

# 静的点荷重を受ける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終局耐力

真下和彦\*1, 前川このみ\*2, 杉浦直樹\*2

## Ultimate Strength of Reinforced Concrete Cylindrical Shells, Reinforced with Carbon Fiber Sheets under Static Point Load

by

Kazuhiko MASHITA, Konomi MAEKAWA and Naoki SUGIURA

(Received on Feb.26, 2003 & accepted on July 16, 2003)

### Abstract

The main purpose of this paper is to investigate, both experimentally and theoretically, the strength of reinforced concrete roof-type circular cylindrical shells with carbon fiber sheets under static load. Carbon fiber sheet reinforcement could be expected not only to improve the strength and mechanical behaviors, but also to retrofit with easy operations. In this study, the effects of the attached area and direction of carbon fiber sheet reinforcement on shell strength were investigated. The shell was subjected to static point load at the center of the shell surface and supported by hinges at four corners.

An experimental study was conducted on reinforced concrete shells with carbon fiber sheets on their bottom surface. Point load was applied perpendicularly on the shell surface to the final failure state. A theoretical study was conducted using material and geometrical nonlinear finite element analyses. The concrete shell strength was significantly influenced by the actual thickness variances of the designed thickness so that nonlinear numerical calculations including discrete shell thickness variances were carried out. The ultimate strength under point load was discussed based on the results of the failure experiments and nonlinear analyses.

**Keywords:** Concrete Shell, Ultimate Strength, Carbon Fiber Sheet

## 1. まえがき

本研究の主目的は、静的荷重を受ける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を実験的及び理論的に究明することである。実験的研究は小型実験供試体による破壊実験を行い、理論的研究は非線形有限要素法を適用して検証を行った。

炭素繊維シート補強は、既存の建築物に対する補修及び補強に効果的であることが、これまで報告されてきている<sup>1-5)</sup>。炭素繊維シートは、柱及び梁の耐震補強（せん断補強）として用いられてきている。曲面に対しては、トンネル表面の補修・補強に用いられているが、この場合は、コンクリートの引張補強、剥離防止として用いられている。シェル構造の強度特性への応用を検討した例はほとんど報告されていない。一方、シェル空間構造に於いて、コンクリート造は耐力に優れている為、内部空間を多目的ホールとして利用するばかりでなく、外部空間に盛土・植栽を施し、緑化して環境に優しい公園等の用途に供することが可能である。しかしその際には、均一分布荷重ばかりでなく、点・線・部分等の局部的荷重接触領域を対象とした不連続荷重に対する検討が、重要な問題として指摘されている。

実験研究を有限要素法解析にて検証する方法は、既往の研究で進められており<sup>6)</sup>、この方法を応用して本研究を進めた、即ち、シェル耐力評価に於ける施工板厚変動分布の影響を考慮し、板厚変動を反映させた個別板厚数値解析を行った。本研究では炭素繊維シート補強された鉄筋コンクリート(CFSRC)造及び点荷重載荷等の条件を設定し、従来の鉄筋コンクリート(RC)造の場合と対比させて、耐力の検討を行った。

以上より、破壊実験と非線形数値解析の各結果に基づき、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耐力及びひび割れ形態に及ぼす影響を検証し、補強効果を確認した。

## 2. 破壊実験概要

コンクリート造円筒殻を対象として、シェル面中央部に静的点荷重が作用した場合に於けるシェル耐力及びひび割れ形態を実験的に検討する為、RC造1体及びCFSRC造4体で合計5体の小型実験供試体を作製し、破壊実験を行った。尚、Fig.1に本破壊実験で用いた破壊実験載荷装置及び支持方法の図を示す。実験供試体寸法は水平投影面に於いて1120mm(L1)×1120mm(L3)の正方形とし、ライズ・スパン比を1/5(L2/L1, L2:ライズ)とした。尚、これは曲率半径812mm及び全開角87.1°となる。シェル境界は、縁部材幅及びせいが40mmの縁アーチ及び縁梁により補剛した。各縁部材配筋は、主筋にD3の異形

