

# 前損傷および修復の有無による鉄筋コンクリート造 円筒殻の耐力と損傷形態変化

真下和彦\*<sup>1</sup>・川崎健二郎\*<sup>2</sup>・篠原貴幸\*<sup>3</sup>・山田祥博\*<sup>3</sup>・田中正史\*<sup>3</sup>

## Strength and Postdamage Pattern of Predamaged and Retrofitted Reinforced Concrete Cylindrical Shells

by

Kazuhiko MASHITA\*<sup>1</sup>, Kenjiro KAWASAKI \*<sup>2</sup>,  
Takayuki SHINOHARA \*<sup>3</sup>, Yoshihiro YAMADA \*<sup>3</sup> and Masafumi TANAKA\*<sup>3</sup>

(Received on March 16, 2007& Accepted on July 4, 2007)

### Abstract

The main purpose of this study is to investigate, both experimentally and numerically, the strength of predamaged and retrofitted reinforced concrete cylindrical shells. The strength of reinforced concrete cylindrical shells, predamaged by natural disasters, such as earthquakes, impact loads, wind and explosions, is difficult to estimate, and the strength of reinforced concrete cylindrical shells that were retrofitted on the basis of predamage to the shells has never been previously evaluated. In this study, the shells were artificially predamaged before evaluation by a loading experiment using a one-point concentrated load. The predamaged shells were retrofitted using noncontracted mortar and carbon-fiber sheets. A static point load was applied perpendicularly onto the predamaged and retrofitted cylindrical shell specimens. A numerical study by nonlinear FEM analysis including analysis of the fluctuations of the shell thickness was also conducted. The strength of the predamaged and retrofitted concrete shells in consideration of the reinforcement of the carbon-fiber sheets was discussed on the basis of the results of the nonlinear FEM analysis and the loading experiment.

**Keywords:** Concrete Shell, Predamage, Carbon-Fiber Sheet

## 1. 序論

本研究の主目的は、鉄筋コンクリート造および炭素繊維シート補強による鉄筋コンクリート造屋根型円筒殻の損傷並びに修復に対する耐力および後損傷形態を明らかにすることである。載荷実験前に人工的に設定した損傷を前損傷、載荷実験後に得られた損傷を後損傷と定義して、それぞれのシェル耐力と後損傷形態を検証した。既往の研究において<sup>1,2)</sup>、鉄筋コンクリート造屋根型円筒殻の耐力を実験的並びに数値解析的に評価する報告がなされてきたが、自然災害や経年変化等により予め損傷を受けた鉄筋コンクリート造並びに修復を施した鉄筋コンクリート造屋根型円筒殻の耐力を究明する報告は殆どなされていない。実験的研究は、円筒殻の中央部に集中荷重による載荷実験を実施し、シェル耐力と後損傷形態を明らかにした。更に、板厚変動を考慮した非線形数値解析による検討を併せて行った。以上より、前損傷の在る鉄筋コンクリート造屋根型円筒殻および前損傷を修復した鉄筋コンクリート造屋根型円筒殻の載荷実験およびこれらと対応する非線形数値解析の各結果に基づき、シェル耐力および後損傷形態の特性を明らかにし、シート補強効果

に関する知見を得たのでその結果を報告する。

## 2. 実験概要

本研究では、前損傷の在る鉄筋コンクリート造円筒殻および前損傷を修復した鉄筋コンクリート造円筒殻のシェル中央部に、静的点荷重が作用した時の耐力および後損傷形態を実験的に検討する為、小型供試体を作製し載荷実験を行った。前損傷を設定したコンクリート造円筒殻に対する修復として、以下の二者を対象とした。一つ目は、無収縮モルタルによる修復方法であり、他の一つは、無収縮モルタルに加えて炭素繊維シート貼り付けによる修復方法である。前者の修復をR(Restoration)法、後者をS(Sheet-Retrofit)法とそれぞれ定義した。供試体は、鉄筋コンクリート(RC)造1体、炭素繊維シート補強による鉄筋コンクリート(文献3に準じて、CSと略記)造1体、RC造に前損傷を与えた供試体4体、これらにそれぞれR法による修復を施したRC造の供試体4体、更にS法による修復を施したCS造の供試体4体の合計14体を対象とした。実験で用いた載荷実験装置、支持方法および前損傷の詳細をFig.1に示す。実験供試体の寸法は、水平投影面において500mm(母線)×500mm(指導線)の正方形とし、設計シェル板厚を8mm、ライズ・スパン比を1/5、曲率半径を362.5mm、全開角を87.1°とした。前損傷部において、損傷幅は3mmおよび20mmとし、損傷長さは供試体の母

