繊維補強コンクリートの楽音への適用性に関する基礎的研究

加藤 勇人¹・竹内 正喜²・小倉 直幸³・北原 有希子⁴・岡本 享久⁵

¹学会員 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

²正会員 立命館大学客員研究員 理工学部 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

³立命館大学 理工学部 環境システム工学科 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

⁴立命館大学 理工学部 環境システム工学科 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

⁵フェロー会員 立命館大学教授 理工学部 環境システム工学科 (〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: okatak86@se.ritsumei.ac.jp

本研究は、近年大幅な技術的進歩をした繊維補強コンクリート (FRC) に着眼し、このコンクリートが保有する基本的音響性能の評価を行い、将来の楽器としての可能性を検討した。FRC において製造メーカーの相違、すなわち結合材量と繊維量の差は、板構造の音響特性にほとんど影響を与えなかったが、板厚が薄くなるほど FRC 独特の音響性能が出せる可能性がある。管構造 (フルー管) の音響解析から、FRC は木材と比較し、高周波数域で高い音圧レベルを示した。この差が官能検査結果に差異を与え、FRC 製が木材製に比べ「明るさ」「美しさ」「迫力」の面で優位になり、楽器としての性能を保有することが分かった。

Key Words : fiber reinforced concrete, wind instrument, musical sound, acoustic analysis, sensory test

1. はじめに

コンクリートが生まれて 150 年余りが経ち、その技術は土木建築の分野を中心に大きな発展を遂げてきた。ここ半世紀のコンクリートの高性能化への動きからコンクリートに新たな付加価値を持たせる様々な研究がなされ¹⁾、最近ではコンクリートにも性能面でのいわゆる「個性」が求められるようになった。その中で超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFRC) は、普通コンクリートの特徴である引張強度・じん性に乏しいという弱点の大幅な改善に成功し、その汎用性は極めて広いといえる²⁾。

一方、楽器の分野においても 18 世紀後半に近代楽器が生まれて 250 年以上が経ち、その技術の多くは成熟を迎えている。楽器の誕生時期は人類の誕生と等しいとも言われており、紀元前 580 年前には音階の仕組みが確立し始めた³⁾。しかし、近年ではこれら楽器を製造する職人の減少や希少材料の枯渇といった問題が生じてきており、これらに代わる人工材料や、その音響性能を評価する研究がなされるようになってきている。

コンクリートは近年の政治的な情勢 (例えば、「コンクリートから人へ」は、公共事業を見直すスローガンに使用された。) もあって、一般の人々に良い印象を持たれていない面もあるのが現状である。しかしながら、インフラの整備には欠かせない安価な材料であり、21 世紀になっても不変な建設系の基盤材料である。業界

の体質による影響もあり、これまで蓄積した技術力は一般の人々にほとんど知られていない。

本研究では多くの人が楽しめる音楽という分野、特に楽器の製作にコンクリート技術を応用することで、多くの人に親しめるコンクリートの在り方を提案することを一つの目的としている。その結果、コンクリートに対する新たなイメージの普及や市場の拡大に繋がることを期待し、現在の産業において資源の枯渇化が進む中、この研究が自然環境と人間環境の両観点から有意義なものとなることを目指している。すなわち、本研究は、コンクリートに楽器としての機能を付与する場合「できうる限り薄厚、適切な強度、耐久性」は具備させる条件として必須であり、近年大幅な技術的進歩をした繊維補強コンクリート⁴⁾に着眼した。このコンクリートが保有する基本的音響性能の評価を行い、将来の楽器としての可能性を検討した。

2. 繊維補強コンクリートの物性

(1) 使用材料

本研究で用いたコンクリートは、使用材料と配合の選定を自ら試行錯誤し提案する繊維補強コンクリート (FRC) と、市場に出回っている超高強度繊維補強コンクリート (UFRC) の 2 種である。FRC の使用材料は表-1 に示すとおりである。この FRC では、楽器部材の加工と表面性状を考慮する上では細骨材の添加は好ま

表-1 FRC に用いた使用材料

セメント (C)	早強ポルトランドセメント	(密度: 3.14 g/cm ³)
細骨材 (S)	珪砂 6 号	(密度: 2.58 g/cm ³)
補強繊維 (F)	ポリエチレン系有機繊維 長さ = 6 mm, 直径 = 0.012 mm	(密度: 1.0 g/cm ³)
高性能減水剤 (HP)	ポリカルボン酸系減水剤	(密度: 1.057 g/cm ³)

表-2 本研究で用いた FRC の配合 (計 27 配合から決定)

