

次世代型遮音吸音パネルの開発とその性能について

Development and Performance of Next-generation Sound Absorption/Insulation Panels

吉村 道彦^{※1} 内田 季延^{※1} 河野 俊樹^{※1}
Michihiko Yoshimura Hidenobu Uchida Toshiki Kohno

【要旨】

物性値の変動を伴うクリンカアッシュや溶融スラグ等を用いた吸音パネルの製造に対し、それらの粒度分布の分析結果を用いて、配合するセメント量を最適化するパラメーター「規準化S/C」を考案した。その結果、そのパラメーターを変数に用いた実験式を用いて物性変動に対する品質変動の影響を予測し、物性変動を考慮した配合設計が可能になった。コンクリート二次製品工場での製造試験および作製した吸音パネルの吸音率および圧縮強度の計測によって、配合設計手法の有効性を確認した。

【キーワード】 吸音材 反射音低減 吸音パネル 低層吸遮音壁 リニューアル 副産物有効利用 配合設計

1. はじめに

次世代型吸遮音パネルは、主要材料に有害物質の溶出などがなく二次使用が可能な溶融スラグや石炭灰（クリンカアッシュ）などの産業副産物を用いた、循環型社会に対応したコンクリート系吸遮音材である。物性値の変動を伴う副産物に対し、それらを分析して配合調製を行うことによって、多くの副産物に対して、分級などの二次加工を行うこと無しに、直接利用することを可能にした。製造には、必ずしも特別な装置は必要でなく、利用場所の近郊（産業副産物排出事業所や建設工事現場）にて汎用ミキサー等の簡易製造設備を用いたオンサイト製造が可能である。その結果、材料調達→製品製造→設置使用に係る資材・製品の移動距離を短縮できるようになり、「材料・流通コストの低減可能」という新しい環境保全対策が可能となった。本論文は、次世代型吸遮音パネルの開発経緯、配合設計の考え方、コンクリート二次製品工場での製造事例、吸音性能等について述べる。

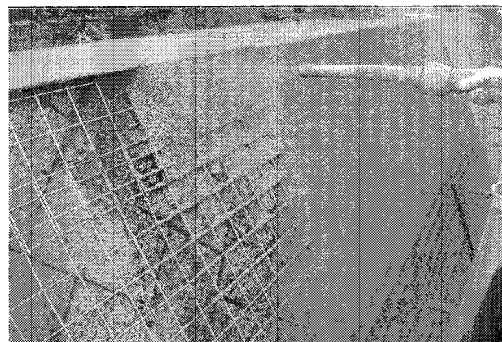


写真-1 吹付型吸音工法

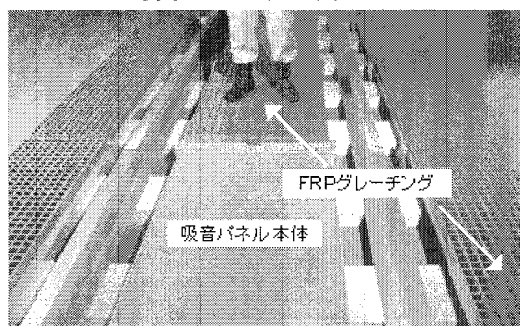


写真-2 鉄道スラブ軌道面用吸音パネル

2. 開発の経緯

飛鳥建設では、現場で吹付け施工を行って吸音層を形成する独自工法として、吹付型吸音工法¹⁾ (写真-1) を展開²⁾³⁾し、施工速度、吸音性能向上のための改良および大気浄化機能付加を実施してきた。また、その応用製品として、鉄道スラブ軌道面用吸音パネル⁴⁾ (写真-2) の開発を行ってきた。それらの展開過程で、複数の施主から、パネルタイプ製品、更なるコストダウン、およびリサイクル型へのリニューアルの要望等があり、それらの要望に応えるために、吹付型吸音工法を応用した既存の金属製吸遮音壁のリニューアル方法の考案（リニューア