\*1 工学部建築学科 教授・工博

\*2 理工学研究科総合理工学専攻博士課程

\*3 工学研究科建築学専攻博士課程前期

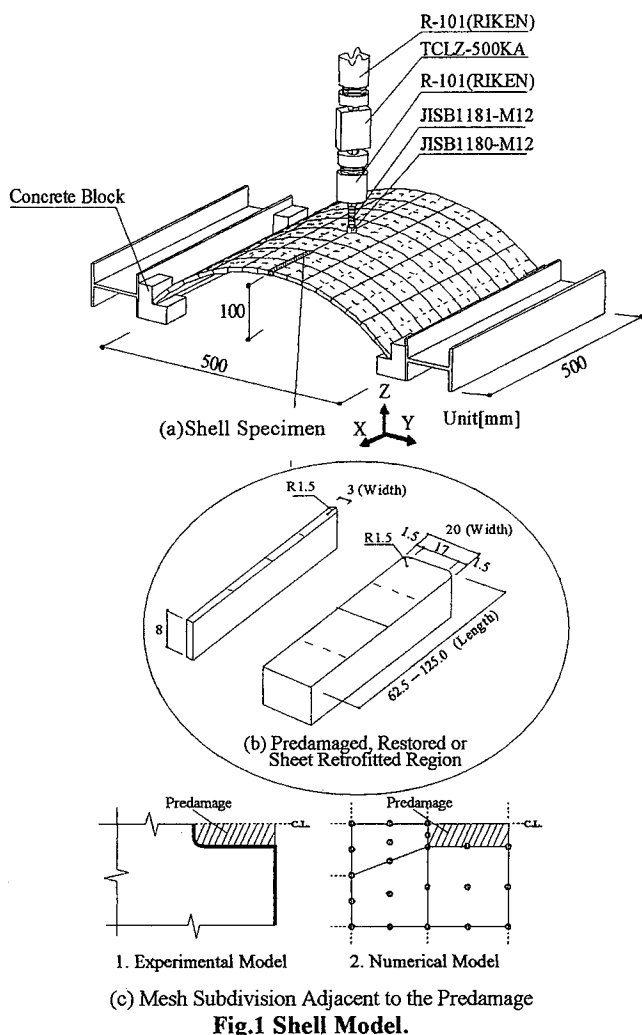


Fig.1 Shell Model.

線長さの 1/8(62.5mm)および 2/8(125.0mm)とした。前損傷部の切り欠きは、シェル頂部の縁から中心に向かって設定した。R法による修復部は、上記の前損傷部に修復用無収縮グラウト材 ( $E=29.5\text{GPa}$ ,  $F_c=67.5\text{MPa}$ ,  $F_t=3.82\text{MPa}$ )を充填した。従って、R法による修復領域は前損傷部と同一寸法である。支持方法は、円筒殻の水平スラストを拘束する為、シェル端部4点をピン支持とした。実験供試体におけるコンクリートの材料定数、施工シェル板厚の平均値および標準偏差(全面領域と限定領域の2種類)を Table 1 に示した。ここで、全面領域はシェル全面を示し、限定領域は載荷点を中心としたシェル面の 1/16 領域を示す。

Table 1 Material Property of Concrete and Shell Thickness.

