

衝撃荷重を受けるコンクリート造円筒殻の破壊形態

真下和彦^{*1}・佐藤由教^{*2}・鈴木悠子^{*3}

Cracking Pattern of Concrete Cylindrical Shells under Impact Load.

by

Kazuhiko MASHITA, Yoshinori SATO, Yuko SUZUKI

(Received on Mar. 12, 2002 & accepted on Jun. 5, 2002)

Abstract

The main purpose of this paper is to investigate the cracking patterns of carbon fiber chip reinforced concrete circular cylindrical shells with openings and with low boundary stiffness under impact line load. In our previous study, the investigation for the nonlinear behavior on concrete cylindrical shells with low edge beam stiffness had been presented. However a little bit inadequate evaluation had been found on some concrete material constants in the nonlinear numerical calculations, and therefore in this paper the effects by low edge beam stiffness were reevaluated. In addition to these reevaluated numerical models the effects by low edge arch stiffness on shell strength were newly investigated, both experimentally and numerically. The failure experimental study was conducted on small-scaled shell specimens, which were made not only from carbon fiber chip reinforced concrete but also from steel reinforced one for the mechanical behavior to be compared. These specimens were loaded onto the center line parallel to the circular directrix with impact line load. As for the numerical analysis the nonlinear numerical calculations was carried out by the transient dynamic response finite element method. The cracking patterns and the nonlinear behaviors were discussed based on the experimental and numerical results.

Keywords: Concrete Shell, Impact Line Load, Low Boundary Stiffness

1. まえがき

コンクリートシェル構造は、高い耐荷性能に加え大空間を覆うことが可能である。その為、危険物を安全に格納する施設として使用できるばかりでなく、多目的ドームのように公共性の高い施設として活用できる構造であると言える。またコンクリートは今日多く活用されているように、供給が容易で安価な材料としてだけではなく、シェル構造においては自由な形を得られる点で非常に有用的である。一方で車両・航空機の衝突、危険物の爆発、地震による衝撃やそれに伴う重量物の落下等の衝撃荷重により大惨事が引き起こされることが十分に考えられ、耐衝撃設計の必要性が認識されてきている。

シェル構造は、一般に膜応力状態となるようにその形状及び支持条件を選定することが望ましい。しかし、実際には建築物を対象とする限り、シェル境界付近に大きな曲げモーメントが生じる。円筒殻を設計する際、この曲げモーメントに対する処理が重要な課題となる。通常はシェル境界を縁梁や隔壁等の補強部材により支持あるいは補剛するが、これらの境界条件がシェル耐力に及ぼす影響に関しては、今後の詳細な研究が必要とされる。一方、シェル構造の生み出す閉鎖的な空間を解消すべく開口部を設けることは有効であるが、シェルの動的応答挙動が乱される可能性があり、その検証に関しても殆ど研究されていない。また、従来の鉄筋補強コンクリート造に対して、複雑

な形状を有する構造物においては配筋作業が軽減できる炭素短繊維補強コンクリート造に注目することが出来るが、静的及び動的荷重を含めた線形及び非線形応答に関する研究も今後の大いな検討課題である。

以上の状況を踏まえて、本研究では、小型模型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、衝撃荷重を受ける開口部付き炭素短繊維補強コンクリート造の縁部材補剛円筒殻を対象として、鉄筋コンクリート造の場合と対比させて、衝撃破壊性状の比較検討を行った。更に、縁部材形状、及び開口部の有無の相違と対応させて、破壊性状に関する複合的影響を検討した。また、破壊実験及び均一板厚数値解析の結果に加えて、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 225 点若しくは 271 点からなる個別点の板厚計測結果を反映させた個別板厚数値解析を併せて比較検討を行った。

尚、著者等は既往の研究において縁梁低剛性補剛の場合を報告したが¹⁾、一部材料特性計算上適切でない評価が確認された為、縁梁低剛性補剛モデル全ての再計算を実施し、その上で、本研究において、新たに縁アーチ低剛性補剛モデルを追加し検討を加えた。

