

# 論文 コンクリートに大きな乾燥収縮をもたらす粗骨材のスクリーニング方法に関する研究

大島 義信<sup>\*1</sup>・宮田 佳和<sup>\*2</sup>・河野 広隆<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究では、コンクリートに大きな乾燥収縮を生じる粗骨材を選別するための指標として、超音波により求めた粗骨材の動弾性係数に着目し、粗骨材の動弾性係数とコンクリートの乾燥収縮率との関係を明らかにした。その結果、粗骨材の動弾性係数とコンクリートの乾燥収縮には高い相関性が認められたが、データのばらつき等を考慮すれば、本手法は等級分けのスクリーニングとして用いるべきであることが明らかとなった。

**キーワード**：乾燥収縮, 粗骨材, 動弾性係数, 超音波

## 1. はじめに

近年、良質な骨材資源が減少し、低品質な骨材を使用したことが原因と思われる乾燥収縮がコンクリートに発生し、構造物に多数のひび割れが生じたという事例が報告されている<sup>1)</sup>。このため、土木学会では設計で考慮するコンクリートの収縮率の見直しを行った<sup>2)</sup>。一方、日本建築学会では、建築物の建設後に生じるひび割れがクレームの対象となることから、2009年制定版 JASS5において、計画供用期間の級が長期または超長期の構造物に用いるコンクリートを対象として、収縮率を $8 \times 10^{-4}$ 以下とする基準値が設けられた<sup>3)</sup>。

しかしながら、現在 JIS に示されるレディーミクストコンクリートでは、収縮率を制限することを要求できる仕組みになっておらず、対応策が定まっていないのが現状である。そのため、全国のレディーミクストコンクリート工場では、それぞれの工場で使用しているコンクリートの収縮率を測定し始めている。しかし、データは多岐に及び配合ごとにそれぞれ必要で、その絶対量も少ない。そのため、コンクリートの収縮率を小さくすることができることとされる石灰石骨材を用いることで対応するなどの応急措置がされている。しかし、石灰石骨材を用いれば平均的には収縮が小さくなる傾向があるものの、収縮の大きいコンクリートは存在し、骨材の種類を特定しても収縮率が定まるということではない。

一方、弾性係数の小さい骨材を使用した場合、コンクリートの乾燥収縮率が大きくなることが指摘されている<sup>4)5)</sup>。また、片平ら<sup>6)</sup>は、乾燥収縮率を簡易的に推定する方法として、コンクリートの円柱供試体を用いた超音波法による動弾性係数計測が最も合理的であると結論づけている。しかしながら、これら既往の研究では検討している粗骨材の種類が少なかったり、極端に低品質な骨材

に偏っていたりするため、コンクリートの乾燥収縮率との相関性が十分に示されたわけではない。さらに、骨材の弾性係数に関しては、砕石となる前の母岩石より採取したコアを用いて測定しているため、実際にコンクリートに配合される状態の粗骨材の弾性係数として扱う事はできない。また、原石から砕かれ使用される状態の粗骨材の弾性係数を測定する方法も確立されていないというのが現状である。このような状況の中、ヘンら<sup>7)</sup>は破碎後の粗骨材の動弾性係数を超音波伝播速度から導き、粗骨材の動弾性係数とコンクリートの収縮率には高い相関性があることを示している。しかしヘンらの研究においても、実験に用いた骨材種類やサンプル数が少なく、信頼性の高い結果を得るには更なるデータの蓄積が必要である。

よって本研究では、コンクリートに大きな乾燥収縮を生じる粗骨材を選別するための指標として、超音波により求めた粗骨材の動弾性係数に着目し、測定誤差やデータのばらつきについて統計的評価を行った。また、動弾性係数を収縮率の指標としたスクリーニング方法を提案し、スクリーニングのために必要な測定条件について検討を行った。

## 2. 粗骨材の動弾性係数とコンクリートの収縮量の関係

### 2.1 測定方法

粗骨材一粒の弾性波伝播速度を求めするため、図-1に示す装置を用いて測定を行った。ここでは、40kHz共振の探触子を用い、ファンクションジェネレータにより発生させたステップ波形を増幅し弾性波を導入した。また、サンプリングレートは10MHz (0.1 $\mu$ s刻み)とした。測定手順は以下の通りである。まず、あらかじめ密度を求めた粗骨材上に測定のための二点を定め、ノギスにより