Model Name	Material Properties of Concrete				Shell Thickness[mm]			
	Young's Modulus:E [GPa]	Ultimate Compressive Strength: $F_c$ [MPa]	Ultimate Tensile Strength: $F_t$ [MPa]	Poisson's Ratio: $\nu$	Global Average	Global Standard Deviation	Local Average	Local Standard Deviation
RDnn	25.1	53.2	3.32	0.229	9.10	0.75	9.73	0.32
RDaa	25.1	53.2	3.32	0.229	8.77	0.59	8.84	0.56
RDab	25.5	54.0	3.34	0.248	8.92	0.66	9.14	0.40
RDba	26.0	51.7	3.24	0.244	8.98	0.82	9.43	0.36
RDbb	25.5	54.0	3.34	0.248	8.75	0.73	8.67	0.56
RRaa	25.1	53.2	3.32	0.229	9.76	0.74	9.34	0.33
RRab	24.7	47.9	3.02	0.219	9.90	0.81	10.2	0.40
RRba	26.0	51.7	3.24	0.244	9.44	0.65	9.80	0.37
RRbb	25.1	53.2	3.32	0.229	8.89	0.71	8.78	0.52
RSnn	25.1	53.2	3.32	0.229	9.88	0.83	10.4	0.38
RSaa	25.8	52.9	3.54	0.212	9.19	0.72	9.60	0.38
RSab	26.0	51.7	3.24	0.244	9.69	0.93	9.35	0.36
RSba	25.8	52.9	3.54	0.212	8.73	0.61	8.90	0.39
RSbb	25.5	54.0	3.34	0.248	9.37	0.88	9.61	0.50

各供試体名は4文字により構成され、第1文字は、構成材料を表しRC造およびCS造をRで示した。第2文字は、損傷と修復情報を表し、前損傷(Predamage)をD、R法による修復をR、並びにS法による修復をSでそれぞれ示した。供試体名の第3番目の小文字は損傷長さを表し、62.5mm長をa、125.0mm長をb、無損傷をnで示した。第4の小文字は損傷幅を表し、3mmをa、20mmをb、無損傷をnで示した。RDnnおよびRSnnは、それぞれ無損傷のRC造およびCS造である。なお、前損傷近傍の板厚変動も耐力に影響を与える可能性も考えられるが、本研究では文献(1)に基づき、集中荷重の載荷点近傍に対する板厚変動に限定した。S法による修復方法は、R法による修復後、シェル面にエポキシ系樹脂を塗布して炭素繊維シート ( $E=71.6\text{GPa}$ ,  $F_t=1.12\text{GPa}$ ,  $\rho=1.05\times 10^3\text{ kg/m}^3$ )を貼り付けた。炭素繊維シートの補強領域は、既往の研究からシェル両面の全面を補強した場合が最も効果的であるという知見を得ている為<sup>1)</sup>、シェル両面の全面を補強領域とした。なお、コンクリートの調合は、セメント対骨材の重量比を1対2、水セメント比を45%とした。鉄筋は $\phi 1.6\text{mm}$  ( $E=201\text{GPa}$ ,  $F_y=250\text{MPa}$ )を使用し、X-Y方向に10mm間隔で格子状の単配筋とした。載荷実験装置は油圧式万能試験機を用い、最大耐力に至るまで載荷を行った。

### 3. 数値解析の概要

#### 3.1 非線形有限要素解析

本研究において、炭素繊維シート補強による鉄筋コンクリート造円筒殻の耐力および力学的非線形特性を理論的に検討する為、コンクリートの引張剛性およびひび割れを考慮した幾何学的非線形有限要素解析を行った。本解析では、双二次ラグランジェ(Lagrange)型の変位関数を有する9節点アイソパラメトリック系積層シェル要素を適用した。シェル面の要素分割においては $8\times 8$ 分割とした。更に、板厚方向に対するモデル化はコンクリートを10層に分割し、2層を鉄筋層として付加した。材料非線形解析において、ひび割れ発生後の引張剛性を考慮した。この引張剛性はコンクリート終局引張強度 $F_t$ の6割(RC造)、または8割(CS造)の応力度を $\nu=0$ から0.002の範囲内で比例させて計算を行った。コンクリートの終局圧縮歪は0.003とし、この値を超える場合には圧壊と判定した。なお、鉄筋の非線形挙動は、応力-歪関係にバイリニア(Bilinear)型を採用した。また、炭素繊維シートは文献と同様に<sup>1)</sup>、XとY方向で剛性が分

