

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

川崎健二郎^{*1}・真下和彦^{*2}・山口紳一郎^{*3}・伊藤由理^{*4}

Failure Pattern of Concrete Cylindrical Shells Reinforced with Complex Carbon Fiber under Impact Load

by

Kenjiro KAWASAKI^{*1}, Kazuhiko MASHITA^{*2}, Shinichiro YAMAGUCHI^{*3} and Yuri ITO^{*4}

(Received on Feb. 25, 2004 & accepted on May 26, 2004)

Abstract

The main purpose of this study is to investigate, both experimentally and numerically, the mechanical behaviors of concrete circular cylindrical shells reinforced with complex carbon fiber under impact point load. Complex carbon fiber reinforcement is defined in this study as combined reinforcement with carbon fiber sheets attached to the outer shell surface and with carbon fiber chips mixed into the inner shell body. Combined reinforcement could be expected to improve the quality of the shells, that is, the homogeneity and isotropy of the concrete shells with carbon fiber chips as compared to those with standard steel bars could be improved, while the mechanical behavior despite large thickness variances could be improved by carbon fiber sheets. A failure experimental study was conducted on two different types of reinforcement on small-scaled shell specimens attached to carbon fiber sheets. One type was made of a concrete shell reinforced with carbon fiber chips and the other type was made of a concrete reinforced shell with ordinary steel bars. Each model was applied with impact load up to failure states. As for numerical analysis, numerical calculations were carried out by a nonlinear transient dynamic finite element method. The effects of complex carbon fiber on the dynamic behaviors of concrete shells were discussed on the basis of the experimental and numerical results.

Keywords: Concrete Shell, Impact Load, Complex Carbon Fiber

1. まえがき

本研究の主目的は、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を実験的及び理論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。著者等は、これまでに炭素短繊維補強コンクリート(CFCRC)造¹⁾、並びに炭素繊維シート補強コンクリート(CFSRC)造²⁾に関して報告を行ってきた²⁾。既往の研究では、炭素繊維シート補強は、静荷重時の建築骨組構造に対して線材補強が主に報告されているが³⁾、衝撃荷重を受けるシェル構造への適用は殆ど検討されていない。しかし最近の報告より²⁾、通常の鉄筋コンクリート造シェルに部分的な炭素繊維シート補強を適用することによりCFSRC造に関して、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た。上記を踏まえて、新たにCCFRC造シェルを対象として、破壊形態の検討を行った。実験は小型実験供試体を作製し、シェル面中央部への衝撃破壊実験を行い、数値解析は動的非線形過渡応答有限要素法を適用した。シート補強の数値モデル化に於いて

は、立体要素による剛性モデルの検討を行った。更に衝撃荷重を受けた場合に於いて、炭素繊維シート補強範囲の変化がシェル破壊形態に及ぼす影響を併せて検討した。

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衝撃破壊実験とこれに対応した動的非線形数値解析の各結果に基づき、複合炭素繊維補強コンクリート造シェルの破壊形態の特性を明らかにした。加えて炭素繊維シート補強範囲の相違がコンクリート造円筒殻のひび割れ形態に及ぼす影響を検証した。

2. 実験概要

2.1 破壊実験

本研究で用いた各実験供試体名の文字構成、コンクリート材料定数及びシェル施工板厚諸元を Table 1 に示した。シェル板厚は各破壊実験終了後にシェル面上の 289 点をノギスにより実測した。また、炭素繊維シートの材料定数を Table 2 に、炭素短繊維の材料定数を Table 3 に、鉄筋の材料定数を Table 4 に示し、衝撃破壊実験図を Fig.1 に示した。

実験供試体寸法は水平投影面に於いて 1120mm×1120mm の正方形、ライズ・スパン比 1/5、曲率半径 812mm、全開角 87.1°と設定した。シェル境界に於いては、40mm×40mm の正方形断

* 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
* 3 戸田建設株式会社
* 4 工学研究科建築学専攻博士課程前期