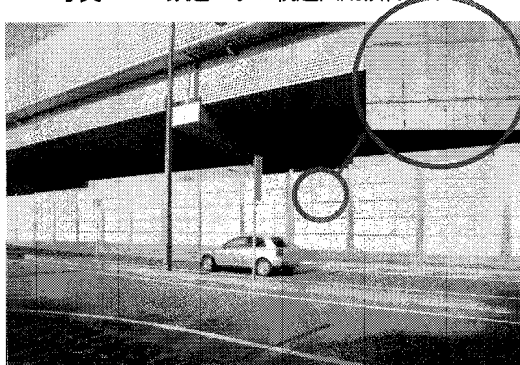


写真-3 リニューアル・パネル(景観設計タイプ設置イメージ)

1. 技術研究所 第二研究室

ルパネル、写真-3)を行い、コストダウンとパネル製品の要求に対して、副産物を利用したパネル化工法の開発に着手し、次世代型吸遮音パネルの開発へ至った。

3. 開発のコンセプト

前章の経緯を反映して、目標とする製品の条件として下記を想定した。

- ①循環(リサイクル)を意識した材料選定
- ②統一型吸遮音壁と同等以下のコスト
- ③旧日本道路公団 (JH) の吸音率基準を確保
(残響室法吸音率 : 0.7以上(400Hz), 0.8以上(1kHz))

これらの目標を達成するためのアプローチとして、下記を検討した。

- ・全国各地に比較的安価で大量に入手可能な副産物 (溶融スラグ, クリнкаアッシュ等) を主要骨材とする。
- ・汎用的な設備を用いて材料供給場所や吸音パネル設置場所に近い場所で製造可能とする。
- ・材料調達→製品製造→設置使用に係る資材・製品の移動距離を短縮しコストダウンを図る。
- ・製品の吸音率を向上させる。

4. 配合設計の考え方

一般に、人工軽量骨材等を使用した多くの吸音パネルの場合、予め、『骨材を製造する工場によって製造時に品質が管理されている』又は『製造された段階で、分級などの二次加工を行うことによって、粒度分布、表乾密度、吸水率他の物性値が確保されている』のどちらか一方か、または両方である。よって、各材料の配合設計や製造における調整項目は、それらの安定した材料に対して実施される。一方、クリンカアッシュや溶融スラグ等『未加工、未調整の副産物』を骨材として使用する場合、その産地や時期によって物性値が変動する。よって、同じ産地の副産物であっても、常に同じ配合設計で品質の安定した製品が製造されるとは限らず、物性値の変動を考慮した配合調整を行うことが必要となる。そこで、物性値の中で特に影響が大きいと考えられる「粒度分布」およびその変動に伴う「表面積の変動」を調べ、変動に適應して配合調整を行う手順を考案した(図-1)。即ち、①骨材調達時に粒度分布等を分析して、そのデータに基づいて、②実験式にて吸音率や圧縮強度等を予測し配合調整を行うものである。配合設計の詳細は次章で述べる。

5. 比表面積を考慮した配合設計

5.1 配合設計の概要

クリンカアッシュ等の副産物を骨材として利用したコンクリート系の吸音材は、主に下記の条件を調整することによって、吸音率および圧縮強度のバランスを変えることが出来る。