離する線材補強としてモデル化を行った。なお、損傷部周辺の要素分割は Fig.1(c)に示した通りである。

### 3.2 計算の概要

本解析において、載荷実験から得られた板厚および材料諸元を反映させた2種類(個別・平均)の実験対応数値解を設定し、計算を行った。即ち、実測シェル板厚を個別に反映させた個別板厚数値解(Discrete)、および実測シェル板厚の平均値を用いた平均板厚数値解(Average)である。さらに、実験の耐力を比較するために、基準数値解(Standard)を設定し、設計板厚(8mm)および材料定数( $E=20\text{GPa}$ ,  $F_c=60\text{MPa}$ ,  $F_t=3\text{MPa}$ ,  $\nu=0.2$ )を統一して計算を行った。また、平均板厚数値解および基準数値解における解析モデルはシェル面に対して1/2対称を考慮して解析を行った。

## 4. 結果および考察

### 4.1 板厚一定の基準数値解の耐力

#### (a) 基準数値解に基づく実験値の耐力補正

無損傷のRDnnの実験値および基準数値解において、それぞれ3.57kNおよび3.04kNの終局耐力を得た。載荷実験の終局耐力は、シェルの板厚変動により大きな影響を受ける為、基準数値解の耐力と比較し実験値との整合性を検討する。文献(1)の両面型枠と比較して本研究では両面型枠の剛性を増す改良を加え、施工板厚の標準偏差は、文献(1)の1.09から1.26に対し、本研究の0.59から0.93の範囲が示され、板厚による初期不整が大幅に改善されている。しかし、板厚不整量がシェル耐力に及ぼす影響をより精密に検証する為、耐力補正を行い、その結果をTable 2に示した。ここで、RDnnの耐力に対する他の供試体モデルの耐力比を、実験値に対して $E_0$ 、基準数値解に対して $S_0$ で示す。RDnnの板厚に対する他の供試体モデルの板厚比を、シェル全面に対して $T_G$ 、シェル限定領域に対して $T_L$ で示す。次に、上記の $S_0$ に対する $E_0$ の比率を耐力整合比 $E_1$ で示す。上記の板厚比による実験耐力比の線形・2次・3次補正を求め、 $S_0$ との各整合比を、シェル全面の平均板厚(全面板厚)に関して $E_{G1}$ ,  $E_{G2}$ ,  $E_{G3}$ 、限定領域の平均板厚(限定板厚)に関して $E_{L1}$ ,  $E_{L2}$ ,  $E_{L3}$ としてそれぞれ示した。以上をまとめて、次式より、各整合比を求めた。

$$E_1 = E_0/S_0,$$

$$E_{G1} = E_1/T_G, E_{G2} = E_1/T_G^2, E_{G3} = E_1/T_G^3,$$

$$E_{L1} = E_1/T_L, E_{L2} = E_1/T_L^2, E_{L3} = E_1/T_L^3, \dots (1a-g)$$

同表より、平均値および標準偏差を考慮すると $E_{G2}$ が最良を示した。これは、伸び剛性(板厚に線形)と曲げ剛性(板厚の3乗に比例)の中間値(板厚の2乗に比例)の補正である。既往の研究では<sup>1)</sup>、限定板厚の $E_{L2}$ が1.00に近い値を示していたが、本研究においては全面板厚の $E_{G2}$ が1.00に近い値を示す結果となった。上記の結果における相異点として、全面板厚と限定板厚を比べると、既往の研究では全面板厚に対し限定板厚の方が薄いのに対し<sup>1)</sup>、本研究では限定板厚に対し全面板厚の方が薄い。即ち、板厚の薄い方を用いて補正を行った場合に、耐力における良い整合性が導かれるものと考えられる。従って、終局耐力の板厚補正において、供試体の板厚変動と共に、板厚の薄い領域が耐力に大きな影響を及ぼすことを示した。以上より、基準数値解の正当性が裏付けられたものと考えられる。