面の縁梁及び縁アーチで補剛した。

縁部材には4-D3を主筋とし、あばら筋としてφ0.85mmのなまし鉄線を20mm間隔で配筋した。RC造供試体のシェル面内配筋は、φ1.2mmの鉄筋を20mm間隔で直線母線方向及び円形指導線方向にそれぞれ単配筋とした。CFRC造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%混入した。

本実験供試体シェル中央に静的単位荷重(1.0kN)が作用した場合を対象として、東海大学汎用コードNASTRANにより弾性解析を行った結果をFig.2に示す。変形図並びに応力分布図より、引張応力度の支配領域を特定し、炭素繊維シートの補強領域を決定し、その補強範囲をFig.3に示した。なお、シート補強効果を確認するため、シェル裏面の圧縮応力度支配領域にもシート補強を施したタイプ(RB12D)を検討に加えた。また、炭素繊維シート補強は実験供試体作製後、エポキシ系樹脂を用いて炭素繊維シート(TR3110MS)をシェル面に貼り付けることにより施工した。

破壊実験に於ける供試体の支持方法としては、縁アーチ両端に於いて水平スラストを拘束する隅角部4点ピン支持とした。衝撃荷重の載荷は、シェル面中央部に鋼製円盤(重量166.6N)を高さ1,000mmから鉛直自由落下させ、半径25mmの鋼製アタッチメントを介して行った。衝撃荷重の計測はFig.1のロードセル(TCLP-5B)により行った。計測値はFNNND, FT12D, FB11D, RT12D, RB12Dの順に10.8kN, 11.8kN, 10.9kN, 9.2kN, 12.5kN(平均10.9kN)であった。なお、鋼製円盤の内側にはフッ素樹脂含浸ガラスクロステープを貼り付け、パイプとの摩擦抵抗に対する低減化処理を施した。

なお、Table 1のRNNNDは文献²⁾の資料を用いている。

2.2 自由振動実験

破壊実験前後にインパクトハンマにより衝撃加振を与え自由振動実験を行った。Fig.4にシェル境界条件を示す。計測位置には加速度計を鉛直Z方向に設置し、加速度応答波形を計測した。境界条件としては、シェル以外の振動数がノイズとして入力されることを避けるため鉄骨上にスタイロフォームを24mm重ね、ゴム板を乗せた土台を作製し、シェル隅角部の四隅に設置し自

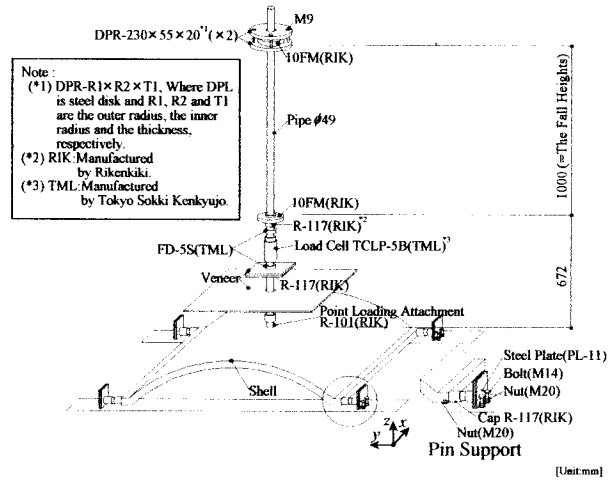


Fig.1 Failure Experiment System.

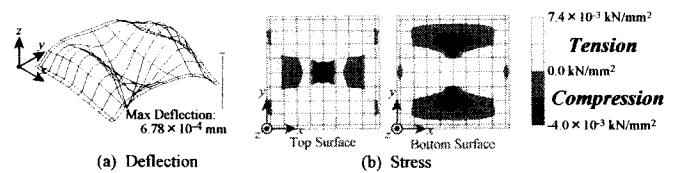


Fig.2 Stress Analysis under Static Load (1kN).

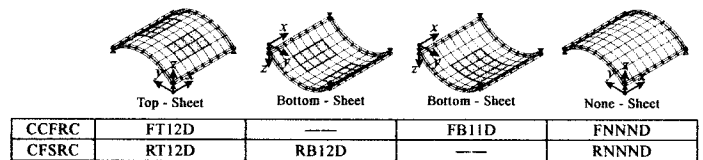


Fig.3 Reinforced Region with Carbon Fiber Sheets.

