

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耐力

須永耕平*¹・真下和彦*²・川崎健二郎*³

Strength of Concrete Cylindrical Shells Reinforced with Carbon Fiber Sheet under Point Load

by

Kohei SUNAGA *¹, Kazuhiko MASHITA *² and Kenjiro KAWASAKI *³

(Received on March 28, 2005, & accepted on May 20, 2005)

Abstract

The main purpose of this study is to investigate, both experimentally and theoretically, the strength of concrete cylindrical shells with carbon fiber sheet reinforcement under point load. We investigated how to influence the shell strength by studying the differences among shells with either their top, bottom or both surfaces reinforced with a carbon fiber sheet. An experimental study was conducted on concrete shells reinforced with carbon fiber sheets on either their top, bottom or both surfaces. A static point load was applied perpendicularly on the shell surface until the final fracture state was obtained. A theoretical study comprising material and geometrical nonlinear finite element analyses including consideration of tension cutoff and tension stiffening effects was conducted. The concrete shell strength should be significantly influenced by the uniformity of the actual thickness, so nonlinear numerical calculations including fluctuations of the actual shell thickness were carried out. The strength of the shell with carbon fiber sheet reinforcement was discussed on the basis of the results of the fracture experiments and nonlinear analyses

Keywords: Concrete Shell, Strength, Carbon Fiber Sheet

1. 序論

本研究の主目的は、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。実験的研究は小型供試体による破壊実験を行い、理論的研究は幾何学的非線形有限要素法を適用して検証を行った。これまで既往の研究より^{1,2)}、炭素繊維シート補強をシェル構造に部分的に適用した場合には、薄肉シェルの板厚変動による欠陥を補正し、各種外乱に対する構造的信頼性を高める効果が期待されることが示された。この為、本研究では、シェル全面に炭素繊維シート補強を適用した場合を新たに検討した。シェル全面シート補強としては、シェル裏面、シェル表面及びシェル両面の3種を対象とした。これに既往の研究で検討を行っていないシェル両面の部分補強及びシート無補強の場合を加えて、合計5種のモデルを対象として、シェル耐力と破壊形態に関する検証を行った。炭素繊維シート補強による鉄筋コンクリート造(R/C reinforced with carbon fiber sheet, ie. Carbon Fiber Sheet Reinforced Concrete)を便宜上、簡易的にCFSRC造と表記する。点荷重による載荷条件を設定し、鉄筋コンクリート(RC)造の場合と対比させて、円筒殻を対象とした耐力の検討を行った。

2. 数値解析の概要

2.1 非線形有限要素解析

- * 1 加藤組鉄工所 技師
- * 2 工学部建築学科 教授・工博
- * 3 工学研究科建築学専攻博士課程後期

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、双二次ラグランジュ(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8×8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。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(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。

また、炭素繊維シートは、文献と同様に¹⁾、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。

2.2 計算概要

本解析において、後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2種類(個別・平均)の実験対応数値解析に基準数値解析を加えた合計3種類を設定し、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析(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(Average Model)、並びに板厚及び材料諸元を統一した基準数値解析(Standard Model)である。尚、基準数値解析に用いた材料

定数は Table 1 に示すものとする。

また、均一板厚数値解析モデルである平均板厚及び基準数値解析における要素分割はシェル面に対して 1/4 対称を考慮して解析を行った。

3. 破壊実験の概要

炭素繊維シート補強による鉄筋コンクリート(CFSRC)造屋根形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おけるシェル耐力及び破壊形態を実験的に検討する為、総計 5 体 (RC 造 1 体, CFSRC 造 4 体) の小型実験供試体を作製し、破壊実験を行った。尚、Fig. 1 に本実験で用いた破壊実験荷重装置及び支持方法の図を示す。支持方法は水平スラストを拘束する為に隅各部 4 点ピン支持とした。実験供試体寸法は、

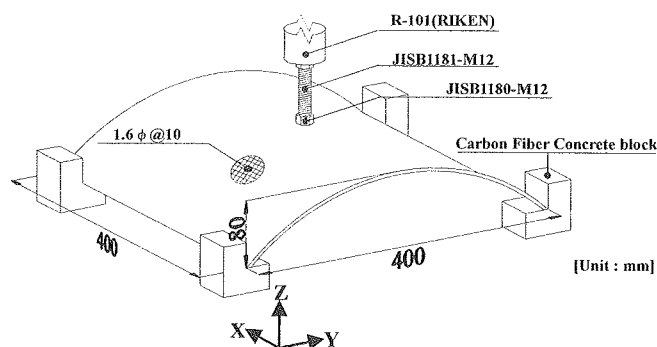


Fig. 1 Shell Model.