W/C (%)	F/C (%)	S/C (%)	W	C	S	F	高性能減水剤
			(kg/m ³)				(ml) (%)
27	1.0	25	394	1 459	365	10.3	43.8 (30)

表-3 本研究で採用した市販の各 UFRC の配合と硬化体の物性

UFRC	W	C	S	Fiber	減水剤	消泡剤	密度	弾性係数
	(kg/m ³)						(g/cm ³)	(kN/mm ²)
UFRC-S (A)	180	2 254	157	23	—	—	2.55	54
UFRC-O	178	2 231	39	28	—	—	2.41	46
UFRC-S (B)	161	2 192	269	69	38.6	—	2.58	46

表-4 本研究で用いた木材 (MDF を含む) の樹種別の物性比較

樹種名	密度	弾性係数	縦圧縮強さ	曲げ強さ
	(g/cm ³)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	
マツ	0.575	12.4	53	94
ヒノキ	0.405	10.7	46	79
スプルス	0.51	12.4	53	94
バルサ	0.16	2.1	9	15
MDF*	0.62	—	—	—

*: 中密度繊維板 (Medium-density fiberboard)

しくなかったが、乾燥収縮を低減する目的で 6 号珪砂を用いた。同時に使用した補強繊維は、少量の添加で高い強度を得ることができる高強度ポリエチレン系補強繊維を用いた。一方、UFRC は一般の市販品であり、プレミックスされたものである。

(2) 配合

本研究で用いた FRC および UFRC の配合・物性をそれぞれ表-2 および表-3 に示す。ここで、表-2 に示す FRC の配合は、W/C を 25%, 27% および 30% の 3 水準、F/C を 0.5%, 1.0% および 1.5% の 3 水準、S/C を 25%, 27% および 30% の 3 水準、計 27 通りの配合において、強度、フロー値および目視 (フレッシュ状態での物性) から、繊細な楽器部材製作に最適と思われる配合を選定した結果である。表-2 で定めた配合による曲げ強度

は 7.9 N/mm², 圧縮強度 74.0 N/mm², モルタルフロー値 191 mm で、強度面では全配合中で平均的な値であるが型枠内への十分に打込み可能な流動性を有している。また、表-3 は UFRC の配合を示す。ここでの UFRC は一般の市販品であり、各社の定めたプレミックス配合で、製造の際の練混ぜ方法および養生方法もパンフレットに示す仕様に従った。なお、本研究にてコンクリートの持つ音響性能の比較検討に用いた木材の樹種と物性を表-4 に示す。

3. UFRC 製板と木製板の振動特性

(1) 使用材料

楽音評価をする場合、音が我々の耳に聞こえるまでに振動媒介となる共鳴盤の物性、特に材質および板厚は重

表-5 振動特性測定に用いた供試体寸法

材料	供試体	寸法 (板厚×板幅×供試体長さ (mm))			供試体 No.
UFRC	UFRC-S (A)	2 × 40 × 900	5 × 40 × 900	3 × 300 × 400	[1], [2], [3]
	UFRC-O	—	—	3 × 300 × 400	[4]
	UFRC-S (B)	—	—	3 × 300 × 400	[5]
木材	マツ	—	5 × 40 × 900	—	[6]
	ヒノキ	—	5 × 40 × 900	—	[7]

図-1 振動特性測定方法

要な意味を持つ⁵⁾。共鳴盤の振動特性の比較に用いた材料は、表-3 に示す UFRC の 3 種類と、木材では表-4 に示したヒノキ材およびマツ材の 2 種類である。

(2) 測定方法

表-5 に振動特性把握に用いた供試体の寸法を示す。表中の最右欄の数字は供試体 No. を示し、供試体 [3], [4] および [5] を用いた実験では市販品 3 種類の UFRC 間の振動特性比較を、[1], [2] では同一 UFRC 製板間の板厚の比較を、[2], [6] および [7] では UFRC と木材の材質自体の比較を行った。これらから UFRC が持つ基本的な振動特性を把握し、楽器部材、特に共鳴盤への適用の可能性を考察した。振動特性の測定方法を図-1 に示す。この方法では、インパルスハンマーによって供試体の端部表面を打撃し、他の端部表面に添付した加速度ピックアップにてその点における振動の周波数分布を FFT アナライザによって解析した。

(3) 試験結果

a) 市販の UFRC 間の比較【供試体 No. [3][4][5]】

各 UFRC の振動特性を比較した結果を図-2 に示す。市販されている UFRC のメーカーによる相違は振動特性に特徴的な影響を与えなかった。ただし、UFRC-O において、5 000 Hz 以降の振幅レベルが若干低下している傾向が見られた。この結果は 25 回繰り返した打撃

