

論文

[1117] シラス軽石を用いた多孔質コンクリートの吸音特性

玉井元治*¹・田中光徳*²

1. まえがき

筆者らは、普通砕石や人工および天然軽量骨材に、粘稠なセメントペーストをまぶした、連続空隙を有する吸音性コンクリート (Sound-Absorbing No-Fines Concrete: SA-NFC) の開発研究を進めている [1], [2]。それらは、軽量にして連続空隙を有し、均質な通気性に長所を持つ NFC である。その望ましい特性と開発内容は、所要の吸音性と強度および自然変化に対する耐久性を有し、騒音となる特定の周波数帯を板厚さを交互に変化することによって吸収する吸音板を製作することである。

これまでの研究は、骨材として普通砕石、各種人工軽量骨材、シラス軽石等を用いたそれぞれの単体の吸音特性および、結合材にポゾラン材や発泡剤を添加して作成した SA-NFC の吸音特性と強度性状につき検討した。その結果、骨材単体の吸音率は、空隙率、粒径、形状、単位当りの表面積、表面性状等の物理的性状と、材料の厚さに依存することが確認できた。

SA-NFC の吸音特性に関係する要素は、骨材物性の外に、骨材空隙を充填する結合材の量に依存する連続空隙と内部表面積、空隙の表面性状等である。実施工と耐久性面からは、製品の嵩比重が低く、強度が高いことが望ましいとした。SA-NFC の構成材料のうち骨材は、軽量で取り扱い易いシラス系の天然軽石が、それらの特性を包含していることを指摘した。結合材への添加剤としては、シリカフュームが高強度化を図り、所要の強度を得るために必要な結合材量を削減することができ、またアルミニウム粉末の添加は結合材表面の凹凸と結合材内部に一部連続空隙を形成させ吸音特性を良好にすることが予測される。

本研究は、これらの研究をさらに発展させるため鹿児島地方に多量に分布するシラス系天然軽石を SA-NFC の骨材として有効利用し、結合材にシリカフューム、ポリマーエマルジョン、カーボン繊維、アルミニウム粉末のそれぞれ単体または複合物を混入し、吸音特性および強度特性について検討した。続いて吸音特性の良好な配合を定め、特定の騒音周波数を SA-NFC の板厚さを交互に変化することによって吸収する吸音板を開発する。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

使用したセメントはO社製の普通ポルトランドセメント(C)、(比:3.16)を、高性能減水剤はナフタリン系(Sp)または多成分コポリマー系(Ssp)を、ポリマー(P)は、カチオン系アクリルエマルジョン(比:1.06)を、カーボンファイバー(CF)は、T社製(比:1.05)繊維径:7 μ m、長さ:5-10mm を、アルミニウム粉末(AL)はW社製、シリカフューム(SF)は、

表1 シラス軽石の物理的性質

Class of Sirasu pumice	Size (mm)	Specific gravity	Void ratio(%)
P ₃	2.0-3.0	1.29	47.7
P ₄	2.4-4.0	1.23	45.0
P ₆	3.0-6.0	1.21	44.3

*1 近畿大学教授 理工学部土木工学科、工博 (正会員)

*2 第一工業大学助教授 工学部土木工学科、(正会員)

ノルウエー産(比:2.28)をそれぞれ使用した。骨材に用いたシラス軽石の種類と、それらの物理的性質は表1に示す。

(SA-NFC)の吸音率測定と強度試験用供試体の配合は表2に示す。

セメントペーストのコンシステンシーは、NFC中における空隙量と均一なバインダー厚さの確保の上から重要な要素である。セメントペーストのレオロジー量と骨材への付着厚さの関係はあるが[3],[4]、本研究では、水/結合材比=18%~25%(wt%)とし、簡便な管理方法として、最適コンシステンシーの値はJIS R 5201のフロー値を210~240mmとした。結合材量は、骨材の空隙を30%または20%充填する配合とした。