Model	CRN	CRA	CRB	CRT	CRL
Top					
Bottom					

□ None ■ Reinforced Surface

Fig. 2 Reinforced Region with Carbon Fiber Sheets.

Table 1 Concrete Properties at Standard Model.

Young's Modulus [GPa]	Ultimate Compressive Strength [MPa]	Ultimate Tensile Strength [MPa]	Poisson's Ratio	Shell Thickness [mm]
21.0	60.0	3.00	0.20	8.00

Table 2 Material Properties of Carbon Fiber Sheet.

Type	Fiber Diameter [μm]	Tensile Strength [GPa]	Modulus of Tensile Elasticity [GPa]	Elongation [%]	Density [N/mm ³]	Weight [N/mm ²]
TR3110MS	17.0	1.12	71.6	1.50	1.03×10^6	1.96×10^6

Table 4 Shell Model.

Model Name	First Capital	Second Capital	Third Capital	Material Properties of Concrete				Shell Thickness [mm]	
			Sheet 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
CRN	Cylindrical:C	Reinforced Concrete:R	None:N	23.7	53.3	3.26	0.23	11.10	1.83
CRA			AH:A					12.85	2.34
CRB			Bottom:B					11.15	1.63
CRT			Top:T					10.13	1.46
CRL			Local:L					10.22	1.96

投影面において 400mm(指導線方向)×400mm(母線方向)の正方形とし、ライズを 80 mm(Z 軸方向)、設計シェル板厚を 8mm、ライズスパン比は 1/5 とした。これは曲率半径 290mm、全開角 87.1 度となる。荷重荷重は島津油圧式万能試験機 RH-100t を用いてロードセルを介し、鉛直集中荷重によりシェル面中央部に破壊に至るまで荷重を行った。シェル面への集中荷重はボルト(JISB1180-M12)の先端にナット(JISB1181-M12)を嵌め込み荷重を行った。炭素繊維シート補強範囲については Fig. 2 に示す 5 種類を選定した。また、Table 2 及び Table 3 に炭素繊維シート及び鉄筋の材料定数を示し、Table 4 には実験供試体のモデル名の文字構成、コンクリートの材料定数、施工シェル板厚の平均値及び標準偏差を示した。同表におけるシェル板厚は、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。

尚、CFSRC 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 37% とした。RC シェル面内は φ1.6 の鉄線を 10mm 間隔で直交方向に単配筋した。炭素繊維シートはシェル表面又は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。

4. 結果及び考察

4.1 シェル耐力

破壊実験の終局耐力を個別板厚数値解析及び平均板厚数値解析と比較する為、数値解析終局耐力(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し Fig. 3 に示す。尚、終局耐力誤差比は次式となる。

$$R_{ERR} = P_{DIF} / P_{EXP} = (P_{NUM} - P_{EXP}) / P_{EXP} \quad (1)$$

これより、CRT を除き、シート補強を施したモデル(CRA, CRB 及び CRL)においては個別板厚数値解析に比べ平均板厚数値解析の方が耐力誤差は低いのに対し、シート補強を施していないモデル(CRN)においては平均板厚数値解析に比べ個別板厚数値解析の方が耐力誤差は少ないことが同図に示されている。

これは、シート補強を施すことにより板厚のばらつきが均一化され、それにより応力の伝達が均等に行き渡ることによるものと考えられる。従って、CRT を除くシート補強を施したモデル(CRA, CRB 及び CRL)においては個別板厚数値解析より平均板厚数値解析の方が比較的良好な結果が得られた。

Fig.3 において CRA 及び CRB の個別及び平均板厚数値解析の

Table 3 Material Properties of Steel Bar.