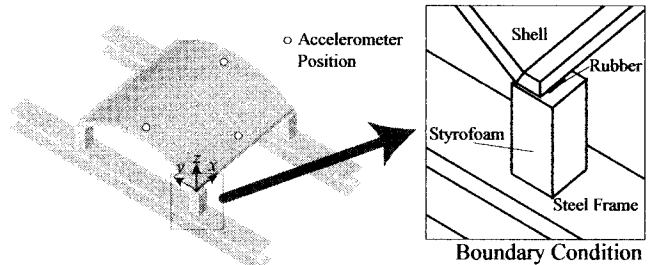


Fig.4 Free Vibration Experiment System.

Table 1 Shell Model.

Model	Label = [1] - [2] - [3] - [4]				Material Properties of Concrete				Shell Thickness [mm] (Ratio to To in Parentheses : To=8mm)	
	Material Properties	Reinforced Surface	Reinforced Region		Young's Modulus : E [GPa]	Ultimate Compressive Strength : F _c [MPa]	Ultimate Tensile Strength : F _t [MPa]	Poisson's Ratio : ν	Average	Standard Deviation
			X	Y						
FNNND	F: Carbon Fiber	N : None	—	—	26.6	69.2	7.16	0.234	10.2 (1.28)	2.63 (0.33)
FT12D	Chips Reinforced Concrete		±1/4	±2/4	26.6	69.2	7.16	0.234	9.97 (1.25)	2.18 (0.27)
FB11D	Concrete		±1/4	±1/4	27.8	78.3	6.52	0.232	9.59 (1.20)	1.99 (0.25)
RNNND ²⁾	R: Reinforced Concrete	T: Top	—	—	26.1	58.5	3.62	0.195	11.8 (1.48)	1.79 (0.22)
RT12D		B: Bottom	±1/4	±2/4	29.1	63.1	4.14	0.224	10.6 (1.33)	1.83 (0.23)
RB12D		±1/4	±2/4	29.1	63.1	4.14	0.224	11.4 (1.42)	1.71 (0.21)	
Average	—	—	—	—	27.6	66.9	5.46	0.224	10.6 (1.32)	2.02 (0.25)

Table 2 Material Properties of Carbon Fiber Sheets.

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

Table 3 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 ³]	Specific Gravity
K661	18.0	17.0	1.77	180	1.00	1.90 × 10 ⁻⁹	1.90

Table 4 Material Properties of Steel Bar.

Steel Bar Diameter	Young's Modulus [GPa]	Yield Strength [MPa]	Ultimate Tensile Strength [MPa]
0.85	186	162	250
1.2	235	364	468
D3	198	334	487

由振動実験を行った。

得られた加速度応答波形から、汎用解析プログラム：DAS100A (FFT 解析), PCD30A (波形処理) を用い FFT 解析を行い、シェル固有振動数を特定した。なお、サンプリング周波数は 5,000Hz とした。

また、破壊実験前後の損傷度合いを評価する指標として減衰定数を求めた。自由振動波形が得られれば減衰定数 h は文献⁴⁾より、以下の式より求められる。

$$h = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi} \ln \frac{x_i}{x_{i+1}}\right)^2}} \approx \frac{1}{2\pi} \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} \quad (h \ll 1) \quad \dots (1)$$

ここで x_i, x_{i+1} は 1 周期ごとの両振幅値であり $\ln(x_i/x_{i+1})$ は対数減衰率である。

3. 数値解析概要

3.1 非線形有限要素解析

本研究では上述の破壊実験を数値解析により再現する為、円筒シェルに衝撃点荷重が作用した場合を対象として、シェル破壊形態を動的非線形数値解析により検証した。その為、20 節点アイソパラメトリック立体要素を用いて、有限要素法による数値解析を行った。なお、薄肉シェルの剛性評価に関しては、最適積分法を適用した。ここで補強鉄筋の剛性に於いては、1 軸方向の剛性のみを有する等価板厚の鋼層としてバイリニア型 (Bilinear) の応力・歪関係をを用いたモデル化を行い、コンクリート立体要素に付加して数値解析を行った。

