

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

真下和彦^{*1}・鈴木悠子^{*2}・山口紳一郎^{*3}

Failure Pattern of Concrete Cylindrical Shells with Carbon Fiber Sheets under Impact Load.

by

Kazuhiko MASHITA, Yuko SUZUKI and Shinichiro YAMAGUCHI

(Received on Feb. 26, 2003 & accepted on May 28, 2003)

Abstract

The main purpose of this paper is to investigate, both experimentally and numerically, the mechanical behaviors of reinforced concrete circular cylindrical shells with carbon fiber sheets under impact point load. The reinforcement with carbon fiber sheets, which were attached on the shell surface, resulted in mechanically favorable characteristics of shell structures, particularly under impact load, with relatively easy operations. Both of an attached area and the reinforced direction of carbon fiber sheets were investigated for the failure pattern of a concrete shell. A failure experimental study was conducted on different types of small-scaled shell specimens, ones of which were made of a reinforced concrete with carbon fiber sheets and the others of which were made of that without the sheets to compare their mechanical behaviors. These specimens were loaded at the center of the upper surface with impact point load. As for numerical analysis, nonlinear numerical calculations were carried out by a nonlinear transient dynamic finite element method. Cracking patterns and nonlinear behaviors were discussed based on experimental and numerical results.

Keywords: Concrete Shell, Impact Load, Carbon Fiber Sheet

1. まえがき

コンクリート殻構造は、高い耐荷性能を有し、大空間を可能にする等、その優れた構造特性を生かして幅広く活用されているが、一方では、簡易的な耐力評価法の確立や、災害時に備えて耐衝撃設計の必要性が高まっている。このような状況の中で、近年既存建築物の補強目的として、炭素繊維シート補強に注目することが出来る。

炭素繊維シートは、軽量、高強度、高耐久性の特長を有し、コンクリート造構造物補強に於いて簡易施工、工期短縮等の工事の簡便化に高い可能性を有している。これまで多くの柱や梁等の鉄筋コンクリート造部材に於ける炭素繊維シート補強に関する研究が報告されているが¹⁻⁵⁾、炭素繊維シート補強は、様々な形状のコンクリート造構造物に対応が可能であり、耐衝撃性に於いても優れた特性が期待され、薄肉の曲面構造には特に威力を発揮するものと考えられる。しかし、コンクリート殻構造に於ける炭素繊維シート補強の有効性及び耐衝撃性を対象とした応答性状に関する問題は殆ど検討されていない。

以上を踏まえて、本研究では、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(CFSRC造)円筒殻を対象として、衝撃破壊性状の究明を行った。その為に、鉄筋コンクリ

ート造(RC造)の場合と対比させて、小型実験供試体による破壊実験を行うと同時に動的非線形数値解析を行い、比較検討を加えた。その結果、炭素繊維シート補強範囲の相違が、耐力及び破壊性状に及ぼす影響を明らかにした。

また、数値解析に於いては、均一板厚数値解析に加え、個別板厚数値解析を行った。個別板厚数値解析は、コンクリート施工時の流動化現象によるシェル板厚の不均一性を考慮し、破壊実験終了後の289点からなる個別点の板厚計測結果を忠実に反映させた解析であり、破壊実験の状況をより詳細にシミュレーションすることが可能であることを実証した。

2. 破壊実験概要

本研究で用いた各実験供試体名の文字構成、コンクリート材材定数及びシェル施工板厚諸元を Table 1 に、補強鉄筋、炭素繊維シートの材料定数を Table 2 及び Table 3 にそれぞれ示した。また、実験供試体シェル形状を Fig.1 に、破壊実験載荷装置及び支持方法を Fig.2 に示し、炭素繊維シート補強範囲を Fig.3 に示した。

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、ライズ・スパン比 1/5(L2/L1)、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 の正方形断面の縁梁及び緑アーチで補剛した。縁部材には 4-D3 を主筋とし、あばら筋としては φ0.85mm のなまし鉄

*1 工学部建築学科 教授・工博

*2 株式会社 中野積算

*3 工学研究科博士課程前期建築学専攻

線を 20mm 間隔で配筋した。シェル面内配筋は、 $\phi 1.2\text{mm}$ 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した。

炭素繊維シート補強は、RC 造実験供試体作製後、エポキシ系樹脂(アラルダイト スタンダード)を用いて炭素繊維シート(TR3110MS)をシェル裏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。