\*1 京都大学 工学研究科社会基盤工学専攻 博士(工) (正会員)

\*2 清水建設 土木事業本部 修士(工)

\*3 京都大学 工学研究科都市社会工学専攻 博士(工) (正会員)

二点間距離を求める。その後、平行を維持した超音波探触子間に骨材を設置し、二点間が探触子面と垂直となるよう一定の力で挟み込む(図-2)。その後、超音波伝播時間を測定し、式(1)に代入することで動弾性係数を導く。

$$v = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1)$$

ここで、 $v$  は超音波伝播速度(m/sec)、 $E_d$ は動弾性係数(kN/mm<sup>2</sup>)、 $\rho$  は密度(g/cm<sup>3</sup>)である。伝播時間の読み取りについては、ファンクションジェネレータから直接入力されるステップ波形の立ち上がり時間を起点とし、受信波形の立ち上がり付近の正負変化に対し最後に0を超え増加していく点を到達点とみなした(図-3)。また、伝播時間の読み取り有効数字が3桁であるため、最終的な測定結果は有効数字3桁に統一した。

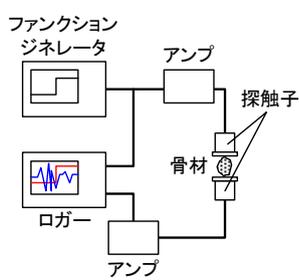


図-1 装置概要



図-2 骨材の設置

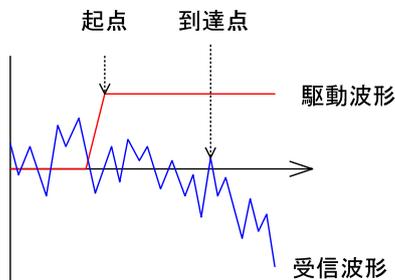


図-3 伝播時間の読み取り(概念図)

## 2.2 骨材

骨材は、産地、岩種などの異なる 25 種類を用いた。表-1 に今回実験に使用した骨材の岩種、絶乾密度、吸水率、収縮量と長さ変化試験に用いた細骨材の岩種、絶乾密度、吸水率を示す。ただし、全ての骨材は最大径が 25~45mm の範囲に収まっている。これらの収縮量は、JIS A 1129 長さ変化試験により測定し、その際の配合は  $W=165\text{kg/m}^3$ ,  $W/C=55\%$ ,  $s/a=46\%$ , 目標空気量 4.5% とした。細骨材には表中最下段に示した良質な川砂を使用し、セメントには普通ポルトランドセメント、混和剤には AE 減水剤と AE 助剤を使用した。練り混ぜたコンクリートのフレッシュ性状については、スランプが 3.5~8.0cm の範囲、空気量が 3.7~5.2% の範囲であった。

## 2.3 測定結果

それぞれの骨材から無作為に 100 個選別し、動弾性係数の測定を行った。動弾性係数の測定結果の一例を図-4 に示す。図中の曲線は頻度データに対しフィッティングさせた対数正規分布を示す。ただし、いずれの結果も頻度分布の最大値を 1 として正規化している。これは、骨材「Ss1」における動弾性係数の頻度を示しているが、データの分布は対数正規分布と良い一致を示し、リリーフォース検定においても 5% の有意水準で対数正規分布と判断されている。その他の骨材においても、分布形状は対数正規分布と良い一致を示した。そのため、各データを対数正規分布と仮定し最尤法により、その平均値と標準偏差、および変動係数を求めた。その結果を表-2 に示す。表より、それぞれの骨材において変動係数が 30~60% となるなど、ばらつきが大きいことがわかる。