コンクリートの圧縮挙動に関しては、弾・粘塑性性のモデル化に降伏面と強度限界面の仮定を用い、2 軸応力状態に対してはクーパー (Kupfer) の実験結果を採用し、降伏判定に用いた。更にコンクリートの終局圧縮歪を 0.003 と設定し、圧縮破壊判定に用いた。コンクリートの引張挙動に関しては、引張剛性に e 関数を用いて計算し、ひび割れ発生後のモデル化を行った。

動的非線形釣合方程式は、準離散型で表し、ニューマーク (Newmark) の β 法を用いて、パラメータを $\beta=0.25$ 及び $\gamma=0.5$ に設定して応答解析を行った。

3.2 炭素繊維シートのモデル化

炭素繊維シートのモデル化は立体要素とした。立体要素で数値計算をする場合、板厚方向長さが極端に薄い要素は、最適積分法を適用しても計算誤差を生じやすい。そのため厚さ 0.19mm

の炭素繊維シートを、シェル基準板厚と等価な 8mm 厚の立体要素として評価した。Fig.5 に節点の共有形態の違いによって M_E (伸び剛性モデル Extensional Model), M_R (曲げ剛性低減モデル Reduced Flexural Model), M_F (曲げ剛性モデル Flexural Model) の 3 タイプを示した。ここで、モデル M_E はシート要素の板厚方向の中間点でコンクリートシェルに結合されている。次にモデル M_R はモデル M_E の共有節点に加えシート要素間で上下の中間節点を結合されている。モデル M_F はシート間及びコンクリートシェルに対応する全ての節点が連結されている。また、シートの厚さを変化させたことにより材料定数を正當に評価する必要があるため、等価炭素繊維シートの材料定数を Table 5 のように設定した。

本実験で使用した RT12D モデルを対象とし上記 3 タイプのモデルにシート無しモデルを加えた 4 つのモデルで、シェル板厚を 8mm に統一した基準板厚数値解析を行った結果を Fig.6 に示した。後述の 5.1 ひび割れ傾向より、破壊実験ひび割れは RT12D モデルに於いてシート補強によりひび割れが低減することが確認されており、ひび割れ低減が認められたモデルを解析モデルとして選定することとした。モデル M_E には殆どひび割れの低減が認められなかったが、モデル M_R 及び M_F に於いてシェル面全体のひび割れ低減効果が認められ、特に炭素繊維シート補強部分を見るとモデル M_R に於いてより顕著な補強効果が得られたため、モデル M_R を採用することとした。なお、炭素繊維シートのモデル化に於いて、シート材料の引張強度、圧縮強度及びヤング係数を一軸剛性モデルに適用した場合、シート補強による効果が殆ど認められなかった為、本研究では立体要素によるモデル化を採用した。

3.3 計算概要

本研究では、前述の破壊実験と対応した実験対応数値解析を行い、材料定数、シェル施工板厚及び炭素繊維シート補強範囲の相違がシェル破壊形態に及ぼす影響について検討した。

実験対応数値解析では、以下に示す 2 種の数値解析を設定した。一つは、個別板厚 (Discrete Model) 数値解析である。これは破壊実験終了後の板厚計測結果を元に 225 点のシェル実測板厚を節点ごとに反映させ、シェル板厚変動を考慮した数値解析である。他の一つは、基準モデル (Standard Model) 数値解析である。これはシェル板厚を 8mm に統一し、材料定数として実験供試体平均値を採用した均一板厚数値解析である。なお、基準モデル数値解析は、対称性を考慮し 1/4 部分での解析を行った。また、入力荷重は各供試体に対して破壊実験より得た最大荷重値を、ヘビサイド関数により与えた。時刻歴応答解析では、1 ス

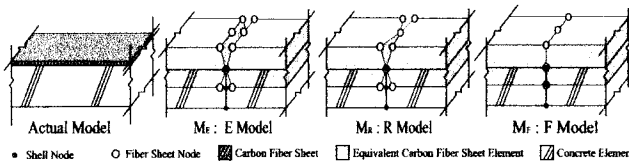


Fig. 5 Numerical Model for Carbon Fiber Sheet.