2.2 供試体の作成と養生

供試体の作成は、図1に示す順序で結合材をJIS型モルタルミキサーにより3分間練り混ぜ、その後所要の結合材と骨材を計量し強制ミキサーで混練した。吸音率測定用供試体は直径9.8cmを一定とし、厚さ5.0, 7.5, 10.0cmの3種類として作成した。強度試験用供試体の作成は、JIS R 5201に準じて行なった。供試体の養生は、吸音率測定用供試体では空气中湿布養生2日脱型後空气中養生26日、強度試験用供試体は、湿潤養生2日、脱型後空气中養生26日とした。

2.3 試験方法

(1) 吸音率測定法および解析法[2]

測定には図2に示す、B & K製吸音率測定装置を用い、試験法はJIS A 1405「管内法による建築材料の垂直入射吸音率測定法」に準じて実施した。

垂直入射吸音率Xの算出は次式による。

$$X = 4 / (n + 1) / n + 2$$

$$n = |P|_{\min} / |P|_{\max}$$

$$= (A - B) / (A + B) \quad \text{但し、A, B: スピーカー面と試料面へ進む音圧振幅}$$

n: 管内マイクロホンによる音圧極大、極小比

(2) 骨材の比重試験、吸水率試験はJIS A 1108に、NFCの強度試験はJIS R 5201に準じた。

表2 (SA-NFC)の配合

Grain size	Kind of mixing	W/(C+SF) (%)	Kind of admixture	Carbon fiber (%)	B/V (%)	Kind of super plasticizer
P ₃	A	40	P/C=1	---	30	---
	B	40	P/C=0.3	---	30	---
P ₄	A	40	P/C=1	---	30	---
	B	40	P/C=0.3	---	30	---
	C	25	---	---	30	Sp=0.75%
	D	25	---	1	30	Sp=0.75%
	E	35	P/C=0.3, AL=1%	---	30	Sp=0.5%
	F	25	SF=0.2	---	30	Sp=1%
	G	25	SF=0.2	---	20	Sp=1%
	H	30	SF=0.2, AL=1%	1	20	Sp=0.75%
	I	18	SF=0.2	---	20	Ssp=1.7%
	J	18	SF=0.2, AL=1%	1	20	Ssp=1.7%
P ₆	A	40	P/C=1	---	30	---
	B	40	P/=0.3	---	30	---

P₃: 2.3-3.0 mm, P₄: 2.4-4.0 mm, P₆: 3.0-6.0 mm,
B/V= Binder/Void, W: Water, C: Normal portland Cement,
P: Polymer emulsion, CF: Carbon fiber, Sp or Ssp: Superplasticizer,
SF: Silica fume, AL: Aluminium powder,

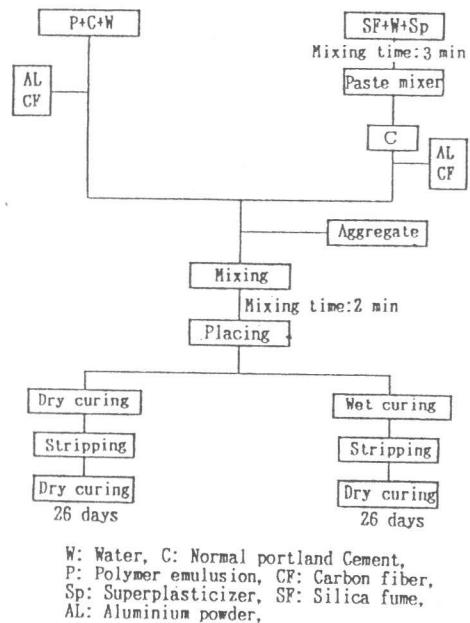


図1 供試体の作成方法

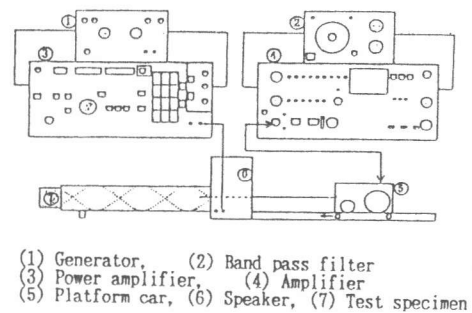


図2 B & K製吸音率測定装置

(3) 吸音効果の評価法

吸音効果の評価する手法は、図3に示すように、吸音面積率(A_{sa})を用いた。これは供試体厚さが変化すると、吸音する周波数帯域も変化するため、交通騒音として実用的な吸音範囲を想定し供試体厚さを7.5cm、周波数帯域を400Hz-1000Hzとし、全面積に対する吸音面積の割合を算出し評価した。

