

# 自由振動実験に基づく複合炭素繊維補強コンクリート造 円筒殻の損傷評価に関する基礎的研究

川崎健二郎<sup>\*1</sup>・真下和彦<sup>\*2</sup>

## Fundamental Study of Damage Assessment of Concrete Cylindrical Shells Reinforced with Composite Carbon Fiber on the Basis of Free Vibration Test.

by

Kenjiro KAWASAKI and Kazuhiko MASHITA,

(received on Mar. 28, 2005 & accepted on Jun. 20, 2005)

### Abstract

The main purpose of this study is to experimentally investigate the damage assessment of concrete cylindrical shells reinforced with composite carbon fiber on the basis of the free vibration test. Composite carbon fiber reinforcement is defined in this study as composite reinforcement with carbon fiber sheets attached to the outer shell surface and with carbon fiber chips mixed into the inner shell body. Carbon fiber chip reinforcement is expected to improve the homogeneity and isotropy of concrete shells compared with those of shells reinforced with standard steel bars, while carbon fiber sheet reinforcement is expected to improve their mechanical behavior in spite of thickness fluctuations. Test models were applied with static, low impact, and high impact loads until the fracture states were obtained. The damage assessment of concrete shells with composite carbon fiber reinforcement was discussed on the basis of the fluctuations of natural frequencies and damping factors measured by the free vibration test.

**Keywords:** Concrete Shell, Damage Assessment, Composite Carbon Fiber

## 1. まえがき

### 1. 序論

本研究の主目的は静的及び動的の荷重を受ける複合炭素繊維補強コンクリート造屋根形円筒殻の破壊形態及び損傷程度の相互関係を動特性の観点から実験的に究明することである。複合炭素繊維補強コンクリート(CCFRC)造は、コンクリート造内部に炭素短繊維を混入し、コンクリート外表面に炭素繊維シートの接着補強を施すことにより、複合炭素繊維補強としたものである。また、炭素繊維シート補強コンクリート(CFSRC)造は通常の鉄筋コンクリート造シェルに炭素繊維シートを補強したものである。既往の研究により、これらの炭素繊維シートを部分的に補強したものは、シェル破壊範囲の縮小化等に対して有効であることが確認されている<sup>1)</sup>。この研究を踏まえ、新たに実験供試体の全面に炭素繊維シートによる補強を行い、検討を行った。検討には破壊実験前後で自由振動実験を行い、シェルの損傷度合いに対応する振動特性の変化を特定した。

実験は小型実験供試体を作製し、シェル面中央部への動的または静的荷重による破壊実験を行なった。また、破壊形態の程度を定量的に求める指標として、破壊実験前後に固有振動数及び減衰定数を求め、比較検討を行った。

以上より、複合炭素繊維補強コンクリート造シェルを対象とし

た破壊実験と、実験前後に行った自由振動実験結果に基づき、シート補強範囲の相違と対応したシェルの破壊形態に基づく振動特性の変化を究明した。以上より、複合炭素繊維補強されたコンクリート造円筒殻の損傷状況を、自由振動実験の結果から明らかにした。

## 2. 実験の概要

### 2.1 破壊実験

CFSRC 造及び CCFRC 造シェルの中央部に点荷重を受けた場合の破壊形態を検討する為、実験供試体を作製し、破壊実験を行った。実験供試体の寸法は、Fig.1 に示す様に、水平投影面に於いて母線方向 400mm、指導線方向 400mm の正方形とし、設計板厚を 8mm、ライズ・スパン比を 1/5 とした。境界条件は、隅角部に炭素短繊維補強コンクリート造ブロックを配し、空隙にセメントペーストを流し込み、シェル端部アーチの水平スラストを拘束したピン支持状態を設定した。コンクリートの調合は、鉄筋コンクリートに於いてセメント対骨材の重量比を 1 対 2、水セメント比を 40% とした。鉄筋は直径 1.6mm を使用し、X・Y 方向に 10mm 間隔に配筋した。炭素短繊維コンクリートに於いてはシェル面内配筋を施さず、炭素短繊維(K661)をセメント重量比に対して 4%、その添加剤としてメチルセルローズ 0.25%混入した。炭素繊維シート(TR3110MS)は一層の平織りを採用しており、シートをエポキシ系樹脂でコンクリート面に接着している。また、円筒シェルの設計では通常縁梁をつけることが一般的であるが、本研究ではシェル