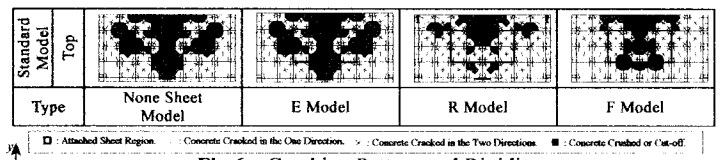


Fig.6 Cracking Pattern and Rigidity.

Table 5 Numerical Model for Carbon Fiber Sheets.

Type	Rigidity	ρ_c [kN·sec ² /mm ⁴]	E_c [GPa]	F_c [GPa]	F_t [GPa]
E Model	Extensional	$\rho_c \times 2.38 \times 10^{-2}$	$E_c \times 2.38 \times 10^{-2}$	1.12	1.12
R Model	Reduced Extensional and Flexural	$\rho_c \times 2.38 \times 10^{-2}$	$E_c \times 1.71 \times 10^{-2}$	1.12	1.12
F Model	Extensional and Flexural	$\rho_c \times 2.38 \times 10^{-2}$	$E_c \times 1.71 \times 10^{-2}$	1.12	1.12

E_c : Young's Modulus of Carbon Fiber Sheets E_e : Equivalent Young's Modulus ρ_c : Density of Carbon Fiber Sheets ρ_e : Equivalent Density

トップ 1.7 μ sec.の時刻刻みで、1要素の全破壊を終局時の判定とみなし計算した。

4. 結果及び考察

本研究では破壊実験及び動的非線形数値解析を行い、ひび割れ形態を特定し、併せて自由振動実験より得られた固有振動数並びに減衰定数の変化を確認した。

4.1 ひび割れ形態

Fig.7に、各実験供試体の板厚変動分布図、破壊実験ひび割れ図及び個別板厚数値解析、基準板厚数値解析より得られたひび割れ図を示し、破壊形態の検討を行った。

まず、基準モデルによる考察を行う。複合炭素繊維補強コンクリートのFB11Dでは上下面、FT12Dでは上面にひび割れの低減が認められる。RCのモデルは複合炭素繊維補強コンクリ

ートのモデルに比べ全体的にひび割れ低減が少ないことが確認された。RT12Dでは上面、RB12Dでも多少の低減が認められる結果が示された。

次に構成材料による比較を行う。破壊実験ひび割れ図より炭素短繊維を混入した3タイプ全てで、表面と裏面のひび割れが重なるせん断破壊モードを示した。これは炭素短繊維が引張力に強くシェル自体の変形を拘束するため曲げ破壊には至りにくいためであると考えられる。また、全体的にひび割れは少ないことが確認された。これに対してRC造は全体的にひび割れが多く確認された。また炭素短繊維補強とは異なり載荷点を囲うように曲げによるひび割れが発生し、載荷点を中心として縁部材に向かうせん断ひび割れが多く見られる。

次に炭素繊維シート補強の有無による比較を行う。炭素繊維シート補強を施した全ての供試体で、表面と裏面共に載荷部近傍で載荷点を囲うようなせん断によるひび割れが発生している。これはシート補強領域でシェルの剛性が増加した結果、引張力