\*1 東海大学工学部建築学科教授 工博

\*2 東海大学大学院工学研究科建築学専攻博士課程前期

鉄筋を使用し、あばら筋としてφ0.85mmの鉄線を20mm間隔とした。一方、シェル面内配筋はφ1.2mmの鉄線を20mm間隔で単配筋とした。炭素繊維シートはシェル裏面にエポキシ系樹脂(アラルダイトスタンダード)を塗布して貼り付けた。これらの炭素繊維シート補強範囲については、Fig.2に示す5種類を設定した。荷重載荷は油圧式のロードセルを用いて、接地面積1963.5mm<sup>2</sup>(直径50mm)の鉛直方向集中荷重とし、シェル面中央部に破壊に至るまで載荷を行った。尚、荷重の伝達は厚さ5mmのゴム板を介して行った。シェルの支持条件は隅角部4点ピン支持とした。また、Table 1には各実験供試体及び数値解析モデ

ル名の文字構成、コンクリートの材料諸元並びに施工シェル板厚の平均値及び標準偏差を示した。供試体名はシェル面に於ける炭素繊維シートの割合による2文字で構成され、1文字目はX方向、2文字目はY方向の割合を示した。尚、丸括弧内に示す値は施工シェル板厚の平均値11.0mm(=T<sub>0</sub>)との比率で示したものである。同表に於けるシェル板厚は、シェル面上の289点での実測結果より計算したものである。Table 2, Table 3には鉄筋及び炭素繊維シートの材料諸元をそれぞれ示した。

### 3. 数値解析概要

#### 3.1 非線形有限要素解析

本研究に於いて、円筒殻の耐力及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及びひび割れを考慮した材料及び形状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於いては8×8分割とし、縁部材に於いてはそれぞれシェル面との分割と一致させて計算を行った。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。材料非線形解析に於いて、ひび割れ発生後の引張剛性を考慮した。引張剛性はコンクリート終局引張強度F<sub>t</sub>の6割(RC造)、または8割(CFSRC造)の応力度を歪に反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。尚、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。

炭素繊維シート補強に関して、2種類のモデル化を検討した。Fig.3には、HHに於ける破壊実験ひび割れ図、2種の数値モデル化のひび割れ図を示した。ひとつは、XとY方向で剛性が分離する線材補強としてのモデル化を行い(Model 1)、他のひとつは、2次元応力状態を仮定し、平板補強としてのモデル化を行った(Model 2)。これらをひび割れ形態に於いて比較検討した