\* 1 工学研究科建築学専攻博士課程前期

\* 2 工学部建築学科 教授・工博

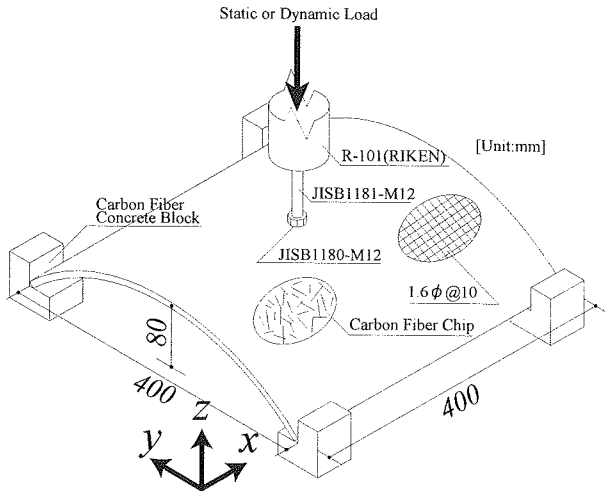


Fig.1 Loading System under Point Load.

端部アーチの水平スラストをピン支持により拘束しその他の境界部分の補剛を一切付加せず、出来る限りシェルにのみで耐力評価並びに損傷評価を行うモデルを設定した。破壊実験は静的荷重及び動的荷重により荷重を行った。両荷重共、シェル面への荷重荷重は、鋼製ボルト M12 を介して行った。静的荷重は、油圧式万能試験機を使用し、ロードセルを介してシェル面中央に荷重した。実験はシェルが破壊に至るまで行った。動的荷重は、シェル面中央部に二種の鋼製円盤を 1,000mm の高さから自由落下させて荷重した。この二種は重量落下モデル(質量 12.38kg)、及び軽量落下モデル(質量 4.75kg)を採用した。これらの落下モデルは、本研究に於いて便宜上、予備実験に於ける結果から、シェルの破壊形態を考慮して設定したものである。尚、前者を H Model、後者を L Model で表記する。補強範囲については Fig.2 に示す 4 種類を選定

した。即ち、シェル上面全面シート補強モデル(T Model)、シェル下面全面シート補強モデル(B Model)、シェル両面全面シート補強モデル(A Model)、及びシート無補強モデル(N Model)の 4 種類である。Table 1 には各実験供試体の文字構成、コンクリート材料諸元を示した。シェルモデル名は 3 文字より構成する。最初の文字は荷重荷重状態を示し、静荷重、重量落下荷重、及び軽量落下荷重をそれぞれ C, H, 及び L で表記した。2 文字目はコンクリート材料種別を示しており、炭素短繊維補強コンクリート及び鉄筋補強コンクリートをそれぞれ、F 及び R で示した。最後の 3 番目の文字はシート補強形態種別を示しており、Fig.2 の説明で記述した通り、シート無補強、シェル上面全面シート補強、シェル下面全面シート補強、及びシェル両面全面シート補強の場合を、それぞれ、N, T, B, 及び A で示した。Table 2-4 には鉄筋、炭素繊維シート及び炭素短繊維の材料定数を示した。

2.2 自由振動

静荷重、重量落下荷重、及び軽量落下荷重の全ての破壊実験の前後にインパクトハンマで加振を行い、自由振動実験を行うことによりシェルの基本固有振動数並びに減衰定数を特定した。Fig.3 に加振点及び計測位置を示し、併せて境界条件も示した。尚、シェルの支持条件が自由振動実験に及ぼす影響を可能な限り排除し、純粋にシェル自体の自由振動状態を実現することを意図して自由境界の元で振動実験を行った。加振点は、既往の研究及び汎用構造解析コードの結果より振れる方向の振動が主となることから、隅角部付近の一点を選定し、各供試体とも同一の箇所とした。尚、汎用構造解析コードによる基本固有振動数と対応した振動モードを Fig.4 に示した。同図は、炭素短繊維補強コンクリート造シート無補強モデル LFN を示したものであり、基本固有振動数は 105.9Hz を確認した。実際の荷重荷重前の同モデルの自由振動実験より基本固有振動数は 107.5Hz であることが計測された。この実験値に