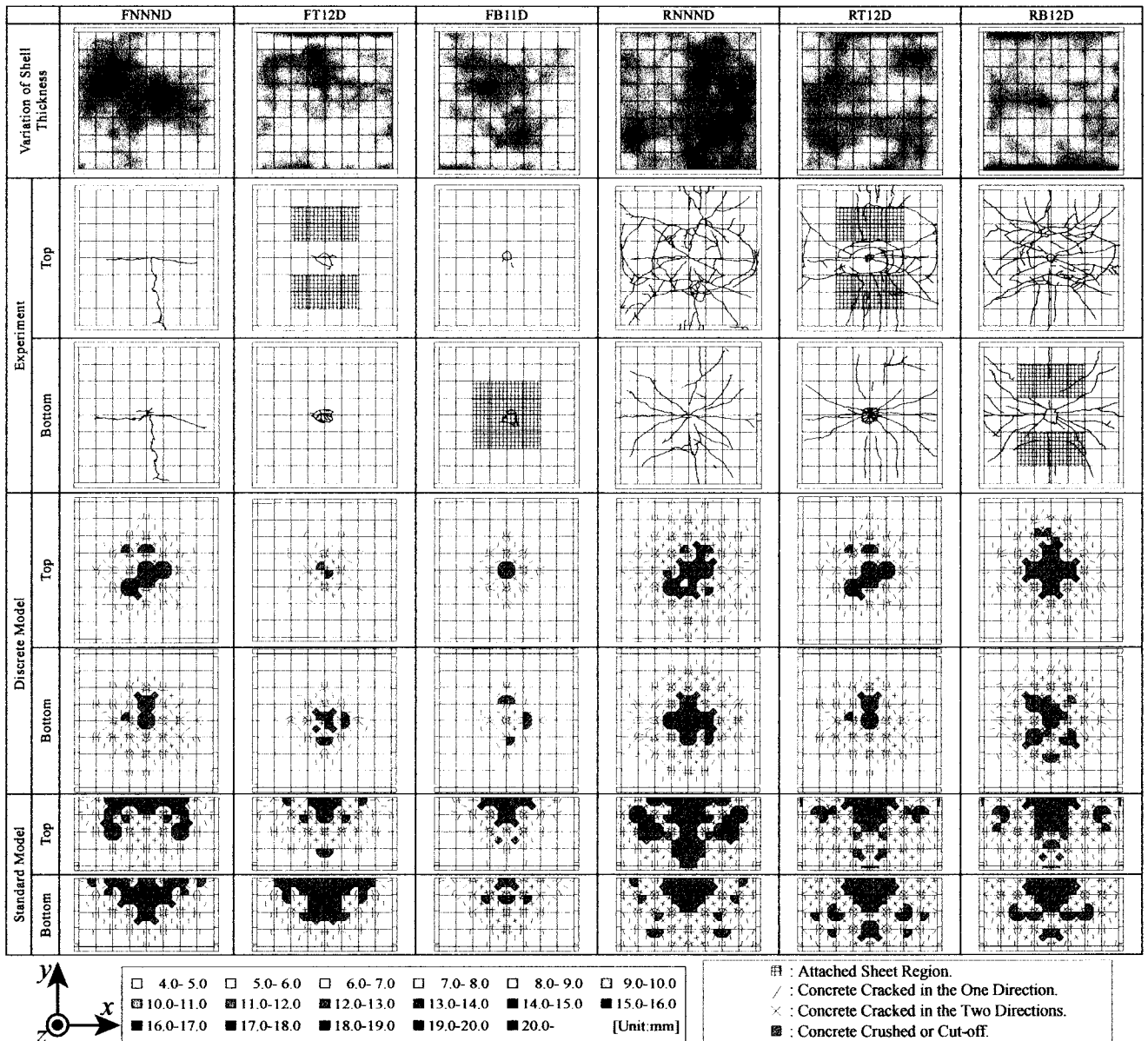


Fig.7 Cracking Pattern.

が荷重アタッチメント接触部分に集中し、面内力がシェル全面に伝わるより先に面外せん断破壊のモードである、パンチングシアアを起こしたと考えられる。その結果、他のシェル面の損傷が大幅に軽減された。また、全供試体に於いて抜け落ちる状態では無かったことが確認された。

続いて、シート補強範囲の影響を考察する。FT12DモデルとFB11Dモデルに於いて、シェルの表面及び裏面の引張力を受ける部分にシートを補強したことにより、ひび割れ領域は狭小し、明確なひび割れ低減効果が見られる結果となった。個別板厚モデル、基準モデルの各数値解析に於いても同様の結果を得た。また、RT12Dモデルに於いて補強部分に顕著なひび割れ低減効果を認めることが出来る。これは引張力を受ける部分にシート補強を施したことによって効果が強く表れたものと思われる。また、シート補強部分からのせん断によるひび割れも確認できる。圧縮力が支配的である領域を補強したRB12DはRNNNDのひび割れと非常に類似した結果であることが示された。また、それぞれのモデルに対して数値解析の結果も同様の特徴が確認された。

