあえて示した。

一方、試験方法の標準化の面では、各国よりわが国はかなり遅れをとっていることは事実である。研究の面でも最近斬新な方法が少なく、あえて古い時代からのものをふり返ってみた。コンクリートは金属材料に比べ非破壊的には研究対象としてやっかいな材料であるが反面適切な非破壊試験方法の研究・開発が望まれる。

参 考 文 献

- 1) Malhotra, V.M. : In Situ/Non Destructive Testing of Concrete, ACI SP-82, 1984.
- 2) Gaede, K. : Die Kugelschlagprüfung von Beton, D. A. für S. Ht. 107. 1952.
- 3) 木村恵雄：シュミットハンマーによるコンクリート強度の判定について，材料試験，5-38, Nov. 1956.
- 4) Gaede, K. und Schmidt, E. : Rückprallprüfung von Beton mit dichtem-Gefüge, D. Aus. für Stahlbeton, Heft 158, 1960.
- 5) 尼崎省二：超音波法および反発硬度法によるコンクリートの非破壊試験方法に関する研究，学位論文，1984.
- 6) 坂 静雄・明石外世樹：シュミットハンマーの各個誤差および較正法について，セメント技術年報 15, 1961.
- 7) 日本材料試験協会，実施コンクリート強度判定法委員会：シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法（指針案），材料試験，7-59, 1958.
- 8) 小阪・谷川：コンクリートの非破壊試験法に関する研究の動向，コンクリート工学 18-1, Jan. 1980.
- 9) 松下・徳光・溜淵：シュミットハンマーによるコンクリートの強度推定，セメント技術年報 33, 1979.
- 10) 林・前川・沖野：シュミットハンマーによるコンクリート既製品の試験方法，セメント技術年報，20, 1966.
- 11) Greene, G.W. : Test hammer provides new method of evaluating hardened concrete, J. ACI, 51-3 Nov. 1954.
- 12) 近田・岡田：コンクリートの表面硬度に影響を及ぼす諸要因について，セメント技術年報 34, 1980.
- 13) 尼崎省二・明石外世樹：シュミットハンマーと超音波法によるコンクリートの非破壊試験，セメントコンクリート，No.385, Mar. 1979.
- 14) 明石外世樹：シュミットハンマーによるコンクリートの反発硬度試験について，立命大理工研紀要第 2 号.
- 15) 坂 静雄・松井敏夫：表面硬度法による実施コンクリートの強度判定方法，セメント技術年報，9，1955.
- 16) 木村恵雄：シュミットハンマーによるコンクリート強度の判定について，材料試験，5-38, Nov. 1956.
- 17) 沢田・兼子・沢田：シュミットハンマーの単打および連打によるコンクリートの強度判定について，プレストレストコンクリート，18-3, June, 1976.
- 18) Klieger, P. : Discussion of Paper 19), P. H. R. B. 34, 1955.
- 19) Petersen, P. H. and Stoll, U. W. : Relation of rebound-hammer test results to sonic modulus and compressive strength data, P. H. R. B. 34, 1955.
- 20) Nasser, K. W. and Al-Manaseer, A. A. : Comparison of nondestructive testers of hardened concrete, ACI Mat. Jour. 84-5, 1987.
- 21) 尼崎・明石：シュミットハンマーによるコンクリートの局部変形とプランジャーに生じる衝撃応力波について，セメント技術年報 33, 1979.
- 22) Akashi, T. and Amasaki, S. : Study of the stress waves in the plunger of a rebound hammer at the time of impact, ACI SP-82, pp. 17~34.
- 23) 尼崎・明石：シュミットハンマーの較正法に関する基礎的研究，セメント技術年報，34, 1980.
- 24) Leslie, J. R. and Cheesman, W. J. : An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures, P. ACI, 46, 1949.
- 25) Jones, R. : The non-destructive testing of concrete, Mag. of Concrete Research, No. 2, 1949.
- 26) 明石・尼崎：超音波スペクトロスコープによるコンクリートの品質評価，セメントコンクリート，489, 1987.
- 27) Breuning, S. M. and Bone, A. J. : Soniscope applied to maintenance of concrete structures, P. H. R. B., 33, 1954.
- 28) Naik, T. R. : Ultrasonic Testing of Concrete, Experimental Methods in Concrete Structures for Practitioners (edited by G. M. Salins and Fitz Simons), Oct. 1979.
- 29) BS 1881 : Part 203 : 1986 : Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete.
- 30) Sturup, V. R. et al. : Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength, ACI SP-82 pp. 201~227, 1984.
- 31) 明石外世樹：コンクリート中の超音波の減衰について，セメント技術年報，12, 1958.
- 32) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験（Ⅱ），材料 28-314, 1979.
- 33) Swamy, R. N. and Al-Hamed, A. H. : The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air dried cubes and hence in situ strength of concrete, ACI SP-82, pp. 247~276.
- 34) Tomsett, H. N. : The Practical Use of Ultrasonic Pulse Velocity Measurements in the Assessment of Concrete Quality, Mag. of Concrete Research, Vol. 34, No. 110, pp. 7~16, March 1980.
- 35) Chung, H. W. and Law, K. S. : Diagnosing in Site Concrete by Ultrasonic Pulse Technique, Concrete International, pp. 42~49, Oct. 1983.
- 36) Chung, H. W. : Effects of embedded steel bars upon ultrasonic testing of concrete, Mag. of Conc. Res. 30, 102, 1978.
- 37) Jones, R. : Testing of concrete by ultrasonic pulse technique, P. H. R. B. 32, 1953.
- 38) Bungey, J. H. : The influence of reinforcement on ultrasonic pulse velocity testing, ACI SP-82, pp. 229~246, 1984.
- 39) 明石外世樹：超音波パルスとコンクリート，セメント技