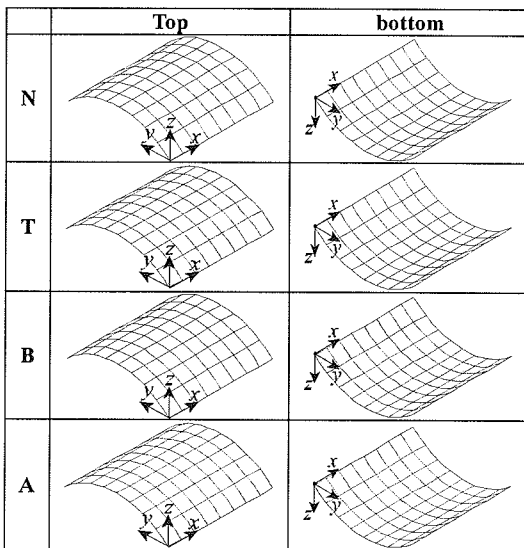


Fig.2 Reinforced Region with Carbon Fiber Sheets.

Table 1 Shell Models.

Models	[1] Model Type	[2] Materials	[3] Sheet	Material Properties of Concrete			
				Ultimate Compressive Strength:Fc[MPa]	Ultimate Tensile Strength:Ft[MPa]	Poisson's Ratio	Young's Modulus E[GPa]
CRN	C: Cylindrical Model under Static Load	F: Carbon Fiber Chip Reinforced Concrete	N:None	53.26	3.28	0.23	23.66
CRA				53.26	3.28	0.23	23.66
CRB				53.26	3.28	0.23	23.66
CRT				53.26	3.28	0.23	23.66
CFN				61.84	5.78	0.217	22.63
CFA				61.84	5.78	0.217	22.63
CFB				61.84	5.78	0.217	22.63
CFT				61.84	5.78	0.217	22.63
CFN				61.84	5.78	0.217	22.63
CFB				61.84	5.78	0.217	22.63
CFB				64.41	6.00	0.213	24.05
CFB				61.84	5.78	0.217	22.63
HFN	H: Experimental Model under Heavy Impact Load	R: Reinforced Concrete	A:All	64.41	6.00	0.213	24.05
HFB				61.84	5.78	0.217	22.63
HFA				64.41	6.00	0.213	24.05
HRN				53.26	3.28	0.23	23.66
HRT				53.26	3.28	0.23	23.66
HRB				53.26	3.28	0.23	23.66
HRA	L: Experimental Model under Light Impact Load	R: Reinforced Concrete	B:Bottom	53.26	3.28	0.23	23.66
LFT				53.26	3.28	0.23	23.66
LFB				53.26	3.28	0.23	23.66
LFA				53.26	3.28	0.23	23.66
LRN				53.26	3.28	0.23	23.66
LRT				53.26	3.28	0.23	23.66
LRB			T:Top	53.26	3.28	0.23	23.66
LRA				53.26	3.28	0.23	23.66
			L:Local	61.84	5.78	0.217	22.63
				61.84	5.78	0.217	22.63
				53.26	3.28	0.23	23.66
				53.26	3.28	0.23	23.66
				53.26	3.28	0.23	23.66
				53.26	3.28	0.23	23.66
				53.26	3.28	0.23	23.66

Table 2 Material Properties of Steel Bar.

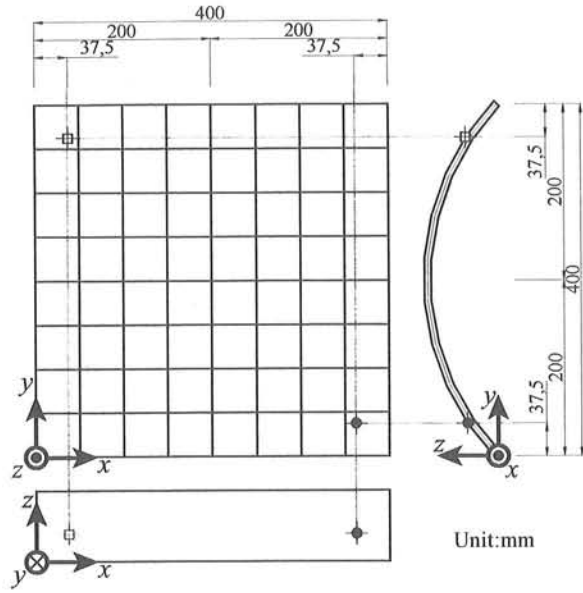
Steel Bar Diameter	Young's Modulus [GPa]	Yield Strength [MPa]	Ultimate Tensile Strength [MPa]
1.6	205	257	385

Table 3 Material Properties of Carbon Fiber Sheets.