次に、上記の方法で求めた動弾性係数の平均値と収縮量の関係について考察する。図-5 は、動弾性係数と収

表-1 骨材の基本データ\*

識別番号	岩種	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	収縮量 (×10 <sup>-6</sup> )
As1	安山岩	2.47	2.74	834
As2	安山岩	2.65	2.67	798
As3	安山岩	2.29	6.53	963
As4	安山岩	2.63	1.66	660
As5	安山岩	2.29	5.58	815
As6	安山岩	2.25	6.43	831
As7	安山岩	2.44	3.91	910
As8	安山岩	2.41	3.29	904
As9	安山岩	2.34	3.99	893
Tf1	安山岩系凝灰岩	2.48	4.38	704
Tf2	玄武岩系凝灰岩	2.28	7.17	1028
Ss1	砂岩	2.65	0.5	600
Ss2	砂岩	2.45	3.33	989
Ss3	砂岩	2.64	0.99	964
Ss4	砂岩~シルト岩	2.37	4.96	1281
Ss5	川砂利	2.39	3.72	776
Ss6	川砂利	2.45	3.37	726
Ss7	川砂利	2.53	1.9	700
Ss8	川砂利	2.45	4.21	780
Ss9	川砂利	2.4	3.98	774
Ss10	川砂利	2.53	2.66	823
Rg	川砂利, 玉砕	2.48	4.39	695
Gr	花崗岩	2.53	1.47	740
Sl	頁岩	2.59	1.54	1044
Li	石灰岩	2.71	0.26	463
(細骨材) 川砂		2.56	1.58	-

\*データ提供:(独)土木研究所

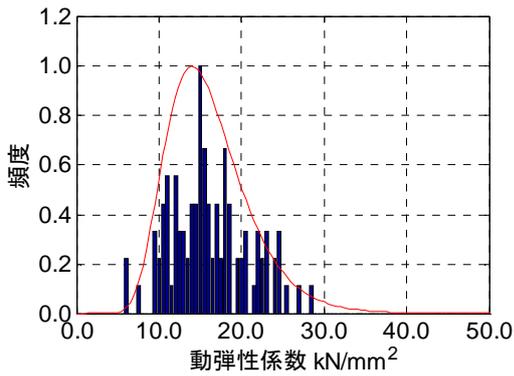


図-4 動弾性係数の頻度分布 (Ss1)

表-2 動弾性係数の測定結果

骨材	平均値 kN/mm <sup>2</sup>	標準偏差 kN/mm <sup>2</sup>	変動係数 %
As1	12.1	4.73	39.0
As2	14.3	5.26	36.7
As3	9.04	4.22	46.7
As4	9.36	3.5	37.4
As5	8.69	3.92	45.1
As6	10.7	3.37	31.4
As7	6.45	2.59	40.2
As8	7.84	2.36	30.1
As9	9.95	4.46	44.8
Tf1	12	5.13	42.9
Tf2	7.85	3.04	38.7
Ss1	16.1	5.05	31.3
Ss2	9.27	5.53	59.6
Ss3	12.4	4.01	32.4
Ss4	7.82	4.14	52.9
Ss5	13.6	5.55	40.7
Ss6	10.5	5.04	47.8
Ss7	11.8	6.14	52
Ss8	13.1	6.96	53.1
Ss9	13.5	6.86	50.8
Ss10	11.6	5.51	47.3
Rg	11.6	5.22	45.2
Gr	9.74	3.92	40.2
Sl	12.6	4.13	32.8
Li	19.4	6.06	31.2

縮量の関係を示している。図中に示す直線は、データに対し線形回帰させたもので、収縮量をX[μ]動弾性係数の平均値をE<sub>d</sub> [kN/mm<sup>2</sup>]とすれば、以下の式で表される。

$$E_d = -0.0113X + 20.6 \quad (2)$$

また、両者の相関係数は-0.65 となり、負の相関があることが確認された。さらに、これらの無相関検定を行ったところ、P 値は 0.0476% となり 0.05% の高い水準で有意な