試験において、同様の基本周波数を持つ振動のすべてで同様の傾向を示し、UFRC-O の振動特性の一つと考えられた。また、各 UFRC の振動特性を個々に見ると、UFRC-S (A) は振動ごとに倍振動の周波数値や音圧レベルにばらつき見られた。一方、UFRC-O 及び UFRC-S (B) は多くの振動で周波数値や音圧レベルが一致しており、振動の傾向が類似していた。この原因として、各 UFRC の弾性係数に注目すると、UFRC-S (A) が UFRC-O 及び UFRC-S (B) と比較して 17%ほど高かった。すなわち、最も振動しにくい材料であり、インパルスハンマーによる打撃の位置や強さの影響を受けやすいのが原因と推測された。UFRC を共鳴盤として用いる場合、UFRC-S (A) でばらつきがあるものの総じて今回用いた UFRC 板の振動特性を把握することは容易であり、すべての UFRC においてほぼ 15 000 Hz までで共通する振動であった。

b) 厚さによる比較【供試体 No. [1][2]】

UFRC-S (A) の 5 mm 厚板、2 mm 厚板の振動比較を行った結果を図-3 に示す。この図から、部材が厚い方が高周波数域まで安定して高い振動レベルを持っていることが分かるが、これは、楽器の共鳴盤として用いる場合、あらゆる周波数の振動に共鳴し、材料に特有の周波数を増幅・減衰させる効果が低いと言える。よって、木製の共鳴盤が持つフィルターとしての役割は期待できないと推測される。一方、5 mm から 2 mm と板厚が薄くなると、振動特性が変化し、5 mm 厚では高周波数域に向かい一様に漸減しているが、2 mm 厚では 3 つの周波数域で一様漸減から乖離した波形が現れていることが分かる。このことより、厚さの薄い UFRC を、特に弦楽器の共鳴盤に用いることで、特徴的な音色が得られる可能性が考察された。

c) 木材との比較【供試体 No. [2][6][7]】

図-4 は木材の振動特性を示し、図-3 で示した UFRC の振動特性も同時に表示した。木材（マツ材、ヒノキ材）の方が 2 000 Hz 付近までは振動レベルが高いが 1 000 Hz のピークから一様に減衰し、2 000 Hz 以上で木材は UFRC の半分程度となった。既存楽器で、この 2 000 Hz 付近までの周波数域の音を主に発生するピアノ、ヴァイオ

図-2 市販の各 UFRC 別の振動比較

図-3 同一 UFRC 板の厚さによる振動特性

図-4 UFRC と木材の振動特性比較

リン、ハープ等では、共鳴盤に木材が用いられており、今回の結果からもほぼ同様な傾向が示された。よって、2000 Hz 以上の音域を発生する楽器には、木材より高い

振動レベルを示す UFRC、特に、2 mm 以下の UFRC 製共鳴盤を用いることの有効性が推測された。

4. FRC が持つ反射性能評価

(1) 試験方法

近年増加した打ちっぱなしのコンクリート空間や、管楽器の内部およびコンクリート共鳴箱の内部における反響性能評価を音響測定室内で測定した。使用した供試体の寸法は表-6に示すとおりである。なお、使用した繊維補強セメント硬化体製板は型枠にガラスを用いることで鏡面仕上げにした。また、比較には市販の MDF

表-6 反響性能測定用供試体

供試体	寸法 (厚さ×幅×長さ (mm))
FRC および MDF (市販)	5 × 700 × 1000
	10 × 700 × 1000

図-5 反響性能測定方法

(中密度繊維板, Medium-Density fiberboard) を用いた。この MDF はスピーカーのキャビネット材として広く用いられている加工材料である。スピーカーのキャビネット材は吸音・遮音効果が重要視されており、UFC が持つ反射性能の一般性を論議するのに適した材料であると考え選定した。なお、測定方法の概略は図-5に示すとおりであり、測定風景を写真-1に示す。

(2) 測定結果

可聴域である 20～20 000 Hz において測定結果を得たが、両材料の反射レベルは全域でほぼ同程度であった。しかし、図-6に示す 800 Hz から 6 500 Hz の範囲において繊維補強セメント硬化体（FRC）の方が平均で 1 dB 程度、平均値の近似曲線が上回る結果を得た。これは、FRC の応答スペクトル実数値が 2 300～3 200 Hz におい

写真-1 測定風景

図-6 反響性能試験結果

て、MDF より最大で7dB 程度高い反射レベルを示しており、この影響が出たものであると考えられる。MDF に近い材料特性を有するフルート、ピアノ、パイプオルガンの高音部分に相当する2300~3200 Hz においてFRC は、既存楽器とは異なる残響性能を示した。