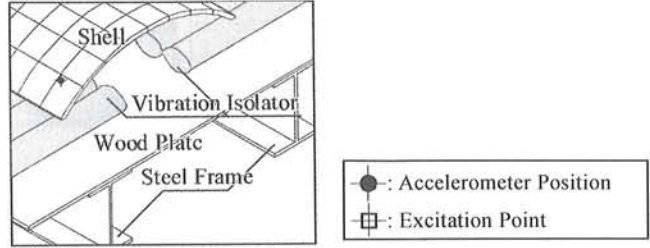
Type	Texture	Fiber Diameter [μm]	Tensile Strength [GPa]	Modulus of Tensile Elasticity [GPa]	Elongation [%]	Density [ton/mm <sup>3</sup> ]	Weight [N/mm <sup>2</sup> ]
TR3110MS	Plain Fabric	17.0	1.12	71.6	1.50	1.05 × 10 <sup>-9</sup>	1.96 × 10 <sup>-6</sup>

Table 4 Material Properties of Carbon Fiber Chip.

Type	Fiber Length [mm]	Fiber Diameter [μm]	Tensile Strength [GPa]	Modulus of Tensile Elasticity [GPa]	Elongation [%]	Density [ton/mm <sup>3</sup> ]	Specific Gravity
K661	18.0	17.0	1.77	180	1.00	1.90 × 10 <sup>-9</sup>	1.90



(a) Experiment System



(b) Boundary Condition

Fig.3 Free Vibration Experiment System.

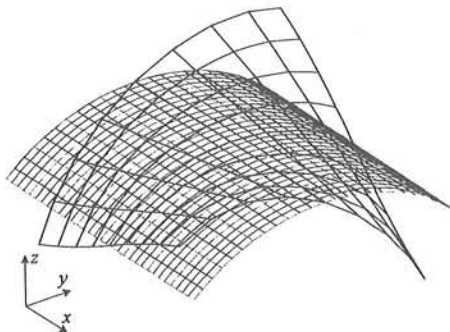


Fig.4 1<sup>st</sup> mode by Numerical Analysis.

Table.5 Fracture Parameter.

Models	T	S	$F_b$	$H_b$	$R_b$	$R_f$	C
CRN	1.39	0.23	1.000	1.000	40.0	-6.3	1
CRT	1.36	0.29	0.909	1.664	-12.7	-7.2	2
CRB	1.39	0.20	0.988	1.556	66.6	-8.9	1
CRA	1.27	0.18	1.196	1.509	133.0	-13.3	1
CFN	1.06	0.18	0.635	1.317	31.9	-3.3	1
CFT	1.13	0.19	0.691	4.095	114.1	-1.0	3
CFB	1.25	0.20	0.803	2.299	5.6	-0.3	1
CFA	1.07	0.22	0.833	4.716	-9.6	-1.8	1
HFN	0.87	0.22	0.542	0.933	110.4	-7.8	1
HFT	1.00	0.33	0.584	3.063	24.0	-1.8	1
HFB	0.96	0.29	0.565	2.943	-8.0	-0.3	4
HFA	1.04	0.16	0.673	4.087	-9.2	-0.3	4
HRN	1.29	0.20	0.878	2.127	—	—	—
HRT	1.34	0.35	1.051	2.379	26.2	1.6	3
HRB	1.57	0.34	1.061	1.280	26.6	-0.8	2
HRA	1.50	0.31	1.051	2.187	25.5	-1.6	4
LFN	1.06	0.15	0.803	1.366	93.0	-10.3	1
LFT	1.01	0.26	0.635	2.513	64.4	-9.5	1
LFB	1.15	0.19	0.766	2.489	-13.2	-5.5	2
LFA	1.19	0.33	0.685	4.012	16.2	-4.1	1
LRN	1.49	0.27	1.090	1.329	-26.5	-9.8	2
LRT	1.42	0.33	0.898	1.846	40.9	-7.6	1
LRB	1.48	0.35	0.892	6.190	17.9	-5.3	2
LRA	1.51	0.26	1.028	2.563	15.8	-7.6	2