2. 破壊実験概要

本研究で用い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詳細図を Fig.2 に示した。また、各実験供試体の文字構成及びコンクリート材料定数並びにシェル施工

*1 工学部建築学科 教授・工博

*2 大成建設株式会社

*3 工学研究科博士課程前期建築学専攻

衝撃荷重を受けるコンクリート造円筒殻の破壊形態

板厚諸元を Table 1 に、補強鉄筋の材料定数を Table 2 に、炭素短繊維の材料定数を Table 3 にそれぞれ示した。

実験供試体はシェル設計板厚を 8mm とし、寸法は水平投影面において $1120\text{mm} \times 1120\text{mm}$ (L1 × L3), 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。RC 造実験供試体とした場合のシェル面内配筋は、 $\phi 1.2\text{mm}$ の鉄筋を直線母線方向及び円形指導線方向にそれぞれ 20mm 間隔で単配筋するものとした。CFCRC 造とした場合には、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。開口部付供試体における開口部は、シェル中心部より直線母線方向へそれぞれシェル幅の 1/4(280mm)を開口部の中心

とし、開口半径をシェルスパンの 1/8(140mm)とした。シェル境界においては、幅 40mm の縁梁及び縁アーチで補剛した。縁部材せいについては 20mm 及び 40mm の 2 種類の形状を設定し、これらの組合せで供試体の相違を構成した。縁部材せいの相違による供試体の内訳は、縁アーチせい 20mm で縁梁せい 40mm の A Type, 縁アーチせい 40mm で縁梁せい 20mm の B Type(既報)¹⁾, 縁アーチ及び縁梁せい共に 40mm の C Type の 3 種類を設定した。尚、部材せい 20mm の縁部材には 2-D3, 40mm の縁部材には 4-D3 を主筋とし、あら筋としては $\phi 0.85\text{mm}$ のなまし鉄線を 20mm 間隔で配筋した。

破壊実験における供試体の支持方法としては、縁アーチ両端

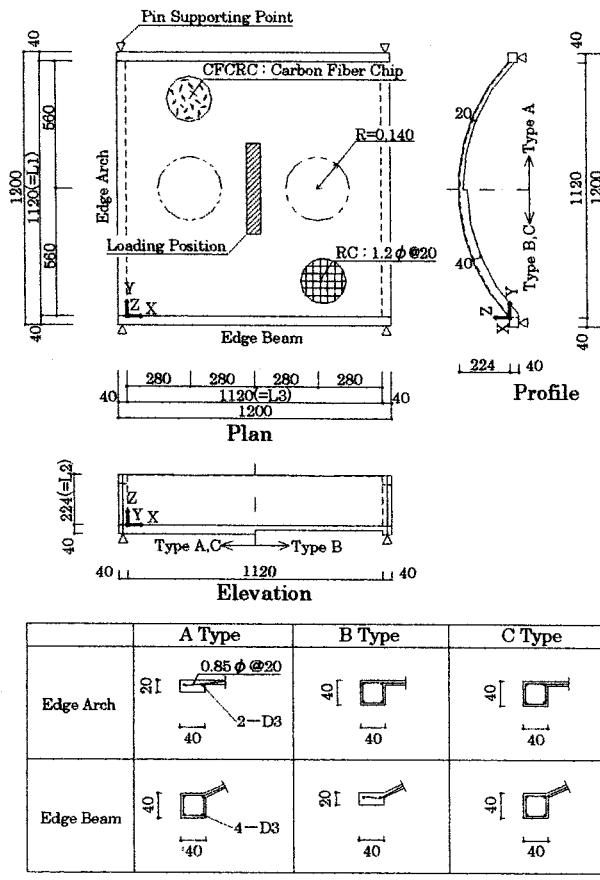


Fig.1 Shell Model.

[Unit : mm]

Table 1 Shell Model.