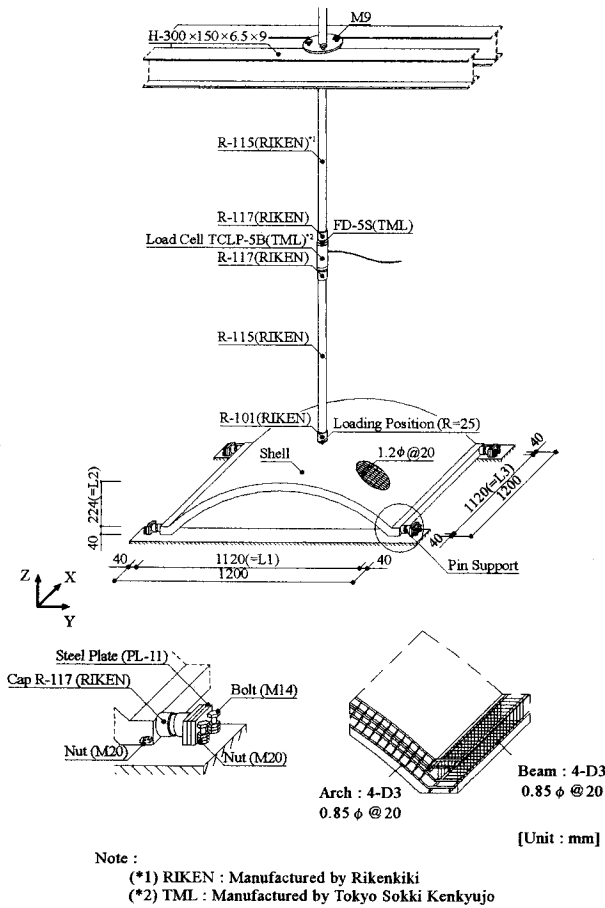


Fig.1 Shell Model

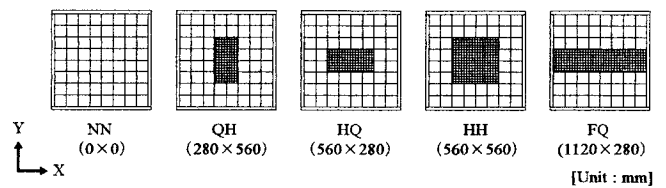


Fig.2 Reinforced Region with Carbon Fiber Sheets

Table 1 Shell Model

Model	Label = [ 1 ] · [ 2 ]		Material Properties of Concrete				Measurement of Shell Thickness [mm] and Ratio to Average Thickness T <sub>0</sub> in Parentheses		
	[ 1 ]	[ 2 ]	Young's Modulus : E [GPa]	Ultimate Compressive Strength : F <sub>c</sub> [MPa]	Ultimate Tensile Strength : F <sub>t</sub> [MPa]	Poisson's Ratio : ν	Average	Standard Deviation	Reduced
	Sheet Size of X Direction	Sheet Size of Y Direction							
NN			26.1	58.5	3.62	0.195	12.0 (1.09)	2.15 (0.20)	9.86 (0.90)
QH			23.0	53.1	3.55	0.211	11.2 (1.02)	1.80 (0.16)	9.40 (0.85)
HQ			26.2	64.0	2.72	0.209	10.4 (0.95)	1.49 (0.14)	8.93 (0.81)
HH			27.1	56.2	3.43	0.233	10.6 (0.96)	1.51 (0.14)	9.10 (0.83)
FQ			20.4	55.0	3.29	0.211	10.8 (0.98)	1.59 (0.14)	9.18 (0.83)
Average			24.5	57.4	3.32	0.212	11.0 (= T <sub>0</sub> )	1.71 (0.16)	9.29 (0.84)

Table 2 Material Properties of Steel

Steel Bar Diameter	Young's Modulus	Yield Strength	Ultimate Tensile Strength
[mm]	[GPa]	[MPa]	[MPa]
0.85	186	162	250
1.20	235	364	468
D3	198	334	487

Table 3 Material Properties of Carbon Fiber Sheets

Type	Texture	Fiber Diameter	Tensile Strength	Modulus of Tensile Elasticity	Elongation	Density	Specific Gravity	Weight
		[μm]	[GPa]	[GPa]	[%]	[N/mm <sup>3</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]
TR3110MS	Plain Fabric	17.0	1.12	71.6	1.50	1.03 × 10 <sup>-5</sup>	1.90	1.96 × 10 <sup>-6</sup>

結果, Fig.3 に示したように後者に於いて破壊実験に相対的に近い状態が得られた為, これを採用した. 尚, Model 1 と Model 2 の計算に於いて, HH の破壊実験に於ける平均板厚及び材料諸元を用いた.

3.2 計算概要

本解析に於いて, 前述の破壊実験から得られた板厚及び材料諸元を反映させた 3 種類(個別・平均・低減)の実験対応数値解析に基準数値解析を加えた合計 4 種類を設定し, 計算を行った. これらは, 実測シェル板厚を個別に反映させた個別板厚数値解析モデル(Discrete Model), 実測シェル板厚の平均値を用いた平均板厚数値解析モデル(Average Model), 平均シェル板厚から実測シェル板厚の標準偏差を差し引いた値を用いた低減板厚数値解析モデル(Reduced Model), 並びに板厚及び材料諸元として 5 体の実験供試体の平均値(シェル板厚 11.0mm, ヤング係数 24.5GPa, 終局圧縮強度 57.4MPa, 終局引張強度 3.32MPa, ポアソン比 0.212)を用いた基準数値解析モデル(Standard Model)である. 尚, 均一板厚数値解析モデルは平均板厚数値解析モデル, 低減板厚数値解析モデル及び基準数値解析モデルである.