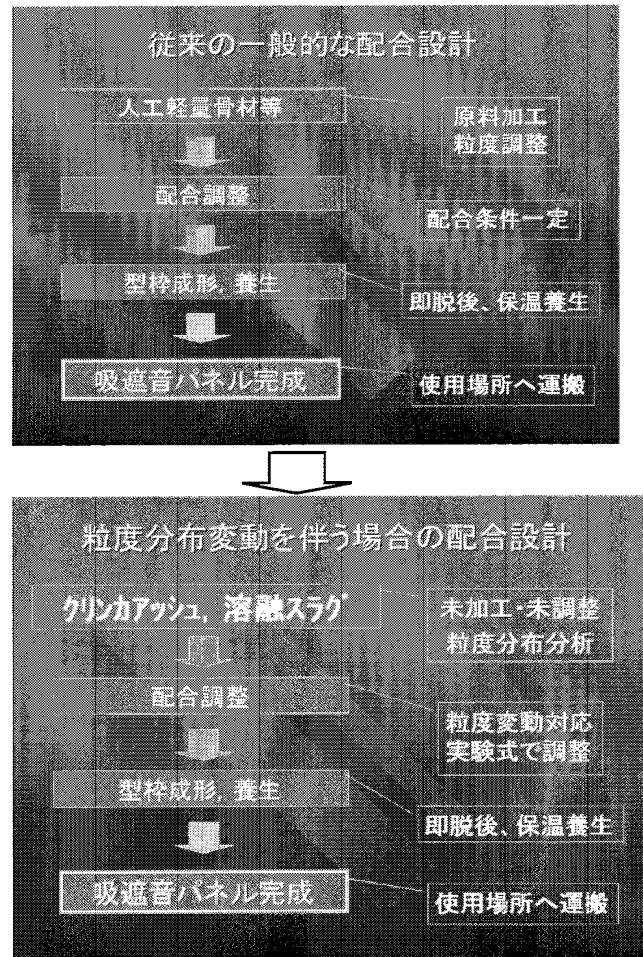


図-1 配合設計方法の比較

- ・骨材(S)とセメント(C)の比 $<S/C>$
- ・水(W)とセメント(C)の比 $<W/C>$
- ・空隙率 (配合重量比率と単位容積重量によって計算)

吸音率と圧縮強度の調整可能な範囲は骨材の種類や粒度分布によって左右される。吸音率と圧縮強度のバランスを適切にコントロールするためには、骨材の表面に付着するセメントペースト量(厚さ)を適切にコントロールし、骨材同士を適度に結合させると同時に骨材間の隙間(空隙)を保つ必要がある。骨材の粒度分布が変化すると、同じ重量比率による配合条件であっても、攪拌時の性状が大きく変化する。具体的には、配合条件が同じ場合、細粒分が多くなる(粗粒率が小さくなる)と表面の湿り気が少なくなり、逆に細粒分が少なくなる(粗粒率が大きくなる)と水気が多くなり、空隙が埋まりがちになる。この原因としては、粒度分布が変わることによって骨材の単位質量あたりの表面積(比表面積)が変化し、その結果、骨材表面のセメントペースト厚さが変わると考えられる。よって、粒度分布の変化およびそれに伴う比表面積の変化に対して配合条件を補正することによって、粒度分布の変化に対する骨材表面のセメントペースト厚さの変化を少なくすることが出来ると考えられる。

5.2 見かけの比表面積の計算

各種副産物の比表面積を求める方法としては、ブレン法、BET法、ガス吸着法など、幾つかの方法があるが、現場で実施可能な方法としては、より簡易な方法が望ましい。よって、比較的容易な篩い分け試験によって得られる粒度分布から、比表面積に相関がある値として、次のパラメーターを考案した。

$$S_w : \text{骨材の見かけの比表面積 (m}^2/\text{kg)}$$

ここで

$$S_w = \sum S_i$$

$$S_i = (4 \cdot \pi \cdot r_i^2) \cdot n_i = 3 \cdot P_i / (M \cdot r_i)$$

$$n_i = P_i / M \cdot (4 \cdot \pi \cdot r_i^3 / 3)$$

S_i : i 番目の粒度の見かけの比表面積 (m^2/kg)

r_i : i 番目の粒度の平均半径 (m)

n_i : 単位質量当たりの i 番目の粒度の粒子数(個/kg)

P_i : 単位質量当たりに含まれる i 番目粒度の質量 (kg)

M : 骨材の表乾密度 (kg/l)