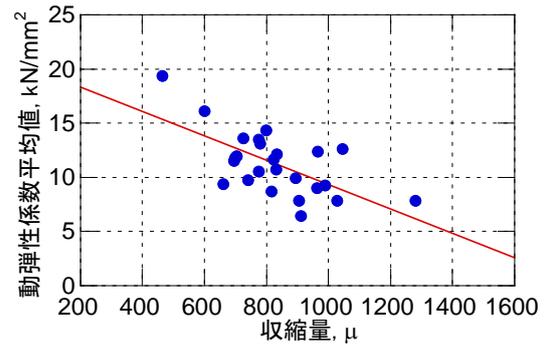


図-5 動弾性係数と収縮量との関係

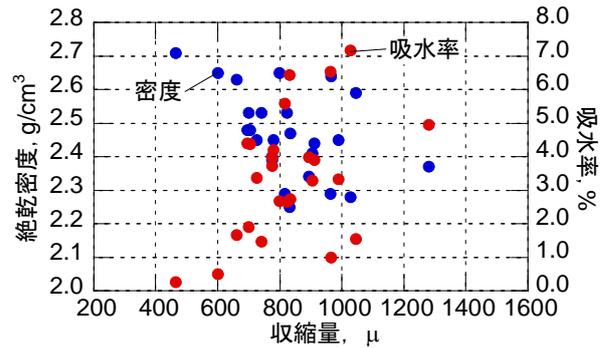


図-6 密度・吸水率と収縮量との関係

相関があると言える。一方、図-6 は骨材密度および吸水率と収縮量の関係について示している。動弾性係数と同様にこれらの相関を求めたところ、相関係数は密度で-0.472、吸水率で0.454 となり、これらの値と収縮量にはやや相関があることがわかる。また無相関検定の結果、P 値の値は密度で 1.72%、吸水率で 2.28% となり、動弾性係数よりも低い水準で収縮量と有意な相関があることがわかった。以上より、骨材密度および吸水率と比較しても、動弾性係数の平均値は収縮量と高い相関を持つことがわかった。

## 2.4 サンプル数の影響

上記の測定では、無作為に抽出した 100 個の骨材を用いて動弾性係数を求めた。しかし、実用上はできる限りサンプル数は少ないほうがよい。ここでは、動弾性係数の平均値を求めるにあたり、適切なサンプル数について考察を行う。

母分散が未知の場合における母平均の区間推定の考え方に基づいて、サンプルの平均値が母平均とある誤差範囲内で収まるために必要なサンプル数を決定することが可能である<sup>8)</sup>。

いま、母分散が分からない場合の母平均の区間推定は以下の式(3)で行われる。

$$\bar{x} - t(n-1, \alpha) \sqrt{\frac{V}{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t(n-1, \alpha) \sqrt{\frac{V}{n}} \quad (3)$$

ここで、 $\mu$ は母平均、 $\bar{x}$ はサンプル平均、 $\alpha$ は有意水準、 $n$ はサンプル数、 $V$ は不偏分散、 $t(n-1, P)$ は自由度 $n-1$ の $t$ 分布の両側 $100P\%$ 点を表す。このとき、区間幅は

$$2t(n-1, \alpha) \sqrt{\frac{V}{n}} \quad (4)$$

であり、この式には確率変数 $V$ が含まれていることから、区間幅の期待値が一定値 $2\delta$ 以下となるようにサンプル数を設計する。すなわち、

$$2t(n-1, \alpha) \frac{E(\sqrt{V})}{\sqrt{n}} \leq 2\delta \quad (5)$$

としたい。ここで、 $E(\ )$ は期待値を表し、不偏分散の平方根に対する期待値は、ガンマ関数 $\Gamma$ を用いて

$$E(\sqrt{V}) = \frac{\sqrt{2}\Gamma\left(\frac{\phi+1}{2}\right)}{\sqrt{\phi}\Gamma\left(\frac{\phi}{2}\right)} \sigma = c^* \sigma \quad (6)$$

と変形することができる。ただし、 $\sigma$ は母標準偏差で、このとき $\phi = n-1$ である。

次に、 $t$ 分布および偏差に対して、以下の近似を行う。

$$t(n-1, \alpha) \cong z_{\frac{\alpha}{2}}, \quad c^* \sigma \cong \sigma_0 \quad (7)$$

ここで、 $\sigma_0$ は標準偏差、 $z_p$ は標準正規分布の $100P\%$ 点を表す。これを用いて、式(4)を $n$ について解くと

$$n \geq \left(\frac{z_{\frac{\alpha}{2}} \sigma_0}{\delta}\right)^2 \quad (8)$$

となる。よって、式(8)を満たす最小の $n$ が必要なサンプル数となる。いま、有意水準を5%、すなわち信頼度95%で動弾性係数の推定を行うことを想定する。動弾性係数の実測値による標準偏差の平均値は $4.67\text{kN/mm}^2$ であるため、対象とするサンプルはこの値を標準偏差にもつ対数正規分布に従うと仮定する。すなわち、サンプル値の自然対数をとったものが正規分布すると仮定する。このとき、許容される誤差と最小サンプル数との関係は図-7のようになる。ただし、許容される誤差は動弾性係数の変動幅 $12.9\text{kN/mm}^2 (=19.4-6.45\text{kN/mm}^2)$ に対する%で示している。図より、サンプル数が100個の場合、許容される誤差は7.1%となる。また、50個の場合約10%、20個の場合16%となる。スクリーニングとしての実用上、50個を超えるサンプル数は現実的でない。よって以下では、サンプル数を20個とした場合の信頼性について検討する。この場合の誤差は、16%、すなわち $2.00\text{kN/mm}^2$ である。

