

る。

$d=12\text{ cm}, d_B=19\text{ cm}$ , スパン中央の版厚 $=14\text{ cm}$ ,  
 ハンチの長さ $=37\text{ cm}$ , ( $e=0.59, m=0.092$ ),  
 $A_{SC}=6.7\text{ cm}^2, A_{SB}=8.5\text{ cm}^2$

そこで、圖-5を用いて設計した固定版(A)と、  
 普通の方法によつたもの(B)とを、コンクリート容  
 積、主鉄筋量、スパン中央の撓みの各々について比較  
 する。

i) コンクリート容積

被りのコンクリートを省略して比較する。

(A)の場合  $V_c=dl(cm+1)$   
 $=8 \times 4(0.265 \times 1.3 + 1) = 0.43\text{ (m}^3\text{)}$   
 (B)の場合  $V'_c=dl(cm+1)$   
 $=12 \times 4(0.59 \times 0.092 + 1) = 0.51\text{ (m}^3\text{)}$   
 $V'_c/V_c=1.18$  (18%節約)

ii) 主鉄筋量

大略の主鉄筋量を、(鉄筋断面積)  $\times$  (スパン長  
 $l$ ) によつて表わして比較する。

(A)の場合  $V_s=6.9\text{ l}$

(B)の場合  $V'_s=7.9\text{ l}$

$V'_s/V_s=1.14$  (14%節約)

iii) 節約スパン中央のタワミ

ハンチの部分のコンクリート重量は全スパンに等  
 分布するものとして、タワミを計算し比較する。

(A)の場合  $d=8\text{ cm}$  は  $l/35=11.4\text{ cm}$  より小さ  
 い。スパン中央のタワミ  $\delta=l/2\ 910$

(B)の場合  $d=12\text{ cm}$  は  $l/35=11.4\text{ cm}$  より大き  
 い。スパン中央のタワミ  $\delta'=l/2\ 250$

明らかに  $\delta < \delta'$  である。よつて、(A)の場合は規定  
 の目的に十分適合している。

## 音響学的測定法によるコンクリートの強度の判定

正 員 樋 口 芳 朗\*

### ESTIMATING STRENGTH OF CONCRETE BY SONIC METHOD.

(JSC E March 1950)

By Yoshiro Higuchi C.E. Member

**Synopsis** The Author studies the Method of Estimating Strength of Concrete by Measuring Sonic Modulus of Elasticity, and presents new Formula coinciding better with Experiments. That is,

$$E_D = \{0.019(w/c) + 1.3\} \times 10^4 \times \sqrt{\sigma} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$E_D$  : Sonic Modulus of Elasticity

$w/c$  : Water-Cement Ratio by Weight (%)  $\sigma$ : Compressive Strength (kg/cm<sup>2</sup>).

All  $\phi 15\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  Test Cylinders

The Author also states about its Applications.

**要 旨** 音響学的方法(共鳴法)によりコンクリートの動的弾性係数を測定し、これよりコンクリートの強度を判定する方法につき考察を加えて実際によくある新しい実験公式を示すと共に應用方面につき略述したものである。

序 言

コンクリートに対する音響学的測定法の應用は、約10年前から、T.C. Powers等<sup>1)</sup>によつてなされているが、我が國では高林博士<sup>2)</sup>が共鳴法を利用して、コンクリートの強度判定を行い成功を収めている。氏はその著書の中で動的弾性係数と強度の間の実験式を提出しているが、水セメント比が非常に大きい場合、或は水

セメント比が非常に小さい場合は動的弾性係数から推定した強度と実際の強度との間に相当大きな差を生ずるので、筆者は之に対して考察を加え、この差が最大で略±20%におさまる実験式を提唱したものである。米國では、音響学的測定法の一つであるタワミ振動を利用した共鳴法が暫定規格となつて發表され(Tentative Methods of Test for Fundamental Transverse Frequency of Concrete Specimens For Calculating Modulus of Elasticity, Sonic Method, C215-47T)。道路用コンクリートに対する品質判定に實用化せられている。音響学的測定法の利点は供試体を破壊せずに迅速簡易に測定の実行すること、一義的に弾性係数を定めうること等である。