Specimen	Label = [1]-[2]-[3]			Material Properties of Plain Concrete and CFCR One				Average Thickness [mm] (T/T ₀ , T ₀ =8mm)	Standard Deviation [mm]	Reduced Thickness [mm] (T/T ₀ , T ₀ =8mm)	
	[1]	[2]	[3]	Young's Modulus : E [GPa]	Ultimate Compressive Strength : F _c [MPa]	Ultimate Tensile Strength : F _t [MPa]	Poisson's Ratio : ν				
	Material	Openings	Depth of Edge Member								
RCA	Reinforced Concrete	Closed (R=0mm)	A Type Arch : 20mm Beam : 40mm	25.6	58.0	3.15	0.217	9.60 (1.20)	1.05	8.55 (1.07)	
RCB*				26.3	61.5	3.48	0.236	8.73 (1.09)	1.39	7.34 (0.918)	
RCC				25.1	61.5	3.01	0.203	11.7 (1.46)	1.76	9.98 (1.25)	
ROA				27.9	61.5	3.31	0.223	9.59 (1.20)	0.880	8.71 (1.09)	
ROB*				24.9	57.2	2.93	0.225	9.28 (1.16)	1.45	7.83 (0.979)	
ROC		Opened (R=140mm)	B Type Arch : 40mm Beam : 20mm	25.1	61.5	3.01	0.203	9.69 (1.21)	1.43	8.26 (1.03)	
FCA				20.6	60.0	6.39	0.252	8.60 (1.08)	1.15	7.45 (0.931)	
FCB*				25.1	60.3	5.58	0.240	8.59 (1.07)	1.18	7.41 (0.926)	
FCC				24.9	60.7	6.12	0.226	10.7 (1.34)	3.15	7.59 (0.949)	
FOA				23.8	63.3	6.93	0.241	10.4 (1.30)	1.57	8.80 (1.10)	
FOB*	Reinforced Concrete	C Type Arch : 40mm Beam : 40mm		24.4	63.0	5.92	0.235	8.04 (1.01)	0.990	7.05 (0.881)	
FOC				26.6	67.6	6.60	0.246	10.1 (1.26)	1.39	8.67 (1.08)	

Note : * Publish in 2001¹⁾

Material Properties of Plain Concrete and CFCR One : Design Model = E : 25.0 [GPa], F_c : 60.0 [MPa], F_t : 3.00 (RC), 6.00 (CFCR) [MPa], ν : 0.200

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 Chip.

Type	Fiber Length (mm)	Fiber Diameter (μm)	Tensile Strength (GPa)	Modulus of Tensile Elasticity (GPa)	Elongation (%)	Density (N/mm ³)	Specific Gravity
K661	18.0	17.0	1.77	180	1.00	1.86×10^{-3}	1.90

において水平スラストを拘束する隅角部 4 点ピン支持の設定とした。衝撃荷重載荷方法に関しては、組合せ鋼製円盤(総重量 166.6N)を高さ 1000mm から鉛直自由落下させ(全供試体平均 9.34kN), 円形指導線方向に対して長さ 400mm, 幅 60mm の線荷重アタッチメントを介して載荷を行った。尚、組合せ鋼製円盤の内側にはマスキングテープを貼り付け、パイプとの摩擦抵抗の低減化に対する処理を施した。

本研究では、RC 造 4 体 CFCRC 造 4 体の計 8 体の実験供試体を作製し、破壊実験を行った。尚、既発表の一部材料定数に補正の必要性が確認された縁梁低減タイプの供試体 4 体に関しては、再計算を行い、本論文の縁アーチ低減タイプと比較を行うに掲載した。

3. 数値解析概要

3.1 動的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で再現する為、円筒シェルに衝撃線荷重が作用した場合を対象として、シェル破壊形態及びシェル耐力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。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おいては、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一型(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。