最後に各供試体の板厚変動分布図及びひび割れ図を比較すると、全体的に板厚の薄い方向へ向かうひび割れが確認され、個別板厚数値解析に於いてもその傾向が見られることから、シェル板厚の変動がひび割れ傾向に与える影響を確認した。また、板厚変動状況に関わらず炭素繊維シートのひび割れ低減効果が表れていることが分かる。この結果は解析からも確認できる。

4.2 自由振動実験結果

破壊実験前後に行った自由振動実験により求めた応答加速度波形をFFT解析し、スペクトルの形でFig.8に示した。ここから得られた固有振動数をTable 6、減衰定数をTable 7に示した。ここで固有振動数破壊パラメータ R_f を以下のように定義した。

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

なお、 f_b は破壊前の固有振動数であり、 f_a は破壊後の固有振動数である。次に減衰定数破壊パラメータ R_h は以下のように定義した。

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

なお、 h_b は破壊前の減衰定数であり、 h_a は破壊後の減衰定数である。

破壊実験前のシェル供試体ではCCFRC造、CFSRC造共に40Hz前後の固有振動数となり、シート補強の有無がシェルの振動数に与える影響は確認されなかった。その理由として、シェルの平均板厚が10.6mmであるのに対し、シート厚は0.19mmで非常に薄く、炭素繊維シートは軽量であるためと考えられる。

破壊実験前後の固有振動数を比較した場合、ひび割れ量が影響していることが明確に示された。FNNNDモデルで5.8%の減少を確認したが、FB11Dモデルにはあまり変化が認められなかった。これは、シート補強によるひび割れ低減効果が発揮され、シェルの剛性が保持されたためであると考えられる。一方CFSRC造供試体では23.6%から26.3%の減少が見られた。その理由としては、CCFRC造供試体と比べ破壊が全体的に生じたためシェルの剛性が弱まり、振動数を低下させたと考えられる。