#### 1. 動的弾性係数(Sonic Modulus of Elasticity)と靜的弾性係数

コンクリートのような粘弾性体にあつては、荷重速度が大なる場合、粘性の受け持つ力が大きくて此の部

\* 日本國有鉄道技術研究所

1) T.C. Powers, L. Obert 等の論文が Proc. A.S.T.M. の 1938, 1939 にある。

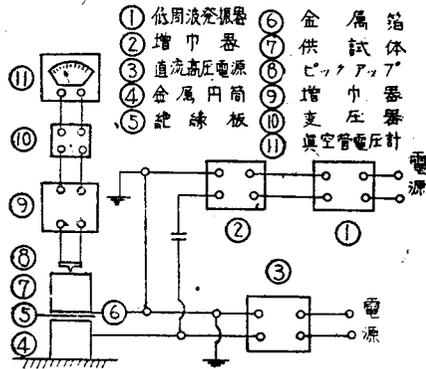
2) 高林利秋「コンクリート無破壊試験法」鹿鳴社(1948)

分の変形が小さく、荷重速度が小なる場合、粘性の受け持つ力は小さくて此の部分の変形が大きい。振動波動等を対称とする音響学的測定法をとる場合は前者に属し、通常の荷重試験機による載荷の場合は、それに比較して後者の方に近い。よつて音響学的測定法によつて得た見掛けの弾性係数——之を動的弾性係数と称する——は、普通の応力弾性歪線図から求めた静的弾性係数より常に大きいのである。以上のように考えれば粘性の減少するにつれて当然この差異は減少すべきであり、コンクリートに於ては、水セメント比の小なる程材令が大なる程、又強度の大なる程、静動両弾性係数の差異が減少するという実験事実を諒承することができる。

2. 動的弾性係数の測定装置(縦振動の場合)

一般に動的弾性係数を求める音響学的測定法としては、定常波を利用する共鳴法と、直接音速(物体中の縦波の速度)を測定する方法等が考えられ、前者は被測定物が規則的な形状を有している場合にしか適用できないが、土、岩石その他の試片の動的弾性係数測定に広く應用されている。高林氏のとつた方法はこの共鳴法であり、筆者もこれにならぬ測定を行つた。

圖一 測定装置 (Fig.1 Sonic Apparatus)



先ず、C-R型の低周波発振器(約15kg)によつて発振した低周波交流を、増巾器(出力約4W, 約20kg)によつて増巾し、之を金属円筒、絶縁板、金属箔で構成されるコンデンサの両端に送り、別に直流高圧を重畳して金属箔に任意の周波数の振動を與える。

3) 121 頁参照

4) A.C.I. Sept 1949 にロツシエル発振器と陰極線オツシロを利用した音速測定装置が紹介されている。この装置の原理は別に新しいものではないが現場構造物の強度判定、龜裂発見等に有利に應用しうることが記されている。この中で言及されているコンクリートのポアソン係数に関する記事は注目すべきであると思われる。

被測定物の一端にこの金属箔を付着させると、結局この境界に可変振動数の強制振動を與えることになる。平行な他の境界との間に定常波が入つたときは共鳴現象として現われ、これはこの境界にピッケアップをつけるか或は直接耳で共鳴音を捕捉することにより判定できる。こうして捕捉した一番小さい固有振動数を  $f$  とすれば動的弾性係数  $E_D$  は次式で計算できる。

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E_D}{\rho}}$$

但し、 $l$  は両境界の距離  $\rho$  は密度である。

3. 動的弾性係数と強度との關係

多くの研究者によつて指摘されているように、コンクリートの強度と静的弾性係数との間には或誤差範囲に於て成立する一定の關係が存在する。コンクリートの動的弾性係数と強度との間にも之に類した關係の成立することが予想せられる。高林氏は養生直後の供試体(15φ×30)につき、動的弾性係数と強度との關係を求め、セメント、骨材、養生方法、材令の如何に関せず次式が誤差 ±20% 以内にて成立すると結論している。

$$E_D = 2.65 \times \sqrt{\sigma} \times 10^4 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (1)$$