Note)  
 T: Average Thickness Ratio to 8mm, S: Standard Deviation Ratio to 8mm,  
 $F_b$ : Natural Frequency Ratio to 133.8Hz at CRN before Experiment,  
 $H_b$ : Damping Factor Ratio to 0.559% at CRN before Experiment,  
 $R_b$ : Fracture Parameter on Damping Factor,  
 $R_b = h_a$  (Damping Factor after Experiment)/ $h_b$   
 $R_f$ : Fracture Parameter on Fundamental Frequency,  
 $R_f = f_a$  (Fundamental Frequency after Experiment)/ $f_b$   
 C: Cracking Pattern shown in Fig.6

対する計算値の比率は 0.984 でありその誤差は 1.6%減である。計測位置は、加振点と対角線上となる点に設置し、応答加速度波形を計測した。境界条件としては、供試体以外の振動がノイズとして入力されるのを避ける為、鉄骨反力フレームの上に木製のベニヤ板 (板厚 9mm) を敷き、その上にエアーマット (50mm 厚) を用いた防振材を載せ、更にその上に供試体を設置して、自由振動実験を行った。また、荷重載荷により、明確に二つ以上に分割された供試体の自由振動実験は行わなかった。

### 3. 計算の概要

自由振動実験より得られた加速度応答波形から、各供試体の固有振動数を求める為に、リアルタイム FFT アナライザ OROS-OR24 を用い解析を行った。サンプリング周波数 640Hz, サンプリング数 2048, 周波数分解能 312.5mHz, 平均数 5 回(リニア平均), ウェイティング関数はレクタンギュラとした。また、振動特性の評価を定量的に行う為に周波数応答関数は伝達関数を用いた<sup>2)</sup>。減衰の評価に関しては、Compliance に半値幅法を適用し、損失係数  $\eta$  を求めた上で次式を用いて減衰定数( $h$ )を求めた<sup>3)</sup>。

$$h = \frac{\eta}{2} \quad \dots (1)$$

次に、Table 5 に、施工シェル板厚 289 点の相加平均値及び標準偏差、並びに実験前に於ける固有振動数及び減衰定数、減衰定数破壊パラメータ( $R_b$ )及び固有振動数破壊パラメータ( $R_f$ )、破壊形態番号を示した。ここで、板厚の相加平均及び標準偏差は、設計板厚 8mm に対する比率を示した。固有振動数( $F_b$ )及び減衰定数( $H_b$ )は鉄筋コンクリートシェルのシート無補強タイプ(CRN)の各値( $f_b=133.8\text{Hz}$ ,  $h_b=0.559\%$ )に対する比率で示した。減衰定数破壊パラメータ及び固有振動数破壊パラメータは、それぞれ破壊前の値に対する破壊後の比(後述の式(2)及び(3))を示している。破壊形態番号は後述の Fig.6 に詳述している。