- 術年報, 40, 1986.
- 40) 尼崎・明石ほか：コンクリートの衝撃疲労強度に関する研究, 土木学会論文報告集, No.217, pp.77~86, 1973.9.
 - 41) 尼崎・明石：高強度コンクリートおよび鋼繊維コンクリートの衝撃疲労強度に関する研究, 同上, No.262, pp.143~151, 1977.6.
 - 42) 明石・尼崎ほか：アルカリ・シリカ反応によるコンクリートの物性変化について, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.17~18, 1984.
 - 43) Jones, R. : Nondestructive testing of concrete, Cambridge Univ. Press, 1962.
 - 44) CNS Electronics Ltd. : Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester, London.
 - 45) 尼崎・明石：超音波法によるコンクリート部材のひびわれ深さ測定に関する基礎的研究, 第2回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.133~136, 1980.
 - 46) 尼崎・明石：超音波法によるコンクリート部材のひびわれ深さ測定に関する研究, 第3回年次講演会論文集, pp.141~144, 1981.
 - 47) 戸井田ほか3名：コンクリート構造物のクラック深さ測定法, 土木学会42回年次大会概要集V部, 1987.
 - 48) 明石外世樹：コンクリート中の超音波の減衰について, セメント技術年報 12, 1958.
 - 49) 明石・尼崎・川崎：種々の非破壊試験方法を組み合わせたコンクリート強度の推定について, セメント技術年報 33, 1984.
 - 50) Rothing, H. : Measuring Ultrasonic Attenuation in Concrete, Building Research and Practice, Jan-Feb, 1975.
 - 51) Akashi, T. : On the measurement of velocity and loss of ultrasonic pulse in concrete, Proc. 3rd International Conference on NDT, 1960.
 - 52) Galan, A. : Estimate of concrete strength by ultrasonic pulse velocity and damping constant, Proc. ACI, 64-10, Oct, 1967.
 - 53) Suaris, W. and Fernando, V. : Detection of crack growth in concrete from ultrasonic intensity measurements, Mat and Stru, 20-117, 1987.
 - 54) Suaris, W. and Fernando, V. : Ultrasonic pulse attenuation as a measure of damage growth during cyclic loading of concrete, ACI Mat. Jour. 84-3, 1987.
 - 55) Kesler, C.E. and Higuchi, Y. : Determination of compressive strength of concrete by using its sonic properties, P. ASTM, 53, 1953.
 - 56) Făcăoaru, I. : Non-destructive Testing of Concrete in Romania, Symp. on NDT of Conc and Timber, I.C. E, 1970.
 - 57) Cianfrone, F. and Făcăoaru, I. : Study on the Introduction into Italy on the Combined Non-Destructive Method, for the determination of in Situ Concrete Strength, RILEM, Mater. and Struc. 21, No.71, 1979.
 - 58) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, 1983.
 - 59) 中野ほか2名：各種コンクリートの超音波伝播特性, セメント技術年報 37, 1983.
 - 60) Long, B.G., Kurtz, H.J. and Sandenaw, T.A. : An Instrument and a technique for field determination of modulus of elasticity of concrete, (Pavement), P. ACI, 41-3, Jan. 1945.