この式は、水セメント比が 60~90% の場合は推定強度と実際の強度との差が小さいが、水セメント比がこの範囲より大きくなるか、又は小さくなると、両者の差が非常に大きくなるという欠点を持つている。この差は水セメント比が小さい場合に於て特に著しい。之は、水セメント比によつて実験値を分類した圖-2 (之は筆者の行つた実験値に高林博士の実験値をも加えて書いたものである) を見れば明らかなように、水セメント比の影響を実験式中に加えないことによつて生ずるものと思われる。 $E_D$  と  $\sqrt{\sigma}$  とは大体比例しているから、 $E_D$  を縦軸、 $\sqrt{\sigma}$  を横軸にとつて圖-2を書き直せば圖-3のようになる。

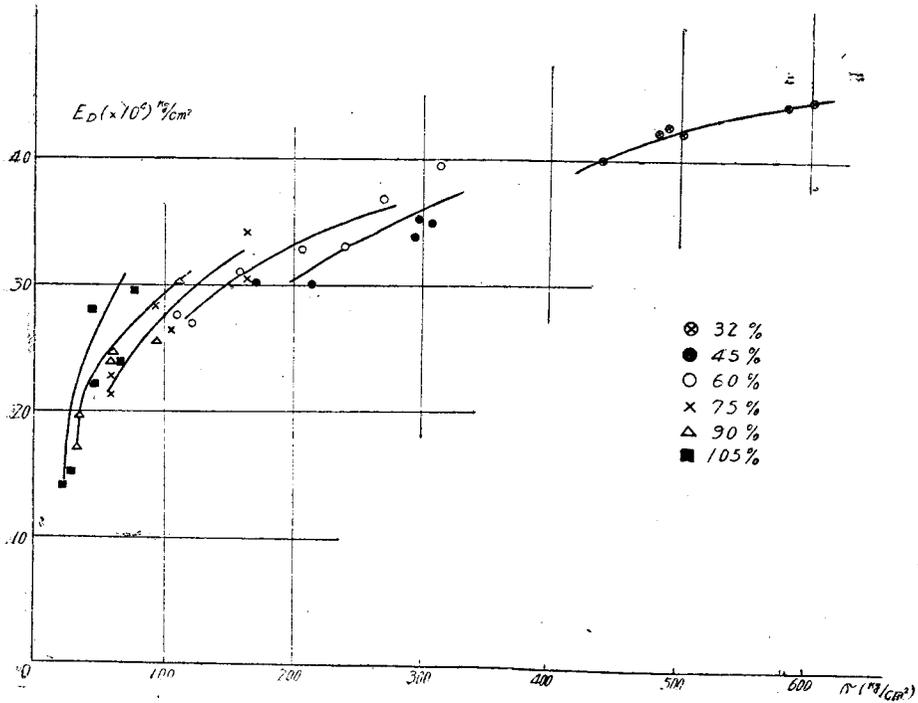
水セメント比によつて異なる直線群を  $E_D = \alpha \times 10^4 \times \sqrt{\sigma}$  で表わして  $\alpha$  の値を求め、この  $\alpha$  を縦軸、 $w/c$  (%) を横軸にとつたグラフを描けば、圖-3 右下のようになり、 $\alpha$  と  $w/c$  の間には略直線で表わせる關係のあることが伺われる。以上のことを考えると、 $E_D$  と  $\sigma$  の間の關係は

$$E_D = \left\{ 0.019 \left( \frac{w}{c} \right) + 1.3 \right\} \times 10^4 \times \sqrt{\sigma} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (2)$$