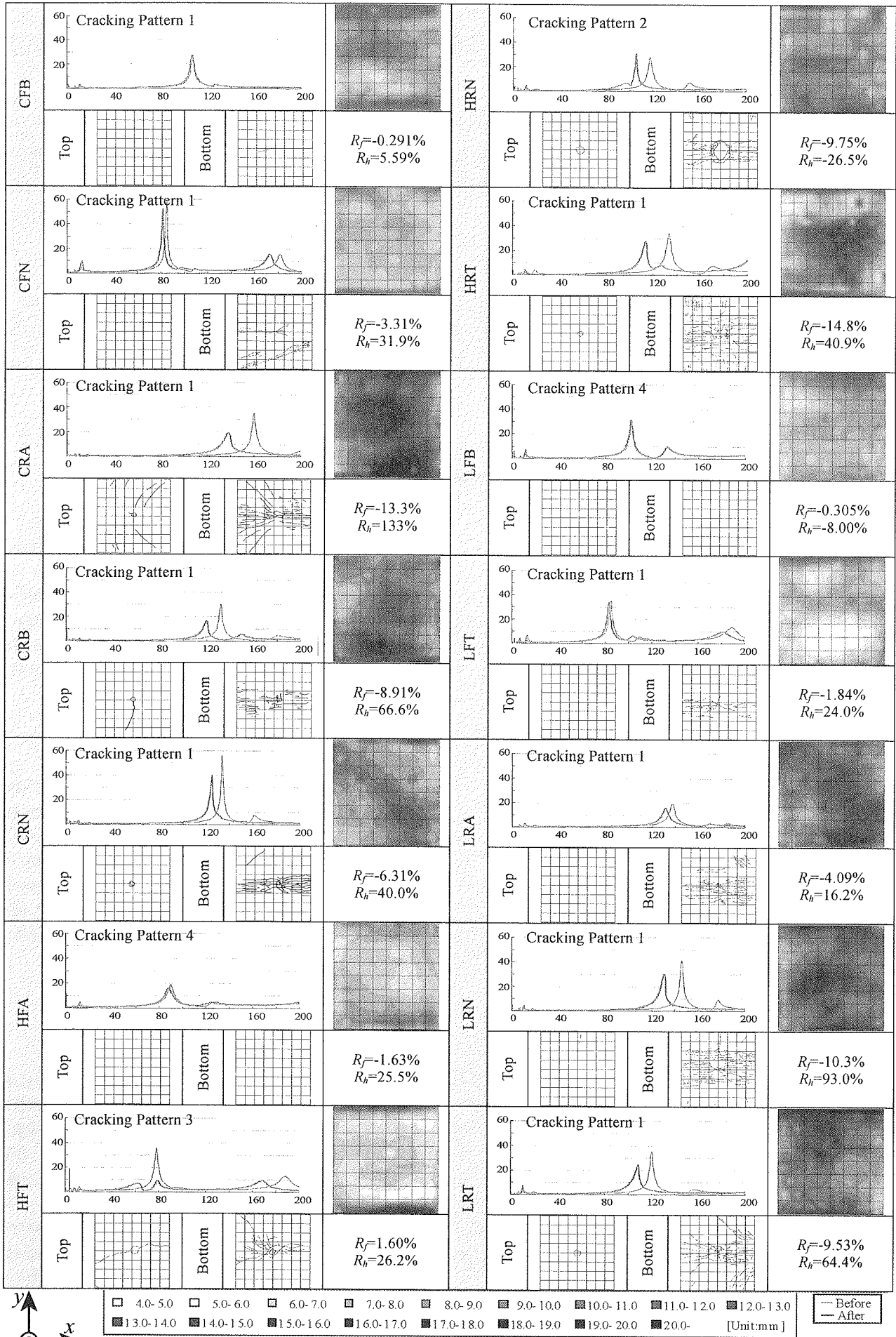


Fig.5 Transfer Function, Shell Thickness, Cracking Pattern and Fracture Parameter ( $R_f, R_h$ ).

#### 4. 結果及び考察

Fig.5 に特徴的な破壊パターンを示した。同図には、各供試体の破壊形態、破壊前後の伝達開数、固有振動数破壊パラメータ  $R_f$ 、減衰定数破壊パラメータ  $R_h$  及び破壊形態番号(後述の Fig.6 で詳述)を示す。尚、 $R_f$ 、 $R_h$  は以下のように定義した。

$$R_f = \frac{(f_a - f_b)}{f_b} \quad \dots (2)$$

$$R_h = \frac{(h_a - h_b)}{h_b} \quad \dots (3)$$

ここに、 $f_b$  は破壊前の固有振動数、 $f_a$  は破壊後の固有振動数、 $h_b$  は破壊前の減衰定数、 $h_a$  は破壊後の減衰定数である。続いて、損傷状態の特徴を大局的に捉える為に、破壊形態を Fig.6 のような4つのパターンに大別した。パターン1は陥没破壊せずにひび割れが放射状に伸びたものであり、パターン2は載荷点に於いて大きく陥没が確認されたものであり、パターン3は構造体が二つ以上に分割されたものであり、パターン4は目視でのひび割れが確認されないものである。以上を踏まえて、破壊形態による比較を行う。破壊パターン1に於いては、シェル面にひび割れが生じ、剛性が低下することにより引き起こされる固有振動数の減少、並びに、ひび割れ部分の摩擦損失が大きくなることによる減衰定数の増加が特徴的である。代表的なパターン1として、Fig.5 に示されている CRN, CFN, HRT, LRN など挙げられる。この他に、CFT, LFN, HRA など多数のモデルが破壊パターン1を示している。破壊パターン2に於いては、抜け落ちた部分にはコンクリートが存在せず、当該部分のひび割れによる摩擦減衰が回避され、その結果、減衰定数の低下を招いたものである。これには、Fig.5 に示されている HRN が該当する。その他にも、LRB が同様の傾向を示している。破壊パターン3に於いては、分離した部分の構造体が個別に振動することにより、固有振動数が増加する、または、非常に軽微に減少する傾向が確認されたパターンである。この破壊形態を呈した供試体は CFT, HFT が確認されている。破壊パターン4に於いては、固有振動数及び減衰定数の変化の度合いは僅かであった。これには HFA, LFB, LFA が該当する。