コンクリートの引張挙動に関しては、主歪を求め、ひび割れ発生後の応力度は、e 関数を用いて評価した。その際に破壊エネルギーパラメータを考慮しており、RC 造では 100N/m, CFCRC 造では 200N/m を採用し、構成材料による引張剛性の相違を反映させた。

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、圧縮破壊判定に用いた。

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 $\beta=0.25$, $\gamma=0.5$ に設定して応答解析を行った。

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と同時に材料定数及びシェル板厚を設計値に統一した設計モデル(Design Model)の数値解析を行い、材料定数及びシェル施工板厚がシェル破壊形態及びシェル耐力に及ぼす影響について検討した。

実験対応数値解析では、それぞれに対応した実験供試体の材料定数を使用し、Table 1 に示した通り、シェル板厚の相違により個別・平均・低減からなる 3 種の板厚解析を設定した。最初に、個別板厚(Discrete Model)数値解析は、破壊実験終了後の板厚測定結果を元に開口部無で 225 点、開口部付で 271 点のシェル実測板厚を節点毎に反映させ、シェル板厚変動を考慮した数値解析を行った。続いて、平均板厚(Average Model)数値解析は、破壊実験終了後板厚測定結果の開口部無で 289 点、開口部付で 343 点の相加平均を求め、その値を均一板厚として採用した解

析である。最後に低減板厚(Reduced Model)数値解析は、板厚測定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。

尚、各均一板厚数値解析(平均板厚数値解析及び低減板厚数値解析並びに設計モデル数値解析)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お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ト関数により与えた。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. 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により、主としてシェル破壊形態及びシェル耐力に関しての検討を行った。

4.1 シェル破壊形態

RC 造及び CFCRC 造供試体の板厚変動分布図、破壊実験ひび割れ図、個別板厚数値解析ひび割れ図を Fig.3 に示し、破壊形態に関する検討を行った。

最初に構成材料による比較を行う。破壊実験ひび割れ図より、RC 造ではシェル全面へと広がるひび割れが特徴的で、特にシェル表面の縁部材周辺ではひび割れ量が多くなっている。また、シェル裏面では表面と比較してひび割れ量が少なくなっていることが認められた。これは、衝撃荷重の載荷で載荷部周辺が沈み込むことにより、シェル表面が引張領域となる曲げ破壊が支配的であると考えられる。それに対し、構成材料を CFCRC 造とした場合には、RC 造と比較してひび割れ量が極端に減少され、縁部材方向へと直線的に伸展するひび割れが特徴的である。コンクリートのひび割れ発生後、RC 造では補強鉄筋によりシェル全面へと応力が伝達されるのに対し、CFCRC 造では炭素繊維が 18mm と短い為に応力はシェル全面へとは伝達されず、局所的なひび割れ傾向となったことが考えられる。

次に開口部の影響を破壊実験ひび割れ図より検討すると、開口部付供試体は RC 造及び CFCRC 造共通して、二つの開口部より縁アーチ方向へと伸びるひび割れが確認された。また、CFCRC 造開口部付供試体において、縁梁せいを低減させた FOB では載荷部周辺の陥没破壊が明確に認められた。尚、縁梁せいを低減させていない FOA 及び FOC では陥没破壊が確認されなかつた。しかしながら、陥没破壊の生じた主要な原因是、FOB のシェル平均板厚が 8.04mm であったのに対し、FOA は平均 10.37mm、並びに FOC は平均 10.06mm が示され、シェル施工板厚の影響が大きいと考えられる。

続いて破壊実験ひび割れ図において縁部材形状による比較を行う。縁部材せいを低減させた RC 造供試体(RCA, RCB, ROA, ROB)と CFCRC 造で縁梁せいを低減させた供試体(FCB, FOB)では、縁部材せいを低減させた縁部材自身並びに当該縁部材近傍領域でのひび割れ発生が顕著である。それに対し、CFCRC 造で縁アーチせいを低減させた供試体(FCA)の縁アーチにはひび割れが認められなかった。これは衝撲線荷重方向を縁梁方向へ向けて載荷していることに加え、上記の CFCRC 造の応力伝達範囲が小さい為と考えられる。尚、開口部付の場合に CFCRC 造で縁アーチせいを低減させた供試体(FOA)の縁アーチにはひび割れが認められた。これは開口部設置による影響と考えられ