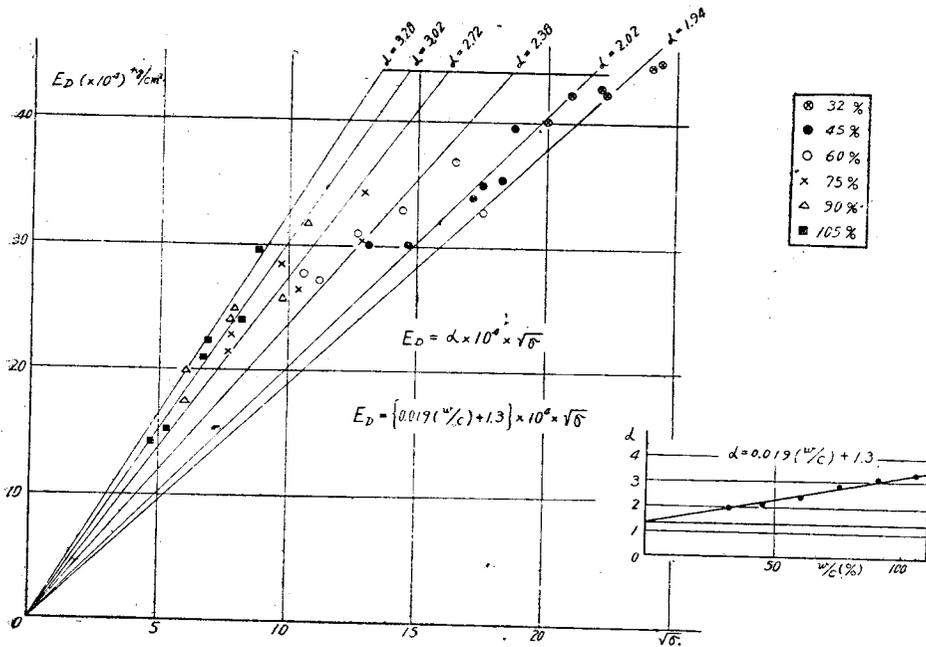
となり、この新しい式では  $w/c$  が係数のパラメーターとして入つてくることになる。この式は、プラスチックなコンクリートである限り、水セメント比が 105

5) 2) 183 頁参照

圖一2 動的弾性係数と強度の関係 (Fig-2  $E_D-\sigma$  Relation)



圖一3 動的弾性係数と強度の平方根との関係 (Fig-3  $E_D-\sqrt{\sigma}$  Relation)



%のように大きい場合から、32% というような小さい場合に至るまですべてを包含することができ、推定強度と実際の強度との差は最大で大体  $\pm 20\%$  程度に

おさまるから、実用に供しうるものと言える。この式は水セメント比、或は材令が異なれば例え強度は同じでも、動的弾性係数の異なるべきことを示しているも

のであつて<sup>6)</sup>、材齢が違つて、強度が等しければ当然水セメント比は異つてくるから、動的弾性係数は異なつてくるのである。水セメント比が異なれば粘性の動的弾性係数に及ぼす影響が違つたために、かゝる現象が生ずるのではないと思われる。

以上の実験はすべて養生直後の供試体につき行つた結果得たものであるが、(2)式で空中乾燥状態の場合を推定すれば、大きな誤差を生ずる恐れがある。何となれば、湿潤状態のコンクリート供試体を1~3週間空中で乾燥させると、標準養生を行つた供試体より20~40%大きい圧縮強度を示すという事実がある<sup>7)</sup>にも拘わらず、動的弾性係数は相当減少するからである。このため 空中乾燥状態のコンクリート強度を(2)式から求めれば30~50% 過少評価することになる。空中乾燥状態のコンクリートを湿潤状態に導けば以上の傾向は又逆戻りするが安全に(2)式で示される元の状態には復しないから安全側にとつて、(2)式から推定される強度より10~20% 程度大なる値を推定しておけばよいと思われる。筆者の行つた実験に於ても乾燥の程度により実験式は敏感に左右されたが、之を定量的に表すことは難かしいし、又音響学的測定法によつて実用的に一定の精度を以て強度を推定しうる範囲を逸脱することになるから、対象とする供試体は原則として養生直後のものとするのが望ましいと思われる。