Steel Bar Diameter [mm]	Young's Modulus [GPa]	Yield Strength [MPa]	Ultimate Tensile Strength [MPa]
1.60	205	257	385

耐力が大幅に実験結果より大きい理由は、実験供試体のシート補強がシェル境界付近で部分的な剝離を示したことによるものと考えられる。従って、シェル耐力としては実験の耐力が過小評価されており、耐力の真の値は少なくとも平均板厚数値解析に近いと考えられる。

因みに CRT においては個別板厚数値解析に比べ平均板厚数値解析の方が耐力誤差は僅かに低かった。しかし CRT の板厚変動が小さい為、平均板厚数値解析においても良好な結果が示されたと考えられる。従って、炭素繊維シート補強をシェル構造に適用することにより、薄肉シェルの板厚変動による欠陥を補正し、構造的信頼性を高める効果が明らかにされた。

4.2 基準数値解析におけるシート補強とシェル耐力

板厚を設計板厚に統一し、材料定数を基準値に統一した基準数値解析において各シート補強タイプの耐力 (P_{SHT}) からシート無補強タイプの耐力 (P_{NNN}) を差し引いた耐力増分 ($P_{INC} = P_{SHT} - P_{NNN}$) に対するシート無補強タイプの耐力との比 ($R_{SHT} = P_{INC} / P_{NNN}$) をシート補強耐力増分比と定義して、この値を Fig. 4 に示した。尚、シート補強耐力増分比は次式となる。

$$R_{SHT} = P_{INC} / P_{NNN} = (P_{SHT} - P_{NNN}) / P_{NNN} \quad (2)$$

同図において、今回対象としたシート補強により 39% から 88% の耐力増大が確認された。特にシート全面補強した場合、51% 以上の耐力増大が確認され、シェル両面に全面補強した場合には 88% の耐力増大が示されている。

4.3 実験及び数値解析におけるシート補強による耐力

前節 4.2 で示した基準数値解析におけるシート補強耐力増分比 (R_{SHT}) と対応して、破壊実験、平均板厚数値解析及び個別板厚数値解析の場合に対して、それぞれの耐力比を R_{EXP} 、 R_{AVE} 及び R_{DIS} と定義し、これらの各耐力比を Fig. 5 に示した。尚、シェル耐力は板厚により大きな影響を受ける為、同図に板厚増分比 (T_{SHT}) を掲載した。この板厚増分比は、次式で示される。

$$T_{SHT} = T_{INC} / T_{NNN} = (T_{SHT} - T_{NNN}) / T_{NNN} \quad (3)$$

尚、 T_{SHT} はシート補強タイプの平均シェル板厚、 T_{NNN} はシート無補強タイプの平均シェル板厚、 T_{INC} はこれらの差を示す。

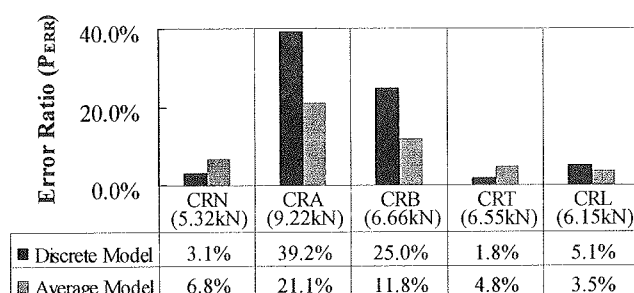
同図において、板厚変動と連動して、シート補強による耐力の変化を以下で確認する。前節「4.1 シェル耐力」において記述した通り、CRA 及び CRB の実験耐力が過小評価されていることを考慮しても、シェル両面の全面にシート補強を施すことにより大幅な耐力の増大が期待される。しかしながら、板厚の影響をより正確に反映させて耐力を評価する為、後述の「4.4 耐力補正」で実験結果を対象として詳細な検討を行う。

Fig. 5 で、最初に CRT 及び CRL に於いて比較を行う。CRN の実験板厚に比べ CRT 及び CRL の実験板厚は 8.8% 減及び 8.0% 減となり板厚が薄い。しかし、CRN の実験終局耐力に対して CRT 及び CRL の実験終局耐力は 23.0% 増及び 15.7% 増が示され、両タイプ共に CRN より板厚が薄いにもかかわらず CRN の実験終局耐力を上回ることが示された。これはシート補強範囲が引張領域に貼られ、シートが板厚の薄い部分を有効に補強したことにより耐力が増加したものと考えられる。

また、数値解析に於いても上記の実験板厚を基に解析した結果、平均板厚数値解析 (Average Model) に於いて、CRN と比較して、CRT で 20.7% 増、CRL で 12.1% 増が示された。上記の実験終局耐力の増加率と比較的近い値が得られ、実験と解析の整合性が確認された。