衝撃荷重の荷重は、シェル面中央部に鋼製円盤(重量 166.6N)を高さ 1000mm から鉛直自由落下させ(衝撃荷重による全供試体シェル面接触荷重の平均値 8 kN)、半径 25mm の鋼製アタッチメントを介して行った。尚、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(ニトフロン 含浸ガラスクロス)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。

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、シェル耐力及びシェル破壊形態を動的な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。尚、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関しては、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。

炭素繊維シート補強に関しては、3 種の数値モデル化を検討し、以下に示す。第 1 モデルは、鋼層と同様に線材補強としてシェル最下面に付加した場合、第 2 モデルは、コンクリート層と同様に薄膜立体要素による補強としてシェル最下面に付加した場合、第 3 モデルは、炭素繊維シート補強範囲のコンクリート引張強度を増大させた場合のモデル化を行った。Fig.4 に HH に於ける実験ひび割れ図、及び上記 3 種の数値モデル化のひび割れ図を示した。前述の破壊実験と比較検討を行った結果、第 1 及び第 2 モデルは、材軸方向引張強度のみ考慮した結果としてシェル境界付近のひび割れ状況が十分に確認されず、実験結果とはかなり異なる形態を示した為、第 3 モデルを採用し、炭素繊維シート補強範囲のコンクリート引張強度を 25 倍に増大

させ(後述の 3.1.a 炭素繊維シート補強範囲のコンクリート引張強度の検討参照。), 炭素繊維シート補強効果を付加した。尚、3 種の数値モデル化の計算に関しては、HH の実験供試体に於ける材料定数及び平均板厚を用いた。

コンクリートの圧縮挙動に関しては、弾・粘塑性のモデル化に降伏面と強度限界面の仮定を用いた。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、圧縮破壊の判定に用いた。

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。その際に破壊エネルギー G_f を考慮しており、RC 造では 100N/m とした。尚、炭素繊維シート補強範囲では引張剛性増大効果が期待されるが、本研究では RC 造と同様に下限値として 100N/m を採用した。(後述の 3.1.b 破壊エネルギー G_f の検討参照。)

動的な非線形適合方程式は、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 $\beta=0.25$, $\gamma=0.5$ に設定して応答解析を行った。

3.1.a 炭素繊維シート補強範囲のコンクリート引張強度の検討

炭素繊維シート補強の数値モデル化に於ける炭素繊維シート補強範囲のコンクリート引張強度を検討する為、シェル構造物全体のひび割れ率 α を求めた。ひび割れ率 α は、ある値のコンクリート引張強度を採用した際の最大ひびわれ総数に対する現ひび割れ総数の比を表している。なお、ひび割れ数は、ガウス点におけるひび割れ状況を定量的に表現する試みとして、2 方向ひび割れ 2 ポイント、1 方向ひび割れ 1 ポイント、圧縮破壊 2 ポイントとして便宜上表現した、ポイントの累計とした。Fig.5 に示すとおり、コンクリート引張強度の値を順次増加することにより、ひび割れ率 α の推移を炭素繊維シート補強範囲の相違ごとに比較した。全ての CFSRC 造に於いて、コンクリート引張強度が特定の値に達すると、ひび割れ率 α は一定の値を示した。このひび割れ率 α が一定になるコンクリート引張強度を対象として、数値解析及び破壊実験の各破壊形態と比較検討した。その結果、下限値として、コンクリート引張強度を 25 倍($=75.0\text{MPa}/F_{t0}$, $F_{t0}=3.0\text{MPa}$)に増大させた値を炭素繊維シート補強範囲のコンクリート引張強度として採用した。

3.1.b 破壊エネルギー G_f の検討

Table 1 Shell Model.