#### 4. 應用例

コンクリートに対する音響学的測定法の應用は多方面に亘つて考えられるが以下に於て筆者の行つた23の應用例につき述べる。

1. 材令による動的弾性係数の変化 材令による強度の増進が、動的弾性係数の変化にどう表われるかを水セメント比を4種類かえて、15φ×30 供試体につき測定してみた所、表-1のような結果をえた。(E<sub>D7</sub>は材令7日の動的弾性係数、E<sub>D28</sub>は材令28日の動的弾性係数を示す。同じ水セメント比のE<sub>D7</sub>とE<sub>D28</sub>は同一供試体につき求めたものである。(表中の値は平均値をとつたものではない。)

w/c が40%のものは、プラスチックなコンクリートでなく、空隙が多かつたため動的弾性係数が落ちてゐるが(勿論この場合は強度も落ちる)それ以外は、水セメント比が小になるにつれて動的弾性係数が大にな

表-1 水セメント比の異なるコンクリートの材令と動的弾性係数

w/c(%)	E <sub>D7</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	E <sub>D28</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	E <sub>D28</sub> /E <sub>D7</sub>
40	2.90×10 <sup>4</sup>	3.32×10 <sup>4</sup>	1.14
50	3.36×10 <sup>4</sup>	4.06×10 <sup>4</sup>	1.21
61	2.45×10 <sup>4</sup>	3.30×10 <sup>4</sup>	1.34
71	2.16×10 <sup>4</sup>	3.00×10 <sup>4</sup>	1.39

り強度も大なる傾向と符合している。ここに注目すべきことは、E<sub>D28</sub>とE<sub>D7</sub>の比をとつてみると、水セメント比が小となるにつれて小さくなつてゐることである。之はセメント糊の濃度が大きい程化学変化の速やかなることを示しているものと判断されて興味深い。一般に、1週強度と4週強度の間にも同様の関係が成立するものと思われるので、1週強度より4週強度を推定する場合、水セメント比の大小を考慮することは有用であると思われる。

2. 火熱により害を受けたコンクリートの強度低下の判定 火災を受けたコンクリートの強度低下が、動的弾性係数の変化に対してどのように表われるかを定性的に検討する目的で行つた予備実験につき述べる。供試体は、材令約6月で空中乾燥状態にある15×15×50cmのものを取り上げた。総数8本で4種類の供試体に対して試験を行つたから後に示す実験値は、火熱による害を受ける前の動的弾性係数が2ヶの平均値である他は、すべて平均値でないことをお断りしておく。(使用骨材はすべて清浄強硬なものを用いた。)

火熱による害を受ける前の供試体の性質は表-2に示す通りであり、火熱による害を受けて後の性質を、加熱の程度及び火害の外観と共に示したものが表-3である。火害を興えるためには20分間主として一面を薪の火にさらしたが、各供試体に対し同一条件におけなかつた。当然の結果として火熱の程度及び火害の外観が相違していた。(火熱の温度は300~500°Cの間にあつたものと推定される)

曲げ試験はすべてスパン45cm 1点荷重で行つた。曲げ強度試験は供試体の加熱面が引張側になる様に行つたので概ね龜裂箇所で切断した。火害を受けたことによる影響は、曲げ引張強度及び動的弾性係数の低下率には割合規則的に出ている。之は火害による組織の変化と龜裂による断面積の減少との両方の影響が重疊したものと判断される。龜裂を生じた桁Ⅰ、Ⅱ、Ⅲに火害の影響が大きく表われているのは当然であるが、肉眼では龜裂は認めえない桁Ⅳに於ても火害の影響が表われており之が強度及び動的弾性係数の両者の変化にも表われていることは興味深いものと思われる。

6) 坂静雄「鉄筋コンクリート工学教程」P.79参照

7) 吉田徳次郎「コンクリート及鉄筋コンクリート施工法」330頁参照

8) 2) 171頁参照

9) 2) 182頁以下参照

表-2 火熱による害を受ける前の性質

桁番号	水セメント比 (%)	重量配合比	動的弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	曲げ引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
I	40	1:2:4	460 000	58.4
II	45	1:2:4	430 000	54.4
III	50	1:2:4	405 000	48.0
IV	45	1:2.5:5	431 000	55.0

表-3 火害の程度及び影響(低下率とは低下量をもとの量で割った比をさす。)