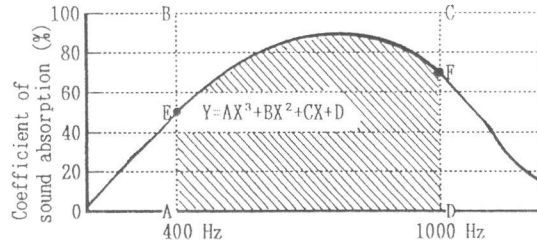


図3 吸音面積率の計算方法

$$A_{sa} = A_i / A_o, \quad A_i = \int Y dx = \int f(x) dx, \quad Y = AX^3 + BX^2 + CX + D,$$

ただし、A_{sa}: 吸音面積率(%), A_o: 所望周波数帯の全面積(ABCDで囲む面積)

A_i: 吸音面積(AEFDで囲む線部の面積), Y: 吸音率, X: 周波数

3. 結果および考察

3.1 吸音率

(1) 材料の性状と吸音特性

吸音特性を左右する因子には、材料の厚さ、材料中の細隙の大きさ、形状、配列状態、材料表面粗度、表面積、通気性等が挙げられる。

図4と図5は粒径P₃(2.0-3.0mm)とP₄(2.4-4.0mm)のシラス骨材の単体を目の開き2mmの網にそれぞれ入れ、供試体厚さ(5.0, 7.5, 10.0cm)を変化した場合の吸音率と周波数の関係を厚さ別に示した。P₃骨材の単体を用いた場合、吸音ピーク値は低いが、全周波数帯域に対し比較的幅広く吸音する。P₄骨材の単体を用いると、高い吸音率を示すが、吸音する音域は狭くシャープになる。一般に骨材粒径が大きくなると、単位当りの表面積が小さくなり、吸音率は低下する。この傾向は骨材にガラス球を用いた場合も同様である。シラス軽石を骨材として用いると、表面の凹凸のみならず内部に一部連続空隙を有するため吸音特性を良好にしている。NFC化した場合も結合材厚さが薄い領域ではその効果を発揮する。しかし、細粒化するとその効果が半減する。図6はP₄を用いJ配合としたSA-NFC供試体の吸音率と周波数の関係を厚

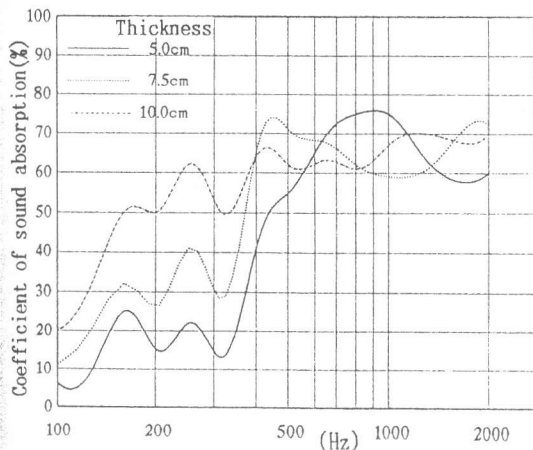


図4 粒径P₃の吸音率と周波数の関係

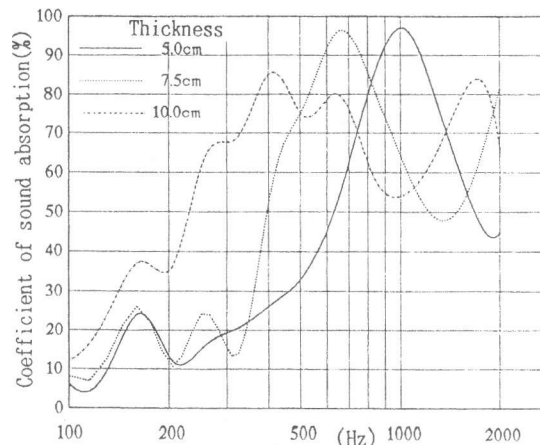


図5 粒径P₄の吸音率と周波数の関係

さ別に示した。シラス軽石は表面の凹凸が大きく NFCとした場合でもその状態が残留する。供試体厚さ(5.0, 7.5, 10.0cm)は、吸音する周波数の波長(λ)に比例し、厚いほど低周波域の吸音効果が大きくなる。