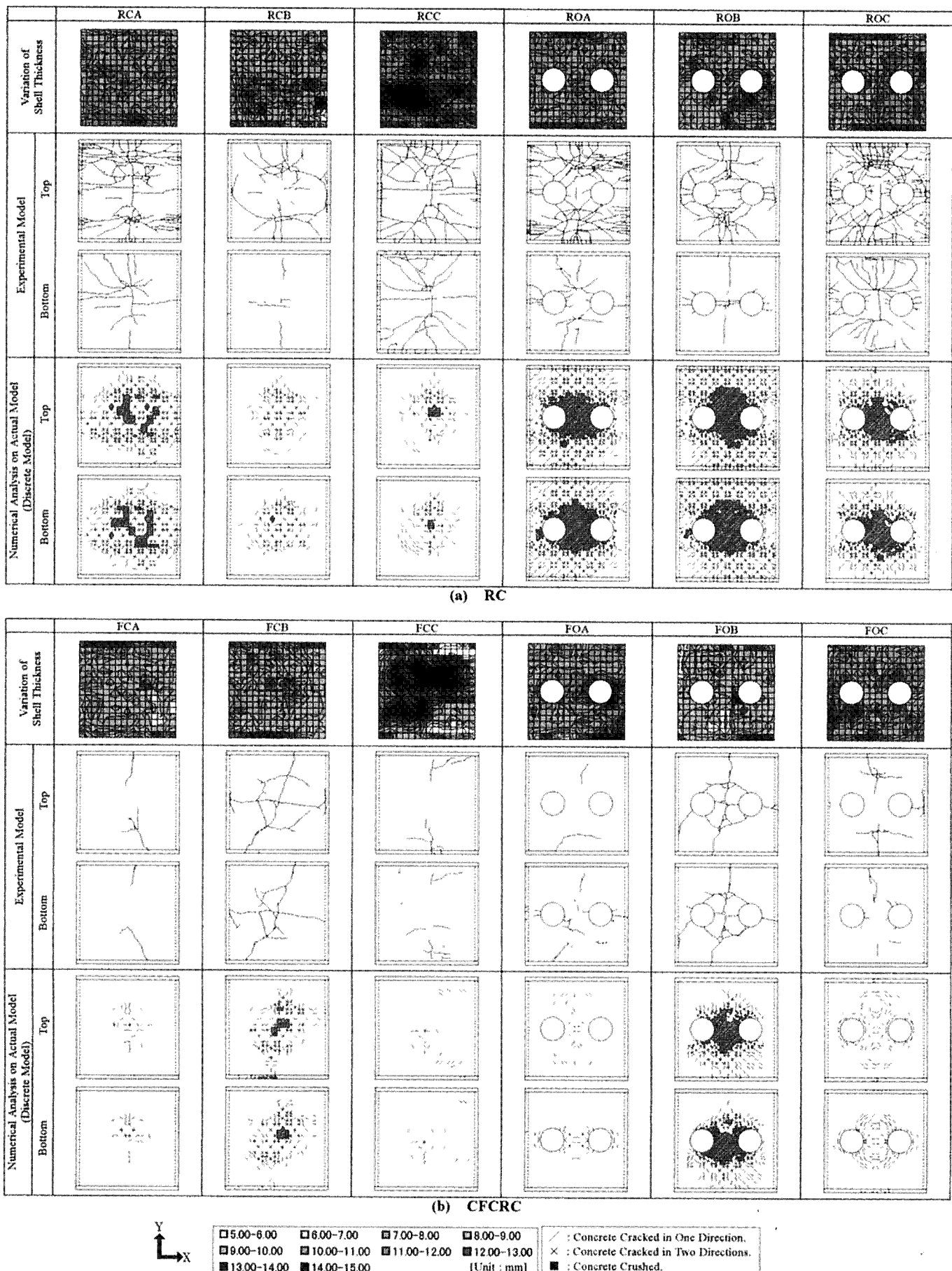


Fig.3 Cracking Pattern.