次に、外れ値の影響について検討する。20個の測定値をそのまま平均すると、100個の測定値を平均した場合と比べ外れ値の影響が大きくなる可能性がある。そのため、測定値の最大最小値より数個を除いて平均をする必

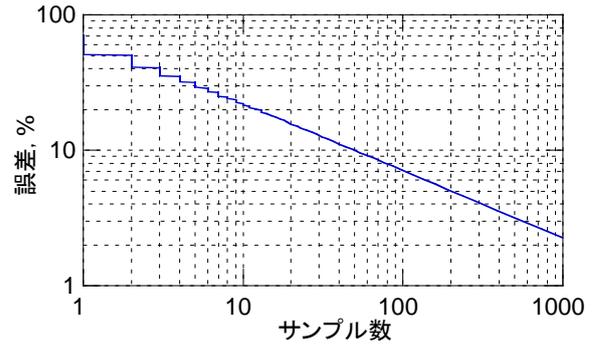


図-7 サンプル数と誤差の関係

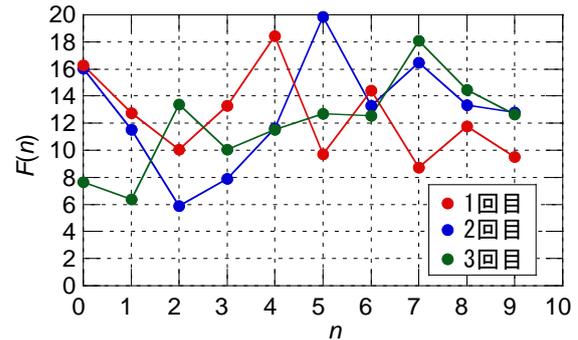


図-8 カット数と平均値のばらつき

要があると考えられる。外れ値の影響を検討するために、100個の測定結果から無作為に $20+2n$ 個抽出することを10回繰り返した( $n=0\sim 9$ )。次に、それらのデータに対し最大値および最小値より $n$ 個ずつ除いた場合の平均値を求め、以下の式(9)を用いて100個平均からのばらつきを求めた(常に平均化の総数が20個とした)。

$$F(n) = \sum_{i=1}^{10} (\bar{x}_i(n) - \bar{X}_{100})^2 \quad (9)$$

ここで、 $\bar{x}_i(n)$ は抽出 $i$ 回目の $n$ 個カット時の平均、 $\bar{X}_{100}$ は100個平均である。全25種類の平均値を図-8に示す。ただし、ランダム抽出の影響があるため、上記の操作をさらに3回繰り返した。図より、操作回数ごとにばらつきがみられ、必ずしも適切なカット数が存在するわけではないことがわかる。しかし、正規分布する仮定のサンプルを対象に同様の操作を行った場合、カット数1としたときに最も $F$ 値が小さくなることを確認している。また、実サンプルを用いた結果でも2個程度のカットが $F$ 値を小さくする傾向にあることから、骨材を24個選定し測定を行い、上下2個ずつの除外を行って20個の平均をとる方法がよいと言える。

## 2.5 骨材のグレーディング

次に、骨材のグレーディングについて検討する。まず、式(2)に示す回帰直線とデータとの残差について、その発生頻度を求めると図-9のようになる。図中の曲線は残

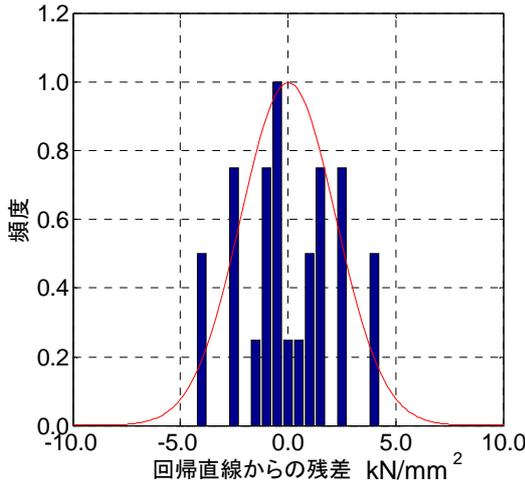


図-9 残差のばらつき

表-3 骨材のグレード

動弾性係数 $E_d$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	収縮量 800 $\mu$ を 超える確率	グレード
$E_d < 5.2$	95%~	収縮大
$5.2 \leq E_d < 7.4$	68~95%	やや大
$7.4 \leq E_d < 15.8$	32~68%	不確定
$15.8 \leq E_d < 18.0$	5~32%	やや小
$18.0 < E_d$	~5%	収縮小