#### (b) 基準数値解における損傷と修復が耐力へ及ぼす影響

$E_{G2}$ における板厚補正の整合性が示されたことを踏まえ、基準数値解において前損傷が終局耐力に及ぼす影響と、前損傷にS法およびR法による修復を施した場合の終局耐力の改善効果について検討した。シェル長さの1/8前損傷タイプでは前損傷の幅の違いによる耐力の大きな差異は認められない。一方、シェル長さの2/8前損傷タイプでは、損傷の無いRDnnと比較して、RDbbの19%減に対しRDbaで39%減の耐力低減が示された。これより、前損傷の幅の相違が耐力に及ぼす影響を確認した。次に、R法による修復タイプで比較すると、シェル長さの1/8前損傷タイプに修復を施したRRaaおよびRRabでは、前損傷時より耐力の改善効果が見られ、前損傷の無いRDnnとほぼ同じ耐力を示した。シェル長さの2/8前損傷タイプの修復を施したタイプでは、RDnnに対しRRbaで13%減およびRRbbで8%減まで耐力の改善が示され、上記のシェル長さの1/8前損傷タイプと同様に改善効果が確認された。特に修復前のRDbaと比較して、無損傷のRDnnに対し、RRbaは、26%の改善効果が示され、修復効率の高い結果を得た。シート補強の効果については、RDnnに炭素繊維シート補強を施したRSnnで50%増の耐力を示した。次に、S法による修復タイプにおいては、RDnnに対しRSabで50%増、その他のタイプにおいても約40%増の耐力を示し、S法による修復を施すことで、前損傷を受ける以前よりも終局耐力が改善する結果を得た。

### 4.2 施工板厚を考慮した数値解による耐力

載荷実験から得た耐力( $P_{EXP}$ )を数値解析の耐力( $P_{NUM}$ )と比較する為、耐力差( $P_{DIF}=P_{EXP}-P_{NUM}$ )と実験耐力の比を耐力誤差比

Table 2 Strength Ratio Adjusted by Shell Thickness.

Strength Ratio	$E_0$	$S_0$	$T_G$	$T_L$	$E_1$	$E_{G1}$	$E_{L1}$	$E_{G2}$	$E_{L2}$	$E_{G3}$	$E_{L3}$
RDaa / RDnn	0.97	0.94	0.96	0.91	1.03	1.07	1.13	1.11	1.25	1.15	1.37
RDab / RDnn	0.95	0.95	0.98	0.94	1.00	1.02	1.06	1.04	1.13	1.06	1.20
RDba / RDnn	0.70	0.61	0.99	0.97	1.14	1.16	1.18	1.18	1.22	1.19	1.26
RDbb / RDnn	0.80	0.81	0.96	0.89	1.00	1.04	1.12	1.08	1.26	1.12	1.41
RRaa / RDnn	1.05	0.97	1.07	0.96	1.08	1.01	1.13	0.94	1.17	0.88	1.22
RRab / RDnn	1.05	0.98	1.09	1.05	1.07	0.98	1.02	0.90	0.97	0.83	0.93
RRba / RDnn	1.01	0.87	1.04	1.01	1.16	1.12	1.15	1.08	1.14	1.04	1.14
RRbb / RDnn	1.01	0.92	1.06	0.95	1.09	1.03	1.15	0.97	1.20	0.91	1.26
RSnn / RDnn	1.52	1.50	1.09	1.07	1.01	0.93	0.95	0.86	0.89	0.79	0.83
RSaa / RDnn	1.43	1.42	1.01	0.99	1.01	1.00	1.02	0.99	1.03	0.98	1.05
RSab / RDnn	1.48	1.50	1.06	0.96	0.99	0.93	1.03	0.87	1.07	0.82	1.12
RSba / RDnn	1.30	1.39	0.96	0.91	0.94	0.98	1.03	1.02	1.12	1.06	1.23
RSbb / RDnn	1.42	1.44	1.03	0.99	0.98	0.96	1.00	0.93	1.01	0.90	1.02
Average	-	-	-	-	1.04	1.02	1.07	1.00	1.12	0.98	1.16
STDEV	-	-	-	-	0.07	0.07	0.07	0.10	0.11	0.13	0.17