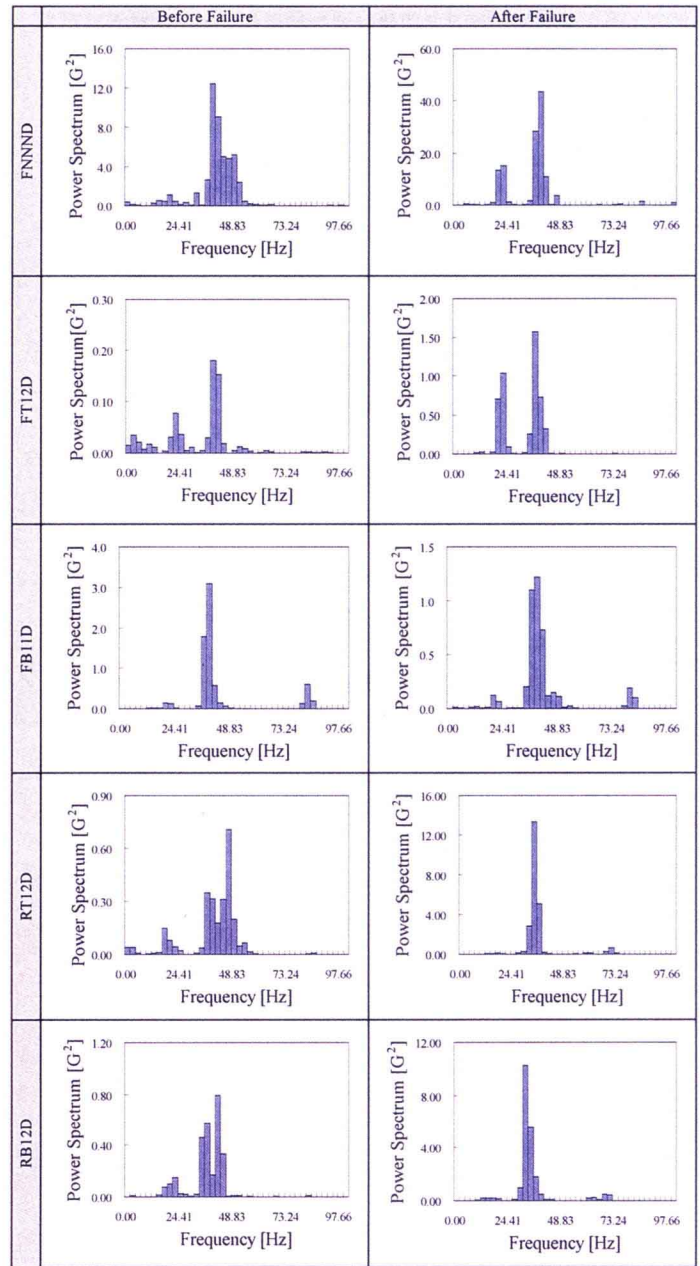


Fig.8 Spectrum.

Table 6 Natural Frequency.

Model	Natural Frequency		
	Elastic [Hz] f_b	Failure [Hz] f_a	Failure Frequency Parameter[%] R_f
FNNND	41.5	39.1	-5.8
FT12D	39.1	36.6	-6.4
FB11D	39.1	39.1	0.0
RT12D	46.4	34.2	-26.3
RB12D	41.5	31.7	-23.6

Table 7 Damping Ratio.

Model	Damping Ratio		
	Elastic [%] h_b	Failure [%] h_a	Failure Damping Parameter[%] R_h
FNNND	4.1	5.2	26.2
FT12D	4.5	4.8	6.7
FB11D	4.5	4.8	5.1
RT12D	6.3	8.4	33.3
RB12D	5.8	7.9	36.4

式(1)を用い破壊実験前後の減衰定数を計算した。減衰定数に於いても、破壊実験前後で明確な変化が見られた。載荷点から縁部材へと伸びるせん断ひび割れを起こした FNNND モデルは 26.2%の増加が示された。載荷点近傍の局所的な破壊状況を示した FT12D モデル、FBI1D モデルでは平均 5.9%(5.1~6.7%の範囲)の増加傾向が示された。ひび割れ領域の大きい CFSRC 造供試体では平均 34.7%(33.3~36.4%の範囲)の増加傾向が示された。破壊実験結果より CCFRC 造供試体は局所的なひび割れに留まったため、CFSRC 造供試体よりもひび割れ量が極端に少なく、破壊後の減衰の増加が抑えられたものと考えられる。以上より、 $R_f=0.0\%$ から 26.3%及び $R_h=5.1\%$ から 36.4%の範囲での変化が確認され、炭素繊維シート補強のひび割れ低減効果による、破壊実験前後の動特性の変化を確認した。

5. 結論

衝撃荷重を受ける炭素繊維シート補強コンクリート造円筒殻を対象として、炭素繊維シート補強範囲の相違が、破壊性状に及ぼす影響を実験的及び理論的に検討を行い、併せて自由振動実験を行い以下の結論を得た。

(1)数値解析を行う場合、炭素繊維シートのモデル化に於いては曲げ剛性低減モデルの有効性が確認された。

(2)炭素繊維シート補強範囲の相違がシェル破壊形態へ及ぼす影響を確認した。

(3)シート補強によるひび割れ低減が顕著であるときは、破壊実験前後で、固有振動数が 20%以上減少し、減衰定数が 30%以上増加することを確認した。

参考文献

- 1) 真下和彦, 佐藤由教, 鈴木悠子: 衝撃荷重を受ける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.42, No.1, pp.17-22, 2002 年 9 月
- 2) 真下和彦, 鈴木悠子, 山口紳一郎: 衝撃荷重を受ける炭素繊維シート補強された鉄筋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.43, No.1, pp.13-18, 2003 年 9 月
- 3) J. G. Teng and L. Lam, Compressive Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete in Elliptic Columns, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.1535-1543, December, 2002
- 4) 日本建築学会, 建築物の減衰, pp.215-216, 2000 年 10 月