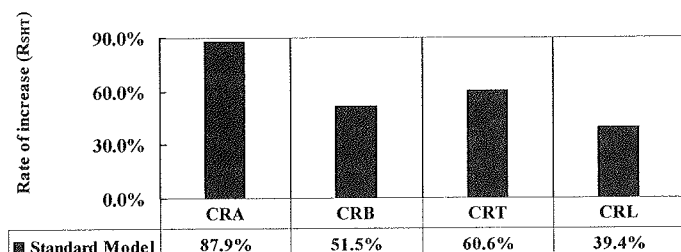
尚、実験及び全ての数値解析の全シート補強モデルにおいて、耐力増分比がこれと対応する板厚の増加率を上回ることが示された。さらに、シート補強を行った全てのシェルモデルに於いて、平均板厚数値解析に於ける終局耐力増加率 (同図の Average) より、個別板厚数値解析に於ける終局耐力増加率 (同図の Discrete) の方が高い数値を示した。これは、載荷点直下及び周辺の板厚が厚かったことによるものと考えられる。

以上より、鉄筋コンクリート造シェルにシート補強を施すことにより、シェルの終局耐力の大幅増加が確認された。



Note: $P_{ERR} = \text{Error Ratio on Ultimate Strength} [P_{ERR} = (P_{NUM} - P_{EXP}) / P_{EXP}]$
 P_{NUM} = Ultimate Strength of Discrete or Average Model
 P_{EXP} = Experimental Ultimate Strength Described in Each Parenthesis.

Fig. 3 Error Ratio of Numerical Strength to Experimental Strength.



Note: $R_{SHT} = \text{Ratio of Strength Increase by Sheet} [R_{SHT} = (P_{SHT} - P_{NNN}) / P_{NNN}]$
 P_{SHT} = Ultimate Strength of Standard Model with Sheet
 P_{NNN} = Ultimate Strength of Standard Model CRN

Fig. 4 Rate of Strength Increase by Sheet at Standard Model.

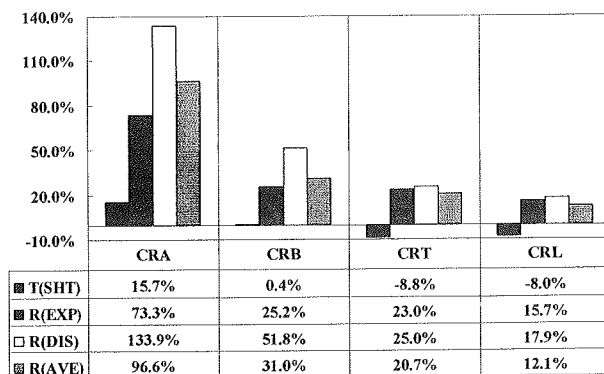


Fig. 5 Rate of Strength Increase by Sheet.

4.4 耐力補正

施工板厚の変動を考慮し、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 Table5 に示す。

各比率はシート無補強モデル CRN に対応するシート補強モデルの値を示している。表中の E0 は、破壊実験による実験耐力比を示している。S0 は、設計板厚(8mm)及びコンクリート材料諸元を統一した場合の基準数値解析より得られた基準耐力比である。TG は、シェル全面における板厚実測値の平均値に基づく全面板厚比である。TL は、点荷重の載荷点直下を含み、その隣接した限定領域、即ちシェル幅と長さの各 1/4 の限定領域内の平均板厚に基づく限定板厚比である。耐力比(E0/S0)は、上記 S0 に対する E0 の比率より求めた耐力整合比である。EG1 は全面板厚線形補正実験耐力比(E0/TG)であり、耐力比(EG1/S0)は全面板厚線形耐力整合比である。同様に EG2 及び EG3 は、TG の 2 乗及び 3 乗補正を行った全面板厚 2 乗及び 3 乗補正実験耐力比(E0/TG² 及び E0/TG³)であり、全面板厚 2 乗及び 3 乗補正耐力整合比を耐力比(EG2/S0)及び耐力比(EG3/S0)で示した。次に EL1 は限定板厚線形補正実験耐力比(E0/TL)であり、耐力比(EL1/S0)は限定板厚線形耐力整合比である。同様に EL2 及び EL3 は、TL の 2 乗及び 3 乗補正を行った限定板厚 2 乗及び 3 乗補正実験耐力比(E0/TL² 及び E0/TL³) であり、限定板厚 2 乗及び 3 乗補正耐力整合比を耐力比(EG2/S0)及び耐力比(EG3/S0)で示した。