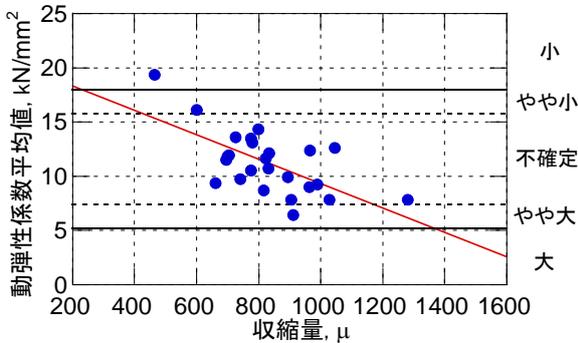


図-10 骨材のグレード（動弾性係数と収縮量）

差に対し正規分布をフィッティングさせたもので、推定された母平均値は $\mu_1 = 0.0123 \text{ kN/mm}^2$ 、標準偏差は $\sigma_1 = 2.20 \text{ kN/mm}^2$ である。この場合、測定された動弾性係数が $2\sigma_1 = 4.40 \text{ kN/mm}^2$ 以上異なっていれば、95%の確率で「異なる収縮量をもつ骨材」と判断することができる。ただし、測定誤差が $2.00 \text{ kN/mm}^2$ 程度含まれるとすれば、 $6.40 \text{ kN/mm}^2$ 程度の差が必要となる。いま、収縮量が $800 \mu$ 以上の骨材を判別したい場合、動弾性係数の閾値は $11.6 \text{ kN/mm}^2$ となる。よって、この閾値を95%の確率で超えると判断できる動弾性係数の測定値は $18.0 \text{ kN/mm}^2$ 以上となる。同様に、下限値は $5.2 \text{ kN/mm}^2$ となる。また、上限値を $15.8 \text{ kN/mm}^2$ 、下限値を $7.40 \text{ kN/mm}^2$ と設定した場合、68%（ $=\sigma_1$ 相当）の確率で異なる判

断できる。以上より、動弾性係数 $E_d$  [kN/mm<sup>2</sup>]の領域を表-3のように分類することができる。また、これらの分類を、図-5に示す収縮量と動弾性係数との関係にプロットすれば、図-10のようになる。

## 2.6 骨材寸法の影響

伝播速度を算定する際、距離すなわち骨材の大きさは直接的に推定精度に影響を与える。今回測定した骨材は、最大径が $25 \sim 45 \text{ mm}$ の間であった。そこで、骨材を最大径 A :  $30 \pm 5 (25 \sim 35) \text{ mm}$ 、B :  $35 \pm 5 (30 \sim 40) \text{ mm}$ 、C :  $40 \pm 5 (35 \sim 45) \text{ mm}$ の3つの区分に分け、2.4の方法に従いそれぞれの動弾性係数を求めた。ただし、上記の区分によって骨材を分類した場合、データ数が20個に満たない骨材があるため、その骨材は比較対象から除外した。各骨材で得られた動弾性係数の平均値および変動係数を全ての骨材で平均した結果を表-4に示す。これより、いずれの寸法においても大きな差はないものの、区分Bすなわち最大径 $35 \pm 5 (30 \sim 40) \text{ mm}$ のものが最も変動が少ないことがわかる。また、区分Bが100個平均での平均値とも近くなっている。この区分で良好な結果となった理由は不明だが、骨材径が小さいと測定誤差が大きくなり、大きすぎると欠損などの影響が出やすくばらつきが大きくなった可能性がある。以上より、測定対象とする骨材径については、直径 $30 \sim 40 \text{ mm}$ 程度の範囲では、いずれの径においても精度に大きな差がないものの、 $35 \pm 5 \text{ mm}$ の範囲において変動が最も小さくなると言える。