 - 61) Pickett, G. : Dynamic testing of pavements, J. ACI. 16-5, April 1945.
 - 62) Jones, R. and Mayhew, H.C. : Thickness and quality of cemented surfacings and bases-Measuring by a nondestructive surface wave method, Civil Eng. (London) 60, 1965.
 - 63) 明石外世樹ほか4名：連続波によるコンクリートの非破壊試験, セメントコンクリート, 284, 1970.
 - 64) Howkins, S.P. : Measurement of pavement thickness by Rapid and nondestructive methods, Nat'l. Cooperative Highway Research Program, Rept. 52, 1968.
 - 65) Bradfield, G. and Gotfield, E.N. : Determining the thickness of concrete pavement by mechanical waves : direct-beam method, Mag. of concrete Research, 16-46, 1964.
 - 66) Golis, M.J. : Pavement thickness measurement using ultrasonic pulses, Highway Research Record, 218, 1968.
 - 67) Fuse, T. and Shimodori, M. : On the measurement of depth with an ultrasonoscope, Memoirs of Faculty of Eng. Osaka City Univ. 1, Dec, 1959.
 - 68) 加藤金正ほか：コンクリート探傷の可能性について, JSTM 実施コンクリートの強度判定法委員会資料.
 - 69) 明石・山路：超音波パルス, エコーによるコンクリートの探傷ならびに厚さ測定, 立命大理工研紀要, No.4, 1959.
 - 70) Carino, N.J. et al. : A point source-point receiver, pulse echo technique for flaw detection in concrete, ACI Jour. Proc. 83-2, 1986.
 - 71) Carino, N.J. : Laboratory study of flaw detection in concrete by the pulse-echo method, ACI SP-82, pp.557~579.
 - 72) 明石・尼崎：超音波パルスによるコンクリート厚の測定について, 土木学会29回年次講演会概要集, V, 1974.
 - 73) 秋鹿：横波超音波による非破壊試験, 第6回年次講演会論文集, pp.305~308, 1984.
 - 74) 明石・山田・塩野谷：波動法によるコンクリート版厚さ測定について (r の精密な推定法), 土木学会第26回年次講演会概要集, 昭46.
 - 75) Cantor, T.R. : Review of penetrating radar as applied to nondestructive evaluation of concrete, ACI SP-82, pp.581~601.
 - 76) Holt, F.B. and Eales, J.W. : Nondestructive evaluation of pavement (Infrared thermography and ground-penetrating radar), Conc. Int'l, 9-6, 1987.
 - 77) Hillger, W. : Verbesserungen und Erweiterungen von Ultraschallprüfverfahren zur Zerstörungsfreien Fehlstellen- und Qualitätskontrolle von Betonbauteilen, zur Erlangung der Würder eines Doktor-Legenieurs, 1983.
 - 78) 尼崎・明石ほか：超音波スペクトル解析によるコンクリートの品質評価について, セメント技術年報 40,

pp.158~161, 昭和61年.

1985.

79) 明石・尼崎：コンクリートの非破壊試験の現状と趨勢，
コンクリート工学，Vol.23, No.12, pp.11~20, Dec,

(1987.12.17・受付)

著者 明石外世樹博士は、胸腹部大動脈瘤破裂のために去る1月
28日にご逝去されました。

この一文は氏の絶筆となりました。

心よりご冥福をお祈りいたします。

土木学会論文集編集委員会