次に構成材料による比較を行う。先ず、静的破壊実験に於いて、CRN と CFN 及び CRB と CFB の比較を行う。炭素短繊維補強コンクリート造の供試体において、固有振動数の減少および減衰定数の増加が共に軽微であることが示されている。これは炭素短繊維を混入した供試体のひび割れが軽減されると共に、シェルの剛性低下が抑制されたことを示している。また、RC造に於ける静的破壊実験供試体は、破壊パターン2の CRT を除いて、同一の破壊パターンを示した動的破壊の供試体 HRT, LRA, LRT に比べ、減衰定数の増加が著しい。これは静的荷重による破壊の特徴を示して

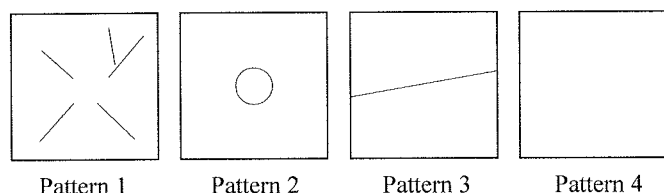


Fig.6 Cracking Pattern.

いる。破壊実験後の減衰定数の増加は、主にひび割れによる摩擦によって引き起こされることから、静的の荷重を受けて破壊に至った供試体にはひび割れがより多く存在すると考えられる。次に、動的破壊実験に於いて、LRT と LFT の比較を行う。炭素短繊維補強の供試体 LFT において、静的破壊実験供試体(N モデル)と同様に、固有振動数の減少および減衰定数の増加の抑制効果を確認した。

続いて、シート補強形態による比較を行う。静的破壊実験の CRN, CRB, 及び CRA について、シート補強モデル N に対してシート補強モデル B のひび割れが低減しているが、シート補強モデル A のひび割れはシート補強モデル B よりもひび割れが増える結果を示した。これに対し、 $R_h$  は、シート補強モデル N, B, A の順に 40% 増、67% 増、及び 133% 増と増加し、目視のひび割れ量と減衰定数の増減の一致は認められない。この理由は、目に見えない程度の損傷が存在していることによるものと考えられる。また、 $R_f$  は N, B, A の順に 6% 減、8% 減、及び 13% 減と減少幅は大きくなり、剛性も低下していることが確認された。この結果は静的実験の終局耐力が CRN, CRB, CRA の順に、5.32kN, 6.66kN, 9.22kN と増大することから、損傷度合いも増大したものと考えられる。炭素短繊維補強コンクリート造供試体 CFN と CFB に於いて、CFB の  $R_f$  が 0.29% 減、 $R_h$  が 5.59% 増という非常に軽微な変化を示し、炭素繊維シートによる補強が有効であることが示されている。動的破壊実験の LRN, LRT, 及び LRA において、シート補強モデル N, T, 及び A は、ひび割れ量の差が殆ど確認できない。しかし、 $R_h$  は、シート補強モデル N, T, A の順に、93% 増、64% 増、及び 16% 増と増加割合が単調減少を示し、シェルに生じたひび割れが炭素繊維シートの補強により順調に軽減されていることを示している。加えて、 $R_f$  は、N, T, A の順に 10.3% 減、9.53% 減、及び 4.09% 減が示されていることから、固有振動数の減少が抑えられ、炭素繊維シートによって、衝撃荷重に対する剛性の低下が免れた結果を示している。また、LFT と LFB との比較において、LFB は、大幅なひび割れの低減が確認され、固有振動数の変化も殆ど確認されない。従って、LFB の耐衝撃性能は、LFT と比較して炭素繊維シートによって向上したことが確認された。従って、軽量落下荷重を受ける複合炭素繊維補強コンクリート造シェルを対象とした場合に、シェル裏面へのシート補強はシェル表面へのシート補強と比較して、優れた耐衝撃性能を示すことが確認された。次に、動的実験に於ける衝撃荷重規模の相違による HRN と LRN の比較を行う。LRN はひび割れが拡散され、破壊パターン1を示しているのに対し、HRN では載荷点で大幅に抜け落ちる破壊パターン2を示している。後者に於いて、抜け落ちることによる減衰定数の減少が確認された。加えて、 $R_f$  は HRN に於いて 9.75% 減、LRN に於いて 10.3% 減が示され、載荷点での陥没破壊に依る周辺への損傷軽