表-4 骨材径による変動係数および平均値の差異

骨材		平均値 [kN/mm <sup>2</sup> ]	変動係数
全 100 個		10.6	43.9%
A	$30 \pm 5 \text{ mm}$	8.99	32.6%
B	$35 \pm 5 \text{ mm}$	10.2	30.8%
C	$40 \pm 5 \text{ mm}$	11.6	34.2%

## 2.7 距離計測の影響

距離計測はノギス（感量 $0.05 \text{ mm}$ ）により行ったが、接触点を結ぶ二点が必ずしもノギスと垂直に接触していない。そのため、接触角度の影響について検討した。いま、骨材表面がノギスと角度 $\theta$ により接触しているとす。このとき、測定距離 $d'$ に対して、実際の伝播距離 $d$ は $d = d' / \cos\theta$ となる。そのため、実際の伝播速度を $V$ とすれば、距離 $d'$ により算定される伝播速度 $V'$ は、 $V' = V \cos\theta$ となる。これより、算定される動弾性係数 $E_d$ の差 $\Delta E_d$ を求めると、

$$\frac{\Delta E_d}{E_d} = \sin^2 \theta \cong \theta^2 \quad (10)$$

となる。以上より、接触角度による影響は距離および伝

播速度に関係なく、角度そのものに影響することがわかる。また、 $1^\circ(=0.01745\text{rad})$ 程度のずれが生じた場合でも、0.03%程度の影響しかないことがわかる。逆に、1%の差異が生じるには、 $5.7^\circ$ 程度の角度が発生する必要がある。よって、実際の測定においては、接触角度を $5^\circ$ 以下にすることを目安として、ほぼ垂直になるように計測しても、推定結果に大きな影響を与えないといえる。

### 3. 結論

本研究では、コンクリートに大きな乾燥収縮を生じる粗骨材を選別するための指標として、超音波により求めた粗骨材の動弾性係数に着目し、粗骨材の動弾性係数とコンクリートの乾燥収縮率との関係を明らかにした。また、スクリーニングのために必要な測定法について検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 25種類の骨材について、各100個の動弾性係数とコンクリートの収縮量について比較を行った。その結果、骨材密度および吸水率と比較しても、動弾性係数の平均値は収縮量と高い相関を持つことが明らかとなった。
- 2) 100個より得られた標準偏差に基づけば、サンプル数を20個とした場合、動弾性係数の推定誤差は $2\text{kN/mm}^2$ 程度となる。このとき、推定される収縮量に応じて骨材のグレードを5分類程度に区分することができる。
- 3) 動弾性係数の測定においては、最大径 $35\pm 5\text{mm}$ の絶乾状態にある骨材を24個抽出し、動弾性係数の最大最小値上下2個ずつ除外した上で平均して求めると、比較的安定した結果が得られることがわかった。

ここでは、コンクリートに過大な膨張を与える骨材に対する簡易な判定法として、動弾性係数の測定を提案したが、本手法の方法では測定値のばらつきが大きく、必

ずしも最良の方法であるとはいえない。しかし、動弾性係数とコンクリートの膨張量は明確な相関があるため、動弾性係数に着目したより簡易で明確な判別法が開発できる可能性は残されている。この点は今後の検討課題とする。

### 謝辞

本研究は科学研究費萌芽研究(課題番号21656111)の助成を受けたものである。また、本研究の実験で使用した骨材並びにその密度、吸水率、コンクリート収縮量のデータは土木研究所から提供を受けた。ここに記し謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 土木学会：垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書，2005.9
- 2) 土木学会：構造物の設計におけるコンクリートの収縮の考慮，2010.12
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書，鉄筋コンクリート工事(JASS5)，2009.4
- 4) 日本コンクリート工学協会コンクリートの収縮問題検討委員会：コンクリートの収縮問題とその対応，2009.7
- 5) 兵頭彦次，谷村充，藤田仁，番地成朋：物性の異なる粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性，土木学会論文集，V-435，p867-868，2009.9
- 6) 片平博，渡辺博志：骨材がコンクリートの乾燥収縮に与える影響の簡易推定法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，p97-102，2009
- 7) ヘンサルピソット，仲井亮平，服部篤史，河野広隆：土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.65，No.1，p567-568，2010
- 8) 永田靖：サンプルサイズの決め方，朝倉書店，2010.