破壊実験において、炭素繊維シートをシェルの表面及び裏面に補強を施した CRA は、前述の「4.1 シェル耐力」で記述した通り、破壊実験の耐力が過少評価されており、CRA における全面及び限定板厚線形補正耐力整合比は 1 から大きく外れている。特に CRA 及び CRB を除く、CRT 及び CRL において耐力比(EL2/S0)の値が、平均値で 0.99、標準偏差で 0.07 が示され、最も良い整合性が確認されている。

これはシェルの伸び剛性が板厚に線形比例し、曲げ剛性が板厚の 3 乗に比例することに注目すると、両者の中間値と対応した板厚の 2 乗補正が有効に作用しているものと考えられる。

4.5 荷重変位曲線

破壊実験より得られた荷重変位曲線を数値解析結果と比較して Fig. 6 に示した。同図の縦軸は鉛直荷重を示し、横軸は載荷点直下の鉛直方向変位を示している。同図において、数値解析結果は平均板厚及び個別板厚モデルの双方を掲載している。同図より、全ての供試体は、弾性範囲の限界直後で破壊に至っている。これは、シート補強を施すことによりシェルの曲げ剛性が増大し、また、局所的な曲げ降伏の影響が減じられることにより、降伏後に急激な破壊を生じた為と考えられる。

同図(b)CRA 及び(c)CRB において実験値と個別板厚数値解析の剛性に大きな相違が認められるのに対し、平均板厚数値解析の剛性は実験の値と良い対応を示している。前述の「4.1 シェル耐力」及び「4.2 耐力補正」で、シェル境界部のシート接着補強の部分的剥離が実験の耐力低下を招いたことを言及し

たが、実験と対応した平均板厚数値解析の適応性が示されている。この理由は、弾性域においては、シート補強効果が僅かで、非弾性領域においてシート補強効果が著しい為と考えられる。即ち、弾性領域における実験と平均板厚数値解析の剛性が良い対応を示し、耐力は実験と比較して数値解析の結果が大幅に増大したものと考えられる。

尚、初期剛性は全ての実験供試体と平均板厚数値解析において良い対応を示した。

4.6 シェル破壊形態

全実験供試体の破壊実験によるひび割れ図及び数値解析によるひび割れ図を Fig. 7 に示した。

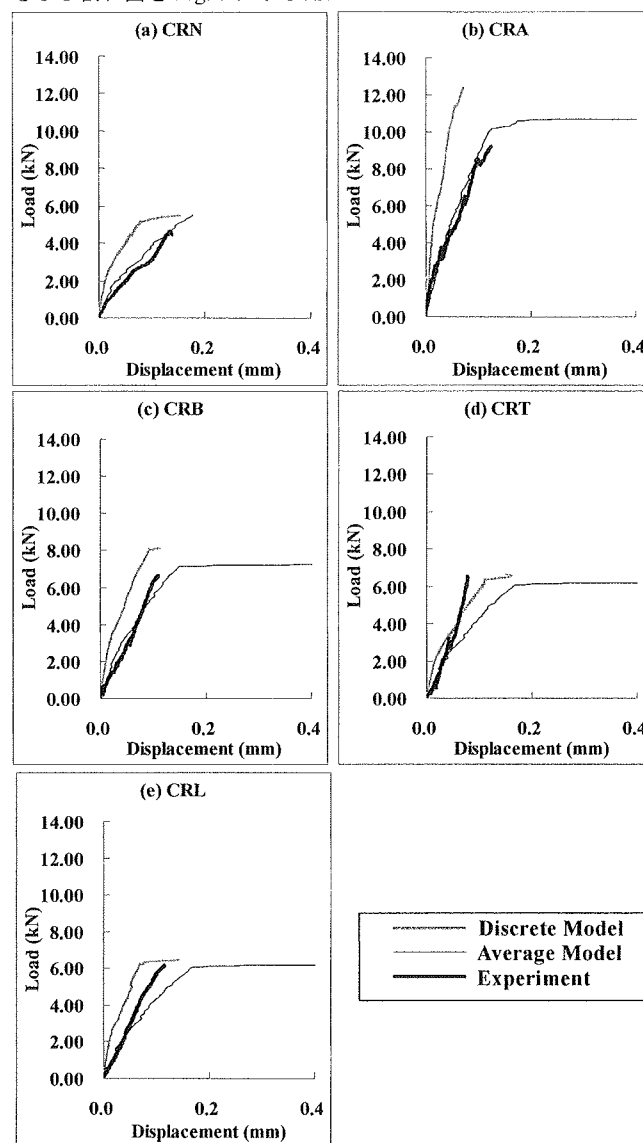


Fig. 6 Displacement vs. Load Curve.