Model	Label = [1]-[2]		Material Properties of Concrete				Shell Thickness [mm] (Ratio to T_0 in Parentheses)		
	[1]	[2]	Young's Modulus : E [GPa]	Ultimate Compressive Strength : F_c [MPa]	Ultimate Tensile Strength : F_t [MPa]	Poisson's Ratio : ν	Average	Standard Deviation	Reduced
	Sheet Size of X Direction	Sheet Size of Y Direction							
NN	N : None	N : None	26.1	58.5	3.62	0.195	11.82(1.01)	1.79(0.15)	10.03(0.86)
QH	Q : Quarter 280[mm]	Q : Quarter 280[mm]	23.0	53.1	3.55	0.211	11.65(1.00)	2.24(0.19)	9.41(0.81)
HQ	H : Half 560[mm]	H : Half 560[mm]	26.2	64.0	2.72	0.209	10.91(0.94)	1.50(0.13)	9.41(0.81)
HH	F : Full 1120[mm]	F : Full 1120[mm]	27.1	56.2	3.43	0.233	11.36(0.97)	1.71(0.15)	9.65(0.83)
FQ	—	—	20.4	55.0	3.29	0.211	12.59(1.08)	2.17(0.19)	10.42(0.89)
Average	—	—	24.5	57.4	3.32	0.212	11.67(= T_0)	1.88(0.16)	9.78(0.84)

Table 2 Material Properties of Steel.

Steel Bar Diameter [mm]	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

Table 3 Material Properties of Carbon Fiber Sheets.

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

本研究で採用する炭素繊維シート補強範囲の破壊エネルギー G_f の検討を行った。Fig.5 に示すとおり、QH に於いて破壊エネルギー G_f を 100N/m 及び 200N/m と設定した時のひび割れ率 α の推移を比較検討した。その結果、両者に於いて、ひび割れ率 α の推移に大きな相違は認められなかった。従って、本研究に於ける炭素繊維シート補強範囲の破壊エネルギー G_f は、下限値として 100N/m を採用した。

3.2 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耐力及び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、4 種の数値解析を設定し、以下に示す。最初に、個別板厚(Discrete Model)数値解析は、破壊実験終了後の板厚計測結果を元に 289 点のシェル実測板厚を節点ごと

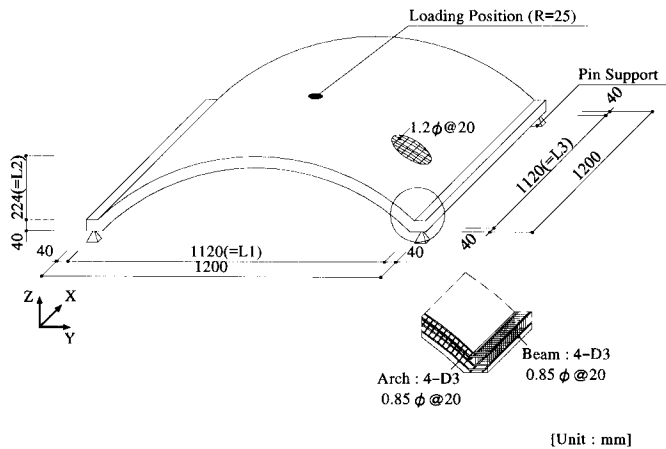


Fig.1 Shell Model.

[Unit: mm]

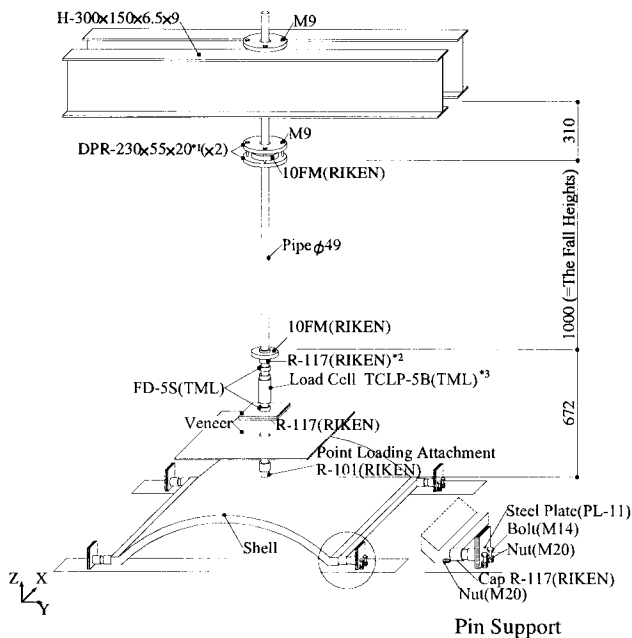


Fig.2 Failure Experiment.

Note:
 (*1) DPR-R1×R2×T1, Where DPL is steel disk and R1, R2 and T1 are the outer radius, the inner radius and the thickness, respectively.
 (*2) RIKEN: Manufactured by Rikenkiki.
 (*3) TML: Manufactured by Tokyo Sokki Kenkyujo.