また、計算には下記の条件を考慮、設定した。

- 骨材形状を球形形状として計算。
(実際には骨材種類や粒径によって異なる)
- 骨材の平均半径は、(粒度幅両端の中間)/2 とする。
例えば、粒径 0.6~1.2mm の場合、
 $r_i = (0.6+1.2)/1000/2/2 = 0.00045$ (m)
(粒度 10mm 以上は 10mm~20mm として計算)
- 同種類の骨材であれば、同じ粒径範囲の比表面積は同じであると仮定。

このように定義した S_w は、実際の比表面積と同じ値では無いが、比表面積に比例関係のある値であると考えられ、パラメーターとして利用する。

5.3 見かけの比表面積を考慮した配合補正

比表面積の変化に対して骨材表面のセメントペーストの厚さが変わらない様にするために、比表面積の増減に対応してセメントペーストの量を増減することを考える。配合設計上は骨材/セメント、水/セメントの比率による管理が一般的でわかりやすいことから、比表面積の変化に対してセメント量を変化させることとする。このとき、水セメント比が一定であれば、セメント量の変化比率はセメントペースト量の変化比率と同じになる。すなわち、ある粒度分布(比表面積 S_{w1}) の骨材/セメントの比 (S_1/C_1) に対して、別の骨材(比表面積 S_{w2}) を用いて同様のセメントペースト厚さにコントロールするためには、セメント量に比表面積の比率 (S_{w2}/S_{w1}) を乗じた S/C を用いればよい。

$$S_1/C_1 \rightarrow S_1 / (C_1 \cdot (S_{w2}/S_{w1}))$$

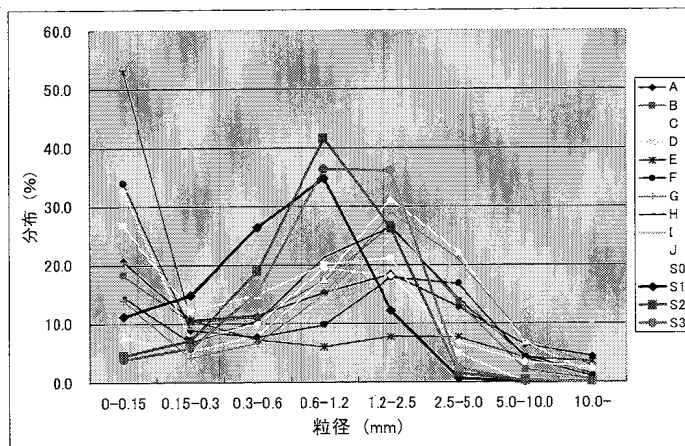


図-2 クリンカアッシュ、熔融スラグの粒度分布分析例

($S_w : 2.4 \sim 21.8 \text{ m}^2/\text{g}$)

ここで、熔融スラグ、クリンカアッシュの粒度分布(図-2)から算出した見かけの比表面積の範囲を考慮して、 $10 \text{ m}^2/\text{g}$ を比表面積の基準値とし、比表面積比を R_s とし、「規準化 S/C 」を下記のように定義する。

$$\text{規準化 } S/C = S / (C \cdot R_s)$$

$$\text{比表面積比} : R_s = S_w / S_{w0}$$

(基準値 $S_{w0} = 10 \text{ m}^2/\text{g}$)

この「規準化 S/C 」が一定となるように S/C の調整を行うことによって、様々な粒度分布の副産物に対して、骨材表面のセメントペースト厚さの変動を少なくし、練り混ぜ性状を均一に保つことが可能となる。

この手法によって配合調整を行うと、調達した副産物を分級などの二次加工を行うことなしに、様々な粒度分布に対応して、吸音パネルに適した配合条件に調製することが可能となると考えられる。