る。また、RC 造供試体では、シェル裏面のひび割れ量がシェル表面に比べ少なくなっていることが認められたが、縁部材せいを低減させていない供試体(RCC, ROC)ではシェル裏面において多くのひび割れ発生が確認された。これは縁部材せいを低減させた供試体と比較して縁部材の剛性が高い為、シェル全体の剛性が高まり、一体化して挙動したことによるものと考えられる。即ち、供試体全体で抵抗し、シェル裏面及び表面において多くのひび割れが発生したものと考えられる。

最後にシェル板厚変動が破壊形態に及ぼす影響を検討する。各供試体の板厚変動分布図及び破壊実験ひび割れ図を参照すると、全体的に板厚の小さい方向へ向うひび割れが確認され、特に板厚変動の大きい供試体においては、その影響が顕著に認められた。即ち、板厚標準偏差が 1.76mm と大きい値を示した RCC では、載荷部左下方向の板厚の大きい領域において、破壊実験のひび割れ図における同領域のひび割れ発生は認められず、同領域を避ける破壊形態が示された。更に数値解析より得られたひび割れ形態の検討を行うと、板厚変動を考慮した個別板厚数値解析では、破壊実験ひび割れ図と同様に、全体的に板厚の小さい方向へ伸展するひび割れ発生が確認され、比較的良好な対応が認められた。特に標準偏差が 3.15mm の供試体 FCC では、載荷部周辺の板厚の大きい領域において、破壊実験ひび割れ図及び個別板厚数値解析ひび割れ図の両者におけるひび割れ発生は認められないのに対し、板厚の小さい載荷部より離れたシェル右上隅角部付近では、両者のひび割れが確認された。以上より、シェル破壊形態に板厚変動が及ぼす影響を明確に確認した。また、本数値解析における個別板厚数値解析の有効性が確認された。

4.2 シェル耐力

Fig.4 には、各数値解析より得られた耐力グラフを示した。尚、(a)は個別板厚、(b)は平均板厚、(c)は低減板厚、(d)は設計モデルの各数値解析を示しており、(b), (c)及び(d)においては 1/4 部

分を対象とした均一板厚数値解析を行った。尚、実験対応数値解析においては、実験供試体独自の材料諸元と施工板厚の変動が反映されてしまい、開口部や縁部材低減等の影響を明確に比較することが困難である。従って、本研究では上記の変動因子を統一した設計モデルを設定し、Fig.4 (d)で比較検討を行った。

最初に各グラフにおいて、終局荷重を対象として、構成材料による比較を行う。RC 造の場合に対し、CFCRC 造とした場合には、(a)個別板厚数値解析で 60%増～104%増、平均 82%増、(b)平均板厚数値解析で 37%増～120%増、平均 85%増、(c)低減板厚数値解析で 70%増～108%増、平均 88%増、(d)設計モデル数値解析で 85%増～100%増、平均 93%増の終局耐力が認められた。

次に終局荷重において、開口部の影響を検討する。開口部無の場合に対し、開口部を設置した場合には、(a)個別板厚数値解析で 37%減～6%増、平均 20%減、(b)平均板厚数値解析で 29%減～27%増、平均 15%減、(c)低減板厚数値解析で 35%減～13%減、平均 21%減、(d)設計モデル数値解析で 41%減～17%減、平均 26%減の終局耐力が確認された。上記より平均板厚数値解析においては、開口部設置により耐力増大という逆転現象が示され、板厚の影響が過度に大きいことが確認された。