5. FRC 製の管構造（フルー管）が発する音の特性評価

(1) 定常波の測定

a) 試験方法

FRC 製フルー管（パイプオルガンの音源であり、この長さ、太さ変化で音階が決まる）の材料特性は表-1 および表-2 に示した。比較に用いた木材は密度 0.16 g/cm^3 のバルサ材で、この選定はFRC との大きな密度差の影響から、比較が容易にできることから選んだ。各材料によって、写真-2 に示すように、同寸法・同構造のフルー管を3 対ずつ作製し、音階 A₄ (440 Hz) の吹奏音を80 dB になるように鳴らし計測を行った。なお、管厚はともに約5 mm であり、表面を平滑にするためアク

リル板を型枠として用いた。また、図-7 に試験方法のモデルを示す。

(2) 試験結果

FRC 製フルー管の放射音（以下、Cs）およびバルサ製フルー管の放射音（以下、Bs）のスペクトル図を、それぞれ図-8 および図-9 に示す。音圧レベルに着目すると、大きな特徴として、9000~15000 Hz でCs のほうが高い音圧レベルであることが分かる。同様の傾向がすべての試行で確認できた。また、基本周波数付近の倍音のピークの推移に注目すると、Bs は基本周波数のピークから一様に減衰している様子が見て取れるが、Cs では、図-8 における3 倍、5 倍、7 倍音の勢力が極めて高いことが分かる。この傾向は、同じフルー管であれば同様に見られるものの、他のフルー管を見た場合、その傾向はさまざまであり、今回の場合、フルー管の構造の微妙な個体差が原因であると考えられた。また、スペクトルの谷の推移に着目すると、これが、図-4 に示した各材料の振動特性と非常に類似していた。UFRC およびFRC は2000 Hz 付近まで上昇傾向にあり、そこか

写真-2 定常波測定用フルー管（左：FRC，右：バルサ）

図-7 定常波測定方法

図-8 FRC 製フルー管の音響スペクトル（CS）

図-9 バルサ製フルー管の音響スペクトル（BS）

ら緩やかに減衰していく。高周波数域においても木材より高いレベルである。一方木材は、共に1000 Hz付近まで比較的急激に増加していき、減衰を始めている。このことより、定常波のスペクトルは材の振動と相関があると推測された。この原因として考えられるのは、発音時の管の微振動にあると考えられ、実際にBsでは携帯電話のバイブレーション程度の振動があり、CsではBsほどではないが、感知できる程度の微振動があった。今回のように、振動媒体の体積に対して、低密度で管壁が薄く、振動しやすい材料である場合、管壁が振動することで内部の空気柱の振動(疎密波)に作用し、材料の振動特性が倍音構成、音色に影響を与えた結果になったのではないかと推測された。このことにより、2mm程度の厚さをもつFRCによって製作したフルー管および管楽器は、図-4にあるように、2000 Hz付近、6000 Hz付近の音を発声させることで振動特性を活かしたFRC特有の音色を得ることが期待できる。また、実際にこれら2材の音色は異なって聞こえるため、この違いが人にどのような印象を与えるか、次の官能検査によって検証を行った。

(3) 発生音による官能検査

a) 検査方法

(1)と同じフルー管を用いて、FRC製フルー管の放射音(以下、Cf)および、バルサ製フルー管の放射音(以下、Bf)の吹奏音に関する官能検査を49名の聴取者を対象に行った。検査に用いた形容詞は、良い音の3要素とされる‘明るさ’‘美しさ’‘迫力’を連想させる形容詞対を表-7に示すように、それぞれ9つ用意し、1~5点の5段階加算方式とした。なお、聴取者には、見た目に左右されないよう、音のみを聞いて判断してもらった。

b) 検査結果

図-10に各要素の得点を示す。いずれにおいてもCfの方がBfより高い結果となっており、要素別の結果では‘明るさ’において、4項目で顕著に高い得点を得ていた。しかし、‘冷たい’といった印象を強く与えていたことも分かった。また、‘美しさ’‘迫力’においては特に‘澄んだ’‘鋭い’という印象の反面、‘硬い’というようなコンクリートらしい印象を与えたことが分かった。この原因としては、スペクトルに表れた、高周波