[Unit: mm]

に反映させ、シェル板厚変動を考慮した数値解析である。次に、平均板厚(Average Model)数値解析は、板厚計測結果の相加平均を求め、その値を均一板厚として採用した解析である。続いて、低減板厚(Reduced Model)数値解析は、板厚計測結果の標準偏差の値を平均板厚から低減させた均一板厚数値解析である。個別板厚・平均板厚・低減板厚数値解析は、それぞれに対応した実験供試体の材料定数を使用した。最後に基準モデル(Standard Model)数値解析は材料定数及びシェル板厚として全実験供試体平均値を採用した均一板厚数値解析である。

尚、各均一板厚数値解析(平均板厚数値解析、低減板厚数値解析及び基準モデル数値解析)では、対称性を考慮し 1/4 部分を対象とした数値解析を行った。また、動的非線形応答計算に於いては時刻歴応答解析を行い、シェル破壊形態の入力荷重に関しては、各実験供試体に対応した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。また、時刻歴応答解析では、1 ステップ 0.0005 秒の時間刻みで 100 ステップまで計算した。

4. 破壊実験及び数値解析結果

本研究では破壊実験及び動的非線形数値解析により、主としてシェル耐力及びシェル破壊形態に関して検討を行った。

4.1 シェル耐力

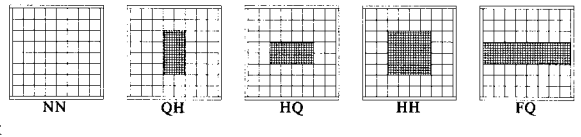


Fig.3 Reinforced Region with Carbon Fiber Sheets.

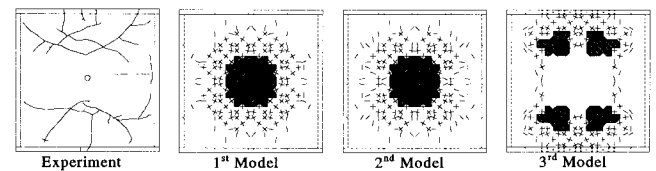


Fig.4 Cracking Pattern (HH Top Surface).

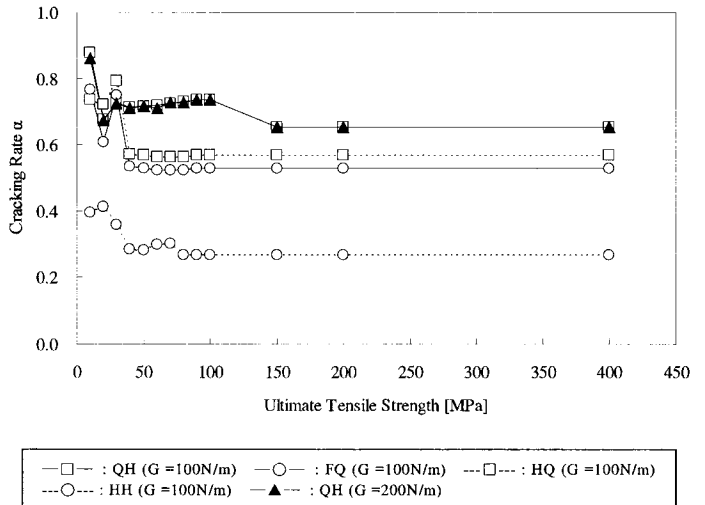


Fig.5 Cracking Rate α and Ultimate Tensile Strength.

数値解析より得られた耐力グラフをFig.6に示した。同図は(a)個別板厚, (b)平均板厚, (c)低減板厚, (d)基準モデルの各数値解析に於ける初ひび割れ発生面, 初ひび割れ荷重値及び終局荷重値とそれぞれの到達時間を示している。

RC造とCFSRC造との比較検討を行うと, 全ての耐力グラフに於いて, NNとQHが類似した傾向の耐力を示すことが認められた。従って, QHは他のCFSRC造であるHQ, HH, FQに比べ, 炭素繊維シート補強による影響がシェル耐力に於いて小さいことが確認された。