続いて縁部材形状による比較を終局荷重に関して行う。縁部材せいを低減させていない C Type に比べ縁アーチせいを低減させた A Type の場合では、(a)個別板厚数値解析で 37%減～6%増、平均 11%減、(b)平均板厚数値解析で 37%減～0%、平均 12%減、(c)低減板厚数値解析で 20%減～0%、平均 7%減、(d)設計モデル数値解析で 23%減～3%増、平均 10%減の終局耐力が示された。尚、設計モデル数値解析で 3%増という微小の増加が示されたが、衝撃荷重における破壊現象を極う上で、今後慎重な検討が必要であると思われる。また C Type に比べ縁梁せいを低減させた B Type の場合では、(a)個別板厚数値解析で 41%減～23%減、平均 29%減、(b)平均板厚数値解析で 45%減～27%減、平均 37%減、(c)低減板厚数値解析で 40%減～23%減、平均 35%減、(d)設計モデル数値解析で 25%減～21%減、平均 23%減の終局耐

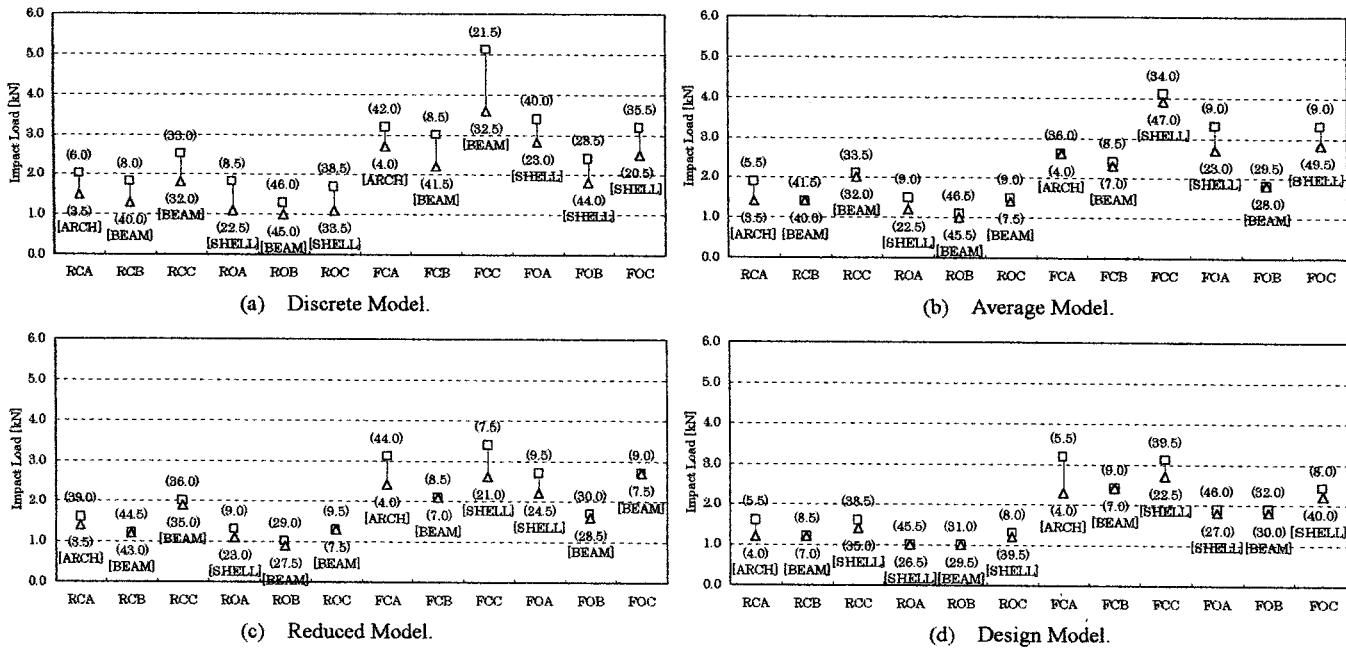


Fig.4 Initial Crack Strength and Ultimate Strength.