( $R_{ERR} = P_{DIF} / P_{EXP}$ )と定義し、供試体別に Fig.2 に示した。同図の括弧内の数値は RDnn の実験値に対する各実験値の耐力比を示す。に同図に示したシート補強の無い RD および RR においては、板厚変動を考慮した個別板厚数値解(Discrete)が実験値と良く対応している。一方、シート補強タイプ RS においては、平均板厚数値解(Average)が実験値と良く対応している。この結果より、シート補強を施すことにより施工した際の初期不整による板厚変動を抑制する効果が期待されるものと考えられる。実験値と数値解析の耐力誤差比は最大で 5.0%減(RDaa)から 7.9%増(RSnn)を示し、既往の研究結果と比較して精度の向上が見られ<sup>1)</sup>、前損傷および修復におけるモデル化並びに解析結果において良好な整合性が得られたものと考えられる。

4.3 荷重変位曲線

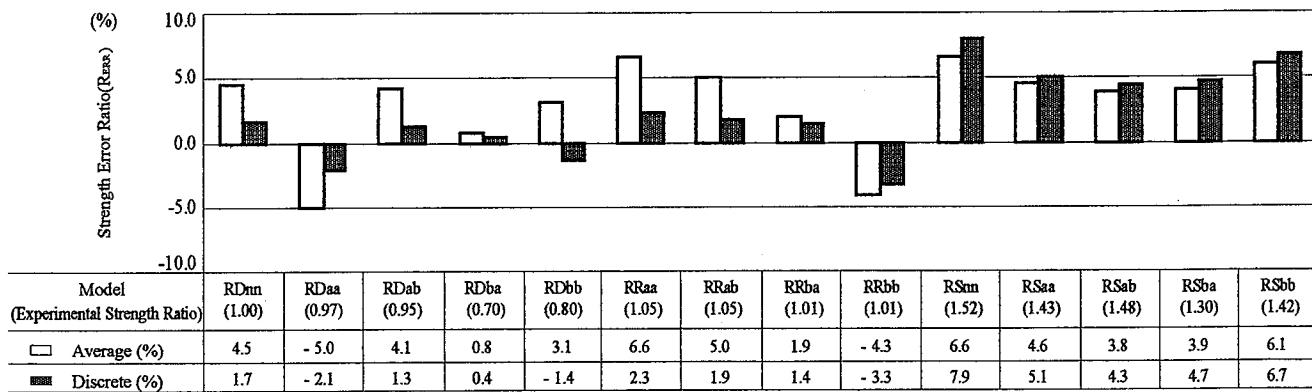
実験値における荷重変位曲線を平均板厚数値解および個別板厚数値解の結果と共に Fig.3 に示した。同図は、載荷荷重と載荷点直下の鉛直方向変位の関係を示している。無損傷の RDnn、前損傷 RDba および RDbb 並びに R 法による修復の RRbb を同図(a-d) にそれぞれ示した。更に、無損傷の CS 造である RSnn および S 法による修復の RSbb を同図(e, f) に示した。以上の図において、前損傷と修復の長さは長い方のタイプを示している。最初に、実験値について考察する。RC 造において、前損傷のある同図(b)と(c)は無損傷の同図(a)と比較して、耐力が減少し修復タイプの同図(d)で回復していることが確認できる。しかし、剛性の変動は顕著ではない。CS 造では、耐力および剛性が急激に増大している様子が確認できる。更に、初期剛性は高く、終

局までほぼ直線的に耐力が増大し、弾性範囲が RC 造と比べて広いことが特徴的である。次に、実験値と数値解を比較すると、シート補強のない RC 造は個別および平均の各板厚数値解と比較的良好に対応している。シート補強のある CS 造では平均板厚数値解と良好な対応が確認できる。