次に, 各数値解析に於けるそれぞれの初ひび割れ耐力比を求め, Fig.7に示した。初ひび割れ耐力比は, 終局荷重値に対する初ひび割れ荷重値の比を表している。同図より, 炭素繊維シート補強範囲, 材料定数及びシェル板厚の相違がシェル耐力に及ぼす影響を検討した。NNでは0.46~0.57, 全数値解析平均0.54, QHでは0.56~0.62, 全数値解析平均0.60, HQでは0.74~0.90, 全数値解析平均0.85, HHでは0.76~0.90, 全数値解析平均0.84, FQでは0.72~0.92, 全数値解析平均0.85の各値を示した。以上より, 材料定数及び板厚の相違に関係なく, 全数値解析を通じてNN, QHに比べ, HQ, HH, FQでは初ひび割れ荷重値と終局荷重値との差が小さいことが確認された。これにより, HQ, HH, FQでは, ある一定の荷重までは炭素繊維シート補強効果が確認され, 初ひび割れ発生を遅らせる為の有効であることを

明らかにした。しかし, 炭素繊維シート補強による終局荷重値の増大は比較的小さいと予想される。特に, (b)平均板厚, (c)低減板厚, (d)基準モデルの均一板厚数値解析に於けるHQ, HH, FQの初ひび割れ耐力比が1.00に近い値を示すことから, 板厚が均一の場合ではその傾向が顕著であると考えられる。

4.2 シェル破壊形態

全供試体に於ける板厚変動分布図, 破壊実験ひび割れ図及び各数値解析より得られたひび割れ図をFig.8に示した。

まず, 破壊実験ひび割れ図に於いてRC造とCFSRC造との比較検討を行う。RC造に於いては, 載荷点からシェル面全体へひび割れが放射状に発生しているのに対し, CFSRC造に於いては, 炭素繊維シート補強範囲を取り囲むようにひび割れが発生している。特に全CFSRC造供試体に於いて, 載荷アタッチメントによる直接的なひび割れ発生が特徴的である。これは炭素繊維シート補強範囲に於いて, 補強により引張に対する剛性が増加した結果, 載荷点のひび割れを除外とその周辺のひび割れが減少し, 炭素繊維シート補強範囲の損傷が大幅に軽減されたことによるものと考えられる。尚, 荷重載荷接触部分は, 炭素繊維シート補強により抜け落ちる状態ではないことが確認された。更に, 破壊実験終了後, 炭素繊維シートの剥離は確認されなかった。