(2) 粒径の相違と吸音面積率

図7は粒径と配合の相違が吸音面積率に与える影響を示した。この結果を粒径別にみると、吸音面積率(Asa)は粒径P₃を用いると58-66%であるのに対しP₄が66-81%、P₆は69-71%となり、これらの粒径の範囲ではP₄が良好となった。

(3) ポリマーエマルジョン混入の影響

ポリマーを混入すると、粒子の剥離防止効果を著しく改善するが、多量に添加すると、内部表面を平滑化する傾向があり、吸音面積率をやや低下させる。この傾向は粒径が小さい程大きい。

(4) カーボンファイバー混入と吸音特性

バインダーに繊維質のCFを混入したD, H, J配合は、吸音幅が高周波域へ広がり、CF混入による吸音特性の改善が見られた。これは空隙内に一部のCFが交差し、音波が振動エネルギーとなって減衰したものと推測できる。しかし、P₃骨材を用いた別の実験では混入時に分散性が悪く一部空隙の閉塞がおり、結果的に吸音率が低下する傾向を示した。

(5) シリカフェームの混入と吸音特性

SF混入によりNFCの強度増進が望めることから、セメントペーストの充填率を下げ、内部表面積を拡大することが可能となった。SFを混入したNFCの吸音率は平均で70%以上と比較的良好な結果を示した。例えばG~J配合(B/V=20%)においては、空隙率の上昇による表面積、表面粗度の増大と通気性が向上し、その結果骨材単体に近い吸音特性を示したものと思われる。そのうちCFを1%混合した配合は、吸音効果を更に改良している。

(6) アルミニウム粉末混入と吸音特性

通常セメントペーストに発泡剤であるAl粉末を混入した場合、吸音幅、ピーク値共に上昇するが、ポリマーと共に混入した場合ポリマー量に拘らず吸音率にさほど変化は見られなかった。これは、ポリマーがセメントペースト中に分散した結果、Al粉末とセメントとの反応による発泡作用が幾分阻害されたものと思われる。Al粉末を1%混合したJ配合は、SF, CFとの相乗効果も発揮して比較的良好な吸音特性を示した。

(7) 板の厚さを交互に変化したSA-NFCの吸音特性

NFCの吸音特性は層の厚さを変化することによって吸音周波数帯が移動する。従って、吸音板は、図8に示す一例のように意匠を考慮し、道路騒音周波数帯域(400-1000Hz)を吸音する