Table 5 Strength Ratio Adjusted by Shell Thickness.

Strength	E0	S0	TG	TL	EG1	EL1	EG2	EL2	EG3	EL3	E0/S0	EG1/S0	EL1/S0	EG2/S0	EL2/S0	EG3/S0	EL3/S0
1:CRA/CRN	1.73	1.88	1.16	1.21	1.50	1.43	1.29	1.18	1.12	0.97	0.92	0.80	0.76	0.69	0.63	0.59	0.52
2:CRB/CRN	1.25	1.52	1.00	1.01	1.25	1.24	1.24	1.24	1.24	1.23	0.83	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.81
3:CRT/CRN	1.23	1.61	0.91	0.90	1.35	1.37	1.48	1.51	1.62	1.68	0.77	0.84	0.85	0.92	0.94	1.01	1.05
4:CRL/CRN	1.16	1.39	0.92	0.89	1.26	1.30	1.37	1.45	1.48	1.63	0.83	0.90	0.93	0.98	1.04	1.07	1.17
Average	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.84	0.84	0.84	0.85	0.86	0.87	0.89
STEDV	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.06	0.04	0.07	0.13	0.18	0.21	0.29
Average(3-4)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.80	0.87	0.89	0.95	0.99	1.04	1.11
STEDV(3-4)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.05	0.04	0.06	0.04	0.07	0.04	0.09

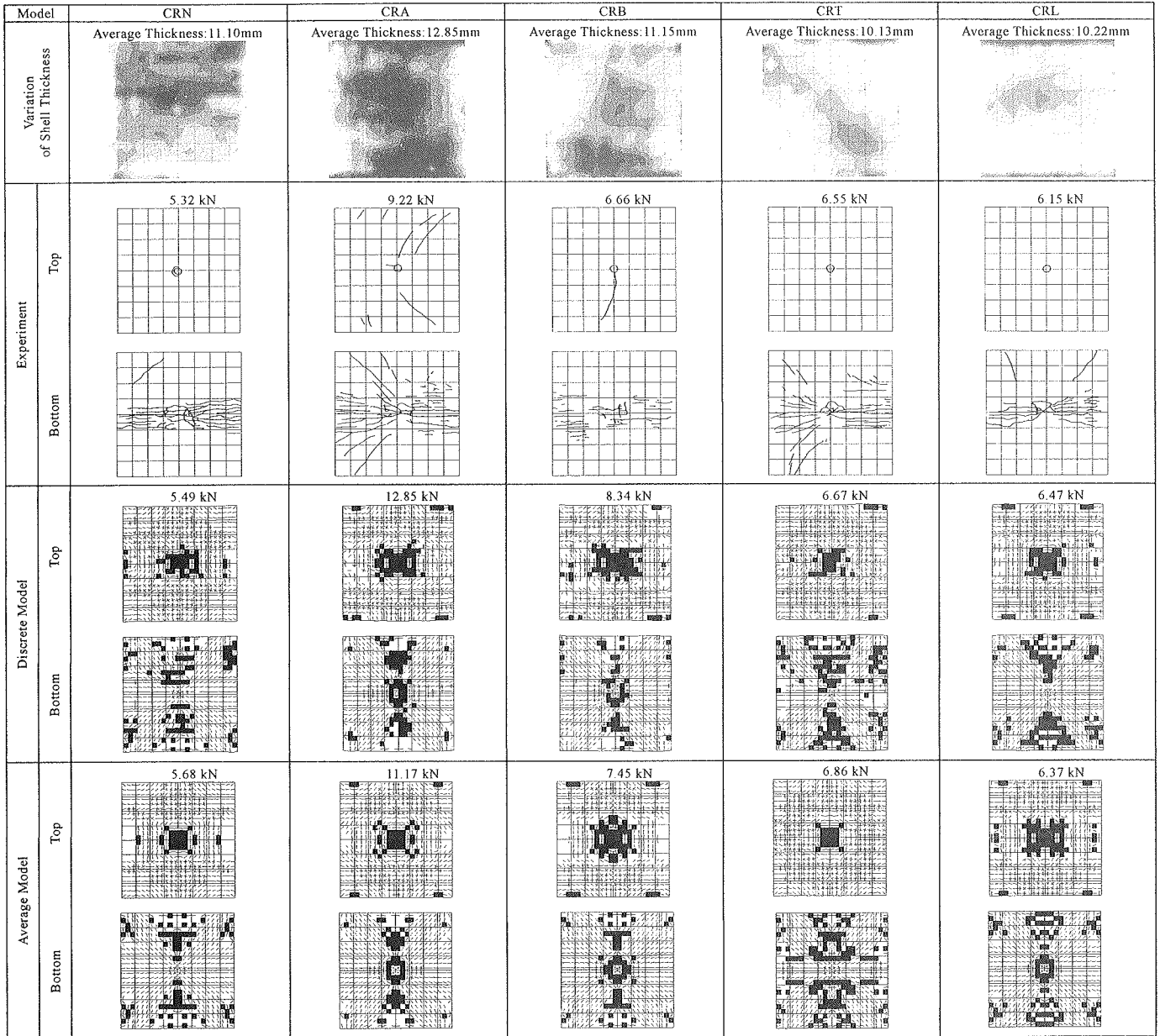
Note :