6. 製造試験結果

6.1 製造試験概要

前章で述べた配合設計手法により、コンクリート二次製品工場既存ラインで充填成型する製造試験を行い、

- 他のコンクリート二次製品と同様に製造が可能か
- 実験式で予測した性能が得られるか

の確認を行った。製造試験当日に実施した製造フローは図-3に示す。また、製造状況を写真-4に示す。

6.2 配合設計

粒度分布を「骨材のふるい分け試験方法 (JIS A1102-1999)」、表乾密度・吸水率を「細骨材の密度及び吸水率試験 (JIS A 1109)」に従って分析し、実験式による配合設計を行った。骨材の粒度分布から算出した見かけの比表面積を用いて吸音材として設定可能な配合条件範囲を予め把握し、骨材セメント比 S/C を 4.9 (規準化 $S/C : 3.9$)、水セメント比 W/C を 0.67 に調整した。使用した骨材

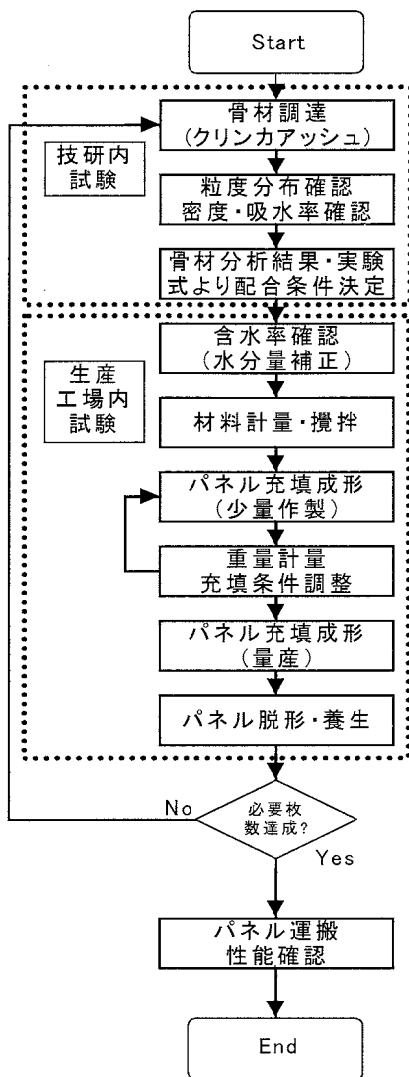


図-3 製造フロー

の粒度分布分析結果（製造実験に使用した袋毎の粒度分布および平均値）を、表乾密度、吸水率、 S_w 平均、 R_s 平均と共に図-4に示す。

6.3 試験結果

1) 吸音率

垂直入射吸音率を「2マイクロホン法 (ASSEM E1050⁹ 準拠)」に従って計測し、残響室法吸音率を、「残響室法吸音率測定方法 (JISA 1409(1998))」に従って計測した。製造したパネルの垂直入射吸音率計測結果、残響室法吸音率計測状況および計測結果を、図-5、写真-5および図-6にそれぞれ示す。垂直入射吸音率は、斜入射吸音率の算出過程で行う処理と同様に、400~2,000Hzの道路交通騒音のA特性スペクトルで補正を行った値を補正垂直入射吸音率 α_{RA0} と定義³⁰⁾し、実測値と実験式による予測値との比較を行った。 α_{RA0} の予測値が0.48 (袋③使用 3バッチ目)、0.51 (袋④使用、4バッチ目) に対して、実測値 (6個の平均値) は0.49であり、実験式による予測値は、概ね実測値をトレースしている。



写真-4 コンクリート二次製品工場既存ラインでの製造状況 (充填・脱形直後、クリンカアッシュ使用)