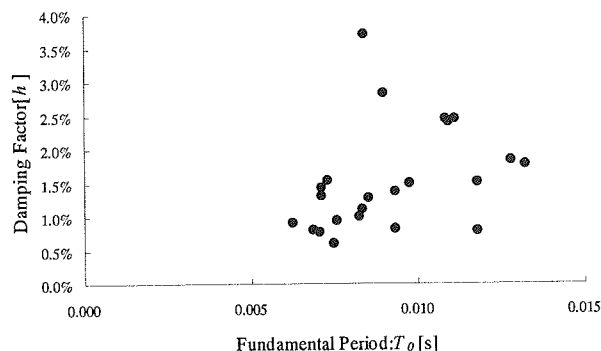


Fig.7 Fundamental Period vs. Damping Factor.

減に起因する剛性低下の僅かな軽減傾向が示された。

これまで国内外で主として高層建築を対象とした固有振動数と減衰定数の関係をまとめた参考文献に基づき<sup>3)</sup>、Fig.7に破壊前における供試体毎の固有周期と減衰定数の関係を示した。シェル構造に関して、上記のような固有周期及び減衰定数を関係づける研究資料は殆ど報告されておらず、今後の資料蓄積が望まれる。上記の高層建築を対象とした参考文献には相応の関係が確認できるが、本研究のシェル構造を対象とした場合には、明確な相関を確認することは困難であることが示された。従って、シェル破壊実験前後に於いて、上記動特性を明らかにする為、本研究では新たに固有振動数と減衰定数の変化に注目し、その相関関係をFig.8に示した。即ち、破壊パターンによる各供試体の $R_f$ と $R_h$ の関係を示した。破壊パターン1を示した供試体における回帰直線の寄与率は0.796となり、 $R_f$ と $R_h$ が比例関係を示した。即ち、ひび割れが放射線状に伸びた破壊パターンを示す供試体において、減衰定数と固有振動数の変化割合は直線関係を示すことが確認された。また、破壊パターン2を示した供試体については、回帰直線が同図の破線の様になることが示され、固有振動数の変化に対し減衰定数の変化の割合は少なく、ひび割れによる摩擦減衰の増加が抑制される傾向を確認した。

## 5. 結論

静的及び動的の荷重を受ける複合炭素繊維補強コンクリート造屋根形円筒殻の破壊形態及び損傷程度の相互関係を固有振動数及び減衰定数に基づく動特性の観点から実験的に検討を行った結果以下の知見を得た。

(1)ひび割れが周辺に伸びる破壊形態を示した供試体では、最大で減衰定数において133%の増加、固有振動数において13%の減少

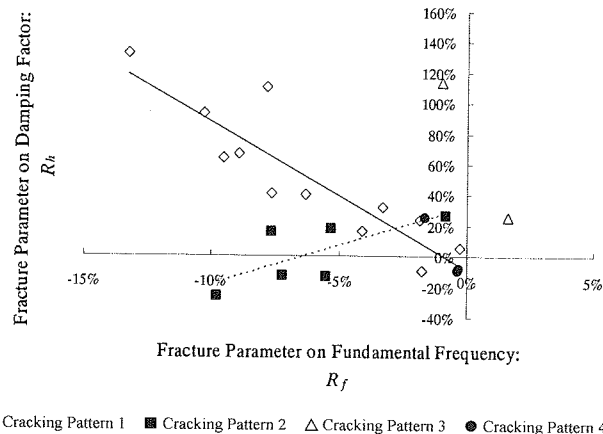


Fig.8 Fracture Parameter  $R_h$  vs.  $R_f$

を確認した。

(2)載荷点周辺での陥没破壊を示した供試体では、最大で減衰定数において26%の減少が示された。また固有振動数においては最大で9%の減少が示された。

(3)動的破壊実験と比較して、静的破壊実験におけるRC供試体の減衰定数は、増加傾向にあることを確認した。

## 参考文献

- 1) 川崎健二郎, 真下和彦, 山口紳一郎, 伊藤由理, 衝撃荷重を受ける複合炭素繊維補強コンクリート造円筒殻の破壊形態, 東海大学紀要工学部, Vol.44, No.1, 2004, pp.29-34
- 2) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社, 1993年7月, pp.66-68
- 3) 建築物の減衰, 日本建築学会, 2000年10月, pp.215-216