E0 : Experimental Strength Ratio
S0 : Standard Strength Ratio
TG : Global Shell Thickness Ratio

TL : Local Shell Thickness Ratio

EG1 : (=E0/TG) Experimental Strength Ratio Adjusted by TG
EG2 : (=E0/TG²) Experimental Strength Ratio Adjusted by TG²
EG3 : (=E0/TG³) Experimental Strength Ratio Adjusted by TG³

EL1 : (=E0/TL) Experimental Strength Ratio Adjusted by TL
EL2 : (=E0/TL²) Experimental Strength Ratio Adjusted by TL²
EL3 : (=E0/TL³) Experimental Strength Ratio Adjusted by TL³

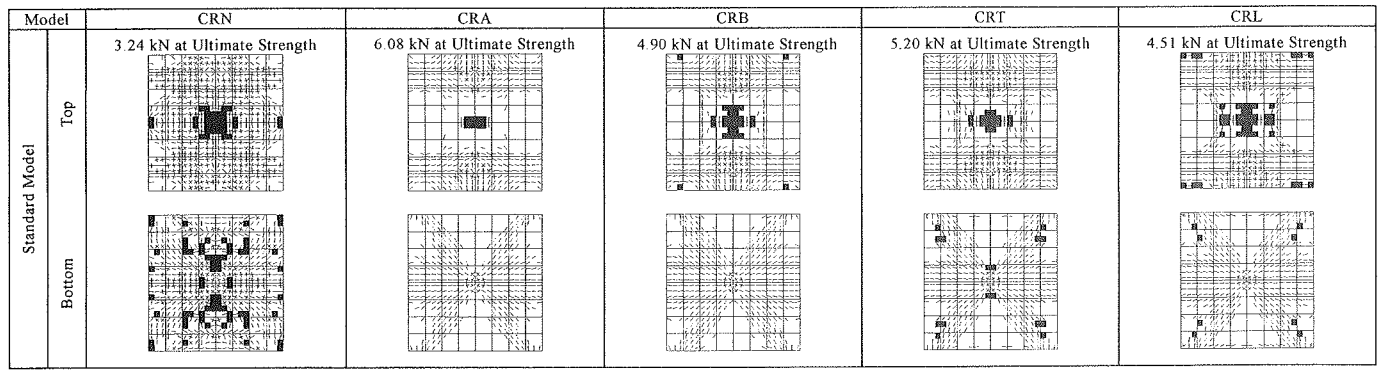


Y
X

□ 5-6 □ 6-7 □ 7-8 □ 8-9 □ 9-10 □ 10-11 □ 11-12
 ■ 12-13 ■ 13-14 ■ 14-15 ■ 15-16 ■ 16-17 ■ 17-18 ■ 18-19 [Unit: mm]

/: Concrete Cracked in the One Direction ×: Concrete Cracked in Both Directions ◻: Concrete Yield in Compression ◼: Concrete Crushed

Fig. 7 Cracking Pattern at Ultimate Strength.