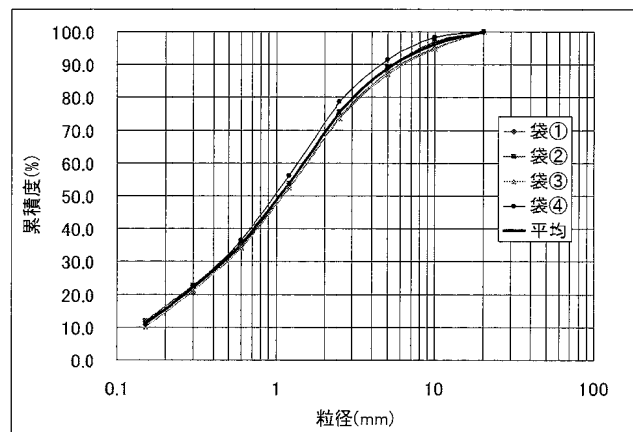


図-4 使用骨材の累積粒度分布図

(表乾密度: 2.03, 吸水率: 8.32, S_w 平均: $7.9m^3/g$, R_s 平均: 0.79)

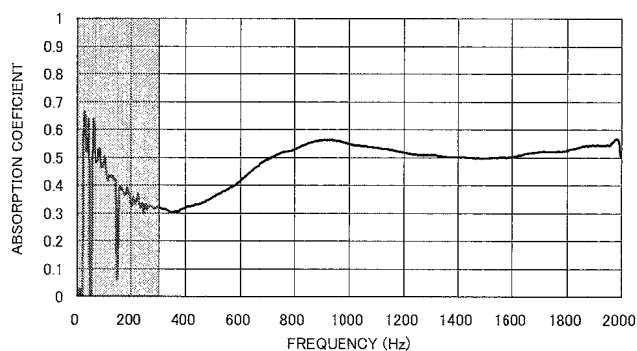


図-5 垂直入射吸音率計測結果 (α_{RA0} : 0.49)

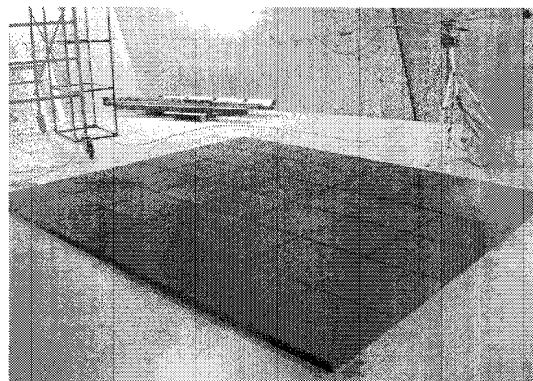


写真-5 残響室法吸音率計測 (飛鳥建設技術研究所, 10.5m設置)

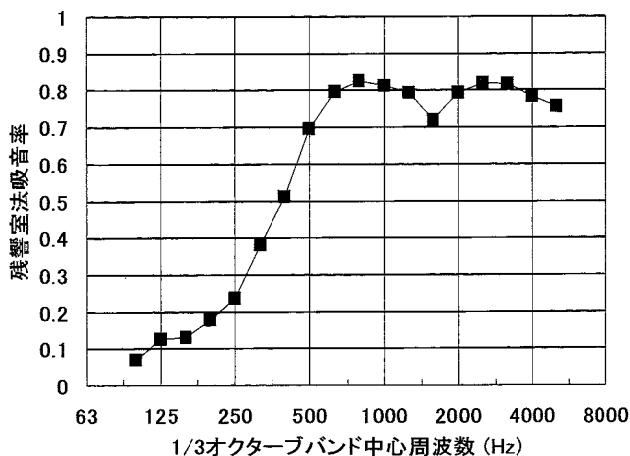


図-6 残響室法吸音率計測結果

また、残響室法吸音率の計測結果では500Hz以上の周波数帯域で0.7以上の吸音率が得られた。400Hzにおいて目標値に達していないが、製造条件の調整で十分達成可能な範囲と考えられる。