力が認められた。

以上より本研究において、構成材料を RC 造から CFCRC 造とすることにより平均 82%増～93%増の終局耐力を確認した。また、開口部設置により平均 26%減～15%減、縁アーチせいの低減により平均 12%減～7%減、縁梁せいの低減により平均 37%減～23%減の終局耐力が認められた。

最後に Table 4 に示した初ひび割れ耐力比(終局荷重値に対する初ひび割れ荷重値)の検討を行う。各数値解析別に比較を行うと、(a)個別板厚数値解析で全 12 供試体の平均が 0.74、(b)平均板厚数値解析で平均 0.91、(c)低減板厚数値解析で平均 0.91、(d)設計モデル数値解析で平均 0.91 の各値を示した。以上より、各均一板厚数値解析では 1 に近い値が示され、初ひび割れ荷重値と終局荷重値との荷重差が小さいことが確認された。このことからシェル板厚が均一な場合は、板厚にばらつきが有る場合と比較して、脆的な破壊を迎えることが考えられる。続いて初ひび割れ耐力比において、構成材料による比較を行う。全 RC 造解析モデルの初ひび割れ耐力比の平均は 0.86、CFCRC 造の平均は 0.87 という値が示された。破壊実験ひび割れ図を参照すると、CFCRC 造は RC 造と比較して脆的な破壊を引き起こす様に見受けられるが、初ひび割れ耐力比の値からは構成材料による影響が少ないことが認められた。

Table 4 Initial Crack Strength Ratio (P_r)。

	(a) Discrete Model	(b) Average Model	(c) Reduced Model	(d) Design Model
RCA	0.75	0.74	0.88	0.75
RCB	0.72	1.00	1.00	1.00
RCC	0.72	0.95	0.95	0.88
ROA	0.61	0.80	0.85	1.00
ROB	0.77	0.91	0.90	1.00
ROC	0.65	0.93	1.00	0.92
FCA	0.84	1.00	0.77	0.72
FCB	0.73	0.96	1.00	1.00
FCC	0.71	0.95	0.77	0.87
FOA	0.82	0.82	0.82	0.95
FOB	0.75	1.00	0.94	0.95
FOC	0.78	0.85	1.00	0.92

Note : $P_r = P_i / P_u$ (P_i = Initial Crack Strength, P_u = Ultimate Strength)

5. まとめ

衝撃線荷重を受けるコンクリート造円筒殻を対象として、構成材料及び開口部の有無並びに縁部材形状の複合的影響を実験的及び理論的に検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 破壊実験及び個別板厚数値解析より、縁部材形状及び開口部の有無がシェル破壊形態に及ぼす影響を確認した。また、シェル板厚の小さい方向へ向うひび割れが認められ、破壊実験と個別板厚数値解析の比較的良好な対応が確認されたことから、本研究における個別板厚数値解析の有効性が認められた。
- (2) 各数値解析より得られたシェル終局耐力に関して、鉄筋コンクリート造の場合に対し、炭素短繊維補強コンクリート造とした場合には、平均 82%増～93%増の耐力を確認した。また、開口部の設置により平均 26%減～15%減、縁アーチせいの低減により平均 12%減～7%減、縁梁せいの低減により平均 37%減～23%減の耐力が認められた。
- (3) 各数値解析のシェル耐力に関して、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)の検討を行うと、シェル板厚が均一な場合には、脆的な破壊を迎えることが認められた。また、構成材料、即ち鉄筋コンクリート造と炭素短繊維補強コンクリート造による検討を行うと、初ひび割れ耐力比より得られた結果では、構成材料の影響が少ないことが確認された。

参考文献

- 1) 真下和彦、源一臣、佐藤由教、熊田陽志、鈴木悠子：衝撃線荷重を受ける炭素短繊維補強コンクリート造円筒殻の耐力、東海大学紀要工学部、(2001), Vol.41, No.2, pp77-82