4. 結果及び考察

4.1 ひび割れ形態

まず, 基準数値解析に於ける同一荷重時のひび割れ形態を比較する. Fig.4 には 3.82kN 荷重時のひび割れ形態を示した. 3.82kN は NN に於ける終局耐力である. RC 造と CFSRC 造による比較を行うと, NN に於いてシェル面全体にひび割れが確認できるのに対し, QH, HQ, HH 及び FQ に於いては, 荷重部から縁アーチ方向及び隅角部へのひび割れ進展の減少が認められた. また, 終局耐力に大きな差が確認されない. 従って, ある荷重までは炭素繊維シート補強によりひび割れ発生が抑制されるが, その後はシート補強による終局耐力の増大は比較的小さいと予測される.

次に, Fig.5 に破壊実験及び各数値解析より得られた終局荷重時のひび割れ形態を示す. 同図には, 実験供試体毎の破壊実験並びに個別板厚数値解析, 平均板厚数値解析及び低減板厚数値解析に於けるシェル表面と裏面のひび割れ形態を, 施工シェル板厚変動分布図と共に示した. なお, 同図に, 荷重点鉛直変位 5mm 時の, 荷重荷重を [ ] 内に記載した. 同図より, 破壊実

験のひび割れ状況は, シェル表面に於いて, RC 造である NN は荷重点付近からシェル全面へと広い範囲に放射状に伸びるひび割れ発生が確認できる. これは, コンクリートのひび割れ発生から引張抵抗力が補強材に集中する為, 即ち鉄筋を通して広範囲に応力が伝達する為と思われる. これに対し CFSRC 造である QH, HQ, HH 及び FQ はシート補強範囲のひび割れ発生抑制が確認できる. しかし, 個別数値解析, 平均板厚数値解析及び低減板厚数値解析に於いて, 炭素繊維シート補強範囲の相違による影響は, 実験ほど顕著には認められない. これは, 構成材料の材料定数の相違及び板厚変動の影響の方が比較的大きく, 炭素繊維シート補強の影響が微小となった事に起因するものと考えられる. また NN に於いては, 他の供試体に比べ施工シェル板厚変動が比較的大きく, 平均板厚が大きい為, 他の供試体よりも耐力増が得られたものと考えられる. 尚, 破壊実験に於いて炭素繊維シートの剥離による破壊は認められなかった. シートの剥離による破壊は認められなかった. シートの剥離による破壊は認められなかった. また, 同図に記載した荷重点鉛直変位 5mm は, 何れのモデルにおいても終局荷重に近い変形領域に入った状態であるが, 破壊実験値と数値解析値は, 多少変動が認められ, 数値モデルの検討を含め今後の課題とした.

4.2 終局耐力

破壊実験の終局耐力を 3 種の実験対応数値解析結果と比較する為, 終局耐力の誤差を Fig.6 に示した. 同図に於いて, 各数値解析の終局耐力  $P_{num}$  から破壊実験の終局耐力  $P_{exp}$  を差し引いた値  $P_{dif} (= P_{num} - P_{exp})$  と実験終局耐力  $P_{exp}$  との比  $P_{err} (= P_{dif} / P_{exp})$  を終局耐力誤差比と定義する. これより終局耐力誤差比は, 個別板厚数値解析モデルで 5.7%減~37.1%減で, 平均 18.1%減, 標準偏差 13.6%が示された. 次に同比は, 平均板厚数値解析モデ