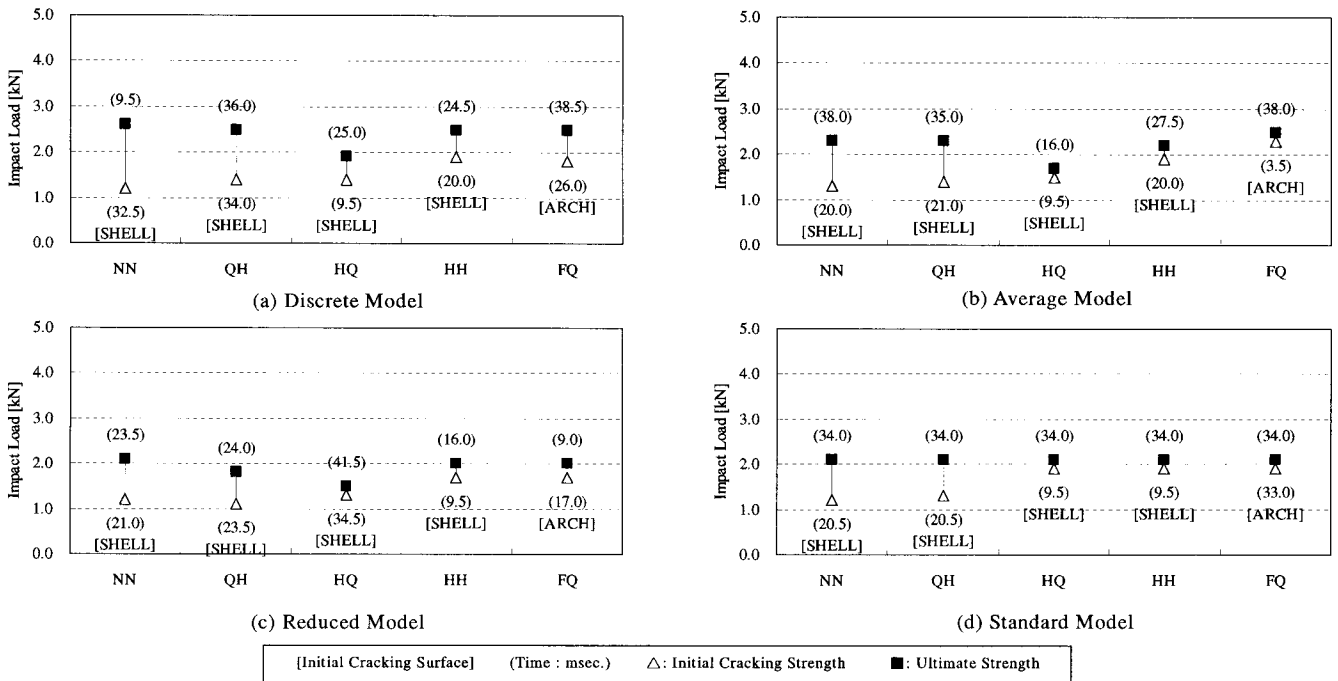


Fig.6 Initial Cracking Strength and Ultimate Strength.

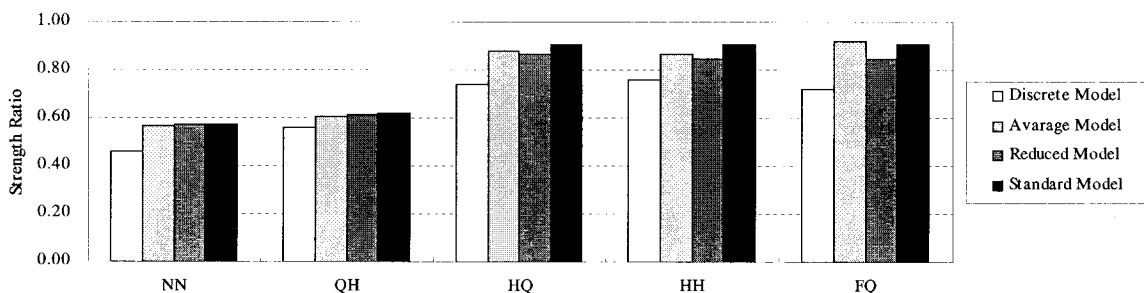


Fig.7 Initial Cracking Strength Ratio to Ultimate Strength.