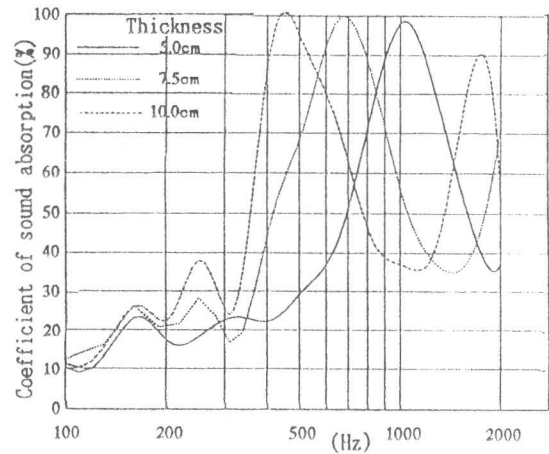


図6 吸音率と周波数の関係

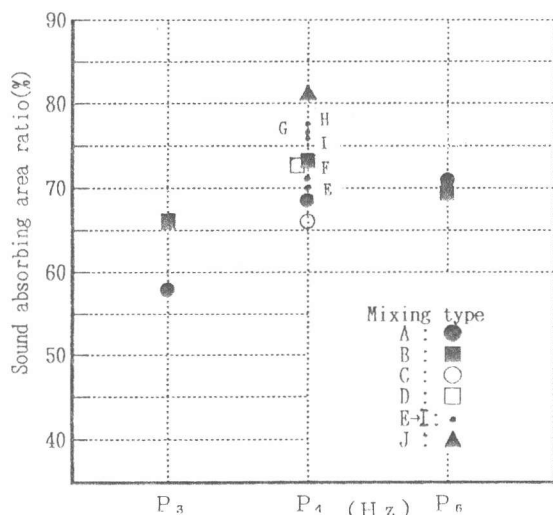


図7 配合と吸音率の関係

よう板厚を交互に配置する必要がある。

図9は、SA-NFCの配合をP₄-Jとし、板の厚さ5cm, 7.5cm, 10cmの面積比をそれぞれ1/3ずつとした場合および5cm, 10cmとした板の面積比をそれぞれ1/2ずつ変えた場合の吸音率と周波数の関係を示す。

このように板厚さを必要に応じて任意に変化すると、一定厚さのものに比べ吸音率のピーク値は低下するが、吸音を要する周波数帯域を拡大し、吸音板としての特性を改良することができる。なお実際の現場に近い残響室法による実験値は、ランダム入射や側面からの吸音も含まれるため、本実験に採用した垂直入射吸音率測定法に比べ、15%以上吸音特性は良好になることが予測できる[5]。

また、供試体の背後に3cmの空気層を設けると、吸音ピークが低周波域へ移動し250Hz-600Hz間の吸音率の上昇が見られた。この結果からSA-NFCの板厚さを薄くし、背後に適当な空気層を設けることにより道路や鉄道等の所要の騒音を経済的に吸収させることができる。

3.2 各種配合と強度特性

(1) ポリマー量と強度

ポリマーの混入は骨材の剥離防止には効果があるが、混入割合を上げると強度が急激に低下する。この傾向は表3に示すように、粒径が大きくなるほど顕著となるようである。

(2) カーボンファイバー添加と強度特性

CFの添加が圧縮強度に与える影響は比較的小さく、また繊維の分散性からも1-2wt%内の添加が望ましい。P₄を用い結合材にCFを1%添加し、骨材空隙に30%充填したD配合の強度は大きく、またSFと併用したH, J配合は骨材空隙に20%充填したにもかかわらず、高い強度を示した。なおこれらの圧縮強度はP₄骨材を用いると配合に関係なく平均してALC板の強度程度の値を得ることができた。