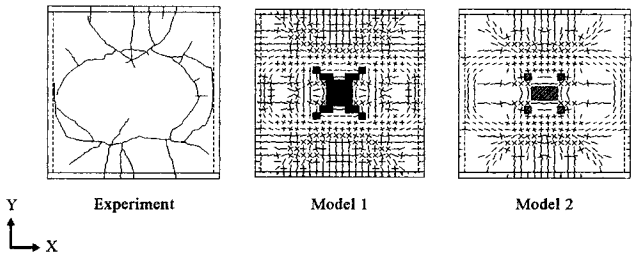


Fig.3 Cracking Pattern (Top Surface of HH)

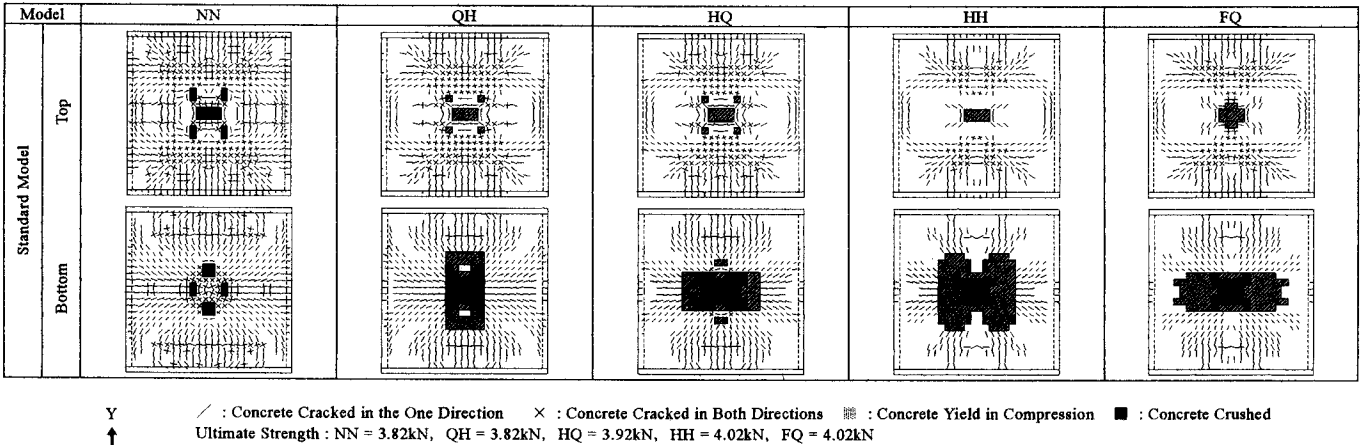
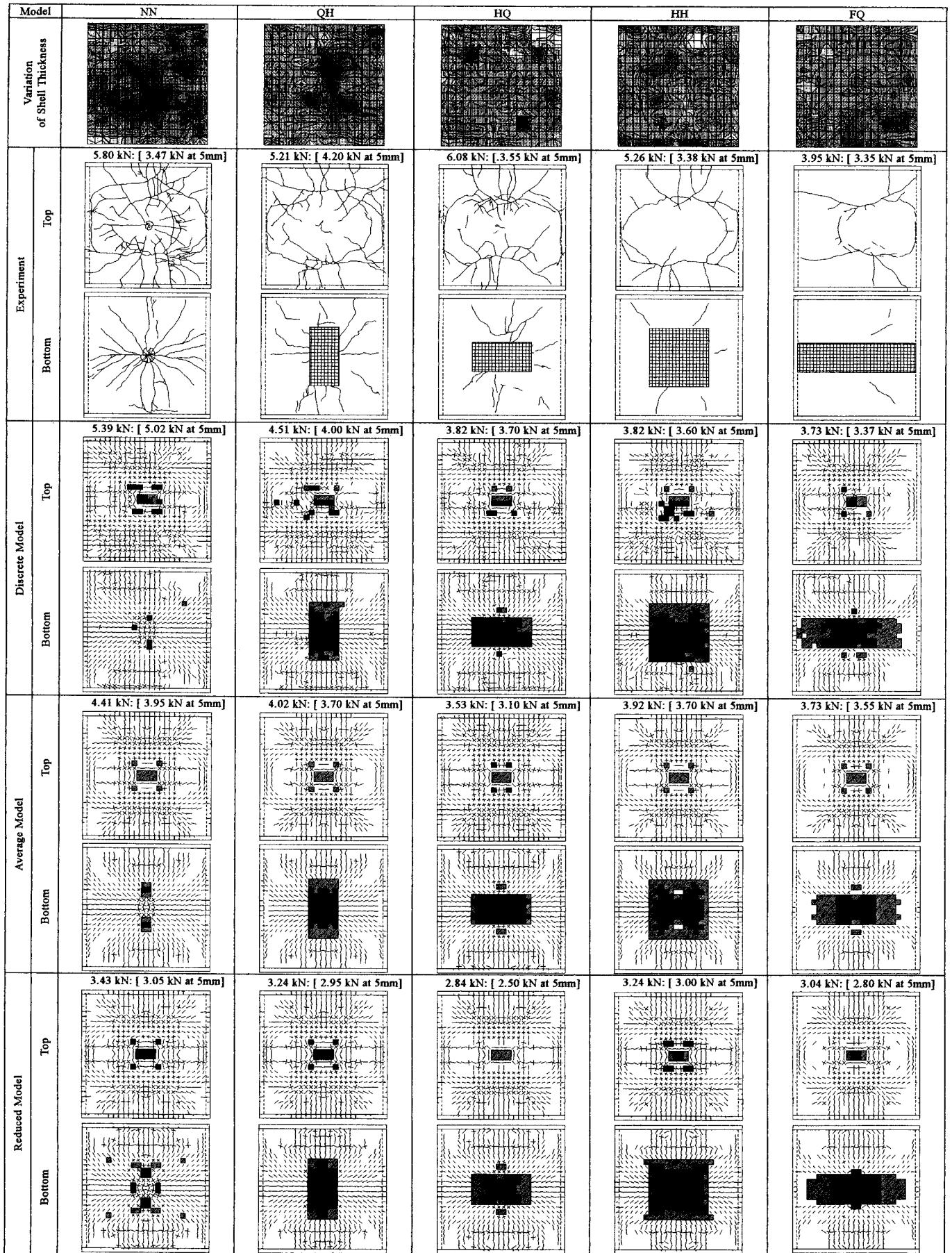