4.4 ひび割れ形態

実験における後損傷のひび割れ図を上面と下面に分けて板厚の変動分布と共に Fig.4 に示した。前損傷において、損傷幅の狭い RDaa および RDba は、損傷幅の広い RDab および RDbb と比較してシェル上面の裾部における母線方向のひび割れが抑制されている。続いて、RC 造の R 法による修復において、修復幅の広い RRab と RRbb のひび割れ形態は、修復幅の狭い RRaa と RRba との比較において、相互により類似しており、しかも、無損傷の RDnn とも類似している。これより、修復幅が広い場合に修復効果が高い可能性が示されている。次に、RC 造に対する S 法の修復において、全てのタイプ RSaa, RSab, RSba および RSbb は、無損傷の RSnn と比較して、上面のひび割れ発生が顕著であるが、修復長さおよび幅の規模による影響は不明確である。従って、シート補強を行った場合、損傷規模による影響が緩和されるものと考えられる。板厚変動に関しては RRab, RSbb, 等に示されている通り、修復部の板厚が多少厚肉であることが示された。しかし、文献 1 と比較しても、かなり均一な板厚が確保されているものと考えられる。

5. 結論



Note) Strength Error Ratio to RDnn Described in Parenthesis

Fig.2 Strength Error Ratio to Experimental Strength.

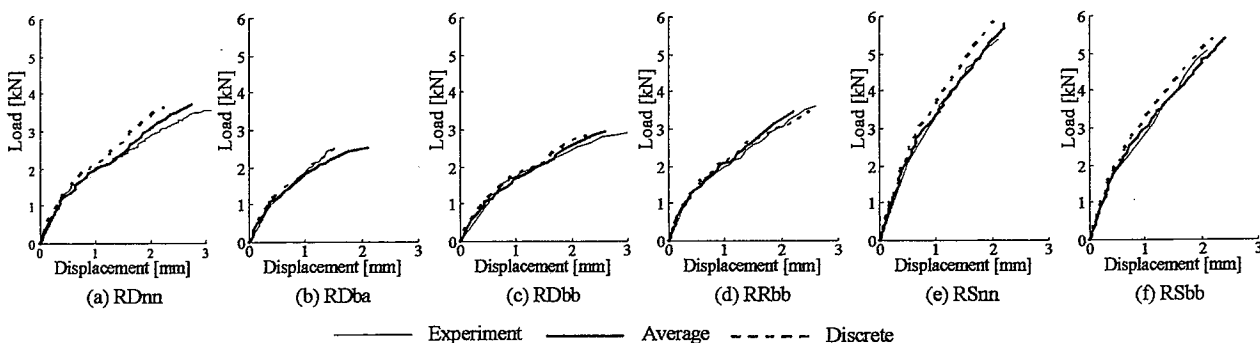


Fig.3 Load vs. Displacement Curve.