Y
X

/: Concrete Cracked in the One Direction ×: Concrete Cracked in Both Directions ◻: Concrete Yield in Compression ◼: Concrete Crushed
 Ultimate Strength: CRN = 3.24kN, CRA = 6.08kN, CRB = 4.90kN, CRT = 5.20kN, CRL = 4.51kN

Fig. 8 Cracking Pattern of Standard Model at 3.24kN (=CRN Ultimate Strength).

全実験供試体の破壊実験のひび割れ図より、シェル表面中央部において、荷重載荷時に用いたボルトと同程度の径の円形ひび割れが確認された。これは荷重載荷時に曲げ圧縮破壊が生じた為と考えられる。

更に CRB と CRL のシェル表面における破壊実験のひび割れ図を比較すると、CRB の表面は載荷点から指導線方向にひび割れが生じているのに対し、CRL は載荷点に生じた円形ひび割れのみが発生し、それ以外のひび割れは確認されなかった。これは、既往の研究にも報告されているが^り、シェルにシート補強を施すことにより、ひび割れ発生が抑制された為と考えられる。

また、シェル裏面における破壊形態を2つのパターンに分類することができる。一つは、母線方向に生じるアーチ頂部の曲げ引張り破壊であり、他方は、載荷点直下から放射線状に広がるシェル2次元面内応力状態の特徴を示した破壊パターンである。CRN、CRB 及び CRL は前者の破壊パターンであり、CRA 及び CRT は後者の破壊パターンである。これより、シート補強の有無及び範囲の相違によって、以上の2種類の破壊形態を示したものと考えられる。

まず前者の破壊パターンについて言及する。CRN、CRT 及び CRL は母線方向に沿って生じる指導線方向頂部の曲げ破壊である。しかし、CRT 及び CRL は CRN に比べ指導線方向頂部の曲げ破壊が小さくなっている。この理由は、シートをシェルの片面全域又は部分補強することにより補強部分の剛性が高まりシェルの変形が抑制された為と考えられる。

次に後者の破壊パターンについて言及する。CRA においては、他の全ての供試体に比べひび割れ領域がシェル全面に拡大している。これは CRA の表面及び裏面がシート補強されたことにより、曲げ剛性が均一に増した為、応力がシェル面全体に均一に分配された結果によるものと考えられる。

尚、基準数値解析における 3.24kN 荷重時のひび割れ形態を Fig. 9 に示した。同荷重は基準数値解析における CRN の終局耐力を示す。これらを比較検討した結果、同一荷重載荷時において、炭素繊維シート補強によるひび割れ発生抑制効果が明確に示された。

5. 結論

本研究では、炭素繊維シート補強がシェル構造の耐力に及ぼす影響を検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 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を終局耐力誤差比と定義し、個々の実験結果を比較した。同比を用いると、シート無補強モデル(CRN)及びシェル上面シート補強モデル(CRT)は、個別板厚数値解析及び平均板厚数値解析において良い対応を示した。

一方、その他両面、下面及び部分補強モデル(CRA、CRT 及び CRB)では平均板厚数値解析が良い対応を示した。これより、シート補強モデルにおいて平均板厚数値解析が良い対応を示した。従って、炭素繊維シート補強をシェル構造に適用することにより、薄肉シェルの板厚変動による欠陥を補正し、構造的信頼性を高める効果が明らかにされた。

(2) 破壊実験の終局耐力に対して、限定領域板厚の2乗補正を適用することにより、数値解析との良好な整合性が認められた。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表わすことができることを確認した。

(3) 荷重変位曲線より、弾性領域における実験結果と平均板厚数値解析の剛性が良い対応を示すことが確認された。初期剛性は全ての実験供試体と平均板厚数値解析において良い対応を示した。

参考文献

- 1) 真下和彦, 熊本千大, 須永耕平, 川崎健二郎: 静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終局耐力, 東海大学紀要工学部, Vol.44, No.1 (2004), pp35-40,
- 2) 真下和彦, 前川このみ, 杉浦直樹, 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, 東海大学紀要工学部, Vol.43, No.1(2003), pp19-24