Fig.4 Cracking Pattern of Standard Model at 3.82kN (=NN Ultimate Strength)



□ 7.00-8.00 □ 8.00-9.00 □ 9.00-10.00 □ 10.00-11.00 □ 11.00-12.00 □ 12.00-13.00 □ 13.00-14.00 □ 14.00-15.00 □ 15.00- [Unit : mm]  
 / : Concrete Cracked in the One Direction    × : Concrete Cracked in Both Directions    ■ : Concrete Yield in Compression    ■ : Concrete Crushed

Fig.5 Cracking Pattern at Ultimate Strength

ルで 15.4%増~10.0%減で、平均 0.2%増、標準偏差 10.3%、低減板厚数値解析モデルで 15.4%減~36.4%減で、平均 24.8%減、標準偏差 8.3%が示された。従って、既往の研究<sup>9)</sup>とは異なり、板厚変動を忠実に反映させた個別板厚数値解析モデルよりも平均板厚数値解析モデルに於いて、平均及び標準偏差ともに耐力誤差比が小さく、これはシート補強により板厚剛性の平均化が図られていると考えられる。更に、平均板厚、個別板厚及び低減板厚数値解析で、全てのモデルに於いて実験値の終局耐力が計算値の場合より大きく、安全側の評価がなされた。