2) 圧縮強度

圧縮強度を、「コンクリートからのコア及びはりの切取り方法並びに強度試験方法 (JIS A 1107)」に従って計測した。このパネルから採取した供試体による圧縮強度(材齢7日、3個の平均値)は 5.1N/mm^2 で、既存製品の2倍以上の値であった。このときの圧縮強度の実験式(気温 20°C での室内実験結果より構築)による予測値は、 1.56N/mm^2 (袋③使用3バッチ目)、 1.18N/mm^2 (袋④使用、4バッチ目)で、予測値よりも実測値が大きな値となった。これは、実験式を構築する母集団である試験体が、気温 20°C の恒温室内で気中養生しているのに対し、製造実験を行った工場ではコンクリート水和反応熱を利用した保温養生であったことが原因の一つであると考えられる。

7. むすび

粒度分布が変動する各種副産物骨材に対して、骨材の粒度分析結果を用いた配合設計によって、他のコンクリート二次製品と同様に製造が可能で、かつ、吸音率についても実験式で予測した性能が得られ、その有効性を確認した。一部、圧縮強度の予測に関しては、製造工場と

実験室との養生条件の違いのため安全側の値となったが、より高い精度を求める場合は養生条件の違いによる補正等が必要である。

骨材の調達コストは、材料の運搬費が占める割合が多いことから、調達先、製造場所、が使用場所に近くなるような選定を行うことでトータルコストを下げ、統一型吸音壁と同等以下にすることが可能と考える。例えば、この製造試験の条件では、調達先から工場まで約15トンの骨材を調達した場合、骨材単体で 500円/m^2 以下(運搬費を含む)のコストを試算している。

これまでの実験で行った、複数の溶融スラグやクリンカッシュの分析結果から、これらの副産物に対して調整が可能であると考えているが、細粒分が多い場合には吸音率と圧縮強度のバランスを取ることが難しいことがわかった。そのため、試験実績のない材料の場合は量産を行う前に、事前の試験体作成とその評価を行うことが必要である。また、コンクリート系の吸音パネルはポーラスコンクリートの範疇の一部であると考えられる。要求仕様に応じた配合水準の取り直しと実験式の再構築は、必要であるが、透水性ブロック等にも拡張が可能であると考えている。

今後は、自治体内における、副産物有効利用部門と騒音対策部門との連携による需要創出も視野に入れた展開と、都市圏を中心とした、外部展開(製造委託・販売委託など)の協力体制拡大が課題であると考えている。

【参考文献】

- 1) 田中, 他: 吹付型吸音工法の開発, とびしま技報(土木), No.49, p237-241. (1999)
- 2) 常盤, 他: 高速道路トンネル出口部擁壁への大気浄化吹付型吸音工法の施工とその性能について, とびしま技報(土木), No.52, p75-82. (2003)
- 3) 奥野, 他: 高速道路近傍のスプリットブロック積み擁壁への吹付け型吸音工法の施工とその性能について, とびしま技報, No.56(2007).
- 4) 吉村, 他: 鉄道スラブ軌道面用吸音パネルの開発, とびしま技報, No.54, p109-114. (2005)
- 5) ACTIVE STANDARD: E1050-98(2006) Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System.
- 6) 吉村他: "吹付型吸音工法による吸音材厚さのばらつきと平均斜入射吸音率との関係について" 日本音響学会講演論文集(2001年秋期 2-P-8 p871~872)

Summary : For the production of acoustical concrete panels made using by-product aggregates such as clinker ash and slag ash with fluctuations in their solid state properties, the authors devised a parameter "standardized S/C" for optimizing the cement content based on their particle-size distribution and so on. An empirical formula including the standardized S/C enables estimation of the physical properties of the resulting concrete, such as the absorption co-efficient and compressive strength, thereby allowing proportioning control in consideration of the fluctuations in the solid state properties of these aggregates. The effectiveness of this proportioning technique was confirmed by the measured absorption co-efficient and compressive strength of absorption panels and production tests at factories producing precast concrete elements..

Keywords : acoustical material, reflection noise control, acoustical panel, low height sound barrier, renewal, effective usage of "by-product", blending control