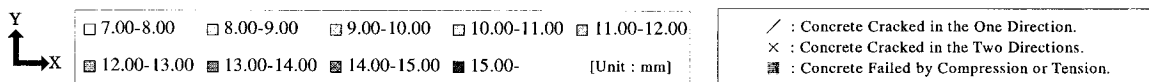
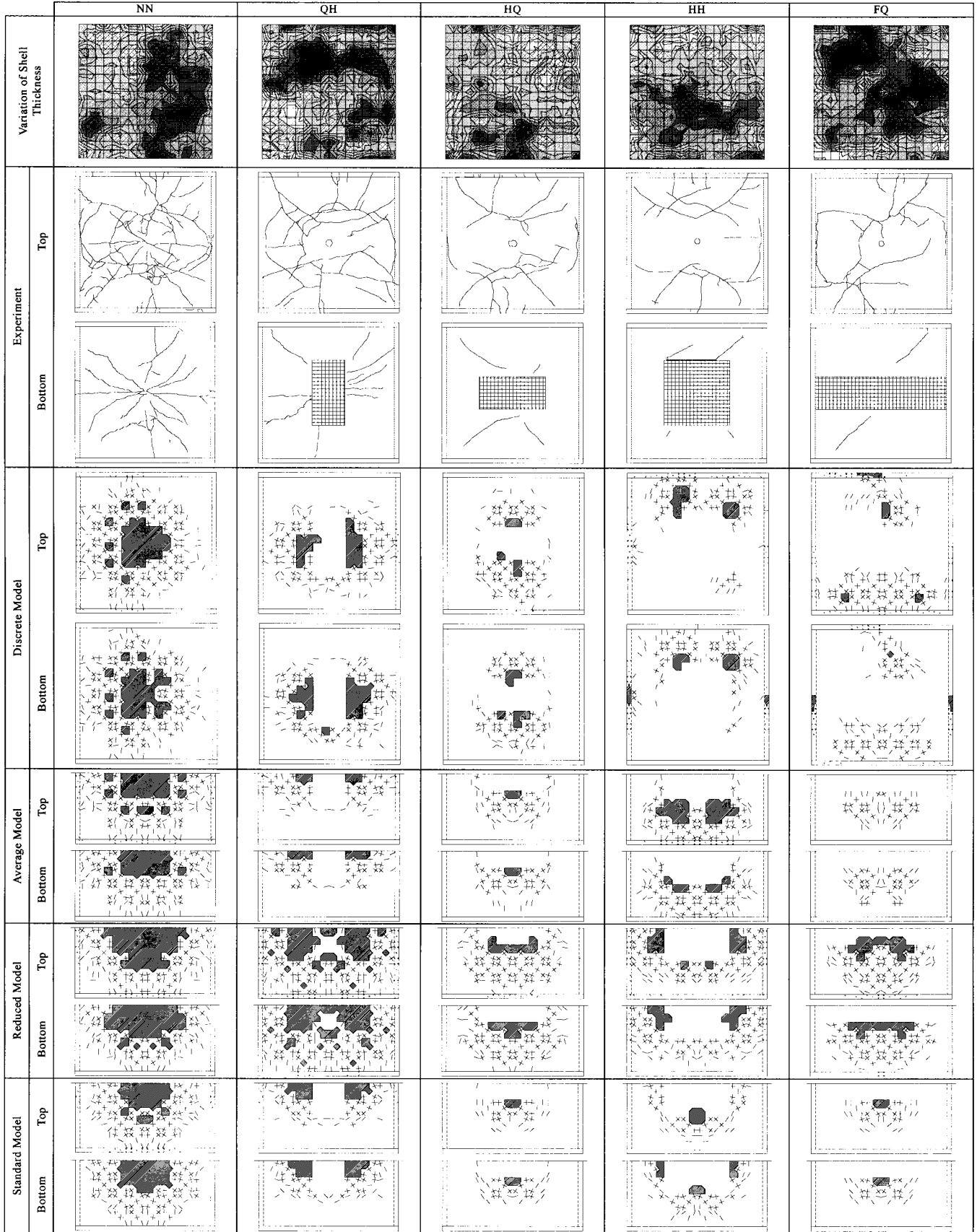


Fig.8 Cracking Pattern.

また、HQ, HH, FQ と比較して、QH の場合はひび割れ量がやや多く、RC 造である NN に類似した傾向を示している。これより、シェル破壊形態に於いて、QH の場合には炭素繊維シート補強による影響は小さいことが確認された。

次に、各数値解析に於けるひび割れ図の検討を行う。CFSRC 造に於いて、炭素繊維シート補強範囲の境界から外側へ発生するひび割れが、全数値解析ひび割れ図に共通して認められた。更に、個別板厚・平均板厚・低減板厚の各数値解析結果より、シェル板厚が均一で小さくなる程、その傾向が顕著であり、炭素繊維シート補強範囲境界線上近傍の破壊が大きくなることが確認された。

また、個別板厚数値解析ひび割れ図では、全供試体に於いて板厚変動を反映した破壊形態を示し、破壊実験との良い対応が確認された。

以上より、直線母線方向にある一定以上の長さ(本研究では 560mm, シェル幅の 1/2)を持つ炭素繊維シート補強範囲を対象として、シェル耐力及びシェル破壊形態に共通した炭素繊維シート補強による影響度合いを確認した。

5. まとめ

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を対象として、炭素繊維シート補強範囲の相違が、耐力及び破壊性状に及ぼす影響を実験的及び理論的に検討を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 直線母線方向の炭素繊維シート補強長さの変化と連動して、補強範囲がシェル耐力の増大をもたらし、更にシェル破壊形態においてひび割れ発生を抑制する効果を確認した。

(2) 炭素繊維シート補強により弾性範囲が拡大すること、及びシェル板厚が均一である程、初ひび割れ耐力比(終局荷重値に対する初ひび割れ荷重値の比)が大きいことを示した。

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) 伊藤倫顕, 角一行, 松浦恒久, 田中義成, 林田則光: 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) E.HINTON: DYNAMIC ANALYSIS OF PLATES AND SHELLS, Pineridge Press 1988 年

謝辞

実験資料作成に御協力頂きました三菱レイヨン株式会社土井忍氏に深謝致します。