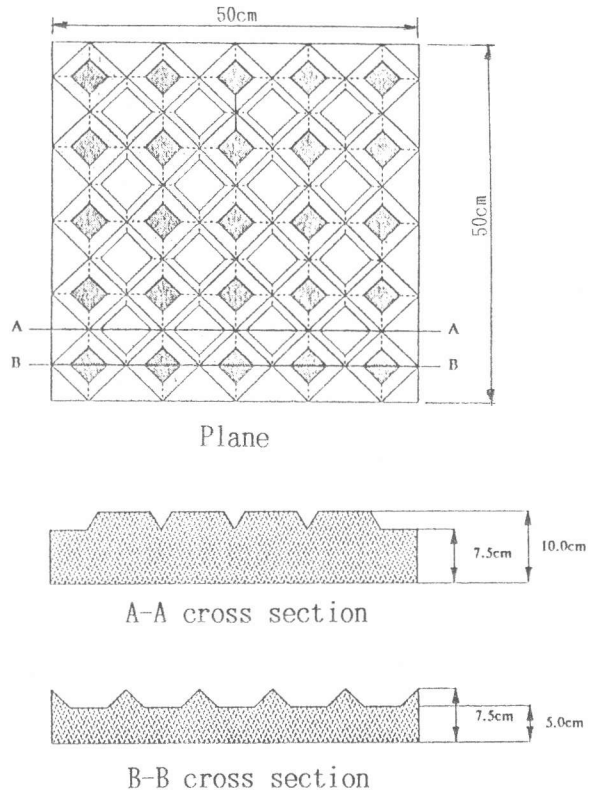


図8 SA-NFC板の一意匠例

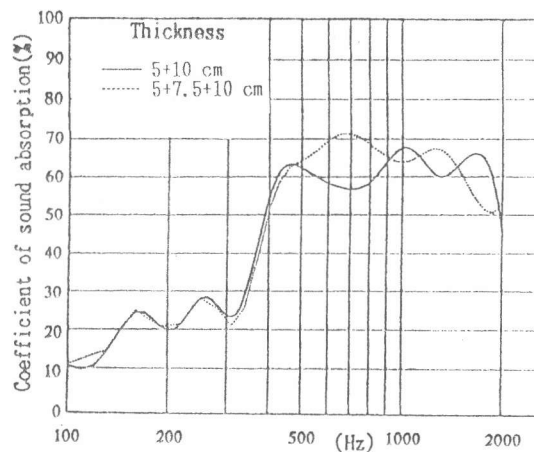


図9 厚さを変えた供試体の吸音特性

表3 SA-NFCの配合と強度特性 (MPa)

Grain size	P ₃		P ₄										P ₆	
	A	B	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	A	B
Compressive st.	2.2	3.6	2.8	3.1	3.8	4.3	3.1	3.8	2.8	3.0	3.2	3.5	1.6	2.1
Bending st.	0.7	1.2	0.8	1.4	1.0	1.2	0.9	1.0	0.8	0.9	0.9	1.2	0.5	1.0

(2) シリカフューム添加と強度

SFを添加したF配合の圧縮強度は、NFCに関する既報の研究と同様に改善に大きな効果が見られた[4],[6]。特にH,J配合は、B/V=20%としたにも拘らず、ある程度の強度を保持することができ、またJ配合ではAl粉末を1%添加したが、CFを併用したため強度の減少を阻止することができた。

(3) アルミニウム粉末の添加と強度

Al粉末の添加による強度の減少は、添加量を1%程度に限定すれば比較的少なく、前記の如く吸音特性との相関を考慮しながら用いることが望ましい。

4. まとめ

骨材としてシラス軽石を、セメント結合材に高性能減水剤、シリカフューム、ポリマー、アルミニウム粉末やカーボン繊維の単体または、それらの混合物を用いたNFCを作成し、吸音性コンクリートとしての利用方法につき検討したが、概して次のように要約する。

- 1) SA-NFC供試体の厚さを薄くすると吸音周波数帯は高周波域に移動する。
- 2) シラス軽石は、軽量にして表面の凹凸が多く、骨材自体の吸音特性は良好である。この性状を維持するには、SA-NFCとした吸音板の所定の強度を高強度用高性能減水剤やシリカフュームを使用して保持し、結合材の量をできるだけ少なくする必要がある。
- 3) ポリマーを混入すると、骨材粒子の剝離防止に効果があるが、多量に添加すると強度低下のみならず、内部表面の平滑化を招き、吸音特性を低下させる。
- 4) カーボン繊維を適量混入すると、空隙内に一部の繊維がまたがり、音波が振動エネルギーとなって減衰され、また強度増加にも効果がある。
- 5) シリカフュームを混入すると、骨材への付着特性のみならず所望の強度を得るために充填する結合材量を下げ、結果的に内部の凹凸を含む表面積を拡大し吸音率を上昇させる。
- 6) Al粉末の混入による発泡効果は、SFやCFと併用すると比較的良好的な吸音特性を示した。
- 7) 騒音の広い周波数帯域を吸音するには、版厚を交互に配置したり、背後に空気層を設ける等の考慮が必要である。

[参考文献]

- 1) 田中光徳、玉井元治；各種骨材を用いたまぶしコンクリートの垂直入射吸音率，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.196-197(1991)
- 2) 玉井元治、田中光徳；軽石を用いたまぶしコンクリートの吸音特性，セメント・コンクリート論文集，No.46，pp.892-897(1992)
- 3) M.TAMAI；Properties of No-Fines Concrete with Superplasticizer,Proc. of Pacific Concrete Conference, Vol.2, pp.483-492(1988)
- 4) M.TAMAI；Properties of No-Fines Concrete Containing Silica Fume, ACI SP-114, pp.799-814(1989)
- 5) 守田栄；騒音・振動対策ハンドブック、日本音響材料協会、技報堂出版、pp.603-621(1991)
- 6) 玉井元治；まぶしコンクリートの動弾性係数と凍結融解に対する抵抗性，セメント・コンクリート論文集，No.43，pp.376-381(1989)