桁番号	加熱の激しきの順	火害の外観	動的弾性係数低下率	曲げ引張強度低下率
I	3	微龜裂 2	0.37	0.68
II	4	龜裂なし	0.18	0.60
III	2	龜裂 2 白斑 2	0.40	0.80
IV	1	龜裂 5 白斑 3	0.68	0.96

3. 鉄筋コンクリート枕木の強度判定 実施コンクリートの強度判定法としては、釘抜き試験法、硬度試験法等があるが、一番簡単なのは金槌による音響試験法である。之は金槌でコンクリートを叩き、その音と指先に傳わるコンクリートの感じとで強度その他を判定する方法であり、簡単で一番便利な方法であるが非常な熟練と経験を要するという難点がある。この法を科学的にするため音叉の共鳴を利用する方法が考えられ、進んで本論に述べたような音響学的測定法が案出されたものである。この音響学的測定法は被測定物を破壊しないで試験の目的を達するため、プリキャストコンクリート製品の検収試験等には最も適したものと考えられる。以下、鉄筋コンクリート枕木の強度を判定した結果を示しておく。

表-4 鉄筋コンクリート枕木のコンクリート強度判定

番号	製作所	w/c (%)	動的弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	推定強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	備考
No.1	T工場	45	339 000	216	手突き
No.2	"	"	331 000	210	"
No.3	N工場	40	322 000	217	振動締め固め
No.4	"	"	287 000	172	"
No.5	"	"	365 000	275	"
No.6	"	"	409 000	350	"

但し、コンクリートの強度推定は(2)式によつた。No.1, No.2 は完全な空中乾燥状態にあつたから、圧縮強度だけを問題にすれば上の推定強度は相当安全側にあるものと見るべきである。No.3~No.6 も幾分乾燥状態にあつた。推定の精度を高めようと思えば養生直後のものについて試験を行わなければならない。

#### 結 言

3. で述べた所によつて、音響学的測定法により、コ

ンクリートの動的弾性係数から強度を推定するとき水セメント比を考慮に入れると一層の精度を期待しうることが明かになつたと思われる。音響学的測定法はプリキャストコンクリート製品等の品質判定に非常に有用であると判断される。

尚、本法は現場構造物(平行な2境界を有する場合)のコンクリートの強度判定、振り振動の共鳴状態捕捉による剪断弾性係数、ポアソン比の一義的決定等に應用の可能性を有するものであり、筆者も一部実験を行つたが目下検討中である。

(2) 式より判る通り、測定されるコンクリートの水セメント比が既知でないと強度の判定が不正確になるのは大きな欠点であるが、減衰係数の測定をあわせて行えば、或いは打開できるのではないかと思われる。

以上のように種々の問題を残してはいるが、音響学的方法によれば被測定物に殆ど損傷を與えずに測定ができ、同一供試体の変化を、つゞけて観測することができるから、凍結融解試験によるコンクリートの耐久性の研究、或はセメント骨材反應によるコンクリートの過度膨脹現象の研究等に有利に應用することができ最近の米國の文献にも、本法による実験例がしばしば見えている。

以上のように、音響学的測定法は、之を十分理解して用いれば、破壊試験機の及びえない長所を發揮するものであり、A.S.T.M. 暫定規格の制定を見るに到つたこともその優秀性を示唆するものと思われる。我國に於ても將來、各方面に於てこの研究が進めば、從來の破壊試験に代る有力な方法として本法が採用されるに到るものと思われる。

最後に終始御懇切な御指導を賜つた吉田徳次郎先生に対し、厚く感謝の意を表する次第である。

附記 音響学的測定装置は、米國製品で一式約 30 万円であるが、日本製品ならば、共鳴状態を耳で判定することにすれば 10 万円程度、ピックアップ、受振増巾器、真空管電圧計等一式揃えても 20 万円程度のものである。

共鳴状態を耳で判定することにすれば、測定装置の運搬は 3 人で行える。取り扱いを丁寧なことに氣をつければ粗悪品を購入しない限り故障することは少ない。

10) 2) 186 頁参照

11) 2) 196 頁参照

12) 藤井光藏 セメントコンクリート No.19, P.14, No.20, P.10, No.31, P.16 参照