次に、破壊実験の終局耐力から炭素繊維シート補強効果が明確には確認されない為、施工板厚及び材料諸元の変動を考慮し、耐力の検証を行った。破壊実験より得られた各供試体の比較及び耐力補正結果を Table 4 に示す。既往の研究<sup>7)</sup>から板厚の 2 乗に比例させた耐力補正が最も有効であることを確認した為、板厚線形耐力補正に加え、2~3 乗の板厚耐力補正及びコンクリートの終局引張強度による補正を行った。以下に耐力補正の過程を示す。最初に、破壊実験に於ける NN の終局耐力に対する各終局耐力の耐力比 E0 は、QH/NN = 0.90, HQ/NN = 1.05, HH/NN = 0.91, FQ/NN = 0.68 を得る。従って、単純に比較を行うと、QH で 10%減、HQ で 5%増、HH で 9%減、FQ で 32%減が示された。ここで施工板厚の平均値は Table 1 に示した通りであり、上記と同様な比較で板厚比 T0 は、0.93, 0.87, 0.88 及び 0.90 を得る。これを用いて板厚による補正を行うと、耐力比 E1(E0/T0) は 0.96, 1.21, 1.03 及び 0.76 となる。更に、コンクリートの終局引張強度  $F_t$  による補正を行うと、 $E1_{TF}(E1/F_t)$  を得る。ここで、基準数値解析の耐力比 S0 に対する補正実験耐力比を耐力整合比と定義する。各  $F_t$  による補正耐力整合比( $E1_{TF}/S0$ )を比較すると、0.80~1.56 の変動が示された。この値は、線形板厚補正による値 E1/S0 の範囲 0.72~1.18 と比較して改善が示されていない。この為、 $F_t$  による耐力補正の検討は対象外とした。続いて、板厚の 2 乗比  $T0^2$  による補正を行うと、 $E2(E0/T0^2)$  を得る。同様に、板厚の 3 乗比  $T0^3$  による補正を行うと、 $E3(E0/T0^3)$  を得る。これより耐力整合比は、板厚線形補正に於いて平均 0.96、標準偏差 0.19( $E1/S0$ )、板厚 2 乗比による補正に於いて平均 1.08、標準偏差 0.23( $E2/S0$ )、板厚 3 乗比による補正に於いて平均 1.21、標準偏差 0.28( $E3/S0$ )となる。以上より、補正なし耐力比( $E0/S0$ )の平均 0.86 及び標準偏差 0.16 に対し、板厚線形及び 2 乗比による補正に良好な終局耐力比が示された。これは、面内剛性が板の曲げ剛性より卓越している為、シェル本来の面内剛性が支配的となることで線形補正が有効となり、面内剛性を反映した線形補正と曲げ剛性を反映した 3 乗補正の中間値として 2 乗補正が有効となったものと考えられる。

5. まとめ

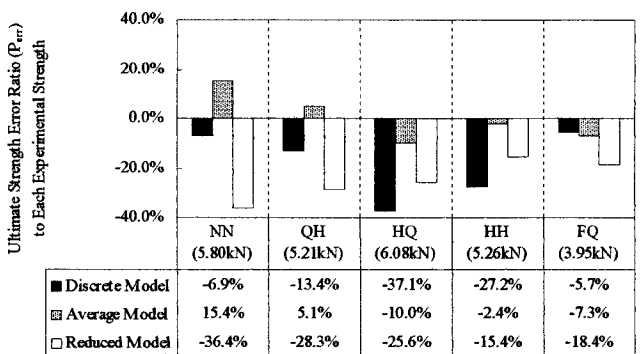
本研究では、静的荷重が作用した場合に於いて、鉄筋コンク

リート造と炭素繊維シート補強による鉄筋コンクリート造による比較を行い、炭素繊維シート補強範囲の相違が終局耐力及びひび割れ形態に及ぼす影響を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 終局耐力誤差比(破壊実験の終局耐力に対する各数値解析の終局耐力から破壊実験の終局耐力を差し引いた値の比)は、平均板厚数値解析に於いて最も小さい値が示された。
- (2) 板厚の線形及び 2 乗比に於いて良好な耐力補正効果が認められた。また同補正を適用した耐力比により、炭素繊維シートによる補強効果を確認した。
- (3) ひび割れ形態に於いて、炭素繊維シート補強によるひび割れ発生範囲の軽減が確認された。特に、破壊実験のひび割れ形態及び材料と板厚を一定値に設定した基準数値解析結果に於いて、この影響が顕著に示された。