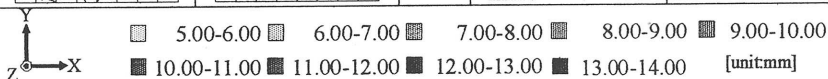
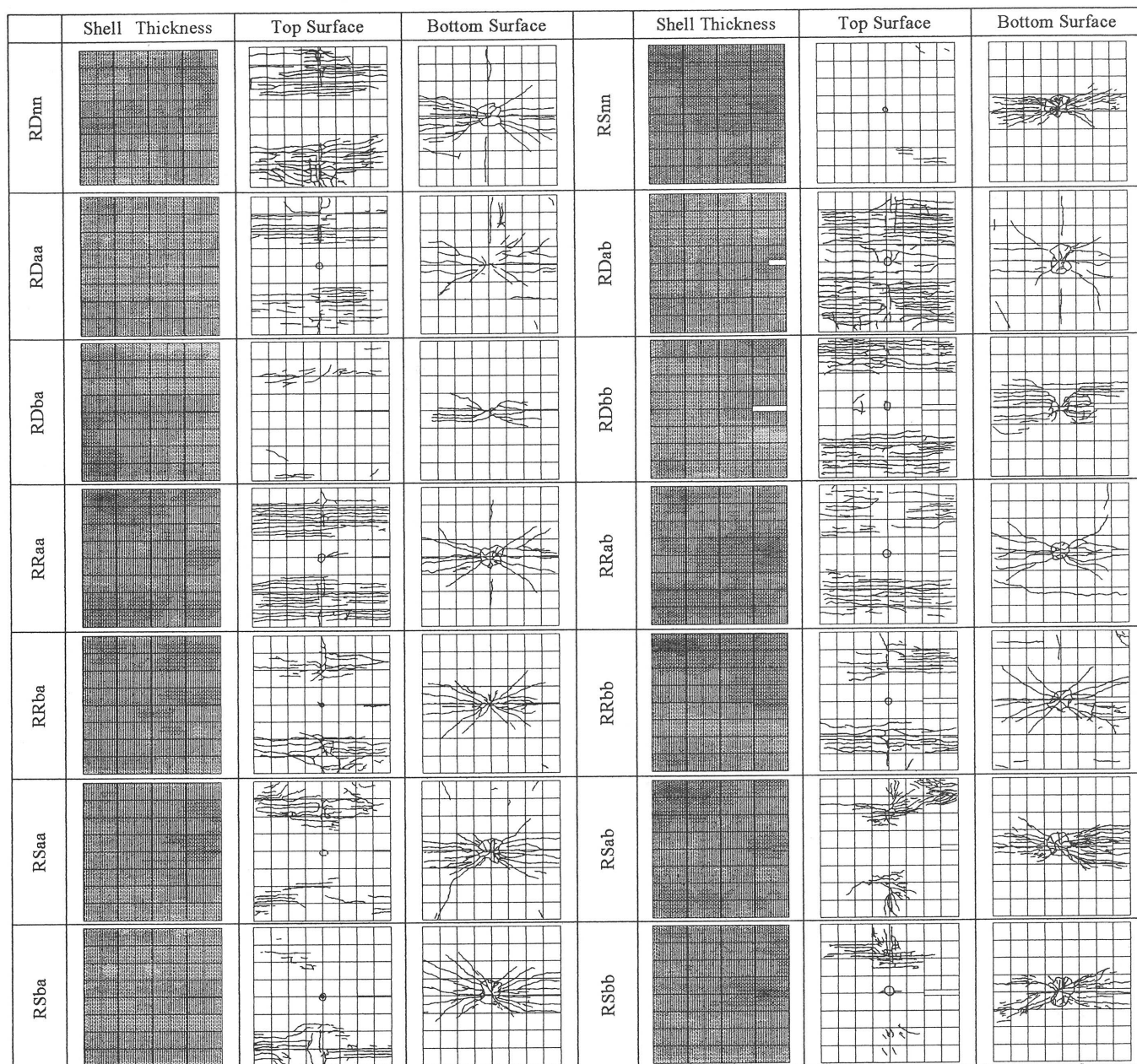


Fig.4 Postdamaged Pattern at Ultimate Strength.

前損傷および修復の在る炭素繊維シート補強による鉄筋コンクリート造屋根型円筒殻の耐力および後損傷形態を検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 板厚および材料定数を一定値に設定した基準数値解と実験の耐力との整合性を確認した。これより、載荷点近傍の限定板厚より全面板厚の肉厚が薄いことを考慮し、今回の実験に関しては、全面板厚の二乗補正が有効であることを示した。
- 2) シェル耐力に関して、実験値と数値解の比較より、RC造の前損傷およびR法による修復タイプに関して、全ての個別板厚数値解は実験値と良い対応を示した。S法による修復タイプに関しては、CS造において全ての平均板厚数値解は実験値と良い対応を示し、シート補強による板厚変動の抑制効果が示された。
- 3) 実験における載荷点直下の荷重変位曲線は平均板厚数値解および個別板厚数値解と比較的良好な対応を示した。前損傷を有

するシェルにシート補強に基づくS法による修復を行った場合、CS造はRC造における剛性および耐力を著しく高めることが確認された。

参考文献

- 1) 川崎健二郎, 真下和彦: 集中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耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第592号2005年6月, pp105-112,
- 2) 真下和彦, 川崎健二郎, 篠原貴幸, 入江聡: 炭素繊維シート補強による鉄筋コンクリート造シェル耐力, 東海大学紀要工学部, Vol.46, No.1, 2006, pp23-2
- 3) 川崎健二郎, 真下和彦: 複合炭素繊維補強コンクリート造円筒殻の耐力, 破壊形態および振動特性 - 集中荷重による破壊実験に対する検討 -, 日本建築学会構造系論文集, 第609号, 2006.11, pp.113-12