表-7 官能検査例

図-10 官能検査結果(3主因子別に)と項目別の得点比較

写真-3 UFRC および FRC 製パイプオルガン

数域の音圧レベルが強い勢力を示していたことが挙げられ、特定の倍音のピークが高いこと、管の振動が比較的微弱であったことが冷たい印象を与えた原因であると考えられる。

6. UFRC および FRC を用いたパイプオルガンの製作

写真-3 および写真-4 が UFRC および FRC を用いて製作したパイプオルガンである。全部で 37 本、3 オクターブのパイプを有しており、鍵盤、フルー管といった細かい造形も FRC によって製作することが可能であることが分かった。ただし、細部の加工においては、ヤスリによる研磨等の成形が重要である。本研究によって行った、音響解析結果より、特に高音発生時にはフルー管内および、アーチ内で木製楽器よりも高い残響効果を出せた。さらには、複数のフルー管を用いた場合の和音についても通常の楽器と同様であったことを付記する。

最後に、応用例として図-11 にダムに適用した際のイメージ図を示す。

7. 結論

本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

- (1) 市販 UFRC 製板構造の振動特性にはメーカー別の相違は認められず、同一寸法の木製板構造と比較して高周波数域で高い音圧レベルを示すことが分かった。2 mm 程度の薄肉断面にすることで UFRC の振動の特徴が表現しやすく、楽音の共鳴盤とし

写真-4 フルー管（上）と鍵盤（下）の FRC 部材

て有効性も示された。

- (2) FRC と MDF と比較した反射性能では 2300～3200 Hz において FRC のほうが高い残響性能を示しており、残響効果の乏しい既存楽器の高音部で音に豊かさを与えることが期待できた。また、反射性能が重要なスピーカーのキャビネット材として有効性も示された。
- (3) 管楽器の一種であるフルー管にて、FRC 製と木製のそれぞれの音色に関しスペクトル解析および官能検査を実施した結果、FRC と木材には有意性の異なる差異が認められた。特に、高周波数域での FRC 製フルー管は、木製の倍音傾向より音楽的に豊かな楽音を示す傾向が示された。よって、楽器としても十分な性能を保有していることが分かった。
- (4) 繊維補強コンクリートを利用して新規楽器が製造できる可能性が示された。すなわち、狹隘複雑な型枠内に打込める十分な流動性と使用に耐えうる強度を確保できる配合をポリエチレン系の補強繊維混入により確立できた。また、施工面では低粘性と高流動性を持たせ、珪砂等の微細な細骨材を混入することより、打込み後の乾燥収縮などひび割れ防止を試みた。

謝辞： 本研究を進めるに当たり、ヤマハ(株)素材素子センター長・室井國昌氏、(株)河合楽器製作所生産統括部技術開発戦略室長・北川弘志氏から、我々の基

図-11 ダムへの適用例（不要になったダムに巨大楽器としての付加価値を持たせることで新たな価値をもたらすことも期待できる。図は、自然風や水頭差を送風システムとして用い、自然の反響を活かしたパイプオルガンのイメージ）

本データの解釈、楽器製作に当たり注意事項など様々なご助言・コメントを頂きました。立命館大学理工学部建築都市デザイン学科・児島孝之教授、都市システム工学科・尼崎省二教授には楽器製作に当たった材料特性などに関するご助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 長瀧重義監修：コンクリートの高性能化，第8章コンクリートの高性能化－まとめと展望－，pp.213-215，技報堂

出版，1997.11.

- 2) 趙唯堅，尾博俊，加納宏一，田中良弘：超高強度繊維補強コンクリート薄板の曲げ・せん断特性に関する基礎研究，コンクリート工学論文集，第18巻第2号，pp.31-33，2001.8.
- 3) 小方 厚：音律と音階の科学，pp.3-114，講談社，2007.9.
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004.9.
- 5) 永井洋平，小野晃明，小幡谷英一：楽器作りと材料，音響学会誌，第62巻8号，pp.587，2006.8.

(2010. 4. 20 受付)

CREATION OF MUSIC WITH FIBER REINFORCED CONCRETE

Hayato KATO, Masaki TAKEUCHI, Naoyuki OGURA, Yukiko KITAHARA and Takahisa OKAMOTO

This research focuses on the Fiber Reinforcement Concrete (FRC) and its performance on musical tones. The possibility of future musical instruments made of this concrete is discussed.

Recently, the technical properties of FRC had been improved and the different production styles, such as unit weight of binding material and volume of fiber in the structure, hardly affects the results of the acoustics. However, the board thickness in the FRC instruments is directly related with the variety of musical tone. The FRC musical effects were compared with those produced with wood on wind instruments. The sounds were compared with those produced with woodwind instruments. The sound pressure level was affected by the material and it becomes remarkably notorious in the high frequency levels.

These differences had great influence on the spectrum analysis of the tone in the wind instruments and the sensory test. The results from the sensory test show dominant performances of "brightness, beauty and power" in the FRC instruments compared with those made of wood.