参考文献

- 1) 白都滋, 塩原等, 楠原文雄, 法量良二: 炭素繊維シートにより耐震補強された既存鉄筋コンクリート造腰壁付き短柱の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集 No.534, 2000年 pp.121-128.
- 2) 吉澤弘之, 呉智深: 炭素繊維シート補強による RC 引張部材のひび割れ特性に関する研究, 土木学会論文集 613 巻 V-42 号, 1999年 pp.249-262.
- 3) 林田則光, 嶋川喜与志, 堀江啓, 角一行, 田中義成: 炭素繊維シートによる既存 RC 部材の耐震補強に関する研究(その 1)RC 壁補強実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997年 pp.601-602.
- 4) 伊藤藤顕, 角一行, 松浦恒久, 杉田則光, 田中義成: 炭素繊維シートによる既存 RC 部材の耐震補強に関する研究(その 2)梁のせん断補強実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1997年 pp.603-604.
- 5) 木虎久人, 吉澤弘之, 島内洋年: 炭素繊維シートとコンクリートの定着挙動, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 5 部 50 巻, 1995年 pp.402-403.
- 6) 東 秀, 真下和彦, 前川このみ: 静的線荷重を受けるコンク



Note :  $P_{err} = \text{Error Ratio on Ultimate Strength} [ P_{err} = (P_{num} - P_{exp}) / P_{exp} ]$   
 $P_{num} = \text{Numerical Ultimate Strength (Discrete \cdot Average \cdot Reduced)}$   
 $P_{exp} = \text{Experimental Ultimate Strength Described in Each Parentheses}$

Fig.6 Error Ratio on Ultimate Strength

Table 4 Strength Ratio Adjusted by Shell Thickness and Concrete  $F_t$

Strength	E0	T0	E1	$F_t$	$E1_{TF}$	$T0^2$	E2	$T0^3$	E3	S0	E0/S0	E1/S0	$E1_{TF}/S0$	E2/S0	E3/S0
QH / NN	0.90	0.93	0.96	0.98	0.98	0.87	1.03	0.81	1.11	1.00	0.90	0.96	0.98	1.03	1.11
HQ / NN	1.05	0.87	1.21	0.75	1.60	0.75	1.39	0.65	1.61	1.03	1.02	1.18	1.56	1.36	1.57
HH / NN	0.91	0.88	1.03	0.95	1.08	0.78	1.16	0.69	1.31	1.05	0.86	0.98	1.03	1.10	1.25
FQ / NN	0.68	0.90	0.76	0.91	0.84	0.80	0.85	0.72	0.94	1.05	0.65	0.72	0.80	0.81	0.90
Average	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.86	0.96	1.09	1.08	1.21
STDEV	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.16	0.19	0.33	0.23	0.28

Note :

- E0 : Experimental Strength Ratio
- E1 : (=E0/T0) Experimental Strength Ratio Adjusted by T0
- $E1_{TF}$  : (=E1/ $F_t$ ) Experimental Strength Ratio Adjusted by T0 and  $F_t$
- E2 : (=E0/ $T0^2$ ) Experimental Strength Ratio Adjusted by  $T0^2$
- E3 : (=E0/ $T0^3$ ) Experimental Strength Ratio Adjusted by  $T0^3$
- S0 : Standard Strength Ratio
- T0 : Actual Shell Thickness Ratio
- $T0^2$  : T0 Squared
- $T0^3$  : T0 Cubed

リート造円筒殻の耐力における縁部材の影響(その 2)破壊形態,  
日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002 年 pp.709-710.  
7) 前川このみ, 真下和彦, 東 秀: 静的線荷重を受けるコンク  
リート造円筒殻の耐力における縁部材の影響(その 1)終局耐力,  
日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002 年 pp.707-708.

**謝辞**

実験資料作成にご協力頂きました三菱レイヨン株式会社 土  
井忍氏に深謝いたします。